

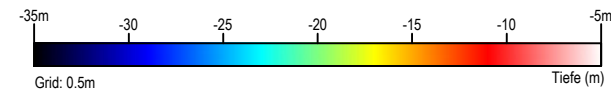


Infrastruktur

 Kabeltrasse OPTION 1b
 geplante Alternativtrasse
 500m Sicherheitszone
 N05-A Plattform

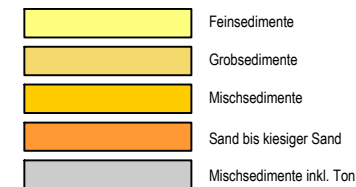
Windparkgebiet
 Innerparkkabel Riffgat
 WEA-Standort Riffgat
 NorNed-Kabel

Bathymetrie






 20 Tiefenlinien Intervall 0,5m


Sedimente

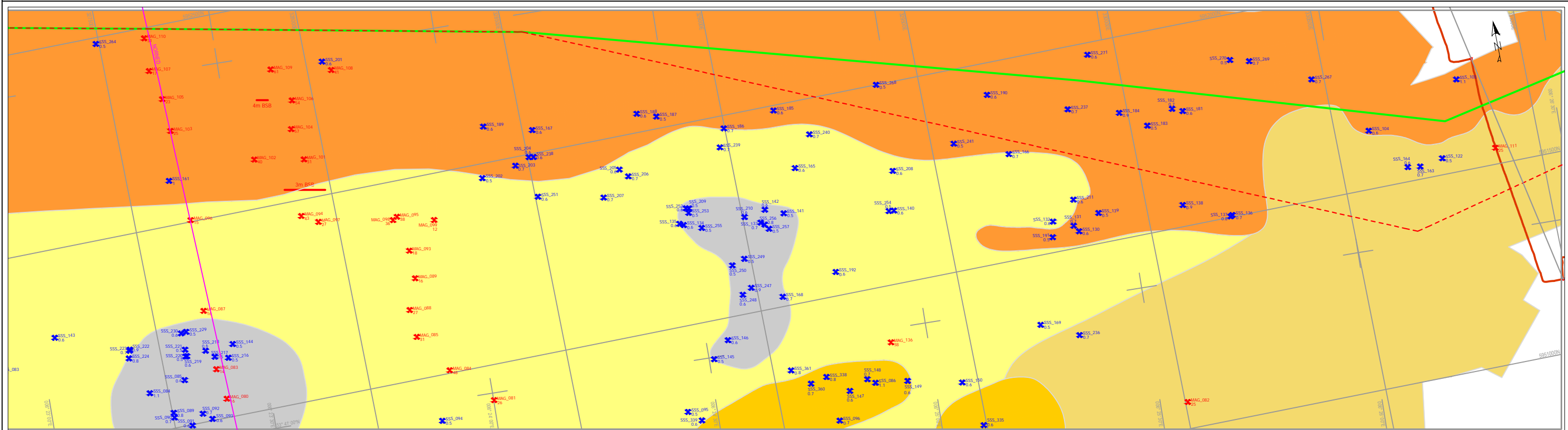
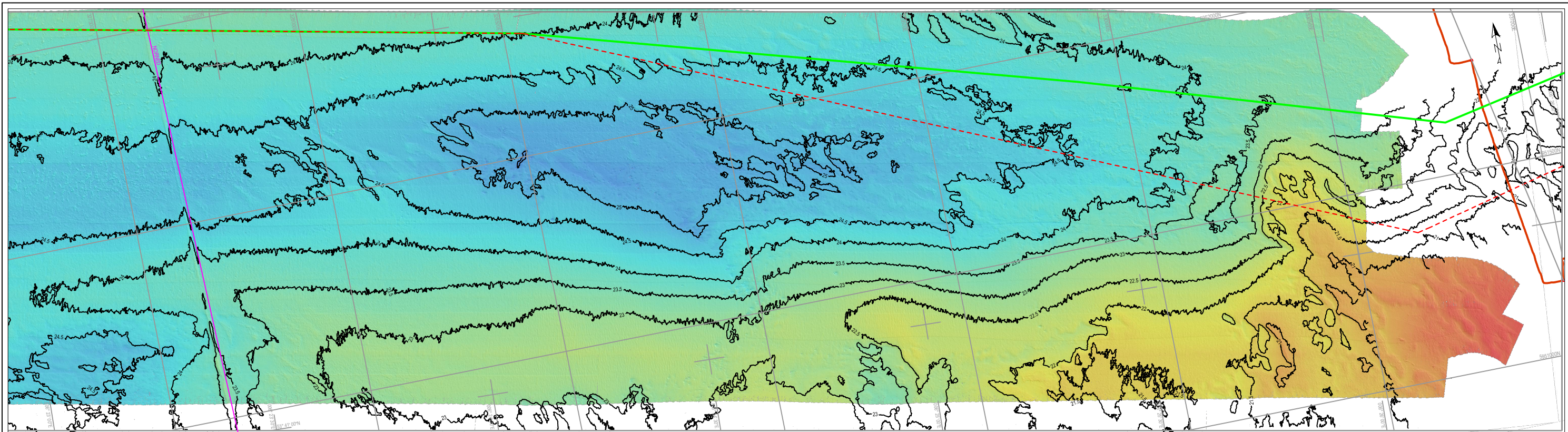


Objekte

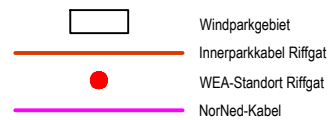
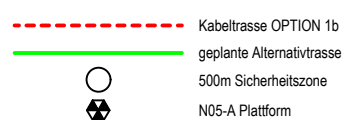
	SSS_266 0.8	SSS Kontakt/Objekt
	MAG_158 0.6	Magnetometer Kontakt
	DEB_023 1.4 x 0.5 x 0.3	Geröll / Findling

Quelle: GEOxyz Offshore / Survey Report - N05A-7-10-0-70023-01.2.0

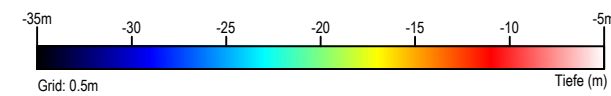
C									This document is confidential. The copyright is vested in Oranje-Nassau Energie B.V., Amsterdam, the Netherlands. All rights reserved. Neither the whole nor any part of this document may be disclosed to any third party or reproduced, stored in any retrieval system or transmitted in any form or by any means (electronic, mechanical, reprographic, recording or otherwise) without the prior written consent of the copyright owner. 2015.	T I T E L	Kabelverbindung N05—A – OWP RIFFGAT Bathymetrie und Sedimente Blatt 01							
B																		
A																		
01	19	10	2020	Genehmigungsplanung			HJM	DHE										
Revision	DD	MM	YYYY	REVISIONSBESCHREIBUNG				Zeichner	Prüfer	Freigabe	 Oranje-Nassau Energie B.V. Amsterdam	ASSETCODE	DISC.CDE	DOC.TYPE CDE	PREFIX	DOCUMENT NUMBER	SHEET NR	REVISION
	Revisions Datum											N05A	5	50	0	52003	01	01
Erstellt	EWE Offshore Service and Solutions GmbH				Maßstab	1:10.000	Papiergröße	A3										



Infrastruktur

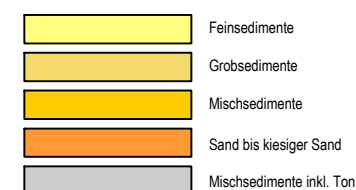


Bathymetrie

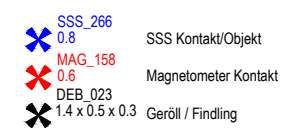


 20 Tiefenlinien Intervall 0,5m


Sedimente



Objekte



Quelle: GEOxyz Offshore / Survey Report - N05A-7-10-0-70023-01.2.0

C									This document is confidential. The copyright is vested in Oranje-Nassau Energie B.V., Amsterdam, the Netherlands. All rights reserved. Neither the whole nor any part of this document may be disclosed to any third party or reproduced, stored in any retrieval system or transmitted in any form or by any means (electronic, mechanical, reprographic, recording or otherwise) without the prior written consent of the copyright owner. 2015.	T I T E L	Kabelverbindung N05–A – OWP RIFFGAT Bathymetrie und Sedimente Blatt 02									
B																				
A																				
01	19	10	2020	Genehmigungsplanung			HJM	DHE												
Revision	DD	MM	YYYY	REVISIONSBESCHREIBUNG				Zeichner	Prüfer	Freigabe		Oranje-Nassau Energie B.V. Amsterdam	ASSETCODE	DISC.CDE	DOC.TYPE CDE	PREFIX	DOCUMENT NUMBER	SHEET NR	REVISION	
	Revisions Datum												N05A	5	50	0	52003	02	01	
Erstellt	EWE Offshore Service and Solutions GmbH				Maßstab	1:10.000	Papiergröße	A3												

32222-TRT-OF0262295

**"Technischer Bericht N05-A Elektromagnetisches Feld von
Unterseekabeln"**

TKF (Twentsche Kabelfabriek)



Technischer Bericht

N05-A

Elektromagnetisches Feld eines
Unterseekabels



Details zum Dokument

Datum der Veröffentlichung	02 Jul 20
TKF Revision	C4
Name des Dokuments	32222-TRT-OF0262295
Arbeitgeber	ONE-Dyas B.V.
Kunde	ONE-Dyas B.V.
Kunde Ref.	EIN-006096
Kunde TQ	NA

Dieser Text wurde aus dem Englischen übersetzt. Soweit es Widersprüche zum Originaltext gibt, ist der Originaltext führend.

Dokumentstatus-Historie & Autorisierung

Zustand	Updater	Prüfer	Datum der Änderung	Revision	Kommentar zur Revision
Unter Bearbeitung			11 Jun 20	S3	Dokument mit Simulationsergebnissen bearbeiten
Warten auf interne Zulassung			16 Jun 20	P4	
Intern zugelassen			02 Jul 20	C3	genehmigt
Zur Überprüfung unter Kunde			02 Jul 20	C4	zur Überprüfung an den Kunden senden
Freigegeben			13 Mai 20	02	Intern für die Ausgabe an den Kunden freigegeben
-	-	-	-	-	-
-	-	-	-	-	-

Inhaltsverzeichnis

Dokumentdetails	2
Dokumentstatus Historie & Autorisierung	
Abkürzungen.....	3
1 Einleitung.....	4
2 Eingaben.....	4
3 Berechnungen zur Kabelauswahl	5
4 Berechnungsmethode für elektromagnetisches Feld	6
4.1 Kabelmodelle	6
4.2 EM-Parameter	7
5 Simulationsergebnisse	8
5.1.3×185mm ² Kabel.....	18
5.1.3×300mm ² Kabel.....	210
6 Schlussfolgerung.....	12
7 Literaturverzeichnis	12





Abkürzungen

Die im Text verwendeten Abkürzungen sind wie definiert zu interpretieren

Querschnittsfläche	ONE-Dyas B.V.
CUSTOMER	Tiefe der Grabens
DOB	Tiefe der Abdeckung
DOC	Finales Element Modellierung
FEM	N05-A
PROJECT	Twentsche Kabelfabriek
SUPPLIER	Twentsche Kabelfabriek
TKF	
Finite-Elemente-Methode	

LIEFERANT verwendet das Internationale Einheitensystem (SI) und damit Einheiten wie z.B.; MW, kA, s et cetera und deren zugehörige Erklärung sind in dieser Liste nicht aufgeführt.

1 Einleitung

Der Zweck dieses Dokuments ist es, den berechneten Wert des elektromagnetischen Feldes von zwei Seekabeln zu berichten, die potenziell für das PROJEKT ausgewählt wurden. In einer früheren Phase wurde eine Reihe von Berechnungen durchgeführt und über einen Teil des Seekabel-Portfolios des LIEFERANTEN berichtet. Die Eingaben für diese Berechnungen sind in Kapitel 3 und die Ergebnisse in Kapitel 4 zusammengefasst. Der KUNDE wählte zwei Szenarien, d.h. CSAs für einen nächsten Schritt der Berechnungen. Dies betrifft den Pegel des elektromagnetischen Feldes in Gauß oder μT , den das Kabel auf der Ebene der Meeresbodenoberfläche abstrahlen wird. In Kapitel 5 wird die gewählte Methode zur Bestimmung des elektromagnetischen Feldes erläutert und in Kapitel 6 werden die Ergebnisse und ggf. Schlussfolgerungen genannt.

2 Eingaben

Die Eingabeparameter werden vom KUNDEN zur Verfügung gestellt, mit Ausnahme der letzten Gruppe von Parametern in diesem Kapitel. Diese elektrischen Parameter des Meeresbodens sind jedoch sinnvolle Annahmen.

Elektrische Parameter:

Betriebsspannungspegel	19/33 (36) kV
Leistung:	23595 kVA
Kosinus Phi:	0,88
Gesamtlänge des Kabels:	9000 Meter
Spannungsabfall:	= < 10%

Umgebungsparameter:

Thermischer Widerstand des Meeresbodens	0,39 K*m/W
DoC	1.5 m
Bodentemperatur am Meeresboden	15 Grad Celsius

Elektrische Parameter des Meeresbodens:

Elektrische Leitfähigkeit des Meeresbodens	1,0 S/m
Relative elektrische Durchlässigkeit des Meeresbodens	1.0
Relative elektrische Permittivität des Meeresbodens	25
Elektrische Leitfähigkeit des Meerwassers	5,0 S/m
Relative elektrische Durchlässigkeit von Meerwasser	1,0
Relative elektrische Permittivität von Meerwasser	81



3 Berechnungen zur Kabelauswahl

Basierend auf den oben genannten Eingangsparametern wird der tatsächliche Strom im Kabel

413 A betragen.

Tabelle 1.

Kabel-konfiguration	CSA (mm ²)	Isc (kA/1s)	Uo Spannungsabfall (V)	Uo Spannungsabfall (%)	Temperaturanstieg auf dem Meeresboden ⁽¹⁾	Strombelastbarkeit (A)	Kommentar
149186	400	37.8	547	2,9%	0,9	665	Option 4
149288	300	27.9	647	3,4%	1,1	585	Option 3
149166	240	22.6	757	4,0%	1,4	518	Option 2
⁽¹⁾ 149368	185	17.3	933	4,9%	1,8	447	Option 1
149364	150	13.8	1121	5.9%	2.4	394	Zu geringe Strombelastbarkeit

Temperaturanstieg am Meeresboden bei -200 mm unter der Meeresbodenoberfläche und 413 A

Der KUNDE hat sich für Option 1 und 3 entschieden, um mit der Bestimmung des elektromagnetischen Feldes fortzufahren.

4 Berechnungsmethode für elektromagnetisches Feld

Die Finite-Elemente-Methode (FEM) wird angewendet, um das elektromagnetische Feld in und um ein im Meeresboden verlegtes Seekabel zu berechnen. COMSOL wird als Simulationssoftware gewählt. Ein 2D-FEM-Modell wird in der COMSOL-Software für jedes Kabel generiert (Szenario von Option 1 und Option 3). Die elektrische Leitfähigkeit, die elektrische Durchlässigkeit und die elektrische Permittivität des Meeresbodens werden durch vernünftige Annahmen berücksichtigt. Da es keine existierenden Normen zur Anleitung der FEM-Simulation gibt, werden veröffentlichte wissenschaftliche Arbeiten als Anleitung für die Simulationsarbeit verwendet [1, 2, 3].

4.1 Kabelmodelle

2D-Kabelmodelle, die auf TKF-Kabelabmessungen basieren, werden in COMSOL erstellt. Die Kabelquerschnittsfläche ist so gewählt, dass die Verlegerichtung von Leistungsadern und Lichtwellenleitern (LWL) den ungünstigsten Fall darstellt, bei dem die emittierte magnetische Flussdichte an der Meeresbodenoberfläche direkt über der Kabelachse den höchsten Wert hat.

In den realen TKF-Kabeln für beide Typen sind die Leiter als Al-Litzen ausgeführt, mit quellfähigen Garnen zwischen den Drähten. Um die Simulation zu vereinfachen, wird im Modell der Leiter des Kabels als massiver Al-Leiter mit dem gleichen Durchmesser wie im Kabeldatenblatt angegeben aufgebaut. Die elektrische Leitfähigkeit des Leitermaterials wird stattdessen so eingestellt, dass der elektrische Gesamtwiderstand des Leiters mit den in IEC60228 [4] definierten Werten übereinstimmt.

Diese Vereinfachung hat keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse.

Als Beispiel ist das $3 \times 300 \text{ mm}^2$ Kabelmodell in Abbildung 1 unten dargestellt. $3 \times 185 \text{ mm}^2$ Kabel haben die gleiche Struktur, aber nur unterschiedliche Abmessungen im Vergleich zu $3 \times 300 \text{ mm}^2$ Kabel.

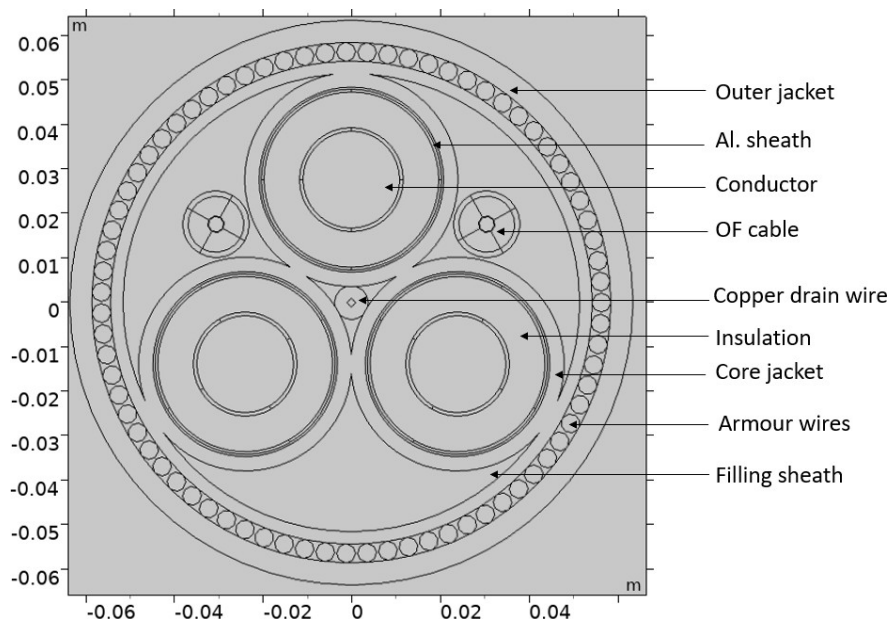


Abbildung 1. 2D-Kabelmodell für $3 \times 300 \text{ mm}^2$, erstellt in COMSOL.

Das Kabel ist im Meeresboden mit einer Überdeckungstiefe von 1,5 Metern vergraben, wie in einem Beispiel des vollständigen Modells in COMSOL in Abbildung 2 zu sehen ist.



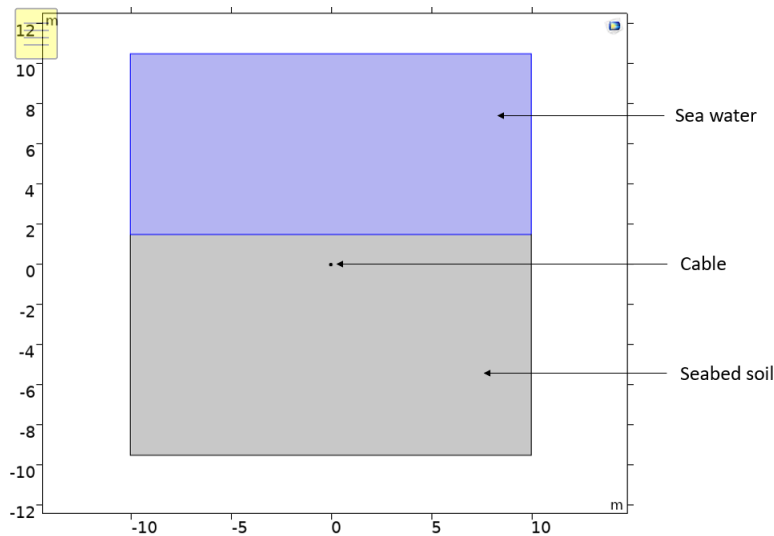


Abbildung 2. Vollständiges Modell für ein im Meeresboden vergrabenes Kabel in COMSOL. Das Rechteck oben, das mit blauer Farbe markiert ist, stellt das Meerwasser dar. Das Rechteck unten repräsentiert den Meeresboden.

4.2 EM-Parameter

Die elektromagnetischen Parameter des Kabels und seiner Umgebung haben Einfluss auf die Simulationsergebnisse. In der folgenden Tabelle 2 sind die elektromagnetischen Parameter für die Komponenten zusammengefasst.

Tabelle 2. Elektrisch-magnetische Eigenschaften des Kabelmaterials und seiner Umgebung. R_c - elektrischer Widerstand des Leiters, definiert nach IEC60228, in der Einheit Ω/m ; A_c - Querschnittsfläche des Leitermaterials, in der Einheit m^2 .

		Relative elektrische Dielektrizitätskonstante	Relative elektrische Permeabilität	Elektrische Leitfähigkeit (S/m)
Leiter (Al.)		1,0	1,0	$1/(R_c A_c)$
XLPE-Isolierung		2,5	1,0	1×10^{-18}
Isolierendes PE-Material		2,5	1,0	1×10^{-14}
Halbleitender Leiter/Isolierschirm		2,3	1,0	1
Semi-leitfähiges PE über Adermantel und LWL-Kabelmantel		2,3	1,0	4
Erdungsschirm (geschweißtes Al. Rohr)		1,0	1,0	$3,521 \times 10^7$
Armirtes Kabel		1,0	600	$7,246 \times 10^6$
Meeresboden		81	1,0	1,0
Meerwasser		25	1,0	5,0

5 Simulationsergebnisse

Das Modell der magnetischen und elektrischen Felder in COMOSL wurde verwendet, um das elektrische Magnetfeld in und um die Kabel zu simulieren. Der in Tabelle 1 definierte PROJEKT-Strom wird während der Simulation in beiden Kabeln angelegt, d.h. 413A für beide $3 \times 185 \text{ mm}^2$ Kabel und $3 \times 300 \text{ mm}^2$ Kabel. Zwischen Leiter und Erdungsschirm wurde eine Spannung von 19 kV angelegt. Das Oberflächendiagramm für das elektrische Feld und das Konturdiagramm der magnetischen Flussdichte werden für jeden Kabeltyp unter stationärer Lösung aufgezeichnet.

Zur besseren Veranschaulichung werden die Ergebnisse der magnetischen Flussdichte für jeden Kabeltyp in drei Diagrammen dargestellt.

5.1.1 $3 \times 185 \text{ mm}^2$ Kabel

- **Elektrisches Feld**

Das elektrische Feld existiert nur innerhalb der Kabelisolierung und ist unabhängig von den Umgebungsbedingungen und der angelegten Last. Bei einer angelegten Spannung von 19 kV zwischen Phase und Erde wird die Verteilung des elektrischen Feldes in einem $3 \times 185 \text{ mm}^2$ großen Kabel simuliert; das Ergebnis ist in Abbildung 3 dargestellt. Das maximale elektrische Feld erscheint auf dem Leiterschirm: 3,3kV/mm und ein minimales elektrisches Feld tritt auf der Außenseite der Isolierung auf: 1,8 kV/mm.

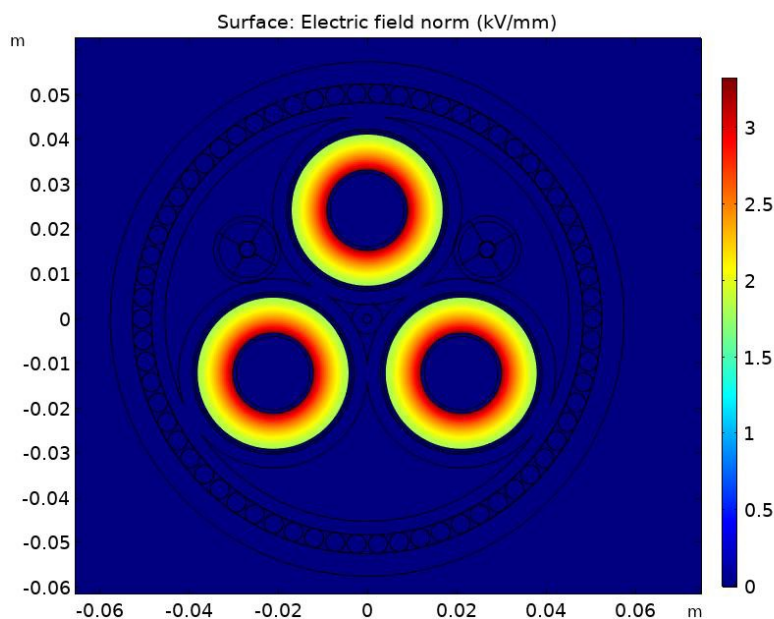
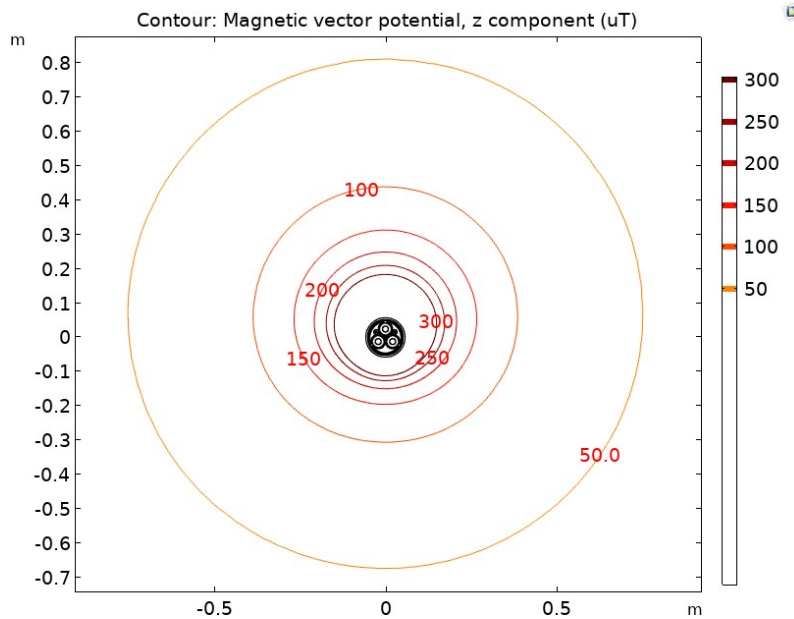
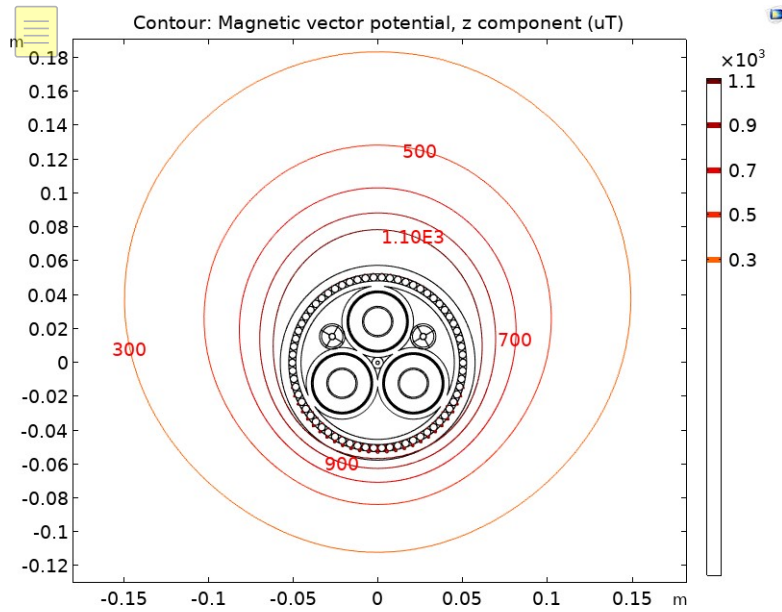


Abb. 3. Elektrische Feldverteilung in einem $3 \times 185 \text{ mm}^2$ Kabel unter einer Phase-Erde-Spannung von 19kV.

- **Magnetisches Feld**

Die drei Diagramme in Abbildung 4 zeigen die magnetische Flussdichte innerhalb und um das $3 \times 185 \text{ mm}^2$ -Kabel unter der PROJECT-Spitzenlast. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die magnetische Flussdichte hauptsächlich innerhalb des Kabels begrenzt ist. An einer Stelle, die 0,1 mm neben der Außenfläche des Kabels liegt, beträgt die magnetische Flussdichte 1,9 mT. In einem Abstand von 50cm von der Kabelaußenfläche entfernt, sinkt die höchste magnetische Flussdichte auf 76µT. An der Oberfläche des Meeresbodens direkt über der Kabelachse beträgt die vom Kabel ausgehende magnetische Flussdichte 26µT. In einer Entfernung von 2 m von der Kabelaußenfläche nimmt die höchste magnetische Flussdichte auf 19 µT ab.





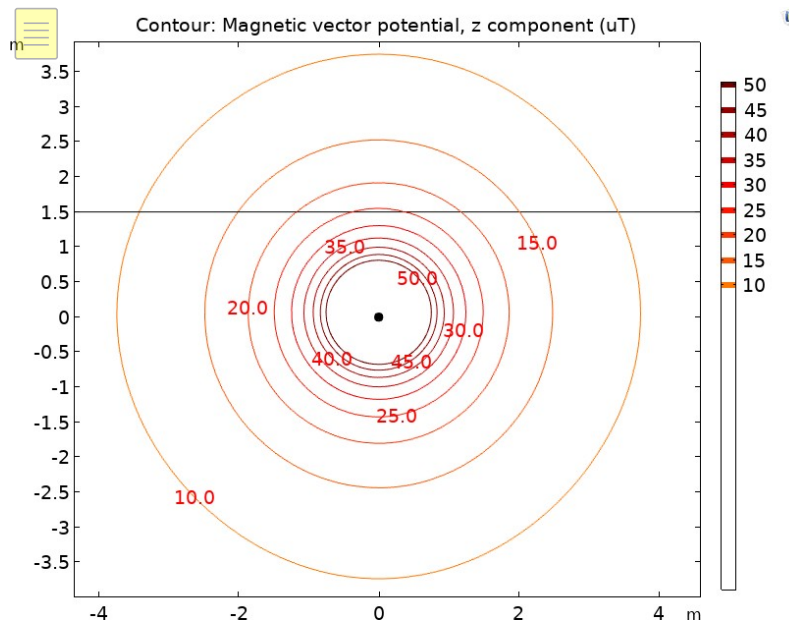


Abbildung 4. Magnetische Flussdichte im und um das 3×185mm² Kabel, unter PROJECT-Spitzenlast: 413A.

5.1.2 3×300mm² Kabel

• Elektrisches Feld

Das elektrische Feld existiert nur innerhalb der Kabelisolierung und ist unabhängig von den Umgebungsbedingungen und der angelegten Last. Bei einer angelegten Spannung von 19 kV zwischen Phase und Erde wird die Verteilung des elektrischen Feldes in einem 3×300 mm² großen Kabel simuliert, und das Ergebnis ist in Abbildung 5 dargestellt. Das maximale elektrische Feld erscheint auf dem Leiterschirm: 3,1 kV/mm und ein minimales elektrisches Feld tritt auf der Außenseite der Isolierung auf: 1,9 kV/mm.

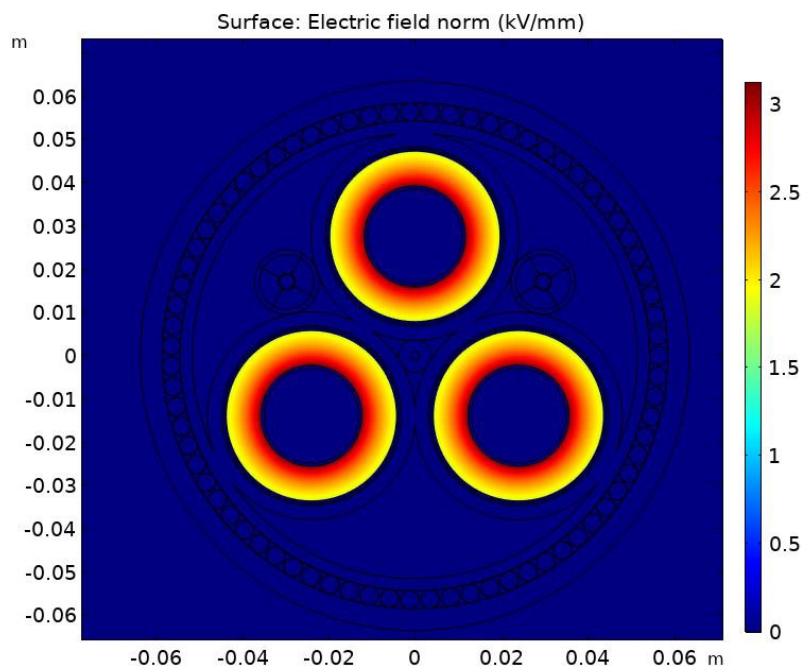


Abb. 5. Elektrische Feldverteilung in einem 3×300mm² Kabel unter einer Phase-Erde-Spannung von 19kV.

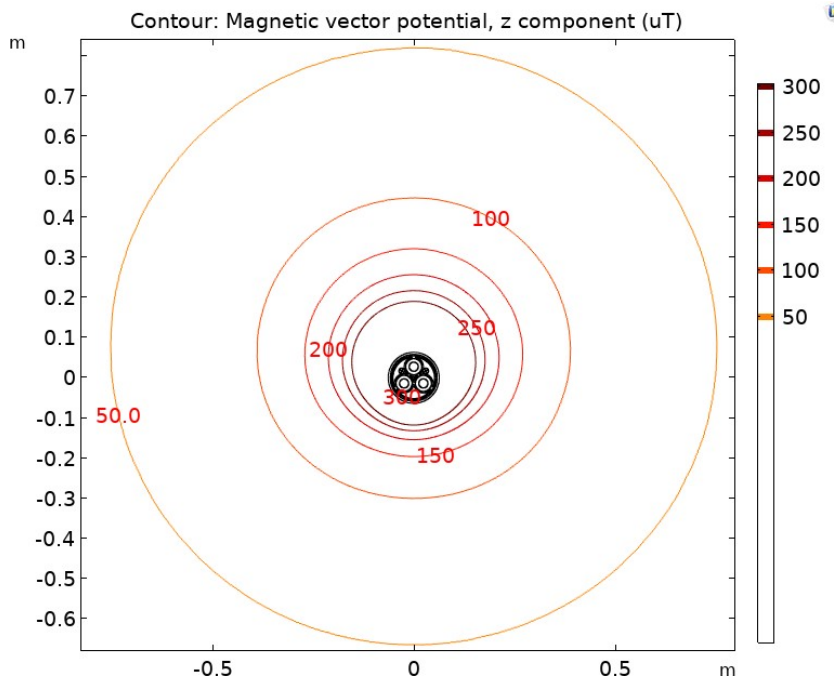
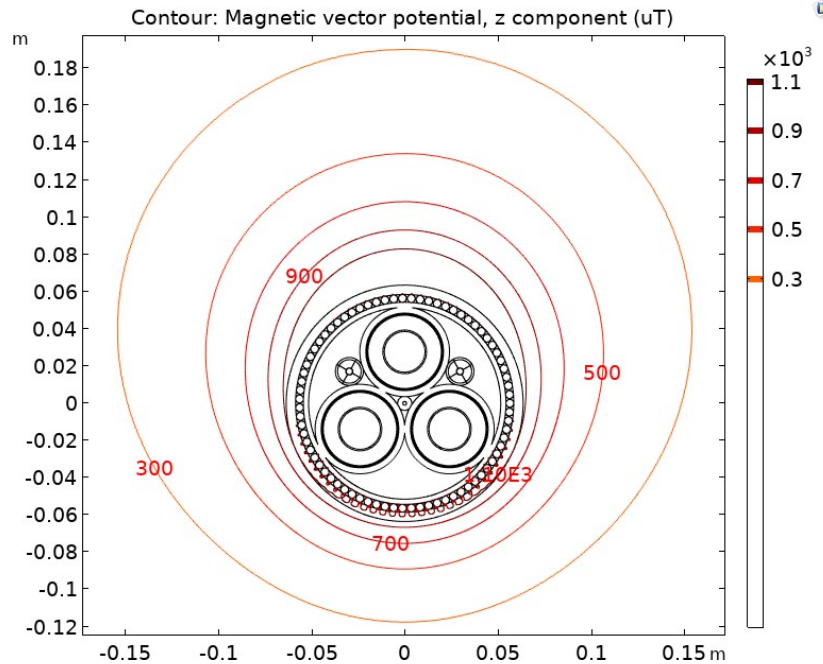
VERTRAULICH

Alle Rechte vorbehalten. Alle in diesem Schreiben enthaltenen Daten, Kenntnisse und Informationen sind streng vertraulich. Weitergabe sowie Vervielfältigung dieses Dokuments, Verwertung und Mitteilung seines Inhalts sind nicht gestattet bzw. bedürfen der vorherigen schriftlichen Zustimmung der B.V. Twentsche Kabelfabrik. Als Ergebnis unseres kontinuierlichen innovativen Entwicklungsprogramms behalten wir uns das Recht vor, technische Änderungen mit ähnlichen oder verbesserten funktionellen Produktspezifikationen vorzunehmen. Aus dem Inhalt

Magnetisches Feld

Die drei Diagramme in Abbildung 6 zeigen die magnetische Flussdichte innerhalb und um das 3×300mm² - Kabel unter der PROJECT-Spitzenlast. Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass die magnetische Flussdichte größtenteils innerhalb des Kabels begrenzt ist.

An der Stelle 0,1mm neben der Kabelaußenfläche beträgt die magnetische Flussdichte 1,8mT. In einem Abstand von 50cm von der Kabelaußenfläche entfernt, sinkt die höchste magnetische Flussdichte auf 77μT. An der Oberfläche des Meeresbodens direkt über der Kabelachse beträgt die vom Kabel ausgehende magnetische Flussdichte 26 μT. In einem Abstand von 2 m von der Kabelaußenfläche nimmt die höchste magnetische Flussdichte auf 19 μT ab.



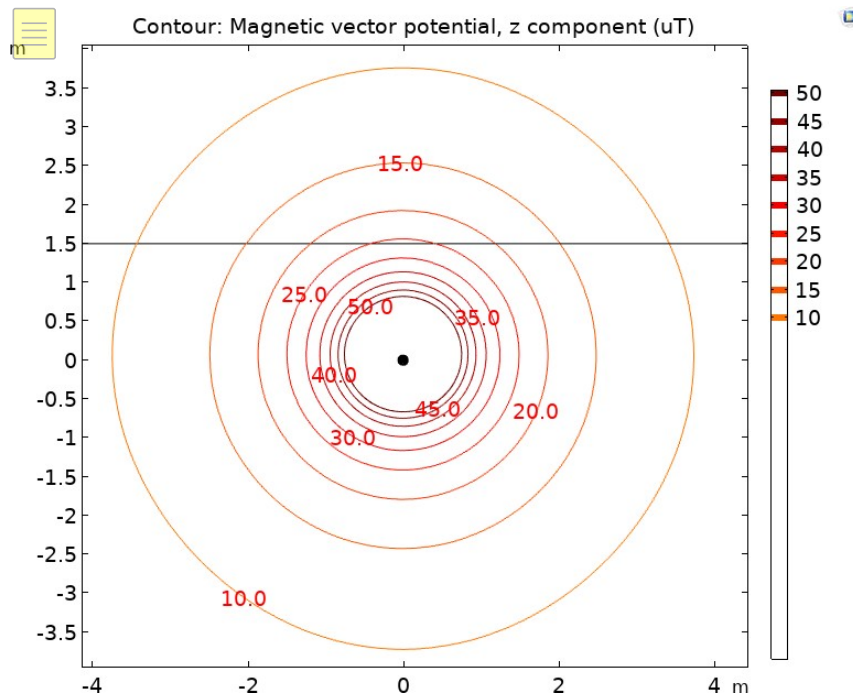


Abbildung 6. Stationäre magnetische Flussdichte im und um das 3×300mm² Kabel, unter PROJEKT-Spitzenlast: 413A.

6 Fazit

Elektrische und magnetische Felder, die von den beiden PROJEKT-Kabeln 3×185mm² und 3×300mm² ausgehen, werden mit Hilfe eines FEM-Modells simuliert. Das elektrische Feld ist aufgrund der Erdungsabschirmung auf jeder Ader innerhalb der Kabelisolierung begrenzt. Die magnetische Flussdichte in und um die Kabel 3×185mm² und 3×300mm² unter PROJEKT-Strom wird mit einem 2D-FEM-Modell simuliert. Bei beiden Kabeln beträgt die magnetische Flussdichte an der Kabelaußenfläche weniger als 2 mT, während die magnetische Flussdichte in weniger als 1 m Entfernung von der Kabeloberfläche auf einige zehn Mikrottesla abnimmt, was im gleichen Bereich wie die magnetische Hintergrundflussdichte in der Erde liegt. An der Oberfläche des Meeresbodens beträgt die magnetische Flussdichte, die sowohl von 3×185mm² als auch von 3×300mm² Kabeln ausgeht, 26μT.

7 Referenzen

- [1] J. C. L. Veloso Silva, A. C. S. Lima, A. P. Cardillo Magalhães und M. T. Correia de Barros, "Modelling seabed buried cables for electromagnetic transient analysis," in IET Generation, Transmission & Distribution, vol. 11, no. 6, pp. 1575-1582, 20 4 2017, doi: 10.1049/iet-gtd.2016.1464.
- [2] V. Grinchenko, O. Tkachenko und K. Chunikhin, "Magnetic field calculation of cable line with two-point bonded shields," 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF), Lviv, 2017, pp. 211-214, doi: 10.1109/YSF.2017.8126621.
- [3] Gill, A.; Huang, Y.; Spencer, J.; Gloyne-Philips, I. (2012). Electromagnetic Fields Emitted by High Voltage Alternating Current Offshore Wind Power Cables and Interactions with Marine Organisms, London, UK.
- [4] IEC 60228:2004 Conductors of insulated cables.

N05A-5-10-0-50003-01

**"Thermischer Einfluss von Seekabeln auf die umgebenden
Sedimente und Einhaltung des 2-K-Kriteriums"**

FGH e.V.

Dokument Titel:

**Thermischer Einfluss von Seekabeln auf
die umgebenden Sedimente und Einhaltung de
2-K-Kriteriums**

Kunde:

ONE-Dyas

Projekt:

ONE-Dyas-N05-A

EWE-Dokument-Nummer:

ONE_ET_FGH_ga_Thermal influence of submarine cables_00

ONE Dokumentnummer:

N05A-5-10-0-50003-01

Weitere Informationen:

Revision	Datum	Beschreibung	Absender	geprüft / genehmigt durch
00	19.10.2020	Rohentwurf, zur Kommentierung freigegeben	FGH e.V.	

Thermischer Einfluss von Seekabeln auf die umgebenden Sedimente und Einhaltung des 2-K-Kriteriums

Bericht



Herausgeber:

FGH e.V.

Adresse:

Besselstraße 20-22
68219 Mannheim
Deutschland

Telefon: +49 621 976807-10

Telefax: +49 621 976807-70

E-Mail: info@fgh-ma.deInternet: www.fgh-ma.de**Herausgeber:**

Mannheim, im Oktober 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Umfang der Studie	3
2	Grundlage der Berechnungen	3
2.1	Eigenschaften des Meeresbodens	3
2.2	Kabelsystem	3
2.3	Kabelverluste eines 3-phasigen Unterseekabels	4
2.4	Berechnung der 2-K-Kriteriums	4
3	Ergebnisse	5
4	Fazit	6
	Referenzen	7

1 Umfang der Studie

Eine neue Station von ONE DYAS soll an das 33-kV-Netz des 155-kV-/33- kV-Netzes des Offshore-Windparks (OWF) Riffgat angeschlossen werden [1]. Es ist geplant, ein Seekabel mit einer Länge von ca. 9 km zu verlegen. Der Leistungsbedarf der Station beträgt ca. 20 MW (24 MVA). Der erforderliche Mindestquerschnitt des Seekabels wird mit Hilfe von Leistungsflussberechnungen ermittelt [1]. Es wird ein Mindestquerschnitt von 300 mm² empfohlen, um den Strom zu führen. Der maximale Laststrom einer Phase beträgt ca. 460 A. Zusätzlich muss aus naturschutzfachlicher Sicht die Erwärmung des Meeresbodens oberhalb des Kabels begrenzt werden. Es wird eine maximale Erwärmung von 2 Kelvin in 300 mm unterhalb des Meeresbodens (oberhalb des Kabels) gefordert, was als 2-K-Kriterium bezeichnet wird [2]. In diesem Bericht werden die Erwärmungsverluste des Kabelprojekts und die Berechnung des 2-K-Kriteriums dargestellt. Das 2-K-Kriterium wird für drei verschiedene Kabelquerschnitte (300, 400 und 500 mm²) berechnet.

2 Basis der Berechnungen

2.1 Eigenschaften des Meeresbodens

Der spezifische Wärmewiderstand ρT des wassergesättigten Meeresbodens beträgt 0,33 bis 0,50 K-m/W [3]. Die "Geo-Engineering.org GmbH" hat im Jahr 2011 die Wärmeleitfähigkeit des Meeresbodens des Offshore-Windparks Riffgat gemessen [3]. In einer Tiefe zwischen 1,45 und 1,55 m wird ein Wärmewiderstand ρT zwischen 0,39 und 0,37 K-m/W gemessen. Als konservativer Ansatz wird das 2-K-Kriterium mit einem Wert von $\rho T = 0,39$ K-m/W berechnet. Die Temperatur des Meeresbodens wird mit 10 °C angenommen [2]. Die Berechnung wird für ein Kabel durchgeführt, welches 1,5 m unter dem Meeresboden verlegt ist.

2.2 Kabelsystem

Für die Berechnung wird ein 30 kV-Seekabel verwendet (2XS(FL)2YRAA 18/30(36) kV) [4]. Die thermischen Widerstände und die Leitungsverluste werden mit Hilfe der konstruktiven Daten (Abbildung 1) und der elektrischen Daten (Abbildung 2) des Datenblatts [4] berechnet.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Nominal cross sectional area of conductor (mm ²)	Conductor copper round stranded diameter over conductor (mm)	Insulation XLPE wall thickness (mm)	Screen copper wires and counter helix cross sectional area (mm ²)	Metallic tape aluminium wall thickness (mm)	Core sheath PE black wall thickness diameter (mm) (mm)	Bedding wall thickness (mm)	Armour steel wires round galvanized diameter (mm)	Serving bitumen fib. material and lime wash wall thickness (mm)	Outer diameter of cable (mm)	Cable weight (t/km)
300	20.6	8.0	25	0.2	2.5 47	2	4.2	4.0	121	24.1
400	23.8	8.0	35	0.2	2.5 50	2	4.5	4.0	129	28.1
500	26.6	8.0	35	0.2	2.6 53	2.5	5.0	4.0	137	33.4

Abbildung 1 - Konstruktionsdaten [4]

1		2	3	4	5	6	7	8	9	
Nominal cross sectional area		Conductor resistance DC 20°C	Conductor resistance AC 90°C	Screen resistance 20°C	Capacitance	Inductance	Current rating	Losses	1s short circuit current after full load at 90°C conductor temperature	
conductor (mm²)	screen (mm²)	(Ω/km)	(Ω/km)	(Ω/km)	(μF/km)	(mH/km)	(A)	(W/m)	conductor (kA)	screen (kA)
300	25	0.0601	0.079	0.73	0.25	0.35	564	83	43.3	5.1
400	35	0.0470	0.063	0.53	0.28	0.34	627	86	57.8	7.1
500	35	0.0366	0.050	0.53	0.32	0.32	699	88	72.2	7.1

Abbildung 2 - Elektrische Daten [4]

2.3 Kabelverluste eines 3-phasigen Unterseekabels

Zur Berechnung der Kabelverluste eines 3-phasigen Seekabels werden verschiedene Verluste und thermische Resistenzen berücksichtigt. Die Hauptverluste sind die $I^2 R$ -Verluste (W_e) des Leiters.

Mit höherer Temperatur des Kabels steigt der Widerstand des Leiters, der Ummantelung und des Ar mors. Daher steigen die Verluste im gesamten Kabel. Zusätzlich werden der Skin-Effekt und der Proximity-Effekt im Mantel (W_s) und in der Bewehrung (W_c) berücksichtigt. Nach IEC 60287-1-1 werden dielektrische Verluste (W_d) in Spannungsebenen unter 127 kV nicht berücksichtigt [5]. In Abbildung 3 sind das thermische Netzwerk der Verluste und die thermischen Widerstände des Kabelsystems und der Umgebung angegeben.

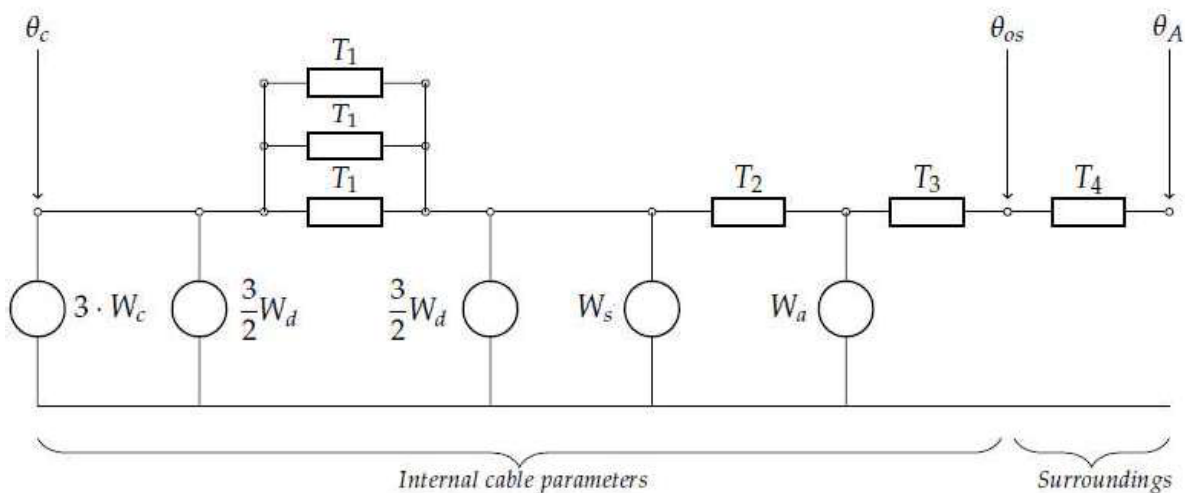


Abbildung 3 - Wärmewiderstände (T), Wärmequellen (W) und Temperaturen (θ) in einem dreiadrigen XLPE-Unterseekabel [6]

2.4 Berechnung des 2-K-Kriteriums

Die Erwärmung wird nach der stationären Methode gemäß IEC 60287-2-1 [7] ermittelt. Diese Methode basiert auf dem stationären Zustand des Wärmeflusses. Der Fluss hält konstant den gleichen Maximalwert und der Meeresboden ist bereits erwärmt. Dies ist eine konservative Annahme, da das Erwärmungsverhalten im Meeresboden instationär ist und noch mehr Wärme aufnehmen kann. Das 2-K-Kriterium wird mit Hilfe der Spiegelungsmethode nach IEC 6028-2-1 Abschnitt 2.2.3.1 [7] berechnet. Die Maße für diese Methode sind in Abbildung 4 angegeben.

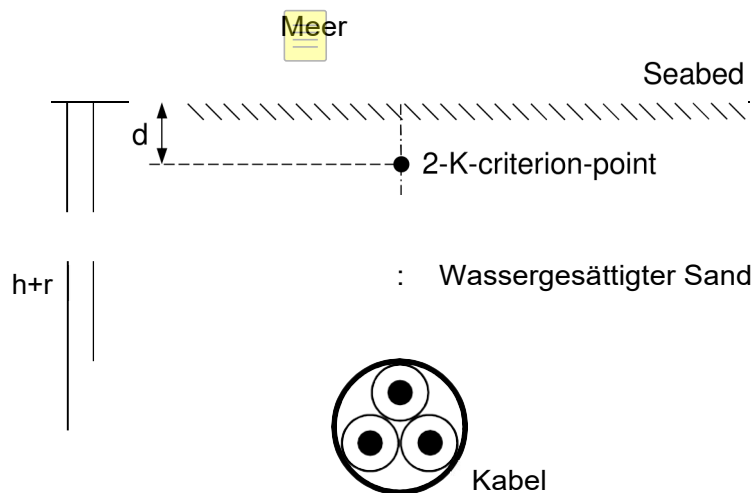


Abbildung 4 - Schematische Darstellung der Verlegung des Kabels und des 2-K-Kriteriumspunktes

Die Temperaturerhöhung $\Delta\theta_{2KP}$ am 2-K-Kriteriumspunkt wird wie folgt berechnet:

$$\Delta\theta_{2KP} = \frac{1}{2\pi} W_{tot} \cdot \rho_T \cdot \ln \left(\frac{h + r + d}{h + r - d} \right)$$

W_{tot} : Gesamtverluste

ρ_T : spezifischer Wärmewiderstand des Meeresbodens

h: Verlegetiefe des Kabels (1500 mm) d: 2-K-Kriteriumspunkt (300 mm)

r: Radius des Leiters (60 . 5 - 68,5 mm)

3 Ergebnisse

In Tabelle 3-1 sind die unterschiedlichen Verluste für einen maximalen Effektivstrom von $I = 460$ A von drei verschiedenen Kabelquerschnitten angegeben. Als Ergebnis sind die stationären Werte der Gesamtverluste W_{tot} und die Temperatur des Leiters T_c angegeben.

Tabelle 3-1 - Verluste der berechneten Kabel

	300 mm ²	400 mm ²	500 mm ²
Nennstrom in einem Leiter I (r.m.s)	460 A	460 A	460A
Kabel-Leitungsverluste W_s	42,90 W/m	33,60 W/m	26,71 W/m
Schicht- und Näherungsverluste $W_{s,A}$	15,22 W/m	16,40 W/m	15,85 W/m
Dielektrische Verluste W_d (nicht berücksichtigt)	0,38 W/m	0,38 W/m	0,38 W/m
Gesamtverluste W_{tot}	58,13 W/m	50,00 W/m	42,56 W/m
I Temperatur des Leiters T_c	42,27 °C	35,56 °C	30,23 °C

Tabelle 3-2 zeigt die Temperatur am 2-K-Kriteriumspunkt für die drei untersuchten Kabel. Alle drei Querschnitte liegen unter den Maximalwerten von 2 K.

Tabelle 3-2 - Verluste der berechneten Kabel

	300 mm ²	400 mm ²	500 mm ²
Strom in einem Leiter I (r.m.s)	460 A	460 A	460A
Gesamtverluste (W_{tot})	58,13 W/m	50,00 W/m	42,56 W/m
$\Delta\theta_{2KP}$	11,21 K	11,02 K	1,02 K

4 Fazit

Das 2-K-Kriterium in 300 mm unterhalb des Meeresbodens wird mit 1,40 K (300 mm²), 1,21 K (400 mm²) und 1,02 K (500 mm²) für alle Kabelquerschnitte erfüllt. Die Berechnung ist stark abhängig von den Randbedingungen wie der Verlegetiefe des Kabels, dem spezifischen Wärmewiderstand des Meeresbodens und dem maximalen Laststrom. Die Ergebnisse sind nur für die angegebenen Parameter gültig. Die Berechnung wird mit einem konservativen stationären Verfahren durchgeführt.

Quellen

- [1] " Power System Study, OWF Riffgat ONE DYAS, 155-kV-/33-kV-grid" , Schneider Electric GmbH, 15.07.2020
- [2] "Einhaltung des „2 K- Kriteriums" für die Kabelverbindungen innerhalb des OWP Riff gat", Nexans Deutschland GmbH, 08.11.2011
- [3] VDI 4640 Blatt 1 - "Thermal use of the underground – Fundamentals, approvals, environmental aspects", VDI 2010
- [3] „Stellungnahme zur Vergleichbarkeit der Sedimente", Geo-Engineering.org GmbH, 2011
- [4] „Submarine Power Cables" , Datenblatt Nexans Deutschland GmbH, 2008
- [5] IEC 60287 Teil 1-1 „Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses - General", 2006
- [6] T. Nielsen, S. Jakobsen, and M. Savaghebi, "Dynamic Rating of Three-Core XLPE Submarine Cables for Offshore Wind Farms," Applied Sciences, vol. 9, no. 4, p. 800, 2019.
- [7] IEC 60287 Teil 2-1 „Thermal resistance – Calculations of thermal resistance", 2006