

Technischer Bericht

Magnetische Felder und Erwärmung des Erdbodens im Bereich des als Erdkabelverbindung geplanten Teilabschnitts „Verden (Aller)“ der 380-kV-Leitung „Stade – Landesbergen“

Dr.-Ing. Winfried Fricke

Frettchenweg 31A

12623 Berlin

Germany

fon: +49 (0)30 9831 8213

fax: +49 (0)30 9831 8234

mobile: +49 (0)1577 8925 229

eMail: wfricke@fricke-engineering.de

www.fricke-engineering.de

Textseiten / Anlagen
42 / 4

Datum: 30.07.2021

<u>Inhalt</u>	Seite
1. Einführung	2
2. Theoretische Grundlagen	3
2.1. Allgemeine Erläuterungen zu elektrischen, magnetischen und Temperaturfeldern	3
2.2. Berechnungsverfahren für die magnetische Flussdichte	4
2.3. Berechnungsverfahren für die Erwärmung	5
3. Technische Parameter der Kabelverbindung	7
3.1. Aufbau der Kabelanlage	7
3.2. Kabelströme bei maximaler bzw. typischer Anlagenauslastung	10
3.3. Thermische Eigenschaften des Erdbodens entlang der Trasse	17
4. Berechnungsergebnisse	20
4.1. Berechnete magnetische Flussdichten	20
4.1.1. Magnetische Flussdichten im Bereich der Abschnitte mit Regelprofil	20
4.1.2. Magnetische Flussdichten an ausgewählten Punkten mit Bebauung	28
4.1.2.1. Wohngebäude nahe Trassen-km 0+679,0	28
4.1.2.2. Wohngebäude nahe Trassen-km 3+403,1	30
4.2. Berechnete Erwärmungen des umgebenden Erdbodens	32
4.2.1. Erwärmung des Erdbodens im Bereich der Abschnitte mit Regelprofil	32
4.2.2. Erwärmung des Erdbodens im Bereich der Allerunterquerung	35
5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	38
6. Quellenverzeichnis	42

1. Einführung

Die erwartete zunehmende Einspeisung von elektrischer Energie aus regenerativen Quellen (u.a. On- und Offshore-Windenergieanlagen, Photovoltaikanlagen, Biogasanlagen) sowie neuen Kraftwerken erfordert den Ausbau des deutschen Hochspannungs-Übertragungsnetzes. Die sich daraus ergebenden konkreten Anforderungen sind im sogenannten „Netzentwicklungsplan Strom“ zusammengefasst, der nach den Vorgaben des Energiewirtschaftsgesetzes von den vier deutschen Übertragungsnetzbetreibern federführend erstellt und jährlich aktualisiert wird.

Im Rahmen dieses Netzausbaus ist unter anderem die Errichtung der 380-kV-Leitung „Stade - Landesbergen“ vorgesehen. Für diese Leitung ist die TenneT TSO GmbH mit Sitz in Bayreuth als der für diesen Bereich zuständige Übertragungsnetzbetreiber verantwortlich. Die Leitung ist im überwiegenden Teil der Trasse als Freileitung geplant. Unmittelbar westlich der Stadt Verden (Aller) ist jedoch vorgesehen, einen ca. 4,5 km langen Teilabschnitt als Erdkabelverbindung auszuführen.

Stromdurchflossene Kabel erzeugen in ihrer Umgebung magnetische Felder. Elektrische Felder außerhalb der Kabelanlagen treten wegen der geerdeten metallischen Mäntel bzw. Schirme im vorliegenden Fall nicht auf. Für magnetische 50-Hz-Wechselfelder gilt in Deutschland ein verbindlich einzuhaltender Grenzwert von 100 μT für Bereiche, die *„zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“*. Dieser Grenzwert ist in der 26. Bundesimmissionschutzverordnung (26. BImSchV [1], siehe auch 26. BImSchVVwV [2]) festgelegt.

Neben diesen magnetischen Feldern emittieren stromdurchflossene und unter Spannung stehende Kabel auch Wärmeleistungen, die in Bezug auf die durchzuleitende Übertragungsleistung oft auch vereinfachend als Verlustleistungen bezeichnet werden, obwohl diese Leistungsanteile physikalisch korrekt betrachtet nicht verloren gehen, sondern lediglich in Wärme umgewandelt werden. Diese Kabelverluste müssen von den Kabeln nach außen durch gegebenenfalls vorhandene Schutzrohre und das umgebende Erdreich zur Erdoberfläche abgeführt werden. Diese Wärmeflüsse führen zu einer Erwärmung des Erdbodens und gegebenenfalls vorhandener Grundwasserschichten in der Umgebung der Kabel. Im Gegensatz zu den magnetischen Emissionen existiert kein verbindlich einzuhaltender allgemein gültiger Grenzwert für die Erwärmung von Erdboden und Grundwasser in der Umgebung der Kabel. Für weiterführende Betrachtungen zum Einfluss der Kabel auf ihre Umgebung können Angaben zur maximalen Höhe dieser Erwärmungen jedoch von Nutzen sein.

Im vorliegenden Bericht sind die Ergebnisse von Magnetfeldberechnungen sowie von Berechnungen der Erwärmung des umgebenden Erdbodens für die geplante Kabelverbindung zusammengefasst. Berechnet wurde jeweils die magnetische Flussdichte oberhalb des Erdbodens nach der in der 26. BImSchV vorgeschriebenen Methode für die maximale Anlagenauslastung und unter Berücksichtigung der Wechselwirkung aller beteiligten Kabel für den jeweils ungünstigsten Fall. Für die Berechnungen der Erwärmung wurde eine vom zuständigen Übertragungsnetzbetreiber TenneT TSO GmbH definierte typische Übertragungsleistung angesetzt. Die ungleichmäßige Stromaufteilung auf parallelgeschaltete Kabel sowie die Wirkung induzierter Ströme in den Kabelschirmen wurden in allen untersuchten Fällen ebenfalls einbezogen.

2. Theoretische Grundlagen

2.1. Allgemeine Erläuterungen zu elektrischen, magnetischen und Temperaturfeldern

Die elektrische Energieübertragung ist aus physikalischen Gründen zwangsläufig immer mit dem Auftreten elektrischer und magnetischer Felder verbunden. Elektrische Felder entstehen in der Umgebung elektrischer Ladungen, die sich bei Anlagen der elektrischen Energietechnik auf allen spannungsführenden leitfähigen Teilen befinden. Magnetische Felder werden dagegen von den in den Anlagenteilen fließenden Strömen erzeugt, also von Strömen in Phasenleitern, Schirmen, Erdungsleitern und gegebenenfalls auch leitfähigen Kapselungen.

Die Intensität elektrischer Felder wird durch die elektrische Feldstärke (Formelzeichen: E) charakterisiert, die Maßeinheit ist Volt pro Meter (V/m). Im Hochspannungsbereich werden elektrische Feldstärken aus praktischen Gründen zumeist in Kilovolt pro Meter (kV/m) angegeben. Zur Beschreibung magnetischer Felder dient die magnetische Feldstärke (Formelzeichen: H) bzw. die magnetische Flussdichte (Formelzeichen: B), die sich nur durch einen materialabhängigen Proportionalitätsfaktor, die sogenannte Permeabilität (Formelzeichen: μ) unterscheiden. Die magnetische Flussdichte wird in der Maßeinheit Tesla (T) angegeben, aus praktischen Gründen wird zur Beurteilung der von Energieanlagen ausgehenden magnetischen Felder zumeist die abgeleitete Maßeinheit Mikrottesla (μT) verwendet. Elektrische und magnetische Feldstärken sind grundsätzlich vektorielle Größen, d.h. sie werden neben ihrem Betrag auch durch ihre Richtung gekennzeichnet.

Da der Betrag der elektrischen bzw. magnetischen Feldstärke proportional zur jeweiligen felderzeugenden Größe (Spannung bzw. Strom) ist, folgt der Zeitverlauf der Feldstärken im für die Energieübertragung relevanten Bereich niedriger Frequenzen genau dem Zeitverlauf der Ströme bzw. Spannungen. Weitere wesentliche Einflussgrößen sind Anzahl und geometrische Anordnung der spannungs- bzw. stromführenden Anlagenteile sowie der Abstand des betrachteten Raumpunktes zu diesen Teilen. Im Niederfrequenzbereich, der für die Beurteilung der von elektrotechnischen Anlagen ausgehenden elektrischen und magnetischen Felder relevant ist, sind elektrische und magnetische Felder entkoppelt, sie können daher unabhängig voneinander getrennt berechnet bzw. gemessen und bewertet werden.

Hochspannungskabel sind grundsätzlich als koaxiale Anordnungen aufgebaut, bei denen sich im Innern ein strom- und spannungsführender Phasenleiter befindet, der von einem geerdeten metallischen Schirm umgeben ist. Ein geerdeter Schirm weist gegenüber seiner Umgebung keine nennenswerte Spannungsdifferenz auf, nach außen hin erzeugt ein Hochspannungskabel daher kein elektrisches Feld. Dieses bleibt vielmehr bauartbedingt auf das Innere des Kabels beschränkt. Auch andere leitfähige Teile einer Hochspannungskabelverbindung wie z.B. gegebenenfalls installierte parallele Erdungsleiter führen gegenüber der Umgebung ebenfalls keine nennenswerte Spannung und erzeugen daher praktisch kein elektrisches Feld. Dagegen reichen die magnetischen Felder, die durch die in den Leitern und Schirmen der Hochspannungskabel fließenden Ströme erzeugt werden, in die Umgebung der Anlage hinein. Hinsichtlich der von einer Hochspannungskabelanlage ausgehenden Feldwirkungen ist es daher in der Praxis ausreichend, nur das magnetische Feld zu betrachten.

Charakteristisch für dreiphasige Wechselstromsysteme (Drehstromsysteme) ist, dass Ströme und Spannungen der drei Phasen jeweils den gleichen sinusförmigen Zeitverlauf aufweisen, der jedoch von Phase zu Phase jeweils um ein Drittel einer Periodendauer zeitlich verschoben ist. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von einer Phasenverschiebung von jeweils 120° . Auf Grund dieser Phasenverschiebung ist die Summe der Ströme in den drei Phasenleitern eines Drehstromsystems im (symmetrischen) Normalbetrieb zu jedem Zeitpunkt gleich Null. Daher kommt es auch zu einer teilweisen Kompensation der von den Phasenleitern erzeugten magnetischen Felder, die jedoch auf Grund der im Allgemeinen unterschiedlichen geometrischen Abstände der einzelnen Phasenleiter zu dem jeweils betrachteten Raumpunkt nicht vollständig ist.

Die in den Kabeln umgesetzten strom- und spannungsabhängigen Verlustleistungen werden in Form von Wärmeflüssen vom jeweiligen Ort der Entstehung durch die Aufbauelemente der Kabel, durch gegebenenfalls vorhandene Luftspalte und Kabelschutzrohre sowie durch das umgebende Erdreich zur Erdoberfläche hin abgegeben. Der Zeitverlauf der in den Kabeln umgesetzten Wärmeleistungen folgt unmittelbar dem Quadrat des Stroms (für Leiter- und Schirmverluste) bzw. dem Quadrat der Spannung (für dielektrische Verluste). Für die Höhe der durch die Wärmeflüsse verursachten Temperaturgradienten ist neben der Größe dieser Wärmeleistungen auch die jeweilige Wärmeleitfähigkeit (bzw. der Wärmewiderstand) der beteiligten Materialien sowie zusätzlich auch deren Wärmespeichervermögen (Wärmekapazität) von Bedeutung. Das Zusammenspiel von Wärmekapazität und Wärmewiderstand führt zu einer gewissen „thermischen Trägheit“, durch die kurzzeitige lastbedingte Schwankungen der erzeugten Verlustleistungen ausgeglichen werden. Deshalb spiegeln sich diese zeitveränderlichen Verlustleistungen häufig nicht oder nicht vollständig in einer adäquaten Temperaturerhöhung wider. Da insbesondere der Erdboden in der Umgebung der Kabel eine erhebliche Wärmekapazität aufweist, ist es deshalb sinnvoll, zur Berechnung der Erwärmung des Erdbodens bzw. des Grundwassers auf typische Strombelastungen zurückzugreifen, die den über längere Zeiträume zu erwartenden Belastungszustand der Kabelverbindung abbilden und die üblicherweise kleiner als die zur Dimensionierung herangezogenen maximalen Strombelastungen sind.

Temperaturfelder sind im Gegensatz zu magnetischen Feldern skalare Felder, d.h. sie sind nur durch eine physikalische Feldgröße gekennzeichnet. Diese Feldgröße ist in der Regel die durch die Kabelverluste verursachte Temperaturdifferenz zur unbeeinflussten Umgebungstemperatur am jeweils betrachteten Ort. Sie wird üblicherweise in der Maßeinheit Kelvin (K) angegeben.

2.2. Berechnungsverfahren für die magnetische Flussdichte

Die magnetische Flussdichte B ist mit der magnetischen Feldstärke H für magnetisch homogene und isotrope Materialien über folgende Beziehung verknüpft:

$$\vec{B} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$$

- \vec{B} - komplexer Vektor der magnetischen Flussdichte
- \vec{H} - komplexer Vektor der magnetischen Feldstärke
- μ_r - relative Permeabilität (für nicht ferromagnetische Materialien $\mu_r \approx 1$)
- μ_0 - absolute Permeabilität ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Vs/Am)

Wenn keine ferromagnetischen Materialien vorhanden sind, kann die magnetische Feldstärke eines theoretisch unendlich langen geraden stromdurchflossenen Leiters in einem vorgegebenen Aufpunkt nach dem Gesetz von Biot-Savart berechnet werden [3]. Dieses lautet in vektorieller Form:

$$\vec{H} = \frac{\vec{I} \times \vec{R}}{2\pi |\vec{R}|^2}$$

- \vec{H} - komplexer Vektor der magnetischen Feldstärke
- \vec{I} - komplexer Stromvektor (in Richtung der Leiterachse)
- \vec{R} - Radiusvektor (Vektor senkrecht von der Achse des Leiters zum Aufpunkt)

Bei Drehstromkabelverbindungen wird die Zeitabhängigkeit des magnetischen Feldes, wie in der Wechselstromtechnik üblich, durch komplexe Größen mit Betrag und Phasenlage beschrieben. Die magnetischen Felder mehrerer Quellen (Ströme in den Leitern und Kabelschirmen) werden nach dem Superpositionsprinzip überlagert.

Im allgemeinen Fall wird das magnetische Feld in einem bestimmten Punkt bei mehrphasiger Erregung ein sogenanntes elliptisches Drehfeld sein, bei dem die Spitze des magnetischen Flussdichtevektors in der Darstellung nach Bild 1 während einer Periode der felderzeugenden Ströme eine Ellipse beschreibt [3]. Der Augenblickswert der magnetischen Flussdichte variiert dabei zwischen den Werten B_{\min} und B_{\max} , während sich die Feldrichtung ständig ändert.

Die Berechnung des echten Maximalwertes der magnetischen Flussdichte B_{\max} erfordert die Berücksichtigung der Phasenverschiebung zwischen den räumlichen Komponenten B_x und B_y und führt auf eine sehr komplexe Berechnungsvorschrift. Für die Grenzwertvorgaben gemäß 26. BImSchV wird deshalb auf einen Ersatzwert der magnetischen Flussdichte Bezug genommen, der sich ohne Berücksichtigung der Phasenverschiebung aus den beiden Extremwerten B_{\min} und B_{\max} wie folgt berechnet:

$$B_{\text{ers}} = \sqrt{B_{\text{max}}^2 + B_{\text{min}}^2}$$

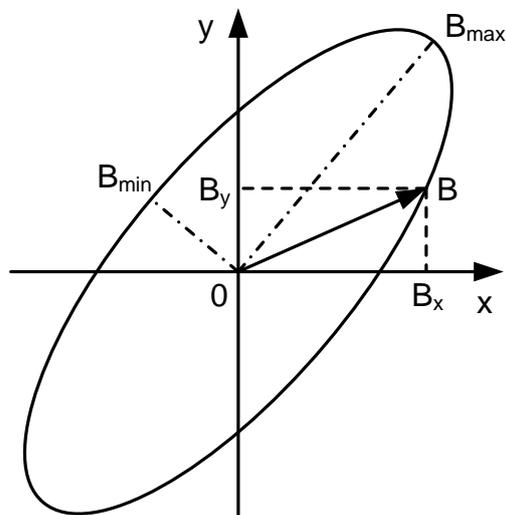


Bild 1: Magnetisches Feld in der Ebene senkrecht zu den felderzeugenden Strömen (nach [3])

Es lässt sich mathematisch zeigen, dass es letztendlich unerheblich ist, in welcher Lage die beiden Raumrichtungen x und y zur Lage des maximalen Flussdichtevektors (B_{\max} nach Bild 1) stehen. Wichtig ist nur, dass die Achsen x und y orthogonal zueinander und zur Richtung der Kabel stehen und dass zur Ermittlung des Ersatzwertes jeweils die maximalen Werte der Flussdichtekomponenten in den Raumrichtungen x und y verwendet werden. Der Ersatzwert der Flussdichte kann bis zum Faktor $\sqrt{2}$ größer sein als die maximale Flussdichte, wird jedoch niemals kleiner als diese. In allen nachfolgend vorgestellten Berechnungsergebnissen wurde einheitlich der Ersatzwert der magnetischen Flussdichte verwendet.

2.3. Berechnungsverfahren für die Erwärmung

Zur Berechnung der Erwärmung erdverlegter Kabel sind in der Fachliteratur sowie in nationalen und internationalen Standards verschiedene ähnliche Verfahren beschrieben [6], [7], [8], [9], [10]. Diese Verfahren verwenden im Allgemeinen eine Reihe von Annahmen und Näherungen, um die komplexen Vorgänge des Wärmetransports von den Kabeln in die Umgebung mittels handhabbarer Formeln bzw. Tabellen mathematisch erfassen und nachbilden zu können. Diese Einschränkungen führen jedoch in bestimmten Fällen dazu, dass z.B. Konfigurationen mit komplexer Geometrie, unterschiedlichen Materialien oder einer Vielzahl unterschiedlich belasteter Kabel nicht

oder nur mit hohem Aufwand hinreichend genau berechnet werden können. Für diese Fälle bieten sich numerische Berechnungsverfahren wie die Finite-Elemente-Methode (FEM) an. Der Aufwand zur Erstellung der Berechnungsmodelle ist zwar recht hoch, jedoch lassen sich mit diesem Verfahren auch sehr komplexe Konfigurationen mit hoher Genauigkeit berechnen. Auch die Modellierung zeitabhängiger Erwärmungsvorgänge für solche Anordnungen ist möglich.

Für die Erwärmungsberechnungen im Rahmen der hier beschriebenen Untersuchungen kam aus den genannten Gründen die Finite-Elemente-Methode (FEM-Programm ANSYS) zu Einsatz. Dabei wurden die Kabel selbst, die Kabelrohre sowie der umgebende Erdboden durch ein FEM-Modell nachgebildet. Erfahrungen zeigen, dass die damit berechneten Erwärmungen sehr gut mit den Ergebnissen der genannten klassischen Verfahren übereinstimmen. Die Berechnung des Wärmeübergangs von der Kabeloberfläche zur Innenwand des Kabelrohrs könnte grundsätzlich auch mit Hilfe eines FEM-Modells erfolgen, das Konvektions- und Strahlungsvorgänge nachbildet. Für ein solches, relativ komplexes Modell wäre jedoch eine Reihe von zusätzlichen Parametern und Materialkennwerten erforderlich, die in der Praxis meist nicht exakt bekannt sind und die für den klassischen vereinfachten Ansatz nicht benötigt werden. Um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der FEM-Berechnungen mit den nach der üblichen klassischen Methode gewonnenen zu gewährleisten, wurde deshalb der Wärmeübergang im Luftspalt zwischen Kabel und Schutzrohr nach dem klassischen Verfahren mit Hilfe einer empirischen Formel berechnet (Details siehe [5], [7]) und dieser klassische Ansatz in das FEM-Modell integriert.

3. Technische Parameter der Kabelverbindung

3.1. Aufbau der Kabelanlage

Für den als Kabelverbindung geplanten Abschnitt der 380-kV-Leitung Stade - Landesbergen im Bereich unmittelbar westlich der Stadt Verden (Aller) sollen pro Stromkreis der ankommenden bzw. weiterführenden Freileitung jeweils zwei parallele Kabelsysteme aus VPE-isolierten 400-kV-Kabeln zum Einsatz kommen. Diese Aufteilung auf jeweils zwei elektrisch parallelgeschaltete Teilsysteme ist aus Gründen der Stromtragfähigkeit erforderlich. Im Trassenquerschnitt existieren somit 12 Einzelkabel, die in ebener Anordnung geführt werden sollen.

Für die Berechnungen wurde vom Auftraggeber ein Kabelaufbau vorgegeben, der auf der Konstruktion eines 400-kV-VPE-Kabels mit Kupferdrahtschirm und Aluminium-Schichtenmantel des Herstellers NEXANS beruht (Anlage 1). Das Kabel enthält einen Kupfer-Millikenleiter mit einem Nennquerschnitt von 2500 mm². Es folgen eine leitfähige Bandage sowie eine extrudierte VPE-Isolierung mit innerer und äußerer Leitschicht. Darüber befinden sich ein leitfähiges Polster sowie ein Kupfer-Drahtschirm mit Gegenwendel. Der Drahtschirm hat einen Nennquerschnitt von 250 mm², er enthält neben den Schirmdrähten auch ein integriertes Edelstahlröhrchen mit LWL-Fasern. Nach einer Bettung folgen ein Aluminium-Schichtenmantel als Querwassersperre sowie ein HDPE-Außenmantel mit leitfähiger Außenschicht. Die Kabel werden einzeln in vorab installierte Kabelschutzrohre aus Kunststoff eingezogen. Nach dem zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts gültigen Planungsstand beginnt die Kabeltrasse an der Kabelübergangsanlage (KÜA) Nord (Trassen-km 0+000) und endet an der Kabelübergangsanlage Süd (Trassen-km 4+460). Die gesamte Trassenlänge beträgt also ca. 4,5 km (Anlage 2).

Auf dem überwiegenden Teil der Trasse (nach gegenwärtiger Planung ca. 2/3 der Gesamtlänge) soll die Kabelanlage in offener Bauweise gemäß dem sogenannten Regelprofil nach Bild 2 errichtet werden. Nur bei Bedarf wird auf kürzeren Teilstücken von diesem Regelprofil abgewichen, z.B. bei notwendigen Querungen von Straßen, kleineren Gewässern oder anderen im Boden bereits existierenden Installationen bzw. bei der Querung ökologisch sensibler Bereiche. Im Verlauf der Trasse ist auch der Fluss Aller zu unterqueren. Hier sind zwei parallele Tunnel geplant, die jeweils die Kabel eines der beiden Stromkreise, also zwei Teilsysteme mit je drei Kabeln enthalten (Bild 3).

Die Kabel werden auf den Abschnitten außerhalb der beiden parallelen Aller-Tunnel in ebener Anordnung geführt. Diese Anordnung ist notwendig, um die Verlustleistung der hochbelasteten Kabel hinreichend gut durch das umgebende Erdreich abführen zu können. Die Legetiefe „H“ wurde für das Regelprofil einheitlich mit 1,6 m festgelegt. Die erforderlichen Kabelabstände innerhalb der Teilsysteme „a“ sowie die Abstände zwischen den Teilsystemen benachbarter Stromkreise „s1“ bzw. innerhalb der Stromkreise „s2“ (jeweils bezogen auf die Achsen der Kabelschutzrohre) folgen aus den Ergebnissen von Erwärmungsberechnungen.

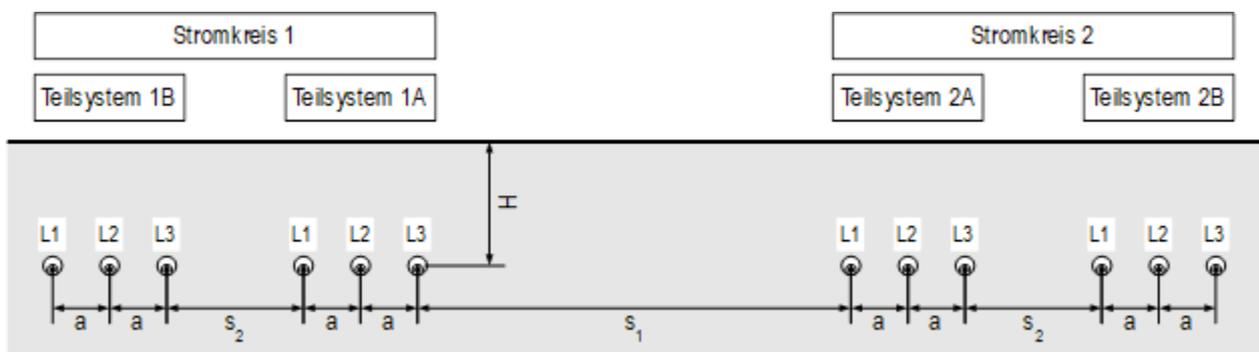


Bild 2: Regelprofil der 380-kV-Kabelverbindung (Kabel einzeln in Schutzrohren DA 280 x 16,6 mm SDR 17)

Im Ergebnis von Erwärmungsberechnungen für typische 380-kV-Teilverkabelungen der TenneT TSO wurde ein sogenanntes Regelprofil mit definierten Kabel- und Systemabständen festgelegt, das auch im vorliegenden Fall für den überwiegenden Teil der in offener Bauweise zu errichtenden Trassenabschnitte zum Einsatz kommt. Für dieses Regelprofil gelten folgende Parameter:

Legetiefe („H“), Regeltiefe:	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System (Phasenabstand „a“):	0,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre zwischen Teilsystemen (Systemabstand „s2“):	1,90 m
Achsenabstand der Kabelrohre zwischen Stromkreisen (Stromkreisabstand „s1“):	10,90 m

Für die beiden parallelen Tunnel der Aller-Unterquerung ist eine Anordnung gemäß Bild 3 vorgesehen.

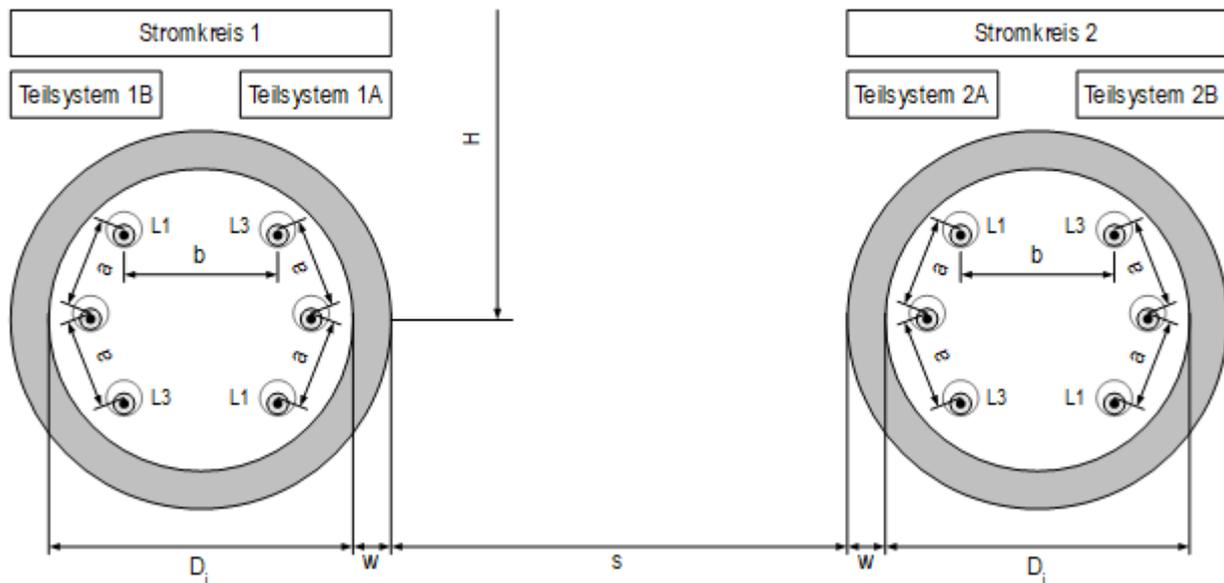


Bild 3: Profil der 380-kV-Kabelverbindung für die Allerquerung (je ein Tunnel pro Stromkreis, Kabel einzeln in Schutzrohren DA 250 x 14,8 mm SDR 17, Tunnel-Innenraum verfüllt)

Für das Sonderprofil im Bereich der Unterquerung der Aller gelten folgende Parameter:

Tiefe der Tunnelachsen („H“)	(variabel)
Innendurchmesser der Tunnel („Di“)	2,00 m
Wandstärke der Tunnel („w“)	0,25 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“)	0,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre zwischen Teilsystemen (Systemabstand „b“):	1,00 m
Lichter horizontaler Abstand zwischen beiden Tunneln (Tunnelabstand „s“):	(variabel)

Bei elektrisch parallelgeschalteten Kabelsystemen wird die Stromaufteilung von den gegenseitigen induktiven Kopplungen der einzelnen Phasen bestimmt. Die Aufteilung der Lastströme ist daher in der Regel nicht gleichmäßig. Allgemein üblich ist dabei die häufig in der Literatur empfohlene alternierende Phasenfolge (L1 – L2 – L3, L3 – L2 – L1, L1 – L2 – L3, L3 – L2 – L1), die zu den geringsten Abweichungen von der idealen gleichmäßigen Stromaufteilung führt. Für die insgesamt vier Teilsysteme der hier beschriebenen Kabelverbindung wurde auf den Trassenabschnitten außerhalb der Allerquerung abweichend davon jedoch eine gleichbleibende Phasenfolge gewählt (L1 – L2 – L3, L1 – L2 – L3, L1 – L2 – L3, L1 – L2 – L3). Dies führt zwar zu einer deutlich ungleichmäßigeren Stromaufteilung (und damit zu einer geringeren Strombelastbarkeit), jedoch haben Voruntersuchungen gezeigt, dass die von der Kabelanlage im Betrieb erzeugten magnetischen Felder unmittelbar oberhalb der Kabeltrasse vor allem bei den vergleichsweise geringen Legetiefen des Regelprofils in diesem Fall deutlich kleiner sind als bei einer alternierenden Phasenfolge.

Die metallischen Schirme der einzelnen Kabel sind nur an den beiden Enden der Kabelverbindung geerdet. Zur Verringerung der Zusatzverluste infolge induzierter Zirkulationsströme werden die Schirme entlang der Trasse an geeigneten Verbindungsmuffen zyklisch ausgetauscht, so dass im Idealfall drei elektrisch gleiche Teilabschnitte entstehen (sogenanntes „Cross-Bonding“). Die theoretisch optimalen Positionen der Schirmauskreuzungen liegen bei ca. 1/3 bzw. 2/3 der Trassenlänge. Die drei sich ergebenden Auskreuzungsabschnitte können wiederum aus mehreren physischen Kabellängen zusammengesetzt sein, die mit Hilfe von Verbindungsmuffen ohne Schirmauskreuzung miteinander verbunden werden.

Würde man in dieser klassischen Art und Weise eine Aufteilung in drei annähernd gleich lange Teilabschnitte vornehmen, so müsste die erste Cross-Bonding-Muffengruppe im Tunnelbereich der Aller-Unterquerung liegen. Um dies zu vermeiden, wurde für die vorliegende Kabelverbindung ein modifiziertes Cross-Bonding-Schema erarbeitet. Der erste Cross-Bonding-Teilabschnitt wurde dazu in zwei Teillängen aufgeteilt, die zweite dieser Teillängen wurde an das Ende der Kabelstrecke verschoben. Dafür muss nach dem Cross-Bonding-Teilabschnitt 3 eine weitere Auskreuzung der Kabelschirme erfolgen, auf dem anschließenden Teilabschnitt 1b gilt dadurch wieder die gleiche Zuordnung zwischen Schirmen und Leitern wie auf dem Teilabschnitt 1a. Damit ergibt sich ein elektrisches Schema der Kabelverbindung gemäß Bild 4.

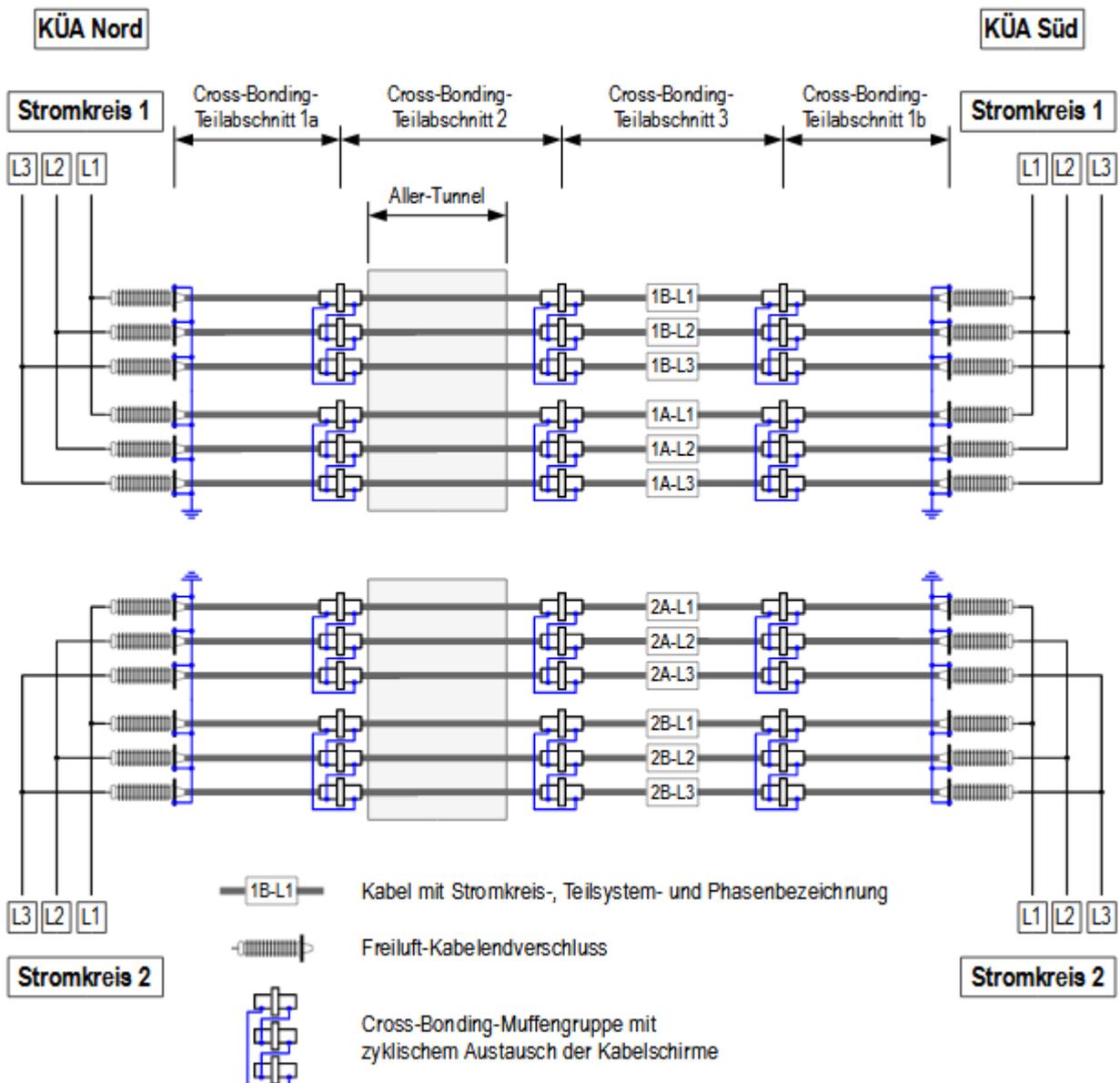


Bild 4: Elektrisches Schema der 380-kV-Kabelverbindung (vereinfacht)

Auf Grund der induktiven Kopplung der Schirme untereinander sowie zu den einzelnen Phasenleitern ergeben sich auch in den Schirmen unterschiedlich große Restströme. Da diese neben den Strömen in den Leitern der Kabel ebenfalls einen gewissen Einfluss auf das resultierende magnetische Feld haben, werden die magnetischen Flussdichten auf den einzelnen Cross-Bonding-Teilabschnitten wegen der Schirmauskreuzung nicht völlig identisch sein. Wie im nachfolgenden Abschnitt dargelegt wird, sind die Unterschiede jedoch vergleichsweise gering.

3.2. Kabelströme bei maximaler bzw. typischer Anlagenauslastung

Die Kabelanlage ist so ausgelegt, dass sich ein thermisch zulässiger stationärer Laststrom von 3150 A pro Stromkreis bei einem Belastungsgrad von $m = 0,8$ ergibt. Dies bedeutet, dass der mittlere Laststrom im Tageszyklus bei 2520 A pro Stromkreis liegt (80 % des Tageshöchstwertes von 3150 A). Bei dieser Last würde das wärmste der 12 einzelnen Kabel gerade die zulässige Grenztemperatur für Dauerbetrieb von 90 °C am Leiter erreichen. Bild 5 zeigt die für die Berechnungen benutzte künstliche Tageslastkurve mit einem Belastungsgrad von $m = 0,8$. Für einen begrenzten Zeitraum von wenigen Stunden ist die Kabelverbindung auch in der Lage, einen erhöhten Laststrom von 4000 A pro Stromkreis zu übertragen. Obwohl diese Strombelastung nicht dauerhaft zulässig ist, wurde der Laststrom von 4000 A pro Stromkreis im Sinne der „*höchsten betrieblichen Anlagenauslastung*“ ([1], [2]) als Basis für die Ermittlung der magnetischen Flussdichte angesetzt.

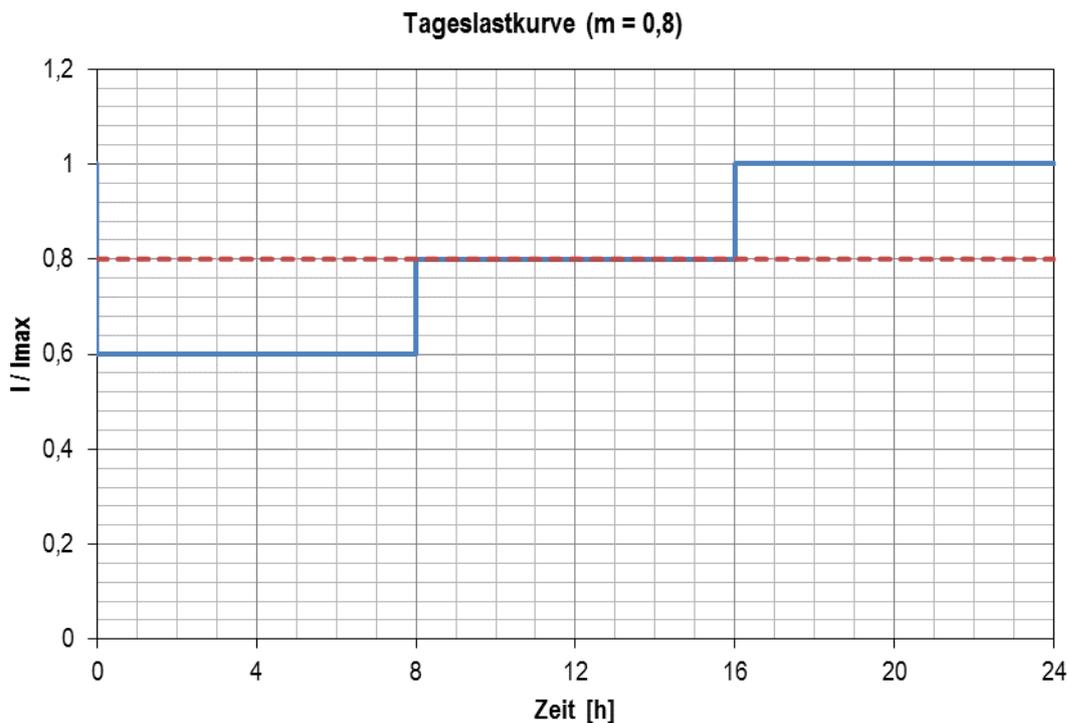


Bild 5: Künstliche Tageslastkurve mit einem Belastungsgrad $m = 0,8$

Wegen der thermischen Trägheit (Wärmespeicherefähigkeit in Verbindung mit Wärmeleitfähigkeit) aller Materialien, insbesondere des umgebenden Erdbodens, ist es sinnvoll, für die Berechnung der kabelbedingten Erwärmungen in der Umgebung der Kabel mit einem Lastwert zu rechnen, der den üblichen über längere Zeiträume zu erwartenden Wert der Strombelastung widerspiegelt. Diese Last wurde vom zuständigen Übertragungsnetzbetreiber TenneT TSO GmbH mit 1800 A pro Stromkreis angegeben, der Belastungsgrad beträgt weiterhin $m = 0,8$.

Die Berechnung der Stromaufteilung auf die Leiter der parallelgeschalteten Kabel sowie die Ermittlung der Schirmströme erfolgten anhand eines Berechnungsmodells nach dem Knotenspannungsverfahren, das die Selbst- und gegenseitigen Impedanzen (ohmsch und induktiv) aller beteiligten stromführenden Aufbauelemente der Kabel (d.h. Leiter und Kabelschirme) berücksichtigt (Details u.a. in [4], [5]). Dafür wurden die konkreten Trassenprofile und Abschnittslängen gemäß dem zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Berichts gültigen Planungsstand angesetzt. Für die maximale Anlagenauslastung mit 4000 A pro Stromkreis (magnetische Felder) ergaben sich folgende Ströme in den Leitern der Kabel (Bild 6):

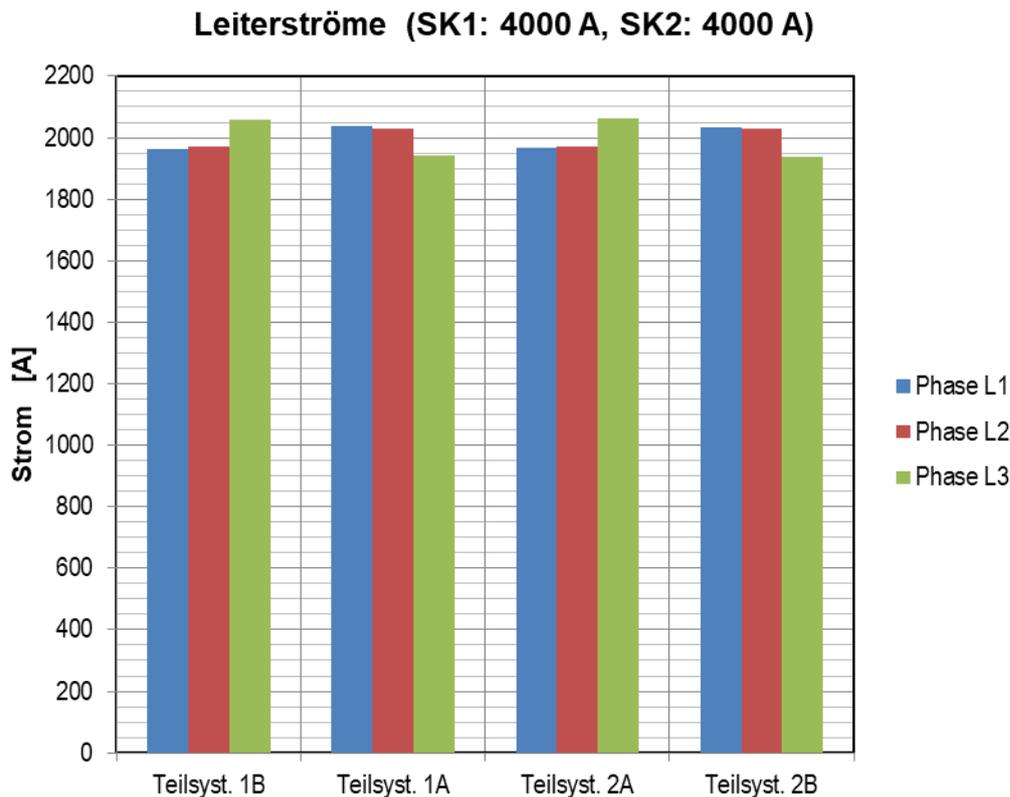


Bild 6: Berechnete Stromaufteilung in den Phasenleitern für 4000 A pro Stromkreis (zur Berechnung der magnetischen Felder)

Mit dem gleichen Rechenmodell wurden auch die induzierten Schirmrestströme berechnet, die sich auf den einzelnen Cross-Bonding-Teilabschnitten ergeben (Bilder 7, 8, 9 und 10). Sie sind im Vergleich zu den Leiterströmen relativ gering, da sich die in den Schirmen induzierten Längsspannungen durch die Auskreuzungen über die drei Abschnitte hinweg betrachtet weitgehend kompensieren. Dies entspricht dem bekannten Grundprinzip des Cross-Bonding-Verfahrens, mit dessen Hilfe die Zusatzverluste in den Kabelschirmen minimiert werden können.

Definierte Grenzwerte für die Schirmrestströme existieren nicht, in der Praxis wird man aber bestrebt sein, diese Restströme in den Schirmen durch geeignete Gestaltung des Cross-Bonding-Systems so klein zu halten, dass die dadurch verursachten Zusatzverluste auf eine akzeptable Größenordnung verringert werden.

Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1a (Stromkreis 1: 4000 A, Stromkreis 2: 4000 A)

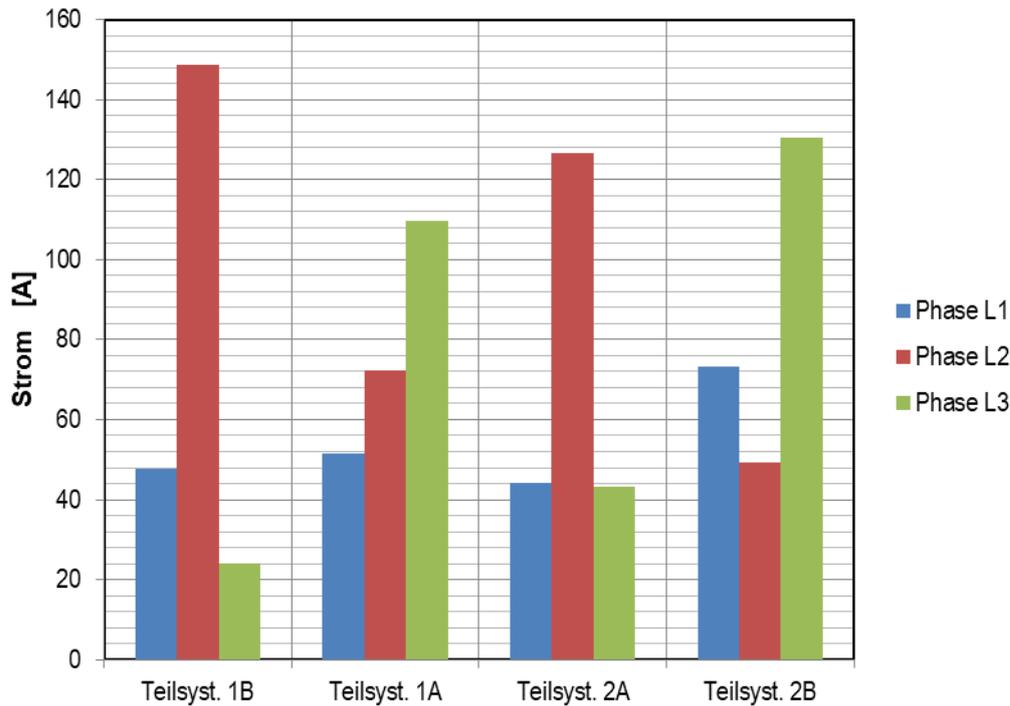


Bild 7: Berechnete Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1a für 4000 A pro Stromkreis (zur Berechnung der magnetischen Felder)

Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2 (Stromkreis 1: 4000 A, Stromkreis 2: 4000 A)

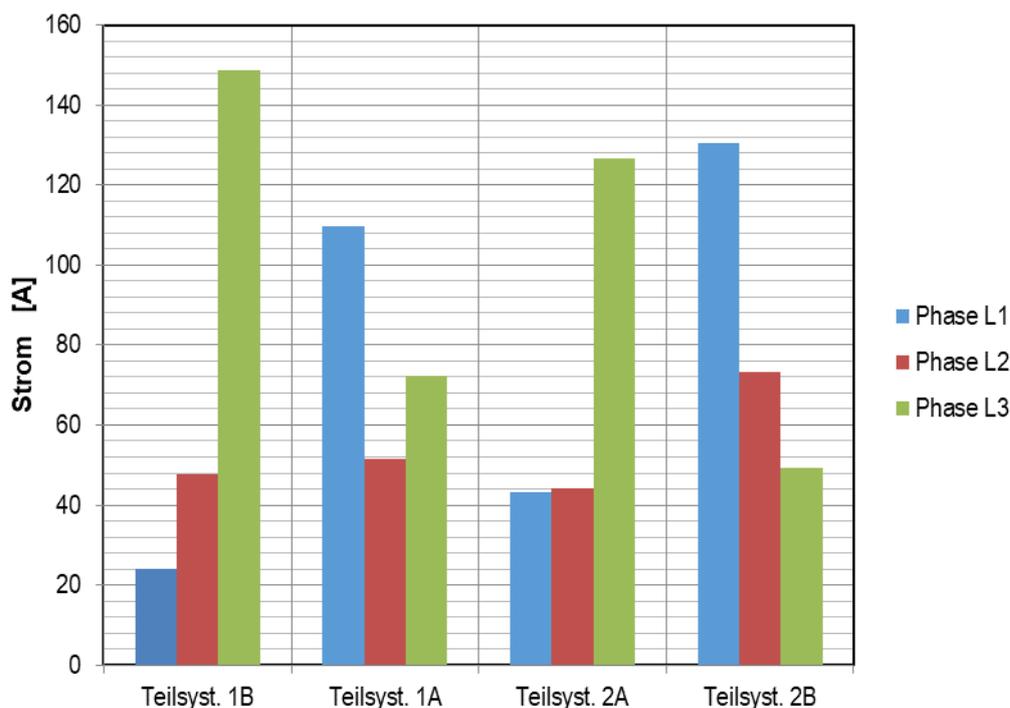


Bild 8: Berechnete Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2 für 4000 A pro Stromkreis (zur Berechnung der magnetischen Felder)

Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3 (Stromkreis 1: 4000 A, Stromkreis 2: 4000 A)

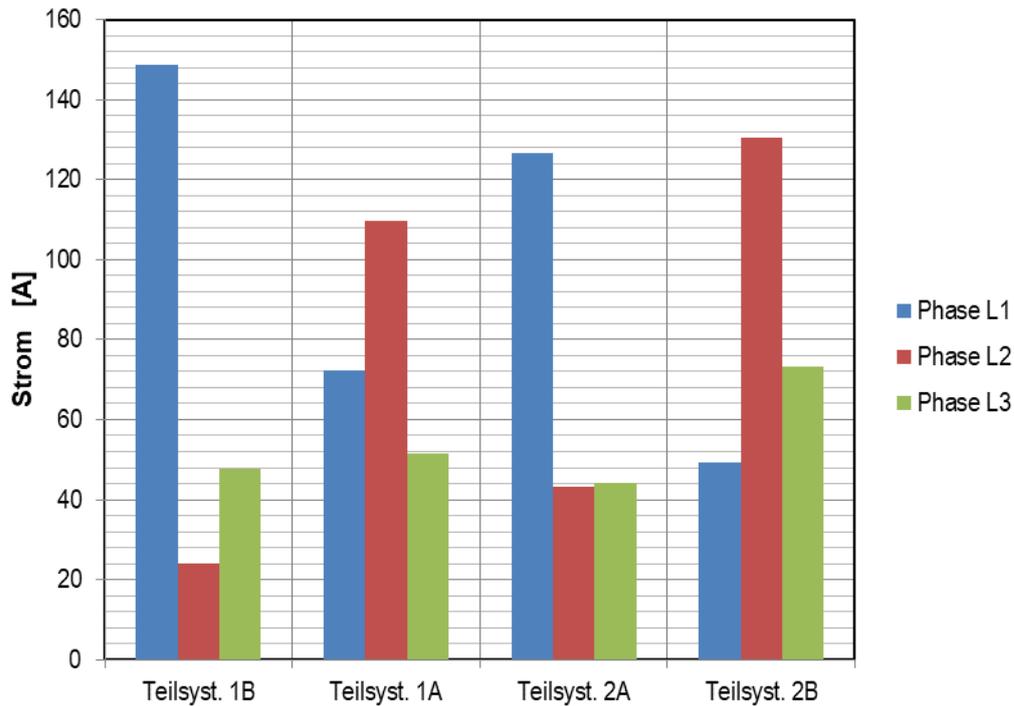


Bild 9: Berechnete Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3 für 4000 A pro Stromkreis (zur Berechnung der magnetischen Felder)

Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1b (Stromkreis 1: 4000 A, Stromkreis 2: 4000 A)

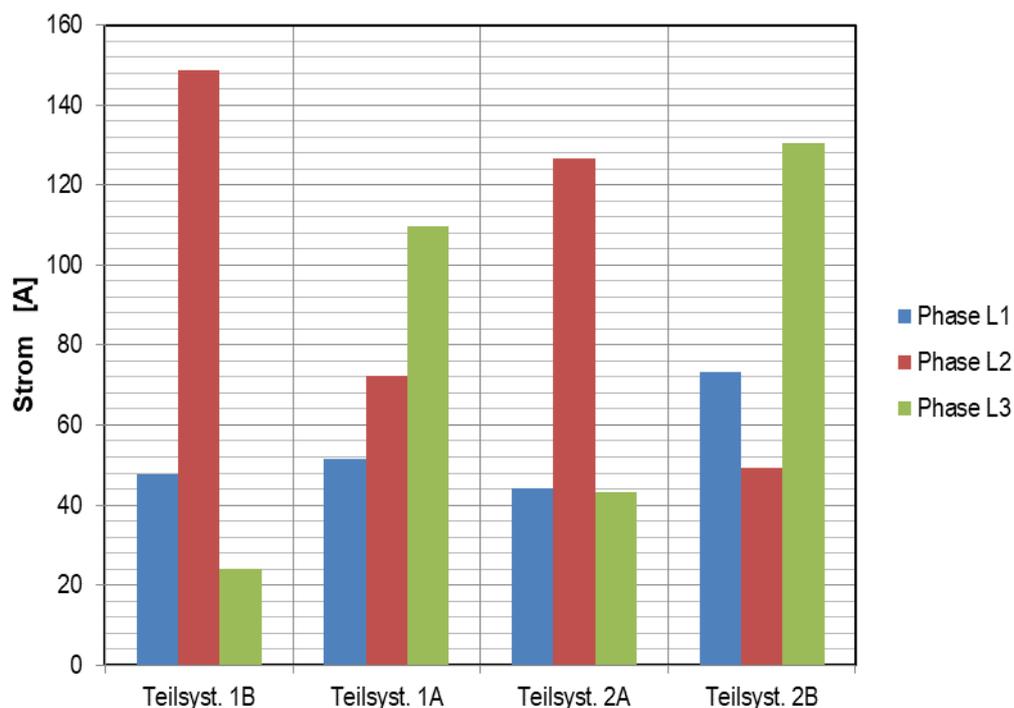


Bild 10: Berechnete Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1b für 4000 A pro Stromkreis (zur Berechnung der magnetischen Felder)

Für die Berechnung der Erwärmung des Erdbodens wird die typische, für längeren Betrieb zu erwartende Strombelastung von 1800 A pro Stromkreis angesetzt. Diese Belastung ist deutlich kleiner als der kurzzeitig mögliche Maximalwert, der für die Berechnung der magnetischen Flussdichte verwendet wird.

Bei einer Belastung in Höhe der vorgegebenen typischen Belastung von 1800 A pro Stromkreis führten die Berechnungen der Stromaufteilung auf die parallel geschalteten Teilsysteme sowie der induzierten Schirmströme auf folgende Werte (Bilder 11, 12, 13, 14 und 15):

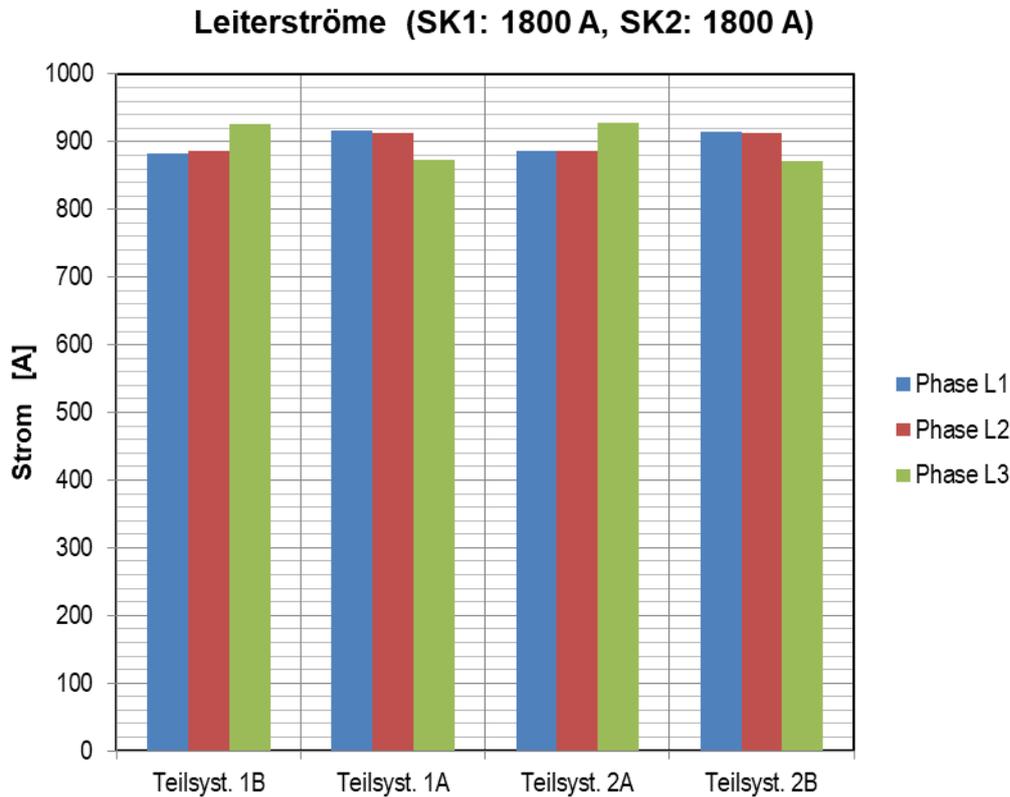


Bild 11: Berechnete Stromaufteilung in den Phasenleitern für 1800 A pro Stromkreis (zur Berechnung der Erwärmung in der Umgebung der Kabel)

Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1a (Stromkreis 1: 1800 A, Stromkreis 2: 1800 A)

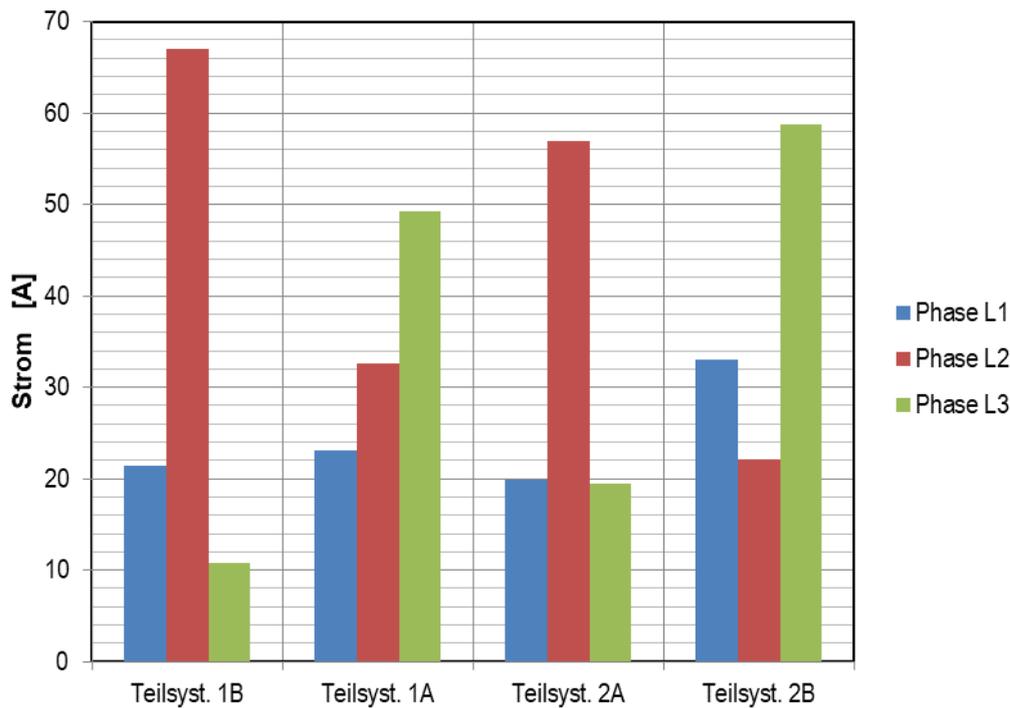


Bild 12: Berechnete Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1a für 1800 A pro Stromkreis (zur Berechnung der Erwärmung in der Umgebung der Kabel)

Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2 (Stromkreis 1: 1800 A, Stromkreis 2: 1800 A)

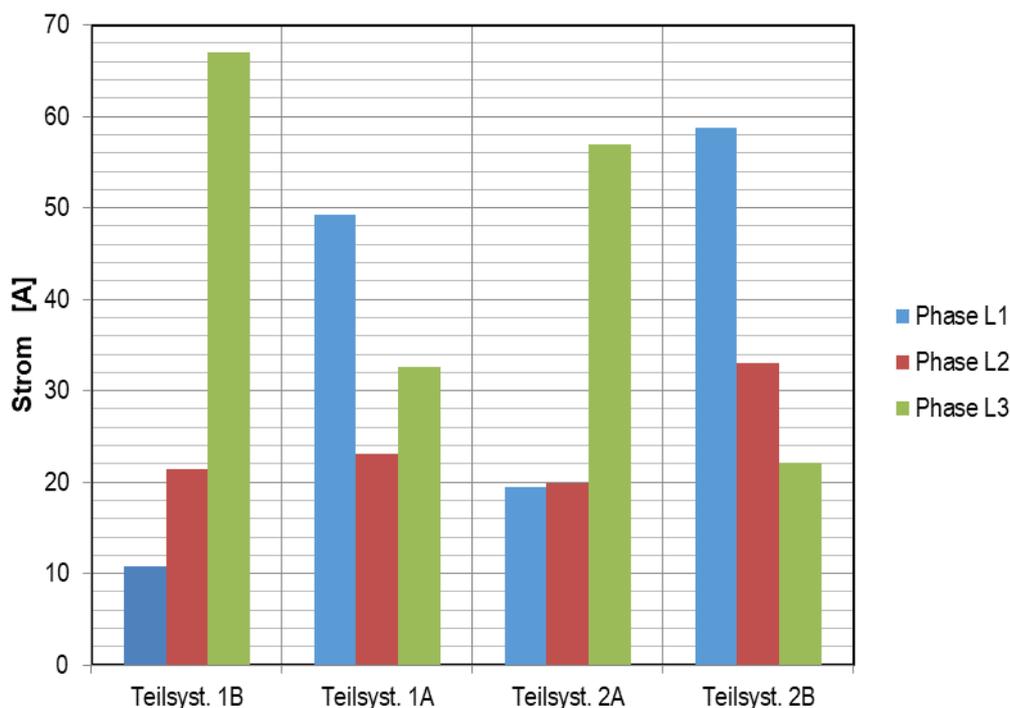


Bild 13: Berechnete Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2 für 1800 A pro Stromkreis (zur Berechnung der Erwärmung in der Umgebung der Kabel)

**Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3
(Stromkreis 1: 1800 A, Stromkreis 2: 1800 A)**

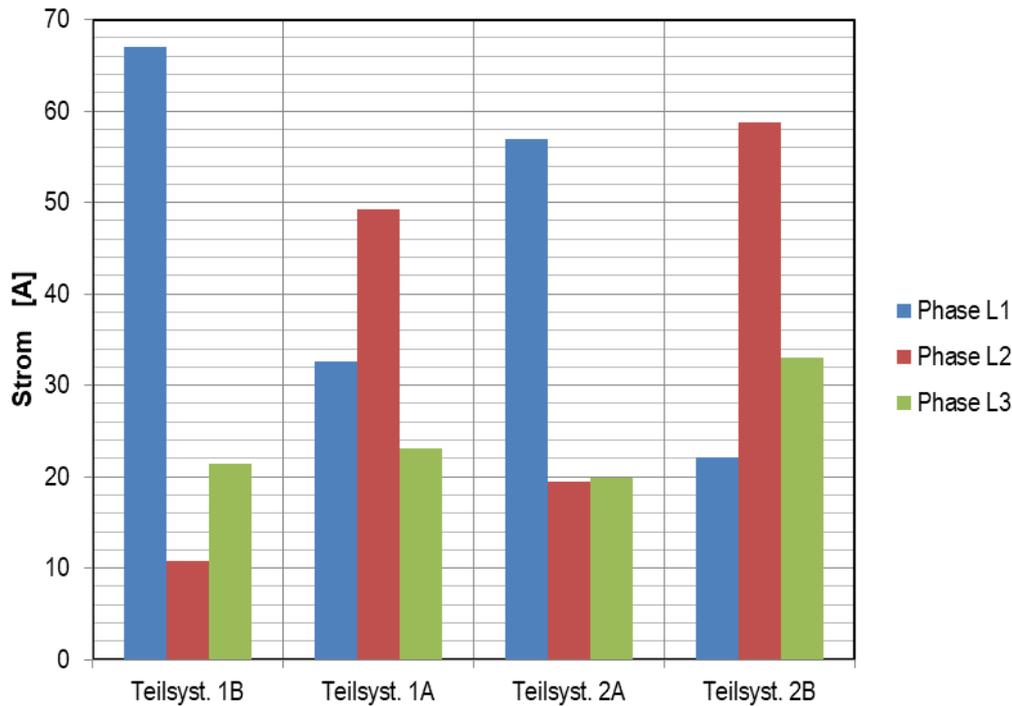


Bild 14: Berechnete Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3 für 1800 A pro Stromkreis (zur Berechnung der Erwärmung in der Umgebung der Kabel)

**Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1b
(Stromkreis 1: 1800 A, Stromkreis 2: 1800 A)**

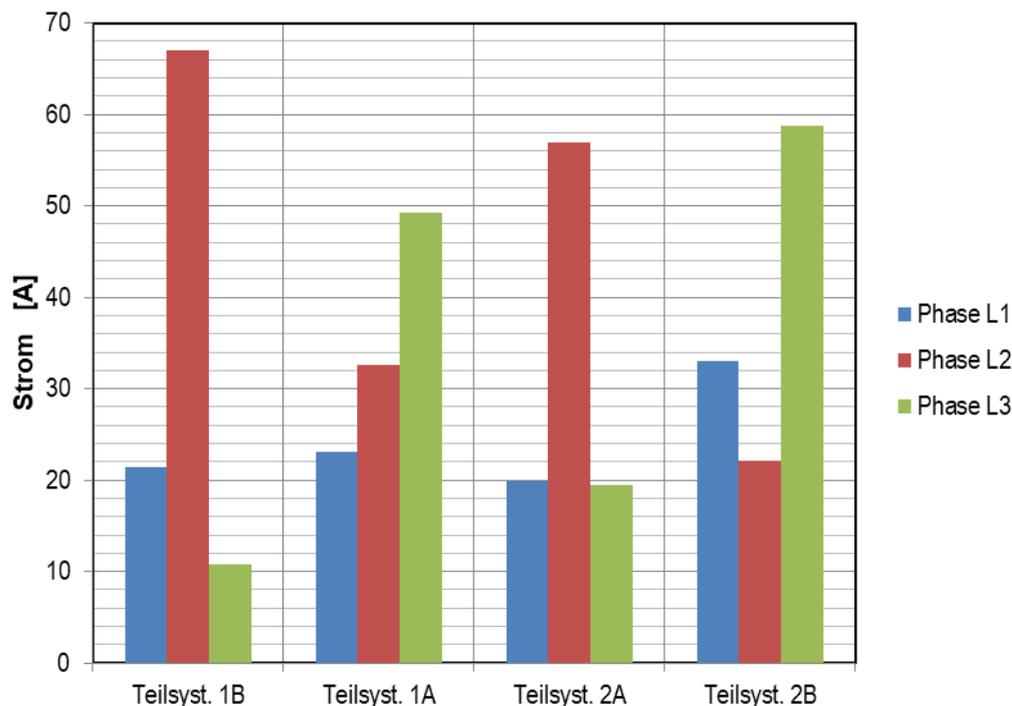


Bild 15: Berechnete Schirmströme im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1b für 1800 A pro Stromkreis (zur Berechnung der Erwärmung in der Umgebung der Kabel)

3.3. Thermische Eigenschaften des Erdbodens entlang der Trasse

Für die geplante Kabeltrasse erfolgten auf Veranlassung von TenneT TSO GmbH geologische Untersuchungen, deren wesentliche Ergebnisse vorab zur Verfügung gestellt wurden. Bei diesen Untersuchungen wurden Bodenaufbau und -eigenschaften sowie Grundwasserverhältnisse bis zu Erkundungstiefen von 2 m bis 20 m (je nach Trassenabschnitt) ermittelt. Ausgewählte Bodenproben aus dem Bereich der Allerunterquerung wurden anschließend im Labor hinsichtlich ihres spezifischen Wärmewiderstandes untersucht.

Es zeigte sich, dass typische Bodenschichten fast durchgängig im gesamten Trassenbereich zu finden sind. Die Schichten weisen zwar im Detail unterschiedliche Mächtigkeiten auf, es ist aber möglich, im Sinne eines „Worst-Case-Ansatzes“ bestimmte Parameterkombinationen für die einzelnen Cross-Bonding-Teilabschnitte zu definieren, für die dann die Werte der Bodenerwärmung berechnet werden. Bei sorgfältiger Auswahl der Parameter lassen sich damit Obergrenzen der Bodenerwärmung berechnen, die im späteren Betrieb mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht überschritten werden.

Bei den Berechnungen wurden die folgenden typischen Bodenarten berücksichtigt (die Werte des spezifischen Wärmewiderstandes entstammen Messungen bzw. wurden aus [11] abgeleitet:

Oberflächennaher Erdboden (oberste Schicht)

Spezifischer Wärmewiderstand (feucht/ ausgetrocknet): 1,0 Km/W / 2,5 Km/W

(Dieser Ansatz entspricht den konservativen Parametern gemäß DIN VDE 0276-1000 [6] und soll mögliche anthropogene Einflüsse auf die Bodeneigenschaften in der oberen Schicht berücksichtigen).

Bodenart „Schluff“

Spezifischer Wärmewiderstand (feucht/ ausgetrocknet): 0,7 Km/W / 2,5 Km/W

Bodenart „Sand/ Kies“

Spezifischer Wärmewiderstand (feucht/ ausgetrocknet): 0,5 Km/W / 2,5 Km/W

Bodenart „Ton“ (nur im Bereich der Allerunterquerung unterhalb des Grundwasserspiegels)

Spezifischer Wärmewiderstand (feucht): 0,75 Km/W

Bettungsbereich in unmittelbarer Umgebung der Kabelschutzrohre (nur für offene Bauweise)

Spezifischer Wärmewiderstand (feucht/ ausgetrocknet): 0,67 Km/W / 1,4 Km/W

Tunnelwand aus Beton (nur für Tunnel im Bereich der Allerquerung)

Spezifischer Wärmewiderstand (feucht): 1,0 Km/W

Tunnelfüllung Bentonit (nur für Tunnel im Bereich der Allerquerung)

Spezifischer Wärmewiderstand (feucht): 1,2 Km/W

Auf Grund der überall vorhandenen Nähe zum Grundwasser wurde angenommen, dass der Erdboden ab einer Tiefe von 2,5 m unter GOK nicht mehr durch die von den Kabeln verursachten Verlustwärmeeinträge ausgetrocknet werden kann. Im Bereich der Allerquerung (Tunnel) wurde diese Grenze einer möglichen Bodenaustrocknung wegen des nahen Fließgewässers und des-

sen Einfluss auf den Grundwasserspiegel bereits ab 1 m unter GOK angenommen. Für die Berechnungen bedeutet dies, dass für Bodenbereiche unterhalb dieser Grenze nur noch mit dem spezifischen Wärmewiderstand des feuchten Bodens gerechnet wird. Für die oberhalb liegenden Bodenschichten gilt der Ansatz nach dem in der Kabeltechnik üblichen thermischen Zweischichtenmodell [7]. Bei diesem Modell wird eine Bodenaustrocknung in allen Bodenbereichen angenommen, deren Erwärmung um mehr als die Grenzüber Temperatur über der natürlichen Umgebungstemperatur liegt. Die Grenzüber Temperatur für die Austrocknung ist abhängig vom Belastungsgrad, für den hier verwendeten Wert $m = 0,8$ liegt sie nach [6], [7] bei 21,7 K.

Die maximale unbeeinflusste Temperatur des Erdbodens in Legetiefe der Kabel ist eine weitere wesentliche Einflussgröße für die Strombelastbarkeit erdverlegter Kabel. Sie ist abhängig von der Tiefe und unterliegt jahreszeitlichen Schwankungen. In Übereinstimmung mit Vorgaben des Auftraggebers wurde für die Abschnitte in offener Bauweise eine Bodentemperatur von 15 °C angenommen, für die Allerunterquerung gilt wegen der größeren Legetiefe ein Wert von 12 °C.

Für die Berechnungen ist es erforderlich, zeitveränderliche Erwärmungsvorgänge zu modellieren. Der Standard IEC 60853-2 [10] beschreibt für diesen Zweck ein Berechnungsverfahren, das in unveränderter Form jedoch nur bei thermisch homogenem Boden einsetzbar ist. Das Wärmespeichervermögen des Bodens, das bei diesen Berechnungen zu berücksichtigen ist, kann durch den thermischen Diffusionskoeffizienten „a“ charakterisiert werden (oft auch als Temperaturleitfähigkeit oder Temperaturleitzahl bezeichnet, in der englischsprachigen Literatur auch „δ“ genannt, Einheit: m^2/s). Dieser Parameter kann in guter Näherung aus der Wärmeleitfähigkeit des Bodens über folgende Approximationsformel ermittelt werden [8]:

$$a = 1,688 \cdot 10^{-3} \frac{m^2}{h} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{0,8} = 0,4689 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{s} \cdot \left(\frac{\lambda}{\lambda_0}\right)^{0,8} \quad \lambda_0 = 1,0 \frac{W}{K \cdot m}$$

$$\lambda = \frac{1}{\rho}$$

- mit
- a - thermischer Diffusionskoeffizient des Bodens
 - λ - Wärmeleitfähigkeit des Bodens (Kehrwert des spezifischen Wärmewiderstandes ρ)
 - λ_0 - Bezugswert für Wärmeleitfähigkeit des Bodens
 - ρ - Spezifischer Wärmewiderstand

Der thermische Diffusionskoeffizient ist grundsätzlich mit der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärmekapazität über die Materialdichte gemäß folgender Formel verknüpft:

$$a = \frac{\lambda}{\delta \cdot c}$$

- mit
- a - thermischer Diffusionskoeffizient des Bodens
 - λ - Wärmeleitfähigkeit des Bodens (Kehrwert des spezifischen Wärmewiderstandes)
 - δ - Dichte des Bodens
 - c - Massebezogene spezifische Wärmekapazität

Bild 16 zeigt die nach dieser Approximationsfunktion berechneten Werte im Vergleich mit Werten aus der Literatur (IEC 60853-2 [10] und VDI 4640 Blatt 4 [12]). Diese Darstellung macht deutlich, dass die Approximationsfunktion für den thermischen Diffusionskoeffizienten die in IEC 60853-2 und VDI 4640 genannten Werte über den gesamten relevanten Wertebereich mit hinreichender Genauigkeit abbildet. Für alle im Rahmen des vorliegenden Berichts aufgeführten Berechnungen wurden deshalb einheitlich die nach der Approximationsfunktion aus dem spezifischen Wärmewiderstand berechneten Werte für den thermischen Diffusionskoeffizienten benutzt.

Thermischer Diffusionskoeffizient des Bodens abhängig vom spezifischen Wärmewiderstand

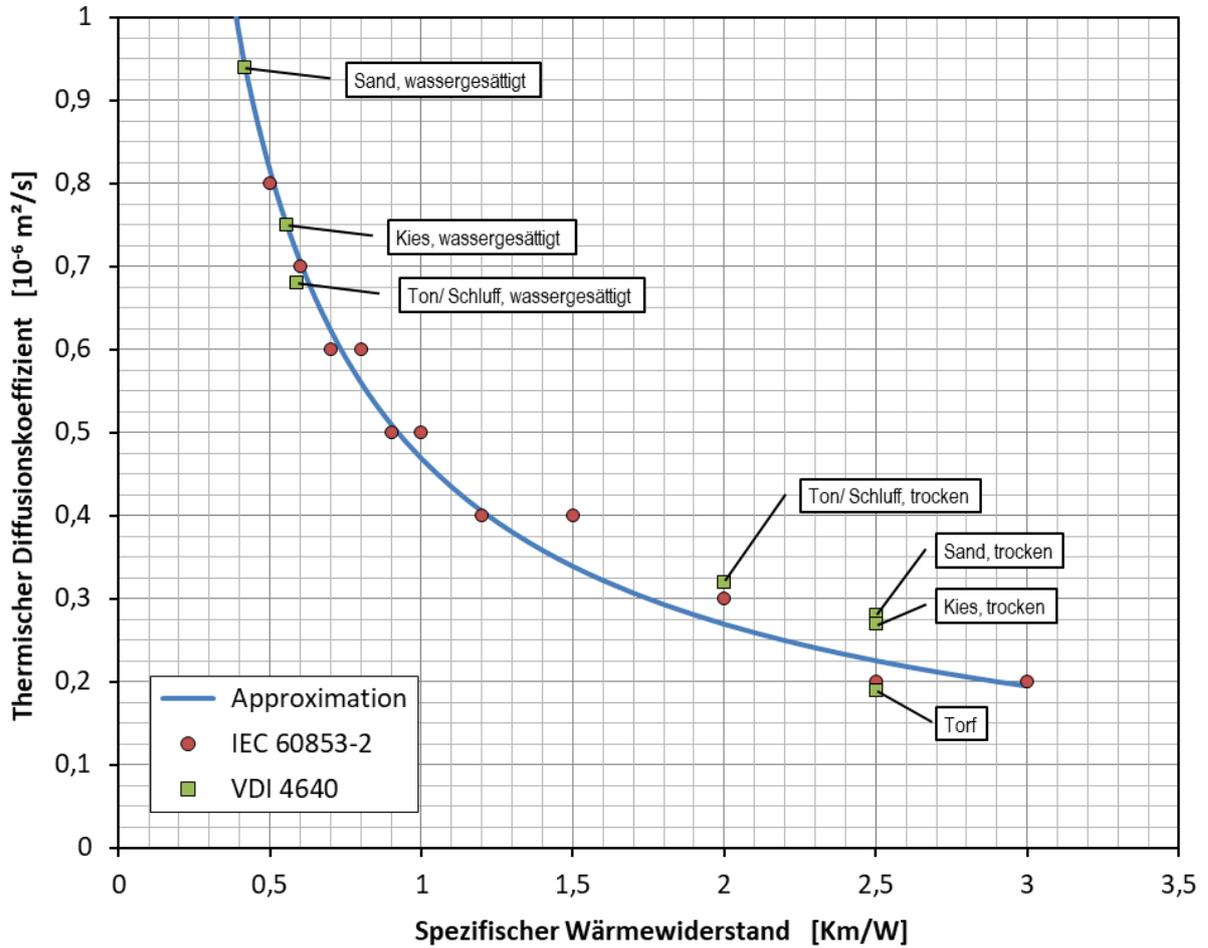


Bild 16: Thermischer Diffusionskoeffizient abhängig vom spezifischen Wärmewiderstand des Bodens (Approximationsfunktion im Vergleich mit Werten nach IEC 60853-2 [10] und VDI 4640 [12])

4. Berechnungsergebnisse

4.1. Berechnete magnetische Flussdichten

4.1.1. Magnetische Flussdichten im Bereich der Abschnitte mit Regelprofil

Auf ca. 2/3 der gesamten Trassenlänge soll das Regelprofil nach Bild 2 zum Einsatz kommen. Dies ist gleichzeitig auch das Profil mit der geringsten Legetiefe (1,6 m bezogen auf die Achse der Kabelschutzrohre). Auf kürzeren Trassenabschnitten kommen bedarfsweise auch andere Profile zum Einsatz. Solche Profile sind beispielsweise Sonderprofile in offener und HDD-Bauweise oder Rohrpressungen, die vorzugsweise bei erforderlichen Unterquerungen von Straßen, kleineren Gewässern oder bei Kreuzungen mit existierenden Kabel- oder Rohrtrassen eingesetzt werden. Bei allen diesen Sonderprofilen und vor allem auch im Bereich der Aller-Unterquerung ist die Legetiefe erheblich größer als im Regelprofil. Da die magnetische Flussdichte maßgeblich vom Abstand zu den stromdurchflossenen Leitern abhängt (kleinere Abstände führen zu größeren magnetischen Flussdichten), ergibt sich für diese Profile trotz gegebenenfalls größerer Kabelabstände ein geringerer Maximalwert der magnetischen Flussdichte über der Erdoberfläche unmittelbar oberhalb der Kabeltrasse als auf den Abschnitten mit Regelprofil. Die zyklische Auskreuzung der Kabelschirme führt auf den einzelnen Cross-Bonding-Teilabschnitten zu einer unterschiedlichen geometrischen Zuordnung der Schirm- und Leiterströme. In Folge der Überlagerung der von diesen Strömen erzeugten Magnetfelder sind daher für die einzelnen Cross-Bonding-Teilabschnitte leicht unterschiedliche Maximalwerte der magnetischen Flussdichte zu erwarten.

Weder auf der Trasse selbst noch in deren unmittelbarer Umgebung (weniger als 20 m Abstand von der Trasse) befinden sich Bereiche, die nach 26. BImSchV [1] „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“, insbesondere auch keiner der in [1] explizit genannten Bereiche, für die besondere Anforderungen zur Vorsorge gelten (Wohnungen, Krankenhäuser, Schulen, Kindergärten, Kinderhorte, Spielplätze oder ähnliche Einrichtungen). Für Wechselstrom-Erdkabel mit einer Nennspannung von 380 kV und höher wird in [2] ein Einwirkungsbereich bis zu einem Abstand von 100 m festgelegt. Der Einwirkungsbereich einer Anlage ist in [2] definiert als „der Bereich, in dem die Anlage sich signifikant von den natürlichen und mittleren anthropogen bedingten Immissionen abhebende elektrische oder magnetische Felder verursacht, unabhängig davon, ob die Immissionen tatsächlich schädliche Umwelteinwirkungen auslösen.“

Unter Berücksichtigung dieser Vorgaben wurden die erzeugten magnetischen Felder daher durchgehend für einen Bereich von ± 120 m beidseits der Trassenmittelachse in einer Höhe von 0,2 m, 0,5 m bzw. 1,0 m über der Erdoberfläche berechnet. Zusätzlich zu den grafischen Darstellungen dieser Verläufe wurden die maximalen Werte der magnetischen Flussdichte auch für vier ausgewählte unterschiedlich weit von der Trassenmittelachse entfernte Punkte berechnet und in tabellarischer Form zusammengestellt.

Für die Trassenabschnitte mit Regelprofil in den Cross-Bonding-Teilabschnitten 1a zwischen der KÜA Nord und der Muffe CBVM1 und 1b zwischen der Muffe CBVM3 und der KÜA Süd wurden folgende Verläufe der magnetischen Flussdichte berechnet:

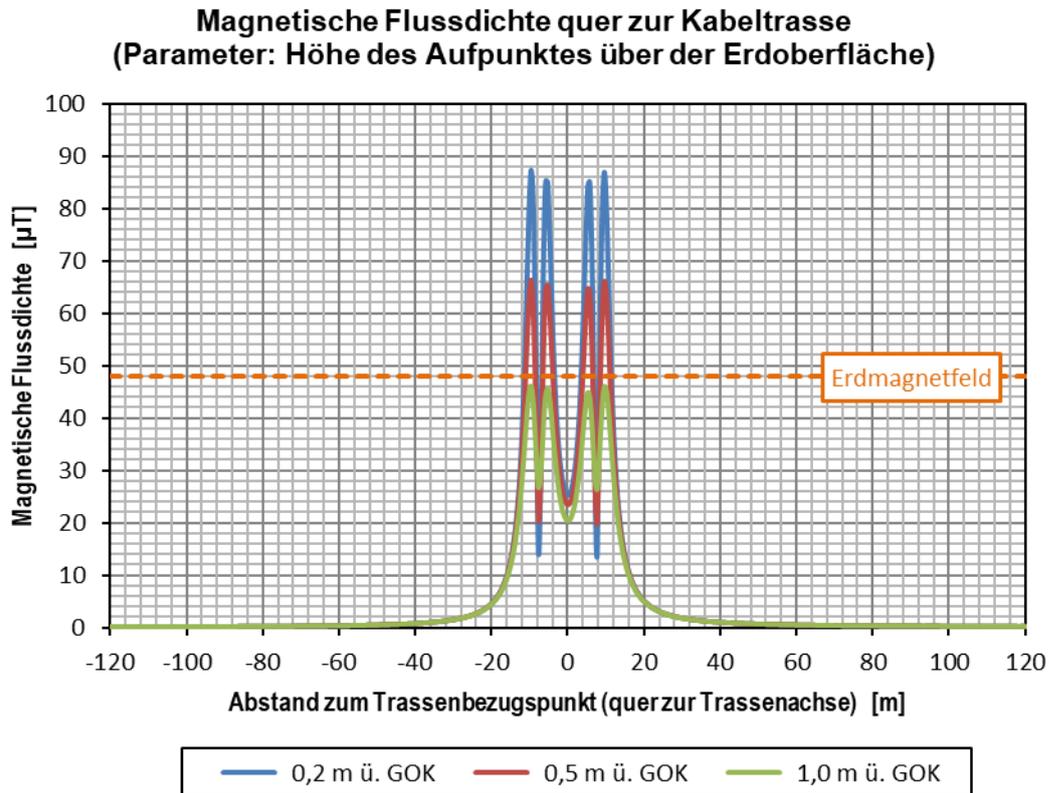


Bild 17: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche in den Cross-Bonding-Teilabschnitten 1a, 1b, Regelprofil, 4000 A Laststrom je Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μT)

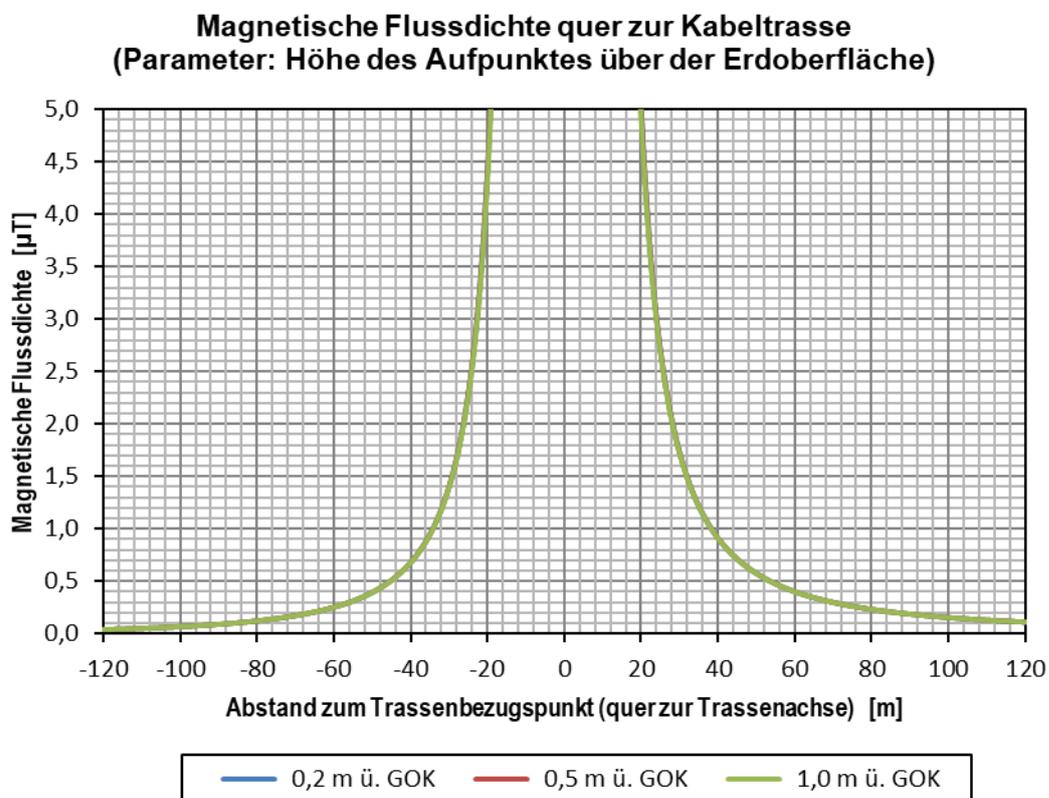


Bild 18: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche in den Cross-Bonding-Teilabschnitten 1a, 1b, Regelprofil, 4000 A Laststrom je Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

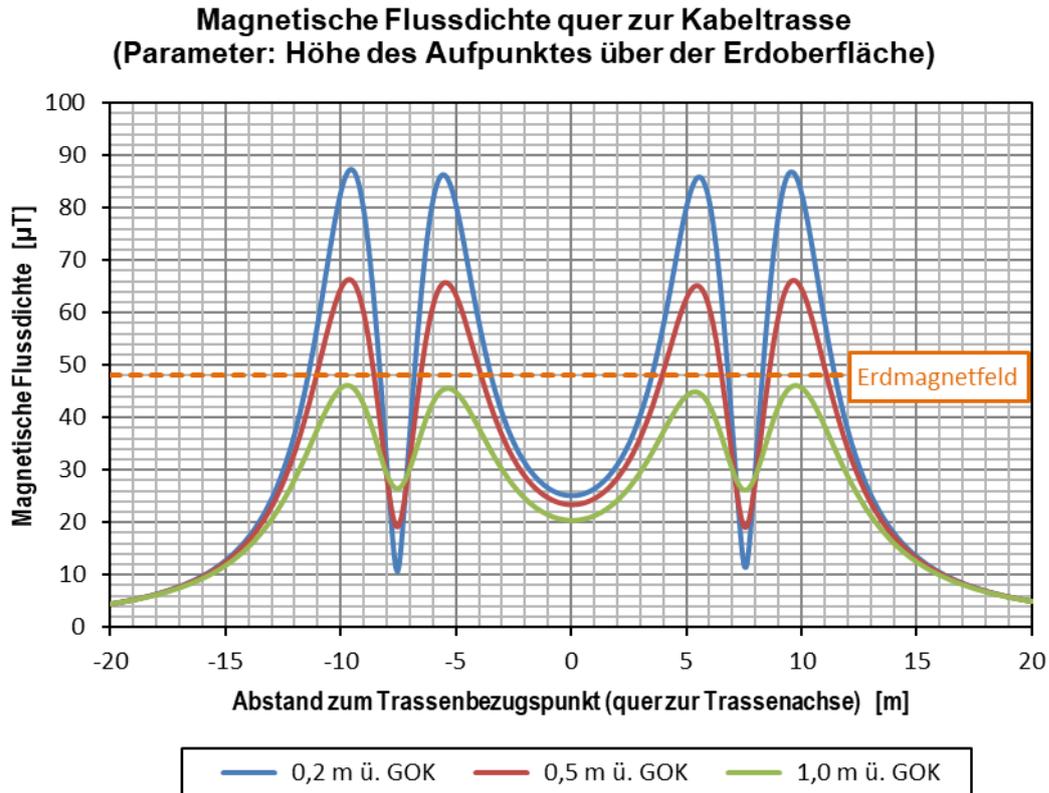


Bild 19: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche in den Cross-Bonding-Teilabschnitten 1a, 1b, Regelprofil, 4000 A Laststrom je Stromkreis (Detail -20 m ... + 20 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b:

Höhe über der Erdoberfläche	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	87,3 µT	2,70 µT	0,58 µT	0,16 µT	0,05 µT
0,5 m	66,4 µT	2,69 µT	0,58 µT	0,16 µT	0,05 µT
1,0 m	46,1 µT	2,67 µT	0,58 µT	0,16 µT	0,05 µT

Die nach 26. BImSchV zulässige Obergrenze der magnetischen Flussdichte von 100 µT wird direkt über der Kabeltrasse selbst unmittelbar über der Erdoberfläche nicht erreicht. In 1 m Höhe verringert sich der Wert dort bereits auf weniger als 50 % des Grenzwertes. Ab einem seitlichen Abstand von ca. 16 m zur Trassenmitte bleibt die maximale magnetische Flussdichte kleiner als 1/10 des Grenzwertes. Eine Abhängigkeit von der Höhe des Aufpunktes über der Erdoberfläche besteht ab dort praktisch nicht mehr. Für weiter von der Trasse entfernte Punkte sinkt die magnetische Flussdichte noch weiter ab.

Für die Trassenabschnitte mit Regelprofil im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2 zwischen den Muffen CBVM1 und CBVM2 ergeben sich folgende Werte der magnetischen Flussdichte:

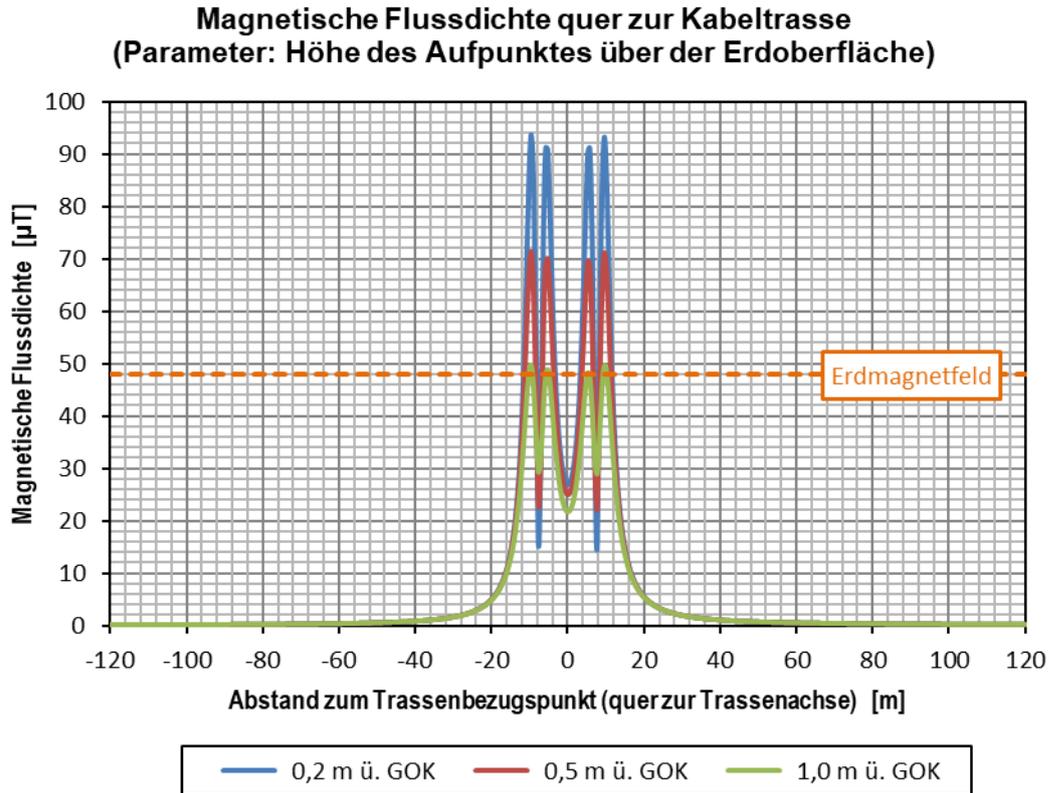


Bild 20: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2, Regelprofil, 4000 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μT)

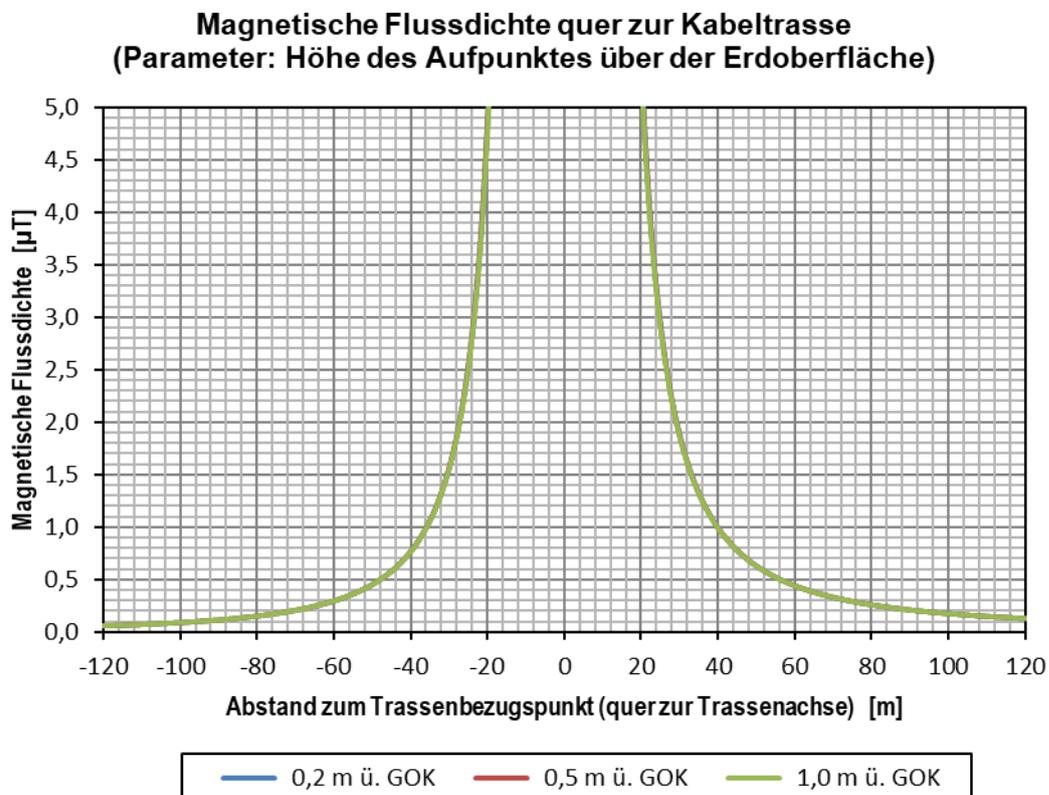


Bild 21: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2, Regelprofil, 4000 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

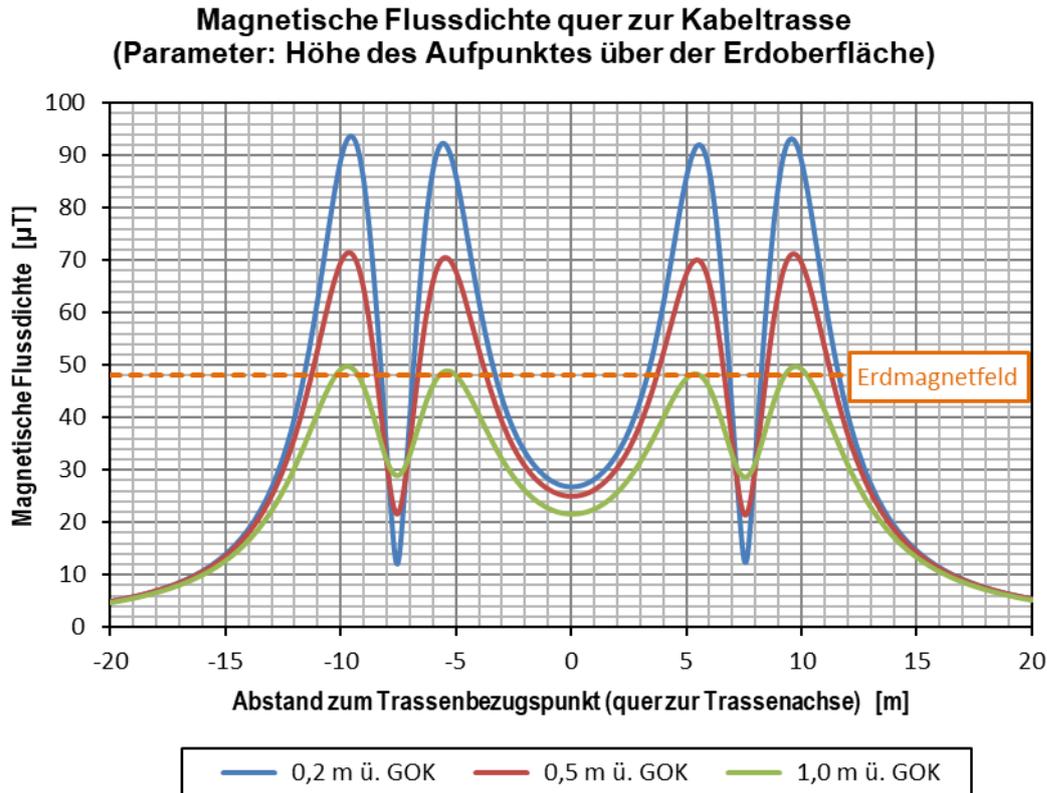


Bild 22: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2, Regelprofil, 4000 A Laststrom pro Stromkreis (Detail -20 m ... + 20 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Cross-Bonding-Teilabschnitt 2:

Höhe über der Erdoberfläche	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	93,7 µT	2,92 µT	0,62 µT	0,17 µT	0,05 µT
0,5 m	71,4 µT	2,91 µT	0,62 µT	0,17 µT	0,05 µT
1,0 m	49,8 µT	2,89 µT	0,62 µT	0,17 µT	0,05 µT

Die nach 26. BImSchV zulässige Obergrenze der magnetischen Flussdichte von 100 µT wird direkt über der Kabeltrasse selbst unmittelbar über der Erdoberfläche nicht erreicht. In 1 m Höhe verringert sich der Wert dort bereits auf ca. 50 % des Grenzwertes. Ab einem seitlichen Abstand von ca. 16,5 m zur Trassenmitte bleibt die maximale magnetische Flussdichte kleiner als 1/10 des Grenzwertes. Eine Abhängigkeit von der Höhe des Aufpunktes über der Erdoberfläche besteht ab dort praktisch nicht mehr. Für weiter von der Trasse entfernte Punkte sinkt die magnetische Flussdichte noch weiter ab.

Für die Trassenabschnitte mit Regelprofil im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3 zwischen den Muffen CBVM2 und CBVM3 ergeben sich folgende Werte der magnetischen Flussdichte:

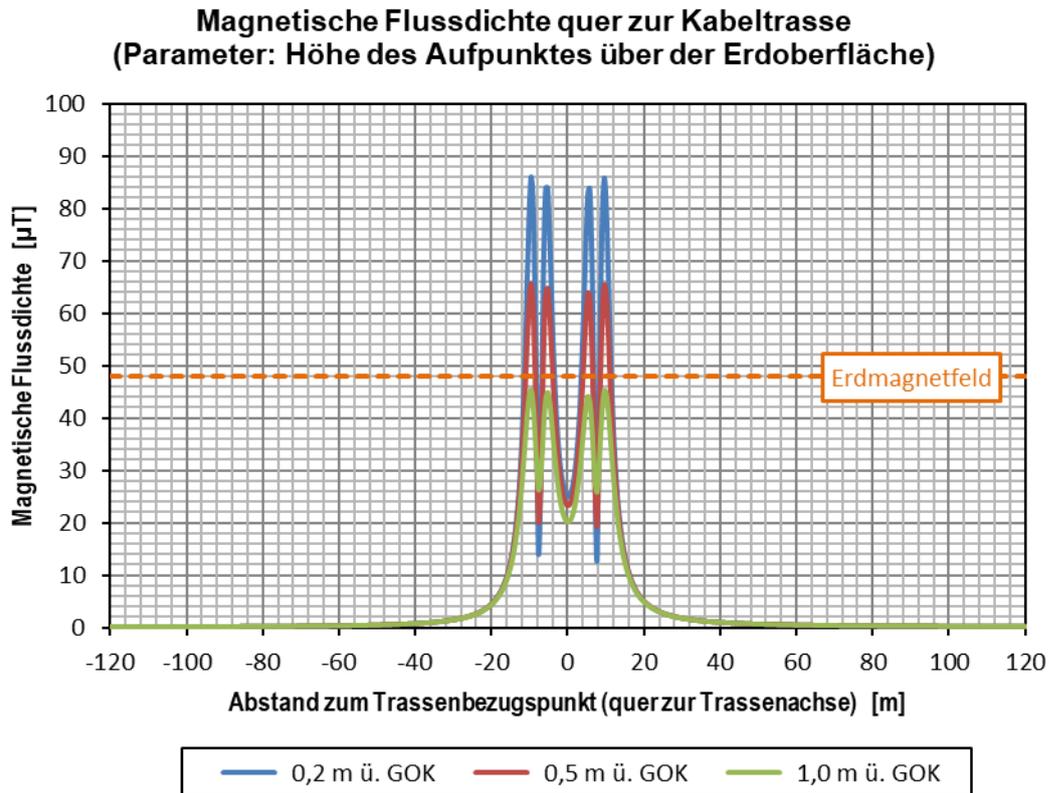


Bild 23: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3, Regelprofil, 4000 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 100 μT)

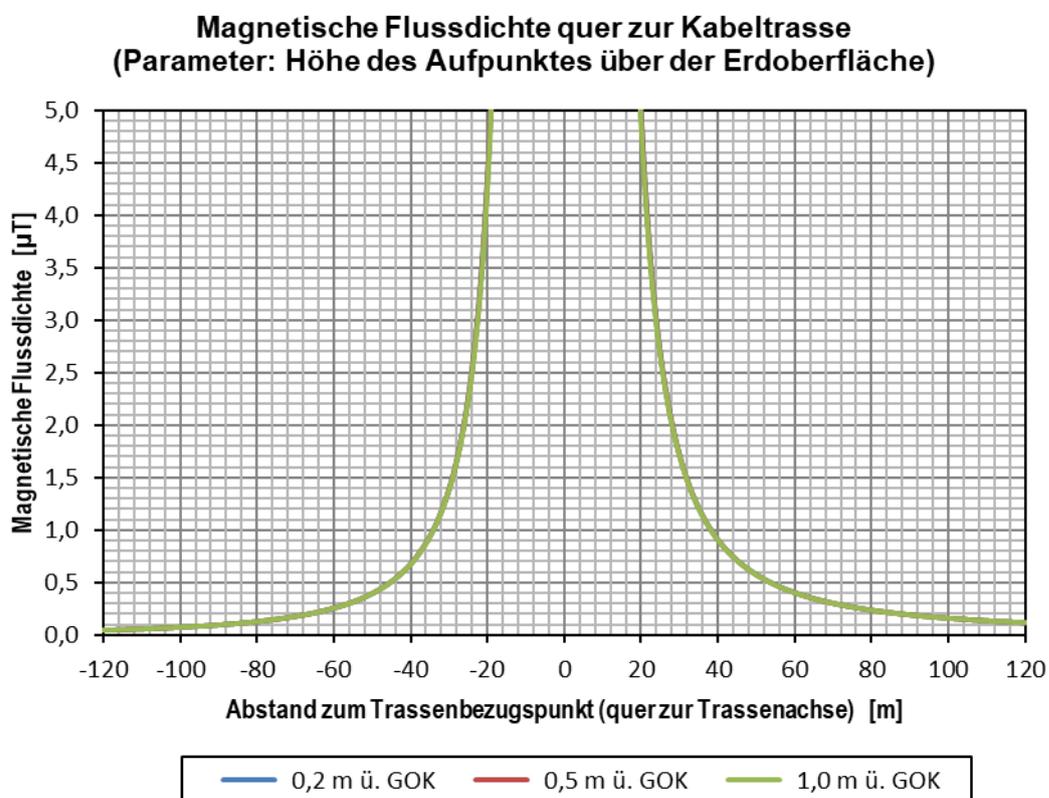


Bild 24: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3, Regelprofil, 4000 A Laststrom pro Stromkreis (Skalierung 0 – 5 μT)

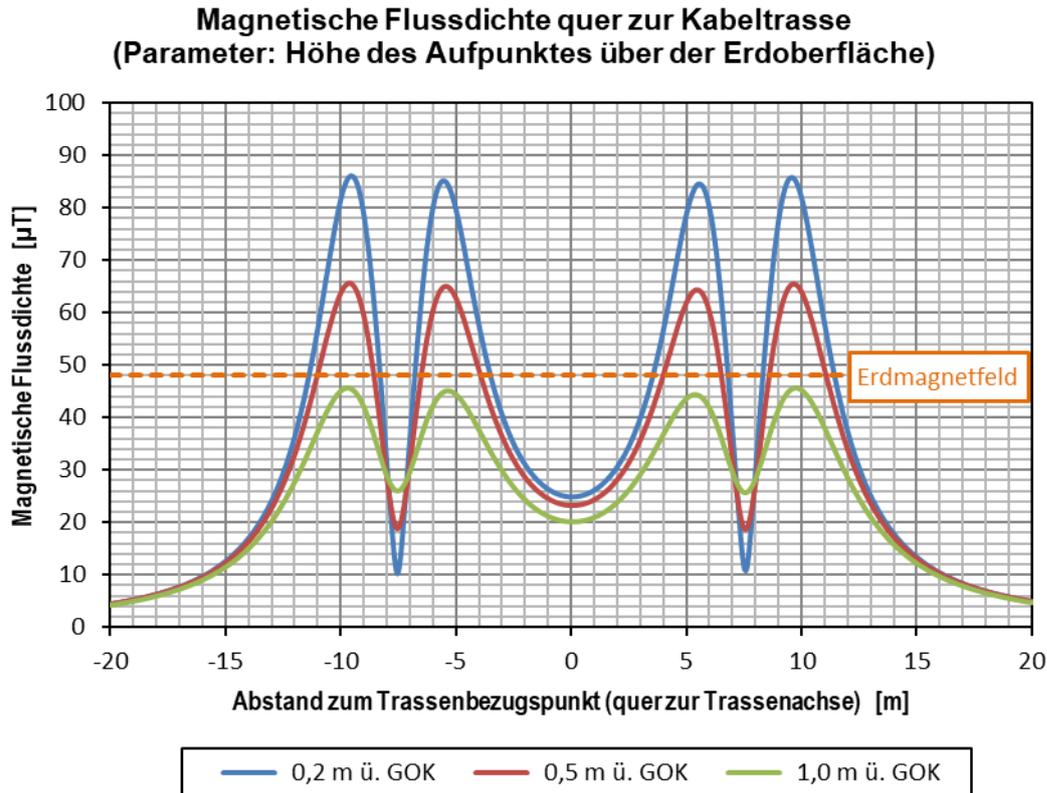


Bild 25: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3, Regelprofil, 4000 A Laststrom pro Stromkreis (Detail -20 m ... +20 m)

Berechnete maximale magnetische Flussdichte für Regelprofil, Cross-Bonding-Teilabschnitt 3:

Höhe über der Erdoberfläche	Horizontaler Abstand von der Trassenmittellachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	86,2 µT	2,66 µT	0,57 µT	0,16 µT	0,05 µT
0,5 m	65,5 µT	2,65 µT	0,57 µT	0,16 µT	0,05 µT
1,0 m	45,6 µT	2,63 µT	0,57 µT	0,16 µT	0,05 µT

Die nach 26. BImSchV [1] zulässige Obergrenze der magnetischen Flussdichte von 100 µT wird direkt über der Kabeltrasse selbst unmittelbar über der Erdoberfläche nicht erreicht. In 1 m Höhe verringert sich der Wert dort bereits auf weniger als 50 % des Grenzwertes. Ab einem seitlichen Abstand von ca. 16 m zur Trassenmitte bleibt die maximale magnetische Flussdichte kleiner als 1/10 des Grenzwertes. Eine Abhängigkeit von der Höhe des Aufpunktes über der Erdoberfläche besteht ab dort praktisch nicht mehr. Für weiter von der Trasse entfernte Punkte sinkt die magnetische Flussdichte noch weiter ab.

Im Regelprofil gemäß Bild 2 befinden sich die am weitesten außenliegenden Kabel in einer Entfernung von ±9,75 m von der Trassenmitte. Gemäß [2] ist bei einer Erdkabelanlage (Niederfrequenz) der Nennspannung ≥380 kV von einem Bewertungsabstand von 10 m auszugehen. Der Bewertungsabstand ist nach [2] definiert als „Abstand von der Anlage, ab dem die Feldstärken mit zunehmender Entfernung durchgehend abnehmen“. Nach diesem Ansatz würde im konkreten Fall beim Regelprofil der Kabeltrasse der Bewertungsabstand bei ±19,75 m von der Trassenmittellachse liegen (10 m Abstand zum äußersten Leiter der Kabelanlage). Die berechneten Verläufe der magnetischen Flussdichte zeigen aber eine durchgängige Abnahme der Werte bereits ab der Position des äußersten Kabels (±9,75 m ab Trassenmittellachse, siehe Bilder 19, 22, 25). In einer

Entfernung von der Kabelanlage, die dem in [2] vorgegebenen Bewertungsabstand für Wechselstrom-Erdkabel entspricht, liegen die magnetischen Flussdichten bei 4000 A Strombelastung pro Stromkreis im Bereich zwischen 5 und 6 μT und somit bereits um mehr als eine Größenordnung unter dem zulässigen Grenzwert von 100 μT . Damit ist auf jeden Fall sichergestellt, dass die magnetische Flussdichte für alle Orte jenseits des in [2] definierten Bewertungsabstandes mit zunehmender Entfernung durchgehend abnimmt.

Auch innerhalb des Bewertungsabstandes wird im Regelprofil auf allen Trassenabschnitten der zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte bereits unmittelbar oberhalb der Kabeltrasse in 0,2 m Höhe in jedem Fall eingehalten. Dies gilt unabhängig davon, in welchem Cross-Bonding-Teilabschnitt der jeweilige Trassenbereich liegt. In diesem Bereich liegt aber ohnehin kein maßgeblicher Minimierungsort gemäß [2], d.h. kein Bereich, der *„zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt ist“* und auch kein Bereich, für den besondere Anforderungen zur Vorsorge gelten.

Unter Berücksichtigung des in [2] definierten Einwirkungsbereiches für Niederfrequenz-Kabelanlagen mit Nennspannungen ab 380 kV wurde die magnetische Flussdichte für alle untersuchten Trassenabschnitte bis in eine Entfernung von 120 m von der Trassenachse berechnet und in gesonderten Diagrammen dargestellt (Bilder 17, 18, 20, 21, 23 und 24). Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die magnetische Flussdichte mit zunehmender Entfernung von der Kabeltrasse schnell kleiner wird, so wird im Regelprofil z.B. bereits deutlich vor der Grenze des gemäß [2] festgelegten Einwirkungsbereiches (100 m Abstand zum äußersten Kabel) ein Wert von 1 μT (1/100 des Grenzwertes) unterschritten.

4.1.2. Magnetische Flussdichten an ausgewählten Orten mit Bebauung

An zwei Orten entlang der Trasse befinden sich Gebäude, die zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind, innerhalb des Einwirkungsbereiches (d.h. in weniger als 100 m Abstand von der Kabelanlage). In beiden Fällen betrifft diese Definition jeweils die Wohngebäude in diesem Bereich. Daher wird nachfolgend eine individuelle Prüfung der magnetischen Felder an diesen Orten durchgeführt.

4.1.2.1. Wohngebäude nahe Trassen-km 0+679,0

In einer Entfernung entlang der Trasse von ca. 679 m ab der KÜA Nord nähert sich die Kabeltrasse bis auf 49,4 m an ein Wohngebäude an (Bild 26, siehe auch ① in Anlage 2). Dieses Wohngebäude stellt den der Kabeltrasse nächsten Ort im betreffenden Umfeld dar, der gemäß der Definition der 26. BImSchV [1] „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt ist“. In diesem Bereich befindet sich der Beginn der Aller-Unterquerung, auf der die Kabel in zwei parallelen unterirdischen Tunnelbauwerken verlaufen (siehe Bild 3). Die Bodenüberdeckung der Tunnel beträgt in diesem Bereich 5,7 m, die Tunnelachsen liegen demnach also in einer Tiefe von 6,95 m. Der lichte horizontale Abstand der beiden Tunnel beträgt 9 m. Der gesamte Bereich der Aller-Unterquerung gehört zum Cross-Bonding-Teilabschnitt 2.

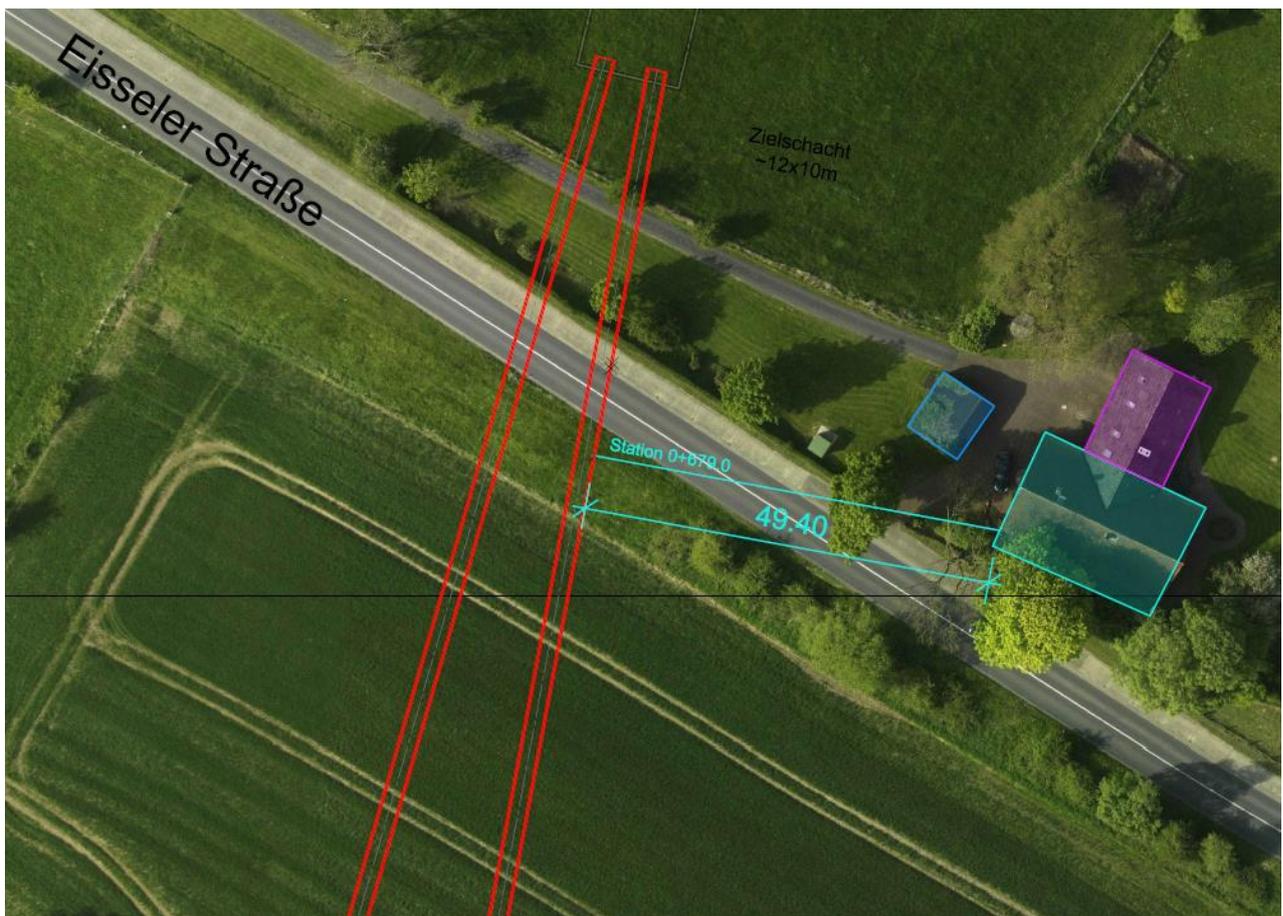


Bild 26: Annäherung der Kabeltrasse an ein Wohngebäude nahe Trassen-km 0+679,0

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte für das beschriebene Trassenprofil führt auf den in Bild 27 gezeigten Verlauf. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in diesem Diagramm nur die Seite berücksichtigt, auf der sich das Wohngebäude von der Kabeltrasse aus gesehen befindet. Die Positionen dieses Wohngebäudes sowie die Lage des äußersten Kabels sind im Diagramm markiert.

Die Position des am weitesten außen liegenden Kabels ergibt sich für diesen Ort zu 6,47 m ab Mittelachse der Kabeltrasse. Eine Entfernung von 49,4 m vom äußersten Kabel zum Wohngebäude entspricht somit einer Entfernung von rechnerisch 55,87 m von der Mittelachse der Kabeltrasse (Trassenbezugspunkt) zum Wohngebäude.

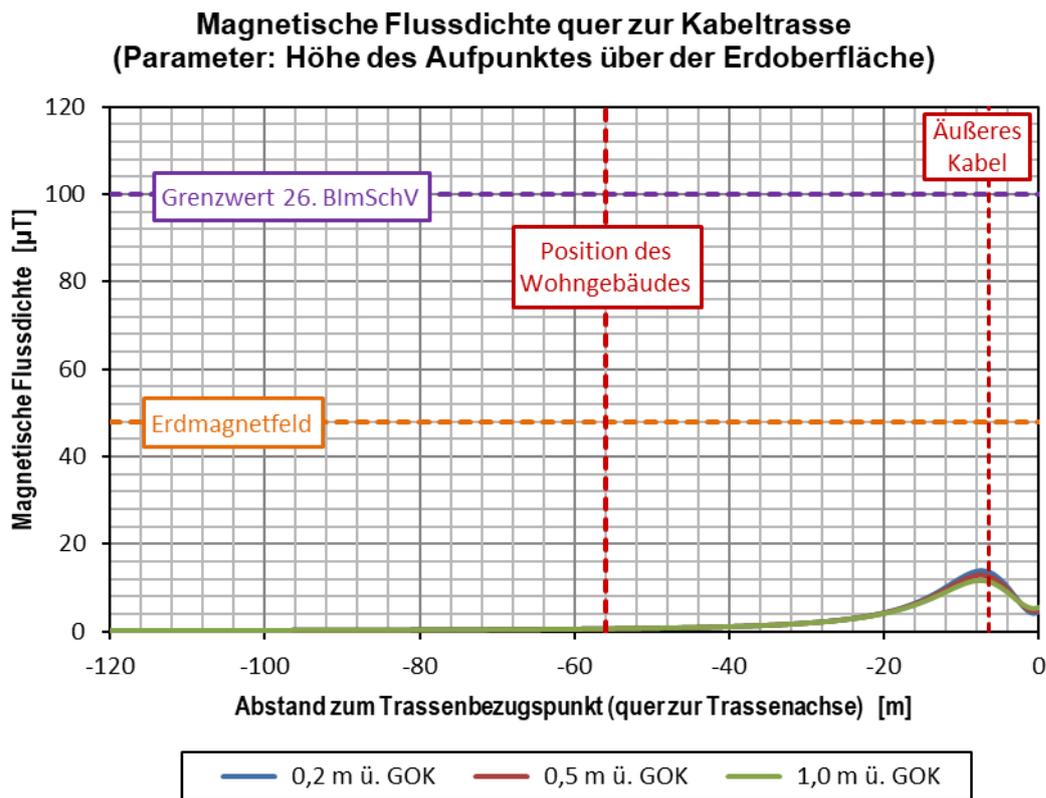


Bild 27: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Bereich eines Wohngebäudes nahe Trassen-km 0+679,0 (① in Anlage 1) für 4000 A Laststrom pro Stromkreis

Folgende maximale magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Höhe über der Erdoberfläche	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse (Position des Wohngebäudes) 55,87 m
0,2 m	0,54 µT
0,5 m	0,54 µT
1,0 m	0,54 µT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 µT wird um mehr als zwei Größenordnungen (Faktor ca. 185) unterschritten.

4.1.2.2. Wohngebäude nahe Trassen-km 3+403,1

In einer Entfernung entlang der Trasse von ca. 3,4 km ab der KÜA Nord nähert sich die Kabeltrasse bis auf 60,4 m an ein Wohngebäude an (Bild 28, siehe auch © in Anlage 2). Dieses Wohngebäude stellt den der Kabeltrasse nächsten Ort im betreffenden Umfeld dar, der gemäß der Definition der 26. BImSchV [1] „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt ist“. Auf diesem Abschnitt ist die Errichtung der Trasse in offener Bauweise vorgesehen. Wegen der Unterquerung des in diesem Bereich beginnenden Grenzgrabens müssen die Kabel hier jedoch im Gegensatz zum Regelprofil in Tiefen zwischen 2,88 m und 3,18 m geführt werden (Regelprofil: 1,6 m). Aus thermischen Gründen ist es dabei erforderlich, den horizontalen Abstand der Kabel innerhalb der Teilsysteme auf 1,26 m bis 1,44 m zu vergrößern, ebenso muss der Systemabstand auf 4,07 m bis 4,48 m vergrößert werden, damit die maximale Leitertemperatur der Kabel im Volllastbetrieb weiterhin unterhalb des zulässigen Grenzwertes bleibt. Die Berechnungen der magnetischen Flussdichte erfolgten unter Zugrundelegung dieses gegenüber dem Regelprofil modifizierten Sonderprofils für die offene Bauweise. Der betreffende Bereich der Kabeltrasse befindet sich im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3.



Bild 28: Annäherung der Kabeltrasse an ein Wohngebäude nahe Trassen-km 3+403,1

Die Berechnung der magnetischen Flussdichte für das beschriebene Trassenprofil führt auf den in Bild 29 gezeigten Verlauf. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde in diesem Diagramm nur die Seite berücksichtigt, auf der sich das Wohngebäude von der Kabeltrasse aus gesehen befindet. Die Positionen dieses Wohngebäudes sowie die Lage des äußersten Kabels sind im Diagramm markiert.

Die Position des am weitesten außen liegenden Kabels ergibt sich für diesen Ort zu 17,49 m ab Mittelachse der Kabeltrasse. Eine Entfernung von 60,4 m vom äußersten Kabel zum Wohngebäude entspricht somit einer Entfernung von rechnerisch 77,89 m von der Mittelachse der Kabeltrasse (Trassenbezugspunkt) zum Wohngebäude.

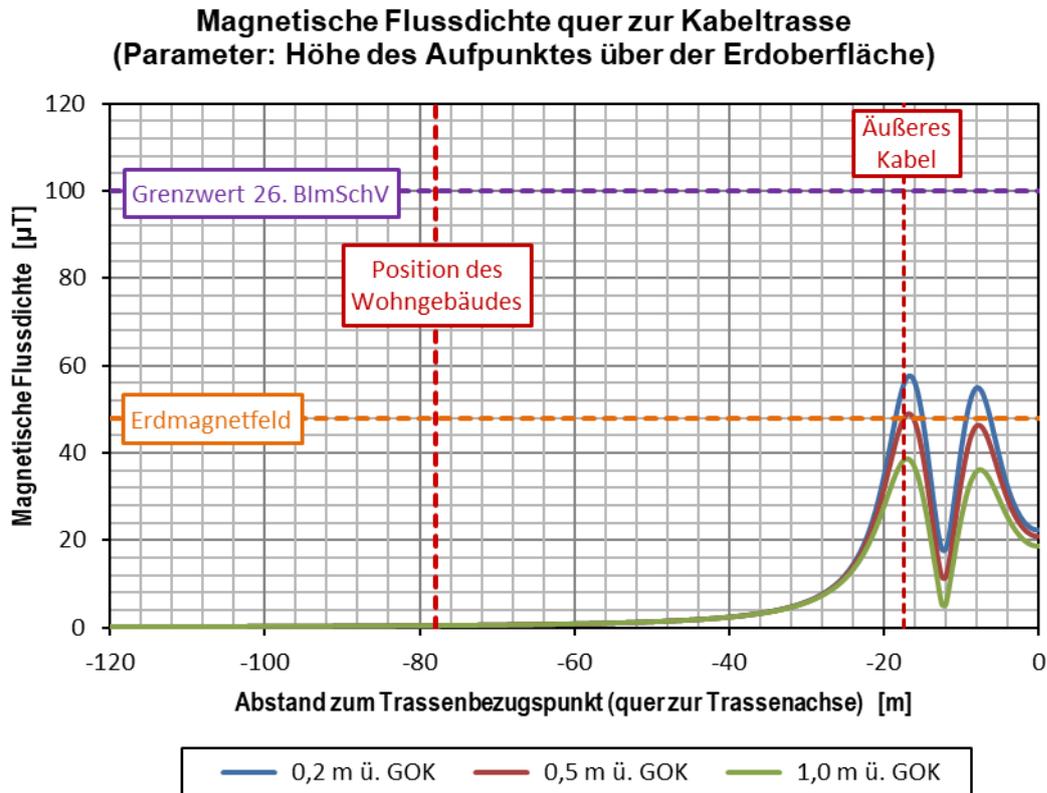


Bild 29: Berechnete magnetische Flussdichte über der Erdoberfläche im Bereich eines Wohngebäudes nahe Trassen-km 3+403,1 (② in Anlage 1) für 4000 A Laststrom pro Stromkreis

Folgende maximale magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Höhe über der Erdoberfläche	Horizontaler Abstand von der Trassenmittellachse (Position des Wohngebäudes)
	77,89 m
0,2 m	0,46 µT
0,5 m	0,46 µT
1,0 m	0,46 µT

Der nach 26. BImSchV zulässige Grenzwert der magnetischen Flussdichte von 100 µT wird um mehr als zwei Größenordnungen (Faktor ca. 217) unterschritten.

4.2. Berechnete Erwärmungen des umgebenden Erdbodens

4.2.1. Erwärmung des Erdbodens im Bereich der Abschnitte mit Regelprofil

Die Stromaufteilung auf die elektrisch parallel geschalteten Phasenleiter der beiden Teilsysteme ist auf der gesamten Kabelstrecke gleich, durch die Auskreuzung der Kabelschirme (Cross-Bonding) gilt dies aber nicht für die induzierten Schirmströme (siehe Abschnitt 3.2.). Die Verluste in den Kabelschirmen sind im Vergleich zu den Leiterverlusten zwar gering, aber nicht komplett vernachlässigbar. Daher sind auch leicht unterschiedliche Werte der Erwärmung des Erdbodens auf den jeweiligen Cross-Bonding-Teilabschnitten zu erwarten.

Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b (siehe auch Anlage 3.1)

Regelprofil nach Abschnitt 3.1, Bild 2, Leiter-/ Schirmströme nach Abschnitt 3.2, Bilder 11, 12, 15
 Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($0 \leq H \leq 1,0$ m), feucht/ trocken: 1,0 Km/W / 2,5 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,0 \text{ m} < H \leq 2,5$ m), feucht/ trocken: 0,7 Km/W / 2,5 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($H > 2,5$ m): 0,5 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken: 0,67 Km/W / 1,4 Km/W

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A:

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	21,4	67,0	10,8	23,1	32,6	49,3	19,8	57,0	19,5	33,0	22,2	58,8
Max. Temperatur	Rohr	24,7	26,0	25,8	25,9	26,2	24,9	24,9	26,1	25,9	25,8	26,1	24,7
	Leiter	33,7	35,2	35,4	35,4	35,7	33,8	33,9	35,3	35,6	35,3	35,6	33,6
Verluste je Kabel	[W/m]	13,3	13,8	14,2	14,0	14,1	13,2	13,3	13,7	14,3	14,0	14,1	13,2

Maximale Erwärmung des Erdbodens: 0,2 m unter GOK: 1,33 K 0,5 m unter GOK: 3,35 K

Erwärmung der oberflächennahen Erdbodenschichten durch die Kabelanlage bei Betrieb mit typischer Last (2 x 1800 A)

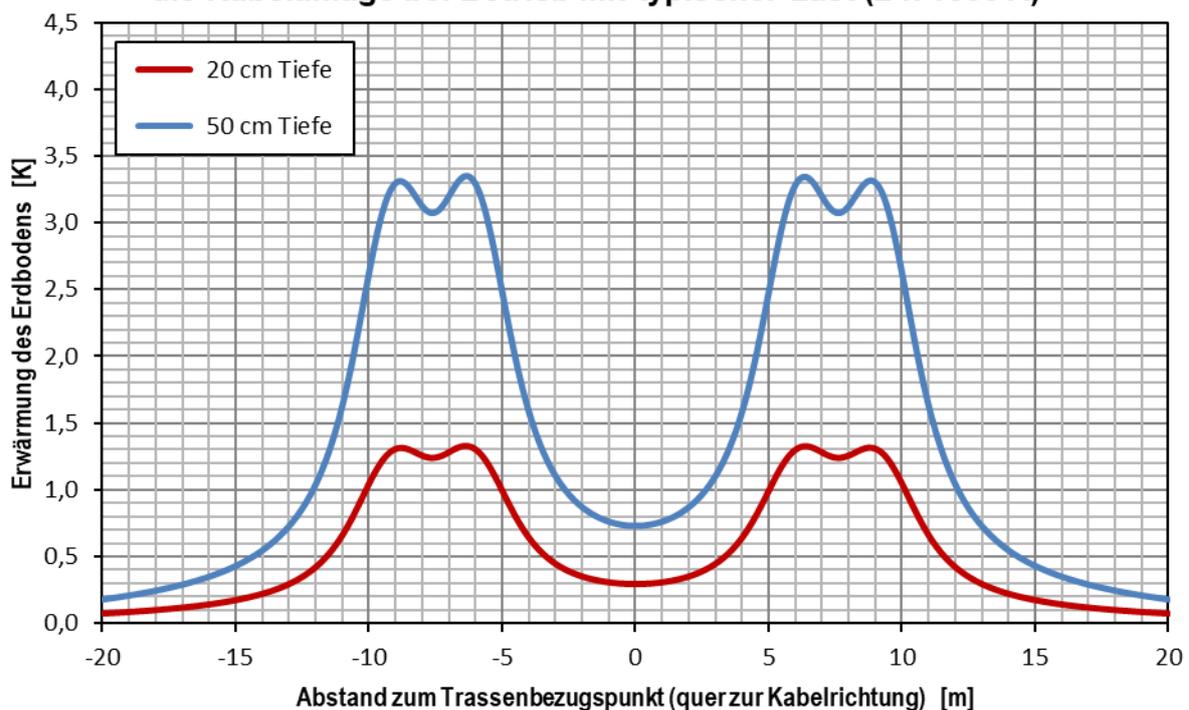


Bild 30: Maximale Erwärmung des Erdbodens in 0,2 m und 0,5 m unter GOK bei typischer Last (1800 A pro Stromkreis), Regelprofil, Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b

Cross-Bonding-Teilabschnitt 2 (siehe auch Anlage 3.2)

Regelprofil nach Abschnitt 3.1, Bild 2, Leiter-/ Schirmströme nach Abschnitt 3.2, Bilder 11, 13
 Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($0 \leq H \leq 1,0$ m), feucht/ trocken: 1,0 Km/W / 2,5 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,0 \text{ m} < H \leq 1,8$ m), feucht/ trocken: 0,7 Km/W / 2,5 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,8 \text{ m} < H \leq 2,5$ m), feucht/ trocken: 0,5 Km/W / 2,5 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($H > 2,5$ m): 0,5 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken: 0,67 Km/W / 1,4 Km/W

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A:

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,6	25,8	24,6	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,4	34,7	35,3	35,1	35,3	33,5	33,7	34,8	35,4	35,0	35,2	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,2	13,5	14,5	14,1	14,1	13,1	13,3	13,5	14,4	14,2	14,1	13,0

Maximale Erwärmung des Erdbodens: 0,2 m unter GOK: 1,29 K 0,5 m unter GOK: 3,26 K

Erwärmung der oberflächennahen Erdbodenschichten durch die Kabelanlage bei Betrieb mit typischer Last (2 x 1800 A)

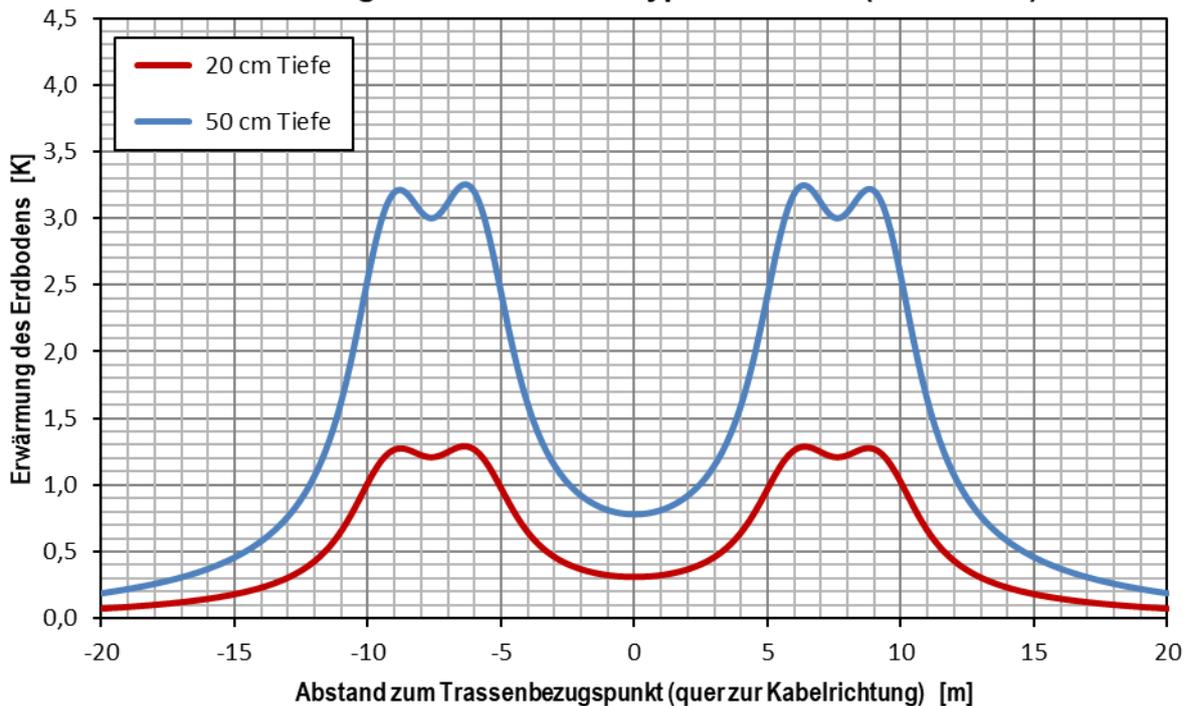


Bild 31: Maximale Erwärmung des Erdbodens in 0,2 m und 0,5 m unter GOK bei typischer Last (1800 A pro Stromkreis), Regelprofil, Cross-Bonding-Teilabschnitt 2

Cross-Bonding-Teilabschnitt 3 (siehe auch Anlage 3.3)

Regelprofil nach Abschnitt 3.1, Bild 2, Leiter-/ Schirmströme nach Abschnitt 3.2, Bilder 11, 14

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($0 \leq H \leq 1,0$ m), feucht/ trocken: 1,0 Km/W / 2,5 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,0 \text{ m} < H \leq 1,7$ m), feucht/ trocken: 0,7 Km/W / 2,5 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,7 \text{ m} < H \leq 2,5$ m), feucht/ trocken: 0,5 Km/W / 2,5 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($H > 2,5$ m): 0,5 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken: 0,67 Km/W / 1,4 Km/W

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A:

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	67,0	10,8	21,4	32,6	49,3	23,1	57,0	19,5	19,8	22,2	58,8	33,0
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,5	25,8	24,5	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,6	34,7	35,1	35,1	35,4	33,4	33,7	34,8	35,2	34,9	35,3	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,5	13,4	14,2	14,0	14,2	13,1	13,5	13,5	14,3	14,0	14,3	13,0

Maximale Erwärmung des Erdbodens: 0,2 m unter GOK: 1,29 K 0,5 m unter GOK: 3,25 K

Erwärmung der oberflächennahen Erdbodenschichten durch die Kabelanlage bei Betrieb mit typischer Last (2 x 1800 A)

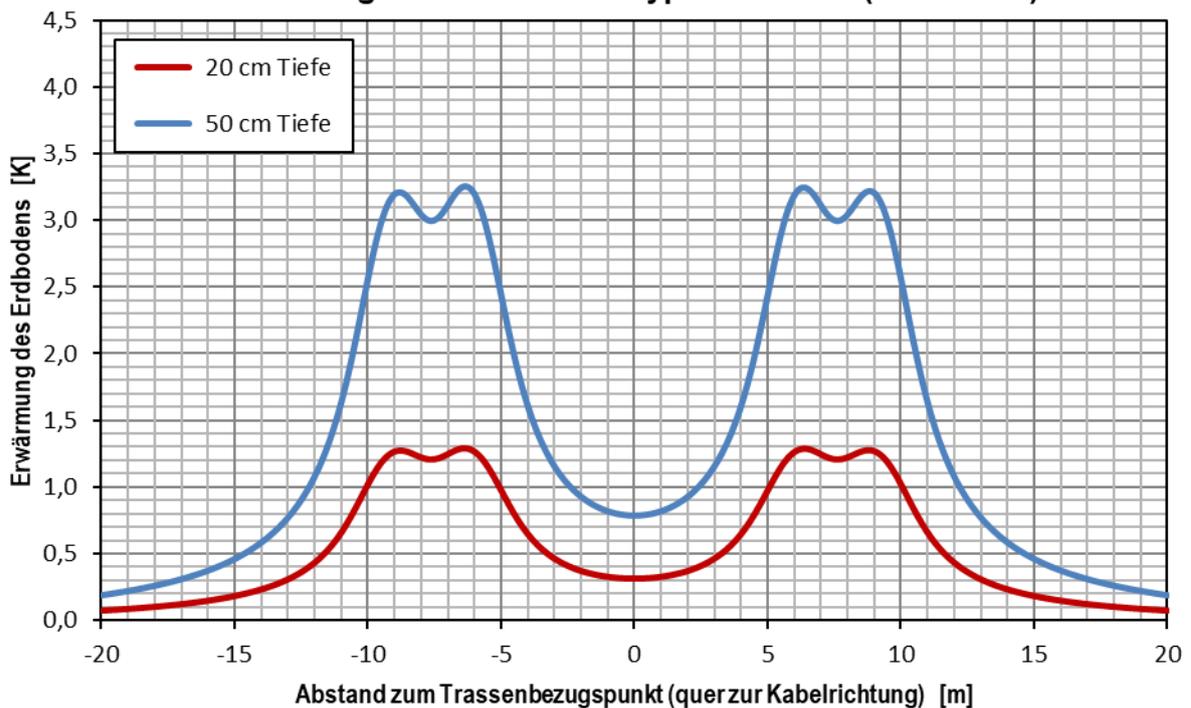


Bild 32: Maximale Erwärmung des Erdbodens in 0,2 m und 0,5 m unter GOK bei typischer Last (1800 A pro Stromkreis), Regelprofil, Cross-Bonding-Teilabschnitt 3

4.2.2. Erwärmung des Erdbodens im Bereich der Allerunterquerung

Die parallelen Tunnel der Allerunterquerung liegen im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2. Im Gegensatz zum Rest der Trasse soll im Tunnelbereich ein Kabel mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter zum Einsatz kommen. Bei diesem Kabel sind Skin- und Proximity-Effekt im Leiter gegenüber dem Standard-Aufbau nach Anlage 1 signifikant kleiner, ansonsten sind die Kabel baugleich.

Tunnelabschnitt 01: Bereich unter Deich nahe Startschacht (siehe auch Anlage 4.1)

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($0 \leq H \leq 1,0$ m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,0$ m < $H \leq 3,8$ m):	0,7 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($3,8$ m < $H \leq 19,5$ m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($H > 19,5$ m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,15 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,07 m

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A:

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur	Rohr	33,0	33,9	34,1	34,6	34,8	33,5	33,5	34,7	34,7	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	42,3	42,4	40,7	40,8	42,0	42,5	41,7	41,7	40,1
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,3	12,0	11,8	11,7	10,9

Maximale Erwärmung des Erdbodens in Höhe der Tunnelachse: 17,0 K

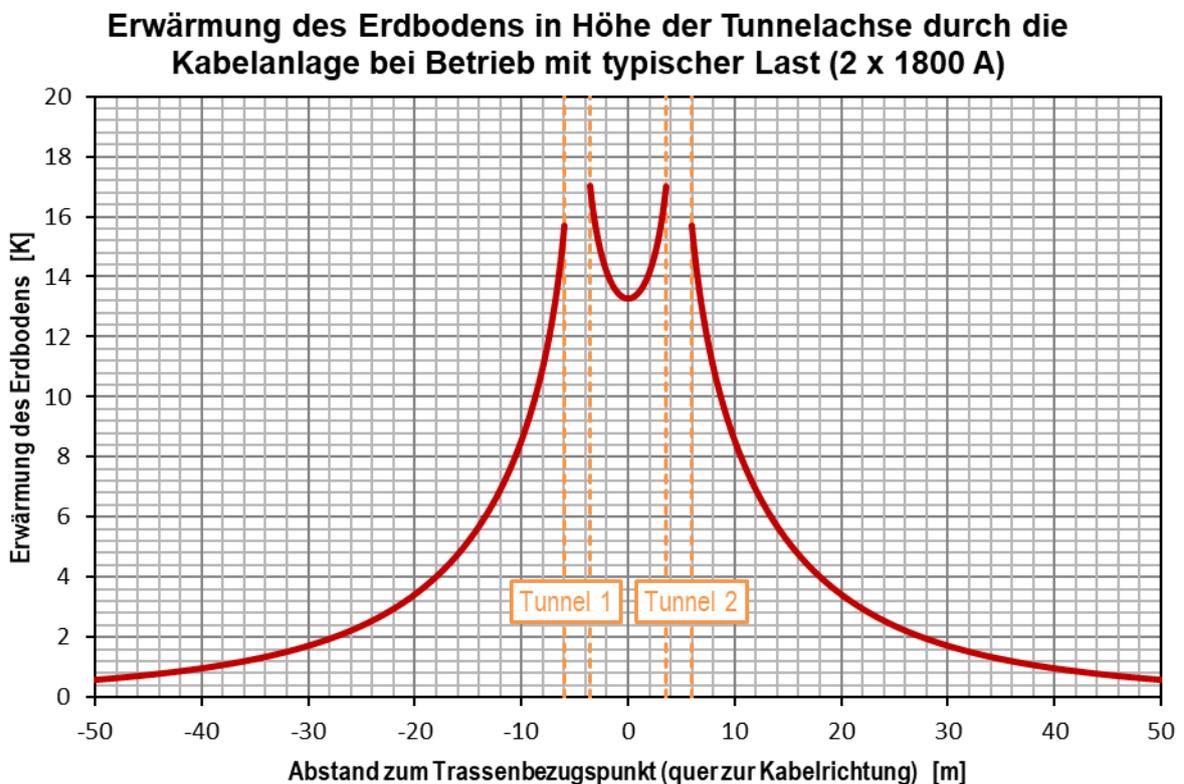


Bild 33: Maximale Erwärmung des Erdbodens in in Höhe der Tunnelachse bei typischer Last (1800 A pro Stromkreis), Tunnelabschnitt 01, Cross-Bonding-Teilabschnitt 2

Tunnelabschnitt 08: Bereich neben rechtem Flussufer (siehe auch Anlage 4.2)

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($0 \leq H \leq 1,0$ m), feucht/ trocken: 1,0 Km/W / 2,5 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,0$ m $< H \leq 14,0$ m): 0,5 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($H > 14,0$ m): 0,75 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr): 1,0 Km/W
 Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit): 1,2 Km/W
 Legetiefe (Tunnelachse): 12,05 m
 Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise: 20,00 m

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A:

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	32,9	33,9	34,1	34,2	34,3	33,1	33,1	34,2	34,3	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	41,9	41,9	40,2	40,4	41,5	42,1	41,7	41,7	40,0
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,2	12,0	11,8	11,7	10,9

Maximale Erwärmung des Erdbodens in Höhe der Tunnelachse: 16,3 K

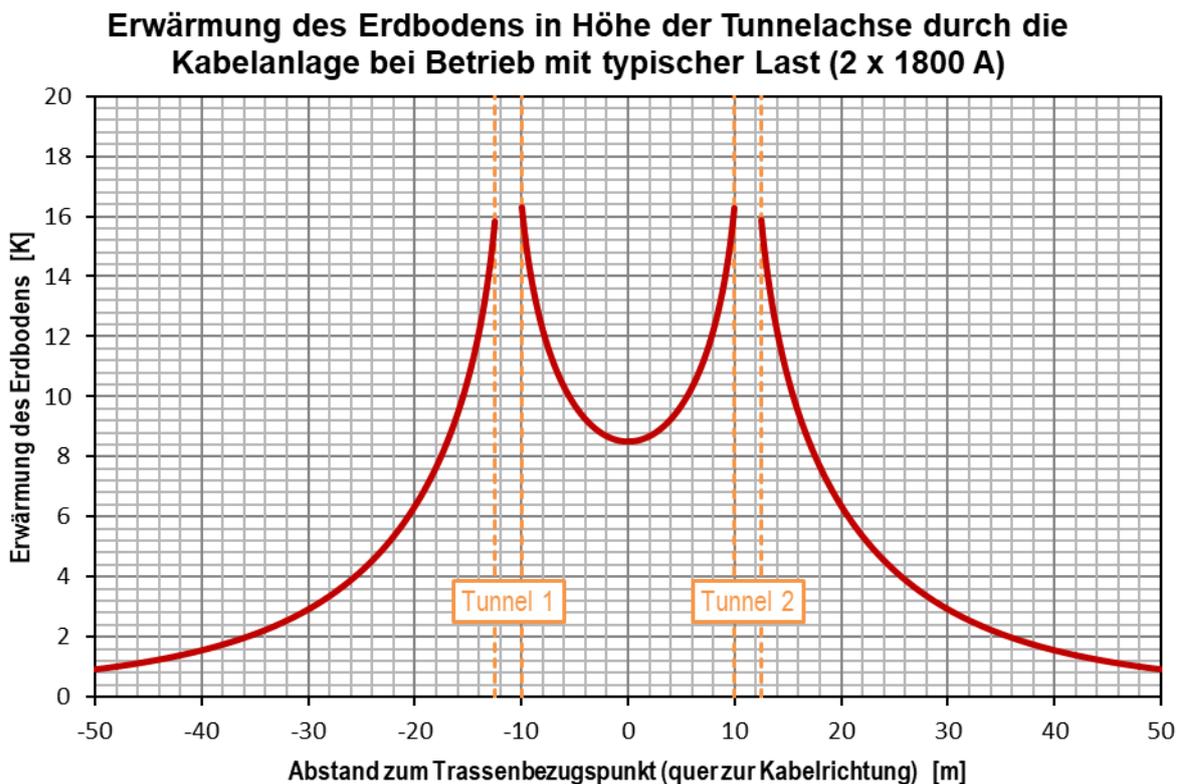


Bild 34: Maximale Erwärmung des Erdbodens in in Höhe der Tunnelachse bei typischer Last (1800 A pro Stromkreis), Tunnelabschnitt 08, Cross-Bonding-Teilabschnitt 2

Tunnelabschnitt 22: Bereich unter Deich nahe Zielschacht (siehe auch Anlage 4.3)

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($0 \leq H \leq 1,0$ m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,0$ m $< H \leq 4,0$ m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($4,0$ m $< H \leq 5,0$ m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($5,0$ m $< H \leq 10,5$ m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($H > 10,5$ m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,77 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,48 m

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A:

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,7	34,7	35,1	35,6	35,7	34,2	34,2	35,6	35,7	35,1	34,9	33,6
	Leiter	40,9	42,1	42,9	43,3	43,3	41,4	41,5	42,9	43,5	42,7	42,5	40,8
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,3	12,1	11,8	11,7	11,0	11,1	11,3	12,0	11,8	11,8	10,9

Maximale Erwärmung des Erdbodens in Höhe der Tunnelachse: 17,9 K

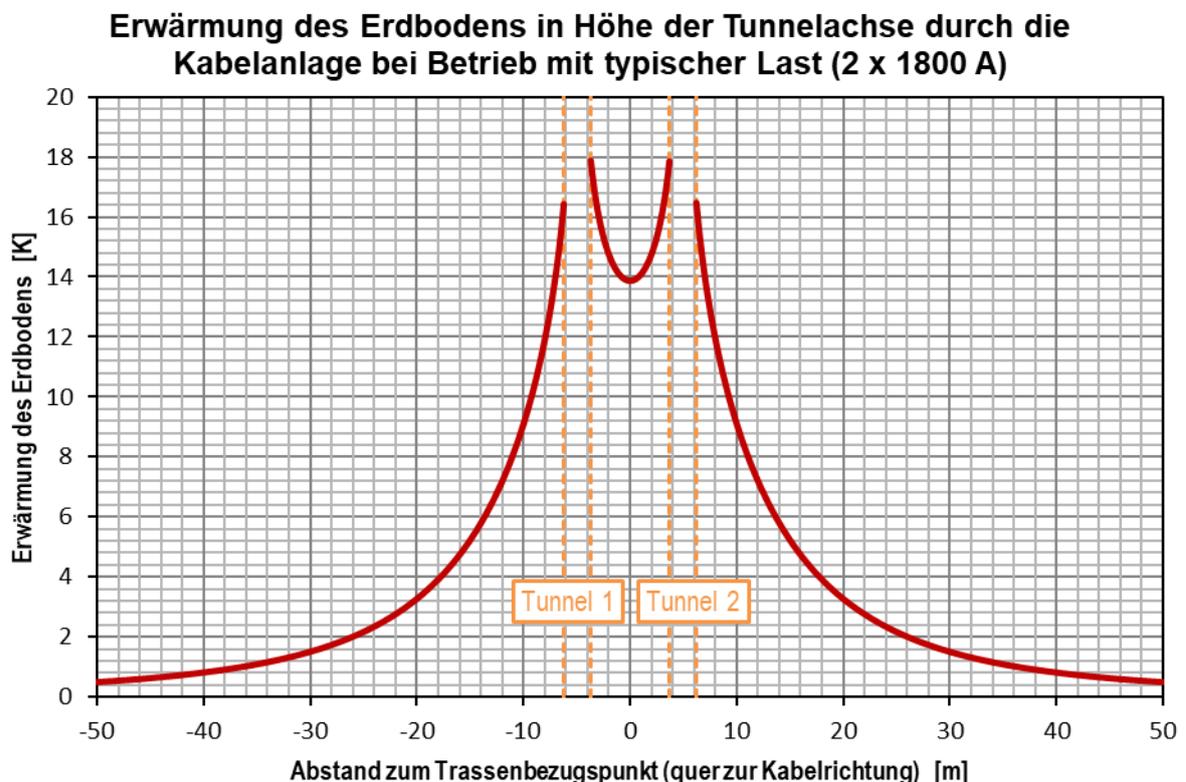


Bild 35: Maximale Erwärmung des Erdbodens in in Höhe der Tunnelachse bei typischer Last (1800 A pro Stromkreis), Tunnelabschnitt 22, Cross-Bonding-Teilabschnitt 2

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Für den als Erdkabeltrasse geplanten Teilabschnitt der 380-kV-Leitung „Stade – Landesbergen“ im Bereich westlich der Stadt Verden (Aller) wurden Untersuchungen zur Größe der von der Kabelanlage im Betrieb erzeugten magnetischen Felder sowie zur Erwärmung des umgebenden Erdbodens durchgeführt. Die Kabelverbindung soll aus insgesamt vier Teilsystemen bestehen, wobei pro Stromkreis der angeschlossenen Freileitung zwei Kabelteilsysteme elektrisch parallelgeschaltet werden sollen. Auf Grund der induktiven Kopplung ist mit einer ungleichmäßigen Stromaufteilung auf die parallelgeschalteten Kabel der beiden Stromkreise zu rechnen.

Für magnetische Wechselfelder mit einer Frequenz von 50 Hz existiert in Deutschland ein verbindlicher Grenzwert von 100 μT , der laut 26. BImSchV [1] einzuhalten ist in Bereichen, die „*zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind*“.

Im Interesse einer Minimierung der erzeugten Magnetfelder wurde für die Kabelanlage bereits aus grundsätzlichen Erwägungen heraus eine gleichbleibende Phasenfolge gewählt, obwohl die in der Literatur üblicherweise vorgeschlagene alternierende Phasenfolge zu einer gleichmäßigeren Stromaufteilung und damit zu einer etwas höheren Strombelastbarkeit führen würde. Diese grundsätzliche Maßnahme dient somit auch der von der 26. BImSchV [1] in § 4 vorgeschriebenen vorsorglichen Minimierung der erzeugten elektromagnetischen Felder (siehe auch [2]).

Für die Magnetfeldberechnungen wurde jeweils eine maximale Belastung von 4000 A pro Stromkreis angesetzt, obwohl diese Last aus thermischen Gründen nur für einen begrenzten Zeitraum von wenigen Stunden zulässig ist. Bei allen Berechnungen wurden die ungleichmäßige Stromaufteilung auf die parallelgeschalteten Kabel sowie die induzierten (Rest-) Ströme in den Kabelschirmen berücksichtigt, die sich trotz zyklischer Auskreuzung der Kabelschirme (Cross-Bonding) einstellen.

Auf dem überwiegenden Teil der Trasse soll ein vorgegebenes Regelprofil zum Einsatz kommen. Kürzere Teilabschnitte der Kabeltrasse erfordern größere Legetiefen, aus thermischen Gründen müssen hier die Kabelabstände vergrößert werden, damit die aus technischen Gründen zulässige maximale Leitertemperatur der Kabel nicht überschritten wird. Andere kürzere Teilabschnitte werden in geschlossener Bauweise mit Hilfe des Horizontalspülbohrverfahrens (HDD-Verfahren) oder als Rohrpressung erstellt. Auf allen diesen Trassenabschnitten ist die Legetiefe der Kabel durchweg größer als im Bereich des Regelprofils, die horizontalen Kabelabstände müssen aus verschiedenen technischen Gründen jedoch ebenfalls größer gewählt werden. Der Einfluss der größeren Legetiefe und des damit größeren Abstandes zu den Kabeln, der zu kleineren magnetischen Flussdichten führt, überwiegt regelmäßig gegenüber dem Einfluss des vergrößerten Kabelabstandes, der die magnetische Flussdichte tendenziell vergrößert. Die magnetischen Flussdichten sind also im Bereich der Sonderprofile mit größerer Legetiefe trotz größerer Kabelabstände geringer als im Regelprofil.

Im Verlauf der Kabeltrasse muss auch der Fluss Aller unterquert werden. Dafür sollen zwei parallele unterirdische Tunnelbauwerke erstellt werden, die die 6 Kabel eines Stromkreises (jeweils 2 Teilsysteme) aufnehmen. Der lichte horizontale Abstand der beiden Tunnel variiert zwischen 4 m und 20 m, die Bodenüberdeckung ist jedoch mit mindestens 5 m ebenfalls deutlich größer als im Regelprofil.

Für das Regelprofil wurde die auf allen drei Cross-Bonding-Teilabschnitten erzeugte magnetische Flussdichte für einen symmetrisch zur Mittelachse der Kabeltrasse liegenden ± 120 m umfassenden Korridor berechnet. Zusätzlich wurde die magnetische Flussdichte noch einmal explizit für 2 ausgewählte Orte in der Nähe der Trasse berechnet. Diese ausgewählten Orte stellen die Positionen von 2 Wohngebäuden dar, die sich innerhalb des sogenannten Einwirkungsbereiches der Kabelanlage befinden, d.h. weniger als 100 m vom äußersten Kabel entfernt.

Folgende maximale magnetische Flussdichten wurden berechnet:

Regelprofil im Cross-Bonding-Teilabschnitt 1a (KÜA Nord – Muffe CBVM1) und Cross-Bonding-Teilabschnitt 1b (Muffe CBVM3 – KÜA Süd):

Höhe über der Erdoberfläche	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	87,3 μ T	2,70 μ T	0,58 μ T	0,16 μ T	0,05 μ T
0,5 m	66,4 μ T	2,69 μ T	0,58 μ T	0,16 μ T	0,05 μ T
1,0 m	46,1 μ T	2,67 μ T	0,58 μ T	0,16 μ T	0,05 μ T

Regelprofil im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2 (Muffe CBVM1 – Muffe CBVM2, Bereich außerhalb der Aller-Unterquerung):

Höhe über der Erdoberfläche	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	93,7 μ T	2,92 μ T	0,62 μ T	0,17 μ T	0,05 μ T
0,5 m	71,4 μ T	2,91 μ T	0,62 μ T	0,17 μ T	0,05 μ T
1,0 m	49,8 μ T	2,89 μ T	0,62 μ T	0,17 μ T	0,05 μ T

Regelprofil im Cross-Bonding-Teilabschnitt 3 (Muffe CBVM2 – Muffe CBVM3):

Höhe über der Erdoberfläche	Horizontaler Abstand von der Trassenmittelachse				
	-20 m ... +20 m	25 m	50 m	100 m	200 m
0,2 m	86,2 μ T	2,66 μ T	0,57 μ T	0,16 μ T	0,05 μ T
0,5 m	65,5 μ T	2,65 μ T	0,57 μ T	0,16 μ T	0,05 μ T
1,0 m	45,6 μ T	2,63 μ T	0,57 μ T	0,16 μ T	0,05 μ T

Die größten magnetischen Flussdichten treten immer unmittelbar oberhalb der Kabeltrasse auf. Die berechneten Ersatzwerte liegen für das Regelprofil zwischen 45,6 μ T in 1,0 m Höhe und 93,7 μ T in 0,2 m Höhe über der Erdoberfläche je nachdem, in welchem Cross-Bonding-Teilabschnitt sich der betreffende Trassenbereich befindet. Unabhängig davon, dass die Flächen unmittelbar über der Kabeltrasse nicht zu den Bereichen gehören, die nach 26. BImSchV „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“ [1] und dafür auch keine besonderen Anforderungen zur Vorsorge gelten, wird der Grenzwert von 100 μ T selbst dort bereits deutlich unterschritten, obwohl dies formal nicht erforderlich wäre. Für größere horizontale Abstände von der Kabeltrasse sind die erzeugten magnetischen Flussdichten bereits erheblich geringer.

Zusätzlich wurden die zu erwartenden maximalen magnetischen Flussdichten auch für zwei ausgewählte Orte berechnet, an denen sich die Kabeltrasse auf weniger als 100 m an Wohngebäude annähert. Beide Wohngebäude sind im betreffenden Umfeld jeweils die der Kabeltrasse nächsten Orte, die gemäß Definition der 26. BImSchV „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“ [1]. Bei den Berechnungen wurden die jeweiligen Trassenprofile im Bereich der größten Annäherung der Kabeltrasse an die Wohngebäude (Sonderprofil Aller-Tunnel bzw. modifiziertes Profil für offene Bauweise mit größeren Legetiefen sowie Kabel- und Systemabständen) berücksichtigt. Für beide Orte wurden maximale Werte der magnetischen Flussdichte ermittelt, die um mehr als zwei Größenordnungen unter dem zulässigen Grenzwert liegen (0,54 μ T und 0,46 μ T).

Die gesetzlich geforderte Minimierung der magnetischen Felder an den im Einwirkungsbereich der Kabelanlage liegenden maßgeblichen Minimierungsorten wurde durch verschiedene Maßnahmen bereits bei der grundsätzlichen Planung der Kabelanlage berücksichtigt. Zunächst wurde für die vier Teilkabelsysteme eine gleichbleibende Phasenfolge gewählt. Diese führt im Gegensatz zu der in der Literatur häufig vorgeschlagenen alternierenden Phasenfolge zwar zu einer ungleichmäßigeren Stromaufteilung auf die elektrisch parallel geschalteten Teilsysteme der beiden Stromkreise und somit zu ungünstigeren thermischen Verhältnissen, jedoch sind die in unmittelbarer Umgebung der Kabelanlage erzeugten magnetischen Felder bei gleichbleibender Phasenfolge erheblich kleiner. Als weitere grundsätzliche Minimierungsmaßnahme wurde der Abstand der Kabel und Systeme jeweils nur so groß gewählt, dass die maximale Leitertemperatur der Kabel bei Betrieb mit thermischer Grenzlast gerade den technisch bedingten zulässigen Grenzwert erreicht. Eine weitere Verringerung der Kabelabstände mit dem Ziel, die magnetische Flussdichte zu minimieren, ist somit technisch nicht möglich.

In [2] wird als weitere grundsätzliche Minimierungsmöglichkeit die Vergrößerung der Legetiefe genannt. Eine solche Vergrößerung der Legetiefe ist zwar grundsätzlich möglich (und an bestimmten Stellen der Trasse aus anderen Gründen auch zwingend erforderlich), jedoch müssen dann aus thermischen Gründen die Kabel- und Systemabstände vergrößert werden, um die zulässige Leitertemperatur bei Betrieb mit thermischer Grenzlast nicht zu überschreiten. Derartige Veränderungen des Trassenprofils sind stets mit einem erheblich höheren Tiefbauaufwand verbunden. Insbesondere steigt dadurch aber auch der Flächenverbrauch sowie die potentiellen Beeinträchtigungen der Umgebung, wodurch wiederum andere schutzwürdige Güter betroffen wären. Andererseits könnten durch diese Maßnahmen an den beiden maßgeblichen Minimierungsorten nur noch geringe Verbesserungen der bereits um mehr als 2 Größenordnungen unterhalb des zulässigen Grenzwertes liegenden magnetischen Flussdichten erreicht werden. Der erforderliche Aufwand und die negativen Folgen für andere schutzwürdige Güter würden in keinem Verhältnis zum möglichen Ergebnis stehen.

Bei Ausführung der Kabelanlage in der vorgestellten Form und unter Zugrundelegung der beschriebenen maximalen Strombelastung von 4000 A pro Stromkreis kann somit davon ausgegangen werden, dass der in der 26. BImSchV vorgegebene Grenzwert von 100 μT für ein magnetisches 50-Hz-Wechselfeld außerhalb des Bewertungsabstandes (10 m ab dem äußersten Kabel) im gesamten Bereich der Kabeltrasse sicher eingehalten wird. In den individuell untersuchten Bereichen der maximalen Annäherung an Gebäude im Einwirkungsbereich, bei denen es sich im Sinne der 26. BImSchV um Bereiche handelt, die „zum nicht nur vorübergehenden Aufenthalt von Menschen bestimmt sind“ wird dieser Grenzwert sogar um mehr als zwei Größenordnungen unterschritten.

Neben den magnetischen Feldern wurde auch die von der Kabelverbindung im typischen Betriebsfall verursachte Erwärmung des umgebenden Erdbodens für ausgewählte repräsentative Trassenabschnitte berechnet. Die Erwärmung des umgebenden Erdbodens ist eine unvermeidbare Begleiterscheinung bei erdverlegten Energiekabeln, da die gesamte in den Kabeln umgesetzte Verlustleistung letztlich durch den umgebenden Boden zur Erdoberfläche hin abgeführt werden muss.

Auf Grund des erheblichen Wärmespeichervermögens aller beteiligten Materialien und insbesondere auch des umgebenden Erdbodens spiegeln sich Veränderungen der umgesetzten Verlustleistung infolge veränderter Strombelastungen nicht unmittelbar und unverzögert in einer Temperaturerhöhung des umgebenden Bodens wider, vor allem, wenn der betreffende Referenzpunkt in einer gewissen Entfernung von den wärmeabgebenden Energiekabeln liegt. Für die Bodenerwärmung an solchen Referenzpunkten ist daher nicht die momentane maximale Strombelastung relevant, sondern ein typischer, über längere Zeit zu erwartender mittlerer Belastungswert. Dieser für die Erdbodenerwärmung relevante typische Lastwert liegt deutlich unterhalb des maximal zu erwartenden Momentanwertes, der für die magnetischen Felder relevant ist. Vom Auftraggeber TenneT TSO GmbH wurde ein typischer Lastwert zur Ermittlung der Erwärmung des Erdbodens von 1800 A pro Stromkreis bei einem Belastungsgrad von $m = 0,8$ vorgegeben.

Die Berechnungen erfolgten sowohl für Trassenabschnitte in offener Bauweise mit Regelprofil für alle 3 Cross-Bonding-Teilabschnitte als auch für 3 ausgewählte Trassenprofile im Bereich der Allerunterquerung im Cross-Bonding-Teilabschnitt 2, auf der die Kabel in verfüllten Tunneln angeordnet sind.

Für die Abschnitte in offener Bauweise wurde die Erwärmung des Erdbodens in Tiefen von 0,2 m und 0,5 m unter der Erdoberfläche in einem Bereich von ± 20 m beidseits der Trassenmittelachse quer zum Trassenverlauf berechnet. Dieser Bereich befindet sich oberhalb der Kabel, die größten Bodenerwärmungen sind zu erwarten, wenn sich die Kabel in geringer Entfernung von den ausgewählten Referenzpunkten bzw. Referenzlinien befinden. Die geringste Legetiefe der Kabel wird beim sogenannten Regelprofil erreicht, bei Sonderprofilen in offener Bauweise (z.B. bei Unterquerung kleinerer Hindernisse) liegen die Kabel in der Regel tiefer im Erdboden. Das gleiche trifft in noch stärkerem Maße auf Abschnitte in geschlossener Bauweise (HDD-Bauweise) zu. Für solche Abschnitte mit deutlich größeren Legetiefen der Kabel ist regelmäßig eine geringere Bodenerwärmung in den vorgegebenen beiden Referenztiefen als beim Regelprofil zu erwarten. Aus diesem Grunde wurden die Berechnungen der Erdbodenerwärmung für die Abschnitte außerhalb der Allerunterquerung nur für das Regelprofil der offenen Bauweise durchgeführt, das von allen Profilen die geringste Legetiefe aufweist.

Im Bereich der Allerunterquerung liegen die Kabel in deutlich größerer Tiefe als auf den anderen Abschnitten. Für diesen Bereich ist deshalb im Hinblick auf möglich thermische Auswirkungen auf das Grundwasser vor allem die Erwärmung des Erdbodens in Tiefen interessant, die der jeweiligen Tiefe der beiden Kabeltunnel entsprechen. Tiefe und Abstand der Kabeltunnel sind im Bereich der Allerunterquerung nicht konstant. Für die Berechnungen der Erdbodenerwärmung wurden daher 3 typische Profilschnitte ausgewählt. Es handelt sich um einen Abschnitt unter dem Deich nahe dem Startschacht (Tunnelabschnitt 01), um einen Abschnitt am rechten Flussufer der Aller (Tunnelabschnitt 08) und einen Abschnitt unter dem Deich auf der anderen Seite der Aller nahe dem Zielschacht (Tunnelabschnitt 22).

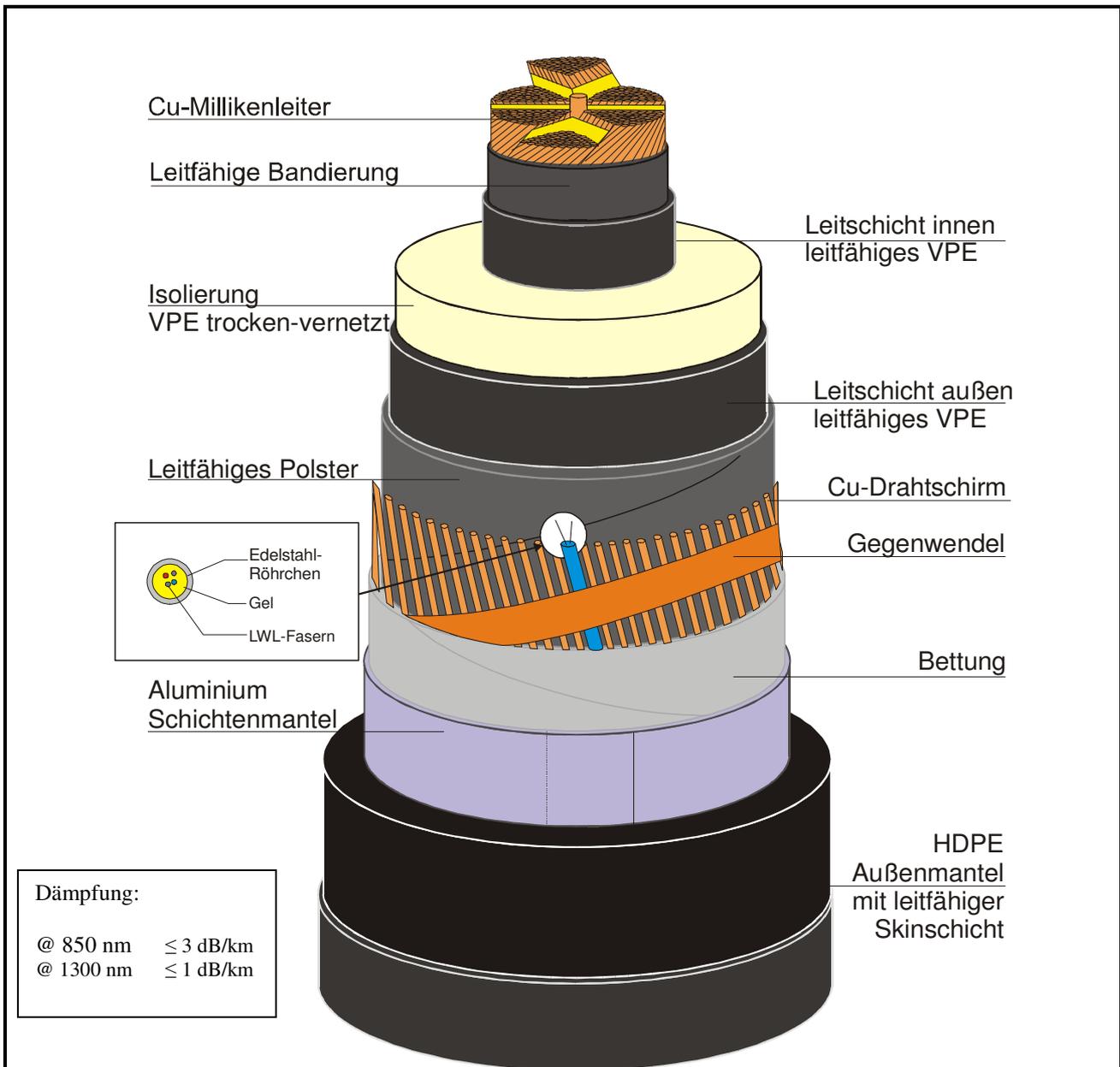
Aus den verfügbaren Ergebnissen der geologischen Baugrunduntersuchungen wurden jeweils typische Bodenschichtungen abgeleitet, die die (hinsichtlich der Erwärmung des Erdbodens) ungünstigsten Verhältnisse des jeweiligen Abschnitts repräsentieren. Damit ist sichergestellt, dass die berechneten Werte der Bodenerwärmung im gesamten relevanten Trassenabschnitt nicht überschritten werden.

Für die Abschnitte in offener Bauweise mit Regelprofil wurden unabhängig vom jeweiligen Cross-Bonding-Teilabschnitt sehr ähnliche Werte der Erdbodenerwärmung berechnet. Die größten Werte sind erwartungsgemäß jeweils unmittelbar oberhalb der Kabel zu finden. Für die Referenztiefe von 0,2 m wurden Bodenerwärmungen zwischen 1,29 K und 1,33 K berechnet, für 0,5 m Referenztiefe liegen die Maximalwerte zwischen 3,25 K und 3,35 K. Mit zunehmender seitlicher Entfernung von den Kabeln wird die Bodenerwärmung schnell kleiner.

Im Bereich der Allerunterquerung werden die höchsten Werte der Erdbodenerwärmung in Höhe der Tunnelachsen jeweils an der Außenseite der Tunnelwand erreicht, und zwar immer an der Seite, die zum benachbarten Tunnel zeigt. Trotz der unterschiedlichen Legetiefen und Abstände der Tunnel sowie der unterschiedlichen Bodenverhältnisse in der Umgebung der Tunnel unterscheiden sich die berechneten Maximalwerte nicht gravierend, sie liegen zwischen 16,3 K und 17,9 K. Auch hier wird die Erwärmung des Erdbodens mit zunehmendem seitlichem Abstand von den Kabeltunneln rasch kleiner.

6. Quellenverzeichnis

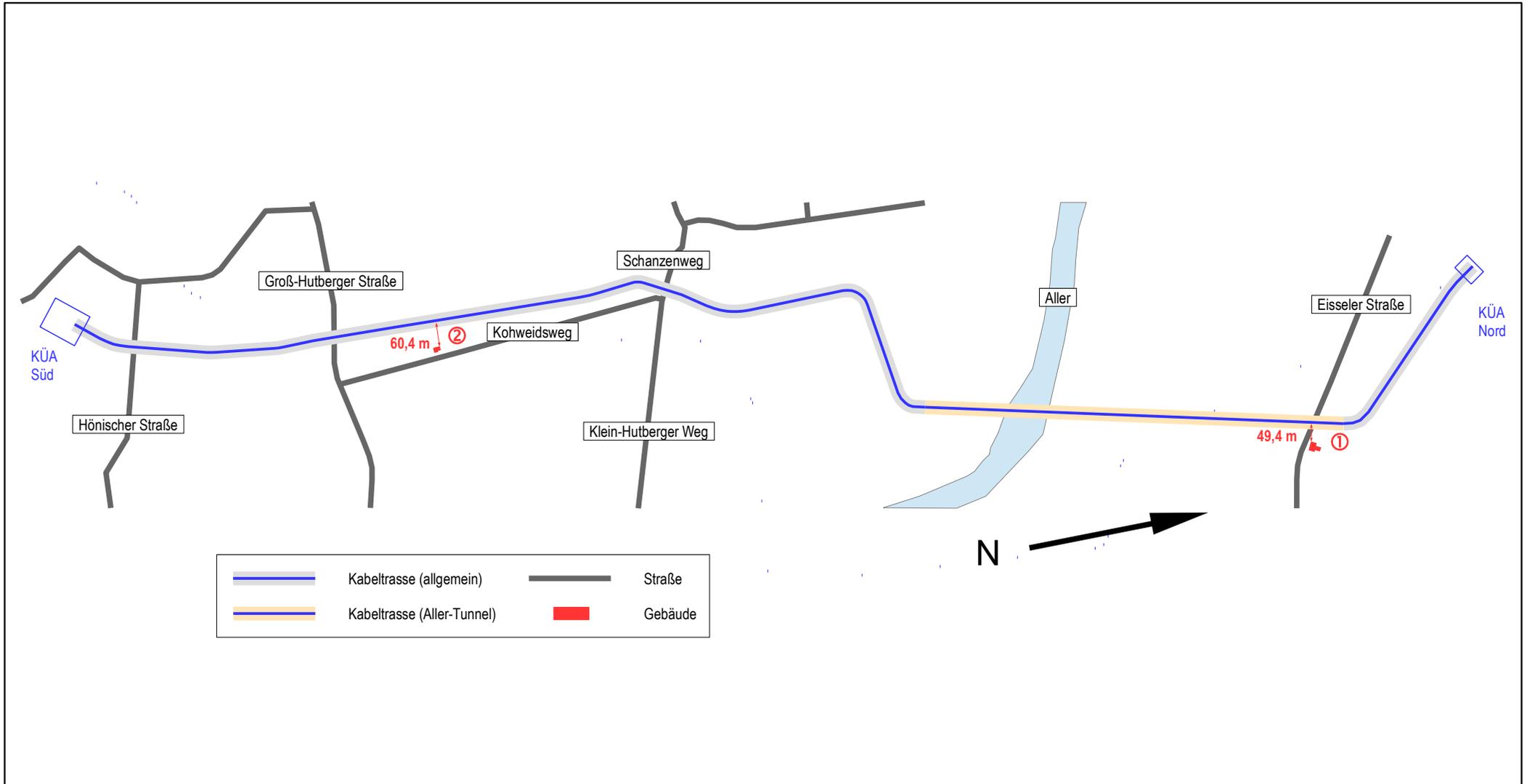
- [1] - 26. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über elektromagnetische Felder, 26. BImSchV) 21. August 2013, BGBl. Jahrgang 2013 Teil I Nr. 50, S. 3267
- [2] - Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der Verordnung über elektromagnetische Felder – 26. BImSchV (26. BImSchVVwV) 26. Februar 2016, BAnz AT 03.03.2016 B5
- [3] - Magnetic field in HV cable systems
1/ systems without ferromagnetic component
CIGRE Technical Brochure No. 104, June 1996
Joint task force 36.01/21
- [4] - Special Bonding of High Voltage Power Cables
Technical Brochure No. 283, CIGRE Working Group B1.18,
October 2005
- [5] - Earth Potential Rises in Specially Bonded Screen Systems
Technical Brochure No. 347, CIGRE Working Group B1.26,
June 2008
- [6] - DIN VDE 0276 – Starkstromkabel
Teil 1000: Strombelastbarkeit, Allgemeines
Umrechnungsfaktoren
Juni 1995
- [7] Heinhold, L.
Stubbe, R. Kabel und Leitungen für Starkstrom
Publicis MCD Verlag, Erlangen, 1999
ISBN 3-89578-088-X
- [8] Brakelmann, H. Belastbarkeiten der Energiekabel
VDE-Verlag, Berlin und Offenbach, 1985
- [9] - Standardreihe IEC 60287
Electric cables – Calculation of the current rating
- [10] - IEC 60853-2
Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables
Part 2: Cyclic rating of cables greater than 18/30 (36) kV and emergency ratings for cables of all voltages
1989-07
- [11] - Long term performance of soil and backfill systems
CIGRE Technical Brochure No. 714, December 2017
ISBN: 978-2-85873-416-0
- [12] - VDI 4640 Thermische Nutzung des Untergrundes
Blatt 4: Direkte Nutzungen
September 2004



Abmessungen unterliegen Fertigungstoleranzen.

Nicht maßstäblich.

	Nenn-Wanddicke (mm)	Durchmesser (mm) Ca.	
Cu-Leiter, Typ Milliken		63.7	
Extrudierte Leitschicht, innen	2	68.5	
Isolierung, VPE (Super CLean)	26.8	122.5	
Extrudierte Leitschicht, außen	1.7	126.5	TenneT TSO GmbH
Leitfähiges Quellvlies	0.3	127.5	
Cu-Drahtschirm (n x Ø)	78 x 2.03	131.8	
Bettung	0.3	132.8	2XS(FL)2Y 1x2500 RMS/250 + FO 230/400 kV
Aluminiumband	0.2	133.2	
HDPE Außenmantel	5	145	
Gewicht: (ca.)	38.5 kg / m		HTC 2753-3T
Datum:	01.07.2011		



	Kabeltrasse (allgemein)		Straße
	Kabeltrasse (Aller-Tunnel)		Gebäude

Verantwortliche Abteilung -	Technische Referenz -	Erstellt durch Dr.-Ing. W. Fricke	Genehmigt von -	
		Dokumentenart	Dokumentenstatus freigegeben	Massstab -
		Titel Verlauf der Kabeltrasse mit eingetragenen Gebäuden im Abstand bis 100 m		Dokumenten-Nr. Anlage 2
		Rev B	Ausgabedatum 17.02.2021	Sprache DE

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b**

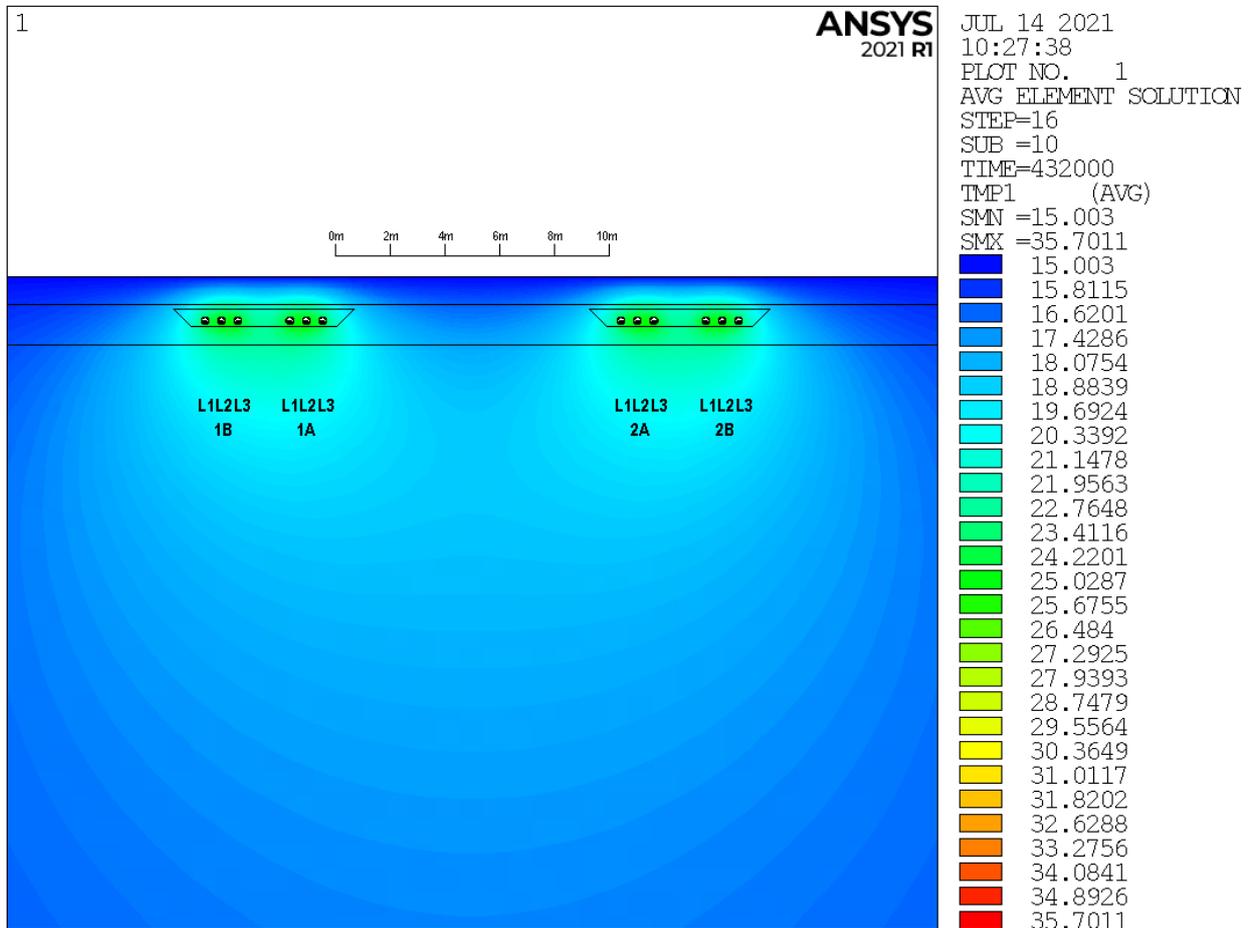
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	21,4	67,0	10,8	23,1	32,6	49,3	19,8	57,0	19,5	33,0	22,2	58,8
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,7	26,0	25,8	25,9	26,2	24,9	24,9	26,1	25,9	25,8	26,1	24,7
	Leiter	33,7	35,2	35,4	35,4	35,7	33,8	33,9	35,3	35,6	35,3	35,6	33,6
Verluste je Kabel	[W/m]	13,3	13,8	14,2	14,0	14,1	13,2	13,3	13,7	14,3	14,0	14,1	13,2



Temperaturverteilung im Erdboden, Übersicht (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b**

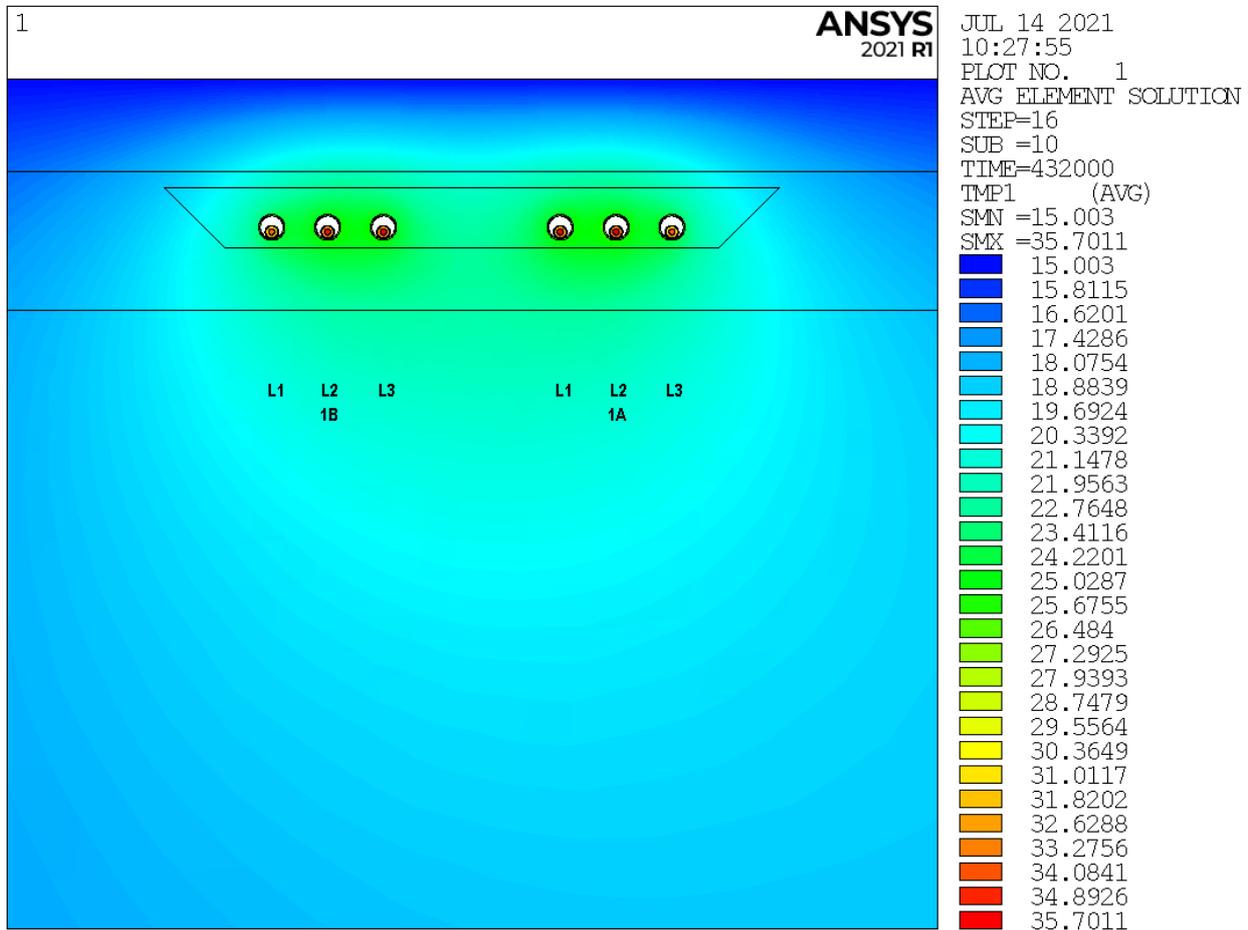
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	21,4	67,0	10,8	23,1	32,6	49,3	19,8	57,0	19,5	33,0	22,2	58,8
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,7	26,0	25,8	25,9	26,2	24,9	24,9	26,1	25,9	25,8	26,1	24,7
	Leiter	33,7	35,2	35,4	35,4	35,7	33,8	33,9	35,3	35,6	35,3	35,6	33,6
Verluste je Kabel	[W/m]	13,3	13,8	14,2	14,0	14,1	13,2	13,3	13,7	14,3	14,0	14,1	13,2



Temperaturverteilung im Erdboden, Detail Stromkreis 1 (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b**

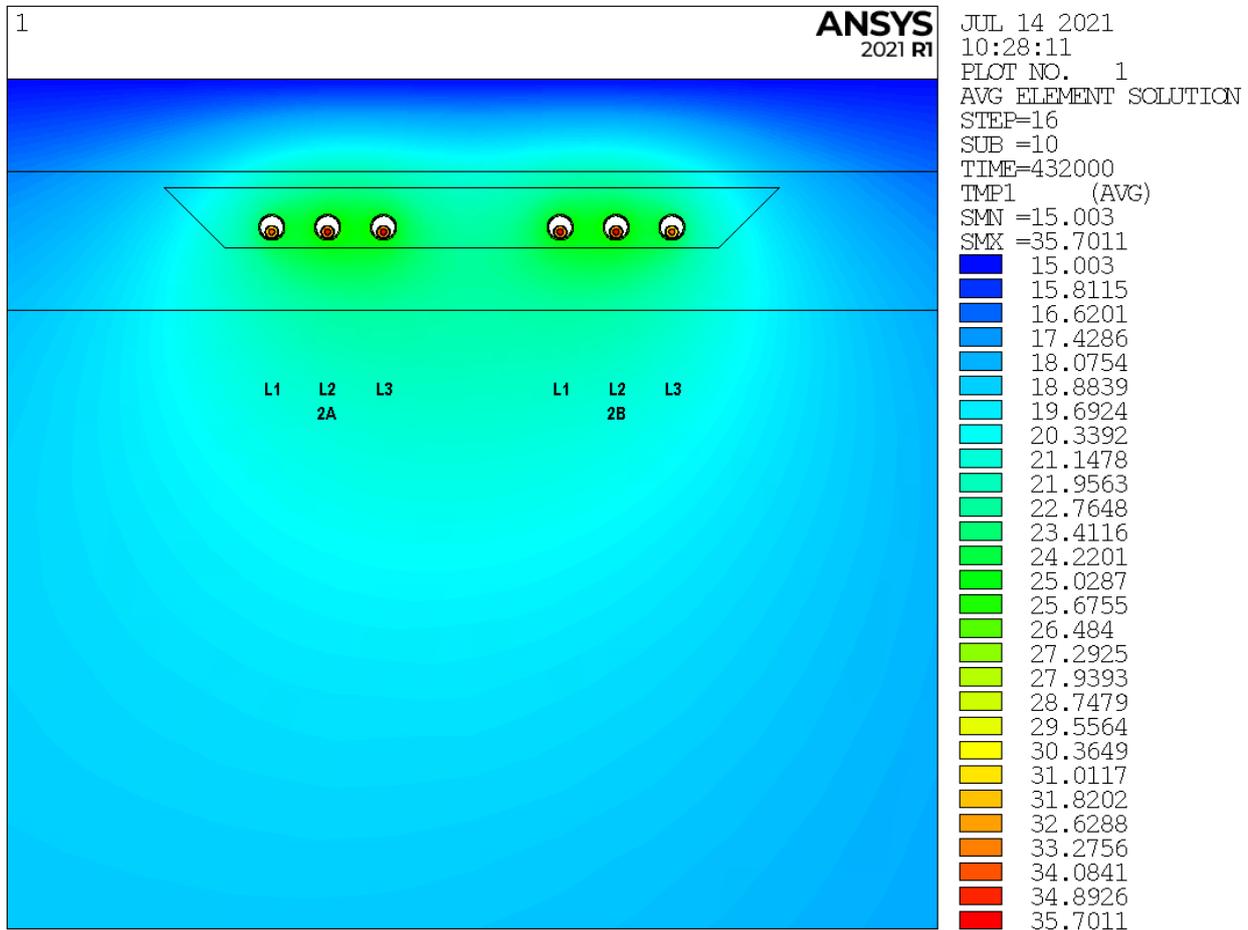
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	21,4	67,0	10,8	23,1	32,6	49,3	19,8	57,0	19,5	33,0	22,2	58,8
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,7	26,0	25,8	25,9	26,2	24,9	24,9	26,1	25,9	25,8	26,1	24,7
	Leiter	33,7	35,2	35,4	35,4	35,7	33,8	33,9	35,3	35,6	35,3	35,6	33,6
Verluste je Kabel	[W/m]	13,3	13,8	14,2	14,0	14,1	13,2	13,3	13,7	14,3	14,0	14,1	13,2



Temperaturverteilung im Erdboden, Detail Stromkreis 2 (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b**

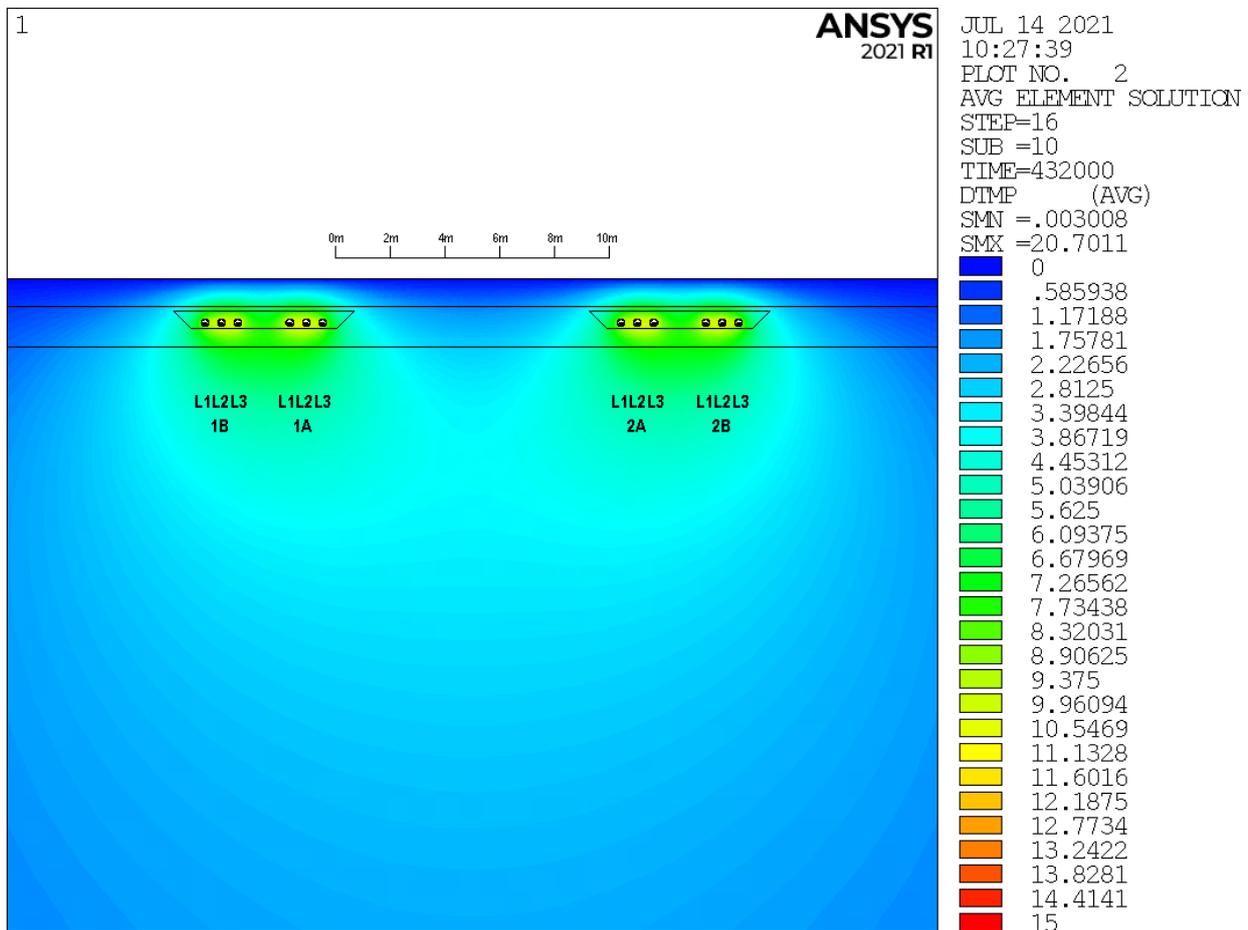
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	21,4	67,0	10,8	23,1	32,6	49,3	19,8	57,0	19,5	33,0	22,2	58,8
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,7	26,0	25,8	25,9	26,2	24,9	24,9	26,1	25,9	25,8	26,1	24,7
	Leiter	33,7	35,2	35,4	35,4	35,7	33,8	33,9	35,3	35,6	35,3	35,6	33,6
Verluste je Kabel	[W/m]	13,3	13,8	14,2	14,0	14,1	13,2	13,3	13,7	14,3	14,0	14,1	13,2



Erwärmung des Erdbodens, Übersicht (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b**

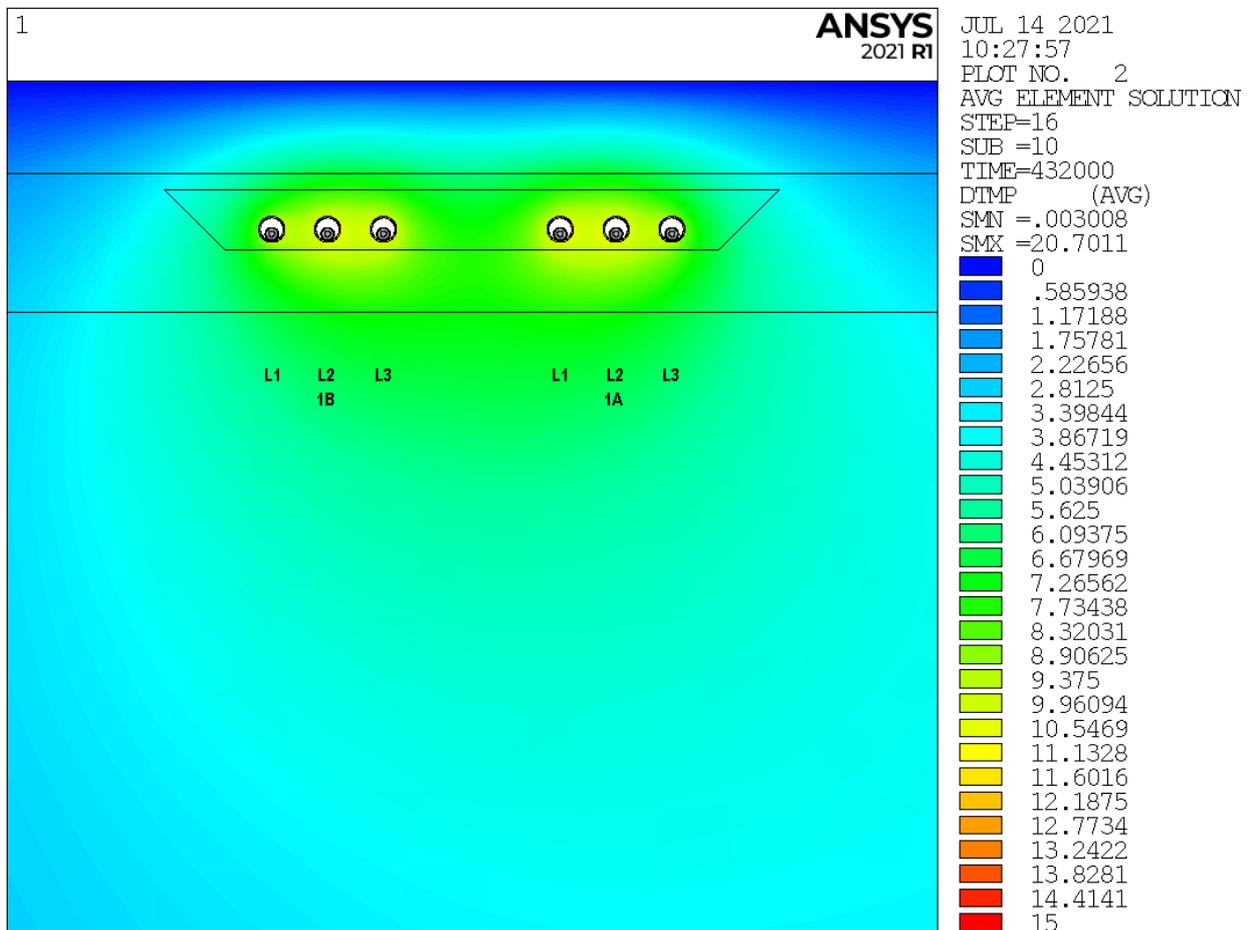
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	21,4	67,0	10,8	23,1	32,6	49,3	19,8	57,0	19,5	33,0	22,2	58,8
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,7	26,0	25,8	25,9	26,2	24,9	24,9	26,1	25,9	25,8	26,1	24,7
	Leiter	33,7	35,2	35,4	35,4	35,7	33,8	33,9	35,3	35,6	35,3	35,6	33,6
Verluste je Kabel	[W/m]	13,3	13,8	14,2	14,0	14,1	13,2	13,3	13,7	14,3	14,0	14,1	13,2



Erwärmung des Erdbodens, Detail Stromkreis 1 (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b**

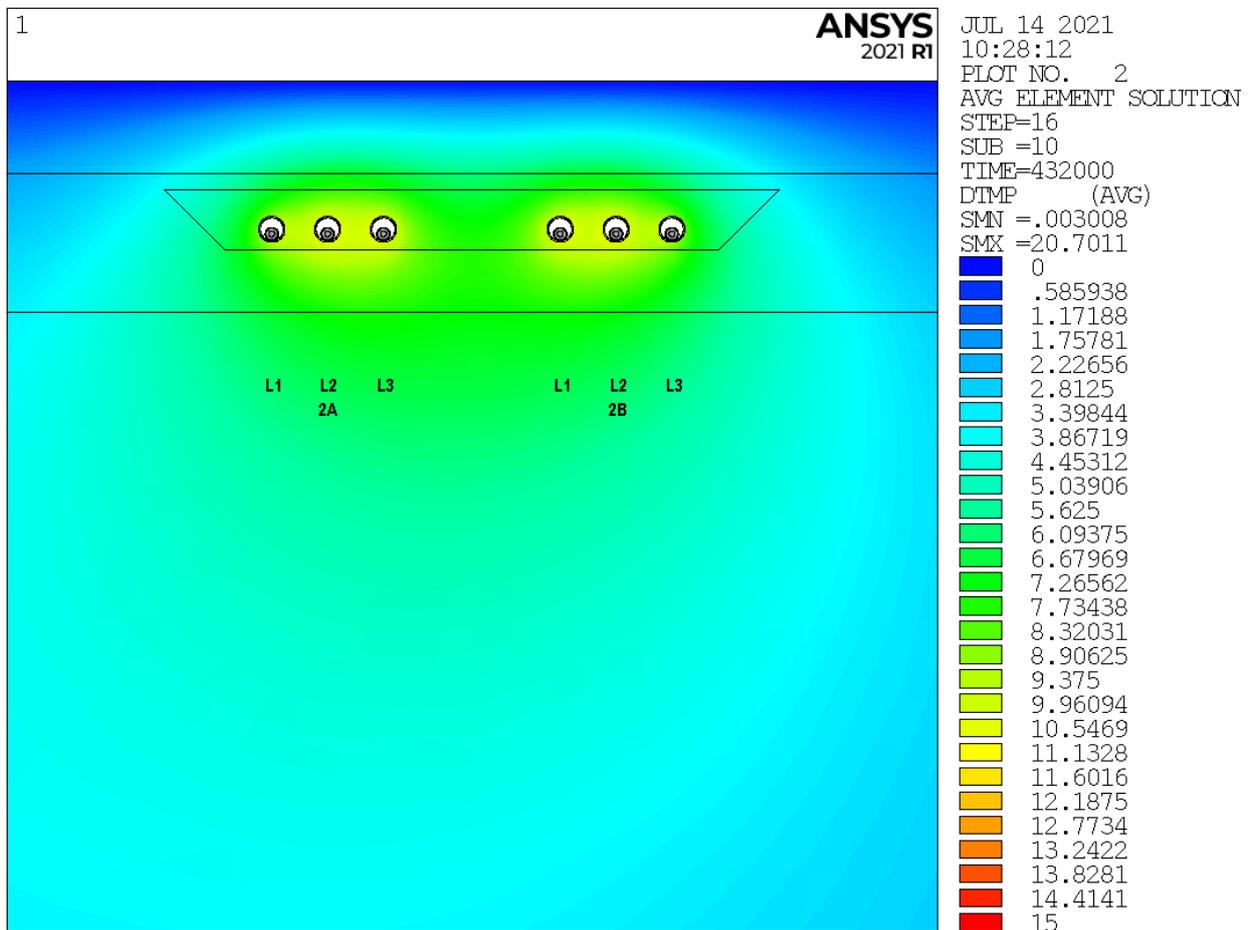
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	21,4	67,0	10,8	23,1	32,6	49,3	19,8	57,0	19,5	33,0	22,2	58,8
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,7	26,0	25,8	25,9	26,2	24,9	24,9	26,1	25,9	25,8	26,1	24,7
	Leiter	33,7	35,2	35,4	35,4	35,7	33,8	33,9	35,3	35,6	35,3	35,6	33,6
Verluste je Kabel	[W/m]	13,3	13,8	14,2	14,0	14,1	13,2	13,3	13,7	14,3	14,0	14,1	13,2



Erwärmung des Erdbodens, Detail Stromkreis 2 (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b**

Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

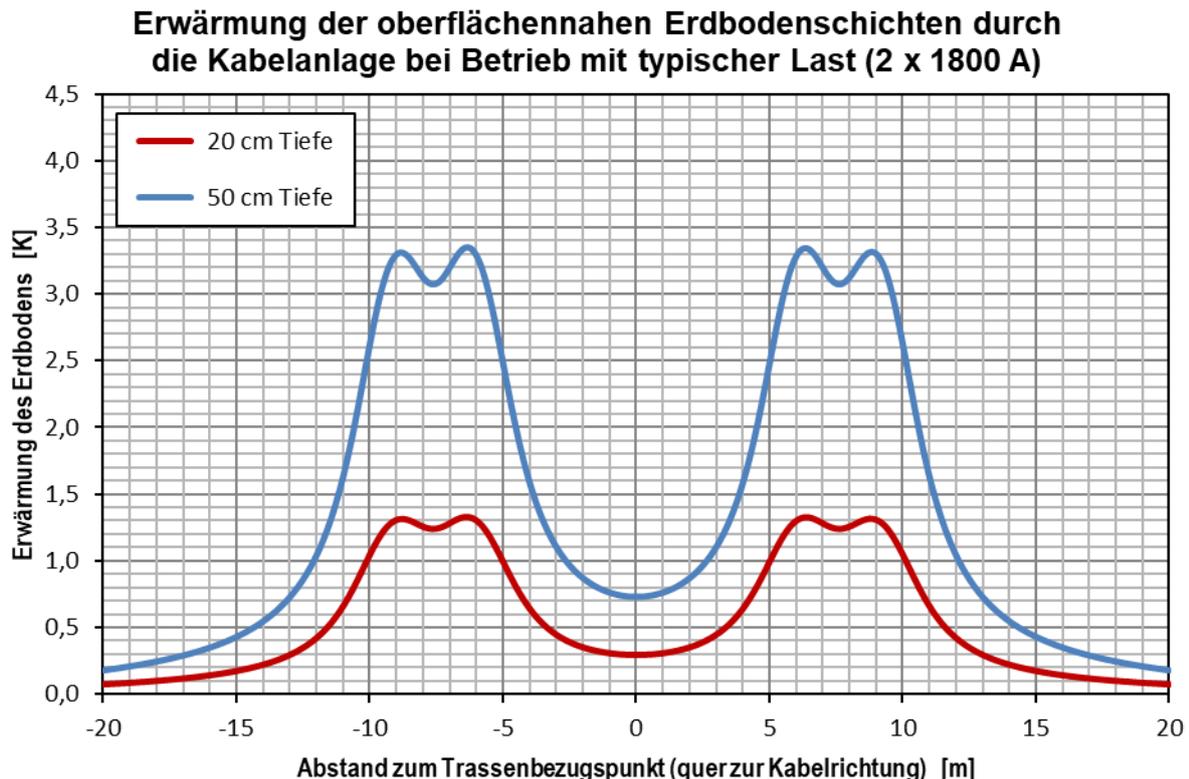
Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitte 1a, 1b):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	21,4	67,0	10,8	23,1	32,6	49,3	19,8	57,0	19,5	33,0	22,2	58,8
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,7	26,0	25,8	25,9	26,2	24,9	24,9	26,1	25,9	25,8	26,1	24,7
	Leiter	33,7	35,2	35,4	35,4	35,7	33,8	33,9	35,3	35,6	35,3	35,6	33,6
Verluste je Kabel	[W/m]	13,3	13,8	14,2	14,0	14,1	13,2	13,3	13,7	14,3	14,0	14,1	13,2

Maximale Erwärmung des Erdbodens in 0,2 m Tiefe unter GOK: 1,33 K

Maximale Erwärmung des Erdbodens in 0,5 m Tiefe unter GOK: 3,35 K



**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitt 2**

Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:

15 °C

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:

1,0 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 1,8 m), feucht/ trocken:

0,7 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,8 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:

0,5 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):

0,5 Km/W

Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:

0,67 Km/W / 1,4 Km/W

Legetiefe (Rohrachse):

1,60 m

Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):

0,60 m

Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):

1,90 m

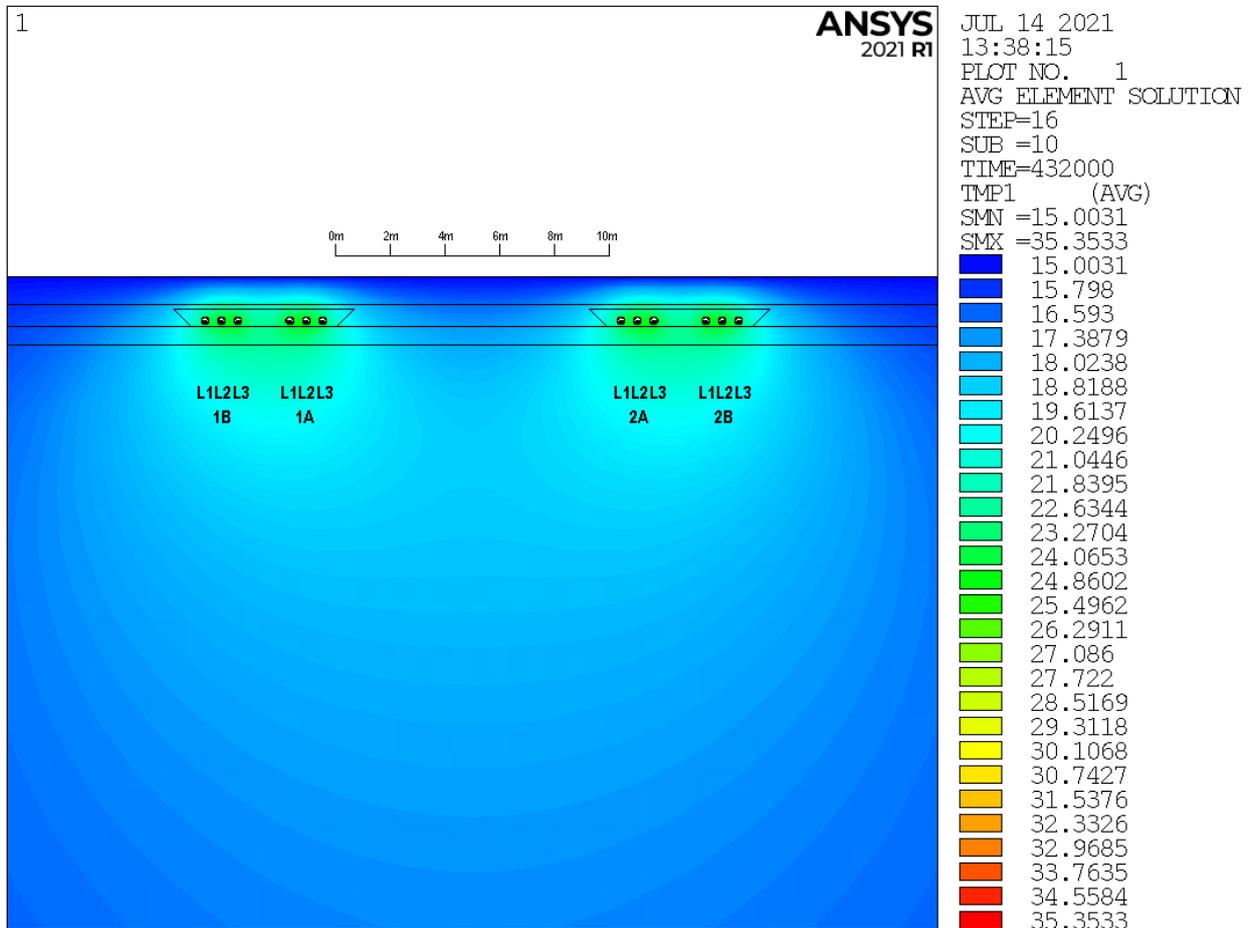
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):

10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,6	25,8	24,6	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,4	34,7	35,3	35,1	35,3	33,5	33,7	34,8	35,4	35,0	35,2	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,2	13,5	14,5	14,1	14,1	13,1	13,3	13,5	14,4	14,2	14,1	13,0



Temperaturverteilung im Erdboden, Übersicht (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitt 2**

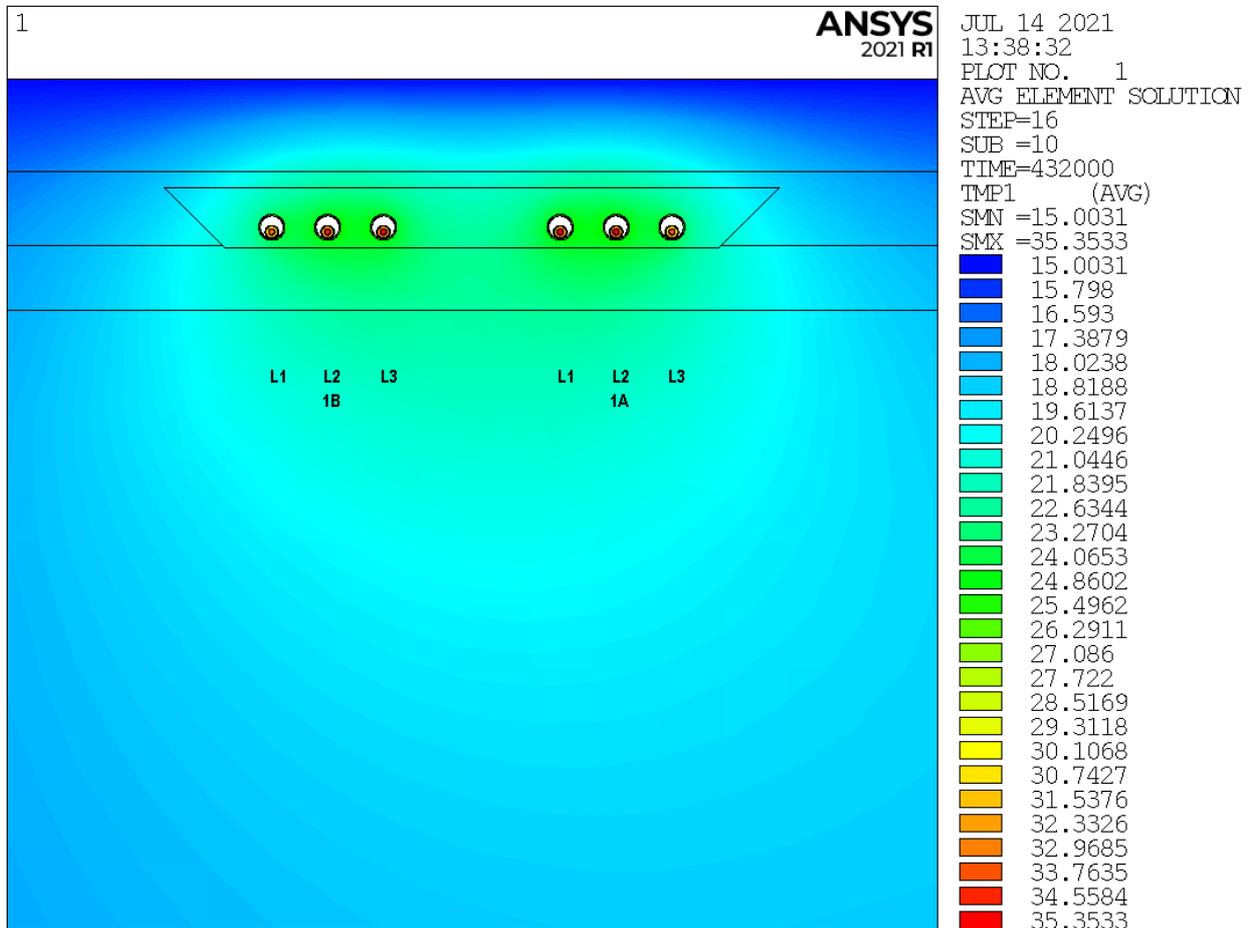
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 1,8 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,8 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,5 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,6	25,8	24,6	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,4	34,7	35,3	35,1	35,3	33,5	33,7	34,8	35,4	35,0	35,2	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,2	13,5	14,5	14,1	14,1	13,1	13,3	13,5	14,4	14,2	14,1	13,0



Temperaturverteilung im Erdboden, Detail Stromkreis 1 (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitt 2**

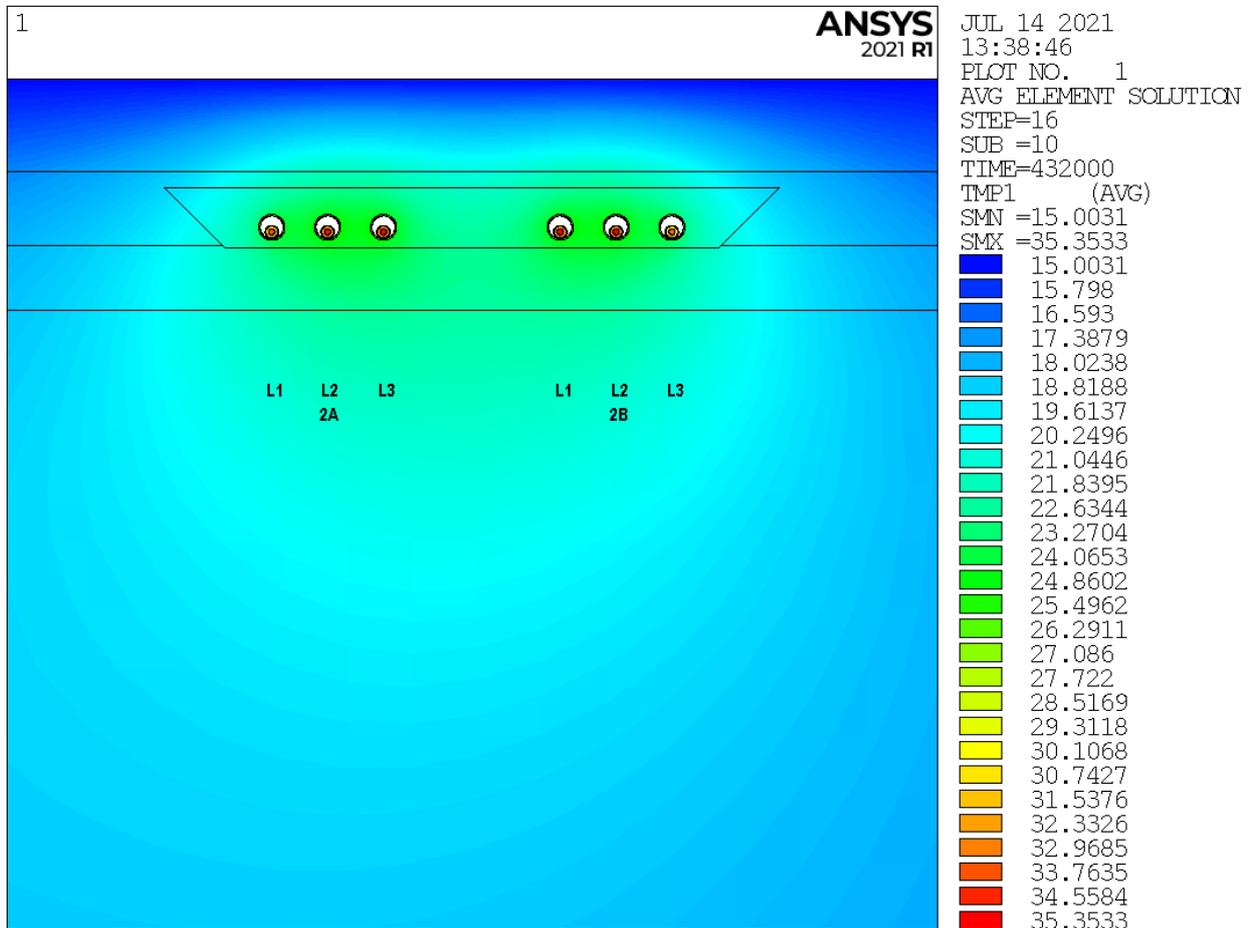
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 1,8 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,8 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,5 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,6	25,8	24,6	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,4	34,7	35,3	35,1	35,3	33,5	33,7	34,8	35,4	35,0	35,2	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,2	13,5	14,5	14,1	14,1	13,1	13,3	13,5	14,4	14,2	14,1	13,0



Temperaturverteilung im Erdboden, Detail Stromkreis 2 (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitt 2**

Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:

15 °C

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($0 \leq H \leq 1,0$ m), feucht/ trocken:

1,0 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,0$ m < $H \leq 1,8$ m), feucht/ trocken:

0,7 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,8$ m < $H \leq 2,5$ m), feucht/ trocken:

0,5 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($H > 2,5$ m):

0,5 Km/W

Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:

0,67 Km/W / 1,4 Km/W

Legetiefe (Rohrachse):

1,60 m

Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):

0,60 m

Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):

1,90 m

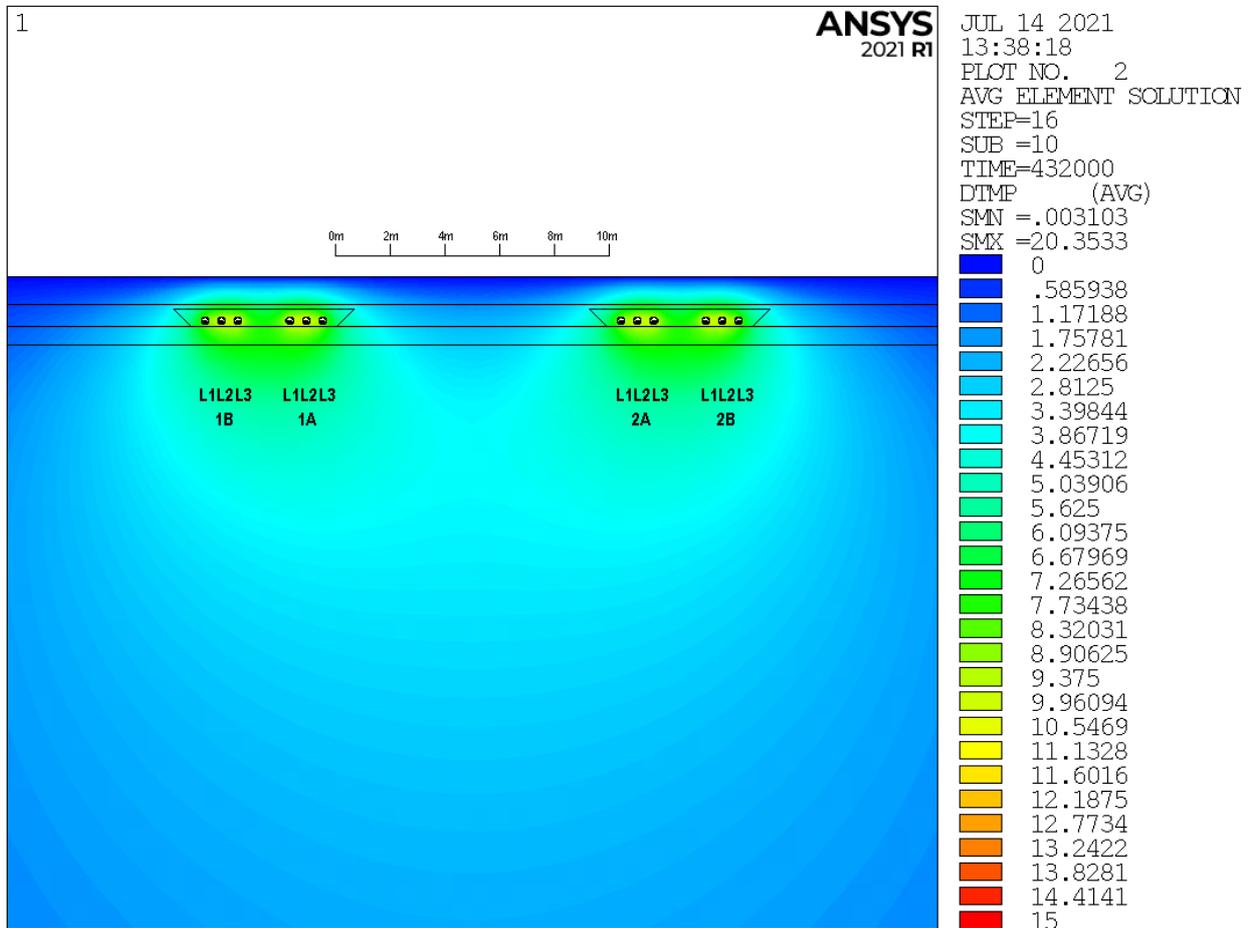
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):

10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,6	25,8	24,6	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,4	34,7	35,3	35,1	35,3	33,5	33,7	34,8	35,4	35,0	35,2	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,2	13,5	14,5	14,1	14,1	13,1	13,3	13,5	14,4	14,2	14,1	13,0



Erwärmung des Erdbodens, Übersicht (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitt 2**

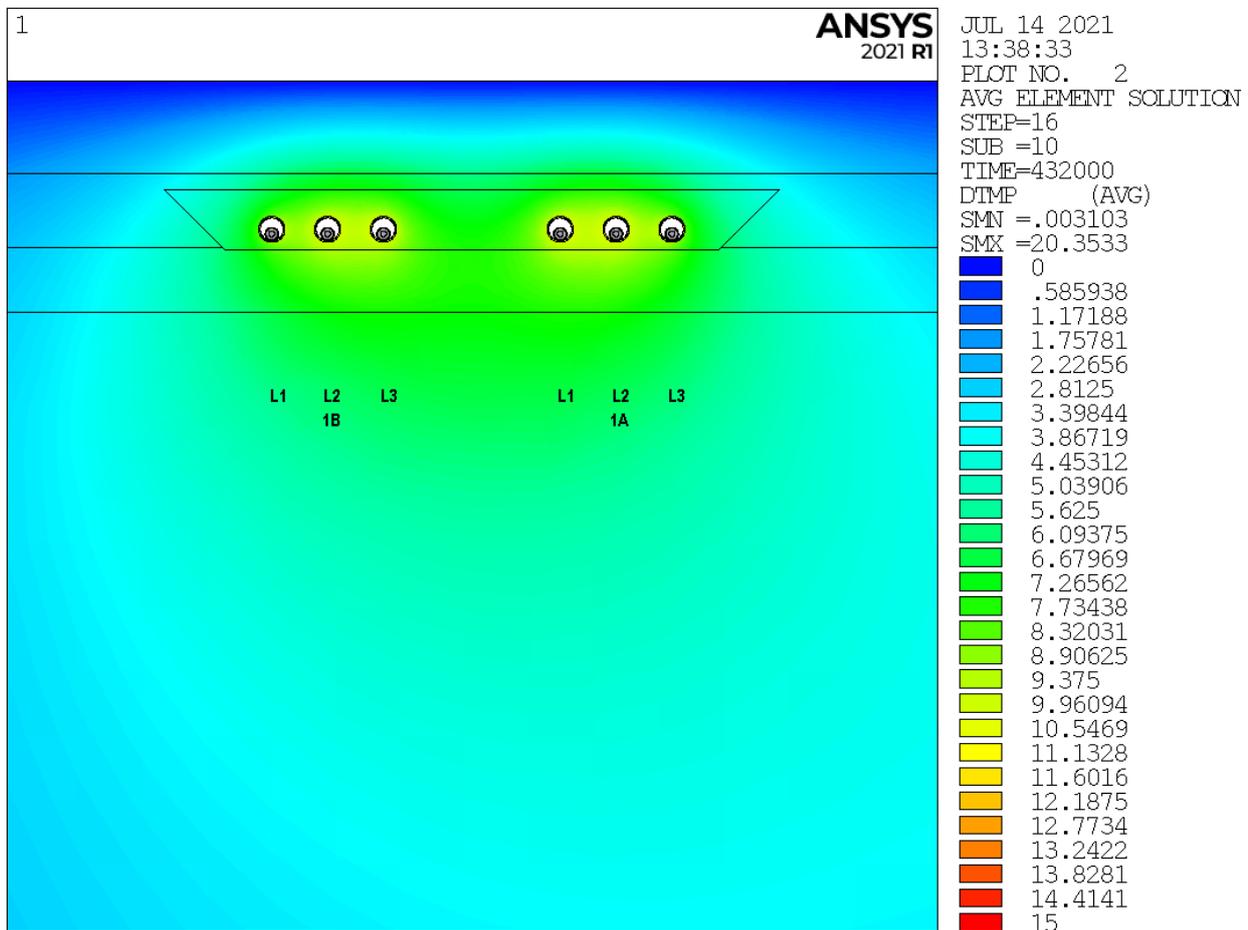
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 1,8 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,8 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,5 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,6	25,8	24,6	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,4	34,7	35,3	35,1	35,3	33,5	33,7	34,8	35,4	35,0	35,2	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,2	13,5	14,5	14,1	14,1	13,1	13,3	13,5	14,4	14,2	14,1	13,0



Erwärmung des Erdbodens, Detail Stromkreis 1 (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitt 2**

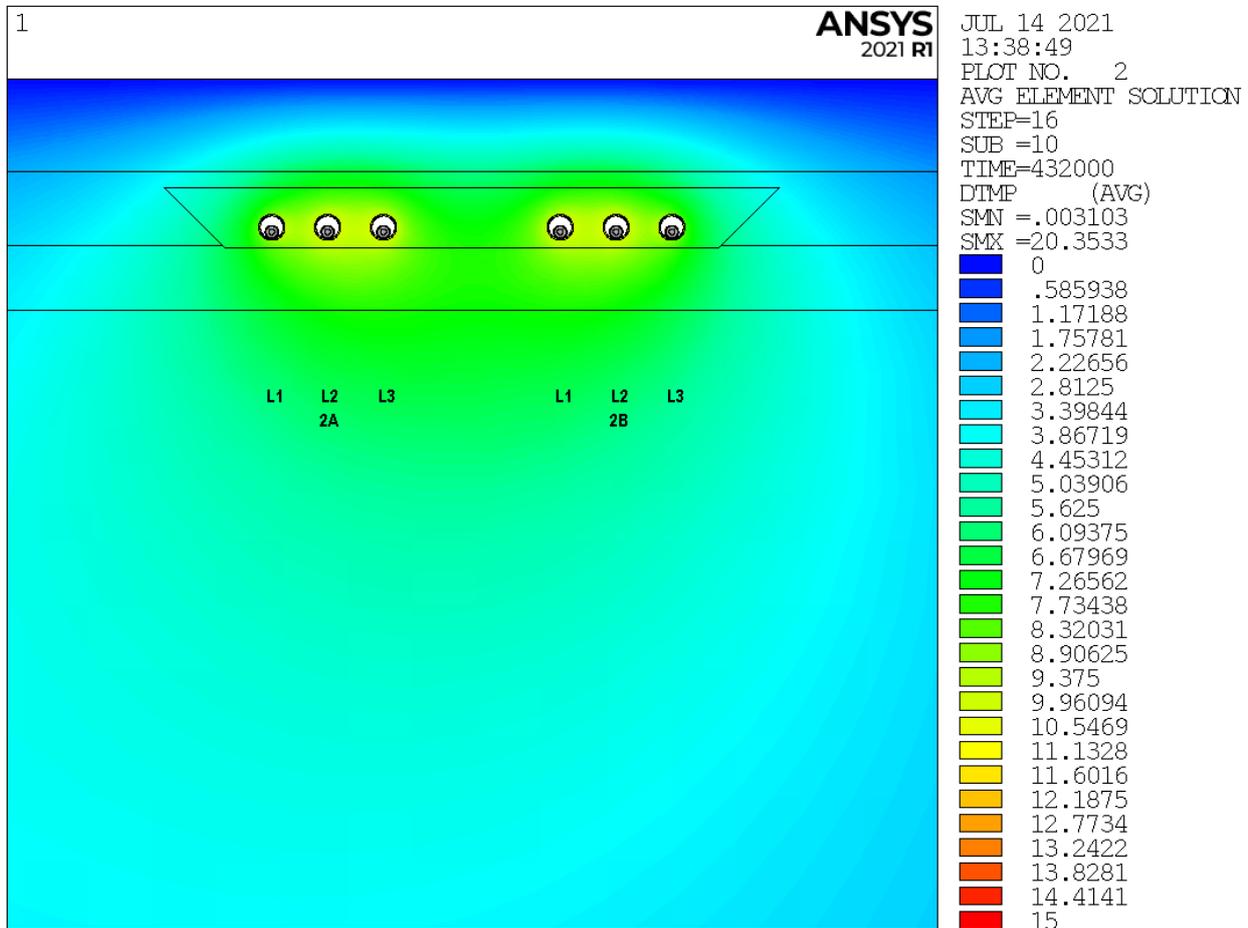
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 1,8 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,8 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,5 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,6	25,8	24,6	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,4	34,7	35,3	35,1	35,3	33,5	33,7	34,8	35,4	35,0	35,2	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,2	13,5	14,5	14,1	14,1	13,1	13,3	13,5	14,4	14,2	14,1	13,0



Erwärmung des Erdbodens, Detail Stromkreis 2 (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitt 2**

Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:

15 °C

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($0 \leq H \leq 1,0$ m), feucht/ trocken:

1,0 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,0 \text{ m} < H \leq 1,8$ m), feucht/ trocken:

0,7 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,8 \text{ m} < H \leq 2,5$ m), feucht/ trocken:

0,5 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($H > 2,5$ m):

0,5 Km/W

Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:

0,67 Km/W / 1,4 Km/W

Legetiefe (Rohrachse):

1,60 m

Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):

0,60 m

Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):

1,90 m

Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):

10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0 · I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,6	25,8	24,6	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,4	34,7	35,3	35,1	35,3	33,5	33,7	34,8	35,4	35,0	35,2	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,2	13,5	14,5	14,1	14,1	13,1	13,3	13,5	14,4	14,2	14,1	13,0

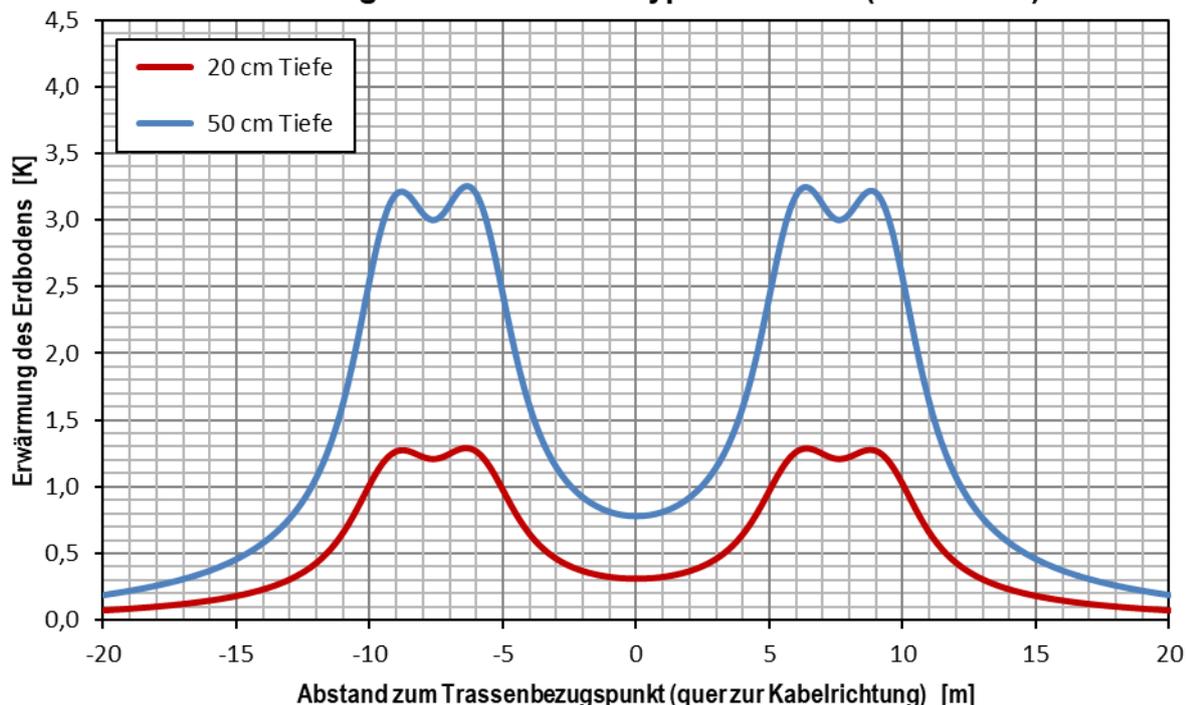
Maximale Erwärmung des Erdbodens in 0,2 m Tiefe unter GOK:

1,29 K

Maximale Erwärmung des Erdbodens in 0,5 m Tiefe unter GOK:

3,26 K

Erwärmung der oberflächennahen Erdbodenschichten durch die Kabelanlage bei Betrieb mit typischer Last (2 x 1800 A)



**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitt 3**

Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:

15 °C

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:

1,0 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 1,7 m), feucht/ trocken:

0,7 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,7 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:

0,5 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):

0,5 Km/W

Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:

0,67 Km/W / 1,4 Km/W

Legetiefe (Rohrachse):

1,60 m

Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):

0,60 m

Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):

1,90 m

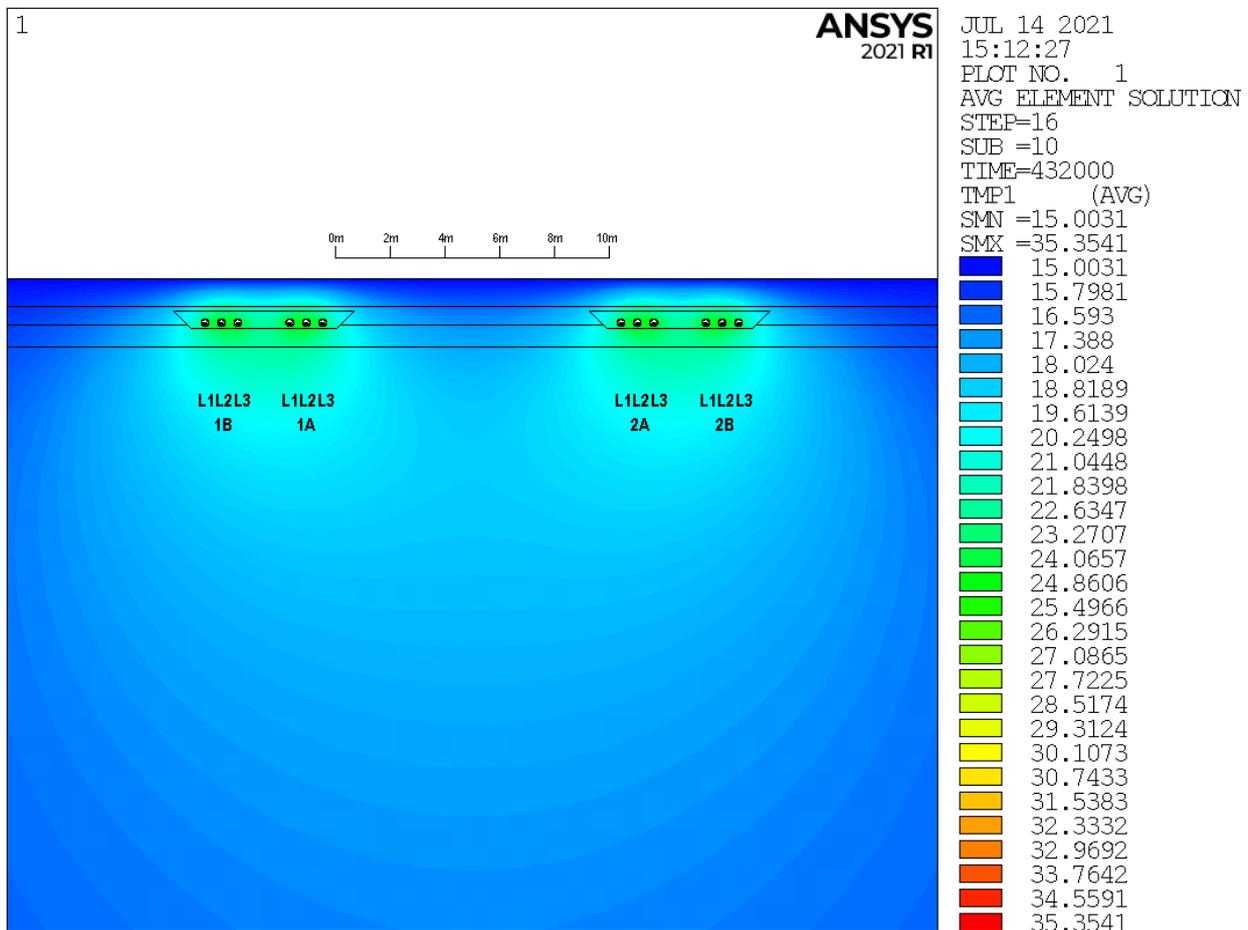
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):

10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 3):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	67,0	10,8	21,4	32,6	49,3	23,1	57,0	19,5	19,8	22,2	58,8	33,0
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,5	25,8	24,5	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,6	34,7	35,1	35,1	35,4	33,4	33,7	34,8	35,2	34,9	35,3	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,5	13,4	14,2	14,0	14,2	13,1	13,5	13,5	14,3	14,0	14,3	13,0



Temperaturverteilung im Erdboden, Übersicht (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitt 3**

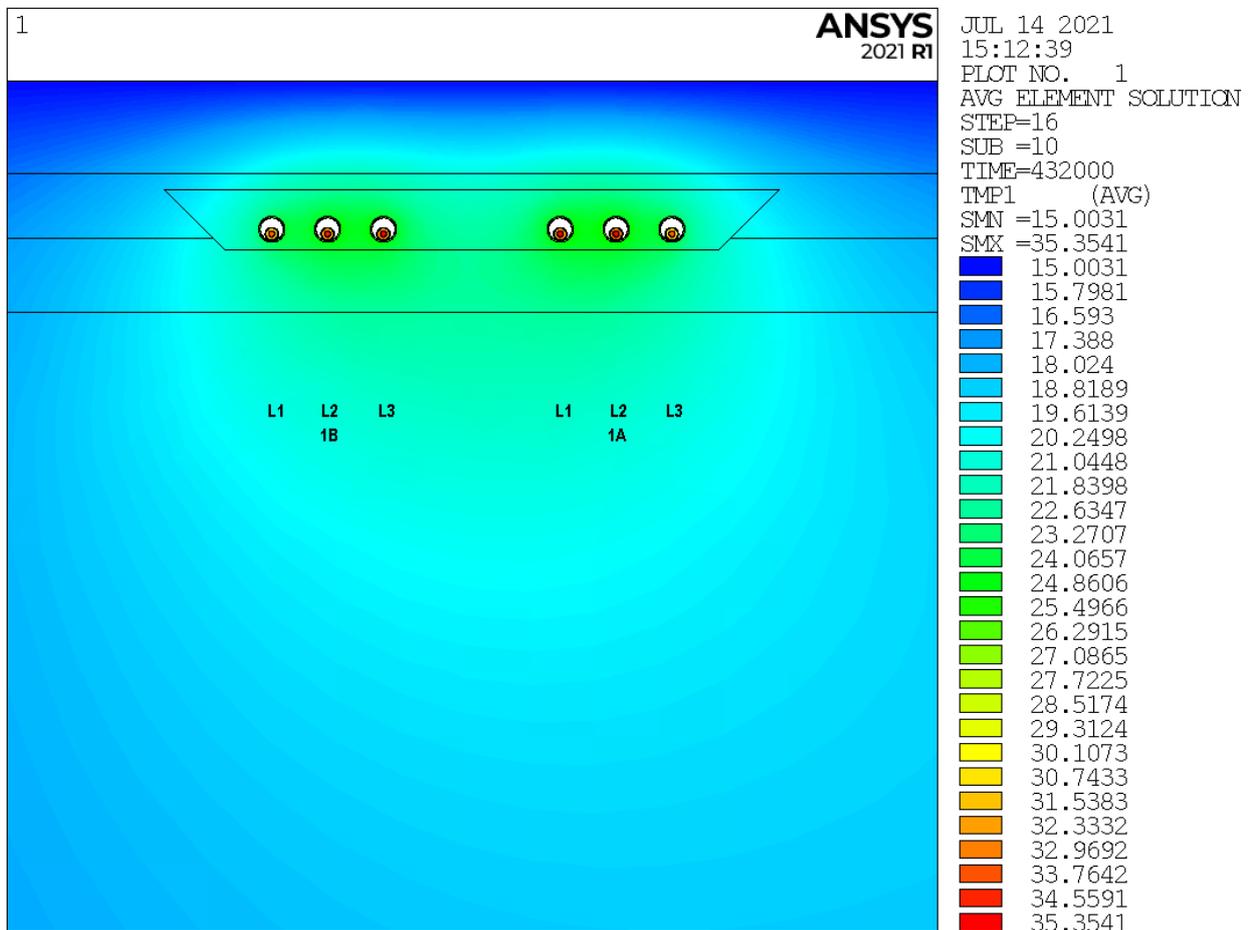
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 1,7 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,7 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,5 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 3):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	67,0	10,8	21,4	32,6	49,3	23,1	57,0	19,5	19,8	22,2	58,8	33,0
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,5	25,8	24,5	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,6	34,7	35,1	35,1	35,4	33,4	33,7	34,8	35,2	34,9	35,3	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,5	13,4	14,2	14,0	14,2	13,1	13,5	13,5	14,3	14,0	14,3	13,0



Temperaturverteilung im Erdboden, Detail Stromkreis 1 (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitt 3**

Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:

15 °C

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:

1,0 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 1,7 m), feucht/ trocken:

0,7 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,7 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:

0,5 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):

0,5 Km/W

Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:

0,67 Km/W / 1,4 Km/W

Legetiefe (Rohrachse):

1,60 m

Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):

0,60 m

Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):

1,90 m

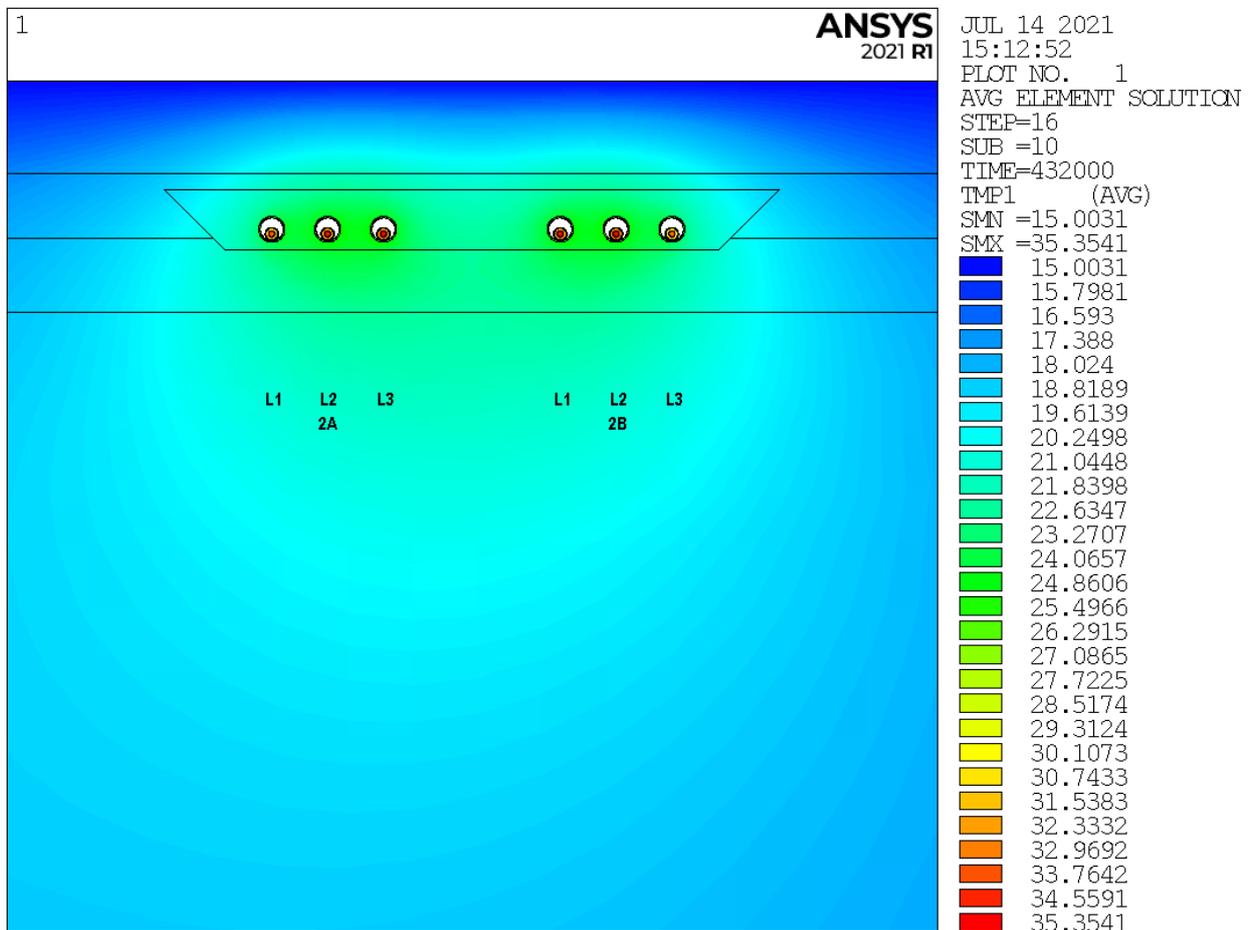
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):

10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 3):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	67,0	10,8	21,4	32,6	49,3	23,1	57,0	19,5	19,8	22,2	58,8	33,0
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,5	25,8	24,5	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,6	34,7	35,1	35,1	35,4	33,4	33,7	34,8	35,2	34,9	35,3	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,5	13,4	14,2	14,0	14,2	13,1	13,5	13,5	14,3	14,0	14,3	13,0



Temperaturverteilung im Erdboden, Detail Stromkreis 2 (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitt 3**

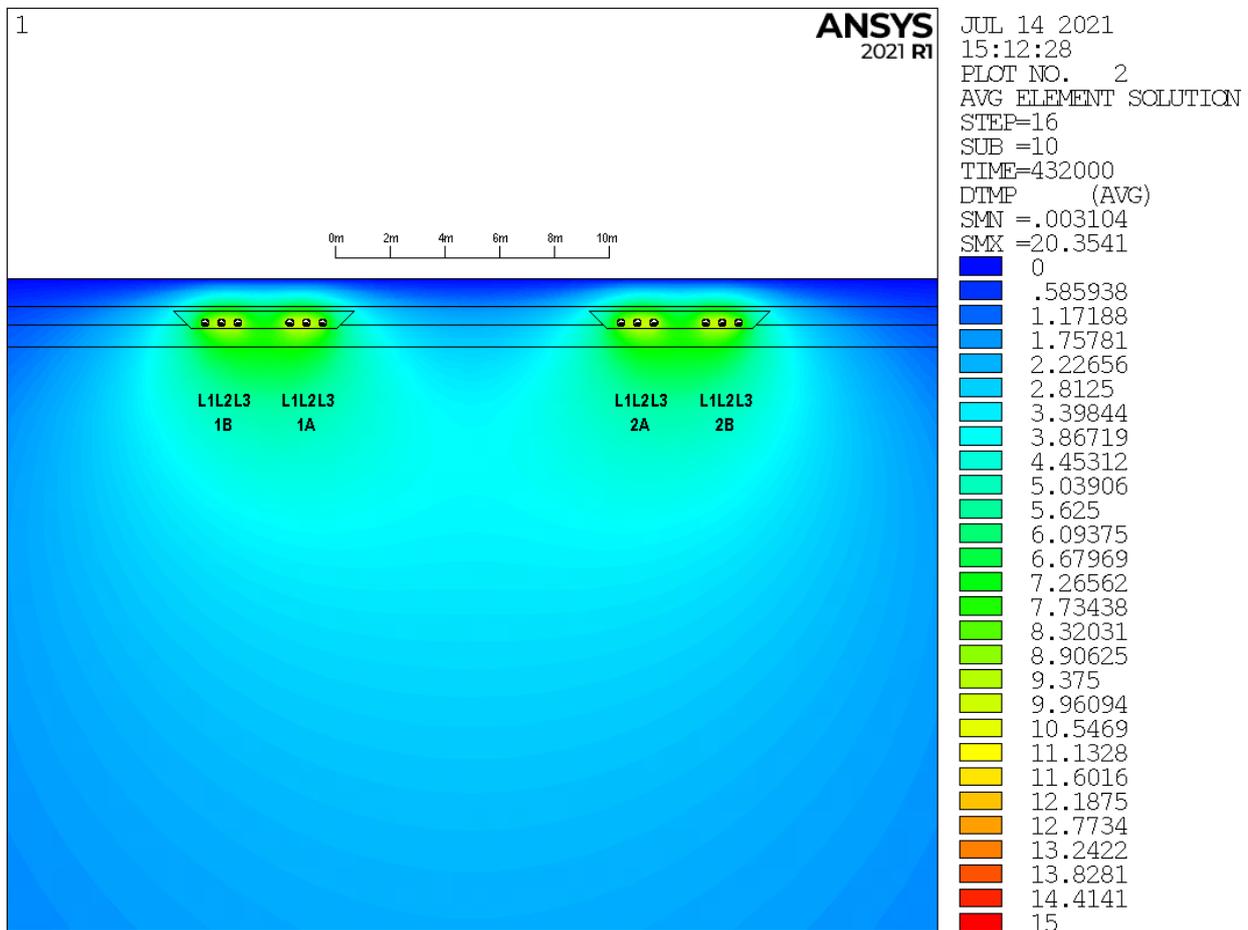
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 1,7 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,7 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,5 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 3):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	67,0	10,8	21,4	32,6	49,3	23,1	57,0	19,5	19,8	22,2	58,8	33,0
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,5	25,8	24,5	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,6	34,7	35,1	35,1	35,4	33,4	33,7	34,8	35,2	34,9	35,3	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,5	13,4	14,2	14,0	14,2	13,1	13,5	13,5	14,3	14,0	14,3	13,0



Erwärmung des Erdbodens, Übersicht (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitt 3**

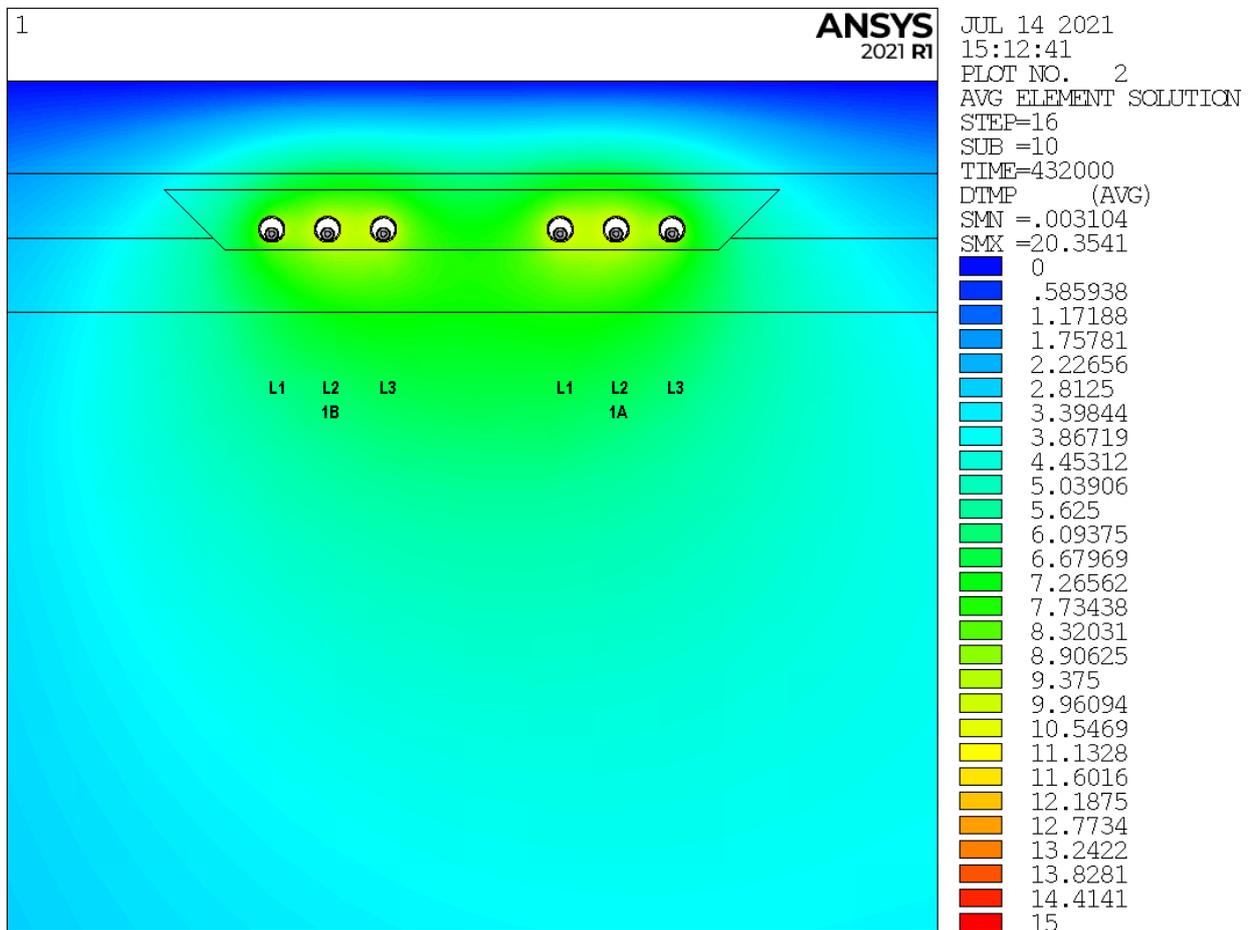
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 1,7 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,7 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,5 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 3):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	67,0	10,8	21,4	32,6	49,3	23,1	57,0	19,5	19,8	22,2	58,8	33,0
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,5	25,8	24,5	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,6	34,7	35,1	35,1	35,4	33,4	33,7	34,8	35,2	34,9	35,3	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,5	13,4	14,2	14,0	14,2	13,1	13,5	13,5	14,3	14,0	14,3	13,0



Erwärmung des Erdbodens, Detail Stromkreis 1 (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitt 3**

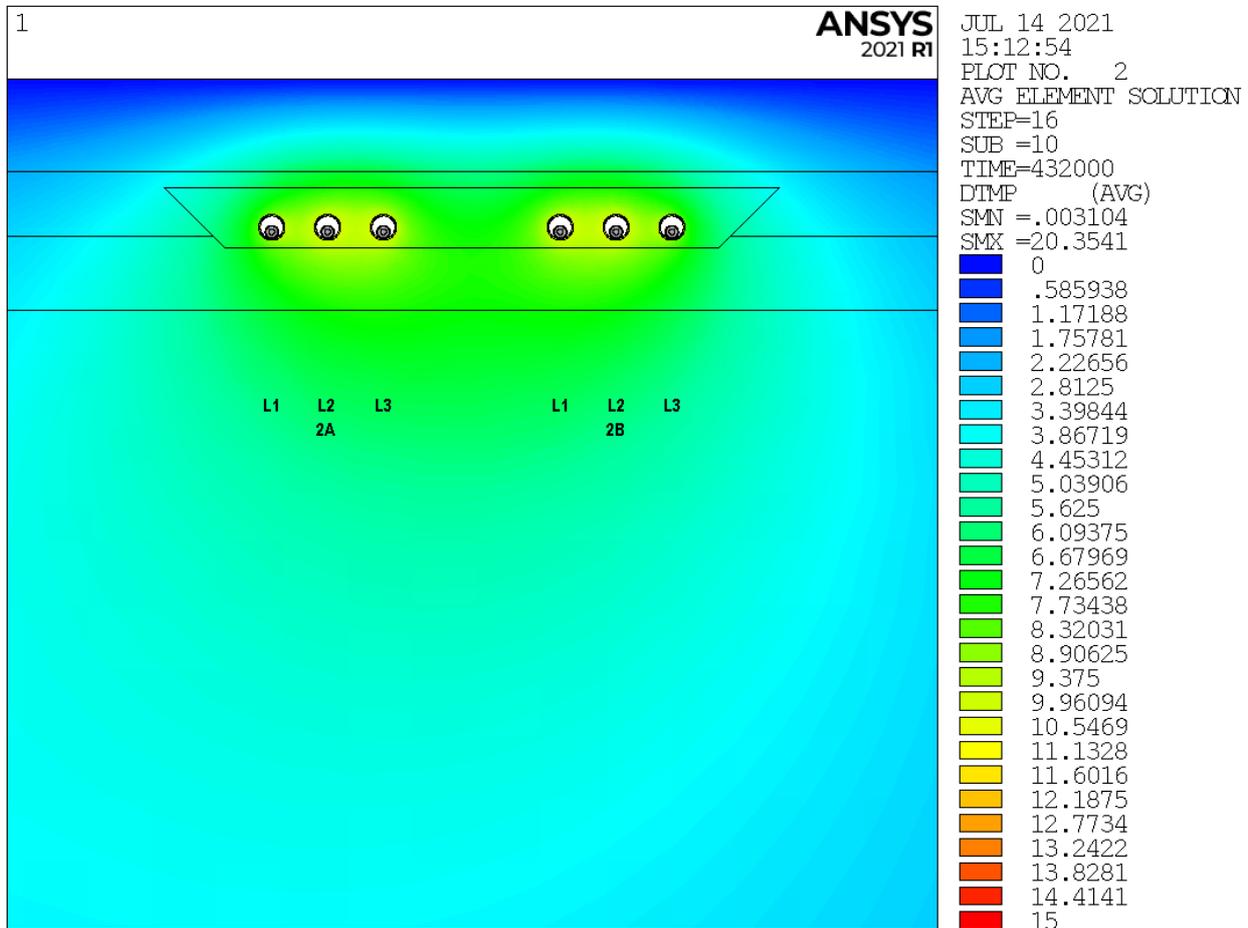
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:	15 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 1,7 m), feucht/ trocken:	0,7 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,7 m < H ≤ 2,5 m), feucht/ trocken:	0,5 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 2,5 m):	0,5 Km/W
Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:	0,67 Km/W / 1,4 Km/W
Legetiefe (Rohrachse):	1,60 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,60 m
Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):	1,90 m
Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):	10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 3):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	67,0	10,8	21,4	32,6	49,3	23,1	57,0	19,5	19,8	22,2	58,8	33,0
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,5	25,8	24,5	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,6	34,7	35,1	35,1	35,4	33,4	33,7	34,8	35,2	34,9	35,3	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,5	13,4	14,2	14,0	14,2	13,1	13,5	13,5	14,3	14,0	14,3	13,0



Erwärmung des Erdbodens, Detail Stromkreis 2 (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Regelprofil in offener Bauweise, Standard-Legetiefe, mit thermisch stabiler Bettung
Cross-Bonding-Teilabschnitt 3**

Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 280 x 16,6 mm (SDR17)

Bodentemperatur:

15 °C

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($0 \leq H \leq 1,0$ m), feucht/ trocken:

1,0 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,0 \text{ m} < H \leq 1,7$ m), feucht/ trocken:

0,7 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,7 \text{ m} < H \leq 2,5$ m), feucht/ trocken:

0,5 Km/W / 2,5 Km/W

Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($H > 2,5$ m):

0,5 Km/W

Spezifischer Wärmewiderstand Bettungsbereich, feucht/ trocken:

0,67 Km/W / 1,4 Km/W

Legetiefe (Rohrachse):

1,60 m

Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):

0,60 m

Achsenabstand der Teilsysteme innerhalb des gleichen Stromkreises („b“):

1,90 m

Achsenabstand der Teilsysteme zwischen beiden Stromkreisen („c“):

10,90 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0 · I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 3):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	67,0	10,8	21,4	32,6	49,3	23,1	57,0	19,5	19,8	22,2	58,8	33,0
Max. Temperatur [°C]	Rohr	24,4	25,6	25,5	25,5	25,8	24,5	24,6	25,7	25,6	25,5	25,7	24,4
	Leiter	33,6	34,7	35,1	35,1	35,4	33,4	33,7	34,8	35,2	34,9	35,3	33,3
Verluste je Kabel	[W/m]	13,5	13,4	14,2	14,0	14,2	13,1	13,5	13,5	14,3	14,0	14,3	13,0

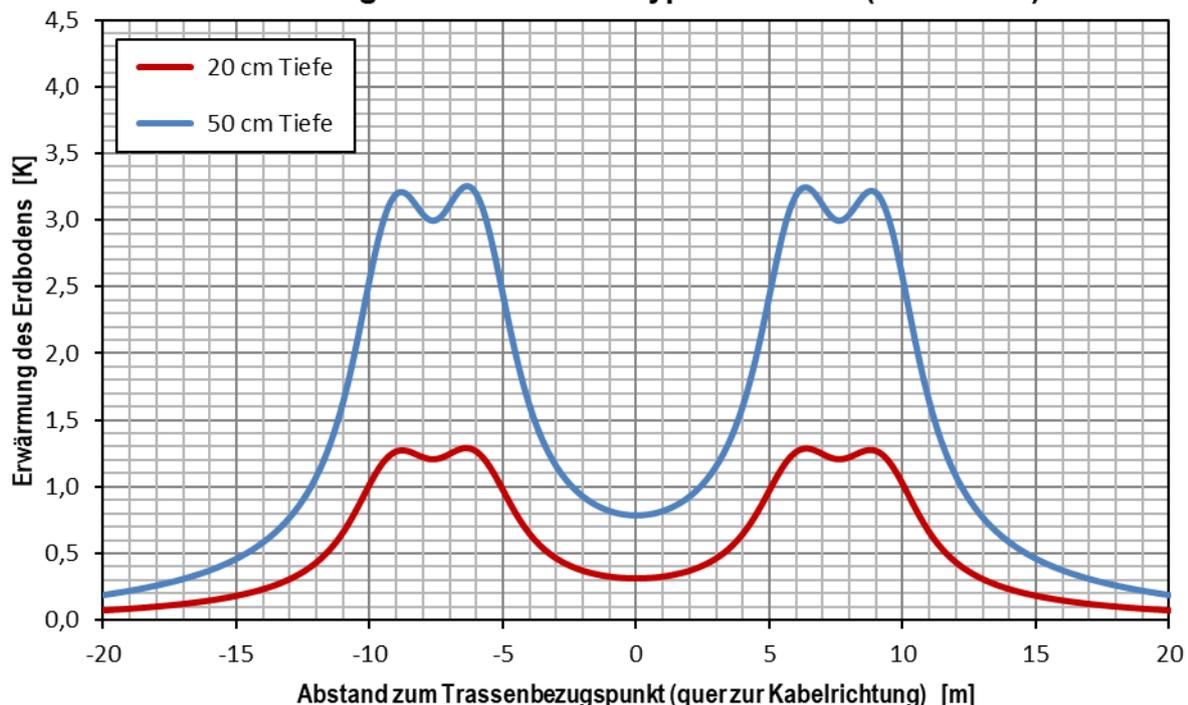
Maximale Erwärmung des Erdbodens in 0,2 m Tiefe unter GOK:

1,29 K

Maximale Erwärmung des Erdbodens in 0,5 m Tiefe unter GOK:

3,25 K

Erwärmung der oberflächennahen Erdbodenschichten durch die Kabelanlage bei Betrieb mit typischer Last (2 x 1800 A)



**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 01: Bereich unter Deich nahe Startschacht**

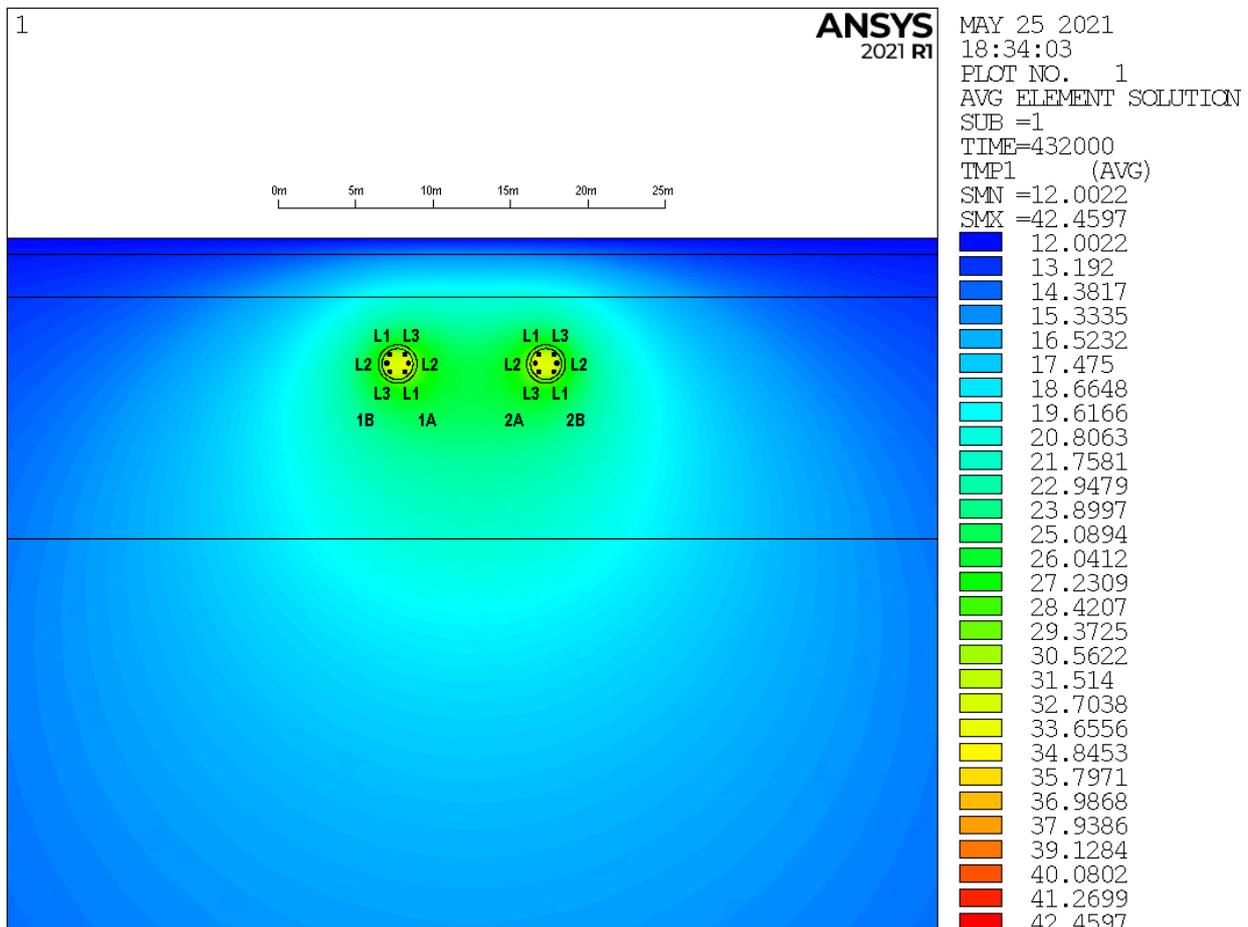
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 3,8 m):	0,7 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (3,8 m < H ≤ 19,5 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 19,5 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,15 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,07 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,0	33,9	34,1	34,6	34,8	33,5	33,5	34,7	34,7	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	42,3	42,4	40,7	40,8	42,0	42,5	41,7	41,7	40,1
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,3	12,0	11,8	11,7	10,9



Temperaturverteilung im Erdboden, Übersicht (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 01: Bereich unter Deich nahe Startschacht**

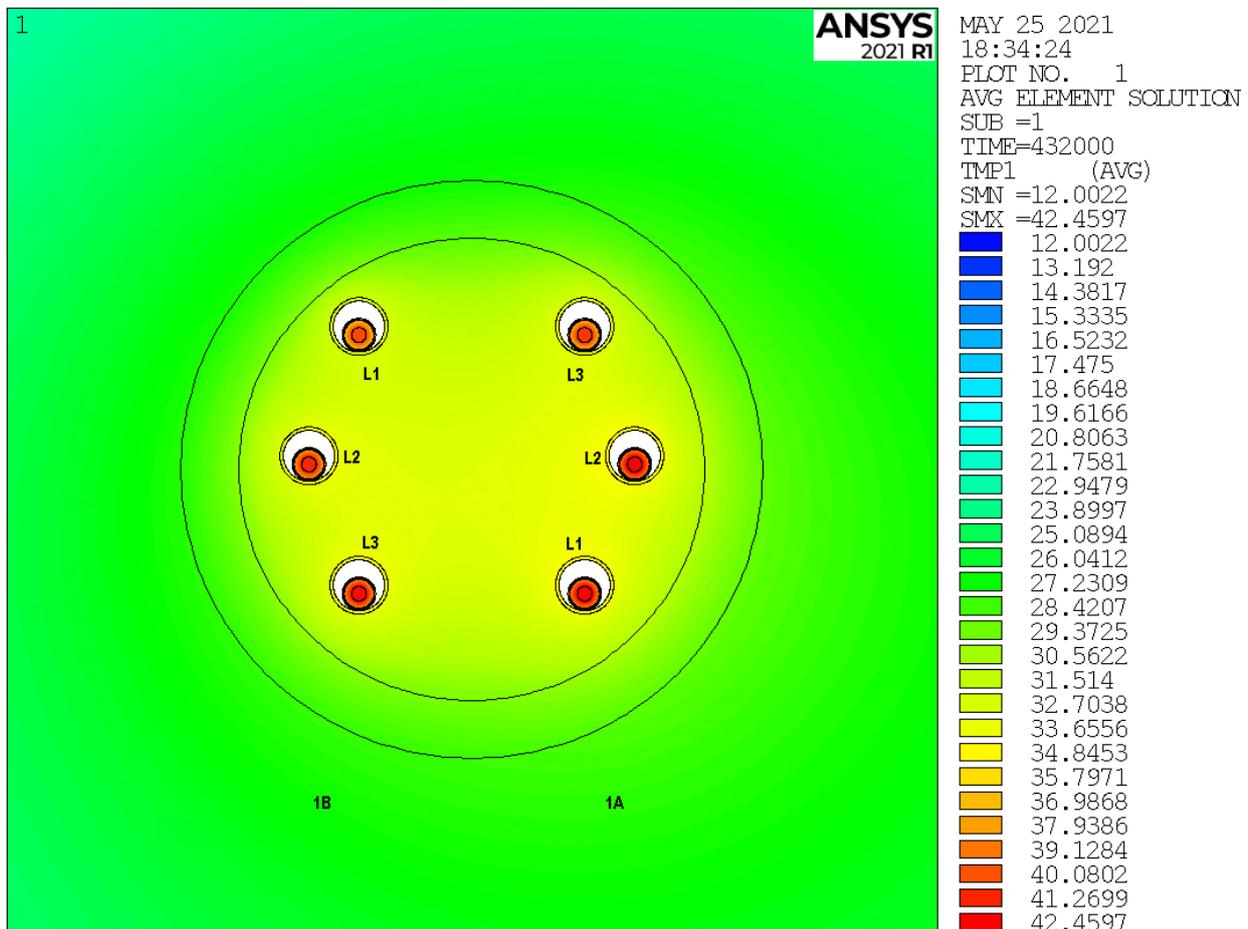
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 3,8 m):	0,7 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (3,8 m < H ≤ 19,5 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 19,5 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,15 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,07 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,0	33,9	34,1	34,6	34,8	33,5	33,5	34,7	34,7	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	42,3	42,4	40,7	40,8	42,0	42,5	41,7	41,7	40,1
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,3	12,0	11,8	11,7	10,9



Temperaturverteilung im Erdboden, Detail Stromkreis 1 (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 01: Bereich unter Deich nahe Startschacht**

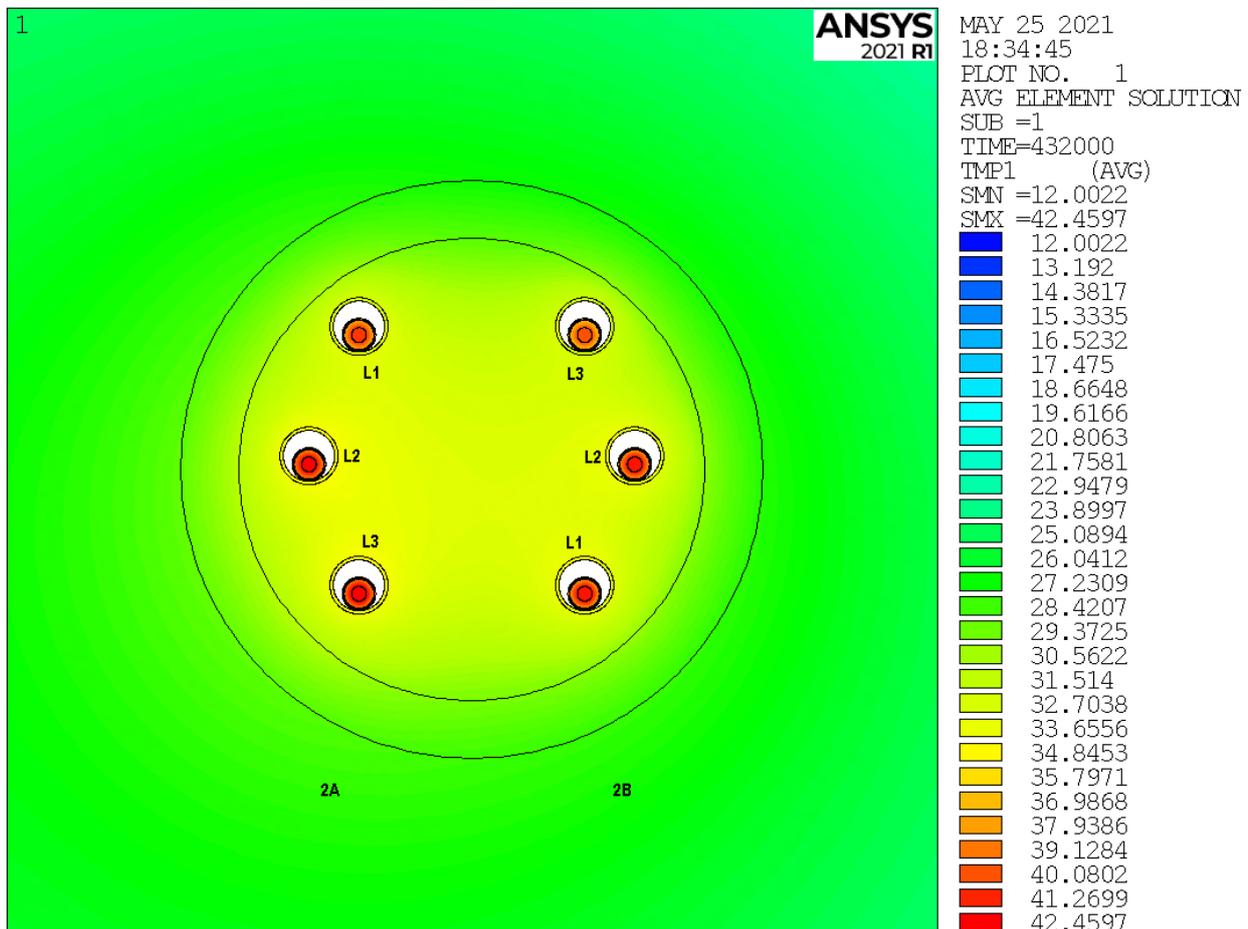
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 3,8 m):	0,7 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (3,8 m < H ≤ 19,5 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 19,5 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,15 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,07 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,0	33,9	34,1	34,6	34,8	33,5	33,5	34,7	34,7	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	42,3	42,4	40,7	40,8	42,0	42,5	41,7	41,7	40,1
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,3	12,0	11,8	11,7	10,9



Temperaturverteilung im Erdboden, Detail Stromkreis 2 (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 01: Bereich unter Deich nahe Startschacht**

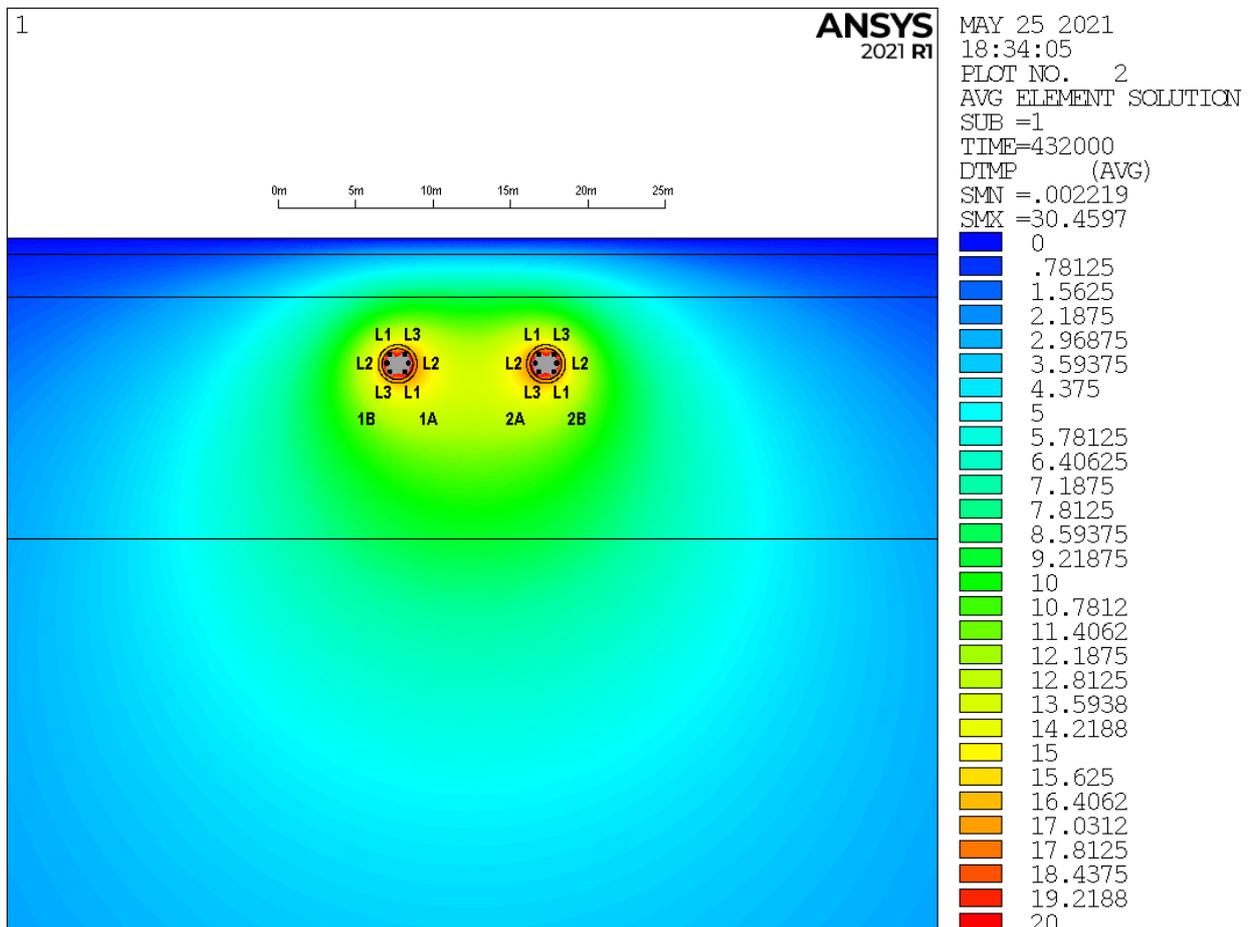
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 3,8 m):	0,7 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (3,8 m < H ≤ 19,5 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 19,5 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,15 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,07 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,0	33,9	34,1	34,6	34,8	33,5	33,5	34,7	34,7	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	42,3	42,4	40,7	40,8	42,0	42,5	41,7	41,7	40,1
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,3	12,0	11,8	11,7	10,9



Erwärmung des Erdbodens, Übersicht (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 01: Bereich unter Deich nahe Startschacht**

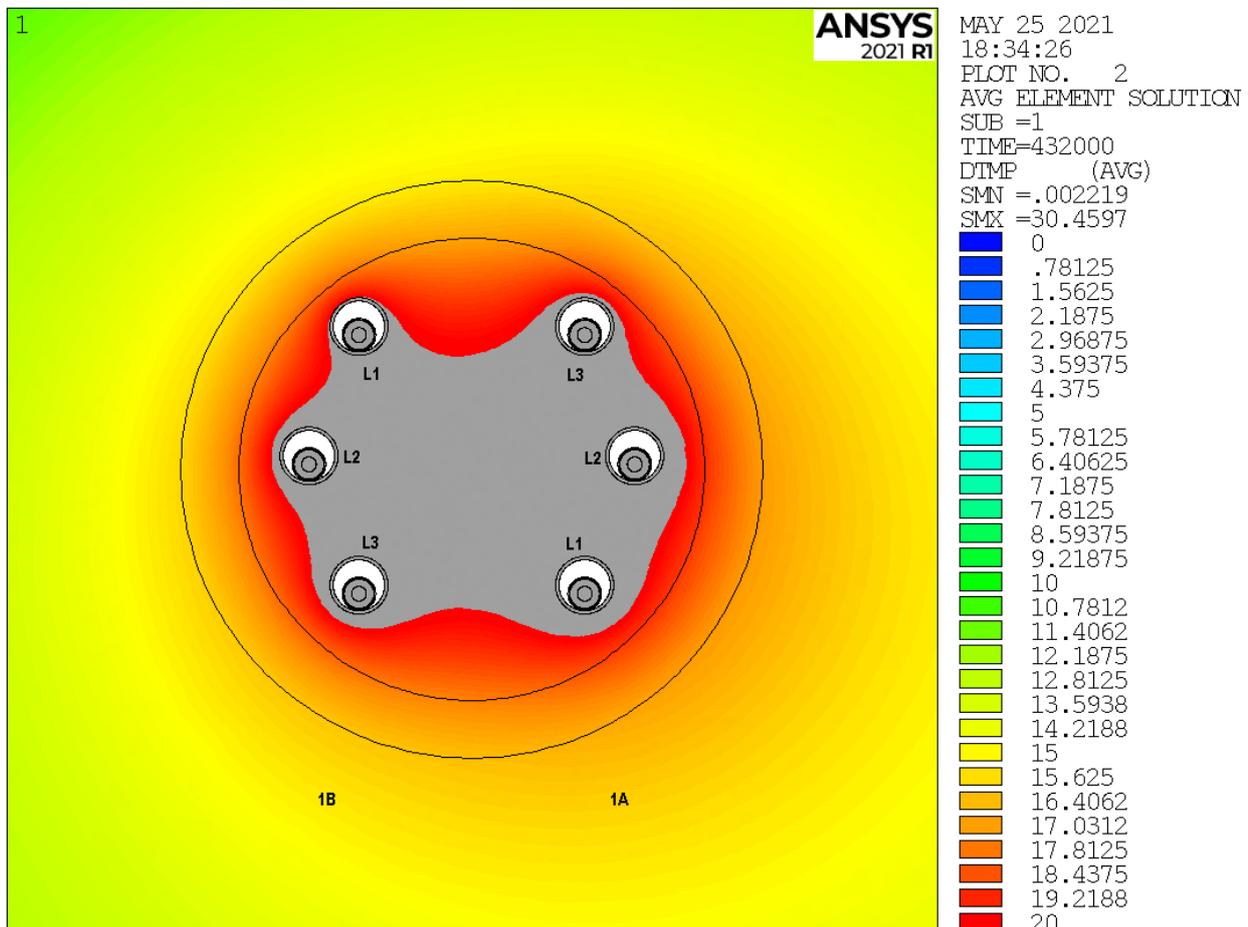
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 3,8 m):	0,7 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (3,8 m < H ≤ 19,5 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 19,5 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,15 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,07 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,0	33,9	34,1	34,6	34,8	33,5	33,5	34,7	34,7	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	42,3	42,4	40,7	40,8	42,0	42,5	41,7	41,7	40,1
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,3	12,0	11,8	11,7	10,9



Erwärmung des Erdbodens, Detail Stromkreis 1 (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 01: Bereich unter Deich nahe Startschacht**

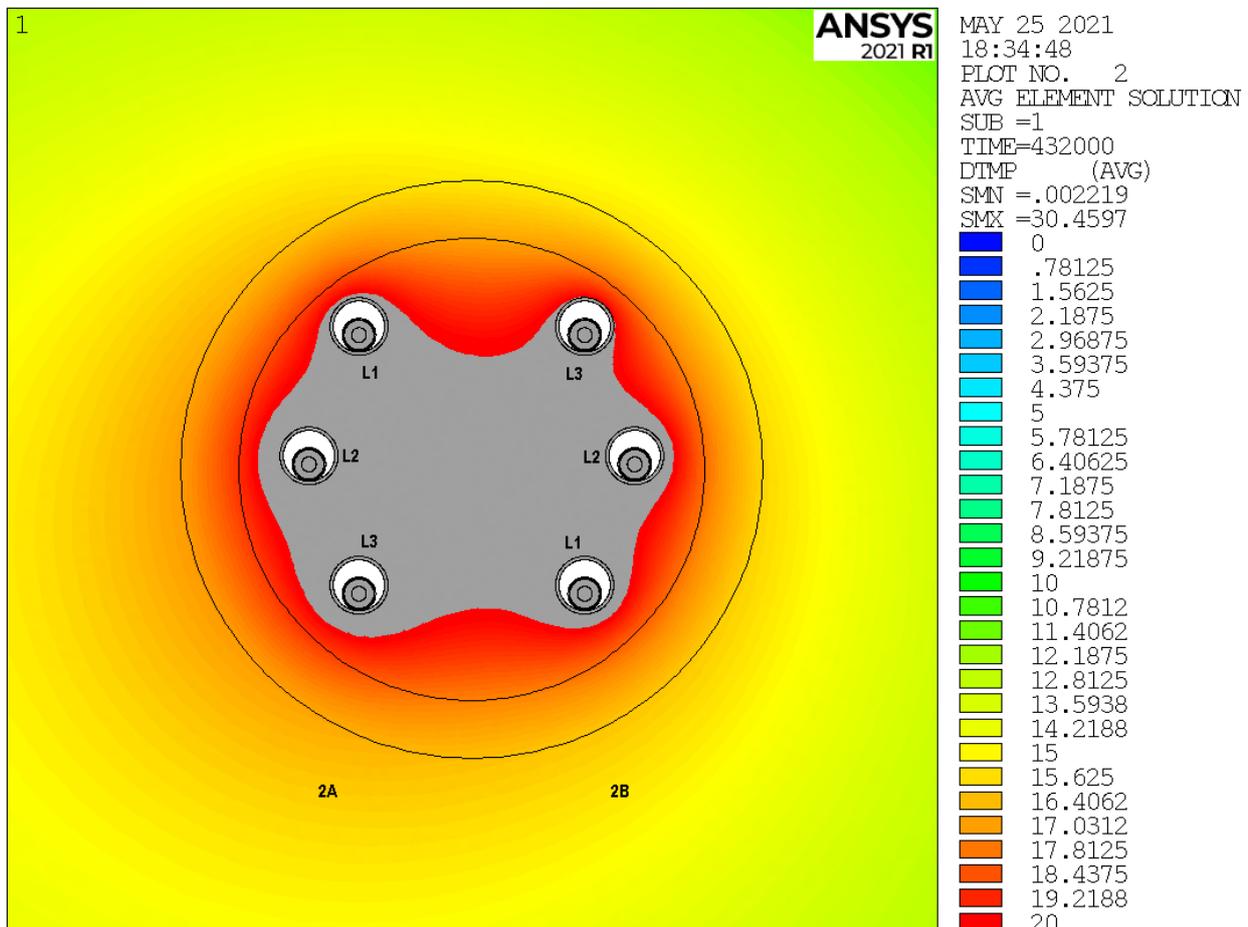
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 3,8 m):	0,7 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (3,8 m < H ≤ 19,5 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 19,5 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,15 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,07 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,0	33,9	34,1	34,6	34,8	33,5	33,5	34,7	34,7	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	42,3	42,4	40,7	40,8	42,0	42,5	41,7	41,7	40,1
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,3	12,0	11,8	11,7	10,9



Erwärmung des Erdbodens, Detail Stromkreis 2 (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 01: Bereich unter Deich nahe Startschacht**

Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

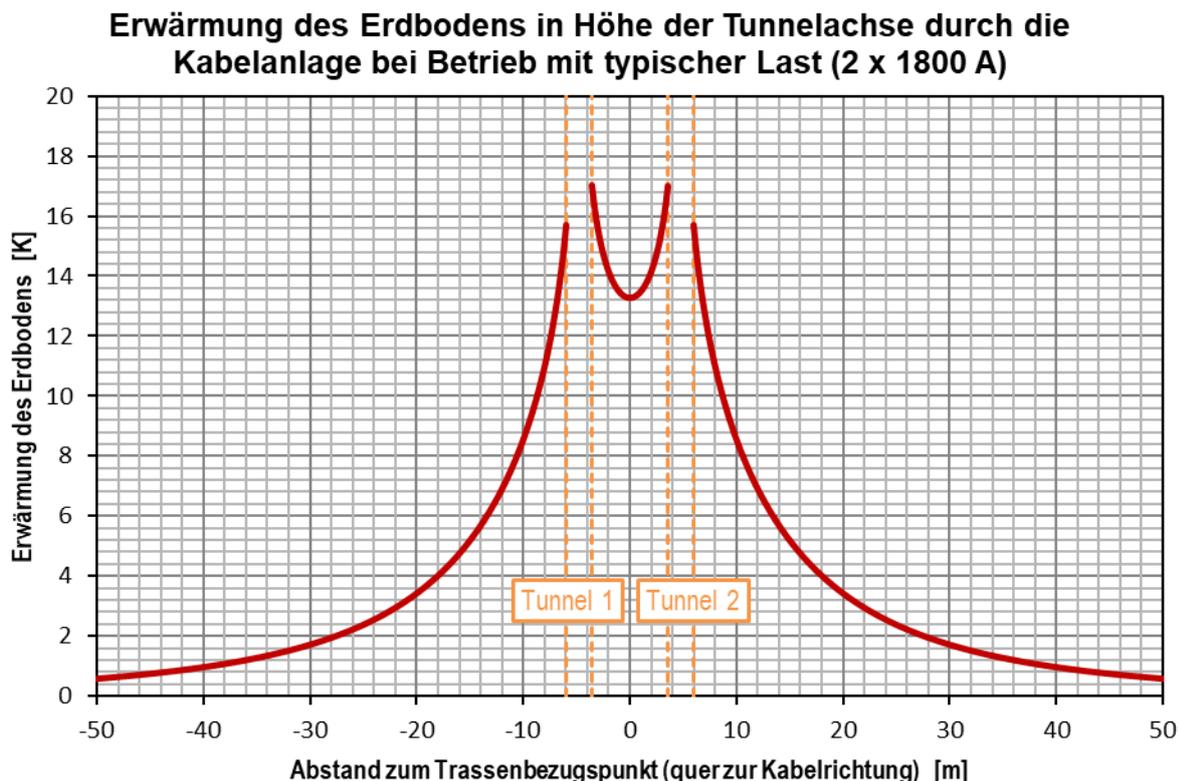
Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($0 \leq H \leq 1,0$ m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,0$ m < $H \leq 3,8$ m):	0,7 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($3,8$ m < $H \leq 19,5$ m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($H > 19,5$ m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,15 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,07 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,0	33,9	34,1	34,6	34,8	33,5	33,5	34,7	34,7	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	42,3	42,4	40,7	40,8	42,0	42,5	41,7	41,7	40,1
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,3	12,0	11,8	11,7	10,9

Maximale Erwärmung des Erdbodens in Höhe der Tunnelachse: 17,0 K



**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 08: Bereich neben rechtem Flussufer, größere Tiefe, größerer Tunnelabstand**

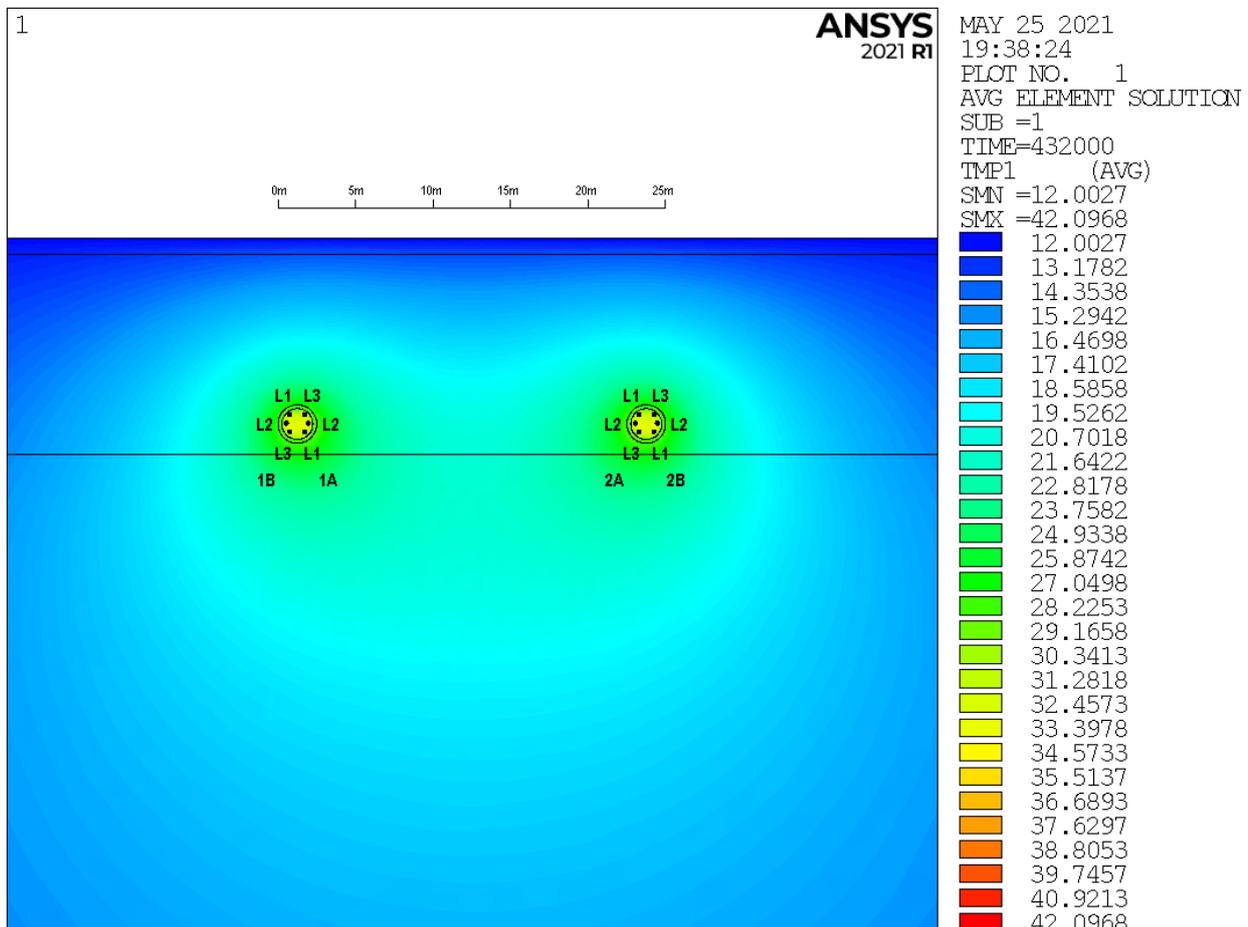
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 14,0 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 14,0 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	12,05 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	20,00 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	32,9	33,9	34,1	34,2	34,3	33,1	33,1	34,2	34,3	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	41,9	41,9	40,2	40,4	41,5	42,1	41,7	41,7	40,0
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,2	12,0	11,8	11,7	10,9



Temperaturverteilung im Erdboden, Übersicht (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 08: Bereich neben rechtem Flussufer, größere Tiefe, größerer Tunnelabstand**

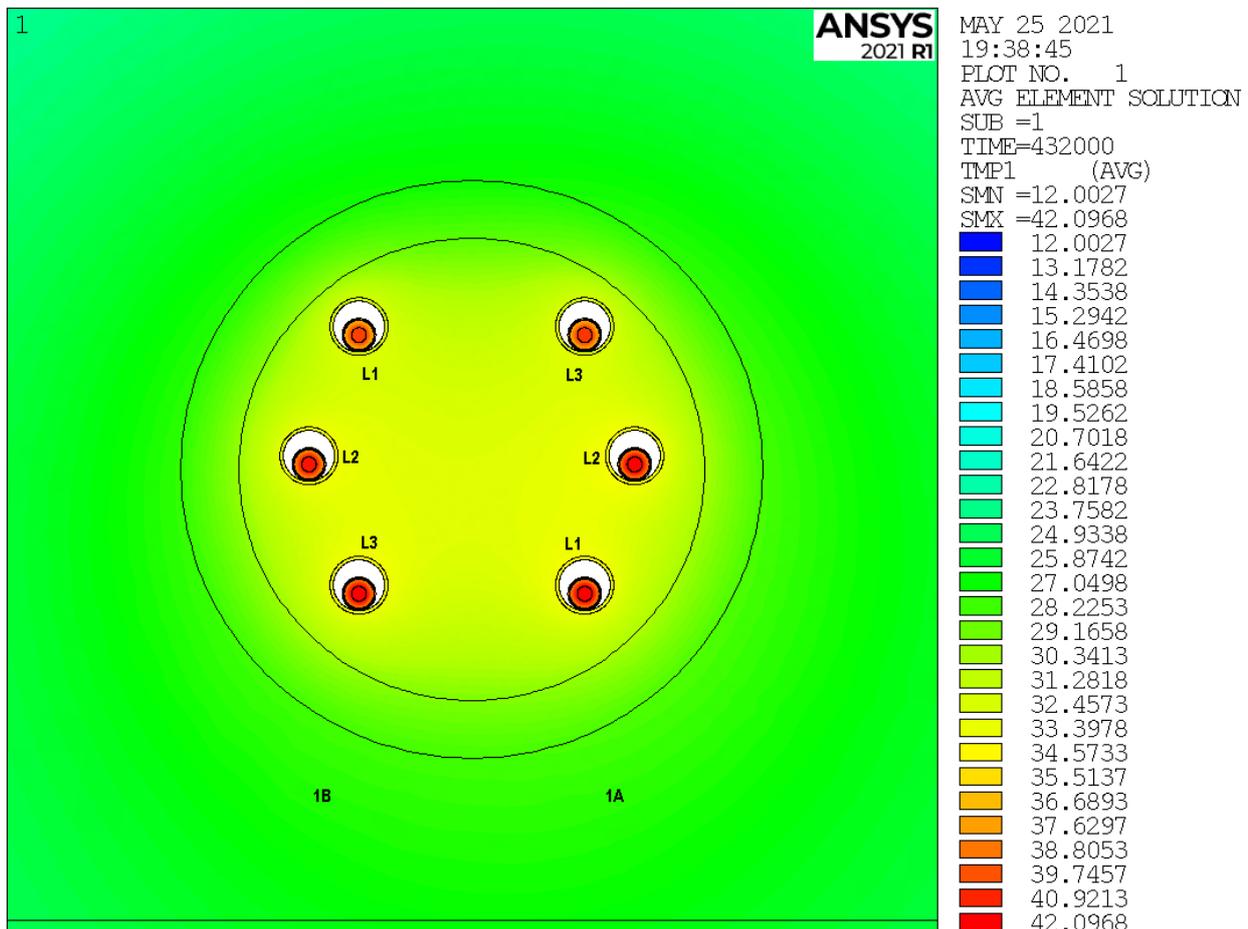
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 14,0 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 14,0 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	12,05 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	20,00 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	32,9	33,9	34,1	34,2	34,3	33,1	33,1	34,2	34,3	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	41,9	41,9	40,2	40,4	41,5	42,1	41,7	41,7	40,0
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,2	12,0	11,8	11,7	10,9



Temperaturverteilung im Erdboden, Detail Stromkreis 1 (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 08: Bereich neben rechtem Flussufer, größere Tiefe, größerer Tunnelabstand**

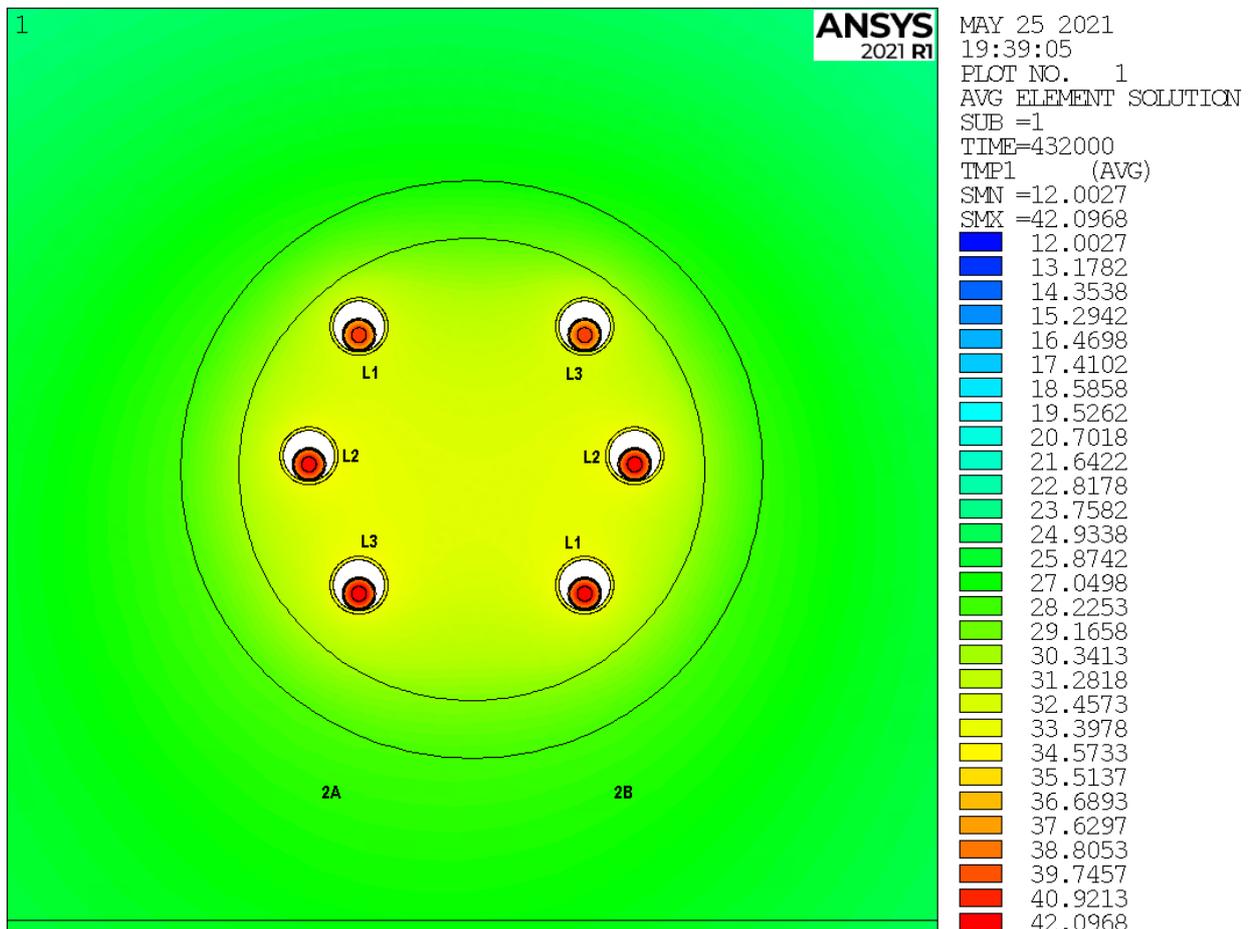
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 14,0 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 14,0 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	12,05 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	20,00 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	32,9	33,9	34,1	34,2	34,3	33,1	33,1	34,2	34,3	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	41,9	41,9	40,2	40,4	41,5	42,1	41,7	41,7	40,0
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,2	12,0	11,8	11,7	10,9



Temperaturverteilung im Erdboden, Detail Stromkreis 2 (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 08: Bereich neben rechtem Flussufer, größere Tiefe, größerer Tunnelabstand**

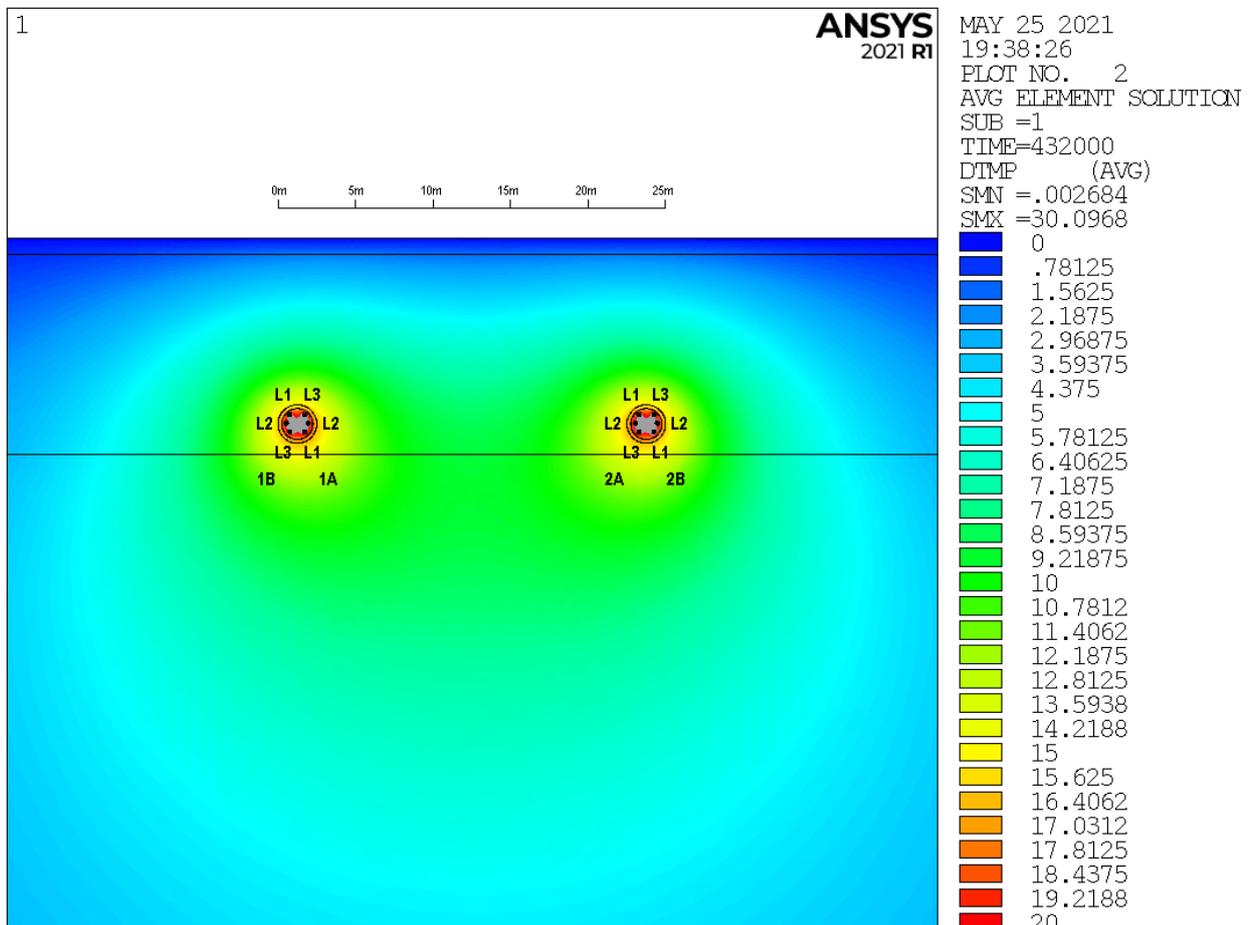
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 14,0 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 14,0 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	12,05 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	20,00 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	32,9	33,9	34,1	34,2	34,3	33,1	33,1	34,2	34,3	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	41,9	41,9	40,2	40,4	41,5	42,1	41,7	41,7	40,0
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,2	12,0	11,8	11,7	10,9



Erwärmung des Erdbodens, Übersicht (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 08: Bereich neben rechtem Flussufer, größere Tiefe, größerer Tunnelabstand**

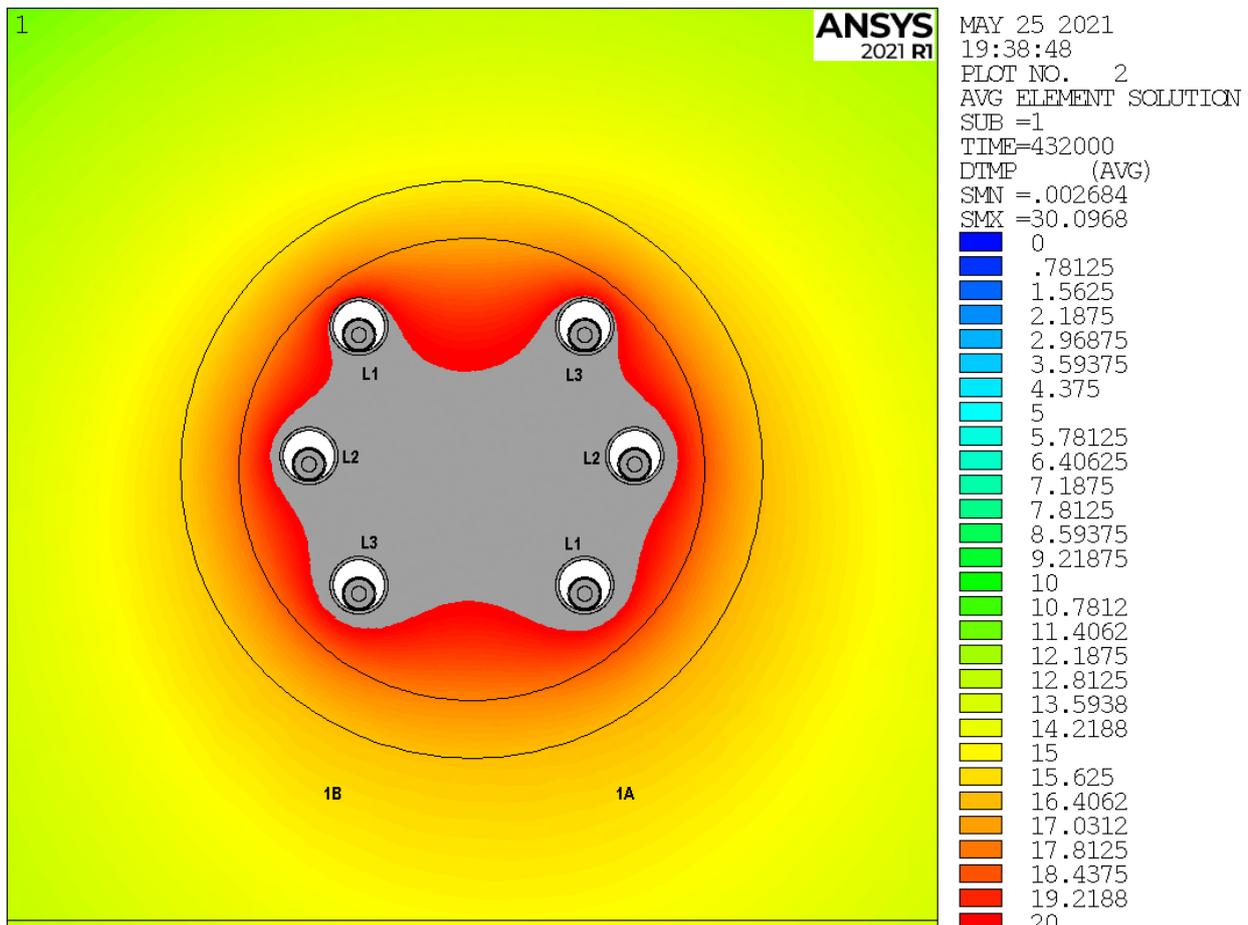
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 14,0 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 14,0 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	12,05 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	20,00 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	32,9	33,9	34,1	34,2	34,3	33,1	33,1	34,2	34,3	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	41,9	41,9	40,2	40,4	41,5	42,1	41,7	41,7	40,0
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,2	12,0	11,8	11,7	10,9



Erwärmung des Erdbodens, Detail Stromkreis 1 (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 08: Bereich neben rechtem Flussufer, größere Tiefe, größerer Tunnelabstand**

Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel

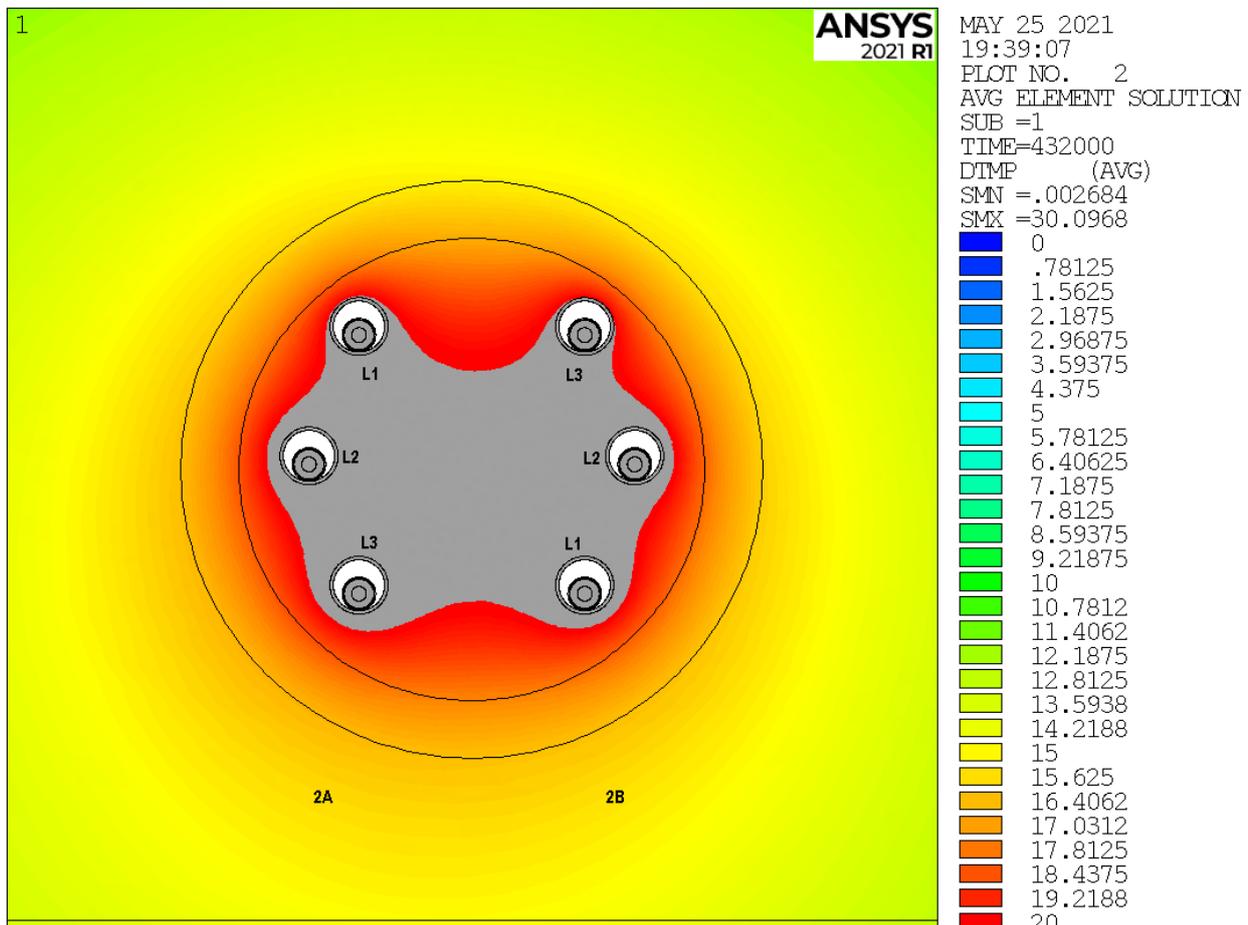
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 14,0 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 14,0 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	12,05 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	20,00 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	32,9	33,9	34,1	34,2	34,3	33,1	33,1	34,2	34,3	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	41,9	41,9	40,2	40,4	41,5	42,1	41,7	41,7	40,0
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,2	12,0	11,8	11,7	10,9



Erwärmung des Erdbodens, Detail Stromkreis 2 (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 08: Bereich neben rechtem Flussufer, größere Tiefe, größerer Tunnelabstand**

Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

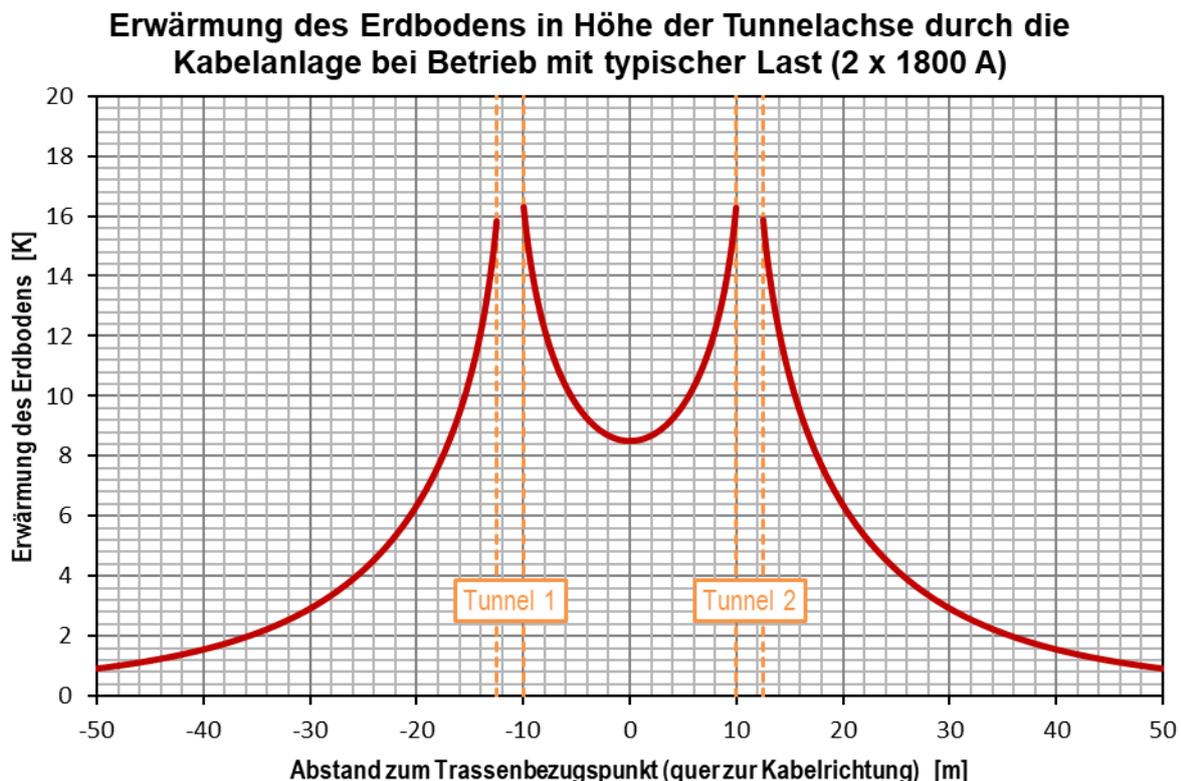
Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($0 \leq H \leq 1,0$ m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($1,0$ m < $H \leq 14,0$ m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden ($H > 14,0$ m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	12,05 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	20,00 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0 · I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	32,9	33,9	34,1	34,2	34,3	33,1	33,1	34,2	34,3	34,1	34,1	32,9
	Leiter	40,2	41,3	41,9	41,9	41,9	40,2	40,4	41,5	42,1	41,7	41,7	40,0
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,2	12,1	11,8	11,7	10,9	11,1	11,2	12,0	11,8	11,7	10,9

Maximale Erwärmung des Erdbodens in Höhe der Tunnelachse: 16,3 K



**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 22: Bereich unter Deich nahe Zielschacht**

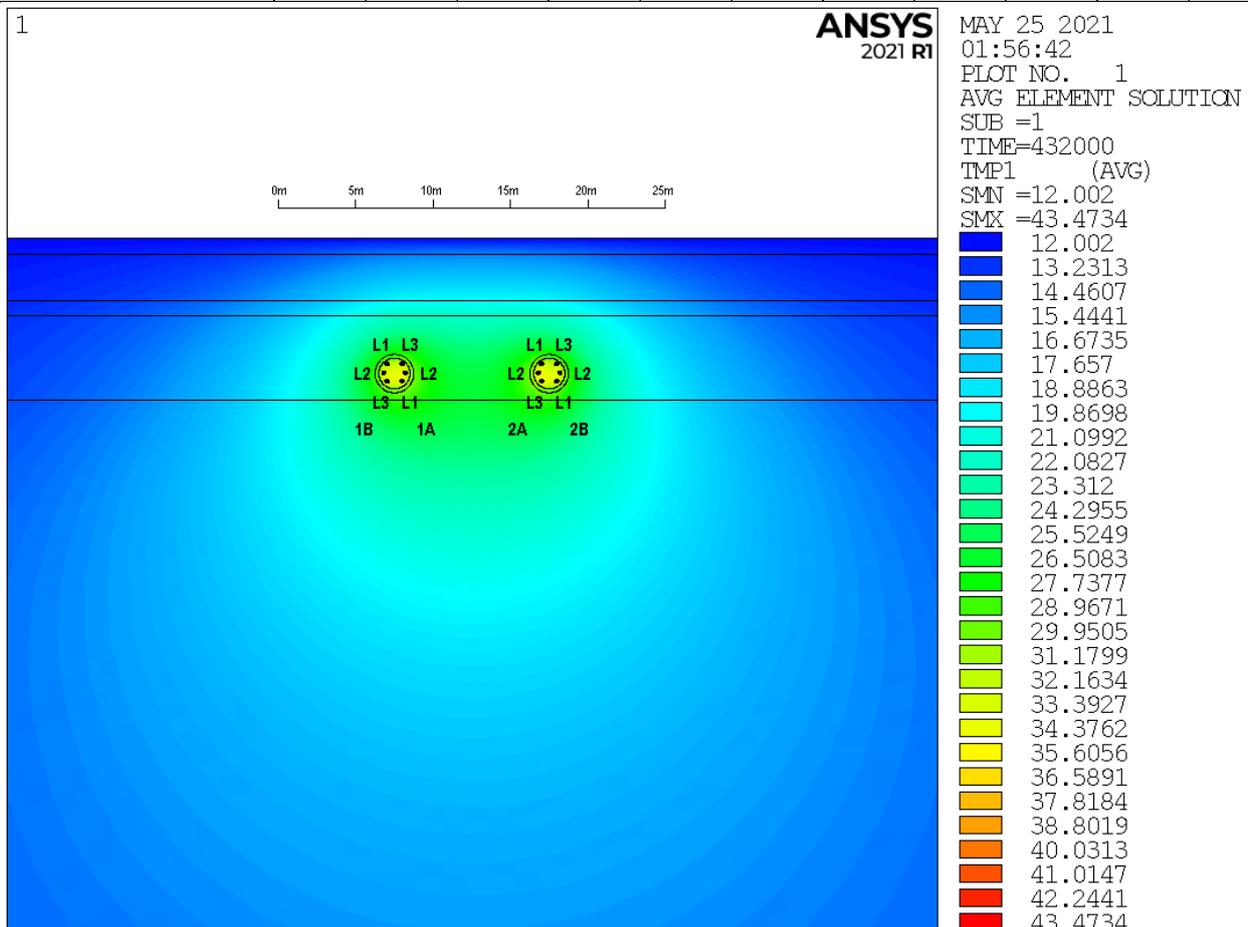
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 4,0 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (4,0 m < H ≤ 5,0 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (5,0 m < H ≤ 10,5 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 10,5 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,77 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,48 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,7	34,7	35,1	35,6	35,7	34,2	34,2	35,6	35,7	35,1	34,9	33,6
	Leiter	40,9	42,1	42,9	43,3	43,3	41,4	41,5	42,9	43,5	42,7	42,5	40,8
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,3	12,1	11,8	11,7	11,0	11,1	11,3	12,0	11,8	11,8	10,9



Temperaturverteilung im Erdboden, Übersicht (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 22: Bereich unter Deich nahe Zielschacht**

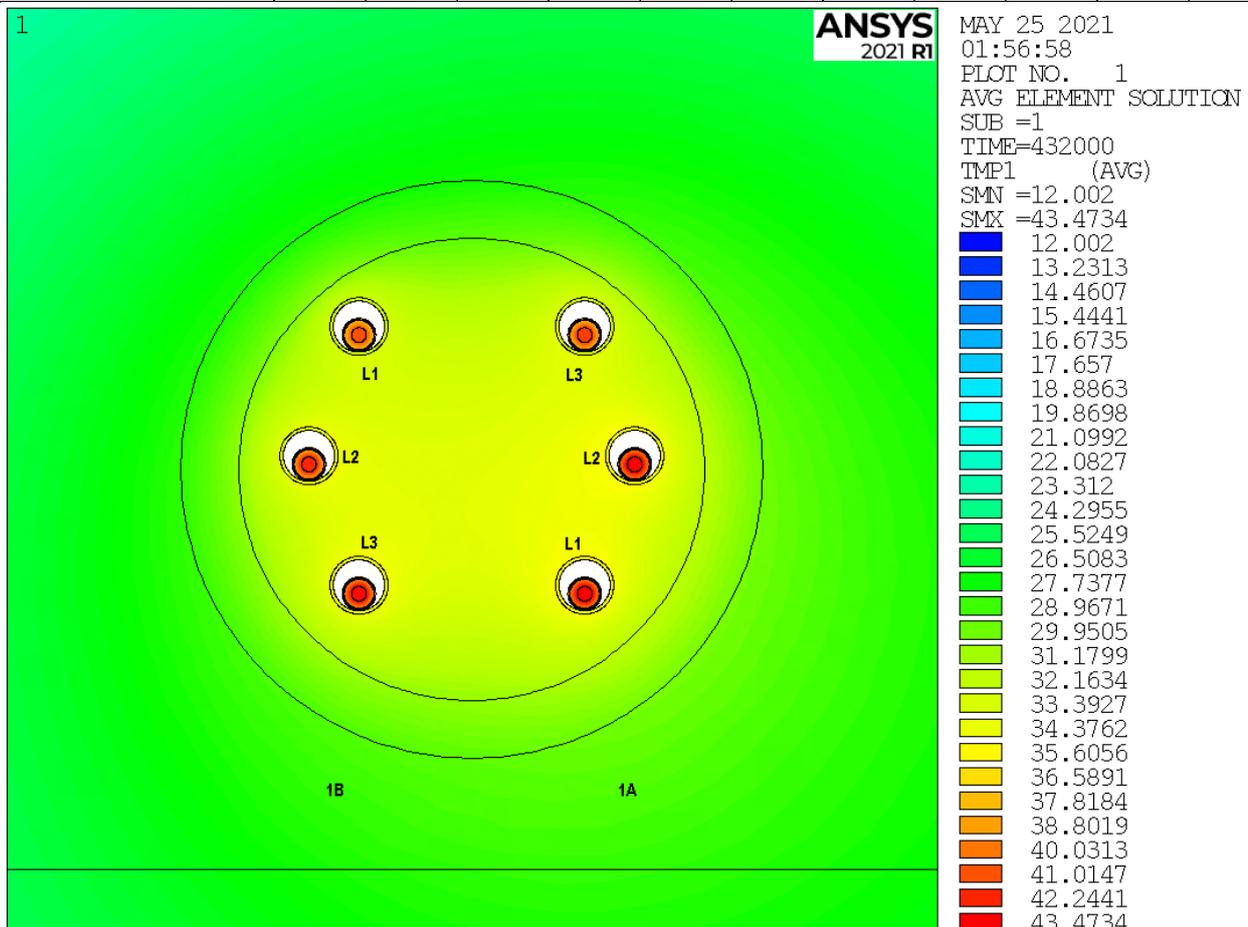
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 4,0 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (4,0 m < H ≤ 5,0 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (5,0 m < H ≤ 10,5 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 10,5 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,77 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,48 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,7	34,7	35,1	35,6	35,7	34,2	34,2	35,6	35,7	35,1	34,9	33,6
	Leiter	40,9	42,1	42,9	43,3	43,3	41,4	41,5	42,9	43,5	42,7	42,5	40,8
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,3	12,1	11,8	11,7	11,0	11,1	11,3	12,0	11,8	11,8	10,9



Temperaturverteilung im Erdboden, Detail Stromkreis 1 (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 22: Bereich unter Deich nahe Zielschacht**

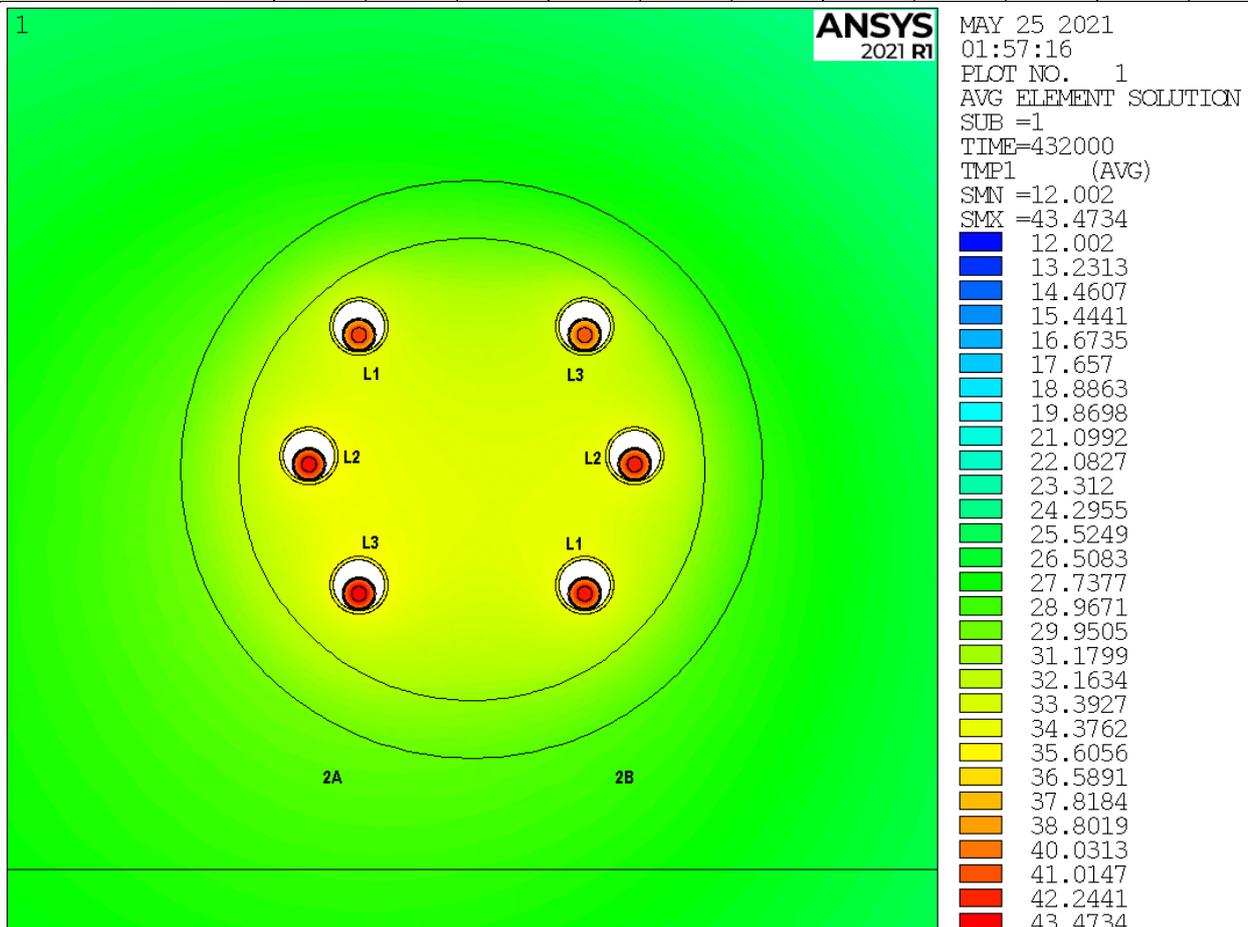
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 4,0 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (4,0 m < H ≤ 5,0 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (5,0 m < H ≤ 10,5 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 10,5 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,77 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,48 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,7	34,7	35,1	35,6	35,7	34,2	34,2	35,6	35,7	35,1	34,9	33,6
	Leiter	40,9	42,1	42,9	43,3	43,3	41,4	41,5	42,9	43,5	42,7	42,5	40,8
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,3	12,1	11,8	11,7	11,0	11,1	11,3	12,0	11,8	11,8	10,9



Temperaturverteilung im Erdboden, Detail Stromkreis 2 (Angaben in °C)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 22: Bereich unter Deich nahe Zielschacht**

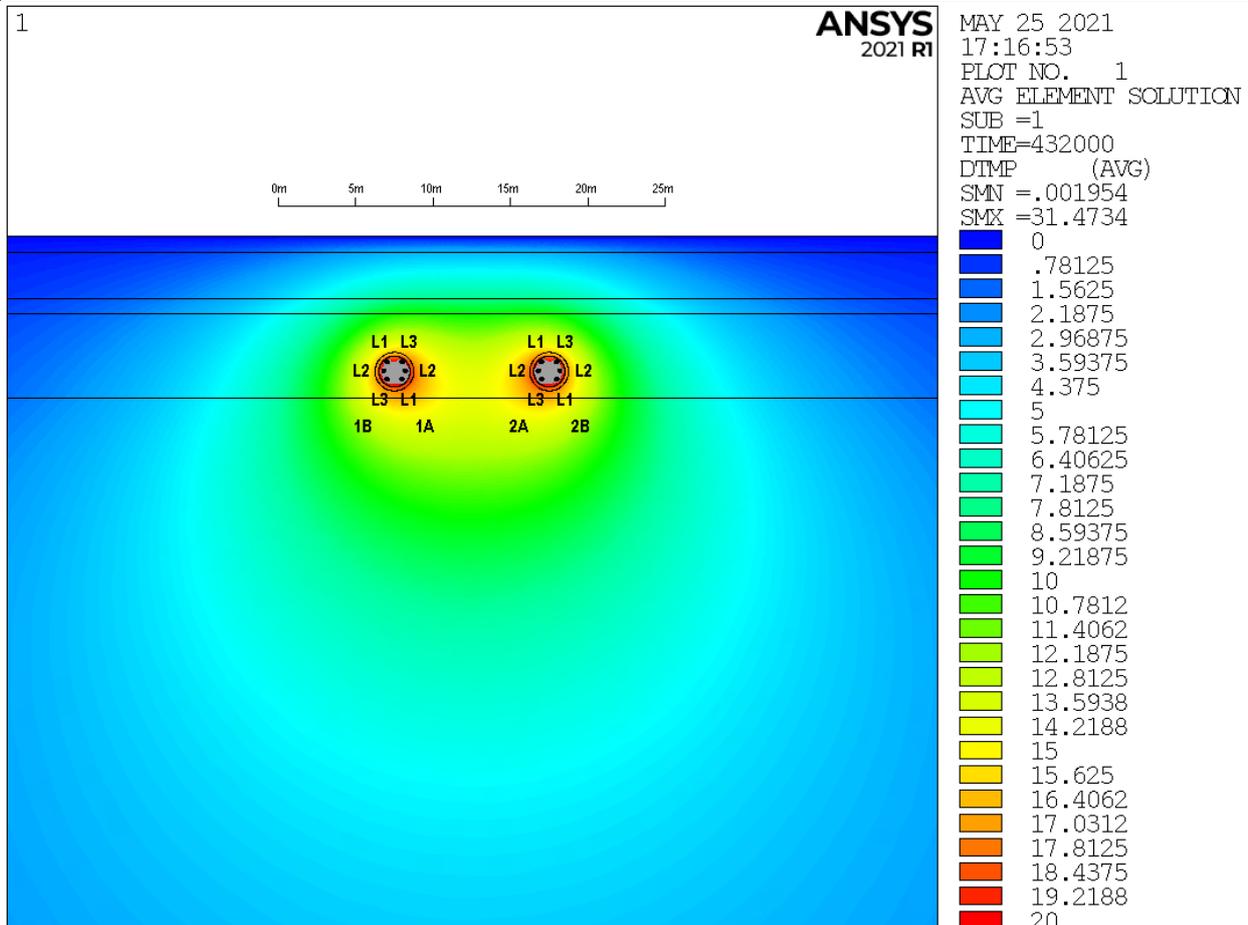
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 4,0 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (4,0 m < H ≤ 5,0 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (5,0 m < H ≤ 10,5 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 10,5 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,77 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,48 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,7	34,7	35,1	35,6	35,7	34,2	34,2	35,6	35,7	35,1	34,9	33,6
	Leiter	40,9	42,1	42,9	43,3	43,3	41,4	41,5	42,9	43,5	42,7	42,5	40,8
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,3	12,1	11,8	11,7	11,0	11,1	11,3	12,0	11,8	11,8	10,9



Erwärmung des Erdbodens, Übersicht (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 22: Bereich unter Deich nahe Zielschacht**

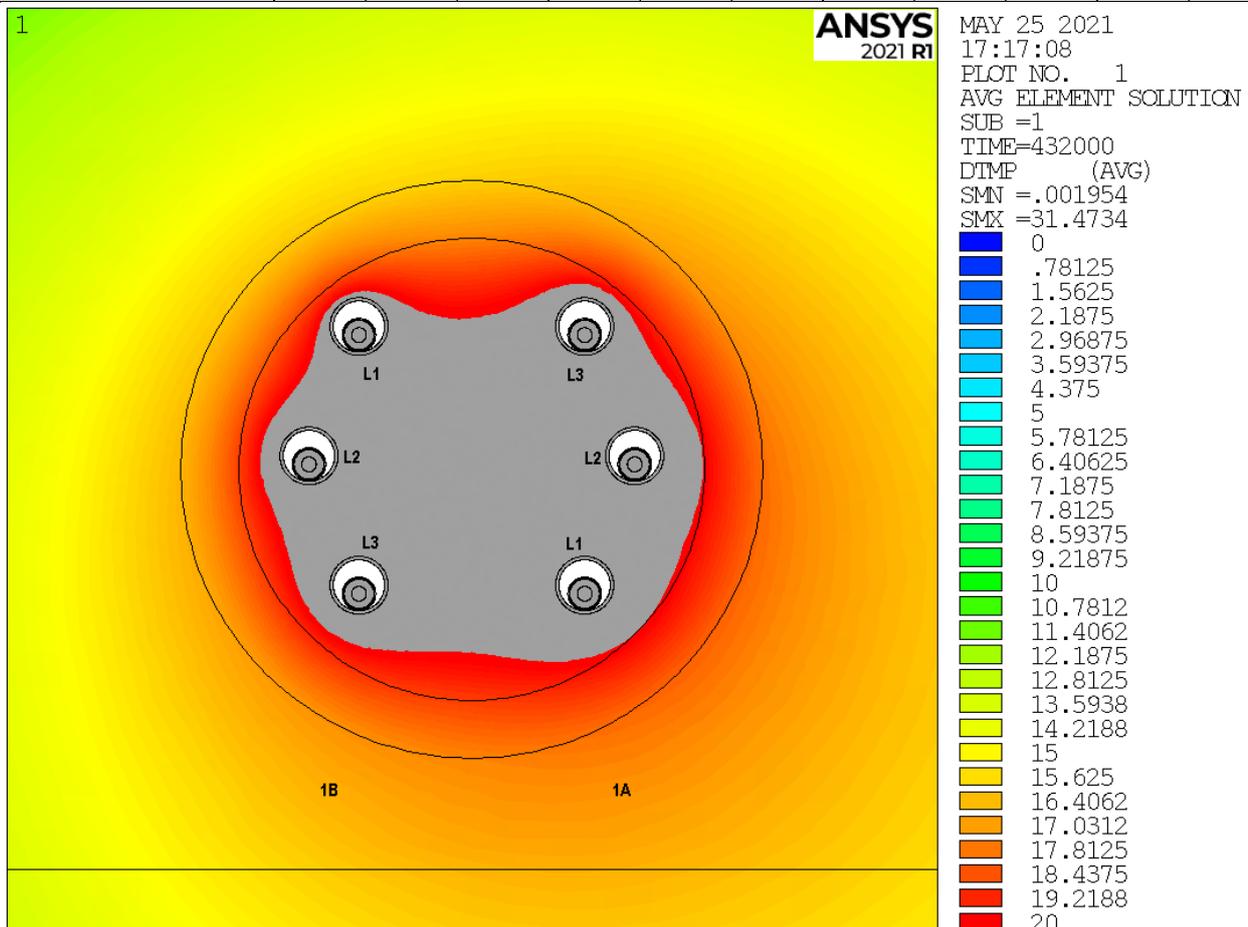
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 4,0 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (4,0 m < H ≤ 5,0 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (5,0 m < H ≤ 10,5 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 10,5 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,77 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,48 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,7	34,7	35,1	35,6	35,7	34,2	34,2	35,6	35,7	35,1	34,9	33,6
	Leiter	40,9	42,1	42,9	43,3	43,3	41,4	41,5	42,9	43,5	42,7	42,5	40,8
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,3	12,1	11,8	11,7	11,0	11,1	11,3	12,0	11,8	11,8	10,9



Erwärmung des Erdbodens, Detail Stromkreis 1 (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 22: Bereich unter Deich nahe Zielschacht**

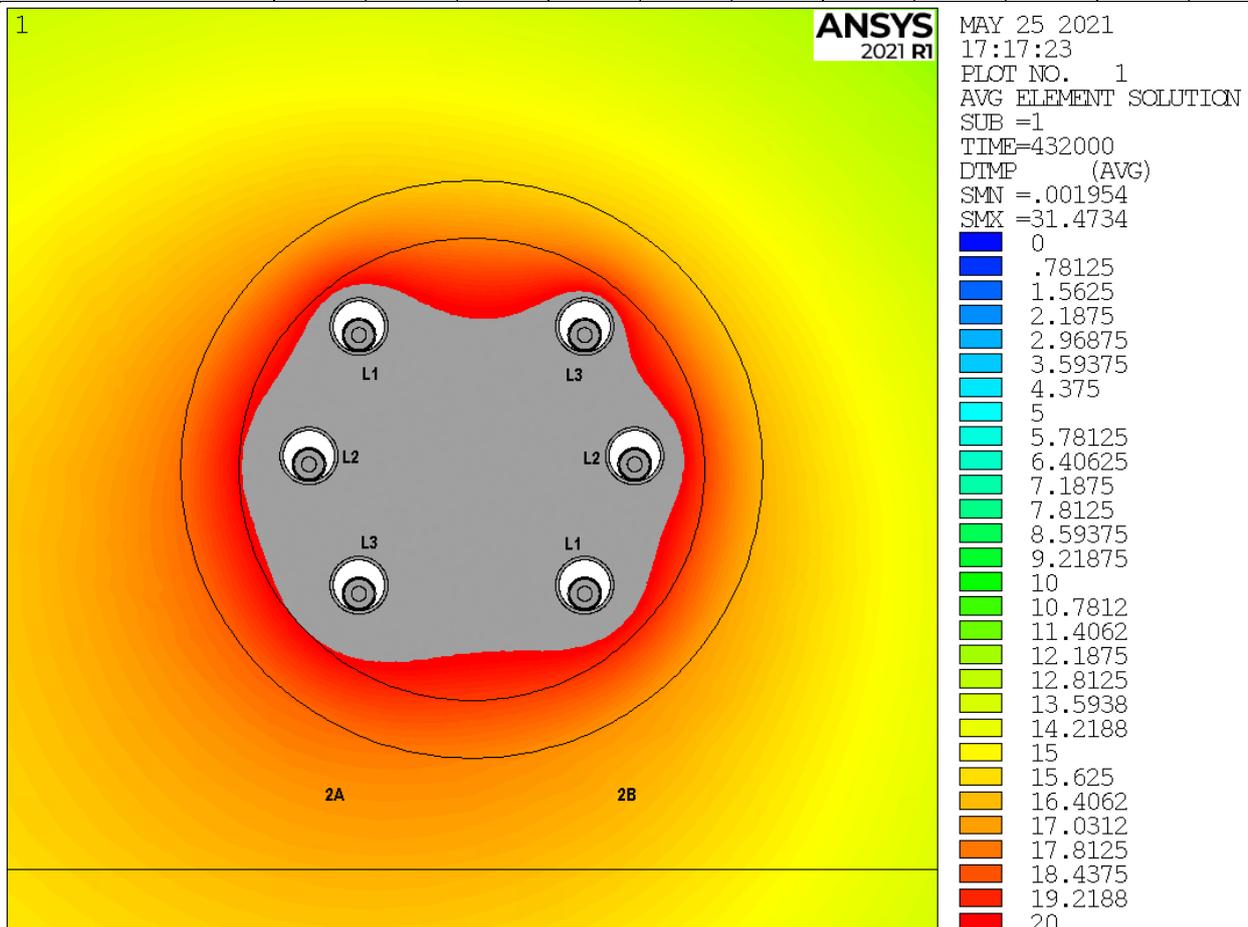
Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 4,0 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (4,0 m < H ≤ 5,0 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (5,0 m < H ≤ 10,5 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 10,5 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,77 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,48 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,7	34,7	35,1	35,6	35,7	34,2	34,2	35,6	35,7	35,1	34,9	33,6
	Leiter	40,9	42,1	42,9	43,3	43,3	41,4	41,5	42,9	43,5	42,7	42,5	40,8
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,3	12,1	11,8	11,7	11,0	11,1	11,3	12,0	11,8	11,8	10,9



Erwärmung des Erdbodens, Detail Stromkreis 2 (Angaben in K)

**380-kV-Teilverkabelung TenneT, Leitung Stade – Landesbergen, Abschnitt Verden - Aller
Allerquerung in 2 verfüllten Kabeltunneln DN 2000, Rohre luftgefüllt, Sonderausführung Kabel
Tunnelabschnitt 22: Bereich unter Deich nahe Zielschacht**

Kabel einzeln in luftgefüllten PE-Rohren 250 x 14,8 mm (SDR17) im verfüllten Kabeltunnel
Kabel im Tunnelbereich: Sonderausführung mit einzeldrahtisoliertem Millikenleiter

Bodentemperatur:	12 °C
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (0 ≤ H ≤ 1,0 m), feucht/ trocken:	1,0 Km/W / 2,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (1,0 m < H ≤ 4,0 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (4,0 m < H ≤ 5,0 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (5,0 m < H ≤ 10,5 m):	0,5 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Erdboden (H > 10,5 m):	0,75 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelwand (Betonrohr):	1,0 Km/W
Spezif. Wärmewiderstand Tunnelfüllung (Bentonit):	1,2 Km/W
Legetiefe (Tunnelachse):	8,77 m
Lichter horizontaler Abstand der Kabeltunnel beider Stromkreise:	7,48 m
Achsenabstand der Kabelrohre im System („a“):	0,6 m

Typische Last (2 x 1800 A, m = 0,8: 8 h/ 8 h/ 8 h 0,6/ 0,8/ 1,0·I_{max})

Kabelströme, Leitertemperaturen und Verluste bei 2 x 1800 A (Cross-Bonding-Teilabschnitt 2):

Kabel		1B/L1	1B/L2	1B/L3	1A/L1	1A/L2	1A/L3	2A/L1	2A/L2	2A/L3	2B/L1	2B/L2	2B/L3
Leiterstrom	[A]	883	887	926	917	913	874	886	887	929	915	913	871
Schirmstrom	[A]	10,8	21,4	67,0	49,3	23,1	32,6	19,5	19,8	57,0	58,8	33,0	22,2
Max. Temperatur [°C]	Rohr	33,7	34,7	35,1	35,6	35,7	34,2	34,2	35,6	35,7	35,1	34,9	33,6
	Leiter	40,9	42,1	42,9	43,3	43,3	41,4	41,5	42,9	43,5	42,7	42,5	40,8
Verluste je Kabel	[W/m]	11,0	11,3	12,1	11,8	11,7	11,0	11,1	11,3	12,0	11,8	11,8	10,9

Maximale Erwärmung des Erdbodens in Höhe der Tunnelachse: 17,9 K

**Erwärmung des Erdbodens in Höhe der Tunnelachse durch die
Kabelanlage bei Betrieb mit typischer Last (2 x 1800 A)**

