

Sonderdruck aus

ew das magazin für die energie wirtschaft

Ausgabe 15-16/2011



■ Powercrete® und CableCem® – technische und wirtschaftliche Perspektiven

Prof. Dr.-Ing. Heinrich Brakelmann
Dipl.-Ing. Raymund Böing
Dr. Jörg Dietrich
Dipl.-Ing. Hans-Peter May

HEIDELBERGCEMENT

Hochwärmeleitfähige Verfüllbaustoffe für Kabelgräben

Powercrete® und CableCem® – technische und wirtschaftliche Perspektiven

Die elektrische Energieübertragung und -verteilung in Ballungsräumen wird aus nahe liegenden Gründen überwiegend unterirdisch, d. h. mit Erdkabeln, realisiert. Beim Ausbau der Hoch- und Höchstspannungsnetze (Hochspannungsnetze: 60 kV und 110 kV; Höchstspannungsnetze: 220 kV und 380 kV) außerhalb der Städte wird im Rahmen der Genehmigungsverfahren immer häufiger die Forderung erhoben, Verkabelungen oder Zwischenverkabelungen im Verlauf der Freileitungen zu realisieren. In beiden Fällen fordern starker Kostendruck, steigende Materialkosten sowie Anforderungen des Umweltschutzes in hohem Maße Anstrengungen zur technisch-wirtschaftlichen Optimierung der Kabelanlagen.

In [1] wurde ein neues Rückfüllmaterial für den offenen Kabelgraben vorgestellt und an ersten Beispielen gezeigt, welche Belastbarkeitssteigerungen bei unterschiedlichen Kabeltypen und Legeanordnungen zu erreichen sind. Inzwischen wurde dieses Material experimentell untersucht und bereits in mehreren Projekten erfolgreich eingesetzt (Bild 1). Heute wird es

mit definierten Eigenschaften unter dem Namen Powercrete am Markt angeboten. Zusätzlich steht ein fließfähiges Material mit dem Namen CableCem zur Ringraumverfüllung bei rohrverlegten Kabeln zur Verfügung. Im Folgenden soll über Materialeigenschaften und Verarbeitbarkeit, über die bisher gewonnenen Erfahrungen sowie über Folgerungen für künftige Kabelanlagen berichtet werden.

Powercrete – ein hochwärmeleitfähiger Beton

Powercrete ist ein patentierter hochwärmeleitfähiger Spezialbeton der Heidelberger Beton GmbH, der als Bettungs- und Verfüllmaterial im feuchten Zustand Wärmeleitfähigkeiten bis zu $6 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ und im ausgetrockneten Zustand i. d. R. mindestens $3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ erreicht. Die Regeleigenschaften des Materials sind in *Tafel 1* zusammengestellt. Andere Druckfestigkeitsklassen, Konsistenz-

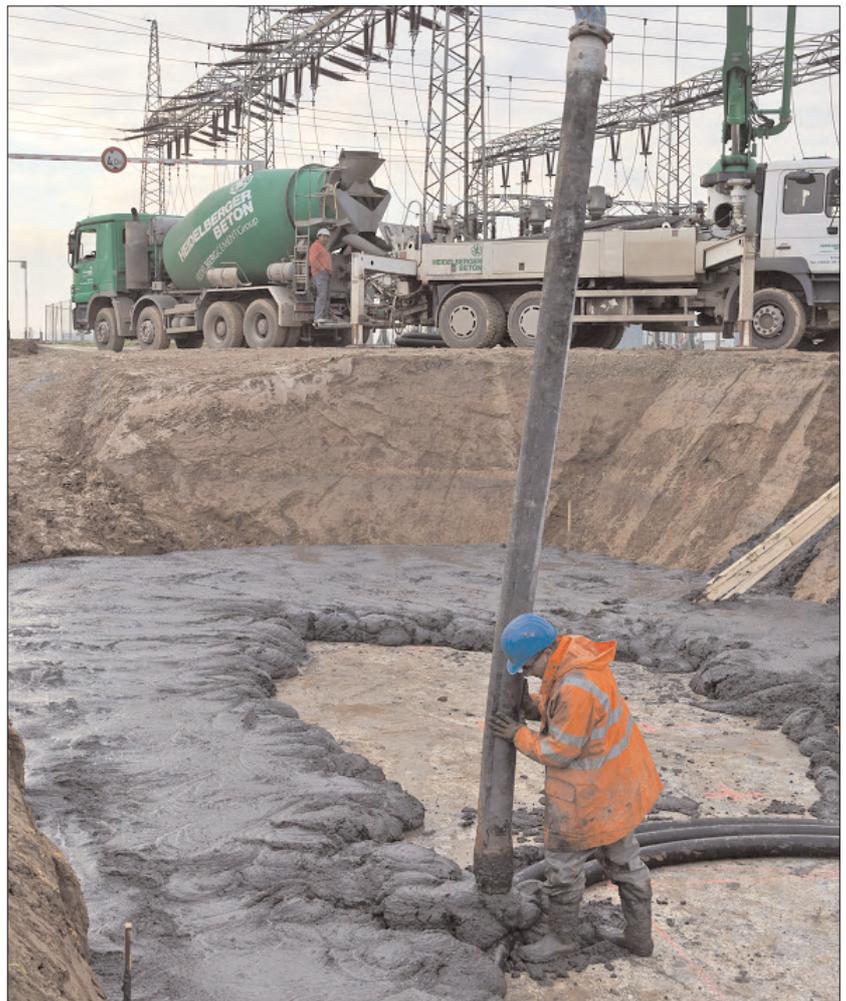


Bild 1. Pilotanlage: Ummantelung von Kabeln an Hotspots

Prof. Dr.-Ing. habil. **Heinrich Brakelmann**, Professor im Fachgebiet Energietransport und -speicherung, Universität Duisburg-Essen, Duisburg; Dipl.-Ing. **Raymund Böing**, Leiter Betontechnologie Transportbeton, Entwicklung und Anwendung, HeidelbergCement AG, Leimen; Dr. **Jörg Dietrich**, stellv. Leiter Produktentwicklung und Qualitätssicherung, HeidelbergCement Baustoffe für Geotechnik GmbH, Ennigerloh; Dipl.-Ing. **Hans-Peter May**, technische Projektierung, nkt cables GmbH, Köln.



Bild 2. Prüfgerät zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit mit Oberflächensensoren (r.)

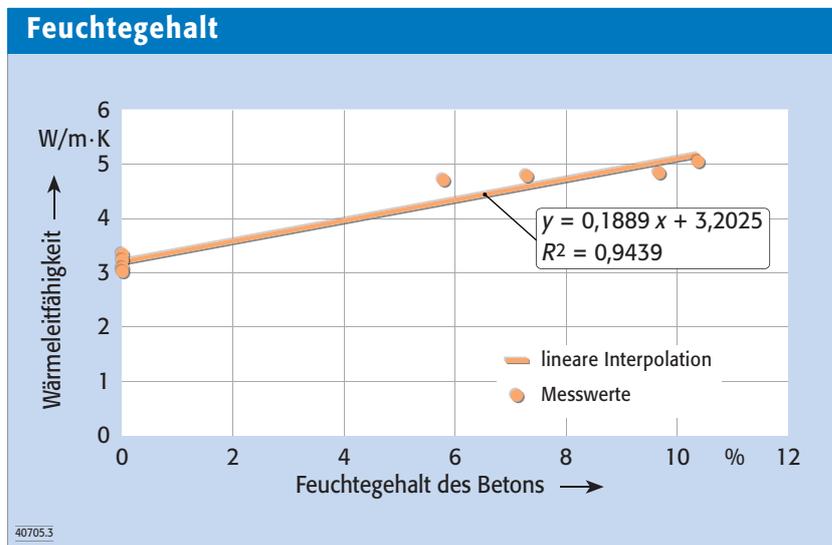


Bild 3. Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Feuchte

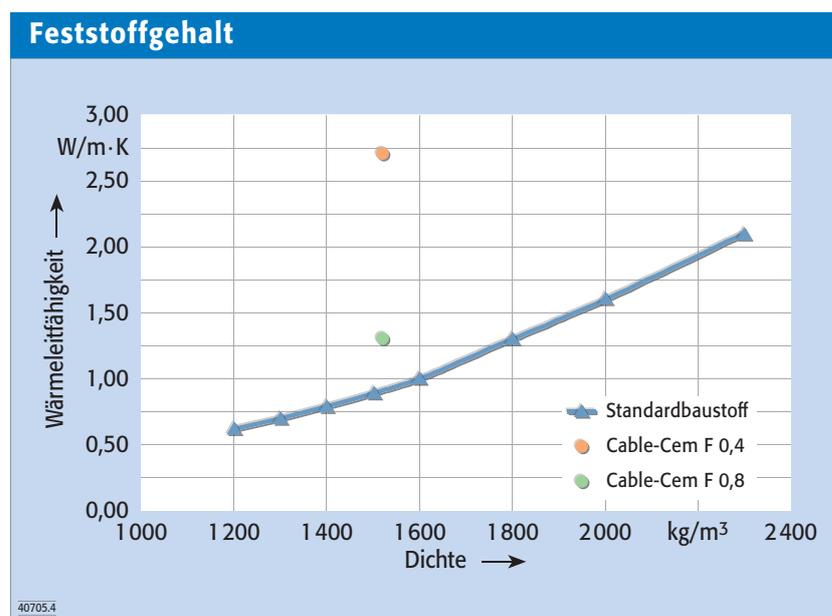


Bild 4. Abhängigkeit der Wärmeleitfähigkeit vom Feststoffgehalt bei thermisch nicht optimierten Standardbaustoffen sowie die Wärmeleitfähigkeiten von CableCem F 0,4 und CableCem F 0,8

Tafel 1

Druckfestigkeitsklasse	C12/15
Konsistenzklasse	F4
Größtkorn	16 mm

Tafel 1. Regeleigenschaften Powercrete

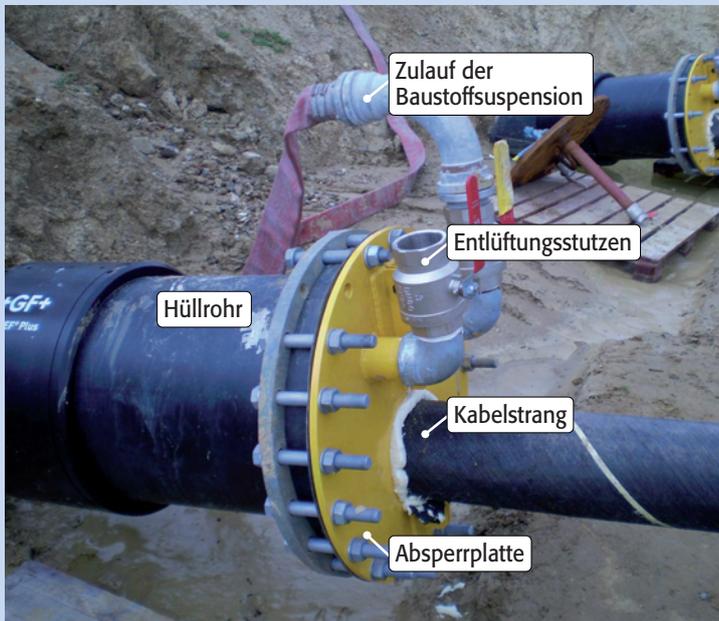
klassen oder ein anderes Größtkorn sind auf Anfrage möglich.

Die Materialkonsistenz von Powercrete ist einstellbar. Eine fließfähige Materialkonsistenz führt zu einer optimalen Einbettung der Kabelstränge mit geringerem Verdichtungsaufwand und damit zu einem niedrigeren Wärmeübergangswiderstand als bei steiferer Konsistenz.

Powercrete besteht durch seine hohe Wärmeleitfähigkeit, die durch eine auf diese Eigenschaft abgestimmte Betonzusammensetzung erreicht wird und abhängig von der Ausgangsstoffsituation bei der Betonherstellung ist. Im Rahmen der Erstprüfung (Eignungsprüfung) wird die Wärmeleitfähigkeit des Betons an getrockneten Prüfkörpern bestimmt. Hierzu werden mindestens drei Betonwürfel (Mindestkantenlänge 10 cm) oder -zylinder (Mindestdurchmesser 10 cm) hergestellt. Vor der Messung werden die Proben bis zum Alter von 28 Tagen gemäß [2] gelagert und anschließend bei 80 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Vor der Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit werden die zu untersuchenden Proben auf rd. 20 °C abgekühlt. Die Prüfung der Wärmeleitfähigkeit geschieht mit dem Prüfgerät Isomet Heat Transfer Analyzer Model 2104 mit einem für den Messbereich geeigneten Oberflächensensor (Bild 2). Als Messfläche dient eine Schalfläche der Betonprobe.

Bild 3 zeigt, dass die Wärmeleitfähigkeit von Powercrete von dessen Feuchtegehalt abhängig ist und einer etwa linearen Funktion folgt. Im wassergesättigten Zustand sind Größen bis zu 6 W/(m·K) und im getrockneten Zustand, d. h. unter den schlechtestmöglichen Randbedingungen, i. d. R. von mindestens 3 W/(m·K) erreichbar. Welche Wärmeleitfähigkeit später in der Praxis genutzt werden kann, ist abhängig von dem sich einstellenden Feuchtigkeitsgehalt des Bettungsmaterials. Wegen des mit der Kabeltemperatur variierenden Feuchtegehalts des Bettungsmaterials kann sich

Baustellenvorbereitung



40705.5

Bild 5. Baustellenvorbereitung im Vorfeld der Ringraumverfüllung

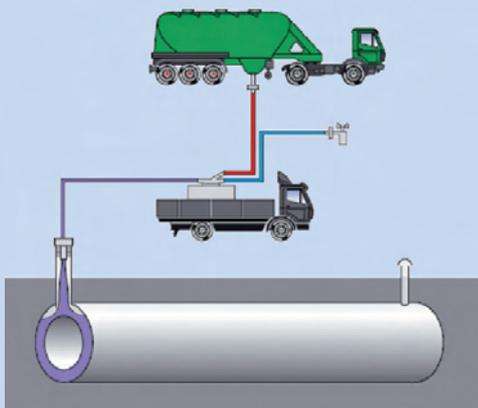
Quelle: De Keerkring

kein konstanter Wert für die Wärmeleitfähigkeit einstellen. Sinkt der Feuchtegehalt des Bettungsmaterials, so reduziert sich auch die Wärmeleitfähigkeit, während sie bei einem nachfolgenden Anstieg des Feuchtegehalts wieder zunimmt.

Powercrete ist wie herkömmlicher Beton zu behandeln. Bezüglich Verar-

beitung, Betonage, Verdichten und Nachbehandlung sind die Forderungen der DIN 1045-3 [3] zu beachten. Veränderungen des Wasser-Feststoff-Verhältnisses durch nachträglich zugeführtes Wasser – z. B. Regenwasser im Kabelgraben während der Einbauphase – führen zur Verschlechterung der Wärmeleitfähigkeit.

Ringraumverfüllung



40705.6

Bild 6. Ringraumverfüllung mit Mischkanone

CableCem – ein hochwärmeleitfähiger Verfüllbaustoff

Bei den Baustoffen der CableCem-Produktgruppe handelt es sich um werksfertige, hochwärmeleitfähige Spezialbaustoffe für die Verfüllung von Kabelhüllrohrsystemen. Werden Erdkabel – z. B. bei der Unterquerung von Eisenbahndämmen oder Gebäudekomplexen oder der Anlandung von Seekabeln – in Hüllrohr-

ren verlegt, kann der verbleibende Ringraum mit CableCem-Baustoffen verfüllt werden, um eine optimale Ableitung der im Kabelstrang entstehenden Wärme in den umgebenden Untergrund zu erreichen.

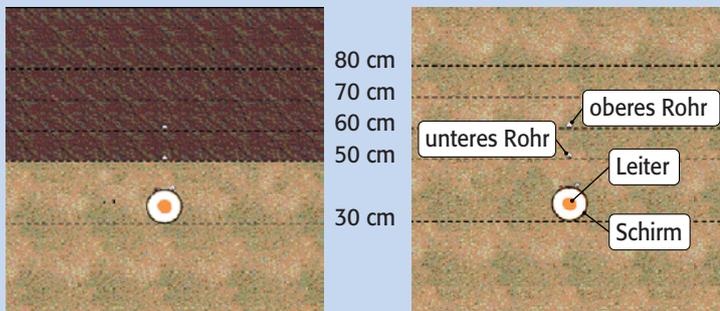
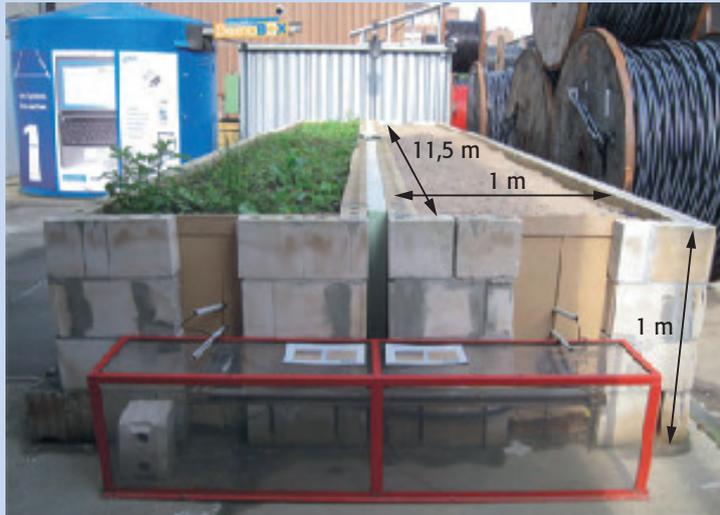
Bei dieser Anwendung wird der pulverförmige Baustoff als Sackware, in Big-Bags oder als Siloware auf die Baustelle geliefert. Vor Ort muss das Material nur noch mit Wasser zu einer hochfließfähigen, sedimentationsstabilen Suspension aufbereitet und mit geeignetem Pumpequipment in den Ringraum verpresst werden. Die rheologischen Eigenschaften der Suspension werden dabei durch einen im Verfüllbaustoff enthaltenen Tonmineralanteil gesteuert. Die Baustoffsuspension ist rd. 5 h verarbeitbar und härtet dann volumestabil und kraftschlüssig aus.

Tafel 2 zeigt die baustofftechnischen Kennwerte der CableCem-Produktgruppe. CableCem F 0,4 erreicht mit $2,5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ eine etwa doppelt so hohe Wärmeleitfähigkeit wie CableCem F 0,8 mit $1,2 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Die rheologischen Kennwerte sowie die Festigkeitsentwicklung beider Materialien sind vergleichbar. Zur Beschreibung der thermischen Eigenschaften von CableCem wird die Wärmeleitfähigkeit im feuchten Zustand angegeben, da das Kabelhüllrohrsystem als abgeschlossen betrachtet werden kann.

Eine Möglichkeit, die Wärmeleitfähigkeit von Verfüllbaustoffen zu steigern, besteht darin, den Feststoffgehalt der Suspension zu erhöhen. In Bild 4 ist diese Abhängigkeit zwischen Feststoffgehalt und Wärmeleitfähigkeit aufgetragen. Bei dieser Vorgehensweise ergibt sich jedoch die Problematik, dass eine Steigerung des Feststoffgehalts zu einer Reduzierung der Fließfähigkeit der Baustoffsuspension führen kann. Eine sehr gute Fließfähigkeit ist aber gerade bei der Verfüllung des engen Ringraums zwischen dem Hüllrohr und dem eingezogenen Kabelstrang die Voraussetzung für eine fehlerfreie Verfüllung und somit für eine optimale Wärmeableitung.

Die hohe Wärmeleitfähigkeit der CableCem-Produkte wird durch die Verwendung eines hochwärmeleitfähigen Additivs erreicht. Dieser Ansatz ermöglicht es, die thermischen Eigenschaften des Verfüllbaustoffs zu optimieren, ohne dabei den Feststoffgehalt der Suspension erhöhen zu müssen (Bild 4).

Testanordnung



40705.7

Bild 7. Testanordnung mit zwei Trögen, gefüllt mit Sand und Boden (l.) bzw. mit Powercrete (r.); 220-kV-VPE-Kabel 2XS(FL)2Y 1 × 1 600 RMS/215 +LWL; optisches Mess- und Prognosesystem Valcap

Tafel 2

Kennwert	Einheit	CableCem F 0,4	CableCem F 0,8
Wasser-Feststoff-Wert			0,8
Bedarf Trockenbaustoff	kg/m ³		844
Bedarf Wasser	l/m ³		675
Suspensionsdichte	kg/m ³		1 520
Rheologie und Verarbeitungseigenschaften			
Auslaufzeit aus dem Marshtrichter (DIN 4126)	s		≥ 50
Wasserabsetzen	%		≤ 3
Verarbeitungszeit	h		≈ 5
thermische Eigenschaften			
thermischer Widerstand	(m · K)/W	≤ 0,4	≤ 0,8
Wärmeleitfähigkeit	W/(m · K)	≥ 2,5	≥ 1,2
einaxiale Druckfestigkeit (in Anlehnung an DIN EN 196-1)			
Prüfkörperalter 7 Tage	N/mm ²	≈ 0,4	≈ 0,2
Prüfkörperalter 28 Tage	N/mm ²	≈ 1,0	≈ 0,5

Tafel 2. Baustofftechnische Kennwerte CableCem F 0,4 und CableCem F 0,8

Damit lässt sich eine Alternative mit ähnlichen Verfülleigenschaften wie die von Bentonitsuspensionen, aber mit deutlich besseren und gesicherten thermischen Eigenschaften realisieren. Darüber hinaus bildet CableCem aufgrund seines Bindemittelanteils im Gegensatz zu reinen Bentonitsuspensionen – bei denen langfristig die Gefahr einer Feststoffsedimentation besteht – eine stabile Gefügestruktur aus.

Um eine fachgerechte Verfüllung des Ringraums zwischen Kabelstrang und umgebendem Hüllrohr sicherzustellen, sind einige wichtige anwendungstechnische Anforderungen zu erfüllen:

- Zur Vorbereitung der Baustelle sind die Hüllrohrenden mit Absperrplatten zu verschließen, die Zuläufe für die Baustoffsuspension zu legen und Entlüftungsstutzen an den Hochpunkten anzubringen (Bild 5). Die Wasserversorgung sowie die Zulauf- und Entlüftungsleitungen müssen ausreichend dimensioniert sein. Eine fehlerfreie Verfüllung ist nur zu erreichen, wenn der Ringraum vom tiefsten Punkt des Hüllrohres aus verfüllt wird. Stellt das Hüllrohrende, über das die Suspension zugeführt wird, nicht den Tiefpunkt der gesamten Anlage dar, ist ein Verfüllrohr in den Ringraum einzubringen, das vom Rohrende bis zum Tiefpunkt reicht und über das dann die Suspension in den Ringraum verpresst wird.

- Das bei der Ringraumverfüllung eingesetzte Misch- bzw. Pumpaggregat muss eine klumpenfreie Suspension erzeugen und einen kontinuierlichen Verfüllvorgang sicherstellen. Im Fall größerer Verfüllmaßnahmen wird häufig mit Mischkanonen gearbeitet, denen das Wasser über einen angeschlossenen Hydranten und der Baustoff direkt aus einem Silo-Lkw über eine Blasleitung zugeführt werden (Bild 6).

- Ausschlaggebend dafür, dass die in den Ringraum verpresste Baustoffsuspension die auf dem technischen Merkblatt angegebenen Kennwerte, z. B. die Wärmeleitfähigkeit, erreicht, ist die Einhaltung des vom Hersteller vorgegebenen Wasser-Feststoff-Verhältnisses (W/F-Wert). Ein einfaches Verfahren zur Überprüfung des W/F-Werts ist die Bestimmung der Suspensionsdichte während des Verfüllvorgangs mit einer Spüluingswaage oder durch das Auswiegen eines mit Suspension gefüllten Litergefäßes. Stimmt die

gemessene Suspensionsdichte mit dem auf dem entsprechenden technischen Merkblatt angegebenen Wert überein, so stimmt auch das Wasser-Feststoff-Verhältnis.

- Die Verfüllmaßnahme ist dann zu beenden, wenn die Suspensionsdichte der am Entlüftungsstutzen austretenden Suspension der Suspensionsdichte am Zulauf entspricht.

Experimentelle Ergebnisse

In einer Zusammenarbeit der Unternehmen HeidelbergCement AG, Heidelberg, und nkt cables GmbH, Köln, sowie der Universität Duisburg-Essen wurden an einer Versuchsanlage über einen längeren Zeitraum Erwärmungsversuche vorgenommen. Bild 7 zeigt den Versuchsaufbau mit zwei Trögen, von denen der linke mit Sand und normale Boden und der rechte mit Powercrete verfüllt ist. Beide Tröge werden aufgeheizt durch ein 220-kV-VPE-Kabel (2XS(FL)2Y 1 × 1 600 RMS/215), das mit unterschiedlichen Stromzyklen beaufschlagt wurde (Bild 8). Ein Temperaturmonitoring wird einerseits mit einer größeren Zahl von Thermoelementen, zum anderen mit Lichtwellenleitern des RTTR-Systems Valcap vorgenommen, die im Leiter und im Schirm des Kabels, zusätzlich aber auch in zwei Kunststoffröhrchen positioniert sind.

In Bild 8 ist ein Zeitbereich dargestellt, in dem der Leiterstrom zunächst von 1 000 auf 2 000 A ansteigt, dann auf 1 500 A fällt und schließlich wieder auf 1 800 A ansteigt. Nach 70 Tagen Versuchsdauer wurde ein Dach oberhalb der Tröge installiert, das ein Wiederbefeuchten der Tröge durch Niederschläge verhindert und ein allmähliches Austrocknen durch Verdunstung erzwingt.

Bild 9 zeigt für beide Tröge den zeitlichen Verlauf der Leitertemperaturen. Während die grünen Kennlinien die gemessenen Temperaturen präsentieren, stehen die roten für Rechenergebnisse, die mit einem Finite-Elemente-Programm unter Berücksichtigung einer partiellen Austrocknung erzielt wurden.

Wie in Bild 9 zu sehen, steigt die Leitertemperatur nach dem ersten Stromsprung in dem mit Sand/Boden gefüllten Trog auf etwa 90 °C an, während sie im Bereich des hochwärmeleitfähigen Betons auf rd. 55 °C begrenzt bleibt. Für diesen

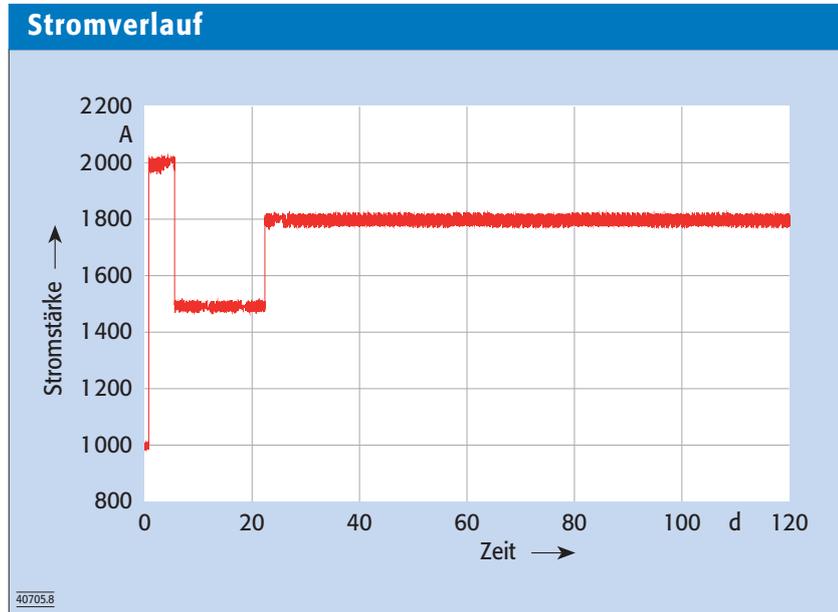


Bild 8. Stromverlauf

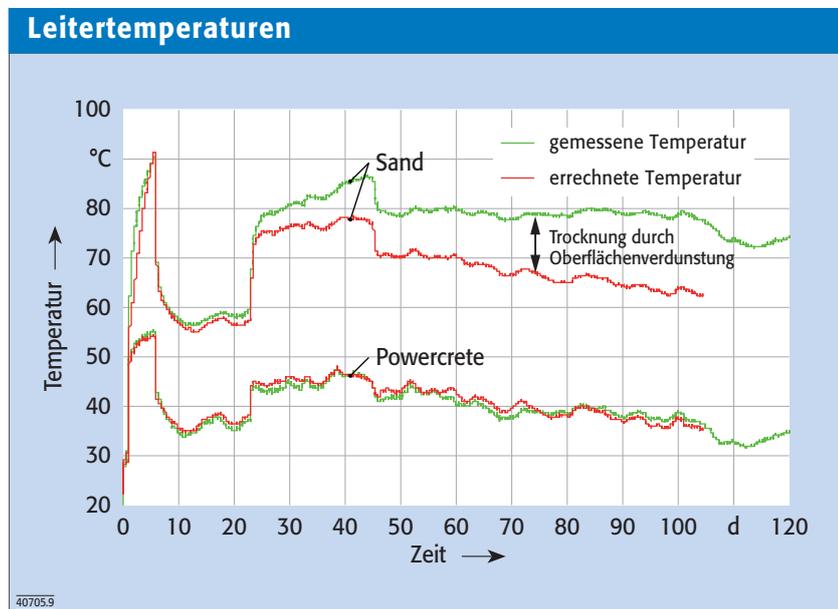


Bild 9. Gemessene (grün) und berechnete (rot) Leitertemperaturen für die beiden Tröge nach Bild 7

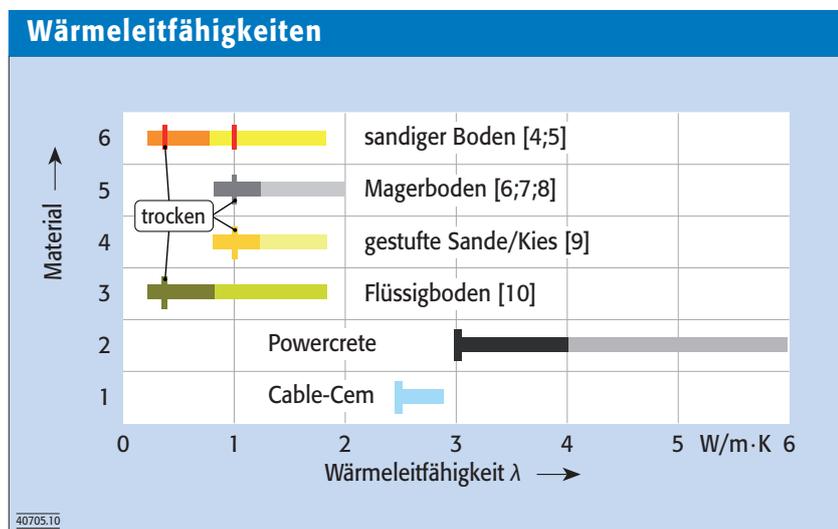


Bild 10. Wärmeleitfähigkeiten verschiedener Materialien für den Kabelgraben (die dunkleren Bereiche kennzeichnen geringen Feuchtegehalt); rot: Standardgrößen nach IEC/VDE [11]

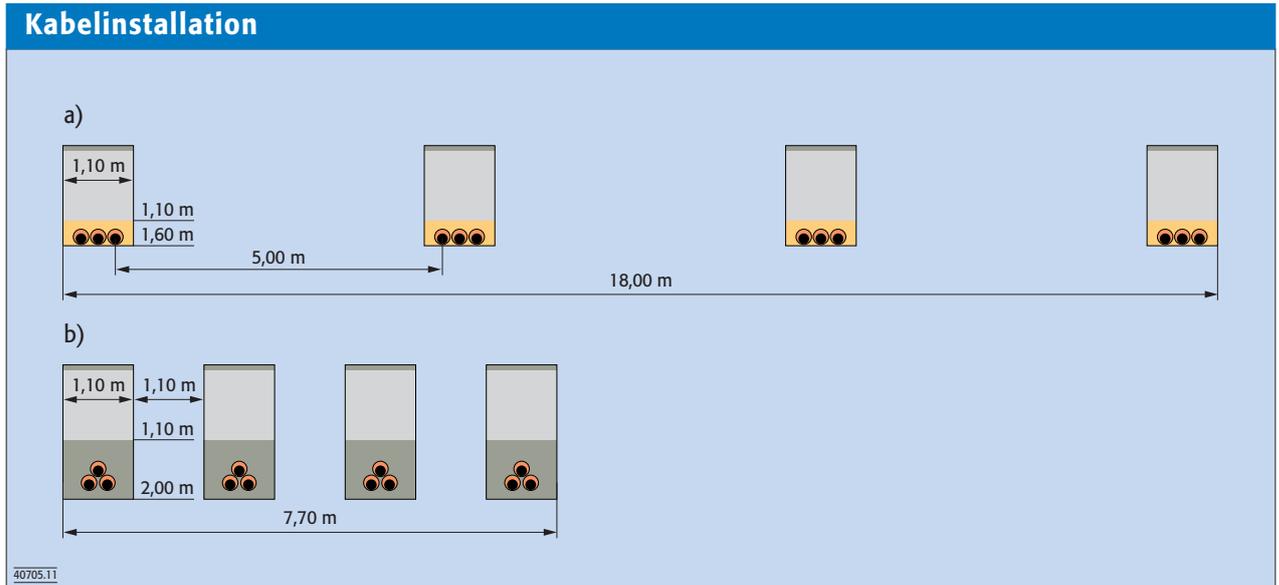


Bild 11. 380-kV-Kabelinstallation für eine $(n - 1)$ -redundante Übertragung von 3 600 A
a) Design in [12] mit einer Wärmeleitfähigkeit von $1,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ (ohne Rohre)
b) thermische Stabilisierung mit Powercrete, Anordnung nach Bild 12

Zeitbereich kann auf eine Wärmeleitfähigkeit des Powercrete von rd. $5,4 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ geschlossen werden.

Für die Simulationsberechnungen wurde ein temperaturabhängiges Austrocknungsmodell zugrunde gelegt, wobei für den linken Trog Wärmeleitfähigkeiten von $0,8 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ für den feuchten Zustand und $0,3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ für den ausgetrockneten Zustand angenommen wurden. Für eine Versuchsdauer von mehr als einem Monat weist Bild 9 hierzu eklatante Abweichungen zwischen Rechnung und Messung aus. Weitere Untersuchungen erklären dies durch eine zusätzliche Austrocknung des Bodens, die nicht vom Temperaturgradienten im Trog abhängt. Ursache ist die Verdunstung an der Oberfläche des Trogs. Weitere Simulationen mit einer hierdurch bewirkten zunehmenden Austrocknung führen zu einer sehr guten Übereinstimmung und weisen aus, dass die Wärmeleitfähigkeit des Sands auf $0,3 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ sinkt, während – unter den gleichen schwierigen Voraussetzungen – Powercrete eine Größe von $3,85 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ beibehält.

Diese Ergebnisse sind ermutigend, da sie die Verfügbarkeit eines Rückfüllmaterials ausweisen, dessen Wärmeleitfähigkeit um einen Faktor drei bis vier höher liegt als bei den bis heute eingesetzten Materialien. Im Gegensatz zu anderen Bettungsmaterialien – vor allem Sande oder Flüssigboden – erreicht

Powercrete eine hohe Wärmeleitfähigkeit auch unter dem Einfluss von Austrocknungsprozessen. Bild 10 zeigt die thermischen Eigenschaften verschiedener Materialien im Vergleich.

Die aufgezeigten Produkteigenschaften des hochwärmeleitfähigen Spezialbetons können weit reichende Konsequenzen haben: Auf der einen Seite die Möglichkeit, thermische Bottle-necks in Kabeltrassen – bei Kabelkreuzungen und -näherungen, benachbarten Fernheizsystemen usw. – zu beseitigen. Auf der anderen Seite die Möglichkeit, Kabelbelastbarkeiten zu vergrößern, Kabelgräben zu verkleinern oder auch einfachere Kabelkonstruktionen einzusetzen wie Querschnittsverminderungen, Übergang von Kupfer- auf Aluminiumleiter usw. Zwei Beispiele hierzu sollen im Folgenden diskutiert werden.

Beispiel 1: 380-kV-Kabeltrasse

Im vorliegenden Beispiel wird eine 380-kV-Trasse diskutiert, die in einem Joint Paper [12] der europäischen Netzbetreiber Entso-E und der europäischen Kabelhersteller Europacable beschrieben wird. Dabei handelt es sich um die Zwischenverkabelung einer 380-kV-Trasse, bei der von zwei Freileitungssystemen auf zwei Kabeldoppelsysteme übergangen wird, wobei jedes dieser Doppelsysteme als

$(n - 1)$ -Last einen Strom von 3 600 A beherrschen muss.

Bild 11 zeigt die diskutierte Anordnung, für die in [12] eine übliche thermische Stabilisierung mit einer Wärmeleitfähigkeit von $1,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ angenommen wurde. Jedes Kabelsystem liegt in einer Einebenenanordnung mit einem Achsabstand von $0,3 \text{ m}$. Dieser Achsabstand darf nicht über rd. $0,35 \text{ m}$ hinaus vergrößert werden, da sonst der Grenzwert der magnetischen Induktion an der

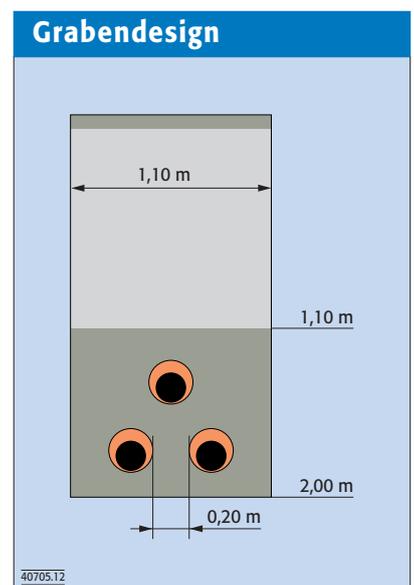


Bild 12. Graben-Design nach Bild 11 b) bei thermischer Stabilisierung mit Powercrete

Induktion

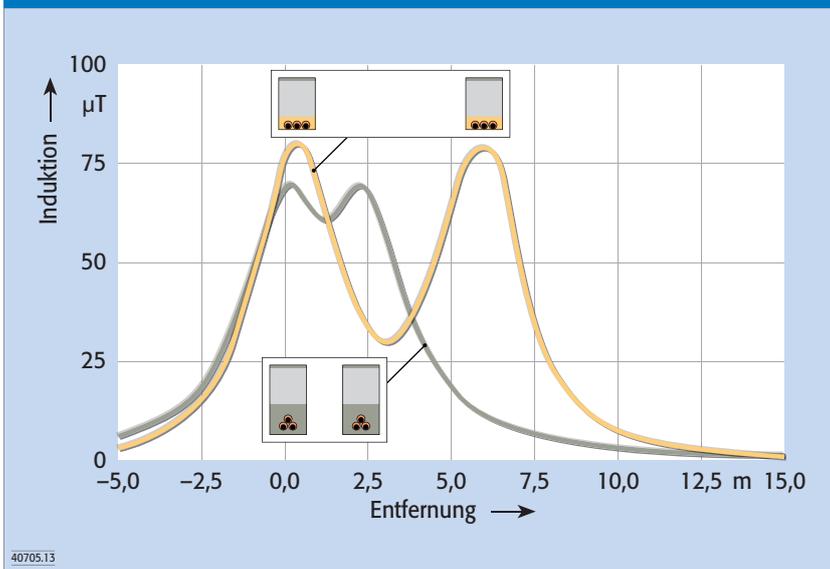


Bild 13. Horizontale Verteilung der magnetischen Induktion B an der Erdoberfläche während des $(n - 1)$ -Betriebs eines Kabel-Doppelsystems mit 3 600 A

Erdoberfläche von 100 μT überschritten würde. Unter dieser Voraussetzung sind entsprechende Abstände zwischen den Kabelsystemen einzuhalten, so dass eine Trassenbreite von rd. 18 m resultiert.

Als Alternative zu diesem Design wird Powercrete ($3,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$) als Rückfüllmaterial gewählt. Dadurch wird es in einer ersten Variante möglich, von Kupferleitern mit einem Querschnitt von $2\,500 \text{ mm}^2$ auf $2\,600 \text{ mm}^2$ -Aluminiumleiter zu wechseln. Insgesamt können hierdurch, trotz der Zusatzkosten für

das Rückfüllmaterial, etwa 1 200 €/m an Investitionskosten – also etwa die Kosten eines Kabelsystems – eingespart werden.

Die Bilder 11b und 12 zeigen als zweite Variante ein alternatives Design der Kabeltrasse: Die rohrverlegten Kabeladern jedes Systems sind mit einer Lücke von 0,2 m im Dreieck angeordnet und in Powercrete gebettet. Als sichere Größe wird eine Wärmeleitfähigkeit des ausgetrockneten Materials von $3,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ gewählt. Die Kabel liegen in PE-Rohren (200 mm Durch-

messer), so dass sie im Fehlerfall einfach ausgetauscht werden können. Der Bedarf an Powercrete liegt etwa bei $0,85 \text{ m}^3/\text{m}$ je Kabelgraben.

Wie im Bild 11b gezeigt, kann durch diese Maßnahme die Trassenbreite ganz erheblich von 18,0 m auf 7,70 m reduziert werden. Die Zusatzkosten für den Einsatz von Powercrete liegen bei etwa 650 €/m. Bei Realisierung von vier Einzelgräben bleiben die Aufwendungen für die Erdarbeiten gleich. Bild 13 weist aus, dass durch diese Maßnahme Größe und Einwirkungsbereich des Magnetfelds der Kabelanlage spürbar vermindert werden.

Beispiel 2: 110-kV-VPE-Kabel im Stahlrohr

Treten längs einer Kabeltrasse zu unterquerende Hindernisse wie Straßen, Bahngleise, Flüsse usw. auf, so wird meist eine Anordnung nach Bild 14 gewählt: In ein großes äußeres Stahl- oder Kunststoffrohr (Durchmesser etwa 500 mm) werden drei Leerrohre (meist mit Distanzhaltern) eingebracht. Der Raum zwischen diesen Leerrohren und dem äußeren Rohr wird mit Baustoff verfüllt. Zuletzt werden dann die Kabel in die Leerrohre eingezogen. Bild 14 zeigt die Rohranordnung in einer konkreten Kabelanlage.

Betrachtet wird ein 110-kV-VPE-Einleiterkabel mit einem Kupferleiterquerschnitt von $1\,200 \text{ mm}^2$, zu dem Bild 15 die erzielbaren Dauerstrombelastbarkeiten bei einer Anordnung nach Bild 14 zeigt. Während Kennlinie 2 den Fall erfasst, dass nur der Zwischenraum zwischen Stahlrohr und Kunststoffrohren ausgefüllt ist – der linke Punkt entspricht wieder dem Normalfall mit $\lambda = 1,0 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ – sind bei Kennlinie 1 auch die Kunststoffrohre mit CableCem gefüllt. Nach Bild 15 lässt sich die Strombelastbarkeit durch Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit des Füllmaterials auf $2,5 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ außerhalb der Kunststoffrohre um rd. 8 % und bei zusätzlicher Verfüllung der Kunststoffrohre um rd. 14 % steigern.

Zu beachten ist hierbei die quadratische Abhängigkeit, so dass eine Steigerung der Strombelastbarkeit um 14 % alternativ einer Verminderung des Leiterquerschnitts um rd. 25 % entspricht. Infrage kommen damit etwa ein $1\,000\text{-mm}^2$ -Kupferleiter oder, kostengünstiger, auch ein $1\,400\text{-mm}^2$ -Aluminiumleiter.

Kabeladern

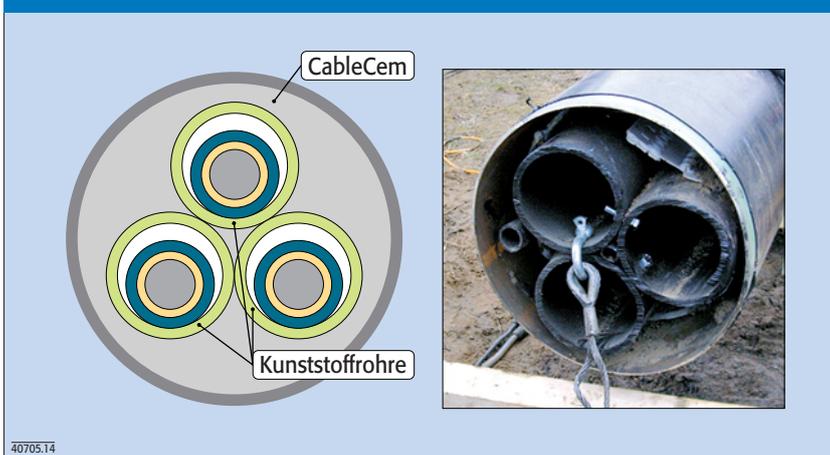


Bild 14. Verlegung von drei Kabeladern in Kunststoffrohren innerhalb eines großen Hüllrohrs

Folgerungen

HeidelbergCement liefert Spezialbetone (Powercrete) mit erhöhten Wärmeleitfähigkeiten von 3,0 bis 6,0 W/(m · K) für die Verfüllung von Kabelgräben. Für den Einsatz in Kabel-/Hüllrohrsystemen wird ein Verfüllbaustoff (CableCem) mit einer Wärmeleitfähigkeit von 2,5 W/(m · K) angeboten. Damit ergeben sich neue Gestaltungsmöglichkeiten für Energiekabelanlagen. In der vorliegenden Studie werden unterschiedliche Möglichkeiten zum Einsatz solcher Materialien und die erzielbaren Vorteile diskutiert.

Die Wirksamkeit dieser Materialien wird anhand zweier Anwendungsbeispiele gezeigt. Für eine hochbelastete 380-kV-Kabeltrasse können durch Einsatz von Powercrete spürbare Senkungen der Investitionskosten oder aber – noch interessanter – erhebliche Verringerungen der Grabenbreite bei gleichzeitiger Minderung des Magnetfelds erzielt werden. Spürbare Vorteile ergeben sich auch bei rohrliegenden Kabeln, wenn CableCem anstelle der heute üblichen Bentonit-suspensionen verwendet wird.

LITERATUR

- [1] Brakelmann, H.; Dietrich, J.; Märten, A.; May, H.-P.: Hochwärmeleitfähiger Spezialbeton für den Kabelgraben. *ew* Jg. 108 (2009), H. 14-15, S. 66 – 72.

Dauerlaststrom

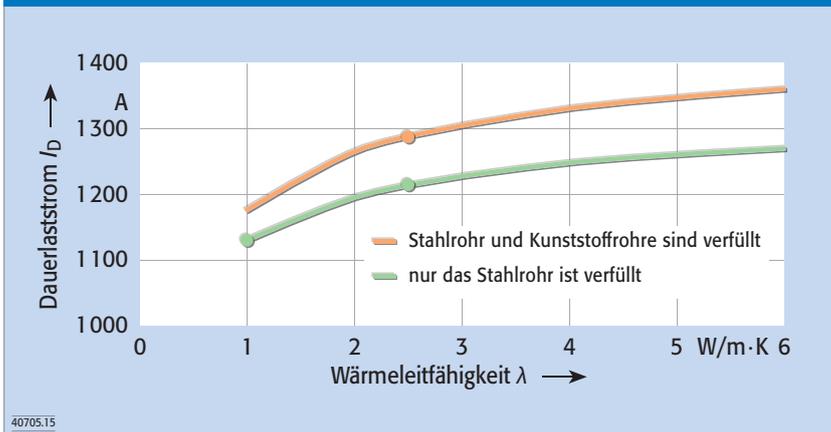


Bild 15. Höchstzulässiger Dauerlaststrom I_D als Funktion der Wärmeleitfähigkeit λ des Verfüllmaterials; 110-kV-VPE-Kabel mit Kupferleitern $3 \times 1 \times 1200 \text{ mm}^2$; Kennlinie 1 rot; Kennlinie 2 grün

- [2] DIN EN 12390-2 (2009): Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen. Deutsche Fassung der EN 12390-2; Beuth-Verlag.
- [3] DIN 1045-3 (2008): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung. Beuth-Verlag.
- [4] Heinhold, L.: Kabel und Leitungen für Starkstrom. Publicis MCD-Verlag, 1999, Erlangen.
- [5] Brakelmann, H.: Belastbarkeiten der Energiekabel. VDE-Verlag, 1985, Berlin, Offenbach.
- [6] CEGB-Standard 993 208 issue 1: TPS 2/10 (cables). 1978.
- [7] Reiter, A.: Das Wiener 380-kV-Kabel aus wärmetechnischer Sicht. *ÖZE* 9/10, 1979.
- [8] Angenend, M., et al.: Beschreibung einer großstädtischen 110-kV-Hochleistungskabelverbindung. *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 92 (1993), H. 7, S. 340 – 349.
- [9] Biewald, H., et al.: Untersuchungen über thermisch stabilisierte Kabelbettungsmaterialien. *Elektrizitätswirtschaft* Jg. 94 (1995), H. 12, S. 699 – 704.
- [10] Dietrich, J., et al.: Messung der Wärmeleitfähigkeiten von Flüssigböden. Interne

Studie, HeidelbergCement AG, 2010, Ennigerloh.

- [11] IEC: Calculation of the continuous current rating of cables (100 % load factor). Amendment 3 to IEC-publ. 60287, 1993.
- [12] Entso-E, Europacable: Feasibility and technical aspects of partial undergrounding of extra high voltage power transmission lines. Joint paper, Brussels, 2010.

(40705)

heinrich.brakelmann@uni-due.de

raymund.boeing@heidelbergcement.com

joerg.dietrich@heidelbergcement.com

hans-peter.may@nktcables.com

www.ets.uni-due.de

www.powercrete.de

www.heidelbergcement-geotechnik.com

www.nktcables.de

Wir weisen ausdrücklich darauf hin, dass das Erreichen der vorgenannten Eigenschaften eine geeignete Zusammensetzung, Herstellung, Verarbeitung und Nachbehandlung des Betons sowie eine sachgerechte, nach dem Stand der Technik durchzuführende Vorbereitung auf der Baustelle voraussetzt.

CableCem®:

HeidelbergCement

Baustoffe für Geotechnik GmbH & Co. KG

Neubeckumer Straße 92

59320 Ennigerloh

Telefon +49 2524 29-51700

Telefax +49 2524 29-51715

E-Mail geotechnik@heidelbergcement.com

www.heidelbergcement-geotechnik.de

Powercrete®:

Heidelberger Beton GmbH

Berliner Straße 10

69120 Heidelberg

Ansprechpartner: Alexis Pimpachiridis

Telefon +49 6221 481-39657

E-Mail powercrete@heidelberger-beton.de

www.heidelberger-beton.de/powercrete

HEIDELBERGCEMENT