Kabelleitungen im Übertragungsnetz

Autor(en): **Dinser, Sandro / Biasiutti, Gianni**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin.ch : Fachzeitschrift und Verbandsinformationen von Electrosuisse, VSE = revue spécialisée et informations des associations Electrosuisse, AES**

Band (Jahr): **112 (2021)**

Heft 9

PDF erstellt am: **01.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-977602

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Kabelleitungen im Übertragungsnetz

Studie zu Ausführungsarten | Im Leitungsbau gewinnen Verkabelungen an Bedeutung. In der Schweiz bestehen besondere Umstände, denn die Bauart mit dem Rohrblock genügt nicht, um der dichten Besiedlung und der gebirgigen Topografie gerecht zu werden. Die Studie präsentiert die Möglichkeiten zur Ausführung von Kabelleitungen und beschreibt deren Charakteristiken.

SANDRO DINSER, GIANNI BIASIUTTI

Beim Bau von Übertragungsleitungen kann eine Verkabelung Wegbereiter sein, um zivilisatorische, ökologische oder topografische Hindernisse zu überwinden, oder für eine Bündelung mit anderen Infrastrukturen in Tunneln. In der ersten Phase eines Leitungsvorhabens, im «Sachplan Übertragungsleitungen» (SÜL), findet eine Evaluation der Leitungsführung mit Varianten statt. Ziel ist die Festsetzung einer Leitungsführung sowie der Technologie (Freileitung oder Kabel). Das Verfahren wird vom Bundesamt für Energie geführt, unter Teilnahme der Stakeholder. Swissgrid als Projekteigner zeigt dabei die unterschiedlichen Varianten der Leitungsführung auf.

Der Rohrblock war bisher die Schweizer Standardlösung für Kabelleitungen. Daneben können Kabel in kleinere und grössere Rohre, in Stollen oder Tunneln eingezogen werden. Für den Bau solcher Anlagen kommen heute verschiedene innovative Techniken in Betracht. Diese erweitern den Spielraum der Leitungsführung und können auch hinsichtlich Kosten interessant sein. Dazu hat Swissgrid eine Studie durchgeführt, mit dem Ziel, alle für Schweizer Verhältnisse relevanten Ausführungsarten von Kabelleitungen zu erfassen und hinsichtlich Eignungen und Charakteristiken zu verstehen. Der Fokus lag dabei auf Trassenlängen von 2 km und mehr.

Vorgehen der Studie

Die Studie wurde einem Expertenteam in den Disziplinen Bau, Elektrotechnik und Thermik anvertraut. Einstieg war eine Literaturrecherche zu Kabelleitungen der obersten Netzebenen.

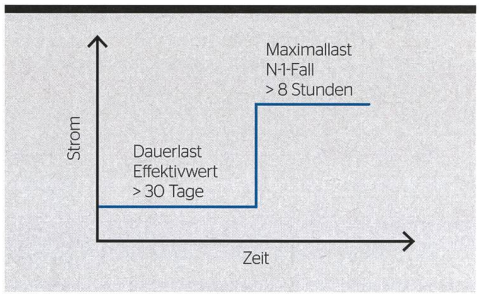


Bild 1 Stromprofil zur Spezifikation der Belastbarkeit von Kabelleitungen. Die Dauerlast bestimmt die Gleichgewichtstemperatur der Kabelleitung. Der Sprung auf Maximallast (bei einem N-1-Ereignis) führt zu einem weiterenTemperaturanstieg, wobei die Leitertemperatur frühestens nach 8 h den Grenzwert von 90 °C erreichen darf.

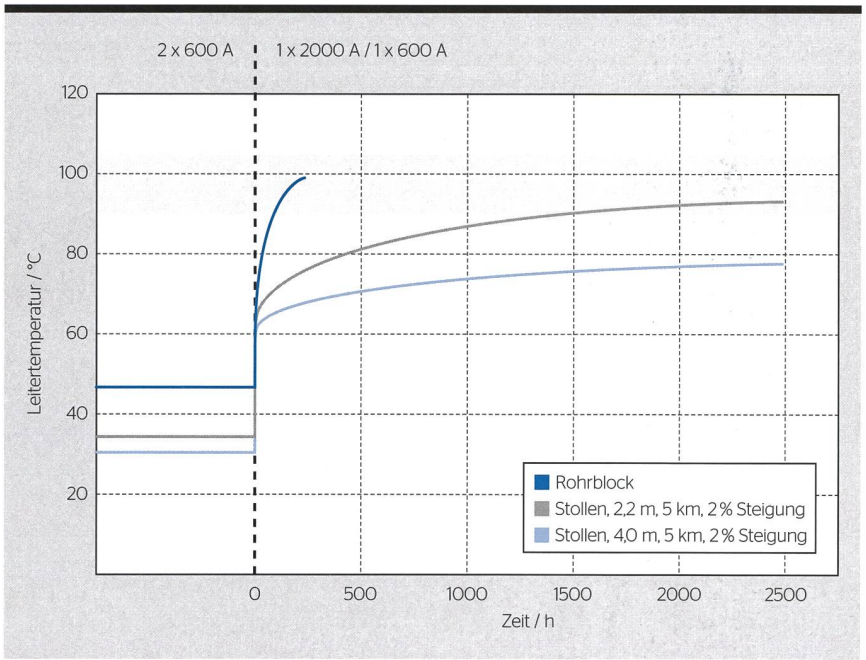


Bild 2 Leitertemperatur in Funktion der Zeit für zweisträngige Kabelleitungen unterschiedlicher Ausführung. Die Ausgangstemperatur bezieht sich auf eine lange Vorbelastung von 600 A. Zum Zeitpunkt null erfolgt ein Sprung auf 2000 A Maximallast. Stationäre Temperaturen werden beim Rohrblock nach Wochen und bei gelüfteten Stollen erst nach Monaten erreicht.

Bilder: Swissgrid

Danach verschaffte sich das Team einen Überblick über die Bauverfahren, vom Grabenbau über untertägig erstellte Röhren, Kleinstollen bis hin zu bergmännischen Stollen/Tunneln. Dann folgte ein technischer Dialog mit einem Hersteller von Maschinen für den Vortrieb von Rohren und Kleinstollen (Herrenknecht, 60% Weltmarktanteil) zum Stand der Technik sowie den Kosten der teils neuartigen Maschinentypen. Auf dieser Grundlage entwickelte das Team diverse Ausführungsarten von Kabelleitungen, untersuchte sie in allen massgebenden Aspekten und berechnete die spezifischen Kosten.

Nachfolgend wird über die Ausführungsarten, deren thermisches Verhalten und die Kosten berichtet.

Anforderungen an Kabelleitung

Um die Ausführungen vergleichen zu können, wurden Anforderungen einheitlich gewählt. Als Ausbau wurde festgelegt: 2 Stränge sowie ein Leiterquerschnitt von 2500 mm² Kupfer.

Die Belastbarkeits-Anforderung ist in einer Weise formuliert, welche die thermische Trägheit der Kabelleitung berücksichtigt. Diese Trägheit ist relevant, weil die höchsten Lasten im Übertragungsnetz sporadische, zeitlich begrenzte Ereignisse sind. Gegenüber solchen Starklastereignissen bieten Kabelleitungen eine bedeutende Belastbarkeitsreserve.

In diesem Sinne wurde ein schematisches Lastprofil gemäss **Bild 1** festgelegt. Das Profil besteht aus einer langandauernden, konstanten Vorlast – diese führt zu einer Gleichgewichtstemperatur – und einem Sprung auf eine temporäre Maximallast. Konkrete Werte, welche die Studie für die Vorlast resp. Dauerlast ansetzt, sind 600 oder 1200 A, und für die temporäre Maximallast sind es 2000 A. Limitierend für die Tragbarkeit des Stromes ist die Temperatur des Kabelleiters. Die maximal zulässige Temperatur beträgt 90 °C dauernd (105 °C kurzzeitig).

Bild 2 zeigt die thermische Trägheit von Kabelleitungen unter dem genannten Lastsprung. Dabei werden drei Ausführungsarten verglichen: Der Rohrblock sowie gelüftete Stollen mit 2,2 und mit 4 m Durchmessern. Dank einer Steigung des Stollens von 2% entsteht die Lüftung durch thermischen Auftrieb. Beim Rohrblock stellt sich unter der Dauerlast eine Leitertemperatur von 43 °C ein. Nach dem Lastsprung werden 90 °C innerhalb von 60 h erreicht. In den Stollen bleiben die Temperaturen unter der Dauerlast tief. Beim Sprung auf Maximallast erfolgt zunächst ein rascher Anstieg aufgrund der kleinen Wärmekapazität der umgebenden Luft. Dann kommt Bewegung in die Stollenluft und die weitere Erwärmung vollzieht sich nur noch langsam, wegen der Wärmeabgabe über die grosse Oberfläche des Stollens in die Speicher des Gebirges. Im 2,2-m-Stollen erreicht der Leiter die 90-Grad-Grenze nach 1500 h resp. zwei Monaten. Im 4-m-Stollen sättigt der Temperaturanstieg nach ca. 2000 h bei 77 °C. Die Illustration zeigt, dass sich das thermische Gleichgewicht, je nach Ausführung der Kabelleitung, erst nach Wochen oder Monaten einstellt – aufgrund der Speicherkapazität der umgebenden Massen.

In die Praxis des Netzbetriebs übersetzt, kann das schematische Lastprofil wie folgt verstanden werden: Die Dauerlast bedeutet den Effektivwert des Stroms in einem Zeitfenster von einem Monat mit hoher Last. Die Maximallast bedeutet den höchsten Wert im N-1-Fall. Letzterer sollte mindestens 8 h getragen werden können, bis zum Abschluss einer Intervention.

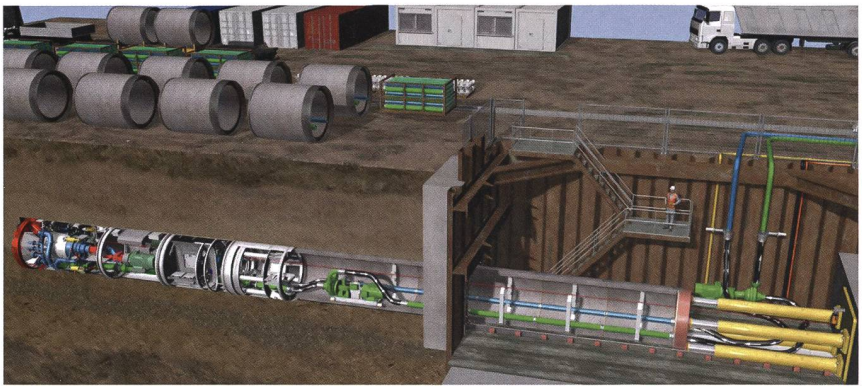


Bild 3 Illustration zum Microtunneling resp. Rohrvortrieb.

Bauverfahren

Klassische Bautechniken für Kabelleitungen sind der Grabenbau für die Erstellung von Rohrblöcken und Leitungskanälen sowie die Spreng- oder Frästechnik für den Vortrieb von begehbaren Stollen resp. Tunneln. Für den untertägigen Bau von Rohren und Kleinstollen stehen verschiedene teils innovative mechanische Vortriebstechniken zur Verfügung:

Horizontal Directional Drilling, HDD: Das Verfahren beruht auf der Technik der gerichteten Bohrung, wie von der Tiefenbohrung bekannt. Von einer Startbaugrube aus erfolgt eine Bohrung zur Zielbaugrube. Dort wird ein Räumer zur Aufweitung der Pilotbohrung an das Bohrgestänge angeschlossen und zurückgezogen. Schliesslich wird das Schutzrohr eingezogen. Diese Technik eignet sich zum unterfahren von Flüssen, Strassen oder Werkleitungen. Sie lässt sich allerdings nur in standfesten Böden oder weichem Fels einsetzen. Die Bauabschnitte (Haltungslängen) betragen bis 2 km.

E-Powerpipe (Herrenknecht): Herzstück des innovativen Verfahrens ist eine miniaturisierte ferngesteuerte Tunnelbohrmaschine. Sie ist Stahlrohren vorgeschaltet. Diese Rohre haben eine Einheitslänge von 9 m, sind kuppelbar und beinhalten die gesamte Ver- und Entsorgung der Maschine. Der Vortriebsprozess beginnt in einem Startschacht. Von dort aus werden die Vortriebsrohre mit einer Vorschubeinrichtung zum Zielschacht gedrückt, wobei die Bohrmaschine den Ausbruch tätigt. Dabei werden die Vortriebsrohre sukzessive eingelegt. Nach dem Durchstich im Zielschacht wird die Bohrmaschine abgekoppelt. An ihrer Stelle wird das definitive Kunststoffrohr angehängt und durch Rückzug der Vortriebsrohre eingezogen. Das Verfahren eignet sich für alle Arten von Lockergesteinen, auch im Grundwasser. Die Rohrdurchmesser betragen maximal 700 mm, die Tiefenlage etwa 2 m und die Abschnittslänge bis zu 1,5 km.

Bilder: Herrenknecht | Swissgrid

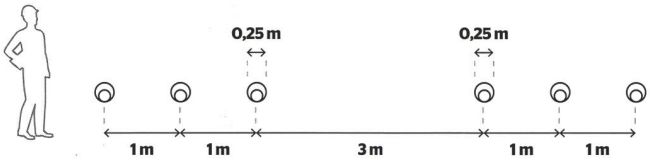
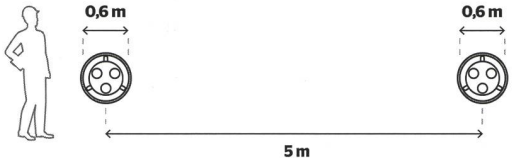
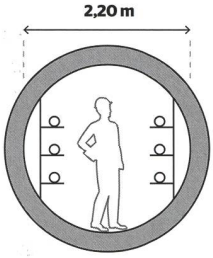
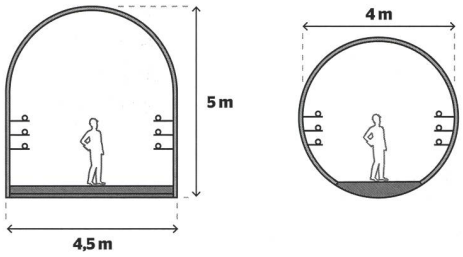
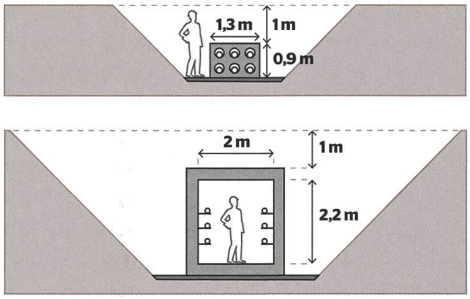
Ausführung / Symbolbild	Baumethode	Masse
Phasenrohre 	**E-Power-Pipe**	**6 Rohre 250 mm** **Haltungslänge 1500m**
Strangrohre 	**HDD**	**2 Rohre 600 mm** **Haltungslänge 2000 m**
	E-Power-Pipe	**2 Rohre 600 mm** **Haltungslänge 1500 m**
	Microtunneling	**2 Rohre 1200 mm** **Haltungslänge 1000 m**
Begehbarer Mikrostollen 	**Microtunneling**	**Rohr 2200 mm** **Haltungslänge 1500 m**
Tunnel 	**Sprengvortrieb SPV**	**Breite 4,5 m, Höhe 5,5 m** **Haltungslänge 5000 m**
	Fräsvortrieb TBM	**Durchmesser 4,0 m** **Haltungslänge 10 000 m**
Grabenbau 	**Rohrblock**	**6 Rohre 250 mm** **Haltungslänge unbeschränkt**
	Leitungskanal	**Breite 2 m, Höhe 2,2 m** **Haltungslänge unbeschränkt**

Tabelle 1 Übersicht über die verschiedenen Ausführungsarten von Kabelleitungen.

Microtunneling (Bild 3): Der Rohrvortrieb ist ein bewährtes Verfahren mit ferngesteuerter Tunnelbohrmaschine, die sich am Kopf von Stahlbeton-Rohrelementen befindet. Eine Presse treibt die Rohre vom Start- zum Zielschacht. Im Startschacht werden laufend weitere Vortriebsrohre versetzt und vorgeschoben. Vortrieb und Einbau der definitiven Stollenverkleidung erfolgen somit in einem Arbeitsschritt. Das Verfahren kann in allen Baugründen angewendet werden und ist für die Erstellung von kleinen, nicht begehbaren Rohren bis hin zu grösseren Stollen mit Durchmessern von maximal ca. 4 m geeignet. Die Abschnittslängen betragen 0,5 km bei kleineren Rohren und 1,5 km bei grösseren Rohren. Die Tiefenlage beträgt rund 10 m.

Weitere neue mechanische Verfahren für den Bau von langen Kabelleitungen sind das Directpipe-Verfahren sowie die Grabenfräse (beide Herrenknecht). Abgesehen davon gibt es diverse Techniken für kurze Unterfahrungen (Geleise, Strassen, Flüsse) im Rahmen von Grabenbauten. Darauf wird hier nicht eingegangen.

Ausführungsarten von Kabelleitungen

Ausgehend von den Bauverfahren wurden Ausführungsarten für kostenoptimierte Kabelleitungen entwickelt. Wichtigste Merkmale der Ausführung sind Profilabmessungen sowie Kabeleinzug und -anordnung. Untersucht wurden u.a. die spezifischen Eigenschaften bezüglich Wärmeabfuhr, Belastbarkeit und magnetischer Feldstärken. Eine Übersicht zu den Ausführungen gibt **Tabelle 1**. Bei Techniken mit beschränkter Haltungslänge (Distanz zwischen Start- und Zielschacht) besteht die Kabelleitung aus einer Folge von Bauabschnitten.

Ein entscheidender Aspekt für die Wahl der Ausführung ist die Geologie. Gewisse Vortriebsverfahren sind universell einsetzbar (z.B. Microtunneling), während andere nur für bestimmte geologische Verhältnisse infrage kommen (**Tabelle 3**). Entscheidend sind zudem die topografischen Verhältnisse und die Hindernisse an der Oberfläche.

Zur Unterbringung der Kabel-Muffen sind nur beim Rohrblock bauliche Vorkehrungen nötig. Bei den Ausführungen mit begehbaren Stollen werden die Muffen direkt am Parament montiert, und bei jenen mit kleineren Rohren dienen die baubedingten Start- und Zielschächte der Unterbringung der Muffen. Die Schachtabstände entsprechen den möglichen Kabel-Lieferlängen von 1,5 bis 2 km.

Für eine gute Wärmeabfuhr werden die Kabel, wenn immer möglich, offen, d.h. ohne Schutzrohre verlegt. In den begehbaren Stollen, Tunneln oder Kanälen sind die Kabel in Ebenen angeordnet, mit 40 cm Achsabstand. Bei den Strangrohren auf Briden im Dreieck mit ca. 25 cm Achsabstand. Für den Kabeleinzug in die Strangrohre sind die Briden mit Rollen versehen.

Um Zusatzverluste durch induzierte Schirmströme zu vermeiden, werden die Schirme nach dem Prinzip des Cross-Bondings geschaltet; alternativ und bei kürzeren Leitungen mit einseitiger Erdung und parallelen Erdleitern.

Mit der Distanzierung der Kabel können von den Nachbaradern induzierte Wirbelstromverluste in den Schirmen reduziert werden. Bei berührender Verlegung betragen diese Wirbelstromverluste bis zu 50 % der Übertragungsverluste im Leiter.

Die Wärmeabfuhr und damit die Belastbarkeit ist die wichtigste technische Charakteristik einer Ausführungsart. Die verschiedenen Ausführungen unterscheiden sich diesbezüglich stark. Hierzu der nächste Abschnitt.

Wärmeabfuhr

Thermische Berechnungen von Kabelleitungen werden in der allgemeinen Praxis mit den Formelsätzen der IEC durchgeführt. Die Anwendung dieser

Wärmeleitfähigkeit / W/m K	Festgestein: 2,0 Beton: 1,5 Lockergestein feucht: 1,0 Lockergestein trocken: 0,5
Wärmekapazität / J/kg K	Festgestein: 1000 Lockergestein feucht: 1800 Lockergestein trocken: 850
Temperatur Untergrund / °C	10 bis 20
Aussentemperatur / °C	-5 bis 25
Steigung Rohre oder Stollen / %	1 bis 3

Tabelle 2 Werte der Parameter für die thermischen Berechnungen.

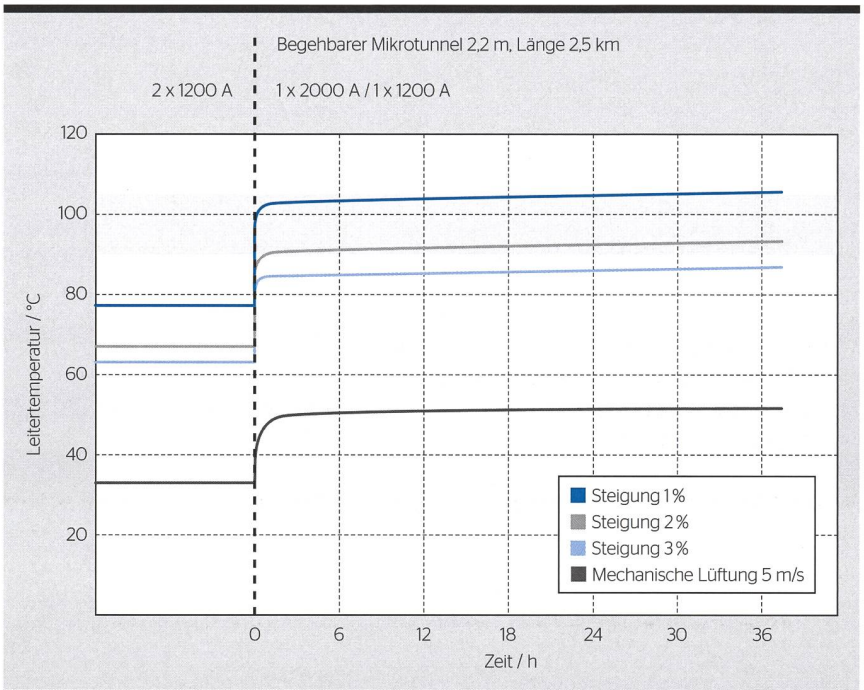


Bild 4 Leitertemperatur einer zweisträngigen Kabelleitung im Mikrotunnel mit Lüftung unterschiedlicher Stärke. Lastsprung von 1200 A Dauerlast auf 2000 A. Das Bild zeigt den grossen Einfluss der Intensität des Luftstroms auf die Wärmeabfuhr resp. Belastbarkeit der Kabelleitung.

Bilder: Herrenknecht | Swissgrid

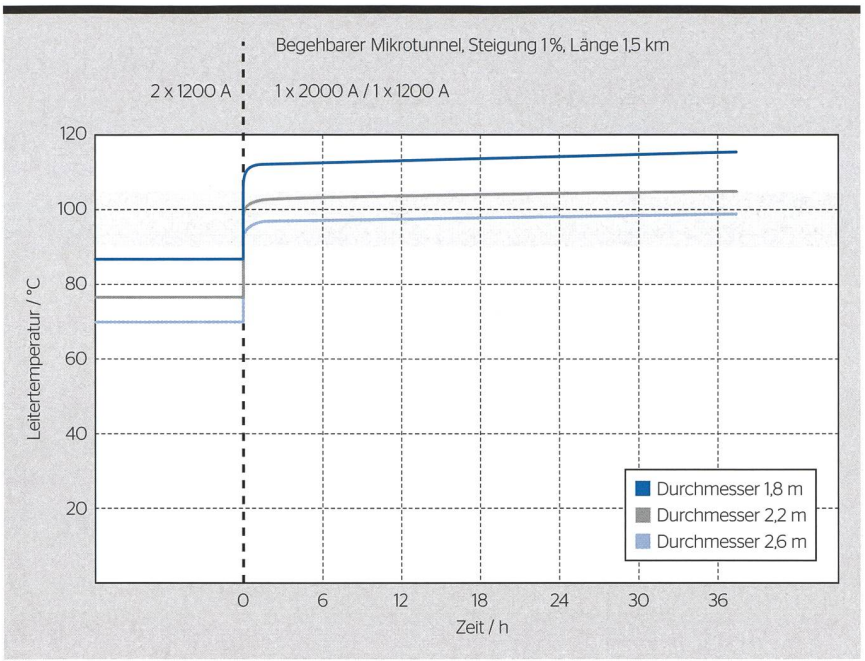


Bild 5 Leitertemperatur einer zweisträngigen Kabelleitung im Mikrotunnel bei 1 % Steigung mit verschiedenen Durchmessern. Lastsprung von 1200 A Dauerlast auf 2000 A. Das Bild zeigt die bessere Wärmeabfuhr bei grösserer Stollenoberfläche. Zum Einfluss der Steigung siehe Bild 4.

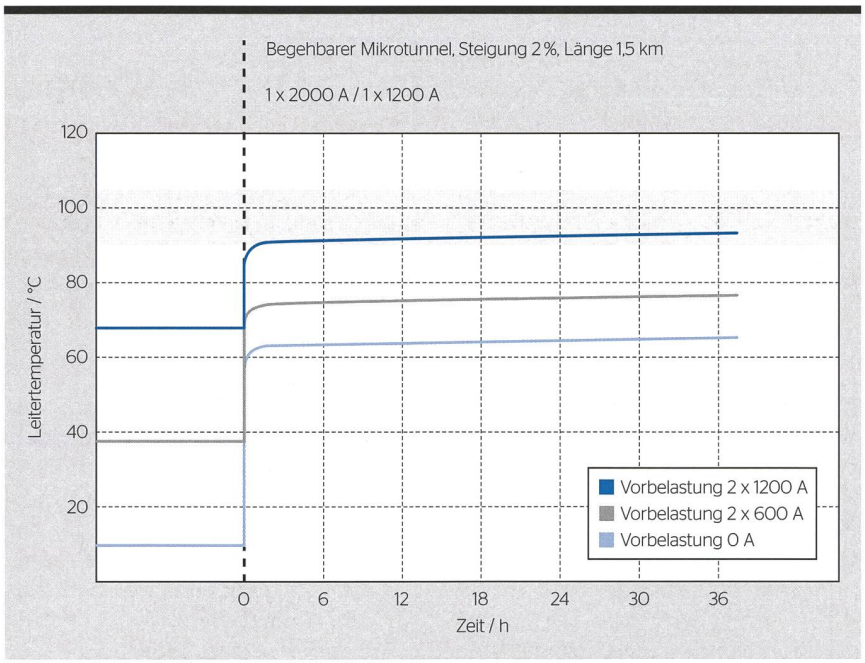


Bild 6 Leitertemperatur beim Sprung auf Maximallast, ausgehend von verschiedenen Vorbelastungen: Keine, 600 A, 1200 A. Eine hohe Vorbelastung füllt die Wärmespeicher der umgebenden Massen, so dass die Zusatzwärme nach dem Lastsprung verstärkt axial abgeführt werden muss.

Formelsätze bei Kabeln in gelüfteten Rohren resp. Stollen deckt allerdings nur stationäre Belastungen ab. Dagegen war die praxisnahe Betrachtung des dynamischen Verhaltens einer Kabelanlage spezieller Fokus der Studie. Deshalb wurde ein eigenes Berechnungsmodell erstellt, auf der Grundlage von Matlab/Thermo. Soweit möglich, wurde das Werkzeug mit den IEC-Ansätzen verglichen.

Die Werte der für die Berechnung massgebenden Parameter sind in **Tabelle 2** zusammengefasst. Der angegebene Wertebereich deckt die typischen Umgebungsbedingungen in der Schweiz ab.

Bei Varianten mit kleinen Rohren ohne Lüftung, namentlich beim Rohrblock und den Phasenrohren, erfolgt die Abfuhr der Verlustwärme nur radial: Die Wärme wird über die Luft im Rohr an die umgebende Bettung abgeleitet, dann an den Untergrund und schliesslich an die Oberfläche.

Bei Varianten mit Lüftung erfolgt die Abfuhr in zwei Richtungen: Ein Teil der Wärme wird mit der Luftströmung längs an die Oberfläche abgeführt. Ein anderer Teil mittels Konvektion der turbulenten Luft radial an die Stollenwand. Der radiale Wärmetransport wird durch die axiale Luftströmung noch verstärkt, weil sie die turbulenten Luftbewegungen intensiviert. Die radiale Wärmeabgabe dominiert umso mehr, je grösser der Stollendurchmesser und je länger der Stollen.

Die axiale Luftströmung kann entweder natürlich durch thermischen Auftrieb oder mechanisch durch Ventilatoren getrieben sein. Die folgenden Ausführungen zeigen, dass die Luftströmung einen grossen Einfluss auf die Wärmeabfuhr und folglich die Belastbarkeit einer Kabelleitung hat.

Bild 4 zeigt den Verlauf der Leitertemperatur (2500 mm² Cu) für unterschiedliche Luftströmungen beim Sprung von Dauerlast auf Maximallast am Beispiel des begehbaren Stollens mit 2,2 m Durchmesser. Der Stollen ist 1,5 km lang, entsprechend der maximalen Haltungslänge. Die angegebene Leitertemperatur bezieht sich auf das Ende des Lüftungsabschnitts, wo die Temperatur am höchsten ist. Treiber der Strömung sind unterschiedliche Steigungen oder eine mechanische Lüftung mit 5 m/s. Die natürliche Strömung bei 2 % Steigung beträgt rund

Bilder: Swissgrid

1 m/s. Diese Steigung gewährleistet in der Praxis einen zuverlässigen Luftstrom.

Bei 2 % Steigung kann im mittelgrossen Stollen von **Bild 4** die hohe Last annähernd getragen werden. Wenn die Steigung des Stollens durch die Topografie limitiert ist, kann die Höhendifferenz mit einem Kaminrohr an der Abluftöffnung erhöht werden. Mit der Option einer mechanischen Lüftung lässt sich die Belastbarkeit in weiten Bereichen ertüchtigen. Dabei kann diese Lüftung nach Bedarf oder dauernd (gemäss **Bild 4**) aktiviert werden.

Ein wichtiger Einflussfaktor auf die Wärmeabfuhr ist die Profilabmessung des Stollens. Dies zeigt **Bild 5** anhand einer relativ kleinen Variation des Durchmessers von 1,8 bis 2,6 m. Es handelt sich dabei um denselben Stollen wie in Bild 4, aber mit einer Steigung von nur 1 %. Die bessere Wärmeabfuhr bei grösserem Durchmesser beruht auf der Tatsache, dass die grössere Stollenwandoberfläche mehr umgebende Speichermasse erschliesst.

Die mittlere Dauerlast bestimmt die stationären Ausgangstemperaturen von Kabel und Umgebung vor dem Lastsprung. Die maximale Belastbarkeit ist umso höher, je tiefer die vorangehende Dauerlast ist. **Bild 6** zeigt diesen Zusammenhang am Beispiel des begehbaren Mikrotunnels für drei verschiedene Vorbelastungen.

Mit mechanischer Lüftung kann die Wärmeabfuhr in weiten Bereichen gesteigert werden, dies umso mehr, je grösser der Querschnitt des Stollens ist. **Bild 7** zeigt den Temperaturverlauf beim Lastsprung in Rohren/Stollen verschiedener Durchmesser bei einem Luftstrom von 5 m/s. Beim grössten Durchmesser von 4,5 m wirkt die Lüftung so stark, dass die Belastbarkeit der Kabel praktisch gleich hoch ist wie bei einer Kabelführung in freier Luft (für 2500 Cu: ca. 2800 A dauernd). Die Effizienz der Wärmeabfuhr beruht primär auf der grossen Oberfläche des Stollens, d.h. der grossen angeschlossenen Speichermasse. Da die Wärmeabfuhr im grossen Stollen hauptsächlich radial erfolgt, steigt die Leitertemperatur bei einer Verlängerung des Lüftungsabschnitts nur wenig an.

In Rohrblöcken, wo keine Luftzirkulation möglich ist, muss die Kabelwärme radial abfliessen. Dabei gelangt sie zunächst in die Speicher des umge-

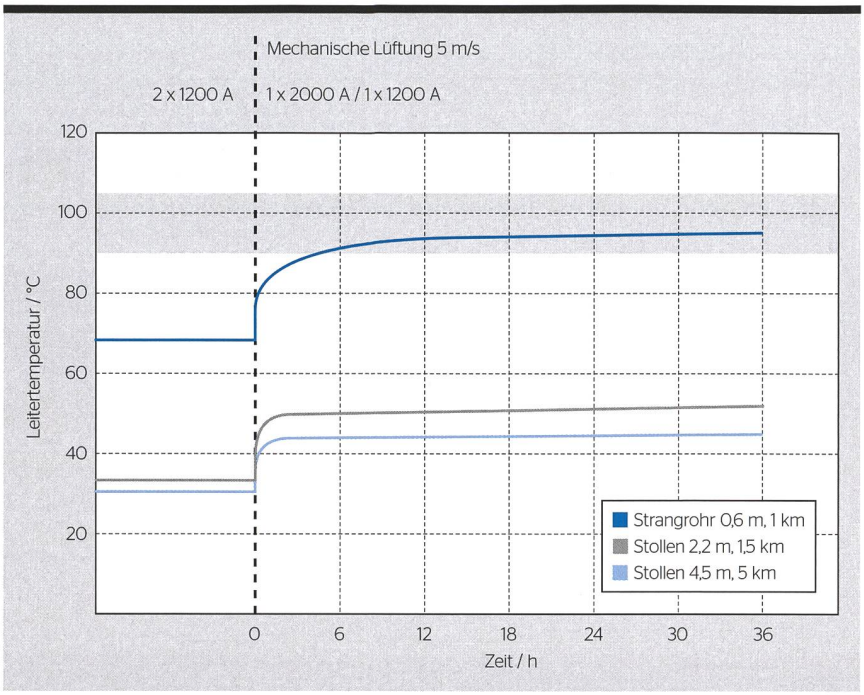


Bild 7 Leitertemperatur von Kabelleitungen unterschiedlicher Ausführungen beim Sprung auf Maximallast, unter mechanischer Lüftung mit 5 m/s. Das Bild illustriert die höhere Effizienz der Lüftung bei grösseren Rohr- resp. Stollendurchmessern. Bei grossen Stollen fliesst die Wärme vor allem radial ab, dank der ausgedehnten Oberfläche.

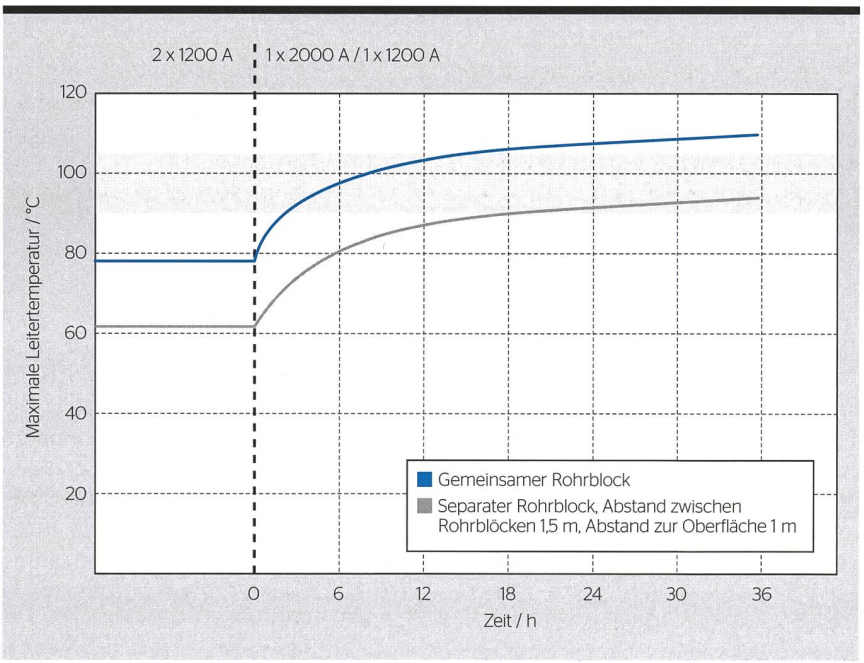


Bild 8 Leitertemperatur beim Lastsprung der zweisträngigen Leitung im gemeinsamen und im separaten Rohrblock. Die Separierung der beiden Stränge verbessert die Wärmeabfuhr.

Bilder: Swissgrid

Ausführungsvariante	Geologie					
	Lockergestein Deckschicht	Lockergestein Schotter Hangschutt	Lockergestein Moräne	Fels weich Molasse Sandstein	Fels hart Granit, Basalt Kalkstein	Note Strombelastbarkeit 1 bis 5
Kabelleitung Untertagebau						
6 Phasenrohre, E-Powerpipe, 250 mm	6,6	6,8	7,0			3
2 Strangrohre, E-Powerpipe, 600 mm	5,9	5,9	6,0			1
2 Strangrohre, HDD, 600 mm			5,7	6,7		1
2 Strangrohre, Microtunnel, 1200 mm	10,5	10,6	11,1	13,4	14,7	2
2 Strangrohre, Directpipe, 1000 mm	7,4	7,7	8,4	10,7		2
Begehbarer Microtunnel, 2200 mm	10,6	10,7	11,1	12,7	13,6	4
Gesprengter Stollen					10,5	5
Gefräster Stollen, Gripper-TBM					11,2	5
Gefräster Stollen, Einfachschild-TBM				15,5		5
Gefräster Stollen, TBM Bruststützung		26,1	26,1			5
Kabelleitung Grabenbau						
Grabenfräse, Pipe Express, 900 mm	6,4	6,4	6,4			2
Kabelrohrblock	5,4	5,4	5,4	6,2		2
Leitungskanal	10,2	10,2	10,2	13,2		4

Tabelle 3 Übersicht über die Kosten, die Eignung für unterschiedliche Geologien und die Belastbarkeit verschiedener Ausführungsarten, 2 Stränge, 2500 mm² Cu. Kostenangaben bedeuten Mio. CHF pro Kilometer. Die Note zur Strombelastbarkeit ist eine einheitslose Vergleichsgrösse.

benden Materials. Dann erfolgt zunehmend eine Wärmeleitung via Erdboden an die Umgebungsluft. **Bild 8** zeigt den Temperaturverlauf des Leiters beim Lastsprung, wobei die sechs Kabel entweder in einem Block liegen oder in zweien im Abstand von 1,5 m. Die Distanzierung der beiden Systeme steigert die Belastbarkeit: Im gemeinsamen Block werden 90 °C nach 3 h, bei separaten Blöcken erst nach 20 h erreicht.

Die Überdeckung des Rohrblocks resp. die Verlegetiefe hat wenig Einfluss auf die Belastbarkeit unter transienter Last: Berechnungen mit variabler Tiefenlage haben ergeben, dass die Erwärmung in der ersten Woche in einem Radius von nur etwa 1 m in die Umgebung eindringt. D.h. die Verlegtiefe beeinträchtigt die Belastbarkeit nur in Bezug auf Dauerlast, nachdem alle Speicher der umgebenden Massen gefüllt sind. Bei bergmännischen Stollen sind die Speichermassen so gross, dass das thermische Geschehen keinen Bezug zur Oberfläche hat.

Kostenberechnung

Die Berechnung der Baukosten der verschiedenen Ausführungen erfolgte «bottom-up», gemäss Maschinenkosten, Personalbedarf, Installationen, Vortriebsleistungen, sowie bei Schächten, Voreinschnitten und Ausbauten nach Einheitspreisen.

Die geologischen Verhältnisse haben wesentlichen Einfluss auf die Baukosten (Vortriebsgeschwindigkeit, Ausbauten); gewisse Bauverfahren sind nur unter bestimmten Verhältnissen anwendbar. Zur Berücksichtigung dieser Einflüsse wurden fünf geologische Typen gemäss **Tabelle 3** definiert.

Die Angaben beziehen sich einheitlich auf Ausführungen mit 2 Strängen und Leitern mit 2500 mm² Kupfer. Die Preise für die Kabel beruhen auf ausgeführten Projekten sowie Richtofferten. Die Kosten der Ausführungen sind in **Tabelle 3** zusammengestellt.

Aus den Ergebnissen der Studie wurde schliesslich ein Instrument für die Planung von Leitungsvorhaben entwickelt. Das Instrument, der «Baukasten Leitungen», besteht aus einem Katalog diverser Ausführungen mit Beschreibungen von Eignung und Charakteristiken sowie einem Excel-Tool zur Kostenberechnung. Mit Einschluss von Freileitungen, Übergangsbauwerken, kurzen Unterfahrungen bei Grabenbauten sowie Blindleistungskompensation deckt es alle Aspekte des Leitungsbaus ab. Darüber soll in einem späteren Artikel berichtet werden.

Schluss

Für die Errichtung von Kabelleitungen bieten sich heute diverse Bauverfahren an. Innovationen betreffen die Untertage-Verfahren, namentlich den Vortrieb von Rohren und Kleinstollen mit ferngesteuerten Bohrern/Fräsen über lange Bauabschnitte. Je nach Baugrund und Topografie kommen unterschiedliche Verfahren in Betracht.

Die Kostenübersicht in **Tabelle 3** zeigt, dass der Kabelrohblock erwartungsgemäss eine günstige Ausführungsart darstellt. Je nach Raumwiderständen und Belastbarkeitsanforderung stehen jedoch andere Ausführungen im Vordergrund: Wenn Grabenbauten erschwert sind und Mehrlängen oder Umweltauswirkungen verursachen, kommen die Vorteile des Untertagebaus der Phasen- und Strangrohre zum Tragen. Andererseits, wenn hohe Belastbarkeit gefordert ist, sind Stollen mit grösserem Profil und guter Wärmeabfuhr vorteilhaft, weil damit Doppelkabel vermieden werden können und die Möglichkeit einer mechanischen Lüftung grossen Spielraum zur Ertüchtigung der Belastbarkeit eröffnet. In der Schweiz mit ihrer kupierten Topografie und der nahen Felsoberfläche bietet der gesprengte Stollen oft eine gute Option mit hoher Belastbarkeit.

Kabelleitungen besitzen dank der umgebenden Massen eine thermische Trägheit. Dies verleiht ihnen eine bedeutende Reserve gegenüber temporären Maximallasten. Je nach Ausführung und Lüftung stellen sich stationäre Temperaturverhältnisse erst nach Wochen oder Monaten ein. Im Gegensatz zur Freileitung muss deshalb bei einer Kabelleitung der zeitliche Aspekt der Belastung berücksichtigt werden – um eine Überdimensionierung zu vermeiden.

Autoren
Dr. **Sandro Dinser** ist Leiter Requirements & Quality Lines.
→ Swissgrid AG, 5000 Aarau
→ sandro.dinser@swissgrid.ch

Dr. **Gianni Biasiutti** ist freischaffender Consultant.
→ Biasiutti Consulting GmbH, 6005 Luzern
→ bia@cmc-solution.ch

La version française de cet article paraîtra dans le Bulletin 12/2021.

QUAND LES CHOSES PRENNENT PLUS DE TEMPS QU'ELLES NE DEVRAIENT...

https://eturnity.ch/fr

E TURNITY

FACILITER VOTRE TRAVAIL QUOTIDIEN POUR LE CONSEIL ET LA VENTE

1. Jusqu'à 80 % de gain de temps dans le conseil et les ventes
2. 5-10 minutes pour une simulation technologique professionnelle
3. Transfert sans effort de toutes les informations du projet dans le système numérique
4. Conversion directe en offre client
5. Plus de temps pour le client

GEBÄUDETECHNIK KONGRESS 2021

Building Lifecycle Excellence

28. Oktober 2021 | Empa, Dübendorf & Online

Leitthema 2021: Kompetenzen & Dekarbonisierung.

Jetzt anmelden!

gebaeudetechnik-kongress.ch