Unterirdische Verlegung von Höchstspannungsleitungen

Autor(en): **[s.n.]**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association Suisse des Electriciens, de l'Association des Entreprises électriques suisses**

Band (Jahr): **79 (1988)**

Heft 18

PDF erstellt am: **01.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-904079

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

Unterirdische Verlegung von Höchstspannungsleitungen

Bericht ausgearbeitet von einer VSE-Arbeitsgruppe

Seit einigen Jahren zeigen sich bei der Erstellung von Freileitungen für Höchstspannungen zunehmende Widerstände; vielfach wird gefordert, die Möglichkeiten einer Verkabelung zu prüfen. Obwohl sich die höchsten eidgenössischen Instanzen in mehreren Streitfällen zugunsten von Freileitungen ausgesprochen haben*, könnte für gewisse, schutzwürdige Gebiete durchquerende Abschnitte eine Verkabelung verlangt werden. In Zukunft werden aus verschiedenen Gründen (Umweltschutz, Stadtgebiete) derartige Situationen vermehrt vorkommen. Die Elektrizitätswerke werden infolgedessen immer öfters mit den Problemen einer Verkabelung von Höchstspannungsleitungen konfrontiert.

** Siehe auch die Stellungnahme der Eidgenössischen Kommission für elektrische Anlagen vom 28. Juli 1987 [2].*

1. Einleitung

1.1 Vorwort

Die mit einer Verkabelung verbundenen Probleme haben sich in den letzten Jahren etwas geändert. Aus diesem Grunde wurde eine VSE-Arbeitsgruppe beauftragt, den aus dem Jahr 1979 stammenden Bericht: «Verkabelung von Höchstspannungsleitungen» [1] auf den neuesten Stand zu bringen. Der Fragenkatalog wurde überprüft und die Kabelfabriken haben verschiedene Lösungen, die zurzeit verwirklicht werden könnten, erneut studiert. Für die Spannungsebenen 220 und 380 kV wurden folgende Probleme untersucht:

1. Elektrotechnische Fragen
2. Bautechnische Fragen
3. Betriebliche Fragen
4. Umweltfragen
5. Rechtliche Fragen
6. Kostenfragen

Die Arbeitsgruppe kam zum Schluss, dass bei Höchstspannungen jede Verkabelung einen Sonderfall darstellt und deshalb individuell behandelt werden muss. Dank den heutigen Kenntnissen kann man sich einen generellen Überblick verschaffen, aber die jeder einzelnen Verbindung eigenen Bedingungen lassen die Aufstellung starrer Regeln nicht zu. Die wenigen in der Schweiz gewonnenen Erfahrungen haben gezeigt, dass oft unerwartete Probleme bei der Projektierung und beim Bau von unterirdischen Verbindungen auftreten. Der nachstehende Fragenkatalog zeigt die verschiedenen Probleme auf, welche bei der Ausführung auftreten können. Die Suche nach spezifischen Lösungen bleibt jeweils dem einzelnen Werk überlassen.

1.2 Allgemeines

Folgende grundlegende Aspekte sind zu erwähnen:

● *Leitungskategorien*

Es ist zwischen zwei ganz verschiedenen Leitungskategorien zu unterscheiden:

- *Stichleitungen:* Hier wird die Verkabelung für die Versorgung städtischer Gebiete, Inselbetriebe oder bei unterirdischen Zentralen angewendet. Die zu übertragenden Leistungen haben begrenzte Werte und die Aufstellung von Masten ist nicht immer möglich.

- *Verbundleitungen:* Bei den grossen nationalen oder internationalen Verbundleitungen sind die Leistungen viel grösser. In diesen Fällen sind die Probleme ganz anderer Natur. Unseres Wissens wurde bis heute noch nirgends auf der Welt eine 380-kV-Kabelverbindung in ein grosses Verbundnetz eingebunden.

● *Realisierungsschwierigkeiten*

Mit zunehmender Inanspruchnahme von Gelände wird es auch immer schwieriger werden, ein Trassee für Höchstspannungskabel zu finden, weil dafür Baugruben mit beträchtlichen Ausmassen nötig werden (siehe Fig. 10, 11 und 12). In der Praxis ist oft ein begehbarer Stollen unerlässlich. Die damit verbundenen Probleme – insbesondere rechtlicher und ausführungstechnischer Art – sind beträchtlich. Sobald die Verbindung erstellt ist, besteht das Hindernis und eine Änderung des Trassees wäre sehr schwierig und kostspielig.

● *Einwirkung auf die Umwelt*

Eine unterirdische Leitung hat entscheidende Auswirkungen auf die Umwelt, die nicht vernachlässigt werden dürfen.

- Die Wärmeabfuhr stellt ein beträchtliches Problem dar und es muss der Erwärmung und dem Risiko der Austrocknung des Bodens besondere Beachtung geschenkt werden. Die Störeinwirkungen sind insbesondere im

Kulturland sowie in unberührten Gebieten wahrnehmbar. Durch die Erstellung von oberflächennahen Gräben oder Stollen wird eine tiefwurzelnde Vegetation verunmöglicht.

- Die Erstellung von Gräben oder Stollen kann eine Drainagewirkung auslösen und den Fluss des Grundwassers verändern. Der Einfachheit halber werden nachstehend folgende Bezeichnungen gebraucht:

«Stollen»: ein wenig tiefes, in offenem Graben erstelltes Bauwerk.

«Tunnel»: ein tiefliegender, durch (Tunnel-)Bohren oder bergmännisch (Sprengen) erstellter Stollen.

- Ebenfalls in Betracht zu ziehen sind die Risiken einer Umweltverschmutzung durch Leckage (Öl, Kühlflüssigkeit oder Isoliergas).

- Der Eingriff in die allgemeine ökologische Struktur der betroffenen Zone durch eine mechanische Veränderung der Bodenoberschicht löst in jedem Fall schwerwiegende Störungen bei Biotopen aus [3].

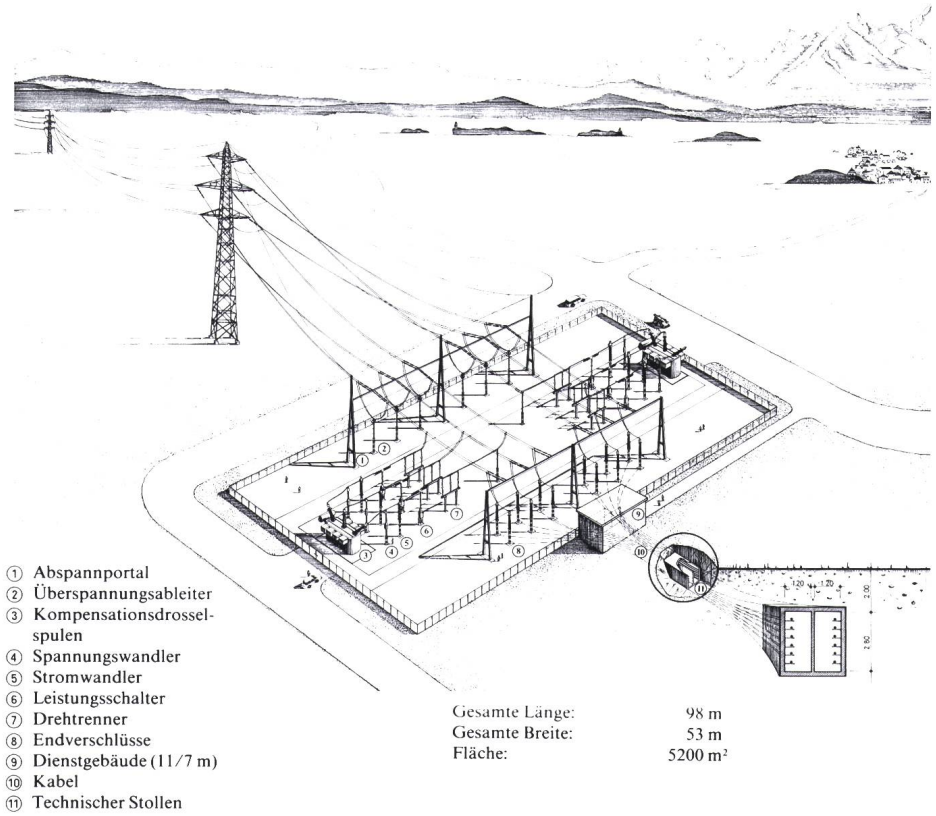
- Die Beanspruchung von kultivierbaren Flächen ist eindeutig grösser als bei Freileitungen.

- Ferner bleibt - obschon die Verbindung erdverlegt ist - der visuelle Eindruck der restlichen oberirdischen Anlagen bedeutend, weil eine Übergangsstelle Freileitungen/Kabelleitungen (siehe Fig. 1), und allenfalls auch Wärmeableitanlagen vorgesehen werden müssen. Für Leitungsverbindungen einer gewissen Länge müssen ferner Blindstromkompensationsstationen oberirdisch erstellt werden. Das Trassee muss für grosse Baumaschinen zugänglich bleiben, damit im Falle von Störungen während des Betriebes diese behoben werden können.

- Während der Bauarbeiten haben die Baustellen vielfältige Auswirkungen auf die Umwelt.

● *Betriebliche Probleme*

- Die Anzahl der bei einer unterirdischen Kabelanlage einzubauenden besonders empfindlichen Bauteile ist beträchtlich. Die mit der Überwachung und dem Unterhalt aller dieser Bauteile verbundenen Kosten fallen stark ins Gewicht. Die Störungsanfälligkeit ist - wegen der Komplexität der Anlagen - grösser.



Figur 1 Darstellung einer Übergangsstation von Freileitung auf Kabel für 380 kV

- Das Netz wird durch die Einführung von verkabelten Abschnitten geschwächt. Der Betrieb ist weniger zuverlässig. Geringere Überlastbarkeit, Probleme in Zusammenhang mit Blindstrom, Spannung, Resonanz und Schutzselektivität; keine automatischen Wiedereinschaltungen; lange Nichtverfügbarkeiten im Falle eines Defektes.

● *Kostenprobleme*

Die Investitionskosten für unterirdische Verlegung sind bis heute noch sehr hoch. Während bei der elektrischen Installationstechnik gewisse kostendämpfende Fortschritte erzielt wurden, haben die Kosten für Tiefbauarbeiten beträchtlich zugenommen.

Die weitere technische Entwicklung dürfte das Kostenverhältnis zwischen Freileitungen und unterirdischen Leitungen künftig kaum beeinflussen.

● *Zukünftige Techniken*

Es werden regelmässig Vorschläge für neue Kabeltypen vorgebracht (zum Beispiel Verwendung von Supraleitern), welche zugunsten einer unterirdischen Verlegung sprechen. Die neuen Möglichkeiten, auf die in der Literatur hingewiesen wird, beinhalten jedoch noch zahlreiche unbekannte Faktoren im Hinblick auf Herstellung und Betrieb, die noch nicht alle gelöst sind. Die Zeit bis zur kommerziellen Anwendung einer neuen Entwicklung, falls es überhaupt zu einem Durchbruch kommt, kann mehrere Jahrzehnte dauern.

- Die Neuerungen betreffen im allgemeinen die Kabel selber. Die für die Entwicklung der Zubehöre, wie Endverschlüsse und Muffen, benötigte Zeit darf jedoch nicht ausser acht gelassen werden.

- Für die unmittelbare Zukunft beruhen die Hoffnungen eher auf einer Lösung mit Kunststoffisolation. Für die Spannungsebene 110 kV sind die Erfahrungen sehr aufschlussreich. Für die Spannungsebenen 220 und 380 kV bestehen erste Ausführungen, und infolge des mit Sicherheit zu erwartenden Fortschrittes wird die Anzahl der Anlagen dieses Typs zunehmen.

2. Kabeltechnik

Obschon es mehrere Kabeltypen für Höchstspannungen gibt, werden hier nur die drei am meisten verwendeten Typen festgehalten, nämlich:

- die Kabel mit Kunststoffisolation
- die Kabel mit ölgetränkter Papierisolation
- die Rohrleitungen mit SF_6-Isolierung

2.1 Kabel mit Kunststoffisolation

Es handelt sich hierbei um Kabel mit extrudierter Isolation. Da Polyäthylen (PE) den Nachteil hat, sich bei hoher Temperatur zu verformen, wird es in der Schweiz kaum verwendet. Im allgemeinen gibt man vernetztem Polyäthylen (XLPE) oder vernetztem Äthylen-Propylen-Kautschuk (EPR) den Vorzug, deren mechanische Eigenschaften bei hohen Temperaturen eindeutig besser sind.

Dieser Kabeltyp besteht aus einem aus Kupfer- oder Aluminiumdrähten gebildeten Leiter, auf welchen eine Halbleiterschicht, eine Isolierschicht und eine weitere Halbleiterschicht aufgespritzt und anschliessend in einem Durchgang vernetzt werden. Zur Vermeidung jedwelchen Eindringens von Feuchtigkeit ins Innere der Isolation wird ein dichter metallischer Mantel als Abschirmung auf dem isolierten Leiter angebracht. Dieser Metallmantel aus Kupfer oder Aluminium wird im allgemeinen gewellt (siehe Fig. 2).

Gegenwärtig stehen in der Schweiz Kabel mit extrudierter Isolation für die Spannungsebene 220 kV im Betrieb, während in Frankreich Versuche auf der Spannungsebene 380 kV stattfinden.*

Im Vergleich zu Ölkabeln sind die dielektrischen Verluste von Kabeln mit extrudierter Isolation erheblich kleiner, vor allem beim XLPE; diese geringen Verluste zusammen mit einem geringeren thermischen Widerstand der Isolation führen im allgemeinen für eine gegebene Last zu einem Leiterquerschnitt, der kleiner ist als derjenige, den man für ein Ölkabel wählen müsste.

Figur 2
Trockenkabel
110 kV, 1×500 mm²
(Photo Cossonay)

	Ungefährer Durchmesser mm
Kupferleiter, mehrdrähtig, rund, verseilt, 500 mm²	27
Extrudierte, vernetzte Halbleiterschicht	30
Isolation aus XLPE oder EPR	62
Halbleiterschicht	67
Metallmantel gewellt	75
Korrosionsschutz	85

2.2 Ölkabel

Die für die Fabrikation derartiger Kabel verwendeten Grundstoffe entsprechen ganz besonderen Anforderungen. Die Papiere werden speziell behandelt und das mineralische oder synthetische Isolieröl wird vor der Imprägnierung des Kabels entgast.

In Abhängigkeit vom thermischen (Betriebs-)Zustand des Kabels (ohne Kühlwirkung) erlaubt ein im Zentrum des einpoligen Kabelleiters angeordneter Kanal die Zirkulation des Öls von und zu Ausgleichsbehältern. Die Anordnung dieser Behälter wird so gewählt, dass der innere Druck des Kabels unter allen Umständen und an jeder Stelle über dem atmosphärischen Druck liegt, auch wenn die Leitung beliebig Bodenunebenheiten folgen muss.

Da er den Druck aushalten muss, besteht der Kabelmantel entweder aus mit Metallbandagen verstärktem, legiertem Blei, aus gewelltem Kupfer oder aus einem Aluminium-Wellmantel, wodurch die notwendigen Druck- und Dichtigkeitswerte erreicht werden.

Nach der Imprägnierung wird das Kabel ständig unter Öldruck gehalten. Zu diesem Zweck wird jedes Kabelteilstück während der aufeinanderfolgenden Fabrikations-, Transport- und Verlegungsphasen an einen im Innern der Kabelrolle angeordneten Behälter angeschlossen. Nachdem sie verlegt und montiert worden sind, werden die Kabel an die definitiven Behälter angeschlossen.

Bei Ölkabeln mit hohem oder – der häufigste Fall – niedrigem Druck wird die Ölfüllung durch am Leitungsende angeordnete Membranbehälter aufrechterhalten, welche die Aufgabe haben, in Abhängigkeit vom thermischen Zustand des Kabels Öl nachzuliefern oder aufzunehmen (siehe Fig. 3).

Neben Ölkabeln haben sich auch andere Kabel mit imprägnierter Isolation bewährt, insbesondere solche mit äusserem oder innerem Gasdruck. Diese in der Schweiz wenig gebräuchlichen Kabel werden nur in ganz besonderen Anwendungsfällen eingesetzt, nämlich zur Verhütung einer Verunreinigung von Grundwasser oder bei grossen Höhenunterschieden. Dieser Kabeltyp hat, seit dem Erscheinen von bei Höchstspannungen verwendbaren Kabeln mit extrudierter Isolation, an Bedeutung verloren.

In Tabelle I sind die üblichen Daten der Kabel zusammengefasst.

2.3 Rohrgasleitungen (GIL = gasisolierte Leitungen)

Seit ungefähr 15 Jahren werden in Schaltstationen und grossen Kraftwerken Verbindungen mit Gasisolation (Schwefelhexafluorid SF_6) eingebaut. Diese Anlagen stehen bei Spannungen bis 550 kV und für hohe Leistungen erfolgreich in Betrieb. Die Länge dieser Verbindungen beträgt jedoch nur einige hundert Meter.

In der Schweiz sind 380-kV-SF_6-Verbindungen zum Beispiel seit 1976 in der Zentrale Mapragg (Kraftwerke Sarganserland) und seit 1981 in der

* Insbesondere eine 250 m lange Verbindung für 600 MVA in der Schaltanlage Plessis-Gassot und eine 780 m lange Verbindung für 64 MVA im Kernkraftwerk Nogent-sur-Seine.

Schaltanlage Laufenburg (EGL) eingebaut.

Figur 4 zeigt den Aufbau einer SF_6-Verbindung. Bei 220 kV und 380 kV werden nur einphasige Rohre eingebaut. Der Aluminiumleiter ist in einem geerdeten Aluminiumrohr angeordnet. Der Leiter wird mit Stützisolatoren aus Epoxyharz in der Mitte des Rohres gehalten. Das Rohr ist mit SF_6 gefüllt, welches eine doppelte Funktion hat:

- Isolation des spannungsführenden Leiters;
- Abtransport der durch Energieverluste des Leiters entstehenden Wärme zum Aussenrohr.

Das SF_6 eignet sich gut: Es ist ein unbrennbares, ungiftiges, geruch- und farbloses Gas. Zu beachten ist, dass es sich um ein schweres Gas handelt, das sich im Falle einer Leckage schwer auffangen lässt. Es zersetzt sich unter der Einwirkung eines elektrischen Lichtbogens. Das dabei entstehende weisse Pulver ist giftig und die Entsorgung ist problematisch.

Die Elemente des Aussenrohrs sind im allgemeinen 7,5 m lang und werden verschraubt oder verschweisst. Der Stromübergang in den Leitern zwischen den Elementen wird durch versilberte Fingerkontakte gewährleistet. Bei Längen von mehr als 400–500 m ist es zweckmässig, Dilatationskompensatoren einzubauen, welche spezielle Kammern benötigen (siehe Fig. 5).

In Tabelle I sind auch die technischen Hauptmerkmale der SF_6-Verbindungen für 220 und 380 kV zusammengefasst.

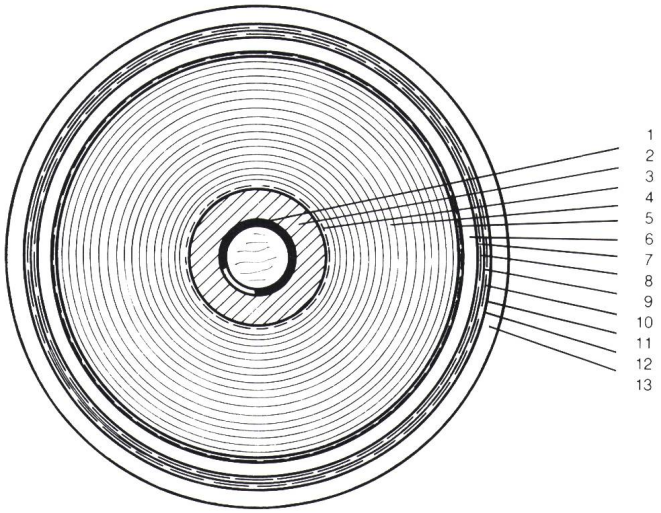
Was die elektrotechnischen Hauptmerkmale betrifft, liegen die mit SF_6-Gas isolierten Verbindungen zwischen den Freileitungen und den Kabeln mit Feststoffisolation.

Die Figuren 6 und 7 zeigen eine ausgeführte SF_6-Verbindung für 380 kV mit einem Stromkreis in einem im Tagbau erstellten Stollen. Figur 8 zeigt eine auf der Erdoberfläche verlegte Verbindung. Es handelt sich um Verbindungen kleiner als 400 m in einer Station.

Figur 12 ermöglicht einen Vergleich der Tunnelquerschnitte in einer SF_6-Anlage und einer solchen mit Ölkabeln für 220 kV und 380 kV, mit zwei Stromkreisen. Die beiden Tunnels sind begehbar; beim Vergleich der Abmessungen darf nicht vergessen werden, dass die SF_6-Verbindung die Übertragung einer höheren Leistung ermöglicht als diejenige mit konventionellen Ölkabeln.

Wichtigste technische Daten

Nennspannung:	380 kV
Maximale Betriebsspannung:	420 kV
Nennstrom:	500 A
Kurzschlussstrom:	44 kA, 1 s



Kabelaufbau

1	Stahlspirale	10,8/12,8 mm	8	Kupferbänder, Längsarmierung	89,6 mm
2	Kupferleiter	29,0 mm	9	Kupferbänder, Querarmierung	91,2 mm
3	Halbleiterpapiere	29,6 mm	10	Kupferbänder, Längsarmierung	92,0 mm
4	Isolation	81,0 mm	11	Kupferbänder, Querarmierung	93,6 mm
5	Halbleiterpapiere und Höchstaedter	81,5 mm	12	Kunststoffband	93,7 mm
6	Bleimantel	88,2 mm	13	PE-Mantel	100,0 mm
7	Bitumierte Papiere	88,8 mm		Gewicht	26,5 kg/m

Figur 3 Ölkabel 220 kV und 380 kV (Photos Cortaillod/Brugg)

Lösung und Verlegungsart			A	B	C	D	S_2	E	F	G	S_3
Isolationsart			Kunststoff extrudiert	Papier/Öl	Papier/Öl	Papier/Öl	SF_6 gasisoliert	Papier/Öl	Papier/Öl	Papier/Öl	SF_6 gasisoliert
Nennspannung U_n verkettet/gegen Erde		kV	110/63	220/127	220/127	220/127	220/127	380/220	380/220	380/220	380/220
Maximal zulässige Dauerspannung U_m		kV	123/71	245/141	245/141	245/141	245/141	420/242	420/242	420/242	420/242
Anzahl und Querschnitt der Leiter pro Phase		mm²	1×800	2×1000	1×1000	1×1600	1×2375	2×2000	2×1600	2×1600	1×2375
Anzahl der parallelen Stromkreise/Stränge			2	2	2	2	2	2	2	2	2
Elektrische Daten für einen Strang											
Schockspannung		kV	500	1050	1050	1050	1050	1425	1425	1425	1425
Versuchsspannung im Werk (15 min) bei 50 Hz		kV	160	225	225	225	460 a)	395	395	395	680 a)
Versuchsspannung verlegt (15 min) bei Gleichspannung		kV	192	520	520	520	368 b)	805	805	850	544 b)
Betriebskapazität pro Phase		10^{-6} F/km	0,240	0,596	0,298	0,348	0,065	0,604	0,574	0,574	0,055
Kapazitiver Ladestrom pro Phase bei U_n	ca.	A/km	5,0	23,9	11,9	13,9	2,6	41,6	39,6	39,6	3,8
Blindleistung dreiphasig im Leerlauf	ca.	MVAr/km	0,92	9,1	4,5	5,3	1,0	27,4	26,1	26,1	2,5
Maximal zulässiger Dauerstrom (Winter/Sommer)		A	800/750	1250/1205	1250	1250	3150	2500	2500	2500	3150
Maximale Übertragungsleistung (Winter/Sommer)		MVA/Strang	152/143	476/459	476	476	476 c)	1645	1645	1645	1645 c)
Maximale Temperatur der Leiter		°C	90	80	80	80	105	80	80	80	100
Dielektrische Verluste pro Phase bei Nennspannung		kW/km	0,4	7,5	3,8	4,4	$0{,}17 \cdot 10^{-3}$	13,7	13,0	13,0	$0{,}33 \cdot 10^{-3}$
Ohmsche Verluste pro Leiter/Phase bei Pmax im Winter	ca.	kW/km	19,0	18,5	37,9	27,1	20,2	39,0	44,1	47,0	87,5
Total Verluste dreiphasig bei Pmax im Winter	ca.	kW/km	3×20	3×26,5	3×43,8	3×34,5	3×163	3×56,4	3×60,5	3×63,5	3×153
Maximaler thermischer Kurzschlussstrom pro Phase während 1s/3s		kA	88/51	110/65	100/65	160/104	.../100	202/116	162/93	162/93	.../100
Technische Daten											
Werkstoff und Aussendurchmesser des Leiters		mm	Cu 37,0	Cu 43,4	Cu 43,4	Cu 53,5	Al 132	Cu 57,4	Cu 53,5	Cu 53,5	Al 132
Aussendurchmesser des Kabels/Rohres	ca.	mm	85,0	102,8	102,8	113,4	326,0	142,0	138,0	138,0	380,0
Gewicht des Kabels/Rohres	ca.	kg/m	12,5	19,4	19,4	26,2	24,0	37,0	32,0	32,0	28,0
Minimaler Verlegeradius		m	1,68	2,06	2,06	2,27	100 d)	2,84	2,76	2,76	100 d)
Maximaler Betriebsdruck		bar	—	15	15	15	5,4	10	10	10	5,4
Übliche Fabrikationslänge des Kabels/Rohres		m	600/1000	500/700	500/700	500/700	7,5	500/600	500/600	500/600	7,5

Tabelle I Hauptdaten der Kabel und SF_6-Rohre

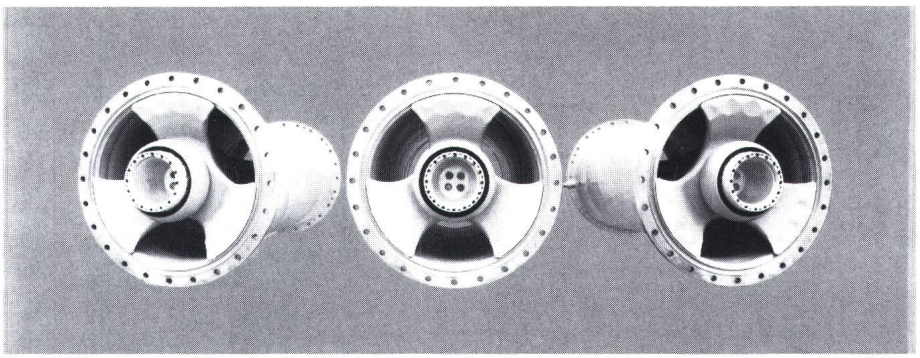
Anmerkungen: Annahmen – maximale Umgebungstemperatur 10 °C im Winter / 20 °C im Sommer
– mittlerer Wärmedurchgangswiderstand des Bodens 85 °C cm/W

a) Versuchsspannung 1 min (U_p) bei 50 Hz
b) Versuchsspannung 80% U_p
c) SF_6-Rohre gestatten eine höhere Übertragungsleistung
d) oder scharfe Richtungsänderung mittels flexiblem Rohrstück

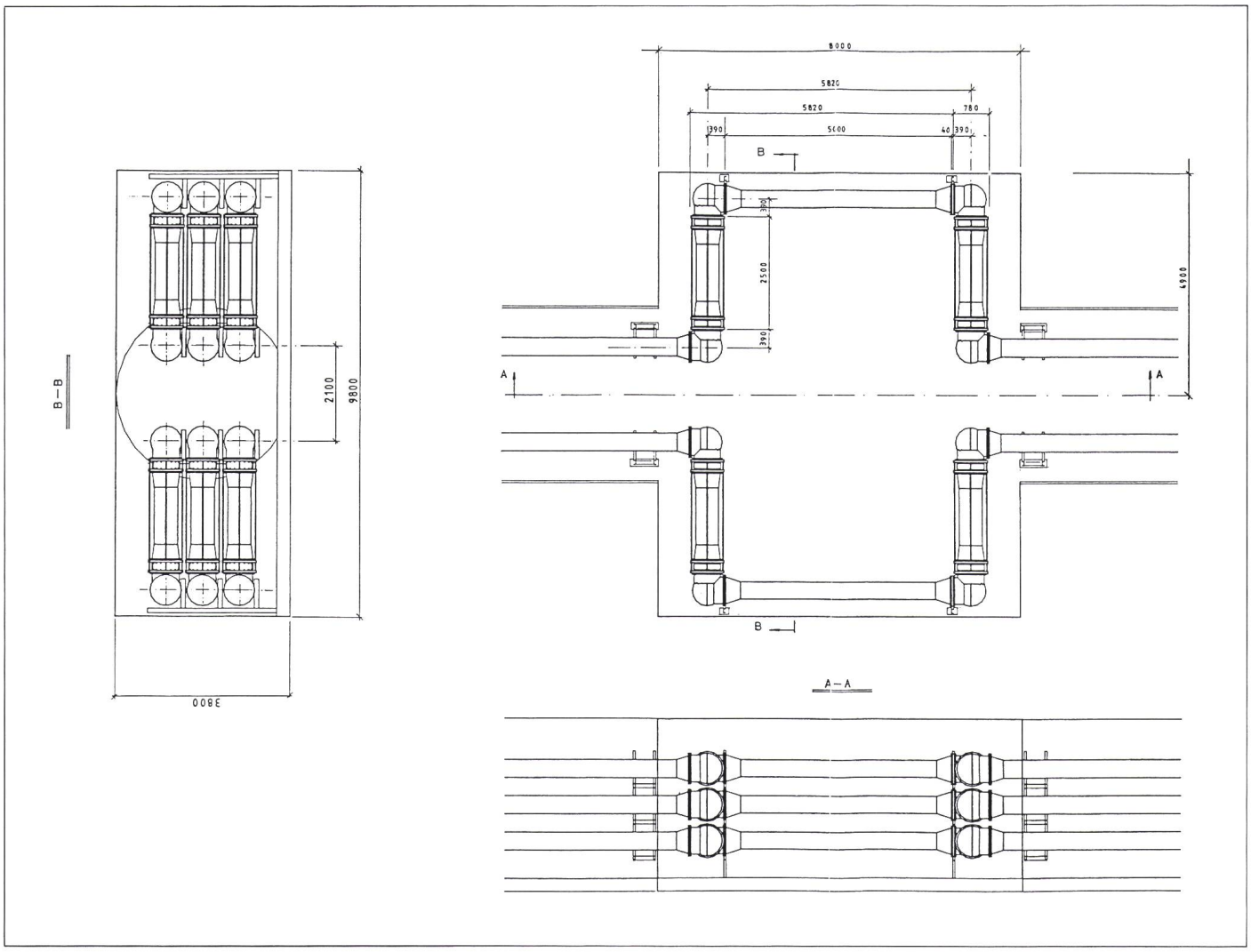
Die während mehreren Jahren in SF_6-Schaltanlagen gemachten positiven Erfahrungen hinsichtlich der Überwachung des SF_6-Gases, der Isolierung der Abschottung, der Übergänge von oberirdischer zu unterirdischer Führung, der Dehnungskompensation und des Überspannungsschutzes dürften es erlauben, zuverlässige SF_6-Verbindungen mit beträchtlichen Längen (einige Dutzend Kilometer) zu bauen. Allerdings besteht bis heute noch keine Anlage dieses Typs und die entsprechende Erfahrung fehlt.

Die Vorteile des SF_6 sind gute elektrische Eigenschaften, ein geringerer kapazitiver Strom als bei Ölkabeln, eine hohe Übertragungsleistung, eine hohe Betriebssicherheit, die Unabhängigkeit von der äusseren Umgebung, annehmbare Reparaturzeiten und das Fehlen von Öl.

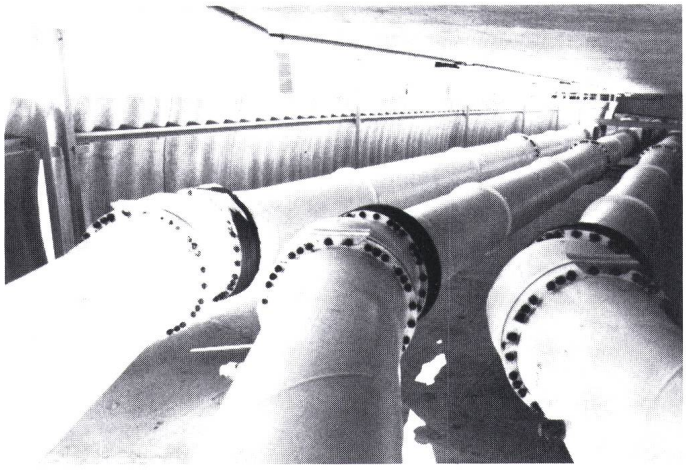
Die Nachteile bestehen bei der Montage in einer aufwendigen, heiklen und absolute Sauberkeit erfordernden Arbeit. Aus diesem Grunde empfiehlt sich der Einbau in Stollen oder Tunnels. Es muss erwähnt werden, dass im Betrieb eine einwandfreie Dichtigkeit erforderlich ist, um Druck und Qualität des Gases zu erhalten. Die Gefahr der Korrosion sowie der oben erwähnten giftigen Auswirkungen einer Gaszersetzung ist beträchtlich.

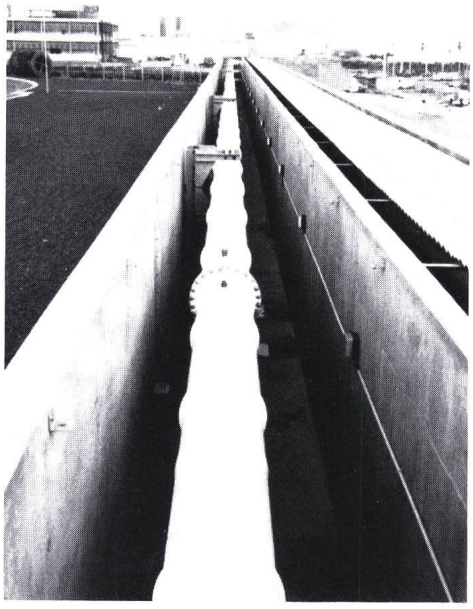


Figur 4 SF_6-Rohr 220/380 kV GIL mit geschraubten Flanschen (Photo ABB)

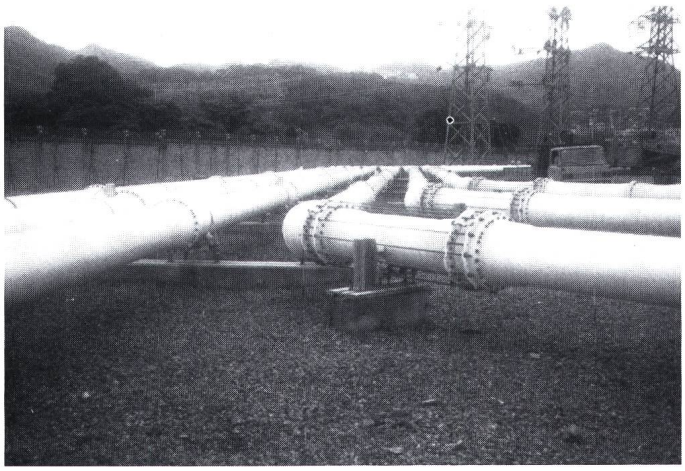


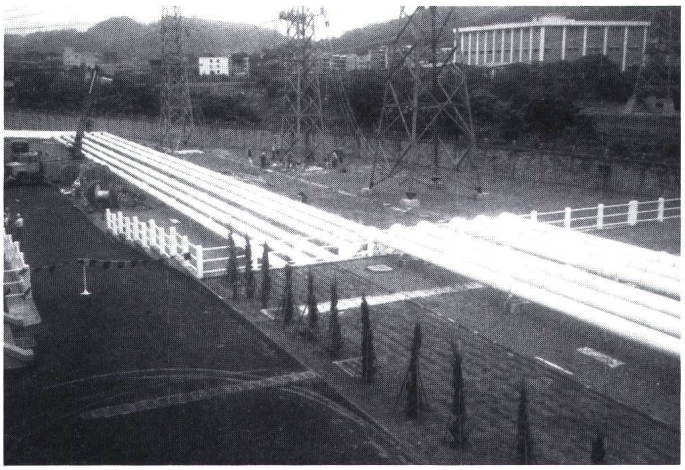
Figur 5 Kompensationskammer für SF_6-Dehnungsausgleichsbögen (Photo ABB)





Figur 6 und 7 Beispiel für SF_6-Leitungen 420 kV, 3150 A, im Kraftwerk Koeberg, Südafrika, in Betrieb seit 1978 (Photo ABB)





Figur 8 Beispiel von SF_6-Leitungen, 362 kV, 4000 A, TPC, Taiwan, in Betrieb seit 1987 (Photos ABB)

2.4 Weitere Lösungen

2.4.1 Gleichstromverbindungen

Aus technischen und wirtschaftlichen Gründen bleibt die Gleichstromübertragung auf folgende Fälle beschränkt:

- Freileitungsübertragung über sehr grosse Distanzen (über 500 km) in unerschlossenen Gebieten;
- Tiefsee-Kabel über mehr als ungefähr 50 km;
- Koppelung zweier nicht synchroner Netze.

In der Schweiz hätten Gleichstromverbindungen keinerlei entscheidende Vorteile gegenüber Wechselstromverbindungen; sie wären im Gegenteil wesentlich teurer.

2.4.2 Supraleiterverbindungen

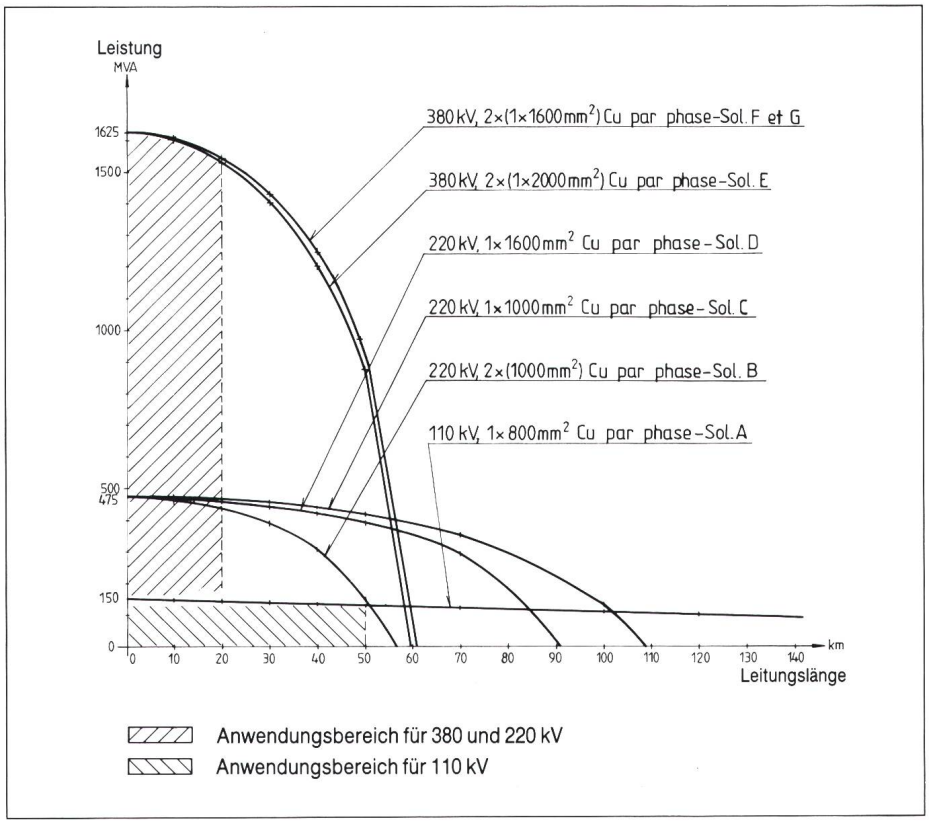
Obschon die in den letzten Monaten auf dem Gebiet der Supraleiter gemachten Entdeckungen von beträchtlicher Bedeutung sind, bleiben die Anwendungsaussichten doch vor allem auf folgende Gebiete beschränkt:

- Erzeugung starker magnetischer Felder;
- ultraschnelle integrierte Schaltungen für Computer;
- medizinische Anwendungsgebiete.

Die grosstechnische Verwirklichung von Verbindungen über grosse Distanzen mit Supraleiterkabeln bleibt vorerst noch Zukunftshoffnung.

3. Probleme bei unterirdischen Leitungen

Ein Katalog der Probleme und Randbedingungen, welche bei der unterirdischen Verlegung von Höchstspannungsleitungen auftreten, findet sich im Anhang.



Figur 9 Ölkabel: Verminderung der Transportleistung in Funktion der Leitungslänge

3.1 Elektrotechnik

3.1.1 Überspannungen

Kabel sowie Zubehör sind Überspannungen unterworfen, welche entweder von atmosphärischen Einwirkungen auf die äusseren Bauwerke (Steilfrontwellen, Reflexion) oder von Betriebstransienten (Öffnen des Stromkreises) stammen. Sämtliche kritischen Stellen müssen mit gross dimensionierten Überspannungsableitern ausgerüstet werden, um die Kabel und ihr Zubehör zu schützen. Es ist wichtig, dass die verschiedenen möglichen Überspannungspegel genau ermittelt werden. Dieses Problem ist vielseitig.

3.1.2 Kapazitive Ströme

- Verminderung der Übertragungsleistung:

Die kapazitiven Ströme sind eindeutig bedeutsamer für die herkömmlichen Kabel als für SF_6-Verbindungen oder Freileitungen. Diese Ströme sind proportional der Länge der Verbindung und vermindern stark die Transportkapazität der Kabel (siehe Fig. 9).

- Blindleistungserzeugung im Netz:
  Bei den Ölkabeln kann, je nach Isolationsdicke und Anzahl der parallel geschalteten Leiter pro Phase, der kapazitive Blindstrom hohe Werte annehmen, zum Beispiel bei der Spannungsebene 380 kV mehr als 40 A pro Phase und Kilometer. Die im Leerlauf gelieferte Blindleistung erreicht 26 MVAr/km pro 380 kV-Stromkreis, wodurch verkabelte Leitungsabschnitte ohne Kompensation auf ungefähr 20 km begrenzt sind.

- Betriebstechnische Probleme:
  Wenn das Netz schwach belastet ist und eine grosse Blindleistung erzeugt wird, kann die Netzspannung auf gefährliche Werte ansteigen. Es könnten im Bedarfsfall also verkabelte Leitungsteilstrecken (oder einer der beiden Stromkreise einer Verbindung) abgeschaltet werden. Durch derartige Massnahmen wird die Betriebssicherheit beträchtlich vermindert.

Ferner müssen weitere inhärente Probleme beachtet werden: Die Unterspannungsetzung der Kabel, die Kontrolle der Synchronisation bei offener Leitung, grössere Abschaltleistung der Schalter, die Stabilität der Generatoren usw.

3.1.3 Kompensation

Wie im vorherigen Abschnitt aufgeführt führt wegen des sehr grossen Kondensatoreffekts der Ölkabel die Erhöhung der Verbindungslänge gezwungenermassen zu einer gleichmässigen Verteilung von Parallel-Drosselspulen, um so die Blindleistung zu kompensieren. Diese Kompensationseinrichtungen sind voluminös, auffällig und kostspielig (siehe Fig. 1).

3.1.4 Verluste

Die Energieverluste der Kabel sind gleich der Summe der dielektrischen Verluste (abhängig von Tangens Delta und von der Spannung, nicht aber von der Last) und der ohmschen Verluste ($3RI^2$) in den Leitern und der Kabelmäntel (in Abhängigkeit von der Last). Letztere werden durch die Vertauschung der Verbindungen zwischen den Mänteln vermindert (Crossbonding, siehe weiter unten).

Bei gleicher Übertragungskapazität sind bei schwacher Last die Verluste einer unterirdischen Leitung höher als diejenigen einer Freileitung, wogegen sie bei Vollast geringer sind. Bei Lösungen mit Zwangskühlung muss man dem Eigenbedarfs-Energieverbrauch der Kühlkreisläufe ebenfalls Rechnung tragen.

3.1.5 Vertauschung (Crossbonding)

Bei langen Leitungen werden die Mantelströme durch die Vertauschung der Verbindungen zwischen den Mänteln begrenzt. In den Verbindungskammern sind Überspannungsschutzvorrichtungen erforderlich; es gibt dafür mehrere Möglichkeiten, wie spannungsabhängige Widerstände oder die Installation von Überspannungsableitern in Stern- oder Dreieckschaltung. Die Erdung des Systems und die dadurch entstehende Gefährdung von Personen stellen oft schwer lösbare Probleme. Der Unterhalt dieses Materials erfordert viel Aufmerksamkeit.

3.1.6 Kühlung

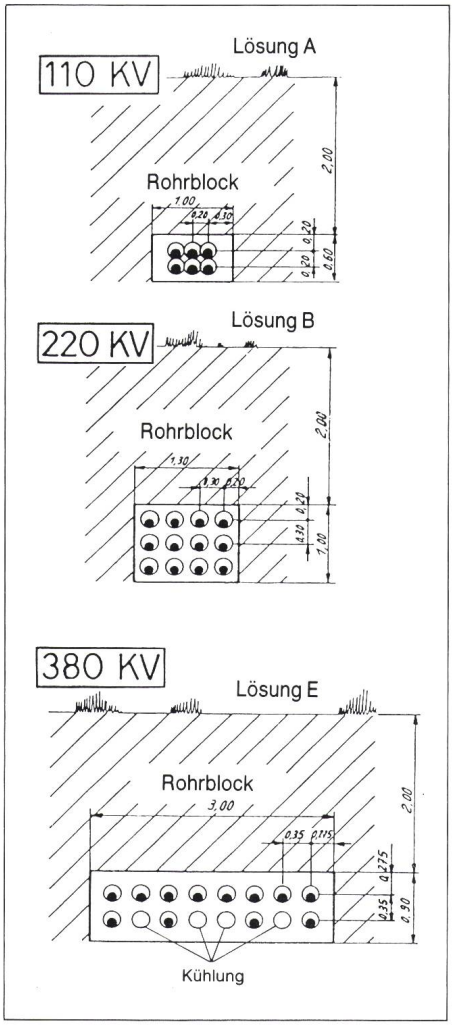
Bei jedem Kabelsystem ist die Übertragungsleistung abhängig vom Gleichgewicht zwischen Wärmeabgabe und Wärmeleitfähigkeit des Bodens. Die Wärmeleitfähigkeit der Isolation des Kabels ist bekannt; hingegen sind die Eigenschaften des Bodens sehr verschieden; die Übertragungsleistungen hängen vom gewählten Kühlsystem ab. Zu erwähnen sind hier die folgenden wichtigsten Systeme:

- die natürliche Kühlung;
- die seitliche Kühlung: In parallel zu den Kabeln verlaufenden Rohren zirkuliert eine Kühlflüssigkeit;
- integrale Kühlung: Eintauchen der Kabel in eine Kühlflüssigkeit;
- direkte Kühlung: Zwangszirkulation eines Kühlmittels im Innern des Kabels (beschränkte Länge); dieses System hat den Vorteil, dass das Risiko des Auftretens allfälliger heisser Stellen am Leiter vermieden werden kann.

Ausführungen mit SF_6-Rohren haben eine geringere Wärmeabgabe und demzufolge eine grössere Belastbarkeit und Überlastbarkeit.

3.2 Bautechnik

Die baulichen Probleme hängen von der Verlegungsart ab, welche ihrerseits vom verlangten Übertragungsvermögen abhängt. Die Erstellung unterirdischer Leitungen auf dem gleichen Trassee wie Strassen und Kanalisationen (Gas, Wasser, Telefon usw.) erweist sich bei den in Betracht kommenden Leistungen oft als nicht praktikabel und es können sich Sicherheitsprobleme ergeben. Deshalb muss eine eigene Trasseeführung studiert werden, welche den bestehenden Hindernissen und dem Zustand der örtlichen Gegebenheiten Rechnung trägt.



Figur 10 Typisches Profil für Verlegung in Graben 110, 220 und 380 kV

Verlegungsart: Man unterscheidet drei verschiedene Verlegungsarten:

- in Graben
- in Stollen
- in Tunnels (siehe Bemerkung Abschnitt 1.2)

3.2.1 Verlegung in Graben

Die Kabel werden in Rohre verlegt, welche in einen Betonblock eingebettet sind (Fig. 10).

Die Grabenverlegung besteht aus dem Einziehen der Kabel in Kunststoffrohre, die in Beton eingebettet sind. Das Wärmeleitvermögen des Betons ist bekannt. Die gesamte erzeugte Wärme muss an den Boden übertragen werden. Es besteht die Möglichkeit, die Kühlung durch Schaffung einer Wasserzirkulation im Beton zu steigern. Diese Verlegungsart erfordert für

eine gegebene Transportkapazität einen grossen Querschnitt.

Vorteile:

- der Block kann in Etappen erstellt werden;
- Möglichkeit eines späteren Kabeleinzuges.

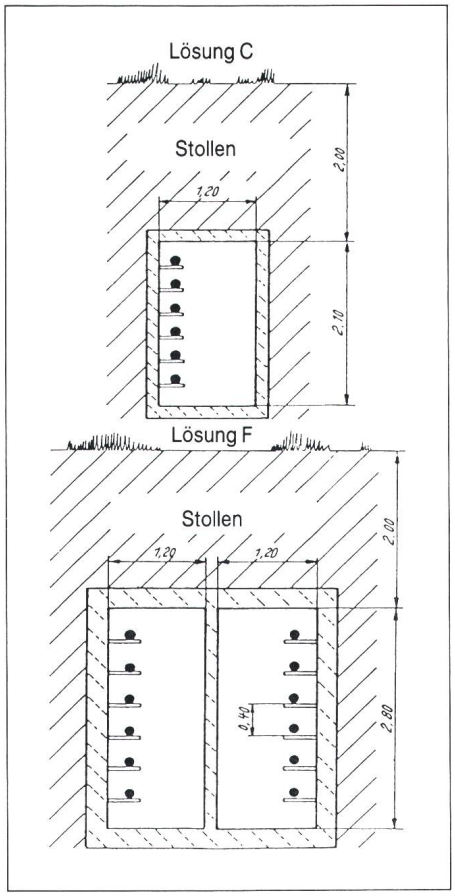
Nachteile:

- die Wärmeabfuhr erfordert grosse Querschnitte oder eine Zwangskühlung;
- die Ortung von Defektstellen kann nur bei den Anschlüssen durchgeführt werden;
- im Falle eines Defektes muss ein gesamter Kabelabschnitt ersetzt werden;
- bei Durchqueren von Wäldern sind Rodungen erforderlich;
- Verbindungsmuffen erfordern spezielle, begehbare Bauwerke;
- diese Verlegungsart eignet sich nicht für SF_6-Verbindungen.

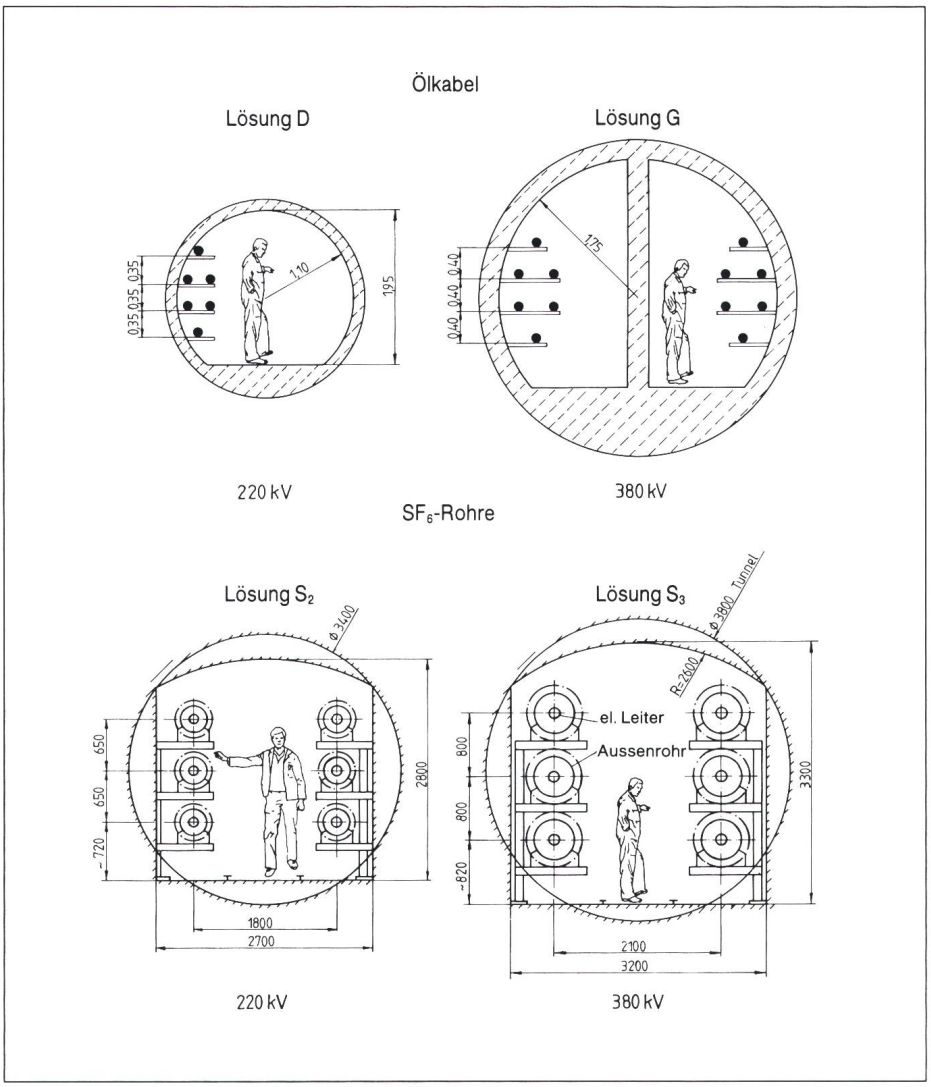
3.2.2 Verlegung in Stollen

Der nahe an der Erdoberfläche verlaufende Stollen wird aus armiertem Beton in offenen Gräben erstellt und anschliessend vollständig überdeckt (Fig. 11).

Im Stollen werden die Kabel den Wänden entlang verlegt oder aufgehängt. Dieser Stollen, welcher für die Begehung (Unterhalt und Kontrolle) gross genug ist, kann künstlich belüftet werden, um die Kühlung der Kabel zu verstärken und dadurch ihre Übertragungskapazität zu steigern. Diese Verlegungsart eignet sich auch für SF_6-Verbindungen.



Figur 11 Typisches Profil für Verlegung in Stollen



Figur 12 Typisches Profil für Verlegung in Tunnel 220 und 380 kV

Vorteile

- die Überwachung der Kabel ist jederzeit möglich;
- das Auswechseln von Kabeln ist leichter.

Nachteile:

- teure Lösung;
- bei Durchqueren von Wäldern sind Rodungen nötig;
- die Muffen und die Ölbehälter erfordern Erweiterungen des Stollens (siehe Fig. 16);
- in gewissen Fällen müssen längs des Stollens Lüftungsfenster angebracht werden (Lärmauswirkungen);
- SF_6: erfordert Kompensationskammern für die Dehnungsausgleichsbögen alle 400 bis 500 m (Fig. 5).

3.2.2 Verlegung in Tunnel

Die Disposition ist ähnlich wie beim Stollen, jedoch liegt der Tunnel tiefer und wird mit Hilfe einer Tunnelbohrmaschine oder konventionnel bergmännisch erstellt (Fig. 12).

Die Verlegung in einem tiefliegenden Tunnel hat ähnliche Probleme wie die vorerwähnte Lösung. Wegen der Isolation gegenüber dem Boden (keine Wärmeabfuhr) ist eine Zwangskühlung unerlässlich. Diese Lösung eignet sich für Kabel und SF_6-Verbindungen.

Vorteile:

- das Trassee ist unabhängig von Hindernissen an der Oberfläche oder in geringer Tiefe;
- Möglichkeit einer gestreckten Linienführung.

Nachteile:

- sehr hohe Kosten;
- Ungewissheiten wegen der Geologie;
- keine Wärmeabfuhr durch den Boden;
- Bau von Zugangsbauwerken;

- Notwendigkeit von Lüftungsöffnungen, die zu Lärmbelästigungen für die Nachbarschaft führen können;
- sehr teure Verbindungs- und Dehnungskammern (siehe Fig. 16).

3.3 Betrieb

3.3.1 Lastverteilung

Die durch die Wechselfolge von Kabel- und Freileitungsstrecken hervorgerufenen Impedanzunterschiede bewirken ein Ungleichgewicht in der Lastverteilung der verschiedenen Netzteile. Der Kabeltyp hat auf diese Erscheinung wenig Einfluss. (Bei SF_6-Verbindungen ist die Situation weniger kritisch.)

3.3.2 Überspannungen

Die Induktivität der Kabel ist geringer als diejenige von Freileitungen; dadurch ergibt sich eine weniger gute Dämpfung von Überspannungen. Eine Stosswelle atmosphärischen Ursprungs oder eine Schaltüberspannung wird an der Übergabestelle zwischen Freileitung und Kabel teilweise reflektiert, wodurch nicht akzeptierbare Spannungswerte hervorgerufen werden können. Die beim Öffnen von Schaltern auftretende Einschwingspannung zwingt zur Verstärkung der Trennkammern.

3.3.3 Schutz

Die Einstellung der Distanzschutzrelais wird durch den Unterschied zwischen den Impedanzen von Freileitungen und Kabeln erschwert. Bei langen Kabelabschnitten ist die Selektivität nicht mehr gewährleistet. Zusätzlich zum normalen Schutz muss ein thermischer Schutz eingebaut werden. Zu diesem Zweck muss man das thermische Abbild des Kabels genau kennen, damit Überlastungen sicher angezeigt werden können. Die genaue Einstellung der Relais wird ferner auch durch den hohen Einschaltstrom des unbelasteten Kabels erschwert.

Die heute in den Netzen stark verbreitete Technik der automatischen Wiedereinschaltung der Leitungen nach Störungen kann bei Kabeln nicht mehr angewendet werden.

3.3.4 Störungen

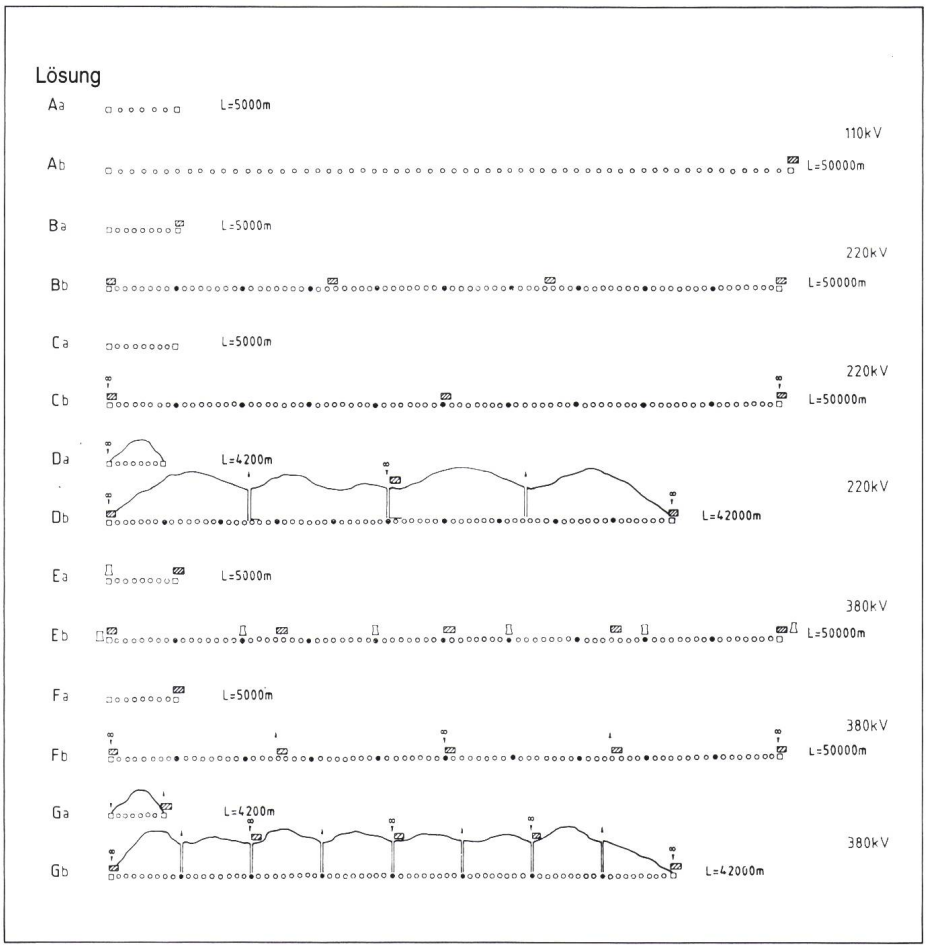
● *Störungen bei beschädigtem Kabel:*

Die Erkennung der Ursache und des Ortes des Fehlers geht verhältnismässig rasch, wenn das Kabel in einem Stollen oder Tunnel verlegt ist, kann sich jedoch bei einem Kabel in einem Graben als viel schwieriger erweisen. Für das Ersetzen eines Kabelabschnitts sind mehrere Wochen sowie ein langer Betriebsunterbruch erforderlich.

● *Störungen ohne sofortige Ausserbetriebsetzung:*

Es handelt sich hierbei um Undichtigkeiten, Eindringen von Wasser oder Ölverluste infolge einer Leckstelle im Aussenmantel. Die Suche nach der Fehlerstelle kann Wochen dauern und ist schwierig. Aus Sicherheitsgründen muss die Leitung während der Fehlerortung ausser Betrieb genommen werden.

Die zahlreichen Zubehörteile sind ebenfalls den oben angegebenen Fehlermöglichkeiten unterworfen. Ferner können Ausfälle an den zahlreichen Überwachungsanlagen zu irrtümlichen Abschaltungen der Leitung führen.



Figur 13 Einbauschema der verschiedenen Kabellösungen (Definitionen s. Kap. 4)

Legende:
- □ Eingangs-/Ausgangsstation
- o Einfache Verbindung
- • Abspannverbindung
- Reaktanz
- Ventilator
- Pumpe und Kühlturm

3.3.5 Überlastung

Im Gegensatz zu Freileitungen und zu den SF_6-Verbindungen sind die Kabel sehr empfindlich gegen Überlast, denn es entsteht in ihnen sehr schnell ein Wärmestau, welcher zu einer Verminderung der Lebensdauer der Isolation führt. Dieser Nachteil hat bei Stichleitungen, wo Überlastungen beschränkt sind, kaum Konsequenzen, erweist sich aber als sehr störend bei einem Verbundnetz.

Die Anfangsbelastung der Kabel bestimmt die zulässige Überlast und deren Dauer. Beide sind um so geringer, je höher der Strom ist. Auch das elektrische und mechanische Verhalten der Kabel im Kurzschlussfall muss berücksichtigt werden.

3.3.6 Einfluss parallelgeführter Kabel

Bei langen parallelgeführten Kabelstrecken kann die induzierte Längsspannung gefährliche Werte erreichen, insbesondere für Fernmeldekabel. Die Mess- und Steuerleitungen müssen in einem geschützten Kanal verlegt oder speziell gekapselt werden.

3.3.7 Überwachung

Im Gegensatz zu Freileitungen bedürfen die Ölkabel oder SF_6-Verbindungen einer erhöhten Überwachung. Man benötigt Apparate, welche dauernd den Verlauf des Drucks in Funktion des Stroms und der Umgebungstemperatur überwachen und welche die Momentanwerte der Mantelströme und die Erkennung gewisser Defekte erlauben.

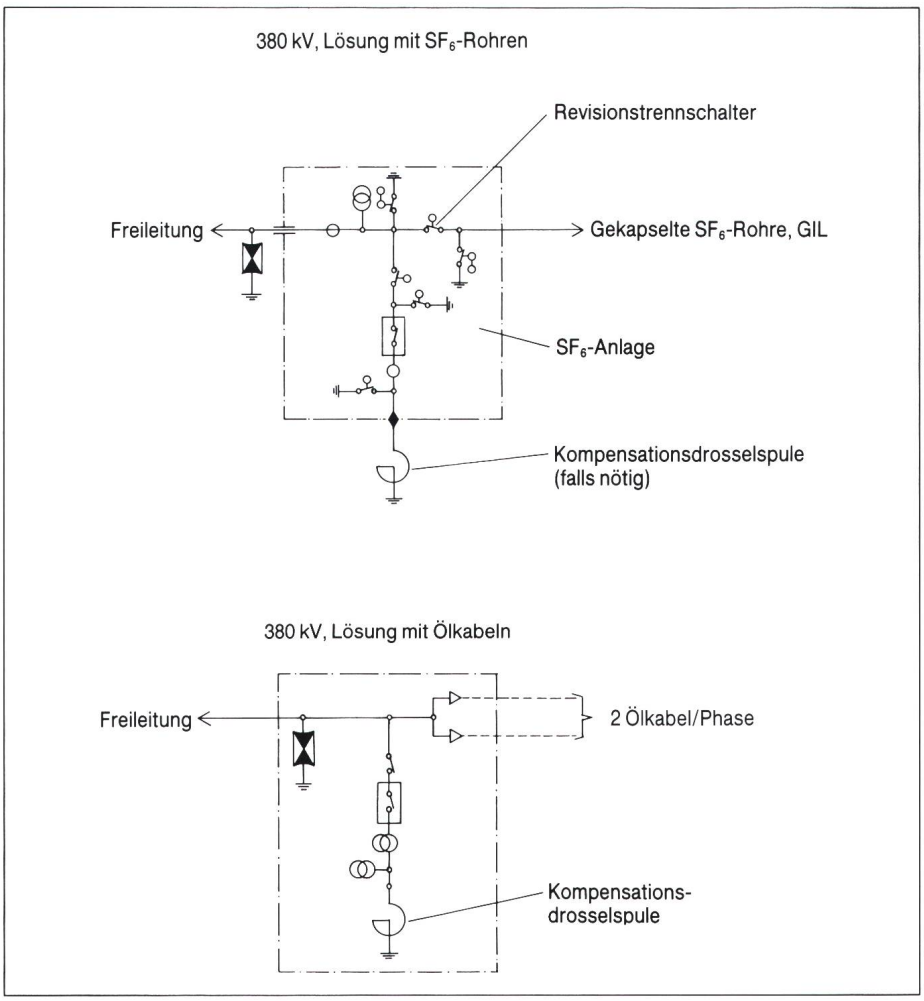
3.3.8 Verfügbarkeit

Es ist schwierig, aussagekräftige, statistisch gesicherte Werte für unterirdisch verlegte Höchstspannungsleitungen anzugeben, da erst sehr wenige Leitungen und Kilometer verlegt wurden. Angaben ausländischen Ursprungs (CIGRE, EDF) ermöglichen es jedoch, grobe Ausfall- und Nichtverfügbarkeitsraten anzugeben für:

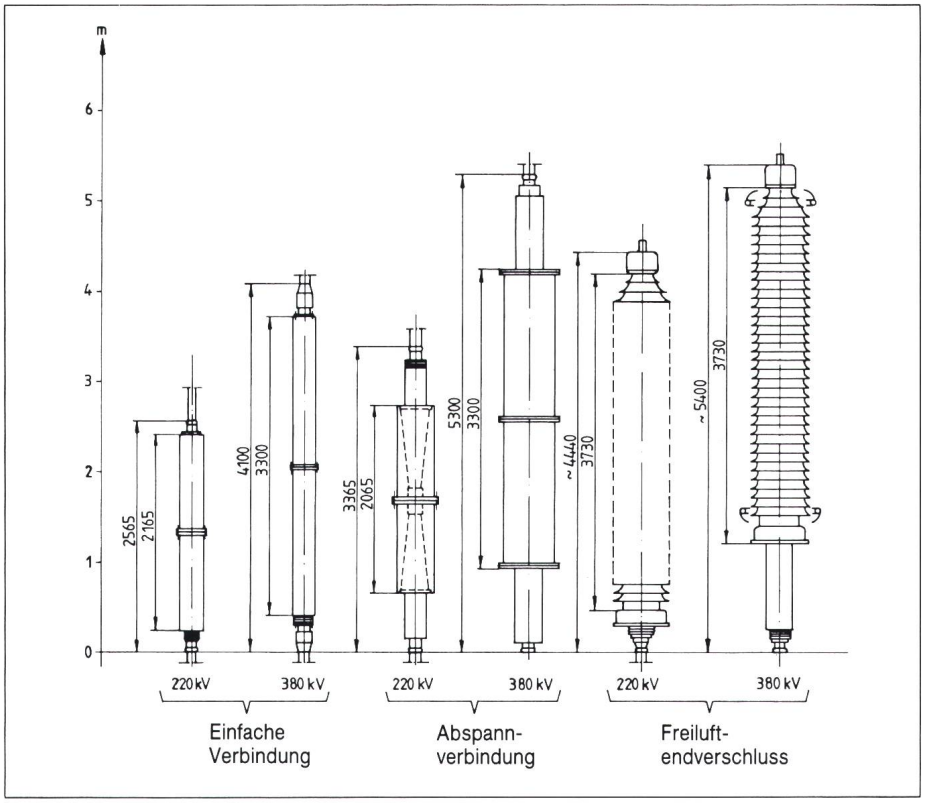
220- und 380-kV-Ölkabel:	
Ausfallrate:	1,25 Störungen/ 100 km und Jahr
Mittlere Dauer der Nichtverfügbarkeit:	250 Stunden
Nichtverfügbarkeitsrate:	3,5%/ 100 km
Freileitungen:	
Ausfallrate:	0,3 Störungen/ 100 km und Jahr
Mittlere Dauer der Nichtverfügbarkeit:	60 Stunden
Nichtverfügbarkeitsrate:	0,2%/100 km

Es sind keine Werte für SF_6-Verbindungen bekannt, da keine so grosse Anlage dieses Typs existiert.

Die mittlere Nichtverfügbarkeitsdauer der Kabel ist hoch, da sie den Zeitbedarf sowohl für das Suchen des Defekts als auch für die Reparatur einschliesst. Die Erfahrung zeigt, dass bei verkabelten Systemen ungefähr ein Drittel der Fehler auf äussere Ursachen zurückzuführen ist (Einwirkung durch Dritte, Erdbewegungen, Blitzeinschläge an Übergangsstellen von der Freileitung zum Kabel usw.). Eine stärkere Vermaschung des Netzes



Figur 14 Schema einer Übergangsstation von Freileitung auf Kabel



Figur 15 Abmessungen der Zubehörteile für Kabel 220 und 380 kV

(grössere Anzahl Verbindungen) kann die geringere Zuverlässigkeit verbessern.

3.4 Umwelt

In den letzten Jahren ist der Schutz der Natur zu einem sehr wichtigen Kriterium bei allen Entscheiden oder Bewilligungen bezüglich der Erstellung von Bauwerken geworden.

Im Sinne der Ökologie, die das Studium der Beziehungen zwischen den Organismen und ihrem belebten (biologische Faktoren, Schädlinge, menschliche Einflüsse) und unbelebten (Klima, Boden) Umfeld zum Gegenstand hat, muss die Problematik eines Bauwerkes in ihrer Gesamtheit betrachtet werden und nicht nur die ästhetischen Aspekte.

Eine unterirdische Leitungsverbindung ist zwar zweifelsohne zu einem grossen Teil unsichtbar und beeinträchtigt deshalb das Landschaftsbild nicht, sie bewirkt jedoch eine Veränderung der Bodenstruktur und eine örtliche Erwärmung. Man muss sich auch die Empfindlichkeit der Kabel gegenüber geologischen Ereignissen (Erdbeben, Erdrutsche usw.) vor Augen halten sowie die Risiken einer Verunreinigung des Bodens durch Austreten von Öl oder von flüssigen Kühlmitteln.

3.5 Rechtliche Probleme

Die rechtlichen Probleme nehmen mit der Zunahme der Infrastruktur zu. Im Untergrund werden zahlreiche Verbindungsleitungen für Starkstrom, Fernmeldewesen, Fernsehen, Erdgas, Wasser und Fernwärme verlegt. Dies bringt nicht nur technische Probleme mit sich, sondern es vervielfachen sich auch die rechtlichen Fragen, dies um so mehr, als unterirdische Leitungen im Grundbuch eingetragen werden müssen. Eine Besonderheit stellt sich bei Leitungen im öffentlichen Grund und Boden (Leitungskataster).

4. Wirtschaftliche Aspekte

Damit man die wirtschaftlichen Aspekte von unterirdischen Leitungen mit einiger Genauigkeit einschätzen kann, wurden acht Lösungen mit je zwei Stromkreisen untersucht, nämlich:

Lösung A: 110-kV-Kabel mit Kunststoffisolation in Graben verlegt (Rohrblock)

Lösung B: 220-kV-Ölkabel in Graben verlegt (Rohrblock)

Lösung C: 220-kV-Ölkabel in Stollen verlegt

Lösung D: 220-kV-Ölkabel in tiefliegendem Tunnel verlegt

Lösung S2: 220-kV-SF_6-Verbindungen in Stollen verlegt

Lösung E: 380-kV-Ölkabel in Graben verlegt (Rohrblock)

Lösung F: 380-kV-Ölkabel in Stollen verlegt

Lösung G: 380-kV-Ölkabel in tiefliegendem Tunnel verlegt

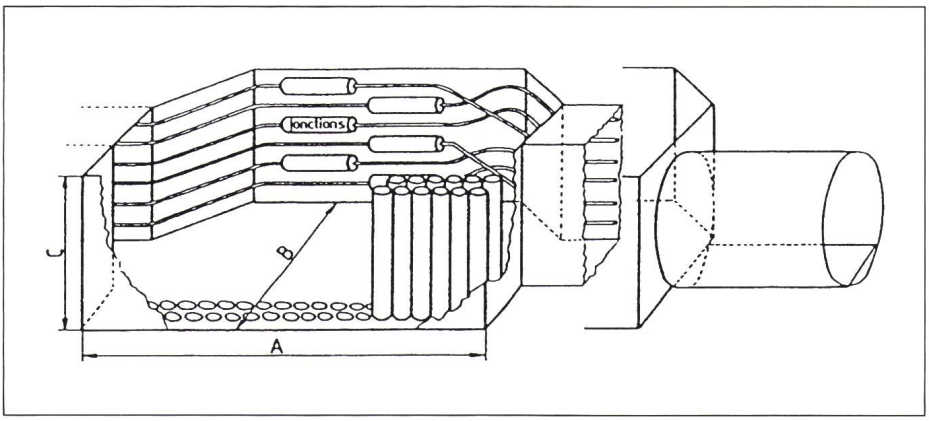
Lösung S3: 380-kV-SF_6-Verbindungen in Stollen verlegt.

Die Figuren 10, 11 und 12 stellen die den verschiedenen Lösungen entsprechenden Profile dar. Figur 13 zeigt die Installationsschemata dieser Lösungen. Es ist zu beachten, dass bei den Lösungen C und F die Stollenabmessungen sehr klein sind, was dem Betrieb und der Sicherheit des Personals abträglich ist.

Die Kosten wurden von schweizerischen Herstellern für typische Leitungen von 5 und 50 km Länge errechnet und dann mit den Kosten einer Freileitung verglichen. In Tabelle I sind die Daten dieser Leitungen zusammengefasst und in den Tabellen II und III sind deren Kosten sowie der Vergleich mit denjenigen einer Freileitung gleicher Übertragungsleistung enthalten. Es geht daraus hervor, dass für 100 kV die Mehrkosten in der Grössenordnung des 11- bis 12fachen, für 220 kV des 14- bis 26fachen und für 380 kV des 21- bis 28fachen einer Freileitung liegen.

4.1 Geographische und geologische Bedingungen

Es versteht sich von selbst, dass der Preis der Tiefbauarbeiten zu einem grossen Teil von den örtlichen Schwierigkeiten abhängt, wobei die angegebenen Preise normalen Bedingungen



Einfache Verbindungen

Leitungsart		Trasseetyp	A m	B m	C m	Zugangs-schächte	Bemerkungen
110 kV	6×1× 800 mm²	Rohrblock	7	2	2	2	
220 kV	12×1×1600 mm²	Rohrblock	13	4	2,7	2	
	6×1×1000 mm²	Techn. Stollen	25	2,2	2,7	2	
	6×1×1600 mm²	Tieflieg. Tunnel	Tunnel ∅				
380 kV	12×1×2000 mm²	Rohrblock	30	4	2,8	4	Trennmauer
	12×1×2000 mm²	Techn. Stollen	20	4	2,8	4	in der Mitte
	12×1×2000 mm²	Tieflieg. Tunnel	20	4	2,8	—	der Kammer

Abspannverbindungen

Leitungsart		Trasseetyp	A m	B m	C m	Zugangs-schächte	Bemerkungen
220 kV	12×1×1600 mm²	Rohrblock	24	6	2,7	2	
	6×1×1000 mm²	Techn. Stollen	28	3,2	2,7	2	
	6×1×1600 mm²	Tieflieg. Tunnel	28	3,2	3	—	
380 kV	12×1×2000 mm²	Rohrblock	30	6	4,8	4	Trennmauer
	12×1×2000 mm²	Techn. Stollen	30	6	4,8	4	in der Mitte
	12×1×2000 mm²	Tieflieg. Tunnel	30	6	4,8	—	der Kammer

Figur 16 Anschlusskammer für Kabel 110, 220 und 380 kV

Nennspannung	kV	110	220				380			
Unterirdische Leitung Lösung u. Verlegungsart		A	B	C	D	S_2	E	F	G	S_3
Kabeltyp		trocken	Öl	Öl	Öl	SF_6-Rohr	Öl	Öl	Öl	SF_6-Rohr
Verlegung in		Graben	Graben	Stollen	Tunnel	Stollen	Graben	Stollen	Tunnel	Stollen
Zwangskühlung mit Kühlmittel		—	—	—	Luft	—	Wasser	—	Luft	Luft
Länge der Leitung	km	5	5	5	4,2	5	5	5	4,2	5
Anzahl und Querschnitt der einpoligen Kabel pro Phase	mm²	1×800 Cu	2×1000 Cu	1×1000 Cu	1×1600 Cu	1×2375 Al	2×2000 Cu	2×1600 Cu	2×1600 Cu	1×2375 Al
Blindleistung im Leerlauf für die 2 Stränge (*kompensiert)	MVAr	2×4,58	2×45,35*	2×22,68	2×22,25	2×4,95	2×136,9*	2×130,3*	2×109,45*	2×12,5
Maximaler Phasenstrom, im Winter	A	800		1250		3150		2500		3150
Maximale Übertragungsleistung der 2 Stränge, im Winter	MVA	2×150		2×475		a)		2×1645		a)
Kosten Kabel geliefert u. verlegt	Mio Fr.	7,8	21,5	11,0	12,5	39,0	58,8	45,2	40,0	47,0
Zubehör geliefert u. eingebaut	Mio Fr.	0,4	5,0	3,6	3,5		8,3	11,0	10,0	
Total der installierten Kabel	Mio Fr.	8,2	26,5	14,6	16,0	39,0	67,1	56,2	50,0	47,0
Bauarbeiten	Mio Fr.	7,1	10,1	29,3	26,6	30,0	13,7	42,1	42,7	43,5
Kühlanlage	Mio Fr.	—	—	—	1,3	—	2,2	—	2,3	0,5
Arbeiten an den zwei Enden	Mio Fr.	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Einbau der Drosselspulen	Mio Fr.	—	4,0	—	—	—	8,0	8,0	8,0	—
Unvorhergesehenes 15%	Mio Fr.	2,5	6,4	6,9	6,9	10,6	14,1	16,4	15,9	14,1
Planung, Bauleitung 9%	Mio Fr.	1,7	4,4	4,8	4,8	7,3	9,7	11,3	11,0	9,8
Gesamtkosten für die 2 Stränge	Mio Fr.	20	53	58	58	89	118	137	133	118
Freileitung gleicher Transportkapazität *Gesamtkosten* für die 2 Stränge über 4,2 km	Mio Fr.	1,7		3,4				5,00		
Preisverhältnis: Unterirdisch/Freileitung		12	16	17	17	26	24	27	27	24

Tabelle II Vergleich der approximativen Kosten (Preise 1987) für günstige Bedingungen (ebenes Gebäude, leichter Zugang) für eine Verbindung mit 2 Strängen von 5 km Länge bei gewundener Führung oder von 4,2 km Länge in direkter Linie

a) Die SF_6-Rohre ermöglichen eine höhere Übertragungsleistung.

Nennspannung	kV	110	220				380			
Unterirdische Leitung Lösung u. Verlegungsart		A	B	C	D	S_2	E	F	G	S_3
Kabeltyp		trocken	Öl	Öl	Öl	SF_6-Rohr	Öl	Öl	Öl	SF_6-Rohr
Verlegung in		Graben	Graben	Stollen	Tunnel	Stollen	Graben	Stollen	Tunnel	Stollen
Zwangskühlung mit Kühlmittel		—	—	—	Luft	—	Wasser	—	Luft	Luft
Länge der Leitung	km	50	50	50	42	50	50	50	42	50
Anzahl und Querschnitt der einpoligen Kabel pro Phase	mm²	1×800 Cu	2×1000 Cu	1×1000 Cu	1×1600 Cu	1×2375 Al	2×2000 Cu	2×1600 Cu	2×1600 Cu	1×2375 Al
Blindleistung im Leerlauf für die 2 Stränge (*kompensiert)	MVAr	2×45,8	2×453,5	2×226,8	2×2225	2×49,5	2×1369	2×1303	2×1094	2×125
Maximaler Phasenstrom, im Winter	A	800		1250		3150		2500		3150
Maximale Übertragungsleistung der 2 Stränge, im Winter	MVA	2×150		2×475		a)		2×1645		a)
Kosten Kabel geliefert u. verlegt	Mio Fr.	77,7	214,8	109,8	124,0	340,0	588,0	451,8	379,5	420,0
Zubehör geliefert u. eingebaut	Mio Fr.	3,6	49,7	36,6	31,8		88,0	115,0	96,6	
Total der installierten Kabel	Mio Fr.	81,3	264,5	146,4	155,8	340,0	676,0	566,8	476,1	420,0
Bauarbeiten	Mio Fr.	64,2	93,1	282,6	268,2	290,0	125,4	406,3	435,8	419,5
Kühlanlage	Mio Fr.	—	—	—	24,0	—	25,0	12,6	11,4	5,0
Arbeiten an den zwei Enden	Mio Fr.	1,0	2,0	2,0	2,0	2,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Einbau der Drosselspulen	Mio Fr.	4,0	32,0	24,0	24,5	4,0	60,0	60,0	61,5	8,0
Unvorhergesehenes 15%	Mio Fr.	22,6	58,7	68,2	71,2	95,4	133,4	157,3	148,2	128,3
Planung, Bauleitung 9%	Mio Fr.	15,6	40,5	47,0	49,1	65,8	92,1	108,5	102,2	88,5
Gesamtkosten für die 2 Stränge	Mio Fr.	189	491	570	595	797	1115	1423	1238	1072
Freileitung gleicher Transportkapazität *Gesamtkosten* für die 2 Stränge über 42 km	Mio Fr.	17		34				50		
Preisverhältnis: Unterirdisch/Freileitung		11	14	17	17	23	22	28	25	21

Tabelle III Vergleich der approximativen Kosten (Preise 1987) für günstige Bedingungen (ebenes Gebäude, leichter Zugang) für eine Verbindung mit 2 Strängen von 50 km Länge bei gewundener Führung oder von 42 km Länge in direkter Linie

a) Die SF_6-Rohre ermöglichen eine höhere Übertragungsleistung.

entsprechen. Diese Kosten könnten wesentlich höhere Werte annehmen, falls Schwierigkeiten auftreten.

4.2 Kühlanlagen

Für die Lösungen A, B, C, S2 und F genügt die natürliche Kühlung. Hingegen ist bei der Lösung E eine Kühlung durch Zirkulation eines Glykol-Wasser-Gemisches parallel zu den Kabeln vorgesehen und bei den Lösungen D, G und S3 gelangt eine Luftkühlung zum Einsatz. Es können selbstverständlich auch andere Kühlsysteme ins Auge gefasst werden.

4.3 Kompensationseinrichtungen

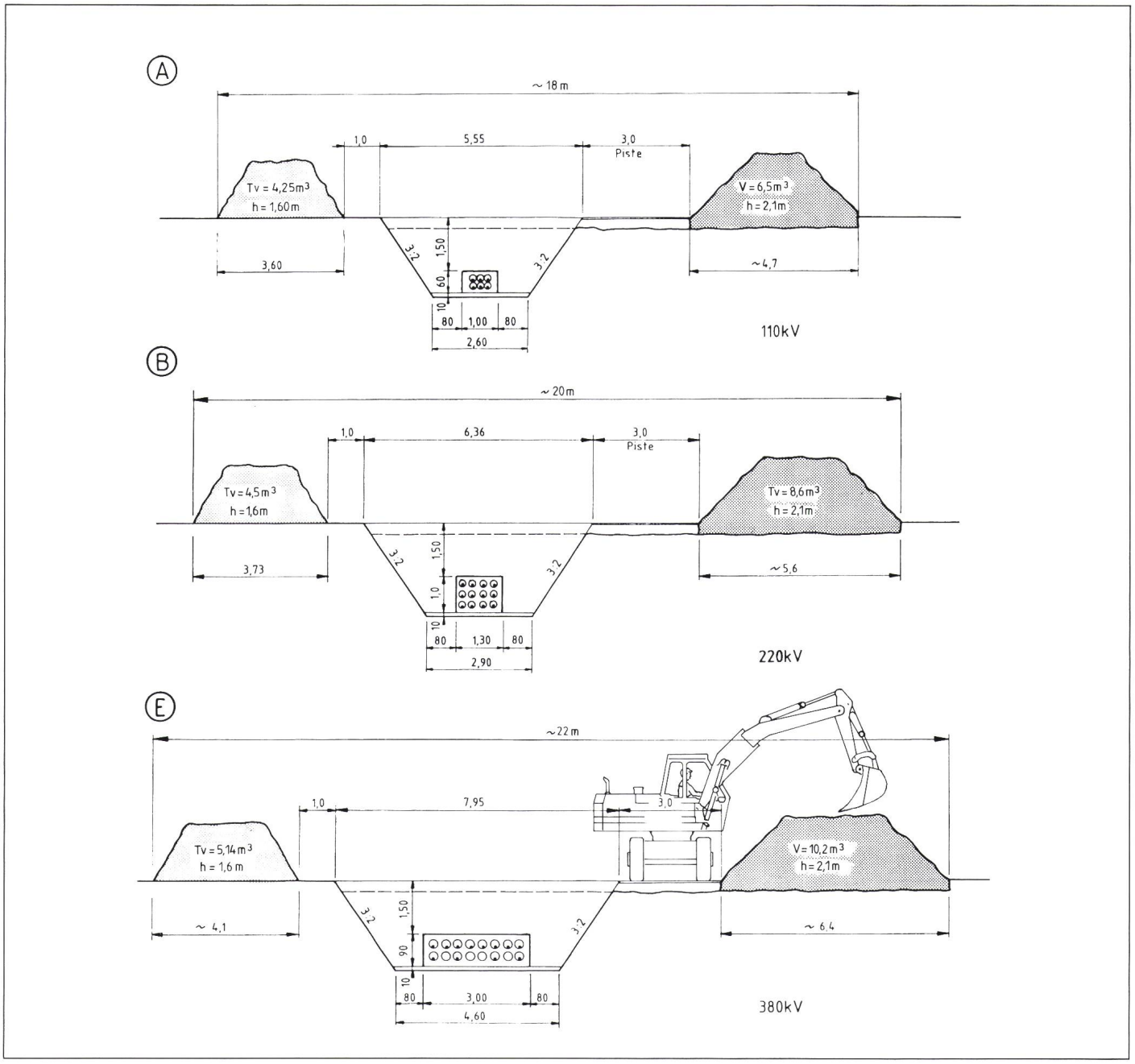
Es wurde angenommen, dass bei einer gesamten Leerlaufleistung von weniger als 90 MVAr die Blindleistung nicht kompensiert werden muss. Hingegen wurde für die über diesem Wert liegende Leistung eine vollständige Kompensation durch gleichmässig verteilte und bei Bedarf abschaltbare Drosselspulen vorgesehen.

4.4 Anlagen für den Übergang von Freileitung auf Kabel

Die Situationen an beiden Enden wurden in die Kostenrechnung einbezogen (siehe Fig. 14).

4.5 Dimensionierung der Anlagen

Sämtliche zusätzlichen Anlagen wurden ebenfalls bewertet und beziffert. In den Figuren 15 und 16 sind die Hauptabmessungen des Ölkabel-Zubehörs aufgeführt sowie die Anschlusskastenkammern mit den zahl-



Figur 17 Inanspruchnahme des Geländes während den Bauarbeiten, Lösung mit Verlegung in Graben

reichen Ölbehältern, die dort aufgestellt werden müssen. Ferner ist in den Figuren 17 und 18 die Inanspruchnahme des Geländes während der Dauer der Arbeiten dargestellt. Figur 1 zeigt eine Übergangsstelle von Freileitung auf Kabel mit zwei 380-kV-Stromkreisen.

5. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

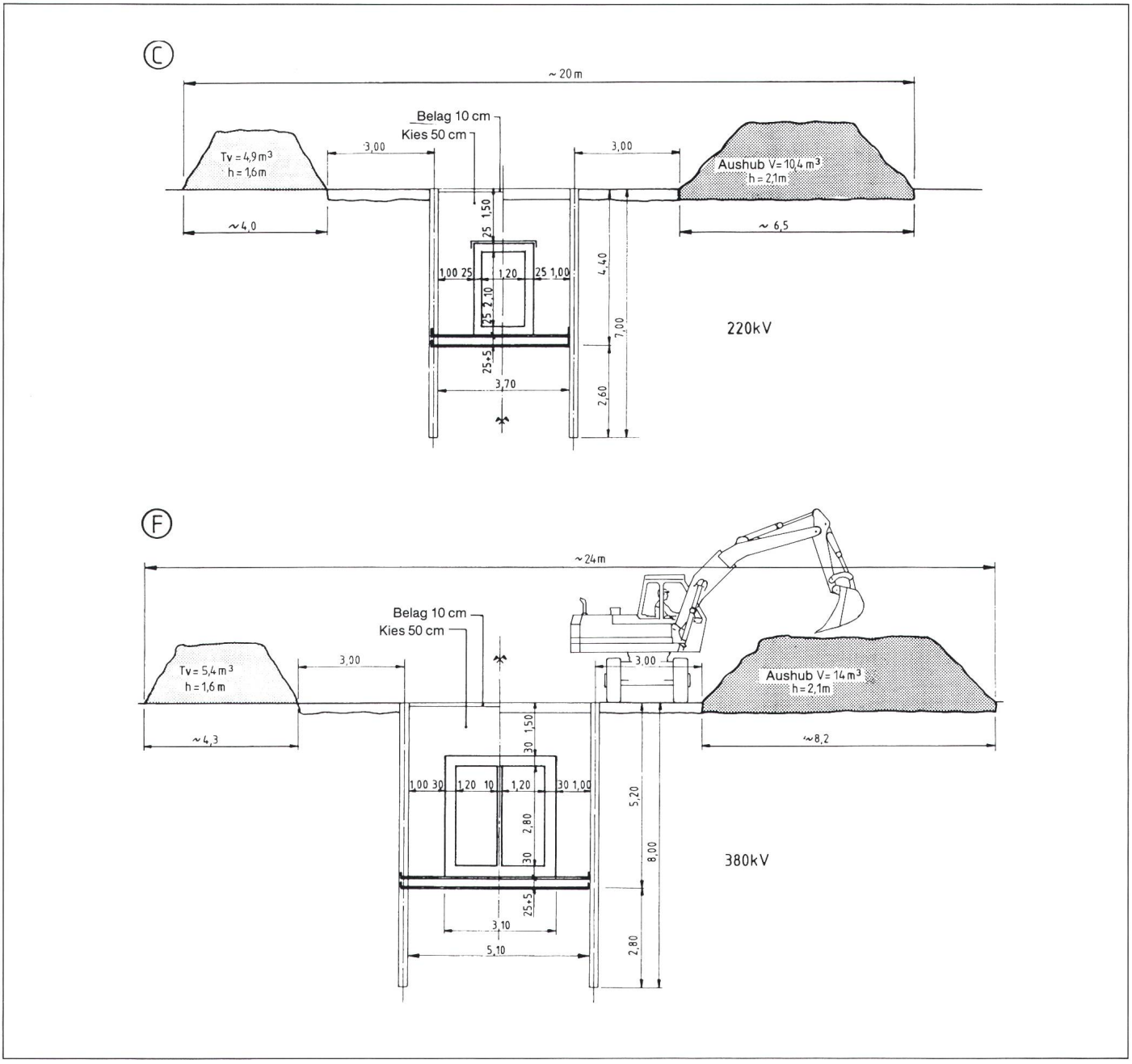
5.1 Zusammenfassung

Das in der Figur 19 dargestellte schweizerische Hochspannungsübertragungsnetz (Spannung 220 und 380 kV) besteht fast ausschliesslich aus Freileitungen (siehe Tabelle IV).

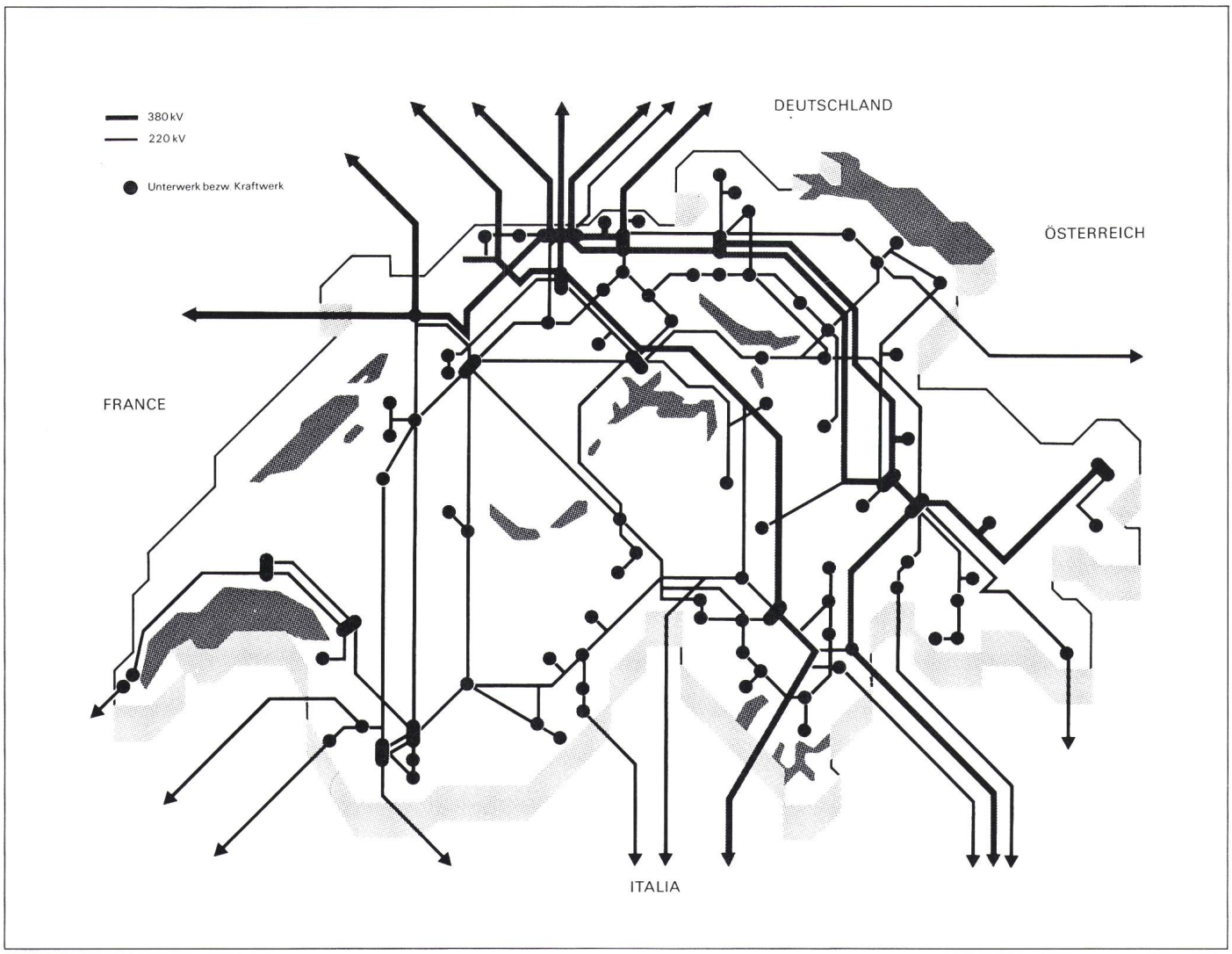
Obschon man heute in der Schweiz in der Lage ist, konventionelle Kabel oder SF_6-Verbindungen für die Spannung 380 kV herzustellen, wurden bis jetzt nur einige sehr kurze unterirdische Verbindungen, und zwar an Netzenden, ausgeführt. Für grosse Verbundleitungen bleiben die Freileitungen die einzige richtige Lösung.

Zu diesen Schlussfolgerungen gelangt man, wenn folgende wesentlichen Punkte berücksichtigt werden:

- die technischen Daten, welche die Vorteile der Freileitung hervorheben;
- der Betrieb, in welchem sich eine geringere Zuverlässigkeit, die lange dauernde Nichtverfügbarkeit der Kabel im Falle eines Fehlers, die Schwierigkeit der Überwachung des Systems und die Komplexität der Technologie bemerkbar macht;
- die Umwelt, die wegen der Durchleitung des Kabels, aus Gründen der Erwärmung oder des Leckagerisikos sowie durch das Ausmass und die Dauer der Baustelle beeinträchtigt wäre;



Figur 18 Inanspruchnahme des Geländes während den Bauarbeiten, Lösung mit Verlegung in Stollen



Figur 19 Schweizerisches 220- und 380-kV-Netz
(Stand 1. Januar 1988)

- die wirtschaftliche Fragestellung, aus welcher hervorgeht, dass Verkabelungen in allen Fällen eindeutig teurer sind als Freileitungen, was sich direkt auf die Kosten der verteilten Elektrizität auswirkt.

5.2. Anwendungsbereich der Kabel

In den grossen schweizerischen Städten ist die Verwendung von Kabeln bis zu einer Spannung von 150 kV eine bekannte und oft angewendete Technik. Hingegen ist eine Verkabelung des Verbundnetzes (in der Schweiz: Spannungen von 220 und 380 kV) nicht vorstellbar. Aus mehreren Gründen scheint diese Lösung heute eine Utopie zu sein.

Die Erstellung von unterirdischen Höchstspannungsleitungen kann nur für die Versorgung von mitten in Ortschaften gelegenen Stationen (Zonen mit hoher Bevölkerungsdichte), oder für die Ableitung in unterirdischen Kraftwerken erzeugter elektrischer Energie ernsthaft in Betracht gezogen werden.

Stranglänge in Betrieb mit 220 kV		5116,9 km
davon Freileitungen	5093,9 km	
für 380 kV ausgelegt	843,5 km	
unterirdische Kabel	23,0 km	
Stranglänge in Betrieb mit 380 kV		1171,1 km
davon unterirdische Kabel	0 km	
Total Stranglänge 220 und 380 kV		6288,0 km

Tabelle IV Länge des schweizerischen 220- und 380-kV-Netzes (Stand 1987)

Anmerkungen:
- Die Daten basieren auf der Summe der am 1.8.1987 in Betrieb befindlichen Leitungen.
- Weitere unterirdische 220-kV-Kabel, die jedoch nicht zum Netz gezählt werden, befinden sich bei der Einspeisung aus den Kraftwerken.

5.3 Schlussfolgerungen

Bei der Entscheidung für oder gegen eine Verkabelung von neuen oder bestehenden Freileitungen muss die Sicherheit, die Qualität und die Wirtschaftlichkeit der Stromversorgung im Verhältnis zu den Erfordernissen des Landschaftschutzes abgewogen werden. Man muss sich auch den Auftrag der Elektrizitätswerke in Erinnerung rufen, der u.a. darin besteht, die vom Land benötigte elektrische Energie zu den bestmöglichen Bedingungen zu liefern, wobei alle Mehrkosten von den Abnehmern getragen werden müssen. Die zuständigen Behörden müssen in Bewilligungsverfahren quantifizierbare technische Kriterien mit subjektiven Umweltschutzkriterien vergleichen. Wie auch in allen kürzlich gefällten Entscheiden der Behörden in dieser Frage unterstrichen wird, ist die Sicherheit der elektrischen Energieversorgung von allergrösster Wichtigkeit für die schweizerische Volkswirtschaft.

Literaturverzeichnis

[1] Verkabelung von Höchstspannungsleitungen, Bulletin SEV/VSE, Nr. 4, 1979.

[2] Verkabelung von Hochspannungsleitungen, Eidg. Kommission für elektrische Anlagen, Bern 1987.

[3] *H. Schweizer:* Gutachten über die Überprüfung der Frage von Verkabelungen der Höchstspannungsleitungen der Reihe 220 kV/380 kV in bezug auf ihre ökologische und optische Auswirkung auf die Landschaft, insbesondere im Alpenraum, Wien 1986.

[4] Beeinflussung der Umwelt durch elektromagnetische Felder. Eidg. Kommission für elektrische Anlagen, Bern 1986.

[5] Freileitung oder Kabel?, Verlags- und Wirtschaftsgesellschaft der Elektrizitätswerke m.b.H., Frankfurt a.M. 1987.

[6] Elektrizitätsübertragung und Landschaftsschutz/Transport de l'énergie électrique et protection du paysage, Eidg. Departement des Innern, Bern 1980.

[7] Elektrische Hochleistungsübertragung und -verteilung in Verdichtungsräumen, Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs- und Hochstromtechnik e.V., Mannheim.

[8] Effets sur l'environnement des champs électriques à proximité des lignes à très haute tension, Conseil Economique et Social de l'ONU, EP/GE/R.72, 1987.

[9] Extremely Low Frequency Fields – Environmental Criteria 35, World Health Organization, Genève 1984.

[10] *G. Mainka:* Berechnung der Belastbarkeit integralgekühlter Einleiter-Energiekabel. Bull. SEV/VSE 71(1980) S. 686.

[11] *B.W. Weber:* Kabelfehler in elektrischen Netzen. Bull. SEV/VSE 72(1981) S. 219.

[12] *E. Schaffer:* Die Wegleitung über Elektrizitätsübertragung und Landschaftsschutz. Bull. SEV/VSE 73(1982) S. 149.

[13] Die Höchstspannungsanlagen im Wiener Netz; ÖZE, 7/8, 1982.

[14] *H. Nyffenegger:* Berechnung der Erdwärme und zulässigen Belastung von Hochspannungs-Polymerkabeln mittels Taschenrechnern. Bull. SEV/VSE 73(1982) S. 425.

[15] *W. Hofmann:* Das längsgeschweisste Kupferwellrohr als Ummantelung von Ölkabeln. Bull. SEV/VSE 73(1982) S. 793.

[16] *H. Brakelmann und H.-G. Dabringhaus:* Bestimmung der Wechselstromverluste und Impedanzbeläge von Hochspannungskabeln. Bull. SEV/VSE 73(1982) S. 796.

[17] *M. Fischer:* Energieübertragung und Kabeltechnik. Bull SEV/VSE 73(1982) S. 1267.

[18] *B. Capol:* Kabeltypen und ihre Eigenschaften. Bull. SEV/VSE 73(1982) S. 1273.

[19] *B. Schmidt:* Kabelherstellung, Zubehör und Installationstechnik. Bull. SEV/VSE 73/(1982) S. 1279.

[20] *A. Meier:* Kabel und Freileitung im System. Bull. SEV/VSE 73(1982) S. 1283.

[21] *H. Glavitsch:* Schutz von Kabelanlagen. Bull. SEV/VSE 73(1982) S. 1288.

[22] *P.-A. Chamorel, P. Blech, M. Ianovici, B. Schädeli:* Berechnung der gegenseitigen elektromagnetischen Beeinflussung von Kabeln. Bull. SEV/VSE 76(1985) S. 218.

[23] *E. Sarbach:* Die äussere Leitschicht bei Kunststoffkabeln. Bull. SEV/VSE 76(1985) S. 236.

[24] *U. Adolph:* Anlaufverhalten des Kühlwassers in Kabeln mit Eigenkühlung. Bull. SEV/VSE 76(1985) S. 754.

[25] *U. Beyer:* Transiente Kabelerwärmung bei zyklischer Belastung. Bull. SEV/VSE 77(1986) S. 251.

[26] Freileitungen und ihre Bewertung als Umweltfaktor, Bulletin SEV/VSE 73(1986).

[27] *E. Sarbach, D.W. Lee:* Messung der Vernetzungsdichte an isolierten Leitungen, speziell mit Infrarot-Spektroskopie. Bull. SEV/VSE 77(1986) S. 762.

[28] *H. Brakelmann:* Kabelbelastbarkeit als Funktion der Tageslastgang-Kennlinie. Bull. SEV/VSE 77(1986) S. 767.

[29] Câbles secs 400 kV: les premières réalisations mondiales, Revue générale d'électricité n° 7(1986).

[30] *E. Sarbach:* XLPE und EPR/EPDM für Kabelisolationen. Bull. SEV/VSE 74(1983)13, S. 706... 710.

[31] *W.J. Borer:* Vernetzte 110-kV-Polymerkabel. Bull. SEV/VSE 74(1983)21, S. 1225... 1228.

[32] *W. Zaengl:* Grundlagen der Kabel-Isolierstoffe. Bull. SEV/VSE 74(1983)24, S. 1394... 1403.

[33] *A. Brechbühler:* Computergestütztes Erfassen und Auswerten der thermischen Belastung eines städtischen Verteilnetzes. Bull. SEV/VSE 74(1983)24, S. 1422... 1425.

[34] *G. Hülsken, W. Rasquin:* Eigenkühlung – eine neue Kühlart von Kabeln. Bull. SEV/VSE 75(1984)5, S. 260... 265.

[35] *J. Artbauer:* Hochspannungskabel mit SF_6-Isolierung. Elektrizitätswirtschaft (1982), S. 21.

[36] *L. Deschamps e.a.:* Liaison par câbles à isolant gazeux comprimé en service dans le monde, Electra N° 94, mai 1984.

[37] *M.P.Gazzana-Prieroggia:* Calcul de la résistance thermique externe effective des câbles posés dans des milieux ayant diverses résistivités thermiques, Electra N° 98, janvier 1985.

[38] *S. Minemura e.a.:* Développement technique et exploitation des câbles souterrains pour le transport de grandes puissances au Japon. CIGRE 1980, 21-03.

[39] *W. Boone* et *G.M.L.M. Van de Wiel:* Essais in situ de câbles à 400 kV à refroidissement latéral. CIGRE 1982, 21-03.

[40] *C.A. Arkell, D.J.Skipper* et *W. Holdup:* Amélioration des liaisons par câbles à pression interne d'huile fluide. CIGRE 1982, 21-06.

[41] *R.G. Foxall, K. Bjørløw-Larsen* et *G. Brazzi:* Etudes, fabrication et pose d'une liaison par câbles sous-marins à 525 kV alternatif entre le continent canadien et l'île de Vancouver. CIGRE 1984, 21-04.

[42] *J.H. Künisch:* Câble de transport d'énergie à grande puissance, refroidi par le conducteur. Résultat d'un essai de longue durée à Berlin-Ouest. CIGRE 1984, 21-08.

[43] *L. Rebuffat e.a.:* Installation de câbles d'énergie sous-marins dans des conditions d'environnement difficiles. Expérience de la liaison 400 kV de Messine. CIGRE 1984, 21-10.

[44] Supertension cables for transmission of large power
Part A: Present state-of-the-art
Part B: Considerations on the near future. CIGRE Symposium 1985, 230-04, 230-05.

[45] *B.R. Schmidt:* Rapport spécial du groupe «Câbles à haute tension». CIGRE 1986, 21-00.

[46] *R. Arrighi:* Caractéristiques fonctionnelles des câbles isolés à haute tension, de grande longueur. CIGRE 1986, 21-13.

[47] *E.M. Allam, J.H. Cooper, J.F. Simshock:* Développement et essais de longue durée d'un câble oléostatique 765 kV à faibles pertes. CIGRE 1986, 21-06.

[48] *R.J. Van Alst, A.M.F.J. Van de Laar, P.P. Leufkens:* Contraintes thermomécaniques dans les câbles à haute tension extrudés. Rapport CIGRE 21-07, 1986.

[49] *H. Dam-Andersen, J. Jorgensen, D.K. Nielsen, S.H. Poulsen:* Conception, fabrication et pose de câbles au PRC Danemark. Rapport CIGRE 21-08, 1986.

[50] *R. Jocteur, E. Favrie, H. Auclair, B. Dhuicq:* Développement des liaisons 400 kV isolées au polyéthylène basse densité. CIGRE 21-09, 1986

[51] *M. Aguet, J. Besson, D. Bezançon, e.a.:* Comportement et maintenance préventive de câbles à haute tension. Rapport CIGRE 21-10, 1986.

[52] *G.M. Lanfranconi, B. Vecellio:* Câbles à huile ininflammable. Rapport CIGRE 21-11, 1986.

[53] *R. Arrighi:* Rapport présenté au nom du Comité d'Etudes 21 (Câbles isolés à haute tension). Caractéristiques fonctionnelles des câbles isolés à haute tension de grande longueur. CIGRE 21-13, 1986.

[54] *K. Harasawa, A. Tsuchida, T. Motomura, H. Fukagawa:* Etudes sur l'application des câbles 275 kV au PRC aux lignes de transport souterrain d'énergie à grande distance au Japon. CIGRE 21-03, 1986.

[55] *S.H. Lee, K.M. Han, W.K. Park:* Développement et installation de câbles d'énergie à haute tension isolés au PRC en Corée. CIGRE 21-04, 1986.

[57] *R.J. Arnold, A. Homer, B. Riot:* Réparation des câbles IFA sur le fond. CIGRE 21-05, 1986.

[58] Comparison of AC and DC Underground and Submarine cable transmission systems. CIGRE Symposium 1987.

[59] Pose de câbles souterrains et sous-marins. Ecole supérieure d'électricité, Gif-sur-Yvette, Journées d'étude des 4 et 5 février 1987.

Anhang: Fragenkatalog und Konsequenzen

1. Elektrotechnische Fragen

Entscheidend ist zunächst eine Differenzierung der Leitungen gemäss ihrer Bedeutung im Netz (Verbund, Stichleitung usw.). Folgende Fragen stellen sich:

Probleme der Parallelführung von Freileitungen und unterirdischen Leitungen, Leistungsverteilung, Erarbeitung eines generellen Netzkonzeptes:

Kabel: Das verkabelte System muss von Anfang an für die grösstmögliche Last ausgelegt werden. Ein Kühlsystem kann in Betrieb gesetzt werden, sobald die Bedingungen dies erfordern.

SF_6: Die bei SF_6-Verbindungen übertragene Leistung ist sehr hoch (Nennströme: 4000 bis 6000 A) und kann verhältnismässig leicht erhöht werden (Ventilation des Kanals, Berieselung des Mantels).

Bedeutende Blindstromerzeugung durch unterirdische Leitungen. Diese vermindert die Übertragungskapazität der Wirkleistung.

Dieses Problem ist bei den SF_6-Verbindungen weniger kritisch (Blindstromerzeugung bei 380-kV-Leitungen: Kabel etwa 26 MVAr/km, SF_6 etwa 2,5 MVAr/km, Freileitungen etwa 0,55 MVAr/km). Es kann nötig sein, die überschüssige Blindleistung mit Drosselspulen oder rotierenden Maschinen (Phasenschiebern) zu kompensieren. Diese Einrichtungen sind teuer und brauchen viel Platz.

Beschränkte Trägerfrequenzübertragungsmöglichkeit bei unterirdischen Leitungen:

Anpasselemente oder Datenübertragung durch andere Mittel (Glasfaserkabel).

Schwierige Überwachung des «Tangens Delta» (Qualität der Isolation):

Kabel: Die Sicherheit kann durch die vorzeitige Erneuerung der Kabel, deren Isolationsqualität abnimmt, oder durch Erhöhung der Reserve sichergestellt werden.

SF_6: Die Dichte des Gases ist für die Güte der Isolation entscheidend; sie muss dauernd und auf der ganzen Länge der Verbindung überwacht werden.

Problem der Belastungsfähigkeit:

Kabel: Infolge der schlechten Wärmeleitfähigkeit ist die Isolation gegen Erwärmung empfindlich. Es muss ein genügend grosser Leiterquerschnitt verwendet werden. Je nach Verlegungsart beeinflussen die Bodeneigenschaften die Dimensionierung und die Transportkapazität der Kabel. Sie werden für ungünstige Bedingungen ausgelegt; die Austrocknung des Bodens muss überwacht werden; es besteht das Risiko, dass entlang eines Leiters heisse Stellen auftreten.

SF_6: Das Gas ist unempfindlich gegen Erwärmung und leitet die Wärme gut an das Aussenrohr ab.

Grosser Kurzschlussstrom:

Dies ist eine Folge der kleineren Induktivität der Kabel; diese Ströme können einen vorgegebenen Wert aus folgenden Gründen nicht überschreiten:

- Stromdichte im Leiter und im Mantel;
- Erwärmung der Isolation;
- dynamische Beanspruchung.

Man kann den Kurzschlussstrom künstlich begrenzen oder die Anlage entsprechend auslegen; der Kurzschlussstrom kann durch Einbau von in Serie geschalteten Drosselspulen (Spannungsprobleme, teuer) oder durch Öffnung des Ringnetzes (Sicherheitsproblem) begrenzt werden.

Verluste im Kabelmantel:

Es gibt drei Arten dieser Verluste: Induzierte Ströme, Wirbelstromverluste und Hystereseverluste:

Man unterbricht die elektrisch leitenden Mäntel durch ein zyklisches Vertauschen ihrer Mäntel («Crossbonding»-Methode). Die Anlage muss isoliert sein und mit speziellen Überspannungsableitern ausgerüstet werden.

Überspannungsprobleme an den Übergangsstellen zwischen Freileitung und Kabel durch Wellenreflexion infolge ungleicher Impedanzen:

Einbau von Überspannungsableitern.

Probleme der Lastverteilung:

Die grosse Übertragungskapazität erfordert im allgemeinen mehrere parallele Kabel:

- der Kurzschlussstrom muss von jedem einzelnen Kabel verkraftet werden
- der Blindstrom nimmt entsprechend zu
- die gegenseitige Induktion beeinflusst die Lastverteilung. Bei längeren Leitungen müssen die Phasen vertauscht werden, damit sie gleich belastet werden.

Bei SF_6-Anlagen macht die Übertragungskapazität der SF_6-Rohre die parallele Verlegung mehrerer Leiter pro Phase überflüssig.

Schutzprobleme:

Diese treten vor allem bei wechselweisem Einsatz von Freileitungen und unterirdischen Kabeln in ein- und derselben Leitung auf. Diese gemischte Bauweise bedingt besondere, komplexere Lösungen.

Probleme der Auswahlmöglichkeit bei den Kabeltypen, der Verlegungsart und den nötigen Zubehörteilen (Verbindungen, Kabelendverschlüsse):

Es müssen verschiedene Kriterien berücksichtigt werden, wie die Bedeutung der Leitung, die Umweltbedingungen, der verfügbare Platz usw.

Probleme bei Vorhandensein von parallelen Niederspannungs- und Fernmeldekabeln:

Risiko von unerwünschten Einflüssen bei Störungen und Schaltvorgängen.

2. Bautechnische Fragen (Tiefbau)

Aufwendige Projektarbeiten:

Notwendigkeit zur Ausführung von Sondierbohrungen und Probegrabungen zur Abklärung der Bodeneigenschaften (Zusammensetzung, Wärmeleitfähigkeit, Wasser, Stabilität) und zur Trasseewahl:
Qualifiziertes Personal ist erforderlich, und die Planungskosten sind hoch.

Probleme der Trasseewahl:

Strassen, Gewässer, Wälder usw.; Geologie; Zugang; Höhenunterschiede; Kreuzung mit anderen Anlagen (Kanalisationen, Bauten). Längeres Trassee, höhere Kosten, grössere Auswirkungen).

Veränderung des Grundwasserstroms während des Bestehens der Baustelle:

Eventuell notwendige Grundwasserabsenkungen während des Baus. Bleibender Eingriff in Grundwasserhaushalt möglich.

Erstellung von grösseren Bauten:

Diese Anlagen müssen zugänglich sein (Verbindungskammern, Kühlsysteme, Übergangsstationen Freileitung/Kabel, Kompensationseinrichtungen).

Notwendigkeit von grossen Erdbewegungsarbeiten auf Baustellen, die für Maschinen schwer zugänglich sind.

Komplexere Bauleitung:

Koordination der verschiedenen Phasen mit anderen Baustellen (einzuhaltende Termine) und von äusseren Bedingungen abhängiger Arbeitsfortschritt (Vermeidung von zu grossen Kulturschäden, Schwierigkeiten, im Winter zu arbeiten, unvorhergesehene Probleme).

Einwirkung der verschiedenen Verlegungsarten:

Diese Einwirkungen (bei Gräben, Oberflächenkanälen oder bei in der Tiefe liegenden Kanälen) sowie die vorhandenen Hindernisse beeinflussen das Gelände und die Kosten beträchtlich. Bei einer Verlegung in Tunnels ist jedwelche spätere Abänderung des Trassees ausgeschlossen.

Die Bauwerke hängen vom Kabeltyp ab:

Ölkabel erfordern Kanäle und Ölauffangbecken aus Gründen des Umweltschutzes.

3. Betriebliche Fragen

Komplexere Installation mit vielen Zubehörteilen:

Es sind vermehrte Überwachung und aufwendigerer Unterhalt nötig; das Störungsrisiko ist höher.

Schwierige Einstellung der Schutzrelais, reduzierte Selektivität, Wiedereinschaltung nicht zulässig.

Periodische Überwachung des Trassees:

Überwachungspersonal für Unterhalt der Kontrollgänge (erschwerte Arbeitsbedingungen).

Probleme der Lokalisierung von Defekt- und Leckstellen in der Isolation (Öl oder Gas):

Kabel: schwierig, besonders wenn es sich nicht um eine sichtbare Fehlerstelle handelt; verlangt Zeit, während welcher die Leitung nicht verfügbar ist; Risiko, dass nach einem zweiten Zwischenfall die Lieferung nicht mehr sichergestellt werden kann.

SF_6: Dank dem Rohrüberwachungssystem kann die Fehlerstelle besser bestimmt werden.

Probleme des Einschaltstromes bei Unterspannungsetzung im Leerlauf:

Kabel: Es sind besondere Schutzmassnahmen zu treffen.

SF_6: Eindeutig geringer als bei Ölkabeln; es sind keine besonderen Massnahmen nötig.

Ausserbetriebnahme schwach belasteter Kabel:

Sie ist notwendig, um die Blindleistung zu reduzieren (bei SF_6-Anlagen praktisch nicht nötig):
Verminderung der Betriebssicherheit.

Korrosion und unfallbedingte Zerstörung der äusseren Oberfläche der Kabel und der Kühlrohre:

Kabel: Korrosionsschutzmassnahmen, zum Beispiel kathodischer Schutz.

SF_6: widerstandsfähiges Aussenrohr, allenfalls Schutzanstrich.

Beschädigung durch Vibrationen und Dehnung.

Heikler Betrieb der Niederspannungs-Überspannungsableiter (Zerstörung durch Durchschläge schwer erklärbar).

Notwendige Vergrösserung des Querschnitts, um Überlastungen zu vermeiden:

Grosse Investitionen und Unterhalt.

Schwierige Festlegung der genauen Nennlast:

Sie hängt von der Bodenqualität und der Verlegungsart ab. Bei einer Verlegung in Gräben muss die Anlage überdimensioniert werden; in den anderen Fällen hängt die Belastung von der Lufttemperatur im Stollen ab; im Sommer ist man gezwungen, die Luft zu kühlen. Energieverluste.

Nichtverfügbarkeit durch Einwirkung Dritter.

Entweder durch Beschädigung der Anlagen bei Ausführung von Bauarbeiten in unmittelbarer Nähe (Risiko schwerer Unfälle) oder weil die Anlage aus Sicherheitsgründen ausser Betrieb gesetzt werden muss:
Es ist genügend Reserve im Netz vorzusehen.

Zeitraubende und schwierige Reparaturen, es handelt sich um heikle Spezialistenarbeit, Arbeitssicherheit (Erdung der Baustelle):

Es müssen Reparaturkonzepte entwickelt und ein ausreichendes Reservematerialiager angelegt werden. Das Reservekabel muss gleich lang sein wie der längste installierte Kabelabschnitt.

Schwierige Einhaltung des Spannungsbereiches; die Überwachung des Synchronlaufs ist erschwert.

Probleme beim Einbau von Kompensationsspulen:

Diese sind kostspielig und heikel im Betrieb. Unstabilität der Generatoren bei ungenügender Kompensation (untererregter Betrieb der Gruppen) oder Resonanzerscheinungen zwischen den Spulen und der Freileitung.

Geringere Verfügbarkeit:

Unterirdische Installationen sind zwar Witterungseinflüssen oder Blitzschlägen weniger ausgesetzt als Freileitungen, jedoch bewirkt der langdauernde ausgeschaltete Zustand bei der Lokalisierung eines Fehlers und dessen Reparatur, dass die Verfügbarkeit eines Kabelsystems geringer ist als diejenige einer Freileitung.

4. Umweltschutzfragen

Abgabe der Energieverluste des Kabels an die Umwelt in Form von Wärme (dieses Problem ist besonders bei einer Verlegung in Gräben wichtig):

Austrocknung des Bodens und Veränderung des örtlichen biologischen Systems (Fauna und Flora), die bestimmte Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen erfordern.

Veränderung der Bodenstruktur durch die Verlegung von Kabeln (Störung und Mischung der Schichten):

Veränderung des Grundwasserhaushaltes, Störung des Lebensraums aller Biotope im Bereich des Trassees.

Schwere Probleme im Falle von geologischen Ereignissen wie Erdbeben, Erdrutschen und Senkungen:

Geologisch instabile Gegenden müssen vermieden werden, was zu einer Verlängerung des Trassees führen kann.

Gefahr einer Umweltverunreinigung durch Austreten von Öl und Kühlflüssigkeit:

Das Ölleckagerisiko ist bei Kabeln mit Kunststoffisolation oder bei SF_6-Verbindungen ausgeschaltet.

Probleme der elektromagnetischen Felder:

Die elektrischen Felder können verringert werden, die magnetischen Felder bleiben dennoch beträchtlich. Aufgrund der heutigen Erkenntnisse kann man jedoch sagen, dass es kaum einen schädlichen Einfluss der von Kabel hervorgerufenen elektromagnetischen Felder auf die Umwelt gibt.

Grosse Fläche des in Anspruch genommenen Geländes:

Obschon die Leitung unterirdisch verlegt wird, benötigt sie dennoch grosse an der Oberfläche liegende Anlagen wie:

- Übergangsstelle von Freileitung auf Kabel,
- Kompensationsstationen,
- Kühlanlagen.

Probleme der Bauphase:

Die grossen Bauarbeiten und deren lange Dauer bewirken eine langdauernde Störung der Umwelt:

- Lärm
- Schwertransporte
- Erdbewegungen
- Beeinträchtigung der Landwirtschaft

5. Rechtliche Fragen

Bevor mit den Arbeiten begonnen werden kann, muss eine ganze Reihe von juristischen Verfahren durchgeführt werden. Diese Verfahren sind lang, schwierig und im allgemeinen sehr teuer (Honorare, Erwerb von Dienstbarkeiten und Grundstücken, Enteignung):

- Beschränkung der Erstellung von Bauten auf dem Trassee.
- Erwerb von Durchleitungsrechten und Servituten.
- Eintragung der Servitute in das Grundbuch (für alle Leitungsstrecken obligatorisch, da die Anlagen nicht sichtbar sind).
- Die auf öffentlichem Grund und Boden verlaufenden Trassees sind im allgemeinen nicht gleich geschützt.
- Kreuzung mit anderen unterirdischen Anlagen und auszuführende Sonderbauten (Folge des Servituts).
- Haftpflicht gegenüber Dritten (zum Beispiel bei einer Verunreinigung durch Ölleckage).
- Recht zur Benutzung von Privatwegen für den Bau und den Unterhalt der Leitung, Probleme bei Landumlegungen (allenfalls Zwang zum Landkauf).