

# Verbundisolatoren liegen im Trend

## Die Baustromversorgung der Alptransit Gotthard AG in Sedrun

Die EW Bündner Oberland AG (EWBO) setzt seit etwa zehn Jahren in verschiedenen Versorgungsabschnitten Verbundisolatoren ein. Im Rahmen des Projekts Neue Alpentransversale (Neat) war im Jahr 1999 die 60-kV-Baustromversorgung des Alptransit-Gotthard-Zwischenangriffs<sup>1</sup> Sedrun zu realisieren. Die bisher gesam-

melten positiven Erfahrungen haben zur Verwendung von Verbundisolatoren auch für dieses wichtige Projekt geführt. Nahezu zwei Drittel der Verbundisolatoren werden als Stützisolatoren eingesetzt. Im folgenden Beitrag werden die Aufgaben

*Giusep Cavelti, Konstantin Papailiou, Frank Schmuck*

des EWBO im Neat-Projekt und die Bedeutung des Verbundisolators beschrieben sowie die spezifischen Eigenschaften von Verbundstützisolatoren vorgestellt.

### Erster Einsatz beim EWBO

Im Jahr 1990 erfolgte die Netzumgestaltung in Trun mit dem Ziel, die Betriebsflexibilität zu erhöhen. Es wurden die 60-kV- und 16-kV-Freileitung auf ein gemeinsames Gestänge zusammengefasst. Das Dorf Trun wurde über eine Mittelspannungs-Schwerpunkt-Transformatorstation eingeschlaucht, und ein künftiger Einspeisepunkt für das geplante Kleinwasserkraftwerk wurde bereitgestellt. In diesem Zusammenhang wurden aktuelle Isolatortechnologien bewertet, darunter auch der Verbundisolator mit Silikongummimantel. Erste Erfahrungen

### Die EW Bündner Oberland AG

Die EW Bündner Oberland AG (EWBO) wurde im Jahre 1907 gegründet und betreibt heute ein Versorgungsnetz von ca. 870 km Länge mit den Spannungsniveaus 60 kV, 16 kV und 0,4 kV. Die total installierte Kraftwerksleistung beträgt rund 13 MVA und der mittlere Jahresenergieumsatz 170 Mio. kWh.

mit Verbundisolatoren in den Siebzigerjahren, der Vergleich zwischen konventioneller und Verbundisolortechnologie, aber auch die seit 1979 gewonnenen Betriebserfahrungen im Lötschbergtunnel sowie der internationale Trend führten zur Entscheidung, eine Versuchsstrecke mit Verbundisolatoren auszustatten. Die Anforderungen an den Verbundisolator übertrafen die Anforderungen an einen vergleichbaren Porzellanisolator: Bei gleichen Kosten sollte ein besseres Eigenschaftsbild (niedriges Gewicht bei hoher Bruchsicherheit und mechanischer Festigkeit, hohes Isoliervermögen, wartungsfreier Betrieb, gute visuelle Integration ins Landschaftsbild) erreicht werden. Der von der Firma Sefag AG in Malers hergestellte Verbundisolator Silcosil entsprach auf Grund der flexiblen Fertigungstechnologie diesen Erfordernissen. Der störungsfreie Betrieb seit 1991 hat den Entscheid für die Technologie Verbundisolator umfänglich bestätigt (Bild 1).

### Beteiligung des EWBO an der Neat

Der Gedanke, einen Gotthard-Basistunnel zu bauen, geht bereits auf das Jahr 1947 zurück. Das erste Projekt stammt aus dem Jahre 1962. Fünfzig Jahre später, also im Jahre 2012, soll der längste Eisenbahntunnel der Welt in Betrieb genommen werden. In diesen 50 Jahren wurde das Projekt entsprechend dem wissenschaftlich-technischen Fortschritt, den Sicherheitsbestimmungen und dem Umweltschutz weiterentwickelt. Die Annahme der Vorlagen zur Neat im Jahre 1992 bildete die Planungsgrundlage, und die Annahme der leistungsabhängigen Schwerverkehrsabgabe (LSVA) sowie der Vorlage zur Modernisierung der Bahn

im Jahre 1998 bedeuteten die Baubewilligung.

Das erste Projekt des Jahres 1962 beinhaltete einen einspurigen Tunnel, erschlossen über zwei Zwischenangriffe. Der Tunnel sollte von Amsteg nach Giornico in gerader Linienführung durch den Berg führen. Seine 45 km Länge waren in der Mitte mit einer Überholgleisanlage versehen. Das System Tunnelschiene war für eine maximale Geschwindigkeit von 200 km/h ausgelegt, was der heutigen Planung weitestgehend entspricht. Andere Details des damaligen Plans wurden umfassender modifiziert. Dies gilt insbesondere für das Tunnelsystem: Erste Reviews aus dem Jahre 1971 favorisierten einen Doppelspurtunnel, der gegebenenfalls streckenweise in zwei Einspurprofile aufzuteilen ist. Der Entscheid zwischen einer Doppelspurröhre mit Dienströhre beziehungsweise zwei Einspurröhren (mit oder ohne Dienströhre) fiel dann im Jahre 1995. Die in der jüngeren Vergangenheit diskutierte Hybridlösung wurde als optimales Konzept eingeführt: zwei Einspurrohre ohne Dienstunnel, jedoch mit zwei Multifunktionsstellen,

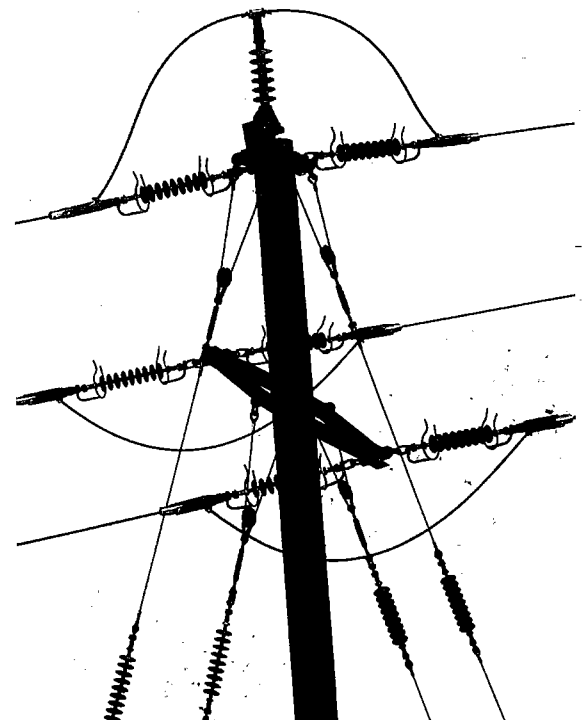


Bild 1 Abspannmast mit Verbundisolatoren aus dem beschriebenen Leitungsabschnitt



wurde durch die NOK/KVR geplant und ausgeschrieben, da der grösste Teil dieses Abschnittes über den Baustellenperimeter des Zwischenangriffs verläuft und verlegt werden musste. Die Alptransit Gotthard AG genehmigte schliesslich eine kombinierte Holzregel-, Betonmasten- und Kabelleitung von 6,4 km Länge (drei Teilstücke mit Längen von 4,5 km, 0,6 km und 1,3 km). Die Gesamtstrecke wurde von der Abteilung Netze des EWBO realisiert (Bild 4).

### Verbundisolatoren als Alternative

Nach den positiven Erfahrungen des EW Bündner Oberland mit den ersten, im Jahr 1991 installierten Verbundisolatoren entsprach diese Technologie vollständig dem hohen Sicherheitsstandard für dieses Projekt. Innovativ und dem aktuellen technischen Stand entsprechend, wurden für die Regelleitung Verbundstützisolatoren vorgesehen. In enger Zusammenarbeit mit der Sefag AG in Malters, die bereits seit über 20 Jahren Verbundisolatoren fertigt, wurde die technische Spezifikation der Verbundisolatoren (Verbundlangstabilisatoren für Abspannpunkte und Verbundstützisolatoren) erarbeitet. Die aus der Spezifikation abgeleiteten Typen wurden im Labor hinsichtlich ihrer mechanischen und elektrischen Eignung geprüft und bestanden vollumfänglich. Mit der Verwendung von Verbundisolatoren folgt das EWBO einem internationalen Trend, diese Technologie in zunehmendem Masse einzusetzen.

### Design der EWBO-Verbundstützisolatoren

Der Verbundstützisolator wurde gemäss Bild 5 ausgelegt. Mit der Verwendung des modularen Prinzips für die Silikonummhülle kann die erforderliche Bauhöhe exakt eingestellt werden. Der spezifische Kriechweg entspricht bei 60 kV der Verschmutzungsstufe I (rund 18 mm/kV) und gewährleistet mit der hydrophoben<sup>3</sup> Oberflächenwirkung ein optimales Verhalten bei Verschmutzung und gleichzeitiger Feuchtebelastung. Die elektrischen Werte korrespondieren mit den Erfordernissen der Isolationskoordination<sup>4</sup>. Der Bruchwert von 25 kN garantiert in Kombination mit dem im Folgenden beschriebenen «Safe-Failure»-Verhalten eine hohe Versorgungssicherheit.

### Weltweiter Einsatz

Die ersten Verbundisolatoren wurden in den USA vor rund 35 Jahren einge-

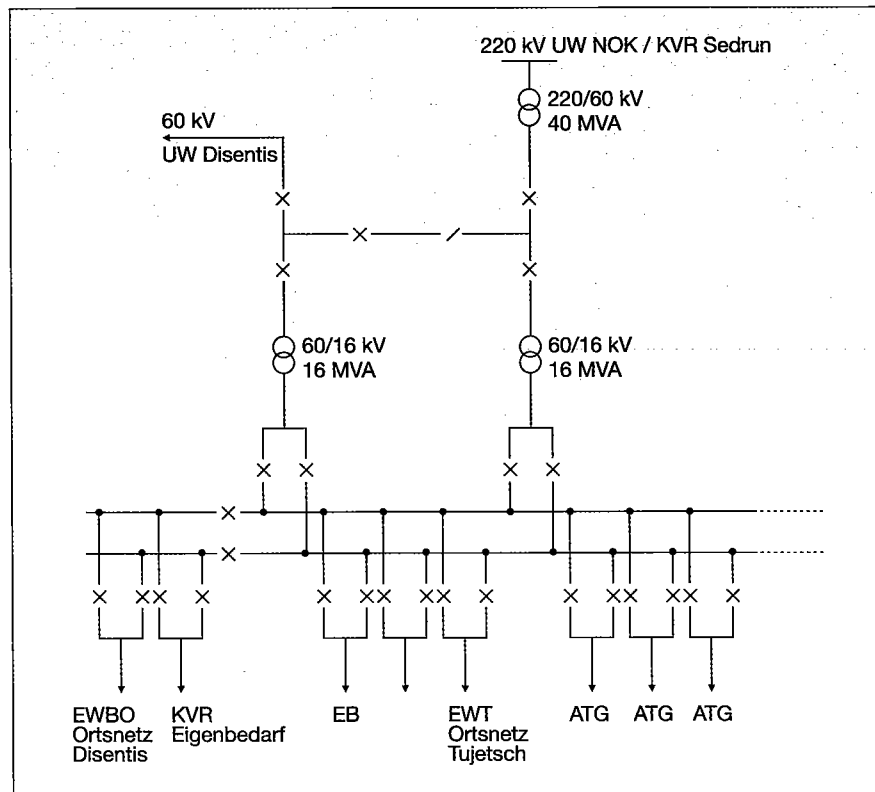


Bild 4 Konzept für die Stromeinspeisung im Zwischenangriff Sedrun  
Teilprojekt 2 aus Bild 3: Unterwerk 60/16 kV (Baustelleneinspeisung)

setzt. Der Grundgedanke, verschiedene Materialien gemäss ihrem Eigenschaftsbild optimal in einer Isolierung einzusetzen, wurde bis in die heutige Zeit beibehalten. Die Materialien und Fertigungsprozesse wurden aber weiterentwickelt, so dass das Betriebsverhalten gegenüber konventionellen Isolatoren signifikant verbessert wurde. Diese Verbesserung ist auch finanziell von Vorteil. Das zeigt die

Analyse der Gesamtkosten für Komponenten, Installation und Betrieb.

### Studie fasst wichtige Vorteile zusammen

Die Vorteile haben weltweit zu einem starken Zuwachs an Verbundisolatoren geführt. Aus diesem Grund hat die Cigré WG 22.03<sup>5</sup> [7] im Jahre 1997 die Arbeit an einer zweiten Studie (Survey) begonnen, deren Ergebnisse basierend auf der Studie des Jahres 1990 abschliessend in der *Electra* 191 im August 2000 [2] publiziert wurden. Die auszugsweise in Bild 6 dokumentierten Ergebnisse sind die Zusammenfassung einer weltweiten Befragung von Energieversorgungsunternehmen (Befragung für Übertragungsspannungen > 100 kV).

- Das Verhalten bei Verschmutzung ist in beiden Studien prioritär: Der Zuwachs in der jüngeren Studie auf rund 55% ist auch auf das bessere Verständnis des Verschmutzungsverhaltens durch intensive Grundlagenuntersuchungen sowie die mittlerweile vorliegenden Freiluftverfahren zurückzuführen.
- Die Vandalismusbeständigkeit basiert auf dem bekannten elastischen Verhalten.
- Die Vorteile im Handling und Transport betreffen finanzielle Betrachtun-

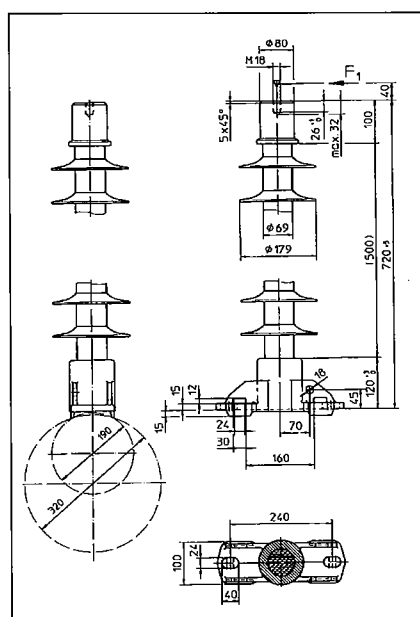


Bild 5 Design des Verbundstützisolators

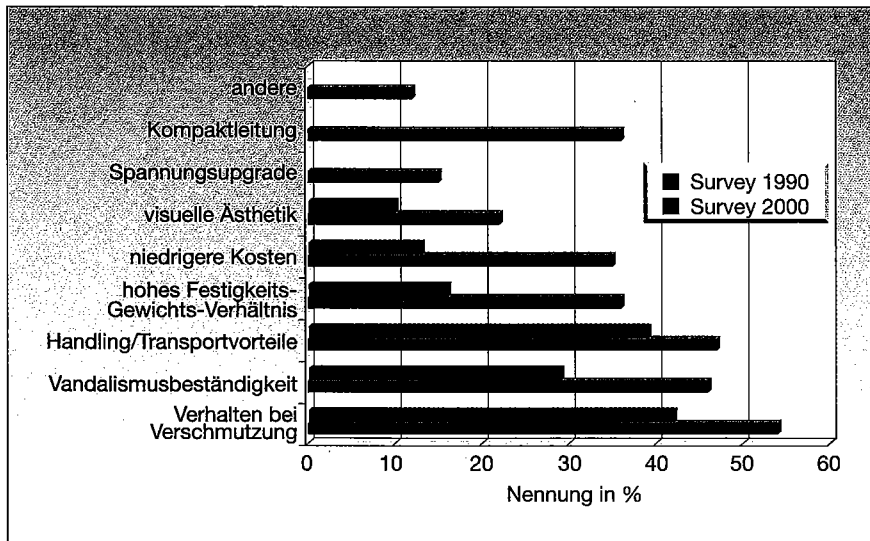


Bild 6 Gründe für den Einsatz von Verbundisolatoren laut Cigré-Befragung

gen, Kosteneinsparung durch schnellere Installation und die fehlende Notwendigkeit von Reserveisolatoren.

- Spannungserhöhungen und Kompaktleitungen sind relativ neue Kriterien, die im Rahmen des deregulierten Strommarktes zunehmend an Bedeutung gewinnen.

**Anzahl installierter Einheiten**

Die Anzahl installierter Einheiten reflektiert eindeutig den Trend vom konventionellen Isolator zum Verbundisolator. Die Studie enthält nicht den traditionellen Markt USA, so dass die aus der aktuellen Bewertung resultierende Gesamtzahl von 692 176 in der Realität erheblich übertroffen wird (zum Vergleich: 1990 waren 42 590 Einheiten installiert). Schätzungen gehen weltweit von einer Gesamtzahl von 3,5 Mio. Verbundisolatoren aus bzw. 10 Mio., wenn die 36-kV-Spannungsebene berücksichtigt wird. Auf allen Kontinenten ist ein hoher Zuwachs zu beobachten. Der Aufbau der Elektrifizierung in China hat zu einer überproportionalen Zunahme in Asien geführt.

Ungefähr 5% der in der Studie erfassten Verbundisolatoren sind Stützisolatoren. Dieser scheinbar untergeordnete Isolatortyp spielt eine essentielle Rolle für die Kompaktierung<sup>6</sup> von Leitungen bei limitierten Durchleitungsrechten [3] beziehungsweise bei einer Spannungserhöhung. Die Philosophie einer Kompaktierung wird verstärkt in den USA verfolgt: Die im Rahmen der Studie verfügbaren Daten zeigen einen Anteil der Stützisolatoren von 50% in amerikanischen EVU. Auf Grund ihrer zunehmenden Bedeutung in Europa und für das

EWBO-Projekt wird im Folgenden speziell auf die Erhöhung der Versorgungszuverlässigkeit durch das «Safe-Failure»-Verhalten von Verbundstützisolatoren eingegangen.

**Bruchverhalten von Verbundstützisolatoren**

Die allgemeinen Gründe für den Einsatz von Verbundisolatoren entsprechen den in der Studie [2] genannten bekannten Vorteilen:

- niedriges Gewicht bei hoher Bruch-sicherheit und mechanischer Festigkeit
- reduzierte Installationskosten
- hohes Isoliervermögen
- wartungsfreier Betrieb (Lifecycle Costs)
- dynamische Festigkeit
- Vandalismusbeständigkeit
- kurze Prozesszeit (Lieferzeit)

Darüber hinaus versprechen Verbundstützisolatoren:

- Kompaktlösungen für Übertragungs- und Verteilssysteme (T&D-Systeme)
- Bruchsicherheit (Safe Failure Mode)

Verbundstützisolatoren zeigen im Fehlerfall nicht das typische Bruchverhalten im Sinn einer physischen Trennung, wie es von Porzellanisolatoren bekannt ist [4]. Es kommt zu einem partiellen Verlust der mechanischen Festigkeit durch Faserbruch im tragenden Stab. Die verbleibenden intakten Fasern gewährleisten aber, dass das Leiterseil auf dem Mast gehalten wird. Das äußert sich optisch in einer stärkeren Deformation bei konstanter Biegelast. Dieses optische Erscheinungsbild ist für die Diagnose relevant, weil die

zerstörungsfreie Prüfung des im Inneren des Isolatorverbundes befindlichen Stabs zu aufwändig und teuer wäre.

Dieses Verhalten wurde im neuen Standard für Verbundstützisolatoren (IEC 61952 [5]) berücksichtigt. Als Bestandteil der Designprüfung (im deutschen Sprachgebrauch auch als Bauartprüfung bezeichnet) ist eine so genannte Maximum Design Cantilever Load (MDCL) zu bestimmen. Dieser Wert ist als Belastung definiert, bei der erste Schäden des Stabs auftreten.

Die noch begrenzten Langzeiterfahrungen führten zur Definition, dass dieser Wert im Betrieb nicht überschritten wer-



Bild 7 Schadensbild bei Überschreiten des MDCL-Wertes

den sollte. Ein typisches Schadensbild zeigt Bild 7 [6]. Deutlich erkennbar ist der Riss, der sich typischerweise auf der Druckseite ausbildet. Die mittlere Spannung, bei der dieses Schadensbild auftritt, hängt u.a. von folgenden Parametern ab:

- Stabmaterial aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK)
- Form der metallischen Endarmatur
- Verfahren zum Aufbringen der metallischen Endarmatur auf den Stab

Typische mittlere Spannungswerte für die MDCL liegen abhängig vom Verhältnis zwischen Längen und Durchmesser bei 250 bis 400 N/mm<sup>2</sup> (zum Vergleich: Das Versagen des GFK-Stabes ohne Armatur auf Zugbelastung tritt bei wesentlich höheren Werten zwischen 400 und 1100 N/mm<sup>2</sup> auf).

Der eigentliche Bruchversuch ist Bestandteil des «Type Tests» (Typprüfung). Dieser Wert – in der branchenüblichen englischen Terminologie als Specified Cantilever Load (SCL) bezeichnet – ist die Biegekraft, welche allmählich innerhalb von 300 s bis auf den Bruchwert erhöht wird.

#### Beispiel eines SCL-Versuchs

Bild 8 zeigt die Anordnung eines Tests für einen 72,5-kV-Stützer, bei welchem die SCL 20 kN betrug. Das Erscheinungsbild im Bruchaugenblick zeigt, dass es zu keiner physischen Separation der Stützerteile gekommen ist. Der Bruchwert kann sowohl dem Kraft-Zeit-Diagramm entnommen als auch akustisch zweifelsfrei bestimmt werden. Das nachfolgende Anlegen der Betriebslast von 6 kN führte zu einer stärkeren Deformation im Vergleich zum ungebrochenen Zustand, der Stützer behielt aber seine mechanische Integrität.

Eine Analyse des Fusstorsos ergab ein verändertes Schadensbild (Bild 9) gegenüber dem MDCL-Schadensbild aus Bild 7. Deutlich erkennbar ist die Rissbildung auf der Druckseite. Der Riss endet an der so genannten neutralen Faser (hier



Bild 8 SCL-Versuch des 72,5-kV-Stützers

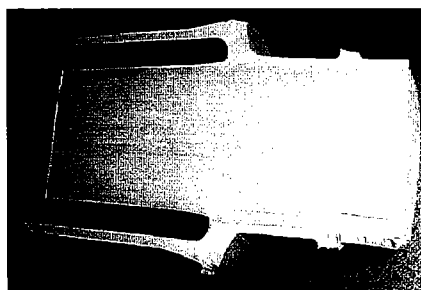


Bild 9 Schadensbild des SCL-geprüften Stützers

gibt es weder Druck noch Zug) des Stabes. Der den Zuganteil aufnehmende Stababschnitt weist keine Schädigung auf. Dieses Bruchverhalten führt zu einer Restfestigkeit im Vergleich zu Porzellanstützern und zu einem gesamthaft sicheren «Failure Mode». Der betroffene Stützer kann auf Grund der grösseren Deformation zweifelsfrei erkannt und ersetzt werden.

#### Versuch zur Bestimmung der Restfestigkeit

Die für die Betriebssicherheit interessante Restfestigkeit wurde hinsichtlich ihrer zeitlichen Beständigkeit untersucht. Dazu wurde folgendes Prüfverfahren angewendet:

- Festlegung des MDCL-Wertes
- Bruch des Stützers
- Anlegen des 1,1-fachen MDCL-Wertes für 96 h

Für den Prüfling (unbeschränkter 36-kV-Stützer) wurde aus versuchstechnischen Gründen ein MDCL von 5 kN festgelegt. Dieser Wert übertrifft die verbreitete Praxis, die der empirischen Beziehung  $MDCL < 0,4 SCL$  folgt. Der Bruchwert wurde mit 11,1 kN bestimmt. Es ist wieder erkennbar, dass der Stützer trotz erheblicher Deformation seine physische Integrität behält (Bild 10).

Der gebrochene Stützer wurde über 96 h statisch mit 5 kN belastet (Bild 11). Die Deformation beträgt rund 45 mm. Das entspricht einer Zunahme gegenüber dem ungebrochenen Zustand um 100% (22 mm).

Nach den 96 h wurde die Restfestigkeit untersucht. Die Resultate sind in Bild 12 dargestellt. Es ergab sich ein nicht linearer Verlauf, wobei die ursprünglichen 11 kN nicht erreicht wurden. Bis etwa 8 kN kann der gebrochene Stab die Biegekraft nahezu linear aufnehmen, das rechnerisch reduzierte E-Modul beträgt rund 22 000 N/mm<sup>2</sup>. Eine weitere Krafterhöhung führt zu einer überproportionalen Deformation.

Mit dem Anwenden einer MDCL-korrespondierenden Belastung über 96 h und dem konstant-plastischen Verhalten im untersuchten Bereich kann tendenziell eine hohe Sicherheit für die Restfestigkeit des gebrochenen Stützers abgeleitet werden.

Aus Sicht der Prüfphilosophie entspricht in einem Diagramm mit logarithmischer Zeitachse eine Prüfzeit von 96 h der «Mitte» zwischen einem Tag und 50 Jahren. Führt die reduzierende Belastung zu einem gleichbleibenden Alterungsprozess, so ergibt sich ein konstanter Änderungsgradient und es kann z.B. aus den



Bild 10 Bruchverhalten des Stützers

Prüfwerten des Neuzustandes und des 96-h-Tests entsprechend auf grössere Betriebszeiten extrapoliert werden.

#### Zusammenfassung

Verbundisolatoren haben heute einen technischen Reifegrad erreicht, der auf Grund ihrer Vorteile zu einem überproportionalen Anwendungswachstum geführt hat. Für die wichtige Baustromversorgung der Alptransit Gotthard AG in Sedrun wurden Verbundisolatoren sowohl als Stützer wie auch als Abspannisolatoren eingesetzt. Die elektrischen und mechanischen Prüfungen wurden mit den entsprechenden Sicherheitsfaktoren bestanden. Zudem zeigten die mechanischen Prüfungen ein sicheres Bruchverhalten, welches mit Isolatoren in konventioneller Bauweise nicht erreichbar ist. Die im vorliegenden Beitrag beschriebenen spezifischen Eigenschaften des Ver-

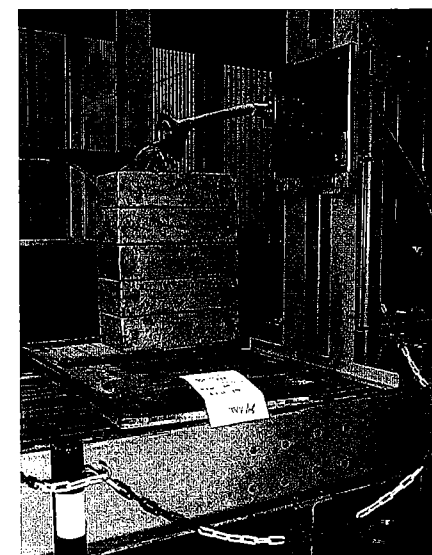


Bild 11 96-h-Test des gebrochenen Stützers

