

PETER MATT INGENIEUR-BERATUNG, ITTIGEN

Forschungsauftrag 52/88
Bundesamt für Strassenbau

ZERSTOERUNGSFREIE PRUEFUNG VON SPANNGLIEDERN
IN BESTEHENDEN BRUECKENBAUTEN

Peter Matt, dipl. Bauing. ETH/SIA

Ittigen, Januar 1989

ZUSAMMENFASSUNG

Bei Spannbetonbrücken leisten die Spannglieder einen wichtigen Beitrag zur Gebrauchstauglichkeit und zur Tragsicherheit. Der zuständige Bauherr möchte deshalb bei bestehenden Brücken den Zustand der Spannglieder kennen.

Der Bericht beginnt mit einer Definition der Ziele und mit Hinweisen zu den verwendeten Spannsystemen.

Anschliessend ist eine Uebersicht über die möglichen Prüfmethoden gegeben. Diese werden in bezug auf Praxistauglichkeit und zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten beurteilt. Es muss festgestellt werden, dass wir heute über keine zerstörungsfreie oder zerstörungsarme Methode verfügen, welche direkt und umfassend Auskunft über den Zustand der Spannglieder in bezug auf Schädigung durch Korrosion geben können. Immerhin hat es sich gezeigt, dass einzelne Methoden wenigstens lokal wichtige Informationen zur Beurteilung liefern.

Im weiteren enthält der Bericht auch Hinweise zu Schadensfällen, möglichen Schwachstellen bei bestehenden Brücken und Empfehlungen für zukünftig zu bauende Spannbetonbrücken.

RESUME

Pour les ponts en béton précontraint, les câbles sont essentiels pour l'aptitude au service et la sécurité de la structure. Par conséquent, le gestionnaire responsable pour les ouvrages d'art aimerait connaître l'état des câbles dans les ponts existants.

D'abord on présente les buts du rapport et quelques informations relatives aux systèmes de précontrainte utilisés.

Par la suite, on décrit les méthodes d'auscultation existantes, suivi d'une analyse de leur utilité en pratique et leur potentiel de développement ultérieur. Il faut noter que jusqu'à ce jour on ne dispose pas d'une méthode non- ou peu- destructive qui permettrait de juger d'une façon directe et globale de l'état de corrosion des câbles. Cependant, il existe quelques méthodes qui donnent des résultats valables, au moins localement.

Enfin, on donne des informations utiles relatives à des dégâts observés et à des points éventuellement critiques dans les ponts existants, et des recommandations pour les futurs ponts en béton précontraint.

VORWORT

Als Folge des starken Ausbaus des schweizerischen Strassennetzes seit dem zweiten Weltkrieg und insbesondere im Zuge des Nationalstrassenbaues wurden in unserem Lande Tausende von Brücken gebaut. Neben den bereits früher bekannten Stahl- und Stahlbetonbrücken hat sich bereits in den Fünfzigerjahren der Spannbeton als neue Bauweise gut etabliert. Dank technischen Vorzügen und Wirtschaftlichkeit wurden immer mehr Brückenüberbauten in Spannbeton erstellt, sodass heute diese Bauweise den grössten Anteil am Gesamtbestand aufweist.

Die Gebrauchstauglichkeit und die Tragsicherheit bei Spannbetontragwerken werden in hohem Masse durch die Spannglieder gewährleistet. Für den verantwortlichen Betreiber eines solchen Bauwerkes ist es deshalb wichtig, den Zustand der Spannglieder zu kennen.

In der vorliegenden Arbeit sind die Resultate einer Bestandesaufnahme der möglichen zerstörungsfreien und zerstörungsarmen Prüfverfahren zur Zustandsermittlung in bezug auf Korrosion der vorgespannten Bewehrung dargestellt. Im weiteren werden auch deren Praxistauglichkeit beurteilt und Empfehlungen für weitere Entwicklungen gemacht.

Der Verfasser dankt den verschiedenen Fachleuten, die ihm viele wichtige Hinweise und Auskünfte gegeben haben.

Besonderen Dank geht an Herrn M. Donzel, Leiter der Sektion Brücken beim Bundesamt für Strassenbau, für seine wertvollen Anregungen.

Ittigen, Januar 1989 PM/rr

Peter Matt

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1. EINLEITUNG - AUFGABENSTELLUNG	1
2. ARTEN DER SPANNGLIEDER	2
2.1 Allgemeines	2
2.2 Spannstähle	3
2.3 Hüllrohre, Injektionsrohre	3
2.4 Verankerungen, Kupplungen	4
2.5 Injektionsgut	4
3. UEBERSICHT UEBER DIE MOEGlichen PRUEFMETHODEN UND DEREN BEURTEILUNG BEZUEGLICH PRAXISTAUGLICHKEIT UND ENTWICKLUNGSMOEGlichkeiten	5
3.1 Allgemeines	5
3.2 Visuelle Inspektion-Fiberskopie	8
3.3 Durchstrahlungsprüfungen	10
3.4 Ultraschallprüfungen	13
3.5 Reflektometrische Impulsmessungen	16
3.6 Georadar	18
3.7 Infrarot-Scanner, Thermographie	20
3.8 Magnetische Verfahren	21
3.9 Elektrochemische Methoden	22
3.10 Weitere Methoden	23
4. ZUSAMMENFASSUNG, SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK	26
4.1 Allgemeines zur aktuellen Situation	26
4.2 Schlussfolgerungen in bezug auf die Zustands- ermittlung bei bestehenden Brücken	29
4.3 Ausblick	32
5. LITERATURVERZEICHNIS	35
6. BILDER	43
7. BILDNACHWEISE	60
8. BEILAGE	61

1. EINLEITUNG - AUFGABENSTELLUNG

Gemäss Schreiben des Bundesamtes für Strassenbau vom 3.3.1988 wurde der Verfasser beauftragt,

"eine Bestandesaufnahme der vorhandenen zerstörungsfreien Methoden für die Erfassung des Zustandes von Spannkabeln in bezug auf Korrosion vorzunehmen, die Methoden zu beurteilen und eine Empfehlung für die Weiterentwicklung einer oder mehrerer Methoden bis zur Praxistauglichkeit abzugeben."

Dieses Ziel soll mittels Literaturrecherchen, Gesprächen mit Fachleuten und Einbringen eigener Erfahrungen erreicht werden.

Im Zwischenbericht per 31.8.1988 wurden die damals bereits vorhandenen Resultate zusammengefasst. Damit konnte sich der Auftraggeber einen ersten Ueberblick auch im Zusammenhang mit gegebenenfalls zu erteilenden Forschungsaufträgen verschaffen.

Die Beilage enthält eine Zusammenstellung der Namen von Fachleuten, mit denen der Verfasser Gespräche geführt hat. Es sei hier besonders erwähnt, dass der Verfasser überall sehr grosse Bereitschaft zur offenen Aussprache und Auskunft angetroffen hat.

Bei dieser Arbeit geht es primär um Spannglieder bei Strassenbrücken. In der Schweiz wurden seit Einführung der Spannbetonbauweise in den Vierzigerjahren in überwiegender Masse sog. nachgespannte Vorspannung mit Verbund (Post-tension) verwendet. Diese Anwendungsart bildet die Grundlage für diesen Bericht.

Auf andere Arten wie Vorspannung im Spannbett (Pré-tension), Vorspannung ohne Verbund, externe Spannglieder, Schrägseile und vorgespannte Boden- und Felsanker wird an den entsprechenden Stellen kurz hingewiesen.

2. ARTEN DER SPANGLIEDER

2.1 Allgemeines

Nach dem Wissensstand des Verfassers gibt es keinen genauen Ueberblick über die Arten, der seit der Einführung der Spannbetonbauweise in der Schweiz verwendeten Spannglieder. Weltweit gesehen sind vor allem in den Fünfziger- und Sechzigerjahren über 100 verschiedene Spannverfahren entwickelt worden. Die spätere wirtschaftliche Entwicklung hat dann eine strenge Selektion bewirkt, sodass heute weniger als 10 Verfahren noch eine grössere Bedeutung haben.

In der Schweiz sind es seit vielen Jahren 5 Firmen, die teilweise mehr als ein Spannverfahren anbieten. In den Anfängen wurden noch mindestens 2 andere Verfahren verwendet, die später vom Markt verschwanden (Verfahren Baur-Leonhardt und KA).

Auch die Verfahren der 5 Firmen AVT (früher Element AG), Freyssinet SA, Spannstahl AG, Stahlton AG und VSL International AG (früher Spannbeton AG) haben sich natürlich über die Zeit verändert. Für einzelne Bauwerke wurden auch Sonderlösungen entwickelt und eingebaut.

Wir sind demnach bei den vorhandenen Spannbetonbrücken mit einer Vielzahl von Systemen konfrontiert, die zusätzlich in manchen Fällen nur ungenügend dokumentiert sind. Dies gilt nicht nur für den Wissensstand in den Firmen, wo die Spannbetonpioniere ja meistens bereits im Ruhestand sind und auch die Archive kaum mehr bis in die früheren Zeiten zurückreichen; dies gilt leider auch für die Bauwerksdokumentation beim Bauherrn, wo teilweise nur rudimentäre Angaben zum verwendeten Spannverfahren vorhanden sind.

Es ist zu überlegen, wie die bestehenden Mängel in der Dokumentation über Spannverfahren verbessert werden könnten.

2.2 Spannstähle

Auch hier ist ein vollständiger Ueberblick ohne weitergehende Nachforschung nicht möglich. Immerhin kann gesagt werden, dass überwiegend glatte Drähte ($\emptyset$ 5 - 8 mm) und Litzen ($\emptyset$ 13 und 15 mm) zur Anwendung gelangten. Diese sind aus patentiertem Walzdraht im Kaltziehverfahren hergestellt. In einigen Fällen wurden auch leicht profilierte Drähte verwendet. Für kürzere Spannglieder, beispielsweise für die Quervorspannung von Fahrbahnplatten, wurden oftmals Gewindestangen bis zu $\emptyset$ 36 mm, vorzugsweise der Stahlgüten 835/1030 und 1080/1230 verwendet (i.a. warmgewalzt, gereckt und gelassen). Inwieweit in unserem Lande auch die Stahlgüte 1080/1320 bei Brücken eingebaut wurde, entzieht sich der Kenntnis des Verfassers; dieses Material erwies sich in anderen Ländern als zu empfindlich und nach dem Auftreten einer grösseren Anzahl von Schadensfällen musste es vom Markt genommen werden.

Die Zugelemente für das in den Sechziger- und frühen Siebzigerjahren auch verwendete KA-Verfahren bestehen aus warmgewalzten, vergüteten Ovalrippenstähle.

Die Herstellarten für Spannstähle waren über die Jahre Veränderungen unterworfen, die nicht immer nur eine Qualitätsverbesserung ergaben. So hat die Einführung des Luftpatentierens in Einzelfällen zu Problemen geführt.

2.3 Hüllrohre, Injektionsrohre

In den weitaus meisten Fällen sind bisher gefalzte oder längsgeschweisste Wellhüllrohre aus dünnwandigem Stahlblech zur Anwendung gelangt (Wandstärken i.a. 0.2 - 0.35 mm). Deren primäre Funktion ist die Schaffung eines Hohlraumes, welches die Längsbeweglichkeit des Spannstahles beim Vorspannen ermöglicht.

In den späten Sechzigerjahren bis zur Energiekrise 73/74 wurden verschiedentlich auch gewellte PVC- und PE-Hüllrohre verwendet (beispielsweise beim Viaduc de Chillon und bei einer Anzahl der vorfabrizierten Standardüberführungen). Der Grund für deren Verschwinden war der Kostenanstieg bedingt durch höhere Erdölkosten.

Für die Injektionsrohre wurden glatte oder gewellte Kunststoffrohre oder teilweise auch glatte Stahlrohre verwendet. Nach dem Injizieren sind die Rohrüberstände an den Betonoberflächen abgetrennt worden, d.h. meistens auf ok. Fahrbahnplatte.

2.4 Verankerungen, Kupplungen

Wir unterscheiden zwischen Spannankern und Festankern; bei den Kupplungen zwischen festen und beweglichen Typen. Auch hier gilt das bereits früher gesagte, dass im Laufe der Zeit auch innerhalb des gleichen Spannfahrens unterschiedliche, weiterentwickelte Verankerungen und Kupplungen zum Einsatz kamen.

Es muss vermutet werden, dass die Dokumentationen nicht mehr durchwegs vollständig sind.

2.5 Injektionsgut

Das Injektionsgut besteht normalerweise aus Portlandzement, Wasser und einem Zusatzmittel. Das letztere soll die Eigenschaften der Wasser-Zement-suspension in verschiedener Hinsicht verbessern.

Um eine möglichst gute Verfüllung zu erzielen, ist es wichtig, den WZ-Faktor so tief wie möglich zu halten und gleichzeitig noch genügend Fließfähigkeit zu haben.

Es ist dem Verfasser nicht bekannt, in welchem Masse in der Schweiz gegen diese Regel verstossen wurde. Im weiteren ist nicht auszuschliessen, dass früher auch ungeeignete Zusatzmittel und Verpressgeräte Verwendung fanden. Immerhin kann gesagt werden, dass hierzulande die Bedeutung einer guten Injektion für die Dauerhaftigkeit frühzeitig erkannt wurde.

3. UEBERSICHT UEBER DIE MOEGlichen PRUEFMETHODEN UND DEREN BEURTEILUNG BEZUEGLICH PRAXISTAUGLICHKEIT UND ENTWICKLUNGSMOEGLICHKEITEN

3.1 Allgemeines

Die Notwendigkeit der Ueberwachung und des Unterhaltes von Brücken ist den Fachleuten schon lange bewusst. Die wichtigsten Grundsätze sind in Normen, Richtlinien und Empfehlungen enthalten (1, 2, 3). In diesen Unterlagen sind folgende Hinweise in bezug auf Spannglieder enthalten:

- in (1), Art 34.3: "Bauten aus Beton, Stahlbeton und Vorspannbeton sind vor allem auf Betonschäden, Lage und Ausdehnung von Rissen, **Verrostung der Stahleinlagen,....**" zu untersuchen.
- in (2) auf Seite 6: "Schrittweise zu kontrollieren sind:
.... **15.5 Korrosion an Spannkabeln**"

und auf Seite 12, 4.31: "**Der Verankerungsbereich von Spannkabeln ist sorgfältig auf Risse oder Abplatzen des Schutzbetons und auf Korrosion der Ankerköpfe zu kontrollieren**", dazu im Kommentar: "Die Rissigkeit, die Porosität und Ablösung des Schutzbetons sind oft Ursache der Korrosion der Ankerköpfe".

- in (3), Art. 4.35: "Die einzelnen Bauwerksteile..... sind **systematisch** zu kontrollieren, insbesondere im Hinblick auf:

den Zustand der Materialien (Korrosion,.....)
die Verankerung von Kabeln.

Die Grundsätze sind klar. Da die Spannglieder bei einer Brücke unzweifelhaft einen entscheidenden Beitrag zur Gebrauchstauglichkeit und zur Trag-sicherheit leisten, müssten sie periodisch und systematisch untersucht werden. Dies ist von den Verfassern des OECD-Berichtes "Bridge Inspection" erkannt worden. Der bereits 1976 erschienene Bericht hält fest, **dass die Entwicklung von Verfahren, die den Zustand von Spanngliedern feststellen können, absoluten Vorrang haben soll.**

Beim Lesen der Textstellen fällt auf, dass vor allem von der visuellen Kontrolle der Ankerköpfe die Rede ist. Diese haben sicher eine wichtige Funktion; es wäre aber genauso wichtig, den Spannstahl auf der gesamten Spanngliedlänge auf Korrosion überprüfen zu können.

Es ist zu vermuten, dass die Autoren dieser Normtexte einerseits daran gedacht haben, dass die Verankerungen i.a. exponiert und damit besonders gefährdet sind und sie andererseits die Vorstellung hatten, die Spannglieder würden ja relativ weit im Beton drin vor jeglicher Korrosion geschützt sein. Im weiteren war ja auch keine Methode bekannt, mit der Korrosionsschäden auf ganzer Spanngliedlänge festgestellt werden konnten.

Erst in jüngster Zeit hat man begonnen darüber nachzudenken, wie man die Voraussetzungen für eine solche Kontrolle in Zukunft schaffen könnte.

Wir sind demnach mit der Situation konfrontiert, dass man bei der Entwicklung und Anwendung des Spannbetons und insbesondere der Spannsysteme sicher auch an deren Dauerhaftigkeit, nicht aber an deren Überprüfbarkeit auf Korrosion gedacht hat.

Interessant an dieser Feststellung ist dabei die Tatsache, dass die erste je gebaute Spannbetonbrücke, Merkmale aufweist, wie wir sie teilweise heute wieder neu formulieren. Es handelt sich dabei um die von Dischinger entworfene Bahnhofsbrücke in Aue (heute DDR), welche in den Jahren 1935 bis 1937 erstellt wurde (4). Die aussenliegenden Spannglieder sind ohne weiteres überprüfbar, können nachgespannt werden und sind auch auswechselbar (siehe Bild 1)

Währenddem Freyssinet von Anfang an für die Vorspannung mit Verbund unter Anwendung hochfester Spannstähle eintrat, "konvertierte" Dischinger erst 1949 in das Lager der Vertreter dieses Konzeptes. Die höhere Ausnützung der Spannstähle im Bruchzustand und das weitgehende Beherrschen der Kriech- und Schwinderscheinungen, durch die von Dischinger geschaffenen Theorien, waren die Gründe zu diesem Sinneswandel.

In der Folge wurden - von wenigen Ausnahmen abgesehen - die Brücken mit innenliegenden Spanngliedern gebaut. Die Bilder 2 bis 6 zeigen verschiedene Spanngliedanordnungen und verdeutlichen die Problematik jeder nachträglichen, zerstörungsfreien Zustandsermittlung.

Der Vollständigkeit halber sei an dieser Stelle erwähnt, dass seit einigen Jahren die aussenliegende, externe Vorspannung wieder verstärkt ins Gespräch gekommen ist und in verschiedenen Ländern (darunter auch die Schweiz) bei Neubauprojekten, auch aus den hier diskutierten Ueberlegungen betr. Ueberprüfbarkeit und Auswechselbarkeit, wieder angewendet wird.

Welche Methoden zur Zustandsermittlung sind nun dem Verfasser im Laufe seiner Arbeit bekannt geworden?

In den nachfolgenden Abschnitten werden eine ansehnliche Zahl **zerstörungsfreier** oder zumindest **zerstörungssarmer** Prüfmethoden vorgestellt und deren Tauglichkeit und Begrenzung diskutiert. Im weiteren sind Empfehlungen für zukünftige Entwicklungen gegeben.

Neben einer Vielzahl von spezifischen Literaturstellen, die in den einzelnen Abschnitten aufgeführt und zitiert werden, sei noch auf einige Arbeiten hingewiesen, welche die Thematik allgemein behandeln ((5) bis (16)).

Ein Grossteil der angeführten Methoden basiert auf den elektromagnetischen Strahlen; der Wellenbereich ist in Bild 7 dargestellt.

Im weiteren ist zu dieser Stelle der Hinweis wichtig, dass bei vorliegender Schädigung durch Korrosion zur weiteren Abklärung ein ausgewiesener Korrosionsexperte zugezogen wird.

3.2 Visuelle Inspektion - Fiberskopie

Nach wie vor ist die sorgfältige, visuelle Inspektion eines Brückenbauwerkes durch den erfahrenen Fachmann von ausschlaggebender Wichtigkeit. Feuchtigkeit, Rostspuren, Risse, Verformungen, etc. können entscheidende Hinweise auch über mögliche Schäden an Spanngliedern geben und damit Veranlassung zu weiteren Untersuchungen sein. Es ist aber leider so, dass nicht alle plangemässen Betonoberflächen auch visuell überprüft werden können (z.B. nicht begehbare Hohlräume bei plattenartigen Ueberbauten und Auflagerbereiche, wo die Endverankerungen liegen).

In Einzelfällen können solche Stellen mittels **Fiberskopie** eingesehen werden. Diese Methode kann als **zerstörungssarm** bezeichnet werden. Der Unterschied zu **zerstörungsfrei** ist natürlich dann sehr bedeutend, wenn eine intakte Fahrbahnisolation durchbohrt werden müsste. Hier muss der **Grundsatz** gelten, **dass durch Erhebungsbohrungen nicht mehr Schaden angerichtet werden soll, als der mögliche Nutzeffekt sein könnte.**

Im weiteren muss darauf hingewiesen werden, dass das Fehlen der erwähnten Anzeichen an zu begutachtenden Oberflächen nicht immer bedeutet, dass im Innern alles in Ordnung ist.

Bei vermuteten Hohlräumen innerhalb eines Spanngliedes (Fehlstellen im Zementstein durch mangelhaftes Verpressen) kann die entsprechende Stelle **schonend** angebohrt werden. (Bild 8)

Liegt ein Hohlraum vor, so kann mittels eines Endoskops der Zustand von Spannstahl und Hüllrohr visuell begutachtet werden. Durch geeignete Wechselobjektive ist eine Beobachtung auch quer zur Bohrxaxe möglich.

Die Methode basiert auf der Lichtleitfähigkeit von Glasfasern und wurde zuerst für den Einsatz in der Humanmedizin entwickelt. Im Maschinen- und Flugzeugbau gehört die Fiberskopie heute zu den zerstörungsfreien Standardmethoden, wobei deren Einsatz normalerweise schon in der Planung berücksichtigt wird.

Durch Koppelung des Endoskopes mit einer Kamera (Foto, Film, Video) können die Beobachtungen festgehalten werden. Diese Methode ist verschiedentlich auch bei Spanngliedern erfolgreich angewendet worden. (Bilder 9, 10, 11)

In der Schweiz sind einige Geräte vorhanden, die von verschiedenen Firmen oder Instituten bei Bedarf eingesetzt werden.

Zeigt die Begutachtung der Hohlräume, dass keine weiteren Sanierungsmassnahmen notwendig sind, dann werden diese mittels Vakuuminjektion verpresst (siehe auch 3.10).

Es ist zu erwähnen, dass in jüngster Zeit in der Bundesrepublik Deutschland bei einigen Brücken beim Ersatz von Fahrbahnbelag und Abdichtung die Kabelhochpunkte angebohrt und wo erforderlich, nachgepresst wurden. Bis anhin liegen dazu noch keine behördlichen Regelungen vor.

Tauglichkeit: geeignete, zerstörungsarme Methode mittels entwickelten und erprobten Geräten.

Begrenzung: da nur gerade gebohrt werden kann, ist bei einer Konzentration von Spanngliedern nicht jeder gewünschte Punkt erreichbar. Problematisch kann auch das Erreichen der notwendigen Präzision in der Ortung des Hüllrohres und des Durchstosspunktes sein. Je nach vermuteter oder wirklicher Lage des Spannstahles innerhalb des Hüllrohres kann das letztere nicht einfach durchbohrt werden, da sonst eventuell der Spannstahl beschädigt wird.

Es stellt sich natürlich die wichtige Frage, wie man weiss, wo sich ein Hohlraum in einem Spannglied befindet. (Bemerkungen dazu in Kap. 4.2).

Empfehlung für zukünftige Entwicklungen:

Aus jetziger Sicht keine Notwendigkeit. Es wäre allerdings empfehlenswert, die gemachten Erfahrungen und die Fotodokumente in geeigneter Form zusammenzustellen.

3.3 Durchstrahlungsprüfungen

Zur Sprachregelung im folgenden einige wichtige Begriffe (siehe auch Bild 7):

- **Radiographie als Oberbegriff:** man versteht darunter das Sichtbarmachen ionisierender Strahlung mittels photographischem Material. Zur Anwendung gelangen **Röntgenstrahlen** (Röntgenographie), **Gammastrahlen** (Gammagraphie) oder **Protonenstrahlen** (Protonen-Radiographie).

Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei allen Arten um elektromagnetische Strahlen, die sich aber in ihrer **Entstehungsweise** unterscheiden.

Man unterscheidet im weiteren zwischen **...graphie** (von grch. "graphein" = schreiben, d.h. es wird stationär eine Aufnahme auf einem Film gemacht) und **...skopie** (von grch. "skopein" = spähen, betrachten, d.h. es ist möglich, beispielsweise mittels Video eine Abfolge von durchstrahlten Bauwerksteilen zu betrachten). Bei der Radiographie entstehen auf einer photographischen Schicht eine Art Schattenbilder. Die Kontraste ergeben sich aus der unterschiedlichen Strahlenabsorption der durchstrahlten Materialien.

- **Röntgenstrahlen (X-Strahlen):** es handelt sich hier um elektromagnetische Strahlung mit Wellenlängen zwischen den radioaktiven Gammastrahlen und dem Licht. Diese Strahlungsart weist bei vielen Stoffen ein hohes Durchdringungsvermögen auf. Sie wird mittels Röntgen- oder Elektronenröhren erzeugt. Je nach Wellenlänge spricht man von überweichen ($0.25-0.06$ nm) bis zu überharten ($\leq 5 \cdot 10^{-3}$ nm) Wellenlängen. Sehr viel härtere, d.h. kurzwelligere Strahlen (10^{-6} bis 10^{-7} nm) lassen sich mit anderen Geräten (beispielsweise mit **Linearbeschleunigern**) erzeugen. Von der Medizin bis zur Bautechnik (Röntgenprüfung von Schweissnähten) sind Anwendungen bekannt.
- **Gammastrahlen (γ -Strahlen):** bei dieser Strahlungsart handelt es sich um eine energiereiche, elektromagnetische, radioaktive Strahlung mit Frequenzen von $1.6 \cdot 10^{19}$ bis $2.8 \cdot 10^{22}$ Hz und Wellenlängen zwischen $2 \cdot 10^{-2}$ bis $1 \cdot 10^{-5}$ nm. Als Strahlungsquellen werden i.a. Kobalt-, Iridium- oder Cäsium-Isotope verwendet.

Es sind Anwendungen von Gammastrahlen aus den verschiedensten Bereichen der Technik bekannt, u.a. in einigen Ländern auch für die Beurteilung von Spannbetontragwerken (5, 17, 18, 19, 20, 21).

Es herrscht in diesem Gebiet der zerstörungsfreien Prüfung mittels Durchstrahlung eine für den Nichtfachmann recht verwirrende Vielfalt. Aus verschiedenen Untersuchungen geht hervor, dass Röntgenstrahlen, wie sie beispielsweise in der Medizin laufend verwendet werden, bei Betontragwerken wegen ihrer ungenügenden Intensität nicht in Frage kommen. Wie bereits weiter oben erwähnt, führt erst die Anwendung sehr harter Röntgenstrahlung zu Resultaten. Diese Art Strahlung kann beispielsweise mittels eines **Lineargeschleunigers** erzeugt werden. In Frankreich ist ein solches Gerät seit 1984 unter dem Namen SCORPION II (radioscopie par rayonnement pour l'inspection des ouvrages en béton) in Einsatz. Aus der vorhandenen Literatur geht hervor, dass es mit diesem Gerät möglich ist, Beton bis 1.20 m Stärke zu durchstrahlen.

Die Verwendung der **Gammagraphie** bei Betontragwerken ist seit vielen Jahren bekannt. In einigen Ländern wurde sie recht weit entwickelt und auch bei Spannbetontragwerken eingesetzt. Es scheint, dass Frankreich auch die Entwicklung dieser Technik am weitesten getrieben hat. Seit 1982 befindet sich in diesem Land eine fahrbare Einrichtung im Einsatz, die SCORPION I genannt wird. (Bild 12)

Es werden verschiedene Strahlenquellen verwendet, wobei Betonstärken bis zu max. 600 mm so durchstrahlt werden können, dass auf dem Film noch ein einigermaßen lesbares Bild erzeugt werden kann (bei Verwendung von Co 90).

Die Belichtungszeiten können je nach Filmqualität, Strahlungsquellen und Betonstärke von 10 bis 60 Min. variieren. Dabei entsteht in der Regel ein Bild von 300 x 400 mm, also ein vergleichsweise kleiner Ausschnitt aus einem Bauwerk. Die Bilder 13 und 14 zeigen Fehlstellen.

Wie bereits erwähnt, hat Frankreich in diese Verfahren sehr viel Entwicklungsarbeit und Geld gesteckt. Während zu einem früheren Zeitpunkt offenbar die Hoffnung bestand, diese Geräte systematisch bei der Brückenabnahme als Qualitätskontrolle zu verwenden, scheint mittlerweile die Euphorie, u.a. wegen des hohen Aufwandes, von einer realistischeren Einschätzung abgelöst worden zu sein. Heute kommen sie nur zum Einsatz, wenn Problemfälle abgeklärt werden müssen.

In der Schweiz ist die Gammagraphie bis heute nur in Einzelfällen angewendet worden.

Tauglichkeit: dem Verfasser fehlen persönliche Erfahrungen mit Durchstrahlungsprüfungen. Aus der Literatur und diversen Gesprächen mit Fachleuten ist aber zu schliessen, dass auf diesem Gebiet über viele Jahre recht grosse Anstrengungen unternommen wurden, diese Methoden anwendungstauglich zu machen. Es ist damit möglich, die Lage von Betonstahl und Spanngliedern, Verpressfehler und teilweise auch Spannstahlbrüche zu lokalisieren. Positiv ist zu vermerken, dass Durchstrahlungen für das Bauwerk zerstörungsfrei sind.

Begrenzungen: verglichen mit dem erzielten Resultat, sind diese Methoden teuer. Sehr nachteilig wirkt sich die hohe Strahlungsgefahr aus. In einem weiten Bereich dürfen sich beim Einsatz weder Menschen noch Tiere aufhalten. Bei vielen Brücken, beispielsweise in Städten oder über offenen Verkehrswegen, ist deshalb die Anwendung kaum möglich. Die Bewilligungspraxis eidgenössischer und kantonaler Behörden ist aus diesem Grunde sehr restriktiv.

In technischer Hinsicht wirkt sich negativ aus, dass heikle Bereiche, wie beispielsweise Kabelhochpunkte über Stützen, gar nicht untersucht werden können.

Im weiteren muss darauf hingewiesen werden, dass die Bildbeurteilung - ähnlich wie in der Humanmedizin - nur vom Spezialisten vorgenommen werden kann. Der mit dieser Technik nicht vertraute Bauingenieur wird die für die Zustandsbeurteilung wichtigen Details nicht immer herauslesen können (diese letzte Bemerkung trifft allerdings mehr oder weniger für alle Prüfmethoden zu).

Empfehlung für zukünftige Entwicklungen:

Gewisse oben aufgeführte Nachteile sind so gravierend, dass es nicht sinnvoll ist, in der Schweiz eigene Entwicklungsarbeiten zu machen. Die weiteren Entwicklungen und Erfahrungen im Ausland sollten aber weiter verfolgt werden.

Der Vollständigkeit halber sei noch erwähnt, dass zur Kategorie der Durchstrahlungsprüfungen noch folgende Methoden gehören:

- Isotopen-Sonde
- Computer-Tomographie

Es erscheint möglich, mit der **Isotopensonde** Hinweise auf Hohlräume in Hüllrohren bekommen zu können; deshalb ist es sinnvoll, diese Möglichkeit näher zu untersuchen; dies insbesondere, weil diese Geräte nicht den vorerwähnten strengen behördlichen Einschränkungen unterliegen.

Die **Computer-Tomographie** hingegen ist bis auf weiteres nur einsetzbar bei der Untersuchung von relativ kleinen Baustoffproben im Labor (22, 23, 24).

3.4 Ultraschallprüfung

Beim Ultraschall handelt es sich um Schallwellen mit Frequenzen oberhalb des menschlichen Hörbereiches, der bis ungefähr 20 kHz geht.

Bei der Ultraschalldiagnostik oder auch Sonographie genannt, werden mechanische Schwingungen mittels eines Gebers auf einen Bauteil übertragen und an Grenzflächen unterschiedlich reflektiert.

Die Dichteunterschiede (Einschlüsse, Risse, Hohlräume) werden durch die vom Empfänger aufgenommenen Wellen auf einem Kathodenstrahl-Oszilloskop in einem sogenannten Sonogramm aufgezeigt und lassen mehr oder weniger zuverlässige Rückschlüsse auf Fehler zu (Bild 15).

Bei den verschiedenen Baustoffen ergeben sich unterschiedliche Prüfmöglichkeiten. Die Materialien variieren bezüglich Schalleitfähigkeit und somit auch bezüglich des Energieverlustes eines Ultraschallimpulses pro Weglänge. Bei Beton ist der Energieverlust grösser als bei Metallen. Bei Stahl arbeitet man in der Regel mit Frequenzen von ca. 2 MHz und bei Beton wählt man diese üblicherweise im Bereich zwischen 20 und 200 kHz (25). Neuerdings sind Geräte vorhanden, welche diesen Bereich ausweiten, und die sich besonders für das Auffinden von Fehlstellen im Beton eignen sollen (26).

Bei der Prüfung von Spanngliedern unterscheidet man zwischen dem Reflexions- und dem Durchschallungsverfahren. Bei beiden wird der Schallkopf am Spannstahlende aufgesetzt (Bild 16). Beim Reflexionsverfahren (Echoverfahren) wird die an Unregelmässigkeiten (z.B. Spannstahlbrüche) reflektierte Schallwelle zur Information benutzt. Beim Durchschallungsverfahren geht die Welle vom Sender durch das Spannglied durch bis zum Empfänger.

Tauglichkeit: Ultraschallprüfungen können **theoretisch** Informationen über Fehlstellen sowohl im Injektionsgut wie auch im Spannstahl liefern. Wie dies nachfolgend beschrieben wird, ist dies allerdings nur bei sehr günstigen Verhältnissen möglich.

Begrenzung: bei der Untersuchung von Spanngliedern im Brückenbau erweist sich die Ultraschallprüfung als wenig praxistauglich. Währenddem solche Werkstoffprüfungen im Labor und in der Fabrikation durchaus Hinweise auf Fehlstellen geben können (u.a. (27) und Bilder 17, 18), sind die Verhältnisse in einem Spannbetontragwerk für diese Methode zu komplex, um genügend aussagekräftige Hinweise zu liefern. In (28) wird über umfangreiche Untersuchungen berichtet mit der Schlussfolgerung, dass es wegen der Schallwellenausbreitung im Bauwerk nur möglich sein wird, nahe beim Ankertkopf innerhalb weniger m Fehlstellen zu finden.

Weitere Schwierigkeiten sind:

- Ankerköpfe müssten zugänglich sein.
- Schallübertragung vom Sender auf den zu prüfenden Bauteil ist sehr delikat.
- Vergleichbare "Eichmessungen" sind für die Interpretation erforderlich.

Empfehlung für zukünftige Entwicklungen:

Nach dem heutigen Kenntnisstand erscheint es wenig sinnvoll, in der Schweiz mit Entwicklungsarbeiten zu beginnen. Es ist allerdings denkbar, dass diese Prüfmethode bei externen Spanngliedern, Schrägseilen und vorgespannten Boden- und Felsankern zumindest im Bereich der Verankerungen anwendbar sein könnte; deshalb sollten die Entwicklungen im Ausland verfolgt werden.

In diesem Zusammenhang sei noch die Möglichkeit erwähnt, mittels permanenter Messung von **Schallemissionen** am Bauwerk, auftretende Spannstahlbrüche feststellen zu können. Die dabei aufgezeichneten akustischen Signale weisen allerdings keine charakteristischen Frequenzen auf und können deshalb in der praktischen Anwendung nicht von der Wirkung von Schlägen in Fahrbahnübergängen, Hammerschlägen, etc. unterschieden werden (16) . Im weiteren gibt diese Methode auch keine Auskunft über die Lage der Spannstahlbrüche.

3.5 Reflektometrische Impulsmessungen

Bei der Prüfung von Spanngliedern mittels reflektometrischer Impulsmessung (auch elektrische Reflektometrie genannt) werden die physikalischen Gesetzmässigkeiten von Werkstoffen bei hochfrequenten Wechselströmen nutzbar gemacht (29). Das Spannglied ist dabei der elektrische Leiter innerhalb des, einen hohen Eigenwiderstand aufweisenden Betons. Hochfrequente Spannungsimpulse werden über die einseitig freigelegten Spannstrahlenden in das Spannglied eingespeist. Als zweiter Pol dient ein Anschluss über einen hochohmigen Widerstand.

Der angelegten Wechselspannung wirkt in dem als elektrischen Leiter dienenden Spannglied ein Scheinwiderstand entgegen, der Impedanz genannt wird. Da die bis heute fast ausschliesslich verwendeten metallischen Hüllrohre elektrisch mit dem Spannstrahl verbunden sind, bilden beide eine Einheit. Der eingespeiste Impuls durchläuft das untersuchte Spannglied über Hüllrohr und Spannstrahl in Form einer elektrischen Welle, wobei durch Änderung der Impedanz längs des Spanngliedes (beispielsweise Schädigungen durch Korrosion, Spannstrahl- und Hüllrohrbrüche, grössere Injektionsstellen, Endverankerungen, etc.) ein Teil der Energie zum Ausgangspunkt zurückgesendet wird und dort aufgezeichnet werden kann (Bilder 19, 20). Durch Messung der Durchlaufzeiten sind Aussagen über die Lage von Anomalien möglich. Durch Messung weiterer Charakteristiken können solche Anomalien nach Art und Grösse unterschieden werden. Hier scheiden sich allerdings die Geister. Währenddem die einen die Hoffnung auf relativ präzise Aussagen sehr hoch stecken, bezeichnen andere die Anwendung bei bestehenden Brücken als aussichtslos.

Diese Messtechnik ist nicht für das Bauwesen entwickelt worden, sondern wird seit längerer Zeit zur Qualitätskontrolle von langen Kabeln und ganzen Leitungssystemen in der Fernmeldetechnik verwendet (30, 31). Diese Kabel bestehen i.a. aus Kupferseelen mit Kunststoffumhüllungen. Es ist wichtig, schon nach der Fabrikation, nach dem Verlegen und beim Betrieb, eventuelle Drahtbrüche feststellen zu können.

Obwohl es sich hier - verglichen mit dem Spannglied in einer Brücke - um eine viel klarer abgegrenzte Messaufgabe handelt, ist laut Aussagen von Fachleuten, eine präzise Aussage nur möglich, wenn an Musterstücken aus dem genau gleichen Fabrikationslos eine Kalibrierung gemacht wird (Prüfung der Laufzeit bzw. Fortpflanzungsgeschwindigkeit).

Dies heisst auf unseren Fall angewendet, dass man, ähnlich wie bei anderen zerstörungsfreien Prüfungen, über einen Katalog von "Musterschäden" und deren messtechnischen Charakteristiken verfügen müsste. Da dies ein kaum gangbarer Weg ist, bleibt die Möglichkeit, bei kritischen Fällen, durch eine Nullmessung und periodische Nachmessungen, signifikante Veränderungen feststellen zu können.

Tauglichkeit: diese Messmethode wird in anderen Bereichen der Technik zur Lokalisierung von Schädigungen an elektrisch leitenden Metallseelen von Kabeln als tauglich befunden. Der Einsatz bei Spanngliedern im Brückenbau kann bezüglich Tauglichkeit zum jetzigen Zeitpunkt nicht abschliessend beurteilt werden. Dazu müssten die Erfahrungen der Schweizer Firma, die diese Methode seit einiger Zeit im Bauwesen anwendet, miteinbezogen werden.

Begrenzung: neben den weiter oben angeführten, erheblichen Zweifeln an der konkreten Aussagekraft, muss noch erwähnt werden, dass bei manchen Brückenkonstruktionen die Spanngliedverankerungen gar nicht mehr zugänglich sind. Dabei denkt der Verfasser nicht an Verankerungen in zubetonierten Nischen - deren Freilegung ist bei möglichem Zugang mit vernünftigem Aufwand zu erreichen - sondern beispielsweise an die Spannglieder bei Freivorbaubrücken, wo ein Freilegen der Ankerköpfe einen massiven Eingriff bedeuten würde.

Empfehlung für zukünftige Entwicklungen:

Obwohl auch ernstzunehmende Zweifel an der Tauglichkeit der Methode im Brückenbau bestehen, ist der Verfasser der Meinung, dass weitere Ueberlegungen und Untersuchungen gemacht werden sollten. Wichtig ist dabei, dass die wertvollen Erfahrungen aus den traditionellen Anwendungsbereichen der Reflektometrie vollumfänglich berücksichtigt werden.

Im weiteren sieht der Verfasser die Möglichkeit, bei zukünftigen Projekten die Spannverfahren so anzupassen, dass mittels dieser Methode periodische Ueberprüfungen relativ einfach gemacht werden könnten.

3.6 Georadar

Beim Radar (engl. Radio detecting and ranging; deutsch: Funkortung und -messung) werden elektromagnetische Wellen scharf gerichtet gesendet und je nach Dichte reflektiert. Der Frequenz- und Wellenlängenbereich variiert i.a. zwischen 500 Mhz (60 cm Wellenlänge) und 40 GHz (0.75 cm Wellenlänge).

Diese Technik wird seit vielen Jahren auch in der Geophysik angewendet und wird dort als Georadar bezeichnet. Elektromagnetische Impulse von sehr kurzer Dauer (einige Nanosekunden) werden in den Boden gesandt und deren Echos am selben Punkt aufgenommen.

Die physikalischen Kennwerte verschiedener Materialien (Leitfähigkeit, relative dielektrische Konstante, Geschwindigkeit) erlauben eine Aussage über Schichtaufbau und Hohlräume bis in eine gewisse Tiefe.

Die Anwendung im Brückenbau ist neueren Datums und noch im experimentellen Stadium. Erste Tastuntersuchungen an einer Brücke wurden in den USA allerdings bereits vor 10 Jahren gemacht (32). Es ist dem Verfasser nicht bekannt, wo diese Entwicklungen heute stehen. Auch in Frankreich hat man die Methode in der Praxis ausprobiert (33).

Neuerdings befasst sich auch in der Schweiz eine Firma mit dieser Messmethode ((34), Bilder 21, 22). Erste Erfahrungen liegen vor. In bezug auf Spannglieder scheint es möglich zu sein, dieselben mit Georadar zu orten. **Eine direkte Aussage über den Korrosionszustand oder über Hohlstellen im metallischen Hüllrohr ist jedoch nicht möglich** (Faraday'scher Käfig). Es erscheint hingegen nicht ausgeschlossen, mit dieser Methode signifikante Aussagen über den Zustand des umgebenden Betons und die Bewehrung zu machen, um so zumindest das Gefährdungspotential für die Spannglieder abschätzen zu können (Hohlräume, Risse, Feuchtigkeit), und zwar ohne vorgängiges Entfernen des Belages und der Isolation.

Tauglichkeit: die Anwendung des Georadars im Brückenbau befindet sich noch im Anfangsstadium, weshalb die Praxistauglichkeit noch schwer abzuschätzen ist.

Begrenzung: in bezug auf den Zustand von Spanngliedern sind keine direkten Aussagen zu erwarten.

Empfehlung für zukünftige Entwicklungen:

Trotz der oben gemachten Einschränkungen erscheint es sinnvoll, weitere Ueberlegungen und Untersuchungen zu machen. Die Methode ist in der Anwendung relativ rasch, einfach durchzuführen und ausserdem wirklich zerstörungsfrei. Nach Auffassung des Verfassers müsste versucht werden, bereits vorhandene ausländische Erfahrungen miteinzubeziehen.

3.7 Infrarot-Scanner, Thermographie

Bei dieser Prüf- und Diagnosetechnik handelt es sich um ein Verfahren zur Sichtbarmachung der Temperaturverteilung in den Oberflächenschichten eines Objektes. Verschiedene Materialien haben unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit und damit unterschiedliche Wärmeabstrahlung. Diese kann mittels besonderen Scanner-Geräten aufgezeichnet werden. (Bild 23)

Die Methode ist u.a. bekannt durch die Thermographie-Aufnahmen bei Gebäuden zur Feststellung von Energieverlusten in den Gebäudehüllen.

Erste Versuche einer Schweizer Firma haben ergeben, dass man bei der nächtlichen Aufnahme von Brückenfahrbahnplatten Zonen entdecken kann, die durchfeuchtet sind; dies darum, weil Wasser eine andere Wärmeleitfähigkeit als die umliegenden Materialien hat (Bild 24).

Im gleichen Arbeitsgang kann man mittels der sichtbaren Wellenlänge ein sehr präzises Bild der Oberfläche erhalten, was erlaubt, bei periodischen Aufnahmen die Veränderungen und mögliche Schwachstellen gut feststellen zu können.

Tauglichkeit: sehr rasche Methode, die es ermöglicht, Aussagen über den Feuchtigkeitshaushalt in der Fahrbahnplatte zu machen. Es ist nicht notwendig, Belag und Isolation zu entfernen.

Begrenzung: Aussagen über den Zustand der Spannglieder sind naturgemäss nicht möglich.

Empfehlung für zukünftige Entwicklungen:

Obwohl keine direkten Aussagen über den Zustand von Spanngliedern möglich sind, erscheint es sinnvoll, weitere Ueberlegungen und Untersuchungen zu machen. Aussagen über die vorhandene Feuchtigkeit, die ja auch den Chloridtransport bewerkstelligt, können wichtig sein.

Im besonderen müsste auch abgeklärt werden, ob Feuchtigkeitstransporte in dünnen Brückenstegen längs Hüllrohren und anderen Einbauten mittels dieser Methode festgestellt werden könnten.

3.8 Magnetische Verfahren

Es ist bekannt, dass sich die **Magnetinduktion** bei der Prüfung von Seilen bei Luft- und Standseilbahnen seit Jahren bewährt hat. So hat die EMPA beispielsweise im Jahre 1987 ca. 370 Seile geprüft (35). Das Verfahren wurde auch erfolgreich bei der Prüfung der vollverschlossenen Seile der Schrägseilbrücke "General Belgrano" über den Rio Parana in Argentinien eingesetzt. (Bild 25).

Bei innenliegenden Spanngliedern ist die Methode nicht anwendbar, da ja der Prüfring das Spannglied umfassen muss.

Auch bei externer Vorspannung und bei Schrägseilen ist die Anwendbarkeit begrenzt, u.a. darum weil Verankerungs- und Umlenkbereiche nicht überprüft werden können.

In den USA sind seit einigen Jahren Forschungsarbeiten im Gange, welche zum Ziel haben, Fehlstellen an Bewehrung und Spannstählen zu lokalisieren (36,37). Ausserhalb der Betonkonstruktion wird ein Magnetfeld erzeugt, welches auch den Beton durchdringen kann (Bilder 26, 27). Diskontinuitäten in der Bewehrung zeigen sich als Störungen im Magnetfeld; diese können aufgezeichnet werden (Bild 28). Die Methode wird auch "**Magnet Field Disturbance Inspection System**" genannt (MFD). Obwohl ein Team seit über 10 Jahren an der Entwicklung arbeitet, sind die Resultate für die Anwendung in der Praxis nicht überzeugend.

Währenddem eine Anwendung bei Spannbettvorspannung in Trägern unter günstigen Verhältnissen noch denkbar wäre, sind Aussagen über Spannstahl in metallischen Hüllrohren kaum zu erwarten (Faraday'scher Käfig).

Seit neuerer Zeit versucht die amerikanische Gruppe, die Geräte zur Prüfung von Schrägseilen einzusetzen.

Tauglichkeit: diese Methoden können bei der Prüfung zugänglicher, "nackter" Seile als bewährt angesehen werden. Neben der traditionellen Anwendung bei Seilbahnen, ist bei geeigneten Verhältnissen auch ein Einsatz bei Schrägseilen im Brückenbau möglich.

Begrenzung: bei Spannstahl innerhalb des Betons sind im günstigsten Fall Aussagen bei der Spannbettvorspannung, nicht aber bei Spanngliedern in Stahlhüllrohren möglich.

Empfehlung für zukünftige Entwicklungen:

Für die traditionelle Vorspannung ist eine schweizerische Entwicklung nicht sinnvoll. Bei Schrägseilen und externer Vorspannung ist die Anwendbarkeit der bereits bewährten Methode der Magnetinduktion im Einzelfall mit den Fachleuten der EMPA abzuklären.

3.9 Elektrochemische Methoden

In diesem Bereich spricht man von Potential-, Impedanz- und Transientenmessung. Die **Potentialmessung** kann heute als baustellentaugliche Methode zur Lokalisierung und quantitativer Einstufung von Korrosionsschäden an Bewehrungsstahl bezeichnet werden (38). Die beiden anderen Methoden befinden sich im Stadium der Forschung.

Nach Abklärungen mit Fachleuten ergibt sich der Schluss, dass die Potentialmessmethode bei **Spanngliedern normalerweise keine brauchbaren Resultate liefert**.

Im Normalfall sind die Spannglieder von einer bereits rostenden Bewehrung umgeben. Das dabei erzeugte elektrische Feld schirmt die Spannglieder ab; es ist eine Art kathodischer Schutz entstanden. Im weiteren wirkt das metallische Hüllrohr als Faraday'scher Käfig, der das Eindringen äusserer, elektrischer und magnetischer Felder verhindert.

Es sind allerdings auch Fälle bekannt, bei denen Salzwasser durch nicht mit Zementstein gefüllte Injektionsrohre bis in Hohlräume von Spanngliedern vorgedrungen ist. Das Resultat waren gänzlich korrodierte metallische Hüllrohre und stark korrodierte Spannstähle. Die umgebende Bewehrung war nicht korrodiert. Es ist denkbar, dass in solchen Fällen die Potentialmessung Hinweise geben könnte. Dies erscheint auch möglich bei der Spannbettvorspannung.

Tauglichkeit: diese Methode hat sich bei der Lokalisierung von Korrosion des Betonstahles bewährt.

Begrenzung: bei Spanngliedern liefert sie normalerweise keine brauchbaren Hinweise.

Empfehlung für zukünftige Entwicklungen:

Zum jetzigen Zeitpunkt und Kenntnisstand drängen sich keine Entwicklungsarbeiten auf. Mit den Fachleuten des Institutes für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion der ETH-Zürich (IBWK) und der Korrosionskommission (KK) wäre allerdings noch zu prüfen, ob die Methode in den vorerwähnten Sonderfällen doch Resultate bringen könnte.

3.10 Weitere Methoden

Chloriduntersuchungen im Injektionsgut und an Spannstahl:

Das Eindringen von Salzwasser und damit von Chloriden in den Beton stellt die grösste Bedrohung für die Dauerhaftigkeit des Betonstahles und der Spannglieder dar. Währenddem vieles über Eindringtiefen, Chloridkonzentrationen und Art der Chloridgehaltermittlung im umgebenden Beton bekannt ist, hat der Verfasser bis anhin nur wenig über die diesbezüglichen Verhältnisse beim Injektionsgut oder im Fall von Injektionsfehlstellen direkt am Spannstahl in Erfahrung bringen können.

Das Vordringen von Chloriden bis ins Injektionsgut oder direkt zum Spannstahl ist aber sowohl durch Diffusionsvorgänge, wie auch durch Einsickern längs Injektionsrohren und grösseren Rissen bzw. Hohlräumen möglich.

Es drängt sich auf, solchen Ueberlegungen im Detail nachzugehen und gegebenenfalls Untersuchungsmethoden zu entwickeln.

Hohlraummessung mittels Vakuumverfahren

Hat man einen Hohlraum innerhalb von Hüllrohren lokalisiert, so kann es für das spätere Nachinjizieren im Sinne einer Qualitätskontrolle wichtig sein zu wissen, wie gross dessen Volumen ist. Dieses kann mittels des Vakuumverfahrens festgestellt werden (5). Das gleiche Prinzip ist auch bei der anschliessenden Nachinjektion anwendbar. (Bilder 29, 30, 31).

Nach Ansicht des Verfassers wäre es gut, in der Schweiz über die praktische Anwendung dieser Verfahren mehr zu wissen. Diese sind hierzulande nur in Einzelfällen verwendet worden; sie haben sich aber in anderen Ländern offensichtlich bewährt.

Auffinden von Hohlräumen im Beton mittels Schlagen

Schlägt man mit einem Hammer auf eine Betonoberfläche, so hört man am Klang, ob sich darunter Hohlstellen befinden. Deshalb gehört der Hammer auch zur Standardausrüstung eines Bauwerksinspektors.

In den USA wurde bereits vor einiger Zeit eine mechanische Vorrichtung entwickelt und angewendet, welche definierte Schläge erteilt (57, 58). Es werden dabei 60 Schläge/Sekunde erzeugt und die Klangsignale mittels Mikrofon und einem Auswertegerät aufgezeichnet; damit können Bereiche mit Hohlstellen ermittelt werden.

Seit neuerer Zeit wird in Japan eine ähnliche Methode verwendet, um mittels Abklopfen von Keramikplatten-Fassaden mögliche Haftfehlstellen frühzeitig erkennen zu können (59). Heute werden neben Handgeräten (Bild 32) auch eigentliche vollautomatische Robotgeräte eingesetzt (Bild 33).

Es ist abzuklären, ob der Einsatz solcher weitergehender Methoden zur Auffindung von Hohlräumen im Beton zweckmässig ist.

Prüfverfahren	Ab-schnitt	Tauglichkeit	Begrenzung	Empfehlung für zukünftige Entwicklungen in der Schweiz
<u>Fiberskopie</u>	3.2	geeignete, zerstörungsarme Methode um Hohlräume in Spanngliedern oder nicht zugängliche Betonoberflächen einzusehen; Geräte sind praxistauglich	bei einer Anhäufung vieler Spannglieder ist es nicht möglich jede Stelle zu erreichen	keine Notwendigkeit; Zusammenstellung der Erfahrungen und der Fotodokumente ist wünschenswert
<u>Durchstrahlung (Radiographie)</u>	3.3	zerstörungsfreie Methode, welche in geeigneten Tragwerksbereichen aussagekräftige Bilder liefern kann	hohe Kosten; sehr restriktive Bewilligungspraxis der Behörden wegen Strahlengefahr; in wichtigen Tragwerksbereichen nicht einsetzbar	nicht empfohlen; Ausnahme ist die Anwendung der Isotopensonde zur Auffindung von Hohlräumen (bedeutend geringere Strahlung)
<u>Ultraschall</u>	3.4	in einfachen Fällen kann die Methode Hinweise auf Fehlstellen in Spanngliedern geben	Aussagen nur nahe bei einer Verankerung; diese muss zugänglich sein; vergleichbare Eichmessungen sind erforderlich; Zugänglichkeit zu den Verankerungen nicht immer gegeben.	nicht empfohlen; Entwicklung im Ausland verfolgen
<u>Reflektometrische Impulsmessung</u>	3.5	Währenddem sich das Verfahren in anderen Bereichen der Technik bewährt hat, ist der Erfolg bei bestehenden Bauwerken noch ungewiss	bei bestehenden Tragwerken vermindern Störfaktoren eine präzise Aussage beträchtlich; Zugänglichkeit zu den Verankerungen nicht immer gegeben	trotz Vorbehalten empfohlen, vor allem auch im Hinblick auf die Anwendung bei zukünftigen Projekten; Einbezug der Erfahrungen in der Fernmeldetechnik
<u>Georadar</u>	3.6	Anwendung im Brückenbau noch im Anfangsstadium; Aussagen über Lage von Spanngliedern sowie über Hohlräume im umgebenden Beton sind möglich; Methode ist zerstörungsfrei	keine direkte Aussage über Zustand der Spannglieder möglich	trotz Vorbehalten empfohlen, weil Aussagen über Lage und Umfeld der Spannglieder möglich sind
<u>Infrarot-Scanner</u>	3.7	rasche Methode, welche u.a. Aussagen über den Feuchtigkeitshaushalt in Fahrbahnplatten erlaubt; Methode ist zerstörungsfrei	direkte Aussagen über Spannglieder sind nicht möglich	empfohlen, weil Aussagen über den Feuchtigkeitshaushalt wichtig sein können
<u>Magnetische Verfahren</u>	3.8	Magnetinduktion bei nackten Seilen bewährt (z.B. Seilbahnen)	bei Spanngliedern in Brücken nicht anwendbar	keine Entwicklung
<u>Elektrochemische Methoden</u>	3.9	Potentialmessung zur Lokalisierung von Korrosion des Betonstahles geeignet	bei Spanngliedern in Brücken ist normalerweise keine Aussage möglich	keine Entwicklung; Möglichkeiten der Anwendung bei Sonderfällen abklären
<u>Weitere Methoden:</u> - Chloriduntersuchungen im Injektionsgut und am Spannstahl - Hohlraummessungen mittels Vakuumverfahren - Schlagmethoden zum Auffinden von Hohlräumen im Beton	3.10	Methoden, die geeignet sind, wichtige Informationen zur Schadensbeurteilung und -behebung zu liefern	liefern nur indirekt Aussagen über den Zustand von Spanngliedern	weitgehende Abklärungen erforderlich, aber keine eigentlichen Entwicklungen

4. ZUSAMMENFASSUNG, SCHLUSSFOLGERUNGEN UND AUSBLICK

4.1 Allgemeines zur aktuellen Situation

Es ist festzustellen, dass keine der im Kapitel 3 beschriebenen Methoden direkt Auskunft über den Schädigungsgrad von Spannstahl durch Korrosion gibt (Tabelle 1). Wie bereits unter 3.1 erwähnt, wurden Spannbetonbrücken und die dabei verwendeten Spannsysteme nicht so projektiert und gebaut, dass die Möglichkeit einer zerstörungsfreien Prüfung eingeplant worden wäre. Immerhin hat die Bestandesaufnahme gezeigt, dass bei bestehenden Bauwerken einzelne Methoden wenigstens lokal wichtige Informationen zur Beurteilung liefern können.

Es ist deshalb auch richtig, diejenigen Methoden in ihrer Entwicklung zu fördern, welche wenigstens eine gewisse Aussicht auf Erfolg bieten. Dabei ist immer auch auf das Kosten-Nutzenverhältnis zu achten.

Da wir bis auf weiteres den Zustand eines Spanngliedes nur lokal beurteilen können, müssen wir uns folgende Fragen stellen:

- Welche Schäden an Spanngliedern sind bereits aufgetreten?
- Ist es möglich, aus solchen Schadensinformationen abzuleiten, wo sich die heiklen Stellen befinden und wo demnach gezielt gesucht werden müsste?

Für die Schweiz liegen diesbezüglich noch keine systematisch zusammengetragenen und ausgewerteten Informationen vor. Bei einzelnen Bauherren und bei der EMPA sind einige Fälle bekannt, bei denen auch die Integrität von Spanngliedern fraglich war. Nach Kenntnis des Verfassers konnten bis anhin solche korrodierten Spannglieder jedoch stets saniert werden.

In (39) geben Woywod u.a. einen Ueberblick über den Zustand von Kunstbauten im Kanton Aargau. In bezug auf Schäden an der Vorspannung kommen sie zum Schluss, dass noch keine solchen aufgetreten sind ("Kleinere Mängel, die beim Bau, z.B. durch verstopfte Hüllrohre auftraten, wurden sofort behoben").

Im Rahmen der Forschung im Strassenwesen, ist der Abt. 116 der EMPA Mitte 1988 ein Auftrag mit dem Titel "Schadenssystematik bei Kunstbauten als Grundlage zur Erarbeitung von Verhaltensmodellen" erteilt worden. Der Abschluss dieser Arbeiten ist auf Ende 1990 zu erwarten. Damit wird ein systematischer Ueberblick über bekannte Schäden auch bei Spanngliedern im Brückenbau vorhanden sein. Dieser wird sicher mithelfen, zukünftig mögliche Schwachstellen zu erkennen.

Für die Schweiz können wir also festhalten, dass bis anhin keine katastrophalen Schäden an Spanngliedern bekannt sind, die möglicherweise bis zum Einsturz eines Brückentragwerkes hätten führen können. Dies gilt für im Beton liegende Spannglieder (57).

Bei den permanenten Boden- und Felsankern und der Witterung ausgesetzten Zuggliedern beurteilt der Verfasser die Situation als weniger günstig. Es ist allerdings so, dass hierzulande mit Ausnahme des in (40) aufgeführten Einsturzes einer Spannbandbrücke durch Versagen der permanenten Rückverankerung auch noch keine grösseren Schäden bekannt geworden sind (50). Die ersten permanenten, vorgespannten Anker wurden um 1960 erstmals eingesetzt. In bezug auf Korrosionsschutz ist der damalige Standard mit dem seit einigen Jahren geforderten nicht vergleichbar. Die in (41 - 44) beschriebenen Erfahrungen zeigen aber, dass bei Ankern auch die heutige Konstruktions- und Ausführungspraxis noch zu verbessern ist.

Wie sieht die Situation im Ausland aus?

Es ist natürlich unmöglich, hier einen Gesamtüberblick zu geben. Immerhin können doch einige Hinweise gemacht werden.

In der Bundesrepublik Deutschland wurde 1980 ein Bericht veröffentlicht, in dem 242 in- und ausländische Schadensfälle aus den Jahren 1950 bis 1979 zusammengestellt sind (12). In der Zusammenfassung schreibt der Autor: "Bei den meisten dieser Fälle wurden mehrere Schadensursachen festgestellt, wobei Mängel am Beton oder Stahl (herstellungs- und verarbeitungsbedingt) in Kombination mit einer feuchten und/oder aggressiven Umgebung am häufigsten vorkamen".

Auch in (5) sind weitere Ergebnisse von einer Vielzahl von Untersuchungen enthalten.

Am IVBH-Kongress 1980 in Wien wurde über eine Brücke in Frankreich berichtet, bei welcher während der Ausführung in fast unglaublicher Art und Weise gepfuscht wurde (siehe Bilder 34, 35). Die Brücke musste ersetzt werden (46).

Aus jüngerer Zeit ist ein Brückeneinsturz in Grossbritannien bekannt geworden (Bild 36). Der Einsturz im Jahre 1985 erfolgte ohne Vorankündigung und ist eindeutig auf das Versagen von Spanngliedern infolge Korrosion zurückzuführen. Es handelt sich hier um einen Ueberbau, der im Jahre 1953 in Segmentbauweise hergestellt wurde, d.h. die vorgefabrizierten Betonelemente sind mit Zementmörtelfugen und Spanngliedern längs und quer zu einem Tragsystem zusammengefügt worden (Bilder 37, 38). Ueber die Jahre sind Salzwasser und damit Chloride in erheblicher Konzentration in die 25mm breiten Mörtelfugen eingesickert und haben die Spannstähle bis zum Versagen korrodiert (Bild 39).

In (47) berichten Woodward und Williams über die sehr detailliert und vorbildlich vorgenommene Untersuchung dieses Schadenfalles. Es wurden im übrigen auch erhebliche Injektionsmängel in den Spanngliedern festgestellt.

Bis heute sind weltweit nur wenige Einstürze von Spannbetonbrücken bekanntgeworden, deren Ursache die Korrosion des Spannstahles war. Normalerweise werden Schäden an Spanngliedern durch Risse, Verformungen, Durchfeuchtungen, etc. frühzeitig angekündigt. Damit werden auch Gegenmassnahmen möglich. **Deshalb ist es auch immer sinnvoll, dass das Risse- und Verformungsverhalten einer Brücke von Anbeginn an periodisch festgestellt wird.**

Die Erfahrungen bei ausländischen Brücken können nur teilweise auf unsere Verhältnisse übertragen werden. So sind beispielsweise gewisse schädliche Baustoffe in der Schweiz gar nicht oder kaum zur Anwendung gelangt.

Allerdings scheint es dem Verfasser, dass die vorhandenen Bauwerksdokumentationen keineswegs über alle Zweifel erhaben sind. Deshalb sind zu optimistische Aussagen doch mit einiger Vorsicht zu geniessen, denn wir wissen manchmal nicht einmal, welches Spannverfahren sich in der betreffenden Brücke befindet.

Mit fortschreitender Zeit findet auch bei den Spannverfahrensfirmen ein immer stärkerer Generationenwechsel statt. Es besteht die Gefahr, dass immer mehr Wissen über die früher verwendeten Spannsysteme verschwindet.

4.2 Schlussfolgerungen in bezug auf die Zustandsermittlung bei bestehenden Brücken

Es war nicht die primäre Aufgabe dieser Arbeit, den Schadensbildern und -ursachen nachzugehen. Immerhin sollen im folgenden doch einige Hinweise gegeben werden, wo möglicherweise Schwachstellen und Probleme auftreten können.

4.2.1 Verwendung ungeeigneter Baustoffe:

Dazu gehören zu sensitive Spannstähle (z.B. St 1080/1320),
aggressive Zemente und Zusatzmittel,
Kombination von Metallen mit galvanischer
Elementbildung,
etc.

Es ist zu vermuten, dass in der Schweiz in dieser Kategorie mit wenig Schäden zu rechnen ist. Eine Gewissheit besteht allerdings nicht, denn die entsprechenden Dokumentationen fehlen weitgehend.

4.2.2 Art der Brückenkonstruktion:

In dieser Kategorie ist es erforderlich, auf folgende Gefährdungen hinzuweisen:

- **keine oder mangelhafte Abdichtung der Brückenoberfläche** - damit früher oder später Vordringen von Chloriden und Wasser bis zum Spannstahl (Sauerstoff ist immer genügend vorhanden). Es sei erwähnt, dass die Kombination eines solchen Mangels mit nicht zugänglichen Hohlräumen (z.B. Schalungsrohre) besonders unangenehm ist. Das Eindringen von Oberflächenwasser in solche Hohlräume führt zu Chloridkonzentrationen, die i.a. höher sind, als an den Brückenoberflächen. Diese Chloride können seitwärts bis zu den Spanngliedern vordringen.

Bei Trogbrücken in Spannbeton befinden sich die Spannglieder in den Wandbereichen, die nicht besonders gegen Tausalze geschützt sind.

- **Risse in Arbeitsfugen oder bei sonstigen Schwachstellen** - die Diskussion über den Wert der Rissbreite, ab der mit einer Gefährdung der Stahleinlagen und auch der Spannglieder gerechnet werden muss, ist weiterhin im Gange und soll hier nicht aufgegriffen werden. Neben Rissen in Arbeitsfugen sind solche bei Koppelstellen sowie Risse aus Bemessungs- und Ausführungsfehler zu beachten.

Bei Freivorbaubrücken kann eine besondere Gefährdung vorhanden sein, da sich der überwiegende Teil der Spannglieder in der Fahrbahnplatte befindet und ausserdem zahlreiche Arbeitsfugen vorhanden sind.

Die Kombination von Rissen und dynamischer Beanspruchung kann zu Ermüdungsbrüchen (48) auch in Form von Reibkorrosion führen (49).

- **Spannglieder in unbewehrten Bereichen** - wie unter 3.9 erwähnt, erscheinen die Bereiche besonders gefährdet, wo Spannglieder nicht noch von einer Bewehrungslage umgeben sind. Solche Stellen sind:

Fugen bei Segmentbauweise ohne durchgehende Bewehrung (welche Bauwerke dieser Art sind in der Schweiz vorhanden?) und Verankerungsnischen.

Wie der Schadenfall (47) gezeigt hat, sind solche Bauwerke besonders dann problematisch, wenn noch Ausführungsmängel vorhanden sind.

- **Vorgespannte Zugglieder im Erdreich oder der Witterung ausgesetzt** - die Problematik ist bereits diskutiert worden. Es soll daran erinnert werden, dass bei Brücken Boden- und Felsanker manchmal auch zur Sicherung von Foundationen eingesetzt sind.
- **Mangelhafte Entwässerungen und undichte Fahrbahnübergänge** - im Bestreben, Wasser von der Tragkonstruktion fernzuhalten, ist ein besonderes Augenmerk auch auf solche Mängel zu richten. Es ist bekannt, dass wegen defekten Entwässerungsleitungen über Jahre Salzwasser in Hohlräume gelangen konnte, was dort dann zu umfangreichen Schädigungen führte. Tragwerksbereiche unterhalb undichter Fahrbahnübergänge an Brückenenden oder bei Gelenken sind gefährdet.

Im weiteren erscheint es dem Verfasser notwendig, der Frage nachzugehen, ob wir Brückenbauwerke haben, die infolge Spanngliedkorrosion **ohne Vorankündigung** versagen könnten. **Solche Tragwerke müssten vordringlich untersucht werden.**

4.2.3 Ausführungsmängel:

In verschiedenen Veröffentlichungen wird darüber eingehend berichtet (siehe auch (13)).

An dieser Stelle soll nur kurz auf Mängel in der **Spanngliedinjektion** hingewiesen werden.

Auch wenn in der Schweiz von Anbeginn an ein besonderes Augenmerk auf eine gute Qualität der Injektionsarbeiten gelegt wurde, so sind mittlerweile auch hier Fälle mit kleineren und grösseren Fehlstellen bekannt geworden.

Bei Brücken treten diese vorzugsweise auf an Hochpunkten über den Stützen sowie bei den Verankerungen und Kupplungen (51, 52). Als weitere Schwachstellen sind auch schon nicht vollständig verfüllte Injektionsrohre identifiziert worden. Solche Verhältnisse ermöglichen es dem Salzwasser, auf direktem Weg bis zum Spannstahl vorzudringen.

Wie bereits in 4.1 erwähnt, sind zumindest im Ausland Fälle bekannt geworden, wo bei Brückenbauten eine mehr oder weniger grosse Anzahl von Spanngliedern überhaupt nie verpresst wurden. Es ist nicht auszuschliessen, dass dies auch in der Schweiz vorgekommen ist.

Eine weitere Verbesserung der Injektionstechnik sollte in Auge gefasst werden.

4.3 Ausblick

In einer Brücke sind Spannkabel ohne Zweifel sehr wichtige Tragelemente, sowohl für die Gebrauchstauglichkeit wie für die Tragsicherheit. Die Bestandesaufnahme der vorhandenen zerstörungsfreien oder zerstörungsarmen Prüfmethode hat gezeigt, dass beim heutigen Stand dieser Verfahren nur lokal begrenzte Aussagen möglich sind.

Es ist zu erwarten, dass die Weiterentwicklung einzelner Verfahren zu einer Verbesserung der Aussagekraft führen wird. Ein entscheidender Durchbruch ist nach Ansicht des Verfassers aber nur damit zu erreichen, dass bei zukünftigen Spannbetonbrücken die entsprechenden technologischen Voraussetzungen für eine spätere Inspektion geschaffen werden (53).

Es ist anzunehmen, dass auch in Zukunft **in überwiegender Masse die Spannkabel innerhalb des Brückenquerschnittes angeordnet werden**. Die Verwendung von **elektrisch isolierten Spanngliedern** wäre ein Weg, um einerseits einen verbesserten Korrosionsschutz zu erreichen (54, 55, 56) und andererseits eine Ueberprüfung mit verschiedenen Methoden zu erlauben.

Die elektrische Isolation wird erreicht durch ein robustes Kunststoffhüllrohr und mit kunststoffbeschichteten "Umhüllungen" im Verankerungs- und Kupplungsbereich.

Damit wäre es möglich, mit einer Widerstandsmessung (43) oder der elektrischen Reflektometrie (siehe 3.5) von der Bauphase an die Wirksamkeit des Schutzes festzustellen und über den Zustand des Spannstahles eine brauchbare Aussage zu erhalten. Sicher müsste dazu noch Entwicklungsarbeit geleistet werden, bevor eine konkrete Realisierung ins Auge gefasst werden könnte. Insbesondere müsste auch die "Zugänglichkeit" für das Messen geschaffen werden.

Ein anderer Weg besteht darin, **ausenliegende Spannglieder** anzuordnen. Damit werden grosse Abschnitte auch visuell überprüfbar. In Verankerungs- und Umlenkbereichen wird aber i.a. die Einsehbarkeit gestört sein. Deshalb müsste überlegt werden, ob das Prinzip der elektrischen Isolation nicht auch hier angewendet werden sollte.

Der Vollständigkeit halber sei noch kurz auf die mögliche Verwendung von Faserverbundwerkstoffen hingewiesen. Seit einiger Zeit ist in diesem Zusammenhang von Glasfasern, Aramiden und Kohlestofffasern die Rede. Obwohl im Rahmen von Entwicklungsprogrammen bereits auch einige kleinere Brückentragwerke mit solchen neuen Zuggliedern ausgeführt wurden, ist der Verfasser der Meinung, dass in nächster Zeit die Marktreife nicht erreicht werden wird.

Zukünftige Brücken werden auch weiterhin mit Stahlspanngliedern vorgespannt werden. Eine Anpassung der vorhandenen Spannverfahrenstechnik an neue Anforderungen erscheint aber aus heutiger Sicht als notwendig.

5. LITERATURVERZEICHNIS

- (1) SIA Norm 160, Ausgabe 1970: Norm für die Belastungsannahmen, die Inbetriebnahme und die Ueberwachung der Bauten.
- (2) SIA Richtlinie 160/3, Ausgabe 1975: Periodische Untersuchungen der Brücken.
- (3) SIA Empfehlung 169, Ausgabe 1987: Erhaltung von Ingenieur-Bauwerken.
- (4) Specht M., u.a.: Spannweite der Gedanken - Zur 100. Wiederkehr des Geburtstages von Franz Dischinger, Springer Verlag, Berlin, 1987.
- (5) Jungwirth D., Beyer E., Grübl P.: Dauerhafte Betonbauwerke, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1986.
- (6) Ladner M.: Zustandsuntersuchung von Bauwerken, Bericht Nr. 116/3, Mai 1988, EMPA, Dübendorf.
- (7) Favre R., Suter R., Andrey D.: Maintenance des ouvrages d'art, Méthodologie de surveillance, Office fédéral des routes, Mandats de recherche 32/82, juin 1987.
- (8) FIP Guide to good practice: Inspection and maintenance of reinforced and prestressed concrete structures, Verlag Thomas Telford Ltd, London, 1986.
- (9) August L., Jonetzki H., Stremmel W.: Empfehlungen für die Durchführung zerstörungsfreier und zerstörungsarmer Prüfverfahren im Rahmen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076, Strasse und Autobahn, Heft 3/1984, S. 102-110.

- (10) Nymand K.K.: Inspection of Pre-stressing Cables in Concrete Bridges, Nordisk Betong 1-2-1986, S. 20-24.
- (11) Standfuss F.: Schäden an Strassenbrücken - Ursachen und Folgerungen, Strasse und Autobahn - Heft 10/1979, S. 417-426.
- (12) Nürnberger U.: Analyse und Auswertung von Schadensfällen an Spannstählen, Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 308, 1980.
- (13) König G., Maurer R., Zichner T.: Spannbeton: Bewährung im Brückenbau, Springer-Verlag, Berlin, 1986.
- (14) Woodward R.J.: Application of non-destructive testing techniques on concrete bridges, Highway Construction and Maintenance, Proceedings of Seminar at University of Warwick, England, 9-12.7.1979.
- (15) Woodward R.J.: Detection of defects in concrete bridges, Institution of Highways and Transportation National Workshop, Leamington Spa, Warwickshire, 8.4.1986, Institution of Highways and Transportation, London.
- (16) Geymayer H.: Auffinden von Schäden - Methoden und deren praktische Handhabung, Kolloquium 21.6.1983, Technische Universität Graz.
- (17) Dufay J.-C.: Une nouvelle possibilité d'examen des ouvrages d' art: La radioscopie, Bulletin liaison LCPC, Paris, 98, 1978-11/12, S. 85-94.

- (18) Champion M.: Scorpion II - un appareillage lourd pour la radiographie et la radioscopie des ouvrages d'art, Travaux, Mai 1985, S. 7-11.
- (19) Dufay J.-C., Piccardi J.: Scorpion-Premier système de radioscopie télévisée haute énergie pour le contrôle non destructif des ouvrages d'art au béton précontraint, Bulletin liaison LCPC, Paris, 139, Sept.-Oct. 1985, S. 77-83.
- (20) Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Blois: Scorpion II, Broschüre, Febr. 1986.
- (21) Kodak-Pathé, Paris: Films Radiographiques Kodak par dessus Fleuves et Rivières, Broschüre, Ed. 1282.8915.
- (22) Reimers P., u.a.: Beispiele für die Anwendung der Computer-Tomographie (CAT) in der zerstörungsfreien Materialprüfung, Materialprüfung, 22 (1980), Nr. 5, S. 214-217.
- (23) Morgan I.L., u.a.: Examination of Concrete by Computerized Tomography, ACI Journal, Jan.-Febr. 1980, S. 23-27.
- (24) Schwander P., Rösli A.: Anwendung der Computer-Tomographie auf Beton, Schweizer Ingenieur und Architekt, 5/84, S. 59-64.
- (25) Springenschmid R., Wagner-Grey U.: Die zerstörungsfreie Prüfung von Brücken, Bundesministerium für Bauten und Technik, Stassenforschung, Nr. 145, 1980, Wien.

- (26) Hillger W., Ingenieurbüro, D-Braunschweig: Ultraschallprüfsystem Beton-Sonograf 1000, Firmenmitteilung.
- (27) Becker K., Nöller H.: Zerstörungsfreie Prüfungen an den Endverbindungen von Spiralseilen und Paralleldrahtbündeln mittels Ultraschall, Der Maschinenschaden, 61 (1988), Heft 3, S. 104-106.
- (28) CUR-Report Nr. 124, April 1986: Acoustic inspection and monitoring of prestressing tendons and bars in concrete structures, 31 Seiten.
- (29) Kapp H.: Korrosionsprüfungen an Vorspannkabeln und Injektionsankern, Schweizer Ingenieur und Architekt, 38/87, S. 1093-1095 sowie Unterlagen der Fa. Grundbauberatung AG, St. Gallen (unveröffentlicht).
- (30) Mäusl R., Schlagheck E.: Messverfahren in der Nachrichten-Uebertragungstechnik, Dr. A. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1986.
- (31) Rohde & Schwarz, München: Vector Analyzer ZPV, Broschüre, 382/887 (F).
- (32) Cantor T., Kneeter C.: Radar and Acoustic Emission Applied to Study of Bridges Decks, Suspension Cables and Masonry Tunnel, Transportation Research Record 676 (1978), S. 27-32.
- (33) Girot M., Benoist M., Godard M.: Utilisation d'un radar impulsionnel pour l'étude des structures, Travaux, Mai 1985, S. 15-18.

- (34) Boscomer SA, Neuchâtel: Firmendokumentation (unveröffentlicht)
- (35) EMPA, Dübendorf und St. Gallen: Jahresbericht 1987, S. 30.
- (36) Barton J.R., Kusenberger F.N.: Detection of defects in the reinforcement of prestressed concrete bridge members, Colloque International sur la gestion des ouvrages d'art, Bruxelles-Paris (1981), Vol. I, S. 145-150.
- (37) Federal Highway Administration, Washington: Detection of Flaws in Reinforcing Steel in Concrete Bridge Members, Report No. FHWA/RD-83/081, Final Report, November 1983.
- (38) Elsener B.: Elektrochemische Methoden zur Bauwerksüberwachung, SIA Dokumentation D 020, 1988, S. 27-37.
- (39) Woywod E., u.a.: Ueberwachung und Unterhalt von Kunstbauten, Schweizer Ingenieur und Architekt, 22/82, S. 457-480.
- (40) FIP: Corrosion and corrosion protection of prestressed ground anchorages, Verlag Thomas Telford Ltd, London, 1986.
- (41) von Matt U., Bressan R.: Boden- und Felsanker-Anmerkungen zur Bemessung, Ausführung und Prüfung, Schweizer Ingenieur und Architekt, 7/87, S. 150-155.

- (42) Steiger A., Hagmann, A.J.: Permanentanker: Korrosionsschutz und Dauerhaftigkeit-Gefährdung, Schwachstellen, Erfahrungen, Massnahmen, Schweizer Ingenieur und Architekt, 33-34/87, S. 973-977.
- (43) Hunkeler F., Stalder F.: Streustromschutzmassnahmen bei Boden- und Felsankern, Schweizer Ingenieur und Architekt, 33-34/87, S. 978-983.
- (44) Hunkeler F.: Massnahmen während der Projektierung, Ausführung und Nutzung am Beispiel von Permanentankern, SIA Dokumentation D 020, 1988, S. 15-25.
- (45) Nürnberger U.: Wasserstoffinduzierte Spannungsrisskorrosion bei Spannstählen - Ein lösbares Problem, Ergebnisse der Werkstoff-Forschung, Band 2, 1988, Institut für Metallforschung und Metallurgie, ETH - Zürich, S. 57-81.
- (46) Rimboeuf, M., Salzmann, Ch.: Bridge over the River Azergues, IVBH Kongress, Wien, 1980, Report, p. 27-31.
- (47) Woodward R.J., Williams F.W.: Collapse of Ynys-y-Gwas bridge, West Glamorgan, Proceedings Institution of Civil Engineers, Part 1, 1988, 84, August, 635-669.
- (48) Schmitz H.: Die Sanierung der Hochstrasse im Heerdter Dreieck Düsseldorf, Vorträge Betontag 1979, Deutscher Beton-Verein e.V.

- (49) Oertle J.: Reibermüdung einbetonierter Spannkabel, Bericht Nr. 166, Sept. 1988, Birkhäuser Verlag Basel.
- (50) Matt, P. : Korrosionsprobleme bei Spanngliedern und vorgespannten Boden- und Felsankern, SIA-Studientagungen Korrosion und Korrosionsschutz, Teil 4: Anker und Spannkabel, SIA Dokumentation D 031, 1989.
- (51) Engelke P., u.a.: Zur Einpresstechnik bei Spanngliedern mit mehr als 1500 KN Spannkraft, Mitteilungen Institut für Bautechnik Berlin, Vol. 6, 1979, S. 161-166.
- (52) Engelke P.: Zum Stand der Einpresstechnik im Spannbetonbau, Beton- und Stahlbetonbau 81 (1986), Vol. 6, S. 147-150.
- (53) Matt P.: Inspection and Maintenance of Post-tensioned Tendons, IVBH Symposium Paris-Versailles 1987, Symposium Report, S. 265-270.
- (54) Jungwirth D.: Korrosionsschutz im Massivbau, VDI Berichte Nr, 653, 1988, S. 1-42.
- (55) Schupack M.: Protecting post-tensioning tendons in concrete structures, Civil Engineering-ASCE, December 1982, S. 43-45.
- (56) Thielen G., Jungwirth D.: Corrosion Protection of Prestressing Tendons, IVBH Symposium Paris-Versailles 1987, Symposium Report, S. 73-78.

- (57) Springenschmid, R., Wagner-Grey, U.: Die zerstörungsfreie Prüfung von Brücken, Heft 145, Bundesministerium f. Bauten u. Technik. Wien, 1980.
- (58) Moore, W.M., u.a.: An Instrument for Detection of Delamination in Concrete Bridge Decks, Highway Research Record No. 451, S. 44-52, Washington D.C., 1973.
- (59) Otsuka, H.: Development of Construction Robots, Taisei Corporation, Technical Development Department, Tokyo, Japan, 1987.

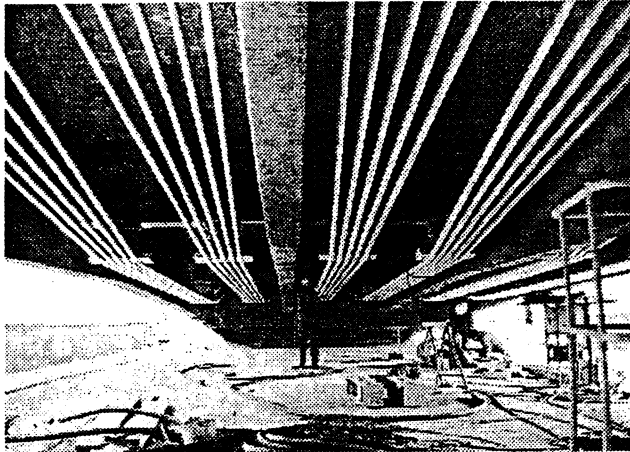


Bild 1:

Bahnhofsbrücke in Aue (DDR),
ausenliegende Spannglieder beim
Einhängeträger, während Inspek-
tions- und Unterhaltsarbeiten

Bild 2:

Spanngliederanordnung

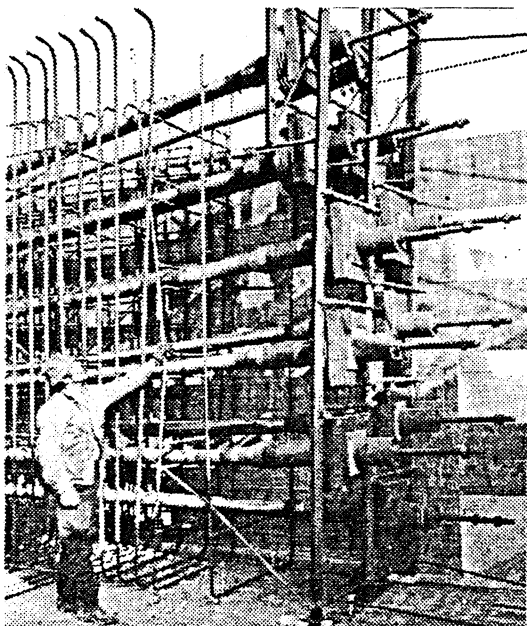
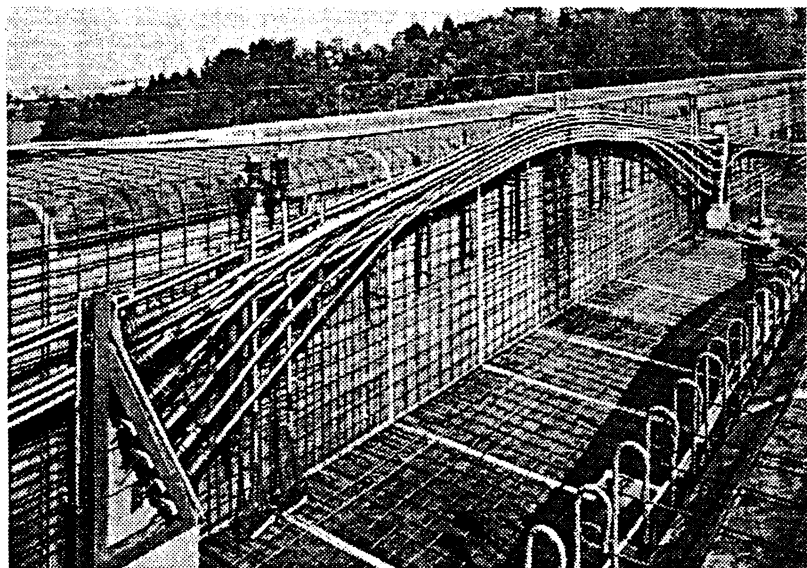


Bild 3:

Anordnung von Spannverankerungen

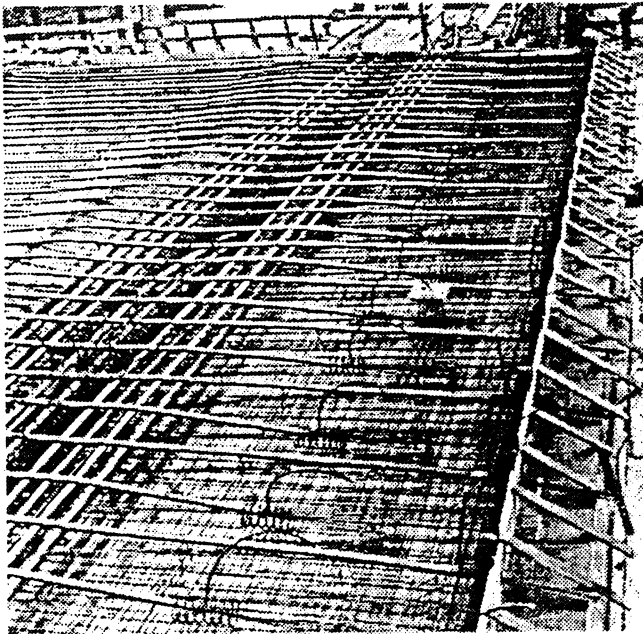


Bild 4:
Quer- und Längsspannglieder

Bild 5:
Spanngliedanordnung

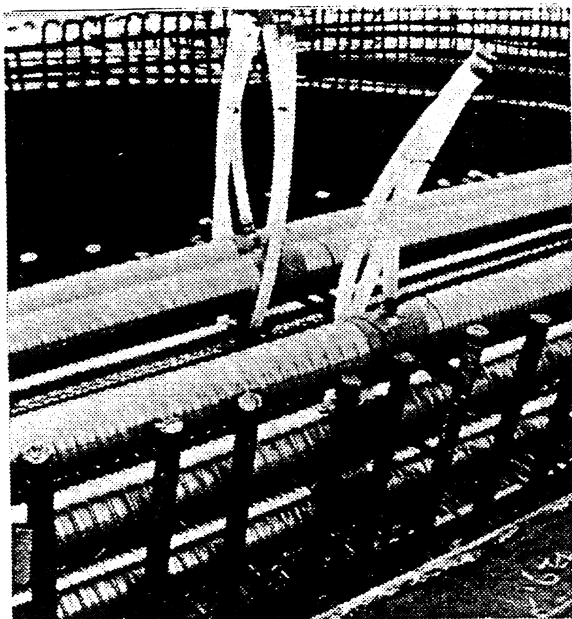
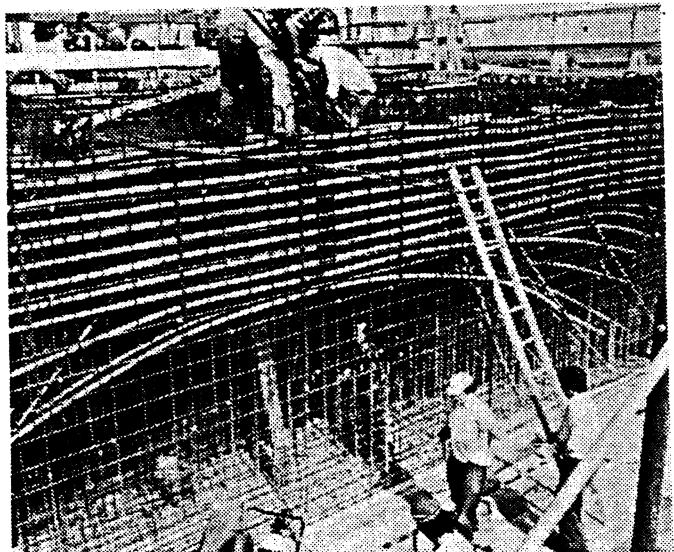


Bild 6:
Spannglieder an Hochpunkten mit Ent-
lüftungsrohren

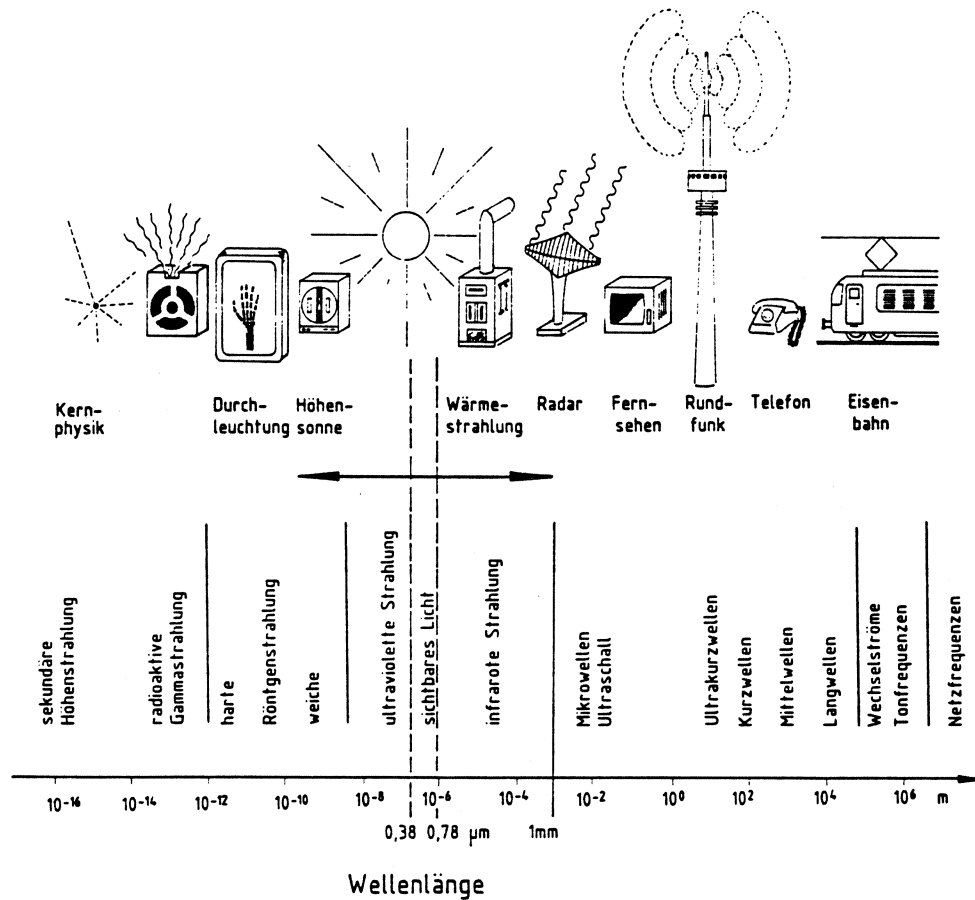


Bild 7: Wellenlängen elektromagnetischer Strahlen und Beispiele für ihre Wirkungsbereiche

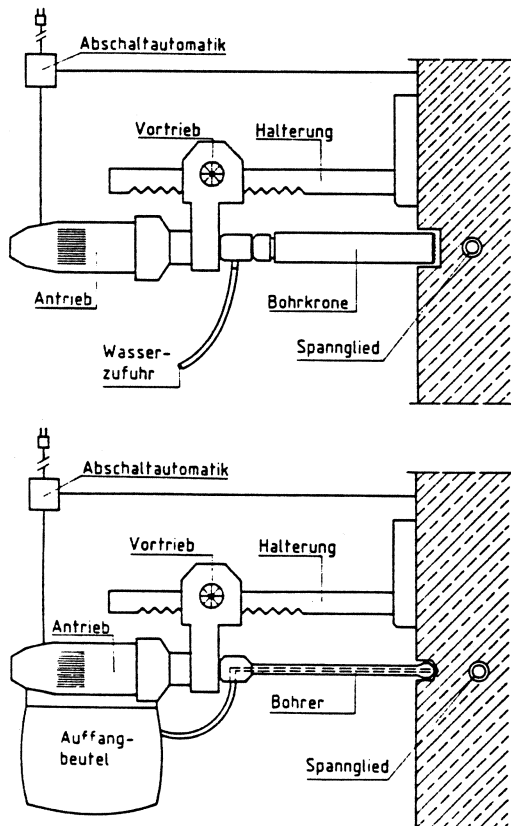


Bild 8:

Methoden zum schonenden Anbohren eines Spanngliedes, die Abschaltautomatik bewirkt ein sofortiges Abschalten der Bohrmaschine beim Auftreffen der Bohrspitze auf dem metallischen Hüllrohr.

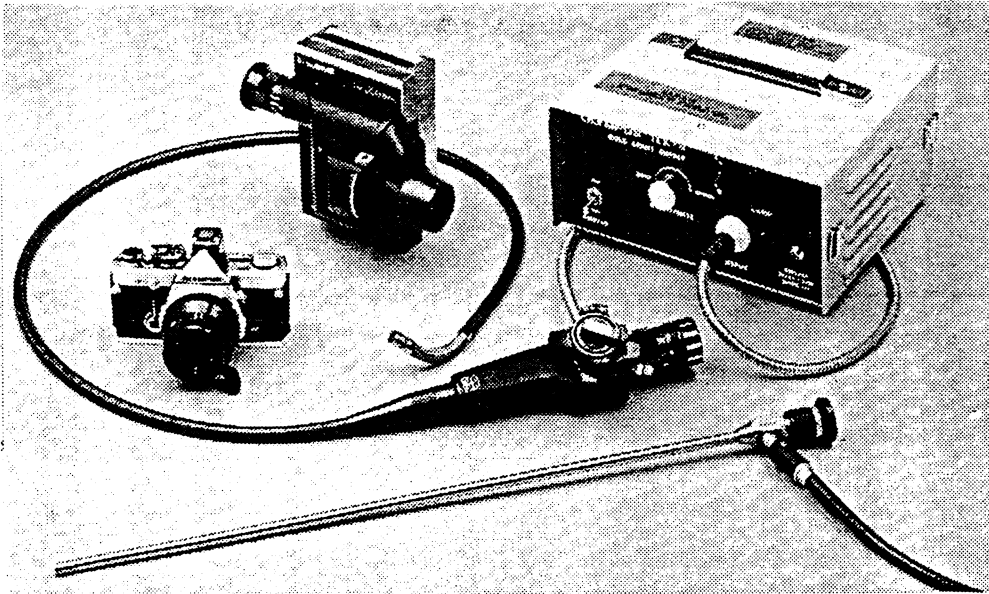


Bild 9: Fiberskopieausrüstung

Bild 10:
Inspektion mit starrem Endoskop

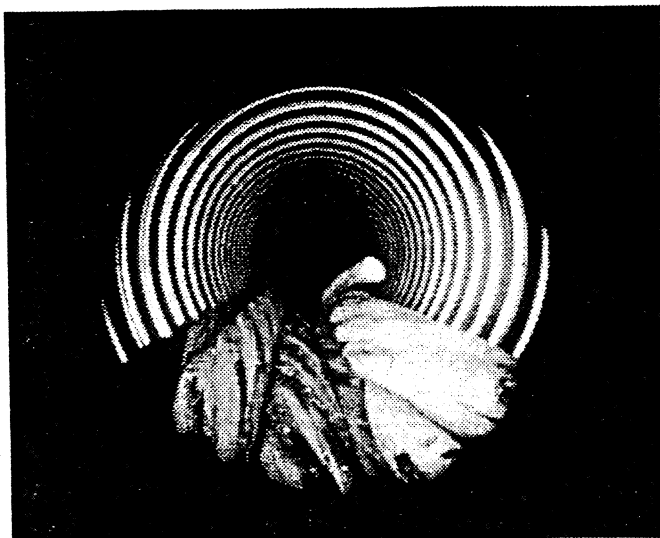
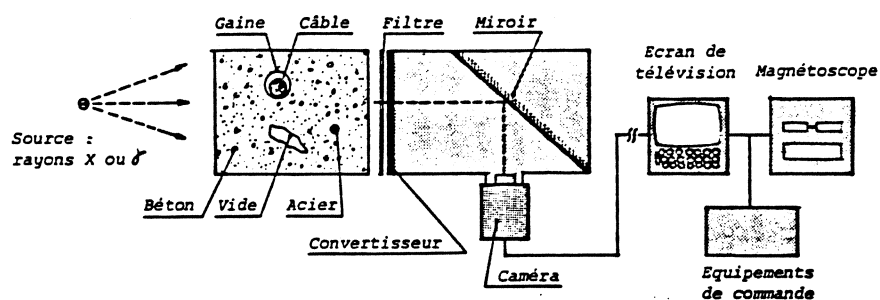


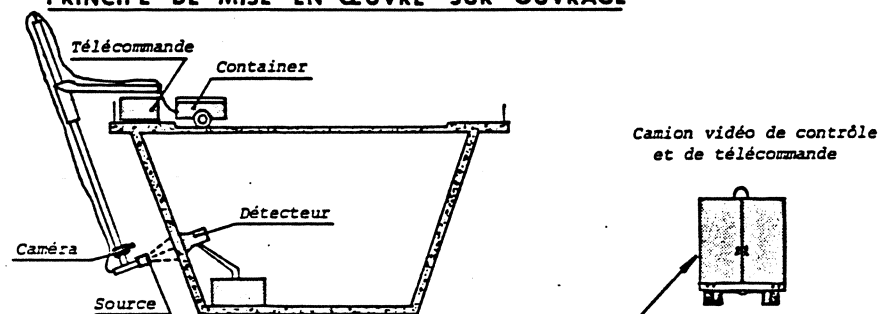
Bild 11:

Aufnahme mittels Endoskop vom
Hüllrohrinneren mit Litzen-
spannglied (Versuchsspannglied
mit simuliertem Drahtbruch)

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT



PRINCIPE DE MISE EN ŒUVRE SUR OUVRAGE



PRINCIPE DE TELECOMMANDE

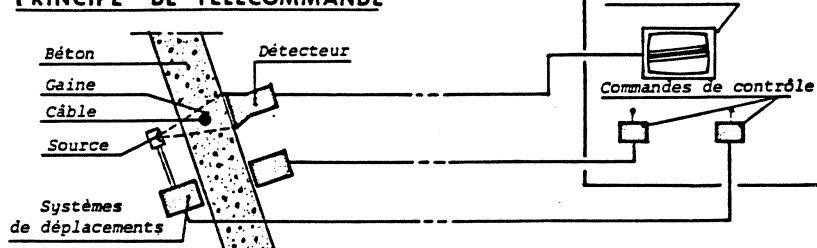


Bild 12: Schematische Darstellung der Radioskopie SCORPION I in der Anwendung im Brückenbau

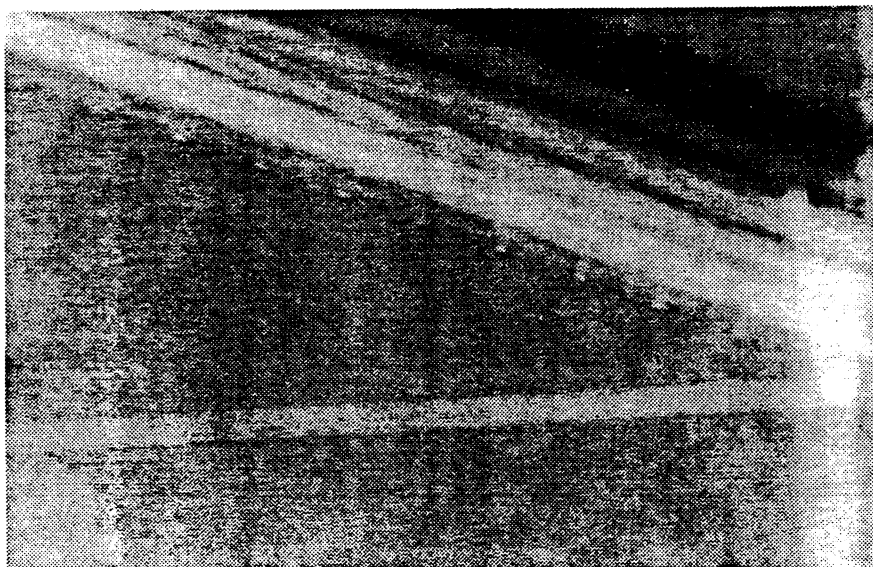


Bild 13: Radiographie-Aufnahme eines unverpressten Litzenspanngliedes

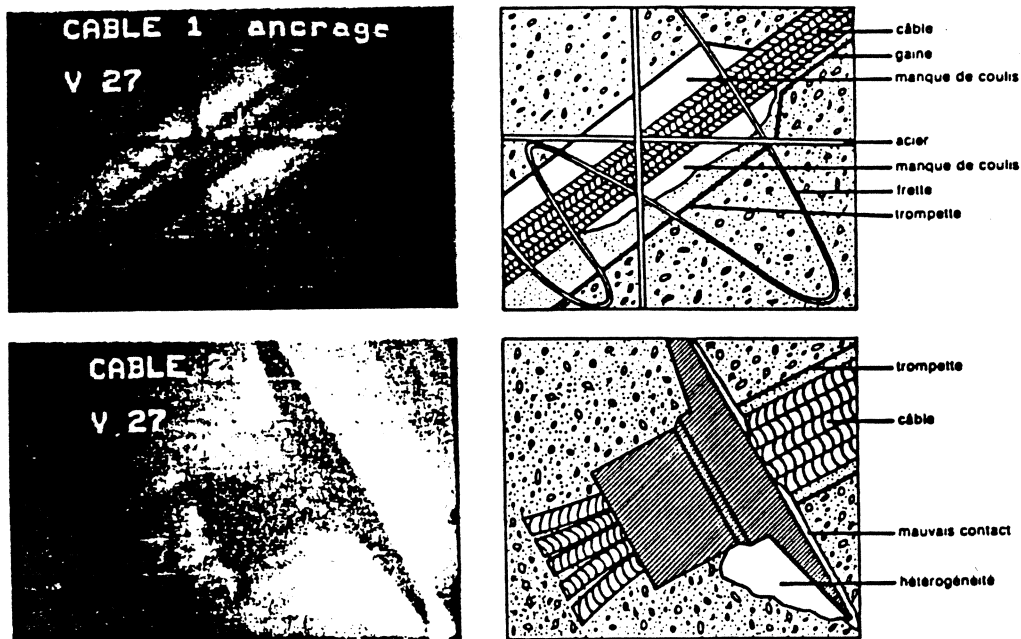
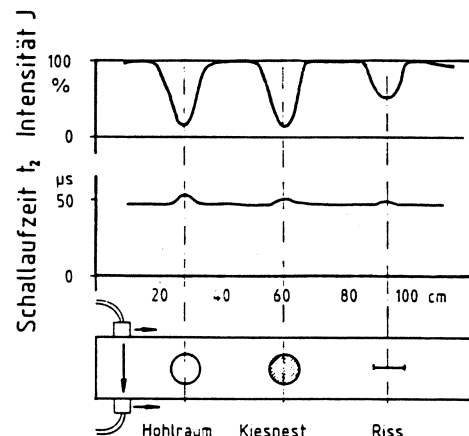


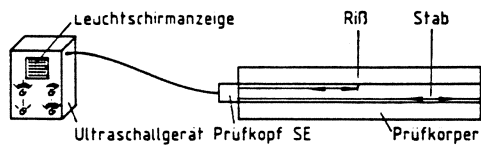
Bild 14: 2 Beispiele von Radioskopie-Aufnahmen und deren Interpretation

Bild 15:

Einfluss von Fehlstellen in Betontragwerk auf Intensität und Laufzeit von Ultraschall



Reflexionsverfahren



Durchschallverfahren

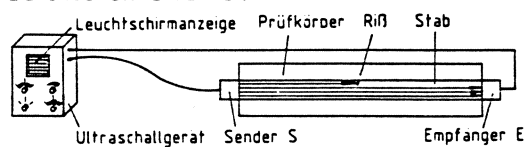


Bild 16:

Messanordnungen bei der Ultraschallprüfung nach dem Reflexions- und dem Durchschallverfahren

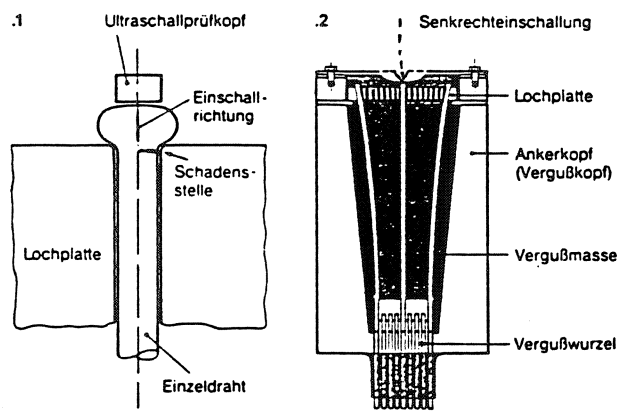


Bild 17:

Ultraschallprüfung einer Schrägseilverankerung vom Typ HiAm

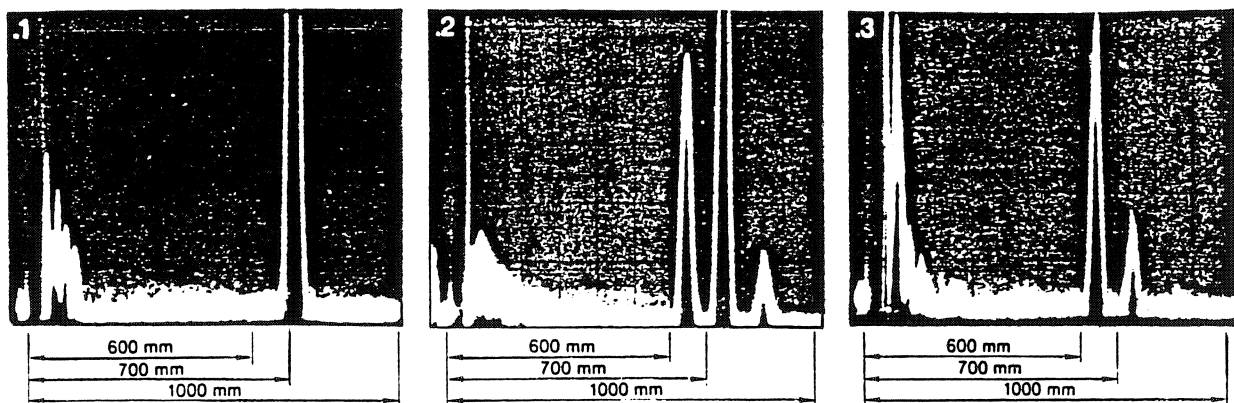
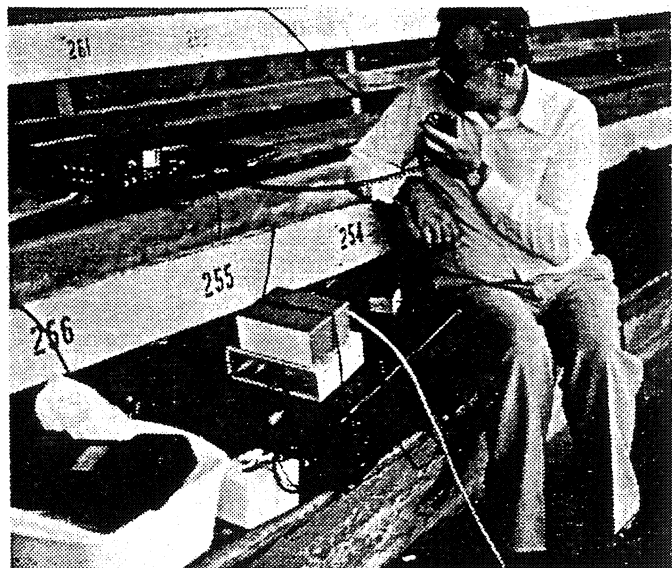


Bild 18: Ultraschallamplituden aus Drähten einer HiAm-Verankerung - .1: Drahtprobe ohne Einschnitt, Rückwandecho bei 700 mm Schallweg - .2: Drahtprobe mit 2 mm tiefem Einschnitt bei 600 mm Schallweg, Rückwandecho bei 700 mm Schallweg - .3: Drahtprobe mit 4 mm tiefem Einschnitt bei 600 mm Schallweg, Rückwandecho bei 700 mm Schallweg

Bild 19:

Reflektometrie - Messung



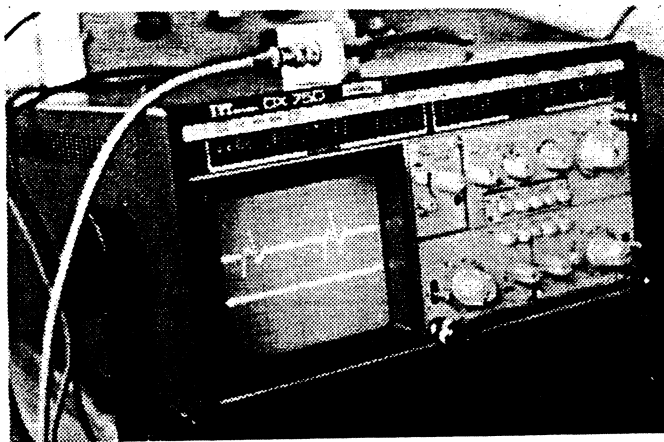


Bild 20:

Reflektometrie - Anzeige auf
Oszilloskop

Bild 21:

Georadar - Messprinzip

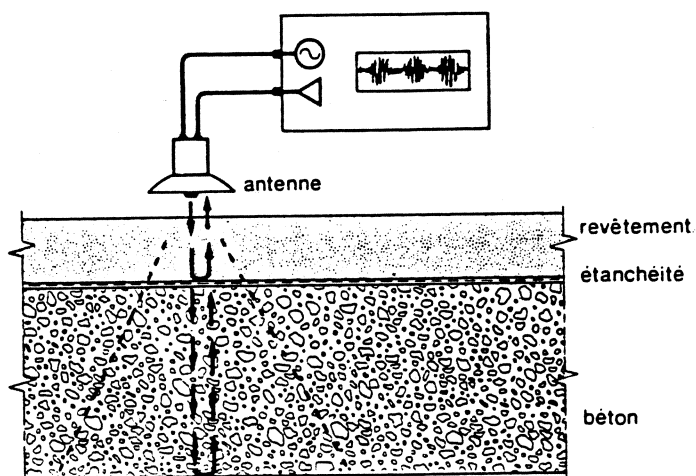
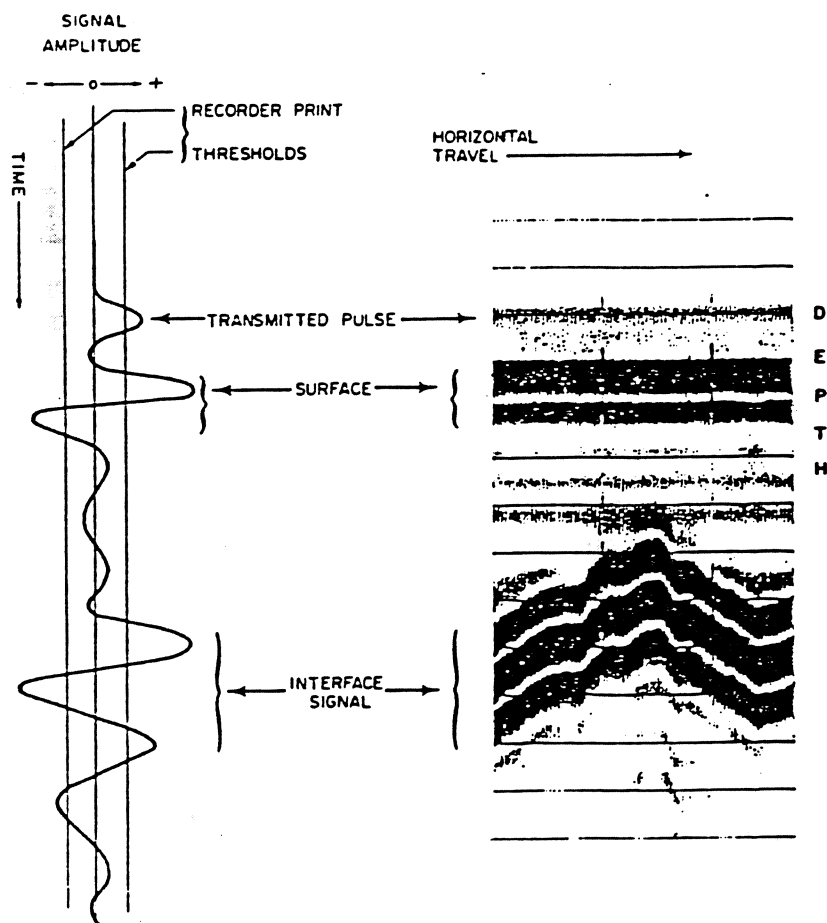


Bild 22:

Beispiel einer Geo-
radar-Messung



a) SKETCH OF A SINGLE ESP
PULSE AND REFLECTIONS
AS SEEN BY THE RECEIVER

b) EXAMPLE OF PROFILE INFORMATION
AS DISPLAYED BY THE
GRAPHIC RECORDER

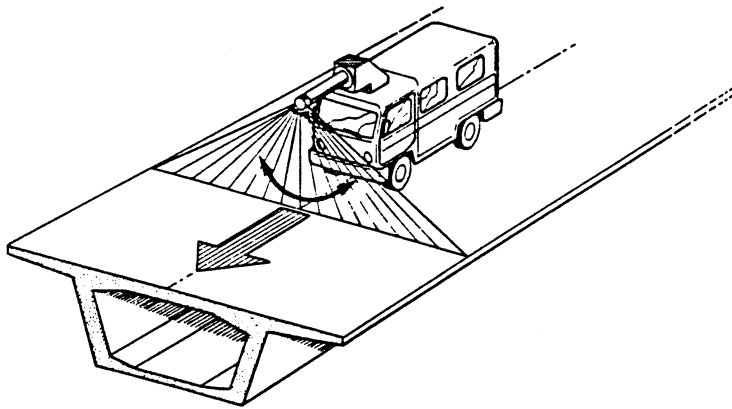


Bild 23:

Infrarot-Scanner bei der Aufnahme

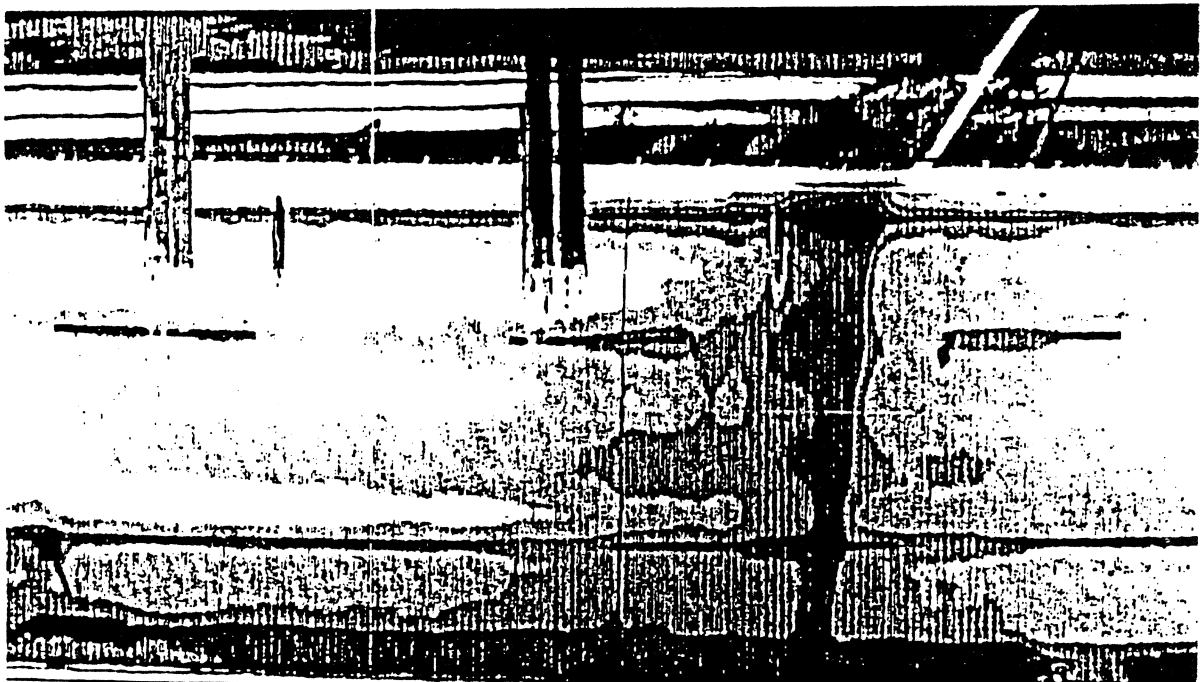


Bild 24: Infrarot - Bild einer Brückenfahrbahnplatte, dunkle Stellen können auf Feuchtigkeit unter dem Belag im Bereich einer Dehnfuge hindeuten.

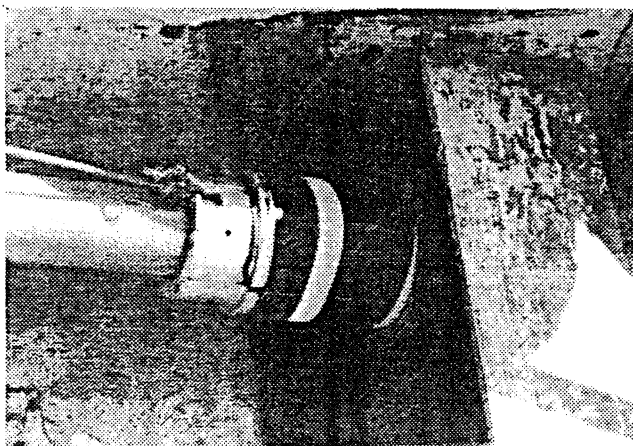


Bild 25:

Prüfung der Schrägseile der Parana-Brücke "General Belgrano", Argentinien, mittels Drahtseilprüfgerät (Magnetinduktion)

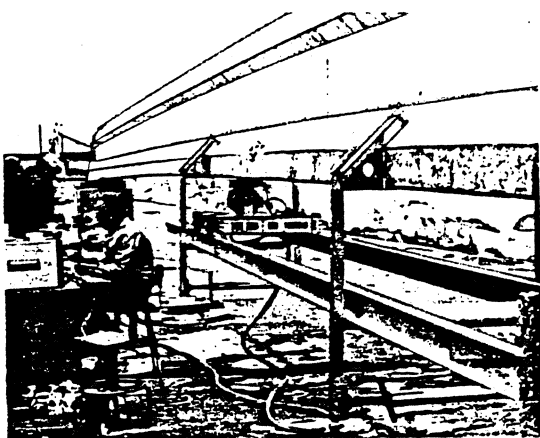


Bild 26:

Magnetfeldprüfung eines Spannbetonträgers, Prüfgerät auf Schienen unterhalb des Trägers.

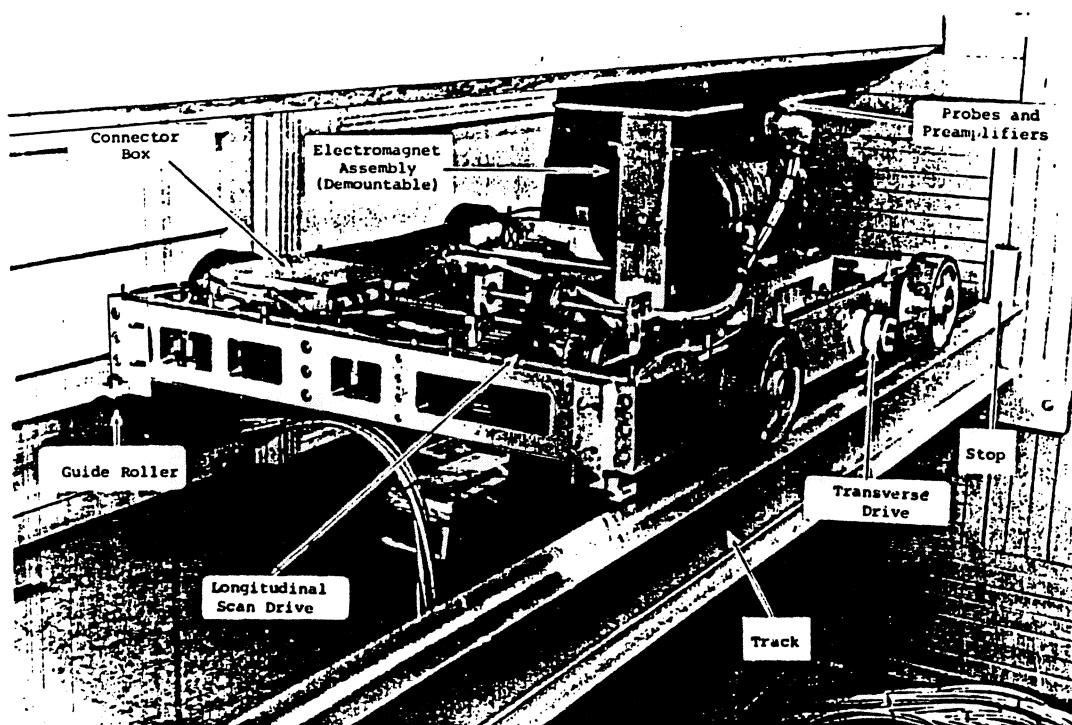
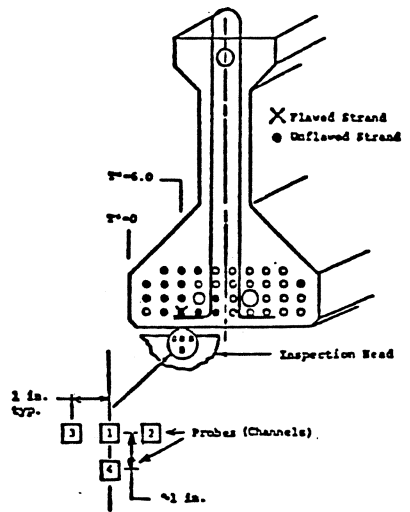


Bild 27: Magnetprüfgerät



T = transverse scan position in inches from left face

Flaw = 1/4-in. gap in 6 wires of 7 wire strand

1 in. = 2.54 cm

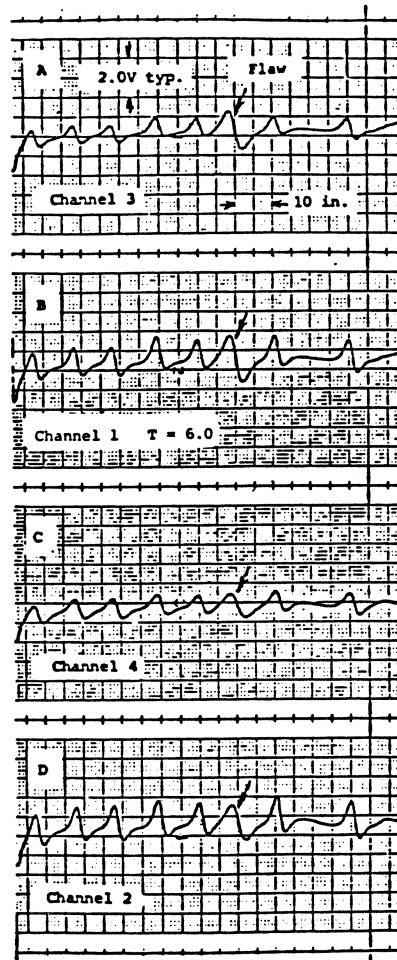
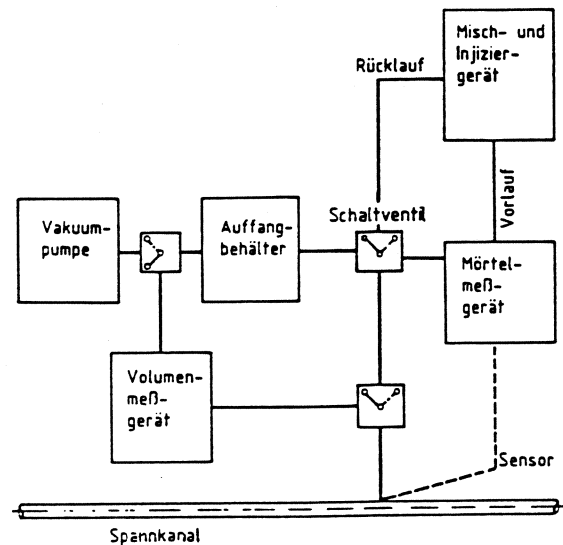


Bild 28: Aufzeichnungen einer Magnetprüfung bei Träger mit Spannbettvorspannung, simulierte Schädigung in Litze, 6 von 7 Drähten durchgetrennt mit 6 mm - Trennabstand (Flawed Strand = geschädigte Litze)

Bild 29:
Schema Vakuumverpressen



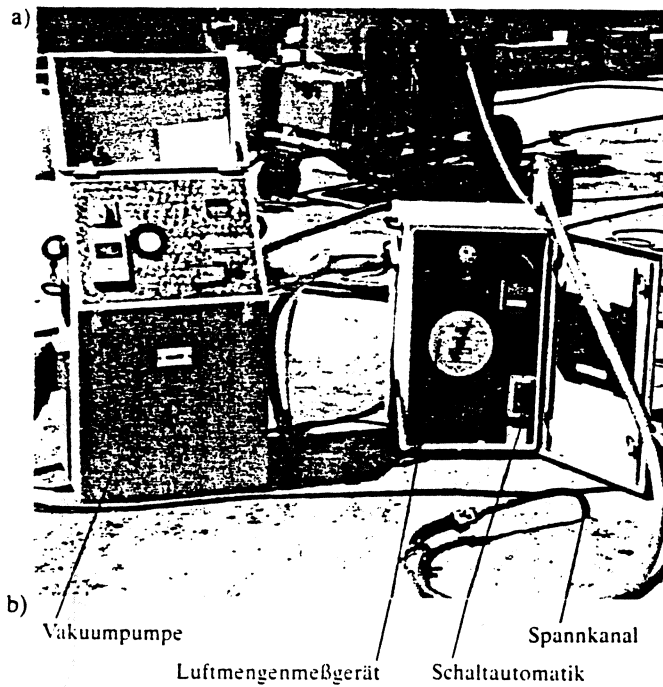


Bild 30:

Hohlraummessung mit dem Vakuumverfahren, a) Volumessgerät im Einsatz - kann auch zum nachträglichen Injizieren von unvollständig verpressten Spanngliedern benutzt werden, b) Schaltschema

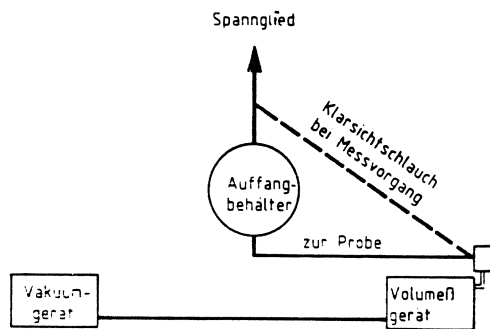
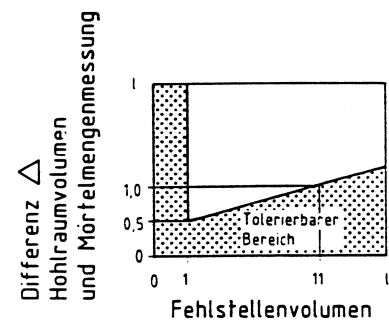


Bild 31:

Genauigkeit bei der Volumenbestimmung mit dem Volumessgerät.



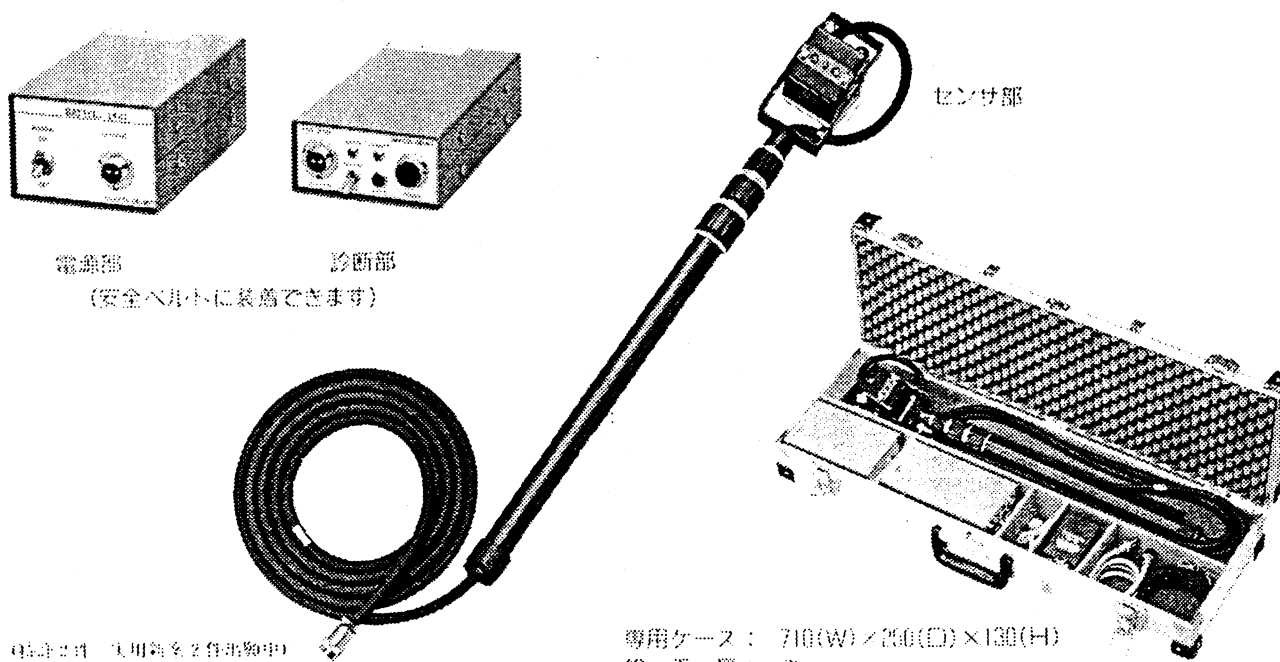
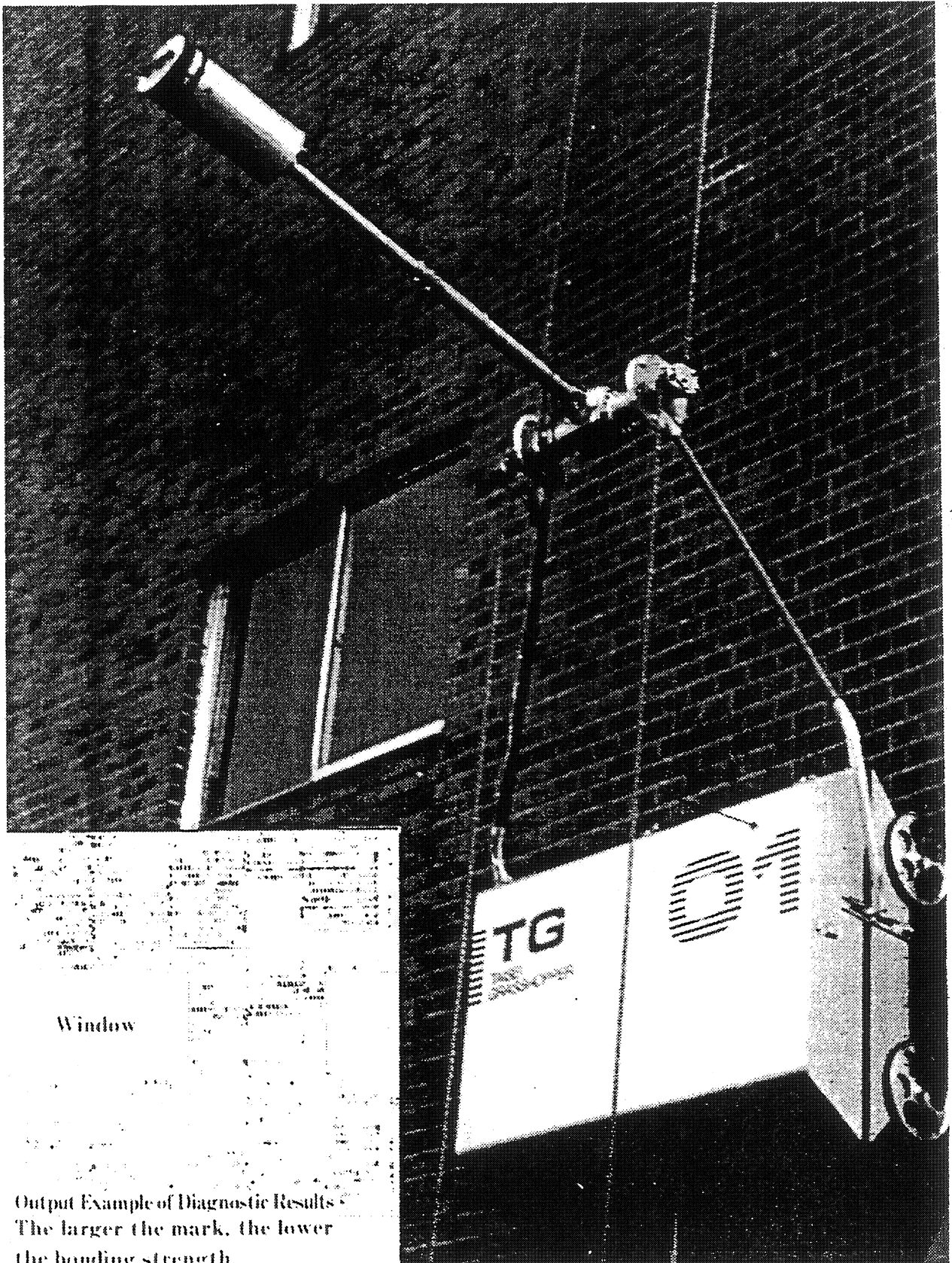


Bild 32: Schlagmethode, Handgerät zum Abklopfen von Keramikplattenfas-
saden zur Kontrolle von Fehlstellen im Verbund zwischen Platten
und Wandkonstruktion



Output Example of Diagnostic Results
The larger the mark, the lower
the bonding strength.

Bild 33: Schlagmethode, gleiches Prüfverfahren wie bei Bild 32 aber mit Robotgerät, Aufzeichnung der Ergebnisse - je dunkler die Markierung, desto kleiner die Haftung.

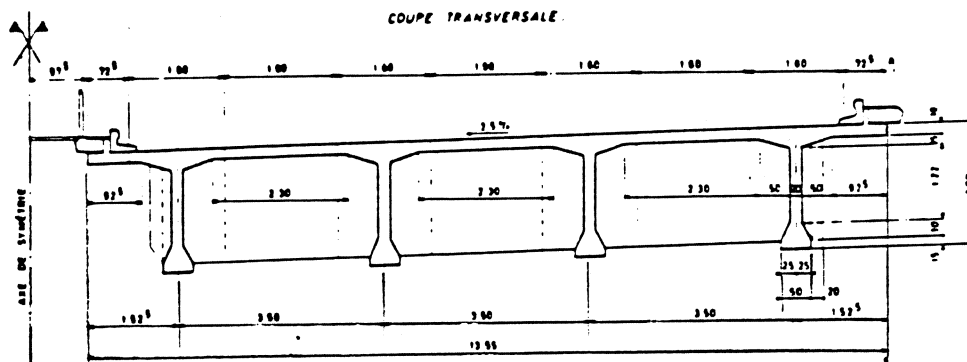


Bild 34: Brücke Val d'Azergues, Querschnitt des Ueberbaues mit 4 Spann-
betonträgern.

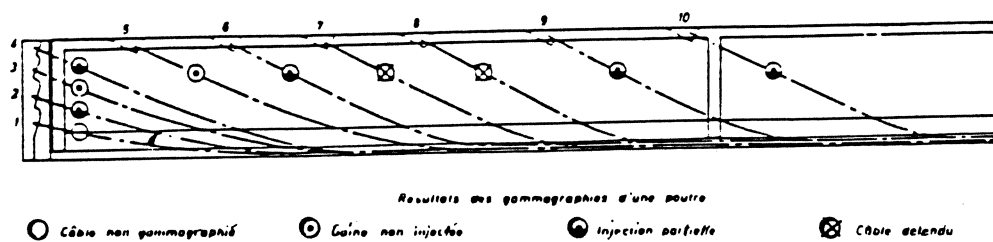


Bild 35: Brücke Val d'Azergues, Längsschnitt durch Spannbeton-
träger mit Verlauf der Spannglieder, Angabe der Radio-
graphie-Aufnahmen und deren Befunde, gesamthaft ergab
sich folgendes Resultat: total der untersuchten Spann-
glieder 144 Stk., vollständig injiziert 16 Stk., teil-
weise injiziert 38 Stk., nicht injiziert 80 Stk.,
weder gespannt noch injiziert 10 Stk.!



Bild 36: Einsturz der Ynys-y-Gwas-Brücke

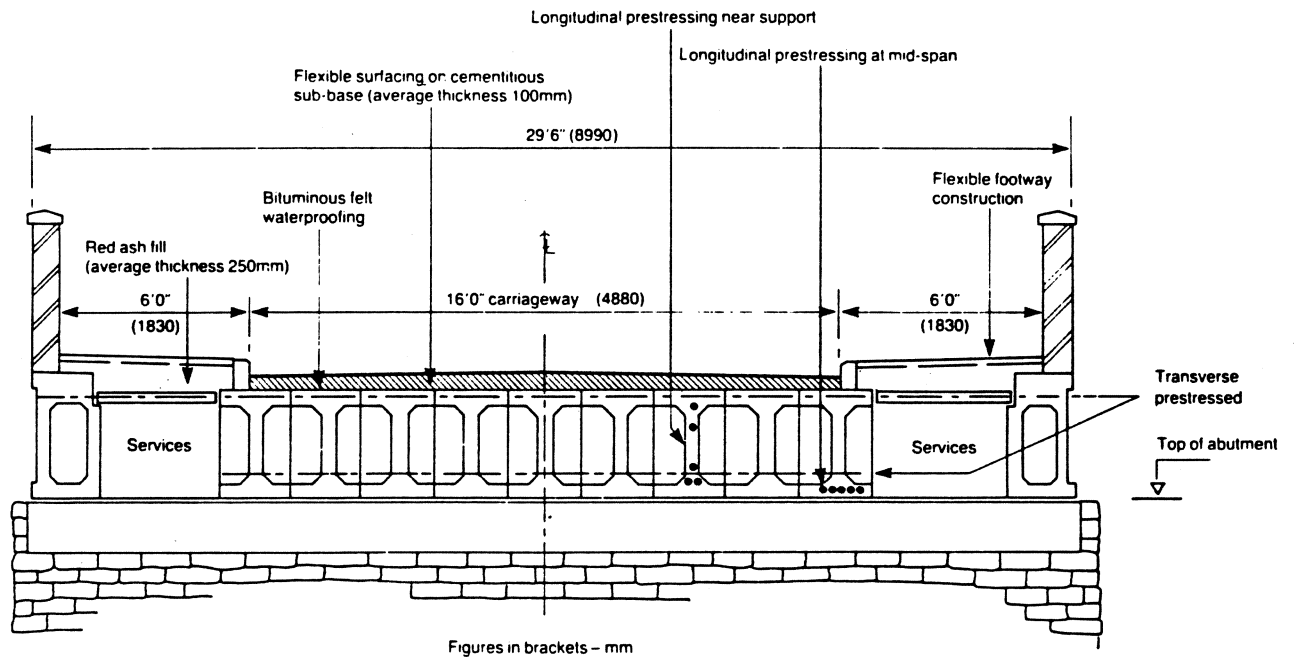


Bild 37: Ynys-y-Gwas-Brücke, Querschnitt mit 9 inneren und 2 äusseren Spannbetonträgern, mit Spanngliedern längs und quer vorgespannt.

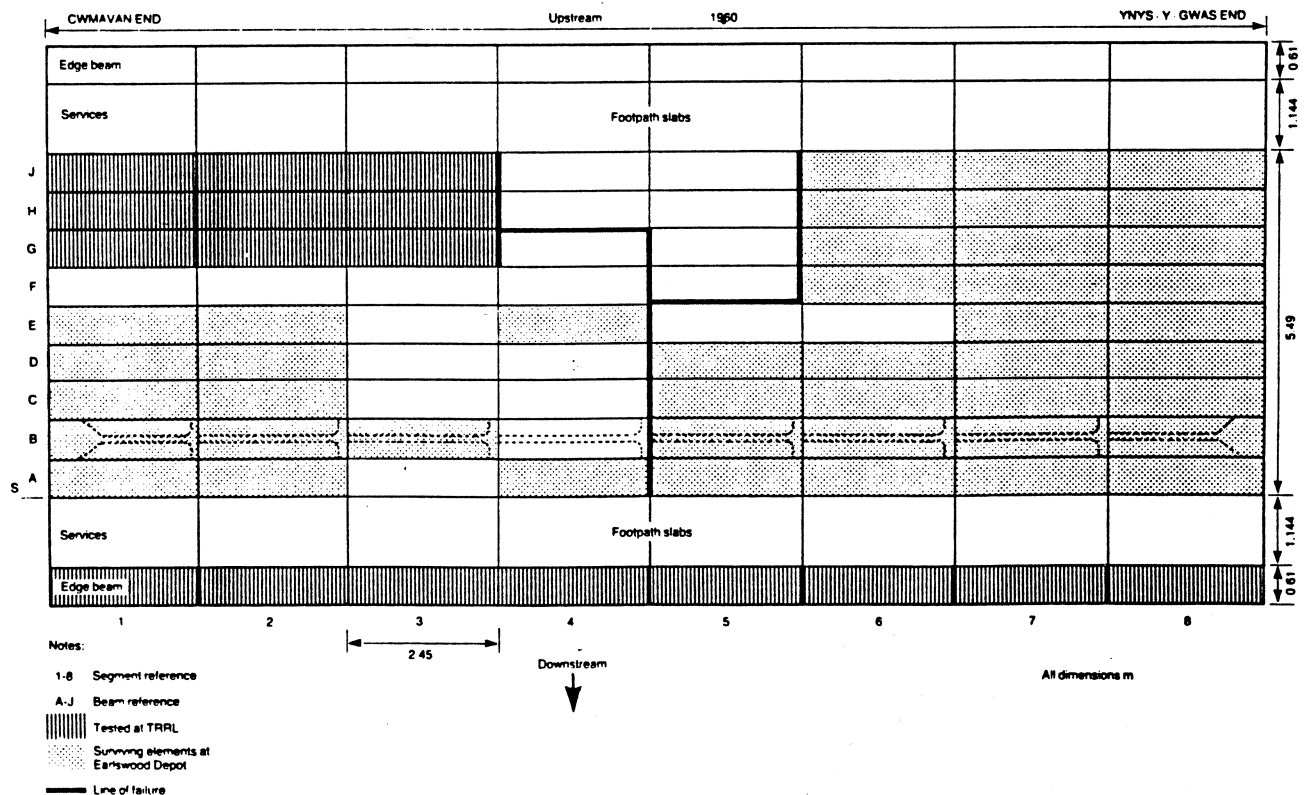


Bild 38: Ynys-y-Gwas-Brücke, Grundriss mit Angabe der längs- und quer-verlaufenden Mörtelfugen zwischen den Trägerelementen und Bruchlinie (Line of failure)



Bild 39: Ynys-y-Gwas-Brücke, gut injiziertes Querspannglied aus Drähten Ø 5mm, in der Mörtelfuge sind die Spanndrähte lokal fast vollständig korrodiert

7. BILDNACHWEISE

- VSL International AG, CH : 1, 4, 5, 6, 10, 11, 19, 20
- Stahlton AG, CH : 2, 3
- aus (5) : 7, 8, 15, 16, 30, 31
- SPI AG, CH (Olympus) : 9
- aus (20) : 12, 14
- aus (21) : 13
- aus (27) : 17, 18
- aus (7) : 21, 23
- aus (34) : 22, 24
- aus (35) : 25
- aus (37) : 26, 27, 28
- aus (54) : 29
- Taisei Corp., Japan : 32, 33
- aus (46) : 34, 35
- aus (47) : 36, 37, 38, 39

8. BEILAGE

8.1 Kontakte mit Fachleuten in der Schweiz

1. Hr. M. Donzel, ASB, Bern
2. Prof. B. Thürlimann, ETHZ
3. Prof. C. Menn, ETHZ
4. Prof. H. Böhni, ETHZ
5. Dr. M. Ladner, EMPA
6. Dr. F. Hunkeler, KK, Zürich
7. Dr. R. Suter, EPFL
8. Prof. G. Oplatka, ETHZ (tel.)
9. Hr. P. Schwander, ETHZ
10. Dr. H. Kapp, Grundbauberatung AG, St. Gallen (tel.)
11. Hr. J. Dormenval, Zschokke SA, Genève (tel.)
12. Hr. C. de Bosset, Boscomer SA, Neuchâtel
13. Hr. Jönsson, SPI AG, Fiberskopie, Ipsach (tel.)
14. Hr. P. Wolf, Tiefbauamt, Kt. Schwyz (tel.)
15. Hr. Werrén, Roschi Telecommunications, Ittigen
16. Hr. H. Dietrich, Messtechnik, Bolligen

8.2 Kontakte mit Fachleuten im Ausland

1. Fachleute in der FIP-Kommission Nr. 4 "Practical Construction", Vorsitz: P. Matt, Austausch von Informationen zu diesem Thema unter den Mitgliedern aus 20 Ländern (Vertreter von Baubehörden, Hochschulen, Projektbüros, Unternehmern, Spannverfahrensfirmen)
2. Japan: Kontakte zu den Firmen Taisei und Kajima mit grossen, eigenen Forschungsstätten.
3. ISMES, Bergamo, Italien
4. Hr. R. Dorton, Brückeningenieur der Provinz Ontario, Kanada
5. Construction Technology Laboratories, Skokie, USA
6. Hr. D. Burkhard, Rohde & Schwarz, München, BRD
7. Dr. R. Woodward, Dept. of Transport, Grossbritannien
8. Dr. W. Podolny, Federal Highway Administration, Washington, USA
9. Dr. E. Wölfel, Institut für Bautechnik, Berlin, BRD
10. Hr. A. Chabert, LCPC, Paris, Frankreich

