

ELS - eine revolutionäre Prüfmaschine der EMPA

Autor(en): **Erismann, Theodor H.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **102 (1984)**

Heft 40

PDF erstellt am: **07.05.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75538>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

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

ELS – eine revolutionäre Prüfmaschine der EMPA

Von Theodor H. Erismann, Dübendorf

Seit vielen Jahren stellt die Prüfung von Drahtseilen ein wichtiges Arbeitsgebiet der Eidgenössischen Materialprüfungs- und Versuchsanstalt (EMPA) dar. Dabei handelt es sich neben der routinemässigen Untersuchung kleiner bis mittlerer Kaliber (wie im Seilbahnbau üblich) häufig auch um ausgesprochen schwere Probekörper extrem hoher Festigkeit. Dies führte, als die damals verfügbare Maschine mit einer maximalen Kraft von 1 MN (entsprechend dem Gewicht einer Masse von 100 Tonnen) immer wieder nicht ausreichte, zu Bemühungen um die Beschaffung stärkerer Geräte.

Vorgeschichte

Das steigende Interesse an hochfesten Bauelementen liegt im Zuge des technischen Fortschritts: Die Spannweiten der Hängebrücken nehmen laufend zu; immer kühnere Betonbauten sind nur dank Vorspannung mit gewaltigen Kräften möglich; neuerdings ist die Verankerung von Bohrinseln als neuer Anwendungsbereich hinzugekommen.

Wie stürmisch sich diese Entwicklung in den sechziger und siebziger Jahren abspielte, ist aus den Reaktionen von Fachleuten auf die Frage nach den für absehbare Zeit zu fordernden Prüfkraften ersichtlich: Eine zu Beginn der genannten Periode veranstaltete Umfrage zu diesem Thema ergab die Antwort: «5 MN für die nächsten 20 Jahre». Auf diese Höchstkraft wurde denn auch in der Folgezeit eine erste grosskalibrige Maschine der EMPA ausgelegt (Bild 1).

Doch schon 1969 wurde für die Kabel der Mannheimer Schrägseilbrücke eine häufig wiederholte (Ermüdungs-)Beanspruchung mit Spitzenkräften bis fast 7 MN verlangt. Und 1978 bezeichnete ein führender Spannbeton-Fachmann 25 MN als Richtwert für seine Branche in den nächsten Dekaden!

Um derart wertvolle (und lukrative) Aufträge nicht zu verlieren, entschloss man sich vorerst zu Improvisationen: Einerseits wurde mit dem grossen «Baukasten» des Aufspannbodens ein Aufbau für Ermüdungsprüfung bis rund 7 MN geschaffen, andererseits eine Umlenkvorrichtung zum Einsatz der bestehenden 20-MN-Druckprüfmaschine für Zugversuche (Bilder 2 und 3). Beide Lösungen bewährten sich bis heute, aber beide sind nicht problemlos: Der wegen seiner Vielseitigkeit sehr begehrte Aufspannboden ist seit fünfzehn Jahren zu einem guten Teil durch den erwähnten Aufbau belegt, und die Umlenkvorrichtung lässt sowohl hinsichtlich der Länge als auch der Zugänglichkeit des Probekörpers wesentli-

che Wünsche offen. Nur eine auf lange Sicht ausgelegte, leistungsfähige Anlage konnte hier echte Abhilfe schaffen und der Konkurrenz ausländischer Anstalten die Stirne bieten, die allmählich immer stärkere Prüfgeräte anschaffen. Als Kaliber wurden schon 1975 30 MN festgelegt.

Auf den ersten Blick mochte die Realisierung eines derart ehrgeizigen Planes als reine Utopie erscheinen. Denn der Kauf einer Maschine der genannten Klasse läge mit mehreren Millionen Franken eindeutig über den Möglichkeiten der EMPA im heutigen Prioritätenfeld. Angesichts dieser Sachlage wurde – entgegen sonst konsequent befolgter Praxis – unter dem Projektnamen ELS (Erprobung langer Seile) ein Eigenbau riskiert. Um einen derart schwerwiegenden Entschluss verständlich zu machen, muss gesagt sein, dass man seit einigen Jahren nicht nur über mehrere erstklassige Fachleute des Prüfmaschinenbaues verfügte, sondern auch konkrete Vorstellungen von revolutionären Neuerungen besass, deren

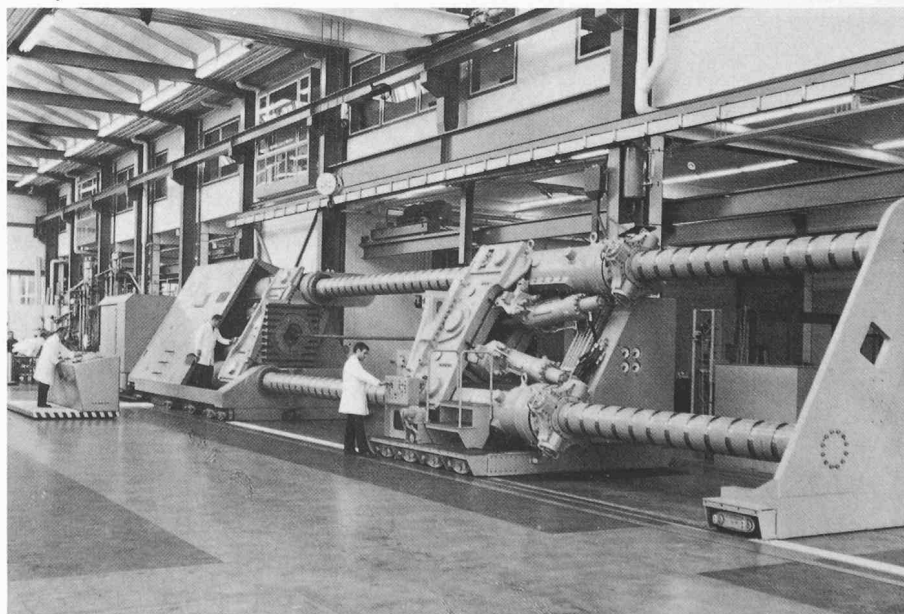
Verwirklichung eine sprunghafte Kostensenkung erhoffen liess. Diese Neuerungen seien hier kurz beschrieben.

Probenkonforme Gesamtdisposition

Ausgangspunkt war die Tatsache, dass jedes technische Zugelement (gleichgültig, ob Drahtseil, Paralleldrahtbündel, Stange, Rohr oder Kette) im praktischen Einsatz an seinen Enden irgendwie verankert sein muss, um die Kraft aufnehmen zu können, und dass gerade die Verankerungen («Köpfe»), wie jedes konstruktive Zwischenglied, risikoträchtig und damit der Prüfung in besonderem Masse bedürftig sind. Damit entfielen die sperrigen und aufwendigen Einspannvorrichtungen üblicher Bauart, und es mussten lediglich geeignete Auflageflächen für die als Teil des Probekörpers anzusehenden Köpfe geschaffen werden. Da für eine praxisnahe Seilprüfung die Länge der Probe ein gewisses Mindestmass nicht unterschreiten soll und deren Köpfe «nach Mass» angebracht werden können, durfte man auch auf den technischen Aufwand für die sonst üblichen verstellbaren Traversen verzichten, und man begnügte sich mit hufeisenartig geformten, zwischen Probenkopf und Auflagefläche gelegten Distanzstücken, welche die Anpassung der Maschine an die Probenlänge erlauben (Bild 4).

Das Manipulieren schwerer (und womöglich noch biegsamer) Probekörper ist eine der Hauptsorgen des Benützers einer Grossprüfmaschine. Wünschbar ist ein möglichst einfaches Ein- und Ausfahren mit dem Kran. Um diese

Bild 1. 5-MN-Zugprüfmaschine der EMPA. Diese Maschine erwies sich als zu schwach für die heutigen Bedürfnisse



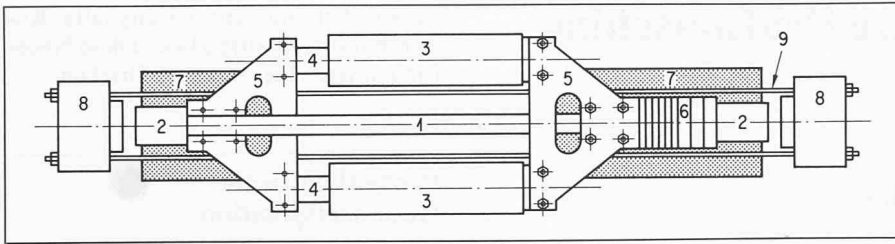


Bild 4. Zugprüfmaschine ELS, Gesamtdisposition. 1 Probekörper, 2 Probenköpfe, 3 schlanke Dreifachzylinder, auf Rollen gelagert, 4 Kolbenstangen, 5 Sandwichtraversen (links Oberteil abgehoben), 6 Distanzstücke, 7 Rollwagen für Elemente 2, 5 und 6, 8 Puffer; 9 weiche Drähte zur Aufnahme der Bruchenergie. Das Fundament mit den Rollenführungen ist in der Skizze weggelassen

Forderung zu erfüllen, wurde die Bauart mit liegender Maschinenachse gewählt. Gleichzeitig wurden die beiden Traversen, welche die Kräfte von den Zylindern zu den Probenköpfen führen, erstmalig als zweiteilige Sandwich-Konstruktion ausgeführt. So kann die obere Hälfte jeder Traverse nach dem Lösen weniger (nicht kraftübertragender) Schrauben mit dem Kran entfernt werden. Der gesamte Probenraum liegt dann offen, und die Mühsal des «Einfädelns» eines tonnenschweren Objektes entfällt (Bilder 4 und 5). Im übrigen wurden die Traversen im Interesse der Materialeinsparung in Dreiecksform mit optimaler Geometrie gestaltet.

Die erwähnte Notwendigkeit einer Mindest-Probenlänge konnte noch auf andere Weise ausgenutzt werden: Es wurde eine zweizylindrige Bauweise gewählt, bei der die Zylinder neben den Probekörper zu liegen kommen und somit die Rolle der sonst unerlässlichen Säulen übernehmen. Selbstverständlich

könnte die Maschine bei Bedarf durch zusätzliche Säulen beliebig verlängert werden.

Zylinder und Kolben – das Herz der Maschine

Bei der beschriebenen Bauart kommt dem Durchmesser der Zylinder eine ausschlaggebende Bedeutung zu, da er (neben dem für die Zugänglichkeit des Probekörpers erforderlichen Freiraum) den Abstand zwischen den Zylinderachsen bestimmt. Dieser ist seinerseits für Spannweite, Masse und Kosten der auf Biegung beanspruchten Traversen massgebend. Zudem gehören die Zylinder ohnehin zu den aufwendigsten Teilen jeder hydraulischen Prüfmaschine, wobei der Preis überproportional mit der Wirkfläche zunimmt. Hier steht man vor einem zentralen Problem der Konstruktion, denn wenige Zentimeter

können Tonnen und viele Kilofranken bedeuten. Drei Neuerungen führten zum Ziel, von denen der «Mehrfachzylinder» und der «atmende Zylindermantel» vollständig neu sind, der «schwebende Kolbenring» zumindest für Maschinen dieses Kalibers.

Der Mehrfachzylinder ist nichts anderes als die Aneinanderreihung mehrerer Zylinder auf gemeinsamer Achse, also mit gemeinsamer Kolbenstange (Bild 6). Dadurch entsteht im Vergleich zur klassischen Bauart ein wesentlich längeres und schlankeres Gebilde, beides im vorliegenden Fall erwünschte Eigenschaften. Die Verwirklichung ist allerdings nicht ganz einfach, weil die grosse Zahl eng tolerierter Sitze zwischen Zylinder, Kolben und Kolbenstange bei einem normalen Konzept extreme Anforderungen an die Genauigkeit der Einzelteile stellt. Dieses Problem konnte erst durch das in der Folge beschriebene Prinzip des schwebenden Kolbenringes gelöst werden. Zunächst sei aber auf den atmenden Zylindermantel eingegangen, der ebenfalls eng mit der Verwendung von Kolbenringen für die Dichtung verknüpft ist.

Offensichtlich ist man an möglichst dünnen Wandungen der Zylindermantel interessiert. Dies führt aber angesichts des hydraulischen Innendruckes zu einer beträchtlichen Aufweitung und zu erhöhtem Kolbenspiel. Ohne nachgiebige Kolbenringe würde damit eine wirksame Dichtung ausgeschlossen. Solche Ringe (wie bei doppeltwirkenden Prüfmaschinen üblich) werden normalerweise bei zunehmendem Öldruck immer stärker an den Zylindermantel gepresst. Dies ist nicht allein eine Quelle starker Abnützung, vorab im Ermüdungsbetrieb. Die Reibung verunmöglicht auch die klassische (und bei grossen Kalibern dank Wegfallens der Messdosen ökonomische) Verwendung des hydraulischen Druckes als Mass für die wirkende Kraft; sie kann darüber hinaus unter Umständen eine wirksame servohydraulische Regelung des Prüfungsvorganges erschweren. Dem atmenden Zylindermantel liegt die Idee zugrunde, die Druckverteilung zwischen einem metallischen Kolbenring und der Zylinderwandung durch geeignete Geometrie beider Teile genügend genau unter Kontrolle zu bringen, um ein etwa gleichbleibendes Spiel, also auch beherrschbare Leckverluste und geringe Abnützung, sicherzustellen.

Von besonderer Bedeutung ist dabei ein unverändertes Verhalten über den gesamten Kolbenhub. Aus diesem Grunde sind bei ELS die Zylindermäntel nicht fest mit den Zylinderböden verbunden, sondern haben die Möglichkeit, sich auf ihrer ganzen Länge frei

Bild 2. Seilprüfstand für Ermüdungsprüfung bis zu Maximalkräften von fast 7 MN. Die grossen horizontalen I-Träger dienen als Vorspannfedern für das Aufbringen einer statischen Kraft. Der Probekörper ist (im Bild unsichtbar) vertikal in der Mitte des Aufbaues angeordnet. Die Einrichtung beansprucht seit Jahren einen wesentlichen Teil des wertvollen Aufspannbodens

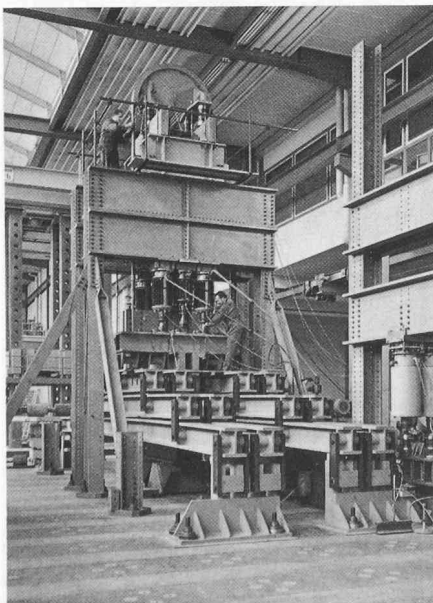
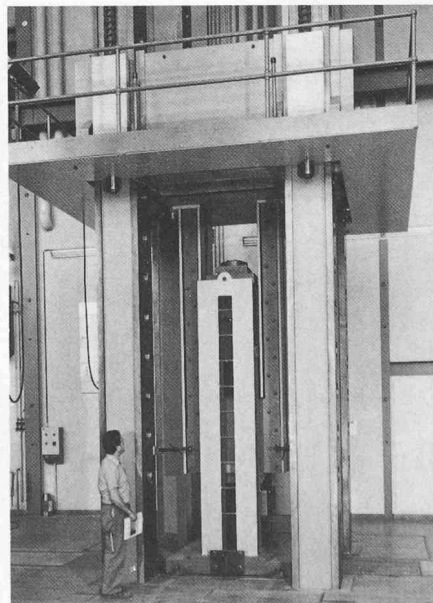


Bild 3. Aus zwei U-förmigen Jochen aufgebaute Kraft-Umlenkvorrichtung zum Einsatz der bestehenden 20-MN-Druckprüfmaschine für Zugversuche. Man beachte die schlechte Zugänglichkeit zum zentral angeordneten Probekörper



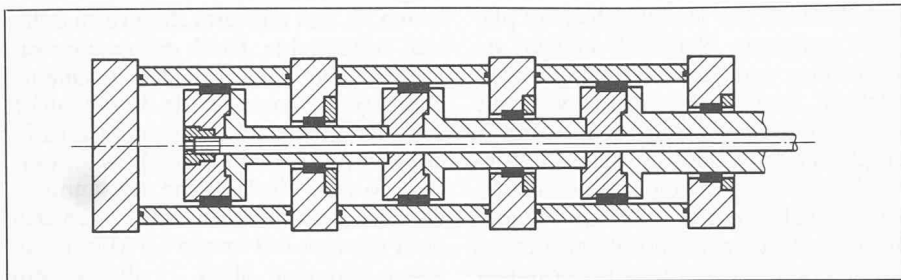


Bild 6. Schematische Darstellung des hydraulischen Mehrfachzylinders, der eine gestreckte, schlanke Bauweise gestattet

auszuweiten. So konnte ein dünnwandiger Dreifachzylinder verwirklicht werden, dessen Durchmesser bei 15 MN Kraft und 40 MPa (400 bar) Druck um 0,3 mm zunimmt und in dem der Kolben trotzdem weder klemmt noch undicht ist.

Das Prinzip des atmenden Zylindermantels ist eng mit demjenigen des schwebenden Kolbenringes verknüpft. In beiden Fällen steht die Beherrschung des Druckes im Spalt zwischen Ring und Zylindermantel im Mittelpunkt. Entscheidend ist eine Geometrie des Systems, die unter allen wesentlichen Betriebsbedingungen einen in Richtung der Druckabnahme leicht sich verengenden Spalt sicherstellt. Damit ergibt sich bei einseitiger Annäherung des Ringes an den Mantel ein verstärkter Dichtungseffekt im Bereich der Verengung, so dass die Umverteilung des Druckes eine zentrierende Kraft auf den Ring ergibt (Bild 7). Dieser hat also eine Tendenz, frei zu schweben, ohne mit der Mantel-Innenfläche in Berührung zu kommen. Die Anwendung dieses Prinzips auf eine Maschine des vorliegenden Kalibers konnte nur dank dem hohen Know-how-Stand der beteiligten Fachleute gewagt werden, da der Spalt in der Grössenordnung 10 μm liegt und die Konizität etwa ebenso gross sein muss. Als interessantes Detail sei erwähnt, dass die Ringe nicht gedreht, sondern mit senkrechter Achse auf einem NC-Bohrwerk gefräst wurden, um die durch die Erdanziehung entstehende Abplattung zu vermeiden. Als Ergebnis konnte nicht nur eine bemerkenswert geringe Reibung gemessen werden, sondern auch das praktisch völlige Ausbleiben von Abnützung, was bei einer schweren Maschine mit Mehrfachzylindern ein unschätzbarer Vorteil ist: Die bei servohydraulischen Anlagen – vor allem im Ermüdungsbetrieb – recht häufigen Revisionen mit Auswechseln der Kolbenringe fallen dahin.

Führungs- und Energieprobleme

Eine gute Prüfmaschine muss eine einwandfrei fluchtende Führung der bewegten Teile sicherstellen. Dazu wer-

den in der Regel die kraftübertragenden Elemente des Maschinenrahmens verwendet, was bei grossen Ausführungen zu hohen Genauigkeitsforderungen für zahlreiche Komponenten führt. Bei ELS wurde von diesem klassischen Prinzip radikal abgegangen, indem man eine vollständige Trennung des Kraftschlusses von der Führung wählte: Jeder Zylinder und jede Traverse (diese mit einer zur Aufnahme des Probenkopfes dienenden Platte) bildet einen unabhängigen Wagen, der sich parallel zur Hauptachse auf Rollen frei bewegen kann. Die entsprechenden Schienen sind im massiven Betonfundament der Anlage eingegossen. Bei ihrer Justierung machte man sich die Erfahrungen zunutze, die heute mit Betonbetten für Werkzeugmaschinen vorliegen. Es ist im übrigen eine alte Weisheit, dass Steifigkeit in Beton billiger kommt als in Stahl. Für den Fall unsymmetrischer Schädigung der Probe ist eine automatische Überwachung der entstehenden Querkräfte mit zahlreichen Messfühlern und einem zentralen Mikroprozessor vorgesehen, der den Prüfungsvorgang beim Überschreiten der zulässigen Grenzwerte unterbricht.

Bild 5. Einfahren eines schweren Brückenkabels in die im Boden versenkte Maschine. Der biegsame Probekörper hängt an einem starren Balken. Vorne oben einer der Probenköpfe; unten die Oberseiten der beiden Zylinder

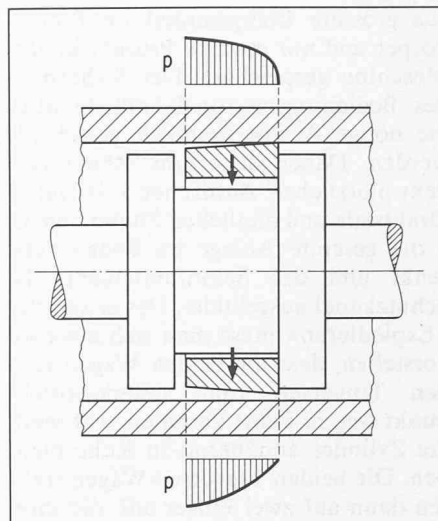
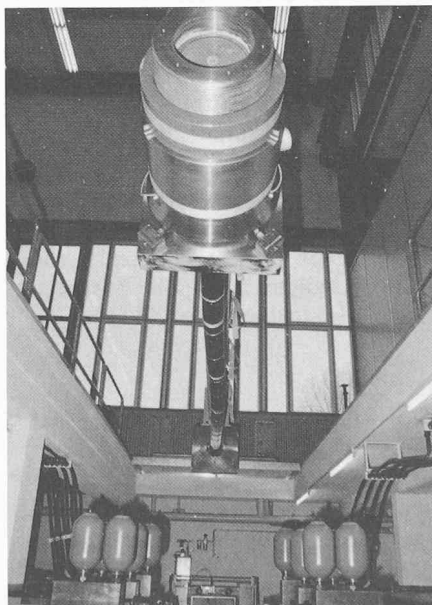
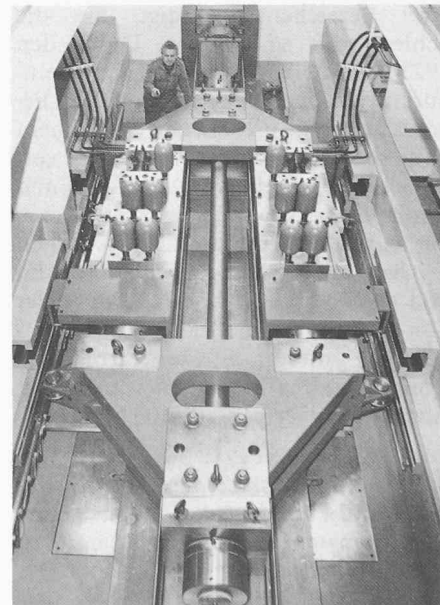


Bild 7. Funktionsprinzip des schwebenden Kolbenringes. Durch die Änderung der Verteilung des Druckes p bei unsymmetrischer Lage des Ringes erfährt dieser eine zentrierende Kraft in Pfeilrichtung. Die Konizität ist im Bild um mehrere Zehnerpotenzen übertrieben dargestellt

Bei einer derart konzipierten Prüfmaschine wird offensichtlich, was bei konventionelleren Ausführungen auf den ersten Blick zwar nicht auffällt, was aber trotzdem zu Schäden führen kann: Nach sprödem Bruch (und ELS ist auch für gelegentliche bruchmechanische Versuche an extrem schweren Proben gedacht) entlädt sich die im System gespeicherte elastische Energie in kürzester Zeit, und die Maschine «explodiert». Das Problem wird im vorliegenden Fall durch die hohe Energiemenge ernsthaft: Im Gesamtsystem kann es zur Entladung von maximal etwa $1,5 \cdot 10^6$ Joule kommen, was einem mit 70 km/h fahrenden Lastwagen von gut 7 Tonnen entspricht. Dabei ist der weit-

Bild 8. Zugprüfmaschine ELS, Gesamtansicht. Am hintern Ende einer der durch weiche Stahldrähte verbundenen Puffer zum Abbremsen der bei Sprödbbruch in Bewegung geratenden Wagen mit den Traversen und Probenköpfen



aus grössere Energieanteil im Probekörper und nur etwa 10 Prozent in der Maschine gespeichert. Der Sicherheit des Bedienungspersonals musste also die nötige Aufmerksamkeit gewidmet werden. Daher ist – zum Schutz vor dem plötzlichen Aufdrehen reissender Drahtseile und ähnlichen Phänomenen – die gesamte Anlage im Boden versenkt und das Betonfundament als Schutzkanal ausgebildet. Das erwähnte «Explodieren» muss man sich etwa so vorstellen, dass die beiden Wagen mit den Traversen vom System-Mittelpunkt weg in Fahrt kommen, während die Zylinder annähernd in Ruhe bleiben. Die beiden Traversen-Wagen treffen dann auf zwei Puffer auf, die ihre Bewegungsenergie vernichten müssen, ohne ein wesentliches Zurückfedern (und damit einen Zusammenprall nach zentripetalem Rücklauf) zu bewirken.

Dieses Problem wurde in einfachster Weise durch eine Anzahl von Drähten aus weichem Stahl gelöst, welche die beiden Puffer verbinden (Bilder 4 und 8). Im relativ seltenen Fall eines hochenergetischen Sprödbrechens werden diese Drähte zu einem bescheidenen

Teil elastisch, zur Hauptsache aber plastisch verformt. Natürlich müssen sie nach einer derartigen Reckung ausgetauscht werden, was prima vista als Verschwendung erscheinen könnte. Vergleicht man aber die dabei entstehenden Kosten mit denen eines hochfesten Probekörpers (etwa einer 500 mm dicken Bruchmechanik-Kompaktprobe), so erkennt man die Belanglosigkeit des Aufwandes für die Drähte.

Wichtigste Daten

ELS ist das Resultat einer Gesamtkonzeption, bei der die konsequente und harmonische Kombination neuartiger Prinzipien einen eigentlichen Durch-

Maschine	Amsler	ELS
Baujahr	1964	1984
Anordnung	vertikal	horizontal
Betriebsweise	Druck	Zug
Maximale Kraft	20 MN	30 MN
Maximale Probenlänge	8 m	6 m
Maschinen-Masse (Stahl)	150 t	40 t
Fundament-Masse (Beton)	100 t	50 t

bruch im Bau schwerer Zugprüfmaschinen ermöglichte. Dank der grossen Erfahrung der mitwirkenden Fachleute aller Stufen konnten die Vorversuche und die Inbetriebnahme ohne ernstliche Schwierigkeiten abgeschlossen werden. So wird die Tatsache verständlich, dass der gesamte Aufwand für den Bau des Prototyps mit knapp 1,5 Mio. Fr. in engen Grenzen blieb. In diesem Zusammenhang sei auf die industriekonforme Kostenerfassung der EMPA hingewiesen, bei der Generalkosten in angemessenen Umlagen zum Ausdruck kommen.

Der erzielte Fortschritt sei abschliessend in einer Tabelle dargestellt, in der zum Vergleich die bisher stärkste Amsler-Prüfmaschine der EMPA herangezogen wird (Bild 3). Man beachte bei der Betrachtung der Daten die hergebrachte Ansicht, eine Zugprüfmaschine benötige bei etwa gleichem Kaliber und gleichen Probenabmessungen einen höheren Aufwand als eine Druckprüfmaschine.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. T.H. Erismann, Direktionspräsident der EMPA, Überlandstr. 129, 8600 Dübendorf.

Rheinbrücke Diepoldsau

Von Albert J. Köppel, Buchs, und Aldo Bacchetta, Zürich

Allgemeines

Zu Beginn dieses Jahrhunderts wurde der Rhein oberhalb des Bodensees in zwei Bereichen begradigt, um die Schleppkraft zu erhöhen. Durch den 1923 in Betrieb genommenen Rheindurchstich kam die Gemeinde Diepoldsau auf die östliche Seite des Rhein zu liegen. Die Staatsstrasse Nr. 41 verbindet die Gemeinden Diepoldsau und Widnau, und sie stellt gleichzeitig eine der kürzesten Verbindungen zwischen der österreichischen Rheintalautobahn und der Nationalstrasse N 13 dar. Der künstliche Rheinlauf hat bei der Überführung dieser Strassenverbindung eine Gesamtbreite von 250 Metern mit einem Mittelgerinne von 100 Metern.

Die in den Jahren 1912 bis 1914 erbaute Stahlfachwerkbrücke weist vor allem in der Fahrbahnkonstruktion so grosse Korrosionsschäden auf, dass sie durch einen Neubau ersetzt werden muss. Der Kanton St. Gallen als Brückeneigentü-

mer war bestrebt, dieses von früherer Brückenbaukunst zeugende Bauwerk durch einen möglichst attraktiven Neubau zu ersetzen. Die Tiefbau- und Strassenverwaltung des Kantons St. Gallen schrieb deshalb im Dezember 1982 eine Schrägseilbrücke zur freien Konkurrenz aus, wobei zur Erreichung von möglichst wirtschaftlichen Lösungen Unternehmervarianten erwünscht waren.

Zur Ausführung gelangte die nachstehend beschriebene Submissionsvariante, die neben technischen und ästhetischen Vorzügen auch die kostengünstigste Lösung darstellte (Bild 1).

Gesamtkonzept

Die Gesamtlänge der neuen Brücke beträgt 250 m, davon sind 178 m seilverspannt. Die Spannweite der Mittelöffnung beträgt 97 m (Bild 2).

Die Hauptcharakteristiken sind:

- symmetrische 2-Pylon-Lösung
- Vielseilanordnung zwischen harfen- und fächerartig mit 6 m Seilabstand bei der Fahrbahnplatte
- Brückenquerschnitt als schlanke Platte ohne Hauptlängsträger.

Die Schrägseilbrücke besitzt 2mal 28 Kabelstränge. Die Verankerung der Seile erfolgt in den Pylonstielen und an den äusseren Rändern der Brücke. Die Gesamtbreite der Konstruktion beträgt 14,5 m. Das Normalprofil setzt sich zusammen aus 7 m Fahrbahn, 2 × 1,5 m Radstreifen sowie einem einseitigen Trottoir von 2 m Breite. In der Vertikalebene ist die Brücke mit einem Radius von 6000 m ausgerundet. Das grösste Längsgefälle beträgt 2,6%, das Quergefälle beträgt 2,5% bis 3,5%. Im Grundriss ist die Brücke im Mittelteil gerade, in den Randfeldern leicht gekrümmt.

Im Rheinvorland, im Bereich der kleinen Spannweiten, ist die Brücke als Plattenkonstruktion ausgebildet. Sie ist in Längsrichtung teilweise vorgespannt. Der Mittelteil (Haupt- und zwei Seitenöffnungen) der Brücke besteht aus einer seilverspannten Konstruktion. Die Fahrbahnplatte ist in Querrichtung teilweise vorgespannt. In Längsrichtung werden die Normalkräfte