

Instandsetzung eines Brücken-Hohlkastens geringer Bauhöhe mit Robotern

Autor(en): **Abt, Lukas / Czechowski, René / Kägi, Jürg**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **111 (1993)**

Heft 40

PDF erstellt am: **24.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-78251>

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.

Führung in den engen Tunnels und erhöhen dadurch die Verkehrssicherheit (vgl. Bild 11).

- Mit den grossen Plattenformaten wurden kurze Montagezeiten erreicht (Tagesleistung ca. 140 m²).

Die Normalfugenbreite zwischen den Platten beträgt 6 mm. Die Verfüllung besteht aus einem zementgebundenen, kunststoffmodifizierten Fugenmörtel (PCI-Flexfuge, wasserdicht, frost-tausalzbeständig). Im Abstand von 4 m wurden Sollriss-Stellen in den Neubeton gefräst (vgl. Bild 12) und mit einer elastischen Dehnungsfuge (Fugenbreite 10 mm) überbrückt. Die Verfüllung erfolgte mit einer dauerelastischen Zweikomponenten-Fugendichtungsmasse auf Polyurethanbasis (PCI-Escutan FF, elastisch, wasserdicht, witterungs-, alterungs- und chemikalienbeständig). Mit demselben Produkt wurden auch die Längsfugen beim Gehwegabschluss verfüllt.

Versiegelung im Sprühnebelbereich

Der ursprüngliche Anstrich (Biladur-A-Emaile) wurde durch Sandstrahlen gereinigt bzw. entfernt und durch eine Versiegelung bis auf eine Höhe von 3.85 m über OK Gehweg ersetzt. Appliziert wurde ein wasserverdünnbarer Zwei-

komponenten-Anstrich auf Epoxidharzbasis (Trilacolor-Bilazo-Emaile perlweiss, 2 Anstriche à min. 2x40 µm, Applikation im Spritzverfahren mit Nachrollen).

Bauprogramm und Verkehrsführung

Die effektive Bauzeit für die Instandsetzung der Tunnels inkl. der Betonschutzmassnahmen betrug für die Bergspur 47 Wochen (24.6.1991–27.5.1992) und für die Talspur 37 Wochen (24.8.1992–28.5.1993), insgesamt also 84 Wochen.

Mit der eingerichteten Gegenverkehrsführung auf der gegenüberliegenden Spur konnten die Arbeiten ohne Behinderungen durch den Individualverkehr ausgeführt werden. Während des Sommer-Reiseverkehrs 1992 waren die Bauarbeiten unterbrochen und beide Richtungen zweiseitig befahrbar.

Baukosten

Die Gesamtkosten für Instandsetzung, Betonschutzmassnahmen, Projekt und örtliche Bauleitung, exklusive Erneuerungen Strassenbelag und elektromechanischen Anlagen, beliefen sich auf 20.2 Mio. Fr. (Fr.5500.-/m' zweiseitiger

Am Bau Beteiligte

Bauherrschaft: Kanton Uri, vertreten durch die Baudirektion Uri

Projektleitung und Oberbauleitung: Bauamt Uri, Altdorf; Herr H. Bargähr, Kantonsingenieur-Stellvertreter

Oberaufsicht: Bundesamt für Strassenbau, Bern

Ausführungsprojekt und örtl. Bauleitung: Lombardi AG & Balestra AG, Erstfeld

Bauausführung:
ARGE Tunnelsanierung N2:
Josef Baumann Söhne AG, Altdorf
Gebr. Bonetti AG, Andermatt
Cellere AG, Altdorf
CSC Bauunternehmung AG, Seedorf
Locher & Cie. AG, Zürich
Ed. Züblin AG, Zürich
ARGE Betonschutzarbeiten:
ATAG Bau AG, Beat Föhn, Schattdorf

Tunnel). Insbesondere kosteten die Plattenarbeiten (Untergrundvorbereitung, Liefern und Versetzen von 14 000 m² Feinsteinezeugplatten inkl. Fugen und Abschlüssen) 1.7 Mio. Fr., bzw. Fr. 120.-/m².

Adresse der Verfasser: *Thomas Keller*, Dr. sc. techn., Balestra AG –Ingenieure und Planer, Hertizentrum 2, 6300 Zug; und *Fritz Burri*, Lombardi AG & Balestra AG, Spittelstrasse 158, 6472 Erstfeld.

Instandsetzung eines Brücken-Hohlkastens geringer Bauhöhe mit Robotern

Die Instandsetzung von Brückenhohlkästen mit geringen Abmessungen bieten wegen der beengten Platzverhältnisse spezielle Probleme für die Ausführung. Bei einer Trambrücke in Muttenz wurden für diese Instandsetzungsarbeiten sowohl für das Wasserhöchststrahlen als auch für den Spritzmörtelauftrag Roboter entwickelt und erfolgreich eingesetzt.

Ausgangslage, Projekt und Ausschreibung

Beschrieb des Bauwerkes

In den Jahren 1975/76 wurde im Gebiet Schänzli in Muttenz (bei Basel) für die Tramlinie Nr. 14 eine 7feldrige, 182 m lange Brücke erstellt. Infolge geringer Bauhöhe ergab sich beim gewählten Querschnitt eine Konstruktion mit zwei bekriechbaren Hohlkästen von nur ma-

ximal 70 cm lichter Höhe. Wegen der zentrisch angeordneten Einzel-Stützen besteht in den Querträgern kein Durchgang, so dass in jeden der 14 Hohlkästen von unten eingestiegen werden muss. Der Querschnitt wurde in zwei Etappen betoniert: Boden und Stege zuerst, dann die Fahrbahn und die erhöhten Kragplatten, wobei in den Kästen als verlorene Decken-Schalung Eternittafeln zum Einsatz kamen (Bild 1: Querschnitt).

Zustand der Hohlkästen

Durch mangelhafte Ausführung wiesen die Bügel der Stege im Kasteninnern grossflächig viel zu geringe Betonüberdeckungen auf, so dass bereits vielerorts angerostete Bügel freilagen. Des Weiteren wurden viele Kiesnester und Abplatzungen, insbesondere am Stegfuss festgestellt (Bild 2). Die Decke (infolge der Eternitschalung) und die Aufsicht der Bodenplatte waren hingegen in Ordnung.

Das Tiefbauamt des Kantons Basellandschaft, Abteilung Ausbau und Unterhalt, entschied in Absprache mit dem ASB, diese Schäden im Zuge der Gesamtsanierung der Brücke instandsetzen zu lassen.

Instandsetzungsmöglichkeiten

Bei derart ausserordentlich beschränkten Platzverhältnissen stellt sich unweigerlich die Frage nach der Machbarkeit einer qualitativ befriedigenden Instandsetzung. Grundsätzlich stehen die drei folgenden Methoden zur Auswahl:



Bild 2. Kiesnester und rostende Bügel im Hohlkasten. Foto Aegerter & Bosshardt AG

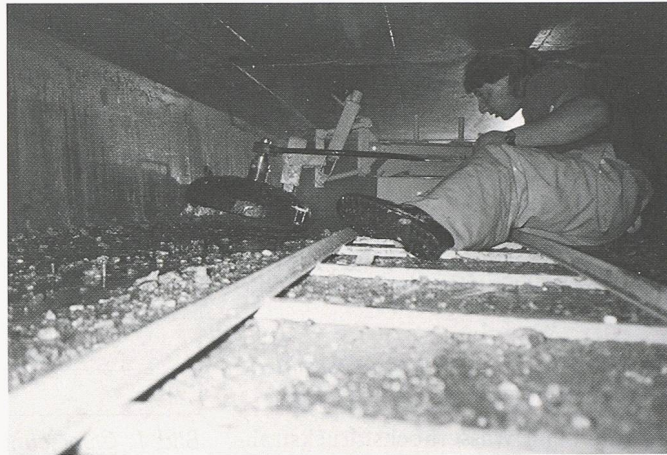


Bild 3. Roboter für Wasserhöchstdruckstrahlen (mit abgeklapptem Teller). Foto Locher & Cie. AG

mässiges und spurgetreues Fahren nicht möglich war. Dies bedingte die Umstellung auf ein Schienenfahrwerk. Durch das Verlegen einer Schiene im Hohlkasten konnten zudem gewisse Höhendifferenzen elegant eliminiert werden, was der Wahrung eines gleichmässigen Düsenabstandes von der Betonfläche sehr dienlich war.

Weiter ist zur Erreichung eines guten Resultates von Vorteil, wenn sich das Trägergerät mit konstanter Geschwindigkeit vorwärts bewegt. Zu erreichen war dies in unserem Falle mit einem kleinen Hydraulikmotor. Die Geschwindigkeit war stufenlos regulierbar von 0–6 m/min., und der Motor entwickelte die für das Nachziehen der Hochdruck- und Hydraulikschläuche nötige Kraft.

Strahlführungsgerät

Durchgesetzt haben sich für das reine Aufrauen im manuellen Bereich die sogenannten Rotordüsen und im maschinellen Bereich rotierende Scheiben, welche mit mehreren kleinen Einzeldüsen bestückt sind. Ein solcher Teller, in unserem Falle ein «Acquablast 1000», wurde an der Schänzli-Brücke von einem Druckerzeuger, welcher 80 l/min. bei 1000 bar lieferte, beschickt.

Weil die Hohlkastenwände auf ganze Höhe bis in die Ecken zu bearbeiten waren, musste der Teller vielseitig verstellbar sein. Die Befestigung am Grundgerät wurde folglich so konstruiert, dass alle Arbeitsstellungen sehr einfach und schnell mechanisch eingestellt werden konnten. Vor allem aber waren beide Kastenwände von einer einzigen Gleisanlage längs in der Hohlkastenmitte zu erreichen (Bild 3).

Strahlergebnis

Das Bearbeiten einer Betonfläche mit Wasserhöchstdruck bedeutet selektives Abtragen. D.h. bei konstanter Energie

am Düsenaustritt (Druck, Wassermenge) und gleichmässigem Abstand sowie Geschwindigkeit wird das Abtragsbild vor allem von der Güte des Betons bestimmt. Da bekanntlich Beton immer als homogen bezeichnet werden kann, führen Unregelmässigkeiten zu einem unterschiedlichen Abtragsbild. Beim Aufrauen, also beim Abtrag des oberflächennahen Bereiches, kommt zu Kiesnestern, Feinanteilansammlungen etc. hinzu, dass die Oberflächengüte je nach Saugfähigkeit der beim Betonieren verwendeten Schalung (Holzfeuchte, Schalöleinsatz) sehr stark und kleinräumig variiert.

Ein Lanzenführer begegnet dieser Schwierigkeit, indem er die einzelnen Partien unterschiedlich lang bearbeitet und so ein regelmässiges Abtragsbild erhält. Bei einem fahrenden Abtragsgerät, das zudem nicht mit einer Kamera überwacht werden kann, wird das Erreichen eines idealen Abtragsbildes auf Antrieb nicht möglich sein. Dies mussten auch wir erfahren. Deshalb wurde nach jedem Arbeitsgang der Hohlkasten visuell überprüft und dabei die nochmals zu überarbeitenden Partien festgelegt. Hiermit wurde automatisch auch in Kauf genommen, dass Überlappungsbereiche eher stärker als notwendig bearbeitet wurden.

Fazit und Ausblick

Insgesamt waren auf die geschilderte Weise 14 Hohlkästen mit bis zu 32 m Länge zu bearbeiten. Die erreichten Resultate sind ermutigend. Einerseits lagen die Leistungen mit 5–7 m²/Betriebsstunde in einer in Anbetracht der Verhältnisse vertretbaren Grösse, und andererseits konnte ein erfreulich gutes Abtragsbild erreicht werden. In jedem Falle konnte die für den Spritzbeton geforderte Qualität in bezug auf Haftzugfestigkeit und Rauigkeit dem nachfolgenden Unternehmer übergeben werden.

Der eigentliche Pluspunkt lag aber sicher in der Tatsache, dass diese Arbeit unter schwierigen örtlichen Verhältnissen recht gefahrlos, d.h. ohne Risiko für das Personal, abgewickelt werden konnte. Der Einsatz des zwei Mann starken Bedienungspersonals beschränkte sich im übrigen auf das Versetzen von Schienen und Manipulator, Pumpenbedienung und periodischer Begutachtung der Abtragsflächen.

Ob es künftig gelingen wird, die Methode mittels Vollautomatik, Fernsteuerung und Video-Überwachung noch weiter zu verfeinern, werden künftige Einsätze zeigen müssen. Erst dann wird man auch von einem eigentlichen Roboter anstelle eines Manipulators sprechen können.

Jürg Kägi, Zürich

Spritzmörtelarbeiten

Entwicklung des «Roboters»

In erster Linie haben wir uns mit der Entwicklung des Manipulators befasst. Der «Roboter» besteht im wesentlichen aus zwei Teilen: aus dem Fahrzeug und dem Manipulator, der auf dem Fahrzeug montiert ist. Nachdem bereits für das Wasserhöchstdruckstrahlen ein «Roboter» vorhanden war, wollte man das Basisgerät weiterverwenden und nur den Manipulator auf das Fahrzeug aufbauen. Erste Versuche in dieser Richtung zeigten jedoch schnell, dass die Spritzmörtelarbeiten ein völlig anderes Konzept erfordern. Andererseits bewiesen die Versuche eindeutig die Machbarkeit.

Das Basisfahrzeug

Man war sich einig, dass nur ein schienengebundenes Basisfahrzeug in Frage kommt. Die Möglichkeit eines «Robo-

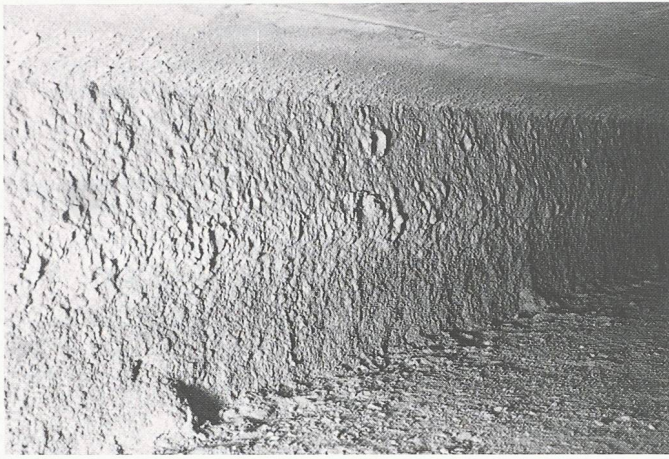


Bild 4. Roboter für den Spritzmörtelauftrag (bei Werksversuchen). Foto Schmidt + Partner

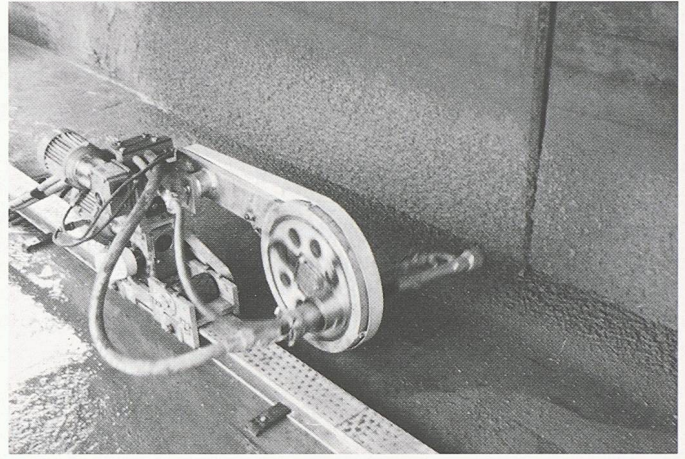


Bild 5. Ergebnis Spritzmörtelauftrag. Foto Schmidt + Partner

ters» auf Raupen wurde vor allem aus zeitlichen und finanziellen Gründen verworfen. Die Überwachung eines solchen Fahrzeuges hätte den Einsatz von Fernsehkameras bedingt, zumal für die Spritzmörtelarbeiten absolute Spurtreue unbedingt notwendig ist. Der Düsenabstand zur Auftragsfläche muss konstant sein, damit eine einwandfreie Qualität des Spritzmörtels gewährleistet ist. Die Entscheidung fiel auf ein elektrogetriebenes Einschienenfahrzeug auf einem I-Aluprofil mit breiten Flanschen. Die wesentlichen Vorteile sind eine bessere Stabilität des Gerätes und eine höhere Haftreibung für die Vorwärtsbewegung.

Der Manipulator

Für die Entwicklung des Manipulators existierten von Beginn an relativ klare Vorstellungen. Durch die niedere Bauhöhe der Hohlkasten stellten sich allerdings spezielle Probleme. Die rotierende Spritzweise erforderte für die ganze Wandhöhe den Auftrag in 2 Durchgängen. Der Manipulator musste also in der Höhe schnell und einfach zu verstellen sein, um das Spritzen in zwei Etappen nass in nass zu ermöglichen. Die Konstruktion des Manipulators ist so ausgerichtet, dass der Düsenabstand genau auf die jeweilige Breite des Hohlkastens abgestimmt werden kann. Die Längsbewegungen des Manipulators lassen sich von der Bedienungseinheit ausserhalb des Hohlkastens stufenlos regulieren, damit ein einheitliches Spritzbild erreicht werden kann (Bild 4).

Der Spritzmörtel

Zu Beginn der Entwicklung des «Roboters» wurde entschieden, die Arbeiten im Nassspritzverfahren auszuführen, weil die beim Trockenspritzen erforderliche Überwachung der Mörtelkonsistenz im Hohlkasten praktisch

nicht möglich ist. Zusätzlich sprachen die geringeren Staubemissionen für das Nassspritzen. Wider Erwarten stellten sich vor allem beim Fördern des Mörtels erhebliche Schwierigkeiten ein infolge der relativ langen Förderleitungen von bis zu 50 m. Die Spritzarbeiten mit einem «Roboter» verlangen einen absolut regemässigen Materialfluss, der nicht unterbrochen werden darf. Verstopfte Schläuche führen zu längeren Unterbrüchen und damit zu Problemen bei der richtigen Neupositionierung des «Roboters» und sauberem Ansetzen des weiteren Auftrages. Nach umfangreichen Materialtests ist es gelungen, einen Mörtel herzustellen, der sowohl die Qualitätsanforderungen erfüllt als sich auch über eine Leitungslänge von 50 m pumpen lässt.

Schlussbemerkungen

Die Vorgaben der Bauherrschaft und des projektierenden Ingenieurs konnten erfüllt werden. Der Einsatz eines «Roboters» hat sich unter den vorliegenden Umständen bewährt. Allerdings waren die zeitlichen und finanziellen Aufwendungen für die Entwicklung eines «Roboters» zu Beginn unterschätzt worden. Die Meinung, dass ein «Roboter» für einen Rechteckquerschnitt einfacher zu bauen sei als für einen runden Querschnitt, ist ein Trugschluss. Insbesondere dürfte es schwierig sein, ein selbstfahrendes Gerät, das ohne Schienen auskommt, zu konstruieren.

Im Gegensatz zu einem Rohr, in dem das Gerät in der Sohle fährt, braucht der «Roboter» in einem rechteckigen Querschnitt eine Führung. Weitere Probleme treten durch die Verschmutzung des Bodens mit Rückprallmaterial auf. Die ausgeführte Arbeit beweist, dass es möglich ist, solche und ähnliche Querschnitte mit einem «Roboter» zu sanieren. Allerdings muss im Minimum so-

viel Platz vorhanden sein, dass die Schienen montiert werden können. Die unterschiedlichen Abmessungen solcher Bauteile werden immer wieder Anpassungen der Geräte und Einrichtungen erfordern.

Der erfolgreiche Abschluss der Arbeiten hat eindeutig bewiesen, dass es richtig ist, solche Arbeiten mit Maschinen auszuführen. Der Einsatz von Menschen unter solch misslichen Bedingungen sollte, wenn immer möglich, vermieden werden.

Daniel Merz, Hochfelden

Beurteilung aus der Sicht des Bauherrn und des Projektverfassers

Zeitraumen

Die Entwicklung der Geräte und die erforderlichen Vorversuche nahmen viel Zeit in Anspruch, welche glücklicherweise infolge umfangreicher weiterer Instandsetzungsmassnahmen zur Verfügung stand. Das taktweise Arbeiten (Wasserhöchststrahlens/Spritzmörtel-Auftrag) konnte trotz der grossen Anzahl der Brückenkästen infolge stark unterschiedlichem Zeitbedarf nicht realisiert werden.

Ergebnis und Qualität

Die Oberfläche wurde spritzrauh belassen (Bild 5). Beim Spritzen entstand wider Erwarten viel Rückprall, so dass dieser aus den Brückenkästen entfernt werden musste.

Umfangreiche Materialprüfungen zeigten, dass

- eine gute Haftzugfestigkeit auf dem Untergrund erreicht wurde mit im Mittel $2,3 \text{ N/mm}^2$ bei geforderten $1,5 \text{ N/mm}^2$;
- eine mittlere bis schlechte Frostbeständigkeit infolge hohen W/Z-Fak-

tors (Nassspritzverfahren) vorliegt, welche im Kasteninnern aber genügt (geringe Feuchtigkeit).

Kosten

Bedingt durch die schwierigen Verhältnisse und einzurechnenden Entwicklungskosten ergab sich ein Quadratmeterpreis für die Instandsetzung der Kastenwände von ca. Fr. 850.-. Diese Kosten sind bei grossflächigen umfangrei-

chen Schäden zu vertreten. Kleinere Schäden sollten nach wie vor manuell instandgesetzt werden.

Lukas Abt, René Czechowski, Basel

Adressen der Verfasser: Kapitel: Ausgangslage, Beurteilung: *L. Abt* und *R. Czechowski* c/o Schmidt + Partner, Bauingenieure AG, Basel/Bottmingen; Kapitel: Wasserhöchst- druckstrahlen: *J. Kägi*, c/o Locher & Cie. AG, Zürich; Kapitel: Spritzmörtelauftrag: *D. Merz*, c/o Ing. Greuter AG, Hochfelden.

Liste der Beteiligten

Bauherr und Oberbauleitung: Tiefbauamt BL, Abt. Ausbau und Unterhalt

Gesamtbauleitung: Aegerter & Bosshardt AG

Projektverfasser und örtliche Bauleitung: Schmidt + Partner, Bauingenieure AG

Bauunternehmung: Spaini Bau AG

Unterakkordant: Locher & Cie. AG, Ing. Greuter AG

Neuartiges Ventil

Luftdrucksteuerung in einem EMPA-Prüfstand für statische und dynamische Luftdruckbelastungen

Der Prüfstand wurde für erweiterte Anforderungen umgebaut und ein in der EMPA entwickeltes Steuerventil eingebaut, welches an mechanisch beweglichen Teilen nur ein Schwenkrohr, einen Zahnriemen und einen Schrittmotor aufweist. Die Steuerung des Ventils erfolgt elektronisch mit einem Computer. Durch diese automatische Steuerung von Luftstrom und Luftdruck in einem weiten Bereich sind nun auch dynamische Prüfungen möglich.

Mit dem Prüfstand lassen sich Fenster und andere Prüfobjekte, z.B. Fassadenelemente, bis 4.9 x 3.5 m Grösse unter verschiedenen Druck- und Sogbedin-

VON RENÉ LAUBE,
DÜBENDORF

gungen prüfen, wobei das Prüfobjekt auch beregnet werden kann, so dass beispielsweise folgende Aspekte geprüft werden können:

- Luftdurchlässigkeit
- Schlagregensicherheit
- Deformationen
- Drucksicherheit.

Das Prüfobjekt wird an einem Prüfkasten mit Luft einseitig unter Druck oder Sog gesetzt, um beispielsweise Winddrücke, Windböen und Winddrehungen an Häusern zu simulieren.

Durch einen Umbau wurde der Druckbereich des Prüfstandes auf -3000 Pa bis +3000 Pa - in den Sogbereich - erweitert sowie das Pulsieren als dynamische Beanspruchung des Prüfobjektes zwischen zwei beliebigen Drücken mit digital einstellbaren Druckflankenzeiten möglich. Zusätzlich wurde die digitale Drucksollwerteingabe, die selbsttätige Regelung des Druckes bei Druckstufen

und der beiden Drücke beim Pulsieren, z.B. bei ändernder Luftdurchlässigkeit des Prüfobjektes während eines Versuchs, die integrierte Datenerfassung des Druckes und bei Bedarf parallel dazu des Luftstromes (bis 500 m³/h bidirektional, d.h. für Druck und Sog) eingeführt.

Das nachfolgend beschriebene Steuerventil für den Druck wurde durch die EMPA von Grund auf konzipiert und in die neue Steuerung des Prüfstandes integriert.

Luftversorgung, Steuerventil

Ein Ventilator mit einer einstellbaren, konstanten Drehzahl erzeugt den Luftdruck. Durch die Einstellung werden der maximal mögliche Druck und Sog während einer Prüfung begrenzt.

Das Steuerventil (Bild 1) weist auf der oberen Seite einen Druck- und einen Sogstutzen auf, die beide über Luftleitungen am Ventilator angeschlossen sind. Alle vom Ventilator transportierte Luft kommt und geht zum Steuerventil. Auf der unteren Seite ist der Prüfkasten über eine Luftstrommessstrecke angeschlossen, wobei der Luftstrom je nach Druck oder Sog in der einen oder anderen Richtung fliesst.

Dazwischen schwenkt ein Rohr in einem Bereich von $\pm 90^\circ$ mehr oder weniger in den Bereich des Druckstutzens oder des Sogstutzens ein. Dadurch wird eine feine Regulierung des Druckes zwischen Null und dem eingestellten max. Druck vom Ventilator sowie auch die Umschaltung des Prüfkastens von Druck auf Sog ermöglicht. Ein Schrittmotor positioniert über einen Zahnriemen das Schwenkrohr an der berechneten Stelle mit einer Auflösung von mehr als 4000 Schritten, wobei der Computer die Sollwerte über eine serielle Schnittstelle an die Schrittmotorsteuerung sendet. Die Schwenkgeschwindigkeit und

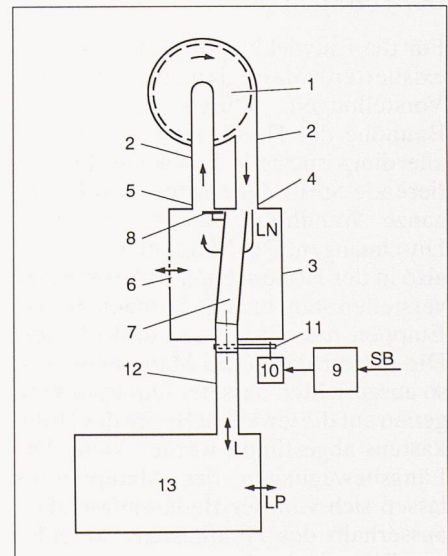


Bild 1. Luftversorgung, Steuerventil. Legende: 1 - Ventilator, 2 - Luftleitungen, 3 - Steuerventil mit: 4 - Druckstutzen, 5 - Sogstutzen, 6 - Luftein-/austritt, 7 - Schwenkrohr, 8 - Ventilatscheibe Sogseite, 9 - Schrittmotorsteuerung, 10 - Schrittmotor, 11 - Zahnriemen; 12 - Luftstrommessstrecke, 13 - Prüfkasten, L - Luftstrom, LN - Nebenluftstrom, LP - Luftdurchlässigkeit des Prüfobjektes, SB - Digitale Steuerbefehle