

Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 97 (1979)
Heft: 38

Artikel: Bau der Schwarzwasserbrücke
Autor: Bucher, Max / Fuchs, Armin / Graber, Urs
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-85531>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 29.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Bau der Schwarzwasserbrücke

Von Max Bucher, Armin Fuchs und Urs Graber, Bern

Mit einem eleganten Bogen von 114 m Spannweite wurde für die Bahnlinie Bern-Schwarzenburg, die von der BLS (Bern-Lötschberg-Simplon-Bahn) betrieben wird, eine 180 m lange Brücke über den 65 m tiefen Schwarzwassergraben geschlagen. Angeregt durch die positiven Erfahrungen im Freivorbau von Balkenbrücken und ermutigt durch das gute Gelingen eines ersten schweizerischen Beispiels an der Simplonstrasse wurde dieser Bogen im Freivorbau erstellt. Das Gewicht der frei auskragenden Bogenhälften wurde durch Zugstangen in die Talhänge zurückverankert. Die Erfahrungen bei diesem interessanten Bauverfahren sind Gegenstand der folgenden Ausführungen.

Eine bemerkenswerte Errungenschaft in der neueren Entwicklung des Massivbrückenbaus ist der freie Vorbau von Betonbalkenbrücken über tiefe Täler oder entlang unzugänglicher Hänge. Von den Pfeilern ausgehend werden die Tragwerke nach beiden Seiten gleichzeitig forschreitend vorgebaut, wobei die für den Endzustand nötige Spannarmierung des Balkens vorerst zur Aufhängung der einzelnen Vorbauetappen benutzt wird. Der *Wegfall von Lehrgerüsten*, die beim Brückenbau normalerweise einen grösseren Kostenanteil verursachen, macht dieses Bauverfahren interessant. Gerade wegen der hohen Gerüstkosten ist die elegante Bogenbrücke in Kostenvergleichen bisher oft ausgeschieden. Es ist deshalb naheliegend zu versuchen, auch *Betonbogen ohne Lehrgerüste* zu bauen.

Beim Neubau der Schwarzwasserbrücke der Bahnlinie Bern-Schwarzenburg führte die Anwendung des Freivorbaus dazu, dass die Bogenbrücke als *preisgünstigste* aller untersuchten Lösungen zur Ausführung kam (Bild 1).

Die Brücke weist eine Gesamtlänge von 180 m auf und überquert den Talgrund in 65 m Höhe. Die Spannweite des Stahlbetonbogens beträgt 114 m, seine Pfeilhöhe 25 m. Sämtliche Bauteile – Fundationen, Stützen, Überbau und Bogen – sind mit Ausnahme einer kurzen Randstütze *biegesteif* miteinander verbunden. Die Längenänderungen des Brückenüberbaus werden durch verschiebbliche Lager auf den Widerlagern aufgenommen. Der Brückenüberbau ist ein *vorgespannter durchlaufender Plattenbalken mit 2,10 m Bauhöhe*. Der Querschnitt des Bogen besteht aus einem zweizelligen Hohlkasten mit konstanter Breite und variabler Stärke von 1,60 m im Scheitel und 2,20 m an der Einspannstelle (Schema 1).

Zur statischen Berechnung des Bogenfreivorbaus

Der Betonbogen hat im Endzustand im wesentlichen nur Druckbeanspruchungen aufzunehmen und kann entsprechend schwach armiert werden. Damit

ständen so klein zu halten, dass die Armierung des Endzustandes genügte.

Statisches System und Schnittkräfte

Die Tragelemente im Bauzustand – Bogen, Abspankkabel, Versteifungsträger und Stützen – bilden ein statisch hochgradig unbestimmtes System (Schema 2). Dabei sind der Bogen und die Stützen wie im Endzustand voll in die Fundamente eingespannt, während mit jeder weiteren Bogenetappe und der dazugehörigen Abspanspannung jeweils ein neues statisches System entsteht.

Durch Gleichgewichtsbetrachtungen am statisch bestimmten Kragarm konnten die Abspanspannkräfte in erster Näherung als äussere Lasten ermittelt und somit die Abspanspannungen vordimensioniert werden. Danach wurden die Schnittkräfte des Gebrauchszustandes für jede Bauetappe mit dem Programm *Stress linear* elastisch ermittelt. Die Be-

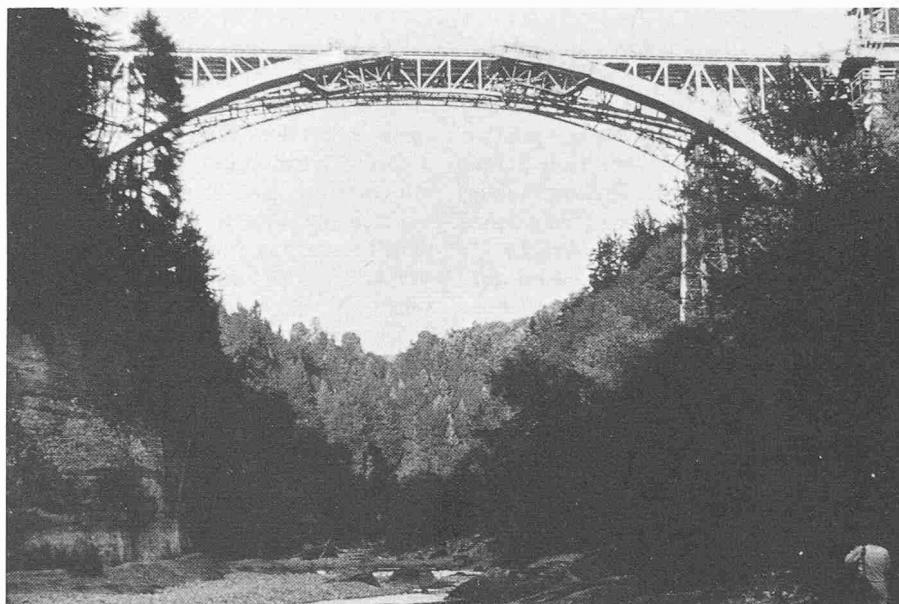
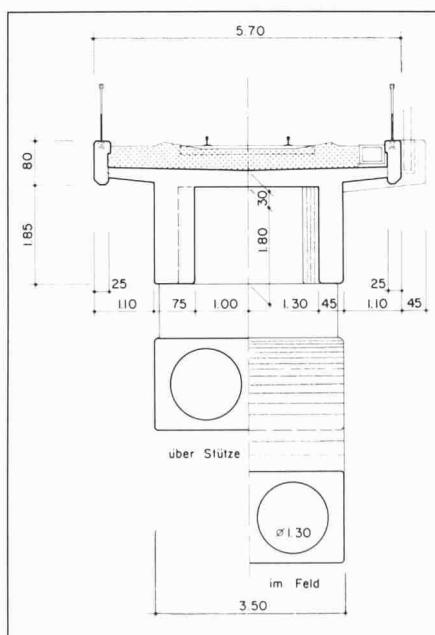


Bild 1. Freivorbau vor dem Bogenabschluss



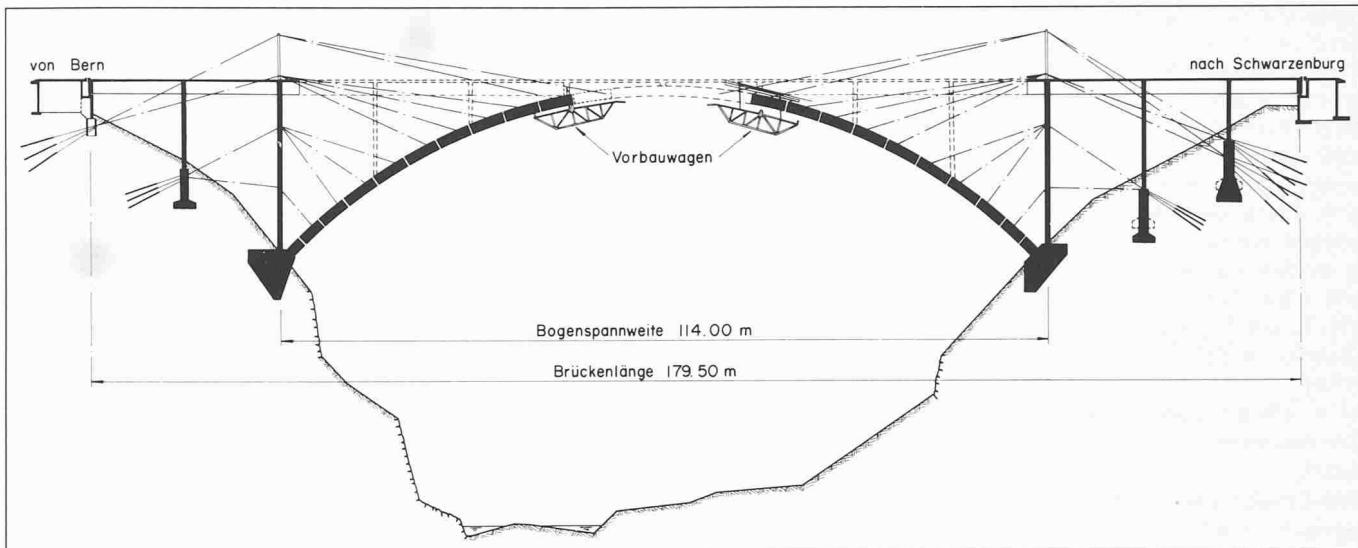
Schema 1. Querschnitt

rechnung der Schnittkräfte im Bruchzustand erfolgte nichtlinear unter Berücksichtigung des Einflusses 2. Ordnung. Folgende Lastfälle wurden berücksichtigt:

- Eigengewicht, Nutzlast,
- Temperatur, Wind,
- 10 t Einzellast (Absturz Betonkübel),
- Ausfall eines Abspankkabels.

Der Ausfall eines Abspankkabels wurde mit einem dynamischen Stoßfaktor von 2,0 erfasst.

Damit im Bauzustand keine grösseren Biegebeanspruchungen des Bogen als im Endzustand auftraten, mussten die Abspanspannkräfte stufenweise mit der Belastung reguliert werden. Die Rechnung zeigte, dass je Vorbauetappe zwei Spannstufen ausreichten (Schema 3): Eine *Hauptspannstufe* vor dem Betonieren, in der sämtliche Kabel umgespannt wurden und eine *Nebenspannstufe* nach dem Betonieren und Enthärten, in der



Schema 2. Bogenfreivorbau

lediglich die neu eingezogenen Kabel angespannt wurden.

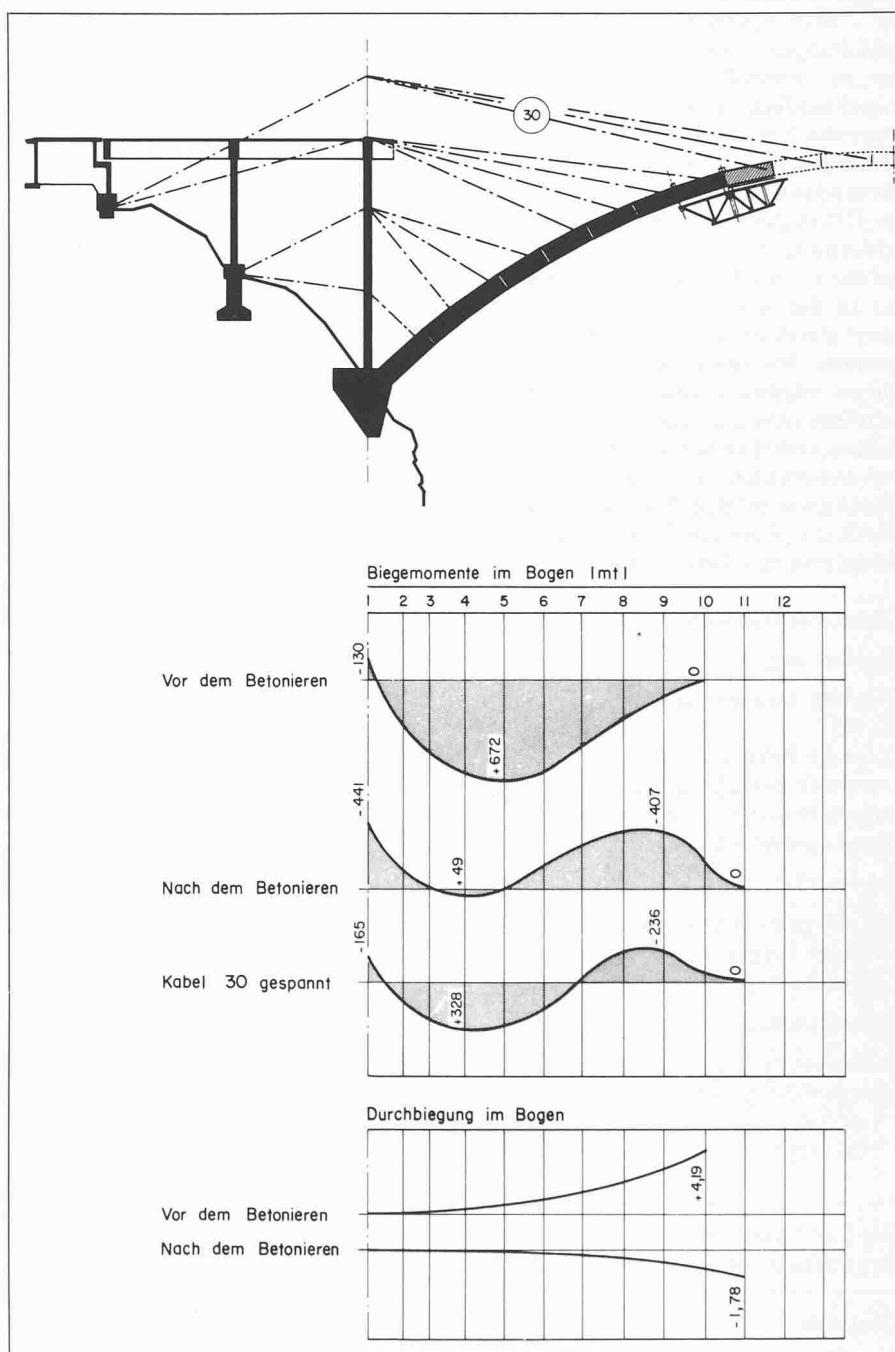
Die vordersten Kabel wurden immer am stärksten beansprucht. Mit wachsender Bogenlänge nahmen die Kräfte der zurückliegenden Kabel stetig ab, was sich als Folge der stark verschiedenen Steifigkeiten zwischen Zugstangen und Betonbogen erklären lässt. Diese Eigenart wurde im Hinblick auf einen möglichst geringen Spannstahlverbrauch dazu benutzt, die nicht mehr gebrauchten Kabel von den hinteren Etappen in die vorderen Etappen wieder einzubauen. Interessant in diesem Zusammenhang ist die *Parallele zwischen Bau- und Endzustand*: Die konzentrierte Kraft in der vordersten Kabelgruppe entspricht dem Horizontalorschub des Bogens im Endzustand.

Der Temperaturunterschied zwischen Bogen und Abspaltung wurde mit $\pm 20^\circ\text{C}$ berücksichtigt. Die aus dieser Temperaturbelastung hervorgerufene Formänderung des Bogens (max. 2,5 cm Vertikalverschiebung in der Etappe 12 vor dem Scheitelschluss) erzeugte Beanspruchungen, die das Tragverhalten nur unwesentlich beeinflussten. Durchbiegungsmessungen am Bauwerk bei extremen Temperaturbedingungen bestätigten die Berechnungsannahme, blieben die maximalen Durchbiegungen doch kleiner als 2 cm.

Die Stabilität des Bogens im Freivorbau

Der Bogen erreicht die maximale Schlankheit nach dem Betonieren der Etappe 12 mit den Werten $\lambda = 85$ senkrecht zur Bogenebene und $\lambda = 45$ in der Bogenebene.

Stabilitätsgefährdete Bauteile mit der Schlankheit $\lambda \geq 30$ müssen unter Berücksichtigung des Einflusses 2. Ordnung bemessen werden. Im vorliegenden Falle wurden die entsprechenden Nachweise nach Richtlinie 35 der Norm SIA 162 geführt. Die Berechnung



Schema 3. Statisches System, Beanspruchung und Verformung

senkrecht zur Bogenebene ist ein Standardfall (unten eingespannter, oben freier Stab). Der Nachweis in der Bogenebene wurde in Anlehnung an die DIN-Richtlinien für die Bemessung und Ausführung massiver Brücken an einem unten eingespannten, geraden und durch die Abspaltung elastisch gestützten Ersatzstab geführt.

In beiden Fällen war die Bruchsicherheit ohne Zusatzarmierung gewährleistet. In der Bogenebene wurden im ungünstigsten Schnitt folgende Werte erreicht:

$$M' = 1450 \text{ mt} \leq 2045 \text{ mt} = M,$$

Bruchmoment \leq Querschnittswiderstand.

Das Zusatzmoment infolge 2. Ordnung betrug hievon 250 mt.

Der Fugenschluss

Während der Abbinde- und Erhärtungszeit des Betons in der letzten Etappe - dem Scheitelschluss - sind Verschiebungen zwischen den Bogenhälften zu vermeiden. Hierzu wurde eine zug-druckfeste Verbindung der beiden Bogenhälften, bestehend aus einem Druckglied aus Stahl und gekuppelten Gewindestäben eingebaut. Die Kräfte im Druckglied infolge Temperatureinwirkung können beachtliche Werte annehmen. Eine Erhöhung der Temperatur in der Abspaltung um 15°C erzeugt gleich grosse Druckkräfte wie die gesamte Betonlast der Schlussetappe. Dieser ungünstig wirkende Temperaturreinfluss liess sich durch Ansetzen der Betonierarbeiten auf den Spätnachmittag ausschalten: Der Kraftanstieg im Druckglied infolge Betonierlast wurde durch die sinkende Temperatur in der Abspaltung teilweise ausgeglichen.

Technische Daten des Freivorbaues

Abspaltung:

Dywidag Gewindestahl $\varnothing 32/36$ mm St 85/105

Zulässige Beanspruchung

- unter Gebrauchsbelastung $\text{zul } \sigma = 0,55 \beta_z$
- unter Bruchlast Streckengrenze σ_s

Spannstahlverbrauch 25,5 t

Schnittkräfte:

max. Biegemoment am Kämpfer

- infolge Eigengewicht -16 200 mt
- infolge Abspaltung +15 920 mt

Deformationen:

Verschiebung der Etappe 11, infolge Betonlast der Etappe 12

- vertikal 6,0 cm
- horizontal 1,8 cm

horizontal geschichteten Molassefels der Talhänge erfolgte mit Felsankern (Schema 2). Es wurden 38 Anker mit folgenden Daten versetzt:

Dywidag Gewindestahl $\varnothing 36$ St 85/105	
Gebrauchskraft	$V_G = 50 \text{ t}$
Prüfkraft $0,7 \beta_z$	$V_p = 75 \text{ t}$
Verankerungslänge	$L_v = 5 \text{ m}$
Freie Ankerlänge	$L_f = 5-10 \text{ m}$
Ankerklasse für prov. Anker:	3 (S=1.8)
max. zu verankernde Last pro Fundament	630 t

Zur Berechnung der Gleitsicherheit wurde ein die Ankerzone umfassender Verankerungskörper mit folgenden Bodenkennwerten in der Gleitfuge gebildet:

$$\gamma_l = 2,2 \text{ t/m}^3$$

$$\phi = 20^\circ \text{ (horizontale Siltschichten)}$$

$$C = 2 \text{ t/m}^2 \text{ (Kohäsion)}$$

Sicherheit gegen Gleiten 1.4

Das Spannen der Anker erfolgte in drei Stufen, entsprechend dem Baufortschritt des Bogens.

Verschiebbares Schalgerüst

Der Bogen wurde in 2×12 Etappen von 5,40 m Länge auf einem verschiebbaren Schalgerüst betoniert. Als max. Betonlast ergab sich ein Gewicht von ca. 65 t. Die Ermittlung der auf das Gerüst wirkenden Kräfte bereitete einige Probleme. Die Schalungsdrücke bei geneigten Schalungen hängen von verschiedenen Faktoren ab: Konterschalung, Reibungswert Beton/Schalung, Konsistenz des Betons etc. Sie wurden in Anlehnung an die Publikation von M. Specht ermittelt.

Technische Daten des Gerüstes:

Länge 12 m

Höhe 2,5 m

Binderabstand 2,6 m

Stahlgewicht (St. 37, St. 52) 8,0 t

Totalgewicht mit Schalung und Gerüsten 11 t

Durchbiegung des Gerüstes beim Betonieren max. 2 cm



Bild 2. Grundetappe mit Vorbaugerüst

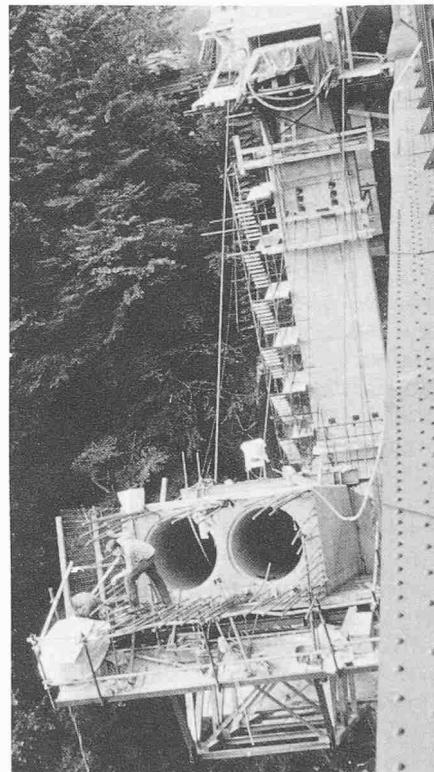


Bild 3. Bogen betoniert, Abspaltung

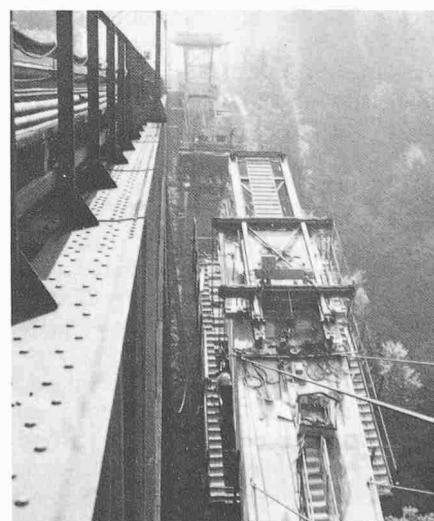
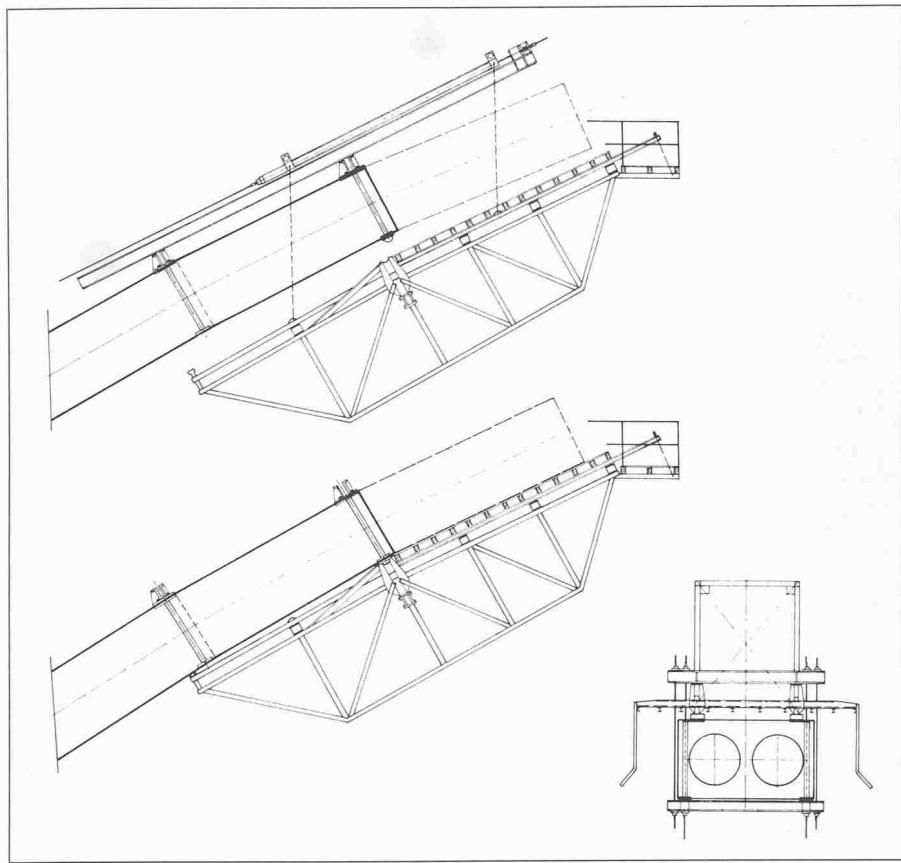


Bild 4. Verschiebelafette

Die Elemente des Bogenfreivorbaues

Felsanker

Die Übertragung der Kräfte aus der Abspaltung des Freivorbaues in den



Schema 4. Ablauf des Verschiebevorganges

Oben: Verschieben des Vorbauwagens

Unten links: Vorbaugerüst in Betonierstellung

Unten rechts: Querschnitt durch Vorbaugerüst in Betonierstellung

Kabel	23	24	26	27	28	30	25	29	33
vorhandene Kräfte aus Etappe 9	31,4	58,2	91,6	127,1	40,0		46,1	311,3	
	-12,0	-20,6	-23,2	-27,5	86,0		-0,9	11,2	
	19,4	37,6	68,4	99,6	126,0		45,2	322,5	
	-2,8	-4,8	-5,0	20,0	-5,8		-0,2	3,2	
	16,6	32,8	63,4	119,6	120,2		45,0	325,7	
	15,0	-2,1	-1,7	-1,7	-1,4		3,6	0	
	31,6	30,7	61,7	117,9	118,8		48,6	325,7	
	2,1	-14,0	2,8	2,8	2,7		0	-3,4	
	33,7	16,7	64,5	120,7	121,5		48,6	322,3	
	1,5	2,3	-10,0	2,5	2,4		0	-1,9	
	35,2	19,0	54,5	123,2	123,9		48,6	320,4	
	0	1,8	1,2	1,0	0,8		-3,4	7,0	
	35,2	20,8	55,7	124,2	124,7		45,2	327,4	
	-1,9	0	0	0,1	0,1		-8,0	3,2	
	33,3	20,8	55,7	124,3	124,8		37,2	330,6	
	33,0	21,5	55,5	123,5	124,0		36,0	330,0	
	6,8	8,4	14,3	21,5	25,9		12,4	66,3	
	10 / II	40,0	30,0	70,0	145,0	150,0		43,5	401,0
Einbau 30 + 33		-4,4	-5,2	-7,6	-10,4	12,4	40,0	-6,8	34,0
	10 / III	35,5	25,0	62,5	134,5	138,0	40,0	38,5	365,5
									43,5
Regulieren der Abspänkräfte mit hydraulischen Pressen									
I	Etappe 9 betoniert, Vorbauwagen in 9								
II	Etappe 10 betoniert, Vorbauwagen in 10								
III	Kabel 30 auf 40 t gespannt								

Schema 5. Spannprogramm (Etappe 10)

kran eine Vorschublafette mit hydraulisch verschiebbares Schlitten auf die zuletzt betonierte Bogenetappe aufgesetzt (Bild 4).

Der Ablauf des Verschiebevorganges ist aus Schema 4 ersichtlich:

A: Bogen betoniert bis Etappe 7, Gerüst aufgehängt an Verankerungsstangen (Bild 3);

B: Ausschalen, Verschiebeschlitten aufsetzen, Gerüst anhängen, Verankerungsstangen ausbauen;

C: Gerüst absenken und mit hydraulischen Pressen vorschieben;

D: Gerüst aufziehen;

E: Ankerstangen einbauen, grobrichten, Verschiebeschlitten entfernen.

F: Bogenabspannung 7 einbauen, Gerüst feinrichten und Ankerstangen spannen, schalen und armieren, Abspannkabel umspannen, betonieren Etappe 8.

Betonfestigkeit beim Vorschieben min. 250 kg/cm²

Die Bemessung der Vorschublafette erfolgte unter der Bedingung, dass beim Bruch einer Gerüst-Aufhängung die restlichen Tragelemente die zusätzliche Last ohne Versagen aufnehmen könnten.

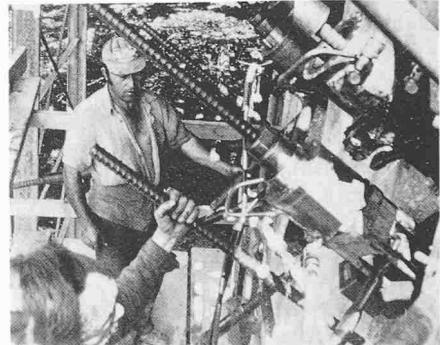


Bild 5. Umspannvorgang

Bogenabspannung

Aus dem Spannprogramm der Etappe 10 geht hervor, dass jede Kraftänderung in einer Kabelgruppe alle andern Kabelgruppen beeinflusst (Schema 5). Die günstigste Spannreihenfolge musste deshalb aus den Kraft-Einflusslinien der einzelnen Kabelgruppen ermittelt werden.

Das Umspannen einer Bogenhälfte für eine neue Betonetappe beansprucht eine Spannequipe von drei Mann einen halben Tag (Bild 5). Bei allen Spannvorgängen wurden gemessen: Die Kraft auf der hydraulischen Presse, die Kabelverlängerung, der Messpunkt auf dem Bogen nach Länge und Höhe sowie die Verschiebungen in den Umlenkpunkten mit Theodolit oder Senklot.

Bei jeder Kabelgruppe war eine Druckmessdose eingebaut, die ein kontinuierliches Ablesen der Kräfte in allen Kabeln ermöglichte. Nach anfänglichen Korrekturen der Berechnungsannahmen (E-Modul = 500 000 kg/cm², statische Einspannverhältnisse des Systems) stellte sich eine sehr gute Übereinstimmung der berechneten und der auf der Baustelle gemessenen Werte ein. Als erschwerend für die Spannarbeiten wirkte sich die Verwendung verschiedener Stabdurchmesser in der gleichen Kabelgruppe aus.

Mittels Dehnungsmessungen im Kämpferschnitt des Bogens wurden die berechneten Spannungen kontrolliert.

Der Ein- und Ausbau der Dywidag-Stangen erfolgte mit dem Kabelkran. Zum Einfädeln der Stangen von oben war auf genügende Hubhöhe des Kranes zu achten, da diese an mehreren Punkten aufgehängt werden mussten. Spannstähle dürfen weder geschweisst werden, noch mit Schweißperlen in Berührung kommen, da sonst Sprödbrüche entstehen können. Im Bereich der Arbeitsstelle wurden die Stangen deshalb mit Plastikrohren geschützt. Befürchtungen, die Abspannstangen könnten durch Winddruck zu kritischen Schwingungen angefacht werden, erwiesen sich als unberechtigt.

Die Umlenkung der Kabelkräfte erfolgte im Pfeiler über dem Kämpferfundament (Bild 6) sowie über eine provisorische Betonschwelle auf der Brückenplatte durch Überlappung.

Für die Abspannung der drei obersten Bogenetappen wurde ein provisorischer *Pylon* errichtet: Max. Vertikallast 320 t. Höhe 7,0 m über der Fahrbahn, gelenkige Lagerung am Fuß; max. Auslenkung am Kopf $\pm 3,0$ cm. Konstruktion: 2 Stahlprofile HEB 400 mit obenliegender Betonschwelle.

Absteckungsarbeiten

Der Bogen ist entsprechend der Länge der Betonieretappen polygonal geformt (Bild 7). Je Bogenetappe wurde ein Messbolzen gesetzt. Dieser Bolzen wurde nach jeder Betonieretappe nach Länge und Höhe eingemessen. Darauf erfolgt die Ermittlung der Absteckungselemente Δh und Δs für die neue Etappe. Nach jeweils drei Etappen wurde eine Kontrollmessung über den ganzen

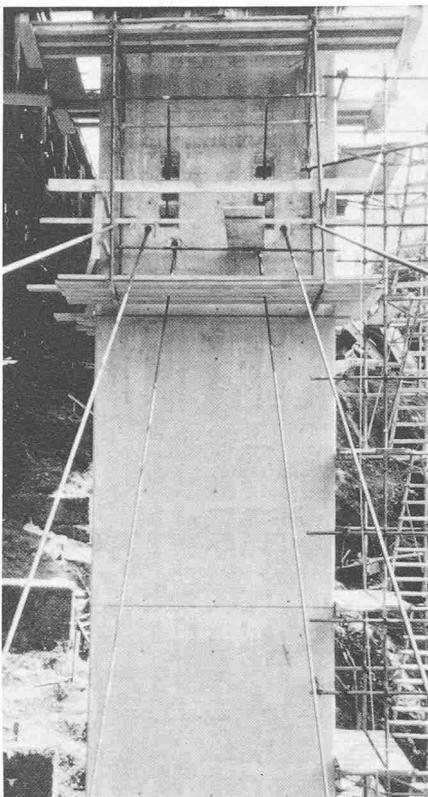


Bild 6. Umlenkung der Kabelkräfte

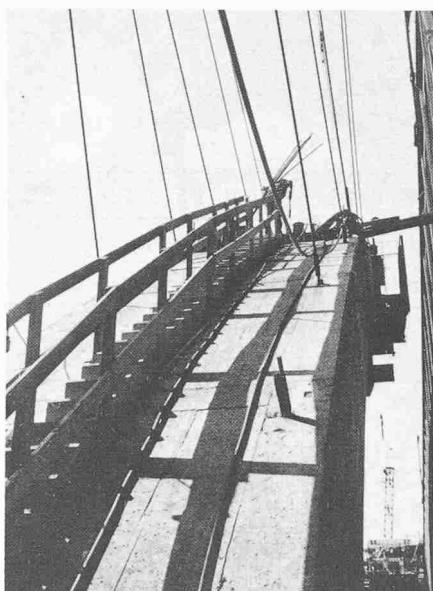


Bild 7. Im freien Vorbau himmelwärts ...

Bogen durchgeführt und die Verschiebungen des Kämpferfundamentes gemessen. Für die Nivellemente musste auf die gesamte Höhe des Pfeilers auf

dem Bogenkämpfer ein festes Gerüst erstellt werden.

Vorteile des Bogenfreivorbau

Die Kosten für die Baumeisterarbeiten der Schwarzwasserbrücke betrugen 2,3 Mio Franken. Davon wurden für den Freivorbau des Bogens, d.h. für Vorbaugerüst, Abspannungen, Felsanker etc. nur Fr. 400 000.– oder 17,4 Prozent der Bausumme aufgewendet. Ein Bogenlehrgerüst hätte Fr. 800 000.– oder 34,8 Prozent der Gesamtbaukosten gekostet.

Nebst der Einsparung an Lehrgerüstkosten konnte beim Freivorbau jeglicher Zugang im Talgrund für Montagearbeiten und provisorische Abstützungen vermieden werden. Dies kam neben den beträchtlichen finanziellen Einsparungen auch den Erfordernissen des *Landschaftsschutzes* im darunterliegenden Naturschutzgebiet sehr zustatten.

Die mehrmalige Wiederholung gleicher Bauvorgänge beim etappenweisen Vorbau des Bogens führte auch zu einem zügigen Fortschreiten des Bogenschlages. Nach einer Einarbeitungszeit konnte auf jeder Seite wöchentlich eine Etappe vorgebaut werden. Als weiterer Vorteil des Bogenfreivorbau kann die *hohe erreichbare Präzision der Bogengeometrie* erwähnt werden, da *Fehler laufend korrigierbar* sind. Bei der Schwarzwasserbrücke beträgt die max. Abweichung von der theoret. Achse ± 2 cm.

Die Planung und Ausführung des Freivorbau eines Bogens erfordert einen grossen Arbeitsaufwand im technischen Bereich. Für die Schwarzwasserbrücke hat der Unternehmer 80 Pläne gezeichnet und mit dem Projektverfasser und der Oberbauleitung fanden 40 Bausitzungen statt. Die gute Vorbereitung wurde durch einen reibungslosen Bauablauf belohnt. Die neue Baumethode darf als sehr geeignet, technisch sauber, rationell und absolut sicher zur weiteren Verbreitung empfohlen werden.

Adresse der Verfasser: *M. Bucher, c/o Emch und Berger, Gartenstr. 1, Bern, A. Fuchs, c/o Frutiger Söhne AG, Thun und U. Gruber, c/o BLS Bauabteilung, Genfergasse 11, Bern.*