
Konventioneller bergmännischer Tunnelbau

I. Der gebettete Spannbogen – ein modernes Tragsystem für den Tunnelbau

Wolfgang Pitscheider

Wird im Tunnelbau ein Gewölbe bewehrt, muss ein temporäres Tragsystem eingebaut werden. Dieses Tragsystem muss freitragend sein, um dem Schalwagen die Einfahrt unter die Bewehrung zu ermöglichen. Bisher war es gängige Praxis, Tragbögen oder Gitterträger zu verwenden. Dabei ließ die erzielte Betondeckung auf der Luftseite oftmals zu wünschen übrig und führte vielfach zu aufwendigen Sanierungen bzw. Haftungsproblemen für die ausführende Baufirmen. Seit 2018 steht ein innovatives, neues Tragsystem zur Verfügung – der gebettete Spannbogen. Dieses von der Firma GSR GmbH, ansässig in Deutschland, entwickelte und patentierte Tragsystem erzielt luftseitige Betondeckungen mit hoher Präzision. Dadurch werden aufwendige Sanierungen vermieden und die Haftungsrisiken für die ausführenden Baufirmen minimiert. Der Bauherr erhält im Gegenzug eine makellose Betondeckung. Seit 2018 wurden 1400 Blöcke an unterschiedlichen, namhaften Tunnelbauprojekten mit dem System GSR zur vollsten Zufriedenheit von Baufirmen und Bauherren gebaut. Dazu zählen u. a. das Baulos H33 am Brenner-Basis-Tunnel (BBT), 2 Tunnel aus dem Projekt S21 mit sehr hohen Bewehrungsgehältern, der Speicherstollen Obervellach in Österreich und das Baulos SBT3.1 am Semmering-Basis-Tunnel. Aktuell wurde am BBT damit begonnen, Gewölbe mit dem System GSR zu verlegen. An diesem weltweit bekannten Projekt mit einer angestrebten Lebensdauer von 200 Jahren wird das System GSR in den nächsten Jahren auf etwa 100 km Länge verbaut.

Der Fachartikel behandelt u. a. die fachliche Erläuterung des Systems GSR, mögliche Einsatzbereiche von klassisch bis full-round und die Unterschiede zwischen den bisherigen Tragsystemen und dem System GSR. Außerdem werden die

Montage und Anforderungen an die Baustelle beschrieben und die Interaktion zwischen Tragsystem und Abdichtung erläutert.

The Embedded Tension Arch – A Modern Support System for Tunnel Construction

When reinforcing a vault in tunnel construction, a temporary support system must be installed. This support system must be self-supporting to allow the formwork carriage to drive under the reinforcement. Until now, it has been common practice to use support arches or lattice girders. However, the achieved concrete cover on the air side was often inadequate, frequently leading to costly repairs or liability issues for the executing construction companies. Since 2018, an innovative new support system has been available—the embedded tension arch. This system, developed and patented by GSR GmbH, based in Germany, achieves air-side concrete covers with high precision. This avoids costly repairs and minimizes liability risks for the executing construction companies. In return, the client receives a flawless concrete cover, which greatly contributes to the durability of their structures. Since 2018, 1400 blocks have been constructed using the GSR system in various renowned tunnel construction projects. These include, among others, Lot H33 of the Brenner Base Tunnel (BBT), 2 tunnels from the S21 project with very high reinforcement densities, the Obervellach storage tunnel in Austria and Lot SBT3.1 of the Semmering Base Tunnel. All projects were completed to the fullest satisfaction of construction companies and clients. At the Brenner Base Tunnel (BBT) currently Vaults are being installed using the GSR system. At this world-renowned project, which aims for a service life of 200 years, the GSR system will be installed over approximately 100 km in the coming years.

This article deals with the technical explanation of the GSR system, possible areas of application from classic to full-round and the differences between the previous support systems and the GSR system. In addition, the installation and requirements for the construction site are described and the interaction between the load-bearing system and the waterproofing is explained.

1 Einleitung

Wird im Hochbau eine Decke bewehrt, so wird die Bewehrung auf die vorab gestellte Schalung abgelastet. Im Tunnelbau ist es umgekehrt. Wird ein Gewölbe bewehrt, so muss zuerst die Bewehrung verlegt werden, anschließend wird die Schalung eingefahren.



AUGUST REINERS

HEGEMANN • REINERS GRUPPE

IHR ZUVERLÄSSIGER PARTNER IM TUNNELBAU

INGENIEURBAU

TUNNELSANIERUNG

TUNNELERWEITERUNG

BERGMÄNNISCHER
TUNNELBAU



www.hegemann-reiners.de



Daher ist ein temporäres Tragsystem erforderlich, um die Bewehrung in Solllage zu halten. Dieses Tragsystem muss freitragend sein, um dem Schalwagen die Einfahrt zu ermöglichen. Die triviale Lösung würde darin bestehen, die Bewehrung mithilfe von Ankern an der Außenschale zu befestigen. Damit wäre aber ein Eingriff in das Schwindverhalten des Betons verbunden, der aus betontechnologischer Sicht und aufgrund von sich einstellenden Zwangsspannungen nicht zulässig ist. Zudem würde eine vorhandene Kunststoffdichtungsbahn (KDB) durch die Anker vielfach durchdrungen und damit ihre Funktion trotz aller Zusatzmaßnahmen infrage gestellt.

Bisher war es gängige Praxis, freitragende Bewehrungen mithilfe von Trag- bzw. Gitterbögen zu realisieren. Dabei ließ die erzielte Betondeckung auf der Luftseite nach eigenen Erfahrungen zu wünschen übrig und führte vielfach zu aufwendigen Sanierungen bzw. Haftungsproblemen für die ausführende Baufirma.

Seit 2018 steht ein innovatives, neues Tragsystem zur Verfügung – der GSR-Spannbogen. Das System ist weltweit patentiert und erzielt luftseitige Betondeckungen mit hoher Präzision. Im vorliegenden Bericht wird das System GSR sowohl technisch als auch wirtschaftlich erläutert.

2 Vergleich mit den bisherigen Systemen

2.1 Der Tragbogen

Der Tragbogen wurde 1986 entwickelt und im Tunnel Dietershan (DB-Neubaustrecke Hannover – Würzburg) erstmalig eingesetzt. Er besteht aus einer zur U-Form gebogenen Listenmatte. Ihre dauerhafte Krümmung erhalten Tragbögen, indem sie auf dem Tunnelprofil folgenden Schablonen befestigt und mit händisch angeschweißten Rückenstäben versehen werden.

Die Biegesteifigkeit von Tragbögen ist aufgrund der fehlenden Diagonalen eingeschränkt, da sie grundsätzlich nach dem Prinzip der Vierendeelträger konzipiert sind. Die dazu erforderliche Schubsteifigkeit der Knoten wird über die herstellungsbedingte Punktschweißung aber nicht vollständig erreicht, sodass von einem weichen System gesprochen



©HOCHTIEF (rechts) Mark Doerflinger (links)



TEAMLEISTUNG FÜR NEUE VERBINDUNGEN

Moderne Verkehrswege verbinden Menschen nachhaltiger – international, national, regional. HOCHTIEF sorgt seit mehr als 150 Jahren mit Planung und Bau anspruchsvoller Tunnelbauwerke für mehr Mobilität. Wir bieten innovative Lösungen in den Bereichen: maschineller und konventioneller Tunnelbau, Tunnel in offener Bauweise, Tröge und Tunnelsanierung.

infrastructure@hochtief.de

Wir bauen die Welt von morgen.



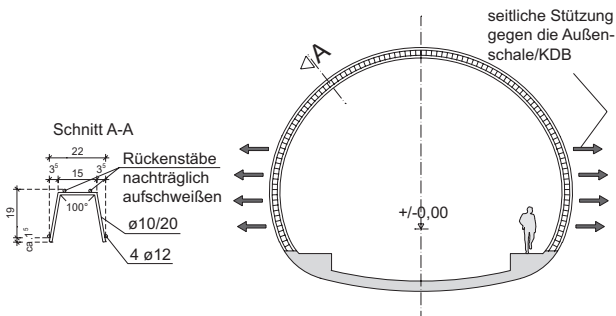


Bild 1. Querschnitt und Tragverhalten von Tragbögen

werden muss. Dementsprechend groß sind die Verformungen. Diese können im Firstbereich durchaus 20 cm und mehr betragen.

Aufgrund der fehlenden Biegesteifigkeit muss der Tragbogen von der Arbeitsfuge bis etwa 14 Uhr bzw. 22 Uhr gegen die Außenschale gestützt werden. Über die dabei auftretenden Stützkkräfte und damit verbundenen Belastungen der KDB liegen keinerlei Erkenntnisse vor.

Gemäß eigenen Erfahrungen ist der Tragbogen das gängigste Verfahren zur Herstellung freitragender Gewölbewehrungen. Bild 1 zeigt einen typischen Tragbogen-Querschnitt und das Tragverhalten, das auf seitlicher Stützung gegen die Außenschale/KDB beruht.

2.2 Der Gitterbogen

Der Gitterbogen wurde ursprünglich für den Vortrieb entwickelt. Er ist in den meisten Fällen eine maschinell hergestellte, räumliche Fachwerksstruktur, die eine sehr hohe Eigensteifigkeit aufweist. Bei robuster Bemessung treten praktisch keine Verformungen auf. Die Montage ist aufwendig, vor allem im Fußbereich, da hier die Ungenauigkeiten der Arbeitsfuge ausgeglichen werden müssen.

Die Tragwirkung des Gitterbogens beruht auf der Bogenwirkung mittels Abtrag von Druckkräften auf die Arbeitsfuge. Bild 2 zeigt einen



GSR Spannring GmbH
Zotzenheimer Straße 64a
D-55576 Sprendlingen
Tel.: +49 6701 9331-50
Fax: +49 6701 9331-21
zentrale@spannring-gmbh.eu
www.spannring-gmbh.eu

*Wir freuen uns
auf Ihren Anruf!*



Karl Josef Witt (Hrsg.)

Grundbau- Taschenbuch

Teil 1-3

- einmaliges Nachschlagewerk
- umfassend und auf höchstem Niveau
- Berücksichtigung aktueller Normen

BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3154

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

8. vollst. überarb. u. aktualis.
Auflage · 2018 · 3326 Seiten ·
3 Bände

.....
Hardcover

ISBN 978-3-433-03154-4

€ 483*

.....
eBundle (Print + ePDF)

ISBN 978-3-433-03214-5

€ 659*

* Der €-Preis gilt ausschließlich für Deutschland inkl. MwSt.

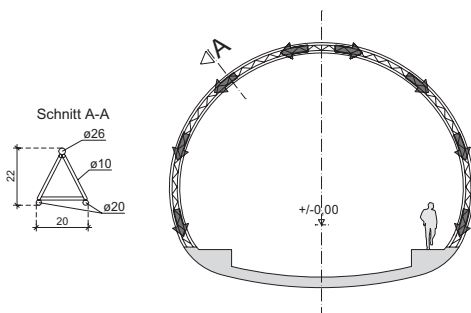


Bild 2. Querschnitt und Tragverhalten von Gitterbögen

typischen Gitterbogen-Querschnitt und verdeutlicht das Tragprinzip der Bogenwirkung.

2.3 Der GSR-Spannbogen

Der GSR-Spannbogen besteht aus einem Stab mit 20 mm Querschnitt ($\varnothing 20$), der umlaufend an der Außenschale gebettet ist. Er besitzt keine große Eigensteifigkeit, dafür aber aufgrund der Bettung hohe Tragfähigkeit. Da die Montage lasergestützt erfolgt, ist die erzielbare Lagegenauigkeit sehr hoch. Bild 3 zeigt einen GSR-Spannbogen und verdeutlicht das Tragprinzip der Bettung.

Tabelle 1 zeigt einen Vergleich aller drei Systeme in Bezug auf Tonnage, Stützwirkung und Verformungen. Dabei fällt auf, dass die Tonnagen von Trag- und Spannbogen in etwa identisch sind. Der Gitterbogen benötigt für die robuste Bogenwirkung (praktisch verformungsfreie Ausführung) erheblich höhere Tonnagen.

Beim Vergleich der Systeme sind auch logistische bzw. baubetriebliche Aspekte zu berücksichtigen. Trag- bzw. Gitterbögen müssen für jedes Projekt adaptiert angefertigt werden, GSR-Spannbögen bestehen aus handelsüblichem Stabstahl und können von jedem Biegebetrieb geliefert werden.

Theodoros Triantafyllidis

Planung und Bauausführung in der Schlitzwand- und Dichtwandtechnik

- Qualitätssicherung im Schlitz- und Dichtwandbau
- praxisgerechte Darstellung der Grundlagen
- praktische Anleitung vom Entwurf bis zur Ausführung

BESTELLEN

+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/3340

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

2024 · 380 Seiten ·
54 Abbildungen · 10 Tabellen

Softcover

ISBN 978-3-433-03340-1

€ 59*

eBundle (Softcover + ePDF)

ISBN 978-3-433-03342-5

€ 79*

* Der e-Preis gilt ausschließlich für Deutschland, inkl. MwSt.

www.BPA-waterproofing.com

BPA
WATERPROOFING SYSTEMS

100% **DICHT
HALTEN**

Hochtechnische
Abdichtungslösungen
für Gebäude, Tunnel
und Fundamente.
Weltweit im Einsatz.

BPA GmbH | Behringstraße 12 | 71083 Herrenberg
TEL +49 (0)7032 89 399-0 | info@BPA-waterproofing.com

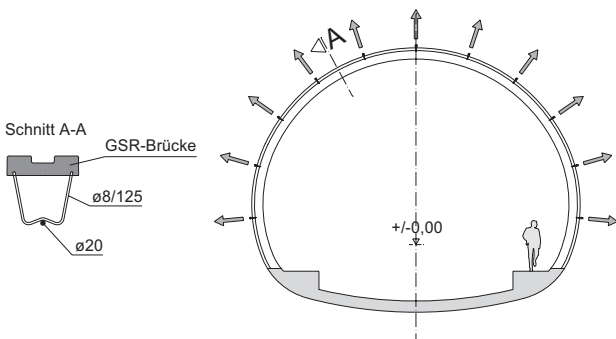


Bild 3. Querschnitt und Tragverhalten von GSR-Spannbögen

Tabelle 1. Vergleich der Systeme

	Gewicht je lfm	Stützwirkung	Verformungen
Tragbogen	ca. 6,0 kg	seitliche Stützung an der Außenschale	teils große Verformungen
Gitterbogen	ca. 15–20 ^{a)} kg	Bogentragwirkung	je nach Bemessung gering
GSR-Spannbogen	3,14 kg + ca. 2,5 kg ^{b)} = 5,64 kg	rundum gebettet	praktisch verformungsfrei

- a) Nicht jeder Gitterträger-Querschnitt genügt auch als Abstandhalter zwischen den Lagen. In den meisten Fällen müssen noch zusätzliche Abstandhalter berücksichtigt werden.
- b) Da der GSR-Spannbogen bergseitig der eigentlichen Bewehrung liegt, muss die Tonnage für die Abstandhalter zwischen den Lagen zur Tonnage der Spannbögen dazu addiert werden.

Zudem ist zu berücksichtigen, dass beim Transport von Trag- und Gitterbögen aufgrund ihrer räumlichen Struktur „sehr viel Luft“ mitgeliefert wird. Die Auslastung der Lkw in Bezug auf die mögliche Tonnage ist daher gering, die Transportkosten je Tonne daher deutlich

höher. Beim GSR-Spannbogen wird nur ein Bündel Stabstahl $\varnothing 20$ benötigt. Es sind keine eigenen Transporte erforderlich, die Spannbögen können mit der Bewehrung in den Tunnel gefahren werden.

3 Systemkomponenten

Der GSR-Spannbogen besteht aus den folgenden Komponenten:

- Spannbogen $\varnothing 20/\varnothing 25$
- M-Bügel $\varnothing 8$
- GSR-Brücke (bei genügend Überprofil)
- GSR-Tripel (bei zu wenig Überprofil)
- Seilklemmen zum Verbinden der Einzelteile.

Der Spannbogen und die M-Bügel sind aus handelsüblichem Betonstahl B500 gem. [1, 2] gefertigt. Die GSR-Brücke sowie der GSR-Tripel bestehen aus Beton C50/60, haben an den Aufstandsflächen ein Schutzvlies (10 mm) und entsprechen den Vorgaben gemäß [3].

Die GSR-Brücke hat zwei Kunststoff-Stopfen, in die der M-Bügel eingesteckt wird. Zur Sicherung gegen Ausziehen sind in den Kunststoff-Stopfen Lippen angebracht, die sich mit den Rippen des M-Bügels verhaken (Bild 4, links).

Der GSR-Tripel wurde für Bereiche konzipiert, in denen Unterprofil vorliegt. Durch seine spezifische Form kann er durch Drehung für drei

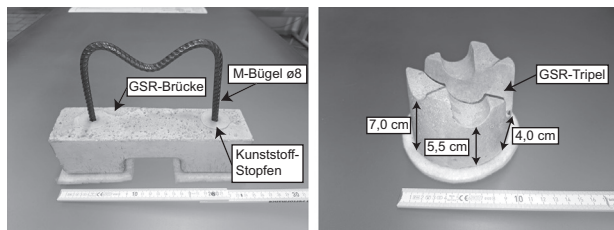


Bild 4. GSR-Brücke und GSR-Tripel

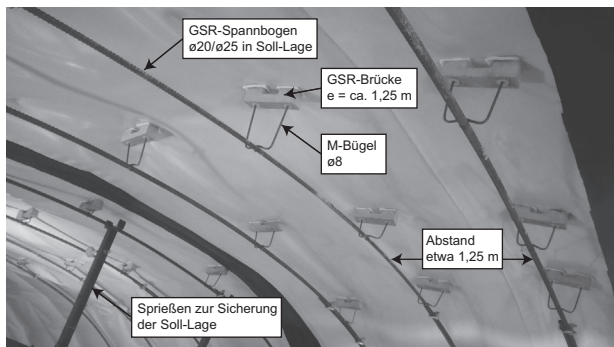


Bild 5. Typische Verlegesituation mit ausreichend Überprofil

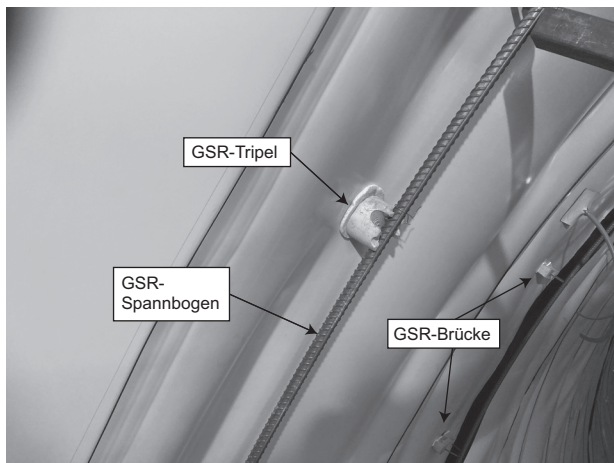


Bild 6. GSR-Tripel im Fall von Unterprofil

verschiedene Betondeckungen (4,0 cm/5,5 cm/7,0 cm) eingesetzt werden (Bild 4, rechts).

Bild 5 zeigt eine typische Verlegesituation. Es ist ausreichend Überprofil vorhanden, sodass rundum die GSR-Brücke zum Einsatz kommt. An den verschiedenen hohen M-Bügeln kann man gut die Unebenheit der Außenschale erkennen.

Ist nicht genug Überprofil vorhanden, um die GSR-Brücke inklusive M-Bügel zu verbauen, kommt der GSR-Tripel zum Einsatz. Bild 6 zeigt den GSR-Tripel im Einbauzustand. Im Hintergrund sind GSR-Brücken erkennbar.

4 Montage des GSR-Spannbogens

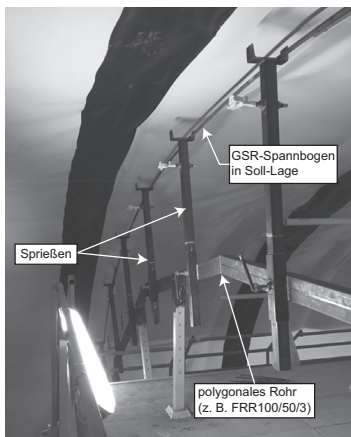
4.1 Voraussetzungen

Die Montage des GSR-Spannbogens kann auf verschiedene Weise erfolgen. Wichtig ist dabei nur, dass eine maßhaltige Vorrichtung zur Verfügung steht, mit der die GSR-Spannbögen in Solllage gebracht werden können. Die optimale, aktuell noch futuristische Methode wäre ein automatischer Bewehrungswagen, der sich mittels Höhen- bzw. Querverschub selbst in die Solllage justiert. Im Folgenden wird die bisher angewendete Methode beschrieben, wie von jedem Bewehrungswagen aus GSR-Spannbögen verlegt werden können.

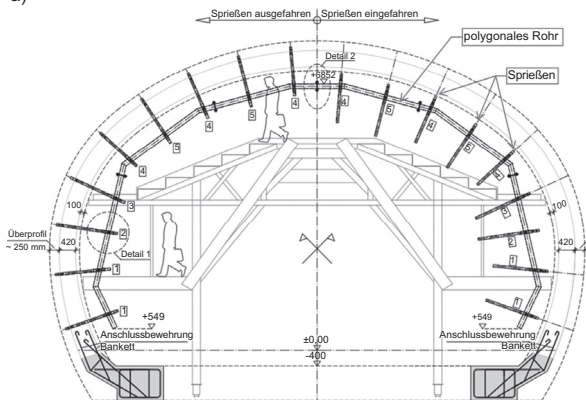
Zur Montage des GSR-Spannbogens ist ein polygonales Rohr mit Sprießen erforderlich. Dieses Rohr (z. B. FRR100/50/3) kann entweder direkt am Bewehrungswagen montiert oder auf einem eigenen Montagewagen situiert sein. Bild 7 zeigt das polygonale Rohr mit den Sprießen.

Am bergseitigen Ende (links in Bild 8) der Sprießen ist eine Aufnahme für die Spannbögen angeordnet.

Das polygonale Rohr samt Sprießen ist am vorderen Ende des Bewehrungswagens angebracht. Durch diese Situierung ist es möglich, den Einbau jedes GSR-Spannbogens vermessungstechnisch zu begleiten und so eine hohe Präzession bei der Verlegung zu erzielen.



a)



b)

Bild 7. Polygonales Rohr mit Spriessen a) Foto, b) Querschnittzeichnung

Konrad Bergmeister (Ed.)

Models for financing, cost and risk assessment

- valuable information for future major projects of railroad infrastructure
- recommendations for action at various stages of the project to deal with identified risks and take precautions against unknown and unforeseen influences

ORDER

+49 (0)30 470 31-236
marketing@ernst-und-sohn.de
www.ernst-und-sohn.de/en/3314

* All book prices inclusive VAT.

Ernst & Sohn
A Wiley Brand

2021 - 152 pages - 28 tables

Softcover

ISBN 978-3-433-03314-2

ca. € 89*

eBundle (Print + ePDF)

ISBN 978-3-433-03315-9

€ 139*



Mit innovativen Lösungen für die Zukunft bauen

**Bauwerks- und Baugruben-
abdichtungen**

Injektionen im Tunnelbau

Bodenverfestigungen

Hebungsinjektionen

Spritzbetonarbeiten

**Bohrungen für Injektionen,
Vereisungen und Anker**

**Kraftwerks- und Tal
sperreninjektionen**



Brenner-Basistunnel H52 – Gebirgsinjektion (bis 100 bar Wasserdruck)



London, H52 – Vereisungsbohrungen



U2 Berlin – Hebung U-Bhf.
Alexanderplatz

DMI Injektionstechnik GmbH, Warmensteinacher Str. 60, 12349 Berlin,

Tel: +49 30 4174423-40 - Fax: +49 30 4174423-44 E-Mail: info@d-m-i.net

DMI Spezialinjektionen Süd GmbH, Kaistener Str. 33, 97450 Arnstein,

Tel: +49 9728 907026-0 - Fax: +49 9728 907026-9 E-Mail: info.sued@d-m-i.net

www.d-m-i.net

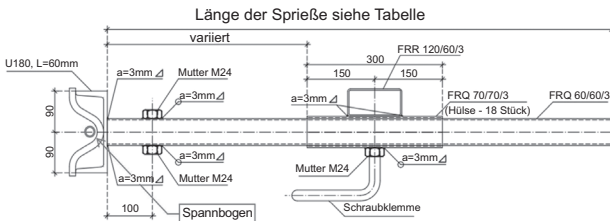


Bild 8. Sprießen mit Aufnahme für Spannbogen

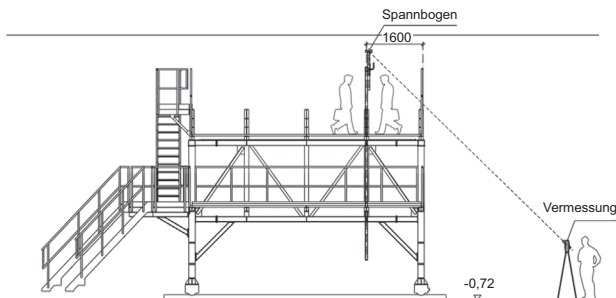


Bild 9. Platzierung des polygonalen Rohrs am Bewehrungswagen

Bild 9 zeigt ein Beispiel für die Situierung des polygonalen Rohrs am Bewehrungswagen. Vielfach ist es auch möglich, das polygonale Rohr wegzulassen und die Spriessen direkt am Geländer des Bewehrungswagens zu befestigen.

4.2 Einbau des GSR-Spannbogens

Im Folgenden wird der Montageablauf Schritt für Schritt erläutert. Bild 10 veranschaulicht den Ablauf der Montage von GSR-Spannbögen.

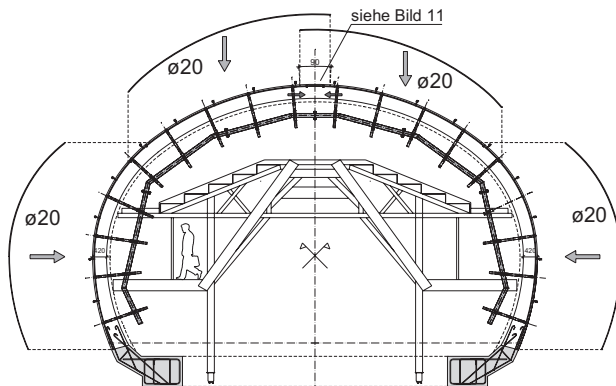


Bild 10. Montage des GSR-Spannbogens

1. Der Bewehrungswagen wird im Block so positioniert, dass die Spriessen in der Ebene des ersten Spannbogens liegen.
2. Anschließend werden die Spriessen etwa auf das Sollmaß ausgefahren. Nun werden die vier Einzelteile des GSR-Spannbogens in die Aufnahme der Spriessen eingelegt und dort angerödelt.
3. Am Fußpunkt werden die Spannbögen mit Seilklammen an der Anschlussbewehrung befestigt. Ist keine Anschlussbewehrung vorhanden, wird ein ca. 5 cm tiefes Loch in die Arbeitsfuge gebohrt und der GSR-Spannbogen eingesteckt.
4. Nun kann der GSR-Spannbogen mithilfe eines automatischen Tunnelmesssystems und den verstellbaren Spriessen lagerichtig positioniert werden. Dabei wird die Polygonalisierung der Tunnelblöcke in Kurvenfahrten ebenso berücksichtigt wie die Überhöhung des Schalwagens und damit der Bewehrung.
5. Die drei Stöße werden mit je zwei Seilklammen starr verbunden.
6. Die GSR-Spannbögen werden nun mit GSR-Brücken plus M-Bügel hinterbaut. Dazu wird an jeder Einbaustelle das tatsächliche

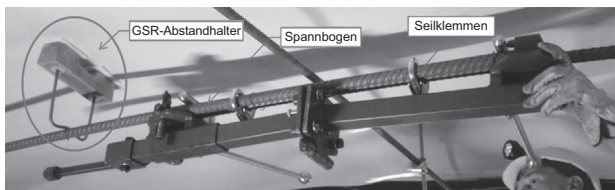


Bild 11. Spannvorrichtung

Einbaumaß (abhängig vom Überprofil) gemessen, der M-Bügel entsprechend abgelängt und 2,5 cm tief in die dafür vorgesehenen Stopfen der GSR-Brücken gesteckt. Die GSR-Brücke inklusive M-Bügel wird schräg auf den GSR-Spannbogen aufgesetzt und durch eine Drehbewegung radial zum Spannbogen positioniert. Dabei ist darauf zu achten, dass die GSR-Brücke möglichst kraftschlüssig an der KDB/Außenschale anliegt. Dies kann durch leichtes Verschieben der GSR-Brücke entlang des Spannbogens über die Unebenheit der Außenschale erreicht werden.

7. Wenn alle GSR-Brücken gemäß Plan montiert sind, wird der GSR-Spannbogen gespannt. Dazu wird im First an beiden Stabenden eine Spannvorrichtung (Bild 11) angesetzt. Die beiden Seilklemmen werden gelöst und die Stabenden mit der Spannvorrichtung ca. 5 cm zusammengeschoben. Durch das Zusammenschieben der Stabenden (= Vergrößerung der Abwicklungslänge) richtet sich der Spannbogen auf und drückt über die M-Bügel auf die GSR-Brücken, die ihre Druckkräfte auf die Außenschale/KDB übertragen. Die dabei aufgewendete Kraft beträgt im Mittel 5 kN (die Kraft ist abhängig vom Profil, siehe 6.). Die Radiusvergrößerung des Spannbogens durch Vergrößerung der Abwicklungslänge beträgt ca. 1 cm. Dadurch wird der Einbauschlupf der GSR-Brücken überwunden und die Bettung des Spannbogens aktiviert.
8. Abschließend werden die zuvor gelösten Seilklemmen wieder geschlossen. Die Spannvorrichtung wird entfernt und die Sprießen werden eingezogen.

5 Technische Grenzen des GSR-Spannbogens

Die Einsetzbarkeit des GSR-Spannbogens ist nicht durch die Größe bzw. die Spannweite des Tunnelprofils begrenzt. Vielmehr ist es der Krümmungsradius im Firstbereich, der über Erfolg oder Misserfolg entscheidet. Der Grenzradius liegt bei $< 11,0$ m.

Der Grund dafür liegt in der Kinematik des Spannvorgangs. Bei Radien $> 11,0$ m wird durch die schwache Krümmung nicht genug Bewegung in Richtung Firste erreicht. Dadurch können die GSR-Brücken in diesem Bereich keine Druckkraft aufbauen, die sich als Stützkraft für die Bewehrung heranziehen lässt. Deshalb sind hier unterstützende Maßnahmen wie z. B. Anker erforderlich. Dies betrifft aber nicht nur den GSR-Spannbogen, auch Trag- bzw. Gitterbögen kommen bei solch großen Radien nicht mehr ohne Zusatzmaßnahmen aus.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen verschiedene Querschnitte und ihre Eignung in Bezug auf GSR-Spannbögen. In den meisten Fällen ist der Regelquerschnitt sehr gut mit GSR-Spannbögen zu bewältigen.

Bei Pannenbuchten kommt es darauf an, wie sie im Vergleich zum Regelquerschnitt gestaltet sind. Wird der Pannenbuchtquerschnitt durch ein „in die Breite ziehen“ des Regelquerschnitts ohne nennenswerten Höhenzuwachs generiert, dann überschreitet der Firstradius schnell den Grenzradius von $> 11,0$ m (Bild 12a und b).

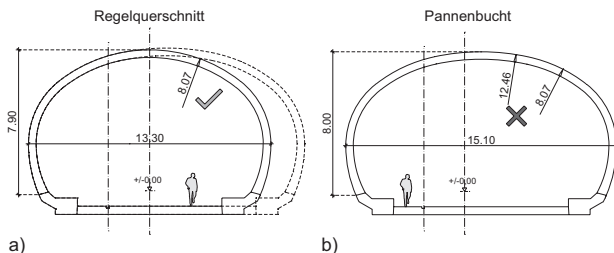


Bild 12. GSR-Spannring; a) ohne Hilfsmaßnahme, b) Anker erforderlich

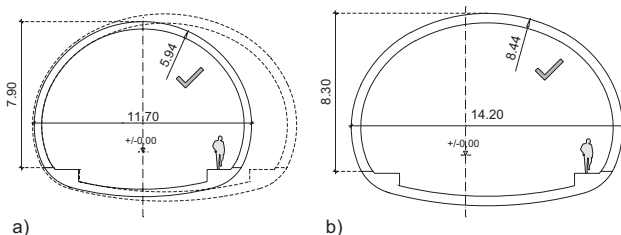


Bild 13. GSR-Spannring ohne Hilfsmaßnahme; a) Regelquerschnitt, b) Pannenbucht

Wird der Pannenbuchtquerschnitt durch eine „Rundum-Vergrößerung“ erzielt, dann können GSR-Spannbögen wieder problemlos eingesetzt werden (Bild 13a und b).

6 Dimensionierung

Die Dimensionierung des GSR-Spannbogens erfolgt anhand weniger Parameter. Wie bei Trag- und Gitterbögen ist eine eigentliche statische Bemessung nicht zielführend, da die Bettungsbedingungen stark schwanken und nur ungenau simuliert werden können. Eine rein auf rechnerische Ergebnisse abzielende Betrachtung führt daher zu keinem vernünftigen Ergebnis.

Es müssen folgende Werte ermittelt werden

- Durchmesser des GSR-Spannbogens
- Abstand der GSR-Spannbögen
- Vorspannkraft
- Abstand der GSR-Brücken.

Der Durchmesser der GSR-Spannbögen beträgt im Regelfall 20 mm. Kleinere Durchmesser sind nicht zielführend, da sie aufgrund mangelnder Eigensteifigkeit beim Vorspannen im Bereich der Ulme seitlich ausweichen. Bei größeren Profilen werden GSR-Spannbögen $\varnothing 26$ verwendet.

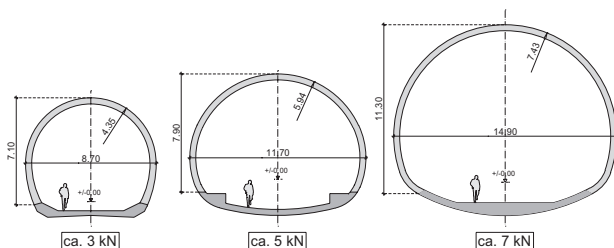


Bild 14. Zusammenhang zwischen Profilgröße und Vorspannkraft

Der Abstand der GSR-Spannbögen ist abhängig vom Tunnelprofil, vom Durchmesser der bergseitigen Längsbewehrung und der Tonnage der Gewölbebewehrung. Die Erfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass ein Abstand der GSR-Spannbögen von etwa 1,25 m in den meisten Fällen die richtige Wahl ist. Bei besonders großen zu stützenden Tonnagen kann sich dieser Abstand bis auf 60 cm verringern.

Die erforderliche Vorspannkraft ist abhängig von der Größe des Profils. Erfahrungsgemäß lässt sich der Zusammenhang zwischen Profilgröße und Vorspannkraft wie in Bild 14 gezeigt darstellen.

Der Abstand e der GSR-Brücken wird mit der Kesselformel ermittelt ($D = (V/R) \cdot e$ [kN]). Dabei wird der Abstand e über die Vorspannkraft V und den Radius R so festgelegt, dass die Anpresskraft D der GSR-Brücken etwa 1 kN beträgt (Bild 15a).

Im Beispiel gem. Bild 15b ergibt sich der Abstand der GSR-Brücken bei einem Radius von 5,80 m und einer Vorspannkraft von 5 kN zu 1,20 m. Bei wechselnden Radien muss der Abstand der GSR-Brücken auf jeden Radius angepasst werden, um eine gleichmäßige Druckverteilung zu gewährleisten.

- D Anpresskraft der GSR-Brücke [kN] (gewählt $D = 1$ kN)
- V Vorspannkraft [kN]
- R Radius Spannbogen [m]
- e Abstand GSR-Brücken [m]

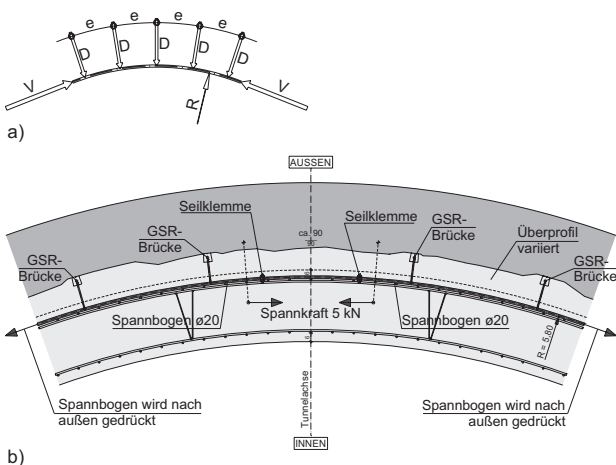


Bild 15. Im Spannbogen wirkende Kräfte; a) Zusammenhang Vorspannkraft, Anpresskraft, Radius und Abstand; b) Ermittlung der Anpresskraft der GSR-Brücke auf die Außenschale/KDB

7 Full-Round-Lösungen

Soll ein Querschnitt Full-Round bewehrt werden, werden die Vorteile von GSR-Spannringen deutlich sichtbar.

Die Systeme Trag- bzw. Gitterbogen liegen zwischen den Bewehrungslagen und können somit immer nur stückweise mit der Bewehrung verbaut werden. Aufwendige Stützungen sind erforderlich. Großflächige Aussparungen in der Bewehrung für die Stützungen des Verlegegerüsts erschweren die Verlegung der Bewehrung zusätzlich. Die dabei erzielte Geometrie lässt oftmals zu wünschen übrig.

Da der GSR-Spannring vor der Bewehrung eingebaut wird, steht nach dessen Verlegung eine saubere, rundum verlaufende Montageebene zur Verfügung. Die Bewehrung muss nur noch angebunden werden,

da die Geometrie des Querschnitts durch die GSR-Spannringe festgelegt ist.

Im Unterschied zum GSR-Spannbogen, der von Arbeitsfuge zu Arbeitsfuge geführt und in der Firste vorgespannt wird, muss der GSR-Spannring an zwei Stellen vorgespannt werden, einmal in der Firste und einmal in der Sohle. Damit erreicht man eine gleichmäßigere Verteilung des Anpressdrucks.

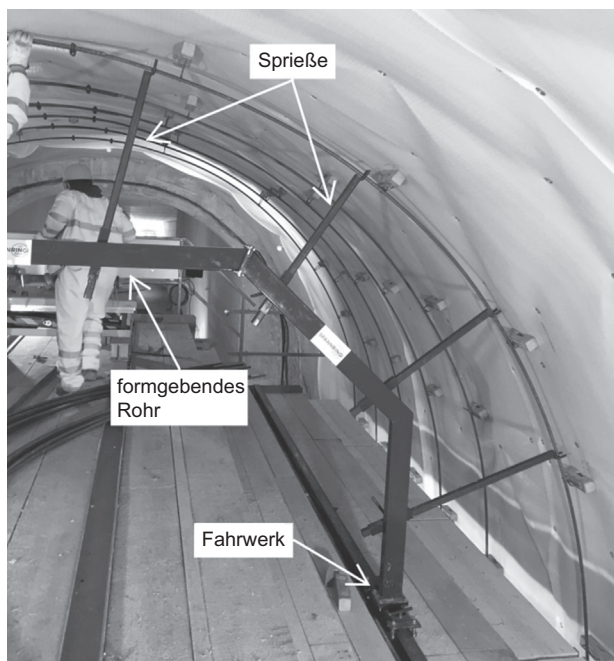


Bild 16. Fahrbares polygonales Rohr im Fall von Full-Round

Für Full-Round-Lösungen muss der Bewehrungswagen auf einem Schreitwerk montiert sein, da ein Fahrwerk die Verlegung in der Sohle unmöglich machen würde. Ein Vorwärtsbewegen des Wagens von Ring zu Ring ist somit nicht möglich. Daher darf das formgebende Rohr nicht wie sonst üblich starr auf dem Bewehrungswagen verbaut sein, sondern muss fahrbar sein. Ist der Wagen über sein Schreitwerk mittels hydraulischem Quer- und Höhenvershub lagegenau ausgerichtet, kann mit den fahrbaren Sprießen ein Ring nach dem anderen rundum montiert werden. Bild 16 zeigt das fahrbare polygonale Rohr im Firstbereich.

8 GSR-Spannbögen bei Nischen und Querschlägen

8.1 Nischen

Im Bereich von Nischen fehlt dem GSR-Spannbogen das Druckauflager an der Arbeitsfuge. Diese Aufgabenstellung wurde beispielsweise am Tunnel Horchheim wie nachfolgend beschrieben gelöst.

Bild 17 zeigt die Abwicklung des Gewölbes. Die Druckkräfte aus den GSR-Spannbögen werden im Bereich der Nische über Schrägstäbe in Form von Zugkräften auf die Nachbarbögen übertragen. Zusätzlich

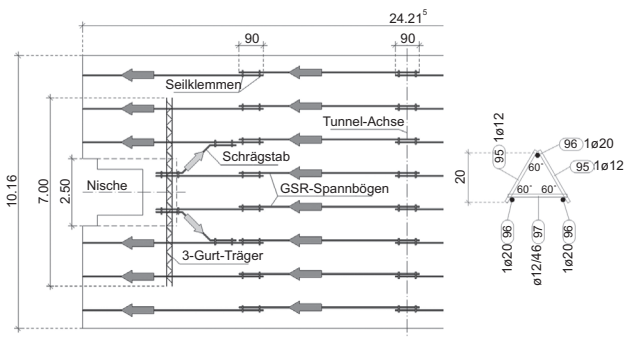


Bild 17. Abwicklung Gewölbe mit Kräfteverlauf im Bereich der Nischen und Querschnitt 3-Gurt-Träger

wird ein 3-Gurt-Träger ($L = 7,00 \text{ m}$) zwischen den Lagen eingebaut. Er dient einerseits dazu, die durch die Schrägstäbe ausgelösten Kräfte in Tunnellängsrichtung aufzunehmen und andererseits der Übertragung der Druckkräfte auf die weiter außerhalb liegenden GSR-Spannbögen.

8.2 Querschläge

Bis dato wurden GSR-Spannbögen im Bereich von Querschlägen mit Montageankern (z. B. BA-Anker) an der Außenschale befestigt. Auch bei Tragbögen sind Montageanker erforderlich. Konstruktionen aus Gitterbögen kommen meist ohne Anker aus, sind aber sehr aufwendig und damit teuer.

Zukünftig ist geplant, die oben beschriebene Lösung für Nischen auch auf Querschläge anzuwenden.

9 Interaktion mit der Abdichtung

Der GSR-Spannbogen erhält seine Stützkraft aus der Bettung gegen die Außenschale/KDB. Um jegliches Potenzial einer Gefährdung oder gar Beschädigung der KDB auszuschließen, wurden von der Fachhochschule Münster mehrere und unterschiedlich konzipierte Versuchsserien durchgeführt. Nachfolgend werden die Ergebnisse der Versuche auszugsweise dargelegt (für Details siehe [4]).

9.1 Qualitative Spannungsverteilung unter der GSR-Brücke

Die GSR-Brücke hat zur Übertragung der Druckkräfte zwei Aufstandsflächen mit einer Fläche von insgesamt rund 75 cm^2 . Bedingt durch die Unebenheit und die Rauigkeit der Außenschale kann trotz Anordnung der Vliese nicht von einer gleichmäßigen Spannungsverteilung über die gesamte Aufstandsfläche ausgegangen werden. Daher wurden Druckversuche durchgeführt, die die tatsächliche Spannungsverteilung auf das Abdichtungssystem mithilfe von Druckmessfolien sichtbar machen. Das Ergebnis ist Bild 18 und Bild 19 zu entnehmen.

Der Versuch zeigt die erwartete Spannungsverteilung. Der Druck wird hauptsächlich über vergleichsweise geringe Teilflächen abgetragen, die

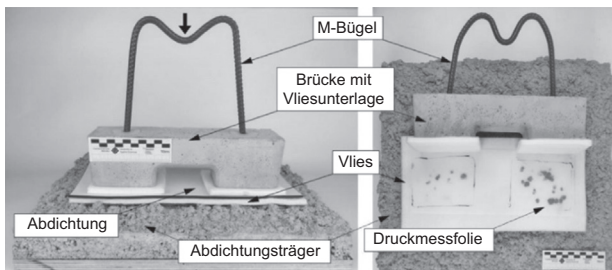


Bild 18. Versuchsaufbau zur Ermittlung der Spannungsverteilung [4]

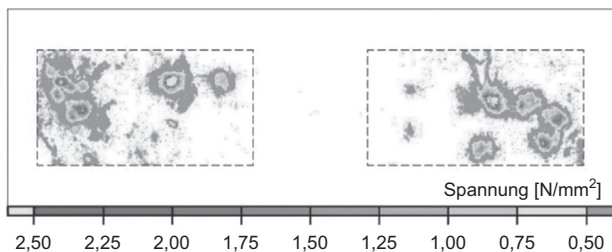


Bild 19. Qualitative Auswertung der Spannungsverteilung mittels Druckmessfolie [4]

aus der Rauigkeit des Abdichtungsträgers resultieren. Die dabei gemessenen Druckspannungen liegen im Bereich von 0,5 bis 2,5 N/mm^2 .

9.2 Ermittlung der Grenztragfähigkeit und der Federkennlinien

Zur Ermittlung der Grenztragfähigkeit der Stützstellen sowie zur Bestimmung von Federkennlinien wurde eine Versuchsanordnung gem. Bild 20 gewählt.

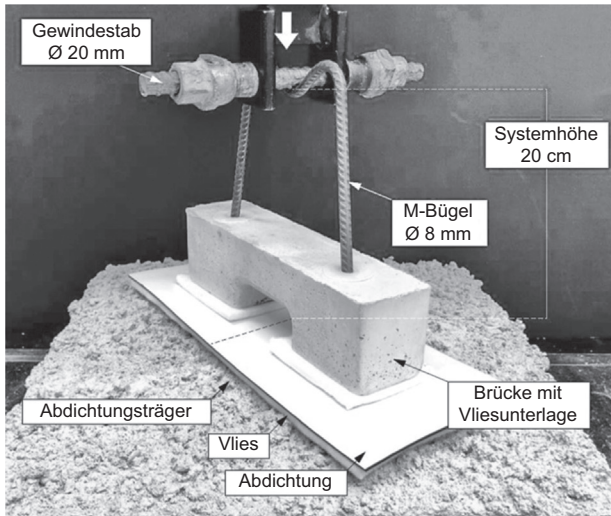


Bild 20. Versuchsaufbau zur Ermittlung des Last-Verformungsverhaltens einer Einzelstützstelle bei einer Systemhöhe von 20 cm [4]

Die Stützstelle weist ein nichtlineares Last-Verformungsverhalten auf. Bis zu einer Last von 2,0 kN kommt es zu einer Zunahme der abgeleiteten Federsteifigkeit, bis zum Erreichen der Grenztragfähigkeit von etwa 3,4 kN nimmt die Federsteifigkeit wieder etwas ab. Bild 21 zeigt die Last-Verformungskurve. Die tatsächlich auf der Baustelle aufgebrachten Lasten liegen im Bereich von etwa 0,5 bis 1,5 kN. Die Verformungen hierbei betragen etwa 3 bis 8 mm.

Der Grund für die Verformungen unter Baustellenlasten liegt in der Kompressibilität der beiden Vliese. Dies ist beim Verlegen in Form von zusätzlichem Weg in Richtung Außenschale zu berücksichtigen.

Die Hauptursache für das Erreichen der Grenztragkraft liegt im seitlichen Ausweichen der Endschenkel des M-Bügels. Dieser M-Bügel hat

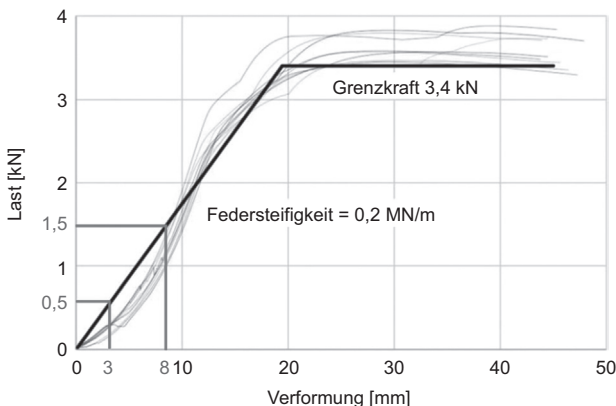


Bild 21. Last-Verformungsverhalten von 10 Abstandhaltern mit einer Systemhöhe von 20 cm [4]

einen Durchmesser von 8 mm. Dadurch wird genug Steifigkeit erreicht, um die aufgetragenen Lasten sicher aufnehmen zu können. Zugleich aber regelt die begrenzte Aufnahmefähigkeit des M-Bügels auch die maximale Kraft, die auf den GSR-Abstandhalter und damit auf die KDB aufgebracht werden kann.

Eine Erhöhung des Durchmessers des M-Bügels bringt nach eigenen Erfahrungen keine Erhöhung der Tragkraft.

9.3 Durchstanzen der Brücke

Kommt die Vorspannkraft auf den M-Bügel, wird diese über die Stabenden auf die Brücke übertragen – es besteht somit die theoretische Möglichkeit des Durchstanzens. Die Versuchsanordnung ist Bild 22 zu entnehmen.

Die Ergebnisse sind eindeutig. Auch bei angespitzten Stabenden liegt der Sicherheitsfaktor gegen Durchstanzen bei 8 [4].

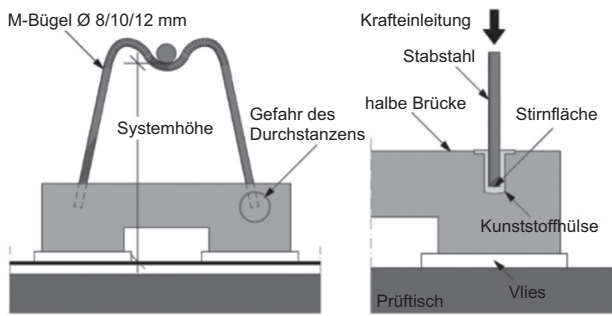


Bild 22. Versuchsaufbau Durchstanzen

9.4 Einflüsse von Scherspannungen

Außer den zuvor untersuchten axialen Belastungen kommt es beim Schwinden des Betons auch zu Scherbeanspruchungen. Im Versuch [4] wurde dafür vereinfacht ein Endschwindmaß von 0,6 mm/m angenommen. Dies entspricht einem konservativen Wert für üblich

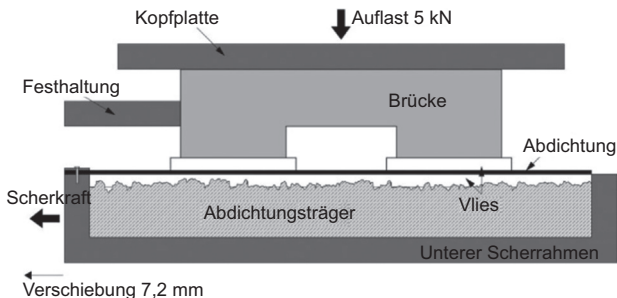


Bild 23. Simulation der Scherbeanspruchungen aus Zwangsverformungen

verwendete Betone. Die Auflast wurde mit 5,0 kN festgelegt und liegt damit höher als die tatsächlich auftretenden Lasten. Bild 23 stellt den Versuchsaufbau zur Simulation der Scherbeanspruchungen aus Zwangsverformungen dar. Nach Beendigung der Versuche wurde die KDB ausgebaut und einer visuellen Prüfung unterzogen. Perforationen wurden nicht festgestellt, lediglich leichte plastische Verformungen waren erkennbar. Die Schutzvliese bilden einen ausreichenden Schutz gegenüber den Einwirkungen.

9.5 Bestimmung der Bügelkräfte im Spannbogen

Um die angenommenen Lasten aus den Versuchen zu verifizieren, wurde am Tunnel Feuerbach ein Feldversuch mit Druckmessdosen durchgeführt. Der untersuchte Spannbogen hatte einen Radius von 5,0 m. Die Belastung des Spannbogens erfolgte zunächst mit einer planmäßigen Vorspannung von 5,0 kN, im zweiten Schritt wurde die Gewölbebewehrung (60 t) montiert. Bild 24 zeigt die Ergebnisse des Feldversuchs.

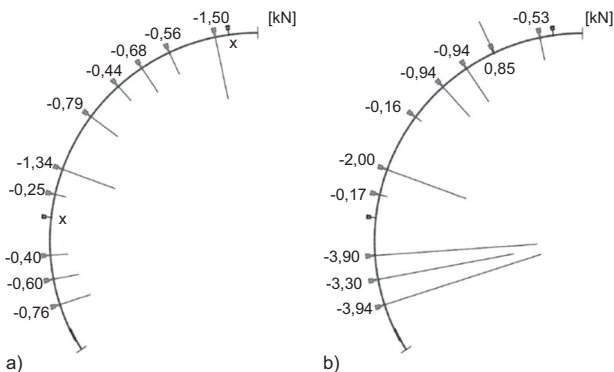


Bild 24. Gemessene Kräfte an den Druckmessdosen a) nach der Vorspannung, b) nach dem Verlegen der Bewehrung

Als Fazit ist festzuhalten, dass der GSR-Spannbogen die KDB in keiner Weise beeinträchtigt. Weder wird die KDB eingedrückt noch in ihrer Bewegung eingeschränkt. Alle Annahmen konnten im Rahmen der Versuchsdurchführung bestätigt werden.

10 Referenzen

Seit 2018 wurden 1400 Blöcke mit dem System GSR-Spannbogen/ Ring gebaut. Dabei wurden sowohl Sohlgewölbe als auch Gewölbe und Full-Round-Strecken realisiert. Tabelle 2 zeigt die bisher mit GSR-Spannbögen umgesetzten Projekte.

Tabelle 2. Übersicht der bisher mit dem System GSR gebauten Blöcke

Projekt	Baulos H33	Bauteil	Jahr	Anzahl Blöcke
BBT	Baulos H33	Gewölbe	2018	459
S21	Tunnel Feuerbach	Gewölbe	2019	200
S21	Tunnel Bad Canstatt	Gewölbe	2020	99
S21	Tunnel Rosenstein	Full-Round	2021	63
KW Obervellach	Speicherstollen	Sohle und Gewölbe	2022	47
Norwegen	Tunnel Drammen	Gewölbe	2022	25
Deutschland	Tunnel Horchheim	Gewölbe	2022	55
SBT	Tunnel Grautschenhof	Gewölbe	2023	227
BBT	H53	Gewölbe	2024	50
BBT	H41	Gewölbe	2024	175
			Gesamt:	1400

11 Zusammenfassung

Der GSR-Spannring hat sich seit seiner Einführung im Jahr 2018 in all seinen Anwendungsmöglichkeiten als funktionierendes System erwiesen. Sohlgewölbe, Gewölbe und auch Full-Round-Lösungen wurden erfolgreich umgesetzt.

Die hohe Maßhaltigkeit und Stabilität des Systems erhöhen die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauten im Untertagebau. Da der GSR-Spannbogen im Unterschied zu Trag- bzw. Gitterbögen bergseitig der Bewehrung angeordnet ist, ergeben sich ganz neue Möglichkeiten, den Baubetrieb zu gestalten.

Literatur

- [1] EN 1992-1-1 (2012). Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetonbauwerken, Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau mit Nationalem Anhang (Fassung 2012-01).
- [2] DIN 488-1:2009-08 (2009). *Betonstahl - Teil 1: Stahlsorten, Eigenschaften, Kennzeichnung*. Berlin: Beuth.
- [3] Deutscher Beton Verein (2011). Abstandhalter nach Eurocode 2. Merkblatt, Fassung Januar 2011.
- [4] Mähner, D., Rudolf, S., Lengers, J. et al. (2021). Der gebettete Spannbogen, ein neuartiger Ansatz für freitragende Gewölbebewehrung im Tunnelbau. *Beton- und Stahlbetonbau* 116 (8): 620–631.