

Aufständierungen der Gewölbebrücken der A2 im Wesergebirge

Gefügeverbesserungen an der Talbrücke Kleinenbremen

Dr.-Ing. Siegfried Droese und Dipl.-Ing. Guido Steven

1. Einleitung

Beginnend im Jahr 1989, erhielten die Talbrücken der A2 im Bereich zwischen Hannover und der Grenze zu Nordrhein-Westfalen Parallelbrücken, die vorhandenen Naturstein-Gewölbebrücken wurden mit freitragenden Überbauten aufgeständert. Als Letztes dieser Bauwerke wird derzeit die Talbrücke Kleinenbremen aufgeständert. Bei allen Maßnahmen war das Fachgebiet Massivbau der TU Braunschweig bei Untersuchung der vorhandenen Brücken, Beratung zu den Aufständierungen und stichprobenhafter Überprüfung der Arbeiten zur Gefügeverbesserung gutachterlich tätig. Es wird kurz über die Maßnahmen an den Brücken Arensburg, Luhden, Schermbeck A und Schermbeck B, Oelbergen berichtet und im Vergleich dazu die Maßnahmen an der Talbrücke Kleinenbremen dargestellt.

Im Zuge der Autobahn A2 sind auf niedersächsischem Gebiet eine Reihe von Talbrücken vorhanden, die (bis auf Restarbeiten) in den Jahren ab 1937 bis gegen Kriegsende erstellt wurden. Eine Übersicht über die in diesem Beitrag behandelten Brücken gibt Bild 1.

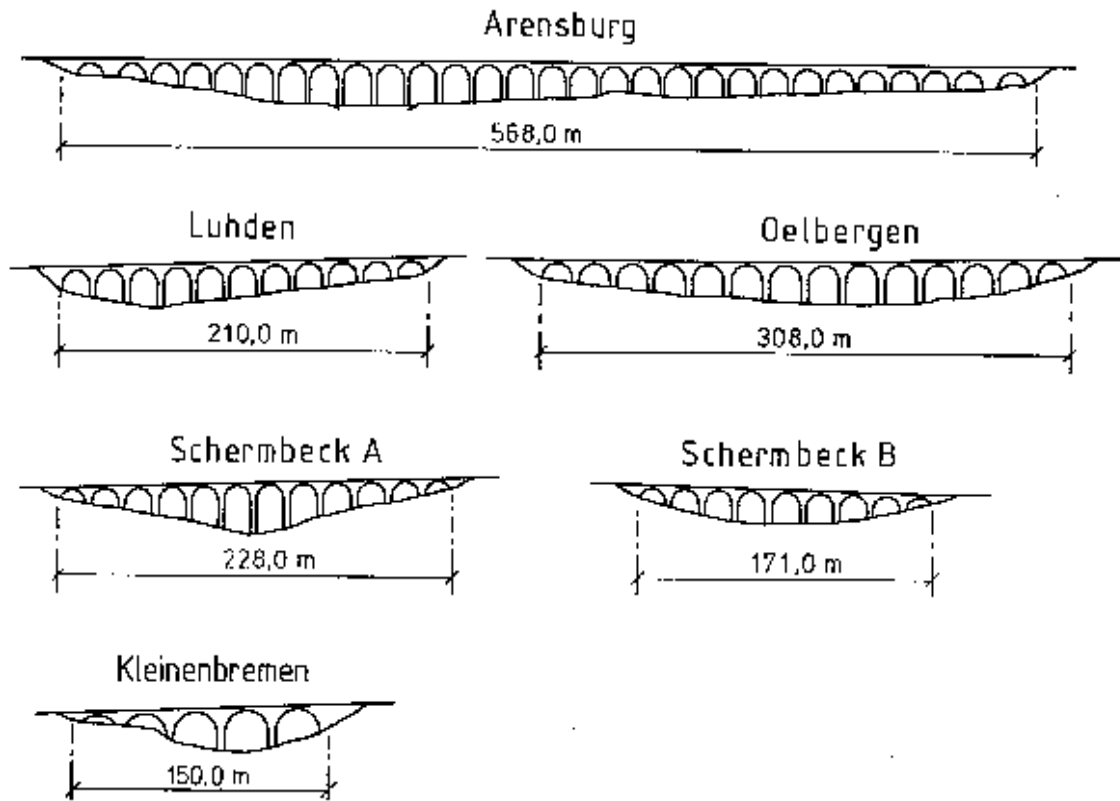


Bild 1: Ansichtsskizzen der sanierten und aufgeständerten Talbrücken der A2

Die Brücken Arensburg, Luhden, Schermbeck A und B, Oelbergen sind in der zu dieser Zeit üblichen Bauweise aus Naturstein (Obernkirchner Sandstein) als Gewölbe-Brücken ausgeführt. Die Pfeiler bestehen aus tragenden Vorsatzschalen in hammergerechtem Naturstein-Mauerwerk, im Innern aus Bruchsteinmauerwerk. Die Fahrbahn wird von einer Verfüllung auf dem Gewölberücken bzw. über den Pfeilerköpfen aus gebrochenen, mörtelgebundenen Sandsteinen getragen (Bild 2).

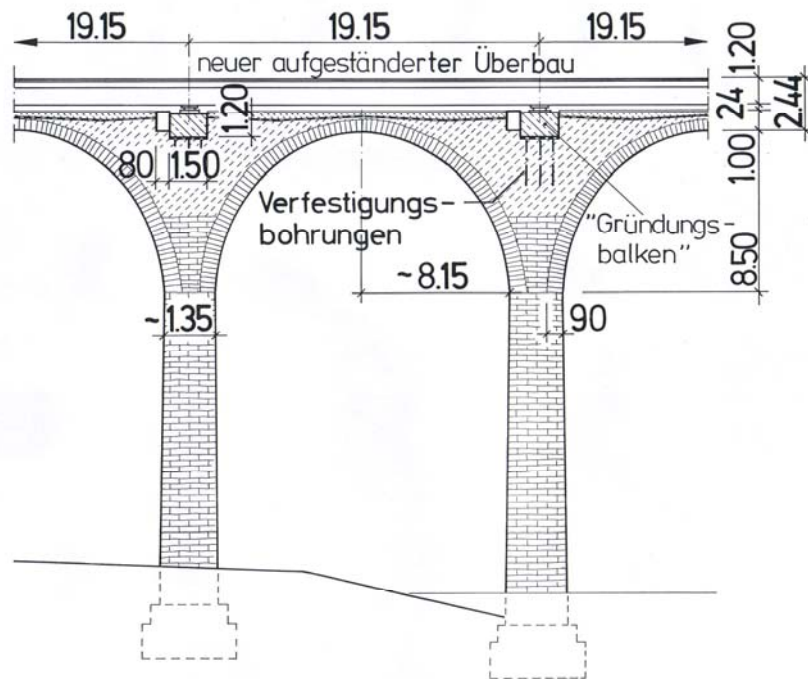


Bild 2: Teillängsschnitt der Talbrücke Arensburg, Zustand nach Aufständering. Pfeiler und Gewölbe aus Naturstein gemauert. Verfüllung über den Gewölben und den Pfeilerköpfen aus mörtelgebundenen Sandsteinen. Die Talbrücken Luhden, Schermbeck A und B, Oelbergen haben z. T. etwas andere Abmessungen.

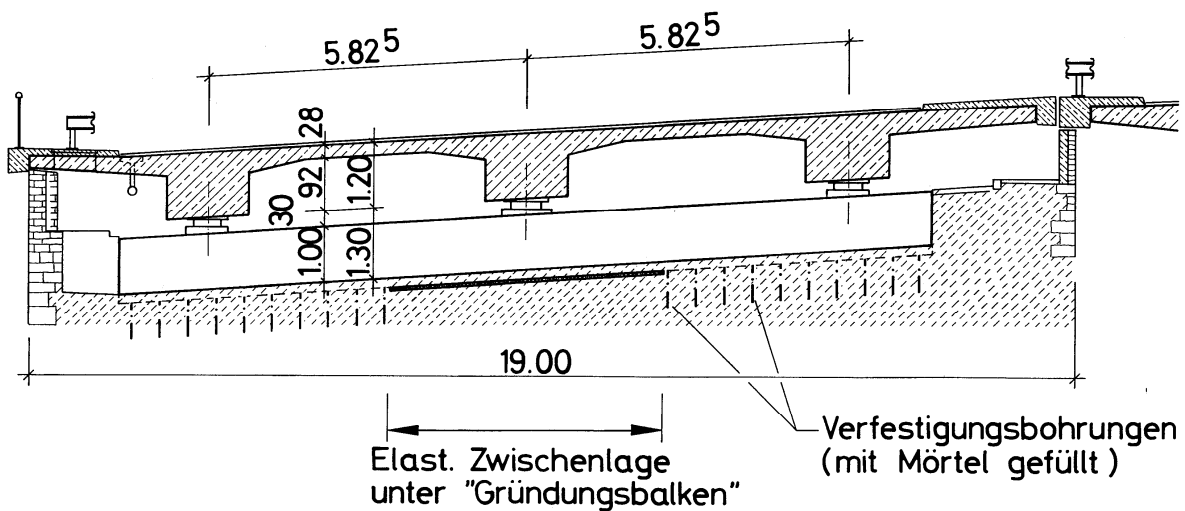


Bild 3: Querschnitt durch die Fahrbahn der Talbrücke Arensburg nach Aufständering. Bei den Talbrücken Luhden, Schermbeck A und B, Oelbergen wurde ein zweistegiger Plattenbalken-Querschnitt ausgeführt, die elastische Zwischenlage unter den „Gründungsbalken“ konnte entfallen.

Die Brücke Kleinenbremen unterscheidet sich von den anderen hier behandelten Talbrücken in wesentlichen Punkten. Als Naturstein wurde bei der Talbrücke Kleinenbremen gelb-weißer Pirnaer Sandstein verwendet. Die Stützweiten sind deutlich größer (max. 30,0 m, bei der Brücke Oelbergen max. 22,0 m, bei den anderen Talbrücken max. 19,0 m). Bei allen Talbrücken wurde bei Kriegsende jeweils der höchste Pfeiler gesprengt, worauf dieser Pfeiler und die beiden anschließenden Gewölbe zusammenbrachen. Bei der Talbrücke Kleinenbremen wurden die zerstörten Gewölbe aus Stahlbeton neu erstellt, bei allen anderen hier behandelten Talbrücken wieder aus Naturstein-Mauerwerk.

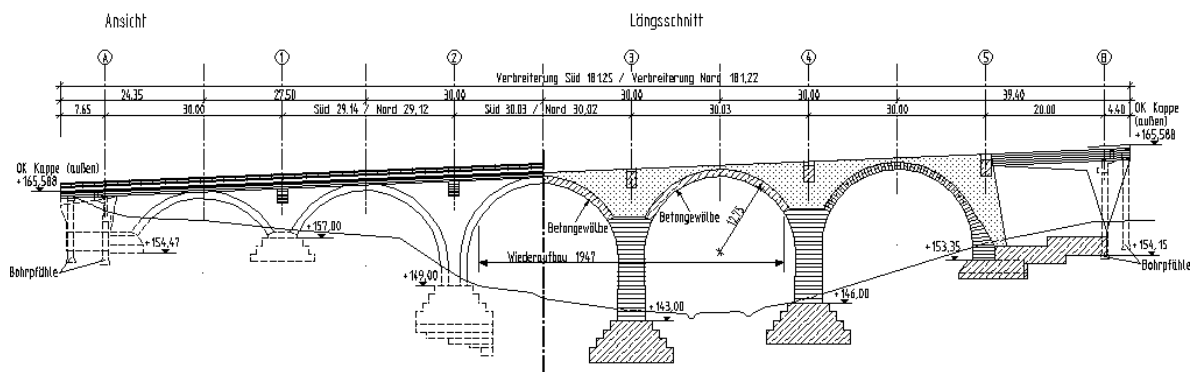


Bild 4: Teilansicht / Teillängsschnitt der Talbrücke Kleinenbremen. Zustand nach Verbreiterung um je eine Spur an den Längsseiten. Pfeiler und Gewölbe aus Naturstein gemauert. Verfüllung über den Gewölben und den Pfeilerköpfen aus Bruchstein-Mauerwerk. Gewölbe zwischen den Achsen 2 bis 4 nach Sprengung neu als Stahlbetongewölbe aufgebaut.

Als einzige der behandelten Talbrücken war die Brücke Kleinenbremen bereits verbreitert worden, dafür war an beiden Seiten je eine zusätzliche Spur auf Spannbeton-Hohlkastenträgern neu geschaffen. Die Hohlkastenträger lagerten auf den Auskragungen von in den Stützenachsen neu angeordneten Stahlbeton-Querträgern (Bild 5).

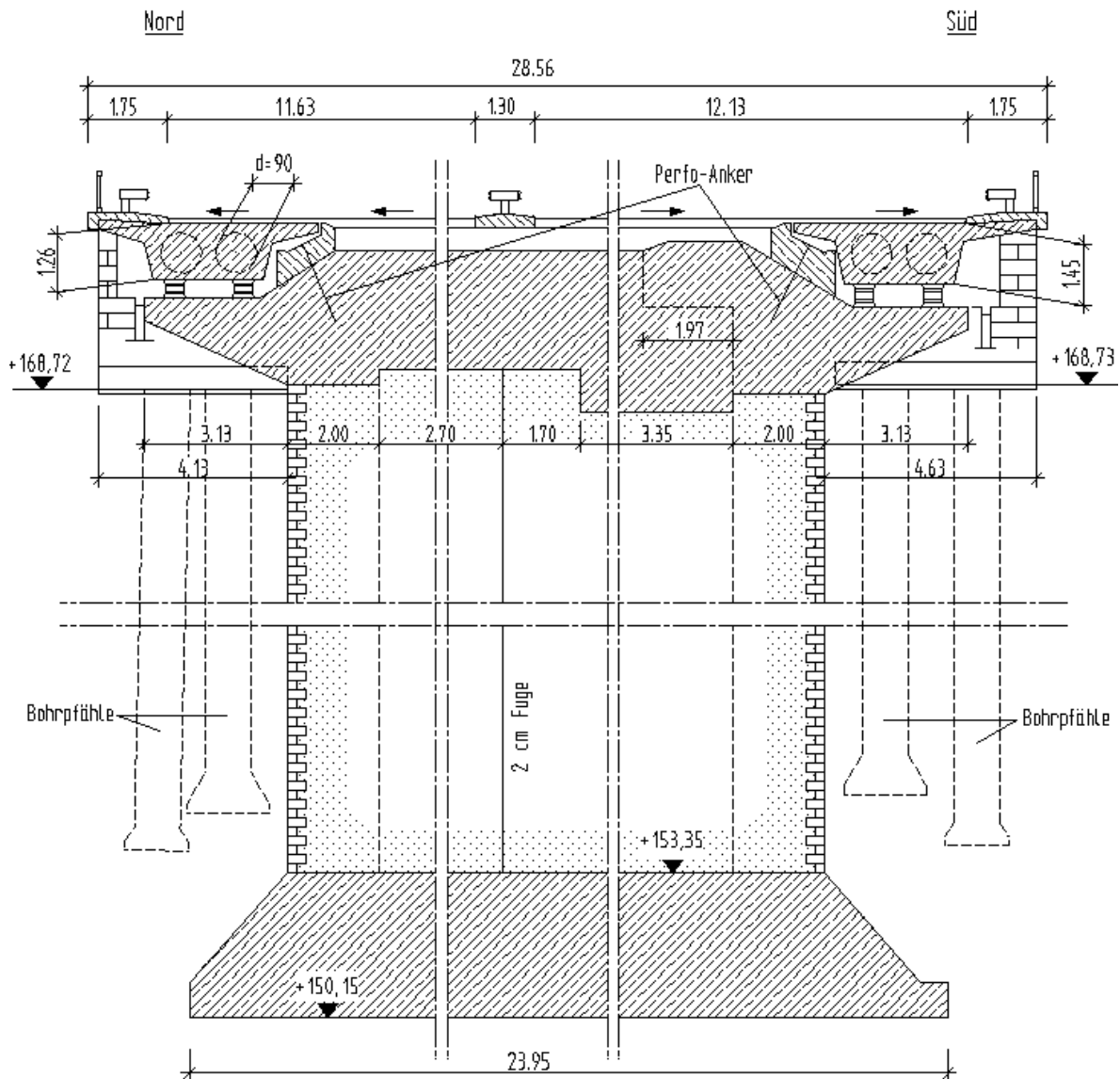


Bild 5: Querschnitt in Pfeilerachse durch die Talbrücke Kleinenbremen. Zustand nach Verbreiterung um je eine Spur an den Längsseiten. Neu angeordneter Querbalken, auf den Auskragungen sind die Spannbetonträger der Verbreiterung gelagert.

Die Breite der vorher vierspurigen Autobahn genügte nicht mehr dem gestiegenen Verkehrsaufkommen der A2, daher erfolgt ein sechsstreifiger Ausbau. Aus Denkmalschutz- und Kostengründen kam ein Abbruch der Brücken nicht in Frage. Gemäß Planung der Straßenbauverwaltung des Landes Niedersachsen wurde jeweils ein Parallelbauwerk erstellt, das die Fahrbahnen einer Richtung aufnimmt. Der Verkehr der Gegenrichtung wird über die mit einem neuen Überbau versehenen alten Brücken geführt. Die Talbrücke Arensburg erhielt 1989 eine Parallelbrücke und wurde in den Jahren 1990/91 aufgestän-

dert. Bei den Talbrücken Schermbeck A, Schermbeck B, Luhden und Oelbergen wurden diese Baumaßnahmen in den Jahren 1994 bis 1999 durchgeführt und waren vor der Expo 2000 abgeschlossen. Im Jahr 2004 wurde die Parallelbrücke Kleinenbremen erstellt, die Aufständering der Natursteinbrücke wird in diesem Jahr fertig (Bild 6).

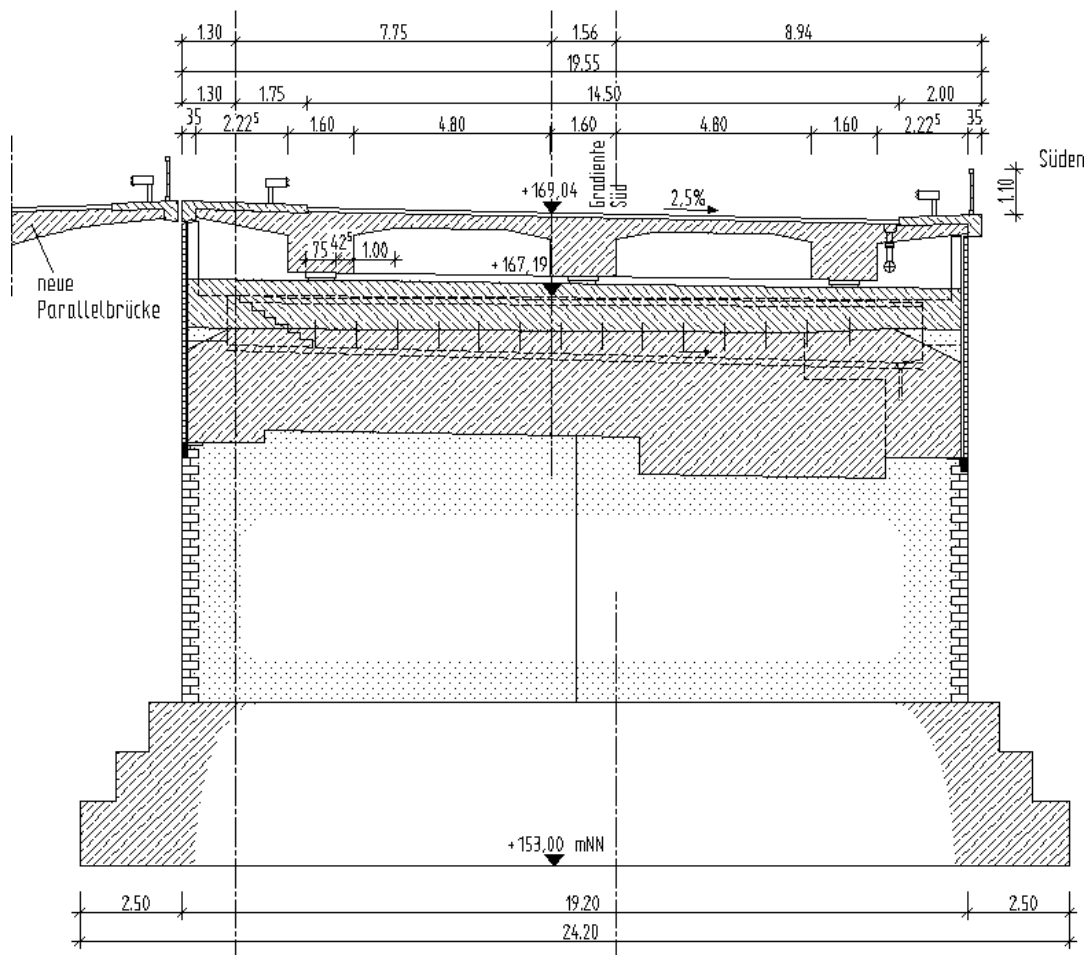


Bild 6: Querschnitt an Pfeiler Achse 1 durch die Talbrücke Kleinenbremen. Zustand nach Aufständering. Überbau dreistegiger Plattenbalken-Querschnitt, auf neuen Querbalken in den Pfeilerachsen gelagert. Die ursprünglichen Querbalken verbleiben im Bauwerk (Kragarme abgetrennt).

Im folgenden wird über die Entwurfsüberlegungen und die von uns durchgeführten Untersuchungen für die „Gründung“ der aufgeständerten neuen Überbauten auf der Verfüllung über den Pfeilern berichtet.

2. Besonderheiten der Konstruktion und der Herstellung der Talbrücken

Zum Zeitpunkt der Erstellung der Natursteinbrücken wurden Baumaterialien aus der Umgebung der Baustellen (Obernkirchner Sandstein) eingesetzt. Eine Ausnahme bildet die Talbrücke Kleinenbremen, verwendet wurde hier Pirnaer Sandstein. Die für die Gewölbe und für die tragende Vorsatzschale der Pfeiler erforderlichen Sandsteine wurden erst auf der Baustelle zugerichtet. Der anfallende Gesteinsbruch wurde als Verfüllung über den Gewölben und im oberen Kernbereich der Gewölbepfeiler in Schichthöhen von 20 bis 30 cm eingebracht, mit Mörtel überdeckt und dieser eingestampft. In Abhängigkeit von Mörtelmenge, Mörtelkonsistenz und Verdichtungsgrad traten Hohlstellen in der Verfüllung (im folgenden Füllmaterial genannt) auf, was zu verminderten Festigkeiten führte (Bild 7). Bei der Talbrücke Kleinenbremen besteht, wie sich bei den Untersuchungen zeigte, die gesamte Verfüllung aus Bruchstein-Mauerwerk.

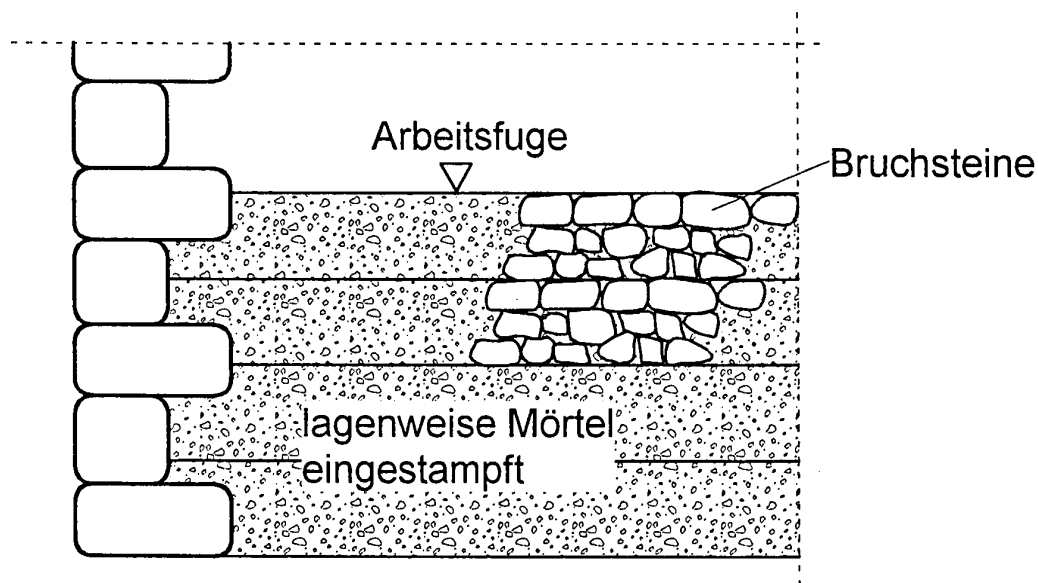


Bild 7: Schema der Herstellung der Verfüllung über den Gewölben und den Pfeilerköpfen. Bei Verwendung von zu wenig Mörtel oder ungenügender Verdichtung entstehen oberhalb der Arbeitsfugen Schichten mit starkem Lunkeranteil.

3. Erhaltungszustand

Das Natursteinmauerwerk der Brücken ist überwiegend in gutem Zustand. Nur vereinzelt sind schieferartige Ablösungen an den Steinoberflächen aufgetreten. Die Brücken weisen Risse mit zum Teil erheblicher Länge und Rissbreite auf.

Wie bei vielen dieser Brücken zeigten auch die Talbrücken der A2 starke Durchfeuchtungen. Die ursprünglich abdichtend wirkenden Fahrbahnen waren im Laufe der Zeit gerissen und ließen Niederschlagswasser in die Konstruktion eindringen. Kalkaussinterungen und Frostschäden des nassen Mauerwerks waren die Folge.

Die Gewölbe und Pfeiler der Natursteinbrücken sind noch tragfähig, die bereits eingetretenen Schäden und die gegenüber der ursprünglichen Auslegung inzwischen stark gestiegenen Verkehrslasten lassen es aber vorteilhaft erscheinen, die Bestands-Bauteile künftig zu entlasten.

4. Vorüberlegungen zum Entwurf der Aufständungen der Talbrücken

Ziel der Entwürfe war es, bei den Umbaumaßnahmen die Tragfähigkeit zu erhöhen (ursprünglich Brückenklasse I, DIN 1072 (09. 1931), jetzt Brückenklasse 60/30 und MLC 100/50 gefordert) und gleichzeitig die Linienführung der Autobahn zu verbessern. Neue freitragende Überbauten aus Spannbeton mit Plattenbalkenquerschnitt auf den vorhandenen Gewölbebrücken leiten die Lasten in die Pfeilerachsen ein (Bilder 2 und 3). Daher werden die Natursteingewölbe nach erfolgtem Umbau nur noch aus ihrem Eigengewicht (und damit deutlich geringer als bisher) belastet. Für die Unterbauten erhöht sich zwar etwas die Auflast, diese ist aber dann „zentriert“. Nach dem Umbau wird die alte Konstruktion also trotz vorhandener Schäden in Form von Rissbildungen, Kalkaussinterungen und Steinabplatzungen für die Eigengewichtslasten ausreichend tragfähig und dauerhaft sein.

Für die Erhöhung der Tragfähigkeit bzw. Sanierung geschädigter Gewölbebrücken wurden verschiedene „Standard-Bauweisen“ entwickelt. Einige Beispiele dafür werden nachstehend kurz erläutert.

Der vollständige Abbruch und Neuaufbau mit dem alten Material, wie er bei kleinen Brücken noch vertreten werden kann, ist bei Talbrücken dieser Größenordnung wirtschaftlich nicht tragbar und bei der überwiegend noch guten Bausubstanz auch nicht ernsthaft zu erwägen.

In vielen Fällen wurden die Gewölbe aus Stahlbeton neu erstellt oder oberhalb der alten Natursteingewölbe neue Stahlbetongewölbe eingebaut. Abgesehen von denkmalschützerischen Bedenken gegen derartige Lösungen und den unserer Meinung nach noch nicht endgültig beantworteten Fragen des Zusammenwirkens alter und neuer tragender Systeme

me dieser Art müssen dabei sehr große Mengen Füllmaterial und gegebenenfalls auch Natursteinmauerwerk abgebrochen und durch neues Material ersetzt werden.

Eine weitere bereits ausgeführte Variante besteht darin, freitragende neue Überbauten auf die Brücke zu legen und nach Ausräumen des Füllmaterials über den Pfeilern bis zum gut tragfähigen, gemauerten Pfeilerkopf "versteckte Pfeiler" anzuordnen oder durch „Tiefgründungen“ die Auflagerkräfte des neuen Überbaus auf die Pfeilerschäfte zu übertragen.

Aus wirtschaftlichen Überlegungen war bei den Brücken der A2 hingegen zu prüfen, ob die Lasten der neuen Überbauten auch durch eine "Flachgründung" über Auflagerbalken auf die Verfüllung oberhalb der Pfeilerköpfe ausreichend sicher abgegeben werden können, ohne dass unzulässig hohe Druck- und Zugspannungen im Bauwerk auftreten. Druckspannungen zwischen "Gründungssohle" und Verfüllung können durch die Größe der „Gründungsfläche“ an die Tragfähigkeit der Verfüllung angepasst werden.

Zugspannungen (insbesondere Spaltzugspannungen infolge Lasteinleitung) sind kritisch, da Natursteinmauerwerk und Verfüllung eine nur geringe Zugfestigkeit besitzen. Die Ausbildung der "Gründung" musste so erfolgen, dass Zugspannungen vermieden werden, da Zusatzmaßnahmen wie z. B. Zuganker unerwünscht waren.

5. Durchgeführte Untersuchungen

5.1 Materialuntersuchungen

Zur Feststellung der mechanischen Eigenschaften der Baumaterialien (Druckfestigkeit, Zugfestigkeit, E-Modul und Spannungs-Dehnungsverhalten), der Bindemittelart sowie des Bindemittelgehaltes des Mörtels und zur Erkundung von Art und Umfang vorhandener Hohlstellen wurden Bohrkern (Bohrungen \varnothing 70 mm bis \varnothing 150 mm) aus den Bauwerken entnommen. Vorab wurden während der Planungsphase je ein ursprünglicher und ein wieder aufgebauter (früher gesprengter) Pfeiler abgebohrt. Wegen des laufenden Verkehrs auf den Brücken mussten die in den Bildern 8 und 9 beispielhaft dargestellten Schrägbohrungen von unten bis in den "Gründungsbereich" der neu zu erstellenden Auflagerbalken geführt werden. Zur Bestätigung, dass die hierbei angetroffenen Verhältnisse auf sämtliche Pfeiler übertragbar sind, wurden später (während der Bauphase) alle Pfeilerschäfte abgebohrt. Aus dem vorliegenden Bohrgut waren für Vorsatzschale und Kernbereich der Brücken repräsentative Bohrkernabschnitte für Materialuntersuchungen auszuwählen (zylindrische Prüfkörper, Schlankheit $h/d = 1$ bis 2,5). Dabei wurde zwischen Sandstein-

Mauerwerk (Serie A), Füllmaterial (Verfüllung) ohne Lunker (Serie B) und Füllmaterial mit Lunker (Serie B1) unterschieden.

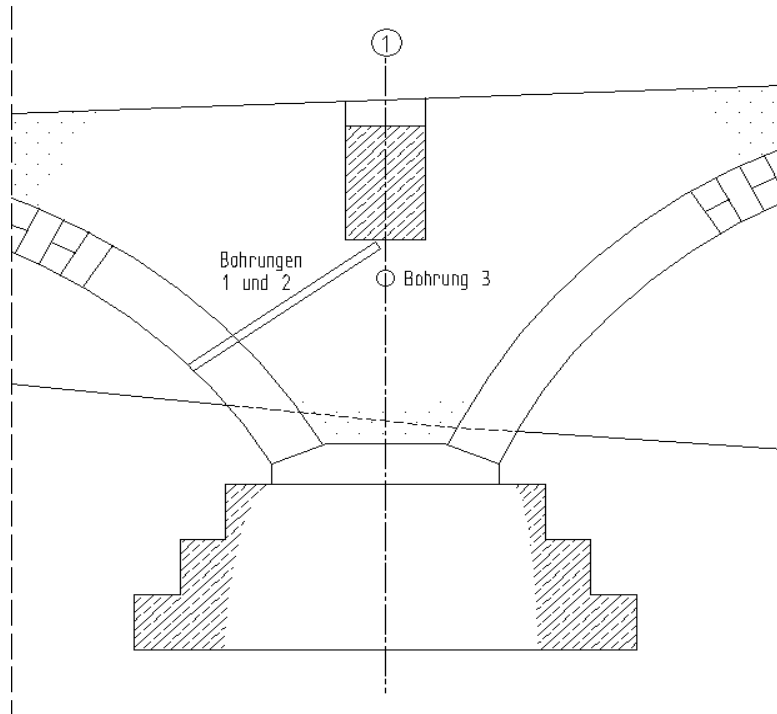


Bild 8: Lage und Richtungen der Erkundungsbohrungen am Pfeiler 1 der Talbrücke Kleinenbremen, hier dargestellt im Längsschnitt der Brücke.

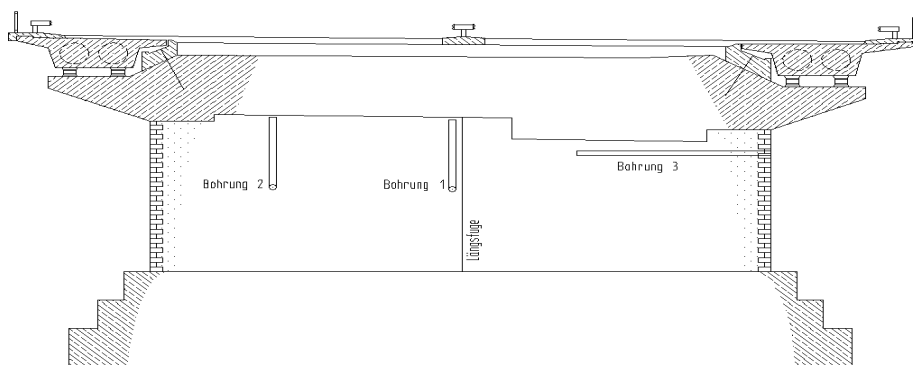


Bild 9: Lage und Richtungen der Erkundungsbohrungen am Pfeiler 1 der Talbrücke Kleinenbremen, hier dargestellt im Querschnitt in Pfeilerachse.

5.1.1 Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen

Die mit Hilfe statistischer Untersuchungsmethoden aufbereiteten Prüfergebnisse werden im folgenden beispielhaft für die Talbrücke Arensburg angegeben.

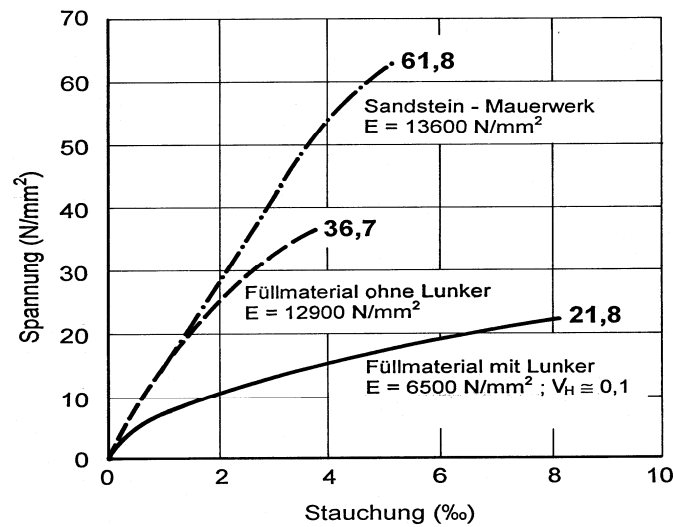


Bild 10: Gemessene Spannungs-Dehnungslinien von Sandstein-Mauerwerk und dem Füllmaterial, hier Werte für die Talbrücke Arensburg dargestellt.

Für das Füllmaterial war eine Einstufung in die Festigkeitsklassen nach DIN 1045 gewünscht. Das Füllmaterial entspricht mit $\beta_{WN} = 17,3 \text{ N/mm}^2$ hinsichtlich seiner Festigkeit einem Beton der Festigkeitsklasse B 15. Ihm wurde ein Rechenwert der Druckfestigkeit von $\beta_R = 10,5 \text{ N/mm}^2$ zugewiesen.

Das gegenüber den anderen Talbrücken deutlich bessere Gefüge bei der Talbrücke Kleinenbremen erlaubte es, hier auf die Bestimmung der Festigkeiten des Natursteinmauerwerks zu verzichten.

5.1.2 Zugfestigkeiten untersuchter Materialien

Die Zugfestigkeit des Sandstein-Mauerwerks wurde rechnerisch zum Lastabtrag nicht planmäßig angesetzt. Zur Beurteilung des Ausmaßes zusätzlicher Rißbildung bei den untersuchten Varianten der Lasteinleitung wurde jedoch ein Rechenwert benötigt. Selbstverständlich ist uns bewusst, wie fraglich die Untersuchung an derart kleinen Proben und die Übertragung auf das Bauwerk ist. Die genannten Zugfestigkeiten wurden daher nur als Anhaltswerte betrachtet und in den Berechnungen entsprechend konservativ berücksichtigt.

5.1.3 Elastizitätsmodul/Spannungs-Dehnungsverhalten

Der Elastizitätsmodul wurde an Probekörpern mit einem Durchmesser von 70 mm und 140 mm (Schlankheit h/d 2,0 bis 2,5) nach DIN 1048 Teil 5, Abschnitt 7.5 ermittelt.

Die Entnahme großer Prüfkörper, etwa nach DIN 18554 Teil 1 oder DIN 1048, aus den unter Verkehr stehenden Brückengewölben kam hier wegen dadurch entstehender Querschnittsschwächungen nicht in Frage. Daher waren die Mauerwerksdruckfestigkeit und der dazugehörige E-Modul aus den vorliegenden Daten aus Sicherheitsgründen relativ konservativ abzuschätzen. Die an Prüfzylindern aus Sandstein-Mauerwerk gemessenen Werte des E-Moduls wurden für Traglastberechnungen mit dem Rechenwert von $E_{mw} = 400 \beta_R$ (DIN 1053, Abschnitt 7.2) verglichen. Mit diesem Wert (Sekantenmodul) wurde berücksichtigt, dass das Mauerwerk mit zunehmender Belastung "weicher" wird und größere Verformungen zulässt, zumal hier in den Lagerfugen des Sandstein-Mauerwerks Fehlstellen größeren Ausmaßes zu erwarten waren. Es wurde daher für weitere Berechnungen von einem reduzierten E-Modul (Werte siehe Tabelle 1) des Sandstein-Mauerwerks ausgegangen.

Bei der Talbrücke Kleinenbremen wurde auch auf die Ermittlung von Elastizitätsmodul und Spannungs-Dehnungslinien verzichtet.

Brücke	Materialkennwert	Materialwert	
		Sandsteinmauerwerk	Füllmaterial
Arensburg	Druckfestigkeit [N/mm ²]	17,6	10,5
Schermbek A, B und Luhden		20,2	3,5
Oelbergen		16,9	3,5
Arensburg	E-Modul (Druck) [N/mm ²]	12 000	12 000
Schermbek A, B und Luhden		10 000	7 000
Oelbergen		10 000	7 000

Tabelle 1: Aus Materialuntersuchungen ermittelte Rechenwerte der Druckfestigkeit und des E-Moduls

5.2 Überlegungen zur „Gründung“ auf der Auffüllung

Die Brückenpfeiler sind bei den Brücken Arensburg, Luhden, Schermbek A und B durch ein Spargewölbe in Brückenquerrichtung in zwei Pfeilerschäfte gegliedert. Bei den Talbrücken Oelbergen und Kleinenbremen wurden durch eine mittlere Fuge die Pfeiler in zwei

Schäfte geteilt und ohne Spargewölbe ausgeführt. Neue „Gründungsbalken“, die über Längsfugen geführt sind, können (da die Setzungen aus dem Eigengewicht der Brücken längst abgeklungen sind) jetzt keine negativen Auswirkungen haben.

Bei der Talbrücke Arensburg, als erste der Brücken aufgeständert mit einem dreistegigen Plattenbalken-Querschnitt, wurde es noch vermieden, oberhalb der Spargewölbe der Pfeiler die Auflagerkräfte des mittleren Steges in die Pfeiler einzuleiten. Daher wurde bei dieser Brücke im mittleren Bereich zwischen „Gründungsbalken“ und Verfüllung eine weichelastische Schicht aus Mineralfasermatten angeordnet, so dass der freitragende „Gründungsbalken“ die Auflagerkräfte aus dem mittleren Steg des Überbaus in die Achsen der Pfeilerschäfte ableitet (Bild 3).

Bei den Talbrücken Luhden, Schermbeck A und B, Oelbergen sind die Aufständungen mit zweistegigem Plattenbalken-Querschnitt ausgeführt. Es wurde hier auf die weichelastische Schicht verzichtet. Dass es möglich ist, auch oberhalb der Spargewölbe Lasten einzuleiten, belegten rechnerische Untersuchungen (siehe den folgenden Abschnitt), allerdings würde dies zu verstärkter Rissbildung im Scheitel der Spargewölbe führen.

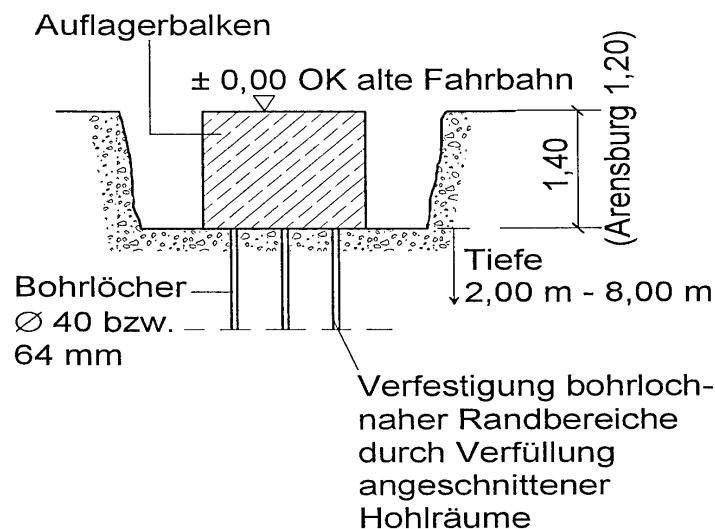


Bild 11: Auflagerbalken in den Pfeilerachsen zur Auflagerung des neuen Überbaus. Hier dargestellt Ausbildung bei den Talbrücken Arensburg, Luhden, Schermbeck A und B, Oelbergen (vgl. Bilder 2 und 3). Der Bereich unterhalb der neuen Auflagerbalken wird durch einen fließfähigen Zementmörtel, eingebracht in Tränkbohrungen, verfestigt.

Wegen der größeren Stützweite war es bei der Brücke Kleinenbremen erforderlich, für die Aufständung einen dreistegigen Plattenbalken zu wählen. Da bei dieser Brücke keine

Spargewölbe in den Pfeilern vorhanden sind, ist hier die Ableitung der Auflagerkraft aus dem mittleren Steg unproblematisch.

Bei der Talbrücke Kleinenbremen sollten die seitlich später angeordneten Spannbeton-Überbauten entfernt, die Kragarme der Querbalken abgetrennt und dieser Querbalken als Auflagerbalken für die neue Aufständigung benutzt werden. Leider zeigte sich bei der Begutachtung, dass die Bewehrung des Querbalkens für die neue Funktion nicht ausreichend ist. Das wird verständlich, wenn man die Momentenverteilung betrachtet. Die Querbalken wurden nahe der Stirnwände aufgelagert, dazwischen waren sie freitragend ausgebildet. Das Kragmoment ist bemessensbestimmend, im Mittelbereich ist das negative Moment zwar etwas kleiner, es bildet sich jedoch kein positives Feldmoment aus (Bild 12). Die gesamte Biegezugbewehrung liegt daher an der Oberseite der Querbalken.

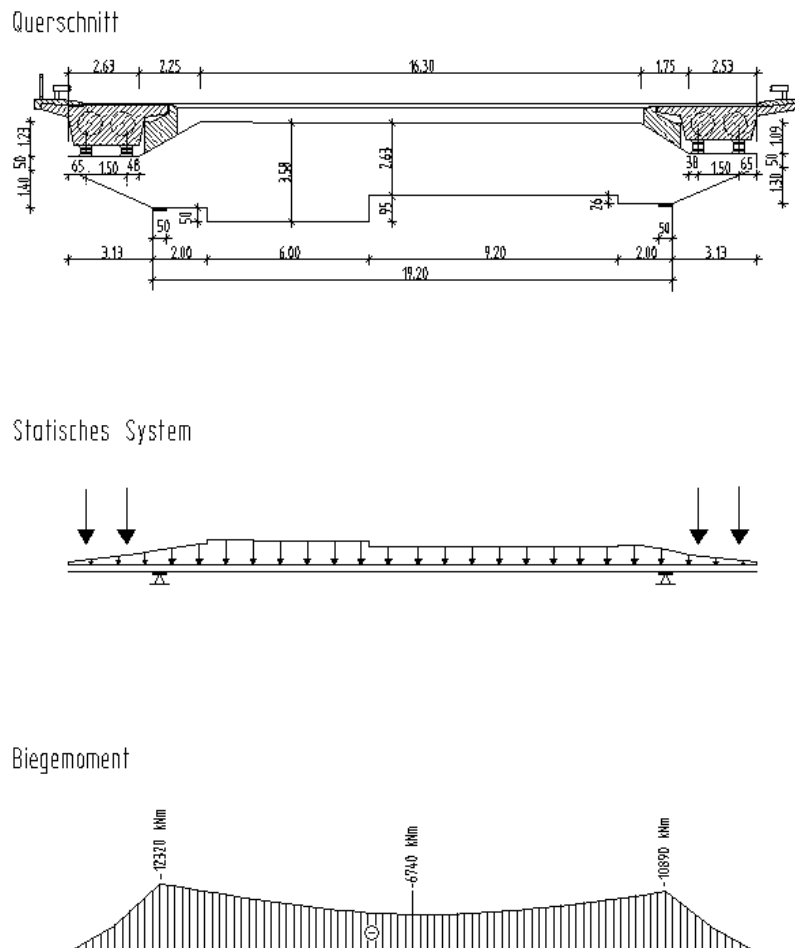
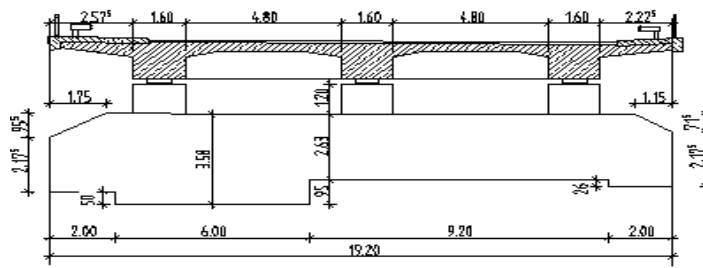
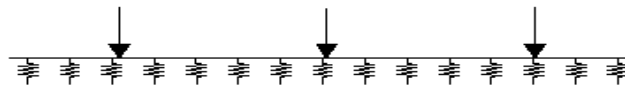


Bild 12: Querschnitt, statisches System und Biegemomentenverteilung der Auflagerbalken in den Pfeilerachsen der Talbrücke Kleinenbremen. Zustand nach Verbreiterung (beidseitig je eine Spur) der alten Natursteinbrücke. Der Auflagerbalken hat nur negative Biegemomente aufzunehmen, die Biegezugbewehrung liegt oben im Auflagerbalken.

Querschnitt



Statisches System



Biegemoment

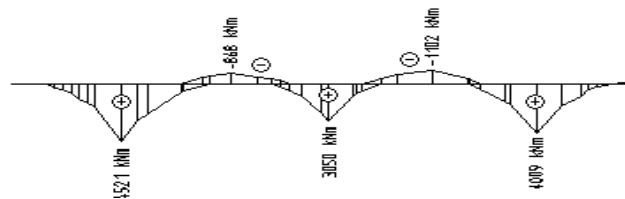


Bild 13: Querschnitt, statisches System und Biegemomentenverteilung der Auflagerbalken in den Pfeilerachsen der Talbrücke Kleinenbremen, Planung für die Aufständering. Der Auflagerbalken hat jetzt auch große positive Biegemomente aufzunehmen, die im Balken vorhandene unten liegende Biegezugbewehrung ist dafür nicht ausreichend.

Nach Aufständering treten überwiegend positive Momente auf, die dafür unten im Querbalken erforderliche Bewehrung fehlt. Hier sind bei 1,80 m Balkenbreite lediglich 8 Bewehrungsstäbe $\varnothing 16$ mm aus St II angeordnet, für das neue System und die neue Belastung absolut unzureichend. Die Verteilung der Auflagerkräfte aus der Aufständering in Querrichtung der Brücke musste daher durch einen neuen biegesteifen Stahlbetonbalken erfolgen. Das ist mit relativ wenig Aufwand möglich, statt der vorgesehenen drei Lagersockel in jeder Querachse wird ein durchlaufender Balken ausgebildet. Die ausreichende Bügelbewehrung der vorhandenen Querbalken kann aber zur Lastverteilung in Brückenlängsrichtung genutzt werden. Es war daher möglich, die Verfestigung des Mauerwerksgefüges unterhalb der vorhandenen Querbalken sparsamer auszubilden und nur zwei Streifen längs der unteren Kanten der Querbalken zu verfestigen (Bilder 14 und 20).

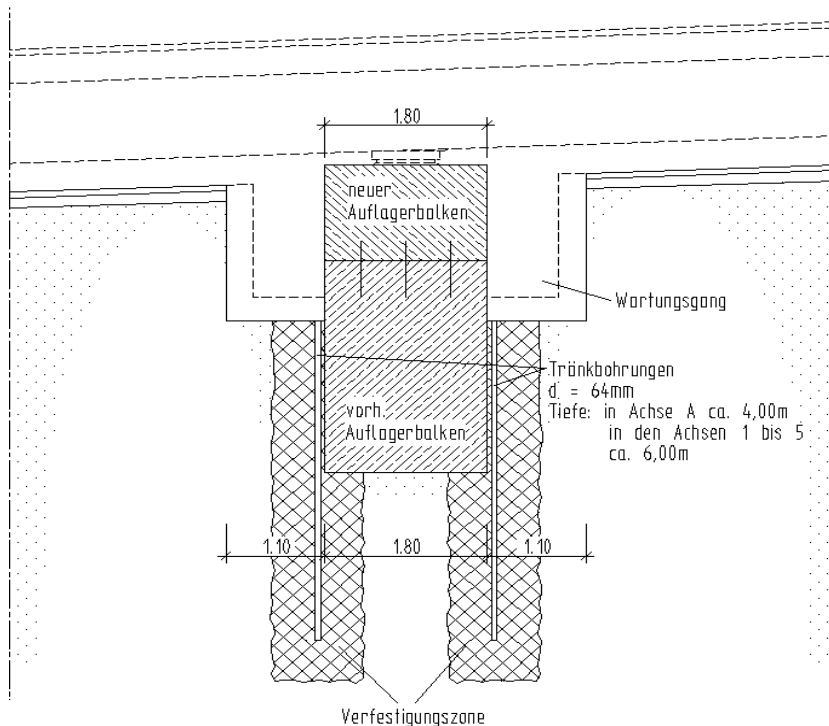


Bild 14: Auflagerung der Aufständering bei der Talbrücke Kleinenbremen. Tränkbohrungen neben dem vorhandenen Auflagerbalken eingebracht. Auf dem vorhandenen Auflagerbalken ist ein neuer biegesteifer Auflagerbalken aus Stahlbeton angeordnet.

5.3 Rechnerische Untersuchungen

Für die Festlegung von Rechenwerten der Materialfestigkeit wurden auch Ergebnisse früherer Untersuchungen an Gewölbebrücken, die sich ebenfalls im Zuge der Linienführung der A2 befinden, herangezogen. Die Berechnungen erfolgten mit der FE-Methode. Die "Flachgründung" bewirkt in Brücken-Längsrichtung Spaltzugspannungen. Durch Berechnungen war nachzuweisen, dass diese Spaltzugspannungen durch Spannungen aus den Gewölbe-Auflagerkräften (Horizontalschub) auch dann, wenn die Gewölbe nur ihr Eigengewicht tragen, ausreichend überdrückt werden. Bild 15 zeigt das FE-Modell.

Die Untersuchungen wurden für verschiedene Breiten und Höhenlagen der "Gründungssohle" durchgeführt. Es ergab sich, dass bei allen bautechnisch sinnvollen Querschnittsabmessungen der "Gründungen" keine Zugspannungen in Brücken-Längsrichtung auftreten. Daher konnte auf horizontale „Verankerungen“ in den Stützenköpfen verzichtet werden.

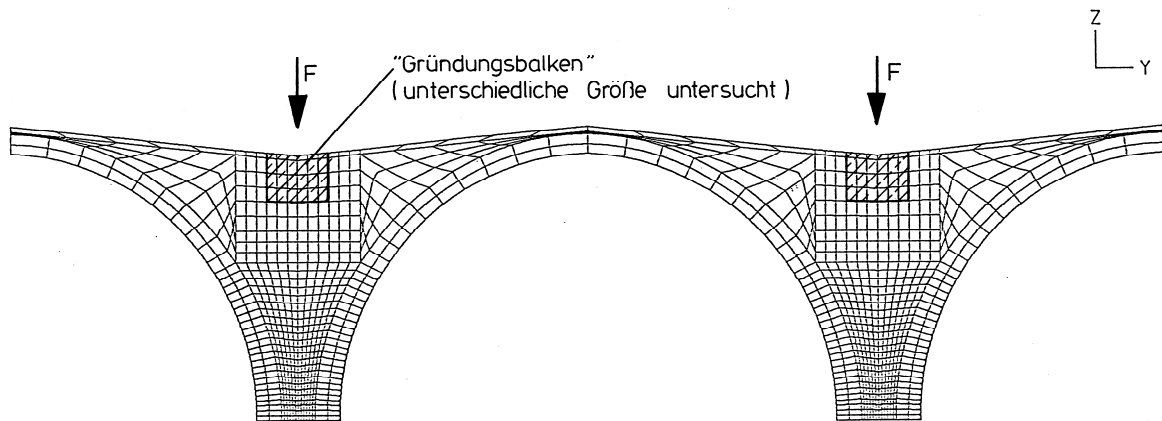


Bild 15: FE-System zur Ermittlung des Spannungszustandes unterhalb der Auflagerbalken der Aufständungen.

Das gleiche FE-System wurde auch für die rechnerischen Untersuchungen der Spannungen in den Gewölben und Pfeilern während der Bauzustände genutzt. Die Frischbetonlast der neuen Überbauten musste dabei von den Gewölben getragen werden. Hier wurde ein Zusammenwirken von gemauerten Gewölbe und Füllmaterial angesetzt („auswandern“ der Stützlinie aus dem Querschnittskern des Mauerwerkgewölbes zugelassen), da die rechnerischen Druckspannungen vom Füllmaterial aufgenommen werden können.

Bei der Talbrücke Arensburg sind die Spargewölbe relativ hoch geführt, bei den anderen Talbrücken sind die Verhältnisse günstiger, da die Scheitel der Spargewölbe tiefer liegen (bzw. bei den Brücken Oelbergen und Kleinenbremen überhaupt keine Spargewölbe angeordnet sind). Bei diesen Brücken schien die Übertragung von „Gründungslasten“ auch im Bereich oberhalb der Spargewölbe möglich. Durch rechnerische Untersuchungen der Pfeiler (als Scheibe für den ebenen Spannungszustand, Elementnetz für die FE-Berechnung siehe Bild 16) wurden die Spannungen aus Eigengewicht der alten Konstruktion und für den Zustand nach Aufständering (hier alternativ untersucht für einen zwei- bzw. dreistegigen Überbau-Querschnitt) ermittelt.

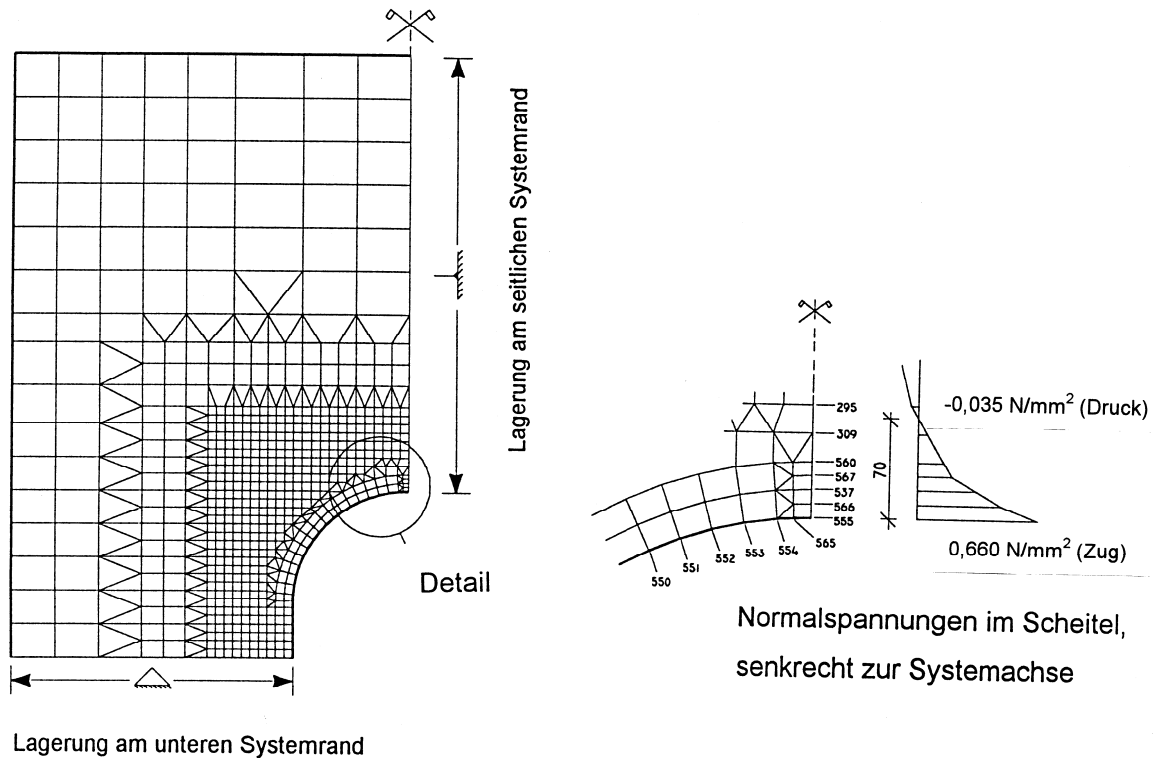


Bild 16: Elementnetz für die FE-Berechnung im Scheitelbereich der Spargewölbe, Talbrücke Arensburg.

Die Rechenergebnisse ergaben, dass schon unter Eigenlast der alten Konstruktion im Scheitel der Spargewölbe Zugspannungen auftreten. Dies erklärt die an den Brücken häufig vorgefundenen senkrecht verlaufenden Risse an dieser Stelle. Die Aufständigung mit einem neuen Überbau vergrößert diese Zugspannungen, wobei gegenüber dem gewählten zweistegigen Überbau ein dreistegiger Überbau rd. 10 % größere Zugspannungen und einen um ca. 5 % im Scheitel höher reichenden Zugbereich hervorruft. Die späteren Aufständigungen bei den Talbrücken Luhden, Schermbeck A und B wurden mit zweistegigen Plattenbalkenquerschnitten ausgeführt, um die Bildung neuer Risse oder Rissaufweitung und Rissfortschritt in den Spargewölben möglichst zu vermeiden. Dabei konnte dann auf die weichelastische Zwischenschicht unter den „Gründungsbalken“ verzichtet werden.

5.4 Untersuchungen und Zusatzmaßnahmen während der Bauausführungen

Es war nicht auszuschließen, dass Hohlräume im Füllmaterial unter örtlich begrenzten Lasten bzw. direkt unter der „Gründungsebene“ zu lokalen Festigkeitseinbußen führen. Im schlimmsten denkbaren Fall kann ein derartiger Hohlraum sogar „einstürzen“. Üblicherweise werden bei derartigen Fehlstellen im Material Mörtelverpressungen vorgenommen, wenn nicht ein Materialaustausch erfolgt. Im Zuge von beabsichtigten Rissverpressungen

wurde lange vor Beginn der Umbaumaßnahmen an einer der Talbrücken eine Mörtelverpressung vorgenommen. Dabei zeigte sich, dass Unmengen von Mörtel in das Bauwerk gepresst werden konnte. Bedingt durch zusammenhängende Hohlräume in der Verfüllung über den Gewölben, fließt der Verpressmörtel überall hin und tritt an allen Rissen und undichten Fugen aus, ohne diese kraftschlüssig zu füllen.

Eine Gefügeverbesserung der Verfüllung wurde nicht insgesamt, sondern nur unterhalb der Lasteinleitungsebene in Bereichen großer Hohlraumvorkommen für erforderlich gehalten. Diese Stellen waren zu lokalisieren. Weiterhin war sicherzustellen, dass an keinem Pfeiler ungünstigere Materialfestigkeiten vorliegen, als bei den Voruntersuchungen ermittelt. Bild 17 zeigt die Regelanordnung dieser Tränkbohrungen bei den Talbrücken Arensburg, Luhden, Schermbeck A und B, Oelbergen. Bei als hohlraumreich eingestuften Pfeilern wurden die Achsabstände der Bohrungen bis auf 0,25 m verkleinert und die Tiefe bis 8,0 m vergrößert.

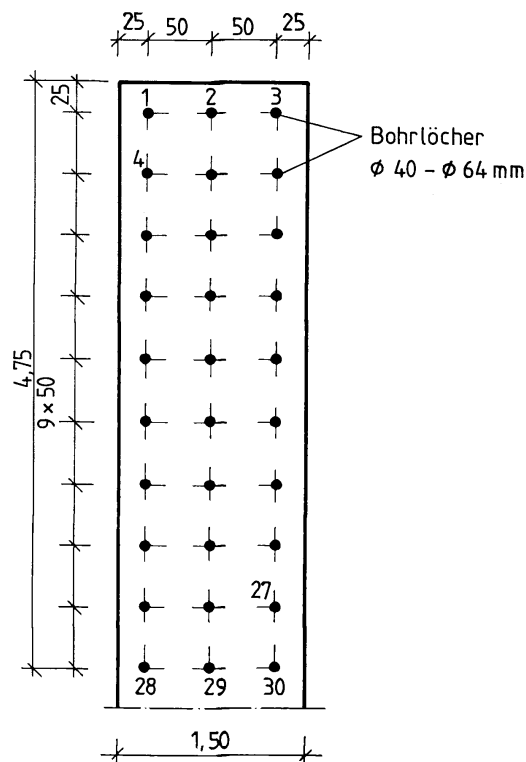


Bild 17: Regelanordnung (Grundrissdarstellung) der Tränkbohrungen unter den Auflagern bei den Talbrücken Arensburg, Luhden, Schermbeck A und B, Oelbergen. Tiefe der Bohrungen zwischen 2,0 und 8,0 m, abhängig vom Lunckeranteil des Gefüges der Auffüllung über den Gewölben und Pfeilerköpfen. Bei sehr hohem Lunckeranteil wurden zusätzliche Bohrungen im Abstand von 25 cm angeordnet.

Zur Beurteilung der Festigkeitseigenschaften und der Gefügebeschaffenheit des Zwickelmauerwerks der Gewölbebrücke Kleinenbremen im Bereich der Querbalken wurden in den Achsen 1 bis 5 je Überbauhälfte zwei und in Achse A insgesamt drei Kernbohrungen \varnothing 80 mm hergestellt. Mit den zwischen 4,0 m und bis zu 14,0 m tiefen Bohrungen wurden insgesamt 23 Bohrkern des Zwickelmauerwerks zwischen UK Auflagerbalken und Gewölbemauerwerk gezogen. Die Sichtprüfung der erbohrten Kerne kann größere zusammenhängende Fehlstellen in der Gefügestruktur aufzeigen, die für die Tragfähigkeit der Auffüllung ungünstig wären (Bild 18).



Bild 18: Bohrkern 5-3 der Kernbohrung \varnothing 80 mm der Talbrücke Kleinenbremen in Achse 5 im Bereich des Querbalkens. Das angebohrte Gefüge des Zwickelmauerwerkes unterhalb des Querbalkens ist inhomogen. Mauerwerk mit geschlossenem Gefüge wird durch z. T. haufwerksporige Schichten unterbrochen.

Der Zustand der Bohrlochwandungen wurde mittels Video-Befahrung mit einem Kanalfernaugauge erfasst. Die visuelle Begutachtung der Aufzeichnungen des Kanalfernauges zeigte vorhandene Lunker und offene Mörtelfugen zwischen den Sandsteinbrocken (Bild 19).

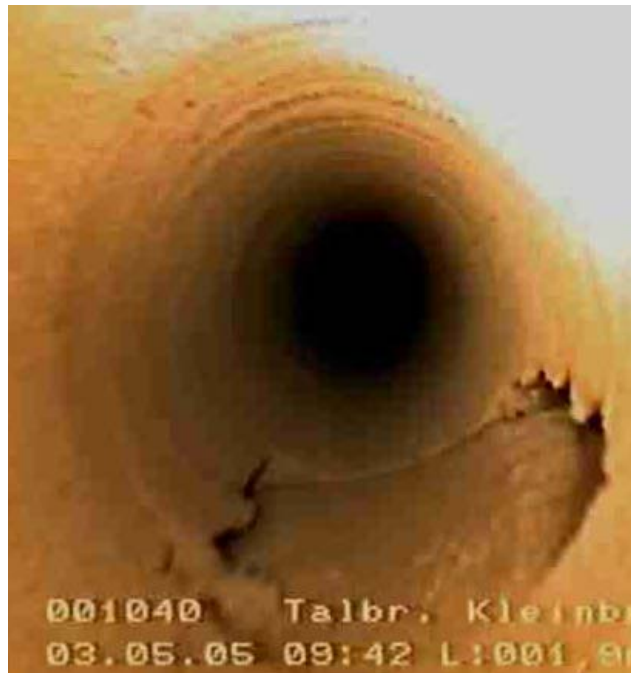


Bild 19: Fotoausschnitt („Screenshot“) aus der Videoaufzeichnung der Befahrung der Probebohrung 1-1 (\varnothing 80 mm) mit dem Kanalfernaug, Tiefe: ca. 2,0m , Achse 1 - Bohrung 1. Die Bohrung hat einen Hohlraum angeschnitten.

Die Sichtprüfung der Bohrkerns und die Durchsicht der Filmaufzeichnung ergab, dass das Gefüge des Zwickelmauerwerkes unterhalb der Querbalken inhomogen ist. Mauerwerk mit geschlossenem Gefüge wird durch z. T. haufwerksporige Schichten unterbrochen.

Wegen der geringen Anzahl an Bohrungen konnte nicht ausgeschlossen werden, dass das Mauerwerk der Auffüllung Fehlstellen, Hohlräume bzw. Klüfte aufweist, die die Tragfähigkeit des Mauerwerkes unterhalb der Querbalken unzulässig einschränken. Es wurde festgestellt, dass die 23 Probebohrungen alleine noch nicht repräsentativ waren, da z.B. eine bei vorherigen Untersuchungen der Brücke Kleinenbremen im Jahre 2003 festgestellte Fehlstelle in Achse 3 mit den o. g. Bohrprogramm nicht wieder aufgefunden wurde.

Mit den Ergebnissen der optischen Untersuchung lässt sich der Anteil der Hohlräume am Gesamtvolumen, deren Geometrie, sowie die Auswirkung auf die Tragfähigkeit der Auffüllung allein noch nicht beurteilen. Um sicherzugehen, dass keine weitreichenden Hohlräume (die bei Bohrungen nicht sicher erkannt werden können) in einer waagerechten Schichtung vorliegen und um im unmittelbarem Bereich der Auflagerbalken die Hohlräume zu verfüllen, wurden Tränkbohrungen, stellenweise auch mit verdichtetem Raster, erforderlich. Es wurde ein Raster mit insgesamt 134 Tränkbohrungen \varnothing 64 mm in einem Ab-

stand von ca. 1,00 m in zwei Reihen in Fahrtrichtung vor und hinter den Querbalken angeordnet (Bild 20). Die Tränkbohrungen \varnothing 64 mm wurden jeweils von UK Wartungsgang bis in ca. 4,00 m Tiefe (Achse A) bzw. bis in ca. 6,0 m Tiefe in den Achsen 1 bis 5 geführt.

Um den Hohlraumanteil bzw. die Klüftigkeit verifizieren zu können, wurden alle Bohrlöcher der Kernbohrungen \varnothing 80 mm und alle Tränkbohrungen mit einem quellfähigen, schwindarmen Zementleim verfüllt. Der aus dem Vergleich von Zementleimvolumen zu Bohrlochvolumen ermittelte „Verfüllfaktor“ dient als Beurteilungskriterium für das Ausmaß der im Bereich der Bohrung angeschnitten Klüfte und erlaubt Rückschlüsse auf den Hohlraumanteil des Mauerwerkes der Zwickelauffüllung. Bereiche mit großen Hohlräumen und entsprechend größerem Verfüllfaktor sind qualitativ weniger tragfähig als Bereiche mit dichtem Gefüge / kleinerem Verfüllfaktor. Die Auswertung der Protokolle zur Verfüllung der Kern- und Tränkbohrungen ergab, dass an ausgesuchten Stellen verhältnismäßig große Mengen Mörtel verbraucht wurden und entsprechend große Klüfte und Hohlräume vorhanden gewesen sind. In den anderen Bereichen wurden kleinere Verfüllfaktoren (< 5) ermittelt. Es ist zu erwarten, dass die vor der Tränkung entsprechend kleineren vorhandenen Klüfte mit dem hier gewählten Raster ausreichend verfüllt wurden. Um sicherzugehen, dass auch in Bereichen mit hohem „Verfüllfaktor“ (> 5) die Tragfähigkeit des Zwickelmauerwerks gegeben ist, wurden insgesamt 13 zusätzliche Tränkbohrungen \varnothing 64 mm angeordnet. Für diese wurden wiederum Verfüllfaktoren ermittelt, die aber nur gering waren. Es kann daher erwartet werden, dass die vorher vorhandenen Klüfte und Hohlräume des Zwickelmauerwerks der Auffüllung im Bereich der Querbalken soweit verfüllt wurden, dass die Tragfähigkeit des Zwickelmauerwerks nunmehr gegeben ist.

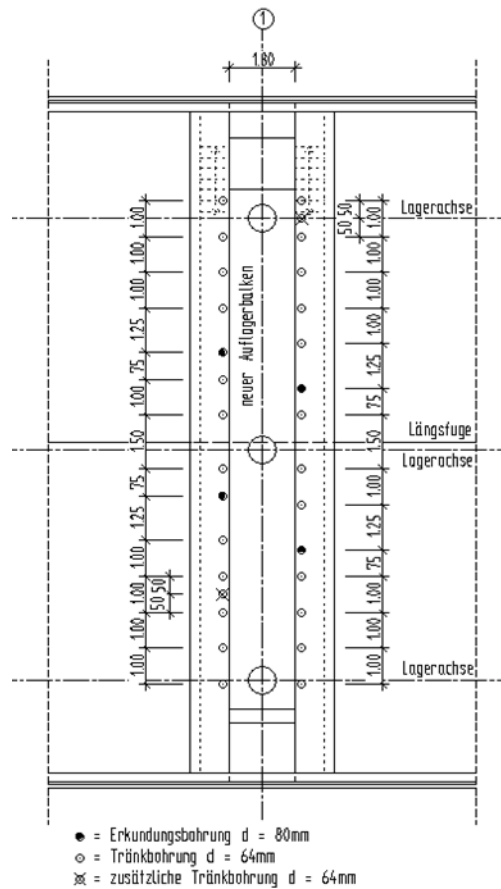
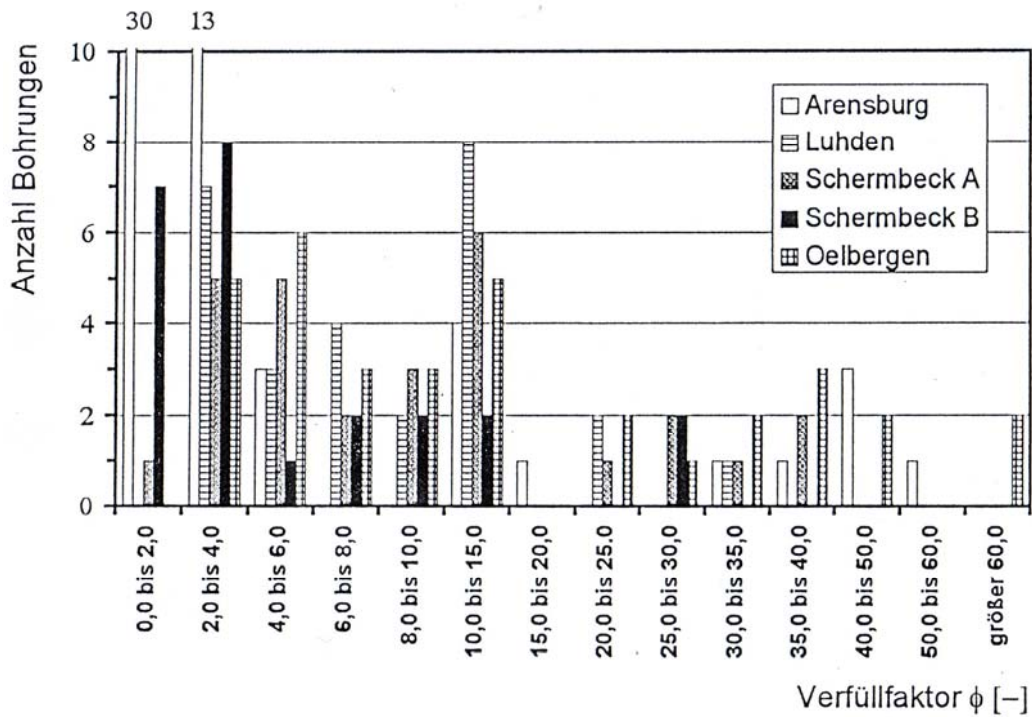


Bild 20: Beispiel für die Anordnung der Erkundungs- und Tränkbohrungen (Grundrissdarstellung) an den Auflagerbalken bei der Talbrücke Kleinenbremen, hier dargestellt für Achse 1. Nach Auswertung der Verfüllfaktoren hier zwei zusätzliche Tränkbohrungen angeordnet.

Die Ergebnisse zeigten, dass es unumgänglich ist, bei Natursteinbrücken dieser Größe jeden Pfeilerschaft gesondert zu untersuchen. In Abhängigkeit von den vorgefundenen Gefügestörungen im "Gründungsbereich" des aufgeständerten Überbaus wurde jeweils der Umfang der erforderlichen Gefügeverbesserung festgelegt.

Zum Zeitpunkt der Aufständering der Talbrücke Arensburg waren Anforderungen an Füllgüter aus Zementleim (ZL) für Hohlrauminjektionen, wie sie heute in den technischen Lieferbedingungen - bzw. Prüfvorschriften (TL/TP FG-ZL/ZS) der ZTV RISS 93 enthalten sind, noch nicht geregelt. Daher wurde hier der Zementleim einer Eignungsprüfung unterzogen. Die bei Füllung der Bohrlöcher und der Hohlräume ermittelten Verfüllfaktoren sind in Bild 21 angegeben, der Maximalwert war 104.



Statistik	Arensburg	Luhden	Schermbeck A	Schermbeck B	Oelbergen
Anzahl Bohrungen	57	27	28	24	34
Mittelwert	7,2	9,5	12,0	5,9	19,2
Standardabweichung	8,4	5,4	8,3	5,0	16,0
Max. Wert	55,6	31,8	38,9	29,3	103,6
95 %-Quantile	40,6	23,2	34,6	23,5	51,6
50 %-Quantile	1,9	7,9	8,0	2,6	9,7
5 %-Quantile	1,2	2,3	2,4	1,2	3,4
Min. Wert	0,9	2,3	1,7	1,0	2,6

Bild 21: An verfüllten Erkundungsbohrungen ermittelte Verfüllfaktoren (Verhältnis Zementleimmenge zu theoretischem Bohrlochvolumen) und statistische Auswertung für die Talbrücken Arensburg, Luhden, Schermbeck A und B, Oelbergen.

Bei der Talbrücke Kleinenbremen war es nicht erforderlich, unter der gesamten Sohlfläche der Querbalken eine Gefügeverbesserung mit Zementleim vorzunehmen. Es genügte, in jeweils einem Streifen beidseitig der unteren Längskanten des Balkens die Hohlräume zu füllen (s. Abschnitt 5.2, Bild 14). Daher musste nicht für Tränkbohrungen durch den Stahlbeton, sondern nur durch Mauerwerk gebohrt werden. Dies und die im Vergleich zu den anderen Talbrücken geringere Anzahl von Bohrungen ergab Kosteneinsparungen.

Wie schon aus den Bohrkernen der Erkundungsbohrungen und der Videoaufnahmen der Bohrlöcher vermutet werden konnte, wies das Mauerwerk der Talbrücke Kleinenbremen nur verhältnismäßig geringe Fehlstellen auf. Dies zeigte sich an den im Vergleich zu anderen Talbrücken geringen Verfüllfaktoren (max. Wert 16,4). Nach Aushub der Besichtigungsgänge an den Lagerungsachsen konnte das Ausmaß der Fehlstellen im Mauerwerk auch direkt durch Augenschein als gering festgestellt werden (Bild 22).



Bild 22: Mauerwerk der Auffüllung im Bereich der Querträger in Achse A und 1. Das sichtbare Zwickelmauerwerk zeigt kleinere Klüfte.

6 Verfestigungsgrad des Füllmaterials

Aufgrund der vorgefundenen Risse und wegen des Umfangs und der Größe der Lunkerstellen drang der Zementleim in die vorhandenen Fehlstellen unterhalb der "Gründungssohle" ein und bildete so einen mindestens 2,0 m dicken, tragfähigen "Gründungskörper".

4-Phasen Steinmodell

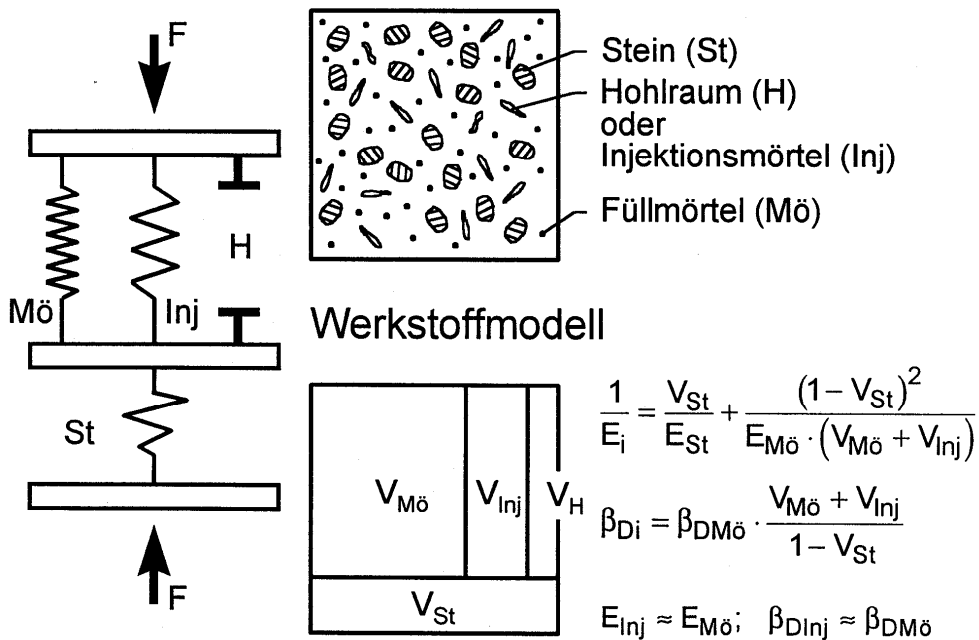


Bild 23: Werkstoffmodell für das verfestigte Füllmaterial der drei Brücken (nach Warnecke).

Der zu erwartende Verfestigungsgrad wurde rechnerisch abgeschätzt und verbleibende Unwägbarkeiten durch eine großzügige Dimensionierung des „Gründungsbalkens“ kompensiert. Auf der Grundlage eines von Warnecke entwickelten Konsolidierungsmodells für Hohlrauminjektionen wurden die Rechenansätze für die Bedingungen ähnlich großer E-Modulwerte und Druckfestigkeiten von Injektionsgut (E_{inj} ; $\beta_{D,inj}$) und dem Mörtel ($E_{mö}$; $\beta_{D,mö}$) zwischen den Sandsteinbrocken des Füllmaterials ausgewertet (Bild 23). Das Bild 24 zeigt ein Diagramm zum Verfestigungsgrad $f = \beta_{D}^{II} / \beta_{D}^{I}$ in Abhängigkeit vom bezogenen zum injizierenden Hohlraumgehalt V_H . An Bohrkernen waren Hohlraumgehalte von bis zu 20 % festgestellt worden. Aufgrund der bei den Verfüllungen von Erkundungsbohrungen (Beispiel für die Anordnung siehe Bilder 8 und 9) und Tränkbohrungen (Bilder 11, 14, 17 und 20) verbrauchten Zementleimmengen muss der Hohlraumgehalt im Füllmaterial des Bauwerks mindestens örtlich noch wesentlich höher eingeschätzt werden. Dieser wird hier konservativ bis maximal 30 % angenommen. Der Volumenanteil der Sandsteinbrocken beträgt aufgrund von Volumenbestimmungen an Bohrkernen mindestens 60 %. Unter ungünstigen Annahmen für die Zusammensetzung des injizierten Füllmaterials sind somit Versteifungen bis zu 150 % bzw. Verfestigungen bis 300 % (Bild 24) möglich.

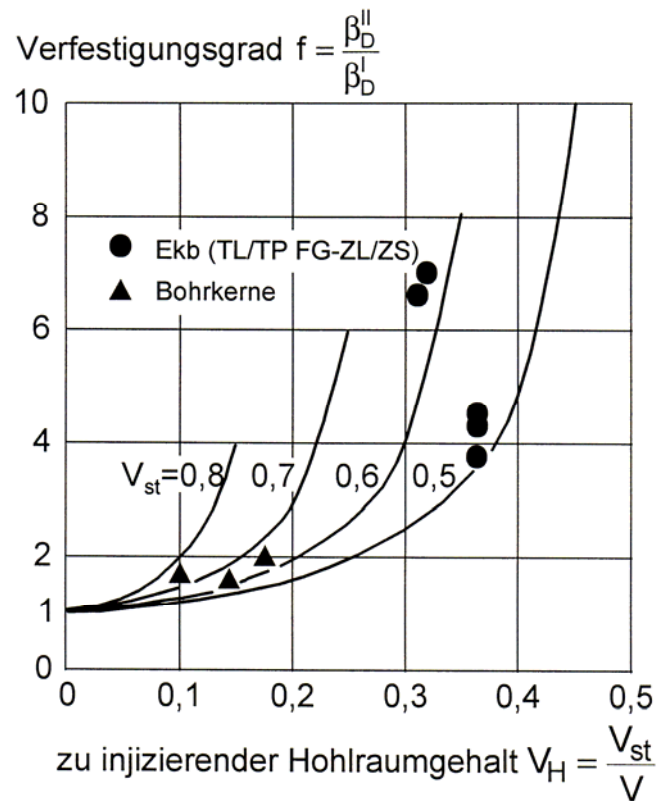


Bild 24: Erwartete Verfestigung des Füllmaterials der Brücken nach dem Füllen der Hohlräume mit Zementleim.

7 Erfahrungen

Durch frühzeitige, enge Zusammenarbeit aller am Bau Beteiligten war es bei den Talbrücken der A2 problemlos möglich, im Zuge der Bauarbeiten Erkundungen und nachfolgende Gefügeverbesserungen der Verfüllung festzulegen und durchzuführen, ohne dass Behinderungen des Bauablaufs eintraten. Die "Gründungsart" des aufgeständerten Überbaus auf der Verfüllung hat sich als sehr wirtschaftlich, einfach und schnell durchführbar erwiesen. Die aufgeständerte Brücke Arensburg ist bereits seit über 14 Jahren wieder unter Verkehr, die Brücken Luhden, Schermbeck A und B seit über 9 Jahren, die Brücke Oelbergen seit über 7 Jahren, ohne dass negative Erscheinungen aufgetreten sind.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass es unumgänglich ist, an jedem Lasteinleitungspunkt gesondert den Gehalt an Fehlstellen im Gefüge festzustellen und angepasste Anordnung, Tiefe und Abstand von Tränkbohrungen festzulegen. Am selben Bauwerk können sich verschiedene Bereiche hinsichtlich der Fehlstellen im Gefüge und des Verfestigungsbedarfs stark unterscheiden. Offensichtlich bewirkt schon der Wechsel eines Vorar-

beiters solche Änderungen, die den Bauwerken äußerlich nicht anzusehen sind. Erste, wenige Erkundungsbohrungen können immer nur einen Anhalt geben, auf eine verfeinerte Untersuchung in der Ausführungsphase kann nicht verzichtet werden.

Die Festigkeitsuntersuchungen an Proben aus Bohrkernen mit hohem Lunkergehalt sind grundsätzlich problematisch. im Bauwerk können die Spannungen um die Hohlräume „herumfließen“, selbst bei verhältnismäßig hohem Lunkergehalt ergibt sich immer noch eine für derartige Natursteinbrücken völlig ausreichende Tragfähigkeit. Wird jedoch eine Probe mit einseitig angeschnittenem Lunker hinsichtlich der Festigkeit untersucht, ergeben sich Werte, die nahe an Null liegen. Diese Prüfungen sind daher keine realistische Grundlage für die Beurteilung der „großräumigen“ Bauwerksfestigkeit. Es ist daher nötig, auf diese Verhältnisse schon bei der Auswahl der Proben Rücksicht zu nehmen und die im Laborversuch ermittelten Festigkeitswerte kritisch zu beurteilen. Auswahl der Lage der Bohrungen am Bauwerk, Bestimmung der Abschnitte der Bohrkern, die für Festigkeitsuntersuchungen genutzt werden, und die Gesamtbeurteilung anhand der Bohrkern und der Videoaufzeichnungen des Inneren der Bohrlöcher stellen schwierige Aufgaben dar, die nicht routinemäßig angegangen werden sollten.

Gegenüber der Standardmethode, zur Verfestigung des Gefüges ein derartiges Mauerwerk mit Zementmörtel zu verpressen, konnte durch die Tränkung mit einem fließfähigen Mörtel einfach, schnell und kostengünstig der gewünschte Erfolg erzielt werden. Zusätzlich ist das Verfahren auch noch gegen Ausführungsfehler weitgehend gefeit.

Literatur

- [1] Lüsse, G.: Integrierte Planung der Ingenieurbauwerke und ihre Ausführung im Zuge der Verbreiterung der A2 im Wesergebirge. Vortrag beim VSVI-Seminar Brücken- und Ingenieurbau, Braunschweig, 24.-25.02.1998.
- [2] Lüsse, G.: Die Bauwerke für den sechsstreifigen Ausbau der Bundesautobahn A 2 im Wesergebirge - Grundlagen und Planung. Bauingenieur 74 (1999), Heft 9, 384-389.
- [3] Lüsse, G.: Die Bauwerke für den sechsstreifigen Ausbau der Bundesautobahn A 2 im Wesergebirge - Konzeption der Bauwerke und Abwicklung der aktuellen Bauarbeiten. Bauingenieur 74 (1999), Heft 12, 515-522.
- [4] Droese, S.; Gunkler, E.; Niemann, P.; Bodendiek, P.; Riese, A.: Aufständungen der Talbrücken Arensberg, Luhden, Schermbeck A und B, Oelbergen der BAB A2. Materialuntersuchungen und Ertüchtigungsmaßnahmen an den Natursteinbrücken. Bau-technik 76 (1999), Heft 6, 445-458.