



Querverschub der 985 m langen Lennetalbrücke

Thomas Lechner, Michael Neumann, Jan Felgendreher, Hans-Joachim Casper

Querverschub der 985 m langen Lennetalbrücke

Die Lennetalbrücke gehört zu den großen Talbrücken der A45. Aufgrund des gestiegenen Verkehrsaufkommens und des baulichen Zustands der Bestandsbrücke war die Notwendigkeit eines Ersatzneubaus gegeben. Um den Verkehr während der Bauzeit möglichst wenig einzuschränken, wurde der neue Überbau für eine Fahrtrichtung in Seitenlage hergestellt und im Anschluss durch einen Querverschub an die endgültige Position gebracht. Mit einer Länge von fast 1000 m handelt es sich bei der Lennetalbrücke – bezogen auf die Brückenlänge – um den größten Querverschub, der bisher in Deutschland realisiert wurde. In diesem Beitrag wird auf die Besonderheiten bei Planung und Ausführung des Querverschubs eingegangen.

Stichworte Lennetalbrücke; Querverschub; Stahl-Verbundbrücke

1 Einleitung

1.1 Ausgangslage

Die Lennetalbrücke ist eine Talbrücke im Zuge der Autobahn A45, der sog. Sauerlandlinie, die die Ballungsgebiete Rhein-Main und Ruhr miteinander verbindet. Sie überspannt in einer Höhe von 20 bis 30 m das bei Hagen gelegene Lennetal auf einer Länge von knapp 1000 m und überquert neben dem Fluss Lenne eine Bahnstrecke sowie eine Landstraße und eine Kreisstraße. Eine Übersicht über die Autobahn A45 mit der Lage der Lennetalbrücke inkl. der anderen Talbrücken in deren Nähe kann Bild 1 entnommen werden.

Das im Jahre 1967 errichtete Bestandsbauwerk der Lennetalbrücke war eine Spannbetonbrücke über 22 Felder mit je ca. 45 m Spannweite. Ein sechsstegiger Plattenbalken mit einer Breite von 31,75 m bildete den einteiligen Brückenquerschnitt. Der Überbau war in die Pfeiler eingespannt und die Pfeiler mit Hammerkopfform waren flachgegründet. Aufgrund von Schäden wie bspw. großflächigen Betonabplatzungen mit freiliegender Bewehrung und korrodierten Lagerplatten in Kombination mit dem gestiegenen Verkehrsaufkommen wurde ein Ersatzneubau geplant.

1.2 Ersatzneubau

Der Entwurf der Lennetalbrücke sah zwei voneinander getrennte Überbauten mit jeweils eigenständigen Unterbauten vor, sodass jede Fahrtrichtung auf einem eigenen Bauwerk überführt wird, wie Bild 2 entnommen werden

Transverse sliding of the 985 m long steel Lennetal bridge

The Lennetal bridge is one of the major viaducts on the A45. Due to the increased traffic volume and the structural condition of the existing bridge, it was necessary to build a new bridge. In order to restrict traffic as little as possible during the construction period, the new superstructure was built for one direction of traffic in a lateral position and then moved to its final position by means of a transverse sliding. With a length of almost 1000 m, the Lennetal bridge is – in relation to the bridge length – the largest transverse sliding that has been realised in Germany so far. This paper deals with the special features of the planning and execution of the transverse sliding.

Keywords Lennetal bridge; transverse sliding; steel-composite-bridge

kann. Die Überbauten mit Breiten von jeweils ca. 19 m überspannen als Verbundquerschnitte mit geschlossenem Kasten und außenliegenden Schrägstreben 14 Brückenfelder, die Spannweiten zwischen 54 m und 115 m erreichen. Wie aus dem Längsschnitt in Bild 3 zu entnehmen ist, verändert sich die Querschnittshöhe in den Seitenfeldern der Lenne ($L = 87,5$ m) sowie im Hauptfeld ($L = 115$ m) voutenförmig.

In jeder der 15 Pfeilerachsen sind unter den Kastenstegen zwei Lager vorhanden. Die Längsfesthaltung eines Überbaus befindet sich in Achse 90, also etwa in der Mitte der Brücke. Dort wurde ein Lager allseits fest und ein Lager längsfest ausgebildet. In allen übrigen Achsen befindet sich jeweils ein querfestes und ein allseits verschiebliches Lager.

Die Montage beider Stahlüberbauten in Brückenlängsrichtung erfolgte jeweils durch einen Längsverschub. Im Anschluss wurden Halbfertigteilplatten aufgelegt, bevor die Fahrbahnplatte mittels Ortbetoneergänzung komplettiert wurde.

Für den Ersatzneubau gab es die Vorgabe, dass die vorhandene Trasse beibehalten werden sollte und gleichzeitig der Verkehr dauerhaft aufrechtzuerhalten war. Da der Bestandsüberbau wie oben beschrieben in Form eines einteiligen Überbauquerschnitts für beide Fahrtrichtungen vorlag und entsprechend bis zum Abriss vollständig erhalten werden musste, erfolgte der Neubau der Fahrtrichtung Frankfurt zunächst in Seitenlage. Um diesen Überbau später an seine endgültige Position zu bringen, wurde ein Querverschub erforderlich, bei dem die gesamte Brückenlänge von 984,5 m um 19,15 m quer in ihre



Bild 1 Lage der Lennetalbrücke an der A45
Location of Lennetal bridge on A45



Quelle: SSF Ingenieure AG

Bild 2 Visualisierung des geplanten Neubaus
Visualisation of the planned new bridge

Endlage verschoben werden musste. Mit einer Länge von fast 1000 m handelt es sich bei der Lennetalbrücke – bezogen auf die Brückenlänge – um den größten Querverschub, der bisher in Deutschland realisiert wurde.

2 Planung und Vorbereitung des Querverschubs

2.1 Verschubkonzept

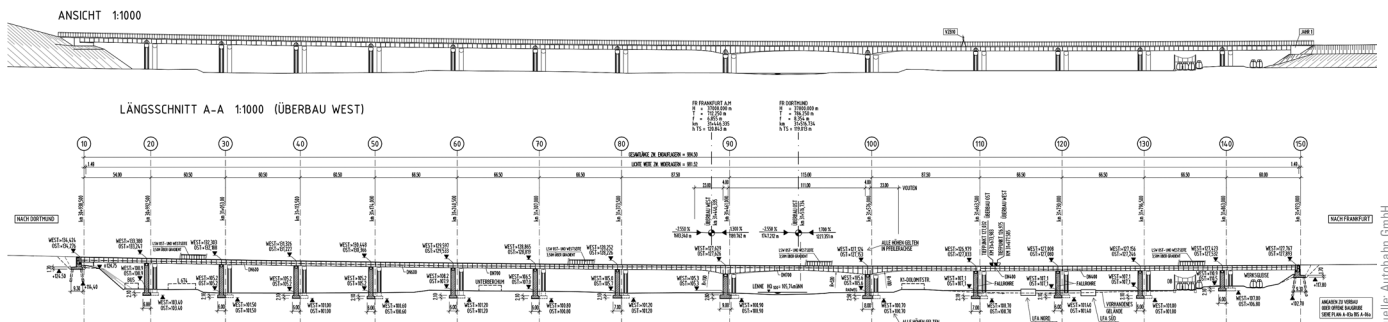
Das detaillierte Konzept des Querverschubs, mit dem die durchgängige Nutzbarkeit der A45 sichergestellt werden konnte, kann Bild 4 entnommen werden.

Die Behelfsunterbauten wurden in der Seitenlage westlich neben dem Bestand errichtet. Auf diesen Unterbauten wurde der Überbau in gleicher Höhenlage und mit gleichem Lagerungssystem wie in der späteren Endlage geplant und hergestellt.

Nach Fertigstellung des Überbaus in der westlichen Seitenlage konnte der Verkehr auf diesen neuen Überbau umgelegt und die alte Brücke abgebrochen werden. Im Anschluss an den Rückbau wurden die endgültigen Unterbauten für beide Richtungsfahrbahnen und der Überbau Ost mit Fahrtrichtung Dortmund hergestellt. Gleichzeitig wurden bereits der Querverschubträger und die Hilfsstütze direkt neben dem endgültigen Pfeiler West errichtet. Vor dem Querverschub wurde der Verkehr schließlich auf den neuen Überbau Ost umgelegt.

Aufgrund der Randbedingungen war es möglich, den Vershubträger in den Behelfspfeiler einzuspannen. Auf Seite des endgültigen Pfeilers war eine Raumfuge zwischen Vershubträger und Pfeiler gefordert, weshalb hier jeweils eine Hilfsstütze direkt neben dem Pfeiler Ost zur Auflagerung des Vershubträgers zur Ausführung kam.

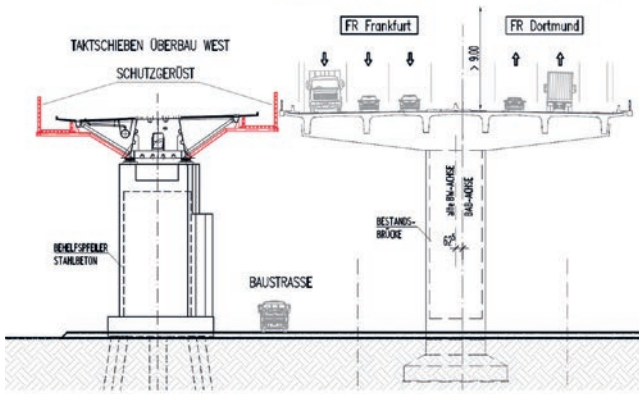
Nach dem Querverschub erfolgte der Rückbau der behelfsmäßigen Unterbauten, des Vershubträgers und der Hilfsstütze.



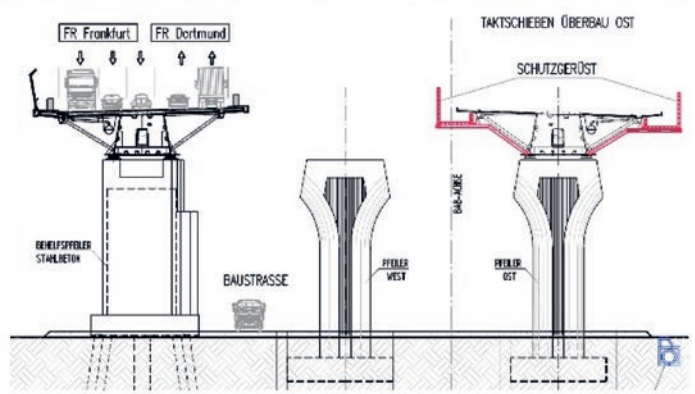
Quelle: Autobahn GmbH

Bild 3 Ansicht und Längsschnitt der Lennetalbrücke
View and longitudinal section of the Lennetal bridge

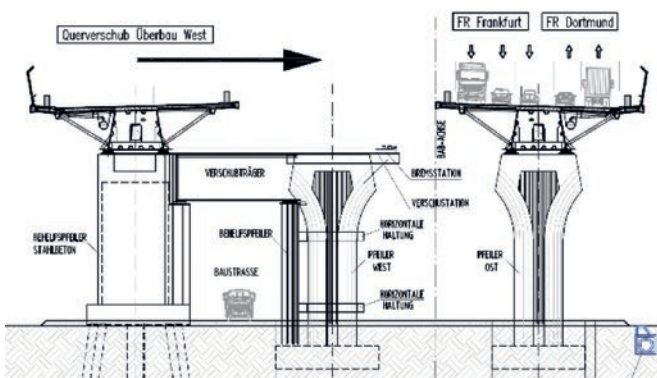
1. Überbau West in Seitenlage (Auflagerung auf Behelfspfeiler)



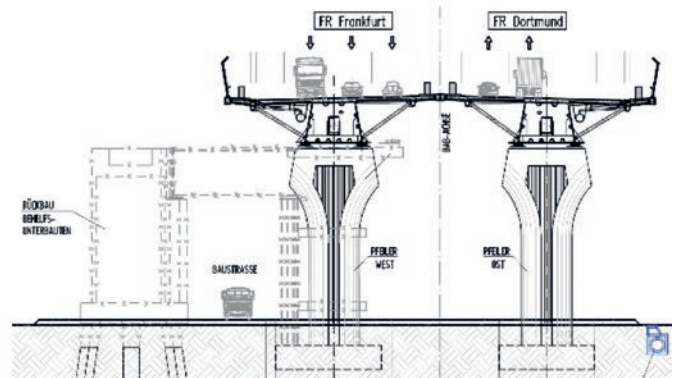
2. Abbruch Bestand und Neubau (West in Behelfslage; Ost in Endlage)



3. Querverschub (nach Verkehrsumlegung)



4. Rückbau Behelfskonstruktionen



Quelle: Autobahn GmbH

Bild 4 Prinzipielle Darstellung des Bauablaufs bei der Lennetalbrücke
Principle drawing of the construction process for the Lennetal bridge

Für den Querverschub wurden in allen 15 Auflagerachsen Verschiebbahnen vorgesehen. Wie auch aus Bild 5 zu erkennen ist, bestand eine besondere Herausforderung darin, dass das Bauwerk nicht in Richtung seiner Lagerachsen, d.h. nicht rechtwinklig zur Bauwerkslängsachse, quer verschoben werden sollte, sondern entsprechend dem Versatz zwischen den temporären und endgültigen Unterbauten unter einem Winkel von 70°. Die Achse der Brückenlager liegt in Seitenlage und Endlage senkrecht zur Bauwerkslängsachse. Die Verschiebungsachse war also gegenüber den Auflagerachsen um 20° gedreht.

Das Bauwerk sollte zusammen mit seinen endgültigen Lagern verschoben werden. Dazu wurde ein Konzept erarbeitet, das die Beibehaltung des Lagerungssystems in allen Bauphasen ermöglichte. Für den Querverschub wurde der Überbau mit den Brückenlagern in allen Achsen auf Verschieblager (Verschiebschlitten), die aus massiven Stahlplatten bestanden, umgesetzt.

Da die Verschieblager in den Verschiebachsen angeordnet waren, mussten die Brückenlager für den Querverschub entsprechend in Brückenlängsrichtung versetzt werden. Dies erforderte sowohl für den Überbau als auch für die Unterbauten zusätzliche Maßnahmen wie z.B. zusätzliche Steifen im Überbau und zusätzliche Spaltzugbewehrung in den Unterbauten.

2.2 Verschiebungsübersicht

Eine Übersicht über die wesentlichen Verschiebeinrichtungen in einer Regelachse findet sich in den Bildern 6, 7. Die Verschiebeinrichtungen bestanden im Wesentlichen aus dem Behelfspfeiler, dem Verschiebeträger, der Hilfsstütze, der Verschiebbahn, den Verschiebschlitten sowie den Zug- und Gegenzuganlagen. Neben der Schiefe der Verschiebbahn war die in Bild 7 zu erkennende Raumfuge zwischen dem Verschiebeträger auf der Hilfsstütze und



Bild 5 Visualisierung des Zustands vor Beginn des Querverschubs
Visualisation of the situation before the start of the transverse sliding

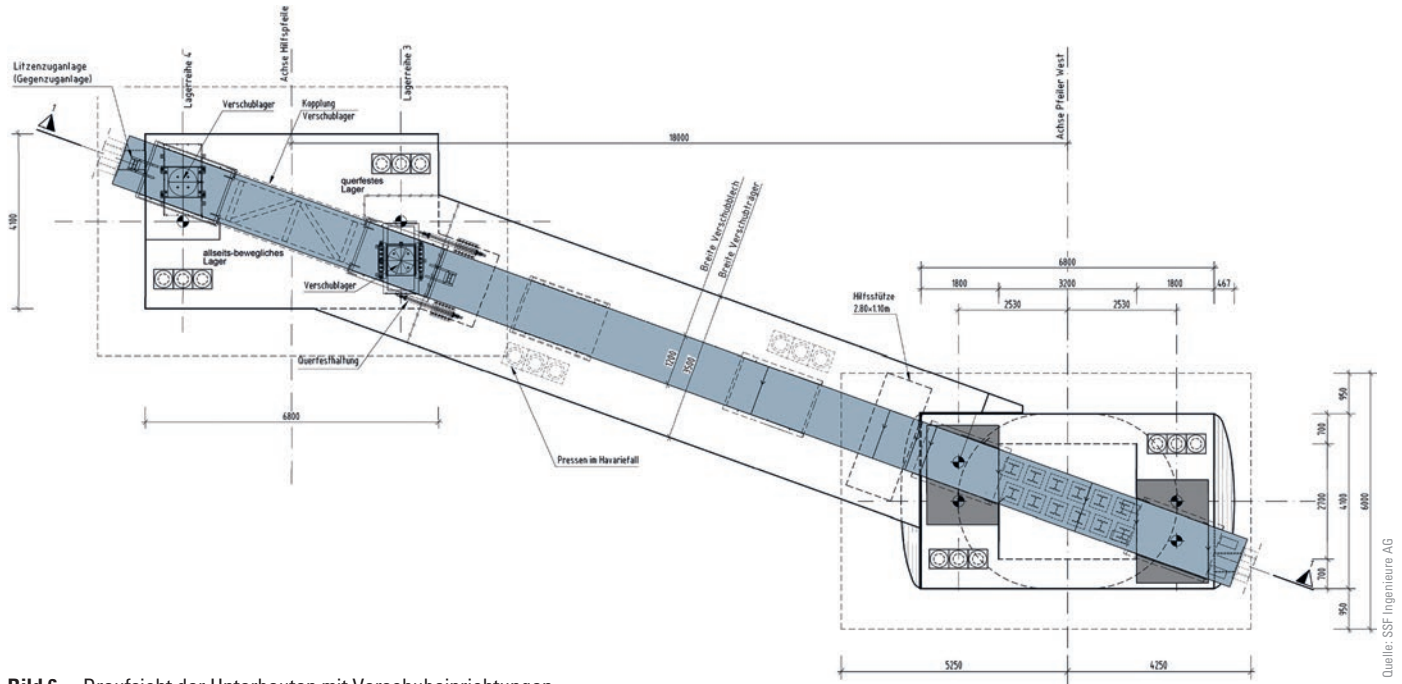


Bild 6 Draufsicht der Unterbauten mit Verschiebeinrichtungen
Top view of the substructures with sliding devices

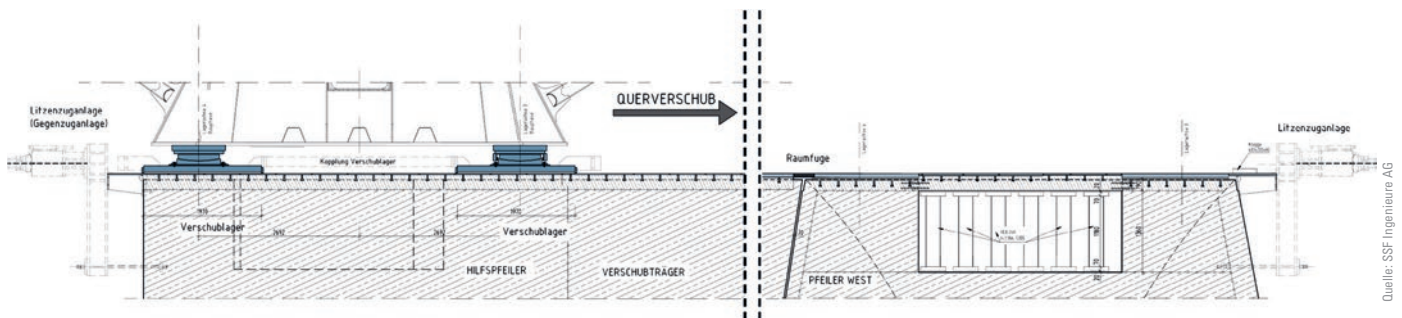


Bild 7 Schnitt durch die Verschiebbahn inkl. Unterbauten
Section through the slide track including substructures

dem endgültigen Pfeiler West eine besondere Herausforderung für die Planung und Ausführung. An dieser Stelle mussten sowohl große Kräfte übertragen und eine gewisse Flexibilität für den Fall unterschiedlicher räumlicher Verformungen der beiden Fugenränder ermöglicht als auch Differenzverformungen in der Verschiebbahn auf ein Minimum reduziert werden.

2.3 Detailplanung

2.3.1 Behelfspfeiler

Die Behelfspfeiler wurden als rechteckige Hohl Pfeiler ausgebildet, die mittels einer Bohrpfeilergründung tiefgegründet waren. Die Besonderheit der Behelfspfeiler ergab sich durch die Bauverfahren für den Überbau. Auf dem Pfeilerkopf wurden zunächst die Verschiebewippen für den Längsverschub platziert. Nach der Überbaumontage wurden die endgültigen Lager der Brücke auf den Lagersockeln montiert. Die Lagersockel, die wie üblich in Beton ausgeführt wurden, überbauten bereichsweise entsprechend der Schiefwinkligkeit der Verschiebachse

die bereits zu diesem Zeitpunkt vorhandenen Verschiebbahnen. Die Lagersockel wurden dabei so ausgebildet, dass sie für das Umsetzen des Überbaus in die Verschiebachse so einfach wie möglich wieder rückgebaut werden konnten. Für alle Umbausituationen wurde der erforderliche Platzbedarf für den Einbau/Umbau der Lager inkl. der Pressenstellplätze untersucht sowie die Sicherstellung des Lagerungssystems der Brücke gewährleistet.

Für die biegesteife Anbindung des Verschiebträgers wurden aus Gründen des Bauablaufs Muffen vorgesehen und ein Auflagerbereich für den als Teilfertigteil ausgebildeten Verschiebträger geschaffen. Die Situation vor der Montage der Verschiebträger ist in Bild 8 zu erkennen.

2.3.2 Verschiebträger und Hilfsstützen

Die Stahlbeton-Verschiebträger bestanden aus einem unteren, vorgefertigten Fertigteil und einer oberen Ortbetonergänzung. Das Fertigteil konnte auf den vorhandenen Absatz am Behelfspfeiler (Bild 8) sowie auf die Hilfsstüt-

zen abgelegt werden. Für die weitere Betonage und monolithische Anbindung an diese beiden Bauteile war daher keine vertikale Schalung mehr erforderlich, wodurch sich der Arbeitsaufwand in den entsprechenden Höhen deutlich reduzieren ließ.

Die Vershubträger wurden mit den Behelfspfeilern über Bewehrungsmuffen biegesteif verbunden. Neben den neuen Brückenpfeilern West wurden die Vershubträger von biegesteif angeschlossenen Stahlbeton-Hilfsstützen getragen, die auf den endgültigen Pfeilerfundamenten der West-Pfeiler aufgeständert waren.

In den Widerlagerachsen erfolgte ebenfalls ein Lückenschluss mittels Muffen zwischen dem provisorischen und dem endgültigen Widerlager.

Die Vershubbahn wurde auf den Endpfeilern West in Form einer Betonbahn weitergeführt. Diese Betonbahn wurde im Bereich des im Pfeilerkopf vorhandenen Mannlochs durch kurze Trägerstützen (Bild 7) unterstützt, die nach dem Rückbau leicht ausgehoben werden konnten. Eine Draufsicht auf die Vershubbahn findet sich in Bild 9.

2.3.3 Vershubbahn

Nach der Fertigstellung der tragenden Unterkonstruktionen wurden die auf den Behelfspfeilern bereits vorhandenen Vershubbleche über die Vershubträger bis auf die neuen Pfeiler West verlängert (Bild 9).

Die Vershubbahnen bestanden aus Stahlblechen, die über Kopfbolzendübel mit einer über Behelfspfeiler, Vershubträger und endgültige Unterbauten verlaufenden Stahlbetonbahn schubfest verbunden waren. Lediglich im Bereich der Raumfuge zwischen Vershubträger und Endpfeiler liegt eine bauliche Trennung der Betonbauteile vor (s. Bild 7).

In den Pfeilerachsen musste das Vershubblech die Raumfugen zwischen den Vershubträgern und den Pfeilern West überbrücken und dabei sowohl die auftretenden Kräfte abtragen als auch derart flexibel gestaltet sein, dass es die Verformungen aufnehmen konnte. Das Vershubblech war hierfür in diesem Bereich verstärkt und in Lamellen aufgelöst.

Die Gleitebene bestand aus dem Vershubblech aus Stahl S355 und Teflonplatten mit Elastomereinlage, die an der Unterseite der Vershubschlitten in Ausnehmungen eingelassen waren.

Der Vershub erfolgte direkt auf dem Vershubblech, das dafür vor dem Vershub von Rost, Schweißnahtückständen und sonstigen Belägen gereinigt wurde. Alle Öffnungen im Vershubblech wurden verschlossen und kurz vor dem Vershub wurde auf das Blech ein Spezialfett zur besseren Gleitung aufgetragen.



Bild 8 Behelfspfeiler vor Montage des Vershubträgers
Temporary pillar before mounting the shifting girder



Bild 9 Draufsicht auf Vershubträger und Vershubbahn
Top view of the sliding girder and sliding track

Die Breite der Vershubträger war so dimensioniert, dass in einem Havariefall während des Vershubs stets das Anheben des Überbaus mittels Pressen möglich war, um Verschleißteile zu tauschen oder Reparaturarbeiten durchführen zu können.

Vor dem Vershub wurden durch die Hebetec Engineering AG, die für die Vershubeinrichtungen (Litzenheber, Vershubschlitten etc.) verantwortlich war, Versuche unternommen, um die Reibbeiwerte der Gleitpaarung unter den vorliegenden Bedingungen zu prüfen (Bild 10). Hierbei wurde der Ausschnitt eines Vershubschlittens inkl. des eingekammerten Teflons mit einer definierten Kraft, die der späteren Pressung beim Quervershub entsprach, auf ein gefettetes Stahlblech gepresst. Gemessen wurde dann die Kraft, die notwendig war, um das Stahlblech unter dem Schlitten herauszuziehen. Es wurden auch Einflüsse aus Unsauberkeiten des Stahlblechs sowie Schweißnahtückständen untersucht. Die Versuche bestätigten die Annahme, dass diese Gleitpaarung anstelle der zuvor angedachten gebräuchlichen Variante aus Edelstahl und Teflon verwendet werden konnte.

2.3.4 Vershubschlitten und Litzenzuganlagen

Bild 11 zeigt die finale Ausführung der Vershubschlitten mit den eingekammerten Teflonstreifen. Die Brücken-



Bild 10 Versuch zur Ermittlung des Reibkoeffizienten vor dem Querverschub
Experiment to determine the coefficient of friction before the transverse sliding

Quelle: Hochtief Infrastructure GmbH



Bild 11 Untersicht der Verschubslitten mit Verband zur Kopplung
Underside view of the shifting slides with bracing for coupling

Quelle: Hochtief Infrastructure GmbH

lager wurden nach dem Lösen von den Ankerplatten in der Behelfslage mit den Verschubslitten fest verschraubt. Entsprechend mussten die Verschublager und die zusätzlich notwendigen Hilfskonstruktionen das Lagerungssystem des Brückenüberbaus in allen Bauphasen sicherstellen.

Dies erfolgte, indem in Verschubrichtung zum Querverschub in allen Achsen Litzenzuganlagen auf den Außenseiten der endgültigen Pfeiler West installiert und die Litzen an den östlichen Verschublager angeschlossen wurden. Da unplanmäßige Bewegungen in Richtung des Querverschubs im Falle zu geringer Reibungskräfte und bei ungünstigen Windverhältnissen nicht ausgeschlossen werden konnten, wurden in den Achsen 20, 50, 70, 90, 110 und 140 Gegenzuganlagen montiert, die während des Verschubs spannungsfrei mitliefen. Die auf der Außenseite der temporären Pfeiler installierten Gegenzuganlagen wurden hierbei an den westlichen Verschublager angeschlossen.

Die beiden Verschubslitten waren durch einen Verband miteinander gekoppelt, der die Zugkraftdurchlei-



Bild 12 Luftaufnahme der Lennetalbrücke vor dem Querverschub
Aerial view of the Lennetal bridge before the transverse sliding

Quelle: Hochtief Infrastructure GmbH

tung gewährleistet (Bild 11). Auch zur Übertragung von Horizontalkraftanteilen (Querlasten/Schiefe der Verschubbahn) zu den östlichen Verschublager, die die querfesten Brückenlager trugen, diente diese Verbindung zwischen den Verschublager.

Eine Seitenführung der Verschubschlitten verhinderte Verformungen senkrecht zur Verschubrichtung, womit für den Verschub das Lagerungssystem definiert war. Für Umbauzustände der einzelnen Lager auf die Verschubschlitten wurden weitere Hilfskonstruktionen auf den Pfeilern in der Behelfslage und der Endlage West erforderlich. Besondere Maßnahmen erforderte hierbei der Umbau der längsfesten Lager in Achse 90.

3 Querverschub

Die eigentliche Detailplanung der Verschubschlitten, der Litzenzuganlagen sowie die Steuerung und Bedienung des Querverschub-Equipments erfolgten durch die Firma Hebetec Engineering AG, die Planung des Querverschubs durch die SSF Ingenieure AG. Durchführung und Gesamtkoordination lagen bei der Hochtief Infrastructure GmbH.

Alle Bauteile der Querverschubeinrichtungen waren so dimensioniert, dass der Querverschub bis zu einer Windgeschwindigkeit von maximal 14 m/s stattfinden konnte. Während des Querverschubs war in jeder Pfeiler- und Widerlagerachse zuvor geschultes Personal positioniert, um den Verschub zu überwachen sowie die Verschubbahnen zu kontrollieren und zu fetten. Die erforderlichen Zugkräfte und der Verschiebeweg in jeder Achse wurden elektronisch erfasst und in der Steuerzentrale nachverfolgt. Ein unplanmäßiger Anstieg der erforderlichen Kraft eines Litzenhebers oder eine ungleichmäßige Verschiebung der einzelnen Achsen hätte zu einem sofortigen Stopp des Querverschubs geführt.

Darüber hinaus wurden die Verformungen der Unterbauten und der Verschubbahn bzw. des Verschublechs messtechnisch überwacht. Hierfür wurden in einem Messkonzept vorab Verformungsgrenzwerte definiert, die nicht überschritten werden durften. Während des Querverschubs blieben alle gemessenen Werte im definierten Bereich.

Bild 12 zeigt das Luftbild der Lennetalbrücke kurz vor dem Querverschub. Zu diesem Zeitpunkt wurden die Nullmessungen durchgeführt.

Die maximale Haftreibung zu Beginn des Verschubs war in dieser Größenordnung in der Planung berücksichtigt worden. Die im weiteren Verschubvorgang registrierten Reibungsbeiwerte lagen unter den angenommenen Werten.

Der Verschub der Lennetalbrücke verlief wie geplant und reibungslos, sodass nach 7 h die endgültige Position des 30.000 t schweren Überbaus auf den Endpfeilern West erreicht wurde. Bild 13 zeigt den Überbau West kurz vor dem Erreichen der finalen Parkposition.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Planung und Durchführung des Querverschubs der Lennetalbrücke erfolgten unter sehr anspruchsvollen Randbedingungen mit Hinblick auf die Größe des Bauwerks und der unter 20° zur Bauwerksachse gedrehten Verschubrichtung.

Durch eine sorgfältige Planung konnte der Umbau des Bauwerks bzw. der Lager von der üblichen Betriebsposition in die in Längsrichtung versetzte Verschubposition gewährleistet werden. Der Überführung der Raumfuge zwischen Verschubträger und endgültigem Pfeiler wurde im Zuge der Planung besondere Beachtung geschenkt. Die



Quelle: Hochtief Infrastructure GmbH

Bild 13 Untersicht der Lennetalbrücke kurz vor Verschubende
Bottom view of the Lennetal bridge shortly before the end of transverse sliding

gewählte Lösung mit einem lamellenförmig aufgelösten Vershubblech sorgte für die beim Vershub notwendige Verformungsmöglichkeit bei gleichzeitig durchgehender Vershubbahn, sodass die Fuge ohne Probleme überfahren werden konnte. Der durch vorgezogene Versuche ermittelte und erwartete Reibkoeffizient der Gleitpaarung wurde beim Querverschub bestätigt und eingehalten.

Der Querverschub der Lennetalbrücke stellt, bezogen auf die Brückenlänge von nahezu 1000 m, den größten Querverschub dar, der bisher in Deutschland realisiert werden konnte. Über 15 Vershubachsen konnte das Bauwerk mit mehr als 30.000 t Gewicht innerhalb von nur 7 h exakt wie geplant von der Seitenlage in die Endlage verschoben werden.

Autoren

Dr.-Ing. Thomas Lechner (Korrespondenzautor)
tlechner@ssf-ing.de
SSF Ingenieure AG
Domagkstraße 1a
80807 München

Michael Neumann
michael.neumann@autobahn.de
Die Autobahn GmbH des Bundes
Niederlassung Westfalen | Außenstelle Hagen
Feithstraße 137
58097 Hagen

Jan Felgendreher
jan.felgendreher@hochtief.de
Hochtief Infrastructure GmbH
Butzweilerhof-Allee 4
50829 Köln

Dank

Die Autoren danken allen Projektbeteiligten für konstruktive, zielgerichtete und kollegiale Zusammenarbeit bei diesem spannenden und herausfordernden Projekt.

Projektbeteiligte

- Bauherr: Die Autobahn GmbH des Bundes, Niederlassung Westfalen, Außenstelle Hagen
- Bauausführung: Hochtief Infrastructure GmbH
- Querverschub (Detailplanung, Montage und Bedienung des Equipments): Hebetec Engineering AG
- Genehmigungs- und Ausführungsplanung des Querverschubs sowie der Unterbauten in den Pfeilerachsen: SSF Ingenieure AG
- Prüfingenieur: Dipl.-Ing. H. J. Niebuhr (SKP Ingenieursozietät)

Hans-Joachim Casper
jcasper@ssf-ing.de
SSF Ingenieure AG
Domagkstraße 1a
80807 München

Zitieren Sie diesen Beitrag

Lechner, T.; Neumann, M.; Felgendreher, J.; Casper, H.-J.; (2023) *Querverschub der 985 m langen Lennetalbrücke*. Bautechnik 100, H. 3, S. 127–134. <https://doi.org/10.1002/bate.202300011>

