

Rohrvortrieb unter der Festen Fahrbahn mit dem Mikrotunnel-Bauverfahren

Erfahrungen bei der NBS Nürnberg–Ingolstadt

YIFENG HU | ULRICH SIELER | RON TISCHER | HEINER SCHOLTEN

In dem Beitrag werden die planerischen Randbedingungen und Festlegungen zum Vortrieb zweier paralleler Stahlbeton-Mantelrohre DN 600 unter der ICE-Strecke 5934 Nürnberg–Ingolstadt bei km 84+483,75 und km 84+489,25 dargestellt. Bedingt durch das sehr verformungsempfindliche Oberbausystem ist die Zusatzsetzung durch den Rohrvortrieb auf ein möglichst geringes Maß zu begrenzen und als ein maßgebliches Kriterium bei der Planung, Ausführung und Überwachung zu betrachten. Die planerischen Überlegungen zur Wahl des Vortriebsverfahrens sowie des Herstellungsverfahrens der Start- und Zielgrube, die Setzungsprognose sowie das Monitoring der Gleisanlage werden beschrieben. Über die wesentlichen Ergebnisse bei der Ausführung, insbesondere Vortriebskraft und Vortriebsgeschwindigkeit sowie Messergebnisse der Gleislage, wird berichtet.

Einleitung

Zum Neubau einer Doppelkabelleitung als Verbindung des Umspannwerkes Etting mit dem Umspannwerk Audi wurde eine grabenlose Bahnquerung der ICE-Strecke 5934 Nürnberg–Ingolstadt bei DB km 84+483,75/489,25 mit zwei parallelen Stahlbeton-Mantelrohren DN 600 von der Bayernwerk Netz GmbH geplant und realisiert. Hierbei handelt es sich um eine Bahnquerung unter der Festen Fahrbahn (FF) mit einer Streckengeschwindigkeit von $v=300$ km/h. Nach Ril 836 [1] ist die Restsetzung nach Einbau der FF für die vorgesehene Betriebszeit (in der Regel 60 Jahre) auf 15 mm zu begrenzen. Im Hinblick auf das sehr hohe verformungsempfindliche Oberbausystem und die hohen Anforderungen an Sicherheit und Gebrauchstauglichkeit soll deshalb die Setzung durch den geplanten Vortrieb der beiden Stahlbetonrohre so weit wie möglich minimiert werden, idealerweise innerhalb der Messgenauigkeit von z. B. 1 mm. Davon ausgehend, wurde dieser Rohrvortrieb nach DIN 4020 in die geotechnische Kategorie GK 3 eingestuft.

Die Landesgewerbeanstalt (LGA) Bayern hat den Bau dieser Bahnstrecke in den Jahren

zwischen 2000 und 2004 als EBA-Prüfer (Eisenbahn-Bundesamt, EBA) begleitet. Zur sicheren Realisierung der gegenständlichen Bahnquerung wurde die LGA als EBA-Prüfsachverständiger von der Bayernwerk Netz GmbH für die Beratung beauftragt.

Randbedingungen des Vortriebs

In Abb. 1 sind der Längsschnitt und Lageplan der Bahnquerung mit zwei Stahlbetonrohren DN 600 (Rohrlänge 2 m) bei DB km 84+483,75/489,25 dargestellt. Die zweigleisige Bahnstrecke mit FF verläuft im Bereich der vorgesehenen Querung in flacher Damm-lage mit einer Höhe von ca. 1,5 m bezogen auf das Vorland. Der Kreuzungswinkel beträgt ca. 90° und die Überdeckung der Vortriebsrohre $h_v=4,3$ m bezogen auf die Unterkante der Betontragschicht. Die Gesamtlänge des Vortriebs eines Stahlbetonrohrs DN 600 ist ca. 35 m. Der Achsabstand der beiden Vortriebsrohre wurde auf 5,5 m festgelegt und ausgeführt. Die Start- und Zielgruben befinden sich vollständig außerhalb der ideellen Böschungslinie (1:1,5).

Baugrund und Grundwasser

Zur Erkundung der Boden- und Grundwasserhältnisse wurden beidseits neben dem Bahndamm in einem Abstand von ca. 5 m zwei Rammkernbohrungen (RKB) bis 5,2 m und zwei schwere Rammsondierungen (DPH) bis 6,5 m unter Geländeoberkante (GOK) ausgeführt. Davon ausgehend, können die Baugrundverhältnisse im Untersuchungsgebiet als gleichmäßig angesehen werden. Das Baugrundmodell setzt sich vereinfacht aus den vier Bodenschichten, beginnend von der GOK, Auffüllungen/Decklehme/Flussschotter/Tertiäre Tone zusammen.

Auf der Grundlage der bekannten Ausführungsplanung für die Neubaustrecke Nürnberg–Ingolstadt wurde in diesem Bereich zum Auskoffern von Auffüllungen und Decklehm ein Bodenaustausch mit den Bodenarten GE/GW/GI nach DIN 18196 von 2,0 bis 2,3 m Tiefe ausgeführt. Unter dem Bodenaustausch im Bahnbereich kommt die tragfähige Bodenschicht des Flussschotters zu liegen (Abb. 1). Der Flussschotter weist die Bodenarten SW/SI/GW/GI mit den maximalen Korn-

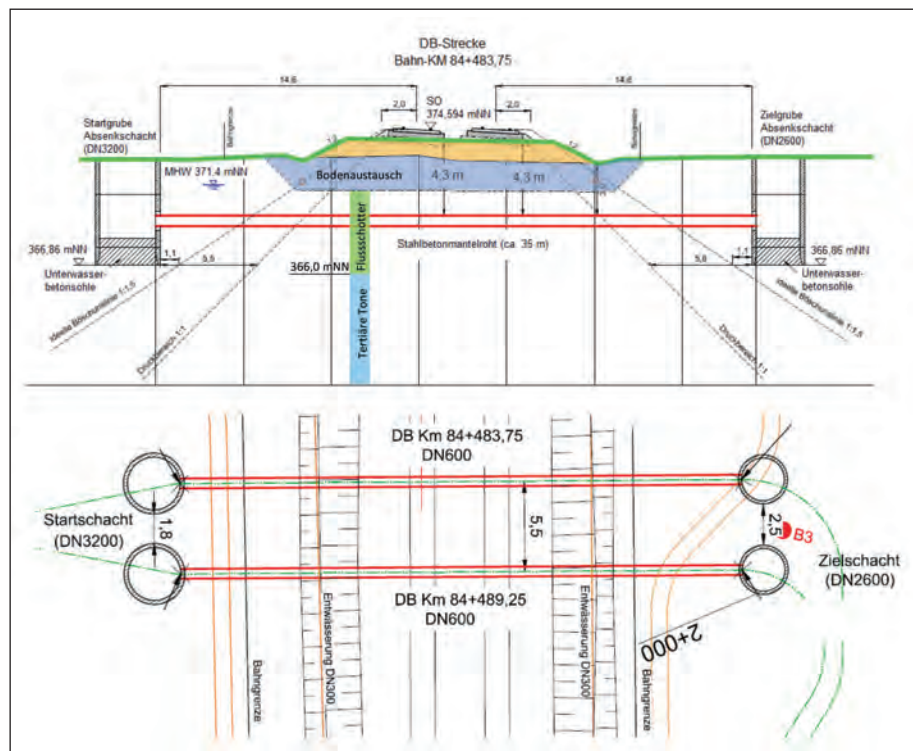


Abb. 1: Längsschnitt und Lageplan des Rohrvortriebs 2xDN 600, DB km 84+483,75/489,25

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Grundbauinstitut/LGA Bautechnik GmbH, Bayernwerk Netz GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH



Abb. 2: Mischbodenbohrkopf (Kombiwerkzeug)

misches zwischen der Schnecke und dem Förderrohr auftreten würde und sich somit Hohlräume an der Ortsbrust ausbilden könnten. Ferner könnte der Vortrieb beim Antrieb des Bohrkopfes über die Förderschnecke behindert bzw. gestoppt werden, wenn im Baugrund eingelagerte bzw. angesammelte (große) Kieskörner, Steine bzw. Blöcke angetroffen werden. Zur Sicherstellung eines ungehinderten Rohrvortriebes und Eisenbahnbetriebes wurde deshalb bei der Ausführung des Mikrotunnel-Vortriebsverfahrens mit flüssigkeitsgestützter Ortsbrust und Spülförderung gemäß DWA A 125 (Abschnitt 6.1.3.1.3) [3] mit einer AVN (automatische Vortriebsmaschine Nass) der Fa. Herrenknecht AG eingesetzt. Hierzu kam ein Mischbodenbohrkopf (Kombiwerkzeug) zur Anwendung (Abb. 2). In diesem Fall ist das Mischbodenschneidrad mit Schälmesser und Felddisken bestückt. Damit können sowohl Lockerböden als auch Festgesteine abgebaut und verarbeitet werden. Die Mindestüberdeckung von zwei- bis dreifachem Bohrkopfdurchmesser ($\geq 1,8$ m) ist hierbei erfüllt.

Start- und Zielgruben

In der ursprünglichen Planung wurden die Start- und Zielbaugruben wasserdicht in Spundwandbauweise mit auftriebssicherer Unterwasserbetonsohle vorgesehen. In diesem Fall ist beim Einbau der Stahlspundwände das Einbringverfahren mit Vibrations- oder Schlagrammen nicht zulässig, da die beiden Verfahren als erschütterungsintensiv anzusehen sind. Sofern die Erregerfrequenz etwa in der Größenordnung der natürlichen Eigenfrequenz des FF-Bodensystems liegt, treten resonanzbedingt Verstärkungen der Schwingungen auf. Darüber hinaus können durch intensive Schwingungen baugrundbedingte Zusatzsetzungen verursacht werden, soweit die volumetrische Scherdehnungsgrenze γ_{IV} überschritten ist. Erst in einem Abstand von > 25 m befinden sich erfahrungsgemäß die gemessenen Scherdehnungen in der Größenordnung der linearen Scherdehnungsgrenze γ_{II} . Davon ausgehend, wurden Stahlbetonschächte DN3200/DN2600 im Absenkenverfahren mit auftriebssicherer Unterwasserbetonsohle ausgeführt (Abb. 1). Dieses Verfahren kann als erschütterungsarm angesehen und somit eine mögliche Auswirkung auf das FF-Bodensystem ausgeschlossen werden. Hierzu waren jedoch für die beiden vorgesehenen Vortriebsrohre DN 600 jeweils doppelte Start- und Ziel-schächte erforderlich.

Setzungsabschätzung

Zur realitätsnahen Bestimmung der Setzung der FF durch den geplanten Rohrvortrieb wurde eine rechnerische Untersuchung nach der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Dabei wurden die Baugrundverhältnisse, die Einwirkungen und die gegenseitige Auswirkung der zeitlich hintereinander durchgeführten Rohrvortriebe (2xDN 600) möglichst

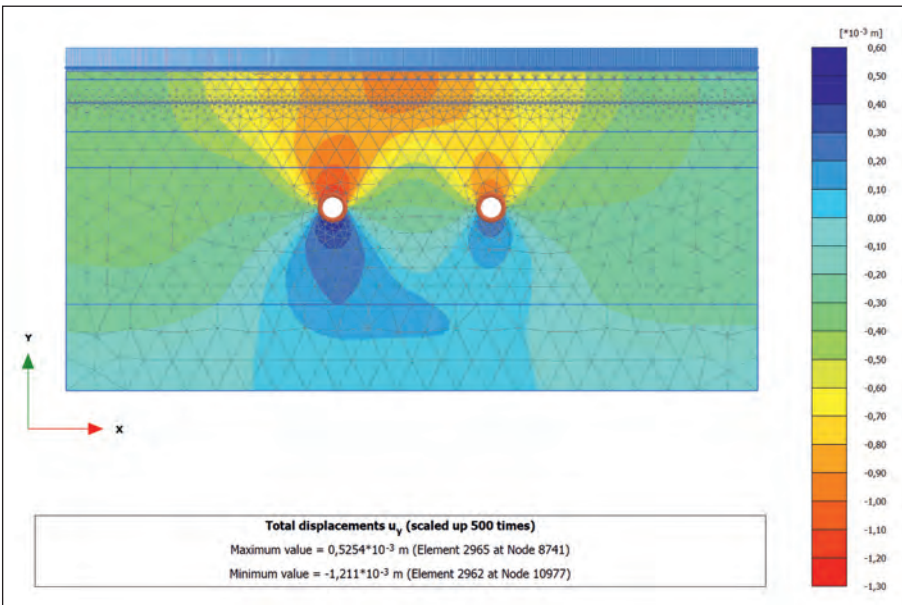


Abb. 3: Rechnerische Vertikalverformungen im Unterbau/ Untergrund unter der FF nach Rohrvortrieb, (Setzung SO, ca. 1,0 mm)

größen der Größenordnung von ca. 20 bis 30 mm (Kiesanteil ca. 55 %) auf. Dieser befindet sich in einem mitteldichten bis dichten Zustand und ist wasserdurchlässig bis stark wasserdurchlässig ($k_f = 1 \times 10^{-6}$ bis 1×10^{-2} m/s). Der abgeschätzte LCPC-Abrasivitäts-Index ergibt Werte zwischen 250 und 1250 g/t und ist als abrasiv bis stark abrasiv einzustufen. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass Steine bzw. Blöcke in der Bodenschicht des Flussschotters eingelagert sind. Die darunter anstehende Bodenschicht der Tertiären Tone liegt im halbfesten bis festen Zustand vor. Der mittlere Grundwasserstand beträgt MW = 370,25 mNN bzw. MHW = 371,40 mNN. Der ursprünglich geplante Rohrvortrieb befindet sich unterhalb der Gleisanlage im Übergang Bodenaustausch/Flussschotter. Zur Vermeidung

der Störung der unteren Tragschicht und der Zerstörung der Trennschicht (Vlies) wurde der Vortrieb nach Empfehlung um 1,5 m tiefer mit einer Überdeckung von $h_{ij} = 4,3$ m ausgeführt (Abb. 1). In diesem Fall befindet sich die Oberkante des Vortriebsrohrs auf der Höhenkote von ca. 369,80 mNN und somit vollständig in der Bodenschicht des Flussschotters sowie unterhalb des Grundwasserstandes.

Vortriebsverfahren

Ursprünglich war geplant, das Mikrotunnel-Bauverfahren mit Schneckenförderung auszuführen. Ausgehend von den beschriebenen Baugrund- und Grundwasserbedingungen, ließ sich im Vorfeld nicht ausschließen, dass bei Verwendung der Schneckenförderung ein unkontrolliertes Fließen des Bodenwasserger-



Abb. 4: Startschacht und Stahlbetonrohre DN 600

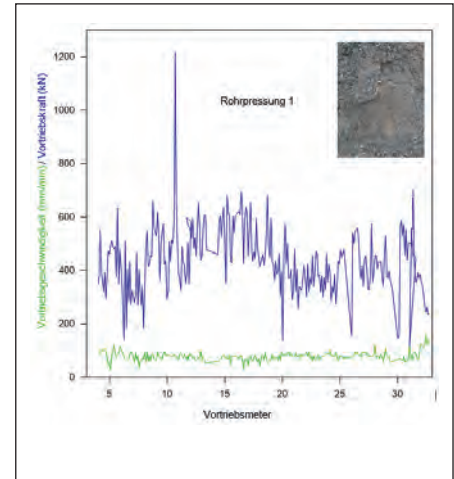


Abb. 5: Vortriebsgeschwindigkeit und -kraft in Abhängigkeit von der Vortriebslänge, erste Rohrpressung

zutreffend nachgebildet. Im Rahmen eines 2D-Modells wurde die dreidimensionale Auswirkung der Ortsbrust, des Abbaus und des Überschnittes beim Mikrotunnelbau mit einem sogenannten Entspannungsparameter $\beta=0,5$ untersucht. Die maximale Zusatzset-

www.pintsch.net



Systemlösungen für die Bahninfrastruktur

- Bahnübergangstechnik
- Achszähltechnik
- Stellwerkstechnik
- Rangiertechnik
- Digitalisierung & Diagnose, Service



Foto: www.fotostock.com
 Bildmaterial genehmigt für Grundbauinstitut/LGA Bautechnik GmbH, Bayerwerk Netz GmbH /
 Druckmaterial genehmigt für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

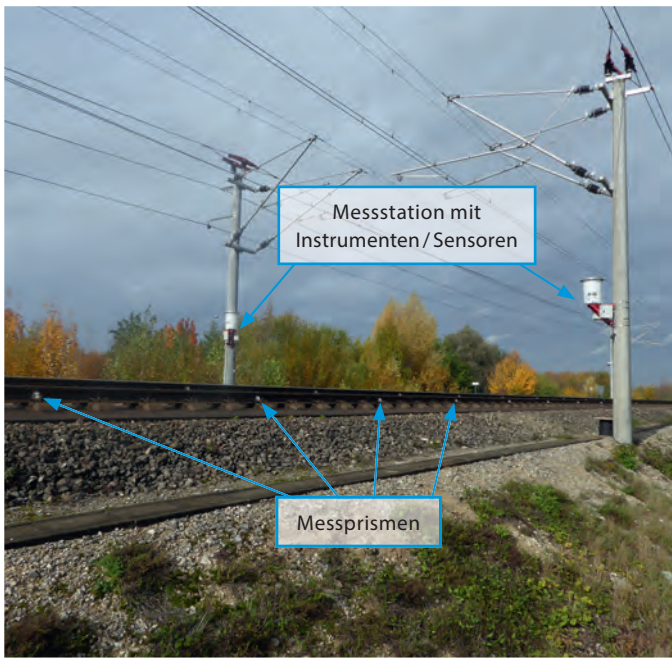


Abb. 6: Messelemente und Messstation

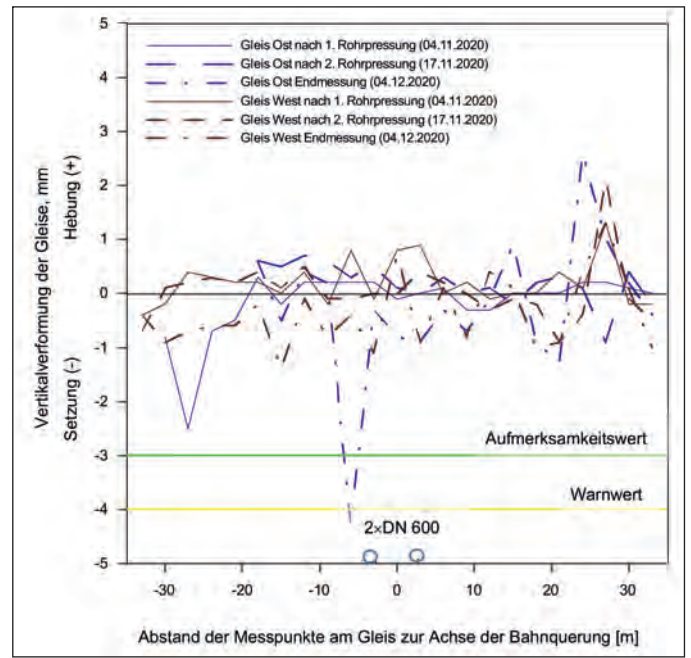


Abb. 7: Messergebnisse der Setzung am Gleis

zung an der Unterkante der Betontragschicht der FF ergab rechnerisch ca. 1,0 mm (Abb. 3). Somit konnte die Machbarkeit der geplanten Bahnquerung hinsichtlich der Setzungsanforderung für die FF nach Ril 836 rechnerisch bestätigt werden.

Vortriebsausführung

Der geplante Vortrieb wurde im Oktober/November 2020 von der Wadle Bauunternehmung GmbH ausgeführt. Die Bahnstrecke befand sich während des Vortriebs uneingeschränkt in Betrieb.

Die erste und zweite Rohrpressung wurden jeweils in einzelnen Arbeitstagen bzw. Vortriebsabschnitten vom 27. Oktober bis zum 4. November 2020 sowie vom 10. November bis zum 18. November 2020 ausgeführt. Die Abb. 4 zeigt die Startgrube als Stahlbetonschacht und die für den Vortrieb vorgesehenen Stahlbetonrohre DN 600.

In Abb. 5 sind exemplarisch für die erste Rohrpressung die Vortriebsgeschwindigkeiten und Vortriebskräfte in Abhängigkeit von der Vortriebslänge wiedergegeben. Der Verlauf der Vortriebsgeschwindigkeit während des Vortriebs ist insgesamt stabil und liegt im Mittel in der Größenordnung von ca. 80 mm/min. Abgesehen von einem einzelnen Peak-Wert von ca. 1200 kN bei Vortriebsmeter TV=10,7 m bewegt sich die Vortriebskraft überwiegend zwischen ca. 300 bis 600 kN, im Mittel bei ca. 400 kN. Dies ist deutlich geringer als die in der freigegebenen Prüfstatik angegebene, zulässige Presskraft (≤ 1300 kN). Ab einer Vortriebsstrecke von 20 m reduziert sich die Vortriebskraft von 600 auf 500 kN. Zurückzuführen ist dies auf die höheren sandigen Anteile des Flussschotter im Baugrund, die deutlich größer im Rückspülgut, verglichen mit den ersten 20 m, waren.

Bei der zweiten Rohrpressung lag die Vortriebsgeschwindigkeit im Mittel bei ca. 180 mm/min sowie die Vortriebskraft überwiegend zwischen ca. 300 bis 450 kN, im Mittel ca. 350 kN.

Monitoring der Gleislage

Für die kontinuierliche Überwachung der Gleislage beim Vortrieb wurde das vollautomatische Monitoring-System des Ingenieurbüros b2v2 München mit geodätischen und geotechnischen Messsensoren eingesetzt. In Abstimmung mit der LGA wurden entlang der Gleisachse in einer Länge von 65,5 m insgesamt 22 Profile mit jeweils vier Messprismen (88 Prismen) an den Gleisen eingerichtet bzw. vermarktet. Die Messquerschnitte (Profile) für das automatische Messsystem wurden in jedem Gleis paarweise in einem Abstand von 3,0 m (auf jeder fünften Schwelle) angeordnet. Die installierten Messstationen an den Oberleitungsmasten und die an der Schiene befestigten Messprismen sind in Abb. 6 dokumentiert.

Zur Beobachtung der Verformung auf der GOK zwischen dem Start- bzw. Zielschacht und der FF wurden entlang der Vortriebsachsen sowie seitlich zusätzlich Prismen matrixförmig im Abstand 3,0 m angebracht.

Die Messungen erfolgten halbstündlich. Die Vertikalverformung/Setzung jedes Messprismas wurde als maßgeblicher Beurteilungsparameter betrachtet und bewertet. Die Aufmerksamkeits-, Warn- und Alarmwerte wurden jeweils zu 3/4/5 mm festgelegt. Dazu wurden, ausgehend von dem Prognosewert nach der FEM (1,0 mm), die Sicherheit der Gleisanlage und die Einflüsse der Messgenauigkeit sowie der Witterungsbedingungen mit berücksichtigt. Darüber hinaus

wurden weitere Beurteilungsmaßstäbe aus der Messung, wie z.B. Verwindung, ermittelt und nach der Ril 821.2001 [8] bewertet. Die Eingreifmaßnahmen und die Meldekette wurden definiert.

Die Überwachung der Bahngleise fand mit dem automatischen Monitoring-Programm während der Bauarbeiten und für einen bestimmten Zeitraum nach der Ausführung statt. Zur Minimierung der Einflüsse durch die Witterung wurden die Prismen wöchentlich gereinigt bzw. kontrolliert.

In Abb. 7 sind die Messergebnisse der Vertikalverformungen jeweils für Gleis Ost und West zum Zeitpunkt nach der ersten und zweiten Rohrpressung sowie zur Endmessung, bezogen auf die Nullmessung, dargestellt. Es kann, abgesehen von einzelnen punktuellen Ausreißern ($> \pm 1$ mm), festgehalten werden, dass sich die Messergebnisse der Vertikalverformungen am Gleis während und nach dem Vortrieb in der Größenordnung des Prognosewerts (1,0 mm) sowie der Messgenauigkeit (± 1 mm) befanden.

Die vier Ausreißer mit maximal ca. -4,3 mm (Abb. 7) sind laut Angabe des Vermessers Messfehler, die auf Lichtbrechungen des Infrarotstrahls durch auf den Prismen befindliche Tropfen bzw. Schnee zurückgeführt werden können. Dadurch bedingt, liegt der „Signal-Peak“ für Empfänger nicht mehr in der Spiegelmittle, sondern leicht exzentrisch. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Sicherheit und die Gebrauchstauglichkeit der ICE-Strecke durch die Vortriebsmaßnahme nur unwesentlich im zulässigen Rahmen beeinflusst wurde und das planerische Ziel eines erfolgreichen, sehr verformungsarmen Rohrvortriebs unter der FF erfüllt wurde. ■

QUELLEN

- [1] Ril 836: Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten. Fassung vom 20.12.1999 mit 1. Aktualisierung gültig ab 01.10.2008 und 2. Aktualisierung gültig ab 01.02.2013, DB Netze AG
- [2] Ril 878: Stromkreuzungsrichtlinie 2016, DB Netz AG, Immobilienmanagement (I.NFR), Frankfurt/Main, Aug. 2013
- [3] DWA-A 125: Kapitel 8 - Rohrvortrieb und verwandte Verfahren unter Bahngelände der Eisenbahnen des Bundes, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Dezember 2008
- [4] DWA-A 161: Statische Berechnung von Vortriebsrohren, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V., Juli 2013
- [5] Stein, D.: Grabenloser Leitungsbau, 2003, Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH und Co. KG, Berlin
- [6] Weigelt, H.; Honerkamp, B. (Bearb.): Schnellbahnachse Nürnberg-Ingolstadt-München, Neue Infrastruktur mit Spitzentechnologie, 2006, Edition ETR, Eurailpress
- [7] DIN 4150-3: Erschütterungen im Bauwesen, Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen, 1999
- [8] Richtlinie 821: Oberbau inspizieren, Fassung vom 01.01.2010, DB Netz AG, Zentrale, 60486 Frankfurt



Dr.-Ing. habil. Yifeng Hu
 EBA-Prüfsachverständiger (PSV)
 für Geotechnik
 Grundbauinstitut/LGA
 Bautechnik GmbH, Nürnberg
 yifeng.hu@lga.de



Dipl.-Ing. Ron Tischer
 Sachverständiger für Geotechnik
 Grundbauinstitut/LGA
 Bautechnik GmbH, Nürnberg
 ron.tischer@lag.de



Dipl.-Ing. Ulrich Sieler
 EBA-Prüfsachverständiger (PSV)
 für Geotechnik
 Grundbauinstitut/LGA
 Bautechnik GmbH, Nürnberg
 ulrich.sielers@lga.de



Dipl.-Ing. (FH) Heiner Scholten
 Projektleiter
 Bayernwerk Netz GmbH, Bamberg
 heiner.scholten@bayernwerk.de

Internationales Forum für Tunnel und Infrastruktur

STUVA-Tagung 2021

24.–26. November 2021 · Messe Karlsruhe

Nutzen Sie die Möglichkeit, sich auf dem „Familientreffen der Tunnelbranche“ zielgenau über neueste Entwicklungen zu informieren und sich mit Kollegen aus aller Welt auszutauschen. **Besuchen Sie die STUVA-Tagung vom 24.–26. November 2021 in Karlsruhe!**

- Mehr als 3.800 Fachleute aus über 20 Nationen
- Weltweit führender Branchentreff für das unterirdische Bauen und Betreiben
- Fachausstellung auf 8.000 m² mit mehr als 200 Ausstellern aus dem In- und Ausland

Separates Segment
 Tunnelbetrieb/Planung!



www.stuva-tagung.de
www.stuva-expo.de

STUVA e.V.
 Mathias-Brüggen-Str. 41, D-50827 Köln
 Tel. +49 (221) 5 97 95-0, Fax +49 (221) 5 97 95-50
 E-Mail: team@stuva-conference.com



Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Grundbauinstitut/LGA Bautechnik GmbH, Bayernwerk Netz GmbH /
 Rechte für einzelne Downloads und Ausdrücke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH