

NBS Dresden-Prag – Was passiert beim Wechsel von Datum und Projektion mit den Trassierungselementen?

Enrico ROMANSCHKE¹ (0000-0002-0242-3109), Emanuel SCHÜTZ² (0009-0004-9097-8201) & Christian CLEMEN³ (0000-0002-5807-7698)

¹ Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, enrico.romanschek@htw-dresden.de

² Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, emanuel.schuetz@htw-dresden.de

³ Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, christian.clemen@htw-dresden.de

DOI: [10.3217/978-3-99161-070-0-005](https://doi.org/10.3217/978-3-99161-070-0-005), CC BY 4.0

1 Einleitung

Die Neubaustrecke (NBS) zwischen Dresden und Prag soll Europa näher zusammenbringen und die Reisezeit zwischen den beiden Städten um mehr als die Hälfte verkürzen. Die NBS führt zwischen Heidenau (bei Dresden) und der tschechischen Stadt Chabařovice durch einen circa 30 Kilometer langen, grenzüberschreitenden Erzgebirgsbasistunnel (EGBT).

Die in diesem Beitrag beschriebene Studie der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (HTWD) wurde von der Deutschen Bahn (DB InfraGO) beauftragt und in enger Absprache mit der Projektsteuerung (Schüßler-Plan Ingenieurgesellschaft und Vössing Ingenieurgesellschaft), Správa železnic (Eisenbahninfrastrukturbetreiber in Tschechien), der Technischen Universität Dresden (TUD) und Jaud IT durchgeführt.

Grundsätzlich ist die Erstellung eines einheitlichen Raumbezugs für Lage, Höhe, 3D-Messungen und Schwere bei jedem Tunnelprojekt dieser Größenordnung erforderlich und seit Jahrzehnten erprobt und kodifiziert (MÖSER, 2016; ZIMMERMANN & WUNSCH, 2023). Mit Building Information Modelling (BIM) muss allerdings eine weitere digitale Methode integriert werden. Alle relevanten Bauwerksdaten werden in BIM dreidimensional koordiniert. Für die BIM-Software müssen die Koordinaten, Geodaten und Trassenelemente so umgeformt werden, dass die Abweichung zwischen 3-D-Planung und Vermessung möglichst gering wird.

Der homogene, grenzüberschreitende Raumbezug für den geplanten Erzgebirgsbasistunnel (EGBT) basiert auf Messungen des Dresdner Ingenieurbüros Dr. Franke und den GNSS-Netzausgleichungen der TUD (Prof. L. Wanninger). Diese Ergebnisse konstituieren das geodätische Datum EGBT22, das für die einheitliche homogene Planung und Bauausführung verwendet werden soll. Auf deutscher und auf tschechischer Seite müssen die jeweiligen Koordinatenreferenzsysteme der existierenden Bahninfrastruktur im Übergangsbereich eingebunden werden. Das projizierte Koordinatenreferenzsystem EGBT22/LDP ist eine sogenannte *Low Distortion Projection* (LDP). Diese hat im Bereich der Tunnelbaumaßnahme auf der Neubaustrecke Dresden-Prag eine minimale Maßstabsabweichung zwischen den in der Örtlichkeit gemessenen/modellierten Horizontalstrecken und den projizierten Strecken, die aus Koordinaten berechnet werden. Damit können diese georeferenzierten EGBT22/LDP Koordinaten gut in BIM-Software verwendet werden, obwohl die im Bauwesen eingesetzten

Softwareprogramme (3D-CAD, BIM-Autorensystemen, BIM Koordinationsplattformen) häufig keine geodätischen Reduktionen anbringen können, weil sie ursprünglich für den Hochbau, also nicht für langgestreckte Anlagen, entwickelt wurden. Bei der Verwendung von geodätischen Koordinatenreferenzsystemen, deren Maßstab nicht für die Baumaßnahme optimiert ist, können folgende systematische Abweichungen entstehen: Erstens Abweichungen in der Mengenberechnung (Längen, Flächen, Volumen), zweitens Abweichungen der geodätischen Messungen zu einer Laserscan-Punktwolke (Maßstab=1) oder einem geplanten Bauwerksmodell (BIM, Maßstab=1). Ggf. entsprechen abgesteckte Bauteile nicht den in 1:1-3D geplanten Dimensionen. Um dieses Risiko zu minimieren, soll ein geodätisches Koordinatenreferenzsystem angelegt werden, das im Bereich der Tunnelbaumaßnahme eine systematische Maßstabsabweichung von weniger als 10ppm, also weniger als 10mm/1km, hat. Mit diesem optimierten Koordinatensystem können 3D-CAD, BIM-Autorensystemen und BIM Koordinationsplattformen auch für große Baumaßnahmen eingesetzt werden. Für die hochgenaue Transformationen von ingenieurgeodätischen Vermessungen der deutschen Bahn oder Správa železnic wird zusätzlich eine geozentrische Datumstransformation für das EGBT22 spezifiziert, die zwischen dem tschechischen ETRS89/CZ und der deutschen Realisierung ETRS89/DREF91 vermittelt. Weil eine einheitliche Transformation von Punktkoordinaten, Geodaten/CAD-Modellen und BIM-Modellen besonders wichtig ist, wurden in der Studie zwei Open Source Softwarepakete entwickelt.

2 Grundlagen aus Forschung und Praxis

Die Georeferenzierung von 3D-BIM-Modellen ist ein hochaktuelles Thema, wie die neueste Metastudie von AZARI u. a. (2025) zeigt. Die spezifischen Probleme, die bei der Verwendung globaler CRS für die 3D-Modellierung langgestreckter Strukturen (Eisenbahnen) auftreten, wurden unter anderem in JAUD u. a. (2020) diskutiert. Die Autoren gehen speziell auf das Maßstabsproblem ein und zeigen auch, wie falsch interpretierte Koordinaten die Volumenberechnungen, beispielsweise von Erdmassen, beeinflussen. Einige spezifische Untersuchungen zum IFC-Schema wurden von JAUD u. a. (2022) durchgeführt, wobei der Schwerpunkt auf IFC-Entitäten für die Georeferenzierung und die Adressierung von CRS lag, die als WKT, aber nicht mit einem EPSG-Code spezifiziert sind. Der kanonische britische Snake-Grid-Ansatz (ILIFFE u. a., 2007) war für die NBS Dresden-Prag nicht geeignet, da ein Snake-Grid nur mit sehr speziellen Softwarebibliotheken und nicht auf Trassierungselemente angewendet werden kann. Die wissenschaftliche und technische Literatur enthält jedoch zahlreiche Methoden für lokale CRS, die alle darauf abzielen, Verzerrungen aufgrund der Krümmung der Erde lokal zu minimieren. DENNIS (2016) zeigt, wie sich verschiedene Projektionstypen auf verzerrungsarme Kartenprojektionen auswirken. Wichtige Argumente für die Berücksichtigung der Höhe bei der CRS-Gestaltung werden in älteren Studien zur erforderlichen Höhenauflösung für die Bestimmung des Maßstabsfaktors k_0 von BURKHOLDER (2004) beschrieben. Wenn es um standardisierte Konzepte und den IT-Einsatz der Georeferenzierung geht, sind die internationalen Normen ISO19111 „Koordinatenreferenzsysteme“ (ISO, 2019a) und ISO 19162 zur WKT-Darstellung von Koordinatenreferenzsystemen (ISO, 2019b) maßgeblich. Für zuverlässige Formeln und die Umsetzung durch Programmierung ist das Kompendium Coordinate Conversions & Transformationen einschließlich Formeln (INTERNATIONAL ASSOCIATION OF OIL & GAS PRODUCERS (IOGP), 2025) ein zuverlässiges Standardwerk. Die praktischen Auswirkungen der Anwendung von

Low Distortion Projections (LDP) Systemen auf Personenbahnhöfe wurden in CLEMEN & ROMANSCHKE (2025) und KALANTARI u. a. (2024) beschrieben.

Für das Verständnis der Trassierungselemente, insbesondere verschiedener Übergangsbögen, sind die Ausführungen von SANDNER (2021) und NOTTBECK (2016) besonders hilfreich. In letzterem wird zudem die Berechnung von Bloss-Kurven mittels Fresnelscher Integrale (SCHUHR, 2007) einer Reihenentwicklung nach Taylor (SCHUHR, 1983) gegenübergestellt. Die Berechnung von Koordinaten für Klothoiden wird unter anderem von KIMIA u. a. (2003) behandelt.

3 Transformation von Punkten

Die Optimierung der Parameter für die Mercator-Projektion erfolgte iterativ über die Minimierung der Spanne (nicht der Summe!) des Maßstabes (ppm) über die Variation der Lage des Zentralpunktes λ_0 , φ_0 und des Maßstabes k_0 zur Kompensation der Höhenreduktion. Dabei wurde die im Datum DB_REF2016/GK5 geplante Vorzugsvariante des Tunnels als Grundlage verwendet und mit den bekannten Parametern DB_REF→ETRS89/DREF91 und dem Quasigeoid GCG2016 transformiert.

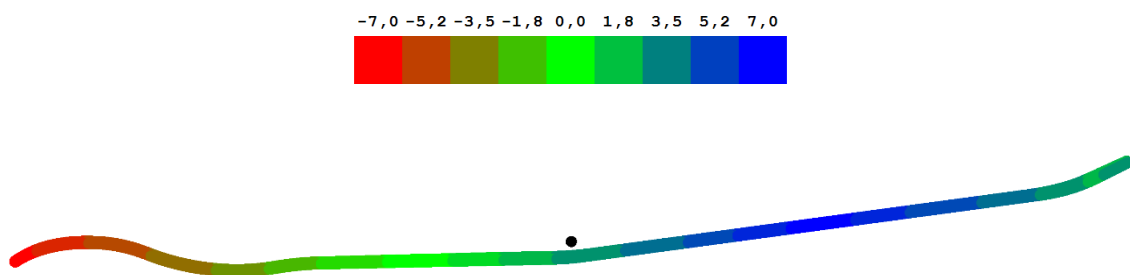


Abb. 1: Trasse (Norden links, Süden rechts) nach PPM Werten eingefärbt, der schwarze Punkt ist das Projektionszentrum. Farbskala der PPM Werte

Tabelle 1: Abschätzung der Höhenreduktion entlang der Trasse und auf der Geländehöhe

Ort	Höhe $h_{\text{ell_EGBT22}}$	Maßstab	Maßstab
Tunnel			
Min	164 m	1,000009	+9 ppm
Mittel	222 m	1,000000	-1 ppm
Median	231 m	0,999998	-7 ppm
Max	265 m	0,999993	-7ppm
Gelände			
Min	150 m	1,000011	+11 ppm
Mittel	458 m	0,999963	-37 ppm
Median	447 m	0,999964	-36 ppm
Max	845 m	0,999902	-98 ppm

Wie in **Abb. 2** dargestellt erfolgt die Datumstransformation von den Gebrauchssystem der Deutschen Bahn DB_REF/GK5 und der SŽ S_JTSK in zwei Schritten über das vermittelnde ETRS89 in der jeweiligen nationalen Realisierung. Die Transformationsparameter zwischen dem ETRS89 und dem vermittelnden EGBT22 sind nur translatorisch und $<3\text{mm}$ – müssen also nur bei hochgenauen Netzverdichtungen im Übergangsbereich angewendet werden.

ETRS89/DREF91(R2016) nach ETRS89/EGBT22:

+proj=helmert +x=-0.0028 +y=-0.0023 +z=0.0029

ETRS89-CZ nach ETRS89/EGBT22:

+proj=helmert +x=0.0028 +y=-0.0023 +z=-0.0029

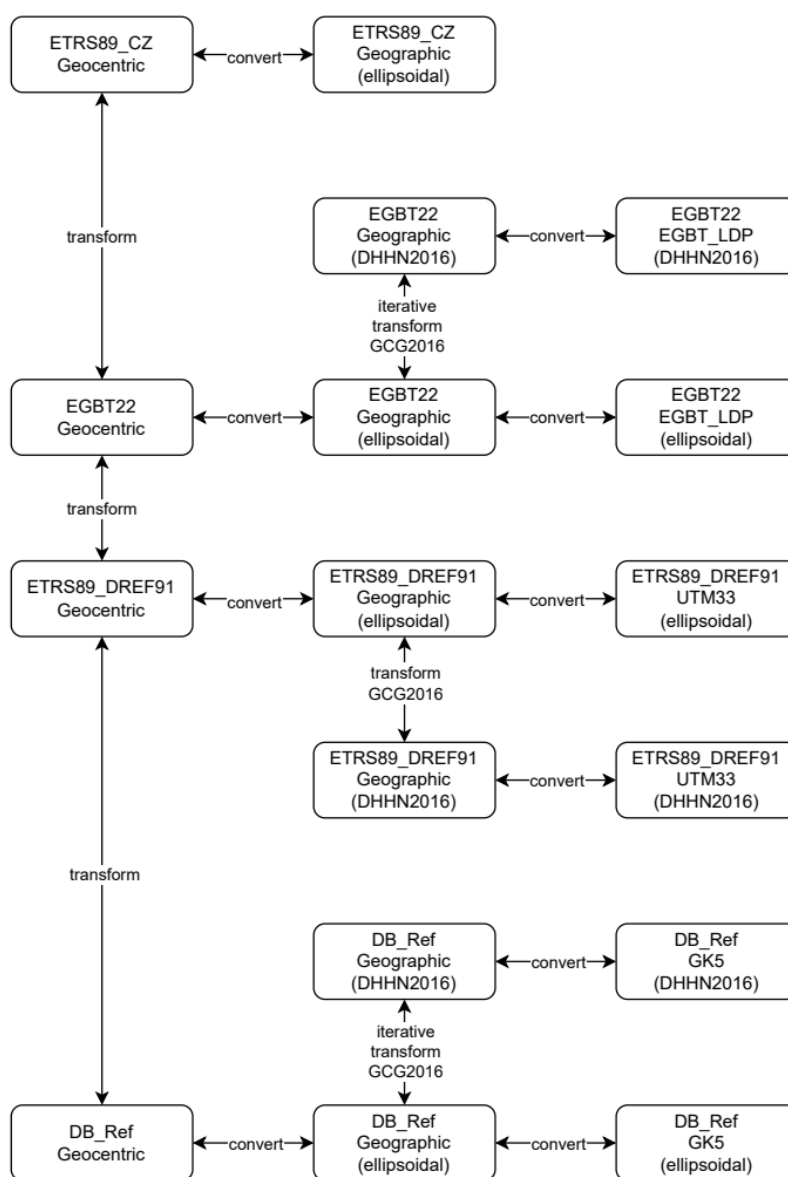


Abb. 2: Umgesetzte Schritte zur Transformation und Umformung von Koordinatenwerten.

Für die zukünftige Transformation von Punkten und Geodaten wurden durch die Studie der HTW Dresden folgende Werkzeuge zur Verfügung gestellt:

- CRS-Konfigurationsdateien für CAD und GIS-Software für das EGBT22/LDP Gebrauchssystem (proj, WKT-CRS Dialekten und Autodesk Civil3d-XML) für die BIM Koordination
- Vereinfachte CRS-Konfigurationsdateien ohne (den geringen) Datumsunterschied ETRS89→EGBT22/LDP für das Geodatenmanagement
- Open Source Software egbt22trans für Transformation von Punktkoordinaten zwischen den Datums DB_REF, ETRS89/CZ, ETRS89/DREF91 und EGBT22 in geographischen, kartesischen und projizierten Koordinaten (GK, UTM, LDP)

4 Transformation von Trassierungselementen

Die Datumstransformation und kartographische Umformung von Trassierungselementen Gerade, Kreis, Übergangsbögen und Gradiente ist in der nationalen Praxis eigentlich nicht notwendig, weil die Trassierung, sowie die gleisgeometrische und fahrdynamische Prüfung im Koordinatenreferenzsystem der Deutschen Bahn oder Správa železnic durchgeführt werden. In einem grenzüberschreitenden Projekt müssen aber vor allem im Übergangsbereich die Trassierungselemente in beiden Systemen vorliegen, damit z.B. eine parametrische Modellierung möglich ist. Für diesen Zweck wurde im Rahmen der Studie eine OpenSource Software mit MIT-Lizenz entwickelt, die auch in kommerzielle ClosedSource eingebunden werden kann. Die Anforderungen an die Funktionalität der trans.lib Software sind:

1. Die übergeben **gra/tra Dateien** im DB_REF/GK5 können eingelesen werden, die Trassierungselemente werden (nach der Interpolation) in der tra.lib GUI tabellarisch dargestellt und visualisiert. Die Software visualisiert Lage(2D), Richtung, Krümmung, Höhe, und Steigung.
2. Die tra.lib Software kann die Trasse **im DB_REF/GK5 interpolieren** (z.B. max. Abstand 1m und max. orthogonale Differenz zu Trasse 1mm) und eine csv-Datei mit Stationswert, Eigenschaften des Trassierungselements und Koordinaten ausgeben.
3. Die TRA.Tool Software kann die Trassierungselemente **ins EGBT22/LDP transformieren**, interpolieren und eine csv-Datei mit Station, Elementeigenschaften und Koordinaten ausgeben.
4. Für das Ergebnis der Transformation der Geometrieelemente steht **zusätzlich ein Qualitätskriterium** zur Verfügung, das Auskunft über die transformationsbedingten Abweichungen der Geometrie gibt. Abweichungen in Lage und Stetigkeit werden durch **Warnungen** ersichtlich gemacht, deren Schwellwerte definiert werden können.
5. Die TRA.Tool Software kann die transformierten Trassierungselemente **in eine gra/tra Datei schreiben**. Dabei gibt es für den Umgang mit dem Maßstab verschiedene Varianten, allerdings können nicht gleichzeitig die Stationswerte im DB_REF beibehalten und alle Stetigkeitsbedingungen im EGBT22/LDP erfüllt werden.
6. Die exportierten gra/tra Dateien (EGBT22/LDP) können in die Software ProVI geladen werden. Die transformierte Trasse kann **in ProVI für die parametrische BIM Modellierung genutzt** werden.

7. Der **orthogonale Abstand** zwischen der unabhängig erstellten und transformierten 3D-Polylinie (Civil3D) und der mit tra.tool transformierten Trassen beträgt im CAD-System max. 2mm
8. Eine im „**Roundtrip**“ (DBREF/EGBT22/DBREF) transformierte Trasse (gra/tra) hat maximale geometrischen Abweichungen <1mm zu der originalen Trassendateien.

Für Transformationen wird die oben beschriebene Bibliothek *egbt22trans* verwendet. Da mit *egbt22trans* nur 2/3D-Koordinaten transformiert werden können, müssen die übrigen Geometrieparameter *Länge*, *Richtung* und *Radien* separat geändert werden. Die Erhaltung der Stetigkeitsbedingungen und die Anpassung der Stationierung nach der Transformation ist eine der Hauptfunktionen des TRA.Tool. Beachtet werden müssen der Maßstab und die Meridiankonvergenz als zusätzliche Einflussgrößen auf die Trassenparameter.

Aus dem lokalen Projektmaßstab (Höhe, Abstand Mittelmeridian) wird eine Skalierung am Start- und Endpunkt der Geometrieelemente berechnet. Diese wird angewandt:

- auf den Parameter Länge als Mittelwert der Skalierung am Start- und Endpunkt der Elemente
- auf r_1 & r_2 einer Kreisgeometrie als Mittelwert von Skalierung am Start- und Endpunkt der Elemente.
- Für Bloss-Kurve und Klothoide wird r_1 mit der Skalierung am Elementanfang multipliziert und r_2 mit der Skalierung am Elementende.

Die Meridiankonvergenz vor und nach der Transformation wird als Delta von der ursprünglichen Richtung subtrahiert:

$$heading_{new} = heading - (\gamma_{EGBT22} - \gamma_{DBRef})$$

Trotz dieser Korrektur bleiben systematische Abweichungen zwischen den Geometrieelementen in DB_REF20116/GK5 und EGBT22/LDP bestehen (Abb. 4).

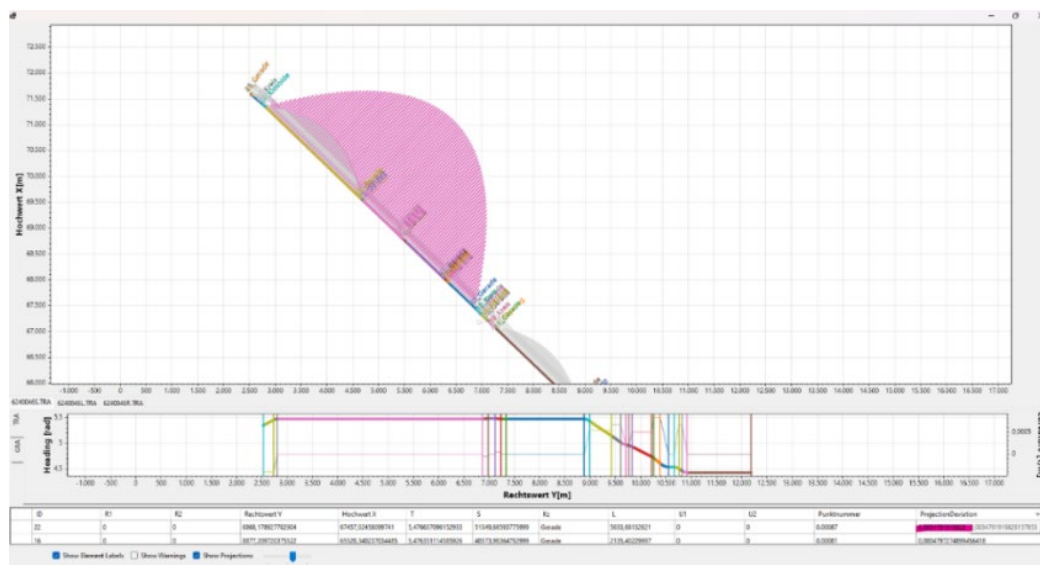


Abb. 4: Systematische Abweichungen durch die Meridiankonvergenz zwischen DB_REF20116/GK5 und EGBT22/LDP (ohne Optimierung)

Für bessere Ergebnisse werden die zuvor modifizierten Geometrieparameter durch eine Art 2D-Helmert-Transformation optimiert (Abb. 5). Dies ist standardmäßig im Transformationsalgorithmus aktiviert, kann jedoch für Richtung und Länge separat deaktiviert werden. Zunächst wird die Richtung angepasst, um den Endpunkt der aktuellen Geometrien durch ΔT optimal an den Startpunkt der nachfolgenden Elemente auszurichten. Dann wird der Längenparameter um die verbleibende Abweichung ΔL skaliert. Eine Anpassung des Längenparameters variiert jedoch die Geometrie, was erneut zu einer Abweichung zum Folgeelement führen kann. Aus diesem Grund ist eine iterative Anpassung notwendig, wobei aber in den meisten Fällen der Standardschwellenwert 0,1 mm innerhalb der ersten Iteration erreicht wird. Dadurch können die Abweichungen deutlich reduziert werden, wie Abb. 6 zeigt (die Abweichungen sind hier deutlich höher skaliert als in Abb. 4).

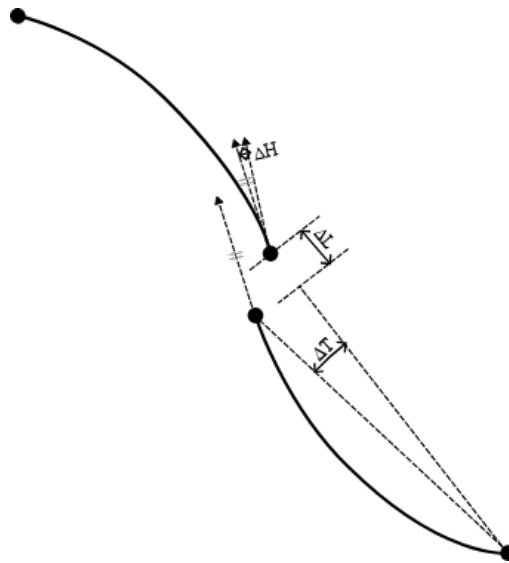


Abb. 5: Abweichungen bzgl. der Stetigkeit in der Lage zum Folgeelement werden durch eine lokale Helmert-Transformation optimiert.

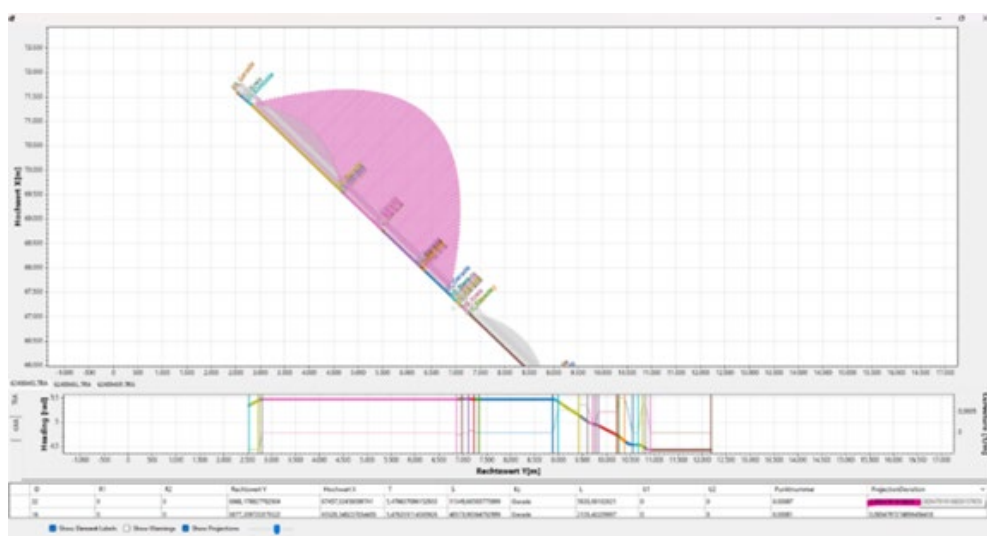


Abb. 6: Stark überzeichnete Abweichung zwischen den einzeln ins EGBT22/LDP transformierten Interpolationspunkten und einer Gerade im DB_REF20116/GK5 nach der Optimierung.

Durch die Optimierung in Bezug auf die Stetigkeit der Anschlusspunkte (Abb. 5), kann es durch die Richtungsanpassung zu Abweichungen in der Richtung zwischen dem letzten interpolierten Punkt (Endpunkt) und der Startrichtung der Nachfolger kommen. Abb. 6 zeigt den Extremfall eines 5,6 km langen Trassierungselements. Die Richtungsabweichung (*Knick*) beträgt nach der Transformation 0.8°.

Neben der eigentlichen Transformation ist es wichtig, Aussagen über die Qualität der transformierten Geometrie treffen zu können. Durch Interpolation der Punkte der ursprünglichen Geometrie werden diese als Polylinie zusammen mit der parametrisierten Geometrie transformiert. Im Zielkoordinatensystem werden dann die Punkte der transformierten Polylinie auf die neue, parametrisierte Trasse projiziert und die verbleibenden Abweichungen können als Qualitätsindikator verwendet werden. Für den genannten Extremfall aus Abb. 6 beträgt die mittlere Abweichung 3,5 mm. Für alle übrigen Trassierungselemente sind die Abweichungen aufgrund der geringeren Elementlänge deutlich geringer.

Die Bibliothek ermöglicht den Export in die Formate .gra/.tra, .csv und .dxf. Der als Ergebnis der Transformation erhaltene Maßstab kann nicht direkt in TRA gespeichert werden, da es im Dateistandard kein entsprechendes Feld gibt. Für den Export nach TRA stehen daher verschiedene Optionen zur Verfügung:

- **Verwerfen:** Der Maßstab wird ignoriert, die Länge behält ihren ursprünglichen Wert. Dies führt zu Koordinatenunterschieden zwischen den Geometrieelementen. Die Bedingung $\text{Stationswert} + L = \text{Stationswert des Folgeelements}$ ist erfüllt.
- **Multiplizieren:** Die Länge wird mit dem Maßstab multipliziert. Die Stationswerte der Elemente werden nicht angepasst. Die Bedingung $\text{Stationswert} + L = \text{Stationswert des Folgeelements}$ wird **NICHT** erfüllt.
- **KSprung hinzufügen:** Die Länge wird mit dem Maßstab multipliziert. Um die Bedingung $\text{Stationswert} + L = \text{Stationswert des Folgeelements}$ zu erfüllen, werden bei Bedarf zusätzliche KSprung-Elemente hinzugefügt (dies führt meist zu einer TRA-Datei mit KSprung-Elementen zwischen jeder Geometrie). Aufgrund von Berechnungsungenauigkeiten können einige der hinzugefügten KSprung-Elemente aufgrund ihres Längenparameters die Toleranz für Stationsabweichungen überschreiten und in der Datei verbleiben.

5 Auswirkungen auf die Praxis

Derzeit wird in einer Bachelorarbeit (Phil Abel, Studiengang Infrastrukturmanagement, HTW Dresden) die Transformation mit dem erstellten TRA.lib Tool und der in die Planungssoftware ProVI integrierten Transformationslösung für parametrisierte Trassen untersucht. Erste Ergebnisse zeigen erwartungsgemäß, dass manuelle CAD-Verfahren, wie das Verschieben, Drehen und/oder Skalieren der Trassen oder IvL-Pläne, zu starken Lageabweichungen führen. Deswegen ist eine softwaregestützte Transformation von Trassierungselementen unbedingt erforderlich. Ziel der Koordinatentransformation ist vor allem die Beibehaltung der Stetigkeitsbedingungen und Anpassung der Stationierungswerte als Grundlage für eine parametrische BIM-Modellierung.

Die bis jetzt durchgeführten numerischen Auswertungen zeigen, dass die untersuchten Transformationsverfahren trotz unterschiedlicher mathematischer Ansätze im Lageplan vergleichbare geometrische Ergebnisse liefern. Kleine ($<3,5\text{mm}$) Unterschiede werden vor allem in den Hauptpunktkoordinaten, Stationierungen und Richtungswinkeln (mittel $0,004\text{gon}$) der Achselemente sichtbar. Bei den ProVI-internen Transformationsvarianten erweist sich insbesondere die Variante mit beibehaltenen Radien als praktikabelste Lösung für die Entwurfs- und Ausführungsplanung. Sie erzeugt eine konsistente und gut interpretierbare Achsgeometrie, die lagebezogen eine ausreichende Genauigkeit aufweist und gleichzeitig die Anschlussfähigkeit an etablierte planerische Workflows gewährleistet. Radien stellen eine zentrale geometrische Größe der Entwurfsplanung dar und bilden die Grundlage für weitere Berechnungen, etwa zur Überhöhung oder zur Bemessung von Übergangsbogenlängen. Eine Veränderung dieser Parameter hat zur Folge, dass die Berechnungen und Nachweise zur Einhaltung der Regelwerte (wie maximale Seitenbeschleunigung, zulässige v_{max} , Überhöhung/sfehlbetrag) neu durchgeführt werden müssen, ohne im Lageplan einen erkennbaren Mehrwert zu bieten.

Die mit TRA.Tool durchgeführte Transformation weist im Vergleich zur ProVI-Transformation insgesamt geringere numerische Abweichungen gegenüber der Referenztransformation auf. Für die Planungspraxis ist jedoch weniger die maximal erreichbare numerische Genauigkeit entscheidend als vielmehr die geometrische Konsistenz der Achse und ihre Eignung für integrierte planerische Prozesse

Literaturverzeichnis

AZARI, P., LI, S., SHAKER, A. & SATTAR, S. (2025): Georeferencing Building Information Models for BIM/GIS Integration: A Review of Methods and Tools. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 14 (5), Art.-Nr. 180. <https://doi.org/10.3390/ijgi14050180>

BURKHOLDER, E. F. (2004): Accuracy of Elevation Reduction Factor. In: *Journal of Surveying Engineering*, 130 (3), S. 134–137. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9453\(2004\)130:3\(134\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9453(2004)130:3(134))

CLEMEN, C. & ROMANSCHKEK, E. (2025): 6326 Shades of Georeferencing BIM – Low Distortion Projections (LDP) for the German Railway. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLVIII-4/W15-2025, S. 47–53. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W15-2025-47-2025>

DENNIS, M. L. (2016): Ground Truth: Low Distortion Map Projections for Engineering, Surveying, and GIS. In: LIVINGSTON, B. L., CATE, C., PRIDMORE, A., HEIDRICK, J. W. & GEISBUSH, J. (Hrsg.): *Pipelines 2016*. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, S. 857–869. <https://doi.org/10.1061/9780784479957.085>

ILIFFE, J. C., ARTHUR, J. V. & PRESTON, C. (2007): The Snake Projection: A Customised Grid for Rail Projects. In: *Survey Review*, 39 (304), S. 90–99. <https://doi.org/10.1179/003962607X165015>

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF OIL & GAS PRODUCERS (IOGP) (2019): *IOGP Report 373-07-2 – Coordinate Conversions and Transformations including Formulas*. London.

ISO (2019a): *ISO 19111:2019 – Geographic Information — Referencing by Coordinates*. Geneva: International Organization for Standardization.

ISO (2019b): *ISO 19162:2019 – Geographic Information — Well-known Text Representation of Coordinate Reference Systems*. Geneva: International Organization for Standardization.

JAUD, Š., CLEMEN, C., MUHIČ, S. & BORRMANN, A. (2022): Georeferencing in IFC: Meeting the Requirements of Infrastructure and Building Industries. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, X-4/W2-2022, S. 145–152. <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-4-W2-2022-145-2022>

JAUD, Š., DONAUBAUER, A., HEUNECKE, O. & BORRMANN, A. (2020): Georeferencing in the Context of Building Information Modelling. In: *Automation in Construction*, 118, Art.-Nr. 103211. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103211>

KALANTARI, M., CLEMEN, C. & JADIDI, M. (2024): *BIM and 3D GIS Integration for Digital Twins: An Introduction*. 1. Auflage. Boca Raton: CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781351200950>

KIMIA, B. B., FRANKEL, I. & POPESCU, A.-M. (2003): Euler Spiral for Shape Completion. In: *International Journal of Computer Vision*, 54 (1–3), S. 159–182. <https://doi.org/10.1023/A:1023713602895>

MÖSER, M. (2016): Handbuch Ingenieurgeodäsie. Band 3: *Ingenieurbau*. 2., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Wichmann, Berlin/Offenbach.

NOTTBECK, A. (2016): Untersuchungen zu Auswirkungen von Geschwindigkeitserhöhungen auf Bahnstrecken im Bestand. Dissertation, Technische Universität München, München.

SANDNER, C. (2021): Charakterisierung von Einzelfehlern im Eisenbahnoberbau aus Messfahrten der Regelinspektion und dem Fahrwegmonitoring mit Regelzügen. Dissertation, Technische Universität München, München.

SCHUHR, P. (2007): *Übergangsbogen für Bahnen mit hohen Fahrgeschwindigkeiten*. Deutsche Geodätische Kommission bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, Reihe B, Angewandte Geodäsie. München.

ZIMMERMANN, J., WUNSCH, S. & MÖSER, M. (Hrsg.) (2023): *Eisenbahnbau*. Handbuch Ingenieurgeodäsie. 3., neu bearbeitete Auflage. Wichmann, Berlin/Offenbach.