

Moderne Messmethoden bei Gleisbauarbeiten ohne Festpunktfeld

Kombination von inertialer Messtechnik und GNSS beim Gleismesssystem
Trimble GEDO IMS-GNSS

KAI NAUMANN | LINAS MACIULEVICIUS

Gleise unterliegen Verschleiß- und Alterungsprozessen. Deswegen müssen in regelmäßigen Abständen Erhaltungsmaßnahmen in Form von Stopfarbeiten oder umfassenden Sanierungsmaßnahmen zur Erneuerung des Gleiskörpers durchgeführt werden. Das Herstellen der geplanten Sollgeometrie ist dabei das wichtigste Kriterium, um die fahrdynamische Qualität zu gewährleisten. Ohne absolute Gleisvermarkung sind diese Ziele jedoch kaum zu erreichen. Da die Herstellung eines geodätischen Festpunktfeldes sehr zeit- und kostenaufwendig ist, wird mitunter nur im Ausgleichsverfahren gestopft. Bei dem vorgestellten Messverfahren wird modernste inertielle Messtechnik zusammen mit GNSS auf einem GEDO-Gleismesswagen kombiniert, sodass alle relevanten gleisgeometrischen Parameter in einem Arbeitsgang erfasst werden.

Motivation

Mit dem hier vorgestellten Konzept sollen mit geringstmöglichem zeitlichem und personellem Aufwand Gleisbauarbeiten vermessungstechnisch begleitet werden. Dabei wird der gesamte Prozess der Gleiserneuerung vom Gleisaufmaß inklusive der Vermarkung temporärer Festpunkte über die Optimierung der Gleisgeometrie bis zur Begleitung der Stopf-

arbeiten vermessungstechnisch betrachtet. Auch bei privaten Streckenbetreibern sind regelmäßige Erhaltungsmaßnahmen notwendig, aber das Verständnis für die Kosten einer Grundlagenvermessung ist nur bedingt vorhanden. Die üblicherweise nach Ril 883 [1] geforderte statische GNSS Kampagne (GNSS: Global Navigation Satellite System) zur Erzeugung der PS1-Punkte, Netzmessung und Nivellement mit anschließender Netzausgleichung zur Erzeugung der Gleisvermarkungspunkte (GVP) sowie die Vermessung des Gleises und die notwendige Trassierung sind sehr aufwendig und damit entsprechend kostenintensiv. Dieser Aufwand wird mitunter nicht gewünscht, aber die Stopfmaschine soll trotzdem ein bestmögliches Ergebnis herstellen. Der Ansatz, auf RTK-Basis (RTK: RealTimeKinematic = Echtzeit-GNSS-Messungen) die absolute Gleislage punktuell zu bestimmen und mit inertialer Messtechnik zu verdichten, führt zu einem sehr guten Kompromiss zwischen Messaufwand und Genauigkeit.

Inertielle Messtechnik

Inertielle Messtechnik beschreibt in diesem Fall einen Gleismesswagen, auf dem eine inertielle Messeinheit (engl.: Inertial Measurement Unit = IMU) angebracht ist. Bei einer IMU handelt es sich um ein Multisensorsystem, das mit Beschleunigungs- und Drehratensensoren die freie Bewegung eines Körpers im dreidimensionalen Raum erfasst (Trajektorie). Kennt man die Startposition des Körpers in einem beliebigen Koordinatensystem, so stehen in

der Folge für jeden Punkt der gemessenen Trajektorie die Koordinaten im Bezugssystem zur Verfügung.

Ein Nachteil des Systems liegt in der Drift, welcher die einzelnen IMU-Sensoren unterworfen sind. Drift bedeutet in dem Fall, dass eine Bewegung bzw. Rotation erkannt wird, obwohl das System eigentlich in Ruhe ist. Diese Drift nimmt mit fortlaufender Dauer exponentiell zu und führt dazu, dass die Abweichung von der tatsächlichen Position immer weiter zunimmt. Dem steuert man durch das Messen von Synchronisationspunkten entgegen, deren koordinatenmäßige Position bekannt ist und korrigiert dadurch die Drift in regelmäßigen Abständen. Typischerweise werden die Punkte der Gleisvermarkung verwendet, aber auch ein per GNSS bestimmter Punkt ist (mit herabgesetzter absoluter Genauigkeit) geeignet.

Potenzieller Messablauf für Gleisbaumaßnahmen

Bei Gleisbaumaßnahmen unterscheidet man zwischen Erneuerung und Erhaltung. Das Gleis wird erneuert, indem Schienen, Schwellen, Schotter oder auch das Planum des Gleises ausgetauscht werden. Basierend auf einer Sollgeometrie wird das Gleis durch eine Stopfmaschine in mehreren Stopfgängen so lange bearbeitet, bis die Sollposition erreicht ist. Bei einer Erhaltungsmaßnahme wird lediglich das vorhandene Gleis erneut gestopft, um wieder die besten Fahreigenschaften zu erzielen. Vermessungstechnisch werden zwei Anforderungen gestellt:



Trimble Track Survey & Scanning

die Einhaltung der relativen (Form des Gleises) und die Einhaltung der absoluten Gleislage (Position). Zur Einhaltung der absoluten Gleislage dienen GVP, deren Einrichtung und Unterhalt sehr sinnvoll, aber gleichzeitig aufwendig und kostenintensiv ist. Es stellte sich daher schon öfter die Frage, ob hier die Verwendung von GNSS nicht für Abhilfe sorgen könnte. Gerade für Strecken ohne Vermarkung, die mit niedrigeren Geschwindigkeiten befahren werden, scheint dies verlockend.

GNSS ist ein absolutes Messsystem, aber Genauigkeit und Zuverlässigkeit sind für die eigentliche Gleismessung nicht ausreichend. Kombiniert man GNSS als absolutes System zusätzlich mit einer IMU, entsteht ein Messsystem, das die hochgenaue relative Genauigkeit der IMU mit der absoluten Messung von GNSS unterstützt.

Bei dem Gleissmesssystem Trimble GEDO IMS-GNSS handelt es sich um einen handgeschobenen und spurgebundenen Gleismesswagen (Trimble GEDO CE 2.0). Der Wagen wird entweder mit einem Profiler (Distometer plus Vertikalwinkelmessung) oder einem Tachymeter zur Messung seitlich gelegener Objekte und einem GNSS-Empfänger auf einer Karbonverlängerung ausgestattet. Die inertielle Messtechnik (Trimble GEDO IMU) ist in einer gelben Box auf dem Wagen direkt über der Schiene untergebracht (Abb. 1).

Die IMU misst auf dem Gleismesswagen die innere Geometrie des Gleises und erreicht dabei auf typische Sehnenlängen Genauigkeiten

deutlich unterhalb von 1 mm. Die Drift, die nach einigen 100 m signifikant an Größe zunimmt, wird durch per GNSS bestimmte Stützpunkte wieder korrigiert. Das GNSS befindet sich mit auf dem Gleismesswagen, und die Punkte werden mit RTK mit kurzen Standzeiten von einigen Sekunden bestimmt. Indem der Abstand zwischen zwei Stützpunkten groß genug gewählt wird, hat die GNSS-Genauigkeit keinen messbaren Einfluss mehr auf die innere Genauigkeit der Messung (Abb. 2). Setzt man als maximal zulässige Größenordnung für entstehende Knicke 1 ‰ an, wie es bei Richtungsknicke und Neigungswechseln ohne Ausrundung zulässig ist, dann ergibt sich bei einem angenommenen GNSS-Fehler von 2 cm eine theoretische Mindestsehnenlänge von 40 m. In der Praxis wird man jedoch eher Sehnenlängen von 200 m bis 300 m verwenden, da die Drift der IMU dann noch unterhalb der GNSS-Genauigkeit liegt.

Sollen mehrere Messungen wiederholt auf dem gleichen Gleisstück erfolgen, dann ist das wegen der mangelhaften Reproduzierbarkeit der GNSS-Messungen nach wie vor nicht realisierbar. Man kann dieses Problem jedoch umgehen, wenn man während der ersten Messung mit GNSS zusätzliche temporäre Festpunkte neben dem Gleis vermarkt und misst. Messen bedeutet in dem Fall, den seitlichen Abstand und die Höhendifferenz der Punkte im gleichen Arbeitsgang vom Gleismesswagen aus mit einem

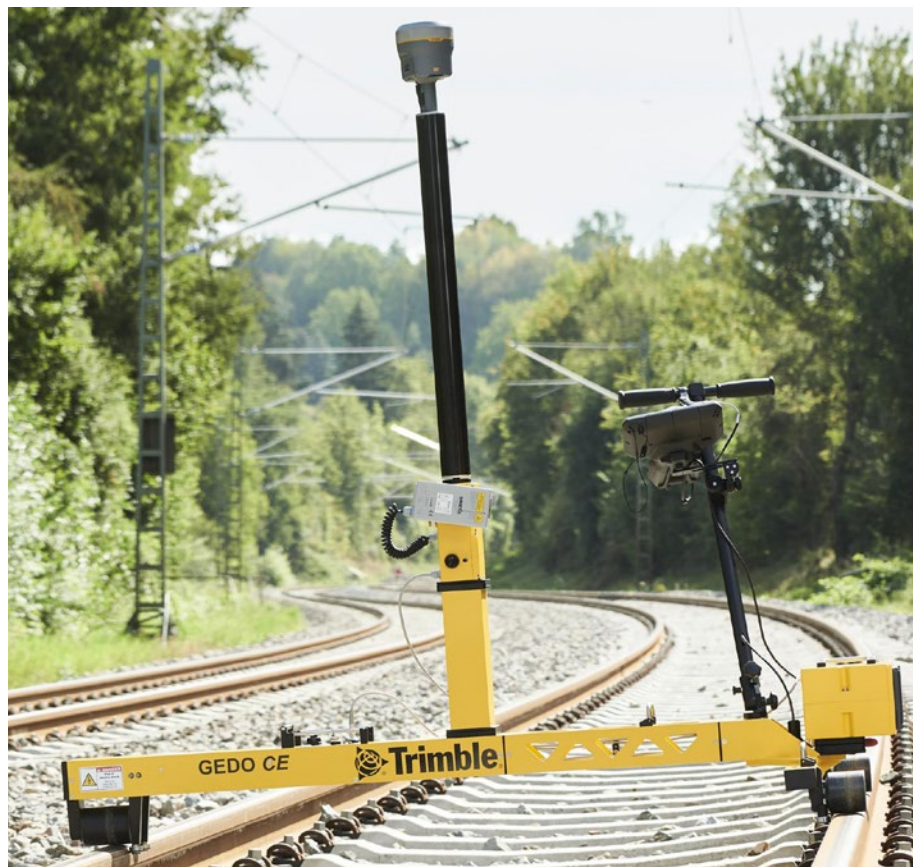
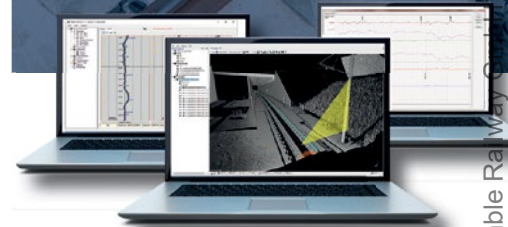


Abb. 1: Gleissmesssystem Trimble GEDO IMS-GNSS mit Profiler



- ┌ ┐
- └ ┘
- Gleiskontrolle
- Bestandsaufnahme
- Feste Fahrbahn
- Vormessen
- Lichtraumprüfung
- Laserscanning

Bei den **Trimble® GEDO Systemen** werden moderne Technologien entsprechend der jeweiligen Anwendungen individuell kombiniert. Der **Trimble GEDO CE 2.0** Gleismesswagen kann mit Tachymeter, GNSS, Laserscanning und Inertialmesstechnik ausgerüstet werden. Der flexible und modulare Aufbau ermöglicht die Anpassung der **Trimble GEDO Systeme** an neue Herausforderungen und künftige Entwicklungen.

Mehr Informationen:
gedo.trimble.com

 **Trimble**

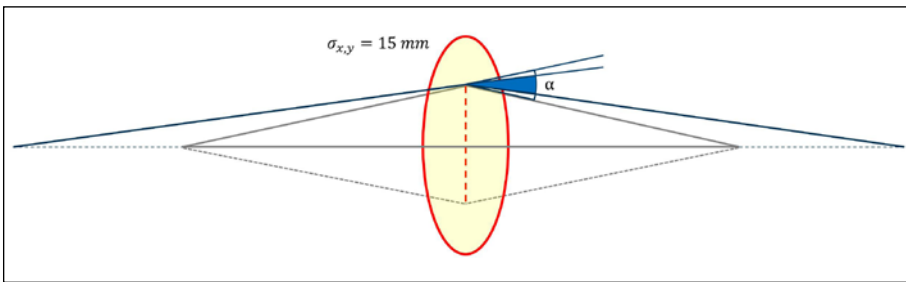


Abb. 2: GNSS-Fehlereinfluss auf die innere Genauigkeit

Profiler oder Tachymeter zu bestimmen. Durch Kombination mit der gemessenen Gleislage entstehen 3D-Koordinaten für diese Punkte im gleichen Bezugssystem. Bei einer erneuten Messung wird nun nicht mehr mit GNSS gemessen, sondern stattdessen werden die temporären GVP verwendet. Dadurch sind die Ergebnisse zwischen den Messungen vergleichbar, da man jeweils im gleichen Bezugssystem misst. In Bereichen, in denen zusätzlich äußere Zwänge die Gleislage vorgeben, müssen zusätzliche Messungen mit dem Profiler durchgeführt werden (Abstand Nachbargleis, Bahnsteig usw.), die aber auch im DB-Netz bereits vorgeschrieben sind.

Vergleichsmessungen innerhalb eines Testprojekts

Bei der Durchführung eines groß angelegten Eisenbahndigitalisierungsprojekts der TCDD (Türkische Staatsbahn) war eine der wichtig-

sten Fragen die Auswahl einer effizienten und zuverlässigen Methode für die Errichtung des geodätischen Netzes auf GVP-Niveau (60–120 m zwischen den Punkten), das in späteren Phasen für alle detaillierten Gleisvermessungen und Scananwendungen verwendet werden kann.

Für die Evaluierung wurde eine 2 km lange Teststrecke bei einem Eisenbahndepot in der Nähe von Ankara ausgewählt (Abb. 3). Der Gleiskorridor enthielt PS1-Netzpunkte alle 1–1,5 km und alle 30 m einen oberleitungs-basierten GVP. Zu Vergleichszwecken wurden die PS1- und GVP-Netze mit traditionellen geodätischen Methoden (Netzmessung, Nivellement) bestimmt und die GVP-Koordinaten mit der Methode der kleinsten Quadrate ausgeglichen. Ziel der Evaluierung war, ohne den Aufwand eines Festpunktfeldes eine Messmethode basierend auf RTK-GNSS und Intertialmesstechnik zu finden, die die beste relative und absolute Genauigkeit lieferte.

Die Arbeiten im Feld wurden in zwei Phasen unterteilt. In der ersten Phase fand die Vermessung des Gleises statt, auf deren Basis die Referenztrajektorie erstellt wurde. Hierbei wurde die Variante GEDO IMS + Totalstation mit Sehnenlängen von 70–80 m verwendet. Die Sehnenendpunkte wurden aus dem GVP-Netz per Freie Stationierung mit mindestens sechs Anschlusspunkten bestimmt (Abb. 4). In der zweiten Phase erfolgte die Messung der Teststrecke mit der Methode GEDO IMS + GNSS-RTK. Die IMS-GNSS-RTK-Sehnenpunkte wurden in Abständen von 30–40 m mit einer Standzeit von mindestens 15 Sekunden gemessen. Außerdem wurde während der Standzeit die Rohdatenaufzeichnung aktiviert, sodass die Sehnenendpunkte per PPK-Methode (PPK: Post Processing Kinematic) in Trimble Business Center nachprozessiert und die Trajektorie erneut ausgewertet werden konnte, um eventuell bessere Genauigkeiten zu erzielen. Die Standzeit verlängert sich im Vergleich zu RTK dadurch nicht. Bei PPK werden die gesammelten Rohdaten erneut prozessiert. Dadurch kann sich nachträglich durch das Ändern der Messbedingungen (z.B. Elevationsmaske, Hinzunahme von Galileo-Satelliten, andere Referenzstation/-en) ein idealeres Szenario ergeben als zur Messzeit und somit die Genauigkeit gesteigert werden. Wenn die RTK-Messbedingungen allerdings bereits sehr nahe am Ideal waren, ist auch keine merkliche Verbesserung oder in Einzelfällen sogar eine Verschlechterung möglich.

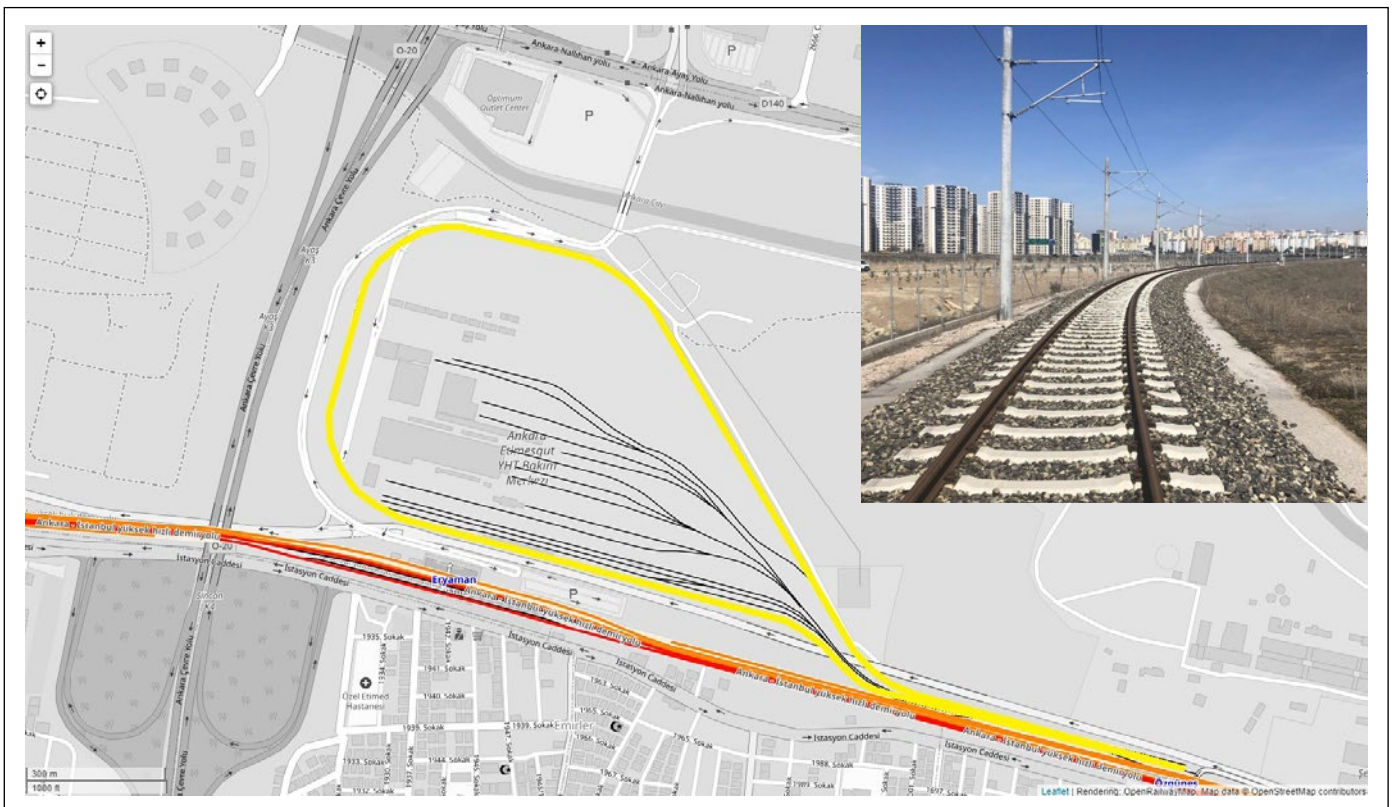


Abb. 3: Übersichtskarte und -foto der Teststrecke

Quelle: OpenStreetMap (Übersichtskarte)

Für die Beurteilung der relativen Genauigkeit wurden die gemessenen Sehnen prozessiert und im Anschluss Pfeilhöhen auf Basis einer 10-m-Wandersehne berechnet. Aus dem Vergleich mit der Referenzmessung lässt sich ableiten, dass jeweils an den GNSS-Sehnenpunkten Pfeilhöhendifferenzen von 2 mm (Lage) bis 3 mm (Höhe) sichtbar werden (Abb. 5). In Stationsrichtung erstrecken sich die Auswirkungen auf einen Bereich von 10–20 m. Die Korrelation mit den GNSS-Endpunkten ist eindeutig. Wird die Sehnenlänge durch Weglassen der Zwischenpunkte auf ca. 180 m vergrößert, verbessert dies die innere Qualität der Trajektorie signifikant. Durch die PPK-Nachprozessierung kann die innere Qualität der IMS-GNSS-Punkte hingegen nur minimal verbessert werden. Die Pfeilhöhendifferenz liegt nun bei 1 mm (Lage) und 0,7 mm (Höhe). Außerdem fand noch eine rein relative Auswertung komplett ohne Sehnenendpunkte statt. Auch wenn keine Festpunkte verwendet werden, wirkt sich die IMU-Drift auf die Pfeilhöhe bei gleichbleibender Länge der Wandersehne nicht aus. Die Differenzen zur Referenzmessung lagen nur noch bei 0,5 mm (Lage) und 0,3 mm (Höhe). Verbleibende Unterschiede in den Pfeilhöhen lassen sich durch zufällige Messfehler erklären und liegen innerhalb der Systemgenauigkeit der terrestrischen Vergleichsmessung. Um die absolute Genauigkeit beurteilen zu können, wurden die GVP während jeder Messfahrt miterfasst. Dazu wurde ein auf dem Wagen befestigter Tachymeter im Profiler-Modus verwendet und der Wagen senkrecht zum GVP positioniert. Die Messung von seitlichem Abstand und Höhe erfolgte auf ein am Punkt angebrachtes Prisma. Basierend auf der gemessenen Trajektorie können so für jeden GVP kartesische Koordinaten berechnet werden. Die Koordinaten wurden mit den ausgeglichenen Koordinaten aus der Referenzmessung

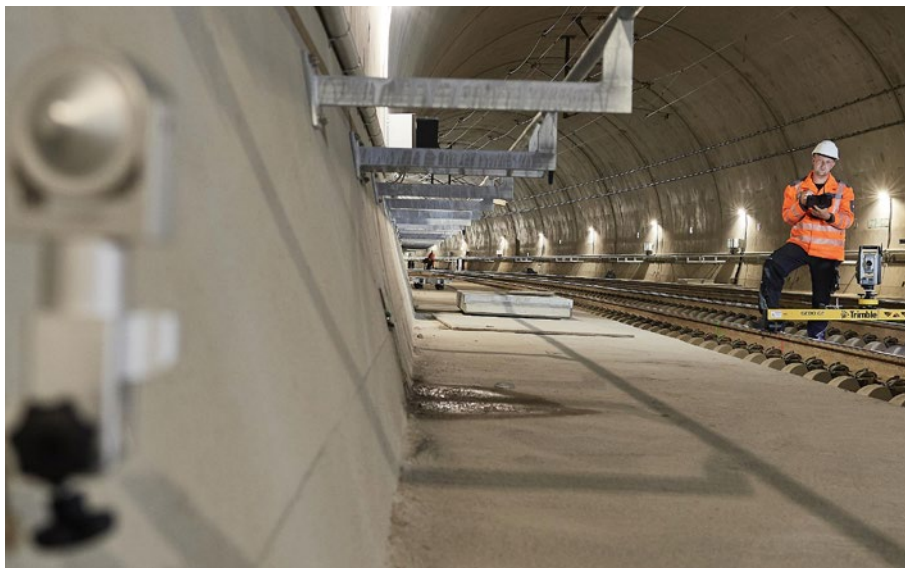


Abb. 4: Freie Stationierung mit Trimble GEDO IMS

verglichen, wobei die Ergebnisse trassenbasiert (senkrecht zur Trajektorie, Höhe über Schienenoberkante) ausgewertet wurden. Die Ergebnisse spiegeln die zu erwartende GNSS-Genauigkeit von 10–20 mm mit Ausreißern nach oben und nach unten wider. Durch die PPK-Nachprozessierung lässt sich in der Lage eine signifikante Verbesserung der absoluten Position der Trajektorie und somit auch der GVP um durchschnittlich 10 mm erreichen. In der Höhe sind die Verbesserungen hingegen nicht signifikant. Die Abweichungen liegen bei RTK und PPK um 5 mm (Abb. 6). Auch wenn durch die PPK-Neuberechnung bei diesem Projekt eine Verbesserung erreicht wurde, lassen sich die Ergebnisse nicht automatisch auf andere Einsatzgebiete übertragen. Aufgrund des nicht vorhandenen Mehraufwands im Feld wird die Rohdatenauf-

zeichnung aber seitens der TCDD empfohlen, um im Bedarfsfall darauf zurückgreifen zu können.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit dem vorgestellten Messverfahren wird bei Projekten ohne klassische Gleisvermarkung eine massive Produktivitätssteigerung für bestehende Gleise zur Herstellung einer absoluten Referenz erreicht. Gerade für einmalige Wartungs- und Instandsetzungsarbeiten ist das Verfahren perfekt geeignet, denn es kombiniert die sehr hohe innere Genauigkeit inertialer Messtechnik mit den Vorzügen der absoluten Gleisposition. In Testmessungen wurde nachgewiesen, dass die Verwendung von GNSS an Stützpunkten ausreicht, um Trassierungselemente und die Sollgeometrie zuverlässig zu bestimmen. Dabei stellt das Intervall zwischen den GNSS-Punkten ei-

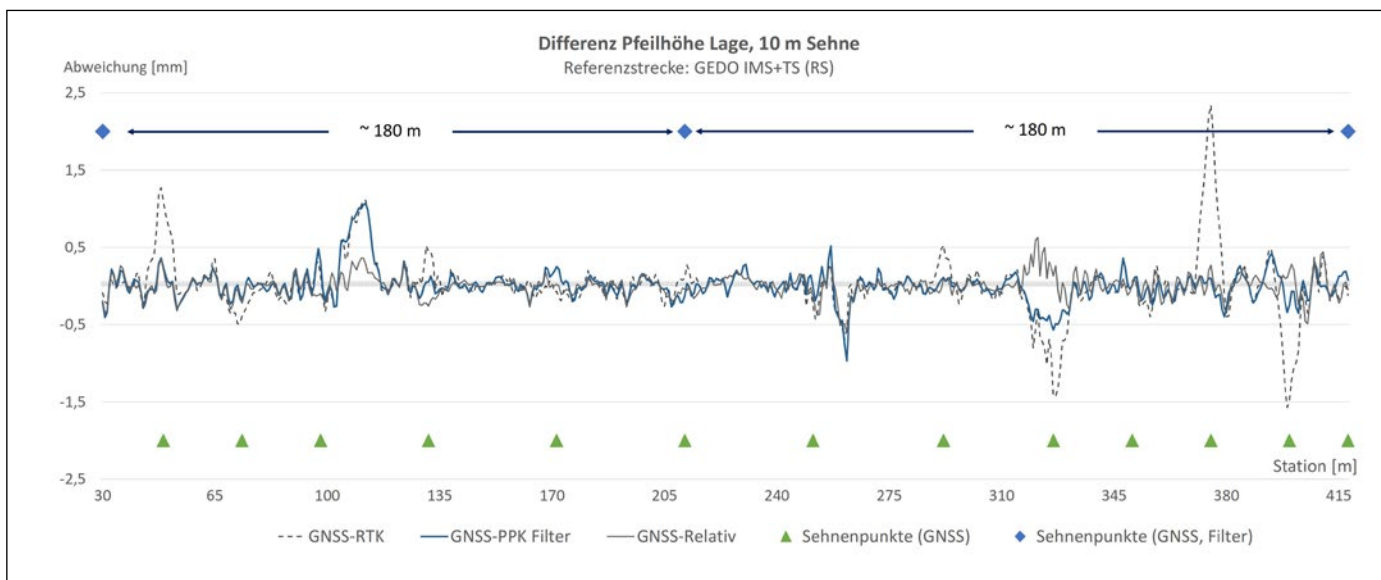


Abb. 5: Differenz der Pfeilhöhe – 2D Gleislage

Homepageveröffentlichung unbefristet genehmigt für Trimble Railway GmbH / Rechte für einzelne Downloads und Ausdrucke für Besucher der Seiten genehmigt / © DVV Media Group GmbH

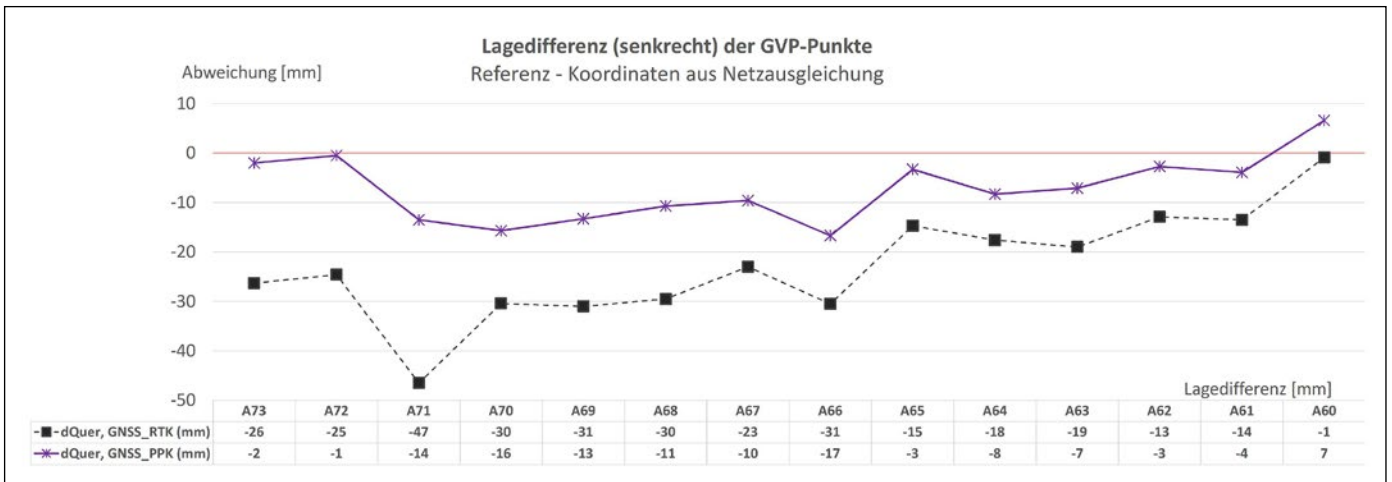


Abb. 6: Absolute Differenz der GVP (2D)

» Professionelle Mobile Mapping Lösungen aus einer Hand.

Zum Beispiel mit dem Trimble MX50 + Trimble MX Publisher

Die perfekte Kombination für mehr Produktivität.

- Praxisorientiertes, mobiles Datenerfassungssystem mit von Trimble® entwickelter, präziser LIDAR-Technik
- Sehr hohe Punktwolkendichte und anspruchsvolle Bilderfassung für Panoramabilder mit perfekt darauf abgestimmten Workflows
- Kombinieren Sie Punktwolkendaten, Panorama- und planare Bilder, Vektordaten, Rasterressourcen sowie 3D-Modelle in einer einzigen Trimble MX-Publikation
- Integration in gängige GIS- oder CAD-Umgebungen sowie problemlose Anbindung an Software von Drittanbietern durch Plugins / SDKs
- Effizientes, einfaches und intuitives Datenhandling

» Sprechen Sie uns an, wir beraten Sie gern bei Ihren Projekten!

AllTerra Deutschland GmbH
Autorisierter Vertriebspartner | 05031 51780 | allterra-dno.de

nen wichtigen Faktor dar. Die Verwendung des PPK-Verfahrens erhöhte die Genauigkeit zwar für die absolute Gleislage um ca. 10 mm, nicht aber für die Höhe. Für die direkte Unterstützung beim Stopfen sind RTK/PPK nach wie vor nicht ausreichend.

Seit dem Erwerb des ersten Trimble GEDO IMS Gleissmesssystems 2020 hat die türkische Staatsbahn TCDD mit dem Messverfahren bereits über 1800 km ihres Gleisnetzes erfolgreich erfasst, trassiert und teilweise erneuert [2]. Außerdem wurden mehr als 350 km Tunnel durch Kombination mit einem Trimble Laserscanner gescannt und die Punktwolke für die Engstellenauswertung verwendet. Die TCDD setzt das System mit einem Drei-Mann-Trupp ein, da sie für die GNSS-Messung eine eigene Basis statt eines Korrekturdatendienstes verwenden. Pro Arbeitstag wird inklusive Einmessung der GVP im Schnitt eine Gesamtleistung von 18 km erreicht. Das Verfahren hat sich bewährt und wird auch in Zukunft für weite Bereiche des Netzes zur Anwendung kommen.

QUELLEN

- [1] Ril 88301: Handbuch Gleis- und Bauvermessung, DB Netz AG, Akt. 18, 01.09.2022
- [2] <https://www.tcddteknik.com.tr/proje-detay-tamamlanan?id=56> (Abruf am 27.04.2023)



Dipl.-Ing. Kai Naumann
Senior Product Manager
kai_naumann@trimble.com



Linas Maciulevicius, M. Sc.
Sales Application Engineer
linas_maciulevicius@trimble.com

Beide Autoren:
Trimble Railway GmbH,
Wiesentheid