

10. Erdbaufachtagung „Erd-, Verkehrs- und Wasserbau“



Bau einer Neubaustrecke der Deutschen Bahn AG – Planung und Bau von Untergrund und Erdbauwerken bei höchsten Anforderungen an Setzungen und Verformungen

Referenten	<p>Prof. Dr.-Ing. Klaus Lieberenz GEPRO Dresden</p> <p>Tel.: +49 351 8777 50 Fax: +49 351 8777 555</p> <p>Prof. Dr.-Ing. habil. Peter-A. v. Wolffersdorff BAUGRUND DRESDEN</p> <p>Tel.: +49 351 8241 30 Fax: +49 351 8030 786</p>
Tagungsort	<p>Ramada Hotel Leipzig Schongauer Straße 29 04329 Leipzig</p> <p>Tel.: +49 341 2540</p>
Termin	<p>14. Februar 2014</p>

1 Die Hochgeschwindigkeitsstrecke VDE 8.2 Erfurt – Halle/Leipzig der Deutschen Bahn AG

1.1 Streckencharakteristik und Streckenverlauf

Die Neubaustrecke (NBS) Erfurt – Halle/Leipzig bildet den 2. Abschnitt des Schienenverkehrsprojektes Deutsche Einheit VDE 8, mit dem die Städte Berlin und Nürnberg mit einer Hochgeschwindigkeitsstrecke verbunden werden (Bild 1).

Die geplante zweigleisige Eisenbahnstrecke Erfurt – Halle/Leipzig wurde mit einer Entwurfsgeschwindigkeit von $v_e = 300$ km/h für regelspurigen Mischverkehr, das heißt für den Personen- und den Güterverkehr, trassiert und geplant. Als Oberbauart für die NBS Erfurt – Halle/Leipzig kommt die instandhaltungsarme Feste Fahrbahn (FF) zur Anwendung, womit unter anderem die aus der hohen Fahrgeschwindigkeit resultierenden großen fahrdynamischen Beanspruchungen besser als beim konventionellen Schotteroberbau kompensiert werden können und somit eine dauerhaft stabile Gleislage gewährleistet ist.

In Bild 2 ist das Längsband der ca. 93 km langen NBS mit den 3 Tunneln und den 6 großen Talbrücken dargestellt.

Beginnend am Erfurter Hauptbahnhof verläuft die geplante Strecke in östlicher Richtung über das Thüringer Becken mit den beiden großen Ingenieurbauwerken Scherkondetalbrücke und Gänsebachtalbrücke bevor sie ca. bei Bau-km 38,0 den Höhenzug Finne erreicht, welcher mit dem knapp 7 km langen Finnetunnel durchquert wird. An diesen Tunnel anschließend befindet sich das Saubachtal, das von der Saubachtalbrücke überquert wird. Diese Brücke bindet direkt an den nächsten Tunnel – den Bibratunnel – an. Im weiteren Verlauf überquert die Trasse das Unstruttal mit der größten Talbrücke – der Unstruttalbrücke – und erreicht den Osterberg, der mit dem gleichnamigen Tunnel durchquert wird. Bei etwa Bau-km 67 überquert die Stöbnitztalbrücke das Tal des Stöbnitz. Nach einem längeren Streckenabschnitt auf Dämmen und in Einschnitten wird das Naturschutzgebiet „Saale-Elster-Aue“ erreicht. Die beiden Flüsse Saale und Elster werden mit einer über 7 km langen Brücke überquert, wobei der Abzweig nach Halle auf dem Brückenbauwerk erfolgt. Im Anschluss an die Saale-Elster-Talbrücke verläuft die NBS ohne weitere größere Ingenieurbauwerke weiter auf Erdbauwerken bis zum Knoten Gröbers, wo sie in die bereits fertig gestellte Eisenbahntrasse zum Hauptbahnhof Leipzig einmündet.

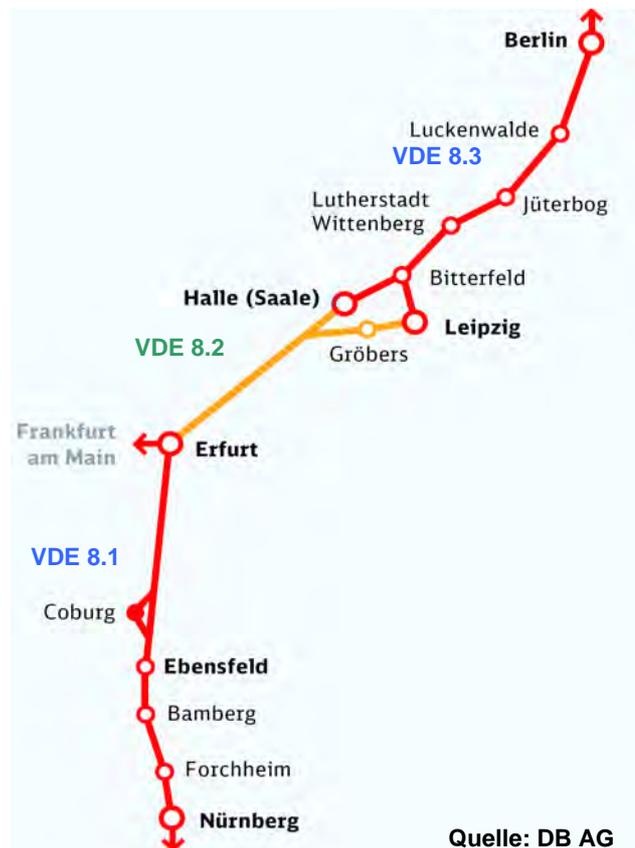


Bild 1: VDE 8 mit Abschnitt „Erfurt – Halle/Leipzig“

Quelle: DB AG

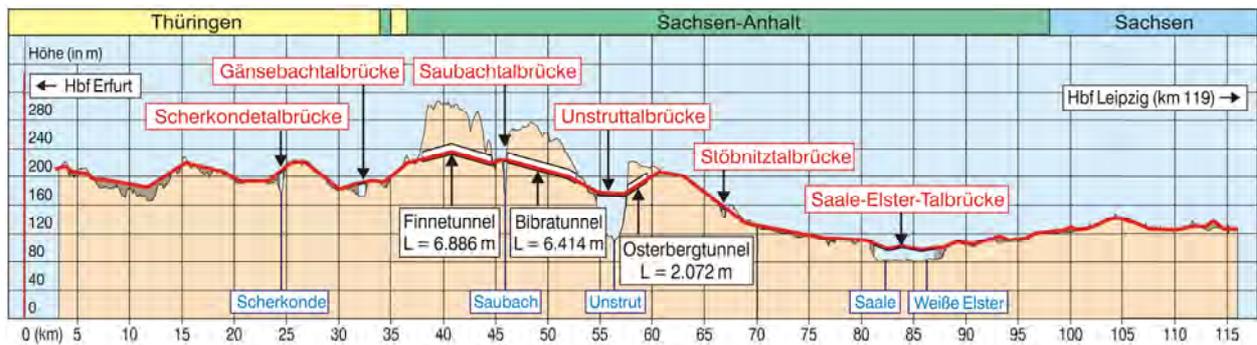


Bild 2: Längsschnitt der NBS Erfurt – Halle/Leipzig (Quelle: DB AG)

Entsprechend der planerischen Vergabe der einzelnen Bauwerke wurde die NBS in verschiedene Bauwerkslose unterteilt, wobei im Wesentlichen die Großbrücken mit den dazugehörigen Anschlussdämmen, die Tunnel mit den Voreinschnitten sowie die Erdbauwerke der Strecke in insgesamt 5 Lose unterteilt wurden.

Die Planung der Eisenbahntrasse des VDE-Teilprojektes begann Anfang der 1990-iger Jahre. Die Herstellung aller Erdbauwerke (Einschnitt und Dämme), der Ingenieurbauwerke (Tunnel und Großbrücken) ist abgeschlossen. Auch ein beträchtlicher Teil der Festen Fahrbahn ist fertiggestellt. Die Arbeiten an der sonstigen Streckenausrüstung, wie z. B. Fahrleitungsmasten, Lärmschutzwände sind weit fortgeschritten. Es ist davon auszugehen, dass die Hochgeschwindigkeitsstrecke in 2015 in Betrieb genommen wird.

1.2 Geologische Gegebenheiten

Die NBS Erfurt – Halle/Leipzig verläuft zunächst durch die Thüringer Keupermulde mit Bereichen oberflächennahem Gipskeuper. Die Gipslagen können unter Wassereinfluss auslaugen. Die Keupermulde wird ca. bei Bau-km 38 durch eine großräumige Verwerfung, der sogenannten Finnestörung, begrenzt. Nach anschließender Querung der tektonischen Einheiten Hermundurische Scholle, Querfurter Mulde, Merseburger Buntsandsteinplatte endet die geplante Eisenbahnstrecke in der Leipziger Tieflandsbucht.

Im Trassenbereich befinden sich quartäre Lockergesteinsüberdeckungen, welche im Wesentlichen aus Löß- und Hanglehmen, Geschiebemergel und in den Niederungen aus Auelehmen bestehen. Bei den im Bereich der Strecke unterhalb der quartären Lockergesteine anstehenden geologischen Formationen handelt es sich überwiegend um Festgesteine des Keuper, der im Wesentlichen aus Ton-, Schluff- und Mergelsteinen aufgebaut ist, um Muschelkalk, der überwiegend Kalk- und Mergelsteine aufweist und um Buntsandstein, der aus Sandsteinen, wie auch aus Ton- und Schluffsteinen bestehen kann.

1.3 Aufgabenstellungen

Der Hochgeschwindigkeitsverkehr erfordert höchste Anforderungen an die Erdbauwerke und Ingenieurbauwerke hinsichtlich einzuhaltender Verformungen während des Streckenbetriebs. Um diese Anforderungen durchgängig über die gesamte Strecke gewährleisten zu können, wird das streckenübergreifende Mess- und Nachweiskonzept der Gesamtheitlichen Verformungsbetrachtung (GVB) angewendet. Im ersten Teil des Beitrages wird die Gesamtheitliche Verformungsbetrachtung mit ihren Vorgaben für die messtechnische Überwachung sowie ihrer Realisierung während der verschiedenen Planungs- und Ausführungsphasen behandelt.

Die Besonderheiten und bautechnische Maßnahmen, die sich im Zusammenhang mit vorhandenen und zu erwartenden Auslaugungserscheinungen im Bereich des genannten oberen Gipskeupers ergeben haben, werden im zweiten Teil des Beitrages dargelegt.

Beim Hochgeschwindigkeitsverkehr ergeben sich intensive dynamische Beanspruchungen, weshalb der überwiegende Teil der Strecke mit Fester Fahrbahn ausgeführt wird. Zur Vermeidung unzulässiger dynamischer Beanspruchungen infolge Zugverkehrs ist der Nachweis der dynamischen Stabilität – wie in den einschlägigen Bahnvorschriften gefordert wird – zu führen. Der dritte Teil des Beitrages widmet sich diesem besonderen Nachweisverfahren.

2 Gesamtheitliche Verformungsbetrachtung

2.1 Vorgaben für die Gesamtheitliche Verformungsbetrachtung

Für die zulässigen Verformungen und Verformungsunterschiede sind im technischen Vorschriftenwerk der DB AG (insbesondere Ril 836 [1]) Anforderungen formuliert, deren Einhaltung im Rahmen der GVB vor Einbau der Festen Fahrbahn nachzuweisen ist.

Ausgehend von einem maximal möglichen Korrekturmaß des Oberbaus von 20 mm gelten für die NBS Erfurt – Halle/Leipzig gemäß Ril 836.0401 folgende Verformungsanforderungen nach Einbau der Festen Fahrbahn:

- Restsetzungen $s_{R,FF,zul} \leq 1,5$ cm
- Restsetzungen $s_{R,FF,zul} \leq 3,0$ cm bei Erdbauwerken mit gleichmäßigem Setzungsverhalten über Längen von mehr als 20 m.
- Restsetzungen $s_{R,FF,zul} \leq 6,0$ cm in Ausnahmefällen bei Einhaltung eines Ausrundungsradius $R_{a,erf} \geq 0,4 \cdot v_e^2$ (v_e – Entwurfsgeschwindigkeit)

Diese Anforderungen gelten für bleibende Verformungen und betreffen vorrangig Erdbauwerke sowie die Brückenwiderlager. Das Grundprinzip für die Vorgaben der Ril 836 besteht darin, dass zur Aufrechterhaltung einer langfristigen Gebrauchstauglichkeit die Restsetzungen $s_{R,FF,zul}$ nach Einbau der Festen Fahrbahn in der Schienenbefestigung ausgeglichen werden können und somit die Soll-Gleislage wieder hergestellt werden kann.

2.2 Das Zusammenwirken von Verformungsprognosen und messtechnischer Überwachung

Die Durchführung von Verformungsprognosen ist zentraler Bestandteil der GVB. Anhand von rechnerischen Prognosen können schwierige Streckenabschnitte erkannt werden und bereits in der Planungsphase beispielsweise mit konstruktiven Maßnahmen oder Anpassungen im Bauablauf reagiert werden. Die Durchführung der rechnerischen Prognosen kann anhand einfacher konventioneller Methoden erfolgen. Sofern komplexe Betrachtungen erforderlich sind, können jedoch auch aufwendigere Modellierungen – beispielsweise mittels FEM – zur Anwendung kommen.

Bei der NBS Erfurt – Halle/Leipzig werden im Regelfall Setzungen des Hochgeschwindigkeitsfahrweges bei Erd- und Ingenieurbauwerken eintreten. Die Restsetzungen s_{FF} ab Einbau der Festen Fahrbahn ergeben sich aus:

$$s_{FF} = s_U + s_E + s_V$$

mit den Setzungsanteilen: s_U – Untergrundsetzungen, s_E – Eigensetzungen der Erdbauwerke, s_V – Setzungen infolge Verkehr. Diese 3 Setzungsanteile sind in Bild 3 dargestellt.

Im Regelfall kann bei der NBS Erfurt – Halle/Leipzig davon ausgegangen werden, dass Eigensetzungen der Dämme $s_E \approx 0$ sind, da zumeist eine Bodenverbesserung mit Bindemitteln für diese Dämme zur Anwendung kommt.

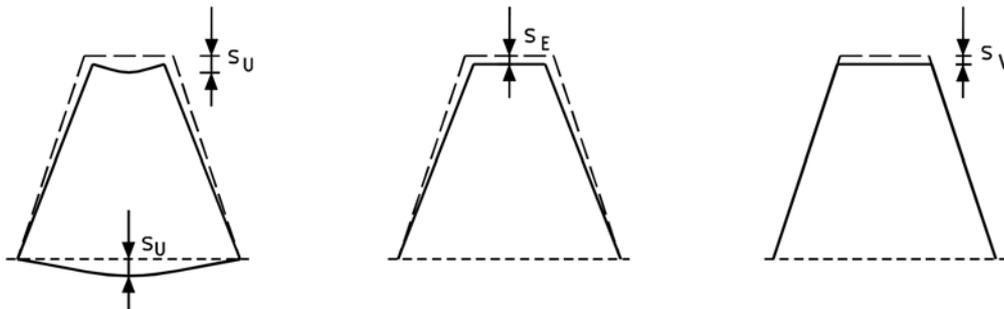


Bild 3: Setzungsanteile bei einer Dammschüttung

Setzungen aus dem Untergrund s_U und insbesondere auch deren zeitlicher Verlauf infolge von statischen Lasten (Untergrund bzw. Gebirge, Unterbau, Oberbau der einzelnen Bauwerke des Fahrweges) können in der Regel mit konventionellen Berechnungsmethoden ermittelt werden, wobei alle relevanten Belastungssituationen berücksichtigt werden sollten. Für Setzungen infolge Verkehrslasten s_V gibt es keine ausreichend abgesicherten Berechnungsverfahren. Hier wird empfohlen, die Verformungen auf der Grundlage des Entwurfes der Ril 836 von 1997 abzuschätzen.

Bei Dammbauwerken genügt in der Regel für die rechnerischen Prognosen ein Abstand von 50 m zwischen zwei Berechnungsquerschnitten entsprechend der Stationierung in Längsrichtung, wobei eine Vergrößerung des Abstandes bei einfachen geotechnischen Verhältnissen (gleichmäßiger Untergrund und geringe erwartete Setzungen, z.B. Dämme mit geringer Dammhöhe und gut tragfähigem Untergrund) möglich sein sollte. In Übergangsbereichen zu Ingenieurbauwerken ist eine Verdichtung der Berechnungsquerschnitte erforderlich. Für Einschnittsbauwerke ist ein Regelabstand für die Verformungsprognosen von 100 m entsprechend der Stationierung in Längsrichtung zwischen zwei Messquerschnitten mit Option der Vergrößerung des Abstandes bei einfachen Verhältnissen sinnvoll.

Bei Brückenkonstruktionen müssen Mitnahmesetzungen von Widerlagern aus Hinterfüllungen bzw. Anschüttungen beachtet werden. Es ist die zeitliche Abfolge der Lastaufbringung auf das jeweilige Gründungselement zu berücksichtigen, falls die zu erwartenden Restverformungen ab Einbau der Festen Fahrbahn davon abhängen. Bei Tunneln ist die Einhaltung des Regelabstandes von 50 m nicht zwingend notwendig. Stattdessen ist es hier sinnvoll, die Berechnungsquerschnitte und deren Abstände zueinander anhand von Homogenbereichen festzulegen.

Die Verformungsprognosen bilden die maßgebliche Grundlage für die messtechnische Überwachung. Es ist zweckmäßig, für die messtechnische Überwachung den gleichen Abstand der Messquerschnitte entsprechend dem festgelegten Abstand bei den Verformungsprognosen zu wählen, um einen Vergleich der

Messungen mit den rechnerischen Prognosen zu ermöglichen und so gegebenenfalls die Prognosen verbessern zu können.

Die messtechnische Überwachung kann bei Erdbauwerken mit einfachen geotechnischen Verhältnissen anhand eines Setzungsmesspunktes an der Dammoberkante bzw. Einschnittssohle ausgeführt werden.

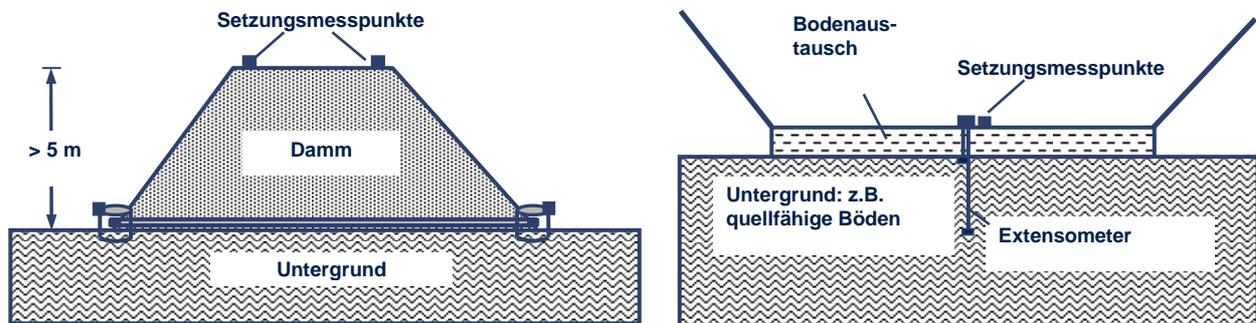


Bild 4: Ausbildung der Messquerschnitte für Dämme und Einschnitte bei schwierigen geotechnischen Verhältnissen

Für Dämme mit Dammhöhen > 5 m und schwierigen Untergrundverhältnissen sollten Verformungsmessungen an der Dammoberkante und in der Dammaufstandsfläche mittels Setzungsmesspunkten und Horizontalinklinometern durchgeführt werden. Bei Einschnitten mit schwierigen Untergrundverhältnissen z. B. bei quelfähigen Böden ist die zusätzliche Überwachung mittels Vertikalextensometern sinnvoll. Bild 4 zeigt die Ausbildung der Messquerschnitte für Dämme und Einschnitte bei schwierigen geotechnischen Verhältnissen.

2.3 Umsetzung der Gesamtheitlichen Verformungsbetrachtung im Zuge des Projektablaufes

Bild 5 zeigt, dass sich die Gesamtheitliche Verformungsbetrachtung über alle Phasen eines Bauvorhabens einer Neubaubahnstrecke erstreckt.

In der Planungsphase sind von den Planern (Entwurfs-, Genehmigungsplanung) die in den Abschnitten 1.2 und 2.2 erläuterten Vorgaben für die GVB und das Konzept einer übergreifenden messtechnischen Überwachung vorzugeben. Weiterhin sind von den Planern vorab erste rechnerische Prognosen zu erstellen. Maßgeblich für die Umsetzung der GVB in der nachfolgenden Ausführungsphase ist es, dass die aus den Vorgaben der GVB und der Realisierung der messtechnischen Überwachung abzuleitenden Aufwendungen in den Ausschreibungsunterlagen berücksichtigt werden.

Bei der nachfolgenden Ausführungsphase ändert sich in der Regel der Auftraggeber (AG) (z.B. die DB ProjektBau) nicht und die zu erbringenden GVB-Leistungen sind nunmehr gemäß Ausschreibungsunterlagen von den ausführenden Auftragnehmern (AN) und den von den AN beauftragten Ausführungsplanern zu erbringen.

Die meisten und vielfältigsten Arbeitsschritte sind während der Ausführungsphase zu vollziehen. Deswegen sind sie separat in Bild 6 dargestellt. Bezüglich der wesentlichen Aspekte zu den zu erstellenden Verformungsprognosen und zur messtechnischen Überwachung wird auf den Abschnitt 2.2 verwiesen. Dieses Flussbild verdeutlicht, dass zum Nachweis der Vorgaben der GVB nach den Grundsätzen der Beobachtungsmethode vorgegangen wird. Dabei sind im Zuge des Baufortschritts bei Bedarf die rechne-

rischen Verformungsprognosen entsprechend vorliegender Messergebnisse zu verbessern. Die Ergebnisse der Verformungsprognosen und der Messungen sind anhand der Vorgaben der Gesamtheitlichen Vorformungsbetrachtung zu überprüfen.

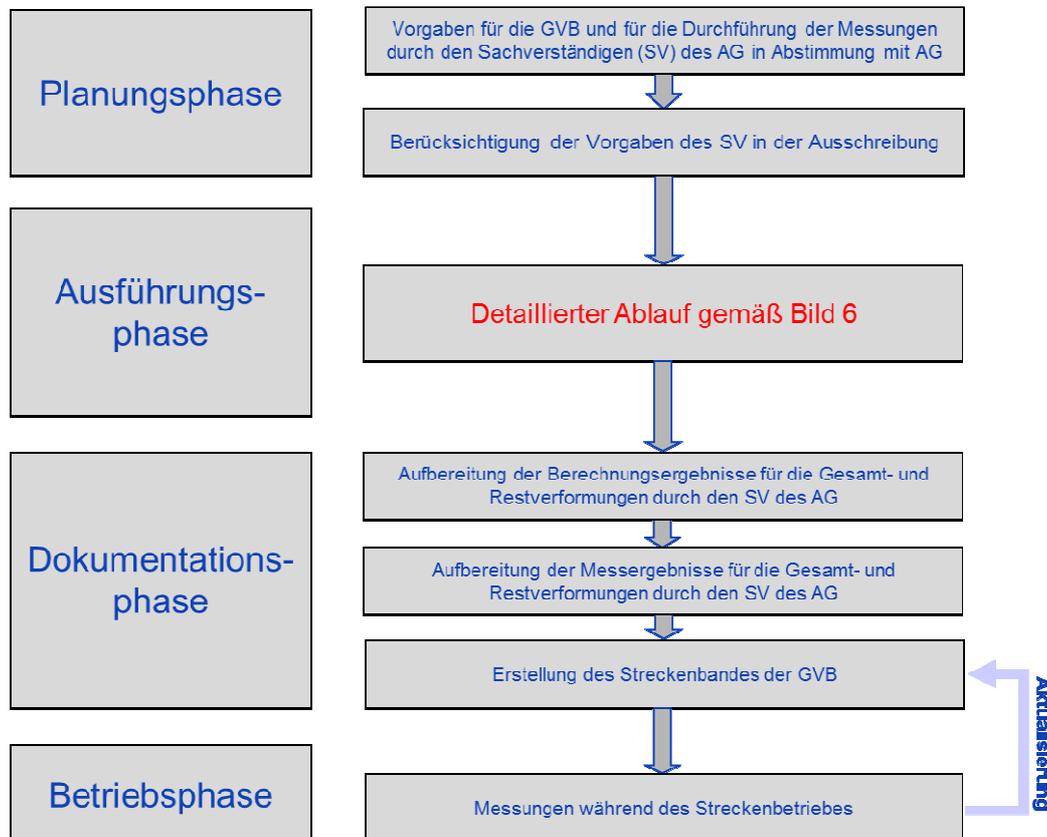


Bild 5: Ablauf der Gesamtheitlichen Verformungsbetrachtungen während der Ausführungsphase

Maßgeblich dabei ist, dass die auf der Grundlage der bisher rechnerisch prognostizierten und anhand der Messungen belegten tatsächlich eingetretenen Vorformungen des Fahrweges ableitbaren Restsetzungen $s_{R,FF,zul}$ nach Einbau der Festen Fahrbahn die in Abschnitt 2.1 genannten hohen Verformungsanforderungen einhalten. Im Sinne der Beobachtungsmethode sind im „worst case“, d.h. bei Nichteinhalten der Verformungsanforderungen geeignete bautechnische bzw. ingenieurtechnische Maßnahmen zu ergreifen. Solche Maßnahmen können sein: z. B. Ertüchtigungsmaßnahmen des Baugrundes unter Erdbauwerken zur Reduktion weiterer Verformungen, planerische Anpassung der Trassengradiente, Korrektur der Trassengradiente durch „Plätten“ der Schienenstützpunkte.

Zentrale Bedeutung kommt der Tätigkeit eines für GVB qualifizierten Sachverständigen/Gutachters für Geotechnik zu. Dieser sollte vom Auftraggeber von Beginn des Bauvorhabens an eingebunden werden und die Überwachung und Prüfung aller Arbeitsschritte der GVB für alle Phasen des Projektablaufes gemäß Bild 5 im Auftrag des Bauherrn übernehmen. Für die Freigabe der Neubaustrecke zum Einbau der Festen Fahrbahn ist ein fachlich zuständiger Sachverständiger des Eisenbahnbundesamtes hinzuzuziehen.

Die in Bild 5 enthaltene Dokumentationsphase beginnt innerhalb der Ausführungsphase. Eine einheitlich aufbereitete Dokumentation der GVB ist für den Bauherrn notwendig, um die Einhaltung der hohen Verformungsanforderungen an den Hochgeschwindigkeitsfahrweg eindeutig und übersichtlich dem Betreiber

der Strecke aufzuzeigen. Hierfür hat sich die überwiegend grafische Darstellung in Form eines Streckenbandes für die GVB als zweckmäßig erwiesen. Die innerhalb der Dokumentationsphase zu erbringenden Leistungen obliegen dem für die GVB zuständigen Sachverständigen/Gutachter. Er hat insbesondere dafür Sorge zu tragen, dass die GVB lückenlos für die gesamte Strecke vorgenommen und dokumentiert wird.

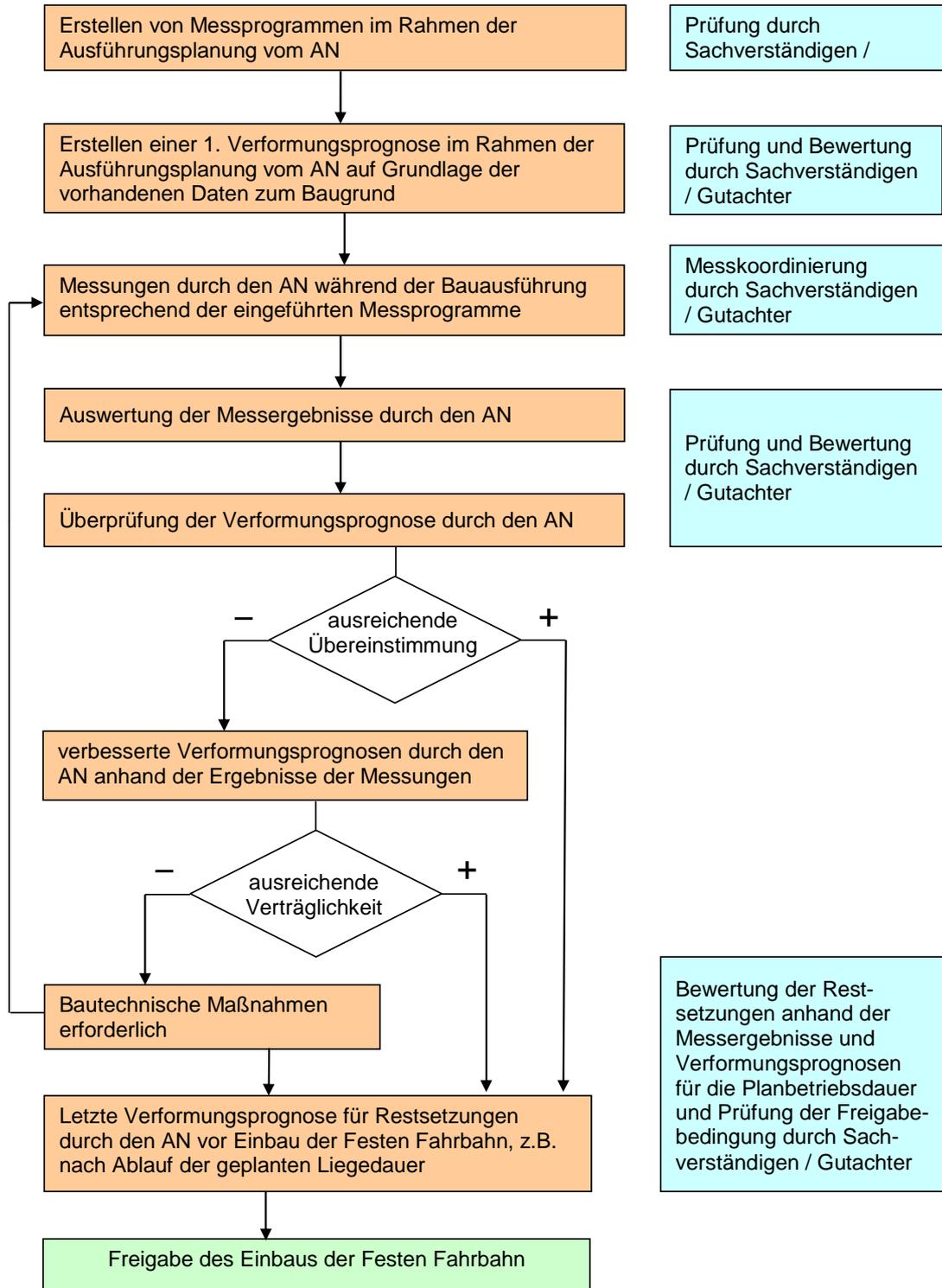


Bild 6: Ablauf der Gesamtheitlichen Verformungsbetrachtungen während der Ausführungsphase

Noch während der Dokumentationsphase findet die Übergabe von dem Bauherrn (DB ProjektBau) an den Betreiber (DB Netz) statt. Während der Betriebsphase sind die Verformungen des Fahrweges im Rahmen der turnusmäßigen Gleismessfahrten gemäß RIL 821.2001 [2] messtechnisch zu verfassen und auszuwerten. Die erforderlichen Messzyklen innerhalb der Betriebsphase sind bereits in der Planungsphase unter Federführung des für die GVB zuständigen Sachverständigen für Geotechnik in Abstimmung mit dem Bauherrn und späteren Betreiber zu planen.

3 Nachweiskonzept für Bereiche mit Auslaugungserscheinungen

3.1 Besonderheiten der Bereiche mit Auslaugungserscheinungen

In den Streckenlosen 2 und 3 der Neubaustrecke Erfurt – Halle/Leipzig sind im Rahmen der Baugrunduntersuchung in Teilbereichen anstehende gipshaltige Untergründe mit Auslaugungserscheinungen erkundet worden. Diese Baugrundverhältnisse haben sich in der Phase der Bauausführung bestätigt, allerdings sind sie im beobachteten Umfang ihres Erscheinens verstärkt festgestellt worden.

Die zu den Auslaugungserscheinungen vorgenommene umfangreiche geotechnische Bewertung sagt aus,

- dass die festgestellten Auslaugungserscheinungen das Ergebnis einer sogenannten regulären Auslaugung sind, in deren Folge kleinere Hohlräume (Ponore) und flächenhafte wellenartige Geländeversenkungen eingetreten sind, und
- dass diese reguläre Auslaugung auch weiterhin abläuft und somit in den betroffenen Abschnitten zukünftig zwar nicht mit größeren Erdfällen, aber mit weiträumigen Senkenbildungen gerechnet werden muss.

Da insbesondere Auslaugungsprozesse während der Betriebsdauer der NBS nicht völlig ausgeschlossen werden können, sind neuartige Untersuchungen dieser Vorgänge notwendig, um bewerten zu können, dass die weiträumigen Senkenbildungen zu keiner Beeinträchtigung der Gebrauchstauglichkeit der NBS führen.

3.2 Nachweiskonzept und bautechnische Maßnahmen für die Bereiche mit vorhandenen und zu erwartenden Auslaugungserscheinungen

Die erdbautechnisch relevanten subrosionsgefährdeten Bereiche im Streckenlos 2 begrenzen sich auf 3 Streckenabschnitte mit einer Länge von insgesamt 3,25 km. Weiterhin gibt es einen solchen stark begrenzten Bereich im Streckenlos 3 mit einer Länge von 150 m.

Gemäß den vorliegenden Gutachten sowie den Beobachtungen bzw. Erkundungen während der Bauausführung kann in den o. g. Bereichen von folgender geologischer Situation und folgenden Auslaugungserscheinungen ausgegangen werden:

- Die auslaugungsgefährdete Schichtenfolge hat eine maximale Dicke von 5 m. Ihre Tiefenlage reicht von direkter Oberflächennähe bis zu einer maximalen Überlagerung von 20 m. Die auslaugungsgefährdeten Schichten der Formation des Grundgipses sind in ihrer Zusammensetzung inhomogen, d. h. Gipslagen wechseln sich mit Tonsteinlagen ab.

- Die sehr selten auftretenden Hohlräume haben eine zusammenhängende voluminöse Ausdehnung von nicht mehr als 1 m³. In der Regel sind diese Auslaugungsstrukturen schlauchartig und haben die Form von Klüften, in den seltensten Fällen die Form eines größeren kompakten Hohlraumes (Ponore).
- Weiterhin sind langwellige Senken mit einer Länge zwischen 10 m und 20 m und einer Tiefe bis maximal 2 m entlang von Störungszonen vorhanden.

Um abzusichern, dass die Erdbauwerke über die Zeitdauer des geplanten Nutzungszeitraumes ausreichend tragfähig bzw. standsicher und gebrauchstauglich sind, wurden in Rahmen der Planung ergänzende Maßnahmen zum Schutz gegen vorhandene und zu erwartende Auslaugungserscheinungen in dem unmittelbar von dem NBS-Fahrweg beeinflussten Untergrund vorgesehen. Diese Maßnahmen sind:

- Bodenaustausch der auslaugungsgefährdeten Untergrundbereiche mit einer Mindestdicke von 2,10 m (bzw. bis mindestens 3,30 m unter Schienenoberkante) bei Einschnitten, Geländegleichlagen und entsprechend flachen Dämmen mittels qualifizierter Bodenverbesserung ($\geq 4\%$ Bindemittel mit Verdichtungsanforderungen gemäß vorliegender UiG) mit schwach durchlässigem Bodenaustauschbaumaterial ($k \leq 1 \cdot 10^{-6}$ m/s),
- Bodenaustausch der auslaugungsgefährdeten Untergrundbereiche im Bereich von höheren Dämmen unterhalb der Dammaufstandsflächen mit einer Dicke von mindestens 0,50 m mittels qualifizierter Bodenverbesserung ($\geq 4\%$ Bindemittel mit Verdichtungsanforderungen gemäß vorliegender UiG) mit schwach durchlässigem Bodenaustauschmaterial ($k \leq 1 \cdot 10^{-6}$ m/s),
- Herstellung der gesamten Dämme mittels qualifizierter Bodenverbesserung ($\geq 4\%$ Bindemittel mit Verdichtungsanforderungen gemäß vorliegender UiG) mit schwach durchlässigem Material ($k \leq 1 \cdot 10^{-6}$ m/s).
- Verfüllung offener Auslaugungsstrukturen (Klüfte, kleine Hohlräume), die in der Bodenaustauschsohle und/oder im Böschungsbereich vorgefunden werden, auf der Basis einer Arbeitsanweisung,
- Verdichtung der Bodenaustauschsohle und Zertrümmerung der vorhandenen Auslaugungserscheinungen mit schwerer Walze (32 t mit Polygonbandage) mit einer Tiefenwirkung von $\geq 0,50$ m



Bild 7: Ponore – kompakte Hohlräume (links, mitte); Walze mit Polygonbandage (rechts)

Im Zuge der Bauausführung wird beurteilt, ob die angetroffenen Gründungssohlen dem bisherigen Kenntnisstand hinsichtlich der Auslaugungserscheinungen entsprechen und somit die vorgesehenen Maßnahmen ausreichend sind. Bei Abweichungen sind Nacherkundungen, Bewertungen vorzunehmen und besondere bautechnische Maßnahmen zu ergreifen. Die hierzu erstellte Arbeitsanweisung enthält detaillierte Festlegungen zu den eventuell erforderlichen Nacherkundungen, Bewertungen und den gegebenenfalls notwendigen weitergehenden bautechnischen Maßnahmen, wie z. B. Verfüllung offener Auslaugungsstrukturen. Die hier erläuterten erdbautechnischen Maßnahmen sind zusätzlich zu der in der Entwurfsplanung vorgegebenen Abdichtung des Untergrundes gegen das Eindringen von Oberflächenwasser unter dem Fahrweg zur weitgehenden Verhinderung von Auslaugungen („Subrosion von oben“) zu realisieren.

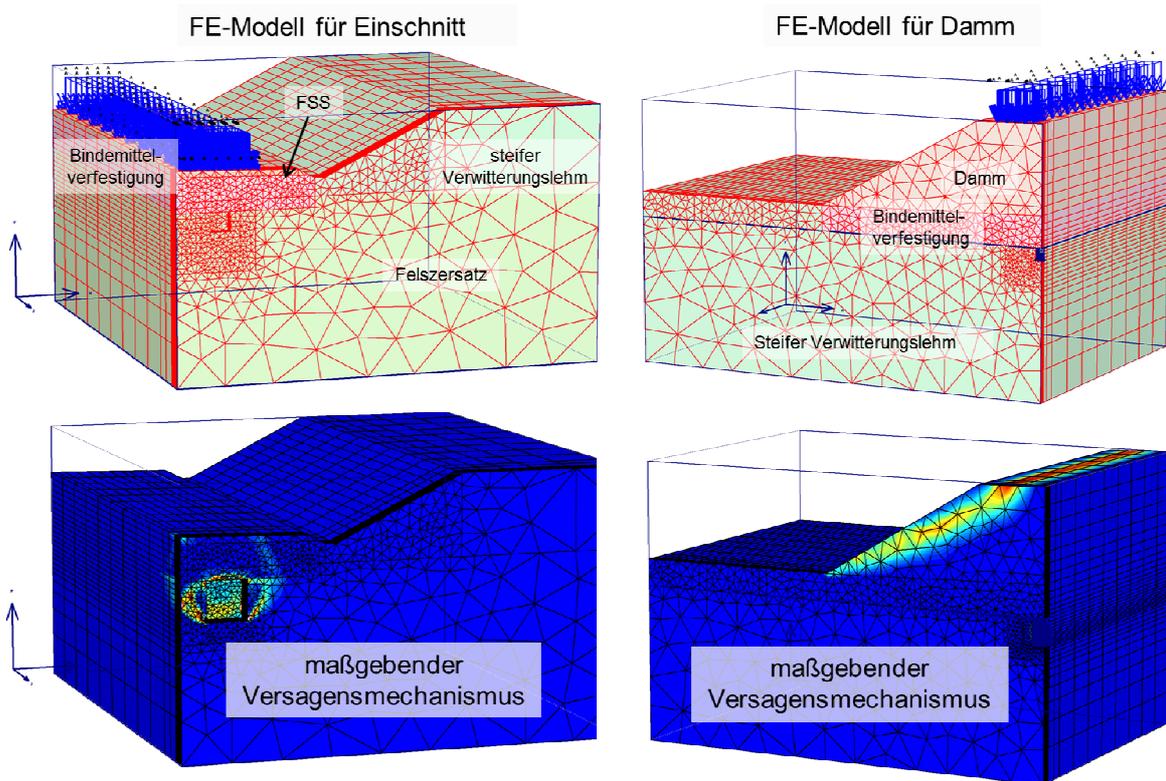


Bild 8: Untersuchung der Standsicherheit anhand von 3D-FE-Modellen für Damm und Einschnitt

Durch die zusätzlichen bautechnischen Maßnahmen werden die o. g. angetroffenen Auslaugungserscheinungen hinsichtlich Tragfähigkeit bzw. Standsicherheit des Fahrweges vollständig beherrscht. Nicht erkannte o. g. Auslaugungsstrukturen (Klüfte, schlauchartige bzw. kompakte Hohlräume $\leq 1 \text{ m}^3$) werden insbesondere durch die bindemittelstabilisierte Schicht in den Einschnitten und Geländegleichlagen sowie durch die vollständig bindemittelstabilisierten Dämme mit ausreichender Sicherheit überbrückt. Es wurde nachgewiesen, dass auch für einen angenommenen quadratischen Hohlraum von $2 \times 2 \times 2 \text{ m}$ (8 m^3), dessen Existenz nach den vorliegenden Erkenntnissen ausgeschlossen wird, die Standsicherheit viel größer als die in den Regelwerke geforderte Standsicherheit für Erdbauwerke ist. In Bild 8 sind die anhand von 3D-FE-Standsicherheitsuntersuchungen ermittelten maßgebenden Versagensmechanismen für einen Damm und einen Einschnitt dargestellt. Der maßgebende Versagensmechanismus mit der kleinsten Sicherheit stellt sich in der Dammböschung und nicht am Hohlraum ein, d. h. die Standsicherheit des Hohlräume ist hier größer als die der geplanten Böschung.

3.3 Mögliche zukünftige Auslaugungsszenarien im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit der Hochgeschwindigkeitsstrecke

Zur Bewertung der fortschreitenden Subrosion in Bezug auf Gebrauchstauglichkeit der NBS war es notwendig, Größe und Zeitverlauf von Auslaugungsprozessen und die damit verbundene Erhöhung der Porosität im Sulfatkarst infolge von Grundwasserneubildung abzuschätzen. Bei diesen Abschätzungen wurden überwiegend auf der sicheren Seite liegende Annahmen getroffen. Worst-Case-Betrachtungen wurden jedoch nicht mit einbezogen, da darauf aufbauende Prognosen von vornherein nicht mehr realistisch wären.

Das entwickelte Abschätzungsmodell ist in Bild 9 dargestellt. Es stützt sich auf eine umfangreiche Literaturrecherche. Insbesondere wurden Untersuchungen des Auslaugungsverhaltens von Sulfatgesteinen in der Schweiz, die im Rahmen der Endlagersuche für schwach- und mittelradioaktive Abfälle vorgenommen wurden, in die Betrachtungen miteinbezogen.

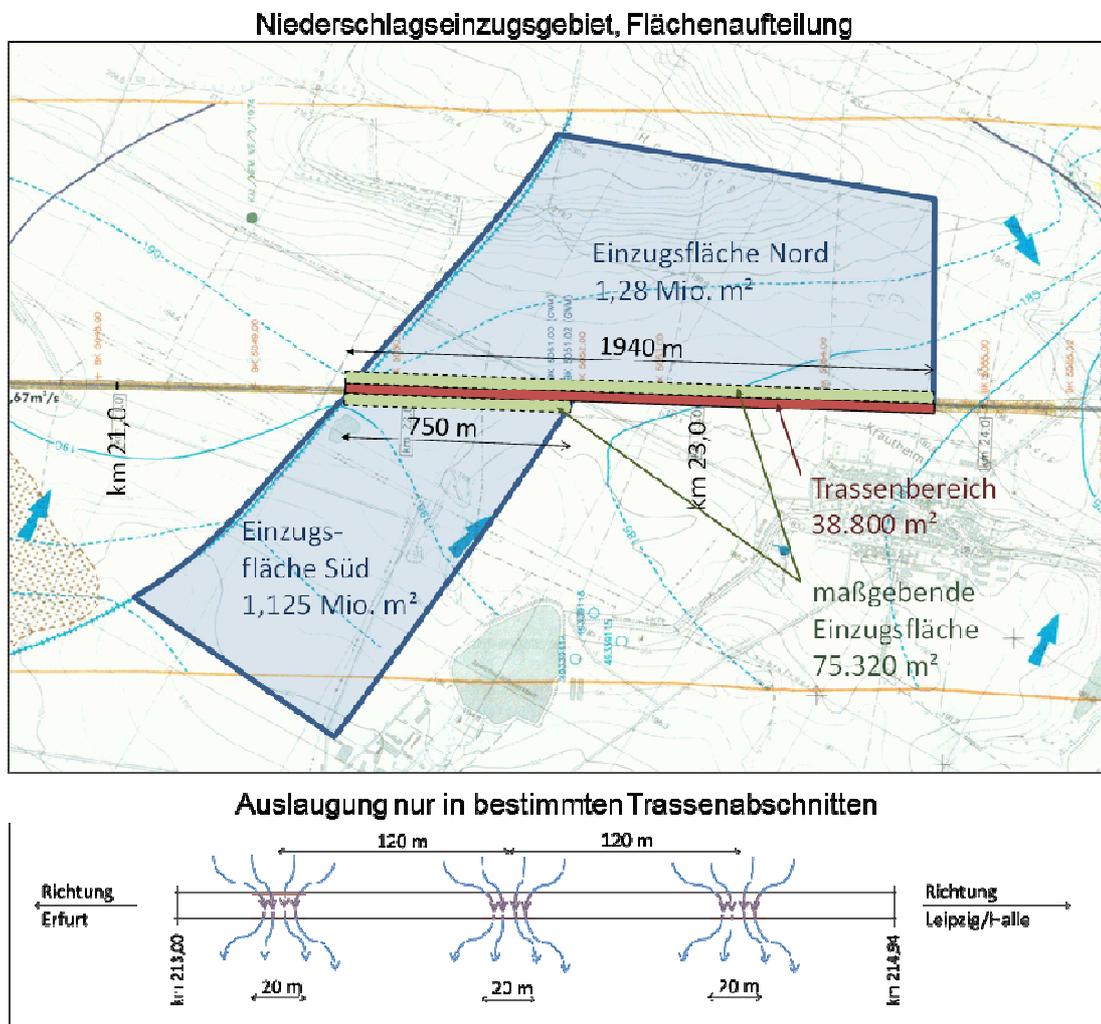


Bild 9: Abschätzungsmodell für Porositätserhöhung infolge Gipsaustrag – Niederschlagseinzugsgebiet und Auslaugungsabschnitte unter der Trasse

Das vorliegende Abschätzungsmodell für einen möglichen Gipsaustrag im Bereich der Bahntrasse basiert auf der hydrologischen Bilanz für den versickernden Anteil des jährlichen Niederschlages. Folgende Annahmen waren hierfür erforderlich bzw. folgende Festlegungen mussten hierzu zweckmäßig bzw. realitätsnah getroffen werden:

- Festlegung der Fläche des Niederschlageinzugsgebietes
- Festlegung des Volumens und der Tiefenlage des auslaugungsgefährdeten Gesteinsbereiches
- Bestimmung des Jahresniederschlages und des Niederschlagsanteils, der mit dem Gipsgestein in Kontakt kommt
- Bestimmung der Konzentrationsunterschiede der ausgelaugten Gipsbestandteile in dem anströmenden Wasser und dem Wasser im Auslaugungsbereich bzw. im Abstrom
- Bestimmung der Sättigungskonzentration des Gipses

Es wurde davon ausgegangen, dass eine Grundwasserströmung quer zur Trassenachse erfolgt. Bei der Festlegung der hierfür maßgeblichen Einzugsbreite wurde berücksichtigt, dass außerhalb dieser Einzugsbreite das Grundwasser vollständig aufgesättigt ist und der Bereich außerhalb der Einzugsbreite somit keinen Einfluss mehr auf die Auslaugung besitzt. Hierzu wurde eine Abschätzung der Fließstrecke des infiltrierten Niederschlages bis zur vollständigen Gipsättigung anhand eines eindimensionalen Stofftransportmodells vorgenommen.

Mit dem o. g. Modell in Verbindung mit den o. g. Annahmen bzw. Festlegungen wurde das jährliche Austragsvolumen des Gipsgesteins am Beispiel des Trassenabschnittes zwischen km 213,00 und km 214,94 ermittelt. Dabei wurde weiterhin angenommen, dass sich die Auslaugung nicht gleichmäßig über die gesamte Länge des betrachteten Trassenbereiches von 1940 m und über die gesamte Trassenbreite von 20 m vollzieht, sondern dass sich die Auslaugungsprozesse auf jeweils 20 m lange Trassenabschnitte in einer 1 m dicken Gipsgesteinsschicht konzentrieren und dort eine verstärkte Auslaugung, die eine Zuströmung aus einem Trassenlängenbereich von ca. 100 m einschließt, über die gesamte Trassenbreite von 20 m stattfindet (siehe Bild 8 unten). Diese Annahme liegt einerseits auf der sicheren Seite und entspricht andererseits eher dem durch Klüften und Spalten bestimmten Wassertransport im Gipsgestein und den beobachteten Setzungsmulden mit einer Länge von ca. 20 m.

Anhand des hier kurz erläuterten Modells zur Abschätzung des Gipsaustrages ergibt sich eine jährliche Porositätszunahme von 0,18 % bzw. eine entsprechende Porositätszunahme in 100 Jahren von 18 %, d. h. in 100 Jahren werden 18 % des subrosionsgefährdeten Materials ausgetragen.

Aufbauend auf den Ergebnissen aus der Abschätzung des zu erwartenden Gipsaustrages wurden zu erwartende Setzungsmulden ermittelt.

Hierzu wurde eine ebene Betrachtung entlang der Trassenachse vorgenommen und ein entsprechendes 2D Finite-Elemente-Modell generiert. Es wurde der ungünstigste Fall angenommen, dass unterhalb des Oberbaus eine bindemittelstabilisierte Schicht mit einer minimalen Dicke von 2 m den auslaugungsgefährdeten Bereich überdeckt. Unmittelbar unter der bindemittelverfestigten Schicht wurde ein auslaugungsgefährdeter Bereich mit einer Länge von 20 m und einer Dicke von 1 m in dem Modell berücksichtigt. Als übriger Untergrund wurde nicht ausgelaugtes Gesteinsmaterial angenommen.

Für den ausgelaugten Bereich wurde eine poröse Struktur mit sehr kleinen Klüften bzw. Auslaugungszoonen angenommen. Es wurde ein empirisch gefundener Zusammenhang zwischen einer Porositätssteigerung und einer entsprechenden Verringerung der Steifigkeit zugrunde gelegt. Danach ergibt sich bei

einer Erhöhung der Porosität um 20 % eine Steifigkeitsverringering des ausgelaugten Materials auf 40 % der ursprünglichen Steifigkeit des nicht ausgelaugten Materials.

Mit reduzierter Steifigkeit im Bereich des Auslaugungsabschnitts wurden Setzungsmulden anhand des beschriebenen Finite-Elemente-Modells ermittelt. Die Berechnungen ergaben für den ungünstigen Fall einer Steifigkeitsreduzierung auf 30 % eine Setzungsmulde infolge Verkehrsbelastung und -entlastung mit einer maximalen Länge von 40 m und einer maximalen Einsenkung von 0,6 cm.

Die durchgeführten Setzungsberechnungen infolge möglicher vorhandener, jedoch nicht erkannte Auslaugungsstrukturen haben gezeigt, dass während der Nutzungsdauer auch im ungünstigsten Fall nur sehr kleine und flache Setzungsmulden zu erwarten sind und dass diese Setzungsmulden den Gebrauchstauglichkeitsanforderungen des Fahrweges in Anlehnung an die Planungswerte gemäß Ril 836.3001 prinzipiell genügen.

Als vorbeugende Maßnahme zur erhöhten Absicherung gegen nicht völlig auszuschließende Setzungsmulden infolge fortschreitender Subrosion sollten im Rahmen der routinemäßigen Gleismessfahrten eine erweiterte Auswertung, mit der auch langwellige Gleislageänderungen rechtzeitig erkannt werden können, vorgenommen werden. Auf der Grundlage der vorliegenden Erkenntnisse zu den Auslaugungsvorgängen und den Abschätzungen zu möglichen Setzungsmulden kann davon ausgegangen werden, dass solche Setzungsmulden nicht durch entsprechende Instandhaltungsmaßnahmen ausgeglichen werden müssen.

4 Nachweis der dynamischen Stabilität

4.1 Erfordernis der Nachweisführung

Mit dem Nachweis der dynamischen Stabilität sollen unzulässige Beanspruchungen aus der dynamischen Lastbeitragung durch Eisenbahnverkehrslasten, die als Schwingbeschleunigungen bzw. Scherdehnungen zur Akkumulation von bleibenden Verformungen führen können, verhindert werden.

Nach der 2. Aktualisierung der Ril 836 vom 01.02.2013 [1] wird in Ril 836.3001, Abs. 3 (4) gefordert, „Nachweise der dynamischen Stabilität des Unterbaus für Strecken mit Fester Fahrbahn sowie für Strecken mit Schotteroberbau, die mit Geschwindigkeiten von mehr als 200 km/h befahren werden sollen, zu führen.“

Zur Führung von Nachweisen zur dynamischen Schwingungsstabilität sind nach [1] Vorschläge auf der Basis von Begutachtungen im Rahmen der Entwurfsplanung zu erbringen. Die Begutachtung ist von einem vom EBA anerkannten Gutachter für Geotechnik durchzuführen. Folgende Anforderungen an die Nachweisführung zur dynamischen Schwingungsstabilität sind in der Ril 836 [1] formuliert:

- Die Vorschläge zur Nachweisführung sind durch UiG der DB Netz AG und durch ZiE des EBA als objektspezifische Bemessungsvorgaben zu bestätigen bzw. zu modifizieren.
- Nach dem derzeitigen Stand der Technik dürfen für Nachweise der dynamischen Stabilität Verfahren verwendet werden, bei denen vorhandene mit zulässigen resultierenden Schwinggeschwindigkeiten oder vorhandene mit zulässigen Scherdehnungen verglichen werden.
- Die Einwirkungen sind durch reale Lastzüge nach DIN EN 1991-2 [2] zu erfassen.

- Die bodendynamischen Eigenschaften und Widerstände sind unter Berücksichtigung der Vorgaben der „Empfehlungen des Arbeitskreises Baudynamik“ der DGGT [4] zu ermitteln und festzulegen.
- Die Nachweise sind durch messtechnische Untersuchungen zu bestätigen.
- Bei Strecken mit Geschwindigkeiten über 200 km/h sollen rechnerische Verfahren angewendet werden.

Erfahrungen mit rechnerischen Nachweisen der dynamischen Stabilität liegen von der NBS Nürnberg – Ingolstadt mit Fester Fahrbahn [5], [6] von der ABS Hamburg – Berlin [7], [8], [9] und aus dem Forschungsthema „Dynamische Stabilität bei Weichschichten“ [11], 0 mit Schotteroberbau vor.

4.2 Herangehensweise für die Nachweisführung

Die gewählte Herangehensweise beinhaltet folgende Schritte, siehe auch [10]:

- Betrachtung der zu bewertenden Streckenbereiche nach Geschwindigkeit und Oberbauart,
- Abgrenzung von Bereichen mit Begutachtung bzw. rechnerischer Nachweisführung,
- Auswahl der Bemessungsquerschnitte,
- Ermittlung Boden- und Materialkennwerte,
- Nachweisführung nach Scherdehnungen entsprechend 0,
- Plausibilitätsprüfung und
- Erarbeitung eines Messkonzeptes unter Betrieb.

Der rechnerische Nachweis der dynamischen Stabilität wird für die ausgewählten Bemessungsquerschnitte dabei nach dem in Bild 10 dargestellten Ablauf geführt.

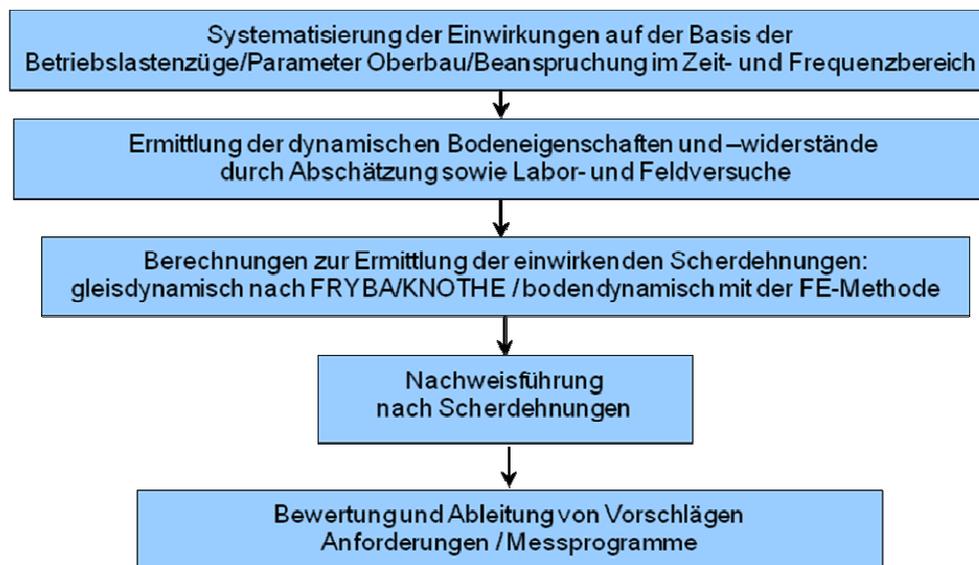


Bild 10: Ablaufschema für den Nachweis der dynamischen Stabilität

Die Vorschläge zur Nachweisführung wurden durch die UIG der Zentrale der DB Netz AG grundsätzlich bestätigt und mit Bedingungen und Hinweisen konkretisiert. Die Nachweisführung wurde durch den Gutachter des EBA begleitet und nach Vorliegen aller rechnerischen und versuchstechnischen Ergebnisse durch eine ZIE bestätigt.

4.3 Auswahl der Bemessungsquerschnitte

Für die Auswahl der Bemessungsquerschnitte war zu berücksichtigen, dass nach Ril 836 [1] planmäßig innerhalb der erdbautechnisch abzusichernden Bereiche in den Einschnitten und Geländegleichlagen bis 3 m unter SO keine weichen bindigen oder locker gelagerten nicht bindigen Böden verbleiben bzw. diese ausgetauscht oder durch eine entsprechende qualifizierte Bodenverbesserung stabilisiert werden und in hohe Dammbereiche verformungsarmes Dammschüttmaterial bzw. bindemittelstabilisierten Böden eingebaut werden.

Für die Auswahl der relevanten Bemessungsquerschnitte waren zusammenfassend die folgenden wesentlichen Kriterien zu berücksichtigen gewesen:

- Trassenlage (Auswahl von Streckenabschnitten in Übergangsbereichen zwischen Damm- und Einschnittslage bzw. in Bereichen mit geringer Dammhöhe oder Einschnittstiefe),
- Art und Zustand der oberflächennah anstehenden Bodenschichten im Trassenbereich (Quartäre Lockergesteinsböden, nachgiebige Baugrundsichten mit hohem Porenanteil und geringer Überdeckung) und
- Hydrologische Verhältnisse (Auswahl von Streckenabschnitten mit oberflächennah anstehendem Grundwasser).

Entsprechend wurden jeweils ein Bemessungsquerschnitt für bindige und nichtbindige Böden im Bereich der Festen Fahrbahn und ein Bemessungsquerschnitt im Bereich des Schotteroberbaues ausgewählt.

Zur Ermittlung der bodendynamischen Bodenparameter für den Nachweis der dynamischen Stabilität wurde zunächst ein detailliertes Labor- und Feldversuchsprogramm mit Detailbeschreibungen und Vorgaben der Probenahmen sowie der Versuchsdurchführungen und deren Auswertungen aufgestellt.

Mit den Indexversuchen konnten die zu untersuchenden Böden entsprechend ihrer Eigenschaften klassifiziert werden. Mit den Elementversuchen bzw. den dynamischen Versuchen konnten die maßgeblichen bodendynamischen Eigenschaften ermittelt werden. Die Ödometerversuche dienten dabei vorwiegend einer Überprüfung des Steifigkeitsverhaltens der zu untersuchenden Böden sowie eines Abgleiches mit den Ergebnissen aus den Baugrundgutachten.

In Tabelle 1 sind beispielhaft die auf der Basis der Labor- und Feldversuchsergebnisse abgeleiteten bodendynamischen Berechnungskennwerte für den Lößlehm mit und ohne Bindemittelbehandlung dargestellt.

Tabelle 1: Abgeleitete bodendynamische Berechnungskennwerte exemplarisch für den Lößlehm mit und ohne Bindemittelbehandlung aus [10].

Bodenart	c_s [m/s]	c_p [m/s]	ρ [g/cm ³]	$G_0 = c_s^2 \cdot \rho$ [MN/m ²]	$\gamma_{0,7}$ [-]	D [%]	$\gamma_{t,v}$ [-]
Lößlehm	200	400	1,80	72	$2 \cdot 10^{-4}$	2	$8 \cdot 10^{-5}$
Lößlehm (verbessert)	700	1.400	2,00	980	$4 \cdot 10^{-5}$	3	$2 \cdot 10^{-5}$

4.4 Nachweisführung

Die Modellierung des dynamischen Verhaltens des Gesamtsystems aus Fahrzeug, Oberbau, Unterbau und Untergrund erfolgt durch Zerlegung in zwei Substrukturen siehe auch [11], 0:

- Mit einem ersten Berechnungsmodell werden Fahrzeug und Gleis modelliert, wobei der Oberbau und Untergrund mittels Feder und Dämpfer modelliert werden, die aus einem Konusmodell nach 0 hergeleitet werden (gleisdynamische Berechnungen). Die gleisdynamische Berechnung liefert nach dem in 0 dargestelltem Modell die Vertikalspannungs-Zeit-Verläufe als Eingabe für die dynamische FE-Berechnung.
- In einem zweiten Berechnungsmodell wird der Input von oben (Beanspruchungen in der Ebene UK HGT bei Fester Fahrbahn bzw. UK Schwelle bei Schotteroberbau) als Einwirkung angesetzt, um die Wellenausbreitung im Untergrund mittels eines 2D-FE-Modells modelliert. Die Ausbreitung der Schwingungen in der 3. Dimension wird über eine entsprechende Lastverteilung in der Bahnlängsrichtung erfasst.

Bild 11 zeigt die ermittelten Einsenkungen für die SO und die Ebene UK HGT im Ergebnis der gleisdynamischen Berechnung.

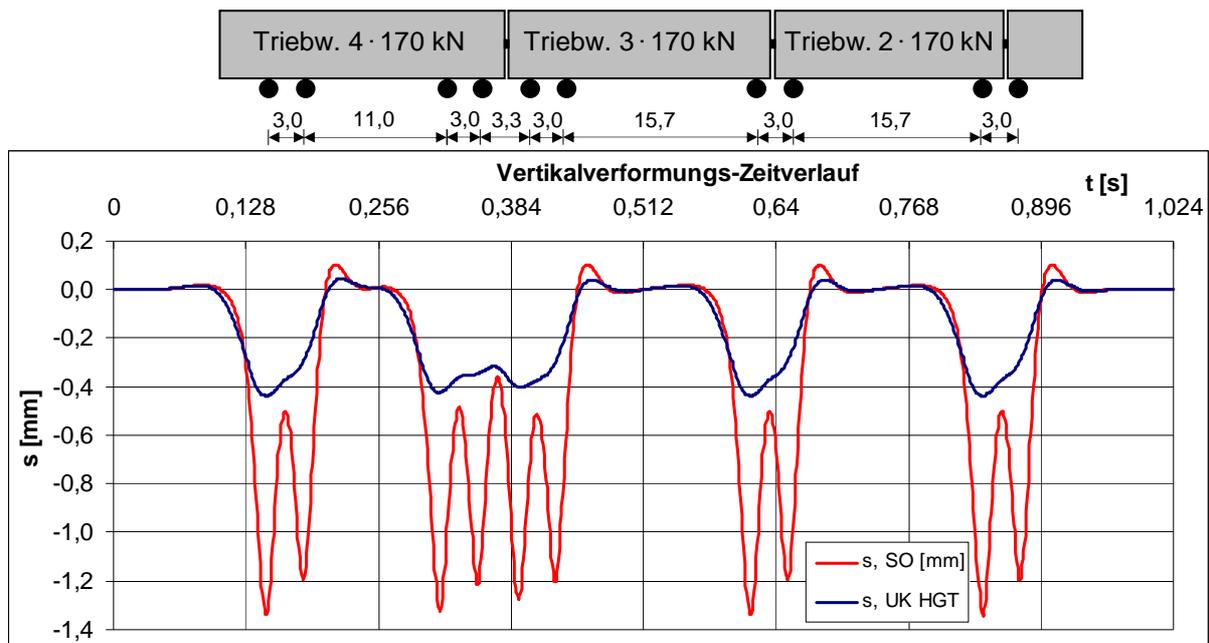


Bild 11: Typ 4 nach DIN FB 101 mit charakteristischem Lastbild (oben) sowie daraus ermittelter Vertikalverformungs-Zeitverlauf für die SO und die Ebene UK HGT aus [10]

In Bild 12 ist exemplarisch das bodendynamische FE-Modell für den maßgebenden Bemessungsquerschnitt im Bereich der Festen Fahrbahn mit bindigem Baugrund dargestellt.

Der Nachweis der dynamischen Stabilität erfolgt durch einen Vergleich der einwirkenden Scherdehnungen mit Scherdehnungsgrenzen, siehe auch ausführliche Erläuterungen in 0.

In Bild 13 ist zu sehen, dass die ermittelten Scherdehnungen für die untersuchten Lastenzüge kleiner als die Scherdehnungsgrenze γ_{tv} (rot gekennzeichnet) in allen Bodenschichten sind. Somit konnte der Nachweis der dynamischen Stabilität mit einem rechnerischen Verfahren als Prognose erbracht werden. Die

Plausibilität wurde anhand einer unabhängigen Vergleichsberechnung, bisheriger Berechnungen, Erfahrungswerten und vorliegender Messergebnisse [5], [6] und 0 überprüft.

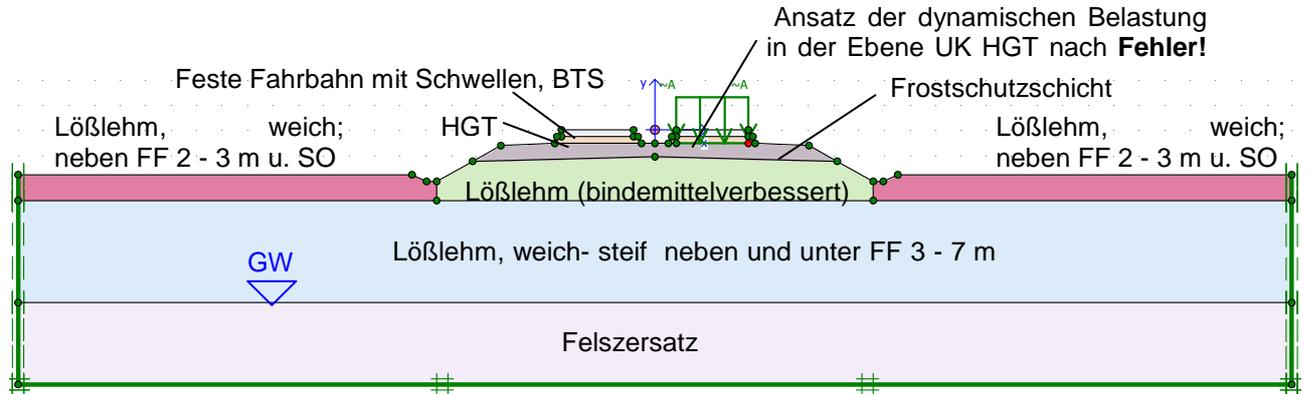


Bild 12: Bodendynamisches FE-Modell für den maßgebenden Bemessungsquerschnitt mit Darstellung der Baugrundsichtung und dem Grundwasserstand aus [10]

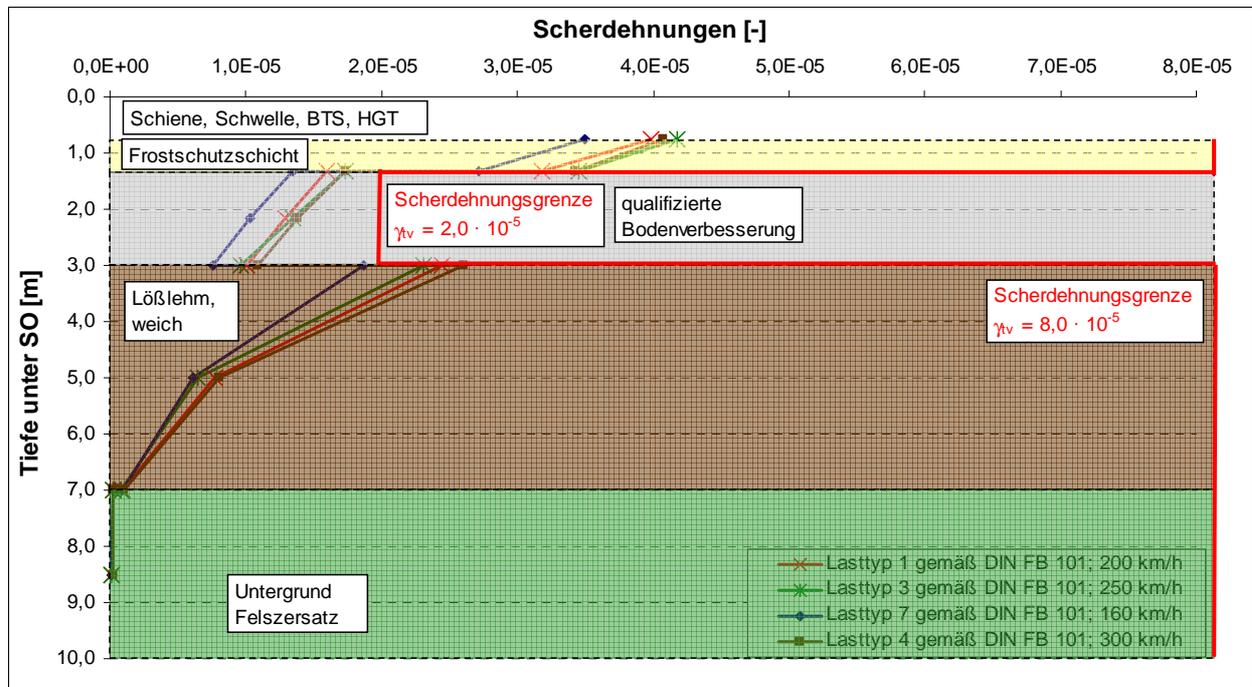


Bild 13: Vergleich der ermittelten Scherdehnungen mit der zulässigen Scherdehnungsgrenze innerhalb des maßgebenden Bemessungsquerschnitts aus [10]

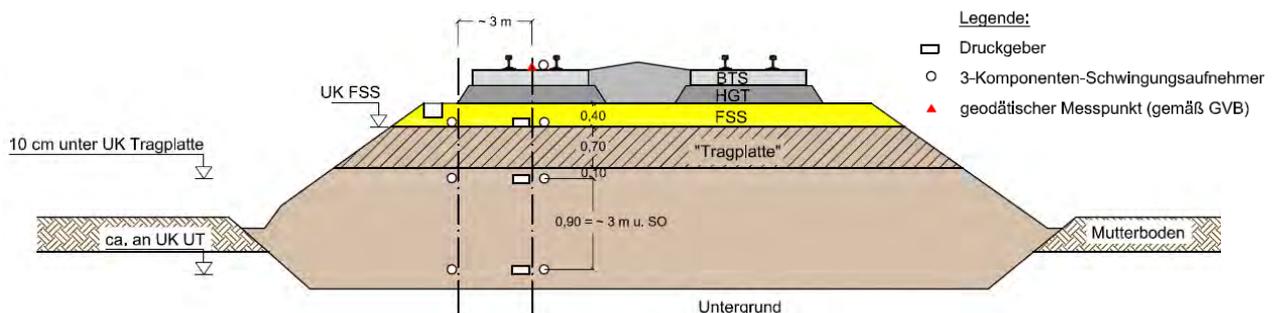


Bild 14: Skizze mit Messgebern aus [10]

Zur Überprüfung der Berechnungsergebnisse sind dynamische Messungen und Verformungsmessungen in situ im Zuge der Hochtastphase vorgesehen. Zur Ermittlung der tatsächlichen dynamischen Einwirkungen infolge Eisenbahnverkehrs sind die tatsächlichen Schwinggeschwindigkeiten sowie die dynamisch eingetragenen Spannungen infolge Zugüberfahrt zu messen. Dazu wurden in 3 verschiedenen Tiefen 3-Komponenten-Schwingungsaufnehmer und dynamische Druckgeber nach Bild 14 installiert.

Mit dem vorgestellten Verfahren zum Nachweis der dynamischen Stabilität konnte eine nach dem derzeitigen Stand der Technik entsprechende Nachweisführung erfolgen. Dabei konnte bestätigt werden, dass bei Ausführung des Oberbaues nach den Konstruktionsprinzipien für die Feste Fahrbahn mit hochelastischem Stützpunkt und der hohen Biegesteifigkeit der Betonkonstruktion sowie der Absicherung von Unterbau / Untergrund nach Ril 836 [1] eine ausreichende dynamische Stabilität für die Untergrundverhältnisse auf der NBS Erfurt - Halle/Leipzig erreicht wird.

5 Literaturverzeichnis

- [1] DB Netz AG: RIL 836, Erdbauwerke planen, bauen und instand halten, 2. Aktualisierung, 01.02.2013.
- [2] DB Netz AG: Ril 821, Oberbau inspizieren, 01.01.2010
- [3] Deutsches Institut für Normung e. V.: Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 2: Verkehrslasten auf Brücken; Deutsche Fassung EN 1991-2:2003 + AC:2010, 12/2010.
- [4] DGGT e. V.: Empfehlungen des Arbeitskreises AK 1.4 „Baugrundrynamik“, Hrsg.: Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V., Essen (2002). Hinweis: Überarbeitete Neuauflage mit wesentlichen Ergänzungen, 2012.
- [5] NBS Nürnberg – Ingolstadt; Zwischenbericht (So228a) zur dynamischen Stabilität von TM/TA-Böden innerhalb der Unteren Tragschicht der Einschnitte PFA 31 und 32 – Teil 2, Los Nord, BAUGRUND DRESDEN vom 07.03.2005, unveröffentlicht.
- [6] NBS Nürnberg – Ingolstadt; Abschließender Messbericht (So 251) zu der 3. Messkampagne im Los Nord, BAUGRUND DRESDEN vom 07.12.2006, unveröffentlicht.
- [7] Lieberenz, K.; Müller-Boruttau, F.H.; Weisemann, U.: Sicherung der dynamischen Stabilität von Unterbau / Untergrund – Herangehensweise und Lösungswege an der ABS Hamburg – Berlin, Eisenbahningenieur, 54 (2003) Heft 2, S. 14 – 24.
- [8] Reduzierung der Einwirkungen auf Erdbauwerke durch den Einsatz von hochelastischen Elementen im Oberbau, Abschlussbericht, ABS Hamburg – Berlin, 2. Ausbaustufe, Erprobungsabschnitt km 76,300 – km 76,800, GEPRO Ingenieurgesellschaft mbH, 2008, unveröffentlicht.
- [9] Lieberenz, K.; Wegener D.; Müller-Boruttau, F. H.: Dynamische Stabilität der Fahrbahn, Edition ETR, ABS Hamburg – Berlin, Eurailpress (2005).
- [10] Lieberenz, K.; Vehlow, A.; Vogt, L.; Wegener, D.: Zum Nachweis der dynamischen Stabilität bei Neubaustrecken mit Fester Fahrbahn am Beispiel der VDE 8.2; Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 62 (2013), Nr. 12, S. 32 – 39.
- [11] Vogel, W.; Lieberenz, K.; Neidhart, T.; Wegener, D.: Zur dynamischen Stabilität von Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR) 60 (2011), Nr. 9, S. 46 – 54.
- [12] DB Netz AG: Planungshilfe, Eisenbahnstrecken mit Schotteroberbau auf Weichschichten, Rechnerisches Untersuchungs- und Nachweisverfahren zur Beurteilung der dynamischen Stabilität, Stand 20.08.2013.

- [13] Göbel, C.; Lieberenz, K. (Hrsg.): Handbuch Erdbauwerke der Bahnen, Planung, Bemessung, Ausführung, Instandhaltung; Eurailpress-Verlag, Hamburg, 2013.
- [14] Wolf, J.P.: Foundation Vibration Analysis using Simple Physical Models, Prentice Hall, Englewood Cliffs (1994).
- [15] Fryba, L.: Vibrations of Solids and Structures under Moving Loads, 3. Auflage, Verlag Telford Verlag London (1999).
- [16] Neidhart, T.; Fischer, R.: Optimierung des Unterbaus der Festen Fahrbahn - mess-technische Überprüfung unter Betrieb; Vortrag auf der Erd- und Grundbautagung im Rahmen der INNOTRANS 2000.