

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 114 (1996)  
**Heft:** 18

**Artikel:** Bodenverbesserung durch Rüttelstopfverdichtung  
**Autor:** Keller, Felix  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-78959>

#### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

#### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

#### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 04.02.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

Felix Keller, Basel

# Bodenverbesserung durch Rüttelstopfverdichtung

**Die Querung einer ehemaligen Kiesgrube, die teilweise wieder verfüllt wurde, in der aber die Setzungsprozesse noch immer anhalten, machen eine Verdichtung dieses Auffüllbereichs zur Erstellung des Trassees notwendig.**

Das Trassee der Neubaustrecke verläuft zwischen dem Rangierbahnhof Muttenz und dem Nordportal des Adlertunnels im Bereich ehemaliger sowie in Betrieb stehender Kiesgruben. Zwischen den Bahnkilometern 6.90 und 7.15 wird der vor Baubeginn vollständig verfüllte und aufgeforschte Grubenteil (Abschnitt I) gequert. Hier erfolgt die Kreuzung mit der bereits verlegten Stammlinie Zürich - Basel über das neu erstellte Überwerfungsbauwerk «Hard». Von km 7.18 bis 7.71 traversiert die Neubaustrecke den heute noch betriebenen Grubenbereich (Abschnitt II), welcher während der Bauausführung mit dem Felsausbruch des Adlertunnels verfüllt wird. In (1) sind die einzelnen Abschnitte mit dem entsprechenden Bauvorhaben zusammengestellt.

Die Ausbeutung der bis zu 26 m tiefen Gruben hat anfangs dieses Jahrhunderts begonnen. Die Rheinschotter sind dabei bis auf wenige Meter Restmächtigkeit abgetragen und etappenweise wieder verfüllt worden. Das Material ist zum Teil nur lose «vor Kopf» geschüttet und nicht verdichtet worden. Bei den einzelnen Abschnitten können Unterschiede des Grubenmaterials in der Zusammensetzung und La-

gerungsdichte festgestellt werden. In den Abschnitten I und II Nord liegen eher kiesiger bis grobblockiger Bauschutt vor, im Abschnitt II Süd überwiegen dagegen die feinkörnigen Anteile. Setzungsmessungen während der Zeitperiode 1984 bis 1987 haben im Abschnitt II Süd gezeigt, dass trotz der langjährigen Liegezeit von etwa 20 Jahren der Konsolidationsvorgang anhält, wurden doch immer noch Setzungswerte von  $1/2$  -  $1 1/2$  cm pro Jahr gemessen. Das projektierte Bahntrasse liegt über eine längere Strecke in diesem nicht verdichteten Auffüllungsbereich, so dass es ohne besondere Massnahmen bei den prognostizierten Setzungswerten nicht erstellt werden kann.

## Massnahmen

Um die Grubenfüllung als Fundationshorizont nutzen zu können, ist eine Bodenverbesserung mit folgenden Zielsetzungen gefordert worden:

- Homogenisierung des Baugrundes, d.h. Hohlräume bzw. Schwachstellen in der Auffüllung sind zu verdichten;
- Erhöhung der Lagerungsdichte, d.h. Reduktion der Setzungen;
- Beschleunigung der Konsolidationszeit;
- Stabilisierung der Böschungen im Grubeneinschnitt.

Gewählt wurde eine Rüttelstopfverdichtung (RSV), wobei ein Gerät, bestehend aus einem Raupenfahrgestell und einem am Masten geführten sogenannten

L-Rüttler, zur Anwendung kam. Der Rüttler wurde mit einer maximalen Anpresskraft von 200 kN und unter Druckluftzufuhr bis auf die gewünschte Tiefe in den Boden einvibriert. Das durch Verdrängen und Verdichten entstandene Loch ( $D \approx 80$  cm) wurde anschliessend mit Kies der Fraktion 8/32 über eine am Gerät befestigte Zugabewanne mit dem Rüttler im Pilgerschritt von unten nach oben verstopft (2).

## Vorversuche und Eignungsnachweis

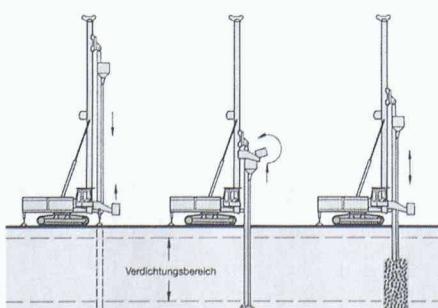
Als Eignungsnachweis sowie zur Festlegung des Säulenrasters für die Bauausführung sind Vorversuche mit Grosslastplatten ausgeführt worden. Infolge der unterschiedlichen Zusammensetzung und Lagerungsdichte der Grubenfüllung sind in den drei Abschnitten I, II Nord und II Süd je ein Versuchsfeld angeordnet worden. Stellvertretend für die Versuchsanordnung der einzelnen Abschnitte zeigt (3) die geometrische Anordnung für den Abschnitt II Süd.

Für die einzelnen Plattenversuche sind zur Homogenisierung des umliegenden Bodens jeweils 12 Rüttelstopfsäulen erstellt worden, wovon dann drei mit einer Betonplatte der Fläche 10 bzw. 15 m<sup>2</sup> und der Stärke 50 cm belastet wurden. Als Belastungsstufen sind 25 kN/m<sup>2</sup>, 50 kN/m<sup>2</sup>, 75 kN/m<sup>2</sup> und 100 kN/m<sup>2</sup> gewählt worden. Die Belastung der Platten erfolgte durch mit Kies gefüllte Baumulden (4), wobei der Plattenversuch «neutral» (ohne Bodenverbesserung) als Referenzmessung diente.

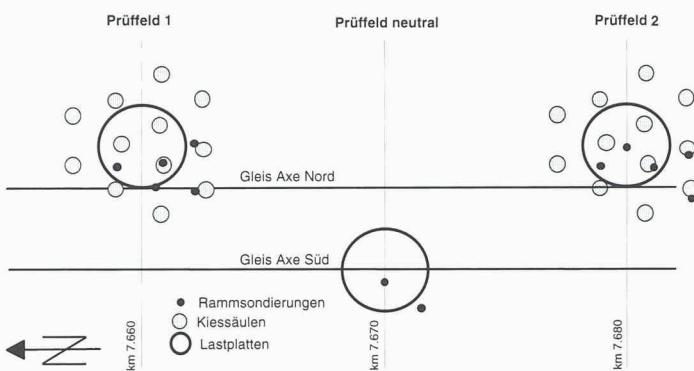
Vor der Verdichtung des Baugrundes wurden im Bereich der Prüffelder Rammsondierungen (SRS nach DIN 4094) zum Abtasten der Grubensohle sowie zum Bestimmen der Lagerungsdichte des Grubenmaterials vor den Verdichtungsarbeiten

1 Abschnittsbezogene Bauvorhaben

2 Prinzipskizze Rüttelstopfverdichtung

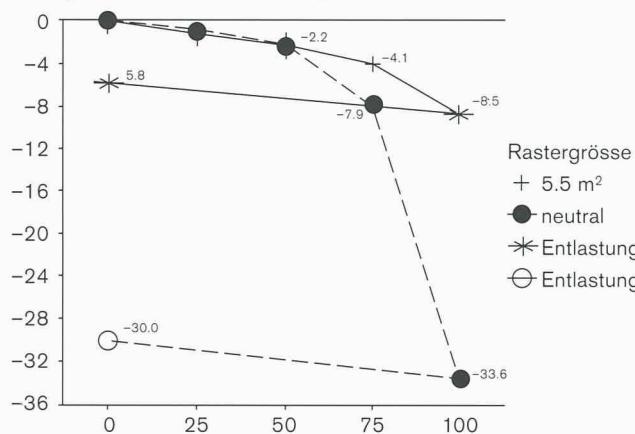


	km	Bauvorhaben	Gruben-zustand	Mächtigkeit
Abschnitt I	6.90 - 7.15	Überwerfung mit Stammlinie Damschüttung bis ca. 6 m auf Auffüllung	vollständig verfüllt	bis ca. 20 m
Rothausstrasse Abschnitt II Nord	7.24 - 7.39	Damschüttung bis ca. 9 m auf Auffüllung	teilweise verfüllt	bis ca. 14 m
Mitte	7.39 - 7.49	Damschüttung ab Grubensohle	offen	-
Süd	7.49 - 7.70	Einschnitt in Grubenfüllung Tunnelportal Nord mit Betriebsgebäude	vollständig verfüllt	Mächtigkeit bis zu ca. 26 m; unter Trasse ca. 11 m



3

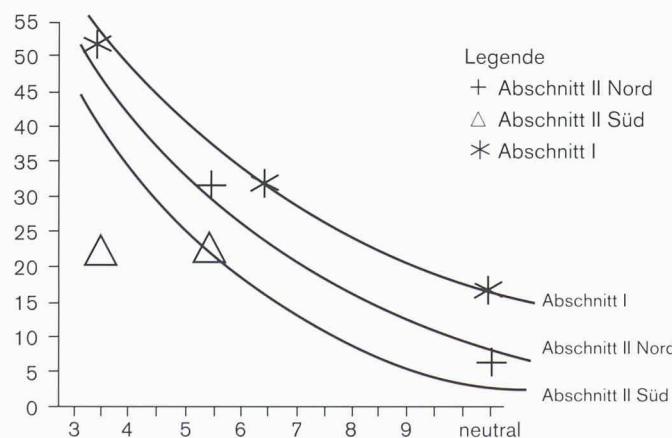
Setzungen [mm] Last-Setzung Nord



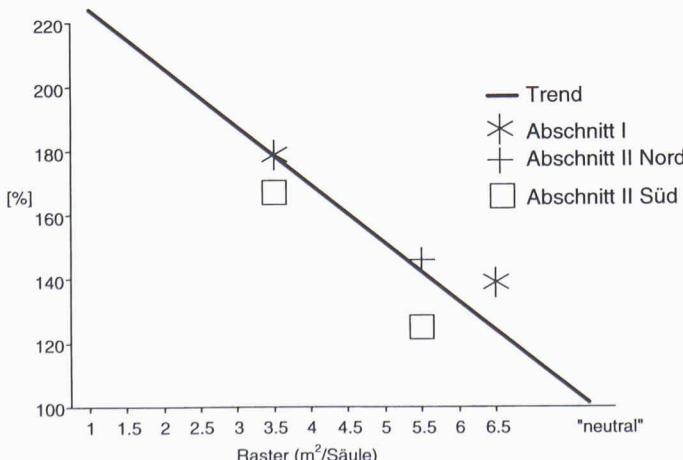
5

### Versuchsauswertung

Aus dem Verlauf der Lastsetzungskurve sowie mittels einer Setzungsberechnung für Kreisplatten nach Grasshof ist der massgebende Wert des Zusammendrückungsmoduls  $M_E$  bestimmt worden.

 $M_E$ -Wert [ $\text{MN/m}^2$ ]

6

 $M_E$ -Werte in Abhängigkeit der Rastergrösse

7



4

ten durchgeführt. Diese Rammversuche wurden nach der Rüttelstopfverdichtung wiederholt.

Die Setzungen der Platten sind über vier am Rand angeordnete Messbolzen mit einer Genauigkeit von 1/10 mm gemessen worden. Sobald bei den jeweiligen Laststufen die Setzungen abgeklungen waren, wurden die neuen Mulden aufgesetzt. Am Schluss der Versuchsdurchführung wurde nach dem Abtragen der Mulden eine Entlastungsmessung durchgeführt (5).

3 Versuchsanordnung Abschnitt II Süd

4 Muldenturm

5 Last-/Setzungsverlauf Abschnitt II Nord (Raster 5,5  $\text{m}^2$  / neutral)6  $M_E$ -Werte in Abhängigkeit der Rastergrösse

7 Rammwiderstände (in %) in Abhängigkeit des Säulenrasters

8 Gewählte Säulenraster

Bauvorhaben		Raster (m <sup>2</sup> pro Säule)
Abschnitt I	- Überwerfungsbauwerk «Hard»	2.5
	- Böschungen und mittleres Trassee	4.5
	der Stammlinie im Einschnitt	5.0
	- Trassee Neubaustrecke mit Dammschüttungen	6.0
	- Trassee Stammlinie mit kleinem Einschnitt	
Abschnitt II Nord	- Dammschüttung	6.0
	- Übergang Süd	6.5
Abschnitt II Süd	- offenes Trassee im Einschnitt	9.0
	- Übergang Portalzone	4.5
	- Portalbereich Tagbaustrecke	5.5*)

\*) Im Portalbereich der Tagbaustrecke und unter dem Betriebsgebäude neben dem Tunnelportal sind die Kiessäulen teilweise mit einer Zement-/Bentonitsuspension vermortelt worden. Dadurch wird erreicht, dass bei einem allfälligen Karsteinbruch die Stopfsäulen nach unten nicht austrieseln. Durch die Verfestigung des Bodens kann sich eine Überbrückung über die Doline ausbilden.

8

Bei der Versuchsdurchführung im Abschnitt I lässt sich anhand der drei Messpunkte eine in etwa parabolische Abhängigkeit zwischen dem  $M_E$ -Wert und der Rastergrösse erkennen (6). Infolge der längeren Liegezeit der Auffüllung gegenüber dem Abschnitt II sind hier generell höhere Elastizitätsmoduli ermittelt worden. Die tieferen  $M_E$ -Werte im Abschnitt II Süd sind auf den hohen Feinkornanteil zurückzu-

führen, wobei für das Prüffeld 1 mit einer Säule auf 3,5 m<sup>2</sup> und das Prüffeld 2 mit einer Säule auf 5,5 m<sup>2</sup> praktisch die gleichen  $M_E$ -Werte berechnet wurden. Da der Boden aufgrund der hohen Sättigung während der beschränkten Versuchszeit nicht auskonsolidieren konnte, musste ein «undrainierter Zustand» angenommen werden.

In (7) ist die prozentuale Zunahme der Rammwiderstände und somit der Lage-

rungsdichte in Abhängigkeit des Säulenrasters dargestellt. Hier lässt sich eine in etwa lineare Abhängigkeit konstruieren. Bei der Wahl des Säulenrasters ist den unterschiedlichen Anforderungen an den Baugrund für die einzelnen Bauabschnitte bzw. dem Bauvorhaben Rechnung getragen worden. In (8) sind die ausgeführten Säulenraster zusammengestellt.

### Qualitätssicherung

Die Qualitätssicherung der Rüttelstopfverdichtung wurde einerseits durch die permanente Aufzeichnung der Rütteltiefe und Verdichtungsenergie mit einem automatischen Schreiber am Gerät und anderseits durch die laufende Erfassung der Menge des Zugabenmaterials gewährleistet. Im weiteren hat man systematisch Rammsondierungen vor und nach dem Verdichten des Baugrundes als Erfolgskontrolle abgeteuft. Im Bereich der grössten Schüttmächtigkeit des Erddammes (Abschnitt I) wurden zudem drei Setzungspegl eingebaut.

Adresse des Verfassers:

Felix Keller, dipl. Ing. ETH/SIA, Geotechnisches Institut AG, Hochstrasse 48, 4002 Basel

Josef Kalak, Binningen

## Tagbaustrecke Nord

**Für die Tagbaustrecke Nord des Adlertunnels ergeben sich ungewöhnliche Gefährdungsbilder. Die fugenlose durchgehende Tunnelröhre überspannt eventuelle Hohlräume plötzlich auftretender Dolinen und weist genügend Verformungsvermögen auf, um die grossflächigen Einstellungen des Baugrundes mitzumachen.**

Aufgrund der Gefährdung durch Dolinenstürze (siehe «Doline als Rechengrösse») wurden für die Tagbautunnelkonstruktion verschiedene Varianten untersucht, die diesem geologisch bedingten Phänomen Rechnung tragen. Statische Überlegungen und Kostenberechnungen führten zur Lösung mit einem über die ganze Länge von 830 m durcharmierten, sich duktil verhaltenden Tunnelrohr mit kreisförmigem Profil. Dolinen können mit diesem Rohr überbrückt werden, und bei

grossflächigen Einstellungen passt sich die Tunnelkonstruktion an.

### Nutzungsplan

Bauherr und Betreiber der Bahnlinie, die Schweizerischen Bundesbahnen, stellen unter anderem folgende Anforderungen an den Tunnel:

- Nutzungsdauer länger als 150 Jahre
- Teilersatz mit längerer Sperrung der Gleise frühestens nach 100 Jahren
- Ausbaugeschwindigkeit: 160 km/h, in Zukunft > 160 km/h
- differenzierte Einschränkung der Verfügbarkeit bezüglich Tageszeit, Anzahl gesperrter Achsen, Intervall für Unterhaltsarbeiten
- örtlich begrenzte Feuchtstellen sind erlaubt, Tropfstellen und Eisbildung sind nicht erlaubt
- minimaler Krümmungsradius der Gleisaxe bei Verformungen infolge

- langfristiger Einstellungen: 5000 m
- maximal zulässige Setzung der Gleisaxe bei grossflächigen Einstellungen: 0,25 m
- Einhalten der Richtwerte für Durchbiegungen von Bahnbrücken im Falle von lokalen Überbrückungen von Dolinen gemäss Norm SIA 160

### Sicherheitsplan, Risiken und Gegenmassnahmen

Neben den üblichen Einwirkungen auf den Tagbautunnel standen als Gefährdungsbilder die folgenden zwei ungewöhnlichen Situationen im Vordergrund.

Dolinen: Plötzlicher Einsturz einer Karsthöhle mit Trichterbildung in der Schotter schicht bis zum Fundationshorizont des Tunnels oder bis an die Terrainoberfläche.

Grossflächige Einstellung: Sich langsam bildende grossflächige Einstellung, die durch Zusammensacken von durch Auslaugungen porös gewordenem Fels entstehen.

In Zusammenarbeit mit dem Prüfingenieur und den Geologen wurde be-