

## Eppenbergtunnel, Schutzmassnahmen von Anfang bis Kontrolle

Th. Rupp, A. Manuel, Basler & Hofmann AG, Esslingen, CH

### Abstract

#### 1. Ausgangslage

Die Bahnstrecke zwischen Aarau und Olten war ein Nadelöhr im SBB-Streckennetz mit nur zwei Gleisen. Mit dem Projekt Vierspurausbau Aarau-Olten kann neben der Verkürzung der Reisezeit die Kapazität und Flexibilität massgebend erhöht werden. Dadurch wird die Fahrplanstabilität verbessert.

Ein wichtiger Bestandteil des Projektes ist der neue doppelgleisige Eppenbergtunnel, durch welchen seit der Inbetriebnahme im Dezember 2020 etwa 320 Personen- und 55 Güterzüge je 24h rollen. Total verkehren seit Inbetriebnahme auf der Strecke zwischen Aarau und Olten rund 670 Züge.

Der neue Tunnel ist gut 3 km lang. Die Überdeckung beträgt im Westen auf einer Länge von ca. 700 m nur etwa 15 Meter, dann nimmt der Abstand zu Wohngebäuden deutlich zu auf 30 m bis 55 m. Auf der Ostseite liegen keine Wohngebäude in Nähe des neuen Tunnels.

Basler & Hofmann wurde beauftragt, vom Vorprojekt bis zur Inbetriebnahme die Auswirkungen von Erschütterungen und Körperschall infolge des Tunnelverkehrs auf die Umwelt zu untersuchen.

#### 2. Vor- und Hauptuntersuchung UVB

Die Voruntersuchung fanden 2009 statt, die UVB-Untersuchung für das Auflageprojekt erfolgte 2012. Dabei wurden für den Eppenbergtunnel die folgenden Schutzmassnahmen festgelegt:

- LVT-HA auf 1860 m Länge (Vorsorgeprinzip)
- Mittleres Masse-Feder-System (MFS) auf 556 m Länge mit Abstimmfrequenz  $f_0 = 11$  Hz, im Bereich der geringen Tunnelüberdeckung von etwa 15 m
- Unterschottermatte auf 74m Länge beim Westportal (nach dem Wechsel aufs Schottergleis und als Übergang zum MFS).

#### 3. VibroScan-Untersuchung

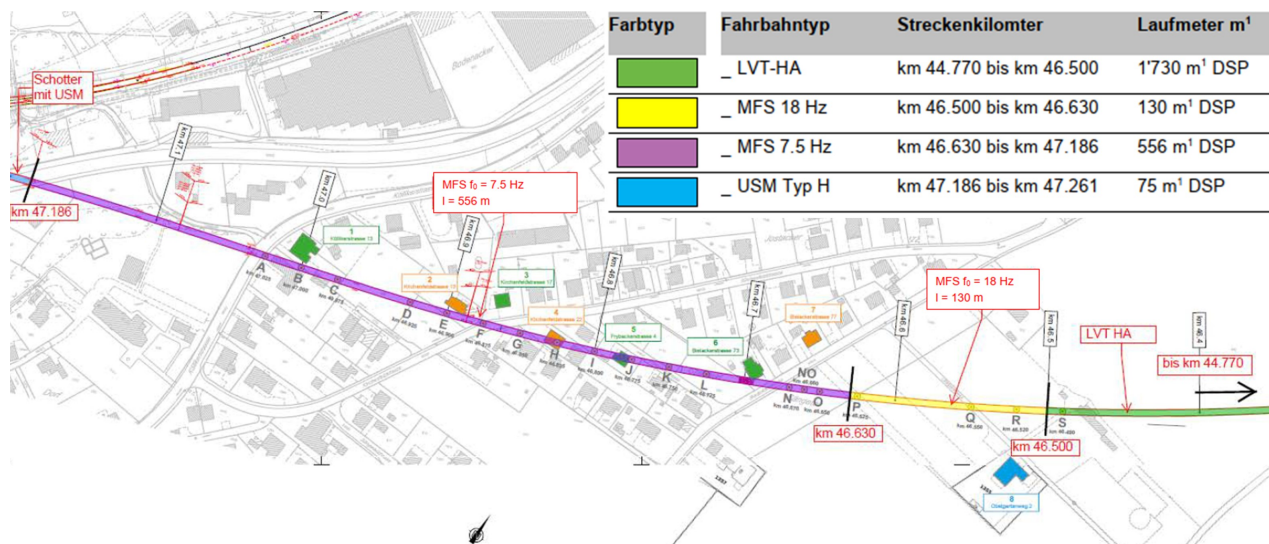
Bei der VibroScan-Methode wird der Tunnelrohbau mit einem schweren Schwingungsgenerator breitbandig zu Schwingungen angeregt. Mittels synchronen Erschütterungsmessungen im Tunnel und in obenliegenden Gebäuden wird die Übertragungsfunktion Tunnel – Freifeld – Fundament – Gebäudedecke messtechnisch bestimmt.

Die VibroScan-Messungen erlauben eine genauere frequenzbasierte Prognose der Zugsimmissionen für den zukünftigen Betriebszustand. Bei Notwendigkeit werden die erforderlichen Schutzmassnahmen in Art und Länge genau spezifiziert.

Die VibroScan-Untersuchung fand im Juli 2018 statt. Dabei wurden entlang des Tunnels in total 19 Wohngebäuden die Erschütterungen gemessen und der Tunnel wurde an fast 40 Stellen angeregt.

Bei der VibroScan-Messung wurden kleinräumig ungünstige Schwingungsübertragungen und spezielle Gebäudeverhalten detektiert. Im violett dargestellten Bereich musste deshalb das geplante MFS deutlich tiefer auf 7.5Hz abgestimmt werden.

Basler & Hofmann AG hat zusammen mit den SBB die unten dargestellten Schutzmassnahmen am Gleis festgelegt (siehe nachfolgende Abbildung).



Mit diesen Massnahmen können die massgebenden Anhalts- und Richtwerte nach BEKS mit ausreichender Sicherheit eingehalten werden.

#### 4. Kontrollmessungen

In den gleichen 19 Wohngebäuden (an den identischen Messpunkten der VibroScan-Messung) fanden unter Regelbetrieb Kontrollmessungen statt. Zusätzlich konnten in 2 Nachtsperrzeiten Messgeräte im Tunnel installiert werden, welche einen in-situ-Vergleich der getroffenen Schutzmassnahmen erlaubten.

In den Gebäuden wurden die Zugsimmissionen tagsüber während mindestens 4 Std gemessen. Zwecks Referenzierung und Zugsidentifikation fand in einem Gebäude eine Dauermessung über die 3 Tage statt. Während der gesamten Messdauer wurde der Zugverkehr beim Westportal mittels Kamera aufgezeichnet, so dass eine eindeutige Zugsidentifikation möglich war.

Bei den **Erschütterungen** wurden die Werte  $KB_{FTm}$  pro Zugkategorie ermittelt und mithilfe des Normzugverkehrs der Beurteilungswert  $KB_{FTn}$  berechnet. Die Werte  $KB_{FTn,Nacht}$  lagen in der Regel bei 0.000, der Maximalwert betrug 0.011 und lag somit deutlich unter dem massgebenden Anhaltswert von 0.05.

Die Messungen und Auswertungen des **Körperschalls** waren erschwert, weil die maximalen Vorbeifahrt-LEQ im Bereich von 20 bis 30 dBA lagen und auf diesem Niveau der Ruhepegel lag. Beim Körperschall waren mehrheitlich die Personenzüge identifizierbar und auswertbar, in 5 Gebäuden konnten auch Güterzüge ausgewertet werden. Es wurden folgende Beurteilungspegel  $L_{KS,Nacht}$  ermittelt:

- im Bereich der minimalen Überdeckung mit MFS 7.9 bis 16.8 dBA (Planungsrichtwert 25 dBA),
- im Bereich der mittleren Überdeckung mit LVT-HA  $L_{KS,Nacht}$  von 7.2 bis 12.5 dBA,
- im Bereich von Überdeckungen über 50 m mit LVT-HA können keine Angaben gemacht werden, da der Körperschall nicht messbar war.

#### 5. Fazit

Die Kontrollmessungen zeigen, dass die gesetzlichen Anforderungen bezüglich Erschütterungen und Körperschall bei allen Gebäuden deutlich eingehalten sind.

# SBB Eppenbergtunnel, Schutzmassnahmen A bis K

A wie Anfangsuntersuchung, K wie Kontrollmessungen

**Kunde**  
SBB AG  
Infrastruktur Projekte Engineering  
Bahnhofstrasse 12, 4600 Olten

**Datum**  
31. Mai 2024



## **Impressum**

---

### **Datum**

31. Mai 2024

---

### **Bericht-Nr.**

05835.300 - 002

---

### **Verfasst von**

Thomas Rupp  
Adriano Manuel

---

Basler & Hofmann AG  
Ingenieure, Planer und Berater

Bachweg 1  
Postfach  
CH-8133 Esslingen  
T +41 44 387 15 22

---

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1.</b>	<b>Projekt neuer Eppenbergtunnel</b>	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>Vor- und Hauptuntersuchung UVB</b>	<b>2</b>
<b>3.</b>	<b>VibroScan-Untersuchungen</b>	<b>2</b>
<b>4.</b>	<b>Kontrollmessungen 2021</b>	<b>5</b>
4.1	Messkonzept und Durchführung	5
4.2	Resultate der Erschütterungsmessungen	5
4.3	Resultate der Körperschallmessungen	7
4.4	Qualität der Messungen und Auswertungen	7
4.5	Beurteilungswerte basierend auf Messungen	7
<b>5.</b>	<b>Prognose-Vergleiche</b>	<b>8</b>
<b>6.</b>	<b>Tunnelmessungen in-situ</b>	<b>9</b>

## Abbildungsverzeichnis

- 1 Übersicht Bestandesstrecke und neuer Eppenbergtunnel)
- 2 Längenprofil Eppenbergtunnel, ab Portal West 1km mit geringer Überdeckung
- 3 Übersicht der durchgeführten VibroScan-Messungen km 46.0 bis 47.0
- 4 Übersicht der durchgeführten VibroScan-Messungen km 44.9 bis 45.7
- 5 Resultate der Kreuzmessung zwecks Korrektur unterschiedlicher Anregung
- 6 Schutzmassnahmen Eppenbergtunnel gemäss PGV
- 7 Realisierte Schutzmassnahmen Eppenbergtunnel
- 8 Vergleich mittlere KBFTi-Werte für Messpunkte G01 – G07
- 9 Vergleich mittlere KBFTi-Werte für Messpunkte G08 – G14
- 10 Vergleich mittlere KBFTi-Werte für Messpunkte G15 – G19
- 11 Synoptischer Plan mit Messabschnitten
- 12 Fotos zu den Tunnelmessungen
- 13 Gemittelte Schwinggeschwindigkeiten für die 5 Messquerschnitte
- 14 Emissionsmessungen Tunnel und offene Strecke
- 15 Gemessene Einfügedämmungen im Eppenbergtunnel

## 1. Projekt neuer Eppenbergtunnel

Die Bahnstrecke zwischen Aarau und Olten war ein Nadelöhr im SBB-Streckennetz mit deren zwei Gleisen. Mit dem Projekt Vierspurausbau Aarau-Olten kann neben der Verkürzung der Reisezeit die Kapazität und Flexibilität massgebend erhöht werden. Zudem wird eine Erhöhung der Fahrplanstabilität erreicht.

Ein wichtiger Bestandteil des Projektes ist der neue doppelgleisige Eppenbergtunnel durch welchen seit der Inbetriebnahme im Dezember 2020 etwa 320 Personen- und 55 Güterzüge je 24h rollen. Total verkehren seit Inbetriebnahme auf der Strecke zwischen Aarau und Olten rund 670 Züge.

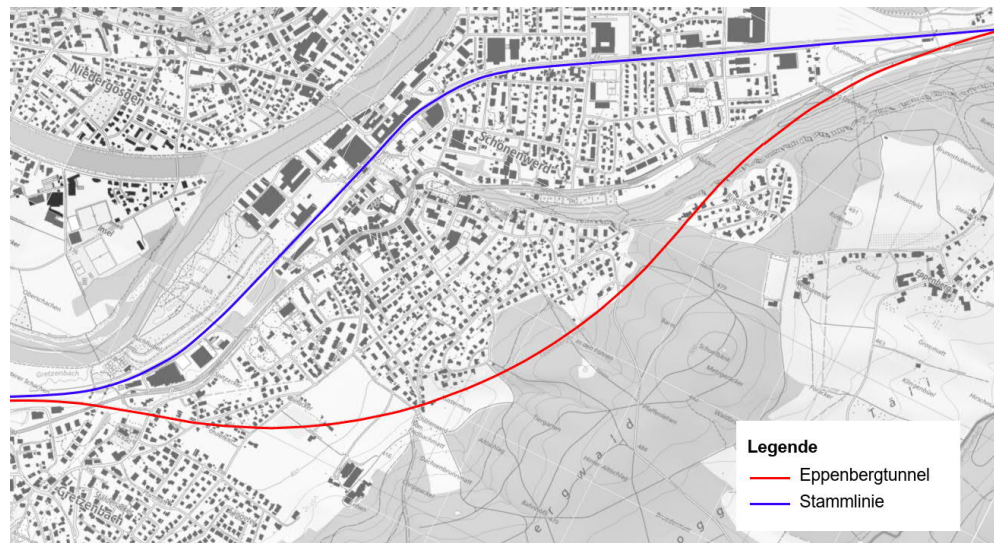


Abb. 1 Übersicht Bestandesstrecke und neuer Eppenbergtunnel)

Der neue Tunnel ist gut 3 km lang. Die Überdeckung beträgt im Westen auf einer Länge von ca. 700m nur etwa 15m, dann nimmt der Abstand zu Wohngebäuden deutlich zu auf 30m bis 55m. Auf der Ostseite liegen keine Wohngebäude in Nähe des Eppenbergtunnels.

Basler & Hofmann AG wurde von den SBB AG mit der Untersuchung der Tunnelstrecke beauftragt.

Um die erforderlichen Schutzmassnahmen in Lage und Wirkung genau festzulegen, fanden im Juli 2018 im Tunnelrohbau sog. VibroScan-Messungen statt.



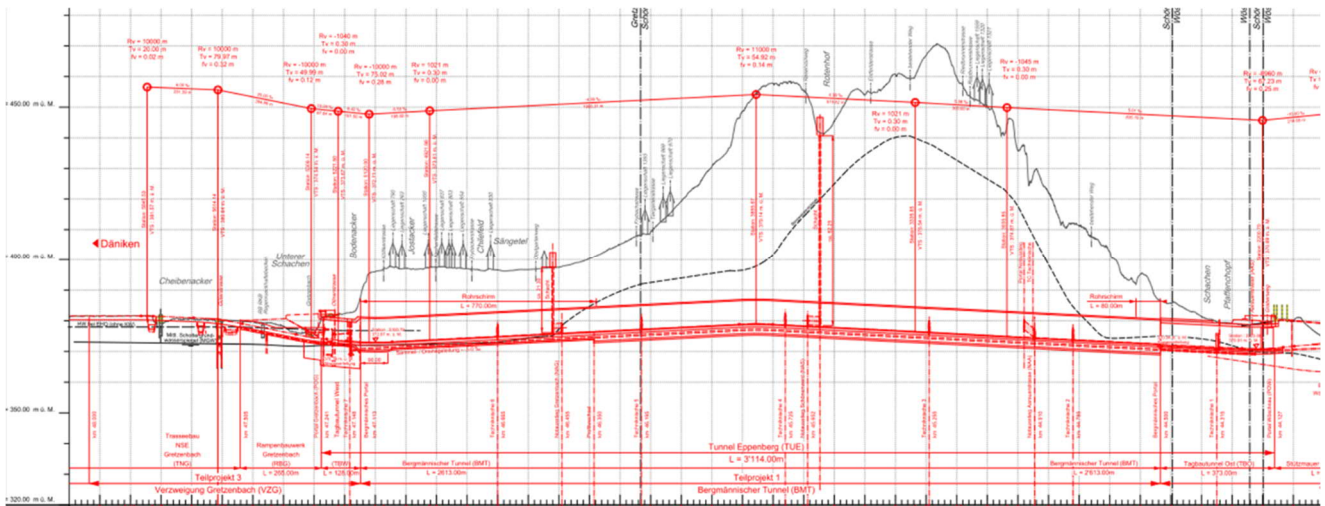


Abb. 2 Längenprofil Eppenbergtunnel, ab Portal West ca. 1km mit geringer Überdeckung < 20 Meter

## 2. Vor- und Hauptuntersuchung UVB

Voruntersuchungen fanden 2009 statt, die UVB-Untersuchung für das Auflageprojekt erfolgte 2012 und 2013. Es wurden die Schutzmassnahmen gemäss Abb. 6 festgelegt. Für den Eppenbergtunnel wurden als Schutzmassnahmen am Gleis LVT-HA 1860 m<sup>1</sup>, mittleres MFS 556 m<sup>1</sup> und USM 74 m<sup>1</sup> eingeplant.

## 3. VibroScan-Untersuchungen

Bei der VibroScan-Methode wird der Tunnelrohbau mit einem schweren Schwingungsgenerator breitbandig zu Schwingungen angeregt.

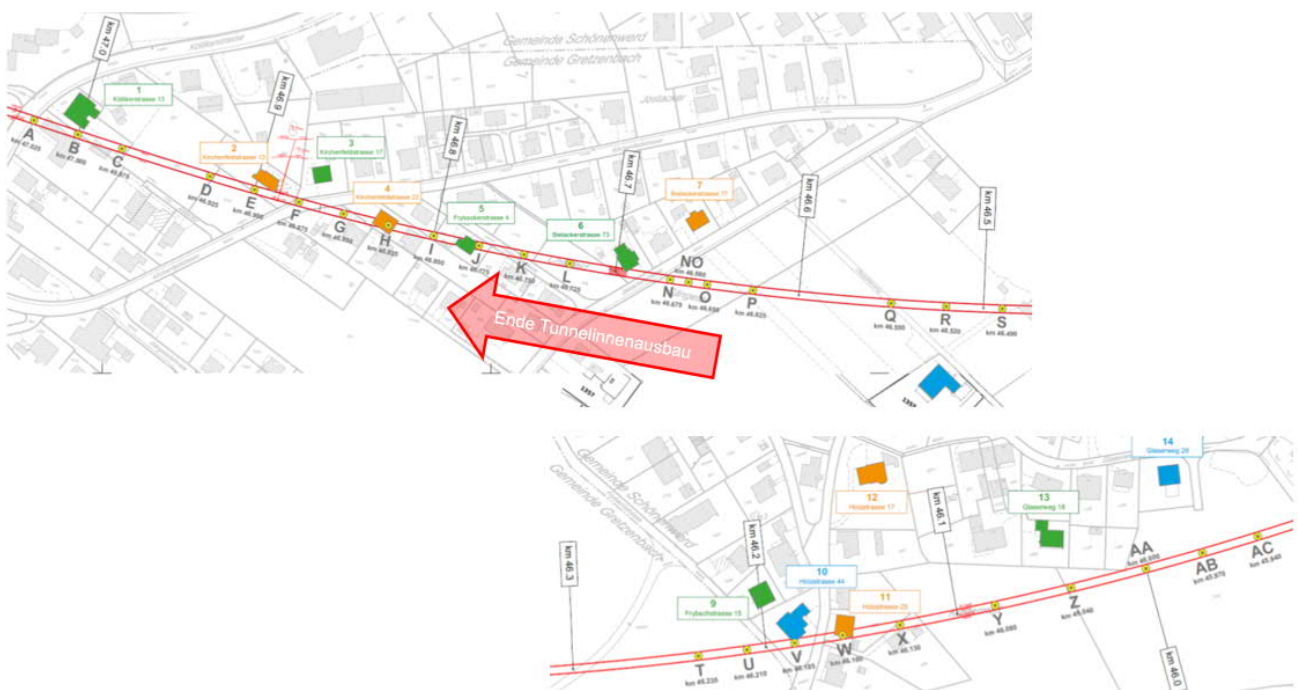


Abb. 3 Übersicht der durchgeführten VibroScan-Messungen in Gebäuden km 46.0 bis 47.0

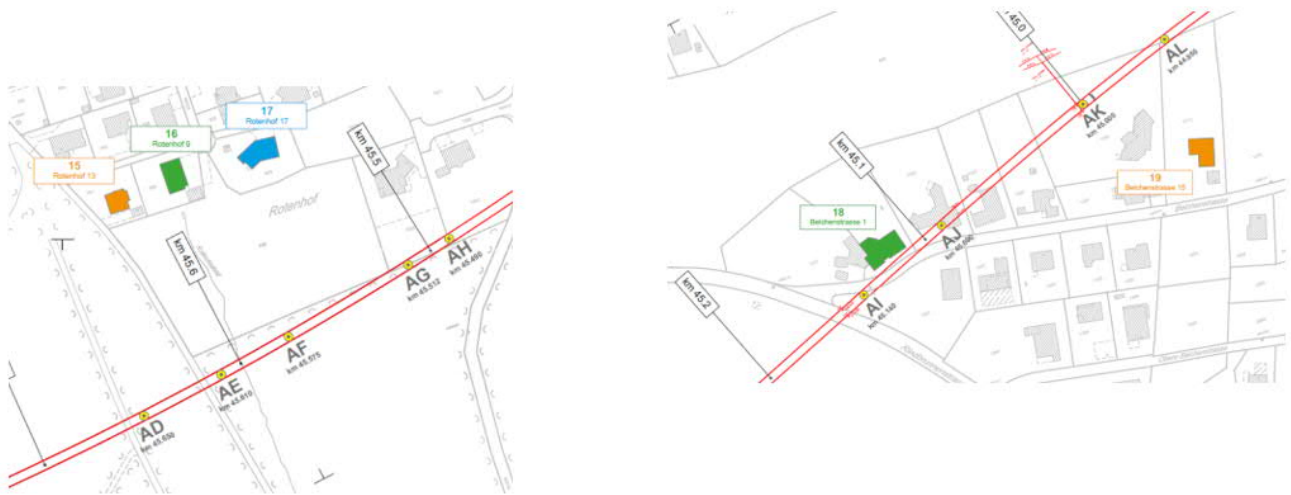


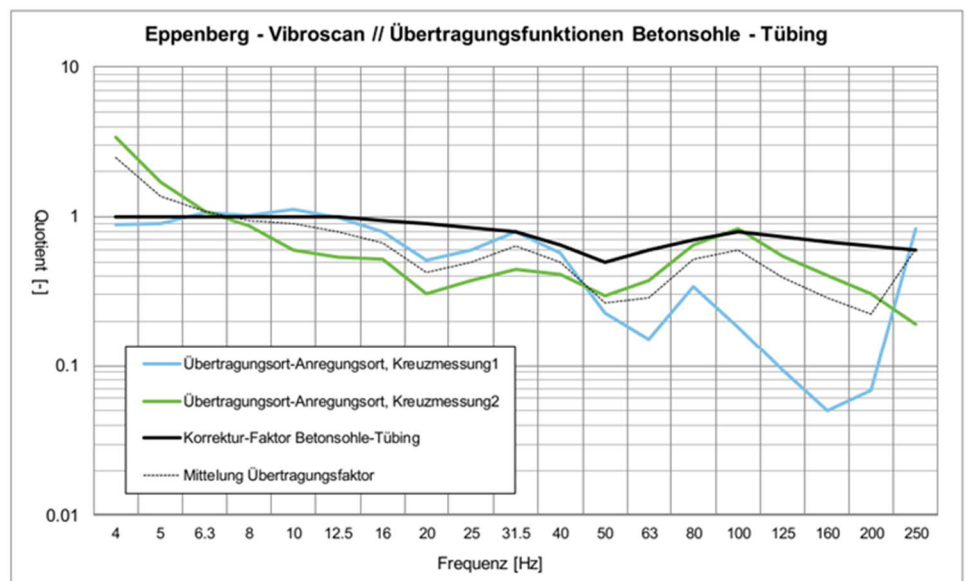
Abb. 4 Übersicht der durchgeführten VibroScan-Messungen in Gebäuden km 44.9 bis 45.7

Mittels synchronen Erschütterungsmessungen im Tunnel und in oberliegenden Gebäuden wird die Übertragungsfunktion Tunnel – Freifeld – Gebäudefundament – Decke gemessen.

Die VibroScan-Messungen erlauben eine genauere frequenzbasierte Prognose der Zugsimmissionen für den zukünftigen Betriebszustand. Bei Notwendigkeit werden die erforderlichen Schutzmassnahmen in Art und Länge genau spezifiziert.

Die Lage von Messgebäuden und Tunnelanregung zeigen die Abb.3 und 4.

Bei den Tunnelmessungen existierte das Problem, dass auf den letzten 250 Tunnelmetern die Tunnel-Innenschale noch nicht erstellt war (Positionen A bis I). Im Bereich der Tübbing-Anregung lag somit eine unterschiedliche Situation vor. Mittels sog. Kreuzmessungen konnte dieses Problem methodisch beseitigt werden.



Frequenz [Hz]	8	10	12.5	16	20	25	31.5	40	50	63	80	100	125	160	200	250
Faktor [-]	1.00	1.00	1.00	0.95	0.90	0.85	0.80	0.65	0.50	0.60	0.70	0.80	0.74	0.68	0.64	0.60

Abb. 5 Resultate der Kreuzmessung zwecks Korrektur unterschiedlicher Anregungs-Querschnitte



Die Untersuchungen im Eppenbergtunnel haben gezeigt, dass der VibroScan-Generator im Lockergesteinstunnel mit geringer Überdeckung zu starken und gut wahrnehmbaren Erschütterungs- und Körperschallimmissionen geführt hat.

Aussergewöhnlich hohe Immissionen wurden in den zwei Gebäuden Bielackerstrasse 73 und 77 gemessen. Für die hohen Immissionen in diesen zwei Gebäuden dürften die folgenden 3 Effekte verantwortlich sein:

1. die Schwingungsübertragung vom Tunnel ins Freifeld weist bei den höheren Frequenzen über 50 Hz geringe Abnahmen auf
2. der Schwingungsübergang vom Freifeld aufs Fundament zeigt Verstärkungen bei Frequenzen oberhalb 50 Hz
3. beide Gebäude verhalten sich ungünstig mit breitbandigen Verstärkungen vom Fundament auf die Decken.

Diese drei Effekte verstärken insbesondere die körperschallrelevanten Frequenzen.

Als Konsequenz der VibroScan-Messungen musste die Abstimmfrequenz des Masse-Feder-Systems auf einer Länge von 110 Metern von 11 Hz auf 7.5 Hz gesenkt werden.

Aus Gründen von Immissionsschutz und Bahntechnik wurde das tiefabgestimmte MFS auf einer Länge von 556 m realisiert. Die zwei folgenden Abbildungen zeigen die im PGV aufgelegten Schutzmassnahmen (Abb. 6) sowie die tatsächlich ausgeführten (Abb. 7).

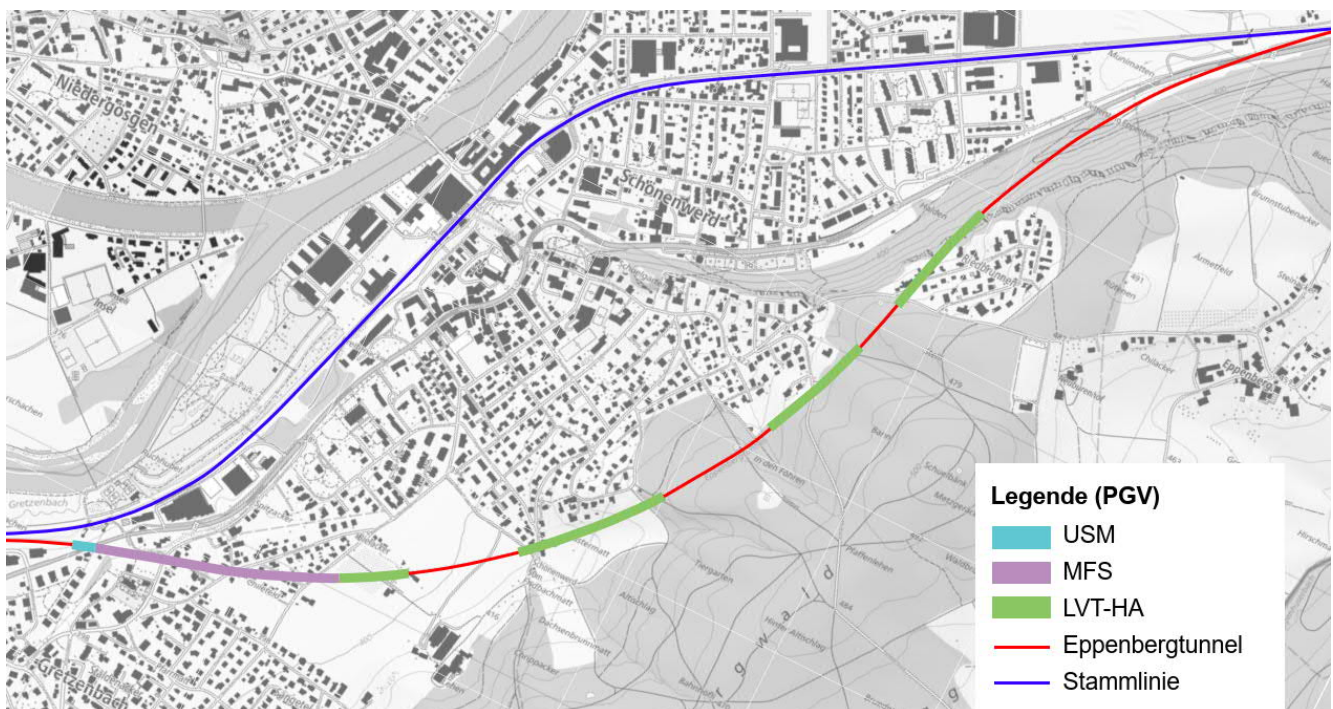


Abb. 6 Schutzmassnahmen Eppenbergtunnel gemäss Plangenehmigungs-Verfahren (PGV)

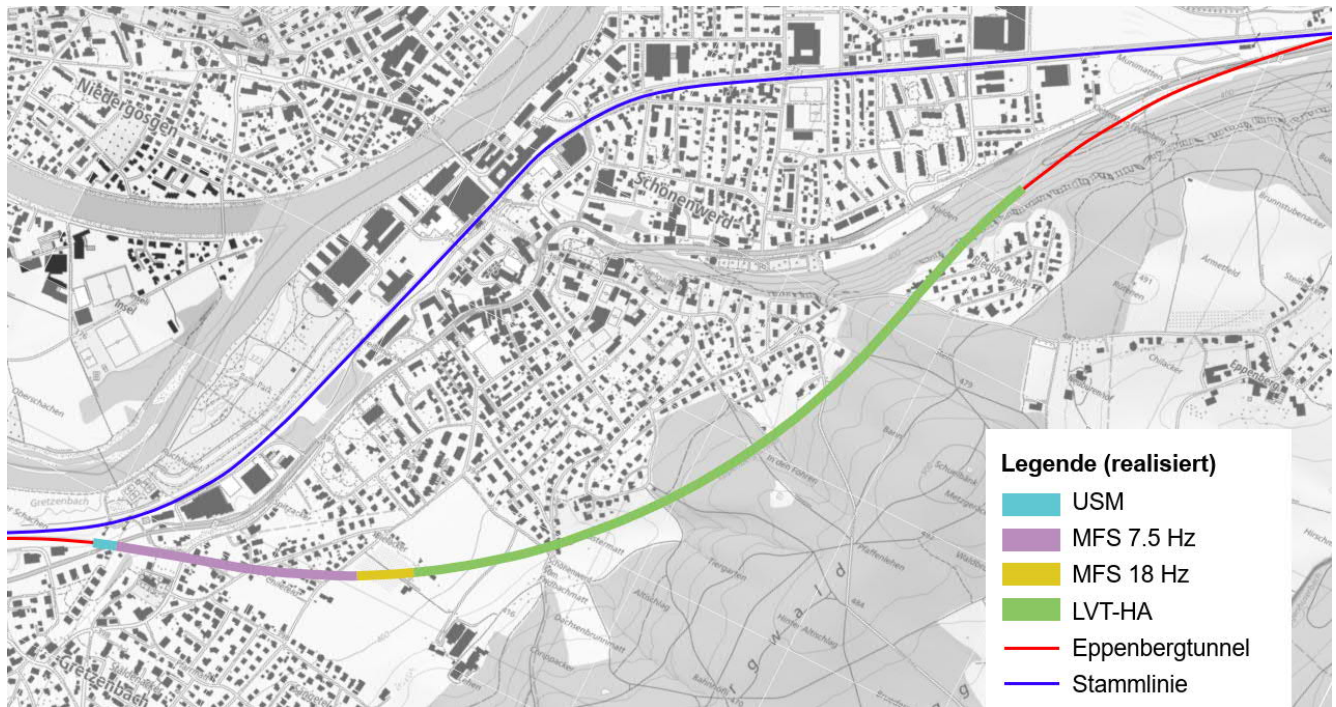


Abb. 7 Realisierte Schutzmassnahmen Eppenbergtunnel

## 4. Kontrollmessungen 2021

### 4.1 Messkonzept und Durchführung

Konzept analog VibroScan  
Messung

Die Kontrollmessungen in den Gebäuden sollen repräsentative Vergleichswerte zu den prognostizierten Werten aufgrund der VibroScan-Messungen liefern. Die Kontrollmessungen sollen Aussagen zur Einhaltung der gesetzlichen Richtwerte ermöglichen. In den Gebäuden wurden 3 Vertikalsensoren am Fundament und auf 2 Decken platziert. Parallel fand bei einem Erschütterungssensor eine Körperschallmessung statt. Um eine repräsentative Datenmenge für eine statistische Auswertung zu erhalten, wurde eine Messdauer von ungefähr 4 Stunden definiert.

Damit die Erschütterungsmessungen untereinander referenziert und mögliche Schwankungen des Zustands vom Rollmaterial der Züge verglichen werden können, wurde im Gebäude G01 eine durchgehende Langzeitmessung (24 Stunden Tag und Nacht, triaxial) über den gesamten Messzeitraum von drei Tagen durchgeführt.

Zugsprotokoll

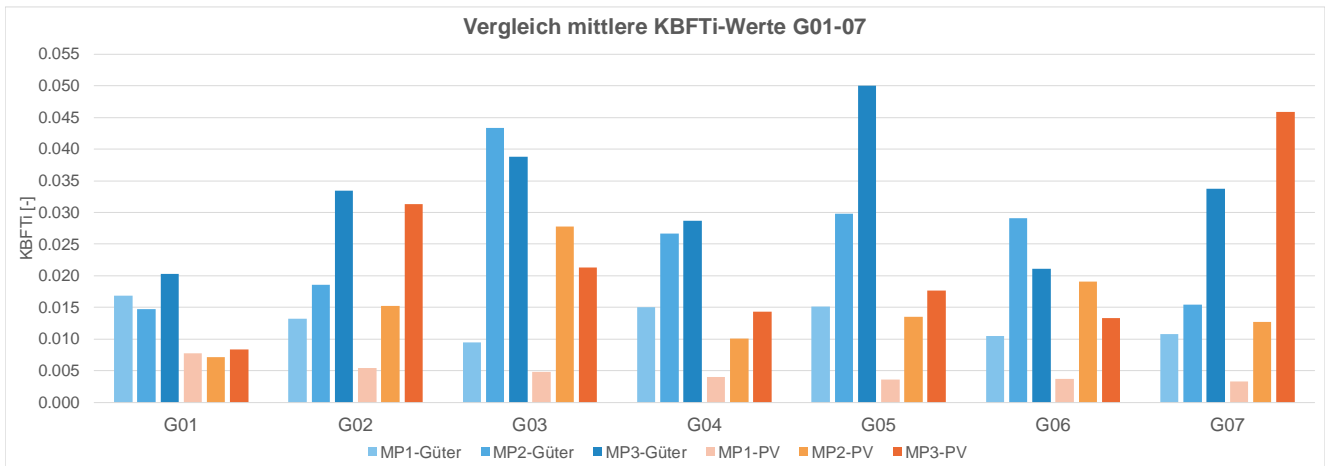
Die Erfassung der Züge erfolgte mittels infrarotfähiger Kamera. Die Kamera wurde im Portalbereich Schönenwerd aufgestellt, mehrmals am Tag kontrolliert und die Daten täglich heruntergeladen. Mit den Video-Aufnahmen konnte ein lückenloses Zugsprotokoll erstellt werden.

### 4.2 Resultate der Erschütterungsmessungen

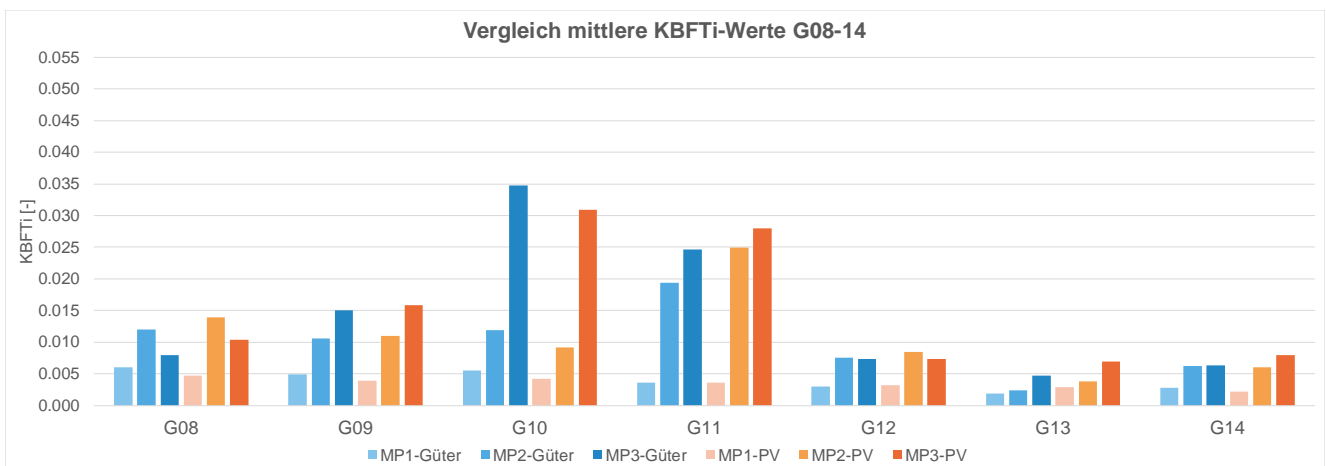
Auswertung  
Erschütterungsmessung

Von der Erschütterungsmessung wurden die  $KB_{FTI}$ -Werte gemäss DIN 4150-2 ausgewertet, wobei der Güterverkehr und der Personenverkehr (PV) unterschieden wurde.

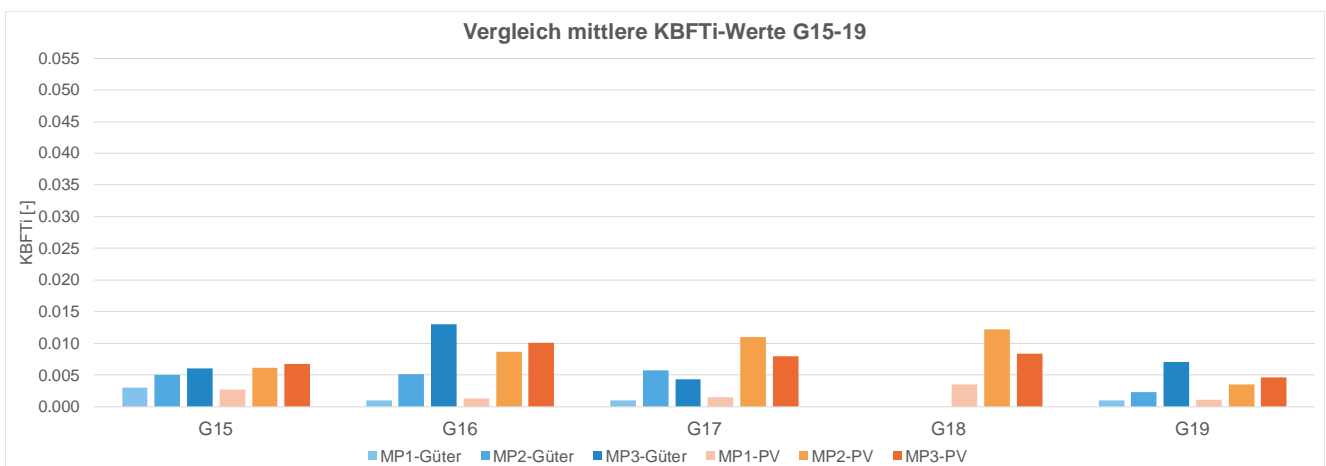
Die nachfolgenden Abbildung 8 bis 10 zeigen die Resultate der Erschütterungsmessungen anhand der mittleren  $KB_{FTI}$ -Werten ( $KB_{FTM}$ ). Die 3 Balken in den Abbildungen stehen für die Messpunkte Fundament, Decke1 und Decke2.



**Abb. 8 Vergleich mittlere KB<sub>FTi</sub>-Werte für Personen- (PV, blau) und Güterverkehr (orange) für Messpunkte G01-G07**  
 blau: Güterverkehr, orange: Personenverkehr (PV)



**Abb. 9 Vergleich mittlere KB<sub>FTi</sub>-Werte für Personen- (PV, blau) und Güterverkehr (orange) für Messpunkte G08-G14**  
 blau: Güterverkehr, orange: Personenverkehr (PV)



**Abb. 10 Vergleich mittlere KB<sub>FTi</sub>-Werte für Personen- (PV, blau) und Güterverkehr (orange) für Messpunkte G15-G19**  
 blau: Güterverkehr, orange: Personenverkehr (PV)

### 4.3 Resultate der Körperschallmessungen

Körperschall de facto nicht messbar

Im Vergleich zu den Erschütterungen war es beim Körperschall noch schwieriger, die vorbeifahrenden Züge ausfindig zu machen (von der Erschütterungsmessung war die Zeit auf die Sekunde genau bekannt). Über die Messdauer von etwa 4 Stunden waren zwischen Null und 9 Schallereignisse von Zügen identifizierbar. Die maximalen Vorbeifahrts-LEQ lagen oft um 20 dBA, der höchste Wert lag bei 30.6 dBA.

Weil die statistische Aussagekraft der Körperschallmessungen gering ist, konnten keine Zahlenwerte oder Diagramme erstellt werden.

### 4.4 Qualität der Messungen und Auswertungen

Erschütterungsmessungen

Infolge der tiefen Zugsimmissionen war einerseits die Durchführung ungestörter Messungen schwierig und andererseits die Auswertung erschwert und aufwändig. Die betroffenen Anwohner hatten i.d.R. grosses Verständnis und schränkten ihren Bewegungsradius während der Messdauer ein. Mit einer sehr sorgfältigen Triggerung war es aber möglich, in jedem Haus Züge zu messen.

Körperschallmessungen

Für die Körperschallmessung wurde das Menschenmögliche für eine brauchbare Messung gemacht. Die Messauswertung zeigte, dass die maximalen Vorbeifahrts-LEQ typischerweise im Bereich von 20 bis 30 dBA lagen. Praktisch auf diesem Niveau lag auch der Ruhepegel tagsüber für diese Häuser im Siedlungsgebiet, was entsprechend die Messauswertung (Zug/Ruhepegel) erschwerte.

Langzeitmessung Köllikerstr. 13

Die Auswertung der Langzeitmessung ergab einen konstanten Verkehr über die drei Tage. Folglich kann die Hochrechnung auf den Normzugverkehr ohne zusätzliche Korrekturfaktoren durchgeführt werden.

### 4.5 Beurteilungswerte basierend auf Messungen

Die Beurteilungswerte wurden nach aktuellem Stand der Technik berechnet.

Nachfolgende Tabelle 1 zeigt die ermittelte Beurteilungsschwingstärke ( $KB_{FT}$ ) sowie die Beurteilungswerte für den Körperschall ( $L_{KS}$ ).

Messgebäude	Zone	Tunnel-kilometer	Schutz-massnahme	$KB_{FT}$ [-] Tag	$KB_{FT}$ [-] Nacht]	$L_{KS}$ [dBA] Tag	$L_{KS}$ [dBA] Nacht
		<b>Anhalts-/PRW</b>	<b>Wohnzone</b>	<b>0.070</b>	<b>0.050</b>	<b>35.0</b>	<b>25.0</b>
G01 Köllikerstrasse 13	W	47.000	MFS 7.5 Hz	0.000	0.000	-	-
G02 Kirchenfeldstrasse 13	W	46.900	MFS 7.5 Hz	0.000	0.000	9.1	9.1
G03 Kirchenfeldstrasse 17	W	46.870	MFS 7.5 Hz	0.000	0.000	12.8	12.8
G04 Kirchenfeldstrasse 22	W	46.830	MFS 7.5 Hz	0.000	0.000	11.9	11.9
G05 Frybackerstrasse 4	W	46.780	MFS 7.5 Hz	0.008	0.011	7.7	10.3
G06 Bielackerstrasse 73	W	46.695	MFS 7.5 Hz	0.000	0.000	7.8	7.9
G07 Bielackerstrasse 77	W	46.660	MFS 7.5 Hz	0.000	0.000	16.7	16.8
G09 Frybachstrasse 15	W	46.200	LVT-HA	0.000	0.000	7.2	7.2
G10 Holzstrasse 44	W	46.185	LVT-HA	0.000	0.000	12.5	12.5
G11 Holzstrasse 25	W	46.160	LVT-HA	0.000	0.000	10.7	10.7
G12 Holzstrasse 17	W	46.130	LVT-HA	0.000	0.000	12.2	12.1
G13 Glaserweg 18	W	46.040	LVT-HA	0.000	0.000	7.4	7.4

Messgebäude	Zone	Tunnel-kilometer	Schutz-massnahme	KB <sub>FTr</sub> [-] Tag	KB <sub>FTr</sub> [-] Nacht]	L <sub>Ks</sub> [dBA] Tag	L <sub>Ks</sub> [dBA] Nacht
		<b>Anhalts-/PRW Wohnzone</b>		<b>0.070</b>	<b>0.050</b>	<b>35.0</b>	<b>25.0</b>
G14 Glaserweg 26	W	45.970	LVT-HA	0.000	0.000	7.8	7.8
G15 Rotenhof 13	W	45.610	LVT-HA	0.000	0.000	5.2	5.2
G16 Rotenhof 9	W	45.580	LVT-HA	0.000	0.000	4.6	4.6
G17 Rotenhof 17	W	45.540	LVT-HA	0.000	0.000	6.4	6.3
G18 Belchenstrasse 1	W	45.110	LVT-HA	0.000	0.000	-	-
G19 Belchenstrasse 15	W	44.970	LVT-HA	0.000	0.000	-	-
		<b>Anhalts-/PRW Mischzone</b>		<b>0.100</b>	<b>0.070</b>	<b>40.0</b>	<b>30.0</b>
G08 Obstgartenweg 2	M	46.520	MFS 18 Hz	0.000	0.000	13.4	13.4

**Tab. 1 Beurteilungswerte Erschütterungen und Körperschall für alle Messgebäude**

Legende:

KB<sub>FTr</sub>: Beurteilungsschwingstärke

L<sub>Ks</sub>: Beurteilungspegel für den Körperschall

- : keine Zugsdurchfahrt auswertbar, entsprechend keine Hochrechnung für den Körperschall (L<sub>Ks</sub>) möglich

Beurteilung Erschütterungen und Körperschall

**Sowohl bei den Erschütterungen als auch beim Körperschall sind die Anforderungen nach BEKS deutlich eingehalten.**

Anmerkung zu KB<sub>FTr</sub>

Die Beurteilungsschwingstärke KB<sub>FTr</sub> ist mehrheitlich mit 0.000 angegeben, was nicht bedeutet, dass dort keine Erschütterungen gemessen wurden. Die Deutsche Norm DIN 4150-2 schreibt, dass für die quadratische Mittelung (KB<sub>FTrM</sub>) der Vorbeifahrten (KB<sub>FTrI</sub>) sämtliche Werte unterhalb von 0.1 KB<sub>FTrI</sub> 0 zu setzen sind. Dies hat zur Folge, dass KB<sub>FTr</sub> häufig gerechnet 0.000 ergibt.

## 5. Prognose-Vergleiche

Vergleich Prognosen 2019 mit Kontrollmessungen

Der Vergleich der Hochrechnung aus den Kontrollmessungen mit den Prognosen VibroScan 2019 zeigt, dass

- \_ die gemessenen Erschütterungen immer unterhalb der 2019 prognostizierten Werte liegen
- \_ auch der gemessene Körperschall in der Regel tiefer ist als 2019 prognostiziert (die grosse Differenz Seite Westportal erklärt sich mit dem realisierten höher-wirksamen MFS), zudem besteht bei sehr tiefem Körperschall eine grössere Unschärfe bei der Messung.

Vergleich Prognosen 2013 mit Kontrollmessungen

Der Vergleich der Hochrechnung aus den Kontrollmessungen mit den Prognosen **PGV** 2013 ergibt

- \_ eine gute Übereinstimmung bei den Erschütterungen
- \_ beim Körperschall Prognosewerte 2013 die deutlich über jenen der Kontrollmessung liegen

Dies erklärt sich damit, dass die Immissionsprognosen für das PGV den ungünstigsten Fall abdecken müssen.



## 6. Tunnelmessungen in-situ

Während der Kontrollmessungen wurden im Tunnel am Bankett Erschütterungsmessungen durchgeführt. Die Lage dieser Messungen T20 bis T24 ist in Abb. 11 eingetragen. Abb. 12 zeigt Impressionen der Tunnelmessung.

Mit den Videoaufnahmen und der Zeitkorrelation konnten insgesamt 150 Züge identifiziert und den Klassen Personen- und Güterverkehr zugewiesen werden.

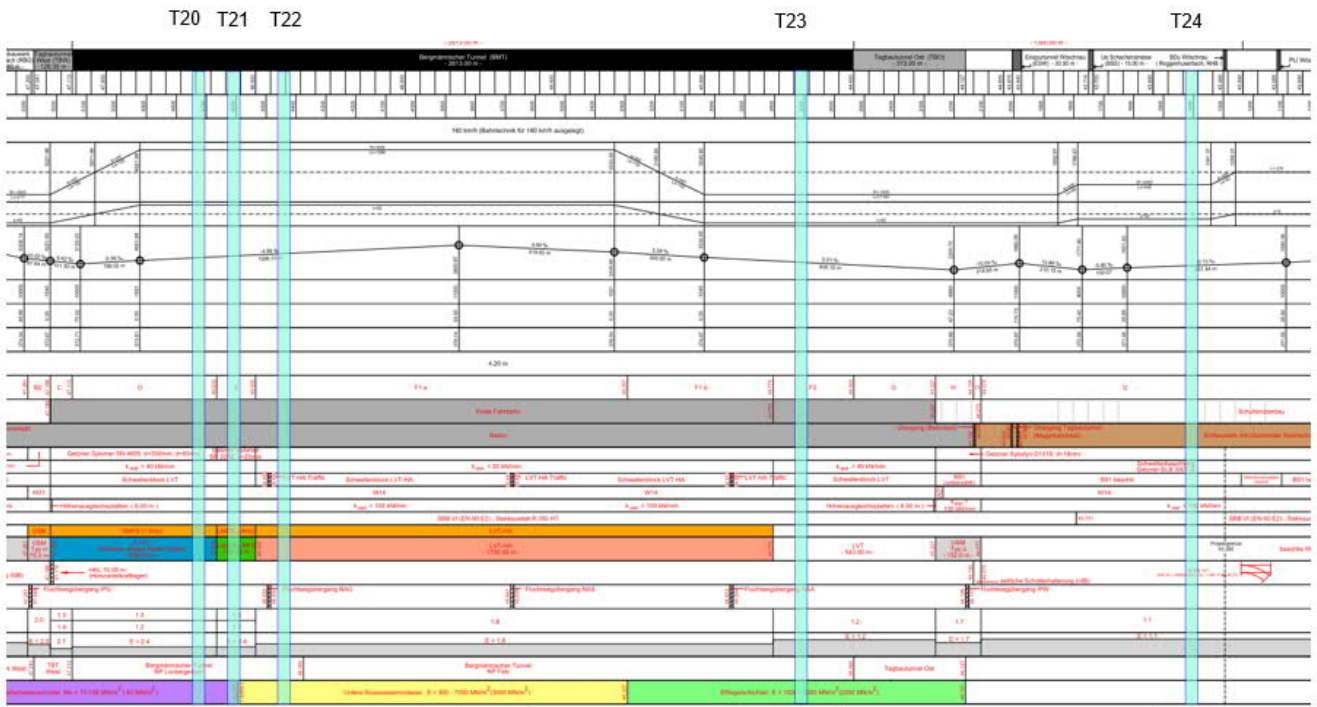


Abb. 11 Synoptischer Plan mit Messabschnitten

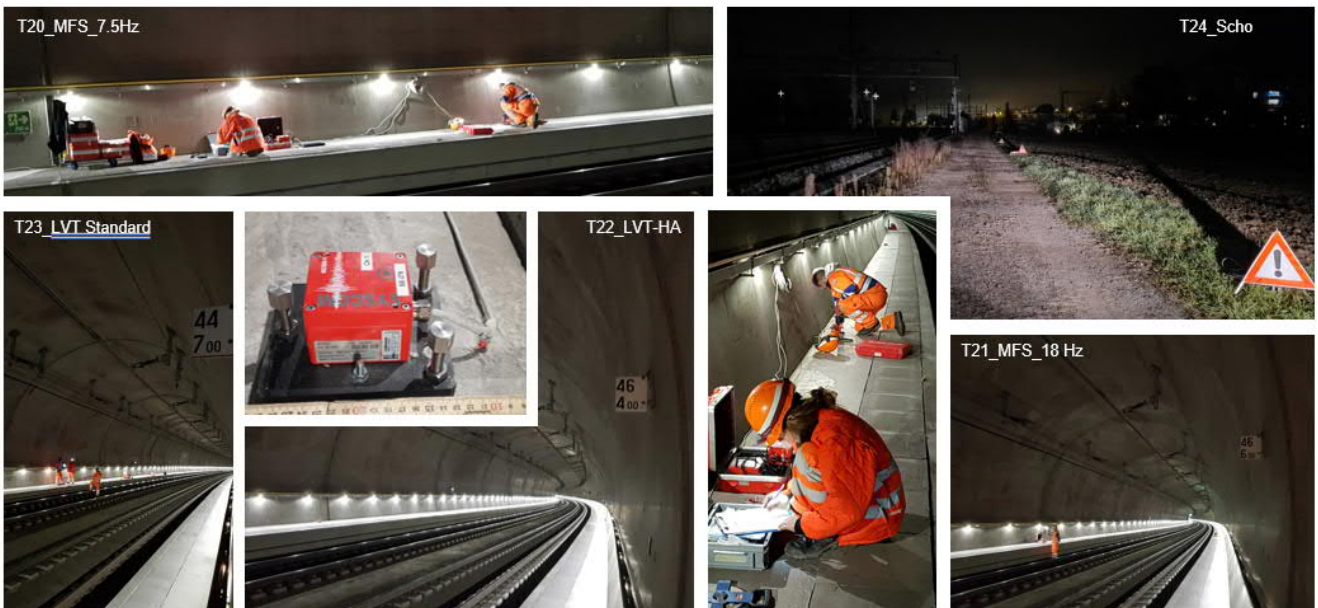
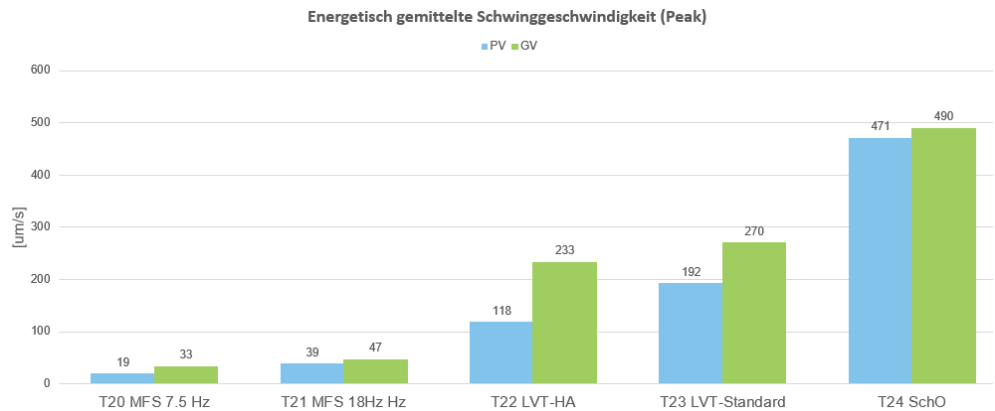


Abb. 12 Fotos zu den Tunnelmessungen

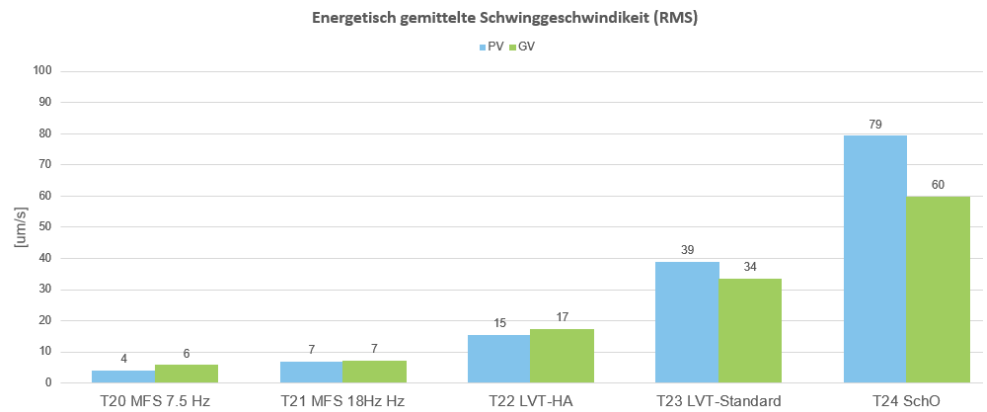


In nachfolgender Abb. 13 werden die energetisch gemittelten Schwinggeschwindigkeiten einander gegenübergestellt. Der Güterverkehr erzeugt mehrheitlich höhere Erschütterungen am Tunnelbankett.

Mittelungswerte V Peak



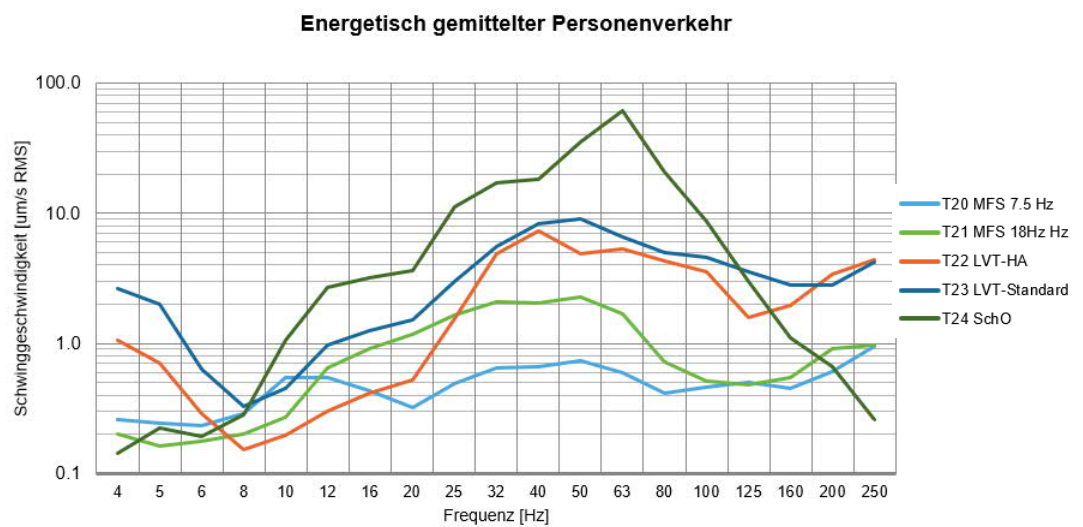
Mittelungswerte V RMS



**Abb. 13** Gemittelte Schwinggeschwindigkeiten für die 5 gemessenen Oberbauformen, obere Figur Peak-Werte, untere Figur RMS-Werte

Aus den Messungen wurden energetisch gemittelte Terzbandspektren gebildet. Sie sind in Abb. 14 für die Personenzüge dargestellt.

Mittlere Terzbandspektren am Tunnelbankett



**Abb. 14** Emissionsmessungen Tunnel und offene Strecke für Personenverkehr

Schottergleis offene Strecke

Abb. 14 zeigt für die offene Strecke (T24, **Schottergleis** in Wöschnau, Messpunkte 17.5m ab Achse Doppelspur) ein typisches Spektrum mit Spitze bei 63 Hz.

LVT-Standard als Referenz

Die blaue Kurve zeigt die Tunnelemission für Fahrbahntyp **LVT-Standard** (T23, Stützpunktsteifigkeit 40 kN/mm). Bei sehr tiefen und hohen Frequenzen >125 Hz liegt LVT-Standard über dem Schotteroberbau.

LVT-HA high attenuation

Die Fahrbahn **LVT-HA** (T22 rote Kurve, Stützpunktsteifigkeit 20 kN/mm) liefert praktisch über den gesamten Messbereich tiefere Emissionen als LVT-Standard.

MFS 7.5 Hz  
und MFS 18 Hz

Die Emissionen der beiden MFS liegen deutlich unter der Referenz LVT-Standard. Das tiefabgestimmte **MFS mit  $f_o=7.5\text{Hz}$**  (T20 hellblau) ergibt ausser im Bereich der Eigenfrequenz tiefere Emissionen als das **MFS mit  $f_o=18\text{Hz}$**  (T21 hellgrün).

Aus den Spektren von Abb. 14 kann die in-Situ gemessene Einfügedämmung bezüglich der Referenz Feste Fahrbahn Typ LVT-Standard abgeleitet werden. Sie ist in Abb. 15 dokumentiert.

Einfügedämmung bezüglich Referenz LVT-Standard

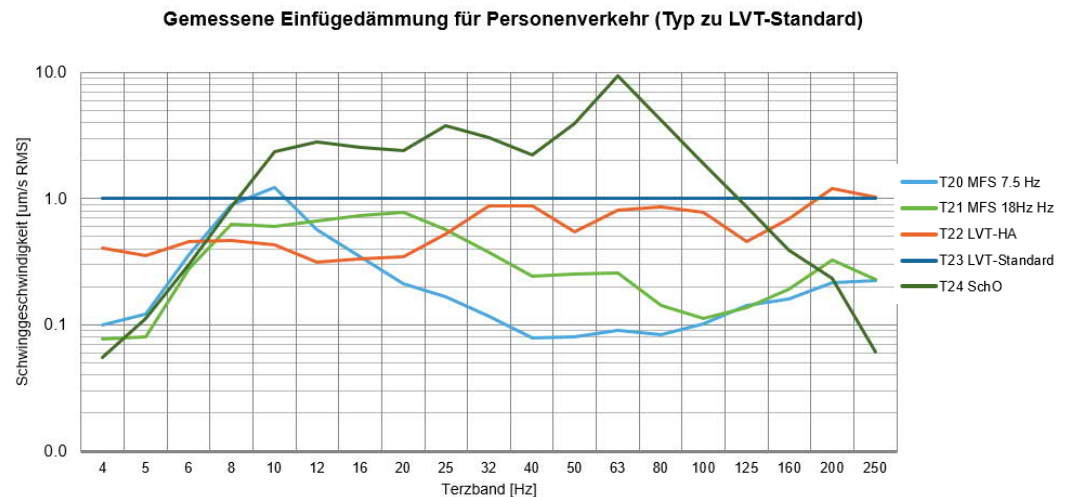


Abb. 15 Gemessene Einfügedämmungen im Eppenbergtunnel und auf offener Strecke

Diese Tunnelmessungen zeigen die Wirksamkeit der Schutzmassnahmen LVT-HA und der 2 MFS mit Abstimmfrequenzen von 18 Hz und 7.5 Hz deutlich auf.

