

23. Mai 2007

Schwellenbesohlung zur Reduktion von Körperschall-Immissionen

Kornel Köstli

SBB Infrastruktur, Umwelt

Inhalt

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | Einleitung | 1 |
| 2. | Einbauten von besohnten Schwellen bei der SBB | 3 |
| 2.1. | Zimmerbergtunnel | 3 |
| 2.2. | Überdeckung Rüdtingen | 9 |
| 2.3. | Spurwechsel Rubigen..... | 11 |
| 2.4. | Tunnelportal Leuk..... | 12 |
| 3. | Aktueller Stand | 15 |

1. Einleitung

Ein fahrender Zug verursacht mechanische Schwingungen, welche über den Boden auf das Gebäudefundament und von dort über Mauern auf die Wohnräume übertragen werden. Böden und Decken werden zu Vibrationen angeregt. Spürt der Mensch ein Erzittern des Fussbodens oder der Wände, so spricht man von **Erschütterungen**. Die sich durch den Boden ausbreitenden Schwingungen können in gleisnahen Gebäuden Immissionen hervorrufen, die für die Gebäude selbst kaum von Bedeutung sind, jedoch vom Menschen wahrgenommen werden.

Abgestrahlter Körperschall entsteht in geschlossenen Räumen als Folge höher frequenter Anteile von Erschütterungen. Dabei regen flächige Bauteile wie Wände, Decken oder Böden durch Vibrationen die Luft zu einem hörbaren Geräusch an. Der Mensch nimmt den abgestrahlten Körperschall als dumpfes Grollen wahr. Der Körperschall kann bei offener Streckenführung teilweise durch den direkten, von aussen her kommenden Luftschall überlagert werden.

Der Einsatz von **besohlenen Beton- und Holzschwellen** wird bei der SBB durch verschiedene Interessensbereiche gefördert. Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Bereiche sowie die damit verbundenen Ziele beim Einbau von besohlenen Schwellen.

| | |
|---------------------------------|--|
| Erschütterungs- schutz | Reduktion des abgestrahlten Körperschalls um 6dB Reduktion der tief frequenten Erschütterungen? |
| Unterbausanierung verhindern | Reduktion der dynamischen Beanspruchung des Untergrundes |
| Gleislage verbessern | Reduktion der Unterhaltskosten |
| Schotter schonen | Ersatz für Unterschottermatten |

Interessensbereiche und deren Ziele beim Einbau von Schwellenbesohlungen

Es hat sich in den letzten Jahren gezeigt, dass einzig der Erschütterungsschutz möglichst weiche Schwellenbesohlungen anstrebt. Damit besteht trotz dem regen Interesse an dem neuen Oberbauelement tendenziell wenig Unterstützung für besohlte Schwellen als Erschütterungsschutz.

Die im folgenden Kapitel zusammengestellten Einbauten von Schwellenbesohlungen zum Schutze der Anwohner vor Erschütterungen respektive abgestrahltem Körperschall, sollen beispielhaft das Potential der Technik aber auch deren Nachteile und welche Fragen für den regulären Einbau noch zu lösen sind, aufzeigen.

2. Einbauten von besohnten Schwellen bei der SBB

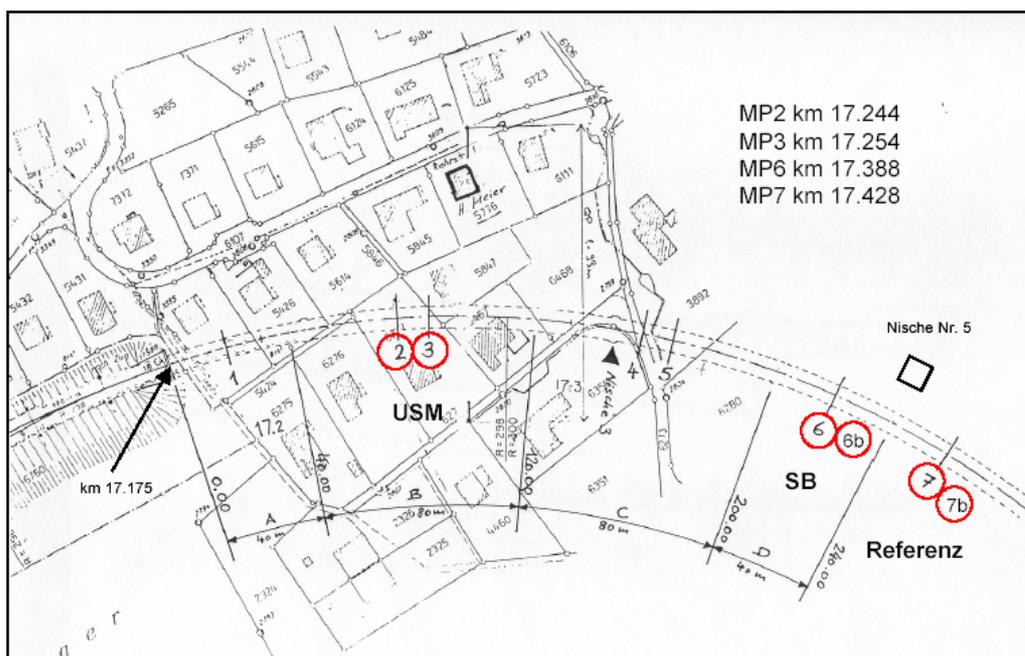
2.1. Zimmerbergtunnel

1985 wurden im alten Zimmerberg-Scheiteltunnel beim Portal Horgen-Oberdorf Unterschottermatten (USM), Pneumatten (auch USM) und eine Schwellenbesohlung (SB) eingebaut. Die Massnahmen wurden zum Schutz, der sich über dem Tunnel befindenden Häuser, eingebaut. Die Wirkung der USM und der SB wurden nach dem Einbau 1986 mit Probefahrten einer Re4/4 und Erschütterungsmessungen kontrolliert und ausgewertet.

Im Rahmen des Innovationsprojekts Schwellenbesohlung wurden im Jahre 2004 bei der SBB verschiedene Untersuchungen durchgeführt: Wiederholung der Erschütterungsmessung im Regelverkehr, Gleiseinsenkungsmessung, Auswertung von Messwagenfahrten über die letzten fünf Jahre, Schotter- und Besohlungsproben.

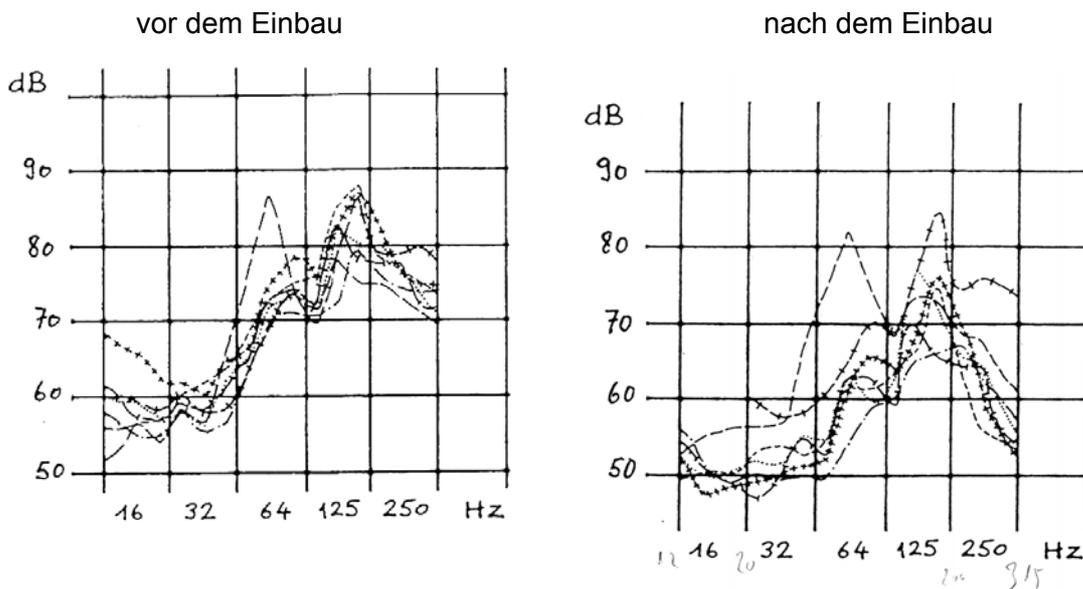
2.1.1. Situation

Im Tunnel bei Horgen-Oberdorf handelt es sich um Schotteroberbau mit Holzschwellen. Der Kurvenradius beträgt 300 Meter, die Schotterstärke ca. 35 cm. Die Gleise wurden im Jahr 2000 ersetzt. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt 80 km/h (Kurvenradius 300m, Überhöhung 140mm). Das Rollmaterial setzt sich aus IC (Doppelstock und EW4), S-Bahn Zürich Kompositionen (EW II) und Güterzügen zusammen. Die einspurige Linie zwischen Zürich und Zug ist mit ca. 71 GBRT pro Tag stark belastet.



Das Verhältnis von dynamischem zu statischem Bettungsmodul beträgt im Frequenzbereich 1 bis 20 Hz 1,6 bis 1,9.

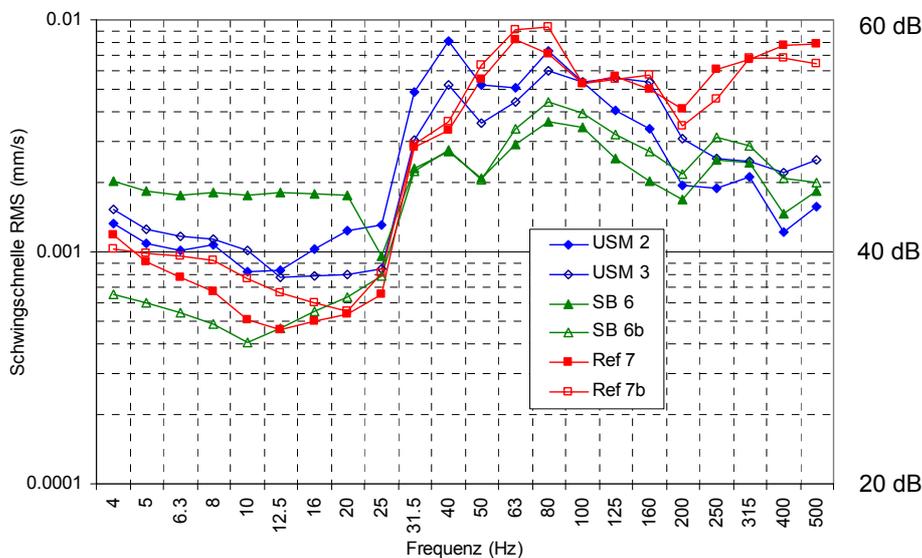
Erschütterungsdämmung



Vertikale Erschütterungsmessungen auf dem Bankett von 1986 vor und nach dem Einbau der Massnahmen: Terzbandspektren der Mittelwerte der Zugdurchfahrten einer Re 4/4 (mit Flachstelle) aller 7 Messpunkte :1 Referenz in Portalnähe (anderes Spektrum => keine gute Referenz), 2 und 3 für USM, 4 und 5 für Pneumatten, 6 für SB und 7 für die Referenzmessung. Die Messung hat vor dem Schleifen der Schienen stattgefunden. ($L_v(dB)=20\log(v/10^{-5}mm/s)$)

| Legende | Messquerschnitte |
|-----------------|------------------|
| — — — — — | 1 |
| - - - - - | 2 |
| + + + + + | 3 |
| | 4 |
| — — — — | 5 |
| — . — . — . — . | 6 |
| + + + + + | 7 |

(bei grosser Streuung unterbrochen)



Vertikale Erschütterungsmessung auf Bankett 2004: Terzbandspektren der Mittelwerte über alle Zugdurchfahrten der 6 Messpunkte: 2 und 3 in blau für USM, 6 und 6b in grün für SB und 7 und 7b in rot für die Referenzmessungen ($L_v(\text{dB})=20\log(v/10^{-5}\text{mm/s})$)

Die Messung 19 Jahre nach Einbau ergibt tendenziell tiefere Dämmwerte als die erste Messung nach dem Einbau. 1986 ergaben die Vorher-/Nachhermessung, sowie der Vergleich mit Messpunkt 7 eine Dämmung von 10 bis 12 dB für USM und SB. 2004 waren nur noch die Vergleiche der Querprofile möglich. Dabei resultierte gemäss eine Dämmung von noch ca. 6 dB für USM und SB (d.h. eine Halbierung der Werte im höherfrequenten emissionsrelevanten Frequenzbereich), wobei für die USM eher noch tiefere Werte gelten.

Für die kleineren Dämmwerte von 2004 gibt es folgende Erklärungen:

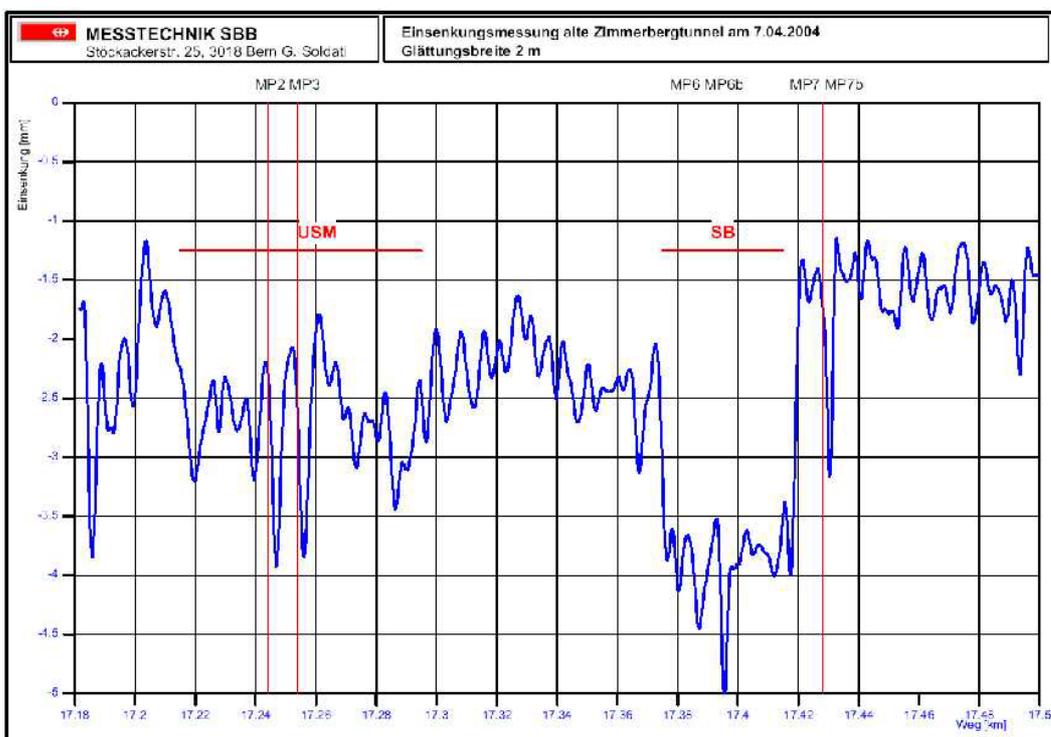
1. Die Werte von 1986 sind absolut viel höher als 2004, weil bei ungeschliffenen Schienen und mit einer Re4/4 mit Flachstelle gemessen wurde. Die Nachmessung von 1986 nach dem Schienenschleifen ergab Werte um bis zu 10dB tiefer (allerdings ohne Querschnitt 7). Bei höheren Emissionen sind (nicht lineares Verhalten vorausgesetzt!) auch grössere Dämmwerte nahe liegend. Darüber gibt es aber noch wenige Untersuchungen.
2. Einfluss Rollmaterial: 1986 wurde mit einer Re4/4 gemessen, welche eine höhere unabh. gefederte Radsatzmasse als das durchschnittliche Rollmaterial bei der Messung von 2004 unter Normalbetrieb aufweist. Damit erhöht sich (gemäss Theorie) auch die Dämmwirkung.
3. Erhöhte Kontaktfläche zwischen Schotter und Matte: Beim Ausbau im 2004 wurden deutliche Eindrücke auf der SB festgestellt. Das heisst die Kontaktfläche der beiden Materialien hat sich vergrössert. Damit ergibt sich bei gleichem Materialwert ein höheres Bettungsmodul (oder eine grössere Federkonstante). Dies erniedrigt die zu erwartende Dämmwirkung.
4. Ermüdung der elastischen Materialien (Die Messung des Bettungsmodul der SB bei der Empa von 2004 ergab allerdings noch ausgesprochen tiefe Werte; vgl. oben.)

Punkte 1. und 2. sagen aus, dass die tieferen Dämmwerte nur durch die verschiedene Situation der beiden Messungen zustande kamen. Punkte 3. und 4. sagen aus, dass die Dämm-

werte tatsächlich tiefer wurden. Inwieweit die Dämmung sich in den 18 Jahren tatsächlich verschlechterte kann mit diesen Untersuchungen nicht abschliessend beantwortet werden.

Der Einfluss verschiedener Zugkategorien (DoSto/S-Bahn/Güterzüge) spielte in der Messung von 2004 eine untergeordnete Rolle. Die Dämmwerte waren weitgehend unabhängig von der Zugkategorie.

2.1.2.1. Verhalten des Oberbaus

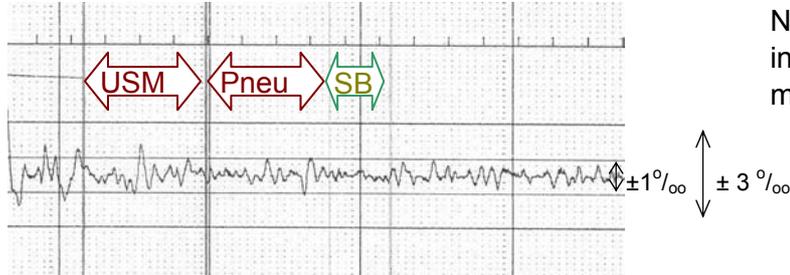


Schienen-Einsenkungsmessung 2004 unter einer 20-t-Achslast. Die Pneumatten befinden sich im Bereich zwischen USM und SB.

Zur Beurteilung der eingebauten Massnahmen leistet der Einsenkungsmesswagen der SBB wertvolle Dienste. Die eingebauten USM sind tendenziell weicher als die Pneumatten. Die SB mit einer durchschnittlichen Einsenkung von 3.5 bis 4 mm sind sehr weich. Sie bewirken eine Zusatzeinsenkung von ca. 2 bis 2.5 mm.

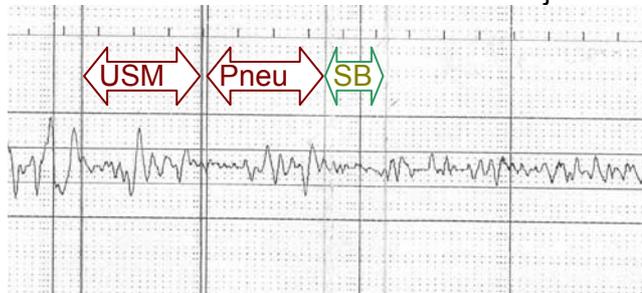
Für die Beurteilung der *Gleislagestabilität* wurden die noch vorhandenen Messwagendiagramme der Jahre 1986 und 2000 bis 2003 ausgewertet. Am aussagekräftigsten erwies sich die unten wiedergegebene Verwindung der Schienen. Als Beispiel werden hier zwei typische Messungen angegeben.

2001 Zustand nach Einbau neuer Schienen



Nach B1 liegen alle Bereiche in der Kurve (ausser bei USM) mit Verwindungen $< 1‰$.

2002 Keine Oberbau-Massnahmen zum Vorjahr



Ausser bei den SB ist in allen Bereichen eine Verschlechterung der Gleislage gegenüber dem Vorjahr erkennbar.

Damit zeigt der Bereich der Pneumatten eine schlechte Gleislage-*Stabilität*. Im Bereich der USM ist eine Störung enthalten, die nicht unbedingt mit der USM in Zusammenhang gebracht werden kann. Die Gleislage-*Stabilität* ist aber auch neben der Störung nicht optimal. Der Bereich mit SB zeigt eine hervorragende, sowie auch sehr stabile Gleislage.

Im Versuchsbericht von 1986 wurde festgestellt, dass sich der Bereich mit SB weniger gesetzt hatte, was mit der obigen Einschätzung übereinstimmt. Weiter wurde 1986 eine signifikant verminderte *Riffelbildung* auf dem gesamten Versuchsabschnitt (USM und SB) im Vergleich zur übrigen Tunnelstrecke festgestellt.

2.1.3. Zusammenfassung der Erfahrungen / Messungen

USM, Pneumatten und SB zeigen etwa die gleiche Dämmwirkung beim Erschütterungsschutz nach dem Einbau. Pneumatten kommen aber wegen der schlechten Gleislage(-stabilität) für die zukünftigen Einbauten nicht in Frage. Die SB weist eine deutlich bessere Gleislage(-stabilität) als die USM auf. Um aber die gleiche Dämmwirkung wie die USM zu erreichen, ist die SB sehr weich und weist eine sehr grosse Schieneneinsenkung auf. Dadurch entsteht eine zusätzliche Belastung für die Schiene. Daraus sind den SBB bis jetzt aber keine zusätzlichen Probleme / Kosten entstanden. Im Tunnel (gleichmässiges Klima) wurde die Sicherheit nicht beeinträchtigt.

19 Jahre nach dem Einbau haben sich die Dämmwirkungen eher verschlechtert. Die SB zeigt mit 6dB die noch beste Wirkung. Inwieweit dies auf heutige Einbauten/Materialien übertragen werden kann, ist ungewiss und kann nur durch neue Einbauten von SB bestimmt werden.

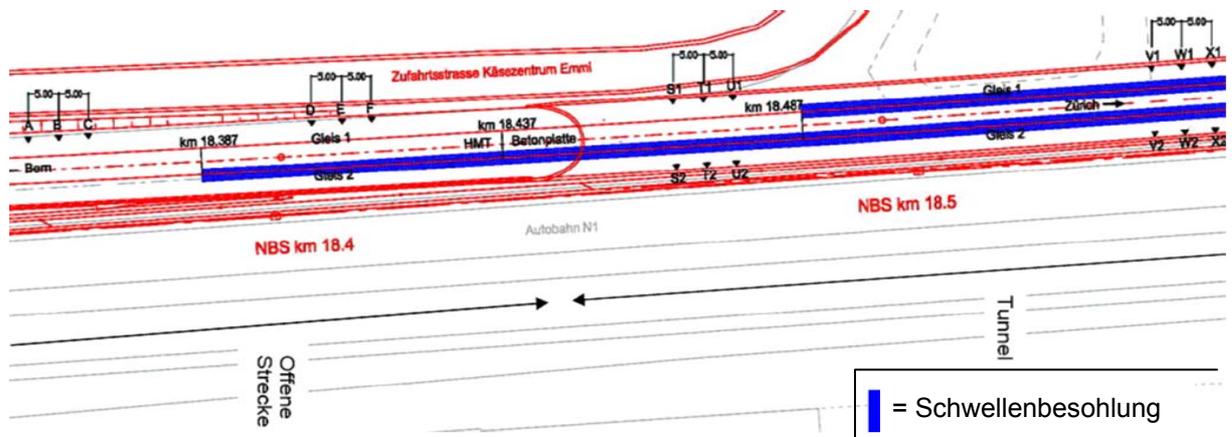
2.2. Überdeckung Rüttlingen



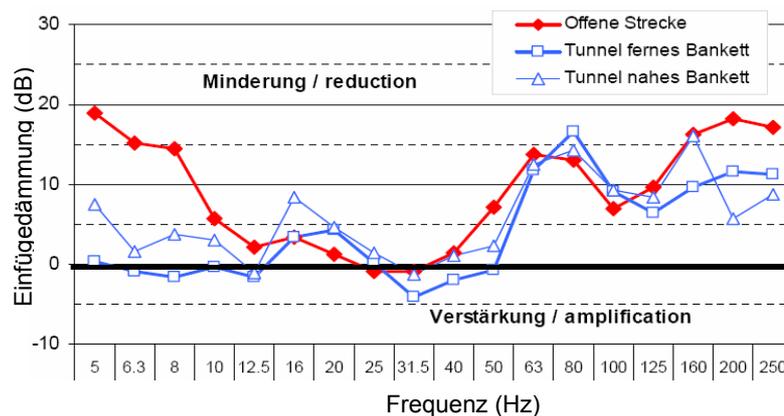
*NBS beim Tunnel
Rüttlingen mit
Messstandorten im
Freien.*

Auf der Neubaustrecke Mattstetten – Rothrist befindet sich die Überdeckung Rüttlingen. Hier wurden gemäss folgendem Diagramm Schwellenbesohlungen absichtlich teilweise nicht im Tunnel und teilweise auf offener Strecke eingebaut, damit später unter Betrieb die Wirkung von Schwellenbesohlungen nachgewiesen werden kann.

Beim Oberbau handelt es sich um eine konventionelle Schotterfahrbahn mit der Betonschwelle B91 und dem Schienenprofil UIC 60. Für die Besohlung wurde der Typ SLS 1308 von Getzner verwendet. Die Werksangabe für den statischen Bettungsmodul beträgt 0.13 N/mm^3 .



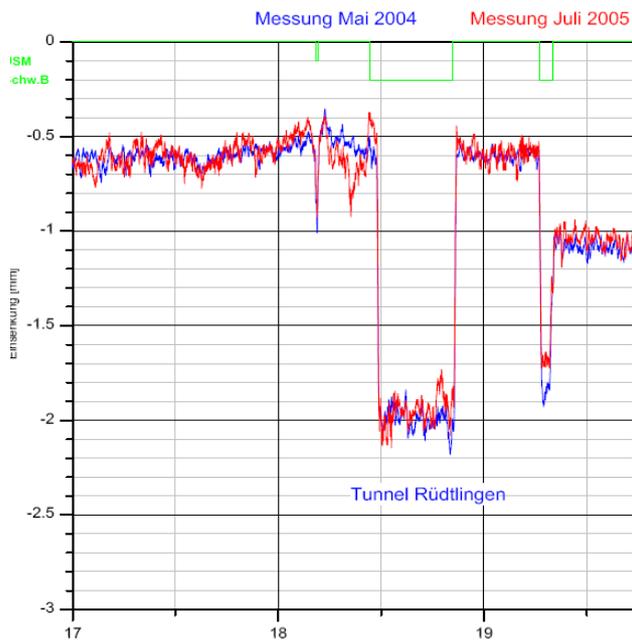
Durch den Vergleich der Messungen bei den Sensoren A, B, C mit den Sensoren D, E, F konnte die Wirkung für die offene Strecke untersucht werden, dito der Vergleich S, T, U mit V, W, X für die Tunnelstrecke (Überdeckung).



Wirkung der Schwellenbesohlung.

Gemessen wurden Personenzüge, zusammengesetzt mit EW IV oder Doppelstockwagen und der Re 460 bei Geschwindigkeiten zwischen 150 und 160 km/h. Die Messungen zeigen eine Wirkung der Besohlung, die die Erwartungen klar übertraf. Im für den abgestrahlten Körperschall relevanten Bereich oberhalb 50 Hz ergibt sich eine Dämmung von 8 bis 15 dB. Bei den tiefen Frequenzen unterhalb 50 Hz gibt es kaum eine Verstärkung, unterhalb 30 Hz resultiert sogar nochmals eine Reduktion von bis zu 4 bis 6 dB. Tunnel und offene Strecke verhalten sich sehr ähnlich.

Zur Gleislage gibt die Messung der Schieneneinsenkung unter 20 t Achslast mit dem SBB-Messwagen erste Auskünfte für die Neubaustrecke. Der Ausschnitt mit dem Tunnel Rüdtingen zeigt, dass die Einsenkung ca. 1.9 mm beträgt. Der Wert liegt relativ nahe beim Idealwert von ca. 1.5 mm. Die zusätzliche Einsenkung gegenüber dem Gleis ohne Besohlung beträgt ca. 1.2 mm.

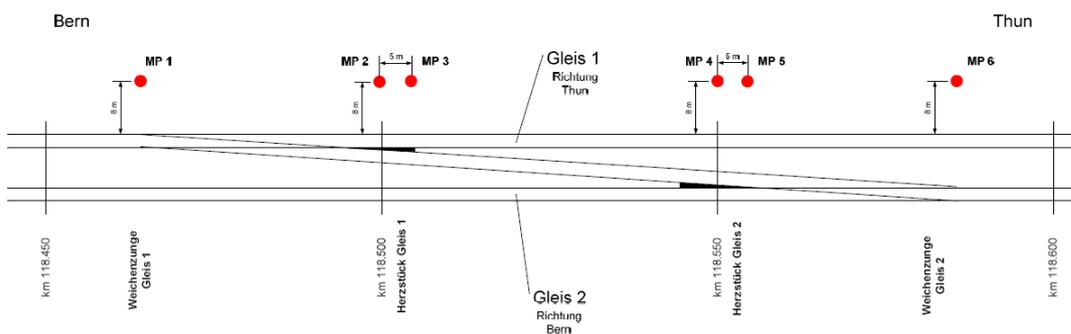


Ausschnitt aus den Schieneneinsenkungsmessungen mit einer Achslast von 20t.

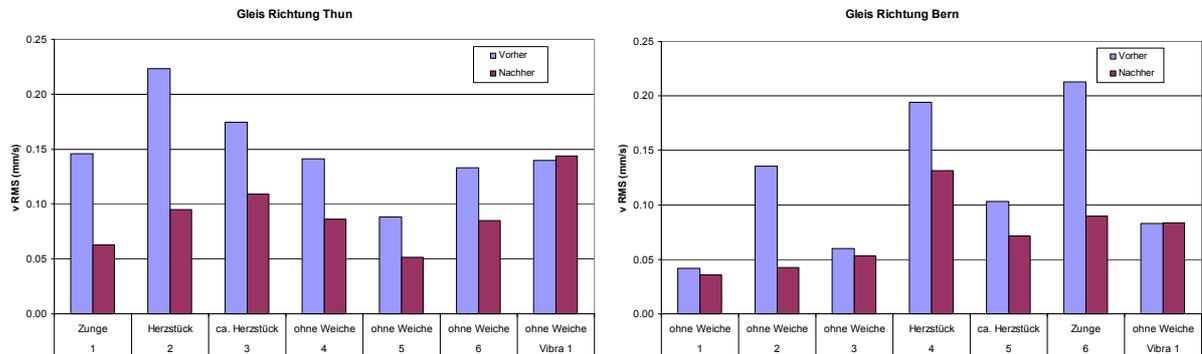
2.3. Spurwechsel Rubigen

Beim Wechsel von Holz- auf Betonschwellen hat die SBB im Jahr 2004 wegen schlechtem Untergrund besohlte Betonschwellen eingebaut. Die Besohlung SLS 2210 von Getzner weist ein statisches Bettungsmodul von 0.22 N/mm^3 auf und ist damit für den Erschütterungsschutz eher als zu hart einzustufen.

Für die Vorher-/Nachhermessung wurden folgende 6 Messpunkte im Abstand 8 Meter zum näher gelegenen Gleis verwendet.



Beim Rollmaterial handelt es sich um gemischten Verkehr: Güterzüge im Bereich 80 km/h, Regionalzüge bei ca. 100 km/h und Schnellzüge bei ca. 150 km/h. Die Messungen wurden mit der Vibra 1 Prognose verglichen.



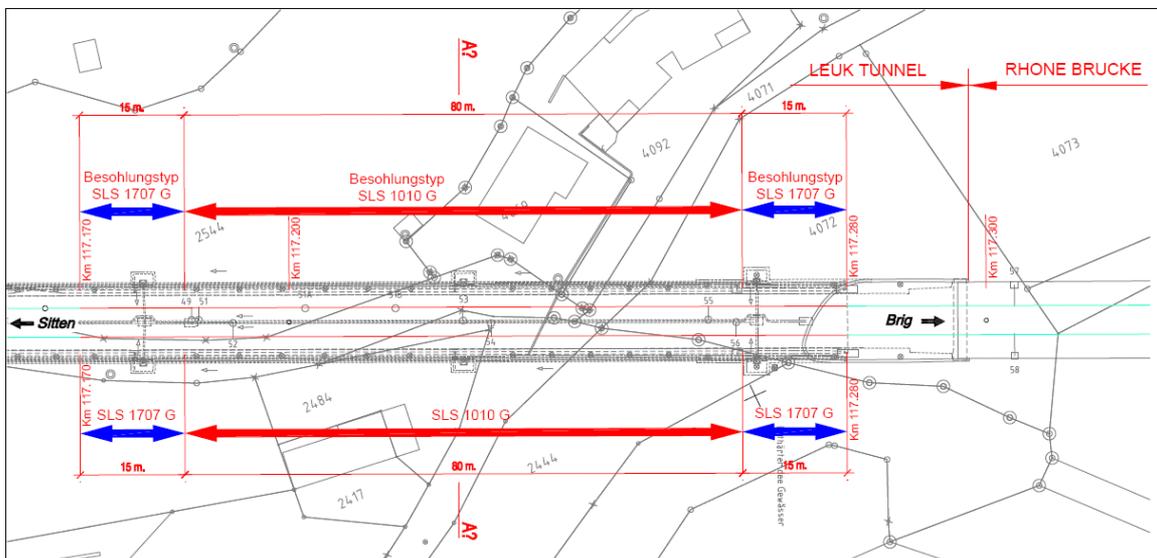
Für alle Messpunkte wurde durch die Oberbauerneuerung mit dem Wechsel von Holzschwellen auf beschlote Betonschwellen eine deutliche Reduktion gemessen. Im Mittel reduzierten sich die Messwerte bei den Weichen um den Faktor 1.95, bei der Strecke ohne Weiche um 1.70.

Alter Oberbau ohne Weiche erzeugt etwa gleich grosse Erschütterungswerte wie neuer Weichenoberbau mit (relativ hart) beschlotten Betonschwellen. Wenn Prognosen auf Messungen basieren mit einem Oberbau ohne Weichen „alt“, dann kann für die Prognose von neuen Weichen mit beschlotten Betonschwellen in Zukunft auf einen Weichenzuschlag verzichtet werden. Das Vorgehen wird sich in der Praxis noch bestätigen müssen.

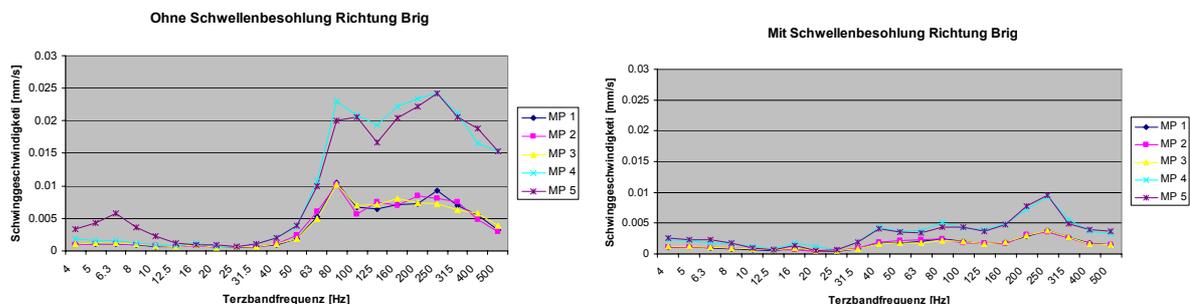
2.4. Tunnelportal Leuk

Auf der Strecke Lausanne–Brig hat die SBB im Rahmen von Bahn 2000 den letzten Einspurabschnitt zwischen Leuk und Salgesch durch eine Doppelspur ersetzt. So wurde mit der Eröffnung im November 2004 auch ein neuer Tunnel unterhalb von Leuk in Betrieb genommen. Die Züge passieren heute die begradigte Strecke mit Geschwindigkeiten bis 160 km/h.

Zum Schutze der Gebäude über dem Tunnelportal vor abgestrahltem Körperschall, hat sich die SBB zum nachträglichen Einbau von beschlotten Betonschwellen entschieden. Das folgende Diagramm gibt einen guten Überblick des Einbaus mit dem Typ SLS 1010 von Getzner. Dieses Material weist einen statischen Bettungsmodul von 0.1 N/mm^3 auf. Die relative weich beschlote Strecke wurde beidseits mit einer je 15 Meter langen Übergangsstrecke versehen. Der Bettungsmodul auf der Übergangsstrecke beträgt (SLS 1710) 0.17 N/mm^3 .



Emissionsmessungen im Tunnel wurden vor und nach dem Einbau auf beiden Bankett durchgeföhrt. Die Messpunkte 1, 2 und 3 befanden sich auf dem Bankett beim Gleis Richtung Sitten, die Messpunkte 4 und 5 auf dem Bankett beim Gleis Richtung Brig.

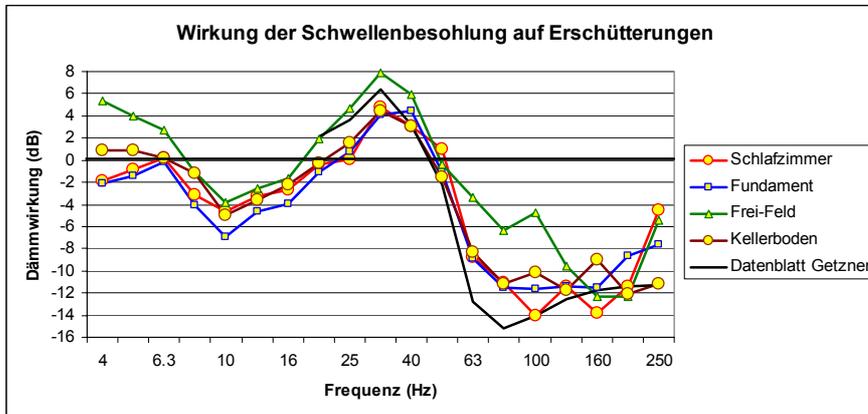


Der Vergleich zwischen den MP 1, 2 und 3 sowie zwischen den MP 4 und 5 zeigten die relativ geringe Streuung verschiedener Messpunkte auf dem gleichen Bankett. Damit ist die Reproduzierbarkeit der Messung bezüglich Ort auf dem Bankett gegeben.

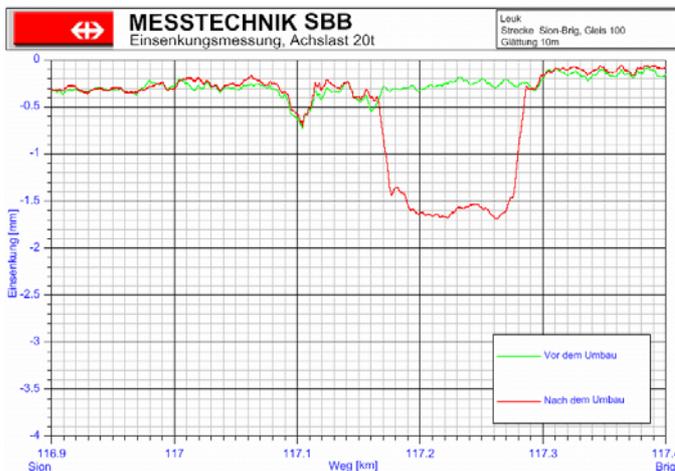
Die Differenz zwischen den MP 1, 2 und 3 und den MP 4 und 5 zeigt die Ausbreitungsminde- rung durch die zusätzliche Distanz vom Gleis Nord zum Bankett Seite Süd gegenüber Ban- kett Seite Nord.

Der Vergleich der beiden Diagramme zeigt die starke Verminderung der Emission im hier entscheidenden Frequenzbereich oberhalb 50 Hz durch den Einbau der Schwellenbesoh-

lung. Die Reduktion entspricht je nach Messpunkt im Tunnel einer Minderung um einen Faktor 2.3 bis 3 oder in Dezibel einer Minderung von 7 bis 9.5 dB.



Die Immissionsmessungen im und vor dem nächsten Gebäude durchgeführt durch das Büro Ziegler Consultants ergaben in etwa die gleichen Werte wie die Messungen im Tunnel. Die Messungen bestätigen auch in etwa die Prognosen des Lieferanten für die Besohlung.



*Ausschnitt aus den Schienen-
einsenkungsmessungen mit
einer Achslast von 20t vor und
nach dem Einbau von Schwellen-
besohlungen*

Zur Überprüfung des Einbaus und Untersuchung der Gleislage wurde auch diese Pilotstrecke mit dem Einsenkungsmesswagen vor und nach dem Umbau ausgemessen. Für den Einbau in Leuk gibt der Messschrieb eine zusätzliche Einsenkung von ca. 1.2 mm.

Je nach Situation kann eine zusätzliche Einsenkung von mehr als einem Millimeter Probleme bereiten. Durch den harten Unterbau im Tunnel und den wenig nachgebenden Betonschwellen im Vergleich zu Holzschwellen ist die Einsenkung aber vor dem Einbau mit ca. 0.3 bis 0.4 mm sehr gering. Damit ist die totale Einsenkung von 1.6 mm noch kaum problematisch.

3. Aktueller Stand

Mehrere Teststrecken mit besohlenen Schwellen wurden bei der SBB ausgemessen und werden laufend unter Betrieb getestet. Die Vielfalt der Situationen (Schwellentyp, Kurvenradius, Geschwindigkeit, Rollmaterial, usw.) erfordert eine Vielzahl solcher Piloteinbauten. Mit den Ergebnissen bis heute hat sich eine klare Tendenz für die Prognose der **Wirkung von Schwellenbesohlungen gegen Erschütterungen** und insbesondere **abgestrahltem Körperschall** ergeben. Die Wirkung für Holz- oder Betonschwellen, der Einsatz bei Weichen zeigt eher bessere Werte, als man ursprünglich erwartete. Damit wurde der Einsatz von besohlenen Schwellen im Erschütterungsschutz durch die SBB stark gefördert.

Aus Sicht der **Fahrbahnspezialisten** bestehen aber nach wie vor verschiedene Lücken im Wissen um die neue Oberbaukomponente. Weitere Messungen (nebst der Verwindung der Gleise und der Einsenkung unter 20 t Achslast) zeigen, dass

- der Querverschiebewiderstand der Schwellen abnimmt,
- die Beschleunigungen der Betonschwelle zunehmen,
- das Biegemoment der Betonschwelle abnimmt,
- die Schienenfussspannung zunimmt

bei der Besohlung von Schwellen. Diese Veränderungen müssen weiterhin genau beobachtet und auf ihre Langzeitauswirkungen analysiert werden.

Eine weitere Einschränkung der Anwendung von besohlenen Schwellen ergibt sich durch die gemessene Erhöhung des **Direktschalls** bei verschiedenen Einbauten auf offener Strecke.

Die neusten Resultate vom Einbau von weichen Schwellenbesohlungen auf der offenen Strecke bei **Pratteln** bestätigen den oben erwähnten Eindruck sowohl positiv bei der Wirkung gegen die Erschütterungen, wie auch negativ bei den (noch vorhandenen) Problemen beim Oberbau und Direktschall.

Erste Resultate der **Langzeitsimulationen** für die Belastung von besohlenen Betonschwellen – welche aktuell im Gang sind - zeigen für weiche Besohlungen möglicherweise Probleme auf, welche noch zu lösen sind, bevor das neue Oberbauelement in der Schweiz als Regeloberbau mit Typenzulassung durch das Bundesamt für Verkehr gelten kann.

Literatur

Der Dokumentation der Pilotstrecken liegen diverse Mess- und Untersuchungsberichte zu Grunde:

- [1] Interner Bericht der SBB: „19 Jahre Erfahrungen mit USM und SB im Zimmerberg Scheiteltunnel“, Bern, 26.09.05
- [2] Rutishauser Ingenieure: „Schwellenbesohlung, Bestimmung des Einfügedämm-Masses, Neubaustrecke Mattstetten-Rothrist“, im Auftrag der DB AG / UIC, 23.01.07
- [3] Interner Bericht der SBB: „Weichen mit Schwellenbesohlung in Rubigen, Auswertung der Erschütterungsmessungen“, Bern, 21.02.07
- [4] Publikation der SBB in der Schweizer Eisenbahn-Revue: „Elastische Lagerung von Schwellen gegen Bahnerschütterungen – ein Pilotversuch in Leuk“, Ausgabe 4/2007, S. 174-176
- [5] Ziegler Consultants: „Erschütterungs- und Körperschallmessungen im Gebäude Alten Kehr 6 / Leuk nach dem Einbau der Schwellenbesohlung“ im Auftrag der SBB, Zürich, 17.09.06