

Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft (BUWAL)

Schallabstrahlung von Eisenbahntunnelportalen

Kurzfassung



René Bayer
Dr. Kurt Heutschi

B+S Ingenieur AG
EMPA

Bern, März 2005

Inhaltsübersicht

1 Ausgangslage	3
2 Vorgehen und messtechnische Untersuchungen	4
3 Berechnungsmodell	7
4 Schlussfolgerungen und Fazit für die Praxis	12

1 Ausgangslage

Der Ausbau des Schienenverkehrs ist in der Schweiz in vollem Gange. Hochgeschwindigkeitsstrecken und intensiver Güterverkehr im Siedlungsraum haben bezüglich Schallschutz einen hohen Stellenwert. Die vermehrte Linienführung unter Terrain vermag die Lärmeinwirkung vielerorts zu entschärfen. Sie konzentriert sich auf die offenen Strecken und Portalzonen, häufig in siedlungsperipherem Bereich.

Die Lärmsituation in diesen Portalbereichen kann in Abhängigkeit des Standorts und Einsichtnahme zu Beeinträchtigungen der Wohnqualität führen. Um nähere Auskünfte über die zu erwartende Lärmbelastung, mögliche Massnahmen und deren Wirkung geben zu können, sind die akustischen Zusammenhänge und Einflüsse der Schallabstrahlung von Eisenbahntunneln näher zu kennen.

Das BUWAL beauftragte die B+S Ingenieur AG und EMPA die akustischen Verhältnisse im Bereich von Tunnelportalen bei Eisenbahnen zu ermitteln und zu beurteilen.

Bei der Fahrt eines Zuges durch einen Tunnel sind 3 Effekte zu berücksichtigen. Die entsprechenden akustischen Auswirkungen wurden in der vorliegenden Studie untersucht:

- ⇒ Die röhrenartige Tunnelform kanalisiert die vom Zug abgestrahlte Schallenergie. Die Schallwellen werden im Tunnel relativ schwach gedämpft und im Portalbereich in die Umgebung abgestrahlt.
- ⇒ Das Verhältnis der Tunnelquerschnittfläche und des Zugkörpers ist relativ klein. Die Zugsbewegung im Tunnel stösst demzufolge eine Luftsäule in Richtung Ausfahrtsportal mit einer allfällig bündelnden Abstrahlcharakteristik aus.
- ⇒ Die oben erwähnte Luftsäule entspricht einem Luftvolumen mit erhöhtem Druck. Im Portalbereich entspannt sich das komprimierte Luftvolumen. Dieser Druckpuls kann in der näheren Umgebung evtl. direkt als Schalldruck wahrgenommen werden.

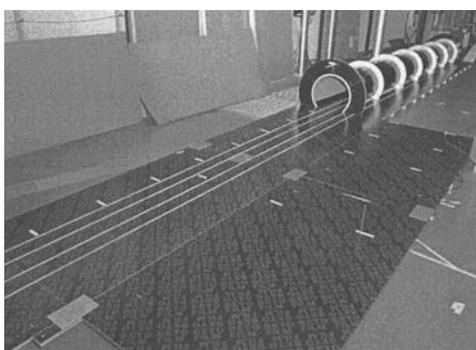
Für den planenden Ingenieur oder Akustiker stehen bei Lärmprognosen und allfällig erforderlichen Massnahmen folgende Fragen im Vordergrund:

- Wie ist die Geräusentwicklung während der Tunneldurchfahrt des Zuges und gibt es in der Portalzone Bereiche mit Pegelzunahmen? Welches sind die geeigneten Massnahmen zur Pegelreduktion?
- Spielt der Tunnelquerschnitt für die Schallausbreitung im Portalbereich eine Rolle (einspurig, doppelspurig, Rechteckquerschnitt, runder Querschnitt)?
- Spielt die Trassebeschaffenheit im Tunnel eine Rolle (harte Fahrbahnplatte, Schotter)?
- Spielt die Fahrtrichtung der Züge und ihre Beschaffenheit (Güterzüge, Personenzüge usw.) eine Rolle? Gibt es beim Einfahren in den Tunnel den erwarteten Druckpuls?

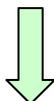
Nachfolgend werden die wesentlichen Untersuchungsergebnisse zusammengestellt und erläutert. Die detaillierten und umfassenden Ausführungen sind dem Gesamtbericht zu entnehmen.

2 Vorgehen und messtechnische Untersuchungen

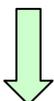
Die akustische Wirkung und Ausbreitungsverhältnisse im Portalbereich von realen Eisenbahntunneln können nicht oder nur mit unverhältnismässigem Aufwand durch Messungen allein ermittelt werden. Gründe dafür sind unterschiedliche Zugkompositionen, Fahrgeschwindigkeiten, Tunnelquerschnitte, Ausbreitungsbedingungen und störende Nebengeräusche. Die Lösung bilden Modellmessungen mit verschiedenen Anordnungen, welche eine lückenlose Reproduktion der massgebenden Fälle zulassen. Die Schlüsselergebnisse werden mittels Messungen an realen Portalen verifiziert.



Modellmessungen an verschiedenen Massstabsmodellen 1 : 16.
Damit ist es möglich, die Schallausbreitung in einer komplexen Umgebung nachzubilden.



Messtechnische Aufnahme der realen Situation bei unterschiedlichen Tunnelquerschnitten und Trassebeschaffenheit. Messposition abgestimmt auf die Modellmessungen.



Vergleich der realen und modellmässigen Ermittlungen.
Erarbeitung des theoretischen Ansatzes zur Berechnung der Schallausbreitung im Portalbereich.

Modellmessungen

Zur Bereitstellung von Grundlegendaten wurden akustische Messungen in einem Massstabsmodell 1 : 16 durchgeführt. Für drei verschiedene Tunnelquerschnitte (einspurig rund, doppel­spurig rund und doppel­spurig rechteckig), unterschiedliche Absorberbelegungen im Portalbereich und verschiedene Zugstypen wurden die Immissionen an acht Empfängerpunkten für ganze Vorbeifahrten ermittelt. Durch jeweilige Aufschlüsselung in den Abschnitt auf freier Strecke bzw. die Tunnel­fahrt konnte eine Tunnelwirkung bestimmt werden. Diese Tunnelwirkung entspricht der Pegeldifferenz der Immission für die ganze Vorbeifahrt bezogen auf den Abschnitt im Freien.

Die gefundenen Tunnelwirkungen beliefen sich für Empfänger in Portalnähe auf bis zu 4 dB, d.h. das Ignorieren des Anteils aus dem Tunnel führte zu Immissionspegel­unter­schätzungen von bis zu 4 dB. Es zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Tunneltypen. Die Belegung der Tunnelwandung auf einer Länge von 2 m (30 m Originalmassstab) im Portalbereich reduzierte in allen Fällen die Tunnelwirkung auf unter 1 dB.

Die Ergebnisse aus den Modellmessungen wurden im Rahmen der Validierung des Berechnungsmodells (Kapitel 3) sehr gut reproduziert.

Messung an realen Portalen

Die Messanordnung wurde so gewählt, dass basierend auf den Modellmessungen eine mögliche Tunnelwirkung erwartet und erfasst werden konnte. Zur Verifizierung der Modellmessungen musste der Messpunkt zudem identisch der Modellanordnung sein.

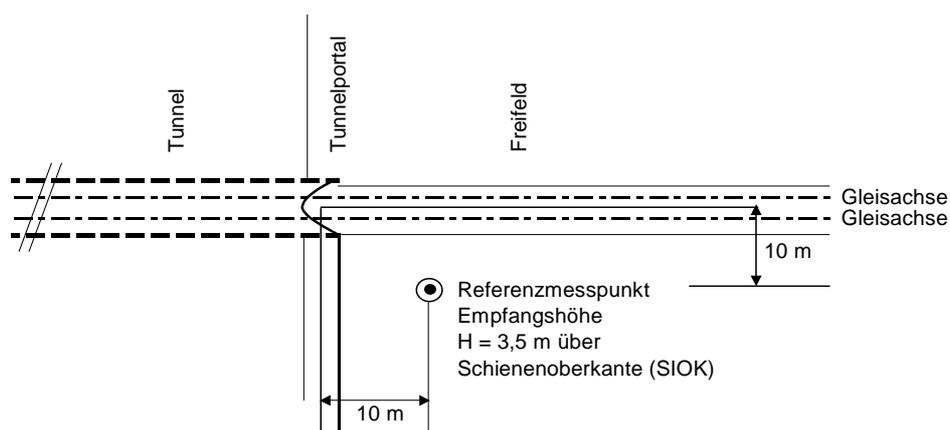


Abbildung 1: Prinzipielle Messanordnung für die Untersuchungen an realen Tunnelportalen.

Als charakteristische Grösse und Kennwert der aus dem Tunnel abgestrahlten Schallenergie wurde der Pegelanstieg oder –abfall in Form der Dämpfung auf 100 m festgelegt. Dazu wurde die Pegel-Zeit-Kurve der Zugsfahrt mittels bekannter Zugsgeschwindigkeit in eine Pegel-Orts-Kurve übersetzt. Die Steigung dieser Kurve während der Tunnel­fahrt wird schliesslich in dB / 100 m ausgewiesen.

Exemplarisch ist nachfolgend der Vergleich der Pegelverläufe einmal im Freifeld und einmal im Portalbereich aufgeführt. Es handelt sich um den selben Zug, Lokomotive mit 11 Wagen und einer Geschwindigkeit von 117 km/h.

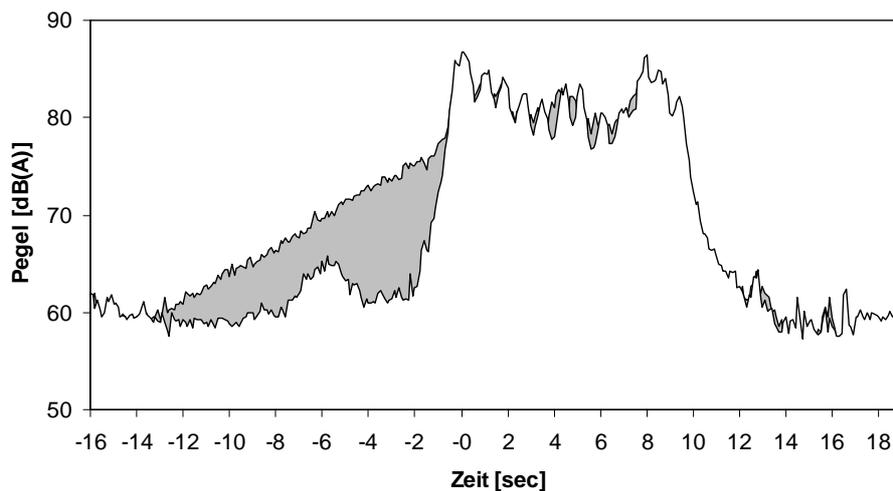


Abbildung 2: Überlagerung der Pegelverläufe des selben Zuges, einmal im Freifeld und einmal im Portalbereich. Der grau hinterlegte Bereich entspricht der Schallenergie aus dem Tunnel.

Die Überlagerung verdeutlicht die Pegelzunahme infolge des sogenannten „Tunneleffektes“ bzw. die zusätzlich erzeugte Schallenergie infolge des Tunnels gegenüber einer Durchfahrt im Freien mit einem Aspektwinkel von 180°.

3 Berechnungsmodell

Allgemeines

Das Berechnungsmodell erlaubt die Bestimmung der Immissionen an einem Empfängerpunkt im Freien für einen sich an einer bestimmten Stelle im Tunnel befindenden Zug. Der Zug wird als Punktquelle mit einer gegebenen Quellenleistung aufgefasst. Die Wirkung der ganzen Tunnelfahrt ergibt sich durch Aufsummation der Beiträge über ein äquidistant verteiltes Quellenraster.

Verwendete Symbole

A_{Portal}	zusätzliche Dämpfungseffekte wie Hinderniswirkung, Luftdämpfung, Bodeneffekt zwischen Portalmitte und Immissionspunkt [dB]
A_{Quelle}	zusätzliche Dämpfungseffekte wie Hinderniswirkung, Luftdämpfung, Bodeneffekt zwischen Quellen- und Immissionspunkt [dB]
D	Richtwirkungskorrektur [dB]
d_1	Abstand von der Portalmitte zum Immissionspunkt [m]
d_2	Abstand vom Quellen- zum Immissionspunkt [m]
ϕ	Winkel von der Portalmitte zum Immissionspunkt bzgl. der Tunnelachse
γ	Pegelabfall pro 100 m für den A-Pegel bzw. für die 1 kHz Oktave [dB/100m]
L_{diffus}	Schalldruckpegel am Immissionsort auf Grund der diffusen Portalabstrahlung [dB]
L_{direkt}	Schalldruckpegel am Immissionsort auf Grund der direkten Portalabstrahlung [dB]
L_y	Tunnelbreite [m]
L_z	Tunnelhöhe [m]
θ	Raumwinkel, den die Portalöffnung von der Quelle aus gesehen aufspannt
W_{Quelle}	Schalleistung der Quelle [W]
$W_{\text{Portal,diffus}}$	durch das Portal hindurchtretende diffuse Schalleistung [W]
$W_{\text{Portal,direkt}}$	direkt durch das Portal hindurchtretende Schalleistung [W]
W_{Portal}	total durch das Portal hindurchtretende Schalleistung [W]
x	Abstand der Quelle vom Tunnelportal [m]
y_0	Abstand der Geleiseachse von der empfängerseitigen Tunnelwand [m]

Rezept

Die sich im Tunnel befindende Quelle liefert zwei Anteile Schallenergie an den Empfänger. Zum einen erzeugt die Quelle im Tunnel durch Ein- und Mehrfachreflexionen an den Tunnelwänden eine Art diffuses Schallfeld. Dieses lässt sich durch die durch die Portalöffnung hindurchtretende diffuse Schalleistung $W_{\text{Portal,diffus}}$ beschreiben. Diese Schalleistung führt unter Berücksichtigung einer Richtwirkung zu einer Abstrahlung in die Umgebung. Für die Rechnung wird die Schalleistung in der Mitte der Portalöffnung konzentriert und ein Punktquellenverhalten (mit Richtcharakteristik), d.h. -6 dB/Abstandsverdopplung angenommen. Zum anderen versorgt die Quelle die Portalöffnung mit Direktschall $W_{\text{Portal,direkt}}$ und erzeugt am Empfangspunkt einen Direktschallanteil, wobei allfällige Hinderniswirkungen (z.B. an den Tunnelportalkanten) zu berücksichtigen sind. Abbildung 1 zeigt die allgemeine Tunnelsituation im Grundriss. Die

Quelle befinde sich an den Koordinaten $(x, y_0, 0.5\text{m})$. Der Tunnel hat die Breite L_y und Höhe L_z wobei der Tunnelboden bei $z = 0$ und die empfängerseitige Tunnelseitenwand bei $y = 0$ liegt.

Bemerkung:

In einem softwareimplementierten Modell werden die Berechnungen frequenzabhängig, d.h. z.B. in Terzen durchgeführt. Für eine Übersichtsrechnung kann zur Bestimmung der unten verwendeten Dämpfungsterme A_{Portal} und A_{Quelle} vereinfachend eine Frequenz von 1 kHz angenommen werden.

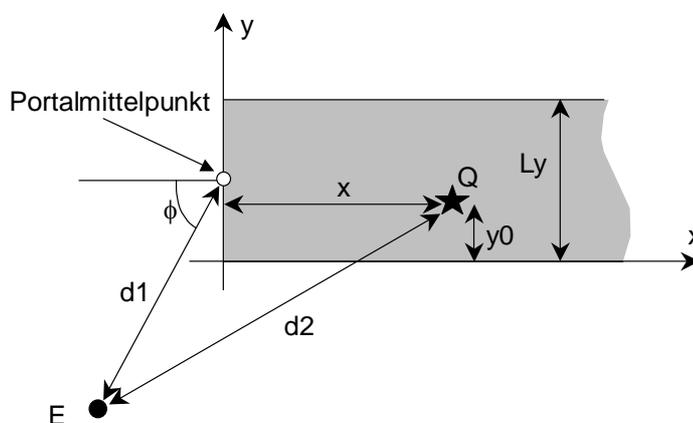


Abbildung 1: Situation im Grundriss zur Immission am Empfänger E einer Quelle Q im Tunnel

Die totale durch das Portal hindurch tretende Schalleistung lässt sich angeben zu

$$W_{\text{Portal}} = W_{\text{Quelle}} \cdot 10^{0.1(-3 - \gamma \frac{x}{100\text{m}})}$$

Für γ kann erfahrungsgemäss bei harter Fahrbahnplatte 4 dB/100 m, bei geschotterter Fahrbahn 10 dB/100 m eingesetzt werden.

Die direkt durch das Portal hindurchtretende Schalleistung ist

$$W_{\text{Portal,direkt}} = W_{\text{Quelle}} \frac{\theta}{4\pi}$$

Der Raumwinkel θ kann vereinfachend angenähert werden als Flächenverhältnis der Portalöffnung zur Kugeloberfläche mit einem Radius, der dem Abstand vom Quellenpunkt zur Portalmitte entspricht, skaliert mit 4π . Dabei ist θ auf maximal 2π zu begrenzen.

Der diffuse Portalanteil wird

$$W_{\text{Portal,diffus}} = W_{\text{Portal}} - W_{\text{Portal,direkt}}$$

Die entsprechenden Teilschalldruckpegel L_{diffus} und L_{direkt} am Immissionsort lassen sich schreiben als

$$L_{\text{diffus}} = L_{W_{\text{Portal,diffus}}} + D(\phi) - 20 \log \frac{d_1}{1\text{m}} - 11 - A_{\text{Portal}}$$

mit

$$L_{W_{\text{Portal,diffus}}} = 10 \log \left(\frac{W_{\text{Portal,diffus}}}{10^{-12} \text{ W}} \right)$$

$$D(\phi) = 10 \log \left(\frac{(1 + 2.5 \cos(\phi))^2}{5.6} \right)$$

und

$$L_{\text{direkt}} = L_{W_{\text{Quelle}}} - 20 \log \frac{d_2}{1\text{m}} - 11 - A_{\text{Quelle}}$$

mit

$$L_{W_{\text{Quelle}}} = 10 \log \left(\frac{W_{\text{Quelle}}}{10^{-12} \text{ W}} \right)$$

Der totale Immissionspegel am Empfangspunkt ergibt sich schliesslich zu

$$L_{\text{total}} = 10 \log \left(10^{(0.1 L_{\text{diffus}})} + 10^{(0.1 L_{\text{direkt}})} \right)$$

Die absorbierende Ausgestaltung des Portalbereichs wird durch eine pauschale Pegelreduktion des diffusen Anteils L_{diffus} um 10 dB berücksichtigt. Der Direktschallanteil bleibt unbeeinflusst. Wenn sich die Quelle ausserhalb des Tunnels befindet verschwindet der Anteil von L_{diffus} .

Zahlenbeispiel

Gemäss Abbildung 1 wird von folgender Geometrie ausgegangen:

- Tunnel: $L_y = 10.5 \text{ m}$, $L_z = 6.5 \text{ m}$
- Quelle: $x = 20.0 \text{ m}$, $y_0 = 7.2 \text{ m}$
- Immissionspunkt: $x = -10.0 \text{ m}$, $y = -2.8 \text{ m}$.

Es wird eine harte Fahrbahnplatte angenommen, d.h. $\gamma = 4.0 \text{ dB}/100 \text{ m}$. Der Portalbereich sei schallhart, die Quellenleistung W_{Quelle} betrage 1 mW.

Die Portalleistung ergibt sich zu $W_{\text{Portal}} = 0.417 \text{ mW}$.

Der Raumwinkel, der von der Quelle aus gesehen durch die Portalöffnung aufgespannt wird, ergibt sich zu $\theta = 0.165$. Damit wird $W_{\text{Portal,direkt}} = 0.0131 \text{ mW}$ und $W_{\text{Portal,diffus}} = 0.404 \text{ mW}$.

Mit dem Winkel von der Portalmitte zum Empfängerpunkt bzgl. der Tunnelachse $\phi = 38.8^\circ$ wird die Richtwirkungskorrektur $D = 1.9$ dB.

Mit der Distanz $d_1 = 12.8$ m und unter der Annahme, dass $A_{\text{Portal}} = 0$ dB wird der Diffusanteil am Immissionspegel $L_{\text{diffus}} = 54.8$ dB.

Mit der Distanz $d_2 = 31.6$ m und unter Berücksichtigung, dass die Quelle gerade noch sichtbar ist, d.h. $A_{\text{Quelle}} = 0$ dB wird der Direktschallanteil am Immissionspegel $L_{\text{direkt}} = 49.0$ dB.

Der Summenpegel ergibt sich zu $L_{\text{tot}} = 55.8$ dB. Die Integration über die ganze Vorbeifahrt führt auf eine Tunnelwirkung von 3.9 dB, d.h. das Ignorieren des aus dem Tunnel stammenden Anteils führt zu einer Immissionspegelunterschätzung von 3.9 dB. Dabei wurde für die Ausbreitungsrechnung lediglich die geometrische Verdünnung, d.h. kein Bodeneffekt und keine Luftdämpfung in Rechnung gestellt.

Übersichtsgrafiken

Abbildung 3 und Abbildung 4 zeigen typische Rasterkarten mit den gemäss dem Rezept berechneten Tunnelwirkungen. Dabei wurde ein rechteckförmiger Tunnelquerschnitt von 10.5 auf 6.5 m angenommen. Die Tunneldämpfung γ wurde zu 4 dB/100 m (harte Fahrbahnplatte) bzw. 10 dB/100 m (geschotterte Fahrbahn) angesetzt.

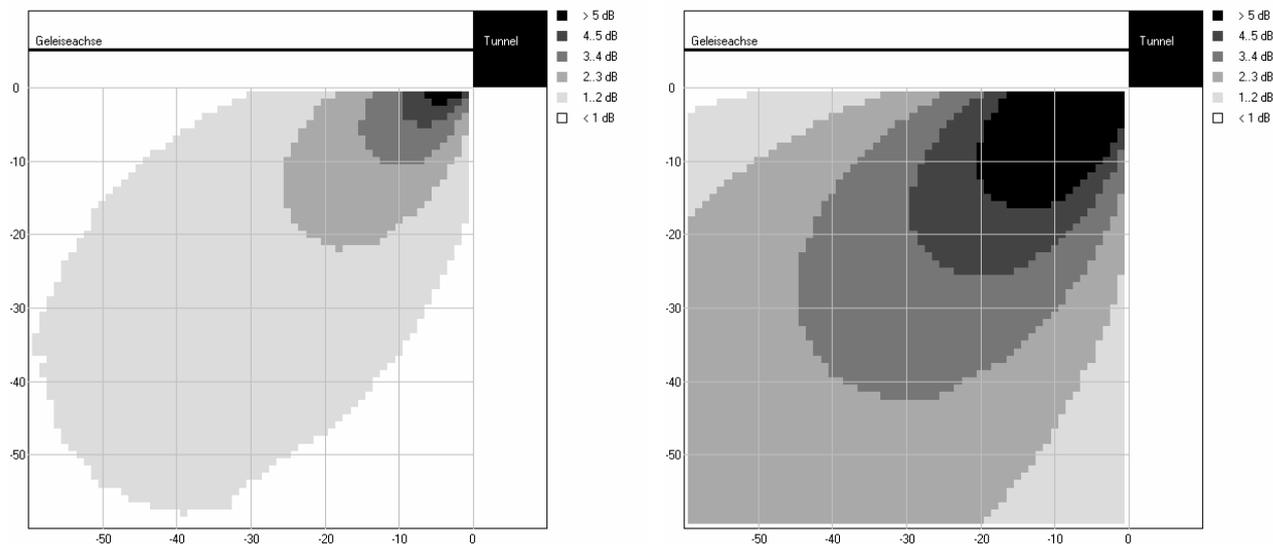


Abbildung 3: Exemplarische Karten mit den Tunnelwirkungen (Pegeldifferenz der totalen Vorbeifahrtenergie bezogen auf den Abschnitt im Freien) an einem Empfangspunktraster in der Umgebung eines rechteckigen Tunnelportals der Breite 10.5 m und der Höhe 6.5 m bei harter Fahrbahnplatte. Links: Direktschall unabgeschirmt, rechts: um 5 dB reduzierter Direktschall (z.B. Abschirmung durch eine Lärmschutzwand). Die Karten sind als Plan zu lesen mit einer Gittermaschenweite von 10 m.

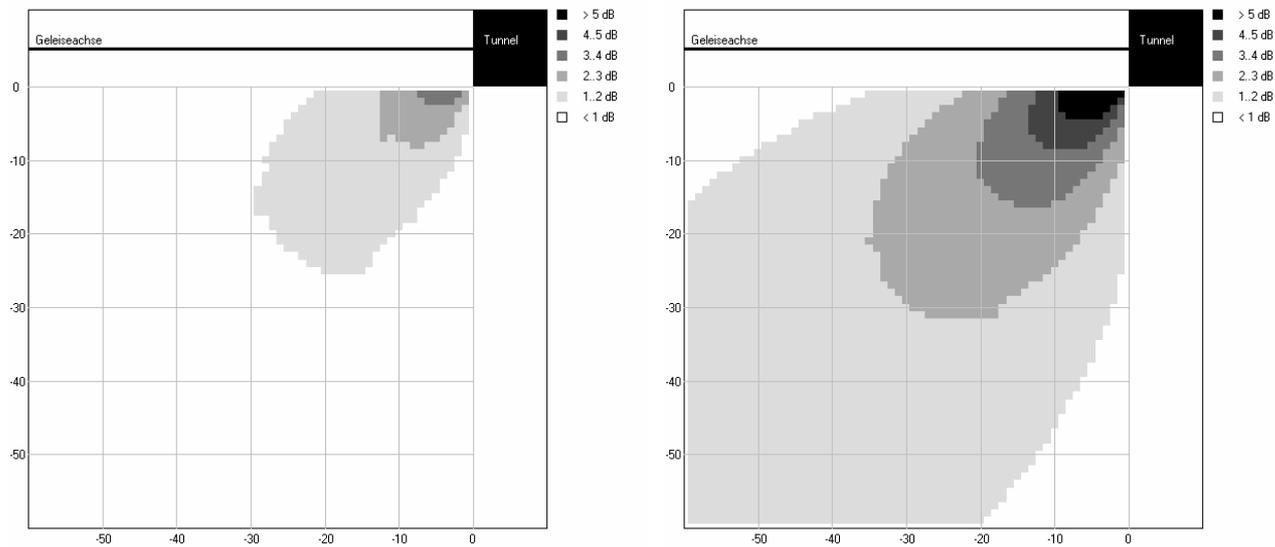


Abbildung 4: Exemplarische Karten mit den Tunnelwirkungen (Pegeldifferenz der totalen Vorbeifahrtenergie bezogen auf den Abschnitt im Freien) an einem Empfangspunktraster in der Umgebung eines rechteckigen Tunnelportals der Breite 10.5 m und der Höhe 6.5 m bei geschotterter Fahrbahn. Links: Direktschall unabgeschirmt, rechts: um 5 dB reduzierter Direktschall (z.B. Abschirmung durch eine Lärmschutzwand). Die Karten sind als Plan zu lesen mit einer Gittermaschenweite von 10 m.

4 Schlussfolgerungen und Fazit für die Praxis

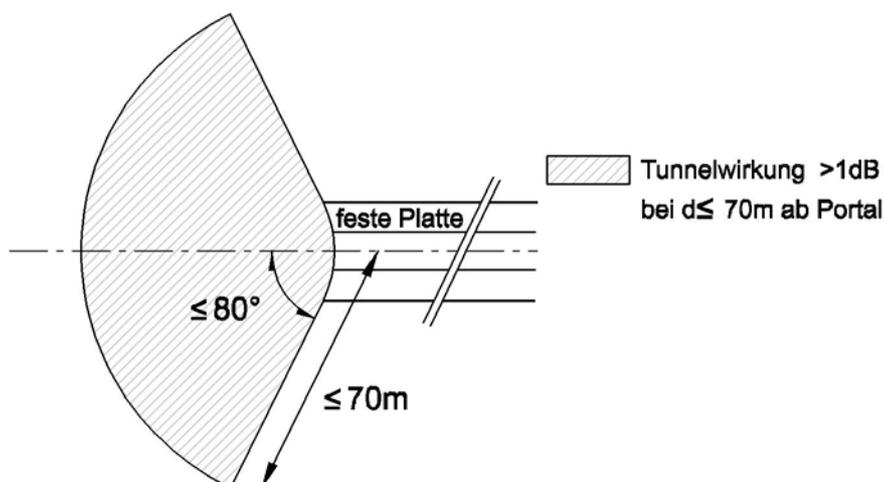
Die Ermittlungen zeigten, dass

- ⇒ Die Pegelanstiege /-abfälle von Zügen in Tunnels pro Tunneltyp relativ konstant sind, die Ein- oder Ausfahrt des Zuges keine signifikanten Unterschiede ergibt und die Geschwindigkeit des Zuges eine untergeordnete Rolle spielt;
- ⇒ Eine wesentliche Rolle spielt hingegen die Art des Trasses, das heisst ob eine feste Fahrbahnplatte oder ein geschottertes Trasse vorliegt. Feste Fahrbahnplatten erzeugen einen deutlich höheren Energieanteil als geschotterte Trassen;
- ⇒ Der Druckpuls als Folge der plötzlichen Entspannung bei der Ausfahrt des Zuges aus dem Tunnel konnte bei den Messungen an realen Portalen nicht festgestellt, resp. kann bei Geschwindigkeiten < 135 km/h vernachlässigt werden. Allerdings handelte es sich um doppelspurige Tunnels, der Einfluss bei einspurigen Tunnels ist noch unklar.

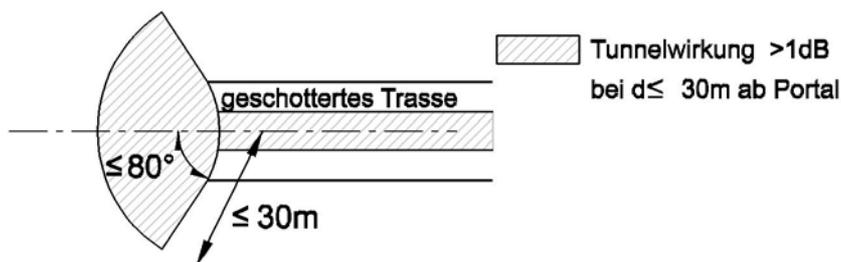
Die Beurteilung durch den Fahrbetrieb verursachten Störwirkung basiert gemäss Lärmschutzverordnung auf einem korrigierten Mittelungspegel gemäss $L_r = L_{eq} + K_1$. Der akustische Charakter des Eisenbahngeräusches während der Tunnelfahrt unterscheidet sich stark von der Freifeldfahrt. Im Portalbereich nehmen die Anwohner den halligen Charakter des Lärms während der Tunnelfahrt wahr, auch wenn der Einfluss auf den Mittelungspegel nur gering ist.

Bei der Ermittlung der Lärmbelastung im Bereich von Tunnelportalen ist in **den folgenden Fällen Vorsicht geboten**.

- ⇒ Tunnelportal **ohne Absorption** und mit **fester Fahrbahnplatte**:
Immissionspunkte, deren Sichtlinie zum Portal mit der Tunnelachse einen Winkel $\leq 80^\circ$ bilden und einen Abstand ≤ 70 m aufweisen.



- ⇒ Tunnelportal **ohne Absorption** und **mit geschottertem Trasse**:
Immissionspunkte, deren Sichtlinie zum Portal mit der Tunnelachse einen Winkel $\leq 80^\circ$ bilden und einen Abstand ≤ 30 m aufweisen.



- ⇒ Die angegebene Tunnelwirkung versteht sich als Differenz der totalen Vorbeifahrtenergie bezogen auf den Abschnitt im Freien.
- ⇒ Wird die Lärmquelle im Freien (Quellhöhe bei Eisenbahnlärm = 0.5 über Schienenoberkante SIOK) durch ein Hindernis abgeschattet und ist das Portal einsehbar, so wirkt sich der Tunneleffekt drastisch aus. Im Bereich bis 50 m Distanz und einem Winkel von $\leq 80^\circ$ der Sichtlinie zum Portal und der Tunnelachse, ergibt sich ein Tunneleffekt von ≥ 3 dB.

Projektierungshinweise

Wird aufgrund der Berechnungen der Lärmausbreitung im Portalbereich eine Relevanz festgestellt, und sind demzufolge Massnahmen in Form von schallabsorbierenden Verkleidungen notwendig, gilt Folgendes zu beachten:

- ⇒ Die Realisierung der schallabsorbierenden Verkleidung bedarf einer sorgfältigen Planung und im Falle einer Tunnelprojektierung der frühzeitigen Berücksichtigung eines entsprechenden Systems. Dies betrifft primär den erforderlichen Platzbedarf für das Absorbersystem.
- ⇒ In den nachfolgend aufgeführten Normalprofilen wird deutlich, dass insbesondere das erforderliche Lichtraumprofil und der Randweg mit Handlauf wenig Spielraum für schalltechnische Massnahmen zulassen.

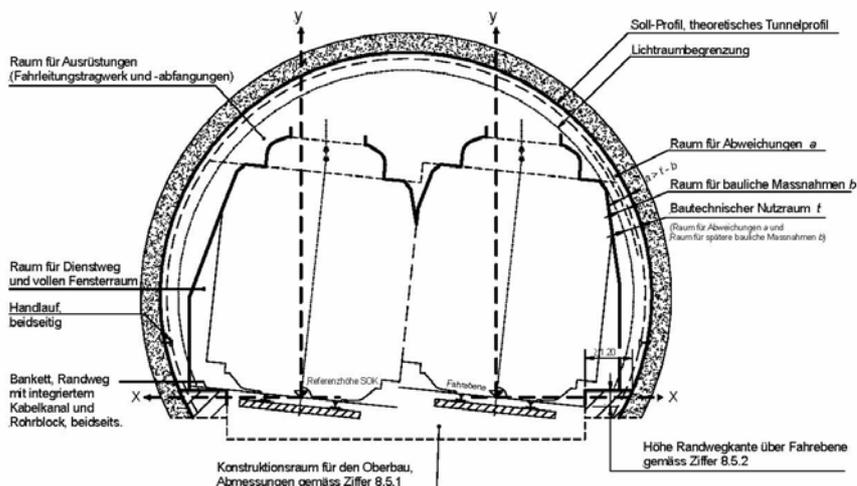


Abbildung 5: Normalprofil Doppelspur (Quelle SIA-Norm, Entwurf 197/1).

- ⇒ Der bautechnische Nutzraum unterteilt sich in einen Teil für bautechnische Abweichungen (a) und für spätere bauliche Massnahmen (b), unter welche, auch schallabsorbierende Verkleidungen fallen. Als Richtwerte werden in der Regel 10 – 20 cm für „spätere bauliche Massnahmen“ vorgesehen. Mit diesem „Raumangebot“ beschränkt sich die Systemwahl des Absorbers. Die in Tunneln infolge der Korrosionsproblematik eher bevorzugten Betonrippenplatten beanspruchen grössere Einbautiefen. Deshalb dürften sich schlankere Systeme wie z.B. aus Aluminium besser eignen.
- ⇒ Nachfolgend einige Hinweise, welche für die Dimensionierung und Wahl einer schallabsorbierenden Verkleidung von Bedeutung sind:
- Frühzeitige Information von Bauherrschaft und Projektteam, falls schallabsorbierende Verkleidungen vorgesehen werden müssen.
 - Tunnel mit fester Fahrbahnplatte sind kritischer (kleinere Dämpfung bzw. grössere Schallanteile) als durchgehend geschotterte Tunnelstrassen.
 - Ein wirksames absorbierendes System sollte auf einer Länge von 30 m angebracht werden. Die schallabsorbierende Verkleidung der Seitenwände ist ausreichend (Deckenbereich relativ schwierig infolge Fahrleitungen und Sicherheits-/Kontrollaspekte).
 - Beachtung von Lichtraumprofil, Gehweg, Handlauf und evtl. Beleuchtung.
 - Bauteile und Ausrüstungsgegenstände haben die in der Regel korrosionsfördernde Atmosphäre in Tunneln zu berücksichtigen.

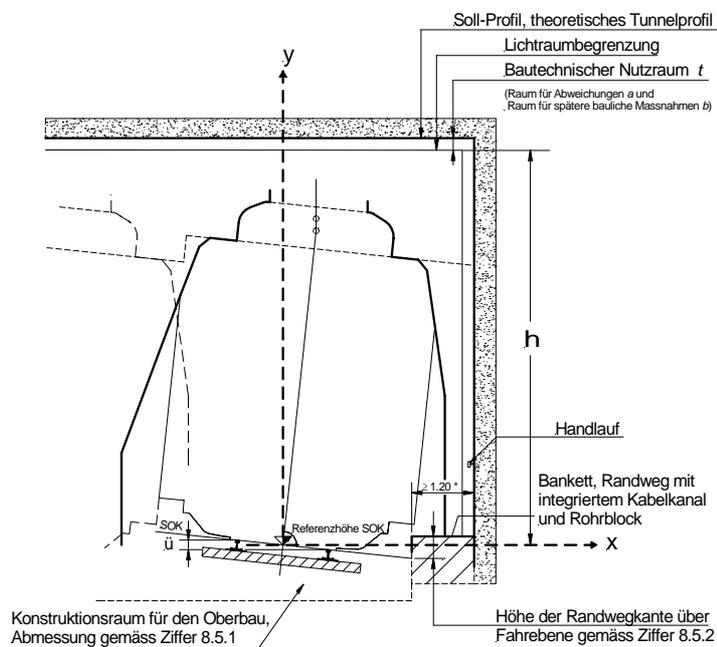


Abbildung 6: Normalprofil Rechteckquerschnitt (Quelle SIA-Norm, Entwurf 197/1).

- Für die Befestigung von Elementen ist korrosionsbeständiger, hochlegierter Stahl zu verwenden (z.B. nach EN 10088, Werkstoff Nr. 1.4529, X1NiCrMoCuN mit $\geq 6\%$ Mo).
- Die Anzahl Lastwechsel aus der Druck-Sogeinwirkung des Zugverkehrs ist mit rund 6 Mio. zu berücksichtigen (entspricht 200 Zugsdurchfahrten pro Tag während einer Nutzungsdauer von 40 Jahren).
- Bei der Befestigung der Systeme ist darauf zu achten, dass die Abdichtung des Gewölbes nicht beschädigt wird. Dies bedeutet in der Regel Dübellängen ≤ 20 cm.
- Abrupte Tunnelquerschnittswchsel – insbesondere bei höheren gefahrenen Geschwindigkeiten – sind infolge der resultierenden Druckschwankungen zu vermeiden.

Vielfach befindet sich der akustisch relevante Tunnelportalbereich noch im sogenannten Voreinschnitt oder der Tagbautunnelstrecke. Hier werden oft Lösungen in Ortsbeton realisiert. Die Bedürfnisse des Schallschutzes können hier besser berücksichtigt werden als im Tunnelbereich, wo der Einsatz der Tunnelbohrmaschine vorgesehen ist und Querschnittsänderungen nur mit relativ grossem Aufwand möglich sind.

B+S Ingenieur AG
Lärmschutz

EMPA Dübendorf
Akustik

R. Bayer

Dr. K. Heutschi