

AKUSTISCHE WIRKUNG VON GLEIS- NAHEN ABSCHIRMKANTEN UND BAHNSTEIGDÄCHERN

WiABahn untersuchte mithilfe messtechnischer Erhebung und Simulation den Einfluss von gleisnahen Strukturen wie Bahnsteige und Bahnsteigdächer auf die Schallausbreitung, mit dem Ziel, Empfehlungen für ein nationales Regelwerk zu erstellen.

Allgemeine, verständliche Zusammenfassung

der Projektergebnisse:

Der aktuelle Stand der Technik sieht keine Berücksichtigung von Bahnsteigen und Bahnsteigdächern in Immissionsberechnungen vor. Deshalb wurde in diesem Projekt die akustische Wirkung des Bahnsteigs und von Bahnsteigdächern untersucht. Diese Wirkung wurde sowohl für eine definierte Schallquelle als auch für Zugvorbeifahrten messtechnisch erhoben und die Messergebnisse anschließend mit Ergebnissen aus numerischen Berechnungen verglichen, mit dem Ziel ein Modell für eine Ersatzschallquelle zu entwickeln.

Die numerischen Berechnungen zeigten eine gute Übereinstimmung insbesondere mit den Ergebnissen der Messungen mit der definierten Quelle. Zusammen mit den Messergebnissen der Zugvorbeifahrten konnte ein geeignetes Ersatzschallquellenmodell für die Berechnung der Schirmwirkung von Bahnsteigen gefunden werden, in welchem die Quellposition auf die Höhe der Bahnsteigkante angehoben wird. Basierend auf diesem Modell wurden dann numerische Berechnungen für einen definierten Regelquerschnitt durchgeführt: diese wiesen eine leichte Pegelverringerng durch Schirmwirkung des Bahnsteiges, aber auch eine schwache Pegelerhöhung durch ein nach außen offenes Bahnsteigdach für Immissionspunkte bis zur Höhe des Bahnsteigdachs vor allem nahe des Bahnsteigs auf. Absorption an der Unterseite des Daches kann eine Verringerung der Pegelerhöhung bewirken, allerdings nur bei ausreichend großer Absorptionsfläche. Hohe, dem Bahnsteig nahe Immissionspunkte erfahren eine Pegelreduktion durch das abschirmende Dach.

Nach Überprüfung der Kompatibilität mit aktuellen nationalen Vorschriften und Vergleich mit den derzeit vorhandenen Regelwerken (ONR 305011 und CNOSSOS-EU) wurden abschließend Empfehlungen für ein nationales Regelwerk erstellt.

Facts:

- Laufzeit: 11/2014 - 12/2016
- Forschungskonsortium:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Institut für Schallforschung, Österreichische Akademie der Wissenschaften

Ziviltechnikerbüro Dr. Kirisits



Kurzzusammenfassung

Problem

Die geltenden Normen und Rechenverfahren zur Schallimmissionsberechnung für Schienenverkehrslärm in Österreich sind derzeit nicht geeignet, die Wirkung von gleisnahen Abschirmkanten mit reflektierenden oder auch schallabsorbierenden Oberflächen auf die Schallausbreitung zu berücksichtigen.

Gewählte Methodik

Messtechnische Erhebung, Berechnungen mittels der Randelementmethode, Entwicklung eines Ersatzschallquellenmodells, Vergleich mit bestehenden Regelwerken (ONR 305011, CNOSSOS-EU) mittels Schallausbreitungsberechnungen.

Ergebnisse

Die durchgeführten Untersuchungen führen zu folgenden Schlüssen: (1) obwohl die Schirmwirkung eines reflektierenden Bahnsteiges für einzelne Terzbänder und Immissionspunkte bei ± 5 dB liegen kann, ist der Gesamteffekt als gering einzustufen und liegt bei ebenem Gelände abhängig vom Immissionspunkt und von der Bahnsteigbreite zwischen 0 und 2 dB(A) für Entfernungen ab 10 Meter vom Bahnsteig; (2) der zusätzliche Effekt eines absorbierenden gegenüber einem reflektierenden Bahnsteig auf die Schirmwirkung liegt selbst im Bereich des Bahnsteiges unter 1 dB(A) und ist daher für Immissionspunkte im Fernfeld vernachlässigbar; (3) das Vorhandensein eines Bahnsteigdachs wirkt sich bei niedrigen Immissionspunkten geringfügig negativ aus (Pegelerhöhung durch zusätzliche Reflexionen) und hebt den positiven Effekt des Bahnsteiges (Pegelabsenkung durch Abschirmung) bei niedrigen Immissionspunkten generell auf; (4) der abschirmende Effekt des Bahnsteigdachs bei hoch liegenden Immissionspunkten (beispielsweise ab 15 Meter Höhe in 20 Meter Entfernung zum Gleis) ist jedoch vorhanden und kann bis zu 8 dB(A) betragen. Am Bahnsteig selbst wird der Pegel bei Vollabsorption an der abgewandten Seite um 2 bis 3 dB(A) verringert.

Schlussfolgerungen

Diese Ergebnisse führten zu Empfehlungen zur Einbindung in ein nationales Regelwerk für die Berücksichtigung von Bahnsteigen und Bahnsteigdächern in Schallausbreitungsberechnungen.

English Abstract

The current standards and calculation methods for computing railway noise in Austria do not allow the consideration of near-track acoustic shielding of reflecting or absorbing surfaces. The project WiABahn included experimental and computational analysis based on the existing knowledge from a literature review and calculation standards in order to take into account the acoustic effects of near-track shielding through platforms and platform canopies. Pass-by measurements, boundary element method as well as engineering calculation methods were compared to analyze the insertion loss. Subsequently, recommendations for a national policy compatible with ONR 305011 and CNOSSOS-EU were made to allow for the consideration of platforms with acoustically reflecting and absorbing edges and platform canopies in noise mapping calculations.

Impressum:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

DI Dr. Johann Horvatits,
Abt. IV/ST 2 Technik und
Verkehrssicherheit
johann.horvatits@bmvit.gv.at,

DI (FH) Andreas Blust,
Abt. III/14 Mobilitäts- und
Verkehrstechnologien
andreas.blust@bmvit.gv.at,
www.bmvit.gv.at

ÖBB-Infrastruktur AG

Dr. Thomas Petraschek, SAE;
Stab LCI, Team Forschung & Entwicklung
thomas.petraschek@oebb.at,
www.oebb.at

ASFINAG

DI Eva Hackl,
Manager International Relations
und Innovation
eva.hackl@asfinag.at,

DI (FH) René Moser, Leiter Strategie, Internationales und Innovation
rene.moser@asfinag.at,
www.asfinag.at

Österreichische Forschungs-förderungsgesellschaft mbH

DI Dr. Christian Pecharda,
Programmleitung Mobilität
Sensengasse 1, 1090 Wien
christian.pecharda@ffg.at,
www.ffg.at

Juli, 2017

Akustische Wirkung von gleisnahen Abschirmkanten und Bahnsteigdächern

WiABahn

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2013
(VIF2013)

November 2017



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
A - 1030 Wien



ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
A - 1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs
Aktiengesellschaft
Rotenturmstraße 5-9
A - 1010 Wien



Für den Inhalt verantwortlich:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH
Donau-City-Straße 1
1220 Wien



Institut für Schallforschung
Österreichische Akademie der Wissenschaften
Wohllebengasse 12-14
1040 Wien



Ziviltechnikerbüro DI Dr. Christian Kirisits
Kolpinggasse 10
7423 Pinkafeld



Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Bereich Thematische Programme
Sensengasse 1
A – 1090 Wien



Akustische Wirkung von gleisnahen Abschirmkanten und Bahnsteigdächern

WiABahn

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
(VIF2013)

AutorInnen:

Dott. Ing. Marco CONTER

Apl. Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Holger WAUBKE

Ao. Univ.-Prof. DI Dr. Christian KIRISITS

Dr. Christian H. KASESS

DI Harald ZIEGELWANGER, PhD

DI Reinhard WEHR

Auftraggeber:

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

AIT Austrian Institute of Technology GmbH

Österreichische Akademie der Wissenschaften

Ziviltechnikerbüro Dr. Kirisits

Inhaltsverzeichnis

1. Kurzfassung.....	6
Deutsche Fassung	6
Englische Fassung.....	8
2. Einleitung.....	9
2.1. Problemstellung.....	9
2.2. Projektziele.....	10
2.3. Literaturrecherche	11
3. Messtechnische Erhebung	15
3.1. Messungen mit definierter Schallquelle.....	15
3.2. Messungen von Zugvorbeifahrten im Nahfeld.....	17
3.3. Fernfeldmessungen.....	23
3.4. Messergebnisse der Vorbeifahrten im Fernfeld	25
4. Modellbildung	27
4.1. Validierung der Randelementemethode mittels Testmessungen	27
4.1.1. Randelementemethode	27
4.2. Vergleich für Bahnsteigkanten: definierte Schallquelle	32
4.3. Vergleich für Bahnsteigkanten: Vorbeifahrten.....	40
4.3.1. Simulationsquerschnitt und Quellmodelle.....	40
4.3.2. Vergleich mit den Fernfeldmessungen	44
4.3.3. Absorbierende Bahnsteigkante.....	51
4.4. Diskussion	54
5. Berechnungsmodell für den Regelquerschnitt.....	55
5.1. Simulationsparameter für den Regelquerschnitt	55
5.2. Einfluss der Bahnsteigkante.....	57
5.3. Einfluss des Bahnsteigdaches	65
5.3.1. Reflektierendes Dach	65

5.3.2.	Absorbierendes Dach	68
5.3.3.	Effekt der Quellenlänge	73
5.4.	Vergleich mit niedriger Lärmschutzwand	76
5.5.	Zusammenfassung der Berechnungen für den Regelquerschnitt	79
6.	Vergleich mit bestehenden Regelwerken und Beispielberechnungen	81
6.1.	Berechnungen mittels ONR 305011	81
6.2.	Berechnungen mittels CNOSSOS-EU	84
6.3.	Berechnungen für den Regelquerschnitt.....	86
6.4.	Berechnungen für Bahnsteigdach nach aktuellen Regelwerken.....	89
7.	Schlussfolgerungen und Empfehlung für ein nationales Regelwerk	94
7.1.	Schlussfolgerungen.....	94
7.2.	Empfehlung für ein nationales Regelwerk.....	96
8.	Literaturverzeichnis	100
Anhang A:	Ergebnisse der Vorbeifahrtsmessungen.....	103
Anhang B:	Ortsabhängiger A-Bewerteter Gesamtpegel.....	110
Anhang C:	Winkelabhängiger Schalldruckpegel in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet	121
Anhang D:	Simulationsergebnisse in Terzbändern	135

1. KURZFASSUNG

Deutsche Fassung

Das Forschungsprojekt WiABahn (Akustische Wirkung von gleisnahen Abschirmkanten und Bahnsteigdächern) untersuchte mithilfe messtechnischer Erhebung und Simulation des Einflusses von Bahnsteigen und Bahnsteigdächern auf die Schallausbreitung, mit dem Ziel, Empfehlungen für ein nationales Regelwerk zu erstellen.

Der aktuelle Stand der Technik sieht keine Berücksichtigung von Bahnsteigen und Bahnsteigdächern in Immissionsberechnungen vor. Deshalb wurde in diesem Projekt die akustische Wirkung des Bahnsteigs und von Bahnsteigdächern untersucht. Diese Wirkung wurde sowohl für eine definierte Schallquelle als auch für Zugvorbeifahrten messtechnisch erhoben und die Messergebnisse anschließend mit Ergebnissen aus numerischen Berechnungen verglichen, mit dem Ziel ein Modell für eine Ersatzschallquelle zu entwickeln.

Die numerischen Berechnungen zeigten eine gute Übereinstimmung insbesondere mit den Ergebnissen der Messungen mit der definierten Quelle. Zusammen mit den Messergebnissen der Zugvorbeifahrten konnte ein geeignetes Ersatzschallquellenmodell für die Berechnung der Schirmwirkung von Bahnsteigen gefunden werden, in welchem die Quellposition auf die Höhe der Bahnsteigkante angehoben wird. Basierend auf diesem Modell wurden dann numerische Berechnungen für einen definierten Regelquerschnitt durchgeführt: diese wiesen eine leichte Pegelverringerung durch Schirmwirkung des Bahnsteiges, aber auch eine schwache Pegelerhöhung durch ein nach außen offenes Bahnsteigdach für Immissionspunkte bis zur Höhe des Bahnsteigdachs vor allem nahe des Bahnsteigs auf. Absorption an der Unterseite des Daches kann eine Verringerung der Pegelerhöhung bewirken, allerdings nur bei ausreichend großer Absorptionsfläche. Hohe, dem Bahnsteig nahe Immissionspunkte erfahren eine Pegelreduktion durch das abschirmende Dach.

Die Messungen im Fernfeld ergaben Pegeldifferenzen zwischen emissionsnahen und weiter entfernt liegenden Punkten zur Verifikation des Ausbreitungsmodells inklusive der Modellierung der Ersatzschallquelle. Das verifizierte Ausbreitungsmodell ermöglichte die Berechnung der Einfügungsdämpfung für konkrete Bahnsteigsgeometrien.

Die durchgeführten Berechnungen führen zu folgenden Schlüssen:

1. Obwohl die Schirmwirkung eines reflektierenden Bahnsteiges für einzelne Terzbänder und Immissionspunkte bei ± 5 dB liegen kann, ist der Gesamteffekt als gering einzustufen und liegt bei ebenem Gelände abhängig vom Immissionspunkt und von

der Bahnsteigbreite zwischen 0 und 2 dB(A) für Entfernungen ab 10 Meter vom Bahnsteig.

2. Der zusätzliche Effekt eines absorbierenden gegenüber einem reflektierenden Bahnsteig auf die Schirmwirkung liegt selbst im Bereich des Bahnsteiges unter 1 dB(A) und ist daher für Immissionspunkte im Fernfeld vernachlässigbar.
3. Das Vorhandensein eines Bahnsteigdachs wirkt sich geringfügig negativ aus (Pegelerhöhung durch zusätzliche Reflexionen) und hebt den positiven Effekt des Bahnsteiges (Pegelabsenkung durch Abschirmung) bei niedrigen Immissionspunkten generell auf.
4. Der abschirmende Effekt des Bahnsteigdachs bei hoch liegenden Immissionspunkten (beispielsweise ab 15 Meter Höhe in 20 Meter Entfernung zum Gleis) ist jedoch vorhanden und kann bis zu 8 dB(A) betragen. Am Bahnsteig selbst wird der Pegel bei Vollabsorption an der abgewandten Seite um 2 bis 3 dB(A) verringert.

Nach Überprüfung der Kompatibilität mit aktuellen nationalen Vorschriften und Vergleich mit den derzeit vorhandenen Regelwerken (ONR 305011 und CNOSSOS-EU) wurden abschließend Empfehlungen für ein nationales Regelwerk erstellt.

Englische Fassung

The aim of the research project WiABahn (Acoustic effect of near-track shielding and platform canopies) was to develop an engineering procedure to enable the modelling of the effect of platforms and platform canopies on the sound propagation based on measurements and simulations.

Current standards and calculation methods for computing railway noise in Austria do not allow the consideration of acoustic shielding of platforms and platform canopies located near the track. In order to derive a method to consider the acoustic effects of such structures the project included experimental and computational analysis based on the existing knowledge from an international literature review and calculation standards. Pass-by measurements, boundary element method as well as engineering calculation methods were compared to analyse the insertion loss. Subsequently, recommendations for a national policy compatible for ONR 305011 and CNOSSOS-EU were made to allow for the consideration of acoustically reflecting and absorbing platform edges and platform canopies in noise mapping calculations.

Based on the investigations carried out, the following conclusions can be drawn:

1. Even if the shielding effect of the platform edges in some particular one-third octave bands can reach ± 5 dB, the overall effect is very small and for immission points in a distance of at least 10 meter from the platform is between 0 and 2 dB(A);
2. The additional effect of an absorbing platform edge compared to a reflecting platform edge in the farfield is negligible, even in the nearfield (measured at the platform) the additional effect is below 1 dB(A);
3. The slightly positive effect of the platform (noise level reduction by shielding) is in general neutralized by slightly negative effect of the platform canopy (noise level increase by reflection) at low immission positions.
4. In contrast to the immission points at low heights, the shielding effect of the platform canopy is clearly present for high immission points (e.g. for 15 meter height over the platform in 20 meter from the track) and can be up to 8 dB(A). On the platform itself the full absorbing roof can reduce the noise level up to 2 to 3 dB (A).

Subsequently, recommendations for a national policy were made to allow for the consideration of acoustically reflecting and absorbing platform edges and platform canopies in noise calculations for noise mapping.

2. EINLEITUNG

2.1. Problemstellung

Die geltenden Normen und Rechenverfahren zur Schallimmissionsberechnung für Schienenverkehrslärm in Österreich sind derzeit nicht geeignet, die Wirkung von gleisnahen Abschirmkanten (z.B. Bahnsteigkanten und niedrigen Lärmschutzwänden) mit reflektierenden oder auch schallabsorbierenden Oberflächen auf die Schallausbreitung zu berücksichtigen. Die derzeit verwendete ONR 305011 geht von einer Ersatzschallquelle entlang der Schienenachse in 30 cm Höhe über Schienenoberkante (SOK) aus, und verwendet zur Berechnung der Abschirmwirkung das Regelwerk ISO 9613-2. Diese Vereinfachung ist für typische Wandgeometrien ausreichend, führt aber bei gleisnahen und niedrigen Abschirmkanten zu hohen Unsicherheiten bei der Erstellung von Schallimmissionskarten oder der Festlegung von Schallschutzmaßnahmen.

Des Weiteren gibt die aktuelle Normung keine Hinweise wie Bahnsteigdächer, in ihrer Funktion als horizontale Schirme, die Schallausbreitung beeinflussen und wie diese in Schallausbreitungsrechnungen zu berücksichtigen wären. Die aktuelle Normung enthält auch keine Information bezüglich der Schallreduktion im Bahnsteigbereich durch Bahnsteigdächer mit schallabsorbierenden Verkleidungen sowie in weiterer Folge die erzielbare Wirkung auf Anrainerpunkte in der Nähe von Bahnstationen.

Aufgrund dieser Schwächen in konventionellen Rechenverfahren werden auch immer häufiger Randelementemethoden (engl. boundary element methods, BEMs) für die Simulation von Lärmschutzwänden herangezogen. Dazu zählen die 2D Randelementemethode, womit recheneffizient einfache Geometrien und einfache Quellenmodelle gerechnet werden können, und die 3D Randelementemethode, welche aufgrund des hohen Rechenaufwands nur für tiefe Frequenzen geeignet ist. Welche Frequenzen noch gerechnet werden kann, hängt einerseits von der Geometrie, andererseits auch von der verfügbaren Hardware (Rechen- und auch Speicherkapazität) ab.

Da absorbierende Böden in der 3D Randelementemethode ebenfalls diskretisiert werden müssen, ist davon auszugehen, dass in diesem Projekt schon im Bereich von 500 Hz die Berechnungen mittels 3D Randelementemethode nicht mehr sinnvoll durchführbar sind. Eine Mittelstufe zwischen 2D und 3D Randelementemethode stellt die 2.5D Simulation dar, welche die Berechnung realistische komplexe 3D Quellen für 2D Geometrien (mit konstantem Querschnitt) erlaubt. Insgesamt gibt es bereits einige Arbeiten zu Simulationen von

Lärmschutzwänden, wobei der Großteil der Simulationen für Straßenlärm durchgeführt wurde. Für die speziell im Bahnbereich interessanten niedrigen Abschirmkanten existieren einige Arbeiten mit Simulationen die demonstrieren, dass der Randelementansatz in 2D und 2.5D auch hier gut funktioniert. Für diese numerischen Simulationen müssen allerdings zuerst die akustischen Eigenschaften von Bahnsteigdächern und –kanten messtechnisch für eine definierte Schallquelle bestimmt werden und später die tatsächliche Schallquelle durch eine experimentelle Erhebung mit Nah- und Fernfeldmessungen bestimmt und für die späteren Rechenmodelle modelliert werden.

2.2. Projektziele

Ziel des Forschungsprojektes war die messtechnische Erhebung und darauf aufbauend der rechnerische Nachweis der schalltechnischen Wirkungen von gleisnahen Abschirmkanten und Bahnsteigdächern. Die Modellierung der schalltechnischen Wirkungen von Bahnsteigkanten und Bahnsteigdächern und die darauffolgende Anwendung in Schallausbreitungsberechnungen wurden dann in einem Vorschlag für eine nationale Richtlinie zusammengefasst. Die erwarteten Projektergebnisse waren demgemäß folgende:

- Übersicht über nationale und internationale Publikationen;
- Untersuchung von Ersatzschallquellen aus existierenden Normen (ONR 305011, HARMONOISE und CNOSSOS-EU);
- Messtechnische Erhebung einer quantifizierbaren Abschirmwirkung durch Bahnsteigkanten sowie Bahnsteigdächer (in Nah- und Fernfeld);
- Rechnerische Modellierung von Regelquerschnitten durch Randelemente-Simulationen (reflektierende und schallabsorbierende¹ Bahnsteigkanten und Bahnsteigdächern);
- Identifizierung von Ersatzschallquellen für den Einsatz in bestehenden Normen;
- Überprüfung der Kompatibilität mit aktuellen nationalen Vorschriften;
- Validierung des Verfahrens zur Modellierung von schallabsorbierenden Bahnsteigkanten und Bahnsteigdächern durch Beispielberechnungen nach derzeit vorhandenen Regelwerken;
- Vorschlag für die Anwendung der Untersuchung in nationalen Regelwerken.

¹Als schallabsorbierend werden in diesem Projekt alle nicht vollreflektierende Oberflächen bezeichnet. Übliche Bahnsteigkanten aus Betonelementen sind als vollreflektierend einzustufen.

2.3. Literaturrecherche

Mit Hilfe der Suchmaschinen Scopus, Web of Science, Mendeley, einer Suche in Konferenzbänden relevanter Veranstaltungen der letzten Jahre und einem Studium entsprechender Referenzen in Normen und Journalartikeln wurde die relevante Literatur zum Thema "Abschirmung von Bahnsteigkanten und Bahnsteigdächern" bzw. "niedrige Lärmschutzwände an Schienenstrecken" zusammengestellt. Das zusammenfassende Ergebnis der Literaturrecherche bestätigt die Angaben aus dem ursprünglichen Projektantrag, wonach keine in Fachzeitschriften oder relevanten Konferenzbeiträgen publizierte Fachliteratur oder Projekte zur konkreten Fragestellung veröffentlicht sind. Für die Abschirmung durch Bahnsteigdächer wurden keine verwertbaren Vorerkenntnisse gefunden. Es gibt jedoch eine Reihe von Fachartikeln, die Hinweise zur besseren Planung der weiteren Schritte in WiABahn enthalten.

Die ONR 305011 (2009), Dittrich & Zhang (2006), Kephelopoulos, Paviotti, & Ledee (2012), Talotte u. a. (2006) formulieren Argumente und Vorschläge zur Positionierung von Ersatzschallquellen als Grundlage zur Modellierung der Emissionsdaten. Der neue Anhang II der europäischen Umgebungslärmrichtlinie mit den entsprechenden Begleitdokumenten (CNOSSOS-EU) legt dazu den neuesten Stand der Technik für ingenieurwissenschaftliche Berechnungsverfahren fest. Zur Umsetzung wurde das von der europäischen Kommission bereitgestellte Verfahren "sourcmodell_v1.10" adaptiert. Damit ist es möglich die entsprechenden Terzband-Schalleistungspegel für die 6 verschiedenen Emissionsarten Rollgeräusch, Antriebsgeräusch, Aerodynamische Geräusche, Stoßgeräusche, Kurvenkreischen und Abstrahlung von Brücken zu berechnen und den Ersatzschallquellen in Position A (0,5 m über der Schienenoberkante, SOK) und Position B (4,0 m über SOK) entsprechend dem Regelwerk zuzuweisen. Für die Anwendung der Randelementemethode ist noch die Arbeit von Jean & Gabillet (2000) zu erwähnen, in welcher das TWINS Quellmodell für die Berechnung der Schirmwirkung von Abschirmungen sehr nahe an der Schiene (15 bis 20 cm) für die 2D- Randelementemethode adaptiert wurde.

Zur Schallausbreitung bei gleisnahen Abschirmungen dienen folgende Literaturstellen noch am ehesten zur weiteren Information. Thorsson (2000) verwendete die Methode der „Equivalent Sources“ zur Berechnung der Einfügungsdämpfung von niedrigen Schallschutzwänden. Im Vergleich zur BEM wurden bei schnellerer Berechnung vergleichbare Resultate erzielt. Eine direkte Anwendung für das Projekt WiABahn ergibt sich nicht. Die wesentlichen Aussagen bestätigen grundlegende Erkenntnisse zur Schallabschirmung wonach der Absorptionsgrad der Schallschirme selbst von Bedeutung ist, insbesondere für

niedrig gelegene Immissionen und niedrige Frequenzen. Die als Beispiel gewählte Geometrie wies jedoch einen deutlich größeren Abstand zwischen Emission und Abschirmung auf, als dies durch die Geometrie von Bahnsteigkanten gegeben ist. Wesentlich ist dazu auch, dass Bahnsteigkanten auf ihren nach oben gerichteten Seiten eine reflektierende Fläche aufweisen, wie sie bei Lärmschutzwänden, insbesondere auch breiteren T förmigen Wänden, vermieden wird.

Koussa, Defrance, Jean, & Blanc-Benon (2013) bestätigt das Fehlen von umfangreichen Studien für niedrige Lärmschutzwände, wie sie für den urbanen Bereich geeignet wären. Die Fragestellung deckt sich nur teilweise mit WiABahn, da hier Straßenverkehrslärm mit einem entsprechenden Abstand zwischen Emission und Abschirmung untersucht wird. Als Abschirmung wurden Gabionen, in Drahtnetz geformte Steinschichtungen, untersucht. Mittels Modellmessungen und BEM Simulationen wurde eine Einfügungsdämpfung von bis zu 8 dB(A) für nur 1 m hohe Wandhöhen beschrieben. Diese Wirkung bezog sich aber auf niedrige Immissionspunkthöhen von 1,5 m Höhe, für 4 m Höhe war die Wirkung in Abhängigkeit vom Abstand zur Quelle deutlich abgeschwächt.

Der Konferenzbeitrag Baulac, Poisson, Defrance, Jean, & Margiocchi (2009) bezieht sich am ehesten auf die WiABahn Fragestellung. Mittels der BEM Software MICADO wurden Konfigurationen mit 1 m über SOK liegenden Lärmschutzwänden untersucht. Diese wurden als nach in Richtung Gleis auskragende Kanten modelliert und im Abstand variiert. Die Emission wurde durch 4 Quellen, je Schiene eine auf SOK und für die Radabstrahlung in ~ 0.5 über SOK angenommen. Für den Schallleistungspegel wurden Terzbandpegel angenommen. Die Abschirmungen wurden absorbierend verkleidet angenommen. Für die nahe liegende Abschirmung kann auf Höhe dieser Abschirmkante eine A-bewertete Einfügungsdämpfung von ~12 dB abgelesen werden. Die zum Gleis nächste Kante lag in ~0,8 m über SOK und ~1,0 m horizontal von der näher gelegenen Schiene.

In Frid (2003) wurde mittels 1:4 Modellversuchen der Einfluss von 3 gleisnahen Lärmschutzwänden (DB Model, Skanska Soundtrack und theoretische Annahme mit LSW Höhe auf der unteren Höhe des Wagenkastens.) und Radabsorbern untersucht. Die Lärmschutzwände unterschieden sich in ihrer Höhe nur um geschätzte 0,5 m (keine Maßstabszeichnungen enthalten). Die A-bewertete Einfügungsdämpfung variierte dabei von ~4 dB bis zu ~ 12 dB. Eine Geschwindigkeitsabhängigkeit wurde berichtet, doch liegt diese im dargestellten kleinen Bereich von 100 km/h zu 120 km/h in einem vernachlässigbaren Bereich. Die Einfügungsdämpfung wurde auch in Terzbändern angegeben. Alle Angaben beschränken sich offensichtlich auf einen Immissionspunkt in 6,25 m Abstand zur Gleisachse, 0,87 m über

SOK. Die Resultate waren sehr sensitiv gegenüber der Annahme der entsprechenden Terz-Schallleistungspegel für die Schienen- und Radabstrahlung.

Bezogen auf die Reduktion der Belästigungswirkung von Lärmschutzmaßnahmen steht die Arbeit von Nilsson, Andéhn, & Leśna (2008) stellvertretend für viele ähnliche Untersuchungen. Durch das veränderte Frequenzspektrum infolge der frequenzabhängigen Einfügungsdämpfung von Schallschutzwänden wurde nach dieser Laborstudie die Belästigungswirkung durch Verwendung des A-bewerteten Pegels unterschätzt. Durch den Vergleich der Belästigungswirkung von Straßenverkehrsgeräuschen bei freier Schallausbreitung und hinter einer Lärmschutzwand in verschiedenen Entfernungen wurden die belästigungsreduzierten Effekte durch die Minderung des A-bewerteten Immissionspegels von Lärmschutzwänden untersucht. Diese Laboruntersuchung zeigte dabei, dass bei gleichem A-Pegel die Verkehrsgeräusche hinter der Lärmschutzwand als lästiger wahrgenommen wurden. Dieser Effekt wurde als Reduktion um bis zu 3 dB (belästigungsäquivalent) der durch die Lärmschutzwand erzielten Abschwächung des A-Pegels quantifiziert.

Auf niedrige Lärmschutzwände bezogen ist das FFG-Projekt PASS (Ostermann u. a., 2014) wichtig in welchem die Wirkung einer solchen niedrigen Wand mittels der Randelementemethode simuliert wurde und die Simulationsergebnisse für Wahrnehmungstests herangezogen wurden. Die Berechnungen zeigten eine gute Übereinstimmung mit der Messung der niedrigen Lärmschutzwand. Außerdem konnte die bereits erwähnte Unterschätzung der Belästigungswirkung durch den A-bewerteten Pegel nachgewiesen werden.

Neue Produkte für niedrige Schallschutzwände: nach den Angaben der Firma Hering sind deren folgende Produkte vergleichbar mit Bahnsteigkanten: nSSW System Gabione "Mono Silenzio Forte" und nSSW System "Zbloc - Typ 3 a".

Die weitere Literatur zur Thematik von Lärmschutzwänden weist zwar keinen direkten Bezug zur Fragestellung von WiABahn, soll aber nach der Erstellung des Modells zur Berücksichtigung von Bahnsteigkanten auf Kompatibilität geprüft werden (Busch & Nugent, 2003; Defrance u. a., 2007; Heutschi, 2008; C. Kirisits u. a., 2013; H. Kirisits, 1986; Morgan, Hothersall, & Chandler-Wilde, 1998; van Leeuwen, 1996).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die höchste Einfügungsdämpfung durch das Vorhandensein von Bahnsteigkanten entlang von Gleisanlagen für niedrig gelegene Immissionsorte erwartet wird. Sowohl durch die Beugungs- und Reflexionseffekte, als auch durch die geometrische Anordnung der Schallquellen wird ein deutlicher vertikaler Gradient

für die Einfügungsdämpfung erwartet. Des Weiteren stellt der Bahnsteig im Gegensatz zu einer niedrigen Lärmschutzwand eine breite (d.h. normal auf die Fahrtrichtung ausgedehnte) Struktur dar. Dies kann sowohl Beugung als auch Reflexionen beeinflussen und zu Veränderungen in der Einfügungsdämpfung führen (für konventionelle breite Lärmschutzwände siehe z.B. Okubo & Yamamoto, 2013).

Daher sind für die experimentellen Analysen jedenfalls Immissionspunkthöhen in mehreren Höhen notwendig. Günstig wäre die Messung in einem Bereich beginnend unter der Höhe der Bahnsteigkante bis zu typischen Höhen für Obergeschoße von nahe gelegenen Objekten. Aufgrund der frequenzabhängigen Einfügungsdämpfung ist in einzelnen Terzbändern zu messen. Dies auch zum Vergleich mit den Methoden zur Immissionsberechnung nach dem neuen Anhang II der END (European Noise Directive) und um Aussagen zur Belästigungswirkung zu diskutieren.

Unbedingt erforderlich ist die Bestimmung der entsprechenden Terzbandpegel für einen Referenzfall ohne Abschirmkante, mit dem erst eine Einfügungsdämpfung bestimmt werden kann. Hierzu wird empfohlen den Referenzpunkt emissionsnah zu positionieren, z.B. entsprechend den gängigen Normen (ISO 3095) in 7,5 m Abstand und 1,2 m oder 3,5 m über SOK.

Abbildung 1 zeigt beispielsweise die Differenzdarstellung zwischen einer Schallausbreitungsberechnung mit Ersatzschallquelle nach ONR 305011 und einer Berechnung mit Ersatzschallquelle verschoben auf Bahnsteigkante und Wagenaußenkante nach dem jetzigen Stand der Technik. Die Höhe der Bahnsteigkante beträgt, wie dann auch am Bahnhof Wiener Neustadt, 53 cm über SOK.



Abbildung 1: Differenzdarstellung mit Ersatzschallquelle nach ONR305011 versus verschoben auf Bahnsteigkante und Wagenaußenkante.

3. MESSTECHNISCHE ERHEBUNG

Zur Validierung der durchgeführten Simulationen wurden akustische Nahfeld-Messungen durchgeführt, um den Einfluss der akustischen Abschirmung durch reflektierend und absorbierend ausgeführte Bahnsteige sowie durch Bahnsteigdächer zu untersuchen. Hierbei wurden zwei Messverfahren angewandt: einerseits sollte mit Hilfe einer definierten Schallquelle die Beeinflussung des Schallfeldes durch die Bahnsteigkante bzw. das Bahnsteigdach vermessen werden. Dazu wurden Messungen der Impulsantwort (MLS-Verfahren) in einer repräsentativen Geometrie durchgeführt. Andererseits wurden in einem Bahnhof Zugvorbeifahrtmessungen im akustischen Nahfeld durchgeführt, um die Auswirkungen der Bahnsteigkanten sowie des Bahnsteigdaches in tatsächlichen Situationen zu quantifizieren.

3.1. Messungen mit definierter Schallquelle

In einem ersten Schritt wurden Testmessungen am Gelände des AIT durchgeführt, um das geplante Messsetup zu testen und erste Vergleichssimulationen in einer kontrollierten Umgebung durchführen zu können. Dazu wurde die Bahnsteigkante mit einem einseitig absorbierenden Lärmschutzwandelement nachgebildet. Das Setup dieser Testmessung ist in Abbildung 2 dargestellt. Zum Vergleich einer absorbierenden mit einer reflektierenden Bahnsteigkante wurde das Lärmschutzwandelement jeweils mit absorbierender bzw. reflektierender Seite zum Lautsprecher ausgerichtet.

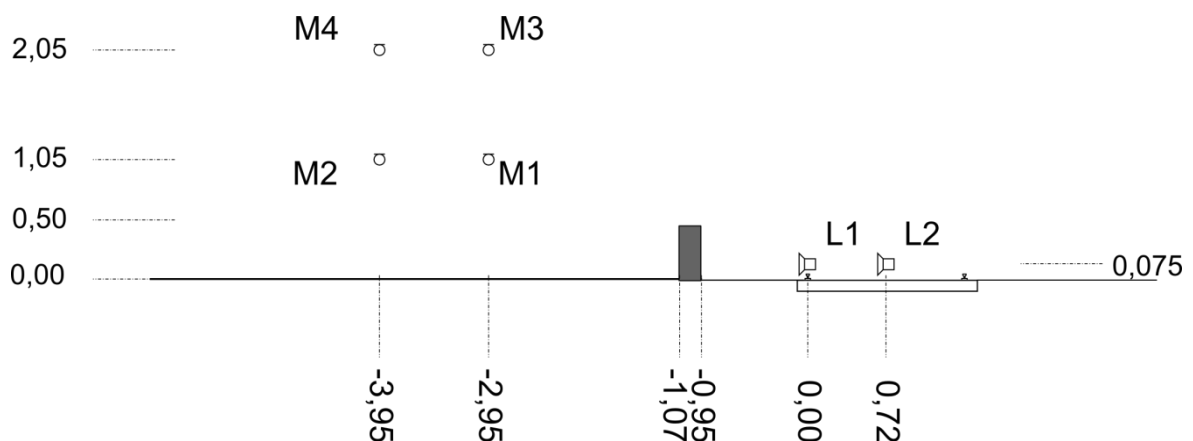


Abbildung 2: Setup der Testmessungen am AIT-Standort; das grau eingezeichnete Lärmschutzwandelement ist einseitig absorbierend ausgeführt und wurde als Vergleich jeweils mit absorbierender und reflektierender Seite dem Lautsprecher zugewandt vermessen.

In beiden Konfigurationen wurde die Impulsantwort zwischen der Schallquelle und den Mikrofonen gemessen und jeweils mit einer Freifeld-Messung über reflektierendem Boden verglichen. In Abbildung 3 sind dazu die Fourier-Spektren der Freifeldmessung sowie der Messung mit reflektierendem und absorbierendem Lärmschutzwand-Element dargestellt. Eine starke Änderung des Schallfeldes aufgrund der Abschirmung durch das Lärmschutzwandelement ist deutlich zu sehen. Während es in einem breiten Spektralbereich zu einer Verringerung des Schalldrucks am Messpunkt kam, kam es durch Beugungseffekte im Bereich um 3,5 kHz seitunenabhängig zu einer Verstärkung. Im Gegenzug dazu waren die Änderungen durch die Ausrichtung der absorbierenden bzw. reflektierenden Seite zum Lautsprecher nur minimal.

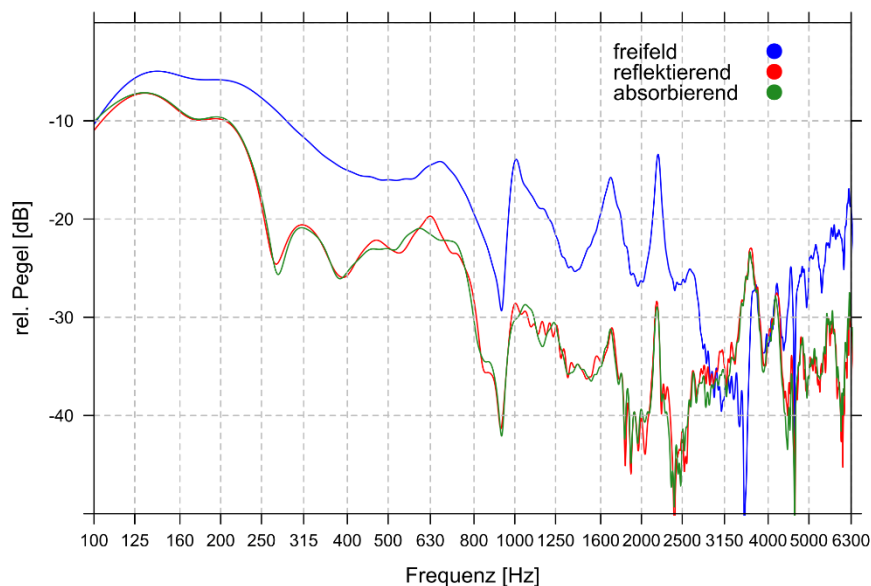


Abbildung 3: Vergleich der relativ-Pegel der Fourierspektren von Freifeld- sowie absorbierender und reflektierender Messung (Testmessungen am AIT-Standort).

Dieses Messkonzept wurde daraufhin am Bahnhof Wiener Neustadt angewandt. Dieser verfügt auf den Durchgangsgleisen über absorbierende Bahnsteigkanten, ebenso ist am Südende des Bahnhofes ein Bahnsteig teilweise nicht überdacht, sodass die zu untersuchenden Situationen gut abgebildet werden können. Abbildung 4 zeigt die Testmessungen am AIT-Standort (links) und Validierungsmessungen an der absorbierenden Bahnsteigkante am Bahnhof Wiener Neustadt (rechts). Die Höhe der Bahnsteigkante am Bahnhof Wiener Neustadt beträgt 53 cm über SOK.

Zu beachten ist hier, dass durch das Gleisbett der Boden der Bahnsteigmessungen im Vergleich zu den Referenz- bzw. Freifeldmessungen nicht als vollreflektierend angenommen werden kann. Diesem Umstand wurde beim Vergleich der Messungen mit den Simulationen durch ein Bodenimpedanzmodell Rechnung getragen. Das führt auch dazu, dass die Testmessungen am AIT-Standort nicht als Vergleich mit den Messungen an der Bahnsteigkante am Bahnhof Wiener Neustadt herangezogen werden sollten, sondern lediglich als Überprüfung des Messkonzeptes und der Nachbildung mittels Randelementesimulationen dienen.



Abbildung 4: Testmessungen am AIT-Standort (links) und Validierungsmessungen an der absorbierenden Bahnsteigkante am Bahnhof Wiener Neustadt (rechts).

Die Ergebnisse der oben erwähnten Messungen sind gemeinsam mit den Vergleichen zu den Randelementesimulationen in Kapitel 4.1.1 und Kapitel 4.2 beschrieben. Die frequenz aufgelösten Ergebnisse der Testmessungen am Standort AIT sind in Abbildung 15 bis Abbildung 20 dargestellt, während in Abbildung 23 bis Abbildung 27 Ergebnisse der Nahfeldmessungen am Bahnhof Wiener Neustadt gezeigt werden.

3.2. Messungen von Zugvorbeifahrten im Nahfeld

Um die tatsächlichen Auswirkungen auf den Vorbeifahrtspegel zu bewerten, wurden Zugvorbeifahrten am Bahnsteig an mehreren Querschnitten gemessen. Dabei wurden die Situationen "ohne Bahnsteig" (Messquerschnitt südlich vor Bahnhof), „Bahnsteig“ sowie „Bahnsteig mit Dach“ jeweils für absorbierende und reflektierende Bahnsteigkanten untersucht (Abbildung 5).



Abbildung 5: für die Zugvorbeifahrten betrachtete Querschnitte am Südende des Bahnhofs Wr. Neustadt; untersucht wurden die Situationen „ohne Bahnsteig“, „Bahnsteig“ sowie „Bahnsteig mit Dach“.

Um Quervergleiche zwischen den Bahnsteigen zu ermöglichen, wurden die Verläufe der Schalldruckpegel der in den Bahnhof ein- bzw. ausfahrenden Züge erfasst und Differenzwerte zwischen den einzelnen Querschnitten berechnet. Dies sollte es ermöglichen, bis zu einem gewissen Grad Vergleiche zwischen den beiden Bahnsteigkantensituationen durchzuführen, obgleich die Vorbeifahrten durch verschiedene Zugarnituren erfolgten (aufgrund einer Baustellen im Bahnhofsbereich von bis zu ca. 50 km/h).

Abbildung 6 zeigt das Setup der Messungen von Zugvorbeifahrten beim Querschnitt „Bahnsteig mit Dach“. Die Bahnsteigkante bei Gleis 3 und Gleis 4 ist einseitig absorbierend ausgeführt (in grau eingezeichnet), während am Gleis 2 eine reflektierende Bahnsteigkante vorhanden ist (weiß dargestellt). Die Höhe der Bahnsteigkante am Bahnhof Wiener Neustadt beträgt 53 cm über SOK. Das Messmikrofon wurde in 1 Meter Höhe über dem Bahnsteig und 2 Meter Entfernung von der Bahnsteigkante positioniert.

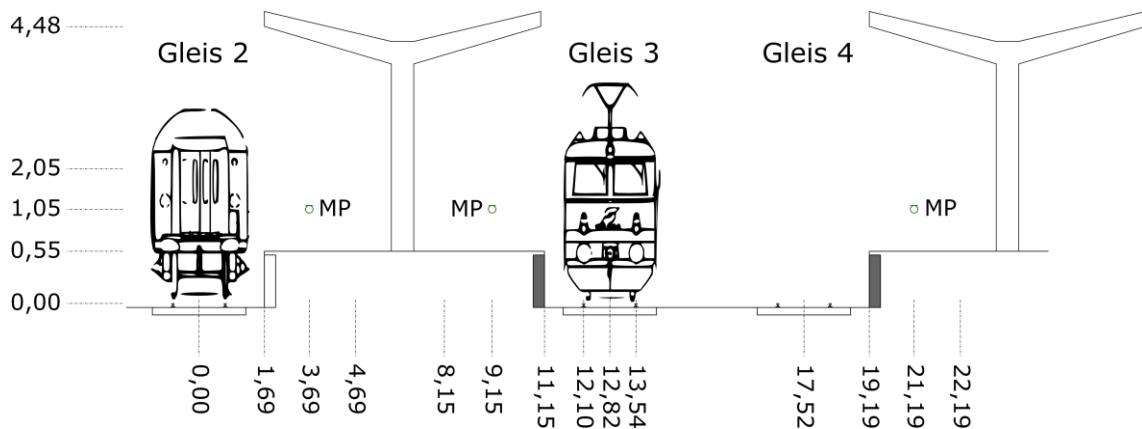


Abbildung 6: Skizze des Messsetups von Zugvorbeifahrten beim Querschnitt „Bahnsteig mit Dach“. Die Bahnsteigkante bei Gleis 3 und Gleis 4 ist einseitig absorbierend ausgeführt (in grau eingezeichnet), während am Gleis 2 eine reflektierende Bahnsteigkante vorhanden ist (in weiß dargestellt) (siehe auch Übersichtsfoto in Abbildung 5 sowie Übersichtslageplan in Abbildung 11).

Abbildung 7 zeigt zwei beispielhafte Vorbeifahrten von einem Güterzug am Querschnitt „Bahnsteig mit Dach“ (links) und von einem Regionalzug am Querschnitt „Bahnsteig ohne Dach“ (rechts).

In Abbildung 8 wird beispielhaft der Schalldruckverlauf als L_{Af} (maximal A-bewerteter Pegel mit Zeitbewertung „fast“) zweier Zugvorbeifahrten an den drei Querschnitten dargestellt. Die Messpunkte am Bahnsteig waren dabei sowohl für die Situation „Bahnsteig“ als auch „Bahnsteig mit Flugdach“ in einer Höhe von 1m über Bahnsteig und 2m von der Bahnsteigkante entfernt, der Referenzmesspunkt vor dem Bahnsteig war so angeordnet, dass die Geometrie relativ zum Gleis gleich den Messpunkten am Bahnsteig war.

In Grün wird die Vorbeifahrt vor dem Bahnhof gezeigt. Man sieht hier die deutliche Spannweite der Schalldruckpegel, wobei es bei jeder Vorbeifahrt eines Waggon-Drehgestells zu einer Erhöhung des L_{Af} um ca. 10 dB(A) kommt. Diese wird durch das Vorhandensein des Bahnsteigs (Querschnitt „Bahnsteig“, blau) wie auch der Maximalpegel abgeschwächt. Am Querschnitt „Bahnsteig mit Dach“ kommt es aufgrund der Reflexionen am Bahnsteig wieder zu einer Erhöhung des L_{Af} .



Abbildung 7: Beispielhafte Vorbeifahrten von einem Güterzug am Querschnitt „Bahnsteig mit Dach“ (links) und von einem Regionalzug am Querschnitt „Bahnsteig ohne Dach“ (rechts).

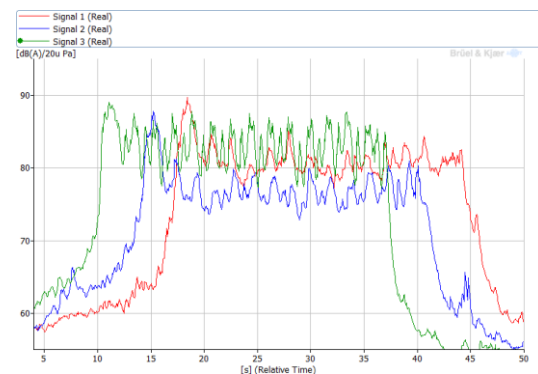
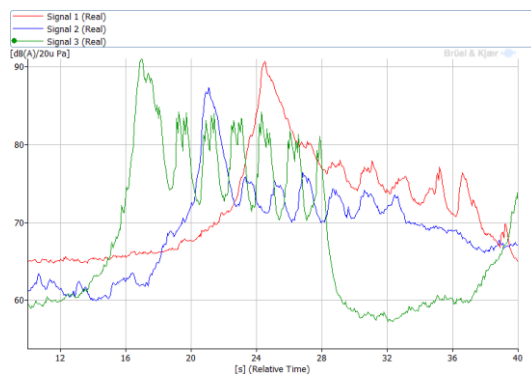


Abbildung 8: Schalldruckpegel-Verlauf zweier Zugvorbeifahrten an den drei Querschnitten (links: Personenzug; rechts: Güterzug). Grün: Vorbeifahrt südlich vor dem Bahnhof am Querschnitt Q1 (ohne Bahnsteig und ohne Dach); Blau: Vorbeifahrt am Querschnitt Q2 (Bahnsteig ohne Dach); Rot: Vorbeifahrt am Querschnitt Q3 (Bahnsteig mit Dach).

Bei Mittelung über mehrere Zugvorbeifahrten (sowohl Güter- als auch Personenzüge) ergeben sich die folgenden Resultate: durch die reflektierende Bahnsteigkante wurde der Schallereignispegel der Vorbeifahrt bei einer reflektierenden Bahnsteigkante am Bahnsteig um ca. 3,7 dB(A) abgeschwächt, bei absorbierender Bahnsteigkante um ca. 3,5 dB(A). Durch die zusätzlichen Reflexionen am Bahnsteigdach wurde der Schallereignispegel wiederum am Bahnsteig um ca. 3 dB(A) angehoben. Aufgrund der aus Tabelle 1 ersichtlichen Schwankung der Pegeldifferenzen ist ersichtlich, dass diese Mittelwerte merklichen Schwankungen unterliegen und daher kritisch betrachtet werden müssen.

Tabelle 1: Schallereignispegel der in die Analyse der Gesamtpegel einbezogenen Zugvorbeifahrten.

Zug-Nr.	Zug-Typ	Bahnsteig- kante	Schallereignispegel [dB(A)]			mittlere Reduktion Bahnsteig	mittlere Reduktion Bahnsteig + Flugdach	mittlere Zunahme durch Flugdach rel. Bahnsteig
			Ref.	Bstg.	Bstg.+Dach			
1	Cityshuttle	reflekt.	91,6	89,0	90,8	-3,7	1,1	2,4
2	Güterzug	reflekt.	104,8	101,6	103,8			
3	4020	reflekt.	92,3	87,5	90,7			
4	Cityshuttle	reflekt.	89,3	84,7	N/A			
5	Cityshuttle	reflekt.	93,3	88,7	N/A			
6	Cityshuttle	reflekt.	88,3	85,7	N/A			
7	Güterzug	absorb.	103,1	100,7	103,9	-3,5	-0,2	3,6
8	Güterzug	absorb.	96,3	91,1	94,8			
9	Railjet	absorb.	92,0	88,3	92,4			
10	Eurocity	absorb.	92,7	88,7	92,6			
11	Güterzug	absorb.	98,2	92,8	96,2			
12	Güterzug	absorb.	103,4	101,5	104,7			
13	Railjet	absorb.	93,8	91,3	N/A			
14	Railjet	absorb.	92,2	88,7	N/A			
15	Railjet	absorb.	89,6	87,0	N/A			
16	Railjet	absorb.	90,0	86,6	N/A			
17	Railjet	absorb.	93,1	89,1	N/A			
18	Railjet	absorb.	89,5	86,1	N/A			

Aufgrund der stark schwankenden Kurzzeit-Schalldruckpegel während der Zugvorbeifahrten, wurden ebenfalls Perzentilpegel ($p=0,05$; $0,25$; $0,50$; $0,75$; $0,95$) der Vorbeifahrtsmessungen berechnet (siehe Tabelle 9 in Anhang A). Diese Bewertung wurde jeweils mit und ohne Anteil des Triebfahrzeugs durchgeführt.

Diese Herangehensweise hat mehrere Gründe. Einerseits ist aufgrund der Antriebstechnik im Triebfahrzeug die Schallquellenverteilung im Gegensatz zu den Waggons deutlich verschieden, wobei für die im Bahnhofsbereich gefahrenen Geschwindigkeiten die durch den Rad-Schiene-Kontakt erzeugte Schallemission von untergeordneter Bedeutung ist. Andererseits weisen auch die Waggons sichtbare Schwankungen der Schallabstrahlung zwischen Drehgestellen und „freiem“ Wagen auf. Hier hat auch der Waggon-Typ einen Einfluss auf die Emission. Die geschlossene Bauweise der Personenzüge tendiert im Vergleich zu den verhältnismäßig offenen Konstruktionen der Güterwaggons im Bereich des Bahnsteiges zu unterschiedlichen Abstrahlcharakteristiken während der Zugvorbeifahrt (Abbildung 9 und Abbildung 10). Gut zu erkennen ist hier die unterschiedliche Spannweite der Perzentilpegel für die Personenzug-Vorbeifahrt. Weitere Zugvorbeifahrten werden in Anhang gezeigt. Die Messergebnisse sind gemeinsam mit den Vergleichen zu den Randelementesimulationen in Kapitel 4.3.3 beschrieben. Die frequenz aufgelösten Ergebnisse der Vorbeifahrtsmessungen in Nahfeld sind in Abbildung 38 bis Abbildung 41 dargestellt.

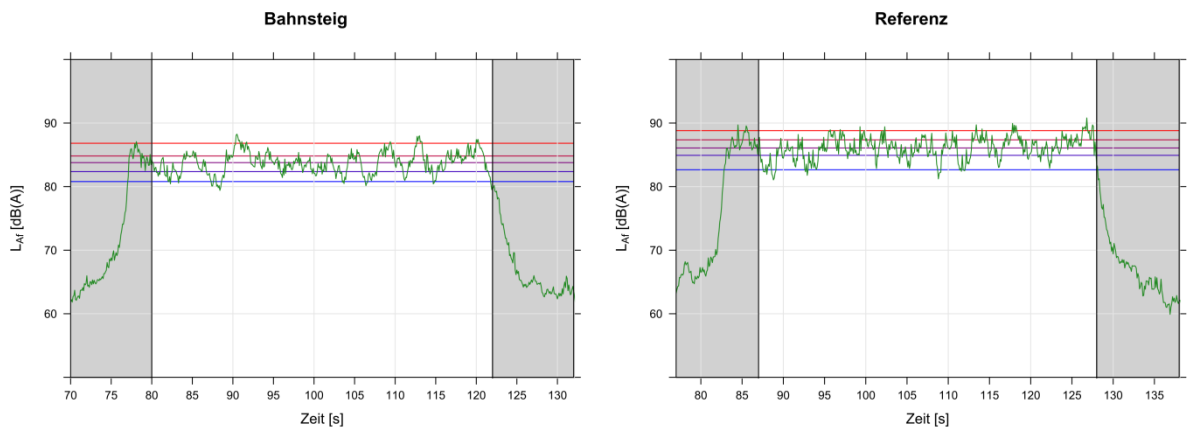


Abbildung 9: Vorbeifahrtspegelverlauf und Perzentilpegel für eine Güterzug-Vorbeifahrt (Zug-Nr. 7); die Perzentilpegel (blau nach rot: $p=0,05$; $0,25$; $0,50$; $0,75$; $0,95$) wurden über den weiß hinterlegten Bereich berechnet, das Triebfahrzeug wurde von der Berechnung ausgenommen.

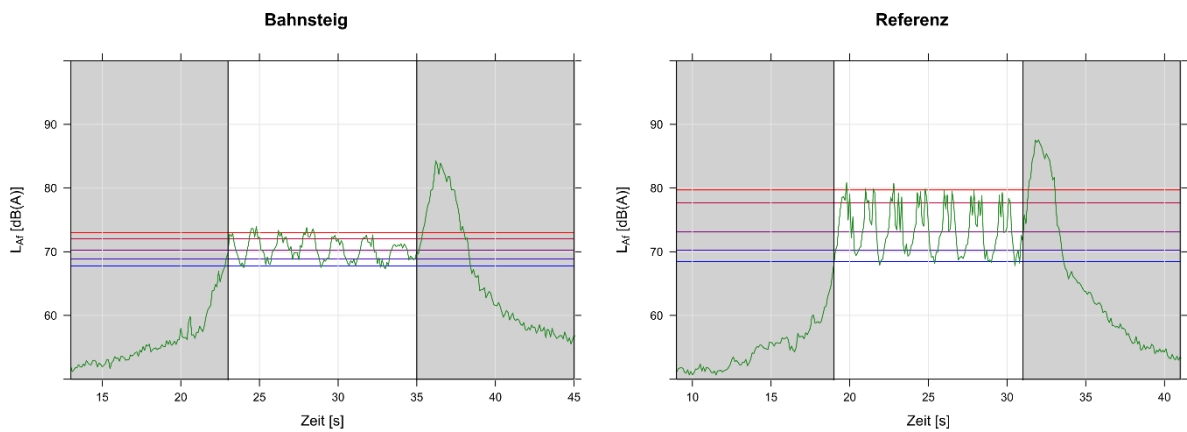


Abbildung 10: Vorbeifahrtspegelverlauf und Perzentilpegel für eine Personenzug-Vorbeifahrt (Zug-Nr. 16); die Perzentilpegel (blau nach rot: $p=0,05$; $0,25$; $0,50$; $0,75$; $0,95$) wurden über den weiß hinterlegten Bereich berechnet, das Triebfahrzeug wurde von der Berechnung ausgenommen.

3.3. Fernfeldmessungen

Im September 2015 fanden am Bahnhof in Wiener Neustadt Fernfeldmessungen statt. Dabei wurde entsprechend des auf der Literaturstudie basierenden Konzeptes ein Messaufbau hergestellt. Ein Referenzpunkt wurde gleisnahe installiert, im Messpunkt befanden sich Mikrofonpositionen in drei verschiedenen Höhen. Die folgenden beiden Abbildungen zeigen Lageplan und Querschnitt des Messaufbaues.

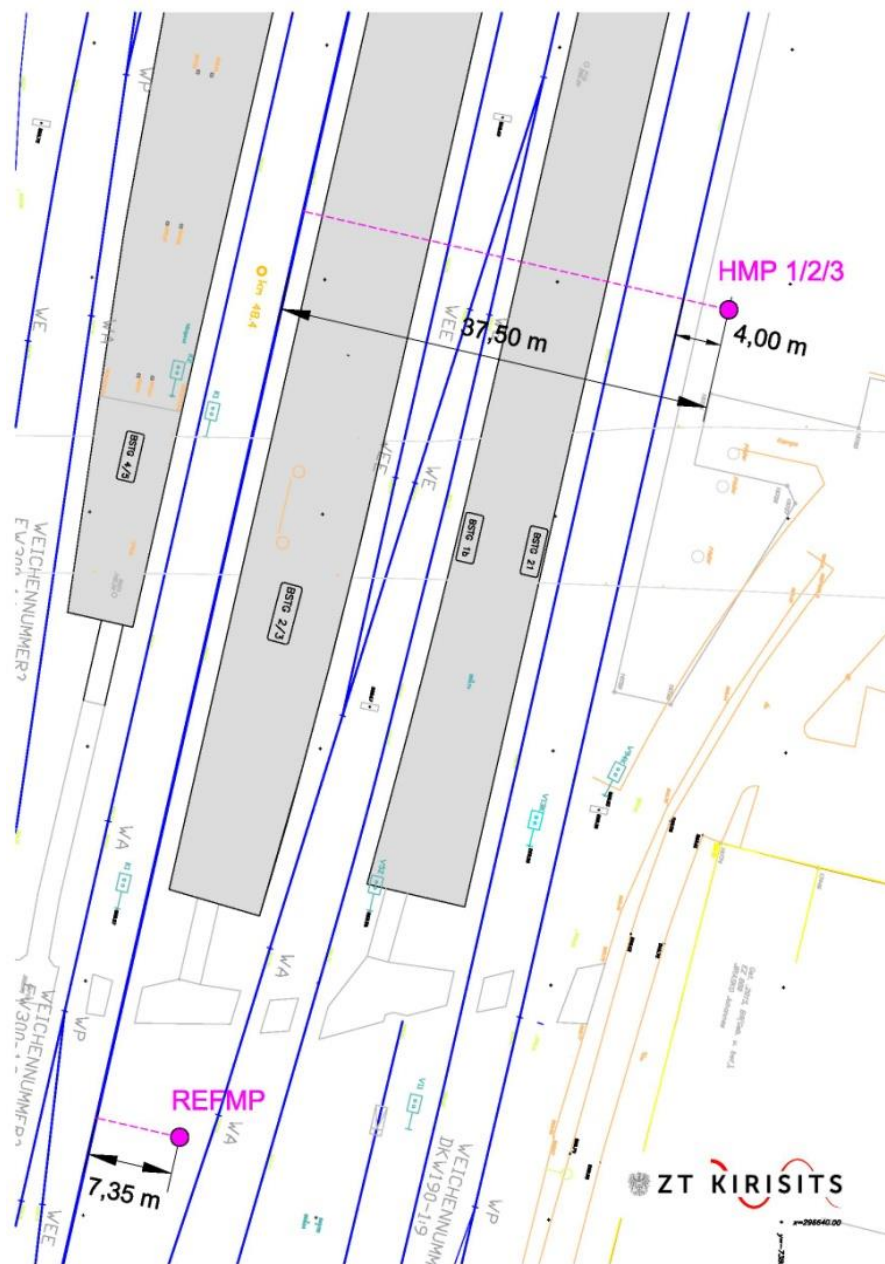
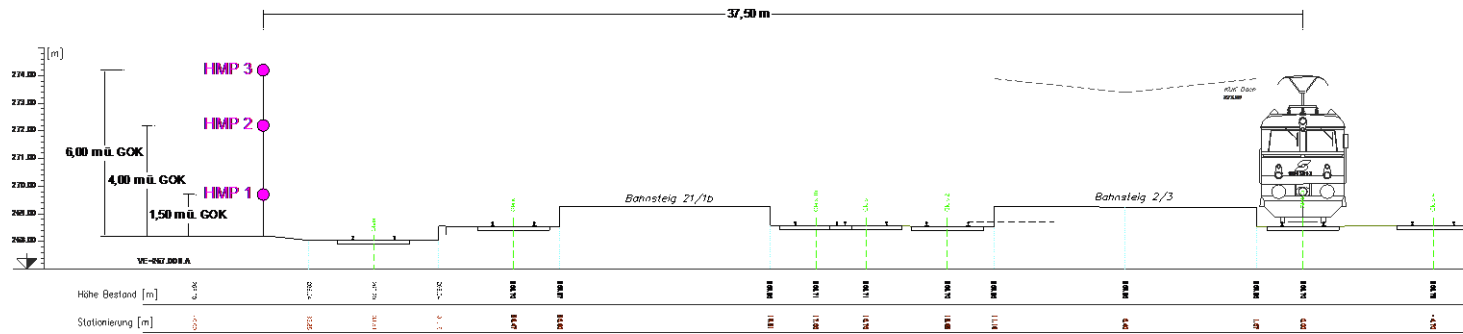


Abbildung 11: Lageplan zur Messgeometrie am Bahnhof Wr. Neustadt.

WIABAHN
QUERPROFILE MESSPUNKTE

Querprofil HMP



Querprofil REFMP

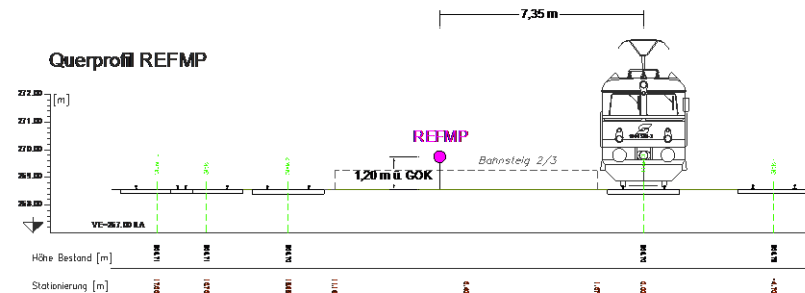


Abbildung 12: Die beiden Querprofile zeigen die Mikrofonpositionen für Messungen in Anwesenheit eines Bahnsteigs und für die Referenzgeometrie mit freier Schallausbreitung.

Insgesamt konnten 11 Vorbeifahrten von Güterzügen auf dem Gleis 3 ausgewertet werden. Aufgrund von Bauarbeiten zum Zeitpunkt der Messung wurden auf dem Gleis 3 die Züge in beide Fahrrichtungen geleitet und eine reduzierte Geschwindigkeit von 50 km/h festgelegt. Diese Züge haben mit gleichbleibender Geschwindigkeit den Messaufbau passiert. Die von der Fahrdienstleitung bekanntgegebene Geschwindigkeit wurde durch Zeitnahme der Vorbeifahrt an festgelegten Punkten auf +/- 10 km/h verifiziert. Die Pegelschriebe wurden sowohl A-bewertet als auch in Terzbändern aufgezeichnet. Die folgende Abbildung zeigt beispielhaft die Pegelschriebe einer Vorbeifahrt.

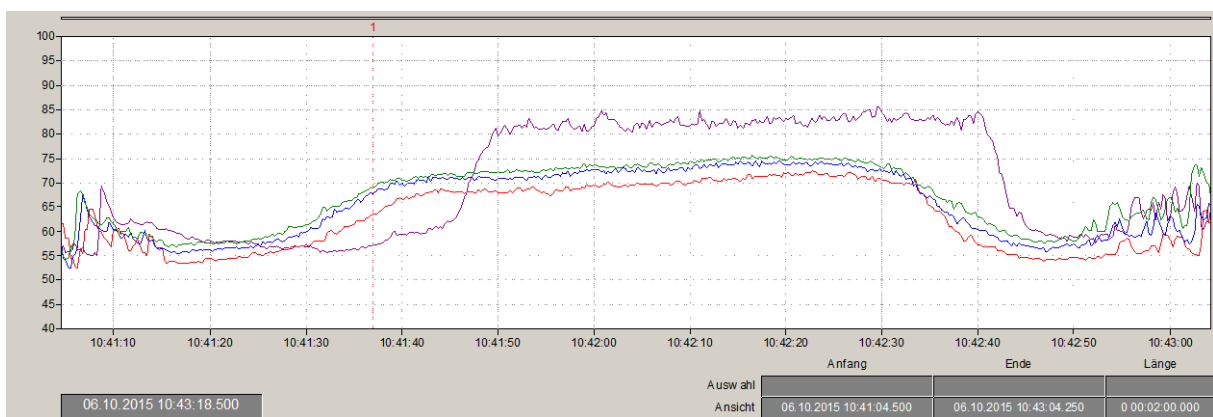


Abbildung 13: Beispiel für einen Pegelschrieb bei einer Güterzugvorbeifahrt (Gleis 3, absorbierende Bahnsteigkante, Fahrrichtung Süden). Der Schallereignispegel der Vorbeifahrt $L_{A,E} = 99,8$ dB ergab sich für den Referenzpunkt (violett), die $L_{A,E}$ Werte für die Messpunkte in 6 m Höhe (grün), in 4 m Höhe (blau) und in 1,5 m Höhe (rot) betragen 90,9 dB, 90,1 dB und 87,2 dB. Aufgrund von Bauarbeiten zum Zeitpunkt der Messungen wurden auf dem Gleis 3 die Züge in beide Fahrrichtungen geleitet.

3.4. Messergebnisse der Vorbeifahrten im Fernfeld

Die detaillierten Ergebnisse der oben erwähnten Messungen sind gemeinsam mit den Vergleichssimulationen in Kapitel 4.3.2 beschrieben. Die frequenz aufgelöste Ergebnisse der Vorbeifahrtmessungen in Fernfeld sind in Abbildung 32 bis Abbildung 37 dargestellt.

Tabelle 2 ist eine Zusammenfassung der A-bewerteten Schallereignispegel aller Vorbeifahrten und die daraus gebildeten Mittelwerte der Differenzen der jeweiligen Messpunktwerte zum Referenzpunkt. Die Standardabweichung von < 1,0 dB zeigt eine für Messungen gut reproduzierbare Situation für den konkreten Messaufbau.

Tabelle 2: Schallereignispegel und Differenzen der 3 Messpunkte zum Referenzpunkt für die einzelnen Vorbeifahrten (nur Güterzüge).

Uhrzeit der Messung	10:42	11:26	11:42	11:47	13:00	13:31	14:02	14:21	15:14	15:50	16:36	Mittelwert	Std.abw.
L_{A,E} 6 m [dB]	90,9	97,7	95,3	84,8	80	85,9	96,4	89,4	90,3	94,8	96,3		
L_{A,E} 4 m [dB]	90,1	96,6	94,6	83,9	78,7	85	95,7	88,4	89,3	94,2	95,6		
L_{A,E} 1,5 m [dB]	87,2	94	91,9	80,6	75,6	82,2	93,1	85,2	85,8	90,6	92,1		
L_{A,E} Ref. [dB]	99,8	104,8	102,1	92,2	88,6	92,9	103,1	96,8	96,8	102,5	103,9		
Diff. 6 m [dB]	-8,9	-7,1	-6,8	-7,4	-8,6	-7	-6,7	-7,4	-6,5	-7,7	-7,6	-7,4	0,8
Diff. 4 m [dB]	-9,7	-8,2	-7,5	-8,3	-9,9	-7,9	-7,4	-8,4	-7,5	-8,3	-8,3	-8,3	0,8
Diff. 1,5 m [dB]	-12,6	-10,8	-10,2	-11,6	-13	-10,7	-10	-11,6	-11	-11,9	-11,8	-11,4	0,9

4. MODELLBILDUNG

Ziel der in diesem Kapitel beschriebenen Untersuchungen war es, ein für die Bestimmung der Abschirmwirkung von Bahnsteigkanten und Bahnsteigdächern geeignetes Berechnungsmodell zu finden. Hierzu wurden Berechnungen mittels der Randelementemethode mit den im vorherigen Kapitel beschriebenen Messungen verglichen. Die Vergleiche unter kontrollierten Bedingungen dienen hierbei einerseits zur Validierung der Randelementemethode selbst als auch bestimmter Annahmen z.B. über die Eigenschaften des Schotters. Basierend darauf wurden verschiedene Quellmodelle untersucht und mit den Vorbeifahrtmessungen verglichen um daraus ein Berechnungsmodell für die Schirmwirkung von Bahnsteigen abzuleiten.

4.1. Validierung der Randelementemethode mittels Testmessungen

4.1.1. Randelementemethode

Um die Wirkung der Bahnsteigkante zu berechnen wurde die Randelementemethode verwendet. Bei dieser wird die Lösung der Helmholtz-Gleichung für eine definierte Geometrie numerisch bestimmt. Hierbei müssen nur die Oberflächen der Streuobjekte erfasst und diskretisiert werden. Trotzdem ist eine volle 3D-Berechnung mittels dieser Methode für die vorhandenen Strukturen (Bahndamm, Bahnsteig,...) zu aufwändig.

Im Gegensatz dazu haben 2D-Simulationen den geringsten Rechenaufwand und werden häufig für Lärmschutzwandberechnungen verwendet, vor allem wenn viele verschiedene Geometrien verglichen werden sollen. Ein Nachteil dieser Methode ist die implizite Annahme einer kohärenten Linienquelle, die für Verkehrslärm nicht gegeben ist und die zu Interferenzen führen kann. Spektrale Mittelung und Mittelung über mehrere Quellen können diese Interferenzeffekte aber vermindern. Die nächste Stufe ist 2.5D-Simulation. Hier ist der Rechenaufwand, vor allem bei Verwendung von Impedanzmodellen für Boden und Struktur (z.B. Grasland, absorbierende Oberflächen oder Schotterbett) schon deutlich höher, allerdings lassen sich damit Punkt- und inkohärente Linienquellen nur für lange gerade Strukturen simulieren. Der Unterschied ist, dass bei 3D-Berechnungen die exakte Länge des Objekts eingeht, bei 2.5D aber angenommen wird, dass der Messquerschnitt konstant, gerade und unendlich lang ist. Aufgrund der Recheneffizienz wurde in diesen Untersuchungen eine 2.5D-Variante verwendet (Duhamel, 1996; Kasess, Kreuzer, & Waubke, 2016).

Um die Berechnungsmethode zu validieren wurde die vom AIT durchgeführte Testmessung (siehe Kapitel 3.1) des Lärmschutzwandsegmentes mit einer 3D Berechnung und einer 2.5D Berechnung verglichen. Quelle und Empfänger wurden in der Simulation genauso platziert wie in der Messung. Es wurden 3 Fälle berechnet: freie Schallausbreitung, reflektierende Seite quellseitig und absorbierende Seite quellseitig. Pro Terzband wurden 7 Einzelfrequenzen berechnet und diese über das jeweilige Band gemittelt. Es wurden Terzbänder von 50 bis 4000 Hz berechnet. Der Boden (Asphalt) wurde als vollständig reflektierend angenommen.

Die Absorption des Elements wurde aus einer in-situ Messung der Reflexionsindex nach dem Adrienne-Verfahren übernommen. Der frequenzabhängige Absorptionskoeffizient (ohne Transmission) wurde bestimmt (1-Reflexionsindex) und in reelle Impedanzen umgerechnet. Unter 80 Hz wurde der Absorptionskoeffizient linear bis zur Frequenz 0 Hz, bei der keine Absorption angenommen wurde, interpoliert (Abbildung 14).

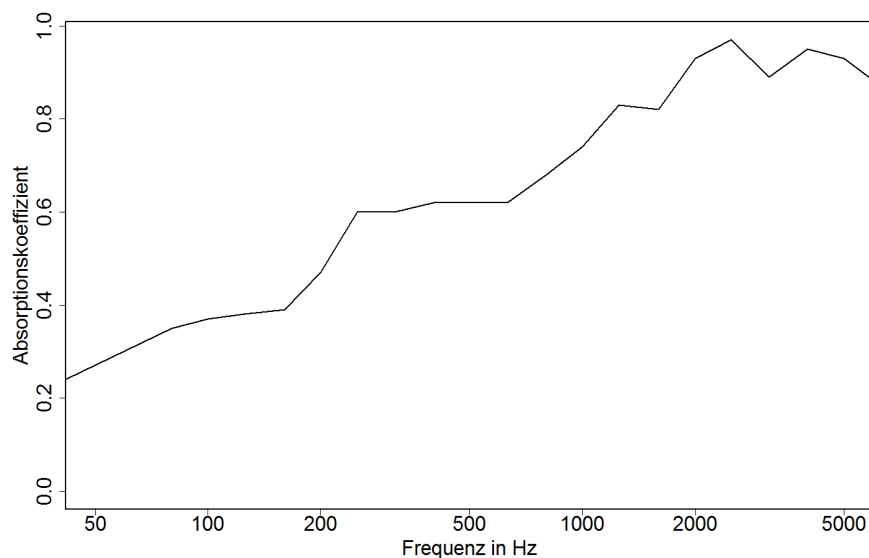


Abbildung 14: In-situ Absorptionskoeffizient für das Forster-Element.

Für die Differenz zwischen freier Ausbreitung und den beiden anderen Fällen wurden Messungen und Simulationen verglichen (siehe Abbildung 15 bis Abbildung 18, über Oktavbänder gemittelt). Es zeigte sich eine sehr gute Übereinstimmung sowohl für die nahe und ferne Position als auch für das quellseitig absorbierende und reflektierende Element, wobei die 3D-Berechnung in den mittleren Frequenzen (100 - 1000 Hz) etwas besser mit der Messung übereinstimmt, was auf die geringe Länge des Elements (4 Meter) und die daraus resultierenden Beugungseffekte seitlich um das Element herum zurückzuführen ist. Diese Abweichung stellt für die Berechnung mit Bahnsteigen kein Problem dar, da der Bahnsteig im

Allgemein bedeutend länger ist, und seitliche Beugungseffekte daher vernachlässigbar sind. Weitere, geringe Abweichungen sind wahrscheinlich auf nicht genau erfassbare Bedingungen wie z.B. die Reflexionseigenschaften des Asphalts, zurückzuführen.

Der Vergleich zwischen quellseitiger Reflexion und Absorption (Abbildung 19 und Abbildung 20) zeigte in der Simulation ebenso wie in der Messung Werte zwischen -1 und 1 dB Unterschied in den Frequenzbändern und lässt auf eine nur geringe Wirkung der Absorption schließen.

In der 2.5D Berechnung wurden die Absorptionskoeffizienten mit 0,95 multipliziert um eine mögliche Überschätzung abzuschwächen. Dies wurde in der 3D-Berechnung nicht getan. Da die Abweichungen zwischen den Berechnungen gering waren und die Unterschiede auf die endliche Länge zurückzuführen sind, wurde in den weiteren Berechnungen die volle Absorption verwendet.

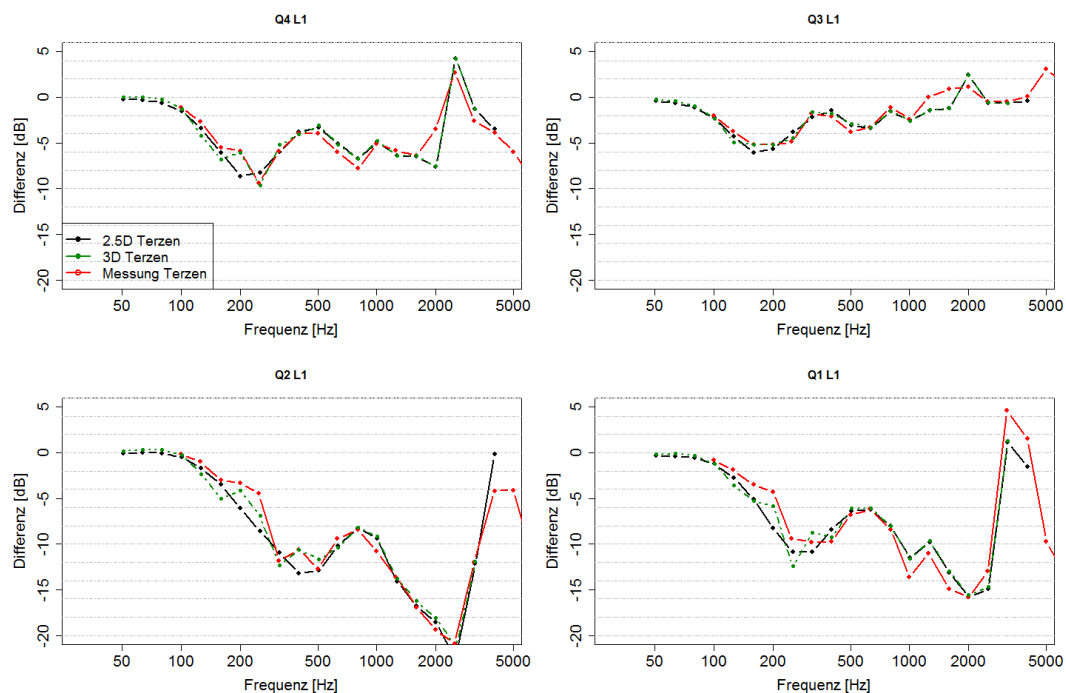


Abbildung 15: Vergleich Messung und Rechnung LSW-Element: Freifeld vs. quellseitig reflektierendes LSW-Element, nahe Quellposition.

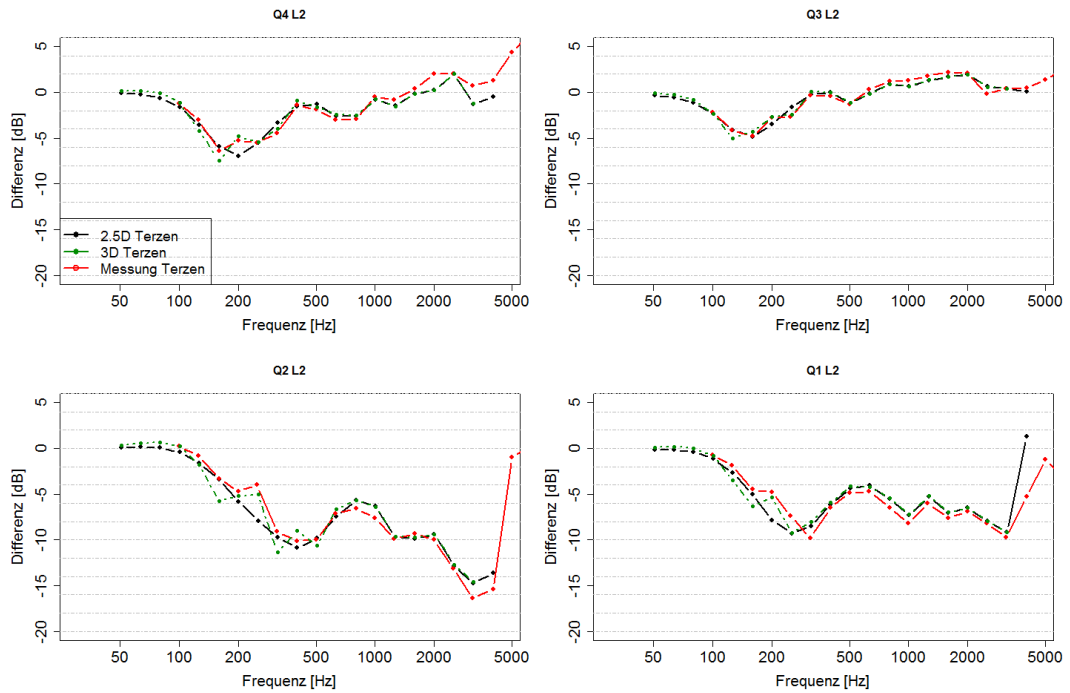


Abbildung 16: Vergleich Messung und Rechnung LSW-Element: Freifeld vs. quellseitig reflektierendes LSW-Element, ferne Quellposition.

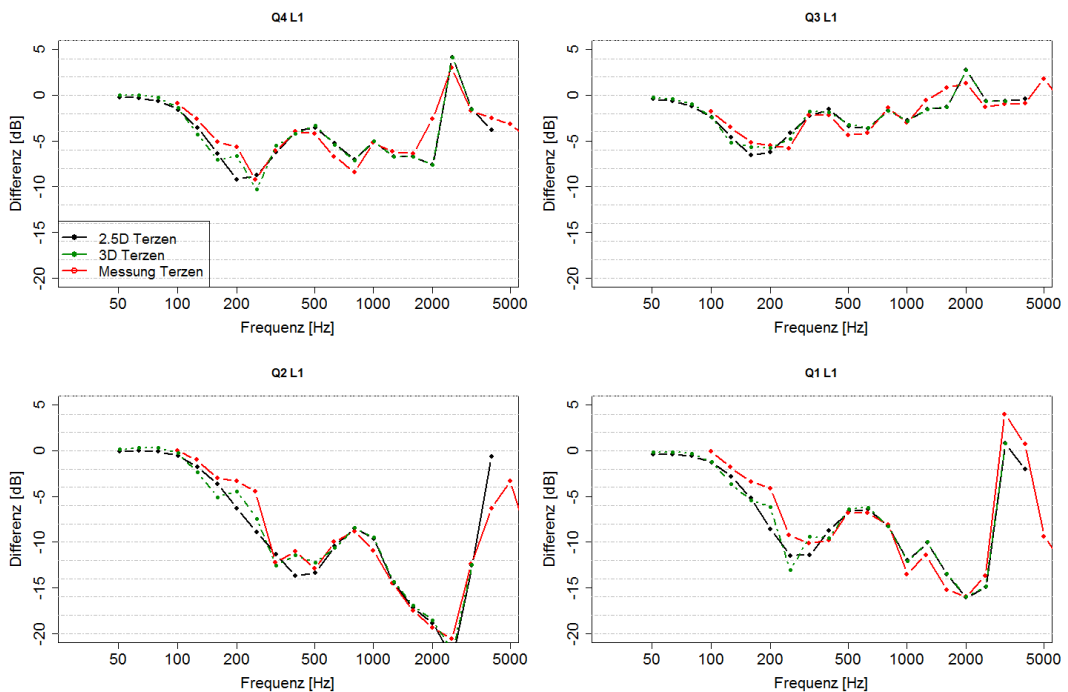


Abbildung 17: Vergleich Messung und Rechnung LSW-Element: Freifeld vs. quellseitig absorbierendes LSW-Element, nahe Quellposition.

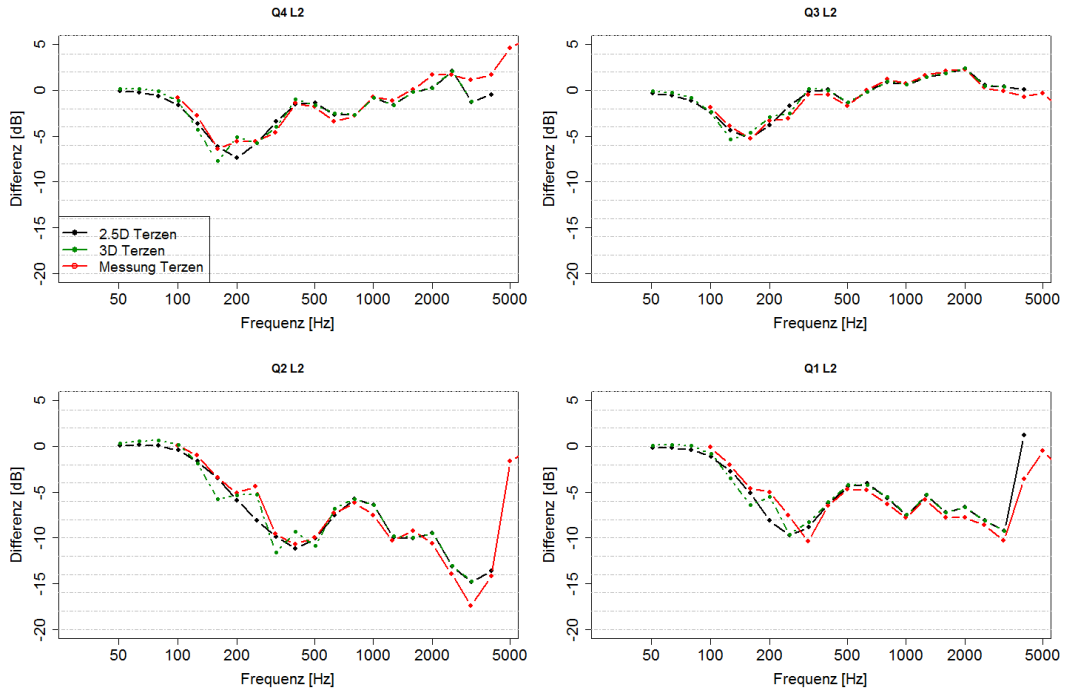


Abbildung 18: Vergleich Messung und Rechnung LSW-Element: Freifeld vs. quellseitig absorbierendes LSW-Element, ferne Quellposition.

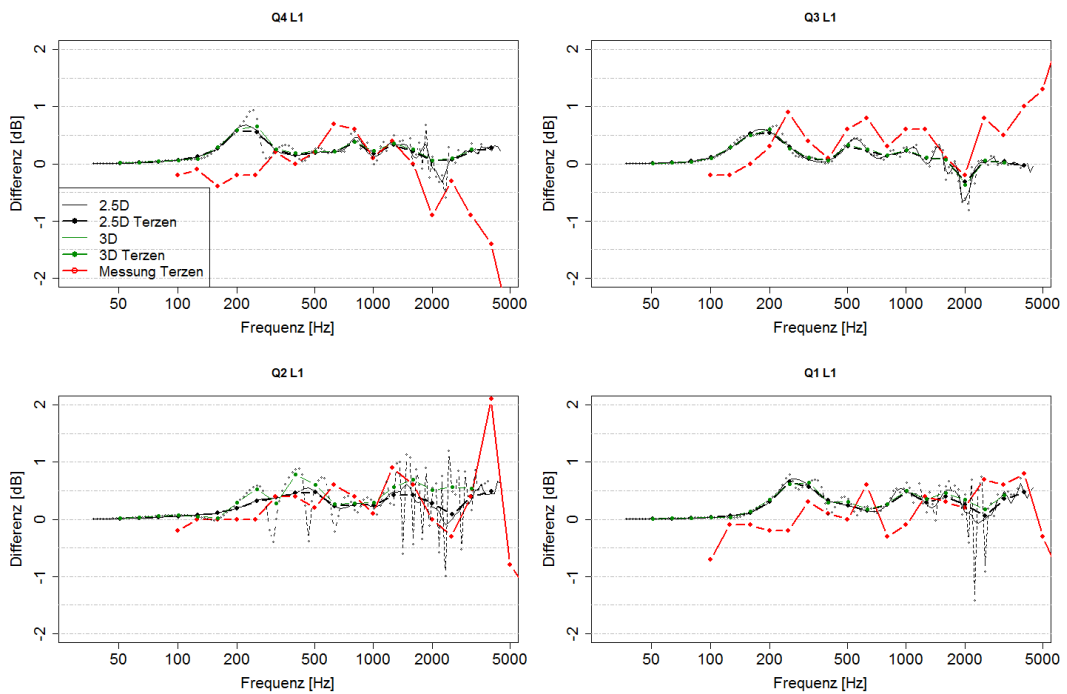


Abbildung 19: Vergleich Messung und Rechnung: Quellseitig absorbierendes vs. reflektierendes Element, nahe Quellposition.

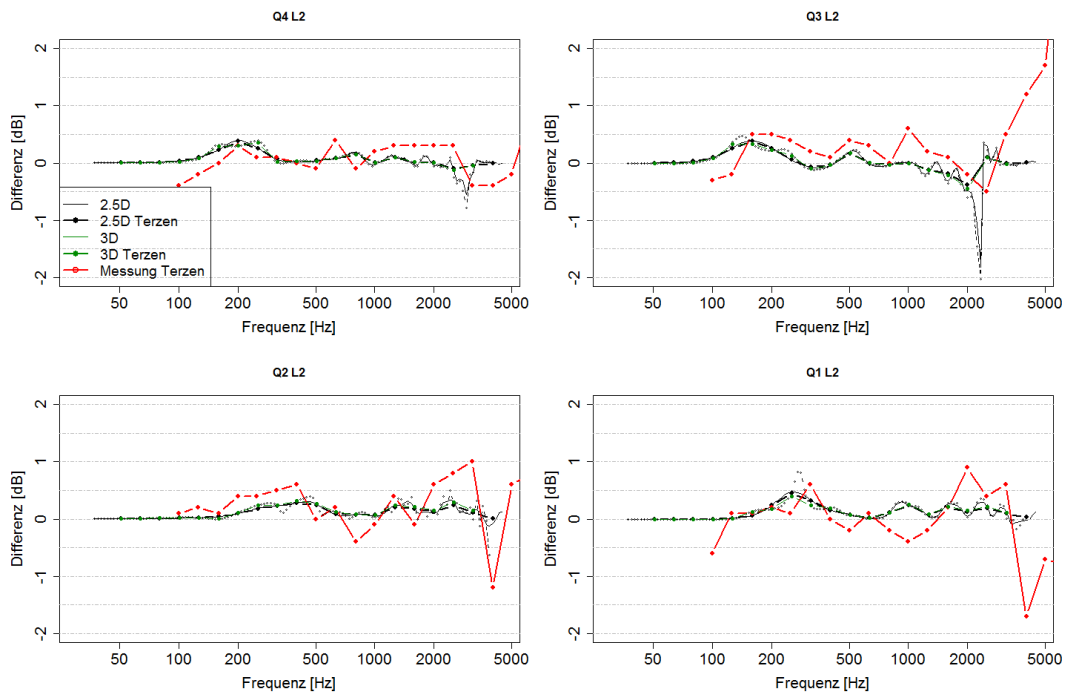


Abbildung 20: Vergleich Messung und Rechnung: Quellseitig absorbierendes vs reflektierendes Element, ferne Quellposition.

4.2. Vergleich für Bahnsteigkanten: definierte Schallquelle

Wie schon bei der Testmessung wurde auch für die Messungen am Bahnsteig mit definierter Schallquelle der Messquerschnitt so genau wie möglich nachgebildet (siehe Kapitel 3.1). Hier gab es allerdings einige relevante Unsicherheitsfaktoren. Für das Gleisbett (Schotter) wurde ein publiziertes Impedanzmodell verwendet (Broadbent, Thompson, & Jones, 2009) die Absorptionseigenschaften von Schotter sind allerdings abhängig von z.B. der Korngröße und Schichtdicke und können daher nur näherungsweise abgebildet werden. Das Modell besteht aus 3 Impedanzschichten (einer dünnen Deckschicht, einer Hauptschicht und einer Bodenschicht) auf einer voll reflektierenden Fläche. Dieses Modell wurde auf Hallraummessungen basierend abgeleitet. Durch die Verwendung einer dünnen oberen und unteren Grenzschicht werden durch mehrfache Reflexionen Interferenzen abgeschwächt (schwarze Linie in Abbildung 21) und es zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit der Hallraummessung. Wie schon im Projekt PASS (FFG 840515) wurde daher auch hier dieses Dreischichtmodell verwendet (siehe auch Waubke & Kasess, 2016).

Die grüne Linie in dieser Abbildung zeigt die Absorption wenn die Admittanz um den Faktor 0,5 abgeschwächt wird. Dieses Modell wurde verwendet um den Boden rund um die Gleise im Referenzquerschnitt des Bahnhofs Wiener Neustadt zu modellieren (siehe Abschnitt 4.3).

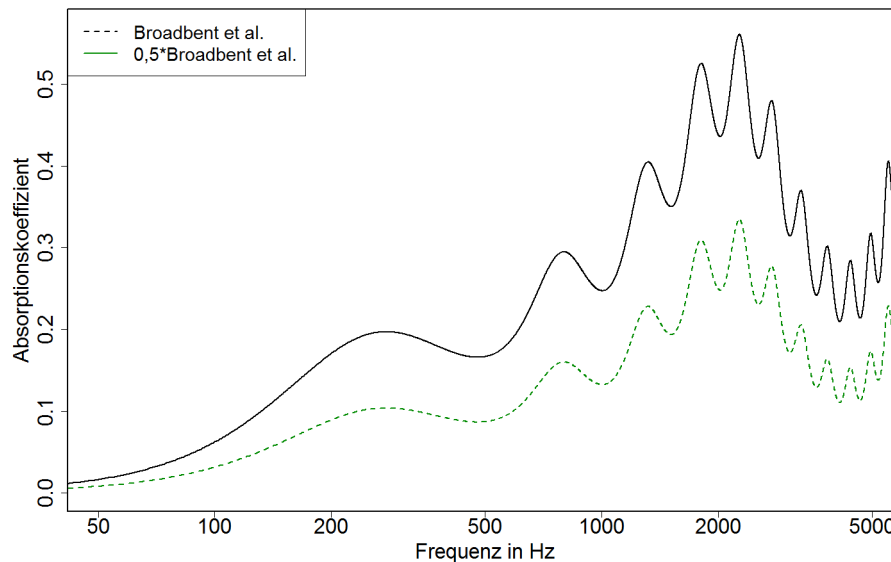


Abbildung 21: Absorptionskoeffizient des 3-Schicht-Admittanzmodells des Schotters.

Die Absorption der Bahnsteigkante ist ebenfalls nur näherungsweise bekannt, da für das verbaute Material keine Kurven existieren sondern nur für ein ähnliches Material das für Gleisabsorber eingesetzt wird.

Weiters ist der Zustand des eingebauten Materials unbekannt (Verschmutzungsgrad, ...). Da es sich nicht um das idente Material handelt und hierfür nur die Hallraumkurve bekannt ist bei der Probleme bzgl. der Überschätzung der Absorption auftreten können wurde auch hier die in-situ Messung des LSW-Elementes aus 4.1 verwendet. (Abbildung 22 repliziert aus Abbildung 14). So wie in der Testmessung wurde auch hier die Absorptionskurve direkt in eine reelle Impedanz umgerechnet.

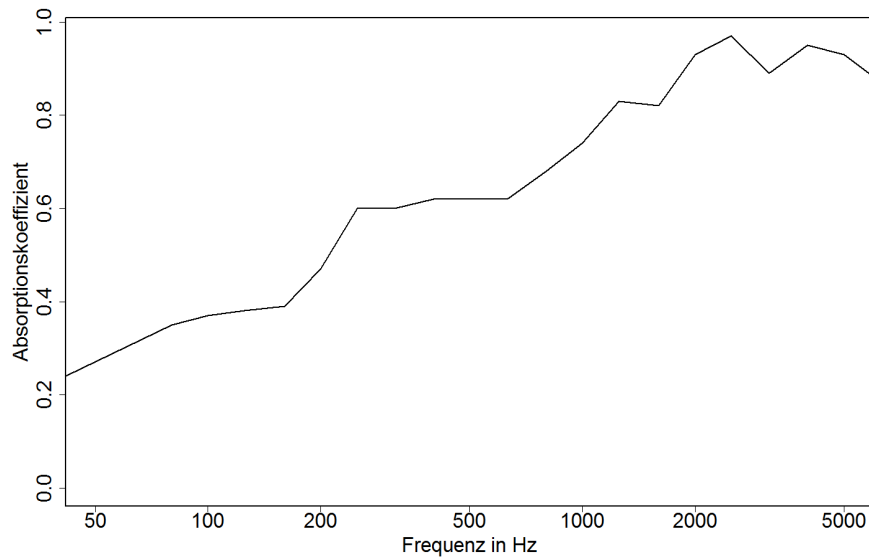


Abbildung 22: In-situ Absorptionskoeffizient für das Forster-Element als Modell für die absorbierende Bahnsteigkante.

Die Schienen sowie alle Betonoberflächen wurden als vollreflektierend angenommen. Falls vorhanden wurde das Dach als dünne Struktur (Mittelflächenelemente, Chen, Hofstetter, & Mang, 1997) angenommen und der Effekt der Riffelung wurde ebenfalls untersucht. Die Referenzmessung am Bahnsteig wurde analytisch nachgebildet da dessen Oberfläche als vollreflektierend angenommen werden kann.

Es wurden 2.5D Simulationen durchgeführt, d.h. der Bahnsteig wurde als unendlich lang angenommen. Wie bereits erwähnt sind 3D-Berechnungen für den Bahnsteig aufgrund der Länge der Struktur und des damit verbundenen extremen Rechenaufwands nicht durchführbar. Diese sind in diesem Fall aber auch nicht notwendig.

Wie in Abbildung 23 und Abbildung 24 ersichtlich, ergab sich auch hier eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung, sowohl mit Bahnsteigdach (die Impulsantwort wurde zeitlich gefenstert sodass die Reflexionen des Daches wegfallen) als auch ohne (hier nicht dargestellt). Die Wirkung der Bahnsteigkante (bezogen auf die Referenzmessung) konnte sehr genau nachgebildet werden.

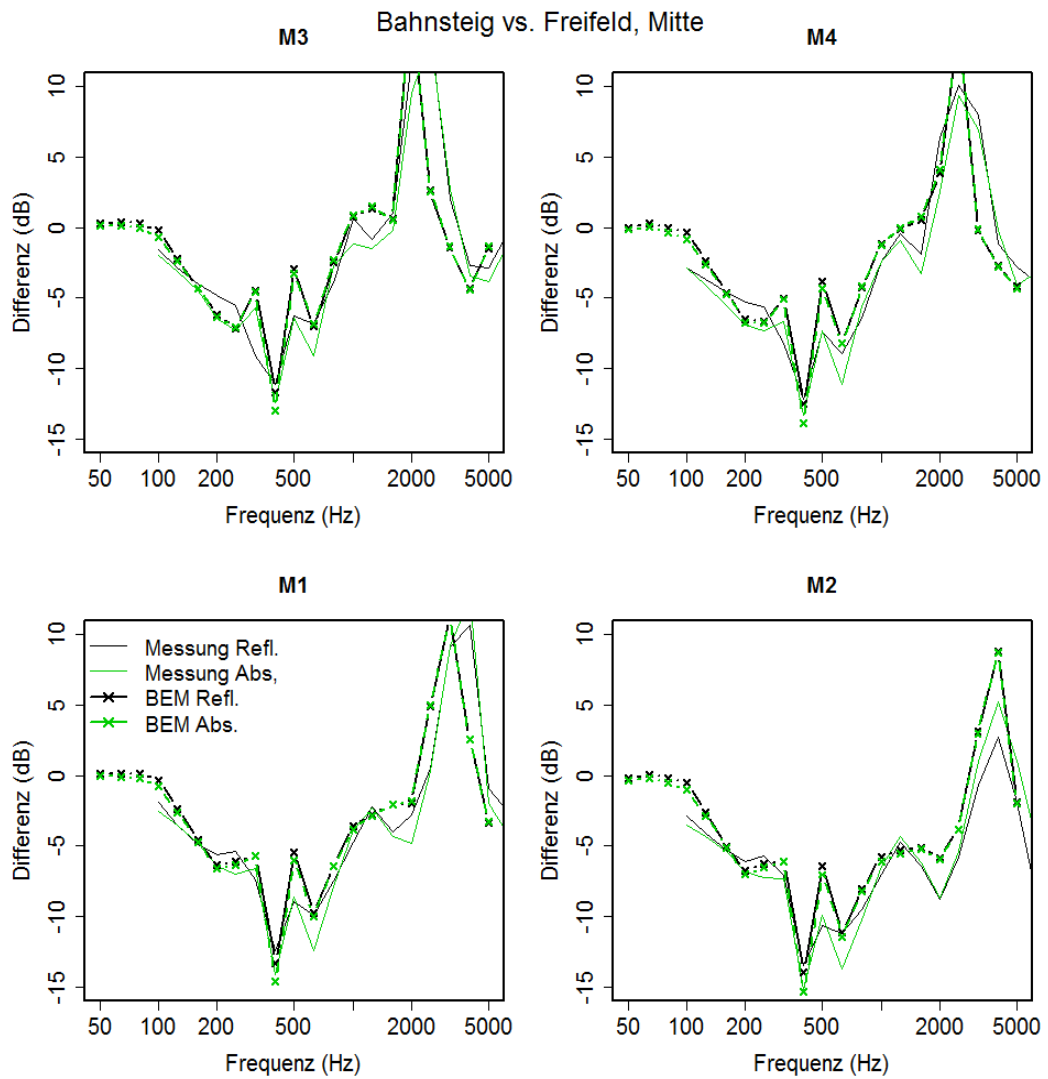


Abbildung 23: Vergleich Messung und Rechnung Schallquelle: Freifeld-Bahnsteig reflektierend und absorbierend mit der Quelle in Gleismitte positioniert.

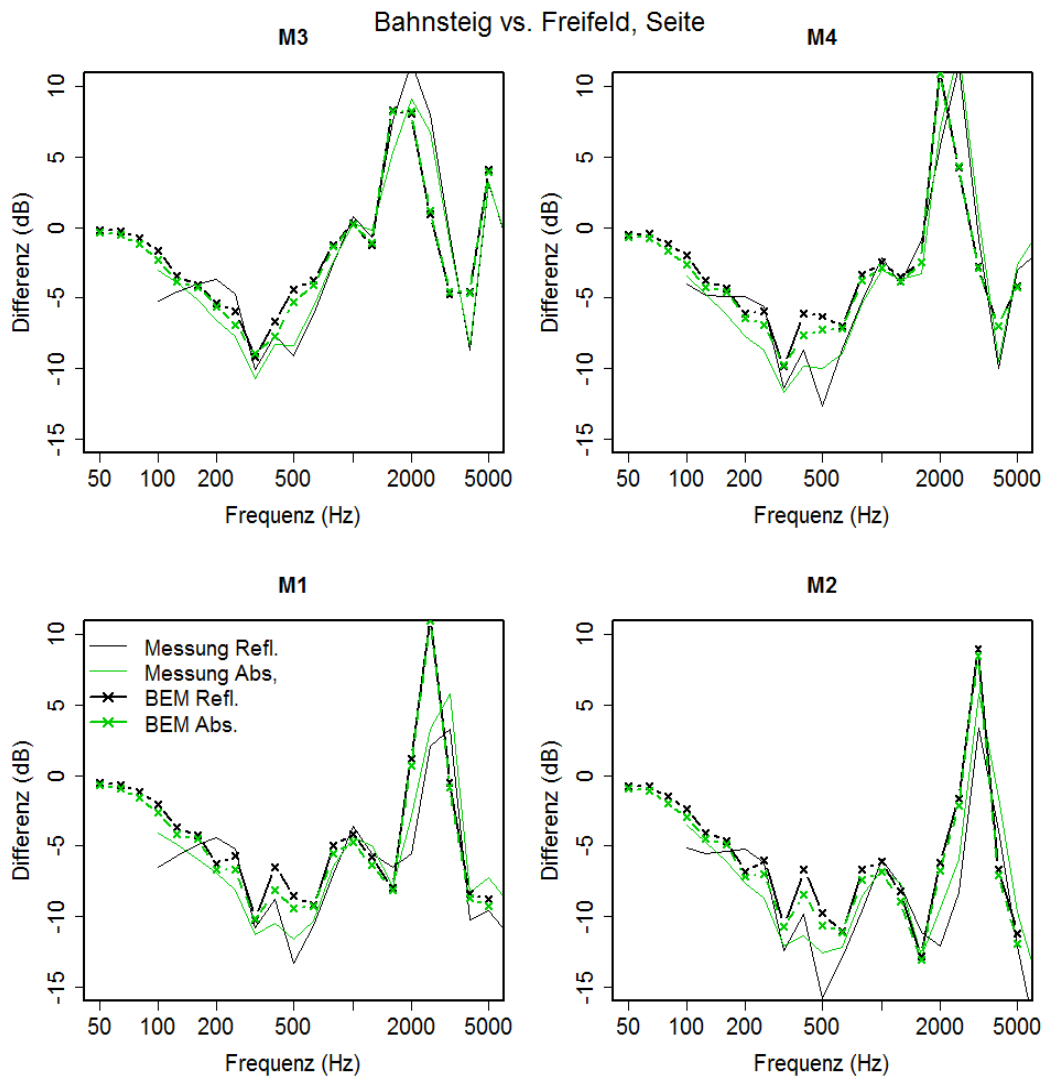


Abbildung 24: Vergleich Messung und Rechnung Schallquelle: Freifeld-Bahnsteig reflektierend und absorbierend mit der Quelle auf der Schiene positioniert.

Der Vergleich zwischen reflektierender und absorbierender Kante (Abbildung 25) zeigt allerdings eine geringere Übereinstimmung, wobei hier anzumerken ist, dass aufgrund der schwierigen Messbedingungen und des geringen zu erwartenden Effektes bei der Differenzbildung größere Schwankungen aufgetreten sind, die in der Berechnung so nicht aufscheinen.

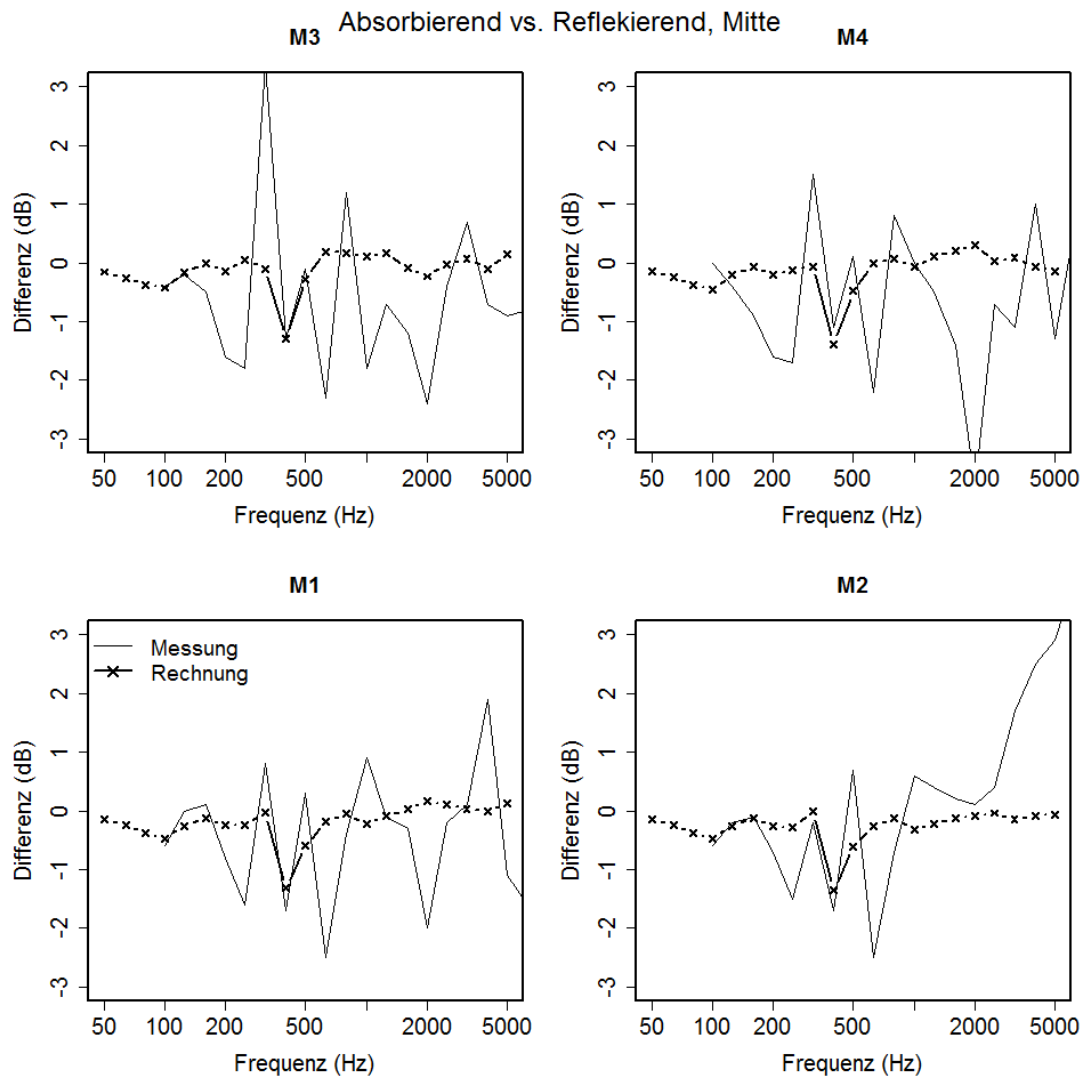


Abbildung 25: Vergleich Messung und Rechnung Schallquelle: Bahnsteig reflektierend vs. absorbierend mit der Quelle in Gleismitte positioniert.

Beim Vergleich der vollen Impulsantwort inklusive des Effekts des Bahnsteigdaches (Abbildung 26 und Abbildung 27) wurde die Wirkung der geriffelten Struktur untersucht. Die Riffelung ist trapezförmig mit einer Periode von etwa 30 cm, das ist ca. die Wellenlänge bei 100 Hz. Der Vergleich zwischen geriffeltem und glattem Dach zeigte für den Fall mit berücksichtigter Struktur dieses Daches eine bessere Übereinstimmung. Die größten Unterschiede zwischen den Dächern traten im hörbaren Frequenzbereich zwischen ca. 400 und 1000 Hz auf und sind daher in einem Frequenzbereich in denen das menschliche Gehör relativ empfindlich ist.

Allerdings werden diese Unterschiede bei Einwirkung mehrere räumlich verteilter Quellen wie z.B. bei einer Zugvorbeifahrt vermutlich deutlich reduziert werden.

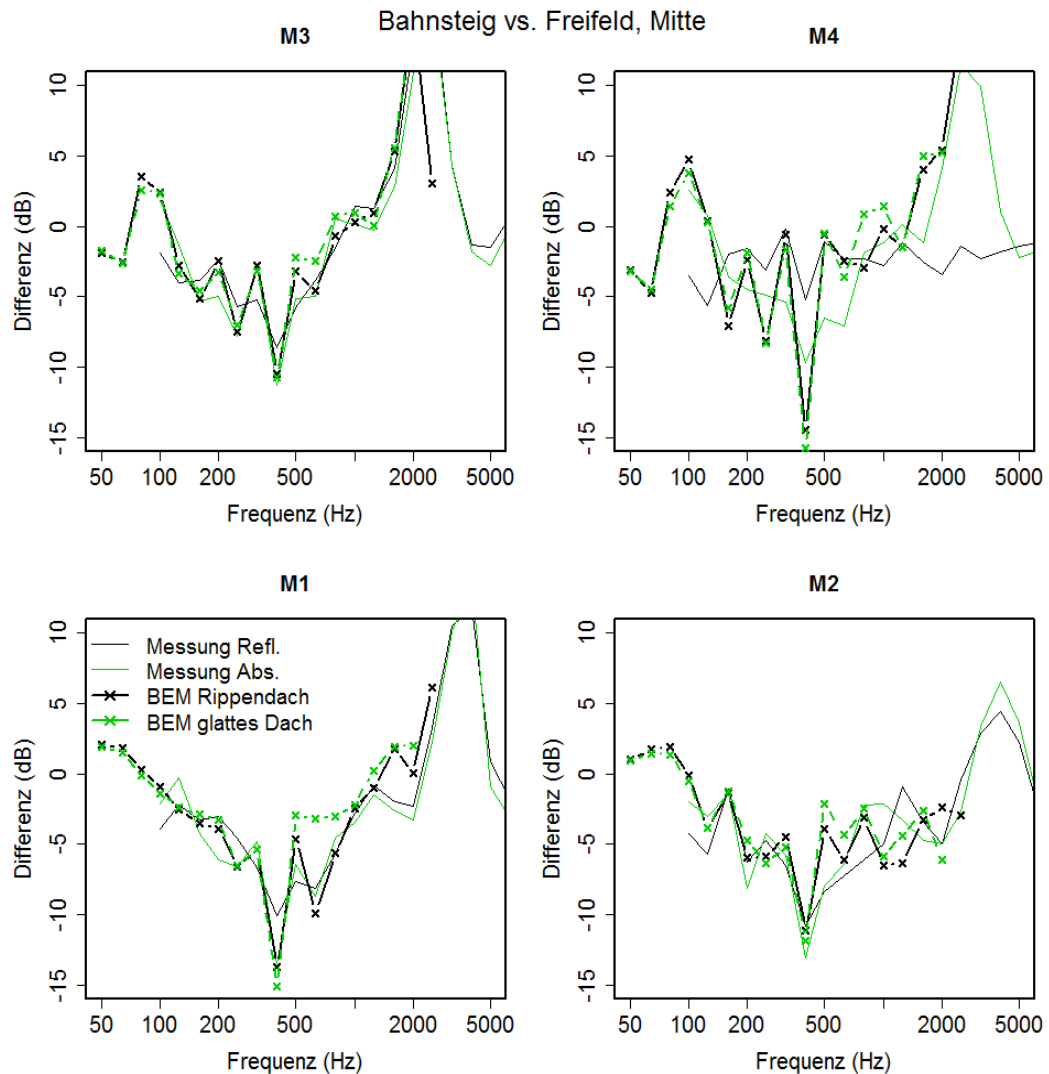


Abbildung 26: Vergleich Messung und Rechnung Bahnsteigdach: Freifeld-Bahnsteig mit glattem Dach und dem Rippenblechdach mit der Quelle in Gleismitte positioniert.

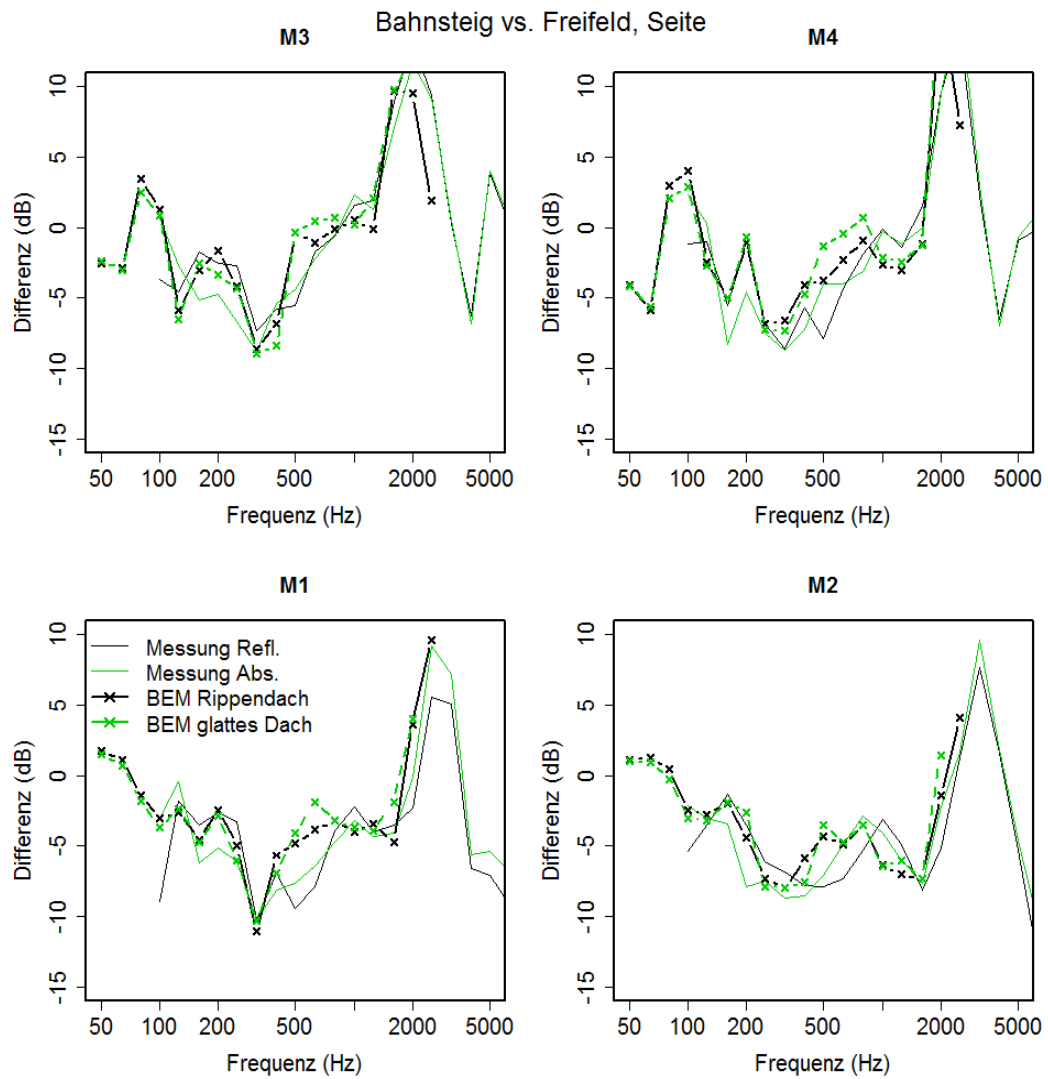


Abbildung 27: Vergleich Messung und Rechnung Bahnsteigdach: Freifeld-Bahnsteig mit glattem Dach und dem Rippenblechdach mit der Quelle auf der Schiene positioniert.

4.3. Vergleich für Bahnsteigkanten: Vorbeifahrten

Der Vergleich zwischen Messung und Simulation bei Verwendung einer definierten Schallquelle illustriert, dass die Berechnungen mittels der Randelementemethode sehr gut mit den Messungen übereinstimmen. Für den Vergleich mit den Vorbeifahrtmessungen wurden daher die prinzipiellen Parameter für den Schotter der absorbierenden Bahnsteigkante beibehalten. Um allerdings auch im Fernfeld Messung und Simulation zu vergleichen, wurden die Simulationsquerschnitte auf die im Ausbreitungsweg liegenden Strukturen ausgeweitet. Im Weiteren musste ein geeignetes Quellmodell gefunden werden um die Messung nachbilden zu können.

4.3.1. Simulationsquerschnitt und Quellmodelle

Abbildung 28 zeigt die verwendeten Simulationsquerschnitte. Der untere Querschnitt zeigt den Referenzmesspunkt, der obere die Höhenmesspunkte (HMPs). Zusätzlich zur Fernfeldmessung sind auch die Messpunkte für die Bahnsteigmessungen eingezeichnet.

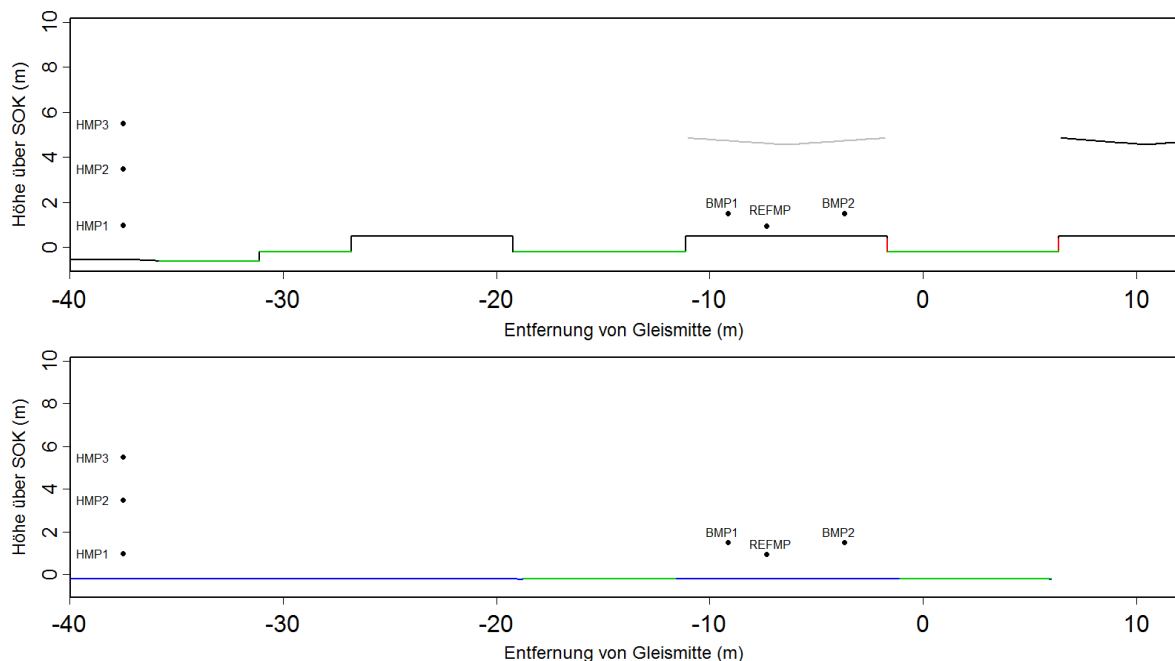


Abbildung 28: Querschnitte die bei der Berechnung des Schallfeldes mittels der Randelementemethode verwendet wurden.

Die Gleisbetten sind grün markiert. Hierfür wurde das oben genannte 3-Schicht-Impedanzmodell verwendet. Das Gleis, für welches die Fernfeldmessungen durchgeführt wurden, ist um den Nullpunkt zentriert. Die absorbierenden Bahnsteigkanten sind

gekennzeichnet, der absorbierende Boden blau. Das grau eingezeichnete Bahnsteigdach erstreckt sich nur über Teile des Bahnsteigs. Der Einfluss dieses Abschnittes wurde ebenfalls im Detail untersucht. Die Dächer wurden hier als glatte Oberflächen gerechnet, da hier kein großer Einfluß auf die HMPs zu erwarten war. Im Referenzquerschnitt wurden die HMPs auf die gleiche Höhe über Schienenoberkante (SOK) gesetzt wie im Bahnsteigsquerschnitt. Abbildung 29 zeigt die verschiedenen Simulationsmodelle (Modell 1-3) die sich durch den Wagenkasten unterscheiden. Darüber hinaus wurden für jedes dieser Modelle auch noch 3 verschiedene Annahmen über die Quellpositionen und Typen unterschieden. Das erste Modell basiert auf dem Modell das in (Jean & Gabillet, 2000) verwendet wurde. Hierbei werden 7 Dipolquellen (mit Pfeilen gekennzeichnet) verwendet die einerseits die Schiene (beidseitige vertikale und horizontale Dipole), das Rad (beidseitige horizontale Dipole) und die Schwellen (vertikaler Dipol in der Gleismitte) modellieren. Diese werden frequenzabhängig gewichtet (Abbildung 30, links) und inkohärent überlagert. Die Gewichtung der einzelnen Quellanteile erfolgt auf Basis des TWINS-Modells (Track-Wheel Interaction Noise Software). Mittels TWINS kann unter Verwendung der Schienen- und Radrauheit sowie weiterer Gleis-, Rad- und Wagenparameter auf Basis der Interaktion Rad-Schiene ein Modell für die Schallemission erstellt werden (Thompson et al., 1996). Für die Modelle 1-3 wurden außerdem Simulationen mit Punktquellen an der Position der Rad- und der Schienendipole durchgeführt. Für die Bildung von Einzahlwerten für die einfacheren Linienmodelle wurde das Emissionsspektrum der EN 16272-3-1 (Abbildung 30, rechts) herangezogen.

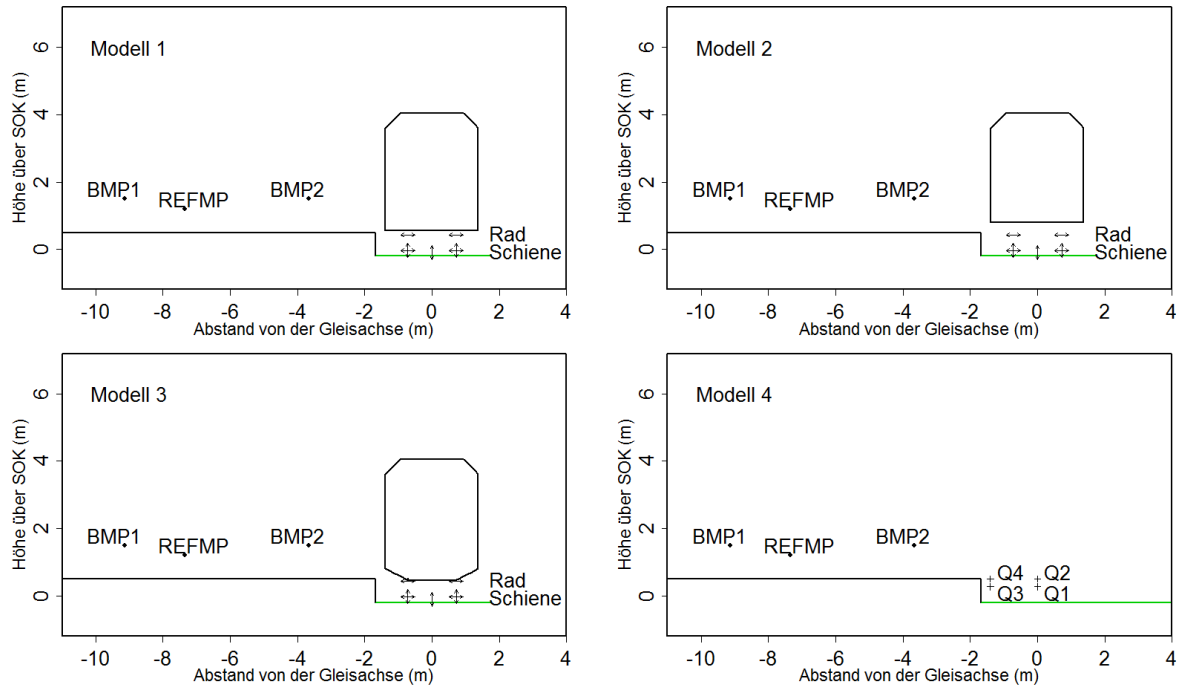


Abbildung 29: Simulationsmodelle 1-4 inklusive der verwendeten Quellpositionen.

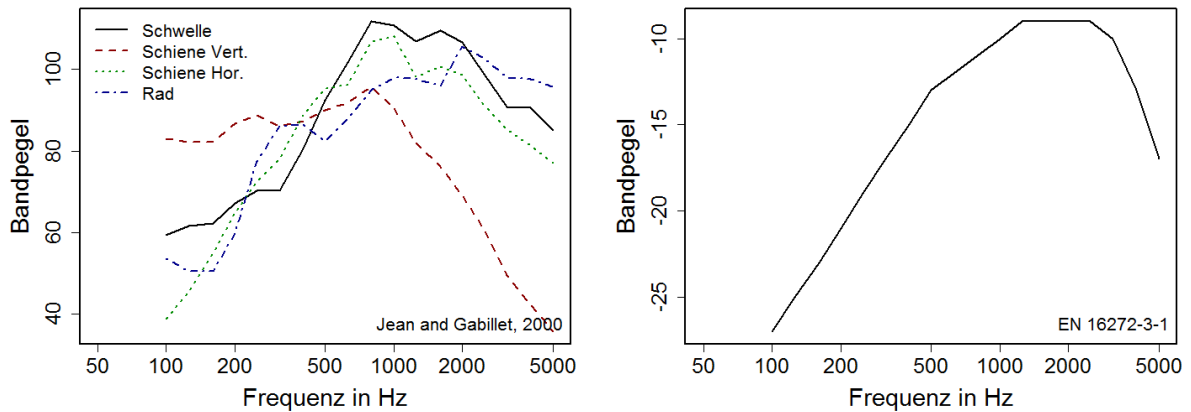


Abbildung 30: TWINS-basierende Frequenzgewichtung und EN 16272-3-1.

Modell 4 hingegen ist an die typischen Ersatzschallquellen z.B. in der ONR 305011 (Q1) angelehnt. Die seitlichen Quellen (Q3 und Q4) sind an der gedachten Außenkante des Wagenkastens, Q1 und Q2 befinden sich in der Gleismitte ca. 30 cm über SOK (Q1) und auf Höhe der Bahnsteigkante (Q2). Es wurde hier sowohl reine omnidirektionale Quellen als auch eine inkohärente Überlagerung von einer horizontalen Dipolquelle (Gewichtungsfaktor 0,85)

und einer omnidirektionalen Quelle (Gewichtungsfaktor 0,15) betrachtet. Zur Berechnung von Einzahlwerten wurde in diesem Fall das Eisenbahnspektrum aus der EN 16272-3-1 verwendet.

In sämtlichen Modellen wurden die Quellen als inkohärente Linienquellen betrachtet, d.h. benachbarte Quellpunkte entlang des Gleises werden energetisch summiert.

Vom Bahnsteig-Messquerschnitt ausgehend endet der Bahnsteig in Fahrtrichtung Graz in einer Entfernung von etwa 59 m. Daher wurde der Referenzquerschnitt ebenfalls in der Berechnung des Schalldrucks in den HMPs berücksichtigt. Hierzu wurden Gewichtungsfunktionen verwendet die positionsabhängig die verschiedenen Querschnitte unterschiedlich stark gewichten (obere Grafik in Abbildung 31). Dieser Ansatz wurde schon früher erfolgreich angewendet (Waubke & Kasess, 2016).

Bei der Untersuchung des Effektes des Daches (beginnt 92,5 m entfernt vom Ende des Bahnsteiges) wurden die 3 Abschnitte mittels der unteren Kurven in Abbildung 31 gewichtet. Für die erste Evaluierung der Simulationsmodelle wurde allerdings das Dach nicht berücksichtigt. Um die Berechnungen noch mehr der Realität anzupassen wurden außerdem die Punkte nach der Dämpfungskurve in der ISO 9613-1 (20°, 50% Luftfeuchte) abgeschwächt (Jean, Defrance, & Gabillet, 1999). Dadurch kann der Effekt der Luftdämpfung näherungsweise in den Berechnungen berücksichtigt werden.

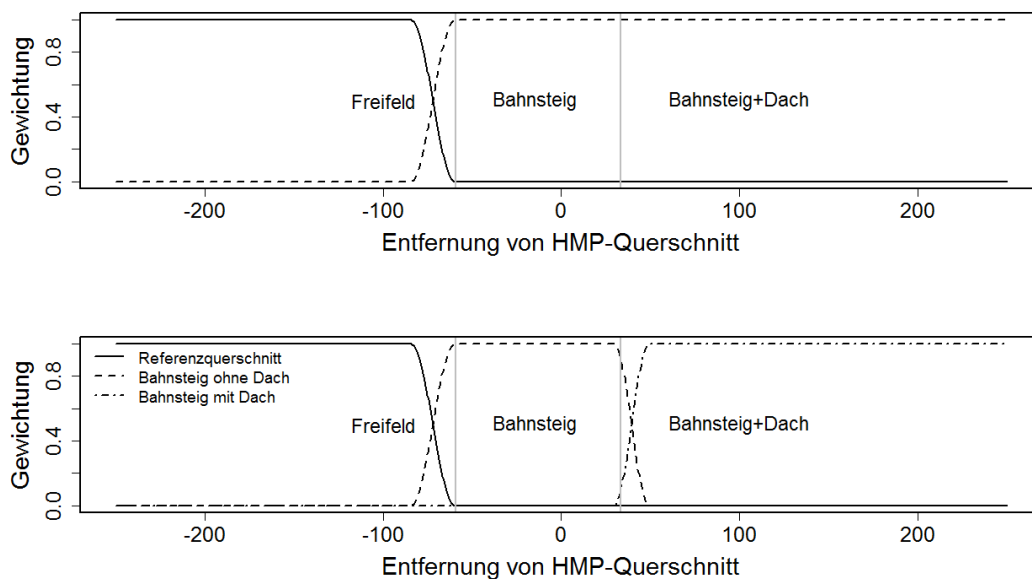


Abbildung 31: Gewichtung der verschiedenen Querschnitte in den HMPs.

4.3.2. Vergleich mit den Fernfeldmessungen

Es wurden zwei Vergleiche durchgeführt: zwischen der Referenzposition (REFMP) und den Höhenmesspunkten (HMP 1-3) sowie zwischen den HMPs selbst (siehe Kapitel 3.4 für die Beschreibung der Fernfeldmessungen). Abbildung 32 und Abbildung 33 zeigen diese Unterschiede für die Simulationsmodelle 1-3. Wie bereits erwähnt, zeigen diese Ergebnisse die Berechnung unter Annahme der Längengewichtung in der oberen Grafik in Abbildung 31 (Bahnsteig und Freifeld kombiniert).

Bezogen auf den Referenzmesspunkt zeigt sich in der Messung ein markantes Tal zwischen 50-100 Hz und 500 Hz. Am stärksten tritt dies für den niedrigsten Höhenmesspunkt (HMP 1, linke Spalte in Abbildung 32) auf. Der Vergleich mit der Simulation mittels des TWINS-basierten Quellmodells (alle 7 Dipole, spektrale Gewichtung wie in Abbildung 30, links) zeigt deutliche Unterschiede. Bei keinem der 3 simulierten Wagenkästen ergibt sich eine gute Übereinstimmung über 500 Hz, wobei Typ 3 den geringsten Fehler hat. Alle 3 Modelle überschätzen die Wirkung der Bahnsteigkante deutlich. Bei Wagenkasten 2 kombiniert mit dem TWINS-Modell ergibt sich zusätzlich noch ein schmalbandiger Effekt bei etwa 200 Hz. Dieser ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die Gewichtung der Dipole sich in diesem Bereich sehr stark ändert (vgl. Abbildung 30).

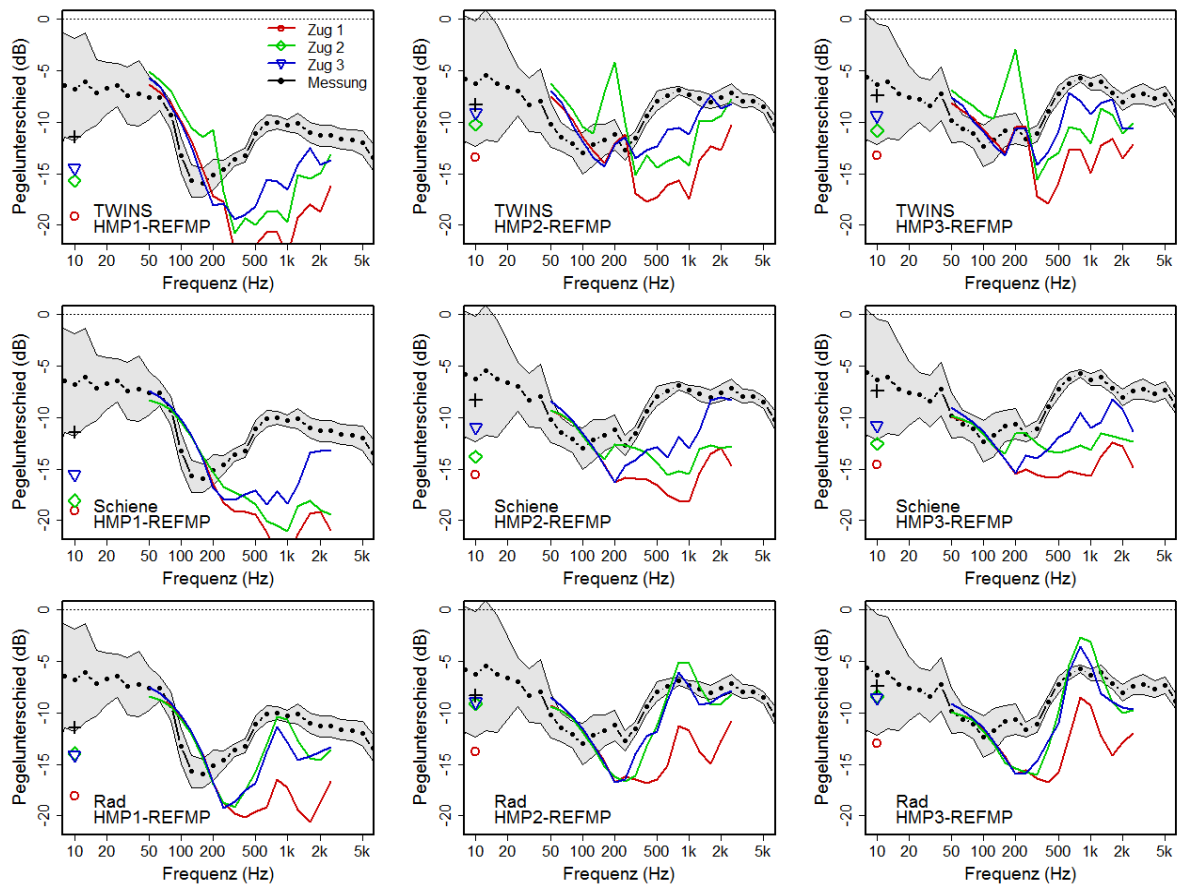


Abbildung 32: Vergleich HMP vs. REFMP für Modelle 1-3.

Wird ein einfacheres Quellmodell angenommen zeigt sich bei der Rad-Linienquelle (untere Reihe) eine deutlich bessere Übereinstimmung, vor allem beim Wagenkasten 2, wobei die Wirkung der Kante vor allem zwischen 100 und 1000 Hz trotzdem noch etwas überschätzt wird.

Beim Vergleich der HMPs untereinander zeigen sich erwartungsgemäß geringere Unterschiede in der Messung, vor allem zwischen den beiden hochgelegenen Punkten. Der Vergleich mit der Berechnung zeigt interessanterweise, dass die TWINS-basierenden Quellmodelle die Form der spektralen Unterschiede zwischen HMP 1 und den beiden hohen MPs sehr gut abbilden und der Wagenkasten keine große Rolle spielt. Bei den vereinfachten Quellmodellen mit Wagenkasten wird vor allem der Unterschied im tiefen Frequenzbereich (100-200 Hz) unterschätzt, bei höheren Frequenzen teilweise eher überschätzt.

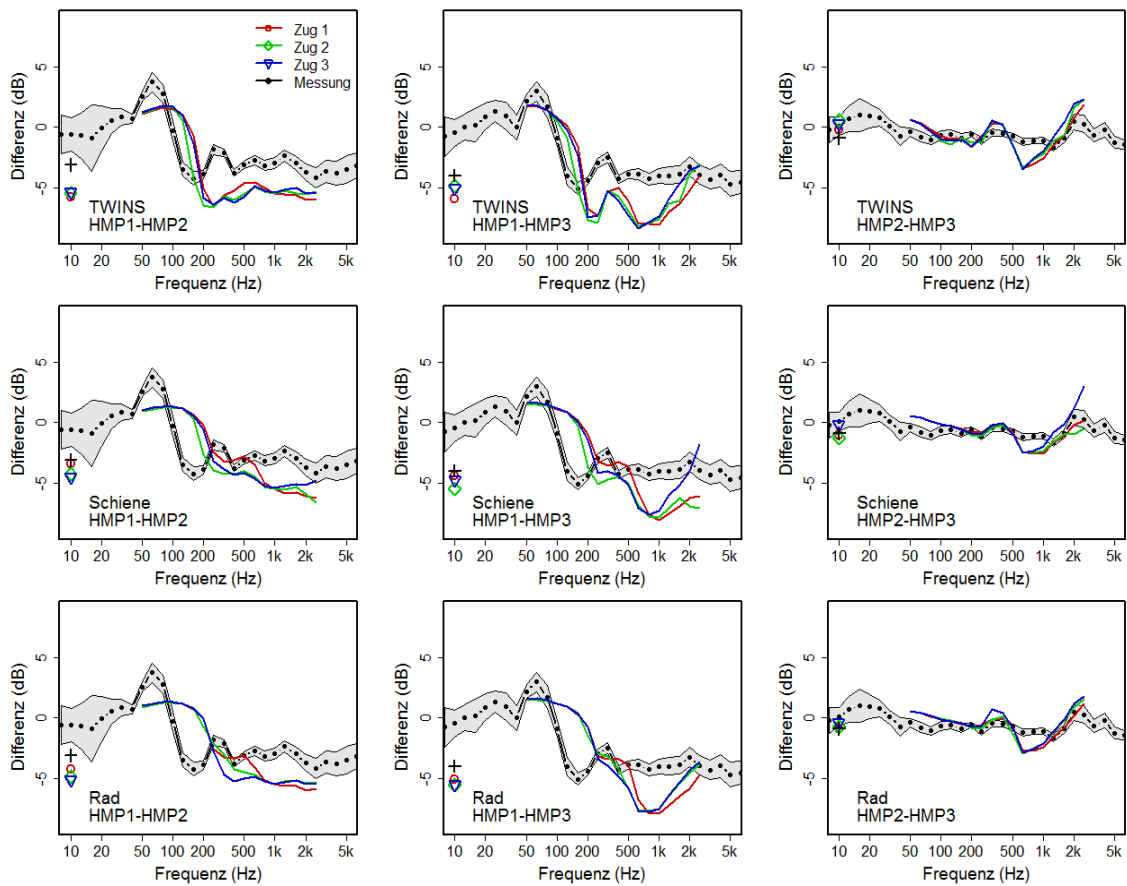


Abbildung 33: Vergleich HMPs für Modelle 1-3.

Das Ersatzschallquellenmodell ohne Wagenkasten (Modell 4) ist ebenfalls sehr sensitiv in Bezug auf die Platzierung der Quelle im Bahnsteigquerschnitt (Abbildung 34). Die beiden niedrigen Positionen resultieren in deutlich zu hohen Abschirmwerten. Die Positionierung der Quelle auf Höhe der Bahnsteigkante verbessert die Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation, wobei die Position in Gleismitte (Q2) in den Einzählwerten eine etwas bessere Übereinstimmung ergibt.

Vergleicht man die HMPs untereinander, so ergibt sich ein ähnliches Bild wie in Abbildung 33 für die einfachen Linienquellenmodelle. Aufgrund der guten Übereinstimmung bei Q2 wird dieses Modell näher betrachtet.

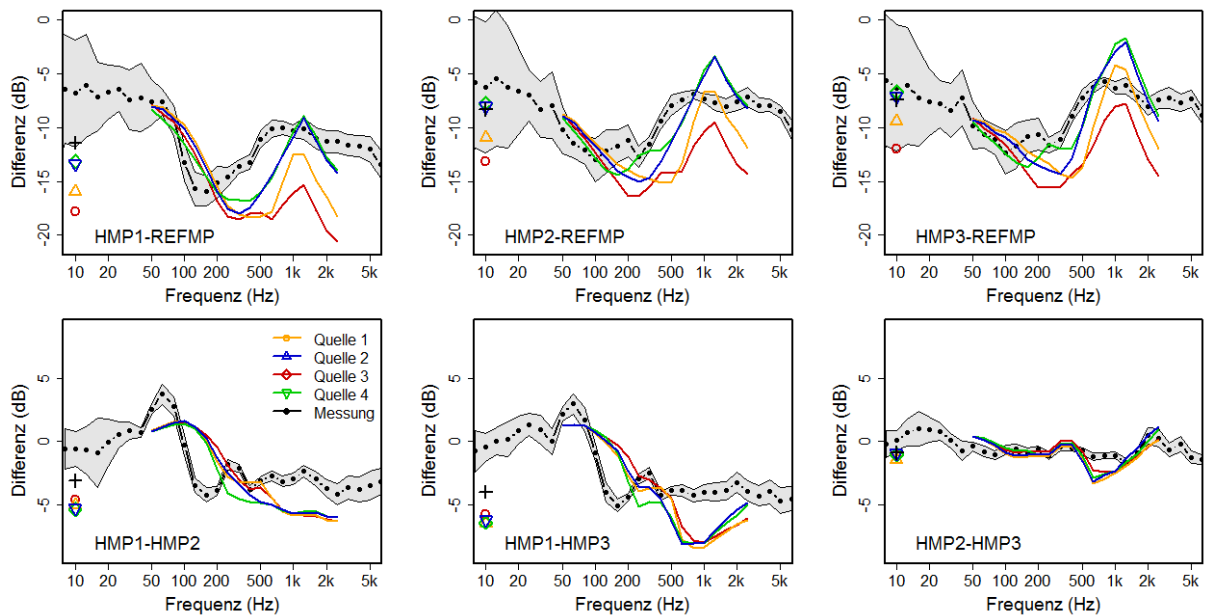


Abbildung 34: Vergleich Messung-Simulation für Modell 4.

Abbildung 35 zeigt nochmals den Vergleich für Q2 im Detail. Die oberste Reihe zeigt den Vergleich zwischen den HMPs und dem Referenzpunkt (schwarze Linie mit Symbolen). Die rote Linie zeigt den Unterschied in der Simulation wenn der Bahnsteig als unendlich lang angenommen wird. Wird das Ende des Bahnsteigs mitberücksichtigt (gewichtete Summe aus Referenzquerschnitt und Bahnsteig) zeigt sich eine leichte Erhöhung des Schalldrucks in den HMPs, vor allem im untersten Punkt (blaue Linie). Wenn außerdem noch das Bahnsteigdach berücksichtigt wird, zeigt sich nur ein sehr geringer Anstieg des Pegels (grün strichliert). Die Übereinstimmung ist für die beiden letzteren Fälle deutlich besser. Die orangenen Linien zeigen den gerechneten Unterschied auf die HMPs im Referenzquerschnitt (ohne Bahnsteig), d.h. die Differenz zwischen der orangenen und den andersfarbigen Linien ergibt das berechnete Einfügedämmmaß (unterste Reihe in den Abbildungen).

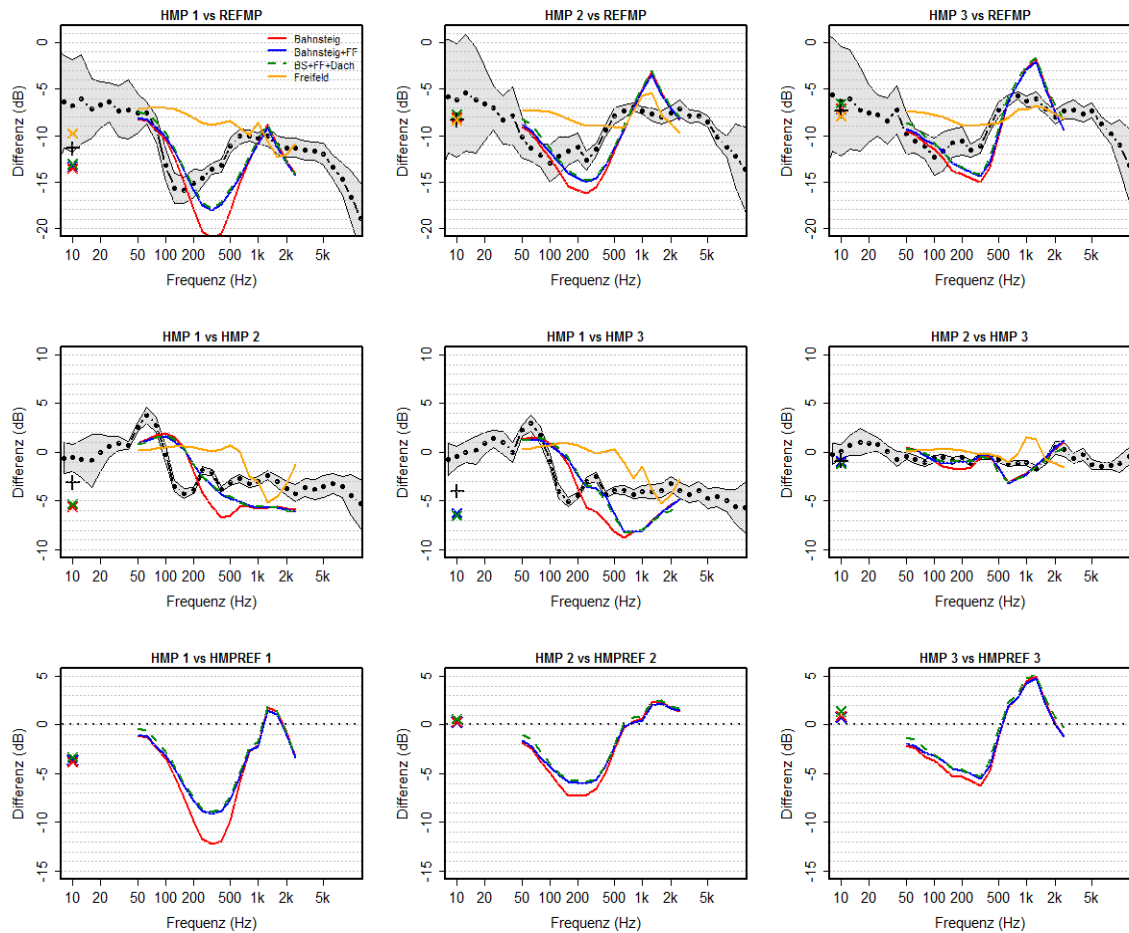


Abbildung 35: Detaillierter Vergleich Messung-Simulation für Quellposition 2 in Modell 4.

Wenn die Unterschiede zwischen den HMPs verglichen werden (mittlere Reihe), zeigt sich ein ähnliches Bild. Da HMP1 am stärksten vom Ende des Bahnsteigs beeinflusst wird, ist die Änderung in Bezug auf HMP1 am größten.

Die unterste Reihe stellt das berechnete Einfügedämmmaß dar. Es zeigt sich, dass in höheren Positionen im mittleren Frequenzbereich auch leichte Erhöhungen entstehen können. Dies ist vermutlich auf die Reflexionen der (voll reflektierenden) Bahnsteigoberfläche zurückzuführen. Wenn die Einzahlwerte verglichen werden, zeigt sich eine schwache Erhöhung von etwa 1 dB(A).

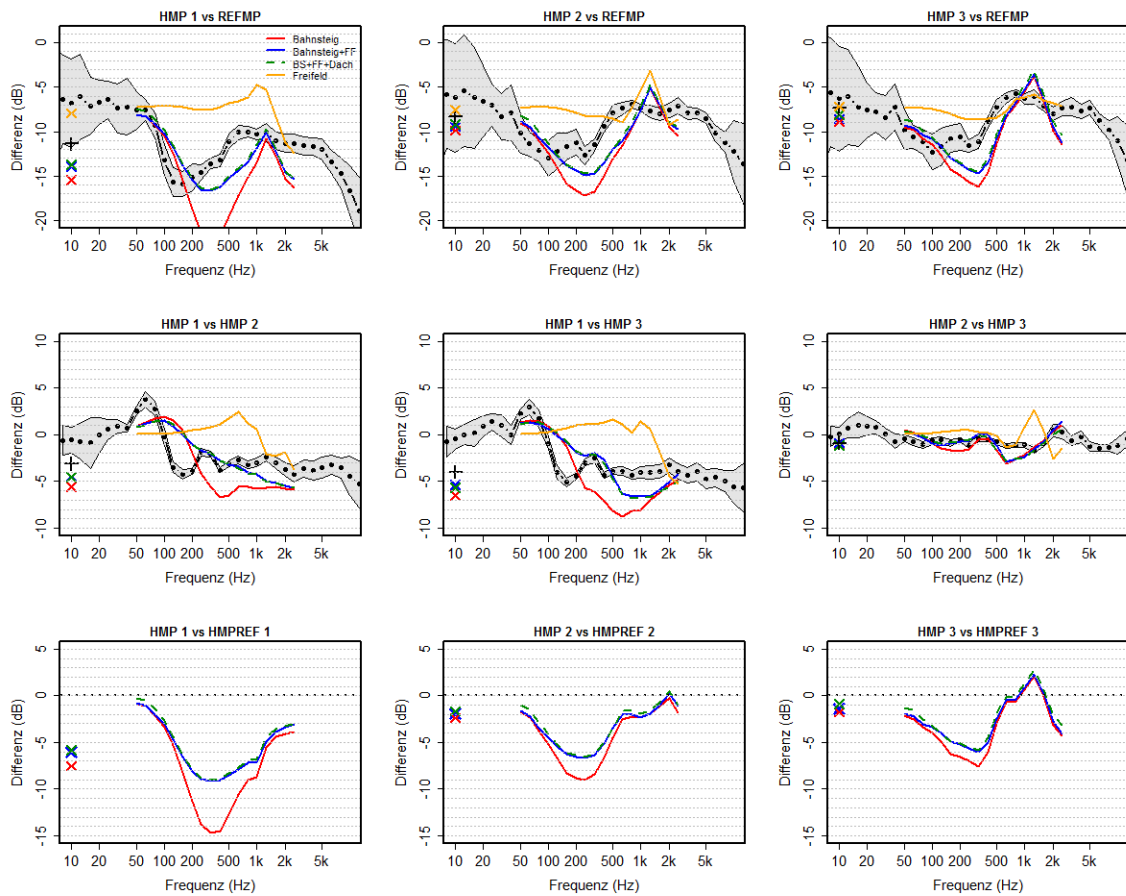


Abbildung 36: Detaillierter Vergleich Messung-Simulation für Quellposition 2 in Modell 4 bei reflektierendem Boden.

Für die Berechnungen in Abbildung 35 wurde ein absorbierender Boden zwischen den Gleisbetten im Referenzquerschnitt angenommen (Abbildung 21). Abbildung 36 stellt die Ergebnisse dar, wenn diese Flächen als reflektierend angenommen werden. Die grundlegenden Tendenzen sind vergleichbar, der Einfluss des Freifeldquerschnitts auf die HMPs steigt aber an (Unterschied roter und blauer bzw. grüner Linie). Es steigt aber auch der Pegel in den Positionen der HMPs im Referenzquerschnitt, weswegen sich das Einfügedämmmaß verbessert. Beide Annahmen (reflektierend vs. schwach absorbierend) stimmen gut mit den Messungen überein, im Allgemeinen ist aber wahrscheinlich eher von einem leicht absorbierenden Boden auszugehen.

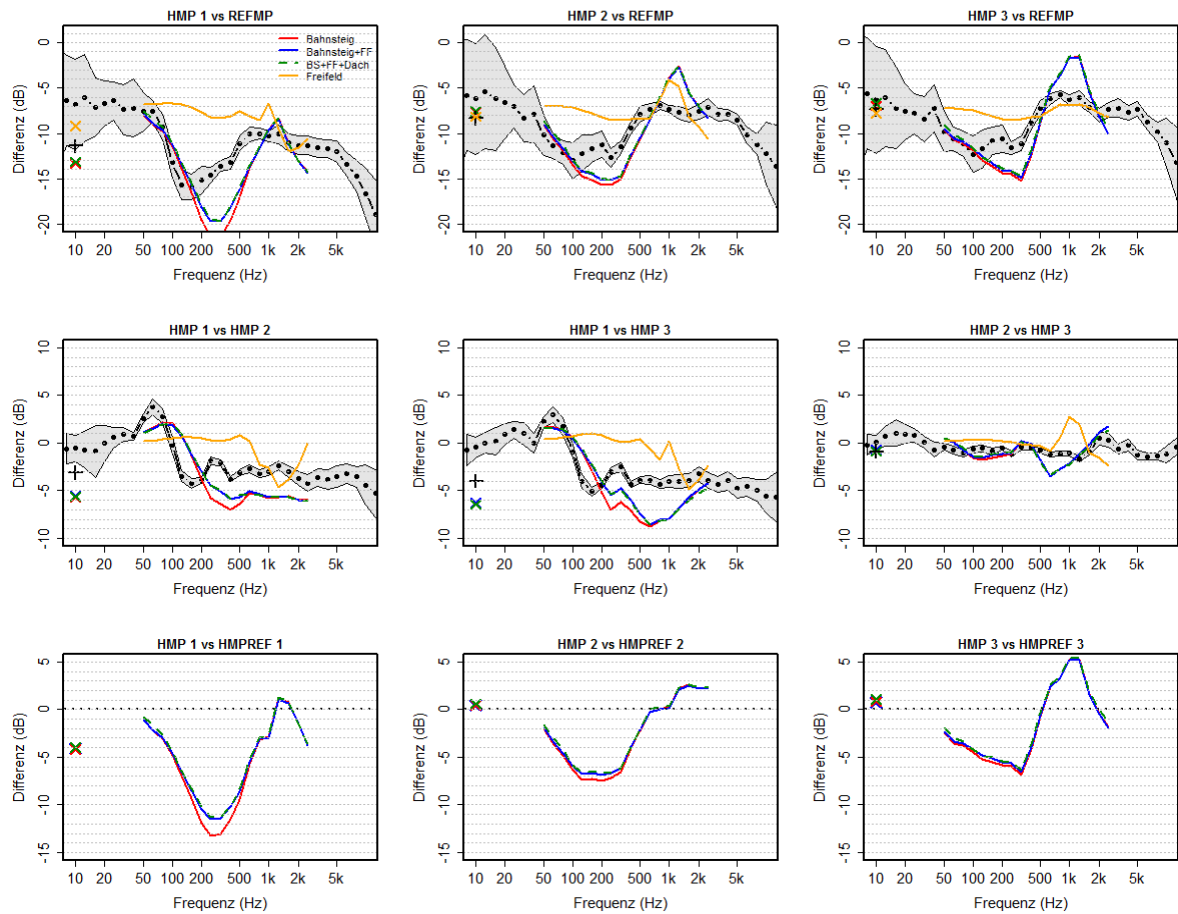


Abbildung 37: Detaillierter Vergleich Messung-Simulation für Quellposition 2 in Modell 4 mit Dipol- und Punktquelle.

Wird eine Kombination aus Dipol (85% Anteil) und einer omnidirektionalen Quelle (15% Anteil) verwendet, sind die Ergebnisse vergleichbar, allerdings sind die spektralen Effekte die gegenüber REFMP bei etwa 500-1000 Hz zu beobachten sind etwas ausgeprägter und der Effekt des Einfluss des Referenzquerschnitts auf die HMPs ist etwas geringer. Aufgrund der horizontalen Richtcharakteristik der Dipolquelle haben die Quellpositionen im und nahe um den Querschnitt einen noch stärkeren Einfluss im Vergleich zu Quellen die weiter vom Querschnitt entfernt sind.

4.3.3. Absorbierende Bahnsteigkante

Die Fernfeldmessungen wurden für den Bahnsteig mit absorbierender Bahnsteigkante durchgeführt. Um den Unterschied zwischen absorbierender und reflektierender Kante zu erfassen und auch um den Effekt der Bahnsteigkante am Bahnsteig darzustellen wurden, wie bereits beschrieben, Nahfeld-Messungen am Bahnsteig durchgeführt (siehe Kapitel 3.3 für die Beschreibung der Nahfeldmessungen von Vorbeifahrten). Für diese Messungen wurden ebenfalls Simulationen durchgeführt, allerdings wurde der Simulationsquerschnitt auf einen Bahnsteig reduziert, um den Rechenaufwand zu reduzieren. (vgl. Abbildung 29). Es wurden sämtliche Quellmodelle aus den Fernfeldsimulationen übernommen. Wie schon bei den Fernfeldmessungen ist die akustische Wirkung des Bodens unklar. Zusätzlich sind die verwendeten Referenzpositionen hier sehr nahe an einem asphaltierten Übergang und zumindest BMP2 liegt näher und etwas höher als die Referenzposition wodurch der Einfluss der Quellen entlang des Gleises räumlich begrenzt ist. Daher wurde der Boden neben dem Gleisbett als reflektierend modelliert.

Abbildung 38 bis Abbildung 41 zeigen sämtliche Vergleiche am Bahnsteig für die verschiedenen Modelle. Die obere Reihe zeigt jeweils den Messpunkt nahe zur Kante (BMP2), die untere Reihe den Messpunkt auf der fernen Position (BMP1). Von links nach rechts werden der Unterschied zwischen dem Referenzquerschnitt und der reflektierenden Bahnsteigkante, der absorbierenden Bahnsteigkante sowie der Unterschied zwischen den beiden Kanten gezeigt.

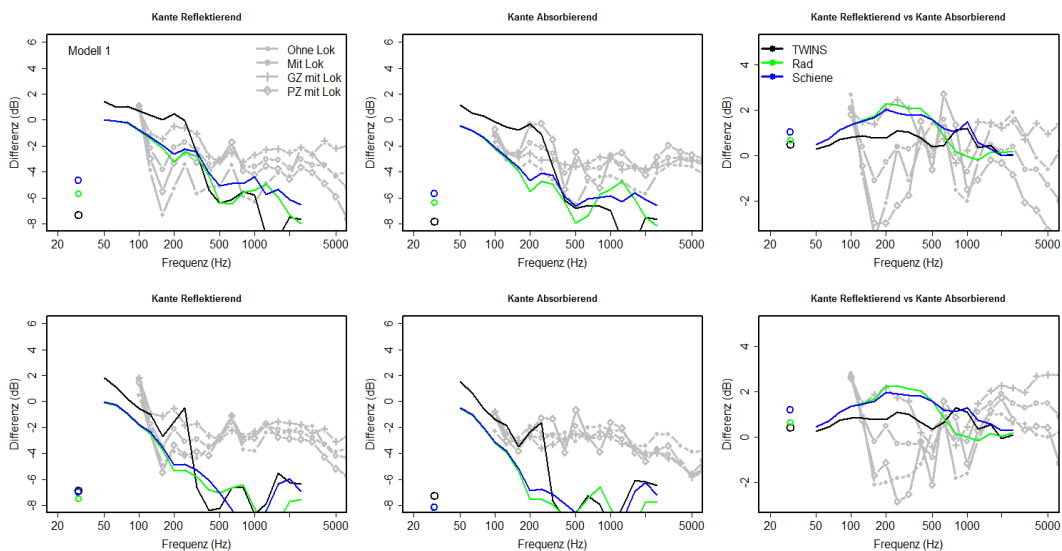


Abbildung 38: Vergleich Messung-Simulation Modell 1 am Bahnsteig.

Für Modell 1 (enger Spalt zwischen Bahnsteig und Wagenkasten) wird die Wirkung der Bahnsteigkante wie schon im Fernfeld über 500 Hz überschätzt.

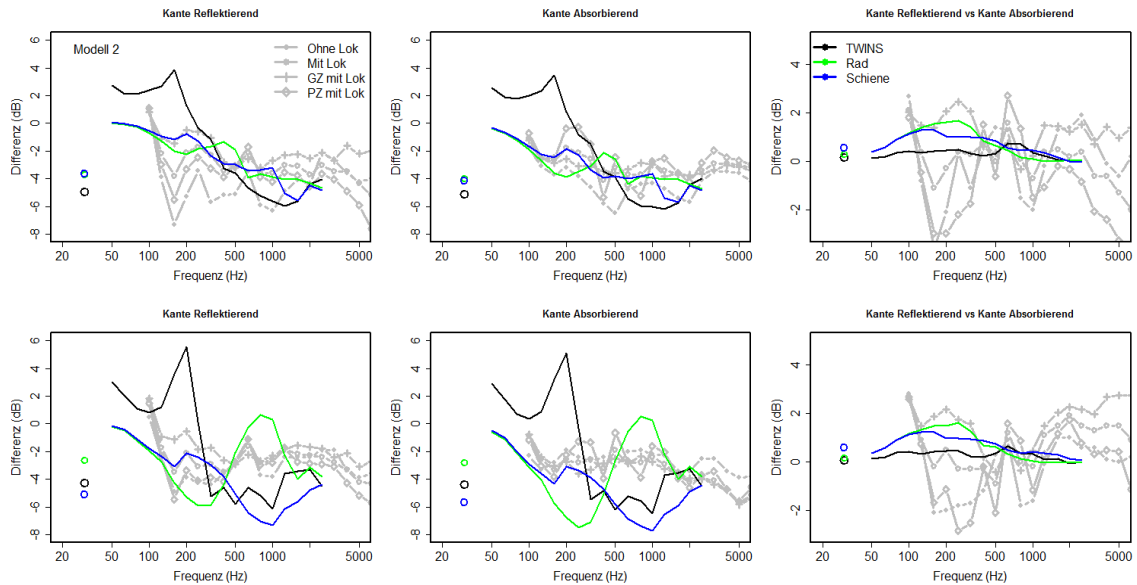


Abbildung 39: Vergleich Messung-Simulation Modell 2 am Bahnsteig.

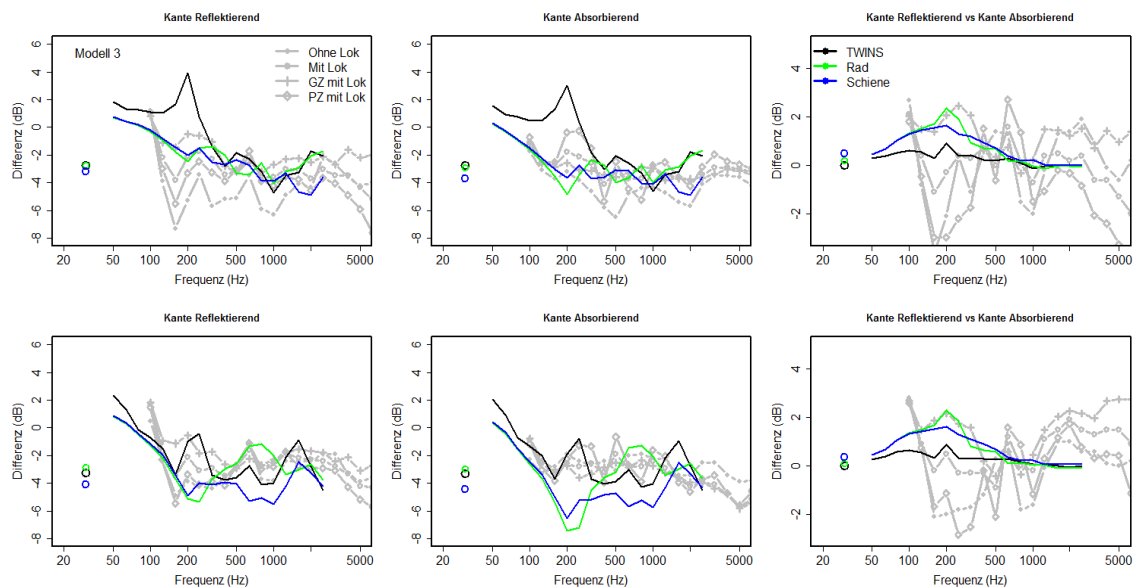


Abbildung 40: Vergleich Messung-Simulation Modell 3 am Bahnsteig.

Modelle 2 und 3 zeigen eine deutlich bessere Übereinstimmung, vor allem im Bereich über 500 Hz. Die absorbierende Kante bringt hier abhängig vom Modell eine Verbesserung im Bereich von 0 bis etwas unter 1 dB(A).

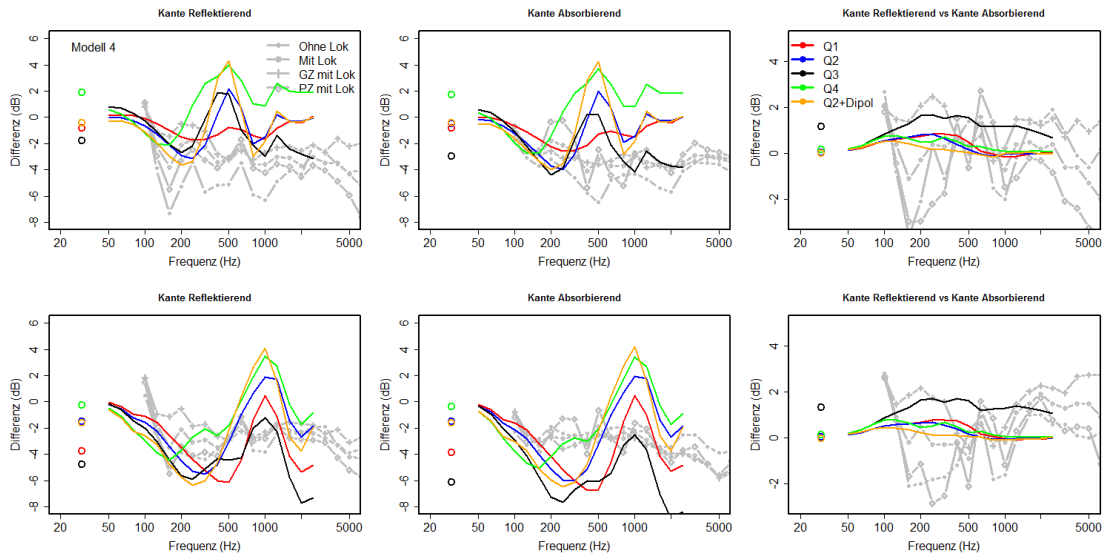


Abbildung 41: Vergleich Messung-Simulation Modell 4 am Bahnsteig.

Für das Ersatzschallquellenmodell wird die Wirkung der Kante am Bahnsteig meist eher unterschätzt und es entstehen ausgeprägte Interferenzen, vor allem um etwa 500-1000 Hz. Die Quellposition 2 (Mitte des Gleises, Höhe Bahnsteigkante, blaue Linie) ist der Effekt sehr stark. Absorption auf der Kante zeigt in diesem Modell keinen Effekt (außer für Q3).

Da die Referenzposition nur etwa 10 m vom Ende des Bahnsteigs entfernt war wurde auch ein Ansatz mit einer Gewichtungsfunktion gerechnet. Für das am besten passende Modell 3 zeigen sich hier Unterschiede in der fernen Position unter 1 dB(A) für die Radquelle (bei Modell 1 treten Unterschiede von bis zu etwas über 2 dB(A) auf, wodurch die Abweichung zur Messung bei der fernen Kante reduziert wird). Für die nahe Position sind die Unterschied geringer. Des Weiteren wird der geringe Effekt der Absorption noch weiter reduziert. Für das Ersatzschallquellenmodell auf Höhe Bahnsteigkante und Gleismitte treten keine nennenswerten Unterschiede auf (unter 0,5 dB(A)).

4.4. Diskussion

In diesem Kapitel wurden verschiedene Berechnungsmodelle untersucht um die Wirkung der Bahnsteigkante zu berechnen. Es wurden hierzu Messungen sowohl unter kontrollierten Bedingungen als auch von Vorbeifahrten mit Berechnungen mittels der Randelementemethode verglichen um geeignete Modellannahmen zu bestimmen.

Berechnungen mittels der Randelementemethode zeigen eine sehr gute Übereinstimmung unter kontrollierten Bedingungen, aber auch für die schwierigeren Bedingungen bei in-situ Messungen konnte ein geeignetes Modell für die Berechnung der Schirmwirkung der Bahnsteigkante gefunden werden. Die beste Übereinstimmung im Fernfeld wird durch ein Ersatzschallquellenmodell erreicht, wobei die Quellposition auf die Höhe der Bahnsteigkante angehoben wurde. Aus den Berechnungen des Einfügedämmmaßes für die Immisionsmesspunkte ergibt sich bei diesem Modell, dass nur in sehr tiefen Lagen ein nennenswerter Effekt der Bahnsteigkante zu erwarten ist (3 dB(A) bei 1,5 m über GOK). In 4 und 6 m Höhe ist kein Effekt vorhanden. Dieses Modell wird im Folgenden auch für die Berechnung der Wirkung von Bahnsteig und Bahnsteigdach im Regelquerschnitt verwendet.

Die Abweichungen zu den Bedingungen am Bahnsteig sind in diesem Modell etwas ausgeprägter wobei dies auf die komplexen Reflexionen nahe an der Quelle zurückgeführt werden kann. Hier zeigen komplexe Modelle die auch den Wagenkasten berücksichtigen eine bessere Übereinstimmung. Aus den Berechnungen ist weiters ersichtlich, dass im direkten Vergleich der Schirmwirkung der reflektierenden und der absorbierenden Bahnsteigkante der reine Effekt der Absorption (nicht zu verwechseln mit dem Effekt der Bahnsteigkante selbst) vernachlässigbar ist, da dieser in fast allen Berechnungsmodellen (meist deutlich) unter 1 dB(A) beträgt². Nur bei sehr tiefen Quellpositionen ist dieser Effekt etwas höher, allerdings ergibt sich bei diesen Annahmen ein deutlich zu hoher Abschirmungseffekt im Fernfeld.

²In diesem Absatz geht ausschließlich um den Effekt einer schallabsorbierenden Bahnsteigkante gegenüber einer schallharten. Die Schirmwirkung der Bahnsteigkante selbst ist selbstverständlich höher.

5. BERECHNUNGSMODELL FÜR DEN REGELQUERSCHNITT

Mittels der aus der Modellbildung gewonnenen Simulationsparameter (Quellmodell, Schottermodell) wurden Berechnungen für den Regelquerschnitt durchgeführt. Untersucht wurden verschiedene Varianten mit und ohne Dach. Weiters wurde der Effekt von Absorption an verschiedenen Punkten untersucht.

5.1. Simulationsparameter für den Regelquerschnitt

Für die Simulation des Regelquerschnittes mittels der Randelementemethode wurden die Maße des Mittenbahnsteigs des Bahnhofes Korneuburg verwendet (Abbildung 42). Dieser ist laut Plan 6,2 m breit, die Kante befindet sich 0,53 m über SOK und die Dachunterkante befindet sich 3,8 m über dem Bahnsteig. Das Dach ist etwa 0,2 m von der Kante rückversetzt. Das Dach wurde als voll reflektierendes, geschlossenes Trapez modelliert. Geringe Höhenunterschiede von wenigen cm aufgrund der Querneigung des Bahnsteiges sollten im Fernfeld keine Rolle spielen und wurden, auch zur besseren Verallgemeinerbarkeit, nicht modelliert. Es wurden der Bahnsteig und das Dach als (unendlich) lange Struktur modelliert unter der Annahme einer inkohärenten Linienquelle. Es wurde daneben auch der Effekt verschiedener Quelllängen untersucht.

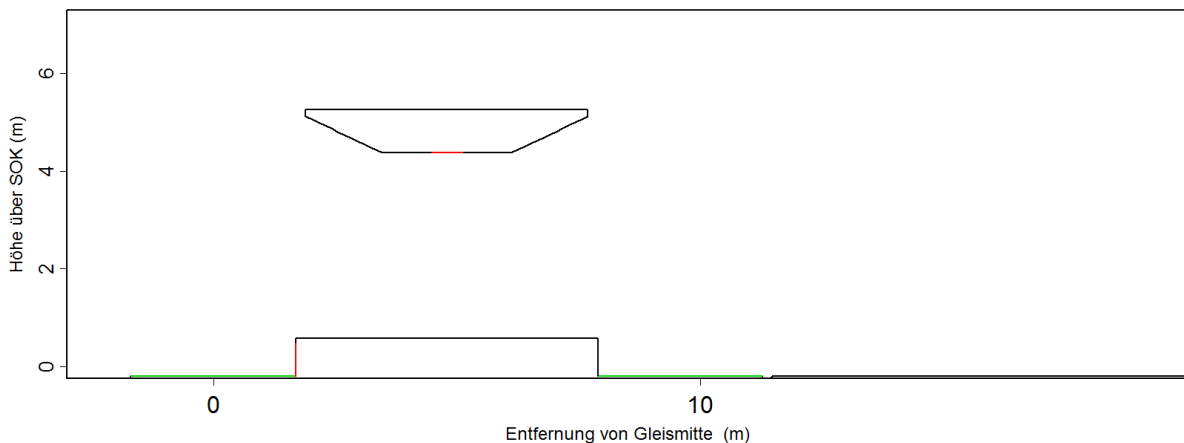


Abbildung 42: Regelquerschnitt entsprechend dem Bahnsteig des Bahnhofes Korneuburg.

Im Weiteren wurden Varianten mit Absorption im mittleren Bereich berechnet. Dort befindet sich eine Öffnung im Dach die durch einen Gitterrost verschlossen ist (rote Linie in der Abbildung).

Außerdem wurden noch Berechnungen mit Absorption auf der gesamten horizontalen Unterkante und auf der gesamten Unterkante (inklusive der schrägen Abschnitte) durchgeführt.

Die Absorption wurde so wie bei den Berechnungen für die absorbierende Bahnsteigkante angenommen. Außerdem wurde auch eine Variante mit absorbierender Bahnsteigkante berechnet.

Für den Boden wurde die in Abbildung 43 dargestellte Absorptionskurve verwendet. Diese ist deutlich höher absorbierend als für die Wiener Neustadt verwendete Kurve, die sich auf den kompakten Boden zwischen den Gleisen bezieht und nicht auf das Gelände neben dem Bahnhof. Es wird hier nicht davon ausgegangen, dass immer eine Vielzahl von Gleisen (und Gleiszwischenräumen) zwischen Quelle und Empfänger liegt. Um eine Abschätzung des Bodeneffektes zu erhalten, wurden der Vollständigkeit halber aber Berechnungen für einige Varianten auch mit voll reflektierendem Boden durchgeführt.

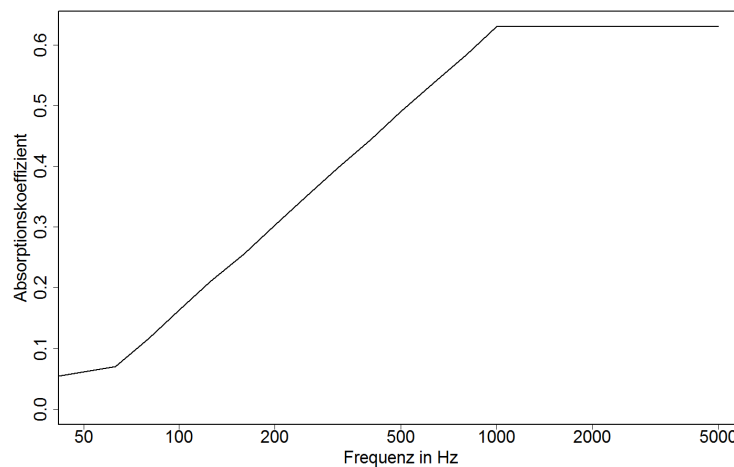


Abbildung 43: Bodenabsorptionskurve.

Des Weiteren wurde auch noch eine breite Variante einem mit 10 m breiten Bahnsteig berechnet um den Effekt der Bahnsteigbreite abzuschätzen. Der Abstand des Daches zur Bahnsteigkante, Schräge sowie der Bereich zwischen dem schrägen Abschnitt und dem Gitterrost wurden wie beim schmalen Bahnsteig definiert. Dadurch ergibt sich ein um 3,8 m breiterer Mittelbereich (Gitterrost, rote Linie in Abbildung 44). Für die freie Ausbreitung wurden die Gleise so wie im jeweiligen Bahnsteigquerschnitt angenommen.

Aufgrund der in Kapitel 4 dargestellten Ergebnisse wurde das Quellmodell mit den Ersatzschallquellen verwendet. Für die freie Schallausbreitung wurde die Quellposition laut ONR 305011 verwendet, im Bahnsteigquerschnitt wurde die Quelle für alle Berechnungen auf die Höhe der Bahnsteigkante gesetzt (53 cm über SOK).

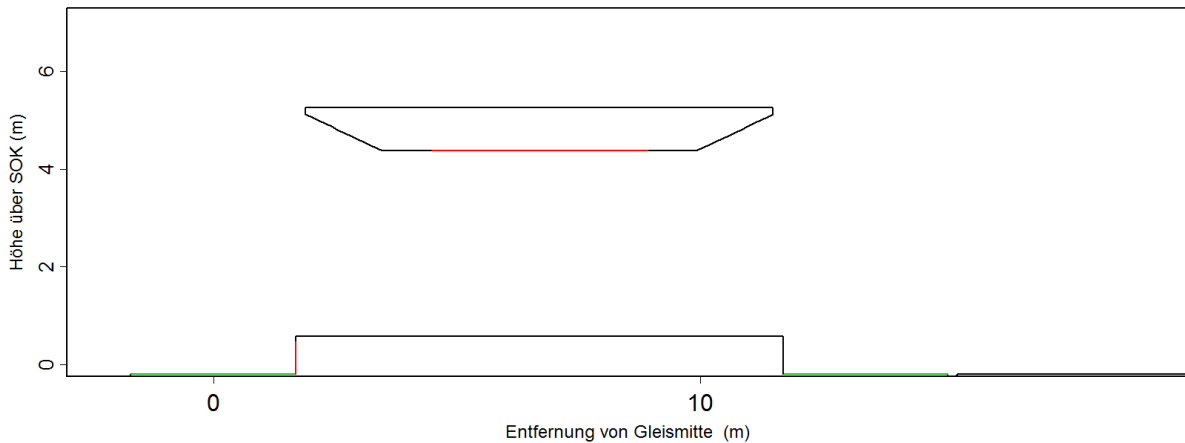


Abbildung 44: Regelquerschnitt verbreitert.

5.2. Einfluss der Bahnsteigkante

Es werden im Folgenden die wichtigsten Ergebnisse präsentiert. Der Fokus liegt auf dem Unterschied zwischen verschiedenen Bahnsteigvarianten und der freien Ausbreitung. In Anhang befinden sich weitere Abbildungen die auch Unterschiede zwischen den verschiedenen Bahnsteigvarianten zeigen. Die Abbildungen zeigen die Veränderung des Schalldrucks in Schritten von 1 dB. Zur visuellen Unterstützung sind einerseits die Übergänge durch Konturlinien markiert, andererseits sind bei 1,5 m und 4 m über SOK Hilfslinien eingezeichnet. Die Berechnungen wurden bis zu einer Höhe von 1 m über GOK durchgeführt. Noch näher am Boden wären die Berechnungen problematisch, da hier der ohnehin schon große Effekt des Bodens noch einmal anwächst.

Die Bahnsteigkante (Abbildung 45 und Abbildung 46) zeigt eine zu den Messungen und Simulationen des Wiener Neustädter Bahnhofs vergleichbare Schirmwirkung von ca. 2 dB(A). Für den breiteren Bahnsteig ist Wirkung ähnlich, wenn auch um bis zu 1 dB(A) reduziert. Der Unterschied ist möglicherweise auf die reduzierte absorbierende Fläche durch den breiteren Bahnsteig zurückzuführen.

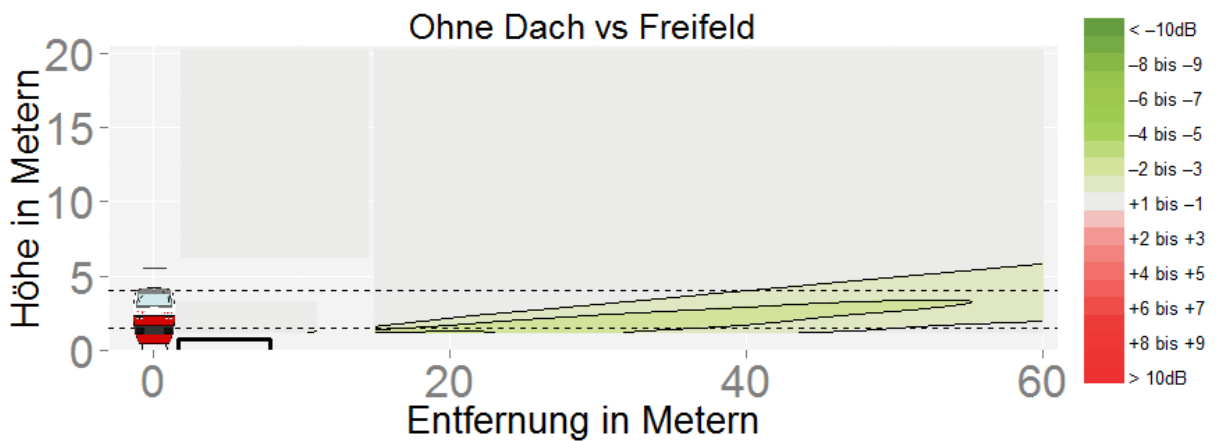


Abbildung 45: Regelquerschnitt: Effekt des Bahnsteigs.

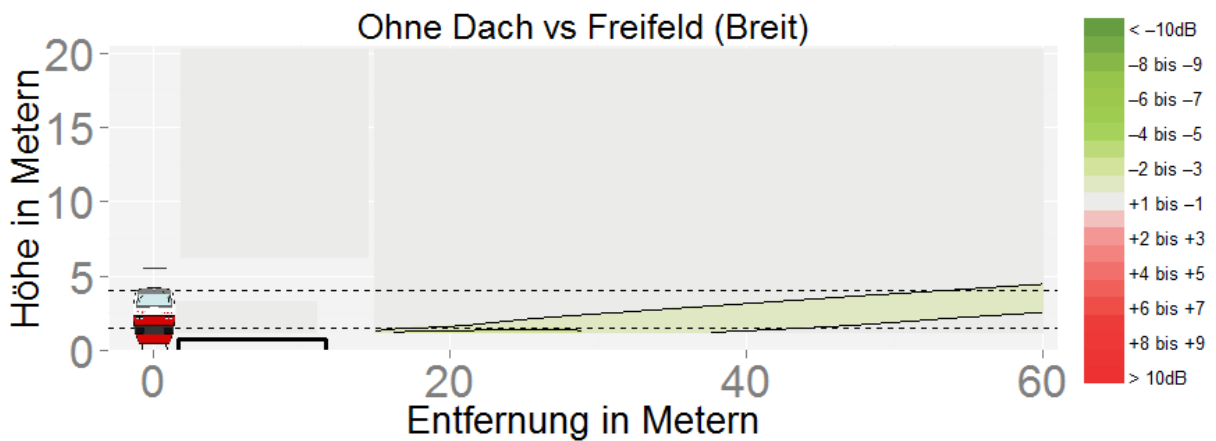


Abbildung 46: Regelquerschnitt: Effekt des breiten Bahnsteigs.

In Abbildung 47 und Abbildung 48 sind die Effekte in einzelnen Frequenzbändern in Abhängigkeit vom Winkel zur Horizontalen dargestellt. Dafür wurden die Winkel in Bereiche von 5° eingeteilt und alle Werte für die Abschirmung in dB in diesem Bereich arithmetisch gemittelt. Hier sieht man einerseits räumlich begrenzte Verringerungen der Bandpegel aber auch Erhöhungen bei einigen Frequenzen (250-1000 Hz) die auch schon bei den Simulationen vor allem für HMP3 in Kapitel 4 beobachtet wurden.

Im Detail zeigt sich:

Bei 250 Hz:

- $<40^\circ$: Verringerungen bis zu 6 dB
- $>40^\circ$: Erhöhungen bis zu 4 dB

Bei 500 Hz

- $<30^\circ$: Erhöhungen bis zu 4 dB
- $30^\circ - 60^\circ$: Verringerung um bis zu 3 dB
- $>60^\circ$: schwache Erhöhung von ca. 1 dB

Bei 1000 Hz

- $<15^\circ$: leichte Erhöhung bis zu 2 dB

Bei höheren Frequenzen treten vorwiegend Verringerungen der Bandpegel um bis zu 2 dB auf (Winkel $< 10^\circ$). Bei tieferen Frequenzen sind die Abschwächungen etwas ausgeprägter.

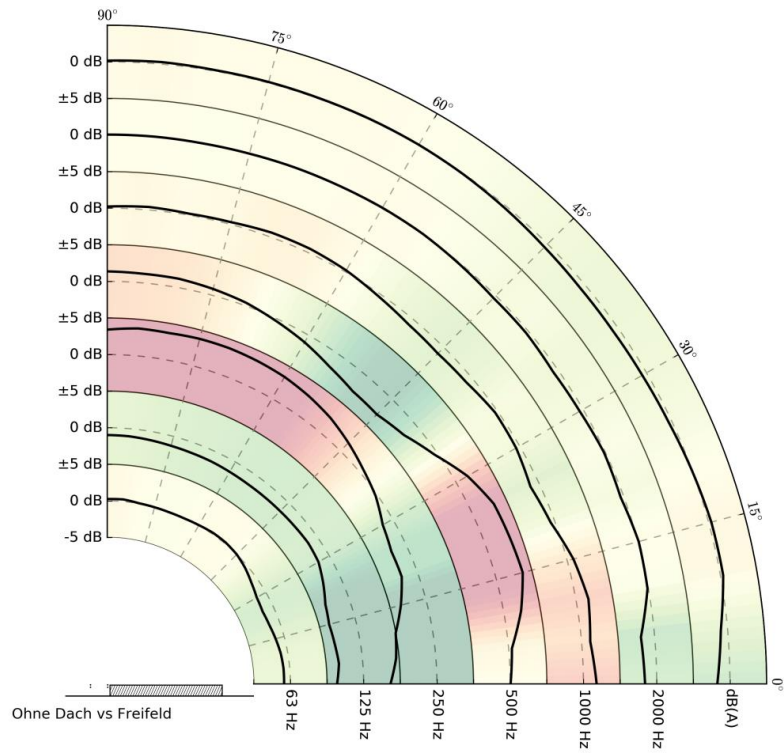


Abbildung 47: Regelquerschnitt: Frequenzabhängiger Effekt des Bahnsteigs.

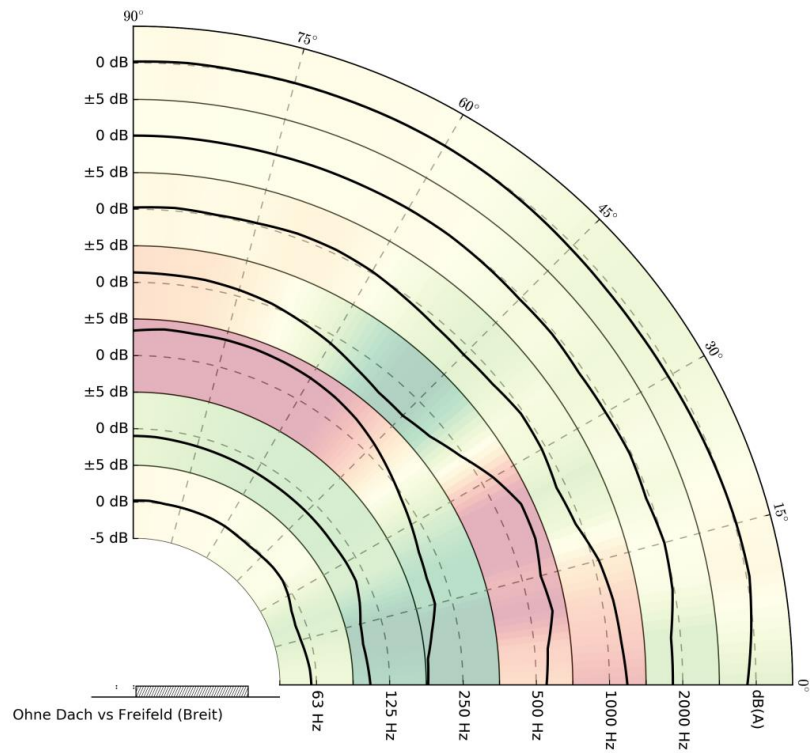


Abbildung 48: Regelquerschnitt: Frequenzabhängiger Effekt des breiten Bahnsteigs.

Abbildung 49 zeigt, die beschriebenen Effekte als Funktion der Empfängerposition. Von 500 auf 1000 Hz wandert die Zone erhöhten Schalldrucks nach unten und verschwindet bei 2000 Hz. Der gesamte Frequenzverlauf ist in Anhang dargestellt.

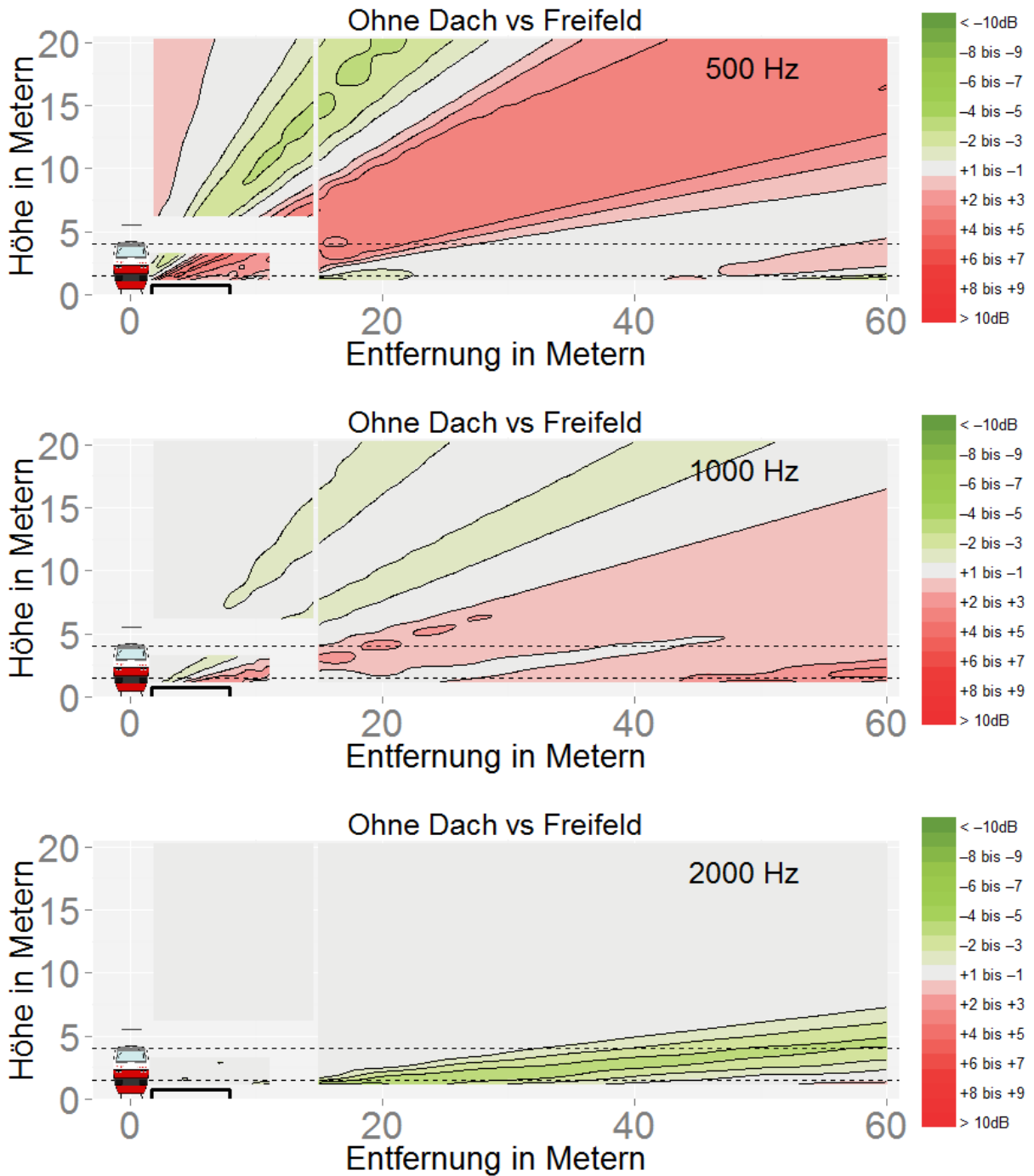


Abbildung 49: Regelquerschnitt: Frequenzabhängiger Effekt des Bahnsteigs für 500, 1000 und 2000 Hz.

Wie schon in den vorangegangenen Simulationen zeigt die absorbierende Bahnsteigkante keinen nennenswerten Einfluss auf die Schirmwirkung der Bahnsteigkante (siehe Abbildung 50 und Abbildung 51).

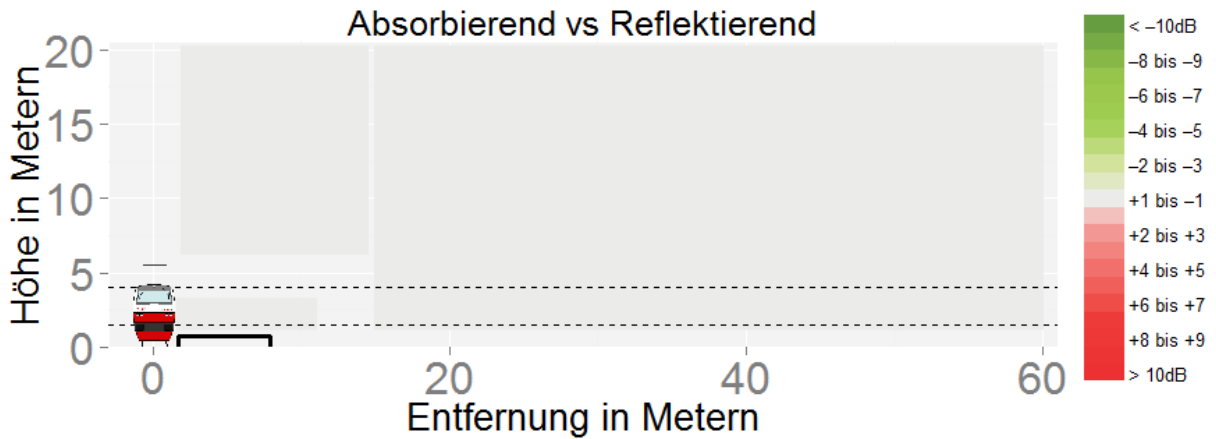


Abbildung 50: Regelquerschnitt: Unterschied durch die absorbierende Kante.

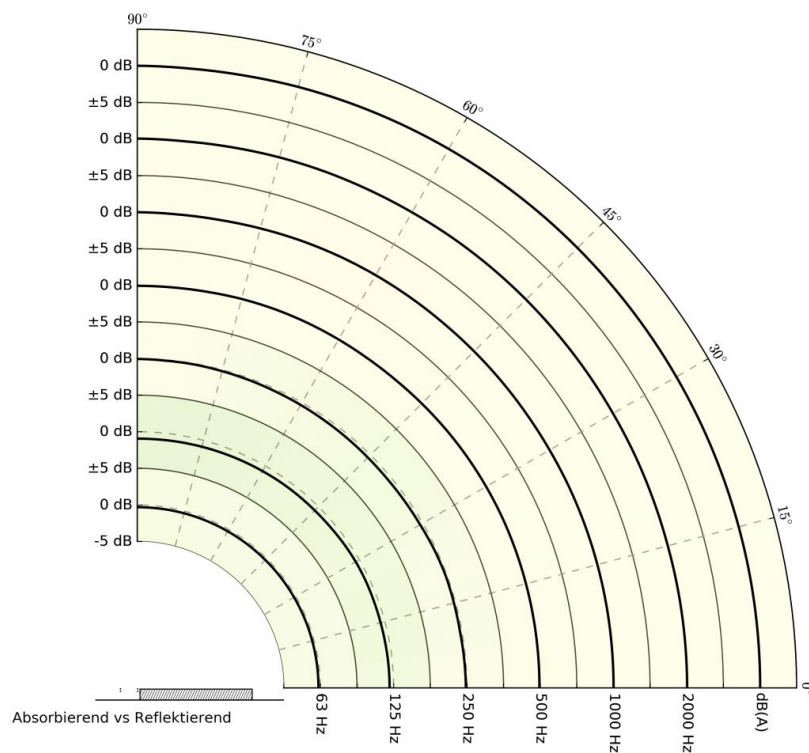


Abbildung 51: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig mit absorbierender Bahnsteigkante; Referenz: Bahnsteig mit reflektierender Bahnsteigkante; Boden: reflektierend).

Der Effekt des reflektierenden Bodens ist ähnlich wie schon bei den Vergleichsrechnungen, d.h. die Schirmwirkung steigt an (siehe Abbildung 52 und Abbildung 53). Dieser Anstieg ist eine Konsequenz der durch die Absorption des Bodens verringerten Freifeldausbreitung (obere Grafik in Abbildung 54). Die Ausbreitung hinter dem Bahnsteig wird aufgrund der vorhandenen Abschirmung weniger beeinflusst (untere Grafik in Abbildung 54).

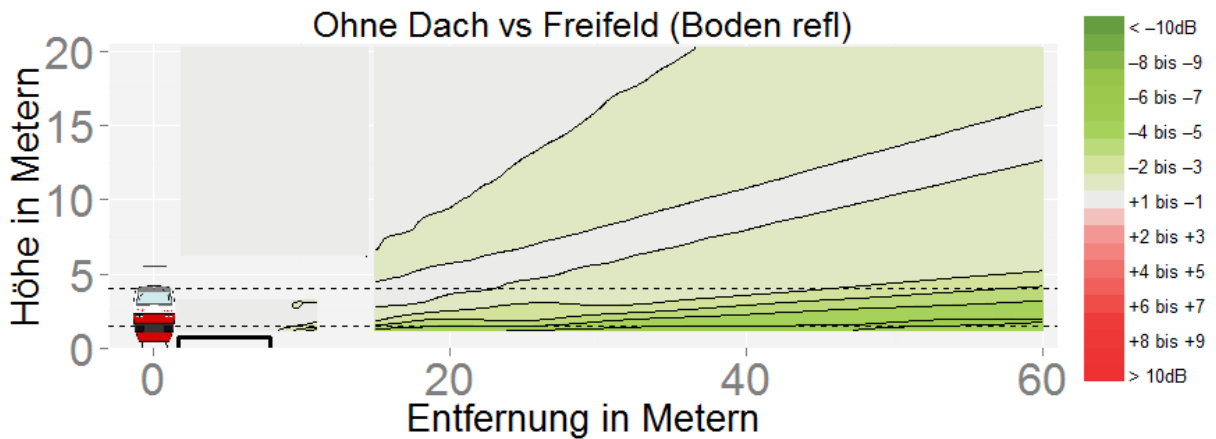


Abbildung 52: Regelquerschnitt: Effekt des Bahnsteigs bei reflektierendem Boden.

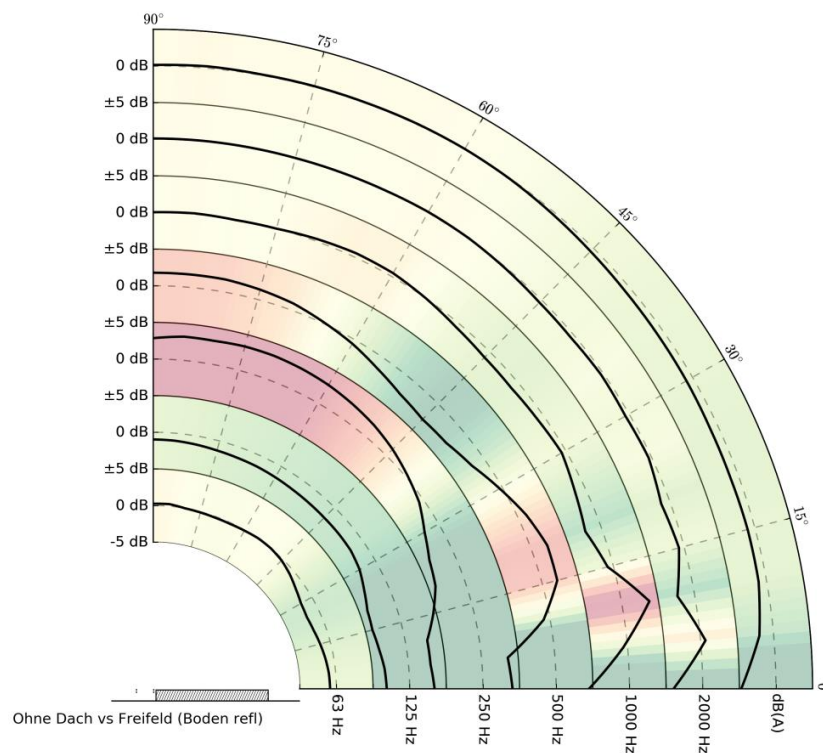


Abbildung 53: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig ohne Dach; Referenz: Freifeld; Boden: reflektierend).

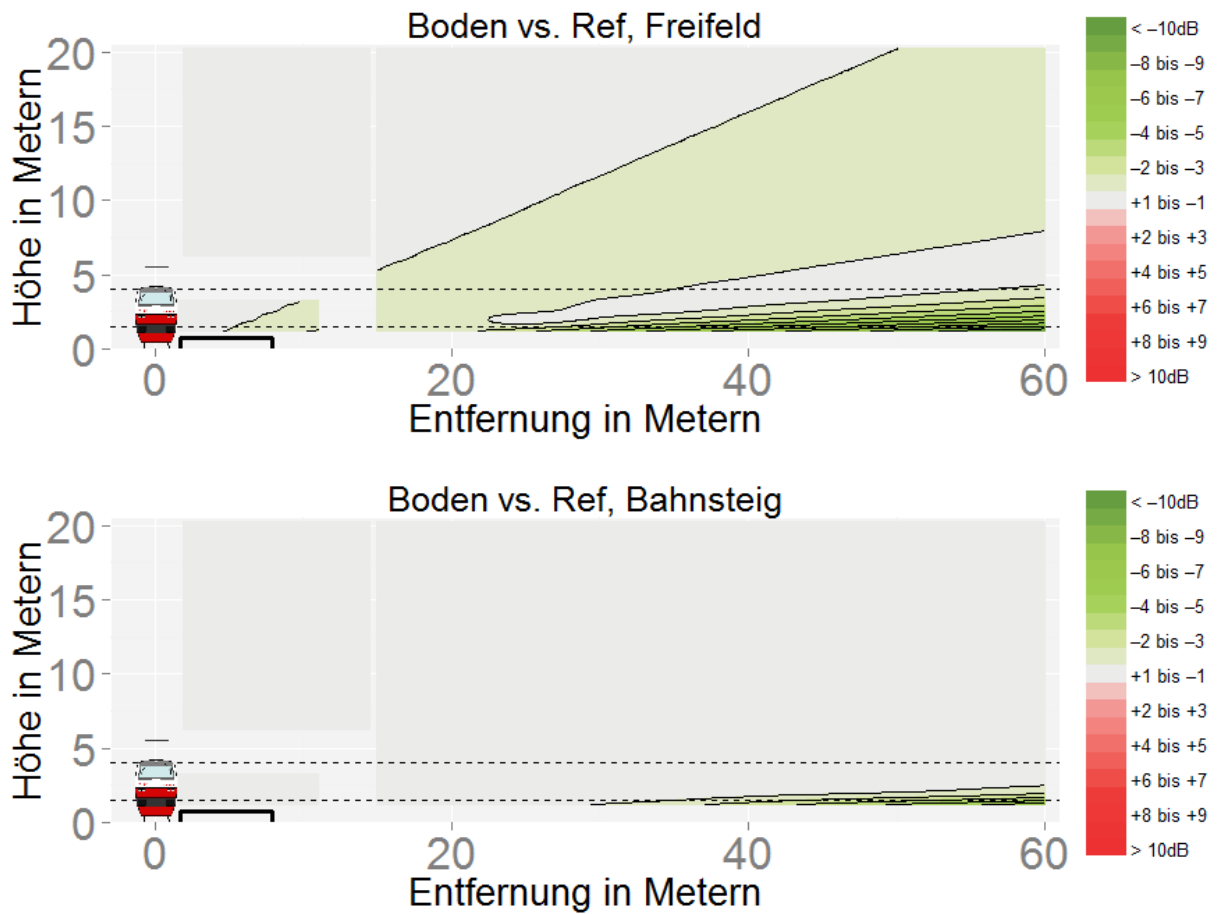


Abbildung 54: Regelquerschnitt: Effekt des Bodens ohne und mit Bahnsteig.

Wie auch beim absorbierenden Boden und bei allen Berechnungen des Regelquerschnitts wurde die Quellhöhe für die freie Ausbreitung wie bei der ONR angesetzt während die Quelle beim Querschnitt mit Bahnsteig auf Höhe Bahnsteigoberkante angesetzt wurde.

5.3. Einfluss des Bahnsteigdaches

5.3.1. Reflektierendes Dach

Beim Dach zeigt sich die zu erwartende Lenkung des Schalls (Abbildung 55 und Abbildung 56) Durch Reflexionen am Bahnsteigdach ergibt sich im Vergleich zur freien Schallausbreitung eine teilweise Verringerung der Schirmwirkung des Bahnsteigs in Bodennähe (ca. 1 dB(A), vgl. Abbildung 45 und Abbildung 46). Durch Reflexionen zwischen Bahnsteig und Dach ergeben sich weiters teilweise Erhöhungen des Schalldruckpegels gegenüber dem Bahnsteig ohne Dach von bis zu 1 dB(A). Beim breiten Bahnsteig ist dieser Lenkungseffekt etwas stärker ausgeprägt (3 dB(A)). Es tritt dieser Effekt allerdings hauptsächlich in relativer Nähe zum Bahnsteig auf (20 m). Hier ist auch sehr gut der Effekt der 2. Reflexion (am Bahnsteig) sichtbar die in einem Band das bei ca. 20 m in 10 m Höhe beginnt und die Schirmwirkung des Daches in diesem Bereich stark reduziert.

Die Verschlechterung die bei großen Distanzen in Bodennähe auftritt (ca. 60 m) ist vermutlich ein Effekt des Bodenmodells in der Randlelementemethode. Der Schalldruck ist hier bei freier Ausbreitung durch die Bodendämpfung schon gering, dadurch kann auch eine leichte Erhöhung auftreten. Unter realistischeren Bedingungen (Wind, ausbreitungsgünstige Bedingungen, zusätzliche Lärmquellen, realistische Zuglänge) wird dieser Effekt wahrscheinlich nicht auftreten.

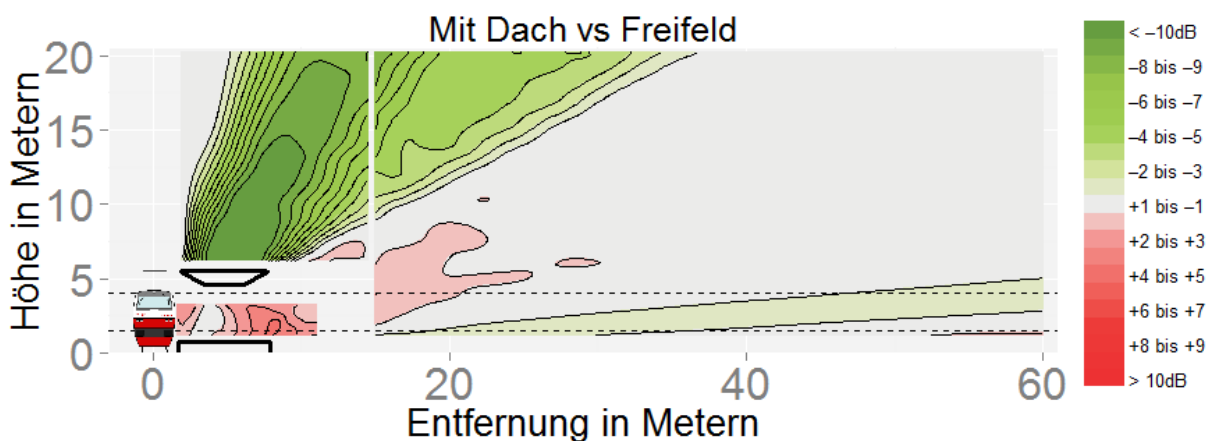


Abbildung 55: Regelquerschnitt: Effekt des reflektierenden Bahnsteigdaches.

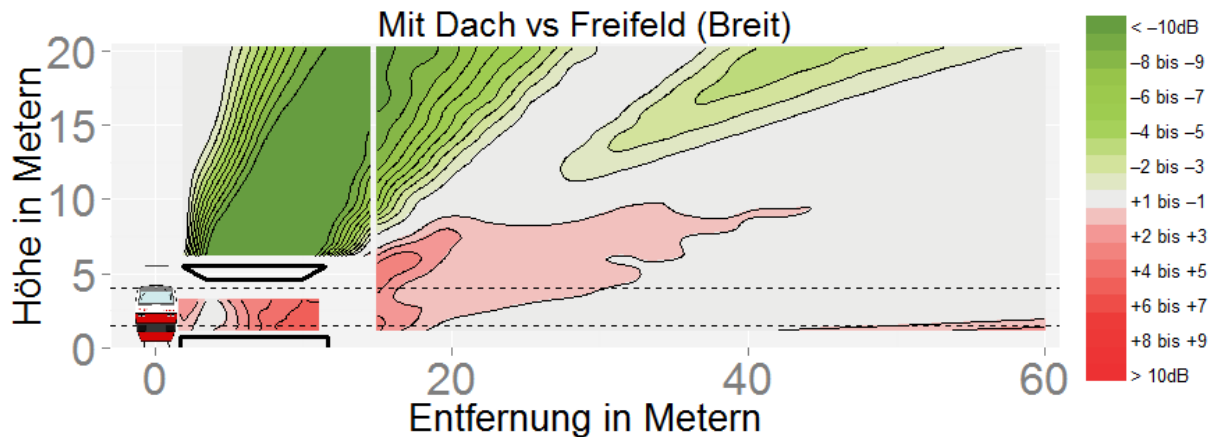


Abbildung 56: Regelquerschnitt: Effekt des reflektierenden Bahnsteigdaches bei einem breiten Bahnsteig.

So wie schon ohne beim Bahnsteig ohne Dach treten die Erhöhungen im Bereich von 500 bis 1000 Hz im Bereich der Ausbreitungswinkel um 30° auf (Abbildung 57). Im Detail zeigen sich folgende Effekte:

Bei 250 Hz:

- $<80^\circ$: Verringerungen bis zu 5 dB
- $>80^\circ$: Erhöhungen bis zu 3 dB

Bei 500 Hz

- $<30^\circ$: Erhöhungen bis zu 5 dB
- $30^\circ - 80^\circ$: Verringerung um bis zu 9 dB

Bei 1000 Hz

- $<15^\circ$: leichte Erhöhung bis zu 3 dB
- $30^\circ - 80^\circ$: Verringerung um bis zu 10 dB

Bei höheren Frequenzen treten vorwiegend Verringerungen der Bandpegel um bis zu 12 dB durch die Abschirmungswirkung des Daches auf (Winkel $30^\circ - 80^\circ$).

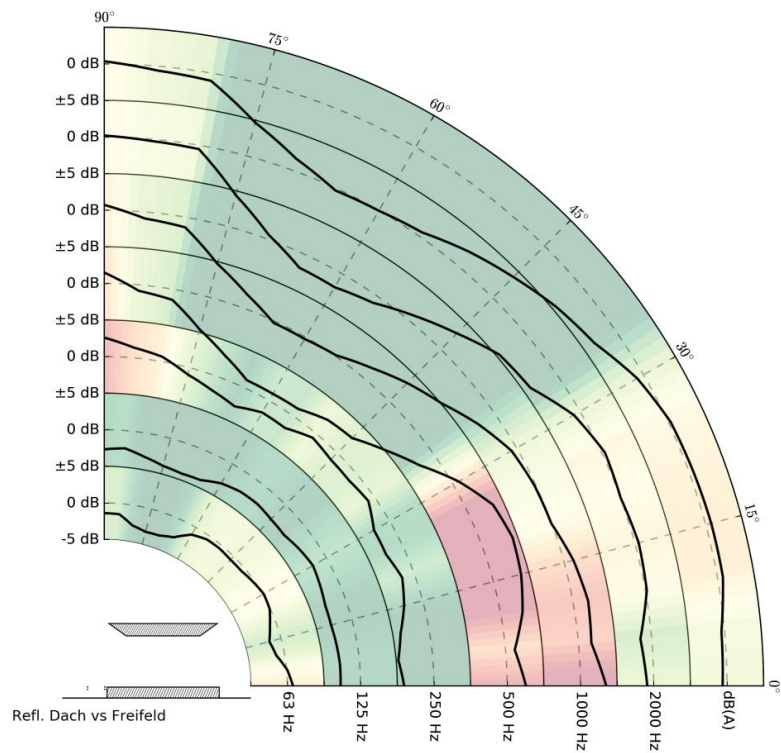


Abbildung 57: Regelquerschnitt: Frequenzabhängiger Effekt des reflektierenden Bahnsteigdaches.

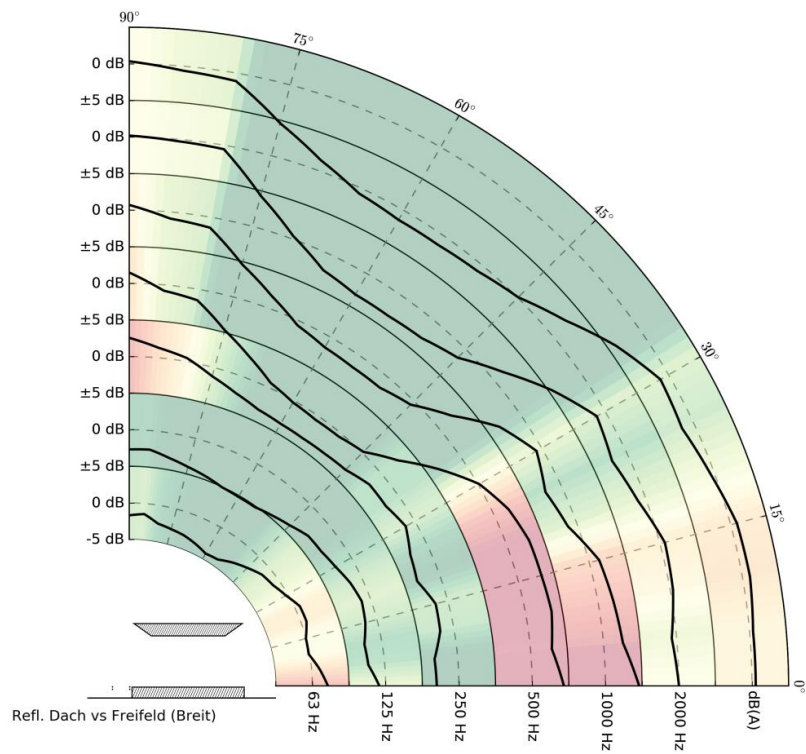


Abbildung 58: Regelquerschnitt: Frequenzabhängiger Effekt des reflektierenden Bahnsteigdaches bei einem breiten Bahnsteig.

5.3.2. Absorbierendes Dach

In den vorangegangenen Ergebnissen wurde mit einem vollständig reflektierenden Dach gerechnet. Es wurden aber auch absorbierende Varianten untersucht.

In Abbildung 59 und Abbildung 60 sind die Effekte der unterschiedlichen Absorptionsvarianten dargestellt. Die rot markierten Bereiche des Daches wurden absorbierend angenommen. Es zeigt sich im Allgemeinen eine leichte Verbesserung durch die Absorption, diese tritt stärker in höheren Lagen auf. Bei vollständiger Absorption auf der Unterseite ist die Schirmwirkung der Bahnsteigkante wieder sehr ähnlich zur Situation ohne Dach (vgl. Abbildung 45 und Abbildung 46). Beim breiten Bahnsteig entsteht vermutlich aufgrund des idealisierten Ausbreitungsmodells eine stark fokussierte leichte Erhöhung (unterstes Bild in Abbildung 60). Diese wird vermutlich in der Realität so nicht auftreten. Am Bahnsteig selbst wird der Pegel bei Vollabsorption an der abgewandten Seite um 2 bis 3 dB(A) verringert.

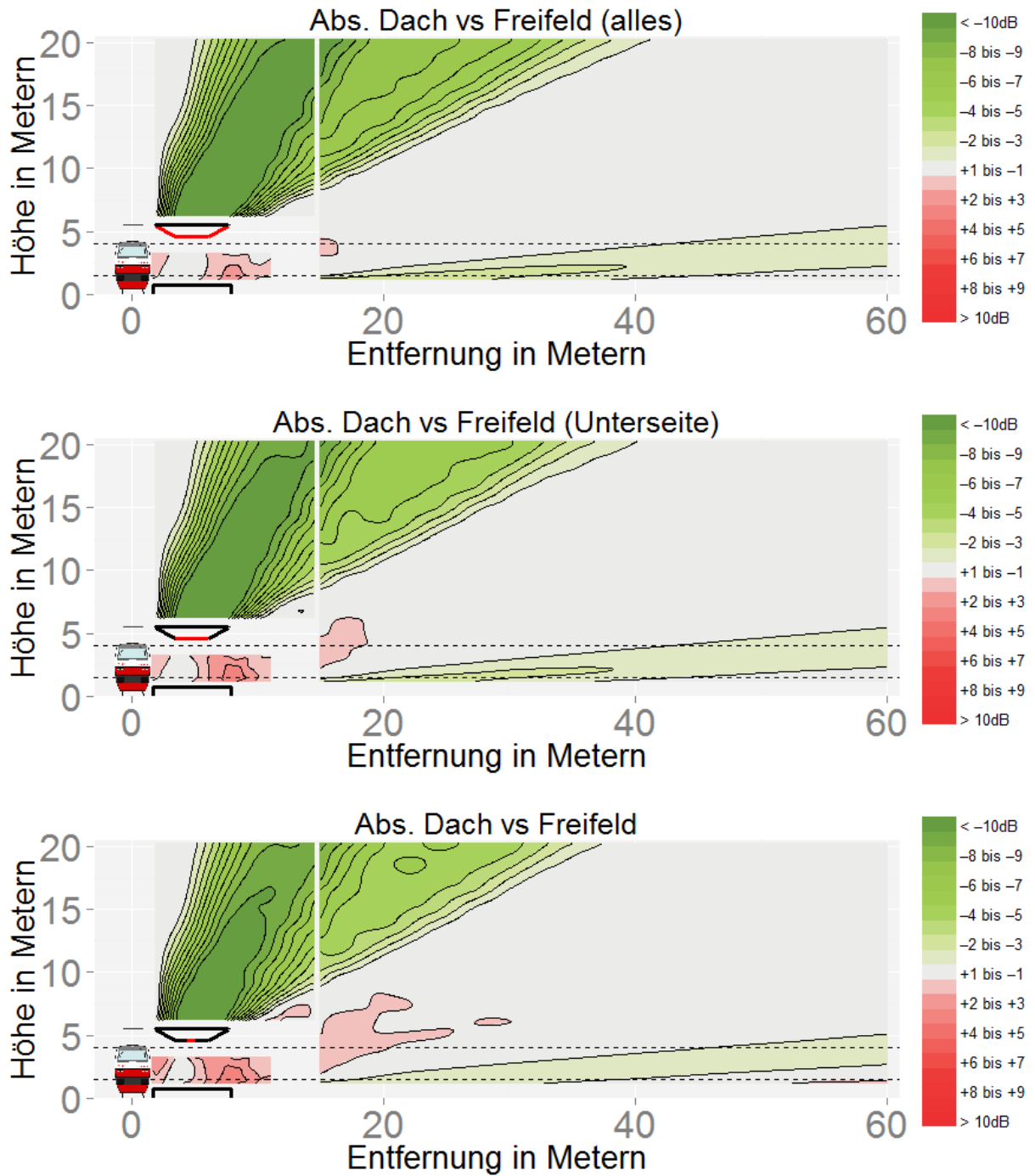


Abbildung 59: Regelquerschnitt: Effekt der Absorption beim schmalen Bahnsteigdach.

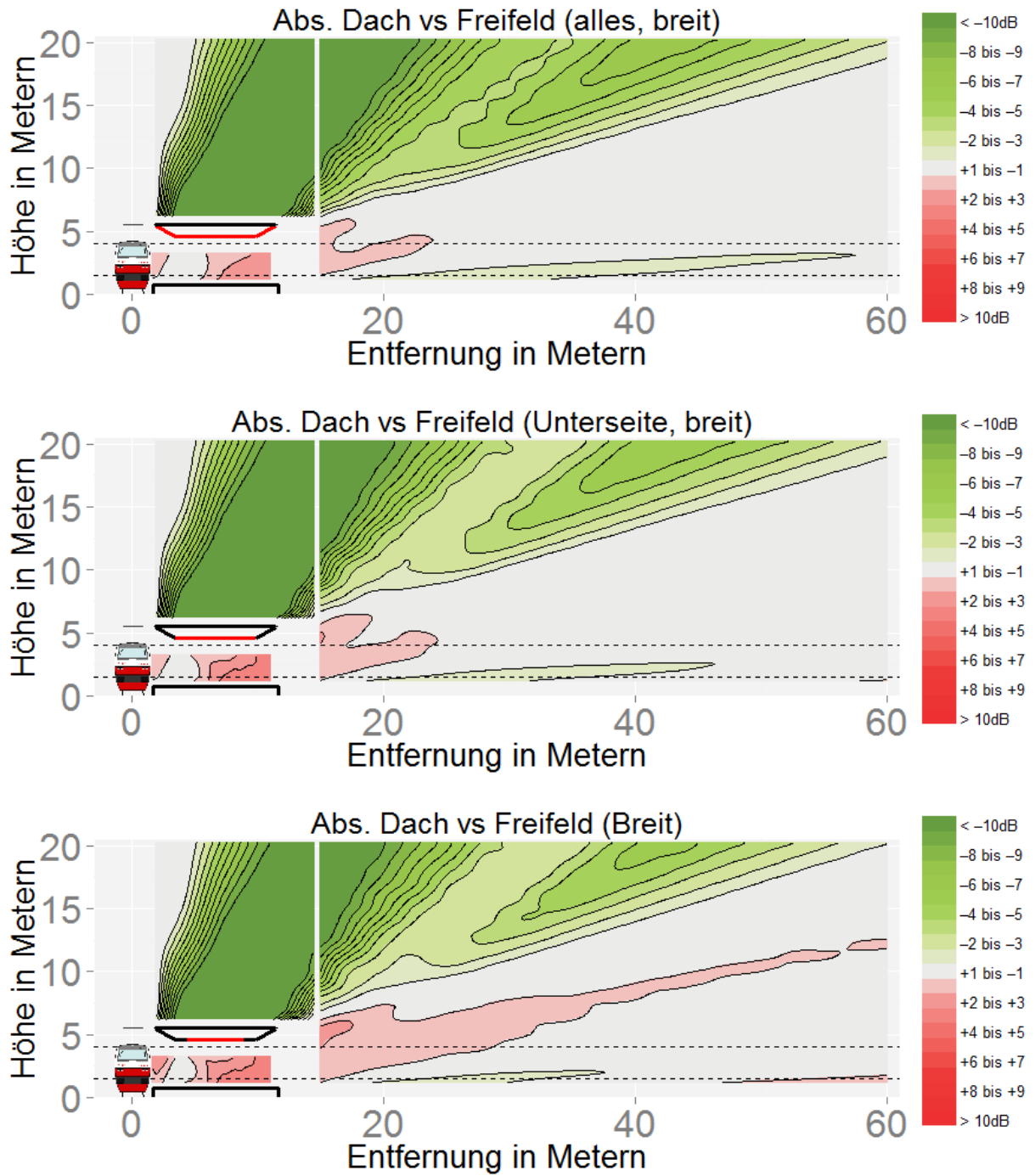


Abbildung 60: Regelquerschnitt: Effekt der Absorption beim breiten Bahnsteigdach.

Abbildung 61 illustriert die Effekte in den unterschiedlichen Frequenzen zwischen dem reflektierenden und dem absorbierenden breiten Bahnsteigdach (Absorption wie im untersten Bild in Abbildung 60). Wie zu erwarten, wirkt die Absorption bei höheren Frequenzen und reduziert hier vor allem die Reflexionen des Daches. Daher ist die Wirkung im Bereich zwischen 15° und 60° am stärksten. Die Wirkung anderer Konfigurationen ist in Anhang zu finden.

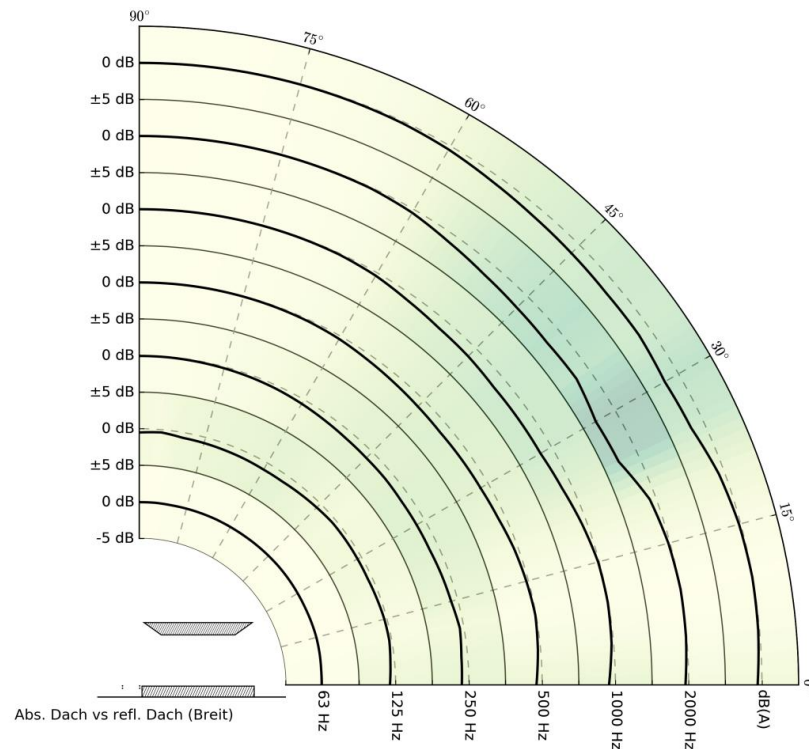


Abbildung 61: Regelquerschnitt: Frequenzabhängiger Effekt der Absorption beim breiten Bahnsteigdach.

Wie schon beim absorbierenden Boden sinkt auch beim reflektierenden Boden die Schirmwirkung ab (siehe Abbildung 61

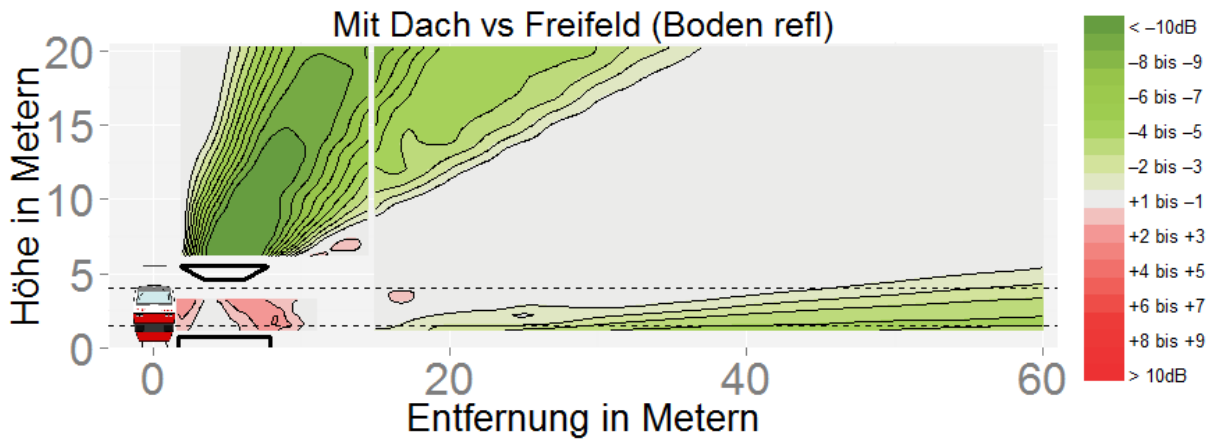


Abbildung 62

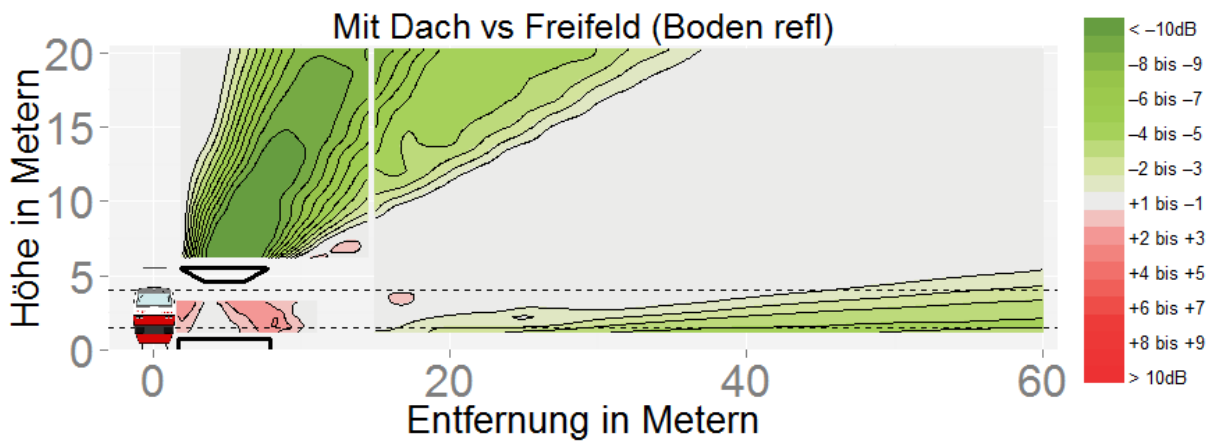


Abbildung 62), wodurch nur in Bereichen geringer Höhe eine tatsächliche Schirmung auftritt.

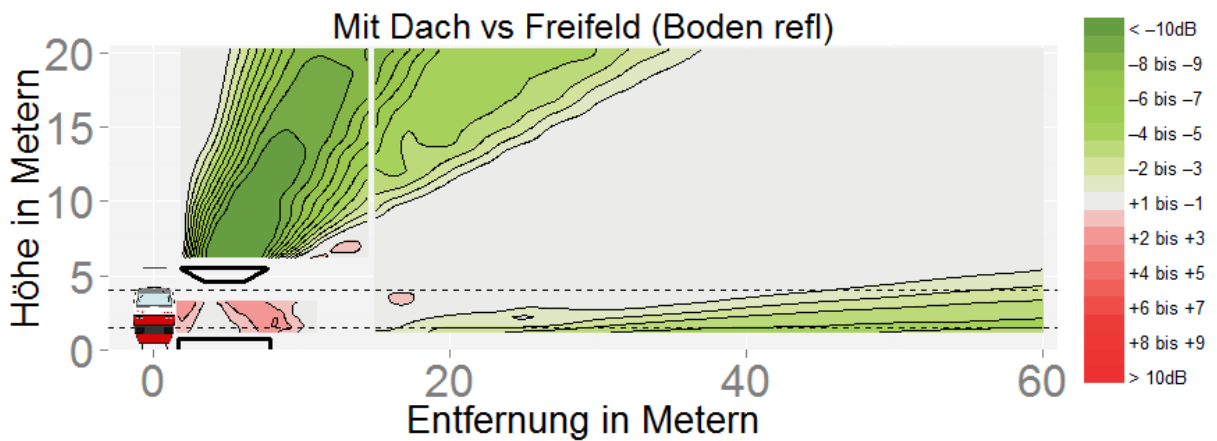


Abbildung 62: Regelquerschnitt: Effekt des reflektierenden Bahnsteigdaches bei reflektierendem Boden.

5.3.3. Effekt der Quellenlänge

Da die bisherigen Berechnungen eine unendlich lange Quelle annehmen und keine Luftdämpfung voraussetzen, wurden auch Berechnungen mit Berücksichtigung verschiedener Quellenlängen und mit Berücksichtigung der Luftdämpfung (vgl. Kapitel 4) durchgeführt. Dies illustriert den Effekt des Bahnsteigs, wenn der Zug völlig abgeschirmt wird und kann daher auch als der Effekt der Bahnsteiglänge bei vollständiger Abdeckung des gesamten (oder Teilen des) Zuges gesehen werden. Befinden sich Teile des Zuges über das Bahnsteigende hinaus, ergibt sich für diese Teile des Zuges einerseits eine Reduktion des Schirmeffekts der Kante, andererseits auch eine Reduktion des Lenkungseffektes des Daches.

Abbildung 63 und Abbildung 64 zeigen jeweils die Berechnung für den Regelquerschnitt mit einer 140 m und einer 300 m langen Quelle.

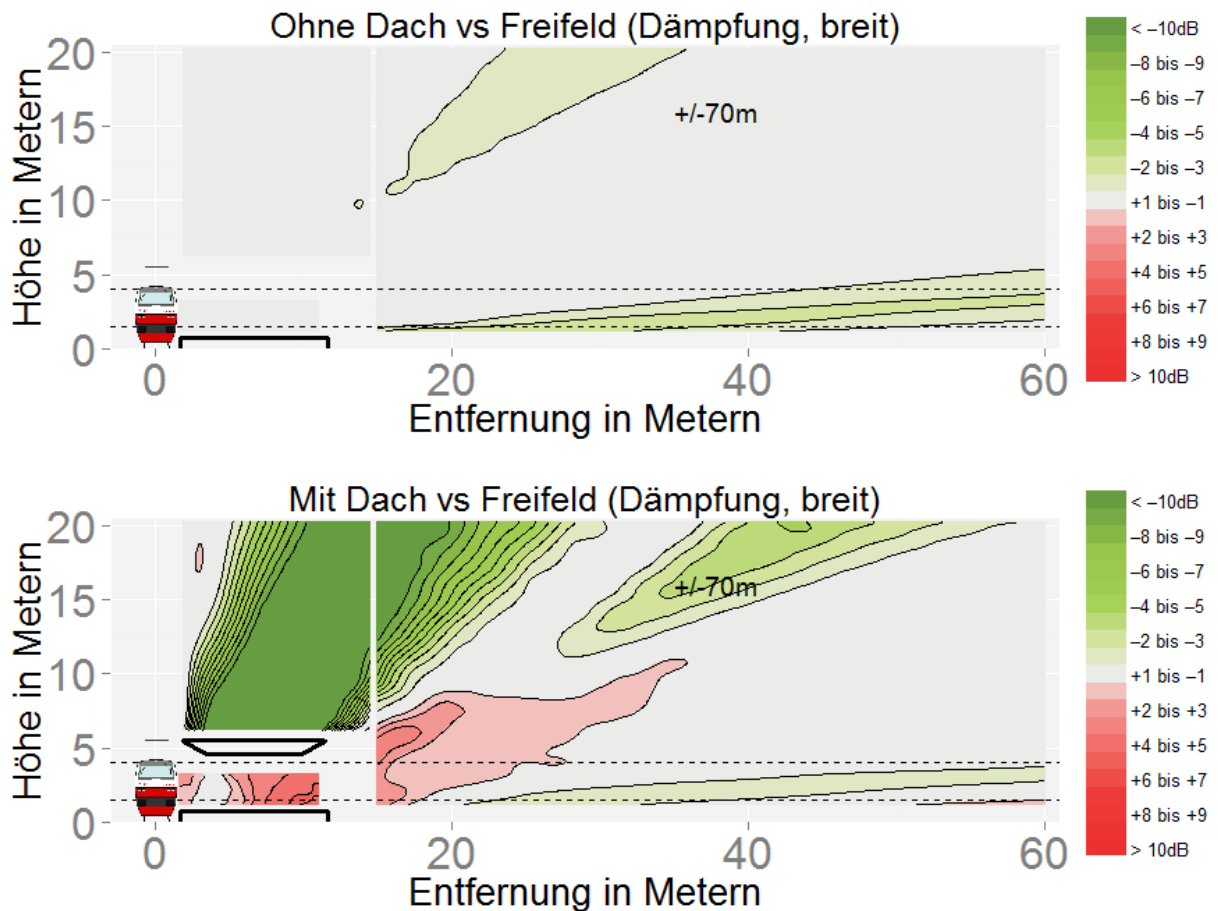


Abbildung 63: Regelquerschnitt: Effekt der Quelllänge (140 m lange Quelle).

Es treten Unterschiede auf, z.B. ist die Schirmwirkung des Bahnsteigs um bis zu 1 dB(A) höher und die Pegelerhöhung die durch das Dach in Bodennähe bei ca. 60 m entsteht wird reduziert. Wenn die Quelle verlängert wird, wird die Schirmwirkung wieder reduziert.

Dies heißt nicht, dass ein kürzerer Bahnsteig mehr Schirmwirkung hat, da ja in diesen Beispielen der Zug immer als vollständig abgedeckt angenommen wird. Wenn man 140 m mit 300 m Länge vergleicht wären bei 140 m in der Realität noch 160 m mit hauptsächlich freier Schallausbreitung zu berücksichtigen. Es zeigt allerdings schon, dass realistischere Annahmen (in diesem Fall eine begrenzte Zuglänge/Bahnsteiglänge und auch die Luftdämpfung) die Gesamtschirmwirkung beeinflussen.

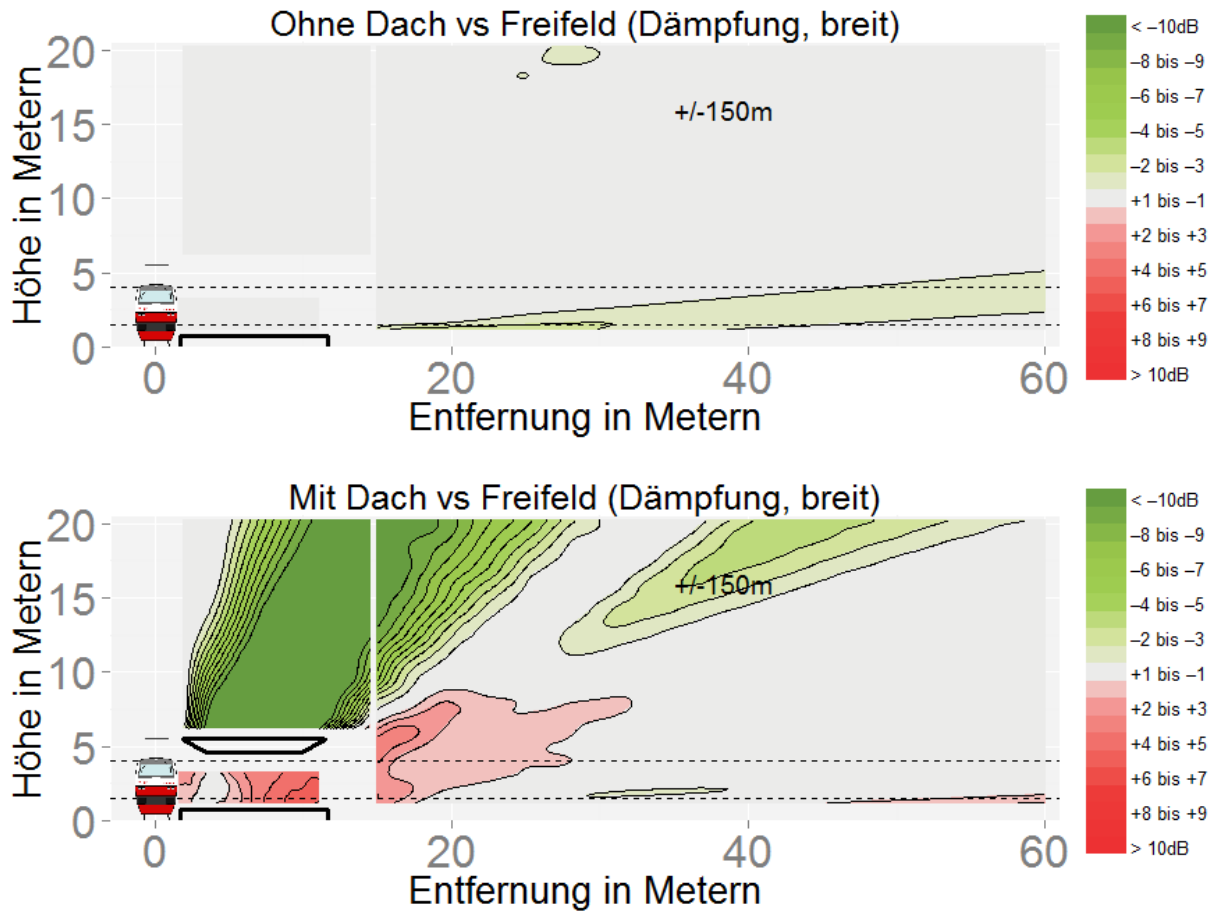


Abbildung 64: Regelquerschnitt: Effekt der Quelllänge (300 m lange Quelle).

5.4. Vergleich mit niedriger Lärmschutzwand

Da die Bahnsteigkante im Prinzip eine lichtraumnahe Abschirmungskante darstellt, liegt der Vergleich mit der niedrigen Lärmschutzwand (nLSW) nahe. Der reduzierte Schirmeffekt des breiten Bahnsteigs gegenüber der schmäleren Variante zeigt allerdings bereits, dass die Situation nicht so einfach ist.

Abbildung 65 stellt Simulationsergebnisse für den schmalen Bahnsteig und zwei unterschiedliche nLSWs dar. nLSW1 ist so wie die Bahnsteigkante positioniert, allerdings nur 20 cm breit. Dahinter befindet sich absorbierender Boden. nLSW2 ist 2,3 m von der Gleisachse entfernt und 1 m über SOK hoch. Die Quellposition wurde bei allen drei Berechnungen auf Höhe der Bahnsteigkante gelegt (im Referenzquerschnitt wie schon zuvor liegt die Quelle auf 30 cm über SOK).

Es zeigt sich, dass vermutlich Reflexionen auf der Bahnsteigoberseite zu veränderten Ausbreitungsbedingungen führen wodurch die Abschirmwirkung der Bahnsteigkante deutlich reduziert wird (bis zu 2 dB(A) Unterschied bei nLSW1). Da die nLSW2 höher ist und daher die Quelle auf Höhe Bahnsteigkante deutlich stärker abschirmt, ist die Wirkung dieser nLSW noch deutlich höher (bis zu 6 dB(A) gegenüber der Bahnsteigkante). Die Annahme dass die Quelle nicht noch weiter nach oben verschoben wird, ist insofern realistisch, als dass einerseits die nLSW2 für niedrige Immissionspunkte die Räder nun überragt und andererseits die großflächige Absorption auf der Innenseite Mehrfachreflexionen stark reduziert.

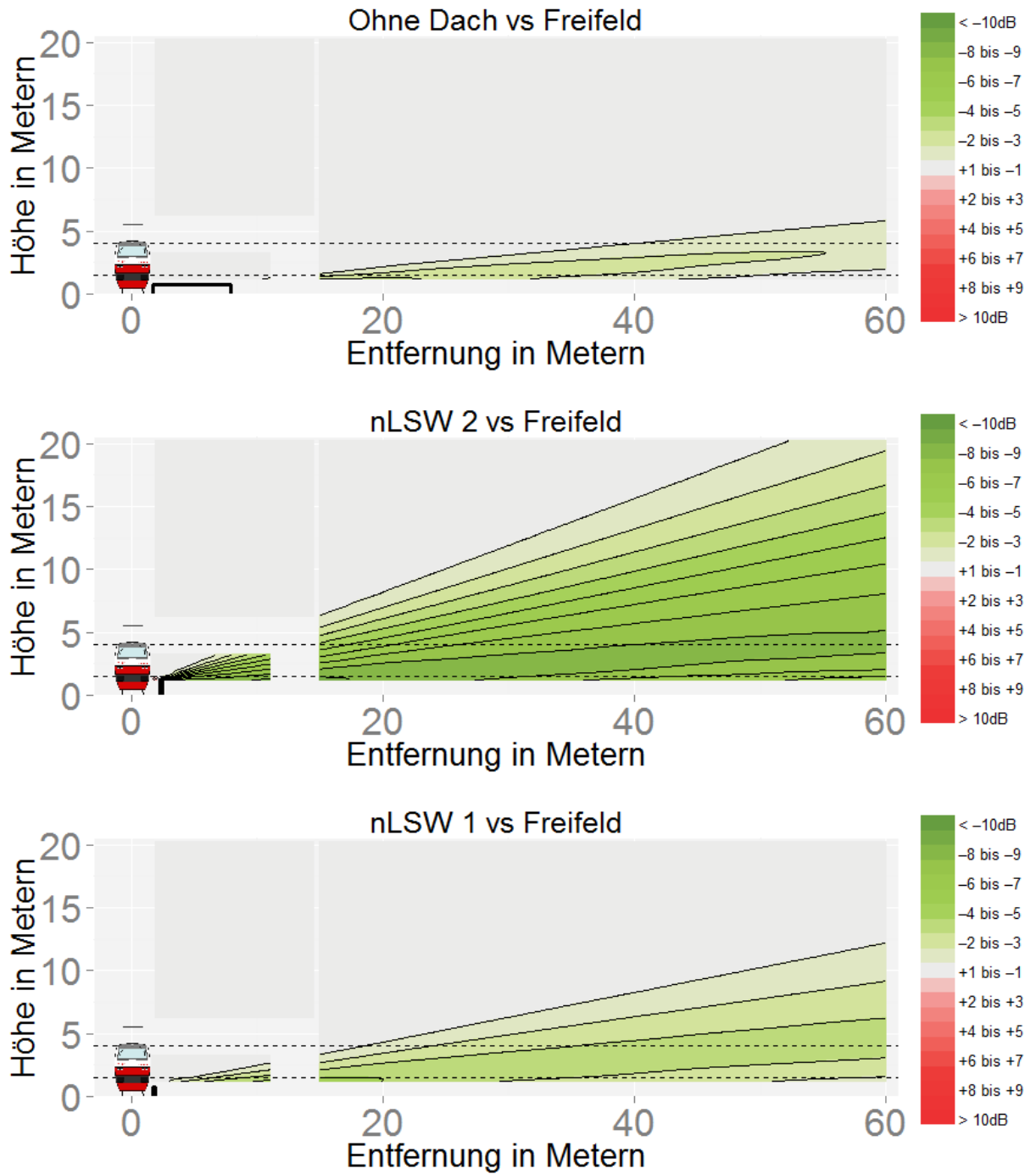


Abbildung 65: Vergleich mit niedrigen Lärmschutzwänden.

Abbildung 66 illustriert den frequenzabhängigen Effekt der niedrigen Lärmschutzwand die der Bahnsteigkante entspricht. Vergleicht man dies mit dem Bahnsteig (Abbildung 47) treten die stärksten Unterschied unterhalb von 20° auf. Dies führt zu einer Abschirmung bei 500 Hz von bis zu 2 dB (vgl. Erhöhung von bis zu 3 dB beim Bahnsteig) und auch die leichte Bandpegelerhöhung von ca. 1 dB bei 1000 Hz beim Bahnsteig verschwindet. Darüber hinaus erhöht sich die Schirmwirkung bei höheren Frequenzen.

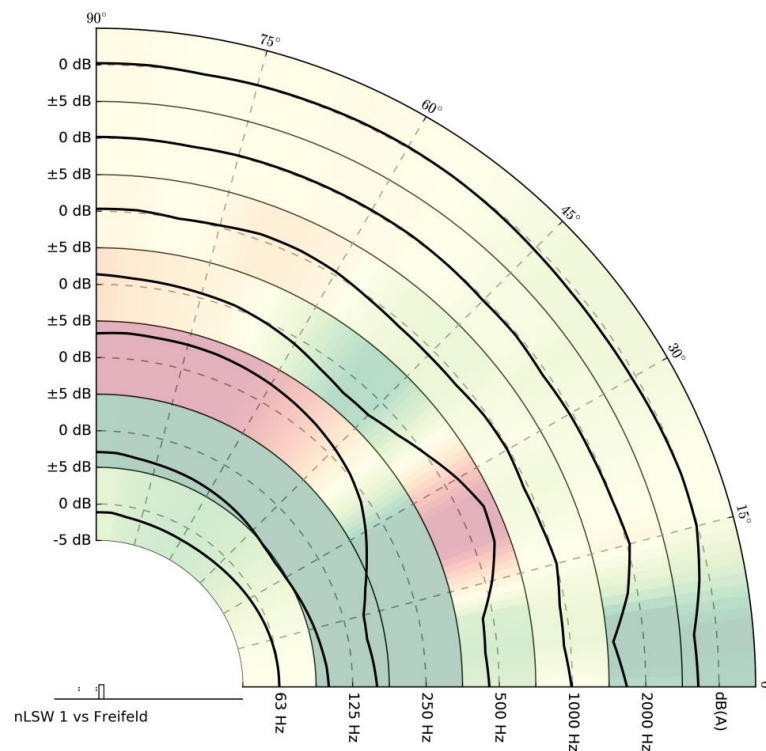


Abbildung 66: Frequenzabhängiger Effekt der niedrigen Lärmschutzwand nLSW1.

5.5. Zusammenfassung der Berechnungen für den Regelquerschnitt

Wie zu erwarten wiesen die für den Regelquerschnitt durchgeführten Berechnungen mittels der Randlementemethode ähnliche Tendenzen wie die Berechnungen für den Bahnhof Wiener Neustadt auf, d.h. eine schwache Schirmwirkung im Größenordnungsbereich von bis zu ca. 2 dB(A) der Bahnsteigkante.

Zusätzlich zeigte sich der zu erwartende lenkende Effekt des Bahnsteigdaches. Einerseits wird durch Reflektionen zwischen Bahnsteigdach und Bahnsteig die Schirmwirkung der Bahnsteigkante aufgehoben, andererseits tritt auch eine Pegelerhöhung von bis zu ca. 4 dB(A) in mittleren und tiefen Lagen vor allem nahe am Bahnsteig (bis zu ca. 20 Meter von der Gleisachse) auf. Dies entspricht etwa einer Entfernung von 10 m von der zweiten Gleisachse. Bei einem breiteren Bahnsteig (in diesem Fall 10 m statt 6,2 m) kann dieser Effekt, allerdings deutlich schwächer, auch etwas weiter entfernt auftreten (1 bis 2 dB(A) bis zu 40 m vom befahrenen Gleis).

Absorption an der Unterseite des Daches bewirkte eine Verringerung des Pegels in mittelhohen Lagen (von 15° bis 60°) von bis zu ca. 3 dB(A), allerdings nur bei ausreichender Fläche. In diesem Fall ist auch die Wirkung der Bahnsteigkante wieder vergleichbar mit der Wirkung ohne Dach. Die Verbesserung lag hier im Bereich von bis zu 1 dB(A).

Der Vergleich mit der niedrigen Lärmschutzwand bei gleicher Kantengeometrie zeigte, dass der Bahnsteig aufgrund der veränderten Reflexionen nicht als eine solche Lärmschutzwand betrachtet werden kann. Die durch eine nLSW zu erwartende Schirmwirkung fiel deutlich höher aus und liegt in Bereichen die auch in der Literatur angegeben werden (vgl. Kapitel 2).

Tabelle 3 zeigt nochmals eine Zusammenfassung der Wirkungen in 15° Abschnitten. Gezeigt wird der Wertebereich und in Klammern der Median. Der Wertebereich gibt die 5% und 95% Perzentilen an, d.h. die oberen und unteren 5% des Wertebereichs werden ausgenommen um eventuelle Ausreißer auszuschließen. Weiters wurden zur Berechnung der Bereiche unterhalb von 5 m nur Immissionspunkte genommen, die mehr als 20 m von der Gleisachse entfernt sind, um die Nahfeldeffekte des Daches herauszunehmen.

Tabelle 3: Übersicht der Effekte der verschiedenen Varianten des Regelquerschnittes in dB(A).

	<15°	15 bis 30°	30 bis 45°	45 bis 60°	60 bis 75°	75 bis 90°
Ohne Dach vs Freifeld, 6,2 m breit						
	-2,3 bis 0,4	-0,6 bis 0,3	-0,9 bis -0,7	-0,6 bis 0	0 bis 0,1	0 bis 0,2
	(0,1)	(-0,1)	(-0,8)	(-0,3)	(0,1)	(0,1)
Ohne Dach vs Freifeld, 10 m breit						
	-1,6 bis 0,4	-0,7 bis 0,1	-0,9 bis -0,7	-0,6 bis 0	0 bis 0,1	0 bis 0,2
	(0,2)	(-0,2)	(-0,8)	(-0,3)	(0,1)	(0,1)
Refl. Dach vs Freifeld, 6,2 m breit						
	-1,4 bis 0,8	-0,3 bis 0,9	-5,6 bis -1,3	-11,7 bis -4,9	-12,1 bis -4,8	-3,6 bis 0,4
	(0,6)	(0,5)	(-3,8)	(-8,4)	(-9)	(0,3)
Refl. Dach vs Freifeld, 10 m breit						
	-0,4 bis 1,5	-3,2 bis 1,6	-12 bis -0,3	-13,8 bis -8,8	-12,5 bis -4,9	-3,7 bis 0,3
	(0,8)	(-0,5)	(-4,8)	(-10,8)	(-9,7)	(0,3)
Abs. Dach vs refl. Dach, 6,2 m breit						
	-0,2 bis 0	-0,3 bis 0	-0,5 bis -0,2	-0,5 bis -0,4	-0,3 bis -0,1	-0,1 bis 0
	(-0,1)	(-0,1)	(-0,4)	(-0,5)	(-0,2)	(0)
Abs. Dach vs refl. Dach (Unterseite) , 6,2 m breit						
	-0,8 bis 0	-1 bis -0,2	-1,4 bis -0,9	-1,6 bis -1	-1 bis -0,3	-0,2 bis -0,1
	(-0,2)	(-0,4)	(-1,1)	(-1,3)	(-0,6)	(-0,1)
Abs. Dach vs refl. Dach (alles) , 6,2 m breit						
	-0,9 bis 0	-1,5 bis -0,1	-2,9 bis -1,9	-2,7 bis -1,5	-1,4 bis -0,3	-0,2 bis -0,1
	(-0,2)	(-0,4)	(-2,4)	(-2,5)	(-0,8)	(-0,1)
Abs. Dach vs refl. Dach, 10 m breit						
	-0,5 bis 0	-2,5 bis -0,3	-2,4 bis -1,5	-1,8 bis -0,5	-0,5 bis -0,1	-0,1 bis -0,1
	(-0,2)	(-0,9)	(-1,9)	(-1,2)	(-0,2)	(-0,1)
Abs. Dach vs refl. Dach (Unterseite, 10 m breit)						
	-1,1 bis -0,2	-2,7 bis -0,6	-2,9 bis -1,8	-2,4 bis -1,2	-1 bis -0,3	-0,2 bis -0,1
	(-0,4)	(-1,8)	(-2,3)	(-1,9)	(-0,7)	(-0,1)
Refl. Dach vs refl. Dach (alles, 10 m breit)						
	-1,3 bis -0,1	-4 bis -0,7	-4 bis -2,7	-3,5 bis -1,3	-1,1 bis -0,3	-0,2 bis -0,1
	(-0,4)	(-2,2)	(-3,8)	(-2,2)	(-0,7)	(-0,1)
nLSW 1 vs Freifeld, 6,2 m breit						
	-3,6 bis -0,2	-0,5 bis 0	-0,8 bis -0,6	-0,5 bis 0,1	0,1 bis 0,2	-0,1 bis 0,2
	(-2,1)	(-0,1)	(-0,7)	(-0,2)	(0,1)	(0,1)

6. VERGLEICH MIT BESTEHENDEN REGELWERKEN UND BEISPIELBERECHNUNGEN

Um einen Vergleich von Messergebnissen zu Berechnungsergebnissen für die relativen Pegelunterschiede zwischen dem Referenzpunkt und den Messpunkten in der Entfernung zu erhalten wurde die örtliche Situation am Messort im Detail modelliert. Dazu wurden die terrestrischen Vermessungsdaten des lokalen Geländes digitalisiert. Als Berechnungsprogramm wurde IMMI 2016 verwendet (Wölfel Messsystem GmbH). Die Lage der Schienenoberkante (SOK) wurde genau bestimmt und im Modell integriert.

Die Messpunkte und der Referenzpunkt sind mit ihren Koordinaten entsprechend des Messaufbaus enthalten. Die Bodendämpfung wurde über den Einzahlwert G berücksichtigt. Im Bereich des Referenzpunktes lag dieser einheitlich bei $G=1$, wie für absorbierenden porösen Boden anzunehmen ist. Die Bahnsteige selbst, sowohl der direkt abschirmende als auch weitere im Ausbreitungsweg, waren einheitlich mit $G=0$ als harter reflektierender Untergrund definiert. Im Bereich der Messpunkte, die sich auf dem Parkplatz befanden, war der Untergrund ebenfalls $G=0$ berücksichtigt. Für die dazwischenliegenden Gleisbette bzw. nicht im Detail definierte Zwischenräume wurden zwei Alternativen verwendet: Einmal wurde mit $G=1$ ein vollständig poröser Untergrund angenommen im zweiten Fall mit $G=0,8$ ein Anteil von etwa 20% reflektierenden Abschnitten. Für das Berechnungsverfahren nach der europäischen Richtlinie CNOSSOS-EU gilt ein Faktor von $G=1$ für nicht verdichteten Boden und $G=0,7$ für ein verdichtetes Feld und Schotter.

Die in den Abschnitten 6.1 und 6.2 dargestellten Pegeldifferenzen beziehen sich auf die Messpunkte im Fernfeld (37,5 m) und dem Referenzpunkt im Nahbereich (7,35 m) zur Vorbeifahrt. Diese Differenzen waren die Basis zur Erstellung des Modelles, welches die in Abschnitt 6.3 gezeigte Einfügungsdämpfung (Pegeldifferenz mit und ohne eingefügten Bahnsteig am identen Punkt) für den Regelquerschnitt ergibt.

6.1. Berechnungen mittels ONR 305011

Das Regelwerk ONR 305011 aus dem Jahr 2009 stellt derzeit in Österreich den Stand der Technik bei der Berechnung von Schienenlärmimmissionen dar. Darin werden einer Ersatzschallquelle in der Gleisachse in 0,3 m über SOK oktavbandweise Schallleistungspegel zugeordnet. Diese sind Ausgangswerte für die Immissionsberechnung nach ÖNORM ISO 9613-2 wobei noch zusätzlich eine Korrektur für Richtcharakteristik einzusetzen ist.

In einem ersten Schritt wurde der Einfluss der Lage der Ersatzschallquelle untersucht. Dies wurde zur Orientierung mit dem Spektrum von K-Sohle gebremsten Güterzügen bei 100 km/h untersucht. Tabelle 4 zeigt den Vergleich unterschiedlicher Ersatzschallpositionen. Die Nummerierung der Position ist in Abbildung 67 dargestellt.

Tabelle 4: Vergleich unterschiedlicher Ersatzschallpositionen. Alle Angaben sind Differenzen der A-bewerteten Gesamtpegel in dB. Zur Nummerierung der Position siehe Abbildung 67. Als Schirmoberkante gilt die Bahnsteigoberkante. Die Messpunkte und deren Ergebnisse stammen aus den in Abschnitt 3.4 beschriebenen Fernfeldmessungen.

Messpunkthöhe (Messpunkt)	Messung	Laut Norm (1)	Fahrzeug- außenkante (3)	Fahrzeug- außenkante und Schirm- oberkante (4)	Schirm- oberkante (2)
6 m ü. GOK (HMP3)	-7,4	-9,9	-13,1	-9,7	-8,2
4 m ü. GOK (HMP2)	-8,3	-10,1	-13,3	-9,8	-9,6
1,5 m ü. GOK (HMP1)	-11,4	-11,0	-14,1	-10,0	-10,4

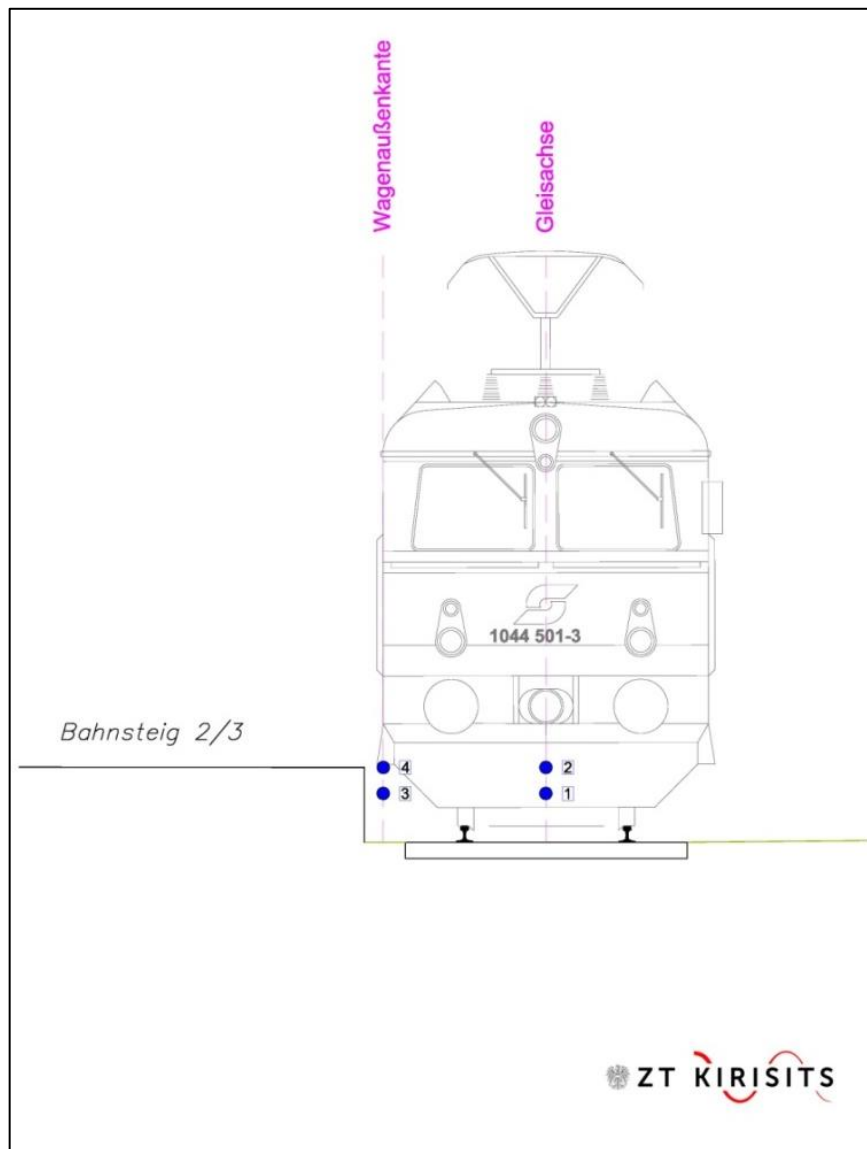


Abbildung 67: Illustration der Ersatzschallquellen.

Eine Veränderung der Ersatzschallquelle wirkt sich auf die Ergebnisse aller Messpunkte aus. Tendenziell zeigt eine Verschiebung in Richtung Bahnsteigoberkante tendenzielle bessere Übereinstimmung insbesondere für die Messpunkte in 1,5 m und 6 m.

Als nächster Schritt folgte die Veränderung der Bodendämpfung von $G=1$ zu $G=0,8$ für die zwischen den Bahnsteigen liegenden Bodenbereiche. Sie führte zu einer durchgehenden Verringerung der Differenzpegel in der Höhe von 0,2 dB bis 0,4 dB.

Als zusammenfassender Vergleich der Messwerte mit Berechnungsergebnissen wurde das Spektrum an die während der Messung vorbeifahrenden Güterzüge angepasst, welche mit 50 km/h und vollständiger Zusammensetzung mit Grauguss-Klotzbremsen angenommen wurde.

Die Unterschiede zum bisher verwendeten Güterzug mit K-Bremssohle waren $< 0,5$ dB, lagen aber für den abschließenden Vergleich näher an der tatsächlichen örtlichen Situation. Der Vergleich nach Tabelle 5 zeigt dennoch Abweichungen von bis zu 2 dB. Bessere Übereinstimmung, insbesondere für höher liegende Messpunkte erreicht man jedenfalls durch eine Anhebung der Ersatzschallquelle auf Bahnsteigkante und Annahme einer Bodendämpfung von $G=0,8$.

Tabelle 5: Vergleich unterschiedlicher Ersatzschallpositionen und Bodendämpfungswerten für das Frequenzspektrum von Güterzügen mit Graugussbremsen und 50 km/h nach ONR305011. Alle Angaben sind Differenzen der A-bewerteten Gesamtpegel in dB. Als Schirmoberkante gilt die Bahnsteigoberkante.

Messpunkthöhe	Messung	nach Norm (1) $G=1$	nach Norm (1) $G=0,8$	Schirmkante (2) $G=1$	Schirmkante (2) $G=0,8$
6 m ü. GOK	-7,4	-9,4	-9,0	-8,2	-8,0
4 m ü. GOK	-8,3	-9,6	-9,2	-9,3	-9,1
1,5 m ü GOK	-11,4	-10,3	-10,3	-9,9	-9,7

6.2. Berechnungen mittels CNOSSOS-EU

Das Berechnungsverfahren nach der europäischen Richtlinie (EU) 2015/996 wurde im Rahmen des Projektes CNOSSOS-EU (Commission directive (EU) 2015/996, 2015; Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council, 2002; Kephelopoulos & Paviotti, 2016; Kephelopoulos u. a., 2012; Christian Kirisits, 2014) entwickelt, wodurch auch heute dieser Kurztitel als Synonym für das Regelwerk der Richtlinie verwendet wird. Für die Schallemission von Schienenfahrzeugen werden zwei Ersatzschallquellenhöhen angenommen, denen Schalleistungspegel für Rollgeräusche, Antriebsgeräusche, aerodynamische Geräusche, Stoßgeräusche, Kurvengeräusche und Brückengeräusche zugeordnet werden. Für die Schallausbreitung stehen sowohl eine ausbreitungsgünstige als auch eine neutrale Bedingung zur Verfügung.

In einem ersten Schritt wurde wiederum der Einfluss der Höhe der Ersatzschallquelle auf die Pegeldifferenzen verglichen. Nachdem die K-Sohle gebremsten Güterwägen bei 100 km/h für ONR als auch CNOSSOS-EU bei freier Schallausbreitung sehr vergleichbare Ergebnisse zeigten, wurde diese wiederum als Referenz für einen ersten Vergleich verwendet. Die Höhe wurde einmal streng nach Norm angesetzt. Für die Vergleiche anderer Höhen wurde die SOK

verändert, wodurch sich auch die Höhe der damit verbundenen Ersatzschallquelle ändert. Diese wurde um -16 cm nach unten gesetzt (SOK lag damit auf Höhe des Bodens), oder um 20 cm erhöht. Für CNOSSOS, welches in der Regel die Ersatzschallquelle 50 cm über SOK definiert, lag dieser Punkt damit bereits deutlich über der Bahnsteigkante (siehe Tabelle 6).

Tabelle 6: Vergleich verschiedener Höhen für die Ersatzschallquelle und der ONR 305011 und CNOSSOS-EU wobei für letztere sowohl ausbreitungsgünstige und neutrale Bedingungen angenommen wurden (für K-Sohle bei 100 km/h).

Punkt	Messung	ONR 305011			CNOSSOS günstig			CNOSSOS neutral		
		-16 cm	0 cm	+20 cm	-16 cm	0	+20 cm	-16 cm	0 cm	+20 cm
6 m ü. GOK	-7,4	-10,3	-9,9	-8,9	-11,1	-8,2	-7,0	-11,3	-8,6	-7,1
4 m ü. GOK	-8,3	-11,0	-10,1	-10,0	-11,6	-10,3	-7,2	-11,9	-10,6	-7,8
1,5 m ü. GOK	-11,4	-12,1	-11,0	-10,5	-13,7	-12,2	-9,2	-14,6	-13,3	-11,2

Insgesamt ist der Einfluss der Höhe der Ersatzschallquelle beim Verfahren CNOSSOS-EU deutlich ausgeprägter im Vergleich zur ONR 305011. So liegen beispielsweise für den Messpunkt in 6 m Höhe die Unterschiede bei mehr als 4 dB. Dies ist insofern schlüssig, da in CNOSSOS die Emissionspunkthöhe auf SOK + 50 cm liegt und damit bereits nahe der Höhe der Bahnsteigkante. Eine Erhöhung um 20 cm verringert die Abschirmwirkung weit ausgeprägter als bei der tiefer liegenden Quelle der ONR 305011. Der Wechsel von ausbreitungsgünstig zu neutralen Bedingungen zeigt höhere Schallpegeldifferenzen in der Entfernung.

Auch nach CNOSSOS bewirkt die Verwendung eines Bodendämpfungsfaktors von $G=0,8$ anstelle von $G=1$ für die Bereich zwischen den Bahnsteigen eine Änderung. Ähnlich wie bei der ONR 305011 verringern sich die Differenzen um 0,2 dB bis 0,4 dB. Allerdings liegen die Unterschiede für den Messpunkt in 1,5 m Höhe deutlich höher und erreichen ein Maximum von 1,1 dB wenn noch gleichzeitig neutrale Bedingungen angenommen werden. So liegt die Differenz dann bei -13,3 dB für $G=1$ und bei -12,2 dB für $G=0,8$.

Als nächster Schritt erfolgte der konkrete Vergleich mit den Messwerten anhand von CNOSSOS-EU Berechnungen für Grauguss gebremste Güterzüge bei 50 km/h (Tabelle 7).

Tabelle 7: Berechnung mit CNOSSOS-EU (ausbreitungsgünstig): Vergleich unterschiedlicher Ersatzschallpositionen und Bodendämpfungswerten für Güterzüge mit Graugussbremsen und 50 km /h (gemessen wurden nur Güterzüge). Alle Angaben sind Differenzen der A-bewerteten Gesamtpegel in dB. Als Schirmoberkante gilt die Bahnsteigoberkante.

Messpunkthöhe	Messung	nach Norm G=1	nach Norm G=0,8	Schirmkante (2) G=1	Schirmkante (2) G=0,8
6 m ü. GOK	-7,4	-8,4	-8,2	-8,0	-7,9
4 m ü. GOK	-8,3	-10,3	-9,9	-9,6	-9,1
1,5 m ü GOK	-11,4	-12,3	-11,6	-12,2	-11,4

Für das konkrete Experiment erwies sich die Annahme von CNOSSOS-EU, der Einstellung $G=0,8$ und der Anhebung der Ersatzschallquelle auf die Höhe der Bahnsteigkante als bestes mit der Messung übereinstimmendes Ergebnis. Die Berechnungen nach CNOSSOS-EU beinhalten auch die Ersatzschallquelle in 4,0 m Höhe welche im konkreten Fall die Traktion durch eine E-Lokomotive beinhalten. Allerdings sind diese im konkreten Fall für die langen Güterzüge fast vernachlässigbar und liegen bei unter 0,2 dB. Prinzipiell ist die Traktion nicht abgeschirmt und es ergibt sich nach CNOSSOS damit eine leicht geringere Schallpegeldifferenz.

6.3. Berechnungen für den Regelquerschnitt

Aus den Vergleichen mit Messwerten und den Berechnungen nach der Randelementemethode wurden Vergleiche mit den existierenden Regelwerken angestellt. Abbildung 68 illustriert allgemein die Wirkung der Standardbahnsteigkante für das Regelwerk ONR 305011. Dabei zeigt sich die Abschirmwirkung von -3 bis -8 dB für relevante Immissionsorte. Die Messhöhen HMP1, HMP2 und HMP3 sind in Tabelle 4 zu finden.

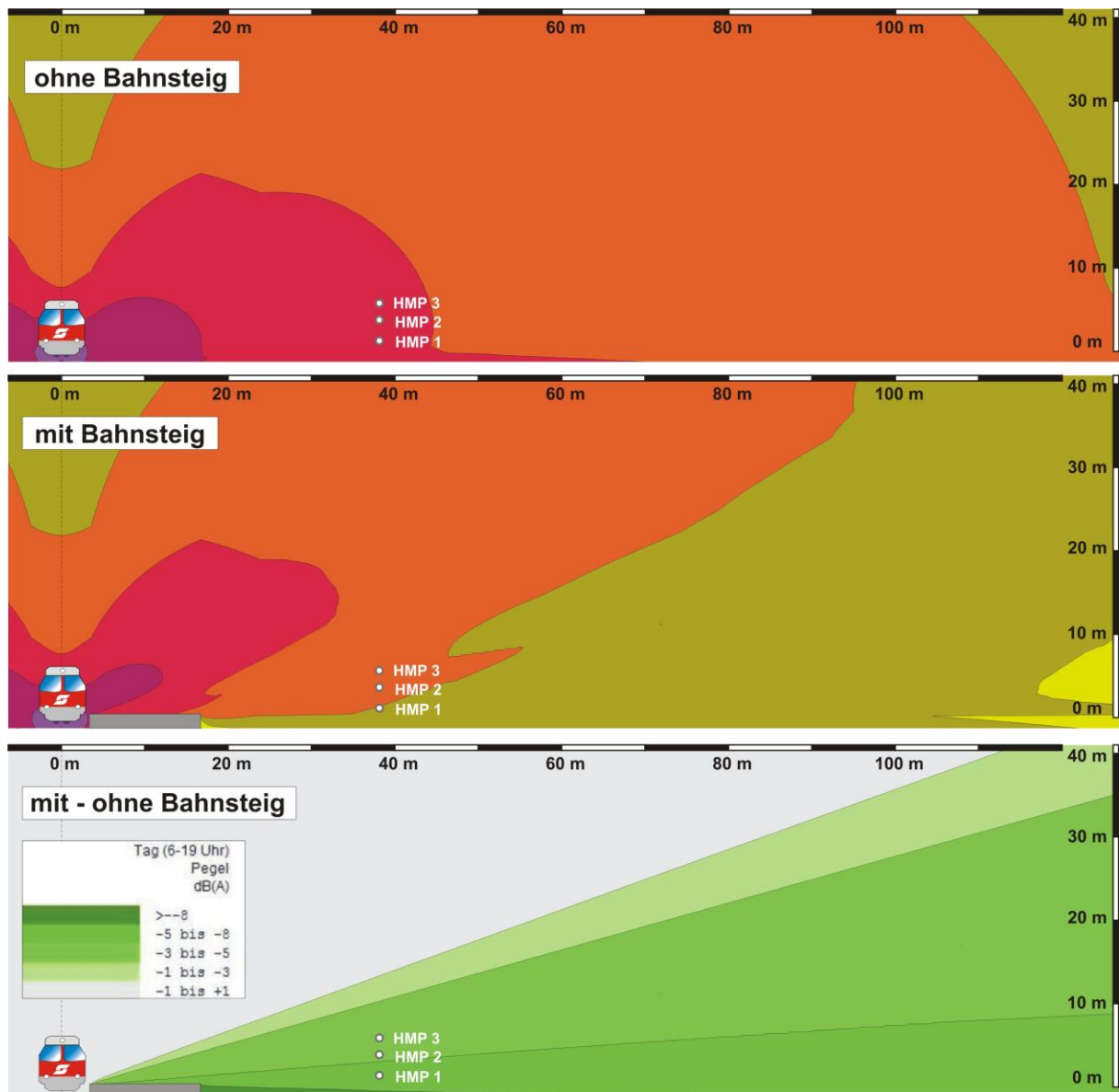


Abbildung 68: Berechnungen nach ONR 305011 mit und ohne Standardbahnsteig sowie als Differenzdarstellung. Da Standardgeometrie und Messgeometrie nicht völlig ident sind, ist die Lage der Messpunkte nur zur groben Zuordnung des Messbereichs illustriert.

Das Berechnungsverfahren nach CNOSSOS-EU setzt die Ersatzschallquelle für das dominierende Rollgeräusche in 50 cm über SOK anstelle von 30 cm wie bei der ONR 305011 an. Daher zeigt sich anhand der Abbildung 69 eine deutlich verringerte Abschirmwirkung für höher gelegene Punkte, wie sie bereits in den Ergebnissen anhand des konkreten Messaufbaues zu beobachten war.

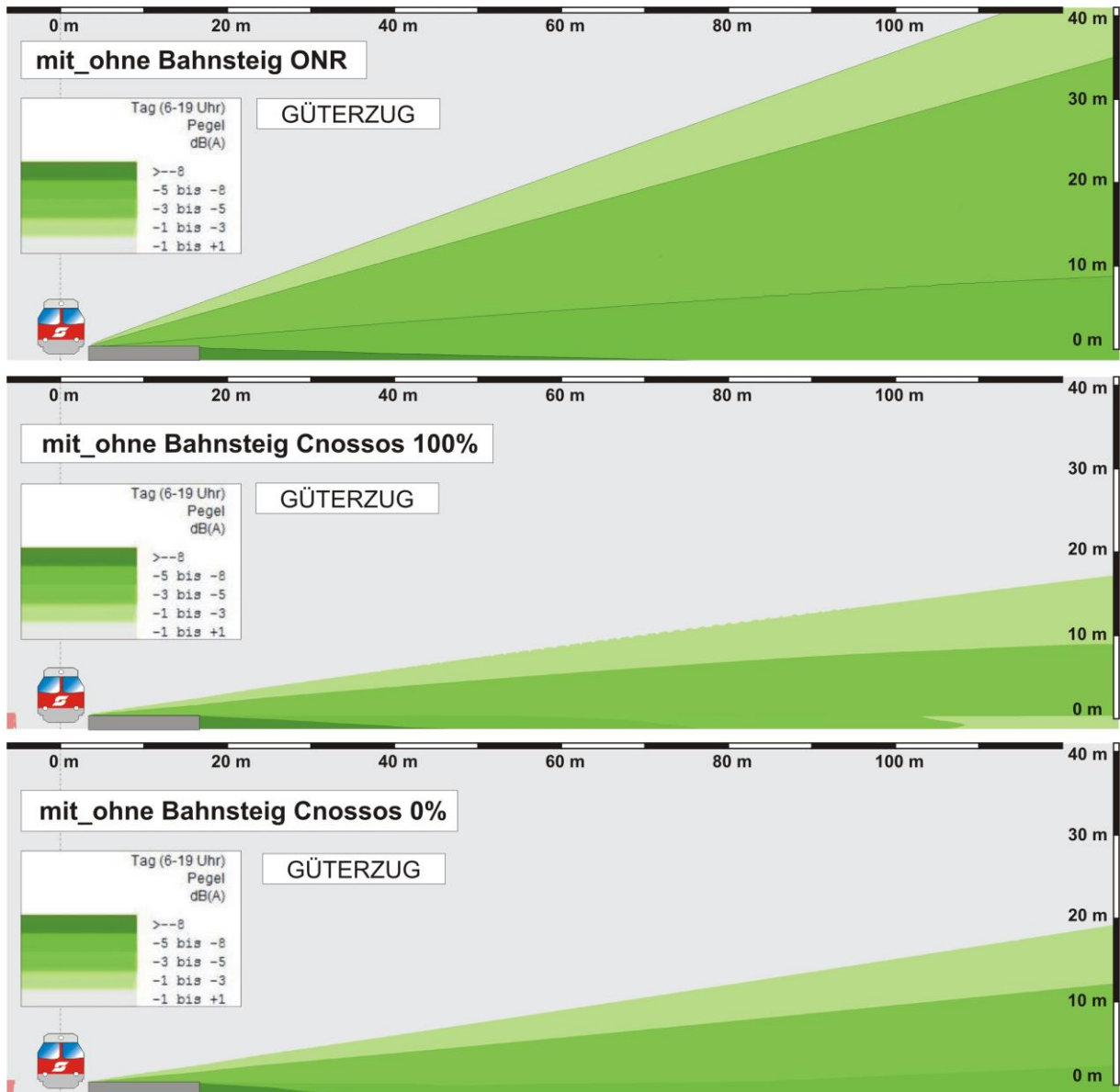


Abbildung 69: Differenzpegeldarstellung (Einfügedämpfung) mit Bahnsteig versus ohne Bahnsteig für ONR 305011, CNOSSOS-EU mit ausbreitungsgünstigen Bedingungen (mitte, 100%) und CNOSSOS-EU mit neutralen Bedingungen (unten, 0%).

6.4. Berechnungen für Bahnsteigdach nach aktuellen Regelwerken

Grundsätzlich stellen weder die ONR 305011 noch CNOSSOS-EU ein Verfahren zur Verfügung um ein schwebendes Hindernis, wie es ein Bahnsteigdach darstellt, im Ausbreitungsmodell zu berücksichtigen. Das Softwareprodukt IMMI 2016 (Wölfel Messsysteme) stellt, so wie auch andere vergleichbare Produkte ein Element eines schwebenden Hindernisses für die Ausbreitungsrechnung nach ISO 9613-2 zur Verfügung. Grundsätzlich werden dabei Abschirmwirkungen und Reflexionen berücksichtigt. Dies ist aber nicht Inhalt der Norm. Abbildung 70 und Abbildung 71 zeigen jeweils die Berechnungsergebnisse und die Differenzdarstellung anhand der ONR 305011/ISO 9613-2 für ein Bahnsteigdach, wobei diese Anwendung von der Norm derzeit nicht vorgesehen ist. Dabei wurden mit „Ref 1“ eine und mit „Ref 2“ zwei Reflexionen berücksichtigt. Die Differenzen beziehen sich auf die Situation ohne Bahnsteigdach, während in Abbildung 72 ist die Situation ohne Bahnsteig und ohne Bahnsteigdach dargestellt.

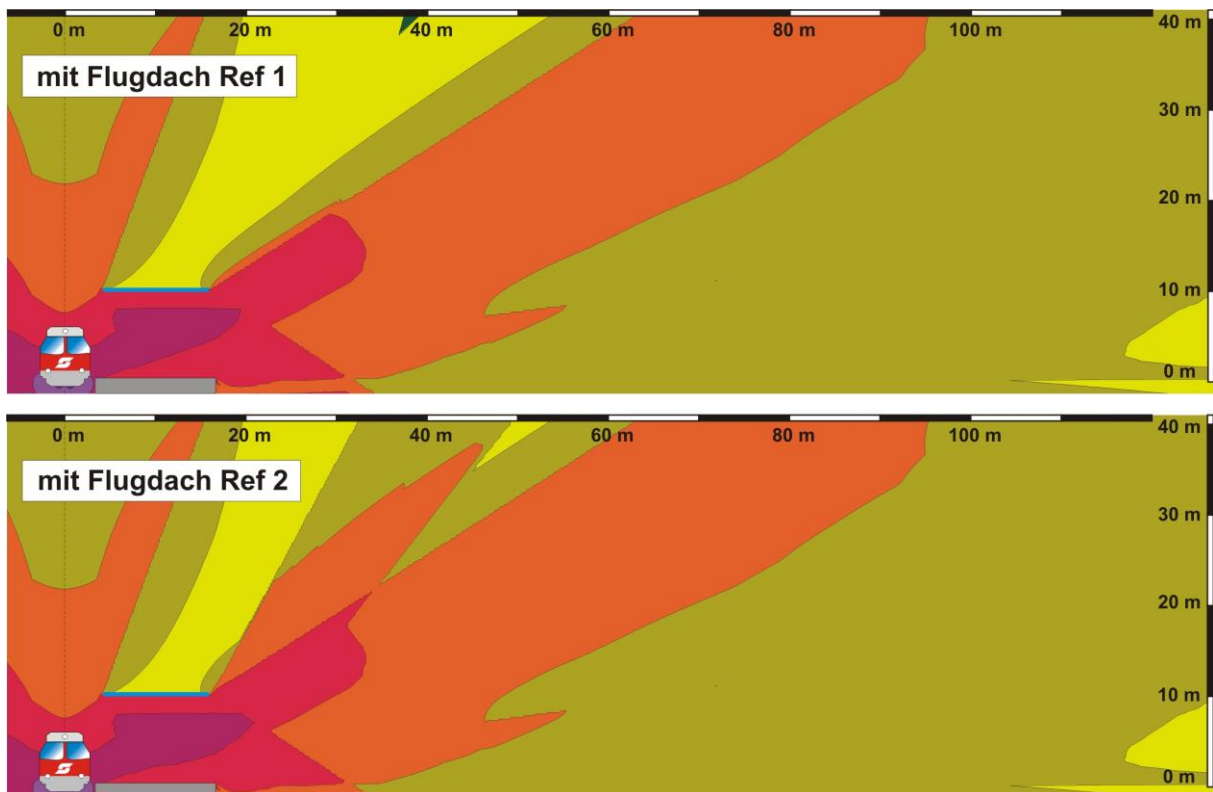


Abbildung 70: Berechnungsergebnisse anhand der ONR 305011/ISO 9613-2 für Bahnsteigdach (außerhalb der Norm). Dabei wurden mit Ref 1 eine und mit Ref 2 zwei Reflexionen berücksichtigt.

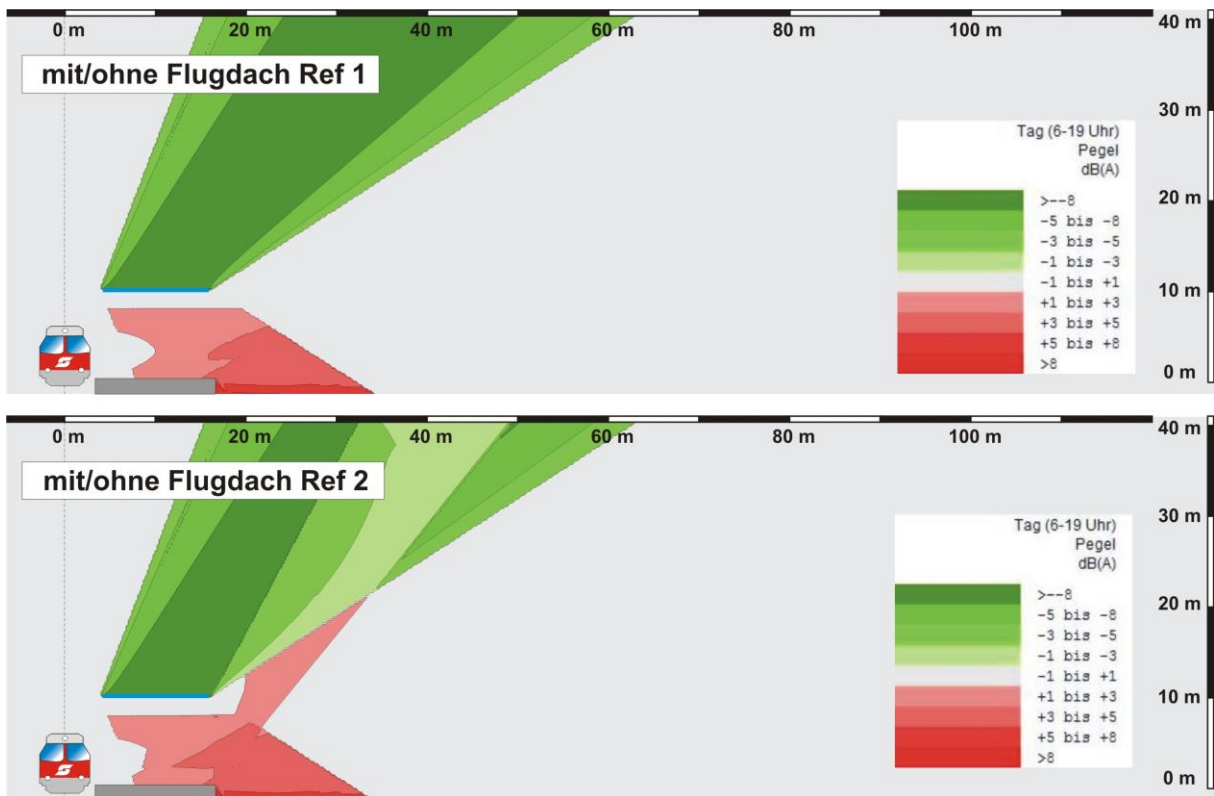


Abbildung 71: Differenzdarstellung anhand der ONR 305011/ISO 9613-2 für Bahnsteigdach (außerhalb der Norm). Dabei wurden mit Ref 1 eine und mit Ref 2 zwei Reflexionen berücksichtigt. Die Differenzen beziehen sich auf die Situation ohne Bahnsteigdach.

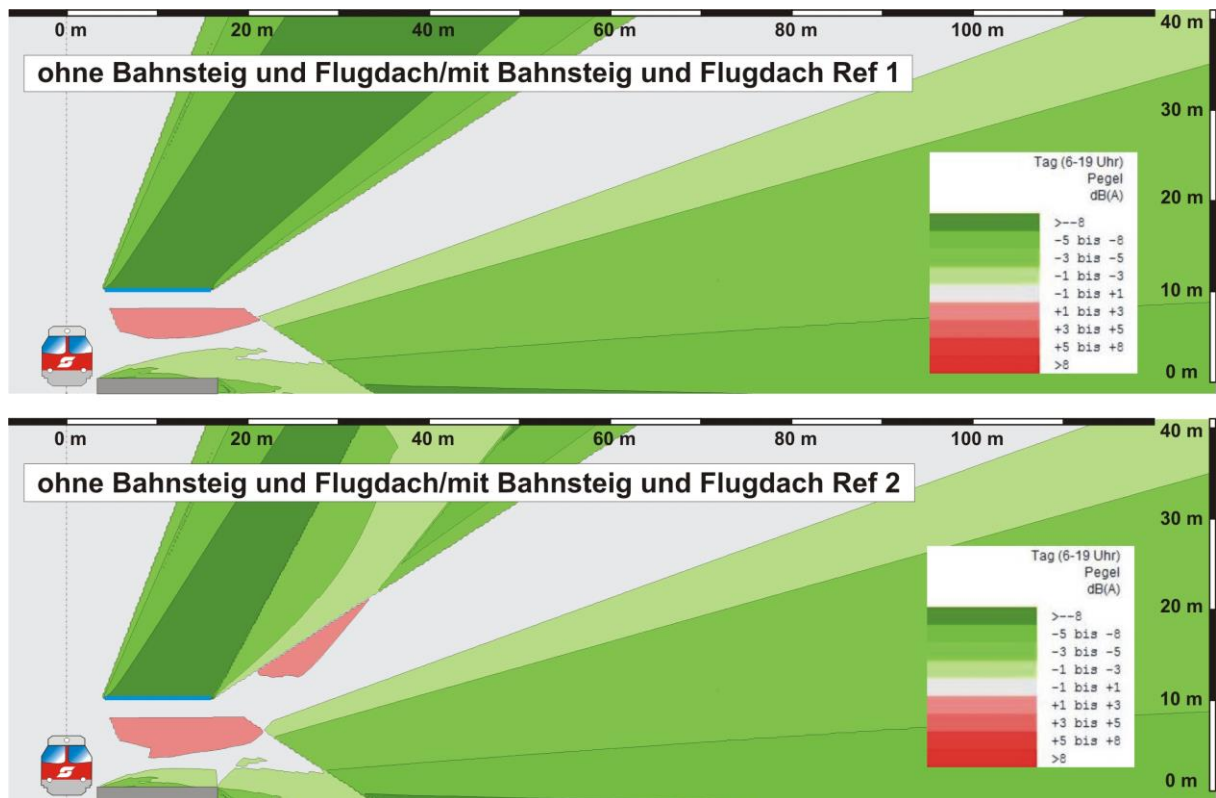


Abbildung 72: Differenzdarstellung anhand der ONR 305011/ISO 9613-2 für Bahnsteigdach (außerhalb der Norm). Dabei wurden mit Ref 1 eine und mit Ref 2 zwei Reflexionen berücksichtigt. Die Differenzen beziehen sich auf die Situation ohne Bahnsteig und ohne Bahnsteigdach.

Für das Ausbreitungsverfahren nach CNOSSOS-EU fehlen noch weit mehr Erfahrungswerte für die Berechnung der Ausbreitungswege. Dies mag ein Grund dafür sein, dass im kommerziellen Produkt IMMI 2016 derzeit nur eine Reflexion für das schwebende Hindernis verwendet werden kann. Der Vergleich nach Abbildung 73 zeigt den Vergleich von CNOSSOS-EU mit der ONR 305011/ISO 9613-2.

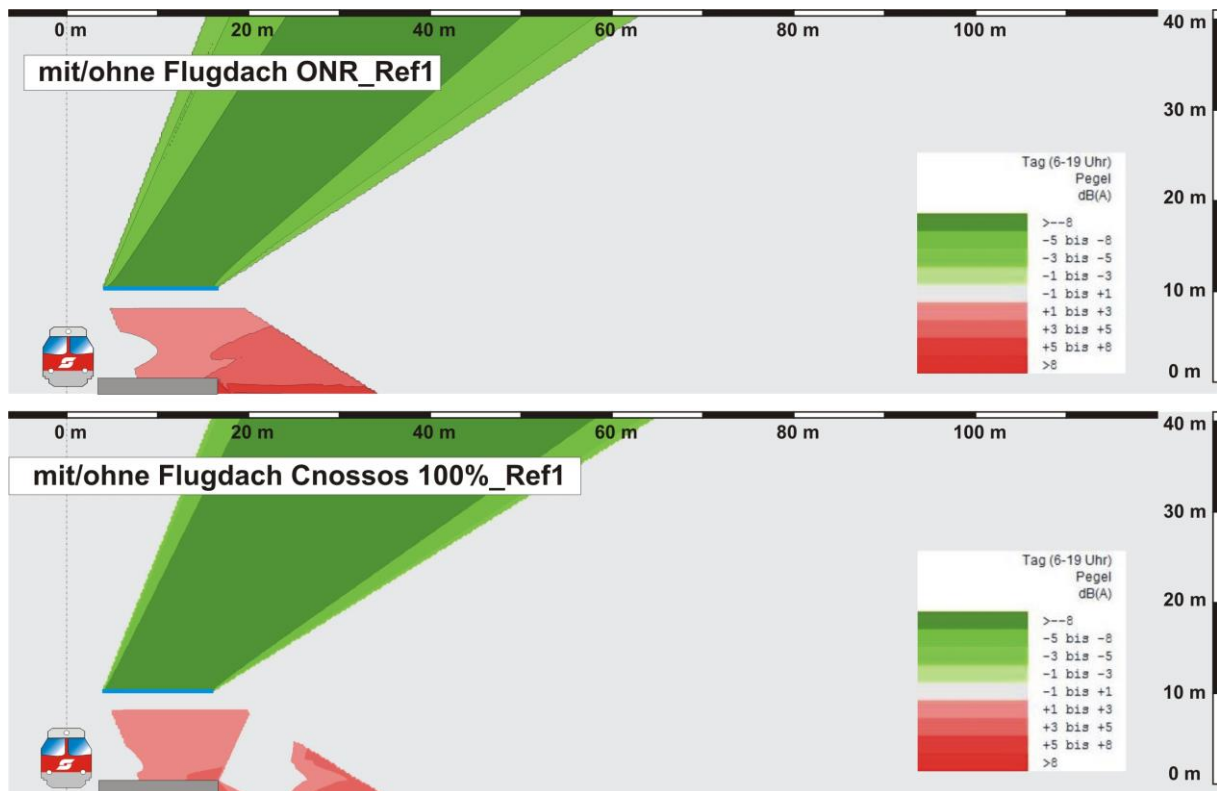


Abbildung 73: Vergleich der Schallpegeldifferenzen durch ein schwebendes Hindernis nach ONR305011 und CNOSSOS-EU (außerhalb der Norm).

Um ein möglichst reproduzierbares Verfahren für verschiedene Programme zu ermöglichen wurde eine Methode streng nach Norm verfolgt. Dazu sollte die Kante des Bahnsteigdaches als Abschirmkante berücksichtigt werden. Die Abschirmungen gelten dann nur für einen ausgewählten Bereich hoch und nahe zum Bahnsteig liegender Punkte. Abbildung 74 zeigt diese Gegenüberstellungen. Diese zeigt interessanterweise einen vernachlässigbaren Unterschied zwischen der ausbreitungsgünstigen Situation CNOSSOS 100% zur neutralen Situation CNOSSOS 0%. Konkret weisen beispielsweise Punkte in der Bahnsteigmitte und 10 m Höhe weniger als 0,1 dB Differenz auf. Dies gilt auch für Punkte in 50 m Höhe und 10 m von der abgewandten Bahnsteigkante entfernt. Die Ursache liegt in der Berücksichtigung der ausbreitungsgünstigen Situation durch Anhebung der Ersatzschallquellen bzw. der effektiven Immissionspunkthöhe durch Formel 2.5.19 des Regelwerks (CNOSSOS-EU). Für die sehr hoch und gleichzeitig nahe gelegenen Immissionspunkte ist diese Korrektur äußerst gering. Die Krümmung des Schallausbreitungsweges in diesem steilen Winkel nach oben, um die abschirmende Kante herum, ist kaum von Bedeutung. Damit sind die gewonnenen Werte für neutrale Ausbreitungsbedingungen von den ausbreitungsgünstigen Zuständen kaum unterscheidbar.



Abbildung 74: Pegeldifferenzen bei Annahme einer Abschirmkante an der Bahnsteigdachkante.

7. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND EMPFEHLUNG FÜR EIN NATIONALES REGELWERK

7.1. Schlussfolgerungen

In diesem Projekt wurden verschiedene Berechnungsmodelle untersucht um die Wirkung der Bahnsteigkante zu berechnen. Berechnungen mittels der Randelementemethode zeigten eine sehr gute Übereinstimmung zu unter kontrollierten Bedingungen durchgeführten Messungen, aber auch für die in-situ Messungen konnte ein geeignetes Modell für die Berechnung der Schirmwirkung der Bahnsteigkante gefunden werden.

Zusammen mit den Messergebnissen der Zugvorbeifahrten wurde ein Ersatzschallquellenmodell für die Berechnung der Schirmwirkung von Bahnsteigen abgeleitet, in welchem die Quellposition auf die Höhe der Bahnsteigkante angehoben wird. Basierend auf diesem Modell wurden dann numerische Berechnungen für einen definierten Regelquerschnitt durchgeführt: diese wiesen eine leichte Pegelverringerng durch Schirmwirkung des Bahnsteiges, aber auch eine schwache Pegelerhöhung durch ein nach außen offenes Bahnsteigdach für Immissionspunkte bis zur Höhe des Bahnsteigdachs vor allem nahe am Bahnsteig auf. Absorption an der Unterseite des Daches konnte eine Verringerung der Pegelerhöhung bewirken, allerdings nur bei ausreichend großer Absorptionsfläche, d.h. wenn bei den untersuchten Standardquerschnitten zumindest die waagrechte Unterseite oder besser noch die gesamte Unterseite (inklusive der schrägen Anteile) hochabsorbierend ausgeführt ist. Hohe und dem Bahnsteig nahe Immissionspunkte erfuhren eine Pegelreduktion durch das abschirmende Dach.

Die für den Regelquerschnitt durchgeführten Berechnungen mittels der Randelementemethode wiesen ähnliche Tendenzen wie die Berechnungen für den Bahnhof Wiener Neustadt auf, d.h. eine schwache Schirmwirkung der Bahnsteigkante im Größenordnungsbereich von bis zu ca. 2 dB(A) für Entfernungen ab 10 Meter vom Bahnsteig. Zusätzlich zeigte sich der zu erwartende Effekt des Bahnsteigdaches, d.h. eine Pegelerhöhung von bis zu ca. 4 dB(A) in mittleren und tiefen Lagen (bis ca. 6 m über Schienenoberkante) und sehr nahe am Bahnsteig (bis zu circa 10 Meter).

Absorption an der Unterseite des Daches bewirkte eine Verringerung des Pegels (bis zu ca. 3 dB(A)), allerdings nur bei ausreichender Fläche (je nach Breite die horizontale Unterkante oder auch die schrägen Abschnitte bei schmälere Bahnsteigen) und dies eher in mittelhohen Lagen (von 15° bis 60°).

Der Vergleich mit der niedrigen Lärmschutzwand bei gleicher Kantengeometrie zeigte, dass der Bahnsteig aufgrund der veränderten Reflexionen nicht als eine solche Lärmschutzwand betrachtet werden kann. Die durch eine nLSW zu erwartende Schirmwirkung fiel deutlich höher aus.

Die Messungen im Fernfeld ergaben Pegeldifferenzen zwischen emissionsnahen und weiter entfernt liegenden Punkten zur Verifikation des Ausbreitungsmodells inklusive der Modellierung der Ersatzschallquelle. Das verifizierte Ausbreitungsmodell ermöglichte die Berechnung der Einfügungsdämpfung für konkrete Bahnsteigsgeometrien.

Die durchgeführten Berechnungen führen zu folgenden Schlüssen:

1. Obwohl die Schirmwirkung eines reflektierenden Bahnsteiges für einzelne Terzbänder und Immissionspunkte bei ± 5 dB liegen kann, ist der Gesamteffekt als gering einzustufen, welcher abhängig vom Immissionspunkt und von der Bahnsteigbreite zwischen 0 und 2 dB(A)³ für Entfernungen ab 10 Meter vom Bahnsteig liegt.
2. Der zusätzliche Effekt einer absorbierenden gegenüber einer reflektierenden Bahnsteigkante auf die Schirmwirkung liegt selbst im Bereich des Bahnsteiges unter 1 dB(A) und ist daher für Immissionspunkte im Fernfeld vernachlässigbar.
3. Das Vorhandensein eines Bahnsteigdachs wirkt sich geringfügig negativ aus (Pegelerhöhung durch zusätzliche Reflexionen) und hebt den positiven Effekt des Bahnsteiges (Pegelabsenkung durch Abschirmung) bei niedrigen Immissionspunkten generell auf.
4. Der abschirmende Effekt des Bahnsteigdaches bei hoch liegenden Immissionspunkten (beispielsweise ab 15 Meter Höhe in 20 Meter Entfernung zum Gleis) ist deutlich vorhanden und kann bis zu 8 dB(A)⁴ betragen. Am Bahnsteig selbst wird der Pegel bei Vollabsorption an der abgewandten Seite um 2 bis 3 dB(A) verringert.

³Diese Werte kommen aus messtechnisch validierten Simulationen (Randelementmethode) und dürfen nicht mit den Messergebnissen auf dem Bahnsteig verwechselt werden.

⁴Die Begrenzung von 8 dB(A) wurde auf der für Anrainer sicheren Seite ausgewählt. Speziell bei Bahnsteigdächern breiter als das Standardbahnsteigdach (10 Meter breit) können Abschirmungen von bis zu 12 dB(A) auftreten. Weiters scheinen beim Standardbahnsteigdach Effekte über 8 dB(A) eher nur unter 15 m Höhe über dem Dach aufzutreten. In diesem Bereich ist die Lage von relevanten Immissionspunkten auszuschließen (siehe Abbildung 55 und Abbildung 56).

7.2. Empfehlung für ein nationales Regelwerk

Empfehlungen für ein nationales Regelwerk zur Berücksichtigung von Bahnsteigkanten und Bahnsteigdächern sollen unter folgenden Kriterien erstellt werden.

Ein Regelwerk soll einen Stand der Technik wiedergeben. Dazu ist ausgehend vom Stand der Wissenschaft ein Verfahren vorzuschlagen, welches praktisch verwendbar ist und welches sich so oder in ähnlicher Form bereits in der Praxis bewährt hat. Nachdem Immissionsberechnungen heute nur mehr Software gestützt durchgeführt werden, muss eine Integration in kommerziell erhältliche Produkte wirtschaftlich möglich sein. Hier besteht insbesondere auch die essentielle Forderung, wonach die Regel eindeutig umsetzbar und verifizierbar ist.

Für die Bahnsteigkanten stehen die bereits bekannten Regelwerke der ONR 305011 und neuerdings nach dem europäischen Verfahren nach CNOSSOS-EU zur Verfügung. Diese sind in der Lage Abschirmwirkungen zu berücksichtigen. Im Spezialfall der Abschirmwirkung von gleisnahen Kanten werden aber nach der ONR 305011 Mehrfachreflexionen vernachlässigt, wie sie bei nicht vollständig absorbierenden Verhältnissen auftreten können.

Nach dem Verfahren nach CNOSSOS-EU gibt es die Regel der „Retrodiffraktion“ (auch „Retrobeugung“ genannt), deren Anwendung derzeit aber noch unklar ist. Dahingehend muss auf die Klarstellungen der Arbeitsgruppe ISO/TC43/SC1/WG 56 und der geplanten Norm ISO/TR 17534-4 gewartet werden. Die Retrodiffraktion soll Mehrfachreflexionen von Verkehr innerhalb von reflektierenden Einschnitten berücksichtigen. Die Richtlinie erwähnt dazu explizit zwei reflektierende Wände. Im Fall eines Zuges entlang einer vertikalen reflektierenden Fläche könnte man jedoch auch die Wagons des Zuges selbst als reflektierende Fläche interpretieren und die Richtlinie dahingehend interpretieren Retrodiffraktion auch bei Schienenverkehr entlang von Wänden anzuwenden. Für die niedrig liegenden Bahnsteigkanten mit einer Ersatzschallquelle nur knapp unterhalb der Kantenhöhe wird der Effekt aber voraussichtlich gering ausfallen, kann aber mit den derzeit implementierten Softwarelösungen nicht errechnet werden.

Der vorliegende Bericht kann mit den Messwerten und Simulationsergebnissen Vergleichswerte liefern, mit denen die Implementierung der Retrodiffraktion in Softwareprodukte getestet werden könnte.

Eine weitere Unklarheit besteht in der Interpretation der Formel 2.5.19 der Richtlinie (CNOSSOS-EU). Diese regelt die Höhenkorrektur für Ersatzschallquelle und effektive Immissionspunkthöhe, um die Schallkrümmung für ausbreitungsgünstige Situationen zu

berücksichtigen. Es besteht kein Konsens in der derzeitigen Handhabung, sodass die in diesem Projekt dargestellten CNOSSOS-EU Werte eine Schwankungsbreite von ~ 0,5 dB aufweisen können. Werte dieser Größenordnung ergaben sich bei bisher nicht veröffentlichten Vergleichen im Rahmen von Expertentreffen zur Umsetzung des Regelwerkes. Die neu gegründete ISO Arbeitsgruppe soll dazu Klarheit schaffen. Die Ergebnisse dieses Projektes für den Standardbahnsteig könnten für Vergleichsrechnungen der verschiedenen Vorschläge zur Handhabung von Formel 2.5.19 herangezogen werden.

Insgesamt werden die Immissionen durch den Ansatz der Bahnsteigkante als Abschirmkante unterschätzt. Für die strategische Lärmkartierung sollte daher die konkrete Modellierung der Bahnsteigkante entfallen. Damit wird keinerlei Abschirmung angenommen, und die berechneten Werte führen zu einer leichten Überschätzung. Möchte man in einem konkreten Verfahren die Abschirmwirkung der Kante gezielt als lärmindernde Maßnahme ansetzen, so ist dies nur mit einer Modifikation möglich. Hierzu wird ein Verfahren vorgeschlagen, welches bereits in einer älteren Version der ONR 305011 empfohlen wurde. Danach ist die Ersatzschallquelle auf die Höhe der abschirmenden Kante (in der Regel eine reflektierende Lärmschutzwand) anzuheben. Das Verfahren hat sich in der Praxis bewährt und kann vom Nutzer verwendet werden ohne in die Berechnungsalgorithmen der Softwareprodukte einzugreifen. Dazu ist die SOK um jenen Teil anzuheben, sodass die Ersatzschallquelle (ONR 305011: SOK +30 cm, CNOSSOS-EU: SOK +50 cm) auf Höhe der Bahnsteigkante zu liegen kommt (im Fall der vorliegenden Untersuchung SOK +53 cm). In diesem Projekt wurde gezeigt, dass diese Näherung zu einer deutlich besseren Übereinstimmung mit simulierten und gemessenen Ergebnissen führt.

Das Vorliegen eines Bahnsteigdaches führt zu einer Immissionserhöhung (bis zu etwas mehr als 1 dB(A) im durch den Bahnsteig abgeschirmten Bereich) im Vergleich zur Situation mit einer teilabschirmenden Bahnsteigkante alleine. Daher darf in diesem Fall die Abschirmung der Bahnsteigkante nicht berücksichtigt werden. Damit heben sich die Unterschätzung durch das Vernachlässigen des Daches sowie die Überschätzung durch Vernachlässigung der Bahnsteigkante näherungsweise auf. Dies ist mit den herkömmlichen Methoden die derzeit plausibelste und nachvollziehbarste Lösung.

Einzelne Programmhersteller bieten die konkrete Simulierung des Bahnsteigdaches als schwebendes Hindernis mit den dadurch resultierenden Reflexionen. Diese Reflexionen sind allerdings weder durch die derzeitige Norm ISO 9613-2 (für die ONR 305011) und auch nicht im Verfahren nach CNOSSOS-EU geregelt. Hierzu ist auf die Arbeiten der ISO/TC43/SC1/WG

56 und der geplanten Norm ISO/TR 17534-4 zu verweisen, die hier möglicherweise eine geregelte Lösung vorschlagen könnte.

Bis zu diesem Zeitpunkt darf lediglich die Abschirmung durch das Dach berücksichtigt werden, wie sie beschränkt auf hoch liegende Immissionspunkt in einem Winkel von 65° bis 90° auftritt und mit maximal 8 dB(A) Einfügungsdämpfung zu begrenzen ist (es treten teilweise auch Abschirmungen bis zu 12 dB(A) auf), dies hängt aber von der Breite des Daches ab. Weiters scheinen bei dem schmalen Bahnsteig Effekte über 8 dB(A) eher nur unter 15 m Höhe über dem Dach aufzutreten (siehe Abbildung 55 und Abbildung 56). In diesem Bereich ist die Lage von relevanten Immissionspunkten auszuschließen. Diese Werte stammen aus den Simulationsergebnissen dieses Projektes (vgl. Kapitel 5) und können ohne wesentlichen Eingriff in bestehenden Schallausbreitungsprogrammen durch Ansatz einer Abschirmkante an Stelle der Bahnsteigdachkante berechnet werden. Der Vorschlag für die Berücksichtigung von gleisnahen Abschirmkanten (Bahnsteigkanten und -Dächern) für ein nationales Regelwerk ist in Tabelle 8 zusammengefasst.

Einzelne kommerziell erhältliche Softwareprodukte sind in der Lage schwebende Hindernisse zu berücksichtigen. Diese Berechnungen basieren auf keiner Norm und sind nicht reproduzierbar dokumentiert. Die als Beispiel illustrierten Resultate mit solchen Methoden zeigen Abschirmungen über 8 dB(A), welche nicht mit den Ergebnissen dieses Berichts übereinstimmen.

Die vorgeschlagene Lösung, eine einzelne Abschirmkante an Stelle der Dachkante zu verwenden eignet sich nicht für großflächige Berechnungen, da dieses Ersatzmodell lediglich für die hoch liegenden (entsprechend Winkel) Immissionspunkte gilt. Damit sind getrennte Rechengänge für die einzelnen Immissionspunkte notwendig. Immissionspunkte, für die diese Kriterien zutreffen sind jedoch selten. Dazu müssen sehr hohe Gebäude nahe am Bahnsteig positioniert sein. Für diese Fälle kann mit einem verhältnismäßigen Aufwand eine individuelle Berechnung mit dem Ersatzmodell und unter Berücksichtigung der Maximalabschirmung durchgeführt werden, während alle übrigen Immissionswerte weiterhin ohne Modifikation von den gängigen Softwareprodukten ermittelt werden können.

Tabelle 8: Vorschlag für die Berücksichtigung von gleisnahen Abschirmkanten (Bahnsteigkanten und -Dächern) für ein nationales Regelwerk.

	Bahnsteigkante (absorbierend oder reflektierend) ohne Bahnsteigdach	Bahnsteigkante mit Bahnsteigdach (absorbierend oder reflektierend)
Standard für Lärmkartierung	Ohne Bahnsteigkante rechnen	Ohne Bahnsteigkante und ohne Dachkante rechnen
Genaueres Verfahren für Immissionspunkte in „normalen“ Höhen (in einem Winkel von 0° bis 64°)	Ersatzschallquelle auf Bahnsteigkantenhöhe verschieben	Ohne Bahnsteigkante und ohne Dachkante rechnen
Genaueres Verfahren für hoch liegende Immissionspunkte in einem Winkel von 65° bis 90°	Ersatzschallquelle auf Bahnsteigkantenhöhe verschieben	Dachkante wie bei einer Standardlärmschutzwand mit maximal 8 dB(A) Einfügungsdämpfung rechnen

8. LITERATURVERZEICHNIS

- Baulac, M., Poisson, F., Defrance, J., Jean, P., & Margiocchi, F. (2009). Noise impact of innovative barriers dedicated to freight trains in urban areas. In *Proceedings of the 16th International Congress on Sound and Vibration (ICSV16)*.
- Broadbent, R. A., Thompson, D. J., & Jones, C. J. C. (2009). The acoustic properties of railway ballast. In *Euronoise* (S. 3307–3316).
- Busch, T. A., & Nugent, R. E. (2003). A reduced-scale railway noise barrier's insertion loss and absorption coefficients: comparison of field measurements and predictions. *Journal of Sound and Vibration*, 267(3), 749–759.
- Chen, Z. S., Hofstetter, G., & Mang, H. A. (1997). A Symmetric Galerkin Formulation of the Boundary Element Method for Acoustic Radiation and Scattering. *Journal of Computational Acoustics*, 05(02), 219–241.
- Commission directive (EU) 2015/996. (2015). Establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council. Official Journal of the European Communities.
- Defrance, J., Salomons, E., Noordhoek, I., Heimann, D., Plovsing, B., Watts, G., De, F. R. (2007). Outdoor sound propagation reference model developed in the European Harmonoise project. *Acta Acustica united with Acustica*, 93(2007), 213–227.
- Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council. (2002, Juni 25). Relating to the assessment and management of environmental noise.
- Dittrich, M. G., & Zhang, X. (2006). The Harmonoise/IMAGINE model for traction noise of powered railway vehicles. *Journal of Sound and Vibration*, 293(3–5), 986–994.
- Duhamel, D. (1996). Efficient calculation of the three-dimensional sound pressure field around a noise barrier. *Journal of Sound and Vibration*, 197(5), 547–571.
- Frid, A. (2003). Skirts and barriers for reduction of wayside noise from railway vehicles—an experimental investigation with application to the BR185 locomotive. *Journal of Sound and Vibration*, 267(3), 709–719.
- Heutschi, K. (2008). Sound propagation in railway line cuttings. *Applied Acoustics*, 69(12), 1189–1194.
- Jean, P., Defrance, J., & Gabillet, Y. (1999). The importance of source type on the assessment of noise barriers. *Journal of Sound and Vibration*, 226(2), 201–216.
- Jean, P., & Gabillet, Y. (2000). Using a boundary element approach to study small screens close to rails. *Journal of Sound and Vibration*, 231(3), 673–679.

- Kasess, C. H., Kreuzer, W., & Waubke, H. (2016). An efficient quadrature for 2.5D boundary element calculations. *Journal of Sound and Vibration*, 382, 213–226.
- Kephalopoulos, S., & Paviotti, M. (2016). Common noise assessment methods for europe (CNOSSOS-EU): Implementation challenges in the context of EU noise policy developments and future perspectives. In *Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration*. Athens, Greece.
- Kephalopoulos, S., Paviotti, M., & Ledee, F. A. (2012). Common noise assessment methods in Europe (CNOSSOS-EU).
- Kirisits, C. (2014). Analyse Lärmberechnung CNOSSOS-AUSTRIA: Analyse und Einbindung der österreichischen Regelwerke, Erfahrungen und Interessen in Lärmberechnungsverfahren CNOSSOS-EU und die Anpassung des Anhangs II der Direktive 2002/49/EC.
- Kirisits, C., Meidl, H., Dinohobl, G., Gutschelhofer, H., Punk, J., & Kirisits, H. (2013). Comparison of measurements and calculation to investigate the effects of multiple-reflections between absorptive noise barriers and trains. In *Proceedings of Internoise 2013* (S. 5955–5963). Innsbruck, Austria.
- Kirisits, H. (1986). Berechnung und Optimierung schallabschirmender Objekte. *Straßenforschung (Herausgeber: Bundesministerium für Bauten und Technik)*, Heft 290.
- Koussa, F., Defrance, J., Jean, P., & Blanc-Benon, P. (2013). Acoustic performance of gabions noise barriers: Numerical and experimental approaches. *Applied Acoustics*, 74(1), 189–197.
- Morgan, P. A., Hothersall, D. C., & Chandler-Wilde, S. N. (1998). Influence of shape and absorbing surface - A numerical study of railway noise barriers. *Journal of Sound and Vibration*, 217(3), 405–417.
- Nilsson, M. E., Andéhn, M., & Leśna, P. (2008). Evaluating roadside noise barriers using an annoyance-reduction criteria. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 124(6), 3561–3567.
- Okubo, T., & Yamamoto, K. (2013). Equivalence in diffraction-reducing efficiency between T-profile and thick barrier against road traffic noise. *Acoustical Science and Technology*, 34(4), 277–283.
- ONR 305011. (2009). Berechnung der Schallimmission durch Schienenverkehr - Zugverkehr, Verschub- und Umschlagbetrieb.

- Ostermann, N., Maly, T., Waubke, H., Kasess, C. H., Jaksch, M., & Biebl, F. (2014). *Psychoakustische Analyse von schienenverkehrsinduzierten Schallimmissionen PASS* (VIF 2012 Ergebnisbericht).
- Talotte, C., van der Stap, P., Ringheim, M., Dittrich, M., Zhang, X., & Stiebel, D. (2006). Railway source models for integration in the new European noise prediction method proposed in Harmonoise. *Journal of Sound and Vibration*, 293(3–5), 975–985.
- Thompson, D. J., Hemsworth, B., & Vincent, N. (1996). Experimental validation of the TWINS prediction program for rolling noise, Part 1: Description of the model and method. *Journal of Sound and Vibration*, 193(1), 123–135.
- Thorsson, P. J. (2000). Optimisation of Low-Height Noise Barriers using the Equivalent Sources Method. *Acta Acustica united with Acustica*, 86(5), 811–820.
- van Leeuwen, J. J. A. (1996). Noise prediction models to determine the effect of barriers placed alongside railway lines. *Journal of Sound and Vibration*, 193(1), 269–276.
- Waubke, H., & Kasess, C. H. (2016). Simulation of the Noise Radiation and Shielding with the Boundary Element Method. In *Proceedings of the 23rd International Congress on Sound and Vibration*. Athens, Greece.

ANHANG A: ERGEBNISSE DER VORBEIFAHRTSMESSUNGEN

Tabelle 9: Ergebnisse der Perzentilpegel-Auswertungen der einzelnen betrachteten Vorbeifahrtmessungen

Zug-Nr	Zug-Typ	Bahnsteig- kante	Bahnsteig					Referenz				
			p = 0,05	0,25	0,50	0,75	0,95	0,05	0,25	0,50	0,75	0,95
1	Cityshuttle	refl.	68,34	69,98	71,06	71,81	72,61	68,60	71,72	74,64	76,83	83,22
2	Güterzug	refl.	74,68	79,46	81,51	83,28	85,58	77,82	81,76	84,49	87,14	89,52
3	4020	refl.	63,64	67,07	69,09	75,07	78,66	63,75	68,29	73,05	76,61	82,37
4	Cityshuttle	refl.	65,79	67,95	70,36	72,30	74,03	68,41	70,64	74,26	79,32	82,14
5	Cityshuttle	refl.	69,32	71,67	72,99	75,40	76,98	72,48	75,29	80,41	83,71	86,61
6	Cityshuttle	refl.	64,72	66,67	67,78	69,15	72,60	67,16	70,65	73,14	76,26	79,37
7	Güterzug	absorb.	80,80	82,36	83,78	84,82	86,82	82,65	84,92	86,08	87,37	88,80
8	Güterzug	absorb.	74,16	75,58	76,87	78,08	79,44	76,35	78,46	81,31	85,07	86,79
9	Railjet	absorb.	69,78	70,73	71,84	72,78	74,34	72,59	74,11	76,78	80,69	83,39
10	Eurocity	absorb.	70,24	71,29	72,32	73,91	75,80	69,08	72,36	75,41	81,00	84,47
11	Güterzug	absorb.	73,79	75,20	76,47	77,91	79,86	76,52	79,32	82,50	85,33	87,31
12	Güterzug	absorb.	73,59	79,28	80,80	82,36	86,32	76,90	82,39	84,25	86,55	89,94
13	Railjet	absorb.	71,11	72,51	74,52	76,24	77,35	72,29	74,38	78,51	80,82	82,97
14	Railjet	absorb.	69,88	70,89	73,43	75,17	76,22	71,01	73,84	77,26	80,18	82,86
15	Railjet	absorb.	69,60	71,04	72,71	74,17	75,55	69,67	71,41	74,88	78,38	80,88
16	Railjet	absorb.	67,59	68,77	70,25	71,71	73,00	68,46	70,23	73,28	77,72	79,70
17	Railjet	absorb.	68,50	70,79	72,54	73,68	75,26	70,05	72,34	75,15	78,58	81,27
18	Railjet	absorb.	67,58	68,97	70,67	72,30	76,02	68,38	70,73	73,68	76,13	79,92

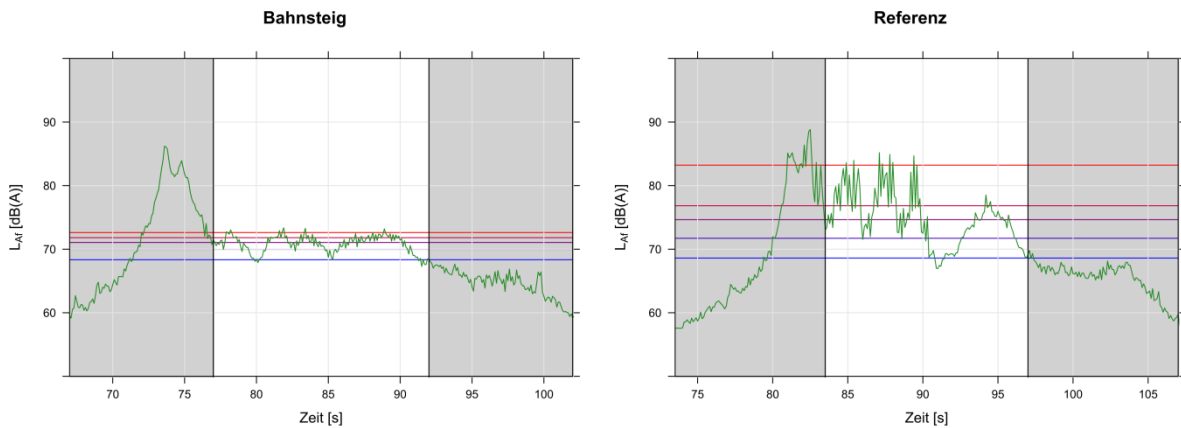


Abbildung 76: Vorbeifahrt Zug-Nr. 1 (Cityshuttle)

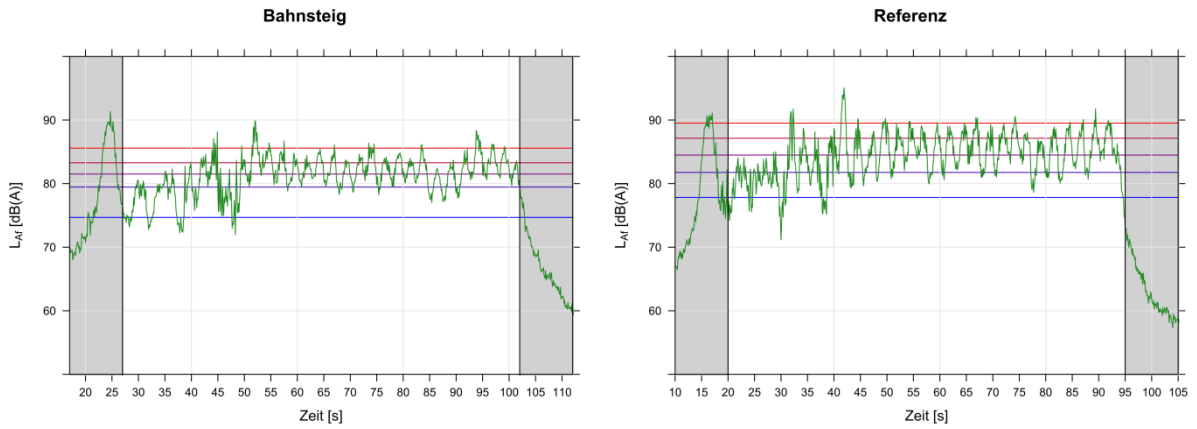


Abbildung 77: Vorbeifahrt Zug-Nr. 2 (Güterzug)

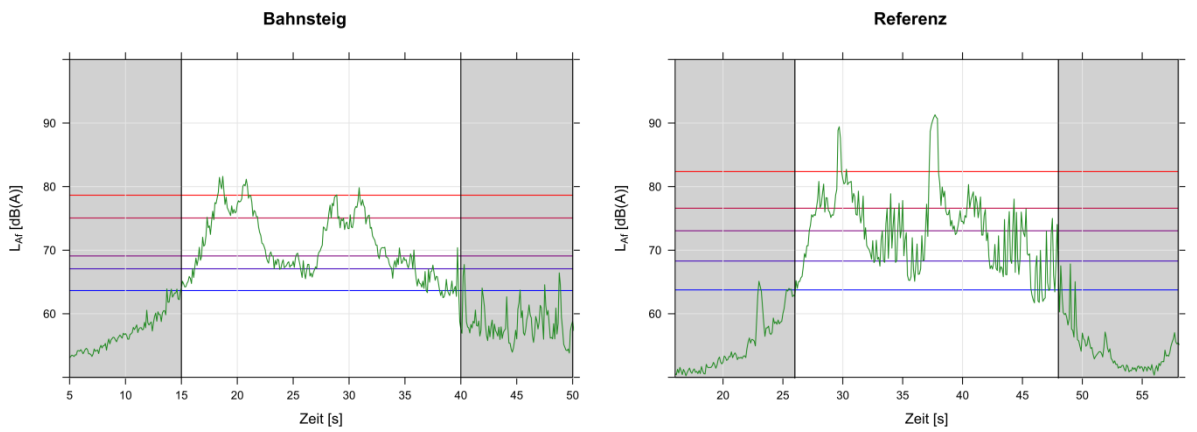


Abbildung 78: Vorbeifahrt Zug-Nr. 3 (4020)

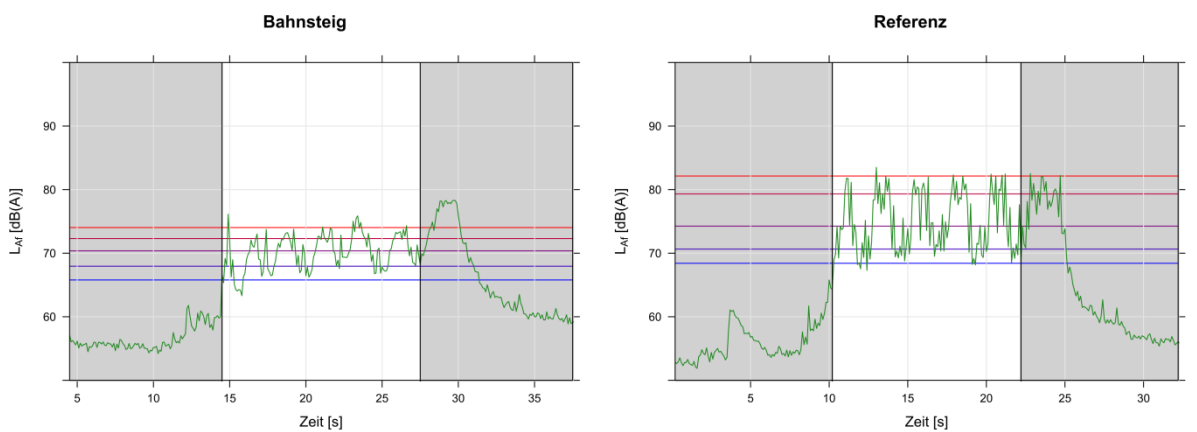


Abbildung 79: Vorbeifahrt Zug-Nr. 4 (Cityshuttle)

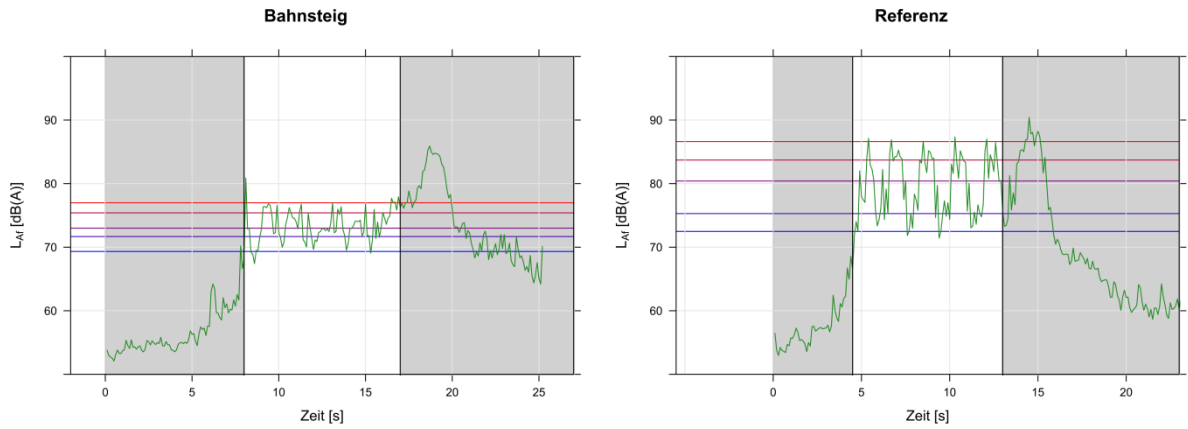


Abbildung 80: Vorbeifahrt Zug-Nr. 5 (Cityshuttle)

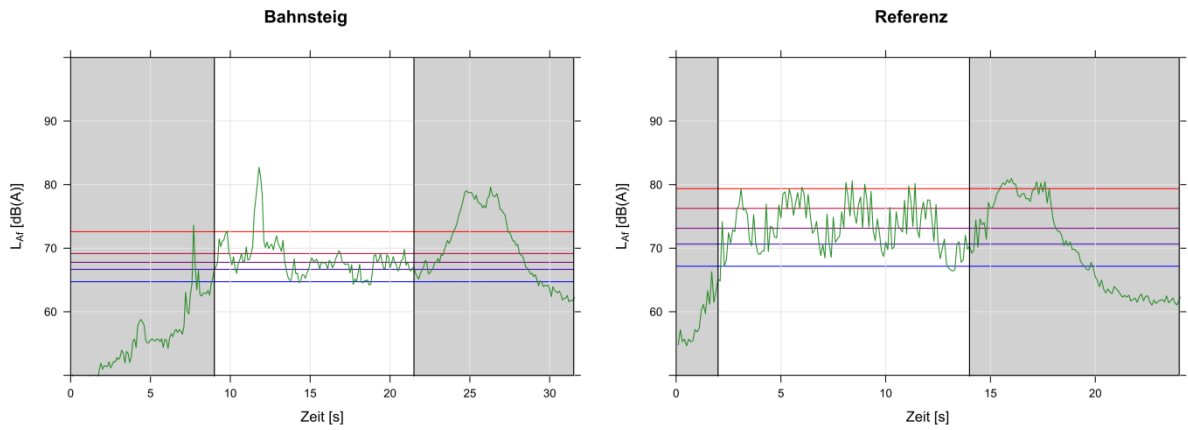


Abbildung 81: Vorbeifahrt Zug-Nr. 6 (Cityshuttle)

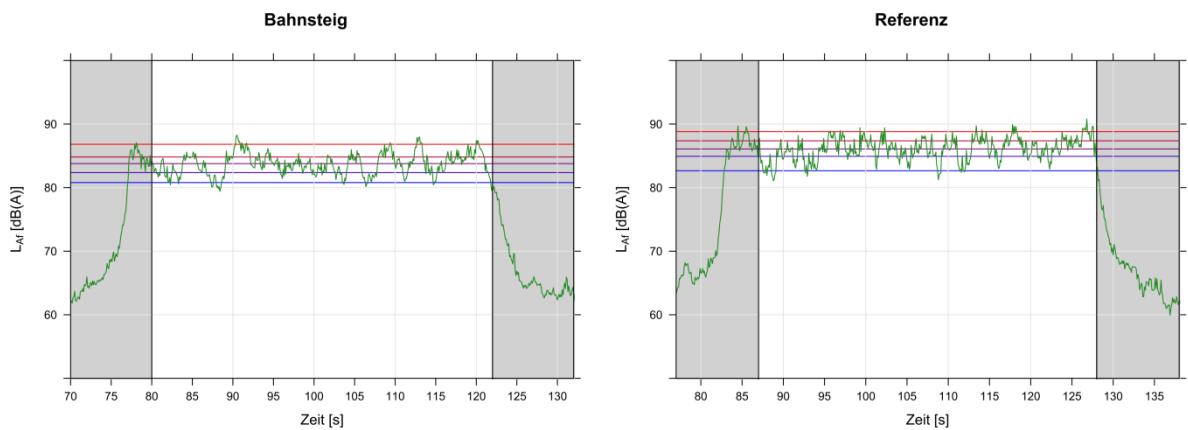


Abbildung 82: Vorbeifahrt Zug-Nr. 7 (Güterzug)

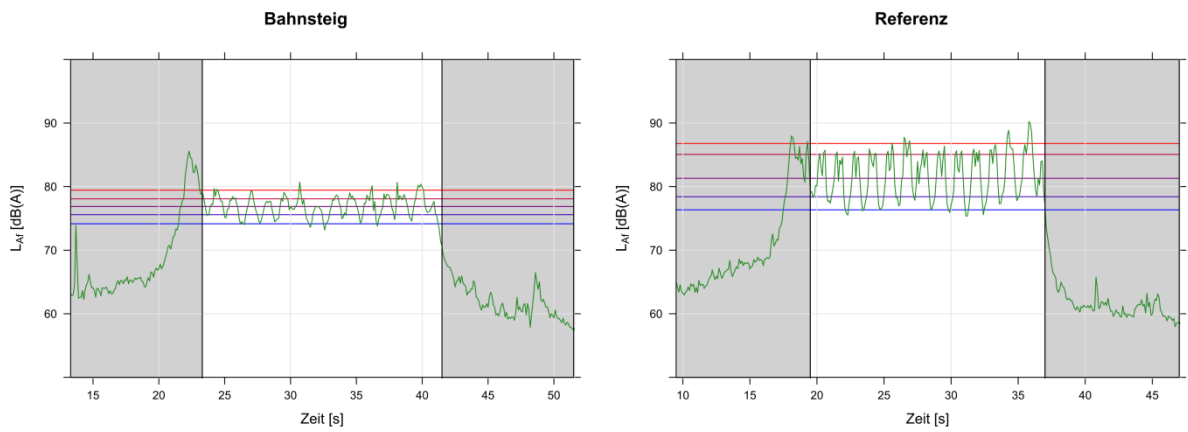


Abbildung 83: Vorbeifahrt Zug-Nr. 8 (Güterzug)

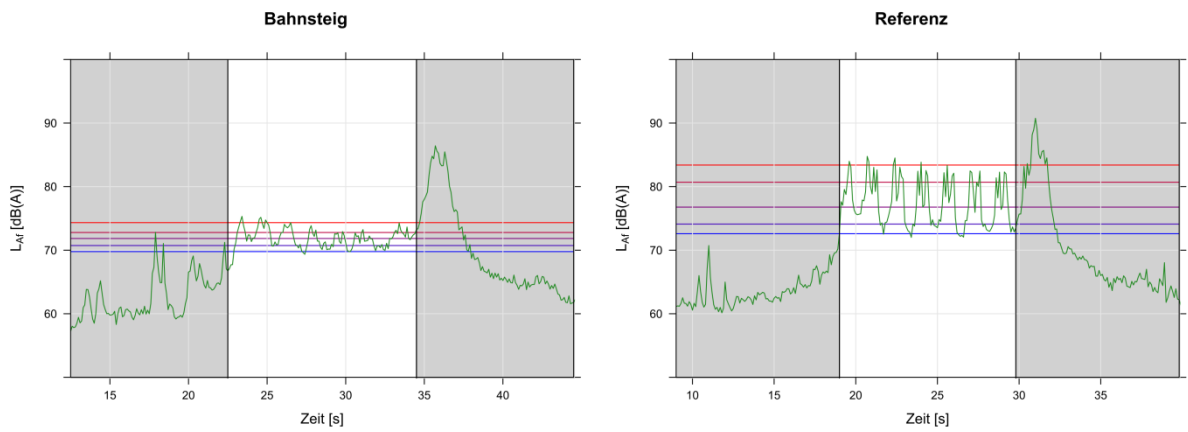


Abbildung 84: Vorbeifahrt Zug-Nr. 9 (Railjet)

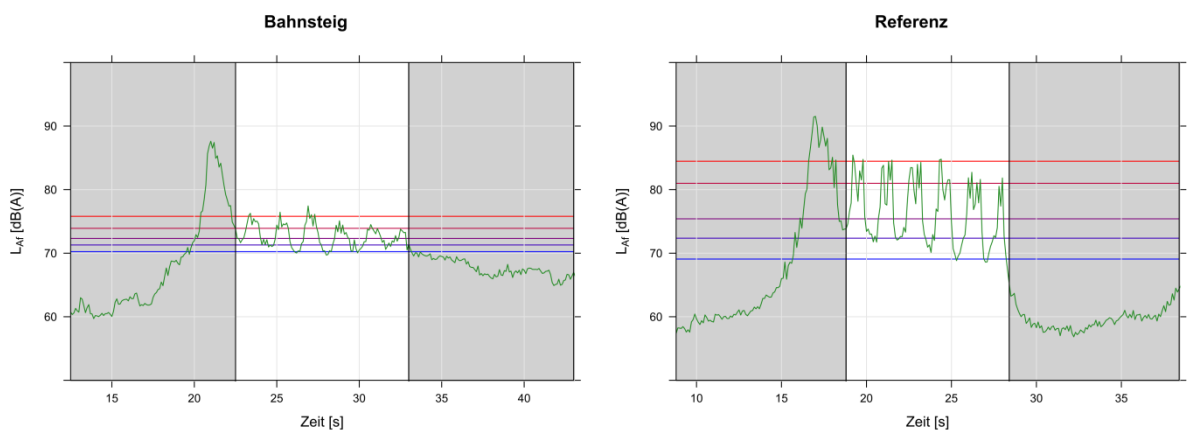


Abbildung 85: Vorbeifahrt Zug-Nr. 10 (EuroCity)

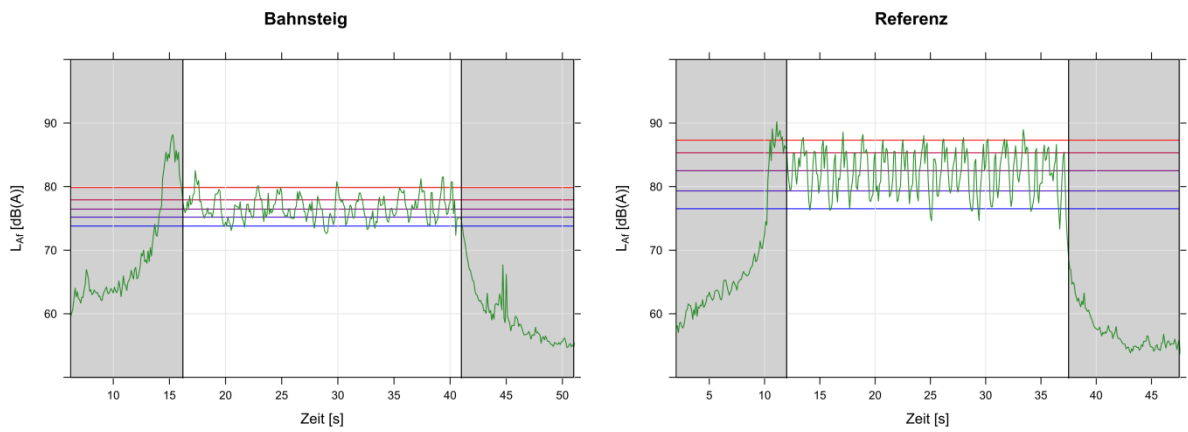


Abbildung 86: Vorbeifahrt Zug-Nr. 11 (Güterzug)

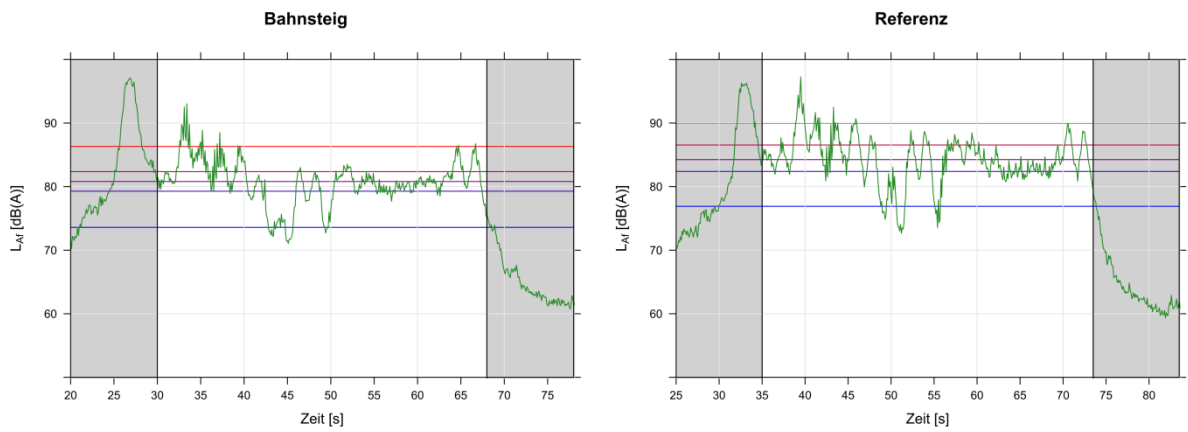


Abbildung 87: Vorbeifahrt Zug-Nr. 12 (Güterzug)

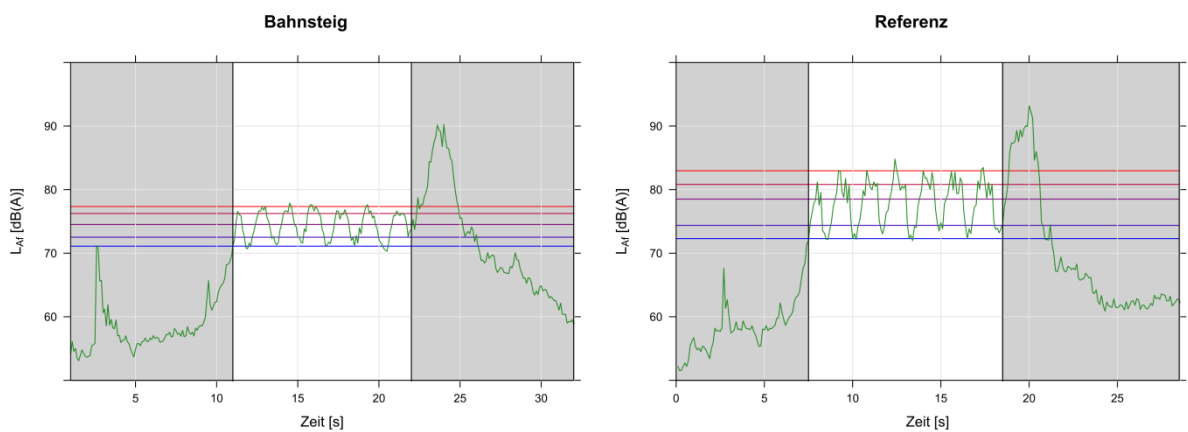


Abbildung 88: Vorbeifahrt Zug-Nr. 13 (Railjet)

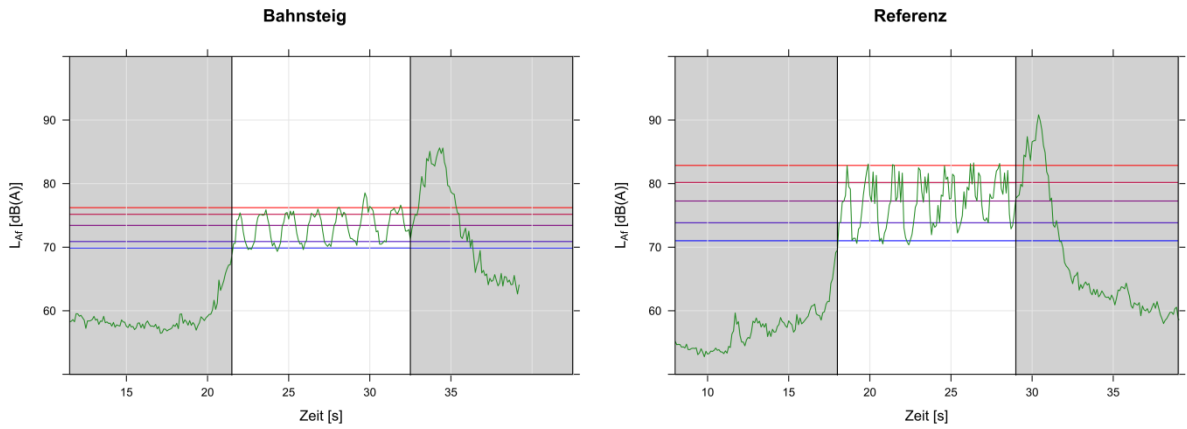


Abbildung 89: Vorbeifahrt Zug-Nr. 14 (Railjet)

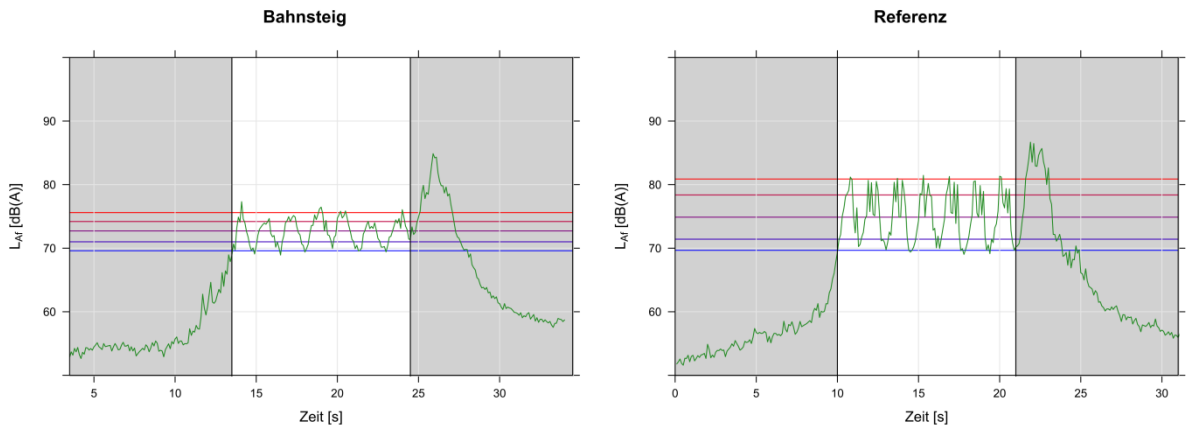


Abbildung 90: Vorbeifahrt Zug-Nr. 15 (Railjet)

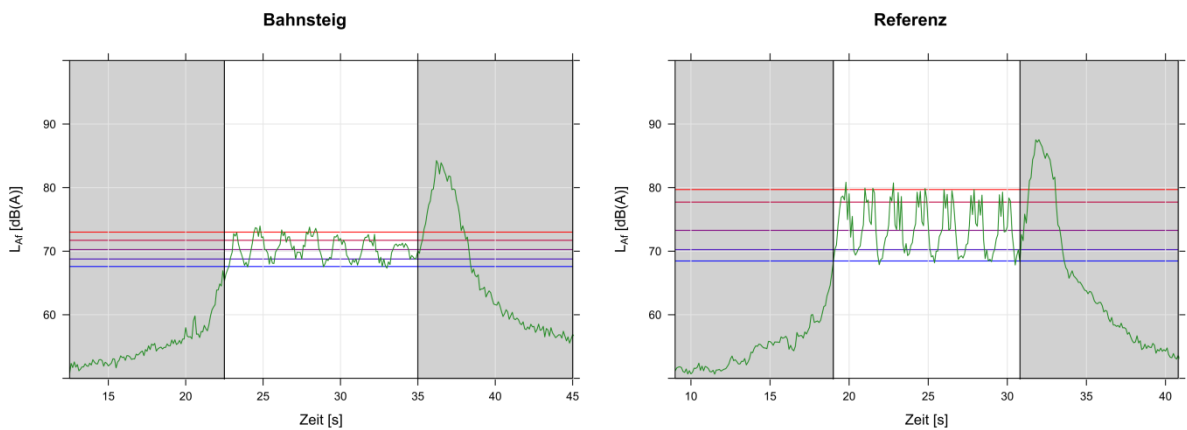


Abbildung 91: Vorbeifahrt Zug-Nr. 16 (Railjet)

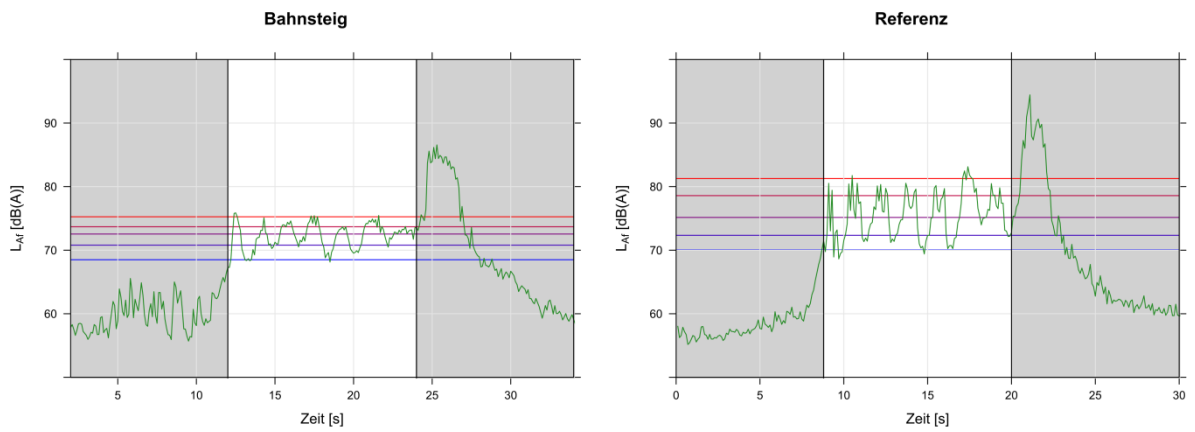


Abbildung 92: Vorbeifahrt Zug-Nr. 17 (Railjet)

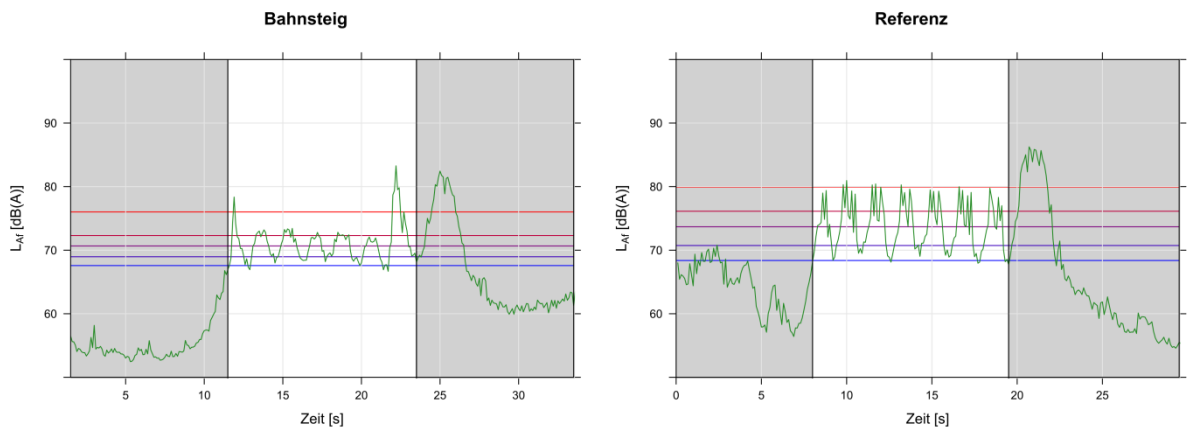


Abbildung 93: Vorbeifahrt Zug-Nr. 18 (Railjet)

ANHANG B: ORTSABHÄNGIGER A-BEWERTETER GESAMTPEGEL

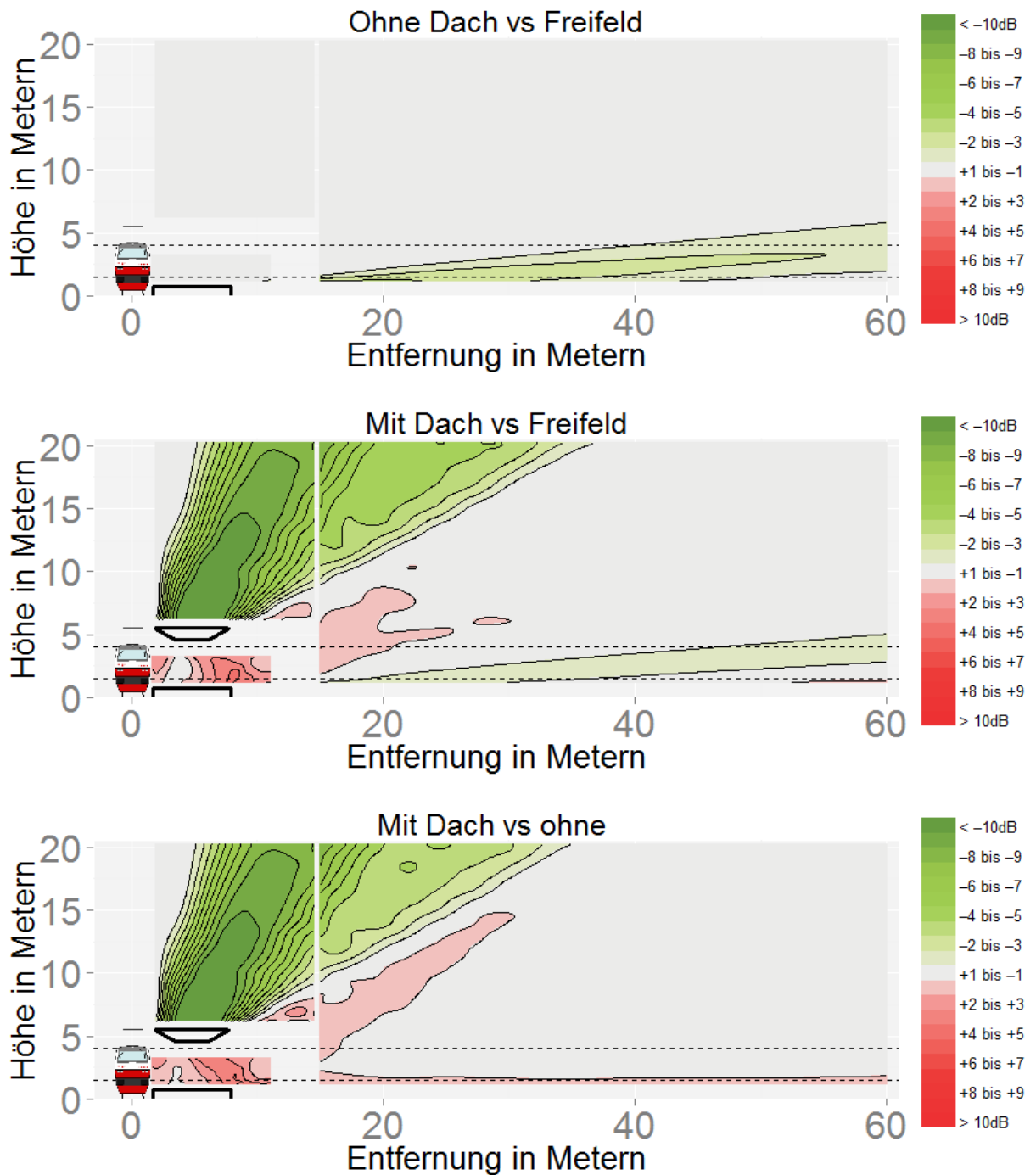


Abbildung 94: Regelquerschnitt: Effekt des Bahnsteigs mit und ohne Dach.

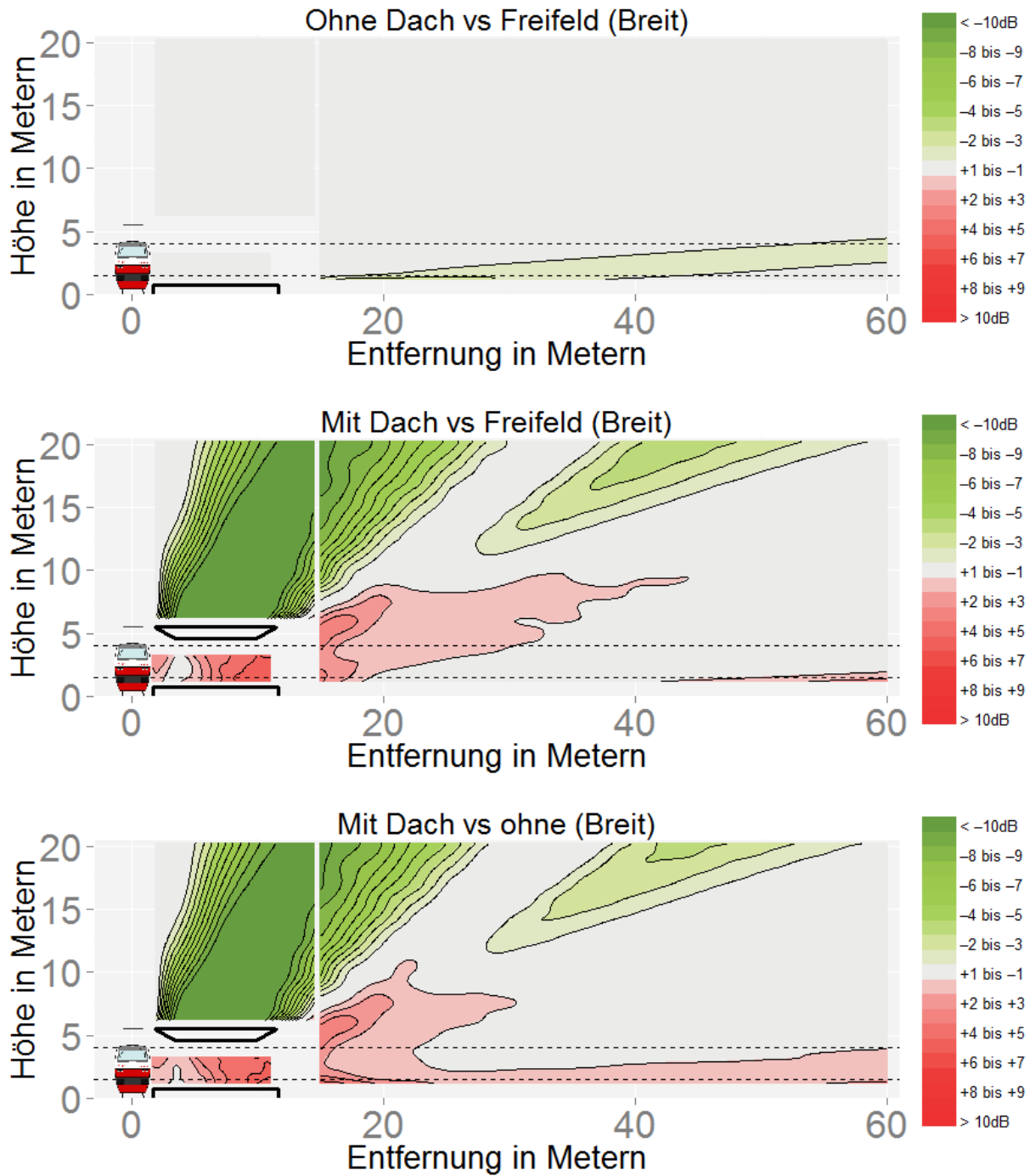


Abbildung 95: Regelquerschnitt: Effekt des breiten Bahnsteigs mit und ohne Dach.

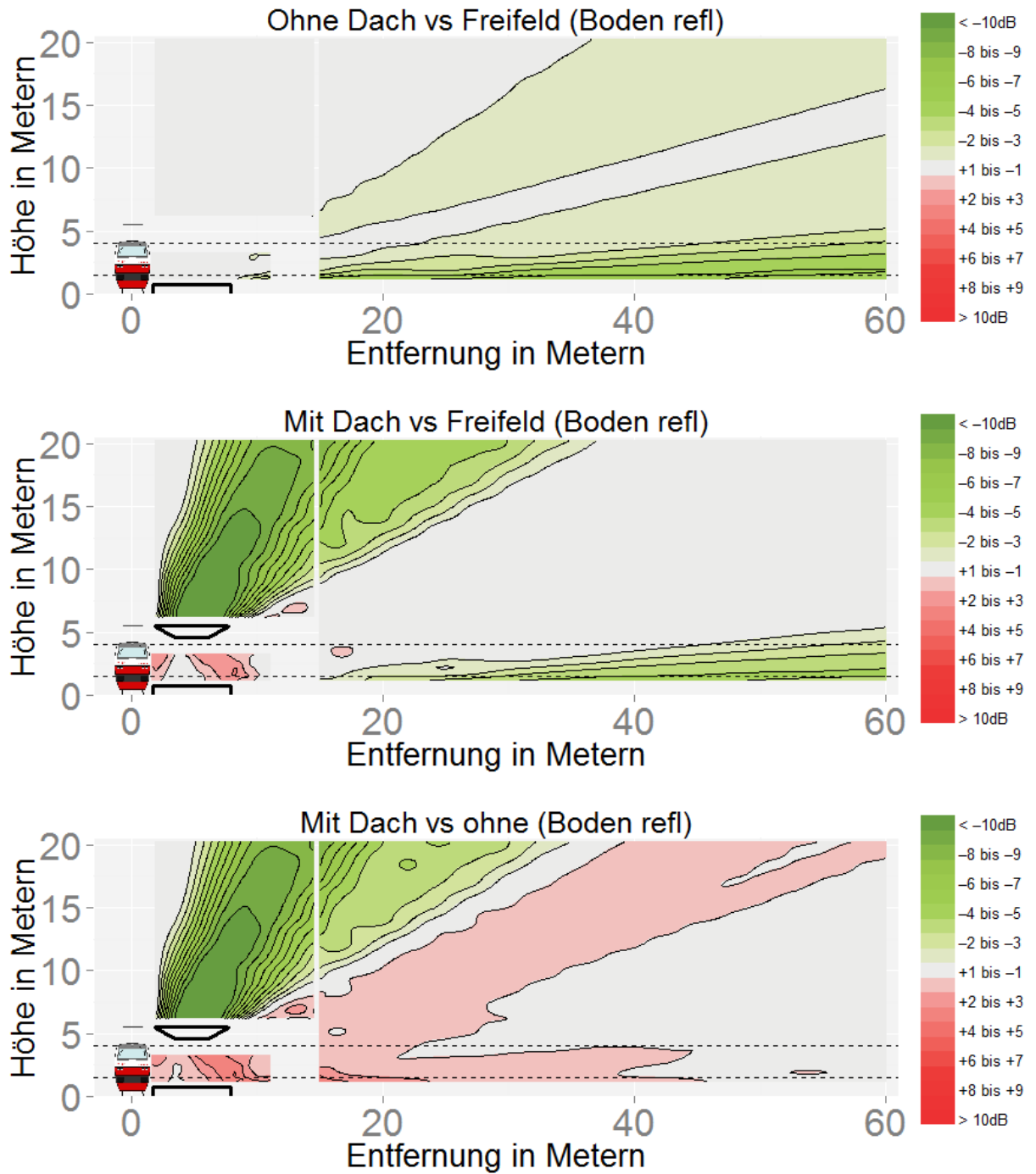


Abbildung 96: Regelquerschnitt: Effekt des Bahnsteigs mit und ohne Dach mit reflektierendem Boden.

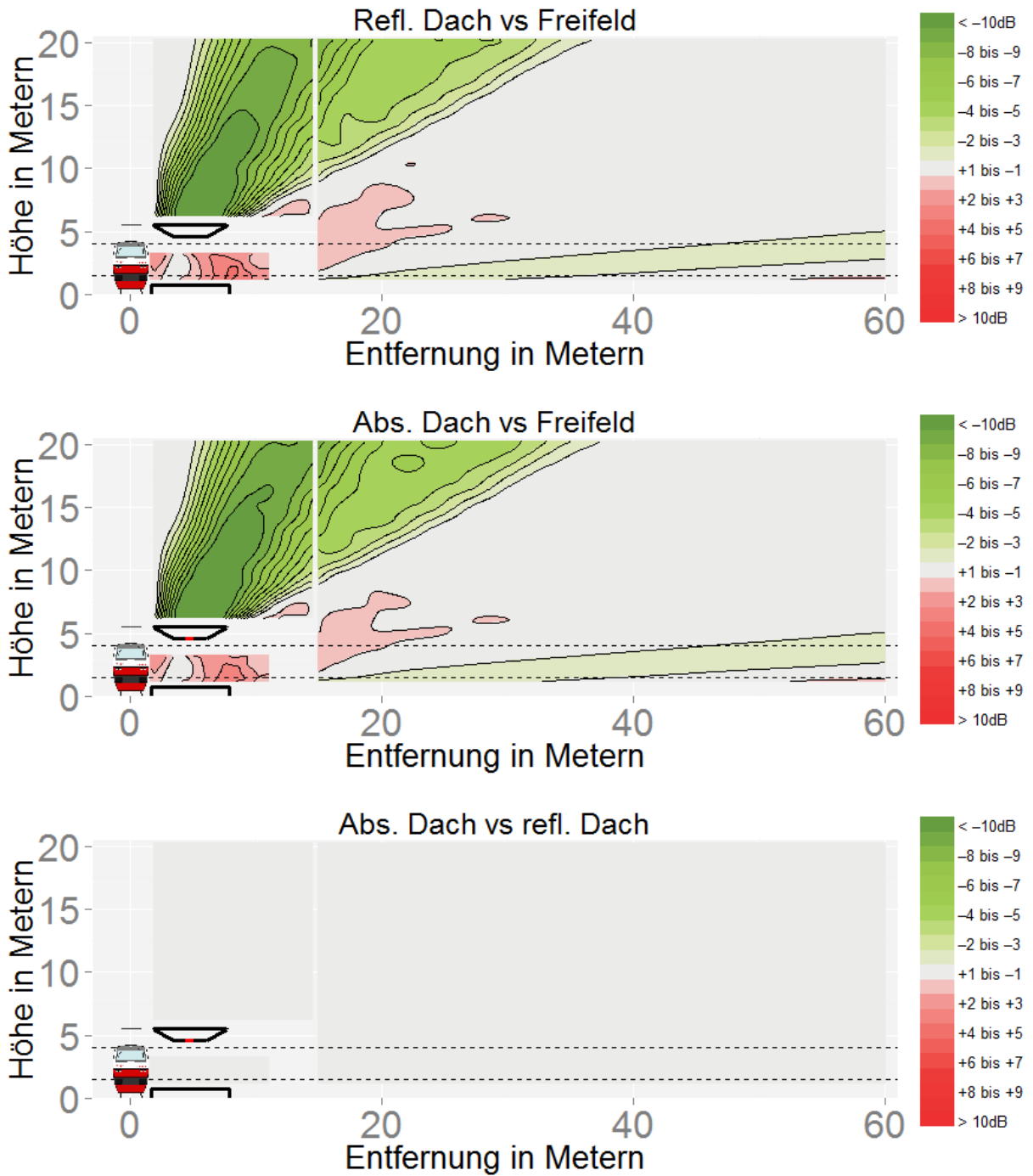


Abbildung 97: Regelquerschnitt: Effekt des absorbierenden Daches.

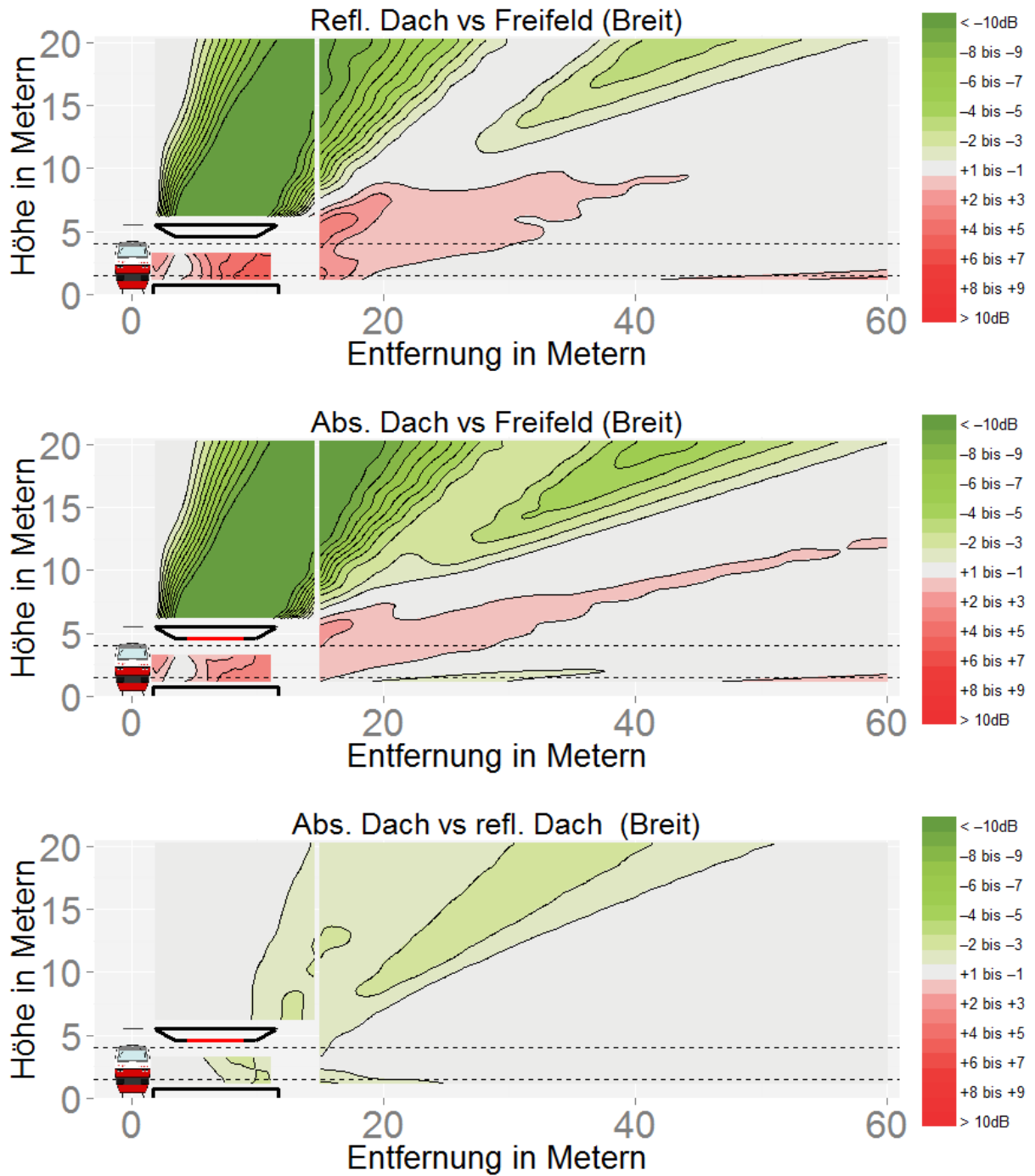


Abbildung 98: Regelquerschnitt: Effekt des absorbierenden Daches beim breiten Bahnsteig.

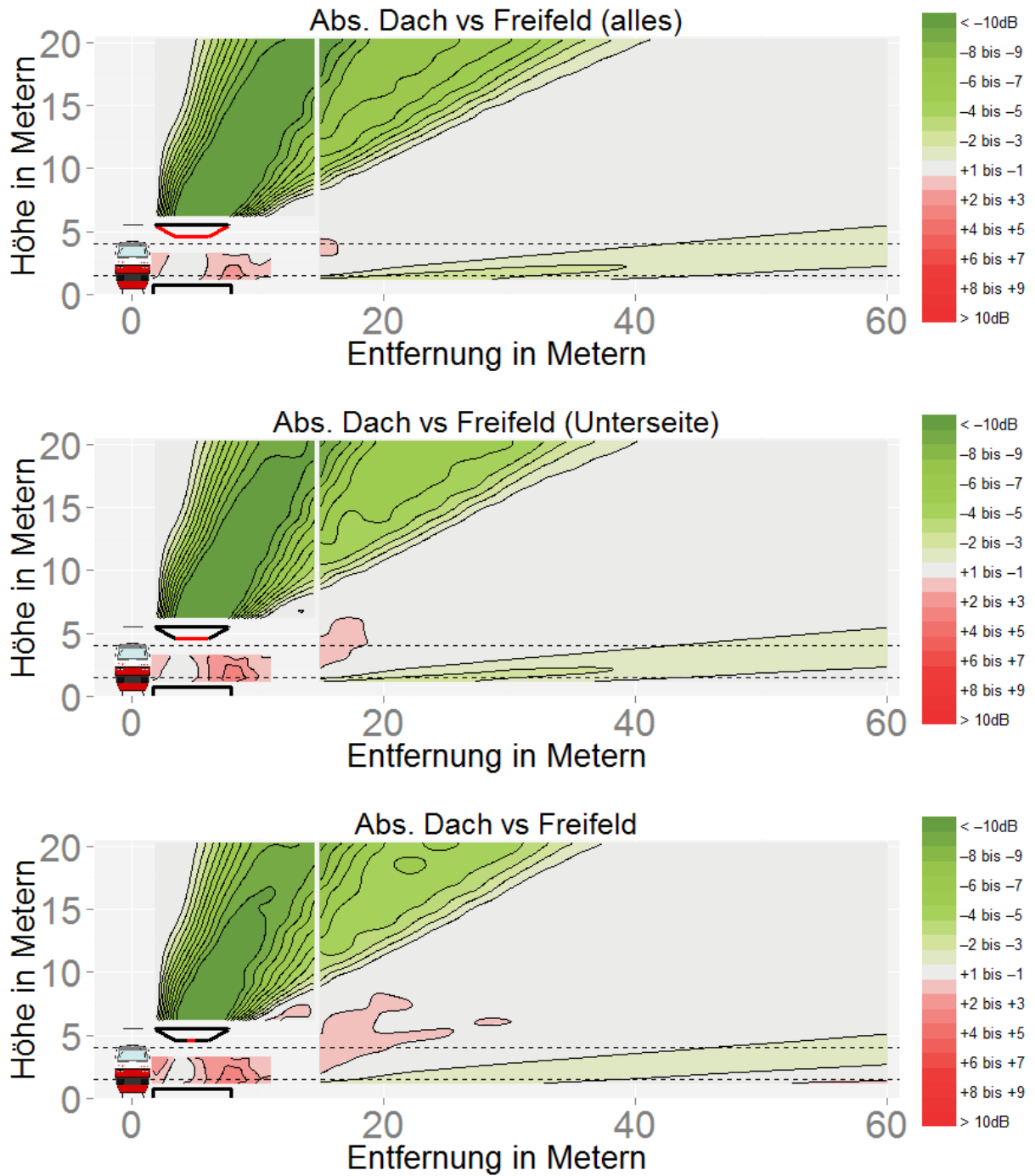


Abbildung 99: Regelquerschnitt: Vergleich absorbierende Dächer mit reflektierendem Dach.

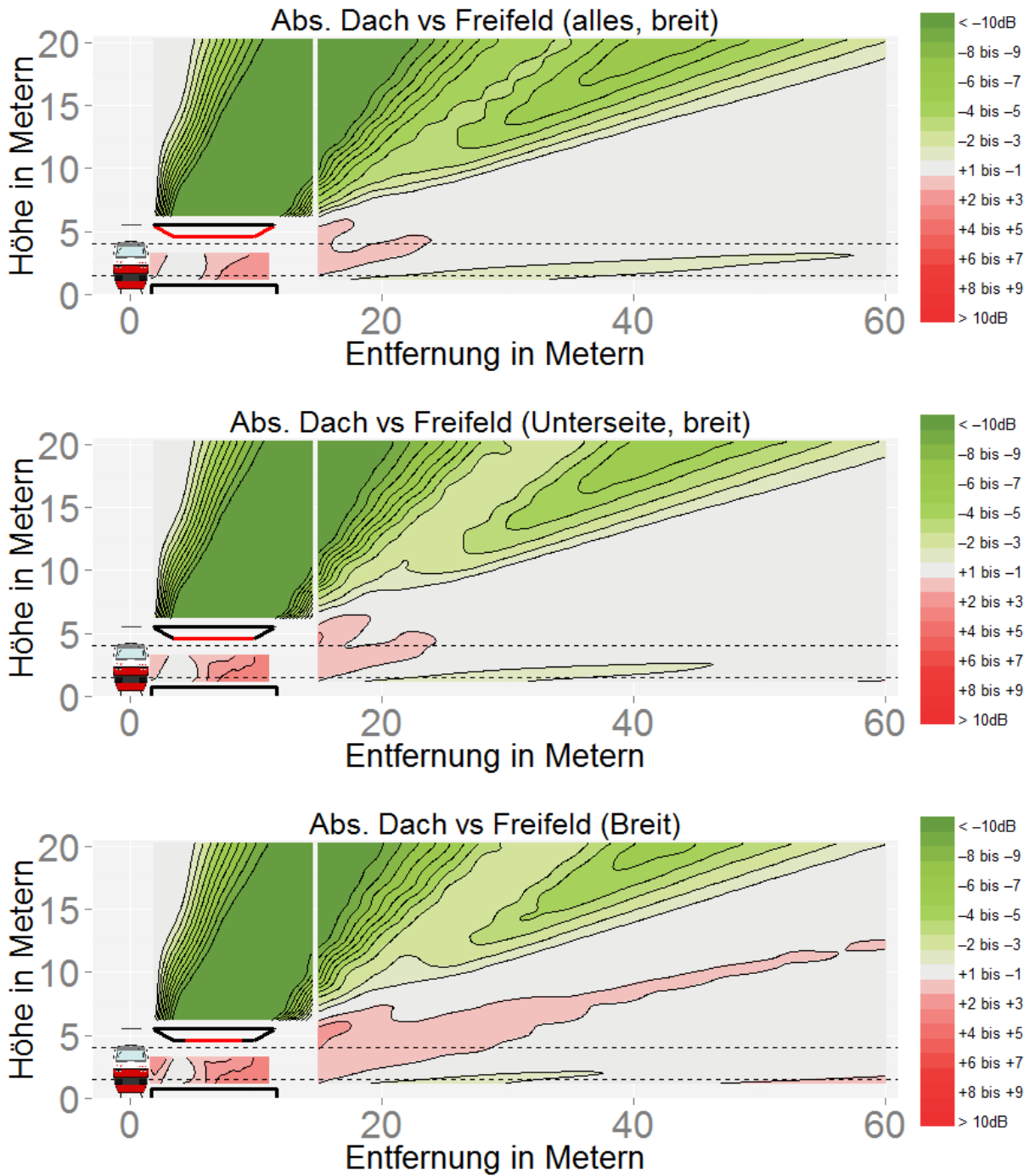


Abbildung 100: Regelquerschnitt: Vergleich absorbierende Dächer mit reflektierendem breiten Dach.

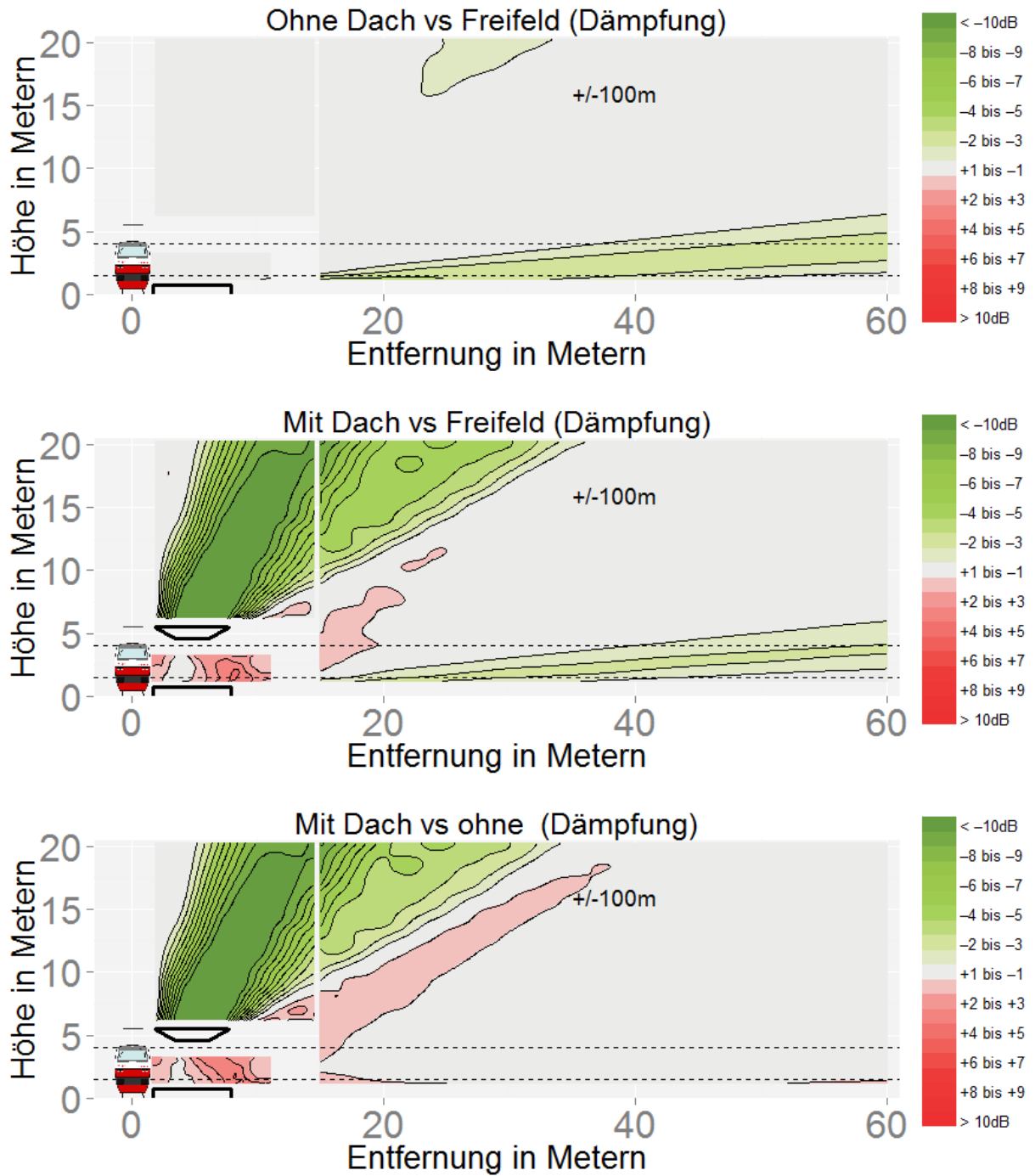


Abbildung 101: Regelquerschnitt: Quelllänge ±100 m mit Luftdämpfung.

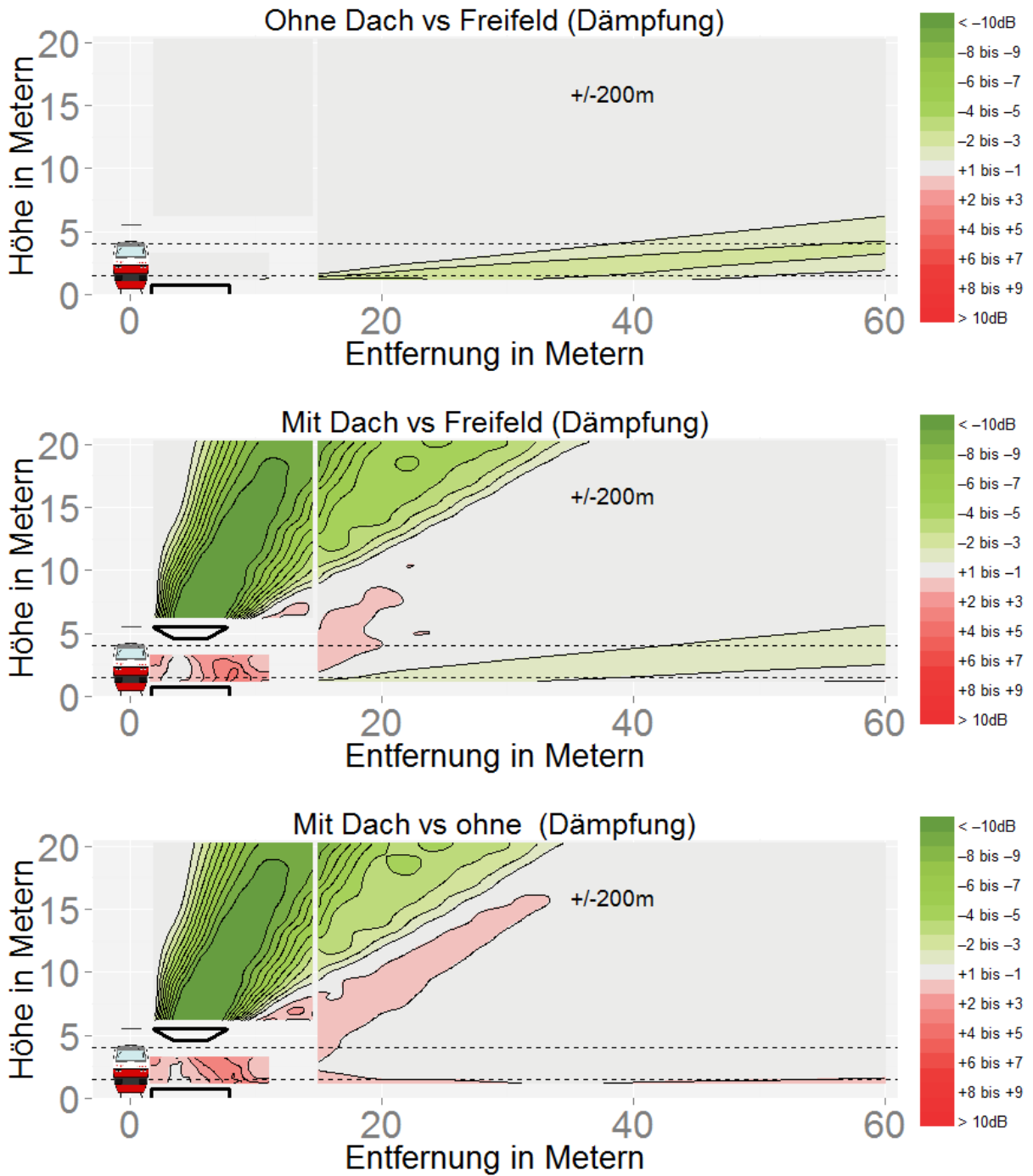


Abbildung 102: Regelquerschnitt: Quelllänge ±200 m mit Luftdämpfung.

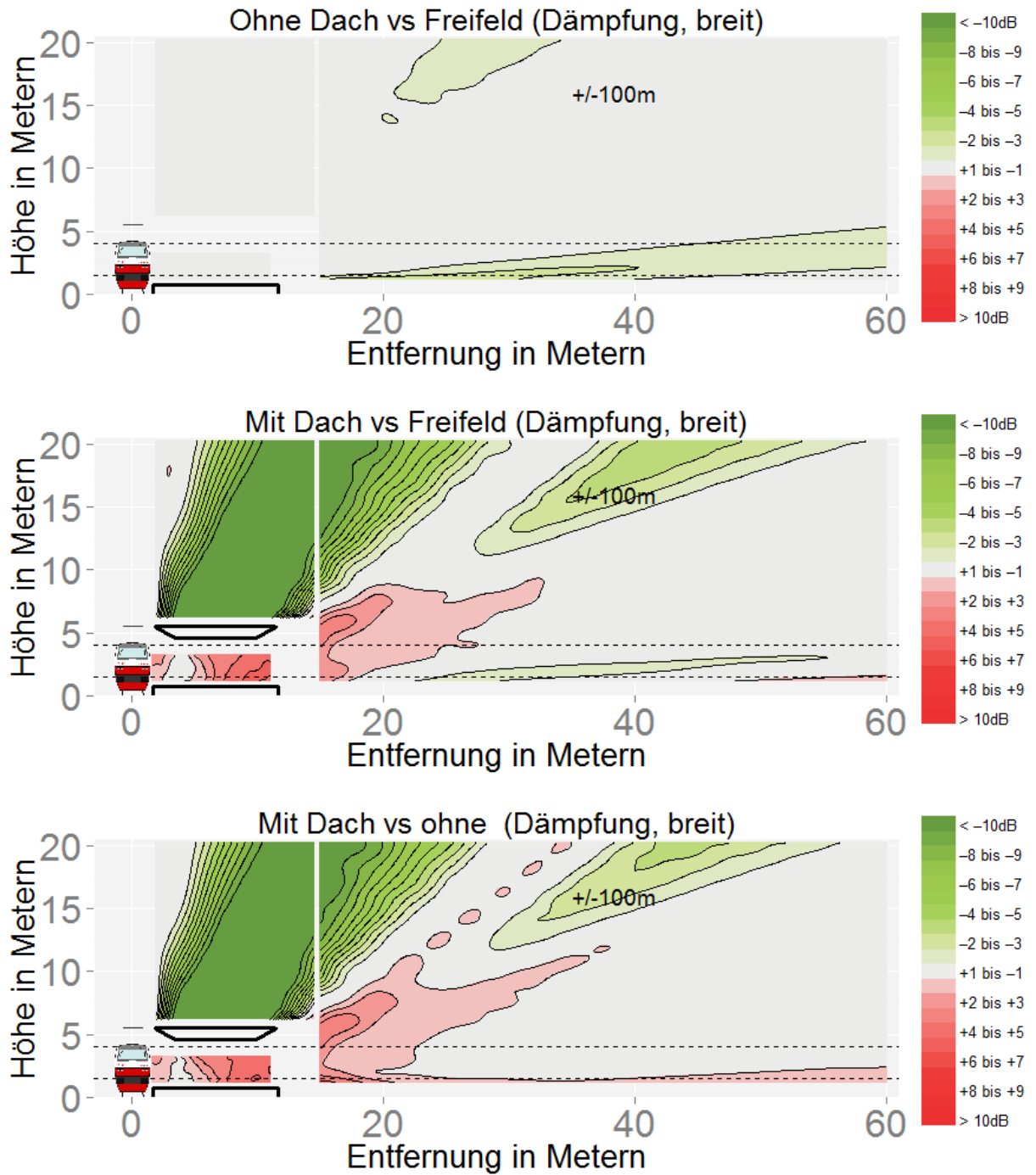


Abbildung 103: Regelquerschnitt: Quelllänge ± 100 m mit Luftdämpfung, breiter Bahnsteig.

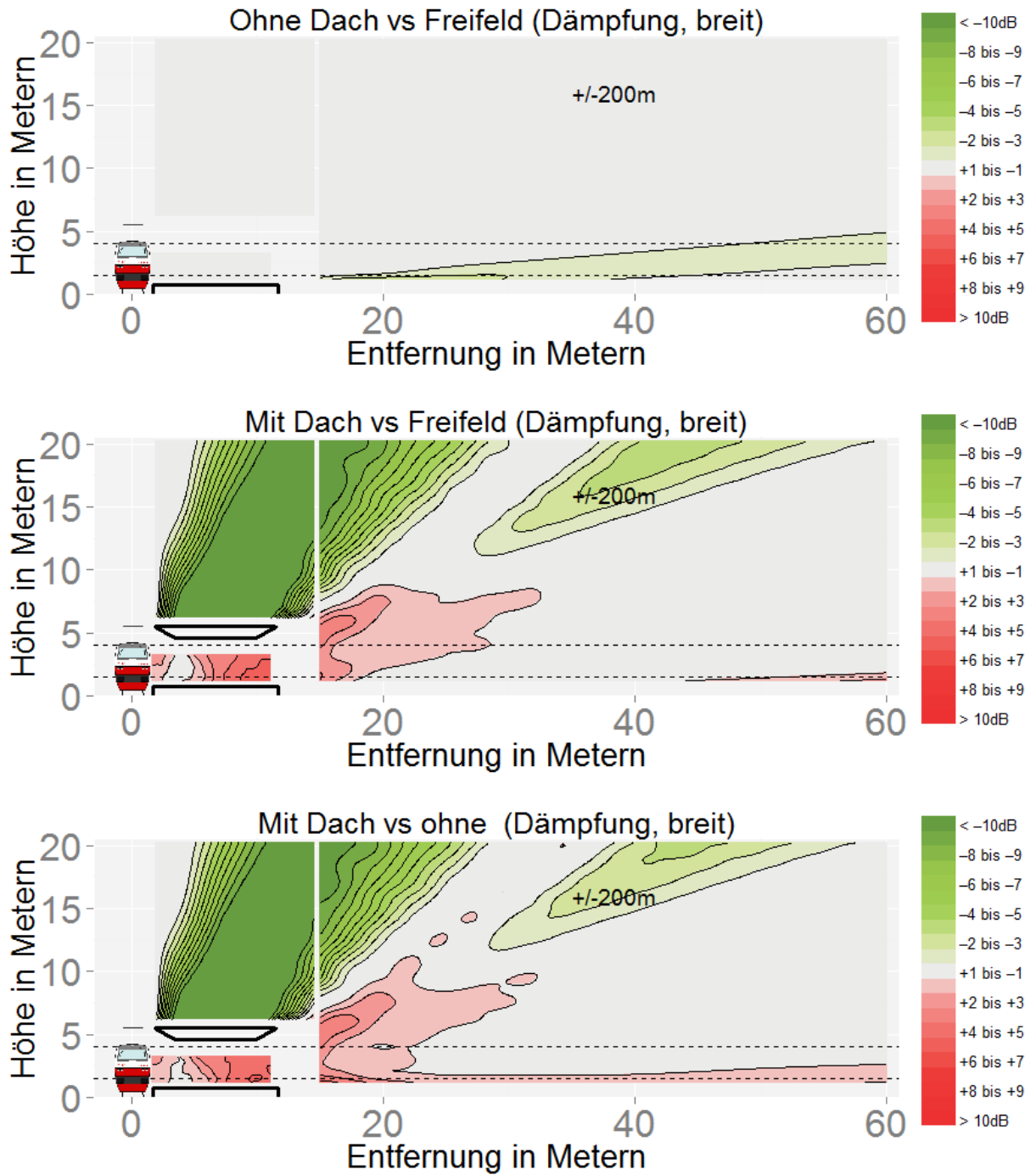


Abbildung 104: Regelquerschnitt: Quelllänge ± 200 m mit Luftdämpfung, breiter Bahnsteig.

ANHANG C: WINKELABHÄNGIGER SCHALLDRUCKPEGEL IN AUSGEWÄHLTEN TERZBÄNDERN UND A-BEWERTET

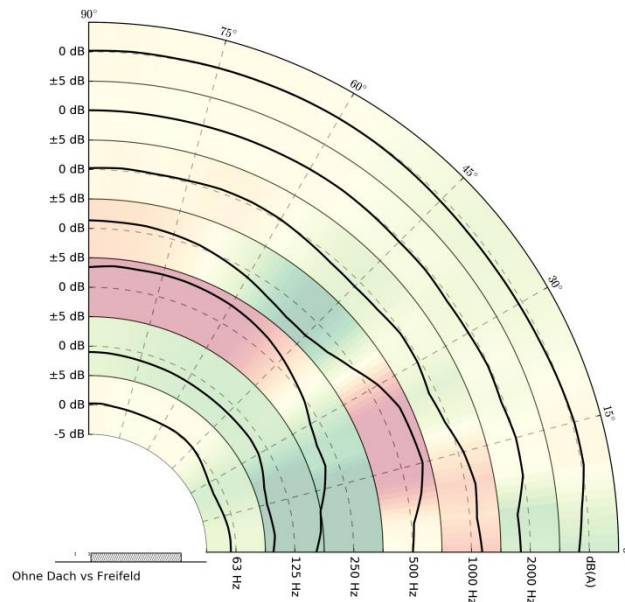


Abbildung 105: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig ohne Dach; Referenz: Freifeld).

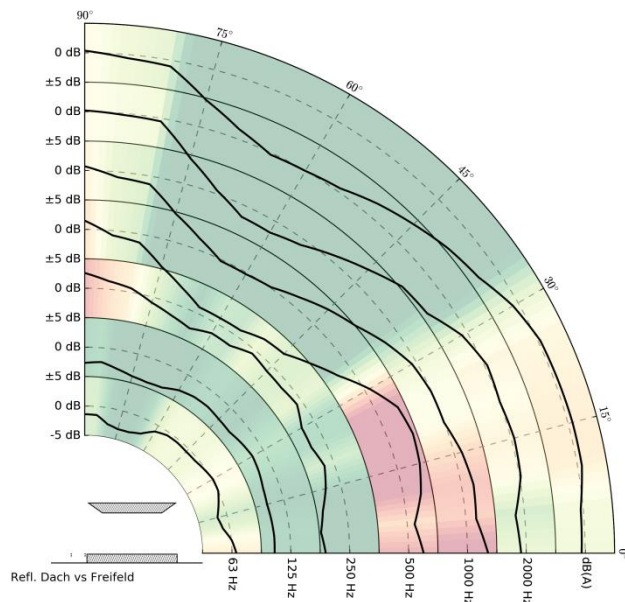


Abbildung 106: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig mit Dach; Referenz: Freifeld).

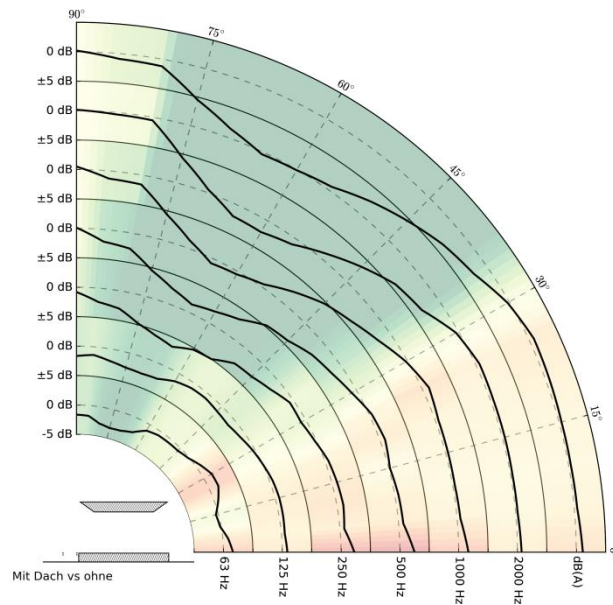


Abbildung 107: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig mit Dach; Referenz: Bahnsteig ohne Dach).

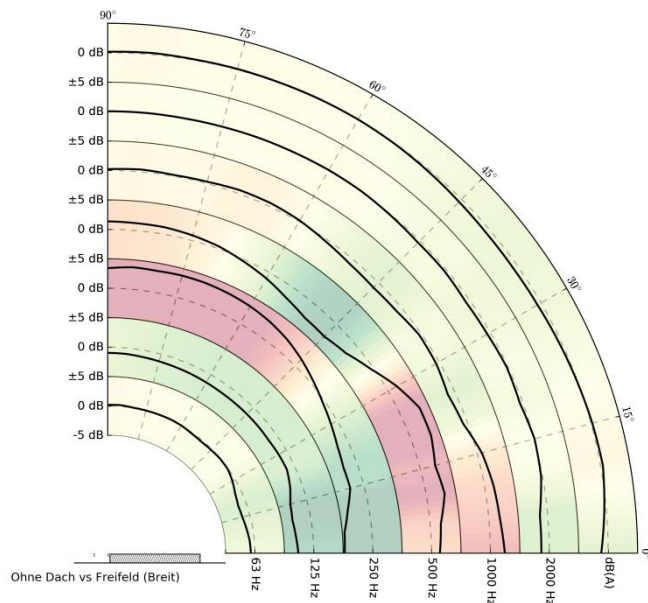


Abbildung 108: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (breiter Bahnsteig ohne Dach; Referenz: Freifeld).

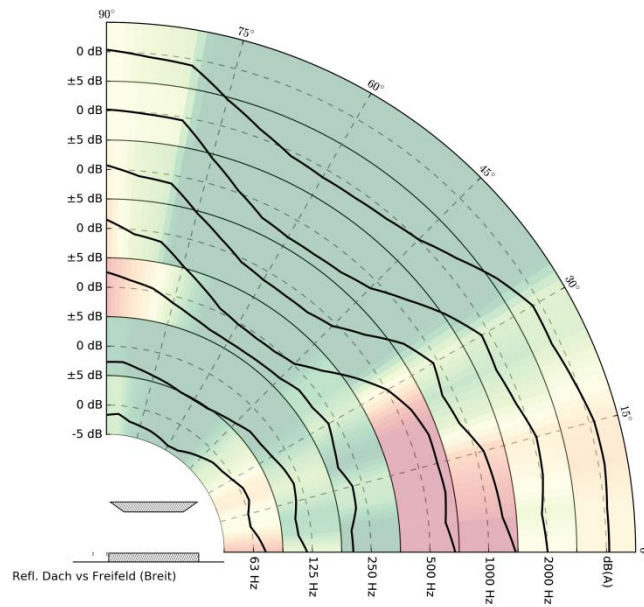


Abbildung 109: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (breiter Bahnsteig mit Dach; Referenz: Freifeld).

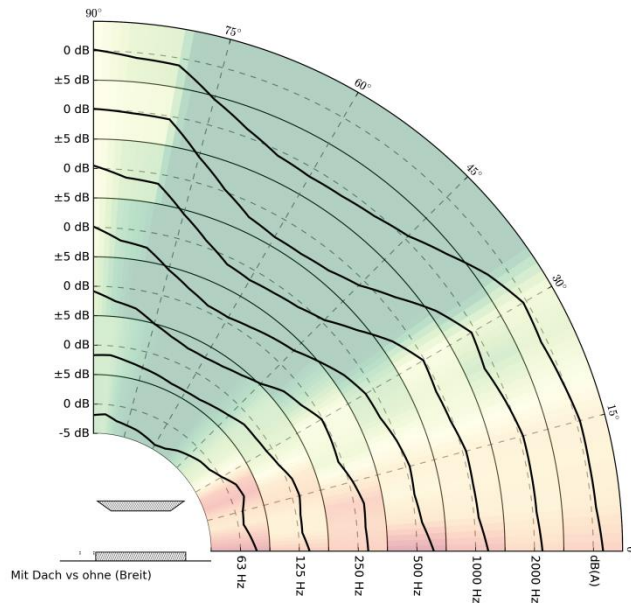


Abbildung 110: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (breiter Bahnsteig mit Dach; Referenz: breiter Bahnsteig ohne Dach).

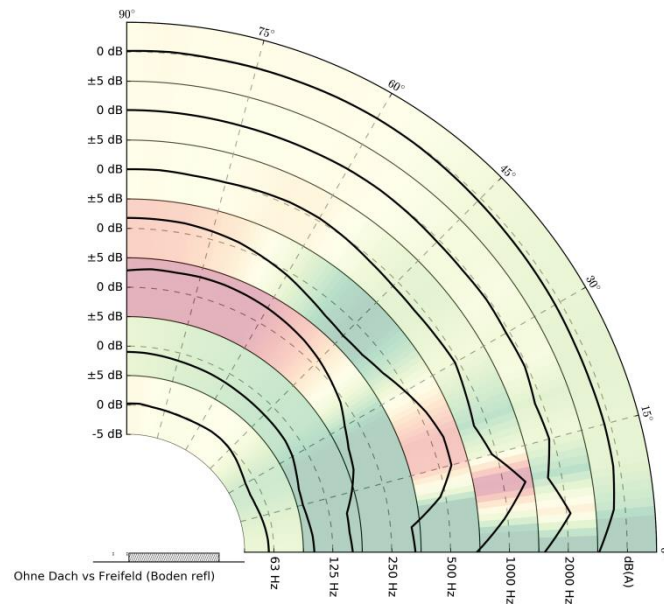


Abbildung 111: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig ohne Dach; Referenz: Freifeld; Boden: reflektierend).

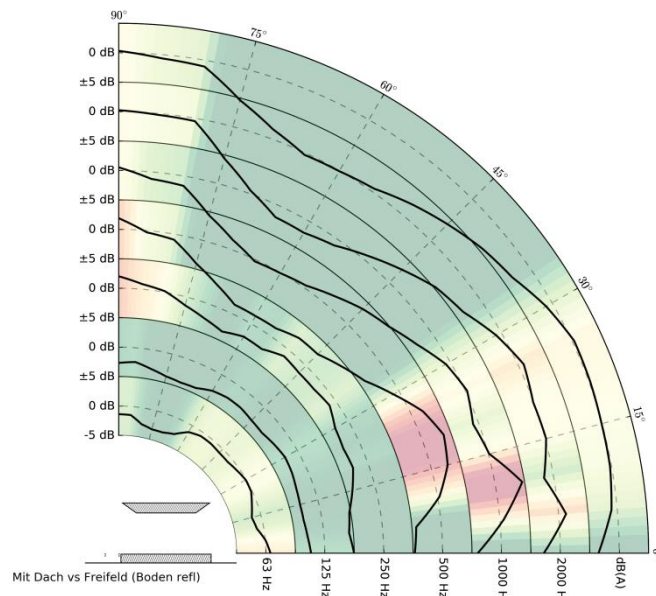


Abbildung 112: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig mit Dach; Referenz: Freifeld; Boden: reflektierend).

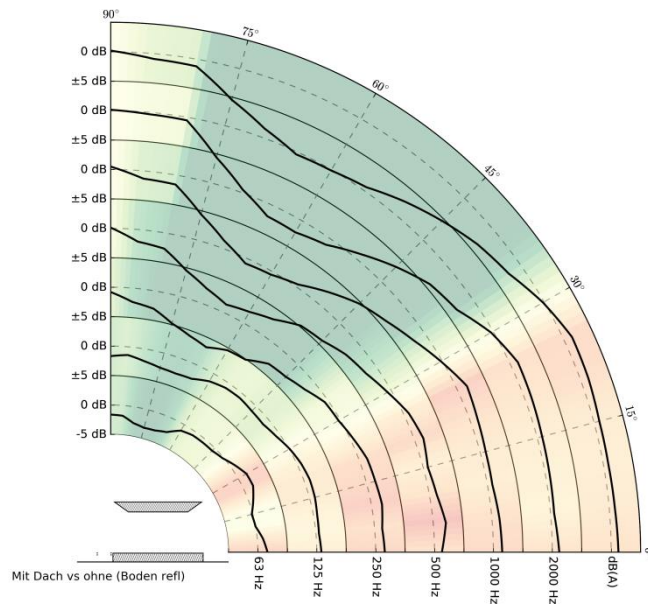


Abbildung 113: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig mit Dach; Referenz: Bahnsteig ohne Dach; Boden: reflektierend).

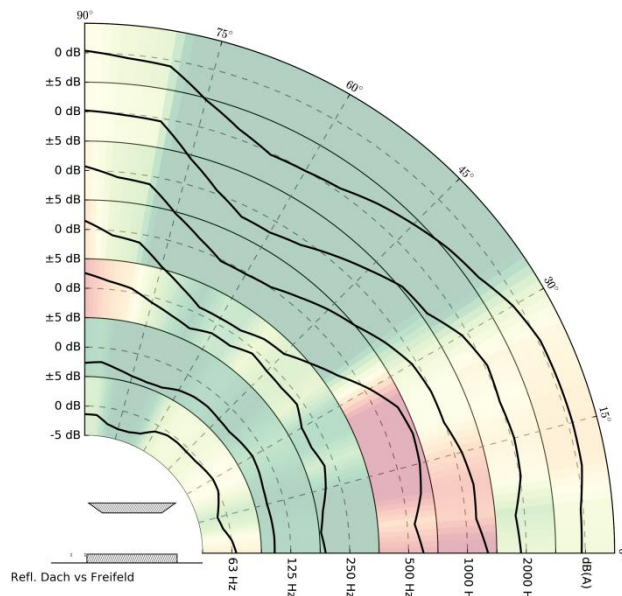


Abbildung 114: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig mit reflektierendem Dach; Referenz: Freifeld).

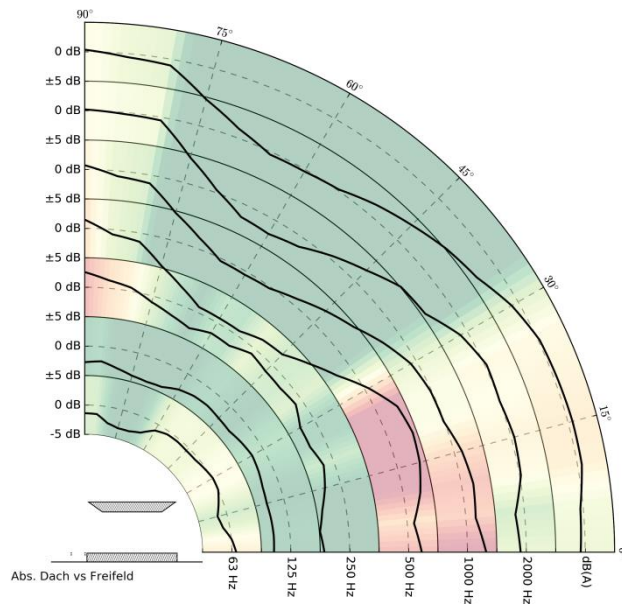


Abbildung 115: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig mit absorbierendem Dach; Referenz: Freifeld).

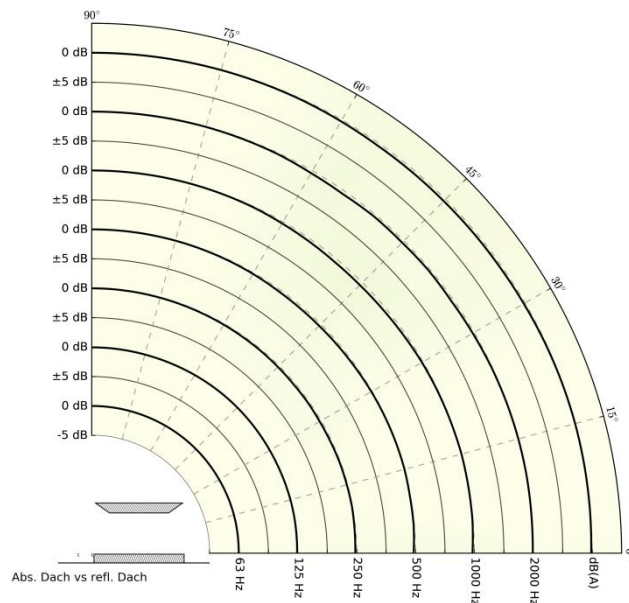


Abbildung 116: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig mit absorbierendem Dach; Referenz: Bahnsteig mit reflektierendem Dach).

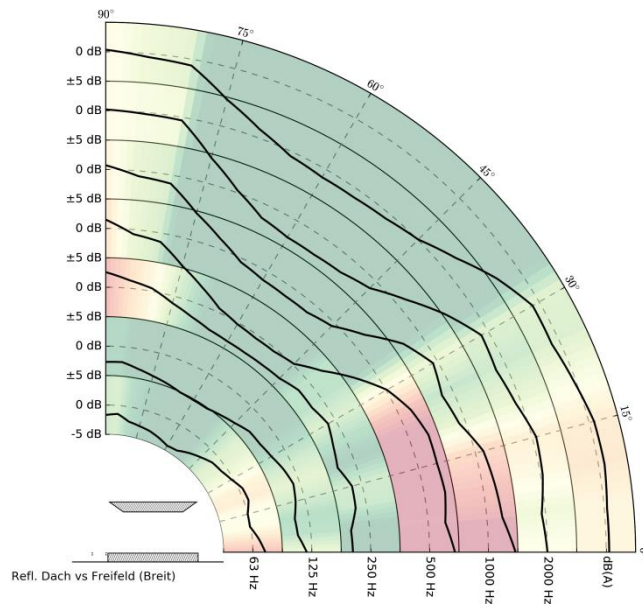


Abbildung 117: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (breiter Bahnsteig mit reflektierendem Dach; Referenz: Freifeld).

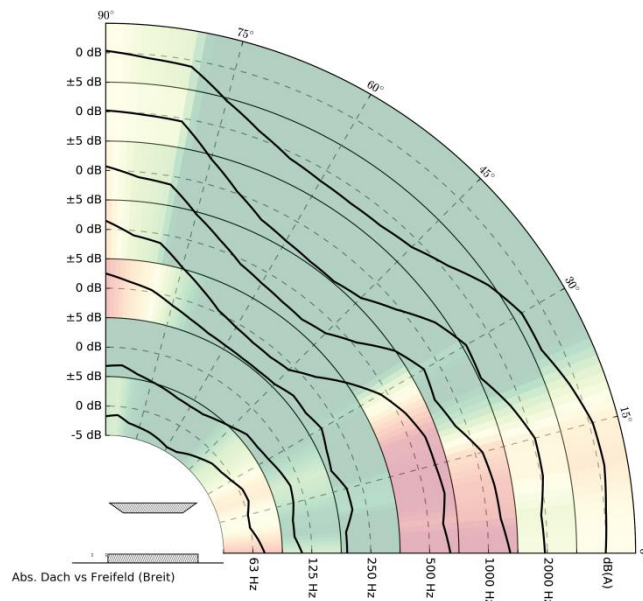


Abbildung 118: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (breiter Bahnsteig mit absorbierendem Dach; Referenz: Freifeld).

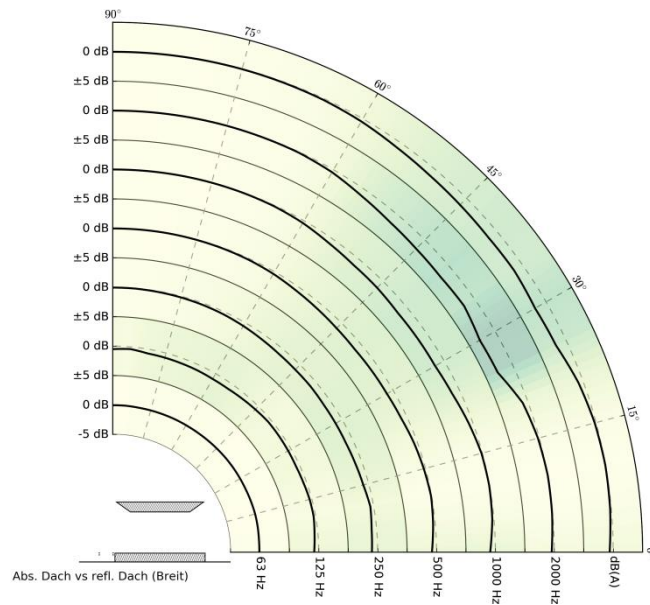


Abbildung 119: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (breiter Bahnsteig mit absorbierendem Dach; Referenz: breiter Bahnsteig mit reflektierendem Dach).

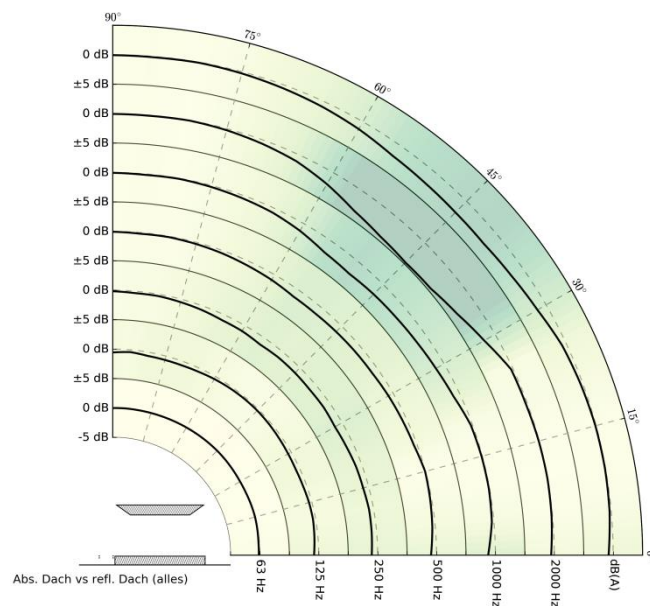


Abbildung 120: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig mit absorbierendem Dach; Absorption: gesamte Unterseite; Referenz: Bahnsteig mit reflektierendem Dach).

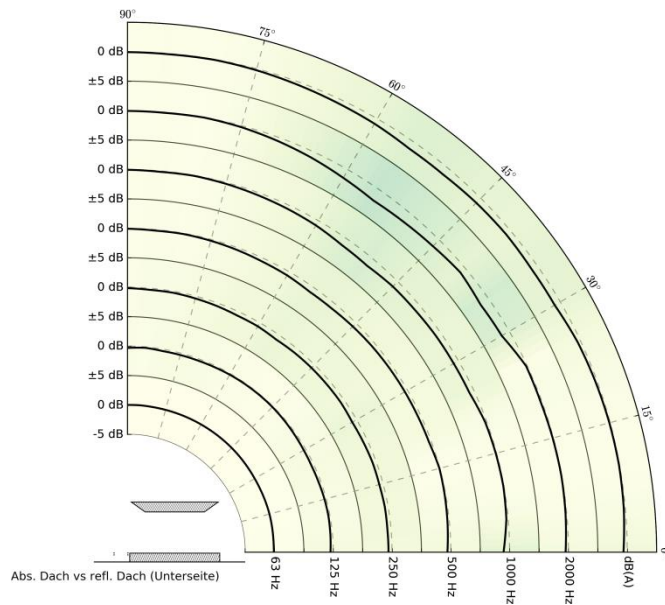


Abbildung 121: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig mit absorbierendem Dach; Absorption: gerade Unterseite; Referenz: Bahnsteig mit reflektierendem Dach).

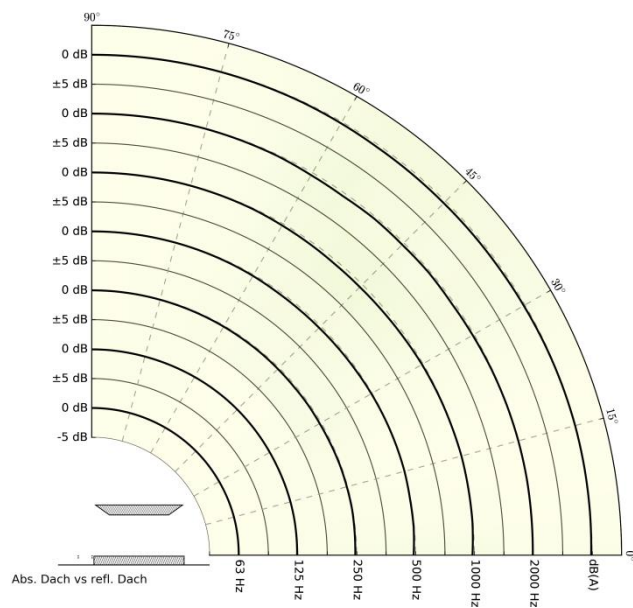


Abbildung 122: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig mit absorbierendem Dach; Absorption: Öffnung in der Unterseite; Referenz: Bahnsteig mit reflektierendem Dach).

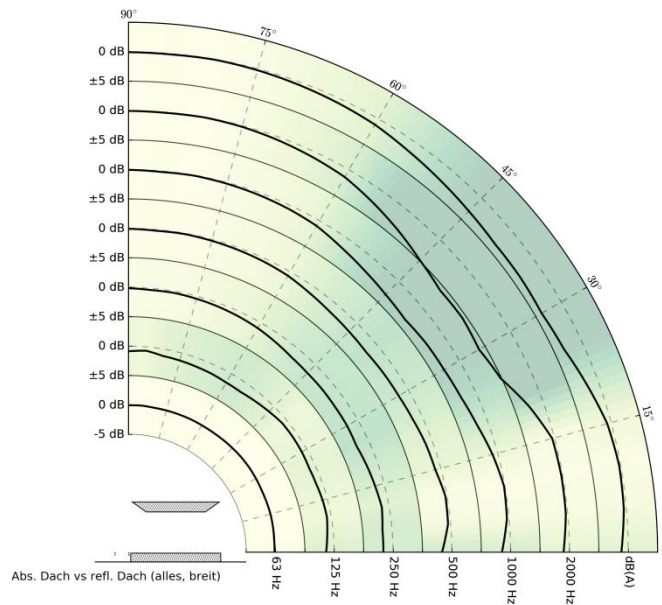


Abbildung 123: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (breiter Bahnsteig mit absorbierendem Dach; Absorption: gesamte Unterseite; Referenz: breiter Bahnsteig mit reflektierendem Dach).

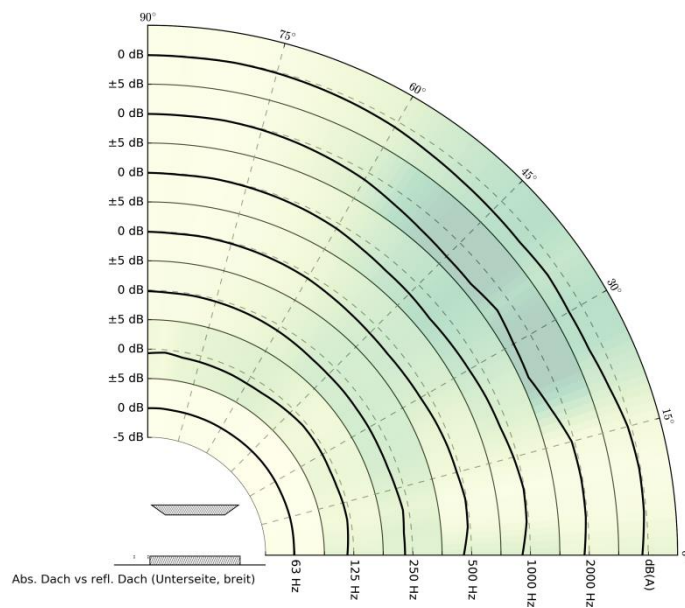


Abbildung 93: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (breiter Bahnsteig mit absorbierendem Dach; Absorption: gerade Unterseite; Referenz: breiter Bahnsteig mit reflektierendem Dach).

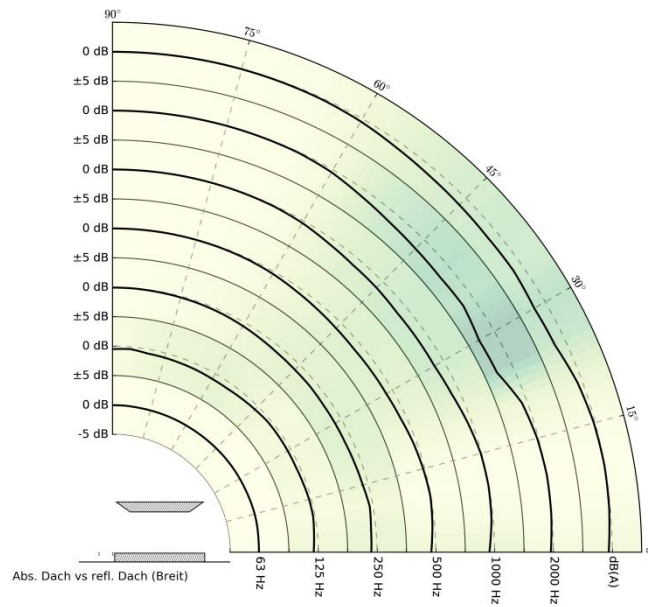


Abbildung 93: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (breiter Bahnsteig mit absorbierendem Dach; Absorption: Öffnung in der Unterseite; Referenz: breiter Bahnsteig mit reflektierendem Dach).

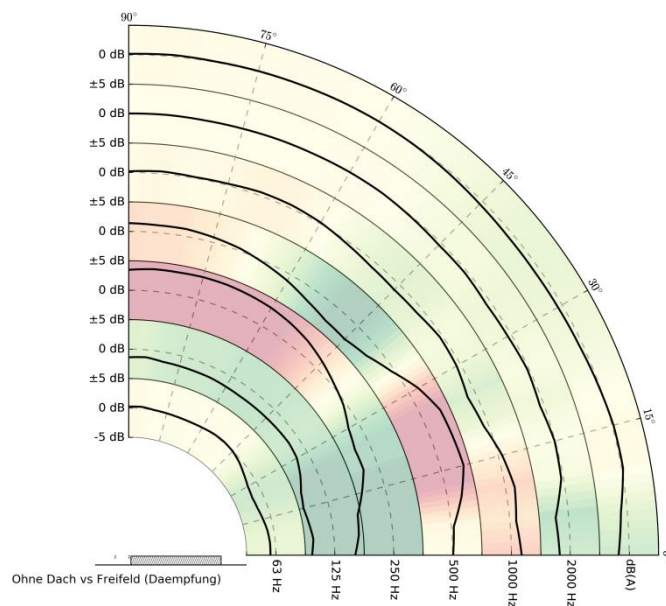


Abbildung 124: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig ohne Dach; Quelllänge ± 100 m mit Luftdämpfung; Referenz: Freifeld).

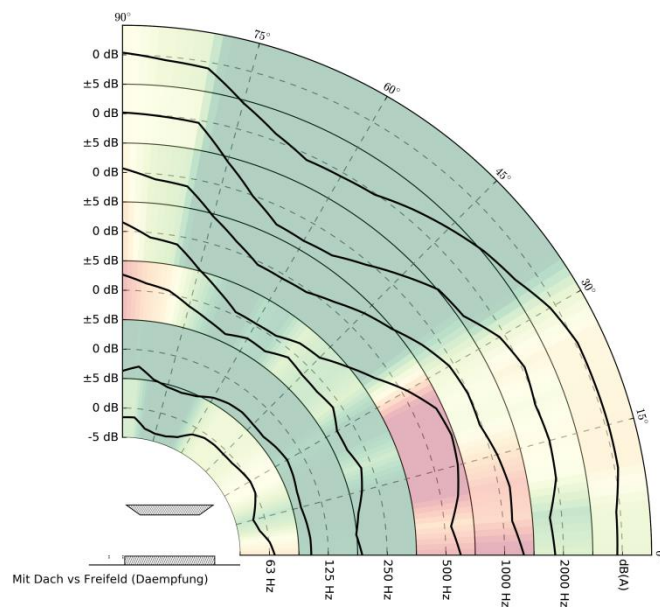


Abbildung 125: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig mit Dach; Quelllänge ± 100 m mit Luftdämpfung; Referenz: Freifeld).

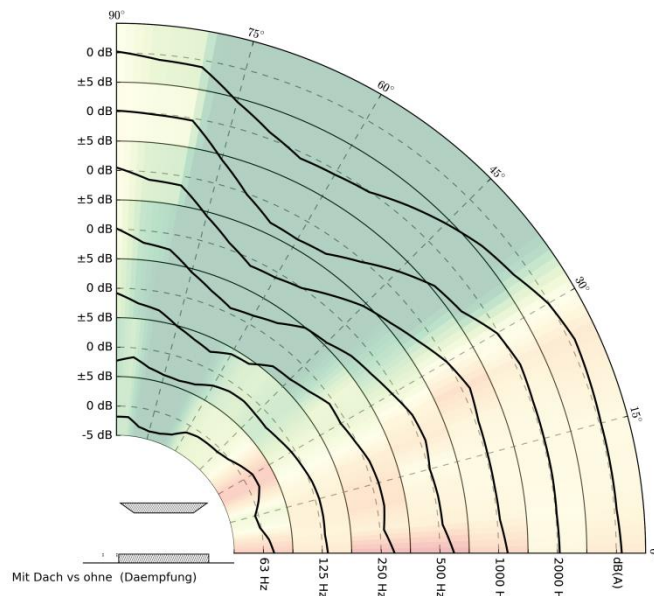


Abbildung 126: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (Bahnsteig mit Dach; Quelllänge ± 100 m mit Luftdämpfung; Referenz: Bahnsteig ohne Dach).

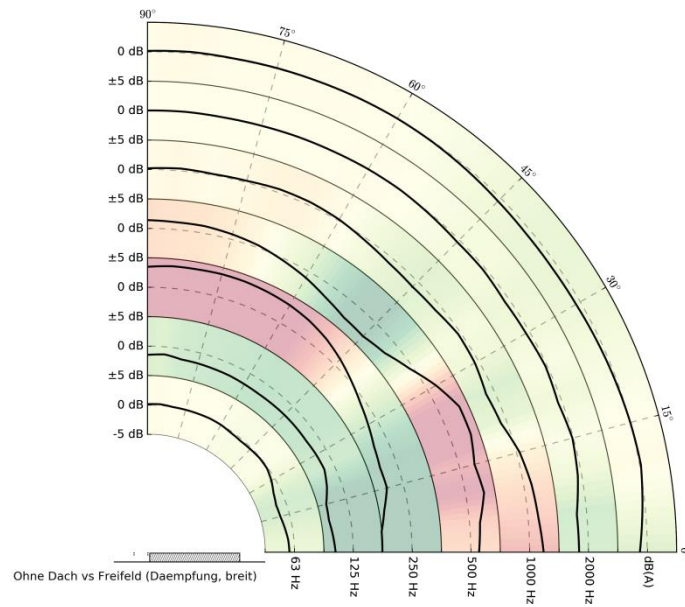


Abbildung 127: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (breiter Bahnsteig ohne Dach; Quelllänge ± 100 m mit Luftdämpfung; Referenz: Freifeld).

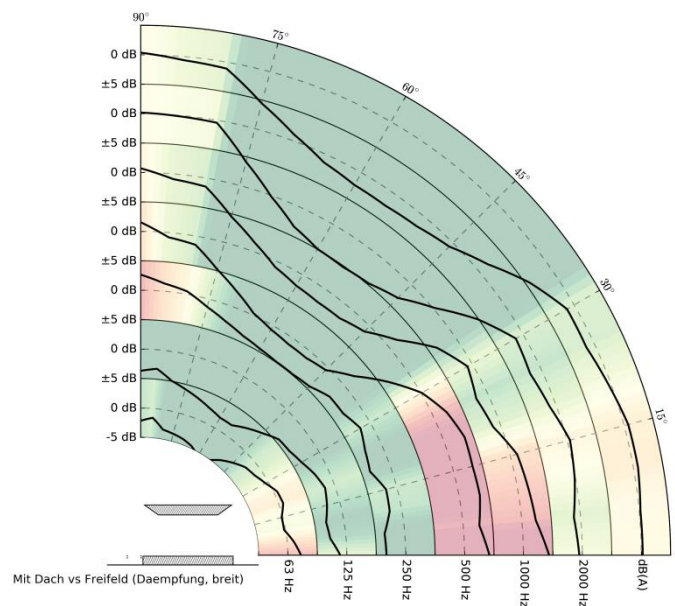


Abbildung 128: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (breiter Bahnsteig mit Dach; Quelllänge ± 100 m mit Luftdämpfung; Referenz: Freifeld).

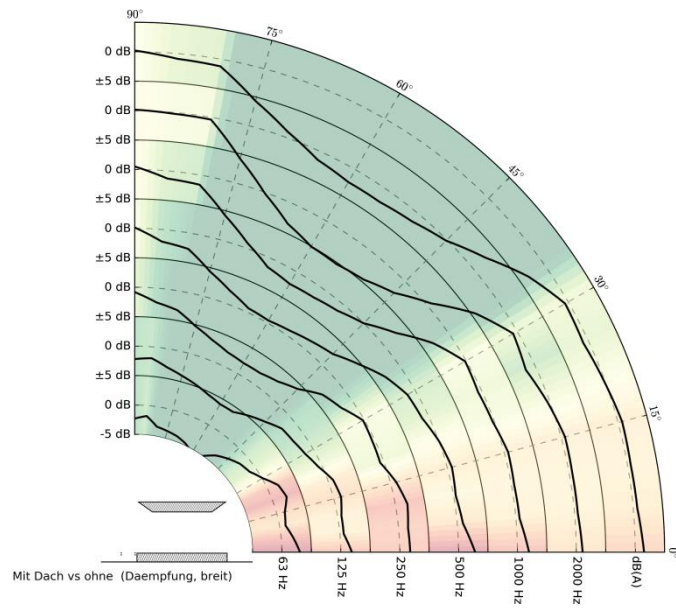


Abbildung 129: Winkelabhängige Schalldruckpegeldifferenz in ausgewählten Terzbändern und A-bewertet (breiter Bahnsteig ohne Dach; Quelllänge ± 100 m mit Luftdämpfung; Referenz: breiter Bahnsteig ohne Dach).

ANHANG D: SIMULATIONSERGEBNISSE IN TERZBÄNDERN

D.1: Effekt des Bahnsteigs mit und ohne Dach

Dargestellt sind die Dritteloktavbandpegel für den Vergleich sowohl zwischen dem Bahnsteig ohne Dach (obere Grafik) als auch mit reflektierendem Dach (mittlere Grafik) im Vergleich zur freien Schallausbreitung für den absorbierenden Boden. Der Einfluss des Daches wird in der unteren Grafik dargestellt.

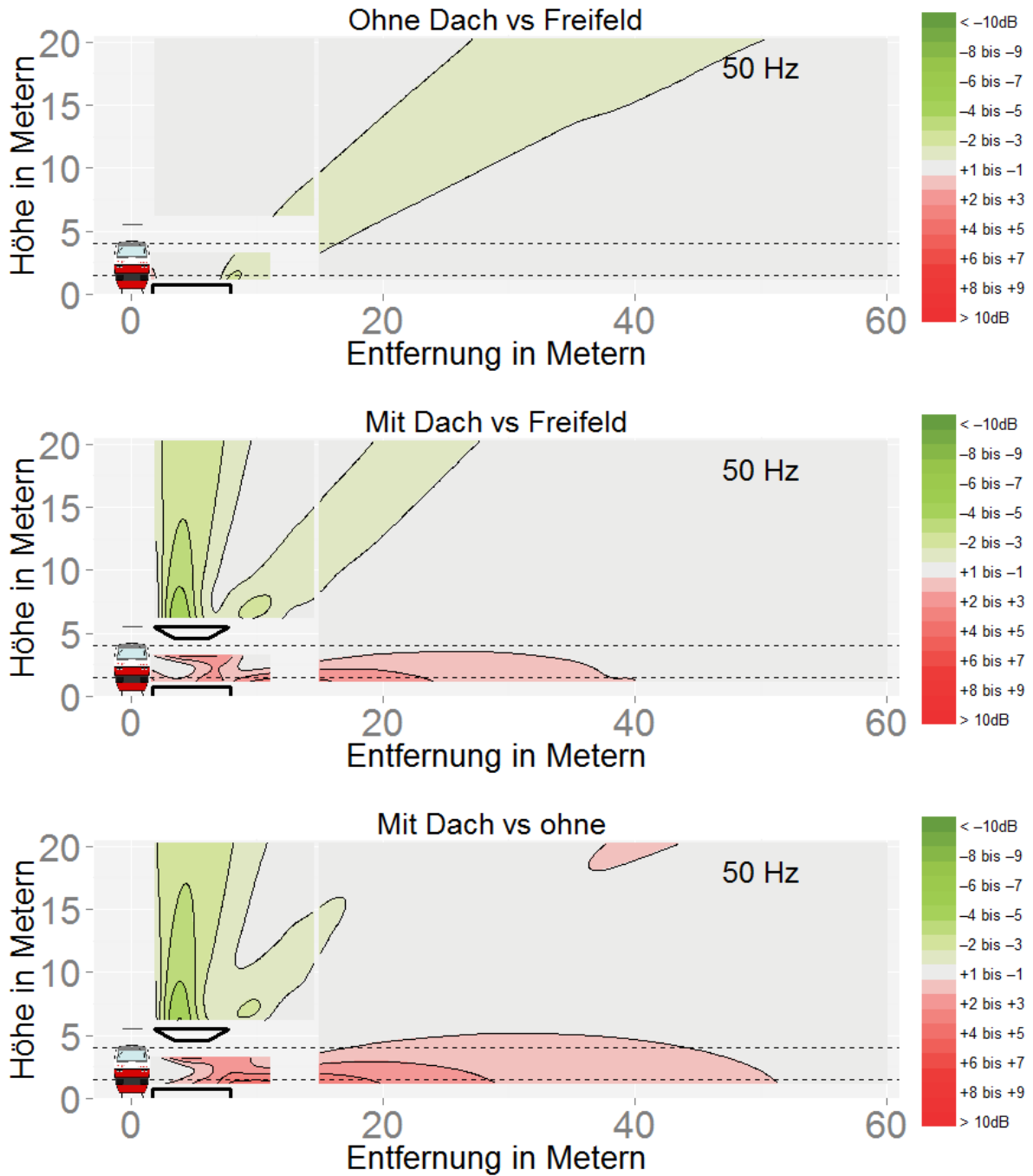


Abbildung 130

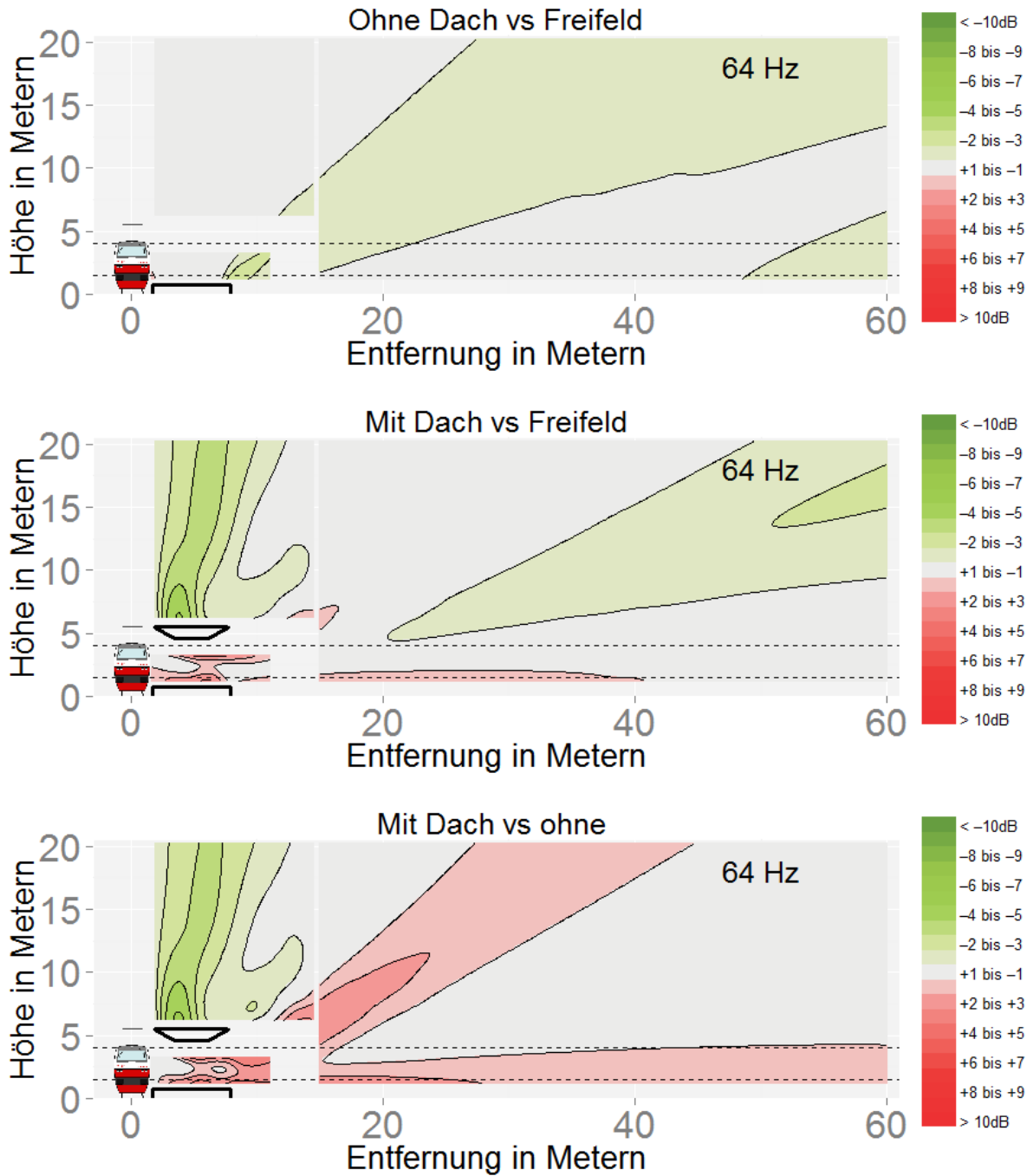


Abbildung 131

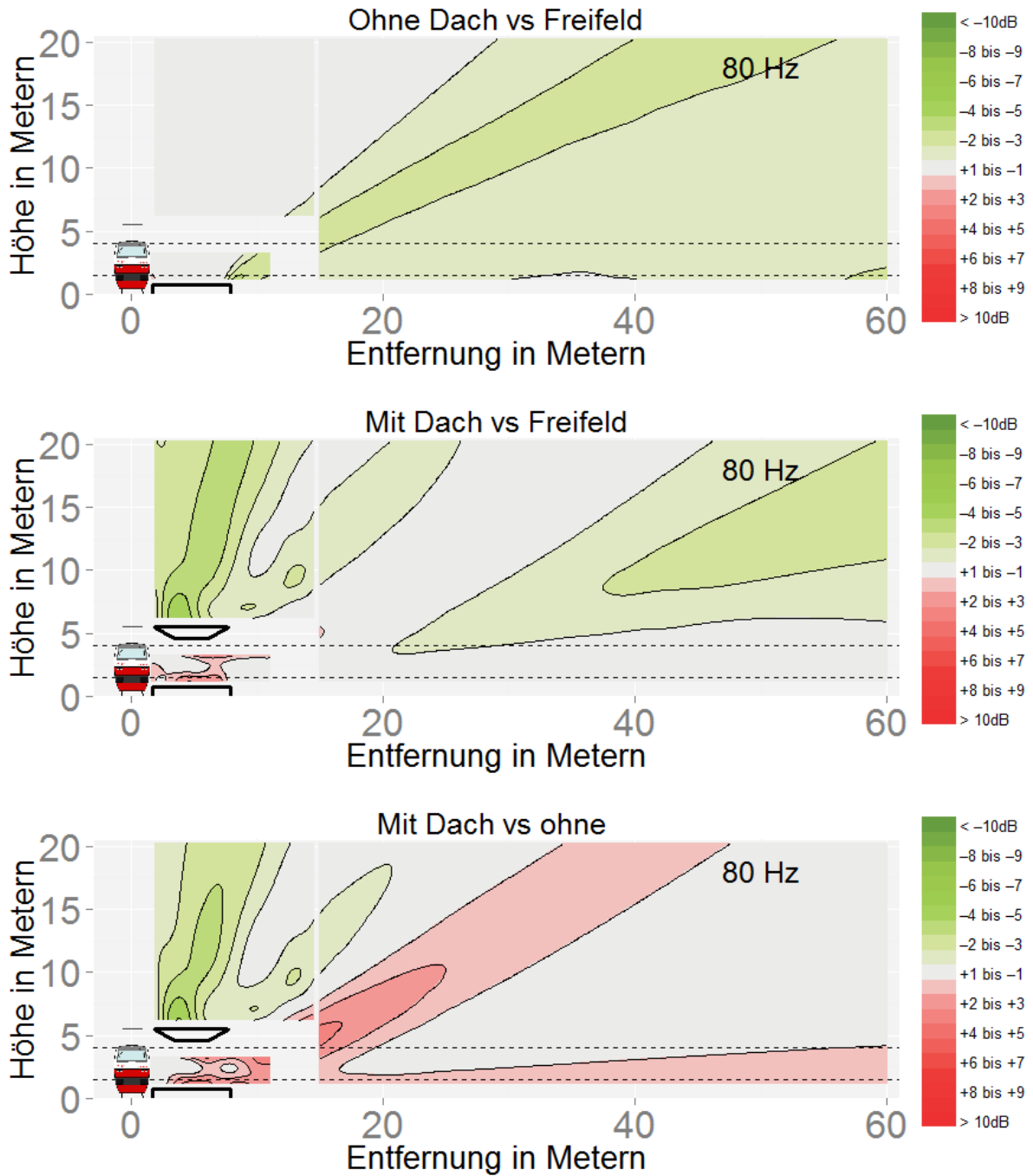


Abbildung 132

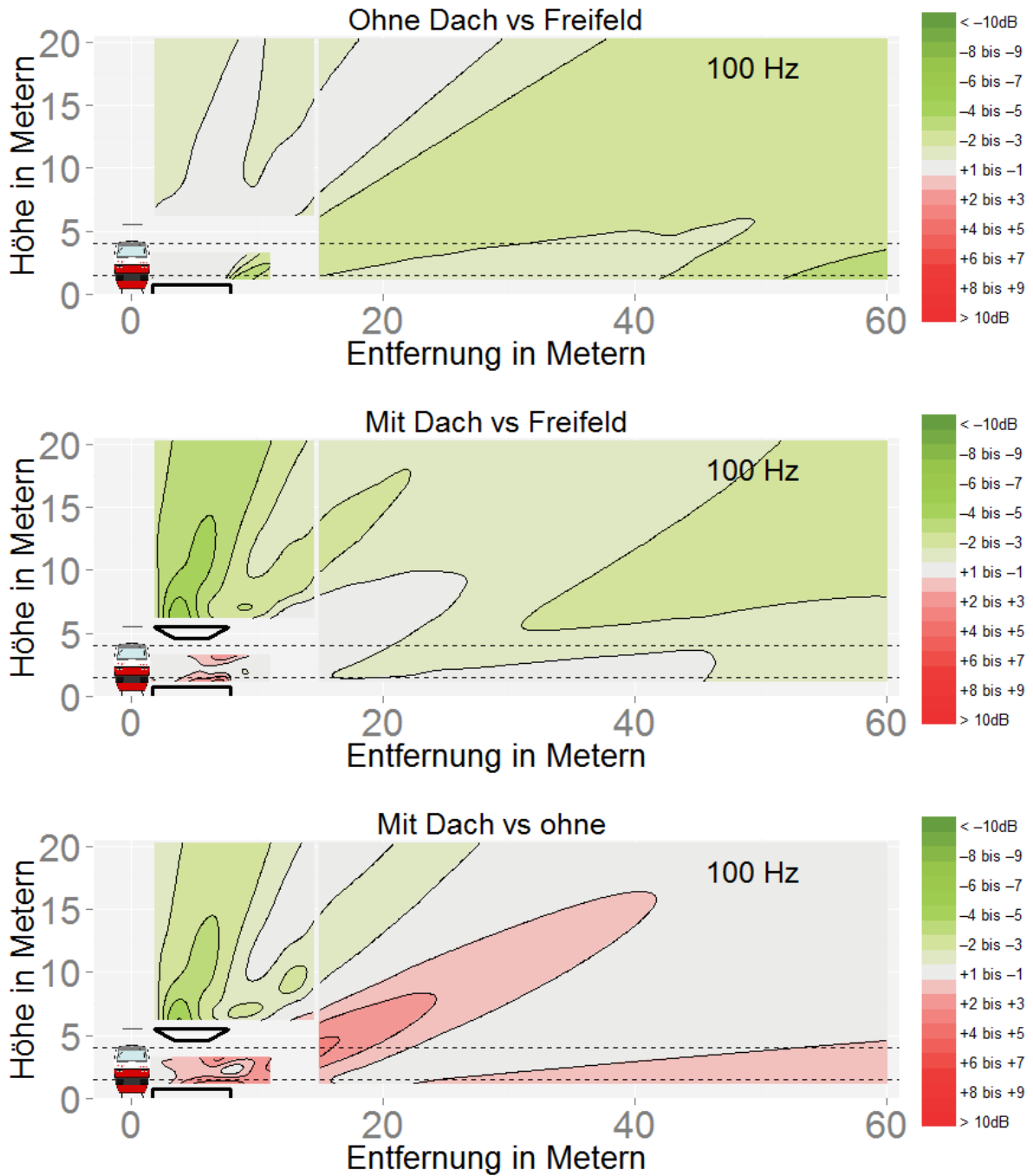


Abbildung 133

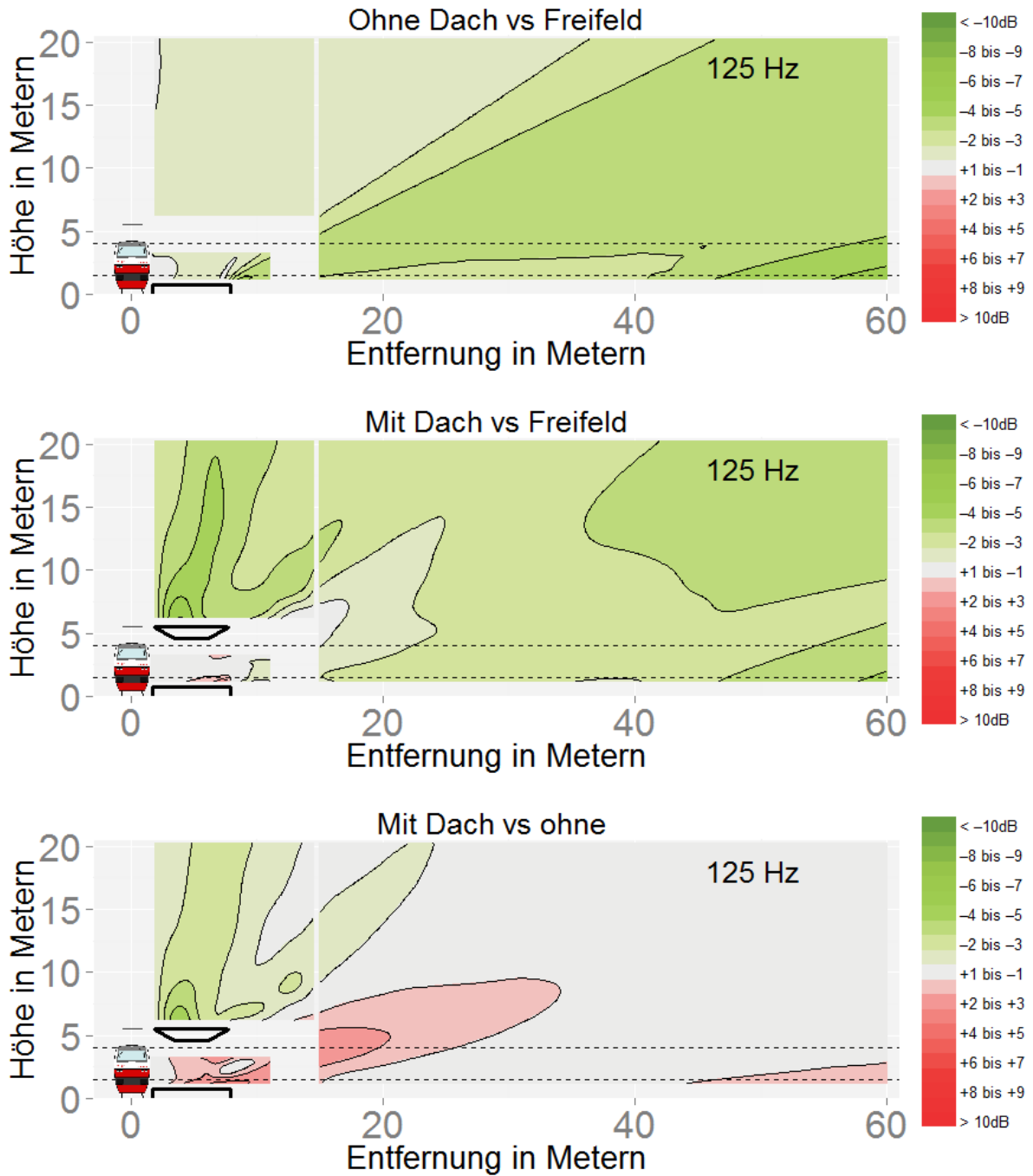


Abbildung 134

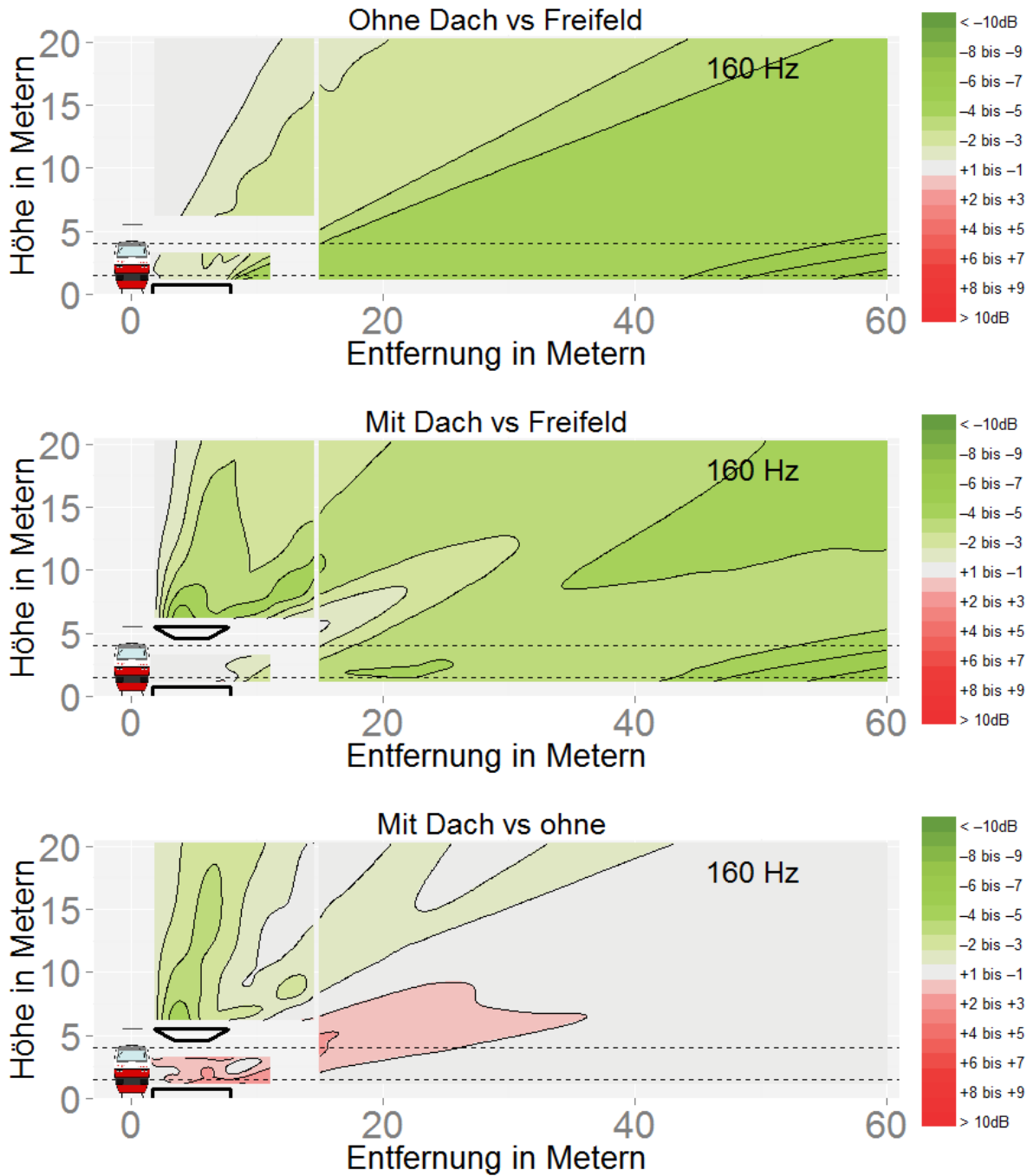


Abbildung 135

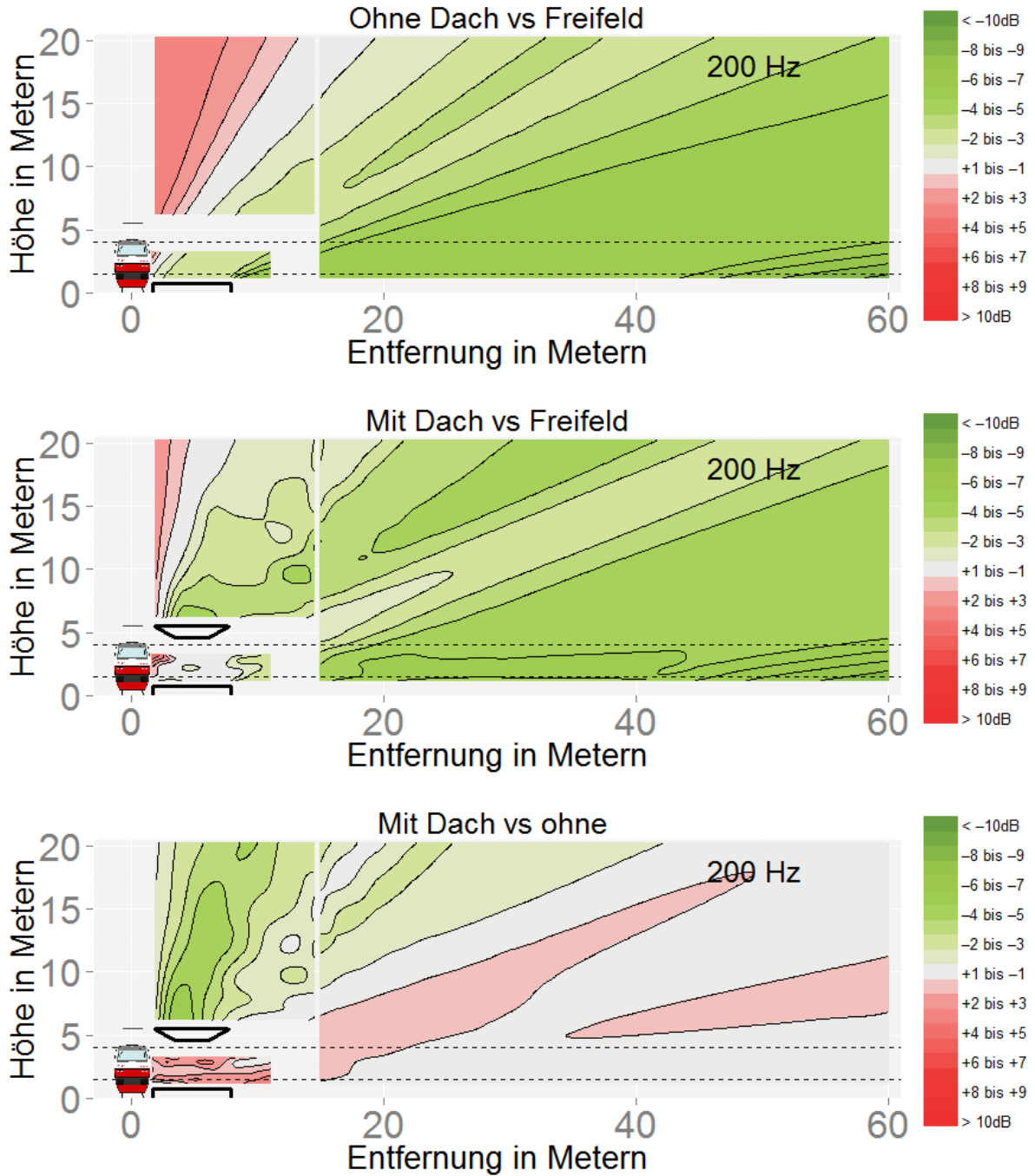


Abbildung 136

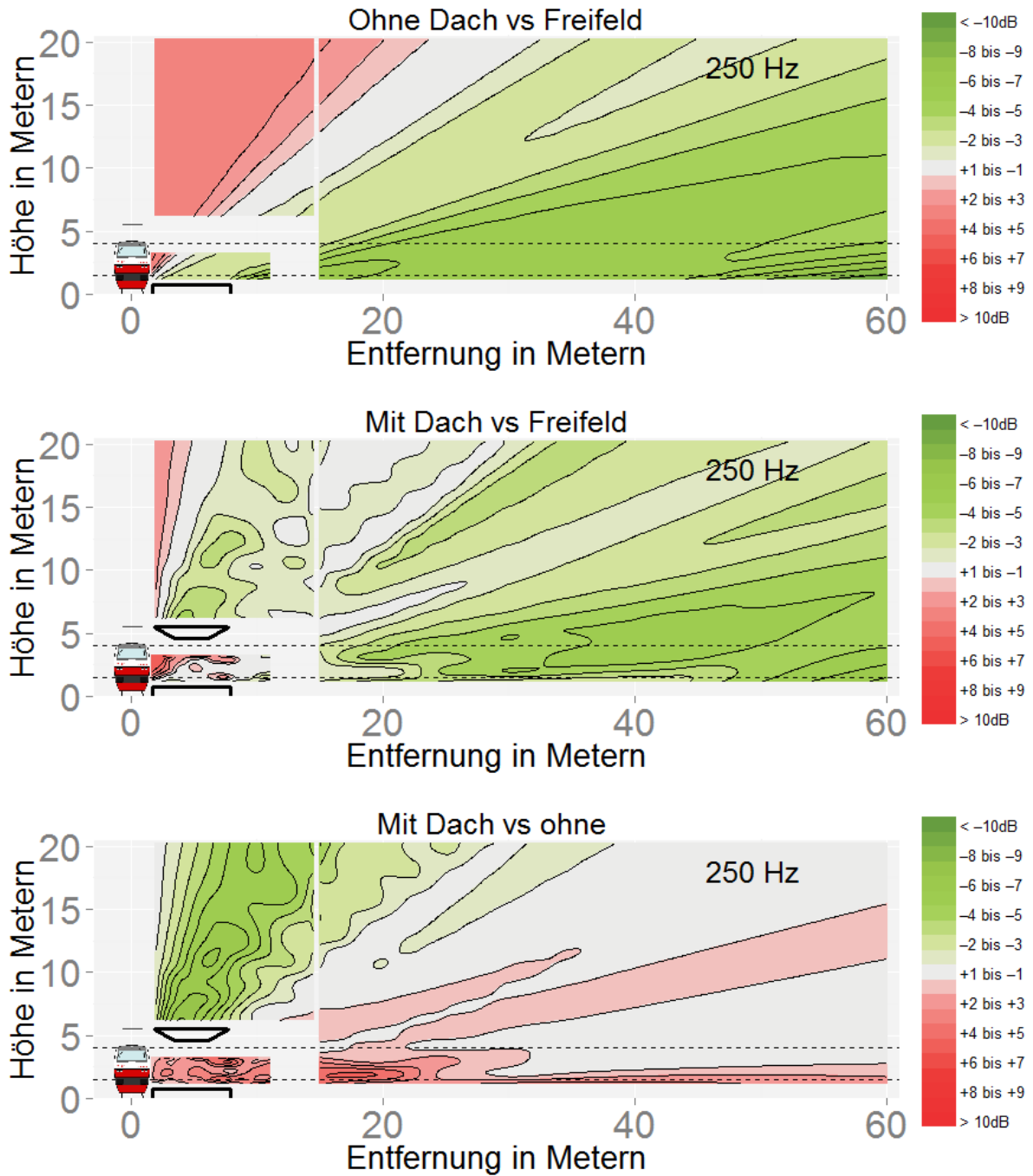


Abbildung 137

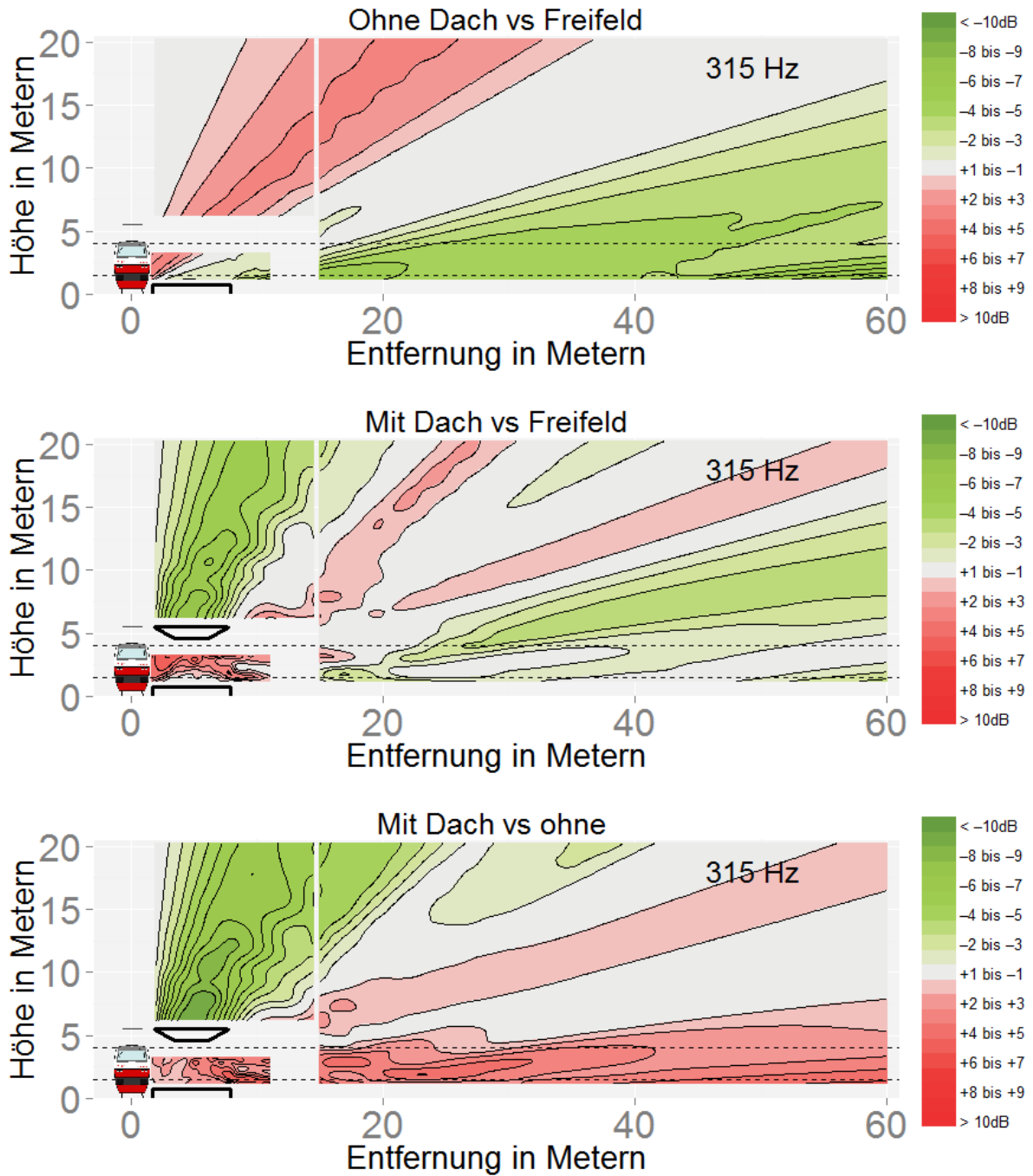


Abbildung 138

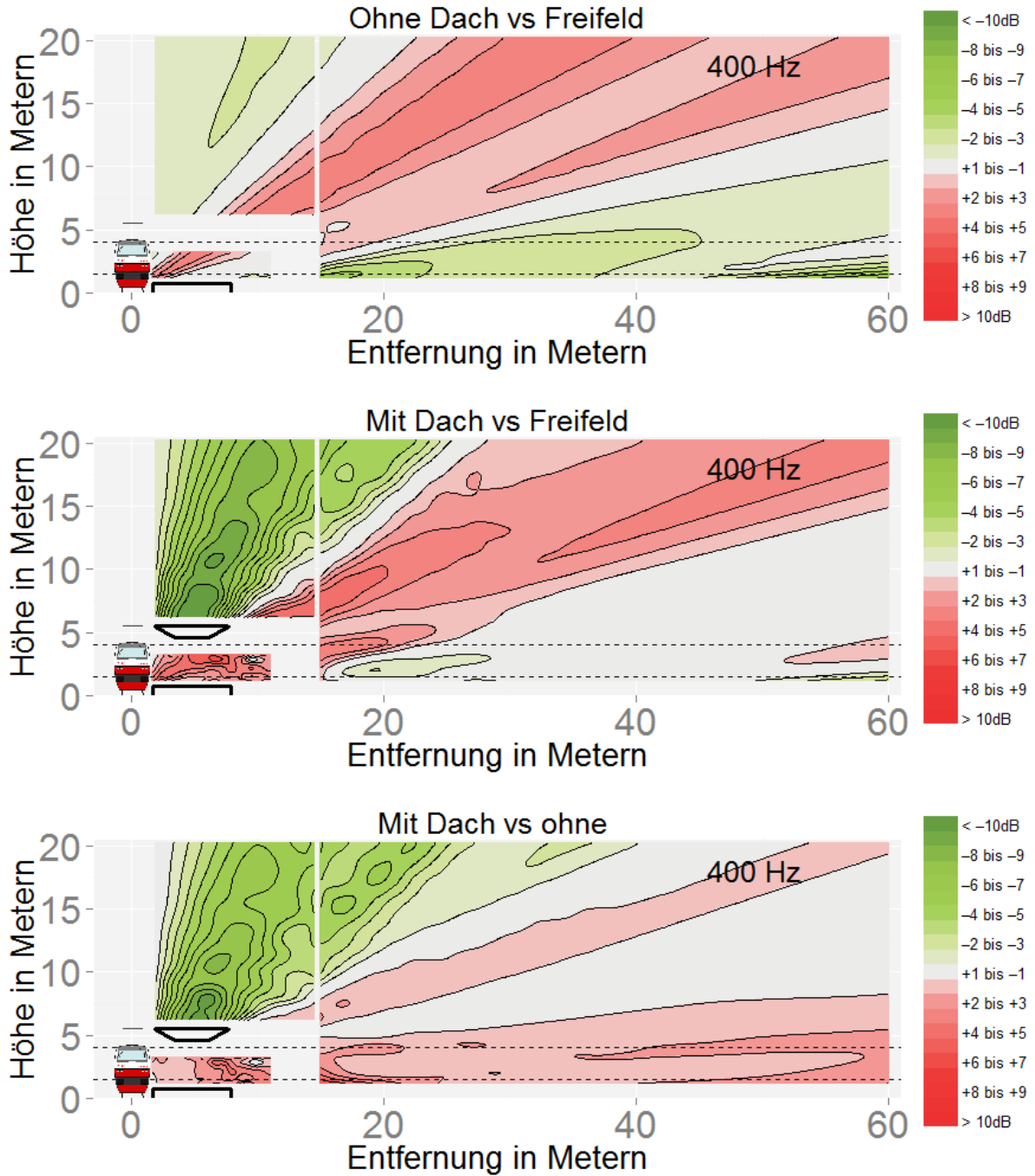


Abbildung 139

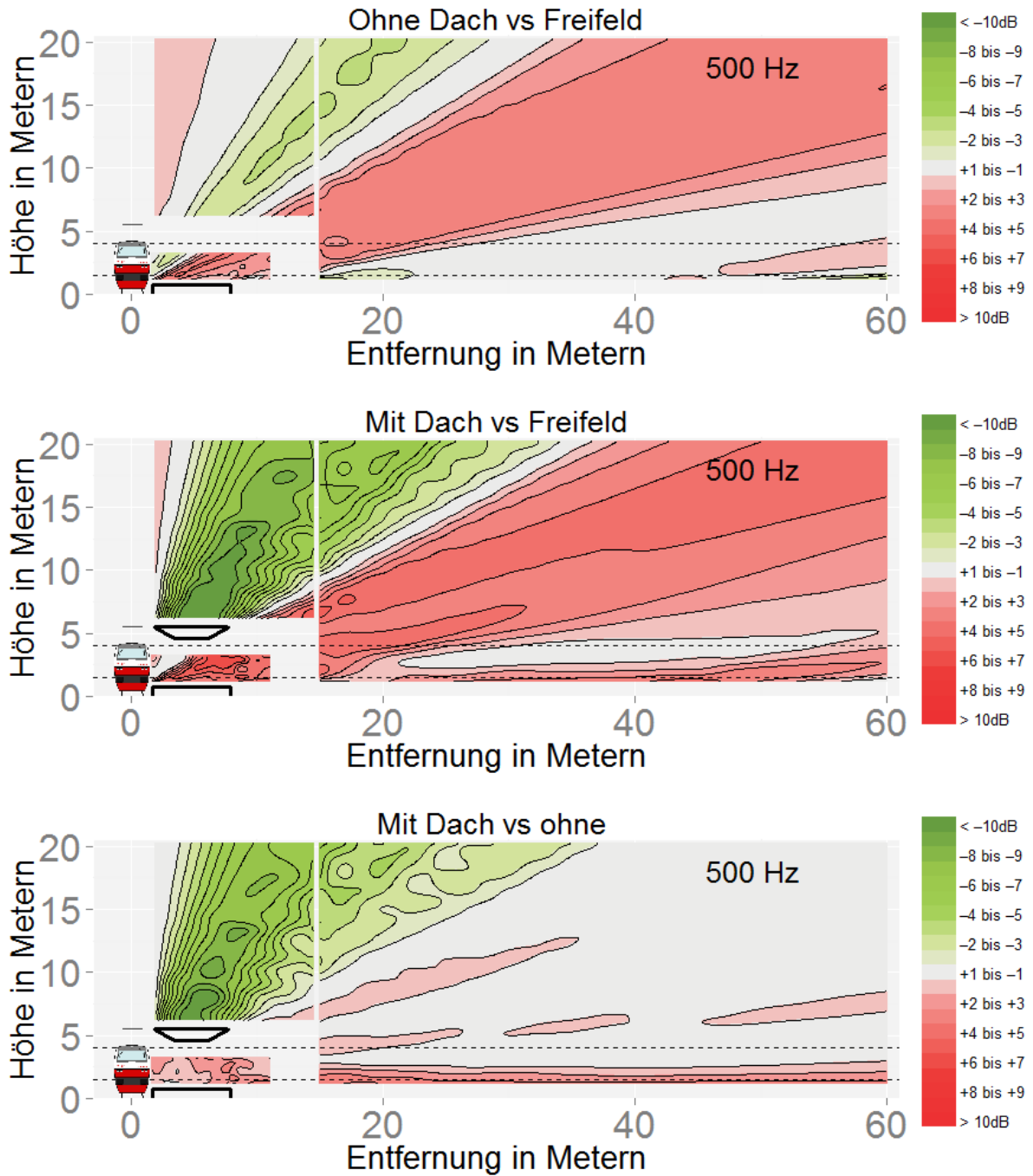


Abbildung 140

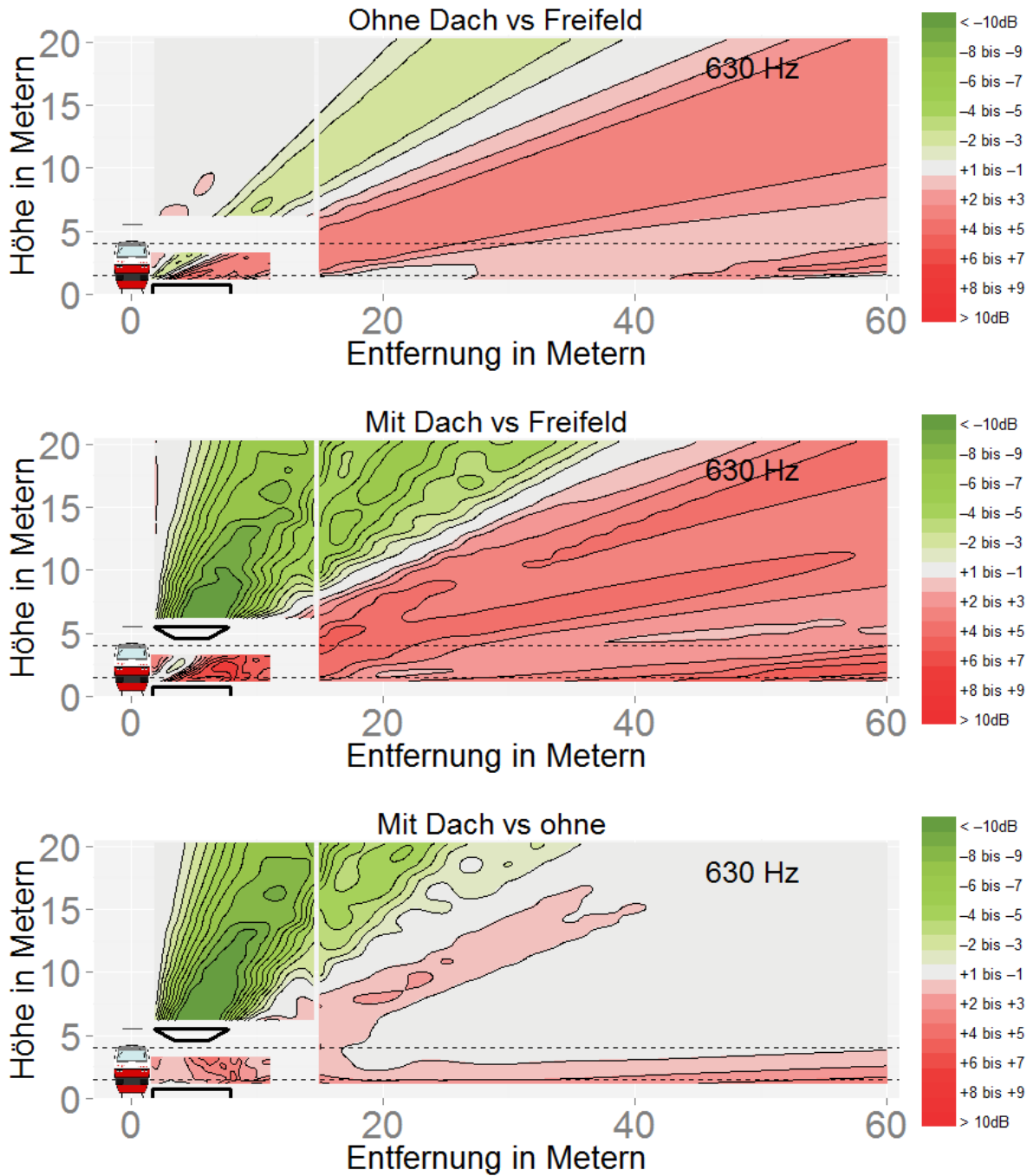


Abbildung 141

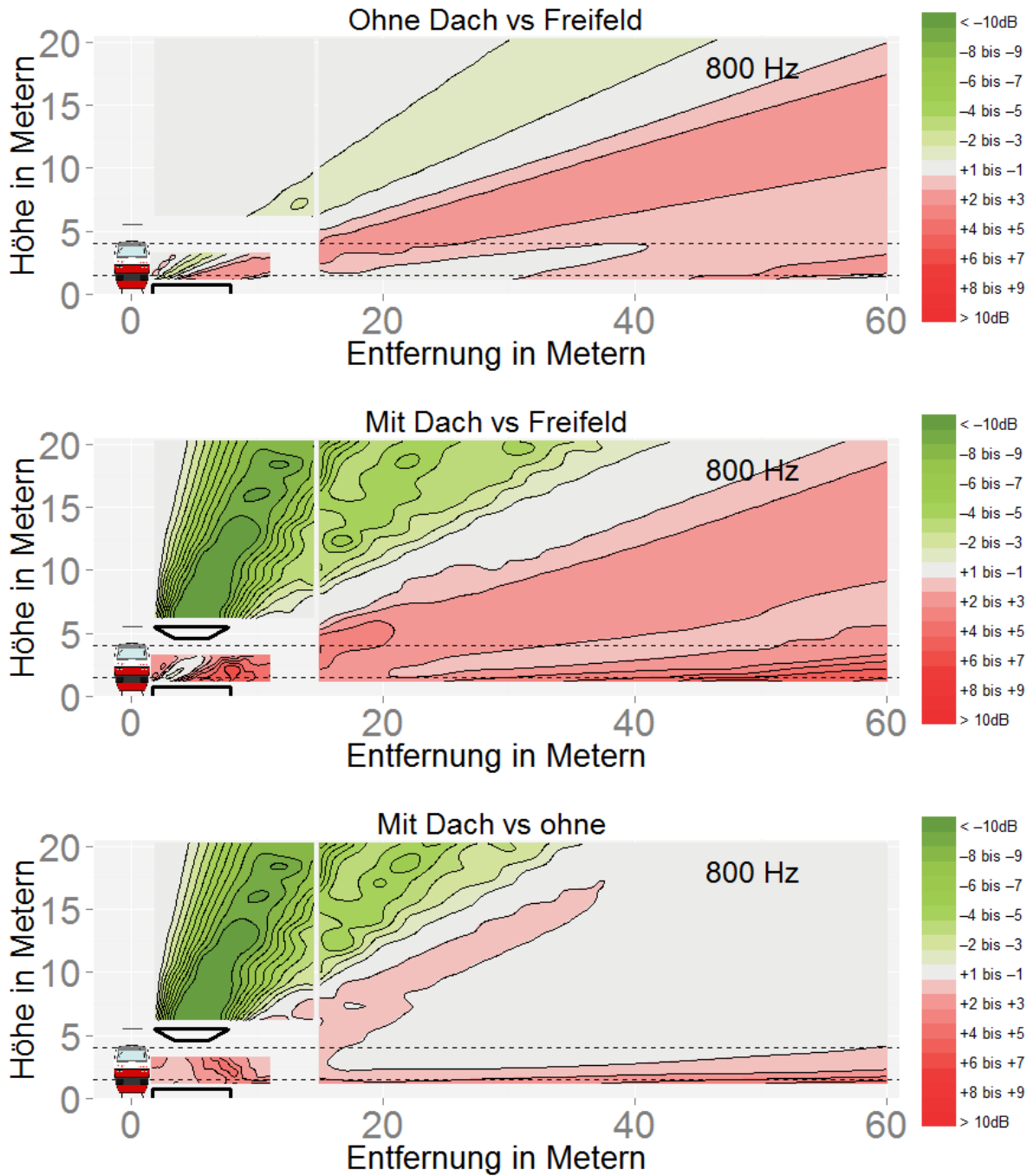


Abbildung 142

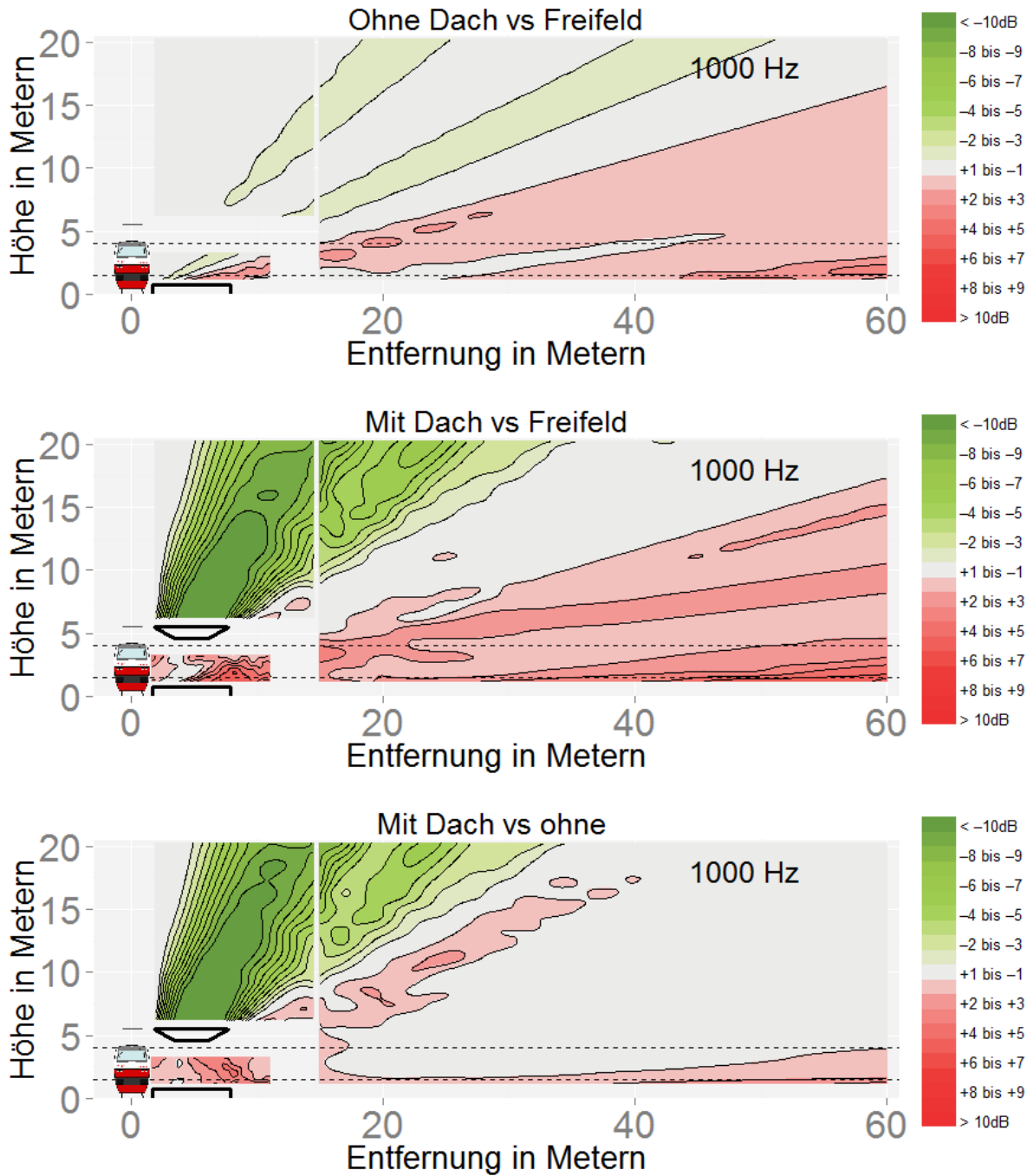


Abbildung 143

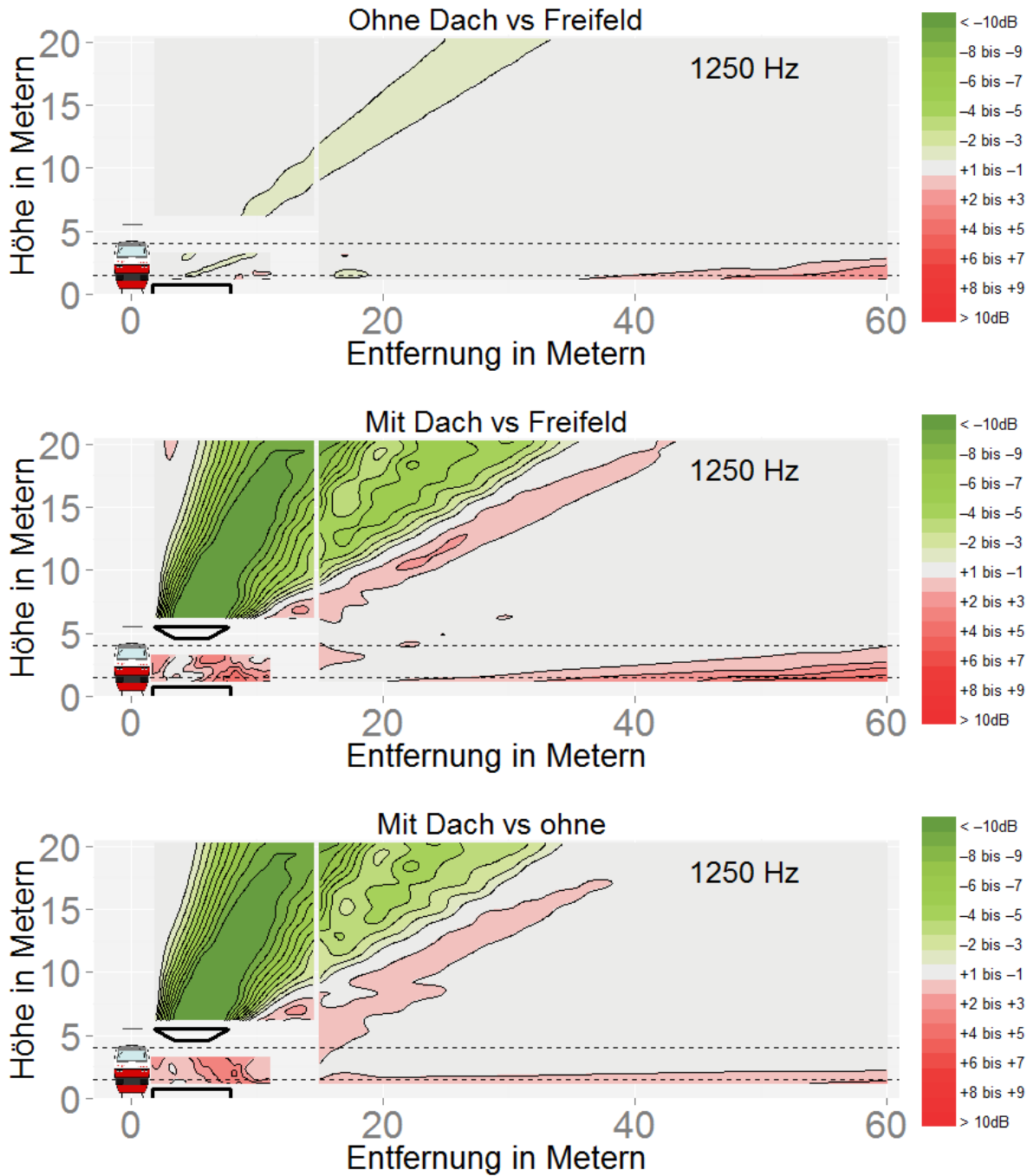


Abbildung 144

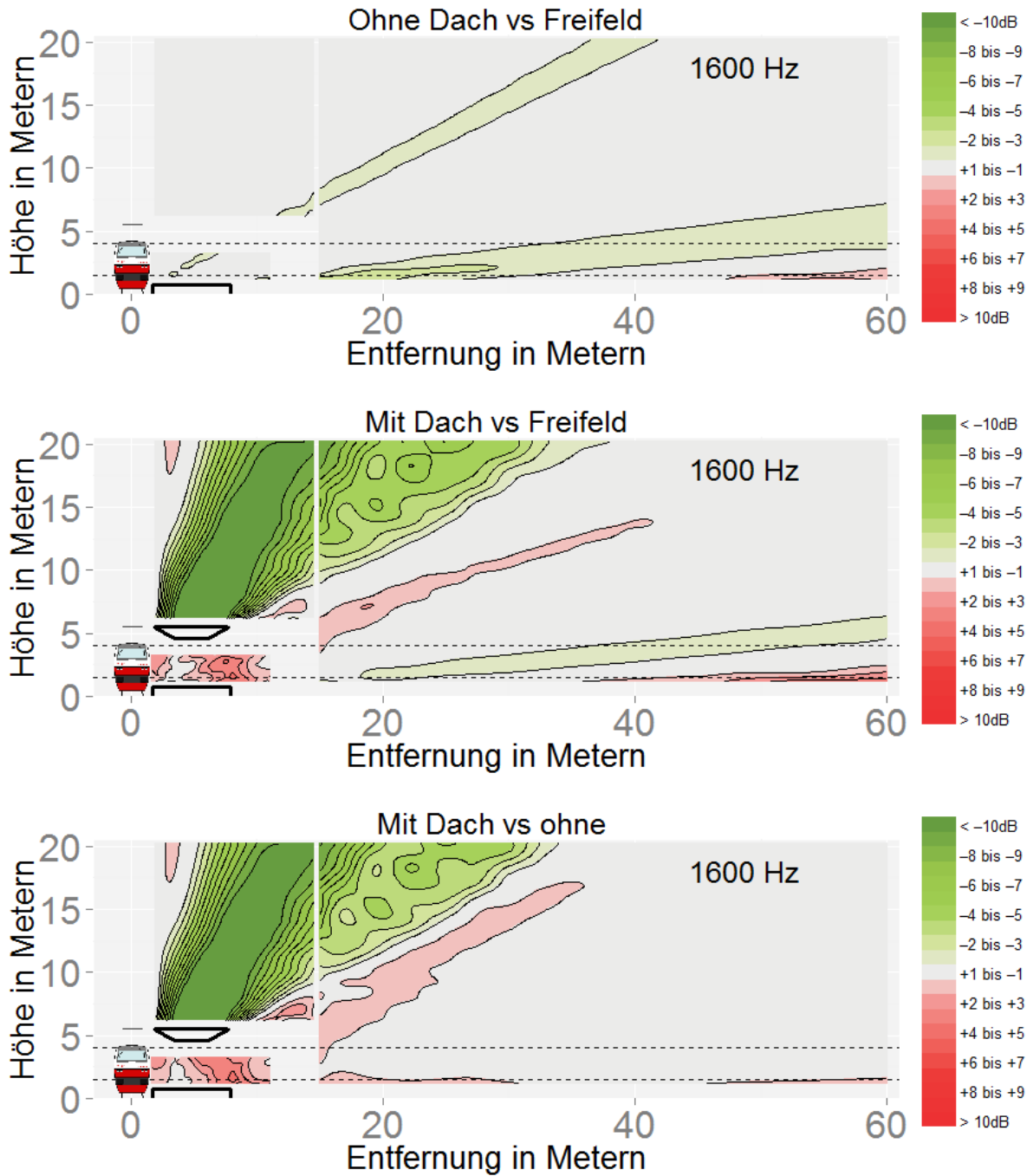


Abbildung 145

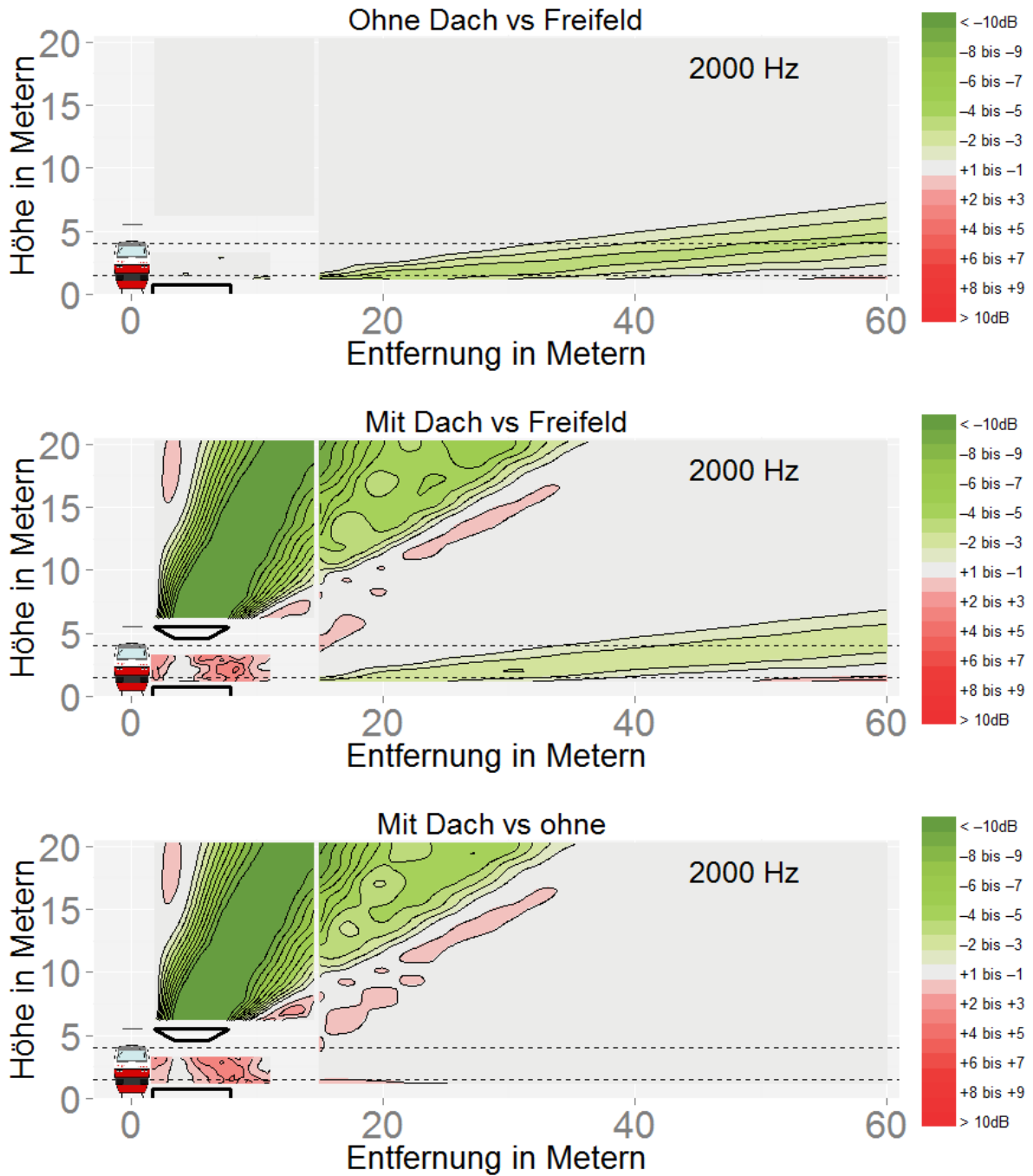


Abbildung 146

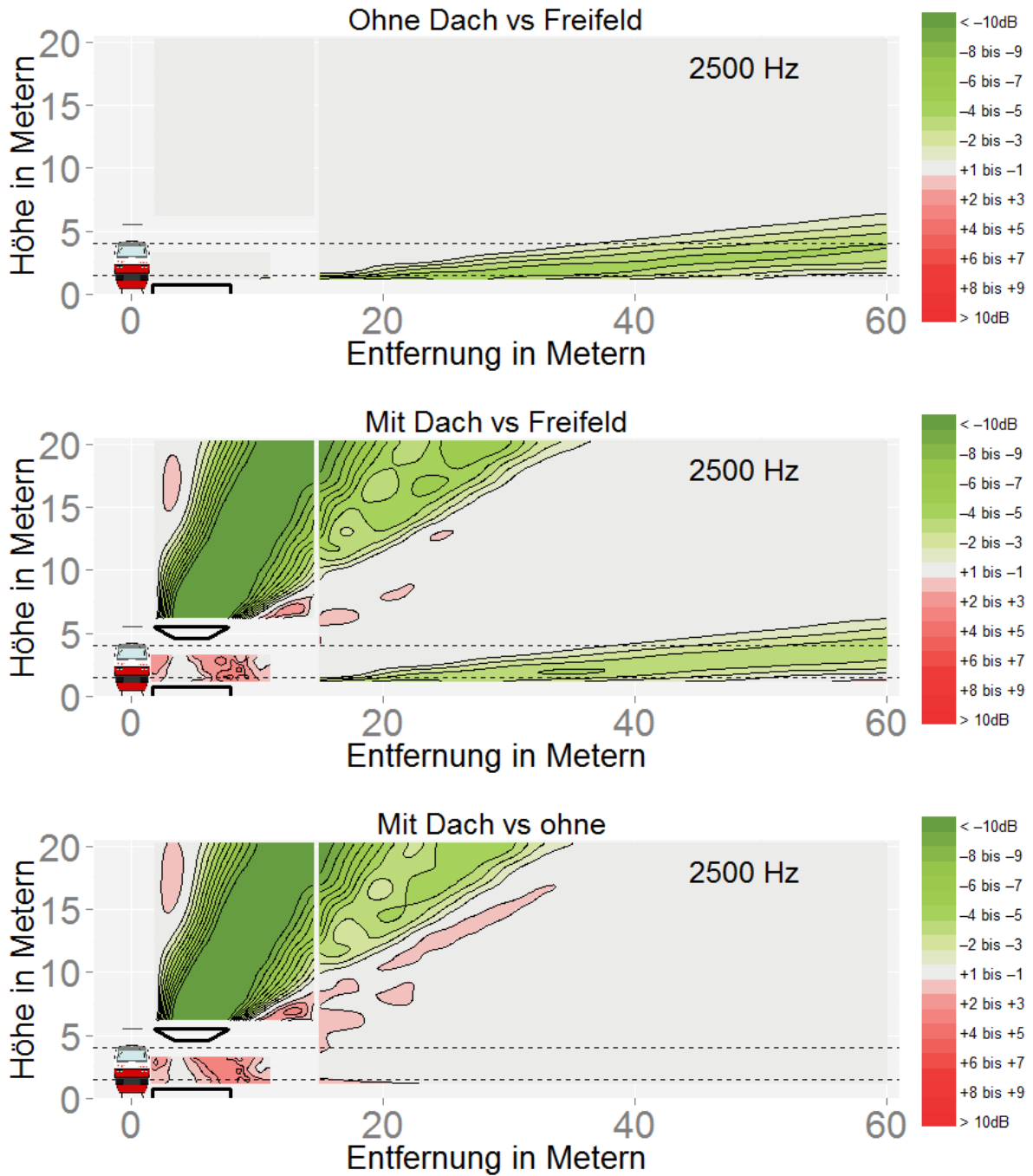


Abbildung 147

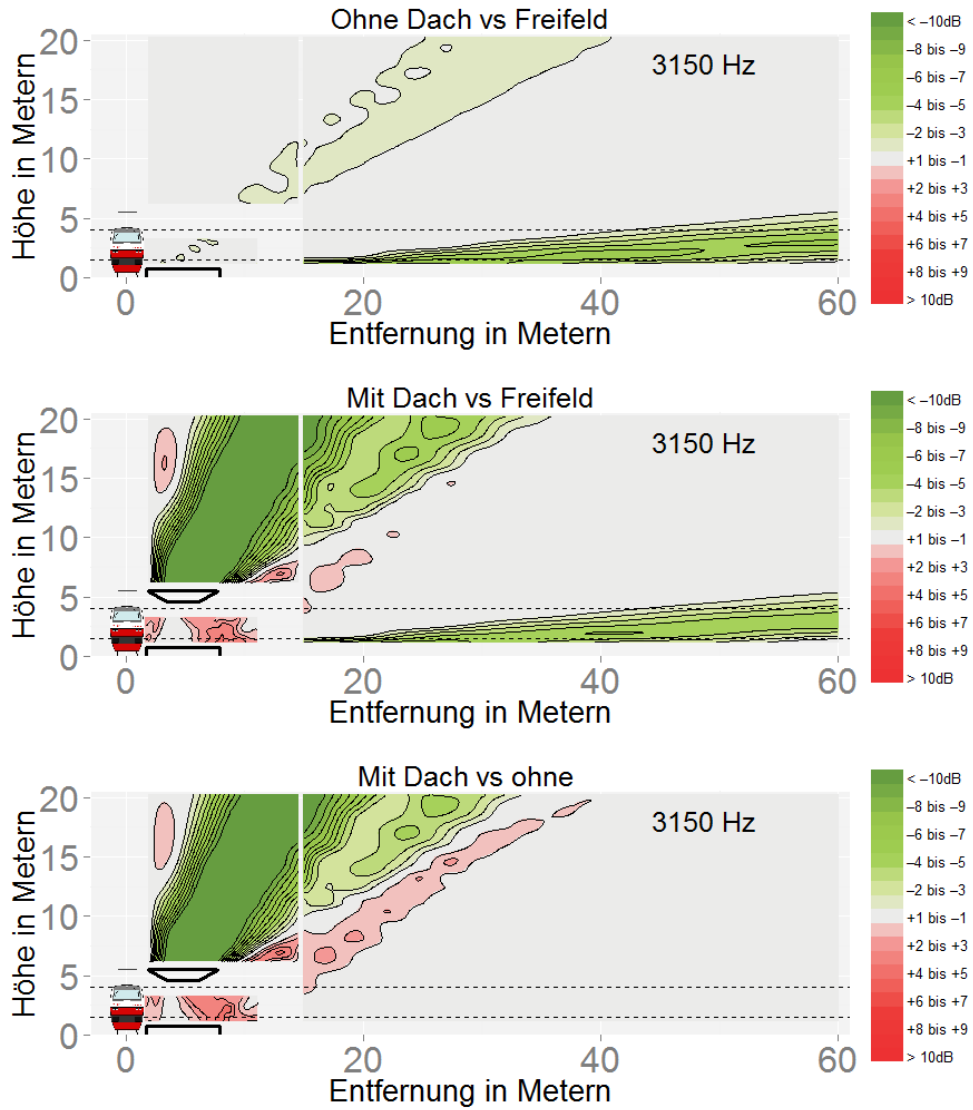


Abbildung 148

D.2: Effekt des breiten Bahnsteigs mit und ohne Dach

Dargestellt sind die Dritteloktavbandpegel für den Vergleich sowohl zwischen dem breiten Bahnsteig ohne Dach (obere Grafik) als auch mit reflektierendem Dach (mittlere Grafik) im Vergleich zur freien Schallausbreitung für den absorbierenden Boden. Der Einfluss des Daches wird in der unteren Grafik dargestellt.

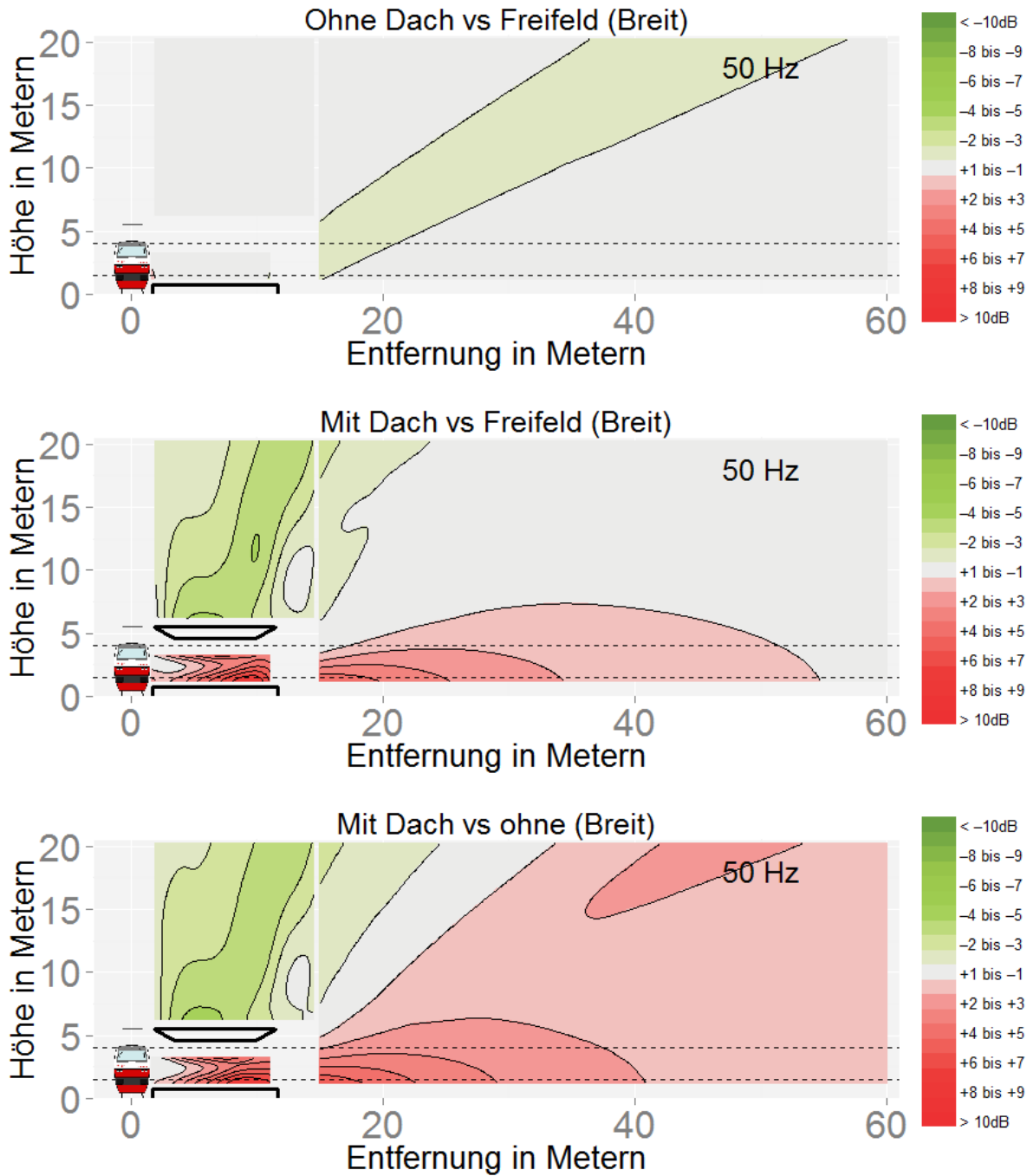


Abbildung 149

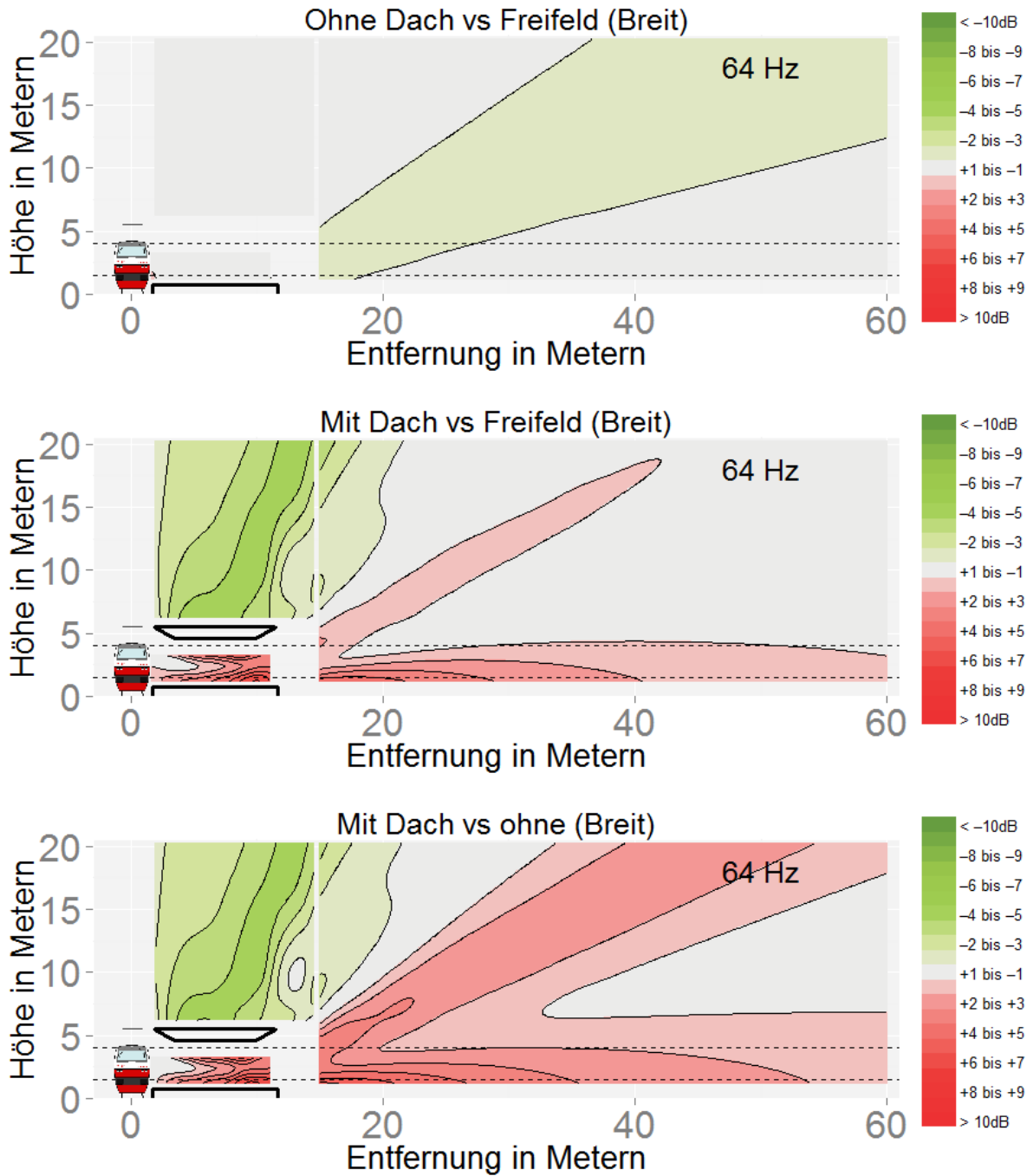


Abbildung 150

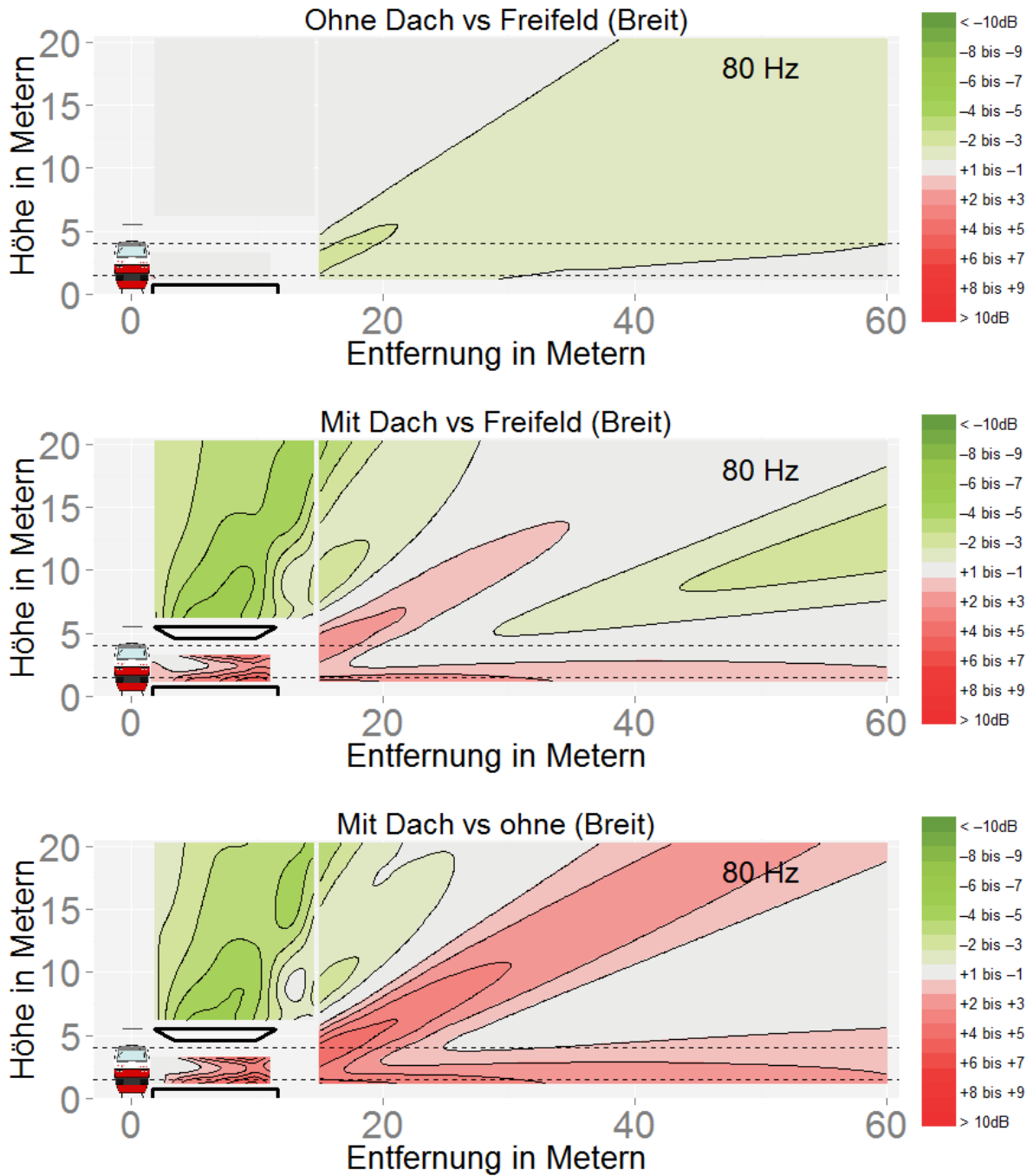


Abbildung 151

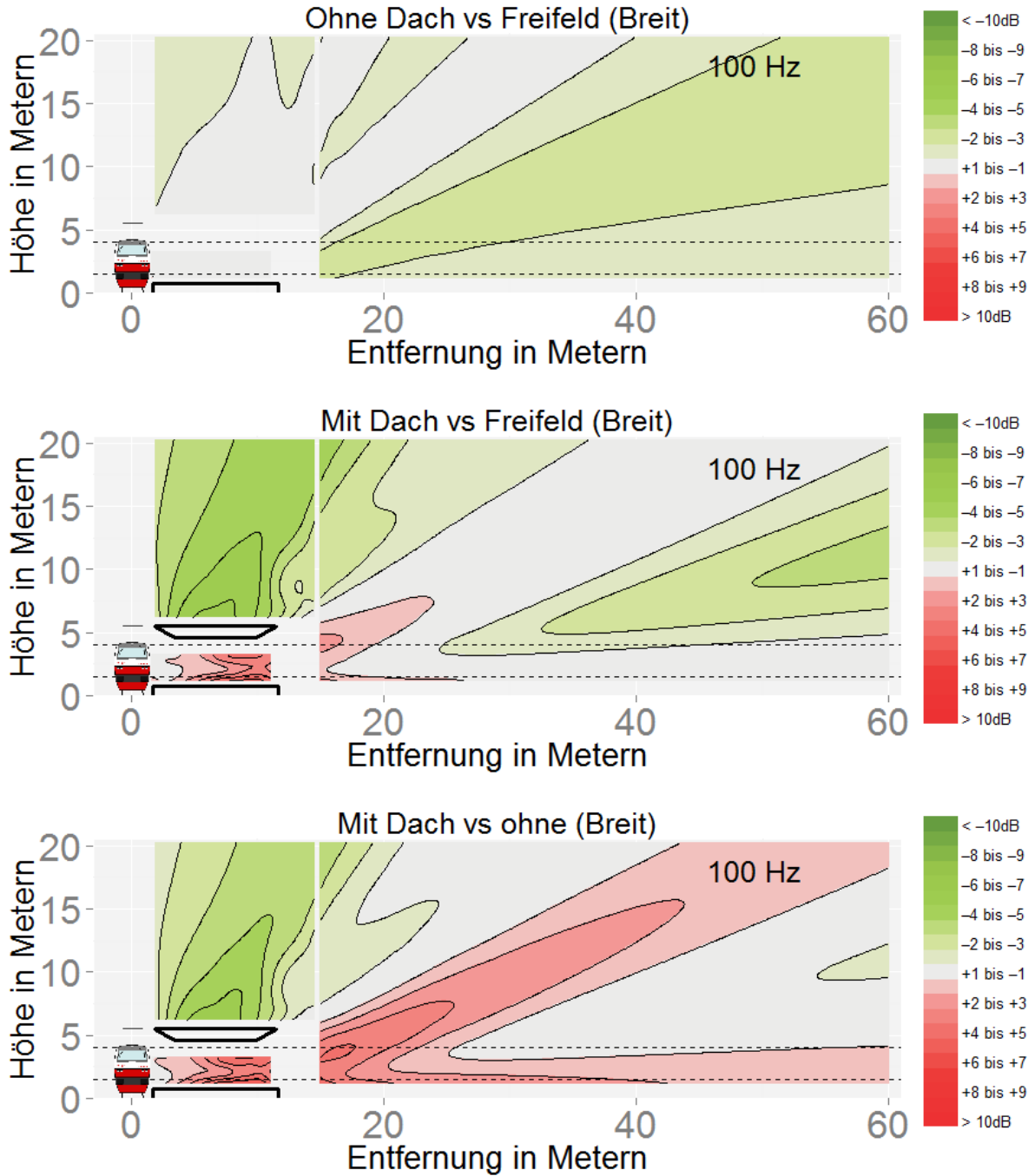


Abbildung 152

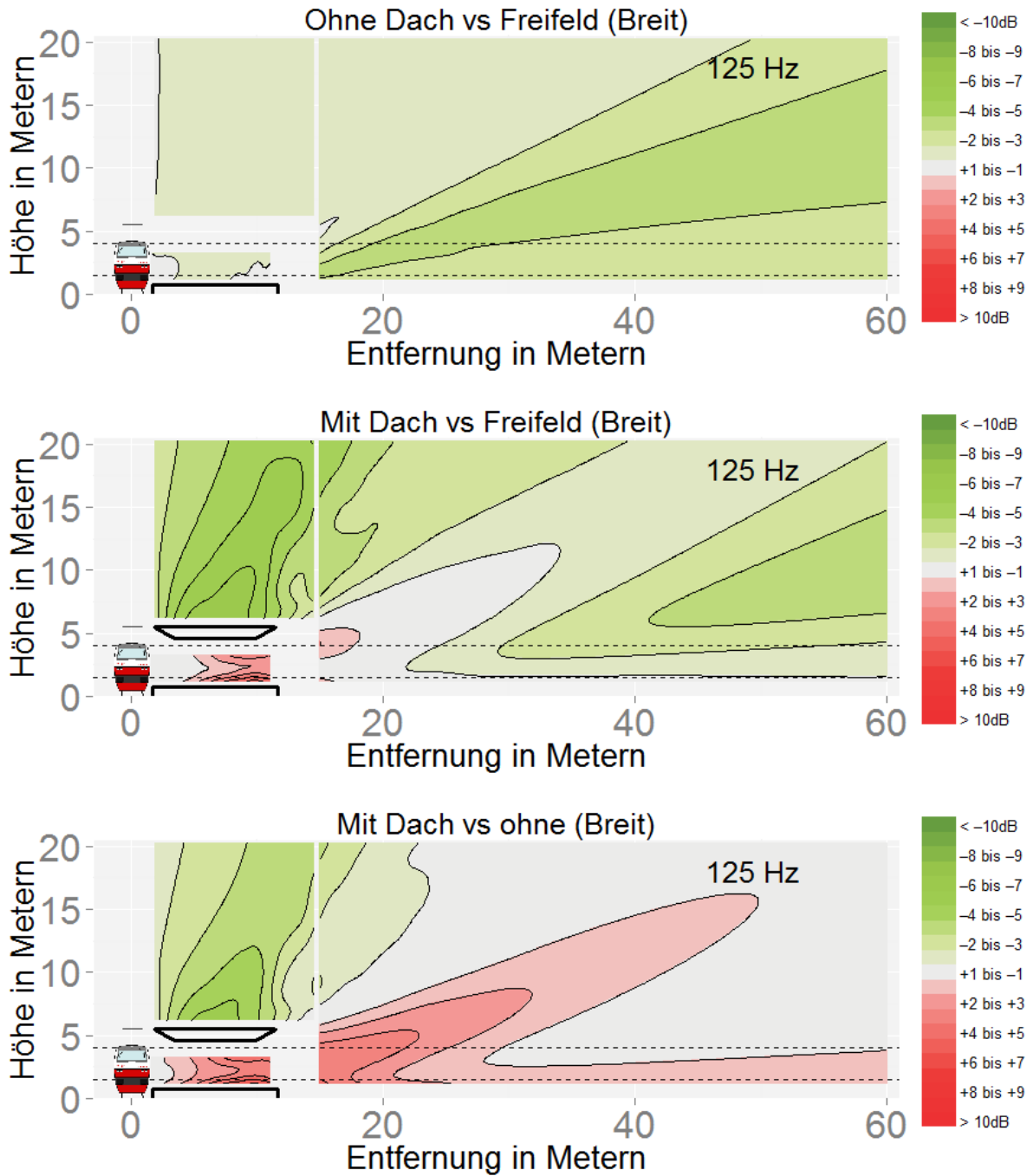


Abbildung 153

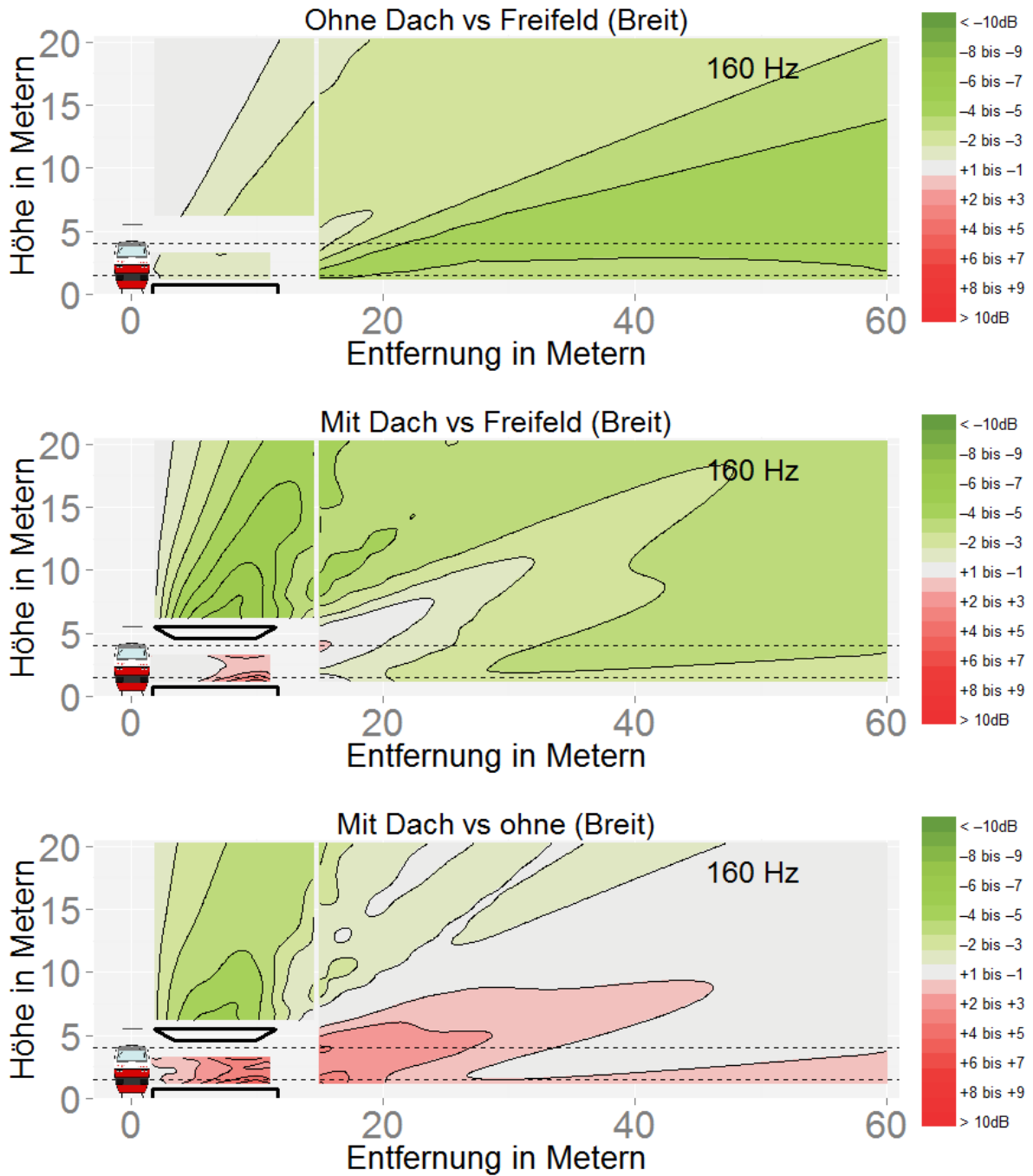


Abbildung 154

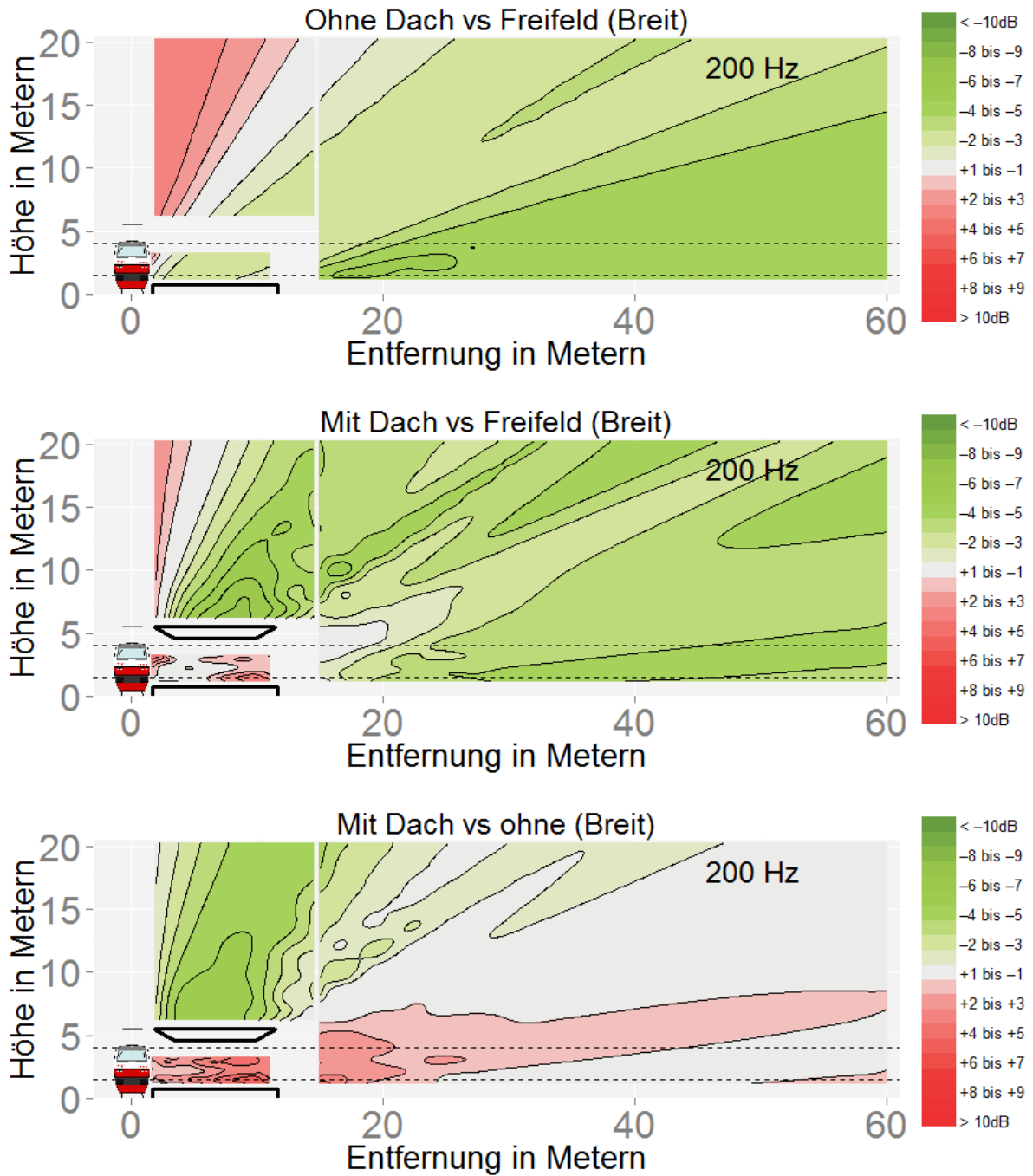


Abbildung 155

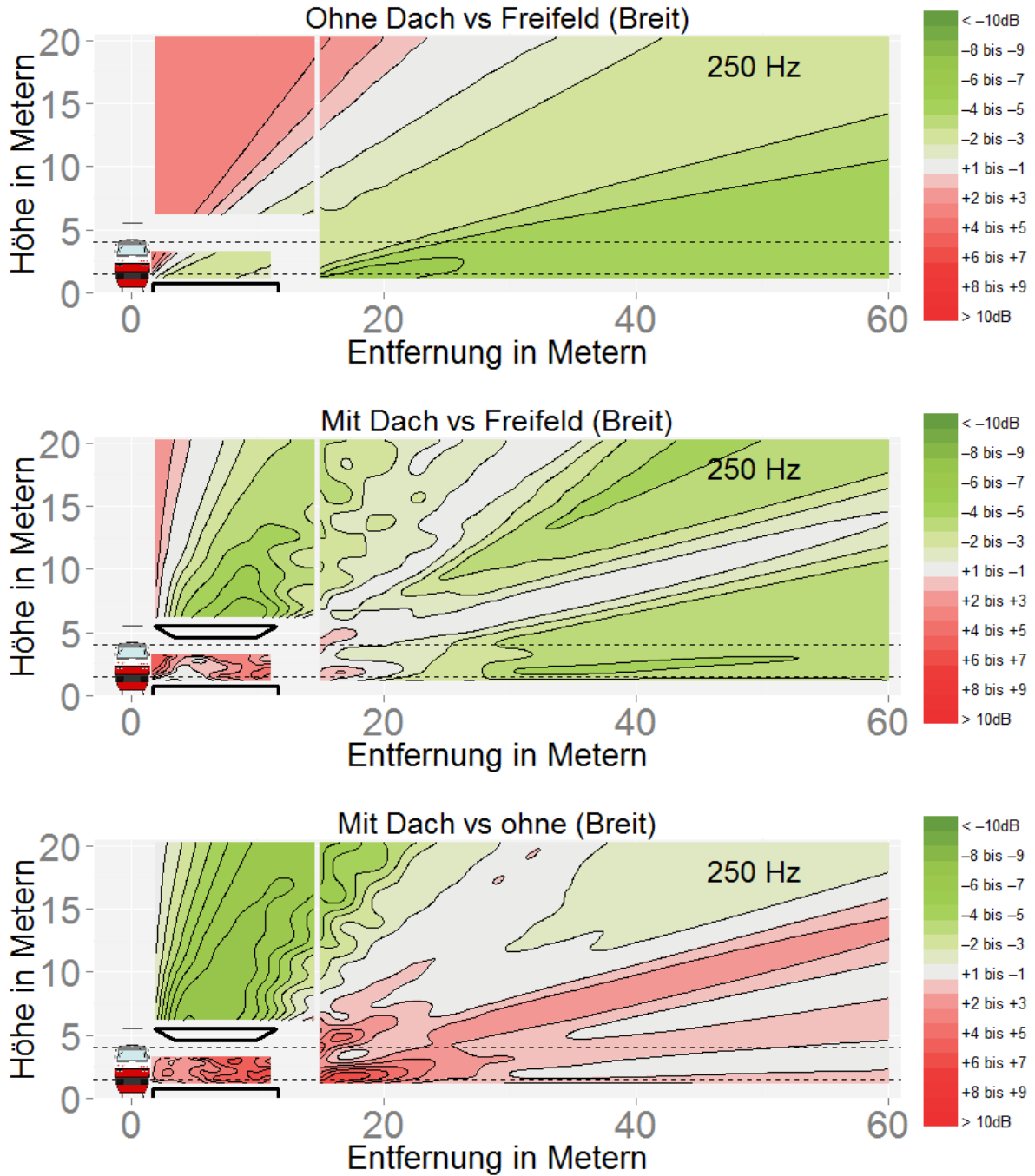


Abbildung 156

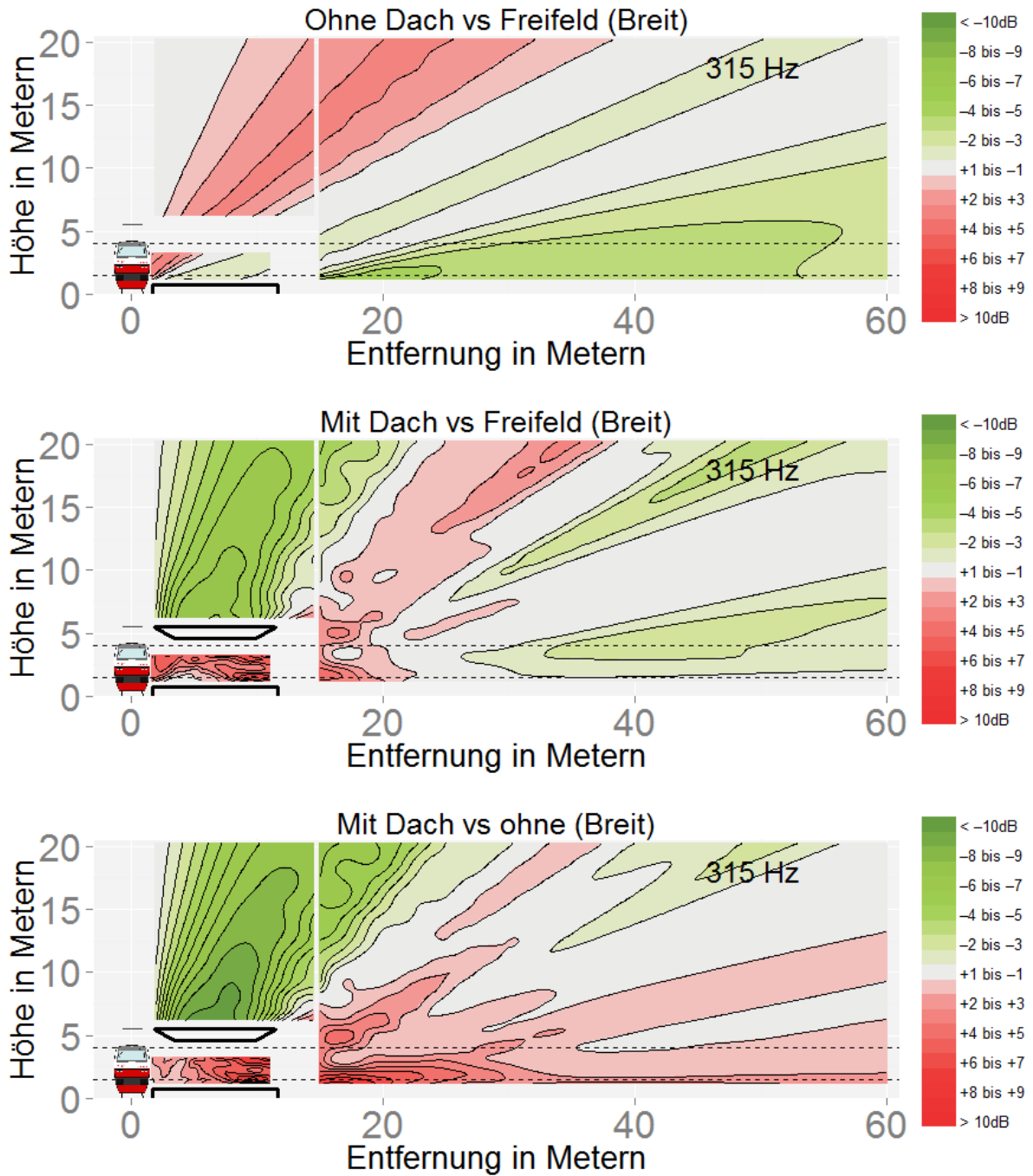


Abbildung 157

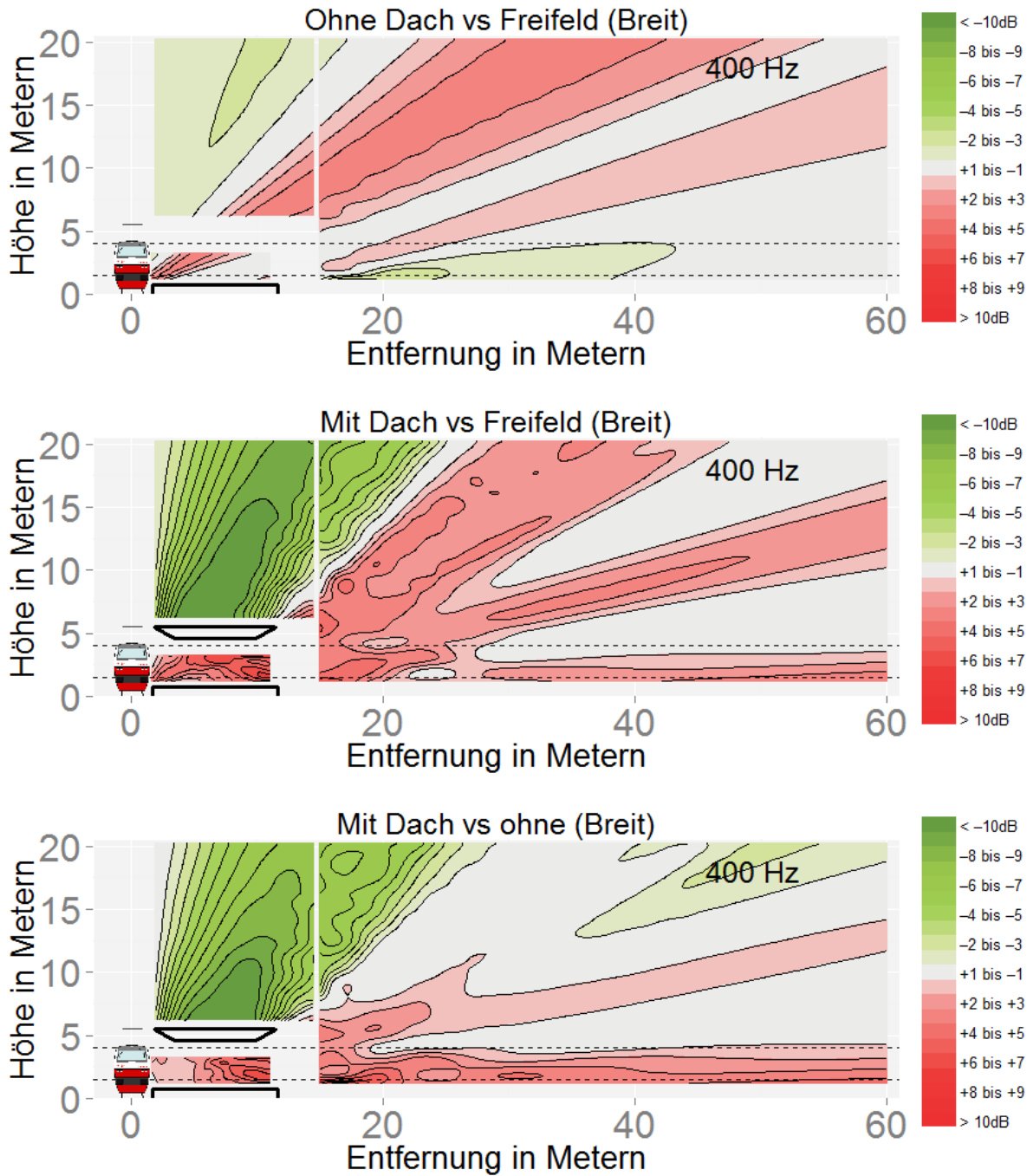


Abbildung 158

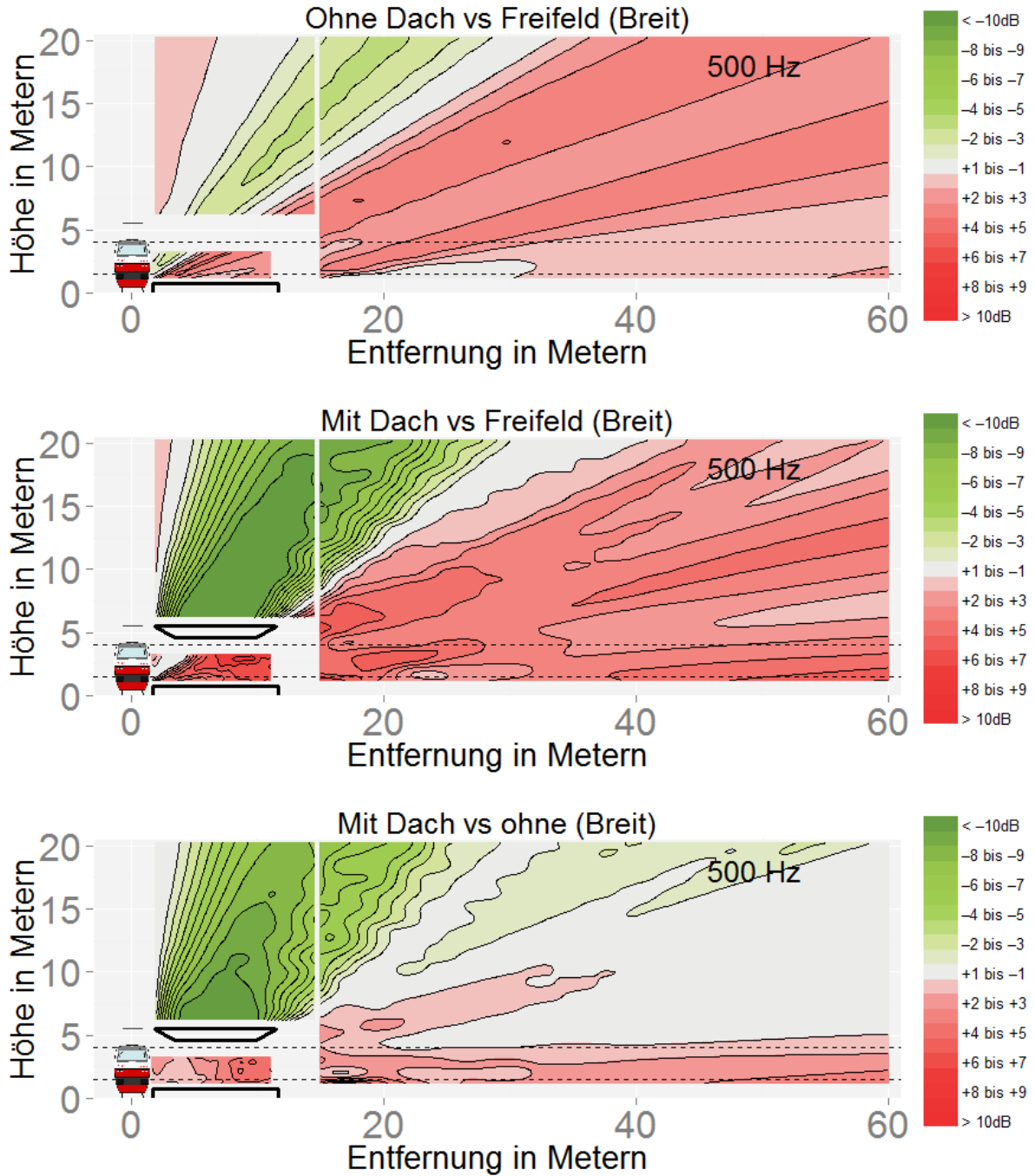


Abbildung 159

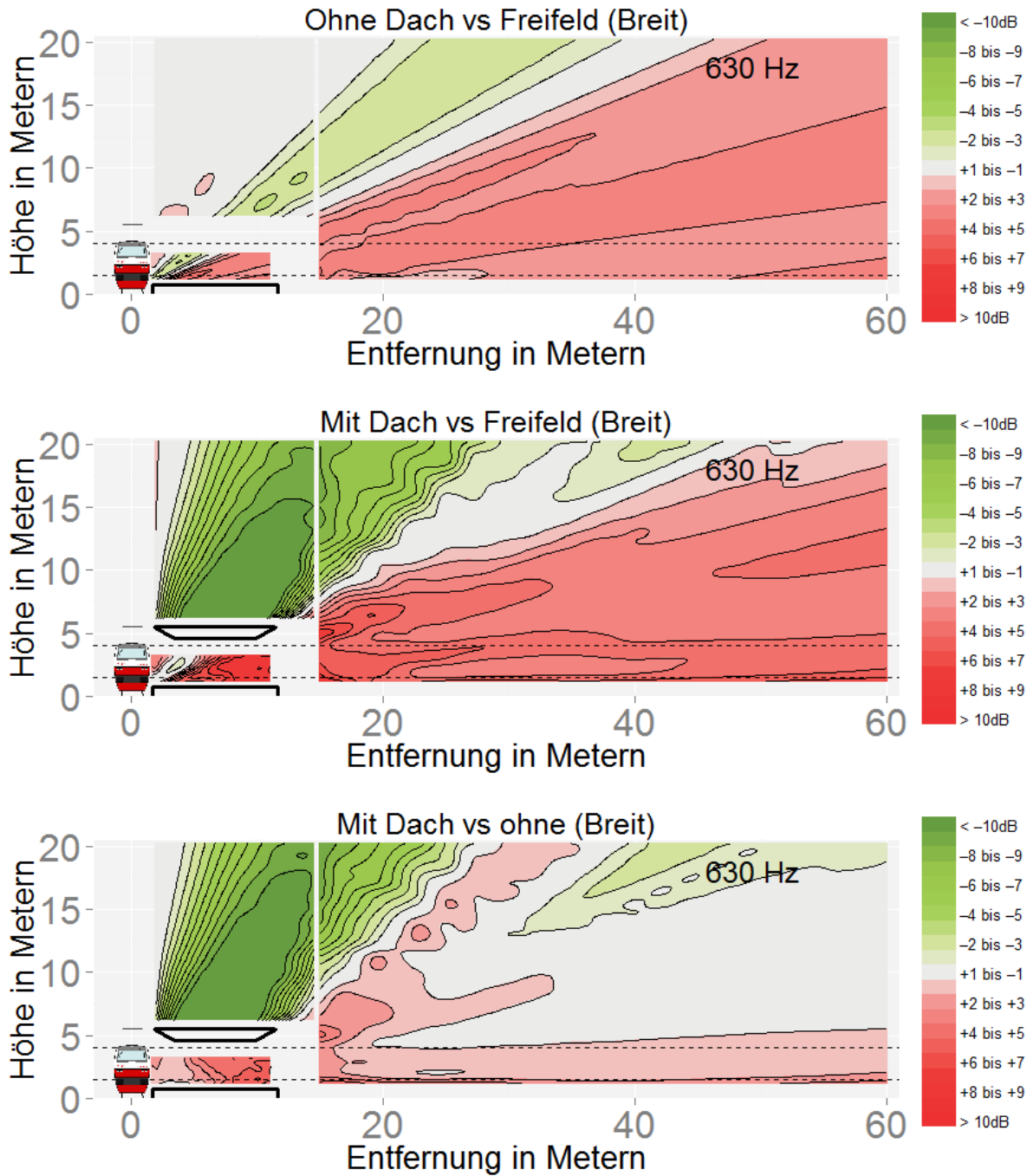


Abbildung 160

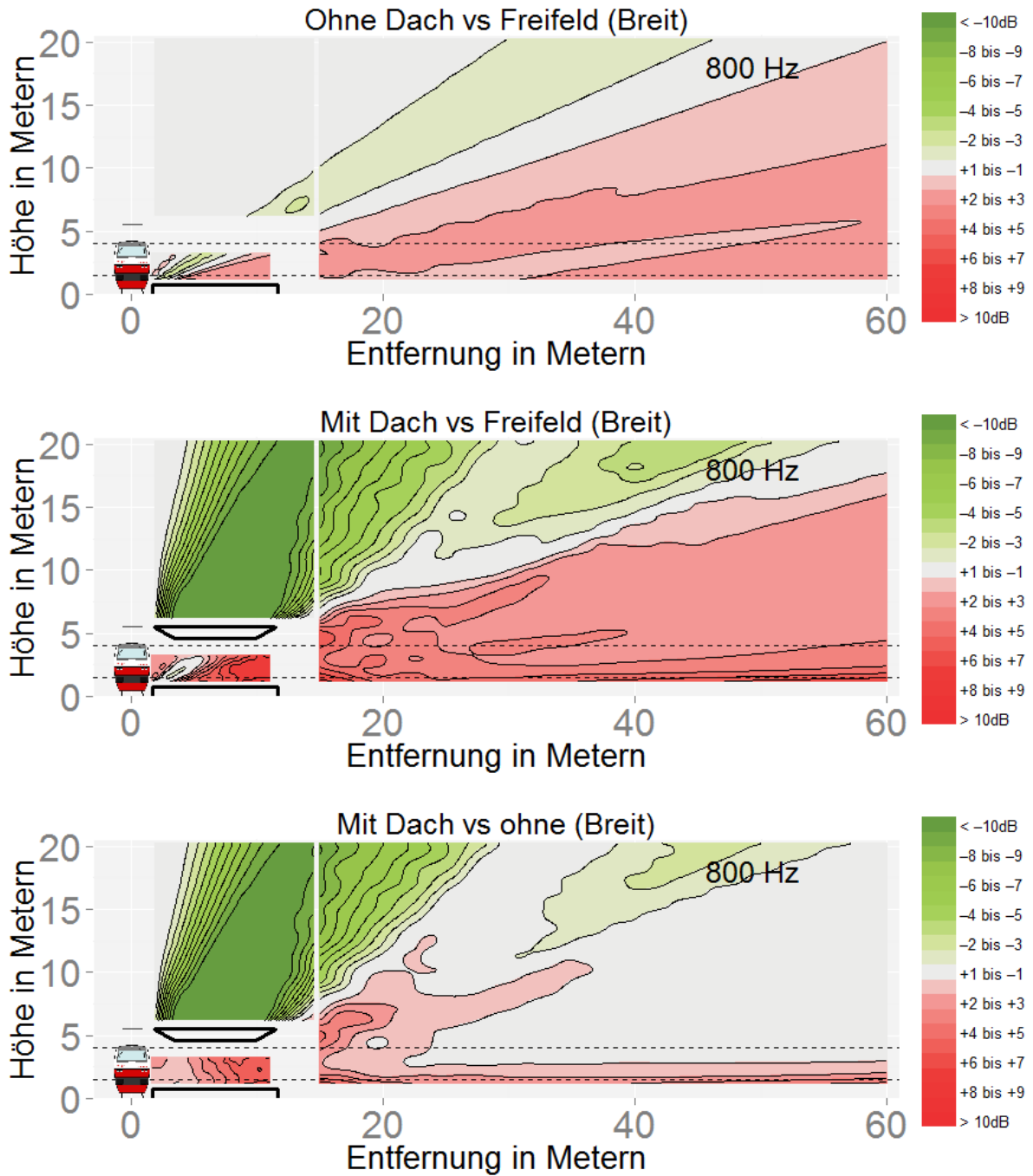


Abbildung 161

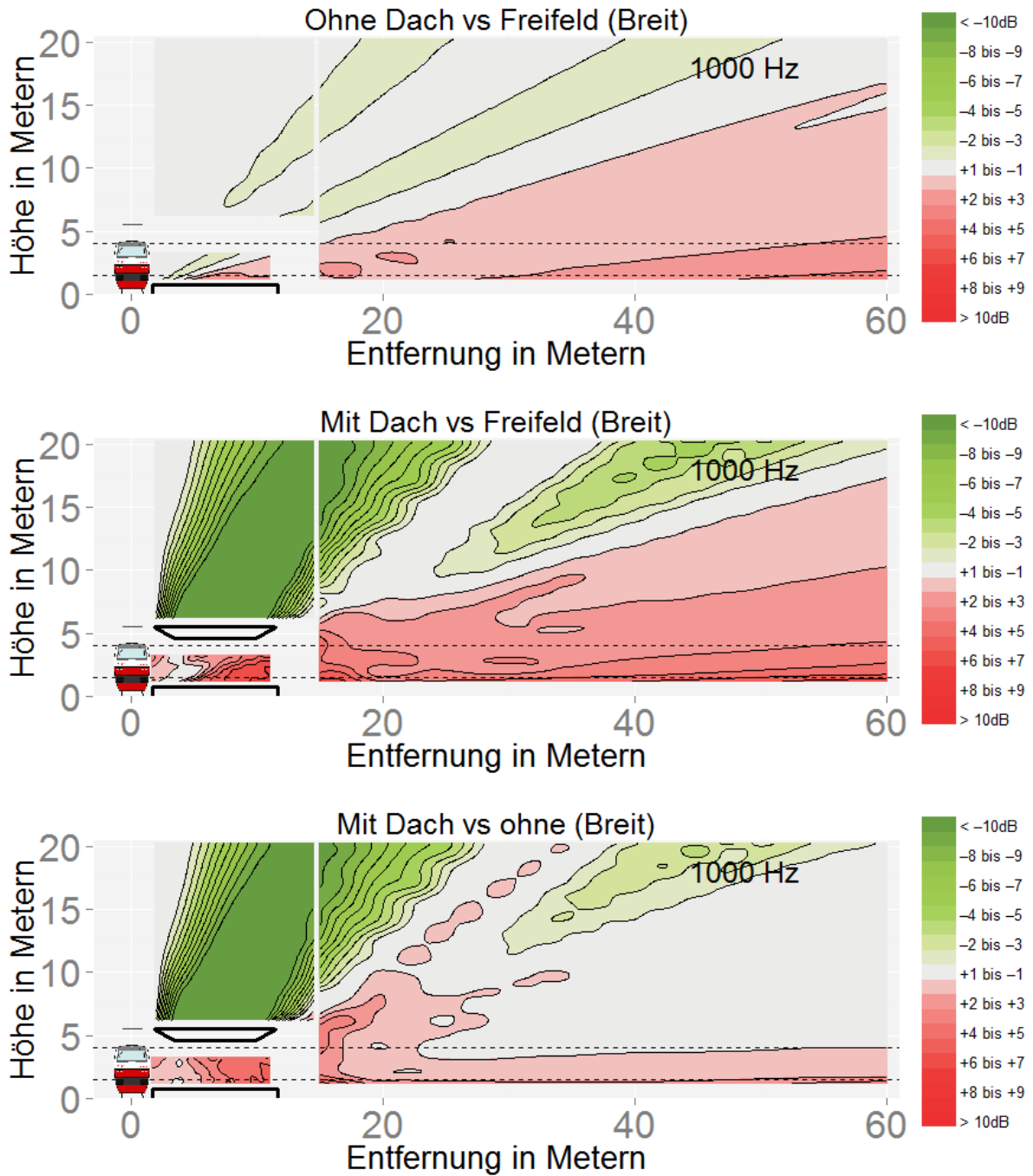


Abbildung 162

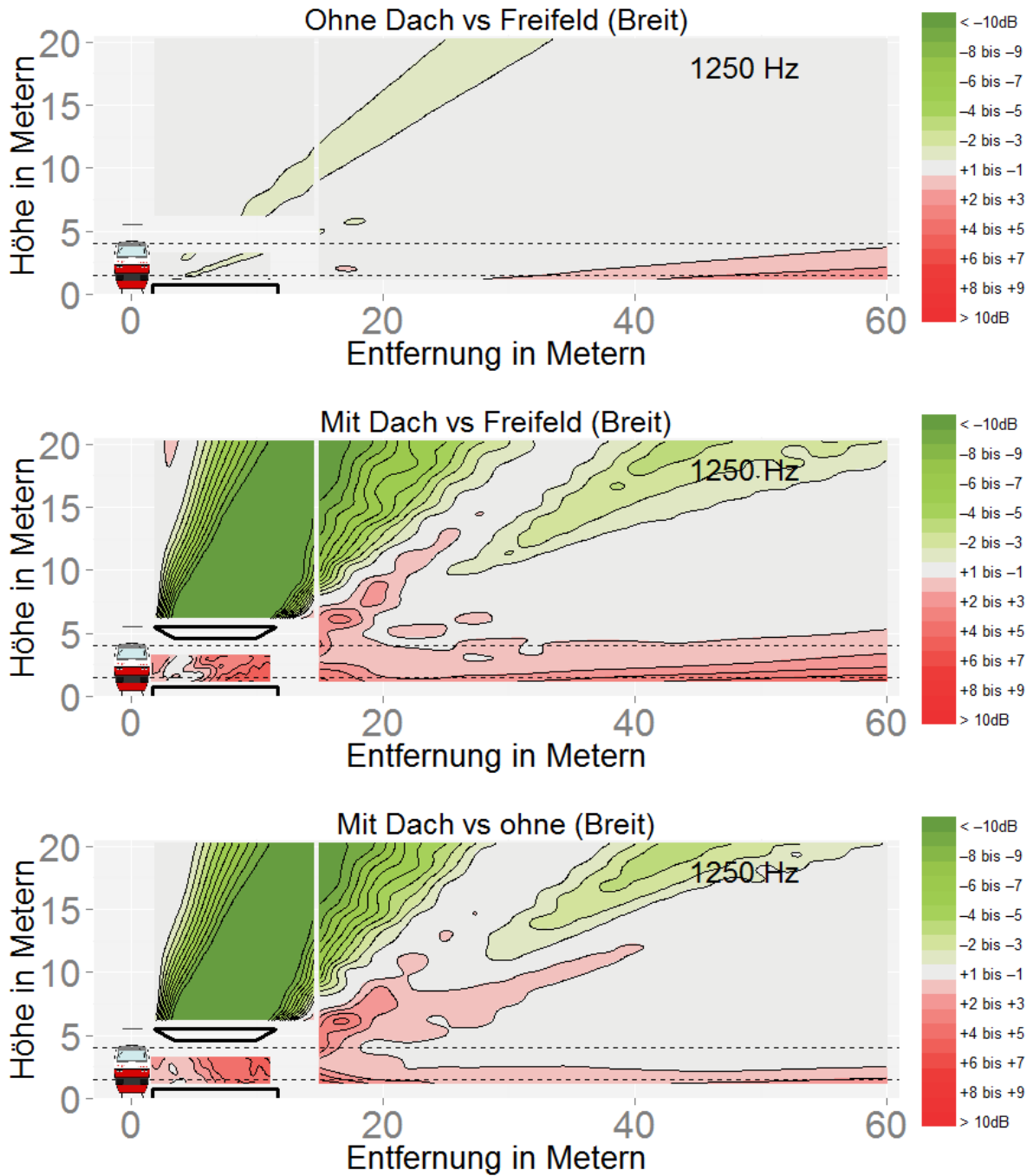


Abbildung 163

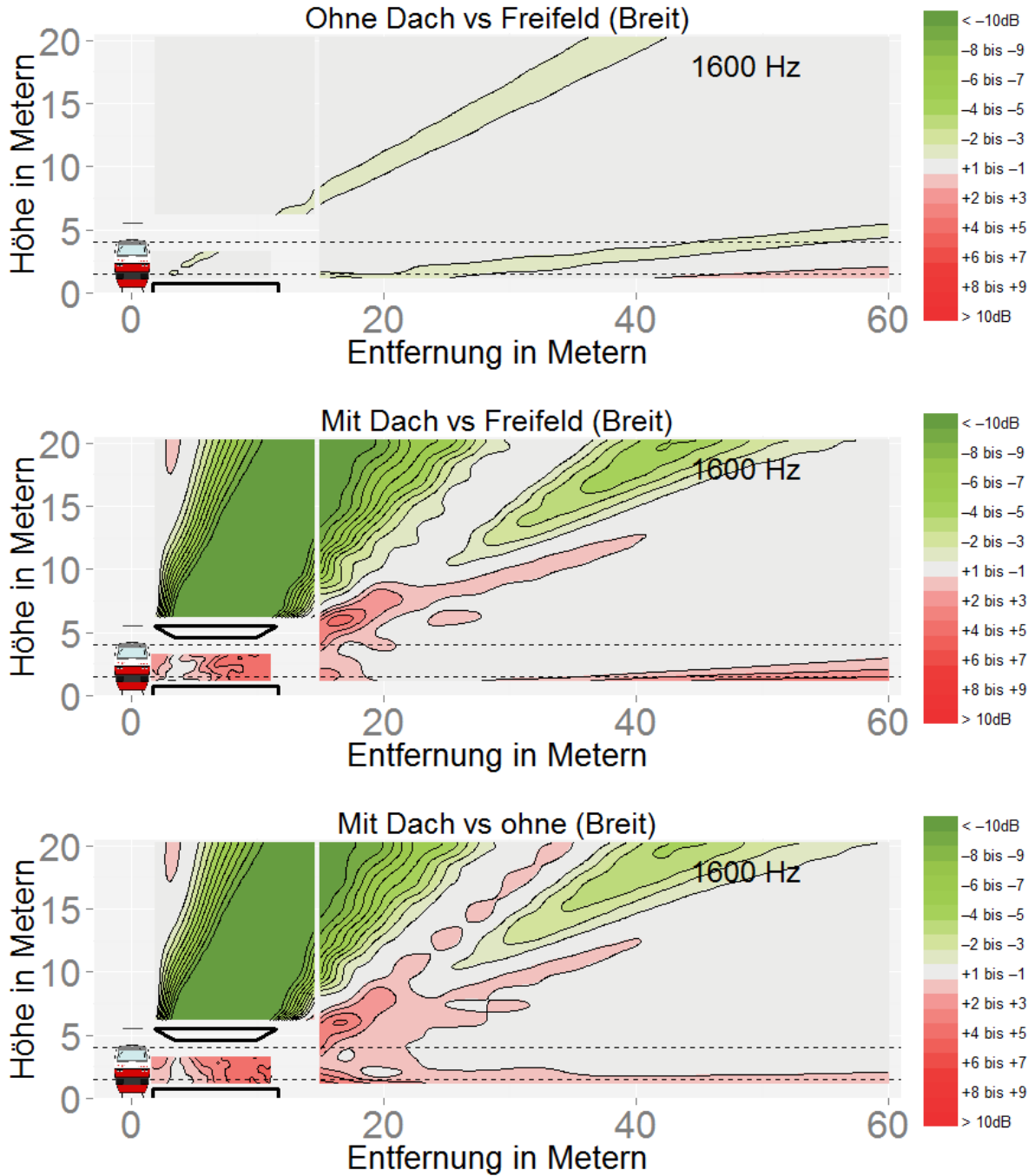


Abbildung 164

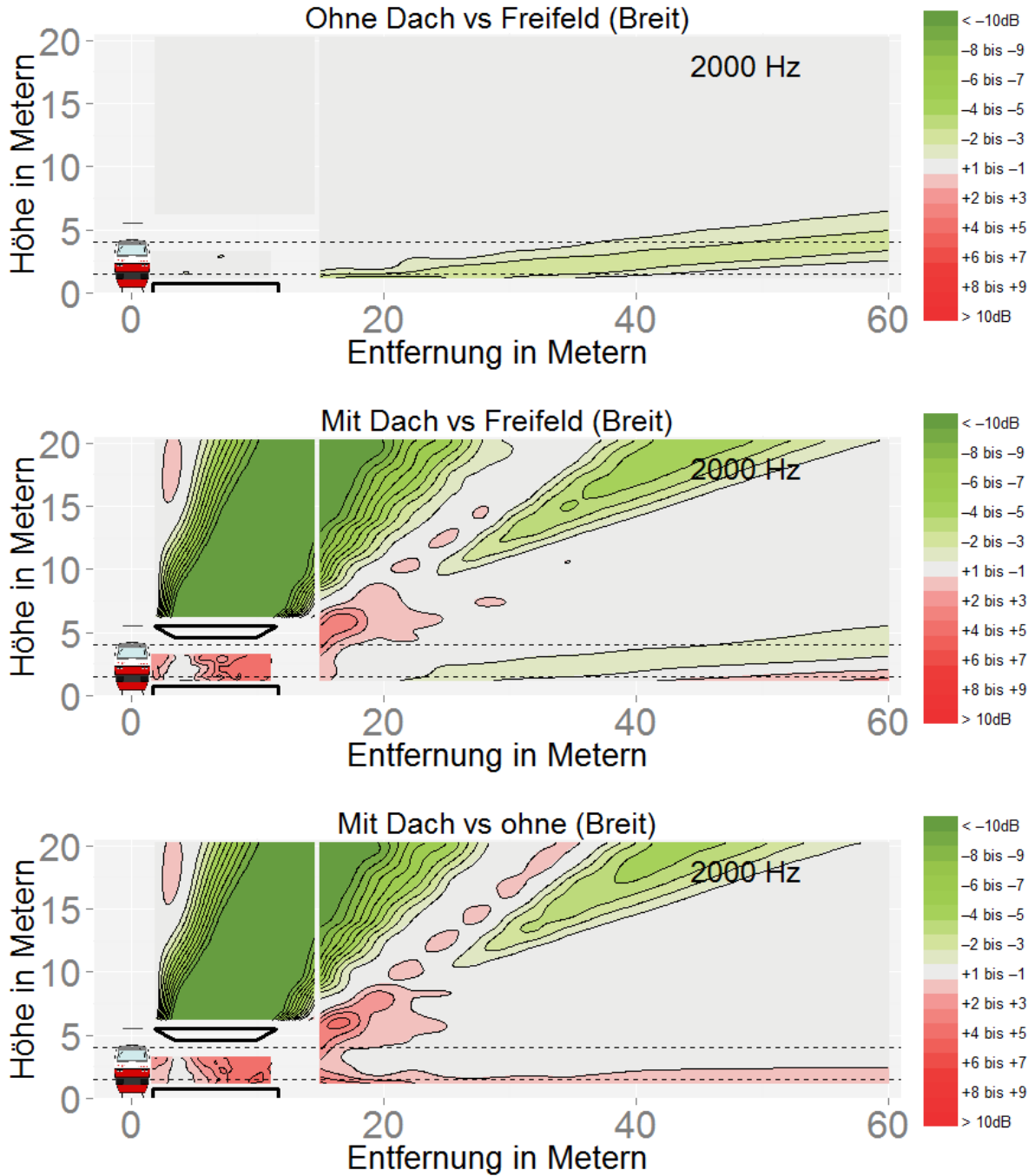


Abbildung 165

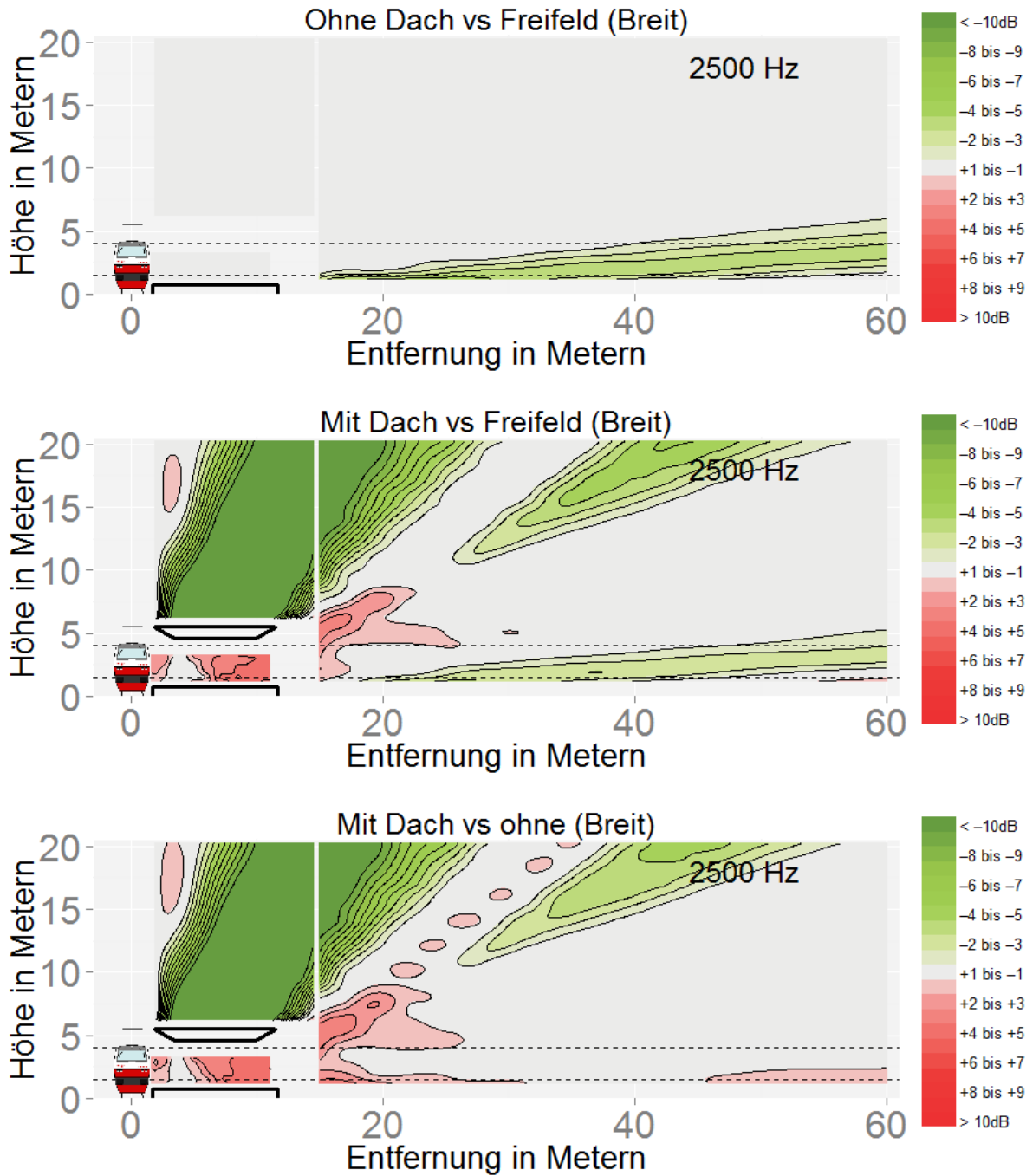


Abbildung 166

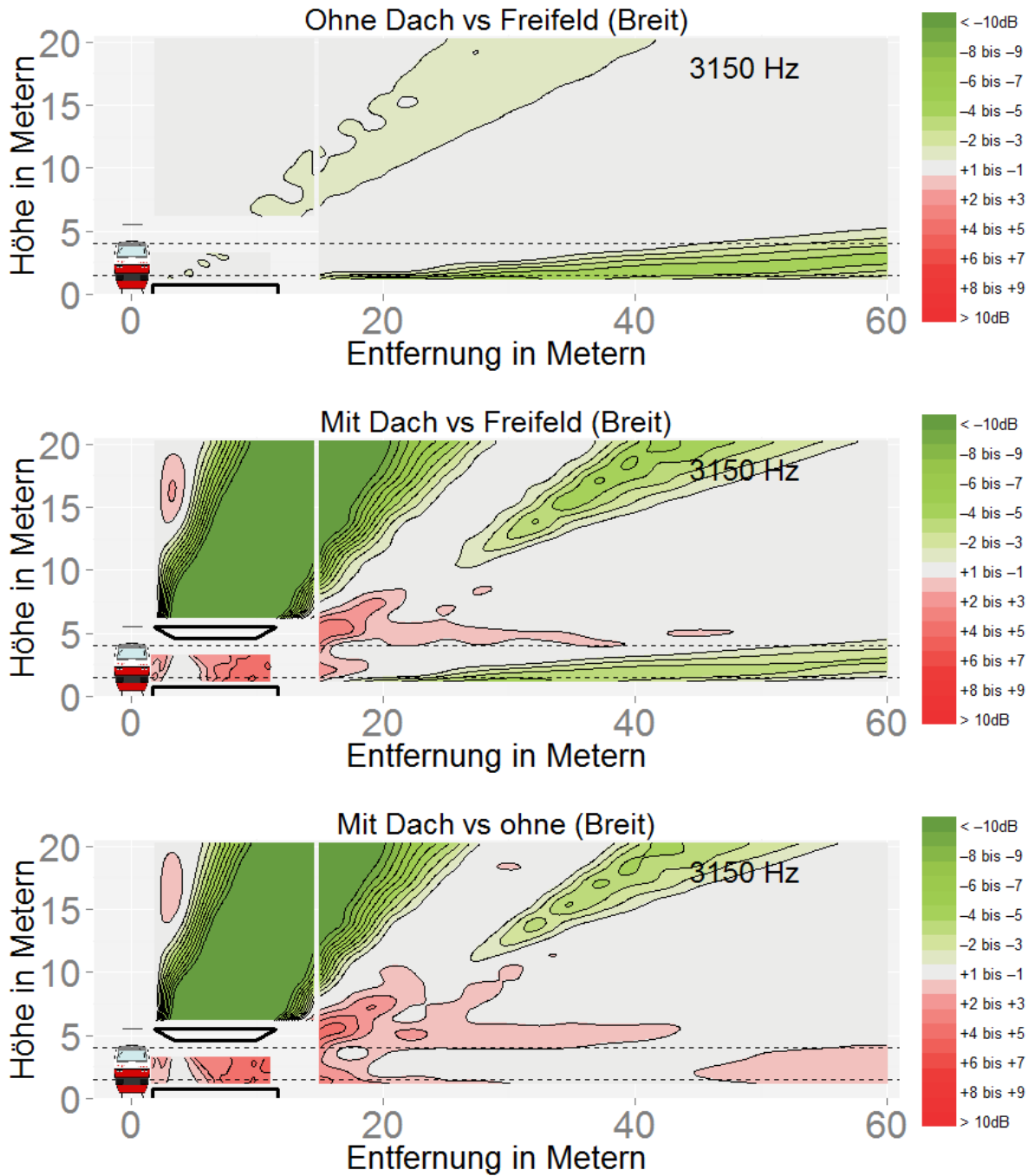


Abbildung 167

D.3: Effekt des Bahnsteigs mit und ohne Dach, reflektierender Boden

Dargestellt sind die Dritteloktavbandpegel für den Vergleich sowohl zwischen dem Bahnsteig ohne Dach (obere Grafik) als auch mit reflektierendem Dach (mittlere Grafik) im Vergleich zur freien Schallausbreitung für den reflektierenden Boden. Der Einfluss des Daches wird in der unteren Grafik dargestellt.

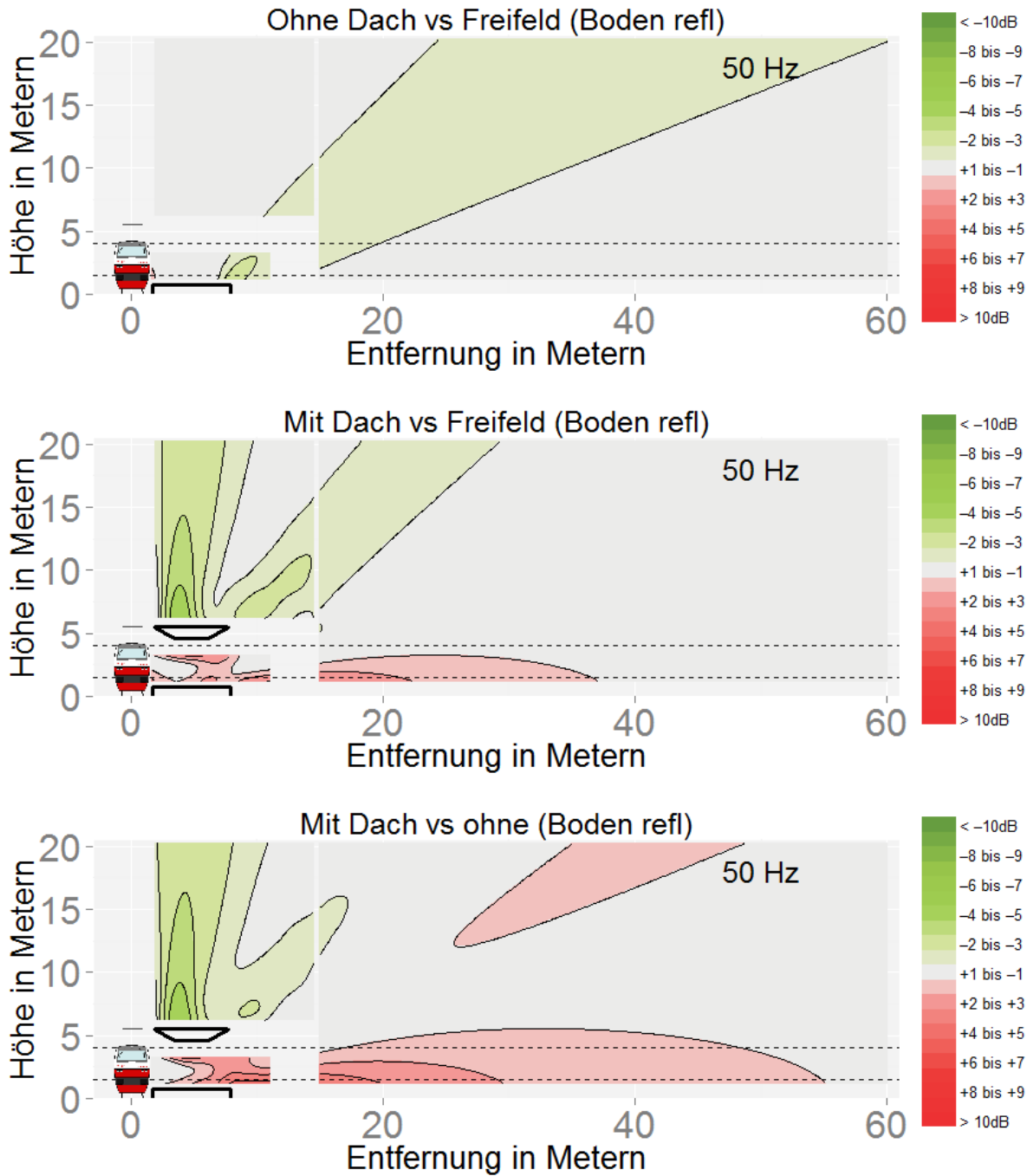


Abbildung 168

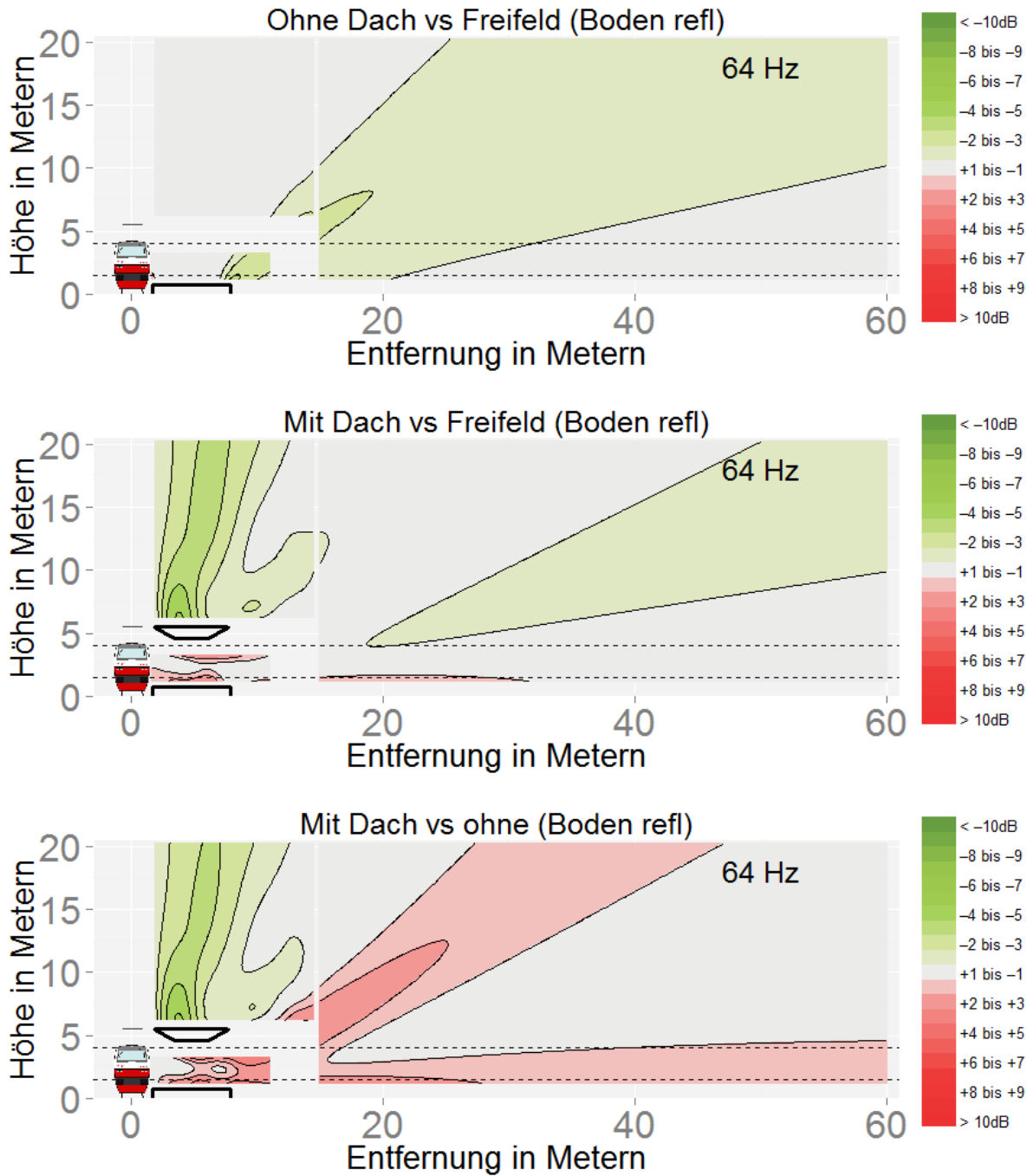


Abbildung 169

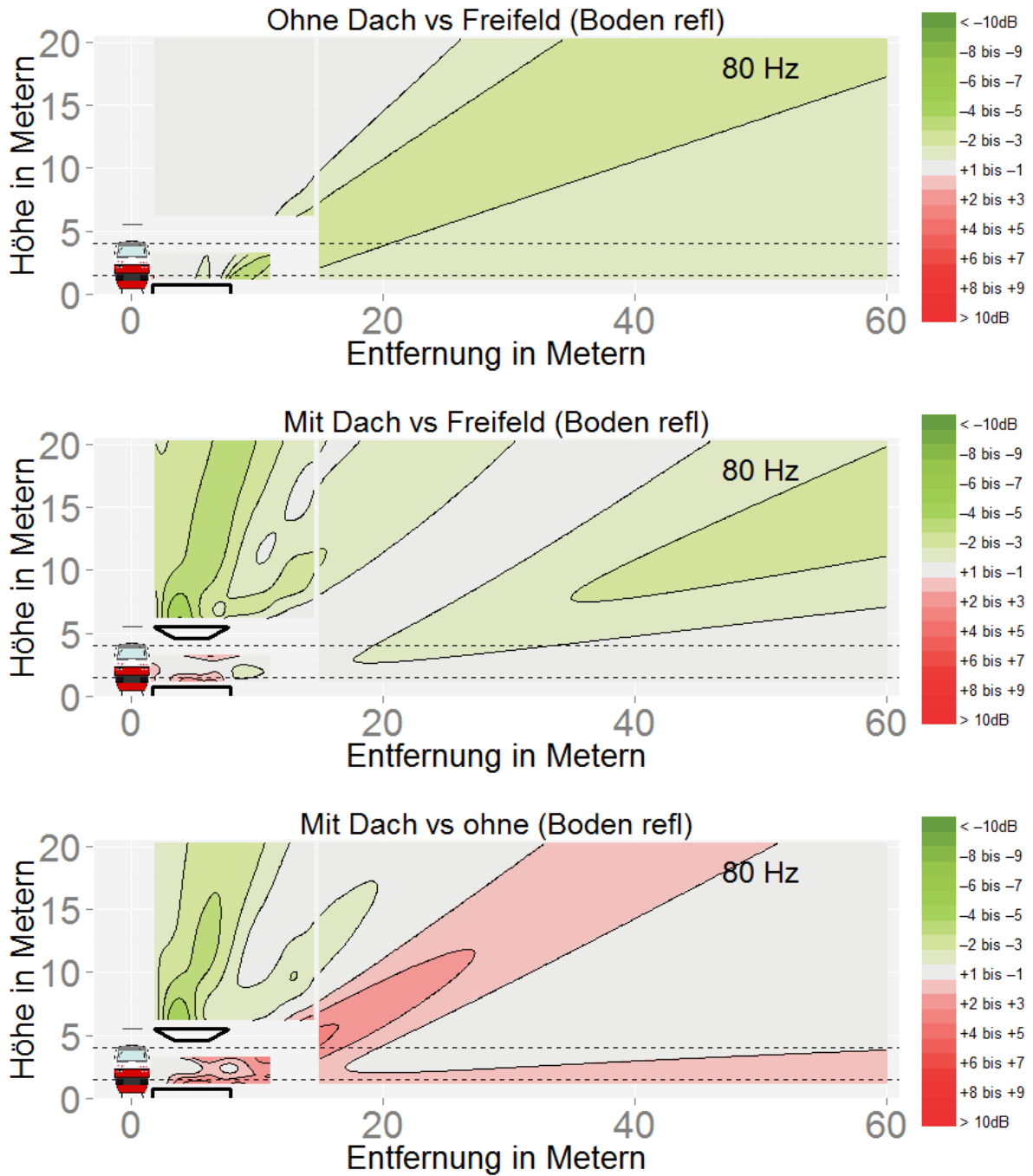


Abbildung 170

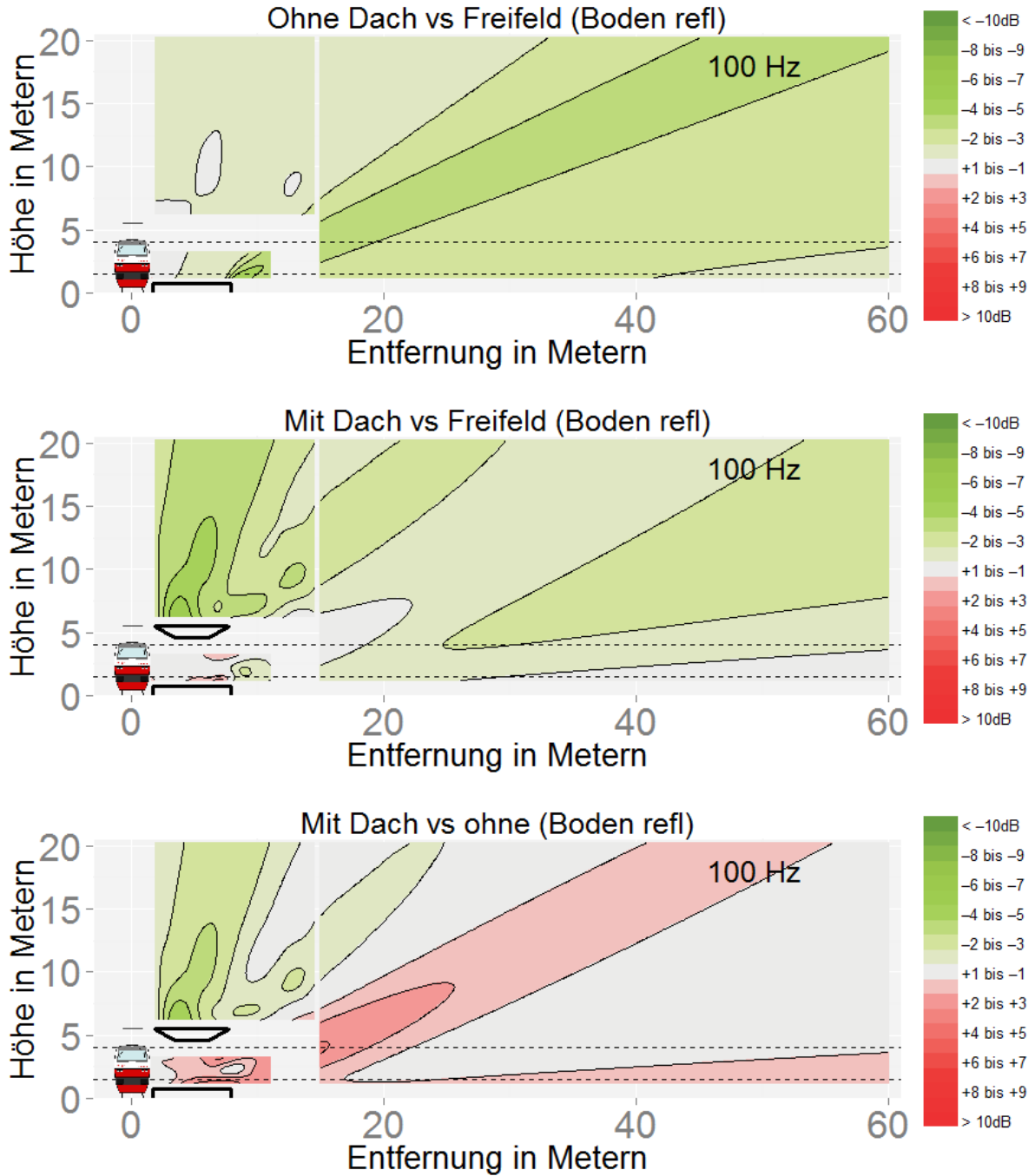


Abbildung 171

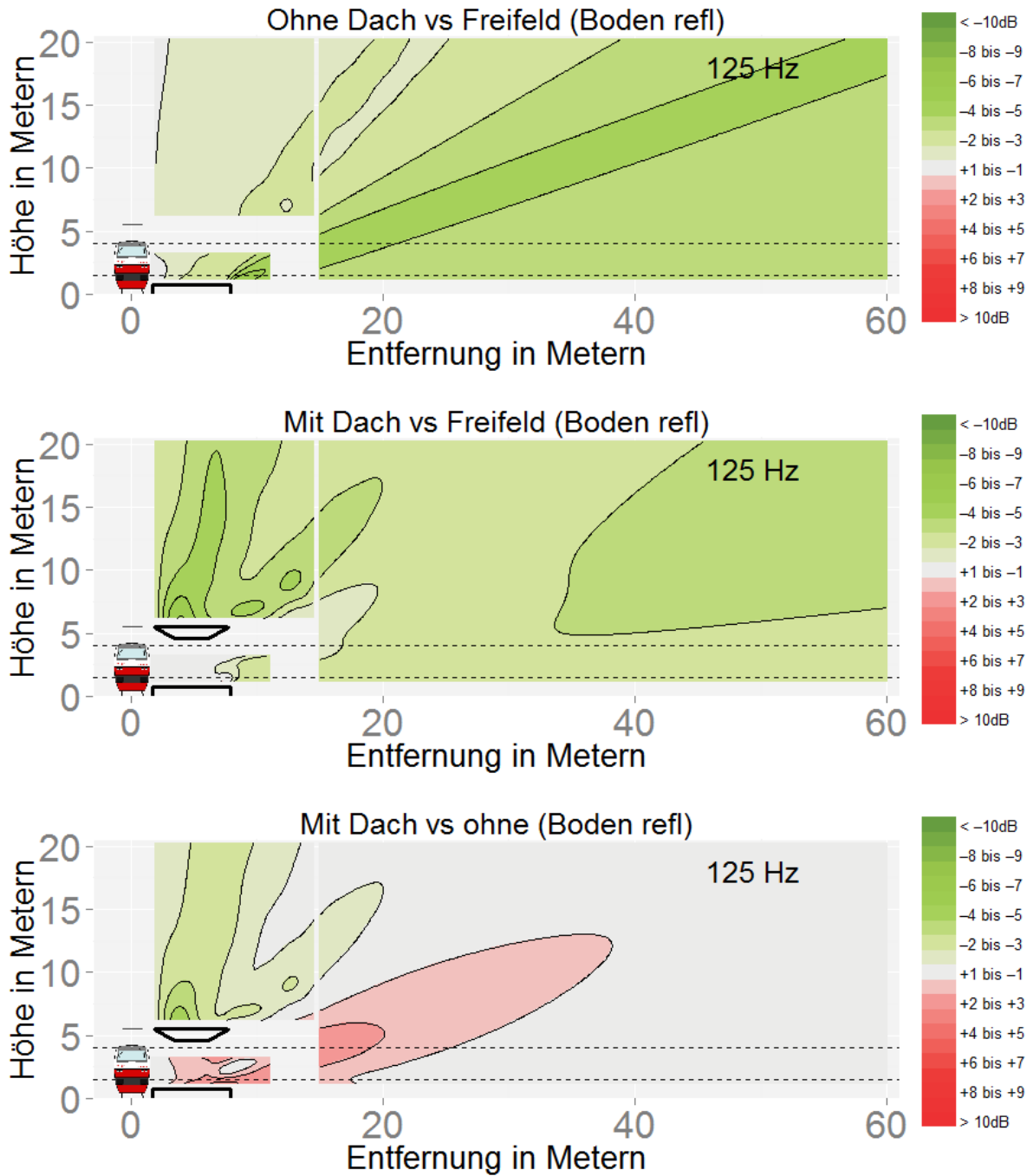


Abbildung 172

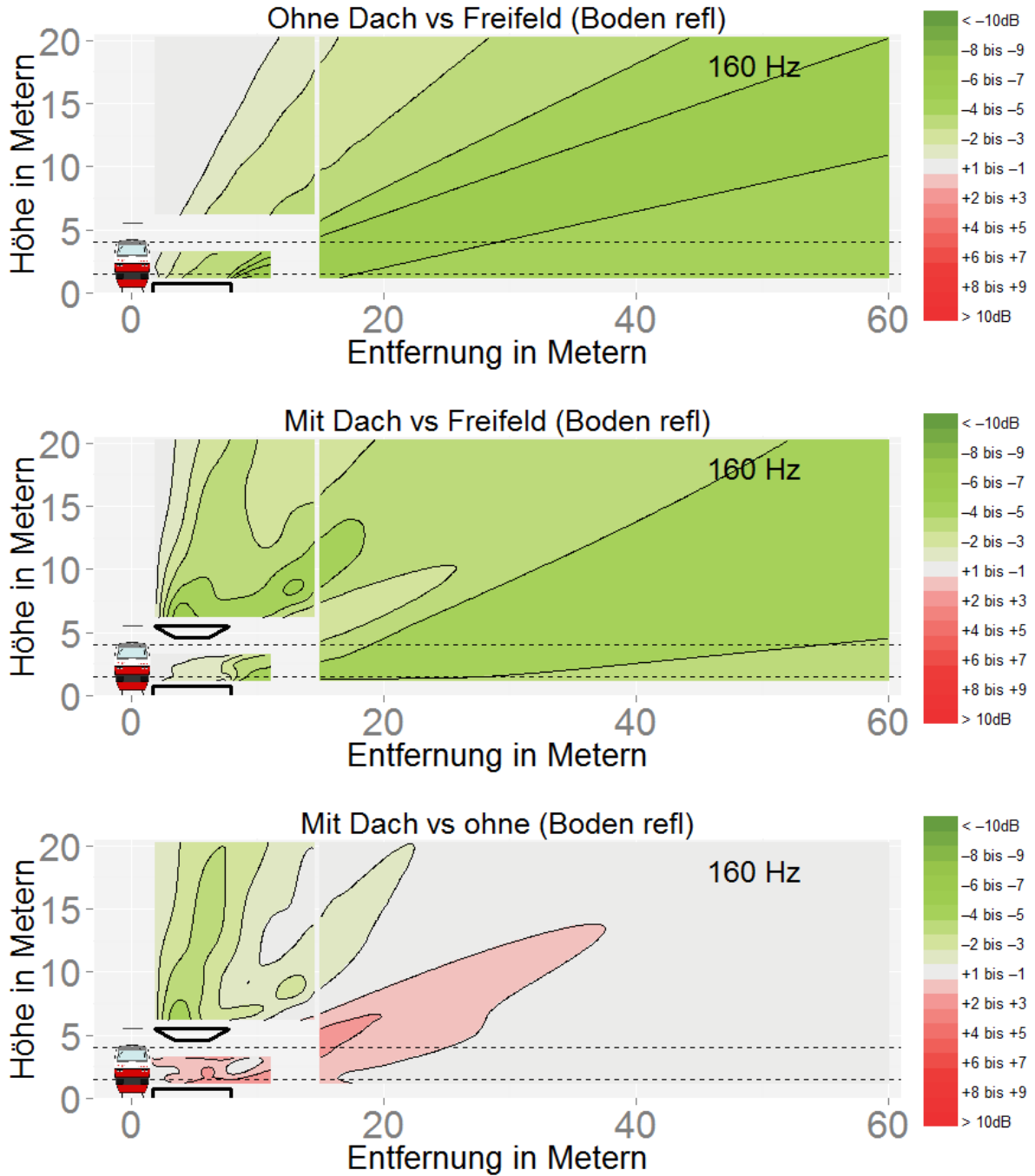


Abbildung 173

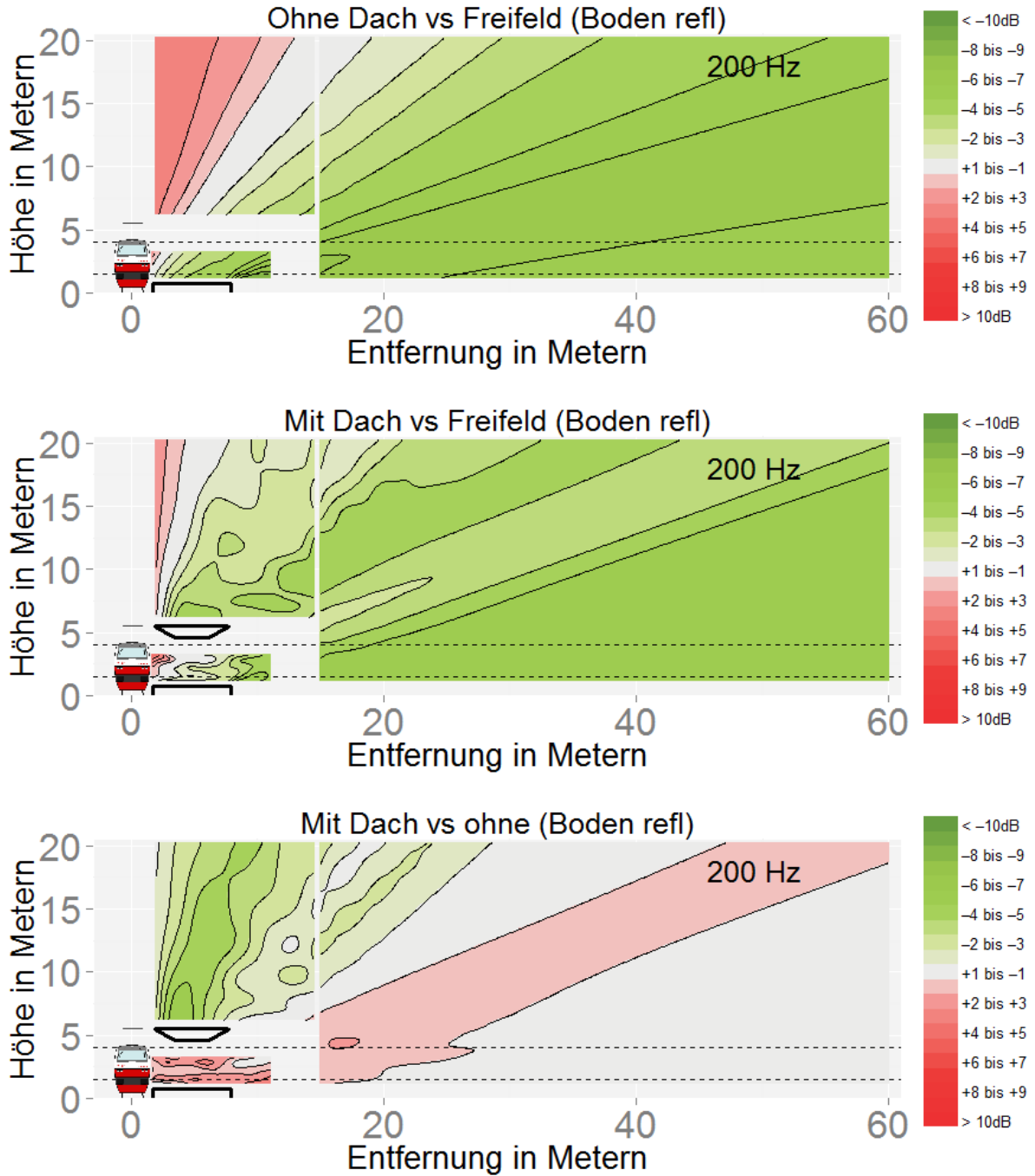


Abbildung 174

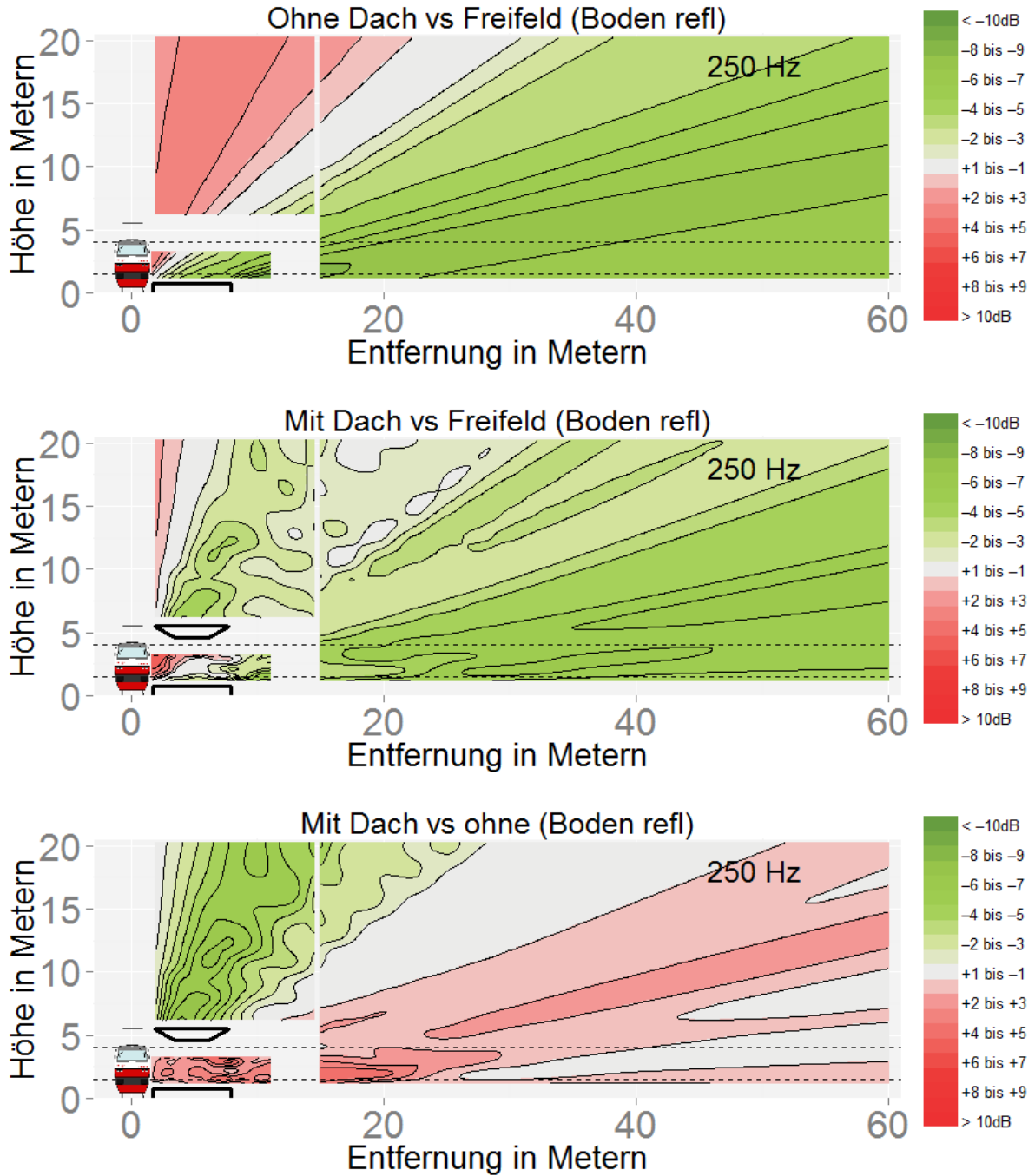


Abbildung 175

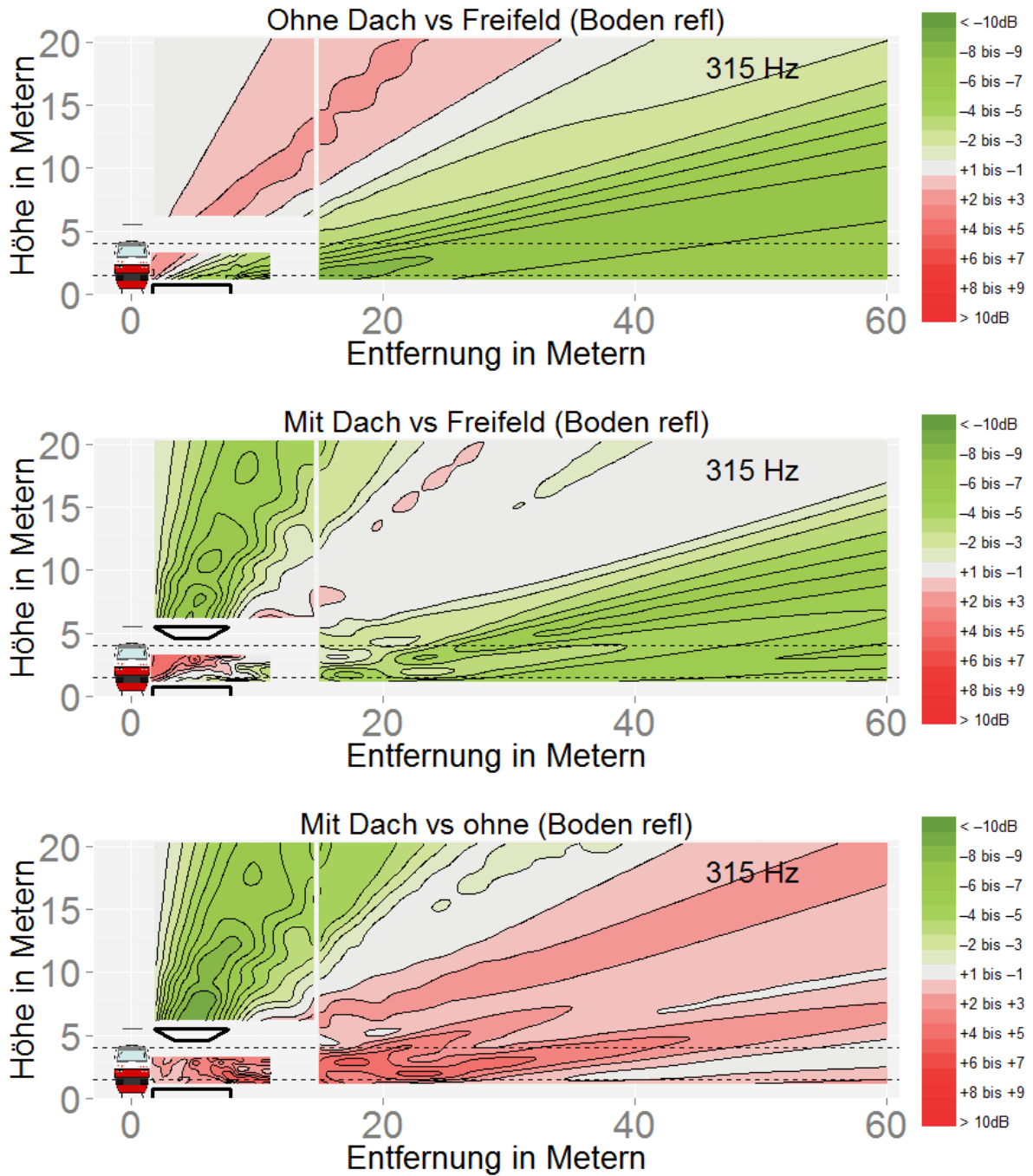


Abbildung 176

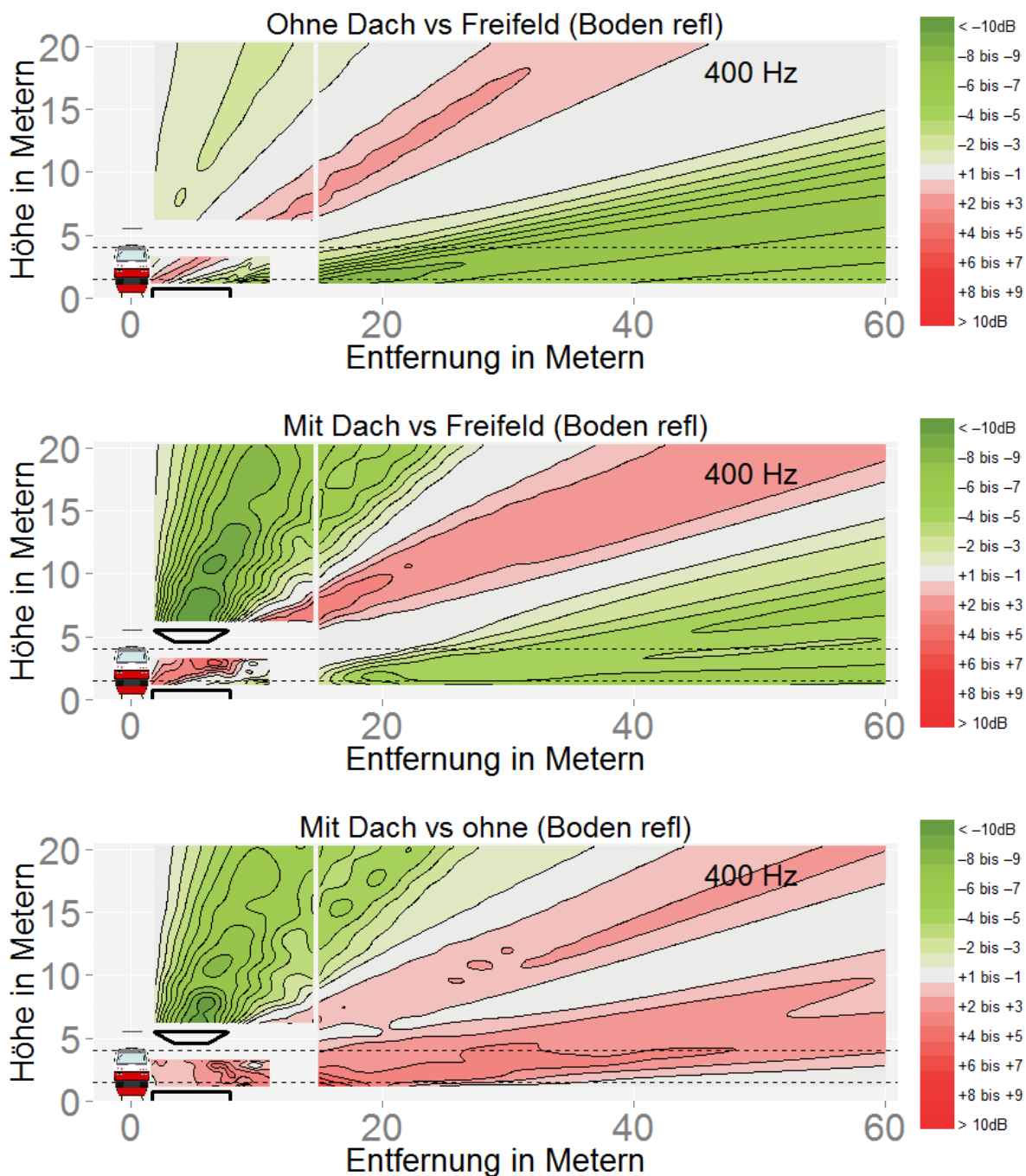


Abbildung 177

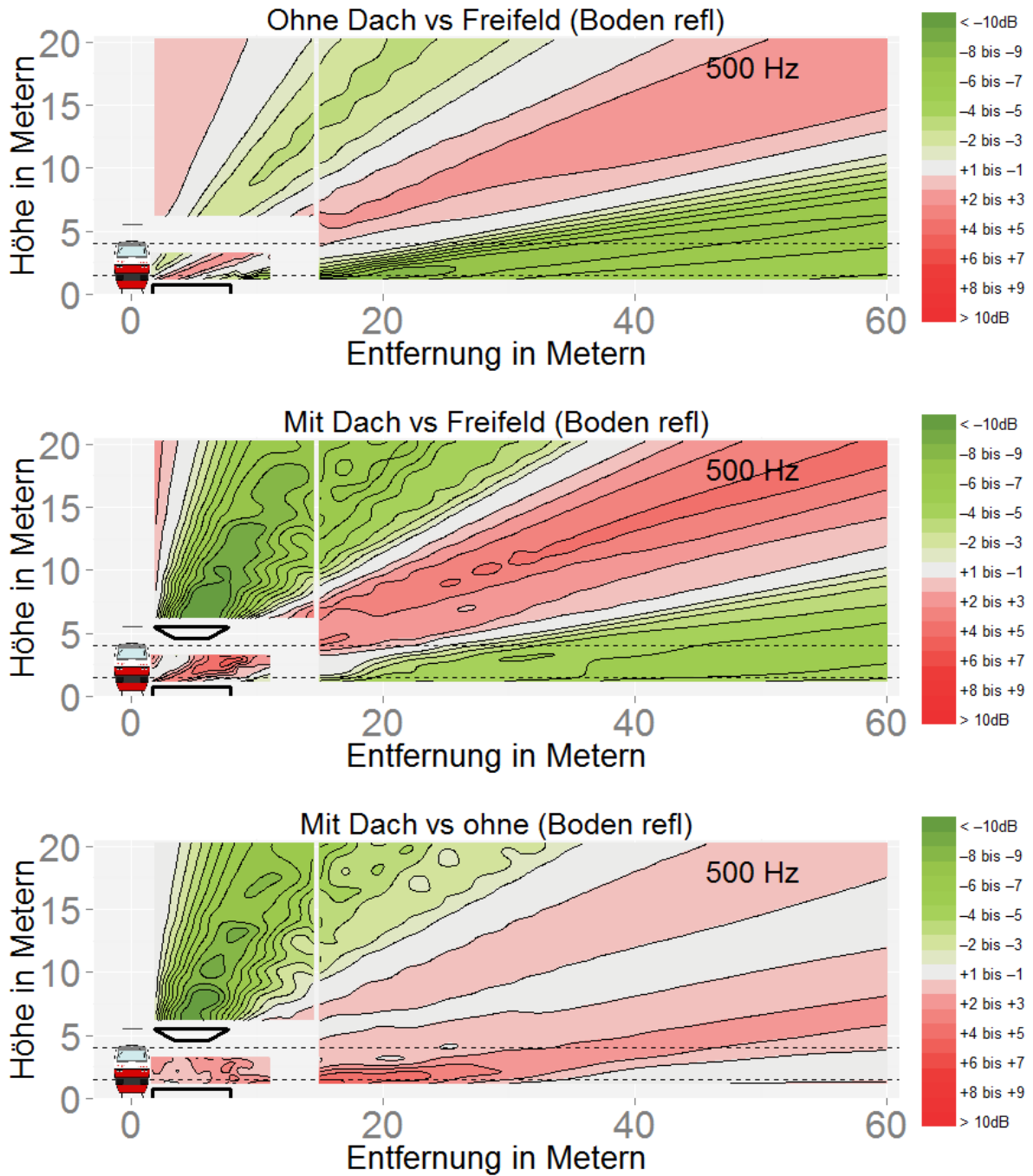


Abbildung 178

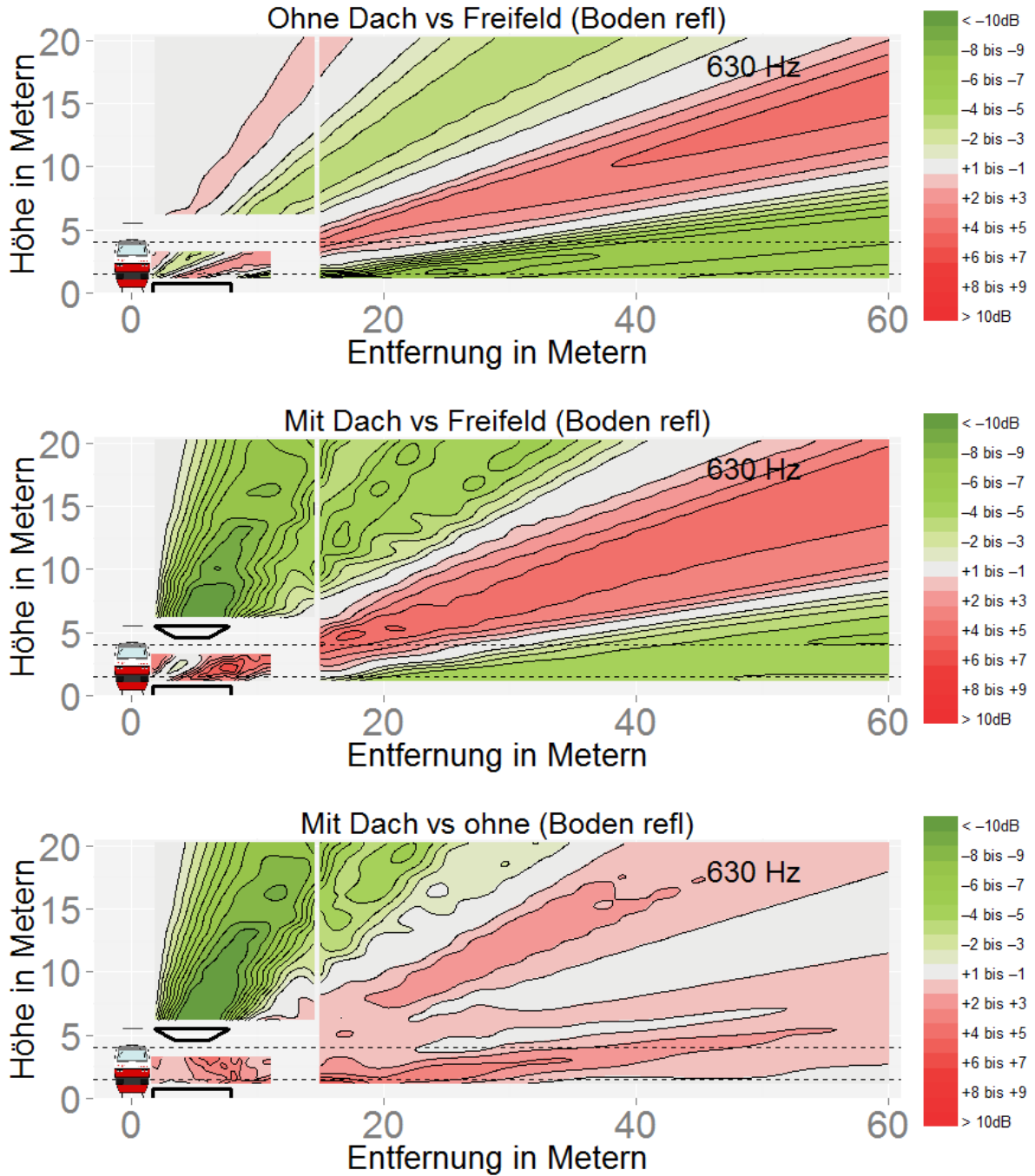


Abbildung 179

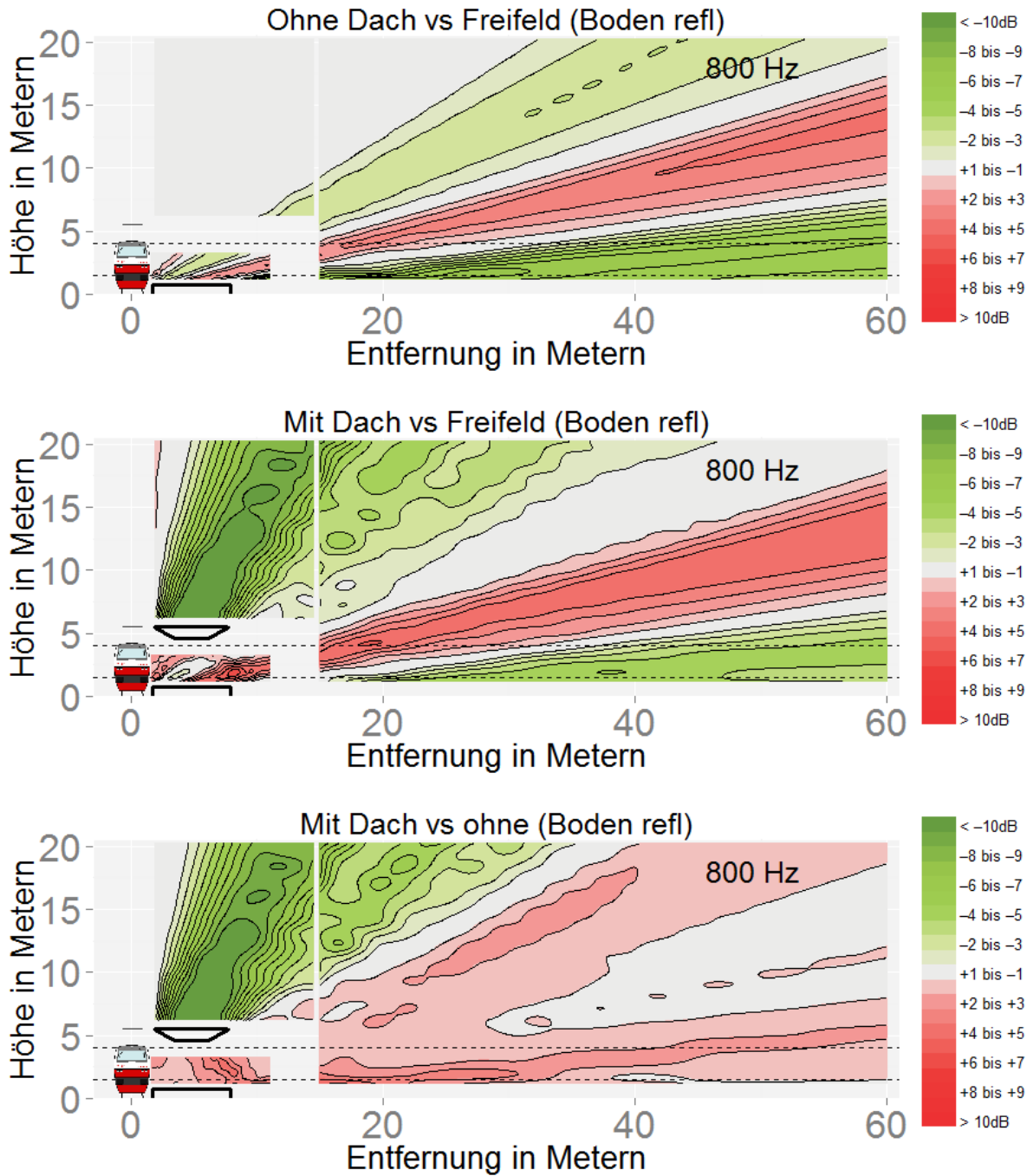


Abbildung 180

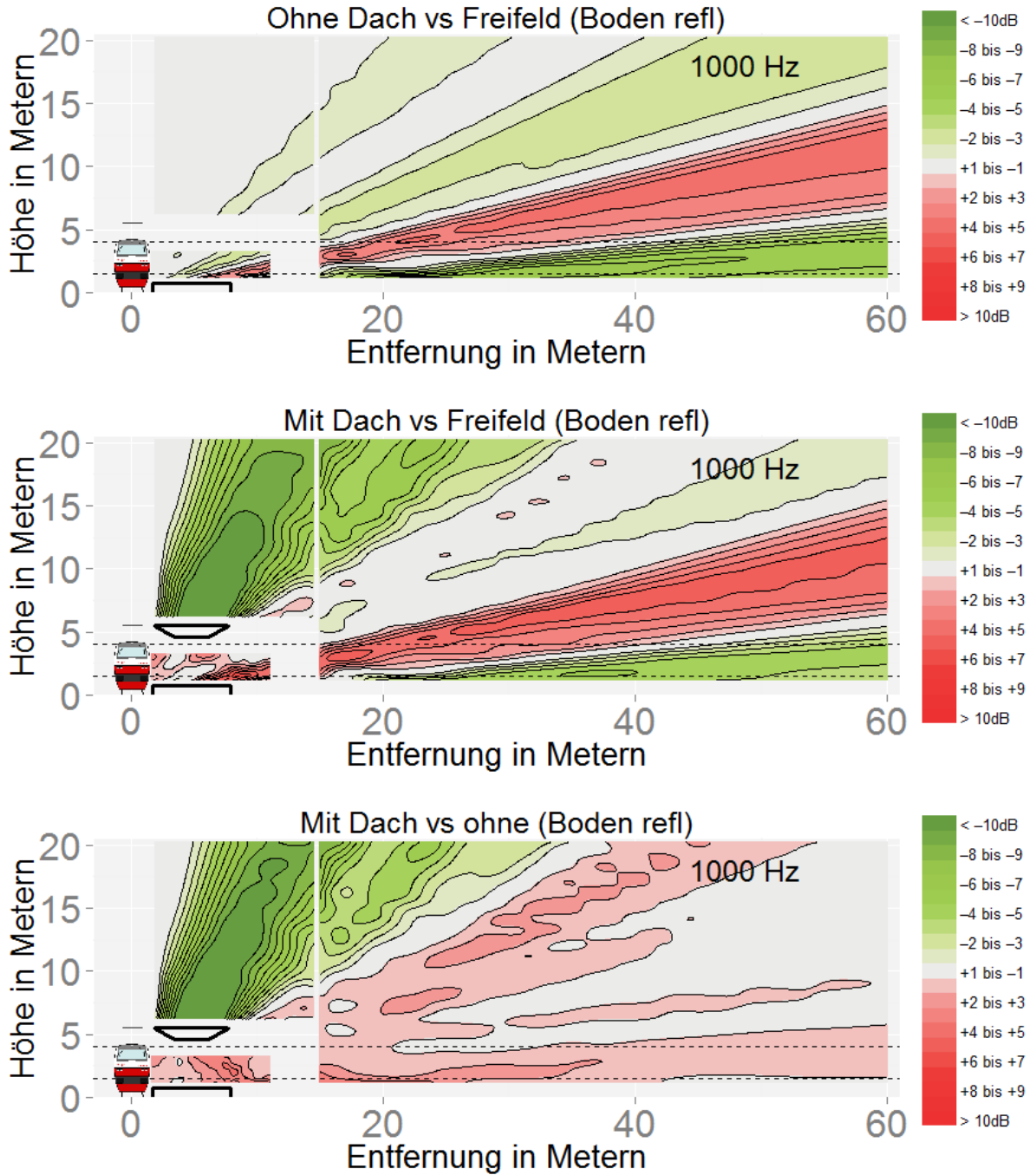


Abbildung 181

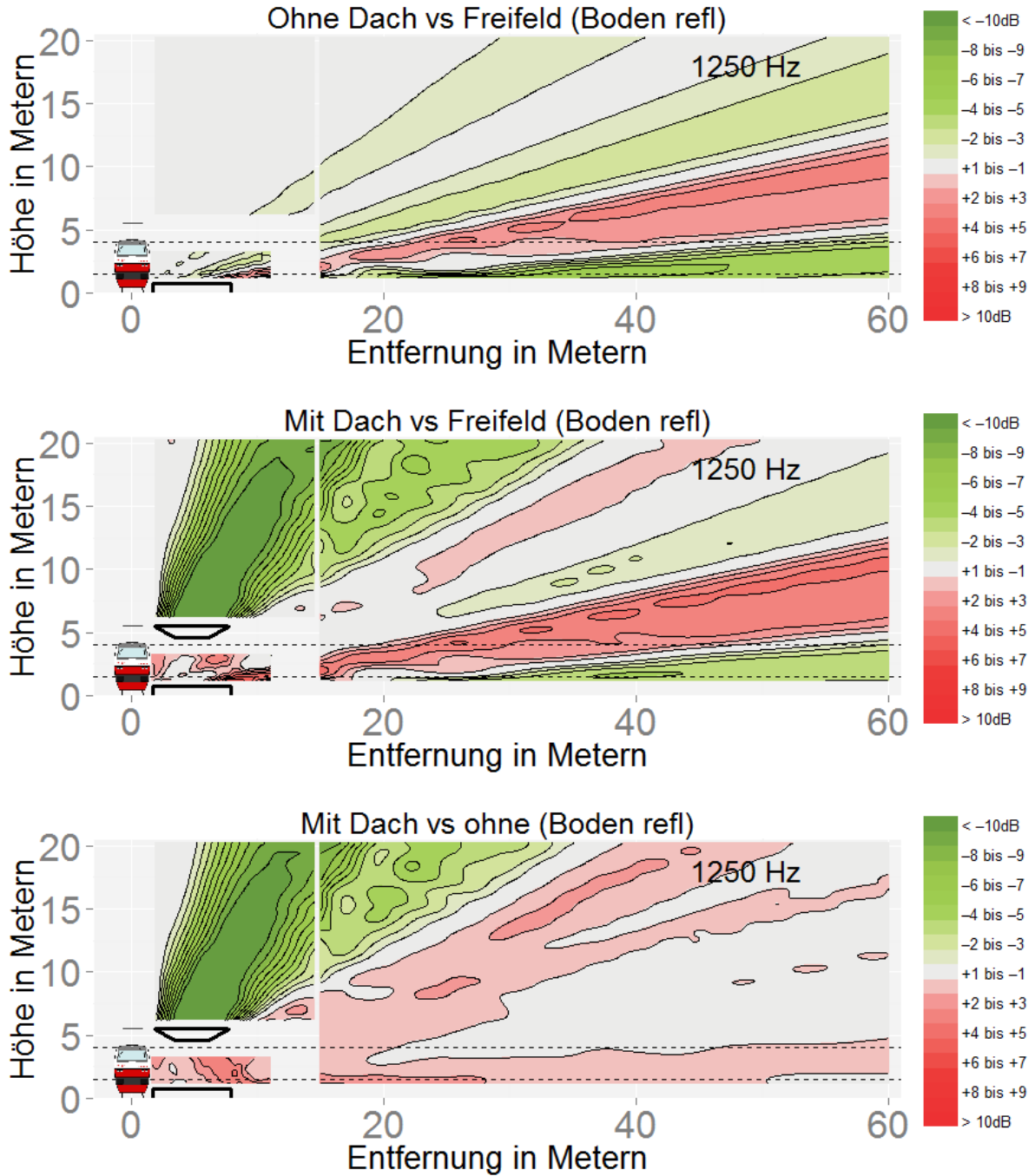


Abbildung 182

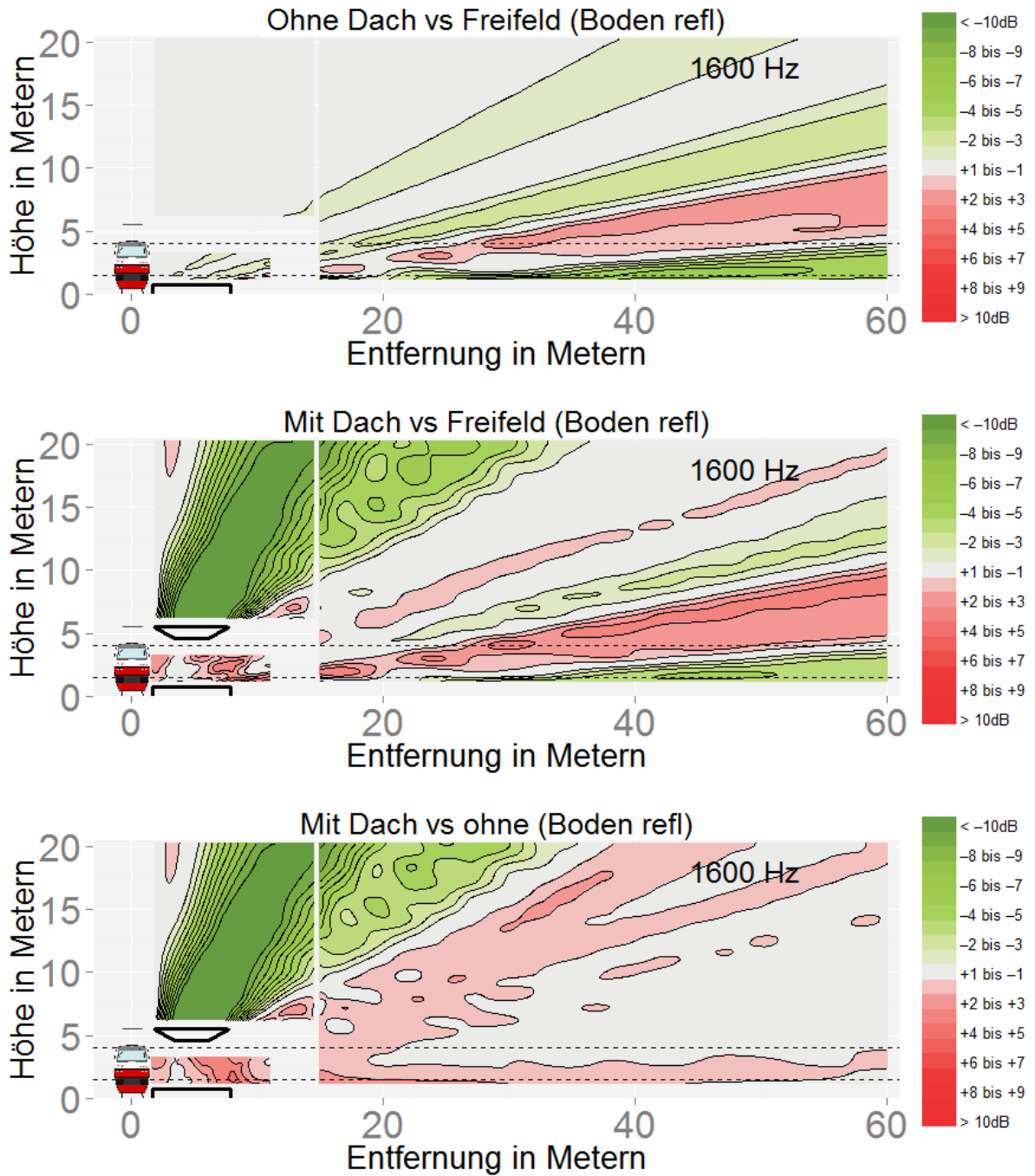


Abbildung 183

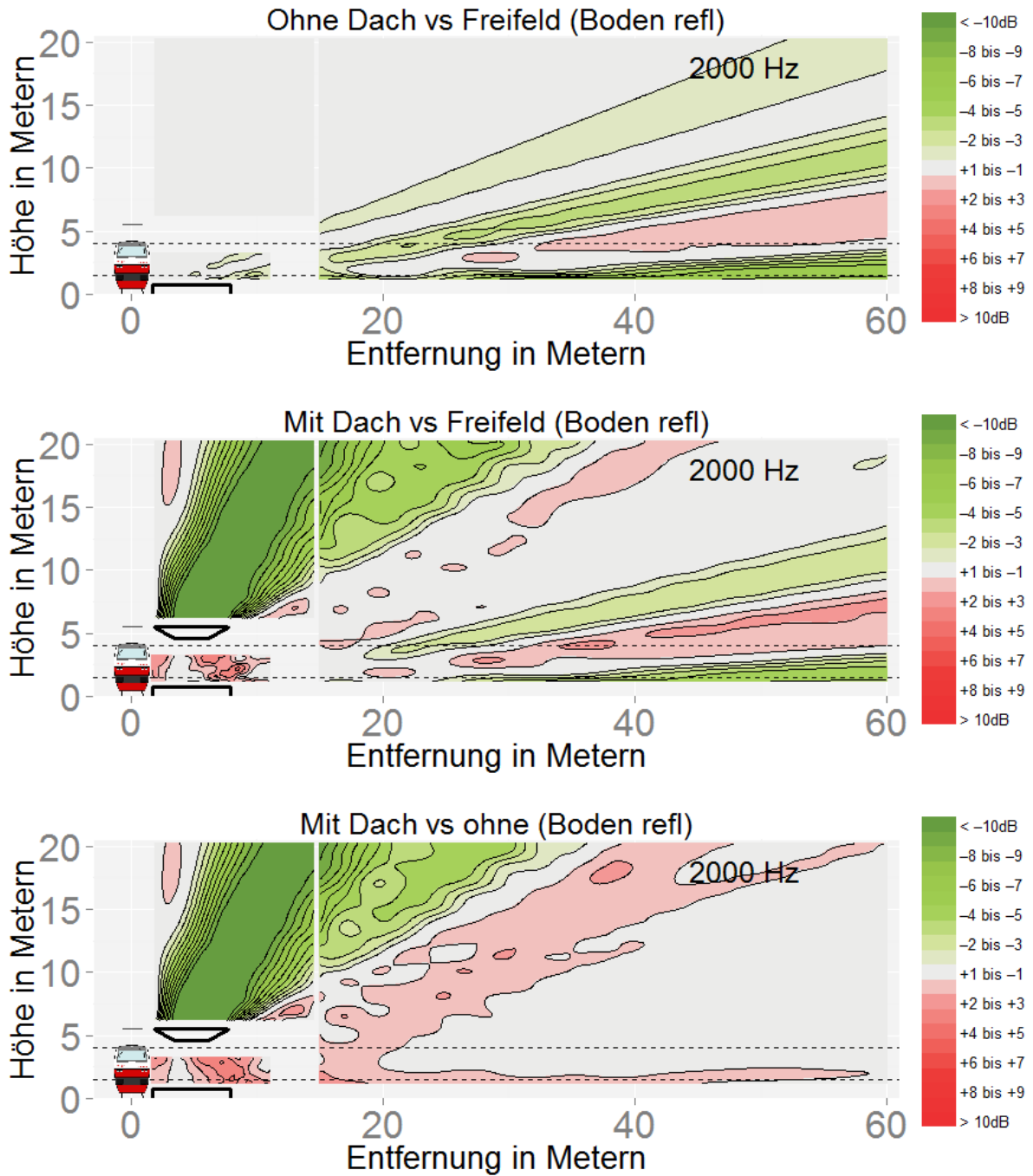


Abbildung 184

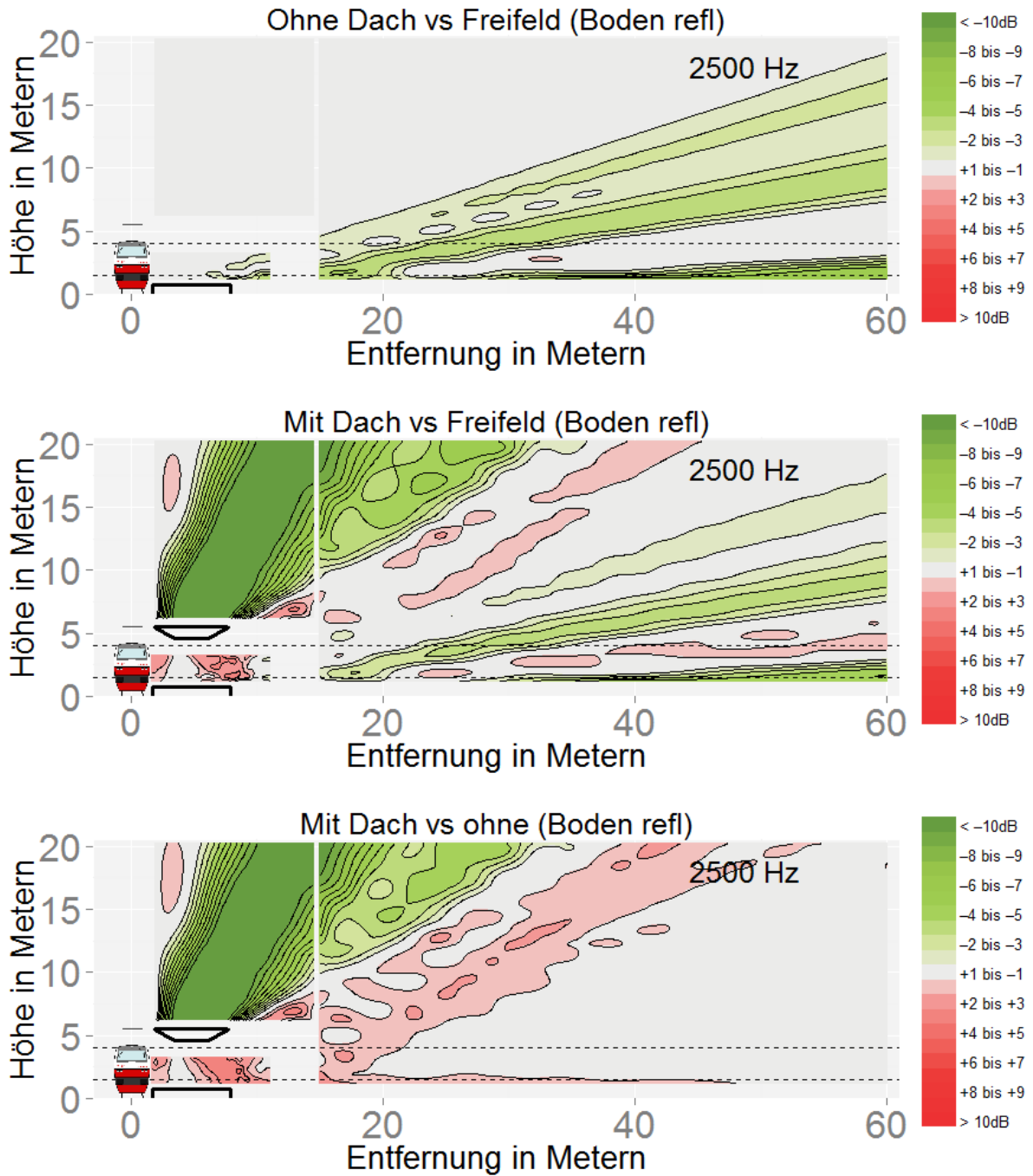


Abbildung 185

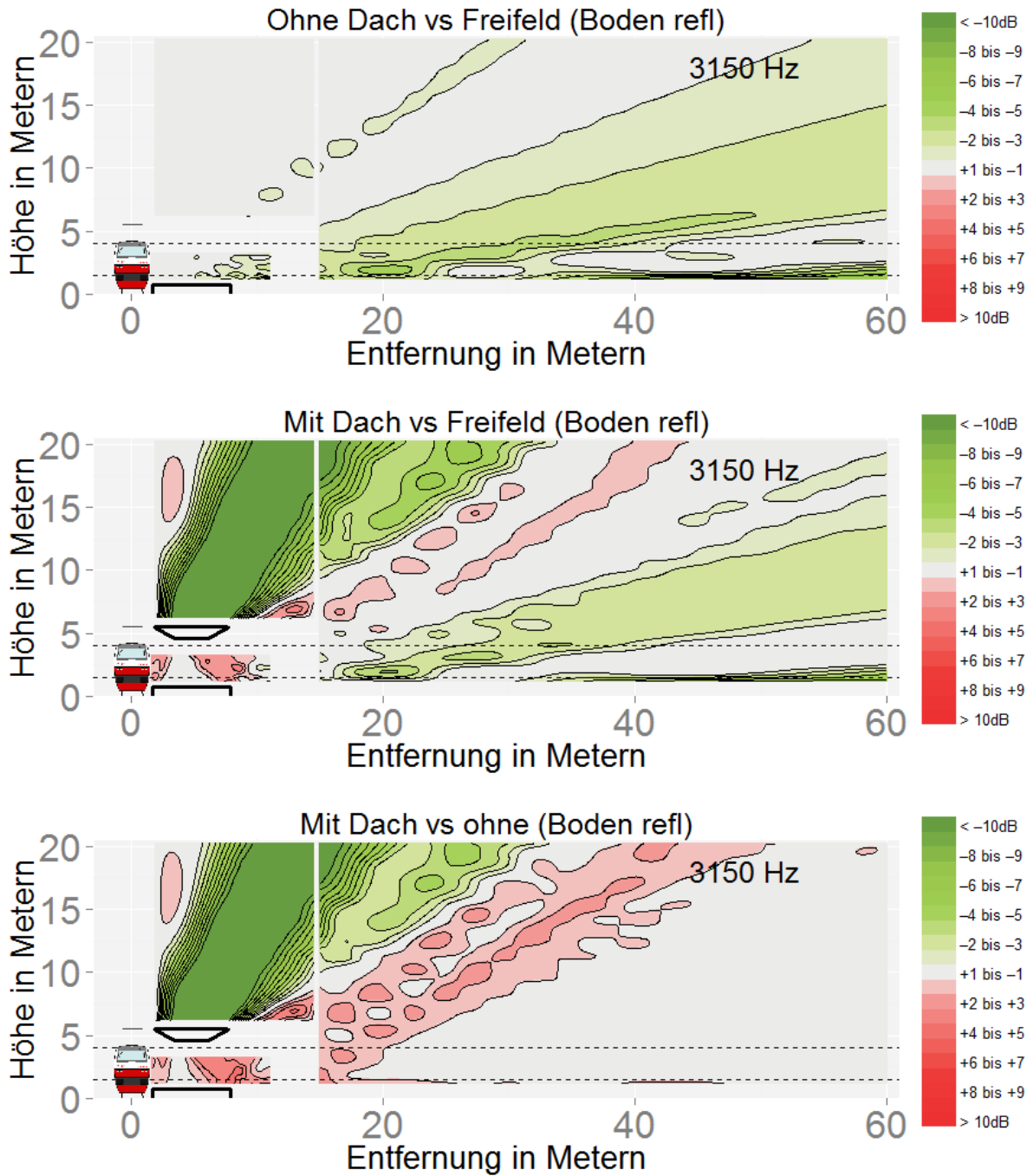


Abbildung 186

D.4: Effekt des absorbierenden Daches

Dargestellt sind die Dritteloktavbandpegel für den Vergleich sowohl zwischen dem Bahnsteig mit reflektierendem Dach (obere Grafik) als auch mit absorbierendem Dach (mittlere Grafik) im Vergleich zur freien Schallausbreitung für den absorbierenden Boden. Der Unterschied zwischen absorbierendem und reflektierendem Dach wird in der unteren Grafik dargestellt.

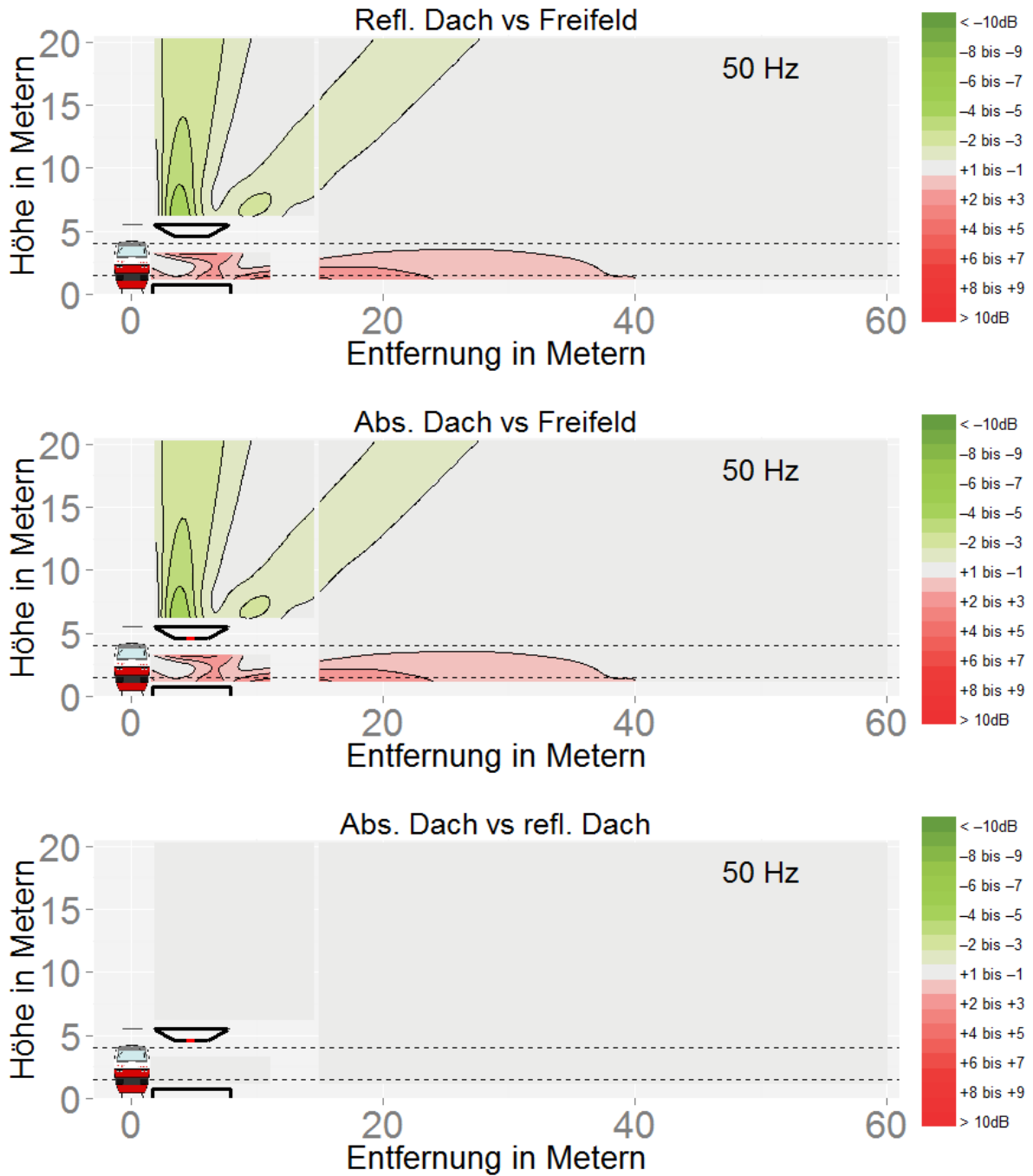


Abbildung 187

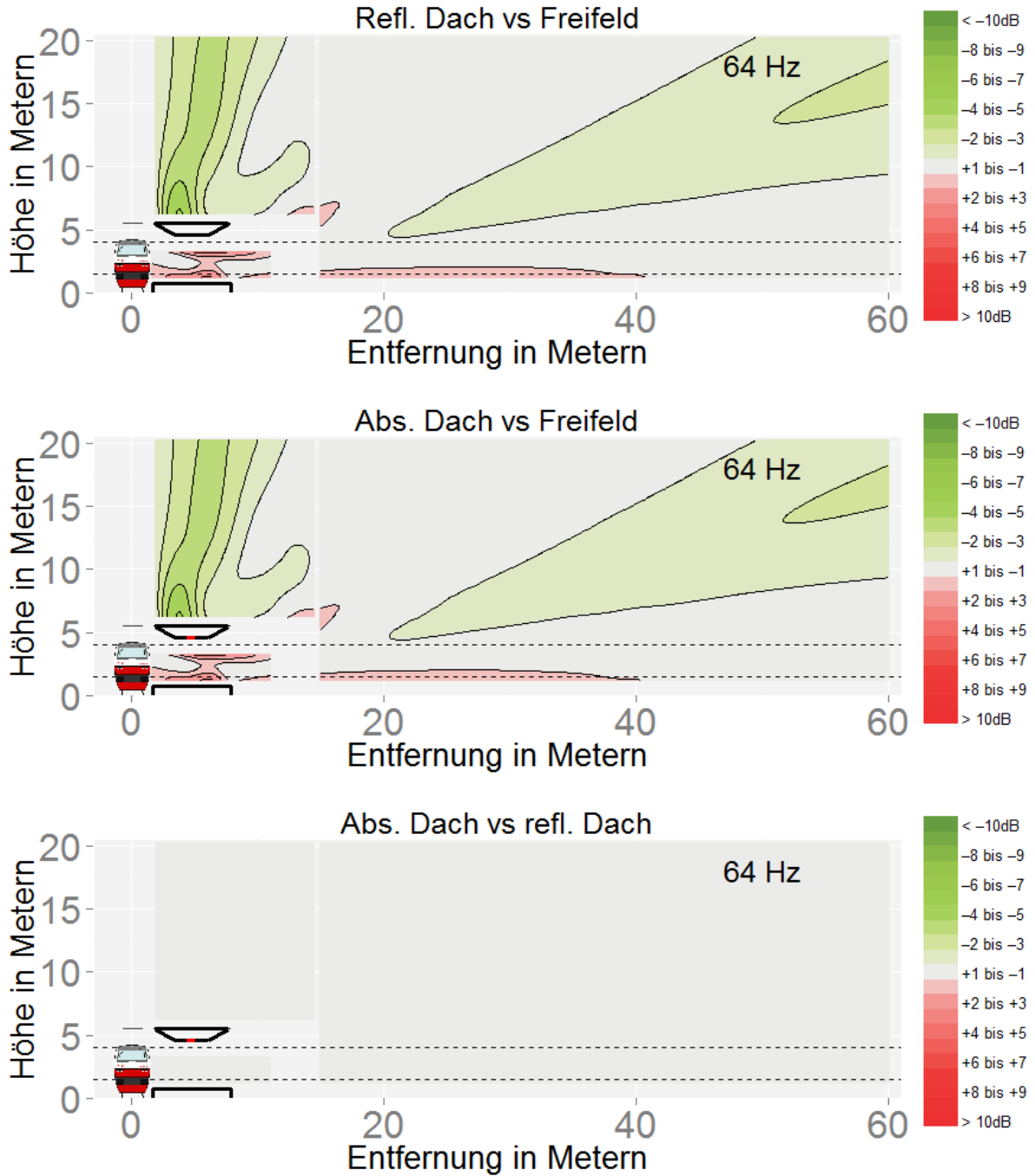


Abbildung 188

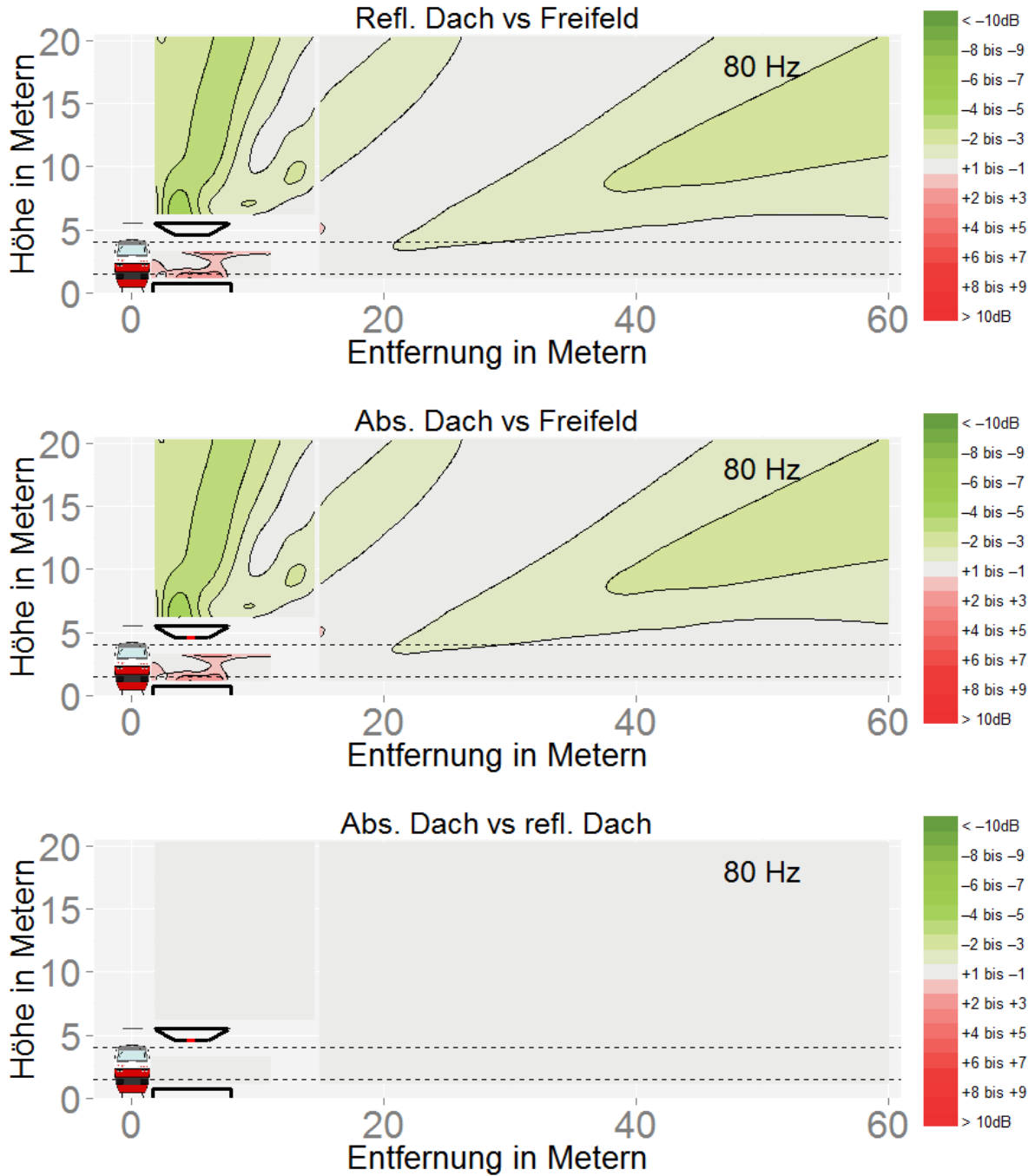


Abbildung 189

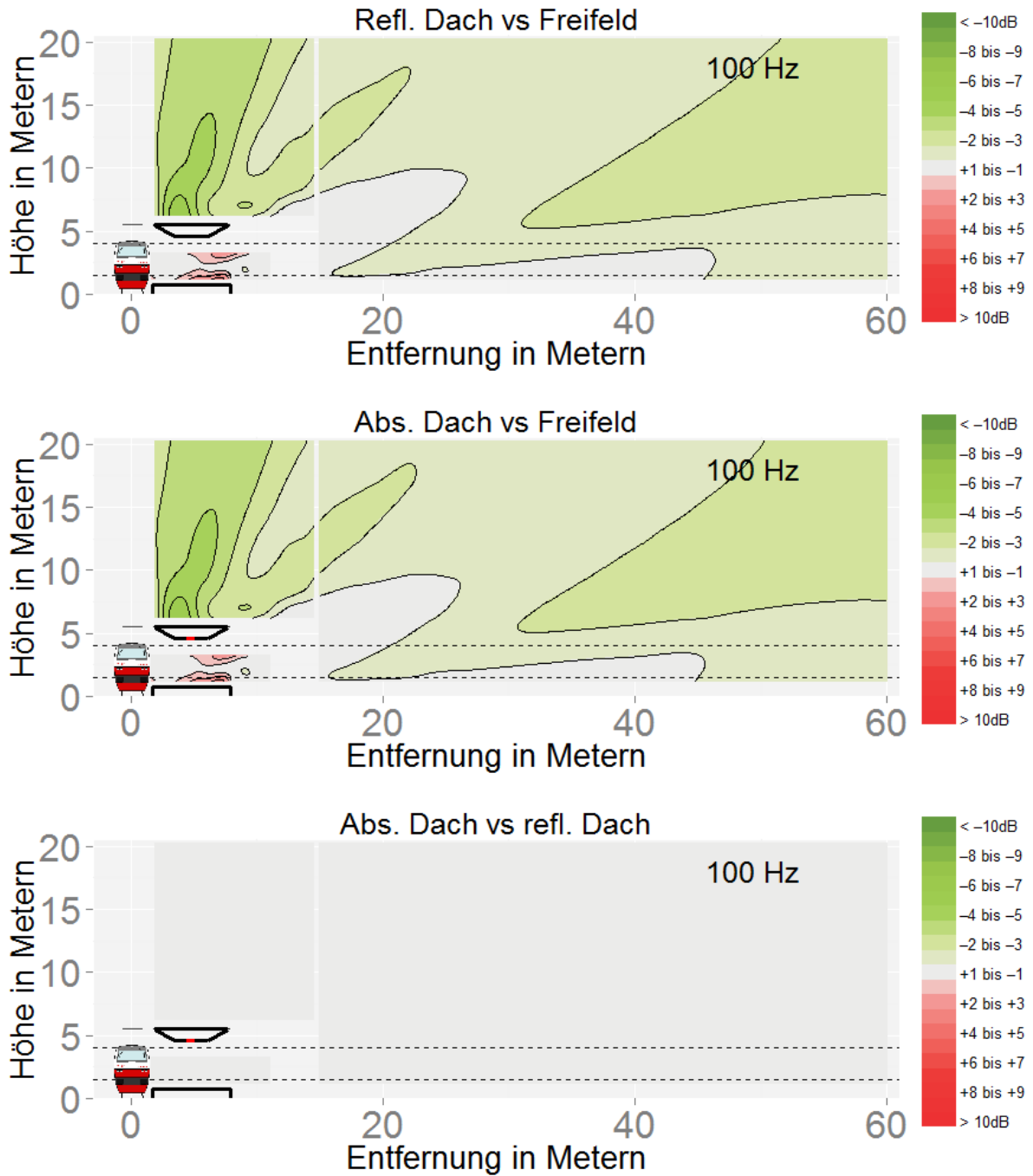


Abbildung 190

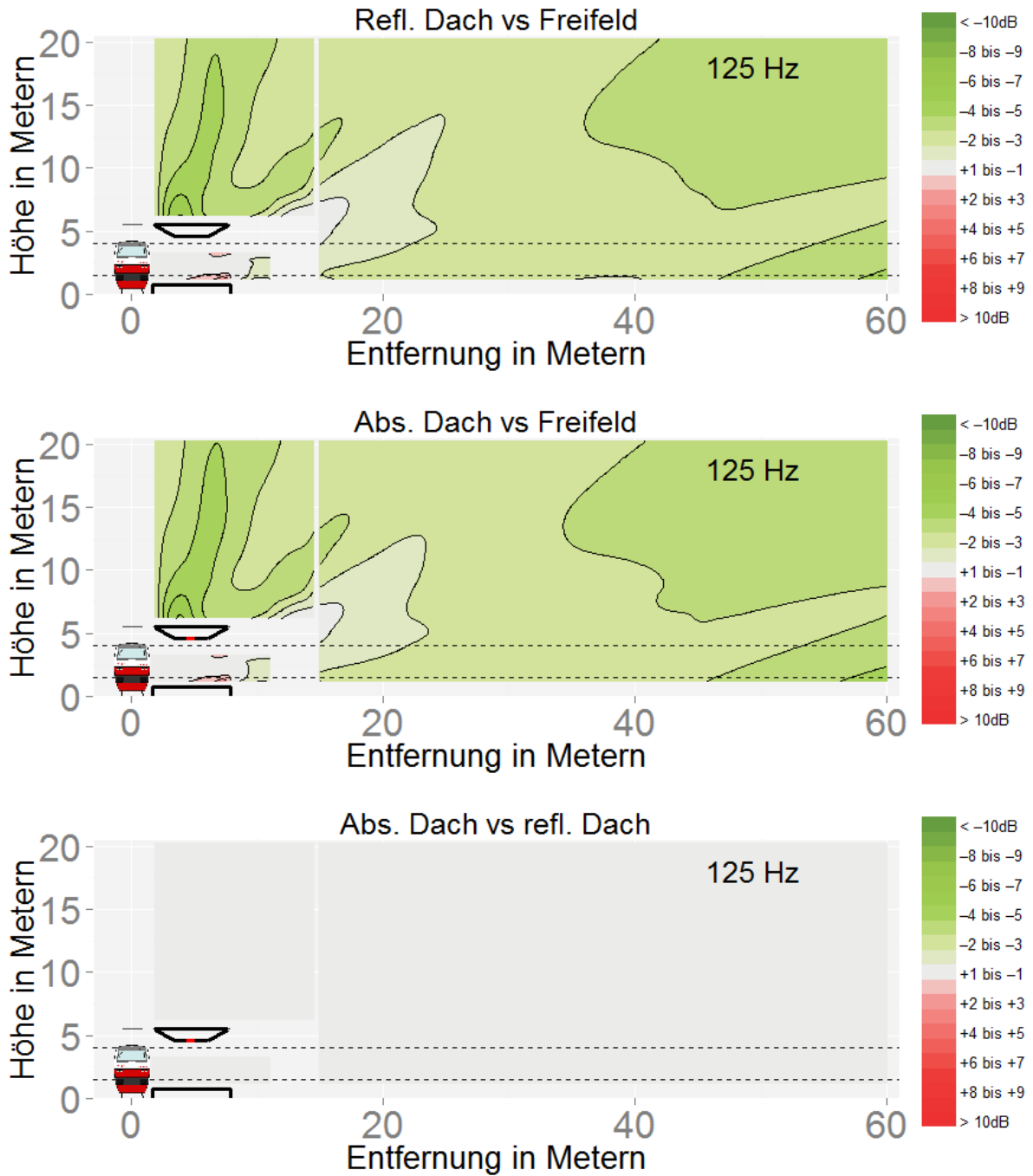


Abbildung 191

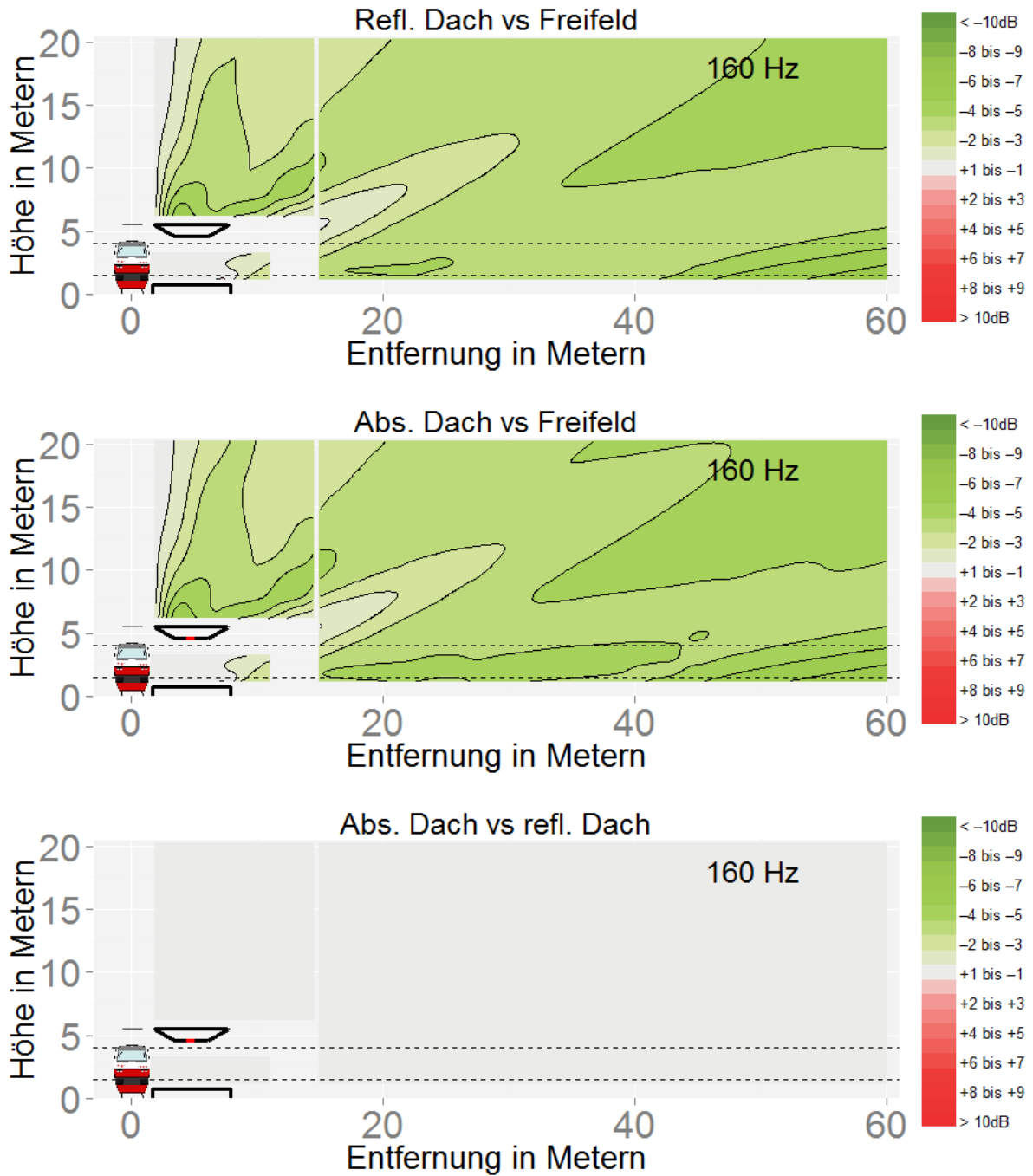


Abbildung 192

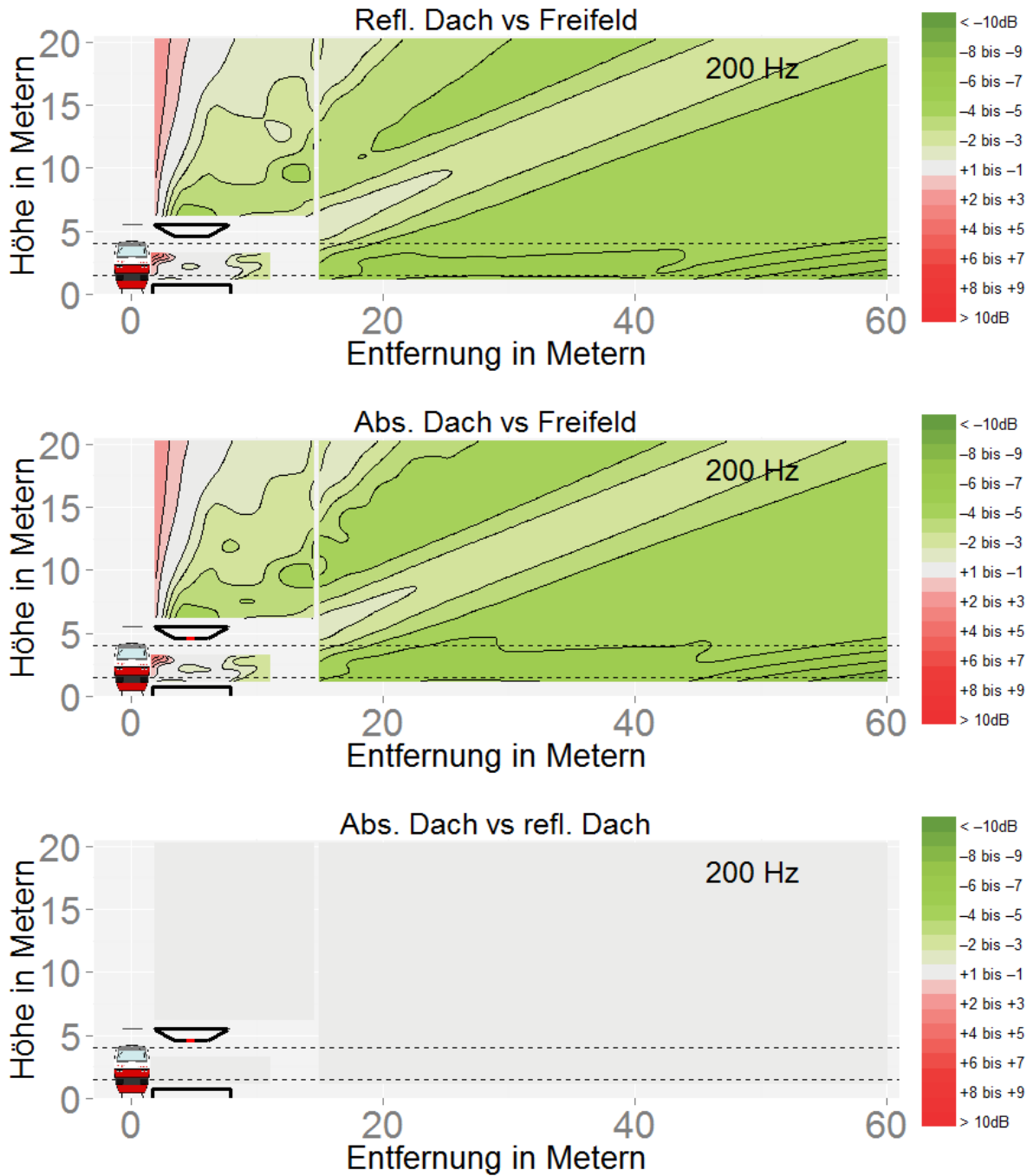


Abbildung 193

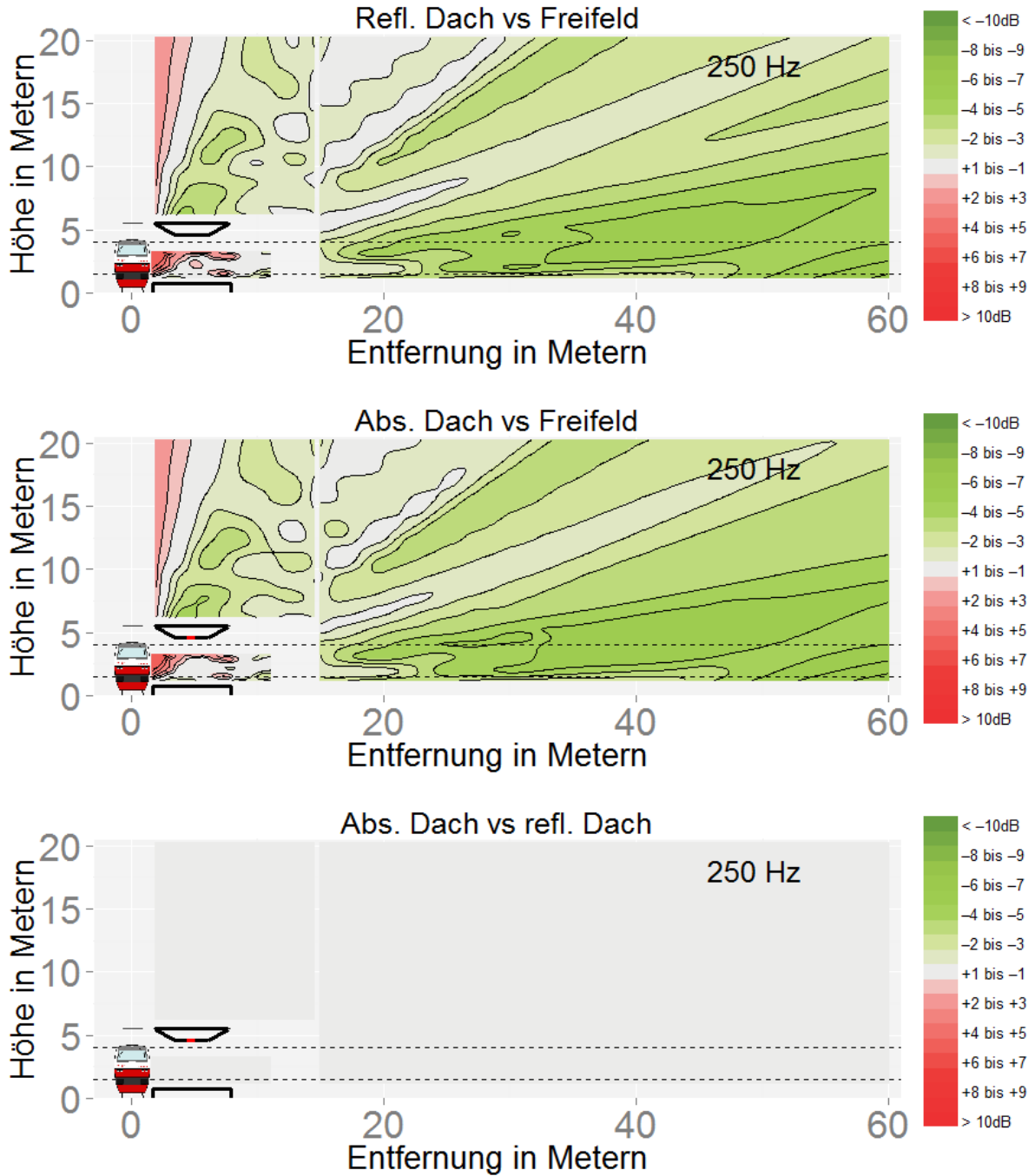


Abbildung 194

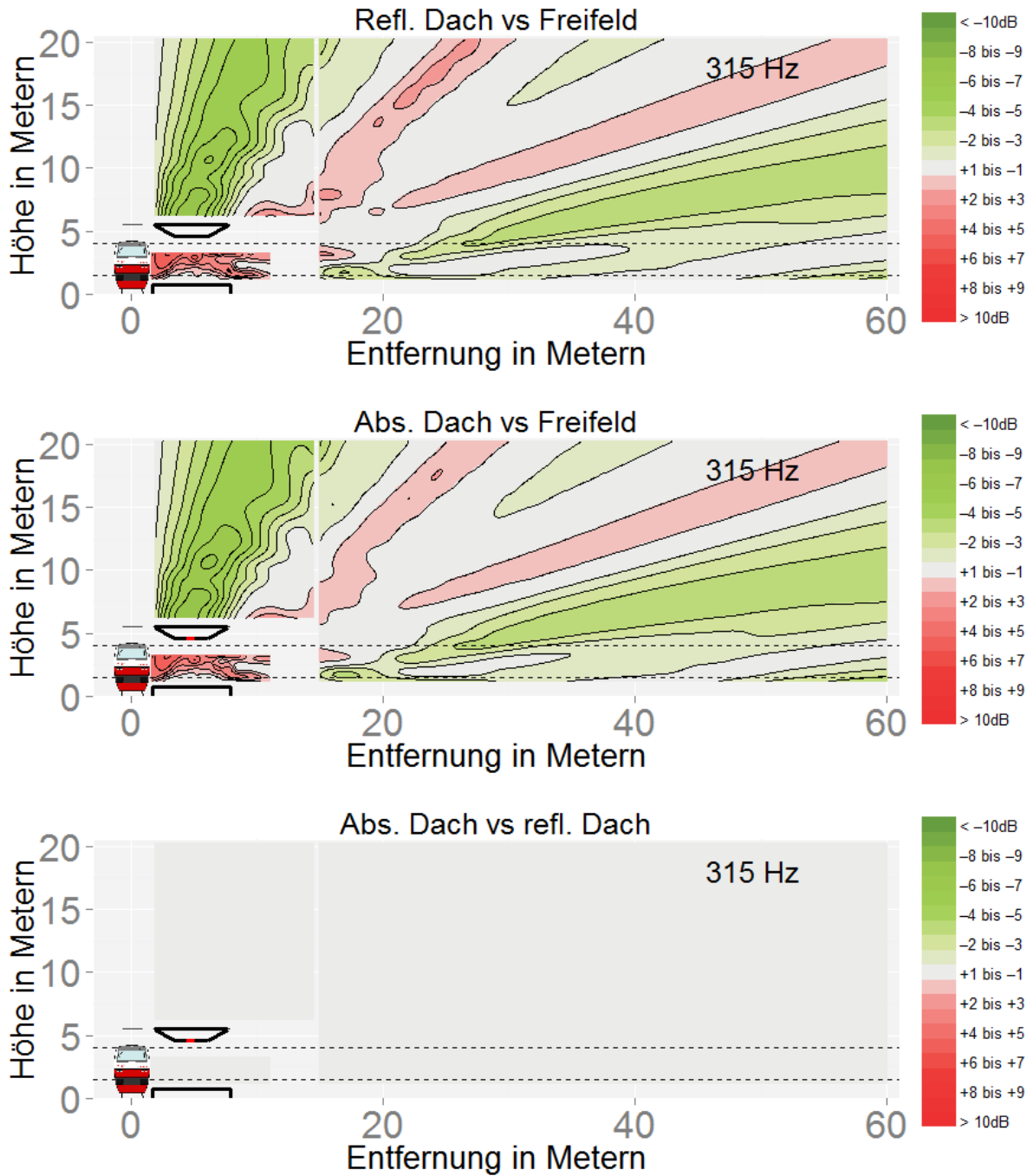


Abbildung 195

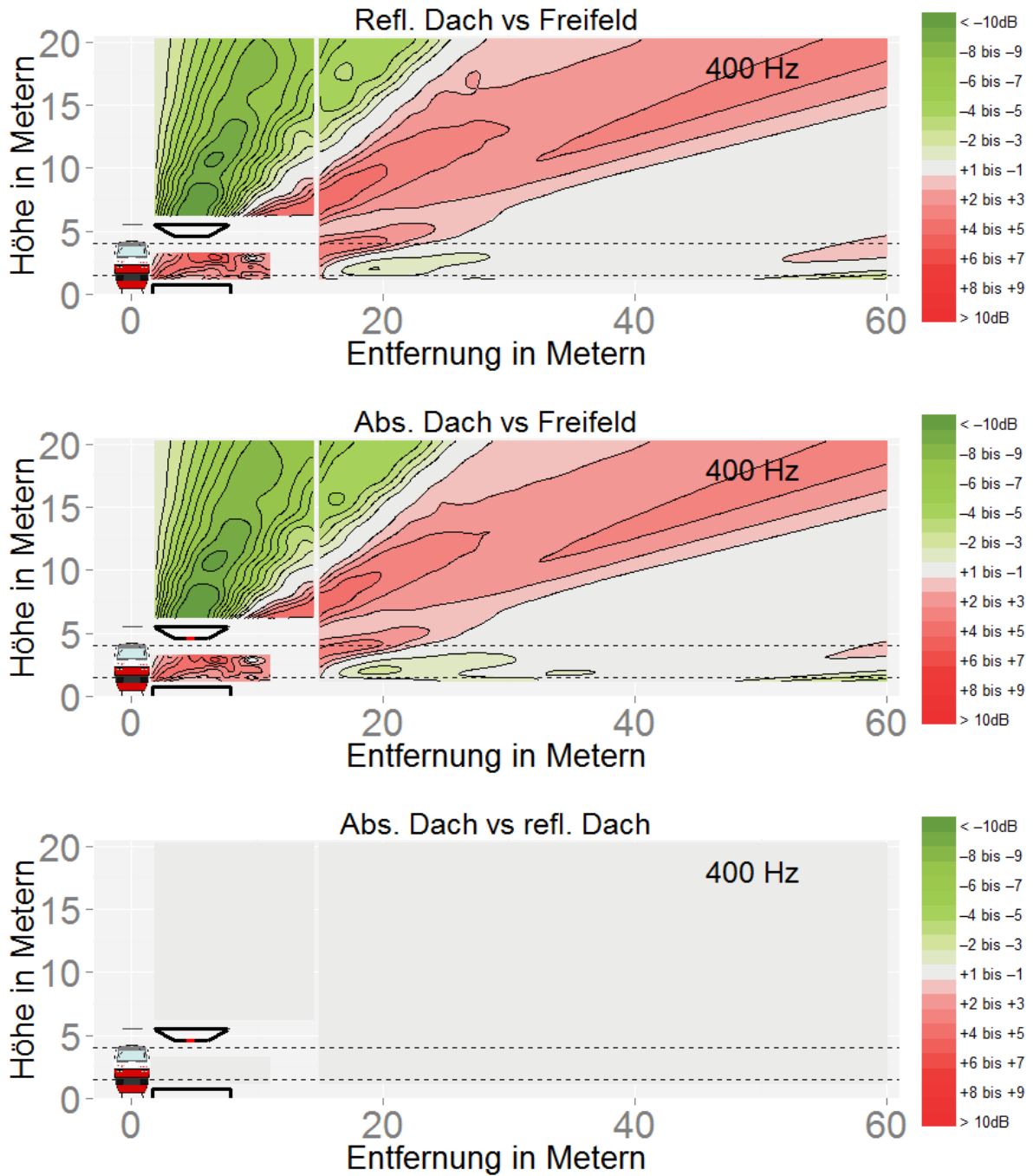


Abbildung 196

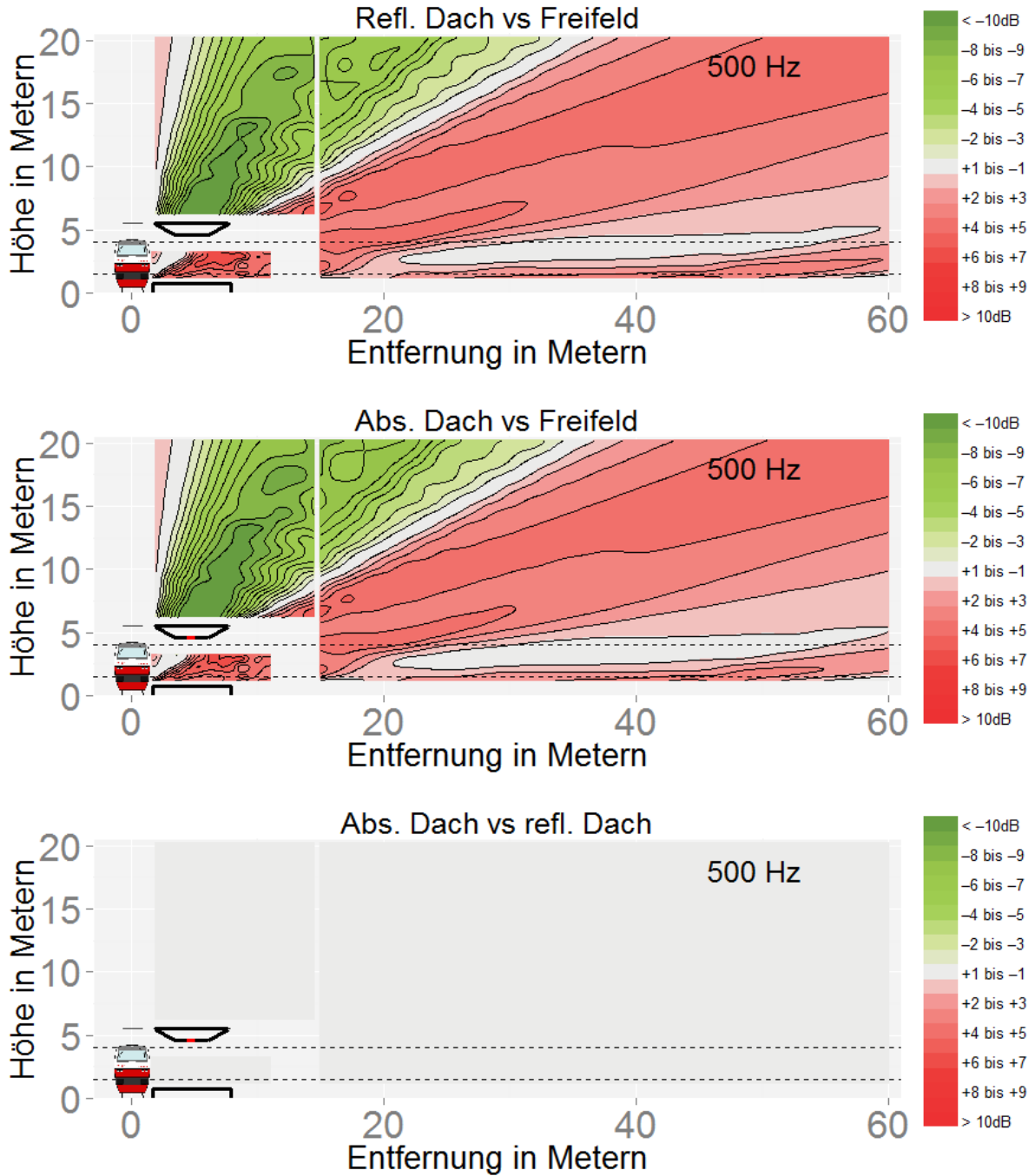


Abbildung 197

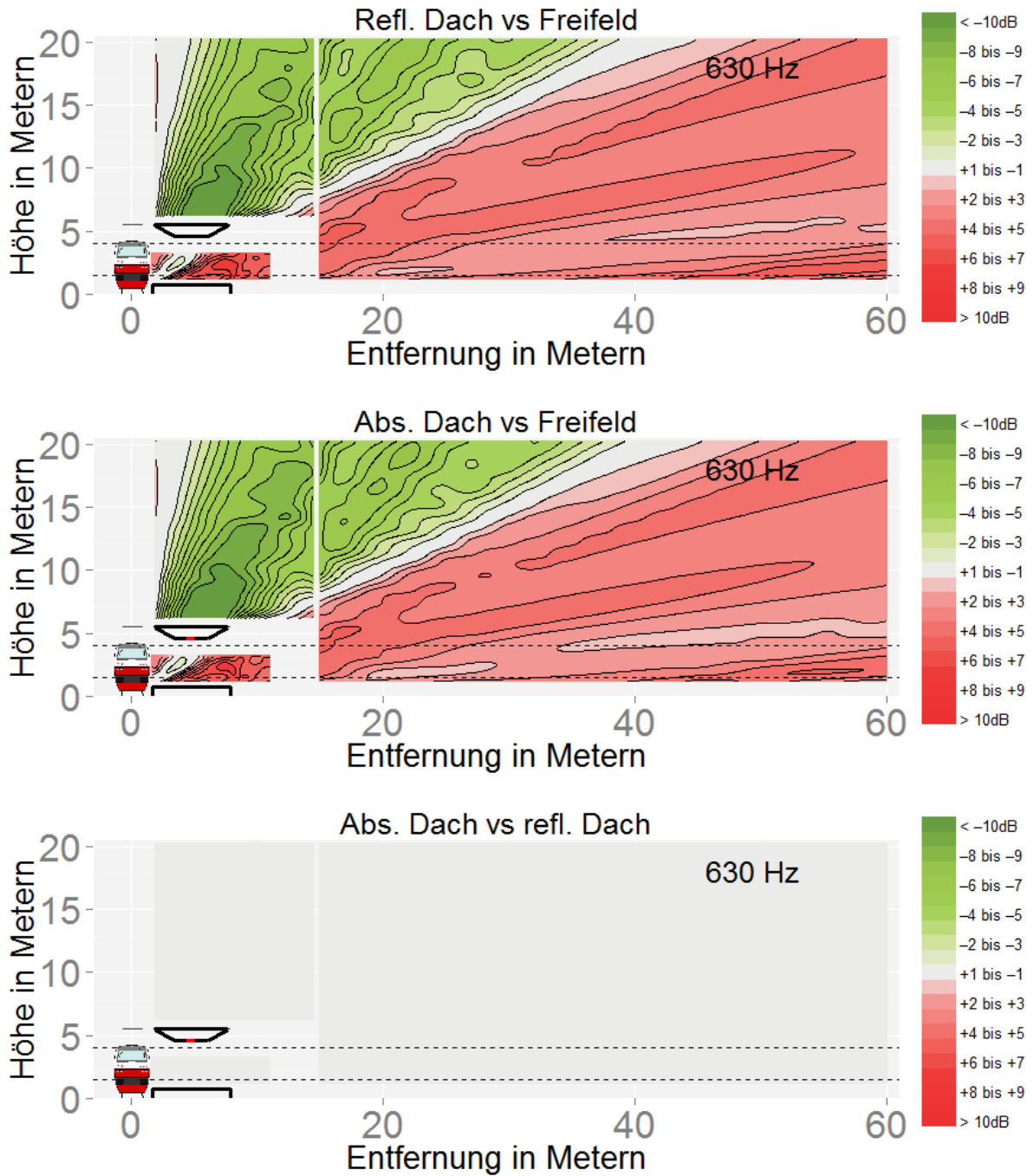


Abbildung 198

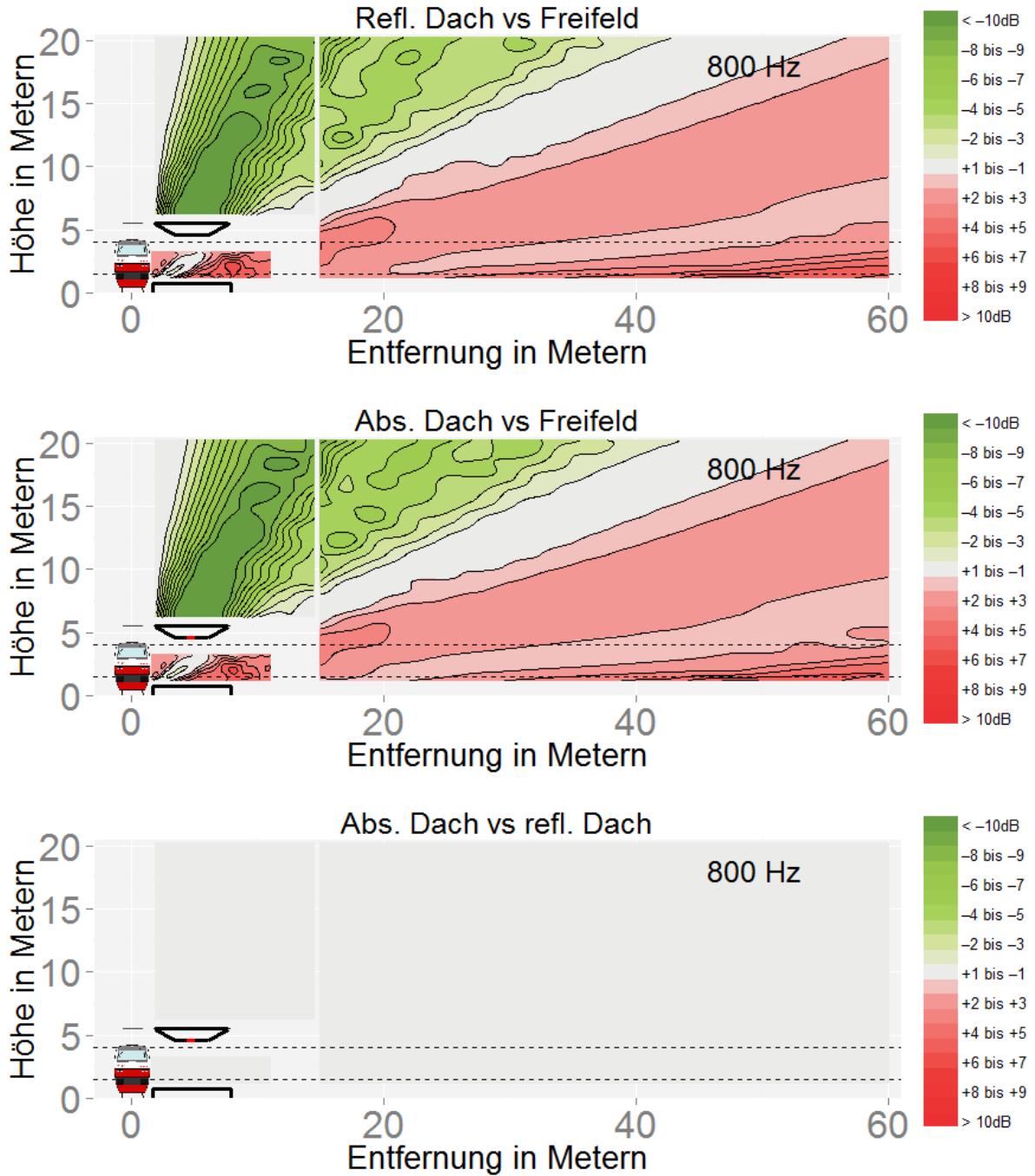


Abbildung 199

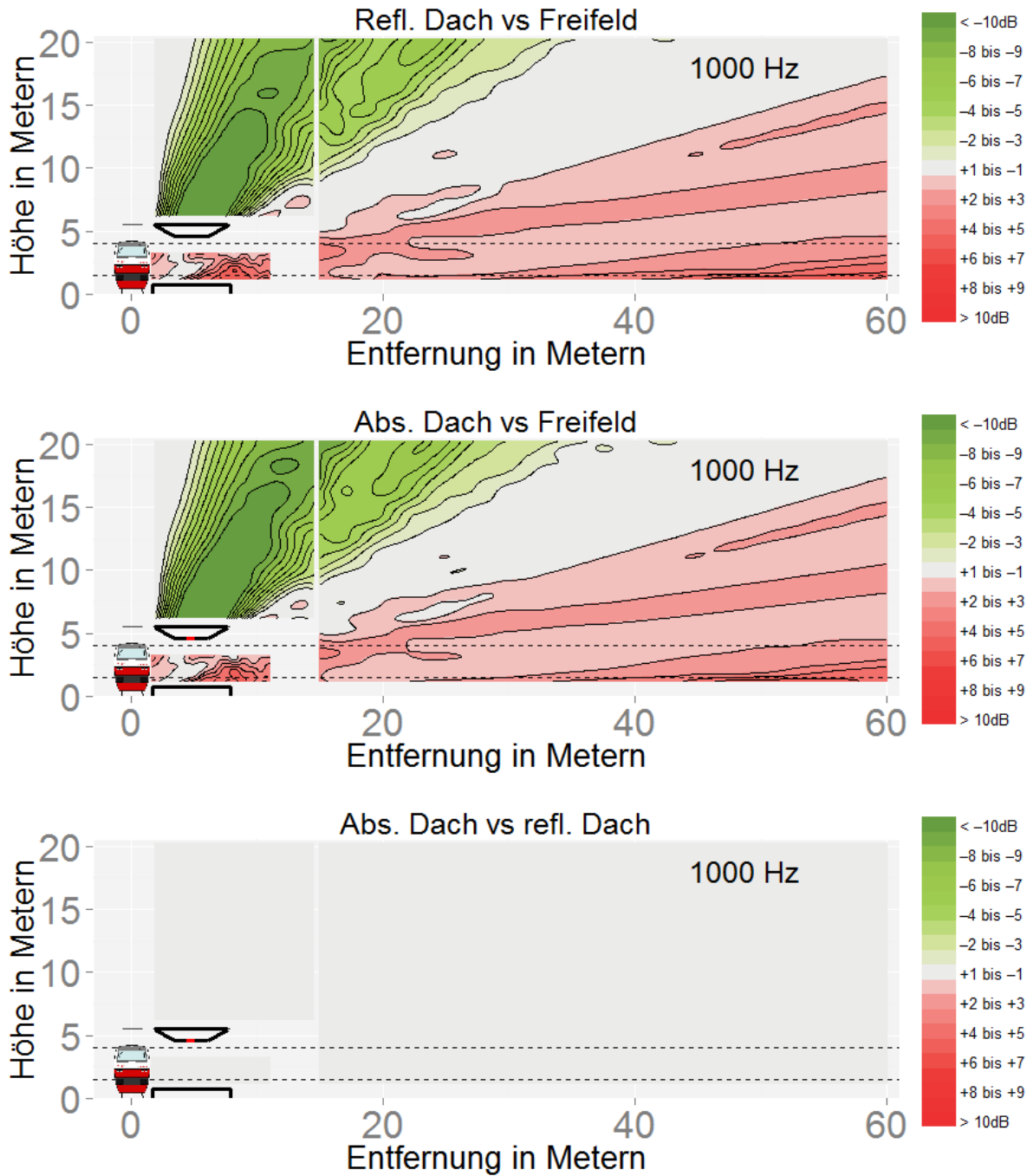


Abbildung 200

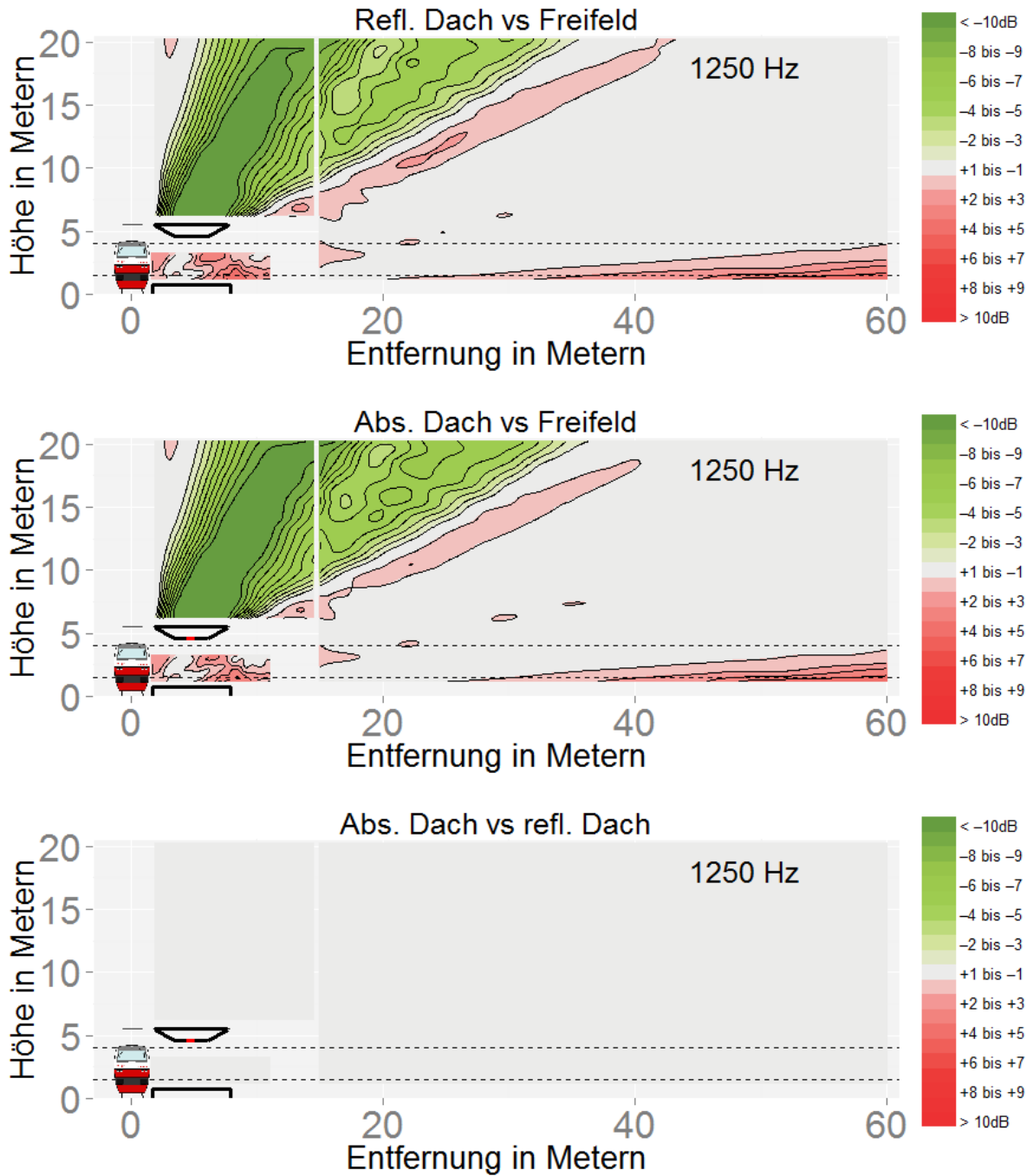


Abbildung 201

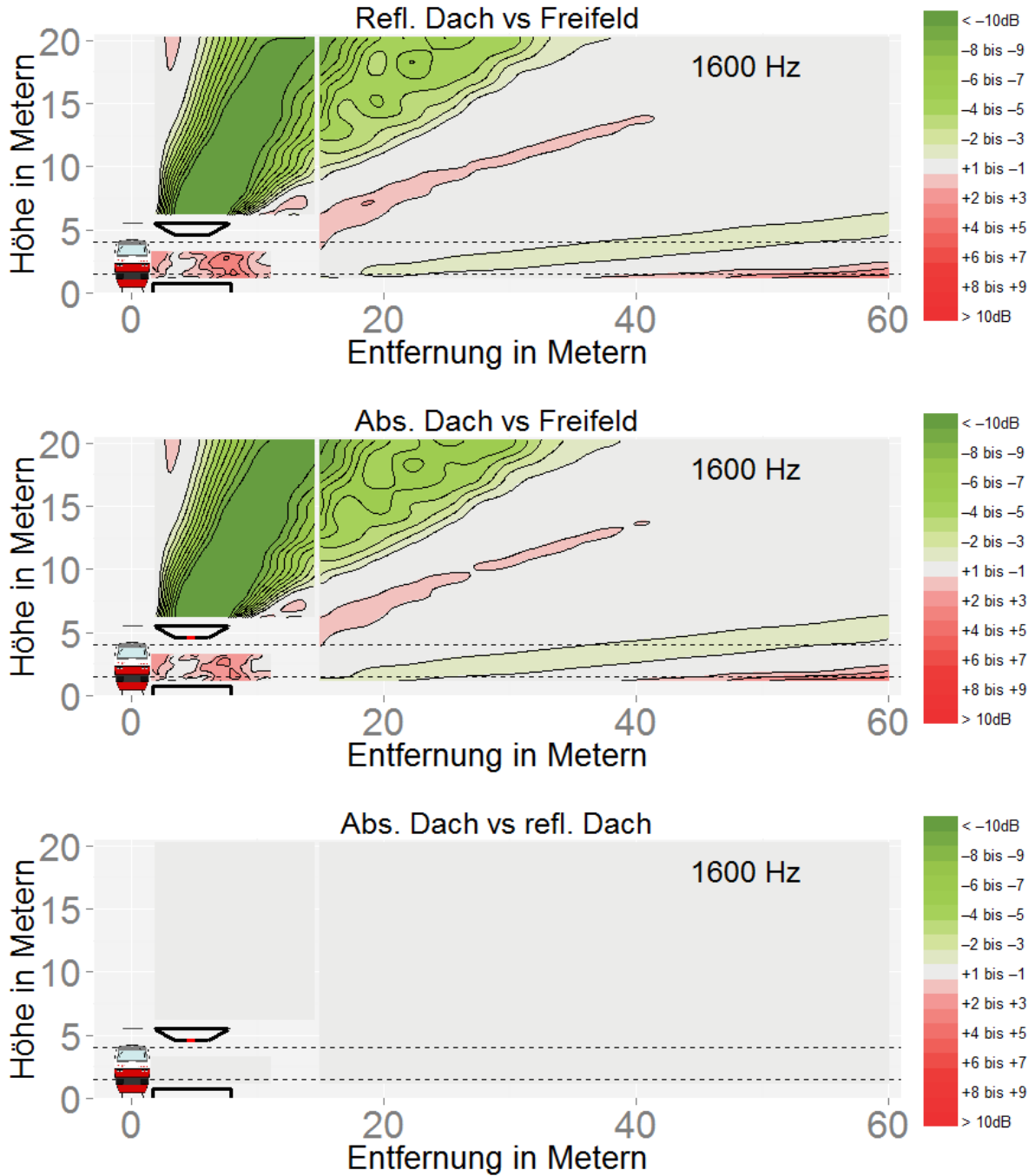


Abbildung 202

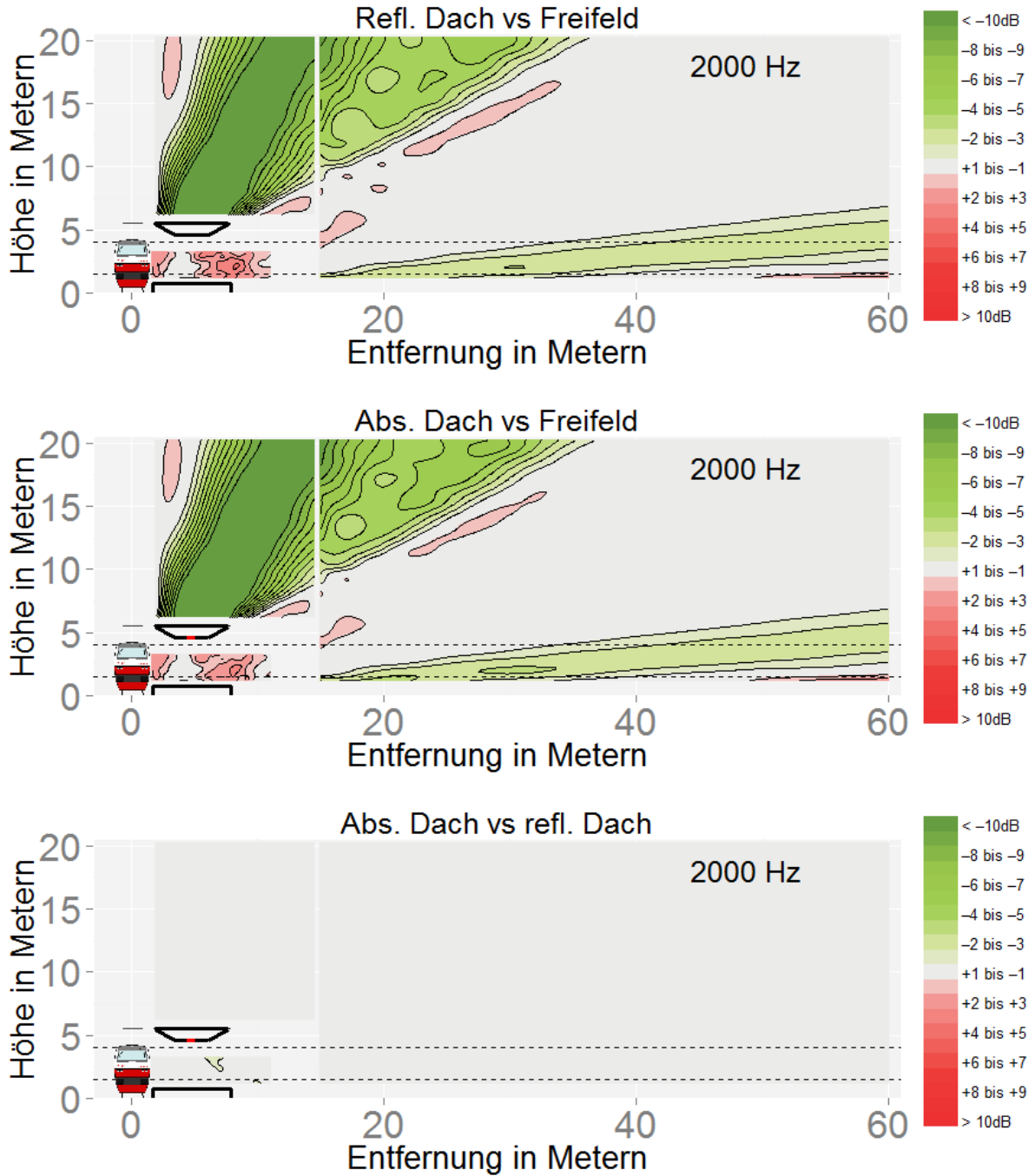


Abbildung 203

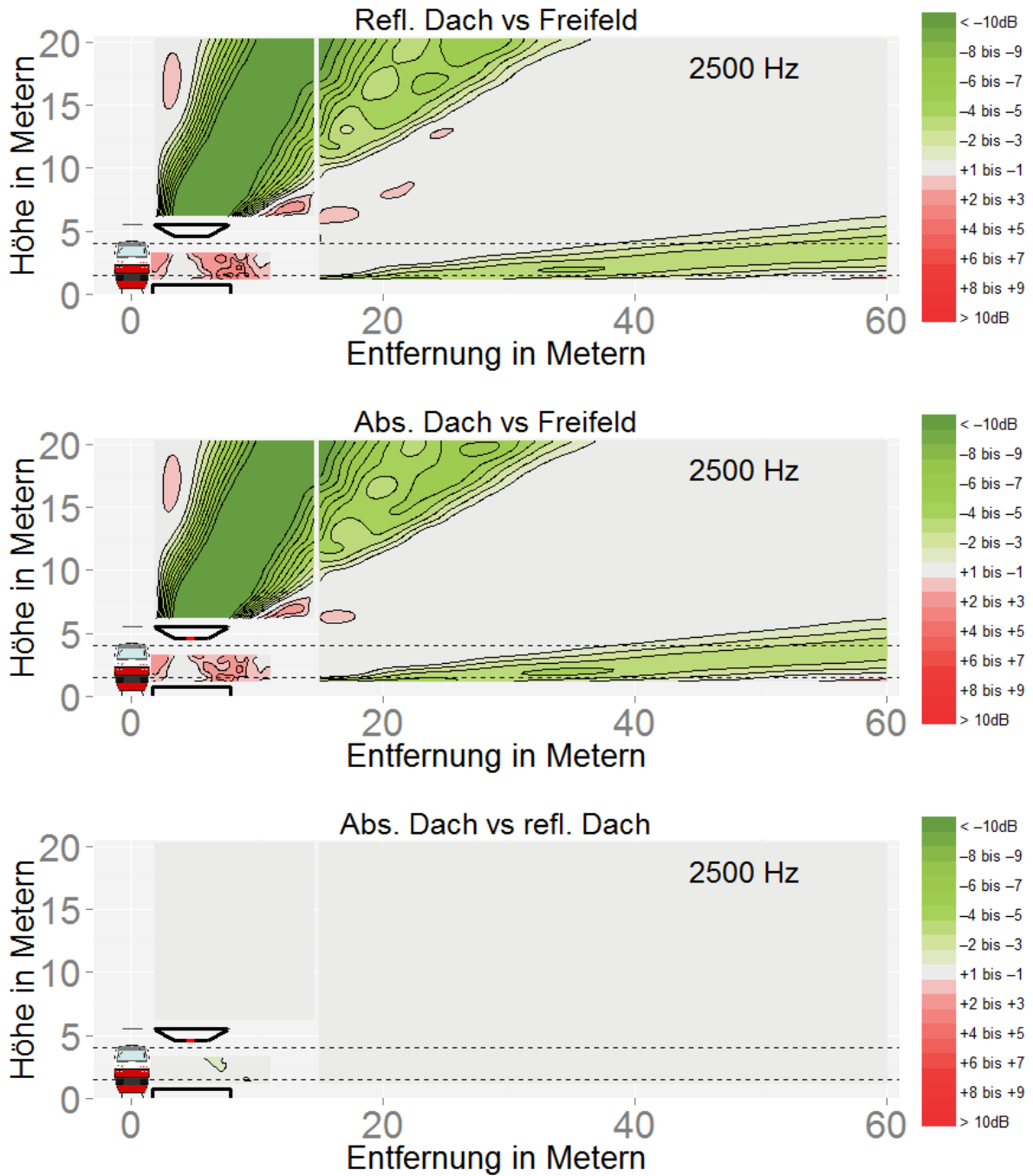


Abbildung 204

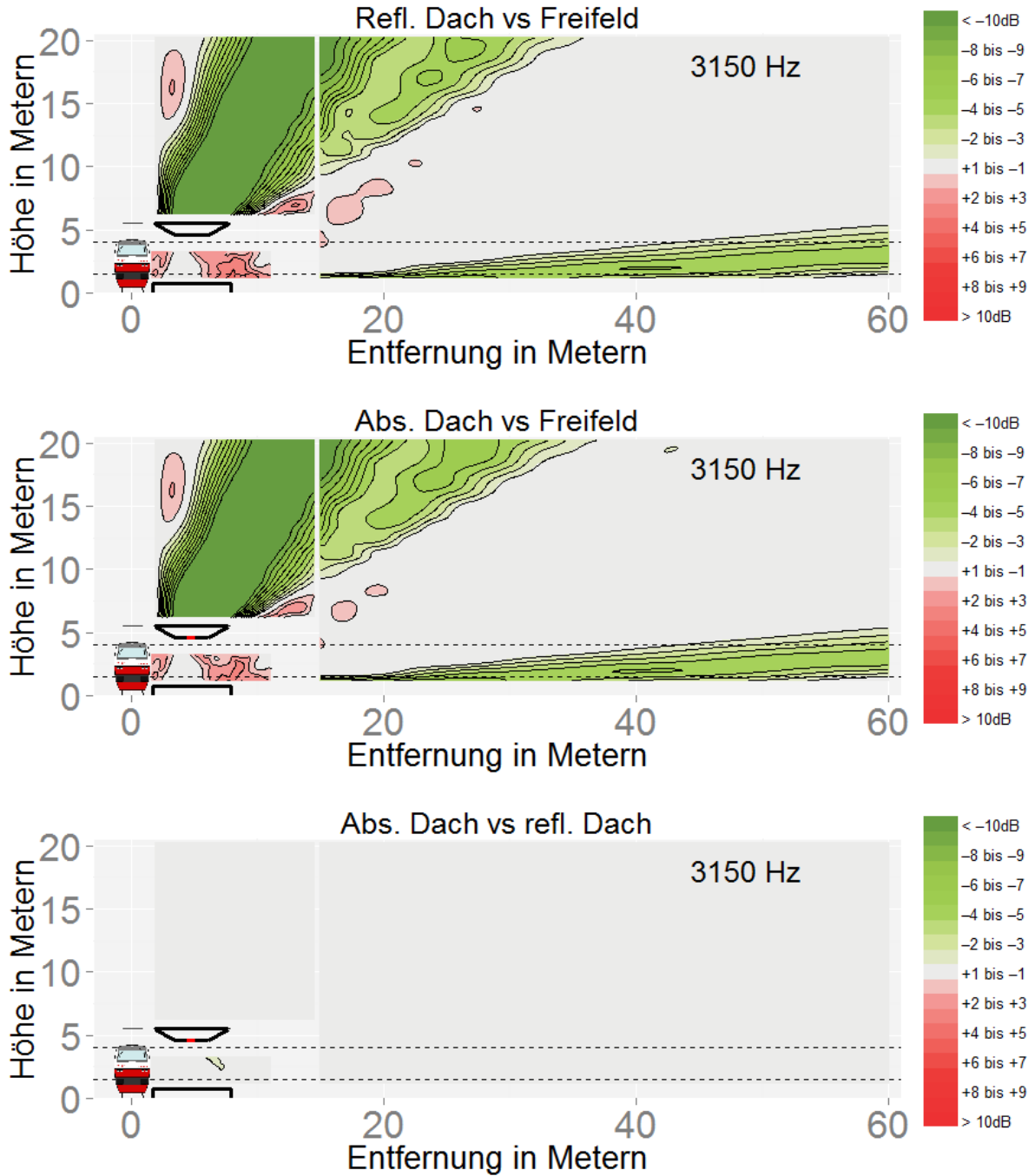


Abbildung 205

D.5: Effekt des absorbierenden Daches, breiter Bahnsteig

Dargestellt sind die Dritteloktavbandpegel für den Vergleich sowohl zwischen dem breitem Bahnsteig mit reflektierendem Dach (obere Grafik) als auch mit absorbierendem Dach (mittlere Grafik) im Vergleich zur freien Schallausbreitung für den absorbierenden Boden. Der Unterschied zwischen absorbierendem und reflektierendem Dach wird in der unteren Grafik dargestellt.

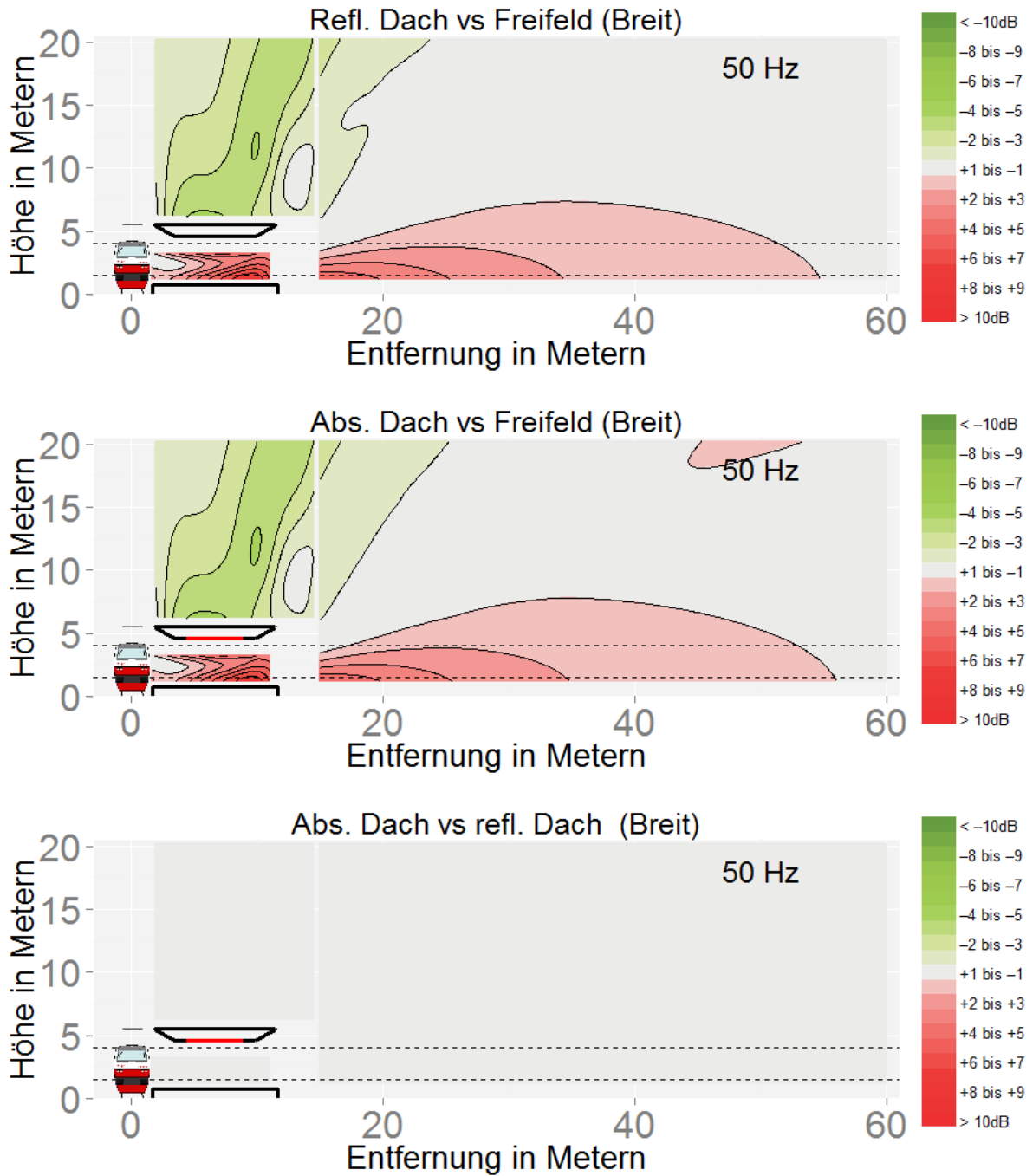


Abbildung 206

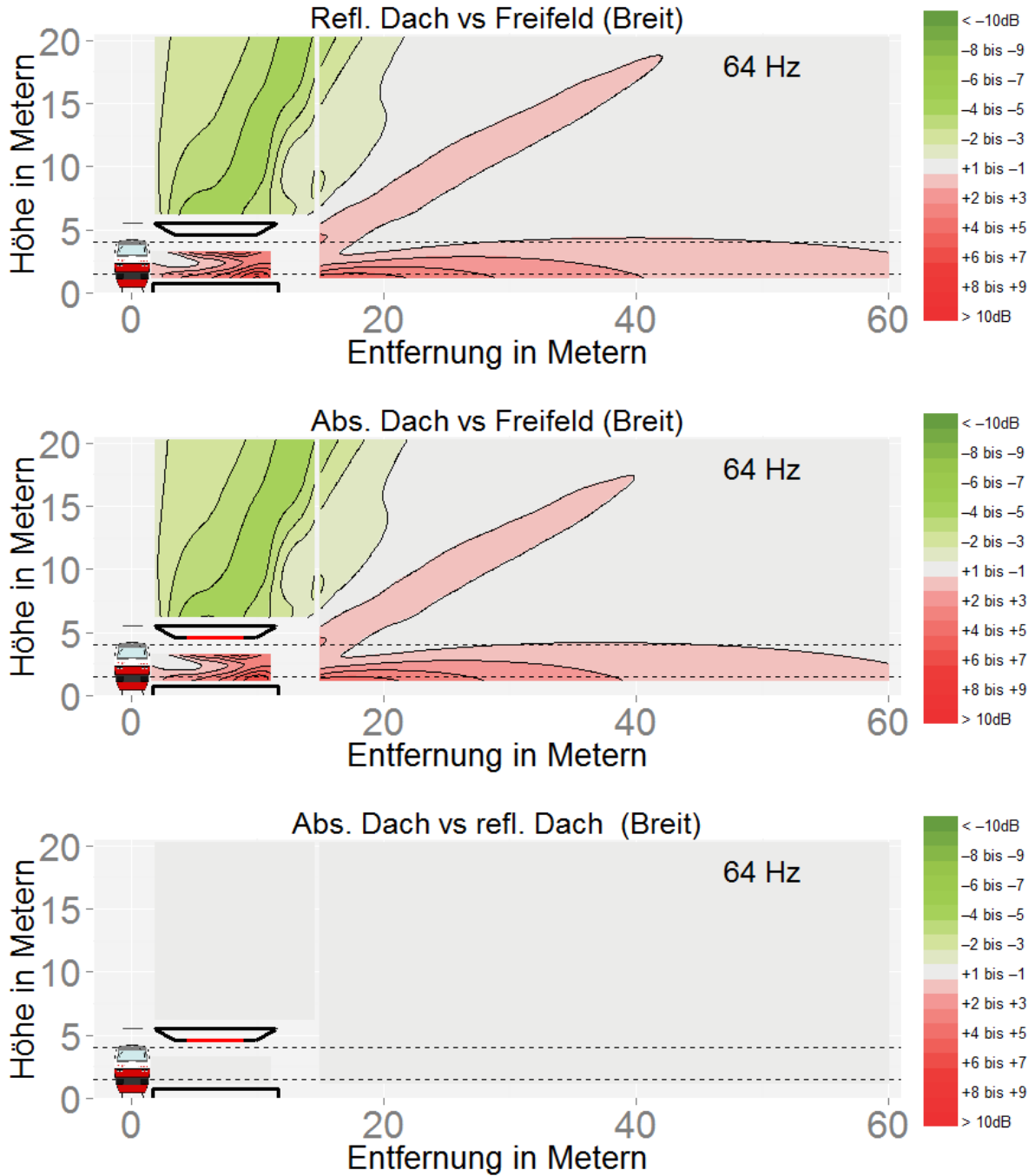


Abbildung 207

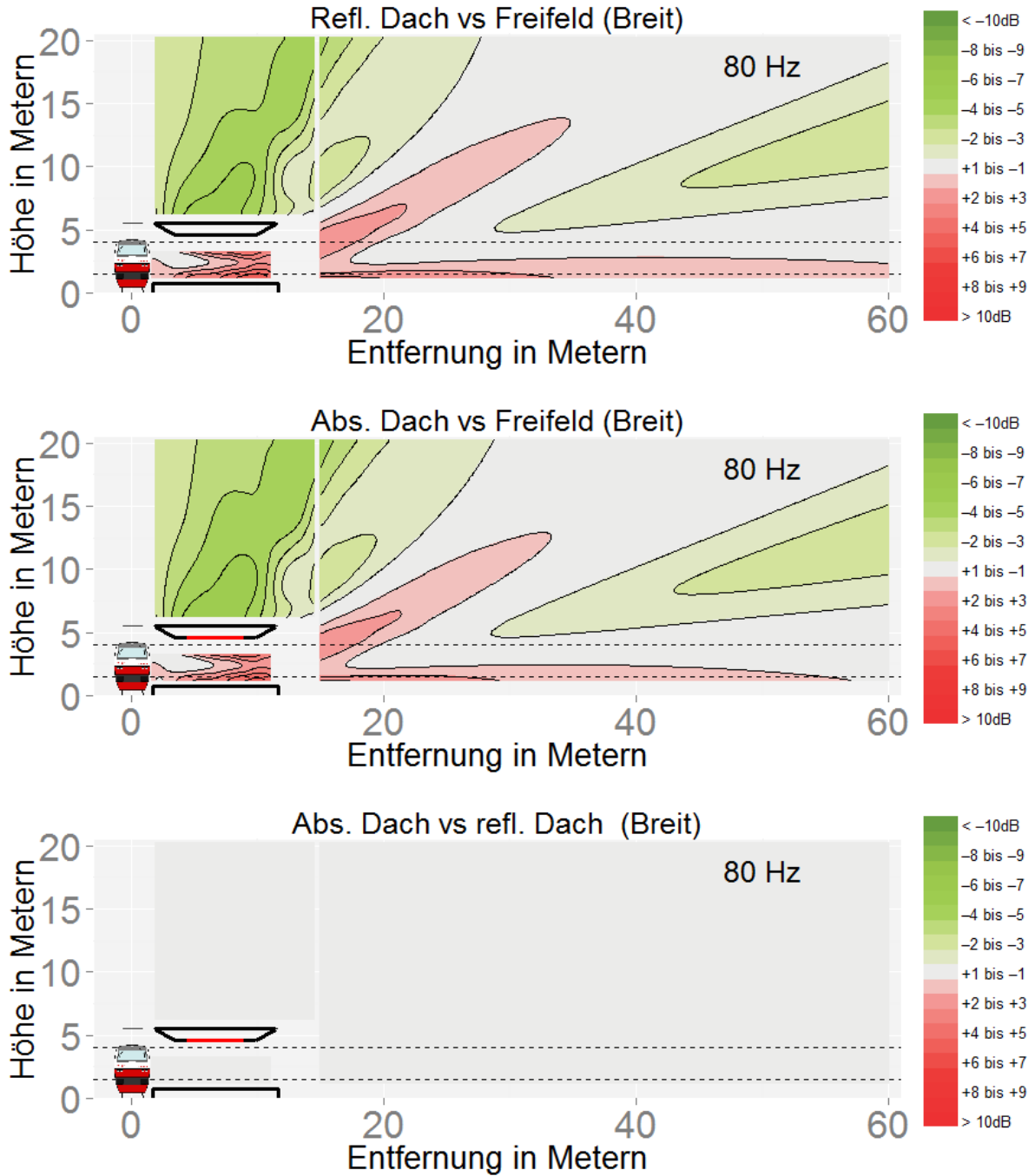


Abbildung 208

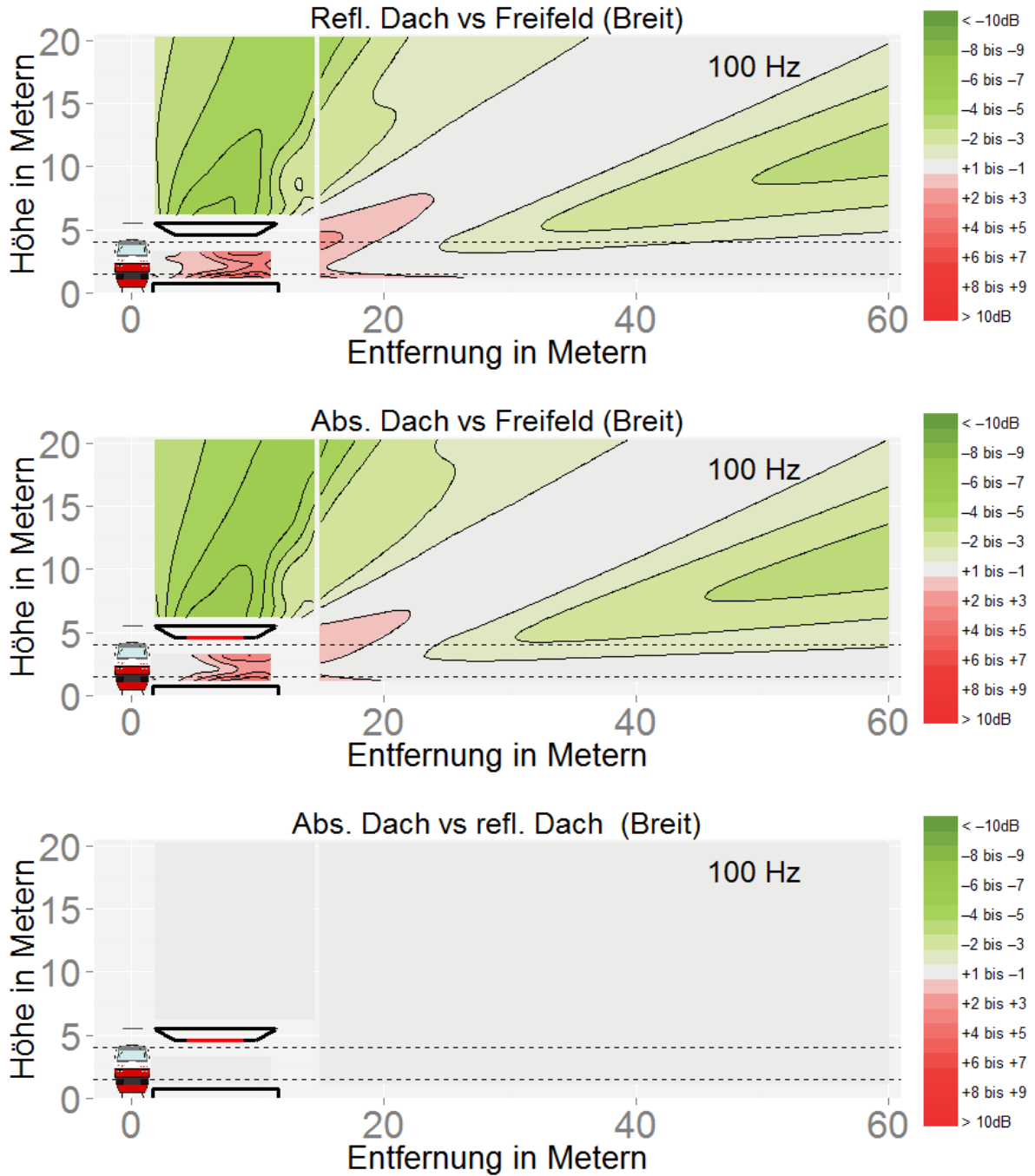


Abbildung 209

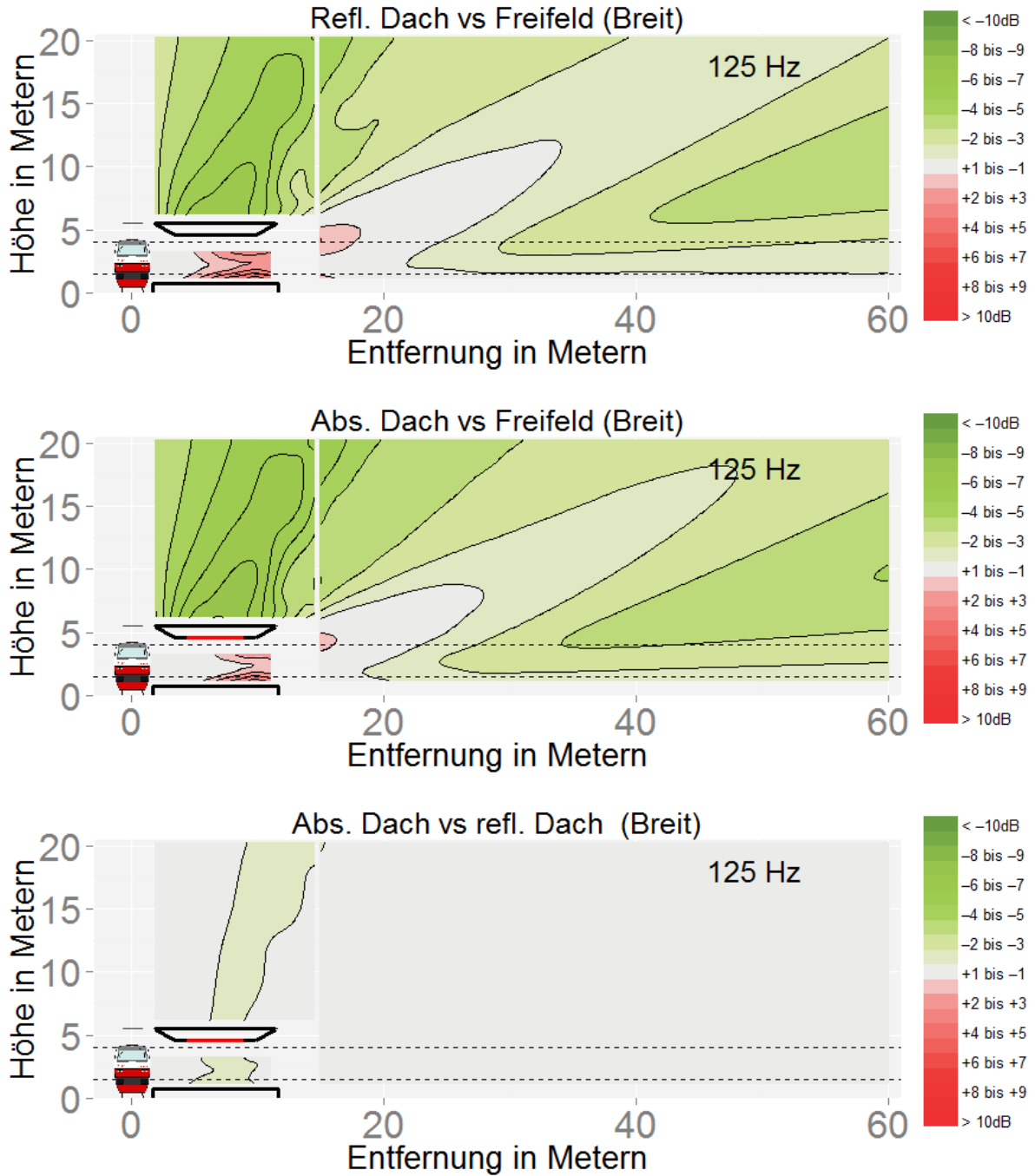


Abbildung 210

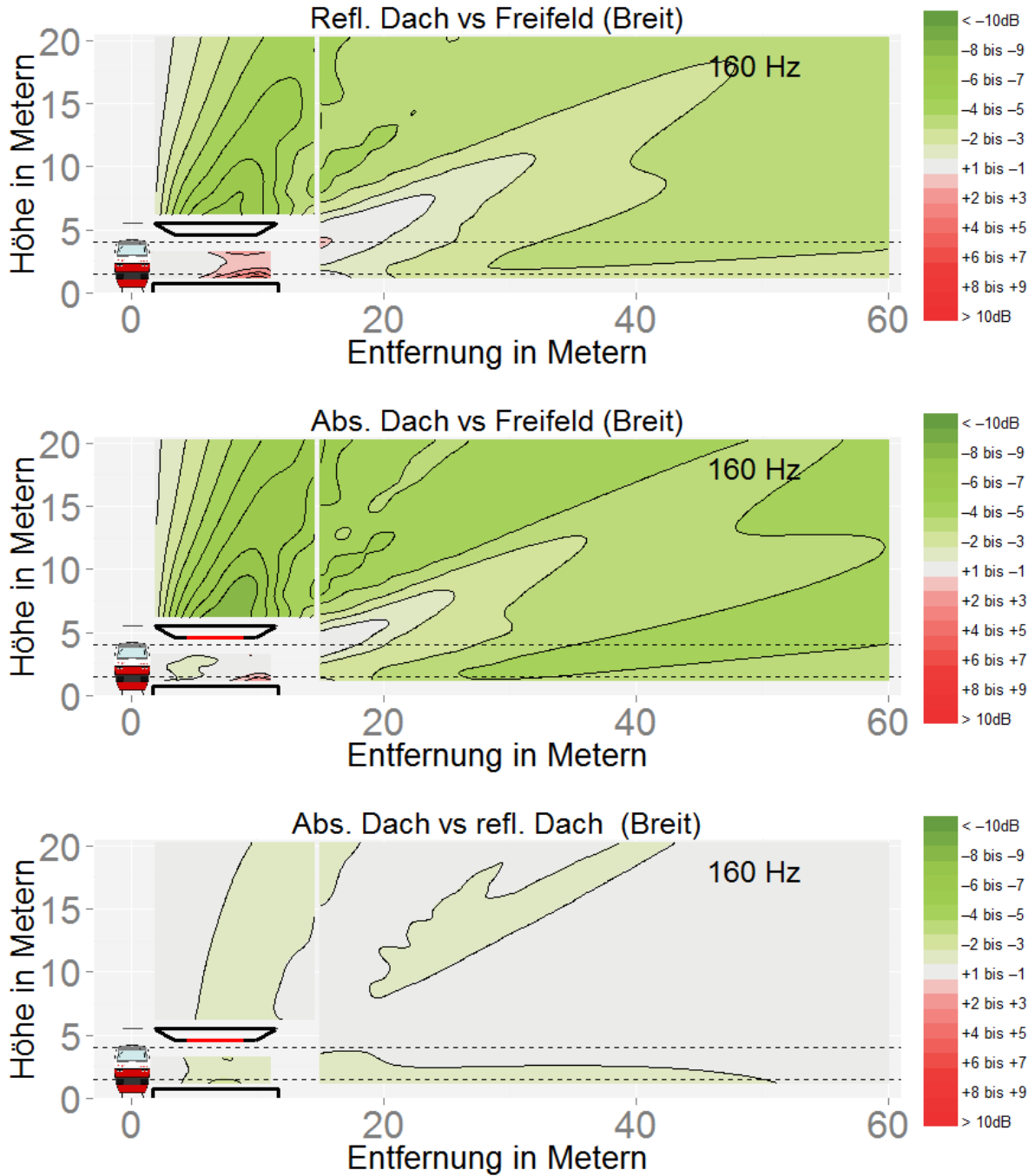


Abbildung 211

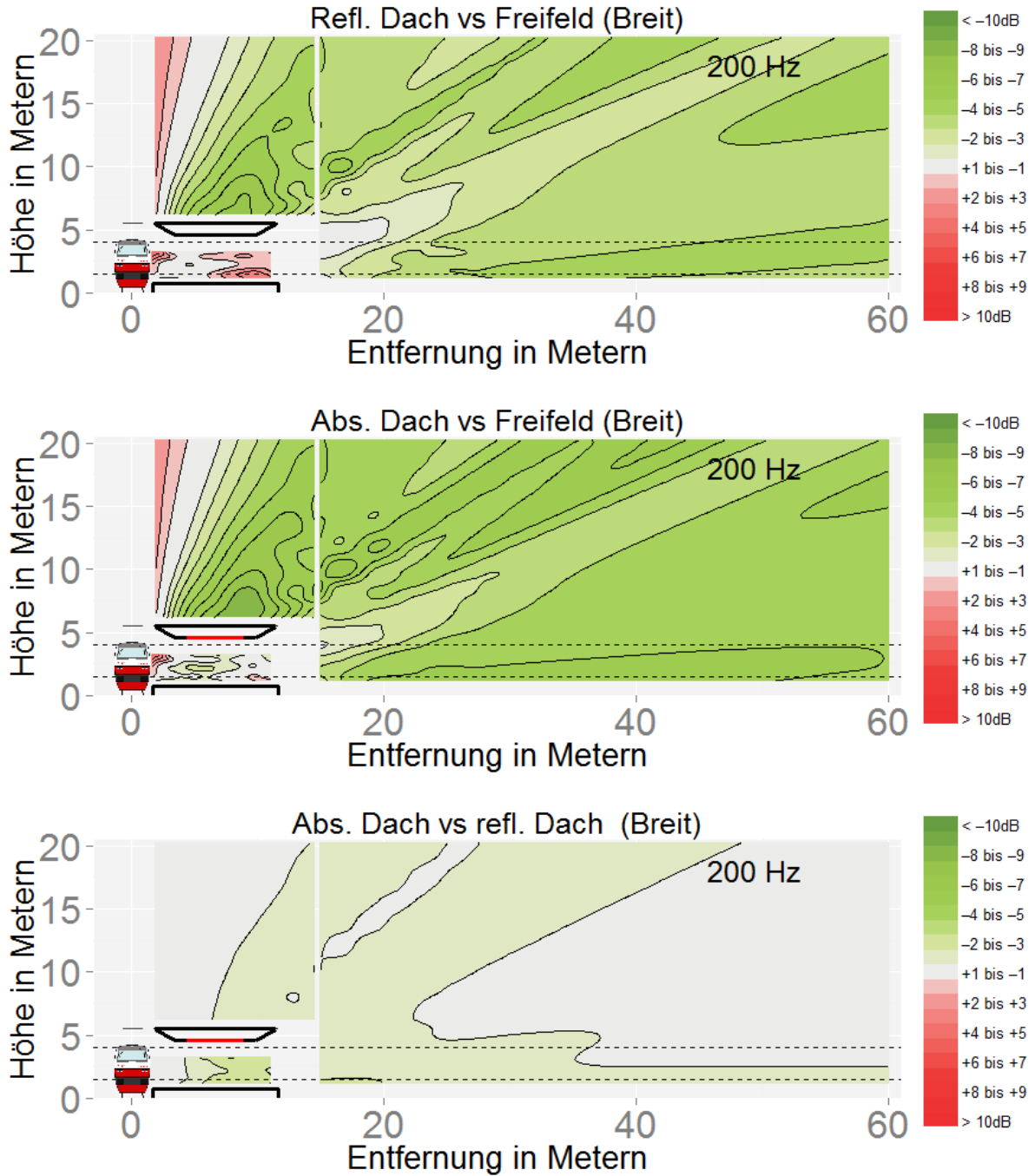


Abbildung 212

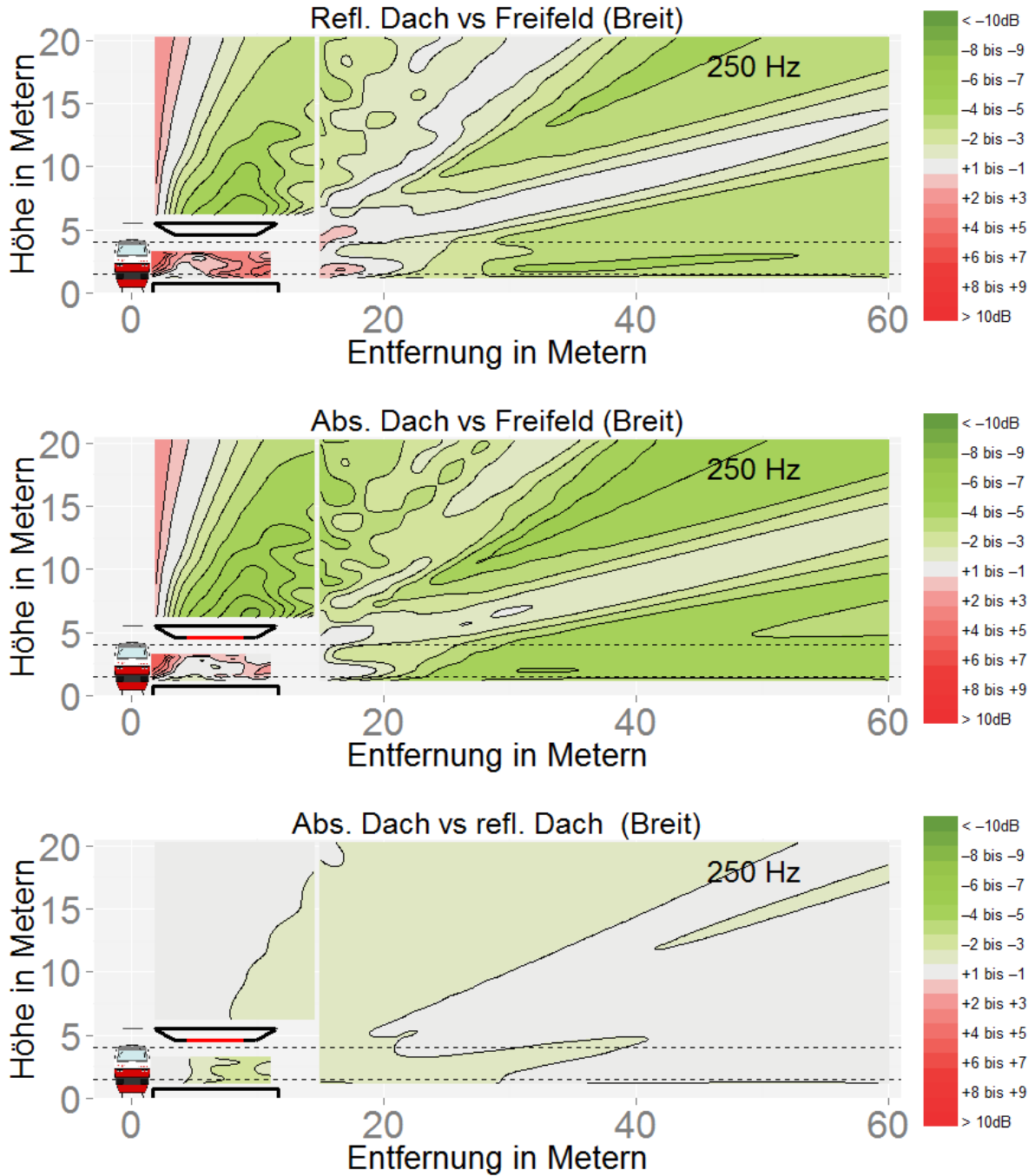


Abbildung 213

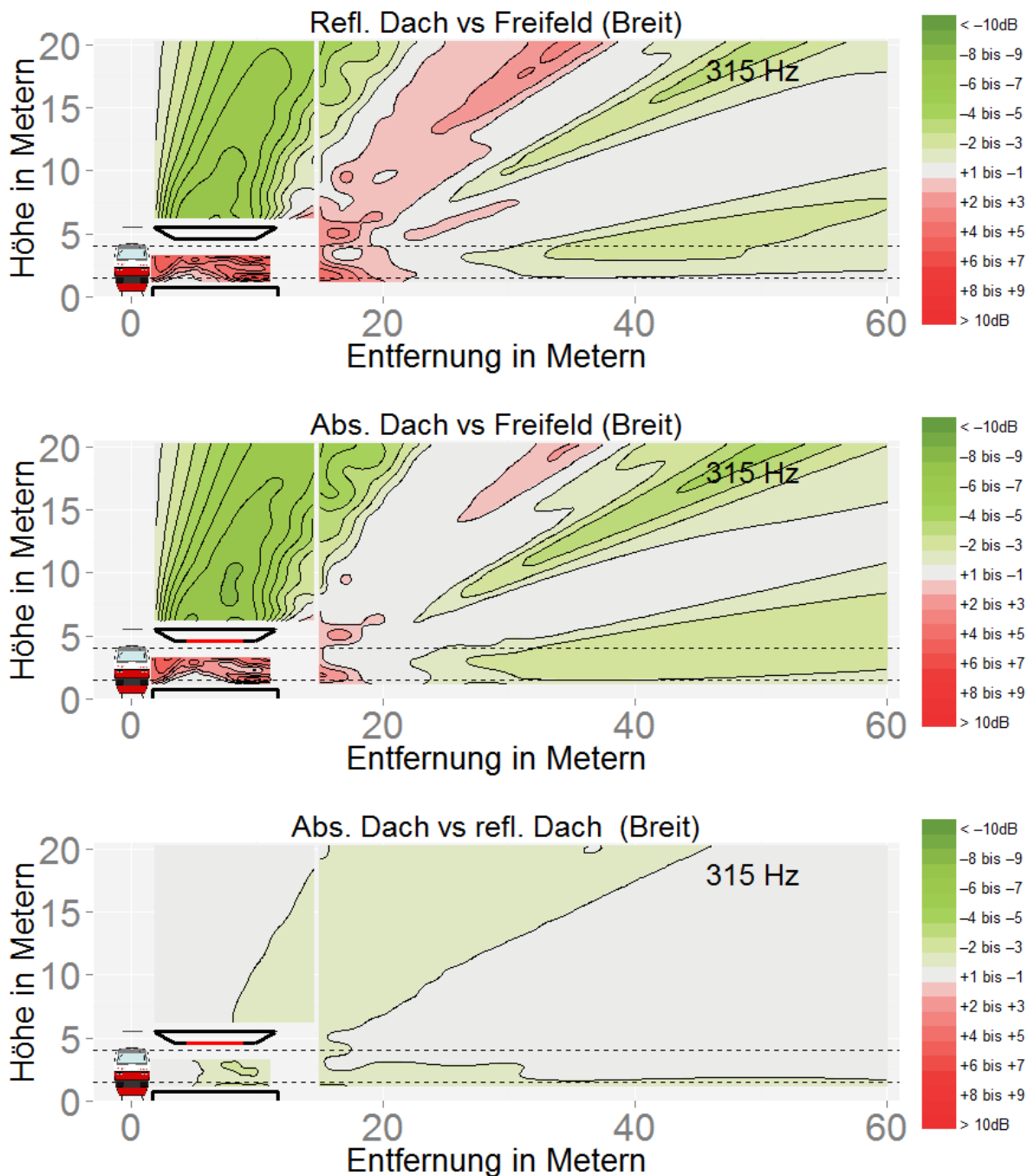


Abbildung 214

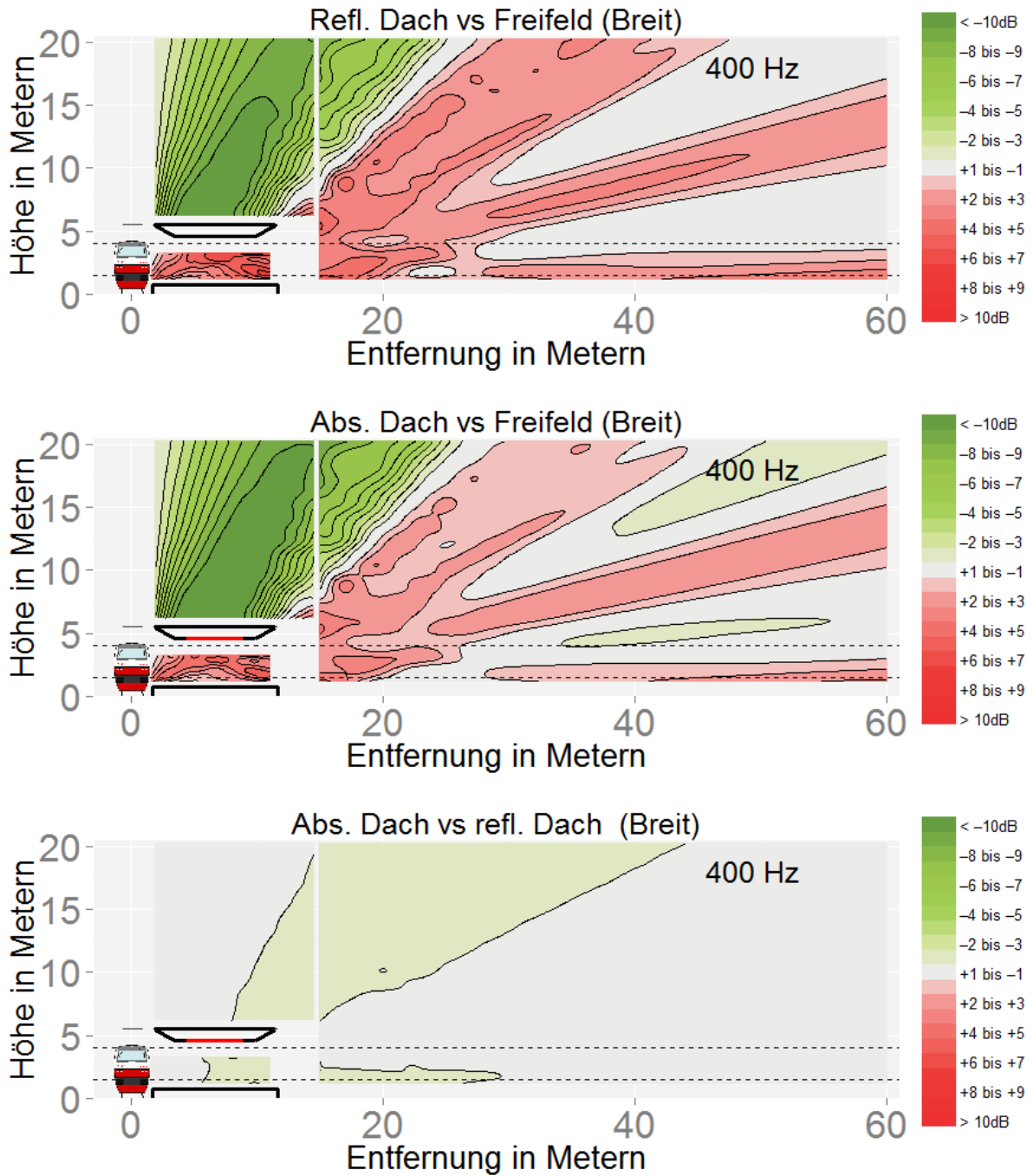


Abbildung 215

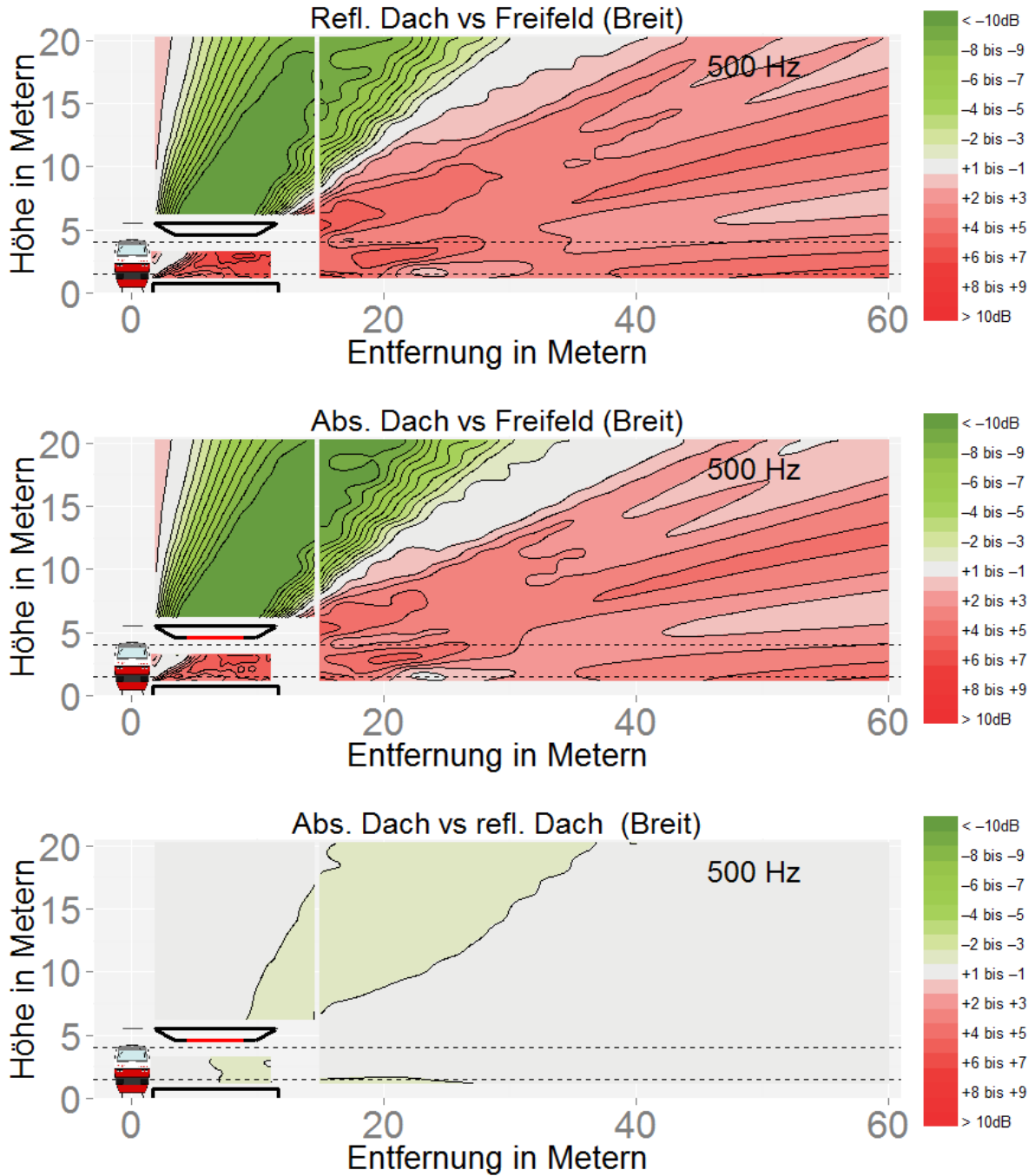


Abbildung 216

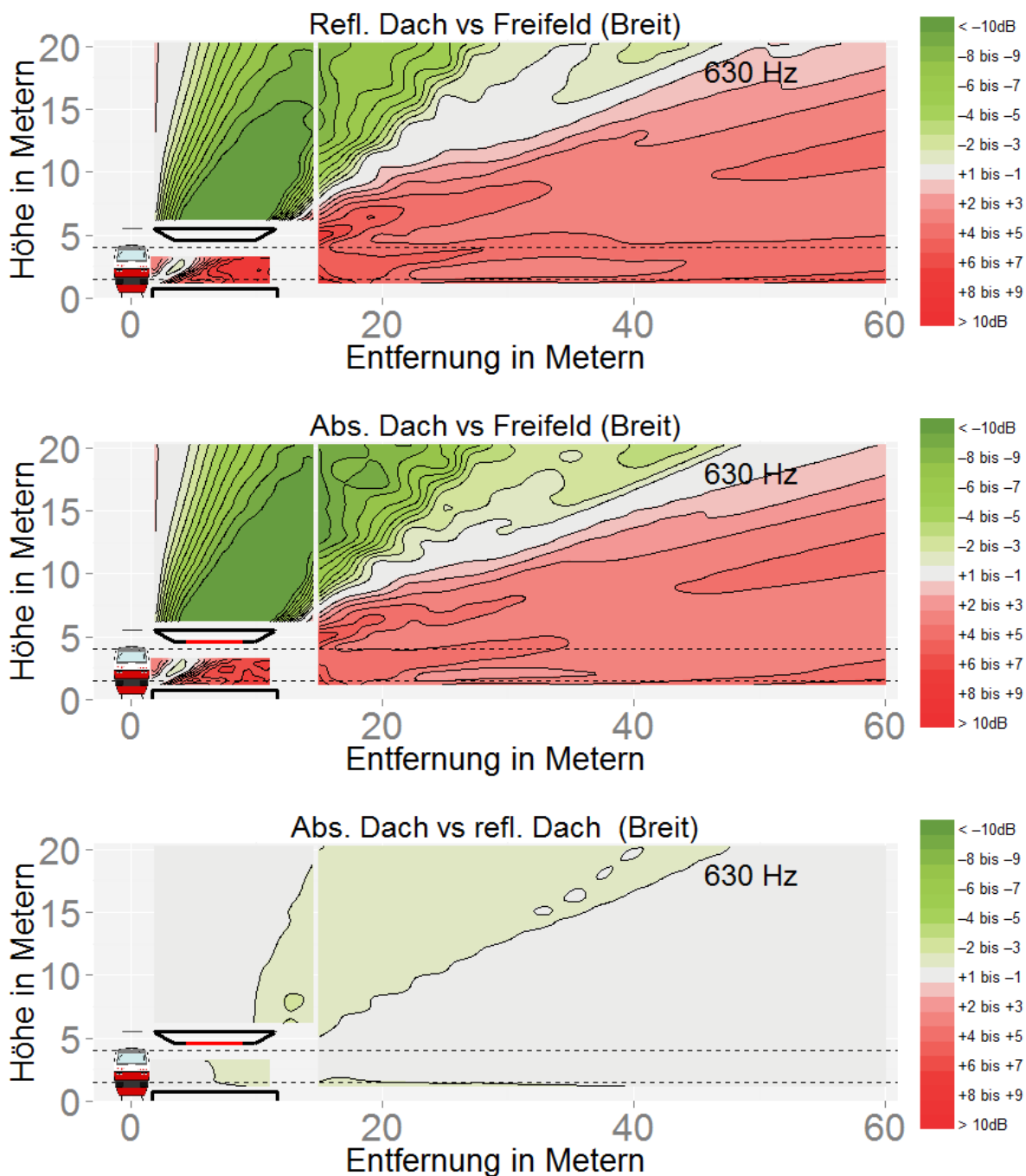


Abbildung 217

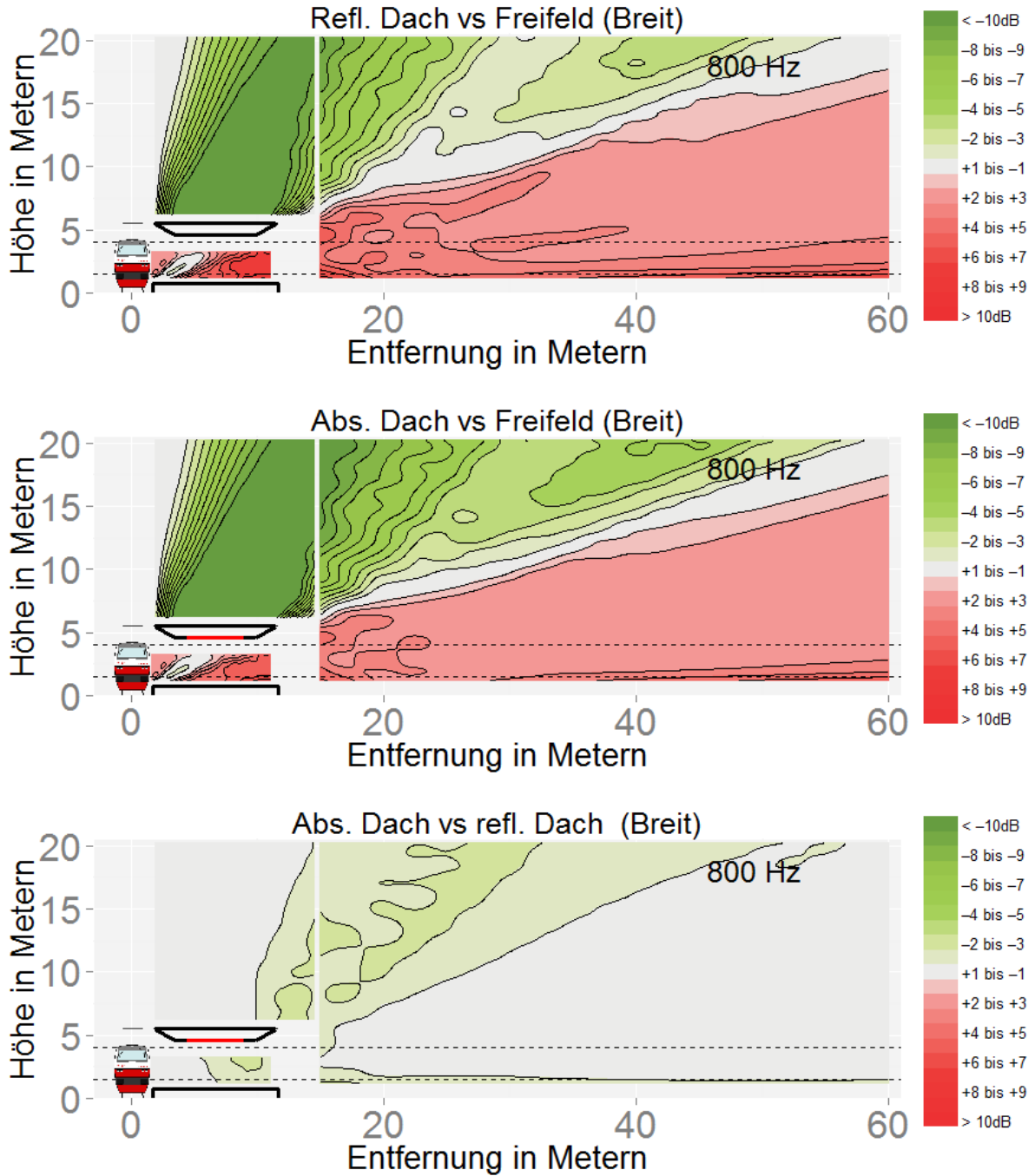


Abbildung 218

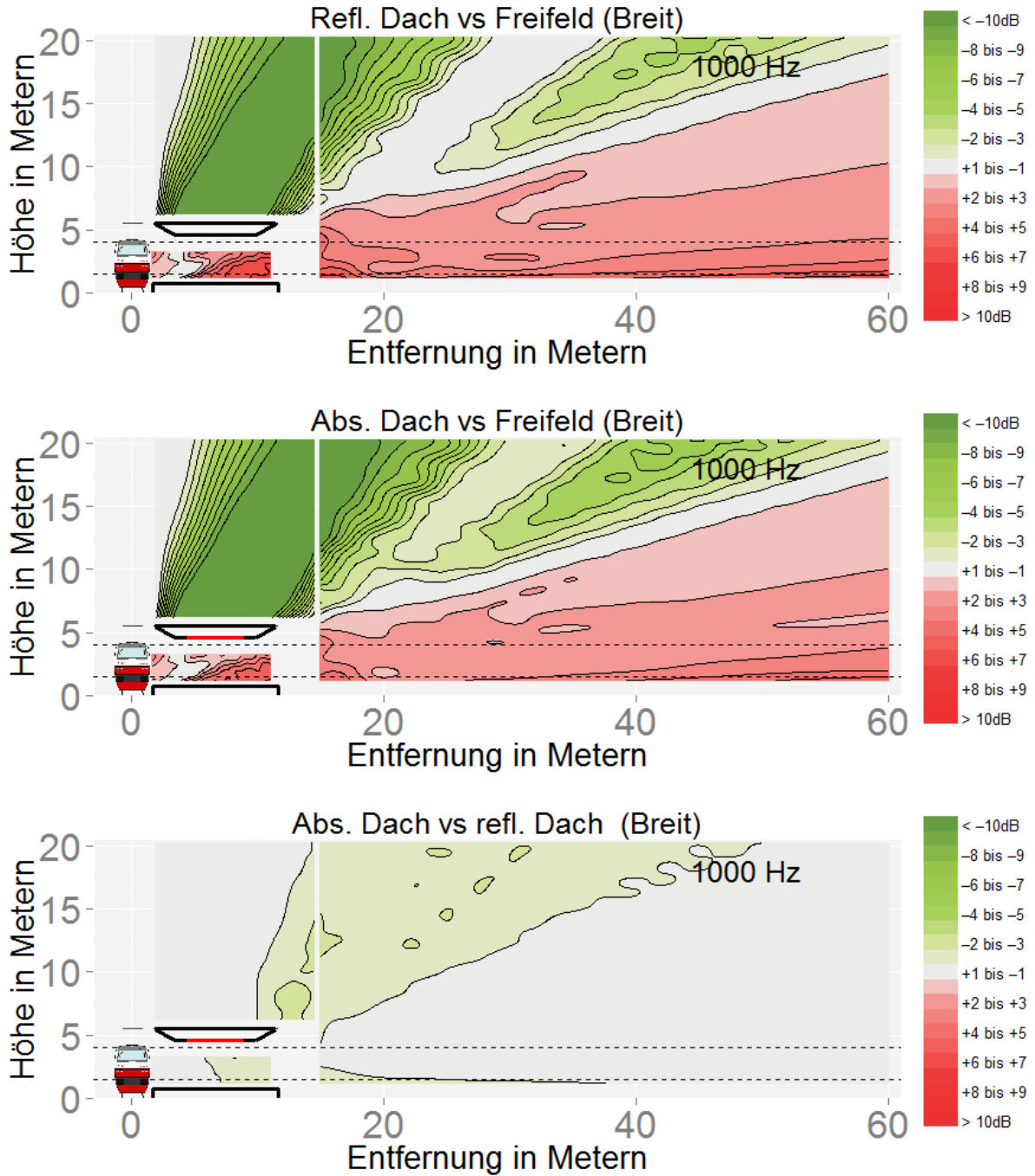


Abbildung 219

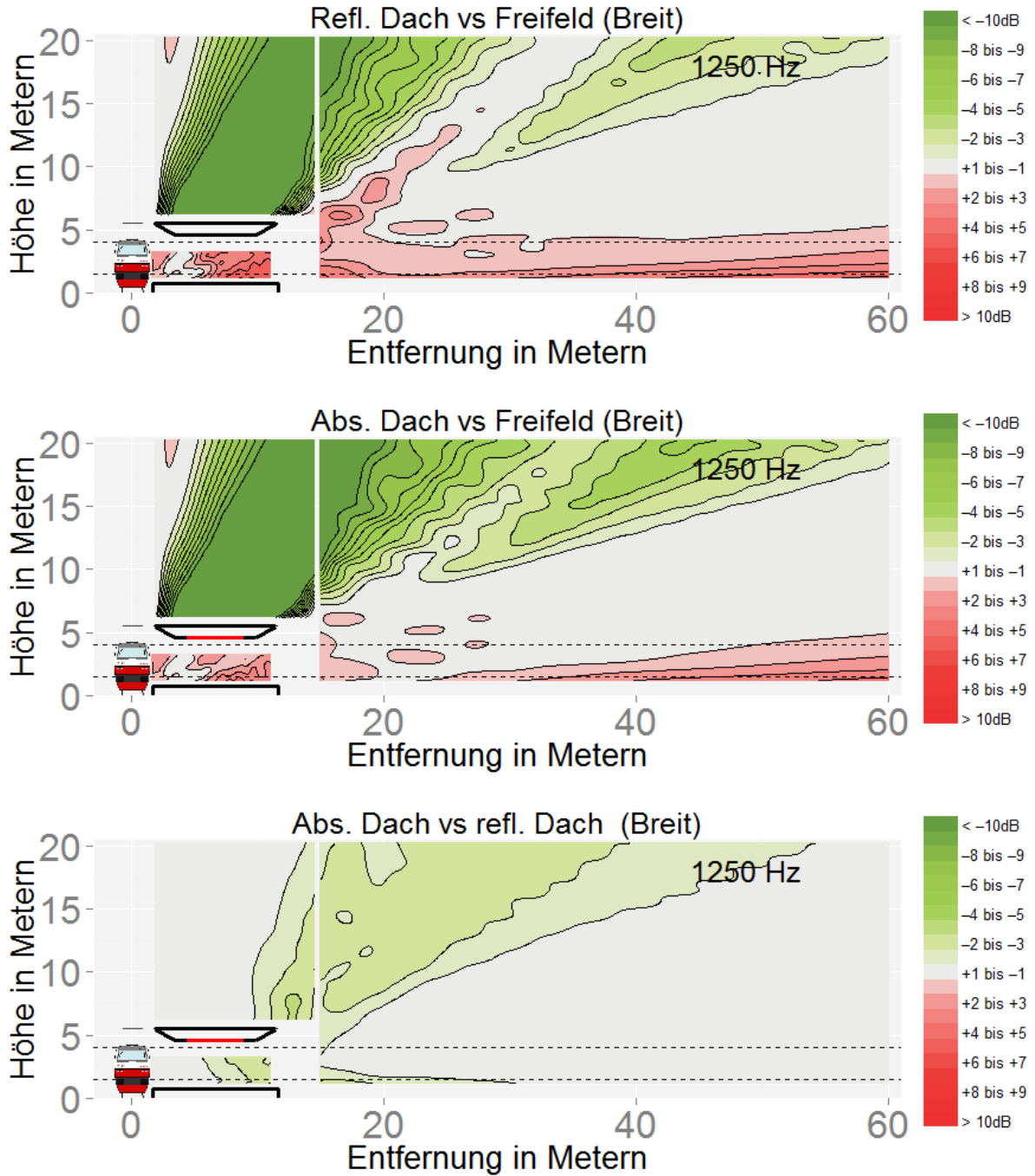


Abbildung 220

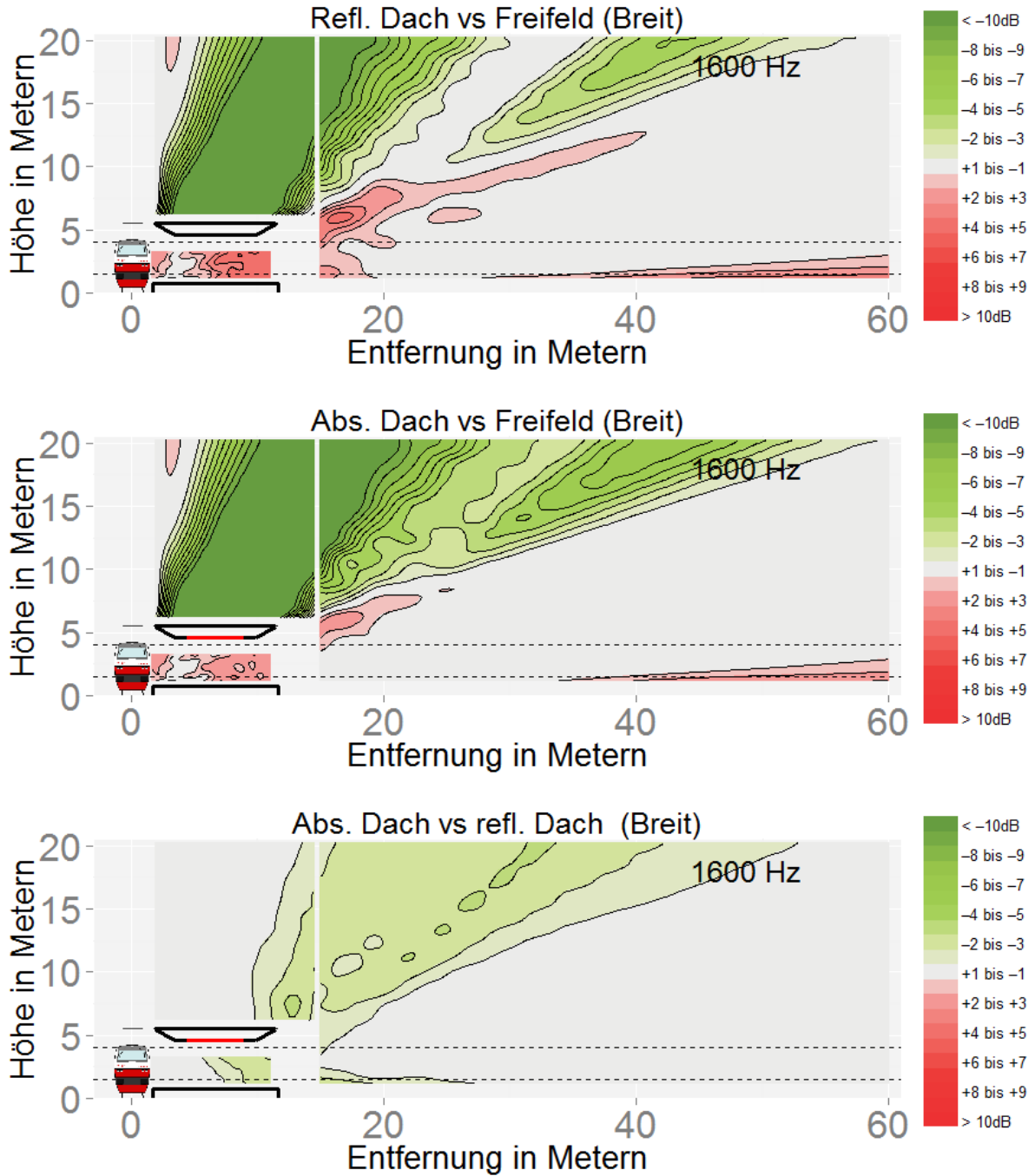


Abbildung 221

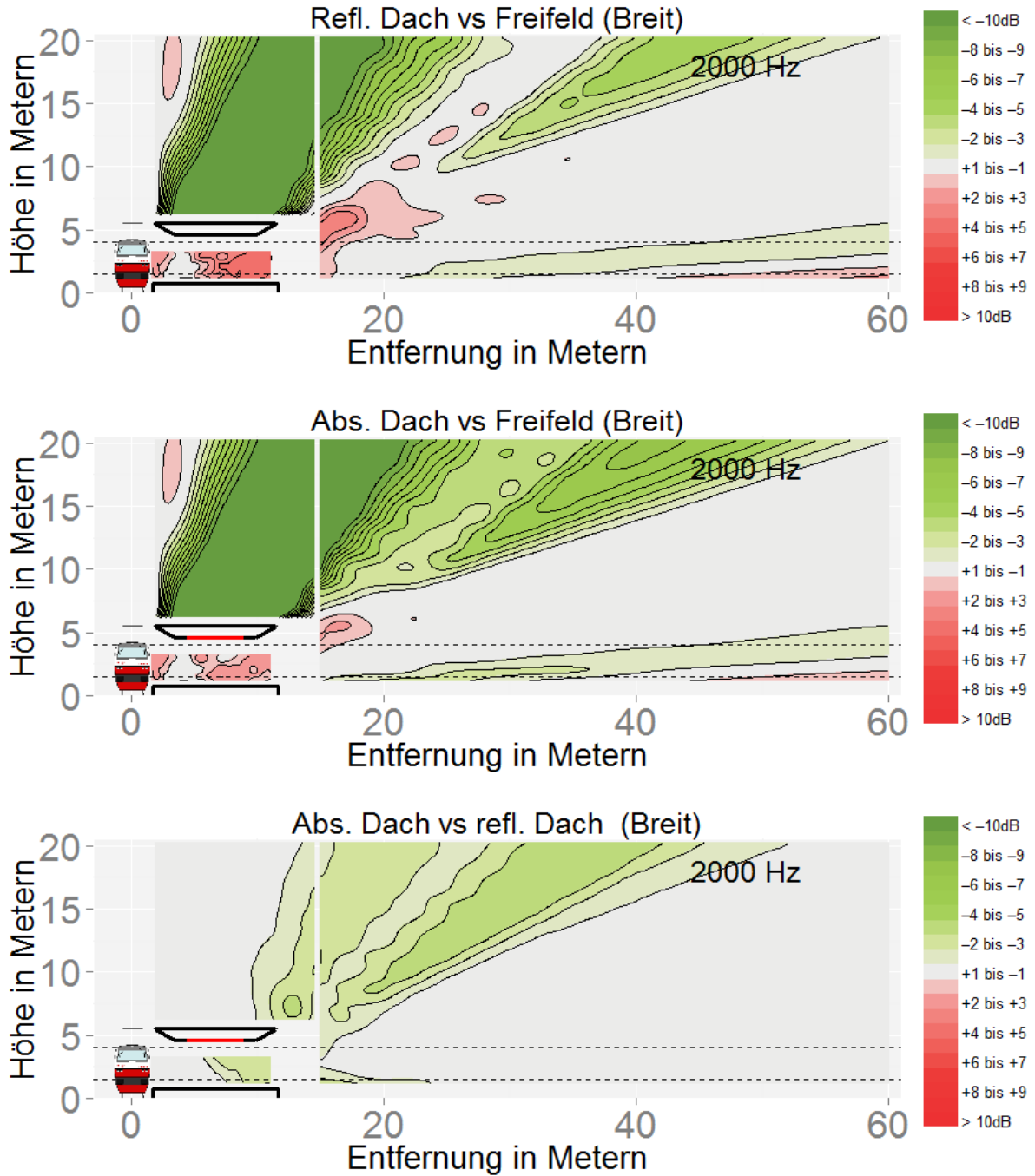


Abbildung 222

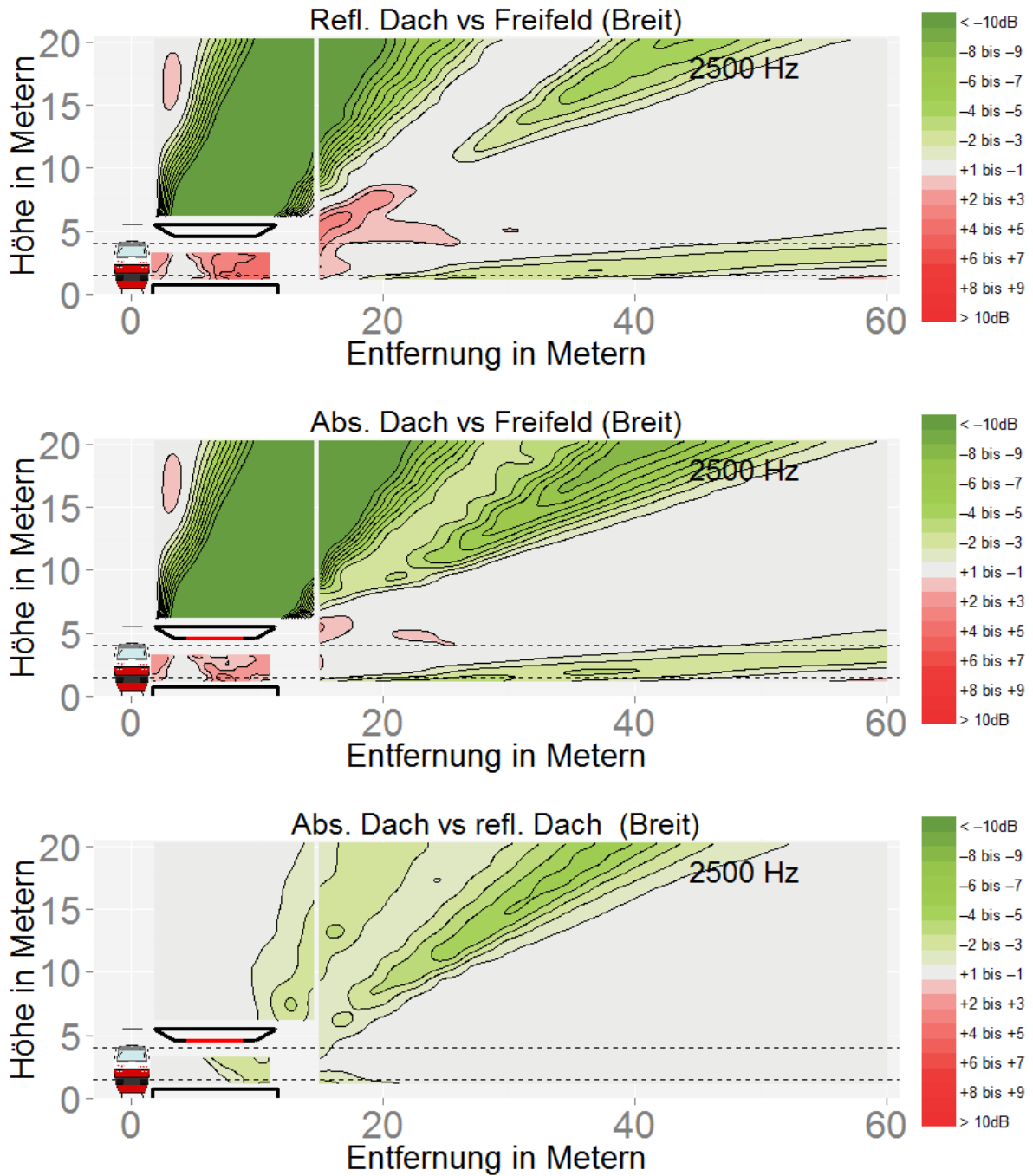


Abbildung 223

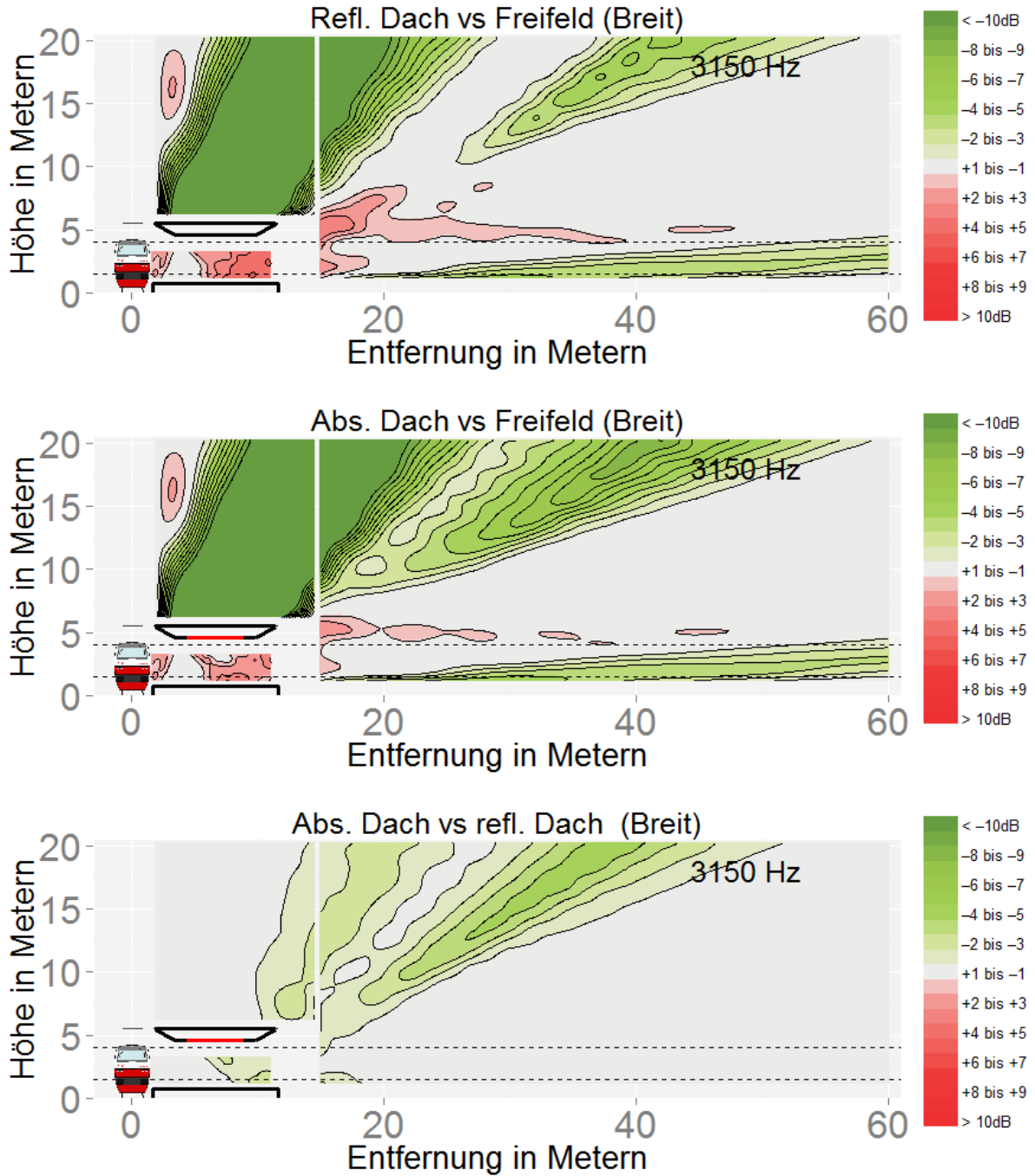


Abbildung 224

D.6: Effekt verschiedener absorbierender Dächer

Dargestellt sind die Dritteloktavbandpegel für den Vergleich sowohl zwischen dem Bahnsteig mit vollständig absorbierender Dachunterseite (obere Grafik), mit teilweise absorbierender Unterseite (mittlere Grafik) und mit minimaler Absorption (untere Grafik) im Vergleich zur freien Schallausbreitung für den absorbierenden Boden.

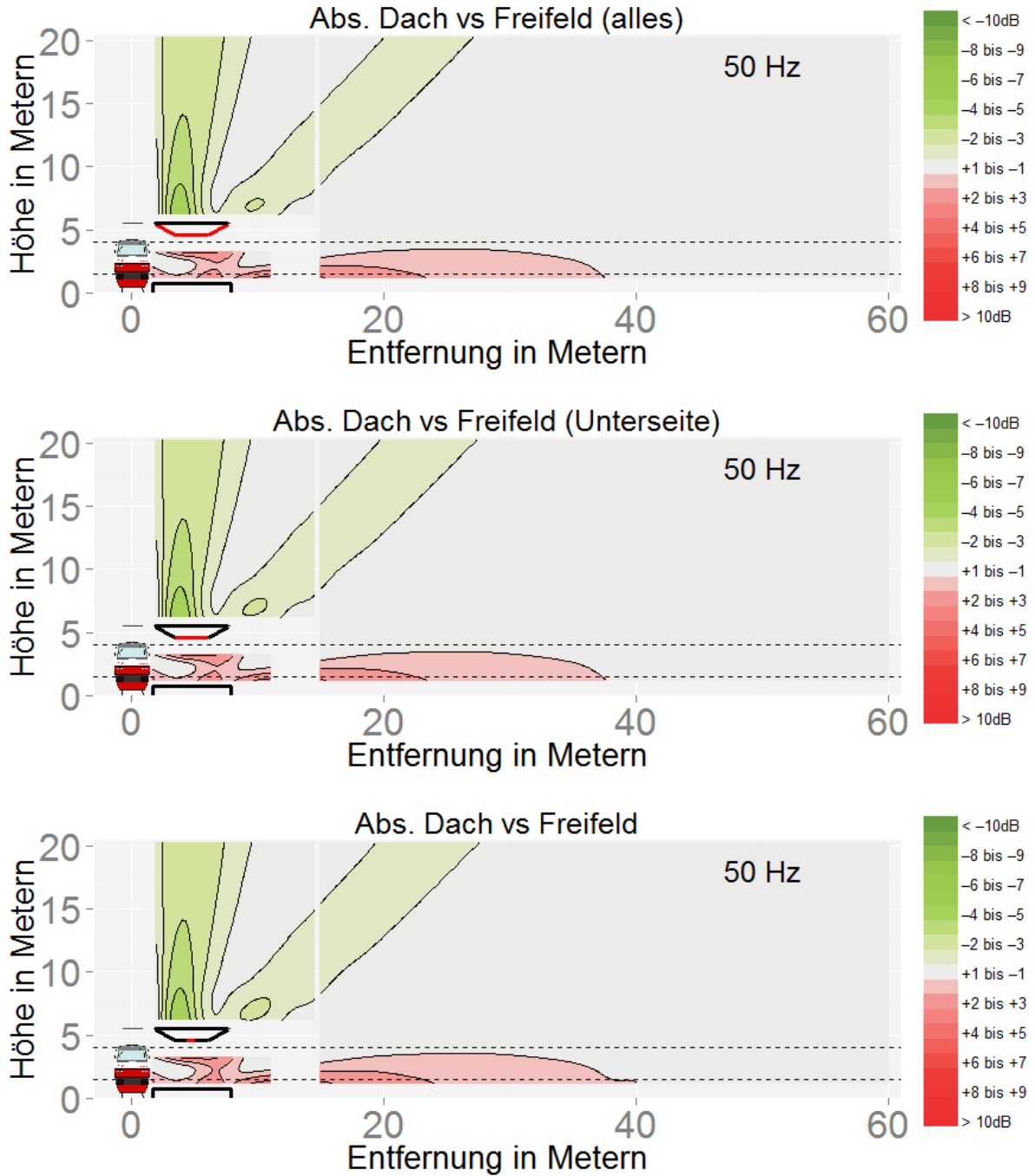


Abbildung 225

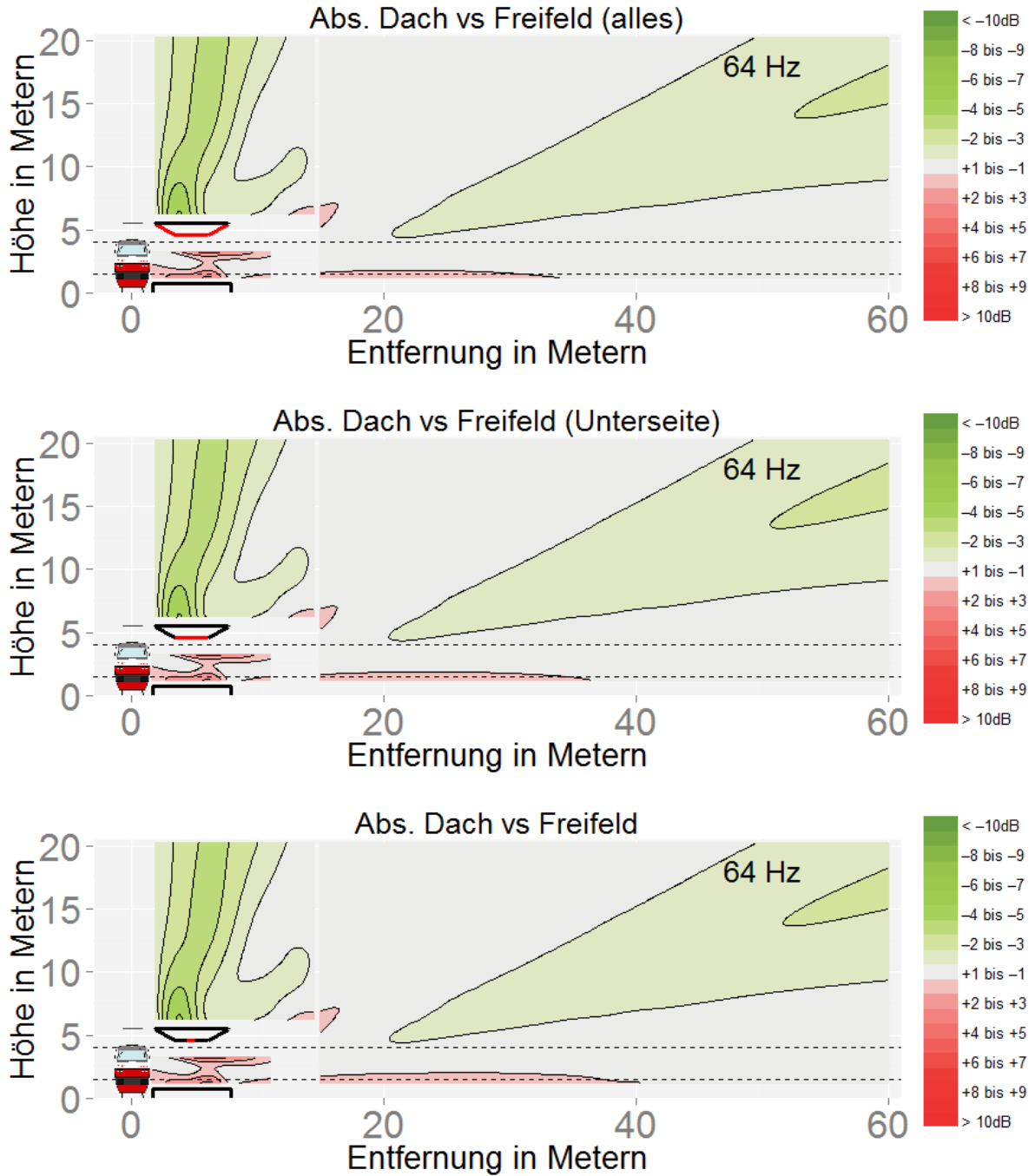


Abbildung 226

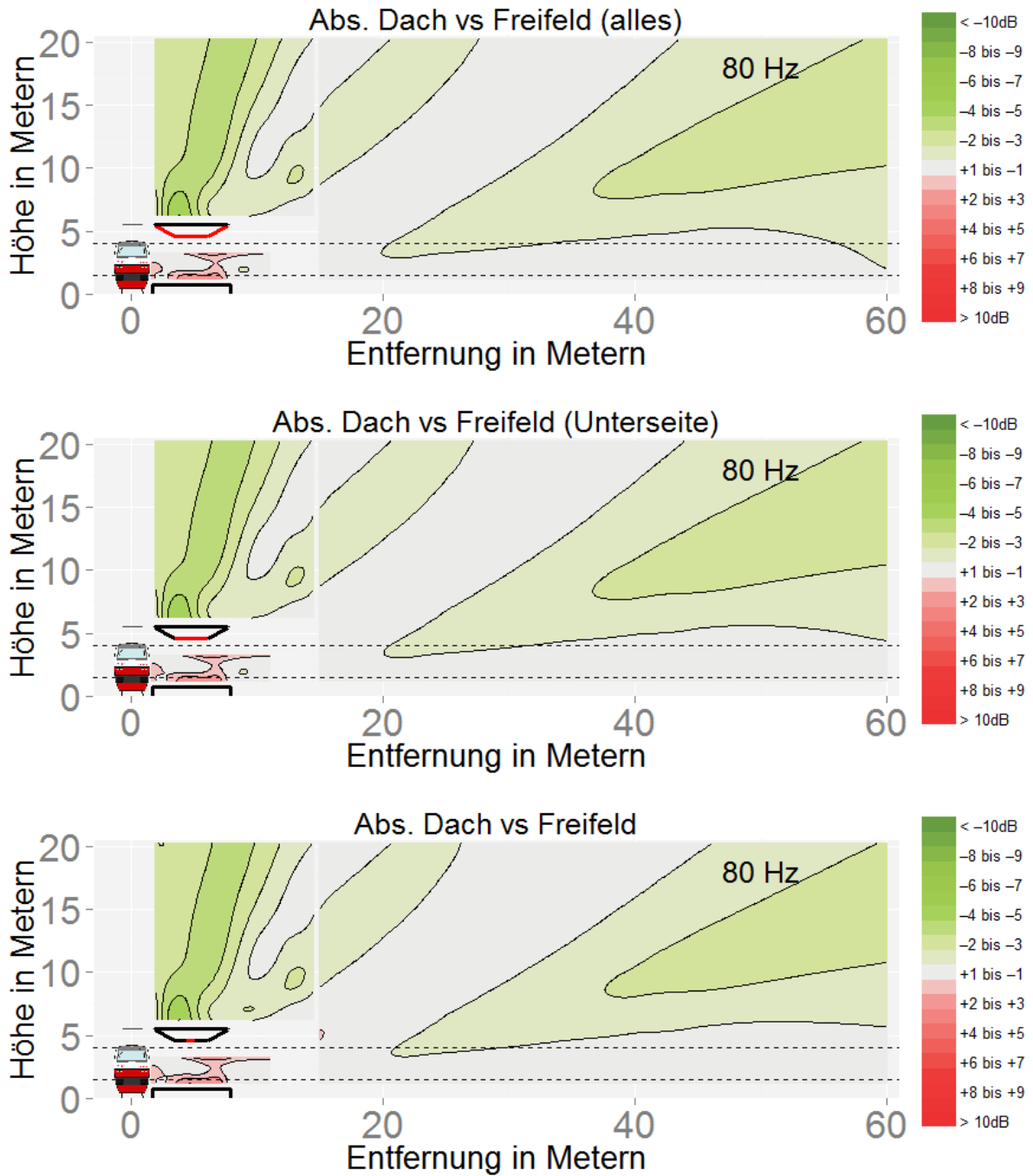


Abbildung 227

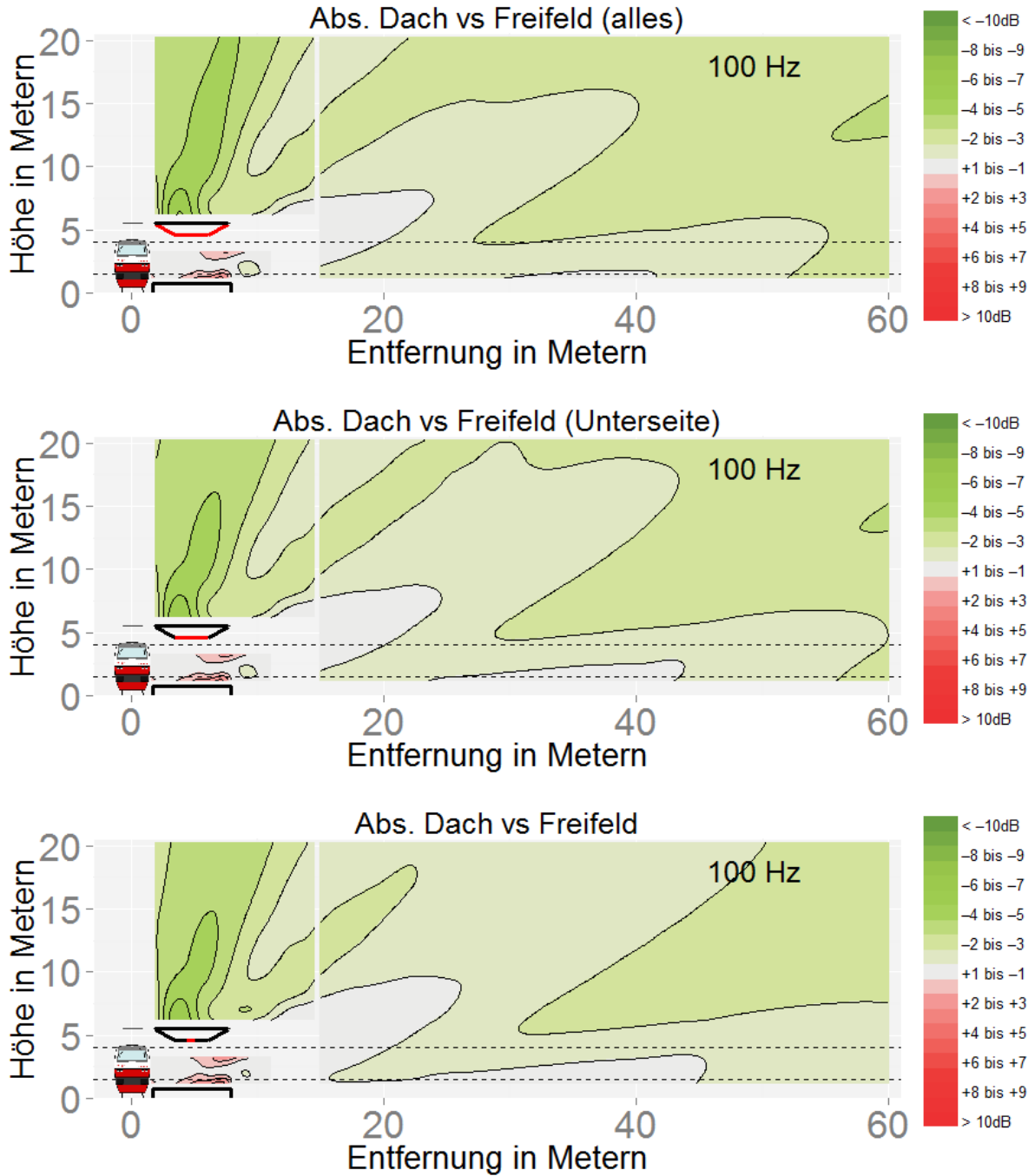


Abbildung 228

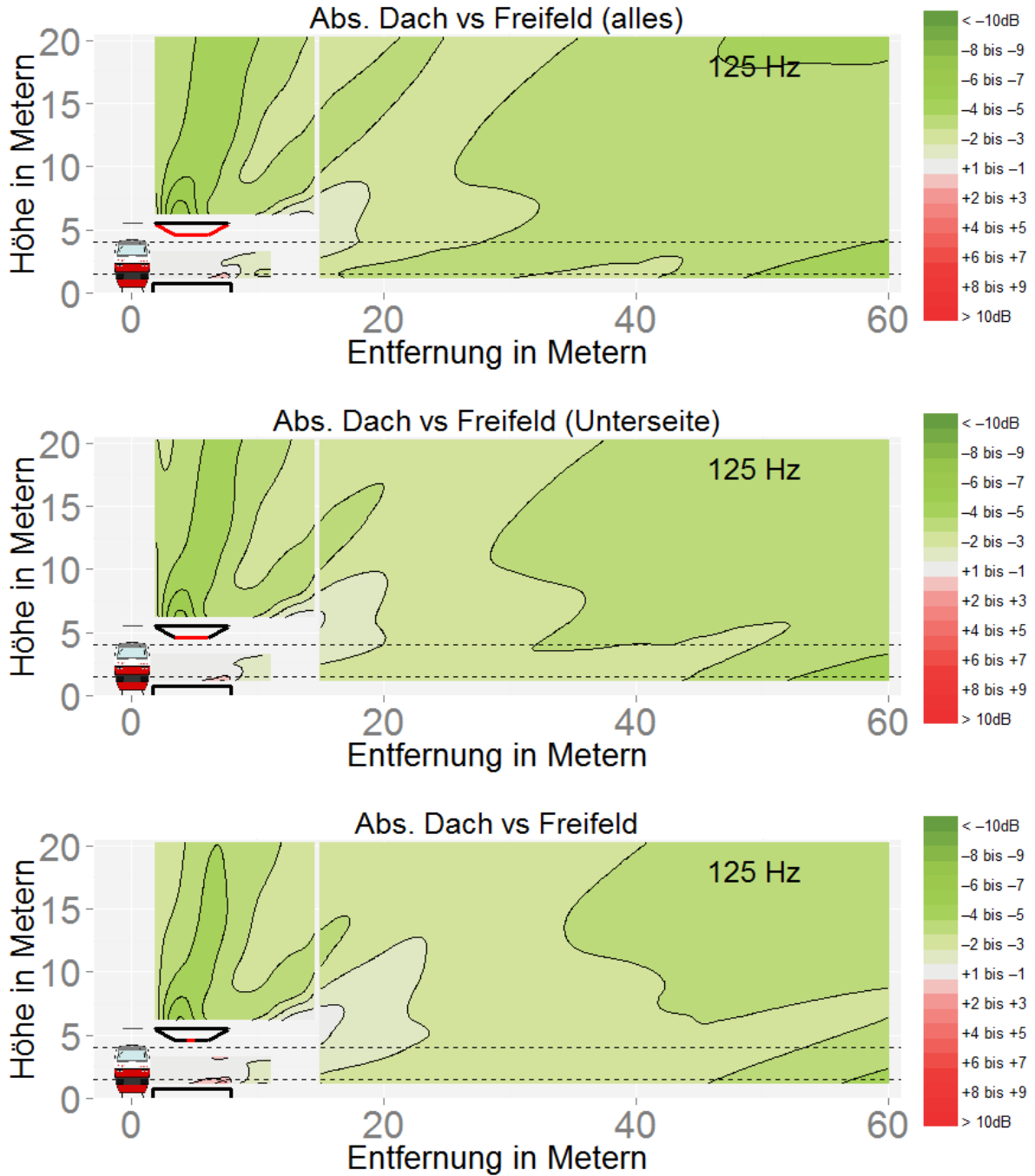


Abbildung 229

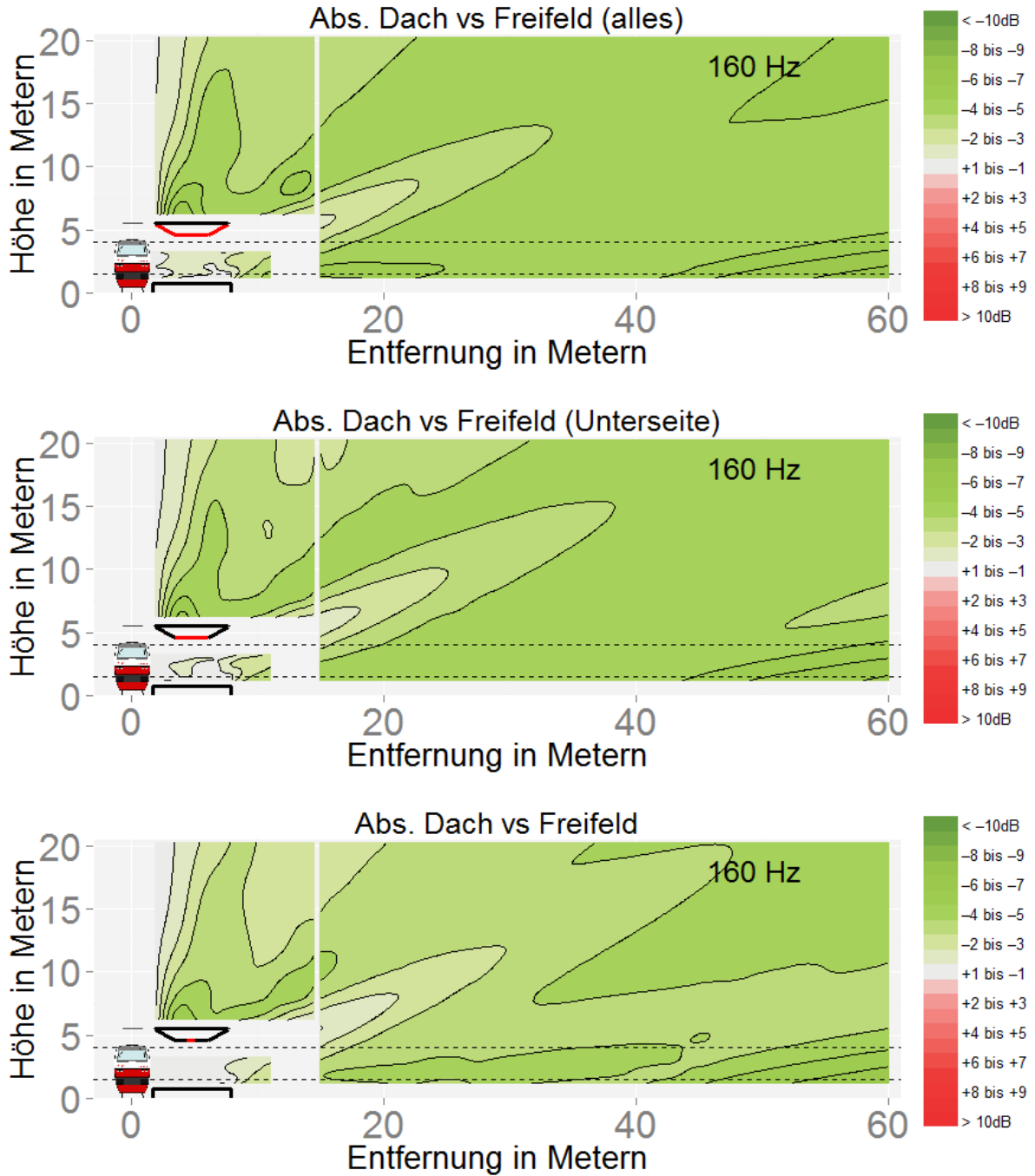


Abbildung 230

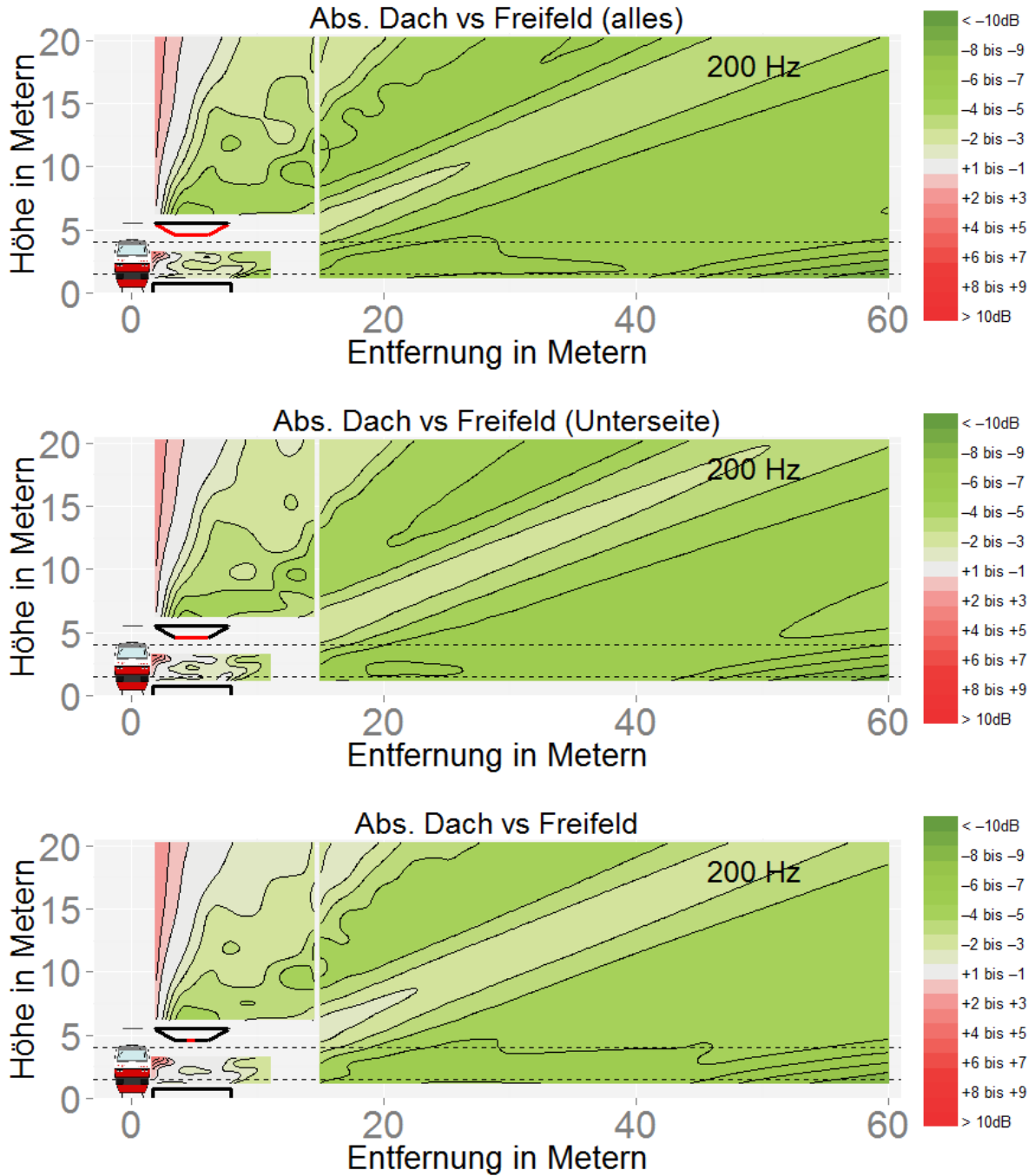


Abbildung 231

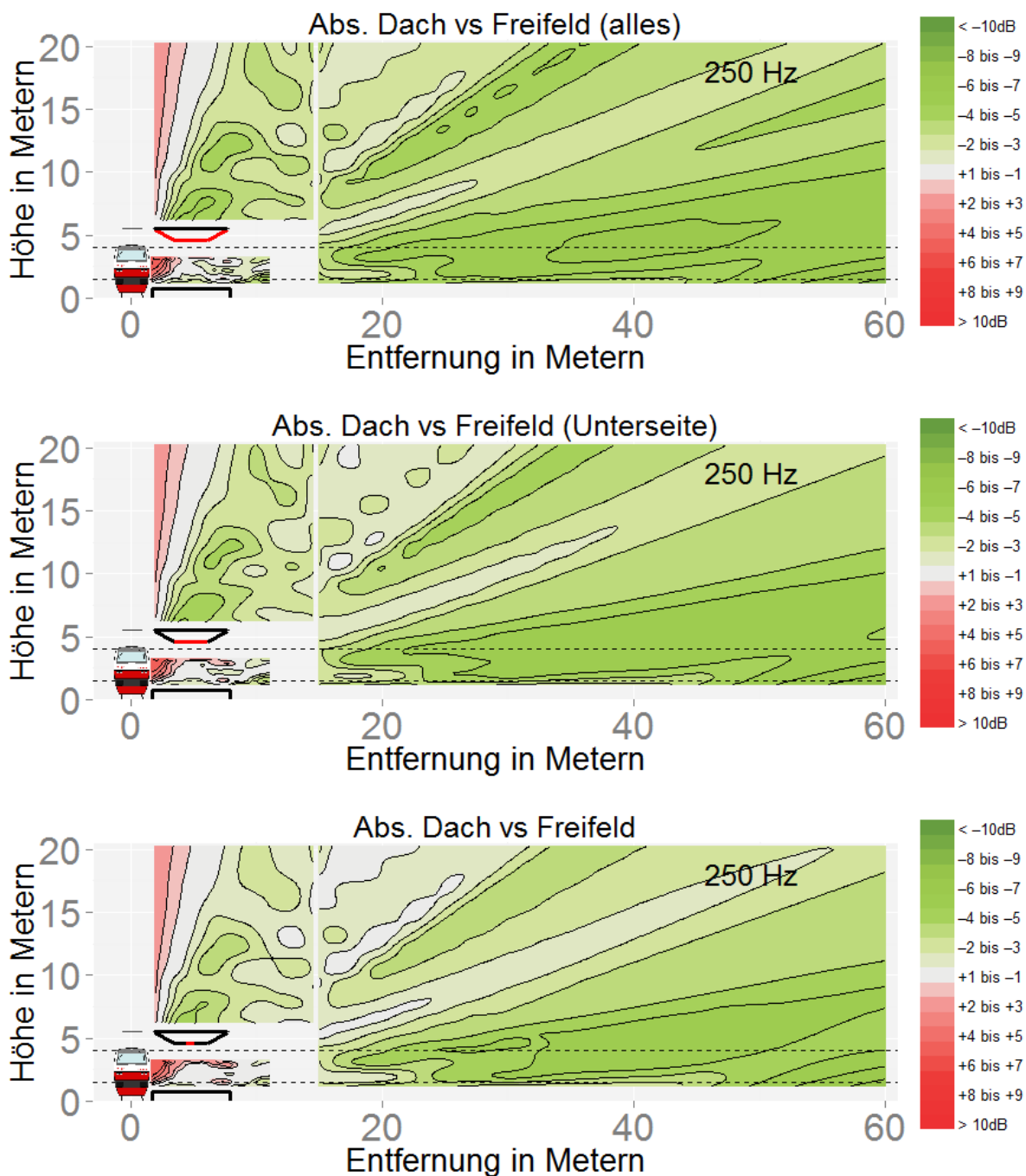


Abbildung 232

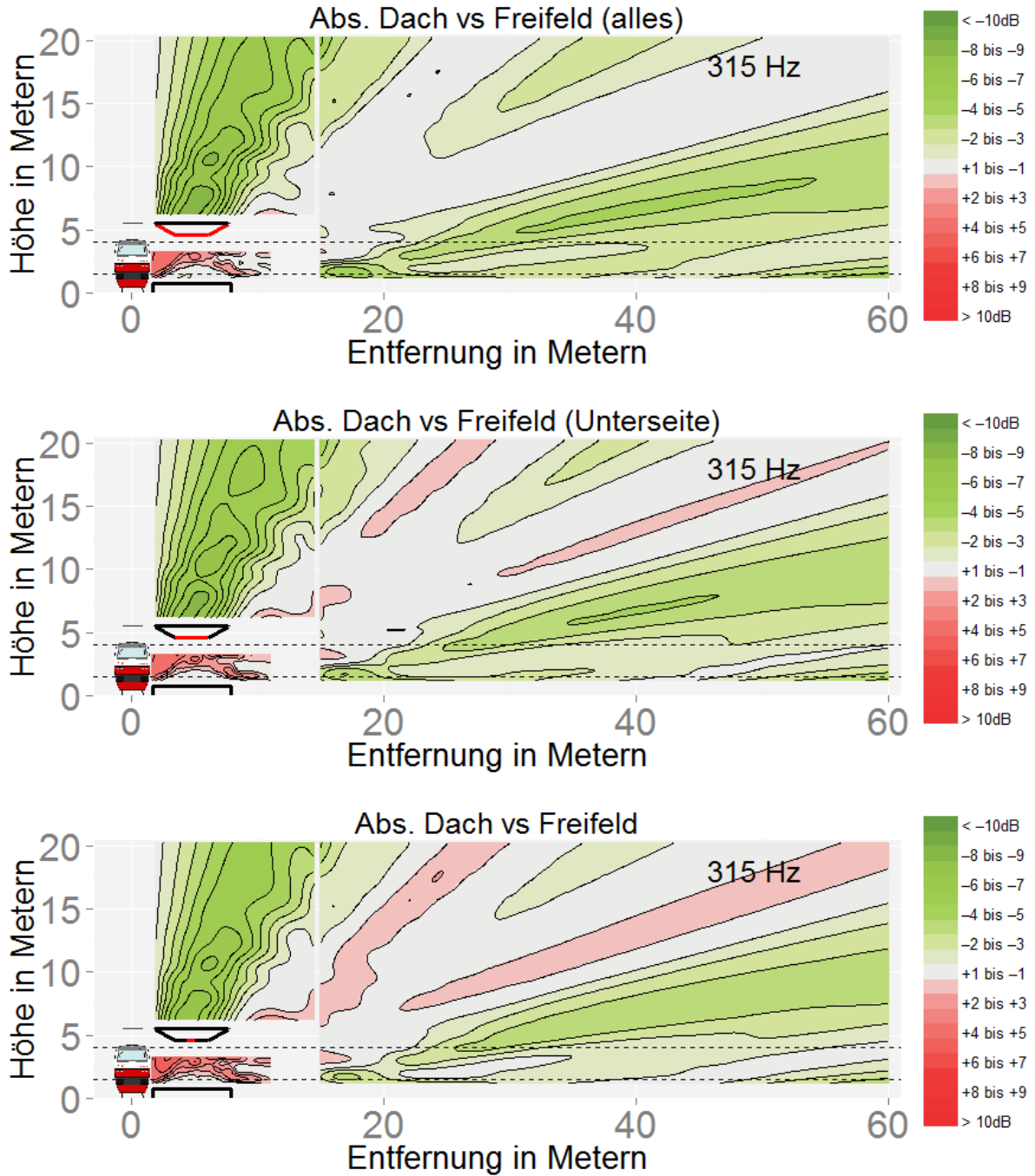


Abbildung 233

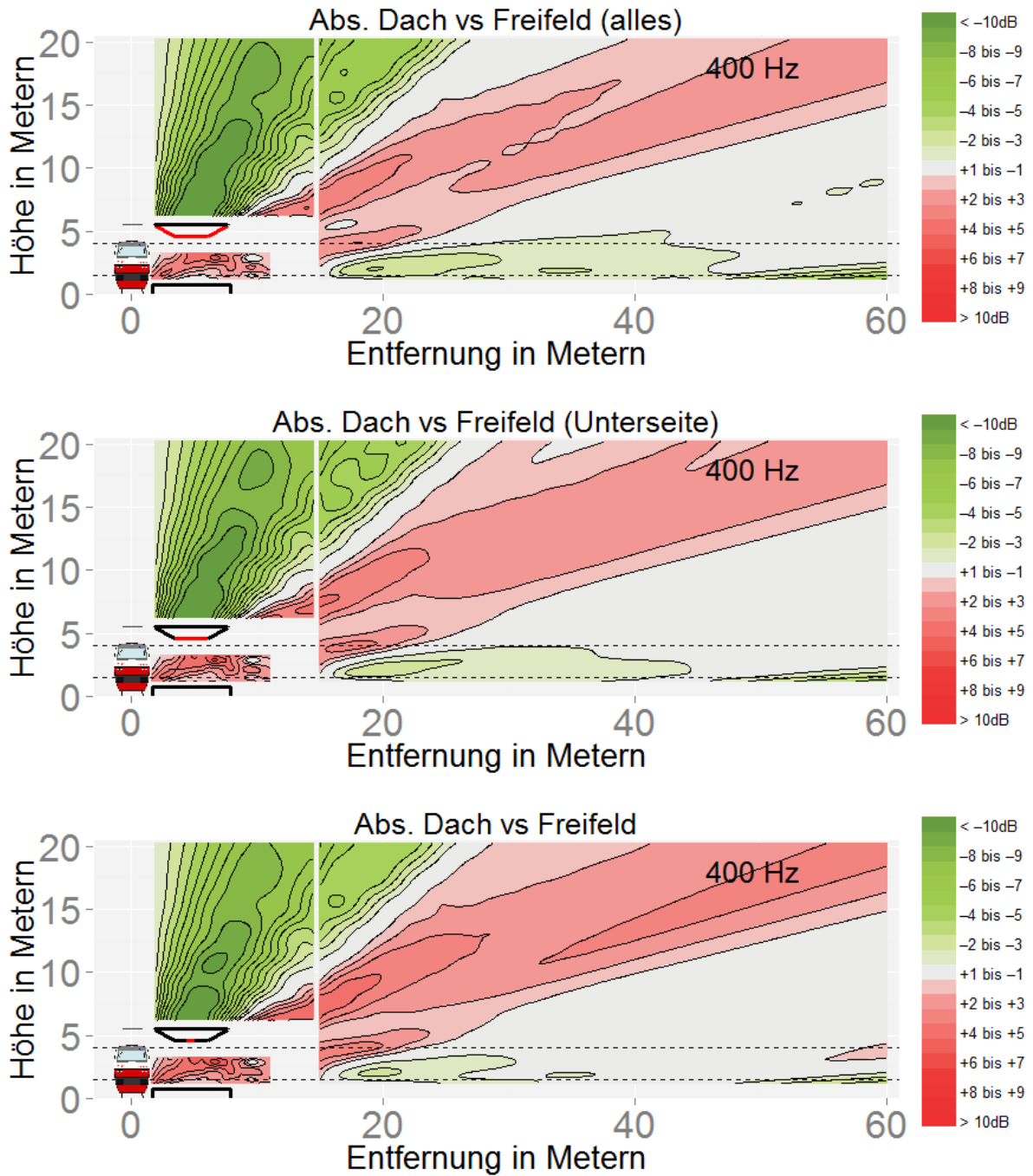


Abbildung 234

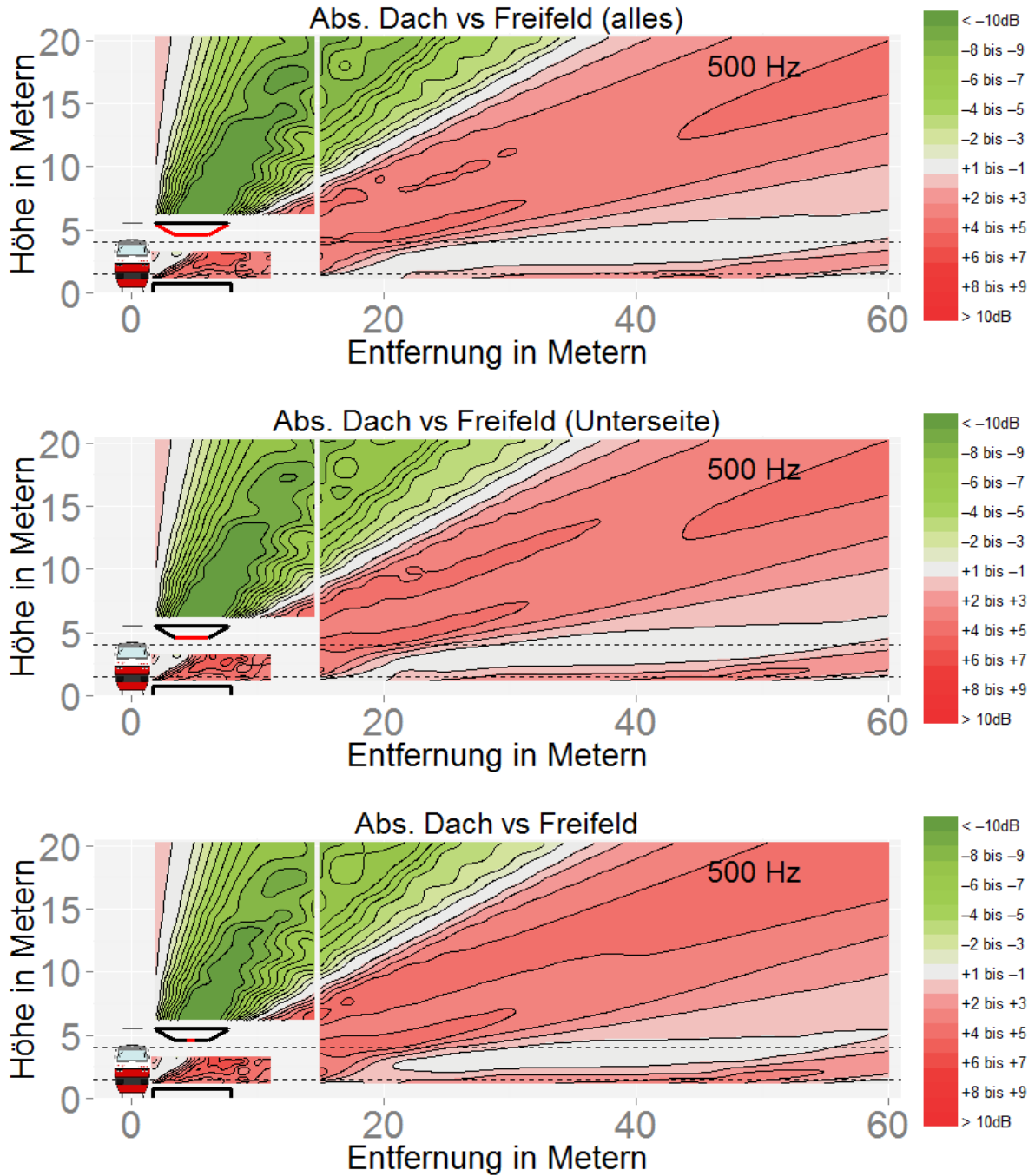


Abbildung 235

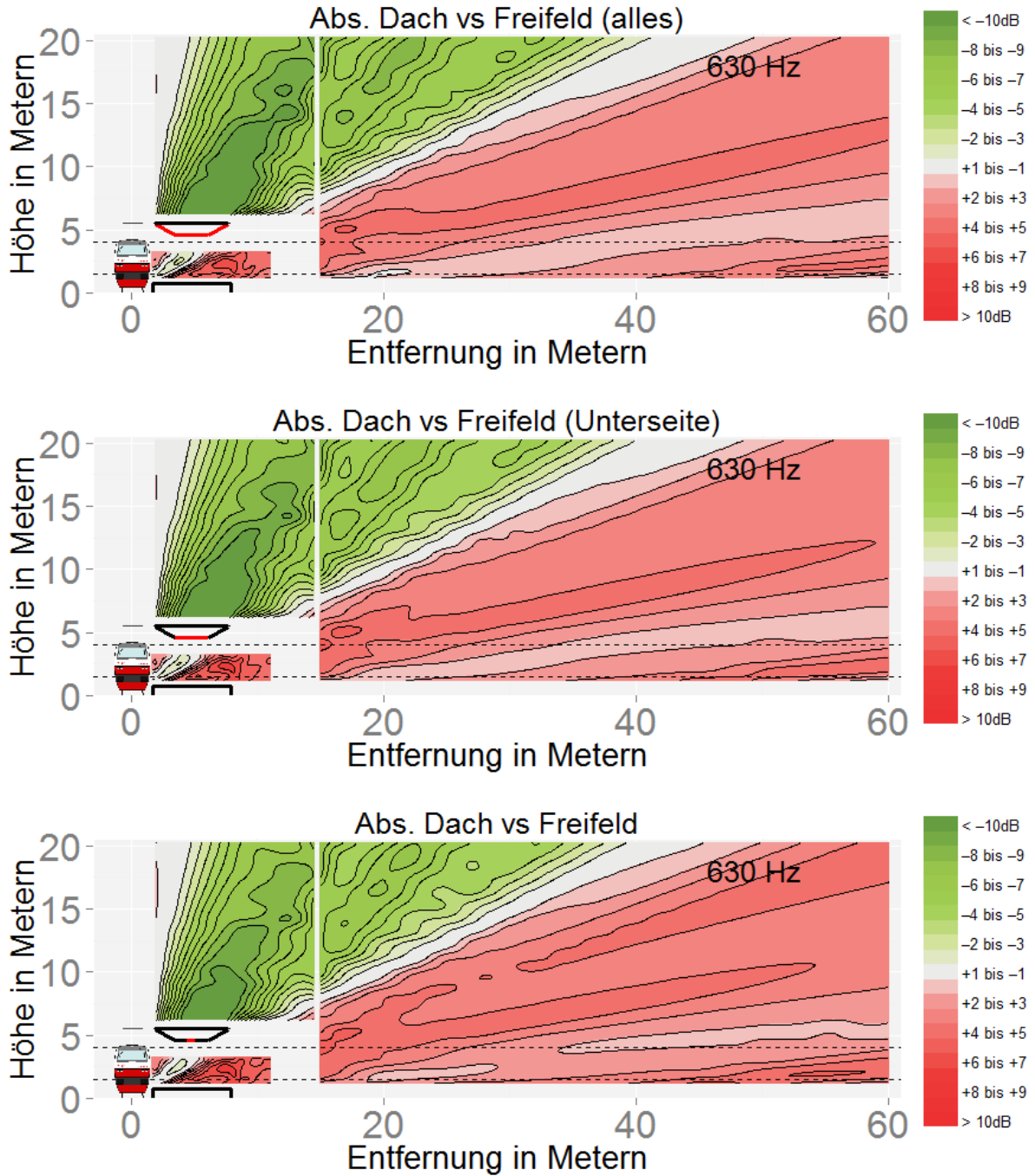


Abbildung 236

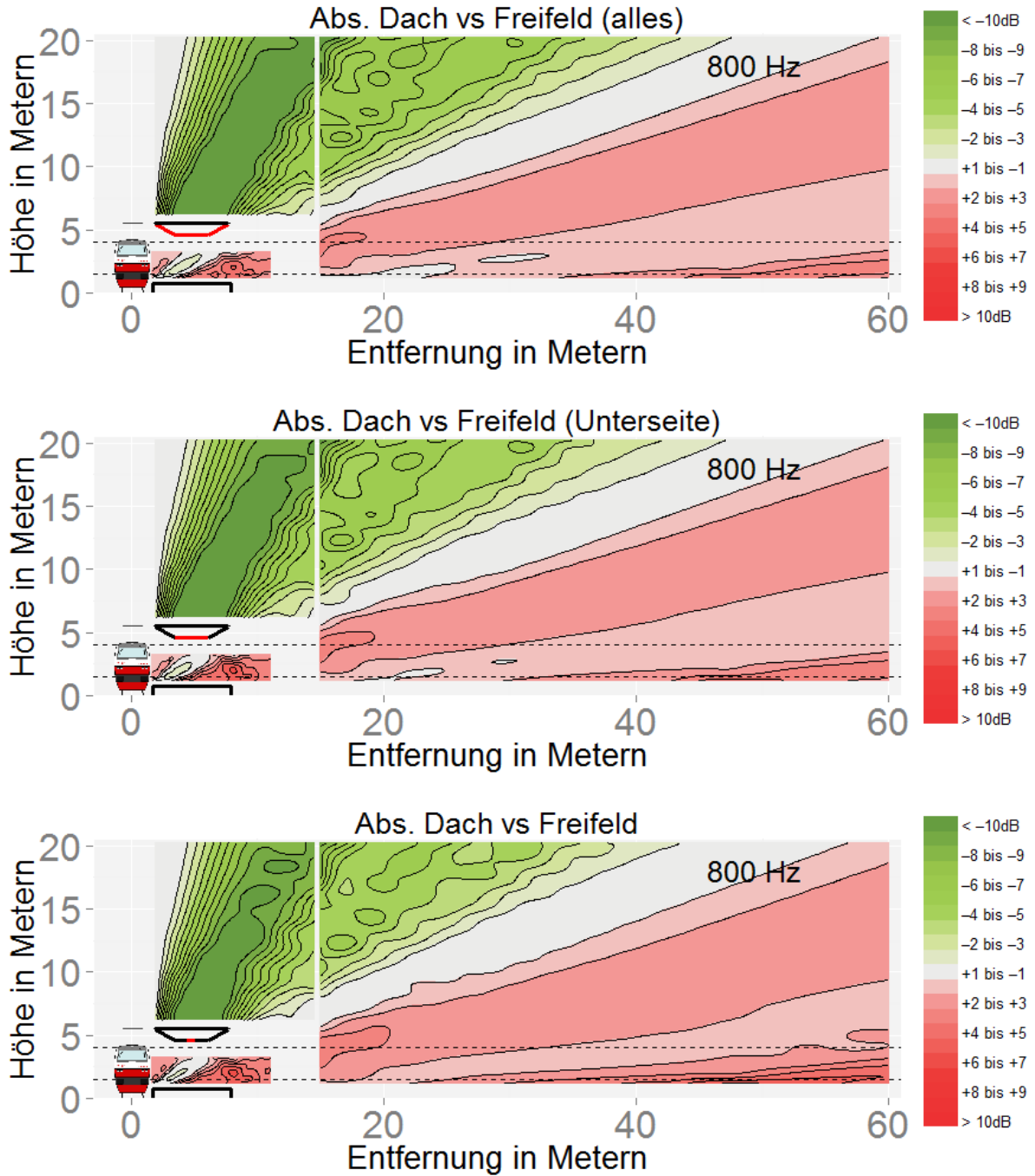


Abbildung 237

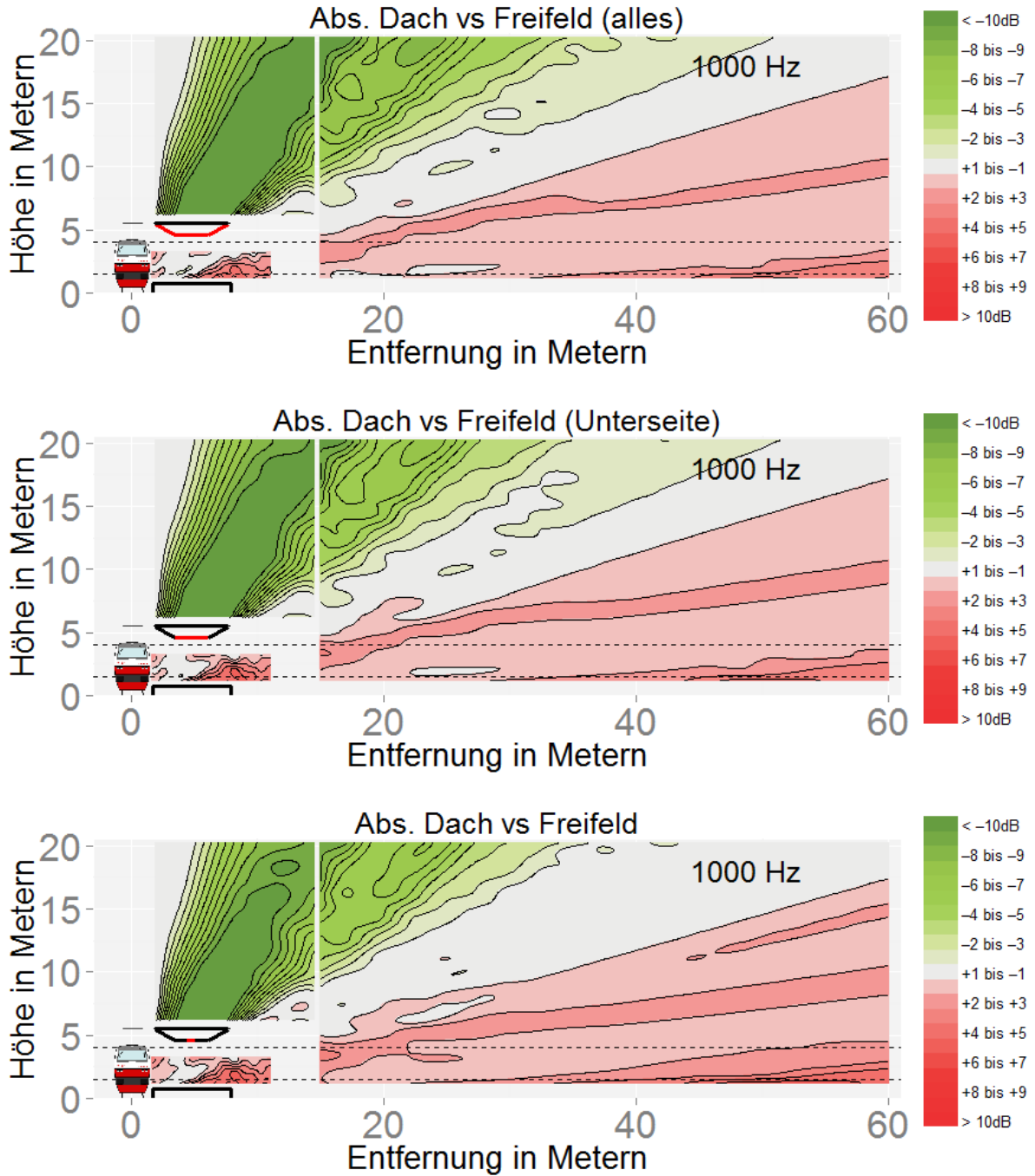


Abbildung 238

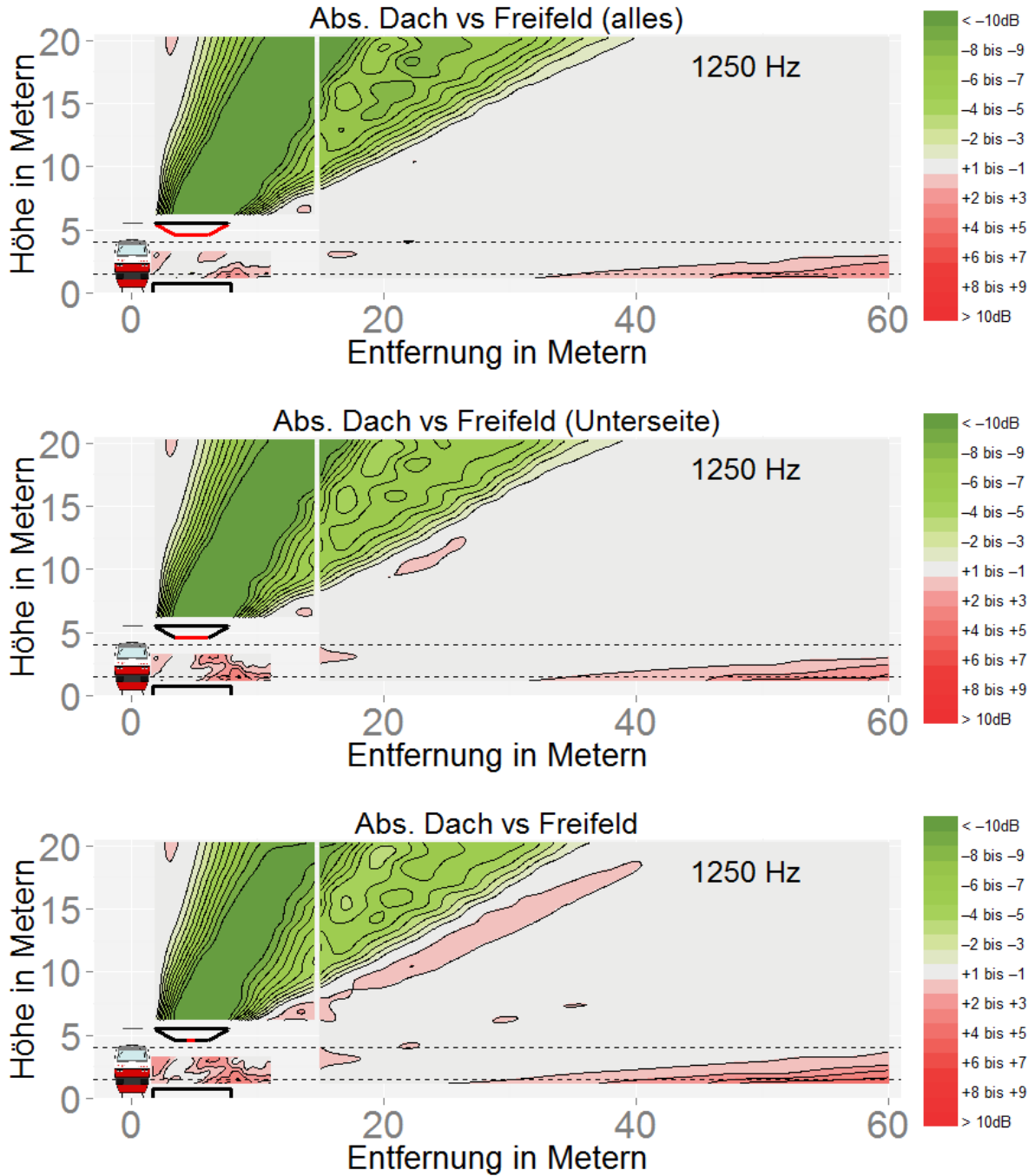


Abbildung 239

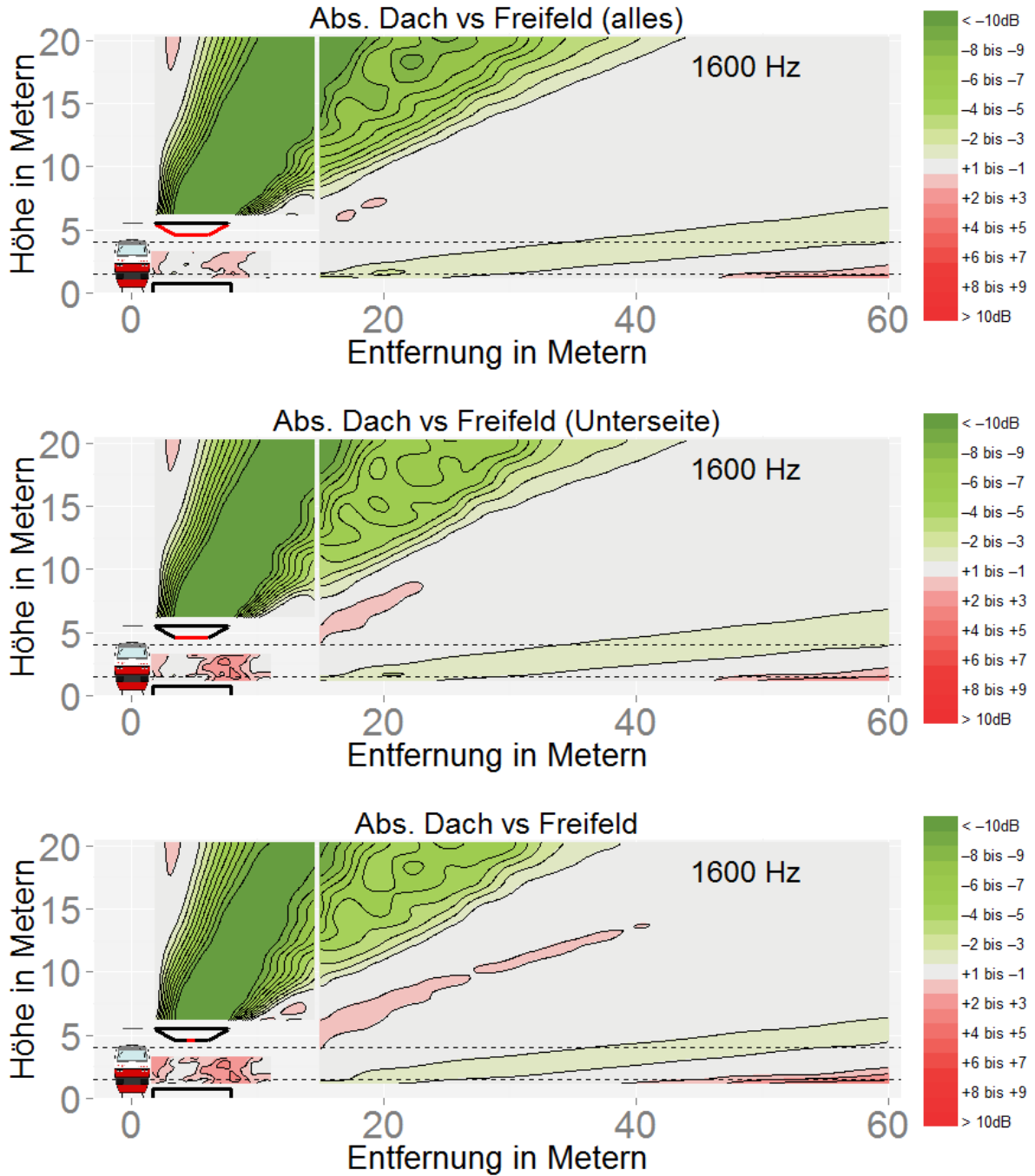


Abbildung 240

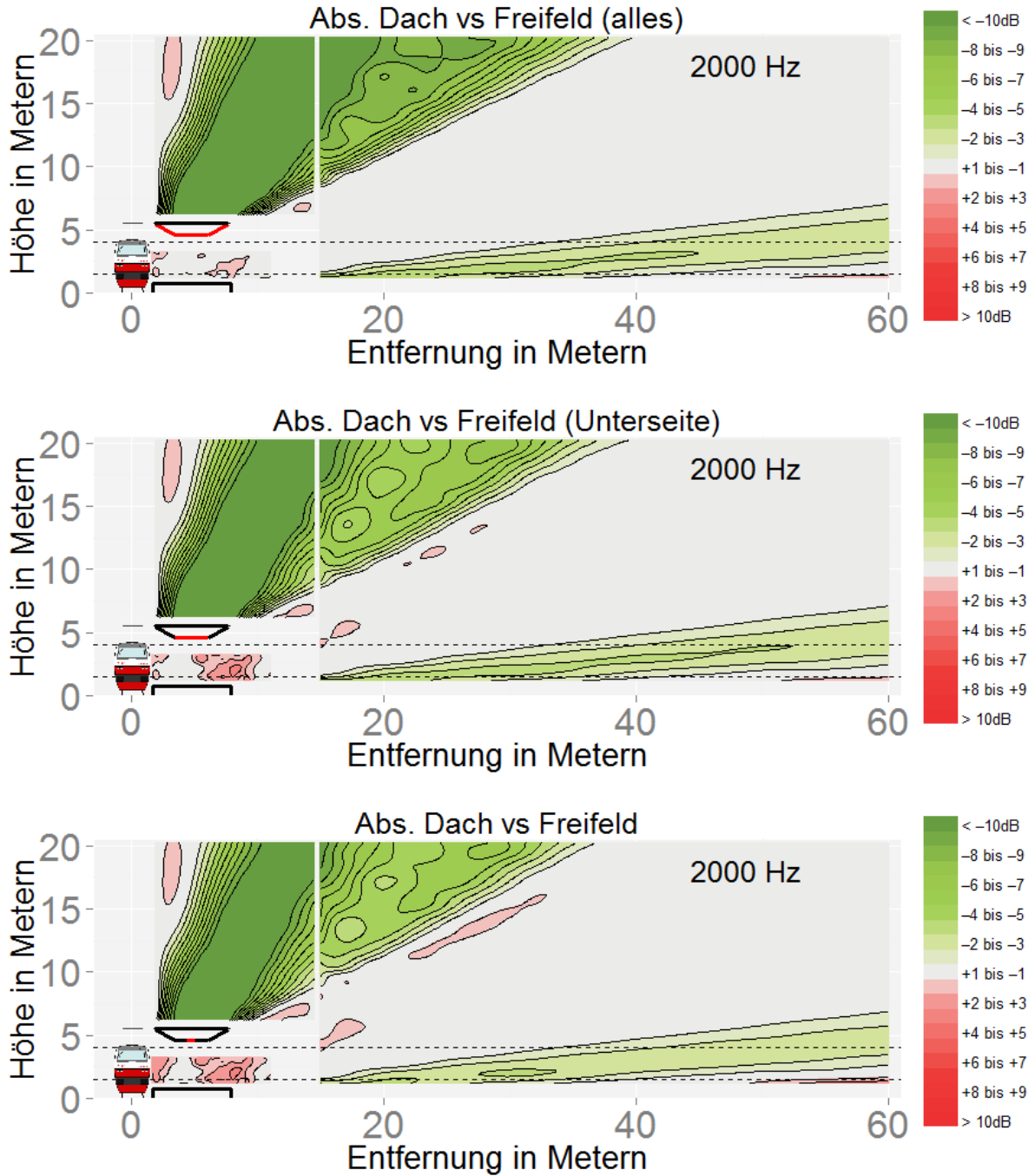


Abbildung 241

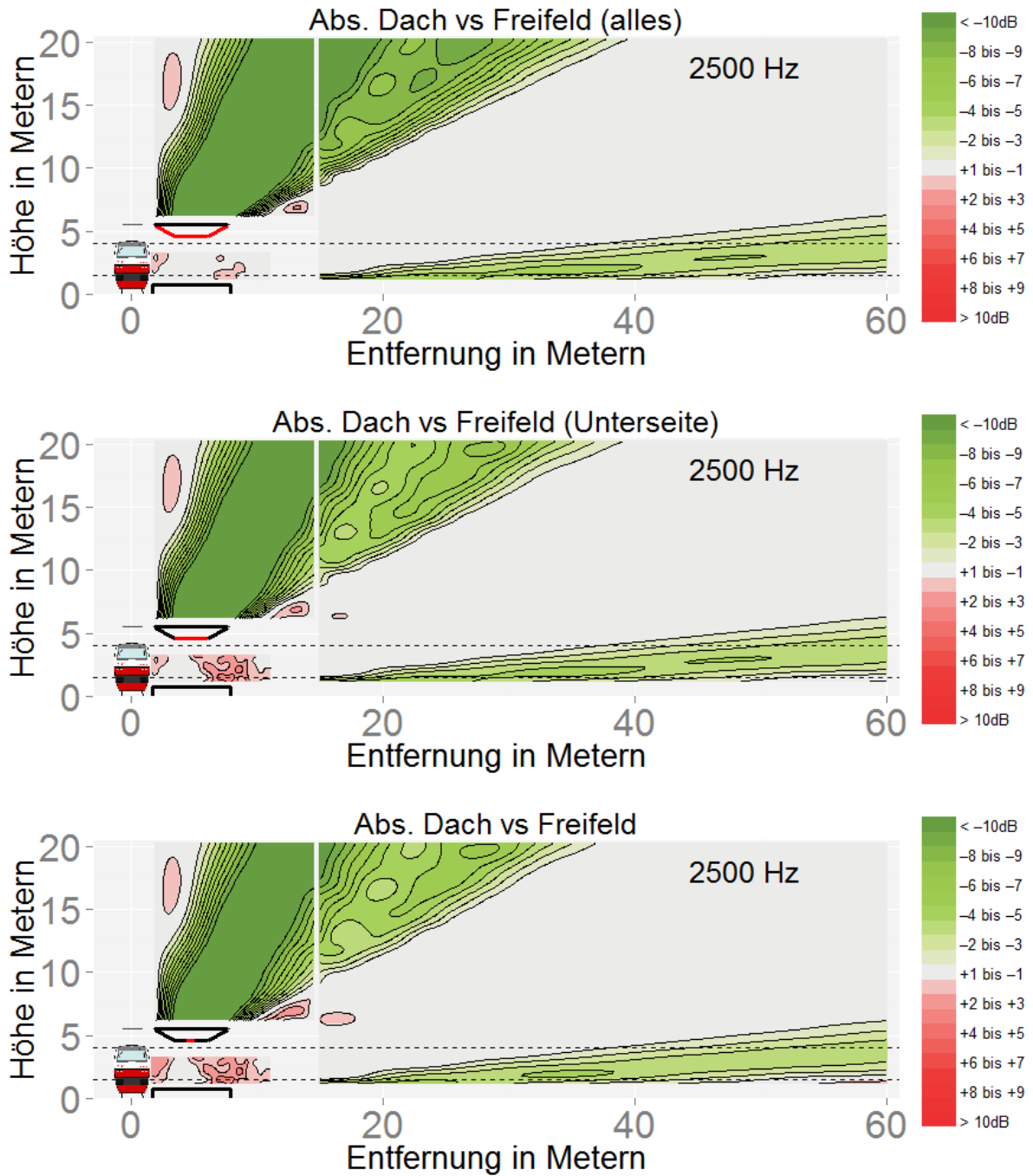


Abbildung 242

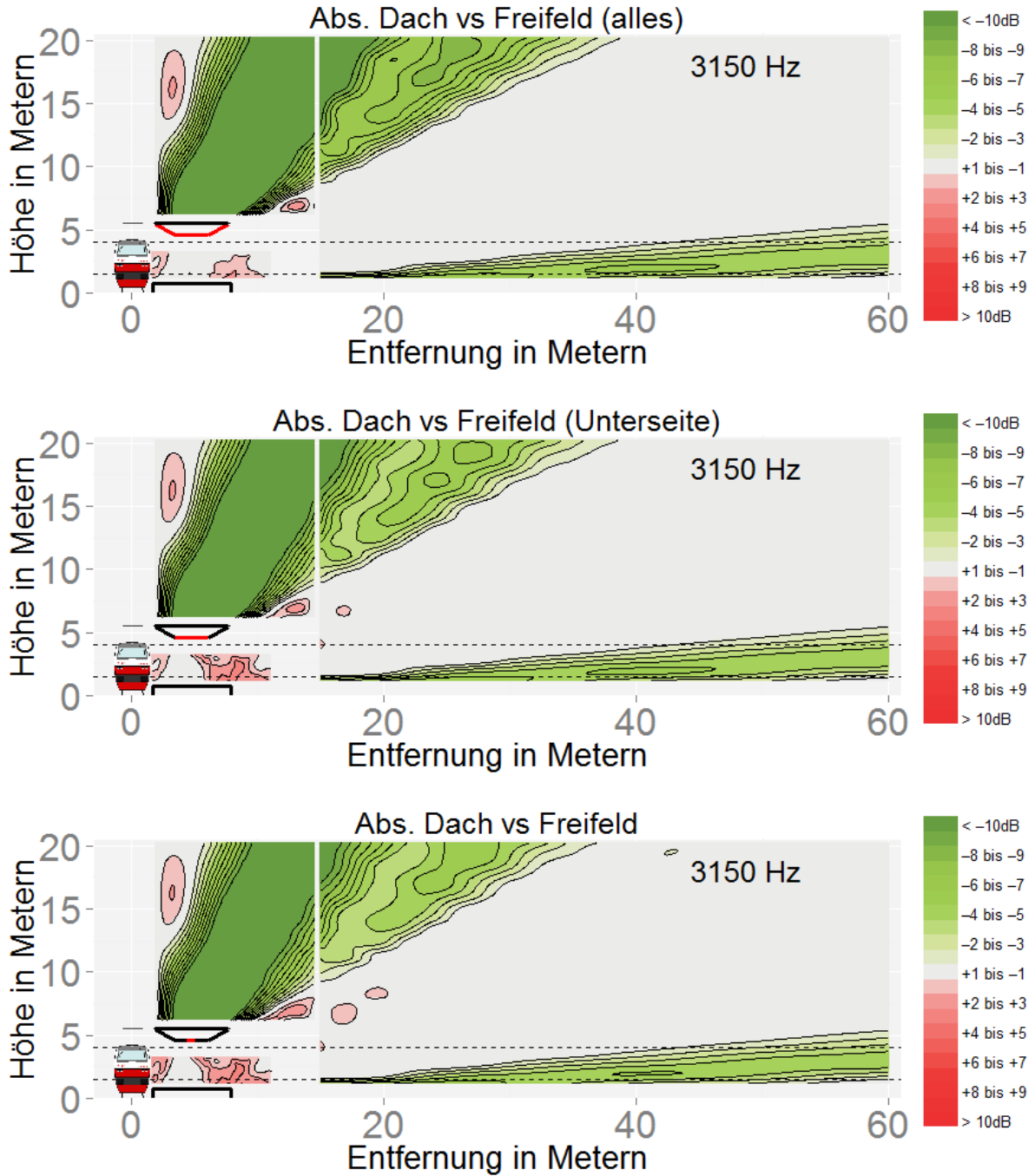


Abbildung 243

D.7: Effekt verschiedener absorbierender Dächer, breiter Bahnsteig

Dargestellt sind die Dritteloktavbandpegel für den Vergleich sowohl zwischen dem breitem Bahnsteig mit vollständig absorbierender Dachunterseite (obere Grafik), mit teilweise absorbierender Unterseite (mittlere Grafik) und mit minimaler Absorption (untere Grafik) im Vergleich zur freien Schallausbreitung für den absorbierenden Boden.

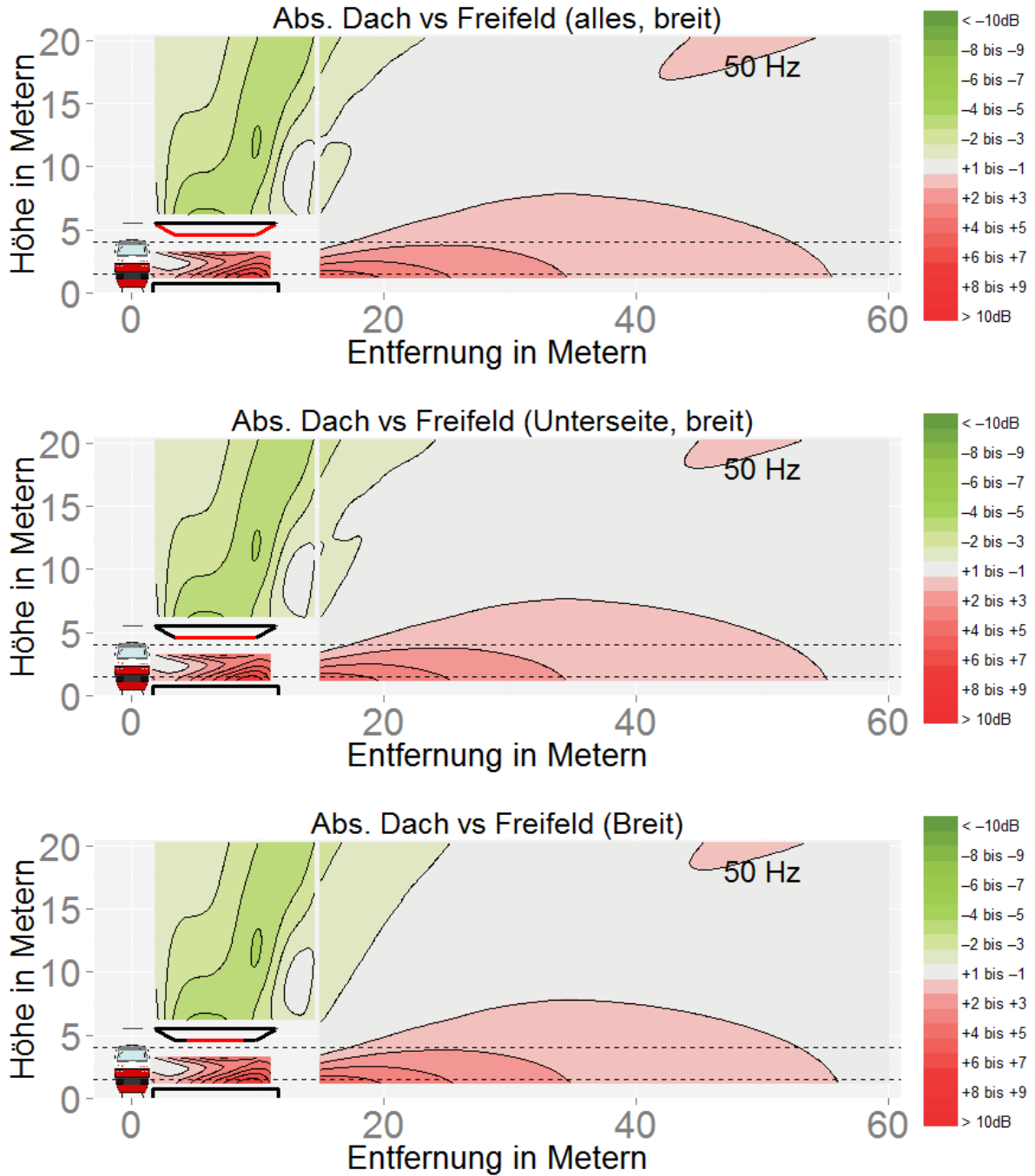


Abbildung 244

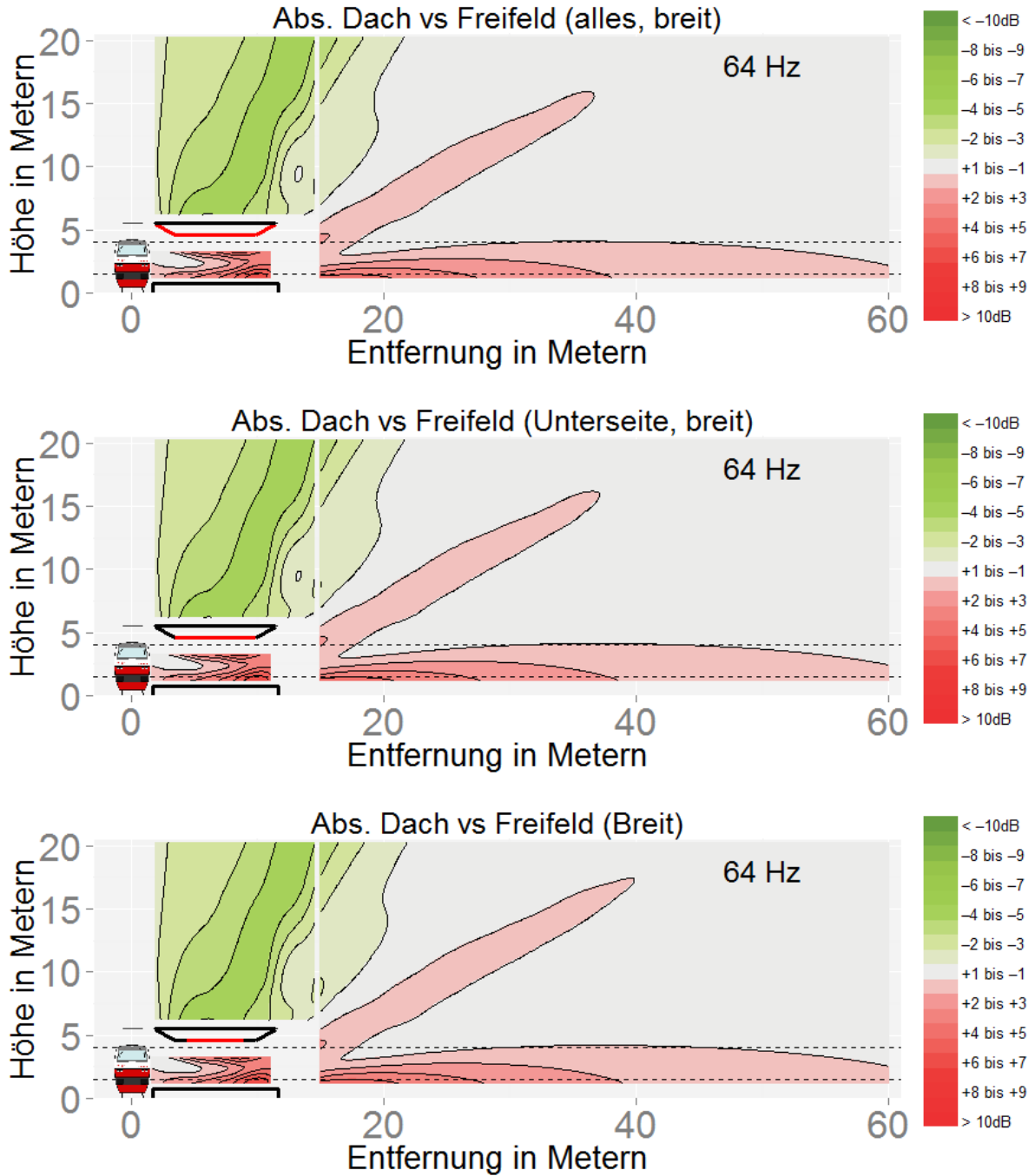


Abbildung 245

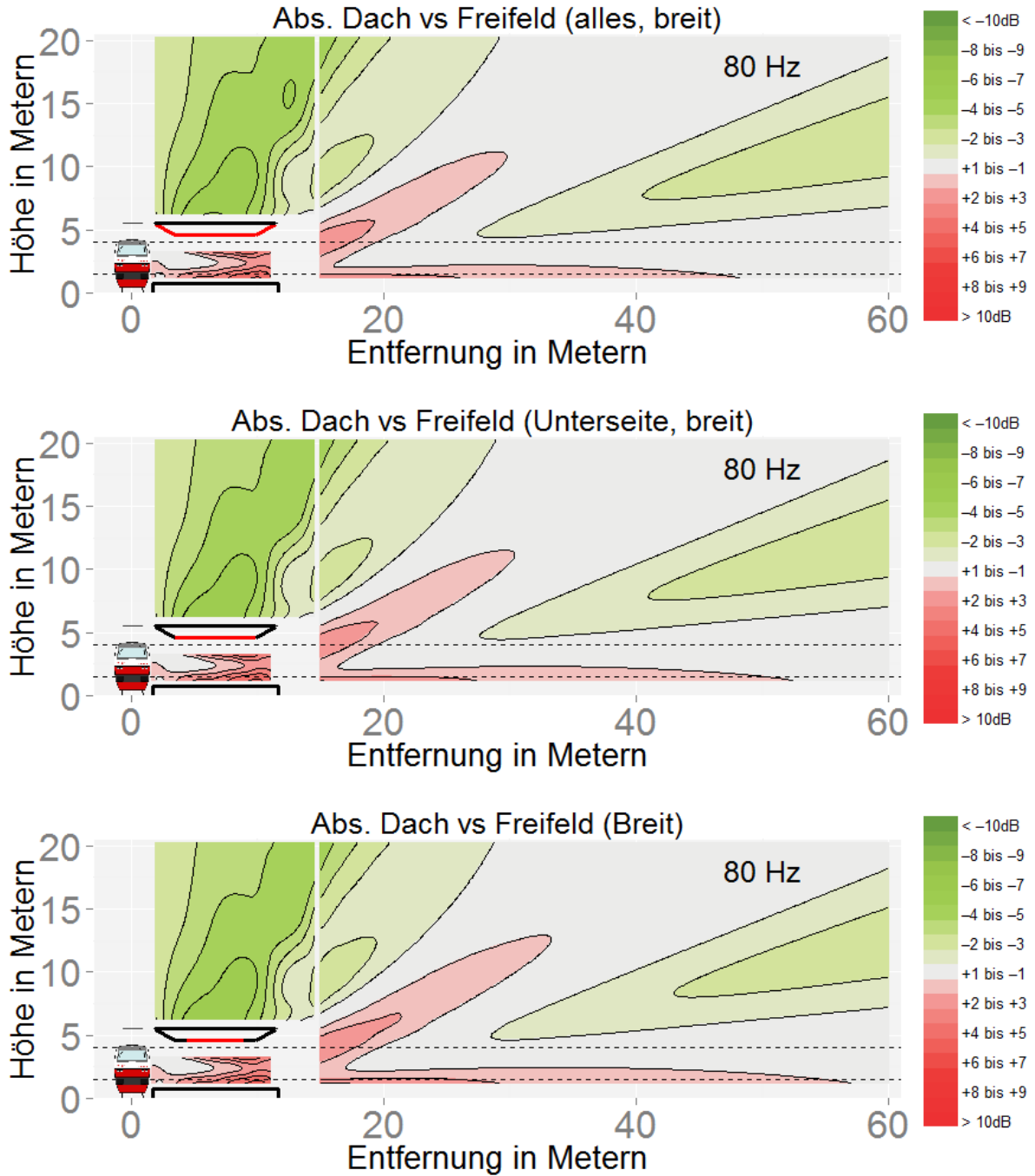


Abbildung 246

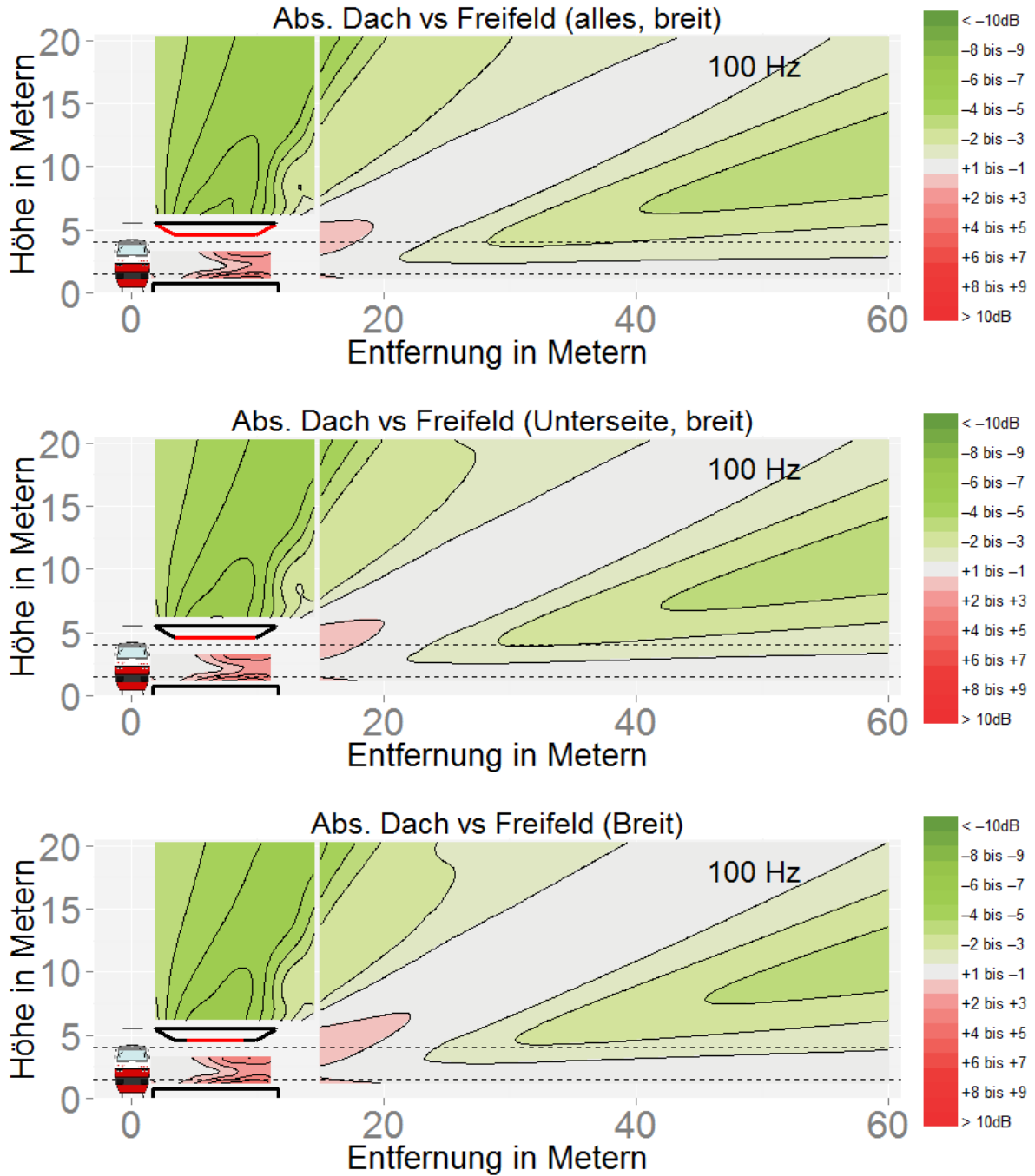


Abbildung 247

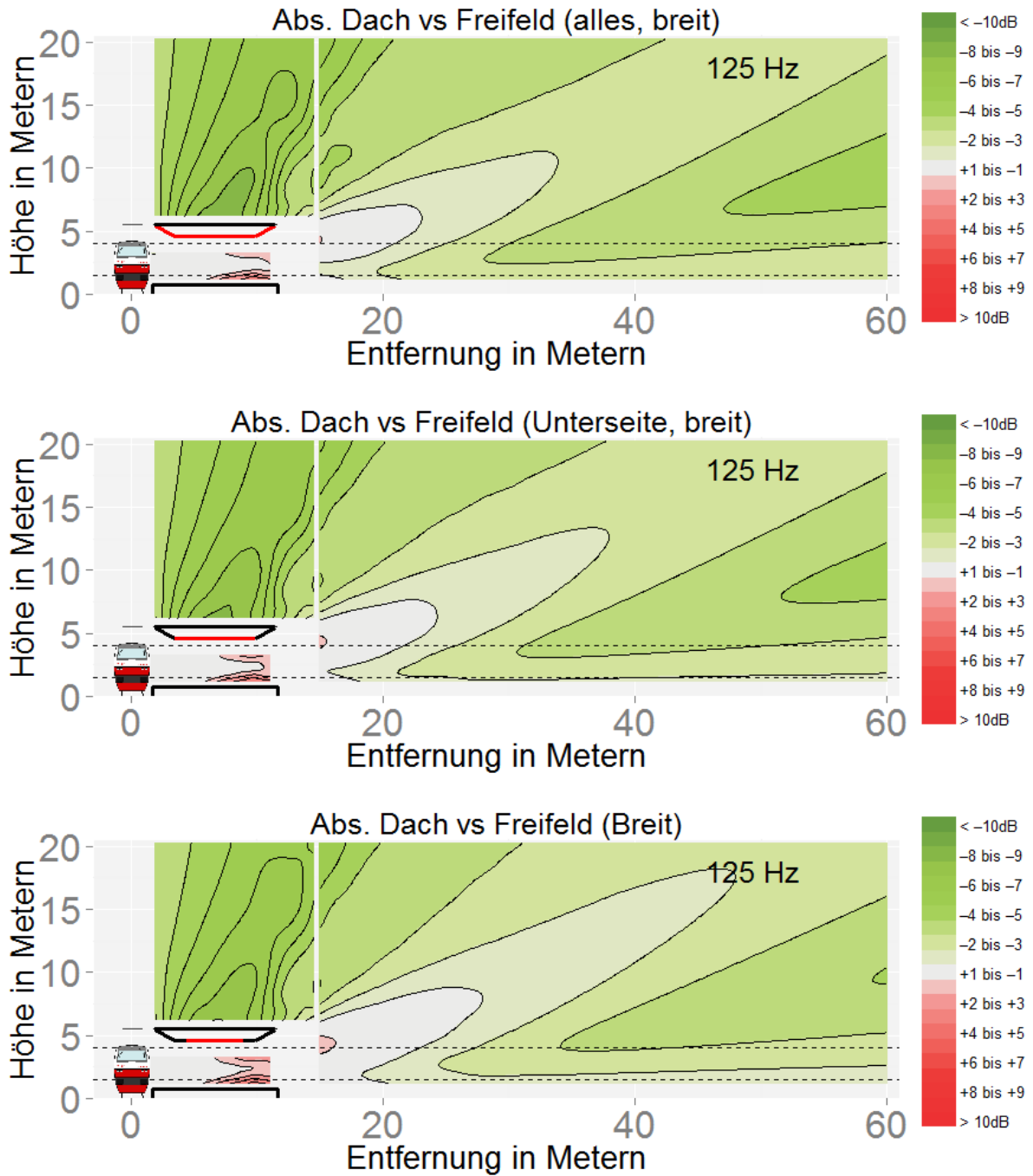


Abbildung 248

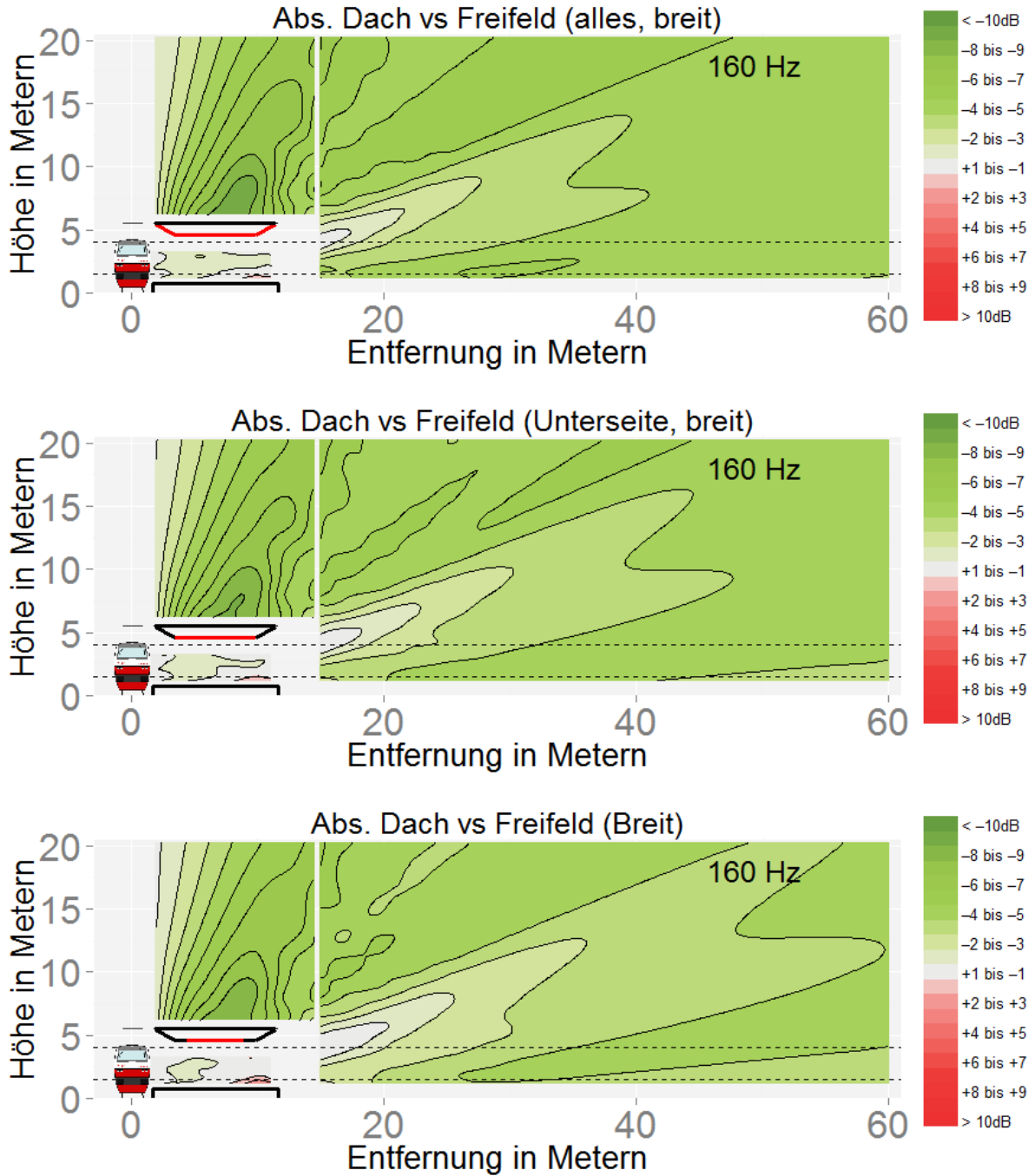


Abbildung 249

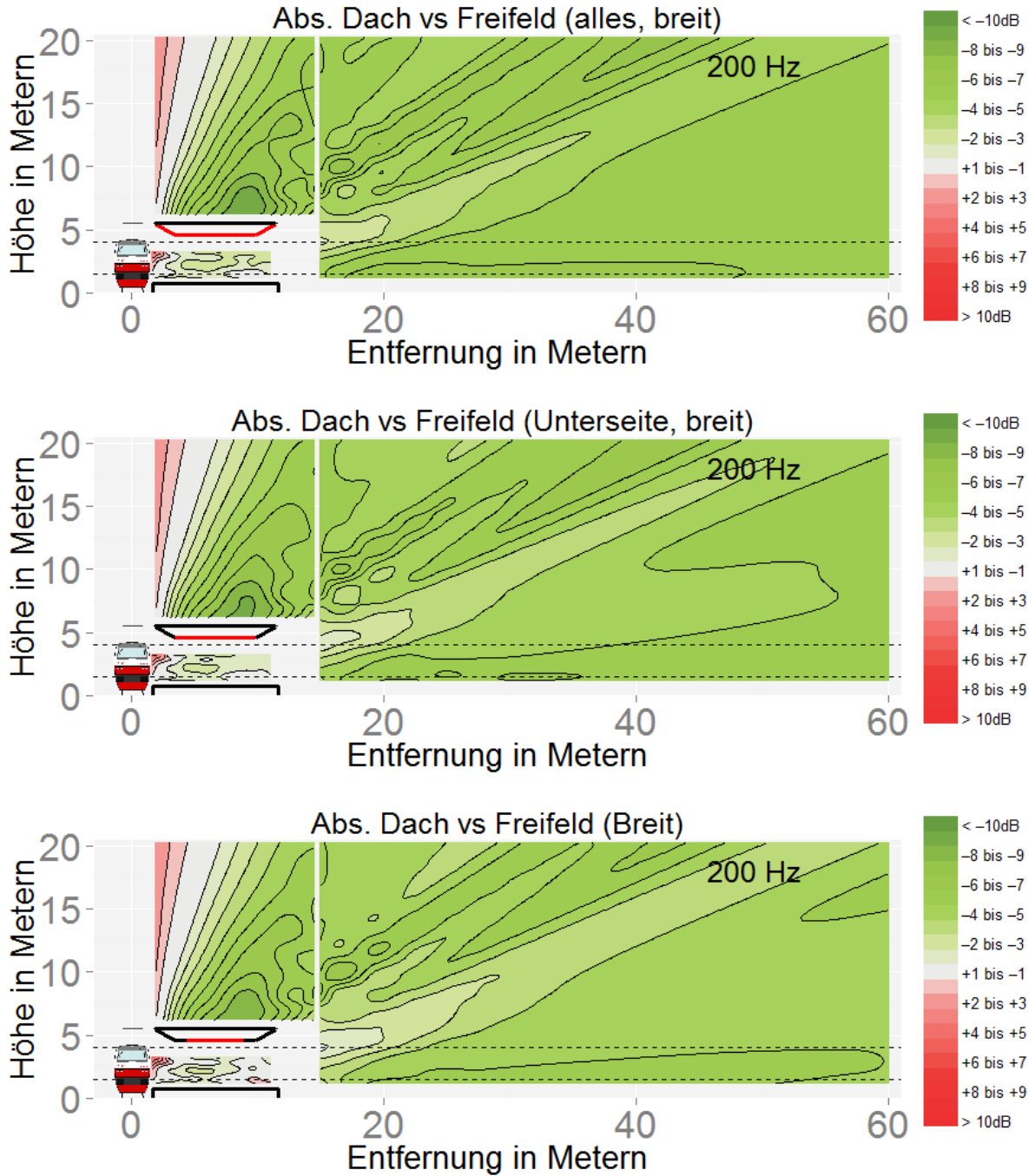


Abbildung 250

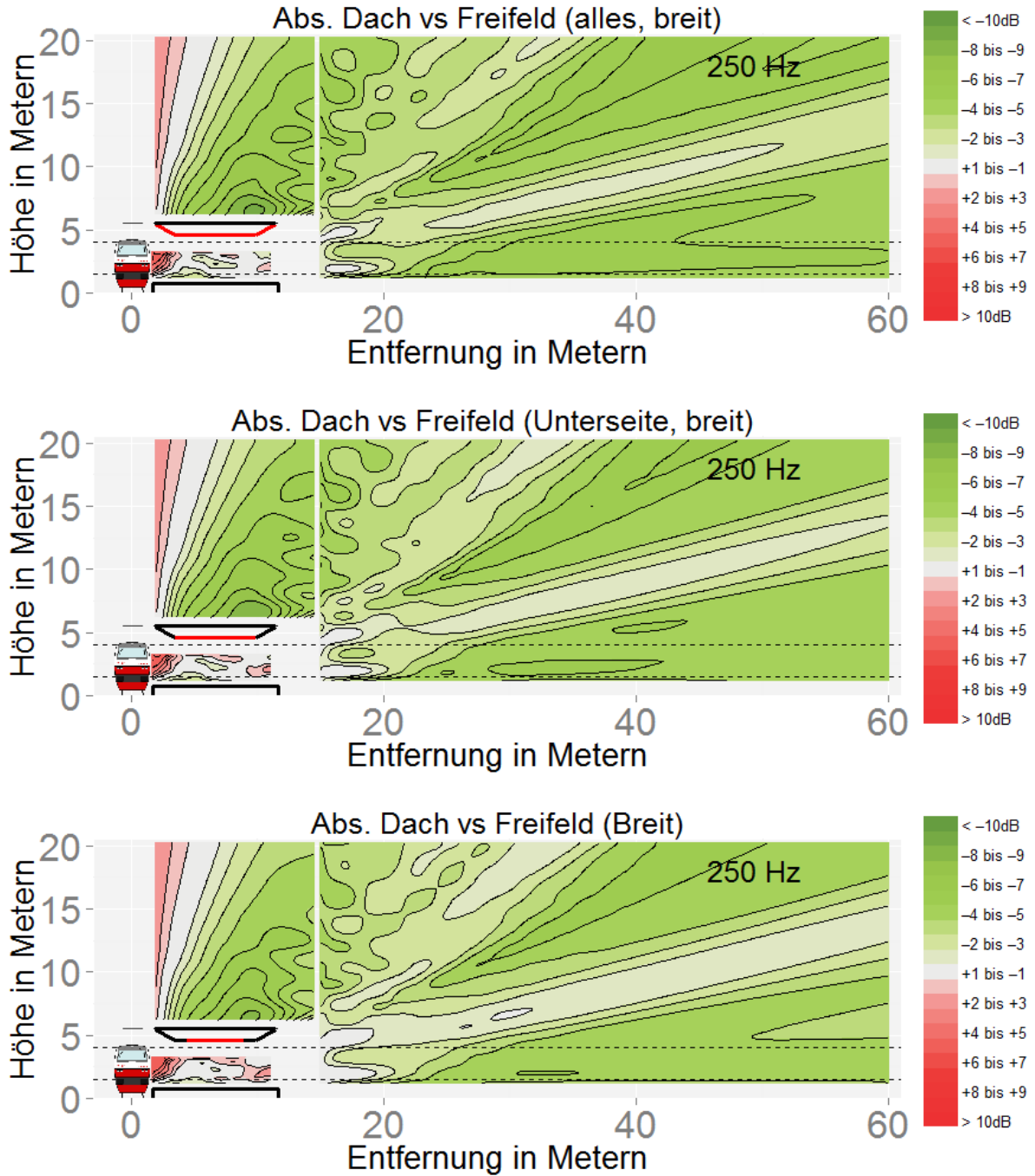


Abbildung 251

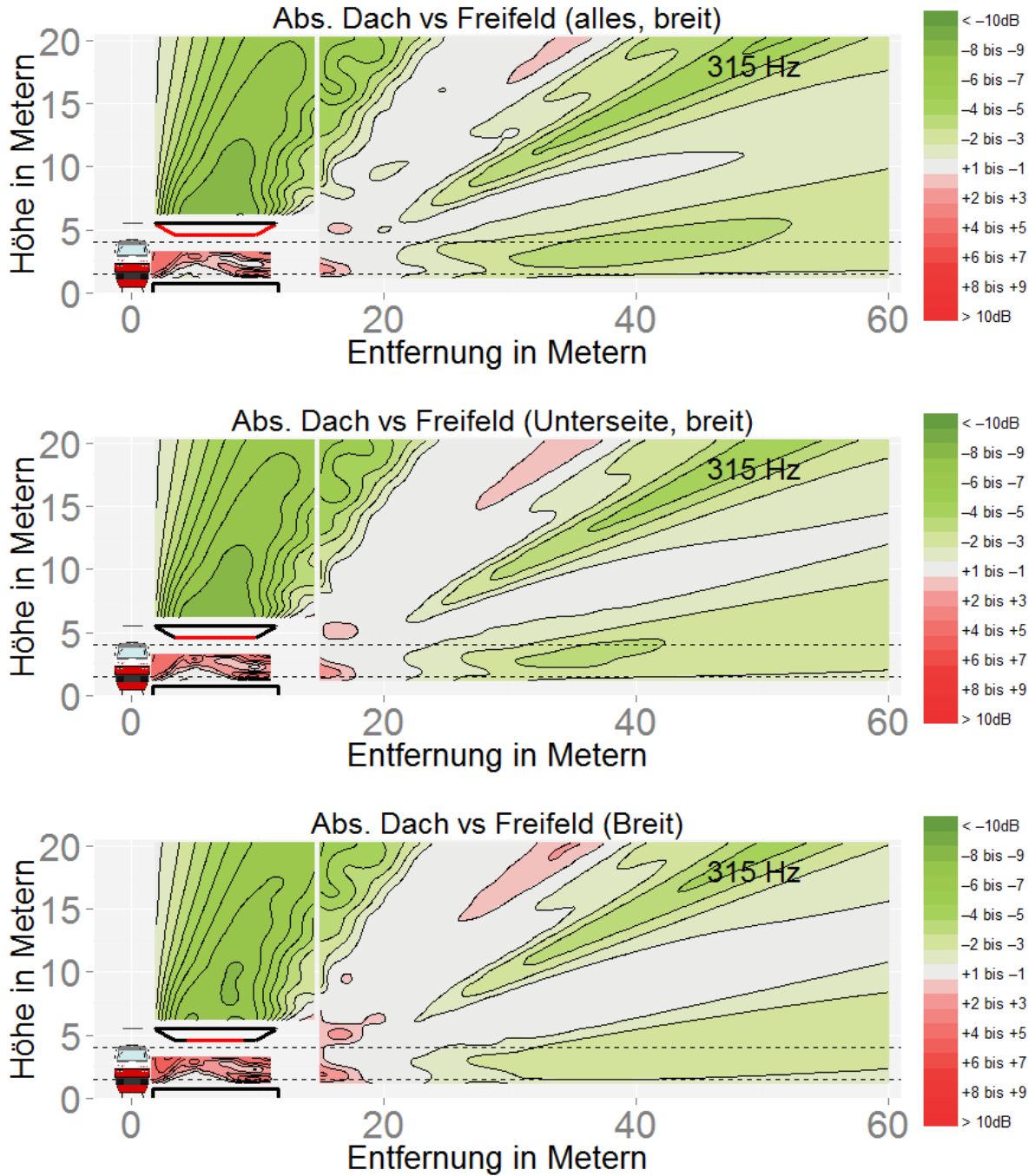


Abbildung 252

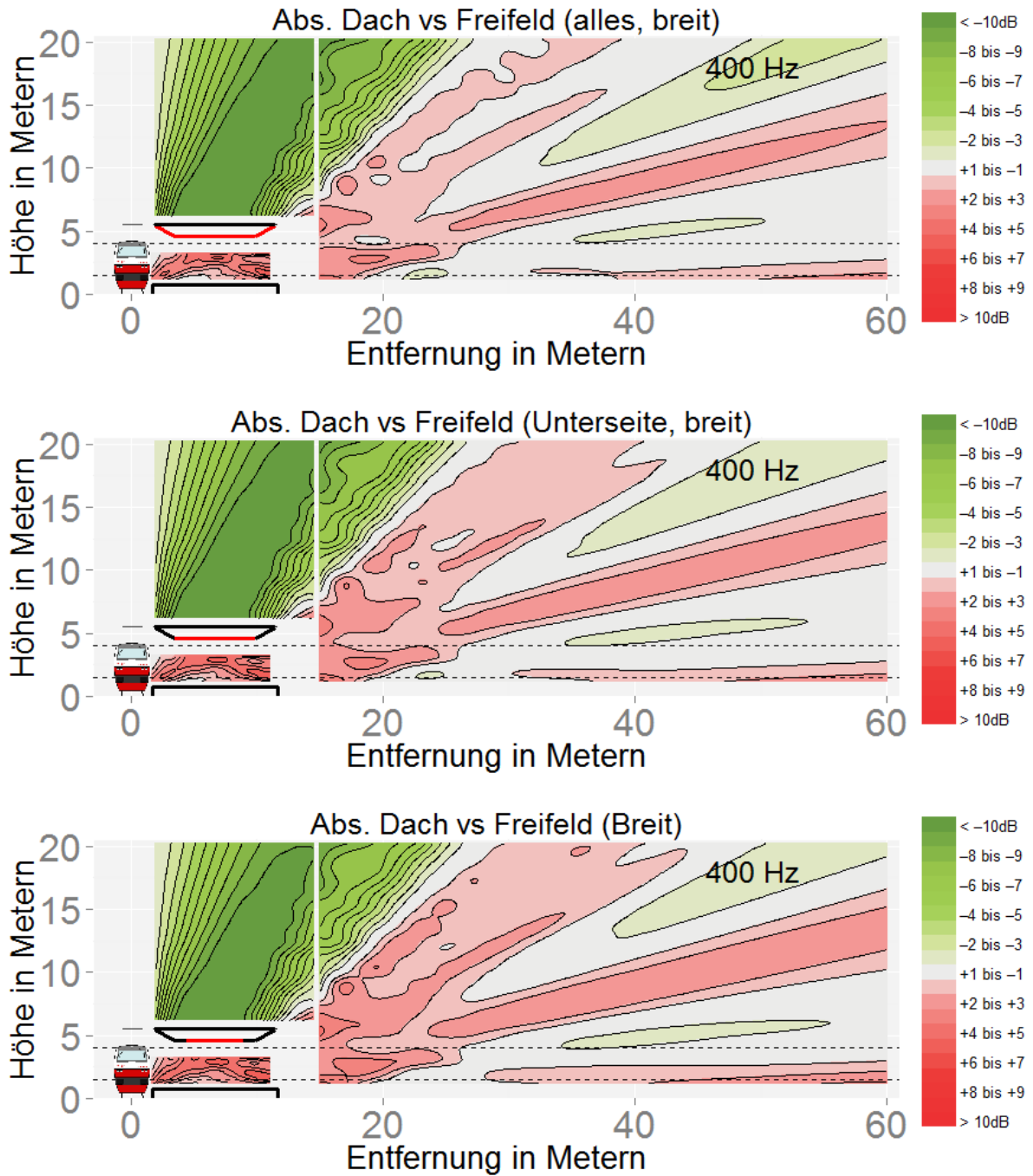


Abbildung 253

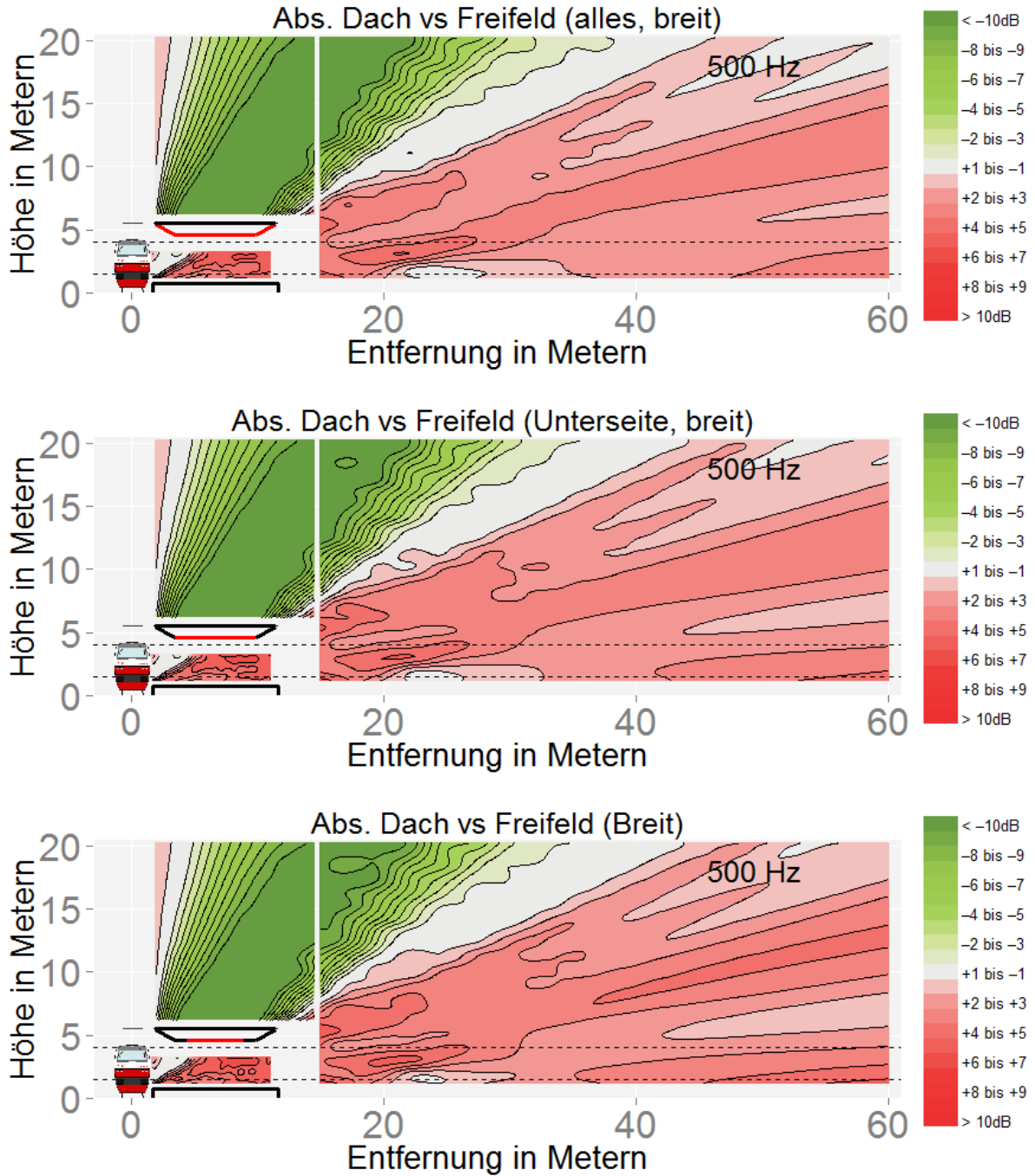


Abbildung 254

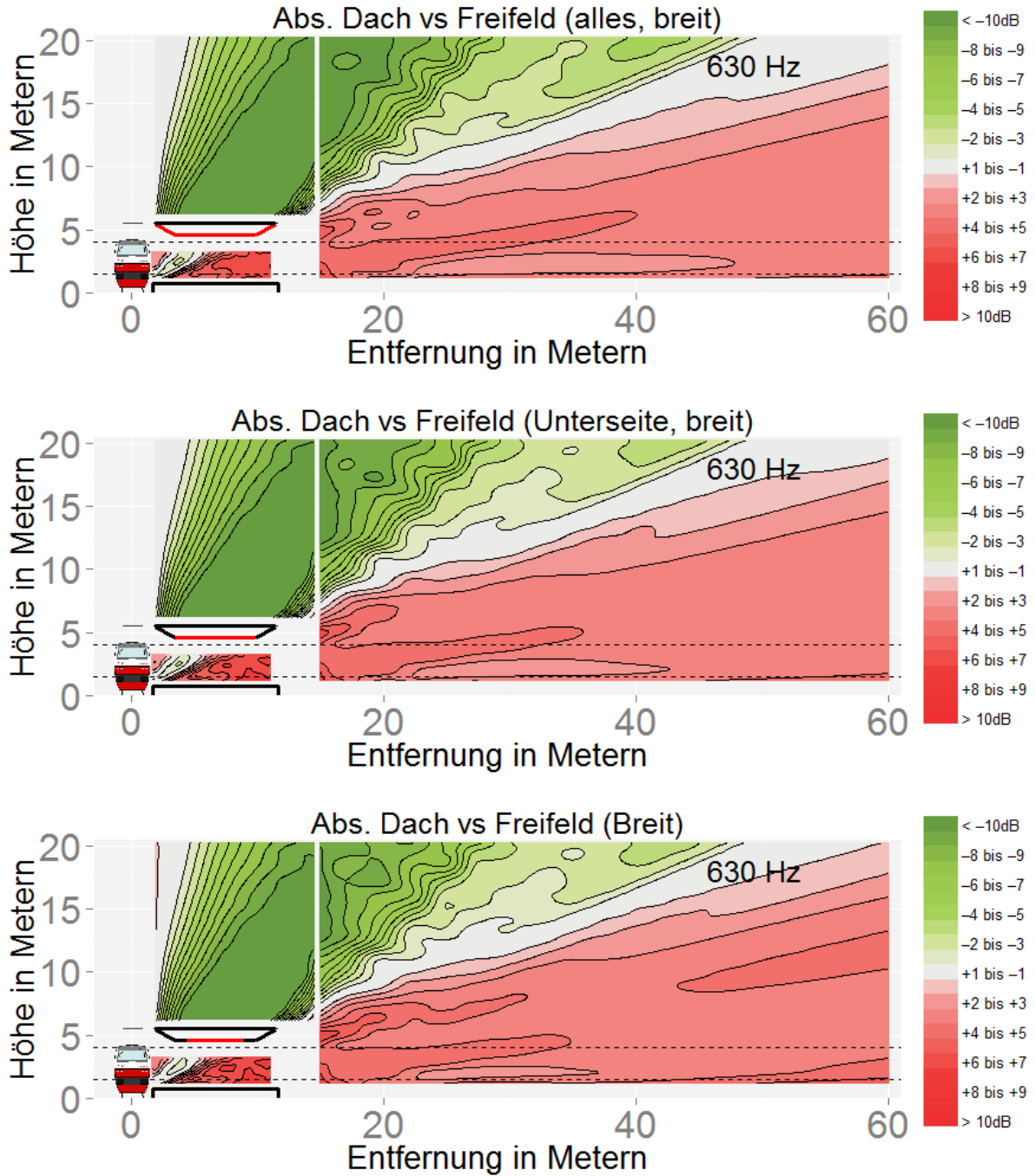


Abbildung 255

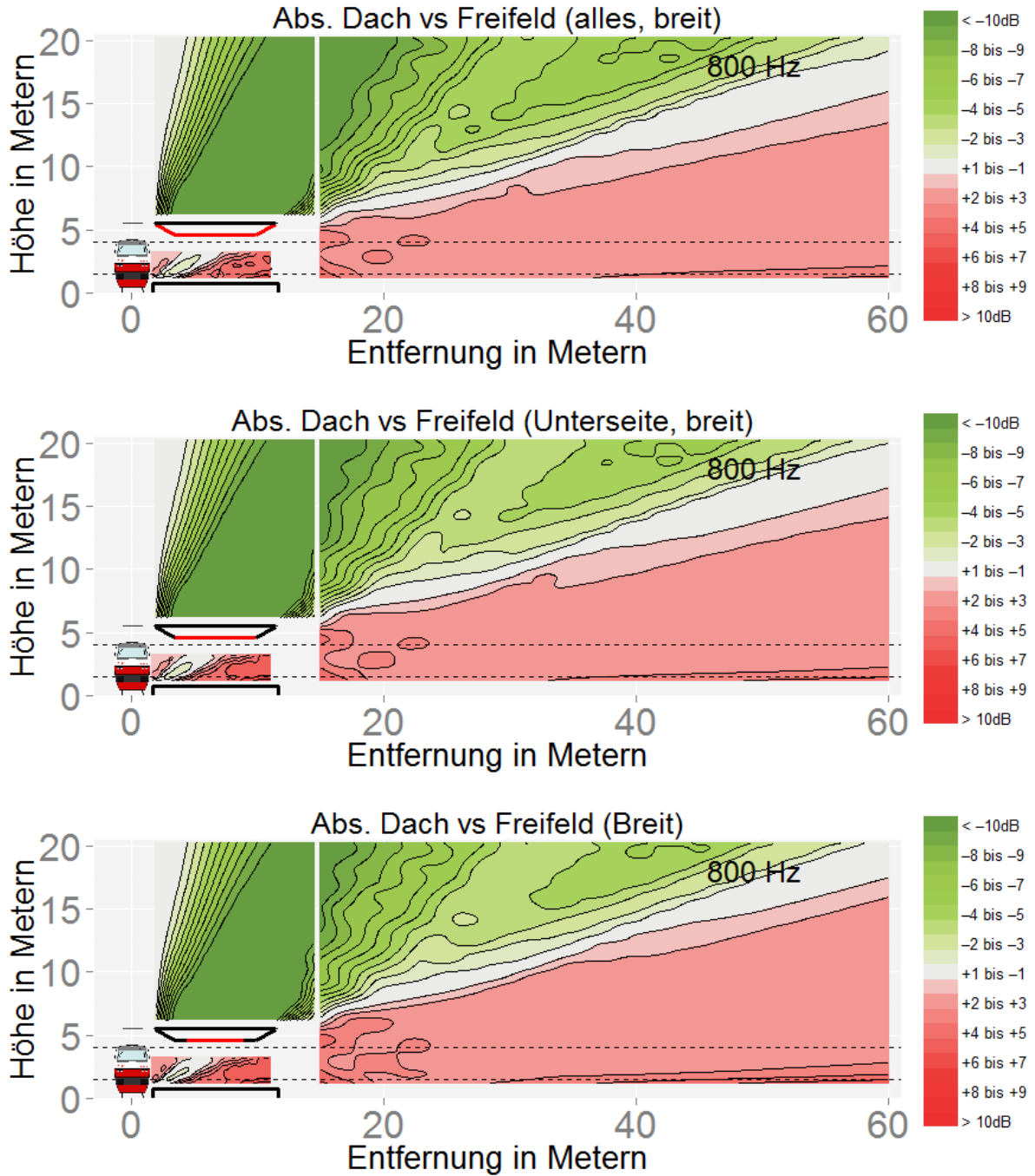


Abbildung 256

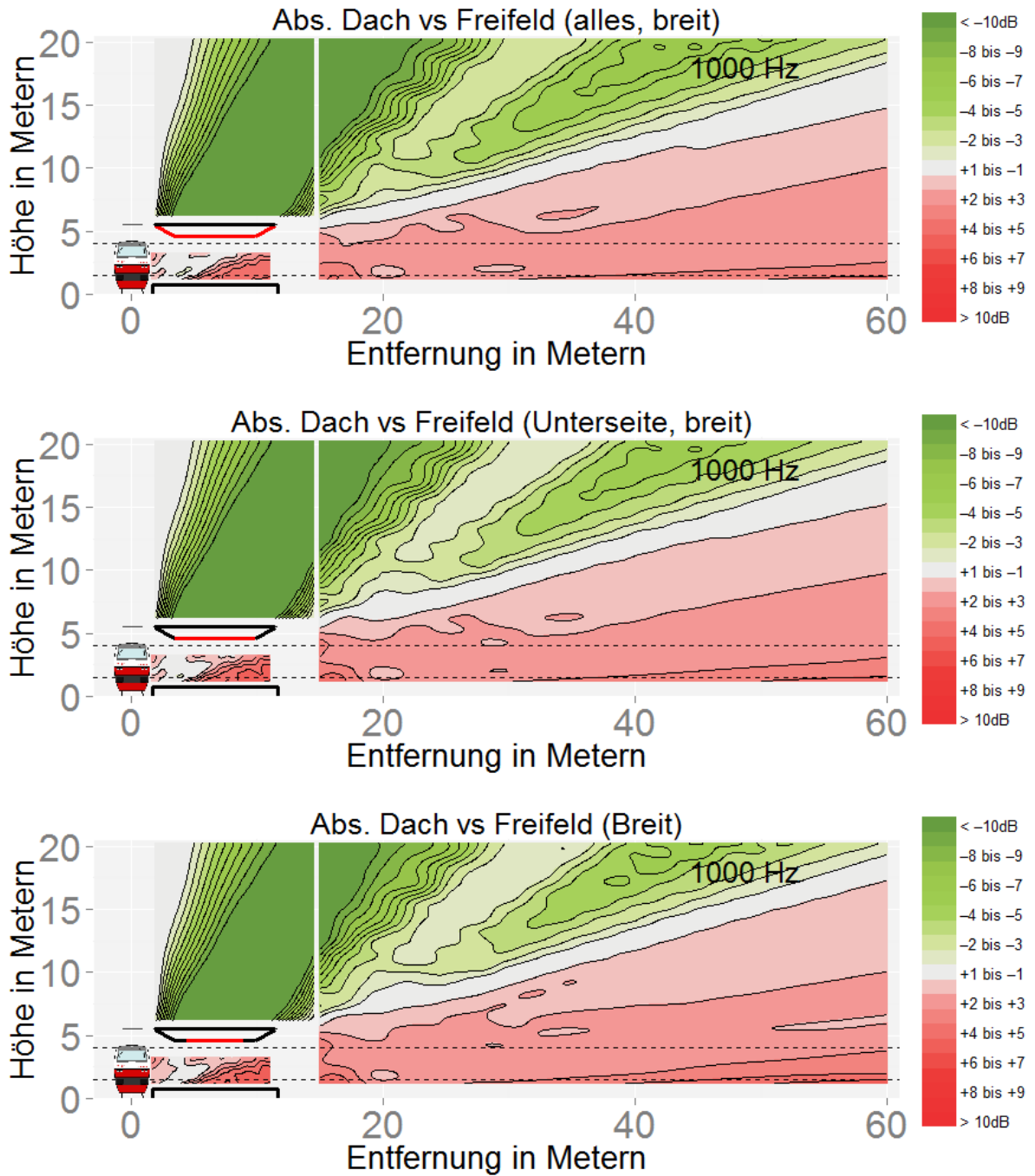


Abbildung 257

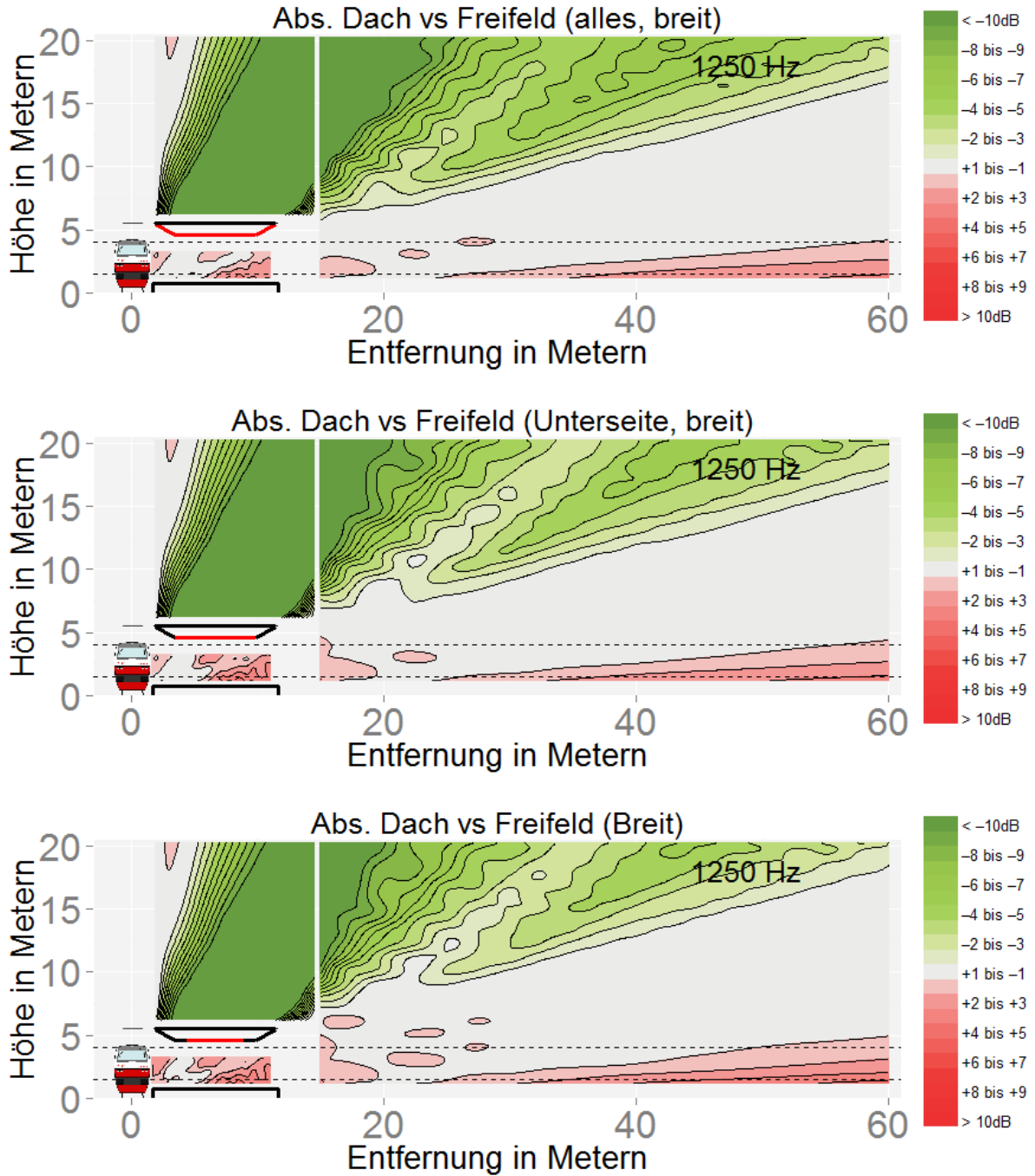


Abbildung 258

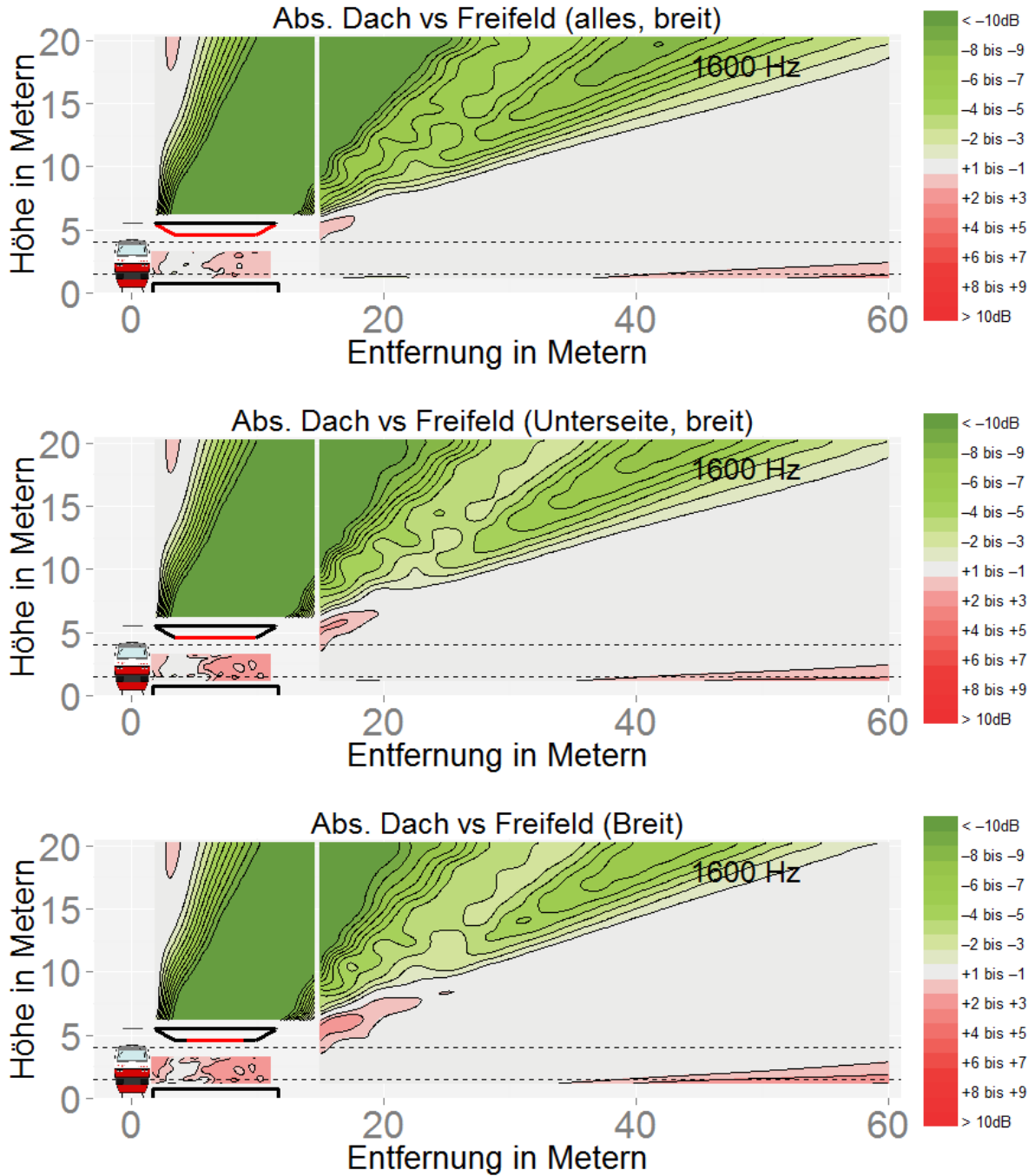


Abbildung 259

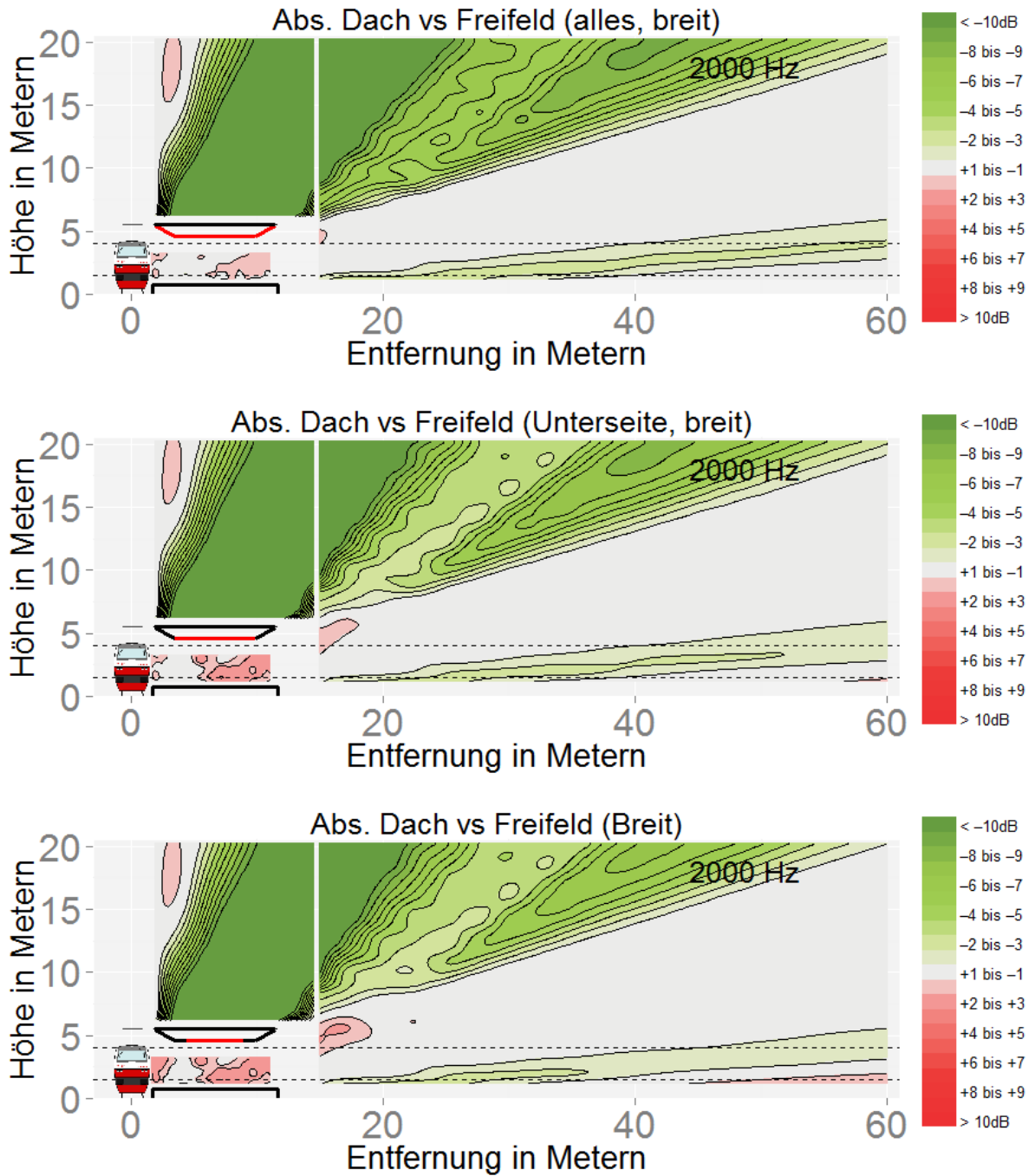


Abbildung 260

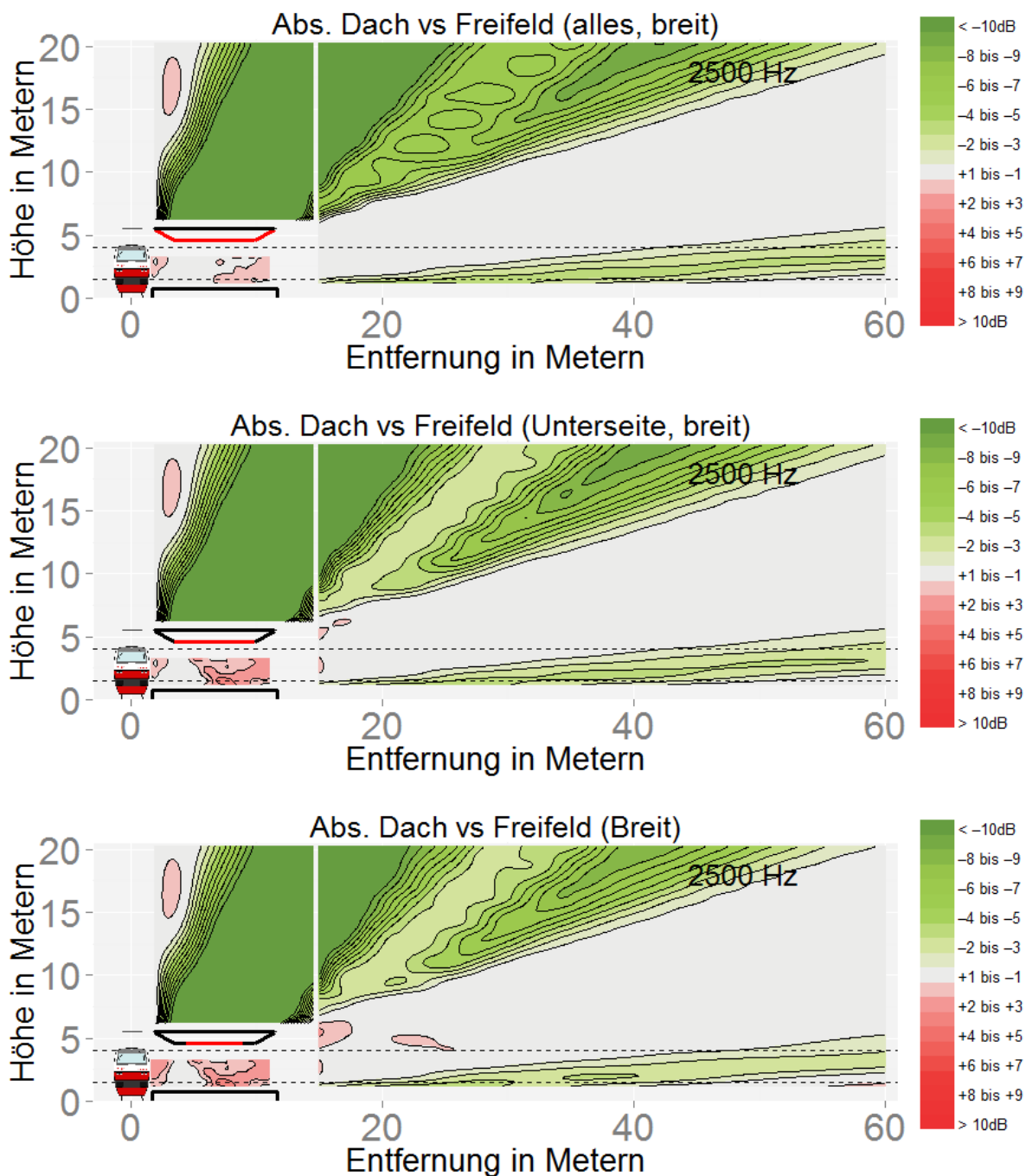


Abbildung 261

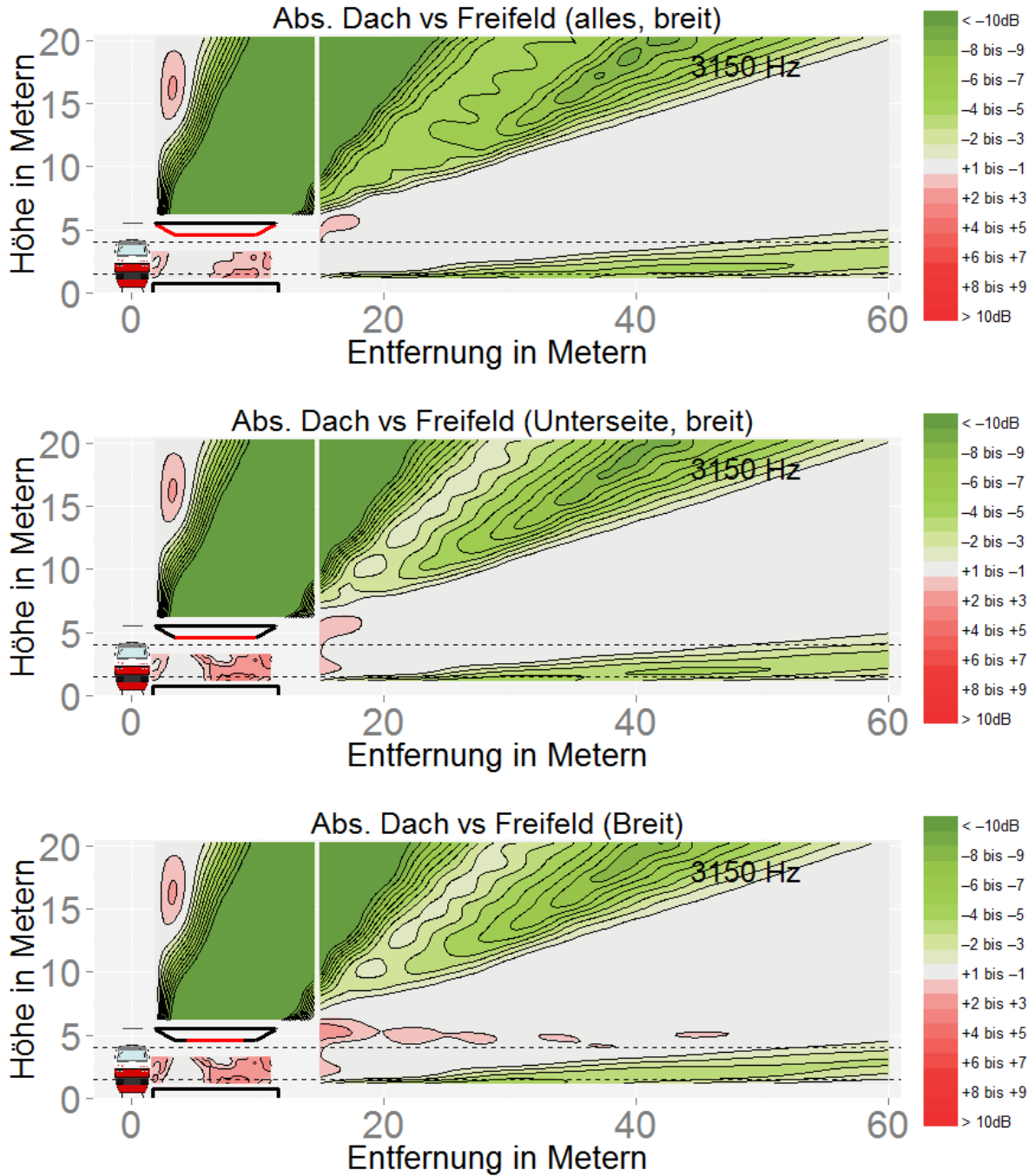


Abbildung 262