

Empa
Überlandstrasse 129
CH-8600 Dübendorf
T +41 58 765 11 11
F +41 58 765 11 22
www.empa.ch

armasuisse Immobilien
z.H. von Philipp Kadelbach
Guisanplatz 1
3003 Bern

Unterstützung Lärmsanierungsprojekt – Plausibilisierung der Hindernisberechnung im Modus BASIC des Schiesslärmmodells sonARMS

Untersuchungsbericht:	Empa-Nr. 5214036168-2
Ihr Auftrag vom:	20. Mai 2025
Anzahl Seiten inkl. Beilagen:	20

Inhaltsverzeichnis

- Zusammenfassung
- 1 Auftrag
- 2 Ausgangslage
- 3 Zur Funktionsweise der Algorithmen
- 4 Testfälle
- 5 Resultate und Diskussion
- 6 Fazit

Dübendorf, 30. September 2025
Gruppenleiter Umweltakustik:

Abteilung Akustik / Lärminderung
Projektleiter / Abteilungsleiter:

Dr. Reto Pieren

Dr. Jean Marc Wunderli

Zusammenfassung

In 2025 ist ein neuer Release des Schiesslärmmodells sonARMS geplant. Verbesserungen betreffen die Berechnung der Hinderniswirkung im Modul BASIC, wo neben Schallpfaden über, unter und seitlich um Hindernisse neu auch die Transmission durch Hindernisse berücksichtigt werden kann. Im vorliegenden Bericht werden die durchgeführten Plausibilisierungsrechnungen dokumentiert und Informationen zur Funktionsweise der Algorithmen gegeben. Der neue Release enthält zusätzlich Verbesserung bei der Berechnung von Waldreflexionen im Modul FOREST, welche jedoch nicht an dieser Stelle dokumentiert werden.

Die Tests sind positiv verlaufen und es wird empfohlen, den Rechenkern in dieser Form zu veröffentlichen.

1 Auftrag

Die Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung entwickelt und unterhält im Auftrag des BAFU und der armasuisse das Schiesslärm-Berechnungsmodell sonARMS. Für den Release 2025, mit der sonARMS Kernel Version V6.0, wurden Anpassungen an der Berechnung der Hinderniswirkung im Modus BASIC sowie an den Waldreflexionen im Modus FOREST durchgeführt. Der vorliegende Untersuchungsbericht dokumentiert Testberechnungen zur Plausibilitätskontrolle der Direktschallberechnung¹ im Modus BASIC.

2 Ausgangslage

Für den Release 2025, mit der sonARMS Kernel Version V6.0, wurden im Vergleich zum letzten offiziellen Release mit Versionsnummer 5.6 folgende Anpassungen vorgenommen:

- Für Schallpfade durch Hindernisse wurde die Dämpfung A_{trans} eingeführt. Objekten mit Hinderniswirkung kann neu in sonARMS eine Schalldämmung in drei Kategorien (hoch, mittel bzw. schwach schalldämmend) zugewiesen werden (für Details wird auf die sonX-Dokumentation verwiesen).
- Bei der Direktschallberechnung im Modus BASIC wurden für die Korrekturen der Hinderniswirkung A_{lat} , A_{bottom} und A_{trans} die Strahlsuchen überarbeitet und die Interaktion der drei Anteile verbessert.
- Schallpfade durch Öffnungen liefern neu auch einen Beitrag, wenn der Schallstrahl nicht durch die Öffnung verläuft.
- Die Suche nach seitlichen Schallpfaden wird abgebrochen, wenn bei 500 Hz die maximale Hinderniswirkung der seitlichen Schallpfade für Einfachhindernisse gemäss sonARMS-Parametern erreicht wird. (Voreingestellt ist der sonARMS-Parameter *SingleBarrierMaxAtt* auf 25 dB.)

Schallpfade durch Hindernisse wurden auf Wunsch der armasuisse eingeführt, um künftig auch mobile Lärmschutzwände bei den Berechnungen berücksichtigen zu können. Die Überarbeitung der Strahlsuche sowie die Einführung einer Limite für die seitliche Hinderniswirkung wurden aufgrund der Erfahrungen mit der Modellierung von Rasterdecken, im Rahmen des Projektes mit Empa-Nr. 5214.033862 (Titel: "Modellierung von Rasterdecken - Validierung von sonARMS mit einem wellentheoretischen Referenzmodell"), angestossen. Die Anpassung zu Schallpfaden durch Öffnung wurde eingeführt, um eine unerwünschte Sprungfunktion beim Treffen einer Kante zu vermeiden.

3 Zur Funktionsweise der Algorithmen

Zum Verständnis und zur besseren Interpretierbarkeit der Resultate der Testberechnungen wird nachfolgend die Methodik zur Berechnung von Hinderniswirkungen in sonARMS kurz zusammengefasst. Für weitere Details sei auf die Dokumentation von sonARMS bzw. dem Ausbreitungskern sonX verwiesen.

In der Direktschallberechnung im Modus BASIC werden verschiedene Ausbreitungseffekte quantifiziert. Von zentraler Bedeutung ist dabei der Dämpfungsterm A_{grBar} , welcher den Einfluss von Reflexionen am Untergrund und von Hinderniswirkungen ausweist. Die Berechnung erfolgt dabei auf der Basis eines Geländeschnittes zwischen Quelle und Empfänger in der Vertikalen, welche neben dem Terrain auch Hindernisse enthält. Diese initiale Berechnung des Direktschalls wird im Falle von künstlichen Hindernissen um mehrere Korrekturen verfeinert:

- A_{lat} beschreibt allfällige Pegelerhöhungen aufgrund seitlicher Schallpfade um Hindernisse,

¹ In sonX wird zwischen Direktschall und Reflexionen unterschieden. Die Direktschallberechnung, inklusive Beugung und Bodenreflexionen, erfolgt in den Modulen BASIC und METEO, die Reflexionsberechnung in den Modulen FOREST und REFLECT.

- A_{bottom} beschreibt Pegelerhöhungen aufgrund von Schallpfaden, welche unterhalb von Hindernissen bzw. durch Öffnungen führen,
- A_{trans} beschreibt Pegelerhöhungen aufgrund von Schallpfaden durch Hindernisse.

Die verschiedenen Korrekturen werden einzeln im Vergleich zu A_{grBar} bestimmt.

Für jede Korrektur werden unterschiedliche massgebliche Schallpfade identifiziert, als Ausgangspunkt für die weiteren Berechnungen:

- A_{grBar} bestimmt sich als Schallpfad, welcher über alle künstlichen Hindernisse inklusive Terrain führt (Gummiband-Methode).
- A_{lat} basiert auf zwei Schallpfaden, welche links und rechts um die Hindernisse führen. Es werden alle künstlichen Hindernisse berücksichtigt, welche durch einen direkten Strahl von Quelle zu Empfänger geschnitten werden. Die seitlichen Umwege werden in der Ebene bestimmt, welche sich entlang dieses direkten Strahls aufspannt. Sind Quelle und Empfänger nicht auf gleicher Höhe, so ist diese Ebene geneigt.
- Der Schallpfad für A_{bottom} wird analog zu A_{grBar} auf der Basis eines vertikalen Schnittes zwischen Quelle und Empfänger bestimmt, wobei alle künstlichen Hindernisse ohne Bodenabschluss weggelassen werden.
- Der Schallpfad für A_{trans} bestimmt sich analog, indem alle durchlässigen Hindernisse weggelassen werden.

Für die eigentliche Berechnung der Korrekturen wird auf die sonARMS- bzw. sonX-Dokumentation verwiesen.

Um eine Überkompensation zu vermeiden, d.h. damit die Immissionspegel in keinem Fall mit Hindernis höher ausfallen als ohne, wird jeweils nur die stärkste Korrektur in der Resultatverarbeitung berücksichtigt. Der Vergleich der verschiedenen Korrekturen erfolgt dabei terzbandweise, d.h. in einem Terzband kann in den Detailresultaten beispielsweise ein Eintrag bei A_{bottom} stehen und in einem anderen Terzband bei A_{trans} .

Eine seitliche Hinderniswirkung wird nicht ausgewiesen, wenn Direktsicht zwischen Quelle und Empfänger besteht. Als Direktsicht gilt auch eine Sichtverbindung, welche durch eine Öffnung führt.

Das Wechselspiel der verschiedenen Korrekturen im konkreten Fall nachzuvollziehen, kann anspruchsvoll sein. Zur Illustration zeigt Abbildung 1 zwei exemplarische Fälle eines (offenen) Torbogens und eines (offenen) Fensters und erklärt, wann A_{lat} und A_{bottom} zur Anwendung kommen:

- Punkt A befindet sich über einer Öffnung, weshalb A_{bottom} zur Anwendung kommt. A_{lat} wird über die ganze Breite des Hindernisses evaluiert. In dieser Situation wird A_{bottom} die grössere Zusatzdämpfung liefern, weshalb A_{lat} deaktiviert wird.
- Punkt B befindet sich knapp seitlich der Öffnung. Hier wird A_{lat} berechnet, und zwar für die ganze Breite des Objektes. Aufgrund der Abmessungen des Torbogens wird aber die Limite für A_{lat} erreicht und deshalb keine Korrektur ausgewiesen.
- Punkt C befindet sich in der Öffnung, A_{bottom} kommt zur Anwendung und A_{lat} ist nicht aktiv.
- Punkt D befindet sich neben der Öffnung, weshalb A_{bottom} nicht zur Anwendung kommt. Hier wird A_{lat} eine massgebliche Korrektur liefern, da nicht die Breite des gesamten Objektes für die Pfadsuche verwendet wird, sondern richtig erkannt wird, dass es einen seitlichen Pfad durch die Öffnung gibt.
- Punkt E entspricht konzeptionell Punkt C. Es wird jedoch erkannt, dass die Öffnung nach unten durch ein zweites Objekt im gleichen Querschnitt abgedeckt wird. Deshalb wird die Korrektur für A_{bottom} deutlich kleiner ausfallen und es wird ein tieferer Immissionspegel resultieren.
- Punkt F ist analog zu Punkt D und es wird A_{lat} ausgewiesen.
- Bei Punkt G kommt die Korrektur für Öffnungen zur Anwendung und es werden keine seitlichen Schallpfade berücksichtigt. Obwohl der Durchstosspunkt vertikal praktisch in der Mitte der Öffnung

des Torbogens liegt, wird richtig erkannt, dass die Öffnung teilweise durch die zusätzliche Wand abgeschirmt wird. Entsprechend resultiert eine Korrektur von A_{bottom} analog zu Punkt A.

- Punkt H entspricht Punkt B, so dass im Endeffekt keine Korrektur zur Anwendung kommt. Im Vergleich zu Punkt F wird richtig erkannt, dass der seitliche Pfad durch die Öffnung durch ein anderes Objekt blockiert wird.

Die Verwendung von Fallunterscheidungen, wie sie in den obigen Beispielen diskutiert wurde, und die Betrachtung in Schnitten bringt es mit sich, dass sich beim Übergang der einen zur anderen Situation Pegelsprünge nicht ganz vermeiden lassen (siehe dazu die Diskussion der Resultate in Kapitel 5).

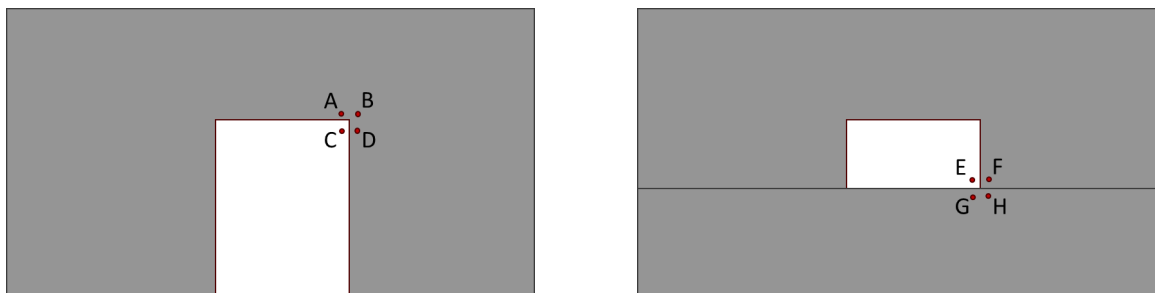


Abbildung 1: Fallunterscheidungen für unterschiedliche Durchstosspunkte von Schallstrahlen zwischen Quelle und Empfänger für die Situation mit einem Tor (links) und einem Fenster (rechts). (Hinweis: Die Situation mit einem Fenster kann nur mit zwei Elementen definiert werden. Als Tor mit einer am gleichen Ort definierten tiefen Wand.)

4 Testfälle

Zur Validierung der Algorithmen werden drei Grundsituationen mit Testfällen verwendet. Die Berechnungen für laterale Schallpfade und Transmission (Abschnitte 4.1 bzw. 4.2) wurden mit Rechenkern Version V5.8.3 durchgeführt. Für die Berechnungen der Rasterdecke gemäss Abschnitt 4.3 kam Rechenkern Version V5.8.6 zum Einsatz. Es wurden, wo nicht anders erwähnt, die Standard-Parametereinstellungen verwendet.

4.1 Laterale Schallpfade und Öffnungen

Ein erster Satz von Situationen wurde aus dem Bericht mit Empa-Nr. 5214016236 aus dem Jahr 2018 (Titel: "Vorbereitungsarbeiten zur Optimierung von Lärm-Indikatoren – Limitierungen des sonX Ausbreitungsmodells"), im Auftrag des BAFU übernommen. Abbildung 2 zeigt die Ausgangslage im Grundriss, Abbildung 3 die verschiedene Hindernisvarianten A bis I, welche getestet wurden. Diese können wie folgt beschrieben werden:

- A: Wandsegment mit vier Punkten von 0 m Höhe (keine Wand, Referenzsituation)
- B: Wie A, aber mit Höhe 5.5 m (Wand, Referenzsituation 2)
- C: Wie B, aber das mittlere Segment mit Höhe 0 m
- C2: Wie C, aber modelliert aus zwei Wandelementen
- D: Wie B, aber das mittlere Segment mit einer Öffnung bis 2 m Höhe (Tor)
- D2: Wie D, aber modelliert aus drei Wandelementen
- E: Wie D, aber mit einem schmalen Tor
- F: Wie D, aber das Verbindungselement reicht nur von 2 bis 3 m Höhe
- G: Wie D, aber mit einer zusätzlichen Wand von 1 m Höhe an gleicher Stelle

- G2: Wie G, aber mit der zusätzlichen Wand um 1 m nach vorne versetzt
 H: Wie D2, aber ohne die seitlichen Wandelemente (Schwebende Wand)
 H2: Wie H, aber mit Bodenabschluss (kurze Wand)
 I: Wie B, aber alle drei Wandelemente ohne Bodenabschluss, mit Öffnung bis 2 m

Das Gelände besteht aus einer Ebene mit Grasland. Als Quelle wurde eine Signalpistole (adaptierte Smith&Wesson, Kaliber 38; Produktbezeichnung: Impulsgeber WBAG Typ 94 von Walter Bauphysik AG) mit omnidirektionaler Abstrahlcharakteristik verwendet. Es wurden fünf Quellen auf einer Höhe von 0.5 m platziert, sowie neun Empfangspunkte auf Höhen von 1.5, 4.0 und 10 m. Lärmkarten wurden mit einer Maschenweite von 1 m und für Höhen von 2, 4 und 6 m über Terrain berechnet. Das Rechengebiet weist Abmessungen von 70 auf 100 m auf (in X- bzw. Y-Richtung). Die Basisversion der Wand, gemäss Variante B aus Abbildung 3, besitzt eine Länge von 50 m und eine Höhe von 5.5 m.

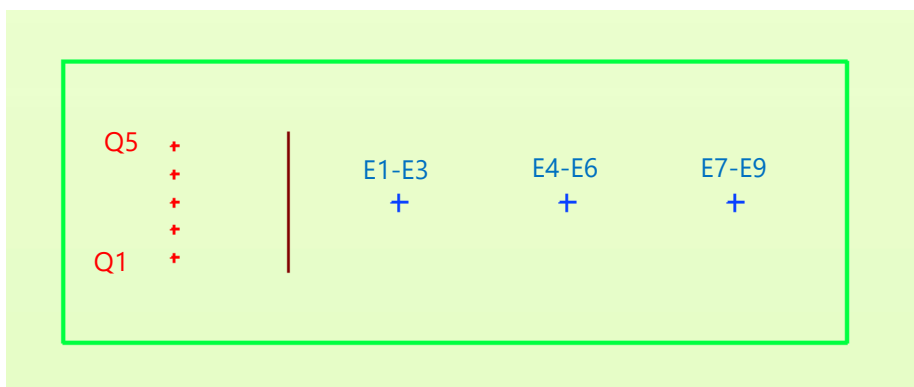


Abbildung 2: Überblick der Testsituation für seitliche Schallpfade und Pfade durch Öffnungen im Grundriss. Die roten Kreuze bezeichnen Quellenpositionen, die blauen Kreuze Empfangspunkte, das grüne Rechteck das Rechengebiet für Lärmkarten und die braune Linie die Lage des Hindernisses. (Achtung: Die X- und Y-Achse sind nicht massstäblich.)

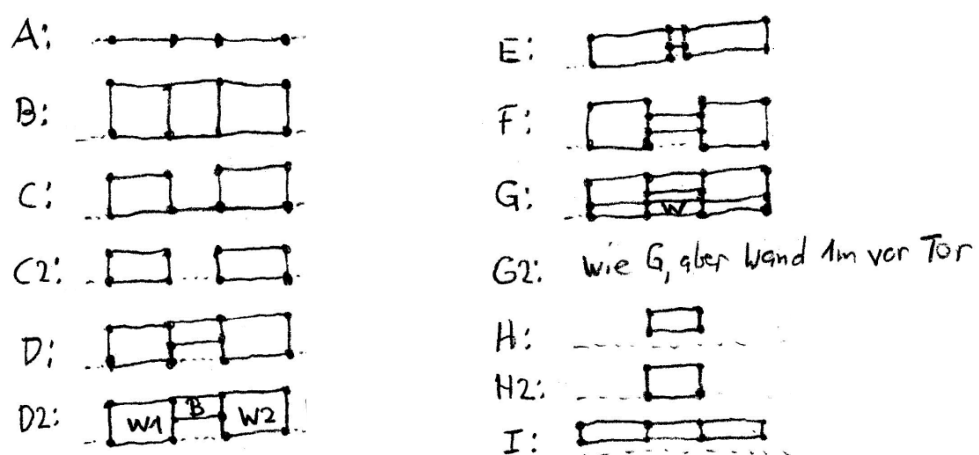


Abbildung 3: Überblick der verschiedenen Hindernisvarianten für seitliche Schallpfade und Pfade durch Öffnungen. Die Punkte stellen Koordinaten dar und die ausgezogenen Rechtecke Hindernisobjekte. Zur Orientierung zeigen gestrichelte Linien das Gelände.

4.2 Transmission

Zum Testen der Wirkung des Schalldurchganges wurde eine künstliche Situation gemäss Abbildung 4 erzeugt, mit einer Signalpistole als Quelle im Zentrum auf 1.5 m Höhe und Wänden mit unterschiedlichen Eigenschaften in die vier Hauptausbreitungsrichtungen. Es wurden neun Empfangspunkte in 4 m Höhe platziert (siehe Abbildung 4, links). Das Rechengebiet weist Dimensionen von 200 x 200 m auf und eine Höhe über Terrain von 2 m, bei einer Maschenweite von 1 m. Sämtliche Wände weisen eine Höhe von 6 m auf. Die vier Wandsituationen, gemäss Abbildung 4 rechts, sind folgendermassen definiert:

W1: Wand schwach schalldämmend (Typ 506)

W2: zwei schwach schalldämmende Wände in 5 m Abstand

W3: Wand mittel schalldämmend (Typ 505)

W4: Wand schwach schalldämmend (Typ 506), mit unten einer 2 m Öffnung

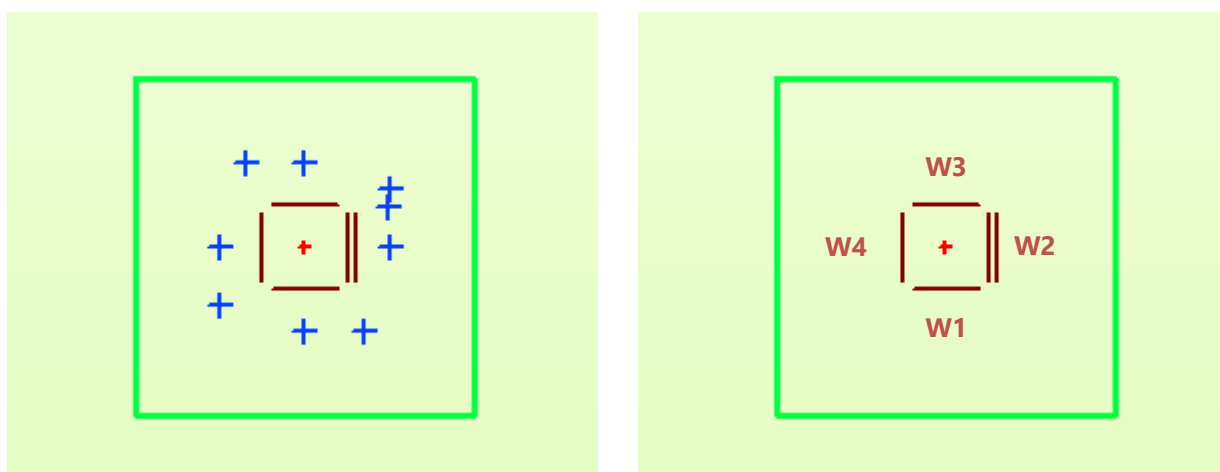


Abbildung 4: Überblick der Testsituation für Transmission. Die roten Kreuze bezeichnen die Quellenposition, die blauen Kreuze links Empfangspunkte, das grüne Rechteck das Rechengebiet für Lärmkarten und die braune Linie die Lage der Hindernisse. Diese sind in der Darstellung rechts noch bezeichnet.

4.3 Rasterdecken

Im Untersuchungsbericht mit Empa-Nr. 5214.033862 (Titel: "Modellierung von Rasterdecken - Validierung von sonARMS mit einem wellentheoretischen Referenzmodell") wurden 2025 im Auftrag des BAFU ausgehend von einer einfachen Box verschiedene Varianten mit hängenden Paneelen modelliert und die Berechnungen von sonARMS mit einem wellentheoretischen Modell, welches die Wellengleichung im Zeitbereich löst², verglichen. Die damals erzielte Übereinstimmung zwischen dem Referenzmodell und sonARMS war nicht befriedigend und gab Anlass zu einigen der seither umgesetzten Änderungen am Rechenkern. Aus diesem Grund wurden die damaligen Situationen in der vorliegenden Validierung nochmals aufgenommen. Abbildung 5 zeigt links eine vereinfachte Geometrie im Grundriss, mit einer rundherum geschlossenen (aber oben offenen) Box und mehreren quer zur Schussrichtung verlaufenden hängenden Paneelen. Abbildung 5 rechts zeigt eine analoge Situation, welche aber deutlich mehr hängende Paneele aufweist, die nicht nur quer, sondern auch längs zur Schussrichtung angeordnet sind. Diese zweite Situation entspricht

² Die Methode wird als Finite Differences in the Time Domain (FDTD) bezeichnet.

bezüglich der Anzahl hängender Paneele der zu erwartenden Umsetzung, wobei in Realität die Paneele teilweise gekippt sein werden. Die Paneele, welche die Rasterdecke bilden, weisen gemäss Materialanalyse aus dem Untersuchungsbericht Empa-Nr. 5214.033862 eine mittlere Absorption und eine schwache Schalldämmung, gemäss sonARMS-Klassierung dar.

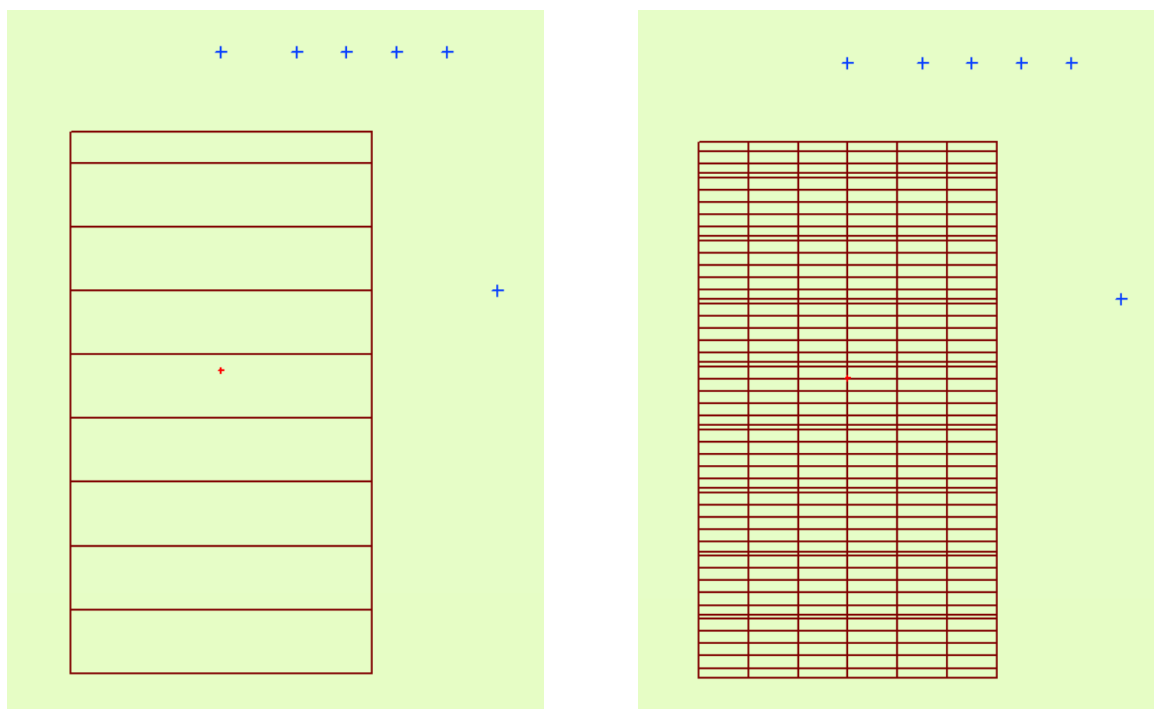


Abbildung 5: Überblick der Testsituation für Rasterdecken im Grundriss (einfaches Raster). Das rote Kreuz bezeichnet die Quellenpositionen, die blauen Kreuze Empfangspunkte und die braune Linie die Lage der Hindernisse. Die Box weist eine Breite von 12 m und eine Länge von 34 m auf. (Achtung: Die X- und Y-Achse sind nicht massstäblich.).

In Abbildung 6 ist die vereinfachte Situation in einer Seitenansicht, so wie sie aus der Visualisierung aus dem FDTD-Referenzmodell resultiert, dargestellt. Abbildung 7 und Abbildung 8 zeigen zur besseren Illustration die beiden Situationen in 3D. Die Höhe der Box reicht bis 4.2 m, darüber folgt bis 4.92 m der Aufbau der Rasterdecke. Der Fokus der Analysen liegt auf der in Abbildung 6 dargestellten vertikalen Linie mit Empfängern in einem Abstand von 20 m von der Quelle bzw. 5 m vom Ende der Box, auf unterschiedlichen Höhen.

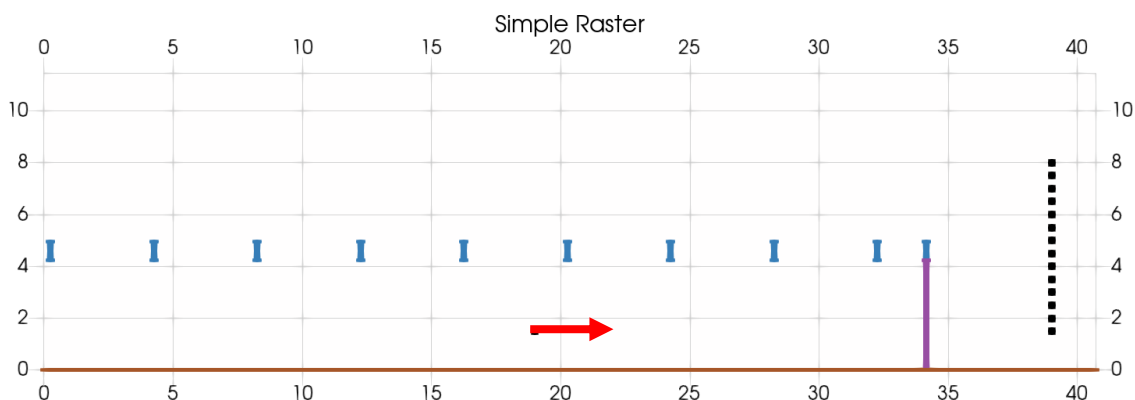


Abbildung 6: Seitenansicht der Rasterdecke mit der Quellposition bei 18 m und einer Linie mit Empfangspunkten bei 39 m. Blau dargestellt sind die Raster. (Quelle: Empa-Bericht Nr. 5214.033862)

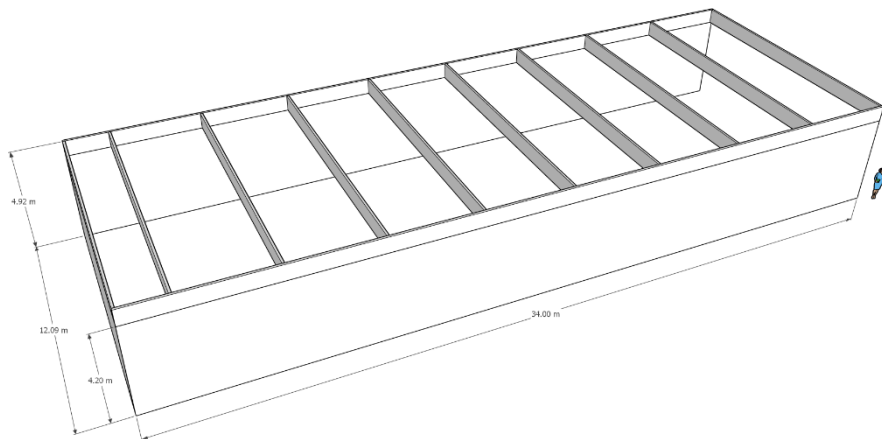


Abbildung 7: 3D-Ansicht der Rasterdecke mit einfachem Raster. (Quelle: Empa-Bericht Nr. 5214.033862)

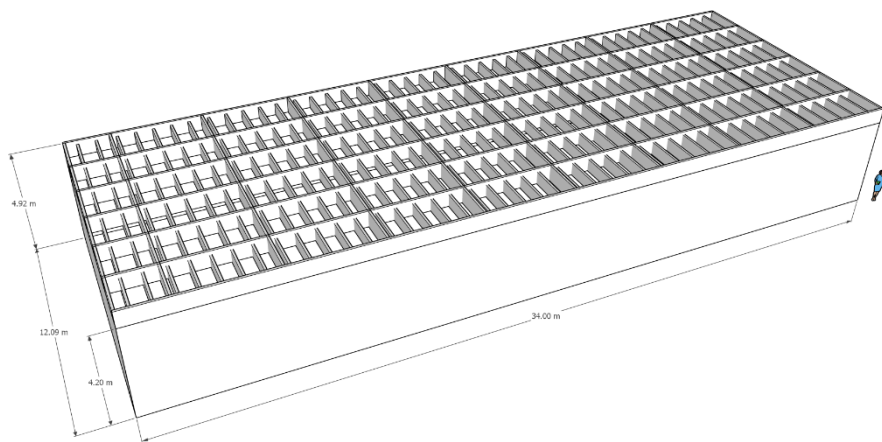


Abbildung 8: 3D-Ansicht der Rasterdecke mit vollständigem Raster.
(Quelle: Empa-Bericht Nr. 5214.033862)

5 Resultate und Diskussion

Die nachfolgend gezeigten Kartendarstellungen wurden mit dem Tool *sonARMS_NoiseMapVisualizer* erstellt.

5.1 Laterale Schallpfade und Öffnungen

Es werden exemplarische Resultate der Testberechnungen gezeigt. Der Fokus liegt auf Quellposition Q1 sowie auf Empfangspunktrastern auf 2 und 4 m Höhe. Resultate anderer Quellen-Empfänger-Kombinationen wurden angeschaut; sie werden jedoch aus Gründen des Umfangs und der Übersichtlichkeit nicht gezeigt. Ebenfalls werden keine Resultate von Einzelpunktberechnungen aufgeführt, welche aber für Plausibilitätskontrollen verwendet wurden.

Abbildung 9 zeigt den Referenzfall B gemäss Abbildung 2 mit einer geschlossenen Wand. Aus Abbildung 10 ist ersichtlich, wie der Schall durch einen Unterbruch in der Wand geht. Es spielt dabei keine Rolle, ob die Situation als durchgehendes Wandelement (Situation C) oder als zwei getrennte Elemente (Situation C2) modelliert wird.

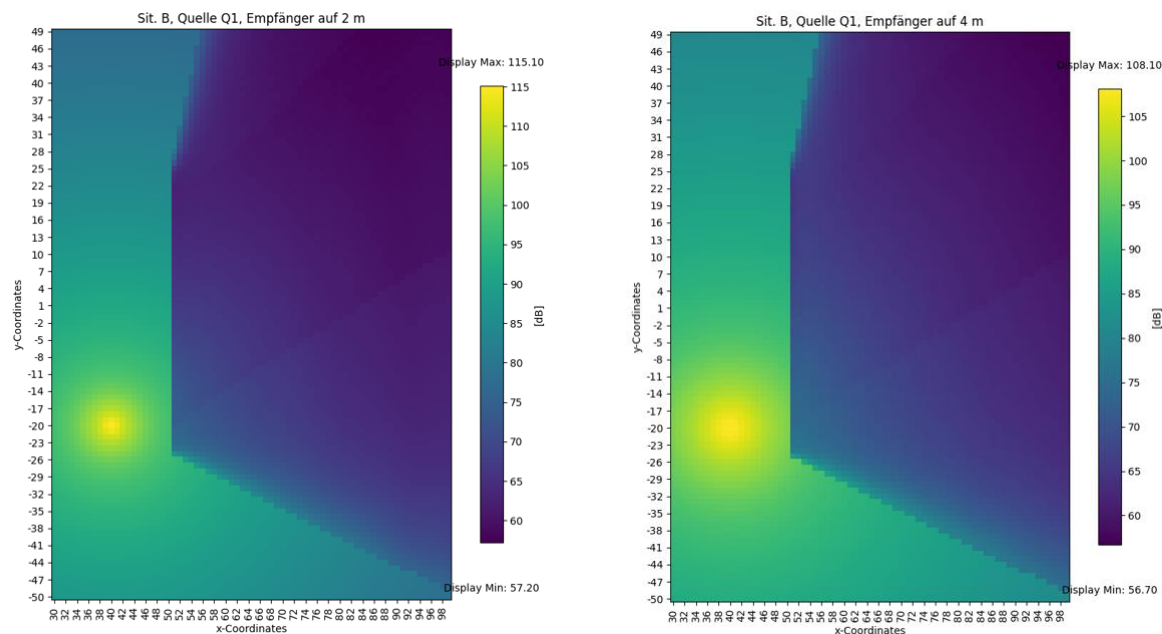


Abbildung 9: Kartendarstellung der Immissionspegel von Situation B für 2 bzw. 4 m Höhe.

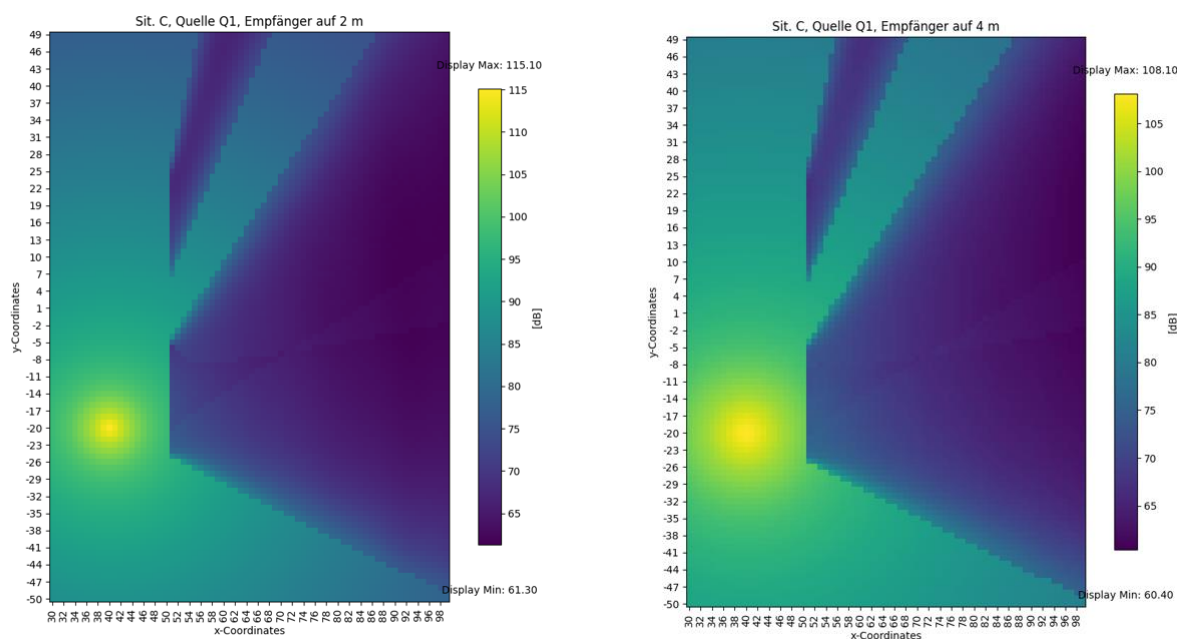


Abbildung 10: Kartendarstellung der Immissionspegel von Situation C für 2 bzw. 4 m Höhe.

Abbildung 11 zeigt die Situation mit einem Tor gemäss Situation D. In Abbildung 12 ist zusätzlich die Pegeldifferenz zu Situation B dargestellt. Die Unterkante des Torbogens befindet sich auf 2 m Höhe. Für eine Empfängerhöhe von 2 m dringt der Schall weitgehend ungehindert durch das Tor, weshalb sich ein ähnliches Bild wie für Situation C ergibt. Für eine Empfängerhöhe von 4 m durchstösst der Schallstrahl teilweise den Torbogen, weshalb die Öffnung schnell an Wirkung verliert. Im Vergleich zu Situation C ergeben sich in diesem Bereich tiefere Pegel, da die seitliche Hinderniswirkung nicht aktiv wird. Diese wirkt nicht für Situationen mit Öffnungen. Es spielt dabei keine Rolle, ob die Hindernisse als Einzelelement (Situation D) oder als Kombination von mehreren Elementen (Situation D2) definiert werden.

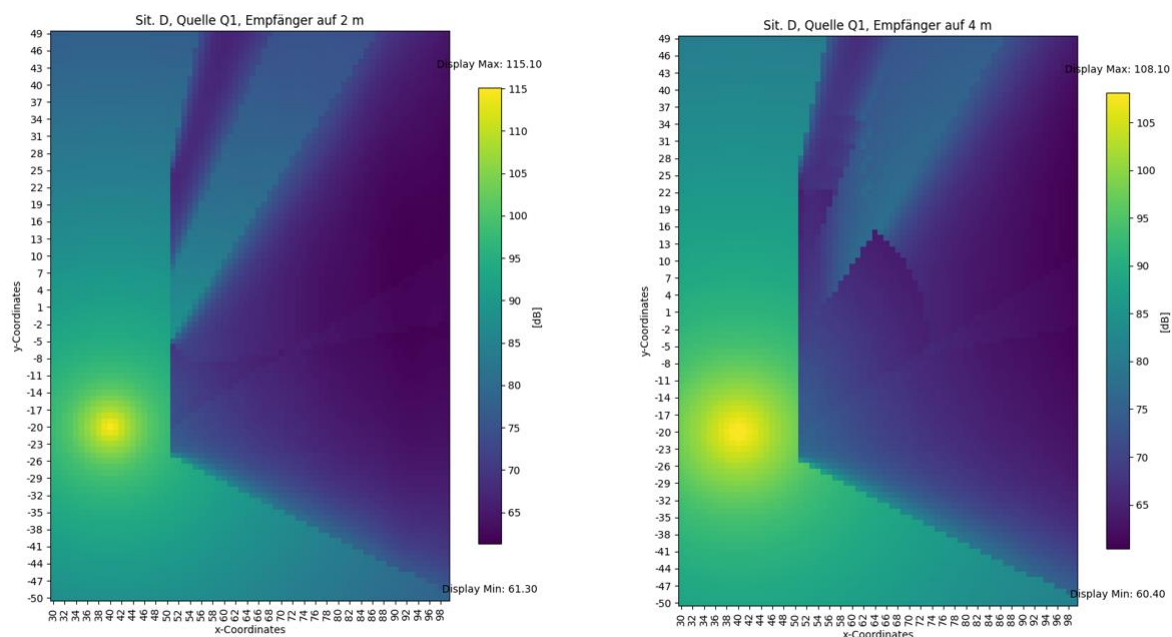


Abbildung 11: Kartendarstellung der Immissionspegel von Situation D für 2 bzw. 4 m Höhe.

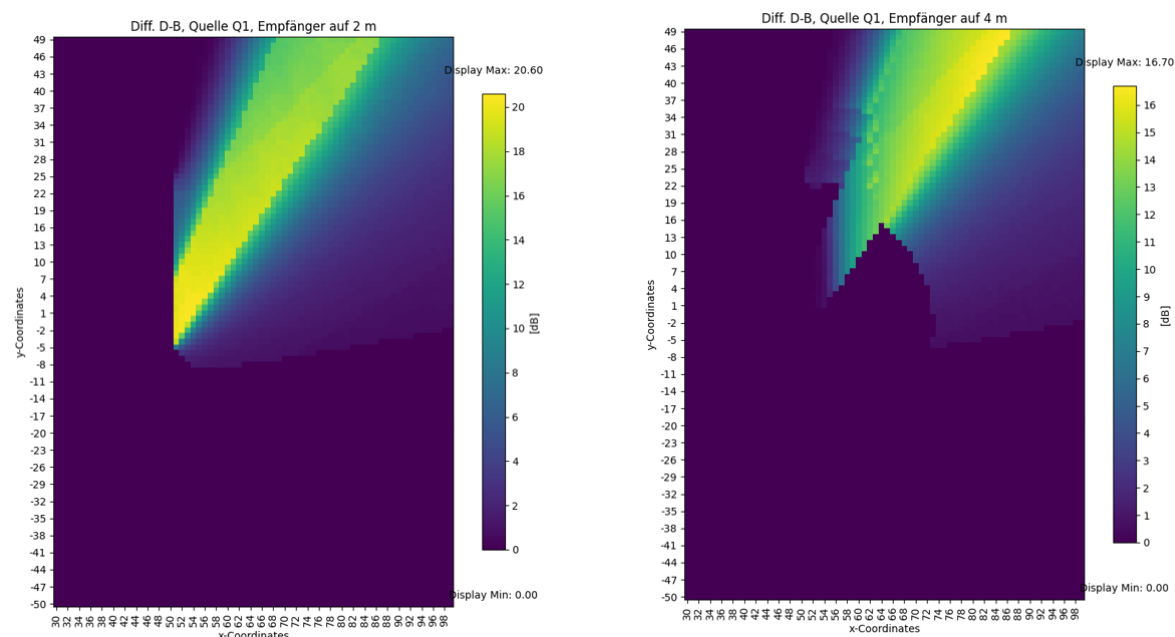


Abbildung 12: Kartendarstellung der Pegeldifferenz von Situation D und B für 2 bzw. 4 m Höhe.

Auffällig in Abbildung 11 und Abbildung 12 rechts ist, dass sich ein dunkler Bereich hinter der Wand, aus Sicht der Quelle rechts des Torbogens, deutlich abhebt, mit abrupten Pegelübergängen sowohl hin zur Öffnung als auch zu weiter entfernten Empfangspunkten. Diese Übergänge entstehen als Folge von Fallunterscheidungen, analog zu den in Abbildung 1 diskutierten Situationen. Es können drei Situationen unterschieden werden, welche in Abbildung 13 dargestellt werden. Im Bereich " A_{bottom} ohne A_{lat} " schneidet die vertikale Ebene zwischen Quelle und Empfänger den Torbogen, in den anderen Fällen führt der Schallpfad durch die Seitenwand und die Korrektur für Öffnungen ist deaktiviert. Dies entspricht einem Wechsel von Punkt A zu B, bzw. von C zu D gemäss dem Beispiel aus Abbildung 1. Im Bereich " A_{lat} Umweg aussen

herum" liegt der Durchstosspunkt im Torbogen. Der seitliche Schallpfad führt um das gesamte Hindernis herum und A_{lat} ist wegen dem grossen Umweg entsprechend nahe bei null. Mit zunehmender Distanz der Empfangspunkte wandert der Durchstosspunkt nach unten und erreicht bei der Bereichsgrenze den Übergang zur Öffnung. Der Algorithmus erkennt hier richtigerweise, dass ein alternativer seitlicher Schallpfad durch die Öffnung existiert und weist deshalb eine deutliche laterale Korrektur aus. Die beiden Situationen entsprechen dem Übergang von Punkt B zu Punkt D, gemäss der Situation in Abbildung 1.

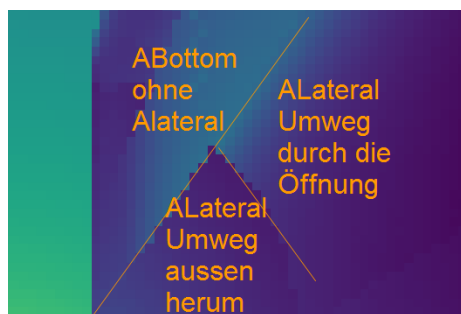


Abbildung 13: Erklärung zum Verhalten des Algorithmus im Fall von Abbildung 11, rechts.

Auf eine Darstellung von Situation E wurde verzichtet, da Situation E derjenigen von Situation D entspricht und lediglich die Breite des Tores kleiner ist.

Situation F gemäss Abbildung 14 zeigt zwei Wände, welche mit einem Querbalken von 2 bis 3 m Höhe verbunden sind. In Abbildung 15 sind ergänzend die Pegeldifferenzen zu Situation D, mit einem Torbogen ab 2 m bis 5.5 m Höhe dargestellt. Die Unterkante des Querbalkens gemäss Situation F entspricht somit Situation D; die beiden Situationen unterscheiden sich lediglich in der Höhe der Querverbindung.

Die Pegeldifferenzen gemäss Abbildung 15 entsprechen für eine Empfängerhöhe von 2 m auf den ersten Blick nicht den Erwartungen, da Situation D mit einem höheren Hindernis leicht höhere Pegel als Situation F erzeugt. Eine Detailanalyse hat gezeigt, dass in beiden Fällen die Hinderniswirkung in den massgeblichen Frequenzen bereits ihr Maximum erreicht und deshalb die zusätzliche Höhe nicht a priori zu tieferen Pegeln führt. Aufgrund der unterschiedlichen Geometrie der Ausbreitungspfade ergibt sich jedoch ein anderes Interferenzmuster bei den Bodenreflexionen, welches in diesem Fall zu höheren Pegeln bei der Situation D führt.

Für eine Empfängerhöhe von 4 m zeigt sich das erwartete Bild, dass Situation F zu höheren Pegeln führt. Für Empfangspunkte, welche sehr nahe an der Wand liegen, besteht eine Sichtverbindung zur Quelle, weshalb die Hinderniswirkung praktisch aufgehoben wird.

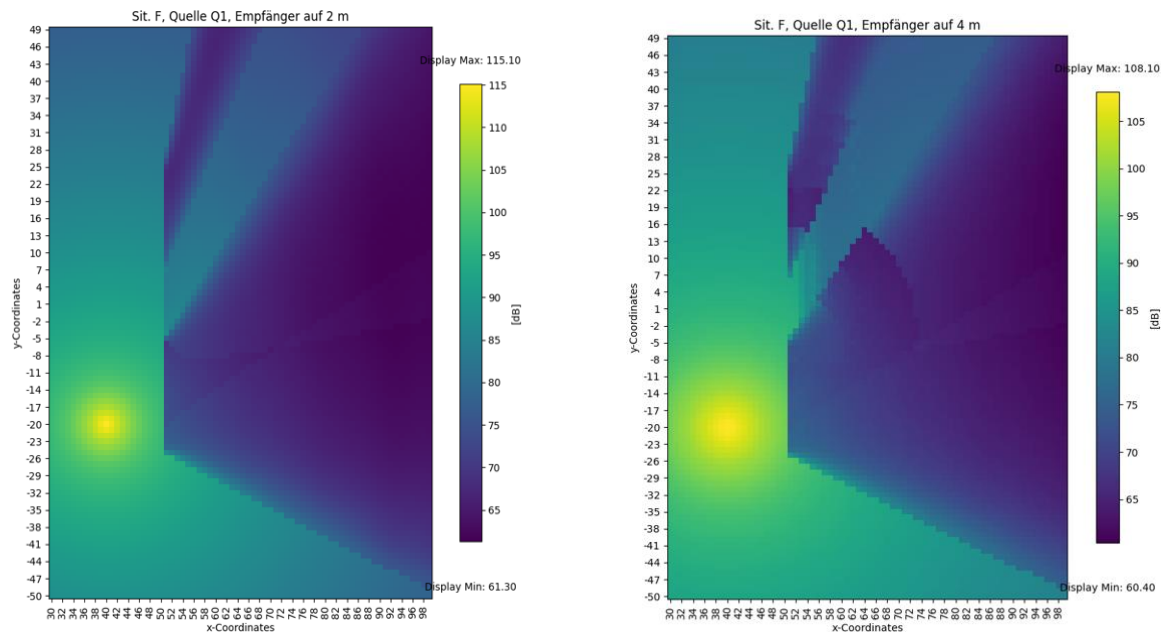


Abbildung 14: Kartendarstellung der Immissionspegel von Situation F für 2 bzw. 4 m Höhe.

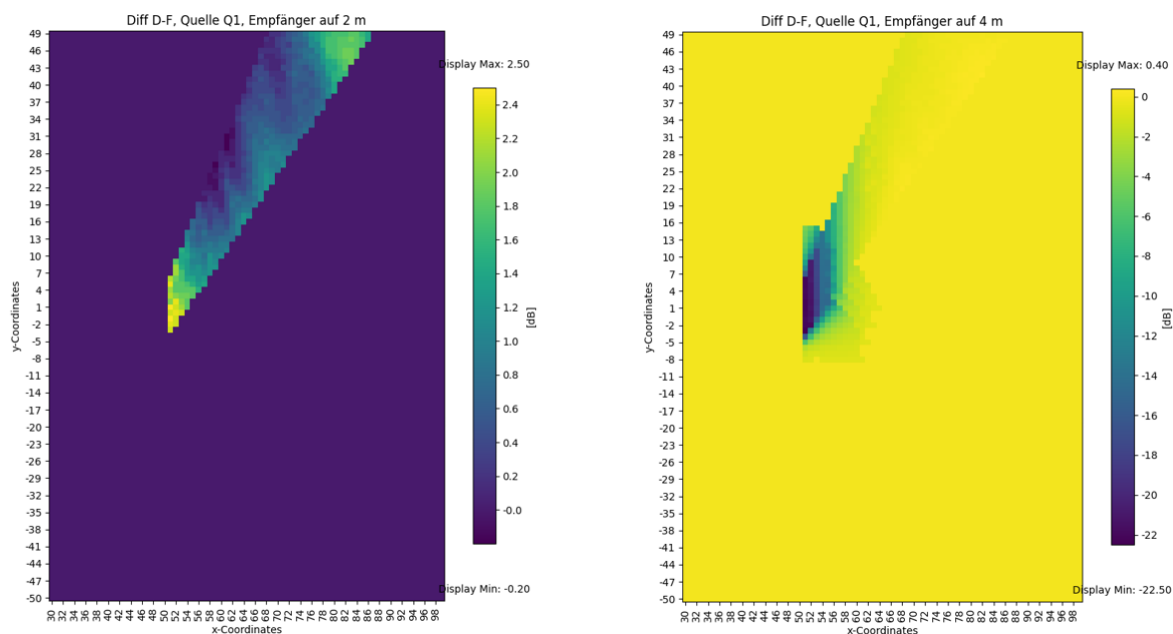


Abbildung 15: Kartendarstellung der Pegeldifferenz von Situation D und F für 2 bzw. 4 m Höhe.

Die Fälle G und G2 stellen die komplexesten Situationen dar, da sie aus zwei Objekten bestehen, einem Tor gemäss Situation D sowie einer zusätzlichen Wand von 1.5 m Höhe. Fall G entspricht der Situation eines Fensters, wie sie in Abbildung 1, rechts, dargestellt wird, mit beiden Objekten im gleichen Querschnitt. Fall G2 unterscheidet sich von G dadurch, dass sich die Wand einen Meter vor dem Tor befindet.

Abbildung 16 und Abbildung 17 zeigen die Immissionspegel, Abbildung 18 die Pegeldifferenz zwischen den beiden Situationen. Das Bild mit den Immissionspegeln im Fall G für 2 m Höhe weist grosse Ähnlichkeit mit den vorherigen Fällen auf. Man erkennt, wie der Schall durch die Öffnung dringt und in einem Kanal hinter der Öffnung zu höheren Pegeln führt. Für die Empfängerhöhe von 4 m ist der Kanal nicht mehr klar erkennbar und es sind helle, also lautere Streifen in der Verlängerung der seitlichen Begrenzungen der

Öffnung neben einer dunkleren Fläche dazwischen zu erkennen. Die Erklärung für diese Feststellung ist, dass die Öffnung nur noch 0.5 m hoch ist und A_{bottom} nur noch eine kleine Korrektur liefert. Sobald der Durchstosspunkt in der Seitenwand liegt, kommt A_{lat} zum Tragen und liefert in dieser Situation eine grössere Korrektur als A_{bottom} . Dieses Verhalten mag akustisch nicht ganz korrekt sein, lässt sich jedoch bei einer Betrachtung in Schnitten und unter Verwendung von Fallunterscheidungen nicht vermeiden.

Die erwähnte dunklere Fläche auf 4 m Höhe ist bei G2 gemäss Abbildung 17 nicht zu erkennen und auf 2 m Höhe zeigt G2 in der Verlängerung der Öffnung durchgehend höhere Pegel, was sich auch im Differenzplot in Abbildung 18 deutlich zeigt. Dieses Verhalten mag ebenfalls nicht ganz der Realität entsprechen, zeigt aber das erwartete Verhalten des Algorithmus. In der Situation G wird richtig erkannt, dass ein zusätzliches Objekt die Öffnung des Torbogens teilweise abdeckt und entsprechend weniger Schall durch die Öffnung tritt. Da die Gewichtung der Grösse der Öffnung nur entlang einer vertikalen Linie in der Öffnung erfolgt, wird die leicht vorgelagerte Wand in Situation G2 nicht berücksichtigt und es resultiert in der Folge eine grössere Korrektur A_{bottom} .

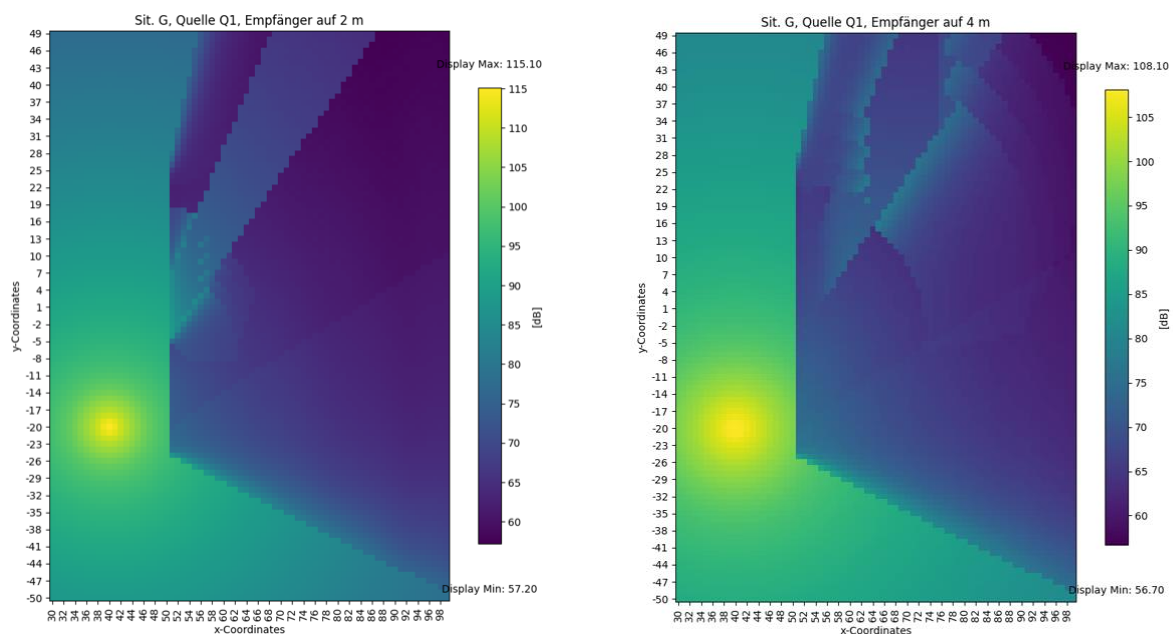


Abbildung 16: Kartendarstellung der Immissionspegel von Situation G für 2 bzw. 4 m Höhe.

In den Differenzplots der Situationen G und G2 sind zusätzlich einige helle Stellen bzw. Strahlen zu erkennen, welche teilweise auffällige Ringmuster bilden. Diese sind Folgen der leicht veränderten Geometrie und zeigen den Einfluss der veränderten resultierenden Schallpfade. So entsteht das helle Eck auf 2 m Höhe, da hier in G2 ein Schallstrahl neu durch die Öffnung dringt. Das Ringmuster, welches sich erst im Differenzplot zeigt, ist ausschliesslich auf Veränderungen von A_{lat} zurückzuführen, welches teilweise einen seitlichen Pfad durch den 0.5 m hohen Schlitz findet und teilweise nicht. Eine detaillierte Pfadanalyse³ hat ergeben, dass die Geometrie richtig interpretiert wird und zu stimmigen Schallpfaden führt.

³ Mit der Setzung des Parameters *PlotRelief* auf 1 oder höher, werden Geländeschnitte mit Schallpfaden ausgegeben. Ein Beispiel einer solchen Pfadanalyse ist in Abbildung 22 dargestellt.

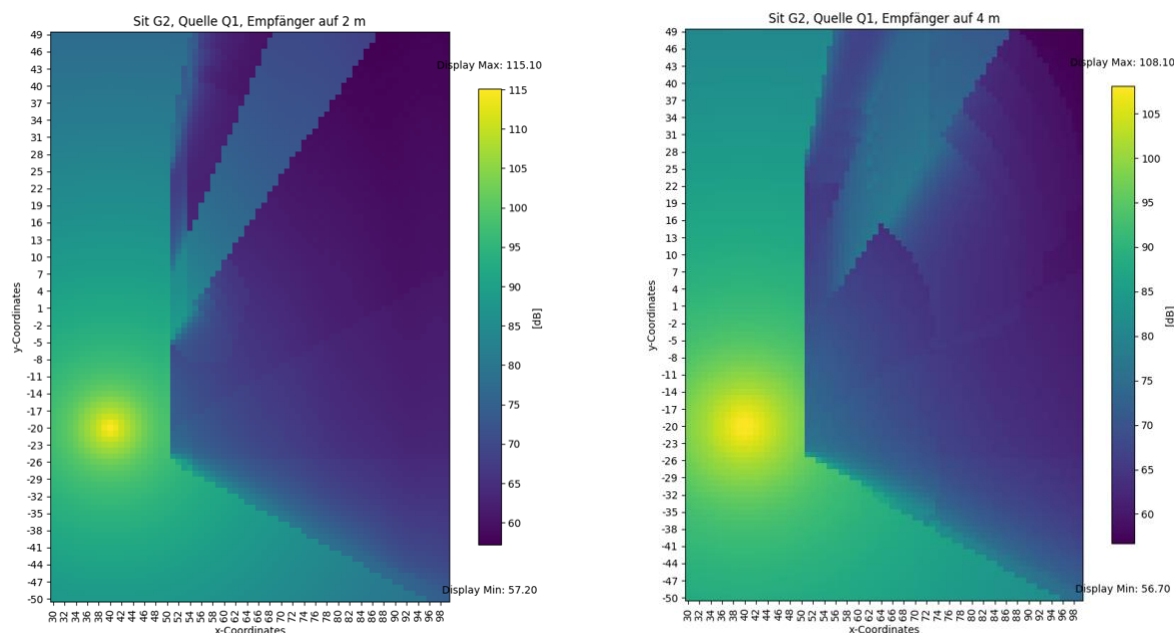


Abbildung 17: Kartendarstellung der Immissionspegel von Situation G2 für 2 bzw. 4 m Höhe.

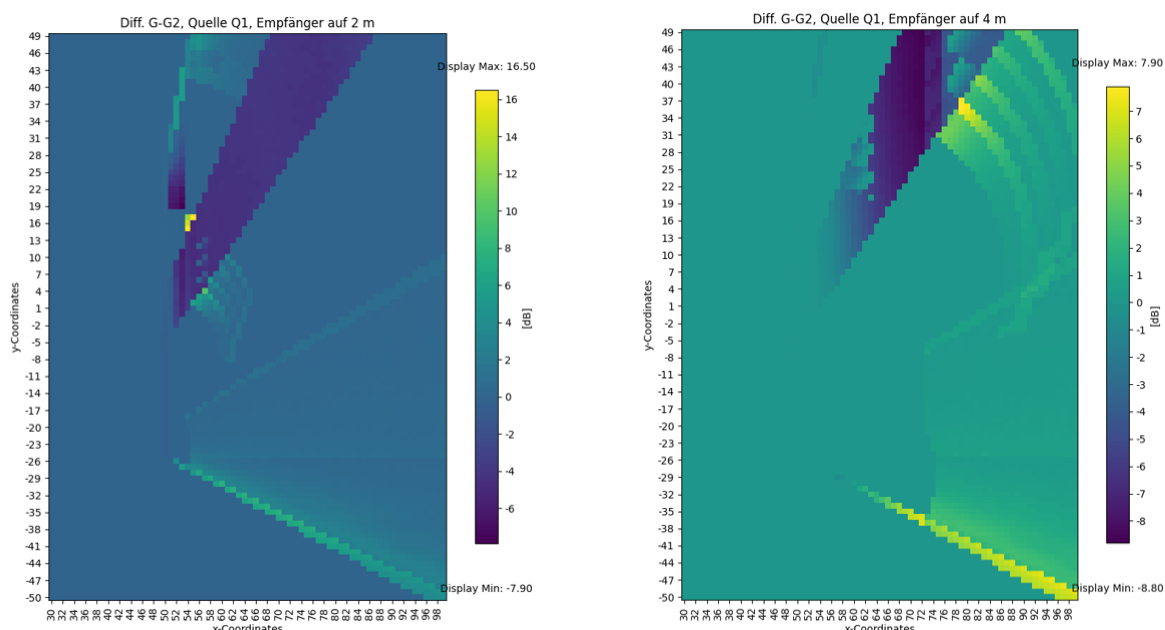


Abbildung 18: Kartendarstellung der Pegeldifferenz von Situation G und G2 für 2 bzw. 4 m Höhe.

5.2 Transmission

Abbildung 19 zeigt die resultierenden Immissionspegel und Abbildung 20 einen Differenzplot im Vergleich zur gleichen Situation mit dichten und bis zum Boden reichenden Wänden, also ohne Schalldurchgang und Schallpfade durch Öffnungen. Wie aus dem Differenzplot zu erkennen ist, führt die Öffnung in Richtung links zu einer massiven Reduktion der Hinderniswirkung. Die Pegeldifferenzen sind in unmittelbarer Wandnähe am grössten und nehmen aufgrund der Fresnelzonen-Gewichtung der Grösse der Öffnung mit zunehmendem Abstand ab. Kleinere Pegeldifferenzen zeigen sich für Schallpfade, welche nahe an den beiden

Wandenden verlaufen, da hier bereits in der Referenzsituation die seitliche Hinderniswirkung zu einer Pegelreduktion führt. (Der unruhige Verlauf direkt an der Wandkante entsteht, da die Wand genau auf einer Rasterlinie verläuft und die Berechnungspunkte deshalb eher zufällig vor oder hinter der Wand angenommen werden.)

Gegen oben und gegen unten zeigt sich die Wirkung der Transmission, welche für die Wand mit geringer Schalldämmung (Typ 506) grösser ausfällt als für die Wand mit einer mittleren Schalldämmung (Typ 505).

Die Ausbreitung nach rechts zeigt, dass bei einem Schalldurchgang durch mehrere schalldurchlässige Objekte die Schalldämmung aufsummiert wird. Auffällig sind im Differenzplot die beiden dünnen Schallstrahlen die schräg nach oben bzw. unten verlaufen. Dies sind Schallanteile, welche durch den Spalt zwischen den beiden Wänden dringen.

Die resultierenden Pegel hinter den durchlässigen Wänden entsprechen in allen Fällen den Erwartungen.

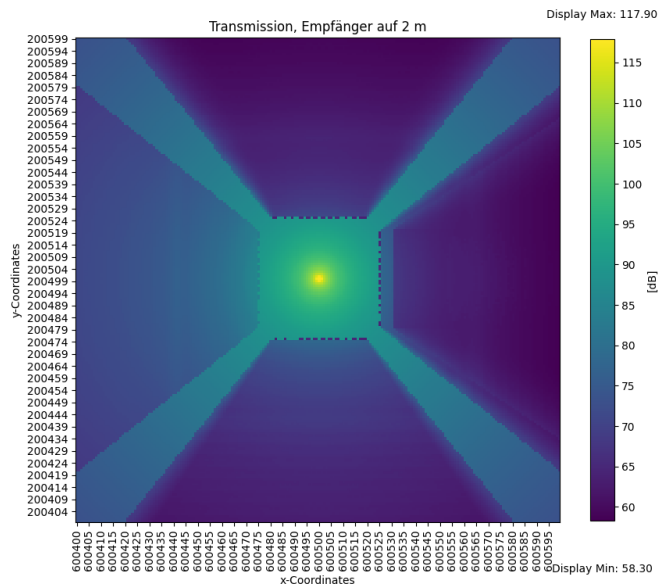


Abbildung 19: Kartendarstellung der Immissionspegel der Situation mit Transmission für eine Empfängerhöhe von 2 m.

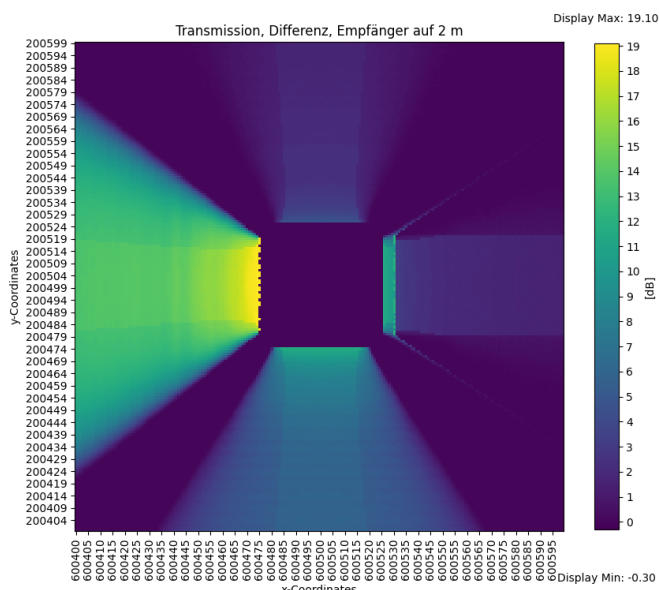


Abbildung 20: Kartendarstellung der Pegeldifferenz der Situation mit Transmission im Vergleich zu Wänden ohne Schalldurchgang und Öffnungen.

5.3 Rasterdecken

Bevor auf den Vergleich der Resultate von sonARMS mit dem wellentheoretischen Referenzmodell eingegangen wird, gilt es auf ein paar Unterschiede in den Berechnungsmethoden hinzuweisen:

- Aufgrund von Limitierungen des allozierbaren Speichers konnten FDTD-Berechnungen nur bis und mit der 2 kHz Terz durchgeführt werden. Die dargestellten Ereignispegel aus sonARMS wurden deshalb aus den Detailresultaten für den Frequenzbereich von 25 Hz bis 2 kHz neu ausgewertet.
- Das FDTD-Modell ist (noch) nicht in der Lage, den Schalldurchgang zu modellieren. Für die Materialien, welche bei Rasterdecken verwendet werden, ist jedoch von einem nicht zu vernachlässigenden Beitrag der Transmission auszugehen. Die sonARMS-Berechnungen wurden deshalb einmal mit und einmal ohne Transmission durchgeführt.
- Obwohl die Seitenwände und Paneele absorbierend ausgestaltet sind, haben die FDTD-Simulationen, gezeigt, dass Reflexionen gerade in den stark abgeschirmten Bereichen zu einer Pegelerhöhung beitragen können. Aus Gründen der Rechenzeitoptimierung ignoriert sonARMS jedoch Reflexionspfade, welche zusätzlich eine Abschirmung durch ein Hindernis erfahren. sonARMS weist deshalb für die vorliegende Situation keine Reflexionen aus und unterschätzt diesen Beitrag entsprechend.

Die Vergleiche zwischen FDTD und den Berechnungen mit dem älteren Kern von sonARMS hatten eine sehr gute Übereinstimmung im Fall mit einer geschlossenen, aber gegen oben offenen Box ergeben, aber grosse Abweichungen, sobald ein Raster ergänzt wurde. In Abbildung 21 werden diese Berechnungsergebnisse mit der älteren sonARMS Version V5.6.3 der neuen Version V5.8.6 mit und ohne Transmission, und FDTD gegenübergestellt. Ergänzend werden in Abbildung 22 die Schallpfade dargestellt, wie sie für verschiedene Quellen-Empfänger-Kombinationen resultieren.

Aus Abbildung 21 kann entnommen werden, dass mit der Referenzberechnung die Pegel mit zunehmender Höhe der Empfänger von unter 55 dB(A) weitgehend kontinuierlich auf über 70 dB(A) ansteigen. Bei der Berechnung mit dem älteren sonARMS-Kern verblieben die Pegel bis zu einer Höhe von 4.5 m auf sehr tiefem, weitgehend konstantem Niveau, um danach sprungartig auf über 70 dB(A) anzusteigen und wieder weitgehend konstant zu verbleiben. Die Analyse der Schallpfade und Detailresultate hat folgende Erklärung für dieses Verhalten zutage gebracht: Wie in Abbildung 22, Darstellung (a) zu sehen ist, führt der vertikale Pfad, welcher für die Berechnung von A_{grBar} verwendet wird, steil nach oben, über die erste Blende, welche unmittelbar nach der Quelle folgt. Aufgrund dieses enormen Umweges erreicht die Hinderniswirkung ihre vorgegebene Limite von 25 dB gemäss ISO 9613-2 in allen Fällen, weshalb die Basisberechnung für sämtliche Empfangspunkte ein praktisch identisches Resultat liefert. (Eine leichte Variation ergibt sich aufgrund der unterschiedlichen Bodeninterferenzen.) Bei den tief gelegenen Empfangspunkten kommen keine Korrekturen zum Tragen. Mit zunehmender Empfängerhöhe neigt sich aber die Ebene, welche zur Ermittlung der seitlichen Schallpfade verwendet wird. Ab dem Empfänger in 5 m Höhe werden seitliche Schallpfade gefunden, welche zwar immer noch einen grossen Umweg darstellen, aber im Vergleich zum Umweg in der Vertikalen kleiner ausfallen.⁴ Dies führt dazu, dass bei der alten Berechnung in dieser Situation die Hinderniswirkung fälschlicherweise praktisch aufgehoben worden war. Dieses Fehlverhalten war bisher nicht aufgefallen, da nie Situationen mit so extremen Umwegen in der Vertikalen untersucht worden waren. Für die

⁴ Hinweis: Obwohl die Box gegen hinten geschlossen ist, findet sonARMS immer seitliche Schallpfade. Dies liegt daran, dass der Suchalgorithmus nur in einem limitierten Bereich hinter der Quelle bzw. dem Empfänger nach einem Schallpfad sucht und nach Erreichen dieser Limite das abschirmende Hindernis durchstösst.

neue Version V5.8.3 bzw. nachfolgende wurde deshalb eine analoge Limite für die seitlichen Pfade eingeführt. Dies hat zur Folge, dass seitliche Pfade im Falle der Rastersituation nie eine Rolle spielen.

Die Berechnungen mit dem neuen Rechenkern V5.8.6 ergeben gleiche Resultate für A_{grBar} wie in V5.6.3, da an diesem Teil des Algorithmus keine Änderungen vorgenommen wurden. Die Änderungen in den Resultaten sind ausschliesslich auf die Dämpfungsterme A_{lat} , A_{bottom} und A_{trans} zurückzuführen. Die überarbeitete Strahlsuche hat teilweise leicht andere Pfade ergeben, so wie sie in Abbildung 22, Darstellung (b), zu sehen sind. Für A_{bottom} und A_{trans} ergeben sich identische Pfade, welche für die tieferliegenden Empfänger über die Oberkante der Box und danach auf direktem Weg von Quelle zu Empfänger führen. Generell kann festgestellt werden, dass die durch den Algorithmus identifizierten Pfade den Erwartungen entsprechen.

Eine Berechnung ohne Transmission⁵ liefert eine kontinuierliche Pegelerhöhung mit zunehmender Höhe der Empfangspunkte, analog zur FDTD-Berechnung. Die Pegel liegen aber, mit Ausnahme des Empfangspunktes auf 7 m Höhe, systematisch tiefer. Die mittlere Abweichung beträgt 3.8 dB.

Wird die Transmission in sonARMS berücksichtigt, so steigen die Pegel bei drei Empfangspunkten, auf Höhen von 4.5 m bis 5.5 m, deutlich an. Bei der Empfängerhöhe von 6 m ist der Beitrag von A_{trans} im Vergleich zu A_{bottom} von untergeordneter Bedeutung, weshalb sich hier keine Pegelerhöhung zeigt. Eine Pfadanalyse zeigt, dass hier der Schallpfad zwei Paneele durchstösst und deshalb die doppelte Schalldämmung zum Tragen kommt. Bei den steileren Emissionswinkeln, hin zu den höherliegenden Empfangspunkten, ist A_{bottom} in jedem Fall im Vergleich zu A_{trans} dominant, unabhängig davon, wie viele Paneele durchstossen werden. Die mittlere Abweichung zwischen FDTD und sonARMS beträgt für den Fall mit einem vereinfachten Raster 3.0 dB

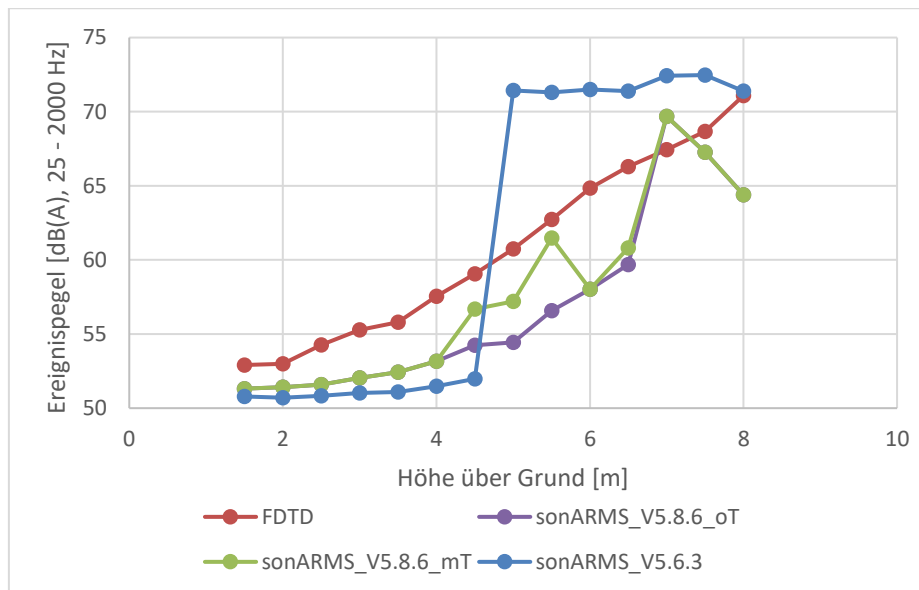


Abbildung 21: Vergleich der A-bewerteten Ereignispegel von sonARMS in der früheren und der aktuellen Version mit den FDTD-Berechnungen für den Fall mit dem einfachen Raster.

⁵ Diese kann über den Parameter *AtransmOn* deaktiviert werden.

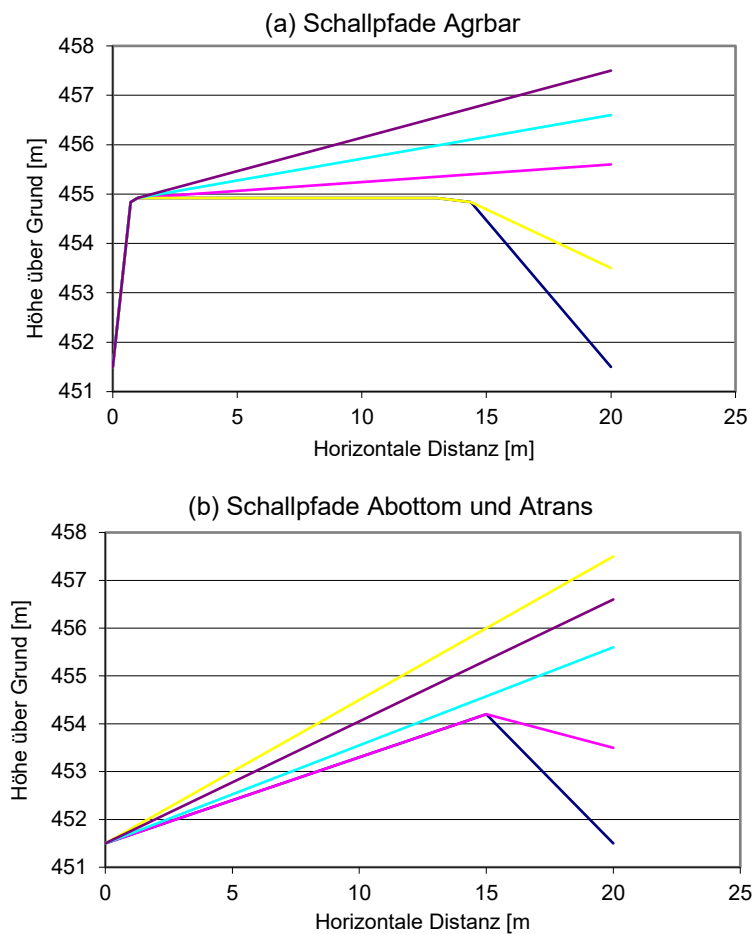


Abbildung 22: Schallpfadanalyse mit der aktuellen sonARMS Version 5.8.3 für die Schallpfade, welche für die Berechnung von A_{grBar} (a), A_{bottom} und A_{trans} (b) verwendet werden.

Abbildung 23 zeigt die Berechnungsergebnisse für die Variante mit vollständigem Raster. Die Pegel der Referenzberechnung sind im Mittel um 4.1 dB tiefer als in Abbildung 21, was eine Folge des dichteren Rasters ist. Die sonARMS-Berechnung ohne Transmission zeigt einen ähnlichen Verlauf wie in Abbildung 21 und verbleibt im mittleren Höhenbereich der Empfangspunkte, zwischen 4 und 6 m, deutlich zu tief. Wird die Transmission aktiviert (grüne Kurve), so wird bei einigen Höhen (4.5 und 5.0 m) eine sehr gute Übereinstimmung erzielt. Bei den Höhen von 5.5 und 6.0 m werden aber mehrere Paneele durchstossen, weshalb der Transmissionsbeitrag vernachlässigbar wird. Dieses Verhalten, welches bereits in Abbildung 21 zu sehen war, führt zu einem sehr unruhigen Pegelverlauf und zu eher zufälligen Resultaten, da bereits kleine Anpassungen an der Geometrie dazu führen können, dass ein Schallpfad ein zusätzliches Objekt trifft. Dies macht zum einen die Modellierung heikel und führt je nach Detaillierungsgrad zu deutlich unterschiedlichen Resultaten. Zum anderen verschlechtert sich die Übereinstimmung der sonARMS-Berechnungen mit der Referenz in Geometrien mit mehreren durchstossenen Objekten deutlich. Es wurde deshalb in sonARMS ein zusätzlicher Parameter mit der Bezeichnung *SingleTransmission* eingeführt. Wird dieser Parameter aktiviert, so berücksichtigt sonARMS nur die Transmissionsdämpfung des Objektes mit der grössten Schalldämmung. In Abbildung 23 sind in blau die Berechnungsergebnisse nach Einführung und Aktivierung dieses Schalters gezeigt. Wie zu erkennen ist, wird eine deutlich bessere Übereinstimmung mit der Referenz erzielt. Die mittlere Abweichung, welche ohne diese Option bei 2.3 dB liegt, reduziert sich auf 0.6 dB. Die grössten Abweichungen, reduzieren sich von beinahe 10 dB auf ca. ± 3 dB. Es wird deshalb empfohlen für die Berechnung von Rasterdecken, diese Option zu aktivieren und das Gitter mit Paneelen dicht zu gestalten, so dass es in jedem Fall zu einer Transmission kommt.

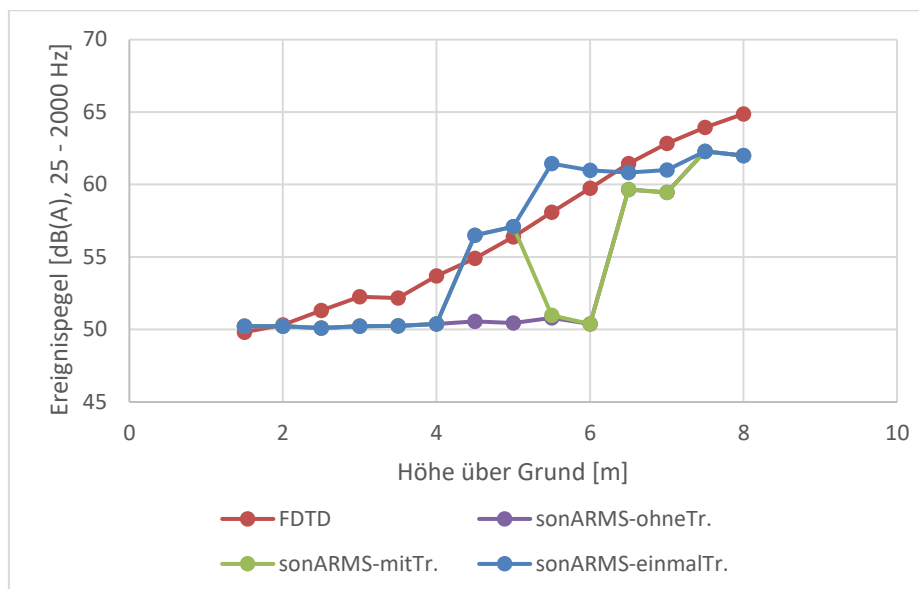


Abbildung 23: Vergleich der A-bewerteten Ereignispegel von sonARMS in verschiedenen Einstellungen mit den FDTD-Berechnungen für den Fall mit dem vollständigen Raster.

Für sämtliche anderen Anwendungsfälle soll der Parameter *SingleTransmission* nicht aktiviert, also auf null gestellt werden. Dies wird auch als Standardeinstellung eingeführt.

6 Fazit

Die Validierungen im Rahmen dieses Projektes ist positiv verlaufen. Die Funktionsweise der Algorithmen und ihre Interaktion hat das beabsichtigte Verhalten ergeben. Die Verwendung von Fallunterscheidungen und die Betrachtung in Schnitten bringt es allerdings mit sich, dass sich beim Übergang der einen zur anderen Situation Pegelsprünge nicht vermeiden lassen. Die Resultate sehen aber plausibel aus und es wird empfohlen, den Rechenkern in dieser Form zu veröffentlichen.

In sehr komplexen Situationen, mit einer Abfolge von Wänden mit unterschiedlichen Eigenschaften (seitlich begrenzt, unten offen, durchlässig) kann es aber zu Resultaten kommen, welche nur begrenzt belastbar sind. Ebenfalls nur schwer abbildbar sind Situationen mit überhängenden Strukturen. Diese vermeintlichen Schwächen liegen in der Natur eines Engineering-Modells, welches darauf ausgerichtet ist, Schallausbreitungsvorgänge in Einzelphänomene aufzuteilen und 3D-Geometrien in Form von Schnitten abzubilden. Verschiedene Limitierungen ergeben sich auch daraus, dass aufgrund von Rechenzeitoptimierungen, Berechnungen mit Absicht einfach gehalten werden. Viele dieser Kompromisse zielen darauf ab, Situationen mit hohen Pegeln möglichst präzis wiederzugeben, während Ungenauigkeiten bei tieferen Belastungen in Kauf genommen werden. Ein Beispiel dafür ist die Vereinfachung bei der Reflexionsberechnung, welche Schallpfade, welche bereits eine Beugung erfahren haben, ignoriert.

sonX bzw. sonARMS berücksichtigt bereits heute deutlich mehr Effekte als dies vergleichbare Modelle, wie zum Beispiel die ISO 9613-2, machen. Dieses Modell, welches als weltweiter Standard gilt, kennt weder einen phasenrichtigen Bodeneffekt, detaillierte Meteeffekte, welche auch Pegelreduktionen wiedergeben, noch kann es Transmission oder Schallpfade durch Öffnungen nachbilden. Entsprechend ist sonX bereits heute deutlich höher entwickelt als vergleichbare Modelle. Umgekehrt kann es kaum das Ziel sein, sonX auf den Stand eines Referenzmodells zu bringen. Das FDTD-Modell ist bereits bei der räumlich begrenzten Geometrie in der Rastersituation nicht mehr in der Lage, den gesamten Frequenzbereich abzudecken. Dieser Vergleich zeigt, dass diese Modelle zwar fundamental wichtig als Referenz sind, aber für den Anwendungsfall von sonARMS mit Lärmkartierungen über viele Quadratkilometer nie eine Alternative darstellen werden.