

## sonARMS – Versionsübersicht

Programmversion: sonARMS Kernel V5.6.0 (vom 15. Juni 2023)  
Anzahl Seiten inkl. Beilagen: 20

### Inhaltsverzeichnis

- 1 Ausgangslage
- 2 Anpassungen am Rechenkern
- 3 Unterschiede bei der Parametersetzung
- 4 Auswirkung der Modellanpassungen auf die Berechnungsergebnisse
- 5 Validierung von sonARMS im Vergleich zu Messungen 2013
- 6 Validierung und Anpassung des Geschosknallmodells von sonARMS 2016
- 7 Validierung von sonARMS im Vergleich zu Messungen 2019
- 8 Diskussion  
Beilagen

### Impressum

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt (BAFU), Abteilung Lärm / NIS, CH-3003 Bern  
Auftragnehmer: Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung  
Autor: Jean Marc Wunderli  
Begleitung BAFU: Kornel Köstli  
Hinweis: Dieser Bericht wurde im Auftrag des Bundesamtes für Umwelt (BAFU) verfasst.  
Für den Inhalt ist allein der Auftragnehmer verantwortlich.

---

Dübendorf, 6. Juli 2023  
Projektleiter / Abteilungsleiter:

Abteilung Akustik / Lärminderung  
Gruppenleiter Lärmauswirkungen:

---

Jean Marc Wunderli

Beat Schäffer

## Zusammenfassung

Die Empa entwickelt im Auftrag des BAFU das Schiesslärmmodell sonARMS, welches auf dem allgemein formulierten Ausbreitungsmodell mit der Bezeichnung sonX basiert. Die Entwicklung des Modells verlief in mehreren Etappen. In diesem Bericht werden die Modellanpassungen, welche zwischen den einzelnen Versionen vorgenommen wurden, dokumentiert und ihre Auswirkungen auf die Berechnungsergebnisse diskutiert. Die aktuelle Version von sonARMS, Version 5.6.0 vom 15. Juni 2023, kann über die Homepage des BAFU gratis bezogen werden.

## Disclaimer

*sonARMS* ist ein im Auftrag des BAFU von der Empa entwickeltes Berechnungsmodell zur Ermittlung von militärischem und zivilem Schiesslärm nach der schweizerischen Lärmschutzverordnung. Das Programm ist Eigentum des BAFU, kann gratis bezogen werden und steht allen Anwendern offen. Das Programm entspricht dem Stand der Technik bezüglich der Berechnung von Schiesslärm. Die Resultate sind durch einen Akustikexperten zu plausibilisieren. Die Anwendung und Interpretation der Resultate liegt in der Verantwortung des Benutzers.

# 1 Ausgangslage

Im Auftrag des BAFU wurde durch die Empa das Schiesslärmmodell sonARMS entwickelt, welches auf dem allgemein formulierten Ausbreitungsmodell mit der Bezeichnung sonX basiert. Die Entwicklung des Modells verlief in mehreren Etappen:

- (1) Im Dezember 2010 wurde der Rechenkern mit Versionsnummer 1.1 erstellt. Dieser wurde ausschliesslich durch die armasuisse bzw. die Firma Triform SA zur Berechnung militärischen Schiesslärms eingesetzt. Berechnungen wurden dabei nur mit dem Modul Basic, d.h. ohne Reflexionen und ohne Berücksichtigung des Wetters, durchgeführt.
- (2) Am 21. August 2013 wurde an der Empa in Dübendorf ein Workshop organisiert, bei welchem eine Vorabversion der zivilen Variante des sonARMS-Modells zum ersten Mal einem ausgesuchten Kreis ziviler Nutzer vorgestellt wurde. Den Teilnehmern wurde bei dieser Gelegenheit ein vollständiges Programmpaket inkl. Benutzeroberfläche und Dokumentation sowie dem Rechenkern, Version 2.0 abgegeben. Im Verlauf des Folgejahres wurden einzelne Projekte mit diesem Rechenkern berechnet und Validierungen durchgeführt.
- (3) Die Erfahrungen und Wünsche der Testnutzer flossen in Modellanpassungen und -verbesserungen ein, welche zu sonARMS, Version 3.0.1 vom 12. August 2014 führten. Diese Version wurde am 15. Oktober auf der Homepage des BAFU zum kostenlosen Download freigeschaltet. Aufgrund von Problemen bei der GIS-Schnittstelle wurde diese Version jedoch kurz darauf durch eine aktualisierte Version ersetzt. Neben Anpassungen an der Benutzerumgebung wurden bei der Gelegenheit auch zwei Fehler beim Rechenkern behoben: zum einen war ein Array mit Laufzeiten nicht korrekt befüllt worden, zum anderen war eine Modifikation der Meteoprofile fälschlicherweise deaktiviert. Frühere und spätere Versionen waren von diesen beiden Fehlern nicht betroffen. Am 31. Oktober wurde die korrigierte Version aufgeschaltet, mit Rechenkernversion 3.0.6a vom 6. Oktober 2014.
- (4) Als nächster Entwicklungsschritt wurde sonARMS um einen Sprachschalter für Französisch erweitert. Da auch die Resultatausgabe sowie Fehlermeldungen und Logfile-Einträge betroffen sind, wurden Anpassungen am Rechenkern vorgenommen. Die Berechnungsalgorithmen wurden jedoch, mit Ausnahme einer kleinen Fehlerbehebung, nicht mehr verändert. Die Rechenkernversion 3.2.1 wurde am 28. Mai 2015 fertig kompiliert und im Anschluss auf der BAFU-Homepage aufgeschaltet.
- (5) Im Folgejahr wurden verschiedene Verbesserungen an der Benutzeroberfläche und der Import/Export-Schnittstelle implementiert. Vergleiche mit Messdaten wiesen auf eine systematische Überschätzung der Geschossknallpegel hin. Rücksprachen mit den Entwicklern des Geschossknallberechnungsmodells der ISO 17201-4 bestätigten diese Vermutung. Es wurde deshalb eine Korrektur integriert, welche die massgebliche Projektillänge um einen Faktor 1.7 erhöht und so eine Reduktion der Geschossknallemissionspegel um 1.6 - 1.8 dB(A) bewirkt (siehe Kapitel 6). Die entsprechende Rechenkernversion 4.4.0 vom 12. September 2016 wird zusammen mit dem aktualisierten Benutzeroberfläche im Herbst 2016 auf der BAFU-Homepage aufgeschaltet.
- (6) Im Jahr 2017 wurde im Auftrag des Bafu eine Studie zu Schwächen des sonX-Ausbreitungsmodells durchgeführt und es wurden Konzepte zur Verbesserung der Ausbreitungsalgorithmen erarbeitet sowie teilweise direkt implementiert.
- (7) In einem Anschlussprojekt wurden 2018 weitere kleine Anpassungen am Ausbreitungsmodell für die Direktschallberechnung vorgenommen und es wurde das Waldreflexionsmodell ersetzt. Für den daraus resultierenden sonX-Rechenkern mit Version V5.0.0 wurde die Validierung aktualisiert. Zusätzlich wurde der Sprachschalter auf Italienisch erweitert und eine parallele Nutzung mehrerer CPUs eingeführt.

- (8) Aufgrund von Benutzerrückmeldungen nach dem Release V5.0.0 wurden zwei punktuelle Verbesserungen implementiert und als Version V5.1.0 ab Ende Oktober 2019 zur Verfügung gestellt.
- (9) Im Release V5.2.0 von Februar 2021 wurden keine weiteren Anpassungen am Ausbreitungsmodell vorgenommen. Es wurden aber die meteorologischen Grundlagen ersetzt und eine weitergehende Parallelisierung der Kartenberechnung implementiert.
- (10) Der Release V5.3.0 von August 2021 wurde erstellt, um Fehlverhalten bei unterschiedlichen Eingangsdaten im FOREST-Modell abzufangen. Namentlich erfolgte keine Reflexionsberechnung wenn die Bodenbedeckung als Raster in Kombination mit einer leeren Polygon-Datei geliefert wurde. Ausserdem führten Bodenbedeckungsraster, welche vom Parameter TerrainTypeGrid abweichende Maschenweiten aufwiesen, zu fehlerhaften Resultaten. Bei der Gelegenheit wurde einige zusätzliche Verbesserungen implementiert.
- (11) Für den Release V5.4.0 von Januar 2022 wurden zum einen die Input-Schnittstellen bereinigt und besser dokumentiert und es wurde die Lauffähigkeit bei unterschiedlichen Ländereinstellungen im Windows Betriebssystem verbessert. (Bisher ging sonARMS davon aus, dass ein Punkt als Dezimaltrennzeichen verwendet wird; neu ist auch ein Komma zulässig.) Zum anderen wurden die Einstellungen für die Wald- und Felsreflexionsmodelle neu definiert und es wurden die zugehörigen Parametereinstellung mit dem Ziel optimiert, die Rechenzeiten zu reduzieren.
- (12) Für den Release V5.6.0 vom 15. Juni 2023 wurden verschiedene Verbesserungen für die Benutzerunterstützung eingeführt. So wurden zusätzliche Kontrollen bei den Eingangsdaten ergänzt und Informationen in den Logfiles verbessert. Verbesserungen am akustischen Modell wurden im Modul REFLECT vorgenommen. Des Weiteren wurden verschiedene Anpassungen vorgenommen, welche keinen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben. So können neu Topographie und Bodenbedeckung in feinerem Raster, mit einer Auflösung im Zentimeterbereich, eingelesen und verarbeitet werden. Bei den Detailresultaten wird neu der Elevationswinkel der Mündung ausgegeben. Ausserdem wurde die Waffenbank bereinigt, um verschiedene militärische Waffen erweitert und die Kategorie "Flugzeugkanonen" wurde eingeführt.

Im Rahmen dieses Berichtes werden die Unterschiede zwischen den Programmversionen dokumentiert und die Auswirkungen auf die resultierenden Immissionspegel diskutiert. Es wird dabei nur auf Änderungen eingegangen, welche Einfluss auf die Berechnungsergebnisse haben, d.h. Änderungen an Resultatformaten oder Logdateieinträgen und Fehlermeldungen werden nicht aufgeführt.

## 2 Anpassungen am Rechenkern

### 2.1 Von Version 1.1 zu 2.0

Zwischen den sonARMS Versionen 1.1 und 2.0 wurden folgende Anpassungen an den Berechnungsalgorithmen des Moduls BASIC vorgenommen:

- a) Verbesserung der Schallpfadsuche und Anpassung des Algorithmus bei der Berechnung der seitlichen Hinderniswirkungskorrektur (Version 1.5)  
➔ Version 1.1 hat die Wirkung von Lärmschutzwänden teilweise vollständig aufgehoben!
- b) Ergänzung eines zusätzlichen Algorithmus zur Berechnung der Hinderniswirkung nach Pierce (Version 1.5).  
➔ Vergleiche mit Messungen haben gezeigt, dass der Algorithmus nach Maekawa bzw. ISO 9613-2 zu konservativ rechnet. Der Ansatz nach Pierce gibt bei Einfachhindernissen systematisch etwas höhere Hinderniswirkungen.

- c) Deaktivierung der Bodenoptimierung nicht nur in unmittelbarer Quellennähe ( $\leq 10$  m) sondern auch in Empfängernähe (Version 1.7/1.8).  
→ Diese Massnahme wurde primär aus Symmetriegründen umgesetzt. Falsche Resultate waren deswegen keine festgestellt worden.
- d) Gebäudesegmente direkt hinter dem Empfangspunkt wurden fälschlicherweise bei der Bodeneffektberechnung berücksichtigt. Diese Reflexionen werden nun unterdrückt (Version 1.9)  
→ Bei Empfangspunkten, welche sich im Geländeschnitt bis zu 10 m vor einem Gebäude befanden, kam es zu einer zusätzlichen Reflexion mit tendenziell Pegel erhöhender Wirkung.
- e) Verbesserung des Algorithmus zur Reduktion der Geländesegmente in den Vertikalprofilen (Harmonoise-Algorithmus) (Version 1.9)  
→ Durch die Verbesserung wird auch die zusätzliche Funktion „ReliefSmoothing“, welche eine nachträgliche Glättung des Geländeschnittes bewirkt hat, nicht mehr benötigt. Die Funktion war problematisch, weil sie Hinderniskanten künstlicher Objekte teilweise verschoben hat.

## 2.2 Von Version 2.0 zu 3.0

Zwischen den sonARMS Versionen 2.0 und 3.0 wurden folgende Anpassungen an den Berechnungsalgorithmen vorgenommen:

- f) Fehlerbehebung beim Meteeinfluss auf die Walddämpfung:  
Für die Berechnung der Walddämpfung wird die in Wald zurück gelegte Strecke bestimmt. Bei einer Berechnung mit Berücksichtigung des Wettereinflusses wird dazu nicht wie bei BASIC ein gerader Schallstrahl, sondern ein gekrümmter Strahl verwendet. Allfällige Differenzen bei der in Wald zurück gelegten Strecke führen zu einem Meteeffekt auf die Walddämpfung.  
Im Falle von akustischen Schattenzonen wird kein Strahl gefunden, der den Empfänger erreicht. Bis Version 2.18 wurde gleichwohl der Strahl, der dem Empfänger am nächsten kommt zur Berechnung der durch Wald zurückgelegten Strecke berechnet.  
→ Es zeigte sich, dass in Situationen mit einem hohen Hindernis in Quellennähe und hinderlichen Ausbreitungsbedingungen der resultierende Strahl steil in den Himmel steigt und somit im Extremfall die Walddämpfung aufgehoben wird.  
Als Korrektur wird eine Meteokorrektur der Walddämpfung nur angewendet, wenn der resultierende Schallstrahl den Empfänger trifft.
- g) Weitergehende Verbesserung der Schallpfadsuche und Anpassung des Algorithmus bei der Berechnung der seitlichen Hinderniswirkungskorrektur (Version 2.2.8)  
→ Fehlverhalten: Der Algorithmus hat vor der Verbesserung bei Gebäuden, die um den Empfänger oder um die Quelle herum U förmig verlaufen, Kanten als Hindernispunkte eingestuft, die keine sind.
- h) Optimierung der Strahlsuche unter hinderlichen Bedingungen (Beschleunigung und gleichzeitig Resultatverbesserung)
- i) Verbesserung eines Fehlverhaltens des Raytracings (Version 2.2.4).  
Für das Raytracing wird das Gelände inkl. Hindernissen auf ein 2m-Raster ausgerichtet, da die Strahlsuche in 2m-Schritten erfolgt. Hindernisse werden dabei auf den nächstgelegenen Rasterpunkt verschoben. Die Rasterung erfolgt von der Quelle aus. Lag eine Wand wenige cm hinter dem Empfänger, konnte sie im 2 m Raster des Raytracings vor den Empfänger rutschen. Neu wird in dem Fall geprüft, wo die Wand ganz genau ist und sie wird wenn nötig weggelassen.  
Hinweis: Diese Situation tritt häufig bei Fassadenpunkten auf.

## **2.3 Von Version 3.0 zu 3.2**

- j) Berücksichtigung überlagerter Hindernisse bei der Berechnung der seitlichen Hinderniswirkung: Lagen zwei Hindernisse im Geländeschnitt exakt an der gleichen Stelle, so wurde bisher nur das höhere weiter berücksichtigt. Dies führt dazu, dass das Modell je nachdem von bedeutenden seitlichen Schallpfaden ausgeht und entsprechend die Hinderniswirkung reduziert. Das Phänomen wurde bei einem Schützenhaus mit Seitenblenden und einer Quellposition ganz am Rand entdeckt. Die Immissionspegel waren in der Folge schräg hinter dem Schützenhaus zu hoch.

## **2.4 Von Version 3.2 zu 4.0**

- k) Der Rechenkern (und die Benutzeroberfläche) wurden dahingehend angepasst, dass sie auch Koordinaten im neuen Koordinatensystem LV95 (im Vergleich zum bisherigen System LV03) verarbeiten können. Bei dieser Gelegenheit wurde auch eine Anpassung der Interpretation von Rasterdaten (sowohl Geländedaten als auch Immissionsraster) umgesetzt. Bisher wurde angenommen, dass sich der Z-Wert einer Koordinate genau über der entsprechenden X/Y-Koordinate befindet. Neu wird der Z-Wert als repräsentativ für eine ganze Rasterzelle interpretiert, welche mit den Koordinaten der linken unteren Ecke definiert wird. Für die Bildung von Geländeschnitten usw. wird deshalb die Höhe Z in die Mitte der Rasterzelle verschoben, d.h. je um eine halbe Rasterzellgrösse in X- und Y-Richtung. Diese Änderung wurde beschlossen, da letztere Interpretation in der GIS-Welt gebräuchlich ist. Das bisherige Konzept wird für Projekte im alten Koordinatensystem beibehalten.
- l) Vergleiche mit Messdaten wiesen auf eine systematische Überschätzung der Geschossknallpegel hin. Rücksprachen mit den Entwicklern des Geschossknallberechnungsmodells der ISO 17201-4 bestätigten diese Vermutung. Als Massnahme wurde beschlossen, bei der Geschossknallberechnung die effektiven Länge des Projektils mit einem konstanten Faktor von 1.70 zu multiplizieren. Diese Korrektur bewirkt pauschal eine Reduktion des Emissionspegels um 1.6 - 1.8 dB(A).
- m) Bei den Meteostatistiken werden ähnliche Tag- und Abendsituationen zusammengefasst mit dem Ziel, den Rechenaufwand zu reduzieren. Als ähnlich gelten dabei Situationen mit gleicher Meteo-klasse und Windrichtungen innerhalb von 30°. Die resultierende Windrichtung wurde bisher als Mittel der Windrichtungen von Tag und Abend bestimmt. Neu wird ein gewichtetes Mittel verwendet, welches die Auftretenshäufigkeit der beiden Situationen und die Dauer der Zeitperioden (12 Stunden am Tag vs. 4 Stunden am Abend) berücksichtigt.

## **2.5 Von Version 4.0 zu 5.0**

- n) Die Formeln zur Berechnung von Hinderniswirkungen wurden dahingehend erweitert, dass neu auch eine Abschirmung ausgewiesen werden kann, wenn eine Sichtverbindung zwischen Quelle und Empfänger besteht.
- o) Das Bodeneffektmodell wurde um zusätzliche Reflexionspfade am Untergrund in Situationen mit Hindernissen ergänzt.
- p) Neu werden auch Schallpfade durch Öffnungen berechnet. Namentlich ist es möglich, Hindernisse oder Gebäudeteile ohne Bodenabschluss zu modellieren
- q) Bei der Maximalpegelberechnung werden die Laufzeiten verschiedener Direktschallpfade um Hindernisse herum separat ausgewiesen.
- r) Das Waldreflexionsmodell wurde dahingehend angepasst, dass nicht mehr der Waldrand als Reflektor interpretiert wird, sondern dass einzelne Bäume über die bewaldeten Flächen verteilt als Reflektoren modelliert werden.
- s) Die Pfadsuche bei seitlichen Schallpfaden wurde verbessert.

- t) Die Rundungsregeln für Beurteilungspegel wurden angepasst.

## 2.6 Von Version 5.0 zu 5.1

- u) Mit Version 5.0 wurde u.a. die Berechnung der seitlichen Hinderniswirkung verfeinert. Bei den Vorgängerversionen waren seitliche Schallpfade jeweils um das gesamte Objekt herum gesucht worden. Neu wird auf der absoluten Höhe des Durchstosspunktes des Direktschalls in der Vertikalen der Schallpfad seitlich um das Hindernis bestimmt. Es wird dabei für jeden Koordinatenpunkt kontrolliert, ob die obere Kante höher als diese Referenzhöhe liegt. Ist dies nicht der Fall, so wird der Punkt ignoriert und der seitliche Schallpfad reduziert sich entsprechend. Beispiele aus der Praxis zeigten, dass im Falle von langen, schräg verlaufenden Hindernissen, welche aber nur mit wenigen Stützpunkten definiert werden, die seitlichen Schallpfade zu kurz werden können. Im Extremfall mit einem nur aus zwei Koordinaten bestehenden Hindernis kann eine Hälfte des Hindernisses wegfallen. Als Gegenmassnahme werden neu bei sämtlichen Hindernissen alle 2 m virtuelle Koordinatenpunkte ergänzt. Bei Gebäuden und Schützhäusern wird auf diese Massnahme verzichtet, da ein Gebäude in der Regel mit einer genügend grossen Zahl von Punkten definiert ist.  
Bei dieser Gelegenheit wurden auch die Rundungsregeln bei der Entscheidungsfindung, ob sich ein Koordinatenpunkt über oder unter der Referenzhöhe befindet, angepasst, da vorgängig bei identischen Höhen ein zufälliges Resultat heraus kam.
- v) In sonX sind zwei Algorithmen zur Berechnung der Hinderniswirkung implementiert (Maekawa und Pierce). Der Algorithmus nach Pierce, welcher als Standardeinstellung empfohlen wird, liefert generell höhere Abschirmwirkungen. Er ist jedoch nur auf Einfachhindernisse anwendbar. Bei Mehrfachhindernissen wird deshalb die Hinderniswirkung des grössten Hindernisses für Pierce getestet und mit der Hinderniswirkung sämtlicher Objekte nach Maekawa verglichen. Als Resultat wird die Variante mit der grösseren Dämpfung verwendet. Bis zur Version 5.0.0 wurde für diesen Test aus Performance-Gründen lediglich für die Hinderniswirkung verglichen und nicht der gesamte Dämpfungsterm  $A_{grbar}$  berechnet. Da sich durch den Wegfall von Hinderniskanten bei Pierce jedoch auch das Bodeneffekt-Interferenzmuster ändert, können Fälle auftreten, bei welchen trotz grösserer Hinderniswirkung mit Pierce tiefere Immissionspegel resultieren. Um solche Inkonsistenzen zu vermeiden, wird ab der aktuellen Version der Dämpfungsterm  $A_{grbar}$  für einen Frequenzbereich von 250 Hz bis 1 kHz doppelt berechnet, einmal mit dem Verfahren nach Pierce und einmal nach Maekawa. Die Variante mit der höheren A-bewerteten Dämpfung wird weiter verwendet und die fehlenden Frequenzen werden für diese Variante nachgerechnet. Der Test wird nur für Mehrfachhindernisse angewandt. Aus Performance-Gründen wird auf eine Berechnung des gesamten Spektrums verzichtet. Die Wahl des Frequenzbereiches von 250 Hz bis 1 kHz sollte jedoch für Schiesslärm und weitere breitbandige Quellen eine eindeutige Zuordnung in der überwiegenden Zahl der Fälle sicher stellen.

## 2.7 Von Version 5.1 zu 5.2

- w) Es wurden die schweizweit zur Verfügung gestellten Meteostatistiken aktualisiert. Die bisherigen Statistiken basierten auf Daten des Wettermodells COSMO2 eines Jahres. Die aktualisierten Statistiken wurden auf Daten von vier Jahren des moderneren COSMO1-Modells erstellt. Das Format wurde beibehalten. Punktuelle Vergleiche haben nur geringfügige Abweichungen ergeben.
- x) Seitliche Hinderniswirkungen werden bei Gebäuden kombiniert bei allen Wandsegmenten berechnet, welche über eine gemeinsame ID\_Block definiert wurden. Bei im sonARMS-GUI definierten Hindernissen besteht keine Möglichkeit, mehrere Wandelemente zu verknüpfen. In der Folge

wurde ein seitlicher Schallpfad um ein Hindernis herum berechnet, auch wenn unmittelbar ein weiteres Hindernisobjekt anschloss. Neu wird bei Wänden kontrolliert, ob weitere Objekte direkt anschliessen. Als Kriterium wird ein maximaler Abstand von 5 cm verwendet.

## **2.8 Von Version 5.2 zu 5.3**

- y) Verbesserung der Eingangskontrollen von Terrain- und Bodenbedeckungsdaten. Sofern beide Datensätze als Raster eingelesen werden, müssen sie bzgl. Fusspunkt übereinstimmen. Verbesserungen für den parallelisierten Berechnungsmodus, bei den IDs und Kommentarfeldern von Gebäuden und Empfängern. Ausserdem wird bei Schützenhäusern das Verhalten abgefangen, dass Projekte mit unvollständig definierten Schützenhäuser bisher nicht mehr geladen werden konnten.

## **2.9 Von Version 5.3 zu 5.4**

Es wurden keine Anpassungen an den Modellen vorgenommen.

## **2.10 Von Version 5.4 zu 5.6**

- z) Die Identifikation von massgeblich an der Reflexion beteiligten Reflektoren erfolgt in Abhängigkeit der im Projekt definierten Quellen und Empfänger. Aufgrund des hohen Rechenbedarfs des Reflexionsmodells für künstliche Objekte, stellen die empfohlenen Modellparameter einen Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit dar. Bei konkreten Beispielen wurden Situationen identifiziert, bei welchen es zu einer massgeblichen Erhöhung der Reflexionspegel kam, wenn zusätzliche Quellen und/oder Empfänger im Projekt dazu genommen wurden. Um dieses unstimmige Verhalten zumindest zu minimieren, wurden zum einen die Kriterien zur Auswahl von Reflektoren sowie die zusätzlichen Abbruchkriterien überarbeitet. Zum anderen wurde der Bereich in welchem Reflektoren berücksichtigt werden, ausgeweitet.
- aa) Die Sichtbarkeitskontrollen wurden bisher für die Reflektormittelpunkte durchgeführt. Neu werden grossen Reflektoren über die Parameter *ReflMaxWallSegmentHoriz* und *ReflMaxWallSegmentVert* in Teilflächen unterteilt.

# **3 Unterschiede bei der Parametersetzung**

Neben den aufgeführten Änderungen am Berechnungsverfahren, können auch Änderungen an den Modelleinstellungen Ursache für die Unterschiede bei Berechnungsergebnissen sein. Nachfolgend werden Änderungen bei den empfohlenen Standardeinstellungen aufgeführt.

## **3.1 Zwischen den Versionen 1.1 und 2.0**

- A) ReliefSmoothing ist neu deaktiviert (siehe Abschnitt 2.1)
- B) Die Parameter für die Vereinfachung der Geländeschnitte wurden überarbeitet (siehe Harmonoise-Algorithmus in der Dokumentation bzw. im Referenzparametersatz) und neu gesetzt.
- C) Der Parameter zur Festlegung eines minimalen Abstandes zu Hindernissen *MinDistRecBar* war ursprünglich auf 1 m gesetzt. D.h. Hindernisse, welche sich innerhalb eines Meters im Bereich eines Empfangspunktes befinden, wurden ignoriert. Dieser Parameter war eingeführt worden, um unpräzise Setzungen von Empfangspunkten zu kompensieren, welche sich in ungewollter Weise im Innern von Gebäuden befinden.  
Das neue GUI bietet zum einen die Möglichkeit, Empfangspunkte an Gebäuden auszurichten. Zum



anderen soll das Prinzip „What-you-see-is-what-you-get“ angewandt werden. Deshalb wurde beschlossen, diesen Parameter neu auf 0 zu stellen, d.h. diese Funktion zu deaktivieren.

- D) Im Rahmen der Validierung der Hinderniswirkung wurde die maximal zulässige Abschirmung für Einzelhindernisse von 20 auf 25 dB erhöht.

### **3.2 Zwischen den Versionen 2.0 und 3.0**

- E) Der Parameter ReflMaxDist, welcher die maximale Ausbreitungsdistanz im Modul REFLECT definiert, war bisher auf 400 m festgelegt. Berechnungen haben aber Situationen gezeigt, bei welchen bei dieser Parametersetzung noch dominante Reflexionen auftraten. Deshalb wird ReflMaxDist neu auf 500 m festgelegt.

### **3.3 Zwischen den Versionen 3.0 zu 3.2**

- F) Es wurden keine Anpassungen an den Parametersetzungen vorgenommen. Jedoch wurden die Meteostatistiken neu ausgewertet. Die bisherigen Meteostatistiken waren aus dem sonRAIL-Projekt übernommen worden und verwendeten folgende Tag/Abend/Nacht-Grenzen: 6-18, 18-22, 22-06 Uhr. Da zivile Schiessen ausschliesslich bei Tageslicht stattfinden, wurde eine Neuauswertung MeteoSchiess-Statistiken mit folgenden Tag/Abend/Nacht-Grenzen vorgenommen: 09-17, 19-23 und 23-07.

### **3.4 Zwischen den Versionen 3.2 zu 4.0**

- G) Es wurden keine Anpassungen an den Parametersetzungen vorgenommen. Es wurden jedoch zwei neue Parameteroptionen eingeführt, *AatmCorrBroadBand* und *ResMeteoMinMax*.

### **3.5 Zwischen den Versionen 4.0 zu 5.0**

- H) Es wurden keine Anpassungen an bestehenden Parametern vorgenommen. Aufgrund der Modelanpassungen wurden folgende Parameter neu eingeführt: *AdditionalGroundReflections*, *Neg-zobstacles*, *DeltaSlope*, *ForestReflectors\_NrOfSpheres*, *ForestReflectors\_Reduction*, *AatmOnlyBASIC* und *MaxThreads*.  
Umgekehrt werden folgende Parameter nicht mehr benötigt: *ForestRimPointsDist*, *MinForestDepth*, *ArmsDirectAtoMaxAF*. Sie werden jedoch aus Gründen der Rückwärtskompatibilität weiterhin mitgeführt.
- I) Allerdings wird neu empfohlen, der Absorptionsgrad von Gebäuden, welche bisher auf schallhart eingestellt waren, auf leicht absorbierend zu reduzieren. Diese Einstellung ist kein eigentlicher Parameter, sondern wird über die in der Gebäudedatei definierten Eigenschaften festgelegt.

### **3.6 Zwischen den Versionen 5.0 zu 5.1**

Es wurden keine Anpassungen an den Parametersetzungen vorgenommen.

### **3.7 Zwischen den Versionen 5.1 zu 5.2**

Es wurden keine Anpassungen an den Parametersetzungen vorgenommen.

### **3.8 Zwischen den Versionen 5.2 zu 5.3**

Es wurden keine Anpassungen an den Parametersetzungen vorgenommen.

### 3.9 Zwischen den Versionen 5.3 zu 5.4

- J) Es wurden zwei neue Parameter RockGrid und ForestGrid eingeführt, welche eine freie Definition der Basisrasterung für diffuse Reflektoren, unabhängig vom zugrundeliegenden Gelände- oder Primärflächenraster, erlaubt.

### 3.10 Zwischen den Versionen 5.4 zu 5.6

- K) Im Rahmen der Optimierung des Reflexionsmodells wurde der Parameter *ReflMaxDist* neu definiert. Neu eingeführt wurden die Parameter *ReflMaxWallSegmentHoriz* und *ReflMaxWallSegmentVert*, welche für eine Unterteilung von grossen Reflektoren benötigt werden. Ausserdem wurde die Parameterliste neu gruppiert und es wurden verschiedene Parameter, welche für sonARMS nicht relevant sind, deaktiviert. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse.

## 4 Auswirkung der Modellanpassungen auf die Berechnungsergebnisse

In der nachfolgenden Tabelle 1 sind die Modelländerungen gemäss Kapitel 2 und die Änderungen an den Parametersetzungen gemäss Kapitel 3 zusammengestellt und es wird ihre Auswirkung auf die resultierenden Immissionspegel diskutiert.

Änderung	Effekt	Situation	Grös- senord- nung
a) Seitliche Hinderniswirkung	Pegelerhöhend	spezielle Situationen mit Hindernissen → Selten	0 – 10 dB(A)
b) Pierce anstatt Maekawa	Pegelreduzierend	Alle Situationen mit Hindernissen	0 – 5 dB(A)
c) Kein Relief Smoothing	Zufällig	Ohne Hindernisse Mit Hindernissen	0 – 2 dB(A) 0 – 5 dB(A)
d) Gebäudereflexion im Bodeneffekt	Pegelreduzierend	Empfangspunkte direkt vor einer Wand	0 – 5 dB(A)
e) Reduktion Geländesegmente	Zufällig	Immer	0 – 2 dB(A)
f) Meteeffekt Wald	Pegelerhöhend	Kombination von quellenahem Hindernis, Wald und hinderlichem Meteo	0 – 10 dB(A)
g) Seitliche Hinderniswirkung	Pegelerhöhend	U-förmige Hindernisse um Quelle bzw. Empfänger	0 – 5 dB(A)
h) Strahlsuche	Pegelerhöhend	Bei hinderlichen Situationen	0 – 2 dB(A)
i) Hindernisse hinter Empfängern	Reduziert	Hindernis direkt hinter Empfänger, nur bei METEO	± 5 dB(A)

	Meteo- effekt		
j) Überlagerte Hindernisse	Pegelre- duzie- rend	Kombination eines schmalen, hohen mit einem tieferen aber breiteren Hindernis an gleicher Stelle.	0 – 3 dB(A)
k) Position Z- Werte	Zufällig	Immer	$\pm 1$ dB(A)
l) Geschossknall	Pegelre- duzie- rend	Nur Geschossknall	- 1.0 dB(A) <sup>1</sup>
m) Mittelung Windrichtung	Zufällig	Bei Verwendung von Meteostatistiken	< 0.5 dB(A)
n) Hinderniswir- kung bei freier Sicht	Pegelre- duzie- rend	Bei Schallpfaden knapp über Hinderniskanten	0 – 6 dB(A)
o) Zusätzliche Bo- denreflexionen	Pegeler- höhend	Bei Quellen und/oder Empfängern in unmittelbarer Boden- nähe	< 1 dB(A)
p) Öffnungen	Pegeler- höhend	Hindernisse oder Gebäudeteile ohne Bodenabschluss	0 – 20 dB(A)
q) Maximalpegel Direktschall	Pegelre- duzie- rend	Maximalpegelberechnung bei Situationen mit bedeutenden seitlichen Schallpfaden	0 – 3 dB(A)
r) Waldreflexionen	Zufällig / Pegeler- höhend	Höchstens kleine Änderungen bei Empfängern vor dem Wald / Neu werden auch Reflexionen hinter dem Wald aus- gewiesen, welche zu Erhöhungen des Gesamtpegels führen können	0 – 2 dB(A) / 0 – 10 dB(A)
s) Seitliche Schall- pfade	Zufällig	Situationen mit bedeutenden seitlichen Schallpfaden	0 – 5 dB(A)
t) Rundungsregeln Lr	Zufällig	Berechnung Beurteilungspegel	0 – 1 dB(A)
u) Seitliche Hin- derniswirkung	Pegelre- duzie- rend	Lange Hindernisse, welche mit wenigen Koordinaten defi- niert sind. Korrigiert ein Fehlverhalten, welches vor Version 5.0 nicht aufgetreten ist.	0 – 15 dB(A)
v) Übergang Mae- kawa - Pierce	Pegelre- duzie- rend	Mehrfachhindernisse	0 – 2 dB(A)
w) Meteostatistik	Zufällig	Meteoeinfluss, bei der Berechnung von Jahresmittelwerten unter Verwendung von Meteostatistiken	0 – 2 dB(A)

<sup>1</sup> Wie in Abschnitt 2.4 ausgewiesen, resultiert im Mittel eine Reduktion des Geschossknallpegels um 1.6 – 1.8 dB(A). Die Auswirkung auf den Maximalpegel  $L_{AFmax}$  bzw. den Ereignispegel  $L_{AE}$  ist jedoch geringer, da sich hier Mündungs- und Geschossknall überlagern.

x) Seitliche Hinderniswirkung	Pegelreduzierend	Aneinander anschliessende Wandobjekte werden verknüpft.	0 – 3 dB(A)
y) Verbesserung Eingangskontrollen	-	Kein Einfluss auf die Berechnungsergebnisse	-
z) Reflektor-Auswahl	Pegelreduzierend	Modul REFLECT: Einschränkung der beitragenden Reflektoren, um Resultate von der Projektgrösse unabhängiger zu machen.	0 – 3 dB(A)
aa) Verbesserung Sichtbarkeitskontrolle	Zufällig	Modul REFLECT: Grosse Reflektoren werden unterteilt; Sichtbarkeitskontrolle und Berechnung erfolgt für Teilflächen	± 0 – 3 dB(A)
A) Siehe c)			
B) Siehe e)			
C) Minimalabstand zu Hindernissen	Pegelreduzierend	Nur bei unpräzisen Empfangspunktsetzungen	0 – 20 dB(A)
D) Maximale Abschirmwirkung	Pegelreduzierend	Bei grossen Hindernissen	0 – 5 dB(A)
E) Maximaldistanz Reflexion	Pegelerhöhend	Bedeutende Reflexionen und abgeschirmter Direktschall	0 – 10 dB(A)
F) Neue Meteostatistiken	Pegelreduzierend	Der Anteil nächtlicher Inversionslagen und damit förderlicher Bedingungen wird reduziert.	0 – 5 dB(A)
I) Absorptionsgrad von Gebäuden	Pegelreduzierend	In Situationen mit dominanten Gebäudereflexionen	0 – 5 dB(A)
J) Parameter RockGrid und ForestGrid	Zufällig	Die Anzahl Reflektoren wird über die Parameter RasterRatioRock und RockGrid bzw. ForestGrid und ForestReflectors_Reduction gesteuert. Je weniger Reflektoren verwendet werden, umso grössere lokale Variationen der Pegel sind zu erwarten.	0 – 5 dB(A)
K) ReflMaxDist	Pegelerhöhend	Neudefinition des Parameters ReflMaxDist und Vergrösserung des Suchradius von 250 auf 300 m in der Standardeinstellung.	0 – 3 dB(A)

Tabelle 1: Zusammenstellung der Änderungen und qualitative Beurteilung der Auswirkung.

Zusammengefasst können die Änderungen folgendermassen beurteilt werden:

- Verschiedene Anpassungen betreffen die Geländesegmentierung und -glättung (Punkte c, d, e und i bzw. A und B). Diese haben geringfügige Veränderungen an den segmentweise berechneten Bodenreflexionen zur Folge, welche sich auf das resultierende Interferenzmuster mit dem Direktschall

auswirken. Der Effekt bei den Immissionspegeln ist moderat und zufälliger Natur, wirkt sich jedoch in jeder Situation auf die BASIC-Berechnung (nicht jedoch auf die anderen Module) aus.

- Bei der Berechnung der Hinderniswirkung wurden z.T. Modellanpassungen vorgenommen (Punkte b bzw. D), z.T. wurden die Algorithmen zur Identifikation des massgeblichen Schallpfades über bzw. um das Hindernis herum verbessert (Punkte a, g und i, j bzw. C)  
Die verschiedenen Veränderungen im Zusammenhang mit der Berechnung der Hinderniswirkung haben zum Teil pegelerhöhende und z.T. pegelreduzierende Auswirkungen. Betroffen sind jedoch nur Situationen mit einer Unterbrechung der Sichtlinie zwischen Quelle und Empfänger. Die Auswirkungen sind bezogen auf eine konkrete Situation systematisch und können mehrere Dezibel, in Einzelfällen sogar mehr als 10 dB(A) ausmachen.
- Modifikationen bei der Berechnung des Meteeffektes bzw. der verwendeten Grundlagen, Punkte f), h), i) und m) sowie F).
- Die Modellanpassung l) hat eine flächendeckende, deutliche Reduktion des Geschosknalls zur Folge.
- Da Situationen mit Schallpfaden knapp über Hinderniskanten häufig auftreten, weist Modifikation n) die grössten Tragweite sämtlicher Modelländerung von Version 5.0 auf. Entsprechend ist in der Tendenz mit einer Pegelabnahme zu rechnen. Für das Beispiel des im sonARMS-Paket enthaltenen Demonstrationsbeispiels resultierte für die Lärmkarte zwischen den Versionen 4.0.0 und 5.0.0 eine mittlere Pegelabnahme um 0.4 dB(A) bei einer Standardabweichung von rund 1 dB(A).
- Die Empfehlung zur Anpassung der Absorptionseigenschaften von Gebäuden, welche mit Version 5.0 eingeführt wurde, führt in Situationen mit dominanten Gebäudereflexionen zu einer Pegelreduktion.
- Seit Version 5.0 wurden nur noch Anpassungen vorgenommen, welche punktuelle Veränderungen der Berechnungsergebnisse bei spezifischen Situationen zur Folge haben, sich aber flächig nur unwesentlich auf die resultierenden Immissionspegel auswirken.

#### **4.1 Statistische Analyse der Auswirkung auf resultierende Beurteilungspegel 2013**

Die in Tabelle 1 aufgeführten Grössenordnungen der Pegeldifferenzen zwischen zwei Berechnungen mit unterschiedlichen Rechenkernversionen bzw. Rechenkerneinstellungen beziehen sich auf einzelne Quellen-Empfänger-Kombinationen. Es stellt sich jedoch die Frage, wie häufig die erwähnten Situationen in der Praxis auftreten und wie stark die resultierenden Abweichungen sich auf die Berechnung von Beurteilungspegeln auswirken, welche sich aus den Beiträgen vieler Quellen zusammen setzen.

Die Empa hat 2013 im Auftrag der Firma Triform SA bzw. der armasuisse zu diesem Zweck Lärmkartenberechnungen für fünf militärische Schiessplätze mit den Rechenkernversionen 1.1 und 2.1 unter Verwendung unterschiedlicher Module durchgeführt und die Resultate verglichen (Empa Untersuchungsbericht Nr. 5214.001400). Der Bericht ist nicht öffentlich zugänglich. Es wurde jedoch erlaubt, die Häufigkeitsdiagramme der fünf Plätze für den Vergleich der BASIC-Berechnungen ohne weitere Angaben als Beilage für diesen Bericht zu übernehmen. Es zeigt sich, dass zwischen den zwei Rechenkernversionen wie erwartet Pegeldifferenzen entstehen, welche in Einzelfällen zu Differenzen von mehreren Dezibel führen können. Im Mittel sind die Abweichungen jedoch gering. Bei der überwiegenden Mehrzahl der Rasterpunkte schwanken die Beurteilungspegel um weniger als  $\pm 2$  Dezibel. Allerdings ist ein leichter systematischer Trend hin zu höheren Pegeln zu erkennen, d.h. die mit Version 2.1 berechneten Beurteilungspegel liegen im Mittel rund 1 Dezibel höher als bei Version 1.1.

Ebenfalls im Rahmen von des Empa-Berichtes Nr. 5214.001400 wurde die Bedeutung der Zusatzmodule METEO, FOREST und REFLECT auf die Berechnungsergebnisse untersucht. Es wurde gezeigt, dass die Verfeinerung der Berechnung einen massgeblichen Einfluss auf die resultierenden Beurteilungspegel hat, welcher klar grösser ausfällt als die Pegeldifferenzen zwischen den beiden untersuchten Versionen.

Entsprechende Vergleiche zu aktuelleren Rechenkern-Versionen liegen für diese Testfälle nicht vor.

## **5 Validierung von sonARMS im Vergleich zu Messungen 2013**

Die Modellgenauigkeit von sonARMS wurde 2013 im Auftrag des BAFU untersucht (siehe Empa-Bericht Nr. 5211.00381.100.01-2), wobei der Rechenkern mit Versionsnummer 2.0 zum Einsatz kam. Nachfolgend wird die Zusammenfassung des Untersuchungsberichtes aufgeführt:

„Im Rahmen der Validierungsuntersuchung wurden gesamthaft 293 Quellen-Empfänger-Kombinationen aus Messungen an 13 verschiedenen Gebieten zusammengefasst und mit sonARMS-Berechnungen verglichen. Die mittlere Abweichung zwischen Messung und Berechnung beträgt -0.1 dB(A) und zeigt, dass es im Mittel über alle Situationen zu keinen systematischen Über- oder Unterschätzungen bei Berechnungen mit sonARMS kommt. Die Standardabweichung liegt bei 4.4 dB(A). Dabei wurde kein Zusammenhang mit der Ausbreitungssituation (direktschall- oder reflexions-dominiert), der Quellenart (Mündungsknall oder Geschossknall) oder der Empfangspunktsituation (Freifeld- oder Gebäudepunkt) festgestellt.

Relativ zur Ausbreitungsdämpfung betrachtet, resultiert eine repräsentative Modellunsicherheit bei der Beschreibung von einzelnen Ausbreitungssituationen von 3.8%. Daraus lässt sich ableiten, dass Prognosen im Bereich der Immissionsgrenzwerte sowohl nach LSV Anhang 7 als auch Anhang 9 eine Unsicherheit von 1 - 2 dB(A) im Sinne einer Standardabweichung aufweisen. „

Die Vergleichsberechnungen wurden mit Version 3.0 nicht wiederholt. Die Messsituationen, welche für die Untersuchung verwendet wurden, sind von den Modellanpassungen zwischen den Versionen 2.0 und 3.0 nicht oder nur geringfügig betroffen, weshalb die aufgeführten Schlussfolgerungen auch für Version 3.0 Gültigkeit haben.

## **6 Validierung und Anpassung des Geschossknallmodells von sonARMS 2016**

Im Sommer 2016 wurden im Auftrag der Fachstelle Lärmschutz des Kantons Zürich Messungen an Lägerblenden und Schiesstunnels durchgeführt (siehe Empa-Bericht Nr. 5214012303). Im Rahmen dieser Messungen wurde auch Geschossknall erfasst. Es zeigte sich dabei eine systematische Überschätzung der Immissionen durch sonARMS. Da bereits früher, u.a. bei Vergleichen mit dem Vorgängermodell sonGun (siehe Bericht von Planteam GHS AG Nr. 15-101 im Auftrag des BAFU) eine entsprechende Tendenz festgestellt wurde, wurde mit den früheren und neuen Messdaten zusammen eine erneute Validierung durchgeführt, wobei nur Geschossknall-Daten mit dominantem Direktschall verwendet wurden. Abbildung 1 zeigt eine Zusammenstellung der Resultate, mit einer systematischen Überschätzung der berechneten Immissionspegel, im Mittel um 2.6 dB(A).

Das in sonARMS verwendete Geschossknallmodell ist in der ISO-Norm 17201-4 aus dem Jahr 2006 definiert. Es basiert auf einem in den Niederlanden durch TNO entwickelten Modell. Nach Rücksprache mit dem Entwickler des Modells, Dr. Frank van den Berg, konnte Einsicht in die damaligen Validierungsgrundlagen genommen werden (TNO report DGT-RPT-030078 vom 2. Februar 2004, „Validation of a computational model for projectile sound“). Der Bericht, welcher Vergleiche mit Niederländischen und Amerikanischen

Messdaten umfasst, weist ebenfalls eine systematische Überschätzung bei der Berechnung aus, im Mittel um 1.8 dB(A).

Auf der Basis dieser Resultate wurde beschlossen, eine Anpassung des Geschossknallmodells vorzunehmen. Aufgrund von Schlierenaufnahmen sowie von Diskussionen innerhalb der ISO-Arbeitsgruppe zu dieser Fragestellung wird vermutet, dass die im Modell verwendete effektive Projektillänge die wahre Wirklänge unterschätzt. Vergleichsberechnungen für das Sturmgewehr 90, welche nicht die effektive, sondern die um einen Faktor 1.7 grössere totale Projektillänge verwendeten, ergaben um 1.8 dB(A) tiefere Emissionen und eine entsprechend bessere Übereinstimmung mit den Messungen. Es wurde deshalb beschlossen, die bereits in der Waffendatenbank enthaltenen Angaben zur effektiven Projektillänge bei der Berechnung pauschal mit einem Faktor 1.7 zu multiplizieren. Abbildung 2 zeigt exemplarisch die Auswirkung einer entsprechenden Anpassung der Projektillänge auf das resultierende Terzbandspektrum.

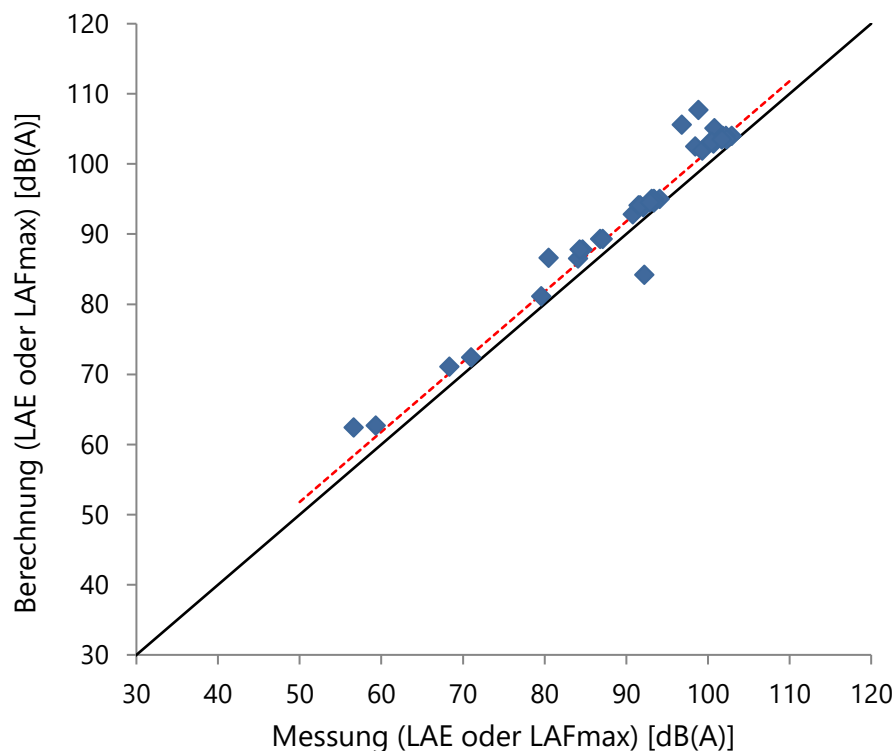


Abbildung 1: Vergleich Messung und Berechnung des Geschossknalls (ohne Mündungsknall) für Situationen mit dominantem Geschossknall-Direktschall gemäss bisherigem Berechnungsansatz. Mittlere Abweichung: -2.6 dB(A), Standardabweichung 2.7 dB(A). Die rot gestrichelte Linie zeigt mit einem Versatz um 1.8 dB(A) den Vergleich nach der Umsetzung der Modellanpassung.

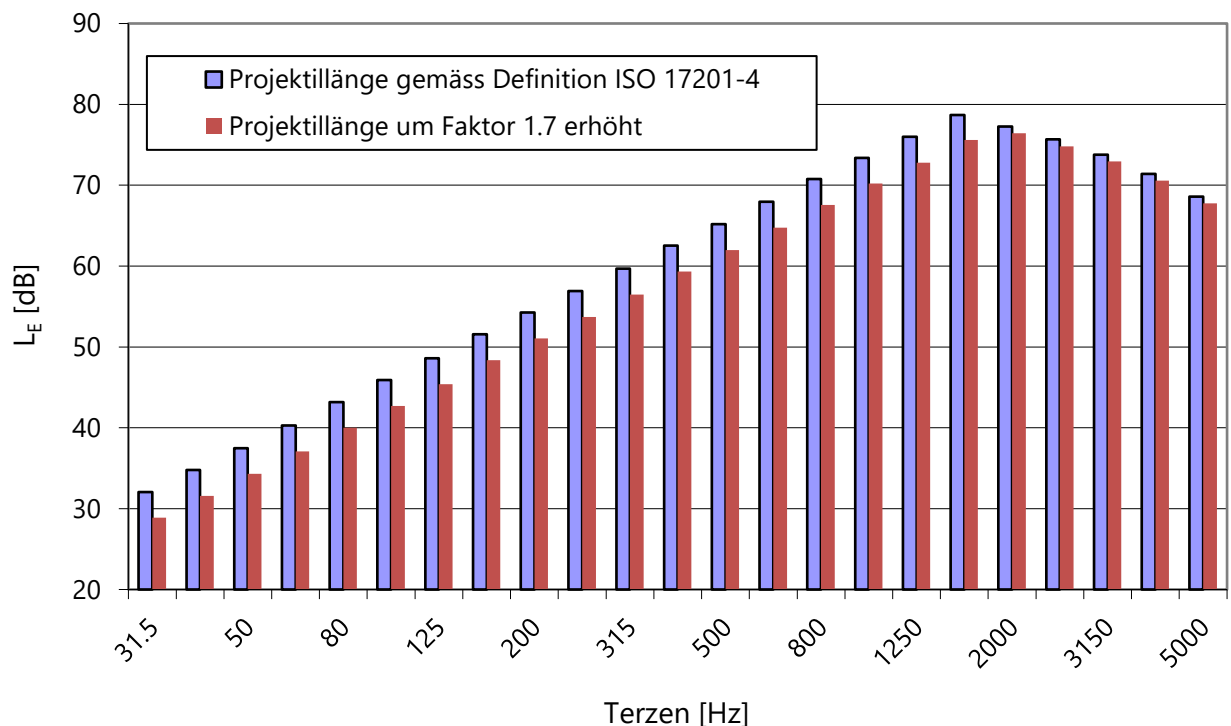


Abbildung 2: Auswirkung der Anpassung beim Geschossknallmodell, exemplarisch dargestellt für das Sturmgewehr 90, mit einem Empfangspunkt 200 m vor der Mündung und 100 m seitlich versetzt. Die Ausbreitungsrechnung berücksichtigt nur die geometrische Dämpfung und die Luftdämpfung.

## 7 Validierung von sonARMS im Vergleich zu Messungen 2019

Im Hinblick auf die Veröffentlichung der sonARMS-Version 5.0.0 wurden die Vergleiche mit Messungen von 2013 (siehe Kapitel 5) wiederholt und mit zusätzlichen Messungen ergänzt. Die Resultate sind im Empa-Untersuchungsbericht Nr. 5211.01543.100-2 dokumentiert. Wiederum wird an dieser Stelle nur die Zusammenfassung aufgeführt:

"Im Rahmen der Validierungsuntersuchung wurden gesamthaft 401 Quellen-Empfänger-Meteo-Kombinationen aus Messungen von jeweils fünf bis zehn Schuss an 19 verschiedenen Standorten zusammengefasst und mit sonARMS-Berechnungen verglichen. Die mittlere Abweichung zwischen Messung und Berechnung der Serienmittelwerte beträgt -0.5 dB(A) bei einer Standardabweichung von 4.0 dB(A). Relativ zur Ausbreitungsdämpfung betrachtet, resultiert eine repräsentative Modellsicherheit bei der Beschreibung von einzelnen Ausbreitungssituationen von 3.7%. Daraus lässt sich ableiten, dass Prognosen im Bereich der Immissionsgrenzwerte sowohl nach LSV Anhang 7 als auch Anhang 9 eine Unsicherheit von 1 - 2 dB(A) im Sinne einer Standardabweichung aufweisen.

Die Validierung ergab zwei Tendenzen zur Überschätzung bei den Berechnungen. So wurde festgestellt, dass das Reflexionsmodell für Gebäude und andere künstliche Objekte unter der Annahme schallharter Flächen im Mittel zu hohe Pegel ausweist. Es wird deshalb empfohlen, pauschal den Oberflächentyp sämtlicher Gebäude von schallhart (ID 501) zu leicht absorbierend (ID 502) anzupassen. Ebenfalls zeigte sich, dass die Maximalpegel im Mittel um 1.2 dB(A) höher als die Messungen liegen. Dies wird damit erklärt, dass sonX für Energie-basierte Grössen wie den  $L_{AE}$  entwickelt wurde und die Maximalpegelberechnung erst in einem zweiten, nachgeschalteten Schritt erfolgt. Dabei werden namentlich zwei Annahmen getroffen, (a) dass es sich beim Direktschall um einen idealen Impuls handelt und (b) dass sämtliche Gebäudereflexionen vom dominanten Reflektor



stammen. Diese Annahmen sind konservativ gewählt und können in entsprechenden Fällen zu Überschätzungen führen.

Die resultierende Genauigkeit ist nur geringfügig besser als bei der Validierung aus dem Jahr 2013; die Modellunsicherheit damit vergleichbar. Allerdings wurde 2013 das Reflexionsmodell bei der Validierung nicht berücksichtigt.

Die aktuelle Version von sonARMS liefert in der Tendenz etwas tiefere Immissionen als die Version von 2013, dies namentlich aufgrund von drei Anpassungen am Modell:

- Pauschale Reduktion des Geschosskalles um ca. 1.8 dB(A) aufgrund einer Zwischenvalidierung im Jahr 2016
- Anpassung der Hindernisformel im Hinblick auf die aktuelle Veröffentlichung, so dass auch bei freier Sicht zwischen Quelle und Empfänger eine Hinderniswirkung auftreten kann.
- Pauschale Reduktion der Gebäudereflexionen durch Anpassung der Oberflächeneigenschaften der Gebäude von schallhart auf leicht absorbierend."

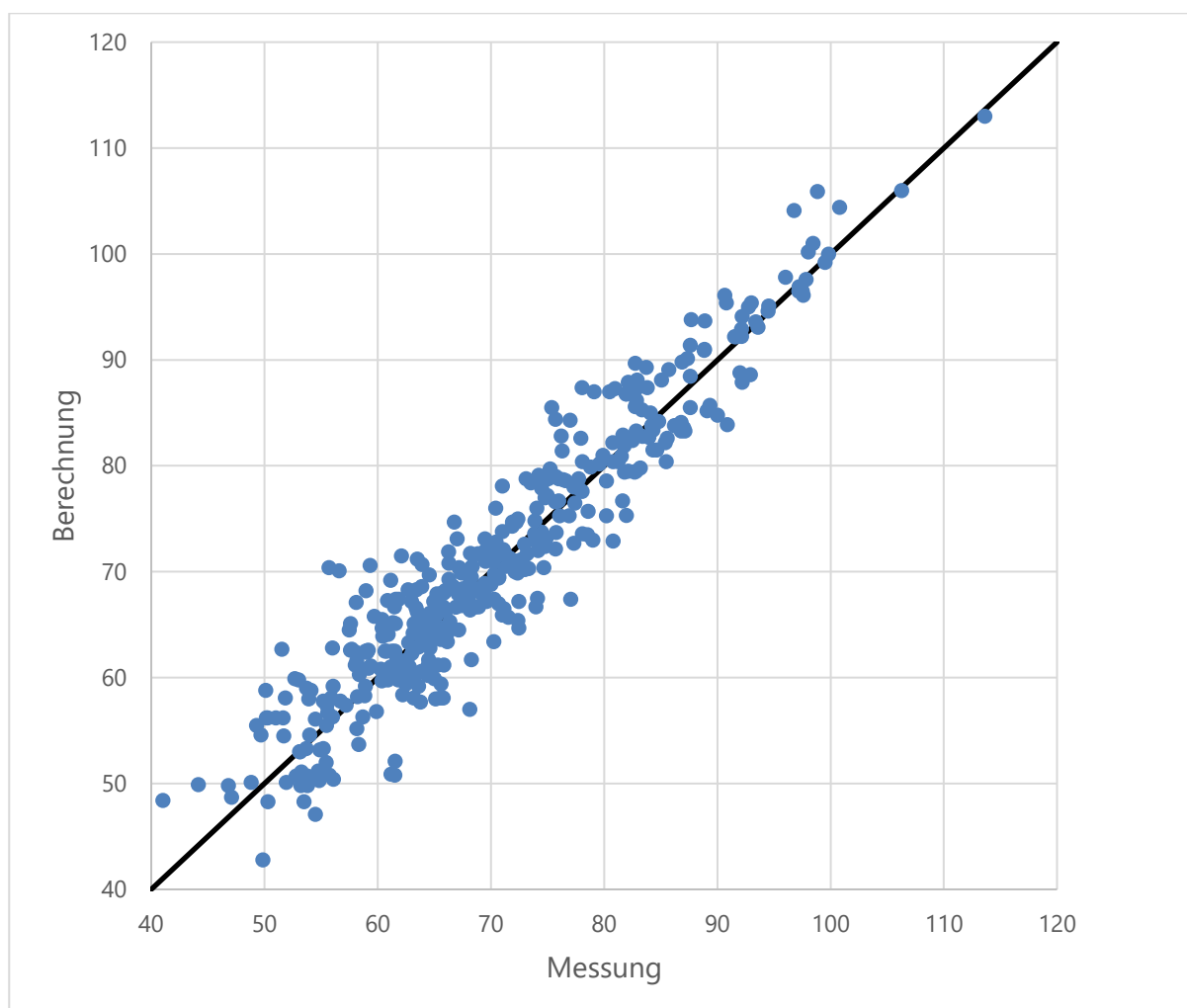


Abbildung 3: Validierung 2019 - Vergleich Messung und Berechnung für sämtliche Validierungsfälle.

## 8 Diskussion

Das Ausbreitungsmodell sonX und seine Umsetzungen für spezifische Lärmarten sonARMS, sonAIR und sonRAIL wurden über die Jahre laufend verbessert und erweitert. Die verschiedenen Modellanpassungen haben Pegelerhöhungen aber auch Pegelreduktionen zur Folge. Im Vergleich zur ersten Version überwiegen in einem statistischen Sinn aber pegelreduzierende Massnahmen, so dass gefolgert werden kann, dass die durch die Modelle prognostizierten Immissionen in der Tendenz zurückgegangen sind. Im Mittel über eine grosse Anzahl Quellen-Empfänger-Kombinationen sind die Pegelveränderungen zwischen den Versionen klein und betrugen in der Regel weniger als ein Dezibel. Gleichwohl muss man sich bewusst sein, dass es in Einzelfällen zu bedeutsamen Abweichungen um mehrere Dezibel kommen kann. Die Erfahrungen in der Praxis namentlich mit sonARMS haben gezeigt, dass eine kritische Würdigung der Resultate durch einen erfahrenen Akustiker immer noch angezeigt ist.

## Anhang

Häufigkeitsverteilungen der Pegeldifferenzen für Beurteilungspegel zwischen 50 und 80 dB für sonARMS-Berechnungen im BASIC-Modus der Versionen 2.1 und 1.1 für fünf militärische Schiessplätze (Luzisteig, Chur, Simplan, Vugelles und Wolfeye).

