

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

Bundesamt für Umwelt BAFU
Abteilung Lärm und NIS
CH-3003 Bern

Vergleich der mit den Modellen FLULA2, AEDT und sonAIR berechneten Immissions- pegel von Einzelflügen mit Messungen

Abschlussbericht zum Forschungsprojekt CompAIR Teil 2: Untersuchungen zum streifenden Schalleinfall

Auftrags-Nr.: 5211.01812.100.01

Bericht-Nr.: 5211.01812.100.01 - 2

Auftraggeber: Bundesamt für Umwelt BAFU, Kornel Köstli

Anzahl Seiten: 64

Beilagen: -

Die Verfasser: D. Jäger
S. Schalcher
C. Zellmann
J. M. Wunderli
J. Meister
B. Schäffer

Status: genehmigter Bericht

Dübendorf, 04. Februar 2021
Der Projektleiter:



Dr. Beat Schäffer

Abteilung Akustik / Lärmminderung
Der Abteilungsleiter:



Dr. Jean Marc Wunderli

Zusammenfassung

Vergleichsberechnungen zwischen dem neuen Fluglärmrechnungsmodell sonAIR und den bestehenden *Best Practice* Modellen FLULA2 bzw. IMMPAC im Referenzrahmen SANC-TE ergaben teilweise deutliche Abweichungen. Grosse Abweichungen zwischen sonAIR und FLULA2/IMMPAC traten insbesondere in Regionen mit grossen Ausbreitungsdistanzen und streifendem Schalleinfall auf, wo die heutigen *Best Practice* Programme zur Beschreibung der Ausbreitungsphänomene eine empirische sogenannte "Bodenzusatzdämpfung" (engl. *Lateral Attenuation*) verwenden. sonAIR hingegen kennt keine entsprechende Korrektur und nimmt für sich in Anspruch, eine allfällige Zusatzdämpfung bereits durch die dreidimensionalen Quellenmodelle, die phasenrichtige Berechnung der Bodenreflexionen sowie die Berücksichtigung akustischer Schattenzonen abzubilden (wobei SANC-TE ohne Meteeinflüsse berechnet wurde).

Es stellt sich deshalb die Frage, welches Modell – sonAIR oder ein *Best Practice* Programm wie FLULA2 oder das weitgehend ECAC Doc.29 konforme Programm AEDT – die reale Exposition besser abbildet. Dies soll im vorliegenden Projekt CompAIR (*Comparison of Aircraft noise models*) geklärt werden. Dazu werden für Messdatensätze von Zürich, Genf und Payerne Vergleichsberechnungen mit den drei Modellen sonAIR, FLULA2 und AEDT durchgeführt. Der Fokus liegt auf Vergleichen des Ereignispegel $L_{AE,t10}$, es werden aber auch exemplarisch Pegelzeitverläufe analysiert. Die Resultate werden in drei Teilberichten dokumentiert.

Der Vergleich simulierter mit gemessenen $L_{AE,t10}$ von Einzelflugereignissen von Grossflugzeugen in **Teilbericht 1** zeigt, dass sonAIR die Messungen genau zu reproduzieren vermag, sowohl im Nah-, als auch im Fernbereich, mit mittleren absoluten Differenzen im $L_{AE,t10}$ zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) von < 0.5 dB. FLULA2 reproduziert im Mittel die Messwerte im Nahbereich ebenfalls exakt ($\Delta L_{AE,t10} < 0.5$ dB) und im Fernbereich befriedigend (Landungen 28: $\Delta L_{AE,t10} = 0.8$ dB; Landungen 34: $\Delta L_{AE,t10} = 3.2$ dB). Die Differenzen im Fernbereich hängen hierbei stark vom jeweiligen Flugzeugtypen ab und sind auf die vereinfachten Quellenmodellierung von FLULA2 zurückzuführen. AEDT schliesslich reproduziert im Mittel die Messwerte im Nah- und Fernbereich befriedigend, wobei die Starts im Mittel etwas unterschätzt ($\Delta L_{AE,t10} = 1.1$ dB) und die Landungen etwas überschätzt werden ($\Delta L_{AE,t10} = 0.6$ dB). Die Genauigkeit von sonAIR widerspiegelt sich auch in der Streuung der Differenzen zwischen Berechnung und Messung. Diese ist für sonAIR geringer als für FLULA2 und AEDT, insb. für die sogenannten "FDR-Typen" (d.h. Flugzeugtypen, für welche bei der Modellerstellung wie auch Simulation FDR-Daten verfügbar waren bzw. sind; im Gegensatz zu den sogenannten "nonFDR-Typen", für welche lediglich Radardaten verfügbar sind). So betragen die Standardabweichungen zwischen Berechnungen und Messungen für die FDR-Typen bei sonAIR 1.6 dB im Nahbereich bzw. 1.3 dB im Fernbereich, bei FLULA2 2.0 dB bzw. 2.7 dB und bei AEDT 2.5 dB bzw. 2.2 dB. Bei den nonFDR-Typen im Nahbereich ist die Streuung der drei Modelle ähnlich, mit Standardabweichungen von 2.2 dB für sonAIR, 2.2 dB für FLULA2 und 2.5 dB für AEDT.

Der Vergleich simulierter mit gemessenen $L_{AE,t10}$ in Situationen mit streifendem Schalleinfall im **vorliegenden Teilbericht 2** zeigt für Grossflugzeuge wie auch für den F/A-18, dass sonAIR solche Situationen gut abbilden kann. Die laterale Richtwirkung der sonAIR-Emissionsmodelle sowie das Bodeneffektmodell von

sonX scheinen somit ausreichend, und es drängen sich keine Modellanpassungen auf. Namentlich erscheint eine ergänzende Bodenzusatzdämpfung nicht notwendig und wäre im Gegenteil sogar kontraproduktiv. Letztere zeigt jedoch gute Resultate in heutigen *Best Practice* Modellen, hier FLULA2, um Meteo- und Bodeneffekte pauschal mit einer empirischen Korrektur abzubilden. Die Bodenzusatzdämpfung in FLULA2 kompensiert somit zumindest teilweise den Umstand, dass mit den zweidimensionalen FLULA2-Quellenmodellen die seitliche Richtwirkung der Flugzeuge nicht abgebildet werden kann. Allerdings zeigt FLULA2 eine Tendenz zur Überschätzung der Pegel in kleinen Distanzen und zur Unterschätzung in grossen Distanzen. Die Überschätzung in kleinen Distanzen wird darauf zurückgeführt, dass FLULA2 im Unterschied zu anderen *Best Practice* Modellen nicht zwischen quellenseitigen Installations-effekten und einem distanzabhängigen Ausbreitungsterm unterscheidet.

Die Untersuchungen zeigen für die vorliegenden Geometrien und Messdaten keinen massgeblichen Meteoerfluss. Es kann aber nicht ausgeschlossen werden, dass dieser bei grösseren Ausbreitungsdistanzen und flachen Schalleinfallswinkeln dennoch zum Tragen kommen könnte. Grössere Abweichungen zwischen FLULA2 und sonAIR, wie sie bei den SANC-TE-Vergleichen festgestellt wurden, traten denn auch erst in Situationen mit mehreren Kilometern Schallausbreitungsdistanz auf, wo keine Messungen verfügbar waren. Es wird deshalb in **Teilbericht 3** ein Konzept vorgestellt, wie solche Ausbreitungsbedingungen künftig in sonAIR für Jahresberechnungen berücksichtigt werden könnten. Dieses basiert auf der Idee, dass für Fluglärm zwei meteorologische Einflüsse auf die Schallausbreitung massgeblich von Bedeutung sind, nämlich die Variation der Luftdämpfung und bei streifendem Schalleinfall das Auftreten von akustischen Schattenzonen. Diese Effekte werden bei der Berechnung mit sonX separat behandelt. Der Effekt akustischer Schattenzonen wird im METEO-Modus berücksichtigt. Um den Rechenaufwand zu begrenzen, wird eine für hinderliche Situationen repräsentative atmosphärische Schichtung definiert und eine einzelne Meteoberechnung unter diesen Bedingungen durchgeführt. Das Jahresmittel wird im Anschluss als über die Auftretenshäufigkeit hinderlicher Situationen gewichtetes energetisches Mittel einer neutralen und einer hinderlichen Atmosphäre ermittelt. Die Auftretenshäufigkeit wird basierend auf lokalen Wetterstatistiken für einen vorgegebenen Zeitraum bestimmt, so dass sich je nach Zeitraum und Ausbreitungsrichtung unterschiedliche Gewichtungen ergeben.

Inhalt

1. Einleitung und Auftrag	5
2. Bodenzusatzdämpfung: Ein Überblick	7
3. Konzept für Vergleiche zu streifendem Schalleinfall.....	8
3.1. Messungen Zürich.....	8
3.2. Messungen Payerne	8
4. Messlayouts, verfügbare Datengrundlagen.....	9
4.1. Vergleiche zu streifendem Schalleinfall in Zürich.....	9
4.2. Vergleiche zu streifendem Schalleinfall in Payerne	11
4.3. Bewilligungen	14
5. Methodik, Arbeitsschritte.....	15
5.1. Vorbereitungsarbeiten, Datengrundlagen	15
5.2. Berechnungen sonAIR für Zürich	15
5.3. Berechnungen sonAIR für Payerne.....	16
5.4. Berechnungen FLULA2 für Zürich.....	17
5.5. Berechnungen FLULA2 für Payerne.....	18
6. Resultate	19
6.1. Streifender Schalleinfall in Zürich	19
6.2. Streifender Schalleinfall in Payerne.....	32
7. Diskussion.....	45
7.1. Streifender Schalleinfall in Zürich	45
7.2. Streifender Schalleinfall in Payerne.....	45
8. Schlussfolgerungen	47
9. Dank.....	48
10. Abkürzungen.....	48
11. Literatur	49
12. Anhang	51
12.1. sonAIR Modellvarianten	51
12.2. Vergleiche zur Bodenzusatzdämpfung – übrige FDR-Typen.....	52
12.3. Verifizierung B77W, BCS1 und BCS3 mit Daten O1/O2 bei Modellerstellung.....	61
12.4. Datengrundlagen, Skripte.....	62

1. Einleitung und Auftrag

Die Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, entwickelte in den letzten Jahren ein neues Fluglärm-berechnungsmodell mit der Bezeichnung sonAIR. Vergleichsberechnungen mit den bestehenden, vom Bundesamt für Umwelt BAFU empfohlenen Modellen FLULA2 bzw. IMMPAC im Rahmen des *Swiss Aircraft Noise Calculation Test Environment* (SANC-TE), ergaben teilweise deutliche Abweichungen von sonAIR zu den anderen Modellen (siehe Abbildung 1-1). Es stellt sich deshalb die Frage, welches Modell die reale Exposition besser abbilden kann. Zudem ist auch von Interesse, wie die Resultate im Vergleich zu dem weltweit benutzten Programm AEDT [21] ausfallen. Letzteres Programm ist grossenteils ECAC Doc.29 [3] konform (bzw. vollständig ICAO Doc.9911 [14] konform) und entspricht somit ebenfalls grossenteils den Anforderungen der Richtlinie über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm (Anhang II [13] zur Richtlinie 002/49/EG [12]), nach welcher die Mitgliedstaaten Fluglärm-berechnungen durchzuführen haben.

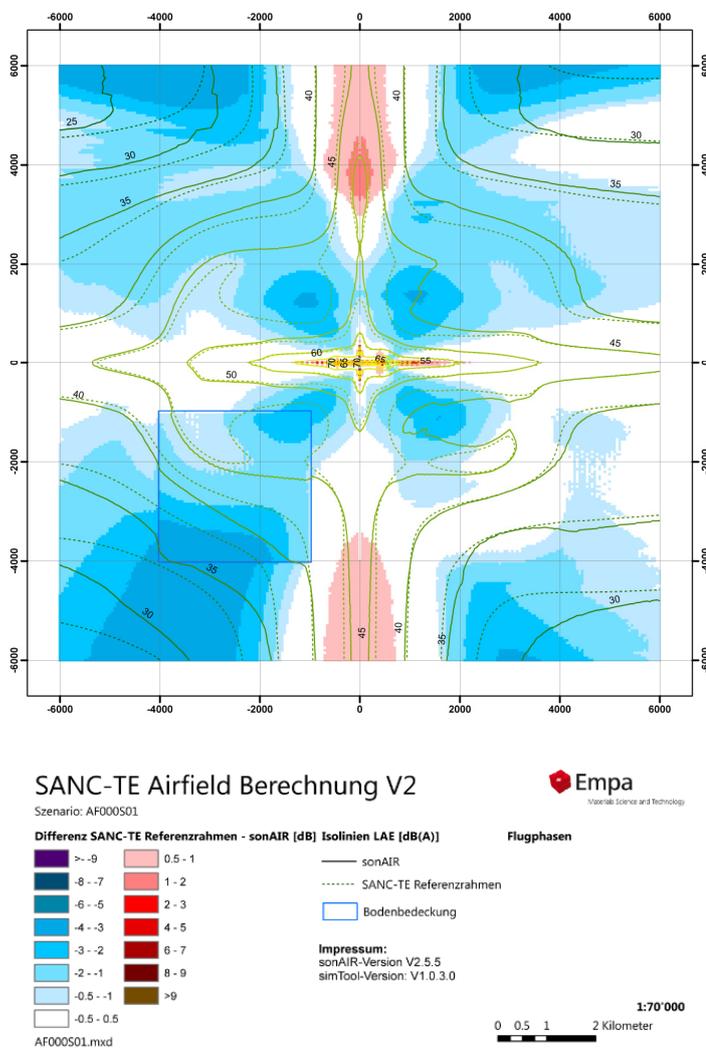


Abbildung 1-1: Differenz SANC-TE Referenzrahmen – sonAIR, Basisszenario ohne Streuspuren mit asymmetrisch gewichteten Flugbahnen (Abbildung 10 aus [9]).

Das Bundesamt für Umwelt BAFU, vertreten durch Kornel Köstli, erteilte daher der Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, im Januar 2020 den Auftrag, für an der Empa verfügbare Messdatensätze der Flughäfen Zürich (ZRH) und Genf (GVA) sowie des Militärflugplatzes Payerne (PAY) Vergleichsberechnungen mit drei Modellen, namentlich sonAIR, FLULA2 und AEDT durchzuführen. Der Fokus soll auf Vergleichen basierend auf dem $L_{AE,t10}$ liegen, aber es sollen auch exemplarisch Pegelzeitverläufe analysiert werden. Es sollen für sonAIR, FLULA2 und AEDT Vergleiche von Grossflugzeugen im Nah- und Fernbereich der Flughäfen Genf und Zürich durchgeführt werden, sowie separat hierzu für sonAIR und FLULA2 Vergleiche für Situationen mit streifendem Schalleinfall für Grossflugzeuge (Flughafen Zürich) und das Kampfflugzeug F/A-18 Hornet (Flugplatz Payerne) untersucht werden. Im Falle einer schlechten Übereinstimmung in Situationen mit streifenden Schalleinfall sollen zudem allfällige Modifikationen an sonAIR geprüft werden. Im Vordergrund stehen dabei zum einen Anpassungen an den Emissionsmodellen für seitliche Emissionswinkel $> 75^\circ$ und zum anderen Anpassungen an den standardisierten LinLog-Meteoprofilen, da diese bisher nur im Hinblick auf bodennahe Quellen- und Empfängerpositionen entwickelt worden waren. Die Resultate sollen zuhanden des Auftraggebers dokumentiert werden.

Das Projekt wurde unter dem Akronym CompAIR (*Comparison of AIRcraft noise models*) bearbeitet. Die Arbeiten am Projekt wurden in Form von drei Teilberichten dokumentiert:

- **Teilbericht 1** zeigt die Vergleiche von sonAIR, FLULA2 und AEDT für Grossflugzeuge im Nah- und Fernbereich der Flughäfen Genf und Zürich.
- **Teilbericht 2** dokumentiert die Vergleiche von sonAIR und FLULA2 in Situationen mit streifendem Schalleinfall für Grossflugzeuge (Zürich) und das Kampfflugzeug F/A-18 (Payerne).
- **Teilbericht 3** schliesslich präsentiert das Konzept zur Berechnung von Jahresbelastungen inklusive Meteo mit sonAIR.

Der **vorliegende Teilbericht 2** gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 wird die Bodenzusatzdämpfung, eine empirische Korrektur heutiger *Best Practice* Programme zur pauschalen Berücksichtigung der Ausbreitungsphänomene in grossen Ausbreitungsdistanzen und/oder streifendem Schalleinfall beschrieben. Kapitel 3 erläutert das Konzept der Vergleiche, Kapitel 4 beschreibt das Messlayout und die verfügbaren Datengrundlagen und Kapitel 5 die Methodik und Arbeitsschritte. Die Resultate werden in Kapitel 6 aufgeführt, separat für ZRH (Kap. 6.1) und PAY (Kap. 6.2). Der Bericht schliesst mit einer Diskussion (Kap. 7) und Schlussfolgerungen (Kap. 8).

2. Bodenzusatzdämpfung: Ein Überblick

Heutige *Best Practice* Modelle (FLULA2, IMMPAC, ECAC Doc.29, ICAO Doc.9911, Deutsche AzB, ...) verwenden eine empirische "Bodenzusatzdämpfung" (engl. *Lateral Attenuation*), um verschiedene Ausbreitungsphänomene in Situationen mit streifendem Schalleinfall und/oder grossen Ausbreitungsdistanzen pauschal zu berücksichtigen. sonAIR hingegen kennt keine entsprechende Korrektur und nimmt für sich in Anspruch, eine allfällige Zusatzdämpfung durch die dreidimensionalen (3D) Quellenmodelle, die phasenrichtige Berechnung der Bodenreflexionen sowie die Berücksichtigung akustischer Schattenzonen physikalisch bereits korrekt abzubilden.

Die Bodenzusatzdämpfung wird beispielsweise detailliert in [17] und [20] erläutert. Sie wird mittels einer empirisch gefundenen Gleichung beschrieben, die teilweise auf Messungen von Parkin und Scholes [18][19] sowie Wiener und Keast zurückgehen [22]. Die *Best Practice* Programme verwenden grundsätzlich denselben Modellansatz, aber mit anderen Fitparametern, was zu unterschiedlichen Distanz- und Winkelabhängigen Dämpfungen führt [17][20].

FLULA2 [4] verwendet folgenden empirischen Ansatz für die Bodenzusatzdämpfung (A_{add}):

$$A_{add}(\beta, r) = \begin{cases} [1 + D \times \sin(\beta)] \times [A + B \times e^{(C \times r)}] & \text{für } \beta < 15^\circ \\ 0 & \text{für } \beta \geq 15^\circ \end{cases}$$

wobei β der Schalleinfallswinkel beim Empfänger ist, r die Ausbreitungsdistanz zwischen Quelle und Empfänger und $A = 10.1451$, $B = -9.9$, $C = -0.00134$ und $D = -3.8637$ Fitparameter sind. Abbildung 2-1 zeigt die resultierende Bodenzusatzdämpfung in Abhängigkeit von β und r . Die Dämpfung nimmt mit zunehmendem Schalleinfallswinkel ab und fällt bei Winkeln über 15° weg. Ausserdem ist sie stark Distanzabhängig. Bei 0 m Distanz fällt die Bodenzusatzdämpfung unabhängig vom Schalleinfallswinkel weg und erreicht bei Distanzen > 3000 m ihren maximalen Wert.

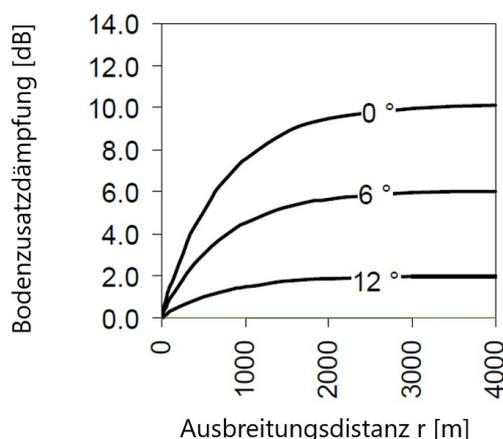


Abbildung 2-1: Bodenzusatzdämpfung für verschiedene Schalleinfallswinkel β in Abhängigkeit der Ausbreitungsdistanz zwischen Quelle und Empfänger (Graphik entnommen aus Fig. 3-7 in [20]).

3. Konzept für Vergleiche zu streifendem Schalleinfall

Ein fundamentaler Unterschied zwischen sonAIR und "Best Practice" Modellen ist, dass diese für Situationen mit streifendem Schalleinfall und/oder grosse Ausbreitungsdistanzen eine "Bodenzusatzdämpfung" verwenden, sonAIR hingegen nicht (vgl. Kap. 2). Da u.a. im Einflussbereich dieser Bodenzusatzdämpfung grössere Unterschiede zwischen sonAIR und den "Best Practice" Modellen wie FLULA2 festgestellt wurden (vgl. Kap. 1), sollen entsprechende Ausbreitungssituationen vertieft untersucht werden.

3.1. Messungen Zürich

Im Rahmen der BV-86 Monitoring-Projektes [10], in welchem u.a. Quellenmodelle für die BCS1, BCS3 und B77W erstellt wurden, wurde im Laufe des Projekts das Messkonzept im Bereich der Landung 14 auf den Flughafen Zürich nachträglich um zwei zusätzliche Messpunkte (O1 und O2) erweitert. Diese Punkte wurden so platziert, dass landende Flugzeuge bei streifenden Schalleinfallswinkeln in grösseren Abständen erfasst werden konnten, also unter Bedingungen, bei welchen der Effekt der Bodenzusatzdämpfung messbar sein sollte. Neben den erwähnten drei Flugzeugtypen wurden für diese Messkette auch Ereignisse der A319, A320, A321, A333 und A343 der Swiss messtechnisch erfasst und nachsimuliert. Diese Messdaten wurden im Rahmen der sonAIR-Validierung noch nicht dokumentiert. Eine erste statistische Analyse zeigte kein einheitliches Bild. Bei einigen Flugzeugtypen war bei Messpunkt O1 eine Überschätzung der Messungen durch sonAIR im L_{AE} um bis zu 2 dB sichtbar. Bei O2 waren die Abweichungen hingegen deutlich kleiner. Ausserdem war der Trend bei verschiedenen Flugzeugtypen nicht einheitlich. Die Interpretation der Resultate gestaltete sich entsprechend schwierig. Aufgrund der breiten und hochqualitativen Datenbasis lohnt es sich jedoch, diesen Datensatz weitergehend zu analysieren. Im Rahmen dieses Projektes werden neben der detaillierten Re-Analyse auf Basis der $L_{AE,t10}$ zusätzliche exemplarische Untersuchungen auf Basis von Pegel-Zeit-Verläufen durchgeführt. Die detaillierte Betrachtung der Ausbreitungseffekte für verschiedene Flugzeugtypen sollte es erlauben, Rückschlüsse zu ziehen, ob Abweichungen primär auf die Quellenmodellierung (Installationseffekte) oder auf Ausbreitungseffekte (Meteo- und Bodeneffekte) zurückzuführen sind. Parallel zu Simulationen mit sonAIR werden diese Ereignisse auch mit FLULA2 nachgerechnet, um so einen weiteren Bodenzusatzdämpfungs-Validierungsdatensatz für eine reale Situation mit flachen Schalleinfallswinkeln in grossen Abständen zu erhalten.

3.2. Messungen Payerne

Im Frühjahr 2019 wurden auf dem Flugplatz Payerne (PAY) während mehrerer Wochen (April–Juni) Flugereignisse des F/A-18 an elf Mikrofonstandorten erfasst. Einige der Messstandorte befinden sich querab zur Piste in grösseren Abständen (bis 2.8 km) und eignen sich deshalb für die Untersuchung von Ausbreitungssituationen mit streifendem Schalleinfall über grössere Distanzen, für welche die Bodenzusatzdämpfung einen massgeblichen Einfluss liefern sollte. Die Einzelflüge werden zu diesem Zweck mit sonAIR und FLULA2 nachmodelliert und mit den Messungen verglichen, wobei die FLULA2-Berechnungen mit und ohne Berücksichtigung der Bodenzusatzdämpfung durchgeführt werden.

4. Messlayouts, verfügbare Datengrundlagen

4.1. Vergleiche zu streifendem Schalleinfall in Zürich

Abbildung 4-1 zeigt das Messlayout zur Untersuchung des streifenden Schalleinfalls in Zürich. Dieses entspricht dem Layout der Messkampagnen von Landungen auf Piste 14 zur Vermessung von Emissionsdaten für sonAIR der Jahre 2013 [6] sowie 2018 [10]. Für die Vermessung 2018 [10] wurde das Messlayout um die Messpunkte O1 und O2 erweitert, d.h. um zwei Positionen mit besonders flachem Schalleinfall. Die Geländeschnitte der drei Messpunkte O, O1 und O2 im kürzesten Abstand zum Anflugpfad sind in Abbildung 4-2 abgebildet, wobei 0 m jeweils der Lage des Anflugpfads entspricht. Die Flugzeuge überfliegen den Bereich der Messpunkte etwa mit einer Höhe von 60–80 m.

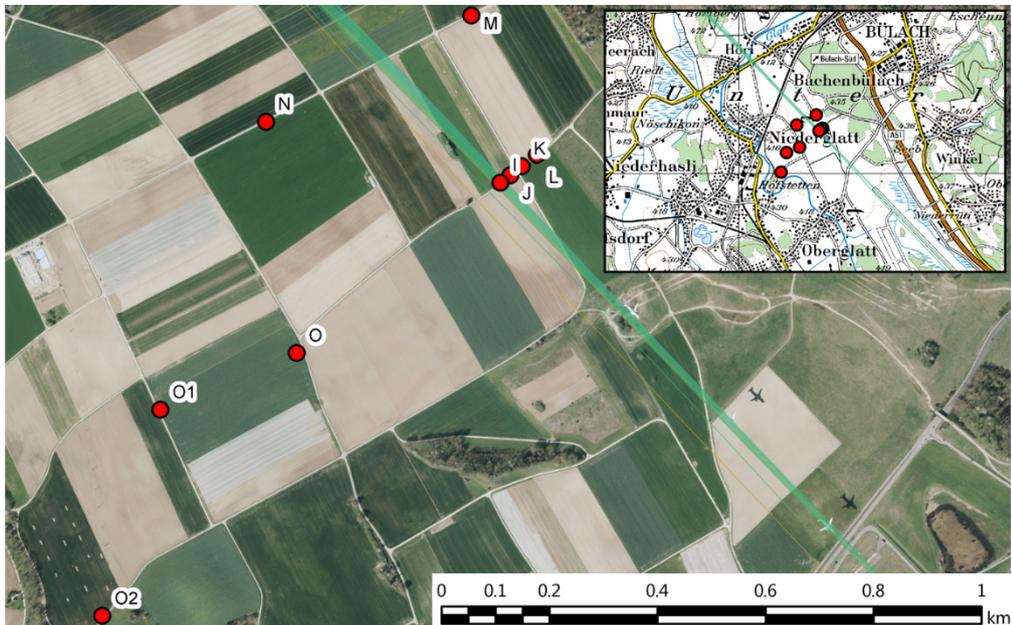


Abbildung 4-1: Übersicht Messung 2018 mit den zusätzlichen Messpunkten O1 und O2. (grosse Karte: © Google Maps, by Google; kleine Karte: ©2019 swisstopo).

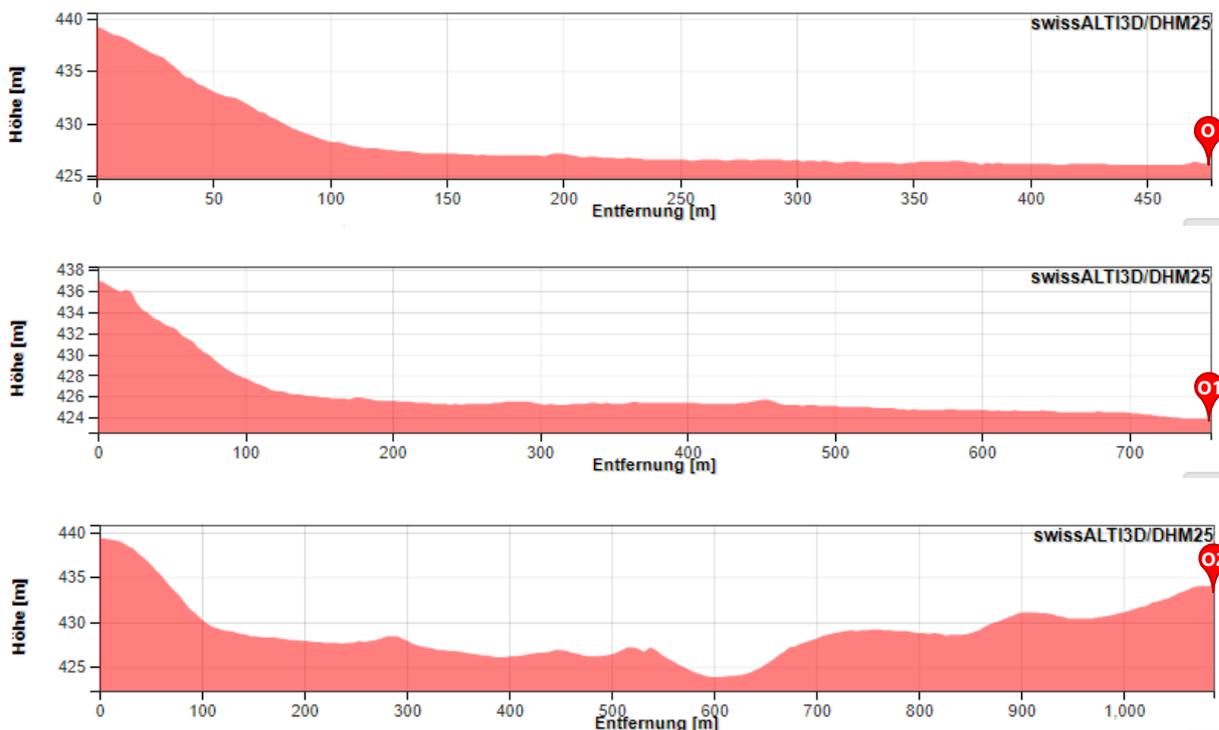


Abbildung 4-2: Geländeschnitte von Messpunkt O, O1 und O2 zum kürzesten Abstand auf die Flugbahn.

Aus der Messkampagne von Landungen auf Piste 14 aus dem Jahr 2018 stehen total 88 Messereignisse von B77W, BCS1 und BCS3 mit FDR-Daten, 1497 Ereignisse von A319, A320 und A320 mit FDR-Daten, und 229 Ereignisse von A333 und A343 ohne FDR-Daten zur Verfügung. Die Unterschiede der Messkampagne zu den Messungen 2013 [6] werden nachfolgend diskutiert, da die Emissionsmodelle der Airbus-Familie auf der Messung 2013 basieren [5].

Bodenbedeckung/Bepflanzung: Während den Monitoring-Messungen 2018 [10] waren die Grasflächen kurz geschnitten. Ackerflächen waren nicht bepflanzt und teilweise kürzlich gepflügt worden. Im Gegensatz hierzu wiesen die Wiesen und Äcker während der Messungen, welche im Rahmen der Messungen 2013 des sonAIR-Hauptprojektes [6] für die Erstellung von Emissionsmodellen für die Airbus-Familie verwendet worden waren [7], etwas mehr, jedoch ebenfalls eher tiefen Bewuchs auf. Im Bereich der Messkette befanden sich auf dem Ausbreitungsweg jedoch Maisfelder mit einer Wuchshöhe von rund zwei Meter. Diese Unterschiede in der Bodenbedeckung zwischen den Messkampagnen könnten sich allenfalls auf die Messergebnisse ausgewirkt haben.

Meteobedingungen: Tabelle 4-1 vergleicht die meteorologischen Bedingungen, welche während der beiden sehr unterschiedlichen Messzeiträume im Sommer 2013 und im Winter 2018 herrschten. So unter-

schieden sich insbesondere die Temperaturen deutlich voneinander. Im Mittel war die Temperatur während der Messkampagne 2013 um 17.5°C höher als während der Messung 2018, und die Temperatur-Wertebereiche überschneiden sich nicht.

Weiter gab es während der Messung 2018 einige Starkwindbedingungen mit gemessenen Windgeschwindigkeiten auf 10 m Höhe von bis zu 9 m/s. Hierbei ist zu beachten, dass diese im Nahbereich bei der Modellerstellung auf Basis der Messungen 2013 nicht aussortiert wurden und somit bei den Messpunkten I bis O vollständig in die Modellierung einfließen. Bei den zusätzlichen Emissionsmodellen aus den Messungen 2018 (B77W, BCS1, BCS3) wurden hingegen nur Ereignisse mit Windgeschwindigkeiten kleiner oder gleich 4 m/s verwendet.

Tabelle 4-1 Meteobedingungen der beiden Messkampagnen 2013 und 2018 der Landungen 14 im Nahbereich. Die Mittelwerte wurden aus allen vermessenen und verwertbaren Flügen gebildet, welche jedoch nicht alle für die Erstellung von Emissionsmodellen verwendet wurden.

	Messung 2013	Messung 2018
Zeitraum	19.08.2013 bis 29.08.2013	29.01.2018 bis 22.02.2018
Vermessene Flüge	1'586 Flüge	1'947 Flüge
Temperatur auf 2m	11.2 bis 26.5°C, Mittel 18.9°C	-5.8 bis +9°C, Mittel +1.4 °C
Rel. Luftfeuchtigkeit	40 bis 92%, Mittel 63%	45 bis 99%, Mittel 78%
Windgeschwindigkeit	0.3 bis 6.3 m/s, Mittel 2.8 m/s	0.2 bis 9.2 m/s, Mittel 2.7 m/s

Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde bei den Vergleichen der Berechnungen mit Messungen in Kapitel 6.1 analog vorgegangen: Für die Emissionsmodelle der Messkampagne 2013 (hier: Airbus-Typen der Swiss) wurden die Ereignisse nicht nach Windgeschwindigkeit gefiltert. Bei den Emissionsmodellen aus der Messkampagne 2018 hingegen (B77W, BCS1, BCS3) werden nur die Ereignisse in den Vergleich Berechnung vs. Messungen einbezogen, welche auch ins Modell flossen. Hierbei sind daher Starkwindsituationen (> 4 m/s) ausgeschlossen.

Basierend auf den Messungen 2018 wurden für die B77W, BCS1 und BCS3 Emissionsmodelle mit und ohne Verwendung von Daten der Messpunkte O1 und O2 erstellt, wobei sich diese im Resultat kaum unterscheiden (Details siehe Kapitel 6.1.1 bzw. 6.1.3). Für die Messpunkte I bis O handelt es sich deshalb beim Vergleich für diese Flugzeugtypen generell und für die Messpunkte O1 und O2 teilweise um eine **Verifizierung**. Bei den Vergleichen für die Airbus-Typen der Swiss, welche basierend auf den Messdaten 2013 erstellt worden waren [7], handelt es sich hingegen um eine **Validierung**. Dies gilt sowohl für sonAIR als auch für FLULA2, da die Quelldaten von FLULA2 (Quelldatensatz RC2019_01) aus den sonAIR-Quelldaten abgeleitet worden waren [11].

4.2. Vergleiche zu streifendem Schalleinfall in Payerne

Im Frühjahr 2019 wurden am Militärflugplatz Payerne Einzelflüge des Typs F/A-18 an elf Mikrofonstandorten (siehe Abbildung 4-3) aufgezeichnet. Fünf Mikrofonstandorte (12, 1, 5, 6 & 11) waren dabei in einer

Linie querab zur Pistenrichtung in Abständen von 100 bis 2'800 m zur Piste angeordnet. Da die Kampf-
 flugzeuge im Normalfall weniger als die halbe Piste zum Beschleunigen und Abheben benötigen, konnten
 mit dieser zentralen Messkette Starts in beide Pistenrichtungen erfasst werden. Die seitliche Anordnung
 der Mikrofone sowie deren Verteilung über einen Hügel (siehe Geländeschnitt in Abbildung 4-4) erlaubten
 die Erfassung von Ereignissen mit sehr flachem Schalleinfall auch in grösseren Distanzen.

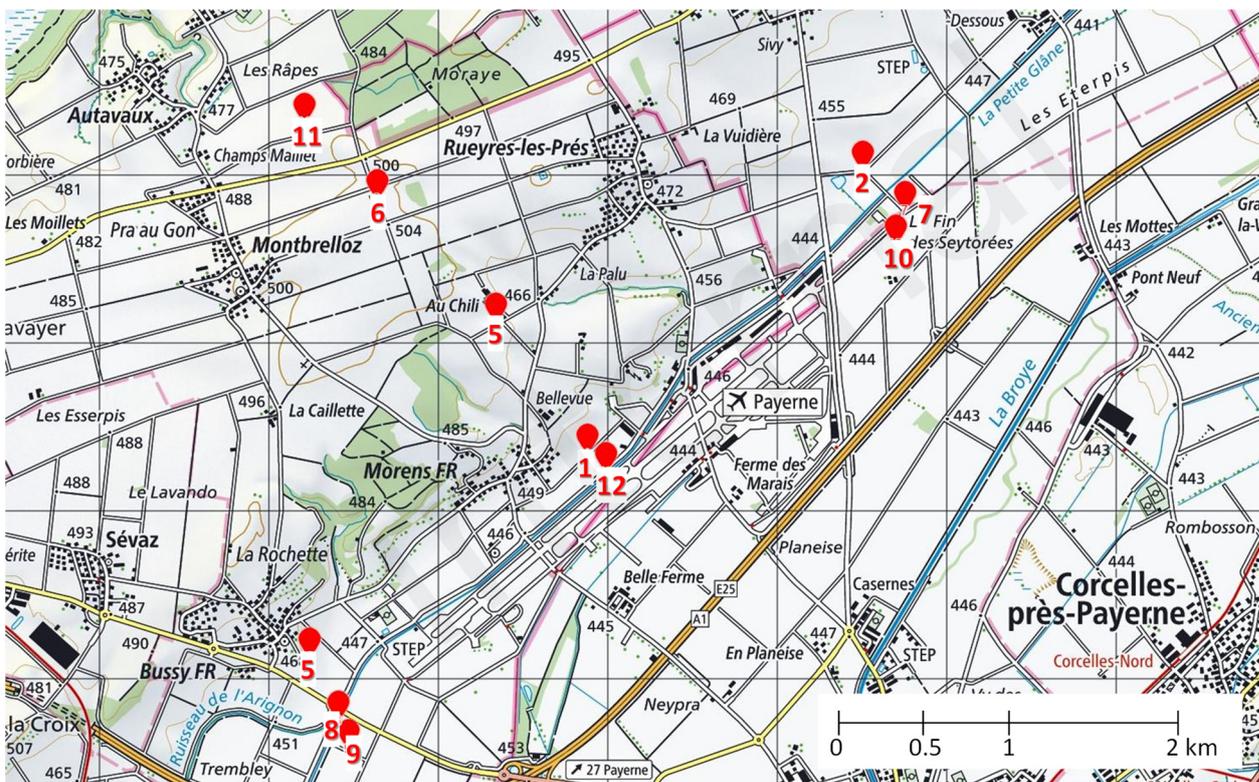


Abbildung 4-3: Position der elf Messpunkte am Militärflugplatz Payerne (Karte © 2019 swisstopo).

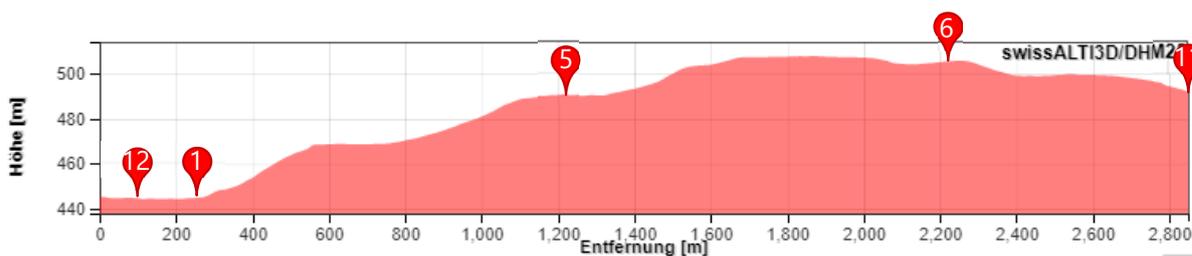


Abbildung 4-4: Geländeschnitt querab zur Piste mit den Messpunkten 12, 1, 5, 6 und 11.

Für den vorliegenden Vergleich wurden zwei Arten von Datensätzen verwendet: F/A-18-Flüge mit Cockpit-
 Daten, wobei diese den FDR-Daten entsprechen, und Flüge ohne Cockpit-Daten. Im Folgenden werden
 beide Kategorien genauer beschrieben.

4.2.1. Flüge mit Cockpit-Daten

Es standen 113 F/A-18-Flüge mit Cockpit-Daten aus vier Testwochen (10.–17. April 2019; 29. April–03. Mai 2019; 20.–24. Mai 2019; 05.–12. Juni 2019) zur Verfügung, welche einzeln unter Verwendung der genauen Positionsdaten mit sonAIR und FLULA2 nachsimuliert wurden. Die Messdaten der Messpunkte 1–2, 4–5, 7–10 und 12 waren dazu verwendet worden, statische sonAIR-Quellenmodelle für drei Flugphasen gemäss SANC-DB [1] (20: *Initial climb standard power*, 29: *Initial climb with afterburner* sowie 60: *Final approach*) zu erstellen. Der Vergleich von Messung und Berechnung an diesen Messpunkten entspricht deshalb für sonAIR lediglich einer **Verifizierung**. Die Messpunkte 6 und 11 in grösseren seitlichen Abständen flossen hingegen nicht in die Modellerstellung mit ein. Der Vergleich mit diesen zwei Punkten stellt daher eine **Validierung** von sonAIR dar. Dabei ist zu beachten, dass diese Messungen zwar grundsätzlich unabhängig von der Modellerstellung sind, aber natürlich unter denselben Meteobedingungen aufgezeichnet wurden wie die Modell-Messungen. Für FLULA2, welches F/A-18-Quellenmodelle der Messungen 1998 in Turtmann verwendet (vgl. Empa-Bericht Nr. 840'141/4) stellen die Vergleiche hingegen eine **Validierung** dar.

4.2.2. Flüge ohne Cockpit-Daten

Neben den oben beschriebenen Daten liegen Messdaten von 264 weiteren F/A-18-Flügen ohne Cockpit-Daten vor, welche über den gesamten Zeitraum vom 8. April bis 21. Juni 2019 aufgezeichnet worden waren. Dabei handelt es sich ausschliesslich um Starts, da nur diese in diese Zusatzanalyse aufgenommen wurden. Diese Ereignisse werden zur Erweiterung der Datenbasis hinzugenommen.

Da die Messungen ausserhalb der vier Testwochen unbeaufsichtigt liefen, war keine vollständige Liste mit Startzeitpunkten und Flugzeugtypen vorhanden. Daher wurden die einzelnen Flugereignisse in den kontinuierlichen Audioaufzeichnungen mittels geeigneten Pegelschwellen am Referenzmesspunkt 12 in der Pistenmitte identifiziert und ausgeschnitten. Diese Methode erlaubte eine zuverlässige Unterscheidung zwischen Strahl- und Propellerflugzeugen. Eine detailliertere Unterscheidung innerhalb der Kategorie Strahlflugzeuge (F-5 Tiger vs. F/A-18, Starts mit vs. ohne Nachbrenner) war jedoch nur beschränkt möglich. Gemäss den Beobachtungen während der vier Testwochen wurden in Payerne ca. 93% aller Strahlflugzeug-Starts mit der F/A-18 durchgeführt, wobei ca. 5% der Starts mit Nachbrenner erfolgten. Nimmt man dieselben Verhältnisse für den gesamten Messzeitraum an, kann davon ausgegangen werden, dass es sich bei den Messdaten ohne Cockpit-Daten zu ungefähr 88% um F/A-18-Starts ohne Nachbrenner handelt. Mehrfachereignisse (mehrere Starts sehr kurz hintereinander) wurden ausgeschlossen, sofern bei Messpunkt 12 deutlich trennbare akustische Pegelmaxima erkennbar waren. Parallelstarts mit gleichzeitigem Passieren von Messpunkt 12 konnten hingegen nicht erkannt und ausgeschlossen werden. Diese kommen aber erfahrungsgemäss eher selten vor (ca. 1% aller Starts).

Es wurden nur Messungen der Starts an der Messkette in der Pistenmitte (Messpunkte 12, 1, 5, 6 und 11) ausgewertet. Die Simulation erfolgte in sonAIR und FLULA2 mittels einer repräsentativen Flugbahn, welche aus den Flügen mit Cockpit-Daten pro Pistenrichtung gemittelt wurde (Details vgl. Kap. 5.3.2). Da die erfassten Ereignisse nicht für die Modellerstellung verwendet worden waren, stellt der Vergleich der mit Messungen ohne Cockpitdaten eine **Validierung** von sonAIR dar, wobei die Daten auch unter anderen

Meteobedingungen aufgezeichnet worden waren. Für FLULA2 stellen die Vergleiche ebenfalls eine **Validierung** dar (unabhängige Quelldaten, vgl. Kap. 4.2.1).

4.3. Bewilligungen

Die Bewilligung zur Verwendung der Daten und Darstellung der Resultate für die Flughäfen Zürich und Genf (ursprünglich bereitgestellt für [10]) sowie für den Militärflugplatz Payerne in aggregierter Form liegen der Empa vor:

- FDR-Daten für Zürich: Datenbewilligung der SWISS vom 07.10.2020 (Patrick Aschwanden, SWISS, E-Mail "*RE: Vergleich von sonAIR mit FLULA2 und AEDT*").
- Cockpitdaten, akustische Messungen Empa der F/A-18:
 - Datenbewilligung der Luftwaffe zur Darstellung der Daten mit Klassifizierung INTERN: Datenbewilligung der Luftwaffe vom 03.11.2020 (Bernhard Berset, armasuisse, E-Mail "*AW: Zulassung sonAIR: Datenbewilligung PAY für Projekt CompAIR*") und des GS-VBS vom 04.11.2020 (Bruno Locher, GS-VBS, "*AW: Zulassung sonAIR: Datenbewilligung PAY für Projekt CompAIR*").
 - Datenbewilligung der Luftwaffe zur Darstellung der Daten ohne Klassifizierung INTERN: Datenbewilligung des GS VBS zur Dokumentation und Publikation (Bruno Locher per E-Mail vom 14.12.2020, "Freigabe Projekt CompAIR: Nachfrage & Berichtentwurf")

5. Methodik, Arbeitsschritte

5.1. Vorbereitungsarbeiten, Datengrundlagen

Die Vorbereitungsarbeiten umfassen die Zusammenstellung (i) der vollständigen Inputdatensätze des Flughafens Zürich und des Flugplatzes Payerne für die Berechnungen mit sonAIR und FLULA2, namentlich Bewegungslisten, Flugbahndaten und Empfängerpunkte (Messstandorte), sowie (ii) der bereits verfügbaren, ausserhalb von CompAIR erarbeiteten Berechnungsergebnisse von sonAIR (Berechnungen für Zürich Landungen 14 an den Messpunkten I-O, O1, O2, sowie für Payerne, namentlich der Flüge mit Cockpitdaten an den Messpunkten 1–5, 7–10 und 12).

Die wichtigsten Daten, Speicherorte und Skripte sind im Anhang (Kap. 12.4) aufgeführt.

5.2. Berechnungen sonAIR für Zürich

Die Simulationen mit sonAIR wurden im Rahmen des sonAIR Monitoring-Projektes für die FDR-Typen von sonAIR, namentlich für die A319, A320, A321, A333, A343, B77W, BCS1 und BCS3 der Swiss durchgeführt (Details siehe [10]). Dabei wurden die 3D-Modelle verwendet, und zwar die sonAIR Modellvarianten V1.1-0011 (Modelle aus der Messkampagne 2013/2014), V1.1-0017 (Modelle aus der Messkampagne 2018, Berechnung der $L_{AE,t10}$, $L_{A,max}$), bzw. 1.1-0018 (Modelle aus der Messkampagne 2018, Berechnung der Pegelzeitverläufe) (vgl. Anhang, Kap. 12.1). Als Flugbahndaten wurden die von der Swiss gelieferten Cockpit-Daten verwendet, nach Überprüfung auf Inkonsistenzen, insbesondere im räumlichen Verlauf der Trajektorien. Ereignisse mit fehlerhaften Daten wurden von der Analyse ausgeschlossen. Die Flugparameter der berücksichtigten Ereignisse wurden von einer zeitlichen Auflösung von 2 Sekunden auf 0.5 Sekunden interpoliert, um die Auflösung des Pegel-Zeit-Verlaufs während der Simulation zu verbessern.

Die Ausbreitungsberechnung zur Bestimmung der Schalldämpfung in der Atmosphäre erfolgte mit sonX V2.8.8 mit den Modi BASIC, METEO und FOREST. Als Meteorinput (meteorologische Profile) wurden COSMO1-Wetterprofile der MeteoSwiss verwendet, welche in einer räumlichen Auflösung von 1 km × 1 km vorliegen. Für die Messkampagne wurden die gemittelten Profile einer einzelnen 1 km²-Kachel rund um einen Referenzmesspunkt verwendet. Als Referenzmesspunkt für die Nahbereichsstationen wurde dabei der Messpunkt I gewählt. Als Geländemodell wurde das DTM-Gelände mit 2 m × 2 m Auflösung verwendet, als Bodenbedeckungsdaten wurden aktuelle Bodennutzungsdaten der amtlichen Vermessung eingesetzt: DM01AV des Kanton Zürichs vom 7.12.2017 und Datensatznummer 2324 des Kantons Aargau vom 17.10.2017. Da sich das Messgebiet bis in den Kanton Aargau erstreckte, wurden die amtlichen Vermessungsdaten zu einem grossen Layer zusammengeführt.

Neben der Ausgabe von individuellen $L_{AE,t10}$ (und $L_{AS,max}$) pro simuliertem Einzelflug wurden Pegelzeitverläufe separat ausgeschrieben, um exemplarisch die gemessenen Pegelzeitverläufe in Situationen mit streifendem Schalleinfall mit simulierten Pegelzeitverläufen zu vergleichen.

Die Daten ($L_{AE,t10}$ und $L_{AS,max}$) werden in tabellarischer Form zusammengestellt und statistisch mit den Messungen verglichen. Der Vergleich der Messungen und Berechnungen beruht auf dem Datensatz 2018 der Monitoring-Messungen [10].

5.3. Berechnungen sonAIR für Payerne

5.3.1. Flüge mit Cockpit-Daten

Die 113 Flüge mit Cockpit-Daten wurden in sonAIR anhand der realen Trajektorien einzeln simuliert und an den 11 Messpositionen ausgewertet. Es wurden Starts und Landungen simuliert. Das verwendete F-A/18-Modell existiert nur prozedural (vgl. Kap.4.2.1), d.h. es wurde eine konstante, dreidimensionale Richtwirkung für die drei Phasen *Initial Climb Standard Power*, *Initial Climb with Afterburner* und *Approach* angewendet. Dadurch ist insbesondere bei den Landungen eine erhöhte Unsicherheit zu erwarten, da die teilweise starken Schubfluktuationen während dem Endanflug modellseitig nicht reproduziert werden können. Als Kenngrößen wurden jeweils der L_{AE} , der $L_{AE,t10}$ sowie der $L_{AS,max}$ berechnet, wobei der Fokus der hier dargestellten Resultate auf dem $L_{AE,t10}$ liegt. Zusätzlich wurden an jedem Messpunkt pro Flug ein Pegelzeitverlauf erzeugt.

Die Simulation erfolgte im METEO-Modus. Dazu wurde jedem Ereignis die zeitlich nächstgelegene Aufzeichnung der MeteoSchweiz Wetterstation in Payerne zugewiesen und aus deren Werte die atmosphärische Stabilitätsklasse bestimmt. Das zur entsprechenden Klasse in sonX hinterlegte Meteoprofil wurde danach auf die gemessene Bodentemperatur angepasst und als Input für die Dämpfungsberechnung verwendet.

Die Bodenbedeckung wurde dem Datensatz swissTLM3D entnommen. Änderungen der Bodenbedeckungen über den Messzeitraum (z.B. starkes Wachstum des Raps bei Messpunkt 1) wurden nicht berücksichtigt. Gebäude wurden in der Form eines Vektor-Datensatzes aus swissBUILDINGS3D berücksichtigt.

Die Daten ($L_{AE,t10}$ und $L_{AS,max}$) werden analog zu den Messungen in Zürich (Kap. 5.2) in tabellarischer Form zusammengestellt und statistisch mit den Messungen verglichen. Dabei bleibt zu beachten, dass es sich beim Vergleich der Messpunkte 1, 2, 4, 5, 7, 8, 9, 10 und 12 um eine **Verifizierung** handelt, bei den Punkten 6 und 11 hingegen um eine **Validierung** (vgl. Kap. 4.2.1)

5.3.2. Flüge ohne Cockpit-Daten

Bei den Flügen ohne Cockpit-Daten wurden nur die Starts nachsimuliert. Die verwendete Flugbahn besteht aus einem aus den 113 Flügen mit Cockpit-Daten gemittelten Steigprofil, welches auf einen künstlich erzeugten Geradeausflug gefaltet wurde. Das gemittelte Profil wurde dabei pro Pistenrichtung individuell bestimmt. Die Simulation wurde an den fünf Messstandorten 1, 5, 6, 11 und 12 ausgewertet. Somit gibt es für jeden Messpunkt nur zwei simulierte Werte (einen pro Pistenrichtung), mit welchem die Messwerte verglichen werden.

Die Simulation erfolgte im BASIC-Modus mit einer homogenen Standardatmosphäre ($T = 14^{\circ}\text{C}$, $p = 1000$ mbar, rel. Feuchte = 60%). Für Bodenbedeckung und Gebäude wurden dieselben Inputdaten verwendet wie für die Flüge mit Cockpit-Daten (vgl. Kap. 5.3.1).

Neben dem Vergleich zwischen Simulationen und Messungen über alle Flüge ohne Cockpit-Daten (analog zu Kap. 5.3.1) wurden zusätzliche, detailliertere Auswertungen durchgeführt, um mögliche Meteeinflüsse aufzudecken. Dazu wurden die Messdaten gemäss den zugeordneten Wetterdaten der MeteoSchweiz-Station Payerne nach Windrichtung und atmosphärischer Stabilität klassifiziert. Danach wurde der Vergleich mit den Simulationen für jede individuelle Sub-Klasse wiederholt.

Die Daten ($L_{AE,t10}$ und $L_{AS,max}$) werden analog zu den mit Cockpit-Daten (Kap. 5.3.1) in tabellarischer Form zusammengestellt und statistisch mit den Messungen verglichen.

5.4. Berechnungen FLULA2 für Zürich

Die Arbeiten werden analog zu denjenigen für die Vergleiche von Grossflugzeugen (vgl. Teilbericht 1) durchgeführt: Es werden die sonAIR-Flugbahndaten in Typen-spezifische Flugbahnen umgewandelt (sog. TC-Files), dann erfolgen Simulationen unter Verwendung des FLULA2-Quellendatensatz: RC2019_01, separat einmal mit und einmal ohne Bodenzusatzdämpfung, mit Ausgabe von je einem L_{AE} , $L_{AE,t10}$ und L_{Amax} pro simuliertem Einzelflug. Zudem wurden exemplarische Pegelzeitverläufe, welche bereits mit sonAIR simuliert und mit Messungen verglichen wurden, separat ausgeschrieben (mit und ohne Bodenzusatzdämpfung), zusammengestellt und mit Messungen verglichen.

FLULA2 verwendet für die Simulation standardmässig die ISA-Standardatmosphäre ($T = 15^{\circ}\text{C}$, $p = 1013$ mbar, rel. Feuchte = 70%) sowie als Untergrundtyp Grasland. Als Gelände wurde der DHM25-Datensatz verwendet; Gebäude können in FLULA2 nicht berücksichtigt werden.

Die Daten (L_{AE} , $L_{AE,t10}$, L_{Amax}) werden in tabellarischer Form zusammengestellt und statistisch mit den Messungen verglichen, separat einmal mit und einmal ohne Bodenzusatzdämpfung. Dabei handelt es sich wie bei sonAIR bei den Vergleichen für die B77W, BCS1 und BCS3 um eine **Verifizierung**, für Airbus-Typen der Swiss hingegen um eine **Validierung** (vgl. Kap. 4.1).

Bei den Auswertungen liegt das Augenmerk auf Vergleichen der Resultate von FLULA2 und sonAIR zur Prüfung der Bodenzusatzdämpfung als pauschale Korrektur für Ausbreitungsphänomene über grosse Distanzen und/oder streifenden Schalleifall in *Best Practice* Modellen: Führt diese zu einer verbesserten Übereinstimmung der Berechnungen mit Messungen, und wie sehen diesbezüglich die Resultate von sonAIR im Vergleich aus?

5.5. Berechnungen FLULA2 für Payerne

5.5.1. Flüge mit Cockpit-Daten

Analog zu den sonAIR-Simulationen wurden auch in FLULA2 die 113 Flüge mit Cockpit-Daten anhand der realen Trajektorien einzeln simuliert und an den 11 Messpositionen ausgewertet. Die Umwandlung der sonAIR-Flugbahn Daten in FLULA2 Typen-spezifische Flugbahnen wurden ebenfalls analog zu denjenigen für die Vergleiche von Grossflugzeugen (vgl. Teilbericht 1) durchgeführt.

Es wurden Starts und Landungen simuliert, mit Ausgabe von je einem L_{AE} , $L_{AE,t10}$ und L_{Amax} pro simuliertem Einzelflug, wobei der Quellendatensatz RC2019_01 verwendet wurde (F/A-18-Quellenmodelle der Messungen 1998 in Turtmann, vgl. Empa-Bericht Nr. 840'141/4). Durchgeführt wurden die Simulationen wie für Zürich einmal mit und einmal ohne Bodenzusatzdämpfung. Zusätzlich wurden für ausgewählte Flüge und Messpunkte Pegelzeitverläufe (mit und ohne Bodenzusatzdämpfung) in FLULA2 erstellt, welche mit den simulierten Pegelzeitverläufen von sonAIR sowie mit den Messungen verglichen wurden.

FLULA2 verwendet für die Simulation standardmässig die ISA-Standardatmosphäre ($T = 15^{\circ}\text{C}$, $p = 1013$ mbar, rel. Feuchte = 70%) sowie als Untergrundtyp Grasland. Als Gelände wurde derselbe Datensatz wie bei sonAIR (siehe Kap. 5.3.1) benutzt. Gebäude können in FLULA2 nicht berücksichtigt werden.

Die Daten (L_{AE} , $L_{AE,t10}$, $L_{AS,max}$) wurden in tabellarischer Form zusammengestellt und statistisch mit den Messungen verglichen, separat einmal mit und einmal ohne Bodenzusatzdämpfung.

5.5.2. Flüge ohne Cockpit-Daten

Bei den Flügen ohne Cockpit-Daten wurden analog zu Kap. 5.3.2 nur die Starts nachsimuliert, wobei dieselben zwei Flugpfade mit gemittelten Steigprofil pro Pistenrichtung verwendet wurden. Die Simulationen wurden dabei wie die Berechnungen mit Cockpit-Daten, mit denselben Recheneinstellungen, durchgeführt (vgl. Kap. 5.5.1) und an den fünf Messstandorten 1, 5, 6, 11 und 12 ausgewertet.

6. Resultate

6.1. Streifender Schalleinfall in Zürich

Nachfolgend werden für sonAIR sowie FLULA2 Berechnungen mit und ohne Bodenzusatzdämpfung Scatter- und Boxplots exemplarisch für die FDR-Typen A320 (ein wichtiger Vertreter der auf der Messkampagne 2013 basierenden Typen) und B77W (als Vertreter der auf der Messkampagne 2018 basierenden Typen) dargestellt. Die Scatter- und Boxplots der übrigen Typen (Messungen 2013: A319, A321, A333, A343; Messungen 2018: BCS1, BCS3) finden sich im Anhang (Kap. 12.2). Ein integraler Vergleich basierend auf den Scatter- und Boxplots aggregiert über alle Typen findet sich in Kap. 6.1.6.

6.1.1. Berechnung sonAIR: Ereignispegel

Abbildung 6-1 zeigt die Scatter- und Boxplots für den $L_{AE,t10}$ der Ereignisse des A320.

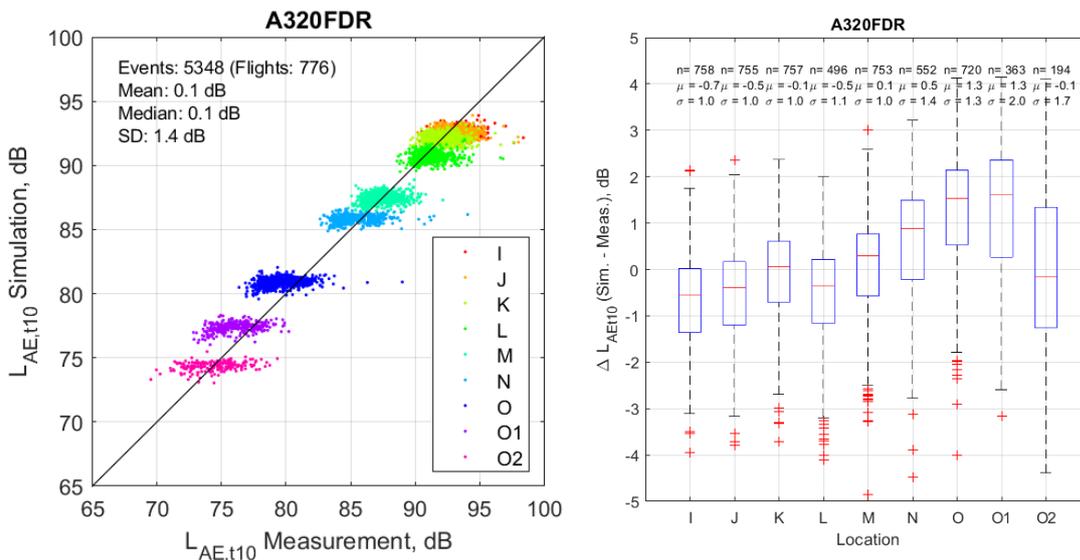


Abbildung 6-1: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (sonAIR) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts) für den A320 am Flughafen Zürich, gruppiert nach den Messpunkten I bis O, O1 und O2.

Im Scatterplot (Abbildung 6-1 links) zeigt sich generell ein relativ grosser Pegel-Streubereich pro Messpunkt von 5 dB unterhalb des Anflugs (Messpunkte I-L) bis hin zu etwa 8 dB für die seitlichen Messpunkte O-O2. Bei letzteren spielt wahrscheinlich sowohl eine erhöhte Unsicherheit aufgrund der grösseren Ausbreitungsdistanz als auch der Einfallswinkel unter 15° eine Rolle.

Der Boxplot (rechts) zeigt dennoch auf, dass der Grossteil der bis zu 750 Ereignissen pro Messstandort an den Messpunkten I bis M eng um den Mittelwert streuen, mit Standardabweichungen von 1 bis 1.2 dB. Dabei zeigt sich ein Trend zunehmender positiver Differenzen zwischen Simulation und Messung von I bis O und O1, welcher jedoch bei O2 nicht auszumachen ist. Während der Mittelwert der Messpunkte I bis M

nahe 0 dB liegt, weicht er für die Messpunkte N, O und O1 um bis zu +1.3 dB ab, mit Standardabweichungen von bis zu 2.0 dB. Dieses Verhalten könnte ein Hinweis auf eine Überschätzung des simulierten Pegels aufgrund fehlender / zu wenig berücksichtigter Effekte beim streifenden Schalleinfall sein, welche bei anderen Modellen durch die Bodenzusatzdämpfung abgedeckt werden. Auffällig ist allerdings, dass der Messpunkt O2 sogar leicht unterschätzt wird und damit nicht zum typischen Verhalten der seitlichen Zusatzdämpfung passt, da der Einfallswinkel von O zu O2 kontinuierlich abnimmt (von 14° bei O bis 5° bei O2). Während bei der A320-Familie (A319, A320, A321) dieser Trend über N – O – O1 – O2 ausgeprägt zu beobachten ist, ist bei anderen Typen (A333, A343) die Streuung sowie der Trend über die Messpunkte deutlich geringer (vgl. Anhang, Kap. 12.2).

Nachfolgende Abbildung 6-2 zeigt eine Gegenüberstellung von Messung und Berechnung für den B77W **ohne Verwendung der Messungen O1/O2** bei der Modellerstellung; die Abbildungen für die BCS1 und BCS3 finden sich im Anhang (Kap. 12.2). Die entsprechenden Darstellungen für dieselben Typen mit O1/O2 bei der Modellerstellung finden sich im Anhang (Kap. 12.3). Der Ein-/Ausschluss der Messungen bei O1/O2 bei der Modellerstellung führt zu keinen nennenswerten Unterschieden in den Resultaten. Bei den auf den Messungen 2018 beruhenden Typen ist kein genereller Trend über die Messpunkte zu sehen; namentlich bei den Messpunkten O1 und O2, welche bei der Modellerstellung nicht verwendet wurden, bildet sonAIR die Situationen mit streifendem Schalleinfall sehr gut ab.

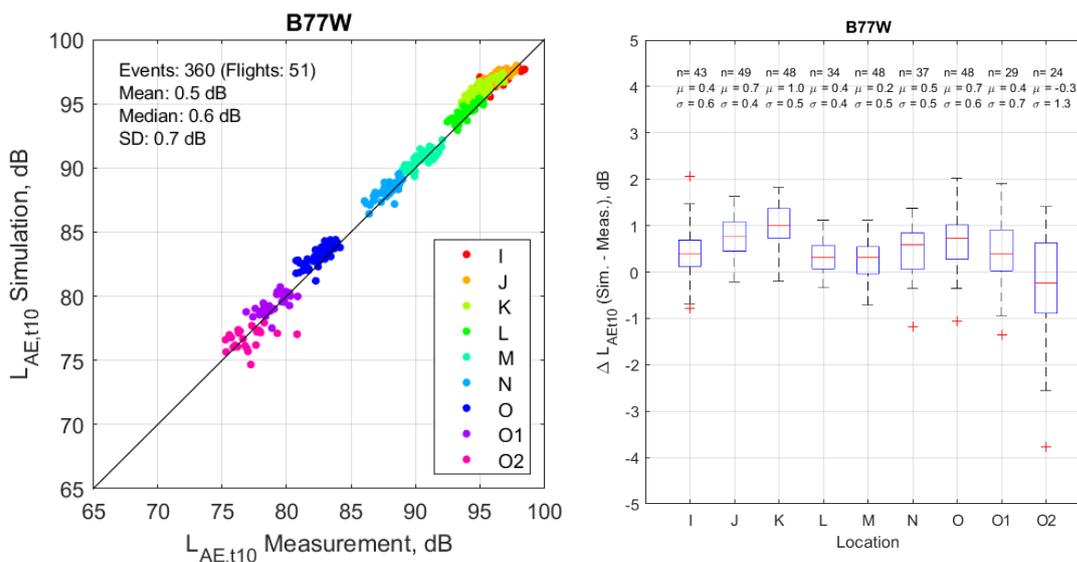


Abbildung 6-2: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (sonAIR) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts) für den B77W am Flughafen Zürich, gruppiert nach den Messpunkten I bis O, O1 und O2.

Anmerkung: Ein Hinweis auf die relativ grossen Pegel-Streubereiche der A320-Familie wurde im LNAS Projekt (Empa-Nr. 5211.01542.100.01) aufgedeckt, welche für Flugzeugtypen mit FDR-Daten nochmals genauer untersucht werden sollte (evtl. möglich im Rahmen des Projekts DYN-CAT [2]). Da die Modelle

vereinfacht auf der Geschwindigkeit relativ zum Boden (*Ground Speed*) basieren, wird je nach Windsituation die wahre Fluggeschwindigkeit (*True Air Speed* TAS) unterschätzt (im Fall von Gegenwind) bzw. überschätzt (im Fall von Rückenwind). Da die Geschwindigkeit relativ zum Boden direkt aus Radardaten abgeleitet werden kann, stellt sie jedoch eine pragmatische Grösse für Jahresbelastungen und auch für die Erzeugung von Emissionsmodellen ohne FDR-Daten dar. Für Flugzeuge mit FDR-Daten wäre jedoch ein verbesserter Modellansatz vorstellbar, der anstatt der Geschwindigkeit relativ zum Boden die TAS zur Berechnung der Machzahl als Modellparameter verwendet. Diese Verbesserung ist aber nicht Gegenstand des Projekts CompAIR.

Im Rahmen von CompAIR wurde weiterhin untersucht, ob die Streuung durch Bildung von Schattenzonen entstanden sein kann. So zeigt Abbildung 6-3 exemplarisch für den Messpunkt O eine Klassierung nach Windrichtung. Es kann kein Trend für eine Über- oder Unterschätzung je nach Windrichtung gefunden werden. Lediglich bei Windrichtung 158° stimmt der Mittelwert besser mit der Messung überein, jedoch wäre eine Schattenzone bei einer Windrichtung von etwa 225° zu erwarten (Wind entgegen der Schallausbreitungsrichtung von Quelle zu Empfänger). Auch die Pegelvariation ist nicht deutlich unterschiedlich zu anderen Windrichtungen. Ein direkter Zusammenhang zur Windrichtung wurde daher trotz hohen Windgeschwindigkeiten im Datensatz nicht beobachtet.

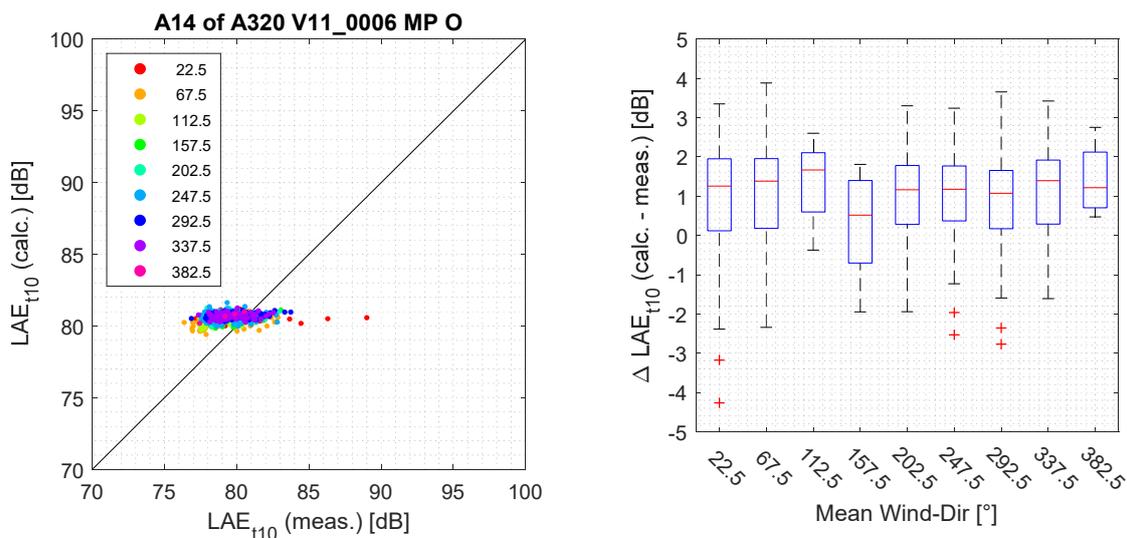


Abbildung 6-3: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (sonAIR) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung am Flughafen Zürich ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts): Klassierung des Messpunktes O nach Windrichtung für den A320.

6.1.2. Berechnung sonAIR: Pegelzeitverläufe

Für ein genaueres Verständnis der Messungen an den Messpunkten O bis O2 werden im Folgenden exemplarisch einzelne Pegel-Zeit-Verläufe untersucht (Abbildung 6-4 bis Abbildung 6-7).

Oft zeigen diese eine Überschätzung des Pegels im Bereich des Maximums (Abbildung 6-4). Im ersten Beispiel (Abbildung 6-4 oben links) stimmen dabei die ansteigende und abfallende Flanke sehr gut mit der Messung überein, der wichtigste Pegelbereich wird jedoch um 2 dB unterschätzt. Im zweiten Beispiel

(Abbildung 6-4 oben rechts¹) wird der Maximalpegel sogar um 3 dB überschätzt. Teilweise wurden auch grössere Überschätzungen festgestellt. Die Messungen zeigten oft nicht den erwarteten "typischen" Pegel-Zeit-Verlauf mehr, sondern ein Plateau mit konstantem Pegel (erste drei Beispiele in Abbildung 6-4). Dieses Plateau kann jedoch nicht mit der Bodenzusatzdämpfungs-Korrektur von FLULA2 verbessert werden, da genau in diesem Bereich der Winkel auf etwa 15° ansteigt und somit die Korrektur gegen 0 geht (Abbildung 6-5). Zudem tritt dieses Plateau auch nicht immer auf (siehe Abbildung 6-4 unten rechts). Folglich kann eine Abschirmung in diesem Bereich durch den Flügel, also ein Richtwirkungseffekt (Installationseffekt), ausgeschlossen werden. Andernfalls müsste das Plateau konsistent für alle Überflüge und auch an den weiter entfernten Messpunkten O1/O2 auftreten. Daraus lässt sich schliessen, dass es sich wohl weniger um eine Eigenschaft der Quelle, sondern vielmehr um ein Ausbreitungsphänomen (Bodeneigenschaften und/oder meteorologischen Bedingungen) handeln könnte (s.u.).

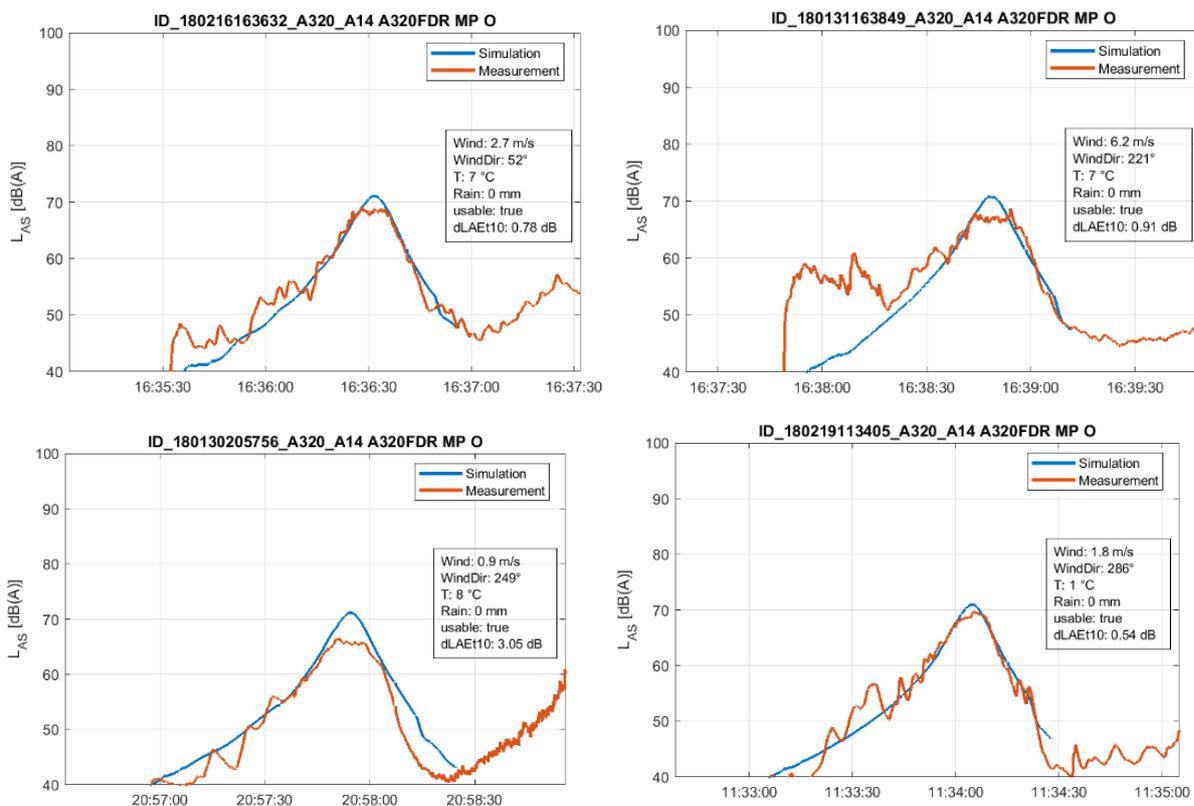


Abbildung 6-4: Exemplarische Pegelzeitverläufe am Messpunkt O für den A320.

¹ Die Messung wird zu Beginn von einem Störgeräusch (Unterhaltung Spaziergänger) überlagert.

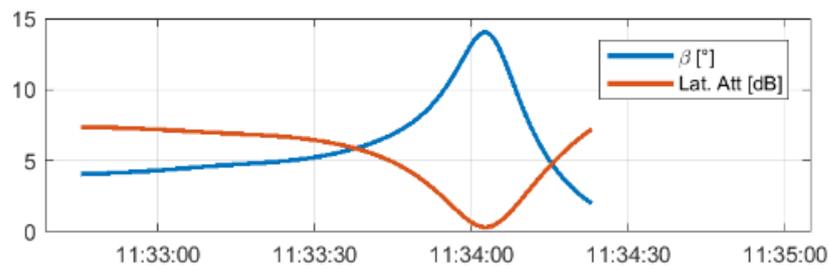


Abbildung 6-5: Verlauf des Einfallswinkels (leichte Abweichung je nach Flughöhe) und der empirischen Bodenzusatzdämpfung gemäss FLULA2 für Messpunkt O.

Abbildung 6-6 zeigt für zwei Ereignisse die Pegelzeitverläufe an den Messpunkten O, O1 und O2. Die in Abbildung 6-4 diskutierte Plateaubildung ist nur bei Messpunkt O zu sehen. Die Pegelverläufe stimmen bei O1 und O2 besser überein, wobei in den Messungen zunehmend Pegelfluktuationen festzustellen sind, welche vermutlich auf Turbulenzeinflüsse zurückzuführen sind und namentlich den Maximalpegel stark beeinflussen.

Die hohen Korrekturen der Bodenzusatzdämpfung von FLULA von bis zu -8 dB, bei ansteigenden und abfallenden Flanken mit kleinen Einfallswinkel unter 5° (Abbildung 6-5) (vgl. Kap. 6.1.5), können sowohl bei O als auch bei O1 und O2 messtechnisch nicht reproduziert werden. Eine Berücksichtigung einer entsprechenden Korrektur würde die Übereinstimmung in den Pegelverläufen klar verschlechtern.

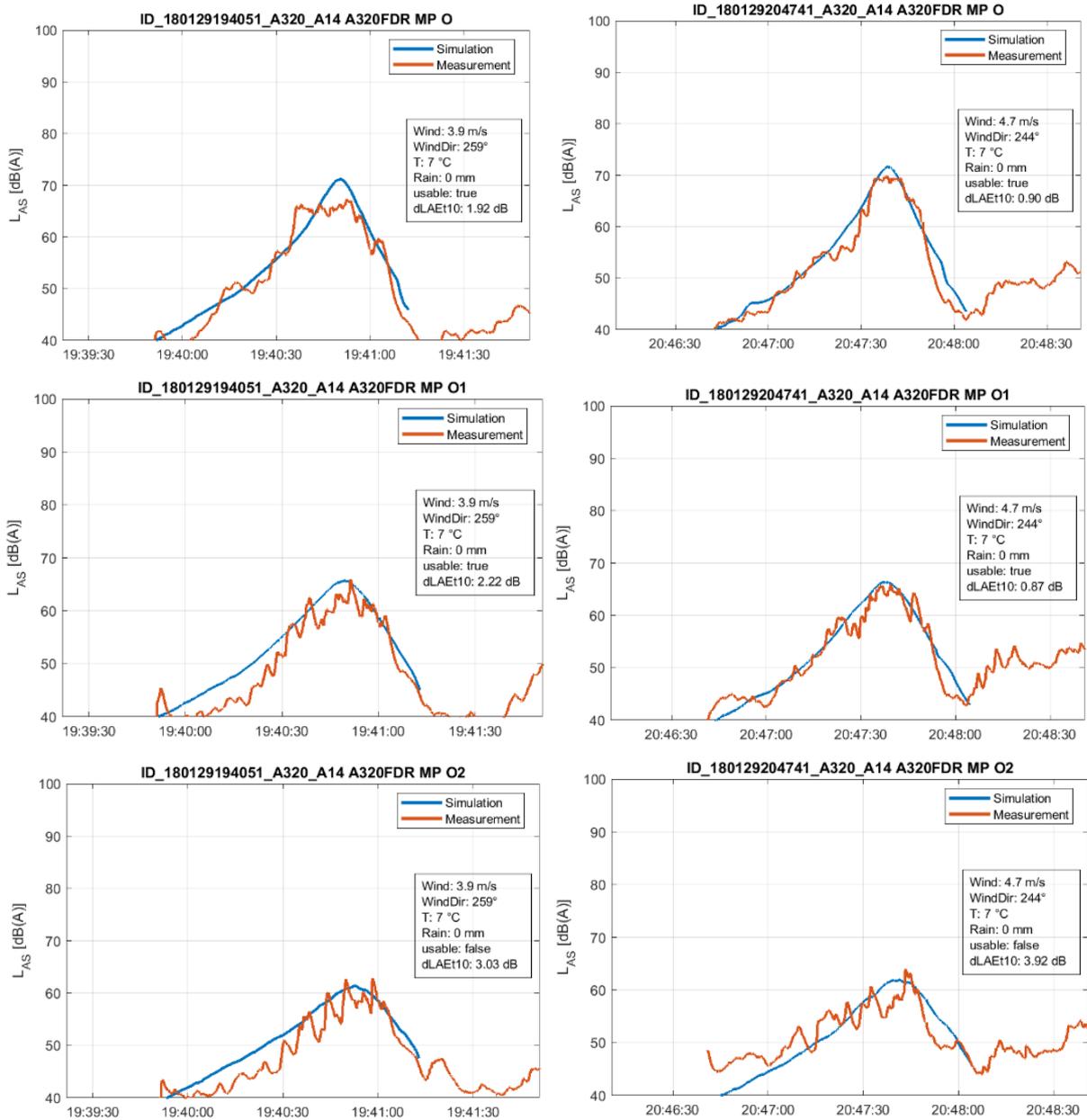


Abbildung 6-6: Zwei exemplarische Pegelzeitverläufe (links und rechts) für den A320 für O (oben), O1, (Mitte) und O2 (unten) ohne Störgeräusche, mit zunehmend hoher Turbulenz $O \rightarrow O1 \rightarrow O2$ (d.h. Ausbreitungseffekt).

Abbildung 6-7 zeigt exemplarische Pegel-Zeitverläufe der B77W als Vertreter der Messungen 2018 (Modell ohne Verwendung der Messpunkte O1, O2 in der Modellbildung). Ähnliche Verläufe ergeben sich auch für die BCS1 und BCS3: Es ist kein Typen-abhängiges Verhalten zu beobachten. Interessanterweise stimmen hier, d.h. für die Modelle aus den Messungen 2018, die berechneten Pegelzeitverläufe besser mit den Mes-

sungen überein als für die auf der Messkampagne 2013/2014 beruhenden Typen (s.o.); eine Plateaubildung ist kaum beobachtbar. Eine Erklärung hierfür steht aus; die Bodenbedeckung bzw. Bepflanzung (vgl. Kap. 4.1) scheint diese Unterschiede kaum erklären zu können.

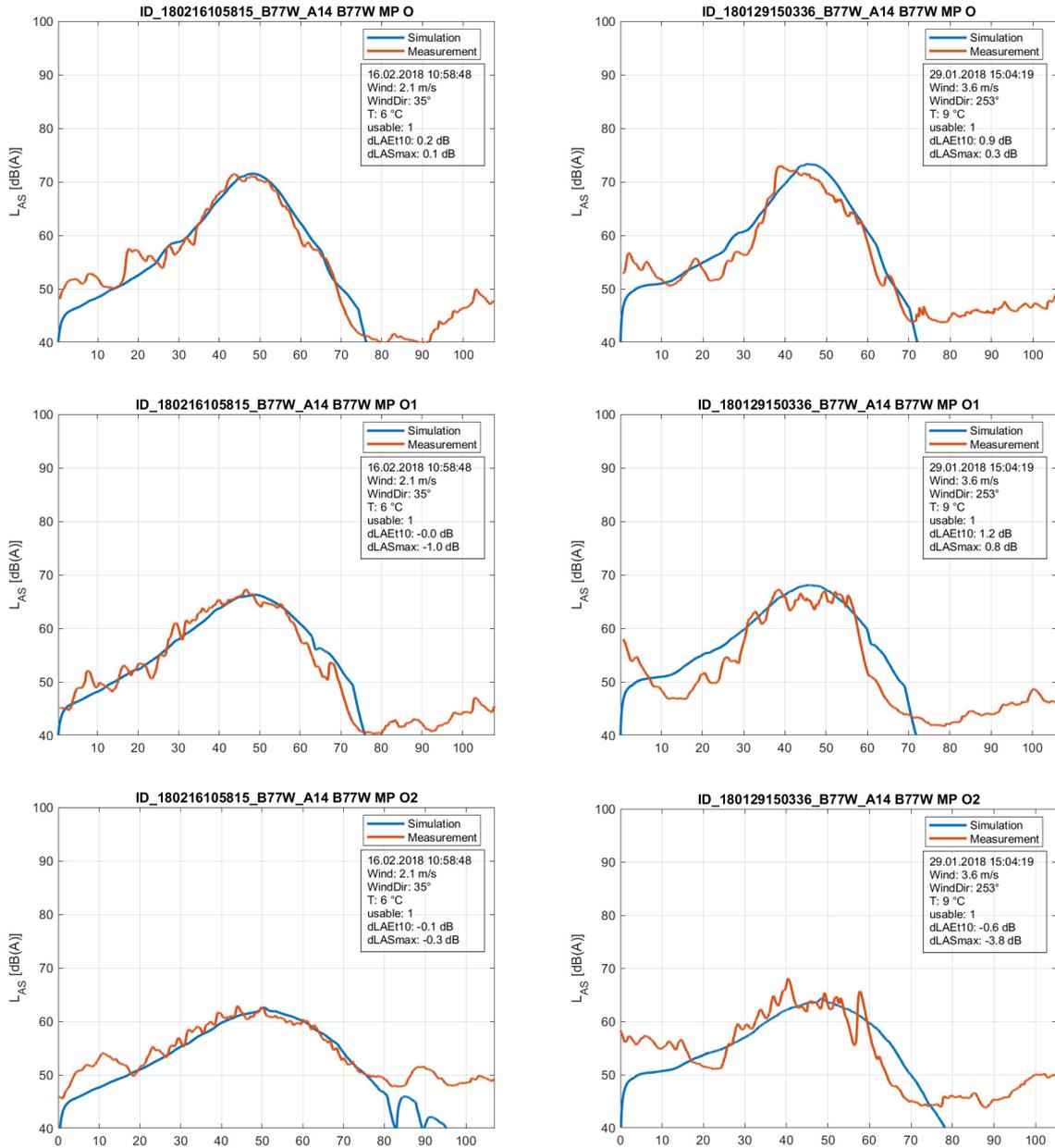


Abbildung 6-7: Zwei exemplarische Ereignisse (links ein Beispiel mit guter Übereinstimmung, rechts eines mit hoher Turbulenz und schlechter Übereinstimmung) für den B77W für O (oben), O1, (Mitte) und O2 (unten) ohne Störgeräusche, zunehmend hohe Turbulenz O → O1 → O2 (d.h. Ausbreitungseffekt).

6.1.3. sonAIR: Beitrag der seitlichen Richtwirkung

Abbildung 6-8 zeigt die Richtwirkung verschiedener sonAIR-Modelle für den *Final Approach*. Es zeigt sich deutlich, dass die seitliche Richtwirkung der auf der Messkampagne 2018 beruhenden Emissionsmodelle BCS1 und B77W [10] bei kleinen Einfallswinkeln (grössere laterale Winkel) steiler abfällt als diejenigen der auf der Messkampagne 2013/2014 beruhenden Airbus-Modelle (Abbildung 6-8): Im Vergleich zu den ursprünglichen sonAIR-Modellen ist der Pegel bei 90° seitlichem Einfalls etwa 1–2 dB niedriger (Abbildung 6-8). In der Validierung zeigten erstere Modelle dort bessere Ergebnisse (vgl. Kap. 6.1.1). Ob in den neuen Modellen nun aber lediglich mittlere, während der Messkampagne erfasste Ausbreitungseffekte in die Richtwirkungsfunktion eingingen (Hinweis auf eine Schwäche in der Rückrechnung) oder tatsächlich die Installationseffekte der Triebwerke Ursache dieser stärkeren seitlichen Richtwirkung sind, lässt sich nicht ermitteln.

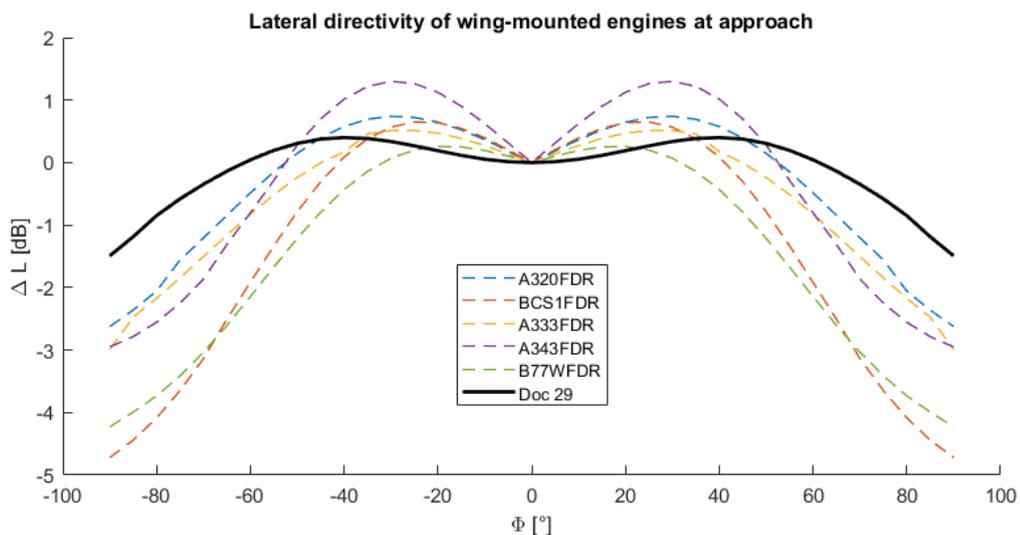


Abbildung 6-8: Richtwirkung von sonAIR-Modellen (**3Dred**) für den *Final Approach*, Grundlage: A-bewertet und auf 1000 ft ausgebreitete Spektren zur Vergleichbarkeit mit der Korrektur der NPD-Daten nach ECAC Doc.29 [3].

Während für die Modellerstellung der Einbezug der Daten der Messpunkte O1/O2 kaum eine Rolle zu spielen scheint (vgl. Abbildung 6-9, BCS1 und B77W mit und ohne O1/O2; sowie Graphiken in Kap. 6.1.1 vs. Kap. 12.3), ist der Ansatz für die Quellenmodelle wichtig (3D oder 3Dred: für Details siehe [23][24]). In Ergänzung zu Abbildung 6-8 zeigt Abbildung 6-9 für den BCS1 und den B77W zusätzlich zu den reduzierten 3Dred-Modellen auch die genauesten verfügbaren Modelle inkl. Konfiguration (3D mit ausgefahrenem Fahrwerk und Flaps 5). Insbesondere beim BCS1 ergeben sich deutliche Differenzen von bis zu > 1 dB bei Abstrahlwinkeln gegen 90°.

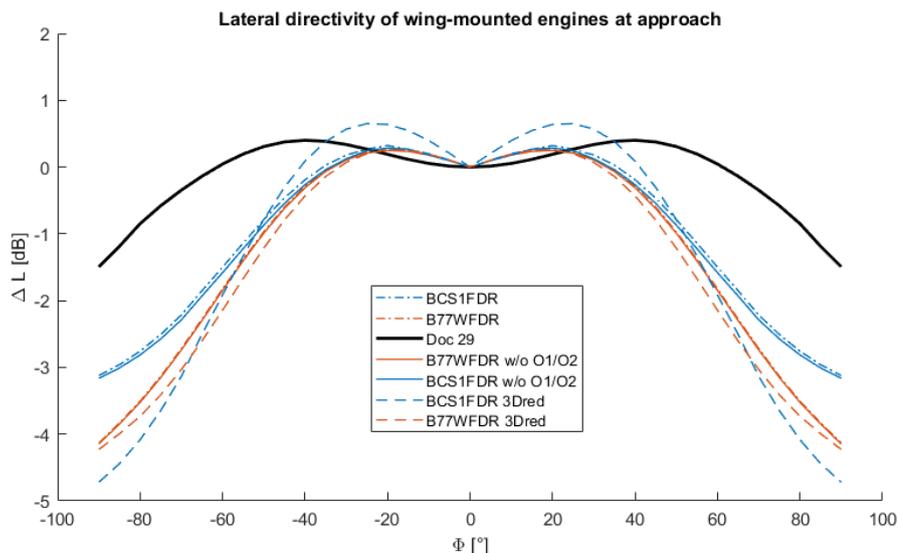


Abbildung 6-9: Richtwirkung der sonAIR Modelle (**3D und 3Dred**) für den Final Approach mit ausgefahrenem Fahrwerk und Flaps 5, Grundlage: A-bewertet und auf 1000ft ausgebreitete Spektren zur Vergleichbarkeit mit der Korrektur der NPD-Daten nach ECAC Doc.29 [3].

6.1.4. Berechnung FLULA2: Ereignispegel

Abbildung 6-10 (A320) und Abbildung 6-11 (B77W) zeigen, dass eine Bodenzusatzdämpfung in FLULA2 unerlässlich ist (vgl. auch die Abbildungen im Anhang, Kap. 12.2). Ohne Bodenzusatzdämpfung werden die Messungen bei O, O1 und O2 deutlich, um – je nach Flugzeugtyp und Messpunkt – bis zu 4 dB (Median) überschätzt ("zu laut" berechnet). Mit der Bodenzusatzdämpfung werden die Messungen über die Messreihe I bis O und O1 befriedigend abgebildet, bei O2 aber teilweise sehr unterschätzt, d.h. "zu starke" Bodenzusatzdämpfung (je nach Flugzeugtyp im Median bis –4 dB). Allerdings ist der Trend zunehmend positiver Differenzen zwischen Simulation und Messung von I bis O und O1, welcher sich zu O2 umgekehrt, auch bei der Simulation mit sonAIR sichtbar, zumindest für die A320-Familie. Somit vermag die Bodenzusatzdämpfung pauschal die Ausbreitungsphänomene, welche in Situationen mit streifendem Schalleinfall auftreten, generell befriedigend abzubilden.

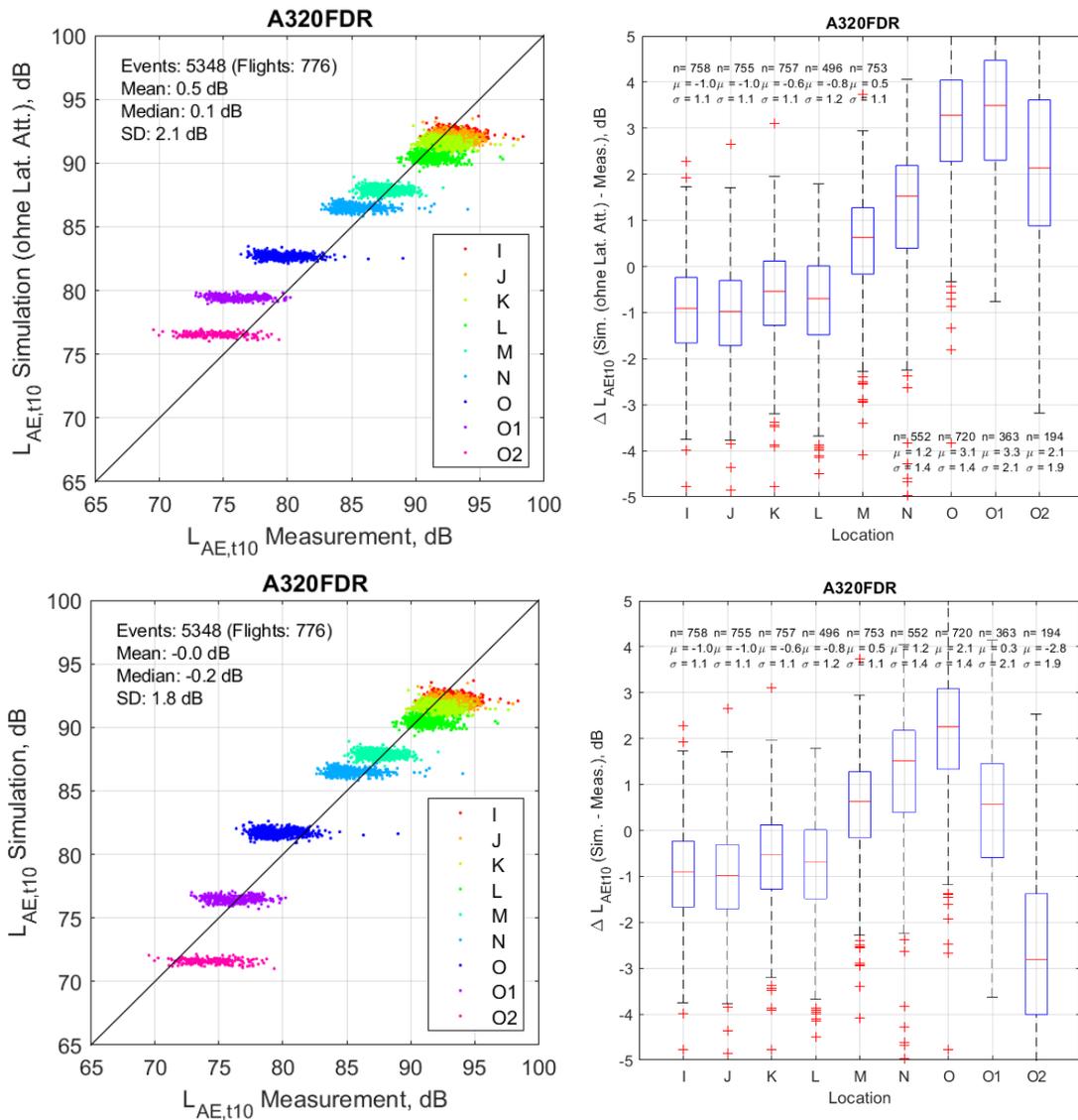


Abbildung 6-10: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (FLULA2) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) am Flughafen Zürich (rechts) für den A320 am Flughafen Zürich, ohne (oben) und mit Bodenzusatzdämpfung (unten).

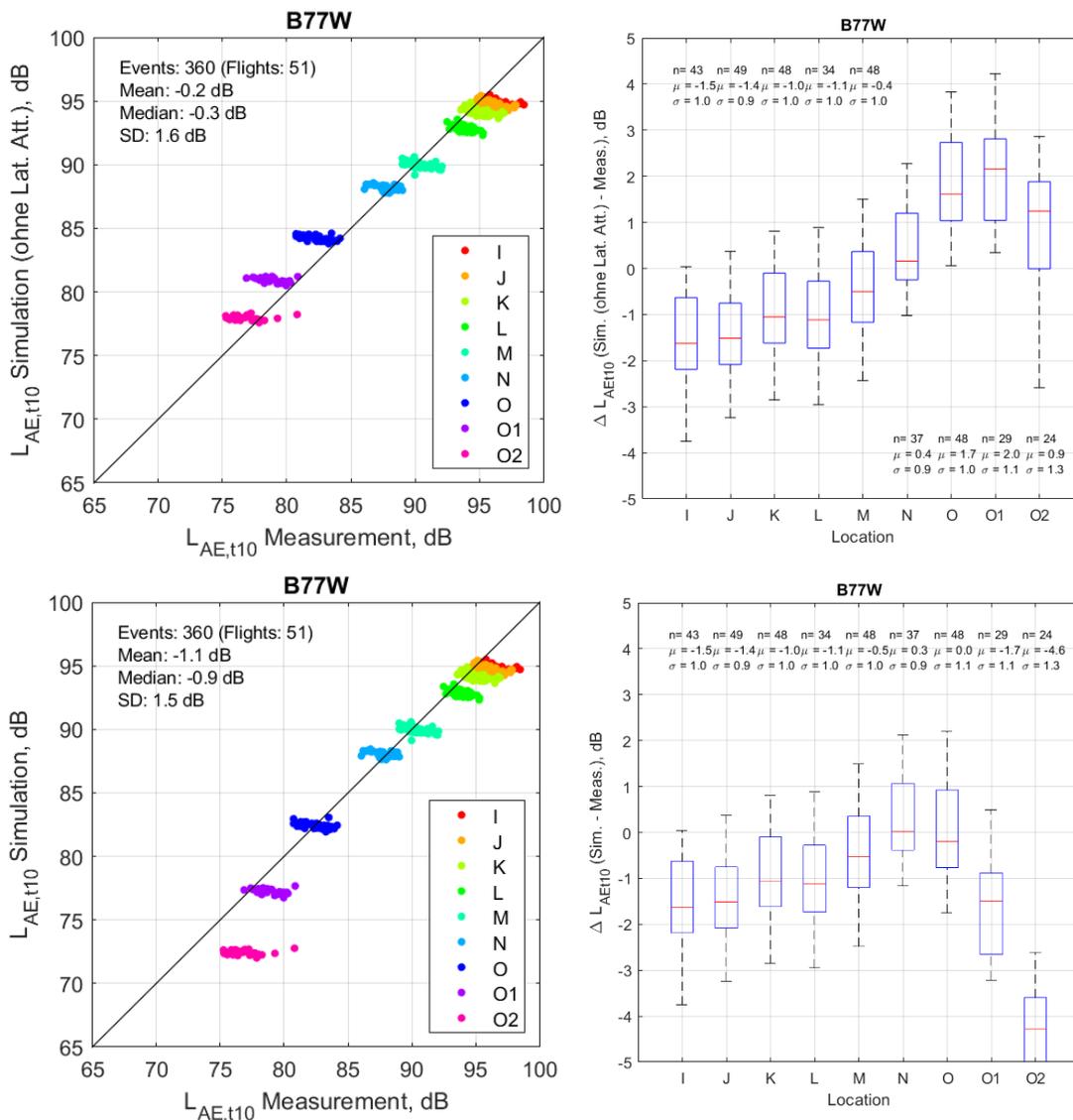


Abbildung 6-11: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (FLULA2) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts) für den B77W am Flughafen Zürich, ohne (oben) und mit Bodenzusatzdämpfung (unten).

6.1.5. Berechnung FLULA2: Pegelzeitverläufe

Abbildung 6-12 zeigt die mit FLULA2 ermittelten Pegelzeitverläufe (mit und ohne Bodenzusatzdämpfung) zweier exemplarischen Ereignisse eines A320 (vgl. mit sonAIR-Simulation in Abbildung 6-6). Die gegen zunehmend streifenden Einfall wichtiger werdende Bodenzusatzdämpfung ist deutlich sichtbar. Während sie bei streifendem Einfall (insb. den Pegelflanken) unerlässlich ist (Überschätzung der gemessenen Pegel ohne Bodenzusatzdämpfung), wirkt sie teilweise zu stark (Unterschätzung mit Bodenzusatzdämpfung). Die hohen Korrekturen bei ansteigenden und abfallenden Flanken mit kleinen Einfallswinkel unter 5° , welche

durch die Bodenzusatzdämpfung in FLULA2 resultieren, konnten sowohl bei O als auch bei O1 und O2 messtechnisch häufig nicht reproduziert werden.

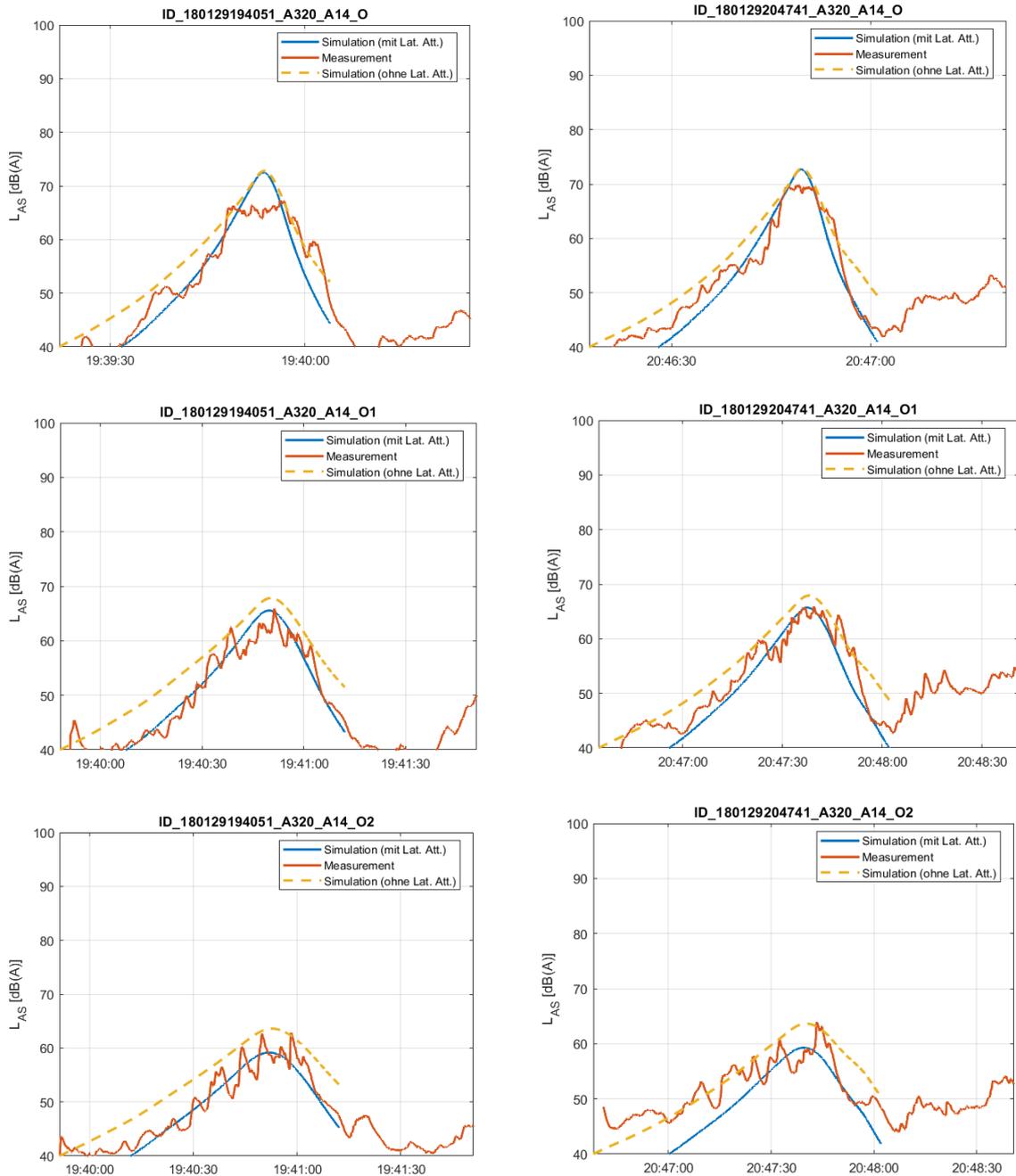


Abbildung 6-12: Zwei exemplarische Ereignisse (links und rechts) für den A320 für O (oben), O1, (Mitte) und O2 (unten) ohne Störgeräusche, zunehmend hohe Turbulenz O → O1 → O2 (d.h. Ausbreitungseffekt). (Hinweis: Es sind die gleichen Ereignisse wie in Abbildung 6-6).

6.1.6. Vergleich sonAIR und FLULA2 über alle Typen

Abbildung 6-13 zeigt den Vergleich der Simulationen mit Messungen für den gesamten, über alle Flugzeugtypen μ -poolten Datensatz für sonAIR und FLULA2 (mit und ohne Bodenzusatzdämpfung).

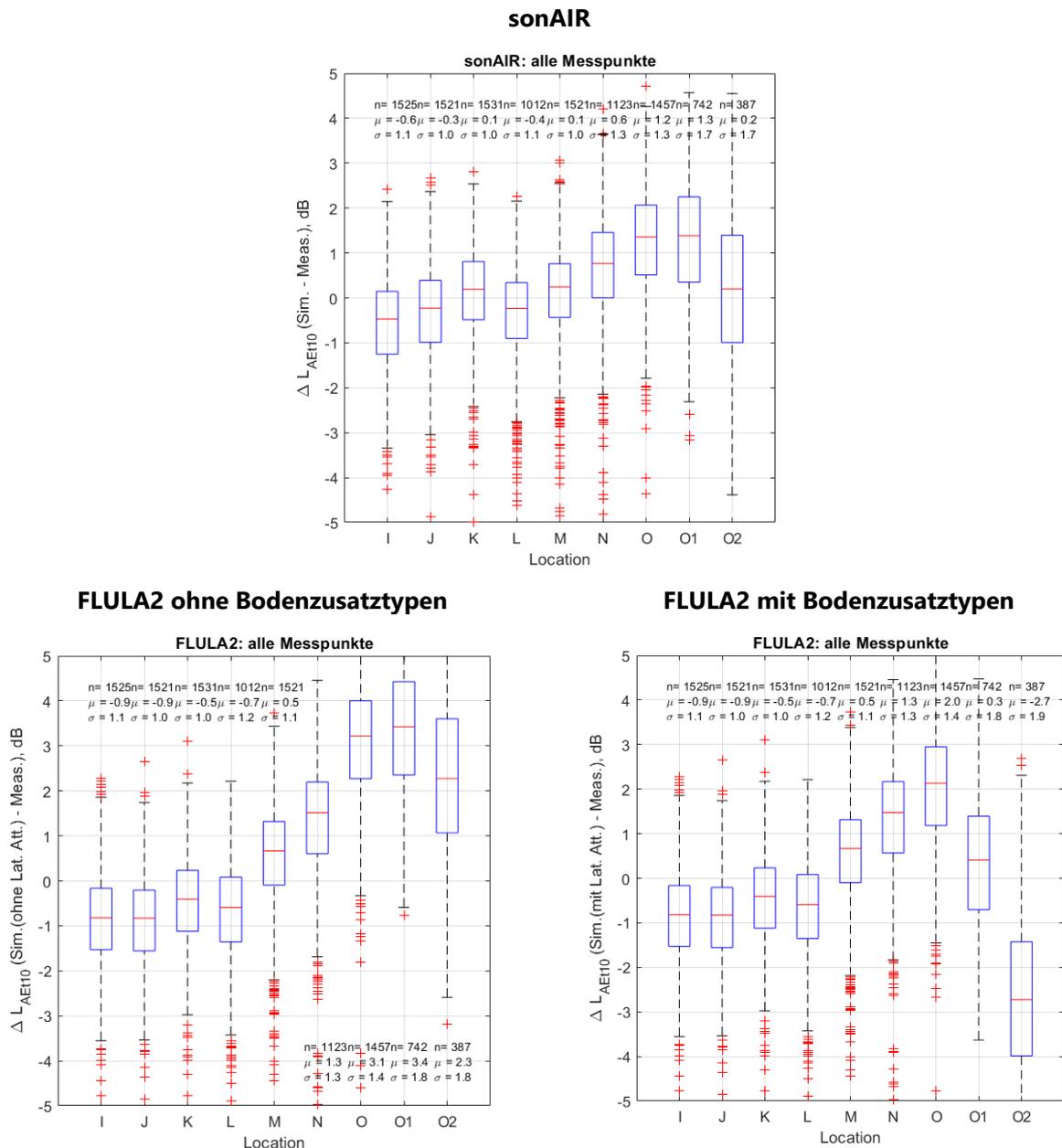


Abbildung 6-13: Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung (ΔL_{AE10}) für sonAIR (oben) und FLULA2 mit (unten links) und ohne Bodenzusatzdämpfung (unten rechts), für den alle Typen umfassenden Datensatz, für die Messpunkte I bis O, O1 und O2.

Insgesamt überschätzt sonAIR die Messungen bei O1 und O2 etwas (rund 1 dB), reproduziert die übrigen Messpunkte jedoch gut (Median der absoluten Differenzen < 0.5 dB). FLULA2 hingegen überschätzt ohne Bodenzusatzdämpfung die gemessenen Pegel deutlich, insbesondere bei stark streifendem Schalleinfall

(bis 2–4 dB bei den Messpunkten O, O1 und O2). Mit Bodenzusatzdämpfung reproduziert FLULA2 die Messungen bei N–O1 besser als ohne Zusatzdämpfung, überschätzt dafür bei O1 die Messungen deutlich um rund 2 dB im Median und unterschätzt umgekehrt O2 deutlich um rund 3 dB. Hier zeigt sich die Distanzabhängigkeit in der Bodenzusatzdämpfung (Dämpfung wächst mit zunehmender Ausbreitungsdistanz): Diese führt für grosse Distanzen zu einer Überschätzung der Dämpfung, bzw. Unterschätzung der Immissionspegel. Dies wird detailliert mit den Messdaten von Payerne untersucht (vgl. Kap. 6.2). Insgesamt scheint bezüglich des gesamten Datensatzes (Abbildung 6-13) sonAIR die Situationen mit streifendem Schalleinfall etwas besser abzubilden als FLULA2.

6.2. Streifender Schalleinfall in Payerne

6.2.1. Berechnung sonAIR: Ereignispegel mit Cockpit-Daten

Abbildung 6-14 zeigt die Scatter- und Boxplots der Simulationen mit sonAIR vs. Messungen für den $L_{AE,t10}$ der Ereignisse des F/A-18 in Payerne.

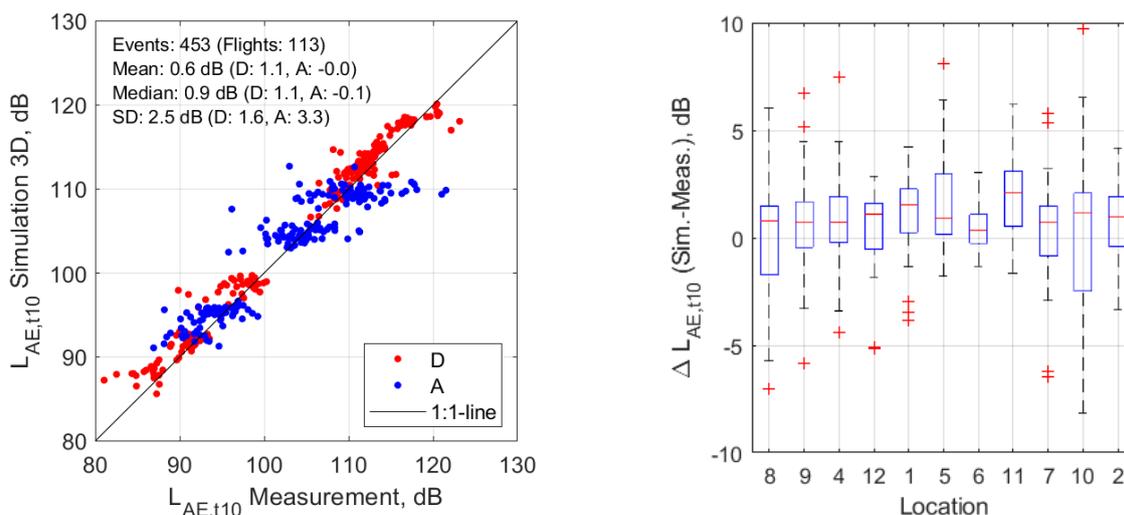


Abbildung 6-14 Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (sonAIR) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts), gruppiert nach den Messpunkten 1 bis 12.

sonAIR bildet die gemessenen Ereignispegel insgesamt gut nach ($\Delta L_{AE,t10} = 0.6 \pm 2.5$ dB, vgl. Abbildung 6-14). Dabei wurden die Starts leicht überschätzt ($\Delta L_{AE,t10} = 1.1 \pm 1.6$ dB). Die Landungen stimmen im Mittel sehr gut, zeigen aber eine erhöhte Streuung ($\Delta L_{AE,t10} = 0.0 \pm 3.3$ dB). Dies ist auf die teilweise stark fluktuierende Schubsetzung während dem Endanflug zurückzuführen, welche mit den prozeduralen Modellen nicht abgebildet werden kann. Es zeigt sich eine ähnliche Übereinstimmung an allen Mikrofonpositionen. Dies deutet darauf hin, dass sonAIR auch Situationen mit streifendem Schalleinfall in grossen seitlichen Distanzen akkurat nachbilden kann.

Der $L_{AS,max}$ (nicht dargestellt) zeigt insgesamt eine Unterschätzung der Messungen sowie eine höhere Streuung ($\Delta L_{AS,max} = -0.8 \pm 3.3$ dB), wobei die Landungen ($\Delta L_{AS,max} = -1.5 \pm 3.8$ dB) etwas schlechter getroffen wurden als die Starts ($\Delta L_{AS,max} = -0.3 \pm 2.8$ dB). Zudem zeigt eine Aufteilung nach Messpunkt, dass die mittlere Differenz sowie die Streuung des $L_{AS,max}$ mit zunehmendem Abstand zur Flugbahn zunimmt. Die grössten Differenzen zwischen Simulation und Messung finden sich denn auch bei den am weitesten entfernten Messpunkten 6 und 11, allerdings zeigen sie entgegengesetzte Trends (Unterschätzung bei MP6, Überschätzung bei MP11). In diesen grossen Abständen sind die turbulenzinduzierte Pegelschwankungen in den Messungen jedoch schon beträchtlich (siehe Pegelzeitverläufe in Abbildung 6-23), was die Aussagekraft des gemessenen Werts des $L_{AS,max}$ und damit auch den Vergleich desselben mit der Simulation vermindert.

6.2.2. Berechnung sonAIR: Ereignispegel ohne Cockpit-Daten

Bei den Flügen ohne Cockpit-Daten wurden nur Starts für die seitliche Messkette in der Pistenmitte (MP 1, 5, 6, 11 und 12) nachsimuliert (vgl. Kap. 4.2.2). Abbildung 6-15 zeigt den Vergleich zwischen Simulation und Messung für den L_{AE} . Die pistennahen Messpunkte 12 und 1 wurden sehr gut reproduziert. Messpunkt 5 zeigt eine leichte Unterschätzung, aber auch eine deutlich erhöhte Streuung. Die weit entfernten Messpunkte 6 und 11 zeigen eine sehr deutliche Unterschätzung von rund 5 dB. Da dieser Trend bei den Flügen mit Cockpit-Daten nicht beobachtet wurde, wurde eine detailliertere Auswertung vorgenommen, um potentielle Ursachen für diese Abweichungen zu finden. Dazu wurden die Daten weiter unterteilt nach Startrichtung, Windrichtung und Meteoklasse.

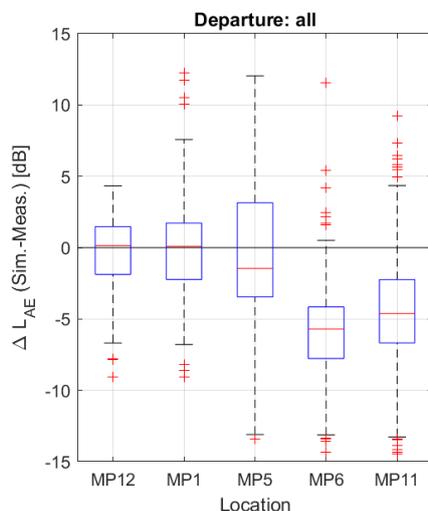


Abbildung 6-15 Boxplot der Differenz zwischen Simulation (sonAIR) und Messung (ΔL_{LAE10}) ohne Cockpit-Daten, aufgeteilt nach Messpunkt.

Gruppierung nach Startrichtung:

Die Startrichtung hat einen deutlichen Einfluss auf die Resultate bei Messpunkt 5: Starts in Pistenrichtung 05 weisen deutlich geringere Streuung in den Messungen auf und damit auch im Vergleich mit der

Simulation als Starts in Richtung 23 (siehe Abbildung 6-16). Dies kann mit der Position des Messpunktes erklärt werden: MP5 liegt im Unterschied zu den anderen Messpunkten in der Messkette nicht genau in der Ebene senkrecht zur Pistenmitte, sondern etwas weiter östlich davon (vgl. Abbildung 4-3). Dadurch befinden sich die Flugzeuge zum Zeitpunkt des geringsten Abstandes zu MP5 bei Start 23 noch näher am oder sogar noch auf dem Boden, was Bodenreflexionen und damit die Unsicherheit erhöht. Ausserdem wird die Schallausbreitung der Starts in diese Richtung teilweise durch die Hangars abgeschirmt. Bei Start 05 fliegen die Flugzeuge dagegen bereits deutlich höher an MP5 vorbei, was zu einer ungestörten, direkten Schallausbreitung beiträgt.

Bei Start 05 zeigt sich derselbe Unterschätzungstrend bei MP5 wie bei der Auswertung über alle Flüge. Bei Start 23 resultiert im Median dagegen eine leichte Überschätzung. Die anderen vier Messpunkte zeigen keine grossen Unterschiede zwischen verschiedenen Startrichtungen.

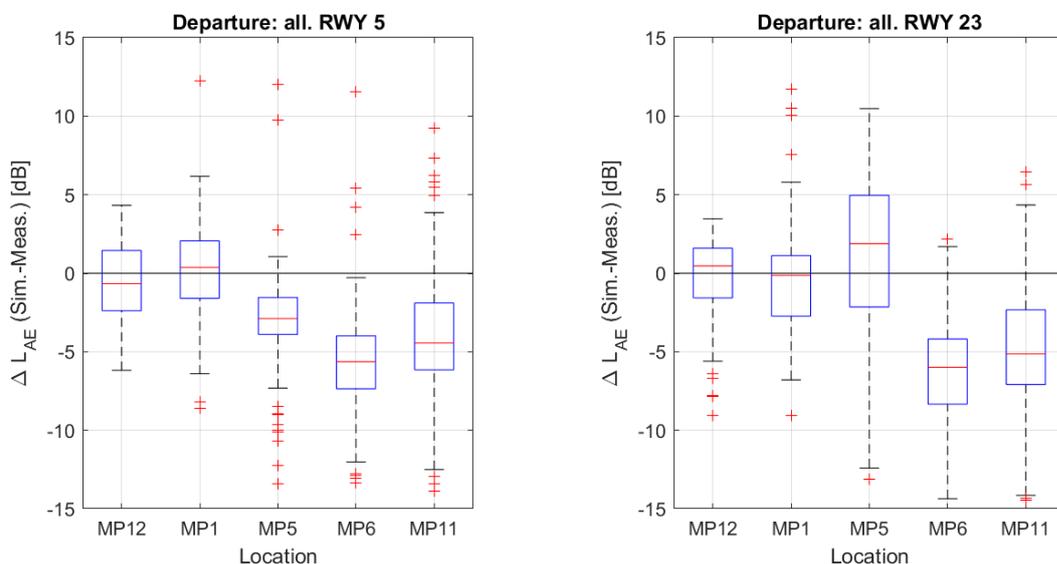


Abbildung 6-16 Boxplot der Differenz zwischen Simulation (sonAIR) und Messung (ΔL_{LAE10}) ohne Cockpit-Daten, aufgeteilt nach Messpunkt. Links: Starts auf Piste 05. Rechts: Starts auf Piste 23.

Gruppierung nach Windrichtung:

Der Wind kommt in Payerne aus topographischen Gründen in den meisten Fällen aus dem westlichen oder östlichen Sektor. Während der Messperiode wurden nur 3.5% der Flüge bei Südwindlagen gemessen. Deutliche Nordwindlagen kamen gar nicht vor.

Bei der Unterteilung in West- und Ostwindlagen zeigen sich ähnliche Trends wie bei der Unterteilung nach Startrichtung: MP5 zeigt bei Ostwind eine stärkere Unterschätzung als bei Westwind, was hauptsächlich auf die starke Korrelation zwischen Windrichtung und Startrichtung zurückzuführen ist (bei Ostwind wird hauptsächlich auf Piste 05 gestartet, bei Westwind hauptsächlich auf Piste 23). Die anderen Messpunkte zeigen kaum Unterschiede (siehe Abbildung 6-17).

Bei Südwindlagen resultiert eine reduzierte Streuung, was aber hauptsächlich auf die wesentlich kleinere Anzahl Ereignisse zurückzuführen ist (9 Starts bei Südwind vs. 133 bei Ostwind und 122 bei Westwind). Ansonsten ist kein klarer Effekt zu erkennen.

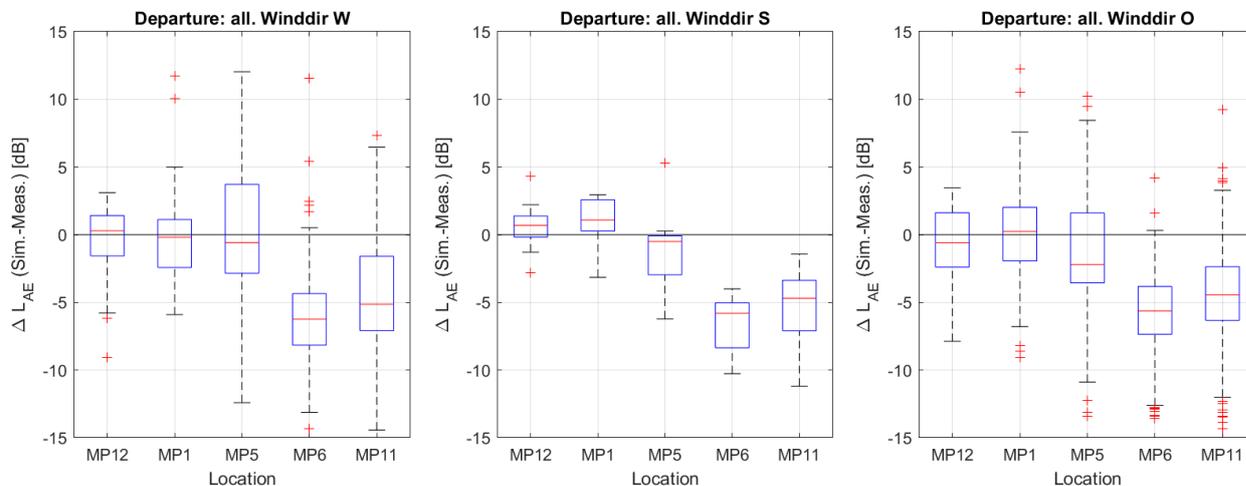


Abbildung 6-17 Boxplot der Differenz zwischen Simulation (sonAIR) und Messung (ΔL_{AEt10}) ohne Cockpit-Daten, aufgeteilt nach Messpunkt. Links: Starts bei westlichen Winden. Mitte: Starts bei südlichen Winden. Rechts: Starts bei östlichen Winden.

Gruppierung nach Meteoklasse:

Bei stabiler atmosphärischer Schichtung (Klasse S) zeigt sich eine deutlich geringere Streuung als bei neutraler (Klasse N) oder labiler Schichtung (Klasse L), was aber hauptsächlich auf die deutlich geringere Anzahl Ereignisse zurückzuführen ist (6 Starts bei S vs. 47 bei N und 184 bei L). Ansonsten sind keine deutlichen Unterschiede zwischen den atmosphärischen Stabilitätsklassen zu erkennen (Abbildung 6-18).

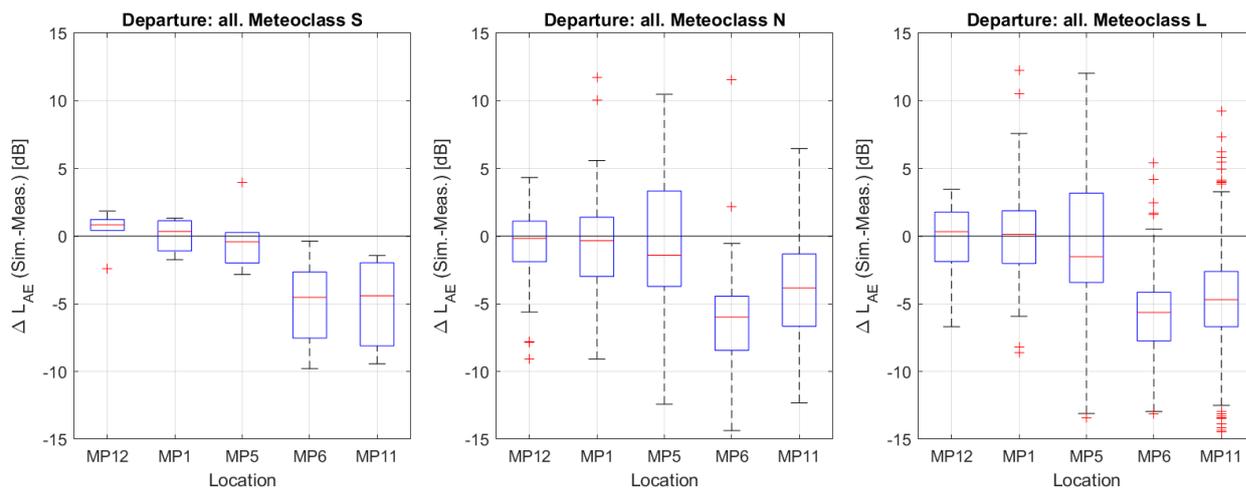


Abbildung 6-18 Boxplot der Differenz zwischen Simulation (sonAIR) und Messung (ΔL_{AEt10}) ohne Cockpit-Daten, aufgeteilt nach Messpunkt. Links: Starts bei stabiler atmosphärischer Schichtung. Mitte: Starts bei neutraler Schichtung. Rechts: Starts bei labiler Schichtung.

Schlussfolgerungen:

Während sonAIR die Ereignisse mit Cockpit-Daten im Ereignispegel an allen Messpositionen ähnlich gut abbilden konnte, zeigt sich bei den Ereignissen ohne Cockpit-Daten eine leichte Unterschätzung bei MP5 und eine sehr deutliche Unterschätzung bei MP 6 und 11. Diese Unterschätzung konnte weder auf die Startrichtung noch auf Wettereinflüsse zurückgeführt werden. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die erfassten Wetterlagen nicht sämtliche Bedingungen abdecken. Namentlich deutlich hinderliche Bedingungen (z.B. Nordwindlagen) wurden kaum erfasst. Trotzdem legen die verfügbaren Daten nahe, dass Meteeffekte bei der vorliegenden Geometrie bei Situationen mit streifendem Schalleinfall keine grossen Einflüsse haben.

Da die Unterschätzung bei den MP 5, 6 und 11 weder durch Startrichtung, Meteeffekte noch durch systematische Abweichungen zwischen Berechnungen in sonAIR und Messungen (sonst wäre diese auch bei den Ereignissen mit Cockpit-Daten aufgetreten) erklärt werden kann, vermuten wir die Ursache in der idealisierten Fluggeometrie. Bei den Flügen mit Cockpit-Daten handelt es sich zu einem grossen Teil um Begleitflüge der in den Testwochen evaluierten Kandidaten für neue Kampfflugzeuge, welche analog zu den Flugvorgaben der Kandidaten nach dem Start für 0.8 NM über das Pistenende hinaus geradeaus flogen, bevor sie abdrehten. Bei den Flügen ohne Cockpit-Daten handelt es sich dagegen um reguläre Trainings- oder Einsatzflüge der Luftwaffe, welche im Normalfall kurz nach dem Start nach Süden oder Norden abdrehten. Insbesondere nach Norden abdrehende Flugrouten führen zu erhöhten Pegeln an den weiter nördlich liegenden Messpunkten, welche in der Simulation aufgrund des modellierten Geradeausflugs nicht abgebildet werden konnten.

Bei den Untersuchungen der Flüge ohne Cockpit-Daten muss zudem beachtet werden, dass die Messungen teilweise auch andere Flugzeuge (namentlich der F-5) sowie Parallelstarts und Starts mit Nachbrenner mit entsprechend höheren Messpegeln enthalten, so dass es sich nur bei ca. 88% der hier analysierten Flüge tatsächlich um F/A-18-Starts ohne Nachbrenner handeln dürfte (Kap. 4.2.2). Ein Vergleich der Mittelwerte an jedem Messpunkt zwischen Flügen mit und ohne Cockpit-Daten mittels eines zweiseitigen t -Tests ergab jedoch, dass sich die Datensätze nicht signifikant voneinander unterscheiden ($p > 0.05$), d.h. diese "Verunreinigungen" im Datensatz haben keinen signifikanten Einfluss auf die Auswertung.

6.2.3. sonAIR: Beitrag der seitlichen Richtwirkung

Eine detaillierte Betrachtung der 3D-Richtcharakteristik des F/A-18 von sonAIR zeigt, dass die Emissionen mit zunehmendem seitlichen Winkel Phi abnehmen (vgl. Abbildung 6-19). Dieser Effekt der lateralen Richtwirkung (d.h. Installationseffekt) führt bei flachem Schalleinfall zu distanzunabhängigen reduzierten Immis- sionen in Situationen mit streifendem Schalleinfall. Dies hat zur Folge, dass sonAIR auch die Pegel der Pisten-nahen Messstationen 1 und 12 adäquat zu reproduzieren vermag. Vergleiche hierzu auch die ent- sprechende Diskussion für den Flughafen Zürich (Kap. 6.1.3).

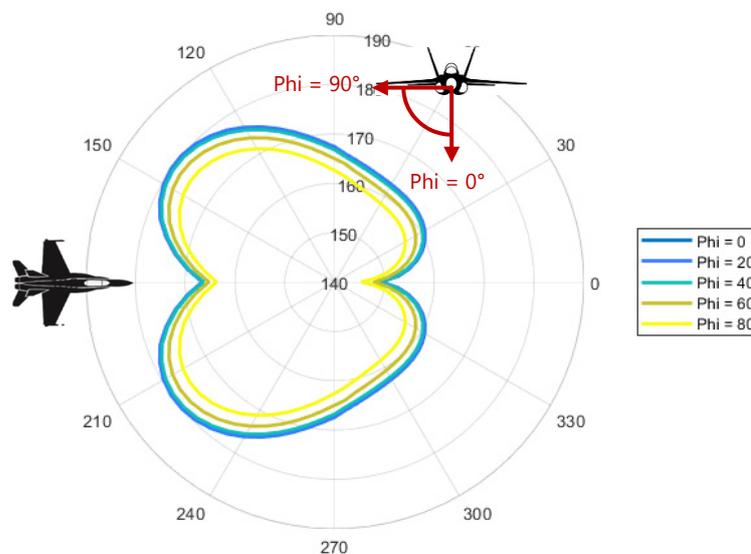


Abbildung 6-19 3D-Richtcharakteristik des F/A-18 Hornet aus sonAIR, dargestellt für unterschiedliche seitliche Abstrahlwinkel Phi von 0 bis 80°.

Im Gegensatz zu sonAIR verwendet FLULA2 nur 2D-Richtcharakteristiken. Ein distanzunabhängiger, Emis- sions-seitiger Installationseffekt (laterale Richtwirkung) kann daher nicht berücksichtigt werden, sondern wird lediglich teilweise mit der empirischen Korrektur der Bodenzusatzdämpfung abgebildet. Die Boden- zusatzdämpfung ist jedoch distanzabhängig, sodass die distanzunabhängige laterale Richtwirkung in Pistennähe unterschätzt wird und somit die Messwerte in Pistennähe überschätzt werden, wie die nach- folgenden Kapitel 6.2.4 und 6.2.5 zeigen.

6.2.4. Berechnung FLULA2: Ereignispegel mit Cockpit-Daten

Abbildung 6-20 zeigt die Scatter- und Boxplots der Simulationen mit FLULA2 mit und ohne Bodenzusatzdämpfung vs. Messungen für den $L_{AE,t10}$ der Ereignisse des F/A-18 in Payerne.

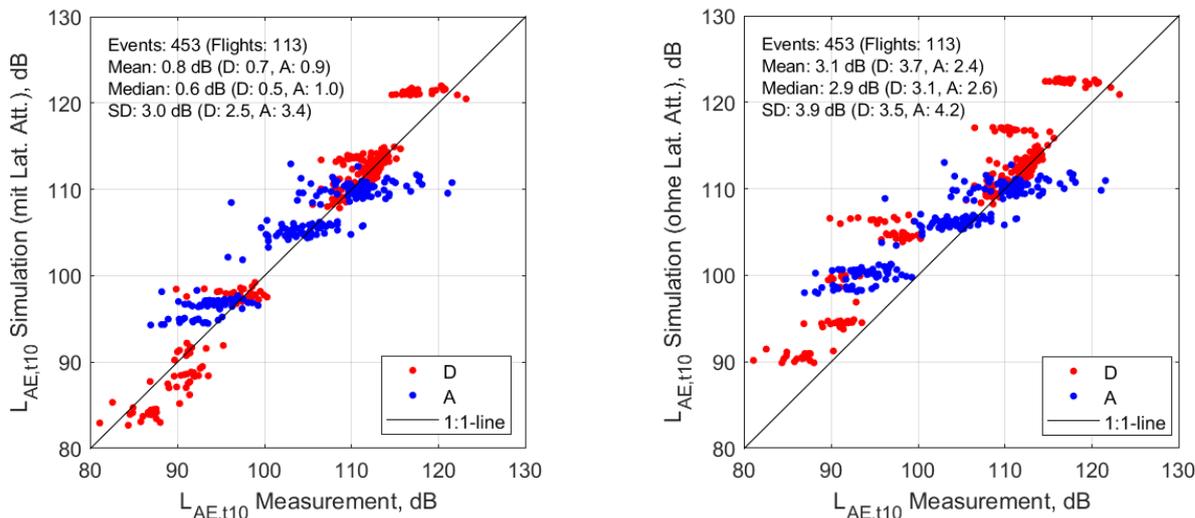


Abbildung 6-20 Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (FLULA2) vs. Messungen, Simulationen mit Bodenzusatzdämpfung (links) und ohne Bodenzusatzdämpfung (rechts).

Im Mittel bildet FLULA2 die Ereignispegel wie sonAIR gut nach ($\Delta L_{AE,t10} = 0.8 \pm 3.0$ dB, vgl. Abbildung 6-20, links). Starts und Landungen werden dabei beide leicht überschätzt (Starts: $\Delta L_{AE,t10} = 0.7 \pm 2.5$ dB, Landungen: $\Delta L_{AE,t10} = 0.9 \pm 3.4$ dB). Wie bei sonAIR zeigt sich eine etwas höhere Streuung bei den Landungen als bei den Starts. Diese kann ebenfalls auf die stark fluktuierende Schubsetzung beim Endanflug zurückgeführt werden, welche FLULA2 mit seiner fixen 2D-Landerichtcharakteristik nicht zu reproduzieren vermag.

Bei FLULA2 resultieren grössere Streuungen als bei sonAIR, dies insbesondere bei den Starts, wo die Streuung bei FLULA2 fast doppelt so gross ist (FLULA2: 3.3 dB, sonAIR: 1.7 dB). Hier bildet sonAIR mit seinem detaillierteren 3D-Emissionsmodell den $L_{AE,t10}$ des F/A-18 exakter ab als FLULA2, welches nur 2D-Richtcharakteristiken für die Simulation benutzt. Allerdings ist hier zu berücksichtigen, dass es sich bei den Vergleichen von sonAIR grossenteils um eine Verifikation handelt, bei FLULA2 hingegen um eine unabhängige Validierung (vgl. Kap. 5.3.1 und 5.5.1).

Ohne Berücksichtigung der Bodenzusatzdämpfung (Abbildung 6-20, rechts) werden die Pegelwerte fast durchgehend stark überschätzt ($\Delta L_{AE,t10} = 3.1 \pm 3.9$ dB). Hierbei gibt es bei den Starts eine etwas deutlichere Überschätzung ($\Delta L_{AE,t10} = 3.7 \pm 3.3$ dB) als bei den Landungen, wo hingegen die Streuung grösser ausfällt ($\Delta L_{AE,t10} = 2.4 \pm 4.2$ dB). Der Vergleich der beiden Scatterplots in Abbildung 6-20 zeigt deutlich, dass FLULA2 die Bodenzusatzdämpfung in den Simulationen zwingend benötigt, um die gemessenen Pegelwerte reproduzieren zu können. Generell ist sowohl bei Starts als auch bei Landungen die Übereinstimmung zwischen Berechnung und Messung bei denjenigen Mikrofonpositionen gut, welche einen genügend grossen Schalleinfallswinkel ($> 15^\circ$) aufweisen. In Situationen mit streifendem Schalleinfall

zeigen sich hingegen deutliche Abweichungen (Abbildung 6-21). Bei ausgeschalteter Bodenzusatzdämpfung resultiert im Gegensatz zu den Simulationen mit Bodenzusatzdämpfung eine starke Überschätzung der gemessenen Pegel, was die Notwendigkeit der Bodenzusatzdämpfung erneut bestätigt.

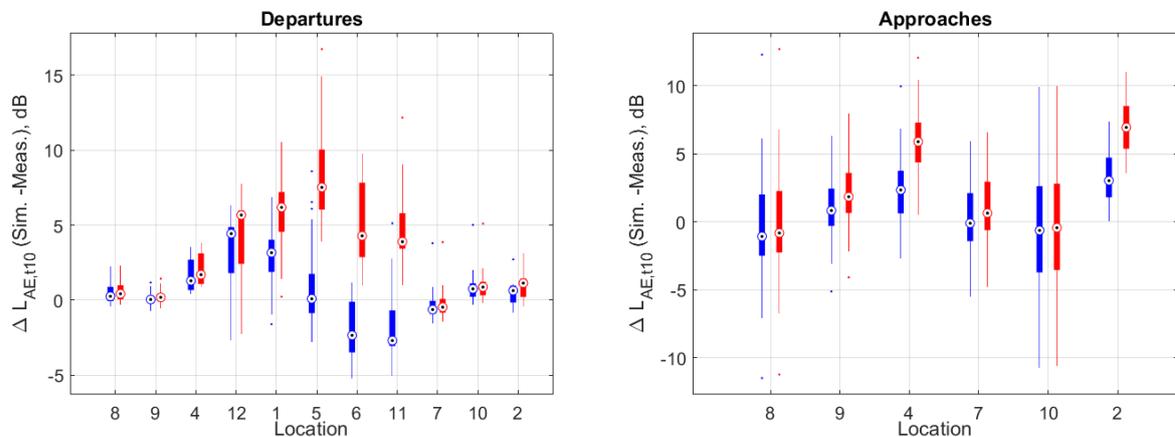


Abbildung 6-21 Boxplot der Differenz zwischen Simulation (FLULA2) und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (blaue Boxplots: mit Bodenzusatzdämpfung, rote Boxplots: ohne Bodenzusatzdämpfung), gruppiert nach den Messpunkten 1 bis 12 sowie nach Prozedur (links: Starts, rechts: Landungen).

Während die Resultate mit Bodenzusatzdämpfung deutlich besser sind als ohne Bodenzusatzdämpfung, zeigt sich ein distanzabhängiger Trend: Bei Quellen-nahen Messpunkten und streifendem Schalleinfall (MP1 und MP12 bei Starts, MP2 und MP4 bei Landungen; vgl. Abbildung 6-21) werden auch mit Bodenzusatzdämpfung die gemessenen Pegel deutlich überschätzt. Die Messungen bei MP5 (mittlere Ausbreitungsdistanz) werden mit Bodenzusatzdämpfung im Mittel sehr genau reproduziert, während die Messungen bei den Standorten MP6 und MP11, welche sich in grösseren Abständen zur Quelle befinden, im Mittel deutlich unterschätzt werden.

Diese Distanzabhängigkeit der Dämpfung bei streifendem Schalleinfall (Überschätzung der Messungen bei kurzen Ausbreitungsdistanzen, gute Wiedergabe bei mittleren Distanzen, Unterschätzung bei grossen Distanzen) dürfte darauf zurückzuführen sein, dass die 2D-Richtcharakteristiken von FLULA2 die seitliche Richtwirkung von Flugzeugen (Installationseffekt) und somit die (distanzunabhängige) Dämpfung der Emissionen bei streifendem Schalleinfall nicht abzubilden vermögen. Eine allfällige Richtwirkung kann ausschliesslich mit der Bodenzusatzdämpfung berücksichtigt werden, welche jedoch für kurze Ausbreitungsdistanzen keine bzw. zu geringe Dämpfungen ergibt.

Die Pegelüberschätzung von FLULA2 in kurzen Ausbreitungsdistanzen könnten mit einer zusätzlichen empirischen Korrektur für die laterale Richtwirkung (Installationseffekt) korrigiert werden (vgl. ECAC Doc.29: empirischer *Installation Effect* Term [3]; auch AEDT kennt diese Korrektur [21]). Dies würde jedoch voraussetzen, dass die distanz- und winkelabhängigen Setzungen in der Bodenzusatzdämpfung im Vergleich zu Messdaten angepasst werden. Alternativ könnte FLULA2 um 3D-Richtcharakteristiken erweitert werden [16]. Solche Modellanpassungen sind jedoch für FLULA2 nicht vorgesehen.

Beim Vergleich der Ergebnisse (Messung vs. Berechnung) von FLULA2 und sonAIR ist zu beachten, dass es sich bei den Vergleichen bei sonAIR mit Ausnahme von MP6 und MP11 um eine Verifizierung und nicht um eine Validierung handelt (vgl. Kap. 4.2.1), bei FLULA2 hingegen vollumfänglich um eine Validierung.

6.2.5. Berechnung FLULA2: Ereignispegel ohne Cockpit-Daten

Analog zu sonAIR wurden auch in FLULA2 nur die Starts für die seitliche Messkette in der Pistenmitte (MP 12, 1, 5, 6 und 11) nachsimuliert. Insgesamt ergibt sich hier ein ähnliches Bild (Abbildung 6-22), wie beim Vergleich mit Cockpit-Daten (vgl. Kap. 6.2.2): Die Notwendigkeit einer Bodenzusatzdämpfung zeigt sich auch hier. Bei den pistennahen Messpunkten 12 und 1 überschätzt die Simulation aber auch mit Bodenzusatzdämpfung wiederum die gemessenen Pegel deutlich (im Mittel um rund 2.5 dB, vgl. Abbildung 6-22). Bei den weiter entfernten Messpunkten 5, 6 und 11 zeigt sich ebenfalls ein ähnliches Bild wie beim Vergleich mit Cockpit-Daten: Während die Messungen am Messpunkt 5 in der Mitte der lateralen Messkette mit der Bodenzusatzdämpfung gut reproduziert wurden, wurden die Pegel bei den weiter entfernten Messpunkten 6 und 11 wiederum deutlich unterschätzt. Hierzu tragen vermutlich zwei Effekte bei: Einerseits liefert die Bodenzusatzdämpfung mit zunehmender Ausbreitungsdistanz zunehmend grosse Dämpfungen und unterschätzt somit die Ereignispegel daher auch zunehmend. Andererseits wurden wie bei sonAIR auch bei FLULA2 idealisierte Geradeausflüge simuliert, was nicht den realen Flugbahnverläufen entspricht und in der Summe zu einer deutlichen Unterschätzung führt, wie sie auch bei sonAIR beobachtet wurde (vgl. Kapitel 6.2.2).

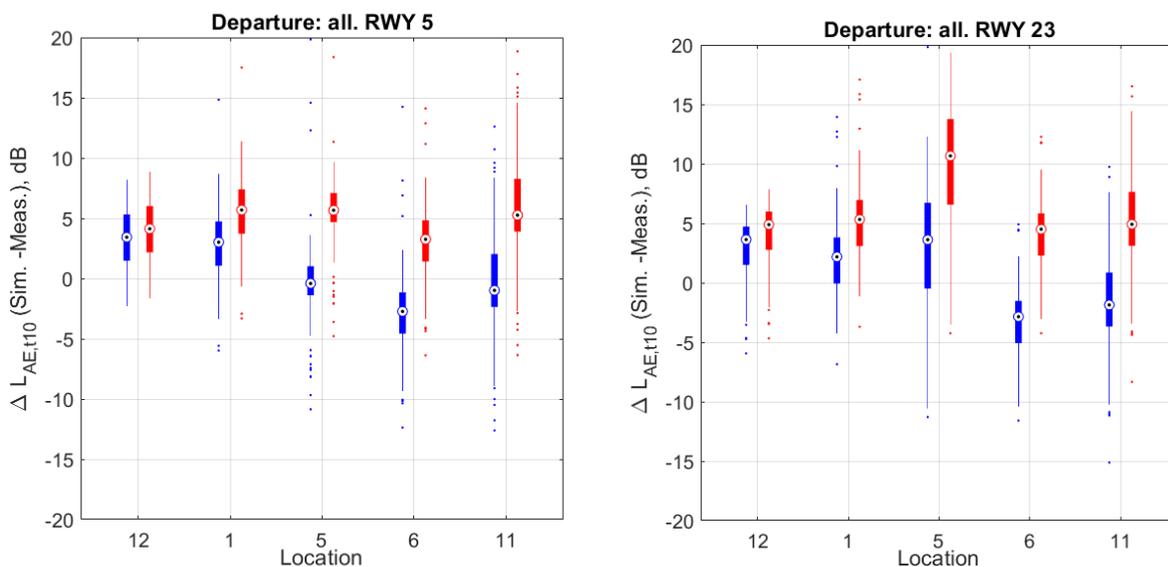


Abbildung 6-22 Boxplot der Differenz zwischen Simulation (FLULA2) und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) ohne Cockpit-Daten (blaue Boxplots: mit Bodenzusatzdämpfung, rote Boxplots: ohne Bodenzusatzdämpfung), aufgeteilt nach Messpunkt. Links: Starts auf Piste 05. Rechts: Starts auf Piste 23.

Bei ausgeschalteter Bodenzusatzdämpfung zeigt sich wie auch bei den Flügen mit Cockpit-Daten beobachtet eine deutliche Überschätzung an allen Messpunkten. Die Messpunkte 6 und 11 werden dabei im

Mittel zwischen 2.5 und 5 dB überschätzt. Der Messpunkt 5 in Startrichtung 23 wird im Mittel sogar bis zu 10 dB überschätzt. Somit zeigen die Simulationen der Flüge ohne Cockpit-Daten weitestgehend dasselbe Bild wie die Flüge mit Cockpit-Daten: FLULA2 braucht zwingend die Korrektur für die Bodenzusatzdämpfung. Diese kann jedoch Pegel seitlich nahe an der Piste nicht hinreichend korrigieren, während in grösseren Abständen zur Flugbahn weiterhin eine Unterschätzung auftritt.

6.2.6. Berechnung sonAIR und FLULA2: Pegelzeitverläufe

Abbildung 6-23 zeigt beispielhaft die Pegelzeitverläufe zweier F/A-18-Flüge (Starts) mit Cockpit-Daten an den Messpunkten 12, 5, 6 und 11. Dabei sind jeweils der gemessene Pegel in schwarz, die sonAIR-Simulation in rot und die FLULA2-Simulation in gelb (durchgezogen: mit Bodenzusatzdämpfung; gestrichelt: ohne Bodenzusatzdämpfung) dargestellt.

sonAIR bildet den gemessenen Pegelzeitverlauf insgesamt gut nach, wobei auch Effekte wie der Übergang von indirektem zu direktem Schallausbreitungsweg beim Auftauchen des Flugzeuges hinter dem Hügel bei der Simulation an den Messpunkten 6 und 11 deutlich erkennbar sind. Die mit dem seitlichen Abstand zunehmenden Turbulenzschwankungen können dagegen von der Simulation nicht reproduziert werden.

Bei der FLULA2-Simulation fällt beim pistennahen Messpunkt 12 die starke Überschätzung des Pegels in der ersten Hälfte des Überflugs auf, während der Pegelabfall nach dem Passieren des Mikrofons gut reproduziert wurde. Dies ist ein Hinweis auf eine nach vorne zu starke Abstrahlung in der FLULA2-Richtcharakteristik des F/A-18. Die Zunahme der Bodenzusatzdämpfung von FLULA2 mit zunehmendem seitlichen Abstand und abnehmendem Schalleinfallswinkels ist über den gesamten Pegelzeitverlauf gut erkennbar. Bei den Messpunkten 6 und 11 zeigt sich wiederum die mit der Bodenzusatzdämpfung zu starke resultierende Dämpfung in grossen seitlichen Abständen. Hier verläuft bei beiden Flügen der simulierte Pegelverlauf deutlich unter dem gemessenen Verlauf.

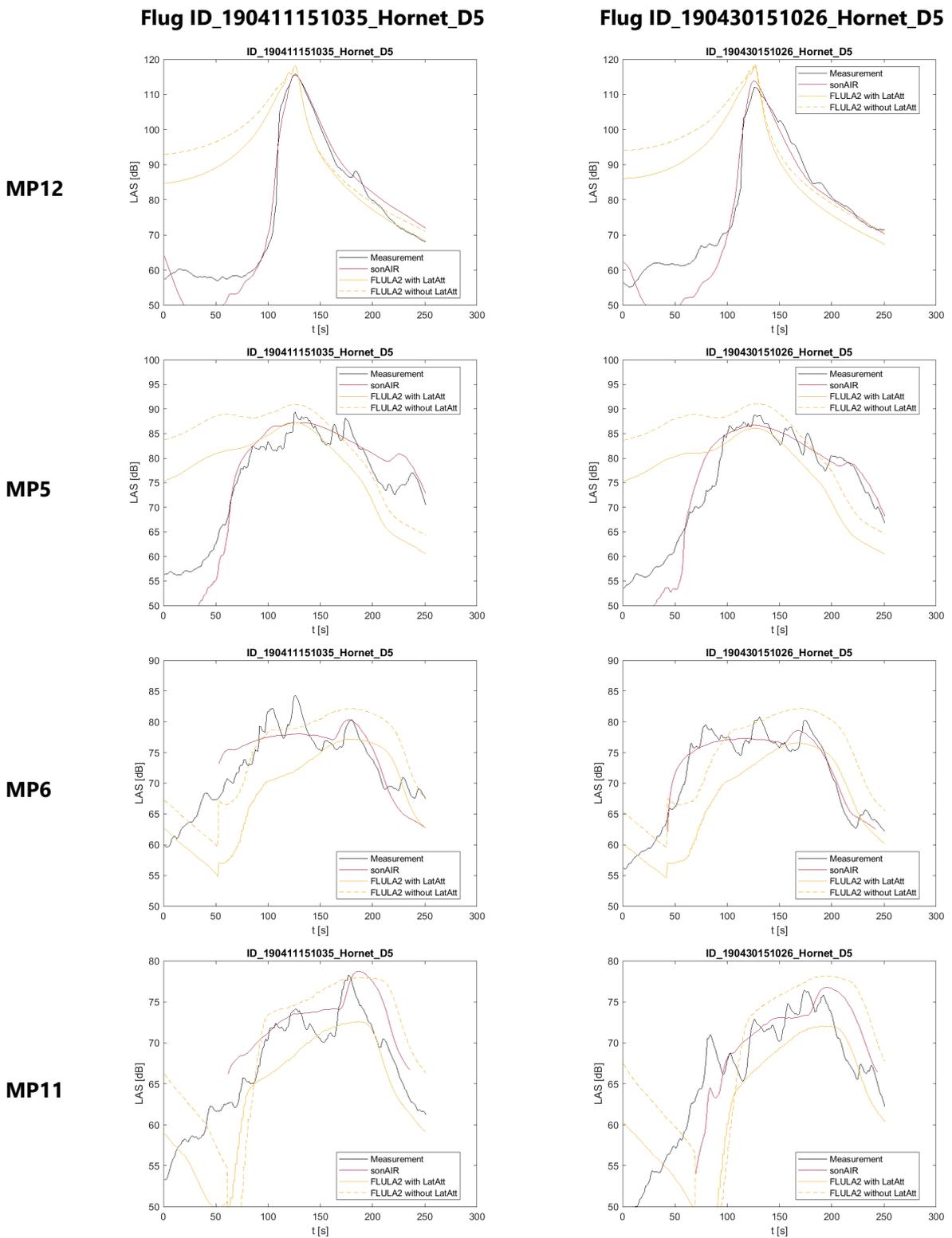


Abbildung 6-23 Vergleich Pegelzeitverläufe an der Messkette in der Pistenmitte von zwei exemplarischen Flügen (Starts) mit Cockpit-Daten zwischen Messungen (in Schwarz) und Simulationen (sonAIR in Rot; FLULA2 in Gelb – durchgezogen mit Bodenzusatzdämpfung, gestrichelt: ohne Bodenzusatzdämpfung).

6.2.7. L_{AE} -Footprints

Die bisherigen Analysen bezogen sich ausschliesslich auf Auswertungen an den einzelnen Messpositionen. Für eine räumliche Untersuchung wurde sowohl mit sonAIR als auch mit FLULA2 ein flächendeckender L_{AE} -Footprint berechnet. In FLULA2 wurde die Berechnung dabei sowohl mit als auch ohne Bodenzusatzdämpfung durchgeführt. Als Input für die Simulationen wurden die gemittelten F/A-18-Flugprofile, welche auf einen idealisierten Geradeausflug gefaltet wurden, verwendet. Abbildung 6-24 und Abbildung 6-25 zeigen die 100 dB-Konturen der Simulationen für den Start 23 bzw. für die Landung 23. Dabei ist zu beachten, dass, während hier ein Geradeausflug simuliert wurde, die Flugzeuge in Realität beim Start üblicherweise kurz nach dem Pistenende nach Norden oder Süden abdrehen. Daher kann aus den gezeigten Konturen nicht auf die reale räumliche Belastung geschlossen werden. Weiter ist zu beachten, dass es sich bei den gezeigten Kurven nicht um Grenzwertkurven nach Lärmschutz-Verordnung (LSV) handelt.

Die FLULA2-Simulation ohne Bodenzusatzdämpfung zeigt beim Start seitlich der Piste und bei der Landung eine deutlich grössere laterale Ausdehnung. Mit Bodenzusatzdämpfung sind die Konturen von sonAIR und FLULA2 aber sehr ähnlich. Dabei zeigt die sonAIR-Kontur insbesondere beim Start stärkere kleinräumige Fluktuationen. Diese sind darauf zurückzuführen, dass sonAIR die reale Bodenbedeckung sowie die Hinderniswirkung von Gebäuden berücksichtigt, während FLULA2 einheitliche Bodeneigenschaften verwendet und ohne Gebäude rechnet. Die physikalische Beschreibung von Ausbreitungsphänomenen in sonAIR bildet somit die in der Bodenzusatzdämpfung empirisch berücksichtigten Phänomene in Situationen mit streifendem Schalleinfall adäquat ab.

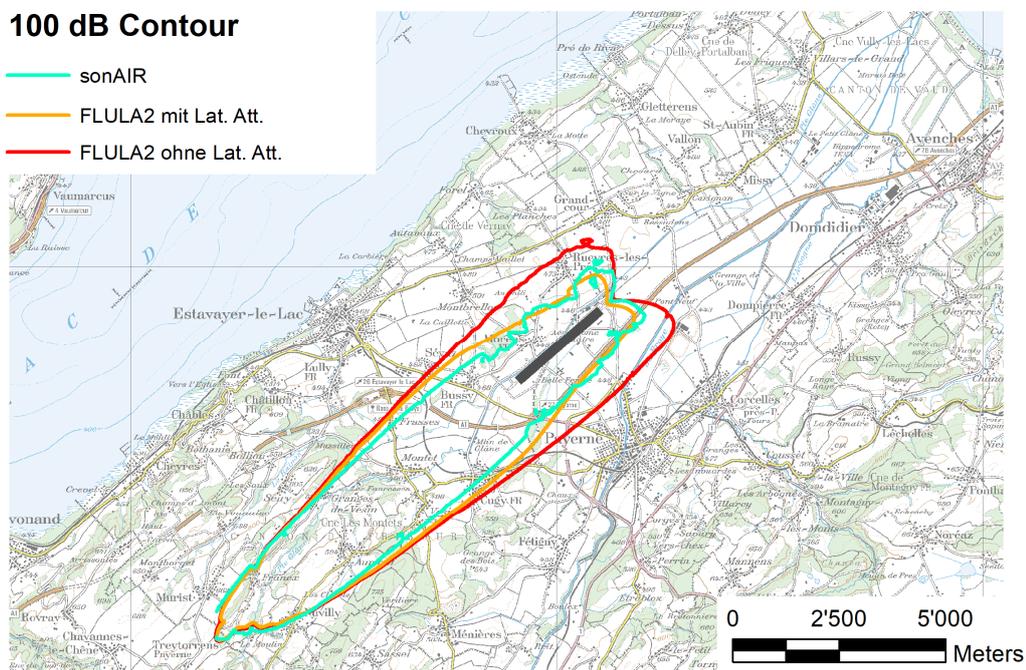


Abbildung 6-24 Vergleich der Simulationsvarianten anhand der 100dBA-Kontur des L_{AE} eines F/A-18-Starts (Karte © 2020 swisstopo).

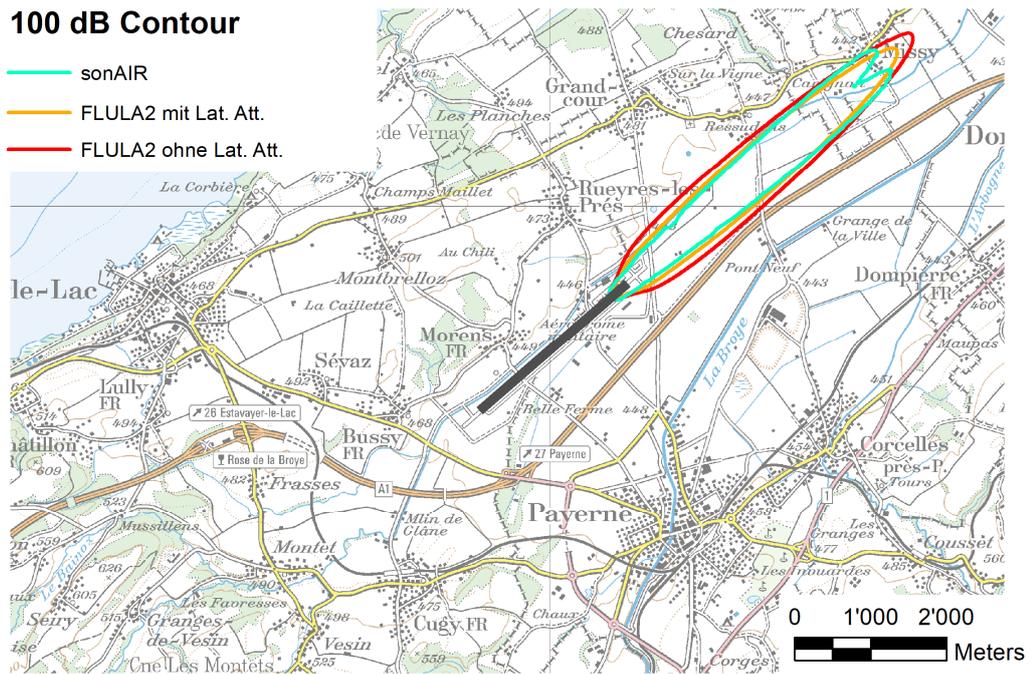


Abbildung 6-25 Vergleich der Simulationsvarianten anhand der 100dBA-Kontur des L_{AE} einer F/A-18-Landung (Karte © 2020 swisstopo).

7. Diskussion

7.1. Streifender Schalleinfall in Zürich

Die Vergleiche in Zürich (Kap. 6.1) legen nahe, dass die laterale Richtwirkung der sonAIR-Emissionsmodelle in Kombination mit der physikalischen Modellierung der Ausbreitungsphänomene von sonX ausreichend scheinen, um solche Situationen adäquat zu reproduzieren. FLULA2 (wie auch weitere *Best Practice* Modelle) benötigen hingegen zwingend eine empirische Bodenzusatzdämpfung zur Berücksichtigung solcher Phänomene. Im Gegensatz zu anderen *Best Practice* Modellen kennt FLULA2 keinen distanzunabhängigen Installationseffekt und verwendet nur distanzabhängige Terme in der Bodenzusatzdämpfung. Dies wird als Ursache vermutet, weshalb FLULA2 in grossen Distanzen eine Tendenz zur Überschätzung der Dämpfung bzw. zur Unterschätzung der Immissionspegel zeigt.

Beide Modelle (sonAIR und FLULA2 mit Bodenzusatzdämpfung) vermögen zwar die Situationen insbesondere bei den Messpunkten O, O1 und O2 nicht perfekt nachzubilden, allerdings gilt hierbei zu beachten, dass auch die Messungen in diesen Situationen (tiefe Pegel) mit erhöhten Unsicherheiten behaftet sind.

Die Bodenbedeckung bzw. Bepflanzung können die Unzulänglichkeiten in der Modellierung des streifenden Schalleinfalls von soAIR kaum erklären. Auch die Quellenmodellierung (Installationseffekte) und die Meteobedingungen vermögen die Differenzen kaum zu erklären. So zeigen die Untersuchungen für die vorliegenden Geometrien und Messdaten keinen massgeblichen Meteoeinfluss. Somit scheinen die Differenzen wohl auf Ausbreitungseffekte, insb. Turbulenzeinflüsse und Bodeneffekte, zurückzuführen sein, welche bisher nicht genügend abgebildet werden können; eine Erklärung hierfür steht jedoch aus.

7.2. Streifender Schalleinfall in Payerne

Die Vergleiche in Payerne (Kap. 6.2) zeigen die Fähigkeit von sonAIR, auch Geometrien mit streifendem Schalleinfall in grossen Abständen akkurat zu reproduzieren. Insbesondere die gute Übereinstimmung an den Messpunkten 6 und 11, deren Messdaten nicht in die Modellerstellung des F/A-18 einfließen, stützen diesen Befund. Dies bestätigt wie bereits für den Flughafen Zürich, dass die 3D-Quellenmodelle in Kombination mit der physikalischen Ausbreitungsberechnung die Phänomene in Situationen mit streifendem Schalleinfall bereits implizit berücksichtigen.

Anders sieht es wiederum bei FLULA2 aus: ohne Berücksichtigung der Bodenzusatzdämpfung überschätzt das Modell die Immissionen an den seitlichen Messpunkten um bis zu 7 dB, was die Notwendigkeit und Angemessenheit der implementierten Korrektur demonstriert. Mit der Bodenzusatzdämpfung reproduzierte FLULA2 die Messungen im Mittel ebenfalls gut, wenn auch mit einer etwas grösseren Streuung als sonAIR. Bei den seitlichen Messstationen zeigt sich aber ein distanzabhängiger Trend als Folge der Bodenzusatzdämpfung. Die pistennahen Messpunkte 12 und 1 wurden von FLULA2 beim Start im $L_{AE,t10}$ deutlich überschätzt. Messpunkt 5 in 1.2 km Entfernung wurde gut reproduziert, während die Pegel bei den weiter entfernten Messpunkten 6 und 11 deutlich unterschätzt wurden.

Ursache dieses Trends dürfte ein Zusammenspiel dreier Effekte sein. Erstens zeigt der Vergleich der gemessenen Pegel-Zeit-Verläufe mit denjenigen von FLULA2 und sonAIR (Abbildung 6-23), dass FLULA2 die Messungen vor allem in der ersten Hälfte (Pegelanstieg, in welcher sich das Flugzeug auf das Mikrofon zubewegt), stark überschätzt, während der $L_{AS,max}$ sowie der Pegelabfall nach Passieren des Messpunktes ansprechend reproduziert werden. Dies lässt darauf schliessen, dass die Richtcharakteristik von FLULA2 nach vorne zu hohe Emissionen (d.h. zu starke Richtwirkung) ausweist. Dies führt auch zu einem erhöhten $L_{AE,t10}$. sonAIR hingegen bildet den steilen Pegelanstieg kurz vor dem Passieren des Messpunktes gut ab, was zu einer besseren Übereinstimmung im $L_{AE,t10}$ führt.

Zweitens führt die laterale Richtwirkung der 3D-Quellenmodelle des F/A-18 in sonAIR bei flachem Schalleinfall zu reduzierten Immissionen (vgl. Kap. 6.2.3). Dieser Installationseffekt kann mit den rotationssymmetrischen 2D-Richtcharakteristiken von FLULA2 nicht berücksichtigt werden. Auch wenn der Installationseffekt teilweise durch die Bodenzusatzdämpfung berücksichtigt wird, führt deren Distanzabhängigkeit zu den beobachteten Pegelüberschätzungen in Pistennähe (kurze Ausbreitungsdistanzen).

Drittens führt die Distanzabhängigkeit der Bodenzusatzdämpfung bei grossen Ausbreitungsdistanzen zu einer Überschätzung der Dämpfung bzw. Unterschätzung der Immissionspegel. Allerdings tritt die Überschätzung der Dämpfung bei streifenden Einfallswinkeln erst in relativ grossen seitlichen Abständen auf, welche bei Grossflugzeugen aufgrund der tiefen Emissionspegel messtechnisch nur schwer erfasst werden können. Daher konnte die Bodenzusatzdämpfung bisher auch nicht in solch grossen Abständen validiert werden. Basierend auf der hier präsentierten Analyse der Daten aus Payerne kann jedoch geschlossen werden, dass sonAIR die seitliche Schallausbreitung über das gesamte Distanzspektrum etwas besser zu reproduzieren vermag als FLULA2.

8. Schlussfolgerungen

Die Situationen mit streifendem Schalleinfall zeigen bei Grossflugzeugen wie auch für den F/A-18, dass sonAIR und FLULA2 diese ähnlich gut abbilden können. Die laterale Richtwirkung der sonAIR-Emissionsmodelle in Kombination mit der physikalischen Modellierung der Ausbreitungsphänomene in sonX scheinen somit ausreichend, um solche Situationen zu reproduzieren. Eine ergänzende Bodenzusatzdämpfung, wie sie im Rahmen des Monitoring-Projektes [10] als mögliche Modellergänzung diskutiert wurde, erscheint nicht notwendig und wäre im Gegenteil sogar kontraproduktiv. Letztere ergibt jedoch gute Resultate in heutigen *Best Practice* Modellen, hier FLULA2, um Meteo- und Bodeneffekte pauschal mit einer empirischen Korrektur abzubilden. Allerdings zeigt sich eine Distanzabhängigkeit in der Bodenzusatzdämpfung. Die Dämpfung wächst mit zunehmender Ausbreitungsdistanz, was in kleinen Distanzen zu einer Überschätzung, in mittleren Distanzen zu einer guten Abbildung und in grossen Distanzen zu einer Unterschätzung der Immissionspegel führt. Somit kann sonAIR die seitliche Schallausbreitung über das gesamte Distanzspektrum etwas besser reproduzieren als FLULA2.

Beide Programme (sonAIR und FLULA2 mit Bodenzusatzdämpfung) vermögen die Situationen mit stark streifendem Schalleinfall und grossen Ausbreitungsdistanzen nicht perfekt nachzubilden. Allerdings gilt hierbei zu beachten, dass auch die Messungen in solchen Situationen (tiefe Pegel) mit erhöhten Unsicherheiten behaftet sind. Zudem liegen diese Situationen mit den tieferen Immissionspegeln üblicherweise ausserhalb von Gebieten mit LSV-relevanten Belastungen.

9. Dank

Wir danken dem Bundesamt für Umwelt BAFU für die Finanzierung des Projektes CompAIR, sowie der SWISS und der Luftwaffe für die Bewilligung zur Nutzung der Daten im Rahmen dieses Projektes.

10. Abkürzungen

$\Delta L_{AE,t10}$	absolute Differenzen im $L_{AE,t10}$ zwischen Simulation und Messung
FDR	Flight Data Recorder ("Cockpit-Daten")
GVA	Flughafen Genf
L_{AE}	Ereignispegel: Gesamtenergieinhalt eines Ereignisses normiert auf eine Sekunde, ausgedrückt als Pegelgrösse
$L_{AE,t10}$	L_{AE} eines Ereignisses normiert für die Zeitspanne, während welcher der L_{AS} weniger als 10 dB unter dem $L_{AS,max}$
$L_{AS,max}$	A-bewerteter Maximalpegel (Integration mit der Zeitkonstante Slow von 1 s)
NMT	Noise Monitoring Terminals ("Monitoringstationen")
PAY	Militärflugplatz Payerne
RC	Richtcharakteristik
ZRH	Flughafen Zürich

11. Literatur

- [1] BAFU, BAZL, GS VBS, 2016. *Leitfaden Fluglärm, Vorgaben für die Lärmermittlung. Umwelt-Vollzug, Lärm Nr. 1625*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL), Generalsekretariat des Eidg. Departementes für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS (GS VBS), Bern.
URL: www.bafu.admin.ch/fluglaerm-ermittlung.
- [2] DYN-CAT: *Lärmarme Anflugverfahren dank optimierten Auftriebshilfen und idealer Konfiguration*. Horizon 2020 (SESAR) Projekt, Projektpartner: DLR, Swiss Airlines, THALES, SkyLab, Projekt-Dauer 2020–2022.
- [3] ECAC, 2016. ECAC.CEAC Doc 29, 4th Edition, *Report on Standard Method of Computing Noise Contours around Civil Airports, Volume 2: Technical Guide, as endorsed by DGCA/147 on 7 December 2016*. ECAC, Neuilly-sur-Seine Cédex, France. URL: <https://www.ecac-ceac.org/ecac-docs>.
- [4] Empa, 2010. *FLULA2, Ein Verfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung. Technische Programm-Dokumentation. Version 4*. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
URL: <http://www.empa.ch/web/s509/flula2>.
- [5] Empa, 2016. *Dokumentation sonAIR: Entwicklung Emissionsmodell und Aufbau Emissionsdatenbank*. Bericht Nr. 5211.00687.100.12. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [6] Empa, 2016. *Dokumentation sonAIR: Quellenvermessung und Auswertung*. Bericht Nr. 5211.00687.100.13 - 1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf
- [7] Empa, 2016 *sonAIR Dokumentation (alle Berichte umfassend)*. Bericht-Nr. 5211.00687.100. Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung, Dübendorf
- [8] Empa, 2018. *Validierung sonAIR, Teil 3: Einfluss Waldreflexionen und Anpassungen Primärflächen*. Bericht Nr. 5211.01324.100.01-3. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [9] Empa, 2018. *Dokumentation SANC-TE -Berechnung mit sonAIR*. Bericht-Nr. 5214.017372. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [10] Empa, 2019. *Dokumentation sonAIR Monitoring Projekt*. Bericht-Nr. 5211.01323.100.01-1. Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung, Dübendorf.
- [11] Empa, 2019. *FLULA2 — Auswirkungen neuer, aus sonAIR abgeleiteter Quellendaten auf Fluglärmbelastungsrechnungen*. Bericht-Nr. 5214.019893, Empa, Abteilung Akustik/Lärminderung, Dübendorf.
- [12] European Union, 2002. *Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council of 25 June 2002 Relating to the Assessment and Management of Environmental Noise*. European Union, Bruxelles, Belgium. URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32002L0049>.
- [13] European Union, 2015. *COMMISSION DIRECTIVE (EU) 2015/996 of 19 May 2015 establishing common noise assessment methods according to Directive 2002/49/EC of the European Parliament and of the Council European Union*. European Union, Bruxelles, Belgium.
URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015L0996&from=EN>.
- [14] ICAO, 2018. *Doc 9911. 2nd Edition, Recommended Method for Computing Noise Contours Around Airports*. International Civil Aviation Organization (ICAO), Montréal, Canada.

- [15] Jäger, D., C. Zellmann, F. Schlatter, J.M. Wunderli, 2021. *Validation of the sonAIR aircraft noise simulation model*. Noise Mapping 8, 95–107.
- [16] Krebs, W., R. Bütikofer, S. Plüss, G. Thomann, 2006. *Spectral three-dimensional sound directivity models for fixed wing aircraft*. Acta Acustica united with Acustica, 92, 269-277.
- [17] Krebs, W., G. Thomann, 2009. *Aircraft noise: new aspects on lateral sound attenuation*. Acta Acustica united with Acustica, 95, 1013-1023.
- [18] Parkin, P.H., W.E. Scholes, 1964: *The horizontal propagation of sound from a jet-engine close to the ground at Radlett*. Journal of Sound and Vibration 1, 1-13.
- [19] Parkin, P.H., W.E. Scholes, 1965: *The horizontal propagation of sound from a jet-engine close to the ground at Hatfield*. Journal of Sound and Vibration 2, 353-374.
- [20] Thomann, G., 2007. *Mess- und Berechnungsunsicherheit von Fluglärmbelastungen und ihre Konsequenzen*. Dissertation, Diss. ETH Nr. 17433. ETH Zürich, Zürich, Schweiz.
URL: <http://e-collection.ethbib.ethz.ch/view/eth:29931>.
- [21] U.S. DOT, 2019. Aviation Environmental Design Tool (AEDT), Technical Manual, Version 3b. U.S. Dept. of Transportation, Federal Aviation Administration, 468 pp.
URL: https://aedt.faa.gov/Documents/AEDT3b_UserGuide.pdf
- [22] Wiener, F.M., D.N. Keast, 1959. *Experimental study of sound over ground*. Journal of the Acoustical Society of America 31, 724-733.
- [23] Zellmann, C., B. Schäffer, J.M. Wunderli, U. Isermann, C.O. Paschereit, 2017. *Aircraft Noise Emission Model Accounting for Aircraft Flight Parameters*. Journal of Aircraft 55, 682-695.
- [24] Zellmann, C., 2018. *Development of an Aircraft Noise Emission Model Accounting for Flight Parameters*. Doctoral thesis. Institute of Fluid Dynamics and Technical Acoustics. Technische Universität Berlin, 168, Berlin.

12. Anhang

12.1. sonAIR Modellvarianten

Version	Bedeutung	Regressionsformel	Regdata
V1.0-0436	Modell zum Ende des sonAIR-Projekts 2016 [5]		V2.3
1.1-0006	Modell zum Testen des Einflusses einer seitlichen RC beim Umströmungslärm	Airframe-Modell erweitert um Phi (laterale Richtwirkung), ohne weitere Interaktionen	V2.3
1.1-0011	Frühere Regressionsdaten, Zwischenversion	Umströmungslärmmodell und Antriebslärmmodell wie in V1.0-0436	V2.3
1.1-0013	Offizielle Modellvariante wie publiziert in [23], [24] und [15] Die Formeln entsprechen V1.0-0436, jedoch basieren die Koeffizienten auf aktualisierten Regressionsdaten vom Validierungsprojekt.	Umströmungslärmmodell und Antriebslärmmodell wie in V1.0-0436	V3.1
1.1-0017	Zwischenversion aus Monitoringprojekt, existiert nur für neue Typen (B77W, BCS1/3)	Umströmungslärm reduziert um den Parameter logarithmierte Dichte (IRho) ohne Interaktionen Antriebslärmmodell wie in Dissertation	V0.4
1.1-0018	Endversion aus Monitoringprojekt, mittlerweile wieder zurückgenommen. Existiert nur für neue Typen (B77W, BCS1/3)	Umströmungslärm wie in Dissertation Antriebslärmmodell erweitert um den Parameter Dichte (Rho) ohne Interaktionen	V0.4

Regressionsdaten

V2.3: Endstand sonAIR Projekt 2016 [6], sonX V2.0.9a/2.0.B für Nahbereich/Fernbereich

V3.1: Rückrechnung konsistent mit sonX V2.8.8 mit Update der Bodenbedeckung und Waldreflexionen, s. [8]

V0.4: Regressionsdaten aus Messung 2018 mit neuer Versionierung nur für neue Typen (B77W, BCS1/3)

12.2. Vergleiche zur Bodenzusatzdämpfung – übrige FDR-Typen

12.2.1. Berechnung sonAIR: Ereignispegel

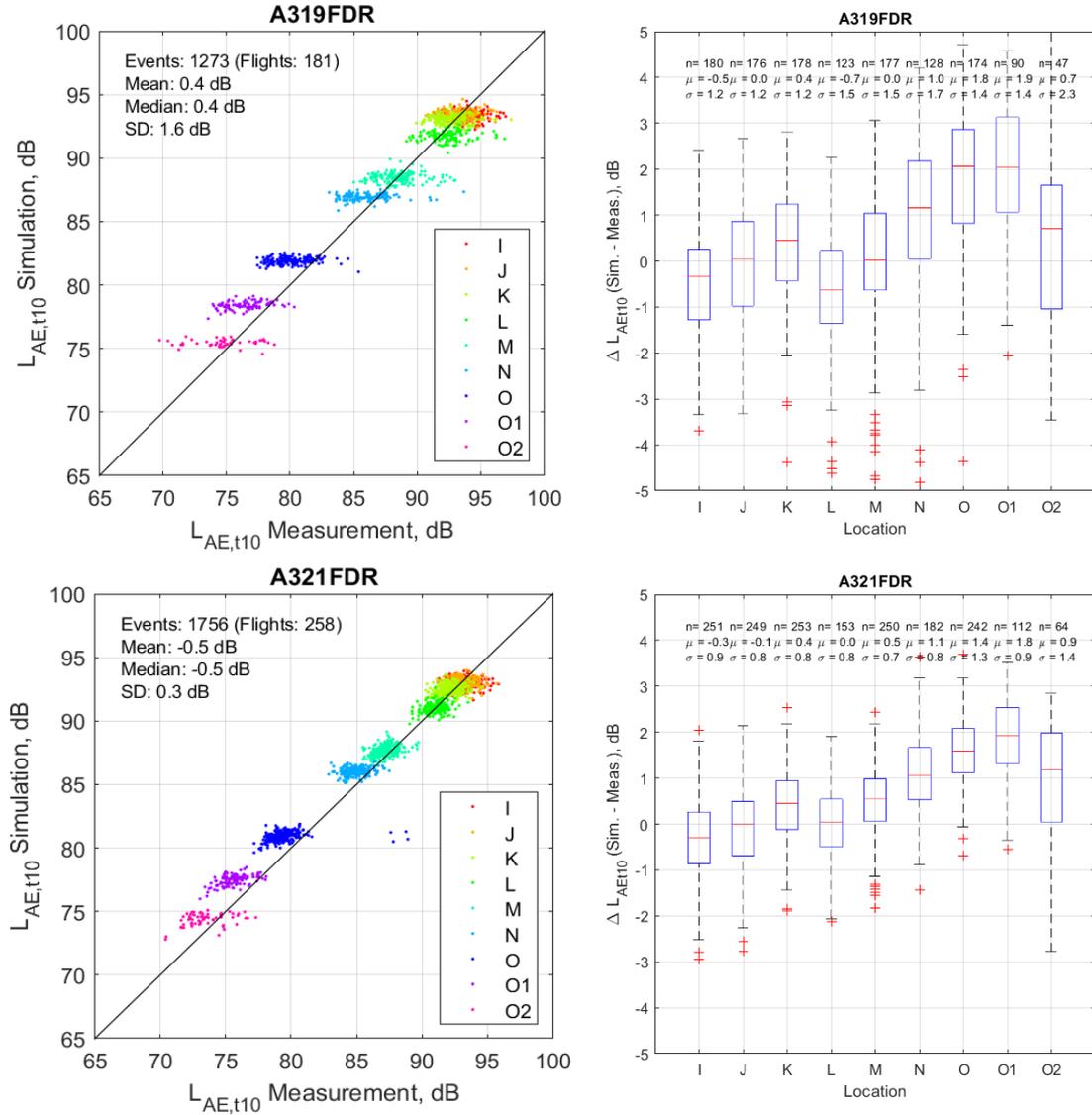


Abbildung 12-1: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (sonAIR) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts) für den A319 und A321 am Flughafen Zürich, gruppiert nach den Messpunkten I bis O, O1 und O2.

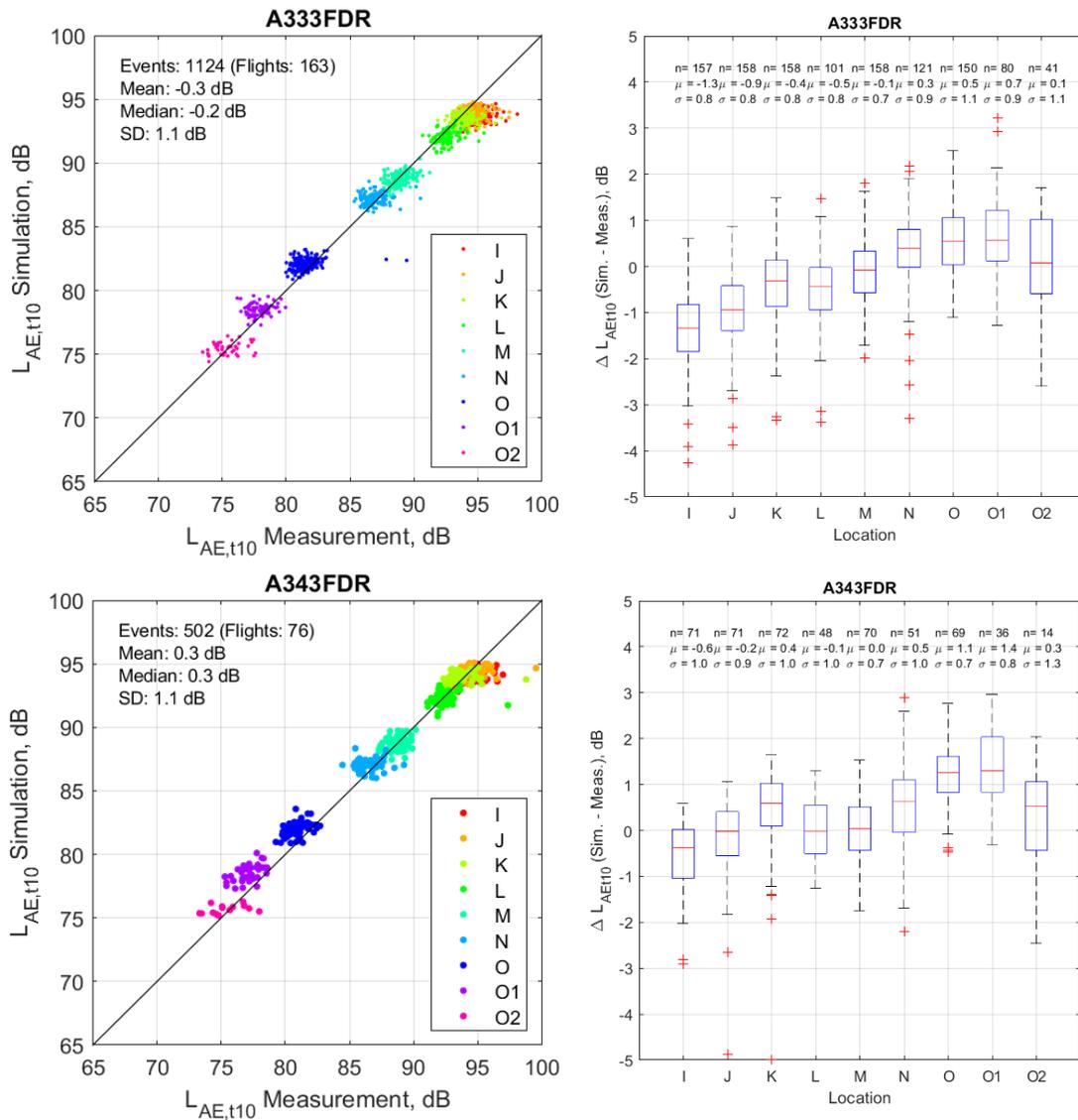


Abbildung 12-2: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (sonAIR) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts) für den A333 und A343 am Flughafen Zürich, gruppiert nach den Messpunkten I bis O, O1 und O2.

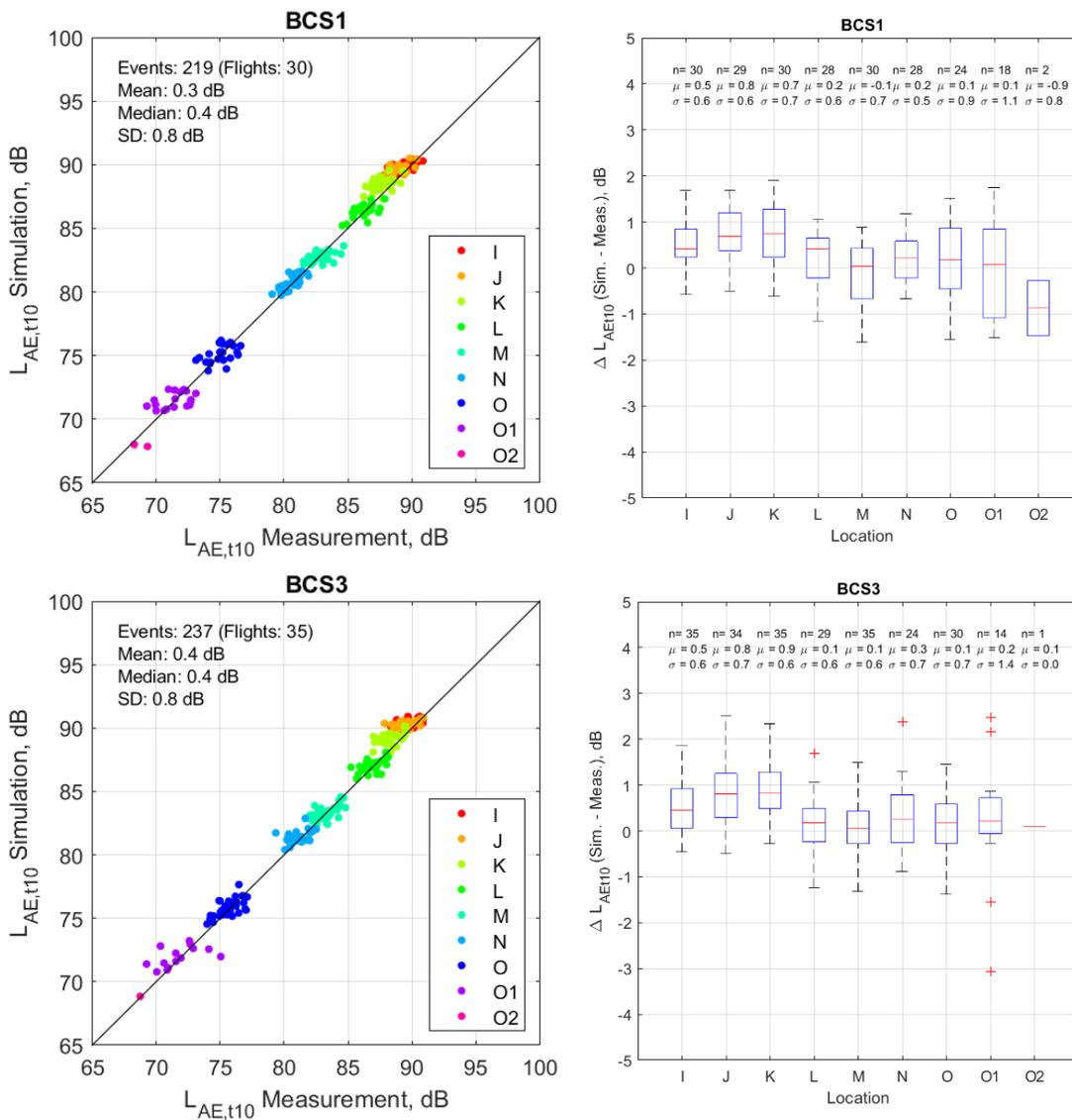


Abbildung 12-3: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (sonAIR) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts) für den BCS1 und BCS3 am Flughafen Zürich, gruppiert nach den Messpunkten I bis O, O1 und O2.

12.2.2. Berechnung FLULA2: Ereignispegel

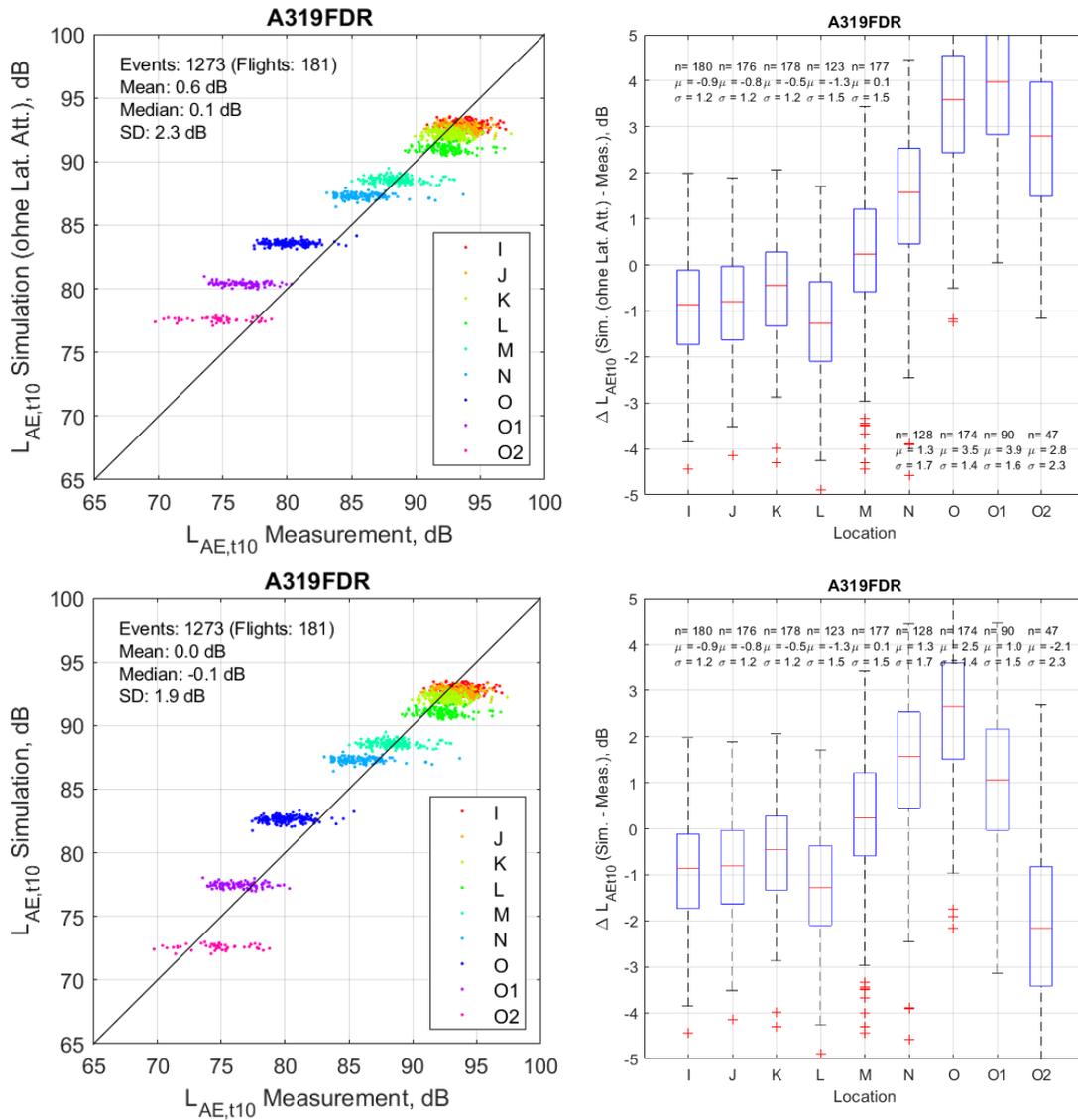


Abbildung 12-4: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (FLULA2) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts) für den A319 am Flughafen Zürich, ohne (oben) und mit Bodenzusatzdämpfung (unten).

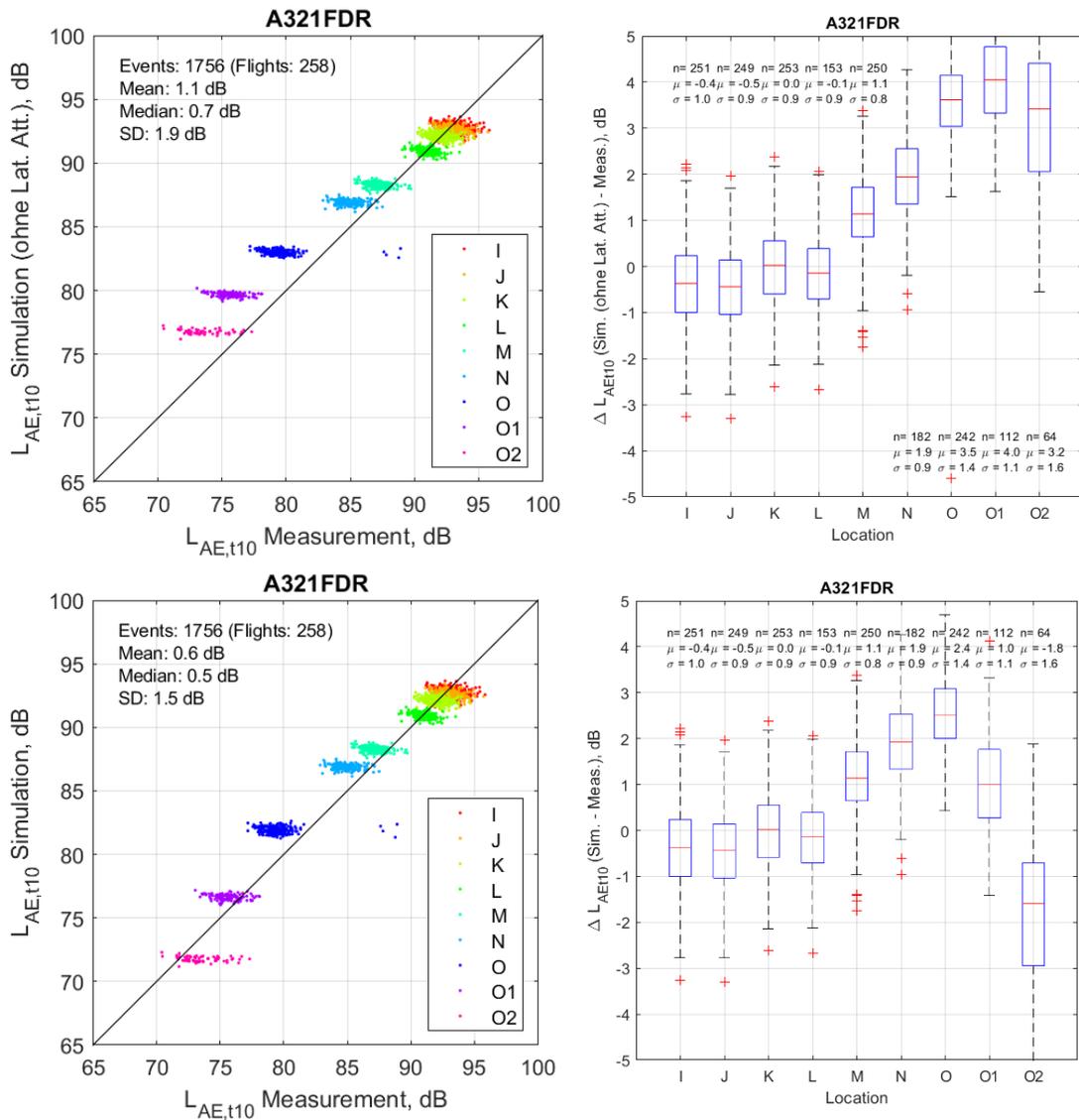


Abbildung 12-5: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (FLULA2) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts) für den A321 am Flughafen Zürich, ohne (oben) und mit Bodenzusatzdämpfung (unten).

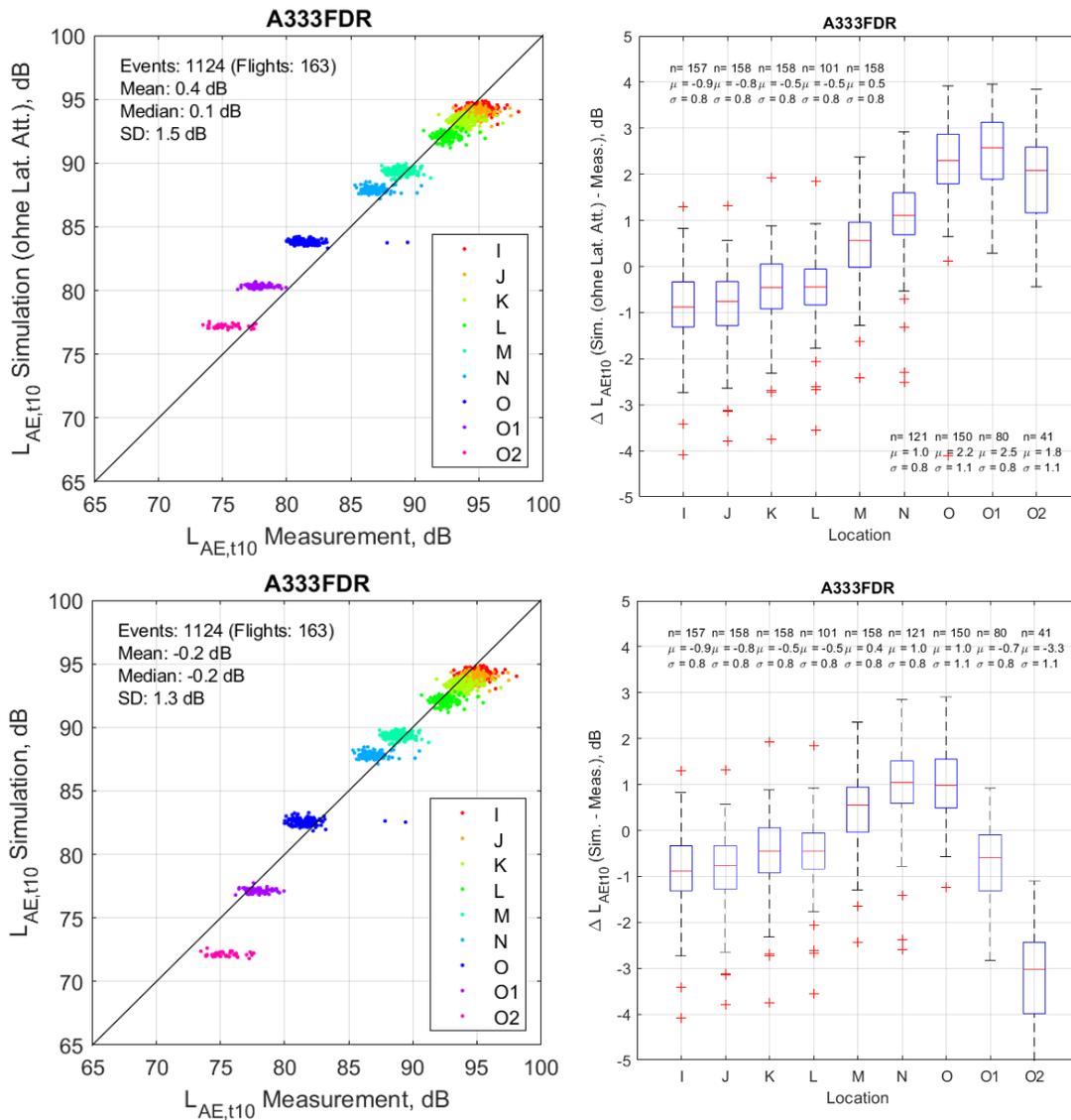


Abbildung 12-6: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (FLULA2) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts) für den A333 am Flughafen Zürich, ohne (oben) und mit Bodenzusatzdämpfung (unten).

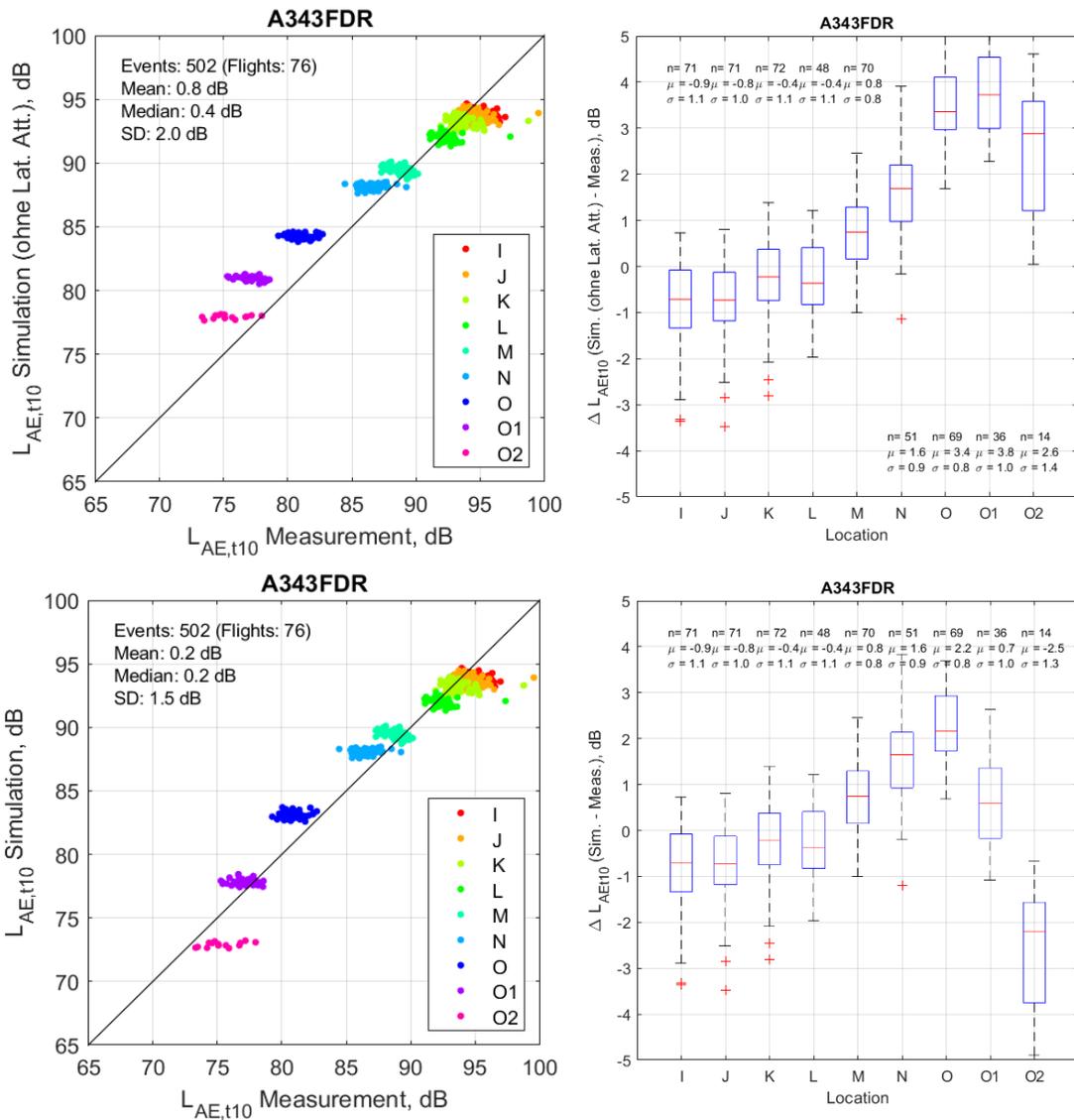


Abbildung 12-7: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (FLULA2) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts) für den A343 am Flughafen Zürich, ohne (oben) und mit Bodenzusatzdämpfung (unten).

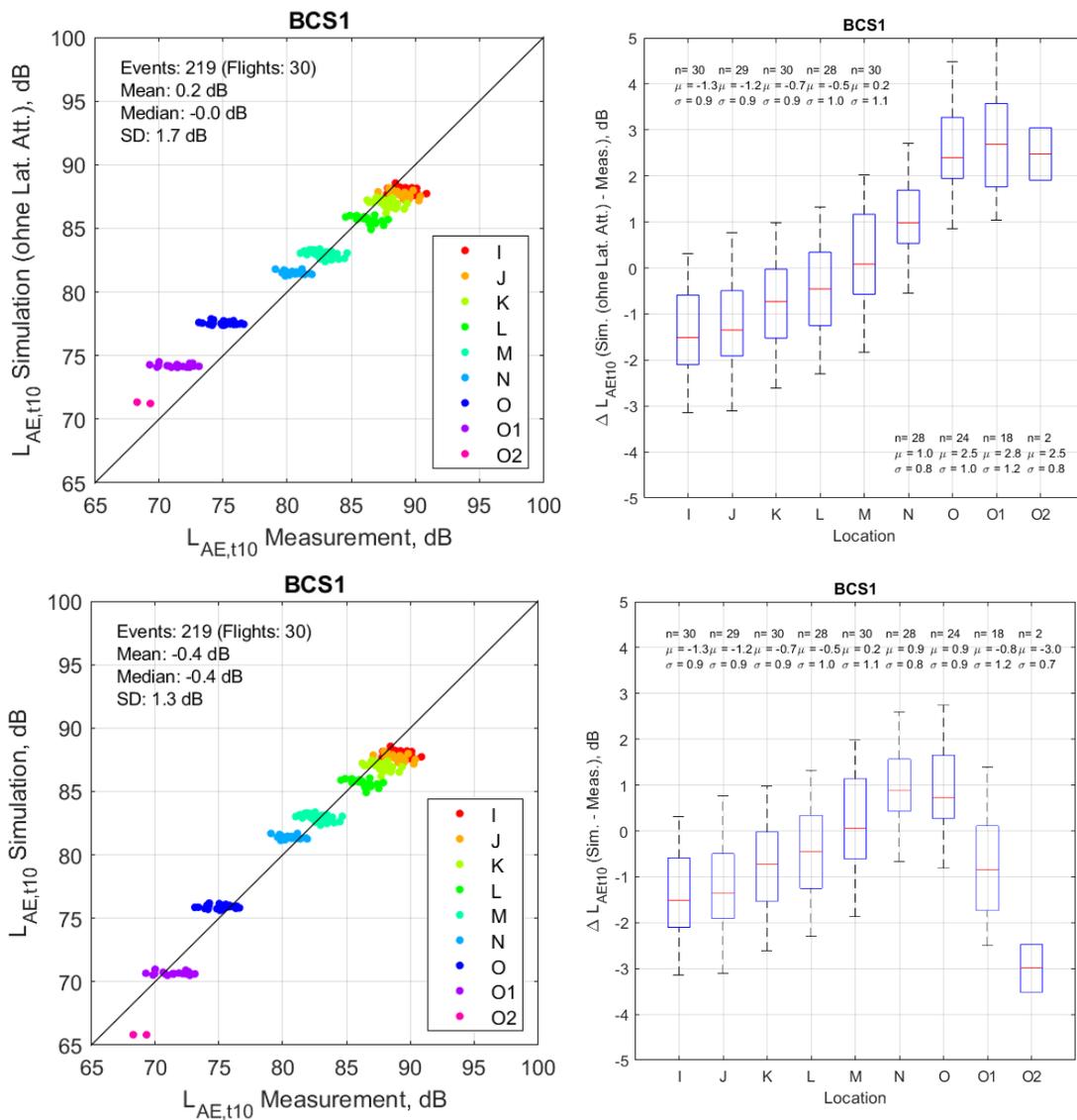


Abbildung 12-8: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (FLULA2) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts) für den BCS1 am Flughafen Zürich, ohne (oben) und mit Bodenzusatzdämpfung (unten).

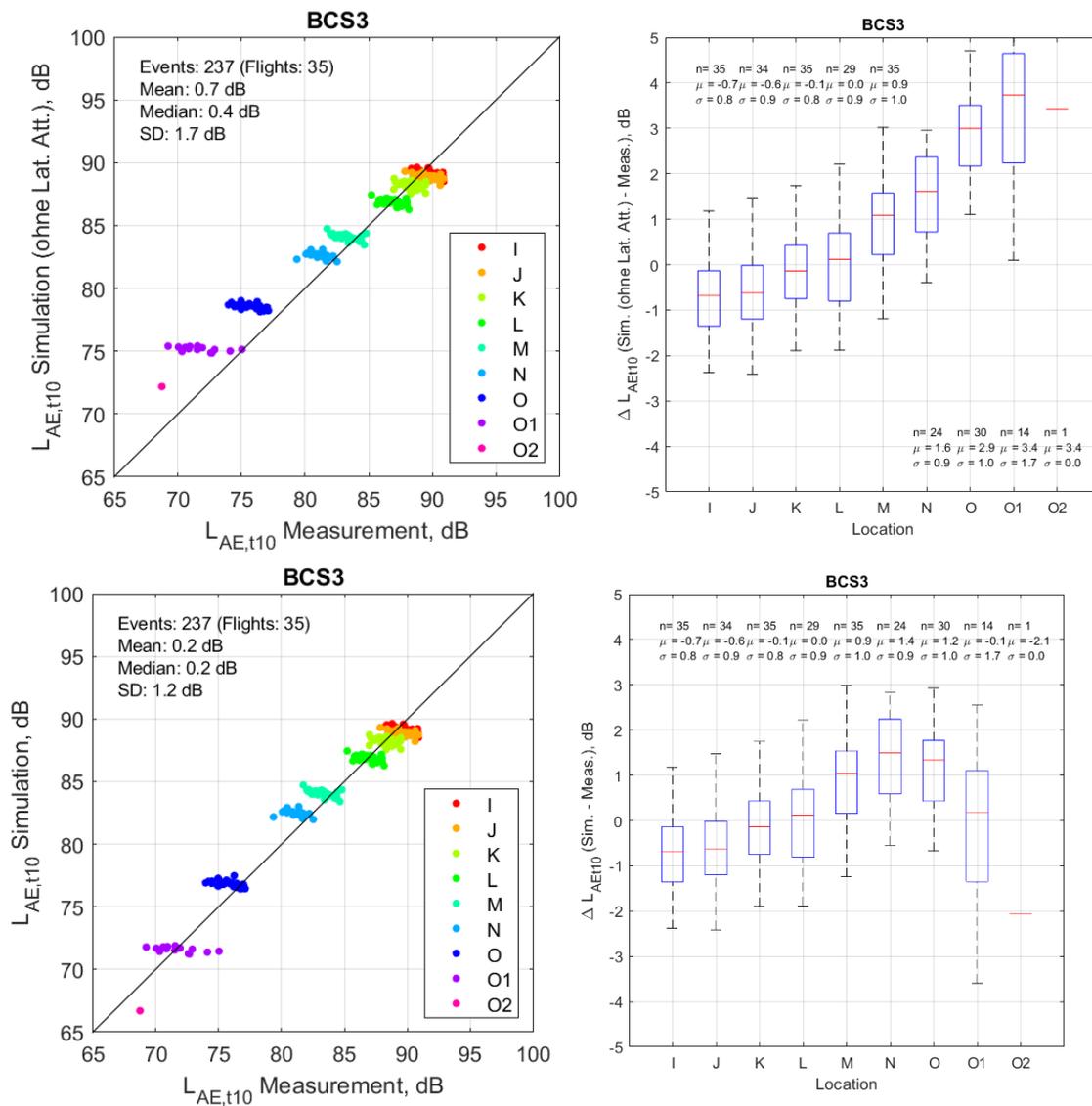


Abbildung 12-9: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (FLULA2) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts) für den BCS3 am Flughafen Zürich, ohne (oben) und mit Bodenzusatzdämpfung (unten).

12.3. Verifizierung B77W, BCS1 und BCS3 mit Daten O1/O2 bei Modellerstellung

Verifizierung der sonAIR-Typen B77W, BCS1 und BCS3 **mit O1/O2** bei Modellerstellung (Basis: V1.1-0017). In der Verifizierung lassen sich kaum Unterschiede zu den Modellen ohne O1/O2 bei der Modellerstellung ausmachen.

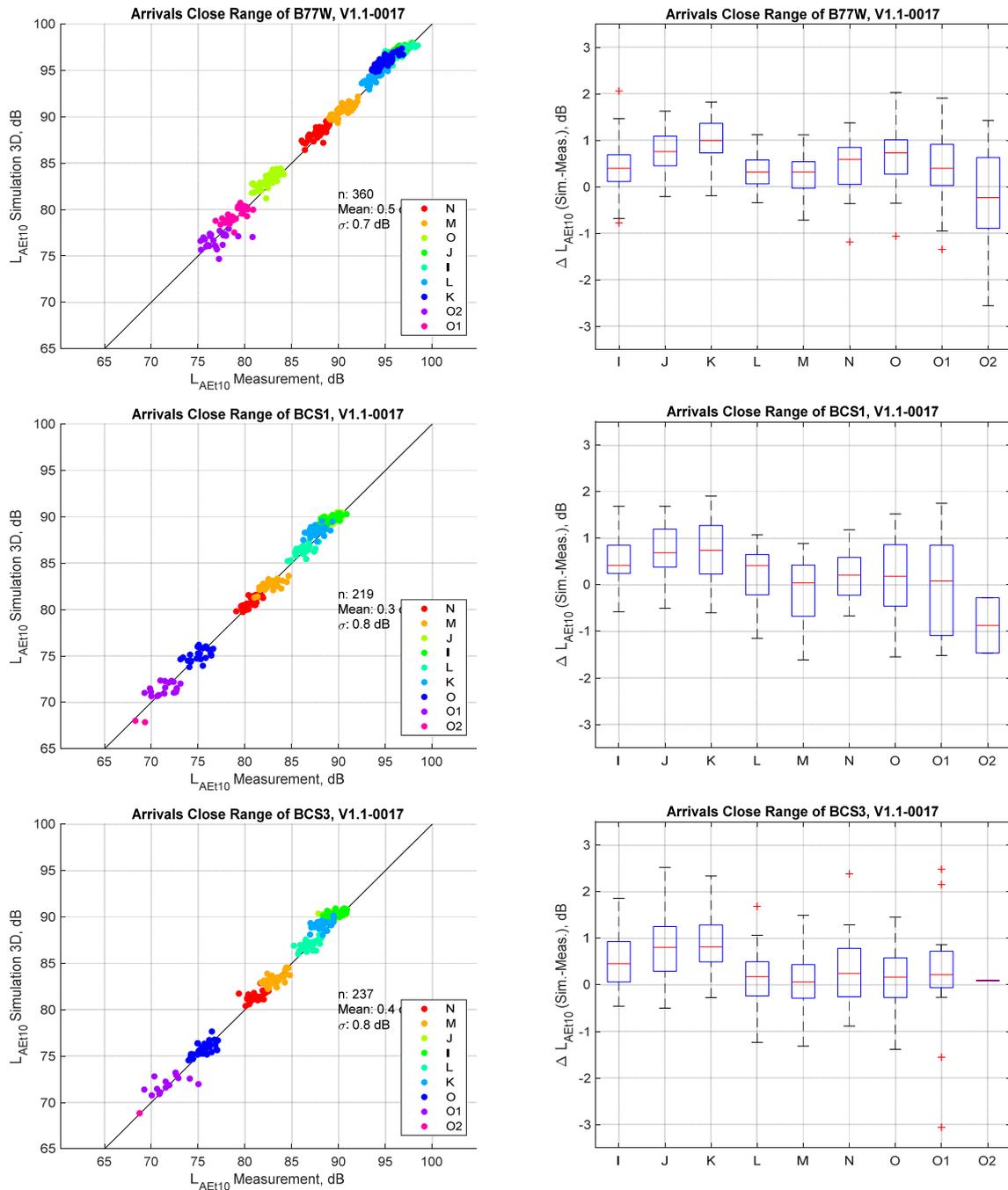


Abbildung 12-10: Scatterplot des $L_{AE,t10}$ der Simulationen (sonAIR) vs. Messungen (links) und Boxplot der Differenz zwischen Simulation und Messung ($\Delta L_{AE,t10}$) (rechts) für den B77W, BCS1 und BCS3 am Flughafen Zürich, Quellenmodelle mit O1/O2 bei Modellerstellung.

12.4. Datengrundlagen, Skripte

Hauptverzeichnis (*) Projektordner: G:\509-Projekte\Fluglaerm\InArbeit\5211.01812.100.01_CompAIR\

12.4.1. Berechnungsgrundlagen

PAY: Aus Kampfflugzeug-Projekt: K:\NKF\5214019353 NKF_Evaluation\ (**eingeschränkter Zugang**)

Messauswertung: K:\NKF\5214019353 NKF_Evaluation\Auswertung\Ereignisauswertung_Stand20200313\

- Ausgeschnittene Wave-Files
- Event-spezifische FDR-Daten
- Bewegungslisten

ZRH:

Aus sonAIR Validierung und Monitoring:

K:\sonAIR\BV86-Anträge2016\5211.01323 Monitoring\

- Bewegungslisten
- sonAIR Trajektorien
- Messstandorte

K:\sonAIR\BV86-Anträge2016\5211.01324 Validierung\

- Bewegungslisten
- sonAIR Trajektorien
- Messstandorte

12.4.2. Modellspezifische Daten

PAY:

sonAIR: Aus Kampfflugzeug-Projekt: K:\NKF\5214019353 NKF_Evaluation\ (**eingeschränkter Zugang**)

Simulationsergebnisse: K:\NKF\5214019353 NKF_Evaluation\Auswertung\Simulation_Stand20200313\

- Bewegungsliste
- .\ Trajektorien_sonAIR\; sonAIR-Trajektorien
- .\sonX\; Dämpfungsberechnung mit allen Inputs

FLULA2:

- FLULA2 TC-Files:
 - * \Berechnungen\FLULA2\xxxx\ TC\
(mit FDR-Daten: \xxxx\ = \PAY_mitFDR\
(ohne FDR-Daten: \xxxx\ = \PAY_ohneFDR\
- FLULA2 Steuer- und Inputfiles für die Simulation:

- * \Berechnungen\FLULA2\xxxx\Steuerfiles\
- FLULA2 RC-Files:
 - * \RC\RC2019_01\
- FLULA2 Geländemodell PAY:
 - * \Berechnungen\FLULA2\xxxx\Steuerfiles\Terrain_Coarse.asc
- FLULA2 Footprints (Resultate)
 - * \Berechnungen\FLULA2\xxxx\Resultate\
- FLULA2 Pegelzeitverläufe
 - *\Berechnungen\FLULA2\xxxx\Pegelzeitverlauf\

ZRH:

FLULA2:

- FLULA2 TC-Files:
 - * \Berechnungen\FLULA2\ ZRH_mitFDR\O1_O2\ TC\
- FLULA2 Steuer- und Inputfiles für die Simulation:
 - * \Berechnungen\FLULA2\ ZRH_mitFDR\O1_O2\Steuerfiles\
- FLULA2 RC-Files:
 - * \RC\RC2019_01\
- FLULA2 Geländemodell ZRH:
 - * D:\ZRH\ZRH_634206_742310_25.ASC
- FLULA2 Pegelzeitverläufe
 - * \Berechnungen\FLULA2\ZRH_mitFDR\O1_O2\Pegelzeitverlauf\

12.4.3. Plots

PAY:

sonAIR: Aus Kampfflugzeug-Projekt: K:\NKF\5214019353 NKF_Evaluation\ (**eingeschränkter Zugang**)

Simulationsergebnisse: K:\NKF\5214019353 NKF_Evaluation\Auswertung\Simulation_Stand20200313\

- .\Ergebnisse\V2.0-0005\; Simulationsergebnisse
- .\Ergebnisse\Vergleichplots\; Box- und Scatterplots, LAS-Vergleiche
- .\SIM_3D\V2.0-0005\; simulierte LAS-Verläufe

FLULA2:

* \Berechnungen\FLULA2\xxxx\Plots\

(mit FDR-Daten: \xxxx\ = \PAY_mitFDR\)

(ohne FDR-Daten: \xxxx\ = \PAY_ohneFDR\)

ZRH:

* \Berechnungen\O1_O2\Plots\

12.4.4. Skripte

PAY:

sonAIR: Aus Kampfflugzeug-Projekt: K:\NKF\5214019353 NKF_Evaluation\Matlab\ (**eingeschränkter Zugang**)

- *NKF_Simulation_Analyse.m*: Auswertung der simulierten Flüge mit FDR-Daten
- *NKF_Simulation_Analyse_nonFDR.m*: Auswertung der simulierten Flüge ohne FDR-Daten
- *Vgl_PegelZeitVerlauf_SIM_MEAS.m*: Einlesen und Plotten von beispielhaften Pegel-Zeit-Verläufen (inkl. FLULA2-Vergleich)

FLULA2:

* \Berechnungen\FLULA2\xxxx\Matlab\

(mit FDR-Daten: \xxxx) = \PAY_mitFDR\

(ohne FDR-Daten: \xxxx) = \PAY_ohneFDR\

- *A_txt_to_TC.m*: Zur Umwandlung der sonAIR-Trajektorien in TC-Files
- *B_create_BEW.m*: Zur Erstellung des Bew-File, notwendig für FLULA2-Simulation
- *C_FLULA2_to_Excel.m*: Zur Auswertung und Zuweisung der FLULA2-Resultate zu den Events
- *D_CreatePegel.m*: Zur Erstellung der Pegelzeitverläufe
- *Plot_Bericht.m*: Zur Erstellung der Plots für den Bericht

ZRH:

FLULA2:

* \Berechnungen\FLULA2\ZRH_mitFDR\O1_O2\Matlab\

- *A_txt_to_TC.m*: Zur Umwandlung der sonAIR-Trajektorien in TC-Files
- *B_create_BEW.m*: Zur Erstellung des Bew-File, notwendig für FLULA2-Simulation
- *C_FLULA2_to_Excel.m*: Zur Auswertung und Zuweisung der FLULA2-Resultate zu den Events
- *D_CreatePegel.m*: Zur Erstellung der Pegelzeitverläufe
- *Plot_Bericht.m*: Zur Erstellung der Plots für den Bericht