

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 3: Konzept zur Berechnung von Jahresbelastungen inklusive Meteo mit sonAIR**

<b>Auftrags-Nr.:</b>	<b>5211.01812.100.01</b>
Bericht-Nr.:	5211.01812.100.01 - 3
Auftraggeber:	Bundesamt für Umwelt BAFU, Kornel Köstli
Anzahl Seiten:	30
Beilagen:	-
Der Verfasser:	J. M. Wunderli

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 Quellenmodelle 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 **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 Installationseffekten und einem distanzabhängigen Ausbreitungsterm unterscheidet.

Die Untersuchungen zeigen für die vorliegenden Geometrien und Messdaten keinen massgeblichen Meteeinfluss. 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 im **vorliegenden 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.	Grundlagen .....	8
2.1.	Meteoeinflüsse auf die Schallausbreitung .....	8
2.2.	Das Meteokonzept von sonX .....	9
2.3.	Wettereinflüsse beim Fluglärm.....	10
2.4.	Bodenzusatzdämpfung bei der Fluglärmmodellierung .....	11
3.	Konzept .....	11
3.1.	Überblick.....	11
3.2.	Berechnung von mittleren jährlichen Ausbreitungsdämpfungen.....	14
3.3.	Definition hinderlicher Bedingungen .....	15
4.	Exemplarische Umsetzung.....	17
4.1.	Situation .....	18
4.2.	Ausbreitungsrechnung.....	19
4.3.	Meteostatistik .....	23
4.4.	Meteokorrektur im Jahresmittel .....	25
5.	Diskussion.....	28
6.	Ausblick .....	29
7.	Dank.....	29
8.	Literatur .....	30



## 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, welches grossenteils ECAC Doc.29 konform ist, ausfallen.

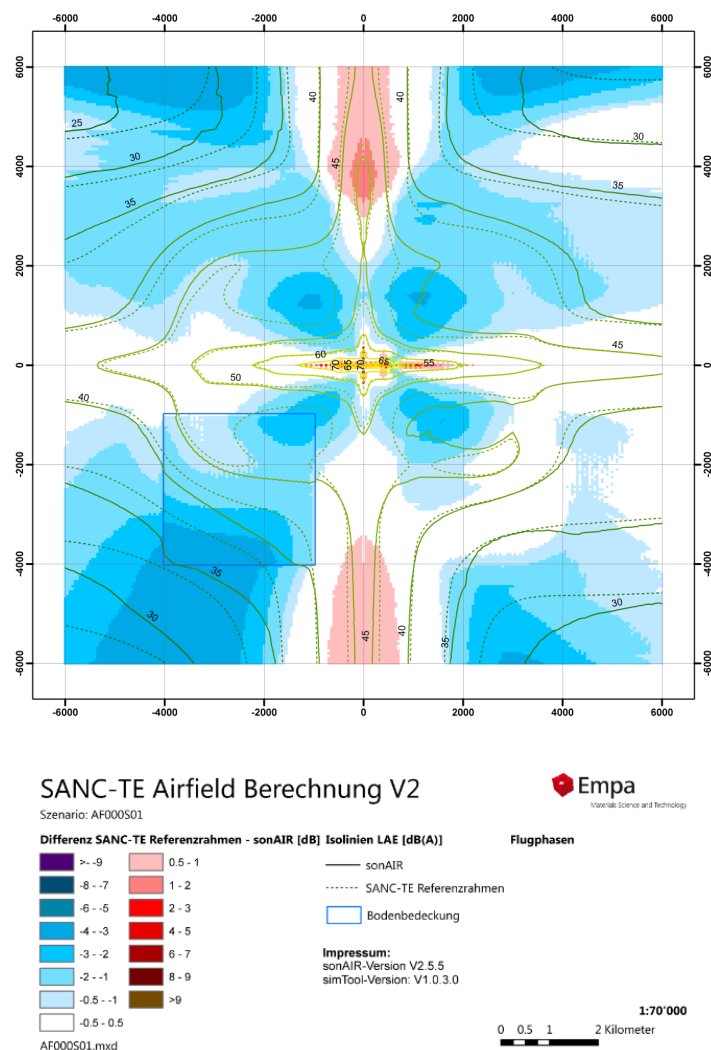


Abbildung 1-1 Differenz SANC-TE Referenzrahmen – sonAIR, Basisszenario ohne Streuspuren mit asymmetrisch gewichteten Flugbahnen (Abbildung 10 aus [8]).



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 (als ECAC Doc.29 bzw. ICAO Doc.9911 konformes Programm) 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** 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 ein Konzept zur Berechnung von Jahresbelastungen inklusive Meteo mit sonAIR.

Wie erwähnt, lautete der Auftrag, bei Bedarf Modifikationen an den sonAIR Emissionsmodellen und den mit dem Ausbreitungsmodell sonX verwendeten Meteoprofilen zu prüfen. Die Validierung zeigte jedoch gute Resultate (siehe Teilberichte 1 und 2) und gab entsprechend keinen Anlass für Anpassungen an der Berechnungsmethode. Es wurde deshalb beschlossen, die entsprechenden Ressourcen zur Klärung der Frage einzusetzen, wie mit sonAIR Wettereinflüsse bei Jahresbelastungen berücksichtigt werden können. Für die Berechnung der Immissionen von Einzelflügen kann sonAIR die momentanen Wetterbedingungen verwenden; das wurde beispielsweise bei den Quellenvermessungen so umgesetzt. Der Schritt, wie man von Einzelflugberechnungen inklusive Meteeinfluss auf Jahresbelastungen kommt, wurde jedoch bisher nicht behandelt. Aufgrund der Rechenzeiten und des Speicherbedarfs ist jedoch absehbar, dass nicht für jeden Flug eine individuelle Ausbreitungsrechnung durchgeführt werden kann und deshalb das Konzept für Einzelflüge nicht für ganze Szenarien angewandt werden kann.

Die Validierungen, welche in den Teilberichten 1 und 2 dokumentiert sind, haben keinen grossen Meteeinfluss auf die Schallausbreitung gezeigt. Wir vermuten jedoch, dass auf grössere Distanzen, welche zwar nicht mit Messungen validiert werden konnten, aber im Hinblick auf die resultierenden Lärmkonturen der



Jahresbelastungen gleichwohl relevant sind, Wettereinflüsse durchaus von Bedeutung sein können. Gleichzeitig erhoffen wir uns, dass sich einige der Diskrepanzen zwischen FLULA2 und sonAIR, welche u.a. in Abbildung 1-1 zu sehen sind, durch Wettereinflüsse erklärt werden können.

Der **vorliegende Teilbericht 3** gliedert sich wie folgt: In Kapitel 2 werden verschiedene Grundlagen zum Thema zusammengestellt, in Kapitel 3 wird ein Konzept entwickelt, welches in Kapitel 3.3 exemplarisch für den Flugplatz Genf angewandt wird. Der Bericht schliesst mit einer Diskussion und einem Ausblick.

Ebenfalls im Rahmen dieser Arbeiten wurde eine neue Version standardisierter LinLog-Meteoprofile erarbeitet, welche bis zu einer Höhe von 300 m optimiert wurden.



## 2. Grundlagen

### 2.1. Meteeinflüsse auf die Schallausbreitung

Das Wetter beeinflusst die Schallausbreitung auf zwei Arten. Zum einen hängt die Luftdämpfung von der lokalen Temperatur und relativen Feuchte ab, zum anderen beeinflussen Temperatur- und Windgradienten mit der Höhe die effektive Schallgeschwindigkeit. Dies führt zu einer Verformung der Schallausbreitungsrichtung, was oft durch gekrümmte Schallstrahlen visualisiert wird, welche die Normalenvektoren der Wellenfront darstellen. Bei sogenannten förderlichen Ausbreitungsbedingungen, d.h. wenn die effektive Schallgeschwindigkeit mit der Höhe zunimmt, werden diese Schallstrahlen nach unten gekrümmt und es kann zu Pegelerhöhungen kommen, falls dadurch Hindernisse überstiegen bzw. Hinderniswirkungen reduziert werden. Im umgekehrten Fall, bei für die Schallausbreitung hinderlichen Bedingungen, erhöht sich die Hinderniswirkung bzw. können akustische Schattenzonen entstehen, also Gebiete, in welche keine Schallstrahlen gelangen können, siehe Abbildung 2-1. Akustische Schattenzonen entstehen dabei, wenn der Schallausbreitungspfad auf seinem Weg zum Empfänger in unmittelbarer Bodennähe verläuft und dort, als Folge der starken Gradienten der effektiven Schallgeschwindigkeit, nach oben abgelenkt werden.

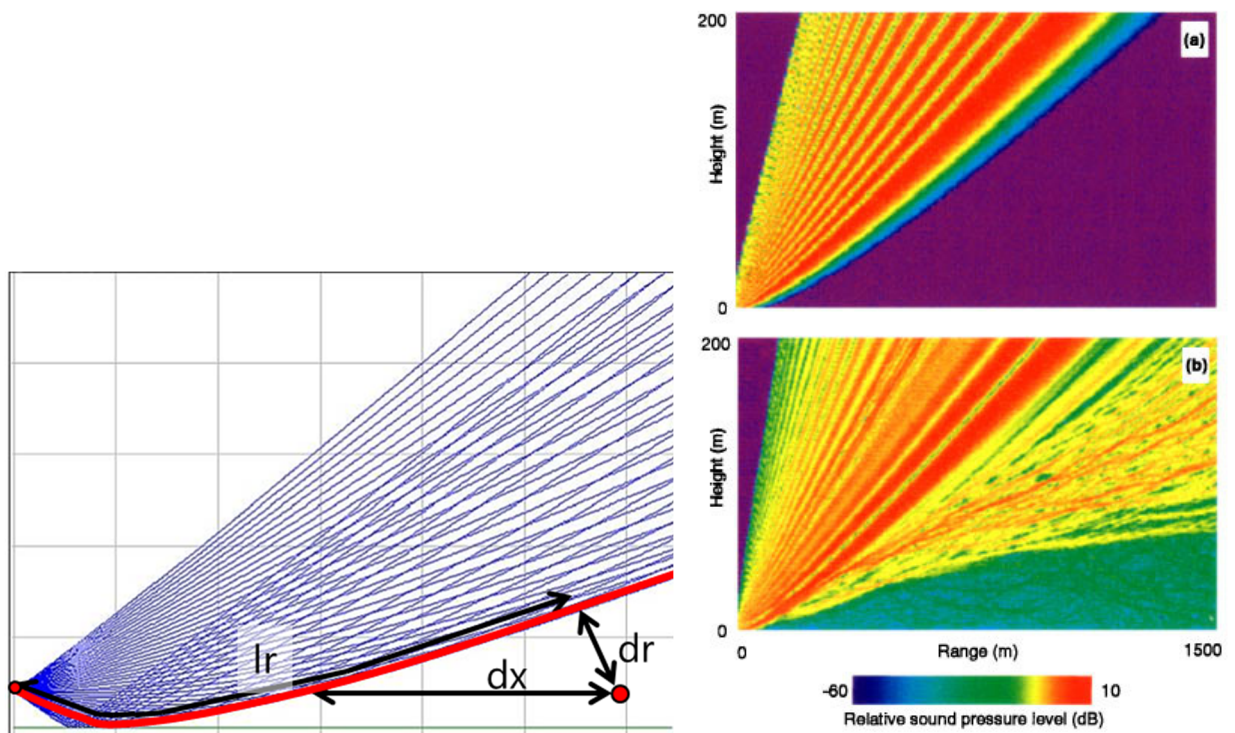


Abbildung 2-1: Visualisierung akustischer Schattenzonen, links mittels Strahlverfolgung (Empa, Kurt Heutschi bzw. [5]) und rechts mittels des Parabolic Equation Ansatzes, oben ohne und unten mit Turbulenz [1].



## 2.2. Das Meteokonzept von sonX

Das Ausbreitungsmodell sonX [3] weist einen modularen Aufbau auf. Im Modul BASIC wird eine Direkt-schallberechnung unter der Annahme einer homogenen Atmosphäre vorgenommen. In Ergänzung zur Direkt-schallberechnung, welche zwingend durchgeführt werden muss, können drei Zusatzmodule zugeschaltet werden; zwei Module, welche Reflexionen behandeln, und ein Modul zur Ermittlung einer Meteokorrektur. Diese Meteokorrektur berücksichtigt zum einen den Einfluss einer geschichteten Atmosphäre auf die Luftdämpfung. Zum anderen kommt ein Strahlverfolgungsalgorithmus zur Anwendung, welcher Einflüsse auf die Hinderniswirkung bzw. die Entstehung von akustischen Schattenzonen modelliert. Die Pegel in akustischen Schattenzonen werden dabei ausgehend von geometrischen Eigenschaften des Strahls, welcher dem Empfänger am nächsten kommt, bestimmt (siehe Abbildung 2-1 links). Die entsprechende Schattenzonenkorrektur wurde im Vergleich zu Simulationen mit FDTD-Modellierungen bestimmt, siehe [5]. Für weitere Informationen zum sonX-Modell sei auf die entsprechende Dokumentation verwiesen [3].

Die Berechnung der Meteokorrektur erfolgt für eine bestimmte Meteosituation. Diese kann entweder durch Angabe eines Vertikalprofils von Wind, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Druck erfolgen oder in Form von idealisierten LinLog-Profilen, welche für 15 Meteoklassen mit drei atmosphärischen Stabilitäts- und fünf Windgeschwindigkeitsklassen vorausberechnet werden. Diese standardisierten Meteoprofile sind zusätzlich variiert für verschiedene Untergrundtypen, und sonX verwendet bei der Ausbreitungsrechnung die zugeordneten Profile je nach Untergrunddefinition, siehe [10].

<b>Strahlungsbilanz / Stabilität</b>		$\geq 180 \text{ W/m}^2$			$\leq -18 \text{ W/m}^2$		
<b>Wind</b> (Bereich / Mittelwert)		Labil		Neutral	Stabil		
0 – 1 m/s	0.0 m/s	L0		N0			S0
1 – 2 m/s	1.5 m/s	L1		N1			S1
2 – 3 m/s	2.5 m/s	L2		N2			S2
3 – 5 m/s	4.0 m/s	L3		N3			S3
> 5 m/s	6.0 m/s	L4		N4			S4

Abbildung 2-2: Systematik mit 15 Meteoklassen in Abhängigkeit der Strahlungsbilanz und der Windgeschwindigkeit 10 m über Grund gemäss [10].

Schweizweit wurden lokale Meteostatistiken erstellt, welche die Auftretenshäufigkeit dieser 15 Meteoklassen und die zugehörigen Windrosen in Abhängigkeit der Tages- und Jahreszeit vorgeben [9]. Bei der Anwendung von sonX für Schiesslärm (sonARMS) und Bahnlärm (sonRAIL) werden aus dieser Statistik die häufigsten Meteosituationen ausgewählt. Für diese Meteosituationen wird danach einzeln der Meteeffekt berechnet und es wird ein mittlerer Wittereinfluss als über die Auftretenshäufigkeit gewichtetes energetisches Mittel bestimmt. Für Schiess- und Bahnlärmsituationen mit Ausbreitungsdistanzen von typisch ein bis zwei Kilometern werden üblicherweise 10 bis 15 Meteosituationen berechnet. Dabei benötigt die METEO-Berechnung erfahrungsgemäss rund zwei- bis dreimal solange wie BASIC. Für Fluglärm mit deutlich grösseren Rechengebieten erscheint dies aufgrund der resultierenden Rechenzeiten aber kaum umsetzbar, weshalb ein Konzept mit kleinerem Rechenaufwand entwickelt werden muss.



## 2.3. Wettereinflüsse beim Fluglärm

Im Vergleich zu terrestrischen Quellen wie bei Strassen-, Bahn- oder Schiesslärm weist der Fluglärm spezifische Eigenschaften auf, welche im Hinblick auf die Berücksichtigung von Wettereinflüssen ein anderes Vorgehen als sinnvoll erscheinen lassen.

Erstens ist der Einfluss der Luftdämpfung auf die resultierenden Immissionspegel wegen den grossen Ausbreitungsdistanzen wichtiger als bei terrestrischen Quellen. Diesem Umstand wurde bereits Rechnung getragen, indem sonX um die Möglichkeit erweitert wurde, für die Berechnung der Luftdämpfung eine geschichtete Atmosphäre vorzugeben und die Luftdämpfung für einzelne Höhenstufen von 100 m Dicke separat zu berechnen.

Zweitens wird bei Bahn-, Strassen- und Schiesslärmrechnungen jeweils pro Meteosituation bzw. Standardprofil eine mittlere Temperatur und Feuchte auf einer Referenzhöhe Tages- und Jahreszeitunabhängig definiert. Aufgrund der grösseren Ausbreitungsdistanzen beim Fluglärm könnte eine feinere Unterteilung mit separat definierten Werten je nach Tages- oder Jahreszeit angezeigt sein.

Drittens spielen beim Fluglärm Hinderniseffekte und im allgemeinen auch Meteeffekte im Gegensatz zu den terrestrischen Quellen eine untergeordnete Rolle. So zeigte auch die Validierung von sonAIR, dass zumindest in den messtechnisch erfassten Geometrien Meteeffekte kaum einen Einfluss auf die Resultate hatten. Eine Berechnung ausschliesslich mit dem Modul BASIC, allerdings mit optimierten Annahmen zur repräsentativen Temperatur und Feuchte der homogenen Atmosphäre, ergab gute Übereinstimmungen zwischen Messung und Berechnung. Allerdings gilt es zu berücksichtigen, dass die Validierungsfälle überwiegend Situationen mit steilem Schalleinfall umfassten. Eine Beeinflussung der Hinderniswirkung und das Auftreten von akustischen Schattenzonen treten jedoch primär bei streifendem Schalleinfall bzw. einer Schallausbreitung in Bodennähe auf. Es kann deshalb sein, dass Meteeffekte auch im Fluglärm eine Rolle spielen können, dies jedoch ausserhalb des bisher validierten Bereiches bzw. möglicherweise ausserhalb der messtechnisch validierbaren Ausbreitungsdistanzen. Als Alternative bietet es sich an, diese Situationen rechnerisch zu untersuchen.

Viertens ist für terrestrische Quellen die Häufigkeit förderlicher Situationen wichtig, da unter solchen Bedingungen Hindernisse durch den Schall überstiegen werden können und sich deutliche Pegelerhöhungen ergeben. Im Gegensatz dazu überwiegen beim Fluglärm Situationen mit Sichtverbindung zwischen Quelle und Empfänger deutlich. Entsprechend führen förderliche Ausbreitungsbedingungen nicht zu einer zusätzlichen Erhöhung der Immissionspegel. Umgekehrt können aber bei streifendem Schalleinfall trotz Sichtverbindung akustische Schattenzonen auftreten, welche eine deutliche Reduktion der Immissionen zur Folge haben.

Schliesslich ist ein bedeutender Unterschied beim Fluglärm im Vergleich zu terrestrischen Quellen, dass das Wetter nicht nur die Schallausbreitung, sondern auch den Betrieb des Flughafens, das Flugverhalten der Flugzeuge (Bsp. unterschiedliche Steigleistung je nach Wind oder Luftdichte) und die Schallemission (Schubstellung bzw. Triebwerksdrehzahl abhängig von der Temperatur) beeinflussen. Der Wettereinfluss



auf die Schallausbreitung kann somit in der Modellierung nicht getrennt vom Wettereinfluss auf die Quelle behandelt werden.

## 2.4. Bodenzusatzdämpfung bei der Fluglärmmodellierung

Ein fundamentaler Unterschied zwischen sonAIR und allen gebräuchlichen "Best Practice" Modellen (FLULA2, IMMPAC, ECAC Doc.29, ICAO Doc.9911, Deutsche AzB, ...) ist, dass letztere für Situationen mit streifendem Schalleinfall und/oder grosse Ausbreitungsdistanzen eine sogenannte Bodenzusatzdämpfung (engl. *Lateral Attenuation*) verwenden (vgl. z.B. [6] und Abbildung 2-3). sonAIR kennt keine entsprechende Korrektur und nimmt für sich in Anspruch, eine allfällige Zusatzdämpfung bei grossen Distanzen und/oder streifendem Schalleinfall bereits durch die dreidimensionalen (3D) Quellenmodelle, die phasenrichtige Berechnung der Bodenreflexionen sowie die Berücksichtigung von Meteeffekten abzubilden. Die bisherigen Validierungen (vgl. [2] und [4] sowie insbesondere auch Teilberichte 1 und 2) haben diese Vermutung bestätigt und eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Berechnung auch bei seitlich liegenden Empfangspunkten gezeigt, in welchen die Bodenzusatzdämpfung der anderen Modelle bereits eine deutliche Korrektur ergeben. Dabei kam diese gute Übereinstimmung aber ohne massgebliche Meteeffekte zustande. Gleichzeitig nimmt die Bodenzusatzdämpfungen für grössere Abstände deutlich zu. Es steht die Vermutung im Raum, dass bei grösseren Abständen Meteeffekte an Bedeutung gewinnen und diese Zunahme der Korrektur damit zu begründen ist.

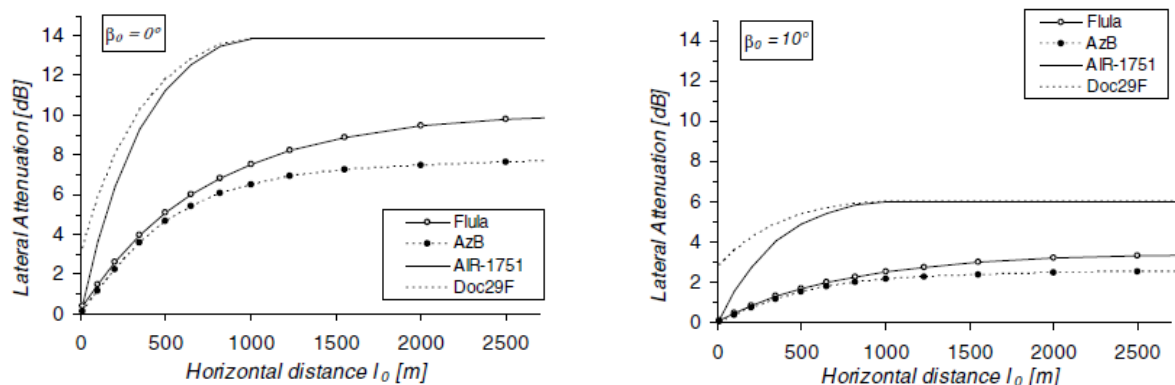


Abbildung 2-3: Vergleich der Bodenzusatzdämpfung verschiedener Best-Practice-Modelle (Graphiken entnommen aus [7]).

## 3. Konzept

### 3.1. Überblick

Ausgehend von obigen Überlegungen wird nachfolgend ein Konzept zur Berechnung von Jahresbelastungen mit sonAIR unter Berücksichtigung von Meteeffekten entwickelt.



- a) Um die Komplexität bzw. die Anzahl zu berücksichtigender Situationen zu verringern, sollen die beiden primären Meteeinflüsse auf die Luftdämpfung und auf die Hinderniswirkung separat behandelt werden. So kann bei der bzgl. Rechenaufwand sehr unproblematischen Luftdämpfung eine Variation der Bedingungen in Abhängigkeit der Tages- oder Jahreszeit berücksichtigt werden, ohne eine aufwändige Strahlverfolgung durchführen zu müssen.
- b) Die Modellierung der Luftdämpfung soll im Rahmen der BASIC-Berechnung, durch eine geeignete Wahl der repräsentativen Temperatur und Luftfeuchtigkeit erfolgen. Eine Verfeinerung in Richtung unterschiedlicher Luftdämpfungen in Abhängigkeit der Jahres- oder Tageszeit ist auf dieser Basis möglich. Abklärungen haben jedoch ergeben, dass eine entsprechende Erweiterung aufgrund des vergleichsweise kleinen Einflusses nicht vordringlich ist [11].
- c) Bei den Meteeffekten, welche als Folge von Schallgeschwindigkeitsgradienten auftreten, wird der Fokus auf hinderliche Situationen und akustische Schattenzonen gelegt.
- d) Abbildung 3-1 zeigt effektive Schallgeschwindigkeitsprofile für die 15 Meteoklassen gemäss [10] unter der Annahme von Gegenwind. Die zugehörigen LinLog-Standardprofilfunktionen wurden im Rahmen dieses Projektes neu erstellt, mit einer Gültigkeit bis 300 m Höhe über Terrain. Zum Vergleich wird in Abbildung 3-2 die Situation unter der Annahme von Mitwind dargestellt.

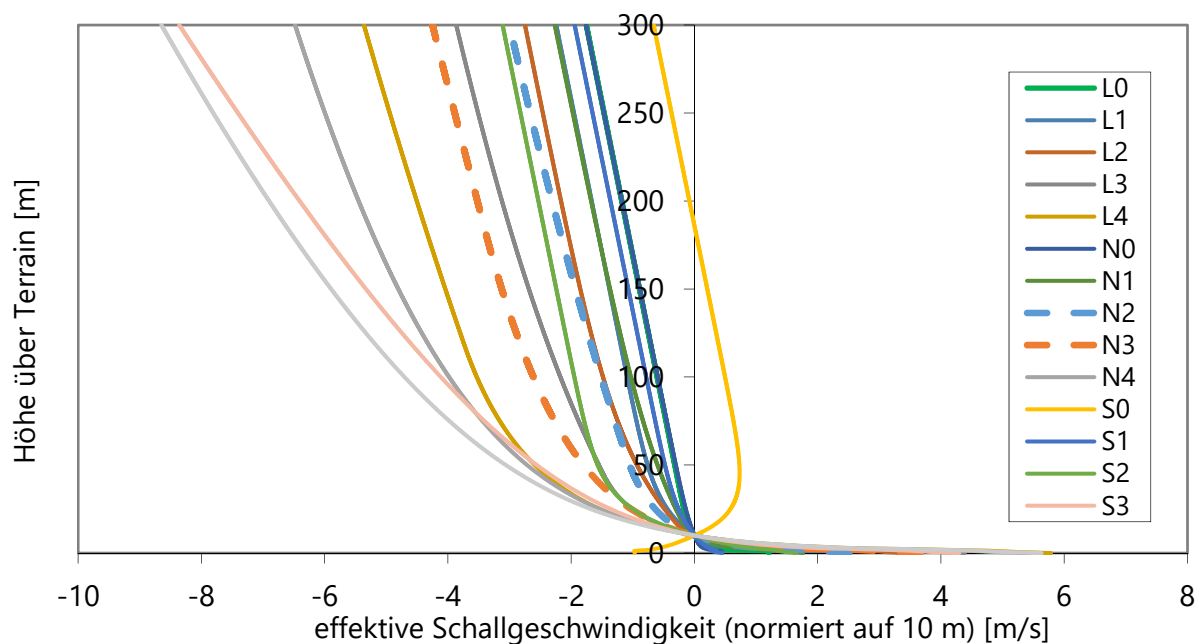


Abbildung 3-1: Effektive Schallgeschwindigkeit für die Standardprofile gemäss Version 13 unter der Annahme von Gegenwind für den Bodentyp Semidense Mixed Ground.<sup>1</sup> Hervorgehoben sind die Profile N2 und N3, für welche in alle Richtungen hinderliche Profile abgeleitet wurden.

<sup>1</sup> Quelle: K:\sonAIR\Modul C - Ausbreitungsmodell\Bodenbedeckung und Meteoprofile\StandardMeteoProfile V13



- e) Die LinLog-Profile können als Vertikalprofile von Windgeschwindigkeit, Temperatur und Feuchte aus sonX exportiert werden. Entsprechende Absolutprofile können alternativ zu idealisierten LinLog-Profilen auch als Eingangsgrößen für die Berechnung verwendet werden. Diese Möglichkeit wird dazu verwendet, Profile mit in alle Richtungen hinderlichen Meteobedingungen zu erzeugen. Unter der Annahme einer bestimmten Windrichtung wird in einem ersten Schritt ein Vertikalprofil der effektiven Schallgeschwindigkeit berechnet. Anschliessend wird der Wind auf Null gestellt und die Temperatur so angepasst, dass das effektive Schallgeschwindigkeitsprofil unverändert bleibt. Die Umsetzung als modifiziertes Temperaturprofil ohne Windeinfluss garantiert einen gleichmässigen Effekt in alle Ausbreitungsrichtungen. Im Endeffekt wird ein einzelnes Profil definiert werden. Im vorliegenden Projekt, soll jedoch untersucht werden, wie stark die Resultate von der Wahl des Profils abhängen. Deshalb wurde gemäss diesem Vorgehen Absolutprofile für zwei Standardprofile, N2 und N3, unter der Annahme von Gegenwind erstellt.
- f) Als Untergrundtyp wurde *Semidense Mixed Ground* und nicht der Standardtyp *Porous Natural Ground* gewählt, weil *Semidense Mixed Ground* für undefinierte Untergrundtypen und teilweise besiedelte Flächen besser geeignet ist.
- g) Mit diesem idealisierten hinderlichen Absolutprofilen wird eine Berechnung im Meteomodus durchgeführt. Diese Berechnung wird in sonX mit der Parameterstellung *AatmOnlyBASIC = 1* ausgeführt, welche Einflüsse der geschichteten Atmosphäre auf die Luftdämpfung unterdrückt. Als Meteeffekte verbleiben der Einfluss gekrümmter Schallstrahlen auf die Hinderniswirkung bzw. die Entstehung von akustischen Schattenzonen sowie, wobei eher vernachlässigbar, ein Einfluss auf die Walddämpfung. Als Resultat liegen zwei Sammlungen von mit Ausbreitungsdämpfungen vor (BASIC und METEO), eine für neutrale (bzw. förderliche) Bedingungen und eine für hinderliche Bedingungen.
- h) Aufgrund der standortabhängigen Meteostatistiken, welche die Häufigkeit förderlicher (bzw. neutraler) und hinderlicher Bedingungen in Abhängigkeit der Ausbreitungsrichtung angeben, werden die beiden Ausbreitungsdämpfungen bei der Einzelflugsimulation gewichtet.
- i) Die Statistik darüber, wie häufig hinderliche Situationen in eine bestimmte Ausbreitungsrichtung auftreten, kann entweder für das ganze Jahr, für bestimmte Tageszeiten oder sogar Routen- und Tageszeit-spezifisch erfolgen.
- j) Gewichtete Dämpfungen in Einzelflugsituationen für *Footprint*-Berechnung verwenden.



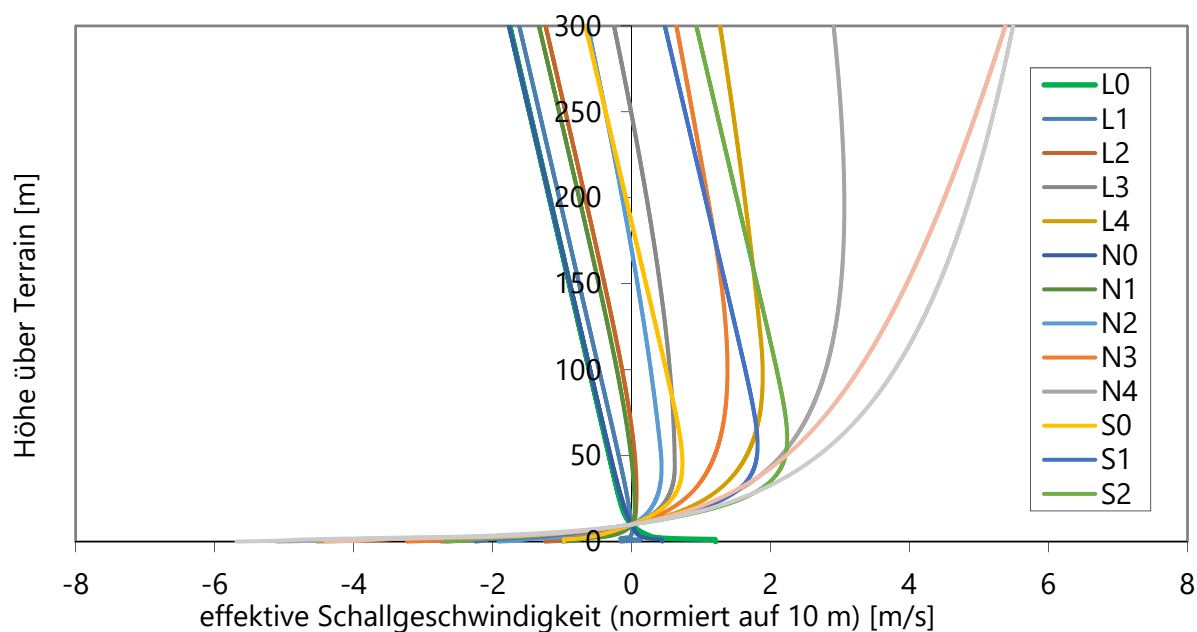


Abbildung 3-2: Effektive Schallgeschwindigkeit für die Standardprofile gemäss Version 13 unter der Annahme von Mitwind für den Bodentyp Semidense Mixed Ground.<sup>1</sup>

### 3.2. Berechnung von mittleren jährlichen Ausbreitungsdämpfungen

In Abbildung 3-3 wird die Berechnung einer mittleren jährlichen Ausbreitungsdämpfung aus den Ausbreitungsdämpfungen für neutrale bzw. hinderliche Situationen, unter Berücksichtigung der Auftretenshäufigkeit hinderlicher Situationen dargestellt. Formel (1) zeigt den zugehörigen mathematischen Ausdruck, wobei die Bezeichnungen der sonX- Resultate verwendet werden.

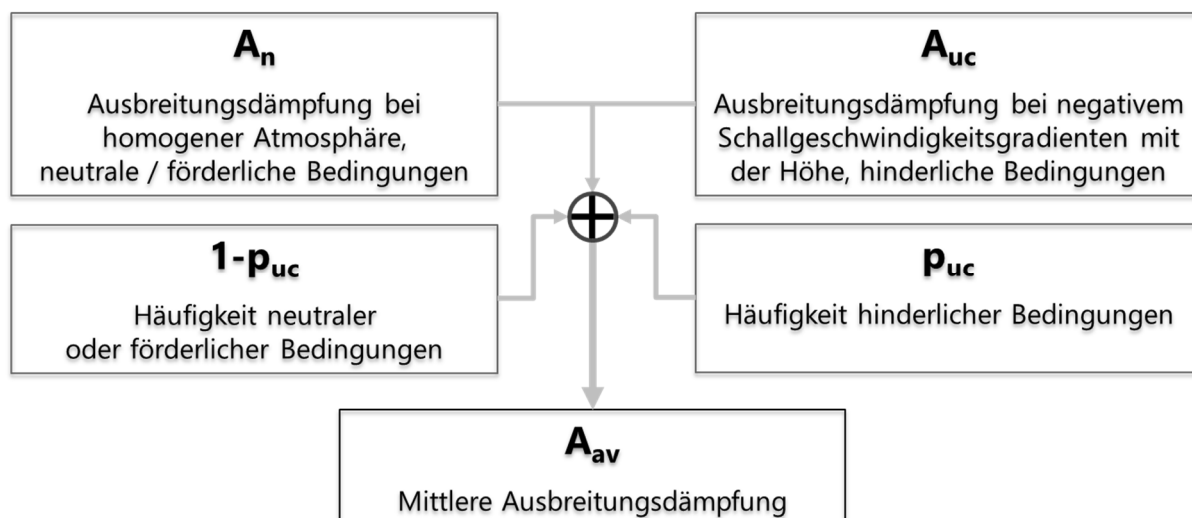


Abbildung 3-3: Graphische Darstellung des Konzeptes zur Berechnung mittlerer jährlicher Ausbreitungsdämpfungen.



$$A_{av} = -10 \cdot \log_{10}[(1 - p_{uc}) \cdot 10^{-0.1 \cdot A_{Basic}} + p_{uc} \cdot 10^{-0.1 \cdot (A_{Basic} + \Delta_{Meteo})}] \quad (1)$$

mit:

- $A_{av}$  = Mittlere Ausbreitungsdämpfung
- $A_{Basic}$  = Ausbreitungsdämpfung, homogene Atmosphäre (Resultat Modul BASIC)
- $\Delta_{Meteo}$  = Meteo Korrektur (Resultat Modul METEO)
- $p_{uc}$  = Wahrscheinlichkeit hinderlicher Ausbreitungsbedingungen

### 3.3. Definition hinderlicher Bedingungen

Als hinderlich gelten Situationen, bei welchen der Gradient der effektiven Schallgeschwindigkeit mit der Höhe in Ausbreitungsrichtung negativ ist. Die effektive Schallgeschwindigkeit wird durch die lokale Windgeschwindigkeit und Temperatur bestimmt, wobei der Temperatureinfluss näherungsweise gemäss Formel (2) berechnet werden kann. Es resultiert näherungsweise eine Veränderung der Schallgeschwindigkeit um 0.6 m/s pro Grad Temperaturänderung. Diese Umrechnung erlaubt einen direkten Vergleich des Einflusses des Windes und der Temperatur auf das Schallgeschwindigkeitsprofil.

$$c \approx 342.2 \cdot \sqrt{\frac{T}{293}} \quad (2)$$

mit:

- $c$  = Schallgeschwindigkeit [m/s]
- $T$  = Temperatur [°K]

Bei der Windgeschwindigkeit wiederum ist nur die Komponente des Windes in Ausbreitungsrichtung zu berücksichtigen. Die absolute Windgeschwindigkeit muss somit noch mit dem Kosinus des Zwischenwinkels zwischen Wind- und Ausbreitungsrichtung multipliziert werden. Ist der Einfluss der Temperatur auf die Schallgeschwindigkeit grösser als die Windgeschwindigkeit, so dominiert dieser und es resultiert ein einheitlicher Trend in alle Ausbreitungsrichtungen. In Situationen, in welchen die absolute Windgeschwindigkeit jedoch grösser ist, leiten sich je nach Ausbreitungsrichtung sowohl hinderliche als auch förderliche Situationen ab. Bei Seitenwind, relativ zur Ausbreitungsrichtung, entfällt die Windkomponente. Bei Mitwind- und Gegenwindsituationen dominiert in diesen Fällen jedoch die Windkomponente. So kann eine Mitwindsituation mit genügend starkem Wind eine Schichtung der Atmosphäre mit abnehmender Temperatur mit der Höhe kompensieren. Umgekehrt kann ein Gegenwind den Einfluss einer Inversionslage auf das Schallgeschwindigkeitsprofil drehen. Abbildung 3-4 zeigt exemplarisch eine Situation mit einer labil geschichteten Atmosphäre und einem angenommenen Temperaturgradienten von 3.5° sowie einem Westwind mit 3 m/s. Gemäss Formel (2) resultiert daraus ein Temperatureinfluss auf die effektive Schallgeschwindigkeit von rund 2.1 m/s. Dies entspricht der Windkomponente unter 45°. Somit heben sich bei einem Zwischenwinkel von 45° der Einfluss von Wind- und Temperatur gegenseitig auf. Bei kleineren Winkeln resultiert eine förderliche, bei grösseren eine hinderliche Situation.



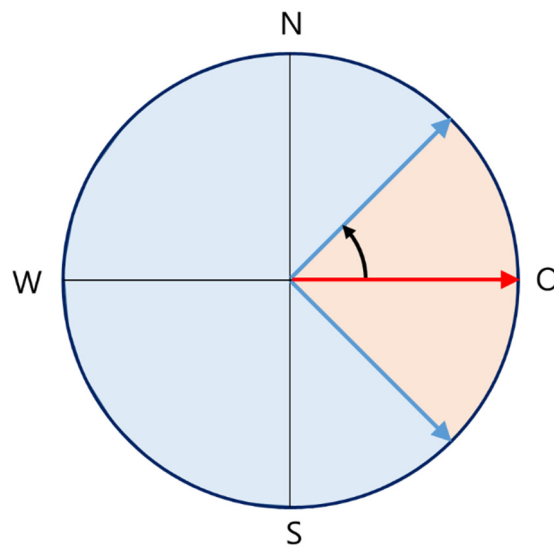


Abbildung 3-4: Darstellung von förderlichen und hinderlichen Ausbreitungsrichtungen (rot bzw. blau hinterlegt) bei einer Situation mit Westwind (roter Pfeil) und einer labil geschichteten Atmosphäre.

Eine entsprechende Analyse muss für jede Meteosituation einzeln durchgeführt werden. Dazu wurde ausgehend von den Absolutprofilen von Wind und Temperatur der 15 Standardprofile des Untergrundtyps Mixed Semidense Ground der Gradient zwischen 0 und 100 m Höhe bestimmt und im Anschluss der Winkel zwischen Wind- und Schallausbreitungsrichtung ermittelt, bei welchem sich der Temperatur- und der Windeinfluss auf das effektive Schallgeschwindigkeitsprofil gegenseitig aufheben. Tabelle 3-1 zeigt die Zusammenstellung der resultierenden Gradienten für Wind und Temperatur. Spalte vier zeigt, wie sich die Temperaturänderung auf die effektive Schallgeschwindigkeit auswirkt. In Spalte fünf ist der Zwischenwinkel aufgeführt, bei welchem sich der Einfluss von Wind und Temperatur gegenseitig neutralisieren. Dabei ist allerdings zwischen Mitwind- und Gegenwindsituationen zu unterscheiden, wobei Mitwind-situationen den Trend in Kombination mit labil geschichteten Atmosphären und Gegenwindsituationen bei Inversionslagen drehen können. Als Resultat ergeben sich die Winkelbereiche, welche in den letzten beiden Spalten aufgeführt sind. In der ersten Spalte sind Situationen mit richtungsunabhängig dominierendem Temperatureinfluss hervorgehoben. Sie sind auch in der vierten Spalte blau gekennzeichnet.



Gradienten von 0 bis 100 m Höhe			Temperatur	Zwischenwinkel	Hinderliche Bedingungen	
SP	v	$\Delta T$	Wind ceff( $\Delta T$ )		Von	Bis
L0	0.0	-3.1	-1.8	50 ° 70 ° 79 °	0 °	360 °
L1	1.7	-3.3	-2.0		0 °	360 °
L2	3.0	-3.2	-1.9		50 °	310 °
L3	4.9	-2.8	-1.7		70 °	290 °
L4	7.9	-2.5	-1.5		79 °	281 °
N0	0.0	-1.7	-1.0	56 ° 73 ° 81 ° 85 °	0 °	360 °
N1	1.8	-1.7	-1.0		56 °	304 °
N2	3.1	-1.5	-0.9		73 °	287 °
N3	5.4	-1.4	-0.8		81 °	279 °
N4	8.7	-1.3	-0.8		85 °	275 °
S0	0.0	2.4	1.5	59 ° 82 ° 87 ° 87 °	0 °	0 °
S1	2.6	2.2	1.3		121 °	239 °
S2	4.2	1.0	0.6		98 °	262 °
S3	8.0	-0.6	-0.4		87 °	273 °
S4	9.9	-0.7	-0.4		87 °	273 °

Tabelle 3-1: Gradienten zwischen 0 und 100 m Höhe für die Standardprofile sämtlicher Meteoklassen, Zwischenwinkel und Kriterium für hinderliche Situationen.

Die Resultate von Tabelle 3-1 lassen sich für die einzelnen Meteoklassen wie folgt zusammenfassen:

- Bei den Klassen L0, L1 und N0 überwiegt der Temperatureinfluss unabhängig von der Windrichtung. Diese Profile führen immer zu hinderlichen Ausbreitungsbedingungen.
- Bei der Klasse S0 überwiegt der Temperatureinfluss und führt in allen Fällen zu förderlichen Ausbreitungsbedingungen.
- Bei den Klassen S1 und S2 führt der Temperatureinfluss zu einer Zunahme der Schallgeschwindigkeit mit der Höhe. Dieser Effekt kann aber durch Gegenwind aufgehoben und übersteuert werden. Dies ist bei S1 der Fall, wenn der Winkel zwischen Wind- und Schallausbreitungsrichtung mehr als 121° und bei S2 mehr als 98° beträgt.
- Bei den übrigen Meteoklassen nimmt die Temperatur mit der Höhe ab. Dieser Trend kann aber durch Mitwindbedingungen übersteuert werden. Die Gradangaben in der letzten Spalte von Tabelle 3-1 mit Werten zwischen 50° und 87° definieren den minimalen Zwischenwinkel ab welchem hinderliche Bedingungen herrschen.

## 4. Exemplarische Umsetzung

Am Beispiel des Flughafens Genf soll exemplarisch das vorgeschlagene Konzept umgesetzt und die Effektgrösse der resultierenden Meteokorrektur abgeschätzt werden. In Abschnitt 4.1 wird die Situation dargestellt und es werden Quellen- und Empfangspunkte eingeführt. Abschnitt 4.2 dokumentiert die Ausbreitungsrechnung und zeigt die resultierenden Meteokorrekturen für hinderliche Ausbreitungsbedingungen.



In Abschnitt 4.3 wird eine lokale Meteostatistik für Genf analysiert und es werden daraus Gewichtungsfaktoren in Abhängigkeit der Ausbreitungsrichtung und Tageszeit bestimmt. In Abschnitt 4.4 werden schliesslich aus den Resultaten der Abschnitte 4.2 und 4.3 Meteeffekte im Jahresmittel abgeleitet.

#### 4.1. Situation

Abbildung 4-1 zeigt einen Differenzplot zweier FLULA2-Berechnungen der Tagesbelastung des Flughafens Genf für das Jahr 2017, als Belastungsdifferenz ohne minus mit Bodenzusatzdämpfung. Wie zu erkennen ist, treten grosse Differenzen vor allem querab zur Piste auf, wobei der Effekt der Bodenzusatzdämpfung in südöstliche Richtung (abfallendes Gelände und somit flacherer Schalleinfall) etwas ausgeprägter ist als in nordwestliche.

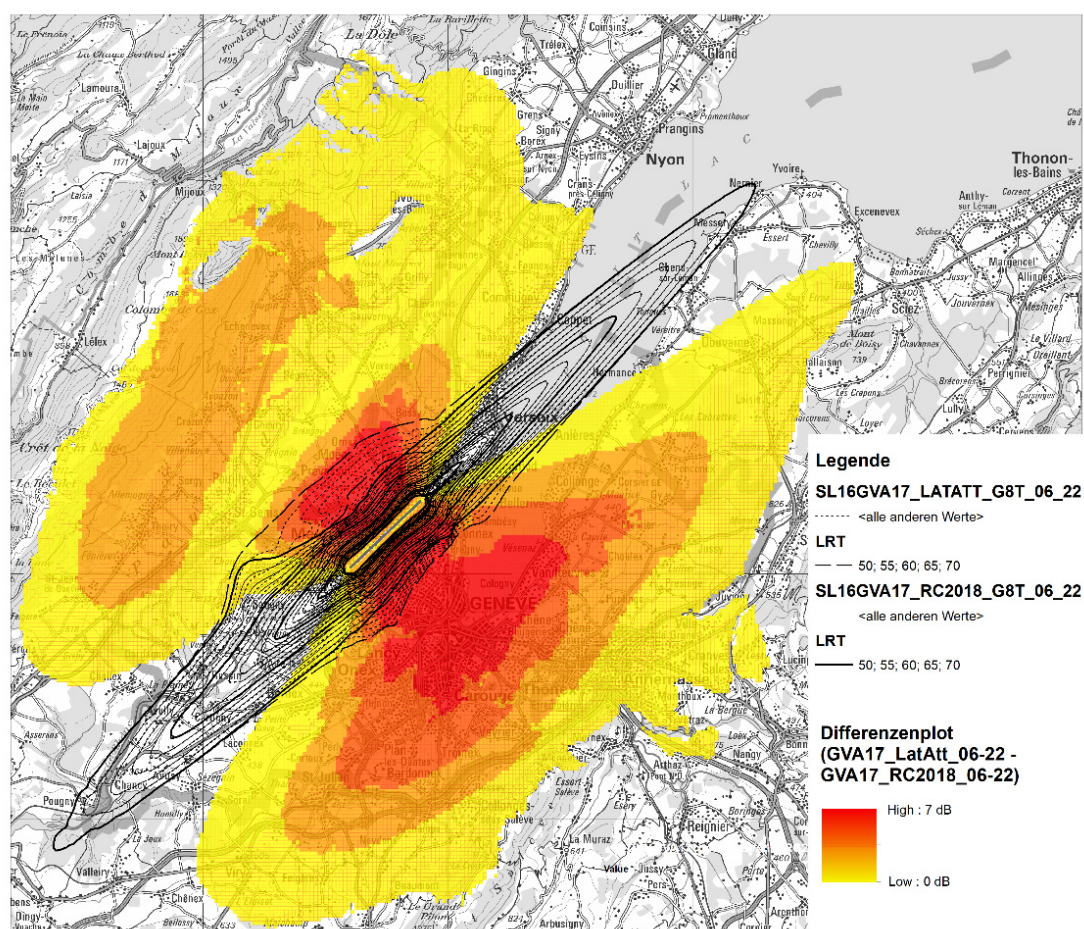


Abbildung 4-1: Effekt der Bodenzusatzdämpfung am Flugplatz Genf.

Ausgehend von dieser Darstellung wurde ein sonAIR Berechnungsprojekt gemäss Abbildung 4-2 aufgesetzt, welches für einen Quellenpunkt in Pistenmitte die Schallausbreitung in beide Richtungen quer zur Pistenausrichtung mit Gesamtausbreitungsdistanzen von 15 (südöstlich) bzw. 13 Kilometern (nordwestlich) und Immissionspunkten bei jedem Kilometer ermittelte. Die Immissionspunkte wiesen eine einheitliche Höhe von 4 m auf, die Quellenhöhe relativ zum Terrain wurde auf 4, 50 bzw. 100 m gesetzt.



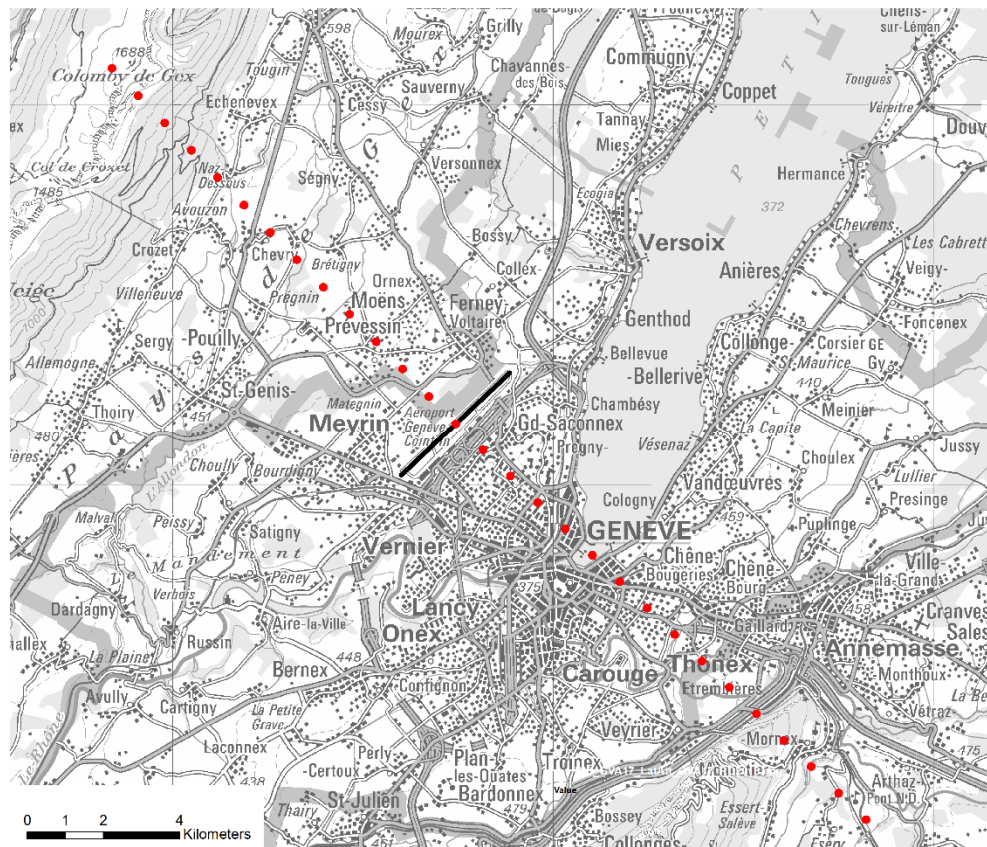


Abbildung 4-2: Quellenposition in Pistenmitte und Berechnungspunkte für eine Schallausbreitung quer zur Pistenausrichtung, Flugplatz Genf.

## 4.2. Ausbreitungsrechnung

Die Ausbreitungsrechnung erfolgte im METEO Modus von sonX Version 3.1.8, mit Absolutprofilen, welche in alle Richtungen hinderliche Profile gemäss den Standardprofilen N2 bzw. N3 im Gegenwindfall (siehe Abbildung 3-1) ergeben. Die Berechnungen wurden mit zwei Standardprofilen durchgeführt, um den Einfluss der Profilkfunktionen auf die resultierenden Strahlen bzw. Ausbreitungsdämpfungen abschätzen zu können.

Abbildung 4-3 bzw. Abbildung 4-4 zeigen die resultierenden Strahlenverläufe für den entferntesten Immissionspunkt pro Ausbreitungsrichtung. Neben der Quellenhöhe und dem verwendeten Meteoprofil hat der Geländeverlauf einen entscheidenden Einfluss darauf, wie nahe die Schallstrahlen dem Gelände bzw. den Immissionspunkten kommen. In nordwestliche Richtung verläuft das Gelände zuerst weitgehend flach. Ab rund 9 km Distanz steigt es deutlich an und die Grösse der Schattenzone wird stark reduziert. In südwestliche Richtung führt eine Geländekuppe zwischen ein und zwei Kilometern zu einer leichten Abschirmung im Anschluss. Danach verläuft das Gelände aber mehrheitlich flach. Wie erwartet zeigt sich, dass die Schallstrahlen mit grösserer Quellenhöhe dem Gelände näher kommen, also einen kleineren Meteoeffekt aufweisen werden und dass das Meteoprofil N3 mit den stärkeren Gradienten zum einem ausgeprägteren Krümmungseffekt der Schallstrahlen führt.



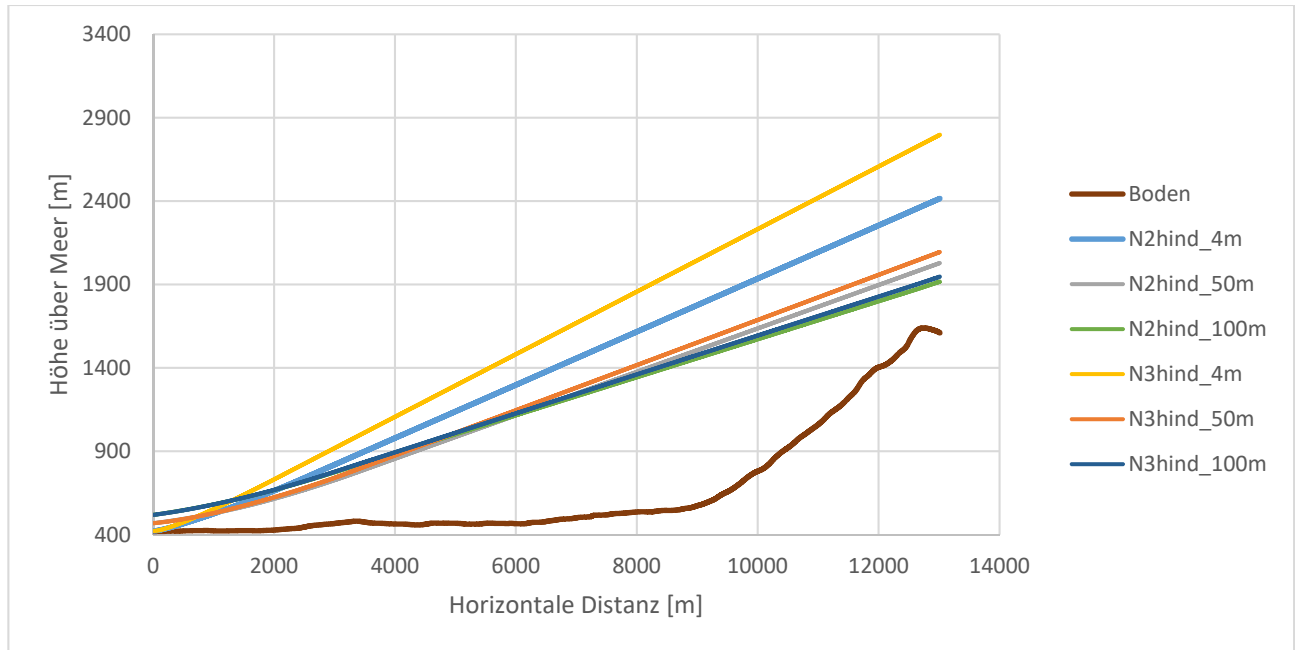


Abbildung 4-3: Resultierende Strahlbilder für die drei Quellenhöhen und zwei Meteoprofile für die Ausbreitungsrichtung Northwest, Flugplatz Genf für einen Empfänger in 13 km Horizontaldistanz.

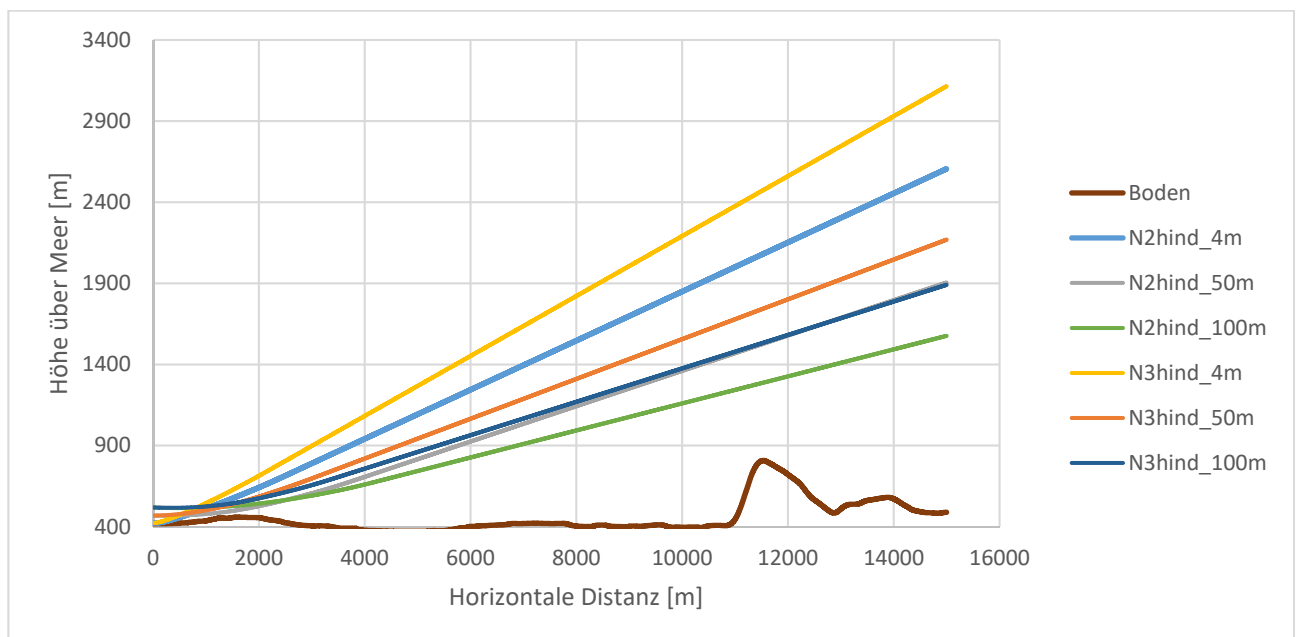


Abbildung 4-4: Resultierende Strahlbilder für die drei Quellenhöhen und zwei Meteoprofile für die Ausbreitungsrichtung Südost, Flugplatz Genf für einen Empfänger in 15 km Horizontaldistanz.

Die Strahlberechnung erfolgt individuell für jede Quellen-Empfänger-Kombination. Wie aus Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6 entnommen werden kann, welche für in Nordwestrichtung für kürzere Ausbreitungs-  
 distanzen von 2 bzw. 5 km erstellt wurden, ergeben sich im Vergleich zu Abbildung 4-3 unterschiedliche Strahlbilder. Abbildung 4-5 zeigt, dass bereits in 2 km Abstand selbst von einer Quellenhöhe von 100 m kein Strahl mehr den Boden erreicht. Da die Gradienten in Bodennähe am grössten sind, werden dort die



Strahlen auch am stärksten abgelenkt. Dies führt beispielsweise in Abbildung 4-6 dazu, dass sich der graue und der grüne Strahl kreuzen.

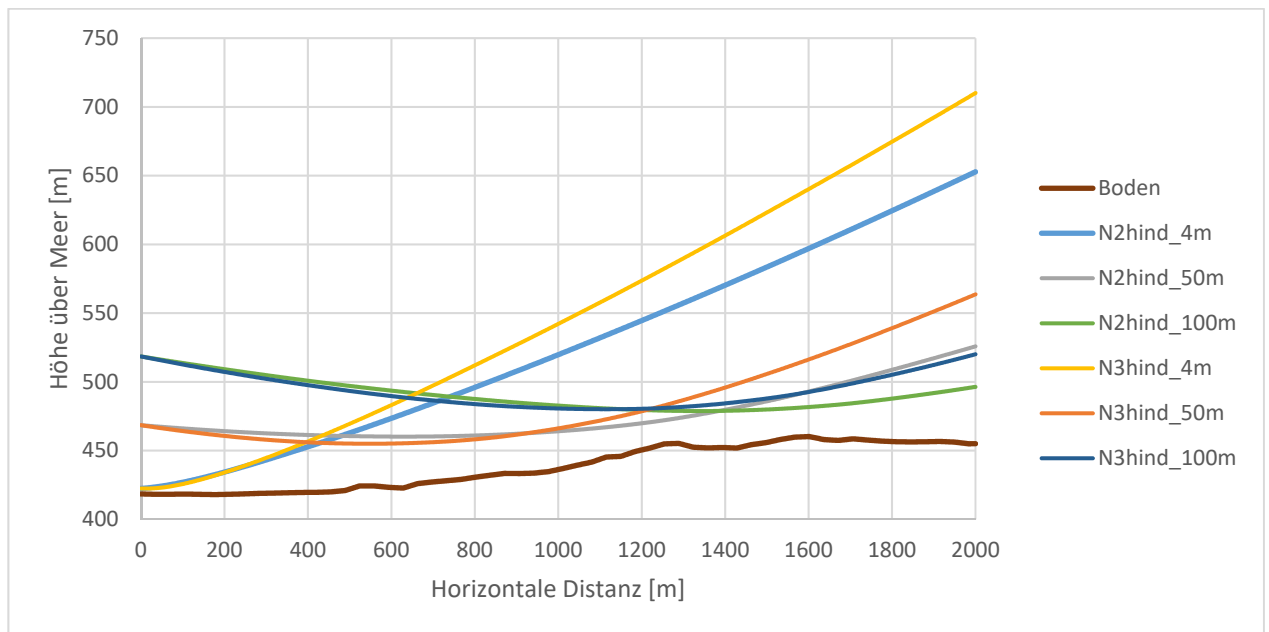


Abbildung 4-5: Resultierende Strahlbilder für die drei Quellenhöhen und zwei Meteoprofile für die Ausbreitungsrichtung Northwest, Flugplatz Genf für einen Empfänger in 2 km Horizontaldistanz.

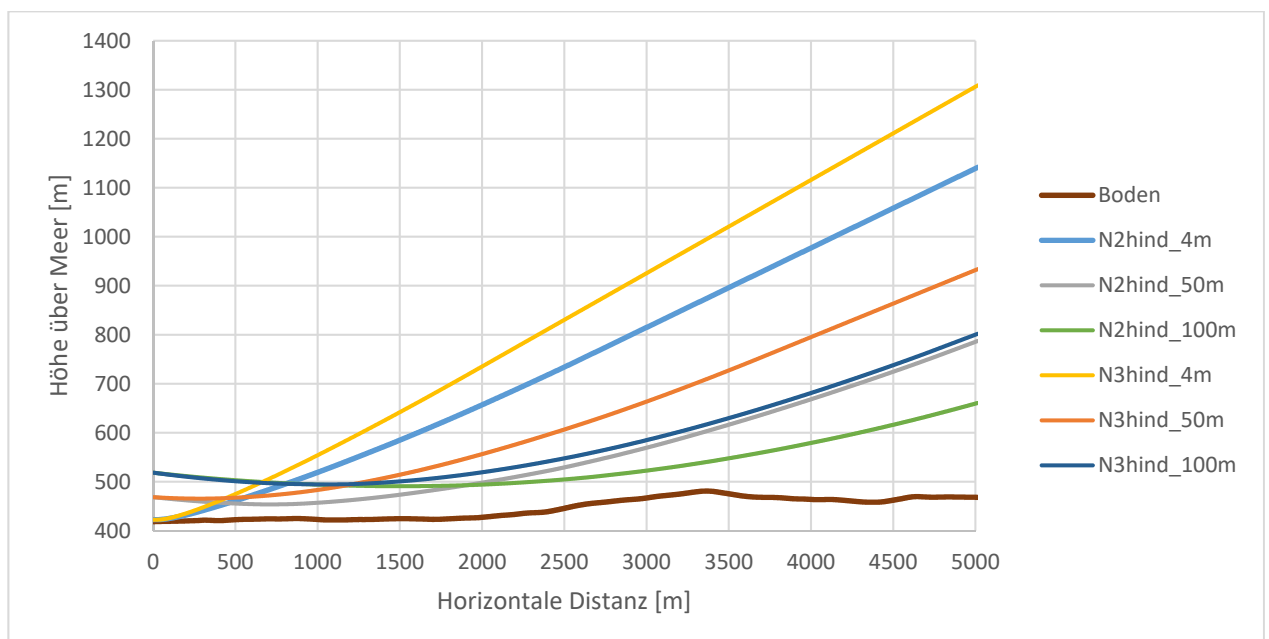


Abbildung 4-6: Resultierende Strahlbilder für die drei Quellenhöhen und zwei Meteoprofile für die Ausbreitungsrichtung Northwest, Flugplatz Genf für einen Empfänger in 5 km Horizontaldistanz.

Ausgehend von geometrischen Eigenschaften der resultierenden Strahlen wird gemäss dem in [5] beschriebenen Algorithmus ein Spektrum für die Pegelabsenkung in der akustischen Schattenzone berechnet. Abbildung 4-7 und Abbildung 4-8 zeigen diese Meteokorrekturen, welche als Zusatzdämpfung zur



BASIC-Berechnung zu verstehen sind, für die beiden Ausbreitungsrichtungen und das 500 Hz Terzband. Die Ausbreitungsberechnung erfolgt generell von 25 Hz bis 5 kHz. 500 Hz wurde als repräsentative Frequenz gewählt, um einen mittleren Meteeffekt zu zeigen.

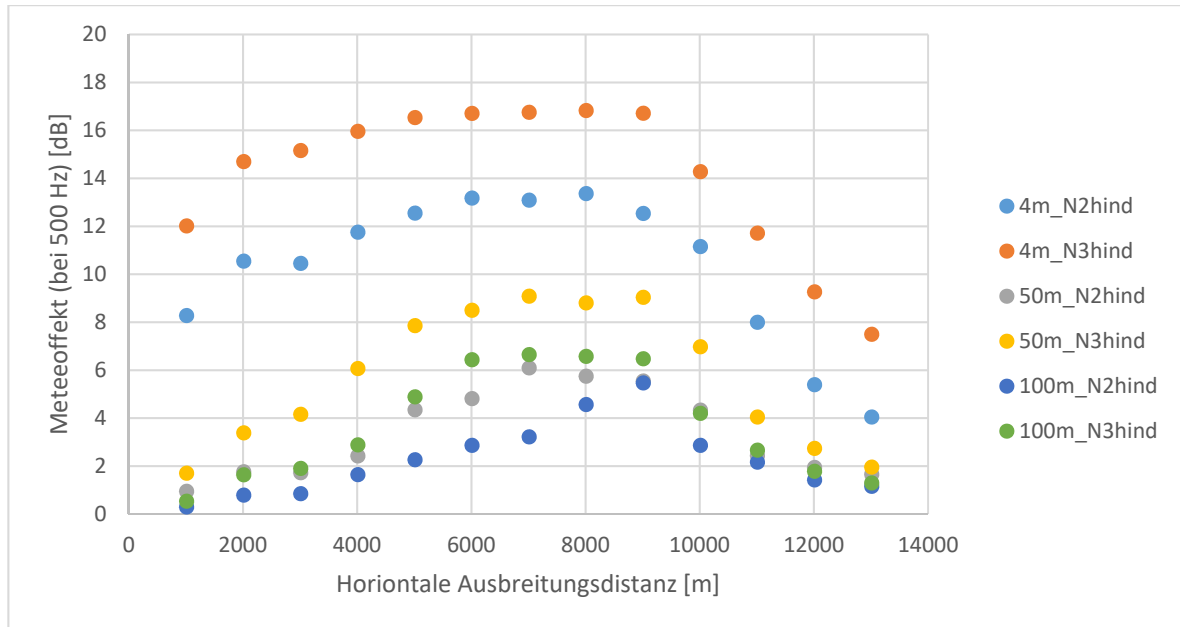


Abbildung 4-7: Resultierende Meteeffekte für die drei Quellenhöhen und zwei Meteoprofile für die Ausbreitungsrichtung Nordwest, Flugplatz Genf.

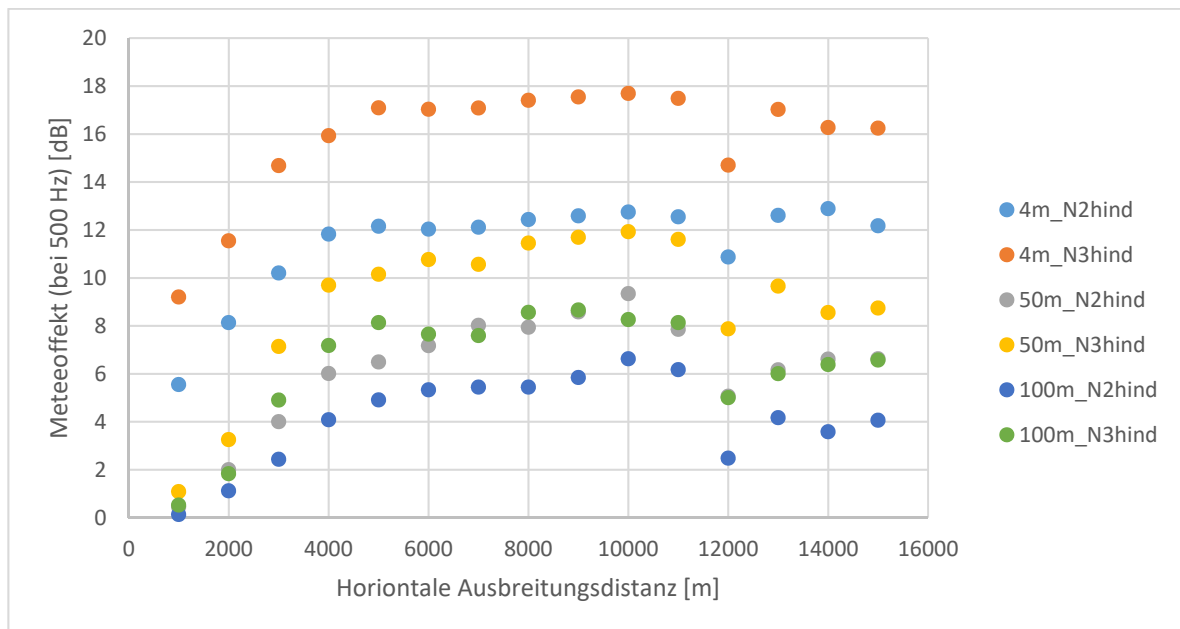


Abbildung 4-8: Resultierende Meteeffekte für die drei Quellenhöhen und zwei Meteoprofile für die Ausbreitungsrichtung Südost, Flugplatz Genf.



Es zeigt sich ein analoges Bild zu den Schallstrahlen: Bei Schallstrahlen mit einem grossen Abstand zum Empfänger, d.h. einer ausgeprägten akustischen Schattenzone, resultiert eine grosse Meteokorrektur. Bei Quellenhöhen von 4 m ergeben sich bereits in einem Kilometer Abstand je nach Meteoprofil und Ausbreitungsrichtung Zusatzdämpfungen zwischen 6 und 12 dB. Die Meteokorrektur erreicht aber bald ein Maximum und steigt nach ca. fünf Kilometern nicht mehr weiter an. Dies ist darauf zurück zu führen, dass die empirische Schattenzonenkorrektur bei maximalen Werten angelangt ist. Bei Quellenhöhen von 50 bzw. 100 m ist der Meteoeffekt deutlich kleiner. Ab fünf km beträgt die Korrektur in nordwestlicher Richtung zwischen 2 und 10 dB und in südöstlicher Richtung zwischen 4 und 12 dB. Wie aufgrund des Geländeverlaufes erwartet, sinkt die Meteokorrektur in Richtung Nordosten ab 10 km Ausbreitungsdistanz wieder ab. Insgesamt ergeben sich für das 500 Hz Terzband je nach Ausbreitungssituation (Profil, Quellenhöhe) Zusatzdämpfungen von 0 bis 18 dB ergeben.

### 4.3. Meteostatistik

Die Meteostatistik wurde gemäss dem in [9] beschriebenen Vorgehen und mit den dort dokumentierten Grundlagendaten des COSMO-2-Modells für den COSMO-2-Gitterpunkt 07854 mit den Landeskoordinaten (498'591 / 121'135) erstellt. Die Auswertung wurde für den Zeitraum von Januar bis Dezember separat für den Tages- und Nachtzeitraum vorgenommen, mit einer Tageszeit von 06-22 Uhr und einer Nachtzeit von 22-06 Uhr. Tabelle 4-1 zeigt die Auftretenshäufigkeiten der verschiedenen Meteoklassen, mit den typischen Tag-Nacht-Unterschieden, dass nachts stabil geschichtete Atmosphären vorherrschen und nie labile Schichtungen auftreten.

*Tabelle 4-1: Auftretenshäufigkeit der 15 Meteoklassen am Tag und in der Nacht, welche sich aus den Windgeschwindigkeitsklassen 0 – 4 in blau und den atmosphärischen Stabilitätsklassen (L, N und S) in lila zusammensetzen.*

Tag	L	N	S	Ges	Nacht	L	N	S	Ges
0	4.0%	8.0%	9.7%	21.7%	0	0.0%	2.9%	34.1%	37.1%
1	7.8%	10.7%	5.6%	24.1%	1	0.0%	5.1%	18.1%	23.2%
2	6.4%	6.8%	4.1%	17.4%	2	0.0%	3.3%	11.2%	14.5%
3	7.0%	9.2%	3.8%	20.0%	3	0.0%	4.5%	10.2%	14.7%
4	5.6%	9.3%	1.9%	16.8%	4	0.0%	4.7%	5.9%	10.7%
	30.8%	44.2%	25.0%			0.0%	20.5%	79.5%	

Jeder Meteoklasse ist eine individuelle Windrose hinterlegt. Abbildung 4-9 zeigt die Windrose, welche sich aus dem gesamten Datensatz (d.h. alle Meteoprofile) für den Tag ergibt. Man erkennt die dominanten



Windrichtungen, welche näherungsweise der Ausrichtung der Piste entsprechen. Im Hinblick auf die weiteren Analysen gilt es sich zu erinnern, dass Nordwind in Richtung Süd bläst. Gemäss Abbildung 4-9 bläst der Wind in Genf deshalb am häufigsten in Richtung 220°, also nach Südwest.

Rasterpunkt 07854, Tag: 6 - 22 Uhr  
Strahlungsbilanz: Total, Sämtliche Windgeschwindigkeiten

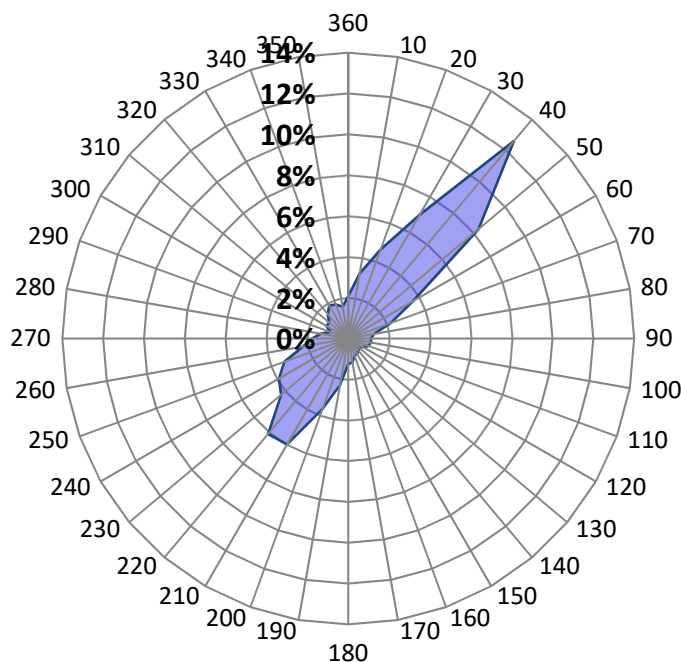


Abbildung 4-9: Windrose für den Tag für sämtliche Meteosituationen.

Durch eine Verknüpfung der Kriterien für hinderliche Bedingungen gemäss Abschnitt 3.3 mit den Auftretenshäufigkeiten der einzelnen Meteo-klassen und ihren individuellen Windrosen kann ermittelt werden, wie häufig hinderliche Ausbreitungsbedingungen in bestimmte Ausbreitungsrichtungen auftreten. Abbildung 4-10 zeigt als Resultat entsprechende Auftretenshäufigkeiten für den Tag und die Nacht, mit Werten zwischen 0 und 100 %. Aufgrund der vorherrschenden Windrichtungen, bzw. da Seitenwind-situationen praktisch immer hinderlich sind, treten hinderliche Bedingungen häufiger quer zur Piste als in Pistenrichtung auf. Am Tag variieren die Werte je nach Richtung zwischen 52 und 69%, in der Nacht zwischen 31 und 41%. Der generell tiefere Prozentsatz hinderlicher Bedingungen in der Nacht ist eine Folge der fehlenden Einstrahlung und der sich daraus häufig ergebenden stabilen Schichtung der Atmosphäre.

**Bemerkung:** Wie in Abschnitt 3.3 definiert, wurde der Schallgeschwindigkeitsgradient zwischen 0 und 100 m Höhe bestimmt. Aus Abbildung 3-1 bzw. Abbildung 3-2 wird ersichtlich, dass die Gradienten spätestens ab 100 m nicht mehr sehr ausgeprägt sind und zumeist durch die adiabatische Temperaturabnahme mit der Höhe dominiert werden. Entsprechend ist die Wahl der oberen Höhe zur Bestimmung des Gradienten nicht sehr sensitiv. Namentlich die labilen Profile weisen jedoch in Bodennähe sehr ausgeprägte Gradienten auf, und es stellt sich die Frage, wie entscheidend der Schallgeschwindigkeitsverlauf in unmittelbarer Bodennähe für die Schallausbreitung ist und wie stark sich die Wahl dieser unteren Grenze



auf das Gesamtergebnis auswirkt. Im Sinne einer Sensitivitätsanalyse wurde deshalb eine zweite Auswertung vorgenommen, bei welcher der Gradient zwischen 2 m und 100 m bestimmt wurde. Die resultierenden Prozentzahlen reduzierten sich bei dieser Setzung am Tag auf 51 bzw. 68%; in der Nacht blieben sie gleich. Es wurde deshalb beschlossen, die ursprüngliche Setzung von 0 bis 100 m beizubehalten.

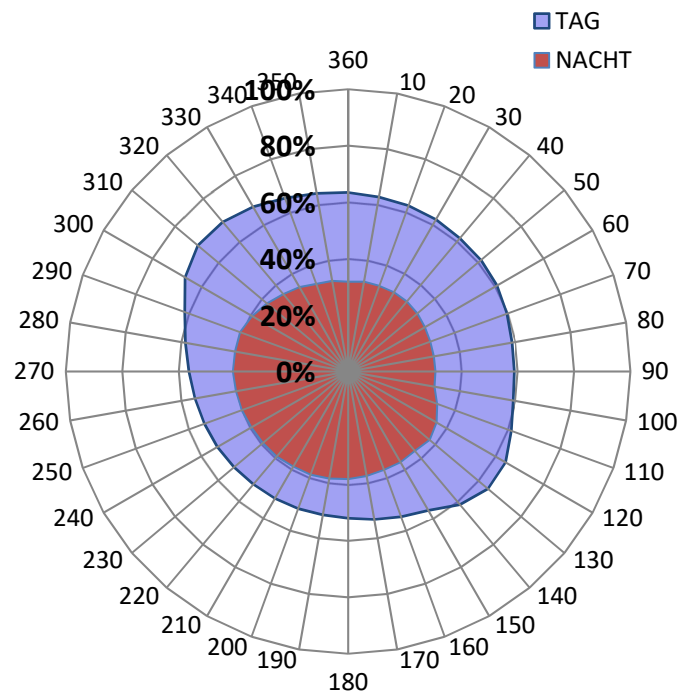


Abbildung 4-10: Auftretenshäufigkeit hinderlicher Schallausbreitungsbedingungen für Genf in Abhängigkeit der Tageszeit und der Ausbreitungsrichtung.

#### 4.4. Meteokorrektur im Jahresmittel

Für die Ausbreitungsrichtungen 130° (Südost) und 310° (Nordwest) ergeben sich gemäss Abbildung 4-10 Häufigkeiten hinderlicher Ausbreitungsbedingungen von 65% bzw. 69% am Tag und je 38% in der Nacht. Mit diesen Gewichtungen und unter der Annahme, dass bei förderlichen Ausbreitungsbedingungen ein Meteeffekt von null resultiert, ergeben sich Meteeffekte im Jahresmittel für die beiden Ausbreitungsrichtungen und die beiden Tageszeiten gemäss Abbildung 4-11 bis Abbildung 4-14.

Für den Tag resultiert auf dieser Basis für bodennahe Quellen bereits ab einem Kilometer bei 500 Hz eine mittlere Meteokorrektur von 4 bis 5 dB. Bei den Quellenhöhen von 50 bzw. 100 m stellt sich ein relevanter Meteeffekt erst ab rund 4 km ein. In Ausbreitungsrichtung Südost liegen die resultierenden Meteokorrekturen zwischen 2 und 5 dB, in Richtung Nordwest liegen sie aufgrund des unterschiedlichen Geländeverlaufes mit 1 bis 5 dB etwas tiefer.



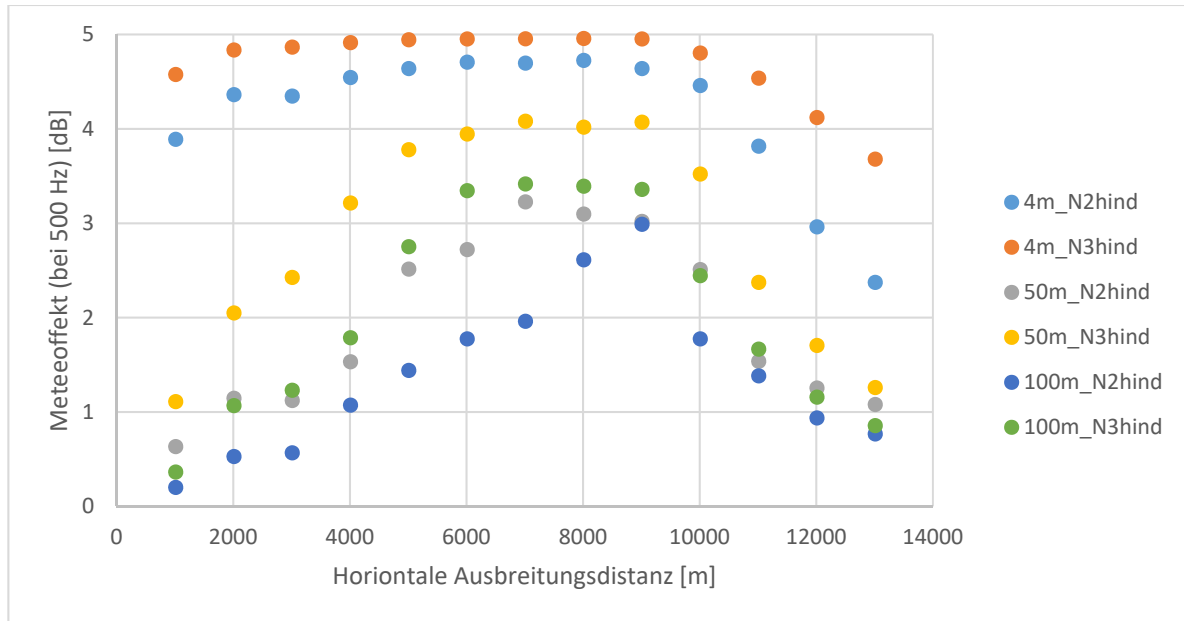


Abbildung 4-11: Resultierender Meteoeffekt im Jahresmittel für den Tag, für drei Quellenhöhen und zwei Meteoprofile für die Ausbreitungsrichtung Nordwest, Flugplatz Genf.

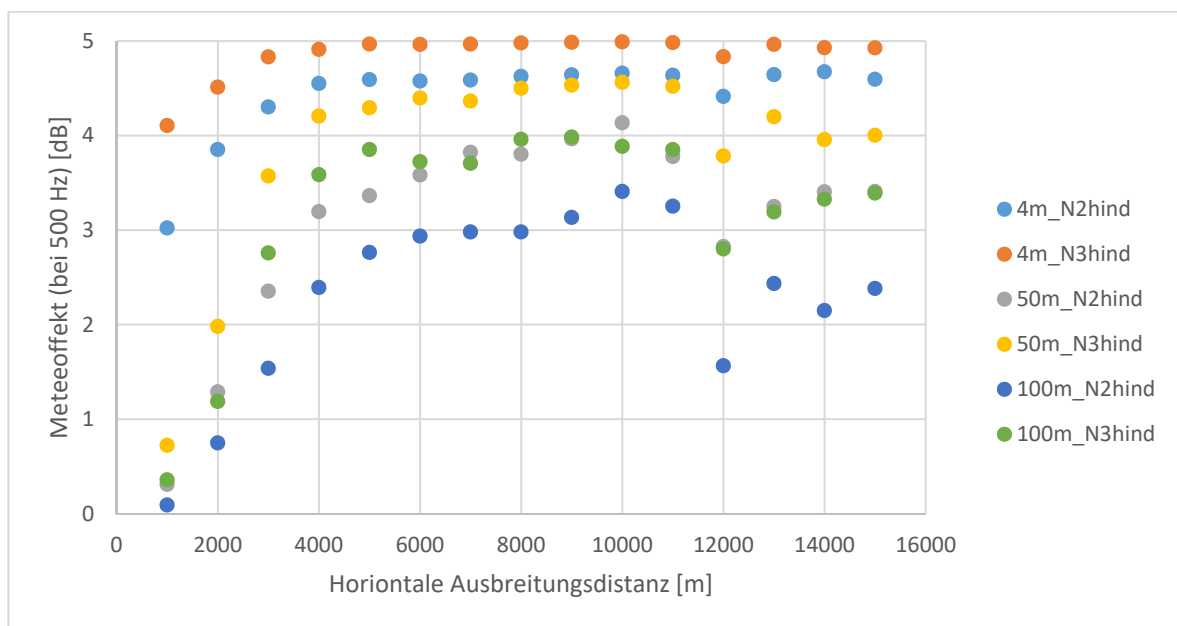


Abbildung 4-12: Resultierender Meteoeffekt im Jahresmittel für den Tag, für drei Quellenhöhen und zwei Meteoprofile für die Ausbreitungsrichtung Südost, Flugplatz Genf.

Die Meteorokorrekturen für die Nachtzeit fallen aufgrund des deutlich selteneren Auftretens hinderlicher Ausbreitungsbedingungen kleiner aus und liegen bei 500 Hz zwischen 0 und 2 dB.



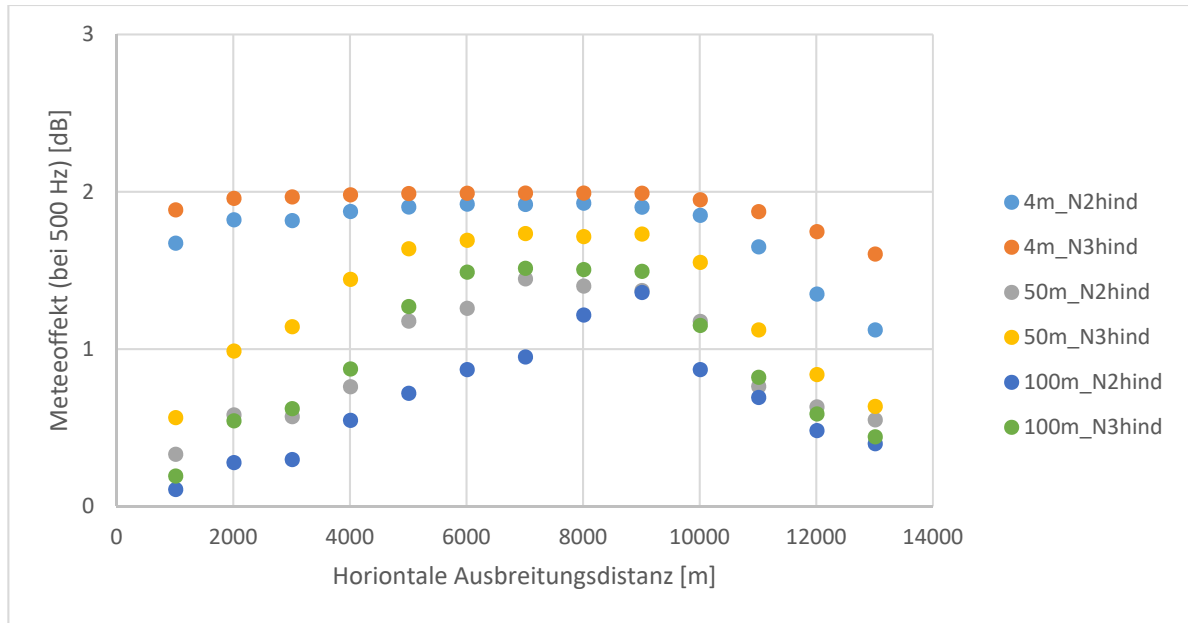


Abbildung 4-13: Resultierender Meteoeffekt im Jahresmittel für die Nacht, für drei Quellenhöhen und zwei Meteoprofile für die Ausbreitungsrichtung Nordwest, Flugplatz Genf.

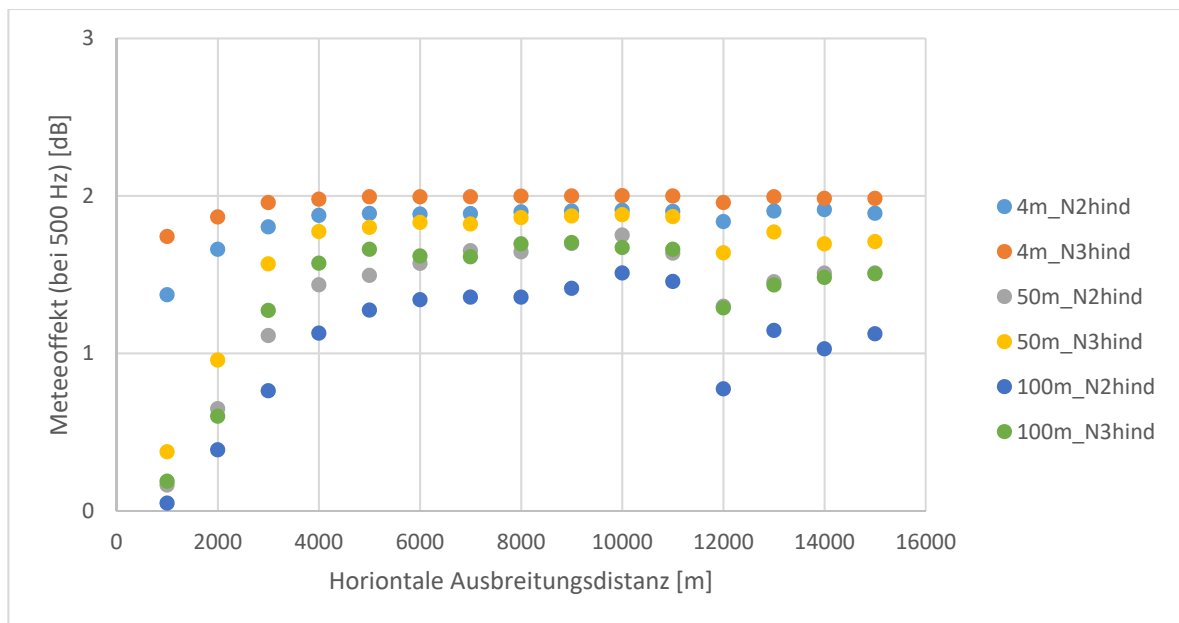


Abbildung 4-14: Resultierender Meteoeffekt im Jahresmittel für die Nacht, für drei Quellenhöhen und zwei Meteoprofile für die Ausbreitungsrichtung Südost, Flugplatz Genf.



## 5. Diskussion

Die exemplarische Umsetzung des in Kapitel 3 entwickelten Konzeptes für einige Ausbreitungssituationen beim Flughafen Genf bestätigte dessen Plausibilität und Anwendbarkeit. Die Strahlverfolgung konnte auch auf Distanzen bis zu 15 km angewandt werden und ergab plausible Resultate. Quellenhöhe, Ausbreitungsdistanz, Topographieverlauf, und die Vertikalprofile der effektiven Schallgeschwindigkeit zeigen den erwarteten Einfluss auf die resultierenden Meteokorrekturen.

Dabei ist zu beachten, dass die Schattenzonenkorrektur nicht für so grosse Ausbreitungsdistanzen entwickelt bzw. validiert worden war. Die Limitierung der Korrektur auf Maximalwerte ist auch unter diesem Aspekt zu sehen. Möglicherweise können in Realität auch grössere Schattenzoneneffekte auftreten. Es erscheint aber sinnvoll, die Limitierung so beizubehalten, da es in einer Jahresbelastungsrechnung eine untergeordnete Rolle spielt, ob ein Immissionspegel 25, 30 oder 35 dB tiefer liegt als im neutralen bzw. förderlichen Fall, und da eine messtechnische Validierung höherer Pegel zurzeit kaum möglich ist. Entscheidend ist die Fähigkeit der Strahlverfolgung, Situationen mit akustischen Schattenzonen zu erkennen – und dazu scheint der Strahlverfolgungsansatz auch auf grosse Distanzen geeignet zu sein – sowie die richtungs- und zeitabhängige Ermittlung der Auftretenshäufigkeit hinderlicher Situationen.

Obwohl nur eine einzelne meteorologische Situation verwendet wird, resultiert eine Meteokorrektur, welche im Vergleich zur klassischen Bodenzusatzdämpfung nicht nur von der Geometrie abhängt, sondern auch lokale meteorologische Bedingungen berücksichtigen und je nach Tageszeit unterschiedliche Resultate liefern kann.

Der Rechenaufwand sollte sich bei diesem Konzept weniger als verdoppeln, da neben BASIC neu eine einzelne Meteoberechnung mit sonX durchgeführt werden muss. Beim Simulationstool müssen parallel zwei Datenbanken abgefragt werden, was eine Erweiterung des sonAIR-Dienstleistungstools bedingt und auch eine gewisse Erhöhung der Rechenzeit in Anspruch nehmen wird. Ein Faktor von maximal zwei bei Rechenaufwand und Speicherbedarf sollte jedoch realisierbar sein.

Gleichwohl muss man sich bewusst sein, dass die Entwicklung einer Meteokorrektur ausgehend von lediglich zwei Ausbreitungsbedingungen (homogen und hinderlich) eine starke Vereinfachung darstellt. So liegen die resultierenden Korrekturen für N2 bzw. N3 Profile teilweise um mehr als ein Dezibel auseinander. Es könnte deshalb beispielsweise eine Verfeinerung auf drei Klassen (homogen, schwach und stark hinderlich) geprüft werden.

Die exemplarisch festgestellten Pegelkorrekturen zwischen 0 und 5 dB liegen etwas tiefer als die in Abbildung 4-1 ausgewiesenen Effekte. Dabei gilt es aber zu berücksichtigen, dass neben dem Meteeffekt auch die laterale Richtwirkung der Flugzeuge und der Bodeneffekt Teil der Nachbildung der Bodenzusatzdämpfung sind, welche ja bereits einen grossen Teil der in der Bodenzusatzdämpfung zusammengefassten (messbaren) Effekte in näherer Umgebung der Flughäfen zu berücksichtigen vermögen (vgl. Teilbericht 2). Entsprechend erscheint die Grössenordnung der ausgewiesenen Effekte sinnvoll.

Wie eingangs erwähnt, beeinflusst die Meteorologie auch das Flugverhalten. Es wurde deshalb die Frage aufgeworfen, ob die Modellierung nicht nur separat für verschiedene Zeiten sondern auch routenspezifisch



zu erfolgen hätte. Die Pistensysteme sind in der Regel auf die lokalen Windfelder ausgerichtet, und es wird nach Möglichkeit gegen den Wind gestartet und mit dem Wind gelandet. Wie die Analyse der Auftretenshäufigkeiten gezeigt hat, treten hinderliche Ausbreitungsbedingungen primär quer zur Hauptwindrichtung und somit zur Pistenrichtung auf. Die Häufigkeiten werden kaum dadurch beeinflusst, ob der Wind nun – wie im Fall von Genf – aus Nordwest oder Südost bläst. Entsprechend scheint sich der zusätzliche Aufwand für eine routenspezifische Modellierung der Schallausbreitung nicht zu rechtfertigen.

Im Hinblick auf die resultierende Meteokorrektur einen grösseren Einfluss hat jedoch die Festlegung der Tag-Nacht-Grenzen für die Meteostatistik. Wie Tabelle 4-1 zeigt, herrschen bei einem Zeitfenster von 6 Uhr morgens bis 22 Uhr abends im Jahresmittel während 25% der Zeit auch am Tag stabile Verhältnisse vor. Dies ist darauf zurückzuführen, dass gerade in den Wintermonaten die Sonne deutlich später auf- und früher untergeht und entsprechend teilweise auch während dem Tag "nächtliche" Bedingungen herrschen. Eine saisonale Ermittlung der Häufigkeiten würde in den Sommermonaten zu einer deutlich ausgeprägteren Meteokorrektur für den Tag führen – und umgekehrt zu einer deutlich kleineren Korrektur im Winter. Da die Flugbewegungen übers Jahr variieren, könnte dies im Hinblick auf das Jahresmittel einen Einfluss auf die resultierenden Pegel haben. Eine Saison-spezifische Korrektur scheint zurzeit jedoch noch verfrüht.

## **6. Ausblick**

Die bisherigen Analysen wurden erst für einzelne Punktquellen durchgeführt. Als nächster Schritt müssten die Simulationen für ganze Flüge wiederholt werden, um den Einfluss einer variablen Quellenhöhe zu ermitteln. Dies sollte idealerweise für die Flugplätze Genf und Zürich erfolgen und zwar sowohl für Starts als auch für Landungen einzelner repräsentativer Flüge, beispielsweise für einen einzelnen Flugzeugtyp. Bei diesem Schritt sollte auch festgelegt werden, was für ein Standardprofil (N2, N3 oder ein alternatives) zur Anwendung kommen soll. Als Vorgehen wird dazu vorgeschlagen, eine feinere Unterteilung zu verwenden, beispielsweise indem die hinderlichen Situationen in Kategorien von unterschiedlichen Schallgeschwindigkeitsgradienten unterteilt werden (Vorschlag: leicht, mittel und stark hinderliche Bedingungen). Diesen Kategorien werden repräsentative Profile zugeordnet, welche einzeln in die Ausbreitungsrechnung einfließen. Gleichzeitig wird für die beiden Flugplätze eine verfeinerte Meteostatistik erstellt und darauf aufbauend ein gewichtetes Mittel gerechnet. Auf dieser Basis wird ein idealisiertes Schallgeschwindigkeitsprofil ermittelt, welches einen möglichst gleichen Meteeffekt wie das gewichtete Mittel erzielt. Unter Verwendung dieses idealisierten Profils sollen im Anschluss dann Jahresberechnungen für Zürich und Genf durchgeführt und so die Auswirkungen auf die resultierenden Lärmkarten beurteilt werden.

Die Implementation bedingt zusätzlich punktuelle Anpassungen an sonAIR, da neu in der Einzelflugsimulation mehrere – im Minimum zwei – Dämpfungsdatenbanken verwendet und kombiniert werden müssen.

## **7. Dank**

Wir danken dem Bundesamt für Umwelt BAFU für die Finanzierung des Projektes CompAIR.



## 8. Literatur

- [1] Chevret, P., P. Blanc-Benon, and D. Juve, 1996. *A numerical model for sound propagation through a turbulent atmosphere near the ground*. J Acoust Soc Am **100**, 3587ff.
- [2] Empa, 2018. *Validierung sonAIR, Teil 4: Vergleiche mit unabhängigen Messungen*. Bericht Nr. 5211.01324.100.01 - 4. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [3] Empa, 2019. *Dokumentation des sonX Ausbreitungsmodells. Programmversion: sonRAIL V6.0.0 bzw. sonARMS V5.0.0 bzw. sonAIR V3.0.0 (vom 21. März 2019)*. Bericht Nr. 5211.00687.100.14. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [4] Empa, 2019. *Dokumentation sonAIR Monitoring Projekt*. Bericht Nr. 5211.01323.100.01 - 1. E Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [5] Hofmann, J. and K. Heutschi, 2005. *An engineering model for sound pressure in shadow zones based on numerical simulations*. Acta Acustica united with Acustica **91**, 661-670.
- [6] Krebs, W. and G. Thomann, 2009. *Aircraft noise: new aspects on lateral sound attenuation*. Acta Acustica united with Acustica **95**, 1013-1023.
- [7] Krebs, W. and G. Thomann, 2009. *Aircraft Noise: New Aspects on Lateral Sound Attenuation*. Acta Acustica United with Acustica **95**, 1013-1023.
- [8] Schlatter, F., 2018. *Dokumentation SANC-TE -Berechnung mit sonAIR*. 5214.017372. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [9] Wunderli, J.M., 2012. *Aufbereitung von flächendeckenden Grundlagen für die Schallausbreitungsmodellierung in den Bereichen Meteorologie und Bodeneigenschaften*. 459'348. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [10] Wunderli, J.M. and M.W. Rotach, 2011. *Application of statistical weather data from the numerical weather prediction model COSMO-2 for noise mapping purposes*. Acta Acustica United with Acustica **97**, 403-415.
- [11] Zellmann, C. and J.M. Wunderli, 2014. *Influence of the atmospheric stratification on the sound propagation of single flights*, in INTER-NOISE: Melbourne, Australia.