

## **Dokumentation SANC-TE -Berechnung mit sonAIR**

**Berichts-Nr.:** **5214.017372**

Anzahl Seiten: 62 sowie 246 Seiten zusätzliche Beilagen  
(Footprints\_SANCTEAF\_sonAIR.pdf)  
(Footprints\_SANCTEAP\_sonAIR.pdf)

Verfasser: F. Schlatter

K:\sonAIR\Projekte\5214017372\_SANCTE\Bericht\5214017372-Dokumentation\_SANCTE\_Berechnung\_sonAIR\_V5\_sig.docx

Status: ENTWURF

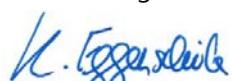
---

Dübendorf, 30. Mai 2018

Abteilung Akustik / Lärminderung

Der Verfasser:

Der Abteilungsleiter:



F. Schlatter

Kurt Eggenschwiler

---

Anmerkung: Bericht und Unterlagen werden 10 Jahre archiviert.

## Inhalt

Zusammenfassung .....	4
1 Einleitung .....	5
2 Erarbeitung der Grundlagen .....	6
2.1 Szenarien.....	6
2.2 Fluggeometrien.....	7
2.2.1 Flugspuren.....	7
2.2.2 Flugprofile .....	8
2.2.3 Faltung.....	11
2.3 Quellenmodelle .....	13
2.4 Gelände.....	13
2.5 Bodenbedeckung.....	14
2.6 Bewegungsstatistiken .....	15
3 Berechnung .....	17
4 Ergebnisse.....	18
4.1 SANC-TE Airfield .....	18
4.1.1 Szenarien ohne Streuspuren.....	19
4.1.2 Szenarien mit Streuspuren.....	21
4.2 SANC-TE Airport .....	23
4.2.1 Szenarien ohne Streuspuren.....	23
4.2.2 Szenarien mit Streuspuren.....	29
4.3 Ursachen für Abweichungen zwischen sonAIR und dem SANC-TE Referenzrahmen.....	34
4.3.1 Abweichungen als Folge unterschiedlicher Quellenmodelle.....	34
4.3.2 Abweichungen als Folge unterschiedlicher Ausbreitungsmodelle.....	36
5 Auswirkung der Bodenzusatzdämpfung .....	37
5.1 Erstellung Monopol-Richtcharakteristik in FLULA2.....	37
5.2 Resultate der Untersuchung der Bodenzusatzdämpfung mit FLULA2 und sonAIR .....	38
5.2.1 Vergleich FLULA2-Intern mit und ohne Bodenzusatzdämpfung.....	38
5.2.2 Vergleich Monopol FLULA2 mit Bodenzusatzdämpfung – sonAIR .....	40
5.2.3 Vergleich FLULA2 ohne Bodenzusatzdämpfung – sonAIR.....	40
5.2.4 Vergleich FLULA2 ohne Bodenzusatzdämpfung – sonAIR Einfachmodellberechnung .....	41
6 Zusätzliche Abklärungen zum Quellengitterkonzept von sonAIR.....	43
6.1 Kommentar zur Hindernisberechnung in sonAIR.....	49
7 Diskussion.....	50
8 Fazit und weiteres Vorgehen .....	53
9 Literatur .....	54
Beilagen .....	55
B.1 Skripte und Pfade .....	55
B.2 Reduktionsdaten SANC-TE AF.....	56
B.3 Reduktionsdaten SANC-TE AP .....	57
B.4 sonAIR – Parameter .....	58
B.5 Einzelfootprints.....	62



## Zusammenfassung

Mit der Swiss Aircraft Noise Calculation Test Environment (SANC-TE) stellt das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) eine künstliche Testumgebung zur Verfügung, um unterschiedliche Verfahren und Programme zur Ermittlung von Fluglärmbelastungen in einer standardisierten Art zu überprüfen und zu beurteilen [1]. Mit sonAIR [2, 3] wurde in den letzten Jahren an der Empa ein neues Fluglärmprogramm entwickelt, dessen Berechnungsergebnisse nun mit dem SANC-TE Referenzrahmen überprüft werden sollen. Die Berechnung des SANC-TE Airfields, sowie des SANC-TE Airports mit sonAIR und der Vergleich mit dem SANC-TE Referenzrahmen zeigt über alle betrachteten Szenarien, dass der Referenzrahmen durch sonAIR nicht eingehalten wird, wobei sonAIR in der Regel höhere Immissionspegel liefert. Neben vereinzelten Abweichungen bei der Quellenmodellierung konnten Differenzen primär auf die unterschiedliche Behandlung von Ausbreitungsphänomenen wie Bodeneffekt, Hinderniswirkung und in reduziertem Umfang der Luftdämpfung zurückgeführt werden. Speziell von Bedeutung war die sogenannte Bodenzusatzdämpfung, welche im Modell FLULA2 und somit im Referenzrahmen enthalten ist und für welche es kein direktes Pendant in sonAIR gibt. Diese beschreibt integral verschiedene Phänomene, namentlich die laterale Richtwirkung der Quelle sowie Boden- und Meteoeffekte. Diese drei Aspekte können in sonAIR separat berücksichtigt werden. Aufgrund der Aufgabenstellung, welche die Verwendung von zweidimensionalen SANC-DB Quellendatensätzen voraussetzt und keine Angaben zum Wetter macht, wurde bei der Simulation mit sonAIR jedoch nur der Bodeneffekt abgebildet. Grundsätzlich haben die Simulationen keine Zweifel an der Qualität von sonAIR geschürt. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass sonAIR die Schallausbreitung deutlich detaillierter und genauer als FLULA2 abbildet.

## 1 Einleitung

Mit der Swiss Aircraft Noise Calculation Test Environment (SANC-TE) stellt das Bundesamt für Umwelt (BAFU) und das Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL) eine künstliche Testumgebung zur Verfügung, um unterschiedliche Verfahren und Programme zur Ermittlung von Fluglärmbelastungen in einer standardisierten Art zu überprüfen und zu beurteilen [1]. Dabei gibt es einerseits ein kleines Flugfeld (SANC-TE Airfield) mit einem Heliport sowie einen Grossflughafen (SANC-TE Airport). Die beiden Szenarien unterscheiden sich hauptsächlich durch die räumliche Ausdehnung, sowie den darauf verkehrenden Luftfahrzeuge. Die beiden Szenarien sollen Testumgebungen für Flugfelder, respektive richtige Flughäfen darstellen und sind mit unterschiedlichen Bewegungsszenarien darauf ausgelegt, die Fluglärmprogramme entsprechend zu testen.

Für die Fluglärmermittlung gilt gemäss aktuellem Leitfaden Fluglärm [4] in der Schweiz die Methodenfreiheit. Das heisst, dass möglichst wenig explizite Vorschriften an die Fluglärmberchnungsprogramme gemacht werden. Entscheidend für das Erlangen einer Empfehlung für ein Fluglärmprogramm vom BAFU ist, dass die vom Fluglärmprogramm ermittelten Lärmkurven innerhalb des SANC-TE -Referenzrahmens liegen.

Mit sonAIR [2, 3, 5] wurde in den letzten Jahren an der Empa ein neues Fluglärmprogramm entwickelt, wessen Berechnungsergebnisse nun im Auftrag des Bafu mit dem SANC-TE Referenzrahmen für die Situationen SANC-TE Airport und Airfield, aber ohne Heliport, überprüft werden sollen.

Im Verlauf der Berechnungen haben sich innerhalb von sonAIR verschiedene Problempunkte gezeigt, welche in der Folge behoben wurden. Die Testumgebung SANC-TE hat sich diesbezüglich als sehr geeignet herausgestellt, um das Programm gründlich zu testen.

## 2 Erarbeitung der Grundlagen

Die Daten der SANC-TE sind in allgemeiner Form abgelegt und sind vom Anwender des zu testenden Fluglärmprogramms in die nötige Form zu bringen. In den folgenden Kapiteln sind die nötigen Umrechnungsschritte kurz dokumentiert, um aus den allgemein definierten Eingangsdaten der SANC-TE zu den in sonAIR verwendbaren Eingangsgrößen zu gelangen.

### 2.1 Szenarien

In der SANC-TE Airfield sind verschiedene Berechnungsszenarien in Form eines Flugfeldes definiert. Dabei wird unterschieden in Szenarien mit Streuspuren, sowie ohne. In diesem Bericht werden vier Szenarien des Airfields betrachtet. Diese vier Szenarien setzen sich folgendermassen zusammen:

- Szenario **AF000S00**: Ohne Streuspuren und mit gleich gewichteten Bewegungszahlen
- Szenario **AF000S01**: Ohne Streuspuren und mit asymmetrisch gewichteten Bewegungszahlen
- Szenario **AF001S00**: Mit Streuspuren und mit gleich gewichteten Bewegungszahlen
- Szenario **AF001S01**: Mit Streuspuren und mit asymmetrisch gewichteten Bewegungszahlen

Die Szenarien des SANC-TE Airports sind analog aufgebaut. Hier werden insgesamt acht Szenarien betrachtet:

- Szenario **AP000S00**: Grundszenario ohne Streuspuren mit gleich gewichteten Bewegungszahlen
- Szenario **AP000S01**: Grundszenario ohne Streuspuren mit asymmetrisch gewichteten Bewegungszahlen
- Szenario **AP000S02**: Gleich verteilte Militärflugzeug-Bewegungszahlen ohne Streuspuren
- Szenario **AP000S03**: Spezielles Nacht-Szenario ohne Streuspuren. Verteilung von Bewegungen auf drei Starts und einer Landung.
- Szenario **AP000S04**: Spezielles Nacht-Szenario ohne Streuspuren. Verteilung von Bewegungen auf einen Start und drei Landungen.
- Szenario **AP001S00**: Grundszenario mit Streuspuren mit gleich gewichteten Bewegungszahlen
- Szenario **AP001S01**: Grundszenario mit Streuspuren mit asymmetrisch gewichteten Bewegungszahlen
- Szenario **AP001S02**: Gleich verteilte Militärflugzeug-Bewegungen mit Streuspuren
- Szenario **AP001S03**: Spezielles Nacht-Szenario mit Streuspuren. Verteilung von Bewegungen auf drei Starts und eine Landung.
- Szenario **AP001S04**: Spezielles Nacht-Szenario mit Streuspuren. Verteilung von Bewegungen auf einen Start und drei Landungen.

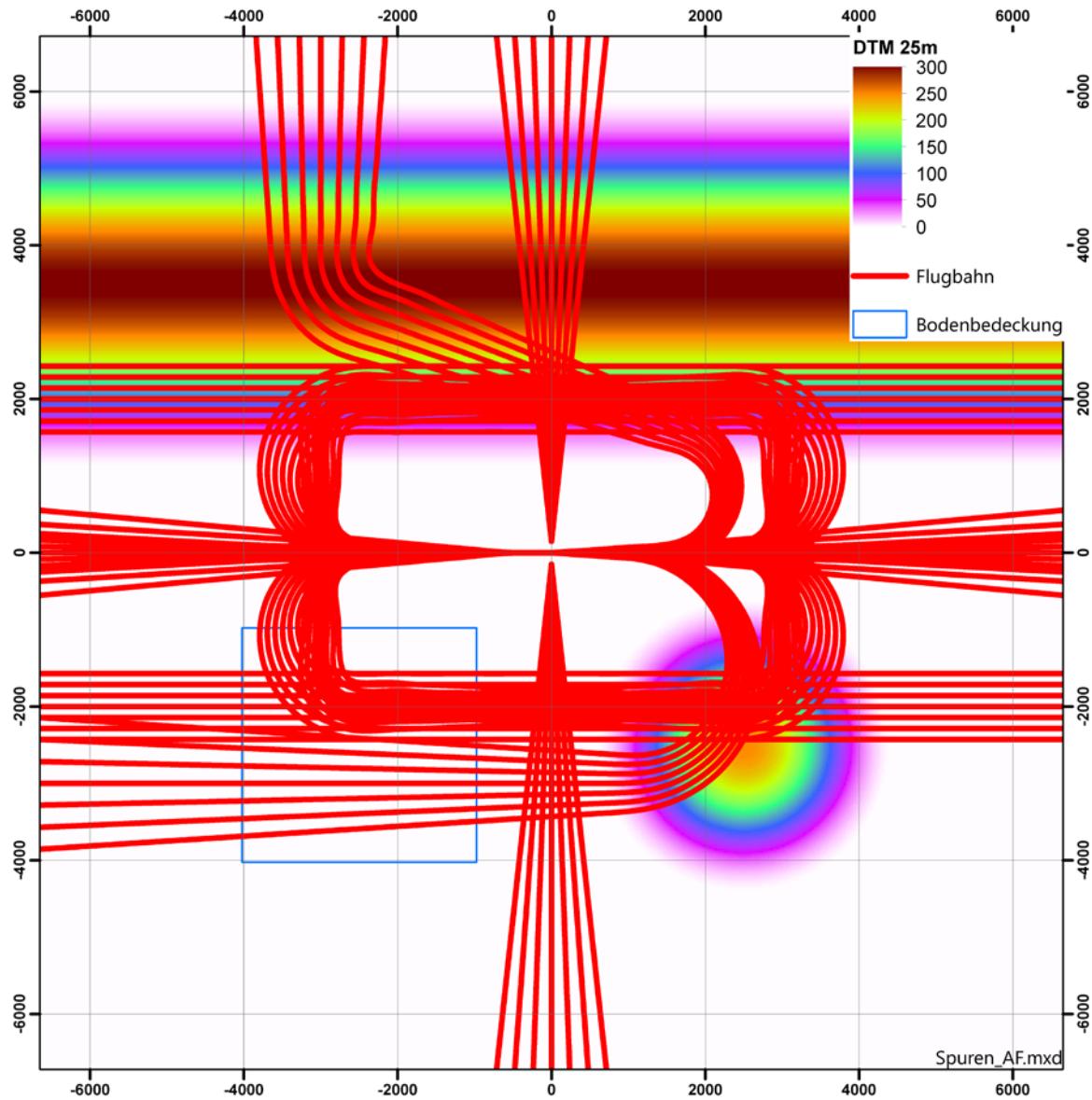
## 2.2 Fluggeometrien

In der SANC-TE werden die benötigten Flugbahnen in Form von horizontalen Flugspuren (zweidimensional) und vertikalen Profilen pro Flugzeugtyp und Route definiert. Diese Grundlagendaten müssen mittels einer Faltung zu idealisierten Flugbahnen (dreidimensional) zusammengesetzt werden. Hierbei werden die Flugspuren und die Flugprofile über die abgerollte Distanz miteinander verknüpft.

### 2.2.1 Flugspuren

In den allgemein formulierten SANC-TE Flugspurdateien enden die Spuren der Landungen jeweils beim Aufsetzpunkt. Die einzelnen Flugzeuge (und Helikopter) weisen in der SANC-TE unterschiedlich lange, typenspezifische Ausrollstrecken auf. Das heisst, dass um die korrekte Länge der Flugspuren zu berücksichtigen, die Ausrollstrecken daher flugzeugtypspezifisch dazu addiert werden müssen.

Während in den Szenarien beginnend mit AF000/AP000 nur die Einzelspuren in der Simulation verwendet werden, kommen in allen Szenarien beginnend mit AF001/AP001 zusätzlich Streuspuren zur Anwendung. Dabei werden pro Flugspur sechs Streuspuren gemäss der in Doc.29 3rd edition vorgesehenen Methode erstellt. Abbildung 1 zeigt am Beispiel von Szenario AF001S01 alle idealisierten Flugspuren für Starts und Landungen inklusive Streuspuren auf.



**Abbildung 1: Spuren des SANC-TE Airfields inklusive hinterlegtem Gelände und Bodenbedeckung (See). Die Spuren beinhalten Streuspuren des Szenarios AF001S01.**

Im Gegensatz zum SANC-TE Airport sind im SANC-TE Airfield auch einige Volten definiert. Die Flugspuren der Volten werden in den Eingangsdaten der SANC-TE in einem Stück definiert. Das Faltungstool von sonAIR kann allerdings nicht ganze Volten basierend auf einer einzelnen Flugspur falten, denn die Profilinformation muss einem Start oder Landungspunkt zugewiesen werden können. Aus diesem Grund müssen die Volten aufgeteilt werden in einen Start- und eine Landungsspur. Dazu wurden die Spuren der Volten jeweils genau in der Mitte geteilt.

## 2.2.2 Flugprofile

In der SANC-TE sind die Flugprofile sehr grob aufgelöst mit wenigen Punkten über grosse Distanzen. Bei der Faltung von Flugspuren und -Profilen zu Flugbahnen mit dem Faltungstool von sonAIR resultieren aufgrund der groben Auflösung grössere Abweichungen. Um dieses Problem zu umgehen, wur-

de die Profilpunktdichte mittels linearer Interpolation deutlich vergrössert, sodass die abgerollte Distanz in 10 m Schritten abgetastet wird.

In sonAIR müssen die Profile stets bei einer abgerollten Distanz von 0 m beginnen. Dies entspricht bei einer Landung dem letzten Punkt. Bei einem Start entspricht die abgerollte Distanz von 0 m dem ersten Punkt.

Gemäss SANC-TE- Dokumentation gelten die Flugzustände für das nächste Segment. Da die Landungen in der SANC-TE rückwärts definiert sind (z.B Distxy = -50'000, Vgl. Tabelle 1) musste die abgerollte Distanz umgedreht, und mit dem letzten Wert (Ausrollstrecke) korrigiert werden, sodass die Profile bei einer abgerollten Distanz von 0 m beginnen. Die Flugzustände wurden in diesem Fall vom nächsten Segment übernommen (Interpolation: 'next').

Bei Starts (Vgl. Tabelle 2) konnte die abgerollte Distanz direkt verwendet werden und es wurden die Flugzuständen vom vorderen Element übernommen (Interpolation: 'previous').

**Tabelle 1: Profil einer Cessna C172, Landung A0.**

Segment	DistXY [m]	H [m]	V [m/s]	OP [-]
0	-50000	1247.14	62.1	60
1	-11990.3	556.3	61.4	60
2	-4240.1	298	55.6	60
3	-1000	83.12	42.78	60
4	0	1.2	42.5	70
5	250	1.2	0	70

**Tabelle 2: Profil einer Cessna C172, Start D0.**

Segment	DistXY [m]	H [m]	V [m/s]	OP [-]
0	0	1.2	0	10
1	250	1.2	44.4	20
2	1300.84	100	48.46	30
3	7583.4	671.8	54.5	30
4	15105.8	1238.1	59.1	30
5	21123.7	1613.4	64.7	30
6	27141.6	1870.3	70.8	30
7	33159.5	2040.9	77	30
8	42186.4	2179.2	81.7	30
9	50000	2301.34	81.58	30

Einige Beispiele von Profilen sind in den folgenden Abbildungen aufgeführt. Dabei stellen die Abbildungen auf der linken Seite jeweils das gesamte Profil dar, während die Abbildungen auf der rechten Seite auf die Profile im Pistenbereich fokussieren. Die Vorgaben gemäss SANC-TE sind jeweils als blaue Diamanten dargestellt und die Linien stellen die sonAIR-Implementation dar.

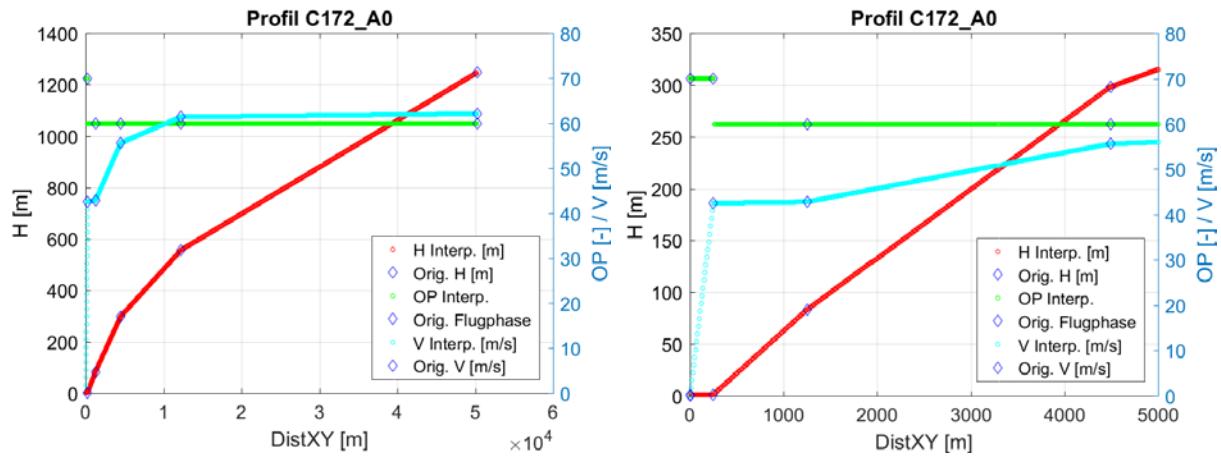


Abbildung 2: Links: Gesamtes Profil der Cessna C172, Landung A0, Rechts Nahaufnahme im Bereich der Piste.

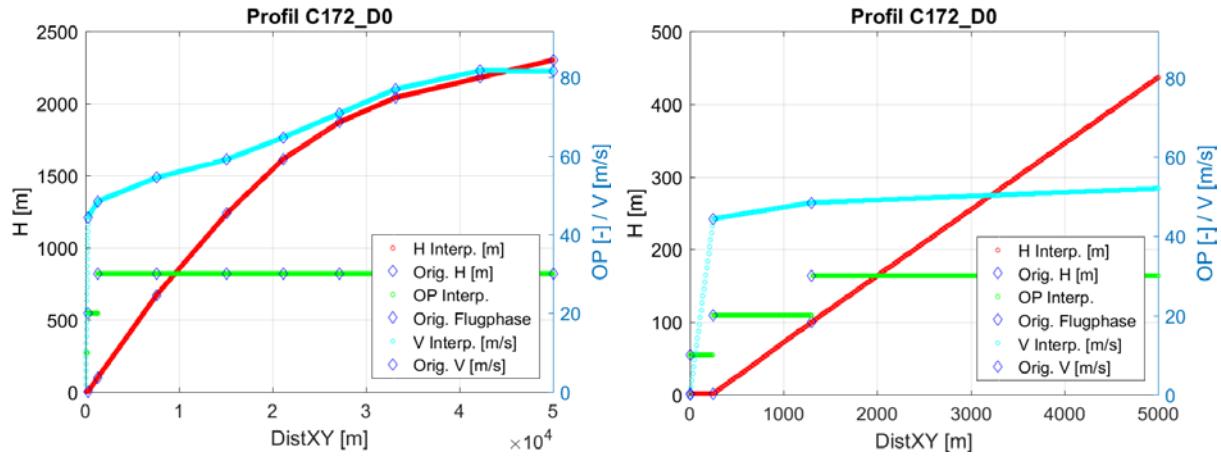


Abbildung 3: Links: Gesamtes Profil der Cessna C172, Start D0, Rechts Nahaufnahme im Bereich der Piste.

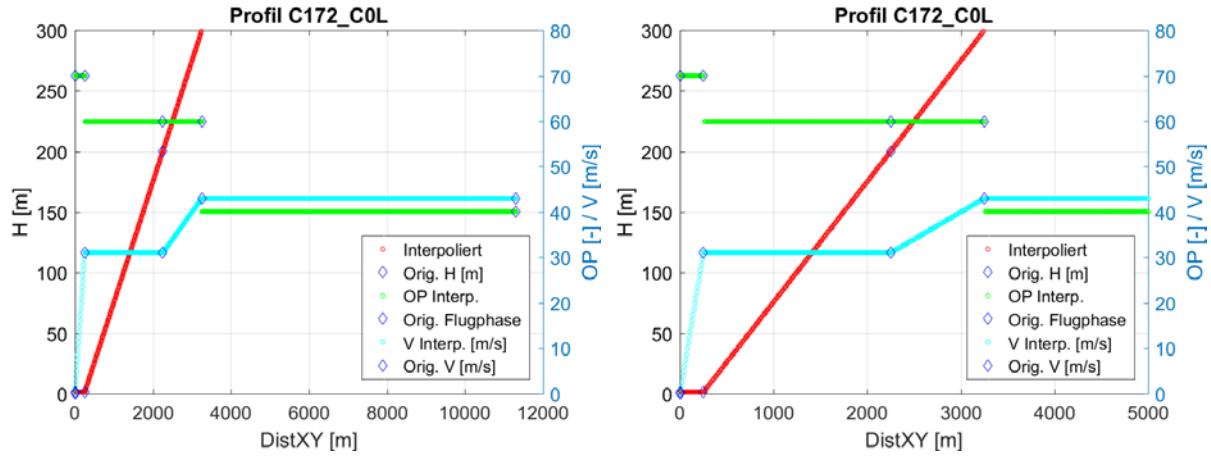


Abbildung 4: Links: Gesamtes Profil der Cessna C172, Volte C0, Landung, Rechts Nahaufnahme im Bereich der Piste.

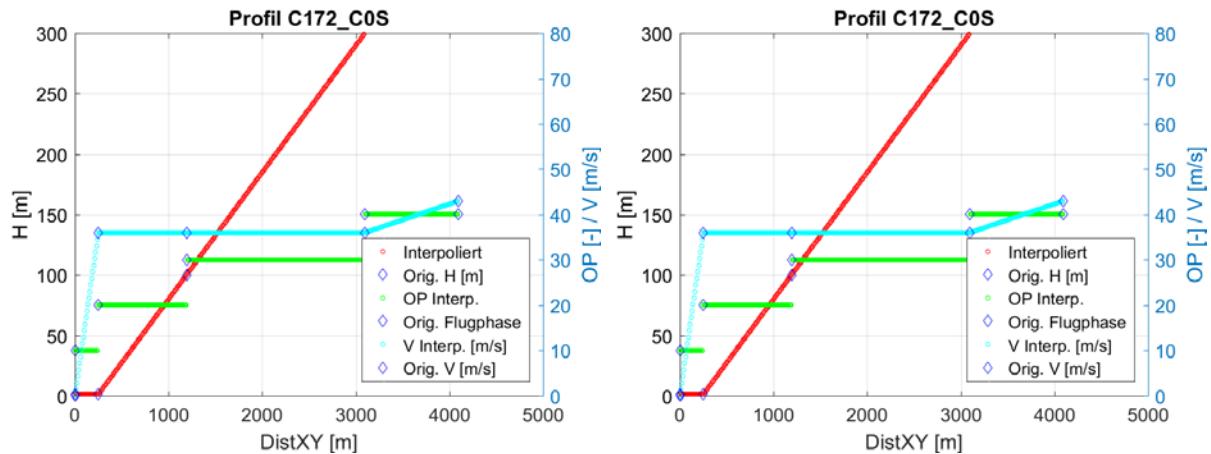
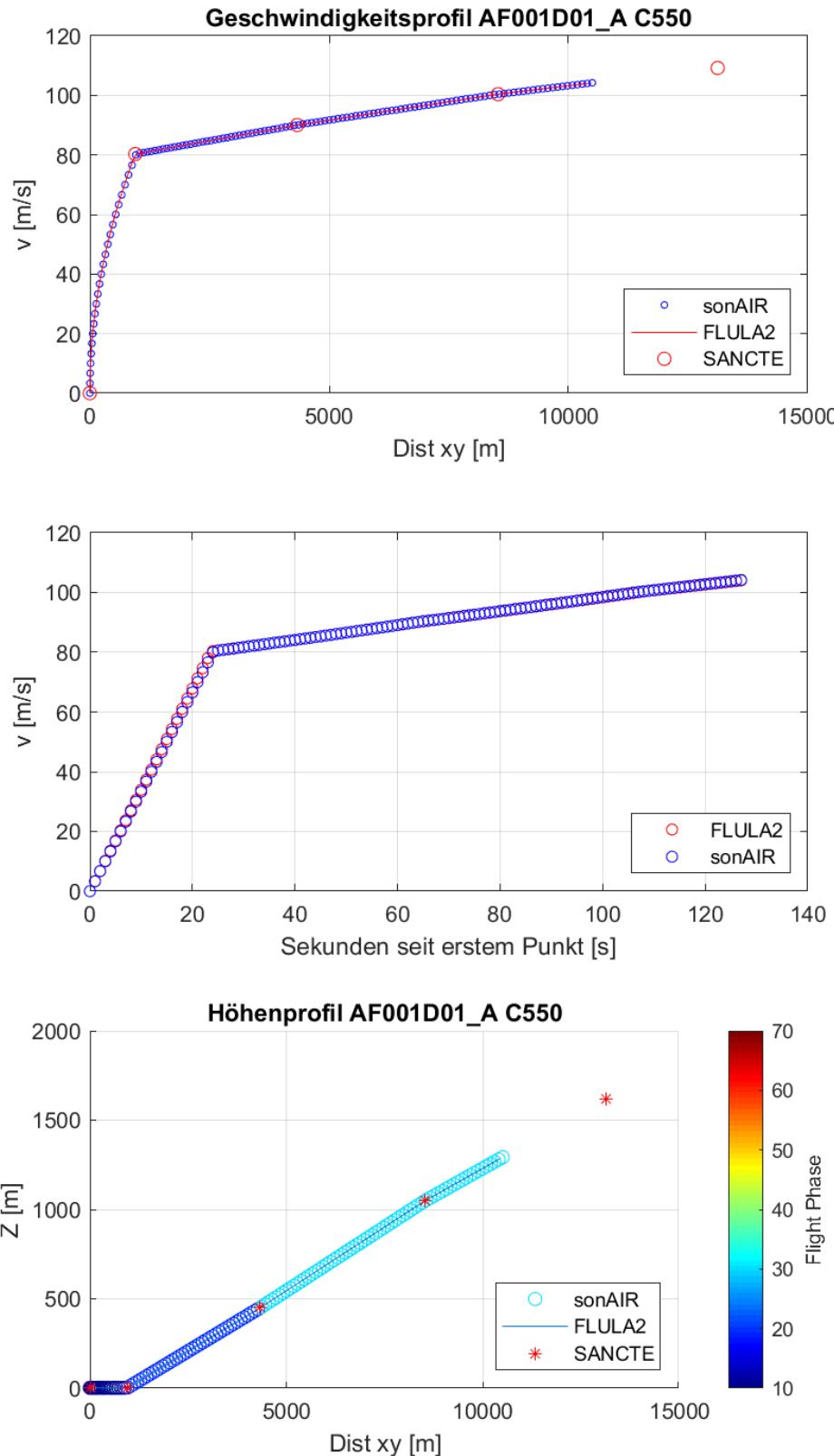


Abbildung 5: Links: Gesamtes Profil der Cessna C172, Volte C0, Start. Rechts Nahaufnahme im Bereich der Piste.

## 2.2.3 Faltung

Die Faltung von Spuren und Profilen zu Flugbahnen (dreidimensional) wurde mit dem in sonAIR integrierten Faltungstool durchgeführt. Um das Ergebnis zu validieren, wurden die resultierenden sonAIR-Flugbahnen mit den in einer früheren Berechnung verwendeten Flugbahnen des Programms FLULA2 verglichen [6]. In Abbildung 6 sind dazu die Faltungsergebnisse von sonAIR und FLULA2 sowie den SANC-TE Eingangsdaten abgebildet. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der verschiedenen Programme sehr gut übereinstimmen.



**Abbildung 6:** Beispiel eines Starts einer Cessna Citation C550 auf Piste 09, Streuspur A (Footprint AF001D09). Dabei wird zuerst die Geschwindigkeit gegen die abgerollte Distanz von sonAIR (blaue Punkte) vs. FLULA2 (rote Linie) und die SANC-TE Vorgaben dargestellt. Im mittleren Teil ist wiederum die Geschwindigkeit v gegen die Zeit aufgetragen. In der untersten Abbildung wird das Höhenprofil zwischen sonAIR (farblich mit Flugphasen codierte Punkte) vs. das FLULA2- Höhenprofil in Blau verglichen. Die Sterne beschreiben wiederum die SANC-TE Vorgaben.

## 2.3 Quellenmodelle

Die Berechnung wurde mit den in der SANC-TE enthaltenen Quellendatendatei SOURCE.TXT, VERSION: 2.00 vom 12.04.2012, durchgeführt. Die entsprechenden Emissionsdaten mussten zuerst in sonAIR-Quellenmodelle umgewandelt werden. Die sonAIR-Quellendaten wurden mittels Simulation eines Überflugs soweit optimiert, dass sie für jeden Flugzeugtyp die akustischen Kennwerte ausreichend genau reproduzieren. Hierzu wurden die Normspektren zu Emissionsspektren skaliert und eine generische Richtwirkungsfunktion mittels einer Optimierung angepasst. Die daraus resultierenden spektralen Emissionsdaten sind in Abhängigkeit des longitudinalen Abstrahlwinkels  $\theta$  und der Flugphase beschrieben. Die Methodik zur Erarbeitung der Quellenmodelle ist im Empa-Bericht Nr. 5214.010391 dokumentiert [7].

## 2.4 Gelände

In den Basisdaten der SANC-TE sind zwei verschieden grosse Gelände für den Airport sowie das Airfield definiert. Die beiden Gelände des Airports und Airfields unterscheiden sich in ihrer Ausdehnung. Die beiden Gelände weisen im Falle des Airports eine Auflösung von 150 m und im Falle des Airfields von 50 m aus.

Für die sonAIR Ausbreitungsrechnung werden zwei Gelände benötigt: Ein fein und ein grob aufgelöste. Das fein aufgelöste Gelände sollte in sonAIR eine Auflösung von maximal 25 m haben. Somit muss die Auflösung des SANC-TE Geländes vergrössert werden. Dies kann grundsätzlich auf verschiedene Arten durchgeführt werden. Mit dem ArcMap-Tool *nearest neighbour* werden die Eingabedaten genau reproduziert, man erhält aber ein kantigeres Ergebnis. Mit dem Tool *Cubic interpolation* resultiert ein deutlich glatteres (und somit realitätsnäheres) Ergebnis. Mit letzterer Methode wurde die Auflösung des 50 m SANC-TE Geländes auf eine Maschenweite von 25 m verfeinert (vgl. Abbildung 7).

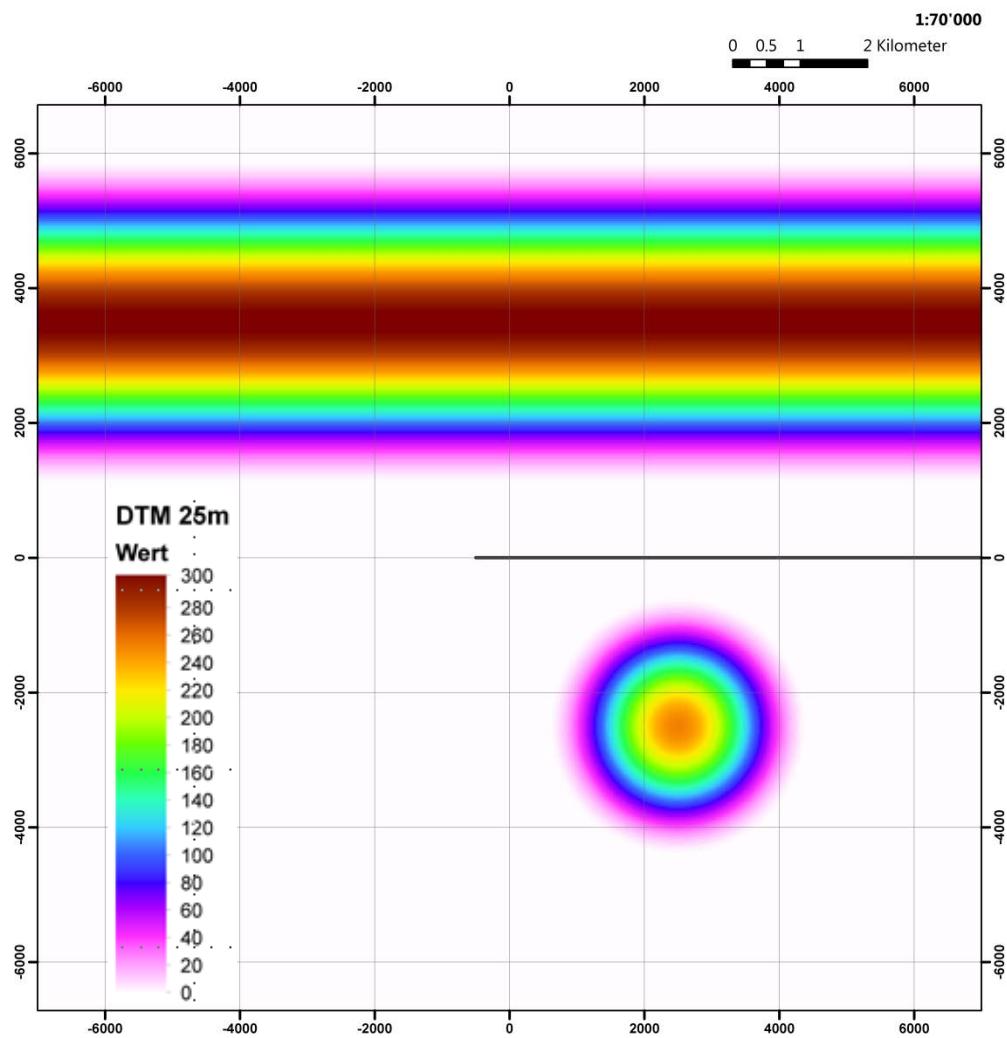
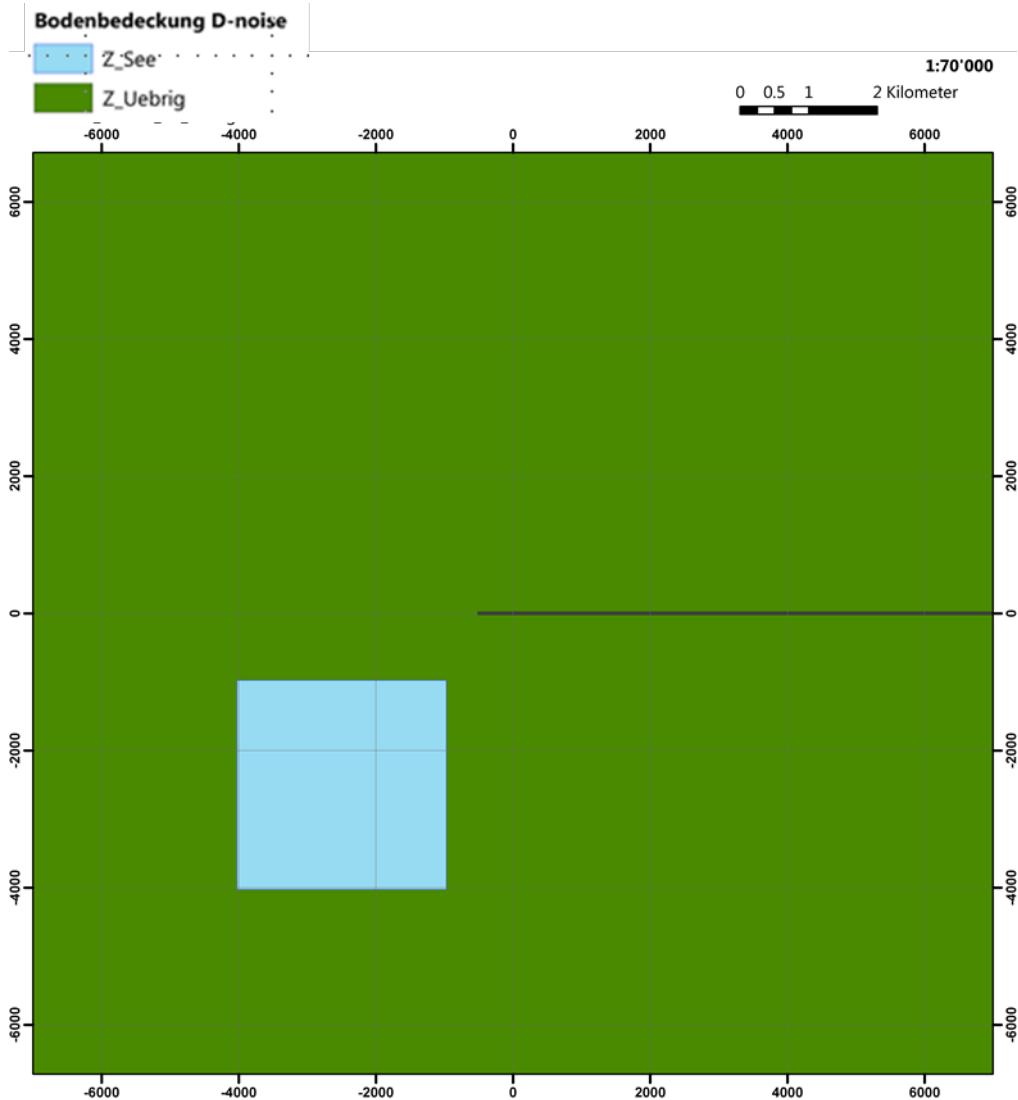


Abbildung 7: Abbildung des Geländes des SANC-TE Airfields mit einer Maschenweite von 25 m.

## 2.5 Bodenbedeckung

Das Fluglärmprogramm sonAIR ist in der Lage unterschiedliche Bodenbedeckungen zu modellieren. Bei der SANC-TE Airfield-Berechnung wurden die Bodenbedeckungen gemäss der Vorgaben in der SANC-TE Dokumentation berücksichtigt. In Abbildung 8 sind die beiden im Airfield-Szenario definierten Bodenbedeckungen Grasland und Wasser abgebildet.



**Abbildung 8:** Bodenbedeckung der SANC-TE Airfield-Berechnung. (Der Typ Z\_Ubrig weist die gleichen Eigenschaften wie Grasland auf).

## 2.6 Bewegungsstatistiken

Neben Einzelfootprints werden auch die in Kapitel 2.1 beschriebenen Szenarien mit der SANC-TE Referenz verglichen. Dabei kamen folgende Bewegungszahlen gemäss SANC-TE zur Anwendung:

**Tabelle 3:** Stündliche und Jährliche Bewegungszahlen der SANC-TE Airfield-Szenarios. Vergleich der tatsächlichen vs. der theoretischen Anzahl Bewegungen

Szenario	Bewegungszahl pro Stunde ( $n_h$ )	Bewegungszahl pro Jahr ( $n_h * 365 * 12$ )	Theoretische Bew. Zahl	Abweichung
<b>AF000S00</b>	15.00	65'693	65'700	-0.011%
<b>AF000S01</b>	15.00	65'701	65'700	0.001%
<b>AF001S00</b>	15.00	65'693	65'700	-0.011%
<b>AF001S01</b>	15.00	65'701	65'700	0.001%

**Tabelle 4: Jährliche Bewegungszahlen des SANC-TE Airports. Vergleich der Implementierten Bew.-Zahlen, vs. theoretischer Anzahl gemäss SANC-TE Projektdaten**

Szenario	Jährliche Bewegungszahlen	Theoretische Anzahl	Abweichung [%]
<b>AP000S00</b>	175'187	175'200	-0.007%
<b>AP000S01</b>	175'198	175'200	-0.001%
<b>AP000S02</b>	6'241	6'240	0.010%
<b>AP000S03</b>	5'256	5'256	0.000%
<b>AP000S04</b>	5'256	5'256	0.000%
<b>AP001S00</b>	175'187	175'200	-0.007%
<b>AP001S01</b>	175'198	175'200	-0.001%
<b>AP001S02</b>	6'241	6'240	0.010%
<b>AP001S03</b>	5'256	5'256	0.000%
<b>AP001S04</b>	5'256	5'256	0.000%

Die Bewegungszahlen weisen aufgrund von Rundungsdifferenzen gewisse Abweichungen auf, welche jedoch sehr gering sind, und deshalb toleriert werden können.

### 3 Berechnung

Im Verlauf des Projektes wurden mit sonAIR verschiedene Berechnungen durchgeführt. Dabei wurden Fehler in den Berechnungen sukzessive aufgedeckt und behoben:

- Erste Berechnung Airfield: Gelände wurde nicht berücksichtigt, da Höhe 0 nicht erlaubt war. Berechnung nur anhand Direktschall
- Berechnung SANC-TE Airfield. Mit sonX-Version Aufdeckung der Kachelung-Problematik bei See.
- Berechnung SANC-TE Airfield mit sonX-Version V2.5.5 → Aktueller Stand SANC-TE Airfield
- Berechnung SANC-TE Airport mit sonX-Version V2.6.7. Weiterhin Probleme mit Primärfächern (Neu: Integration der Bodenbedeckungsdaten als Raster-Datei. Es zeigten sich allerdings wiederum die Kachelungsprobleme beim See)
- Berechnung SANC-TE Airport mit sonX-Version V2.8.7, Fehlerhafte Winkelberechnung, Ausgabe von zu vielen Dämpfungen. Korrigiert mit sonX-Version V2.8.8
- Berechnung SANC-TE Airport mit sonX-Version V2.8.8 → Aktueller Stand SANC-TE Airport

Die aktuelle Berechnung des SANCTE-Airfields wurde mit den unten beschriebenen Modellversionen durchgeführt:

- Ausbreitungskern: sonAIR V2.5.5, BASIC-Modul (Berücksichtigung der Standard-Atmosphäre bei 15°C und 70% Luftfeuchtigkeit)
- Simulation SimTool V1.0.3.0

Die aktuelle Berechnung des SANCTE-Airports wurde mit den unten beschriebenen Modellversionen durchgeführt:

- Ausbreitungskern: sonAIR V2.8.8, BASIC-Modul (Berücksichtigung der Standard-Atmosphäre bei 15°C und 70% Luftfeuchtigkeit)
- Simulation SimTool V1.0.3.0

## 4 Ergebnisse

### 4.1 SANC-TE Airfield

In den folgenden Abbildungen 9 - 12 sind die Ergebnisse der sonAIR SANC-TE Airfield Szenarien abgebildet. Dabei werden jeweils die Differenzen zwischen dem SANC-TE Referenzrahmen und der sonAIR Berechnung als Raster farblich dargestellt (Jeweils  $L_{AE, SANC-TE} - L_{AE, sonAIR}$ ). In den Abbildungen sind ausserdem die Isolinien in 5-dB Schritten des SANC-TE Referenzrahmens (gestrichelte Linien) und der sonAIR Berechnung (ausgezogene Linien) ersichtlich. Wie es sich zeigt, treten bei allen drei Szenarien deutliche Abweichungen zwischen sonAIR und dem Referenzrahmen auf. In Nord-Süd-Richtung sind Bereiche in rot zu sehen, in welchen für sonAIR 1-2 dB tiefere Immissionen resultieren. Überwiegend, namentlich seitlich der Flugbahnen liefert sonAIR jedoch höhere Immissionen als der Referenzrahmen, wobei die Abweichungen lokal bis zu 4 dB betragen.

#### 4.1.1 Szenarien ohne Streuspuren

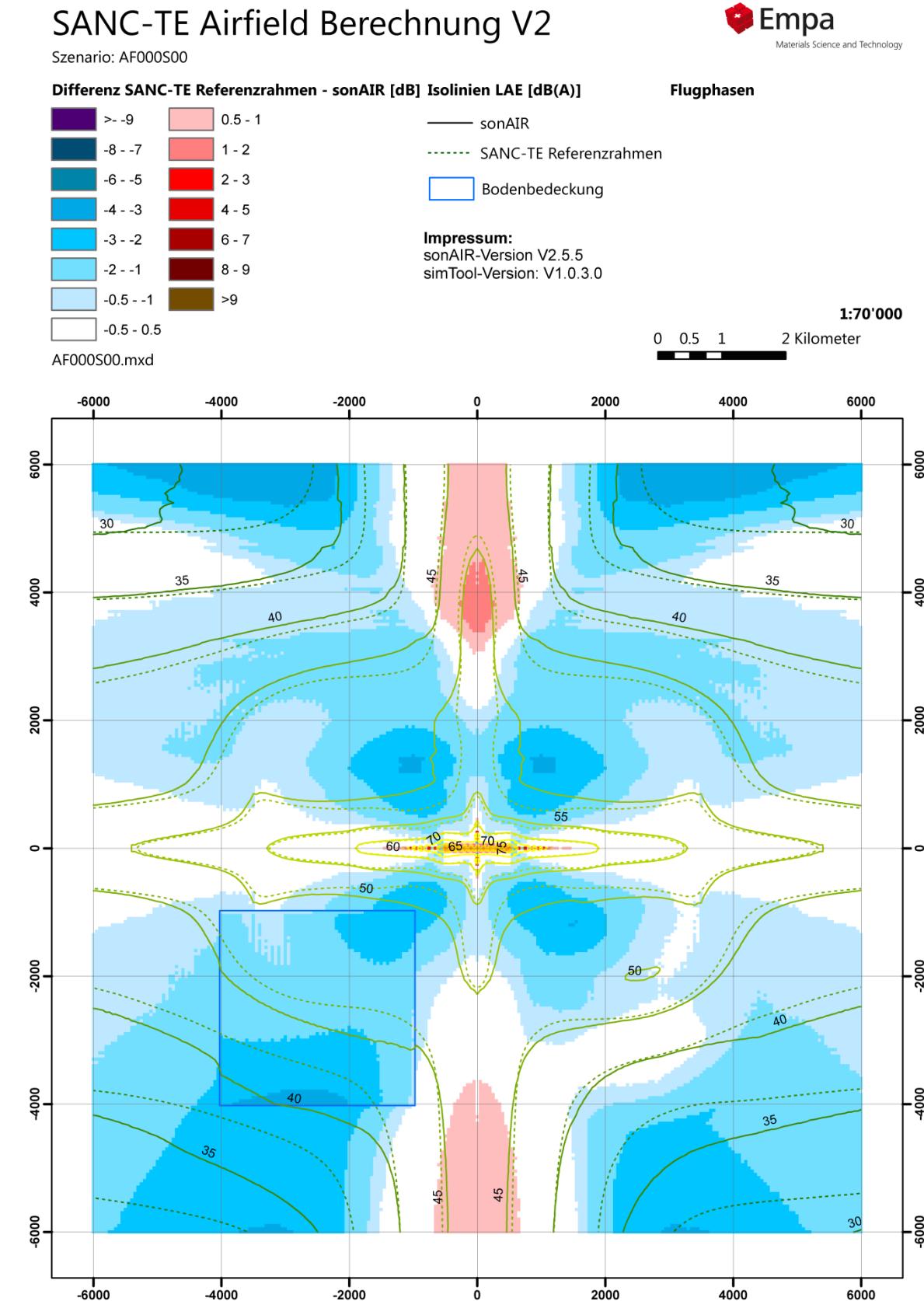


Abbildung 9: Szenario AF000S00, Basisszenario ohne Streuspuren mit gleich gewichteten Flugbahnen.

## SANC-TE Airfield Berechnung V2

Szenario: AF000S01

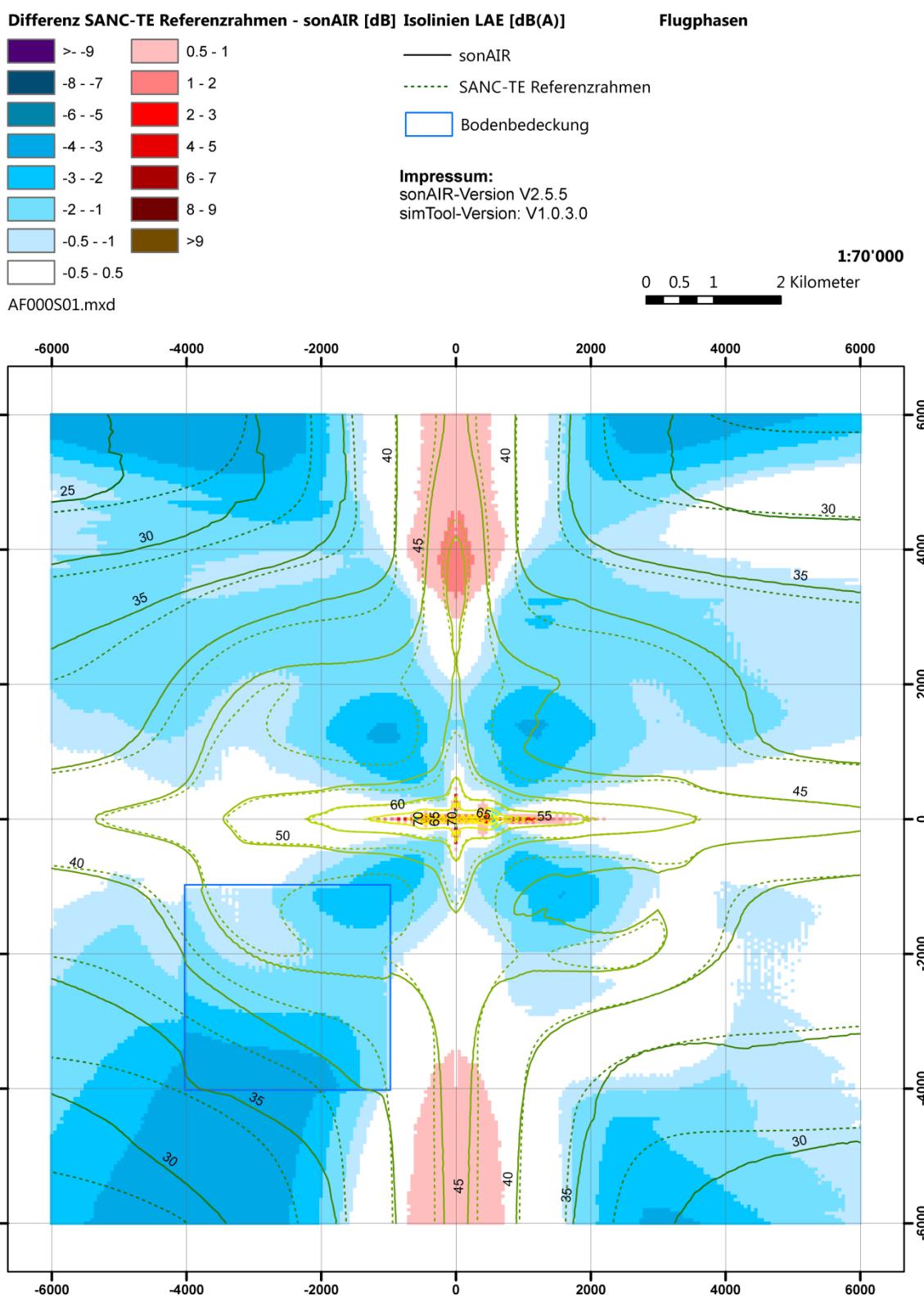
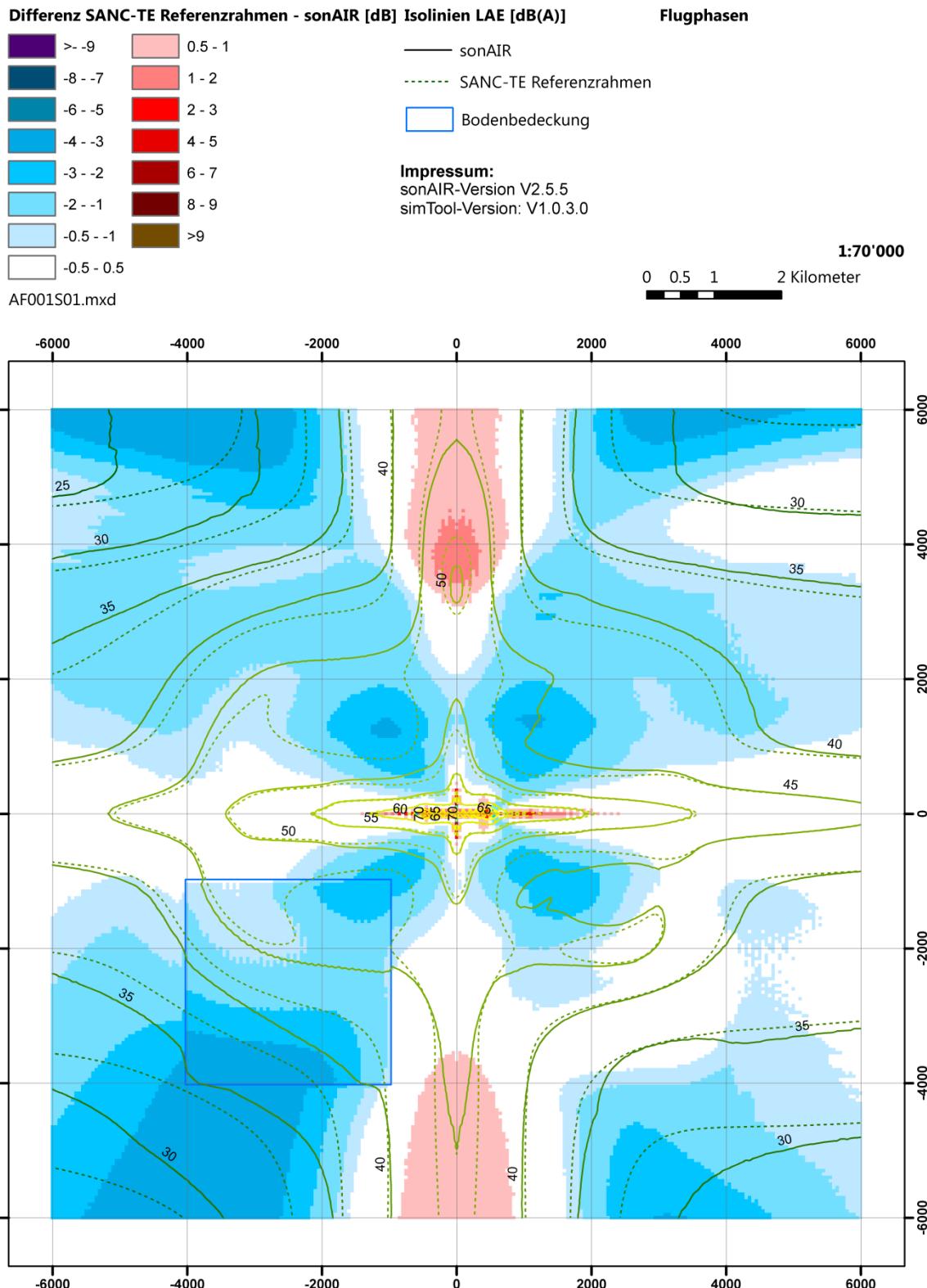


Abbildung 10: Szenario AF000S01, Basisszenario ohne Streuspuren mit assymetrisch gewichteten Flugbahnen.

#### 4.1.2 Szenarien mit Streuspuren

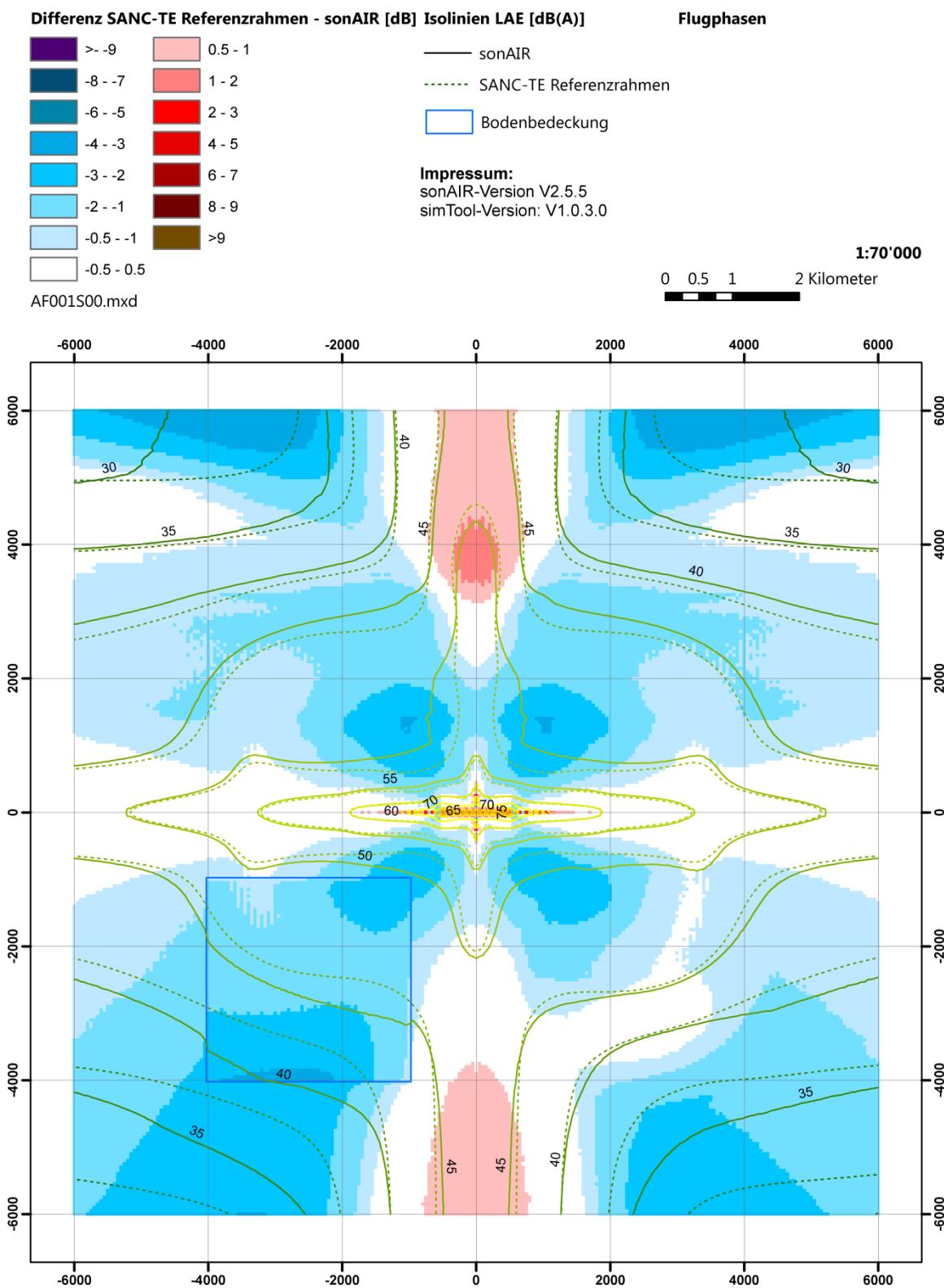
## SANC-TE Airfield Berechnung V2

Szenario: AF001S01



## SANC-TE Airfield Berechnung V2

## Szenario: AF001S00



**Abbildung 12: Szenario AF000S00, Basisszenario mit Streuspuren mit asymmetrisch gewichteten Flugbahnen.**

## 4.2 SANC-TE Airport

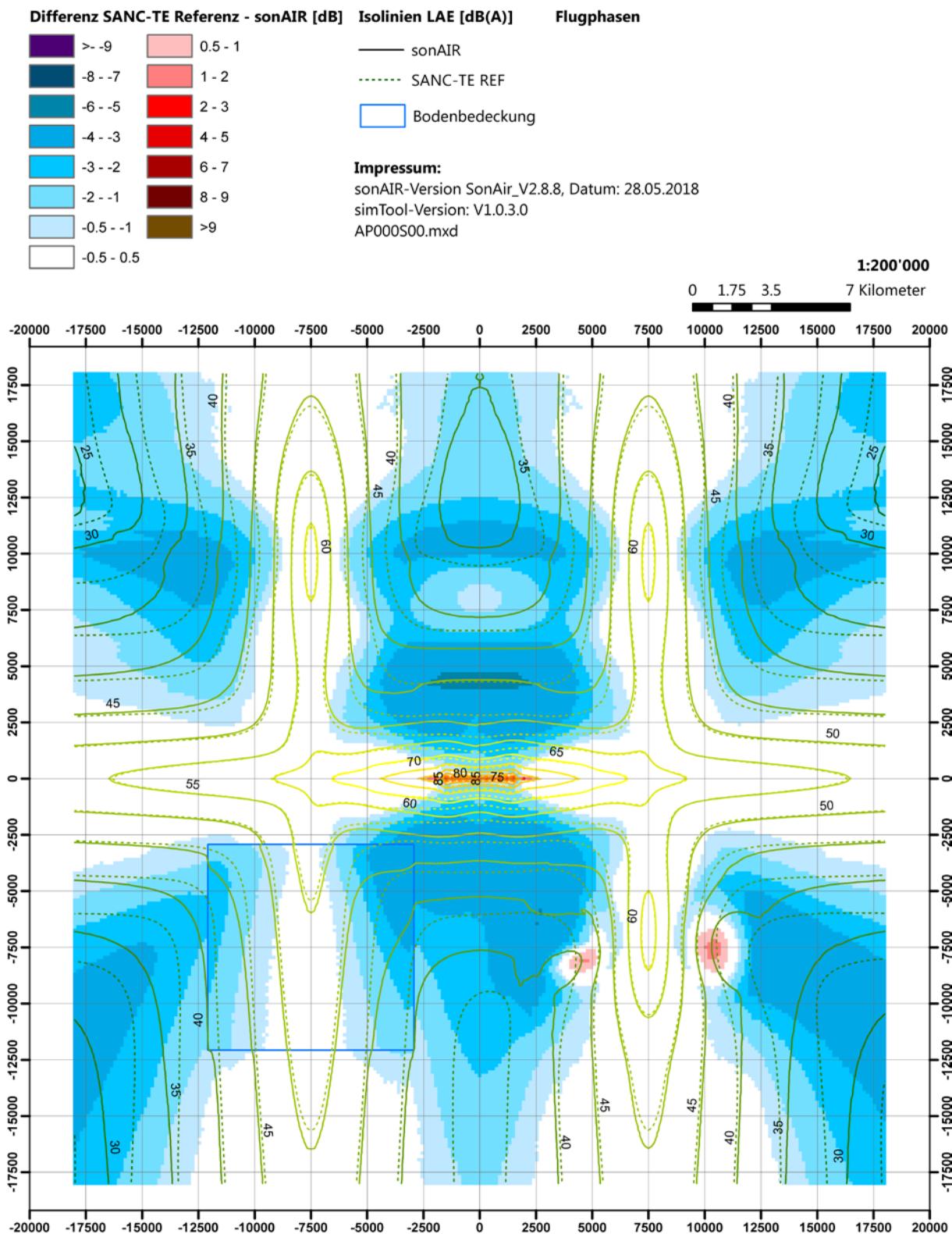
### 4.2.1 Szenarien ohne Streuspuren

Abbildung 13 bis Abbildung 22 zeigen die Ergebnisse der sonAIR SANC-TE Airport Szenarien. Wiederum werden jeweils die Differenzen zwischen dem SANC-TE Referenzrahmen und der sonAIR Berechnung als Raster farblich dargestellt (Jeweils  $L_{AE, SANC-TE} - L_{AE, sonAIR}$ ). In den Abbildungen sind ausserdem die Isolinien in 5-dB Schritten des SANC-TE Referenzrahmens (gestrichelte Linien) und der sonAIR Berechnung (ausgezogene Linien) ersichtlich. Es zeigt sich ein analoges Bild zum Airfield mit wenigen Bereichen in denen sonAIR zu tieferen Pegeln führt und einer generellen Tendenz seitlich der Flugbahnen zu höheren Pegeln im Vergleich zum Referenzrahmen.

Eine Analyse der Ursachen dieser Abweichungen ist auf der Basis ganzer Szenarien schwierig. Deshalb werden in der Beilage alle Einzel-Footprints als Vergleich mit dem SANC-TE Referenzrahmens, sowohl für Airfield als auch Airport, aufgeführt. Im nachfolgenden Abschnitt werden verschiedene Ursachen für Abweichungen einzeln diskutiert.

## SANC-TE Airport Berechnung

Szenario: AP000S00



## SANC-TE Airport Berechnung

Szenario: AP000S01

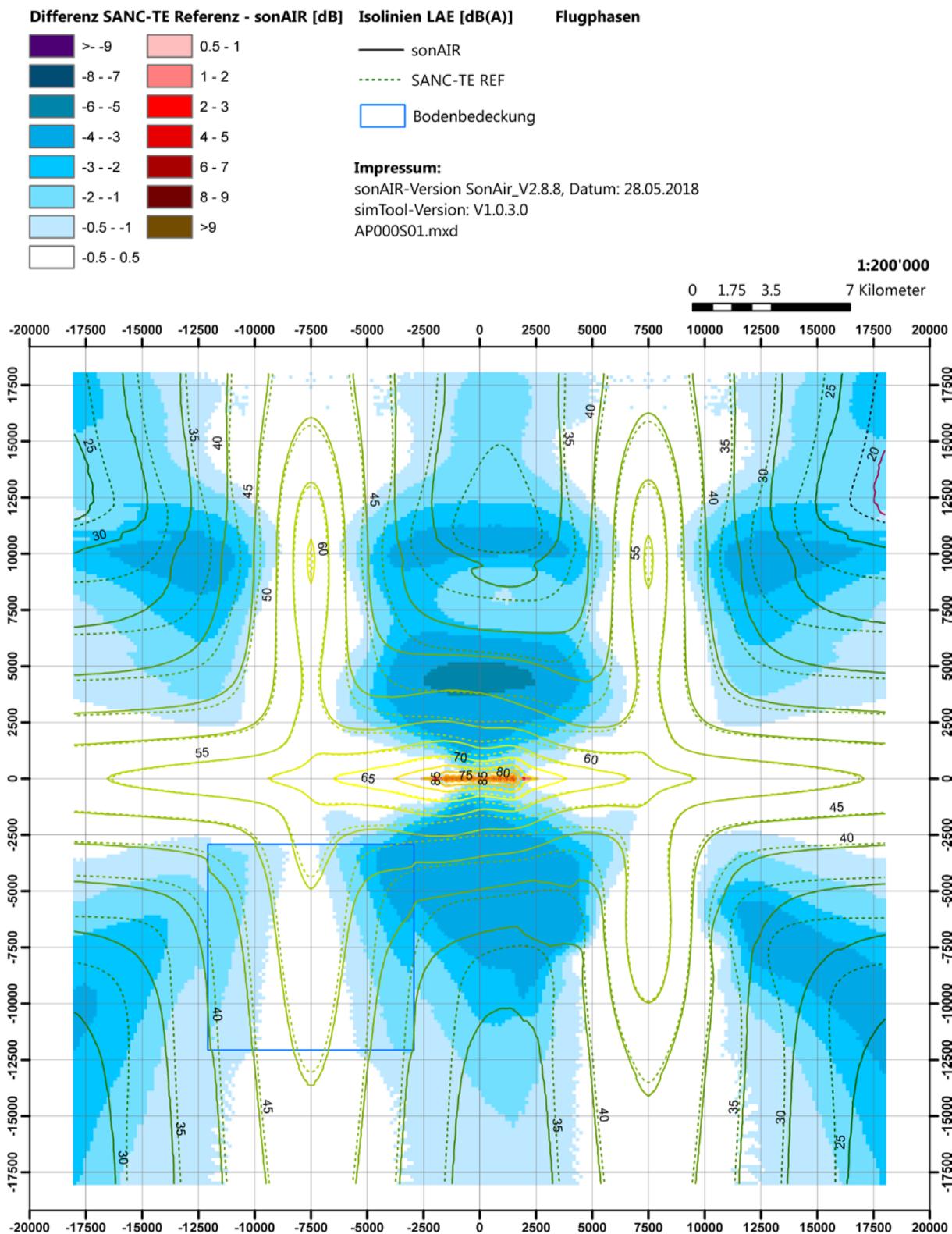


Abbildung 14: Szenario AP000S01, Basisszenario ohne Streuspuren mit asymmetrisch gewichteten Flugbahnen.

## SANC-TE Airport Berechnung

Szenario: AP000S02

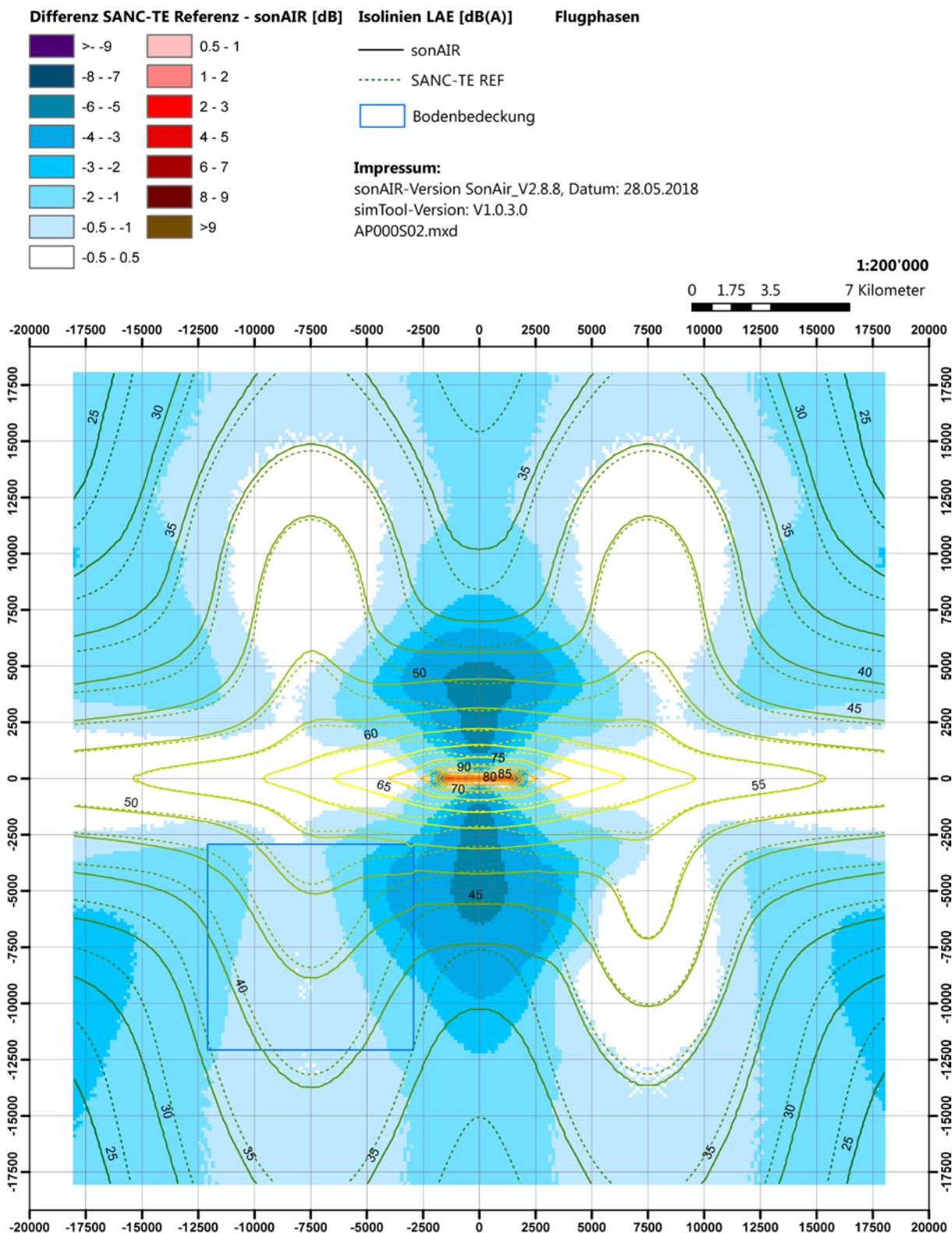


Abbildung 15: Szenario AP000S02, Militär-Szenario ohne Streuspuren.

## SANC-TE Airport Berechnung

Szenario: AP000S03

 **Empa**  
 Materials Science and Technology

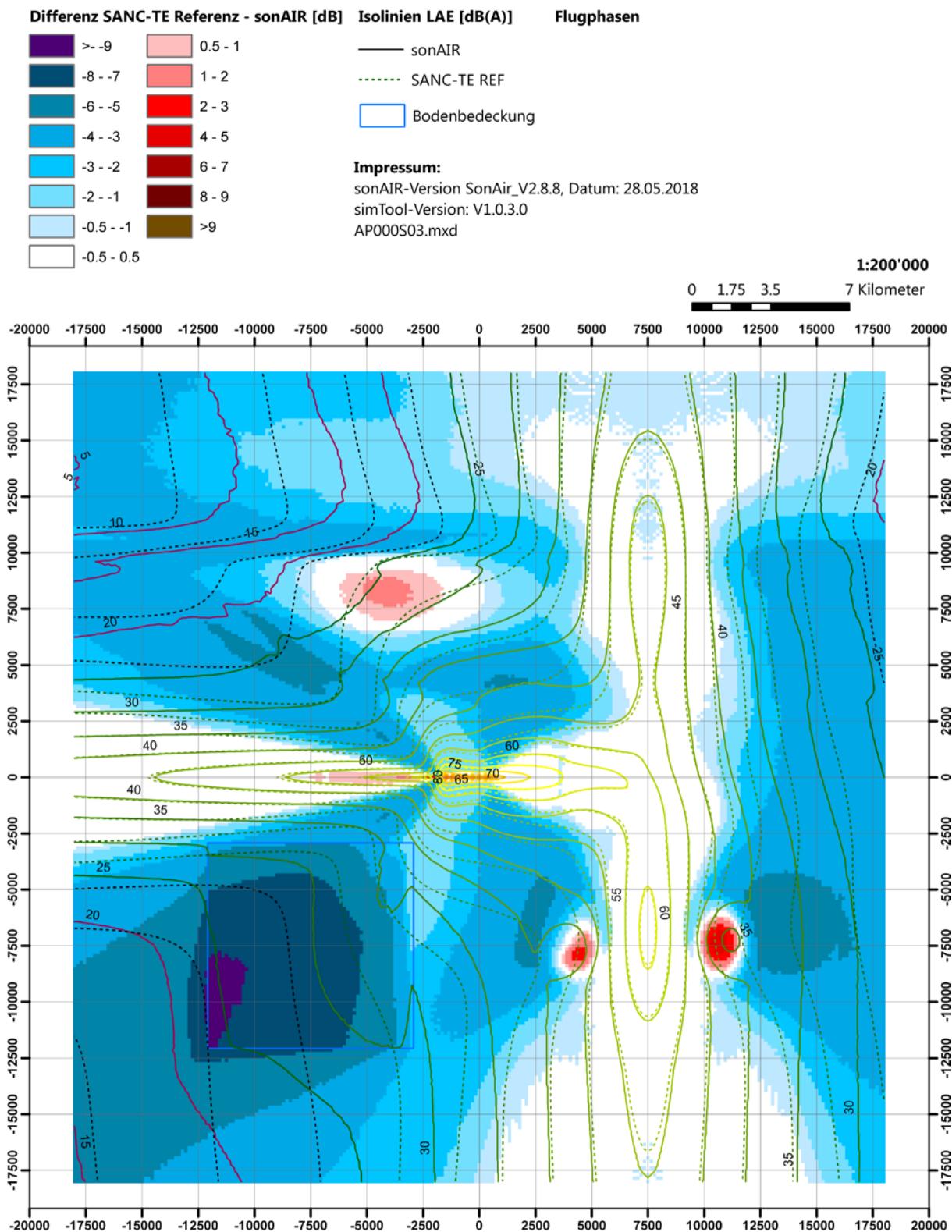


Abbildung 16: Szenario AP000S03, Nacht-Szenario ohne Streuspuren mit drei Starts und einer Landung.

## SANC-TE Airport Berechnung

Szenario: AP000S04

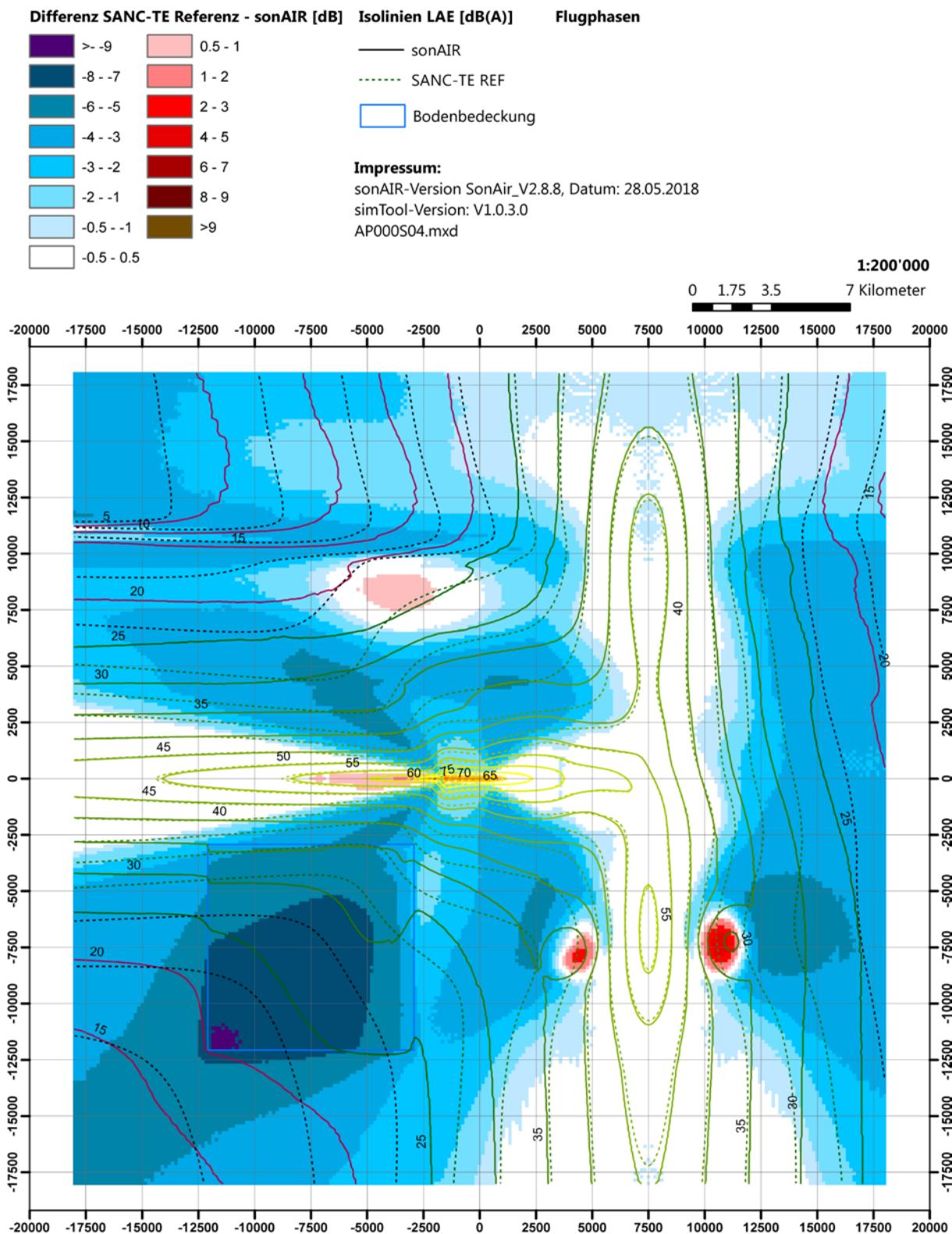


Abbildung 17: Szenario AP000S04, Nacht-Szenario mit einem Start und drei Landungen.

## 4.2.2 Szenarien mit Streuspuren

### SANC-TE Airport Berechnung

Szenario: AP001S00

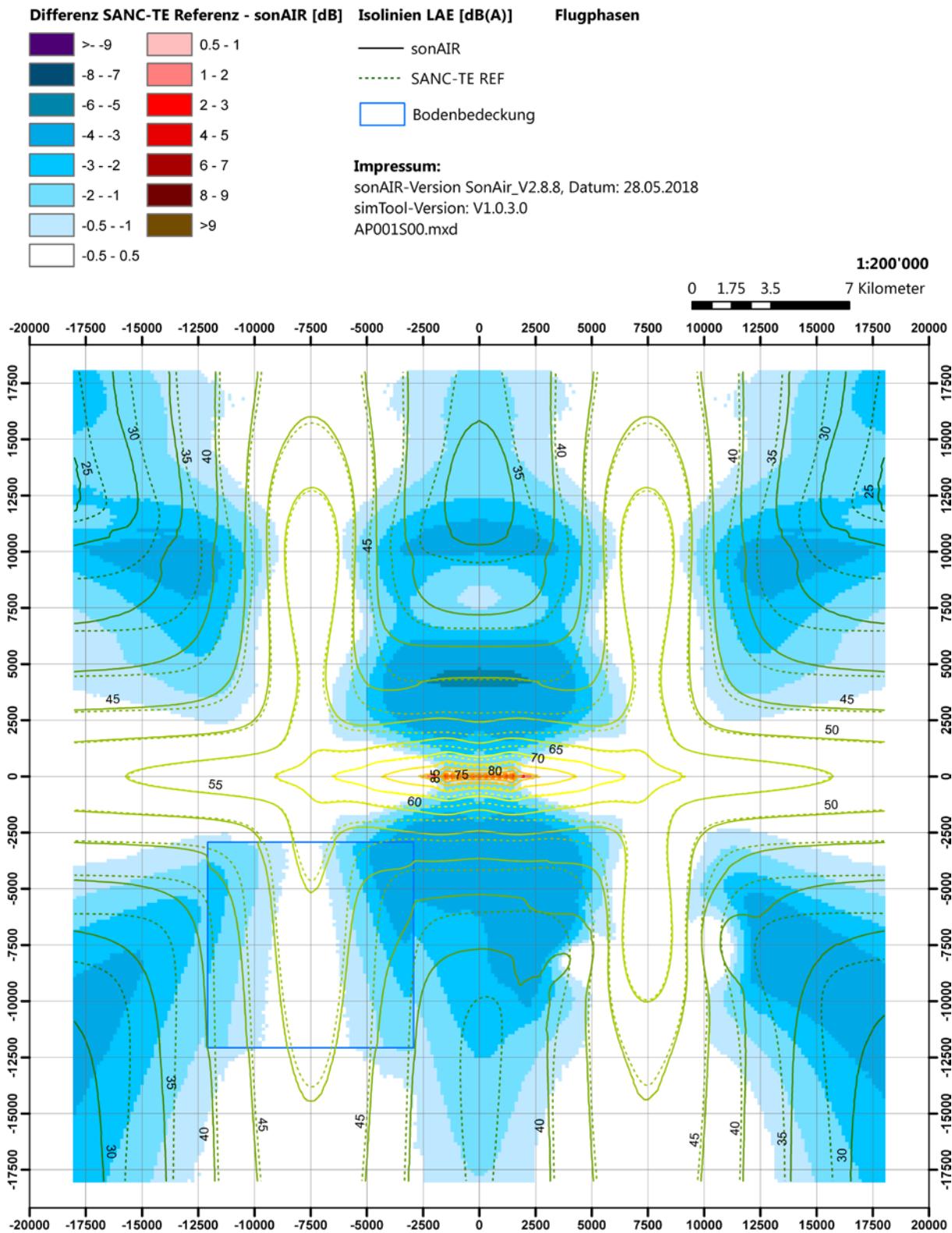
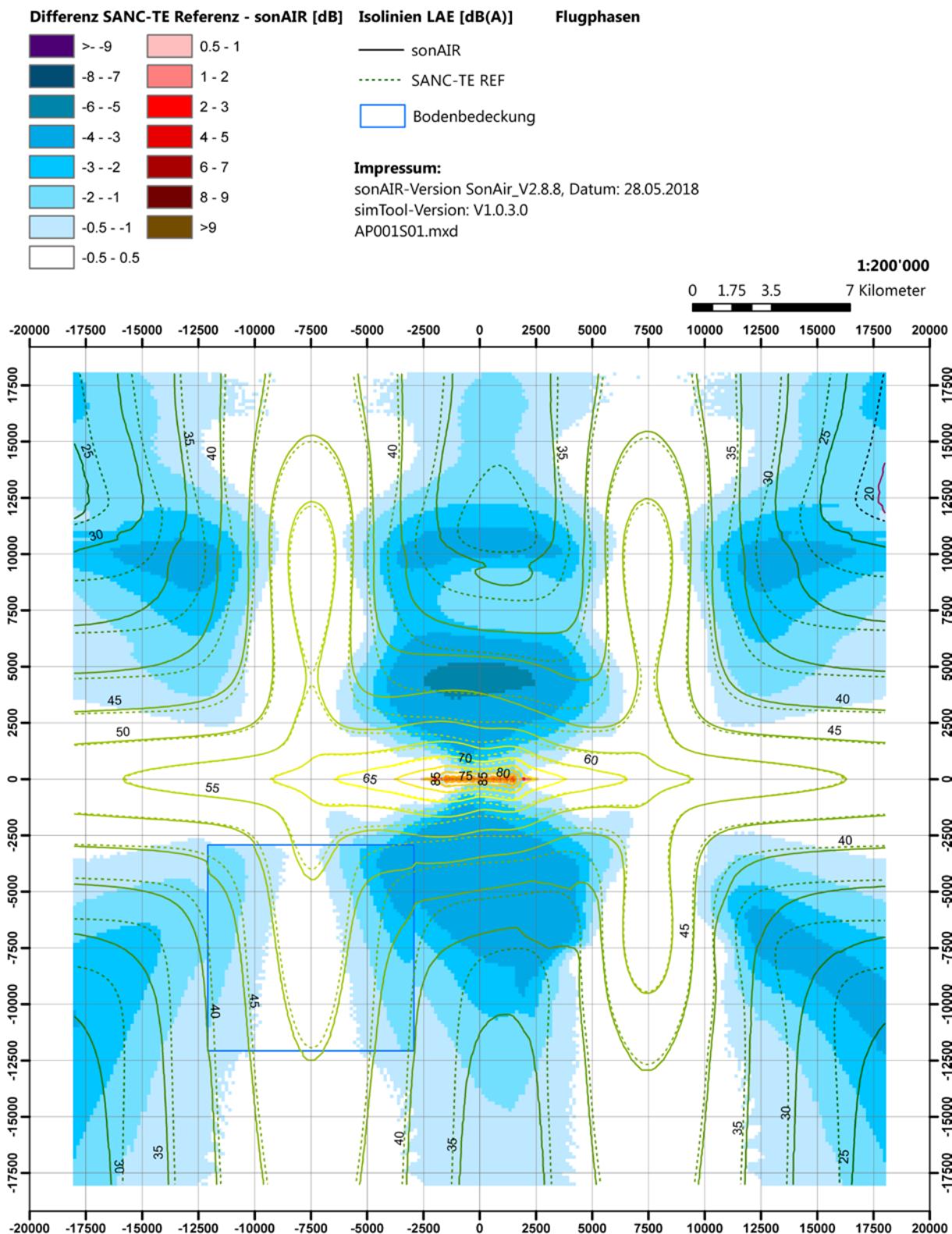


Abbildung 18: Szenario AP001S00, Basisszenario SANC-TE Airport inklusive Streuspuren.

## SANC-TE Airport Berechnung

Szenario: AP001S01



**Abbildung 19:** Basisszenario AP001S01 mit asymmetrisch verteilten Flugbewegungszahlen auf die Routen inklusive Streuspuren

## SANC-TE Airport Berechnung

Szenario: AP001S02

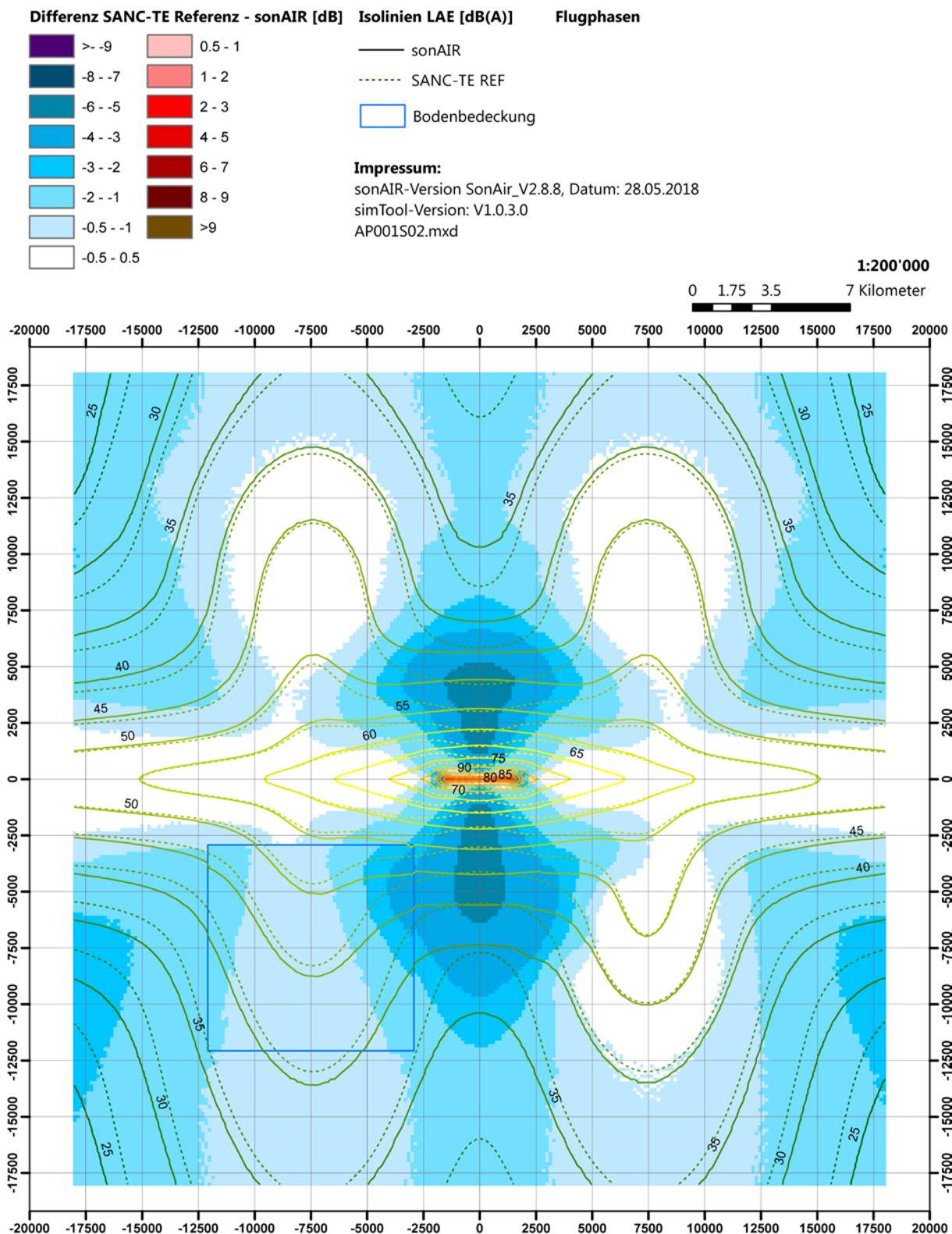


Abbildung 20: Militärszenario AP001S02 inklusive Streuspuren.

## SANC-TE Airport Berechnung

Szenario: AP001S03

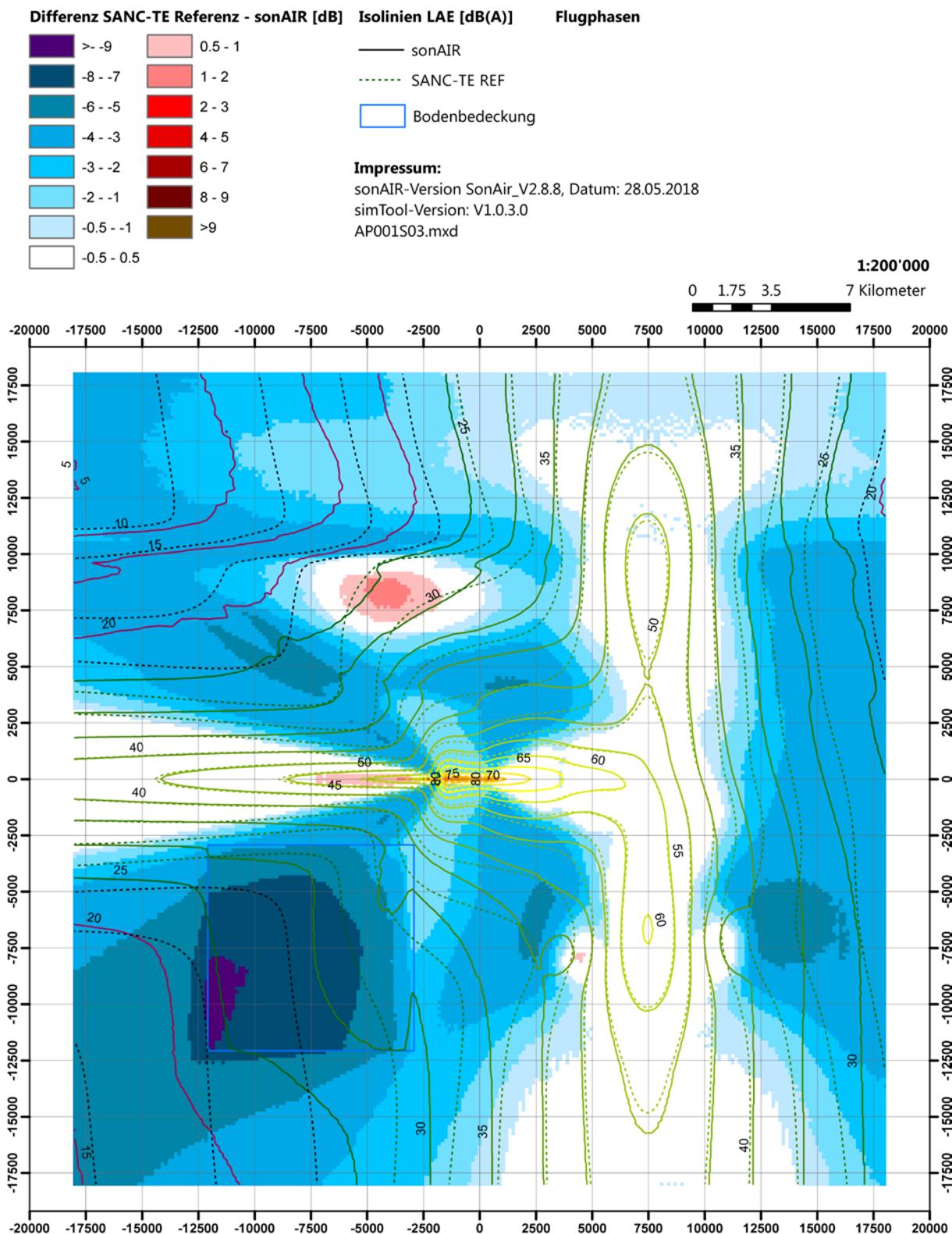


Abbildung 21: Szenario AP001S03, Nacht-Szenario mit Streuspuren mit drei Starts und einer Landung.

## SANC-TE Airport Berechnung

Szenario: AP001S04

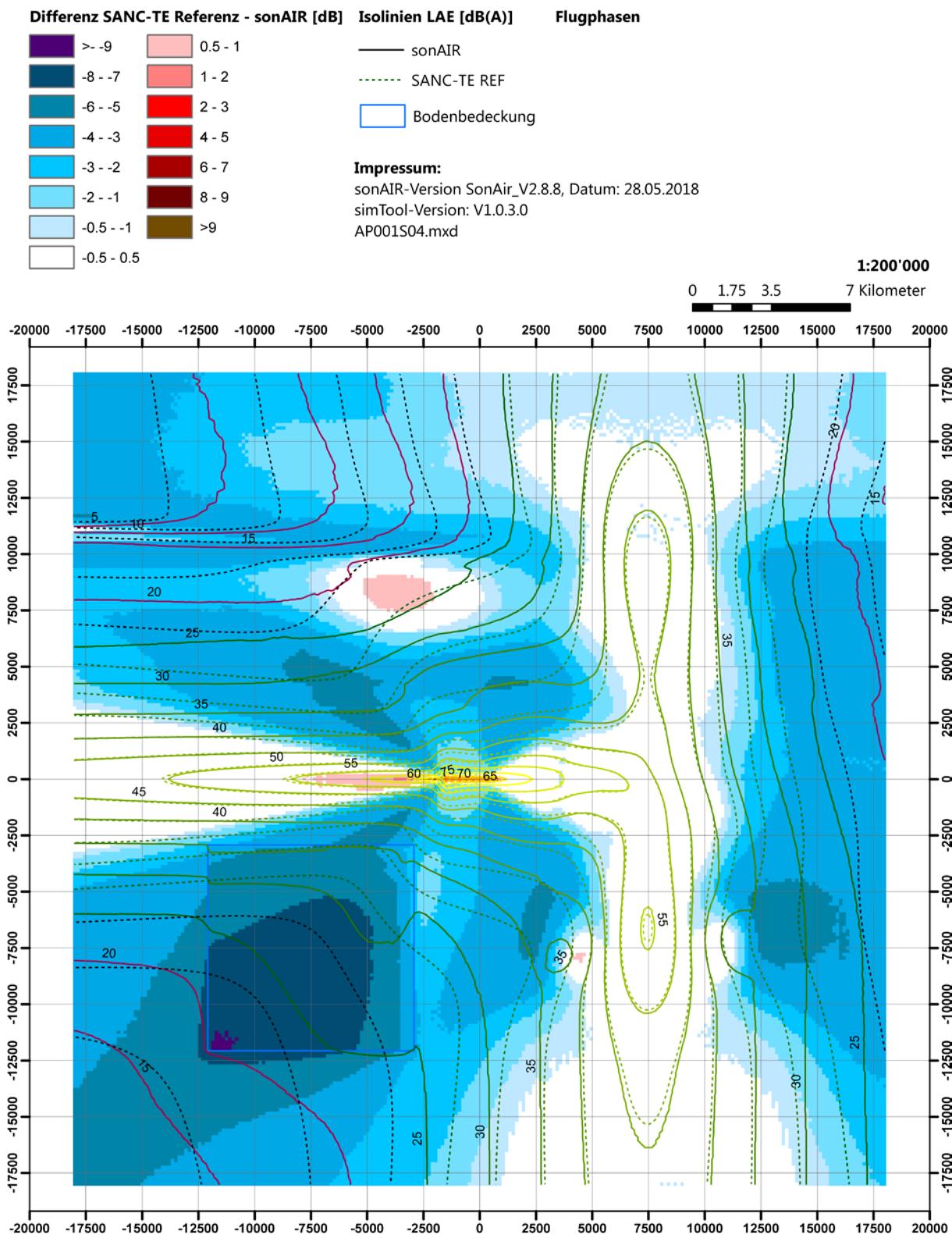


Abbildung 22: Szenario AP001S04, Nacht-Szenario mit Streuspuren einem Start und drei Landungen.

## 4.3 Ursachen für Abweichungen zwischen sonAIR und dem SANC-TE Referenzrahmen

In den präsentierten Vergleichen der Szenarien des SANC-TE Airfields und Airports zwischen dem SANC-TE Referenzrahmen und sonAIR zeigt sich, dass die Abweichungen unterhalb der Flugspuren sehr klein sind. Das bedeutet, dass die Quellen und die Ausbreitung in kurzen Distanzen bzw. steilem Schalleinfall in sonAIR und im Referenzrahmen vergleichbar behandelt werden. Mit zunehmendem seitlichen Abstand liefert sonAIR aber jeweils höhere Pegelwerte als die SANC-TE-Referenz.

In der Folge sind einzelne Berechnungsresultate genauer beschrieben. Aufgrund der gleichen Methodik für die Generierung von Quellendaten, sowie des gleichen Ausbreitungsmodells, für das SANC-TE Airfield, sowie den Airport sind die getroffenen Aussagen für beide Flugplätze gültig.

### 4.3.1 Abweichungen als Folge unterschiedlicher Quellenmodelle

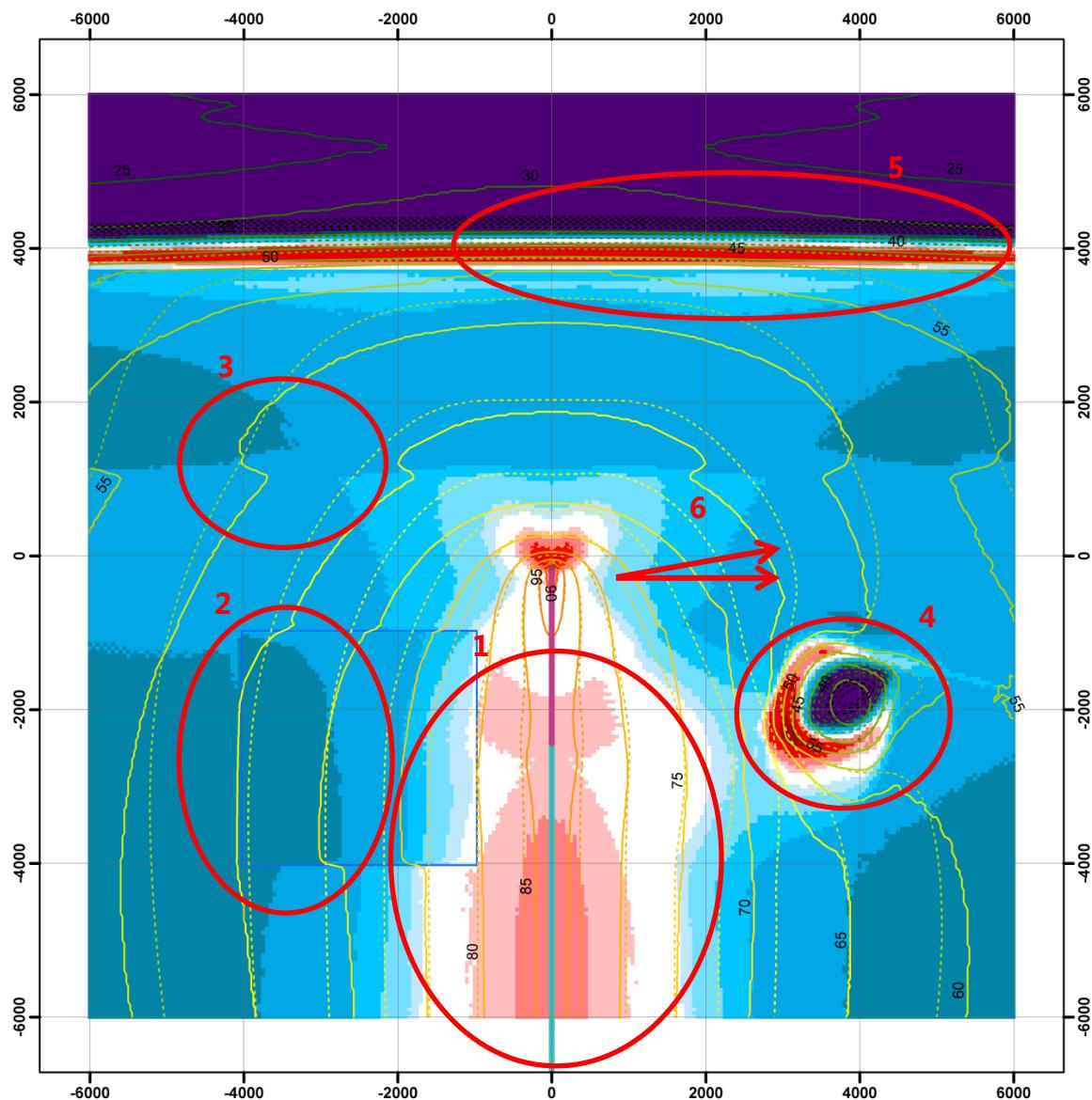
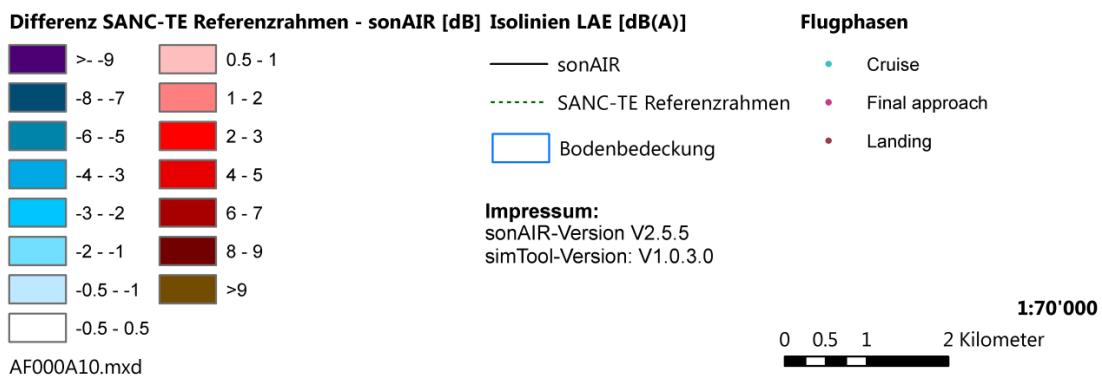
Bei den Szenarien des SANC-TE Airfield zeigte sich, dass im Süden und im Norden ab einer gewissen Höhe der SANC-TE Referenzrahmen höhere Pegelwerte als sonAIR liefert.

Mittels der Einzelfootprints, welche als Grundlage der Szenarien dienen, kann gezeigt werden, dass diese Abweichungen auf Starts und Landungen eines einzelnen Helikoptertyps zurückzuführen sind. In Abbildung 23 ist ein Einzelfootprint einer Helikopterlandung von Süden nach Norden des Typs A109K dargestellt. Dabei ist neben den  $L_{AE}$ -Rastern auch die zugrundeliegende Flugbahn inklusive Flugphase abgebildet. Es lässt sich erkennen, dass die Unterschiede hauptsächlich bei der Flugphase 40 (Cruise) auftreten. Bei den restlichen Flugphasen zeigt sich, dass das sonAIR-Emissionsmodell die Vorgaben gemäss dem SANC-TE Referenzrahmen gut abzubilden vermag.

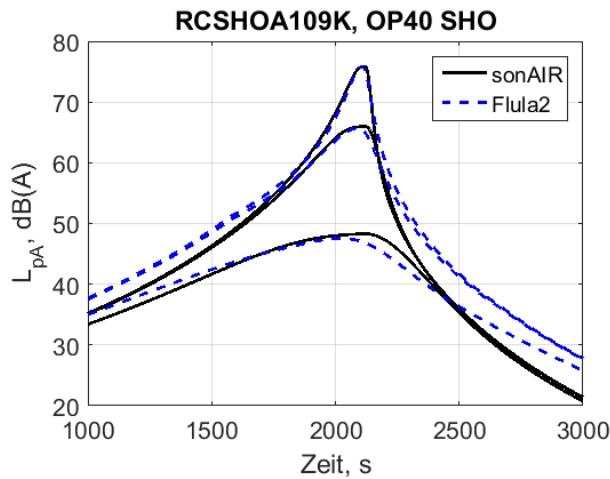
Der Grund für die schlechte Übereinstimmung bei der Flugphase 40 ist auf Unterschiede bei der Abbildung der Richtwirkung zurückzuführen (siehe Markierung 1 in der Abbildung). Abbildung 24 zeigt einen Auszug aus dem Bericht zur Integration der SANC-DB in sonAIR [7], welcher Vergleiche von Pegel-Zeit-Verläufen zwischen FLULA2 und sonAIR zeigt. Trotz ähnlicher Implementation von Typen aus der SANC-DB mit Herkunft BAZL zeigen sich namentlich beim kürzesten Abstand grosse Unterschiede zwischen FLULA2 und sonAIR, welche auf die unterschiedlichen Ansätze zur Trennung von Quellen- und Ausbreitungsphänomenen, sowie auf grundsätzliche Unterschiede zwischen einem reinen A-Pegel-Modell und einer spektralen Behandlung zurückgeführt werden. So beschreibt das FLULA2-Modell eine A-bewertete Richtcharakteristik während in sonAIR effektiv ein Emissionsspektrum hinterlegt wird und auf jede Terz die gleiche Richtwirkung angewandt wird. Beide Implementationen reproduzieren die Kennwerte der SANC-DB korrekt. Wie aber bereits im entsprechenden Empa-Bericht 5214.010391 [7], festgehalten wurde, ist die Definition der Richtwirkung bzw. des Spektrums nicht eineindeutig und kann durch verschiedene Emissionsmodellierungen erfüllt werden.

## SANC-TE Airfield Berechnung V2

Szenario: AF000A10 Flugzeugtyp: A109K



**Abbildung 23:** Vergleich zwischen Referenzrahmen und sonAIR des Einzelfootprints AF000A10 (Landung eines Helikopters A109K von Süden) ohne Streuspuren. Neben den Vergleichen zwischen Referenzrahmen und sonAIR sind ebenfalls die berechneten Flugpuren inklusive der Flugphasen abgebildet. Die Nummern in der Abbildung beziehen sich auf die Erklärungen der Unterschiede im Kapitel 4.2.



**Abbildung 24 Auszug aus dem Bericht Integration sonAIR in sonBASE Phase 2 (Bericht-Nr. 5214010391) [7], bei welchem ein Pegel-Zeitverlauf von sonAIR und dem FLULA2-Modell des A109K für Überflughöhen von 304.8 m, 800 m und 3200 m dargestellt wird.**

#### 4.3.2 Abweichungen als Folge unterschiedlicher Ausbreitungsmodelle

Aus dem Einzelfootprint in Abbildung 23 können auch verschiedene weitere Abweichungen identifiziert werden, welche auf unterschiedliche Modellierungen von Ausbreitungsphänomenen zurückzuführen sind:

- Die unterschiedliche Modellierung des Bodeneffektes zeigt sich in den Markierungen 2 und 3 gemäss Abbildung 23. Während bei sonAIR der lokale Strömungswiderstand sowie der Gelände-Verlauf berücksichtigt werden, ist das bei der mit FLULA2 durchgeföhrten Referenzberechnung nicht der Fall. Markierung 2 zeigt einen Bereich mit höheren Pegeln in sonAIR, als Folge des schallhart modellierten Sees im Südwesten. In Markierung 3 ist ebenfalls eine Pegelerhöhung von sonAIR relativ zum Referenzrahmen zu sehen, welche sich durch einen deutlichen Knick in den Isolinien bemerkbar macht. Ursache dieser Pegelzunahme sind Mehrfachreflexionen am Untergrund im Bereich des ansteigenden Geländes am Fuss des Hügelzuges (vgl. Abbildung 7). Entsprechende Pegelerhöhungen sind auch bei Markierung 4, beim Konus im Südosten des Gebietes, zu sehen.
- Markierung 4 und 5 zeigen auch Bereiche in violett, welche auf deutlich tiefere Immissionspegel beim Referenzrahmen hinweisen. Diese Flächen weisen eine Hinderniswirkung auf, welche in FLULA2 nur mit einem vereinfachten Ansatz abgebildet wird und deutlich grössere Abschirmwirkungen ausweist als sonAIR.
- Die Pfeile bei Markierung 6 weisen schliesslich auf eine allgemeine Tendenz hin, dass die Pegel bei seitlicher, bodennaher Ausbreitung beim Referenzrahmen schneller abfallen als dies bei sonAIR der Fall ist. Dieser Aspekt wird im nachfolgenden Kapitel noch eingehend untersucht.

## 5 Auswirkung der Bodenzusatzdämpfung

Wie im letzten Punkt von Abschnitt 4.3.2 festgestellt wurde, weist FLULA2 eine grössere seitliche Pegelabnahme auf als sonAIR. Es wird vermutet, dass dies auf die in FLULA2 integrierte Bodenzusatzdämpfung (Lateral Attenuation) [4, 6] zurückzuführen ist, zu welcher es in sonAIR kein explizites Pendant gibt. Aus diesem Grund wurde der Einfluss dieser Zusatzdämpfung von FLULA2 detailliert untersucht. Zu diesem Zweck wurde ein einfacher, künstlicher Flughafen mit den nachfolgenden Eigenschaften modelliert und es wurden für beide Modelle einheitliche Emissionsmodelle (siehe nächster Abschnitt) erzeugt:

- Flaches Gelände (Konstant 0 m)
- Pisten und Routen gemäss SANC-TE Airfield
- Empfangspunktgitter von -10'000m - +10'000 m, Empfangspunktabstand: 50 m
- sonAIR: Modellierung Grasland (Z\_Uebrig)
- sonAIR: Betriebsmodus BASIC mit einer homogenen Standard-Atmosphäre von 15° Celsius, einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70 % und einem Luftdruck von 1013.25 mBar.

### 5.1 Erstellung Monopol-Richtcharakteristik in FLULA2

Als Quellenmodell wurde in beiden Modellen eine Monopol-Richtcharakteristik gewählt. Dadurch soll der Einfluss von quellenseitigen Effekten (unterschiedliche Richtcharakteristiken) vermieden werden. Die Monopol-Richtcharakteristik ist in sonAIR relativ einfach zu erstellen: Es wurde dazu nur ein Modell für das Triebwerk (Engine) spezifiziert. Dieses Engine-Modell beinhaltet für jede der 24 Terzen und alle Abstrahlwinkel und Flugphasen eine Emission von 120 dB.

Für die Generierung einer entsprechenden FLULA2-RC, wurde mit dem oben beschriebenen sonAIR-Monopol-Engine-Modell ein Überflug bei konstant 0.2 Ma in sechs verschiedenen Ausbreitungsdistanzen (30, 100, 305, 600, 1'500, 3'000, 6'000) simuliert. Die Luftdämpfung wurde spektral nach ISO-9613-1 [8] bei 15°C, 1013.25 mBar Druck und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 70 % berücksichtigt. Zusätzlich wurde eine Korrektur für breitbandige Geräusche angewandt (siehe sonX-Dokumentation [9]). Der Doppler-Effekt wurde beim modellierten Überflug und somit der Generierung dieses FLULA2-Quellenmodells nicht kompensiert, da dieser in FLULA2 nicht gesondert berücksichtigt wird, sondern in den Quellendaten integriert ist. Konsequenterweise wurde der Doppler-Effekt auch bei den Vergleichssimulationen in sonAIR deaktiviert.

Zusätzlich zur atmosphärischen und geometrischen Verdünnung wurde ein idealisiertes Bodeneffektspektrum berücksichtigt, welches invariant über die Distanz gemäss Gleichung (1) verwendet wurde.

$$GroundFX_i = 3.8 - (i + 2) * 3.3 / 29 \quad (1)$$

Mit  $i$  = Index der Terz ( $i = 1 \dots 24 \cong 25 \dots 5012 \text{ Hz}$ )

Hinweis: Das obige Bodeneffektspektrum wurde bei der Einführung des Hybridkonzepts für Grasland entwickelt. Nachträglich wurde das Spektrum jedoch nochmals geringfügig angepasst. In sonAIR wird aktuell eine Variante verwendet, welche bei Terzen unterhalb von 315 Hz eine konstante Korrektur von 2.30 dB verwendet. Da die Differenz maximal nur rund ein Dezibel beträgt und lediglich die sehr tiefen Frequenzen betroffen sind, wurde auf eine Aktualisierung der Emissionsdaten des Monopols in FLULA2 verzichtet.

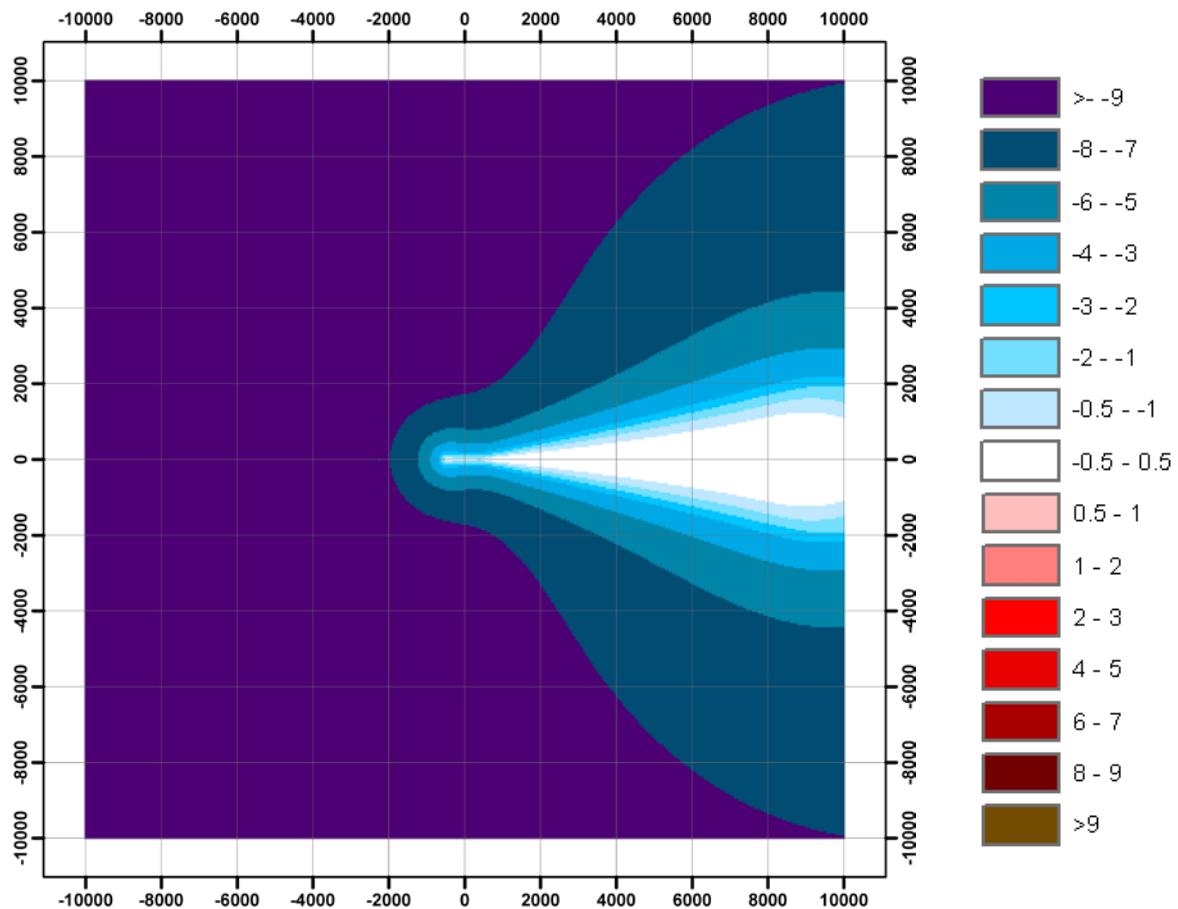
Mit den sechs Pegelverläufen wurden die in FLULA2 nötigen HIK-Koeffizienten mittels Least-Square Fit berechnet.

## **5.2 Resultate der Untersuchung der Bodenzusatzdämpfung mit FLULA2 und sonAIR**

In den folgenden Unterkapiteln werden jeweils Differenzenplots von verschiedenen Berechnungen abgebildet. Dabei ist immer dieselbe Flugbahn (Landung des Monopols auf Piste 09, AF000A00) modelliert worden. Insgesamt wurden vier verschiedene Spuren modelliert. Auf eine Darstellung aller Spuren wird allerdings verzichtet, da die Abbildungen mit den unterschiedlichen Spuren (Starts und Landung) grundsätzlich ähnliche Resultate aufzeigen.

### **5.2.1 Vergleich FLULA2-Intern mit und ohne Bodenzusatzdämpfung**

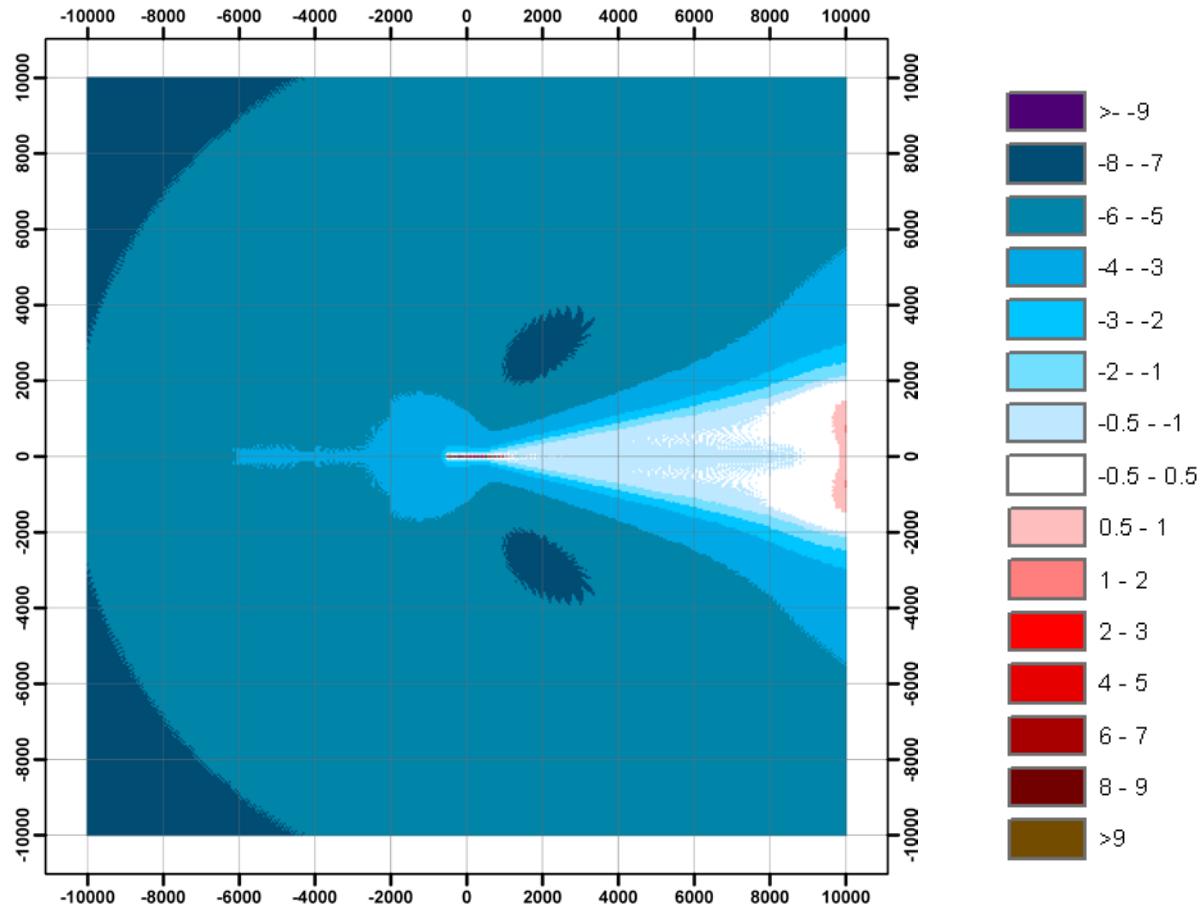
In Abbildung 25 ist der FLULA2-interne Vergleich zwischen Simulationen mit und ohne Bodenzusatzdämpfung abgebildet. Die Abbildung verdeutlicht eindrücklich die Wirkung dieses in FLULA2 integrierten zusätzlichen Dämpfungsterms.



**Abbildung 25:** Differenzenplot (FLULA2 mit Bodenzusatzdämpfung – FLULA2 ohne Bodenzusatzdämpfung) einer Landung des Monopols auf Piste 09 (Route AF000A00).

## 5.2.2 Vergleich Monopol FLULA2 mit Bodenzusatzdämpfung – sonAIR

In der folgenden Abbildung 26 ist die Differenz zwischen der normalen FLULA2-Berechnung und der sonAIR Berechnung dargestellt.



**Abbildung 26: Differenzenplot (FLULA2 mit Bodenzusatzdämpfung – sonAIR) einer Landung des Monopols auf Piste 09 (Route AF000A00).**

Auffallend ist wiederum das Muster, dass die Differenzen mit zunehmender seitlicher Distanz zur Flugbahn relativ rasch zunehmen. Im Vergleich zur Abbildung 25 von oben verdeutlicht diese Abbildung, dass auch der Bodeneffekt von sonAIR eine zusätzliche Pegelabnahme mit zunehmend streifendem Schalleinfall bewirkt. Diese ist allerdings viel weniger stark ausgeprägt, als bei der FLULA2-Implementation.

## 5.2.3 Vergleich FLULA2 ohne Bodenzusatzdämpfung – sonAIR

Falls nun in FLULA2 die Bodenzusatzdämpfung nicht berücksichtigt wird und die Berechnungsergebnisse mit der sonAIR Berechnung verglichen werden, wie in Abbildung 27 dargestellt, so zeigt sich wiederum die zusätzliche Pegelabnahme bei sonAIR als Folge des Bodeneffektes. Denn in diesem Fall liefert die FLULA2-Berechnung mit zunehmender Distanz deutlich höhere Pegel als die sonAIR-Berechnung.

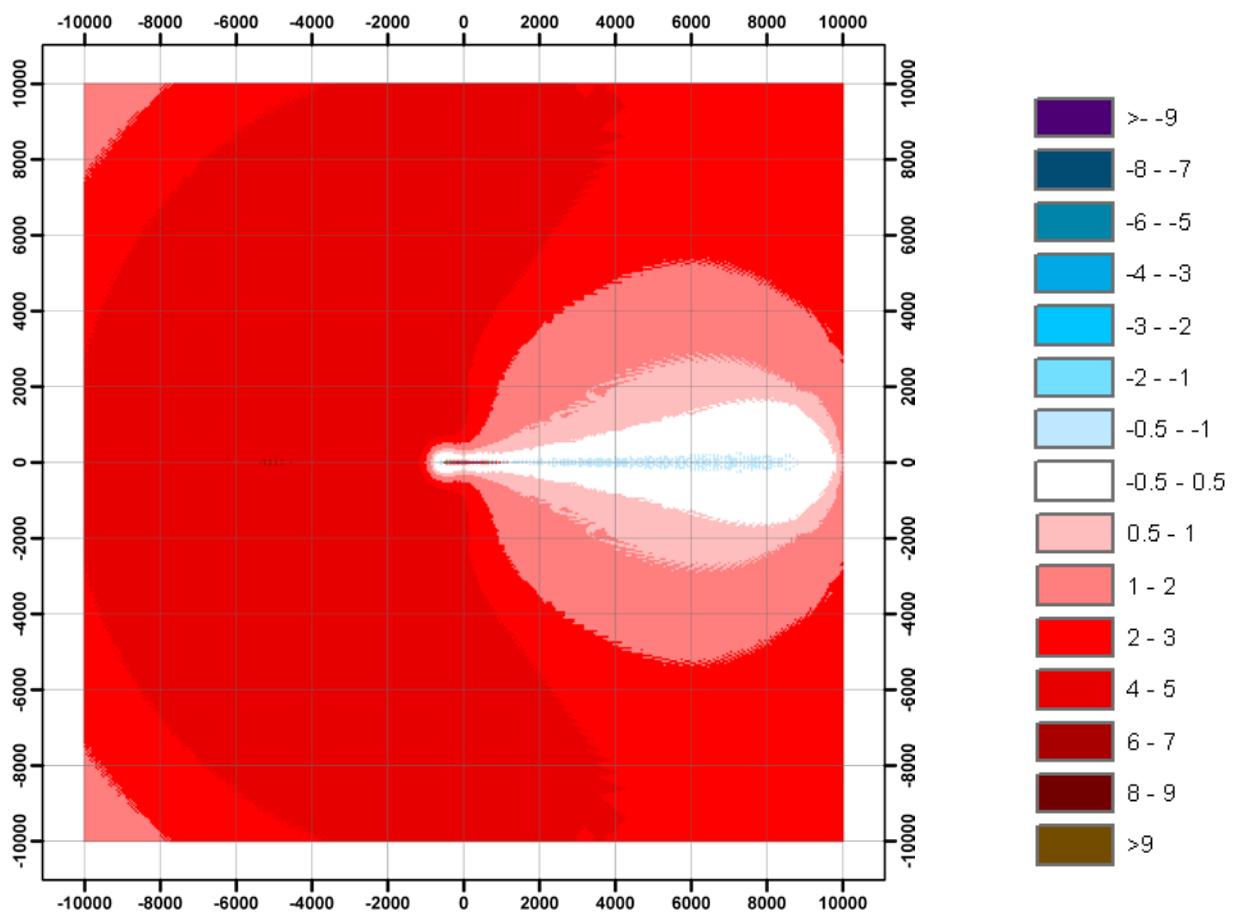


Abbildung 27: Differenzenplot (FLULA2 OHNE Bodenzusatzdämpfung – sonAIR) einer Landung des Monopols auf Piste 09 (Route AF000A00).

#### 5.2.4 Vergleich FLULA2 ohne Bodenzusatzdämpfung – sonAIR Einfachmodellberechnung

Bei steilem Schalleinfall wird bei sonAIR auf die aufwändige sonX-Ausbreitungsrechnung verzichtet und Dämpfungen werden mit einem Einfachmodell (atmosphärische und geometrische Dämpfung sowie ein idealisierter Bodeneffekt) berechnet. Das Einfachmodell ist grundsätzlich gleich aufgebaut, wie die FLULA2-Ausbreitungrechnung, mit dem Unterschied, dass die Ausbreitungsrechnung in sonAIR in Terzbändern gerechnet wird.

Zu Vergleichsberechnungen wurde dieselbe Flugbahn deshalb auch einmal nur mit dem Einfachmodell durchgeführt. Abbildung 28 stellt wiederum die Differenzen zwischen FLULA2 ohne Bodeneffekt sowie sonAIR dar. Dabei zeigt sich, dass die Berechnungsresultate sehr ähnlich sind. Grund für die Abweichungen bei Ausbreitungsdistanzen von mehreren Kilometern ist die präzisere, da spektrale Luftpärfungsberechnung in sonAIR.

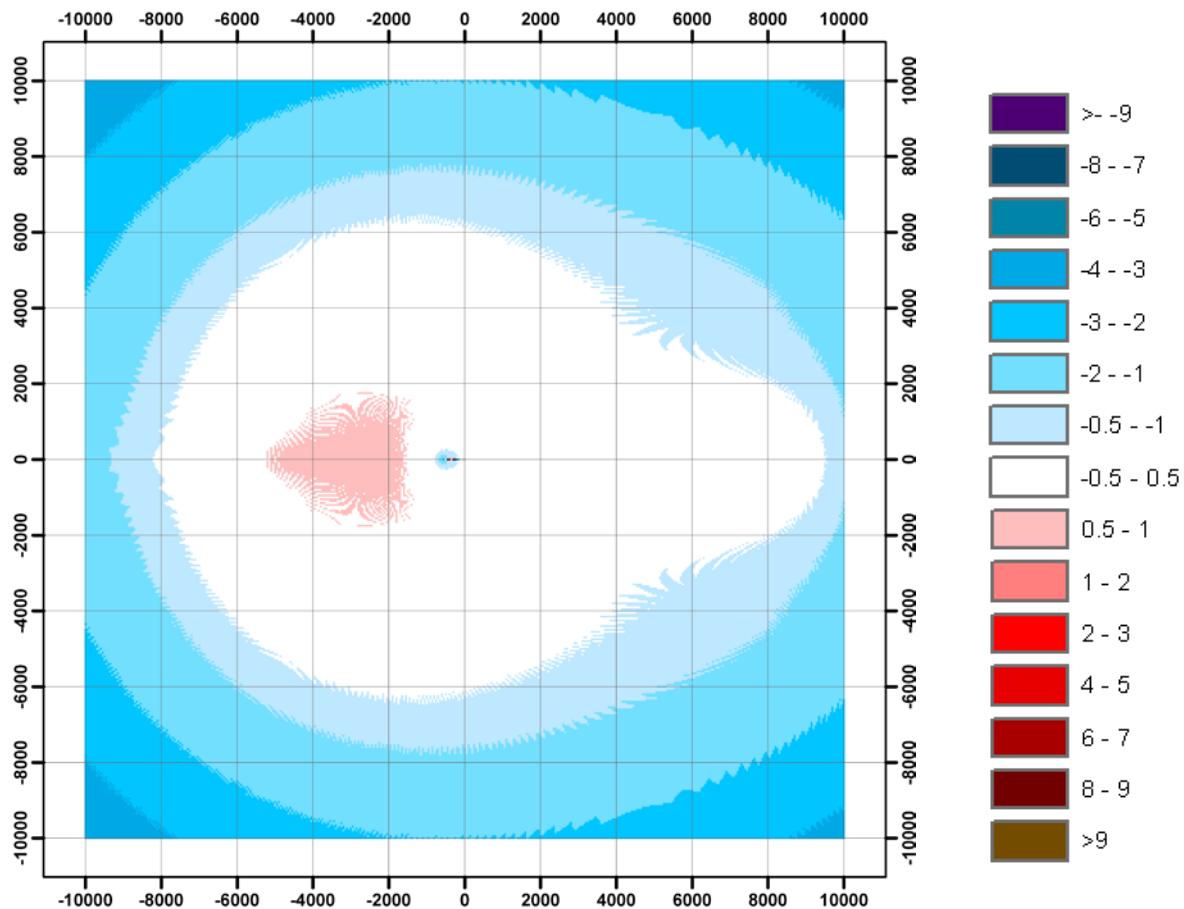
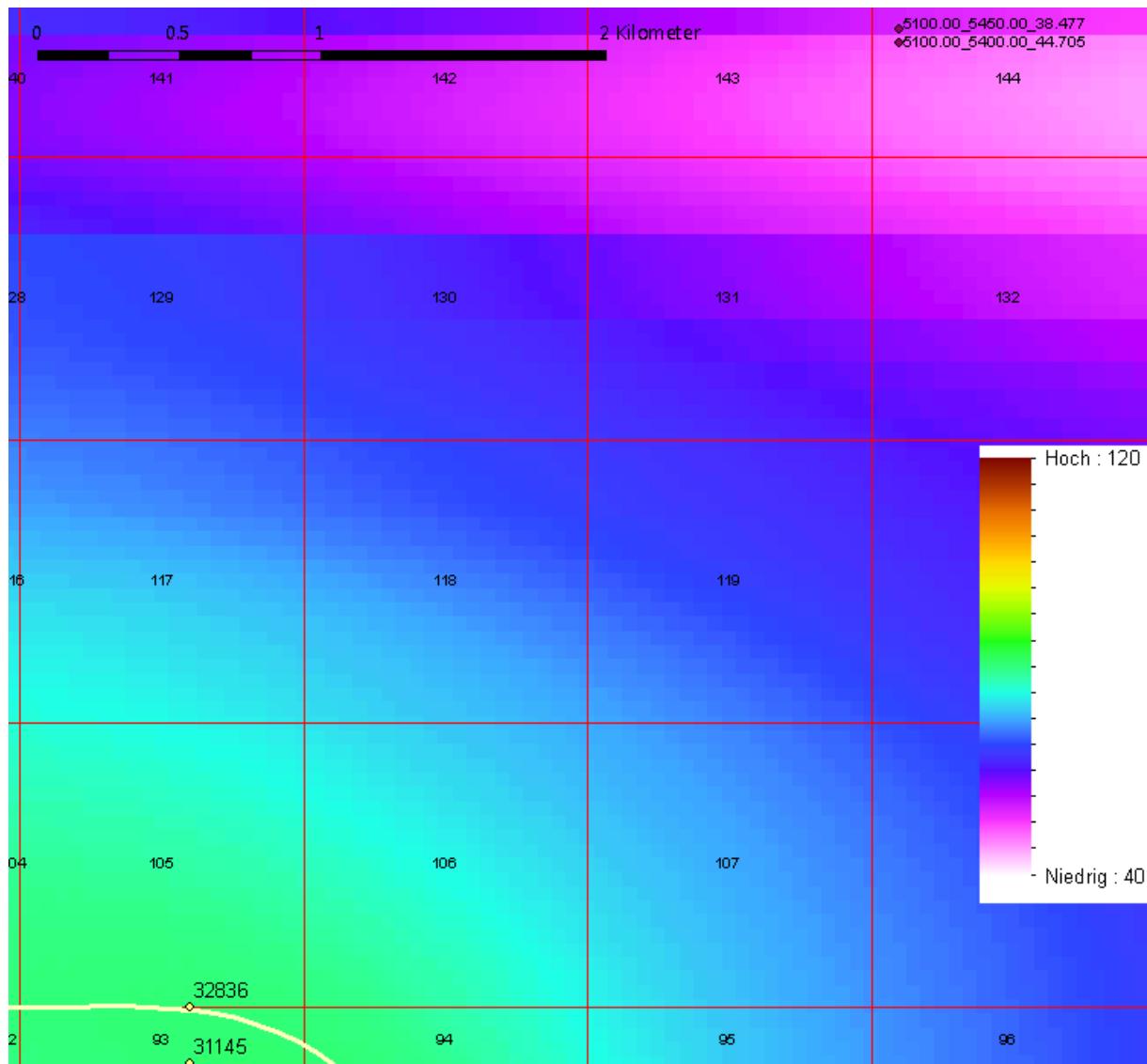


Abbildung 28: Differenzenplot (FLULA2 ohne Bodeneffekt – sonAIR Einfachmodellberechnung) einer Landung des Monopols auf Piste 09 (Route AF000A00).

## 6 Zusätzliche Abklärungen zum Quellengitterkonzept von sonAIR

Bei den Einzelszenarien von gewissen in sonAIR berechneten Flugereignissen zeigte sich teilweise hinter dem horizontalen Hügelzug ein eindeutiger Pegelsprung mit Differenzen von mehreren Dezibel zwischen benachbarten Empfangspunkten. Dieser Aspekt wurde daher ebenfalls detaillierter untersucht. Abbildung 29 zeigt dazu die Ausgangssituation mit Ereignispegeln von Flugereignis AF000D08 (Start eines AT42). Speziell markiert sind je zwei Quell- und Empfangspunkte für welche im Anschluss eine detaillierte Analyse vorgenommen wird.



**Abbildung 29:** Rasterung in L<sub>AE</sub>-Footprint von sonAIR. Unten links sind zwei Quellengitterpunkte (grün) abgebildet und oben rechts zwei Empfangspunkte inklusive Koordinaten (X\_Y\_Z LAE)

In sonAIR wird das sogenannte Quellengitterkonzept angewendet [10]. Das bedeutet, dass nicht die exakten Positionen des Flugzeuges für die Dämpfungsberechnung verwendet werden. Stattdessen wird eine Zelle bestehend aus acht Gitterpunkten rund um jeden einzelnen Flugbahnpunkt aufgespannt und die Dämpfungen nur an den Zellecken berechnet. Aus den acht berechneten Dämpfungen

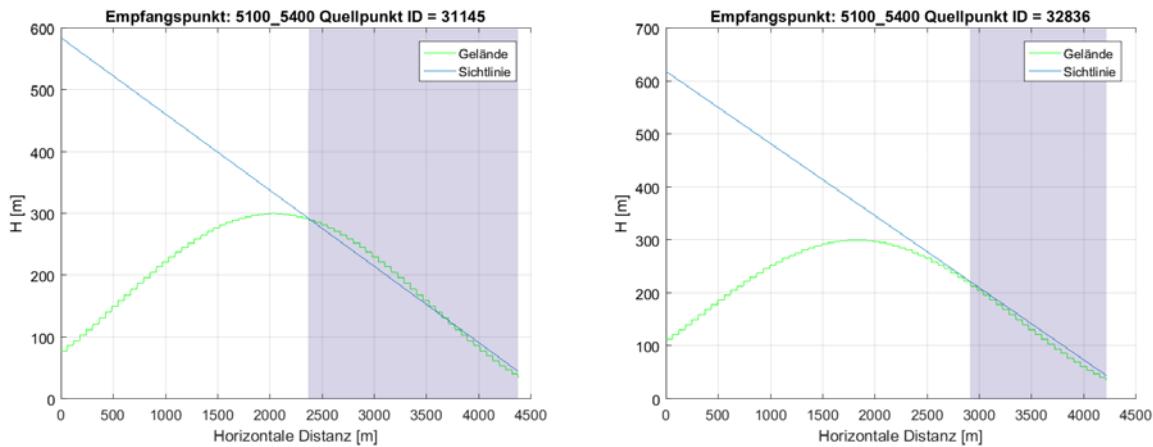
einer Gitterzelle wird mittels Interpolation die Dämpfung jedes Flugbahnpunktes berechnet. Dabei fliessen die acht Dämpfungen über die gewichtete Distanz in die Interpolation ein.

Dieses Vorgehen bringt deutliche Rechenzeitvorteile, falls mehrere Flugzeuge sich dieselbe Gitterzelle teilen. Denn dadurch müssen nur 8 Dämpfungen berechnet werden und die Flugzeuge können sich dadurch die Dämpfungsberechnungen „teilen“.

Die Gitterzellen werden umso grösser, je grösser der Abstand zwischen Quell- und Empfangspunkte ausfällt und je höher sich das Flugzeug über Grund befindet. Dieses Verhalten wird in sonAIR mit den sogenannten Reduktionsdaten (Vgl. Absatz B.3) spezifiziert. So beginnt das horizontale Gitter mit einer Maschenweite von 100 m. Für Flugfelder wird die Maschenweite bei 1200, 2400 und 4800 m verdoppelt und erreicht mit 800 m Gitterabstand ein Maximum. Die vertikale Zellhöhe beginnt mit zwei Metern und nimmt pro vertikale Zelle um 50 % zu. 50 m über Grund beträgt die Zellhöhe somit 15.3 m und z.B. in 200 m bereits 46.6 m. Die maximale Zellhöhe von 1 km wird in einer Flughöhe von 2.3 km bzw. ab der 14. Zelle erreicht. Der Aufbau des Quellgitters ist abhängig vom Berechnungsausschnitt. Je nach Wahl des Ausschnittes kann sich somit die Lage der für einen bestimmten Flugbahnpunkt massgeblichen Quellegitterpunkte horizontal um mehrere hundert Meter verschieben. In der vertikalen folgt das Gitter dem Terrain.

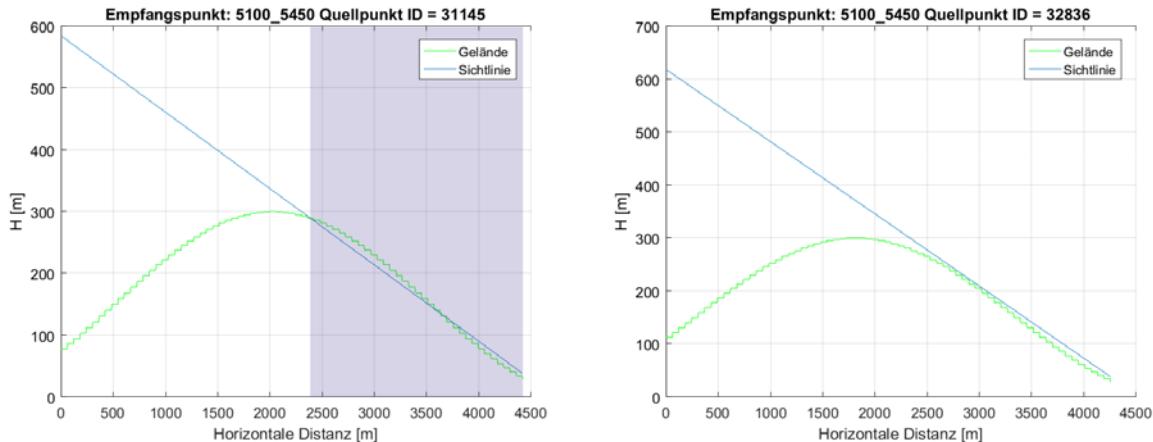
Das Quellengitterkonzept wurde mit dem Ziel einer Rechenzeitoptimierung eingeführt. Die Gitterausdünnung mit zunehmendem Abstand und zunehmender Höhe basiert auf der Überlegung, dass Ausbreitungsphänomene wie Bodeneffekt und Hinderniswirkung namentlich in kurzen Abständen und bei bodennaher Ausbreitung einen grossen Einfluss haben und deshalb in diesen Situationen ein feineres Gitter zur Anwendung kommen soll. Im Rahmen des sonAIR-Hauptprojektes wurde das Konzept erfolgreich validiert und es sind nur geringfügige und tolerierbare Abweichungen zu der punktgenauen Berechnung festgestellt worden [10]. Dabei wurde mit realen Flugbahnen und einem realen Gelände (Umgebung Zürich) gerechnet.

Im vorliegenden Fall der SANC-Testumgebung kommt es jedoch zu Hinderniswirkungen in Situationen mit Abständen von mehreren Kilometern und Flughöhen von mehreren Hundert Metern, in welchen die Zellgitter bereits eine grosse Ausdehnung aufweisen. In der folgenden Abbildung 30 ist die Sichtlinienverbindung zwischen den beiden in der oben dargestellten Abbildung 29 dargestellten Quellengitterpunkten (grün) und dem südlichen Empfangspunkt (X/Y 5100/5400) dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die Sichtlinie im einen Fall knapp unterbrochen wird während sie beim zweiten Geländeschnitt frei ist.



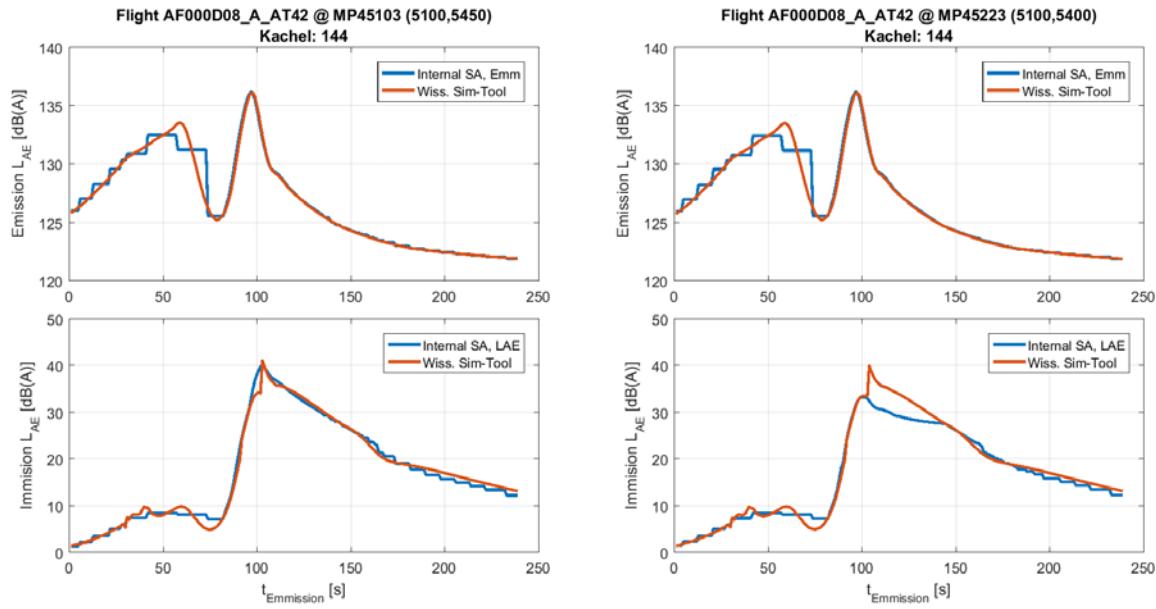
**Abbildung 30:** Darstellung des Geländes und der Sichtlinienverbindung zwischen dem südlich liegenden Empfangspunkt (X/Y 5100/5400) und den beiden Quellenpunkten 31145 und 32836.

Im Gegensatz dazu wird beim Quellenpunktpaar zum nördlich liegenden Empfangspunkt die Sichtlinie von einem Quellenpunkt nicht unterbrochen, wodurch keine Hinderniswirkung auf der Dämpfungsseite anfallen (Vgl. Abbildung 31). Dadurch werden die Flugzeugemissionen deutlich schwächer gedämpft, was zu einem markanten Pegelanstieg beim oberen Empfangspunkt führt.



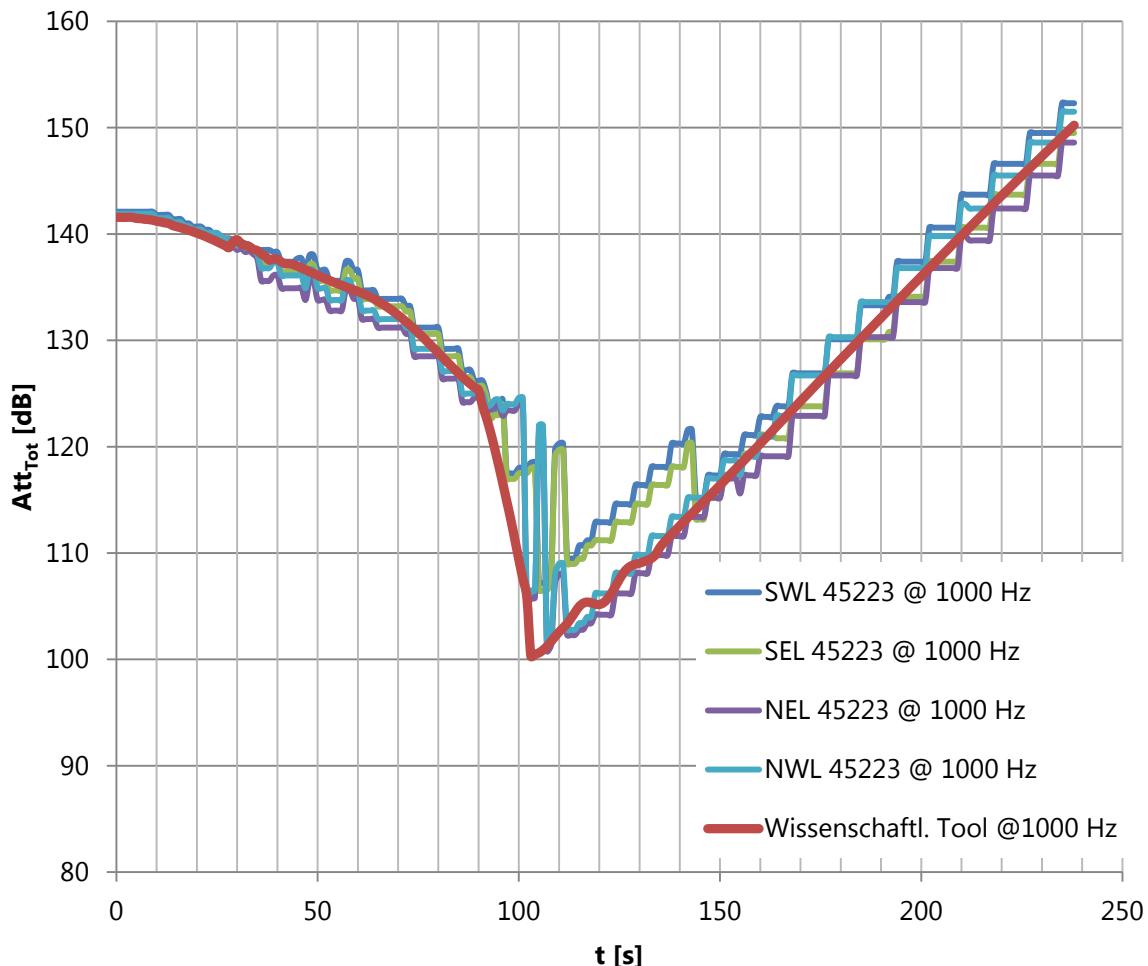
**Abbildung 31:** Darstellung des Geländes und der Sichtlinienverbindung zwischen dem nördlich liegenden Empfangspunkt (X/Y 5100/5450) und den beiden Quellenpunkten 31145 und 32836.

Um den Einfluss des Quellengitterkonzepts auf die Resultate besser abzuschätzen, wurde die Lärmbelastung dieser Flugbahn an den beiden Empfangspunkten mit dem wissenschaftlichen Simulationstool nachsimuliert. In Abbildung 32 sind die Resultate als Pegel-Zeitverläufe beider Empfangspunkte gegenübergestellt. Dabei werden jeweils die sonAIR-Berechnung und die Berechnung mit dem wissenschaftlichen Simulationstool dargestellt.



**Abbildung 32** Pegelzeitverlauf der Emission (jeweils oben) und der Immission (jeweils unten) des in Abbildung 29 dargestellten Footprints an den beiden Empfangspunkten. Dabei wurde die Berechnung einerseits mit sonAIR sowie dem wissenschaftlichen Simulationstool durchgeführt. (Hinweis: Beim Dienstleistungswerkzeug sieht man zusätzlich eine Anpassung des Simulationszeitstriktes, welche aus Rechenzeitgründen eingeführt wurde.)

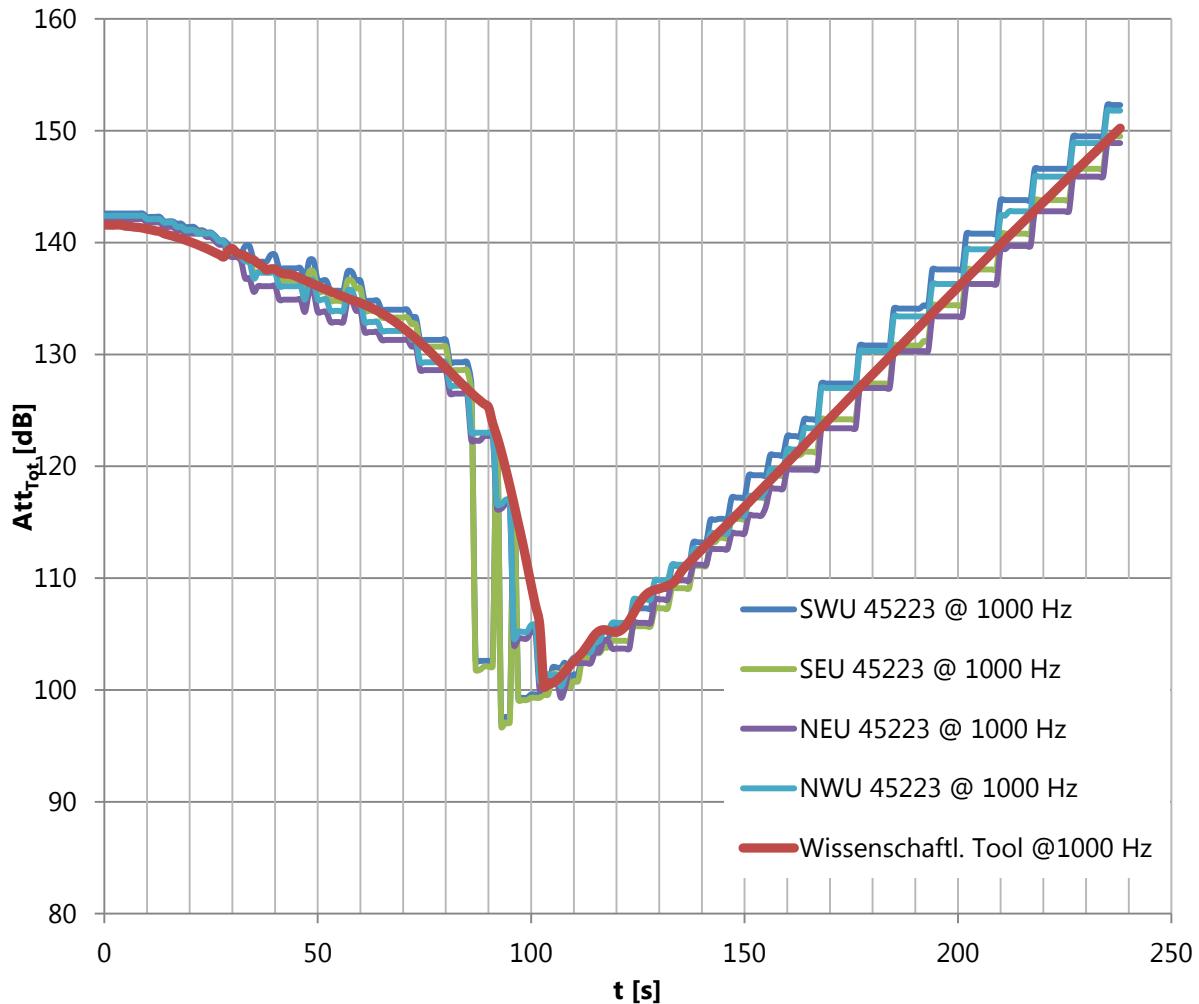
Bei den Pegel-Zeitverläufen der Abbildung 32 fällt auf, dass die Emissionen des wissenschaftlichen Simulationstools und des Dienstleistungstools gut übereinstimmen. Die Unterschiede, welche sich in den Immissionspegeln zeigen, müssen folglich ihre Ursache in den berechneten Dämpfungen haben. Dazu wurde in Abbildung 33 und 34 der Dämpfungs-Zeitverlauf der Berechnung mit dem wissenschaftlichen Simulationstool den acht Dämpfungen der sonAIR-Berechnung gegenübergestellt. (Abbildung 33 stellt dabei die vier unteren Dämpfungen eines Quellenquaders dar, während Abbildung 34 die vier oberen Dämpfungen zeigt.) Bei der Berechnung mit dem wissenschaftlichen Simulationstool wird für jeden exakten Quellenpunkt eine Dämpfungsberechnung durchgeführt.



**Abbildung 33:** Gesamt-Dämpfungsverlauf bei 1000 Hz für den Empfangspunkt mit ID 45223 (5100/5400) von den unteren 4/8 Quellgitterpunkten sowie für die echte Flugzeugposition (bezeichnet als Wissenschaftliches Tool).

In Abbildung 33 fällt auf, dass die beiden Dämpfungen (grün, SWL (South West Lower) und blau, SEL (South East Lower)) deutlich höher ausfallen im Vergleich zu den Dämpfungen des wissenschaftlichen Simulationstools. Die höheren Dämpfungen entstanden durch die Unterbrechung der Sichtlinie und die damit auftretende Hinderniswirkung, wie in Abbildung 30 und Abbildung 31 gezeigt.

Ein gegenteiliges Bild zeigt sich in Abbildung 34. Hier resultieren im Zeitfenster von 80 bis 100 s mit den Zellgitterpunkten teilweise deutlich tiefere Dämpfungen als bei Verwendung der realen Flugzeugposition. Im Endeffekt wird die mittlere Dämpfung aus acht Teildämpfungen ermittelt, welche teilweise bis zu 20 dB auseinander liegen. Da sich der Dämpfungsverlauf aber gerade im Bereich einer Sichtlinienunterbrechung nicht linear verhält, erstaunt es nicht, dass es zu grösseren Abweichungen im Vergleich zu einer Berechnung mit wahren Quellpositionen kommt. Es muss somit gefolgert werden, dass das Zellgitterkonzept bei so grossen Zellabmessungen in Kombination mit Hinderniswirkungen zu ungenauen Resultaten führt. Die Frage ist, wie bedeutsam diese Situationen sind und wie häufig sie auftreten. Aus den nachfolgenden Gründen wurde beschlossen, bis auf weiteres das in den Validierungen verwendete Gitterkonzept beizubehalten:



**Abbildung 34: Gesamt-Dämpfungsverlauf bei 1000 Hz für den Empfangspunkt Mit ID 45223 (5100/5400) von den oberen 4/8 Quellgitterpunkten sowie für die echte Flugzeugposition (bezeichnet als Wissenschaftliches Tool).**

- Im vorliegenden Fall handelt es sich um eine für sonAIR ungünstige Kombination aus der Lage des Geländes sowie der Flugbahn, welche perfekt parallel zum Hügel verläuft. Durch diese Flugbahn wird die Sichtlinie von den südwestlich liegenden Quellgitterpunkten zu den Empfängerpunkten konstant unterbrochen (vgl. Abbildung 33).
- In der Realität wird sich dieses Phänomen kaum zeigen, da diese Kombination von perfekt parallelen Flugbahnen und Geländekanten kaum je vorkommen dürfte.
- Weiter handelt es sich im vorliegenden Fall um Betrachtungen von einzelnen Footprints. Bei der Betrachtung von ganzen Szenarien, bestehend aus mehreren gemittelt Flugbahnen konnte der Effekt der Hinderniswirkung an den Kanten nicht mehr festgestellt werden (Vgl. Abbildungen 9 - 12).
- Schliesslich scheint es zulässig hinter Geländekanten von Bergen und grossen Hügeln, in Situationen die nicht direkt überflogen werden, eine grössere Unsicherheit in Kauf zu nehmen.

Falls gleichwohl eine Erhöhung der Genauigkeit auch in solchen Situationen erwünscht wird, kann das Flugraumgitter enger gesetzt werden. Dadurch werden die Resultate in diesen Bereichen viel genauer, allerdings auf Kosten der Rechengeschwindigkeit.

## 6.1 Kommentar zur Hindernisberechnung in sonAIR

Der sonX-Ausbreitungskern berechnete bis Herbst 2017 keine Hinderniswirkung für Situationen in denen die Sichtlinie nicht unterbrochen wurde. Die aktuelle Version des Rechenkerns, welche ab sonAIR V2.5.5 integriert ist, ist jedoch in der Lage auch Hinderniswirkungen auszuweisen, falls die Sichtlinie knapp nicht unterbrochen ist. Dies hilft, Pegelsprünge von theoretisch rund sechs Dezibel beim Wegfallen der Sichtlinienunterbrechung zu vermeiden. Analysen der resultierenden Dämpfungen zeigten jedoch, dass im vorliegenden Fall dieser neue Algorithmus nicht zum Einsatz kam. Die Ursache dafür liegt bei der vorgeschalteten Analyse der Terrainschnitte. Falls die Sichtlinie zwischen Quelle und Empfänger nicht unterbrochen ist, wird nach massgeblichen Beugungskanten im Gelände gesucht. Als Kriterium wird eine minimale Steigungsabnahme zwischen zwei benachbarten Geländesegmenten von 50% verlangt. Im vorliegenden Fall mit einem idealisierten Gelände ohne effektive Kanten wurde dieses Kriterium nie erreicht. In realen Situationen ist davon auszugehen, dass dieses Kriterium mehrfach erfüllt wird. Dies wird zu einem sanfteren Pegelverlauf führen und die diskutierte Problematik weiter entschärfen.

## 7 Diskussion

Die Berechnung des SANC-TE Airfields und Airports mit sonAIR und dem Vergleich mit dem SANC-TE Referenzrahmen zeigt über alle betrachteten Szenarien, dass sonAIR den Referenzrahmen nicht einhält. Beim SANC-TE Airfield traten unterhalb der wichtigsten Flugbahnen (Starts in westlicher, resp. östlicher Richtung) kaum Abweichungen zwischen den beiden Berechnungsmethoden auf. Allerdings resultieren mit sonAIR tiefere Immissionen direkt unter den Heliokopterflugbahnen (Nord-Süd – Verbindung). Im überwiegenden restlichen Teil, vorwiegend in grossem seitlichem Abstand zur Flugbahn weist sonAIR aber höhere Belastungen aus.

Beim SANC-TE Airport zeigte sich bei der Betrachtung der Szenarien ein ähnliches Bild: Unter den Flugbahnen sind keine Abweichungen zwischen den Berechnungsmethoden sichtbar. Beim SANC-TE Airport liegen die Abweichungen innerhalb eines 5 km breiten Korridors um die Flugbahnen innerhalb 0.5 dB. In Pistennähe verschmälert sich allerdings dieser Korridor mit den Abweichungen.

Weiter konnte mit der SANC-TE Berechnung die Problematik der künstlichen Flugspuren und die Kompatibilität mit dem Zellengitterkonzept vertieft betrachtet werden. Es hat sich gezeigt, dass gerade bei exakt parallel verlaufende Flugbahnen zu einem Hindernis deutliche Unterschiede von Berechnungspunkt zu Berechnungspunkt resultieren können. Dieses Problem dürfte allerdings in Wirklichkeit, bei nicht parallel verlaufenden Flugbahnen und realem Gelände kaum auftreten.

Eine Analyse der Ursachen der Abweichungen basierend auf Einzelfootprints sowie zusätzlichen Simulationen mit einer ungerichtet abstrahlenden Referenzquelle ergab folgende primären Ursachen für Abweichungen in seitlicher Distanz zur Flugbahn:

- Die sonAIR-Emissionsmodelle wurden so konzipiert, dass die Schallquelle dreidimensional modelliert werden kann. Für die vorliegende SANC-TE Berechnung wurden allerdings die aus der SANC-TE generierten zweidimensionalen Quellenmodelle verwendet. Diese Quellenmodelle stellen einfache, mit der Flugphase und dem Abstrahlwinkel  $\theta$  skalierende Emissionsmodelle dar. Im Empa-Bericht „*Integration sonAIR in sonBASE Phase 2 - Einbindung von Kleinluftfahrzeugen in sonAIR und Integration der SANC-DB*“ [7] wird die Methodik beschrieben, um aus der allgemein formulierten SANC-DB Datenbank Quellenmodelle für sonAIR zu erstellen. Es hat sich allerdings schon in diesem Bericht gezeigt, dass gewisse Richtcharakteristiken mit den in der SANC-DB abgelegten Informationen in sonAIR mit der verwendeten Methodik nicht gut abgebildet werden können. Dadurch entstehen vor allem bei Typen mit stark einschnürender Richtcharakteristik teilweise grössere Differenzen. Eine Möglichkeit zur genaueren Beschreibung der Richtcharakteristik in sonAIR aus den SANC-DB – Daten besteht zurzeit, allerdings sind die generierten Richtcharakteristiken aufgrund des gewählten Optimierungsalgorithmus nicht reproduzierbar.
- Bei der Ausbreitungsmodellierung können die grössten Unterschiede auf die in FLULA2 implementierte Bodenzusatzdämpfung zurückgeführt werden. Diese Bodenzusatzdämpfung, welche für flache Schalleinfallswinkel zur Anwendung kommt, kombiniert durch eine empiri-

sche Formel verschiedene Effekte, namentlich den Einfluss der lateralen Richtwirkung der Quelle sowie Boden- und Meteoeffekte [6]

- Weitere Abweichungen können auf die unterschiedlichen Implementationen des Bodeneffektes, der Hinderniswirkung sowie der Luftpärfung zurückgeführt werden.

Bei den letztgenannten Effekten kann davon ausgegangen werden, dass sonAIR die Realität besser als FLULA2 abbildet und entsprechend die sonAIR Resultate glaubwürdiger sind. Bei der Bodenzusatzdämpfung zeigt sich ein komplexeres Bild. Wie bereits erwähnt beschreibt die Bodenzusatzdämpfung eine integrale Korrektur verschiedener Phänomene, welche in sonAIR anders gehandhabt werden als in FLULA2:

- Die sonAIR Emissionsmodelle weisen in der Regel nicht nur eine longitudinale sondern auch eine laterale Richtwirkung auf. Wie der Vergleich mit Messungen gezeigt hat, ist die laterale Richtwirkungskorrektur durchaus relevant und zeigt nota bene zwischen den Flugzeugtypen deutliche Abweichungen [11]. Durch Verwendung der Emissionsdatensätze der SANC-DB, welche analog zu FLULA2 keine laterale Richtwirkung aufweisen, entfällt dieser Aspekt in der Modellierung.
- Der Bodeneffekt wird in sonAIR phasenrichtig, spektral und in Abhängigkeit der Untergrundeigenschaften sowie des Terrains gerechnet. Wie in Kapitel 5 gezeigt wurde, resultiert daraus eine Zunahme der Dämpfung bei streifendem Schalleinfall. Diese fällt jedoch deutlich kleiner aus als die Bodenzusatzdämpfung von FLULA2.
- sonAIR ist in der Lage verschiedene Meteoeffekte abzubilden, u.a. auch die Entstehung akustischer Schattenzonen, welche nach unserem Verständnis ein zentrales Element zur Erklärung der Bodenzusatzdämpfung darstellt. Der SANC-TE Referenzrahmen macht jedoch keinerlei Angaben zur Schichtung der Atmosphäre - als Voraussetzung für die Entstehung einer akustischen Schattenzone – weshalb die Berechnungen unter der Annahme einer homogenen Atmosphäre durchgeführt wurden.

Weitergehende Untersuchungen zu den Ursachen der Bodenzusatzdämpfung und zur Frage, ob diese durch sonAIR reproduziert werden kann, sind geplant.

Die Vergleichsberechnungen und die Analyse der Ursachen haben des Weiteren einige fundamentale, konzeptionelle Schwierigkeiten für die Durchführung von Modellvergleichen deutlich vor Augen geführt.

- Ein Grundkonzept von sonAIR ist die klare Trennung von quellen- und ausbreitungsseitigen Phänomenen. Dies ist bei FLULA2 nicht gegeben. So beinhaltet die FLULA2 Bodenzusatzdämpfung z.B. auch allfällige Einflüsse einer lateralen Richtwirkung. Da sonAIR aber auf dreidimensionale Richtcharakteristiken ausgerichtet ist, muss es zwingend zu Abweichungen kommen, wenn sonAIR mit Quellendatensätzen von FLULA2 bzw. der SANC-DB betrieben wird.
- Das gleiche gilt für den Dopplereffekt, welcher in sonAIR separat behandelt, in FLULA2 analog zur SANC-DB, aber integral in den Quellendaten enthalten ist. Das Vorgehen gemäß FLULA2 ist dabei streng genommen nur für Immissionspunkte korrekt, welche ähnliche geometrische

Bedingungen wie bei den Quellenvermessungen aufweisen. Entsprechend ist es empfehlenswert, diesen Einfluss bei der Rückrechnung auf die Quellenposition zu kompensieren.

- Generell kann gefolgert werden, dass von einer Kombination von Emissionsdatensätzen aus unterschiedlichen Quellen, welche mit unterschiedlichen Ausbreitungsmodellen ermittelt wurden, nach Möglichkeit abzusehen ist. Ohne Wissen um die Art und Weise wie verschiedene Ausbreitungseffekte berücksichtigt wurden, wird es nicht gelingen auf dieser Basis die Messwerte korrekt zu reproduzieren.
- Abschliessend kann zusätzlich festgehalten werden, dass der unterschiedliche Detaillierungsgrad der Modelle ein Problem bei der Kombination darstellt. sonAIR rechnet spektral und weist Richtcharakteristiken auf, die z.B. in Abhängigkeit der Schubsetzung ihre Form ändern. Es ist unmöglich den gleichen Informationsgehalt nur mit einem reinen A-Pegel und einer einzigen Winkelangabe zur Definition der Richtwirkung mitzuführen.

## 8 Fazit und weiteres Vorgehen

Die SANC-TE Berechnung mit sonAIR hat die Unterschiede zwischen den Berechnungsprogrammen sonAIR und dem Referenzrahmen respektive FLULA2 und IMMPAC deutlich aufgezeigt. Hinter den Fluglärmprogrammen liegen andere Modellansätze, welche teilweise fast zwingend grössere Abweichungen zur Folge haben müssen.

Massgebliche Referenz sind primär Vergleiche von Berechnungen mit Messdaten. In einem laufenden Projekt wird das Fluglärmmodell sonAIR mit umfangreichen Messdaten validiert, welche entweder aus externen Quellen stammen oder aus eigenen Messungen, welche nicht für die Modellbildung verwendet wurden. Aufgrund der aktuellen Erkenntnisse wurde das eigene Messprogramm dahingehend erweitert, zusätzliche Messpunkte mit bedeutenden Bodenzusatzdämpfungen zu erfassen. Parallel dazu werden Simulationen mit sonAIR durchgeführt, welche den Einfluss von Meteoeffekten, namentlich von akustischen Schattenzonen, untersuchen sollen und so der Fragen nachgehen, ob die Bodenzusatzdämpfung auf diesem Wege erklärt werden kann.

## 9 Literatur

- [1] Krebs, W., E. Lobsiger, and B. Schäffer, (2014). *SANC-TE, Swiss Aircraft Noise Test Environment, Technische Dokumentation*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärmminderung: Dübendorf.
- [2] Empa, (2016). *Dokumentation sonAIR: Entwicklung Emissionsmodell und Aufbau Emissionsdatenbank*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärmminderung: Dübendorf, Switzerland.
- [3] Wunderli, J.M., C. Zellmann, M. Köpfli, M. Habermacher, O. Schwab, F. Schlatter, and B. Schäffer, (2018). *sonAIR - a GIS-Integrated Spectral Aircraft Noise Simulation Tool for Single Flight Prediction and Noise Mapping*. Acta Acustica United with Acustica, 2018. 104: p. 440-451.
- [4] BAFU, BAZL, and GS-VBS, (2016). *Leitfaden zur Fluglärmvermittlung. Vorgaben für die Lärmermittlung. Umwelt-Vollzug Nr. 1625*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL), Generalsekretariat des Eidg. Departementes für Verteidigung, Bevölkerungsschutz und Sport VBS (GS VBS): Bern.
- [5] Zellmann, C., B. Schäffer, J.M. Wunderli, U. Isermann, and C.O. Paschereit, (2017). *Aircraft Noise Emission Model Accounting for Aircraft Flight Parameters*. Journal of Aircraft, 2017.
- [6] Empa, (2010). *FLULA2, Ein Verfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung. Technische Programm-Dokumentation. Version 4*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärmminderung: Dübendorf.
- [7] Empa, (2016). *Integration sonAIR in sonBASE Phase 2 - Einbindung von Kleinluftfahrzeugen in sonAIR und Integration der SANC-DB*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärmminderung: Dübendorf, Switzerland. p. 46.
- [8] ISO, (1993). *ISO 9613-1. Acoustics – attenuation of sound during propagation outdoors – Part 1: calculation of the absorption of sound by the atmosphere*. Geneva, Switzerland: International Organisation for Standardization (ISO).
- [9] Empa, (2016). *Dokumentation des sonX Ausbreitungsmodells. Programmversion: sonRAIL V5.0.0 bzw. sonARMS V4.0.0 bzw. sonAIR V2.2.0 (vom 12. September 2016)*. Empa, Abteilung Akustik / Lärmminderung: Dübendorf. p. 146.
- [10] Empa, (2016). *Dokumentation sonAIR: Simulationstools*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärmminderung: Dübendorf, Switzerland.
- [11] Empa, (2016). *Dokumentation sonAIR: Validierung*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärmminderung: Dübendorf, Switzerland.

## Beilagen

### B.1 Skripte und Pfade

Erstellen der Spuren:

[K:\sonAIR\Projekte\5214017372\\_SANC-TE\Matlab\Read\\_Spur\\_V2\\_OhneStreuspuren.m](K:\sonAIR\Projekte\5214017372_SANC-TE\Matlab\Read_Spur_V2_OhneStreuspuren.m)

[K:\sonAIR\Projekte\5214017372\\_SANC-TE\Matlab\Read\\_Spur\\_V2\\_MitStreuspuren.m](K:\sonAIR\Projekte\5214017372_SANC-TE\Matlab\Read_Spur_V2_MitStreuspuren.m)

Erstellen der Profile

[K:\sonAIR\Projekte\5214017372\\_SANC-TE\Matlab\Read\\_Profile.m](K:\sonAIR\Projekte\5214017372_SANC-TE\Matlab\Read_Profile.m)

Faltungsdatei

[K:\sonAIR\Projekte\5214017372\\_SANC-TE\Matlab>Create\\_Faltungsdatei\\_P00.m](K:\sonAIR\Projekte\5214017372_SANC-TE\Matlab>Create_Faltungsdatei_P00.m)

[K:\sonAIR\Projekte\5214017372\\_SANC-TE\Matlab>Create\\_Faltungsdatei\\_P01.m](K:\sonAIR\Projekte\5214017372_SANC-TE\Matlab>Create_Faltungsdatei_P01.m)

Erstellen FLULA2-RC:

[K:\sonAIR\Modul\\_B - Quellenvermessung\Auswertung\Matlab\Flula2\Conversion\\_to\\_Flula2\\_Monopol.m](K:\sonAIR\Modul_B - Quellenvermessung\Auswertung\Matlab\Flula2\Conversion_to_Flula2_Monopol.m)

## B.2 Reduktionsdaten SANC-TE AF

```
// Input für sonAir Datenreduktion für basic und meteo Modus
// -----
// Forest und reflect Berechnungen und Output werden nicht reduziert.
// Regeln für die Reduktion:
// 1. Die Empfängerpositionen sind frei wählbar, insbesondere z.B. Mess-
//    punkte im Fenster.
// 2. Für die Schritte hier werden Absolutkoordinaten (Quelle, Empfänger)
//    auf ganze Zahlen gerundet.
// 3. Die Quellen-Absolutpositionen müssen sich an das Raster halten (RAS-
//    TER der ersten Zeile).
// 4. Vom Quelle-Empfänger-Abstand wird das Maximum d der Abstände in x, y
//    Richtung festgehalten.
// 5. Der Abstand in z-Richtung ist indirekt bereits berücksichtigt durch
//    den Grenzwinkel.
// 6. Das RASTER wird aufgrund der zu d passenden (Ober-)GRENZE bestimmt.
// 7. Ist d > die letzte GRENZE, so wird nichts berechnet.
// 8. Berechnung von Rx = Quellenkoordinate X mod RASTER
// 9. Berechnung von Ry = Quellenkoordinate y mod RASTER
// 10. Die Rechnung wird nur dann ausgeführt wenn: Rx = 0 und Ry = 0.

OBJECTID      RASTER      GRENZE
0 - 1000 m    100        1000
1000 - 4000 m 200        4000
4000 - 8000 m 400        8000
8000 - 16000 m 800        16000
16000 - 32000 m 1600      32000
End

OutputReduction 1

MaxAttenuationDistance 32000

OctaveBands 0

// Höhenregel ergänzt ab 27-Jan-2015
// -----
LineOfSightMarginAngle 15

// Ausnahmeregel für Flugzeuge auf der Piste (ergänzt ab 14-Sep-17) // -----
FineUpToRelHeight 50

// -----
// Diese Regel wird von SimTool.exe, nicht von sonAir.exe benutzt.
Zmin 2 m      Starthöhe (1. Quellenniveau) *über Boden*
Zstep 1.5     Multiplikator der Höhe *über Boden* pro Höhenstufe.
Steps 21      für 9861m = Zmin * Zstep^(Steps - 1) oberste Quellenhöhe [obso-
let ab 14-Sep-17]
Zdigits 2      Runden auf so viel Stellen nach dem Punkt, nach der Be-
rechnung aller Stufen.
ZstepLimit 1000 m    Limitiert die Schritthöhe (Limitierung neu ab 14-
Sep-17)

// -----
// Dämpfungsspektren, bei denen der Wert MaxAttenuation für alle Frequen-
// zen überschritten wird, werden bei der Dämpfungsberechnung nicht abgelegt.
// Bei der Footprintberechnung wird bei diesen Dämpfungsspektren für jede
// Frequenz der Wert MaxAttenuation verwendet.
MaxAttenuation 200
```

### B.3 Reduktionsdaten SANC-TE AP

```
// Input für sonAir Datenreduktion für basic und meteo Modus
// -----
// Forest und reflect Berechnungen und Output werden nicht reduziert.
// Regeln für die Reduktion:
// 1. Die Empfängerpositionen sind frei wählbar, insbesondere z.B. Mess-
//    punkte im Fenster.
// 2. Für die Schritte hier werden Absolutkoordinaten (Quelle, Empfänger)
//    auf ganze Zahlen gerundet.
// 3. Die Quellen-Absolutpositionen müssen sich an das Raster halten (RAS-
//    TER der ersten Zeile).
// 4. Vom Quelle-Empfänger-Abstand wird das Maximum d der Abstände in x, y
//    Richtung festgehalten.
// 5. Der Abstand in z-Richtung ist indirekt bereits berücksichtigt durch
//    den Grenzwinkel.
// 6. Das RASTER wird aufgrund der zu d passenden (Ober-)GRENZE bestimmt.
// 7. Ist d > die letzte GRENZE, so wird nichts berechnet.
// 8. Berechnung von Rx = Quellenkoordinate X mod RASTER
// 9. Berechnung von Ry = Quellenkoordinate y mod RASTER
// 10. Die Rechnung wird nur dann ausgeführt wenn: Rx = 0 und Ry = 0.

OBJECTID      RASTER      GRENZE
0 - 1000 m    100        1000
1000 - 4000 m 200        4000
4000 - 8000 m 400        8000
8000 - 16000 m 800        16000
16000 - 32000 m 1600      32000
End

OutputReduction 1

MaxAttenuationDistance 32000

OctaveBands 0

// Höhenregel ergänzt ab 27-Jan-2015
// -----
LineOfSightMarginAngle 15

// Ausnahmeregel für Flugzeuge auf der Piste (ergänzt ab 14-Sep-17) // -----
FineUpToRelHeight 50

// -----
// Diese Regel wird von SimTool.exe, nicht von sonAir.exe benutzt.
Zmin 2 m      Starthöhe (1. Quellenniveau) *über Boden*
Zstep 1.5     Multiplikator der Höhe *über Boden* pro Höhenstufe.
Steps 50      für 9861m = Zmin * Zstep^(Steps - 1) oberste Quellenhöhe [obso-
let ab 14-Sep-17]
Zdigits 2      Runden auf so viel Stellen nach dem Punkt, nach der Be-
rechnung aller Stufen.
ZstepLimit 1000 m    Limitiert die Schritthöhe (Limitierung neu ab 14-
Sep-17)

// -----
// Dämpfungsspektren, bei denen der Wert MaxAttenuation für alle Frequen-
// zen überschritten wird, werden bei der Dämpfungsberechnung nicht abgelegt.
// Bei der Footprintberechnung wird bei diesen Dämpfungsspektren für jede
// Frequenz der Wert MaxAttenuation verwendet.
MaxAttenuation 200
```

## B.4 sonAIR – Parameter

```

// sonX-Parameter.txt - Reference setting for sonAIR
// =====
// 
// Table of contents
//=====
// 
// 0.) Change history since January 2015
// 1.) General parameters for in- and output control
// 2.) General parameters for the setup of the calculation model, sorted
according the modules:
//      Basic - Meteo - Reflect - Forest
// 3.) Spezific parameters for sonRAIL
// 4.) Spezific parameters for sonARMS
// 5.) Spezific parameters for sonAIR

// Note: recommendet parameter settings are given for the following appli-
cations:
// 
=====
==

// - S = Survey (quick calculation with reduced accuracy)
// - E = Engineering (balanced)
// - P = Precision (high accuracy, but longer calculation times)
// - D = Debug (with additional information for validation purposes)

// 
// 0.) Change history since January 2015
// -----
// 
// 15-Apr-15: phm Neuer Parameter MaxWarnPercent (darf fehlen)
// 17-Apr-15: phm Neuer Parameter LiftRcvBelowGround (darf fehlen; SonRail,
sonAir, nicht sonArms)
// 24-Aug-15: phm Neuer Parameter AatmCorrBroadBand (Luftdämpfung nicht für
Terzbandmittenfrequenz)
// 07-Sep-15: phm Neuer Parameter OutPutSrcRcv
// 27-Okt-15: phm Parameter MeteoModify erweitert auf Wert 2
// 25-Apr-16: Neuer Parameter ResMeteoMinMax
// 
// 
// 1.) General parameters for in- and output control
// =====

```

```
// -----
InputTriage          0          S=E=P=D=0
DxfMaxHeightGnd     80 m
DxfMinHeightGnd     0.001 m
DxfMaxHeightEdges   80 m
DxfMinHeightEdges   0.001 m
// -----
FileNameNumbers      0          S=E=P=D=0
// -----
-----
PlotRelief          0          S=E=P=0 D=1
// -----
-----
LogSize              1          S=E=P=1 D=2oder3
MaxWarnPercent      10 %
// -----
-----
LinLogProfilesHeight 200 m
LinLogProfilesDelta  0.1 m
WriteAbsMeteoProfiles 0          S=E=P=0 D=0oder1
// -----
ErrorPopUp          0          S=E=P=0 D=1

///////////////////////////////
///////////////////
// 2.) General parameters for the setup of the calculation model, sorted
according the modules:
//      Basic - Meteo - Reflect - Forest
// -----
=====
// -----
AccelTrigonom        16384
AccelWofz             2000
// -----
OptimizeGndSeg        1          S=E=P=D=1
HarmonoiseDist1Rmax   50 m      S=E=P=D=50
HarmonoiseDist2Rmax   500 m     S=E=P=D=500
HarmonoiseR1           0.25 m    S=E=P=D=0.25
HarmonoiseR2           1 m       S=E=P=D=1
HarmonoiseDist1Dsegm  20 m      S=E=P=D=20
HarmonoiseDist2Dsegm  200 m     S=E=P=D=200
HarmonoiseD1            5 m      S=E=P=D=5
HarmonoiseD2            50 m     S=E=P=D=50
// -----
MinDistRecBarr        0 m       S=E=P=D=0
LiftRcvBelowGround    0 m
// -----
PathDmin              0.33 m
// -----
-----
CoherenceLoss          1          S=E=P=D=1
// -----
-----
ReliefSmoothing        0          S=E=P=D=0
// -----
```

```
AatmGradCelsius      15 °C
AatmHumidityPercent  70 %
AatmMilliBar         1013.25 mBar
// -----
-----
AatmCorrBroadBand    1
AatmMorePrecision    1
AatmMaxHeight        10000 m
AatmDelta            100 m
// -----
FlowResSigma         300
// -----
TerrainTypeGrid      5 m      S=10 E=5 P=D=2
TerrainTypeGridLarge 50 m
// -----
ForestHeight         20 m
FoliageDistLimit    200 m
// -----
MaxDistance          40000 m      S=10000, E=20000, P=30000, D=20000
// -----
-----
SingleBarrierMaxAtt  25 dB
MultiBarrierMaxAtt   25 dB
BarrierUsePierce    1
AdditionalGroundReflections 0
// -----
-----
// Raytracing
// -----
RtDeltaX             2 m      S=E=P=D=2
MeteoModify          2         S=E=P=D=2
SimpleMeteo          1         S=E=P=D=1
MeteoDmax            15 dB
MeteoDmin            -20 dB
// -----
-----
ReflUebergangsFrequenz 1.0      S=1 (only incoherent) E=1 P=300
D=300
ReflSpacingFactorKohaerent 0.11    S=E=P=D=0.11
ReflSpacingInkohaerent  1.0      S=E=P=D=1
ReflIterationsWalls   2         S=1 E=2 P=3 D=2
ReflZugskoerper        0         S=0 E=0 P=1 D=1
ReflMaxDist           500 m     S=300 E=D=500 P=600 für SonArms
s. Hinweis oben.
ReflLimit             0.001
SourceConst           100
ReflLogVisibility     0
// -----
-----
maxDistForestPropagation 20000 m      S=1000 E=2000
P=5000 D=2000
maxDistRockPropagation 20000 m      S=1500 E=3000
P=5000 D=3000
maxRockReflAngle      1.3963 corresponds to 80°      S=E=P=D=1.3963
minDistRockReflector  20 m      S=E=P=D=20
RasterRatioRock        5 times TerrainTypeGrid      S=E=5=5=5 (*
even Numbers!)
DiffusThreshold        0.2      S=0.3 E=D=0.2
P=0.1
ForestRimPointsDist   25 m      S=100 E=25 P=5
D=25
LogReflectionPoints    0      S=E=P=0 D=1
```

```
ForestMaxHorAngle      1.5707963 = Pi/2 = 90°
S=E=P=D=1.5707963
CliffReflectorsOn      1
S=E=P=D=1
ForestReflectorsOn     1
S=E=P=D=1
MinForestDepth         20 m
S=E=P=D=20

///////////////////////////////
/////////////////////////////
//  
// 3.) Specific parameters for sonRAIL
// =====
//  
// -----
OutPutsDetail          0      S=E=P=0 D=1
OutPutsSummary         1      S=E=P=1 D=1
OutputDbPrecision      2      S=E=P=D=2
OutSuppressDb          0.3 dB  S=0.9 E=0.3 P=0.1 D=0.3
OutSuppressBelow       30 dB  S=40 E=30 P= 20 D=30
InpMeteoSuppress       0      S=E=1 P=D=0
// -----
LineSourcePointsDistFOREST 25 m  S=100 E=25 P=5 D=25
LineSourcePointsDistREFLECT 10 m  S=25 E=10 P=5 D=10
LineSourcePointsDistTunnel  2 m   S=2 E=2 P=1 D=2
LineSourcePointsDistLowBASIC 1 m   S=2 E=1 P=1 D=1
LineSourcePointsDistUppBASIC 100 m  S=200 E=100 P=50 D=100
LineSourcePointsDistSlopeBASIC 0.1  S=0.1 E=0.1 P=0.1 D=0.1
LineSourcePointsDistLowMETEO 10 m   S=20 E=10 P=5 D=5
LineSourcePointsDistUppMETEO 100 m  S=200 E=100 P=50 D=100
LineSourcePointsDistSlopeMETEO 0.1  S=0.1 E=0.1 P=0.1 D=0.1
// -----
----  
NearSourceMaxDist      10 m   S=10 E=10 P=25 D=10
NearSourceRecords       2000000000  S=100 E=2000000000 P=2000000000 D=100

///////////////////////////////
/////////////////////////////
//  
// 4.) Specific parameters for sonARMS
// =====
//  
// -----
ArmsWriteInternalData  0      S=E=P=0 D=1
ArmsWriteDetailsP      0      S=E=P=0 D=1
ArmsWriteDetailsR      0      S=E=P=0 D=1
ArmsWriteTimeResponse  0      S=E=P=0 D=1
DeleteOutput           1      S=E=P=1 D=0
LogDominantReflector  0      S=E=P=0 D=1
// -----
ArmsTimeResponseStep   0.010 (=10ms)
ArmsTimeResponseLength 1000   (1000 x ArmsTimeResponseStep = 10 sec
total time)
ArmsDirectAtoMaxAF     9 dB
// -----
REFLECTwithMETEO      2      S=E=P=D=2
// -----
Abuild                0.0
ResMeteoMinMax         0
/////////////////////////////
```

```
//////////  
//  
// 5.) Specific parameters for sonAIR  
// =====  
//  
// -----  
  
//OutPutsDetail      1      S=E=P=0 D=1  ==> wird schon unter 3) de-  
finiert!  
//OutPutsSummary      1      S=E=P=1 D=1  ==> wird schon unter 3) de-  
finiert!  
//OutputDbPrecision   2      S=E=P=D=2    ==> wird schon unter 3) de-  
finiert!  
  
SourceDimension      50 m  
AirAttenuationOutput 1  
OutPutsSrcRcv        0      S=E=P=0 D=1  
  
  
NegZobstacles 1
```

## B.5 Einzelfootprints

108 Seiten, Datei „Footprints\_SANCTEAF\_sonAIR.pdf“

138 Seiten, Datei „Footprints\_SANCTEAP\_sonAIR.pdf“