

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



Amt für Mobilität des Kantons Zürich
Abteilung Flughafen und Luftverkehr
Neumühlequai 10
Postfach
8090 Zürich

Flughafen Zürich

Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2023

Sensitivitätsbetrachtungen 2022

Auftrags-Nr.: 5214.033680
Bericht-Nr.: 5214.033680 - 2
Auftraggeber: Amt für Mobilität des Kantons Zürich
Anzahl Seiten: 37
Beilagen: 6 Karten (A4-Format)

Die Verfasser: B. Schäffer
S. Schalcher
M. Gligorijevic

Status: genehmigter Bericht

Dübendorf, 29. Oktober 2024
Der Projektleiter:

Abteilung Akustik / Lärminderung
Der Abteilungsleiter:

Dr. Beat Schäffer

Dr. Jean Marc Wunderli

Anmerkung: Bericht und Unterlagen werden 10 Jahre archiviert.

Zusammenfassung

Am 26. Februar 2024 beauftragte das Amt für Mobilität des Kantons Zürich die Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, den Zürcher Fluglärm-Index (*ZFI*) für das Jahr 2023 zu berechnen. Der *ZFI* ist eine Einzahlgrosse, namentlich die Summe der Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen (*HA*) und der Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen (*HSD*), welche ebenfalls separat ausgewiesen werden sollen. Zudem sollen die Gründe für die Veränderungen des *ZFI* zwischen dem Vorjahr 2022 und dem Berichtsjahr 2023 mittels Sensitivitätsbetrachtungen diskutiert werden. Die Berechnungen werden dabei gemäss Vorschrift der *ZFI*-Verordnung (*ZFI*-VO) vom 7. Dezember 2011 durchgeführt.

In den Berechnungen des *ZFI* ergab sich zwischen dem Berichtsjahr 2023 und dem Vorjahr 2022 eine methodische Änderung. Namentlich wurde der Quellendatensatz des Fluglärmrechnungsprogramms FLULA2 aktualisiert. Im Gegensatz zur letzten Aktualisierung der Quelldaten im Berechnungsjahr 2018 (Empa-Bericht Nr. 5214. 021166-3) wurde deren Einfluss auf den *ZFI* bzw. dessen Änderung zwischen 2022 und 2023 nicht explizit ausgewiesen. Die Änderungen im *ZFI* zwischen den beiden Jahren beinhalten somit implizit auch die Aktualisierung der Quelldaten. In den Sensitivitätsbetrachtungen hingegen werden die Flugbetriebskomponenten 2022 um die Aktualisierung der Quelldaten bereinigt, um ausschliesslich die flugbetrieblichen Änderungen auszuweisen.

Der *ZFI*, die *HSD* und die *HA* des Jahres 2023 nahmen gegenüber dem Vorjahr 2022 aufgrund der anhaltenden Erholung des Flugbetriebs von der COVID-19 Situation zu (Vergleich der offiziellen Monitoringwerte). Der *ZFI* nahm um 22% zu, die *HSD* 37% und die *HA* um 13% (Differenzen inklusive Aktualisierung der Quelldaten). Die Sensitivitätsanalyse (ohne Aktualisierung der Quelldaten) zeigt, dass das Bevölkerungswachstum alleine (d.h. ohne Veränderungen im Flugbetrieb) den *ZFI* um 2% erhöht hätte; die restliche Zunahme wird durch den Flugbetrieb verursacht. Bei den Komponenten des Flugbetriebs trug hauptsächlich die starke Zunahme der Flugbewegungszahlen mit +28% zur Zunahme des *ZFI* bei. Die verbleibenden Flugbetriebskomponenten Fluggeometrien, Flugzeugflotte und Routenbelegung trugen mit +3.6%, -3.3% und -3.1% annähernd gleich stark, aber deutlich weniger als die Flugbewegungszahlen, zu den Veränderungen im *ZFI* bei. Die Summe der *ZFI*-Differenzen der Sensitivitätsanalyse fällt dabei grösser aus als die offizielle Differenz zwischen den Jahren 2023 und 2022, was auf die Aktualisierung der Quelldaten zwischen den beiden Jahren zurückzuführen ist (Kompensation des realen Anstiegs durch die akustisch günstige Flottenentwicklung, welche in den Sensitivitätsbetrachtungen nicht enthalten ist).

Im Jahr 2023 lag der *ZFI* 12% über dem Wert des Referenzzustands, wobei die *HA* um 10% darunter lagen, die *HSD* hingegen um 67% darüber. Eine zusätzliche Sensitivitätsanalyse zeigt, dass das Bevölkerungswachstum um den Flughafen vom Referenzzustand zum Jahr 2023 alleine (d.h. ohne Veränderungen im Flugbetrieb) zu einer Zunahme des *ZFI* von 29% geführt hätte. Aufgrund der starken Veränderungen im Flugbetrieb nahm der *ZFI* hingegen deutlich um 17% ab, wobei der günstigere, die um -37% *HA* verminderte Flugbetrieb am Tag den ungünstigeren Flugbetrieb in der Nacht, welcher die *HSD* um +33% erhöhte, deutlich zu kompensieren vermochte. Dennoch sank diese Kompensation des Bevölkerungswachstums durch den Flugbetrieb seit dem letzten Jahr wiederum deutlich.

Inhalt

1.	Auftrag	4
2.	Grundlagen und Methodik	6
2.1.	Übersicht	7
2.2.	Berücksichtigung der Aktualisierung der Quelldaten.....	8
2.3.	Einfluss von Veränderungen in der Wohnbevölkerung.....	9
2.4.	Einfluss von Veränderungen der passiven Massnahmen.....	9
2.5.	Einfluss von Veränderungen in den Flugbewegungszahlen.....	10
2.6.	Einfluss von Veränderungen in der Flugzeugflotte	10
2.7.	Einfluss von Veränderungen in der Flugroutenbelegung.....	11
2.8.	Einfluss von Veränderungen in den Fluggeometrien	11
2.9.	Rangfolge der Einflussgrössen	12
3.	Einfluss der Veränderungen in der Bevölkerung und im Flugbetrieb auf die Entwicklung des <i>ZFI</i>	14
4.	Sensitivitätsanalyse <i>ZFI</i> vom Vorjahr 2022 zum Berichtsjahr 2023.....	17
4.1.	Veränderung im <i>ZFI</i> vom Vorjahr 2022 zum Berichtsjahr 2023.....	17
4.2.	Einfluss von Veränderungen in der Bevölkerung	18
4.3.	Einfluss von Veränderungen im Flugbetrieb.....	19
4.4.	Zusammenstellung der Resultate.....	28
5.	Unsicherheit der Berechnungen	29
6.	Abkürzungen und Literatur	31
6.1.	Verwendete Abkürzungen.....	31
6.2.	Literatur.....	32
7.	Verzeichnisse.....	35
7.1.	Abbildungsverzeichnis.....	35
7.2.	Tabellenverzeichnis	35
7.3.	Kartenverzeichnis	36
8.	Anhang	37

1. Auftrag

Am 26. Februar 2024 beauftragte das Amt für Mobilität des Kantons Zürich die Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, den Zürcher Fluglärm-Index (*ZFI*) für das Jahr 2023 zu berechnen. Dabei sollen die für dieses Jahr nach wirtschaftlichem Wohnsitz¹ ermittelten Bevölkerungszahlen verwendet werden. Zu Vergleichszwecken soll der *ZFI* auch für den Referenzzustand (RZ) sowie für die Jahre 2005 bis 2022 ausgewiesen werden. Der RZ wurde vom Regierungsrat des Kantons Zürich definiert und bildet die Grundlage des heutigen *ZFI*-Richtwerts (vgl. *ZFI*-VO [47]). Als Eckwerte wurden die Bevölkerungs- und Bewegungszahlen des Jahres 2000 sowie der Flugbetrieb (Flottenmix und Routenbelegung) des Jahres 2004 festgelegt. Die Zeitreihe erlaubt es, die Entwicklung des *ZFI* bzw. der *HA* und der *HSD* über einen längeren Zeitraum hinweg zu beurteilen. Die entsprechenden Werte wurden bereits in früheren Empa-Berichten [3] (RZ) sowie [4, 6, 9, 12, 14, 17, 20, 22, 24, 27, 29, 32, 36, 38, 40, 42] (2005 bis 2022) ausgewiesen. Die Berechnungen sollen nach dem in [2] dokumentierten Verfahren und unter Anwendung der aktuellen *ZFI*-VO vom 7. Dezember 2011 [47] unter Berücksichtigung von passiven Schallschutzmassnahmen (PM) durchgeführt werden. Seit dem Jahr 2013 werden dazu in der offiziellen Berechnung Gebäude mit PM, die den Anforderungen der SIA-Norm 181 genügen, mit entsprechenden Einfügungsdämpfungen berücksichtigt. Die Berechnungen erfolgen gemäss der Methodik des 3. Teilberichts zum *ZFI* des Jahres 2012 [19]. Zusätzlich zum *ZFI* sollen auch seine beiden Bestandteile, die Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen (*HA*) und die Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen (*HSD*), separat ausgewiesen werden. Es wird eine Auflösung in einzelne Gemeinden für die Schweiz und Deutschland, für die Stadtzürcher Quartiere und nach Himmelsrichtung in vier Quadranten gewünscht. Nebst den gemeinde-, quartiers- und kantonsspezifischen Quantifizierungen soll der *ZFI* auch räumlich auf Karten dargestellt werden.

Des Weiteren sollen die Gründe für die Veränderungen des *ZFI* zwischen dem Vorjahr 2022 und dem Berichtsjahr 2023 diskutiert werden. Die Aussagen sollen dabei die qualitative Ebene verlassen. Dazu werden einzelne Komponenten, wie beispielsweise die Bevölkerung oder die Flugzeugflotte, auf den *ZFI* isoliert betrachtet und quantifiziert. Damit soll aufgezeigt werden, wie sensitiv der *ZFI* reagiert, wenn sich Elemente des Flugbetriebs oder die Bevölkerungsstruktur ändern. Die Sensitivitätsanalyse soll gemäss [5] durchgeführt werden, wobei seit dem Berichtsjahr 2012 die Veränderung des *ZFI* aufgrund neuer PM als zusätzliche Komponente betrachtet wird. Zudem wird im Sinne einer vereinfachten Sensitivitätsanalyse der Einfluss der Bevölkerung und des Flugbetriebs als Ganzes auf die Veränderungen zwischen dem RZ und dem Berichtsjahr untersucht.

In den Berechnungen des *ZFI* ergab sich zwischen dem Berichtsjahr 2023 und dem Vorjahr 2022 eine methodische Änderung. Namentlich wurde der Quellendatensatz des Fluglärmrechnungsprogramms FLULA2 aktualisiert. In den vorliegenden Berechnungen soll – im Gegensatz zur letzten Aktualisierung der Quelldaten im Berechnungsjahr 2018 [31] – deren Einfluss auf den *ZFI* bzw. dessen Änderung zwischen 2022 und 2023 nicht explizit ausgewiesen werden; die Änderungen im *ZFI* zwischen den beiden Jahren beinhalten somit implizit auch die Aktualisierung der Quelldaten. In den Sensitivitätsbetrachtungen

¹ Der wirtschaftliche Wohnsitz einer Person liegt in derjenigen Gemeinde, deren Infrastruktur sie am häufigsten beansprucht, unabhängig davon, wo die Papiere der Person hinterlegt sind.

hingegen sollen die Flugbetriebskomponenten 2022 um die Aktualisierung der Quelldaten bereinigt werden, um ausschliesslich die flugbetrieblichen Änderungen auszuweisen.

Die Resultate sollen in zwei technischen Berichten zuhanden des Auftraggebers dokumentiert werden. Der erste Teilbericht [44] dokumentiert den *ZFI* bzw. dessen Komponenten *HA* und *HSD* für das Jahr 2023 sowie für den *RZ* und die Jahre 2005 bis 2022. Der vorliegende zweite Teilbericht dokumentiert die Sensitivitätsanalyse zwischen dem Berichtsjahr 2023 und dem Vorjahr 2022.

2. Grundlagen und Methodik

In diesem Kapitel wird die Methodik der Sensitivitätsanalyse (Details siehe [5]) zur Untersuchung der Gründe für die Veränderungen des *ZFI* zwischen dem Vorjahr 2022 und dem Berichtsjahr 2023 erläutert. Zwischen den beiden Berechnungsjahren fand eine Aktualisierung der Quelldaten statt (vgl. Kap. 1). In der vorliegenden Sensitivitätsanalyse wird – wie bei der letzten Aktualisierung im Berechnungsjahr 2018 [31-33] – die Quelldatenaktualisierung aus den Berechnungen ausgeschlossen, um ausschliesslich die realen Änderungen im Flugbetrieb zu betrachten (vgl. Kap. 2.2). Im Gegensatz zum Berechnungsjahr 2018 werden hingegen die Fluglärmbelastung sowie die *HA*, die *HSD* und der *ZFI* des Jahres 2022 nicht neu berechnet. Die Differenz im *ZFI* zwischen 2023 und 2022 enthält somit implizit auch die Quelldatenaktualisierung, die Sensitivitätsbetrachtungen hingegen nicht.

In früheren Berichten wurden die Veränderungen der *HA*, der *HSD* sowie des *ZFI* zwischen dem Berichtsjahr und dem Vorjahr bzw. Vergleichsjahr (2000 oder RZ) verglichen sowie deren Gründe ausführlich dokumentiert. Sie können in den entsprechenden Berichten nachgeschlagen werden (Tabelle 2-1). In der vorliegenden Berechnung wurde auf eine detaillierte Sensitivitätsanalyse zwischen dem Berichtsjahr und dem RZ verzichtet. Es wird lediglich der Einfluss der Bevölkerung und des Flugbetriebs als Ganzes auf den *ZFI* untersucht (Kap. 3).

Tabelle 2-1 Übersicht der bisher durchgeführten Sensitivitätsanalysen

Berichtsjahr	Sensitivitätsanalysen	Referenzen
2022	2021 vs. 2022	[41]
2021	2020 vs. 2021	[39]
2020	2019 vs. 2020	[37]
2019	2018 vs. 2019	[35]
2018	2017 vs. 2018	[30]
2017	2016 vs. 2017	[28]
2016	2015 vs. 2016	[26]
2015	2014 vs. 2015	[25]
2014	2013 vs. 2014 RZ vs. 2014	[23]
2013	2012 vs. 2013 RZ vs. 2013	[21]
2012	2011 vs. 2012 2000 vs. 2012	[18]
2011	2010 vs. 2011 2000 vs. 2011	[16]
2010	2009 vs. 2010 2000 vs. 2010	[13]
2009	2008 vs. 2009 2000 vs. 2009	[11]
2008	2007 vs. 2008 2000 vs. 2008	[8]
2007	2006 vs. 2007	[4]
	2000 vs. 2007	[7]
	RZ vs. 2007	[3]
2006	2005 vs. 2006	[5]

2.1. Übersicht

Die Berechnungsvorschrift zur Ermittlung des *ZFI* und deren technische Umsetzung sind in [2] und [44] dokumentiert. Die Sensitivitätsuntersuchungen werden seit dem Berechnungsjahr 2012 [18] unter Berücksichtigung passiver Schallschutzmassnahmen, also gemäss heute offizieller Berechnung nach *ZFI-VO* [47], durchgeführt. Die Sensitivitätsanalyse, deren Methodik im Detail in [5] beschrieben ist, wurde daher seit dem Berichtsjahr 2012 um die Komponente „Passive (Schallschutz-)Massnahmen“ (PM) erweitert. Da der offizielle *ZFI* seit dem Berichtsjahr 2013 die erhöhte Anforderung nach SIA-Norm 181 [46] berücksichtigt, werden diese auch für die Komponente PM verwendet. Bei allen anderen Komponenten werden jedoch Bauten mit PM vereinfacht mit einer einheitlichen Einfügungsdämpfung (*D*) von -25 dB berücksichtigt. Deren Einfluss auf die einzelnen Komponenten ist gering [19]. Daher werden die Komponenten der Sensitivitätsanalyse nicht dem offiziellen Monitoringwert aus [44], sondern einem Vergleichswert gegenübergestellt, welcher einheitlich mit $D = -25$ dB für Bauten mit PM berechnet wird (Index PM_{25}^2). Einzig die Komponente PM, welche unter Berücksichtigung der SIA-Norm 181 ermittelt wird, wird mit dem offiziellen Monitoringwert verglichen.

Grundsätzlich bestimmen die Wohnbevölkerung, die PM sowie die Fluglärmbelastung in den Untersuchungsperimetern die Höhe des *ZFI*. Bei der Fluglärmbelastung beeinflussen folgende vier Faktoren die Lärmimmissionen: (1) die Anzahl Flugbewegungen, (2) die Flugzeugflottenzusammensetzung und deren zeitlicher Einsatz (Flugzeugflotte), (3) die Routenbelegung und (4) die Fluggeometrien bzw. die räumliche Verteilung der Flugwege. Es sind somit sechs Berechnungen nötig, um den Einfluss der einzelnen Komponenten abschätzen zu können. Untenstehende Tabelle 2-2 gibt einen Überblick.

Um den Einfluss dieser Komponenten auf den *ZFI* ermitteln zu können, muss das Set der Eingabedaten zur *ZFI*-Berechnung so angepasst werden, dass jeweils nur die Veränderung einer Komponente sichtbar wird. Dazu wird im Set der Komponenten zur *ZFI*-Berechnung jeweils nur eine Komponente verändert, anschliessend eine *ZFI*-Berechnung durchgeführt und mit der ursprünglichen *ZFI*-Berechnung verglichen (sogenannte *Ceteris Paribus*-Methode). Der Fokus der Veränderungen liegt dabei auf dem Berichtsjahr. Das heisst, sämtliche Inputdaten werden vom Berichtsjahr übernommen, ausser derjenigen, von der die Sensitivität bestimmt werden soll. Dort werden die Inputdaten aus dem Vorjahr verwendet. Damit wird die hypothetische Frage beantwortet: Wie würde sich der *ZFI* vom Vorjahr zum Berichtsjahr verändern, wenn sich nur die Komponente, von der man die Sensitivität bestimmen will, ändern würde? Zur Verständlichkeit ein Beispiel: Will man den Einfluss der Veränderung in der Flugzeugflotte vom Vorjahr 2022 zum Berichtsjahr 2023 bestimmen, so wird eine *ZFI*-Berechnung mit den Inputdaten aus dem Berichtsjahr 2023 durchgeführt, jedoch mit der Flugzeugflotte aus dem Vorjahr 2022. Diese Berechnung wird mit der *ZFI*-Berechnung des Berichtsjahres 2023 verglichen. Daraus lässt sich der Einfluss der Veränderung in der Flugzeugflotte bestimmen, da sich die beiden Berechnungen lediglich bezüglich der Flugzeugflotte unterscheiden.

Abgesehen von den Komponenten Bevölkerung (BEV) und passive Massnahmen (PM) müssen für alle Komponenten neue Fluglärmbelastungen, namentlich der tagesrandstundengewichtete 16-Stunden-

² Bis und mit Berechnungsjahr 2017 wurde der Index PM_{25} als KSL_{25} (für "Komfort- und Schalldämmlüftung") gekennzeichnet. Da seit dem Berechnungsjahr 2018 die passiven Massnahmen auch Fensterschliessmechanismen beinhalten [31], wird der Index verallgemeinert als PM_{25} bezeichnet, welcher alle Arten passiver Massnahmen umfasst.

Mittelungspegel am Tag (Leq^*_{16}), der 8h-Mittelungspegel in der Nacht (Leq_N), sowie die Maximalpegelhäufigkeiten bzw. die Anzahl durch den Fluglärm induzierte zusätzliche Aufwachreaktionen (AWR) der Nacht ermittelt werden, um daraus die HA, die HSD und den ZFI zu berechnen (vgl. Kap. 3 in [44]).

Um den Einfluss der Veränderungen in den Flugbewegungszahlen (BEW), in der Flugzeugflotte (FF) und in der Routenbelegung (RB) zu bestimmen, müssen für die massgebenden Zeitperioden neue Bewegungsstatistiken³ erstellt werden. In den nachfolgenden Kapiteln wird das Vorgehen zur Bestimmung des Einflusses der Veränderungen in den einzelnen Komponenten erläutert. Als Berichtsjahr gilt das Jahr 2023, als Vorjahr das Jahr 2022.

Tabelle 2-2 Zusätzliche Berechnungen zur Bestimmung der Sensitivitäten

Komponente	Abkürzung	ZFI _{BEV_VJ}	ZFI _{PM_VJ}	ZFI _{BEW_VJ}	ZFI _{FF_VJ}	ZFI _{RB_VJ}	ZFI _{FG_VJ}
Bevölkerung	BEV	VJ ¹	BJ ¹	BJ	BJ	BJ	BJ
Passive Massnahmen ²	PM	BJ	VJ	BJ	BJ	BJ	BJ
Flugbewegungszahlen	BEW	BJ	BJ	VJ	BJ	BJ	BJ
Flugzeugflotte	FF	BJ	BJ	BJ	VJ	BJ	BJ
Flugroutenbelegung	RB	BJ	BJ	BJ	BJ	VJ	BJ
Fluggeometrien	FG	BJ	BJ	BJ	BJ	BJ	VJ
Veränderung gegenüber ZFI des Berichtsjahrs		ΔZFI_{BEV}	ΔZFI_{PM}	ΔZFI_{BEW}	ΔZFI_{FF}	ΔZFI_{RB}	ΔZFI_{FG}

¹ VJ = Vorjahr (mit aktualisiertem Quelldatensatz), BJ = Berichtsjahr, $\Delta ZFI_i = ZFI_{BJ} - ZFI_{i,VJ}$ (vgl. Kap. 2.3 bis 2.8)

² PM ist eine zusätzliche Komponente, die implizit schon in BEV enthalten ist (vgl. Kap. 2.4).

2.2. Berücksichtigung der Aktualisierung der Quelldaten

Für die Berechnung des Berichtsjahres 2023 wurde der aktualisierte Datensatz RC2024_01 verwendet [45], während für das Vorjahr der Quelldatensatz RC2022_01 verwendet wurde. Der neue Quelldatensatz bildet die akustisch günstige Entwicklung der Flugzeugflotte ab. Er basiert auf Messungen im Jahr 2022 um den Flughafen Zürich und enthält vier neue (A20N, A21N, DH84 und A3509) und einen aktualisierten (B7878) Flugzeugtyp.

Die neuen Flugzeugtypen werden in der Berechnung des Betriebsjahres 2023 explizit simuliert (*Footprints*), fehlen im Vorjahr 2022 jedoch noch, bzw. sind anderen Typen zugeordnet (A320N → A320, A321N → A321, A3509 → A3303, DH84 → DH8; B7878 neue Quelldaten → frühere Quelldaten). Um eine nach Komponenten getrennte Sensitivitätsanalyse durchführen zu können (namentlich für FF, RB, FG), müssen diese wichtigen Flugzeugtypen des Betriebsjahres 2023 auch im Flottenmix des Vorjahres 2022 explizit ausgewiesen werden. Aus diesem Grund wird ein Teil der *Footprints* neu simuliert. Namentlich werden die typen-, routen- und tageszeitspezifischen Flüge (Radardaten) des Vorjahres 2022, welche die neuen Typen beinhalten, aufgeteilt in die Flüge der neuen Typen (welche bis anhin anderen Typen zugeordnet waren, s.o.) und der übrigen Flüge (alle verbleibenden ohne die neuen Typen). Für diese aufgeteilten Flüge werden die *Footprints* für den Tag (06–22 Uhr) und die Nacht (22–06 Uhr) simuliert. Zudem werden die Bewegungsstatistiken des Jahres 2022 um die neuen Typen ergänzt und die Bewegungen auf die neuen und übrigen

³ Kreuztabelle, welche in den Spaltenköpfen die An- oder Abflugrouten, in den Zeilenköpfen die verschiedenen Flugzeugtypen und in den Feldern die Anzahl Flugbewegungen je Typ und Route enthält.

Flugzeugtypen aufgeteilt. Damit können die Sensitivitäten der Flugbetriebskomponenten basierend auf dem um die Quelledatenaktualisierung bereinigten Flottenmix 2022 berechnet werden. **Die Bereinigung der Flugbetriebskomponenten des Jahres 2022 in den Sensitivitätsanalysen mit dem aktualisiertem Quelledatensatz von FLULA2 (Quelledatensatz RC2024_01 [45]) wird im Nachfolgenden als "2022 (RC24)" bezeichnet.**

Der *ZFI* des Jahres 2022 [42] wird hingegen nicht neu (mit aktualisierten Quelledaten) ermittelt, im Gegensatz zum *ZFI* des Jahres 2018, wo für die Sensitivitätsanalyse als Vorjahr (Referenzzustand) das Jahr 2017 mit aktualisierten Quelledaten verwendet worden war (vgl. [30]). Allerdings war die damalige Aktualisierung grösser (erste grössere Aktualisierung seit dem Berechnungsjahr 2005) und beeinflusste die Fluglärmbelastung bzw. den *ZFI* stärker als die vorliegende Aktualisierung. Der Einfluss der Aktualisierung des Quelledatensatzes (Flottenentwicklung) auf den *ZFI* wird somit aus Sensitivitätsanalysen ausgeschlossen, ist jedoch in der Differenz zwischen den offiziellen *ZFI*-Werten der Jahre 2023 und 2022 implizit enthalten.

2.3. Einfluss von Veränderungen in der Wohnbevölkerung

Um den Einfluss der Veränderungen in der Wohnbevölkerung (BEV) auf den *ZFI* zu bestimmen, wird eine *ZFI*-Berechnung mit der Wohnbevölkerung aus dem Vorjahr durchgeführt. Sämtliche Fluglärm-*Leq*^{*16}, *Leq*_N und *AWR* bzw. die daraus ermittelten %*HA* und %*HSD* werden vom Berichtsjahr übernommen. Der Vergleich mit dem *ZFI* des Berichtsjahres zeigt, wie gross der Einfluss der Veränderungen in der Wohnbevölkerung vom Vorjahr zum Berichtsjahr auf den *ZFI* ist.

Formel 2-1
$$\Delta ZFI_{BEV} = ZFI_{BJ,PM25} - ZFI_{BEV_VJ}$$

ΔZFI_{BEV} Differenz im *ZFI*, die auf die Veränderungen in der Bevölkerungsstruktur zurückzuführen ist.

$ZFI_{BJ,PM25}$ *ZFI* des Berichtsjahres unter Berücksichtigung passiver Massnahmen (*D* = -25 dB).

ZFI_{BEV_VJ} *ZFI* des Berichtsjahres, berechnet mit den Bevölkerungszahlen und unter Berücksichtigung passiver Massnahmen (*D* = -25 dB) des Vorjahres.

Die Komponente BEV umfasst die Entwicklung der Bevölkerungsstruktur als Ganzes, d.h. die Veränderungen in der Bevölkerung insgesamt sowie der Personen in Bauten mit PM (Kap. 2.4) zwischen dem Vorjahr und dem Berichtsjahr. Im Unterschied zu Kap. 2.4 werden hier die PM allerdings vereinfacht mit einer einheitlichen Einfügungsdämpfung von -25 dB berechnet und nicht mit den erhöhten Anforderungen der SIA-Norm 181 [46]. Der methodische Unterschied hierbei ist gering, wobei die Differenz zwischen den Berechnungen über die Jahre zunimmt (2012: 76 Personen [19]; 2023: 640 Personen [44]).

2.4. Einfluss von Veränderungen der passiven Massnahmen

Mit der Berücksichtigung der PM in der Sensitivitätsanalyse kann deren Effizienz, d.h. deren (verminderten) Einfluss auf die rechnerisch ermittelten *HSD* und den *ZFI* quantifiziert werden. Um den Einfluss der Veränderungen der PM auf den *ZFI* zu bestimmen, wird eine *ZFI*-Berechnung mit der Wohnbevölkerung aus dem Berichtsjahr unter Berücksichtigung der Bevölkerung in Bauten mit PM des Vorjahrs durchgeführt. Hierbei werden sowohl für das Berichtsjahr als auch für das Vorjahr die erhöhten Anforderungen der SIA-Norm 181 [46] berücksichtigt, um den Einfluss der passiven Massnahmen möglichst genau zu bestimmen. Sämtliche Fluglärm-*Leq*^{*16}, *Leq*_N und *AWR* bzw. die daraus ermittelten %*HA* und %*HSD* werden vom Berichtsjahr übernommen. Der Vergleich mit dem *ZFI* des Berichtsjahres zeigt, wie gross der Einfluss der

Veränderungen passiver Massnahmen vom Vorjahr zum Berichtsjahr auf den *ZFI* ist. Man beachte, dass die passiven Massnahmen nur die *HSD*, nicht aber die *HA* beeinflussen (vgl. Kap. 3.2.4 in [44]).

Formel 2-2 $\Delta ZFI_{PM} = ZFI_{BJ} - ZFI_{PM_VJ}$

ΔZFI_{PM} Differenz im *ZFI*, die auf die Veränderungen von passiven Massnahmen zurückzuführen ist.

ZFI_{BJ} *ZFI* des Berichtsjahres unter Berücksichtigung passiver Massnahmen mit erhöhten Anforderungen der SIA-Norm 181.

ZFI_{PM_VJ} *ZFI* des Berichtsjahres, berechnet mit den Bevölkerungszahlen des Berichtsjahres und den passiven Massnahmen des Vorjahres unter Berücksichtigung der erhöhten Anforderungen der SIA-Norm 181.

Mithilfe der Komponente PM wird die Effizienz der seit dem Vorjahr erstellten passiven Massnahmen quantifiziert, den *ZFI* zu vermindern. Diese Komponente ist implizit (allerdings ohne Berücksichtigung der erhöhten Anforderungen nach SIA-Norm 181) in der Komponente BEV enthalten, da BEV sowohl die Veränderung in der Gesamtbevölkerung inkl. der Bevölkerung in Bauten mit PM ausweist (Kap. 2.3). Analog dazu sind auch die Komponenten BEW, FF, RB und FG implizit im Flugbetrieb als Ganzes enthalten (vgl. Kap. 2.9).

2.5. Einfluss von Veränderungen in den Flugbewegungszahlen

Um den Einfluss der Veränderungen in den Flugbewegungszahlen (BEW) auf den *ZFI* zu bestimmen, werden Fluglärmrechnungen mit den Bewegungszahlen des Vorjahres durchgeführt. Dabei werden lediglich die Gesamtbewegungszahlen, getrennt nach Starts und Landungen, pro Zeitperiode vom Vorjahr übernommen, die übrigen Flugbetriebsparameter jedoch unverändert belassen. Dazu werden neue Bewegungsstatistiken generiert. Mit den modifizierten Bewegungsstatistiken werden der Leq^{*}_{16} , der Leq_N und die *AWR* neu berechnet und daraus die *%HA* und die *%HSD* neu ermittelt. Diese werden mit der Wohnbevölkerung des Berichtsjahres multipliziert, und man erhält die *HA*, die *HSD* und damit den *ZFI*. Die Differenz dieser Berechnung zum *ZFI* des Berichtsjahres ist hauptsächlich auf die Veränderungen in den Bewegungszahlen zurückzuführen.

Formel 2-3 $\Delta ZFI_{BEW} = ZFI_{BJ,PM25} - ZFI_{BEW_VJ}$

ΔZFI_{BEW} Differenz im *ZFI*, die auf die Veränderungen in den Flugbewegungen zurückzuführen ist.

$ZFI_{BJ,PM25}$ *ZFI* des Berichtsjahres unter Berücksichtigung passiver Massnahmen ($D = -25\text{dB}$).

ZFI_{BEW_VJ} *ZFI* des Berichtsjahres, berechnet mit den Flugbewegungszahlen des Vorjahres unter Berücksichtigung passiver Massnahmen ($D = -25\text{dB}$) des Berichtsjahres.

2.6. Einfluss von Veränderungen in der Flugzeugflotte

Unter Veränderungen in der Flugzeugflotte (FF) fallen sowohl Veränderungen in der Flottenzusammensetzung als auch Veränderungen im zeitlichen Einsatz der Flotte. Um den Einfluss dieser Veränderungen auf den *ZFI* zu bestimmen, werden Fluglärmrechnungen durchgeführt, bei denen die Flugzeugflotte des Berichtsjahres an diejenige des Vorjahres angepasst wird. Dazu werden neue Bewegungsstatistiken generiert, die sich lediglich in der Zusammensetzung und im Einsatz der Flugzeugflotte von denjenigen des Berichtsjahres unterscheiden. Mit den neu erstellten Bewegungsstatistiken werden der Leq^{*}_{16} , der Leq_N und die *AWR* neu berechnet und daraus die *%HA* und die *%HSD* neu ermittelt. Diese werden mit der Wohnbevölke-

zung des Berichtsjahres multipliziert, und man erhält die *HA*, die *HSD* und damit den *ZFI*. Die Differenz dieser Berechnung zum *ZFI* des Berichtsjahres ist hauptsächlich auf die Veränderungen in der Flugzeugflotte zurückzuführen.

Formel 2-4 $\Delta ZFI_{FF} = ZFI_{BJ,PM25} - ZFI_{FF_VJ}$

ΔZFI_{FF} Differenz im *ZFI*, die auf die Veränderungen in der Flugzeugflotte zurückzuführen ist.

$ZFI_{BJ,PM25}$ *ZFI* des Berichtsjahres unter Berücksichtigung passiver Massnahmen ($D = -25\text{dB}$).

ZFI_{FF_VJ} *ZFI* des Berichtsjahres, berechnet mit der Flugzeugflotte des Vorjahres unter Berücksichtigung passiver Massnahmen ($D = -25\text{dB}$) des Berichtsjahres.

2.7. Einfluss von Veränderungen in der Flugroutenbelegung

Um den Einfluss der Veränderungen in der Flugroutenbelegung (RB) auf den *ZFI* zu bestimmen, werden neue Fluglärmrechnungen durchgeführt, bei denen die Routenbelegung des Berichtsjahres derjenigen des Vorjahres angepasst wird. Dazu werden neue Bewegungsstatistiken generiert, die sich lediglich in der Routenbelegung von jenen des Berichtsjahres unterscheiden. Mit den neu erstellten Bewegungsstatistiken werden der Leq^*_{16} , der Leq_N und die *AWR* neu berechnet und daraus die *%HA* und die *%HSD* neu ermittelt. Durch Multiplikation mit der Wohnbevölkerung des Berichtsjahres erhält man die *HA*, die *HSD* und damit den *ZFI*. Die Differenz dieser Berechnung zum *ZFI* des Berichtsjahres ist hauptsächlich auf die Veränderungen in der Routenbelegung zurückzuführen.

Formel 2-5 $\Delta ZFI_{RB} = ZFI_{BJ,PM25} - ZFI_{RB_VJ}$

ΔZFI_{RB} Differenz im *ZFI*, die auf die Veränderungen in der Routenbelegung zurückzuführen ist.

$ZFI_{BJ,PM25}$ *ZFI* des Berichtsjahres unter Berücksichtigung passiver Massnahmen ($D = -25\text{dB}$).

ZFI_{RB_VJ} *ZFI* des Berichtsjahres, berechnet mit der Routenbelegung des Vorjahres unter Berücksichtigung passiver Massnahmen ($D = -25\text{dB}$) des Berichtsjahres.

2.8. Einfluss von Veränderungen in den Fluggeometrien

Um den Einfluss der Veränderungen in den Fluggeometrien (FG), d.h. der Veränderungen in Lage und Verlauf der Flugbahnen im Raum, auf den *ZFI* zu bestimmen, werden ebenfalls neue Fluglärmrechnungen durchgeführt. Dazu werden anstelle der *Footprints*⁴ des Berichtsjahres diejenigen des Vorjahres (ergänzt mit neuen *Footprints* für den aktualisierten Quellendatensatz, vgl. Kap 2.2) verwendet. Da die *Footprints* auf den Radardaten des Vorjahres basieren, werden somit bei der Berechnung der Fluglärmbelastungen implizit die Fluggeometrien aus dem Vorjahr berücksichtigt. Zur Hochrechnung der *Footprints* zur Gesamtbelastung (sogenannte Superposition) werden die Bewegungsstatistiken des Berichtsjahres benutzt. Somit wird bezüglich der Flugbewegungszahlen, der Flugzeugflotte und der Flugroutenbelegung gegenüber der *ZFI*-Berechnung des Berichtsjahres nichts verändert. Bei fehlenden *Footprints*, d.h. wenn ein Flugzeugtyp auf einer bestimmten Flugroute in den Bewegungsstatistiken des Berichtsjahres vorkommt, aber in denjenigen des Vorjahres fehlt, werden bei der Analyse der Veränderungen zwischen dem Berichtsjahr 2023 und dem Vorjahr 2022 die *Footprints* des Jahres 2023 verwendet.

⁴ Typen- und routenspezifisches Belastungsfile, welches die Schallenergie (Ereignispegel L_{AE} oder Maximalpegel $L_{A,max}$) enthält, normiert auf eine Bewegung eines bestimmten Flugzeugtyps auf einer vorgegebenen Route und evtl. während einer bestimmten Zeitperiode.

Mit den so ermittelten Fluglärmbelastungen werden die %HA und die %HSD bestimmt und durch Multiplikation mit der Wohnbevölkerung des Berichtsjahres die HA, die HSD und damit der ZFI berechnet. Der Vergleich dieser Berechnung mit dem ZFI des Berichtsjahres zeigt den Einfluss der Veränderungen in den Fluggeometrien.

Formel 2-6
$$\Delta ZFI_{FG} = ZFI_{BJ,PM25} - ZFI_{FG_VJ}$$

ΔZFI_{FG} Differenz im ZFI, die auf die Veränderungen in den Fluggeometrien zurückzuführen ist.

$ZFI_{BJ,PM25}$ ZFI des Berichtsjahres unter Berücksichtigung passiver Massnahmen ($D = -25\text{dB}$).

ZFI_{BEV_VJ} ZFI des Berichtsjahres, berechnet mit den Fluggeometrien des Vorjahres unter Berücksichtigung passiver Massnahmen ($D = -25\text{dB}$) des Berichtsjahres.

2.9. Rangfolge der Einflussgrössen

Mit der Sensitivitätsanalyse wird der Einfluss von Veränderungen in den einzelnen Komponenten auf den ZFI abgeschätzt. Insbesondere interessiert dabei, welche Komponente wie stark zur Gesamtdifferenz im ZFI vom Vor- zum Berichtsjahr beiträgt. Es soll somit eine Rangfolge der Einflussgrössen erstellt werden.

In der Sensitivitätsanalyse lassen sich zwei Hauptkomponenten identifizieren, nämlich die Bevölkerung als Ganzes (BEV, welche implizit auch PM enthält, vgl. Kap. 2.3 und 2.4) sowie der Flugbetrieb als Ganzes. Grundsätzlich lassen sich lediglich diese beiden Komponenten unabhängig voneinander betrachten, da der Flugbetrieb nicht von der Bevölkerungsstruktur um den Flughafen abhängt und umgekehrt. Die Sensitivitätsanalyse der Bevölkerung (BEV, Kap. 2.3) zeigt, welchen Wert der ZFI des Berichtsjahres angenommen hätte, wenn sich der Flugbetrieb seit dem Vorjahr nicht verändert hätte (ZFI_{BEV_VJ}). Die Differenz zwischen der effektiven Änderung vom Vorjahr zum Berichtsjahr (ΔZFI_{PM25}) und der Änderung durch die Bevölkerung (ΔZFI_{BEV}) ist auf die Änderung des Flugbetriebs als Ganzes zurückzuführen:

Formel 2-7
$$\Delta ZFI_{FB} = \Delta ZFI_{PM25} - \Delta ZFI_{BEV}$$

ΔZFI_{FB} Differenz im ZFI, die auf die Veränderungen im Flugbetrieb zurückzuführen ist.

ΔZFI_{PM25} Differenz im ZFI zwischen dem Berichtsjahr und dem Vorjahr unter Berücksichtigung passiver Massnahmen, mit $D = -25\text{dB}$.

ΔZFI_{BEV} Differenz im ZFI, die auf die Veränderungen in der Bevölkerungsstruktur zurückzuführen ist, inkl. Veränderungen der passiven Massnahmen zwischen Berichts- und Vorjahr mit $D = -25\text{dB}$.

Die Sensitivitätsanalyse vermag somit die Anteile der Komponenten Bevölkerung und Flugbetrieb an der Veränderung des ZFI zwischen Berichts- und Vorjahr zu quantifizieren. Der Einfluss der beiden Komponenten auf Veränderungen im ZFI wird im Detail in Kapitel 3 diskutiert.

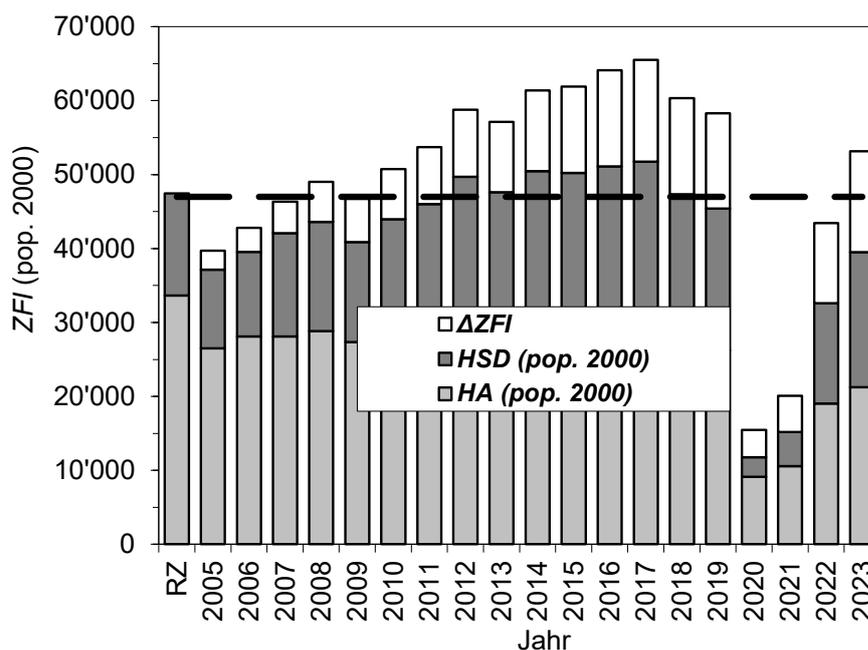
Hingegen hängen die einzelnen Flugbetriebskomponenten (BEW, FF, RB, FG) stark voneinander ab. So kann beispielsweise die Gesamtbewegungszahl nicht beliebig erhöht werden, ohne dass die Routenbelegung betrieblich entsprechend angepasst wird. Dementsprechend lassen sich die Flugbetriebskomponenten auch in der Sensitivitätsanalyse nur bedingt isoliert betrachten. Die Summe der Anteile der einzelnen Flugbetriebskomponenten kann denn auch vom Anteil des Flugbetriebs als Ganzes abweichen, da allfällige Abhängigkeiten bzw. Interaktionen zwischen den Komponenten in der Sensitivitätsanalyse unberücksichtigt bleiben. Die Sensitivitätsanalyse erlaubt jedoch, die relative Wichtigkeit der Komponenten BEW, FF, RB, und FG im Sinne einer Rangfolge zu ermitteln, indem die Komponenten anhand der Differenzen ΔZFI_{BEW} , ΔZFI_{FF} , ΔZFI_{RB} und ΔZFI_{FG} (Kap. 2.5 bis 2.8) geordnet werden. Die Absolutwerte der einzelnen Differenzen sind jedoch nur bedingt aussagekräftig. Zudem enthalten sie die Aktualisierung der Quelldaten zwischen den

Jahren 2022 und 2023 nicht, die Differenzen zwischen den beiden Berechnungsjahren (ΔZFI_{PM25}) hingegen schon (vgl. Kap. 2.2), was beim Vergleich dieser Differenzen berücksichtigt werden muss.

3. Einfluss der Veränderungen in der Bevölkerung und im Flugbetrieb auf die Entwicklung des *ZFI*

Die räumlichen Veränderungen in den *HA*, den *HSD* und im *ZFI* zwischen dem RZ und 2023 werden auf den Karten 4 bis 6 am Ende des vorliegenden Berichtes dargestellt. Die Entwicklung des *ZFI* wird durch die Veränderungen in der Bevölkerung und im Flugbetrieb bestimmt (Kap. 2). Um den Beitrag dieser Komponenten zu den Differenzen zwischen dem *ZFI*-Monitoringwert (2005 bis 2023) und dem RZ, welcher den Richtwert von 47'000 Personen bestimmt [47], zu untersuchen, wurde in einem ersten Schritt der Einfluss des Bevölkerungswachstums und der Entwicklung des Flugbetriebs als Ganzes auf den *ZFI* ermittelt (Abbildung 3-1). Hierzu wurde der *ZFI* für die Jahre 2005 bis 2023 wie für den RZ mit den Bevölkerungsdaten des Jahres 2000 berechnet (Sensitivität BEV, vgl. Kap. 2.2).

Ohne Bevölkerungswachstum seit dem Jahr 2000 wäre der *ZFI* deutlich geringer und hätte bis und mit 2011 den Richtwert nicht überschritten (Abbildung 3-1), in den Jahren 2012 bis 2018 hingegen schon. In den Jahren 2019 bis 2023 hätte der *ZFI* ohne Bevölkerungswachstum den Richtwert erneut eingehalten, 2020 bis 2023 sehr deutlich. Offensichtlich fand – bis im Jahr 2011 sowie ab dem Jahr 2019 – eine Kompensation des Bevölkerungswachstums seit dem Jahr 2000 statt, ansonsten wäre der *ZFI* seit dem RZ kontinuierlich angestiegen: Der *ZFI* wächst alleine durch die Bevölkerungsentwicklung um den Flughafen Zürich jedes Jahr um 1–2%, wie die Sensitivitätsanalysen der letzten Jahre zeigten. Hierbei ist zu beachten, dass zwischen 2017 und 2018 durch die neue Berücksichtigung der Fensterschliessmechanismen in den PM (vgl. [31]) sowie zwischen 2018 und 2019 durch die Berücksichtigung aller Gebäude mit Baujahr 2017 und jünger als Bauten mit PM (vgl. Kap. 3.2.5 in [36]) der Anstieg der *HSD* bzw. des *ZFI* rechnerisch etwas reduziert wurde, während zwischen 2020 und 2021 durch die Berücksichtigung nur noch derjenigen Gebäude mit Baujahr 2017 und jünger als Bauten mit PM, welche abhängig von der massgebenden Fluglärmbelastung gewisse Anforderungen an die PM erfüllen (vgl. Kap. 3.2.5 in [40]), der Anstieg rechnerisch wieder etwas erhöht wurde. Die oben erwähnte Kompensation des Bevölkerungswachstums ist auf eine im Vergleich zum RZ günstige (d.h. den *ZFI* vermindern) Entwicklung des Flugbetriebs zurückzuführen. In Abbildung 3-1 fällt auf, dass die *HA*, *HSD* bzw. der *ZFI* ohne Bevölkerungswachstum von 2017 bis 2020 sichtbar sanken, von 2020 bis 2023 hingegen wieder anstiegen. Insbesondere ist zwischen den Jahren 2019 und 2020 durch die COVID-19 Situation ein massiver Einbruch des *ZFI* und dessen Komponenten *HA* und *HSD* auszumachen, welcher aufgrund der allmählichen Erholung von der COVID-19 Situation von 2020 zu 2023 wieder rückläufig ist. Der Grund für diese massiven Veränderungen sind die Flugbewegungszahlen, welche 2020 noch 37% (Tag: 38%, Nacht: 24%) der Bewegungen des Jahres 2019 entsprachen, bis 2023 jedoch wieder auf 89% (Tag: 89%, Nacht: 105%) der Bewegungen des Jahres 2019 anstiegen. Der Richtwert wird in den Jahren 2020 bis 2022 mit und ohne Bevölkerungswachstum deutlich eingehalten, im Jahr 2023 jedoch mit Bevölkerungswachstum wieder klar überschritten (Abbildung 3-1). In Abbildung 3-1 ist zu berücksichtigen, dass das tatsächliche Wachstum des *ZFI* zwischen 2022 und 2023 wegen der methodischen Änderung des aktualisierten Quellendatensatzes (Kap. 2.2) etwas kompensiert wird. Die Kompensation des Bevölkerungswachstums durch den Flugbetrieb in den letzten Jahren wird im Folgenden detaillierter untersucht.

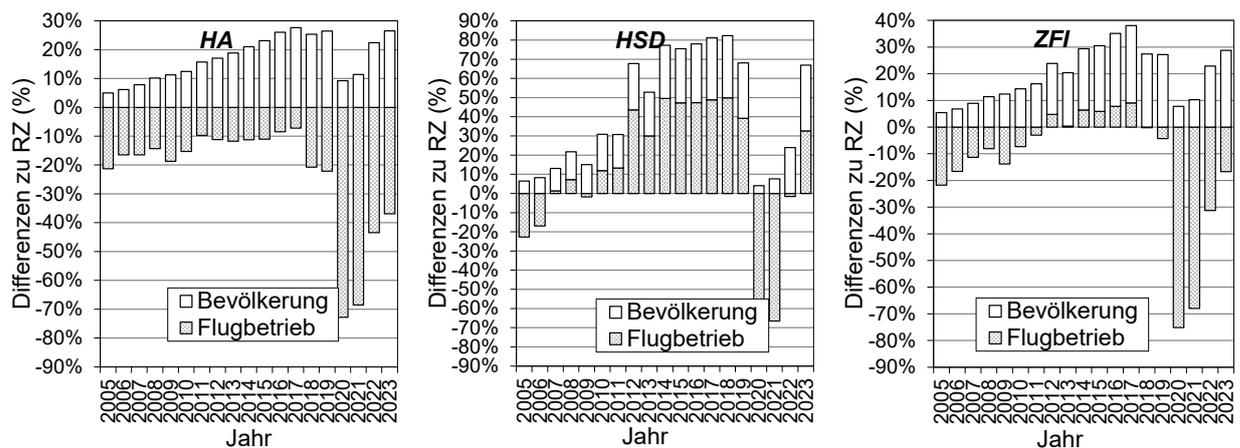


[ZFI_RZ_05-23_SensBEV_FB_zuRZ.xlsx / ZFI_SENS_BEV]

Abbildung 3-1 Der ZFI als Summe der HA und HSD für den RZ sowie die Jahre 2005 bis 2023, basierend auf den Bevölkerungsdaten des Jahres 2000 (pop. 2000), und Differenzen (ΔZFI) zu den offiziellen Werten, mit Bevölkerungsdaten der entsprechenden Jahre (vgl. Abbildung 5-4 aus [44]). **Fette gestrichelte Linie: Richtwert (47'000 Personen).**

Abbildung 3-2 zeigt die relativen Veränderungen in den HA, den HSD und im ZFI zwischen dem RZ und den Jahren 2005 bis 2023, welche durch das Bevölkerungswachstum (ΔZFI in Abbildung 3-1) sowie durch die Entwicklung im Flugbetrieb verursacht wurden. Letztere ergeben sich als verbleibende Differenzen zwischen den ZFI-Werten der entsprechenden Jahre ohne Bevölkerungswachstum [= HA (pop. 2000) + HSD (pop. 2000) in Abbildung 3-1] und dem RZ.

Am Tag (HA) kompensierte die Entwicklung des Flugbetriebs das Bevölkerungswachstum zwischen 2005 und 2022 mehr als vollständig (2005–2010, 2020–2023) oder teilweise (2011–2019). Während der Nacht (HSD) fand eine solche Kompensation bisher nur für die Jahre 2005, 2006, 2009 und 2020 bis 2022 statt. In den anderen Jahren – inklusive dem Betriebsjahr 2023 – erhöhte die Entwicklung des Flugbetriebs die HSD hingegen. In der Summe (ZFI) vermochte der Flugbetrieb das Bevölkerungswachstum seit dem Jahr 2000 in den Jahren 2008, 2010, 2011, 2018, 2019 und 2023 nicht vollständig zu kompensieren und trug in den Jahren 2012 bis 2017 sogar zum Wachstum des ZFI bei. In den Jahren 2005 bis 2007, 2009 und insbesondere 2020 bis 2022 wird das Bevölkerungswachstum jedoch kompensiert. Es fällt auf, dass neben den Jahren 2020 bis 2023 (geprägt von der COVID-19 Situation) der Flugbetrieb auch in den (pre-COVID-19) Jahren 2018 und 2019 das Bevölkerungswachstum wieder zu einem kleinen Teil kompensierte. War die Kompensation im Jahr 2018 noch marginal, war sie im Berichtsjahr 2019 deutlich sichtbar, verringert sich aber nach 2020 wieder kontinuierlich. Ob dieser Trend nach vollständiger Erholung von der COVID-19 Situation und dem damit einhergehenden Einbruch der Flugbewegungszahlen anhält, wird sich in den nächsten Jahren zeigen.



[ZFI_RZ_05-23_SensBEV_FB_zuRZ.xlsx / ZFI_SENS_BEV]

Abbildung 3-2 Einfluss der Änderungen in der Bevölkerung und im Flugbetrieb zwischen dem RZ und den Jahren 2005 bis 2023 auf den ZFI: Differenzen (in %, relativ zu den Werten des RZ) in den HA, HSD und dem ZFI.

Die Überschreitung des Richtwerts in den Vorjahren ist somit in mehreren Fällen durch das Bevölkerungswachstum seit dem Jahr 2000 zu erklären (Abbildung 3-1). Die positive, den ZFI vermindernde Flugbetriebsentwicklung im Vergleich zum RZ verringerte sich über die Jahre graduell und war in den Jahren 2012 bis 2017 nicht mehr feststellbar. In diesen Jahren war der Flugbetrieb am Tag zwar noch immer günstiger, in der Nacht hingegen deutlich ungünstiger und daher insgesamt, d.h. bezüglich des ZFI, ungünstiger als im RZ. Seit dem Jahr 2018 ist wegen des deutlich günstigeren Flugbetriebs am Tag (und 2020 und 2021 auch in der Nacht) die Kompensation des Bevölkerungswachstums im ZFI wieder feststellbar. Diese positive Entwicklung ist einerseits auf die Aktualisierung des Quelldatensatzes des Fluglärmrechnungsprogramms FLULA2 [34] zwischen 2017 [29] und 2018 [32] sowie – in etwas geringerem Ausmass – auch zwischen 2022 [43] und 2023 [45] (Berücksichtigung der akustisch günstigen Entwicklung der Flugzeugflotte bzw. der Flugverfahren in den letzten Jahren: Details siehe [31]) und andererseits auf die Abnahme der Flugbewegungszahlen zwischen 2018 und 2020 bei bis anhin nicht vollständiger Erholung zwischen 2020 und 2023 zurückzuführen (vgl. nachfolgendes Kap. 4), wobei im Jahr 2023 in der Nacht die Kompensation des Bevölkerungswachstums (HSD) bereits wieder verschwunden ist und der Flugbetrieb zum Wachstum im ZFI beiträgt.

4. Sensitivitätsanalyse ZFI vom Vorjahr 2022 zum Berichtsjahr 2023

Im Folgenden werden die Differenzen im ZFI zwischen dem Vorjahr 2022 und dem Berichtsjahr 2023 bezüglich der sechs Komponenten Bevölkerung, passive Massnahmen, Flugbewegungszahlen, Flugzeugflotte, Routenbelegung und Fluggeometrien untersucht. Die HA, HSD und der ZFI dieser Sensitivitätsanalyse werden in einer Access-Datenbank [ZFI23_SENS22.mdb] hektarpunktspezifisch berechnet und verwaltet. Die pro Gemeinde zusammengefassten Daten befinden sich in einer Excel-Datei [ZFI23_SENS22.xlsx].

4.1. Veränderung im ZFI vom Vorjahr 2022 zum Berichtsjahr 2023

Wie in Kap. 2.1 aufgeführt, wird seit dem Berichtsjahr 2012 in der Sensitivitätsanalyse der ZFI-Wert unter Berücksichtigung von Bauten mit PM als Vergleichswert verwendet, allerdings vereinfacht, d.h. ohne Berücksichtigung der erhöhten Anforderungen der SIA-Norm 181 [46]. Zusätzlich wird die Komponente PM untersucht. **Die im Folgenden für den Vergleich mit den Sensitivitätskomponenten ausgewiesenen Werte für das Berichtsjahr 2023 (Index: PM25; vgl. Fussnote²) entsprechen daher nicht den offiziellen Monitoringwerten, wie sie in [44] dokumentiert sind. Zudem werden einmalig die Berechnungen nicht auf die ursprüngliche Berechnung des ZFI des Vorjahres 2022 bezogen, sondern auf die Neuberechnung der einzelnen Flugbetriebskomponenten des ZFI 2022 mit aktualisiertem Quelldatensatz von FLULA2 (Bezeichnung "2022 (RC24)" in den untenstehenden Tabellen und Abbildungen: vgl. Kap. 2.2).**

Die HA, die HSD und somit der ZFI des Jahres 2023 (ohne Anforderungen nach SIA-Norm 181) nahmen seit dem Jahr 2022 um 13%, 37% bzw. 23% zu (Tabelle 4-1). In dieser Differenz ist implizit auch die Aktualisierung des Quelldatensatzes enthalten (vgl. Kap. 2.2).

Tabelle 4-1 Veränderungen bei den HA, HSD und dem ZFI vom Jahr 2022 zum Jahr 2023

Jahr		HA	HSD	ZFI	
2023		30'165	23'648	53'813	= ZFI _{23,PM25}
2022		26'593	17'310	43'903	= ZFI _{22,PM25}
Veränderung	absolut	+3'572	+6'338	+9'910	= ΔZFI _{PM25}
	prozentual	+13%	+37%	+23%	

Um die Veränderungen im ZFI vom Jahr 2022 zum Jahr 2023 auch räumlich analysieren zu können, werden die Differenzen in den HA, den HSD und im ZFI zwischen den Jahren 2022 [42] und 2023 [45] auf den Karten 1 bis 3 am Ende des vorliegenden Berichts dargestellt. Die Karten zeigen dabei die Veränderungen zwischen den offiziellen Monitoringwerten 2022 und 2023, d.h. inklusive der methodischen Veränderung des aktualisierten Quelldatensatzes (Kap. 2.2). Die räumlichen Verteilungen der HA, der HSD und des ZFI im Jahr 2023 finden sich auf den Karten 2 bis 4 des ersten Teilberichts [45] und diejenigen des Jahres 2022 auf den entsprechenden Karten von [42]. In den nachfolgenden Kapiteln wird ergründet, welche Komponente wie stark zu den in Tabelle 4-1 und in den Karten 1 bis 3 ausgewiesenen Differenzen beiträgt.

4.2. Einfluss von Veränderungen in der Bevölkerung

4.2.1. Einfluss von Veränderungen in der Wohnbevölkerung

Die Bevölkerung innerhalb der Untersuchungsperimeter des Jahres 2023 nahm von 2022 zu 2023 am Tag und in der Nacht um je rund 2% zu (Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2 Veränderungen der Bevölkerung innerhalb der Untersuchungsperimeter (UP) 2023 von 2022 zu 2023

Bevölkerung	UP	Anzahl Personen im UP Tag (06–22 h)	Anzahl Personen im UP Nacht (22–06 h)
2023	2023	379'663	296'277
2022	2023	373'978	291'802
Veränderung	absolut	+5'685	+4'475
	prozentual	+2%	+2%

Der Anstieg der Bevölkerung in den Untersuchungsperimetern bewirkt einen Anstieg der *HA*, der *HSD* und insgesamt des *ZFI* um je 1% (Tabelle 4-3: $ZFI_{BEV,22} = 100\%$; vergleiche auch Tabelle 8-1 im Anhang, Kap. 8).

Tabelle 4-3 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2023, berechnet mit den Bevölkerungszahlen und passiven Schallschutzmassnahmen von 2023 bzw. 2022

Bevölkerung	Belastung	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2023	2023	30'165	23'648	53'813	= $ZFI_{23,PM25}$
2022	2023	29'720	23'380	53'101	= $ZFI_{BEV,22}$
Veränderung	absolut	+445	+267	+712	= ΔZFI_{BEV}
	prozentual	+1%	+1%	+1%	

4.2.2. Einfluss von Veränderungen der passiven Massnahmen

Die Zunahme passiver Massnahmen im Jahr 2023 im Vergleich zu 2022 führte zu einer Reduktion der *HSD* resp. des *ZFI* um 42 Personen (Tabelle 4-4). Die Komponente PM ist in vereinfachter Form, d.h. unter Berücksichtigung einer einheitlichen Einfügungsdämpfung von –25 dB, implizit in der Komponente BEV enthalten (Kap. 2.3 und 2.4).

Tabelle 4-4 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2023, berechnet mit den passiven Schallschutzmassnahmen von 2023 bzw. 2022 unter Berücksichtigung der erhöhten Anforderungen nach SIA-Norm 181 [46]

Passive Massnahmen	Restliche Inputdaten	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2023	2023	30'165	23'008	53'173	= ZFI_{23}
2022	2023	30'165	23'050	53'215	= $ZFI_{PM,22}$
Veränderung	absolut	0	–42	–42	= ΔZFI_{PM}
	prozentual	0%	0%	0%	

4.3. Einfluss von Veränderungen im Flugbetrieb

4.3.1. Einfluss von Veränderungen der Flugbewegungszahlen

Die Flugbewegungszahlen nahmen von 2022 zu 2023 deutlich zu, am Tag insgesamt um 16% und in der Nacht um 35% zu (Tabelle 4-5). In der ersten und letzten Tagesstunde nahmen die Bewegungen um 26% bzw. um 23% zu (vgl. Abbildung 4-1 in [45]).

Tabelle 4-5 Veränderungen der Flugbewegungszahlen von 2022 zu 2023

Jahr	Tag (06–22 h)	Erste Tagesstunde (06–07 h)	Letzte Tagesstunde (21–22 h)	Nacht (22–06 h)	Total (Tag + Nacht)	
2023	217'665	7'890	14'564	13'480	231'145	
2022	187'912	6'242	11'844	10'012	197'924	
Veränderung	absolut	+29'753	+1'648	+2'720	+3'468	+33'221
	prozentual	+16%	+26%	+23%	+35%	+17%

Die steigenden Bewegungszahlen führten zu einer Zunahme der *HA* am Tag um 17% und der *HSD* in der Nacht um 50%, was zu einer Zunahme im *ZFI* von insgesamt 29% führte.

Tabelle 4-6 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2022, berechnet mit den Bewegungszahlen von 2023 bzw. 2022 (RC24)

Bewegungszahlen	Restliche Inputdaten	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2023	2023	30'165	23'648	53'813	= <i>ZFI</i> _{23,PM25}
2022 (RC24)	2023	25'837	15'753	41'590	= <i>ZFI</i> _{BEW,22}
Veränderung	absolut	+4'328	+7'894	+12'223	= Δ <i>ZFI</i> _{BEW}
	prozentual	+17%	+50%	+29%	

4.3.2. Einfluss von Veränderungen in der Zusammensetzung und im Einsatz der Flugzeugflotte

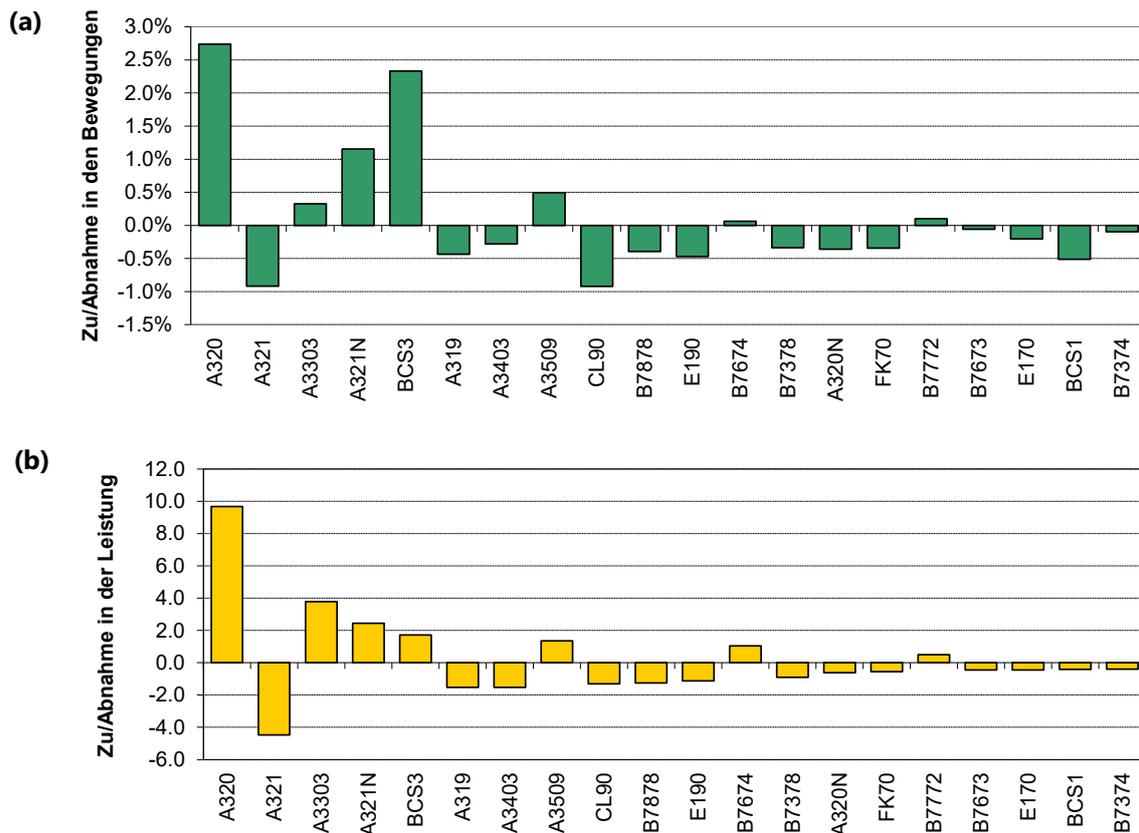
Die Veränderungen in der Flugzeugflotte im Jahr 2023 im Vergleich zum Jahr 2022 beeinflusste am Tag die *HA* kaum (marginale Abnahme um 73 Personen bzw. um -0.2%), verminderte in der Nacht jedoch die *HSD* deutlich um 1'365 Personen (-5%) und insgesamt den *ZFI* um 1'439 Personen (-3%). (Tabelle 4-7).

Tabelle 4-7 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2023, berechnet mit der Flugzeugflotte von 2023 bzw. 2022 (RC24)

Flugzeugflotte	Restliche Inputdaten	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2023	2023	30'165	23'648	53'813	= <i>ZFI</i> _{23,PM25}
2022 (RC24)	2023	30'238	25'013	55'251	= <i>ZFI</i> _{FF,22}
Veränderung	Absolut	-73	-1'365	-1'439	= Δ <i>ZFI</i> _{FF}
	prozentual	0%	-5%	-3%	

Abbildung 4-1 zeigt die Veränderungen in den Bewegungszahlen und der Schallenergie⁵ pro Flugzeugtyp am Tag vom Jahr 2022 zum Jahr 2023. Hierbei werden 20 akustische Flugzeugtypen dargestellt, sortiert nach absteigender (absoluter) Veränderung der Schallenergie (akustische Typenzuordnung nach [10]). Insgesamt stieg am Tag die Summe der Schallenergie aller Flugzeugtypen vom Jahr 2022 zum Jahr 2023 um 1%, was die HA jedoch kaum beeinflusste (Abnahme um 73 Personen bzw. 0.2%: Tabelle 4-7). Dass es trotz leichter Zunahme in der Schallenergie zu einer geringen Abnahme in der HA kam, dürfte auf Unterschiede in den Fluggeometrien der Flugzeuge zurückzuführen sein, deren Einfluss auf die Resultate der Sensitivitätsbetrachtung der Flugzeugflotte sich nicht vollständig vermeiden lassen (vgl. auch Kap. 2.9). Dies beobachtete man auch in früheren Sensitivitätsanalysen, z.B. in der Sensitivitätsanalyse des Jahres 2008 zum Jahr 2000 (Ersatz MD11 durch A3403 [8]) oder des Jahres 2021 zum Jahr 2020 [39]. Die Zunahme der Schallenergie zwischen den Jahren 2022 und 2023 ist auf die Veränderungen in der Zusammensetzung und im Einsatz der Flugzeugflotte zurückzuführen. Diese haben verschiedene Ursachen. Zwischen 2022 und 2023 stieg insgesamt der Flugverkehr erneut stark an; gleichzeitig wurden Flottenerneuerungen vorangetrieben, aber auch Flugzeuge aus der Zwischenlagerung zurückgeholt und wieder integriert. Besonders nahm am Tag der Anteil bzw. die Schallenergie der A320 und A3303, aber auch der (akustisch günstigen) A321N und BCS3 im Vergleich zum Vorjahr zu (Abbildung 4-1). Die Zunahme der A320 dürfte unter anderem auf den vermehrten Einsatz des A320ceo zur Erhöhung der Sitzkapazität bei SWISS zurückzuführen sein; die Zunahme des A321N ebenso.

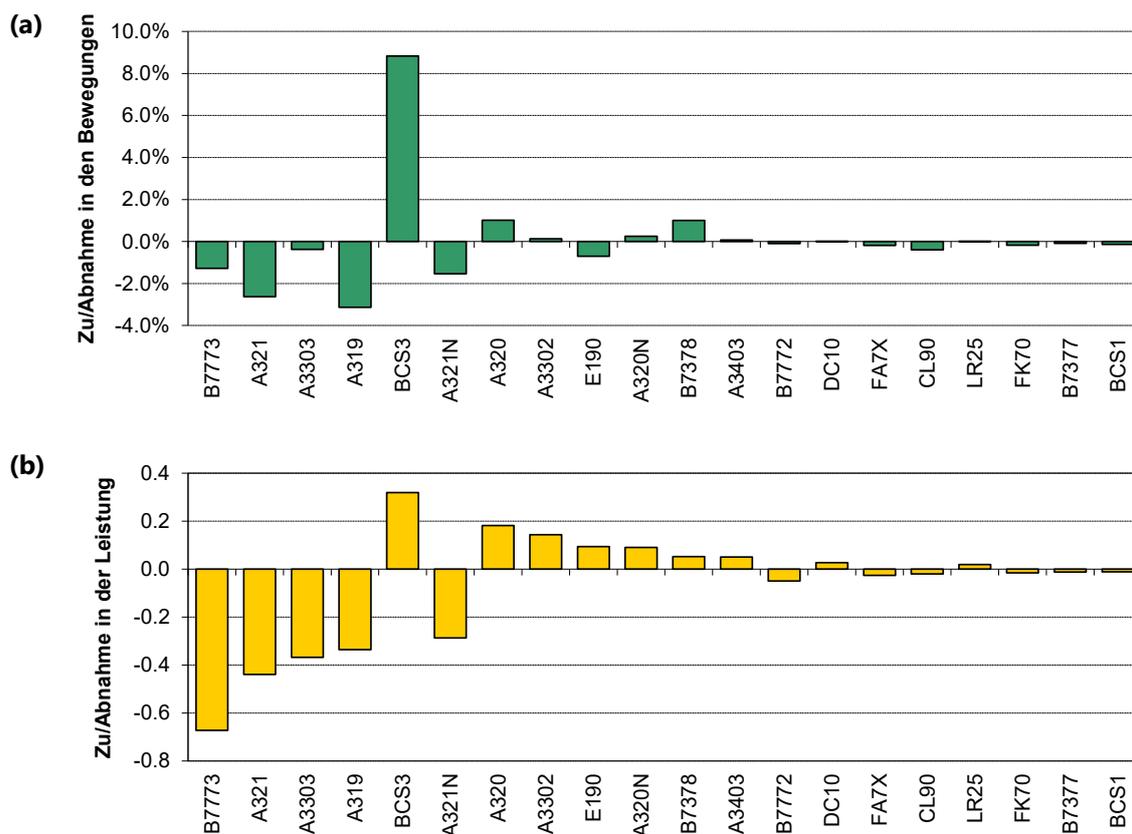
⁵ Die Schallenergie pro Flugzeugtyp wird, getrennt für Starts und Landungen, aus den typenspezifischen Ereignispegeln (L_{AE}), d.h. den akustischen Kenndaten der Flugzeugtypen des Fluglärmrechnungsprogramms FLULA2 [10], ermittelt. Dazu werden die L_{AE} in typenspezifische „Schallenergiegedichten“ pro Einzelereignis, d.h. pro einzelner Bewegung, umgerechnet ($E = 10^{-12} \times 10^{0.1 \times L_{AE}}$ [J/m²]) und mit der Anzahl Bewegungen (Starts bzw. Landungen) pro Typ und Jahr multipliziert. Das Ergebnis entspricht der durch einen bestimmten Betrieb einer gegebenen Flugzeugflotte in rund 305 m Entfernung über ein Jahr resultierenden „Schallenergiegedichte“ [J/m²]. Die akustischen Kenndaten gelten streng genommen nur für einen geradlinigen Vorbeiflug in 1'000 ft (304.8 m) Entfernung mit einer Geschwindigkeit von 160 kt (= 82.3 m/s) bei Standardatmosphäre (15°C, 70% rel. Feuchte), bei Starts zudem nur für Starts mit mittlerer Leistung („VG“) vor dem Cutback, und stellen somit eine relativ grobe Schätzung der emittierten Schallenergie dar. Im Folgenden wird vereinfachend von „Schallenergie“ gesprochen. Wegen der vereinfachenden Annahmen bei deren Berechnung ist sie nur eine grobe Schätzung der tatsächlich durch den realen Flugbetrieb verursachten gesamten Schallenergie.



[BEWST2_ZFI23_SENS22.xlsm / Anteile]

Abbildung 4-1 Veränderung pro Flugzeugtyp am Tag (a) der Bewegungszahlen (% der Gesamtbewegungen tags im Jahr 2022) und (b) in der Schallenergie [J/m²] zwischen den Jahren 2022 und 2023. Die Zu-/Abnahmen entsprechen den Differenzen Flugbetrieb 2023 minus Flugbetrieb 2023 mit Flugzeugflotte 2022 (RC24).

In der Nacht sank die Summe der Schallenergie aller Flugzeugtypen vom Jahr 2022 zum Jahr 2023 um 7% (Abbildung 4-2), was die HSD deutlich um 1'365 Personen bzw. 5% verminderte (Tabelle 4-7). So sank insb. die Schallenergie der Flugzeugtypen B7773, A321, A3303, A319 und A320N deutlich, was den (schwächeren) Anstieg in der Schallenergie der BCS3 und A320 (zurückzuführen auf neu in Betrieb genommene Verbindungen mit Nachtflügen) deutlich überkompensierte.



[BEWST2_ZFI23_SENS22.xlsm / Anteile]

Abbildung 4-2 Veränderung pro Flugzeugtyp in der Nacht (a) der Bewegungszahlen (% der Gesamtbewegungen nachts im Jahr 2023) und (b) in der Schallenergie [J/m²] zwischen den Jahren 2022 und 2023. Die Zu-/Abnahmen entsprechen den Differenzen Flugbetrieb 2023 minus Flugbetrieb 2023 mit Flugzeugflotte 2022 (RC24).

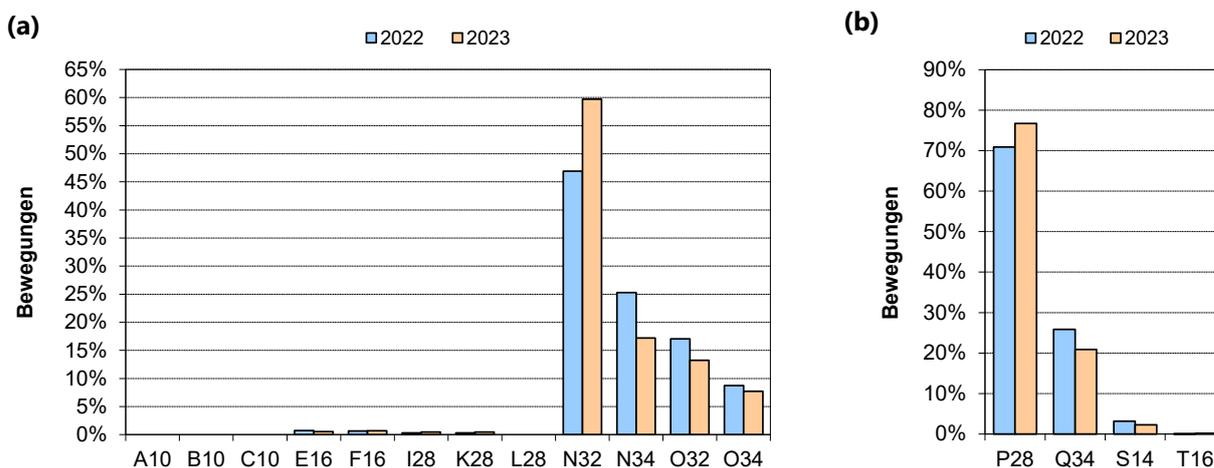
4.3.3. Einfluss von Veränderungen in der Flugroutenbelegung

Abbildung 4-3 zeigt das Pisten- und Routensystem des Flughafens Zürich. Abbildung 4-4 vergleicht die Routenbelegung der Jahre 2022 und 2023 am Tag. Von den am häufigsten belegten Startrouten am Tag wurden im Jahr 2023 die Routen I28 und K28 um -5% bzw. -2% weniger belegt. Damit nahmen insgesamt die Starts nach Westen um 7% ab, und es wurden 60% der Starts am Tag über die Piste 28 abgewickelt. Dafür nahmen Starts nach Norden auf Route N32 um +7% zu, während die Belegung der übrigen Start-routen nach Norden (O32, N32, N34) annähernd gleich blieb. Insgesamt wurden 27% der Starts am Tag nach Norden auf Pisten 32 und 34 abgewickelt (26% auf Piste 32 und 1% auf Piste 34). Die Piste 10 in Richtung Osten wurde ebenfalls etwas häufiger benutzt (+1%). Die Starts in Richtung Süden (E16, F16) nahmen leicht um knapp 1% auf insgesamt 9% ab.

Die meisten Landungen wurden mit 70% von Norden über die Route S14 abgewickelt, was einer Abnahme um 6% seit dem Vorjahr entspricht. Dafür stieg die Belegung der Ostlanderoute P28 um 6% auf 22%. Weiter stieg die Belegung der Südlanderoute Q34 leicht um 1% auf insgesamt 8%, während wie in den Vorjahren auf T16 kaum Landungen stattfanden (Zunahme um 0.1% auf insg. 0.2%).

2023. Insgesamt wurde die Piste 32 mit 73% deutlich mehr (+9%) und die Piste 34 mit 25% deutlich weniger (-9%) benutzt. Die Abflugrouten in Richtung Süden (E16 und F16) sowie Westen (I28 und K28) wurden wie in den Vorjahren nur wenig genutzt (jeweils unter 1%).

Bei den Landungen stieg die Belegung der Ostanflugroute P28 deutlich um 6% auf insgesamt 77%, dafür nahmen die Südlandungen auf der Route Q34 deutlich um -5% auf insgesamt 21% ab. Die Nordlandungen nahmen geringfügig um 1% auf insgesamt 2% ab. Die Route T16 wurde wie in den Vorjahren kaum belegt.



[BEWST2_ZFI23_SENS22.xlsm / F_RB]

Abbildung 4-5 Routenbelegungen der (a) Starts und (b) Landungen in der Nacht der Jahre 2022 und 2023

Die Unterschiede in der Routenbelegung führten zu einer Abnahme der *HA* am Tag um 3%, der *HSD* in der Nacht um 2% und insgesamt im *ZFI* um 2% (Tabelle 4-8).

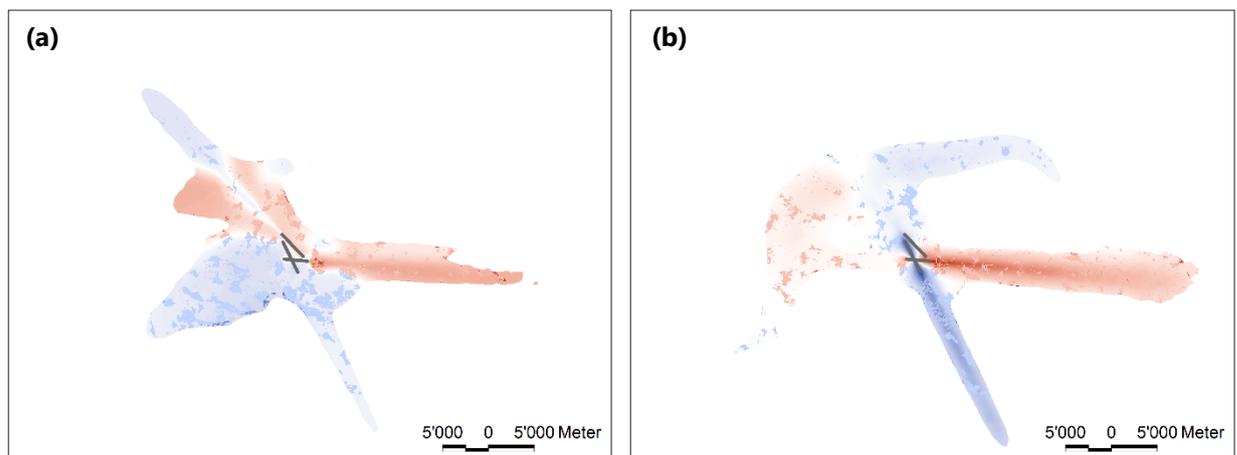
Tabelle 4-8 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2023, berechnet mit den Routenbelegungen von 2023 bzw. 2022 (RC24)

Routenbelegung	Restliche Inputdaten	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2023	2023	30'165	23'648	53'813	= <i>ZFI</i> _{23,PM25}
2022 (RC24)	2023	31'079	24'084	55'163	= <i>ZFI</i> _{RB,22}
Veränderung	Absolut	-914	-436	-1'351	= Δ <i>ZFI</i> _{RB}
	prozentual	-3%	-2%	-2%	

Am Tag (Abbildung 4-6 (a)) zeigt sich im Nordwesten eine deutliche Zunahme der *HA* im Einflussbereich der zunehmenden Starts Richtung Nordwesten (insb. Route N32) sowie generell der deutlich gestiegene Anteil von Starts auf Piste 32 im Gebiet östlich angrenzend an und nördlich von Piste 32. Gleichzeitig zeigt sich im Norden im Einflussbereich der (abnehmenden) Nordlandungen (S14) eine Abnahme der *HA*. Im Südosten nahmen die *HA* wegen abnehmender Südstarts (E16, F16) ab. Interessanterweise nahmen die *HA* im Süden ebenfalls ab, trotz leicht zunehmender Südlandungen auf Route Q34. Der Grund hierfür dürfte an den tageszeitspezifischen Unterschieden in den Südlandungen liegen. Während die Landungen von Süden auf Route Q34 am Tag insgesamt um 1% zunahmen (s.o.), was die *HA* erhöhen müsste, nahm der Anteil der

Südlandungen in der ersten (T1) und letzten Tagesstunde (T16) um 2 bzw. 5% ab. Die Anwendung eines Malus von 5 dB für T1 und T16 (vgl. Kap. 3.2.1. in [44]) zur Ermittlung des Leq^*_{16} führte wohl zu einer Abnahme desselben im Einflussbereich der Route Q34 und somit der *HA* im Gebiet südlich des Flughafens. Östlich des Flughafens in der Verlängerung zu Piste 10 im Nahbereich ist die leicht höhere Nutzung der Piste 10 sichtbar (roter Bereich zunehmender *HA*). Die Zunahme der Starts ab Piste 10 (insb. Route C10, vgl. Abbildung 4-3) zusammen mit der deutlichen Zunahme der Landungen von Osten auf Route P28 führte schliesslich zu einer flächendeckenden Zunahme der *HA* im Osten des Flughafens (nördlicherer Teil: Starts Piste 10, südlicherer Teil: Landungen Piste 28).

In der Nacht (Abbildung 4-6 (b)) sind vier Trends deutlich und grossflächig sichtbar: (1) Eine Abnahme der *HSD* im Nordosten aufgrund des geringeren Anteils der Starts auf den nordöstlichen Startrouten O32 und O34, (2) eine Zunahme der *HSD* im Nordwesten und Westen aufgrund der insgesamt höheren Belegungen der nordwestlichen Startrouten (Routen N32 und N34 zusammen), (3) eine Zunahme der *HSD* im Osten wegen des höheren Anteils der Landungen von Osten auf der Route P28, und (4) eine Abnahme der *HSD* im Süden wegen des geringeren Anteils der Landungen auf der Route Q34. Somit ist generell die anhaltende Verschiebung der Bewegungen von den Routen O32 und O34 auf die Routen N32 und N34 deutlich sichtbar, was dem Trend der beiden Vorjahre 2021 und 2022 entspricht, jedoch dem Trend des Jahres 2020 entgegengesetzt ist. Schliesslich ist im Flughafennahbereich die stärkere Nutzung von Piste 32 schwach sichtbar (roter Bereich direkt östlich der Piste).



[Abbildungen_für_Bericht_ZFI23_SENS22.mxd, DiffPlot_23min23_RB22_Tag.png, DiffPlot_23min23_RB22_Nacht.png, trsg23-rb22.tif, ha23-rb22.tif, awr23-rb22_15.tif, hsd23-rb22.tif]

Abbildung 4-6 Differenzplots 2023 minus 2023 mit Routenbelegung 2022 (RC24) für (a) die *HA* (kräftigere Farben) bzw. den Leq^*_{16} am Tag und (b) die *HSD* (kräftigere Farben) bzw. die *AWR* in der Nacht. Rot bedeutet eine Zunahme, blau eine Abnahme. Dargestellt sind die Gebiete innerhalb der Umhüllenden der relevanten Untersuchungsperimeter.

4.3.4. Einfluss von Veränderungen der Fluggeometrien

Die Veränderungen der Fluggeometrien vom Jahr 2022 zum Jahr 2023 erhöhten die *HA* um 2%, die *HSD* marginal um 4%, den *ZFI* in der Summe um 3% (Tabelle 4-9).

Tabelle 4-9 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2023, berechnet mit den Fluggeometrien des Jahres 2023 bzw. 2022 (RC24)

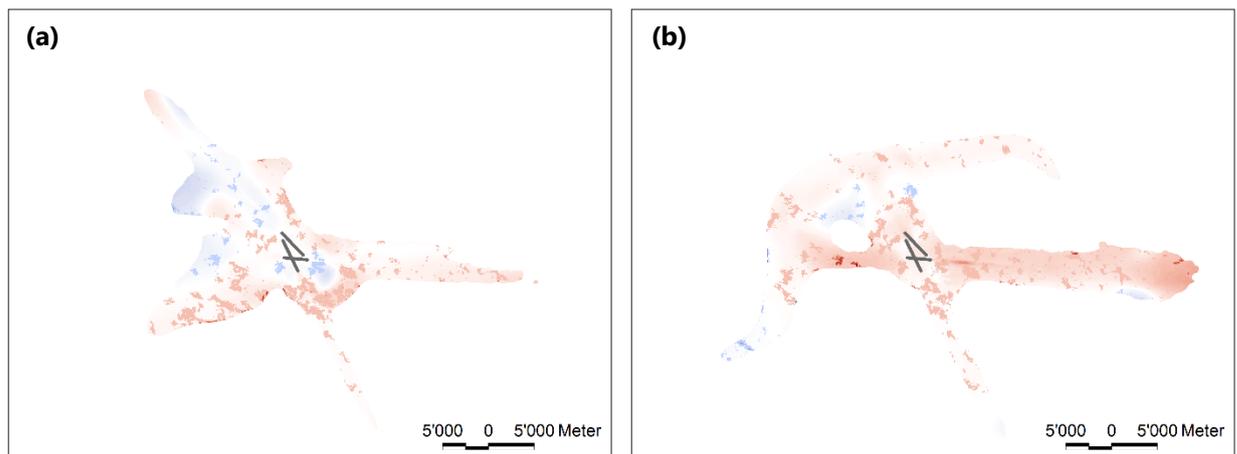
Fluggeometrie	Restliche Inputdaten	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2023	2023	30'165	23'648	53'813	= $ZFI_{23,PM25}$
2022 (RC24)	2023	29'491	22'753	52'243	= $ZFI_{FG,22}$
Veränderung	absolut	+674	+895	+1'569	= ΔZFI_{FG}
	prozentual	+2%	+4%	+3%	

Die Veränderungen der Fluggeometrien beinhalten sowohl Unterschiede im horizontalen (Flugspuren) und vertikalen (Flugprofile) Verlauf der Flugbahnen, als auch in deren Geschwindigkeitsverlauf. Diese Parameter werden durch den Flugbetrieb und die von meteorologischen Bedingungen und Auslastung der Fluggesellschaften abhängige Steigleistung beeinflusst. Am Tag wie auch in der Nacht kommt es zu verschiedenen lokalen Unterschieden durch die Veränderungen der Fluggeometrien, welche in der Summe die *HA*, die *HSD* und den *ZFI* deutlich beeinflussen (Tabelle 4-9). Aufgrund der Komplexität des Flugbetriebs und des Einflusses der meteorologischen Bedingungen und Auslastung auf die Steigleistung kann nicht im Detail auf die Veränderungen der Fluggeometrien eingegangen werden.

Am Tag nehmen die *HA* grossflächig zu, insbesondere im Südosten (Routen E16 und F16), Osten (F16, C10) sowie Westen des Flughafens (I28, K28) (Abbildung 4-7(a)), was auf die zwischen 2022 und 2023 erneut gestiegene Auslastung der Flugzeuge zurückzuführen sein dürfte: Die eingesetzten Flugzeuge waren dadurch im Jahr 2023 im Vergleich zum Vorjahr schwerer, was die Steigleistung verminderte und so die Lärmbelastung erhöhte. Entsprechend ist auch ein späteres Abdrehen der Flugzeuge auf den Startrouten E16 und F16 nach Osten sichtbar. Aufgrund des höheren Abfluggewichts der Flugzeuge im Jahr 2023 dürften diese die Höhenanforderung für das Abdrehen nach Osten später erreicht haben, sodass im Einflussgebiet der Routen E16 und F16 die nördlicheren Gebiete etwas weniger und die südlicheren Gebiete etwas mehr vom Fluglärm betroffen waren. Ähnliche Beobachtungen wurden bereits in den beiden Vorjahren gemacht [39, 41]. Die Zunahme der *HA* im Osten des Flughafens dürfte durch die gestiegene Auslastung der Flugzeuge auf den Startrouten C10 und F16 verursacht worden sein. Im Bereich der Nordstartrouten sind die Unterschiede weniger deutlich. Dort nahmen die *HA* im Einflussbereich der nordöstlichen Routen (O32, O34) leicht zu und im Einflussbereich der nordwestlichen Routen (N32, N34) leicht ab. Der rote Bereich zunehmender *HA* im Osten direkt anschliessend an Piste 32 deutet wiederum auf schwerere (besser ausgelastete) Flugzeuge auf dieser Piste hin. Tatsächlich war dort der Anteil von Starts mit voller Leistung im Jahr 2023 teilweise höher als im Jahr 2022 (vgl. Fluglärmrechnungen [43, 45]). Daneben nahmen die *HA* auch im Süden im Bereich der Landeroute Q34 etwas zu, was auch in einigen früheren Jahren beobachtet worden war [18, 21].

In der Nacht (Abbildung 4-7(b)) sind die grossflächigen Zunahmen der *HSD* noch ausgeprägter als am Tag. Die Zunahme der *HSD* im Bereich der nordöstlichen (O32 und O34) sowie nordwestlichen (N32 und 34)

Startrouten deuten wiederum auf höhere eine Auslastung der Flugzeuge hin. Die Zunahme der *HSD* im Westen und Osten des Flughafens ist auf die erneut häufigere Nutzung der Westschleife nach Osten (270°-Kurve, s.o.) mit schwereren Flugzeugen zurückzuführen. Der Effekt der häufigeren Nutzung wäre eigentlich der Routenbelegung zuzuschreiben; hier lassen sich die Flugbetriebsparameter Routenbelegung und Fluggeometrien jedoch nicht eindeutig trennen (Zuordnung verschiedener SIDs ab Pisten 32 und 34 zu denselben Routen N32 bzw. N34). Die Zunahme im Osten (Fernbereich) dürfte sich durch die Überlagerung der Lärmbelastung durch die nordöstlichen Abflüge (O32, O34 – siehe oben) zusätzlich verstärkt haben. Daneben ist wie am Tag eine Zunahme der *HSD* im Süden Einflussbereich der Landeroute Q34 sichtbar.



[Abbildungen_für_Bericht_ZFI23_SENS22.mxd, DiffPlot_23min23_FG22_Tag.png, DiffPlot_23min23_FG22_Nacht.png, trsg23-fg22.tif, ha23-fg22.tif, awr23-fg22_15.tif, hsd23-fg22.tif]

Abbildung 4-7 Differenzenplots 2023 minus 2023 mit Fluggeometrien 2022 (RC24) für (a) die *HA* (kräftigere Farben) bzw. den Leq^*_{16} am Tag und (b) die *HSD* (kräftigere Farben) bzw. die *AWR* in der Nacht (b). Rot bedeutet eine Zunahme, blau eine Abnahme. Dargestellt sind die Gebiete innerhalb der Umhüllenden der relevanten Untersuchungsperimeter.

4.4. Zusammenstellung der Resultate

Tabelle 4-10 zeigt den Anteil der Bevölkerung (ΔZFI_{BEV}) und des Flugbetriebs an der Veränderung des ZFI vom Jahr 2022 zum Jahr 2023 in der Sensitivitätsanalyse.

Tabelle 4-10 Veränderungen der HA, HSD und des ZFI vom Jahr 2022 zum Jahr 2023, total und aufgrund der Bevölkerung und des Flugbetriebs als Ganzes (vgl. Tabelle 8-1 im Anhang, Kap. 8)

Komponente	Absolute Veränderung			Prozentualer Anteil an den Veränderungen		
	HA	HSD	ZFI	HA	HSD	ZFI
ΔZFI_{PM25} von 2022 zu 2023^a	3'572	6'338	9'910	+100%	+100%	+100%
Bevölkerung: ΔZFI_{BEV} ^b	+445	+267	+712	+12%	+4%	+7%
Flugbetrieb: ΔZFI_{FB} ^c	+3'128	+6'070	+9'198	+88%	+96%	+93%

^a $\Delta ZFI_{PM25} = ZFI_{23,PM25} - ZFI_{22,PM25}$ (Kap. 4.1) ^b siehe Kap. 4.2.1 ^c Differenz zw. ΔZFI_{PM25} und ΔZFI_{BEV} (Kap. 2.9)

Aus Tabelle 4-10 ist ersichtlich, dass die Veränderungen in der Bevölkerung als Ganzes (inkl. Entwicklung der passiven Schallschutzmassnahmen, vgl. Kap. 2.3) im Jahr 2023 den ZFI um 7% erhöhte. Die Veränderungen im Flugbetrieb trugen mit 93% deutlich stärker zur Zunahme im ZFI bei, und wobei der Beitrag am Tag (HA) etwas weniger ausgeprägt ist als in der Nacht (HSD). Die vier Flugbetriebskomponenten Bewegungszahlen (BEW), Zusammensetzung und Einsatz der Flugzeugflotte (FF), Routenbelegung (RB) sowie Lage und Verlauf der Flugbahnen (FG) hängen stark voneinander ab und können nicht vollständig isoliert voneinander betrachtet werden (Kap. 2.9). Die Absolutwerte der in Kapitel 4.3.1 bis 4.3.4 ermittelten Differenzen ΔZFI_{BEW} , ΔZFI_{FF} , ΔZFI_{RB} und ΔZFI_{FG} weichen dementsprechend in der Summe von den in Tabelle 4-10 ausgewiesenen, auf den Flugbetrieb rückführbaren Differenzen ab, und in diesem Jahr umso mehr, als in der obigen Differenz ΔZFI_{PM25} die Aktualisierung der Quelldaten implizit enthalten ist, in den Sensitivitätsanalysen hingegen nicht (Kap. 2.2). Dies wird in der nachfolgenden Unsicherheitsbetrachtung (Kap. 5) weiter diskutiert.

Mittels der Differenzen wurde nachfolgende Rangfolge ermittelt. Hierbei trug die starke Zunahme der Flugbewegungszahlen aufgrund der fortschreitenden Erholung von der COVID-19 Situation deutlich am stärksten zur Zunahme des ZFI bei. Die Änderungen der Fluggeometrien, der Flugzeugflotte und der Routenbelegung trugen annähernd gleich stark, aber deutlich weniger als die Flugbewegungszahlen, zu den Veränderungen im ZFI bei.

1. **BEW:** → ZFI ↑ Die Zunahme Flugbewegungen zwischen 2022 und 2023 bewirkte eine starke Zunahme der HA , der HSD und des ZFI .
2. **FG:** → ZFI ↑ Die Veränderungen in der Lage und im Verlauf der Flugbahnen führten zu einer Zunahme der HA , der HSD und des ZFI .
3. **FF:** → ZFI ↓ Die Veränderungen in der Flugzeugflotte beeinflussten die HA kaum, führten aber zu einer deutlichen Abnahme der HSD und insgesamt zu einer Abnahme des ZFI .
4. **RB:** → ZFI ↓ Die Änderungen in den Routenbelegungen führten ebenfalls zu einer Abnahme der HA , HSD und des ZFI .

5. Unsicherheit der Berechnungen

Die Unsicherheiten der berechneten Werte betragen 10–35% für die *HA*, 40% für die *HSD* und 10–30% für den *ZFI* (vgl. Kap. 6 in [44]). Da bei den Sensitivitätsanalysen verschiedene Einflussfaktoren bei den zu vergleichenden Berechnungen identisch sind und sich bei einem direkten Vergleich gegenseitig aufheben, dürfte die Unsicherheit der mittels Sensitivitäten ausgewiesenen Differenzen wie beim Vergleich der *HA*, *HSD* und des *ZFI* verschiedener Belastungszustände rund 10% betragen (vgl. Kap. 6 in [44]). In der vorliegenden Untersuchung sollte deshalb bezüglich Sensitivitätsanalysen der Einfluss einer Komponente auf den *ZFI* erst dann als signifikant erachtet werden, wenn ihr prozentualer Anteil mehr als rund 10% beträgt. Zu beachten ist jedoch auch die Unschärfe der Einzelkomponentenbetrachtung. Je grösser diese ist, desto mehr weicht die Summe der einzelnen mittels Sensitivitätsanalyse ausgewiesenen Differenzen (ΔZFI_{BEV} , ΔZFI_{BEW} , ΔZFI_{FF} , ΔZFI_{RB} , ΔZFI_{FG} ; vgl. Kap. 2.1) von der offiziellen ("realen") Differenz ΔZFI zwischen den beiden betrachteten Betriebszuständen (Berichtsjahr und Vorjahr) ab, und desto mehr sind die Resultate mit Vorsicht zu geniessen, da diese Rechenartefakte enthalten können. Bei grossen Abweichungen ist eine Aussage bezüglich Signifikanz der Effekte der Einzelkomponenten kaum mehr möglich.

Im Falle der Sensitivitätsbetrachtung 2023 vs. 2022 (Einzelkomponentenbetrachtung) weicht die oben erwähnte Summe der einzelnen Differenzen um +18% von ΔZFI_{PM25} ab (*HA* +25%, *HSD* +14%), sodass die Einzelkomponentenbetrachtung der *HA*, *HSD* und des *ZFI* als zuverlässig angesehen werden kann.

Dass die mittels Sensitivitätsbetrachtung (Summe der Einzelkomponenten) ermittelte Differenz zwischen 2022 und 2023 grösser ausfällt als die Differenz ΔZFI_{PM25} , ist teilweise auf die Aktualisierung der Quelldaten von FLULA2 zurückzuführen. ΔZFI_{PM25} enthält implizit die Quelldatenaktualisierung und somit eine gewisse Kompensation des realen Anstiegs durch die akustisch günstige Flottenentwicklung, die Sensitivitätsbetrachtungen hingegen nicht (vgl. Kap. 2.2). Eine vereinfachte Berechnung illustriert dies⁶: Würden für das Betriebsjahr 2022 die neuen Quelldaten berücksichtigt (RC2024_01), so würde sich die gesamthaft emittierte Schallenergie im Vergleich zur Belastungsrechnung 2022 [43] mit den verwendeten früheren Quelldaten (RC2022_01) vermindern (Quantifizierung der Schallenergie: vgl. Fussnote ⁵). Ohne Cutback (relevant für Gebiete in unmittelbarer Flughafennähe) würde sich Schallenergie um 0.2–0.3 dB vermindern und mit Cutback (relevant für weiter entfernte Gebiete) um rund 0.1 dB (Tabelle 5-1).

Tabelle 5-1 Differenz zwischen der durch den Flugbetrieb emittierten Schallenergie des Jahres 2022, für den Quelldatensatz RC2022_01 (für die Belastungsrechnung und somit den *ZFI* des Jahres 2022 verwendet) und den Quelldatensatz RC2024_01 (für die Berechnungen 2023 verwendet). Quantifizierung der Schallenergie gemäss Fussnote ⁵, mit und ohne Cutback (CB).

Differenz	Tag 06 – 22 h	Nacht 22 – 06 h
RC2024_01 – RC2022_01, Ohne CB	-0.31	-0.24
RC2024_01 – RC2022_01, Mit CB	-0.14	-0.10

⁶ Berechnungen: [Energet.Abschätzung_FLULA2_RC-Update_OhneCB.xlsx], [Energet.Abschätzung_FLULA2_RC-Update_MitCB.xlsx].

Gemäss [1] können die Veränderungen in der Wohnbevölkerung je nach Belastungsniveau zwischen 20 und 30% pro dB betragen. Unter der Annahme einer (mittleren) Veränderung von 25% würden die Bevölkerungszahlen aufgrund der in Tabelle 5-1 ausgewiesenen verminderten Schallenergie rund 6–8% ohne CB bzw. 3–4% mit CB abnehmen. Verwendet man eine mittlere Bevölkerungsabnahme von 4% und nimmt weiter vereinfachend an, dass diese linear auch eine 4%-Abnahme der *HA*, *HSD* und *ZFI* bewirkt⁷, erhält man eine "Schallenergie-korrigierte" Differenz ΔZFI_{PM25} , mit welcher die oben ausgewiesene Summe der einzelnen Differenzen aus den Sensitivitätsbetrachtungen ausserordentlich gut übereinstimmt (Abweichung um 0% beim *ZFI*, –4% in den *HA* und +3% in den *HSD*). Diese Abschätzung belegt, dass die Sensitivitätsanalyse als zuverlässig angesehen werden kann und dass der reale Anstieg des Monitoringwerts zwischen 2022 und 2023 wegen der Aktualisierung des Quelldatensatzes teilweise kompensiert wird.

⁷ In Realität dürften die *HA*, die *HSD* und der *ZFI* bei abnehmender emittierter Schallenergie in Flughafennähe stärker und weiter weg schwächer abnehmen.

6. Abkürzungen und Literatur

6.1. Verwendete Abkürzungen

<i>AWR</i>	Durch Fluglärm induzierte zusätzliche Aufwachreaktionen
<i>BEV</i>	Bevölkerung
<i>BEW</i>	Flugbewegungszahlen
<i>BJ</i>	Berichtsjahr
<i>D</i>	Einfügungsdämpfung für den Übergang vom Aussen- zum Innenpegel zur Berechnung der <i>AWR</i> , für gekipptes Fenster rund –15 dB, bei passiven Schallschutzmassnahmen mit geschlossenem Fenster rund –25 dB bzw. –27 dB ... –43 dB
<i>Empa</i>	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
<i>FF</i>	Flugzeugflotte
<i>FG</i>	Fluggeometrien
<i>FLULA2</i>	Fluglärmrechnungsprogramm der Empa
<i>HA</i>	<i>Highly Annoyed</i> ; Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen
<i>HSD</i>	<i>Highly Sleep Disturbed</i> ; Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen
<i>L_{AE}</i>	Ereignispegel: Gesamtenergieinhalt eines Ereignisses normiert auf eine Sekunde, ausgedrückt als Pegelgrösse
<i>Leq*₁₆</i>	Tagesrandstundengewichteter 16h-Mittelungspegel (06–22 h)
<i>Leq_N</i>	8h-Mittelungspegel in der Nacht (22–06 h)
<i>PM</i>	Passive (Schallschutz-)Massnahmen (Komfort- und Schalldämmlüftungen sowie Fensterschliessmechanismen)
<i>PM25</i>	Index für die vereinfachte Berechnung von Gebäuden mit passiven Schallschutzmassnahmen durch eine einheitliche Einfügungsdämpfung von –25 dB
<i>RB</i>	Routenbelegung
<i>RZ</i>	Referenzzustand
<i>UP</i>	Untersuchungsperimeter
<i>VJ</i>	Vorjahr (d.h. dem Berichtsjahr vorangegangenes Jahr)
<i>ZFI</i>	Zürcher Fluglärm-Index
<i>ZFI-VO</i>	ZFI-Verordnung
2022 (RC24)	Fluglärmbelastung bzw. <i>ZFI</i> des Jahres 2022, berechnet mit dem aktualisierten Quelldatensatz RC2024_01 von FLULA2 (für die Sensitivitätsanalyse)

6.2. Literatur

- [1] Empa, 2003. *Flughafen Zürich, UVB Vorläufiges Betriebsreglement (Eingabe 31.12.2003), Fachbericht Fluglärm, Hauptuntersuchung – Auswirkungen des Vorhabens auf den Menschen und die Umwelt*. Bericht Nr. 427'733 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [2] Empa, 2006. *Zürcher Fluglärmindex ZFI, Berechnungsvorschrift. Version 2*. Bericht Nr. 441'255 - 4. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [3] Empa, 2008. *Flughafen Zürich, Veränderungen im Zürcher Fluglärm-Index ZFI vom Referenzzustand zum Jahr 2007*. Bericht Nr. 450'617. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [4] Empa, 2008. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2007*. Bericht Nr. 448'144. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [5] Empa, 2008. *Flughafen Zürich, Sensitivitäten Zürcher Fluglärm-Index, Entwicklung einer Methode zur isolierten Betrachtung des Einflusses von Veränderungen in der Wohnbevölkerung und im Flugbetrieb auf den Zürcher Fluglärm-Index ZFI. Version 2*. Bericht Nr. 448'451. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [6] Empa, 2009. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2008*. Bericht Nr. 452'380 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [7] Empa, 2009. *Flughafen Zürich, Veränderungen im Zürcher Fluglärm-Index ZFI vom Jahr 2000 zum Jahr 2007. Version 2*. Bericht Nr. 451'116. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [8] Empa, 2009. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2008, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 452'380 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [9] Empa, 2010. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2009*. Bericht Nr. 455'224 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [10] Empa, 2010. *FLULA2, Ein Verfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung. Technische Programm-Dokumentation. Version 4*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
URL: <https://www.empa.ch/de/web/s509/flula2>.
- [11] Empa, 2010. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2009, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 455'224 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf. URL: <http://www.afv.zh.ch/zfi>.
- [12] Empa, 2011. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2010*. Bericht Nr. 458'512 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [13] Empa, 2011. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2010, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 458'512 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [14] Empa, 2012. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2011*. Bericht Nr. 460'539 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [15] Empa, 2012. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2011, Einfluss der Flight Level 80-Regel auf den ZFI*. Bericht Nr. 461'359. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [16] Empa, 2012. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2011, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 460'539 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.

- [17] Empa, 2013. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2012*. Bericht Nr. 5214.001738 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [18] Empa, 2013. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2012, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 5214.001738 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [19] Empa, 2013. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2012, Einfluss der erhöhten bzw. verschärften Schallschutzanforderungen der SIA-Norm 181 auf den ZFI*. Bericht-Nr. 5214.001738 - 3. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [20] Empa, 2014. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2013*. Bericht Nr. 5214.005883 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [21] Empa, 2014. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2013, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 5214.005883 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [22] Empa, 2015. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2014*. Bericht Nr. 5214.008333 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [23] Empa, 2015. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2014, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 5214.008333 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [24] Empa, 2016. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2015*. Bericht Nr. 5214.012095 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [25] Empa, 2016. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2015, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 5214.012095 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [26] Empa, 2017. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2016, Sensitivitätsbetrachtungen 2015*. Bericht Nr. 5214.014941 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [27] Empa, 2017. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2016*. Bericht Nr. 5214.014941 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf. U
- [28] Empa, 2018. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2017, Sensitivitätsbetrachtungen 2016*. Bericht Nr. 5214.018366 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [29] Empa, 2018. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2017*. Bericht Nr. 5214.018366 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [30] Empa, 2019. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2018, Sensitivitätsbetrachtungen 2017*. Bericht Nr. 5214.021166 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [31] Empa, 2019. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2018, Einfluss der Fensterschliessmechanismen und des aktualisierten Quellendatensatzes von FLULA2 auf den ZFI*. Bericht Nr. 5214.021166 - 3. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [32] Empa, 2019. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2018*. Bericht Nr. 5214.021166 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.

- [33] Empa, 2019. *Flughafen Zürich, Fluglärmbelastung im Jahre 2018*. Bericht Nr. 5214.021462. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [34] Empa, 2019. *FLULA2 — Auswirkungen neuer, aus sonAIR abgeleiteter Quelldaten auf Fluglärm-Belastungsrechnungen*. Bericht Nr. 5214.019893. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [35] Empa, 2020. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2019, Sensitivitätsbetrachtungen 2018*. Bericht Nr. 5214.024180 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [36] Empa, 2020. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2019*. Bericht Nr. 5214.024180 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [37] Empa, 2021. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2020, Sensitivitätsbetrachtungen 2019*. Bericht Nr. 5214.026437 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [38] Empa, 2021. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2020*. Bericht Nr. 5214.026437 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [39] Empa, 2022. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2021, Sensitivitätsbetrachtungen 2020*. Bericht Nr. 5214.028868 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [40] Empa, 2022. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2021*. Bericht Nr. 5214.028868 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [41] Empa, 2023. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2022, Sensitivitätsbetrachtungen 2021*. Bericht Nr. 5214.031408 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [42] Empa, 2023. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2022*. Bericht Nr. 5214.031408 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [43] Empa, 2023. *Flughafen Zürich, Fluglärmbelastung im Jahre 2022*. Bericht Nr. 5214.031386. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [44] Empa, 2024. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2023*. Bericht Nr. 5214.033680 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [45] Empa, 2024. *Flughafen Zürich, Fluglärmbelastung im Jahre 2023*. Bericht Nr. 5214.033564. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [46] SIA, 2020. *Norm SIA 181:2020 Bauwesen, SN 520 181, Schallschutz im Hochbau*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich.
- [47] ZFI-Verordnung, 2011. *Verordnung zum Zürcher Fluglärm-Index (ZFI-VO) vom 7. Dezember 2011. LS 748.15*. URL: <http://www.zhlex.zh.ch/Erlass.html?Open&Ordnr=748.15>.

7. Verzeichnisse

7.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3-1	Der <i>ZFI</i> als Summe der <i>HA</i> und <i>HSD</i> für den RZ sowie die Jahre 2005 bis 2023, basierend auf den Bevölkerungsdaten des Jahres 2000 (pop. 2000), und Differenzen (ΔZFI) zu den offiziellen Werten, mit Bevölkerungsdaten der entsprechenden Jahre (vgl. Abbildung 5-4 aus [44]). Fette gestrichelte Linie: Richtwert (47'000 Personen).....	15
Abbildung 3-2	Einfluss der Änderungen in der Bevölkerung und im Flugbetrieb zwischen dem RZ und den Jahren 2005 bis 2023 auf den <i>ZFI</i> : Differenzen (in %, relativ zu den Werten des RZ) in den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i>	16
Abbildung 4-1	Veränderung pro Flugzeugtyp am Tag (a) der Bewegungszahlen (% der Gesamtbewegungen tags im Jahr 2022) und (b) in der Schallenergie [J/m^2] zwischen den Jahren 2022 und 2023. Die Zu-/Abnahmen entsprechen den Differenzen Flugbetrieb 2023 minus Flugbetrieb 2023 mit Flugzeugflotte 2022 (RC24).	21
Abbildung 4-2	Veränderung pro Flugzeugtyp in der Nacht (a) der Bewegungszahlen (% der Gesamtbewegungen nachts im Jahr 2023) und (b) in der Schallenergie [J/m^2] zwischen den Jahren 2022 und 2023. Die Zu-/Abnahmen entsprechen den Differenzen Flugbetrieb 2023 minus Flugbetrieb 2023 mit Flugzeugflotte 2022 (RC24).	22
Abbildung 4-3	Pisten- und Routensystem des Flughafens Zürich.	23
Abbildung 4-4	Routenbelegungen der (a) Starts und (b) Landungen am Tag der Jahre 2022 und 2023	23
Abbildung 4-5	Routenbelegungen der (a) Starts und (b) Landungen in der Nacht der Jahre 2022 und 2023.....	24
Abbildung 4-6	Differenzenplots 2023 minus 2022 mit Routenbelegung 2022 (RC24) für (a) die <i>HA</i> (kräftigere Farben) bzw. den Leq^*_{16} am Tag und (b) die <i>HSD</i> (kräftigere Farben) bzw. die <i>AWR</i> in der Nacht. Rot bedeutet eine Zunahme, blau eine Abnahme. Dargestellt sind die Gebiete innerhalb der Umhüllenden der relevanten Untersuchungsperimeter.	25
Abbildung 4-7	Differenzenplots 2023 minus 2022 mit Fluggeometrien 2022 (RC24) für (a) die <i>HA</i> (kräftigere Farben) bzw. den Leq^*_{16} am Tag und (b) die <i>HSD</i> (kräftigere Farben) bzw. die <i>AWR</i> in der Nacht (b). Rot bedeutet eine Zunahme, blau eine Abnahme. Dargestellt sind die Gebiete innerhalb der Umhüllenden der relevanten Untersuchungsperimeter.....	27

7.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Übersicht der bisher durchgeführten Sensitivitätsanalysen	6
Tabelle 2-2	Zusätzliche Berechnungen zur Bestimmung der Sensitivitäten	8
Tabelle 4-1	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> vom Jahr 2022 zum Jahr 2023	17
Tabelle 4-2	Veränderungen der Bevölkerung innerhalb der Untersuchungsperimeter (UP) 2023 von 2022 zu 2023	18
Tabelle 4-3	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2023, berechnet mit den Bevölkerungszahlen und passiven Schallschutzmassnahmen von 2023 bzw. 2022.....	18

Tabelle 4-4	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2023, berechnet mit den passiven Schallschutzmassnahmen von 2023 bzw. 2022 unter Berücksichtigung der erhöhten Anforderungen nach SIA-Norm 181 [46]	18
Tabelle 4-5	Veränderungen der Flugbewegungszahlen von 2022 zu 2023.....	19
Tabelle 4-6	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2022, berechnet mit den Bewegungszahlen von 2023 bzw. 2022 (RC24)	19
Tabelle 4-7	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2023, berechnet mit der Flugzeugflotte von 2023 bzw. 2022 (RC24).....	19
Tabelle 4-8	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2023, berechnet mit den Routenbelegungen von 2023 bzw. 2022 (RC24).....	24
Tabelle 4-9	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2023, berechnet mit den Fluggeometrien des Jahres 2023 bzw. 2022 (RC24)	26
Tabelle 4-10	Veränderungen der <i>HA</i> , <i>HSD</i> und des <i>ZFI</i> vom Jahr 2022 zum Jahr 2023, total und aufgrund der Bevölkerung und des Flugbetriebs als Ganzes (vgl. Tabelle 8-1 im Anhang, Kap. 8).....	28
Tabelle 5-1	Differenz zwischen der durch den Flugbetrieb emittierten Schallenergie des Jahres 2022, für den Quellendatensatz RC2022_01 (für die Belastungsrechnung und somit den <i>ZFI</i> des Jahres 2022 verwendet) und den Quellendatensatz RC2024_01 (für die Berechnungen 2023 verwendet). Quantifizierung der Schallenergie gemäss Fussnote ⁵ , mit und ohne Cutback (CB).	29
Tabelle 8-1	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> vom Jahr 2022 zum Jahr 2023, total und aufgrund der Veränderung in der Bevölkerung und im Flugbetrieb	37

7.3. Kartenverzeichnis

Karte 1	Differenzen im <i>ZFI</i> (PM25), 2023 minus 2022
Karte 2	Differenzen in den <i>HA</i> , 2023 minus 2022
Karte 3	Differenzen in den <i>HSD</i> (PM25), 2023 minus 2022
Karte 4	Differenzen im <i>ZFI</i> (PM25), 2023 minus RZ
Karte 5	Differenzen in den <i>HA</i> , 2023 minus RZ
Karte 6	Differenzen in den <i>HSD</i> (PM25), 2023 minus RZ

8. Anhang

Tabelle 8-1 zeigt die Veränderungen des *ZFI* (ohne Anforderungen nach SIA-Norm 181) vom Vorjahr 2022 zum Berichtsjahr 2023 insgesamt (total) sowie aufgeschlüsselt nach dem Einfluss der Bevölkerung (ΔZFI_{BEV}) und des Flugbetriebs. Die hier ausgewiesenen prozentualen Veränderungen beziehen sich auf das Jahr 2022, d.h. die *HA*, *HSD* und der *ZFI* des Jahres 2022 werden auf 100% gesetzt.

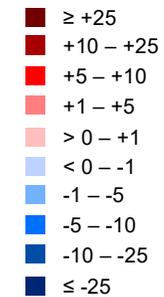
Tabelle 8-1 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* vom Jahr 2022 zum Jahr 2023, total und aufgrund der Veränderung in der Bevölkerung und im Flugbetrieb

Jahr		<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>		
2023		30'165	23'648	53'813	= $ZFI_{23,PM25}$	
2022		26'593	17'310	43'903	= $ZFI_{22,PM25} = 100\%$	
Veränderung	Total ^a	absolut	+3'572	+6'338	+9'910	= ΔZFI_{PM25}
		prozentual	+13%	+37%	+23%	
	Bevölkerung ^b	absolut	+445	+267	+712	= ΔZFI_{BEV}
		prozentual	+2%	+2%	+2%	
	Flugbetrieb ^c	absolut	+3'128	+6'070	+9'198	= ΔZFI_{FB}
		prozentual	+12%	+35%	+21%	

^a $\Delta ZFI_{PM25} = ZFI_{23,PM25} - ZFI_{22,PM25}$ (Tabelle 4-1)

^b Vgl. auch Kap. 4.2.1

^c Differenz zw. ΔZFI_{PM25} und ΔZFI_{BEV} (Kap. 2.9)

Flughafen Zürich**Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2023****Sensitivitätsbetrachtungen****Karte 1****Differenzen im ZFI (PM25)
2023 minus 2022****Legende****Differenz im ZFI (PM25)
(in Anzahl Personen pro Hektare)**

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

**Impressum**Übersichtskarte
PK200:Quelle: Bundesamt
für Landestopografie

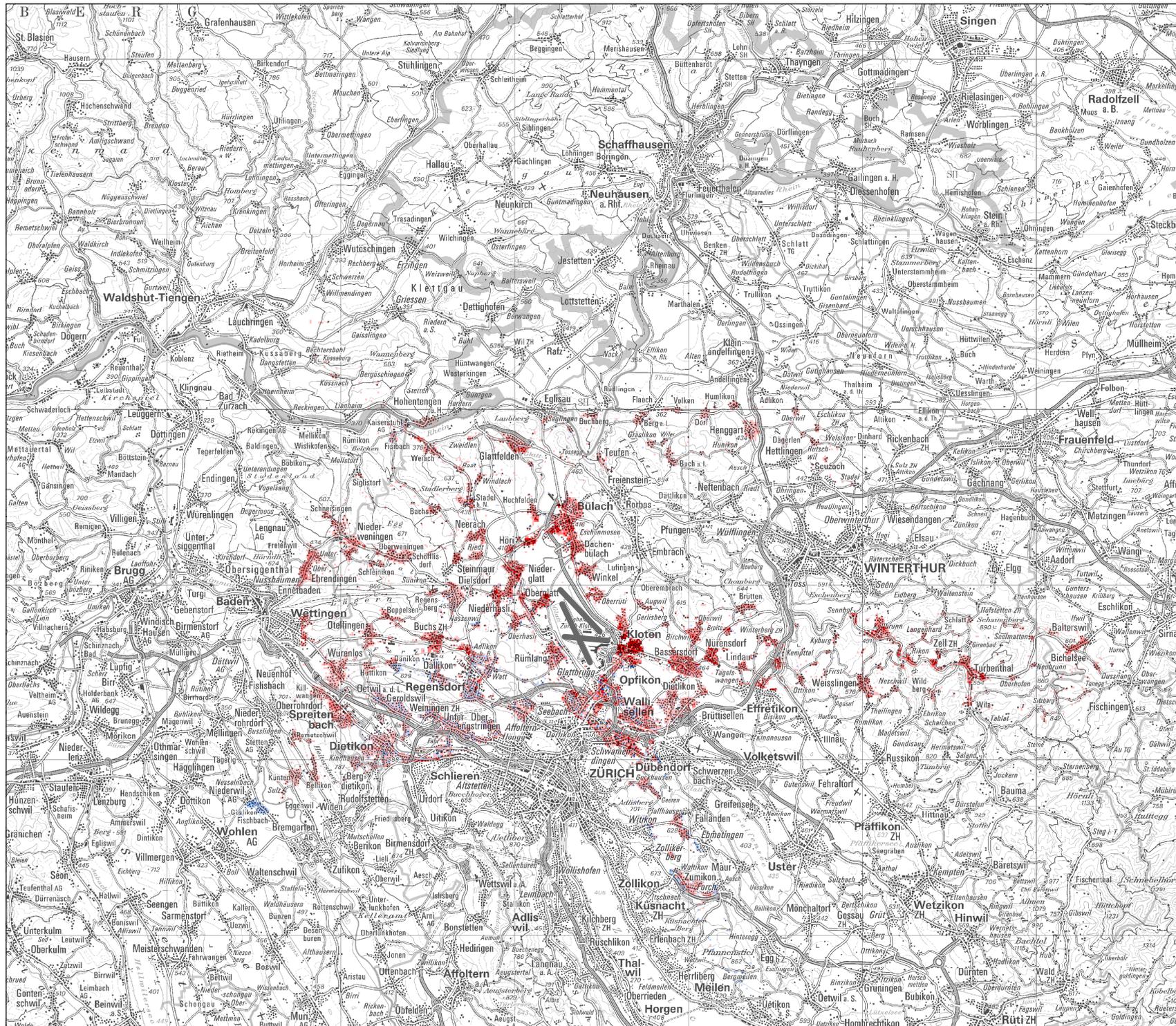
Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH

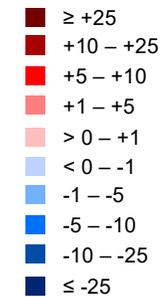
Version / Datum / 1 / 12.06.2024 / glma

Ersteller:

[01_ZRH_ZFI23_SENS_ZFI23-ZFI22_V1.mxd]

[zf23_pm25-zf22_pm25.tif]



Flughafen Zürich**Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2023****Sensitivitätsbetrachtungen****Karte 2****Differenzen in den HA
2023 minus 2022****Legende****Differenz in den HA
(in Anzahl Personen pro Hektare)**

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

**Impressum**Übersichtskarte
PK200:Quelle: Bundesamt
für Landestopografie

Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH

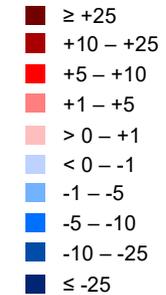
Version / Datum / 1 / 12.06.2024 / glma

Ersteller:

[02_ZRH_ZFI23_SENS_HA23-HA22_V1.mxd]

[ha23-ha22.tif]



Flughafen Zürich**Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2023****Sensitivitätsbetrachtungen****Karte 3****Differenzen in den HSD (PM25)
2023 minus 2022****Legende****Differenz in den HSD (PM25)
(in Anzahl Personen pro Hektare)**

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

**Impressum**

Übersichtskarte PK200: Quelle: Bundesamt für Landestopografie

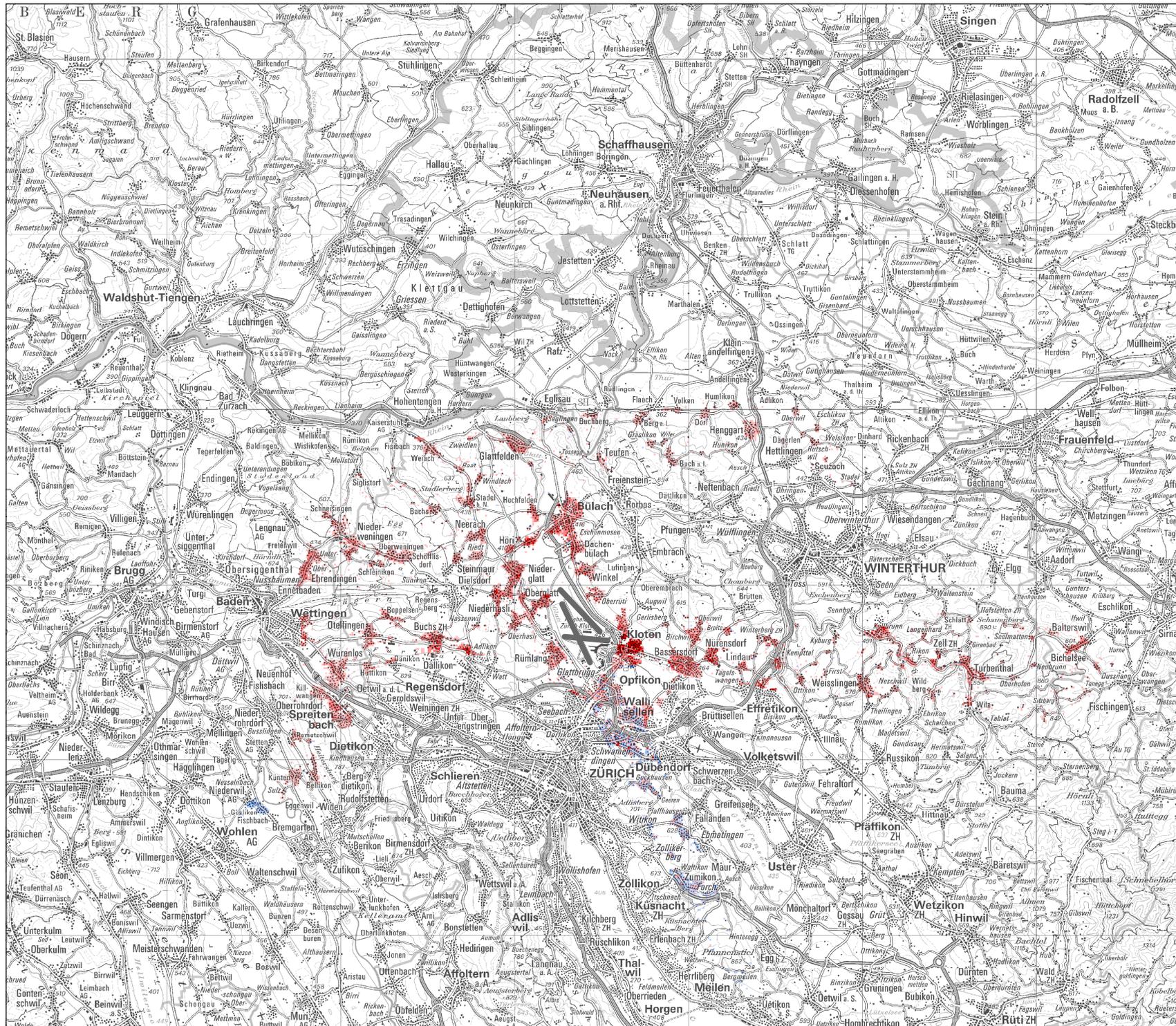
Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH

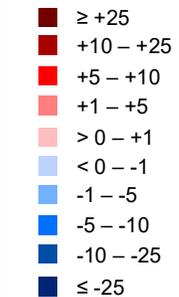
Version / Datum / 1 / 12.06.2024 / glma

Ersteller:

[03_ZRH_ZFI23_SENS_HSD23-HSD22_V1.mxd]

[hsd23_pm25-hsd22_pm25.tif]



Flughafen Zürich**Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2023****Sensitivitätsbetrachtungen****Karte 4****Differenzen im ZFI (PM25)
2023 minus RZ****Legende****Differenz im ZFI (PM25)
(in Anzahl Personen pro Hektare)**

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

**Impressum**

Übersichtskarte PK200: Quelle: Bundesamt für Landestopografie

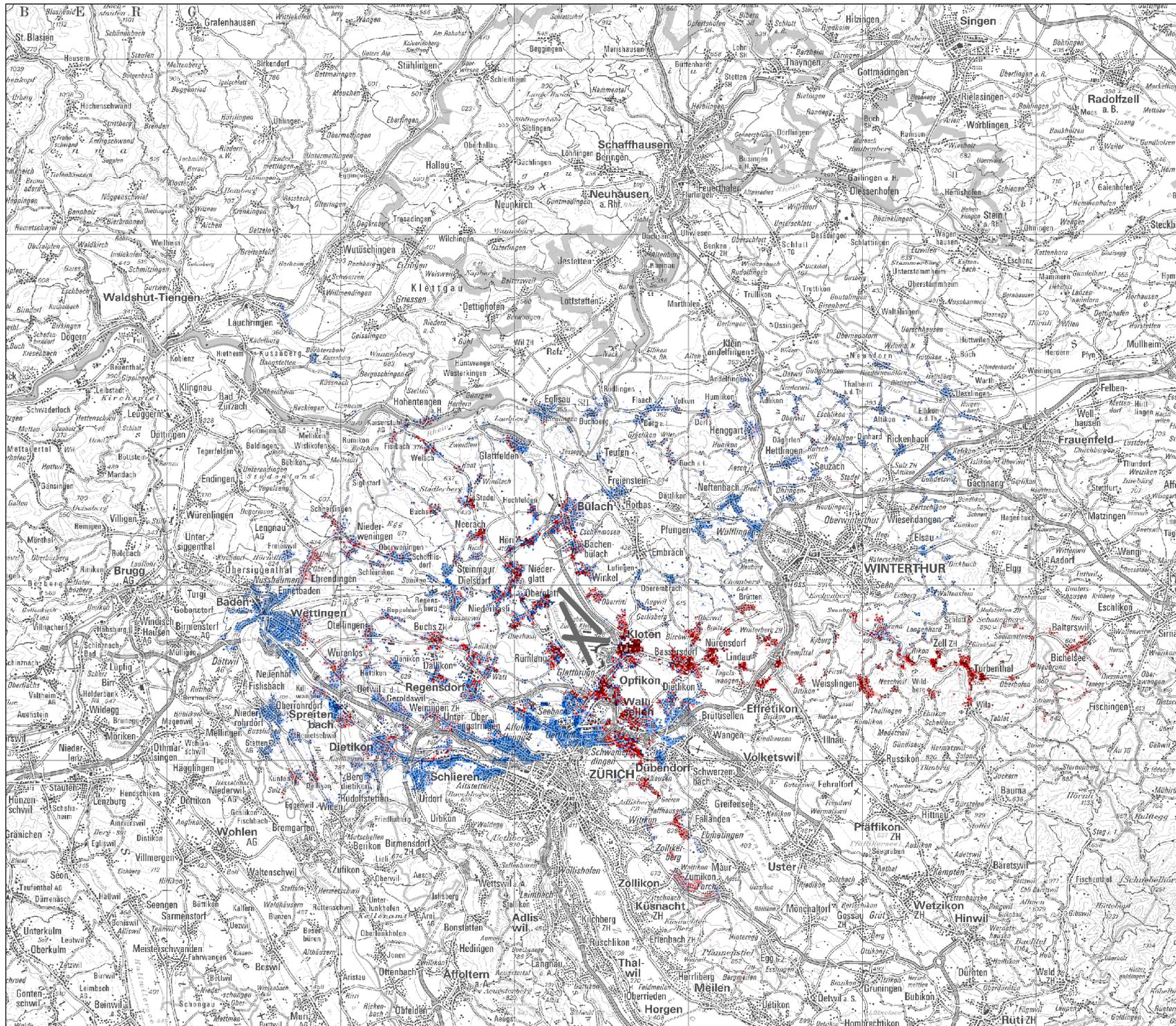
Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH

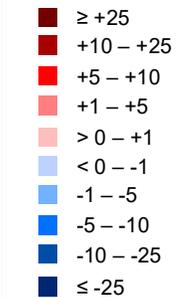
Version / Datum / 2 / 26.10.2024 / bes

Ersteller:

[04_ZRH_ZFI23_SENS_ZFI23-RZ_V2.mxd]

[zf23_pm25-zfi_rz2_v2.tif]



Flughafen Zürich**Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2023****Sensitivitätsbetrachtungen****Karte 5****Differenzen in den HA
2023 minus RZ****Legende****Differenz in den HA
(in Anzahl Personen pro Hektare)**

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

**Impressum**

Übersichtskarte PK200: Quelle: Bundesamt für Landestopografie

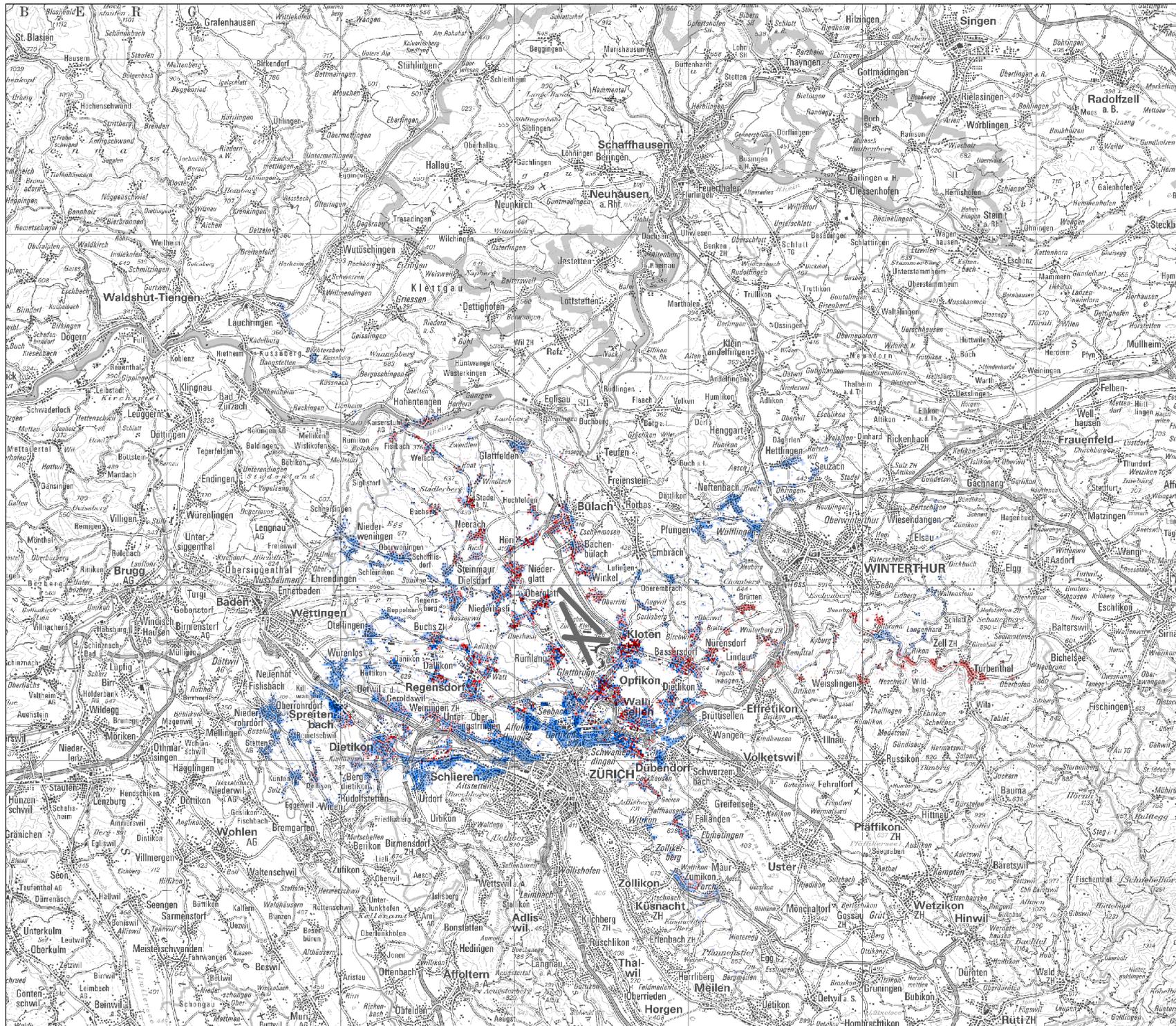
Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH

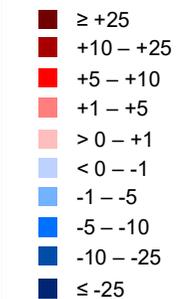
Version / Datum / 2 / 26.10.2024 / bes

Ersteller:

[05_ZRH_ZFI23_SENS_HA23-RZ_V2.mxd]

[ha23-ha_r22_V2.tif]



Flughafen Zürich**Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2023****Sensitivitätsbetrachtungen****Karte 6****Differenzen in den HSD (PM25)
2023 minus RZ****Legende****Differenz in den HSD (PM25)
(in Anzahl Personen pro Hektare)**

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

**Impressum**Übersichtskarte
PK200: Quelle: Bundesamt
für Landestopografie

Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH

Version / Datum / 2 / 26.10.2024 / bes

Ersteller:

[06_ZRH_ZFI23_SENS_HSD23-RZ_V2.mxd]

[hsd23_pm25-hsd_rz2_V2.tif]

