

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

Flughafen Zürich

Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2024

Sensitivitätsbetrachtungen 2023

Auftrags-Nr.:	5214.035721
Bericht-Nr.:	5214.035721-2
Auftraggeber:	Amt für Mobilität des Kantons Zürich
Anzahl Seiten:	40
Beilagen:	9 Karten (A4-Format)
Die Verfasser:	B. Schäffer S. Schalcher C. Affolter M. Gligorijevic

Status: genehmigter Bericht

Dübendorf, 27. Oktober 2025
Der Projektleiter:

Abteilung Akustik / Lärminderung
Der Abteilungsleiter:

Dr. Beat Schäffer

Dr. Jean Marc Wunderli

Zusammenfassung

Am 21. Februar 2025 beauftragte das Amt für Mobilität des Kantons Zürich die Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, den Zürcher Fluglärm-Index (*ZFI*) für das Jahr 2024 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 2023 und dem Berichtsjahr 2024 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 2024 und dem Vorjahr 2023 – wie bereits auch zwischen den Jahren 2022 und 2023 – eine methodische Änderung. Namentlich wurde der Quelldatensatz des Fluglärmrechnungsprogramms FLULA2 aktualisiert. Um deren Einfluss auf den *ZFI* bzw. dessen Änderung zwischen 2023 und 2024 auszuweisen, wurde der *ZFI* für das Jahr 2023 vereinfacht erneut ermittelt, unter Verwendung der aktualisierten Quelldaten und einer einheitlichen Einfügungsdämpfung von –25 dB für Bauten mit passiven Schallschutzmassnahmen. Es zeigt sich, dass die aktualisierten Quelldaten von FLULA2 die *HA*, die *HSD* und somit den *ZFI* für das Jahr 2023 deutlich um 5% (*HA*), 3% (*HSD*) bzw. 4% (*ZFI*) reduzierten und somit deren Anstieg wegen der Entwicklung im Flugbetrieb zwischen 2023 und 2024 teilweise kompensierten. Diese Abnahmen sind auf die akustisch günstige Entwicklung der Flugzeuge in den letzten Jahren zurückzuführen (insbesondere des neu explizit berücksichtigten E290). In den Sensitivitätsbetrachtungen werden die Flugbetriebskomponenten 2023 ebenfalls um die Aktualisierung der Quelldaten bereinigt, um ausschliesslich die flugbetrieblichen Änderungen (ohne die methodische Änderung) auszuweisen, und mit der Neuberechnung 2023 (aktualisierte Quelldaten) als Referenz verglichen.

Der *ZFI*, die *HSD* und die *HA* des Jahres 2024 nahmen gegenüber dem Vorjahr 2023 aufgrund der anhaltenden Erholung des Flugbetriebs von der COVID-19 Situation zu (Vergleich der offiziellen Monitoringwerte), jedoch deutlich weniger als in den Vorjahren. Die *HA* nahmen um 7% zu, die *HSD* 2% und der *ZFI* um 5% (Differenzen inklusive Aktualisierung der Quelldaten).

Die vorliegende Sensitivitätsanalyse zwischen dem Berichtsjahr 2024 und dem Vorjahr 2023 liefert folgende Befunde: Ohne die methodische Änderung nahmen die Monitoringwerte zwischen dem Jahr 2023 und 2024 (beide mit aktualisiertem Quelldatensatz und einheitliche Einfügungsdämpfung von –25 dB) um 13% (*HA*), 5% (*HSD*) bzw. 9% (*ZFI*) zu. Dabei hätte das Bevölkerungswachstum alleine (d.h. ohne Veränderungen im Flugbetrieb) den *ZFI* um 1% erhöht; die restliche Zunahme wird durch den Flugbetrieb verursacht. Bei den Komponenten des Flugbetriebs trug hauptsächlich die starke Zunahme der Flugbewegungszahlen mit +9% zur Zunahme des *ZFI* bei. Die Flugbetriebskomponenten Fluggeometrien und Flugzeugflotte trugen mit 1.0% bzw. 0.7% nur wenig und die Routenbelegung mit 0.1% nur vernachlässigbar zu den Veränderungen im *ZFI* bei. Die Summe der *ZFI*-Differenzen der Sensitivitätsanalyse fällt dabei für die *HSD* (und damit auch für den *ZFI*) deutlich grösser aus als die offizielle Differenz zwischen den Jahren 2024 und 2023. In der Nacht konnten die individuellen Einflüsse der drei Komponenten Fluggeometrien, Flugzeugflotte und Routenbelegung aufgrund verschiedener betrieblicher Änderungen nicht ausreichend separiert werden. Eine kombinierte Betrachtung der drei Komponenten zeigte, dass diese den Bewegungsanstieg

gemeinsam deutlich kompensierten, sodass der Anstieg in den *HSD* und dem *ZFI* schwächer ausfiel als aufgrund der Bewegungen alleine zu erwarten gewesen wäre.

Im Jahr 2024 lag der *ZFI* 17% über dem Wert des Referenzzustands, wobei die *HA* um 4% darunter lagen, die *HSD* hingegen um 71% darüber. Eine zusätzliche Sensitivitätsanalyse zeigt, dass das Bevölkerungswachstum um den Flughafen vom Referenzzustand zum Jahr 2024 alleine (d.h. ohne Veränderungen im Flugbetrieb) zu einer Zunahme des *ZFI* von 31% geführt hätte. Aufgrund der starken Veränderungen im Flugbetrieb nahm der *ZFI* hingegen deutlich um 13% ab, wobei der günstigere, die um -33% *HA* vermin- dernde Flugbetrieb am Tag den ungünstigeren Flugbetrieb in der Nacht, welcher die *HSD* um +35% erhöhte, deutlich zu kompensieren vermochte. Dennoch sank diese Kompensation des Bevölkerungswachstums durch den Flugbetrieb seit dem letzten Jahr wiederum deutlich.

Inhalt

1.	Auftrag	5
2.	Grundlagen und Methodik	7
2.1.	Übersicht	7
2.2.	Berücksichtigung der Aktualisierung der Quelldaten.....	9
2.3.	Einfluss von Veränderungen in der Wohnbevölkerung.....	10
2.4.	Einfluss von Veränderungen der passiven Massnahmen.....	10
2.5.	Einfluss von Veränderungen in den Flugbewegungszahlen.....	11
2.6.	Einfluss von Veränderungen in der Flugzeugflotte	11
2.7.	Einfluss von Veränderungen in der Flugroutenbelegung.....	12
2.8.	Einfluss von Veränderungen in den Fluggeometrien	12
2.9.	Rangfolge der Einflussgrössen	13
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 2023 zum Berichtsjahr 2024.....	17
4.1.	Einfluss des aktualisierten Quelldatensatzes von FLULA2 auf den <i>ZFI</i>	17
4.2.	Veränderung im <i>ZFI</i> vom Vorjahr 2023 zum Berichtsjahr 2024	19
4.3.	Einfluss von Veränderungen in der Bevölkerung	20
4.4.	Einfluss von Veränderungen im Flugbetrieb.....	21
4.5.	Zusammenstellung der Resultate.....	30
5.	Unsicherheit der Berechnungen	32
6.	Abkürzungen und Literatur	33
6.1.	Verwendete Abkürzungen.....	33
6.2.	Literatur.....	34
7.	Verzeichnisse.....	37
7.1.	Abbildungsverzeichnis.....	37
7.2.	Tabellenverzeichnis	38
7.3.	Kartenverzeichnis	39
8.	Anhang	40

1. Auftrag

Am 21. Februar 2025 beauftragte das Amt für Mobilität des Kantons Zürich die Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, den Zürcher Fluglärm-Index (*ZFI*) für das Jahr 2024 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 2023 ausgewiesen werden. Der RZ wurde vom Regierungsrat des Kantons Zürich definiert und bildet die Grundlage des heutigen *ZFI*-Richtwerts (vgl. *ZFI*-VO [51]). 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, 31, 37, 39, 40, 42, 46] (2005 bis 2023) ausgewiesen. Die Berechnungen sollen nach dem in [2] dokumentierten Verfahren und unter Anwendung der aktuellen *ZFI*-VO vom 7. Dezember 2011 [51] 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 [18]. 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 2023 und dem Berichtsjahr 2024 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 2024 und dem Vorjahr 2023 – wie bereits zwischen den Jahren 2022 und 2023 – eine methodische Änderung. Namentlich wurde der Quel-
lendatensatz des Fluglärmrechnungsprogramms FLULA2 aktualisiert. Im Gegensatz zum letzten Berechnungsjahr 2023 [45, 46], wo deren Einfluss auf den *ZFI* bzw. dessen Änderung zwischen 2022 und 2023 nicht explizit ausgewiesen wurde und die Änderungen im *ZFI* zwischen den beiden Jahren somit implizit auch die Aktualisierung der Quelldaten beinhalteten, werden in diesem Jahr – wie bei der letzten Aktualisierung im Berechnungsjahr 2018 [34] – die Änderungen explizit ausgewiesen. Dabei soll eine vereinfachte

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.

Berechnung mit einheitlicher Einfügedämpfung von -25 dB für Bauten mit passiven Schallschutzmassnahmen (statt von -25 und -27 bis -43 dB je nach Gebäudealter) angewendet werden. Auch in den Sensitivitätsbetrachtungen sollen die Flugbetriebskomponenten 2023 um die Aktualisierung der Quelldaten bereinigt werden, um ausschliesslich die flugbetrieblichen Änderungen auszuweisen, und mit der Neuberechnung 2023 (aktualisierte Quelldaten) als Referenz verglichen werden. Der Vergleich der Monitoringwerte des Jahres 2023 mit den Neuberechneten Werten 2023 (Aktualisierung Quelldaten) zeigt zudem auf, wie stark die Entwicklung der Flugzeugflotte (dieses Jahr repräsentiert durch die Aktualisierung der Quelldaten C560X und E290) die Entwicklung die *HA*, die *HSD* und den *ZFI* verminderten.

Die Resultate sollen in zwei technischen Berichten zuhanden des Auftraggebers dokumentiert werden. Der erste Teilbericht [48] dokumentiert den *ZFI* bzw. dessen Komponenten *HA* und *HSD* für das Jahr 2024 sowie für den RZ und die Jahre 2005 bis 2023. Der vorliegende zweite Teilbericht dokumentiert den Einfluss der Aktualisierung der Quelldaten auf den *ZFI* des Jahres 2023 sowie die Sensitivitätsanalyse zwischen dem Berichtsjahr 2024 und dem Vorjahr 2023.

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 2023 und dem Berichtsjahr 2024 erläutert. Zwischen den beiden Berechnungsjahren fand eine Aktualisierung der Quelldaten statt (vgl. Kap. 1). In der vorliegenden Sensitivitätsanalyse wird – wie bei den beiden letzten Aktualisierung in den Berechnungsjahren 2018 [32] und 2023 [45] – die Quelldatenaktualisierung aus den Berechnungen ausgeschlossen, um ausschliesslich die realen Änderungen im Flugbetrieb zu betrachten (vgl. Kap. 2.2). Wie im Berechnungsjahr 2018, aber im Gegensatz zum Jahr 2023, werden für die Vergleiche mit dem Vorjahr die Fluglärmbelastung sowie die *HA*, die *HSD* und der *ZFI* des Jahres 2023 basierend auf dem aktualisierten Quelldatensatz von FLULA2 neu berechnet, welcher auch für das vorliegende Berichtsjahr 2024 verwendet worden war. Die Differenzen in den *HA*, den *HSD* und im *ZFI* zwischen 2024 und 2023 (offizielle Monitoringwerte) enthalten somit implizit auch die Quelldatenaktualisierung, die Sensitivitätsbetrachtungen inkl. neu berechnete Vergleichswerte 2023 (aktualisierte Quelldaten) 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	Berichtsjahr	Sensitivitätsanalysen	Referenzen
2023	2022 vs. 2023	[45]	2014	2013 vs. 2014 RZ vs. 2014	[23]
2022	2021 vs. 2022	[43]	2013	2012 vs. 2013 RZ vs. 2013	[21]
2021	2020 vs. 2021	[41]	2012	2011 vs. 2012 2000 vs. 2012	[19]
2020	2019 vs. 2020	[38]	2011	2010 vs. 2011 2000 vs. 2011	[16]
2019	2018 vs. 2019	[36]	2010	2009 vs. 2010 2000 vs. 2010	[13]
2018	2017 vs. 2018	[32]	2009	2008 vs. 2009 2000 vs. 2009	[10]
2017	2016 vs. 2017	[30]	2008	2007 vs. 2008 2000 vs. 2008	[8]
2016	2015 vs. 2016	[26]	2007	2006 vs. 2007 2000 vs. 2007 RZ vs. 2007	[4] [7] [3]
2015	2014 vs. 2015	[25]	2006	2005 vs. 2006	[5]

2.1. Übersicht

Die Berechnungsvorschrift zur Ermittlung des *ZFI* und deren technische Umsetzung sind in [2] und [48] dokumentiert. Die Sensitivitätsuntersuchungen werden seit dem Berechnungsjahr 2012 [19] unter Berücksichtigung passiver Schallschutzmassnahmen, also gemäss heute offizieller Berechnung nach ZFI-VO [51], 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 [50] 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 [18]. Daher werden die Komponenten der Sensitivitätsanalyse nicht dem offiziellen Monitoringwert aus [48], sondern einem **Vergleichswert** gegenübergestellt, welcher **einheitlich mit $D = -25$ dB für Bauten mit PM berechnet** wird (Index **PM25²**). 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 2023 zum Berichtsjahr 2024 bestimmen, so wird eine *ZFI*-Berechnung mit den Inputdaten aus dem Berichtsjahr 2024 durchgeführt, jedoch mit der Flugzeugflotte aus dem Vorjahr 2023. Diese Berechnung wird mit der *ZFI*-Berechnung des Berichtsjahres 2024 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-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 [48]).

² Bis und mit Berechnungsjahr 2017 wurde der Index PM25 als KSL25 (für "Komfort- und Schalldämmlüftung") gekennzeichnet. Da seit dem Berechnungsjahr 2018 die passiven Massnahmen auch Fensterschliessmechanismen beinhalten [34], wird der Index verallgemeinert als PM25 bezeichnet, welcher alle Arten passiver Massnahmen umfasst.

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 2024, als Vorjahr das Jahr 2023.

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 2024 wurde der aktualisierte Datensatz RC2025_01 verwendet [49], während für das Vorjahr der Quelldatensatz RC2024_01 verwendet worden war. Der neue Quelldatensatz bildet die akustisch günstige Entwicklung der Flugzeugflotte ab. Er basiert auf Messungen im Jahr 2022 um den Flughafen Zürich und enthält zwei neue Flugzeugtypen (C560X und E290)⁴.

Die neuen Flugzeugtypen werden in der Berechnung des Betriebsjahres 2024 explizit simuliert (*Footprints*), fehlten im Vorjahr 2023 jedoch noch, bzw. waren anderen Typen zugeordnet (C560X → C550, E290 → E190). Um eine nach Komponenten getrennte Sensitivitätsanalyse durchführen zu können (namentlich für FF, RB, FG), müssen diese Flugzeugtypen des Betriebsjahres 2024 auch im Flottenmix des Vorjahres 2023 explizit ausgewiesen werden. Aus diesem Grund wird ein Teil der *Footprints*⁵ neu simuliert. Namentlich werden die typen-, routen- und tageszeitspezifischen Flüge (Radardaten) des Vorjahres 2023, 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 diejenigen der 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 2023 um die neuen Typen ergänzt und die Bewegungen auf die neuen und übrigen Flugzeugtypen aufgeteilt. Damit können die Sensitivitäten der Flugbetriebskomponenten

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.

⁴ Empa-Projekte Monitoring II / AirCLOUD (Projekt-Nr. 5211.02005.100.01) und AirCLOUD_Zusatz (Projekt-Nr. 5214033682 / 5214033684).

⁵ 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.

basierend auf dem um die Quelldatenaktualisierung bereinigten Flottenmix 2023 berechnet werden. **Die Bereinigung der Flugbetriebskomponenten des Jahres 2023 in den Sensitivitätsanalysen mit dem aktualisierten Quelldatensatz von FLULA2 (Quelldatensatz RC2025_01 [49]) wird im Nachfolgenden als "2023 (RC25)" bezeichnet.** Diese Methodik entspricht derjenigen des Vorjahres, wo ebenfalls eine Quelldatenaktualisierung stattfand [45].

Zudem wird der **ZFI des Jahres 2023** [46] ebenfalls **neu** (mit aktualisierten Quelldaten; vereinfachte Einfügungsdämpfung von pauschal –25 dB für Bauten mit passiven Schallschutzmassnahmen (PM25): Kap. 1) **ermittelt** ("**2023 PM25 (RC25)**") wie im *ZFI* des Jahres 2018, wo für die Sensitivitätsanalyse als Vorjahr (Referenzzustand) das Jahr 2017 mit aktualisierten Quelldaten verwendet worden war (vgl. [32]), aber im Gegensatz zum Vorjahr 2023 [45]. Somit wird der Einfluss der Aktualisierung des Quelldatensatzes (Flottenentwicklung) auf den *ZFI* sowohl aus den Sensitivitätsanalysen wie auch aus der Differenz zwischen 2024 und 2023 (RC25) ausgeschlossen. Sie ist jedoch in der Differenz zwischen den offiziellen *ZFI*-Werten der Jahre 2024 und 2023 implizit enthalten. Ein **Vergleich der Monitoringwerte 2023 PM25 und 2023 PM25 (RC25)**, d.h. beide mit vereinfachter Berechnung PM25, zeigt zusätzlich, wie **stark die Flottenentwicklung (C560X und E290) die HA, die HSD und den ZFI zwischen 2023 und 2024 verminderten** (vgl. Kap. 4.1).

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 Fluglärmkarten (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 [50]. Der methodische Unterschied hierbei ist gering, wobei die Differenz zwischen den Berechnungen über die Jahre zunimmt (2012: 76 Personen [18]; 2024: 706 Personen [48]).

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 [50] berücksichtigt, um den Einfluss der passiven Massnahmen möglichst genau zu bestimmen. Sämtliche Fluglärmraten (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 [48]).

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 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 ($D = -25dB$).

ZFI_{BEW_VJ} ZFI des Berichtsjahres, berechnet mit den Flugbewegungszahlen des Vorjahres unter Berücksichtigung passiver Massnahmen ($D = -25dB$) 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 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 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*⁵ 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 2024 und dem Vorjahr 2023 die *Footprints* des Jahres 2024 verwendet.

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_{BEW_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 $D = -25\text{dB}$.

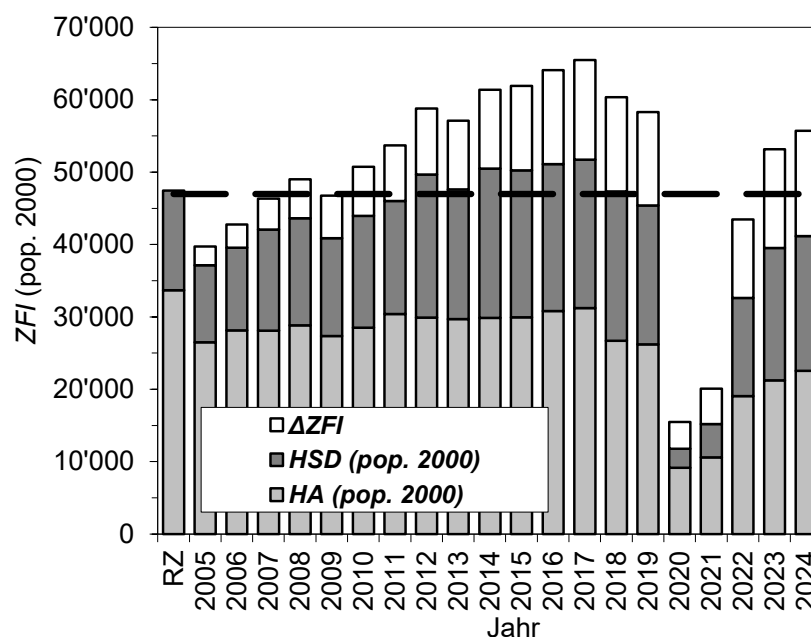
Die Sensitivitätsanalyse vermag somit die Anteile der Komponenten Bevölkerung und Flugbetrieb an der Veränderung des ZFI zwischen Berichts- und Vorjahr zu quantifizieren. Der Einfluss der beiden Komponenten auf Veränderungen im ZFI wird im Detail in Kapitel 3 diskutiert.

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.

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 2024 werden auf den Karten 7 bis 9 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 2024) und dem RZ, welcher den Richtwert von 47'000 Personen bestimmt [51], 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 2024 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 2024 hätte der *ZFI* ohne Bevölkerungswachstum den Richtwert erneut eingehalten, 2020 bis 2024 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. [34]) und zwischen 2018 und 2019 durch die Berücksichtigung aller Gebäude mit Baujahr 2017 und jünger als Bauten mit PM (vgl. Kap. 3.2.5 in [37]) der Anstieg der *HSD* bzw. des *ZFI* rechnerisch etwas reduziert wurde, 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, und schliesslich in diesem Berechnungsjahr (2024) durch die Berücksichtigung von mehr Minergie-Gebäuden [48] der Anstieg rechnerisch wiederum etwas reduziert wurde. Die oben erwähnte Kompensation des Bevölkerungswachstums ist auf eine im Vergleich zum RZ günstige (d.h. den *ZFI* vermindernde) 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 2024 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 des Flugbetriebs von 2020 zu 2024 wieder rückläufig ist. Der Grund für diese massiven Veränderungen sind die Flugbewegungszahlen, welche 2020 noch 37% (Tag: 38%, Nacht: 24%) der Bewegungen von 2019 entsprachen, bis 2024 jedoch wieder auf 95% (Tag: 94%, Nacht: 113%) der Bewegungen von 2019 anstiegen. Der Richtwert wird in den Jahren 2020 bis 2022 mit und ohne Bevölkerungswachstum deutlich eingehalten, in den Jahren 2023 und 2024 jedoch mit Bevölkerungswachstum wieder klar überschritten (Abbildung 3-1). In Abbildung 3-1 ist zu berücksichtigen, dass das tatsächliche Wachstum des *ZFI* wegen der methodischen Änderung des aktualisierten Quellendatensatzes zwischen 2022 und 2023 [45, 46], wie auch zwischen 2023 und 2024 (Kap. 2.2), etwas kompensiert wird. Die Kompensation des Bevölkerungswachstums durch den Flugbetrieb in den letzten Jahren wird im Folgenden detaillierter untersucht.



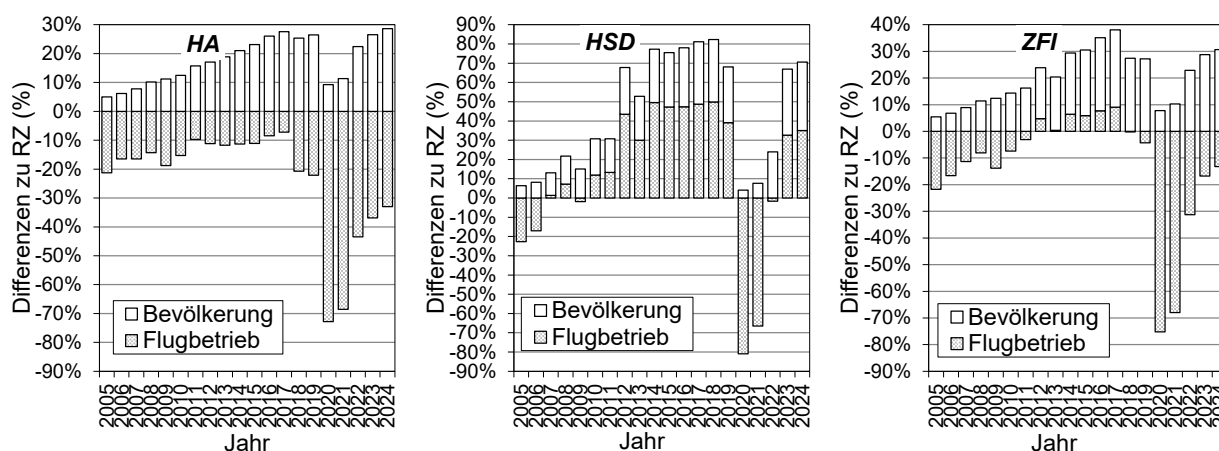
[ZFI_RZ_05-24_SensBEV_FB_zuRZ_V1.xlsx / ZFI_SENS_BEV]

Abbildung 3-1 Der ZFI als Summe der HA und HSD für den RZ sowie die Jahre 2005 bis 2024, 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 [48]). **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 2024, 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, 2020–2024) 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 2023 und 2024 – 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, 2023 und 2024 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 2024 (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. Diese Entwicklung ist unter anderem auf die akustisch günstige Entwicklung der Flugzeugflotte über die Jahre zurückzuführen, welche in FLULA2 mit Aktualisierungen der Quelldaten in den Jahren 2018, 2023 und 2024 abgebildet wurde. 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. Es zeigt sich bis anhin aber (unter Ausklammern der

COVID-19-Jahre), mit wie auch ohne Berücksichtigung des Bevölkerungswachstums (vgl. Abbildung 3-1) der Trend, dass der *ZFI* (und somit die Anzahl betroffener Personen) seit 2017 über die Jahre abnimmt.



[ZFI_RZ_05-24_SensBEV_FB_zuRZ_V1.xlsx / ZFI_SENS_BEV]

Abbildung 3-2 Einfluss der Änderungen in der Bevölkerung und im Flugbetrieb zwischen dem RZ und den Jahren 2005 bis 2024 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 zwischen 2017 [28] und 2018 [35] (siehe auch [33]) sowie – in etwas geringerem Ausmass – auch zwischen 2022 [44] und 2023 [47] und zwischen 2023 und 2024 [49] zurückzuführen (Berücksichtigung der akustisch günstigen Entwicklung der Flugzeugflotte bzw. der Flugverfahren in den letzten Jahren: Details siehe [34] und nachfolgendes Kapitel 4.1). Andererseits trug auch die Abnahme der Flugbewegungszahlen zwischen 2018 und 2020 – bei bis anhin nicht vollständiger Erholung zwischen 2020 und 2024 – zur Abnahme des *ZFI* bei (vgl. nachfolgendes Kap. 4), wobei in den Jahren 2023 und 2024 in der Nacht die Flugbewegungszahlen diejenigen von 2019 übertrafen und damit die Kompensation des Bevölkerungswachstums (*HSD*) wieder verschwand, und der Flugbetrieb zum Wachstum im *ZFI* beitrug.

4. Sensitivitätsanalyse *ZFI* vom Vorjahr 2023 zum Berichtsjahr 2024

Im Folgenden werden die Differenzen im *ZFI* zwischen dem Vorjahr 2023 und dem Berichtsjahr 2024 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 [ZFI24_SENS23.mdb] hektarpunktspezifisch berechnet und verwaltet. Die pro Gemeinde zusammengefassten Daten befinden sich in einer Excel-Datei [ZFI24_SENS23.xlsx].

4.1. Einfluss des aktualisierten Quelldatensatzes von FLULA2 auf den *ZFI*

Die Aktualisierung der Quelldaten zwischen den Berechnungen 2023 (früherer Quelldatensatz RC2024_01 [47]) und 2024 (aktueller Quelldatensatz RC2025_01 [49]) – namentlich die Einführung des C560X und des E290 – verursachte eine gewisse Kompensation des realen Anstiegs des *ZFI* (offizielle Monitoringwerte [46, 48]) zwischen diesen beiden Jahren durch die akustisch günstige Flottenentwicklung, die Sensitivitätsbetrachtungen hingegen nicht (vgl. Kap. 2.2). Eine vereinfachte Berechnung illustriert dies⁶: Würden für das Betriebsjahr 2023 die neuen Quelldaten berücksichtigt (RC2025_01), so würde sich die gesamthaft emittierte Schallenergie im Vergleich zur Belastungsrechnung 2023 mit den verwendeten früheren Quelldaten (RC2024_01) vermindern (Quantifizierung der Schallenergie: vgl. Fussnote ⁹). Ohne Cutback (relevant für Gebiete in unmittelbarer Flughafennähe) wie auch mit Cutback (relevant für weiter entfernte Gebiete) würde sich Schallenergie um rund 0.1–0.2 dB vermindern (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1 Differenz zwischen der durch den Flugbetrieb emittierten Schallenergie des Jahres 2023, für den Quelldatensatz RC2024_01 (für die Belastungsrechnung und somit den *ZFI* des Jahres 2023 verwendet) und den Quelldatensatz RC2025_01 (für die Berechnungen 2024 sowie für die Sensitivitätsbetrachtungen 2024 vs. 2023 verwendet). Quantifizierung der Schallenergie gemäss Fussnote ⁹, mit und ohne Cutback (CB).

Differenz	Tag 06–22 h	Nacht 22–06 h
RC2025_01 – RC2024_01, Ohne CB	–0.19	–0.11
RC2025_01 – RC2024_01, Mit CB	–0.23	–0.11

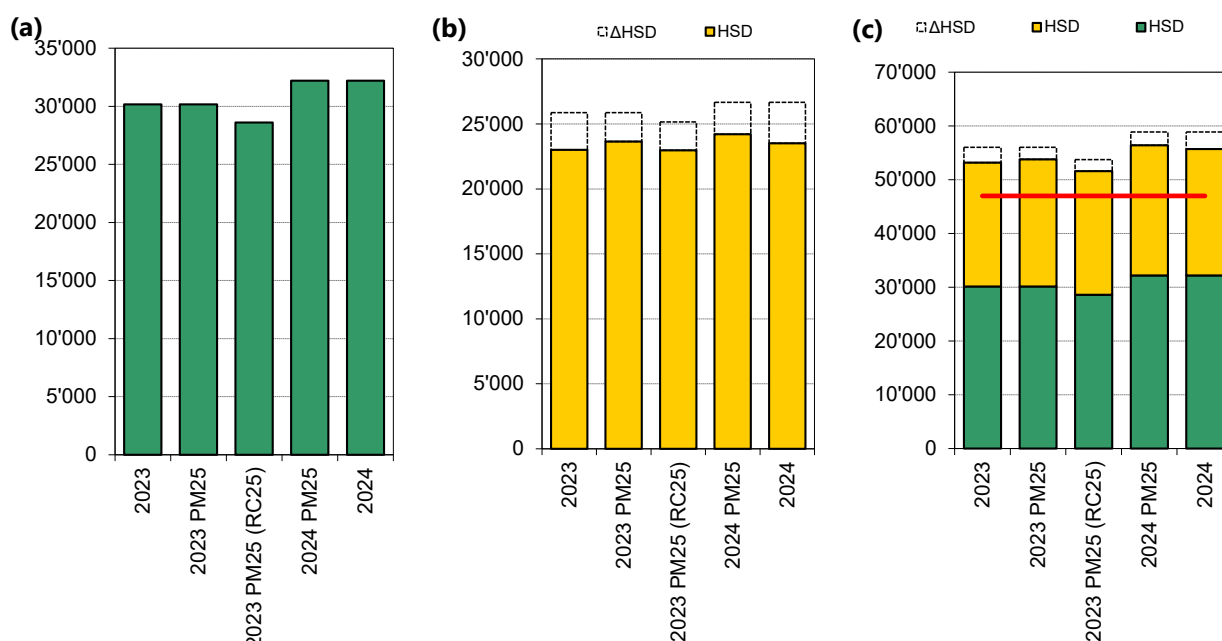
Gemäss [1] können die Veränderungen in der Wohnbevölkerung je nach Belastungsniveau 20–30% pro dB betragen. Unter der Annahme einer (mittleren) Veränderung von 25% würden die Bevölkerungszahlen aufgrund der in Tabelle 4-1 ausgewiesenen verminderten Schallenergie rund 3–5% ohne CB bzw. 3–6% mit CB abnehmen. Verwendet man eine mittlere Bevölkerungsabnahme von 4% und nimmt weiter vereinfachend an, dass diese linear eine entsprechende Abnahme der *HA*, *HSD* und *ZFI* bewirkt⁷, würden letztere ebenfalls um 4% vermindert.

Entsprechend wurde die tatsächlich durch die Aktualisierung des Quelldatensatzes resultierende Verminderung der *HA*, *HSD* und *ZFI* quantifiziert (**2023 PM25 (RC25)**: vgl. Kap. 2.2). Abbildung 4-1 stellt den

⁶ Berechnungen: [Energet.Abschätzung_FLULA2_RC-Update_OhneCB_V1.xlsx],
[Energet.Abschätzung_FLULA2_RC-Update_MitCB_V1.xlsx].

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

Einfluss des aktualisierten Quelldatensatzes auf die *HA*, die *HSD* und den *ZFI* dar. Im Vergleich zu den früheren Quelldaten von FLULA2 (2023 PM25 (RC25) vs. 2023 PM25) reduzieren die aktualisierten Quelldaten die *HA*, die *HSD* und *ZFI* des Jahres 2023 deutlich, und zwar um 5% (*HA*), 3% (*HSD*) und 4% (*ZFI*) (siehe Tabelle 4-2). Diese deutlichen Abnahmen sind auf die akustisch günstige Entwicklung der Flugzeuge in den letzten Jahren zurückzuführen: Mit dem neuen Quelldatensatz werden die Veränderungen der Flotte (hier C560 und E290, letzterer v.a. bei Helvetic Airways) während der letzten Jahre mit einer gewissen Verzögerung in Fluglärmrechnungen und somit auch in der Ermittlung des *ZFI* berücksichtigt. Zu dieser günstigen Entwicklung in der Flugzeugflotte trägt grösstenteils der E290 bei. Tatsächlich weist der E290 beim Start einen knapp 5 dB tieferen L_{AE} als der E190 auf, welchem ersterer zugeordnet worden war.



[ZF124_SENS23_V2.xlsx / Übersicht]

Abbildung 4-1 (a) Anzahl *HA* und (b) Anzahl *HSD* und die Differenz ΔHSD zum *ZFI* ohne Berücksichtigung passiver Schallschutzmassnahmen und (c) Kombination der *HA* und *HSD* sowie die Differenz ΔHSD zum *ZFI* ohne Berücksichtigung passiver Schallschutzmassnahmen. Werte für das Jahr 2023 mit früherem Quelldaten unter Verwendung passiver Massnahmen (PM) nach SIA181 (2023), mit früherem Quelldaten und PM einheitlich mit $D = -25$ dB (PM25) (2023 PM25), mit PM25 und aktualisierten Quelldaten (2023 PM25 (RC25)), wie auch für das Jahr 2024, mit aktualisierten Quelldaten und PM25 (2024 PM25) und PM nach SIA181 (2024). Zahlenwerte: Tabelle 4-2; Richtwert: 47'000 Personen.

Weiter zeigt der Vergleich zwischen den Berechnungen des *ZFI* 2023 PM25 (RC25) und *ZFI* 2024 PM25 (beide mit dem neuen Quelldatensatz), dass ohne die methodische Änderung des aktualisierten Quelldatensatzes eine deutliche Zunahme in den *HA*, den *HSD* und im *ZFI* zwischen 2023 und 2024 zu verzeichnen ist, und zwar um 13% (*HA*), 5% (*HSD*) und 9% (*ZFI*) (siehe Tabelle 4-2). Diese Werte sind auf die Entwicklung in der Bevölkerung und im Flugbetrieb zurückzuführen, nachfolgend im Detail aufgezeigt wird. Schliesslich zeigt der Vergleich des *ZFI* 2023 PM25 (mit früherem Quelldatensatz RC2024_01 [47]) mit dem *ZFI* 2024 PM25 (mit aktuellem Quelldatensatz RC2025_01 [49]) eine (geringere) Zunahme in den *HA* um 7%, in den *HSD* um 2% sowie in der Summe im *ZFI* um 5% (siehe Abbildung 4-1 und Tabelle 4-2). Diese Differenzen entsprechen annähernd den Differenzen zwischen den offiziellen Monitoringwerten (mit

passiven Massnahmen nach SIA181) [48], da die offiziellen Berechnungen (nach SIA181) und mit PM25 sehr vergleichbar sind (Tabelle 4-2).

Somit wurde der Anstieg im *ZFI* zwischen 2023 und 2024 wegen der Entwicklung in den Bevölkerungszahlen und im Flugbetrieb durch die Aktualisierung des Quelldatensatzes teilweise (aber deutlich) kompensiert.

Tabelle 4-2 Werte der *HA*, *HSD* und des *ZFI* für das Jahr 2023 mit früherem Quelldaten unter Verwendung passiver Massnahmen (PM) nach SIA181 (2023), mit früherem Quelldaten und PM einheitlich mit $D = -25$ dB (PM25) (2023PM25), mit PM25 und aktualisierten Quelldaten (2023PM25 (RC25), wie auch für das Jahr 2024, mit aktualisierten Quelldaten und PM25 (2024 PM25) und PM nach SIA181 (2024).

Jahr	Quelldatensatz	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	Δ <i>HSD</i>	<i>ZFI</i>
2023	RC2024_01	30'165	23'008	2'858	53'173
2023 PM25	RC2024_01	30'165	23'648	2'219	53'813
2023 PM25 (RC25)	RC2025_01	28'608	22'976	2'178	51'583
2024 PM25	RC2025_01	32'213	24'218	2'452	56'431
2024	RC2025_01	32'213	23'512	3'158	55'725
Differenz	absolut	-1'557	-672	-41	-2'229
2023 PM25 (RC25) - 2023 PM25	prozentual	-5%	-3%	-2%	-4%
Differenz	absolut	+3'605	+1'242	+274	+4'847
2024 PM25 - 2023 PM25 (RC25)	prozentual	+13%	+5%	+13%	+9%
Differenz	absolut	+2'048	+570	+233	+2'618
2024 PM25 - 2023 PM25	prozentual	+7%	+2%	+11%	+5%
Differenz	absolut	+2'048	+504	+300	+2'552
2024 - 2023	prozentual	+7%	+2%	+10%	+5%

[ZFI24_SENS23_V2.xlsx / Übersicht]

Bemerkung: Die Zahlen (Abnahme der *HA*, der *HSD* und des *ZFI* durch Aktualisierung des Quelldatensatzes um -5%, -3% bzw. -4% stimmen sehr gut mit der oberen vereinfachten energetischen Abschätzung überein. Auch im letzten Berechnungsjahr wurden die Quelldaten aktualisiert (von RC2022_01 in 2022 [44] auf RC2024_01 in 2023 [47], was gemäss letztjähriger energetischer Abschätzung ebenfalls zu einer Verminderung im *ZFI* um rund 4% führte [45]). Somit wurde der *ZFI* über die letzten zwei Jahre durch die akustisch günstige Entwicklung der Flugzeugflotte deutlich vermindert.

4.2. Veränderung im *ZFI* vom Vorjahr 2023 zum Berichtsjahr 2024

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 [50]. Zusätzlich wird die Komponente PM untersucht. **Die im Folgenden für den Vergleich mit den Sensitivitätskomponenten ausgewiesenen Werte für das Berichtsjahr 2024 (Index: PM25; vgl. Fussnote²) entsprechen daher nicht den offiziellen Monitoringwerten, wie sie in [48] dokumentiert sind. Zudem werden einmalig die Berechnungen nicht auf die ursprüngliche Berechnung des *ZFI* des Vorjahres 2023 mit PM25 bezogen, sondern auf die Neuberechnung (vgl. auch Kap. 4.1) der einzelnen Flugbetriebskomponenten des *ZFI* 2023 mit**

PM25 sowie aktualisiertem Quelldatensatz von FLULA2 (Bezeichnung "2023 (RC25)"⁸ in den untenstehenden Tabellen und Abbildungen: vgl. Kap. 2.2).

Die *HA*, die *HSD* und somit der *ZFI* des Jahres 2024 (ohne Anforderungen nach SIA-Norm 181) nahmen seit dem Jahr 2023 (RC25) um 13%, 5% bzw. 9% zu (Tabelle 4-3).

Tabelle 4-3 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* vom Jahr 2023 zum Jahr 2024

Jahr	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2024	32'213	24'218	56'431	= <i>ZFI</i> _{24,PM25}
2023 (RC25)	28'608	22'976	51'583	= <i>ZFI</i> _{23,PM25}
Veränderung	absolut	+3'605	+1'242	+4'847 = Δ <i>ZFI</i> _{PM25}
	prozentual	+13%	+5%	+9%

Um die Veränderungen im *ZFI* vom Jahr 2023 zum Jahr 2024 auch räumlich analysieren zu können, werden die Differenzen in den *HA*, den *HSD* und im *ZFI* (PM25) zwischen den Jahren 2023 (frühere Quelldaten) [47] und 2024 (aktualisierte Quelldaten) [49] auf den Karten 1 bis 3, und die Differenzen in den *HA*, den *HSD* und im *ZFI* (PM25) zwischen den Jahren 2023 und 2024 (beide mit aktualisierten Quelldaten) auf den Karten 4 bis 6 am Ende des vorliegenden Berichts dargestellt. Die Karten zeigen dabei die Veränderungen zwischen den Monitoringwerten 2023 und 2024, namentlich mit (Karten 1–3) bzw. ohne (Karten 4–6) der Aktualisierung des Quelldatensatzes (Kap. 2.2). Die räumlichen Verteilungen der *HA*, der *HSD* und des *ZFI* im Jahr 2024 finden sich auf den Karten 2 bis 4 des ersten Teilberichts [48] und diejenigen des Jahres 2023 auf den entsprechenden Karten von [46]. In den nachfolgenden Kapiteln wird ergründet, welche Komponente wie stark zu den in Tabelle 4-3 und in den Karten 4 bis 6 (ohne methodische Veränderung) ausgewiesenen Differenzen beiträgt.

4.3. Einfluss von Veränderungen in der Bevölkerung

4.3.1. Einfluss von Veränderungen in der Wohnbevölkerung

Die Bevölkerung innerhalb der Untersuchungsperimeter des Jahres 2024 nahm von 2023 zu 2024 am Tag und in der Nacht um je rund 1% zu (Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4 Veränderungen der Bevölkerung innerhalb der Untersuchungsperimeter (UP) 2024 von 2023 zu 2024

Bevölkerung	UP	Anzahl Personen im UP Tag (06–22 h)	Anzahl Personen im UP Nacht (22–06 h)
2024	2024	400'617	284'325
2023	2024	396'657	281'675
Veränderung	absolut	+3'960	+2'650
	prozentual	+1%	+1%

⁸ In Kap. 4.1 wurde auch "PM25" in der Bezeichnung des Szenarios aufgeführt ("2023 PM25 (RC25)"), um die vereinfachte Berechnung von derjenigen mit Einfügungsdämpfungen nach SIA181 zu unterscheiden. Im Nachfolgenden, wo alles mit RC25 berechnet wird, wird hingegen – wie auch in den Vorjahren – auf die explizite Nennung von "PM25" in der Bezeichnung verzichtet.

Der Anstieg der Bevölkerung in den Untersuchungsperimetern bewirkt einen Anstieg der *HA* um 0.9%, der *HSD* um 0.4% und insgesamt des *ZFI* um 0.7% (Tabelle 4-5: $ZFI_{BEV,23} = 100\%$; vergleiche auch -1 im Anhang, Kap. 8).

Tabelle 4-5 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2024, berechnet mit den Bevölkerungszahlen und passiven Schallschutzmassnahmen von 2024 bzw. 2023

Bevölkerung	Belastung	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2024	2024	32'213	24'218	56'431	= $ZFI_{24,PM25}$
2023	2024	31'933	24'116	56'049	= $ZFI_{BEV,23}$
Veränderung	absolut	+280	+102	+382	= ΔZFI_{BEV}
	prozentual	+1%	0%	+1%	

4.3.2. Einfluss von Veränderungen der passiven Massnahmen

Die Zunahme passiver Massnahmen im Jahr 2024 im Vergleich zu 2023 führte zu einer Reduktion der *HSD* resp. des *ZFI* um 102 Personen (Tabelle 4-6). 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 4-6 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2024, berechnet mit den passiven Schallschutzmassnahmen von 2024 bzw. 2023 unter Berücksichtigung der erhöhten Anforderungen nach SIA-Norm 181 [50]

Passive Massnahmen	Restliche Inputdaten	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2024	2024	32'213	23'512	55'725	= ZFI_{24}
2023	2023	32'213	23'613	55'826	= $ZFI_{PM,23}$
Veränderung	absolut	0	-102	-102	= ΔZFI_{PM}
	prozentual	0%	-0%	-0%	

4.4. Einfluss von Veränderungen im Flugbetrieb

4.4.1. Einfluss von Veränderungen der Flugbewegungszahlen

Die Flugbewegungszahlen nahmen von 2023 zu 2024 wiederum deutlich zu, am Tag insgesamt um 7% und in der Nacht um 8% zu (Tabelle 4-7). In der ersten und letzten Tagesstunde nahmen die Bewegungen um 18% bzw. um 6% zu (vgl. Abbildung 4-1 in [48]).

Tabelle 4-7 Veränderungen der Flugbewegungszahlen von 2023 zu 2024

Jahr	Tag (06–22 h)	Erste Tagesstunde (06–07 h)	Letzte Tagesstunde (21–22 h)	Nacht (22–06 h)	Total (Tag + Nacht)
2024	232'045	9'275	15'374	14'542	246'587
2023	217'665	7'890	14'564	13'480	231'145
Veränderung	absolut	+14'380	+810	+1'062	+15'442
	prozentual	+7%	+6%	+8%	+7%

Die steigenden Bewegungszahlen führten zu einer Zunahme der *HA* am Tag um 7% und der *HSD* in der Nacht um 13%, was zu einer Zunahme im *ZFI* von insgesamt 9% führte.

Tabelle 4-8 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2024, berechnet mit den Bewegungszahlen von 2024 bzw. 2023 (RC25)

Bewegungszahlen	Restliche Inputdaten	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2024	2024	32'213	24'218	56'431	= <i>ZFI</i> _{24,PM25}
2023 (RC25)	2024	30'145	21'397	51'542	= <i>ZFI</i> _{BEW,23}
Veränderung	absolut	+2'067	+2'821	+4'888	= Δ <i>ZFI</i> _{BEW}
	prozentual	+7%	+13%	+9%	

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

Die Veränderungen in der Flugzeugflotte im Jahr 2024 im Vergleich zum Jahr 2023 erhöhte am Tag die *HA* um knapp 2%, verminderte in der Nacht die *HSD* geringfügig (Abnahme um 0.4%) und erhöhte insgesamt den *ZFI* um knapp 1%. (Tabelle 4-9).

Tabelle 4-9 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2024, berechnet mit der Flugzeugflotte von 2024 bzw. 2023 (RC25)

Flugzeugflotte	Restliche Inputdaten	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2024	2024	32'213	24'218	56'431	= <i>ZFI</i> _{24,PM25}
2023 (RC25)	2024	31'732	24'315	56'047	= <i>ZFI</i> _{FF,23}
Veränderung	Absolut	+481	−97	+383	= Δ <i>ZFI</i> _{FF}
	prozentual	+2%	0%	+1%	

Abbildung 4-2 zeigt die Veränderungen in den Bewegungszahlen und der Schallenergie⁹ pro Flugzeugtyp am Tag vom Jahr 2023 zum Jahr 2024. Hierbei werden 20 akustische Flugzeugtypen dargestellt, sortiert nach absteigender (absoluter) Veränderung der Schallenergie (akustische Typenzuordnung nach [11], für den Quellendatensatz RC2025_01). Insgesamt stieg am Tag die Summe der Schallenergie aller Flugzeugtypen vom Jahr 2023 zum Jahr 2024 um 3%, was die *HA* um 481 Personen bzw. knapp 2% erhöhte (Tabelle 4-9). Die Zunahme der Schallenergie zwischen den Jahren 2023 und 2024 ist auf die Veränderungen in der Zusammensetzung und im Einsatz der Flugzeugflotte zurückzuführen. Diese haben verschiedene Ursachen. Zwischen 2023 und 2024 stieg insgesamt der Flugverkehr erneut an; gleichzeitig wurden Flottenerneue-

⁹ 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 [11], ermittelt. Dazu werden die *L*_{AE} in typenspezifische „Schallenergiedichten“ 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 „Schallenergiedichte“ [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.

rungen zwar vorangetrieben, aber auch Flugzeuge aus der Zwischenlagerung zurückgeholt und wieder integriert. Besonders nahm am Tag der Anteil bzw. die Schallenergie der A320, A321 und E190 zu, während der Anteil der (akustisch günstigen) E290 und A320N im Vergleich zum Vorjahr abnahm (Abbildung 4-2). Die Zunahme der A320 und A321 dürfte unter anderem auf den vermehrten Einsatz des A320ceo und A321ceo zur Erhöhung der Sitzkapazität bei SWISS zurückzuführen sein (Zunahme der Anzahl Flüge um rund 9% zwischen 2023 und 2024¹⁰) und des E190 durch den vermehrten Einsatz bei Helvetic Airways.



[BEWST2_ZFI24_SENS23.xlsm / Anteile]

Abbildung 4-2 Veränderung pro Flugzeugtyp am Tag (a) der Bewegungszahlen (% der Gesamtbewegungen tags im Jahr 2023) und (b) in der Schallenergie [J/m^2] zwischen den Jahren 2023 und 2024. Die Zu-/Abnahmen entsprechen den Differenzen Flugbetrieb 2024 minus Flugbetrieb 2024 mit Flugzeugflotte 2023 (RC25).

In der Nacht blieb die Summe der Schallenergie aller Flugzeugtypen vom Jahr 2023 zum Jahr 2024 mit einer geringfügigen Abnahme von 0.1% annähernd gleich (Abbildung 4-3). Entsprechend änderten auch die HSD kaum (Abnahme um 97 Personen bzw. um 0.4%: Tabelle 4-9). Zwischen den beiden Jahren sank insb. die Schallenergie des A3403, was u.a. auf dessen fortschreitende Ausflottung zurückzuführen sein dürfte (bis anhin ersetzt durch den vermehrten Einsatz des A3303 und des B7773; ab 2025 durch den A350). Die entsprechende Abnahme in der Schallenergie wurde jedoch durch den vermehrten Einsatz mit entsprechend erhöhter Schallenergie der A320, A321, A380 und E190 kompensiert.

¹⁰ Vgl.: <https://report.lufthansagroup.com/2024/annual-report/en/combined-management-report/business-segments/passenger-airlines-business-segment/swiss/> (zuletzt besucht: 01.07.2025)



[BEWST2_ZFI24_SENS23.xlsm / Anteile]

Abbildung 4-3 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 2023 und 2024. Die Zu-/Abnahmen entsprechen den Differenzen Flugbetrieb 2024 minus Flugbetrieb 2024 mit Flugzeugflotte 2023 (RC25).

4.4.3. Einfluss von Veränderungen in der Flugroutenbelegung

Abbildung 4-4 zeigt das Pisten- und Routensystem des Flughafens Zürich. Abbildung 4-5 vergleicht die Routenbelegung der Jahre 2023 und 2024 am Tag. Von den am häufigsten belegten Startrouten am Tag wurden im Jahr 2024 die Routen I28 und K28 um 2% bzw. 1% mehr belegt (Zunahme der Starts nach Westen ab Piste 28 um 3% auf insg. 63%). Dafür nahmen Starts nach Norden ab Piste 32 um 3% ab (N32: -2%; O32: -1%) ab, während die Starts ab Piste 34 sich kaum veränderten und insg. nur wenig genutzt werden. Insgesamt wurden etwas mehr als 24% der Starts am Tag nach Norden abgewickelt (24% auf Piste 32 und < 1% auf Piste 34). Die Piste 10 in Richtung Osten wurde etwas weniger benutzt (Abnahme um -2% auf insg. 2%), während die Starts in Richtung Süden (E16, F16) um knapp 2% auf insgesamt 11% zunahmen. Die meisten Landungen wurden mit 72% von Norden über die Route S14 abgewickelt, was einer Zunahme um 2% seit dem Vorjahr entspricht. Dafür sank die Belegung der Ostlanderoute P28 um 2% auf 19%. Weiter stieg die Belegung der Südlanderoute Q34 leicht (< 1%) auf 8%, während wie in den Vorjahren auf T16 kaum Landungen stattfanden (Abnahme um -0.1% auf insg. 0.1%).

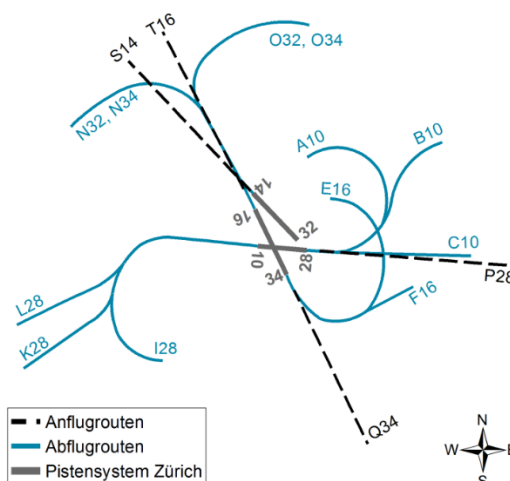
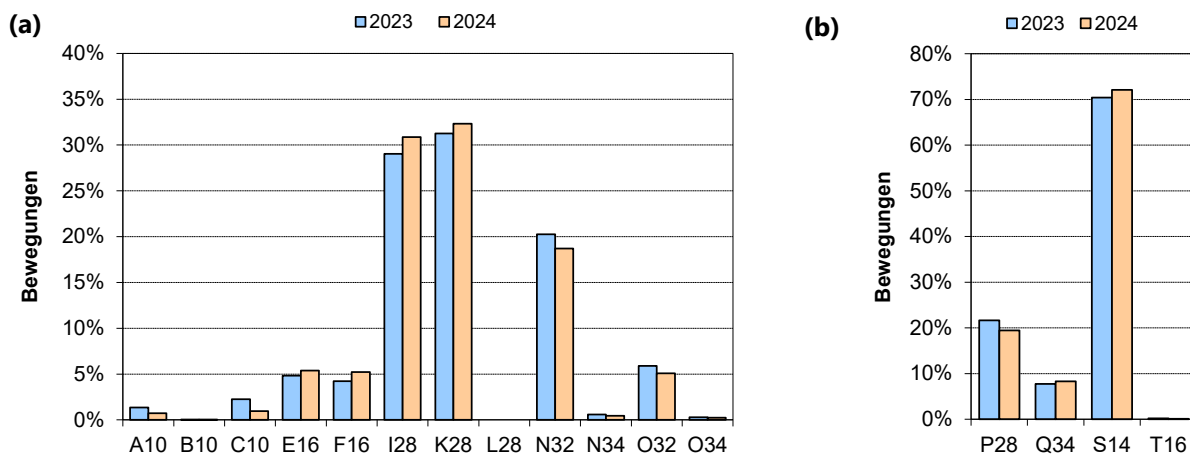


Abbildung 4-4 Pisten- und Routensystem des Flughafens Zürich.



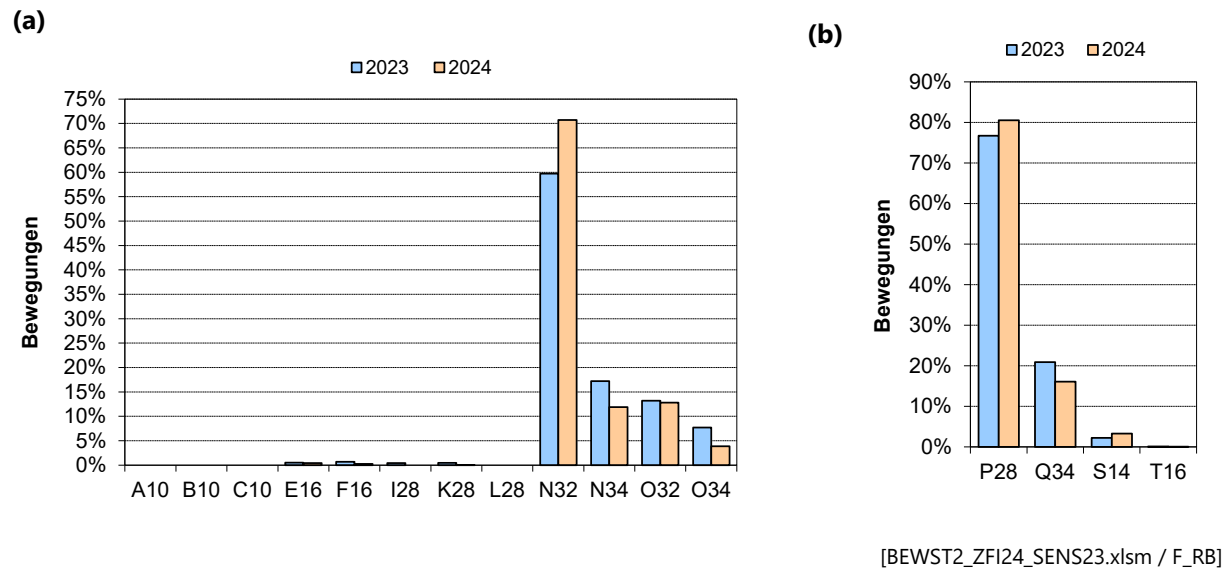
[BEWST2_ZFI24_SENS23.xlsm / F_RB]

Abbildung 4-5 Routenbelegungen der (a) Starts und (b) Landungen am Tag der Jahre 2023 und 2024

Abbildung 4-6 zeigt die Veränderungen in der Routenbelegung zwischen den Jahren 2023 und 2024 in der Nacht. Bei den Nordstarts nahm die Belegung der Route N32 stark um rund 11% auf 71%, auf N34 hingegen um 5% auf 12% ab, was insgesamt einer deutlichen Zunahme der Starts Richtung Nordwesten (N32, N34) um 6% auf insgesamt 83% Anteil entspricht. Dafür sanken die Starts Richtung Nordosten um 4% auf insgesamt 17%. Der Grund für die deutliche Umlagerung der Starts von Nordosten nach Nordwesten – was dem Trend der vorangegangenen Jahre 2021 bis 2023 entspricht [41, 43, 45], aber entgegen der Entwicklung von 2020 läuft [38] – dürfte die anhaltend steigende Anzahl Landungen von Osten auf Piste 28 sein (höhere absolute Bewegungszahlen sowie – für 2023 und 2024 – auch höherer prozentualer Anteil). Bei grossem Verkehrsaufkommen (vgl. Flugbetrieb in den pre-COVID-19 Jahren) starten die Langstreckenflugzeuge vermehrt nach Nordwesten (Routen N32 und N34) und werden danach über eine Westschleife (270°-Kurve) südlich des Flughafens nach Osten geleitet, um genug Höhe zu gewinnen, damit sie mit den Landeanflügen auf die Piste 28 nicht in Konflikt geraten (Details siehe [15]). Wegen des geringen Verkehrsaufkommens im Jahr 2020 gab es wohl weniger solche Konfliktsituationen, und die Langstreckenflugzeuge

starteten vermehrt direkt nach Nordosten (Routen O32 und O34). Dieser Trend kehrte wieder in den Jahren 2021 bis 2024. Insgesamt wurde die Piste 32 mit 84% deutlich mehr (+11%) und die Piste 34 mit 16% 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 4% auf insgesamt 81%, dafür nahmen die Südlandungen auf der Route Q34 deutlich um –5% auf insgesamt 16% ab. Die Nordlandungen nahmen geringfügig um 1% auf insgesamt 3% zu. Die Route T16 wurde wie in den Vorjahren kaum belegt.



[BEWST2_ZFI24_SENS23.xlsm / F_RB]

Abbildung 4-6 Routenbelegungen der (a) Starts und (b) Landungen in der Nacht der Jahre 2023 und 2024

Die Änderungen in der Routenbelegung führten zu einer Zunahme der *HA* am Tag um 2% und zu einer Abnahme der *HSD* in der Nacht um 2%, was den *ZFI* insgesamt praktisch unverändert liess (+64 Personen bzw. +0.1%: Tabelle 4-10).

Tabelle 4-10 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2024, berechnet mit den Routenbelegungen von 2024 bzw. 2023 (RC25)

Routenbelegung	Restliche Inputdaten	HA	HSD	ZFI	
2024	2024	32'213	24'218	56'431	= $ZFI_{24,PM25}$
2023 (RC25)	2024	31'734	24'633	56'367	= $ZFI_{RB,23}$
Veränderung	Absolut	+478	–415	+64	= ΔZFI_{RB}
	prozentual	+2%	–2%	0%	

Am Tag (Abbildung 4-7 (a)) zeigt sich im Nordwesten und Nordosten eine deutliche Abnahme der *HA* im Einflussbereich der abnehmenden Starts Richtung Norden (Routen N32 und O32) sowie generell der etwas geringere Anteil von Starts ab Piste 32 im Gebiet östlich angrenzend an und nördlich von Piste 32. Gleichzeitig zeigt sich im Norden im Einflussbereich der (gestiegenen) Nordlandungen (S14) eine Zunahme der *HA*. Im Südosten sowie im Osten (nördlicher Teil in Pistenverlängerung 10/28) nahmen die *HA* wegen zunehmender Südstarts (E16, F16) zu. Auch im Westen (Einflussbereich der Starts von Piste 28 nahmen die *HA*

deutlich und grossflächig zu). Interessanterweise nahmen die *HA* im Süden ab, trotz leicht zunehmender Anteile Südlandungen auf Route Q34 (2024 vs. 2023). Der Grund hierfür dürfte an den tageszeitspezifischen Unterschieden in den Südlandungen liegen. Während die Landungen von Süden auf Route Q34 am Tag insgesamt leicht zunahmen (s.o.), was die *HA* erhöhen müsste, nahm der Anteil der Südlandungen in der ersten (T1) und letzten Tagesstunde (T16) leicht ab. Die Anwendung eines Malus von 5 dB für T1 und T16 (vgl. Kap. 3.2.1. in [48]) 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 10/28 ist die etwas tiefere Nutzung der Piste 10 (Starts) bzw. der Piste 28 (Landungen P28) sichtbar (blauer Bereich abnehmender *HA*, südlicherer Teil in Pistenverlängerung).

In der Nacht (Abbildung 4-7 (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 Vorjahre 2021 bis 2023 entspricht, jedoch dem Trend des Jahres 2020 entgegengesetzt ist. Schliesslich ist im Flughafennahbereich die stärkere Nutzung von Piste 32 anstatt Piste 34 deutlich sichtbar (roter Bereich direkt östlich der Piste): Am 24. März 2022 trat eine Ausnahmeregelung in Kraft, die für vierstrahlige Flugzeuge eine tiefere Überflughöhe nach dem Start auf Piste 32 bei D4 KLO vorsieht. Diese Ausnahmeregelung führte zu einer gewünschten Verlagerung von Starts von Piste 34 auf Piste 32. Zudem starten auch immer häufiger zweistrahlige B7773 auf Piste 32.

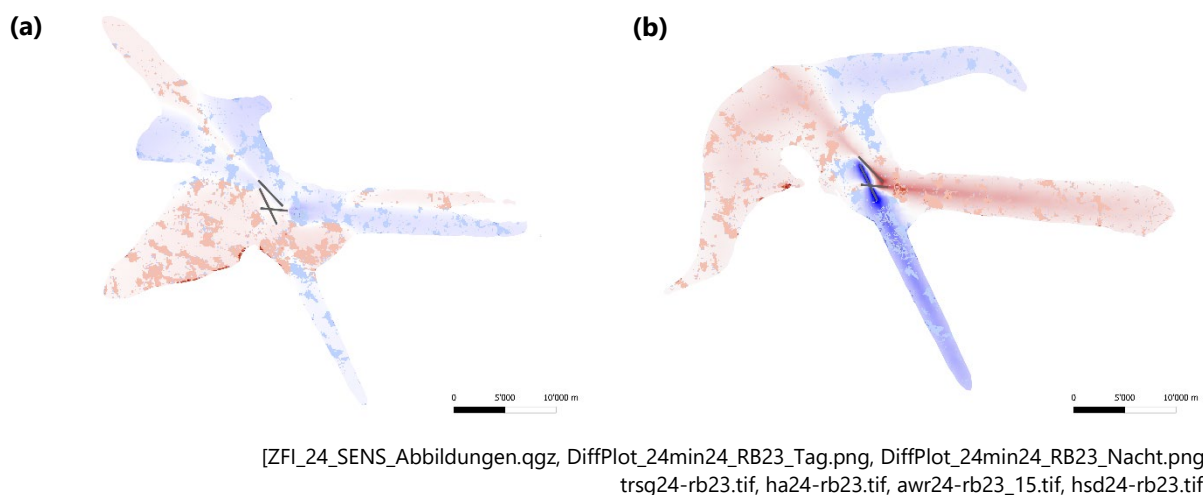


Abbildung 4-7 Differenzenplots 2024 minus 2024 mit Routenbelegung 2023 (RC25) für (a) die *HA* (kräftigere Farben) bzw. den Leq^*_{16} am Tag und (b) die *HSD* (kräftigere Farben) bzw. die *AWR* in der Nacht. Rot bedeutet eine Zunahme, blau eine Abnahme. Dargestellt sind die Gebiete innerhalb der Umhüllenden der relevanten Untersuchungsperimeter.

4.4.4. Einfluss von Veränderungen der Fluggeometrien

Die Veränderungen der Fluggeometrien vom Jahr 2023 zum Jahr 2024 erhöhten die *HA* um 1%, die *HSD* marginal um 103 Personen (+0.4%) und den *ZFI* in der Summe um 1% (Tabelle 4-11).

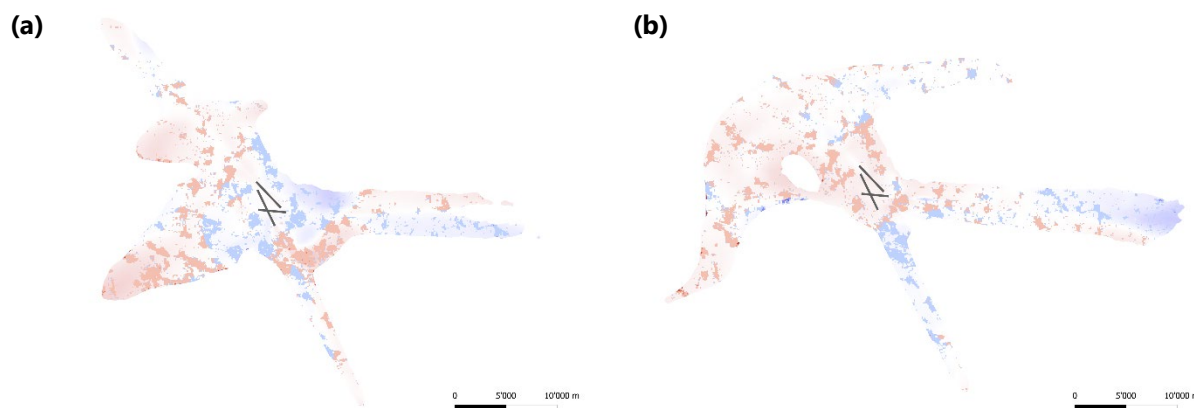
Tabelle 4-11 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2024, berechnet mit den Fluggeometrien des Jahres 2024 bzw. 2023 (RC25)

Fluggeometrie	Restliche Inputdaten	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2024	2024	32'213	24'218	56'431	= <i>ZFI</i> _{24,PM25}
2023 (RC25)	2024	31'823	24'115	55'937	= <i>ZFI</i> _{FG,23}
Veränderung	absolut	+390	+103	+493	= <i>ΔZFI</i> _{FG}
	prozentual	+1%	0%	+1%	

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 4-11). 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 im Südosten (Routen E16 und F16), Osten (F16), Westen (Routen I28 und K28) und Nordwesten (Route N32) zu (Abbildung 4-8(a)), was auf die zwischen 2023 und 2024 erneut gestiegene Auslastung der Flugzeuge zurückzuführen sein dürfte: Die eingesetzten Flugzeuge waren dadurch im Jahr 2024 im Vergleich zum Vorjahr schwerer, was die Steigleistung verminderte und so die Lärmbelastung erhöhte. Im Bereich der Ostlandungen auf Piste 28 (südlicher Bereich in Pistenverlängerung) nahmen die *HA* hingegen ab.

In der Nacht (Abbildung 4-8(b)) sind grossflächige Zunahmen der *HSD* insbesondere im Bereich der nordwestlichen Startrouten (N32 und 34) sichtbar, auch im Nahbereich der Pisten 32 und 34 westlich und östlich des Flughafens, was wiederum auf eine höhere Auslastung der Flugzeuge hindeutet. Die Abnahme der *HSD* im Süden des Flughafens ist auf Veränderungen in den Südlandungen (Q34) zurückzuführen. Die grösseren Zu- und Abnahmen im Osten des Flughafens (Anflugroute P28) könnten schliesslich auf leicht geänderte Routenführung im Fernbereich des Flughafens hindeuten.



[ZFI_24_SENS_Abbildungen.qgz, DiffPlot_24min24_FG23_Tag.png, DiffPlot_24min24_FG24_Nacht.png, trsg24-fg23.tif, ha24-fg23.tif, awr24-fg23_15.tif, hsd24-fg23.tif]

Abbildung 4-8 Differenzenplots 2024 minus 2024 mit Fluggeometrien 2023 (RC25) 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.

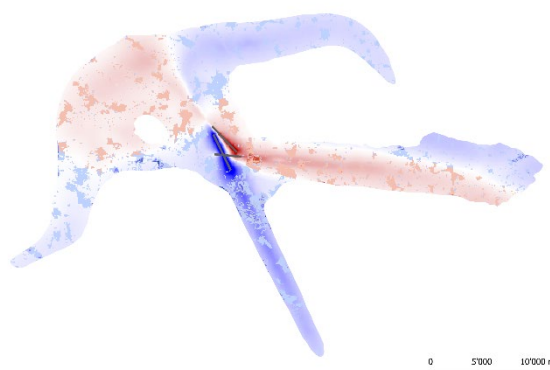
4.4.5. Diskussion der Sensitivitätsanalyse in der Nacht

In der Nacht ergaben sich zwischen dem Vor- und Betriebsjahr betriebliche Änderungen, welche die Trennung der Komponenten FF (Kap. 4.4.2), RB (Kap. 4.4.3) und FG (Kap. 4.4.4) in der vorliegenden Sensitivitätsanalyse erschwerten. Einen Hinweis auf die ungenügende Trennung liefert die grosse Differenz in den HSD zwischen der Summe der Anteile der einzelnen Komponenten und dem Anteil des Flugbetriebs als Ganzes (vgl. Kap. 2.9), bzw. die Differenz in den HSD zwischen der Summe der einzelnen Differenzen (ΔZFI_{BEV} , ΔZFI_{FF} , ΔZFI_{RB} , ΔZFI_{FG}) und der tatsächlichen Differenz ΔZFI zwischen dem Betriebs- und Vorjahr (vgl. Kap. 5). Dies zeigt, dass Abhängigkeiten bzw. Interaktionen zwischen den Komponenten in der Sensitivitätsanalyse unberücksichtigt bleiben. Dasselbe wurde auch in einer früheren Sensitivitätsanalyse beobachtet, namentlich von 2016 mit Flugbetriebsparameter 2015 (vgl. Kap. 4.3.5 in [26]). Dort unterschied sich der Flugbetrieb in der Nacht zwischen den beiden Jahren ebenfalls so stark, dass sich Komponenten FF, RB und FG für die HSD nicht mehr korrekt auftrennen liessen.

Aus diesem Grund wurde hier – analog zur Sensitivitätsanalyse 2016 vs. 2015 – für die HSD eine kombinierte Sensitivität der Komponenten FF, RB und FG berechnet. Hierzu wurden die Bewegungsstatistiken der Nacht des Jahres 2023 jeweils für Starts und Landungen auf die Bewegungszahlen des Jahres 2024 hochskaliert (Flottenmix und Routenbelegung 2023) und die Fluggeometrien (bzw. Footprints) aus dem Jahr 2023 verwendet (wiederum mit aktualisierten Quelldaten RC2025_01). Die kombinierte Sensitivität ergibt eine Abnahme der HSD zwischen 2023 (RC25) und 2024 um -1'913 Personen (im Vergleich zur Summe der drei isolierten Komponenten FF, RB und FG aus Kap. 4.4.2 bis 4.4.4 von lediglich -408 Personen). Die Abnahme ist besonders im Nordosten, südlichen Westen und Süden sowie im Osten im Fernbereich des Flughafens ausgeprägt (Abbildung 4-9), während im Nordwesten und im Osten (Nahbereich der Piste 32) sowie im Bereich der Anflugroute 28 grossflächig Zunahmen resultieren. Die räumlichen Differenzen der

kombinierten Sensitivitätsanalyse ergeben sich dabei aus der Kombination der Routenbelegung (Abbildung 4-7) und der Fluggeometrien (Abbildung 4-8) und können somit durch diese erklärt werden.

Die Zunahme der *HSD* durch die Komponente BEW (+2'281 Personen) wird durch den gemeinsamen Effekt von FF, RB und FG (-1'913) grossenteils kompensiert, und die Summe der einzelnen Differenzen (BEV, BEW und kombinierte Sensitivitätsanalyse) stimmt deutlich besser mit der realen Differenz zwischen Betriebs- und Vorjahr überein, wie in Kapitel 5 ausgeführt wird.



[ZFI_24_SENS_Abbildungen.qgz, DiffPlot_24_min24_FFRBFG23_Nacht.png, awr24-ffrbfg23_15.tif, hsd24-ffrbfg23.tif]

Abbildung 4-9 Differenzenplots 2024 minus 2024 mit Flugzeugflotte, Routenbelegung, und Fluggeometrien 2023 (RC25) für 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.

4.5. Zusammenstellung der Resultate

Tabelle 4-12 zeigt den Anteil der Bevölkerung (ΔZFI_{BEV}) und des Flugbetriebs an der Veränderung des *ZFI* vom Jahr 2023 zum Jahr 2024 in der Sensitivitätsanalyse.

Tabelle 4-12 Veränderungen der *HA*, *HSD* und des *ZFI* vom Jahr 2023 zum Jahr 2024, total und aufgrund der Bevölkerung und des Flugbetriebs als Ganzes (vgl. -1 im Anhang, Kap. 8)

Komponente	Absolute Veränderung			Prozentualer Anteil an den Veränderungen		
	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>
ΔZFI_{PM25} von 2023 zu 2024 (RC25)^a	+3'605	+1'242	+4'847	+100%	+100%	+100%
Bevölkerung: ΔZFI_{BEV} ^b	+280	+102	+382	+8%	+8%	+8%
Flugbetrieb: ΔZFI_{FB} ^c	+3'325	+1'140	+4'465	+92%	+92%	+92%

^a $\Delta ZFI_{PM25} = ZFI_{23,PM25} - ZFI_{22,PM25}$ (Kap. 4.2) ^b siehe Kap. 4.3.1 ^c Differenz zw. ΔZFI_{PM25} und ΔZFI_{BEV} (Kap. 2.9)

Aus Tabelle 4-12 ist ersichtlich, dass die Veränderungen in der Bevölkerung als Ganzes (inkl. Entwicklung der passiven Schallschutzmassnahmen, vgl. Kap. 2.3) mit 8% zu den Veränderungen im *ZFI* zwischen 2023 und 2024 beitrug. Die Veränderungen im Flugbetrieb trugen mit 92% deutlich stärker zur Zunahme im *ZFI*

bei, wobei der Beitrag am Tag (*HA*) und in der Nacht (*HSD*) sehr ähnlich ist. 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 4.4.1 bis 4.4.4 ermittelten Differenzen ΔZFI_{BEW} , ΔZFI_{FF} , ΔZFI_{RB} und ΔZFI_{FG} weichen dementsprechend in der Summe von den in Tabelle 4-12 ausgewiesenen, auf den Flugbetrieb rückführbaren Differenzen ab, wie in Kapitel 4.4.5 (kombinierte Sensitivitätsanalyse in der Nacht) und in Kapitel 5 (Unsicherheitsbetrachtung) weiter diskutiert wird. 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 und der Flugzeugflotte trugen ähnlich stark zu den Veränderungen im *ZFI* bei, aber deutlich weniger als die Flugbewegungszahlen, während die Routenbelegung den *ZFI* insgesamt kaum beeinflusste.

1. **BEW:** → **ZFI** ↑ Die Zunahme Flugbewegungen zwischen 2023 und 2024 bewirkte eine deutliche 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 erhöhte die *HA*, reduzierte die *HSD* geringfügig und führte insgesamt zu einer Zunahme des *ZFI*.
4. **RB:** → **ZFI** ↓ Die Änderungen in den Routenbelegungen erhöhte die *HA* und verminderte die *HSD*, veränderte in der Summe den *ZFI* hingegen kaum (Kompensation des Anstiegs der *HA* durch die Abnahme der *HSD*).

Schlussbemerkung: Es sei nochmals darauf hingewiesen, dass die oben dokumentierte Sensitivitätsanalyse die methodische Änderung der des neuen Quellendatensatzes von FLULA2 nicht enthält (Kap. 2). Letztere Änderung führte zu einer deutlichen Verminderung der *HA*, *HSD* und des *ZFI*, welche den Anstieg im *ZFI* wegen der Entwicklung im Flugbetrieb zwischen 2023 und 2024 teilweise kompensierte (Kap. 4.1).

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 [48]). 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 [48]). 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 tatsächlichen ("realen") Differenz ΔZFI zwischen den beiden betrachteten Betriebszuständen (hier Berichtsjahr und Vorjahr mit aktualisierten Quelldaten) 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 2024 vs. 2023 (RC25) (Einzelkomponentenbetrachtung) weicht die oben erwähnte Summe der einzelnen Differenzen um +28% von ΔZFI_{PM25} ab (*HA* +3%, *HSD* +102%), sodass die Einzelkomponentenbetrachtung der *HA* als zuverlässig angesehen werden kann, nicht aber diejenige der *HSD*. Daher wurde für die *HSD* zusätzlich eine kombinierte Sensitivitätsanalyse durchgeführt (vgl. Kap. 4.4.5). Mit dieser Sensitivitätsanalyse – und unter Berücksichtigung des Bevölkerungswachstums, welches die *HSD* um 102 Personen erhöht (Kap. 4.3.1), weicht die in Kapitel 4.4.5 erwähnte Summe der einzelnen Differenzen (BEV, BEW und kombinierte Sensitivitätsanalyse) noch um –19% von den *HSD* ab, und um 3% vom *ZFI*. Mit der kombinierten Sensitivitätsanalyse (zusammen mit BEV und BEW) können somit die Veränderungen in den *HSD* und insb. im *ZFI* zuverlässig erklärt werden.

6. Abkürzungen und Literatur

6.1. Verwendete Abkürzungen

AWR	Durch Fluglärm induzierte zusätzliche Aufwachreaktionen
BEV	Bevölkerung
BEW	Flugbewegungszahlen
BJ	Berichtsjahr
D	Einfügungsdämpfung für den Übergang vom Aussen- zum Innenpegel zur Berechnung der AWR, für gekipptes Fenster rund –15 dB, bei passiven Schallschutzmassnahmen mit geschlossenem Fenster rund –25 dB bzw. –27 dB ... –43 dB
Empa	Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt
FF	Flugzeugflotte
FG	Fluggeometrien
FLULA2	Fluglärmrechnungsprogramm der Empa
HA	<i>Highly Annoyed</i> ; Anzahl der durch Fluglärm während des Wachzustands am Tag stark belästigten Personen
HSD	<i>Highly Sleep Disturbed</i> ; Anzahl der durch Fluglärm im Schlaf während der Nacht stark gestörten Personen
L _{AE}	Ereignispegel: Gesamtenergieinhalt eines Ereignisses normiert auf eine Sekunde, ausgedrückt als Pegelgrösse
Leq* ₁₆	Tagesrandstundengewichteter 16h-Mittelungspegel (06–22 h)
Leq _N	8h-Mittelungspegel in der Nacht (22–06 h)
PM	Passive (Schallschutz-)Massnahmen (Komfort- und Schalldämmlüftungen sowie Fensterschliessmechanismen)
PM25	Index für die vereinfachte Berechnung von Gebäuden mit passiven Schallschutzmassnahmen durch eine einheitliche Einfügungsdämpfung von –25 dB
RB	Routenbelegung
RZ	Referenzzustand
UP	Untersuchungsperimeter
VJ	Vorjahr (d.h. dem Berichtsjahr vorangegangenes Jahr)
ZFI	Zürcher Fluglärm-Index
ZFI-VO	ZFI-Verordnung
2023 (RC25)	Fluglärmbelastung bzw. ZFI des Jahres 2023, berechnet mit dem aktualisierten Quelldatensatz RC2025_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. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [2] Empa, 2006. *Zürcher Fluglärmindex ZFI, Berechnungsvorschrift. Version 2*. Bericht Nr. 441'255-4. 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. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [4] Empa, 2008. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2007*. Bericht Nr. 448'144. 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. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [6] Empa, 2009. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2008*. Bericht Nr. 452'380-1. 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. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [8] Empa, 2009. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2008, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 452'380-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [9] Empa, 2010. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2009*. Bericht Nr. 455'224-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [10] Empa, 2010. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2009, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 455'224-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [11] Empa, 2010. *FLULA2, Ein Verfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung. Technische Programm-Dokumentation. Version 4*. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf. URL: <https://www.empa.ch/de/web/s509/flula2>.
- [12] Empa, 2011. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2010*. Bericht Nr. 458'512-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [13] Empa, 2011. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2010, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 458'512-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [14] Empa, 2012. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2011*. Bericht Nr. 460'539-1. 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. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [16] Empa, 2012. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2011, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 460'539-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [17] Empa, 2013. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2012*. Bericht Nr. 5214.001738-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [18] 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. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [19] Empa, 2013. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2012, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 5214.001738-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [20] Empa, 2014. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2013*. Bericht Nr. 5214.005883-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [21] Empa, 2014. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2013, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 5214.005883-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [22] Empa, 2015. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2014*. Bericht Nr. 5214.008333-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [23] Empa, 2015. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2014, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 5214.008333-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.

- [24] Empa, 2016. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2015*. Bericht Nr. 5214.012095-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [25] Empa, 2016. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2015, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 5214.012095-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [26] Empa, 2017. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2016, Sensitivitätsbetrachtungen 2015*. Bericht Nr. 5214.014941-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [27] Empa, 2017. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2016*. Bericht Nr. 5214.014941-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [28] Empa, 2018. *Flughafen Zürich, Fluglärmbelastung im Jahre 2017*. Bericht Nr. 5214.018332. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [29] Empa, 2018. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2017*. Bericht Nr. 5214.018366-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [30] Empa, 2018. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2017, Sensitivitätsbetrachtungen 2016*. Bericht Nr. 5214.018366-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [31] Empa, 2019. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2018*. Bericht Nr. 5214.021166-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [32] Empa, 2019. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2018, Sensitivitätsbetrachtungen 2017*. Bericht Nr. 5214.021166-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [33] Empa, 2019. *FLULA2 — Auswirkungen neuer, aus sonAIR abgeleiteter Quelldaten auf Fluglärm-Belastungsrechnungen*. Bericht Nr. 5214.019893. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [34] Empa, 2019. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2018, Einfluss der Fenster-schliessmechanismen und des aktualisierten Quelldatensatzes von FLULA2 auf den ZFI*. Bericht Nr. 5214.021166-3. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [35] Empa, 2019. *Flughafen Zürich, Fluglärmbelastung im Jahre 2018*. Bericht Nr. 5214.021462. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [36] Empa, 2020. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2019, Sensitivitätsbetrachtungen 2018*. Bericht Nr. 5214.024180-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [37] Empa, 2020. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2019*. Bericht Nr. 5214.024180-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [38] Empa, 2021. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2020, Sensitivitätsbetrachtungen 2019*. Bericht Nr. 5214.026437-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [39] Empa, 2021. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2020*. Bericht Nr. 5214.026437-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [40] Empa, 2022. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2021*. Bericht Nr. 5214.028868-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [41] Empa, 2022. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2021, Sensitivitätsbetrachtungen 2020*. Bericht Nr. 5214.028868-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [42] Empa, 2023. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2022*. Bericht Nr. 5214.031408-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [43] Empa, 2023. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2022, Sensitivitätsbetrachtungen 2021*. Bericht Nr. 5214.031408-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [44] Empa, 2023. *Flughafen Zürich, Fluglärmbelastung im Jahre 2022*. Bericht Nr. 5214.031386. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [45] Empa, 2024. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2023, Sensitivitätsbetrachtungen 2022*. Bericht Nr. 5214.033680-2. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [46] Empa, 2024. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2023*. Bericht Nr. 5214.033680-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [47] Empa, 2024. *Flughafen Zürich, Fluglärmbelastung im Jahre 2023*. Bericht Nr. 5214.033564. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [48] Empa, 2025. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2024*. Bericht Nr. 5214.035721-1. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.

- [49] Empa, 2025. *Flughafen Zürich, Fluglärmbelastung im Jahre 2024*. Bericht Nr. 5214.035842. Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [50] SIA, 2020. *Norm SIA 181:2020 Bauwesen, SN 520 181, Schallschutz im Hochbau*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich.
- [51] 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 2024, 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 [48]). Fette gestrichelte Linie: Richtwert (47'000 Personen).15	15
Abbildung 3-2	Einfluss der Änderungen in der Bevölkerung und im Flugbetrieb zwischen dem RZ und den Jahren 2005 bis 2024 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	16
Abbildung 4-1	(a) Anzahl <i>HA</i> und (b) Anzahl <i>HSD</i> und die Differenz ΔHSD zum <i>ZFI</i> ohne Berücksichtigung passiver Schallschutzmassnahmen und (c) Kombination der <i>HA</i> und <i>HSD</i> sowie die Differenz ΔHSD zum <i>ZFI</i> ohne Berücksichtigung passiver Schallschutzmassnahmen. Werte für das Jahr 2023 mit früherem Quellendaten unter Verwendung passiver Massnahmen (PM) nach SIA181 (2023), mit früherem Quellendaten und PM einheitlich mit $D = -25$ dB (PM25) (2023 PM25), mit PM25 und aktualisierten Quellendaten (2023 PM25 (RC25)), wie auch für das Jahr 2024, mit aktualisierten Quellendaten und PM25 (2024 PM25) und PM nach SIA181 (2024). Zahlenwerte: Tabelle 4-2; Richtwert: 47'000 Personen.18	18
Abbildung 4-2	Veränderung pro Flugzeugtyp am Tag (a) der Bewegungszahlen (% der Gesamtbewegungen tags im Jahr 2023) und (b) in der Schallenergie [J/m^2] zwischen den Jahren 2023 und 2024. Die Zu-/Abnahmen entsprechen den Differenzen Flugbetrieb 2024 minus Flugbetrieb 2024 mit Flugzeugflotte 2023 (RC25).23	23
Abbildung 4-3	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 2023 und 2024. Die Zu-/Abnahmen entsprechen den Differenzen Flugbetrieb 2024 minus Flugbetrieb 2024 mit Flugzeugflotte 2023 (RC25).24	24
Abbildung 4-4	Pisten- und Routensystem des Flughafens Zürich.25	25
Abbildung 4-5	Routenbelegungen der (a) Starts und (b) Landungen am Tag der Jahre 2023 und 2024.25	25
Abbildung 4-6	Routenbelegungen der (a) Starts und (b) Landungen in der Nacht der Jahre 2023 und 2024.26	26
Abbildung 4-7	Differenzenplots 2024 minus 2024 mit Routenbelegung 2023 (RC25) 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.27	27
Abbildung 4-8	Differenzenplots 2024 minus 2024 mit Fluggeometrien 2023 (RC25) 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.29	29
Abbildung 4-9	Differenzenplots 2024 minus 2024 mit Flugzeugflotte, Routenbelegung, und Fluggeometrien 2023 (RC25) für 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.30

7.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Übersicht der bisher durchgeführten Sensitivitätsanalysen.....	7
Tabelle 2-2	Zusätzliche Berechnungen zur Bestimmung der Sensitivitäten.....	9
Tabelle 4-1	Differenz zwischen der durch den Flugbetrieb emittierten Schallenergie des Jahres 2023, für den Quelldatensatz RC2024_01 (für die Belastungsrechnung und somit den <i>ZFI</i> des Jahres 2023 verwendet) und den Quelldatensatz RC2025_01 (für die Berechnungen 2024 sowie für die Sensitivitätsbetrachtungen 2024 vs. 2023 verwendet). Quantifizierung der Schallenergie gemäss Fussnote ⁸ , mit und ohne Cutback (CB).....	17
Tabelle 4-2	Werte der <i>HA</i> , <i>HSD</i> und des <i>ZFI</i> für das Jahr 2023 mit früherem Quelldaten unter Verwendung passiver Massnahmen (PM) nach SIA181 (2023), mit früherem Quelldaten und PM einheitlich mit <i>D</i> = -25 dB (PM25) (2023PM25), mit PM25 und aktualisierten Quelldaten (2023PM25 (RC25), wie auch für das Jahr 2024, mit aktualisierten Quelldaten und PM25 (2024 PM25) und PM nach SIA181 (2024).	19
Tabelle 4-3	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> vom Jahr 2023 zum Jahr 2024.....	20
Tabelle 4-4	Veränderungen der Bevölkerung innerhalb der Untersuchungsperimeter (UP) 2024 von 2023 zu 2024.....	20
Tabelle 4-5	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2024, berechnet mit den Bevölkerungszahlen und passiven Schallschutzmassnahmen von 2024 bzw. 2023.....	21
Tabelle 4-6	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2024, berechnet mit den passiven Schallschutzmassnahmen von 2024 bzw. 2023 unter Berücksichtigung der erhöhten Anforderungen nach SIA-Norm 181 [50].....	21
Tabelle 4-7	Veränderungen der Flugbewegungszahlen von 2023 zu 2024	21
Tabelle 4-8	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2024, berechnet mit den Bewegungszahlen von 2024 bzw. 2023 (RC25).....	22
Tabelle 4-9	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2024, berechnet mit der Flugzeugflotte von 2024 bzw. 2023 (RC25).....	22
Tabelle 4-10	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2024, berechnet mit den Routenbelegungen von 2024 bzw. 2023 (RC25).....	26
Tabelle 4-11	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2024, berechnet mit den Fluggeometrien des Jahres 2024 bzw. 2023 (RC25).....	28
Tabelle 4-12	Veränderungen der <i>HA</i> , <i>HSD</i> und des <i>ZFI</i> vom Jahr 2023 zum Jahr 2024, total und aufgrund der Bevölkerung und des Flugbetriebs als Ganzes (vgl. -1 im Anhang, Kap. 8).....	30
Tabelle 8-1	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> vom Jahr 2025 zum Jahr 2023 (RC25), total und aufgrund der Veränderung in der Bevölkerung und im Flugbetrieb.....	40

7.3. Kartenverzeichnis

Karte 1	Differenzen im <i>ZFI</i> (PM25), 2024 minus 2023
Karte 2	Differenzen in den <i>HA</i> , 2024 minus 2023
Karte 3	Differenzen in den <i>HSD</i> (PM25), 2024 minus 2023
Karte 4	Differenzen im <i>ZFI</i> (PM25), 2024 minus 2023 (RC25)
Karte 5	Differenzen in den <i>HA</i> , 2024 minus 2023 (RC25)
Karte 6	Differenzen in den <i>HSD</i> (PM25), 2024 minus 2023 (RC25)
Karte 7	Differenzen im <i>ZFI</i> (PM25), 2024 minus RZ
Karte 8	Differenzen in den <i>HA</i> , 2024 minus RZ
Karte 9	Differenzen in den <i>HSD</i> (PM25), 2024 minus RZ

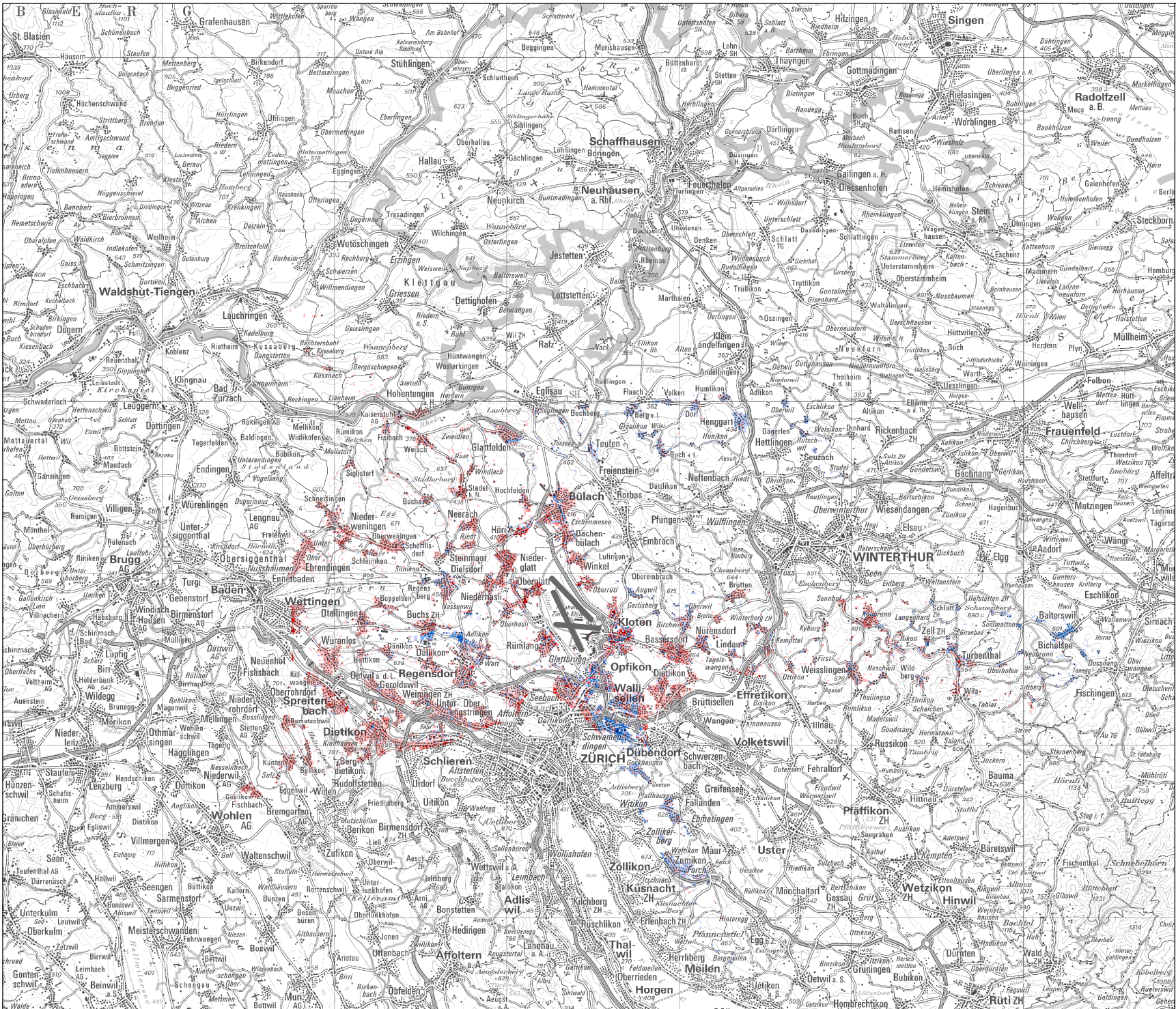
8. Anhang

Tabelle 8-1 zeigt die Veränderungen des *ZFI* (ohne Anforderungen nach SIA-Norm 181) vom Vorjahr 2023 (RC25) zum Berichtsjahr 2024 insgesamt (total) sowie aufgeschlüsselt nach dem Einfluss der Bevölkerung (ΔZFI_{BEV}) und des Flugbetriebs. Die hier ausgewiesenen prozentualen Veränderungen beziehen sich auf das Jahr 2023 (RC25), d.h. die *HA*, *HSD* und der *ZFI* des Jahres 2023 werden auf 100% gesetzt.

Tabelle 8-1 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* vom Jahr 2025 zum Jahr 2023 (RC25), total und aufgrund der Veränderung in der Bevölkerung und im Flugbetrieb

Jahr		HA	HSD	ZFI		
2024		32'213	24'218	56'431	= ZFI_{24,PM25}	
2023 (RC25)		28'608	22'976	51'583	= ZFI_{23,PM25} = 100%	
Veränderung	Total ^a	absolut	+3'605	+1'242	+4'847	= ΔZFI_{PM25}
		prozentual	+13%	+5%	+9%	
	Bevölkerung ^b	absolut	+280	+102	+382	= ΔZFI_{BEV}
		prozentual	+1%	0%	+1%	
	Flugbetrieb ^c	absolut	+3'325	+1'140	+4'465	= ΔZFI_{FB}
		prozentual	+12%	+5%	+9%	

^a $\Delta ZFI_{PM25} = ZFI_{24,PM25} - ZFI_{23,PM25}$ (Tabelle 4-3)
^b Vgl. auch Kap. 4.3.1
^c Differenz zw. ΔZFI_{PM25} und ΔZFI_{BEV} (Kap. 2.9)



Materials Science and Technology

Abteilung Akustik / Lärminderung
Bericht-Nr.: 5214.035721

Flughafen Zürich

Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2024

Sensitivitätsbetrachtungen

Karte 1

Differenzen im ZFI (PM25)
2024 minus 2023

Legende

Differenz im ZFI (PM25)
(in Anzahl Personen pro Hektare)

- ≥ +25
- +10 – +25
- +5 – +10
- +1 – +5
- > 0 – +1
- < 0 – -1
- 1 – -5
- 5 – -10
- 10 – -25
- ≤ -25

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

Impressum

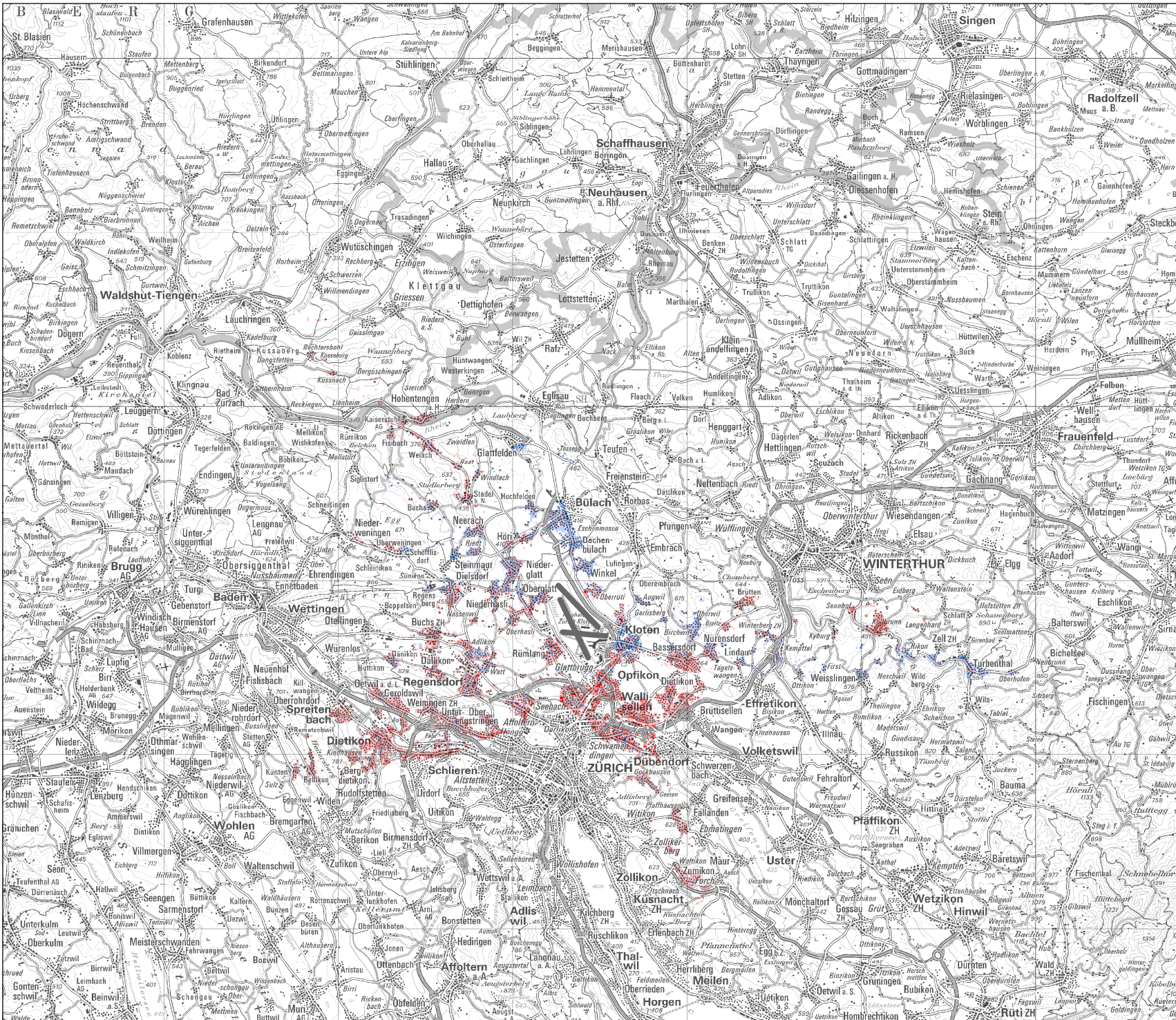
Übersichtskarte
PK200:

Quelle: Bundesamt
für Landestopografie

Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH
Version / Datum / 1 / 17.06.2025 / glma
Ersteller:

[01_ZRH_ZFI24_SENS_ZFI24-ZFI23.mxd]

[zfi24_pm25-zfi23_pm25.tif]



Materials Science and Technology

Abteilung Akustik / Lärminderung
Bericht-Nr.: 5214.035721

Flughafen Zürich

Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2024

Sensitivitätsbetrachtungen

Karte 2

Differenzen in den HA
2024 minus 2023

Legende

Differenz in den HA
(in Anzahl Personen pro Hektare)

- ≥ +25
- +10 – +25
- +5 – +10
- +1 – +5
- > 0 – +1
- < 0 – -1
- 1 – -5
- 5 – -10
- 10 – -25
- ≤ -25

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter



Impressum

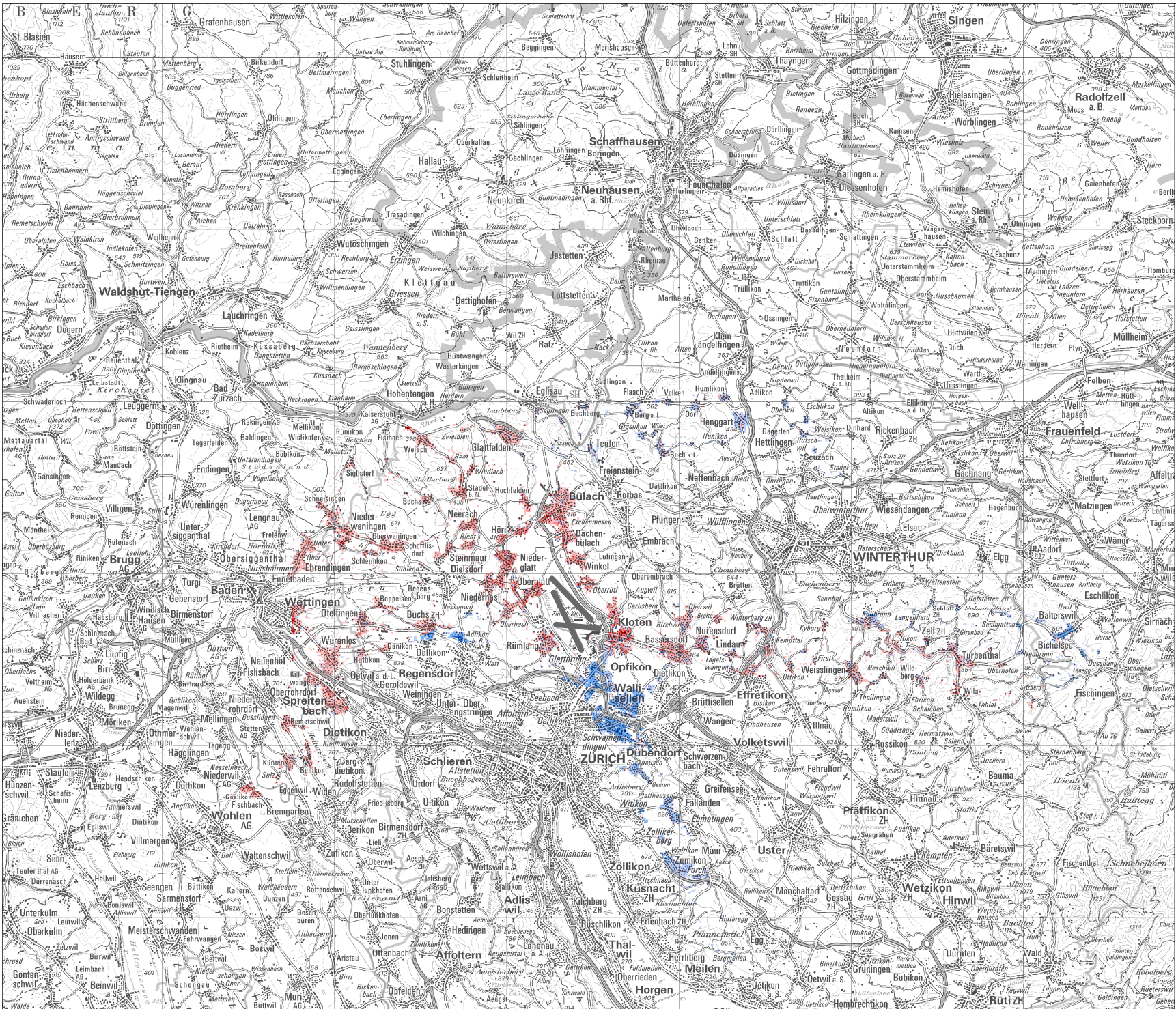
Übersichtskarte
PK200:

Quelle: Bundesamt
für Landestopografie

Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH
Version / Datum / 1 / 17.06.2025 / glma
Ersteller:

[02_ZRH_ZFI24_SENS_HA24-HA23.mxd]

[ha24-ha23.tif]



Materials Science and Technology

Abteilung Akustik / Lärminderung
Bericht-Nr.: 5214.035721

Flughafen Zürich

Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2024

Sensitivitätsbetrachtungen

Karte 3

Differenzen in den HSD (PM25)
2024 minus 2023

Legende

Differenz in den HSD (PM25)
(in Anzahl Personen pro Hektare)

- ≥ +25
- +10 – +25
- +5 – +10
- +1 – +5
- > 0 – +1
- < 0 – -1
- 1 – -5
- 5 – -10
- 10 – -25
- ≤ -25

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter



Impressum

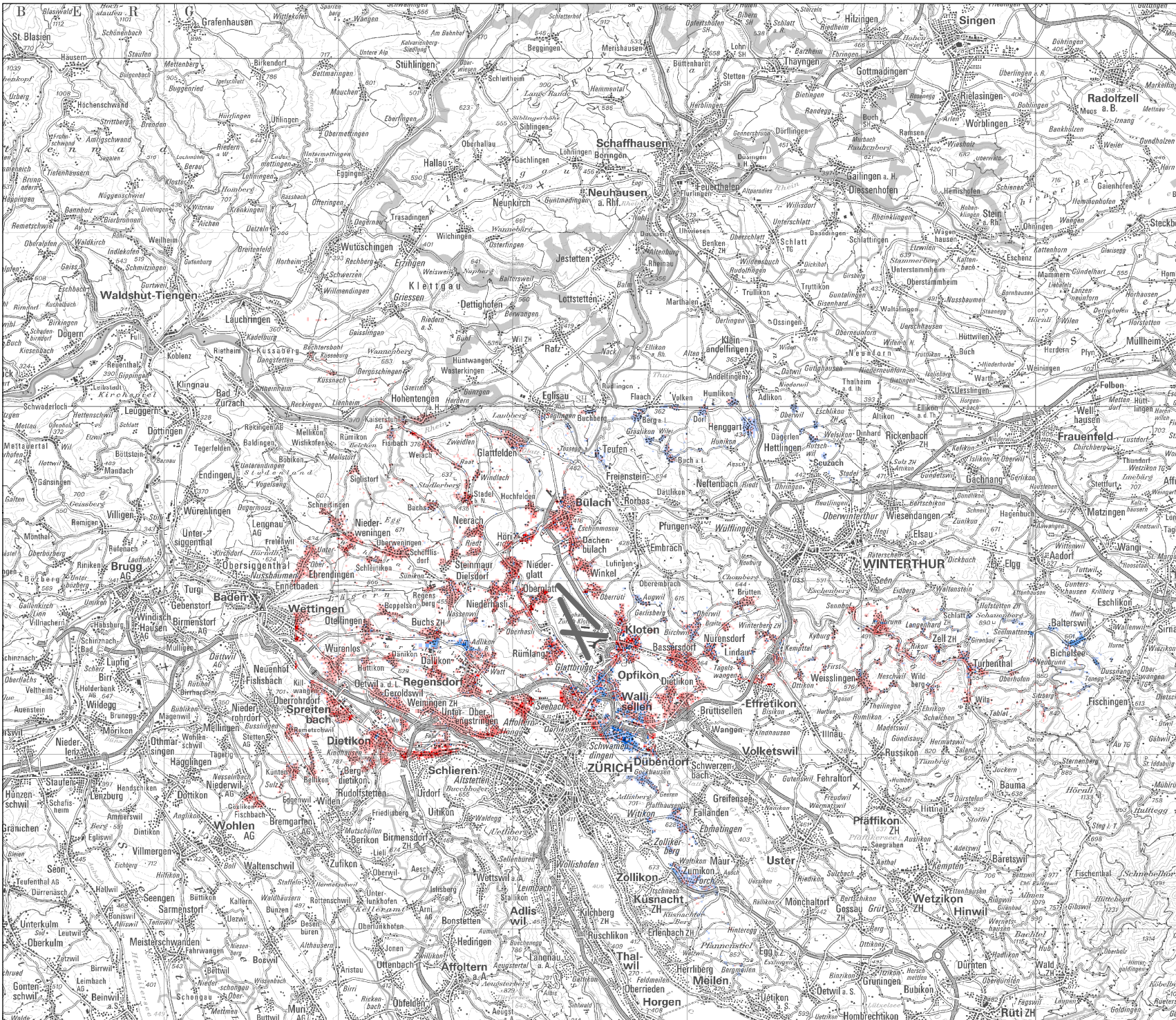
Übersichtskarte
PK200:

Quelle: Bundesamt
für Landestopografie

Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH
Version / Datum / 1 / 15.07.2025 / glma
Ersteller:

[03_ZRH_ZFI24_SENS_HSD24-HSD23.mxd]

[hsd24_pm25-hsd23_pm25.tif]



Materials Science and Technology

Abteilung Akustik / Lärminderung
Bericht-Nr.: 5214.035721

Flughafen Zürich

Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2024

Sensitivitätsbetrachtungen

Karte 4

Differenzen im ZFI (PM25)
2024 minus 2023 (RC25)

Legende

Differenz im ZFI (PM25)
(in Anzahl Personen pro Hektare)

- ≥ +25
- +10 – +25
- +5 – +10
- +1 – +5
- > 0 – +1
- < 0 – -1
- 1 – -5
- 5 – -10
- 10 – -25
- ≤ -25

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter



Impressum

Übersichtskarte
PK200:

Quelle: Bundesamt
für Landestopografie

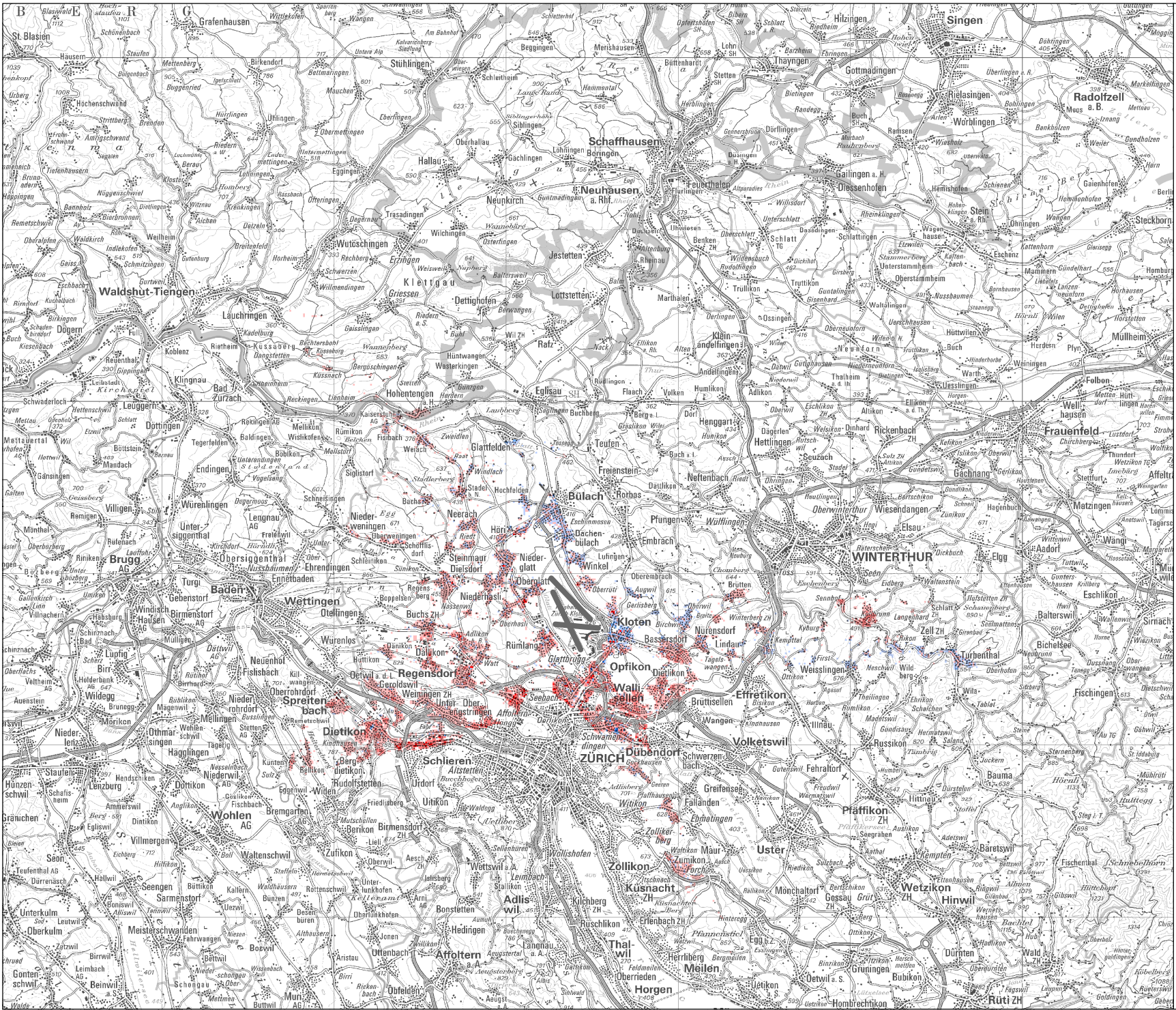
Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH

Version / Datum / 1 / 17.06.2025 / glma

Ersteller:

[04_ZRH_ZFI24_SENS_ZFI24-ZFI23_RC25.mxd]

[zfi24_pm25-zfi23_pm25_rc25.tif]



Materials Science and Technology

Abteilung Akustik / Lärminderung
Bericht-Nr.: 5214.035721

Flughafen Zürich

Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2024

Sensitivitätsbetrachtungen

Karte 5

Differenzen in den HA
2024 minus 2023 (RC25)

Legende

Differenz in den HA
(in Anzahl Personen pro Hektare)

- ≥ +25
- +10 – +25
- +5 – +10
- +1 – +5
- > 0 – +1
- < 0 – -1
- 1 – -5
- 5 – -10
- 10 – -25
- ≤ -25

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

Impressum

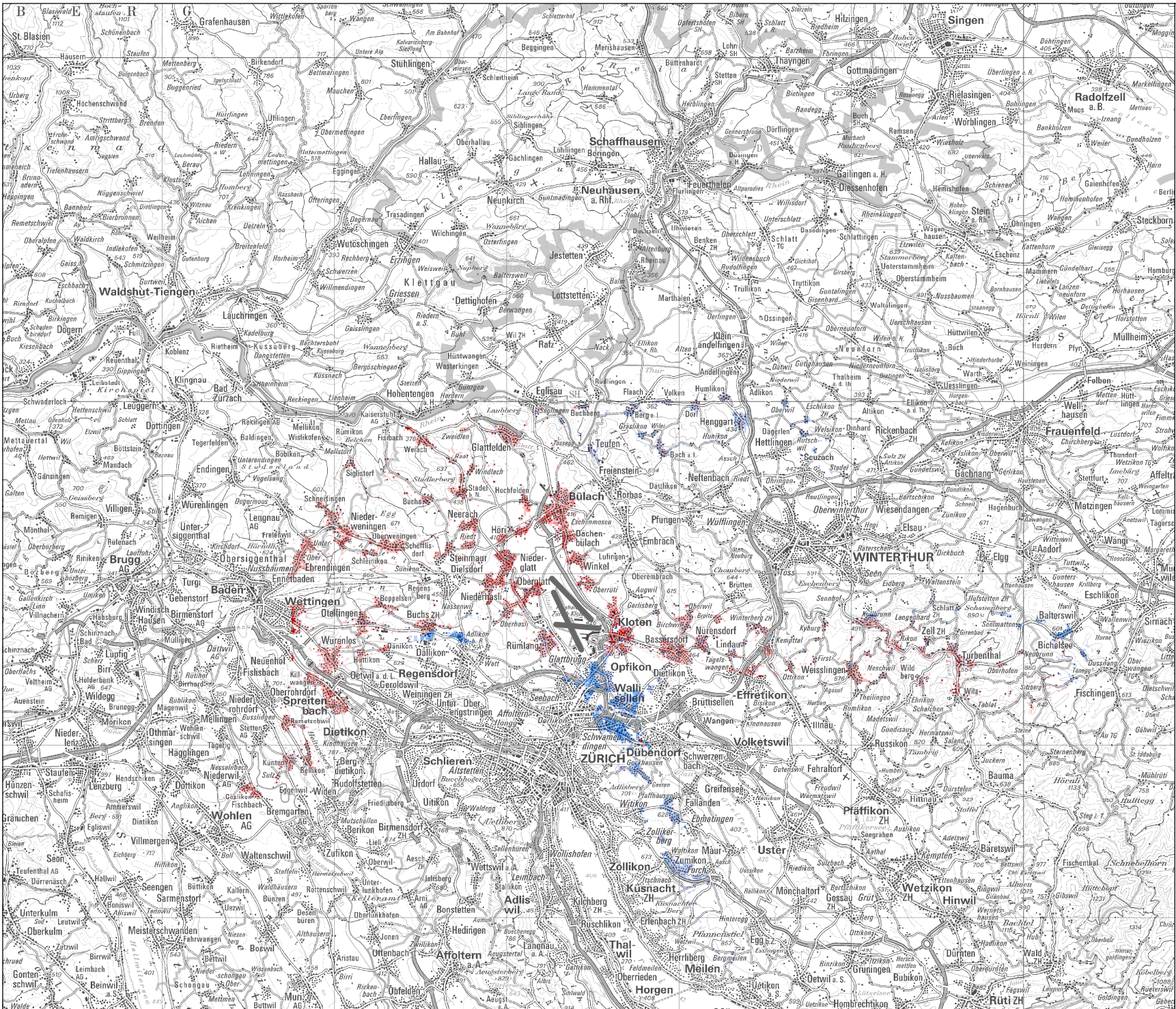
Übersichtskarte
PK200:

Quelle: Bundesamt
für Landestopografie

Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH
Version / Datum / 1 / 17.06.2025 / glma
Ersteller:

[05_ZRH_ZFI24_SENS_HA24-HA23_RC25.mxd]

[ha24-ha23_rc25.tif]



Materials Science and Technology

Abteilung Akustik / Lärminderung
Bericht-Nr.: 5214.035721

Flughafen Zürich

Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2024

Sensitivitätsbetrachtungen

Karte 6

Differenzen in den HSD (PM25)
2024 minus 2023 (RC25)

Legende

Differenz in den HSD (PM25)
(in Anzahl Personen pro Hektare)

- ≥ +25
- +10 – +25
- +5 – +10
- +1 – +5
- > 0 – +1
- < 0 – -1
- 1 – -5
- 5 – -10
- 10 – -25
- ≤ -25

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter



Impressum

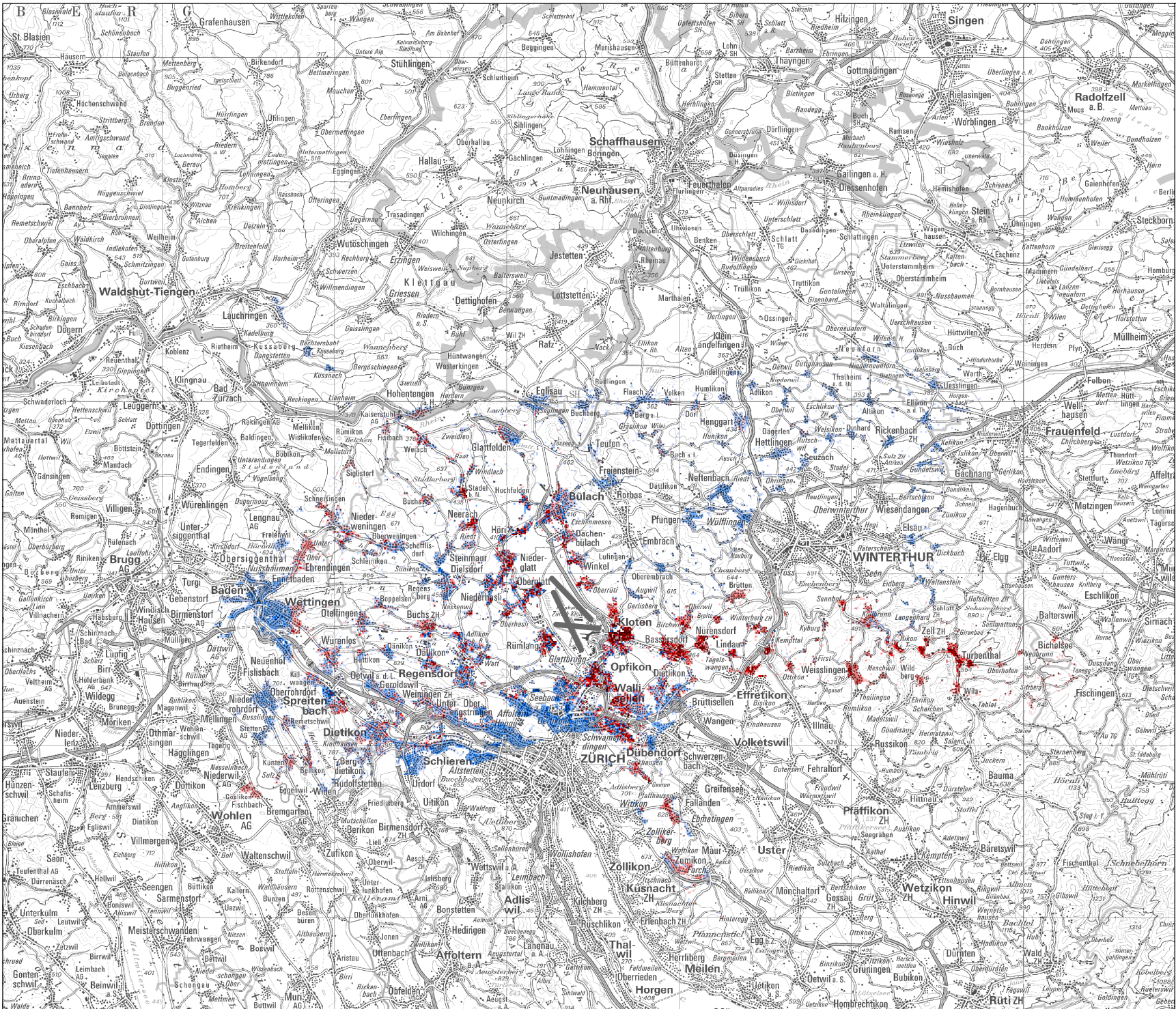
Übersichtskarte
PK200:

Quelle: Bundesamt
für Landestopografie

Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH
Version / Datum / 1 / 17.06.2025 / glma
Ersteller:

[06_ZRH_ZFI24_SENS_HSD24-HSD23_RC25.mxd]

[hsd24_pm25-hsd23_pm25_rc25.tif]



Materials Science and Technology

Abteilung Akustik / Lärminderung
Bericht-Nr.: 5214.035721

Flughafen Zürich

Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2024

Sensitivitätsbetrachtungen

Karte 7

Differenzen im ZFI (PM25)
2024 minus RZ

Legende

Differenz im ZFI (PM25)
(in Anzahl Personen pro Hektare)

- ≥ +25
- +10 – +25
- +5 – +10
- +1 – +5
- > 0 – +1
- < 0 – -1
- 1 – -5
- 5 – -10
- 10 – -25
- ≤ -25

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

Impressum

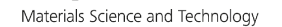
Übersichtskarte
PK200:

Quelle: Bundesamt
für Landestopografie

Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH
Version / Datum / 1 / 15.07.2025 / glma
Ersteller:

[07_ZRH_ZFI24_SENS_ZFI24-RZ.mxd]

[zfi24_pm25-zfi_rz2.tif]



Flughafen Zürich

Sensitivitätsbetrachtungen

Differenzen in den *HA*
2024 minus RZDifferenz in den *HA*
(in Anzahl Personen pro Hektare)

3'000 0 3'000 Meter

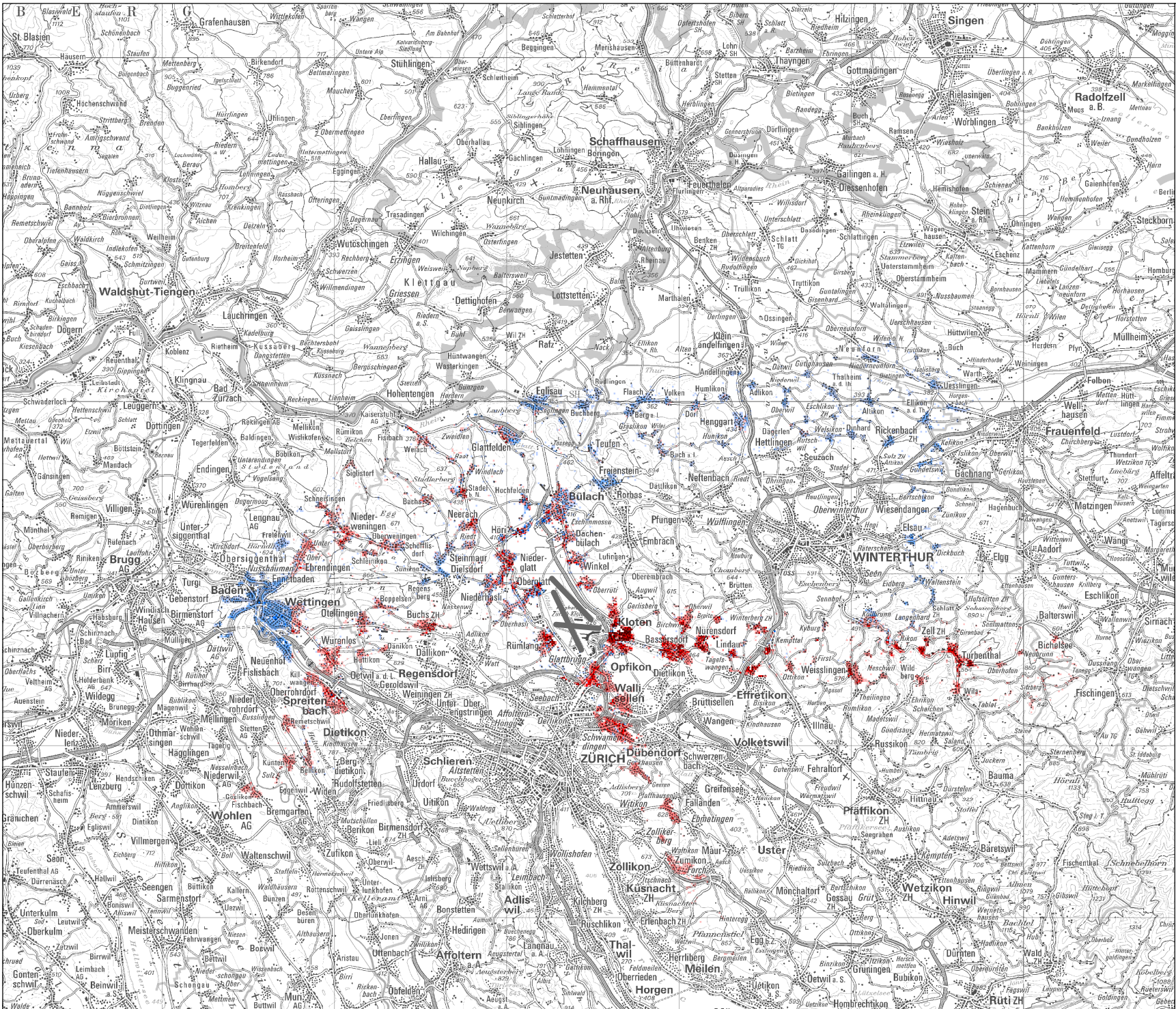


Übersichtskarte
PK200:

Quelle: Bundesamt
für Landestopografie

[08_ZRH_ZFI24_SENS_HA24-RZ.mxd]

[ha24-ha_rz2.tif]



Materials Science and Technology

Abteilung Akustik / Lärminderung
Bericht-Nr.: 5214.035721

Flughafen Zürich

Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2024

Sensitivitätsbetrachtungen

Karte 9

Differenzen in den *HSD* (PM25)
2024 minus RZ

Legende

Differenz in den *HSD* (PM25)
(in Anzahl Personen pro Hektare)

- ≥ +25
- +10 – +25
- +5 – +10
- +1 – +5
- > 0 – +1
- < 0 – -1
- 1 – -5
- 5 – -10
- 10 – -25
- ≤ -25

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 / 15.07.2025 / glma
Ersteller:

[09_ZRH_ZFI24_SENS_HSD24-RZ.mxd]

[hds24_pm25-hsd_rz2.tif]