

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



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

Flughafen Zürich

Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2022

Sensitivitätsbetrachtungen 2021

Auftrags-Nr.:	5214.031408
Bericht-Nr.:	5214.031408 - 2
Auftraggeber:	Amt für Mobilität des Kantons Zürich
Anzahl Seiten:	33
Beilagen:	6 Karten (A4-Format)
Die Verfasser:	B. Schäffer S. Schalcher J. Meister

Status: genehmigter Bericht

Dübendorf, 25. Oktober 2023
Der Projektleiter:

Abteilung Akustik / Lärminderung
Der Abteilungsleiter:

Dr. Beat Schäffer

Dr. Jean Marc Wunderli

Zusammenfassung

Am 30. Januar 2023 beauftragte das Amt für Mobilität des Kantons Zürich die Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, den Zürcher Fluglärm-Index (*ZFI*) für das Jahr 2022 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 2021 und dem Berichtsjahr 2022 diskutiert werden. Die Berechnungen werden dabei gemäss Vorschrift der *ZFI*-Verordnung (*ZFI*-VO) vom 7. Dezember 2011 durchgeführt.

Der *ZFI*, die *HSD* und die *HA* des Jahres 2022 nahmen gegenüber dem Vorjahr 2021 aufgrund der zunehmenden Erholung des Flugbetriebs von der COVID-19 Situation zu (Vergleich der offiziellen Monitoringwerte). Der *ZFI* nahm um 116% zu, die *HSD* 198% und die *HA* um 85%. Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass das Bevölkerungswachstum alleine (d.h. ohne Veränderungen im Flugbetrieb) den *ZFI* um 3% erhöht hätte; die restliche Zunahme wird durch den Flugbetrieb verursacht. Bei den Komponenten des Flugbetriebs trug hauptsächlich die starke Zunahme der Flugbewegungszahlen mit +109% zur Zunahme des *ZFI* bei. Die verbleibenden Flugbetriebskomponenten Routenbelegung, Fluggeometrien und Flugzeugflotte trugen mit +9%, +5%, bzw. -4% deutlich weniger zu den Veränderungen im *ZFI* bei.

Im Jahr 2022 lag der *ZFI* 8% unter dem Wert des Referenzzustands, wobei die *HA* um 21% darunter lagen, die *HSD* hingegen um 22% darüber. Eine zusätzliche Sensitivitätsanalyse zeigt, dass das Bevölkerungswachstum um den Flughafen vom Referenzzustand zum Jahr 2022 alleine (d.h. ohne Veränderungen im Flugbetrieb) zu einer Zunahme des *ZFI* von 23% geführt hätte. Aufgrund der starken Veränderungen im Flugbetrieb nahm der *ZFI* hingegen deutlich um 31% ab, wobei sowohl der günstigere (die *HA* vermindern- de) Flugbetrieb am Tag (-43%) wie auch der knapp günstigere (die *HSD* leicht vermindern- de) Flugbetrieb in der Nacht (-2%) zur Abnahme beitrugen. Dennoch ist diese Kompensation des Bevölkerungswachstums durch den Flugbetrieb seit dem letzten Jahr deutlich gesunken.

Inhalt

1.	Auftrag	4
2.	Grundlagen und Methodik	5
2.1.	Übersicht	5
2.2.	Einfluss von Veränderungen in der Wohnbevölkerung.....	7
2.3.	Einfluss von Veränderungen der passiven Massnahmen.....	7
2.4.	Einfluss von Veränderungen in den Flugbewegungszahlen.....	8
2.5.	Einfluss von Veränderungen in der Flugzeugflotte.....	8
2.6.	Einfluss von Veränderungen in der Flugroutenbelegung.....	9
2.7.	Einfluss von Veränderungen in den Fluggeometrien	9
2.8.	Rangfolge der Einflussgrössen	10
3.	Einfluss der Veränderungen in der Bevölkerung und im Flugbetrieb auf die Entwicklung des <i>ZFI</i>	11
4.	Sensitivitätsanalyse <i>ZFI</i> vom Vorjahr 2021 zum Berichtsjahr 2022.....	14
4.1.	Veränderung im <i>ZFI</i> vom Vorjahr 2021 zum Berichtsjahr 2022	14
4.2.	Einfluss von Veränderungen in der Bevölkerung	15
4.3.	Einfluss von Veränderungen im Flugbetrieb.....	16
4.4.	Zusammenstellung der Resultate.....	25
5.	Unsicherheit der Berechnungen	26
6.	Abkürzungen und Literatur	27
6.1.	Verwendete Abkürzungen.....	27
6.2.	Literatur.....	28
7.	Verzeichnisse.....	31
7.1.	Abbildungsverzeichnis.....	31
7.2.	Tabellenverzeichnis	31
7.3.	Kartenverzeichnis	32
8.	Anhang	33

1. Auftrag

Am 30. Januar 2023 beauftragte das Amt für Mobilität des Kantons Zürich die Empa, Abteilung Akustik / Lärminderung, den Zürcher Fluglärm-Index (*ZFI*) für das Jahr 2022 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 2021 ausgewiesen werden. Der RZ wurde vom Regierungsrat des Kantons Zürich definiert und bildet die Grundlage des heutigen *ZFI*-Richtwerts (vgl. *ZFI*-VO [42]). 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 [2] (RZ) sowie [3, 5, 8, 11, 15, 16, 19, 21, 23, 26, 28, 30, 34, 36, 38] (2005 bis 2021) ausgewiesen. Die Berechnungen sollen nach dem in [1] dokumentierten Verfahren und unter Anwendung der aktuellen *ZFI*-VO vom 7. Dezember 2011 [42] 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 2021 und dem Berichtsjahr 2022 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 [4] 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.

Die Resultate sollen in zwei technischen Berichten zuhanden des Auftraggebers dokumentiert werden. Der erste Teilbericht [40] dokumentiert den *ZFI* bzw. dessen Komponenten *HA* und *HSD* für das Jahr 2022 sowie für den RZ und die Jahre 2005 bis 2021. Der vorliegende zweite Teilbericht dokumentiert die Sensitivitätsanalyse zwischen dem Berichtsjahr 2022 und dem Vorjahr 2021.

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.

2. Grundlagen und Methodik

In diesem Kapitel wird die Methodik der Sensitivitätsanalyse (Details siehe [4]) zur Untersuchung der Gründe für die Veränderungen des *ZFI* zwischen dem Vorjahr 2021 und dem Berichtsjahr 2022 erläutert. 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
2021	2020 vs. 2021	[37]
2020	2019 vs. 2020	[35]
2019	2018 vs. 2019	[33]
2018	2017 vs. 2018	[29]
2017	2016 vs. 2017	[27]
2016	2015 vs. 2016	[25]
2015	2014 vs. 2015	[24]
2014	2013 vs. 2014 RZ vs. 2014	[22]
2013	2012 vs. 2013 RZ vs. 2013	[20]
2012	2011 vs. 2012 2000 vs. 2012	[17]
2011	2010 vs. 2011 2000 vs. 2011	[13]
2010	2009 vs. 2010 2000 vs. 2010	[12]
2009	2008 vs. 2009 2000 vs. 2009	[9]
2008	2007 vs. 2008 2000 vs. 2008	[7]
2007	2006 vs. 2007 2000 vs. 2007 RZ vs. 2007	[3] [6] [2]
2006	2005 vs. 2006	[4]

2.1. Übersicht

Die Berechnungsvorschrift zur Ermittlung des *ZFI* und deren technische Umsetzung sind in [1] und [40] dokumentiert. Die Sensitivitätsuntersuchungen werden seit dem Berechnungsjahr 2012 [17] unter Berücksichtigung passiver Schallschutzmassnahmen, also gemäss heute offizieller Berechnung nach *ZFI-VO* [42], durchgeführt. Die Sensitivitätsanalyse, deren Methodik im Detail in [4] beschrieben ist, wurde daher seit dem Berichtsjahr 2012 um die Komponente „Passive Massnahmen“ (PM) erweitert. Da der offizielle *ZFI* seit dem Berichtsjahr 2013 die erhöhte Anforderung nach *SIA-Norm 181* [41] 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 vernachlässigbar [18]. Daher werden die Komponenten der Sensitivitätsanalyse nicht dem offiziellen Monitoringwert aus [40], sondern einem Vergleichswert gegenübergestellt, welcher einheitlich mit $D = -25$ dB für Bauten mit PM berechnet wird (Index PM_{25}^2). Einzig die Komponente PM, welche unter Berücksichtigung der SIA-Norm 181 ermittelt wird, wird mit dem offiziellen Monitoringwert verglichen.

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

Um den Einfluss dieser Komponenten auf den *ZFI* ermitteln zu können, muss das Set der Eingabedaten zur *ZFI*-Berechnung so angepasst werden, dass jeweils nur die Veränderung einer Komponente sichtbar wird. Dazu wird im Set der Komponenten zur *ZFI*-Berechnung jeweils nur eine Komponente verändert, anschliessend eine *ZFI*-Berechnung durchgeführt und mit der ursprünglichen *ZFI*-Berechnung verglichen (sogenannte *Ceteris Paribus*-Methode). Der Fokus der Veränderungen liegt dabei auf dem Berichtsjahr. Das heisst, sämtliche Inputdaten werden vom Berichtsjahr übernommen, ausser derjenigen, von der die Sensitivität bestimmt werden soll. Dort werden die Inputdaten aus dem Vorjahr verwendet. Damit wird die hypothetische Frage beantwortet: Wie würde sich der *ZFI* vom Vorjahr zum Berichtsjahr verändern, wenn sich nur die Komponente, von der man die Sensitivität bestimmen will, ändern würde? Zur Verständlichkeit ein Beispiel: Will man den Einfluss der Veränderung in der Flugzeugflotte vom Vorjahr 2021 zum Berichtsjahr 2022 bestimmen, so wird eine *ZFI*-Berechnung mit den Inputdaten aus dem Berichtsjahr 2022 durchgeführt, jedoch mit der Flugzeugflotte aus dem Vorjahr 2021. Diese Berechnung wird mit der *ZFI*-Berechnung des Berichtsjahres 2022 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 [40]).

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 2022, als Vorjahr das Jahr 2021.

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

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.

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, BJ = Berichtsjahr, $\Delta ZFI_i = ZFI_{BJ} - ZFI_{L.VJ}$ (vgl. Kap. 2.2 bis 2.7)

² PM ist eine zusätzliche Komponente, die implizit schon in BEV enthalten ist (vgl. Kap. 2.3).

2.2. 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 Fluglärmdaten (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. 2.3) zwischen dem Vorjahr und dem Berichtsjahr. Im Unterschied zu Kap. 2.3 werden hier die passiven Massnahmen allerdings vereinfacht mit einer einheitlichen Einfügungsdämpfung von -25 dB berechnet und nicht mit den erhöhten Anforderungen der SIA-Norm 181 [41]. Der methodische Unterschied hierbei ist gering, wobei die Differenz zwischen den Berechnungen über die Jahre zunimmt (2012: 76 Personen [18]; 2022: 454 Personen [40]).

2.3. 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 Vorjahres durchgeführt. Hierbei werden sowohl für das Berichtsjahr als auch für das Vorjahr die erhöhten Anforderungen der SIA-Norm 181 [41] berücksichtigt, um den Einfluss der passiven Massnahmen möglichst genau zu bestimmen. Sämtliche Fluglärmdaten (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 [40]).

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

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

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

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

Mithilfe der Komponente PM wird die Effizienz der seit dem Vorjahr erstellten passiven Massnahmen quantifiziert, den *ZFI* zu vermindern. Diese Komponente ist implizit (allerdings ohne Berücksichtigung der erhöhten Anforderungen nach SIA-Norm 181) in der Komponente BEV enthalten, da BEV sowohl die Veränderung in der Gesamtbevölkerung als auch der Bevölkerung in Bauten mit PM ausweist (Kap. 2.2). Analog dazu sind auch die Komponenten BEW, FF, RB und FG implizit im Flugbetrieb als Ganzes enthalten (vgl. Kap. 2.8).

2.4. Einfluss von Veränderungen in den Flugbewegungszahlen

Um den Einfluss der Veränderungen in den Flugbewegungszahlen (BEW) auf den *ZFI* zu bestimmen, werden zuerst Fluglärmrechnungen mit den Bewegungszahlen aus dem Vorjahr durchgeführt. Dabei werden lediglich die Gesamtbewegungszahlen, getrennt nach Starts und Landungen, pro Zeitperiode vom Vorjahr übernommen und nicht die gesamten Bewegungsstatistiken, da sich sonst auch die Routenbelegung und die Flugzeugflotte verändern würden. Es werden daher neue Bewegungsstatistiken generiert. Mit den modifizierten Bewegungsstatistiken werden der Leq_{16}^* , der Leq_N und die *AWR* neu berechnet. Daraus werden die %*HA* und die %*HSD* neu ermittelt. Diese werden mit der Wohnbevölkerung des Berichtsjahres multipliziert, und man erhält die *HA*, die *HSD* und damit den *ZFI*. Die Differenz dieser Berechnung zum *ZFI* des Berichtsjahres ist hauptsächlich auf die Veränderungen in den Bewegungszahlen zurückzuführen.

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

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

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

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

2.5. Einfluss von Veränderungen in der Flugzeugflotte

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

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

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

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

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

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

2.6. 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.

2.7. 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 wiederum neue Fluglärmrechnungen durchgeführt. Dazu werden anstelle der *Footprints*⁴ des Berichtsjahres diejenigen des Vorjahres 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 2022 und dem Vorjahr 2021 die *Footprints* des Jahres 2022 verwendet.

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

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

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

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

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

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

2.8. 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. 2.2 und 2.3) 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. 2.2) 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 $D = -25\text{dB}$.

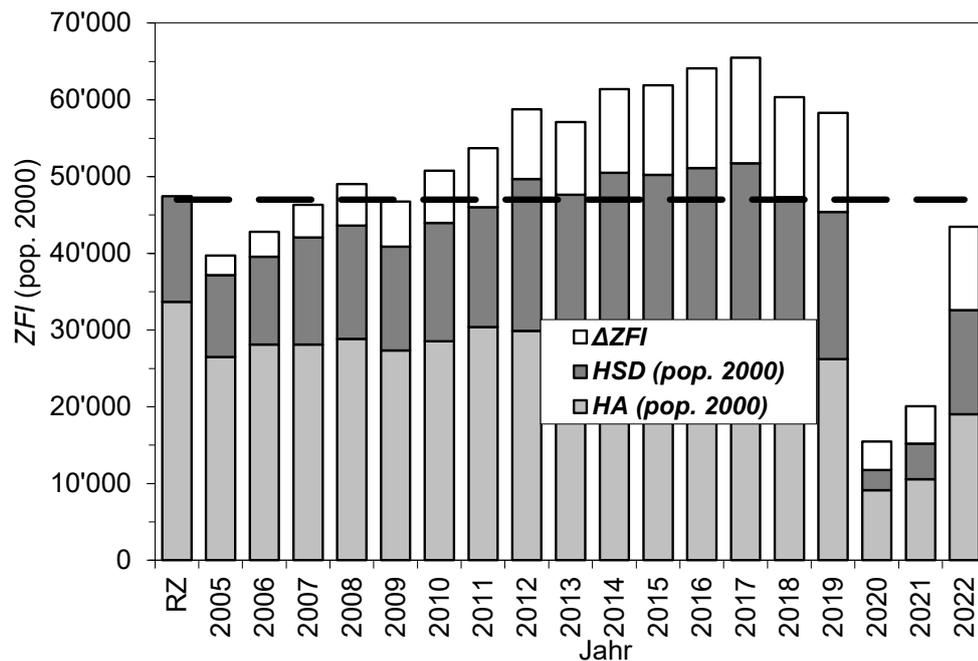
Die Sensitivitätsanalyse vermag somit die Anteile der Komponenten Bevölkerung und Flugbetrieb an der Veränderung des ZFI zwischen Berichts- und Vorjahr zu quantifizieren. Der Einfluss der beiden Komponenten auf Veränderungen im ZFI wird im Detail in Kapitel 3 diskutiert.

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. 2.4 bis 2.7) 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 2022 werden auf den Karten 4 bis 6 am Ende des vorliegenden Berichtes dargestellt. Die Entwicklung des *ZFI* wird durch die Veränderungen in der Bevölkerung und im Flugbetrieb bestimmt (Kap. 2). Um den Beitrag dieser Komponenten zu den Differenzen zwischen dem *ZFI*-Monitoringwert (2005 bis 2022) und dem RZ, welcher den Richtwert von 47'000 Personen bestimmt [42], 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 2022 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 2022 hätte der *ZFI* ohne Bevölkerungswachstum den Richtwert erneut eingehalten, 2020 bis 2022 sehr deutlich. Offensichtlich fand – bis im Jahr 2011 sowie ab dem Jahr 2019 – eine Kompensation des Bevölkerungswachstums seit dem Jahr 2000 statt, ansonsten wäre der *ZFI* seit dem RZ kontinuierlich angestiegen: Der *ZFI* wächst alleine durch die Bevölkerungsentwicklung um den Flughafen Zürich jedes Jahr um 1–2%, wie die Sensitivitätsanalysen der letzten Jahre zeigten. Hierbei ist zu beachten, dass zwischen 2017 und 2018 durch die neue Berücksichtigung der Fensterschliessmechanismen in den PM (vgl. [31]) sowie zwischen 2018 und 2019 durch die Berücksichtigung aller Gebäude mit Baujahr 2017 und jünger als Bauten mit PM (vgl. Kap. 3.2.5 in [34]) der Anstieg der *HSD* bzw. des *ZFI* rechnerisch etwas reduziert wurde, während zwischen 2020 und 2021 durch die Berücksichtigung nur noch derjenigen Gebäude mit Baujahr 2017 und jünger als Bauten mit PM, welche abhängig von der massgebenden Fluglärmbelastung gewisse Anforderungen an die PM erfüllen (vgl. Kap. 3.2.5 in [38]), der Anstieg rechnerisch wieder etwas erhöht wurde. Die oben erwähnte Kompensation des Bevölkerungswachstums ist auf eine im Vergleich zum RZ günstige (d.h. den *ZFI* vermindern) Entwicklung des Flugbetriebs zurückzuführen. In Abbildung 3-1 fällt auf, dass die *HA*, *HSD* bzw. der *ZFI* ohne Bevölkerungswachstum von 2017 bis 2020 sichtbar sanken, von 2020 zu 2022 hingegen wieder anstiegen. Insbesondere ist zwischen den Jahren 2019 und 2020 durch die COVID-19 Situation ein massiver Einbruch des *ZFI* und dessen Komponenten *HA* und *HSD* auszumachen, welcher aufgrund der allmählichen Erholung von der COVID-19 Situation von 2020 zu 2021 und insb. von 2021 zu 2022 wieder rückläufig ist. Der Grund für diese massiven Veränderungen sind die Flugbewegungszahlen, welche 2020 noch 37% (Tag: 38%, Nacht: 24%) der Bewegungen des Jahres 2019 entsprachen, bis 2022 jedoch wieder auf 76% (Tag: 76%, Nacht: 78%) der Bewegungen des Jahres 2019 anstiegen. Der Richtwert wird in den Jahren 2020 bis 2022 mit und ohne Bevölkerungswachstum deutlich eingehalten. Dennoch ist auch für die Jahre 2020 bis 2022 jeweils zwischen Vorjahr und Betriebsjahr ein Bevölkerungswachstum in den beiden Untersuchungsperimetern (für die *HA* und *HSD*) von je 1–2% auszumachen (Kap. 4.2.1), wodurch der *ZFI* mit den Bevölkerungszahlen vom Jahr 2000 noch niedriger wäre (Abbildung 3-1).

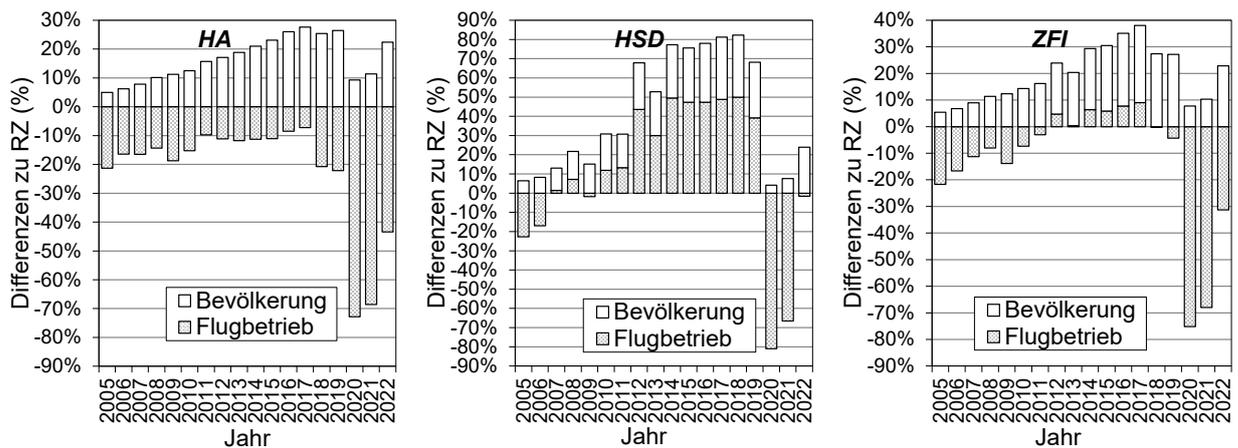


[ZFI_RZ_05-22_SensBEV_FB_zuRZ.xlsx / ZFI_SENS_BEV]

Abbildung 3-1 Der ZFI als Summe der HA und HSD für den RZ sowie die Jahre 2005 bis 2022, 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 [40]). **Fette gestrichelte Linie: Richtwert (47'000 Personen).**

Die Kompensation des Bevölkerungswachstums durch den Flugbetrieb in den letzten Jahren wird im Folgenden detaillierter untersucht. Abbildung 3-2 zeigt die relativen Veränderungen in den HA, den HSD und im ZFI zwischen dem RZ und den Jahren 2005 bis 2022, 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 bis 2010, 2020 bis 2022) 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 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 und 2019 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 2022 (geprägt von der COVID-19 Situation) der Flugbetrieb in den (pre-COVID-19) Jahren 2018 und 2019 das Bevölkerungswachstum wieder zu einem kleinen Teil kompensierte. War die Kompensation im Jahr 2018 noch marginal, war sie im Berichtsjahr 2019 deutlich sichtbar. Ob dieser Trend nach vollständiger Erholung von der COVID-19 Situation und dem damit einhergehenden Einbruch der Flugbewegungszahlen angehalten hätte, lässt sich nicht beantworten. Dies wird sich in den nächsten Jahren zeigen.



[ZFI_RZ_05-22_SensBEV_FB_zuRZ.xlsx / ZFI_SENS_BEV]

Abbildung 3-2 Einfluss der Änderungen in der Bevölkerung und im Flugbetrieb zwischen dem RZ und den Jahren 2005 bis 2022 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 vermindern 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 [32] zwischen 2017 [28] und 2018 [30] (Berücksichtigung der akustisch günstigen Entwicklung der Flugzeugflotte bzw. der Flugverfahren in den letzten Jahren: Details siehe [31]) und andererseits auf die Abnahme der Flugbewegungszahlen zwischen 2018 und 2020 bei bis anhin nur teilweiser Erholung zwischen 2020 und 2022 zurückzuführen (vgl. nachfolgendes Kap. 4), wobei im Jahr 2022 die Kompensation des Bevölkerungswachstums in der Nacht (HSD) jedoch bereits fast verschwunden ist.

4. Sensitivitätsanalyse *ZFI* vom Vorjahr 2021 zum Berichtsjahr 2022

Im Folgenden werden die Differenzen im *ZFI* zwischen dem Vorjahr 2021 und dem Berichtsjahr 2022 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 [ZFI22_SENS21.mdb] hektarpunktspezifisch berechnet und verwaltet. Die pro Gemeinde zusammengefassten Daten befinden sich in einer Excel-Datei [ZFI22_SENS21.xlsx].

4.1. Veränderung im *ZFI* vom Vorjahr 2021 zum Berichtsjahr 2022

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 [41]. Zusätzlich wird die Komponente PM untersucht. **Die im Folgenden für den Vergleich mit den Sensitivitätskomponenten ausgewiesenen Werte für das Berichtsjahr 2022 (Index: PM25; vgl. Fussnote²) entsprechen daher nicht den offiziellen Monitoringwerten, wie sie in [40] dokumentiert sind.**

Die *HA*, die *HSD* und somit der *ZFI* des Jahres 2022 (ohne Anforderungen nach SIA-Norm 181) nahmen seit dem Jahr 2021 um 85%, 197% bzw. 117% zu (Tabelle 4-1).

Tabelle 4-1 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* vom Jahr 2021 zum Jahr 2022

Jahr		<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2022		26'593	17'310	43'903	= <i>ZFI</i> _{22,PM25}
2021		14'410	5'824	20'234	= <i>ZFI</i> _{21,PM25}
Veränderung	absolut	+12'183	+11'485	+23'668	= Δ <i>ZFI</i> _{PM25}
	prozentual	+85%	+197%	+117%	

Um die Veränderungen im *ZFI* vom Jahr 2021 zum Jahr 2022 auch räumlich analysieren zu können, werden die Differenzen in den *HA*, den *HSD* und im *ZFI* zwischen den Jahren 2021 und 2022 auf den Karten 1 bis 3 am Ende des vorliegenden Berichts dargestellt. Die räumlichen Verteilungen der *HA*, der *HSD* und des *ZFI* im Jahr 2022 finden sich auf den Karten 2 bis 4 des ersten Teilberichts [40] und diejenigen des Jahres 2021 auf den entsprechenden Karten von [38]. In den nachfolgenden Kapiteln wird ergründet, welche Komponente wie stark zu den in Tabelle 4-1 und in den Karten 1 bis 3 ausgewiesenen Differenzen beiträgt.

4.2. Einfluss von Veränderungen in der Bevölkerung

4.2.1. Einfluss von Veränderungen in der Wohnbevölkerung

Die Bevölkerung innerhalb der Untersuchungsperimeter des Jahres 2022 nahm von 2021 zu 2022 am Tag um rund 1% und in der Nacht um rund 2% zu (Tabelle 4-2).

Tabelle 4-2 Veränderungen der Bevölkerung innerhalb der Untersuchungsperimeter (UP) 2022 von 2021 zu 2022

Bevölkerung	UP	Anzahl Personen im UP Tag (06–22 h)	Anzahl Personen im UP Nacht (22–06 h)
2022	2022	338'446	255'984
2021	2022	333'750	251'907
Veränderung	absolut	+4'696	+4'077
	prozentual	+1%	+2%

Der Anstieg der Bevölkerung in den Untersuchungsperimetern bewirkt einen Anstieg der *HA* von 2% und einen Anstieg der *HSD* um 1%. Der *ZFI* steigt gesamthaft um 2% (Tabelle 4-3: $ZFI_{BEV,21} = 100\%$; vergleiche auch Tabelle 8-1 im Anhang, Kap. 8).

Tabelle 4-3 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2022, berechnet mit den Bevölkerungszahlen und passiven Schallschutzmassnahmen von 2022 bzw. 2021

Bevölkerung	Belastung	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2022	2022	26'593	17'310	43'903	= $ZFI_{22,PM25}$
2021	2022	26'166	17'081	43'248	= $ZFI_{BEV,21}$
Veränderung	absolut	+427	+228	+655	= ΔZFI_{BEV}
	prozentual	+2%	+1%	+2%	

4.2.2. Einfluss von Veränderungen der passiven Massnahmen

Die Zunahme passiver Massnahmen im Jahr 2022 im Vergleich zu 2021 führte zu einer Reduktion der *HSD* resp. des *ZFI* um 72 Personen (Tabelle 4-4). Die Komponente PM ist in vereinfachter Form, d.h. unter Berücksichtigung einer einheitlichen Einfügungsdämpfung von –25 dB, implizit in der Komponente BEV enthalten (Kap. 2.2 und 2.3).

Tabelle 4-4 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2022, berechnet mit den passiven Schallschutzmassnahmen von 2022 bzw. 2021 unter Berücksichtigung der erhöhten Anforderungen nach SIA-Norm 181 [41]

Passive Massnahmen	Restliche Inputdaten	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2022	2022	26'593	16'855	43'448	= ZFI_{22}
2021	2022	26'593	16'927	43'520	= $ZFI_{PM,21}$
Veränderung	absolut	0	–72	–72	= ΔZFI_{PM}
	prozentual	0%	0%	0%	

4.3. Einfluss von Veränderungen im Flugbetrieb

4.3.1. Einfluss von Veränderungen der Flugbewegungszahlen

Die Flugbewegungszahlen nahmen von 2021 zu 2022 stark zu, am Tag insgesamt um 74% und in der Nacht um 129% zu (Tabelle 4-5). In der ersten und letzten Tagesstunde nahmen die Bewegungen um 68% bzw. um 135% zu (vgl. Abbildung 4-1 in [40]).

Tabelle 4-5 Veränderungen der Flugbewegungszahlen von 2021 zu 2022

Jahr	Tag (06–22 h)	Erste Tagesstunde (06–07 h)	Letzte Tagesstunde (21–22 h)	Nacht (22–06 h)	Total (Tag + Nacht)	
2022	187'912	6'242	11'844	10'012	197'924	
2021	108'126	3'716	5'039	4'364	112'490	
Veränderung	absolut	+79'786	+2'526	+6'805	+5'648	+85'434
	prozentual	+74%	+68%	+135%	+129%	+76%

Die steigenden Bewegungszahlen führten zu einer Zunahme der *HA* am Tag um 64% und der *HSD* in der Nacht um 206%, was zu einer Zunahme im *ZFI* von insgesamt 101% führte.

Tabelle 4-6 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2022, berechnet mit den Bewegungszahlen von 2022 bzw. 2021

Bewegungszahlen	Restliche Inputdaten	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2022	2022	26'593	17'310	43'903	= <i>ZFI</i> _{22,PM25}
2021	2022	16'171	5'655	21'826	= <i>ZFI</i> _{BEW,21}
Veränderung	absolut	+10'422	+11'655	+22'076	= Δ <i>ZFI</i> _{BEW}
	prozentual	+64%	+206%	+101%	

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

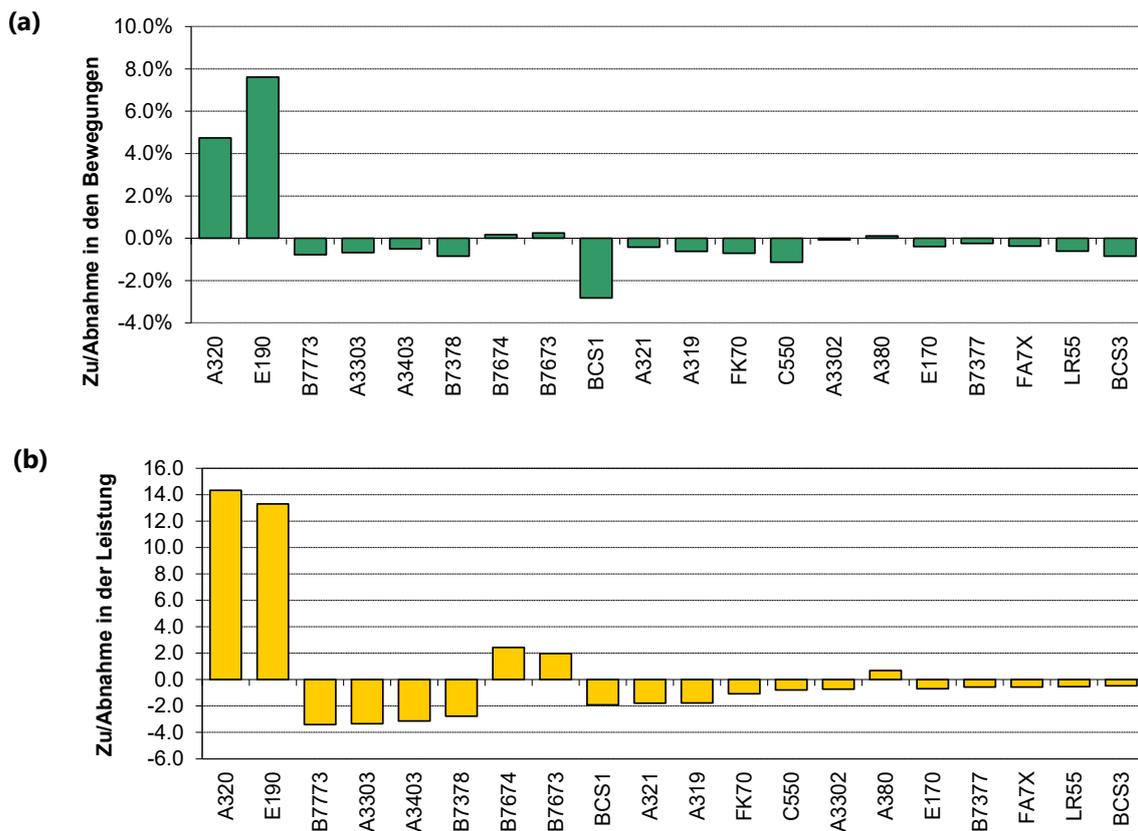
Die Veränderungen in der Flugzeugflotte im Jahr 2022 im Vergleich zum Jahr 2021 bewirkten am Tag eine Erhöhung der *HA* um 420 Personen (+2%), in der Nacht eine Verminderung der *HSD* in der Nacht um 1'204 Personen (-7%) und insgesamt eine Verminderung des *ZFI* um 785 Personen (-2%). (Tabelle 4-7).

Tabelle 4-7 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2022, berechnet mit der Flugzeugflotte von 2022 bzw. 2021

Flugzeugflotte	Restliche Inputdaten	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2022	2022	26'593	17'310	43'903	= <i>ZFI</i> _{22,PM25}
2021	2022	26'173	18'514	44'687	= <i>ZFI</i> _{FF,21}
Veränderung	Absolut	+420	-1'204	-785	= Δ <i>ZFI</i> _{FF}
	prozentual	+2%	-7%	-2%	

Abbildung 4-1 zeigt die Veränderungen in den Bewegungszahlen und der Schallenergie⁵ pro Flugzeugtyp am Tag vom Jahr 2021 zum Jahr 2022. Hierbei werden 20 akustische Flugzeugtypen dargestellt, sortiert nach absteigender (absoluter) Veränderung der Schallenergie (akustische Typenzuordnung nach [10]). Insgesamt stieg am Tag die Summe der Schallenergie aller Flugzeugtypen vom Jahr 2021 zum Jahr 2022 um 3%, was die HA um 420 Personen bzw. 2% erhöhte (Tabelle 4-7). Die Zunahme der Schallenergie zwischen den Jahren 2021 und 2022 ist auf die Veränderungen in der Zusammensetzung und im Einsatz der Flugzeugflotte zurückzuführen. Diese haben verschiedene Ursachen: Zwischen 2021 und 2022 stieg insgesamt der Flugverkehr stark an; gleichzeitig wurden Flottenerneuerungen vorangetrieben, aber auch Flugzeuge aus der Zwischenlagerung zurückgeholt und wieder integriert. Besonders nahmen am Tag die Anteile der A320 und E190 stark zu, während u.a. der Anteil des (akustisch günstigen) BCS1 im Vergleich zum Vorjahr abnahm (Abbildung 4-1). Die Zunahme der A320 ist auf neue A320neo bei SWISS und Edelweiss sowie den vermehrten Einsatz des A320ceo zur Erhöhung der Sitzkapazität zurückzuführen; auch die Zunahme der A321 ist auf den Anstieg bei SWISS zurückzuführen.

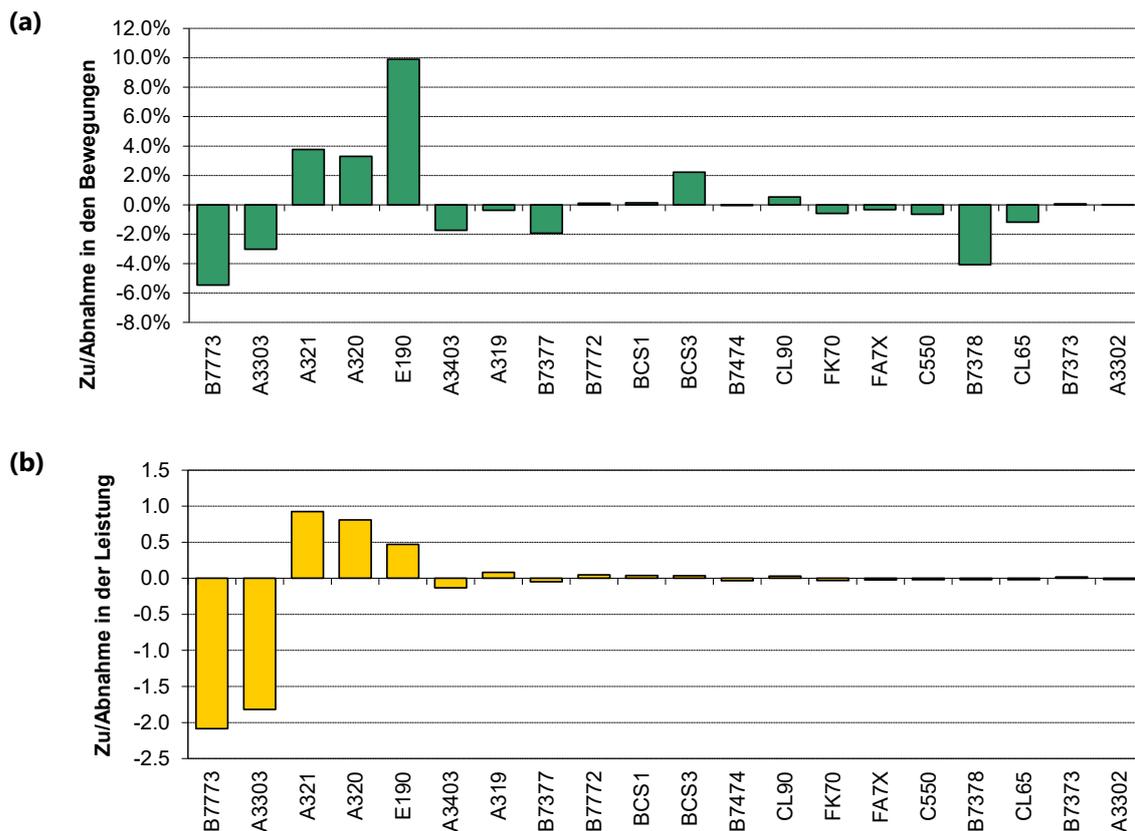
⁵ Die Schallenergie pro Flugzeugtyp wird, getrennt für Starts und Landungen, aus den typenspezifischen Ereignispegeln (L_{AE}), d.h. den akustischen Kenndaten der Flugzeugtypen des Fluglärmrechnungsprogramms FLULA2 [10], ermittelt. Dazu werden die L_{AE} in typenspezifische „Schallenergiegedichten“ pro Einzelereignis, d.h. pro einzelner Bewegung, umgerechnet ($E = 10^{-12} \times 10^{0.1 \times L_{AE}}$ [J/m^2]) und mit der Anzahl Bewegungen (Starts bzw. Landungen) pro Typ und Jahr multipliziert. Das Ergebnis entspricht der durch einen bestimmten Betrieb einer gegebenen Flugzeugflotte in rund 305 m Entfernung über ein Jahr resultierenden „Schallenergiegedichte“ [J/m^2]. Die akustischen Kenndaten gelten streng genommen nur für einen geradlinigen Vorbeiflug in 1'000 ft (304.8 m) Entfernung mit einer Geschwindigkeit von 160 kt (= 82.3 m/s) bei Standardatmosphäre (15°C, 70% rel. Feuchte), bei Starts zudem nur für Starts mit mittlerer Leistung („VG“) vor dem Cutback, und stellen somit eine relativ grobe Schätzung der emittierten Schallenergie dar. Im Folgenden wird vereinfachend von "Schallenergie" gesprochen. Wegen der vereinfachenden Annahmen bei deren Berechnung ist sie nur eine grobe Schätzung der tatsächlich durch den realen Flugbetrieb verursachten gesamten Schallenergie.



[BEWST2_ZFI22_SENS21.xlsm / Anteile]

Abbildung 4-1 Veränderung pro Flugzeugtyp am Tag (a) der Bewegungszahlen (% der Gesamtbewegungen tags im Jahr 2022) und (b) in der Schallenergie [J/m²] zwischen den Jahren 2021 und 2022. Die Zu-/Abnahmen entsprechen den Differenzen Flugbetrieb 2022 minus Flugbetrieb 2022 mit Flugzeugflotte 2021.

Im Gegensatz zum Tag sank in der Nacht die Summe der Schallenergie aller Flugzeugtypen vom Jahr 2021 zum Jahr 2022 um 12% (Abbildung 4-2), was die HSD um 1'204 Personen (bzw. 7%) verminderte (Tabelle 4-7). So sank insb. die Schallenergie der Flugzeugtypen B7773 und A3303 deutlich, was den (schwächeren) Anstieg in der Schallenergie der A320, A321 und E190 (zurückzuführen auf neu in Betrieb genommene Verbindungen mit Nachtflügen) deutlich überkompensierte.



[BEWST2_ZFI22_SENS21.xlsm / Anteile]

Abbildung 4-2 Veränderung pro Flugzeugtyp in der Nacht (a) der Bewegungszahlen (% der Gesamtbewegungen nachts im Jahr 2022) und (b) in der Schallenergie [J/m²] zwischen den Jahren 2021 und 2022. Die Zu-/Abnahmen entsprechen den Differenzen Flugbetrieb 2022 minus Flugbetrieb 2022 mit Flugzeugflotte 2021.

4.3.3. Einfluss von Veränderungen in der Flugroutenbelegung

Abbildung 4-3 zeigt das Pisten- und Routensystem des Flughafens Zürich. Abbildung 4-4 vergleicht die Routenbelegung der Jahre 2021 und 2022 am Tag. Von den am häufigsten belegten Startrouten am Tag wurde im Jahr 2022 die Route I28 etwas weniger belegt (-2%), die Route K28 hingegen leicht mehr (+1%). Insgesamt nahmen die Starts nach Westen um knapp 2% ab, und es wurden 67% der Starts am Tag über die Piste 28 abgewickelt. Die Piste 10 in Richtung Osten wurde ebenfalls weniger häufig benutzt (Abnahme um knapp 2% auf insgesamt 2%). Die Starts in Richtung Süden (E16, F16) nahmen hingegen um 2% auf insgesamt 10% zu (E16 und F16 je rund +1%). Bei den Starts nach Norden nahm die Belegung der Routen Richtung Nordosten (O32, O34) um 2% auf insgesamt 6% ab, während die Belegung der Routen Richtung Nordwesten (N32, N34) um 4% auf insgesamt 14% anstieg (N32 +5%, N34 -1%). Hierbei wurde die Piste 32 mehr (+4%) und die Piste 34 weniger (-3%) benutzt.

Die meisten Landungen wurden mit 77% von Norden über die Route S14 abgewickelt, was einer leichten Abnahme um 1% seit dem Vorjahr entspricht. Dafür stieg die Belegung der Südländeroute Q34 um 1% auf insgesamt 7% an. Die Anflüge auf die Ostländeroute P28 blieben mit insgesamt 16% annähernd gleich (+0.4%). Wie in den Vorjahren fanden auf T16 kaum Landungen statt (Abnahme um 0.4% auf insg. 0.1%).

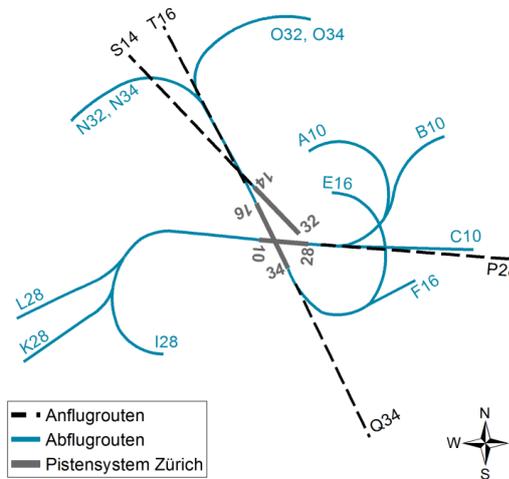
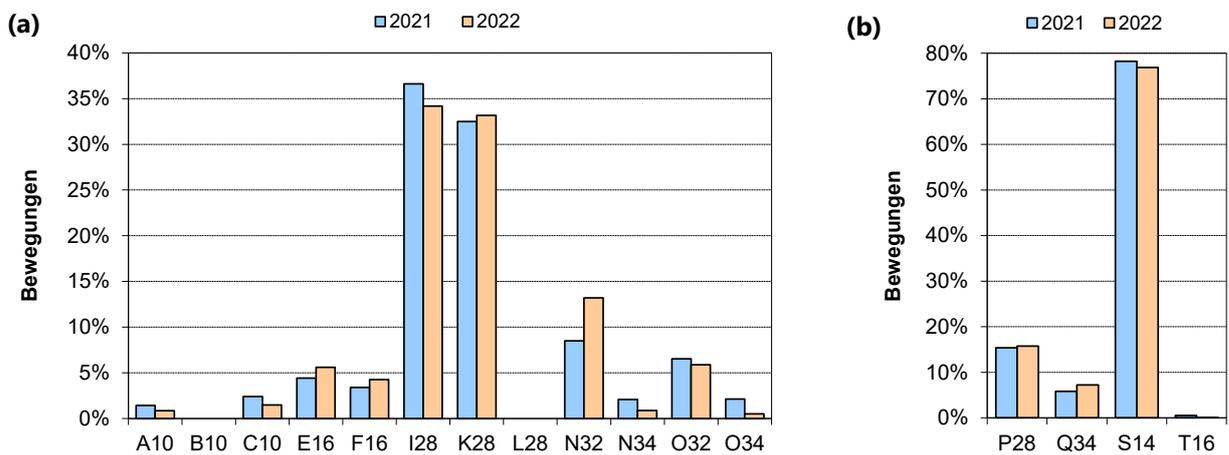


Abbildung 4-3 Pisten- und Routensystem des Flughafens Zürich.



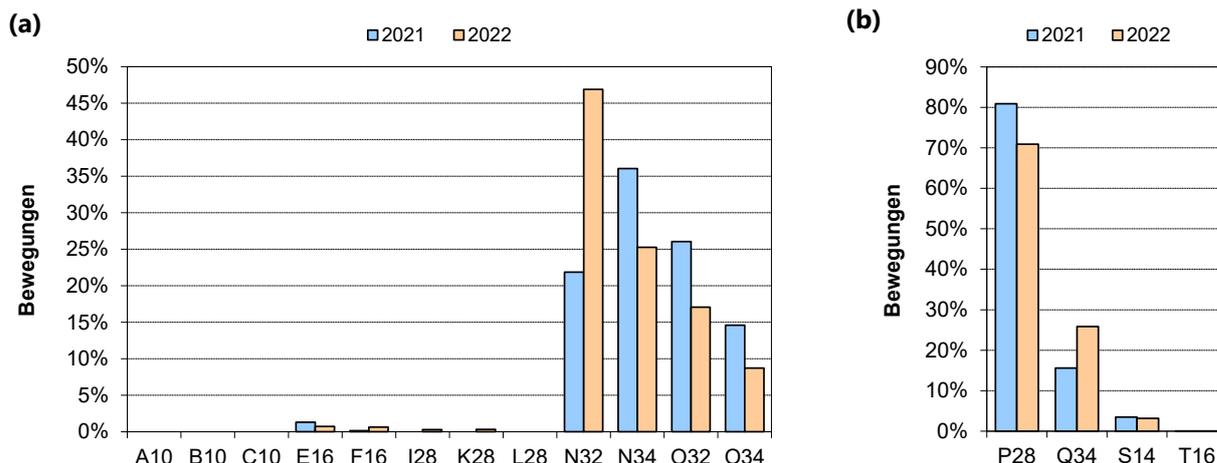
[BEWST2_ZFI22_SENS21.xlsm / F_RB]

Abbildung 4-4 Routenbelegungen der (a) Starts und (b) Landungen am Tag der Jahre 2021 und 2022

Abbildung 4-5 zeigt die Veränderungen in der Routenbelegung zwischen den Jahren 2021 und 2022 in der Nacht. Bei den Nordstarts nahm die Belegung der Route N32 stark um rund 25% zu und auf N34 um 11% ab, was insgesamt zu einer deutlichen Zunahme der Starts Richtung Nordwesten (N32, N34) um 14% auf insgesamt 72% Anteil führte. Dafür sanken die Starts Richtung Nordosten (O32, O34) um 15% (O32: -9%; O34: -6%) auf insgesamt 26%. Der Grund für diese deutliche Umlagerung der Starts von Nordosten nach Nordwesten – was dem Trend des Vorjahrs entspricht [37], aber entgegen der Entwicklung von 2020 läuft [35] – dürfte die anhaltend steigende Anzahl Landungen von Osten auf Piste 28 sein (höhere absolute Bewegungszahlen, nicht prozentuale Anteile wie in Abbildung 4-5 ausgewiesen). Bei grossem Verkehrsaufkommen (vgl. Flugbetrieb in den pre-COVID-19 Jahren) starten die Langstreckenflugzeuge vermehrt nach Nordwesten (Route 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 [14]). Wegen des geringen Verkehrsaufkommens im Jahr 2020 gab es offensichtlich weniger solche Konfliktsituationen, und die Langstreckenflugzeuge starteten vermehrt direkt nach Nordosten (Routen O32 und O34). Dieser Trend kehrte wieder in den Jahren 2021

und 2022. Insgesamt wurde die Piste 32 deutlich mehr (+16%) und die Piste 34 deutlich weniger (-17%) benutzt. Die Abflugrouten in Richtung Süden (E16 und F16) sowie Westen (I28 und K28) wurden wie in den Vorjahren nur wenig genutzt (je rund 1%).

Bei den Landungen sank die Belegung der Ostanflugroute P28 deutlich um -10% auf insgesamt 71%, dafür nahmen die Südlandungen auf der Route Q34 deutlich um 10% auf insgesamt 26% zu. Die Nordlandungen blieben mit einem Anteil von insgesamt 3% im Vergleich seit dem Vorjahr annähernd konstant. Die Route T16 wurde wie in den Vorjahren kaum belegt.



[BEWST2_ZFI22_SENS21.xlsm / F_RB]

Abbildung 4-5 Routenbelegungen der (a) Starts und (b) Landungen in der Nacht der Jahre 2021 und 2022

Die Unterschiede in der Routenbelegung führten zu einer Zunahme der *HA* am Tag um 3%, der *HSD* in der Nacht um 6% und insgesamt im *ZFI* um 5% (Tabelle 4-8).

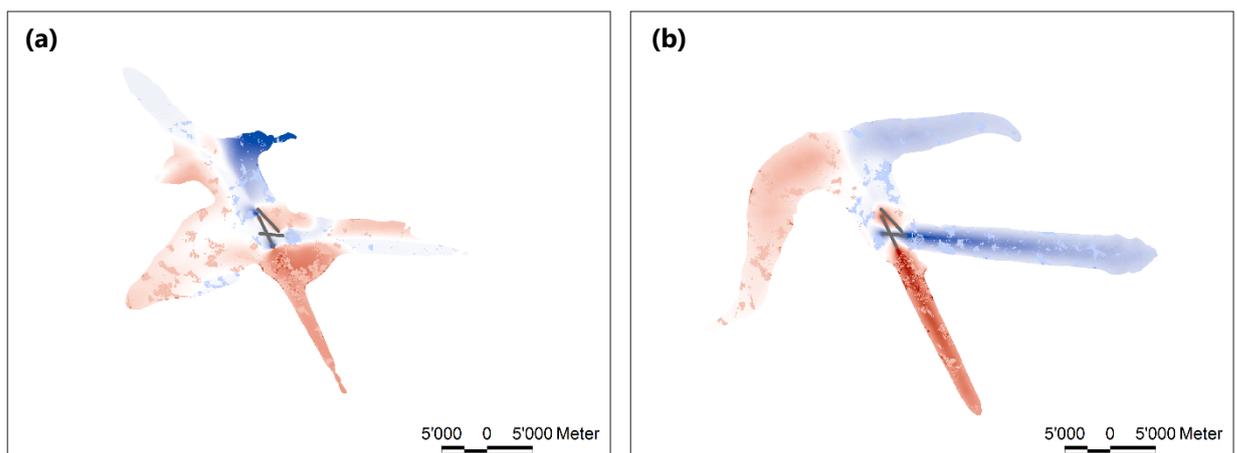
Tabelle 4-8 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2022, berechnet mit den Routenbelegungen von 2022 bzw. 2021

Routenbelegung	Restliche Inputdaten	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2022	2022	26'593	17'310	43'903	= <i>ZFI</i> _{22,PM25}
2021	2022	25'702	16'285	41'986	= <i>ZFI</i> _{RB,21}
Veränderung	Absolut	+891	+1'025	+1'916	= Δ <i>ZFI</i> _{RB}
	prozentual	+3%	+6%	+5%	

Am Tag (Abbildung 4-6 (a)) zeigt sich im Nordwesten eine Zunahme der *HA* im Einflussbereich der zunehmenden Starts Richtung Nordwesten (Routen N32, N34), bei gleichzeitiger Abnahme der *HA* im Nordosten im Einflussbereich der Starts Richtung Nordosten (Routen O32, O34) sowie im Norden im Einflussbereich der abnehmenden Nordlandungen (S14). Im Südosten und Osten (roter Bereich nördlich des Anflugs) nahmen die *HA* wegen zunehmender Südstarts auf den Routen E16 und F16 zu, ebenso wie im Süden wegen zunehmender Südlandungen auf Route Q34. Im Flughafennahbereich ist die stärkere Nutzung von Piste 32 sichtbar (roter Bereich direkt östlich neben der Piste). Östlich des Flughafens in der Verlängerung zu Piste 10 ist die geringere Nutzung der Piste 10 sichtbar (blauer Bereich abnehmender *HA*). Interessanterweise

nahmen die *HA* im Westen des Flughafens trotz Abnahme der Belegung der Startrouten ab Piste 28 zu; lediglich im Bereich westlich direkt anschliessend an Piste 28 sowie südwestlich des Flughafens sind Gebiete abnehmender *HA* sichtbar. Der Grund hierfür dürfte an der Überlagerung mit den Starts Richtung Nordwesten (Routen N32, N34) liegen, welche danach Richtung Süden abdrehen. Während Starts ab Piste 28 um 2% abnahmen (s.o.), was die *HA* vermindern müsste, nahm in der letzten Tagesstunde (T16) der Anteil der Starts Richtung Nordwesten deutlich um 18% zu. Die zusätzliche Anwendung eines Malus von 5 dB für T16 (vgl. Kap. 3.2.1. in [39]) zur Ermittlung des Leq^*_{16} führte wohl zu einer Zunahme desselben auch im Einflussbereich der Routen I28 und K28 und somit der *HA* im Gebiet westlich des Flughafens.

In der Nacht (Abbildung 4-6 (b)) sind zwei Trends deutlich sichtbar, nämlich (1) eine Abnahme der *HSD* im Osten und Nordosten aufgrund des geringeren Anteils der Landungen von Osten auf der Route P28 sowie der Starts auf den nordöstlichen Startrouten O32 und O34, und (2) eine Zunahme der *HSD* im Nordwesten und Süden aufgrund der höheren Belegungen der nordwestlichen Startrouten N32 und N34 sowie der Landeroute Q34. Somit ist generell die Verschiebung der Bewegungen von den Routen O32 und O34 auf die Routen N32 und N34 deutlich sichtbar, was dem Trend des Vorjahres entspricht, jedoch dem Trend des Jahres 2020 entgegengesetzt ist. Schliesslich ist im Flughafennahbereich die stärkere Nutzung von Piste 32 sichtbar (roter Bereich auf und direkt östlich der Piste).



[Abbildungen_für_Bericht_ZFI22_SENS21.mxd, DiffPlot_22min22_RB21_Tag.png, DiffPlot_22min22_RB21_Nacht.png, trsg22-rb21.tif, ha22-rb21.tif, awr22-rb21_15.tif, hsd22-rb21.tif]

Abbildung 4-6 Differenzenplots 2022 minus 2022 mit Routenbelegung 2021 für (a) die *HA* (kräftigere Farben) bzw. den Leq^*_{16} am Tag und (b) die *HSD* (kräftigere Farben) bzw. die *AWR* in der Nacht. Rot bedeutet eine Zunahme, blau eine Abnahme. Dargestellt sind die Gebiete innerhalb der Umhüllenden der relevanten Untersuchungsperimeter.

4.3.4. Einfluss von Veränderungen der Fluggeometrien

Die Veränderungen der Fluggeometrien vom Jahr 2021 zum Jahr 2022 erhöhten die *HA* um 4%, die *HSD* marginal um 0.3%, den *ZFI* in der Summe um 2% (Tabelle 4-9).

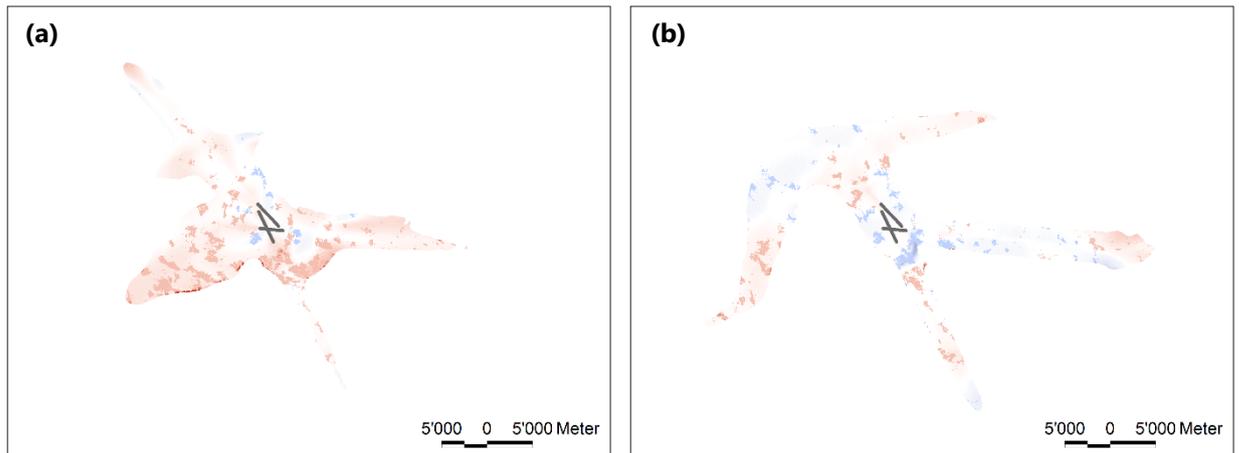
Tabelle 4-9 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* des Jahres 2022, berechnet mit den Fluggeometrien des Jahres 2022 bzw. 2021

Fluggeometrie	Restliche Inputdaten	<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>	
2022	2022	26'593	17'310	43'903	= $ZFI_{22,PM25}$
2021	2022	25'634	17'251	42'885	= $ZFI_{FG,21}$
Veränderung	absolut	+959	+59	+1'018	= ΔZFI_{FG}
	prozentual	+4%	+0%	+2%	

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 *HSD* nur unwesentlich, die *HA* (und somit den *ZFI*) jedoch deutlich beeinflussen (Tabelle 4-9). Aufgrund der Komplexität des Flugbetriebs und des Einflusses der meteorologischen Bedingungen und Auslastung auf die Steigleistung kann nicht im Detail auf die Veränderungen der Fluggeometrien eingegangen werden.

Am Tag nehmen die *HA* mehrheitlich zu (Abbildung 4-7(a)). Dies dürfte auf die zwischen 2021 und 2022 gestiegene Auslastung der Flugzeuge zurückzuführen sein: Die eingesetzten Flugzeuge waren dadurch im Jahr 2022 im Vergleich zum Vorjahr schwerer, was die Steigleistung verminderte und so die Lärmbelastung erhöhte. Dieselbe Erklärung dürfte für die grossflächige Zunahme der *HA* im Einflussbereich der Nordstarttrouten (N32, N34, O32, O34) zutreffen. Zudem nahmen die *HA* im Gebiet südöstlich des Flughafens zu. Ein möglicher Grund dürfte hier das spätere Abdrehen der Flugzeuge auf den Starttrouten E16 und F16 nach Osten sein. Aufgrund des höheren Abfluggewichts der Flugzeuge im Jahr 2022 dürften diese die Höhenanforderung für das Abdrehen nach Osten später erreicht haben, sodass im Einflussgebiet der Routen E16 und F16 die nördlicheren Gebiete etwas weniger und die südlicheren Gebiete etwas mehr vom Fluglärm betroffen waren. Ähnliche Beobachtungen wie in diesem Jahr wurden bereits im Vorjahr im Vergleich zu 2020 gemacht [37].

In der Nacht (Abbildung 4-7(b)) halten sich die lokalen Zu- und Abnahmen ungefähr die Waage (insgesamt geringe Differenz in den *HSD*, vgl. Tabelle 4-9). Teilweise zeigen sich ähnliche Trends wie am Tag (z.B. im Bereich der Nordstarttrouten nordwestlich (N32 und N34) und nordöstlich (O32 und O34) des Flughafens, welche ebenfalls auf eine höhere Auslastung der Flugzeuge hindeuten). Sie sind jedoch nur schwach ausgeprägt und beeinflussen die *HSD* in der Summe nur wenig.



[Abbildungen_für_Bericht_ZFI22_SENS21.mxd, DiffPlot_22min22_FG21_Tag.png, DiffPlot_22min22_FG21_Nacht.png, trsg22-fg21.tif, ha22-fg21.tif, awr22-fg21_15.tif, hsd22-fg21.tif]

Abbildung 4-7 Differenzenplots 2022 minus 2021 mit Fluggeometrien 2021 für (a) die *HA* (kräftigere Farben) bzw. den Leq^*_{16} am Tag und (b) die *HSD* (kräftigere Farben) bzw. die *AWR* in der Nacht (b). Rot bedeutet eine Zunahme, blau eine Abnahme. Dargestellt sind die Gebiete innerhalb der Umhüllenden der relevanten Untersuchungsperimeter.

4.4. Zusammenstellung der Resultate

Tabelle 4-10 zeigt den Anteil der Bevölkerung (ΔZFI_{BEV}) und des Flugbetriebs an der Veränderung des ZFI vom Jahr 2021 zum Jahr 2022 in der Sensitivitätsanalyse.

Tabelle 4-10 Veränderungen der HA, HSD und des ZFI vom Jahr 2021 zum Jahr 2022, total und aufgrund der Bevölkerung und des Flugbetriebs als Ganzes (vgl. Tabelle 8-1 im Anhang, Kap. 8)

Komponente	Absolute Veränderung			Prozentualer Anteil an den Veränderungen		
	HA	HSD	ZFI	HA	HSD	ZFI
ΔZFI_{PM25} von 2021 zu 2022 ^a	12'183	11'485	23'668	+100%	+100%	+100%
Bevölkerung: ΔZFI_{BEV} ^b	+427	+228	+655	+4%	+2%	+3%
Flugbetrieb: ΔZFI_{FB} ^c	+11'756	+11'257	+23'013	+96%	+98%	+97%

^a $\Delta ZFI_{PM25} = ZFI_{22PM25} - ZFI_{21PM25}$ (Kap. 4.1) ^b siehe Kap. 4.2.1 ^c Differenz zw. ΔZFI_{PM25} und ΔZFI_{BEV} (Kap. 2.8)

Aus Tabelle 4-10 ist ersichtlich, dass die Veränderungen in der Bevölkerung als Ganzes (inkl. Entwicklung der passiven Schallschutzmassnahmen, vgl. Kap. 2.2) im Jahr 2022 den ZFI geringfügig um 3% erhöhte. Im Gegensatz dazu trugen die Veränderungen im Flugbetrieb mit 97% stark zur Zunahme im ZFI bei, und zwar fast gleich stark am Tag (HA) wie in der Nacht (HSD). Die vier Flugbetriebskomponenten Bewegungszahlen (BEW), Zusammensetzung und Einsatz der Flugzeugflotte (FF), Routenbelegung (RB) sowie Lage und Verlauf der Flugbahnen (FG) hängen stark voneinander ab und können nicht vollständig isoliert voneinander betrachtet werden (Kap. 2.8). Die Absolutwerte der in Kapitel 4.3.1 bis 4.3.4 ermittelten Differenzen ΔZFI_{BEW} , ΔZFI_{FF} , ΔZFI_{RB} und ΔZFI_{FG} weichen dementsprechend in der Summe von den in Tabelle 4-10 ausgewiesenen, auf den Flugbetrieb rückführbaren Differenzen ab.

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. Änderungen der Routenbelegung, der Fluggeometrien und der Flugzeugflotte hatten einen vergleichsweise geringen Effekt, trugen aber ebenfalls zu den Änderungen der HA , der HSD und des ZFI bei.

1. **BEW:** → ZFI ↑ Die Zunahme Flugbewegungen zwischen 2021 und 2022 bewirkte eine starke Zunahme der HA , HSD und des ZFI .
2. **RB:** → ZFI ↑ Die Änderungen in den Routenbelegungen führten ebenfalls zu einer Zunahme der HA , HSD und des ZFI .
3. **FG:** → ZFI ↑ Die Veränderungen in der Lage und im Verlauf der Flugbahnen führten zu einer Zunahme der HA , einer marginale Abnahme der HSD und insgesamt zu einer Zunahme des ZFI .
4. **FF:** → ZFI ↓ Die Veränderungen in der Flugzeugflotte führten zu einer Zunahme der HA , einer deutlichen Abnahme der HSD und insgesamt zu einer Abnahme des ZFI .

5. Unsicherheit der Berechnungen

Die Unsicherheiten der berechneten Werte betragen 10–35% für die *HA*, 40% für die *HSD* und 10–30% für den *ZFI* (vgl. Kap. 6 in [40]). 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 [40]). 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 realen Differenz ΔZFI zwischen den beiden betrachteten Betriebszuständen (Berichtsjahr und Vorjahr) ab, und desto mehr sind die Resultate mit Vorsicht zu geniessen, da diese Rechenartefakte enthalten können. Bei grossen Abweichungen ist eine Aussage bezüglich Signifikanz der Effekte der Einzelkomponenten kaum mehr möglich.

Im Falle der Sensitivitätsbetrachtung 2022 vs. 2021 (Einzelkomponentenbetrachtung) weicht die oben erwähnte Summe der einzelnen Differenzen um +5% von ΔZFI_{PM25} ab (*HA* +8%, *HSD* +2%), sodass die Einzelkomponentenbetrachtung der *HA*, *HSD* und des *ZFI* als zuverlässig angesehen werden kann.

6. Abkürzungen und Literatur

6.1. Verwendete Abkürzungen

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

6.2. Literatur

- [1] Empa, 2006. *Zürcher Fluglärmindex ZFI, Berechnungsvorschrift. Version 2*. Bericht Nr. 441'255 - 4. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [2] Empa, 2008. *Flughafen Zürich, Veränderungen im Zürcher Fluglärm-Index ZFI vom Referenzzustand zum Jahr 2007*. Bericht Nr. 450'617. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [3] Empa, 2008. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2007*. Bericht Nr. 448'144. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [4] Empa, 2008. *Flughafen Zürich, Sensitivitäten Zürcher Fluglärm-Index, Entwicklung einer Methode zur isolierten Betrachtung des Einflusses von Veränderungen in der Wohnbevölkerung und im Flugbetrieb auf den Zürcher Fluglärm-Index ZFI. Version 2*. Bericht Nr. 448'451. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [5] Empa, 2009. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2008*. Bericht Nr. 452'380 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [6] Empa, 2009. *Flughafen Zürich, Veränderungen im Zürcher Fluglärm-Index ZFI vom Jahr 2000 zum Jahr 2007. Version 2*. Bericht Nr. 451'116. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [7] Empa, 2009. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2008, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 452'380 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [8] Empa, 2010. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2009*. Bericht Nr. 455'224 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [9] Empa, 2010. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2009, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 455'224 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [10] Empa, 2010. *FLULA2, Ein Verfahren zur Berechnung und Darstellung der Fluglärmbelastung. Technische Programm-Dokumentation. Version 4*. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf. URL: <https://www.empa.ch/de/web/s509/flula2>.
- [11] Empa, 2011. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2010*. Bericht Nr. 458'512 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [12] Empa, 2011. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2010, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 458'512 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [13] Empa, 2012. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2011, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 460'539 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [14] Empa, 2012. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2011, Einfluss der Flight Level 80-Regel auf den ZFI*. Bericht Nr. 461'359. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [15] Empa, 2012. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2011*. Bericht Nr. 460'539 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [16] Empa, 2013. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2012*. Bericht Nr. 5214.001738 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.

- [17] Empa, 2013. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2012, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 5214.001738 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [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. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [19] Empa, 2014. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2013*. Bericht Nr. 5214.005883 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [20] Empa, 2014. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2013, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 5214.005883 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [21] Empa, 2015. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2014*. Bericht Nr. 5214.008333 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [22] Empa, 2015. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2014, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 5214.008333 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [23] Empa, 2016. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2015*. Bericht Nr. 5214.012095 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [24] Empa, 2016. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2015, Sensitivitätsbetrachtungen*. Bericht Nr. 5214.012095 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [25] Empa, 2017. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2016, Sensitivitätsbetrachtungen 2015*. Bericht Nr. 5214.014941 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [26] Empa, 2017. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2016*. Bericht Nr. 5214.014941 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [27] Empa, 2018. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2017, Sensitivitätsbetrachtungen 2016*. Bericht Nr. 5214.018366 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [28] Empa, 2018. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2017*. Bericht Nr. 5214.018366 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [29] Empa, 2019. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2018, Sensitivitätsbetrachtungen 2017*. Bericht Nr. 5214.021166 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [30] Empa, 2019. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2018*. Bericht Nr. 5214.021166 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [31] Empa, 2019. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2018, Einfluss der Fensterschliessmechanismen und des aktualisierten Quelldatensatzes von FLULA2 auf den ZFI*. Bericht Nr. 5214.021166 - 3. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [32] Empa, 2019. *FLULA2 — Auswirkungen neuer, aus sonAIR abgeleiteter Quelldaten auf Fluglärm-Belastungsrechnungen*. Bericht Nr. 5214.019893. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.

- [33] Empa, 2020. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2019, Sensitivitätsbetrachtungen 2018*. Bericht Nr. 5214.024180 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [34] Empa, 2020. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2019*. Bericht Nr. 5214.024180 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [35] Empa, 2021. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2020, Sensitivitätsbetrachtungen 2019*. Bericht Nr. 5214.026437 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [36] Empa, 2021. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2020*. Bericht Nr. 5214.026437 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [37] Empa, 2022. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2021, Sensitivitätsbetrachtungen 2020*. Bericht Nr. 5214.028868 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [38] Empa, 2022. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2021*. Bericht Nr. 5214.028868 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [39] Empa, 2023. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2022, Sensitivitätsbetrachtungen 2021*. Bericht Nr. 5214.031408 - 2. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [40] Empa, 2023. *Flughafen Zürich, Zürcher Fluglärm-Index ZFI im Jahre 2022*. Bericht Nr. 5214.031408 - 1. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (Empa), Abteilung Akustik / Lärminderung, Dübendorf.
- [41] SIA, 2020. *Norm SIA 181:2020 Bauwesen, SN 520 181, Schallschutz im Hochbau*. Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein (SIA), Zürich
- [42] 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 2022, 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 [40]). Fette gestrichelte Linie: Richtwert (47'000 Personen).	12
Abbildung 3-2	Einfluss der Änderungen in der Bevölkerung und im Flugbetrieb zwischen dem RZ und den Jahren 2005 bis 2022 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>	13
Abbildung 4-1	Veränderung pro Flugzeugtyp am Tag (a) der Bewegungszahlen (% der Gesamtbewegungen tags im Jahr 2022) und (b) in der Schallenergie [J/m^2] zwischen den Jahren 2021 und 2022. Die Zu-/Abnahmen entsprechen den Differenzen Flugbetrieb 2022 minus Flugbetrieb 2022 mit Flugzeugflotte 2021.	18
Abbildung 4-2	Veränderung pro Flugzeugtyp in der Nacht (a) der Bewegungszahlen (% der Gesamtbewegungen nachts im Jahr 2022) und (b) in der Schallenergie [J/m^2] zwischen den Jahren 2021 und 2022. Die Zu-/Abnahmen entsprechen den Differenzen Flugbetrieb 2022 minus Flugbetrieb 2022 mit Flugzeugflotte 2021.	19
Abbildung 4-3	Pisten- und Routensystem des Flughafens Zürich.	20
Abbildung 4-4	Routenbelegungen der (a) Starts und (b) Landungen am Tag der Jahre 2021 und 2022 ...	20
Abbildung 4-5	Routenbelegungen der (a) Starts und (b) Landungen in der Nacht der Jahre 2021 und 2022	21
Abbildung 4-6	Differenzenplots 2022 minus 2022 mit Routenbelegung 2021 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.	22
Abbildung 4-7	Differenzenplots 2022 minus 2022 mit Fluggeometrien 2021 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.	24

7.2. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1	Übersicht der bisher durchgeführten Sensitivitätsanalysen	5
Tabelle 2-2	Zusätzliche Berechnungen zur Bestimmung der Sensitivitäten	7
Tabelle 4-1	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> vom Jahr 2021 zum Jahr 2022	14
Tabelle 4-2	Veränderungen der Bevölkerung innerhalb der Untersuchungsperimeter (UP) 2022 von 2021 zu 2022	15
Tabelle 4-3	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2022, berechnet mit den Bevölkerungszahlen und passiven Schallschutzmassnahmen von 2022 bzw. 2021	15

Tabelle 4-4	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2022, berechnet mit den passiven Schallschutzmassnahmen von 2022 bzw. 2021 unter Berücksichtigung der erhöhten Anforderungen nach SIA-Norm 181 [41].....	15
Tabelle 4-5	Veränderungen der Flugbewegungszahlen von 2021 zu 2022.....	16
Tabelle 4-6	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2022, berechnet mit den Bewegungszahlen von 2022 bzw. 2021	16
Tabelle 4-7	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2022, berechnet mit der Flugzeugflotte von 2022 bzw. 2021	16
Tabelle 4-8	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2022, berechnet mit den Routenbelegungen von 2022 bzw. 2021	21
Tabelle 4-9	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> des Jahres 2022, berechnet mit den Fluggeometrien des Jahres 2022 bzw. 2021.....	23
Tabelle 4-10	Veränderungen der <i>HA</i> , <i>HSD</i> und des <i>ZFI</i> vom Jahr 2021 zum Jahr 2022, total und aufgrund der Bevölkerung und des Flugbetriebs als Ganzes (vgl. Tabelle 8-1 im Anhang, Kap. 8)	25
Tabelle 8-1	Veränderungen bei den <i>HA</i> , <i>HSD</i> und dem <i>ZFI</i> vom Jahr 2021 zum Jahr 2022, total und aufgrund der Veränderung in der Bevölkerung und im Flugbetrieb.....	33

7.3. Kartenverzeichnis

Karte 1	Differenzen im <i>ZFI</i> (PM25), 2022 minus 2021
Karte 2	Differenzen in den <i>HA</i> , 2022 minus 2021
Karte 3	Differenzen in den <i>HSD</i> (PM25), 2022 minus 2021
Karte 4	Differenzen im <i>ZFI</i> (PM25), 2022 minus RZ
Karte 5	Differenzen in den <i>HA</i> , 2022 minus RZ
Karte 6	Differenzen in den <i>HSD</i> (PM25), 2022 minus RZ

8. Anhang

Tabelle 8-1 zeigt die Veränderungen des *ZFI* (ohne Anforderungen nach SIA-Norm 181) vom Vorjahr 2021 zum Berichtsjahr 2022 insgesamt (total) sowie aufgeschlüsselt nach dem Einfluss der Bevölkerung (ΔZFI_{BEV}) und des Flugbetriebs. Die hier ausgewiesenen prozentualen Veränderungen beziehen sich auf das Jahr 2021, d.h. die *HA*, *HSD* und der *ZFI* des Jahres 2021 werden auf 100% gesetzt.

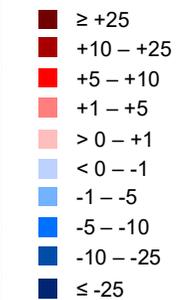
Tabelle 8-1 Veränderungen bei den *HA*, *HSD* und dem *ZFI* vom Jahr 2021 zum Jahr 2022, total und aufgrund der Veränderung in der Bevölkerung und im Flugbetrieb

Jahr		<i>HA</i>	<i>HSD</i>	<i>ZFI</i>		
2022		26'593	17'310	43'903	= $ZFI_{22,PM25}$	
2021		14'410	5'824	20'234	= $ZFI_{21,PM25} = 100\%$	
Veränderung	Total ^a	absolut	+12'183	+11'485	+23'668	= ΔZFI_{PM25}
		prozentual	+85%	+197%	+117%	
	Bevölkerung ^b	absolut	+427	+228	+655	= ΔZFI_{BEV}
		prozentual	+3%	+4%	+3%	
	Flugbetrieb ^c	absolut	+11'756	+11'257	+23'013	= ΔZFI_{FB}
		prozentual	+82%	+193%	+114%	

^a $\Delta ZFI_{PM25} = ZFI_{22,PM25} - ZFI_{21,PM25}$ (Tabelle 4-1)

^b Vgl. auch Kap. 4.2.1

^c Differenz zw. ΔZFI_{PM25} und ΔZFI_{BEV} (Kap. 2.8)

Flughafen Zürich**Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2022****Sensitivitätsbetrachtungen****Karte 1****Differenzen im ZFI (PM25)
2022 minus 2021****Legende****Differenz im ZFI (PM25)
(in Anzahl Personen pro Hektare)**

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

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

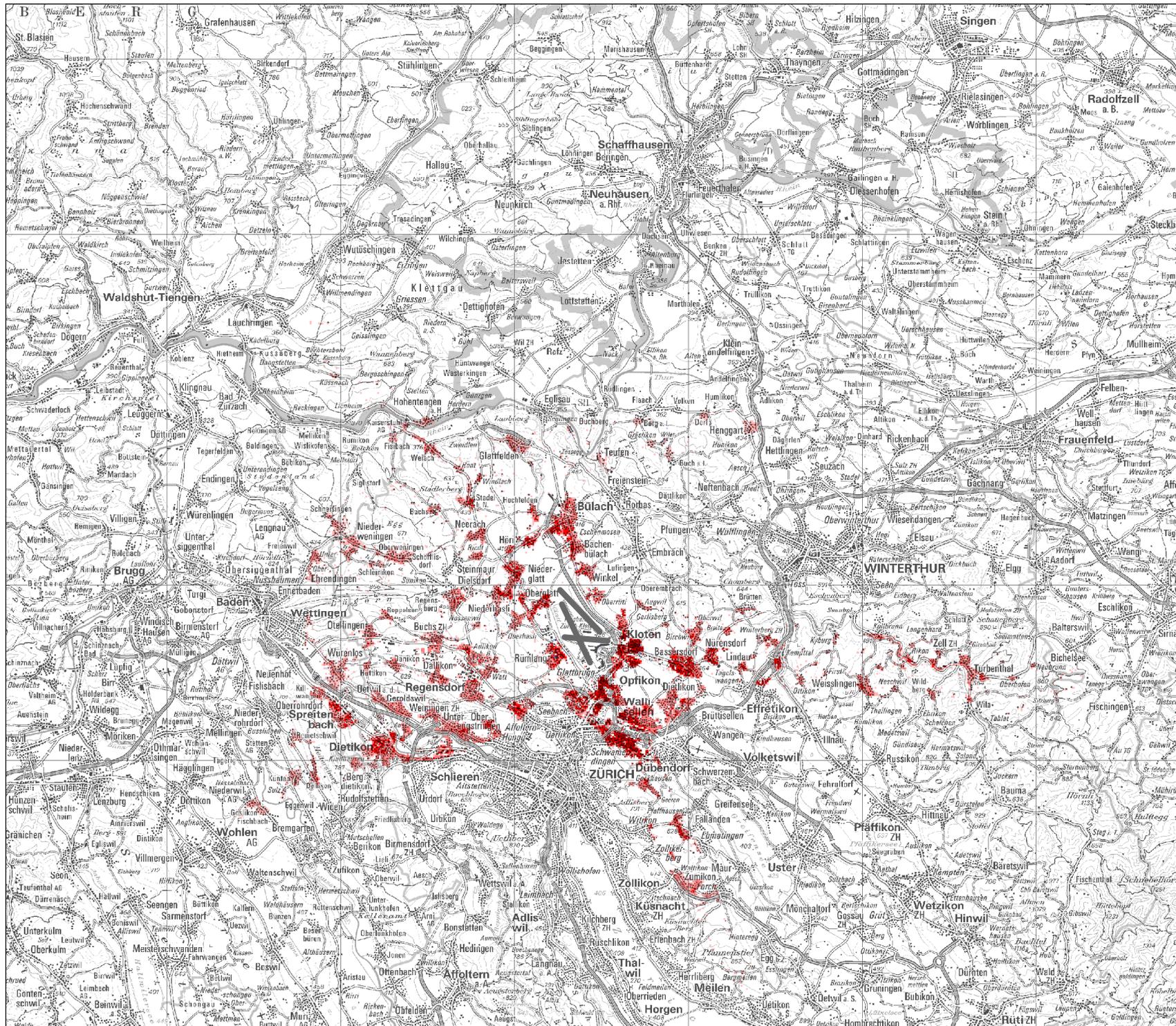
Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH

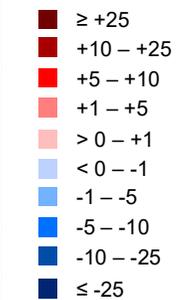
Version / Datum / 1 / 2023-06-12 / mejo

Ersteller:

[01_ZRH_ZFI22_SENS_ZFI22-ZFI21_V1.mxd]

[zf22_pm25-zf21_pm25.tif]



Flughafen Zürich**Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2022****Sensitivitätsbetrachtungen****Karte 2****Differenzen in den HA
2022 minus 2021****Legende****Differenz in den HA
(in Anzahl Personen pro Hektare)**

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

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

Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH

Version / Datum / 1 / 2023-06-12 / mejo

Ersteller:

[02_ZRH_ZFI22_SENS_HA22-HA21_V1.mxd]

[ha22-ha21.tif]



Flughafen Zürich**Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2022****Sensitivitätsbetrachtungen****Karte 3****Differenzen in den HSD (PM25)
2022 minus 2021****Legende****Differenz in den HSD (PM25)
(in Anzahl Personen pro Hektare)**

- $\geq +25$
- $+10 - +25$
- $+5 - +10$
- $+1 - +5$
- $> 0 - +1$
- $< 0 - -1$
- $-1 - -5$
- $-5 - -10$
- $-10 - -25$
- ≤ -25

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

**Impressum**

Übersichtskarte

Quelle: Bundesamt
für Landestopografie

Auftraggeber:

Amt für Mobilität Kt. ZH

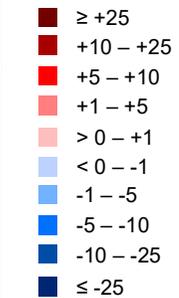
Version / Datum / 1 / 2023-06-12 / mejo

Ersteller:

[03_ZRH_ZFI22_SENS_HSD22-HSD21_V1.mxd]

[hsd22_pm25-hsd21_pm25.tif]



Flughafen Zürich**Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2022****Sensitivitätsbetrachtungen****Karte 4****Differenzen im ZFI (PM25)
2022 minus RZ****Legende****Differenz im ZFI (PM25)
(in Anzahl Personen pro Hektare)**

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

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

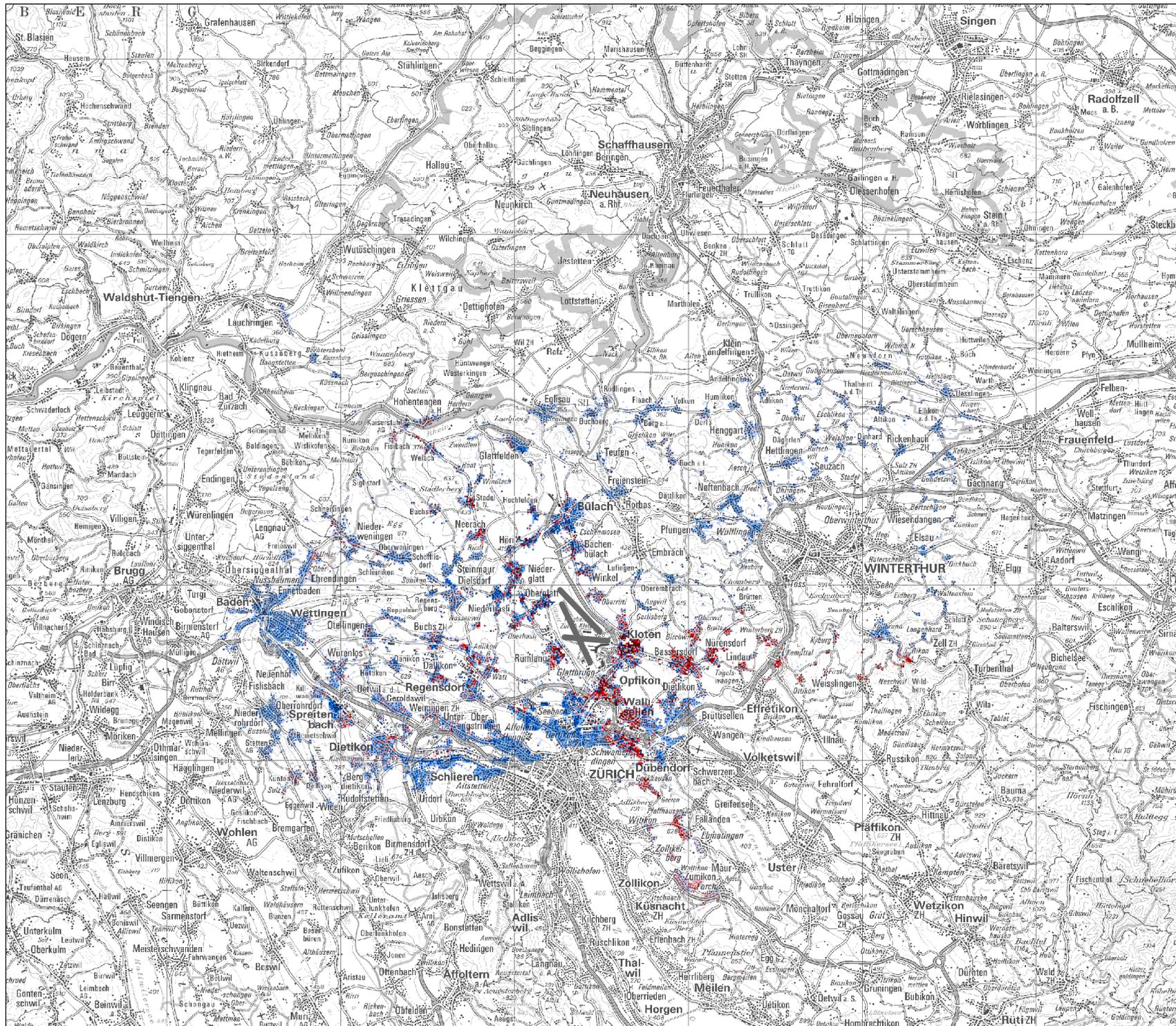
Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH

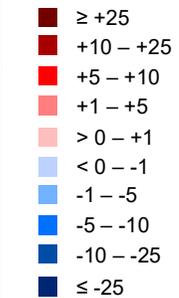
Version / Datum / 1 / 2023-06-12 / mejo

Ersteller:

[04_ZRH_ZFI22_SENS_ZFI22-RZ_V1.mxd]

[zf122_pm25-zfi_rz2.tif]



Flughafen Zürich**Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2022****Sensitivitätsbetrachtungen****Karte 5****Differenzen in den HA
2022 minus RZ****Legende****Differenz in den HA
(in Anzahl Personen pro Hektare)**

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

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

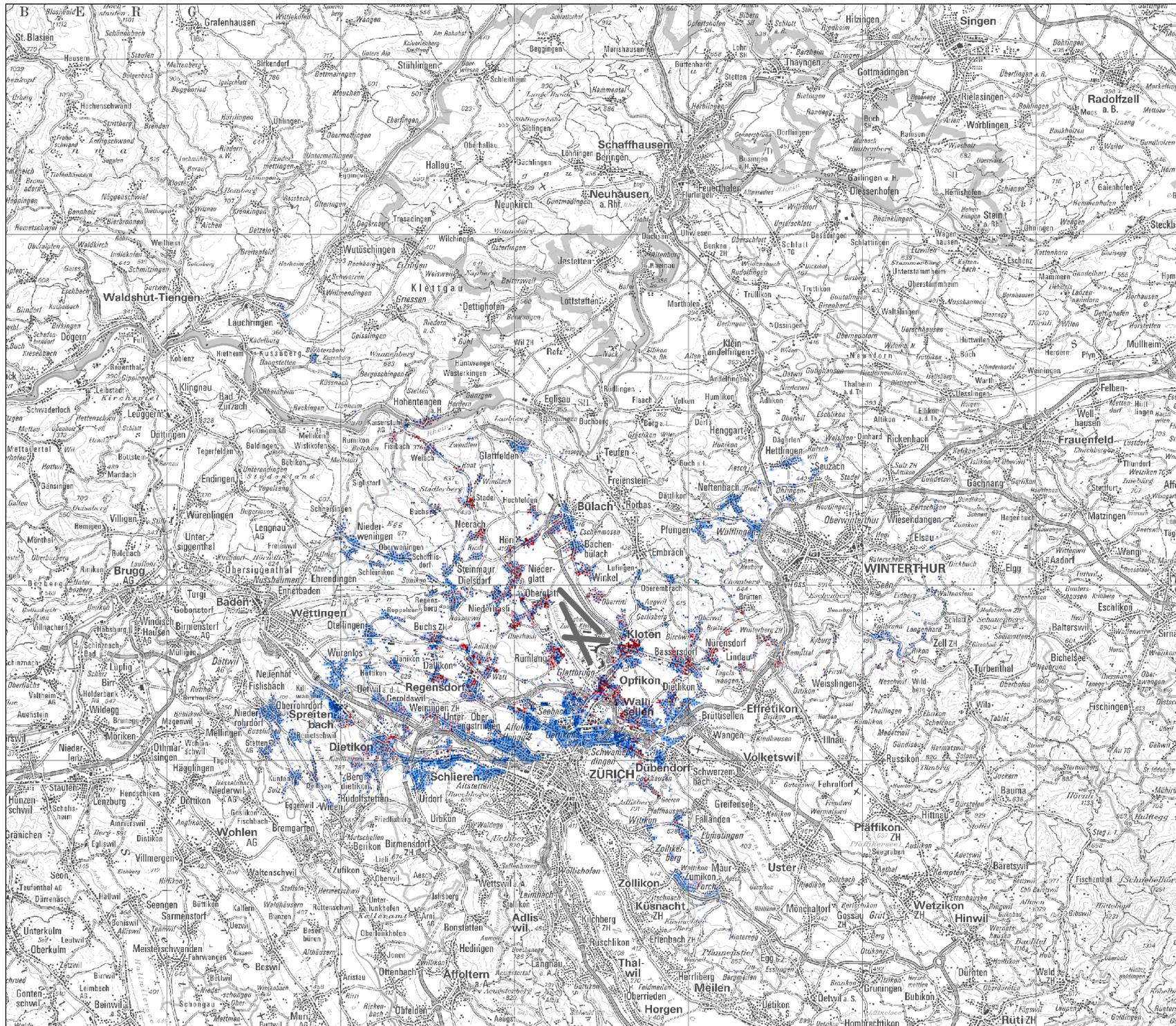
Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH

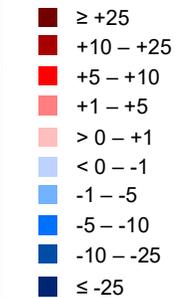
Version / Datum / 1 / 2023-06-12 / mejo

Ersteller:

[05_ZRH_ZFI22_SENS_HA22-RZ_V1.mxd]

[ha22-ha_r22.tif]



Flughafen Zürich**Zürcher Fluglärm-Index ZFI
im Jahre 2022****Sensitivitätsbetrachtungen****Karte 6****Differenzen in den HSD (PM25)
2022 minus RZ****Legende****Differenz in den HSD (PM25)
(in Anzahl Personen pro Hektare)**

Massstab: 1:300'000

3'000 0 3'000 Meter

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

Auftraggeber: Amt für Mobilität Kt. ZH

Version / Datum / 1 / 2023-06-12 / mejo

Ersteller:

[06_ZRH_ZFI22_SENS_HSD22-RZ_V1.mxd]

[hsd22_pm25-hsd_rz.tif]

