



ARBEITSBERICHT NAB 24-33

Bestimmung der unfallbedingten
Flugzeugabsturzhäufigkeiten am
Standort der Oberflächenanlage des
geologischen Tiefenlagers

Juli 2024



ARBEITSBERICHT NAB 24-33

Bestimmung der unfallbedingten
Flugzeugabsturzhäufigkeiten am
Standort der Oberflächenanlage des
geologischen Tiefenlagers

Juli 2024

STICHWÖRTER

Geologisches Tiefenlager, gTL, standortspezifische
Gefährdungsanalyse, Flugzeugabsturz

**Nagra | Nationale Genossenschaft
für die Lagerung radioaktiver Abfälle**
Hardstrasse 73 | 5430 Wettingen | Schweiz
+41 56 437 11 11 | info@nagra.ch | nagra.ch

Nagra Arbeitsberichte stellen Ergebnisse aus laufenden Aktivitäten dar, welche nicht zwingend einem vollumfänglichen Review unterzogen wurden. Diese Berichtsreihe dient dem Zweck der zügigen Verteilung aktueller Fachinformationen.

Zusammenfassung

Im Zuge des Rahmenbewilligungsgesuchs für das geologische Tiefenlager (gTL) am Standort Haberstal (Stadel, Kt. ZH) ist gemäss Kernenergieverordnung (KEV) als Teil der Gesuchsunterlagen ein Sicherheitsbericht einzureichen, in welchem nach Art. 23 KEV Angaben zu den Standorteigenschaften an der Erdoberfläche anzugeben sind. Dies betrifft unter anderem die standortspezifischen externen Gefährdungen, wozu gemäss Richtlinie A05 des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorat (ENSI) auch der unfallbedingte Flugzeugabsturz zählt, der in einer Analyse abzubilden und zu bewerten ist.

Zur Charakterisierung des Standortes der Oberflächenanlage des gTL in Bezug auf das Potenzial der Gefährdung durch einen unfallbedingten Flugzeugabsturz werden in der vorliegenden Analyse die jährlichen Absturzhäufigkeiten von Flugzeugen jeweils für die zu untersuchenden Flugzeugkategorien sowie Gewichtskategorien gemäss den Vorgaben in ENSI A05 ermittelt. Die Bestimmung der Absturzhäufigkeiten erfolgt für die folgenden drei Flugzeugkategorien: Verkehrsflugzeuge, strahlgetriebene Kampfflugzeuge sowie Leichtflugzeuge und Hubschrauber.

Zur Ermittlung der jährlichen unfallbedingten Absturzhäufigkeiten von Verkehrsflugzeugen werden die jährlichen Flugbewegungen der in der Nähe des Standortes befindlichen Flughäfen (d. h. Starts und Landungen) sowie die jährlichen Transitflugbewegungen in einem definierten Umkreis um den Standort zu Grunde gelegt. Die Anzahl jährlicher Flugbewegungen wird grundsätzlich unter Berücksichtigung der Schwankungen in der Vergangenheit sowie der erwarteten zukünftigen Schwankungen ermittelt. Für die Bestimmung der Flugbewegungen in Flughafennähe werden alle Flughäfen innerhalb eines Radius von 50 km um den Anlagenstandort berücksichtigt. Hinsichtlich der jährlichen Transitflugbewegungen sind alle Luftkorridore in einem Radius von 100 km, um den Anlagenstandort zu betrachten. Darüber hinaus werden weitere Randbedingungen wie bspw. die mittlere Flughöhe in Flughafennähe bei Starts und Landungen sowie bei Transitflügen über dem zu betrachtenden Standort ermittelt. Die jährliche Absturzhäufigkeit von Kampfflugzeugen sowie Leichtflugzeugen und Hubschraubern wird direkt aus der Absturzstatistik dieser Flugzeugkategorien für das Gebiet der Schweiz berechnet.

Mit der beschriebenen Vorgehensweise ergibt sich gemäss den ENSI-Berechnungsvorschriften für eine normierte virtuelle Trefferfläche eine unfallbedingte Absturzhäufigkeit über alle Flugzeugkategorien von $1.54 \times 10^{-10} \text{ a}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Die Flugzeugkategorie Leichtflugzeuge und Hubschrauber stellt mit 71.4 % den grössten Anteil, gefolgt von den Verkehrsflugzeugen mit 25.9 % und den strahlgetriebenen Kampfflugzeugen mit 2.7 %.

Die Ergebnisse der Analyse zeigen insgesamt, dass das Gefährdungspotenzial für einen unfallbedingten Flugzeugabsturz für den Standort grundsätzlich als gering eingestuft werden kann. Darüber hinaus sind die ermittelten jährlichen Absturzhäufigkeiten von Flugzeugen am Standort der Oberflächenanlage des gTL vergleichbar mit denen an anderen Standorten von Kernanlagen in der Schweiz und bestätigen somit die Eignung des Standorts.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	I
Inhaltsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	IV
Figurenverzeichnis	IV
Abkürzungsverzeichnis	V
1 Einleitung	1
1.1 Zielsetzung.....	1
1.2 Gliederung und Aufbau des Berichts.....	1
2 Standortbeschreibung der geplanten Oberflächenanlage für das geologische Tiefenlager	2
3 Ermittlung der jährlichen Absturzhäufigkeiten	4
3.1 Verkehrsflugzeuge	4
3.1.1 Anzahl der jährlichen Flugbewegungen	4
3.1.2 Absturzrate.....	7
3.1.3 Bedingte Absturzdichte	7
3.1.4 Virtuelle Trefferfläche	8
3.1.5 Jährliche Absturzhäufigkeiten für eine normierte virtuelle Trefferfläche	9
3.2 Strahlgetriebene Kampfflugzeuge	9
3.3 Leichtflugzeuge und Hubschrauber	10
4 Zusammenstellung der Ergebnisse und Bewertung	11
5 Literaturverzeichnis	12
Anhang A Prognose	A-1
A.1 Verkehrsflugzeuge.....	A-1
A.2 Strahlgetriebene Kampfflugzeuge	A-2
A.3 Leichtflugzeuge und Hubschrauber	A-3

Tabellenverzeichnis

Tab. 3-1:	Flugbewegungen am Flughafen Zürich und Transitflugbewegungen im Umkreis von 100 km um den Anlagenstandort für die entsprechenden Masseklassen der Verkehrsflugzeuge für das Jahr 2019	6
Tab. 3-2:	Flugbewegungen am Flughafen Zürich und Transitflugbewegungen im Umkreis von 100 km um den Anlagenstandort für die entsprechenden Masseklassen der Verkehrsflugzeuge für das Jahr 2019 unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors von 1.1 (konservative Berücksichtigung von Jahresschwankungen)	7
Tab. 3-3:	Jährliche unfallbedingte Absturzhäufigkeiten für die entsprechenden Masseklassen der Verkehrsflugzeuge, bezogen auf eine normierte Trefferfläche	9
Tab. 4-1:	Zusammenstellung der jährlichen unfallbedingten Absturzhäufigkeiten der verschiedenen Flugzeugkategorien, bezogen auf eine normierte Trefferfläche	11

Figurenverzeichnis

Fig. 2-1:	Übersichtskarte des Projektperimeters in der Gemeinde Stadel	2
Fig. 2-2:	Übersichtskarte zum Projektperimeter und zu den Standorten der Flughäfen Zürich, Basel und Bern	3
Fig. 3-1:	Flugbewegungen am Flughafen Zürich im Zeitraum 2003 – 2022	5
Fig. A-1:	Passagieraufkommen am Flughafen Zürich im Zeitraum 2003 – 2022	A-2
Fig. A-2:	Anzahl der pro Jahr für die Analyse relevanten Abstürze von strahlgetriebenen Kampfflugzeugen im Zeitraum 2000 – 2022	A-2
Fig. A-3:	Anzahl der pro Jahr für die Analyse relevanten Abstürze von Leichtflugzeugen und Hubschraubern im Zeitraum 2010 – 2022	A-3

Abkürzungsverzeichnis

ENSI	Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat
FSF	Flight Safety Foundation (Flugsicherheitsstiftung)
gTL	Geologische(s) Tiefenlager
KEG	Kernenergiegesetz
KEV	Kernenergieverordnung
OFA	Oberflächenanlage
PSA	Probabilistische Sicherheitsanalyse
RSK	Reaktor-Sicherheitskommission
SUST	Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle

1 Einleitung

1.1 Zielsetzung

Im Zuge des Rahmenbewilligungsgesuchs für das geologische Tiefenlager (gTL) am Standort Haberstal (Stadel, Kt. ZH) ist gemäss Kernenergieverordnung (KEV 2004) als Teil der Gesuchsunterlagen ein Sicherheitsbericht (Nagra 2025) einzureichen, in welchem nach Art. 23 KEV Angaben zu den Standorteigenschaften an der Erdoberfläche anzugeben sind. Dies betrifft unter anderem die standortspezifischen externen Gefährdungen, wozu gemäss Richtlinie A05 des Eidgenössischen Nuklearsicherheitsinspektorats (ENSI 2018b) auch der unfallbedingte Flugzeugabsturz zählt, der in einer probabilistischen Sicherheitsanalyse abzubilden und zu bewerten ist. Die Richtlinie regelt die Qualität und den Umfang der probabilistischen Sicherheitsanalyse (PSA) der Stufen 1 und 2 für interne und externe auslösende Ereignisse von Kernkraftwerken und gilt gemäss Kap. 7.2 der Richtlinie auch – soweit die PSA-Anforderungen angemessen und übertragbar sind – für das gTL. Die in ENSI-A05 festgelegte PSA zum Flugzeugabsturz ist hierbei als technische Anforderung an eine Stufe-1-PSA formuliert.

Die Bestimmung der Gefährdung durch Flugzeugabstürze erfolgt in der vorliegenden Analyse, basierend auf den Vorgaben in ENSI-A05, durch die Ermittlung von jährlichen unfallbedingten Absturzhäufigkeiten. Die Häufigkeiten werden für die geforderten Flugzeugkategorien sowie Gewichtskategorien ermittelt. Die in diesem Dokument durchgeführte Ermittlung der Flugzeugabsturzhäufigkeiten am Standort des gTL deckt den probabilistischen Teil der Stufe-1-PSA ab.

Zur Ermittlung der jährlichen unfallbedingten Absturzhäufigkeiten von Verkehrsflugzeugen werden die jährlichen Flugbewegungen der in der Nähe des Standortes befindlichen Flughäfen (d. h. Starts und Landungen) sowie die jährlichen Transitflugbewegungen in einem definierten Umkreis um den Standort zu Grunde gelegt. Die jährliche unfallbedingte Absturzhäufigkeit von Kampfflugzeugen sowie Leichtflugzeugen und Hubschraubern wird direkt aus der Absturzstatistik dieser Flugzeugkategorien für das Gebiet der Schweiz berechnet.

Da weder die genaue Anordnung noch die konkreten Abmessungen der geplanten Bauwerke der Oberflächenanlage (OFA) zum jetzigen Zeitpunkt festgelegt sind, werden die jährlichen Absturzhäufigkeiten grundsätzlich als normierte Grösse für eine virtuelle Trefferfläche pro m² ermittelt. Die Bestimmung der jährlichen Flugzeugabsturzhäufigkeiten in Bezug auf die deterministischen Trefferflächen der vorgesehenen Bauwerke und damit der Abschluss des Vorgehens nach ENSI-A05 erfolgt nach Kernenergiegesetz (KEG 2003) im Rahmen des weiteren Bewilligungsverfahrens.

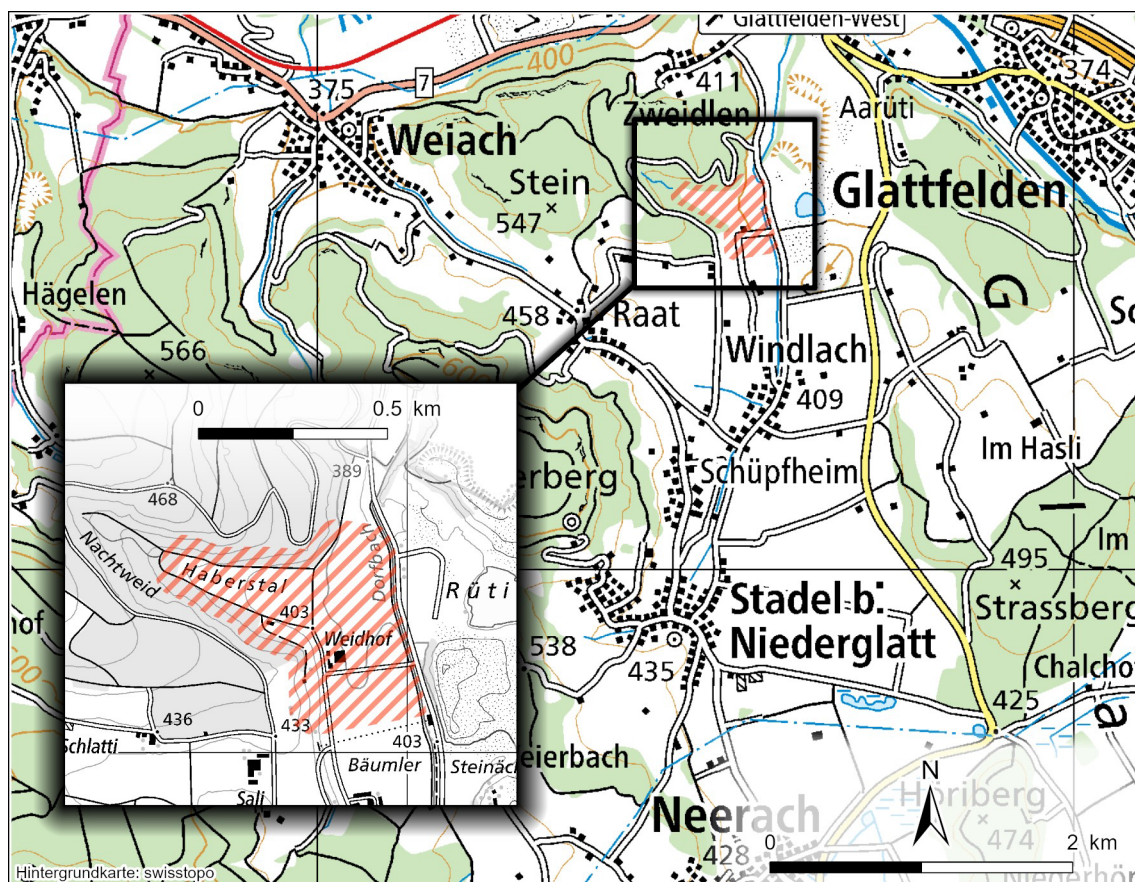
Mit Hilfe der ermittelten jährlichen Häufigkeiten von unfallbedingten Flugzeugabstürzen für eine virtuelle Trefferfläche pro m² kann aber bereits zum jetzigen Zeitpunkt eine Charakterisierung des Standortes und das Potenzial einer Gefährdung an diesem Standort bestimmt und bewertet werden. Über dies hinaus erfolgt eine Prognose der zukünftigen Entwicklung des Flugverkehrs und des allgemein zu erwartenden Trends der unfallbedingten Absturzhäufigkeit, damit die in der vorliegenden Analyse getroffenen Aussagen zur Gefährdungshäufigkeit auch zu einem späteren Zeitpunkt für den Standort gültig und anwendbar bleiben.

1.2 Gliederung und Aufbau des Berichts

Der Bericht beginnt in Kapitel 2 mit einer kurzen, für das Ereignis Flugzeugabsturz relevanten Charakterisierung des Standorts der OFA des gTL. In Kapitel 3 erfolgt die Ermittlung der jährlichen Absturzhäufigkeiten für alle relevanten Flugzeugkategorien auf Grundlage der statistischen Auswertungen zu den Flugbewegungen und Flugzeugabstürzen in der Schweiz. Die resultierenden Ergebnisse werden in Kapitel 4 zusammengefasst und bewertet.

2 Standortbeschreibung der geplanten Oberflächenanlage für das geologische Tiefenlager

Der Projektperimeter, der mit der Rahmenbewilligung raumplanerisch festgelegt wird und auf dem die OFA realisiert wird, befindet sich am Standort Haberstal (Gemeinde Stadel, Kt. ZH). Eine Übersicht über den Projektperimeter zeigt Fig. 2-1 (vgl. auch Nagra 2025). Der Projektperimeter liegt in einem leicht nach Osten geneigten Kerbtal in der ost-west ausgerichteten Flur Haberstal und wird im Osten von der Landstrasse begrenzt. Die im Westen mit ausgedehnten Wäldern bestockte Erhebung des Ämpergs (511 m ü. M.) umrahmt die Flur Haberstal von drei Seiten. Dies begrenzt prinzipiell das Potenzial eines unfallbedingten Flugzeugabsturzes im Hinblick auf Anflugrichtung und -winkel in der Flur Haberstal und darüber hinaus.



/// Projektperimeter

Fig. 2-1: Übersichtskarte des Projektperimeters in der Gemeinde Stadel

Der Projektperimeter in Bezug zum nächstgelegenen Flughafen Zürich, der sich südlich, in ca. 9 km Entfernung zum Projektperimeter befindet, wird in Fig. 2-2 deutlich. Zusätzlich ist in dieser Figur um den Projektperimeter ein Kreis mit einem Radius¹ von 50 km bzw. 100 km sowie die Standorte der Flughäfen Zürich, Basel und Bern eingezeichnet.

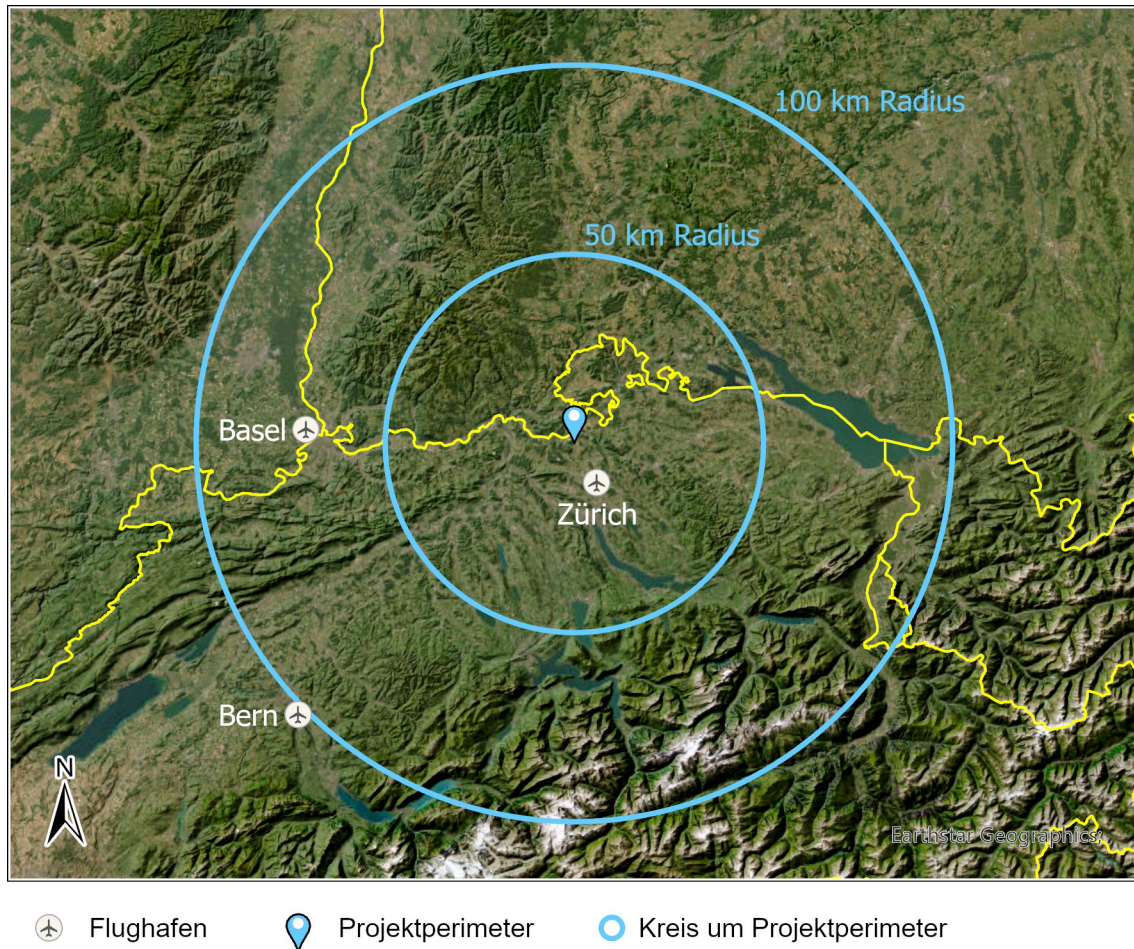


Fig. 2-2: Übersichtskarte zum Projektperimeter und zu den Standorten der Flughäfen Zürich, Basel und Bern

¹ Für die Bestimmung der Flugbewegungen in Flughafennähe sind alle Flughäfen innerhalb eines Radius von 50 km und bei der Ermittlung der jährlichen Transitflugbewegungen sind alle Luftkorridore in einem Radius von 100 km um den Anlagenstandort zu berücksichtigen.

3 Ermittlung der jährlichen Absturzhäufigkeiten

Die Ermittlung der jährlichen Absturzhäufigkeiten richtet sich nach den Vorgaben der Richtlinie ENSI-A05 (ENSI 2018b). Die Absturzhäufigkeiten sind hierbei für die folgenden drei Flugzeugkategorien getrennt zu ermitteln:

- Verkehrsflugzeuge mit einer Masse > 5'700 kg (siehe Kapitel 3.1)
- strahlgetriebene Kampfflugzeuge (siehe Kapitel 3.2)
- Leichtflugzeuge mit einer Masse < 5'700 kg und Hubschrauber (siehe Kapitel 3.3)

3.1 Verkehrsflugzeuge

Zur Ermittlung der jährlichen Absturzhäufigkeit für Verkehrsflugzeuge wird die folgende Vier-Faktor-Formel nach Kapitel 4.6.6.1.1 der Richtlinie ENSI-A05 verwendet:

$$F = \sum_{i,j} N_{i,j} \cdot C_i \cdot \rho_{i,j} \cdot A_{virt}$$

mit:

F jährliche Häufigkeit eines Verkehrsflugzeugabsturzes auf ein bestimmtes Ziel

$N_{i,j}$ Anzahl jährlicher Flugbewegungen am Standort für die Indices i, j

C_i Absturzrate pro Flugbewegung in Flughafennähe oder pro km bei Transitflügen

ρ_i bedingte Absturzdichte in der Nähe eines Flughafens pro km² oder pro Flugkilometer bei einem Transitflug

A_{virt} virtuelle Trefferfläche

i Index für die Flugphase

j Index für den Flughafen oder den Luftkorridor

3.1.1 Anzahl der jährlichen Flugbewegungen

Bei der Ermittlung der Anzahl der jährlichen Flugbewegungen $N_{i,j}$ ist abhängig vom Standort grundsätzlich zwischen den beiden Flugphasen *Flugbewegung in der Nähe des Flughafens* (d. h. Start und Landung) und *Transitflug* zu unterscheiden.

Für die Bestimmung der Flugbewegungen in Flughafennähe sind alle Flughäfen innerhalb eines Radius von 50 km um den Anlagenstandort zu berücksichtigen. Der Projektperimeter befindet sich nördlich in ca. 9 km Entfernung zum einzigen im relevanten Umkreis liegenden Verkehrsflughafen Zürich (vgl. Fig. 2-2). Damit ist die Anwendung bzw. Berücksichtigung des Index j gemäss der o. g. Formel für die Betrachtung mehrerer Flughäfen im Folgenden nicht erforderlich.

Bei der Ermittlung der jährlichen Transitflugbewegungen sind alle Luftkorridore in einem Radius von 100 km um den Anlagenstandort zu berücksichtigen. Im Folgenden wird für alle Transitbewegungen im betrachteten Luftraum mit einem Radius von 100 km um den Projektperimeter ein direkter Überflug des Projektperimeters angesetzt, sodass die Unterscheidung der verschiedenen Luftkorridore sich erübrigt. Daher wird der Index j gemäss der o. g. Formel nicht benötigt.

Die Anzahl der jährlichen Flugbewegungen sind gemäss ENSI-A05 unter Berücksichtigung der Schwankungen in der Vergangenheit sowie der erwarteten zukünftigen Schwankungen zu ermitteln. Der Statistikbericht der Flughafen Zürich AG (Flughafen Zürich AG 2023) gibt hier einen detaillierten Überblick über die Entwicklung des Flugverkehrs der Jahre 2003 bis 2022 für den Flughafen Zürich. Die Flugbewegungen am Flughafen Zürich im Zeitraum 2003 bis 2022 sind in Fig. 3-1 dargestellt. Entsprechend dem Statistikbericht können zwischen 2003 und 2019 keine signifikanten Steigerungen hinsichtlich der Flugbewegungen am Flughafen Zürich festgestellt werden. In den Jahren 2020 bis 2021 ging die Anzahl der Flugbewegungen aufgrund der COVID-19-Pandemie um ca. 50 % zurück, im Jahr 2022/23 erholte sich der Flugverkehr wieder, erreichte jedoch noch nicht das vorherige Niveau der Flugbewegungen. Im Hinblick auf die jährlichen Flugbewegungen von Verkehrsflugzeugen wird daher das Jahr 2019 als repräsentativ angesehen.

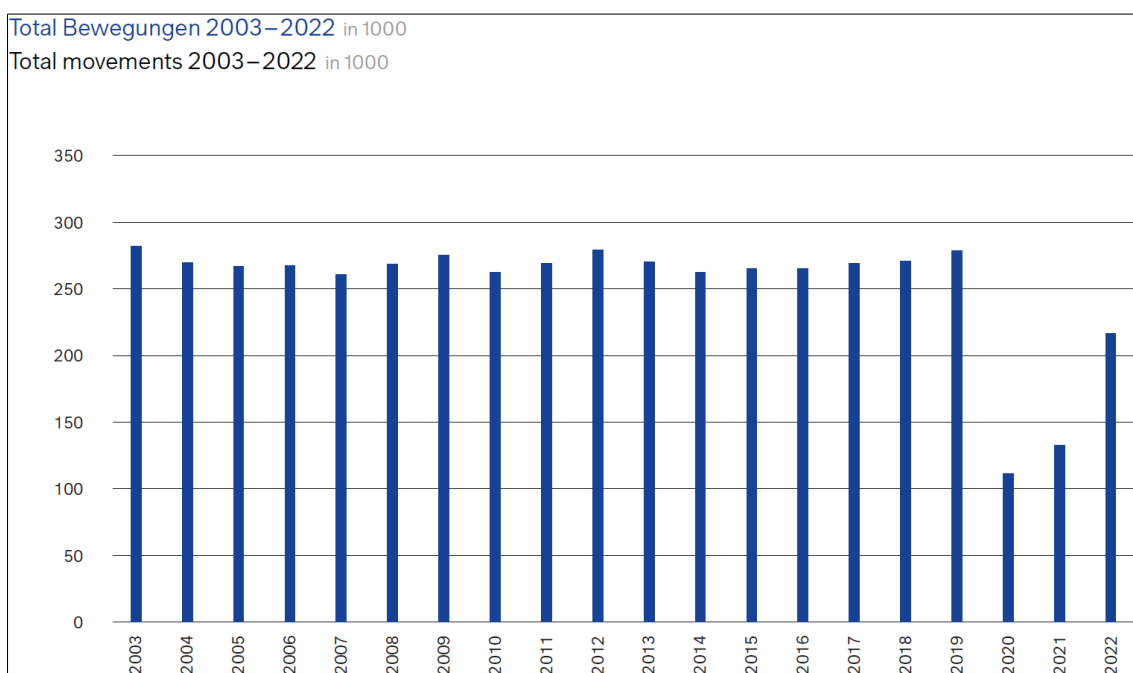


Fig. 3-1: Flugbewegungen am Flughafen Zürich im Zeitraum 2003 – 2022
Flughafen Zürich AG (2023)

Die Daten zu den Flugbewegungen am Flughafen Zürich sowie zu den Transitflugbewegungen in einem Radius von 100 km um den Projektperimeter wurden bei der Schweizer Flugsicherungsgesellschaft Skyguide, welche den Schweizer und den angrenzenden Luftraum überwacht, für das repräsentative Jahr 2019 abgefragt. Die Abfrage wurde gemäss den ENSI-Vorgaben auf Verkehrsflugzeuge mit einem Höchstabfluggewicht (englisch: maximum take off weight, [MTOW]) von > 5'700 kg begrenzt. Für die vorliegende Analyse wurden die Daten zu den Flugbewegungen noch einmal hinsichtlich der Flugzeugkategorien geprüft und selektiert. So wurden bspw. Kampfflugzeuge oder auch Helikopter nicht berücksichtigt, da diese keine Verkehrsflugzeuge im Sinne der ENSI-Vorgaben darstellen.

Die Luftfahrzeugklasse der Verkehrsflugzeuge wird hierbei in vier Unterkategorien unterteilt. Die Aufspaltung der Verkehrsflugzeuge in unterschiedliche Massenklassen erfolgt in Anlehnung an die Schutzgrade bezüglich der Bewertung von Flugzeugabstürzen auf deutsche kerntechnische Anlagen in der Stellungnahme der Reaktor-Sicherheitskommission zur anlagenspezifischen

Sicherheitsüberprüfung deutscher Kernkraftwerke nach dem Ereignis in Fukushima (RSK 2011). Dieses in der Schweiz etablierte Verfahren wurde auch bereits in den probabilistischen Analysen anderer Schweizer Kernanlagen angewendet.

Gemäss Skyguide fanden im repräsentativen Jahr 2019 insgesamt 262'026 Flugbewegungen von Verkehrsflugzeugen am Flughafen Zürich statt. Es wird angenommen, dass die Flugbewegungen zu gleichen Teilen aus jeweils 131'013 Starts und 131'013 Landungen bestehen. Weiterhin wurden gemäss Skyguide im Jahr 2019 insgesamt 818'693 Flugbewegungen von Verkehrsflugzeugen in den Luftkorridoren in einem Radius von 100 km um den Projektperimeter einschliesslich der Starts und Landungen am Flughafen Zürich registriert. Abzüglich der Flugbewegungen am Flughafen Zürich ergeben sich damit insgesamt 556'667 Transitflugbewegungen. In Tab. 3-1 sind die Anzahl der entsprechenden Flugbewegungen für die jeweiligen Masseklassen der Verkehrsflugzeuge für das Jahr 2019 zusammengestellt.

Tab. 3-1: Flugbewegungen am Flughafen Zürich und Transitflugbewegungen im Umkreis von 100 km um den Anlagenstandort für die entsprechenden Masseklassen der Verkehrsflugzeuge für das Jahr 2019

Masse [t]	Starts	Landungen	Starts und Landungen gesamt	Transit- flüge	Flug- bewegungen gesamt	Verteilung [%]
> 300	4'741	4'741	9'482	19'280	28'762	3.5
> 100 bis ≤ 300	12'117	12'117	24'233	42'549	66'782	8.2
> 50 bis ≤ 100	98'630	98'630	197'260	415'492	612'752	74.8
> 5.7 bis ≤ 50	15'526	15'526	31'051	79'346	110'397	13.5
Summe	131'013	131'013	262'026	556'667	818'693	100.0

Um die über die Jahre bedingten Schwankungen der Flugbewegungen am Flughafen Zürich von $\pm 10\%$ bzw. auch bei den Transitflügen zu berücksichtigen, wurden die Anzahl der Flugbewegungen am Flughafen Zürich sowie der Transitflugbewegungen jeweils konservativ um einen Korrekturfaktor von 1.1 erhöht, sodass sich die in Tab. 3-2 dargestellten Flugbewegungen ergeben. Aus der Anwendung des Korrekturfaktors resultieren entsprechend der zu verwendenden Vier-Faktor-Formel abdeckend höhere Absturzhäufigkeiten, sodass die korrigierten Werte in Tab. 3-2 im Folgenden zur Ermittlung der Absturzhäufigkeiten zu Grunde gelegt werden.

Tab. 3-2: Flugbewegungen am Flughafen Zürich und Transitflugbewegungen im Umkreis von 100 km um den Anlagenstandort für die entsprechenden Masseklassen der Verkehrsflugzeuge für das Jahr 2019 unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors von 1.1 (konservative Berücksichtigung von Jahresschwankungen)

Masse [t]	Starts	Landungen	Starts und Landungen gesamt	Transit- flüge	Flug- bewegungen gesamt	Verteilung [%]
> 300	5'215	5'215	10'430	21'208	31'638	3.5
> 100 bis ≤ 300	13'328	13'328	26'656	46'804	73'460	8.2
> 50 bis ≤ 100	108'493	108'493	216'986	457'041	674'027	74.8
> 5.7 bis ≤ 50	17'078	17'078	34'156	87'281	121'437	13.5
Summe	144'114	144'114	288'229	612'334	900'562	100.0

3.1.2 Absturzrate

Als weiterer Faktor zur Ermittlung der Absturzhäufigkeiten ist entsprechend den Vorgaben in ENSI-A05 (ENSI 2018b, ENSI 2018a) eine sogenannte Absturzrate C_i pro Flugbewegung in Flughafennähe (An- und Abflüge) sowie pro Flugkilometer bei Transitflügen zu berücksichtigen. Dabei ist bei Abflügen eine Absturzrate C von $9.40\text{E-}08$ pro Flugbewegung und bei Anflügen eine Absturzrate C von $4.70\text{E-}07$ pro Flugbewegung anzunehmen. Bei Transitflügen ist eine Absturzrate C von $3.40\text{E-}11$ pro Flugkilometer anzusetzen.

3.1.3 Bedingte Absturzdichte

Weiterhin ist gemäss den Vorgaben in ENSI-A05 die bedingte Wahrscheinlichkeit ρ_i eines Absturzes in der Nähe eines Flughafens pro km^2 oder bei einem Transitflug pro Flugkilometer zu bestimmen.

Die bedingte Absturzdichte pro Fläche in Flughafennähe (englisch: airport vicinity) ρ_{AV} lässt sich wie folgt ermitteln:

$$\rho_{AV} = \frac{1}{\pi \cdot g^2 \cdot h^2} \quad [\text{km}^{-2}]$$

mit:

g Gleitzahl ($g = 17$)

h mittlere Flughöhe [km] in Flughafennähe

Die bedingte Absturzdichte pro Flugstrecke im Transitflug ρ_T wird dagegen wie folgt berechnet:

$$\rho_T = \frac{d}{A} \quad [km^{-1}]$$

$$d = 2 \cdot \sqrt{g^2 \cdot h^2 - b^2}$$

$$A = \pi \cdot g^2 \cdot h^2$$

mit:

- d Flugstrecke, bei der das Flugzeug den Standort gleitend (d. h. mit ausgefallenen Triebwerken) erreichen kann [km]
- A Trefferfläche für Flugzeuge
- g Gleitzahl ($g = 17$)
- h mittlere Flughöhe
- b Horizontalkomponente des Minimalabstandes zur kerntechnischen Anlage

Für die mittlere Flughöhe in Flughafennähe wird ein Wert von 1.5 km angenommen. Dieser Wert wurde als Mittelwert aus den Flugbewegungen von Starts und Landungen am Flughafen Zürich abgeschätzt. Bei der Abschätzung wurde u. a. berücksichtigt, dass die mittlere Flughöhe bei Abflügen in der Nähe eines Flughafens aufgrund des erforderlichen Steigflugs der Flugzeuge im Allgemeinen höher ist als bei Landeanflügen. Grundsätzlich ist auch zu beachten, dass der Flughafen Zürich über mehrere Start- und Landebahnen verfügt, sodass der Projektperimeter für einen Teil der Starts und Landungen gar nicht oder deutlich höher überflogen wird.

Als mittlere Flughöhe bei Transitflugbewegungen wird ein Wert von 9 km zu Grunde gelegt.

Die Horizontalkomponente, d. h. der Minimalabstand zum Projektperimeter wird mit 0 km angesetzt und somit konservativ von einem Überflug aller Flugbewegungen ausgegangen (Kap. 3.1.1).

Unter Anwendung der o. g. Formeln ergeben sich damit aus den Flugbewegungen in Flughafennähe (Starts und Landungen) eine bedingte Absturzdichte ρ_{AV} von 4.90E-04 pro km² und im Transitflug pro Flugstrecke eine bedingte Absturzdichte ρ_T von 4.16E-03 pro km.

3.1.4 Virtuelle Trefferfläche

Die Bestimmung der jährlichen Absturzhäufigkeiten in Bezug auf die virtuelle Trefferfläche erfolgt nach KEG im Rahmen des weiteren Bewilligungsverfahrens in den nachfolgenden Bewilligungsschritten, da im Zuge der Rahmenbewilligung insb. der Standort sowie die Grundzüge des Projekts, jedoch weder die genaue Anordnung noch die konkreten Abmessungen der Bauwerke festgelegt werden. Daher beziehen sich die ermittelten jährlichen Absturzhäufigkeiten für die Flugzeugkategorien grundsätzlich als normierte Grösse auf eine virtuelle Trefferfläche A_{virt} pro m².

3.1.5 Jährliche Absturzhäufigkeiten für eine normierte virtuelle Trefferfläche

Aus den o. g. Formeln ergeben sich bezogen auf eine normierte virtuelle Trefferfläche A_{virt} die in der Tab. 3-3 dargestellten Absturzhäufigkeiten für Verkehrsflugzeuge. Die berechnete Absturzhäufigkeit wird hinsichtlich der unterschiedlichen Auswirkungen aufgrund der Flugzeugmasse in verschiedene Luftfahrzeugklassen aufgeteilt. Als Flugzeugmasse wurde hier der jeweilige Wert für das Höchstabfluggewicht verwendet. In der Summe ergibt sich damit eine Absturzhäufigkeit F von $3.99\text{E-}11 \text{ a}^{-1}\text{m}^{-2}$. Der grösste Anteil an der jährlichen Absturzhäufigkeit resultiert aus Flugzeugen mit Massen im Bereich von $50 \text{ t} < m \leq 100 \text{ t}$ mit 75.3% ($3.00\text{E-}11 \text{ a}^{-1}\text{m}^{-2}$).

Tab. 3-3: Jährliche unfallbedingte Absturzhäufigkeiten für die entsprechenden Masseklassen der Verkehrsflugzeuge, bezogen auf eine normierte Trefferfläche

Masse	Starts	Landungen	Transitflüge	Absturz- häufigkeit gesamt	Verteilung
[t]	[a ⁻¹ m ⁻²]	[a ⁻¹ m ⁻²]	[a ⁻¹ m ⁻²]	[a ⁻¹ m ⁻²]	[%]
> 300	2.40E-13	1.20E-12	3.00E-15	1.44E-12	3.6
> 100 bis ≤ 300	6.13E-13	3.07E-12	6.62E-15	3.69E-12	9.2
> 50 bis ≤ 100	4.99E-12	2.50E-11	6.47E-14	3.00E-11	75.3
> 5.7 bis ≤ 50	7.86E-13	3.93E-12	1.23E-14	4.73E-12	11.9
Summe	6.63E-12	3.32E-11	8.66E-14	3.99E-11	100.0

3.2 Strahlgetriebene Kampfflugzeuge

Für strahlgetriebene Kampfflugzeuge wird die jährliche Absturzhäufigkeit nach Kap. 4.6.6.2 der Richtlinie ENSI-A05 ermittelt.

Entsprechend den Vorgaben ist die jährliche Absturzhäufigkeit von Kampfflugzeugen pro Fläche direkt aus der Absturzstatistik für das Gebiet der Schweiz zu berechnen. Als Zeitraum sind mindestens die vergangenen 20 Jahre auszuwerten. Für die Ermittlung von Absturzereignissen von Kampfflugzeugen wurden die Angaben der Schweizer Luftwaffe sowie unterstützend die Datenbank der Flight Safety Foundation (FSF 2023) und die Ereignisberichte der Schweizerischen Sicherheitsuntersuchungsstelle (SUST 2023) herangezogen.

Zur Bestimmung der für die Analyse relevanten Ereignisse wurden sämtliche Reports bzw. Ergebnisberichte der Flight Safety Foundation (FSF 2023) und der SUST (SUST 2023) für den entsprechenden Zeitraum 2000 bis 2022 gesichtet und schliesslich nur jene Ereignisse für die Berechnungen in der Analyse berücksichtigt, aus denen sich eine potenzielle Gefährdung für den Projektperimeter ableiten lässt. Als Kriterium zur Verwendung in der Analyse wird dabei die von Boeing mit Hull Loss (Totalschaden) bezeichnete Unfallart gemäss den Vorgaben des Erläuterungsberichts zur Richtlinie ENSI-A05 (ENSI 2018a) herangezogen. Beim Hull Loss handelt es sich um einen Kontrollverlust über das Flugzeug, der derart folgeschwer ist, dass ein Totalschaden des Flugzeugs vorliegt. Hierzu zählen auch offiziell als vermisst anerkannte Flüge. Hull-Loss-Unfälle von sich nicht im Flug befindlichen Flugzeugen (d. h. in den Phasen *Taxi*, *load/unload*, *parked*, *tow*) werden dagegen nicht als Absturz betrachtet.

Für ein in der vorliegenden Analyse zu berücksichtigendes Ereignis gilt bspw. der Absturz einer McDonnell Douglas F/A-18 Hornet der Schweizer Luftwaffe, welche am 23.10.2013 in der Nähe von Alpnachstad auf einen Berghang prallte und zerstört wurde. Das Ereignis vom 02.11.2017, bei dem eine Northrop F-5 Tiger nach einer technischen Störung von der Landebahn abkam, wurde dagegen nicht als Absturz gezählt.

Insgesamt werden vier relevante Abstürze von strahlgetriebenen Kampfflugzeugen im Zeitraum 2000 bis 2022 für die Analyse ermittelt. Damit ergibt sich aus der Anzahl der Abstürze für den Zeitraum 2000 bis 2022 ein Wert von 0.17 Abstürze pro Jahr. Bei einer Fläche von 41'285 km² für die Schweiz lässt sich eine unfallbedingte Absturzhäufigkeit F für strahlgetriebene Kampfflugzeuge von $4.21\text{E-}12 \text{ a}^{-1}\text{m}^{-2}$ ermitteln.

3.3 Leichtflugzeuge und Hubschrauber

Die jährliche Absturzhäufigkeit für Leichtflugzeuge und Hubschrauber wird anhand dem Kap. 4.6.6.3 der Richtlinie ENSI-A05 berechnet.

Analog zu den Kampfflugzeugen wird die jährliche Absturzhäufigkeit für Leichtflugzeuge und Hubschrauber ebenfalls aus der Statistik der Absturzereignisse in der Schweiz ermittelt. Dabei ist eine Auswertung der Ereignisse von mindestens fünf Jahren vorzunehmen. Für die Recherche der Absturzdaten wurden ebenfalls die Datenbank der Flight Safety Foundation (FSF 2023) sowie die Ereignisberichte der SUST (SUST 2023) herangezogen.

Zur Ermittlung der relevanten Ereignisse für Leichtflugzeuge und Hubschrauber wurden analog zu den Kampfflugzeugen die Reports bzw. Ergebnisberichte der Flight Safety Foundation (FSF 2023) und der SUST (SUST 2023) im relevanten Zeitraum 2010 bis 2022 gesichtet und für die Berechnungen in der Analyse lediglich die Ereignisse mit potenzieller Gefährdung des Projekterimeters berücksichtigt. Auch hier wurde die von Boeing mit Hull Loss bezeichnete Unfallart gemäss den Vorgaben des Erläuterungsberichts zur Richtlinie ENSI-A05 (ENSI 2018a) als Kriterium zur Verwendung in der Analyse herangezogen.

Als potenzielles Ereignis wurde beispielsweise der Absturz einer Robin DR.400/180R Remorqueur am 15.07.2017 betrachtet. Das Kleinflugzeug verlor an Höhe und prallte gegen den Schornstein und das Dach eines Gebäudes. Dagegen wurden Ereignisse wie z. B. ein hartes Aufschlagen auf der Piste bei der Landung oder eine Notlandung auf einem Feld nicht als Absturz gezählt.

Insgesamt wurden 59 Abstürze von Leichtflugzeugen und Hubschraubern im Zeitraum 2010 bis 2020 gezählt. Davon ergaben sich 47 Abstürze von Leichtflugzeugen, neun Abstürze von Hubschraubern sowie zwei Abstürze von Militärhubschraubern und ein Absturz eines militärischen Transport- bzw. Leichtflugzeuges.

Aus der Anzahl der Abstürze von Leichtflugzeugen und Hubschraubern für den Zeitraum 2010 bis 2022 ergeben sich damit 4.54 Abstürze pro Jahr. Bei einer Fläche von 41'285 km² für die Schweiz lässt sich eine unfallbedingte Absturzhäufigkeit F für Leichtflugzeuge und Hubschrauber von $1.10\text{E-}10 \text{ a}^{-1}\text{m}^{-2}$ ermitteln.

4 Zusammenstellung der Ergebnisse und Bewertung

In der Tab. 4-1 sind die jährlichen unfallbedingten Absturzhäufigkeiten für die verschiedenen Flugzeugkategorien bezogen auf eine normierte Trefferfläche A_{virt} zusammengestellt.

Tab. 4-1: Zusammenstellung der jährlichen unfallbedingten Absturzhäufigkeiten der verschiedenen Flugzeugkategorien, bezogen auf eine normierte Trefferfläche

Flugzeugkategorie	Absturzhäufigkeit [a ⁻¹ m ⁻²]	Verteilung [%]
Verkehrsflugzeuge	3.99E-11	25.9
davon		
> 300 t	1.44E-12	0.9
> 100 t bis ≤ 300 t	3.69E-12	2.4
> 50 t bis ≤ 100 t	3.00E-11	19.5
≤ 50 t	4.73E-12	3.1
Kampfflugzeuge	4.21E-12	2.7
Leichtflugzeuge und Hubschrauber	1.10E-10	71.4
Summe	1.54E-10	100

Bei der Berücksichtigung aller Flugzeugkategorien beträgt die gesamte unfallbedingte Absturzhäufigkeit $1.54\text{E-}10 \text{ a}^{-1}\text{m}^{-2}$. Mit einer Absturzhäufigkeit von $1.10\text{E-}10 \text{ a}^{-1}\text{m}^{-2}$ (71.4 %) stellt die Flugzeugkategorie Leichtflugzeuge und Hubschrauber den grössten Anteil, gefolgt von den Verkehrsflugzeugen mit $3.99\text{E-}11 \text{ a}^{-1}\text{m}^{-2}$ (25.9 %) und den Kampfflugzeugen mit $4.21\text{E-}12 \text{ a}^{-1}\text{m}^{-2}$ (2.7 %). Von den Verkehrsflugzeugen liefert die Gewichtskategorie $50 \text{ t} < m \leq 100 \text{ t}$ mit $3.00\text{E-}11 \text{ a}^{-1}\text{m}^{-2}$ (19.5 %) den grössten Beitrag zur Absturzhäufigkeit.

Es ist zu beachten, dass bei dieser Abschätzung verschiedene Standortgegebenheiten konservativ nicht berücksichtigt sind. So sind bspw. aufgrund der Lage des Standortes im Haberstal die möglichen Anflugrichtungen und -winkel für ein Flugzeug grundsätzlich eingeschränkt und damit auch das Potenzial für einen unfallbedingten Flugzeugabsturz in der Flur Haberstal prinzipiell begrenzt (siehe auch Kap. 2 zur Standortbeschreibung).

Die Ergebnisse zeigen insgesamt, dass das Gefährdungspotenzial für einen unfallbedingten Flugzeugabsturz auf den Projektperimeter grundsätzlich als gering eingestuft werden kann. Darüber hinaus sind die ermittelten jährlichen Absturzhäufigkeiten von Flugzeugen am Standort vergleichbar mit denen an anderen Standorten von Kernanlagen in der Schweiz und bestätigen somit die Eignung des Standorts.

5 Literaturverzeichnis

- ENSI (2018a): Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Qualität und Umfang. Erläuterungsbericht zur Richtlinie ENSI-A05/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- ENSI (2018b): Probabilistische Sicherheitsanalyse (PSA): Qualität und Umfang. Richtlinie für die schweizerischen Kernanlagen ENSI-A05/d. Eidgenössisches Nuklearsicherheitsinspektorat ENSI, Brugg.
- Flughafen Zürich AG (2023): Statistikbericht 2022 / Statistics Report 2022. Flughafen Zürich AG, Zürich.
- FSF (2023): Flight Safety Foundation, Aviation Safety Network, Alexandria, Virginia, United States, online verfügbar unter <http://aviation-safety.net/wikibase/wikisearch.php>, Stand am 12. Juli 2023 Stand Juli 2023.
- KEG (2003): Kernenergiegesetz (KEG), vom 21. März 2003, Stand am 01. Januar 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.1, Schweiz.
- KEV (2004): Kernenergieverordnung (KEV) vom 10. Dezember 2004, Stand am 1. Januar 2024. Systematische Sammlung des Bundesrechts SR 732.11, Schweiz.
- Nagra (2025): Rahmenbewilligungsgesuch für eine Brennelementverpackungsanlage - Sicherheitsbericht. Nagra Technischer Bericht NTB 24-02.
- RSK (2011): Anlagenspezifische Sicherheitsüberprüfung (RSK-SÜ) deutscher Kernkraftwerke unter Berücksichtigung der Ereignisse in Fukushima-I (Japan), RSK-Stellungnahme, 437. RSK-Sitzung, Bonn 11. - 14.05.2011.
- SUST (2023): Schweizerische Unfalluntersuchungsstelle (SUST), Berichte über Unfälle und schwere Vorfälle, Bern, online verfügbar unter <https://www.sust.admin.ch/de/berichte/ereignisberichte-aviatik-uebersicht/ereignisberichte-aviatik>, Stand am 12. Juli 2023 Stand Juli 2023.

Anhang A Prognose

Grundsätzlich hat sich die Sicherheit im weltweiten Luftverkehr seit Jahren positiv entwickelt. Zu diesem Ergebnis kommen praktisch alle Luftsicherheitsstatistiken. In den vergangenen Jahren sind demnach Anzahl und Schwere der Flugzeugabstürze deutlich gesunken.

Damit die in der vorliegenden Analyse getroffenen Annahmen zur Gefährdungshäufigkeit auch zu einem späteren Zeitpunkt für den Projektperimeter gültig und anwendbar bleiben, ist insb. die zukünftige Entwicklung des Flugverkehrs am Flughafen Zürich oder auch der allgemein zu erwartende Trend der unfallbedingten Absturzhäufigkeit für die relevanten Flugzeugkategorien Verkehrsflugzeuge, strahlgetriebene Kampfflugzeuge sowie Leichtflugzeuge und Hubschrauber in der Schweiz zu betrachten. Angesichts der teilweise nur eingeschränkten Aussagekraft von Prognosen zur zukünftigen Entwicklung des Flugverkehrs bzw. von Absturzhäufigkeiten sind die hier getroffenen Annahmen jedoch bei der Fortschreibung der probabilistischen Analyse im Rahmen der weiteren Bewilligungsschritte nach KEG zu überprüfen und ggf. anzupassen.

A.1 Verkehrsflugzeuge

Die zeitlich bedingte Entwicklung der Flugbewegungen der Jahre 2003 bis 2022 am Flughafen Zürich wurde bereits in Fig. 3-1 im Kap. 3.1.1 dargestellt. Im Zeitraum 2003 und 2019 konnten keine signifikanten Steigerungen hinsichtlich der Flugbewegungen festgestellt werden. Lediglich in den Jahren 2020 und 2021 während der COVID-19-Pandemie ging die Anzahl der Flugbewegungen zurück und stieg im Jahr 2022/23 wieder an, erreichte jedoch nicht das Niveau der Flugbewegungen aus den Vorjahren. Im Vergleich zur Fig. 3-1 mit der Darstellung der Flugbewegungen zeigt die Fig. A-1 das Passagieraufkommen am Flughafen Zürich im Zeitraum 2003 bis 2022 (Flughafen Zürich AG 2023). Bis auf den Zeitraum der COVID-19-Pandemie ist zwischen 2003 und 2019 ein stetiger Anstieg der Passagierzahlen von ca. 17 Mio. Passagieren im Jahr 2003 auf über 30 Mio. Passagieren im Jahr 2019 zu erkennen. Aus Fig. 3-1 und Fig. A-1 lässt sich damit schliessen, dass ein erhöhtes Passagieraufkommen nicht unbedingt mit einem Anstieg der Flugbewegungen einhergeht. Die Ursache hierfür ist der in diesem Zeitraum vermehrte Einsatz von grösseren bzw. schwereren Flugzeugen mit einer höheren Sitzplatzkapazität. Des Weiteren sind die Flugzeuge aufgrund einer ständigen Optimierung beim Preis- und Kapazitätsmanagement der Fluggesellschaften mit der Zeit immer besser ausgelastet. Es ist davon auszugehen, dass sich der Trend zum Einsatz von Flugzeugen höherer Masseklassen am Flughafen Zürich auch in Zukunft weiter fortsetzt und damit das Passagieraufkommen steigt, die Anzahl der Flugbewegungen jedoch mit gewissen Schwankungen in erster Näherung konstant bleibt.

Grundsätzlich ist am Flughafen Zürich aufgrund der bereits hohen Auslastung des Flugverkehrs ein Kapazitätsaufbau, welcher mit einer Erhöhung der Anzahl der Flugbewegungen verbunden wäre, nicht geplant. Ungeachtet dessen sind laut aktueller Planung zur Erhöhung der Sicherheit und Verbesserung der betrieblichen Abläufe Verlängerungen der Pisten 28 und 32 am Flughafen Zürich vorgesehen (Flughafen Zürich AG 2023). Die geplanten Verlängerungen der Pisten ermöglichen einen stabileren Betrieb bei allen Wetterlagen und für alle Flugzeugtypen und sorgen für eine Erhöhung der Sicherheitsmargen am Flughafen Zürich. Eine Verlängerung der Piste bedeutet einen längeren Bremsweg und damit eine höhere Sicherheitsreserve für die Piloten sowohl für Landungen als auch für Starts. Ausserdem werden sicherheitsrelevante Kreuzungspunkte am Boden und in der Luft reduziert. Ein Kapazitätsaufbau mit einer Erhöhung der Anzahl der Flugbewegungen sind durch die Pistenverlängerungen jedoch nicht geplant. Auf einer längeren Piste können zwar schwerere, aber nicht mehr Flugzeuge landen oder starten. Ein Anstieg der Flugbewegungen bei An- und Abflügen ist für den Flughafen Zürich daher nicht zu erwarten.

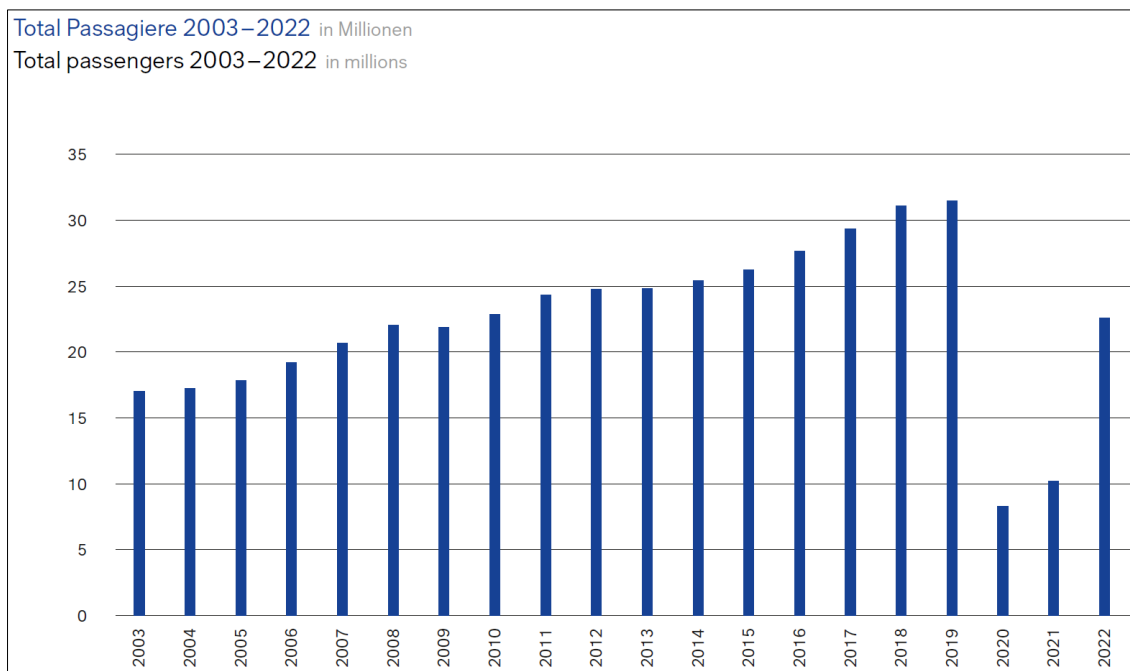


Fig. A-1: Passagieraufkommen am Flughafen Zürich im Zeitraum 2003 – 2022
Flughafen Zürich AG (2023)

A.2 Strahlgetriebene Kampfflugzeuge

Im Hinblick auf strahlgetriebene Kampfflugzeuge haben sich im Zeitraum 2000 bis 2022 insgesamt vier für die Analyse relevante Abstürze im Schweizer Luftraum ergeben. In Fig. A-2 ist die Verteilung der Abstürze der Kampfflugzeuge im Betrachtungszeitraum graphisch dargestellt. Es ist erkennbar, dass in den meisten Jahren kein Absturz zu verzeichnen war und sich die vier Abstürze ungleichmässig über den gesamten Betrachtungszeitraum verteilen. Es ist davon auszugehen, dass sich dieser Trend weiter fortsetzen wird und sich die unfallbedingte Absturzhäufigkeit von Kampfflugzeugen in der Schweiz auch in Zukunft auf einem konstant niedrigen Niveau bewegen wird.

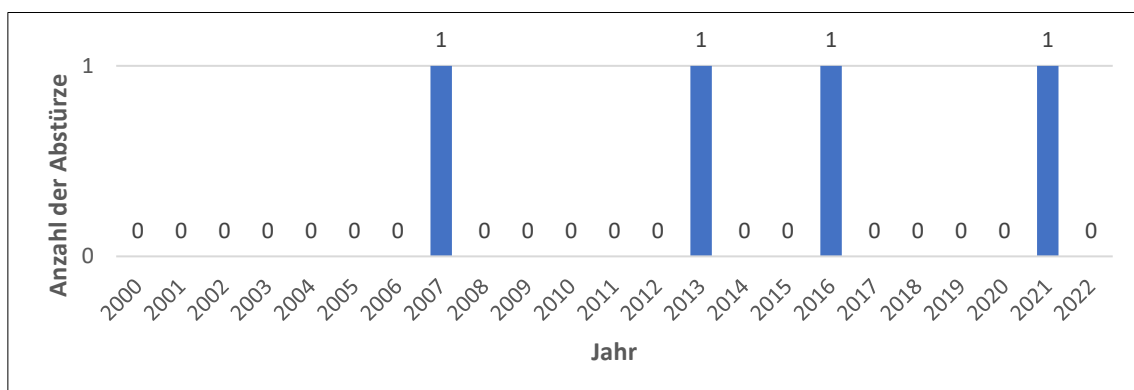


Fig. A-2: Anzahl der pro Jahr für die Analyse relevanten Abstürze von strahlgetriebenen Kampfflugzeugen im Zeitraum 2000 – 2022

A.3 Leichtflugzeuge und Hubschrauber

Bei Leichtflugzeugen und Hubschraubern wurden insgesamt 59 für die Analyse relevante Abstürze im Zeitraum 2010 bis 2022 im Schweizer Luftraum registriert. Die Anzahl der Abstürze von Leichtflugzeugen und Hubschraubern ist in der Fig. A-3 noch einmal graphisch für den Betrachtungszeitraum dargestellt. Fig. A-3 zeigt, dass sich die Absturzhäufigkeit von Leichtflugzeugen und Hubschraubern über den gesamten Betrachtungszeitraum grundsätzlich auf einem niedrigen Niveau bewegt. Ein langfristiger Trend zu mehr Abstürzen ist nicht erkennbar, sodass auch in Zukunft mit vergleichbaren Absturzhäufigkeiten von Leichtflugzeugen und Hubschraubern in der Schweiz auf konstant niedrigem Niveau zu rechnen ist.

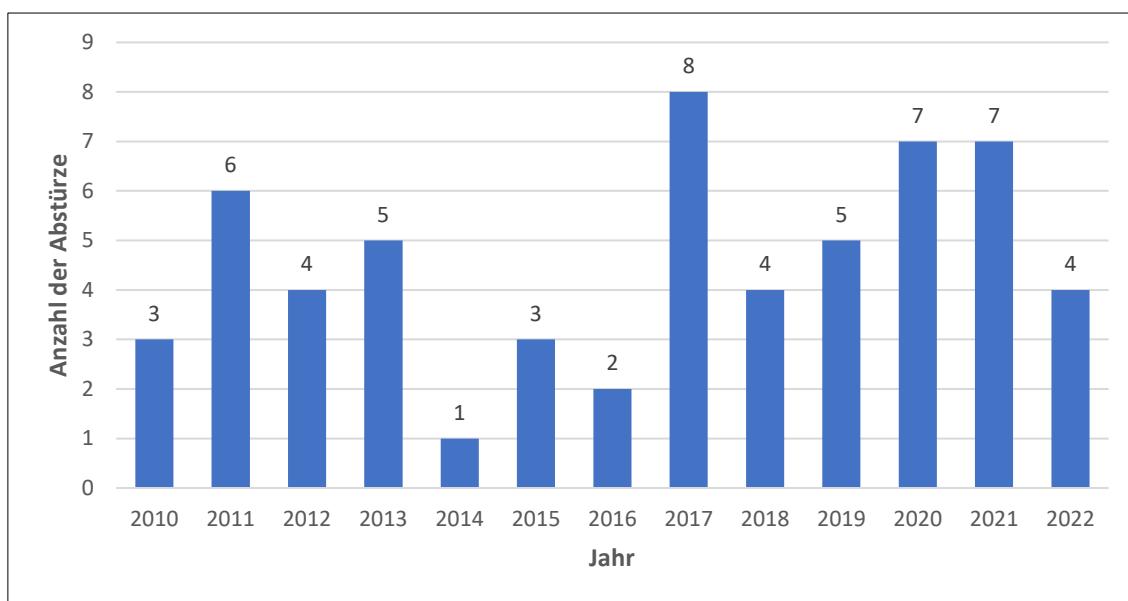


Fig. A-3: Anzahl der pro Jahr für die Analyse relevanten Abstürze von Leichtflugzeugen und Hubschraubern im Zeitraum 2010 – 2022