
Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Luftfahrt in der Schweiz

Wohin weisen die aktuellen Projektionen? Muss die Resilienz des Sektors gestärkt werden?



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Bundesamt für Zivilluftfahrt BAZL

Illustrationen

Gemäss Quellenangabe

Nicht referenzierte Fotos

Titelseite: BAZL Hiltbrunner

Einführung: BAZL Rwakabayiza

Schlussfolgerungen: BAZL Hiltbrunner

Diese Publikation ist auch in französischer und italienischer Sprache verfügbar. Die Originalsprache ist Französisch.

© Bundesamt für Zivilluftfahrt (BAZL)

Bern, 2019

Zusammenfassung

Ausgehend vom heutigen Wissensstand erörtert dieser Bericht die Aspekte des Klimawandels in der Schweiz, welche die Luftfahrt tangieren könnten. Er beschreibt die projizierte Entwicklung der Temperaturen, der Niederschläge, der Winde und der folgenschweren, aber örtlich und zeitlich stark eingegrenzten Ereignisse wie Gewitter und legt dar, wie sich diese Entwicklungen auf die Infrastruktur, den Flugbetrieb und auf weitere Komponenten der Luftfahrt auswirken dürften. Daraus geht hervor, dass die Schweiz nicht zu den Ländern zählt, in denen die Exposition der Luftfahrt gegenüber klimabedingten Gefährdungen am grössten ist. Dennoch sind hierzulande gewisse Risikofaktoren vorhanden, die abhängig vom Ausmass der Erwärmung an Bedeutung gewinnen könnten. Dies zeigt, dass es sinnvoll ist, den Klimawandel in das Risikomanagement der Schweizer Flugplätze zu integrieren. Selbstverständlich sind dabei flugplatzspezifische Merkmale und regionale Klimaprojektionen zu berücksichtigen. Der Umgang mit Klimarisiken wird am Ende des Berichts in einem Kapitel zur Resilienz diskutiert.

Inhaltsverzeichnis

- 1. Einführung..... 1
- 2. Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Luftfahrt..... 1
 - 2.1. Temperatur 3
 - 2.2. Niederschlag..... 6
 - 2.3. Bodenwind 8
 - 2.4. Gewitter und weitere Wetterereignisse mit erheblichen Auswirkungen auf die Luftfahrt 9
- 3. Resilienz und Anpassungsstrategien 10
- 4. Fazit 11
- 5. Literatur..... 13



1. Einführung

Die Luftfahrt spielt in der Wirtschaft und Gesellschaft der Schweiz eine besonders wichtige Rolle. 2018 wurden knapp 57.6 Millionen Fluggäste (Lokal- und Transferpassagiere) und rund 1.4 Millionen Start- und Landebewegungen gezählt. Die Schweizer Luftfahrtinfrastruktur mit ihren 3 Landesflughäfen, 11 Regionalflugplätzen, 5 zivil mitbenutzten Militärflugplätzen, 44 Flugfeldern und 25 Heliports und der auf diesen Anlagen abgewickelte Flugbetrieb sind mit sich verändernden klimatischen Bedingungen konfrontiert.

Wie jeder andere Wirtschaftszweig, der fossile Energieträger nutzt, trägt auch die Luftfahrt zur Klimaerwärmung bei. Diese Erwärmung birgt auch für die Luftfahrt Risiken, denn obgleich der Umgang mit ungünstigen Witterungsbedingungen zum fliegerischen Alltag gehört, ist die Luftfahrt von den Klimaveränderungen betroffen. Eine dauerhafte Veränderung der meteorologischen Bedingungen kann sich unter anderem (vielfach negativ) auf Flughafeninfrastrukturen, auf den Flugbetrieb sowie die wirtschaftlichen Tätigkeiten im Zusammenhang mit der Luftfahrt auswirken. Die Risiken des Klimawandels für die Fliegerei werden hierzulande als weniger bedeutend eingeschätzt als in anderen Regionen der Welt (z. B. Küstenstaaten, tropische Länder), aber gewisse Auswirkungen, die vom Ausmass der Erwärmung abhängen, sind nicht auszuschliessen.

Resilienz bezeichnet die Fähigkeit eines Systems, Störungen zu absorbieren und sich anzupassen. Allgemein wird anerkannt, dass die globale Resilienz des Luftfahrtsektors angesichts der zunehmenden greifbaren Folgen der Klimaerwärmung gestärkt werden muss. Das Bewusstsein für die Problematik wächst parallel zur Präzision der Klimaprojektionen. Laut Eurocontrol anerkannten 2018 die überwiegende Mehrheit (86 %) der befragten europäischen Organisationen, dass bereits heute oder in naher Zukunft Massnahmen ergriffen werden müssen. Allerdings hatten nur 52 % der Organisationen mit der Planung solcher Massnahmen begonnen (Eurocontrol, 2018). Eine Stärkung der Resilienz der Luftfahrt ist nötig, um auf Veränderungen vorbereitet zu sein. Der Einbezug von Anpassungsmassnahmen ist eines der Ziele des Klimaabkommens von Paris aus dem Jahr 2015. Ge-

mäss dem Übereinkommen müssen alle Staaten Anpassungspläne und -massnahmen erarbeiten. Auch dem Handbuch für Flughafenplanung (ICAO, DOC 9184) der Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO) wurde unlängst ein Kapitel über die Resilienz und die Anpassung im Bereich der Luftfahrt hinzugefügt.

Das vorliegende Dokument vermittelt einen aktuellen Überblick über die für die Schweiz projizierten Klimaeränderungen, die bis Ende des 21. Jahrhunderts die Luftfahrt tangieren dürften. Dazu wird die Entwicklung der wichtigsten meteorologischen Parameter und Phänomene (Temperatur, Niederschlag, Wind, Gewitter) in einen Zusammenhang mit potenziellen Auswirkungen auf luftfahrtbezogene Infrastrukturen und Tätigkeiten gestellt. Im abschliessenden Teil werden ausserdem erste Denkanstösse für den Umgang mit Klimarisiken für Schweizer Flugplätze skizziert.

2. Der Klimawandel und seine Auswirkungen auf die Luftfahrt

Klimawandel, Klimaveränderungen und Klimaerwärmung sind allgemeine Begriffe, die eine dauerhafte Umwälzung des globalen Klimasystems bezeichnen. Die damit beschriebenen Veränderungen sind zu einem grossen Teil direkt auf den Anstieg der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre zurückzuführen, welcher wiederum durch anthropogene Emissionen verursacht wird. Der Klimawandel ist gekennzeichnet durch eine dauerhafte Veränderung zahlreicher interdependenter meteorologischer Parameter wie der Temperatur, der Parameter des Wasserkreislaufs und derjenigen des Windes. Aufgrund der heterogenen klimatischen Bedingungen auf der Erde zeigen sich die Folgen des Klimawandels je nach Region auf unterschiedliche Weise. Die Vulnerabilität gegenüber diesen Veränderungen ist auch von der Art und der räumlichen Verteilung der menschlichen Infrastruktur abhängig.

Die wichtigsten Veränderungen meteorologischer Parameter, die generell die Luftfahrt betreffen könnten, lassen sich in zwei Kategorien einteilen:

- Veränderungen der durchschnittlichen meteorologischen Parameter (darunter der Temperatur,

der Niederschläge, der Windstärke und -richtung);

- Veränderung der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen (Hitzewellen, Trockenheit, Gewitter, Stürme usw.).

Die Luftfahrt ist ein Sektor, dessen reibungsloser Betrieb unmittelbar von der Wetterlage abhängt und dessen Infrastruktur empfindlich auf punktuelle oder dauerhafte Veränderungen der Wetterverhältnisse reagiert. Die Auswirkungen auf die Luftfahrt lassen sich wie folgt kategorisieren (nicht erschöpfende Aufzählung) (ACRP, 2012; Eurocontrol, 2018):

- Beschädigung der Infrastruktur;
- Beeinträchtigung des Betriebs;
- Veränderung der Umweltauswirkungen;
- Verschiebung der Nachfrage;
- finanzielle Konsequenzen.

RISIKEN DES KLIMAWANDELS

Der Klimawandel hat nicht nur Folgen für die Ökosysteme, sondern auch für die Menschen, die menschliche Infrastruktur und menschliche Tätigkeiten. Im Umweltbereich wird ein Risiko definiert als Wahrscheinlichkeit, dass ein gefährliches Naturphänomen (Gefährdung, Naturgefahr) Schäden (für Menschen, Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt) verursacht. Das Risiko wird massgeblich durch das Zusammenspiel der drei Faktoren Gefährdung, Exposition und Vulnerabilität bestimmt und lässt sich mit folgender Formel zusammenfassen (CH2018, 2018):

$$\text{Risiko} = f(\text{Gefährdung}, \text{Exposition}, \text{Vulnerabilität})$$

Das Risiko ist somit abhängig von der Gefährdung (insbesondere der Eintretenswahrscheinlichkeit und der Intensität), der Exposition (d. h. der geografischen Verteilung von Personen und Infrastrukturen) und der Vulnerabilität (d. h. der Empfindlichkeit gegenüber einer bestimmten Gefährdung).

Langfristig lassen sich die Risiken im Zusammenhang mit dem Klimawandel durch eine Verringerung der Gefährdung (d. h. eine Senkung des Treibhausgasausstosses) reduzieren. Kurzfristig sind jedoch nur Strategien wirksam, die auf eine Verminderung der Exposition und der Vulnerabilität abzielen.

Situation in der Schweiz

Dieser Bericht stützt sich auf die Projektionen der Entwicklung der Klimaparameter in der Schweiz, die im Technischen Bericht CH2018 des National Centre for Climate Services (NCCS) dargelegt wurden. Die räumliche Heterogenität der Topografie der Schweiz widerspiegelt sich in den regionalen Klimaprojektionen. Anhand der verwendeten hochauflösenden Klimamodelle lassen sich auf der räumlichen Ebene gewisse Gradienten unterscheiden. Zu bedenken ist allerdings, dass Projektionen stets Unsicherheiten aufweisen, deren Ausprägung vom untersuchten Phänomen abhängig ist. Klimaphänomene sind komplex, und die Ausprägungen der Erwärmung können in bestimmten Zeitabschnitten gehäuft auftreten (Clustering), obwohl die Situation während Jahren «normal» war.

Die wichtigsten projizierten Auswirkungen des Klimawandels auf die Luftfahrt, die in der Schweiz zu erwarten sind, lassen sich auf Veränderungen der Temperaturen und der Niederschläge zurückführen (verlässlichste Projektionen). Die Folgen dieser Veränderungen reichen von einer Abnahme der Leistungsfähigkeit der Flugzeuge über eine Verminderung der Kapazitäten der Flughäfen bis hin zu einer Veränderung der Umweltauswirkungen (z. B. Lärmbelastung, Treibhausgasausstoss). Die Entwicklung von Phänomenen mit grosser, aber räumlich und zeitlich begrenzter Wirkung, wie zum Beispiel der Konvektion und ihrer möglichen Folgen (Windscherungen in geringer Höhe, Blitzschlag, Hagel, Turbulenzen in wolkenfreier Luft oder orografische Turbulenzen, Vereisungen, schlechte Sicht, tiefe Wolkenuntergrenze), lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt generell noch schwer abschätzen (WMO, 2016).

Die Mehrzahl der in diesem Bericht genannten und illustrierten Klimaveränderungen basieren auf dem Szenario RCP8.5 («Representative Concentration Pathway 8.5», siehe Kasten unten), welches vom Weltklimarat (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) ausgearbeitet wurde. Dieses Szenario wird herangezogen, weil es zum jetzigen Zeitpunkt wahrscheinlich ist und das ungünstigste Szenario als Grundlage für Risikomanagementstrategien zweckmässig ist (siehe Kasten). Die beschriebenen Folgen für die Luftfahrt beziehen sich auf den Schweizer Luftraum und die dazugehörige Infrastruktur. Die verschiedenen betrieblichen Einschränkungen, die im Ausland durch den Klimawandel verursacht werden (z. B. Anstieg des Meeresspiegels), werden nicht behandelt.

KLIMAMODELLE, EMISSIONSSZENARIEN UND RISIKOMANAGEMENT

Aufgrund der Komplexität des Klimas muss zwischen natürlichen, kurzfristigen Klimaschwankungen und langfristigen Klimaveränderungen unterschieden werden. Wetterverhältnisse können mit geringer räumlicher und zeitlicher Distanz stark schwanken, und mit wachsendem Prognosehorizont nimmt die Verlässlichkeit von Vorhersagen rasch ab. Klimamodelle sind mit Wetterprognosen vergleichbar. Allerdings beziehen sie sich auf einen viel grösseren zeitlichen Massstab und dienen dazu, die Entwicklung der Klimabedingungen auf lange Sicht zu simulieren. Zwar lässt sich das Wetter an einem bestimmten Datum in weiter Zukunft nicht voraussagen, aber es können Statistiken des Wetters bzw. Voraussagen des Klimas erstellt werden (Akademien der Wissenschaften Schweiz, 2016). Diese Voraussagen werden anhand von komplexen Modellen erstellt, bleiben aber dennoch ein vereinfachtes Abbild der Realität. Sie zeichnen sich somit durch eine gewisse Unsicherheit aus, die zu einem grossen Teil in der natürlichen kurzfristigen Variabilität des Wetters begründet ist.

Ein Grund zur Beunruhigung ist auch die Entwicklung der anthropogenen Treibhausgasemissionen. Aus diesem Grund hat der Weltklimarat (IPCC) Emissionsszenarien entwickelt. Dabei handelt es sich um Zeitreihen der Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre, die auf gewissen Hypothesen beruhen. Die optimistischsten und pessimistischsten Emissionsszenarien sind die beiden folgenden RCPs (Representative Concentration Pathways; IPCC, 2018):

- RCP2.6: Dieses Szenario beschreibt die Entwicklung der atmosphärischen Treibhausgaskonzentration unter der Annahme, dass wirksame Massnahmen zum Schutz des Klimas ergriffen werden (Einhaltung der Ziele des Übereinkommens von Paris aus dem Jahr 2015).
- RCP8.5: Dieses Szenario beschreibt die Situation, die ohne eine Neuausrichtung der Klimaschutzpolitik und bei konstant wachsenden Treibhausgasemissionen zu erwarten ist.

Häufig ist festzustellen, dass das Szenario RCP8.5 Veränderungen der klimatischen Bedingungen zwischen einem Referenzzeitraum und einem Projektionszeitraum besser aufzeigen kann. Der Grund dafür ist, dass räumliche und zeitliche Veränderungen amplifiziert und dadurch kontrastreicher dargestellt werden. Ausserdem handelt es sich beim Szenario RCP8.5 um das derzeit glaubwürdige und wahrscheinliche Szenario, denn es verdeutlicht die zu erwartende Erwärmung unter der Annahme, dass sich die derzeit beobachtete Zunahme der Treibhausgasemissionen fortsetzt (Climate Action Tracker, 2017). Beim Risikomanagement spielt aber auch die Verwendung des pessimistischsten Szenarios eine wichtige Rolle. So beruht die häufig verfolgte Minimax-Regret-Strategie auf der Identifizierung der grösstmöglichen Verlustrisiken.

2.1. Temperatur

Der gegenwärtig beobachtete globale Temperaturanstieg ist eine direkte Folge der steigenden Treibhausgaskonzentration in der Atmosphäre, welche eine Veränderung der Strahlungsbilanz der Erde bewirkt (Einstrahlung > Abstrahlung). Für die Schweiz sind verlässliche Messreihen für die Temperatur verfügbar, die bis ins Jahr 1864 zurückreichen. Diese Daten zeigen, dass die Empfindlichkeit der Schweiz gegenüber der globalen Erwärmung besonders gross ist, denn seit Messbeginn sind die Temperaturen um 2 °C angestiegen. Dieser Anstieg ist mehr als doppelt so hoch wie der weltweite Durchschnitt von 0,9 °C (CH2018, 2018). Das Ausmass der künftigen Erwärmung ist stark vom betrachteten Emissionsszenario

abhängig. Gemäss dem Szenario RCP2.6 könnte in der Schweiz die durchschnittliche Temperatur bis Ende des 21. Jahrhunderts (2070–2099) gegenüber der vorindustriellen Zeit um 2,1 bis 3,4 °C ansteigen; gemäss dem Szenario RCP8.5 sogar um 6,9 °C (CH2018, 2018). Die für die Schweiz projizierte Erwärmung gilt für alle vier Jahreszeiten und für alle Landesteile. Die maximale Erwärmung tritt im Sommer ein. Abbildung 1 illustriert die prognostizierten räumlichen und jahreszeitlichen Veränderungen der Temperatur bis zum Ende des 21. Jahrhunderts (RCP8.5). Am stärksten ausgeprägt ist die durchschnittliche Erwärmung im Alpenraum.

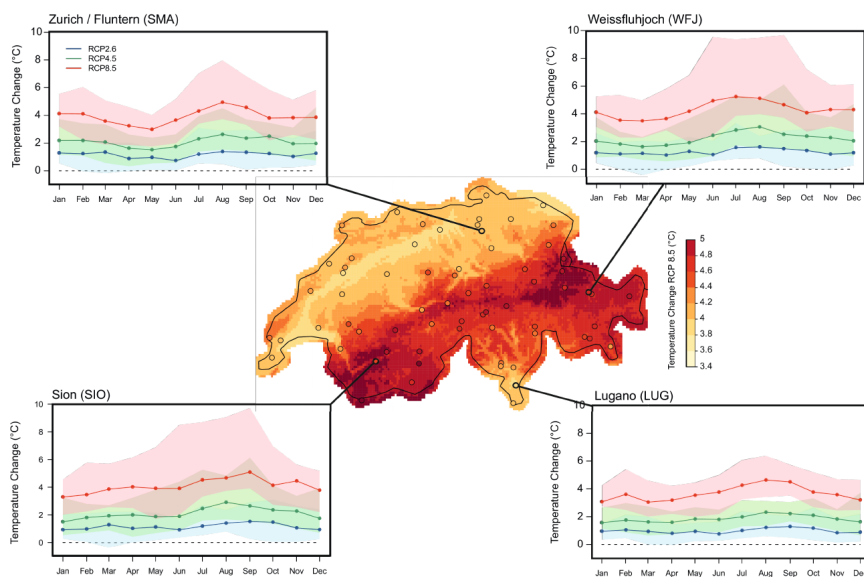


Abbildung 1: In der Mitte: Simulation der Veränderung der Durchschnittstemperatur in der Schweiz (Kombination mehrerer Modelle, Medianprojektion) zwischen dem Referenzzeitraum (1981–2010) und dem Ende des 21. Jahrhunderts gemäss dem Szenario RCP8.5. Die Grafiken in den Ecken zeigen die projizierten monatlichen Durchschnittstemperaturen für verschiedene Messstationen (CH2018, 2018).

Die Klimaprojektionen für die Schweiz zeigen, dass die Höchsttemperaturen tendenziell stärker ansteigen als die Durchschnittstemperaturen. Hitzewellen dürften häufiger auftreten und intensiver werden. Darauf lassen verschiedene Projektionen schliessen, etwa diejenige für den Anstieg der Temperatur am heissesten Tag des Jahres oder für die Zunahme der Anzahl Hitzetage (mit Temperaturen über 30 °C). Abbildung 2 veranschaulicht die räumliche Variation der projizierten Zunahme der Anzahl Hitzetage in der Schweiz zwischen dem Referenzzeitraum (1981–2010) und der Mitte des 21. Jahrhunderts (RCP8.5) (NCCS, 2018). Diese Ausprägung der Erwärmung betrifft mehrheitlich tiefe Lagen, insbesondere die Region Genf und die tief gelegenen Alpentäler (Rhonetal, Rheintal am Zusammenfluss von Vorder- und Hinterrhein, Tessiner Täler).

Die Klimamodelle zeigen weiter, dass parallel zum Anstieg der Durchschnitts- und der Momentantemperaturen die Häufigkeit und Intensität von Kältewellen abnimmt. Im Winter dürfte die Null-Grad-Isotherme bis Mitte des Jahrhunderts von 400 auf 650 m. ü. M. und bis Ende des Jahrhunderts von 700 auf 1050 m. ü. M. ansteigen (RCP8.5) (NCCS, 2018).

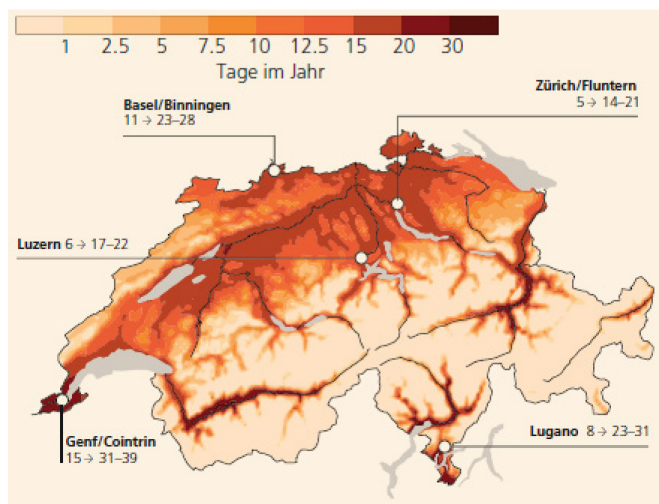


Abbildung 2: Simulierte Entwicklung der Anzahl Hitzetage in der Schweiz zwischen dem Referenzzeitraum (1981–2010) und der Mitte des 21. Jahrhunderts (2060) gemäss dem Szenario RCP8.5 (NCCS, 2018).

FOLGEN FÜR DIE LUFTFAHRT

Die Folgen eines Anstiegs der Durchschnittstemperatur sowie einer Erhöhung der Häufigkeit und Intensität der Hitzewellen hängen vom Ausmass der Erwärmung ab. Gleichzeitig bestimmt der Standort der Flugplätze deren Exposition. Einige der genannten Auswirkungen können je nach geografischer Lage stärker oder schwächer ausfallen.

- Ein Temperaturanstieg hat bei gleichbleibender Höhe vor allem eine verminderte Motorenleistung und eine Verringerung des dynamischen Auftriebs der Flugzeuge zur Folge. Verstärkt werden diese Effekte durch eine potenziell höhere Luftfeuchtigkeit (siehe Kap. 2.2.). Eine solche Verminderung der Luftdichte kann nur bis zu einem bestimmten Punkt und nur durch gewisse Triebwerke (z. B. Turbostrahltriebwerke, Turbo-Prop-Triebwerke, Turbolader-Kolbenmotoren) kompensiert werden. Jedoch könnten je nach der Intensität einer Hitzeperiode, der Höhenlage eines Flugplatzes, der Pistenlänge und dem Flugzeugtyp (und je nach Flugbereich, für den ein Luftfahrzeug zugelassen wurde) vorübergehende oder dauerhafte Betriebsbeschränkungen nötig werden. Dieses Risiko ist bei hoch gelegenen Luftfahrtinfrastrukturen mit kurzen Start- und Landebahnen höher.
- Eine weitere Folge der abnehmenden Luftdichte ist der Anstieg der Lärmemissionen und der atmosphärischen Emissionen. Um nämlich einen bestimmten Schub zu erzeugen, benötigt ein Motor bei höherer Temperatur eine höhere Drehzahl.
- Steigende Temperaturen beeinflussen auch den potenziellen Kühlbedarf der Flughafeninfrastrukturen. So ist während der Sommersaison ein steigender Klimatisierungsbedarf (d. h. Energieverbrauch) zu erwarten. Darüber hinaus könnte bei einigen Infrastrukturen ein Anstieg der Passagierzahlen (saisonale Nachfrageverschiebung) den Energiebedarf ebenfalls in die Höhe treiben.
- Wärmere Winter und weniger intensive und weniger häufige Kältewellen können auch verschiedene positive Folgen für den Luftfahrtsektor haben, vor allem eine Verringerung des Heizungs-, Enteisungs- und Schneeräumungsbedarfs.



Bild 1: Motorenleistung und dynamischer Auftrieb hängen von der Temperatur ab. Je nach Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Höhenlage des Flugplatzes kann die Länge der Startbahn für gewisse Flugzeuge zum limitierenden Faktor werden.

(Foto: BAZL Hiltbrunner)

2.2. Niederschlag

Die globale Erwärmung beeinflusst den Wasserkreislauf und damit die Niederschläge. Dabei muss ein physikalischer Parameter, die hygrometrische Kapazität der Luft (Fähigkeit zur Feuchtigkeitsaufnahme), besonders beachtet werden. Diese Fähigkeit der Luft, eine bestimmte Wassermenge in Form von Dampf aufzunehmen, wächst mit steigender Temperatur¹. Das hat direkten Einfluss auf die Menge und die zeitliche Verteilung des Niederschlags und damit auf die Intensität der Niederschlagsereignisse.

Niederschläge sind starken räumlichen und zeitlichen Schwankungen unterworfen. Trotz dieser natürlichen Variabilität zeigen die Simulationen für die Schweiz einige Zukunftstrends auf, darunter eine Zunahme der Niederschläge im Winter und eine Abnahme der Regenfälle im Sommer. Diese Veränderungen sind im Szenario RCP8.5 am besten ersichtlich. Demnach wird die jährliche Niederschlagsverteilung am Ende des Jahrhunderts durch einen Anstieg (in der Regel um mehr als 15 %) der Niederschläge im Winter und einen Rückgang (generell um mehr als 10 %) der Sommerniederschläge gekennzeichnet sein (CH2018,

2018). Nach diesen Projektionen wird im Sommer vermehrt ein mediterranes Klima mit weniger Niederschlag und mehr Verdunstung herrschen. Für Frühjahr und Herbst werden weniger ausgeprägte bzw. sogar nur geringfügige Veränderungen prognostiziert. Abbildung 3 veranschaulicht die projizierten räumlichen und jahreszeitlichen Veränderungen der durchschnittlichen Niederschläge in der Schweiz auf kurze Sicht (2035), für Mitte des Jahrhunderts (2060) und zum Ende des Jahrhunderts (per 2085) (RCP8.5).

Klare räumliche Trends sind schwer zu erkennen, insbesondere vor Ende des Jahrhunderts. Die Bandbreite der Zunahme der Winterniederschläge reicht von 12 % (Westalpen) bis 22 % (Südschweiz), die der Abnahme der Sommerniederschläge von 10 % (Ostalpen) bis 24 % (Westschweiz) (CH2018, 2018). Für die Regionen Genf und das Tessin ist laut den Projektionen eine im Vergleich zur übrigen Schweiz stärkere Abnahme der Sommerniederschläge sowie mit Hitzewellen im Sommer zu rechnen (siehe Kap. 2.1.). Diese Bedingungen begünstigen eine Zunahme der Waldbrände.

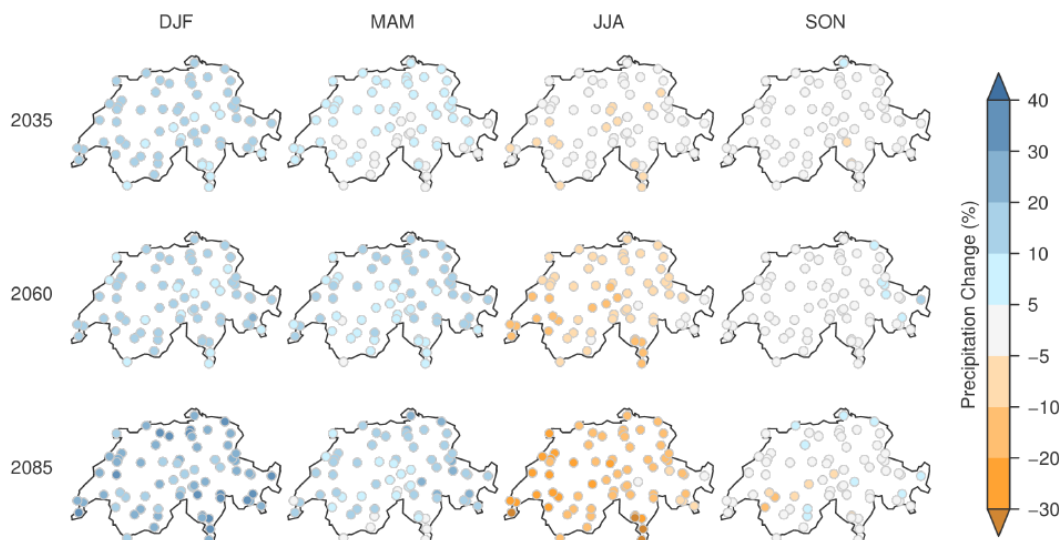


Abbildung 3: Simulierte Entwicklung der durchschnittlichen Niederschläge (in %) in der Schweiz (Kombination mehrerer Modelle, Medianprojektion) zwischen dem Referenzzeitraum (1981–2010) und den Jahren 2035, 2060 und 2085 gemäss dem Szenario RCP8.5 (CH2018, 2018).

¹Nach der Clausius-Clapeyron-Gleichung.

Die Veränderungen der zeitlichen Verteilung der Niederschläge sind für die Luftfahrt von grosser Bedeutung. Die Simulationen des Technischen Berichts CH2018 zeigen, dass die Intensität von Niederschlagsperioden mehr oder weniger linear zur Klimaerwärmung zunimmt. Dies steht in einem direkten Zusammenhang mit dem infolge des Temperaturanstiegs projizierten zunehmenden maximalen Wassergehalt der Luft (vgl. Kap. 2.1). Die Zunahme der Anzahl und der Intensität der Starkniederschläge könnte daher deutlich stärker ausfallen als der Anstieg der durchschnittlichen Niederschlagsmengen. Selbst bei einem Rückgang der durchschnittlichen Niederschlagsmengen sind häufigere und intensivere Starkniederschläge nicht auszuschliessen (Konzentration der Niederschläge auf kürzere Zeiträume und Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen).

Schliesslich machen die Modelle deutlich, dass die Häufigkeit und Menge der Niederschläge in fester Form (Schnee) abnehmen dürften. Angesichts der Erwärmung der Atmosphäre wird ein Anstieg der Null-Grad-Isotherme projiziert. Nichtsdestotrotz werden lokale meteorologische Phänomene wie etwa Inversionslagen auch künftig einen bedeutenden Einfluss auf die Schneefälle haben. Die Aussage, wonach in Zukunft mit schneeärmeren Wintern gerechnet werden muss, ist daher zu nuancieren (NCCS, 2018).

FOLGEN FÜR DIE LUFTFAHRT

Dauerhafte Veränderungen der lokalen Niederschlagsregimes und vor allem häufigere und intensivere Niederschlagsereignisse (im Sommer wie im Winter) wirken sich potenziell auf die Infrastrukturen und den Betrieb aus.

Die zunehmende Intensität von Niederschlägen geht einher mit einem steigenden Risiko von Naturgefahrenereignissen im Zusammenhang mit Wasser. So könnten Schlammlawinen und Hangrutschungen exponierte Infrastrukturen und Zugangsstrassen gefährden. Gleichzeitig steigt das Risiko von Hochwassern und Überflutungen von Infrastrukturen.

Mit der projizierten Zunahme der Niederschlagsintensität könnte der Bedarf an Entwässerungskapazitäten steigen. Kann das überschüssige Wasser nicht abgeleitet werden, sind vorübergehende oder dauerhafte Kapazitätseinschränkungen auf den Flugplätzen nicht auszuschliessen.

Aber auch Niederschlagsmangel kann negative Auswirkungen auf die Luftfahrt haben. Die projizierte Ausdehnung des mediterranen Klimas, welches durch stärkere Sommer-trockenheit geprägt ist, begünstigt die Entstehung von Waldbränden, welche den Flugbetrieb beeinträchtigen können.



Bild 2: Aufgrund des dichten Gewässernetzes sind mehrere Infrastrukturen für die Luftfahrt einem Überflutungsrisiko ausgesetzt (hier der Flughafen Bern-Belp im Jahr 1999). (Foto: VBS/Schweizer Luftwaffe)

2.3. Bodenwind

In der Schweiz können relativ starke Bodenwinde im Zusammenspiel mit typischen Strömungslagen wie Föhn-, Bisen- und Westwindlage sowie bei Gewittern auftreten (CH2018, 2018; MeteoSchweiz, 2015).

Die Analyse der projizierten Entwicklung der Bodenwinde in der Schweiz, welche stark von der örtlichen Topografie abhängt, lässt keine deutlichen räumlichen Tendenzen erkennen. In der Regel sind die projizierten Veränderungen der Windgeschwindigkeiten ungeachtet des jeweils betrachteten Szenarios gering (CH2018, 2018).

Für die Luftfahrt ist die künftige Entwicklung der Extremwinde von besonderem Interesse. Diese Phänomene lassen sich nur schwer modellieren. Mehrere Untersuchungen deuten indessen darauf hin, dass die Häufigkeit und Intensität von extremen Windereignissen in Mittel- und Westeuropa potenziell zunehmen könnten. Davon wäre auch die Nordschweiz betroffen (Goyette, 2011; Donat et al., 2011). Andere Studien prognostizieren für Südeuropa eine Abnahme solcher Ereignisse (Mölter et al., 2016). Da sich die Schweiz zwischen diesen beiden Prognoseregionen befindet, besteht in Bezug auf die Entwicklung hierzulande eine gewisse Unsicherheit (CH2018, 2018).

FOLGEN FÜR DIE LUFTFAHRT

Grundsätzlich können sich Veränderungen der Windrichtung und -geschwindigkeit oder eine Veränderung der Merkmale von Extremwinden (Häufigkeit, Intensität) negativ auf die Luftfahrt auswirken. Insbesondere könnte der normale Betriebsablauf gestört werden.

Auf einem gegebenen Flugplatz würde sich eine Veränderung der Hauptwindrichtung wahrscheinlich durch stärkeren Seitenwind äussern. Auf Flugplätzen mit sich kreuzenden Pisten könnte dies eine Änderung der An- und Abflugverfahren notwendig machen, was wiederum eine Veränderung der Umweltauswirkungen zur Folge hätte (Lärmimmissionen). Aber auch auf Flugplätzen mit parallelen Pisten könnte der Betrieb beeinträchtigt werden. Eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Extremwinden wiederum könnte dazu führen, dass die Kapazitäten eines Flughafens vorübergehend vermindert werden.

Bild 3: Eine vorübergehende oder dauerhafte Veränderung der vorherrschenden Windrichtung und -stärke kann auf Flughäfen mit sich kreuzenden Pisten eine Veränderung der Lärmbelastung bewirken. (Orthofoto: Flughafen Zürich. Quelle: map.geo.admin.ch)



2.4. Gewitter und weitere Wetterereignisse mit erheblichen Auswirkungen auf die Luftfahrt

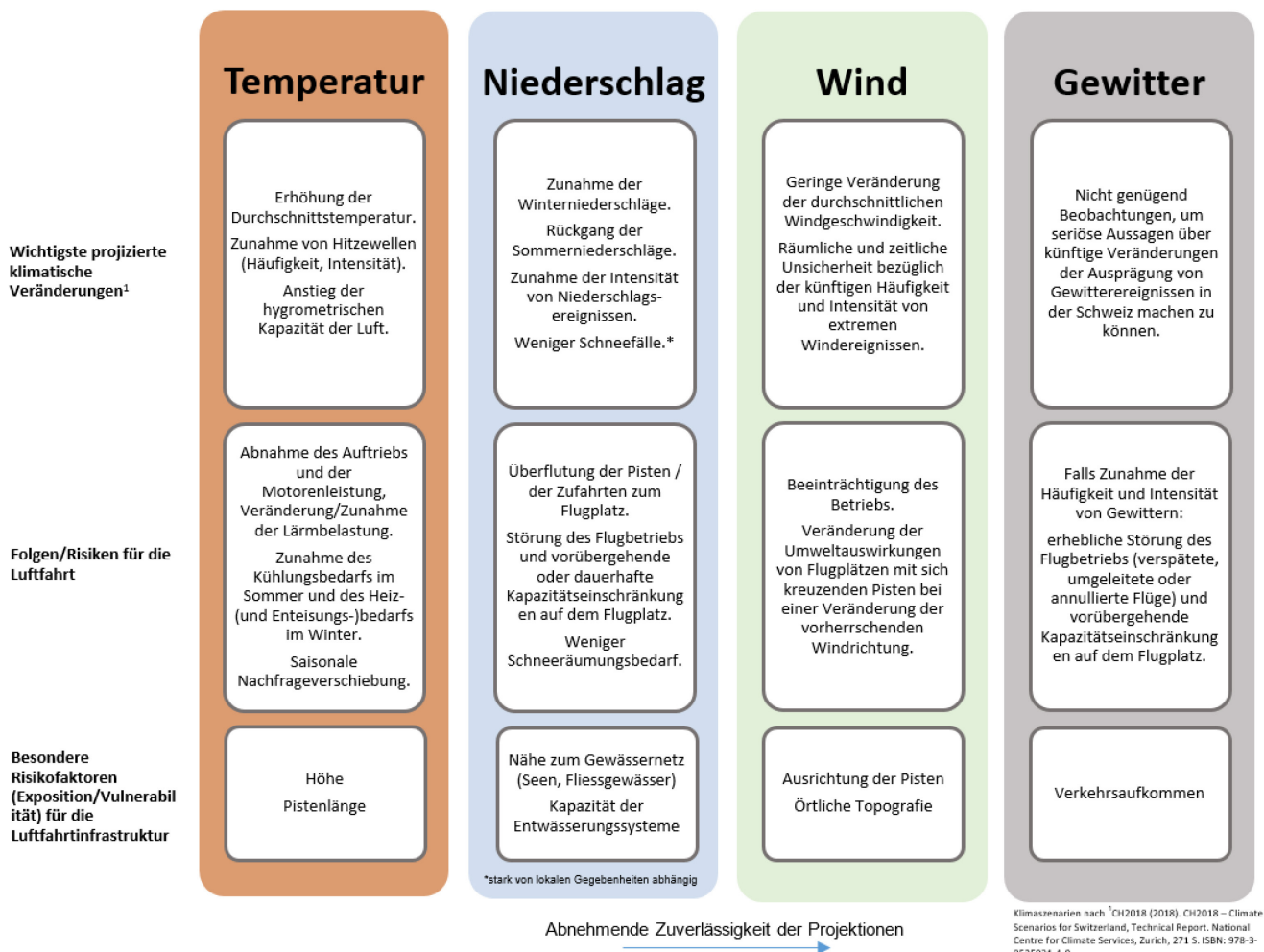
Über örtlich begrenzte Wetterereignisse wie Gewitter, Blitzschlag und Hagel liegen derzeit noch nicht genügend Beobachtungen vor, um seriöse Aussagen über künftige Veränderungen der Ausprägung solcher Phänomene in der Schweiz machen zu können (NCCS, 2018; MeteoSchweiz, 2013). In gewissen Studien wird allerdings darauf hingewiesen, dass die Klimaerwärmung möglicherweise einen Einfluss auf Gewitterereignisse hat.

Ein Anstieg der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit in Bodennähe verstärkt die vertikale thermodynamische Instabilität, die typischerweise als «verfügbare potenzielle Konvektionsenergie» bezeichnet wird (Allen, 2018). Diese zunehmende Labilität bewirkt eine Erhöhung der maximalen Geschwindigkeit der aufsteigenden Luftmassen, was wiederum das Auftreten und die Intensität von Gewittern selbst ausserhalb

der warmen Jahreszeit begünstigen dürfte (Diffenbaugh et al., 2013; Hoogewind et al., 2017; Allen, 2018). Einige Modelle zeigen eine Zunahme der Anzahl schwerer Gewitter und der Blitzfrequenz bei einem Anstieg der Umgebungstemperatur (Romps et al., 2014). Die durch die Klimaerwärmung bedingte Beschleunigung des aufsteigenden Luftstroms könnte indessen auch verhindert oder kompensiert werden (Trapp & Hoogewind, 2016; Allen, 2018).

FOLGEN FÜR DIE LUFTFAHRT

Gewitter werden begleitet von mehreren Phänomenen, die den Flugbetrieb und dessen Sicherheit erheblich beeinträchtigen. Dazu zählen typischerweise Turbulenzen, Blitzschlag, Hagel, Windscherungen, reduzierte Sicht sowie Vereisungen (OMM, 2016). Heftigere und häufigere Gewitter hätten erhebliche Auswirkungen auf die Luftfahrt, die sich insbesondere in betrieblichen Störungen äussern würden (verspätete, umgeleitete oder annullierte Flüge).



Klimaszenarien nach ¹CH2018 (2018). CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report. National Centre for Climate Services, Zurich, 271 S. ISBN: 978-3-9525031-4-0.

Abbildung 4: Überblick über die für die Schweiz projizierten Klimaveränderungen und deren Folgen für die Luftfahrt

3. Resilienz und Anpassungsstrategien

Ausgehend von den für die Schweiz projizierten Klimaveränderungen lassen sich auf verschiedenen Ebenen Auswirkungen skizzieren, die vom Grad der Erwärmung und von der Exposition der Flugplätze abhängig sind. Ein Blick auf die gesellschaftlichen, umweltbezogenen, wirtschaftlichen und sicherheitsrelevanten Interessen macht deutlich, dass die Resilienz des Luftfahrtsektors gestärkt werden muss und Anpassungsstrategien entwickelt werden müssen. Der Luftfahrtsektor ist durch die Interdependenz seiner Akteure gekennzeichnet. Eine Störung an einem bestimmten Punkt kann das gesamte System beeinträchtigen. Die Stärkung der Resilienz des Sektors erfordert daher einen umfassenden Ansatz und eine Zusammenarbeit aller Beteiligten beim Umgang mit Klimarisiken.

Der Umgang mit Klimarisiken auf einem bestimmten Flugplatz ist ein mehrstufiger Prozess, der je nach gewählter Strategie unterschiedlich aussehen kann. Der Umgang mit solchen Risiken kann einerseits in eine bestehende Methodik der Risikobewertung eingebettet werden oder im Rahmen einer neuen, auf Klimarisiken ausgerichteten Methodik erfolgen (ACRP, 2012 ; ACI, 2018). Abbildung 5 fasst die grundlegenden Fragen zusammen, die beim Umgang mit Klimarisiken auf Flugplätzen beantwortet werden müssen.

Es stehen zahlreiche Anpassungsmöglichkeiten auf materieller oder organisatorischer Ebene zur Auswahl. Einige dieser Massnahmen zielen auf betriebliche Anpassungen ab (z. B. Möglichkeiten zur vorübergehenden Einschränkung der Startzeiten), andere wiederum auf die Anpassung der Infrastrukturen (z. B. Verbesserung der Entwässerungssysteme). Es lassen sich verschiedene Kriterien herauschälen, die

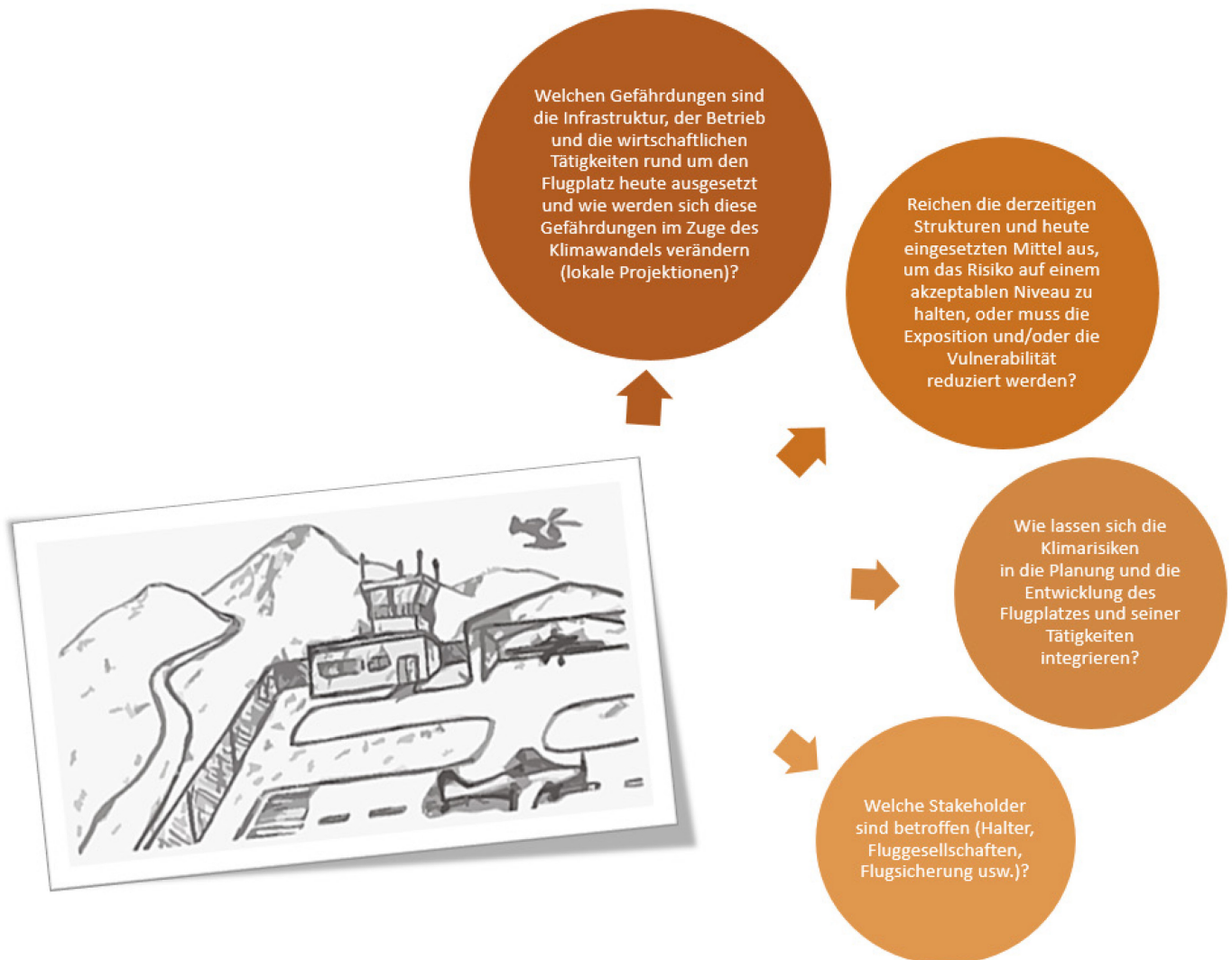


Abbildung 5: Umgang mit Klimarisiken auf Flugplätzen: Bestandaufnahme.

es erlauben, die prioritären Massnahmen zu identifizieren. Dazu gehören die Wahrscheinlichkeit, dass eine Gefährdung eintritt und sich ihre Merkmale im Zuge der Klimaerwärmung verändern, das Ausmass der potenziellen Auswirkungen (auf Infrastrukturen, Tätigkeiten usw.) sowie die Kosten, die Wirksamkeit und die Polyvalenz von Massnahmen (gewisse Massnahmen tragen zur Verminderung mehrerer Risiken gleichzeitig bei). Die Entscheidung, welche Anpassungsmassnahmen getroffen werden müssen, hängt stark von den lokalen Gegebenheiten und vom Risikomanagement der betroffenen Organisationen ab (ACRP, 2012; Eurocontrol, 2018).

4. Fazit

In der Schweiz ist die Luftfahrt den Auswirkungen des Klimawandels weniger stark ausgesetzt als in anderen Regionen der Welt. Tatsächlich ist hierzulande das Risiko, dass Extremtemperaturen Starts verhindern oder Schäden an Infrastrukturen verursachen, kleiner als etwa in äquatornahen oder tropischen Ländern. Als Binnenland ist die Schweiz auch nicht vom Anstieg des Meeresspiegels betroffen, der weltweit zahlreiche Luftfahrtinfrastrukturen bedroht. Dennoch lassen gewisse projizierte Folgen des Klimawandels (z. B. Temperaturanstieg und zunehmende Intensität der Niederschläge) in Anbetracht der Besonderheiten der Schweizer Flugplätze und der Topografie gewisse Auswirkungen erwarten (z. B. Störungen des Flugbetriebs, Schäden an Infrastrukturen), die im Risikomanagement der Schweizer Flugplätze und bei der Planung der künftigen Entwicklung ihrer Infrastrukturen und Tätigkeiten berücksichtigt werden müssen. Zudem kann der Flugbetrieb zwischen der Schweiz und den von den Auswirkungen des Klimawandels stärker betroffenen Staaten von den dort eintretenden Störungen betroffen sein.

Die aus Sicht der Schweizer Luftfahrt bedeutendsten Ausprägungen des Klimawandels sind gleichzeitig diejenigen, für die die verlässlichsten Projektionen vorliegen, nämlich die Veränderungen der Temperaturen und der Niederschläge.

Der projizierte Temperaturanstieg sowie die Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Hitzewellen dürften zu vorübergehenden Störungen des Flugbetriebs, zu einer räumlichen und saisonalen Nachfrage-

verschiebung (Passagierzahlen) sowie zu Veränderungen des Energiebedarfs und der von den Flugplätzen ausgehenden Lärmbelastung führen.

Die projizierten Veränderungen des Niederschlagsregimes (mehr Niederschläge im Winter, weniger Regen im Sommer, intensivere Niederschlagsereignisse) dürften sich ebenfalls störend auf den Flugbetrieb auswirken und zudem Schäden an den Infrastrukturen verursachen.

In Bezug auf den Wind hingegen (und namentlich im Hinblick auf extreme Windereignisse) lassen sich derzeit für die Schweiz keine raumbezogenen Tendenzen ableiten. Eine Veränderung der vorherrschenden Windrichtung und -stärke dürfte jedoch in erster Linie den Flugbetrieb tangieren und eine Veränderung der von einem Flugplatz ausgehenden Umweltbelastung bewirken.

Um Aussagen über die künftige Entwicklung von Phänomenen mit grosser, aber räumlich und zeitlich begrenzter Wirkung treffen zu können, sind zusätzliche Forschungsanstrengungen nötig. Eine Zunahme der Häufigkeit und Intensität von Gewittern würde die Luftfahrt erheblich treffen und sich namentlich im Flugbetrieb störend auswirken.

Ein Blick auf die gesellschaftlichen, wirtschaftlichen und umweltbezogenen Anliegen macht deutlich, dass die Resilienz der Luftfahrt gegenüber dem Klimawandel gestärkt werden muss. Dies erfordert einen globalen Ansatz und eine Zusammenarbeit aller beteiligten Akteure (Flugplatzhalter, Fluggesellschaften, Flugsicherung usw.). Der Umgang mit Klimarisiken ist ein wichtiger Bestandteil der Anpassungsstrategien der Flugplätze und wird in erster Linie durch die örtlichen Gegebenheiten (projiziertes Klima, Ausgestaltung der Infrastruktur und des Betriebs, geplante Entwicklung der Tätigkeiten usw.), aber auch durch die Risikomanagementmodelle der betroffenen Organisationen bestimmt.

Letzten Endes sind Resilienz und Verminderung der Auswirkungen des Klimawandels eng miteinander verknüpft. Die Tragweite der Auswirkungen des Klimawandels auf die Luftfahrt und folglich der Umfang der nötigen Anpassungsmassnahmen hängen vom betrachteten Klimaszenario ab, weshalb die Verminderung eine zentrale Rolle bei der Entwicklung eines resilienten Luftverkehrs spielt.



5. Literatur

- Akademien der Wissenschaften Schweiz (2016). *Brennpunkt Klima Schweiz. Grundlagen, Folgen und Perspektiven*. Swiss Academies Reports 11 (5).
- ACI (2018). *Airports' resilience and adaptation to a changing climate*. Airport Council International. ACI Policy Brief. September 2018.
- ACRP (2012). *Airport Climate Adaptation and Resilience. A Synthesis of Airport Practice*. ACRP Synthesis 33. Airport Cooperative Research Program. National Academy of Sciences. Transportation Research Board. Washington D.C. 2012.
- Allen, J.T. *Climate Change and Severe Thunderstorms*. Oxford Research Encyclopedia of Climate Science. Jul 2018. DOI:10.1093/acrefore/9780190228620.013.62.
- CH2018 (2018). *CH2018 – Climate Scenarios for Switzerland, Technical Report*. National Centre for Climate Services, Zurich, 271 pp. ISBN: 978-3-9525031-4-0.
- Climate Action Tracker (2017). *Improvement in warming outlook as India and China move ahead, but Paris Agreement gap still looms large*. <http://climateactiontracker.org/publications/briefing/288/Improvement-in-warming-outlook-as-India-and-China-move-ahead-but-Paris-Agreement-gap-still-looms-large.html>.
- Diffenbaugh, N. S., Scherer, M. & Trapp, R. J. (2013). *Robust increases in severe thunderstorm environments in response to greenhouse forcing*. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 110, 16,361–16,366.
- Donat, M. G., Leckebusch, G. C., Wild, S., and Ulbrich, U. (2011). *Future changes in European winter storm losses and extreme wind speeds inferred from GCM and RCM multi-model simulations*, Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, 1351-1370, <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1351-2011>, 2011.
- Eurocontrol (2018). *European Aviation in 2040, Challenges of Growth. Annex 2, Adapting Aviation to a Changing Climate*. EUROCONTROL, June 2018.
- Goyette, S. (2011). "Synoptic conditions of extreme windstorms over Switzerland in a changing climate," Climate dynamics, vol. 36, no. 5-6, pp. 845–866.
- Hoogewind, K. A., Baldwin, M. E., & Trapp, R. J. (2017). *The impact of climate change on hazardous convective weather in the United States: Insight from highresolution dynamical downscaling*. Journal of Climate. Advance online publication.
- IPCC (2018). *Summary for Policymakers. In: Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H. O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J. B. R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M. I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, T. Waterfield (eds.)]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, 32 S.
- MeteoSchweiz, 2013. «Regionale Klimaszenarien für die Schweiz», MeteoSchweiz Fachbericht Nr. 243, 36 S.
- MeteoSchweiz, 2015. *Typische Wetterlagen im Alpenraum*. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie MeteoSchweiz. 28 S.
- Mölter, T.; Schindler, D.; Albrecht, A.T.; Kohnle, U. (2016). *Review on the Projections of Future Storminess over the North Atlantic European Region*. Atmosphere 2016, 7, 60.
- NCCS (2018). *CH2018 – Klimaszenarien für die Schweiz*. National Centre for Climate Services, Zürich. 24 S. ISBN-Nr. 978-3-9525031-0-2.
- OMM (2016). *Catastrophes (peu) naturelles : Expliquer les liens entre les événements extrêmes et le changement climatique*. Organisation Météorologique Mondiale. Bulletin Vol. 65 (2) – 2016.
- Romps D. M., Seeley J. T., Vollaro D., Molinari J. (2014). *Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming*. Science, vol. 346, no. 6211, pp. 851–854.
- Trapp, R. J., & Hoogewind, K. A. (2016). *The realization of extreme tornadic storm events under future anthropogenic climate change*. Journal of Climate, 29, 5251–5265.