

Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	lightningRisk4windPower
Langtitel:	ACRPI - lightningRisk4windPower
Zitiervorschlag:	
Programm inkl. Jahr:	Austrian Climate Research Programme Implementation
Dauer:	01.10.2023 bis 30.04.2024
Koordinator/ Projekteinreicher:	Georg Mayr
Kontaktperson Name:	Georg Mayr
Kontaktperson Adresse:	Universität Innsbruck, Innrain 52f, 6020 Innsbruck
Kontaktperson Telefon:	+43 512 507 54459
Kontaktperson E-Mail:	georg.mayr@uibk.ac.at
Projekt- und Kooperationspartner (inkl. Bundesland):	Achim Zeileis (Tirol, Uni Innsbruck) Wolfgang Schulz (Wien, OVE-ALDIS)
Schlagwörter:	Blitz, Windturbine, Windpark, Blitzrisiko
Projektgesamtkosten:	48800 €
Fördersumme:	48800 €
Klimafonds-Nr:	KC305650
Erstellt am:	9. Juli.2024

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

Kurze Darstellung des Projekts, Zusammenfassung der wesentlichen Projektergebnisse qualitativ und quantitativ (bei Szenarien, Kostenanalysen, volkswirtschaftlichen Studien, Potenzialstudien sind ausgewählte numerischen Werte festzuhalten – in % sowie die Werte selbst).

Dieses Projekt untersuchte Blitze an hohen Objekten und bewertete das Risiko von Aufwärtsblitzen über den Ostalpen und den umliegenden Gebieten. Aufwärtsblitze sind zwar lokal sehr selten, stellen aber eine Bedrohung insbesondere für Windkraftanlagen dar, da der langanhaltende Strom von Aufwärtsblitzen erhebliche Schäden verursachen kann. Die derzeitigen Risikobewertungsmethoden lassen die Auswirkungen der meteorologischen Bedingungen außer Acht, wodurch die Aufwärtsblitzrisiken möglicherweise unterschätzt werden. Die Auswirkungen dieser meteorologischen Bedingungen wurden im Projekt ausführlich untersucht und neue, räumlich hochaufgelöste Risikokarten für Österreich und angrenzende Regionen erstellt.

Eingesetzt wurden Random Forests, eine Technik des maschinellen Lernens, um die Beziehung zwischen dem am mit speziellen Messinstrumenten ausgestatteten Gaisbergturm (Österreich) gemessenen Aufwärtsblitzen und 35 großräumigen meteorologischen Variablen zu analysieren. Von diesen Variablen tragen die großräumige Aufwärtsgeschwindigkeit, die Windgeschwindigkeit und -richtung in 10 m Höhe über dem Boden und die Variablen der Wolkenphysik die meisten Informationen bei. Die Random Forests sagen das Aufwärtsblitzrisiko für das gesamte Untersuchungsgebiet mit einer Auflösung von 1 km² voraus.

Starke oberflächennahe Winde in Verbindung mit einer Ablenkung nach oben durch erhöhtes Gelände erhöhen das Aufwärtsblitzrisiko. Der Tageszyklus des Aufwärtsblitzrisikos sowie die Gebiete mit hohem Risiko verschieben sich saisonal. Im Winter konzentrieren sie sich aufgrund der vorherrschenden Nordwinde nördlich/nordöstlich der Alpen, während sie sich in den Übergangs- und Sommermonaten nach Süden ausdehnen und Norditalien betreffen.

Das Modell ist im Winter am genauesten. Das höchste Risiko findet sich nördlich der Alpen, wo aktuell auch die meisten Windkraftanlagen installiert sind.

Es stellte sich heraus, dass die in den Blitzschutznormen für Windkraftanlagen verwendete Blitzdichte (Anzahl der vom Blitzmessnetz gemessenen Blitze pro Fläche und Jahr) ein schlechter Indikator für Blitze an hohen Objekten ist und die Einbeziehung umfassender meteorologische Informationen für die Bewertung des Aufwärtsblitzrisikos unerlässlich ist.

Die **Risikokarten** für Aufwärtsblitze an Windturbinen und ähnlich hohen Objekten und die darauf dargestellten **Daten sind digital verfügbar** auf dem Datahub der Geosphere Austria (Österreichischer Wetterdienst) unter

https://data.hub.geosphere.at/dataset/upward_lightning_risk

bzw. mit dem DOI: <https://doi.org/10.60669/egt6-pp88>

2 Executive Summary

This project investigated lightning at tall objects and evaluated the risk of upward lightning over the eastern Alps and its surrounding areas. While uncommon, upward lightning poses a threat, especially to wind turbines, as the long-duration current of upward lightning can cause significant damage. Current risk assessment methods overlook the impact of meteorological conditions, potentially underestimating the risks from upward lightning. This project extensively studied these impacts, found them to be essential and produced new, spatially highly resolved maps of risk for upward lightning from wind turbines and other tall objects for Austria and its surrounding regions.

This study employs random forests, a machine learning technique, to analyze the relationship between upward lightning measured at the specially instrumented Gaisberg Tower (Austria) and 35 larger-scale meteorological variables. Of these, the larger-scale upward velocity, wind speed and direction at 10 meters above ground and cloud physics variables contribute most information. The random forests predict the risk of upward lightning across the study area at a 1 km² resolution.

Strong near-surface winds combined with upward deflection by elevated terrain increase upward lightning risk. The diurnal cycle of the upward lightning risk as well as high-risk areas shift seasonally. They are concentrated north/northeast of the Alps in winter due to prevailing northerly winds, and expanding southward, impacting northern Italy in the transitional and summer months. The model performs best in winter, with the highest predicted upward lightning risk coinciding with observed peaks in measured lightning at tall objects. The highest concentration is north of the Alps, where most wind turbines are located, leading to an increase in overall lightning activity. Comprehensive meteorological information is essential for upward lightning risk assessment, as lightning densities are a poor indicator of lightning at tall objects.

Charts of the risk of upward lightning at wind turbines and other similarly tall objects for Austria and its surroundings and the underlying data are digitally available at the datahub of the Austrian weather service, Geosphere Austria

https://data.hub.geosphere.at/dataset/upward_lightning_risk

and have this DOI: <https://doi.org/10.60669/egt6-pp88>

3 Hintergrund und Zielsetzung

Die Erreichbarkeit der von der österreichischen Bundesregierung beabsichtigten Klimaneutralität bis 2040, einem wesentlichen Aspekt des Klimaschutzes, hängt entscheidend davon ab, Strom aus erneuerbaren Quellen produzieren zu können. Zum einen als Ersatz für die bisherige klimaschädliche Erzeugung aus fossilen Brennstoffen, zum anderen für die benötigten riesigen zusätzlichen Mengen an Strom, um die CO₂-Reduktion im Verkehr (E-Fahrzeuge), für Heizung und in der Industrie (z.B. energieintensive Vorgänge mit "grünem" Wasserstoff, der aus erneuerbaren Quellen erzeugt wird) zu ermöglichen.

Windkraft spielt dafür eine zentrale und ausbaufähige Rolle.

Blitze als extreme Wetterereignisse mit typischen Stromstärken von über 15 000 Ampere bis zu über 200 000 Ampere können große Schäden an Windturbinen verursachen.

Windkraftanlagen werden nicht nur von Blitzen getroffen, sie lösen im Unterschied zu Gebäuden auch selbst Blitze aus. Da die Stromproduktion mit dem Quadrat des Rotordurchmessers der Turbine zunimmt, erreichen Windturbinen Höhen weit jenseits der ca. 100 m, ab denen Anlagen selbst Blitze auslösen können. Neuartige Rotormaterialien machen einen Blitzschutz der Anlage schwieriger und aufwendiger. Als Konsequenz treten häufig kostspielige Schäden auf, deren Reparaturen die Bilanz von Windturbinenherstellern stark trüben können. Für die Firma Vestas fielen z.B. im 2. Quartal 2020 blitzbezogene Garantiekosten von 175 Mio EUR an. Bis diese Schäden behoben werden, leidet auch die Stromproduktion; und das oft monatelang, bis Ersatzteile verfügbar sind und auch vor Ort transportiert werden können, was an exponierten Standorten nicht ganzjährig möglich ist.

Entsprechende Industrienormen sollen sicherstellen, dass Blitzschutz ausreichend dimensioniert ist. Eine Beilage zur IEC 61400-24:2019 Norm ist eine globale Risikokarte, die allerdings nur auf einem sehr einfachen meteorologischen Kriterium beruht, dass die Temperatur in 700 hPa (ca. 3 km NN) höchstens -10 °C betragen darf.

Eine Verbesserung der Karten hinsichtlich der korrekten Einschätzung des Risikos und der räumlichen und zeitlichen Auflösung ist daher dringend nötig. Da die meteorologischen Bedingungen für das Auftreten von Gewittern und damit das Blitzrisiko regional und jahreszeitlich stark variieren, kann mit einer regional in viel höherer Auflösung dieser Normen ein optimaler Kompromiss zwischen Zusatzkosten für erhöhten Blitzschutz und der Vermeidung von Blitzschäden erzielt werden.

Leider kann eine zuverlässige Risikokarte aber auch nicht aus langjährigen flächendeckenden Messungen mit Blitzortungssystem wie EUCLID in Europa bzw. ALDIS (<https://www.aldis.at/index.php?id=47>) in Österreich erstellt werden. Das hat zwei Gründe. Zum ersten (Flächendeckung) gibt es im größten Teil des Gebietes keine hohe Anlagen jenseits von 100 m, die selbst Blitze auslösen könnten, und zweitens (Genauigkeit) erfassen Blitzortungssystem höchstwahrscheinlich nur ca. die Hälfte aller Blitze, die von hohen Anlagen ausgelöst werden.

Meteorologische Bedingungen, die für selbstausgelöste Blitze von Windturbinen ausreichen, reichen aber oft nicht aus, um "normale" Wolke-Erde Blitze zu produzieren, die am Erdboden

oder niedrigen Strukturen einschlagen. Die Anzahl der Blitze an Windturbinen ist deutlich höher als in deren Umgebung - um das 3-4fache, wie eine Studie für Südfrankreich zeigte. Der Unterschied hängt stark von der Jahreszeit ab und kann im Winter in Japan um das 50(!)fache höher sein als im Sommer. Am 100 m hohen Gaisbergturm werden im Jahr 50 - 60 Aufwärtsblitze gemessen, während im Umkreis von 10 km nur ca. 2 Blitze gemessen werden. Blitzklimatologien ohne Berücksichtigung der Selbstauslösung durch Windturbinen werden daher deren Blitzrisiko massiv und jahreszeitlich unterschiedlich unterschätzen.

Weiters können Blitzortungssysteme nur solche Turbinenblitze erfassen, bei denen zum elektrischen Ladungsausgleich auf einen anfänglichen kontinuierlichen Strom noch ein zeitlich variabler Strom folgt. Ein speziell ausgestatteter Messturm am Gaisberg in Salzburg zeigt jedoch, dass bei mehr als der Hälfte aller Blitze der zeitlich variable Strom fehlt und diese daher nicht vom Blitzortungssystem erfasst wird. Dieses Schadenspotential ist wegen der deutlich längeren Dauer des kontinuierlichen Stroms deutlich höher.

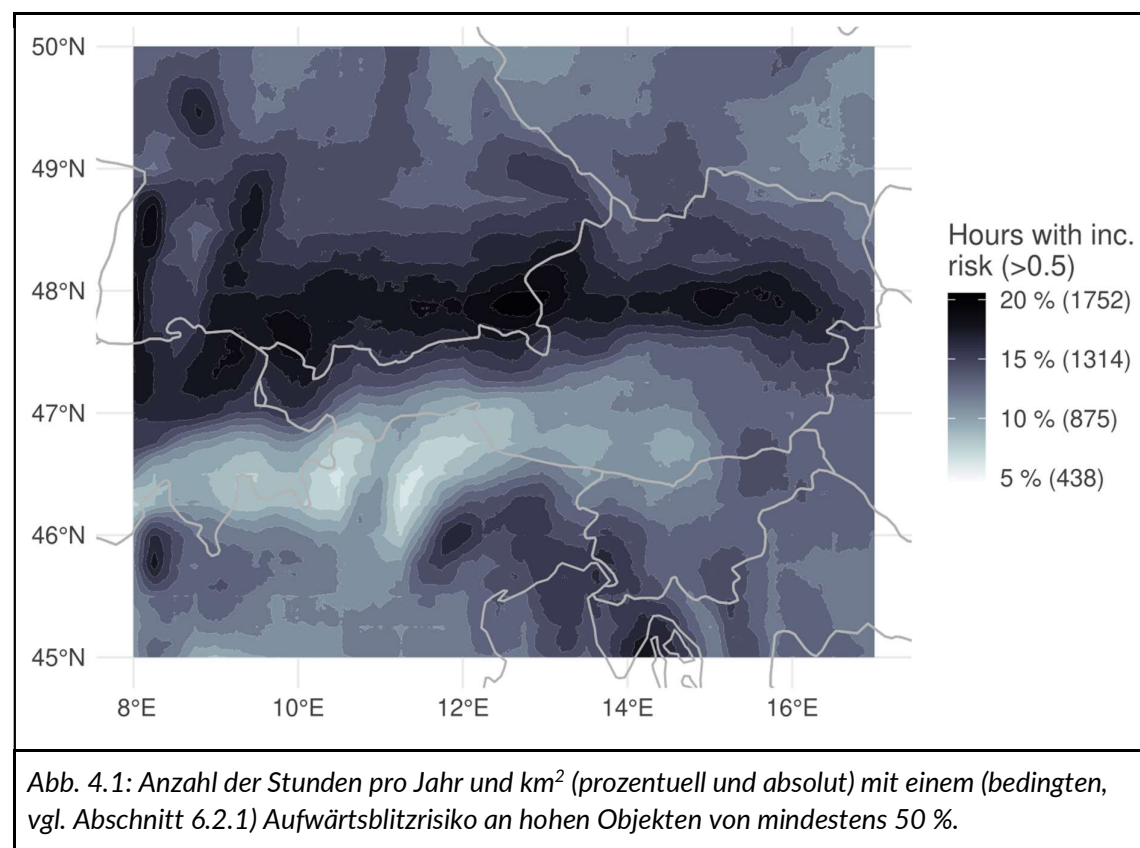
PROJEKTZIEL ist daher die Erstellung von räumlich hoch aufgelöster (km^2) und jahreszeitlich aufgelöster Information über das mit den bisherigen Methoden völlig unterschätzte Blitzrisiko von Windturbinen an jedem beliebigen Ort in Österreich.

4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

Projektziel war die Erstellung von räumlich hoch aufgelöster (km^2) und jahreszeitlich aufgelöster Information über das mit den bisherigen Methoden völlig unterschätzte Blitzrisiko für Windturbinen an jedem beliebigen Ort in Österreich.

Die Ergebnisse sind Karten und digitale Daten des Blitzrisikos für Aufwärtsblitze an hohen (100 m und höher) Objekten wie Windturbinen in Österreich und seiner Umgebung auf einem Raster von $1 \times 1 \text{ km}^2$.

Beispielhaft ist das jährliche Risiko in Abb. 4.1 dargestellt. Das höchste Risiko besteht am Nordrand der Alpen. Das Risiko am Alpensüdrand ist schon deutlich geringer und über den höchsten Alpenbereichen am geringsten.



Diese Ergebnisse wurden bei Projektende wie im Antrag beabsichtigt auf die Datenbank des Climate Change Centers Austria gespielt. Dieses wurde inzwischen aufgelassen. Deswegen wurden die Daten auf den Datahub der Geosphere Austria transferiert (<https://data.hub.geosphere.at/dataset/upward-lightning-risk> bzw. mit dem DOI: <https://doi.org/10.60669/egt6-pp88>)

Es folgt eine ausführliche Darstellung der Projektarbeit. Sie basiert auf einem bei der Fachzeitschrift *Earth and Space Science* zur Begutachtung und Veröffentlichung eingereichten Manuskript (<https://doi.org/10.22541/essoar.171322767.78278045/v1>)

4.1 Einleitung

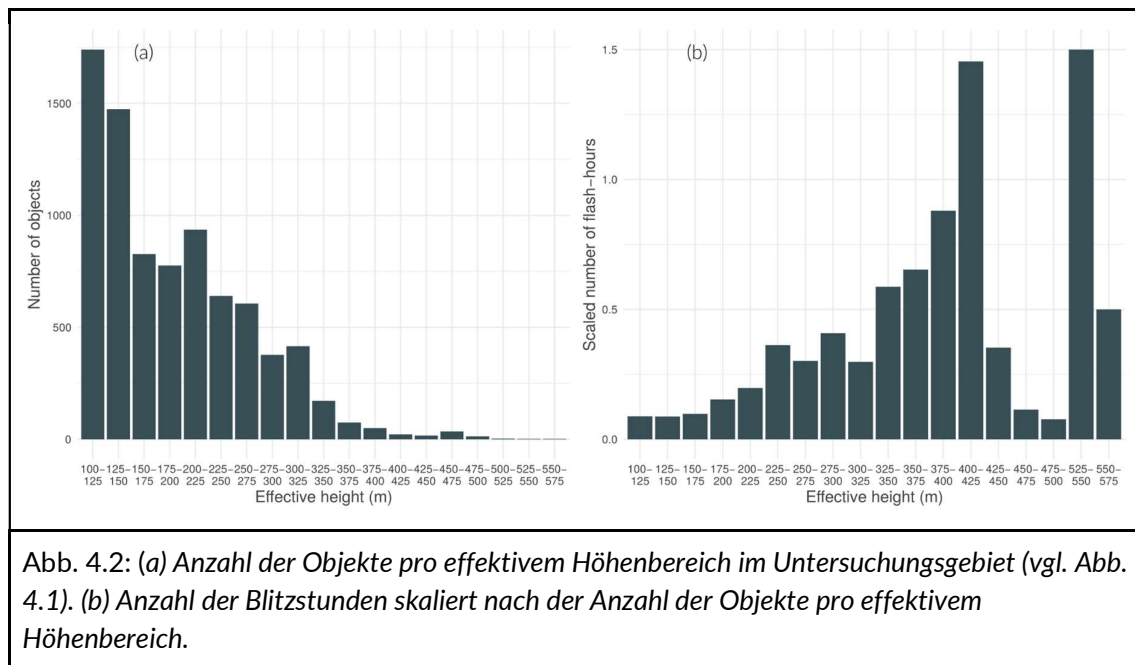
Die Studie besteht aus zwei Hauptschritten. Im ersten Schritt wird die Maschine Learning Methode *Random Forests* mit Daten des speziell für Blitzmessungen instrumentierten 100 m hohen Turms am Gaisberg in Salzburg trainiert, um herauszufinden, welche großräumigen meteorologischen Variablen für die Auslösung von Aufwärtsblitzen verantwortlich sind. Die am Turm trainierten Modelle werden dann auf ein größeres Untersuchungsgebiet angewendet, das Österreich, Süd- und Mitteldeutschland, Italien und die Schweiz umfasst, um hochauflösende (1 km²) monatliche, saisonale und jährliche Aufwärtsblitz-Risikokarten für das gesamte Gebiet zu erhalten. Um das vorhergesagte Risiko besser zu verstehen, werden die saisonalen Schwankungen der einflussreichsten großräumigen meteorologischen Variablen am Gaisbergturm untersucht. Von einem Blitzortungssystem beobachtete Blitze an Objekten (nicht nur an Windkraftanlagen) mit einer effektiven Höhe von ≥ 100 m werden verwendet, um die resultierenden Risikokarten zu verifizieren. Wenn ein Objekt auf einem relativ zur Umgebung erhöhten Ort wie z.B. einem Hügel steht, werden leichter Aufwärtsblitze ausgelöst als von einem gleich hohen Objekt im Flachland. Dies wird durch eine "effektive" Höhe berücksichtigt.

4.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Studie werden in drei verschiedenen Teilen präsentiert. Um die Faktoren zu berücksichtigen, die Blitze an Windkraftanlagen gemäß den aktuellen Blitzschutznormen entscheidend beeinflussen, werden die per Blitzortungssystem beobachteten Blitze an hohen Objekten mit der gesamten Blitzaktivität einschließlich Abwärtsblitzen zur Erde innerhalb des ausgewählten Untersuchungsgebiets verglichen (Abschnitt 4.2.1). Anschließend wird der Einfluss der effektiven Höhe der Objekte auf die per Blitzortungssystem beobachteten Blitze untersucht. Dieser Abschnitt zeigt dann die Anwendung von am Gaisbergturm trainierten Modellen auf die verschiedenen Teilgebiete und veranschaulicht das modellierte Aufwärtsblitz-Risiko an Objekten jährlich und für jede Jahreszeit (siehe Abschnitt 4.2.2). Außerdem werden die jahreszeitlichen Schwankungen des modellierten Risikos (Abschnitt 4.3.1) sowie die jahreszeitlichen Schwankungen im Tagesgang des modellierten Risikos dargestellt (Abschnitt 4.3.2). Abschnitt 4.3.3 evaluiert die Qualität der Ergebnisse durch einen quantitativen Vergleich der modellierten Ergebnisse mit durch Blitzortungssystem beobachteten Blitzen an hohen Objekten. Anschließend untersucht Abschnitt 4.4.1 die meteorologischen Bedingungen, die hauptsächlich zu Aufwärtsblitzen am Gaisbergturm beitragen. Abschnitt 4.4.2 erläutert das resultierende modellierte Risiko aus den wichtigsten meteorologischen Variablen, die das Aufwärtsblitz-Risiko beeinflussen, einschließlich der Art und Weise, wie diese einflussreichen Variablen im Laufe der Jahreszeiten variieren. Eine Fallstudie im Abschnitt 4.4.3 veranschaulicht das Vorhersageverhalten der Modelle und die Bedingungen, die zu einem erhöhten Aufwärtsblitz-Risiko führen.

4.2.1 Vom Blitzortungssystem gemessene Blitze an hohen Objekten

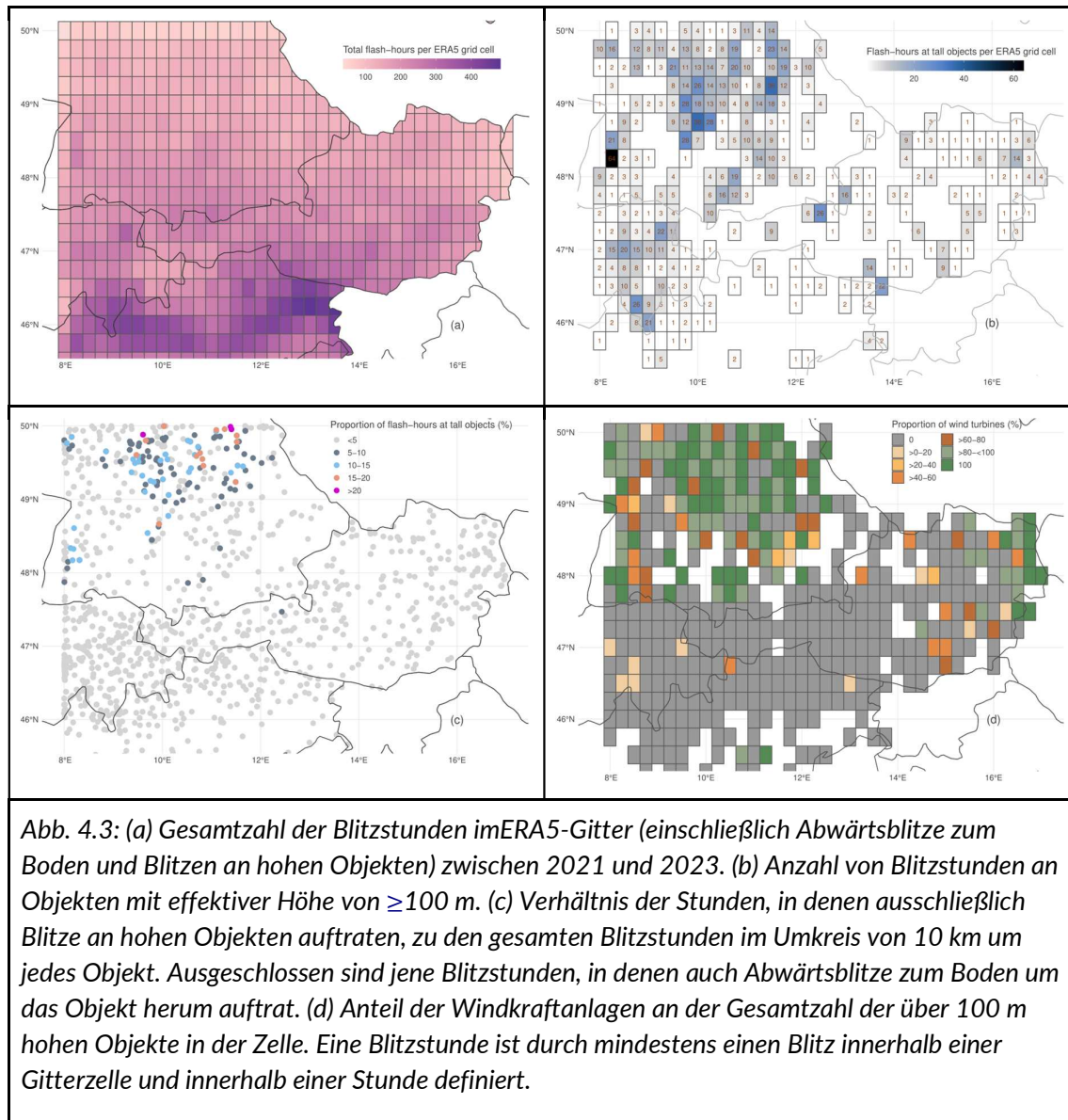
Aktuelle Blitzschutznormen berücksichtigen (i) die physikalischen Eigenschaften der Anlage und (ii) die lokale jährliche Blitzdichte. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass die *effektive* Höhe gemäß den Normen die Blitzeinschläge bei hohen Objekten beeinflussen kann, zeigt Abb. 4.2 die Rolle der effektiven Höhe für die Anzahl der Blitzstunden für Objekte mit entsprechenden effektiven Höhenwerten.



Die Anzahl der hohen Objekte im Untersuchungsgebiet nimmt mit zunehmender effektiver Höhe ab (Abb. 4.2a). Objekte mit höherer effektiver Höhe werden allerdings deutlich häufiger vom Blitz getroffen werden, was frühere Ergebnisse bestätigt. Die Lücke zwischen 425 m und 500 m ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, dass sich die sehr wenigen Objekte in diesem Höhenbereich in Gebieten mit insgesamt wenigen, von Blitzortungssystem beobachteten Blitzeinschlägen bei hohen Objekten befinden (siehe Abb. 4.3b). Die effektive Höhe des Gaisbergturms liegt in einem Bereich zwischen 250 m und 275 m.

Der zweite wichtige Faktor zur normgerechten Beurteilung der Blitzgefährdung von Windenergieanlagen ist die lokale Blitzdichte im Jahr (Abb. 4a).

Abb. 4.3a zeigt, dass die höchste Konzentration der gesamten Blitzaktivität im südlichen Teil des Untersuchungsgebiets in Norditalien liegt. Diese Hotspots sind vermutlich das Ergebnis eines verstärkten Feuchtigkeitstransports aus der Adria durch die thermisch induzierte Zirkulation von der Ebene zum Gebirge hin, die auf die ansteigende Topographie trifft und Konvektion auslöst. Dies steht im Einklang mit früheren Studien zur Untersuchung der Blitzklimatologie in diesen Regionen.



Im starken Kontrast dazu steht Aufwärtsblitzaktivität an hohen Objekten (Abb. 4.3b). Das Maximum liegt hier auf der anderen, nämlich nördlichen Alpenseite im südwestlichsten Teil des deutschen Teilgebiets und im östlichen und südlichsten Teil der Schweiz.

Die Anzahl der Blitzstunden in Abb. 4b ist die Summe von Aufwärts- und Abwärtsblitzen. Um den Anteil der Blitzstunden zu untersuchen, die ausschließlich durch Blitze auf hohe Objekte gekennzeichnet sind, zeigt Abb. 4 c Blitze innerhalb eines Radius von 10 km um jedes Objekt. Die hohe Konzentration von Blitzen auf hohe Objekte im Schweizer Teilgebiet hängt weitgehend damit zusammen, dass Blitze zum Boden innerhalb derselben Stunde auch im Umkreis von 10 km um das hohe Objekt auftreten. Im deutschen Teilgebiet ist der Anteil der Blitzstunden auf hohe Objekte ohne andere Blitzaktivität in der Nähe jedoch deutlich höher

als in den anderen Teilgebieten. Während Stunden mit ausschließlich Blitzen auf hohe Objekte in den meisten Fällen weniger als 5 % der gesamten Blitzaktivität um ein hohes Objekt ausmachen, machen Stunden mit ausschließlich Blitzen auf hohe Objekte im deutschen Teilgebiet bis zu 20 % oder mehr der Gesamtzahl aus. Es kann davon ausgegangen werden, dass die bloße Anwesenheit des hohen Objekts die gesamte Blitzaktivität deutlich erhöht. Aus Abb. 4d lässt sich schließen, dass Blitze an Windkraftanlagen in diesem Gebiet den größten Anteil der Blitzaktivität im Umkreis von 10 km um ein Objekt haben, während Blitze an Windkraftanlagen im Osten Österreichs, wo sich ebenfalls viele Windkraftanlagen befinden, weniger als 5 % der umgebenden Blitzaktivität ausmachen.

Aus dieser Analyse lässt sich schlussfolgern, dass die lokale Blitzdichte das Auftreten von Blitzen an hohen Objekten und insbesondere das Auftreten von Aufwärtsblitz nicht ausreichend berücksichtigt, so dass für eine zuverlässigere Risikobewertung detaillierte meteorologische Informationen einbezogen werden müssen.

4.3 Modelliertes Aufwärtsblitz-Risiko bei hohen Objekten

Die folgenden Analysen unterstreichen die Bedeutung der Berücksichtigung der meteorologischen Umgebung im größeren Maßstab für eine genaue Aufwärtsblitz-Risikovorhersage. Die Abbildungen zeigen die saisonale Variation des Aufwärtsblitz-Risikos im Untersuchungsgebiet sowie die saisonale Variation des Tageszyklus des Aufwärtsblitz-Risikos. Darüber hinaus wird die Vorhersageleistung der Modelle dargestellt und saisonal untersucht.

4.3.1 Saisonale Änderung des modellierten Risikos

Abbildungen. 4.4a-d zeigen das Risiko für Herbst, Frühling, Sommer und Winter, während Feld (e) das jährliche Risiko darstellt. In allen fünf Feldern weisen bemerkenswerte Regionen je nach meteorologischen Rahmenbedingungen im größeren Maßstab ein erhöhtes oder verringertes Aufwärtsblitz-Risiko auf, und diese Muster verschieben sich mit den Jahreszeiten. Dargestellt ist das modellierte saisonale (Felder a-d) und jährliche (Feld e) Aufwärtsblitz-Risiko, wie es von den am Gaisberg-Turm trainierten Random Forests vorhergesagt wird, die ausschließlich auf Aufwärtsblitz und nicht auf Abwärtsblitze basieren. Das Risiko wird quantifiziert, indem die Anzahl der Stunden gezählt wird, in denen die Modelle eine bedingte Wahrscheinlichkeit von über 0.5 für jede 1km²-Rasterzelle vorhersagen. Absolute Werte des erhöhten Risikos sind schwer zu interpretieren, da die am Turm trainierten Random Forests, die auf einer ausgewogenen Reaktion mit Aufwärtsblitz- und Nicht-Aufwärtsblitz-Situationen basieren, die bedingte Wahrscheinlichkeit modellieren.

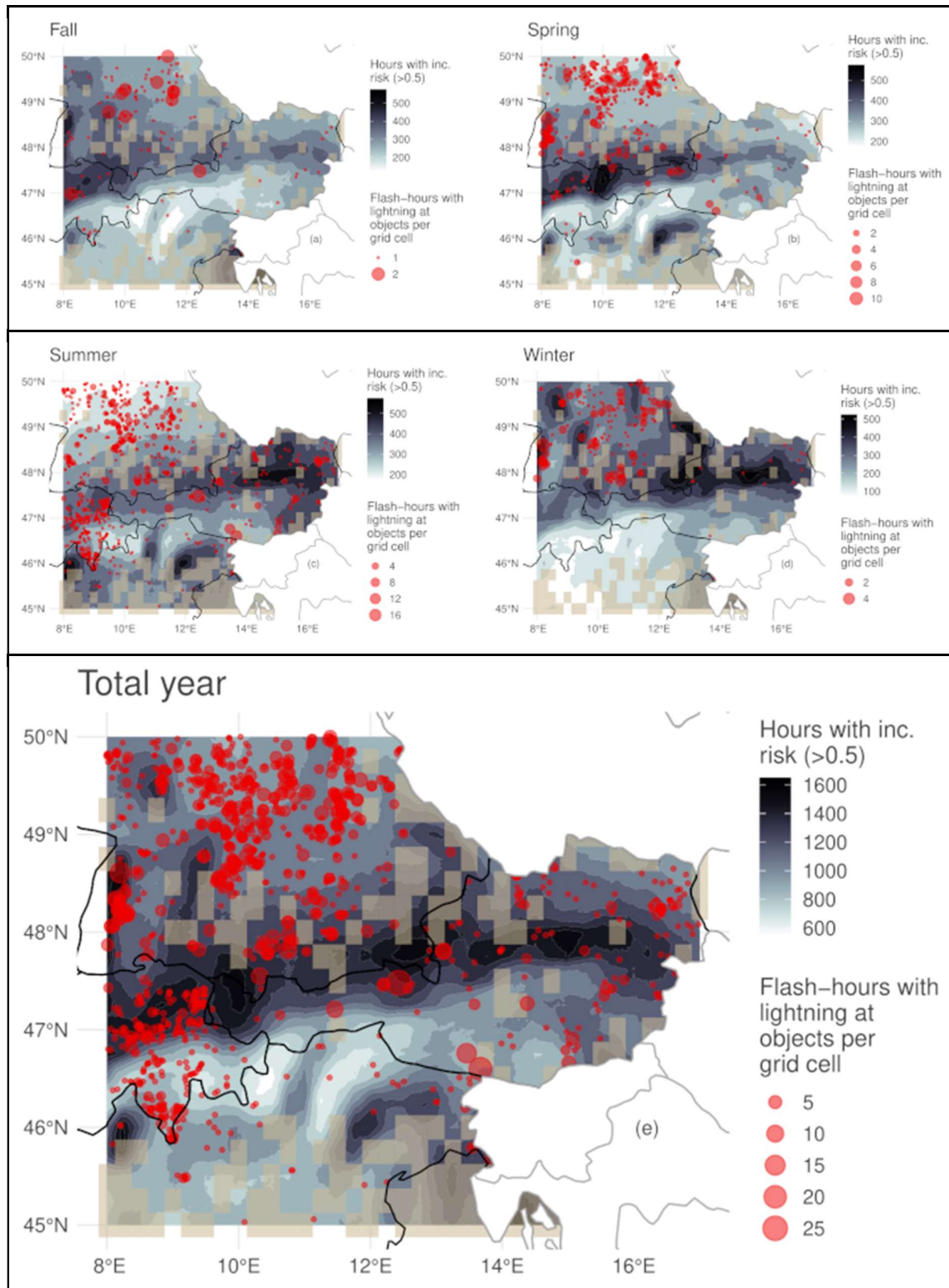


Abb. 4.4: (a) - (d): Saisonales und (e) jährliches Aufwärtsblitz-Risiko bei hohen Objekten, modelliert durch die mit dem Gaisberg Tower trainierten Random-Forest-Modelle. Das Risiko wird quantifiziert, indem die Anzahl der Stunden gezählt wird, die eine bedingte Wahrscheinlichkeit von 0,5 überschreiten. Rote Punkte sind vom Blitzortungssystem erkannte

Blitzstunden bei hohen Objekten, kumuliert auf die Rasterzellengröße von 1 km². Die Zahlen der Größenkategorie sind die Obergrenze, z. B. umfasst Größenkategorie 5 Blitzstunden von 1 bis 5. Hellbeige schattierte Zellen sind Zellen ohne hohe Objekte.

Die Gebiete mit dem höchsten Aufwärtsblitz-Risiko verschieben sich im Laufe des Jahres. Vom Winter über den Frühling bis in den Sommer hinein verschieben sich die Gebiete mit erhöhtem Risiko tendenziell sowohl nach Süden als auch nach Osten. Im Herbst befindet sich die Region mit dem höchsten Risiko hauptsächlich im westdeutschen Teilgebiet und im süddeutschen Teilgebiet und erstreckt sich bis in die nördlichen Teilgebiete der Schweiz und Österreichs. Während es im Frühling ähnlich ist, gibt es eine leichte Verschiebung nach Süden und Osten, wobei das höchste Risiko im westlichsten Teil Österreichs beobachtet wird, der sich ostwärts durch Österreich entlang der Alpen, den östlichsten Teil der Schweiz und den südwestlichen Teil Deutschlands erstreckt. Im Sommer verschieben sich die Hotspot-Regionen in die östlichen und westlichen Teile Norditaliens und in den östlichen Teil Österreichs. Umgekehrt erstreckt sich im Winter das höchste Risiko über den größten Teil des deutschen Teilgebiets und die nördlichen Teile der Schweiz und Österreichs. Im Gegensatz dazu wird während der kalten Jahreszeit südlich der Alpen ein eher geringes Risiko beobachtet.

Kombiniert man die saisonalen Daten, so zeigt sich ein deutliches jährliches Muster (Abb. 4e). Zu den Gebieten mit durchweg höherem Risiko zählen das deutsche Teilgebiet, die nördlichen Teile der Schweiz, Nordwest- und Mittelösterreich sowie die westlichen und östlichen Teile Norditaliens.

Betrachtet man die von Blitzortungssystem beobachteten Blitze an hohen Objekten, darunter möglicherweise Abwärtsblitze an hohen Objekten und Aufwärtsblitze (rote Punkte), ist es wichtig zu beachten, dass mehr als die Hälfte der tatsächlichen Aufwärtsblitz-Blitze möglicherweise nicht von Blitzortungssystem aufgezeichnet wurden, wie in der Einleitung erläutert. Insbesondere im Winter und in den Übergangsjahreszeiten beschränken sich die beobachteten Blitze an hohen Objekten auf den nördlichen Teil des Untersuchungsgebiets, wo das höchste Risiko festgestellt wird. Im Sommer hingegen erstrecken sich die beobachteten Blitze an hohen Objekten auf die südlichen Regionen, wo das Risiko ebenfalls erhöht ist.

4.3.2 Saisonale Änderungen im Tagesgang des modellierten Risikos

In Abbildung 4.5, a–d, ist nicht nur zu erkennen, dass die Blitze an hohen Objekten je nach Jahreszeit variieren, sondern dass sie auch für jede Jahreszeit unterschiedliche tägliche Muster aufweisen.

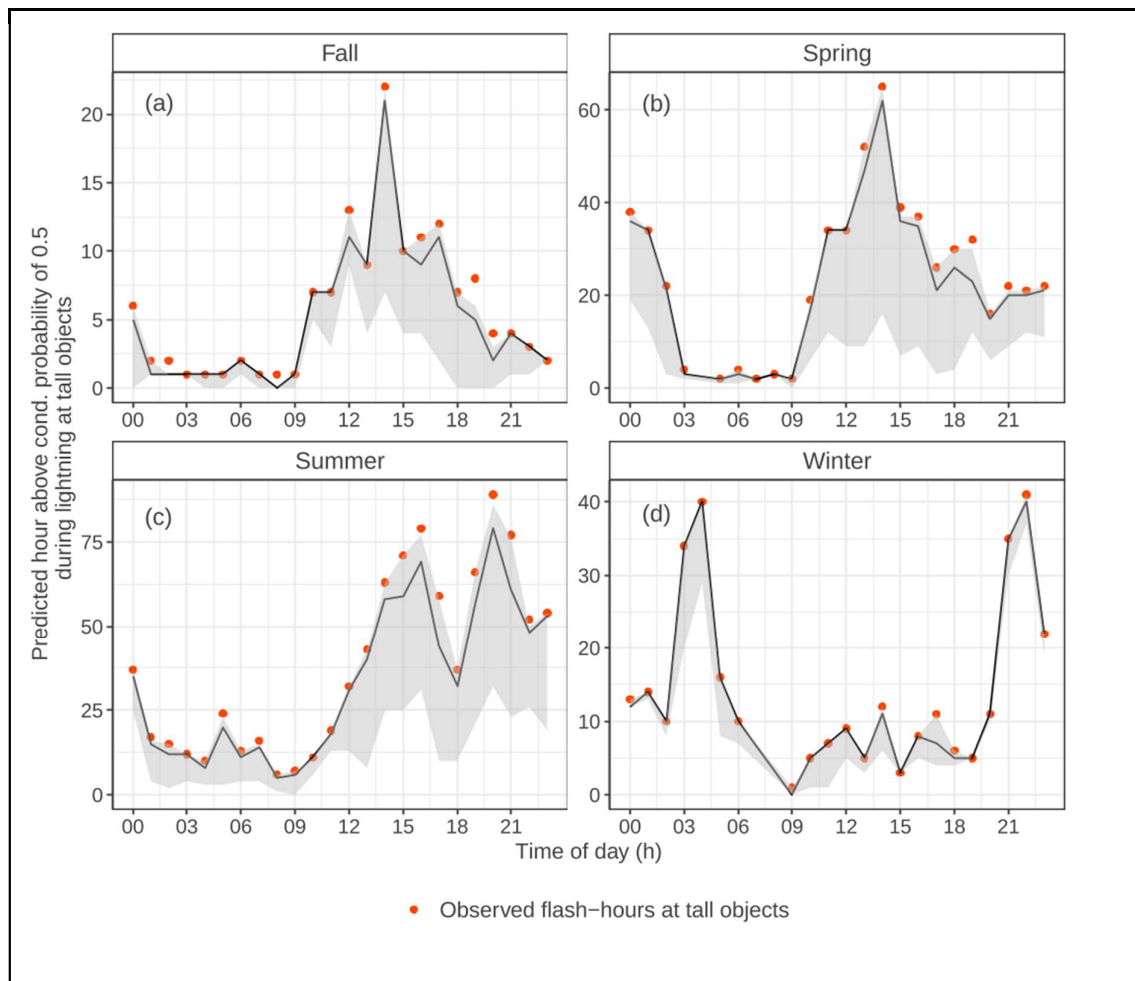


Abb. 4.5: Tageszyklus der beobachteten Blitzstunden an hohen Objekten über das gesamte Untersuchungsgebiet und den Verifizierungszeitraum (orangefarbene Punkte) im Vergleich zum modellierten Aufwärtsblitz-Risiko während dieser Aufwärtsblitz-Ereignisse (über dem bedingten Wahrscheinlichkeitsschwellenwert von 0,5, graue Linie). Die Datenbank besteht nur aus per Blitzortungssystem beobachteten Blitzen an hohen Objekten und vernachlässigt Situationen ohne Blitze an hohen Objekten. Da nur stündliche Vorhersagen bereitgestellt werden, werden Situationen, in denen dasselbe Objekt mehrmals innerhalb derselben Stunde eingeschlagen wird, nur einmal gezählt. Der schattierte Bereich zeigt die Differenz der Summe der vorhergesagten Stunden zwischen bedingten Wahrscheinlichkeiten von 0,25 und 0,75. Kleinere schattierte Bereiche weisen auf schärfere Vorhersagen zur Erkennung von Blitzen an hohen Objekten hin. Die Medianwerte der Vorhersagen für Aufwärtsblitz an hohen Objekten im Winter, Sommer, Herbst und Frühling betragen 0.834, 0.68, 0.68 bzw. 0.67.

Bemerkenswerterweise schwankt die absolute Anzahl der Blitzstunden an hohen Objekten trotz der üblichen deutlichen Zunahme der Abwärtsblitze-Aktivität während der Sommersaison nicht so stark zwischen den Jahreszeiten, wie man erwarten könnte. Die Übergangsjahreszeiten haben jeweils einen einzigen Höhepunkt. Die Aktivität erreicht sowohl

im Herbst als auch im Frühjahr um etwa 14 UTC ihren Höhepunkt. Der auffälligste Unterschied zwischen Herbst und Frühjahr ist die relativ hohe Aktivität um Mitternacht im Frühjahr, ein Muster, das auch im Sommer beobachtet wird. Sowohl die Sommer- als auch die Wintersaison haben zwei markante Höhepunkte. Im Sommer treten der erste und zweite Höhepunkt um etwa 16 UTC bzw. 19 UTC auf, während diese Höhepunkte im Winter um etwa 4 UTC bzw. 22 UTC auftreten. Dies deutet darauf hin, dass unterschiedliche meteorologische Bedingungen zu Blitzen an hohen Objekten in verschiedenen Jahreszeiten beitragen können, wobei im Sommer möglicherweise eine starke tägliche Erwärmung dominiert, die hochreichende Konvektion und andere Prozesse auslöst, wie sie beispielsweise mit Kaltfronten verbunden sind, und die Blitze an hohen Objekten im Winter und in den Übergangsjahreszeiten beeinflusst.

Die schattierten Bereiche in Abb. 4.5ad sind die Differenz der Stunden mit bedingten Wahrscheinlichkeiten über 0.25 und solchen über 0.75 dar. Ein kleinerer schattierter Bereich weist auf schärfere Vorhersagen bei beobachteten Blitzen an hohen Objekten hin. Größere schattierte Bereiche hingegen weisen darauf hin, dass die Modelle bei Blitzbeobachtungen an hohen Objekten kaum eine bedingte Wahrscheinlichkeit über 0.75 vorhersagten, was auf eine geringere Vorhersageschärfe hindeutet. Von den vier Jahreszeiten sind die Vorhersagen im Winter am schärfsten, wobei die schmalsten schattierten Bereiche insbesondere während der Nachtzeit ab 20 UTC bis etwa 3 UTC auftreten. Da die hier trainierten Random Forests nur Aufwärtsblitze modellieren, könnte die beste Leistung im Winter auf einen größeren Beitrag von Aufwärtsblitzen zu allen Blitzen an hohen Objekten in der kälteren Jahreszeit hindeuten. Im Gegensatz dazu deutet die Unterschätzung der Random-Forest-Modelle im Sommer auf eine Dominanz von Abwärtsblitzen bei Blitzen an hohen Objekten hin, die der Random Forest nicht berücksichtigt.

4.3.3 Modellevaluierung

Aufwärtsblitze sind örtlich selten, was zu einem sehr unausgewogenen Datensatz mit einem erheblich höheren Anteil von Fällen führt, in denen kein Aufwärtsblitz auftritt. Abb. 4.6 zeigt die ausgezeichnete Qualität der mit dem Gaisberg Tower trainierten Random-Forest-Modelle im Untersuchungsgebiet, ausgewertet am ERA5 Gitter. Sowohl die precision-recall Kurve (Abb. 4.6a) als auch die Receiver Operating Characteristic (ROC) Kurve liegen weit oberhalb bzw. links der strichlierten "no skill" Linie.

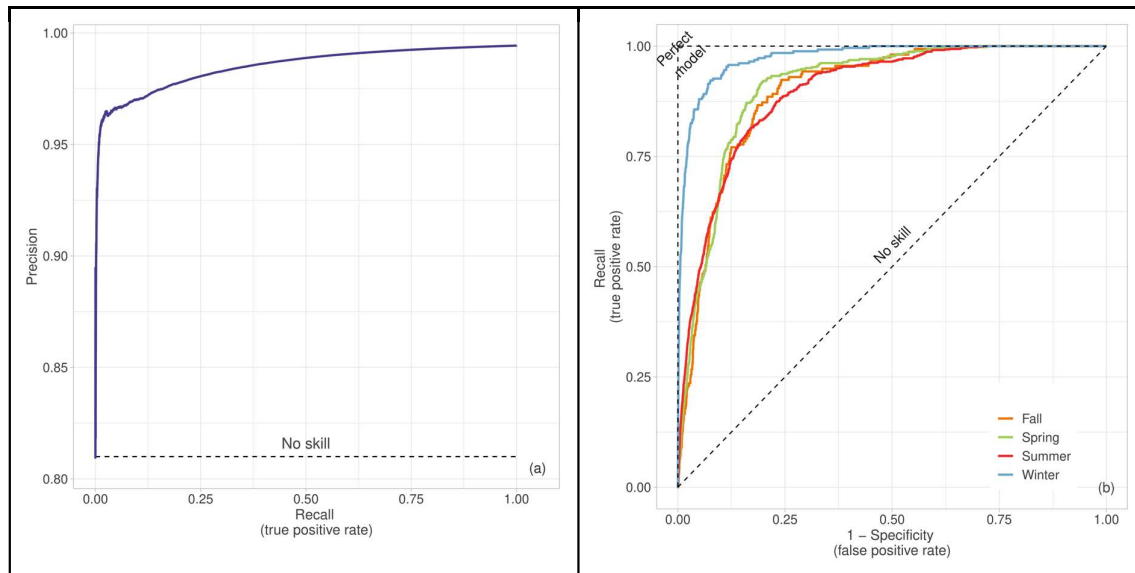


Abb. 4.6 Qualität der Random-Forest-Modelle im Vergleich zu No-Skill-Modellen. (a) Precision-Recall-Kurve, die den Kompromiss zwischen dem Anteil tatsächlicher Aufwärtsblitz-Blitze, die das Modell richtig identifiziert hat (Recall), und dem Anteil tatsächlich aufgetretener Aufwärtsblitz-Blitze, die vom Modell vorhergesagt wurden (Precision), für unterschiedliche Grenzwerte zeigt, die bestimmen, ob ein Aufwärtsblitz aufgetreten ist. (b) ROC-Kurven (für alle Jahreszeiten), die den Kompromiss zwischen dem Anteil ohne Aufwärtsblitze, der fälschlicherweise als Aufwärtsblitz vorhergesagt wurde, und der Genauigkeit der Modelle zur Vorhersage tatsächlich aufgetretener Aufwärtsblitz-Situationen zeigen. Je größer der Bereich unter der Kurve in beiden Panels, desto höher die Qualität der Modelle.

Der schnelle Anstieg der Precision bei niedrigeren Recall-Werten zeigt, dass die Modelle Aufwärtsblitze genau identifizieren, wenn sie tatsächlich auftreten, während die Anzahl der tatsächlich verpassten Aufwärtsblitz-Ereignisse minimiert wird. Saisonal sind die Präzisions-Recall-Kurven kaum zu unterscheiden.

Ergänzend zur Precision-Recall-Kurve zeigt die ROC-Kurve in Abb. 4.6b, dass die Modelle im Winter am besten abschneiden, wie durch die blaue Kurve angedeutet. Die ROC-Kurve veranschaulicht den Kompromiss zwischen der Anzahl der Situationen ohne Aufwärtsblitze, die fälschlicherweise als Situationen mit Aufwärtsblitzen vorhergesagt werden, und der Genauigkeit, mit der die Modelle tatsächlich eingetretene Aufwärtsblitz-Situationen vorhersagen.

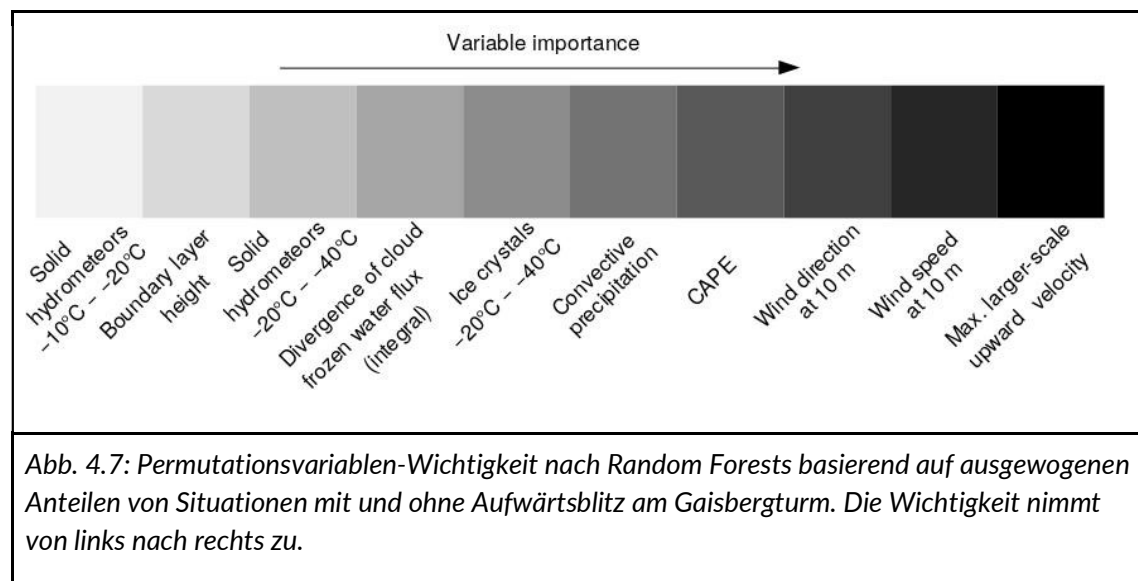
4.4 Der großräumige meteorologische Einfluss auf das Aufwärtsblitz-Risiko

Das Random-Forest-Modell nutzt die in den 35 Eingangsvariablen enthaltenen Informationen zur großräumigen meteorologischen Situation. Es ermöglicht außerdem die Identifizierung der Variablen, die die meisten Informationen über das Auftreten von Aufwärtsblitz enthalten.

4.4.1 Die einflussreichsten meteorologischen Variablen am Gaisbergturm

Um den individuellen Einfluss jeder meteorologischen Prädiktorvariable bei der Klassifizierung von Aufwärtsblitzen zu berechnen, werden die Werte jeder Prädiktorvariable nach dem Zufallsprinzip gemischt und die daraus resultierende Verschlechterung des Modells bewertet. Je größer der Rückgang, desto wichtiger ist die Variable.

Aus der in Abb. 4.7 zusammengefassten Variablenwichtigkeit kann man folgern, dass sowohl das Windfeld als auch die mit der Wolkenphysik verbundenen Variablen den größten Einfluss auf das Auftreten von Aufwärtsblitzen am Gaisbergturm haben. Dies deckt sich mit früheren Forschungsergebnissen. Die fünf wichtigsten Variablen sind die maximale großräumige Aufwärtsgeschwindigkeit, die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe, die Windrichtung in 10 m Höhe, die konvektiv verfügbare potentielle Energie (CAPE) und der konvektive Niederschlag. Nachfolgende Analysen werden sich speziell auf die drei wichtigsten Variablen konzentrieren, um unser Verständnis des modellierten Aufwärtsblitz-Risikos an hohen Objekten zu verbessern. Die maximale großräumige Aufwärtsgeschwindigkeit sollte nicht mit den Aufwinden verwechselt werden, die mit den konvektiven Prozessen bei der Gewitterentwicklung verbunden sind. Sie ist vielmehr das Ergebnis großräumiger Prozesse wie der Aufwinde entlang von Fronten, synoptischen Trögen oder der Topografie.



4.4.2 Saisonale Analyse der großräumigen meteorologischen Bedingungen bei Blitzeinschlägen an hohen Objekten

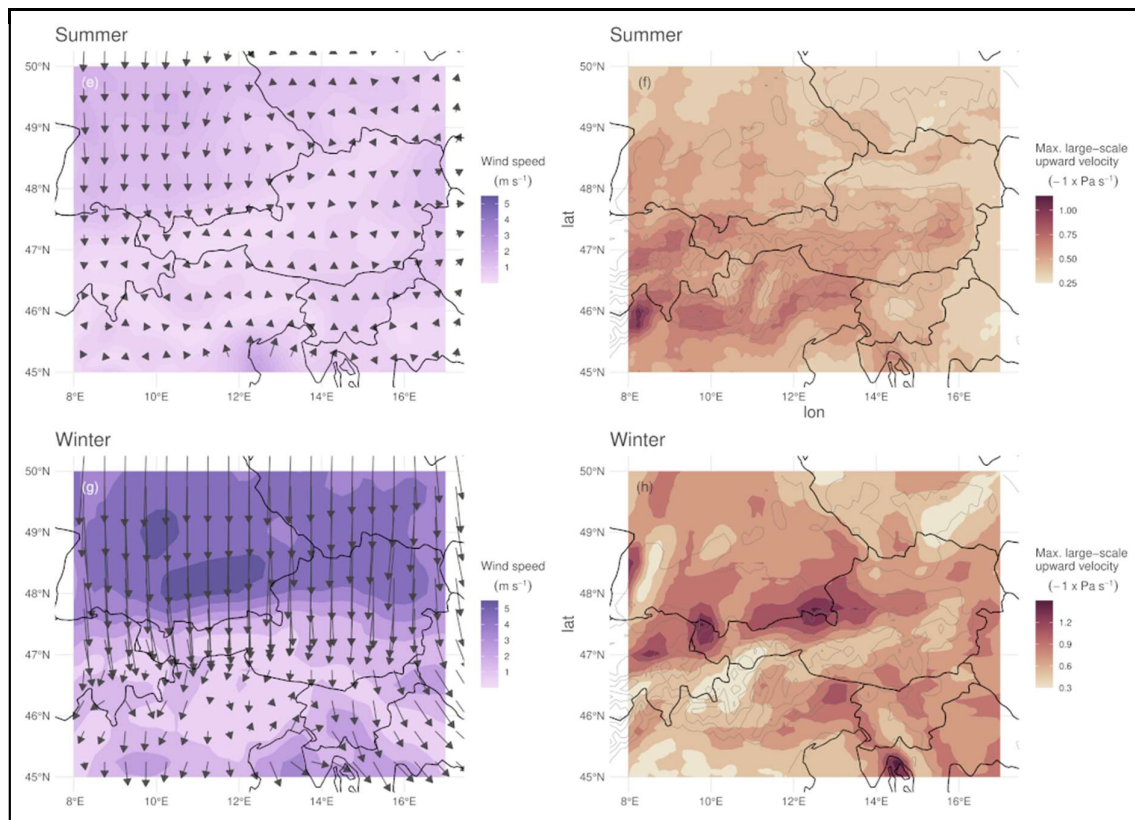


Abb. 4.8: Median der drei einflussreichsten meteorologischen Variablen während der von Blitzortungssystem beobachteten Blitze an hohen Objekten im Sommer (oben) bzw. Winter (unten). Linke Spalte: Windgeschwindigkeit farblich kodiert und Windrichtung durch Pfeile angezeigt (Durchschnitt über $0.5^\circ \times 0.5^\circ$). Rechte Spalte: Median der großräumigen maximalen Aufwärtsgeschwindigkeit. Negative Werte zeigen eine Aufwärtsbewegung an.

Abb. 4.8 zeigt den Median (über alle Tage) der Windgeschwindigkeit und Windrichtung in 10 m Höhe (linke Spalte) und der mittleren maximalen großräumigen Aufwärtsgeschwindigkeit. Im deutschen Teilgebiet ist ganzjährig das Aufwärtsblitzrisiko mit bodennahen Nord- und Nordwestwinden verbunden. In Verbindung mit hügeligem Gelände, wo die Winde nach oben abgelenkt werden, führt dies zu größeren Aufwärtsgeschwindigkeiten. Ähnlich scheint das erhöhte Risiko in komplexem Gelände auf erhöhte maximale Aufwärtsgeschwindigkeiten zurückzuführen zu sein, die wahrscheinlich durch starke Winde verursacht werden, die auf die Topographie treffen und nach oben abgelenkt werden, wodurch an hohen Objekten Konvektion und Aufwärtsblitze ausgelöst werden. Je nach vorherrschender Windrichtung werden erhöhte großräumige Aufwärtsgeschwindigkeiten am nördlichen bzw. südlichen Alpenrand gemessen.

Insgesamt scheint es, dass Regionen auf der dem Wind zugewandten Seite ein erhöhtes Risiko für Aufwärtsblitze haben, da dort vergleichsweise starke Winde in Bodennähe herrschen und Hügel und Berge den Wind nach oben ablenken und so günstige Bedingungen für Aufwärtsblitze an hohen Objekten schaffen. Dies gilt für die dem Wind zugewandte Seite der Nordalpen, die in den Übergangsjahreszeiten und im Winter in der Nordschweiz, in

Österreich und im gesamten deutschen Teilgebiet von starken Nordwinden beeinflusst werden. Dies könnte auch für die schwache Südströmung gelten, die das Risiko im Westen und Osten Norditaliens, insbesondere im Sommer, beeinflussen könnte. Umgekehrt ist das Risiko in den zentralen südlichen Alpenregionen Österreichs, der zentralen Südschweiz und des zentralen Norditaliens geringer.

Wir gehen davon aus, dass insbesondere im Winter, aber auch im Frühjahr und Herbst Prozesse, die mit Zyklogenese, Kaltfrontdurchgängen und Trögen in Zusammenhang stehen, hohe Windgeschwindigkeiten, konvektive Niederschläge und eine instabile Atmosphäre hervorrufen, die Konvektion und Aufwärtsblitze begünstigt. Im Gegensatz dazu könnte die Situation im Sommer oft durch kleinräumigere Prozesse und/oder starke tägliche Erwärmung und Sonneneinstrahlung gekennzeichnet sein, die Bedingungen sowohl für die Einleitung tiefer Konvektion als auch für Aufwärtsblitze an hohen Objekten schaffen, die durch nahegelegene Abwärtsblitz-Aktivität ausgelöst werden.

4.4.3 Fallstudie

Eine Fallstudie der frühen Morgenstunden (3–6 UTC) des 21. Februar 2022 demonstriert die Diagnosegüte der Random Forests. Der Einfachheit halber werden wiederum nur die drei wichtigsten meteorologischen Variablen von 35 im Detail untersucht.

Die synoptische Situation in dieser Fallstudie wird vom Durchzug einer Kaltfront dominiert, was an den dicht gepackten Isothermen in Abb. 4.9b ersichtlich ist. Die blaue Linie mit Dreiecken zeigt die ungefähre Position der Kaltfront um 6 UTC, nachdem sie die nordwestliche Ecke des Untersuchungsgebiets passiert hatte. Die Region mit hohen vorhergesagten bedingten Wahrscheinlichkeiten ist durch starke bodennahe Winde aus dem Norden gekennzeichnet, die ihren Höhepunkt in dem Gebiet erreichen, in dem die meisten tatsächlichen Blitze beobachtet wurden (Abb. 4.9c). Höhenlinien in Abb. 4.9a zeigen erhöhtes Gelände an, was zu einer erhöhten maximalen Aufwärtsgeschwindigkeit führt, wenn der Wind abgelenkt wird. Dies wiederum erhöht die Wahrscheinlichkeit von Aufwärtsblitzen, insbesondere im südwestlichsten Teil Deutschlands, wo tatsächlich Aufwärtsblitze beobachtet wurden, wie durch die gelben Punkte angezeigt. Abb. 4.9d zeigt für diese Region auch die höchste Anzahl der Stunden mit einer Aufwärtsblitzrisikowahrscheinlichkeit von über 50 %. Wo genau in dieser Region Aufwärtsblitze auftreten, hängt von kleinräumigeren Bedingungen ab. Die meteorologischen Daten aus ERA5 spiegeln nur großräumige meteorologische Gegebenheiten wider.

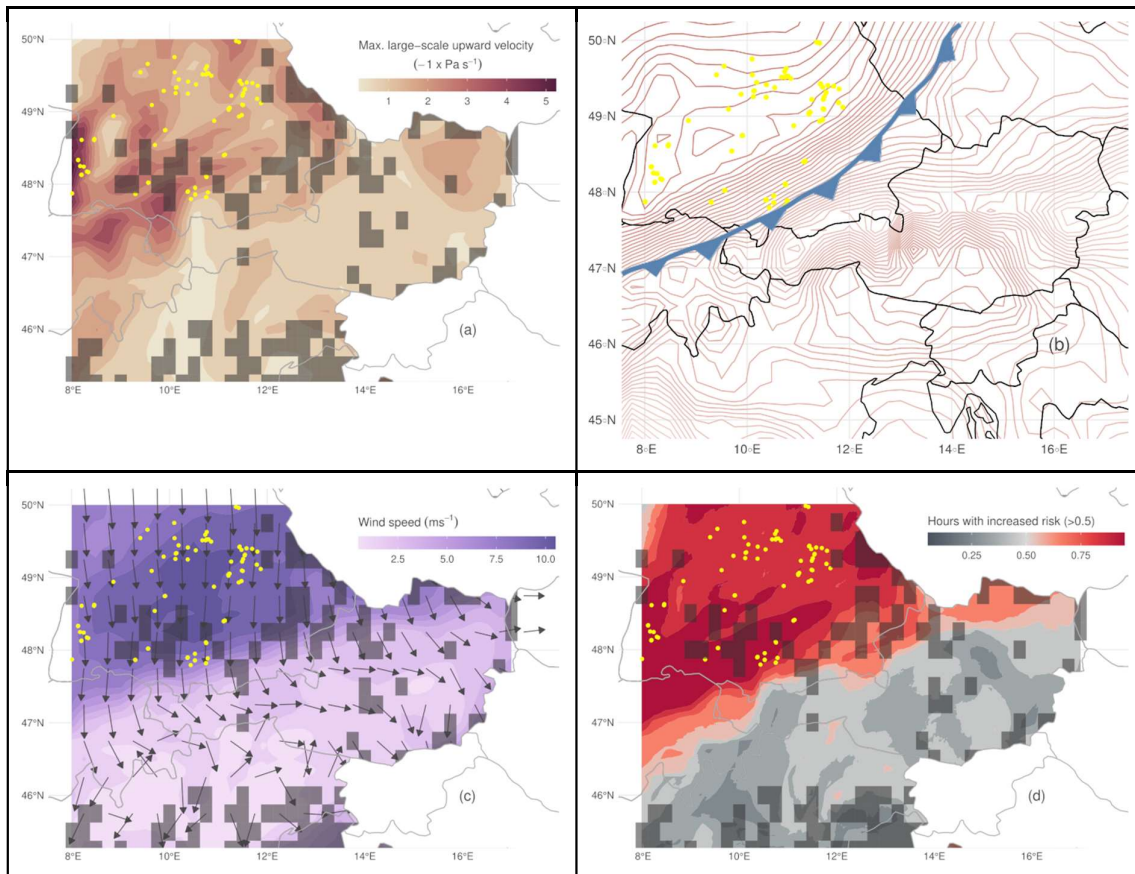


Abb. 4.9: Fallstudie vom 21. Februar 2022 zwischen 3 UTC und 6 UTC. (a) Maximum der großräumigen Aufwärtsgeschwindigkeit über den Verifizierungszeitraum. (b) Lage der 850-hPa-Isothermen um 6 UTC mit Kaltfront. (c) Farbflächen stellen das Maximum der Windgeschwindigkeit über den Verifizierungszeitraum dar, Pfeile veranschaulichen die Windrichtung um 6 UTC. (d) Maximum der vorhergesagten bedingten Wahrscheinlichkeit über den betrachteten Verifizierungszeitraum. Gelbe Punkte sind von Blitzortungssystem erkannte Blitze an hohen Strukturen. Dunkelgrau schattierte Zellen sind Zellen ohne hohe Objekte.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

5.1 Schlussfolgerungen

Diese Studie untersucht das Blitzrisiko an hohen Objekten, die groß genug sind, um einem erheblichen Anteil seltener, aber zerstörerischer Aufwärtsblitze ausgesetzt zu sein. Windkraftanlagen haben inzwischen eine Höhe erreicht, bei denen sie Aufwärtsblitze auslösen und dadurch großen Schaden erleiden können bzw. aufwendig dagegen geschützt werden müssen. Direkte Blitzstrommessungen am speziell instrumentierten Gaisbergturm in Österreich zeigen, dass mehr als die Hälfte der Aufwärtsblitze vom den Blitzortungsnetzwerken wegen ihrer spezifischen Stromwellenformen nicht erfasst werden. Aktuelle Ansätze zur Bewertung des Blitzrisikos übersehen oft entscheidende meteorologische Faktoren, was möglicherweise zu einer erheblichen Unterschätzung des Aufwärtsblitzrisikos für Windkraftanlagen führt. Diese Studie unterstreicht die Notwendigkeit, detaillierte meteorologische Daten in die Risikobewertung einzubeziehen, um ein zuverlässigeres Verständnis des Blitzrisikos bei hohen Windkraftanlagen zu erreichen.

Daher untersucht diese Studie den Beitrag von großräumigen meteorologischen Bedingungen zu Aufwärtsblitzen an hohen Objekten und verwendet direkte Aufwärtsblitzmessungen am speziell instrumentierten Gaisbergturm in Salzburg zusammen mit großräumigen meteorologischen Reanalysedaten. Random Forests, eine beliebte und flexible Technik des maschinellen Lernens, unterscheiden Aufwärtsblitz- von Nicht-Aufwärtsblitz-Situationen. Die Ergebnisse zeigen die Bedeutung von Windfeld- und Wolkenphysik-relevanten Variablen, was mit früheren Studien übereinstimmt. Die drei wichtigsten Variablen aus einem Satz von 35, die Aufwärtsblitz- von Nicht-Aufwärtsblitz-Situationen am Gaisberg unterscheiden, sind die maximale großräumige Aufwärtsgeschwindigkeit, die Windgeschwindigkeit in 10 m Höhe und die Windrichtung in 10 m Höhe. Weiters sind die konvektiv verfügbare potenzielle Energie und Wolkenphysik-bezogene Variablen wichtig.

In einem zweiten Schritt werden diese Erkenntnisse auf ein Untersuchungsgebiet angewendet, das Österreich, Teile Italiens, Deutschlands und der Schweiz umfasst. Die am Gaisbergturm trainierten Modelle sagen die bedingte Wahrscheinlichkeit von Aufwärtsblitzen in diesem Gebiet mit einer Auflösung von 1 km² voraus. Zur Verifizierung über die Periode 2021-2023 werden alle Objekte berücksichtigt, die hoch genug sind, um Aufwärtsblitze auszulösen. Hohe Objekte sind über das gesamte Untersuchungsgebiet verteilt, mit Maxima im zentral-östlichen Schweizer Teilgebiet und in Ostösterreich. Objekte mit großen effektiven Höhen finden sich in Süd-, Südwest- und Mitteldeutschland sowie Ostösterreich.

Die höchste vom Blitzortungssystem beobachtete Aktivität von Blitzen an hohen Objekten findet sich vor allem im zentralen, südlichen und westlichen Teilgebiet Deutschlands sowie im Schweizer Teilgebiet. Im deutschen Teilgebiet können Blitze an hohen Windkraftanlagen bis zu 20 % und mehr der gesamten Blitzaktivität im Umkreis von 10 km ausmachen, insbesondere um Windkraftanlagen herum. In allen anderen Teilgebieten beträgt der Anteil von Blitzen an hohen Objekten an der gesamten Blitzaktivität im Umkreis von 10 km um ein Objekt weniger als 5 %.

Die Bewertung des Aufwärtsblitz-Risikos an hohen Objekten anhand von am Gaisbergturm trainierten Random-Forest-Modellen, die nur auf meteorologischen Variablen in größerem Maßstab basieren, zeigt, dass das jährliche Risiko in Süddeutschland sowie im Norden und Osten Österreichs und der Nordschweiz am höchsten ist. Auch West- und Ostnorditalien weisen ein erhöhtes Aufwärtsblitz-Risiko auf. Eine saisonale Analyse zeigt, dass im Winter das höchste Risiko auf die Regionen nördlich und östlich der Ostalpen beschränkt ist, während südlich der Ostalpen (Ost- und Westnorditalien) das Risiko auch in den Übergangsjahreszeiten und besonders im Sommer erhöht ist. Die Analyse der drei einflussreichsten meteorologischen Variablen zeigt, dass die höchsten vorhergesagten Wahrscheinlichkeiten auf die Ablenkung starker großräumiger bodennaher Winde an der Topographie zurückzuführen sind, was zu einer Zunahme der großräumigen Aufwärtsgeschwindigkeiten führt. Im Winter und in den Übergangsjahreszeiten weht der Wind überwiegend aus Norden, was das Aufwärtsblitz-Risiko nördlich der Alpen erhöht. In den wärmeren Jahreszeiten und im Sommer kann das erhöhte Risiko südlich der Alpen auf andere Einflüsse zurückzuführen sein, wie thermisch getriebene Hangwinde, Talwinde und Ebene-Gebirgszirkulationen. Zwischen den Hochrisikogebieten Südschweiz, Zentral-Norditalien und südlichen Teilen Österreichs ist das Risiko in allen Jahreszeiten geringer. Der Tagesgang des modellierten Risikos variiert saisonal. Während die Übergangsjahreszeiten einen markanten Peak am Nachmittag aufweisen, zeigen Sommer und Winter zwei markante Peaks. Das höchste Risiko besteht im Sommer am späten Nachmittag und Abend, während das höchste Risiko im Winter am späten Abend und in der Nacht besteht.

Ein Vergleich mit durch Blitzortungssystem beobachteten Blitzen an hohen Objekten zeigt eine qualitativ gute Übereinstimmung mit erhöhtem oder verringertem Risiko. Während die Bereiche mit erhöhtem Risiko viel größer sind als die Bereiche mit beobachteten Blitzen an hohen Objekten (Aufwärtsblitz ist ein sehr seltenes Phänomen), ist die Güte der Modelle zur korrekten Vorhersage eines hohen Aufwärtsblitz-Risikos, wenn tatsächlich ein Blitz an einem hohen Objekt aufgetreten ist, das ganze Jahr über gut. Die Genauigkeit der Vorhersagen ist im Winter am höchsten.

5.2 Empfehlungen

Die Ergebnisse dieser Studie zeigen klar, dass die aktuellen Blitzschutznormen für hohe Windkraftanlagen unzulänglich sind, weil die saisonal und regional variierenden großräumigen meteorologischen Bedingungen für Aufwärtsblitze nicht ausreichend berücksichtigt sind. Durch ihre große Höhe können Windturbinen Blitze auslösen, die sonst nicht auftreten würden.

Es wird deswegen empfohlen, die in diesem Projekt erstellten Risikokarten für Aufwärtsblitze bei der Auslegung des Blitzschutzes für Windkraftanlagen mitzubewerten. Das jährlich gemittelte Risiko ist in diesem Endbericht in Abb. 4.1 dargestellt. Stunden mit erhöhtem Risiko bedeuten natürlich nicht, dass es in all diesen Stunden zu Aufwärtsblitzen kommt. Am Gaisbergturm in Salzburg (s. Abb. 6.1) resultieren daraus 50-60 Aufwärtsblitze pro Jahr.

Die Risikokarten und die darin abgebildeten Daten sind in einer Auflösung von 1 km² im Untersuchungsgebiet (s. Abb. 6.1) zusätzlich zum Jahresmittel auch noch für die Jahreszeitenmittel digital verfügbar auf

https://data.hub.geosphere.at/dataset/upward_lightning_risk

bzw. mit dem DOI: <https://doi.org/10.60669/egt6-pp88>

c) Projektdetails

6 Methodik

6.1 Daten

Die Studie erfordert meteorologische Daten, Blitzdaten und eine Datenbank aller hohen Objekte innerhalb eines ausgewählten Untersuchungsgebiets, das aus flachem, hügeligem und komplexem Gelände in den Ostalpen besteht (Abb. 1).

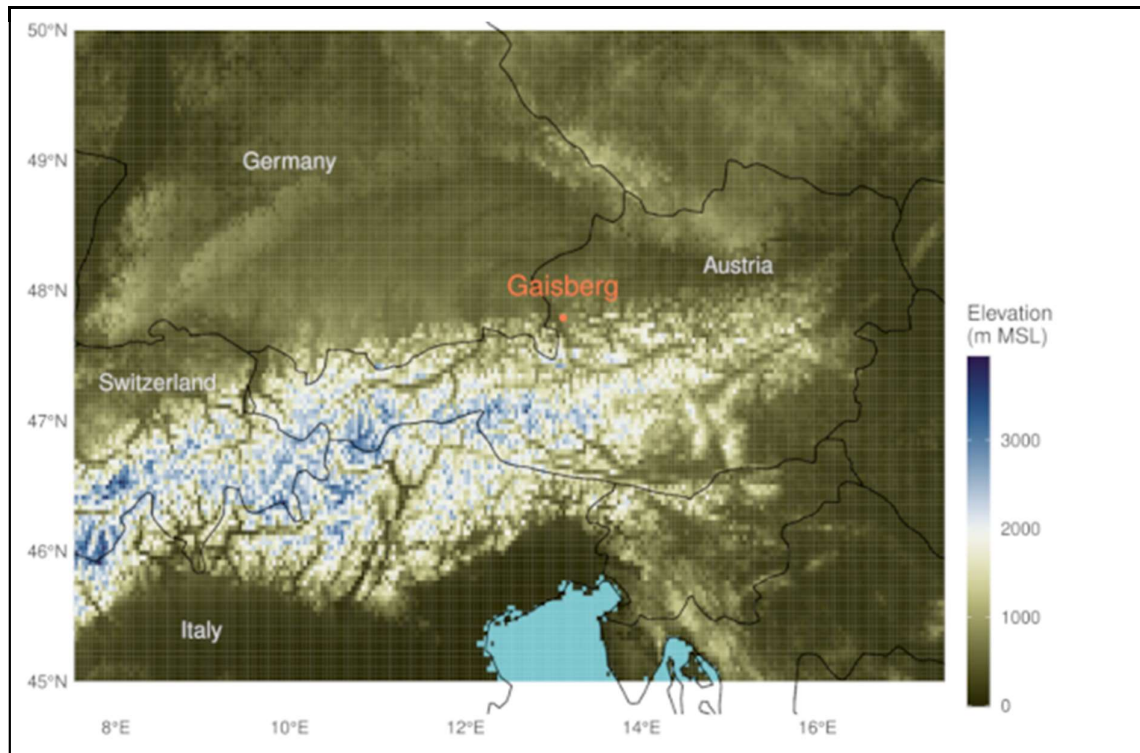


Abb. 6.1: Topographie des Untersuchungsgebiets mit Lage des speziell für Blitzmessungen instrumentierten Turms am Gaisberg in Salzburg.

Großräumige Reanalysedaten (ERA5) mit stündlicher Auflösung bilden die Grundlage aller meteorologischen Untersuchungen in dieser Studie. Darüber hinaus werden bodennahe Blitzstrommessungen am speziell instrumentierten Gaisbergturm in Salzburg (s. Abb. 6.1) und Daten des Blitzmessnetzes der European Cooperation for Lightning Detection (EUCLID) verwendet. Um das prognostizierte Risiko an hohen Objekten zu verifizieren, werden verschiedene Arten von hohen Objekten verwendet, die von den nationalen Flugsicherheitsbehörden Österreichs, der Schweiz, Deutschlands und Italiens dokumentiert wurden. Der Verifizierungszeitraum umfasst drei Jahre (2021–2023).

6.1.1 Atmosphärische Reanalyse

ERA5 ist die fünfte Generation globaler Klimareanalysen, die vom Europäischen Zentrum für mittelfristige Wettervorhersage (ECMWF) bereitgestellt werden. Die Daten sind in stündlicher Auflösung und in einer räumlichen Auflösung von 31km horizontal verfügbar ($0.25^\circ \times 0.25^\circ$ Breitengrad-Längengrad-Raster) und auf 137 vertikalen Ebenen. Da eine genaue Risikobewertung eine höhere Auflösung erfordern kann als die von ERA5 angebotene, werden die ERA5-Variablen bilinear interpoliert auf einen $0.01^\circ \times 0.01^\circ$ Breitengrad-Längengrad-Raster, was ungefähr $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ entspricht. In dieser Studie werden 35 verschiedene Variablen aus ERA5 verwendet, um das Auftreten von Aufwärtsblitzen zu erklären. Diese sind entweder direkt verfügbar oder werden aus den direkt verfügbaren Variablen berechnet.

6.1.2 Blitzmessungen

Die Messungen des Blitzortungssystems für das Untersuchungsgebiet ($45^\circ \text{ N} - 50^\circ \text{ N}$ und $8^\circ \text{ E} - 17^\circ \text{ E}$) stammen von EUCLID. Dieses Blitzortungssystem misst in einem Frequenzbereich von 400 Hz bis 400 kHz und quantifiziert die Blitzaktivität mit einer mittleren Ortungsgenauigkeit von etwa 100 m. Während das Blitzortungssystem Abwärtsblitze mit einer Effizienz von über 90 % erkennt, sinkt die Erkennungseffizienz bei Aufwärtsblitzen auf weniger als 50 %. Daher kann der Anteil von Aufwärtsblitzen die Erkennungseffizienz von Blitzen an hohen Objekten erheblich beeinflussen.

Die grundlegende Datenquelle für die Erstellung von Modellen zum Verständnis des Auftretens von Aufwärtsblitzen ist nur durch direkte Messungen an speziell instrumentierten Türmen zugänglich. Mit einer physischen Höhe von 100 m über Grund und 1.288 m über dem Meeresspiegel ($47^\circ 48' \text{ N}$, $13^\circ 60' \text{ E}$, s. Abb. 6.1) ist der Gaisbergturm überwiegend Aufwärtsblitzen ausgesetzt. Insgesamt 956 mal wurden am Gaisbergturm zwischen 2000 und 2015 sowie von Mitte 2020 bis Ende 2023 Aufwärtsblitze registriert.

Ausgestattet mit einem empfindlichen Shunt-Sensor misst der Gaisbergturm alle Aufwärtsblitze, unabhängig von der Stromwellenform. Am Gaisbergturm werden drei verschiedene Stromwellenformen beobachtet. Der erste Typ entsteht, wenn der Blitzprozess nach der Anfangsphase endet und damit nur einen längeren kontinuierlichen Stromfluss umfasst (initial continuous current, ICC only, ICC_{only}). Beim zweiten Typ wird dieser ICC von impulsartigen Strömen mit relativen Spitzen von $\geq 2 \text{ kA}$ überlagert (ICC_P). Schließlich entwickelt sich der dritte Aufwärtsblitz-Typ nach einer kurzen Phase ohne Strom, gefolgt von einem oder mehreren Abwärts-, Aufwärtsblitzen und return strokes, die denen bei Abwärtsblitzprozessen ähneln (ICC_{RS}).

Die Messungen am Gaisbergturm zeigten, dass der Subtyp ICC_{only} überhaupt nicht durch Blitzortungssystem erkannt werden kann. Die beiden anderen vorgestellten Subtypen von Aufwärtsblitz, (ICC_{RS}) und (ICC_P), werden laut Blitzortungssystem in 96 % bzw. 58 % der Fälle erkannt. Um die resultierenden Modelle besser verifizieren zu können, basieren alle Analysen dieser Studie ausschließlich auf durch Blitzortungssystem erkennbaren Aufwärtsblitze, also Aufwärtsblitze vom Typ ICC_{RS} und ICC_P.

6.1.3 Blitze an hohen Objekten

Glücklicherweise verlangen internationale Luftfahrtbestimmungen, dass jedes Land eine Datenbank hoher Objekte, die die Flugsicherheit gefährden können, führt und aktualisiert. Das Untersuchungsgebiet enthält mehrere Objekte mit für die Flugsicherheit relevanten Höhen (siehe Tabelle 1). Diese Dokumentation ist für Deutschland, Österreich, die Schweiz und Italien frei verfügbar, enthält jedoch keine Daten aus der Tschechischen Republik, Slowenien, Ungarn und Kroatien.

Objekttyp	Österreich	Deutscher Teilbereich	Italienischer Teilbereich	Schweizer Teilgebiet
Windkraftanlage	1318 (1283)	1638 (1632)	8 (8)	17 (11)
Mast (zB Antenne, Turm)	270 (26)	166 (129)	35 (35)	90 (12)
Gebäude	35 (35)	13 (11)	14 (5)	25 (5)
Stapel	26 (26)	75 (75)	30 (30)	2 (2)
Übertragungsleitung	97 (85)	7 (7)	75 (75)	1862 (1216)
Seilbahn	169 (119)	1 (1)	265 (90)	520 (287)
Oberleitung	61 (16)	45 (45)	-	1169 (566)
Andere (z. B. Vegetation, Brücke)	15 (15)	12 (3)	23 (15)	30 (12)
Gesamt	1991	1957	450	3715
Gesamt pro km ²	0,024	0,024	0,009	0,17

Tab. 6.1: Anzahl von Objekten mit einer für die Flugsicherheit relevanten Höhe nach Art und Teilregion der Abb. 6.1. Zahlen in Klammer geben die Anzahl der Objekte mit einer für Aufwärtsblitzen effektiven Höhe von über 100 m an.

Die verfügbare Datenbank enthält genaue Angaben zum geografischen Standort und zur physischen Höhe jedes Objekts und bietet so eine Grundlage für die Überprüfung der Modelle. Jedes Land basiert auf einer anderen Datenbank mit unterschiedlichen Detaillierungsgraden; so sind beispielsweise hohe Bäume in der Schweizer Datenbank enthalten, in den anderen Ländern jedoch nicht.

Aufwärtsblitze werden erst ab einer effektiven Höhe von 100 m des Objekts relevant. Der Verifizierungsprozess soll daher alle von Blitzortungssystem beobachteten Blitze extrahieren, die \geq zwischen 2021 und 2023 ein Objekt mit einer effektiven Höhe von 100 m getroffen haben. Um die Ortungsgenauigkeit von Blitzortungssystem zu erreichen, werden alle Blitze in einem Umkreis von 100 Metern um jedes Objekt berücksichtigt.

Die effektive Höhe berücksichtigt den Unterschied zwischen der Höhe des Objekts über dem Meeresspiegel und der Höhe der umgebenden Umgebung. Diese Anpassung der strukturellen Höhe berücksichtigt die Verstärkung des elektrischen Felds, wenn die mittlere Geländehöhe deutlich niedriger ist als die Höhe, auf der sich ein Objekt befindet, beispielsweise wenn es sich auf einem Berg oder Hügel befindet. Je größer dieser Unterschied ist, desto größer ist die effektive Höhe und möglicherweise der Anteil des gesamten Blitzes an hohen Objekten.

Es wurden mehrere Methoden zur Berechnung der effektiven Höhe vorgeschlagen. Diese Studie verwendet eine Methode, die einen Berg approximiert als halbkugelförmig mit einer Höhe hat, die der Differenz zwischen der Höhe des hohen Objekts und der durchschnittlichen Höhe in 1km^2 um ihn herum entspricht. Die Methode verwendet elektrische Feldparameter, die hauptsächlich aus Laborexperimenten abgeleitet wurden. Der Vorteil dieser Methode ist ihre leichte Berechenbarkeit mit den verfügbaren Informationen. Sie könnte allerdings die wahre effektive Höhe unterschätzen.

Abb. 6.2 veranschaulicht die Verteilung der effektiven Höhe (≥ 100 m) von Objekten, dargestellt durch unterschiedliche Farben.

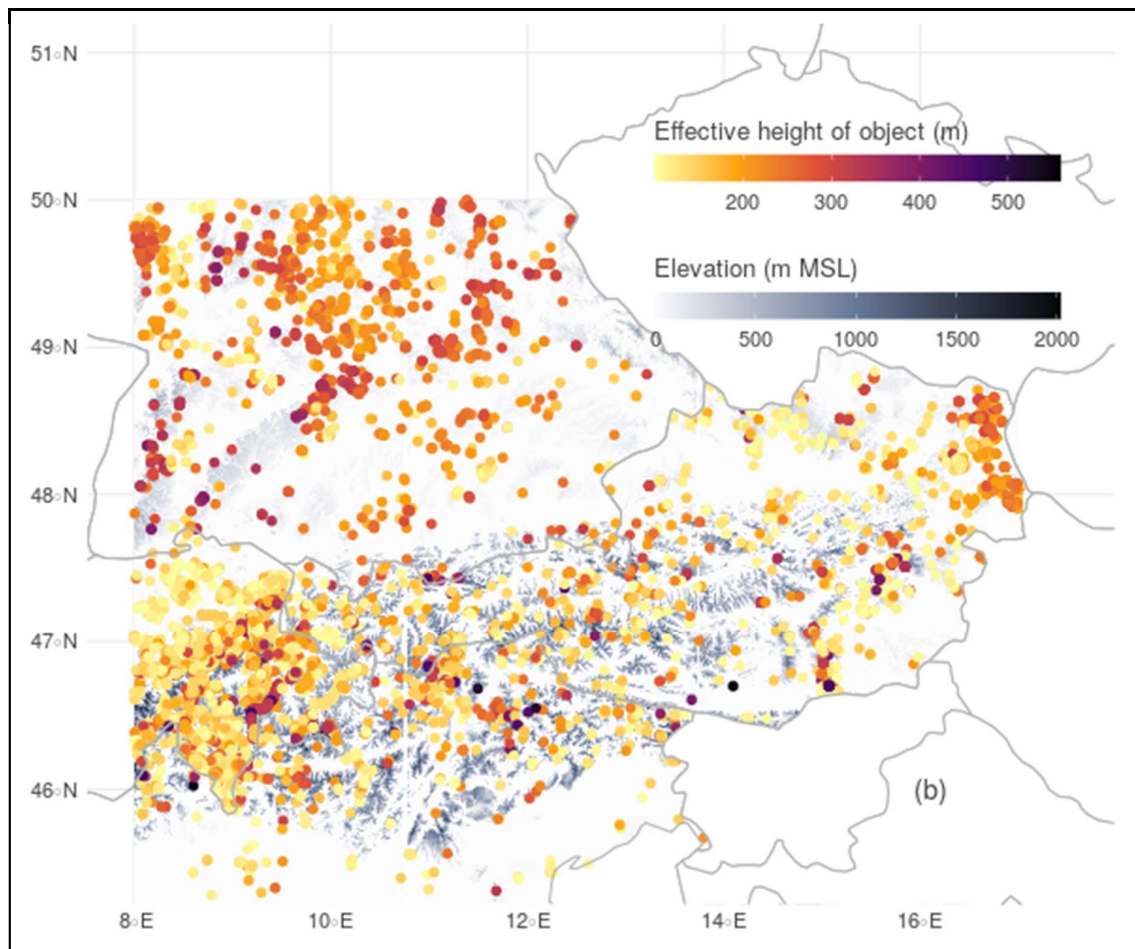


Abb. 6.2: Mindestens 100 m hohe Objekte im Untersuchungsgebiet, farbkodiert nach ihrer effektiven Höhe.

Die höchste Konzentration an hohen Objekten ist im östlichsten Teil Österreichs und im zentralöstlichen Teilgebiet der Schweiz zu beobachten. Auch in Mitteldeutschland gibt es einige Gebiete mit einer erhöhten Anzahl an hohen Objekten. Interessanterweise weisen Objekte im deutschen Teilgebiet trotz des relativ flachen Geländes im Gegensatz zu bergigerem Gelände eine vergleichsweise große effektive Höhe auf. Dieses Phänomen kann auf das hügelige Gelände im deutschen Teilgebiet zurückgeführt werden. In komplexem Gelände, in dem Berge die Landschaft dominieren, ist die mittlere Höhe auf einer Fläche von 1 km² relativ hoch. Umgekehrt ist die mittlere Höhe in hügeligem Gelände relativ niedrig, wodurch Hügel deutlich über der mittleren Höhe liegen.

6.2 Methoden

Zunächst wird die Beziehung zwischen Aufwärtsblitzereignissen und der großräumigeren Meteorologie mithilfe von Random Forests analysiert, indem direkte Aufwärtsblitzmessungen vom Gaisbergturm mit meteorologischen Reanalysedaten verknüpft werden. Der

Gaisbergturm ist der einzige Ort im Untersuchungsgebiet, an dem alle Arten von Aufwärtsblitzen gemessen werden. Die Random Forest Modelle werden anschließend auf das Untersuchungsgebiet angewendet und mit Blitzen ausgewertet, die vom EUCLID Blitzmessnetz an hohen Objekten erfasst wurden.

6.2.1 Modellerstellung auf Basis der Daten des Gaisbergturms

Um die Daten einer meteorologischen Reanalyse mit dem Auftreten von Aufwärtsblitzen am Gaisbergturm zu verknüpfen, verwendet diese Studie Random Forests, eine flexible Technik des maschinellen Lernens, mit der nichtlineare Effekte berücksichtigt werden können.

Ob am Gaisberg Tower ein Aufwärtsblitz auftritt oder nicht, ist ein binäres Klassifizierungsproblem. Für dieses Klassifizierungsproblem verwendet diese Studie 35 großräumige meteorologische Variablen als Prädiktoren gewählt. Jede der meteorologischen Variablen wird räumlich-zeitlich zu einer Aufwärtsblitz-Beobachtung am Gaisberg Tower interpoliert.

Der Algorithmus erstellt Entscheidungsbäume, indem er die Verbindung zwischen dem binären Ereignis und jeder Prädiktorvariable durch Permutationstests (auch als bedingte Inferenz bezeichnet) bewertet. In jedem rekursiven Schritt der Baumkonstruktion wird die Prädiktorvariable ausgewählt, die die höchste (signifikanteste) Assoziation mit dem binären Ereignis aufweist. Dieses Aufteilungsverfahren wird rekursiv angewendet, bis ein vordefiniertes Abbruchkriterium erreicht ist.

In der letzten Phase aggregiert der Random Forest Vorhersagen aus diesem Ensemble von Entscheidungsbäumen und verbessert dadurch die Vorhersagestabilität und -leistung.

(Aufwärts)blitze sind lokal sehr selten, d.h. es gibt viel mehr Zeiten ohne als mit Blitzen. Um trotzdem die Random Forest Modelle trainieren zu können, wurden an ausgeglichener Datensatz mit gleich vielen Zeiten ohne Aufwärtsblitze wie Zeiten mit Aufwärtsblitzen verwendet. Deswegen werden die berechneten Wahrscheinlichkeiten als "bedingte Wahrscheinlichkeit" bezeichnet (z.B. in Abb. 4.1). Um die Robustheit der Ergebnisse zu erhöhen, wird nicht nur ein Random Forest Modell, sondern 10 verwendet. Jedes dieser Random-Forest-Modelle besteht aus den 549 Aufwärtsblitz-Beobachtungen, die mit der großräumigeren meteorologischen Umgebung verbunden sind, und 549 zufällig ausgewählten Nicht-Aufwärtsblitz-Situationen. Die in dieser Studie gezeigten Ergebnisse sind der Median dieser 10 Random Forests.

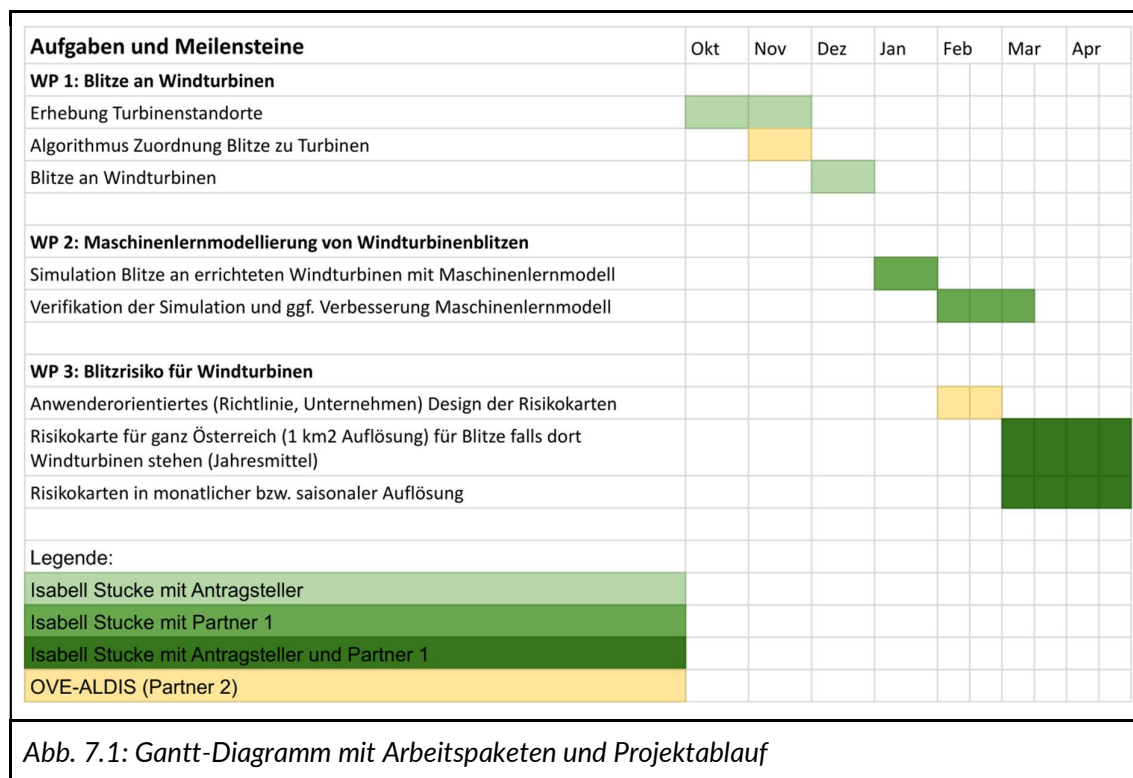
6.2.2 Übertragung der Gaisberg-Modellergebnisse auf das Untersuchungsgebiet

Frühere Studien der Autoren haben gezeigt, dass die auf dem Gaisbergturm trainierten Random-Forest-Modelle eine hohe Güte haben, wenn sie mit zurückgehaltenen Daten des Gaisbergturms oder auf einem anderen Turm, dem Säntisturm in der Schweiz, getestet werden. In dieser Studie werden die Ergebnisse des Gaisbergturms auf eine Vielzahl topografischer Umgebungen übertragen, von flachem über hügeliges bis hin zu komplexem Gelände. Das am Turm trainierte Random-Forest-Modell berechnet die bedingte Wahrscheinlichkeit von Aufwärtsblitz in Rasterzellen von 1 km² und 1 Stunde aus den großräumigen meteorologischen Reanalysedaten. Wie gut die resultierenden Modelle sind,

wird durch einen Vergleich der vorhergesagten bedingten Wahrscheinlichkeiten mit per Blitzmessnetz beobachteten Blitzen an hohen Objekten, wie in Abschnitt 6.1.3 beschrieben, beantwortet .

7 Arbeits- und Zeitplan

Die Abb. 7.1 stellt die **Arbeitspakete** und ihre ungefähre **zeitliche Abfolge** vor.



8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Die Disseminierungsaktivitäten bedienen 3 Ebenen:

1. Publikation in begutachteter Fachzeitschrift: Ende April wurde bei *Earth and Space Science* ein Manuskript eingereicht, das sich beim Schreiben des Endberichts noch in Begutachtung befindet:

Isabell Stucke, Deborah Morgenstern, Gerhard Diendorfer, et al. Spatio-seasonal risk assessment of upward lightning at tall objects using meteorological reanalysis data. ESS Open Archive . April 16, 2024.

[DOI: 10.22541/essoar.171322767.78278045/v1](https://doi.org/10.22541/essoar.171322767.78278045/v1)

2. Institutshomepage: <https://www.uibk.ac.at/en/acinn/research/atmospheric-dynamics/projects/lightning-risk-for-wind-power/>

3. Ergebnisse: Risikokarten und -daten am Datahub der Geosphere Austria
https://data.hub.geosphere.at/dataset/upward_lightning_risk bzw. mit dem
DOI: <https://doi.org/10.60669/egt6-pp88>

Diese Projektbeschreibung wurde von der Fördernehmerin/dem Fördernehmer erstellt. Für die Richtigkeit, VoBlitzortungssystemtändigkeit und Aktualität der Inhalte sowie die barrierefreie Gestaltung der Projektbeschreibung, übernimmt der Klima- und Energiefonds keine Haftung.

Die Fördernehmerin/der Fördernehmer erklärt mit Übermittlung der Projektbeschreibung ausdrücklich über die Rechte am bereitgestellten Bildmaterial frei zu verfügen und dem Klima- und Energiefonds das unentgeltliche, nicht exklusive, zeitlich und örtlich unbeschränkte sowie unwiderrufliche Recht einräumen zu können, das Bildmaterial auf jede bekannte und zukünftig bekanntwerdende Verwertungsart zu nutzen. Für den Fall einer Inanspruchnahme des Klima- und Energiefonds durch Dritte, die die Rechthinhaberschaft am Bildmaterial behaupten, verpflichtet sich die Fördernehmerin/der Fördernehmer den Klima- und Energiefonds vollumfänglich schad- und klaglos zu halten.