Waldbrand-Dokumentation und Analyse von durch Blitzschlag ausgelösten Waldbränden als Beitrag für ein integriertes System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr in Österreich

Mortimer M. Müller

Kumulative Dissertation für die Erfüllung der Voraussetzungen
zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. nat. techn.)

Betreuer: Ao.Univ.Prof. Dr. Harald Vacik

vorgelegt am

Institut für Waldbau
Department für Wald- und Bodenwissenschaften
Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien



Wien, Februar 2021

Danksagung

Es gibt mehrere Menschen, denen ich für ihre Hilfe und Unterstützung in den letzten Monaten und Jahren danken will. Eine Dissertation ist keine Angelegenheit, die nebenbei erledigt werden kann. Sie hat nicht nur Einfluss auf das eigene Leben, sondern auch auf das von guten Freunden und engen Verwandten. Alle hier angeführten Personen haben maßgeblich dazu beigetragen, dass ich nach einer schieren Odyssee (und zahlreichen Semestern mehr als gedacht) mein Doktoratsstudium doch noch abschließen konnte.

Zunächst möchte ich Sandra Almstädter aufrichtig für all ihre Geduld, das Mitgefühl, Verständnis, die Toleranz und nicht zuletzt ihre Liebe danken, die sie mir immer – auch in schwierigen Zeiten – entgegengebracht hat. Ein herzliches Dankeschön ergeht an meinen Betreuer, Prof. Harald Vacik, der mich trotz aller Widrigkeiten stets zurück in die „richtigen Bahnen“ gelenkt hat. Speziellen Dank schulde ich meiner Großmutter Eva Müller. Sie war schon vor vielen Jahren die treibende Kraft, die mich an die BOKU geführt hat und auch jetzt sehr dahinter, dass ich meine Dissertation abschließe – um dieses freudige Ereignis noch erleben zu können, wie sie es ausgedrückt hat. Ebenso möchte ich hier meinen Eltern Karin und Martin Müller danken, die mich mit erwartungsvoller Ruhe, elterlicher Liebe und immer dem vollsten Zuspruch unterstützt haben. Daneben danke ich Teresa Biedermann für ihre Motivation und Seelenfreundschaft in einer für mich schwierigen Zeit – mögen alle ihre Wünsche in Erfüllung gehen. Patrick Cipot, Gergö Dioszegi und Georg Kaiser gilt mein Dank für die rasche Erledigung meiner (manchmal vielleicht überbordenden) Bitten und Korrekturansinnen. Zuletzt danke ich den Mitgliedern meines Beratungsteams, Dr. Marco Conedera, Dr. Gerhard Diendorfer, Prof. Herbert Formayer und Prof. Hartmut Gossow für ihre Unterstützung.

Zum Abschluss eine Erinnerung an mich selbst; aber auch an all jene, die diese Zeilen lesen: Egal, was das Leben bringt, egal, mit welchen Hindernissen und Herausforderungen man konfrontiert wird – niemals sollte man das aus den Augen verlieren, was einem am meisten bedeutet, nie vergessen, dass es die Hoffnungen und Träume sind, die uns dazu bringen, etwas zu schaffen.

Abstract

The worldwide increase in large-scale and intensive wildfires as a result of climate change and human activities represents a major challenge for the future. The central and northern parts of Europe, including the Alpine region, are currently exposed to a comparatively low risk. However, an increase in the number, extent and intensity of forest fires is assumed here as well, resulting in the need for an integrated forest fire management. Elements of this fire management comprise forest fire prevention and preparation, firefighting and post-fire management. The knowledge of the current and past fire regime is the basis for all fire related research work. This requires a complete documentation of forest fire events as far back as possible. Besides the direct and indirect influence of man, lightning strikes are the only relevant cause of forest fires in Europe. Investigations on lightning-induced fires are rare in Europe and have not been available in Austria until now. An essential element of forest fire prevention are integrated fire risk assessment systems, which consider not only meteorological conditions but also natural and anthropogenic causes, the vegetation, topography and potential threats to settlements and infrastructures.

The present work has focused on the above-mentioned aspects of forest fire management in the Alpine country of Austria. As there has not been a central and comprehensive forest fire database in Austria so far, the documentation of forest fire events was initiated in 2008 within the framework of the Austrian Forest Fire Research Initiative (AFFRI) at the Institute of Silviculture at BOKU Vienna. To date, about 7000 wildfires have been recorded and described, with an almost complete documentation of major forest fires since 1993. For the first time, this database allowed a description of the Austrian forest fire regime.

The second part of this PhD thesis dealt with the role of forest fires caused by lightnings. It was found that 15 % of all annual forest fires in Austria are caused by lightning strikes. The spatial and temporal occurrence of lightning caused fires in terms of annual and diurnal variation, topographic parameters, and vegetation types affected was studied and evaluated. Lightning-induced forest fires are most common during the summer months and late afternoon hours. Steep southern slopes at altitudes around 1000 m above sea level with coniferous forests are particularly endangered. An evaluation of the lightning characteristics showed that positively charged cloud-to-ground lightnings ignited relatively more fires than negative discharges. Higher values of meteorological fire weather indices correlated with a higher chance of lightning fire ignition, which underscores the importance of local drought effects.

A spatial high-resolution (100 x 100 m) map of the lightning fire hazard was one of the datasets used for the development of the prototype of an Integrated Fire Danger assessment System (IFDS) for Austria. The meteorological conditions were represented by fire weather indices calculated on a daily basis. Data layers on the human influence on fire ignition and a high-resolution map of the vegetation types were used from other projects and master theses at the Institute of Silviculture and were embedded in the prototype. The topography was considered using a high-resolution terrain model. Different

weighting approaches of the used data layers led to different variants. It was shown that some of these variants performed significantly better than forest fire indices based solely on meteorological parameters.

Keywords: Forest fires, European Alps, wildfires, database, lightning fires, forest fire danger, risk modelling, forest fire management, climate change

Zusammenfassung

Die weltweite Zunahme von großflächigen und intensiven Vegetationsbränden als Folge des Klimawandels und menschlicher Aktivitäten stellt eine Herausforderung für die Zukunft dar. Die zentralen und nördlichen Teile Europas, darunter auch die Alpenregion, sind derzeit einer vergleichsweise geringen Gefährdung ausgesetzt. Allerdings ist auch hier eine Zunahme der Anzahl, Ausdehnung und Intensität von Waldbränden anzunehmen, weshalb ein integriertes Waldbrandmanagement erforderlich ist. Elemente dieses Waldbrandmanagements umfassen die Waldbrandprävention und Vorbereitung, die Brandbekämpfung sowie Renaturierungsmaßnahmen nach Waldbränden. Das Wissen über das aktuelle und vergangene Waldbrandregime ist die Grundlage für sämtliche Forschungsarbeiten zur Thematik Waldbrand. Hierzu bedarf es einer vollständigen und möglichst lang zurückreichenden Dokumentation von Waldbrandereignissen. Neben dem direkten und indirekten Einfluss des Menschen stellen Blitzschläge die einzig relevante Ursache für Waldbrände in Europa dar. Untersuchungen zu Blitzschlagbränden sind in Europa selten und wurden in Österreich bislang nicht durchgeführt. Als wesentliches Element der Waldbrandprävention werden integrierte Systeme zur Abschätzung des Waldbrandrisikos gefordert, welche neben den meteorologischen Bedingungen auch natürliche und anthropogene Ursachen, die Vegetation, Topografie sowie die potenzielle Gefährdung von Siedlungen und Infrastrukturen berücksichtigen.

Die vorliegende Arbeit hat sich auf die oben angeführten Teilaspekte des Waldbrandmanagements im Alpenland Österreich fokussiert. Da es in Österreich bislang keine zentrale und umfassende Waldbrand-Datenbank gegeben hat, wurde 2008 im Rahmen der Austrian Forest Fire Research Initiative (AFFRI) die Erhebung von Waldbränden am Institut für Waldbau der BOKU Wien initiiert. Bis heute konnten rund 7000 Vegetationsbrände aufgearbeitet und beschrieben werden, mit einer nahezu vollständigen Dokumentation von größeren Waldbrandereignissen seit dem Jahr 1993, wodurch erstmals eine Beschreibung des österreichischen Waldbrandregimes möglich war.

Der zweite Teil dieser Arbeit setzte sich mit der Rolle von durch Blitzschlag ausgelösten Waldbränden auseinander. Es konnte festgestellt werden, dass 15 % aller jährlichen Waldbrände in Österreich auf Blitzschläge zurückzuführen sind. Das räumliche und zeitliche Auftreten von Blitzschlagbränden hinsichtlich Jahres- und Tagesgang, topografischer Parameter und betroffener Vegetationstypen wurde untersucht und ausgewertet. Durch Blitzschläge ausgelöste Waldbrände sind in den Sommermonaten und späten Nachmittagsstunden am häufigsten. Besonders gefährdet sind steile Südhänge in Lagen um 1000 m Seehöhe mit Nadelwaldbeständen. Bei der Auswertung der Blitzschlagcharakteristiken zeigte sich, dass positiv geladene Wolke-Erde-Blitze relativ gesehen mehr Brände entzünden als negative Entladungen. Höhere Werte meteorologischer Waldbrandindizes korrelierten mit einem größeren Potenzial für die Entstehung von Blitzschlagbränden, was die Bedeutung lokaler Trockenheit unterstreicht.

Eine räumlich hochaufgelöste (100 x 100 m) Karte der Gefährdung durch Blitzschlagbrände war eine der Datengrundlagen für die Erstellung des Prototyps eines integrierten Systems zur Abschätzung

der Waldbrandgefahr (IFDS) in Österreich. Die meteorologischen Bedingungen wurden über tagesaktuell berechnete Waldbrandindizes in das System integriert. Daten zum menschlichen Einfluss auf die Waldbrandentstehung sowie eine räumlich hochaufgelöste Karte der Vegetationstypen in Österreich konnten aus anderen Projekten und Masterarbeiten am Institut für Waldbau verwendet und in den Prototyp eingebettet werden. Die Topografie wurde über ein hochaufgelöstes Geländemodell berücksichtigt. Unterschiedliche Gewichtungen der verwendeten Datenebenen führten zu verschiedenen Varianten. Es konnte gezeigt werden, dass einige dieser Varianten eine signifikant bessere Leistung erbrachten, als ausschließlich auf meteorologische Parameter gestützte Waldbrandindizes.

Schlüsselwörter: Waldbrände, Alpen, Datenbank, Blitzschlagbrände, Waldbrandgefahr, Risikomodellierung, Waldbrandmanagement, Klimawandel

Inhaltsverzeichnis

Danksagung 2

Abstract 3

Zusammenfassung 5

Inhaltsverzeichnis 7

Abbildungsverzeichnis 9

Tabellenverzeichnis 10

1. Einleitung 11

    1.1. Arbeitsziele und Hypothesen 15

    1.2. Begriffe 18

    1.3. Abkürzungen 19

2. Material und Methoden 20

    2.1. Waldbrand-Dokumentation 20

        2.1.1. Erhebungsmethoden 20

        2.1.2. Metadaten und Qualitätssicherung 22

        2.1.3. Online-Datenbank 26

    2.2. Blitzschlagbrände 28

        2.2.1. ALDIS-Daten 28

        2.2.2. Verifizierung von Blitzschlagbränden 28

        2.2.3. Analyse von durch Blitzschlag ausgelösten Waldbränden 29

        2.2.4. Charakteristik der waldbrandauslösenden Blitzschläge 29

        2.2.5. Gefährdungskarte Blitzschlagbrände 31

    2.3. Integriertes System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr 31

        2.3.1. Meteorologische Daten 32

        2.3.2. Menschlicher Einfluss 32

        2.3.3. Vegetation 33

        2.3.4. Topografie 33

        2.3.5. Gewichtung und Varianten 34

        2.3.6. Validierung 35

3. Ergebnisse 37
3.1. Österreichisches Waldbrandregime 37
3.1.1. Zeitliche und örtliche Verteilung 37
3.1.2. Ursachen 40
3.1.3. Vegetation, Brandflächen und Brandintensitäten 41
3.2. Blitzschlagbrände 42
3.2.1. Verifizierung von Blitzschlagbränden 42
3.2.2. Analyse von durch Blitzschlag ausgelösten Waldbränden 42
3.2.3. Charakteristik der waldbrandauslösenden Blitzschläge 43
3.2.4. Gefährdungskarte Blitzschlagbrände 43
3.3. Integriertes System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr 44
3.3.1. IFDS-Prototyp 44
3.3.2. Validierung 45
4. Diskussion 47
4.1. Österreichisches Waldbrandregime 47
4.2. Waldbrand-Dokumentation 49
4.3. Analyse der Blitzschlagbrände 51
4.4. Integriertes System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr 54
5. Schlussfolgerungen 58
Quellenangaben 60
Anhänge 71

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Für die europäischen Alpen entwickeltes Konzept für ein integriertes Waldbrandmanagement 12

Abbildung 2: Integriertes System zur Abschätzung des Waldbrandrisikos (IFRS) 13

Abbildung 3: Intensitätsmatrizen für Waldbrandereignisse in Österreich unter Berücksichtigung von Brandfläche, Brandart sowie den Brandauswirkungen 24

Abbildung 4: Screenshot des internen Web-GIS der Waldbrand-Datenbank 26

Abbildung 5: Screenshot des externen Web-GIS der Waldbrand-Datenbank 27

Abbildung 6: Erster Teil des expertenbasierten Entscheidungsbaums sowie Beispiel einer Beurteilungsmatrix für die Verifizierung von Blitzschlagbränden in Österreich 29

Abbildung 7: Prototyp eines integrierten Systems zur Abschätzung der Waldbrandgefahr (IFDS) 31

Abbildung 8: Anzahl der Waldbrände in Österreich von 1993 bis 2020 und Anteil der anthropogen ausgelösten Feuer sowie der Blitzschlagbrände 37

Abbildung 9: Verteilung der Anzahl der Waldbrände in Österreich nach Monaten und Bundesländern (1993 bis 2020) [n = 4088] 38

Abbildung 10: Verteilung der Anzahl der Waldbrände in Österreich von 1993 bis 2020 anhand des Meldezeitpunkts, getrennt in anthropogen und durch Blitzschlag ausgelöste Feuer [n = 3354] 38

Abbildung 11: Verteilung der Anzahl der Waldbrände in Österreich von 1993 bis 2020 nach Wochentagen sowie getrennt in anthropogen und durch Blitzschlag ausgelöste Feuer [n = 4088] 39

Abbildung 12: Verteilung der Anzahl der Waldbrände in Österreich von 1993 bis 2020 anhand der Seehöhe und getrennt in anthropogen und durch Blitzschlag ausgelöste Brände [n = 4088] 39

Abbildung 13: Verteilung der Anzahl der Waldbrände in Österreich von 1993 bis 2020 anhand der Exposition sowie der Hangneigung [n = 4088] 40

Abbildung 14: Anteil der anthropogen und durch Blitzschlag ausgelösten Waldbrände von 1993 bis 2020 in Österreich sowie Verteilung der anthropogenen Ursachen [n = 3385] 41

Abbildung 15: Gefährdungskarte für Blitzschlagbrände in Österreich 44

Abbildung 16: Screenshot des IFDS-Prototyps auf waldbrand.at 45

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht der erhobenen Informationen und Parameter für die österreichische Waldbrand-Datenbank am Institut für Waldbau, BOKU Wien 23

Tabelle 2: Beispiel einer Gewichtungsformel des IFDS-Prototyps 34

Tabelle 3: Fünfstufige Gefahrenskala des IFDS-Prototyps als kombinierter Ansatz von Entstehungsgefahr und Brandverhalten 35

1. Einleitung

Seit einigen Jahren häufen sich weltweit außergewöhnlich intensive Vegetationsbrandsaisonen. Die jüngsten Waldbrandkatastrophen in Kalifornien, Brasilien, Sibirien, Australien, aber auch in europäischen Staaten wie Griechenland oder Portugal zeigen, dass die klimawandelbedingte Temperaturerhöhung in Verbindung mit längeren Trockenperioden die Gefahr großflächiger und zerstörerischer Wald- und Buschbrände erhöht (Dowdy et al. 2019; Jolly et al. 2015; Westerling et al. 2011; Zumbrunnen et al. 2009). Neben veränderten Wetter- und Klimabedingungen stellt auch der menschliche Einfluss einen wesentlichen Treiber des Waldbrandregimes dar. Verstärkte Freizeitnutzung und damit mehr potenzielle Zündquellen, die Aufgabe ländlicher Gebiete in Verbindung mit einer Erhöhung der Brennstoffmengen sowie Brandstiftung und Brandrodung sind international relevante Faktoren, welche das Auftreten von Waldbränden determinieren (Conedera et al. 2018; Dupire et. al. 2019; Pezzatti et al. 2013; Vacchiano et al. 2018). Daneben wurden und werden in zahlreichen Ländern Siedlungen, Gebäude und kritische Infrastrukturen am Rand oder direkt in der Vegetationszone errichtet. Das sogenannte *Wildland-Urban-Interface* (WUI) ist die Zone mit einem besonders hohen Brandrisiko, da in diesem Bereich große Brennstoffmengen vorhanden sind, Wald- und Buschbrände häufig auftreten und diese leicht auf besiedeltes Gebiet übergreifen können (Bento-Gonçalves und Vieira 2020; Chas-Amil et al. 2020; Modugno et al. 2016; Parisien et al. 2020).

Auch die europäischen Alpen sind vermehrt von intensiven Waldbrandsaisonen betroffen. Speziell in den Süd-, aber auch Zentralalpen ist in den kommenden Jahrzehnten mit einem Anstieg der Tage mit hoher Waldbrandgefahr zu rechnen (Wastl et al. 2012). Neben der erwarteten Temperaturzunahme und der Abnahme von Niederschlägen speziell in den Sommermonaten (Gobiet et al. 2014; Trnka et al. 2016), wird eine Intensivierung des Waldbrandregimes durch die steigende Erholungsnutzung des Waldes, Landflucht sowie geänderte Bewirtschaftungsmethoden erwartet (Arndt et al. 2013; Moreira et al. 2011; Pezzatti et al. 2013; Seidl et al. 2014; Vacchiano et al. 2018; Valese et al. 2014). Ebenso gewinnt in Mitteleuropa das WUI an Bedeutung (Conedera et al. 2015; Extra-Blatt 2018). Waldbrände in den Alpen sind zwar im internationalen Vergleich meist kleinflächig, sie treten jedoch vermehrt in Schutzwäldern auf und können damit zu einer direkten oder indirekten Gefährdung von Siedlungen und Infrastrukturen führen – etwa durch nachfolgende Naturgefahren wie Steinschlag, Muren oder Lawinen (Conedera et al. 2003; Maringer et al. 2016). Im Extremfall ist speziell auf Carbonatgestein mit geringmächtigem Mineralboden eine vollständige Erosion von Berghängen möglich (Sass et al. 2012; Sass 2019). Die Waldbrandbekämpfung und Renaturierungsmaßnahmen nach Waldbränden sind durch das montane und oft schwer zugängliche Gelände teuer und aufwendig. Die Kosten für einen einzelnen Waldbrand können mehrere Millionen Euro betragen – etwa im Fall des Großbrandes bei Absam, Tirol, im Jahr 2014 mit kolportieren Aufwendungen in der Höhe von drei Millionen Euro (Brenner et al. 2015).

Die wichtigste Ursache für Wald- und Buschbrände in Europa ist der Mensch, wobei bis zu 97 % aller Brände anthropogene Auslöser haben (Ganteaume et al. 2013). Im Alpenraum werden rund 90 %

aller Waldbrände direkt oder indirekt durch den Menschen ausgelöst (Müller et al. 2020a). Die relevanteste natürliche Ursache für Vegetationsbrände in Europa und weltweit sind Blitzschläge (Moris et al. 2020; Scott et al. 2014). Ein Blitzschlagbrand ist dabei das Resultat von elektrostatischen Entladungen im Bereich einer Gewitterwolke. Die Relevanz bzw. der Anteil von Blitzschlagbränden sind regional sehr unterschiedlich. In Südeuropa werden nur etwa 5 % aller Vegetationsbrände durch Gewitteraktivität ausgelöst (Ganteaume et al. 2013). Hingegen wird für einige Regionen der Alpen ein Jahresanteil von über 10 % angenommen, wobei in den Sommermonaten rund 30 % aller Waldbrände auf Blitzschläge zurückzuführen sind (Conedera et al. 2006; Vacchiano et al. 2018; Valese 2007). Andere mögliche natürliche Ursachen (bspw. vulkanische Aktivität) sind in Mitteleuropa nicht relevant, weshalb Waldbrände in den Alpen entweder durch Blitzschläge oder direkt/indirekt durch den Menschen ausgelöst werden.

Ein integriertes Waldbrandmanagement ist das wesentliche Element für den Umgang mit einem sich intensivierenden Waldbrandregime (Abbildung 1). Neben waldbaulichen und politischen Maßnahmen, der Waldbrandbekämpfung und Renaturierungsmaßnahmen nach Waldbränden, ist die Abschätzung der aktuellen Waldbrandgefahr eine der wichtigsten Komponenten der kurzfristigen Waldbrandprävention (Müller et al. 2020a).

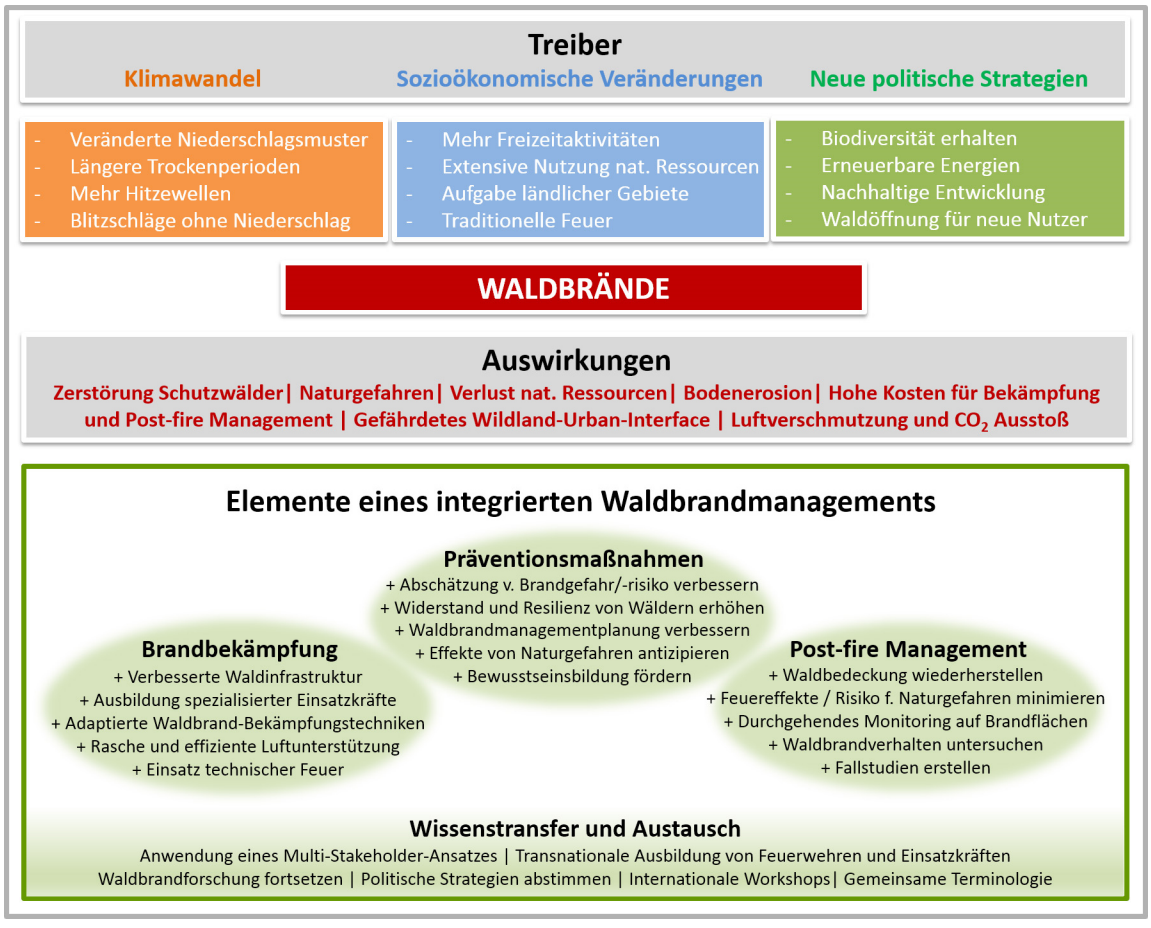


Abbildung 1: Für die europäischen Alpen entwickeltes Konzept für ein integriertes Waldbrandmanagement. Quelle: Müller et al. 2020a.

Abschätzungen der Waldbrandgefahr in Europa und weltweit beruhen meist allein auf meteorologischen Parametern, die oft über den kanadischen Waldbrand-Wetterindex (engl. *Canadian Fire Weather Index*, CFWI, häufig nur FWI, vgl. Van Wagner 1987), nachfolgend als *Waldbrandindex* bezeichnet, abgebildet werden. Das kritische Element für die Entstehung von Waldbränden ist dabei die Streufeuchtigkeit (Schunk et al. 2017), respektive der Wassergehalt des Auflagehorizontes, bestehend aus Nadeln, Laub, abgestorbenem Gras oder Moos.

Neben der Entstehungsgefahr sind das Brandverhalten, die Auswirkungen sowie mögliche Schäden von entscheidender Bedeutung. Daher werden zunehmend integrierte Systeme angestrebt, bei denen abgesehen von den meteorologischen Bedingungen auch die Vegetation, Topografie, potenzielle Ursachen sowie die Vulnerabilität von Siedlungsräumen und Infrastrukturen berücksichtigt werden (Chuvieco et al. 2010; Chuvieco et al. 2014; San-Miguel-Ayanz et al. 2018). Als Grundlage für die Identifizierung sekundärer Naturgefahren kann es relevant sein, auch die erwarteten Schäden an der Vegetation zu evaluieren (Dupire et al. 2019). Bei Berücksichtigung aller oben angeführten Faktoren wird oft der Begriff *Waldbrandrisiko* verwendet (Chuvieco et al. 2010; Goldammer et al. 2017). Zuletzt benötigt es für die Bewertung der Waldbrandgefahr, des Waldbrandrisikos und für das Waldbrandmanagement eine umfassende und zeitlich möglichst lang zurückreichende Erfassung und Aufarbeitung von Waldbrandereignissen (Müller et al. 2020a; Pezzatti et al. 2019). In Abbildung 2 ist ein integriertes System zur Abschätzung des Waldbrandrisikos (engl. *Integrated Fire Risk assessment System*, IFRS) mit sämtlichen relevanten Parametern dargestellt.

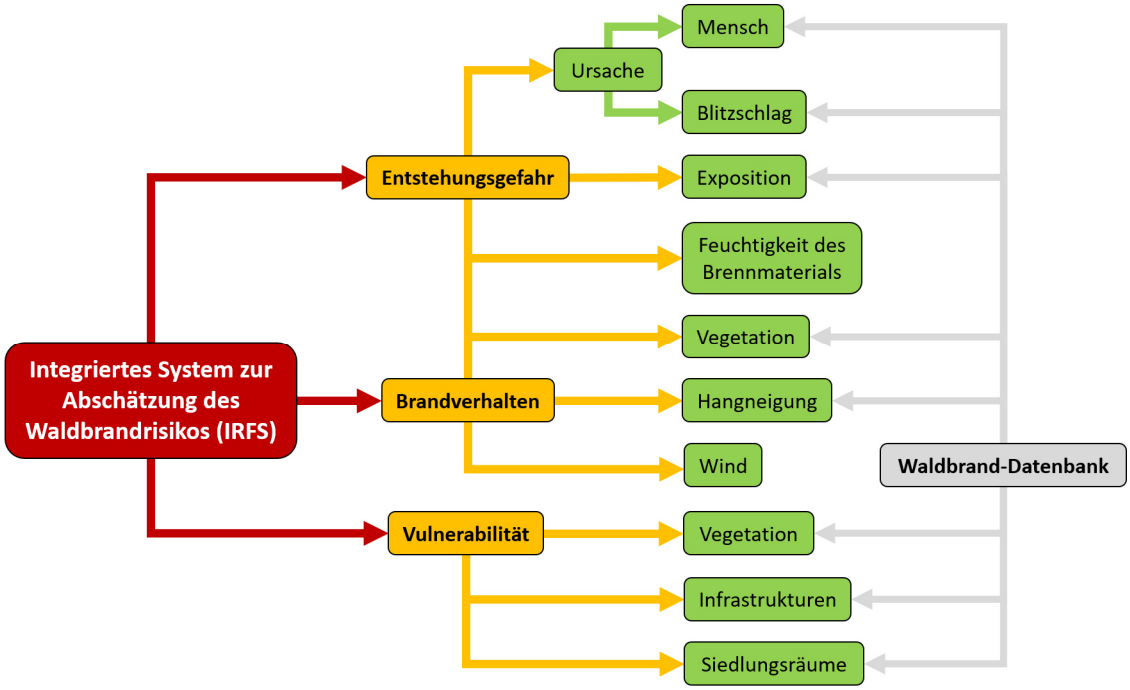


Abbildung 2: Integriertes System zur Abschätzung des Waldbrandrisikos (IFRS). Adaptiert nach San-Miguel-Ayanz et al. 2018.

Im Alpenland Österreich wurde der Waldbrand-Dokumentation, Waldbrandforschung und dem Waldbrandmanagement bis vor wenigen Jahren kaum Beachtung geschenkt. Mit dem Beginn der *Austrian Forest Fire Research Initiative* (AFFRI) im Jahr 2008 am Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien, sind erste Versuche unternommen worden, die vorhandenen Wissenslücken zu schließen. Im Rahmen von AFFRI und mehreren Folgeprojekten, darunter ALP FFIRS (*ALPine Forest FIRe warning System*), FIRIA (*FIre RIsk and vulnerability of Austrian forests under the impact of climate change*), AFFRI 2 (*Austrian Forest Fire Research Initiative II*) sowie CONFIRM (*COpernicus data for Novel high-resolution wildFIRe danger services in Mountain regions*) wurden Forschungsfragen zu den Charakteristiken von Waldbränden und zur Waldbrandvorbeugung behandelt, womit die wissenschaftlichen Grundlagen der vorliegenden Dissertation geschaffen werden konnten.

Eine wesentliche Aufgabe seit dem Start von AFFRI und Grundlage der in Kapitel 1.1 formulierten Arbeitsziele sowie Hypothesen ist der Aufbau und die Wartung einer umfassenden und homogenisierten Waldbrand-Datenbank. In der Vergangenheit gab es in Österreich keine vollständige und nachhaltige Dokumentation von Waldbränden. Um den Zweiten Weltkrieg unternahm Walter Grabherr Anstrengungen zur Aufarbeitung großflächiger Waldbrände (z. B. Grabherr 1936). Danach war das österreichische Innenministerium mit der Erhebung von Waldbrandereignissen betraut. Die gesammelten Daten sind heute nur noch als monatliche Statistiken verfügbar. Mit dem Beginn der 1990er Jahre wurde die zentrale Dokumentation von Waldbränden in Österreich eingestellt. Zusammenfassungen der Folgejahre sind in der Datenbank Waldschädigender Faktoren (DWF) des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW) in Wien erhalten geblieben. Neue Initiativen zur Sammlung von Brandereignissen erfolgten nach dem Dürresommer 2003 (Gossow et al. 2009). Seit 2008 werden am Institut für Waldbau der BOKU Wien Waldbrände umfassend dokumentiert. Im Gegensatz zu anderen mitteleuropäischen Ländern wie der Schweiz (Pezzatti et al. 2019) gibt es in Österreich derzeit keinen behördlichen Auftrag zur Erfassung von Waldbränden. Daher stellt die Waldbrand-Datenbank an der BOKU Wien die einzige und umfangreichste Dokumentation von Waldbrandereignissen in Österreich dar.

Seit dem Beginn von AFFRI wird der Frage der Waldbrandentstehung – und hier speziell der Ursachenforschung – besondere Bedeutung beigemessen. Es konnte gezeigt werden, dass in Österreich, ähnlich wie in seinen Nachbarländern (Ganteaume et al. 2013; Müller et al. 2020a), der Mensch als Auslöser von Waldbränden eine wichtige Rolle spielt (Arndt et al. 2013). Daneben wird durch Blitzschlag verursachten Waldbränden ein relevanter und in den Sommermonaten entscheidender Anteil in Österreich zugesprochen.

Ein weiterer Schwerpunkt der österreichischen Waldbrandforschung liegt in der Verbesserung der Vorhersage der aktuellen Waldbrandgefahr. Derzeit erfolgt die nationale Gefahrenabschätzung in Österreich durch die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) auf Basis des kanadischen FWI, wobei die Berechnung über den von der ZAMG entwickelten INCA-Ansatz (*Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis*) erfolgt. In die Kalkulation fließen ausschließlich meteo-

rologische Eingangsdaten ein und die Parametrisierung des FWI ist für kanadische Verhältnisse optimiert. Ebenso ist die räumliche Auflösung auf 1 x 1 km begrenzt, wodurch alpine Berg-Tal-Systeme kaum abgebildet werden können. Die Verwendung des FWI für alpine Verhältnisse ist mit verschiedenen Einschränkungen verbunden und liefert speziell in der kalten Jahreszeit, aber auch unter windigen Bedingungen, nicht zufriedenstellende Ergebnisse (Müller et al. 2020a). Daher wird ein integriertes, räumlich hochaufgelöstes System angestrebt, ähnlich wie von San-Miguel-Ayanz et al. (2018) vorgeschlagen.

1.1. Arbeitsziele und Hypothesen

Die vorliegende Arbeit konzentriert sich auf mehrere Teilaspekte eines integrierten Waldbrandmanagements im Alpenland Österreich. Folgende Ziele wurden für diese Dissertation formuliert:

1) Umfassende Erhebung, Aufarbeitung und Auswertung von vergangenen Waldbrandereignissen in Österreich zur Beschreibung des Waldbrandregimes.
2) Untersuchung von Blitzschlagbränden in Österreich mit den Teilzielen
    a. Verifizierung von Blitzschlagbränden.
    b. Analyse von durch Blitzschlag ausgelösten Waldbränden.
    c. Charakterisierung der waldbrandauslösenden Blitzschläge.
    d. Erstellung einer Gefährdungskarte für Blitzschlagbrände.
3) Konzipierung, Entwicklung und Testlauf des Prototyps eines integrierten Systems zur Abschätzung der Waldbrandgefahr in Österreich.

ad (1) Für eine fundierte Beschreibung des Waldbrandregimes benötigt es eine umfassende Erhebung von Waldbrandereignissen. Damit können Fragen der räumlichen und zeitlichen Verteilung, zur Brandintensität und zur betroffenen Vegetation beantwortet werden. Die Waldbrand-Dokumentation stellt somit die Grundlage sämtlicher weiterführenden Arbeiten und Studien zur Thematik Waldbrand dar. Als Hypothesen wurden festgehalten:

- Es treten jedes Jahr zahlreiche Waldbrände mit Schwerpunkt im Frühjahr und Sommer auf.
- Der Mensch ist Hauptverursacher von Waldbränden in Österreich.
- Besonders häufig werden Waldbrände auf steilen Südhängen mit Nadelwaldbestand in den Nachmittagsstunden verzeichnet.

ad (2) Blitzschläge sind abgesehen von anthropogenen Ursachen die wichtigsten Auslöser von Vegetationsbränden weltweit (Moris et al. 2020). Auch für zahlreiche Waldbrände in Österreich wird Blitzschlag als Ursache angenommen. Eine Verifizierung und Auswertung von Blitzschlagbränden ist bislang nicht erfolgt. Entsprechende Analysen sind jedoch für die umfassende Beschreibung des österreichischen Waldbrandregimes von Bedeutung. Als Hypothesen wurden formuliert:

- In den Sommermonaten wird ein hoher Anteil an Blitzschlagbränden verzeichnet.
- Die Polarität von Wolke-Erde-Blitzen ist nicht entscheidend für das Auftreten von Blitzschlagbränden.
- Geringere Niederschlagsmengen beeinflussen die Entstehung und Ausbreitung von Blitzschlagbränden.

ad (3) Eine verbesserte Abschätzung der aktuellen Waldbrandgefahr ist ein wesentliches Element der kurzfristigen Waldbrandprävention und Teil eines integrierten Waldbrandmanagements. Das derzeit in Österreich auf nationaler Ebene eingesetzte System kann die Brandgefahr und das Auftreten von Waldbrandereignissen nicht ausreichend abbilden. Deshalb wird ein integriertes System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr erstellt und getestet, wobei zunächst im Rahmen eines Prototyps das Zusammenwirken und die Qualität der unterschiedlichen verwendeten Datensätze geprüft werden sollen. Folgende Hypothesen wurden angenommen:

- Mit den derzeit verfügbaren Daten ist es möglich, ein integriertes System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr mit einer hohen räumlichen Auflösung von 100 x 100 m zu konzipieren und bei täglicher Aktualisierung zu betreiben.
- Dieses System verbessert die Abschätzung des Auftretens von Waldbränden im Vergleich zur alleinigen Verwendung meteorologischer Daten bzw. Waldbrandindizes.
- Das Miteinbeziehen möglicher Ursachen, speziell des Faktors Mensch, optimiert die Vorhersagegüte hinsichtlich des Auftretens von Waldbränden.

Zur Beantwortung der formulierten Hypothesen und zur Erreichung der definierten Ziele wurden verschiedene Forschungstätigkeiten durchgeführt. Die Ergebnisse konnten in zahlreichen wissenschaftlichen und populärwissenschaftlichen Journalen publiziert werden. Für die kumulative Dissertation werden die folgenden fünf SCI-Publikationen herangezogen:

Anhang 1: Vacik H., Arndt N., Arpaci A., Koch V., Müller M.M., Gossow H., 2011. Characterisation of forest fires in Austria. Austrian Journal of Forest Science, 128(1), S. 1-32.

In dieser Arbeit wurde mit Bezug auf das Forschungsziel (1) die räumliche und zeitliche Verteilung von Waldbränden sowie deren Brandursachen zur systematischen Beschreibung des Waldbrandregimes in Österreich untersucht. Für die statistischen Darstellungen wurden die bis dahin durch Mortimer Müller aufgearbeiteten Waldbrandereignisse in Österreich verwendet und ausgewertet. Ebenso wurden durch Mortimer Müller Teile des Textes beigesteuert und die Arbeit korrekturgelesen.

Anhang 2: Müller M.M., Vacik H., Valese E., 2015. Anomalies of the Austrian Forest Fire Regime in Comparison with Other Alpine Countries: A Research Note. Forests, 2015(6), S. 903-913.

In dieser Arbeit wurden mit Bezug auf das Forschungsziel (1) Anomalien im österreichischen Waldbrandregime anhand der österreichischen Waldbrand-Datenbank aufgezeigt und mit anderen Alpenländern verglichen. Damit konnten neue Erkenntnisse zum Waldbrandregime in Österreich gewonnen und mögliche Entwicklungen hinsichtlich intensiverer Waldbrandsaisonen aufgezeigt werden. Mortimer Müller war für den Datenaustausch verantwortlich, führte die Auswertungen durch, steuerte die Waldbranddaten aus Österreich bei und war Hauptverantwortlicher für die textliche Umsetzung.

Anhang 3: Müller M.M., Vacik H., Diendorfer G., Arpaci A., Formayer H., Gossow H., 2013. Analysis of lightning-induced forest fires in Austria. Theoretical and Applied Climatology, 111(1/2), S. 183-193.

Im Rahmen dieser Studie wurde mit Bezug auf das Forschungsziel (2) die Methodik zur Verifizierung von Blitzschlagbränden in Österreich basierend auf der Masterarbeit von Mortimer Müller verfeinert und der verwendete Datensatz ausgeweitet. Daneben fand eine Analyse der Blitzschlagbrände hinsichtlich des zeitlichen und räumlichen Auftretens statt. Die Ergebnisse dienten als Grundlage für die Erstellung einer statischen Gefährdungskarte für Blitzschlagbrände. Mortimer Müller konzipierte die Methodik, steuerte die Waldbranddaten bei, führte die Analysen durch, erstellte die Abbildungen und einen Großteil des Textes.

Anhang 4: Müller M.M., Vacik H., 2017. Characteristics of lightnings igniting forest fires in Austria. Agricultural and Forest Meteorology, 240-241, S. 26-34.

In dieser Arbeit erfolgte mit Bezug auf das Forschungsziel (2) eine Charakterisierung von waldbrandauslösenden Blitzschlägen hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften sowie Untersuchungen zu den meteorologischen Bedingungen am Brandort. Mortimer Müller entwarf die Methodik, steuerte die Waldbranddaten bei, führte die Analysen durch, erstellte die Grafiken und war für die textliche Umsetzung des Artikels verantwortlich.

Anhang 5: Müller M.M., Vilà-Vilardell L., Vacik H., 2020. Towards an integrated forest fire danger assessment system for the European Alps. Ecological Informatics, 60, 101151, ISSN 1574-9541.

In dieser Studie wurde mit Bezug auf das Forschungsziel (3) das am Institut für Waldbau, BOKU Wien, entwickelte integrierte System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr in Österreich methodisch, inhaltlich und technisch beschrieben. Die Leistungsfähigkeit des Systems hinsichtlich der Vorhersagegüte von Waldbränden konnte im Vergleich zu zwei Waldbrandindizes über einen Zeitraum von zwei Jahren validiert werden. Mortimer Müller konzipierte den Prototyp und war Hauptverantwortlicher der Umsetzung, steuerte die Waldbranddaten bei, führte die Analysen durch, erstellte die Abbildungen und einen überwiegenden Teil des Textes.

1.2. Begriffe

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein *Waldbrand* wie folgt definiert:

> *„Ein Waldbrand ist jedes unkontrollierte Feuer, das zumindest teilweise Wald bzw. Waldboden erfasst, unabhängig vom Brandtyp (Schwelbrand, Bodenfeuer, Kronenfeuer), der Ursache, dem Vegetationstyp (auch Grasbrand unterhalb eines Hochwaldes, Feuer auf einer Kahlschlagfläche oder im Windschutzgürtel) sowie der Brandfläche (z. B. auch Wurzelstockbrand oder Brand eines Einzelbaums durch Blitzschlag). Mischformen und unklare Fälle werden als Wald-/Flurbrand erfasst. Hierbei muss wenigstens 10 % der Gesamtbrandfläche Wald betreffen (ab 3 Hektar zumindest 0,3 ha), andernfalls handelt es sich um einen reinen Flurbrand.“*

Hinsichtlich der *Waldbrandtypen* wird zwischen *Schwelbränden* (Glimm-/Humusbrände), *Bodenfeuern* und *Kronenfeuern* unterschieden (Müller und Vacik 2020). Ein Schwelbrand ist gekennzeichnet durch fehlende Flammenentwicklung und sehr langsame Ausbreitung. Bodenfeuer (auch *Lauffeuer* genannt) verbrennen in erster Linie das brennbare Material in Bodennähe. Kronenfeuer erfassen die Baumkronen und treten meist in Verbindung mit Bodenfeuern auf, sie werden in diesem Fall auch als *Vollbrände* bezeichnet. Kronenfeuer können *passiv* sein, wobei nur einzelne Baumkronen Feuer fangen, oder *aktiv*, indem sich die Feuerfront – oft durch starken Wind angetrieben – zwischen den Baumkronen weiter ausbreitet (Cruz et al. 2005).

Die Unterschiede zwischen den Begriffen *Gefahr* (engl. *danger*), *Gefährdung* bzw. *Gefährdungspotenzial* (engl. *hazard*) sowie *Risiko* (engl. *risk*) sind meist klar definiert, allerdings gibt es je nach wissenschaftlicher Disziplin verschiedene Herangehensweisen (Andrecs und Oberndorfer 2008; Ulbig et al. 2010). Darüber hinaus werden diese Ausdrücke im allgemeinen Sprachgebrauch oft synonym oder mit variierender Bedeutung verwendet, was eine Unterscheidung erschwert. In der vorliegenden Arbeit bezeichnet *Gefahr* die dynamisch-meteorologische Entstehungs- und Ausbreitungsgefahr von Waldbränden mit intrinsisch möglichen schädlichen Auswirkungen. *Gefährdung* wird für die statischen Gefährdungskarten der Vegetation, Topografie und der Brandursachen als Ausdruck der potenziellen Auftritts- und Ausbreitungswahrscheinlichkeit bzw. des erwarteten Brandverhaltens verwendet. Der Begriff *Risiko* ist der Vulnerabilität sowie der ganzheitlichen Beschreibung der Aussagekraft eines IFRS vorenthalten.

Die Bezeichnung *Vulnerabilität* (oder Verwundbarkeit) kann je nach Anwendungsfall unterschiedliche Bedeutungen haben. In der vorliegenden Dissertation wird sie definiert als Kombination aus *Eintrittswahrscheinlichkeit* eines Waldbrandes, *Exposition* (hinsichtlich des potenziellen Waldbrandes) sowie erwarteter *Schadensschwere*.

1.3. Abkürzungen

Eine Auflistung der in dieser Arbeit häufig verwendeten Akronyme:

AFFRI	Austrian Forest Fire Research Initiative
ALDIS	Austrian Lightning Detection & Information System
BFW	Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft
BMLRT	Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus
BUI	Build Up Index (Subindex des kanadischen FWI)
CC	Cloud-to-Cloud (Wolke-Wolke-Blitz)
CG	Cloud-to-Ground (Wolke-Erde-Blitz)
CONFIRM	Copernicus data for novel high-resolution wildfire danger services in mountain regions
FFMC	Fine Fuel Moisture Code (Subindex des kanadischen FWI)
FWI	(Kanadischer) Fire Weather Index
GIS	Geographisches Informationssystem
IFDS	Integrated Fire Danger assessment System
IFRS	Integrated Fire Risk assessment System
INCA	Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis
UTC	Coordinated Universal Time (Koordinierte Weltzeit)
WGS 84	World Geodetic System 1984
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik

2. Material und Methoden

2.1. Waldbrand-Dokumentation

Im Jahr 2008 wurde am Institut für Waldbau, BOKU Wien, eine erste Exceltabelle mit rund 500 Waldbrandereignissen in Österreich von 2003 bis 2008 zusammengestellt. Im Folgejahr konnte die Liste auf 700 Datensätze erweitert werden. Im Jahr 2011 war der Datenbestand auf rund 2700 Einträge angewachsen. Dabei wurden neben Waldbränden zunehmend auch (größere) Flurbrände erfasst. Vacik et al. 2011 (Anhang 1) konnten für ihre Studie 1170 Waldbrände von 1993 bis 2009 verwenden, Müller et al. 2015 (Anhang 2) bereits mehr als 2000 Waldbrände. Aktuell (Dezember 2020) sind etwa 7000 Vegetationsbrände in der Datenbank dokumentiert, davon mehr als 5200 Waldbrände. Der Schwerpunkt der Erfassung liegt auf den letzten 20 Jahren – seit 2001 konnten in Österreich 3600 Waldbrände erhoben werden. Eine Studie hat festgestellt, dass seit Anfang der 1990er Jahre die meisten Waldbrände mit einer Brandfläche größer als 1000 m² in der österreichischen Waldbrand-Datenbank dokumentiert sind (Eastaugh und Vacik 2012). Einige Archivbrände wurden zurück bis ins 16. Jahrhundert aufgearbeitet, mit dem frühesten Brand am 20. Juli 1540 in Tirol.

Grundsätzlich werden sämtliche Brände erhoben, welche die Kriterien eines Waldbrandes (vgl. Kapitel 1.2) erfüllen. Daneben sind auch Mischformen (z. B. Feld-/Wiesenbrand, der auf einen Waldbestand übergreift) sowie reine Flurbrände in der Datenbank zu finden. Letztere werden aufgrund der großen Anzahl und des damit verbundenen hohen zeitlichen und personellen Aufwands i. d. R. erst ab einer Brandfläche von 1000 m² aufgearbeitet (Ausnahme: Flurbrand mit Schäden an Gebäuden, Infrastrukturen bzw. in Verbindung mit Verletzten oder Todesfällen).

2.1.1. Erhebungsmethoden

Der erste Datensatz im Jahr 2008 wurde unter Mithilfe verschiedener Personen (darunter Prof. Dr. Hartmut Gossow, DI Natalie Arndt, mehrere Bachelorstudenten) sowie unterstützt durch Internetrecherchen zu Medienberichten über Großbrände erstellt. In den Folgejahren konnten die Daten zahlreicher Quellen eingearbeitet werden, etwa Aufzeichnungen von Forstbehörden und Forstschutzreferenten, Einsatzprotokolle von Feuerwehren, Gemeinde- und Feuerwehrchroniken, Daten der Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB), Informationen von Versicherungen zu entschädigten Waldbrandereignissen, Studienergebnisse aus Tirol (Sass et al. 2012), Recherchen im Zuge des FIRIA-Projektes (Sass 2014) sowie Daten von Archivbränden einer Dissertation mit Schwerpunkt auf den Nördlichen Kalkalpen (Heel 2015).

Seit Beginn der Aufarbeitung von Waldbrandereignissen am Institut für Waldbau der BOKU Wien wurden die Erhebungsmethoden laufend überprüft, angepasst und verbessert. Im Jahr 2018 sind im Rahmen von AFFRI 2 nationale Waldbrand-Workshops mit Vertretern von Feuerwehren, Forstbehörden und Landeswarnzentralen abgehalten worden (DaFNE 2019). Ein Ergebnis des Austausches war die verstärkte Zusammenarbeit mit einigen Landesfeuerwehrverbänden hinsichtlich der Dokumentation von Waldbränden. Derzeit (Stand Dezember 2020) werden dem Institut für Waldbau auf monatlicher bis

jährlicher Basis Vegetationsbranddaten aus Salzburg, Vorarlberg, Oberösterreich, der Steiermark, dem Burgenland sowie Wien übermittelt. Diese sind bisweilen unvollständig und nicht bereinigt, können also Fehlalarme enthalten oder Alarmierungen, die sich im Zuge des Validierungsprozesses als eine andere Brandart herausstellen (z. B. Flur- oder Gebäudebrand anstelle eines Waldbrandes).

Die Hauptquelle für Daten zu Vegetationsbrandereignissen in Österreich ist mangels zentraler und einheitlicher Erfassung auf Behörden- oder Feuerwehrseite nach wie vor das Internet. Hierbei liefern insbesondere Medienartikel sowie Einsatzberichte und -protokolle von Freiwilligen Feuerwehren und der Polizei hilfreiche Informationen. Derzeit läuft die Datenerhebung in der Regel wie folgt ab:

1) Suchabfragen und Überprüfung bestimmter Seiten im Internet, darunter:
    a. Google-Suchalgorithmus mit den Schlagwörtern *Waldbrand*, *Flurbrand*, *Böschungsbrand*, *Wiesenbrand*, *Feldbrand* und *Baumbrand*. Dabei Beschränkung der Ergebnisse auf Österreich und Ausschluss bestimmter Wörter (*Übung*, *Fehlalarm*) sowie anderer Länder (*Kalifornien*, *Spanien*, …)
    b. Feuerwehrportale wie fireworld.at oder einsatzdoku.at
    c. Einsatzkarten bzw. Einsatzübersichten der Landesfeuerwehrverbände (LFV) und/oder der Landeswarnzentralen (LWZ)
    d. Öffentliche Einsatzdokumentationen von Bezirksfeuerwehren
    e. Presseaussendungen der Landespolizeidirektionen
2) Im Fall der Auffindung eines relevanten und noch nicht in der Datenbank aufgearbeiteten Brandereignisses können entweder
    a. die verfügbaren Informationen nicht ausreichend sein. Dies trifft insbesondere für die Einsatzalarmprotokolle von LFV und LWZ zu, da hier meist nur die Art der Alarmierung (z. B. *Waldbrand*) sowie die alarmierte(n) Freiwilligen Feuerwehr(en) angeführt sind. Hier bedarf es weiterführender Recherchen, etwa auf den Homepages oder Facebookseiten der alarmierten Ortsfeuerwehren. Diese Recherchen sind aufgrund der Zeitspanne zwischen Waldbrandeinsatz und Erstellung eines Einsatzberichtes mitunter erst nach einigen Tagen Erfolg versprechend.
    b. die verfügbaren Informationen ausreichend für die weitere Erhebung sein. In diesem Fall wird mit Punkt 3 fortgefahren.
3) Im nächsten Schritt werden die zu einem Brandereignis verfügbaren Internetseiten als Lesezeichen im Browser zwischengespeichert oder sofort als PDFs extrahiert (ggf. über ein Browser-Plugin) und mit eindeutiger Kennung (*JJJJMMTT_Brandartkürzel_betroffeneGemeinde*, also z. B. *20200407_Wb_Saubersdorf*) lokal gespeichert. Vorhandenes Foto- und Videomaterial wird in entsprechend bezeichneten Dateiordnern abgelegt, sofern die Aufnahmen hilfreich bei der Charakterisierung des Brandes sind (etwa Fotos der Brandfläche).
4) Das mittels *HyperText Transfer Protocol Secure* (HTTPS) gesicherte interne Web-GIS wird über https://fire.boku.ac.at/intern zur Eingabe der Vegetationsbranddaten aufgerufen und sämtliche

relevanten Informationen werden – soweit vorhanden oder durch Fotos/Luftbilder ableitbar – eingetragen (vgl. Kapitel 2.1.3).

5) Zuletzt erfolgt das Hochladen der lokal gespeicherten PDFs der Medien-/Einsatzberichte sowie des verfügbaren Foto- und Videomaterials. PDFs und Bildmaterial sind nicht öffentlich zugänglich und dienen allein der internen Datenaufarbeitung, Datensicherung und ggf. Nachbetrachtung von Waldbrandereignissen.

Abhängig von der aktuellen Witterung bzw. Waldbrandgefahr werden die potenziellen Datenquellen im Internet in unterschiedlichen Zeitintervallen abgerufen. Bei verbreitet mäßiger bis hoher Waldbrandgefahr wird die Recherche zur Datenerhebung zumindest alle 24 Stunden durchlaufen. Dies geschieht deshalb, da manche öffentlich zugänglichen Alarmierungsprotokolle der Freiwilligen Feuerwehren (z. B. der Landesfeuerwehrverbände von Tirol und dem Burgenland) nach 24 Stunden verfallen und es bislang nicht möglich ist, auf länger zurückliegende (aber potenziell vorhandene) Alarmierungsdaten zuzugreifen. Bei geringer bis mäßiger Waldbrandgefahr wird alle paar Tage, wenigstens aber einmal pro Woche, nach neuen Brandereignissen gesucht. Im Fall einer sehr geringen Waldbrandgefahr (z. B. bei Schneebedeckung im Winter) erfolgt ein neuer Suchdurchlauf alle zwei bis drei Wochen.

Neben der manuellen Aufarbeitung von Brandereignissen und der ergänzenden Datenübermittlung durch einige Landesfeuerwehrverbände werden gelegentlich neue Waldbrände per E-Mail (z. B. durch die Landeswarnzentrale Steiermark) oder über das Meldeformular unter https://fire.boku.ac.at aufgezeigt (vgl. Kapitel 2.1.3). In jedem Fall müssen diese Datensätze aber von einem wissenschaftlichen Mitarbeiter validiert und ggf. um weitere Informationen ergänzt werden.

2.1.2. Metadaten und Qualitätssicherung

Für jedes Vegetationsbrandereignis sind verpflichtende Kerndaten notwendig, um in die Waldbrand-Datenbank aufgenommen zu werden. Diese Kerndaten werden zur Validierung des Ereignisses und für die Qualitätssicherung benötigt. Folgende Informationen sind zwingend erforderlich:

- Datum des Brandereignisses
- Brandart (z. B. Wald- oder Flurbrand)
- Lokalität des Brandes (WGS-84-Koordinaten, ggf. über Ortsbeschreibung ermittelt)
- Quelle (z. B. Internetlink, einsatzleitende Feuerwehr oder Kontaktperson)

Daneben gibt es eine Reihe an optionalen Daten, die entweder direkt (aus dem Medien-/Einsatzbericht) oder indirekt (etwa über Einsatzfotos oder Luftbilder) gewonnen werden können. Einige Informationen werden im Zuge der Bearbeitung durch die Verschneidung mit verschiedenen Datenebenen im Web-GIS extrahiert (vgl. Kapitel 2.1.3). Tabelle 1 gibt eine Übersicht der derzeit erhobenen Daten.

Tabelle 1: Übersicht der erhobenen Informationen und Parameter für die österreichische Waldbrand-Datenbank am Institut für Waldbau, BOKU Wien, mit Stand Dezember 2020.

Information	**Parameter**	**Anmerkungen**
Zeitliche Aspekte	Datum*	Datum des Brandausbruchs
	Brandausbruch	Uhrzeit des Brandausbruchs
	Meldung / Alarmierung	Melde- bzw. Alarmierungszeitpunkt
	Branddauer	in Stunden, ggf. Tagen
Räumliche Aspekte	Ortsbeschreibung	freies Textfeld
	Lagekoordinaten*	in WGS 84 (Grad und Dezimalgrad)
	Verortungsunsicherheit (Pufferradius)	vordefinierte Auswahlmöglichkeit (in Meter)
	Bundesland / Bezirk / Gemeinde / Postleitzahl / Gemeindekennzahl	Verschnitt Datenebene**
	Seehöhe / Hangneigung / Exposition	Verschnitt Datenebene** (in Meter / Grad)
	Nationales Wuchsgebiet	Verschnitt Datenebene**
Brandattribute	Brandart*	vordefinierte Auswahlmöglichkeit (Waldbrand, Wald-/Flurbrand, Wald-/Latschenbrand, Bahndamm-/Waldbrand, Bahndamm-/Flurbrand, Flurbrand, Baumbrand)
	Brandfläche / Waldbrandfläche	in Quadratmeter (m²)
	Brandursache	vordefinierte Auswahlmöglichkeit (anthropogen oder natürlich inkl. Subkategorien)
	Betroffene Baumarten	vordefinierte Auswahlmöglichkeit
	Vegetationstypen / Wuchsklassen	vordefinierte Auswahlmöglichkeit
	Aufgetretener Brandtyp	Schwelbrand, Bodenfeuer oder Kronenfeuer (vordefinierte Auswahlmöglichkeit)
	Brandintensität	gemäß entwickelter Intensitätsmatrizen***
	Ausbreitungsgeschwindigkeit	in Meter pro Sekunde (m/s)
	Flammenhöhe	in Meter
Meteorologie	Kanadischer FWI / FFMC	Indexwert bei Brandausbruch
	Temperatur / Relative Luftfeuchtigkeit	Werte bei Brandausbruch (°C / %)
	Windgeschwindigkeit	10min-Mittelwert bei Brandausbruch (m/s)
Brandbekämpfung	Feuerwehren, Einsatzkräfte, Helikopter	Anzahl
	Verletzte, Tote	Anzahl
Sonstiges	Anmerkungen	freies Textfeld
	Quelle(n)*	z. B. Internetlinks, ausgerückte Feuerwehr
	Kontakt	Name, Funktion, Kontaktmöglichkeit
	Dateien	PDFs, Fotos, Videos, sonstige Dokumente
	Status	Status der Bearbeitung des Datensatzes
	Erzeuger / Bearbeiter	Verschnitt Benutzerdatenbank**
	Erzeugt am / Letzte Änderung	Verschnitt Datum und Uhrzeit**

** verpflichtende Information für jeden neuen Datensatz*
*** die Ermittlung erfolgt über die Verschneidung mit sekundären Datenebenen im Web-GIS*
**** auf Basis von Brandfläche, Brandart und Auswirkungen, vgl. Abbildung 3*

Seit dem Frühjahr 2020 wird der Aufarbeitung des Brandverhaltens und der Brandintensität von Waldbränden in Österreich vermehrt Beachtung geschenkt. Neben der Dokumentation der Ausbreitungsgeschwindigkeit und Flammenhöhe bei Großbränden werden auch die meteorologischen Bedingungen – sofern entsprechende Daten verfügbar sind – aufgenommen. In Zusammenarbeit mit dem Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (BMLRT) wurden Intensitätsmatrizen für Wald- und Flurbrände ermittelt, die eine rasche Einordnung sämtlicher Brandereignisse ermöglichen sollen (Abbildung 3). Hierfür sind die Parameter Brandfläche, Brandart sowie die Auswirkungen auf Siedlungsräume und Infrastrukturen berücksichtigt worden.

Es wird zwischen fünf an österreichische Verhältnisse angepasste Kategorien von Waldbränden unterschieden: Entstehungsbrände (< 0,03 Hektar), Kleinbrände (0,03 < 0,3 ha), Mittelbrände (0,3 < 3 ha), Großbrände (3 < 30 ha) sowie Extrembrände (≥ 30 Hektar). Extrembrände müssen wenigstens zwei Tage lang aktiv sein und zu einer signifikanten, langfristigen Veränderung der Vegetationszusammensetzung führen (Vacik et al. 2020).

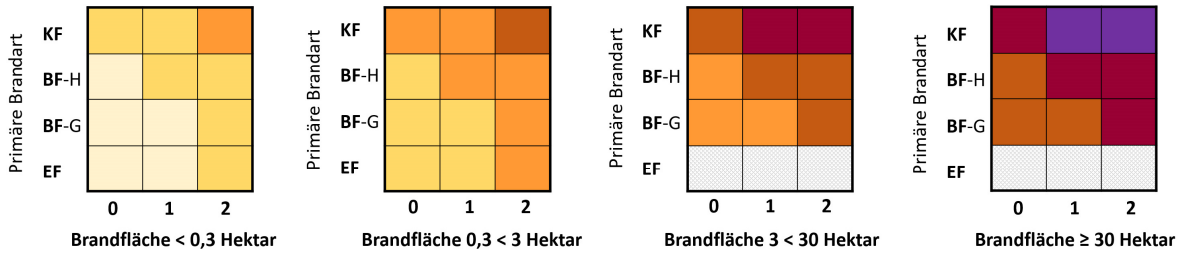


Abbildung 3: Intensitätsmatrizen für Waldbrandereignisse in Österreich unter Berücksichtigung von Brandfläche, Brandart sowie den Brandauswirkungen. Dabei gilt: EF = Erdfeuer (Schwelbrand), BF-G = Bodenfeuer geringer Intensität, BF-H = Bodenfeuer hoher Intensität, KF = Kronenfeuer. Bei den Auswirkungen wird zwischen „0" (keine zu erwarten), „1" (indirekt bzw. durch sekundäre Naturgefahren möglich) und „2" (direkte Auswirkungen, z. B. zerstörte Gebäude) unterschieden.

Für die Qualitätssicherung der Waldbrand-Dokumentation wurden neben der verpflichtend einzutragenden Kerndaten eine Reihe weiterer Maßnahmen getroffen. Die *Verortungsunsicherheit* (als Pufferradius) beschreibt die Genauigkeit, mit der ein spezifischer Vegetationsbrand in WGS 84 verortet werden konnte. Die höchstmögliche Genauigkeit beträgt 5 m, die geringste 20 km. Der Pufferradius wird ermittelt, indem die verfügbaren Lageinformationen ausgewertet werden. Kann der Brandort exakt verortet werden, etwa über bekannte Koordinaten oder die Identifizierung der Brandfläche in Luftbildern, ist der Pufferradius gering. Auf der anderen Seite beträgt die Verortungsunsicherheit bei wenig vorhandenen Informationen (z. B. nur betroffene Gemeinde bekannt) mitunter mehrere Kilometer.

Die wichtigsten Parameter werden mit einem Hinweis zur Datensicherheit versehen, wobei zwischen *gut* (numerisch als „1" gespeichert), *mäßig* (2) und *schlecht* (3) ausgewählt werden kann. Wird ein relevanter Parameter nicht eingetragen, bzw. sind hierzu keine Informationen verfügbar, nimmt das

System *unbekannt* (4) an. Derzeit betrifft die Angabe der Datensicherheit folgende Variablen: Datum des Brandes, Zeitpunkt Brandausbruch, Zeitpunkt Brandmeldung, Brandfläche, Waldbrandfläche, Brandursache sowie betroffene Baumarten. Mittels einer Gewichtungsfunktion über die erfassten Werte der unterschiedlichen Datensicherheiten wird eine Gesamtsicherheit für jedes Brandereignis ermittelt, die bei weiterführenden Analysen berücksichtigt werden kann.

Datensätze mit hohen Unsicherheiten können in der Datenbank unterschiedlich behandelt werden. Es besteht die Möglichkeit, Brandereignisse, bei denen es sich möglicherweise um Fehl- oder Falschalarmierungen der Feuerwehren gehandelt hat, gesondert zu kennzeichnen. Diese Funktion ist hilfreich, um Brände zu einem späteren Zeitpunkt neu zu beurteilen. Bei manchen Vegetationsbränden bleibt unklar, ob es sich um einen Wald- oder Flurbrand gehandelt hat. In diesem Fall kann unter dem Parameter *Brandart* das Attribut *Wald-/Flurbrand* ausgewählt und unter *Anmerkungen* die Unklarheit spezifiziert werden. Außerdem wird für Vegetationsbrände, die über das Waldbrand-Meldeformular auf https://fire.boku.ac.at angezeigt werden (vgl. Kapitel 2.1.3), ein gesonderter *Status* (3) vermerkt, was gleichbedeutend mit *ungeprüft* ist. Es bedarf der Validierung durch eine autorisierte Person, um das neue Brandereignis in den operativen Datenbestand (Status 2) aufzunehmen. Das gleiche Prozedere gilt für Datensätze, die extern übermittelt werden (bspw. Exceltabellen mit Einsatzinformationen der Landesfeuerwehrverbände). Nach erneuter Prüfung, meist zu Jahresbeginn, wird sämtlichen bis dahin dokumentierten und finalisierten Brandereignissen der Status 1 (geprüft, validiert und abgeschlossen) vergeben.

Bei zahlreichen Vegetationsbränden können manche Parameter nicht allein anhand des Medien- oder Einsatzberichtes eruiert werden. Durch die inzwischen verbreitete Foto- und Videodokumentation ist es möglich, einige Informationen indirekt abzuleiten. So lassen sich bei entsprechendem Fachwissen die vom Feuer betroffenen Baumarten, der Vegetationstyp oder die Wuchsklasse feststellen. Mithilfe von Drohnen-/Helikopteraufnahmen und unter Berücksichtigung von Luftbildern ist es mitunter möglich, Waldbrände exakt zu verorten. Auch lässt sich auf diesem Weg die Größe der Brandfläche besser einschätzen bzw. validieren. Ebenso helfen Fotos und Videos, die im Zuge der Brandbekämpfung oder im Nachhinein auf der Brandfläche entstanden sind, bei der Abschätzung des Brandverhaltens und der Brandintensität. Gelegentlich können sogar Vermutungen zur Brandursache getroffen werden (etwa wenn auf den Aufnahmen ein erloschenes Lagerfeuer zu sehen ist). Entsprechende Schlussfolgerungen müssen im Feld *Anmerkungen* vermerkt und die Datensicherheit angepasst werden.

Daneben werden zur Qualitätssicherung der Waldbrand-Dokumentation größere Brandereignisse mehrfach überarbeitet. Die Erfahrungen der letzten Jahre haben gezeigt, dass mitunter Monate oder sogar Jahre nach einem schadensträchtigen Waldbrand neue Informationen verfügbar gemacht werden. Dies können Berichte der zuständigen Bezirksförster oder Landesdienststellen, wissenschaftliche Untersuchungen oder auch in Luftbildern ersichtliche Brandflächen sein; letzteres ist häufig bei Vollbränden von Bergkiefernflächen (*Pinus mugo* Turra) der Fall.

2.1.3. Online-Datenbank

Im Jahr 2013 erfolgte die Umstellung von der tabellenbasierten Erfassung von Vegetationsbränden auf ein online zugängliches Web-GIS (Müller und Vacik 2020). Diese Online-Datenbank läuft auf einem Server an der BOKU Wien und wurde unter fachlicher und inhaltlicher Leitung von Mortimer Müller sowie unter technischer Leitung von DI Georg Kaiser umgesetzt. Bis heute sind zahlreiche Optimierungen, Ergänzungen und Fehlerkorrekturen durchgeführt worden.

Die Waldbrand-Datenbank gliedert sich in ein internes und ein externes Frontend, wobei beide Systeme dieselbe Datenbank nutzen. Das interne Web-GIS ermöglicht die detaillierte Erfassung und Bearbeitung neuer und bestehender Brandereignisse. Hierbei ist das Frontend in vier Bereiche unterteilt: Die Kopfzeile mit den wichtigsten Eckdaten und einer Suchfunktion, das Eingabefenster mit inhaltlich strukturierten Registerkarten (Tabs), die Kartenansicht zur Verortung und dem Anwählen von Brandereignissen sowie eine Tabellenansicht der ausgewählten Datensätze (Abbildung 4). Sämtliche in Kapitel 2.1.2 angeführten Daten können im internen Web-GIS eingearbeitet werden. Folgende zusätzliche Funktionalitäten wurden implementiert:

- Die automatisierte Verschneidung mit verschiedenen Datenebenen (vgl. Tabelle 1).
- Eine interaktive, zoombare Karte mit unterschiedlichen Hintergrundplänen.
- Eine Polygon-zeichnen-Funktion für die Ermittlung der Brandfläche inkl. Shapefile-Export.
- Eine automatisierte Neigungskorrektur für die Flächenberechnung im Fall eines Polygonzugs.
- Eine Möglichkeit zum Up- und Download von Fotos, Videos, PDFs und anderen Dokumenten.
- Umwandlung/Darstellung der Gradkoordinaten in Dezimalgrad sowie Quadratmeter in Hektar.
- Gewichtungsfunktion zur Ermittlung und Ausgabe der Gesamtdatensicherheit.
- Möglichkeit zum Download sämtlicher Datensätze als CSV-Datei.
- Funktionen zum Suchen, Filtern und Validieren.

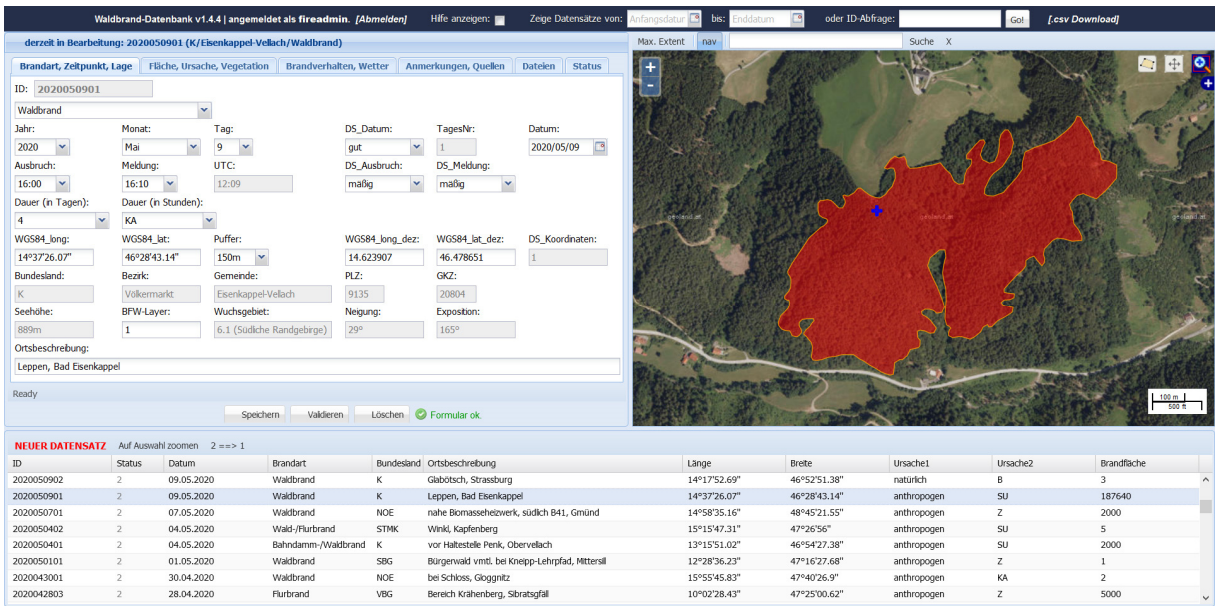


Abbildung 4: Screenshot des internen Web-GIS der Waldbrand-Datenbank am Institut für Waldbau, BOKU Wien.

Daneben existiert ein externes Web-GIS bzw. Frontend, das für Interessierte frei zugänglich ist und die Abfrage zahlreicher Daten von 1993 bis heute erlaubt (https://fire.boku.ac.at, Abbildung 5). In der Kartenansicht können per Klick auf ein als Kreuz bzw. Kreis gekennzeichnetes Brandereignis Kurzinformationen zu diesem Vegetationsbrand abgerufen werden. Die Erstellung individueller Abfragen sowie Statistiken und Grafiken wird unterstützt. Es ist möglich, Brände nach der Größe der Brandfläche, der Ursache und der Brandart zu filtern. In der Rubrik *Die letzten fünf ...* werden die zuletzt dokumentierten Waldbrandereignisse gelistet. Ebenso kann die Meldung von Vegetationsbränden über ein Onlineformular erfolgen. Seit 2019 ist zudem eine englischsprachige Version des externen Web-GIS verfügbar.



Abbildung 5: Screenshot des externen Web-GIS der Waldbrand-Datenbank am Institut für Waldbau, BOKU Wien.

Anknüpfend an die Waldbrand-Dokumentation wird zur Bewusstseinsbildung und Öffentlichkeitsarbeit vom Institut für Waldbau unter administrativer Leitung von Mortimer Müller ein Waldbrand-Blog betreut (https://fireblog.boku.ac.at). Dieser Blog liefert Hintergrundwissen zu größeren Brandereignissen in Österreich, bündelt Informationen zur Waldbrandforschung sowie der aktuellen Waldbrandgefahr und stellt regelmäßig Statistiken und Rückblicke zum österreichischen Waldbrandgeschehen bereit.

2.2. Blitzschlagbrände

Bereits in den Anfängen der Waldbrand-Dokumentation am Institut für Waldbau wurde aufgrund erster Auswertungen ein Blitzschlagbrandanteil von deutlich über zehn Prozent und damit eine hohe Relevanz für das österreichische Waldbrandregime angenommen (Vacik et al. 2011 – Anhang 1). In den Folgejahren zeigte sich, dass – neben einer generell größeren Zahl an Kleinbränden – auch vermehrt natürlich ausgelöste Waldbrände dokumentiert werden konnten. Deshalb war es erforderlich, die Verifizierung und Analyse von Blitzschlagbränden durchzuführen.

2.2.1. ALDIS-Daten

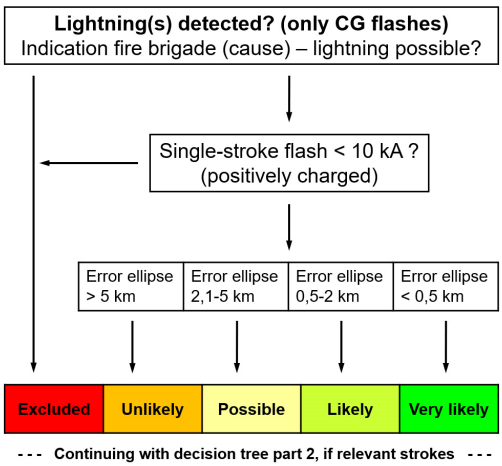
Für die Verifizierung von Blitzschlagbränden bedarf es einem methodischen Abgleich mit den Daten eines Blitzortungssystems (Moris et al. 2020). Hierfür wurde eine Kooperation mit dem österreichischen Blitzortungssystem ALDIS (*Austrian Lightning Detection & Information System*) eingegangen. ALDIS besteht aus acht Sensoren, die mittels Richtungsinformationen sowie der Messung von Zeitdifferenzen das Auftreten elektromagnetischer Gewitterentladungen in ganz Österreich dokumentieren (Schulz et al. 2005). Dabei werden u. a. die exakte Uhrzeit, die Blitzstromamplitude (in Kiloampere, kA), die Anzahl der sogenannten *Strokes* (Teilentladungen innerhalb eines Blitzes, vgl. Müller und Vacik 2017 – Anhang 4) sowie die Polarität ermittelt. Hinsichtlich der Polarität treten positive und negative Blitze auf, sowie, deutlich seltener, bipolare Entladungen (mit einem positiven als auch negativen Stromfluss). Ein positiver Blitzschlag transportiert positive Ladung von der Wolke zum Erdboden, ein negativer Blitz demnach negative Ladung. Es kann zwischen Entladungen innerhalb einer Wolke (*Intra-Cloud*, IC), von einer Wolke zu einer anderen (*Cloud-to-Cloud*, CC) sowie von einer Wolke zum Erdboden (*Cloud-to-Ground*, CG) unterschieden werden. Einen Spezialfall stellen Aufwärtsblitze dar, wobei die elektromagnetische Entladung vom Erdboden – meist ausgehend von erhöhten Geländepunkten – zur Wolke erfolgt. In der Regel können nur CG-Entladungen bzw. Wolke-Erde-Blitze einen Brand entfachen. Mehr Informationen zu den verwendeten Daten kann bei Müller et al. 2013 (Anhang 3) nachgelesen werden.

2.2.2. Verifizierung von Blitzschlagbränden

Für die Verifizierung von Blitzschlagbränden in Österreich wurde von Müller et al. 2013 (Anhang 3) die entwickelte Methodik aus der Masterarbeit von Mortimer Müller verfeinert und der verwendete Datensatz auf den Zeitraum 1993 bis 2010 ausgeweitet. In Summe konnten 964 Waldbrände mit unbekanntem Auslöser oder vermuteter Ursache Blitzschlag untersucht werden. Für die Verifizierung der Blitzschlagbrände wurden ein expertenbasierter Entscheidungsbaum und Entscheidungsmatrizen entwickelt (Abbildung 6). Dabei sind die folgenden Faktoren berücksichtigt worden:

- Blitzstromamplitude in kA (zum Ausschluss vermutlicher CC-Blitze, vgl. Müller et al. 2013).
- Verortungsunsicherheit (Pufferradius) des Waldbrandes.
- Fehlerellipse (resp. Verortungsunsicherheit) des detektierten Blitzschlags.
- Räumlicher Abstand zwischen den Lagekoordinaten des Waldbrandes und des CG-Blitzes.

- Zeitliche Differenz zwischen aufgetretenem Blitzschlag und Waldbrandmeldung.
- Ggf. Fotomaterial oder Detailinformationen aus dem Einsatzbericht (z. B. Blitzspur an Baum).



VERY LIKELY (after part 2)	Distance flash > 2000 m	Distance flash 500-2000 m	Distance flash < 500 m	Flash in range
Buffer radius ≥ 5000 m	Excluded	Unlikely	Unlikely	Unlikely
Buffer radius 3000-4999 m	Excluded	Unlikely	Possible	Possible
Buffer radius 1500-2999 m	Excluded	Possible	Possible	Likely
Buffer radius 500-1499 m	Excluded	Possible	Likely	Very likely
Buffer radius < 500 m	Excluded	Likely	Very likely	Very likely

Abbildung 6: Erster Teil des expertenbasierten Entscheidungsbaums (links) sowie Beispiel einer Beurteilungsmatrix (rechts) für die Verifizierung von Blitzschlagbränden in Österreich. Quelle: Müller et al. 2013.

Jeder relevante Blitzschlag wurde gesondert betrachtet. Zur Berücksichtigung einer möglichen Vorhaltezeit (engl. *Holdover* – Zeitspanne zwischen Blitzeinschlag und Entdeckung des Feuers) sowie mit Bedachtnahme auf die Verortungsunsicherheit von Waldbrand und Blitzschlag, sind sämtliche CG-Entladungen bis zu zehn Tage vor der Waldbrandmeldung und in einem Radius von zehn Kilometern zum Ausbruchsort des jeweiligen Feuers für die Erstanalyse herangezogen worden.

2.2.3. Analyse von durch Blitzschlag ausgelösten Waldbränden

Sämtliche verifizierten Blitzschlagbrände wurden hinsichtlich ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung untersucht (Müller et al. 2013 – Anhang 3; Müller und Vacik 2017 – Anhang 4). Dabei erfolgten deskriptive Auswertungen zu folgenden Parametern:

- Seehöhe, Exposition, Hangneigung und betroffene Vegetation.
- Verteilung nach Bundesländern, Monaten und der Tageszeit.
- Brandflächen (auch im Vergleich zu anthropogen ausgelösten Waldbränden).

2.2.4. Charakteristik der waldbrandauslösenden Blitzschläge

Einige Studien lassen vermuten, dass die Blitzphysik Einfluss auf das Zündungspotenzial von Gewitterentladungen hat (Pineda et al. 2014; Wendler et al. 2011). Daher wurde von Müller und Vacik 2017 (Anhang 4) eine Studie mit 351 verifizierten Blitzschlagbränden von 1993 bis 2013 durchgeführt. Drei Stichproben mit CG-Blitzentladungen wurden definiert:

- *Stichprobe 1* enthielt ausschließlich Blitzschläge, die mit hoher Wahrscheinlichkeit einen Waldbrand ausgelöst hatten.

- *Stichprobe 2* enthielt Blitzschläge, die möglicherweise einen Waldbrand ausgelöst hatten.
- *Stichprobe 3* enthielt zufällig ausgewählte Blitzschläge aus dem vorhandenen Datensatz.

Die folgenden durch ALDIS ermittelten blitzphysikalischen Eigenschaften sind für alle drei Stichproben untersucht worden:

- Ladung der Blitzschläge (positiv oder negativ). Positive CG-Blitze stellen in Österreich etwa 10 % aller Blitzschläge dar, die restlichen 90 % entfallen primär auf negative Entladungen.
- Multiplizität der Blitzschläge (Anzahl der Strokes).
- Stromstärke der Entladungen in kA.

Für die Identifizierung einer möglichen Relevanz der lokalen Witterung auf die Entstehungs- und Ausbreitungsgefahr eines Blitzschlagbrandes, wurde der kanadische Waldbrandindex FWI herangezogen. Die Berechnung dieses Index beruht auf der täglichen Beobachtung von Lufttemperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und mittlerer Windgeschwindigkeit bei Sonnenhöchststand unter Einbezug des 24-Stunden-Niederschlags. Der FWI besteht aus sechs Komponenten, welche die Auswirkungen der Boden-/Streufeuchtigkeit und der Wetterbedingungen auf die Entstehungsgefahr sowie das Brandverhalten beschreiben (Van Wagner 1987). Die ersten drei Komponenten (*Fine Fuel Moisture Code,* FFMC; *Duff Moisture Code,* DMC; *Drought Code,* DC) charakterisieren die Feuchtigkeit unterschiedlicher Bodenhorizonte, wobei der FFMC die Streuschicht bzw. den Auflagehorizont repräsentiert. Der *Initial Spread Index* (ISI) stellt eine Abschätzung des Brandverhaltens bzw. der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Feuerfront anhand der Windstärke und des FFMC dar, während der *Build Up Index* (BUI) den DMC und DC kombiniert, um den für ein potenzielles Feuer verfügbaren Brennstoff und die Brandintensität abzubilden. ISI und BUI werden anschließend im FWI zusammengeführt, der eine kombinierte und numerische Bewertung der meteorologischen Waldbrandgefahr darstellt.

Gemäß Müller und Vacik (2017) erfolgte die Analyse des zeitlichen Verlaufs der beiden Waldbrand-Subindizes BUI und FFMC im Hinblick auf den Ort und Zeitpunkt der ausgewählten Blitzschläge. Hierbei wurden speziell die Veränderungen der Indexwerte vom Tag der Brandentstehung (resp. dem Zeitpunkt des Blitzschlags) auf den folgenden Tag betrachtet. Daneben ist der 48-Stunden-Niederschlag nach der Brandentstehung mittels INCA-Analysedaten für den Ort des Brandes und für alle drei Stichproben untersucht worden. Zuletzt sind für die Identifizierung einer möglichen Korrelation zwischen Indexwert und Brandfläche die BUI-Werte an den Brandtagen mit der Größe der Brandflächen verglichen worden.

Sämtliche Ergebnisse dieser Studie wurden auf Signifikanz ($p < 0,05$) mit dem parametrischen Verfahren des t-Tests für unabhängige Teilmengen und einer Varianzanalyse mit dem Games-Howell Post-hoc-Test geprüft.

2.2.5. Gefährdungskarte Blitzschlagbrände

Anhand der Erkenntnisse von Grima (2011) und Müller et al. 2013 (Anhang 3) ist zusammen mit Albers (2012) ein methodischer Ansatz für die Generierung einer Gefährdungskarte für Blitzschlagbrände in Österreich auf Basis der räumlichen Verteilung der verifizierten Blitzschlagbrände entwickelt worden. Hierbei wurden Informationen bzw. Datenebenen zur Seehöhe, Exposition und Hangneigung sowie zum Vegetationstyp (Nadelwald mit hohen Brennstoffmengen, Nadelwald mit geringen Brennstoffmengen, Mischwald, Laubwald, Bergkiefernflächen, sonstige Vegetation) berücksichtigt und die Lagekoordinaten der Blitzschlagbrände mit diesen vier Datenebenen verschnitten. Anhand der Verteilung der Blitzschlagbrände sind je Parameter fünf Gefährdungsstufen definiert worden, von *sehr gering* (Warnstufe 1) bis *sehr hoch* (Warnstufe 5). Als räumliche Auflösung der statischen Gefährdungskarte wurde ein Raster von 100 x 100 m gewählt. Über eine Gewichtungsfunktion (25 % je Parameter) konnte für jede individuelle Rasterzelle eine kumulierte Gefährdungsstufe ermittelt werden. Weitere Details zur Erstellung der Gefährdungskarte für Blitzschlagbrände sind bei Müller et al. 2020b (Anhang 5) nachzulesen.

2.3. Integriertes System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr

San-Miguel-Ayanz et al. (2018) schlagen für ein integriertes System zur Abschätzung des Waldbrandrisikos neben der Einbindung von meteorologischen Daten auch die Berücksichtigung der Topografie, Vegetation, Brandursachen sowie der Vulnerabilität von Siedlungsräumen und Infrastrukturen vor. Mangels Daten zur Vulnerabilität handelt es sich bei dem hier für Österreich vorgestellten Ansatz um keine Modellierung des Waldbrandrisikos, sondern um ein System zur Abschätzung der Brandgefahr bzw. des Gefährdungspotenzials. Deshalb wird im Gegensatz zu einem IFRS (vgl. Kapitel 1) von einem Integrierten System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr (engl. *Integrated Fire Danger assessment System*, IFDS) gesprochen.

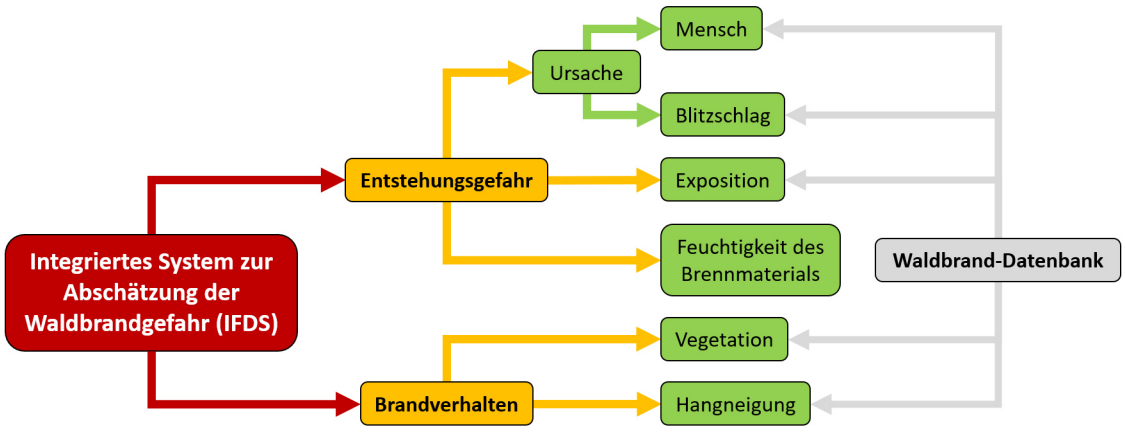


Abbildung 7: Modell eines integrierten Systems zur Abschätzung der Waldbrandgefahr (IFDS), wie es am Institut für Waldbau, BOKU Wien, umgesetzt worden ist. Quelle: Müller et al. 2020b

Sechs unterschiedliche Datenebenen/Gefährdungskarten wurden in das IFDS integriert (vgl. Abbildung 7 und Folgekapitel). Für die Erstellung des IFDS sind bestehende Forschungsergebnisse und Arbeiten aus Österreich zum menschlichen Einfluss auf die Waldbrandentstehung sowie eine Waldbrand-Gefährdungskarte der Vegetationstypen herangezogen worden (vgl. Kapitel 2.3.2 und 2.3.3). Als Teil der Modellerstellung wurde die Sensitivität der verwendeten Datensätze hinsichtlich ihrer Vorhersagegüte für das Auftreten von Waldbrandereignissen getestet.

Das IFDS ist als Online-Prototyp umgesetzt worden. Als operative räumliche Auflösung wurde ein 100 x 100 m Raster gewählt. Für sämtliche verwendeten Parameter bzw. Datenebenen wurden fünf Gefährdungsstufen von *sehr gering* (Warnstufe 1) bis *sehr hoch* (Warnstufe 5) definiert, wobei jede 100 x 100 m Rasterzelle gesondert bewertet worden ist. Die Leistungsfähigkeit des Systems wurde anschließend hinsichtlich der korrekt sowie falsch vorhergesagten Waldbrände untersucht. Ausführliche Informationen zum Vorgehen und der Methodik sind bei Müller et al. 2020b (Anhang 5) zu finden.

2.3.1. Meteorologische Daten

Für die Darstellung der meteorologischen Waldbrandgefahr innerhalb des IFDS sind zwei Waldbrandindizes verwendet worden. Die ZAMG stellt die mittels INCA-Daten berechneten Werte des kanadischen FWI (ab 2018) sowie die Werte des FWI-Subindex FFMC (ab 2019) als ASCII-Dateien bereit. Die Modellierungen erfolgen für den aktuellen Tag sowie die beiden Folgetage, werden täglich aktualisiert und sind flächendeckend für ganz Österreich mit einer räumlichen Auflösung von 1 x 1 km verfügbar. Arpaci et al. (2013) konnten zeigen, dass der kanadische FWI gute Vorhersageergebnisse für Waldbrandereignisse in Österreich liefert. Eine Auswertung aus 2018 mit einem längeren Analysezeitraum und mehr Datensätzen hat gezeigt, dass die Prognosegüte des FFMC hinsichtlich des Auftretens von Waldbränden besser ist als die des FWI (Müller et al. 2020b – Anhang 5). Da in Österreich der Entstehungsgefahr mehr Bedeutung beigemessen wird als dem Brandverhalten, wurde der FFMC ab Verfügbarkeit als Basis für die Variantenberechnung verwendet (vgl. Kapitel 2.3.5). Anhand der Waldbrandverteilung von 2012 bis 2018 sind für die von der ZAMG gelieferten Rohwerte des FWI und FFMC fünf Gefahrenstufen von *sehr gering* (Warnstufe 1) bis *sehr hoch* (Warnstufe 5) abgeleitet worden. Für den Verschnitt der ASCII-Dateien mit den übrigen Datenebenen wurde der 1 x 1 km INCA-Raster auf 100 x 100 m geplottet.

2.3.2. Menschlicher Einfluss

Für die Berücksichtigung des Faktors Mensch als Auslöser von Waldbränden (vgl. Abbildung 7) wurden die Ergebnisse von Arndt et al. (2013) herangezogen. Im Rahmen dieser Studie ist der Zusammenhang zwischen Bevölkerung, touristischer Aktivität, Infrastrukturen, forstwirtschaftlichen Einrichtungen und dem Auftreten von Waldbränden mittels logistischer Regression untersucht worden. Mehrere sozioökonomische Variablen (Forststraßen, Einwohner- und Wanderwegdichte, Eisenbahnstrecken sowie forstliche Infrastrukturen) wurden identifiziert, die 60 % aller Waldbrandursachen erklären konnten. Als

Ergebnis der Analyse ist eine statische, österreichweite GIS-Darstellung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens anthropogen ausgelöster Waldbrände in fünf Gefährdungsstufen und auf Gemeindeebene entstanden. Für das vorliegende IFDS wurde die Datenebene in eine 100 x 100 m Rasterdatei umgewandelt, um mit den anderen Parametern kombiniert zu werden.

2.3.3. Vegetation

Für die Berücksichtigung der Vegetation im IFDS-Prototyp wurde auf nationale Vegetationskarten zurückgegriffen, die auf der Österreichischen Waldinventur des BFW sowie der Corinne Landbedeckungskarte aus 2006 beruhen. Validiert durch die Masterarbeiten von Grima (2011) und Oettel (2012) wurde von Albers (2012) sowie Arpaci et al. (2011) eine statische und österreichweite Gefährdungskarte sämtlicher vorhandener Vegetationstypen mit einer räumlichen Auflösung von 100 x 100 m generiert. In der fünfstufigen Gefahreneinteilung ist landwirtschaftlichen Flächen die geringste Gefährdungsstufe und Nadelwaldbeständen mit hohen Brennstoffmengen die höchste Gefährdungsstufe zugeordnet worden.

2.3.4. Topografie

Hinsichtlich der Topografie sind in erster Linie die Exposition eines Hanges sowie die Hangneigung für die Entstehung und das Verhalten eines Waldbrandes relevant (San-Miguel-Ayanz et al. 2018). Südseitig ausgerichtete Hänge weisen höhere Temperaturen, eine stärkere Sonneneinstrahlung und damit auch eine geringere Streufeuchtigkeit auf, welche entscheidend für die Entstehung eines Waldbrandes ist (Conedera et al. 2018; Maxwell et al. 2019). Auf der anderen Seite unterstützt eine größere Hangneigung die rasche Ausbreitung einer Feuerfront und führt zu einer größeren Brandfläche sowie zu einem aggressiveren Brandverhalten (Csontos und Cseresnyés 2015; Lahaye et al. 2018).

Im Rahmen dieser Dissertation fand eine Neubewertung des topografischen Einflusses auf die Entstehung und Ausbreitung von Waldbränden in Österreich statt. Anhand der Waldbranddaten von 1993 bis 2017 konnte die topografische Verteilung von Waldbrandereignissen ermittelt und in der Folge eine Gefährdungskarte für die Exposition sowie die Hangneigung erstellt werden (vgl. Kapitel 3.1.1). Für die Darstellung wurde ein aktuelles, räumlich hochaufgelöstes (10 x 10 m) topografisches GIS-Shapefile von der Plattform *Open Data Austria* (https://www.data.gv.at) verwendet und für die Angleichung an die restlichen Parameter des IFDS auf 100 x 100 m neu klassifiziert. Im Modell ist die Exposition der Entstehungsgefahr und die Hangneigung dem Brandverhalten zugeordnet worden (vgl. Abbildung 7). Betreffend die Exposition erhielten südseitige Hänge aufgrund der höchsten Zahl an Waldbränden die höchste Gefährdungsstufe. Bei der Hangneigung wurde neben der Anzahl der Waldbrände je Neigungsstufe auch die verbrannte Fläche berücksichtigt. Aufgrund der geringen Zahl an Waldbränden bei einer gleichzeitig großen Brandfläche – sowie der damit assoziierten höheren Ausbreitungsgefahr – wurde Rasterzellen mit einem Gefälle von 40-49° die höchste Gefährdungsstufe zugewiesen (Müller et al. 2020b – Anhang 5).

2.3.5. Gewichtung und Varianten

Bis auf die täglich durch die ZAMG aktualisierten FFMC/FWI-Werte, handelt es sich bei den im IFDS-Prototyp verwendeten Daten um statische Rasterdateien. Durch die räumliche Auflösung von 100 x 100 m ergeben sich Matrizen von 5731 x 2951 Zellen für die Abdeckung des gesamten österreichischen Staatsgebietes. Die in Abbildung 7 angeführten Datenebenen wurden mittels unterschiedlicher Gewichtungen auf dem 100 x 100 m Datenraster kombiniert. Als Grundlage für die Gewichtung der sechs definierten Varianten fungierten die Erkenntnisse der Waldbrandforschung am Institut für Waldbau (Albers 2012; Arpaci et al. 2013; Grima 2011; Müller et al. 2013; Müller und Vacik 2017; Vacik et al. 2011). Variante 6 wurde als Kontrollmodell gesehen, wobei hier sämtliche Parameter/Datenebenen gleichmäßig gewichtet worden sind. Im Jahr 2018 war der kanadische FWI die Basis für die Variantenkalkulation, 2019 erfolgte diese auf Grundlage des FFMC (vgl. Kapitel 2.3.1). Tabelle 2 zeigt eine Gewichtungsvariante, wie sie für das IFDS verwendet worden ist.

Tabelle 2: Beispiel einer Gewichtungsformel des IFDS-Prototyps, hier für Variante 4 im Sommer 2019.

IFDS-Variante 4 (Sommer 2019)		
50 % Entstehungsgefahr	davon:	
	60 % FFMC	
	20 % Exposition	
	20 % Ursache	davon:
		50 % Mensch
		50 % Blitzschlag
50 % Brandverhalten	davon:	
	75 % Vegetation	
	25 % Hangneigung	

Neben den generierten Varianten wurden auch die INCA-Datensätze des FWI und FFMC als eigene Datenebenen bzw. Varianten analysiert (vgl. Kapitel 2.3.1). Zur Berücksichtigung der hohen Relevanz von Blitzschlagbränden in den Sommermonaten, ist die Gewichtung der Ursache Blitzschlag für die Varianten 1 bis 5 von Mitte Mai bis Mitte September mit 50 % festgelegt worden. Die restlichen 50 % entfielen auf den Faktor Mensch. Da im Winterhalbjahr kaum Blitzschlagbrände verzeichnet werden, wurde hier der Parameter Blitzschlag mit 0 % angenommen und die Datenebene des menschlichen Einflusses auf 100 % gesetzt.

Für jede 100 x 100 m Rasterzelle und jede Variante ergab sich bei der finalen, täglich aktualisierten Beurteilung der Waldbrandgefährdung eine von fünf Gefährdungsstufen (Tabelle 3). Aufgabe dieser Gefährdungsstufen ist die Abbildung der Charakteristik des IFDS-Prototyps, weshalb ein kombinierter Ansatz zur Bewertung der Entstehungsgefahr und des Brandverhaltens verfolgt worden ist.

Tabelle 3: Fünfstufige Gefährdungsskala des IFDS-Prototyps als kombinierter Ansatz von Entstehungsgefahr und Brandverhalten.

Gefährdungsstufe	Brandgeschehen	Brandarten	Brandverhalten
Sehr gering (1)	vereinzelt Entstehungsbrände primär auf Flurflächen, keine Sekundärbrände	Schwelbrände und Bodenfeuer sehr geringer Intensität, passive und aktive Kronenfeuer sehr unwahrscheinlich	weiße Rauchfahne, sehr niedrige Ausbreitungsgeschwindigkeit, kein Funkenflug
Gering (2)	vereinzelt Kleinbrände im Wald, großflächige Flurbrände möglich, kaum Sekundärbrände	Schwelbrände und Bodenfeuer geringer Intensität, passive Kronenfeuer unwahrscheinlich, aktive Kronenfeuer sehr unwahrscheinlich	weiß-graue Rauchfahne, niedrige Ausbreitungsgeschwindigkeit, geringer Funkenflug
Mäßig (3)	vermehrt Kleinbrände, vereinzelt Großbrände, Sekundärbrände einige Meter vor der Feuerfront möglich	Schwelbrände und Bodenfeuer mittlerer Intensität, passive Kronenfeuer möglich, aktive Kronenfeuer unwahrscheinlich	graue Rauchfahne mit dunklem Grund, mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit, moderater Funkenflug
Hoch (4)	zahlreiche Kleinbrände, vermehrt Großbrände, Sekundärbrände einige Dutzend Meter vor der Feuerfront möglich	Schwelbrände und Bodenfeuer hoher Intensität, passive Kronenfeuer wahrscheinlich, aktive Kronenfeuer möglich	rötlich-schwarze Rauchfahne, hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit, starker Funkenflug
Sehr hoch (5)	zahlreiche Großbrände, Sekundärbrände einige Hundert Meter vor der Feuerfront möglich	Schwelbrände und Bodenfeuer sehr hoher Intensität, passive Kronenfeuer sehr wahrscheinlich, aktive Kronenfeuer wahrscheinlich	schwarze, dichte Rauchfahne, sehr hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit, extremer Funkenflug

2.3.6. Validierung

Im Zuge der Validierung des IFDS-Prototyps wurde der Anteil der korrekt vorhergesagten Waldbrände für jeden Waldbrandindex bzw. für jede Variante erhoben. Als *korrekt* wurde eine Prognose dann eingestuft, wenn das Brandereignis in einer Rasterzelle der Gefährdungsstufe 3 (mäßig), 4 (hoch) oder 5 (sehr hoch) aufgetreten war. Demzufolge musste eine Prognose als *falsch* bewertet werden, wenn der Waldbrand in einer Zelle mit beurteilter Gefährdungsstufe 1 (sehr gering) oder 2 (gering) verzeichnet worden war. Der Prozentanteil der korrekt vorhergesagten Brände galt somit als Vorhersagegüte jeder Variante. Um der Fehlalarmrate Rechnung zu tragen, wurde an sämtlichen Brandtagen (Tage mit mindestens einem Waldbrand in Österreich) die Anzahl der 100 x 100 m Rasterzellen in den Gefährdungsstufen *mäßig*, *hoch* und *sehr hoch* je Variante bzw. Index gezählt und der prozentuale Anteil hinsichtlich sämtlicher Rasterzellen ermittelt (Müller et al. 2020b – Anhang 5).

Für die Validierung des IFDS-Prototyps sind die Jahre 2018 (erstmaliger Betrieb des IFDS) und 2019 herangezogen worden. Es konnten 135 Waldbrandereignisse aus dem Jahr 2018 (gesamt 172) und

195 Waldbrände aus dem Jahr 2019 (gesamt 235) für die Analyse verwendet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Berechnung der Varianten im Jahr 2018 (FWI als Kalkulationsgrundlage) und 2019 (FFMC als Basis) wurden beide Jahre getrennt betrachtet. Die Unterschiede zwischen den Jahren, Indizes und Varianten sind mittels Pearson's Chi-Quadrat-Tests auf statistische Signifikanz geprüft worden.

Mittels linearer Regression wurde eine mögliche Beziehung zwischen den Brandflächen und der Einteilung der Waldbrandereignisse in die unterschiedlichen Gefährdungsstufen untersucht. Hierfür sind nur Waldbrände ab 0,1 Hektar herangezogen worden (n = 22 im Jahr 2018; n = 26 im Jahr 2019), um die zahlreich vorhandenen und bei jeder Gefährdungsstufe auftretenden Entstehungs- und Kleinbrände unberücksichtigt zu lassen.

3. Ergebnisse

3.1. Österreichisches Waldbrandregime

Für die in dieser Dissertation vorgestellten Ergebnisse wurden sämtliche in der österreichischen Waldbrand-Datenbank dokumentierten Waldbrände von 1993 bis 2020 (Stand Oktober 2020) herangezogen und ausgewertet. Da für manche Brandereignisse relevante Informationen fehlen, ist ggf. ein eingeschränkter Datensatz verwendet worden. In den jeweiligen Statistiken und Abbildungen wird die Untersuchungsgröße bzw. Anzahl der Waldbrände mit [n = x] angegeben.

3.1.1. Zeitliche und örtliche Verteilung

Seit 1993 konnten in der österreichischen Waldbrand-Datenbank 4088 Brände dokumentiert werden, bei denen Wald (mit) betroffen war. Das Jahr mit den bislang meisten Waldbränden war 2015 [n = 285], gefolgt von 2017 [n = 282]. Die geringste Zahl an Bränden ist im Jahr 1999 [n = 16] verzeichnet worden (Abbildung 8). Die meisten Blitzschlagbrände ereigneten sich 2017 [n = 84], gefolgt von 2019 [n = 72] und 2003 [n = 64]. Die größte Gesamtbrandfläche wurde mit 129 Hektar im Jahr 2015 dokumentiert. 2003 waren es 123 Hektar und 2002 108 Hektar.

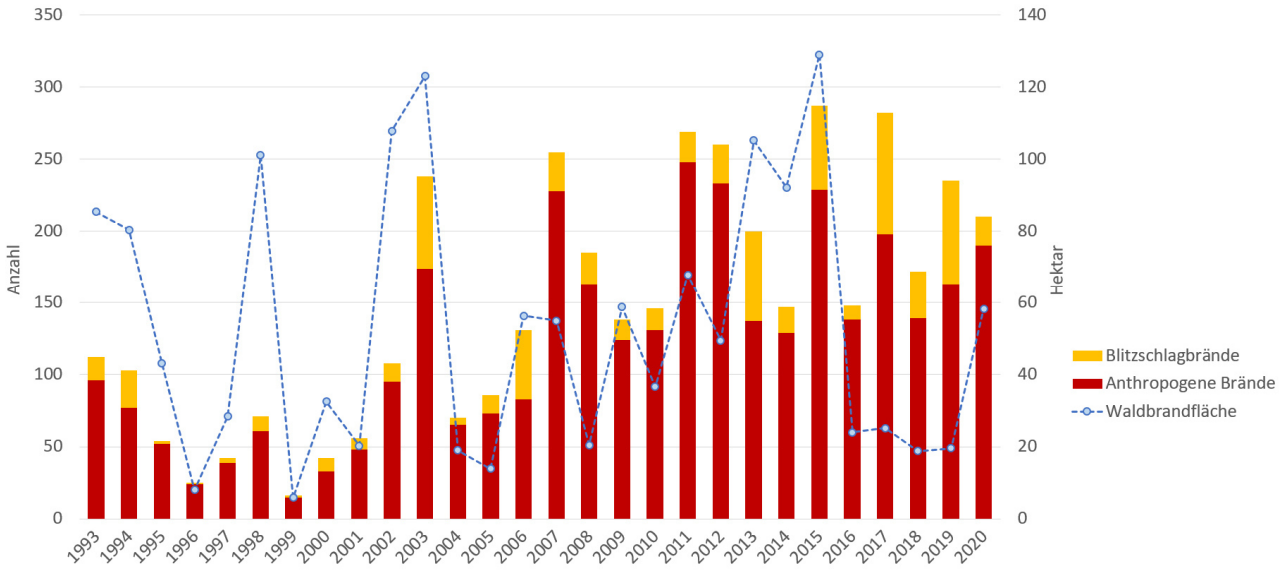


Abbildung 8: Anzahl der Waldbrände in Österreich von 1993 bis 2020 und Anteil der anthropogen ausgelösten Feuer (rot) sowie der Blitzschlagbrände (gelb). Die blaue Linie kennzeichnet die jährliche, nicht neigungskorrigierte Gesamtbrandfläche in Hektar (rechte Achse) [n = 4088].

Im Jahresverlauf wurden mit Abstand die meisten Waldbrände im April [n = 892] registriert, gefolgt von den Monaten Juli [n = 563], März [n = 547] und August [n = 536]. Die wenigsten Waldbrände fanden sich im Dezember [n = 98] (Abbildung 9). Hinsichtlich der Verteilung nach Bundesländern ereigneten sich die meisten Waldbrände in Niederösterreich [n = 994], gefolgt von Tirol [n = 788], der Steier-

mark [n = 700] und Kärnten [n = 689]. 55 Waldbrände sind in den letzten 28 Jahren in Wien dokumentiert worden.

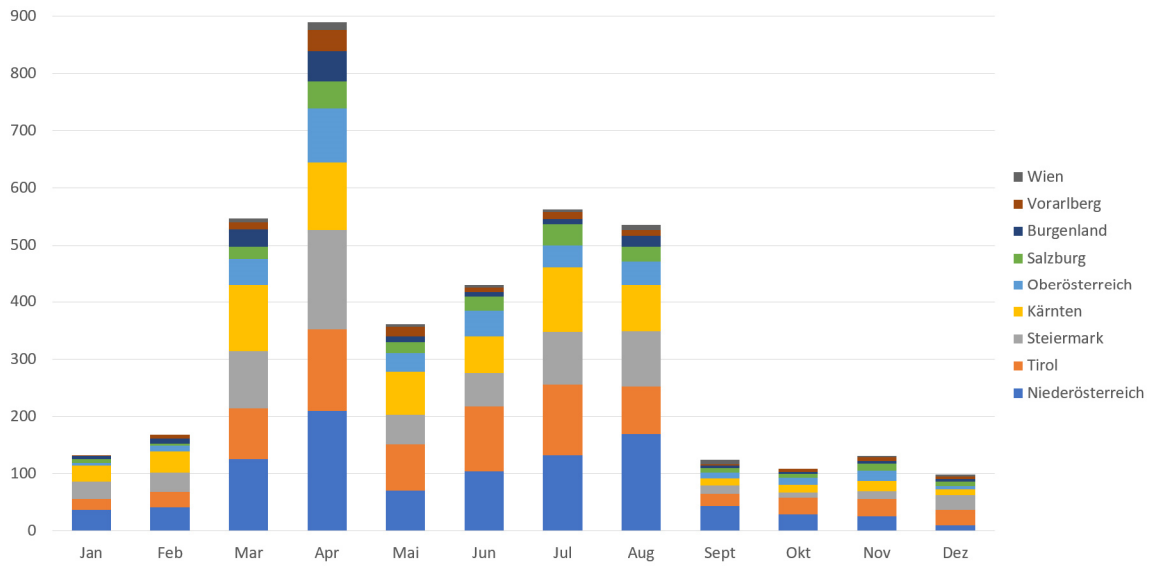


Abbildung 9: Verteilung der Anzahl der Waldbrände in Österreich nach Monaten und Bundesländern (1993 bis 2020) [n = 4088].

Die Verteilung des Waldbrandgeschehens im Tagesgang zeigt einen klaren Höhepunkt am frühen Nachmittag (Abbildung 10). Auffällig ist dabei der etwas spätere Gipfel für natürlich ausgelöste Waldbrände. Betrachtet man die Anzahl der Waldbrände pro Wochentag, so werden deutlich mehr Feuer an Samstagen und Sonntagen verzeichnet (Abbildung 11). Dies trifft jedoch nur für anthropogen verursachte Waldbrände zu, Blitzschlagbrände sind über sämtliche Wochentage gleichmäßig verteilt.

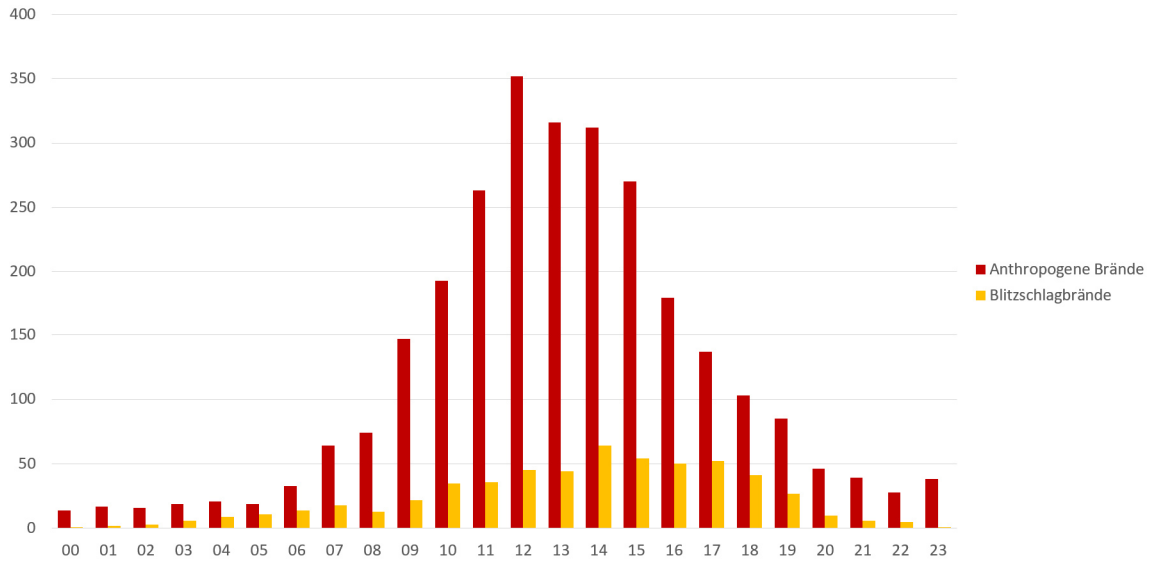


Abbildung 10: Verteilung der Anzahl der Waldbrände in Österreich von 1993 bis 2020 anhand des Meldezeitpunkts (in UTC) sowie getrennt in anthropogen und durch Blitzschlag ausgelöste Feuer [n = 3354].

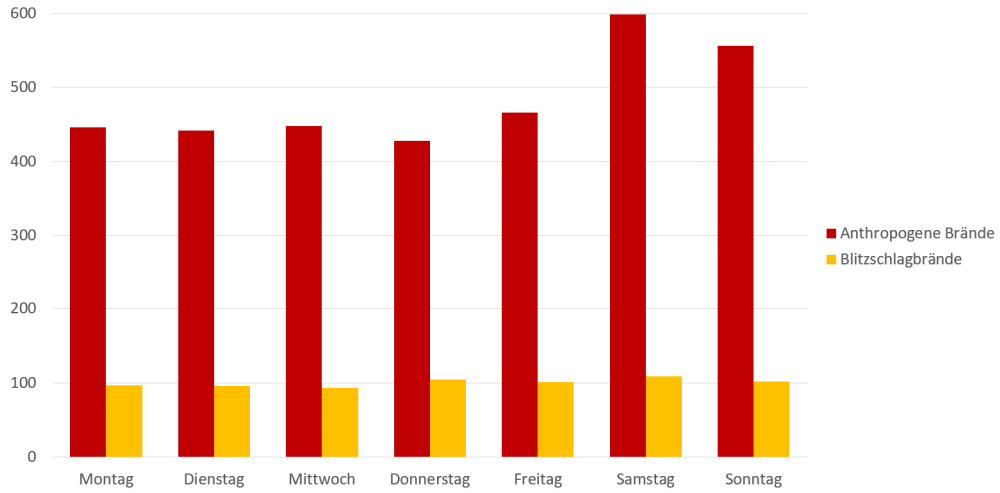


Abbildung 11: Verteilung der Anzahl der Waldbrände in Österreich von 1993 bis 2020 nach Wochentagen sowie getrennt in anthropogen und durch Blitzschlag ausgelöste Feuer [n = 4088].

Hinsichtlich der Seehöhe treten Waldbrände gehäuft in Lagen zwischen 500 und 750 m auf [n = 1172]. Oberhalb von 2000 m werden kaum noch Brände verzeichnet (Abbildung 12). Während der Mittelwert für anthropogen verursachte Waldbrände bei 610 m liegt, ereignen sich Blitzschlagbrände durchschnittlich in einer Höhenlage von 1120 m.

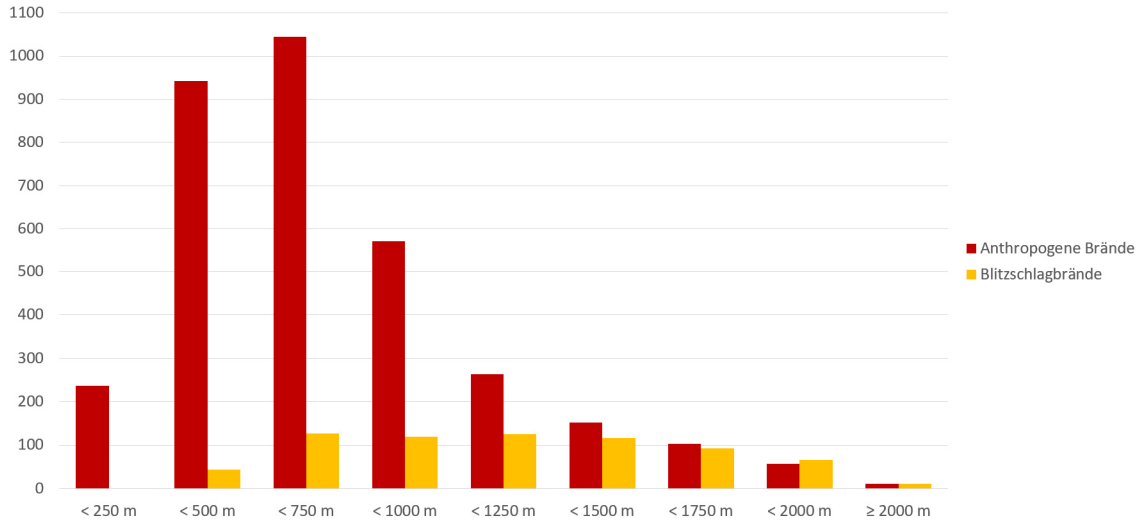


Abbildung 12: Verteilung der Anzahl der Waldbrände in Österreich von 1993 bis 2020 anhand der Seehöhe und getrennt in anthropogen und durch Blitzschlag ausgelöste Brände [n = 4088].

Die meisten Waldbrände in Österreich werden auf südexponierten Hängen verzeichnet [n = 759], die wenigsten Feuer finden sich auf Nordhängen [n = 274] (Abbildung 13). In Bezug auf die Hangneigung sind in annähernd flachen Gebieten mit weniger als 10° Gefälle am meisten Waldbrände zu finden [n = 1096], allerdings nimmt die Anzahl der Brände bis in Lagen um 40° Neigung kaum ab. Die größte Gesamtbrandfläche wurde von 1993 bis 2020 in Lagen mit weniger als 10° Gefälle verzeichnet. Auf-

fallend ist die außerordentlich große Brandfläche – bei einer gleichzeitig geringen Anzahl an Brandereignissen – zwischen 40° und 50° Gefälle. Nur wenige Waldbrände treten im sehr steilen Gelände mit einer Hangneigung von 50° oder mehr auf [n = 57].

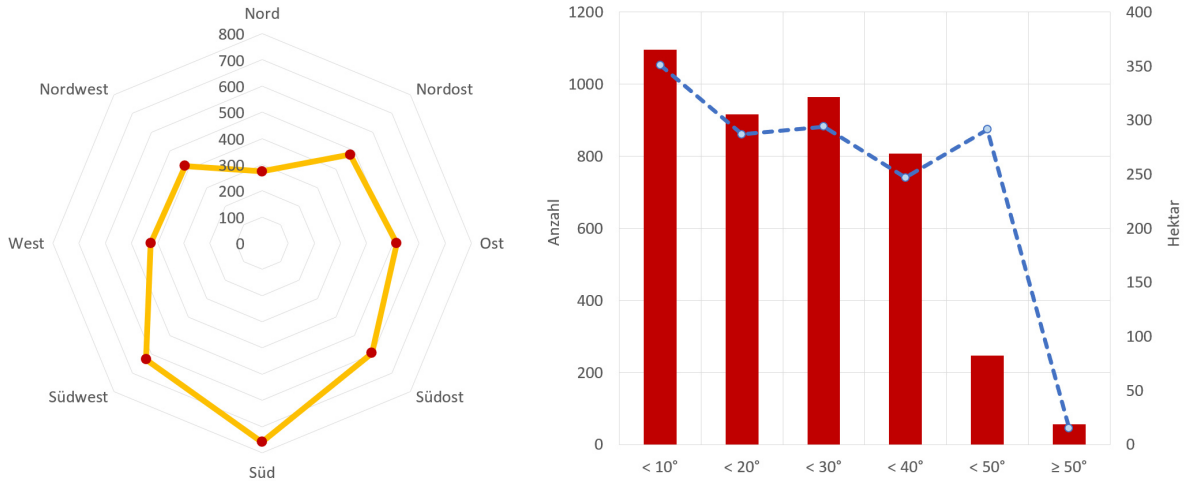


Abbildung 13: Verteilung der Anzahl der Waldbrände in Österreich von 1993 bis 2020 anhand der Exposition (links) sowie der Hangneigung (rechts). Die blaue Linie in der rechten Grafik kennzeichnet die Gesamtbrandfläche je Neigungsstufe in Hektar [n = 4088].

3.1.2. Ursachen

Von 1993 bis 2020 wurden 83 % [n = 3385] aller Waldbrände direkt oder indirekt durch den Menschen ausgelöst (Abbildung 14). Für die restlichen 17 % [n = 703] wird als Ursache Blitzschlag vermutet. Müller et al. 2013 (Anhang 3; vgl. auch Kapitel 3.2.1) ermittelten bei ihrer Auswertung der Waldbranddaten von 1993 bis 2010 einen Anteil von 15 % Blitzschlagbränden. Bei alleiniger Berücksichtigung von Waldbränden mit anthropogenen Ursachen fällt auf, dass für 41 % der exakte Auslöser unbekannt ist (Abbildung 14). Dies liegt – neben mangelhaften Informationen zu einigen Waldbrandfällen – auch darin begründet, dass für Brände, bei denen eine Entstehung durch Blitzschlag ausgeschlossen werden konnte, eine anthropogene Ursache angenommen wird (vgl. Kapitel 2.2.2). Für jeweils 13 % aller anthropogen ausgelösten Waldbrände werden Zigaretten und kontrollierte Feuer außer Kontrolle (z. B. Abbrennen eines Reisighaufens) als Ursache vermutet. 11 % aller durch den Menschen verursachten Waldbrände gehen auf *Sonstige Ursachen* zurück, darunter ausgebrachte heiße Asche, Silvesterraketen, Funkenflug bei Arbeiten im Freien oder die Entzündung von Heeresmunition. Für 10 % aller anthropogen verursachen Waldbrände in Österreich wird Brandstiftung angenommen.

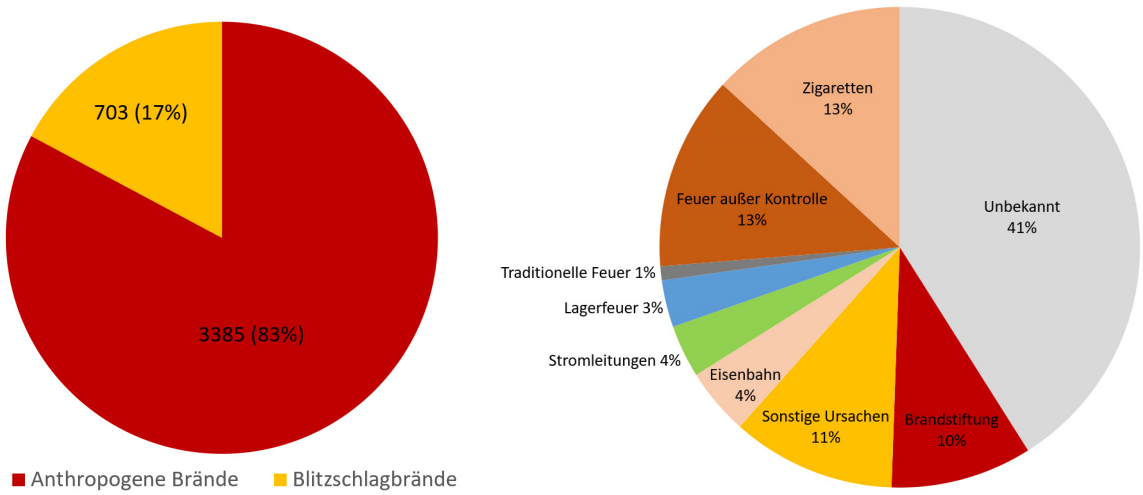


Abbildung 14: Anteil der anthropogen und durch Blitzschlag ausgelösten Waldbrände von 1993 bis 2020 in Österreich (links) [n = 4088] sowie Verteilung der anthropogenen Ursachen (rechts) [n = 3385].

Daneben konnten in den letzten Jahren verschiedene außergewöhnliche Ursachen von Waldbränden dokumentiert werden. Neben Fällen von Grabkerzen und Phosphorpatronen aus dem Zweiten Weltkrieg als Auslöser von Feuern, wurde im Frühjahr 2018 erstmals ein Waldbrand verzeichnet, bei dem von der Exekutive die heißen Bremsen eines Mountainbikes als Ursache des Feuers festgestellt worden sind. Selbstentzündung durch leicht brennbares organisches Material wird für eine Handvoll Waldbrände ausgehend von Heu- oder Komposthaufen vermutet.

3.1.3. Vegetation, Brandflächen und Brandintensitäten

Informationen zur betroffenen Vegetation fanden sich im Zeitraum von 1993 bis 2020 bei insgesamt 2062 Waldbrandereignissen (50 %). Am häufigsten waren dabei fichtendominierte Wälder (*Picea abies* (L.) H. Karst.) betroffen (1260 Feuer, 61 %), gefolgt von kieferndominierten Waldgesellschaften (421 Feuer, 20 %). Von diesem Prozentsatz entfallen 40 % auf die Schwarzkiefer (*Pinus nigra* J.F. Arnold), 33 % auf die Waldkiefer (*Pinus sylvestris* L.), 20 % auf die Bergkiefer/Latsche (*Pinus mugo* Turra subsp. *mugo*) bzw. Spirke (*Pinus mugo* subsp. *uncinata* (DC.) Domin) und 7 % auf die Zirbelkiefer/Zirbe (*Pinus cembra* L.). 7 % aller Waldbrände in Österreich betrafen primär Rotbuchenwälder (*Fagus sylvatica* L.), während weitere 9 % andere Hoch- und Niederwälder aus Laubgehölzen erfassten. Die restlichen 2 % der österreichischen Waldbrände ereigneten sich in Wäldern, die von anderen Nadelgehölzen wie der Europäischen Lärche (*Larix decidua* Mill.) oder Weißtanne (*Abies alba* Mill.) dominiert waren.

Informationen zur Größe der Brandfläche lagen von 1993 bis 2020 für 3281 Waldbrände (80 %) vor. Der Mittelwert für sämtliche Waldbrände betrug 0,45 Hektar, der Median allerdings nur 0,01 ha. Anthropogen ausgelöste Waldbrände wiesen im Durchschnitt eine Brandfläche von 0,51 ha auf, bei Blitzschlagbränden waren es lediglich 0,16 ha. Der flächengrößte Waldbrand im angegebenen Zeitraum

ereignete sich am 20. März 2014 bei Absam (Tirol) und schädigte Wald- und Almwiesenflächen im Ausmaß von 72 ha – neigungskorrigiert kann die betroffene Fläche mit 100 ha beziffert werden.

Hinsichtlich der Brandintensität entsprechend der entwickelten Intensitätsmatrizen (vgl. Abbildung 3) ist eine Einstufung für 78 % aller Waldbrände durchgeführt worden. Bei den meisten Waldbränden mit bekannter Brandfläche im Zeitraum von 1993 bis 2020 handelte es sich um Kleinbrände mit weniger als 0,3 Hektar Brandfläche (2662 Fälle, 81 %). Berücksichtigt man auch Entstehungsbrände (< 0,03 ha), fallen 1906 Waldbrände (58 %) in diese Kategorie und Kleinbrände umfassen 23 %. Als Mittelbrände (0,3 < 3 ha) wurden 520 Waldbrandereignisse (16 %) eingestuft und als Großbrände (3 < 30 ha) 93 Brände (3 %). Nur sechs Waldbrände von 1993 bis 2020 sind als Extrembrand (≥ 30 ha) klassifiziert worden. Laut Definition für österreichische Verhältnisse (Vacik et al. 2020) muss ein Extrembrand mindestens zwei Tage lang aktiv sein und die Vegetationszusammensetzung nachhaltig verändern. Derartige Brände treten im Schnitt alle fünf Jahre auf. Zuletzt wurde ein solches Ereignis im April 2015 bei Lurnfeld in Kärnten verzeichnet.

3.2. Blitzschlagbrände

3.2.1. Verifizierung von Blitzschlagbränden

Müller et al. 2013 (Anhang 3) konnten zeigen, dass 83 % jener Waldbrände von 1993 bis 2010, für die als Ursache Blitzschlag angenommen worden ist, mit hoher Wahrscheinlichkeit tatsächlich auf Gewitteraktivität zurückzuführen sind. Bei 7 % der Brände wurde eine Entstehung durch Blitzschlag als möglich erachtet, blieb aber unklar. Für die restlichen 10 % konnte eine Entzündung durch Blitzschlag ausgeschlossen werden. Auf der anderen Seite wurden 5 % aller Waldbrände mit unbekannter Ursache mit hoher Wahrscheinlichkeit als Blitzschlagbrände eingestuft. Zusammengenommen ergab sich von 1993 bis 2010 ein Anteil von 15 % Blitzschlagbränden (236 Fälle) in Bezug auf die Gesamtzahl dokumentierter Waldbrände in Österreich.

3.2.2. Analyse von durch Blitzschlag ausgelösten Waldbränden

Müller et al. 2013 (Anhang 3) haben für ihren Untersuchungszeitraum von 1993 bis 2010 festgestellt, dass die meisten Blitzschlagbrände in Kärnten aufgetreten sind (0,9 Brände pro 100 km²), gefolgt von Tirol (0,8). Allerdings gab es keinen Zusammenhang zwischen dem Jahresmittel der Gesamtzahl an CG-Entladungen und der Anzahl an Blitzschlagbränden. So werden in Teilen der Steiermark mehr als vier Wolke-Erde-Blitze pro Quadratkilometer und Jahr registriert (Schulz et al. 2005), jedoch nur wenige Blitzschlagbrände.

Hinsichtlich der Brandflächen lag der Median für Blitzschlagbrände bei 0,02 ha, bei anthropogen ausgelösten Waldbränden bei 0,05 ha. Dabei wiesen die meisten Blitzschlagbrände eine noch deutlich

geringere Ausdehnung auf: 60 % erfassten weniger oder gleich 0,01 ha (Müller und Vacik 2017 – Anhang 4). Die meisten Blitzschlagbrände hatten eine südliche, südöstliche oder südwestliche Exposition (53 %). Die Brandflächen zeigten in Bezug auf die Himmelsrichtung keinen signifikanten Trend, allerdings waren Blitzschlagbrände auf Berghängen mit südlicher und westlicher Exposition größer. Dies steht im Einklang mit früheren Untersuchungen (Vacik et al. 2011 – Anhang 1).

Die meisten Blitzschlagbrände konnten zwischen 800 und 1500 m Seehöhe verortet werden, wobei die mittlere Höhenlage 1100 m betragen hat. Die Untersuchung der Hangneigung ergab den größten Anteil an Blitzschlagbränden bei einem Gefälle zwischen 20° und 30°. Am wenigsten natürlich ausgelöste Feuer ereigneten sich im flachen Gelände.

Die hauptsächlich von Blitzschlagbränden betroffene Vegetationsform war der Nadelhochwald. Hinsichtlich der Baumarten wurde die Fichte (74 %) am häufigsten von Blitzschlagbränden geschädigt, wobei der relative Fichtenanteil im österreichischen Wald derzeit 51 % beträgt (ÖWI 2009). Dahinter folgten Kiefernwälder (22 %) sowie andere Nadel- und Laubwälder (4 %). Die verschiedenen Kiefernarten waren zusammen viermal häufiger von Blitzschlagbränden betroffen, als es die natürliche Baumartenverteilung (5 % an der österreichischen Waldfläche) vermuten lassen würde.

3.2.3. Charakteristik der waldbrandauslösenden Blitzschläge

Müller und Vacik 2017 (Anhang 4) haben in ihrer Studie signifikante Unterschiede ($p < 0,05$) zwischen der Entzündung von Waldbränden durch positive und negative Blitzschläge festgestellt. Positive Entladungen als Brandauslöser waren mehr als doppelt so häufig (21 %), als ihre mittlere Verteilung in den untersuchten Sommergewittern vermuten ließ (9 %). Hingegen wiesen sowohl die Stromamplituden von positiven und negativen Blitzen als auch die Anzahl der Strokes in allen drei Stichproben keine nennenswerten Abweichungen vom Mittelwert auf.

Bei der Untersuchung der Veränderung der Werte des BUI und des FFMC vom Tag der Brandentstehung auf den Folgetag zeigte sich für fast alle Stichproben ein hochsignifikanter Rückgang ($p < 0,001$). Zugleich waren die ermittelten Niederschlagsmengen für die Einschlagsorte der Blitzentladungen in Stichprobe 1 (vermutlich brandauslösende Blitzschläge) sowohl 24 als auch 48 Stunden nach der Brandentstehung signifikant niedriger ($p = 0,01$) als in Stichprobe 3 (Zufallsauswahl) und teilweise ebenfalls signifikant niedriger im Vergleich zu Stichprobe 2 (möglicherweise brandauslösend). Höhere BUI-Werte am Tag der Brandentstehung korrelierten mit einer größeren Brandfläche, allerdings war dieser Zusammenhang nicht signifikant ($p = 0,18$). Die Menge der Niederschläge (24h bzw. 48h nach der Brandentstehung) hatte keinen nennenswerten Einfluss auf die Größe der verbrannten Fläche.

3.2.4. Gefährdungskarte Blitzschlagbrände

Gemäß der Analyse von Müller et al. 2013 (Anhang 3) und Albers (2012) sind für die vier inkludierten Parameter der statischen Gefährdungskarte für Blitzschlagbrände in Österreich die folgenden Werte als Gefährdungsstufe 5 (*sehr hoch*) identifiziert worden:

- Seehöhe: 800-1500 m
- Exposition: Süden
- Hangneigung: 20-30°
- Vegetation: Nadelhochwald (mit hohen Brennstoffmengen)

Nach Festlegung der übrigen vier Gefährdungsstufen je Parameter (vgl. Müller et al. 2020b – Anhang 5) und einer Gewichtungsfunktion erfolgte die Berechnung und Darstellung der Gefährdungskarte mit einer räumlichen Auflösung von 100 x 100 m (Abbildung 15, vgl. Kapitel 2.2.5).

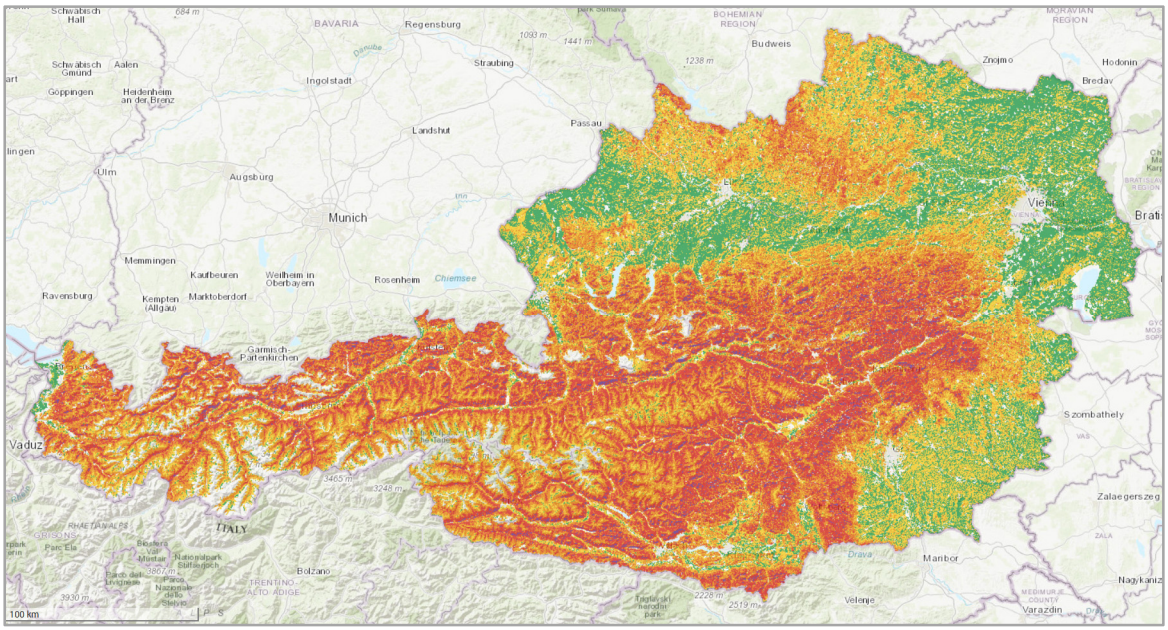


Abbildung 15: Gefährdungskarte für Blitzschlagbrände in Österreich. In Grün erscheinen Gebiete mit einer sehr geringen Gefährdung, gelb sind Regionen mit geringer Gefährdung, orange Flächen mit mäßiger Gefährdung, rot steht für eine hohe Gefährdung und violett kennzeichnet Bereiche mit einer sehr hohen Gefährdung.

3.3. Integriertes System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr

3.3.1. IFDS-Prototyp

Der IFDS-Prototyp wurde auf einem Online-Server unter https://www.waldbrand.at auf Python-Basis und mittels JavaScript-Bibliotheken (jQuery und Leaflet) von zwei Absolventen der Höheren Technischen Lehranstalt (HTL) Donaustadt als interaktives Web-GIS eingerichtet (Abbildung 16). Die Variantenberechnungen und die Aktualisierung der Kartendarstellungen werden vom System täglich gegen 06 UTC unmittelbar nach dem Download der von der ZAMG bereitgestellten FFMC/FWI-Daten automatisiert durchgeführt und angezeigt.

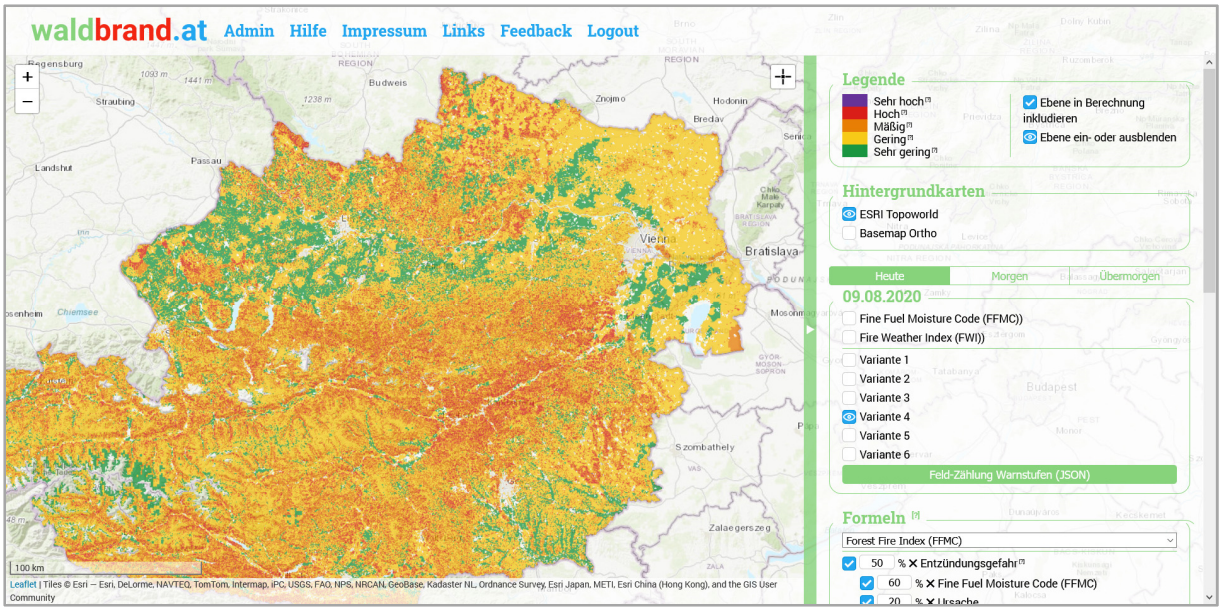


Abbildung 16: Screenshot des IFDS-Prototyps auf waldbrand.at. In der Kartenansicht ist die simulierte Waldbrandgefahr am 09.08.2020 für Variante 4 dargestellt.

Seit dem Start des Prototyps im Jahr 2018 sind verschiedene Optimierungen und Fehlerkorrekturen durchgeführt worden. Zusätzlich implementierte Funktionen umfassen:

- Ein Analysetool, mit dessen Hilfe für jede 100 x 100 m Rasterzelle und für jeden Tag die Rohwerte der Datenebenen sowie die berechneten Gefährdungsstufen abgefragt werden können.
- Die Möglichkeit, sämtliche Brände der österreichischen Waldbrand-Datenbank in der Kartendarstellung einzublenden sowie die vom System berechneten Werte und Gefährdungsstufen am Brandtag auszugeben.
- Eine Downloadfunktion, mit der die Daten sämtlicher Vegetationsbrände samt kalkulierter Varianten- und Indexwerte als CSV-Datei heruntergeladen werden können.
- Ein Benutzersystem zur Einrichtung neuer User mit unterschiedlichen Berechtigungen.
- Eine Such-, Feedback- und umfassende Hilfefunktion.
- Einen interaktiven Kalender.

Der IFDS-Prototyp läuft mit Stand Dezember 2020 passwortgeschützt und ist auf Anfrage für Experten zugänglich. Er wurde im Rahmen von Workshops einem breiteren Publikum präsentiert und befindet sich derzeit im Teststadium.

3.3.2. Validierung

Müller et al. 2020b (Anhang 5) konnten deutliche Unterschiede bei der Leistung des FWI, FFMC und der berechneten Varianten des IFDS feststellen. Im Jahr 2018 zeigte Variante 4 die beste Vorhersagegüte mit 50 % korrekt prognostizierter Waldbrände (in den Warnstufen *mäßig*, *hoch* oder *sehr hoch*, vgl. Kapitel 2.3.6). Dies war signifikant besser ($p < 0,05$) als die alleinige Leistung des FWI (37 %) sowie

ebenfalls signifikant besser als Variante 2 (34 %) und Variante 6 (38 %). Variante 4 hatte auch eine relativ geringe Fehlalarmrate von 16 % (für den FWI lag sie bei 30 %).

Im Jahr 2019 (mit dem FFMC als Grundlage der Variantenberechnung) ergab sich ein differenzierteres Bild. So war die Leistungsfähigkeit sämtlicher Varianten signifikant besser ($p < 0{,}001$) als die des FWI, während nur Variante 4 eine signifikant ($p < 0{,}01$) höhere Vorhersagerate aufwies als der FFMC. Variante 4 hatte mit 58 % auch den höchsten Anteil korrekt prognostizierter Waldbrände bei einer Fehlalarmrate von 28 %. Im Vergleich dazu ergab sich für den FWI eine korrekte Vorhersagerate von 32 % (FFMC 42 %) und eine Fehlalarmrate von 35 % (FFMC 36 %).

Hinsichtlich einer möglichen Korrelation zwischen der Größe der Waldbrandflächen und den berechneten Werten der Waldbrandindizes bzw. IFDS-Varianten konnte kein signifikanter Zusammenhang gefunden werden.

4. Diskussion

4.1. Österreichisches Waldbrandregime

Auffällig ist die in Österreich erhebliche jährliche Schwankungsbreite bei der Anzahl der Waldbrände (etwa 100 bis 300) sowie der Gesamtbrandflächen (ca. 20 bis 150 Hektar), was sich deutlich in Abbildung 8 zeigt. Wie zahlreiche Untersuchungen ergeben haben, hängen das Auftreten und das Verhalten von Waldbränden stark mit dem Witterungsverlauf zusammen (z. B. Jolly et al. 2015; Rodrigues et al. 2020; Wastl et al. 2012). Dies führt dazu, dass es in manchen Jahren in Österreich nur wenige und kleinflächige Waldbrände gibt und andere Jahre außerordentlich brandintensiv ausfallen (Müller et al. 2015). In Österreich wird meist nur eine intensive Brandsaison pro Jahr beobachtet; häufig entweder im März/April oder im Juli/August (vgl. Abbildung 9). So brachte das Jahr 2013 einen de facto Ausfall der Frühjahrsbrandsaison (lediglich zehn Waldbrände von März bis Mai), während im folgenden Juli und August in nur drei Wochen über 100 Waldbrände verzeichnet wurden. Ein weiteres Beispiel kann aus dem Jahr 2020 angeführt werden: Nach einem außerordentlich brandintensiven Frühjahr (allein im April ereigneten sich 125 Waldbrände), fielen die Sommer- und Herbstbrandsaison durch wiederholte Niederschläge und fehlende Hitzewellen ungewöhnlich schwach aus. Im Zuge des Klimawandels ist anzunehmen, dass Trockenperioden und Hitzewellen häufiger werden, wodurch mit mehr und intensiveren Brandsaisonen zu rechnen ist (Gobiet et al. 2014; Trnka et al. 2016; Wastl et al. 2012).

Durch Blitzschlag ausgelöste Waldbrände treten im Mittel etwas später am Tag auf, als anthropogen verursachte Feuer. Bereits Vacik et al. (2011) konnten eine ähnliche Verteilung dokumentieren. Es wird angenommen, dass dieses Bild ein Resultat der sommerlichen Gewitteraktivität ist, die über Landflächen am späten Nachmittag ihr Maximum erreicht (Poelman 2014; Zajac und Rutledge 2001). Das Auftreten von direkt oder indirekt durch den Menschen ausgelösten Waldbränden in Österreich korreliert mit der geringsten Luftfeuchtigkeit und vermehrten Freizeitaktivitäten am frühen Nachmittag (Ghassemi-Bönisch 2011; Schwab und Steinicke 2003). Die Tatsache, dass anthropogen ausgelöste Waldbrände in Österreich an Samstagen und Sonntagen häufiger sind (Abbildung 11), spiegelt die hohe Relevanz von Aktivitäten im Freien wider, da am Wochenende eine größere Anzahl Menschen in den Wäldern unterwegs ist.

Brandstiftung ist in Österreich derzeit noch kein so großes Thema wie in Teilen Südeuropas (Ganteaume et al. 2013; Lovreglio et al. 2010). Der heimische Anteil von etwa 10 % an sämtlichen anthropogen ausgelösten Waldbränden ist mit der Schweiz vergleichbar (Müller et al. 2020a). In Deutschland konnten im Schnitt der letzten Jahre etwa 20 % der jährlichen Waldbrände auf Vorsatz zurückgeführt werden (BLE 2020). In Österreich wurden in den letzten Jahren vermehrt Brandstiftungen dokumentiert. Ebenso häufen sich Fälle, bei denen Brandstiftung als Ursache angenommen wird. Von manchen Waldbrandforschern wird vermutet, dass Brandstiftung auch im Alpenraum an Relevanz gewinnen könnte, wie Beispiele aus anderen Ländern zeigen (Dube 2009; Moreira et al. 2011).

Immer wieder finden sich in Medien- oder auch Einsatzberichten der Feuerwehren Glasscherben als kolportierte Brandursache. Entgegen der landläufigen Meinung ist die Entstehung eines Feuers durch Glasflaschen/-scherben aber sehr unwahrscheinlich (Müller 2007), weshalb im Fall einer solchen Meldung eine andere Ursache angenommen wird. In der österreichischen Waldbrand-Datenbank werden solche Brandereignisse als anthropogen ausgelöste Feuer (ohne spezifizierte Ursache, vgl. Abbildung 14) abgelegt.

Hinsichtlich der von Waldbränden geschädigten Vegetation fällt auf, dass 22 % aller Brände in kieferndominierten Waldgesellschaften auftreten. Dies bedeutet, dass die verschiedenen Kiefernarten viermal häufiger von Waldbränden betroffen sind, als ihre natürliche Verteilung von rund 5 % am österreichischen Wald vermuten lassen würde (ÖWI 2009). Die hohe Entzündbarkeit der Bodenstreu und die durch das lockere bis lichte Kronendach oftmals trockeneren Bedingungen am Waldboden sind hierfür maßgeblich verantwortlich (Fréjaville et al. 2018; Ganteaume et al. 2009). Im Vergleich zu den Anteilen der Baumarten im österreichischen Wald sind Brände in Fichtenwäldern etwas häufiger, in Buchenwäldern etwas seltener. Die meisten Waldbrände in Österreich werden in fichtendominierten Wäldern verzeichnet, die zudem einen Großteil der heimischen Schutzwälder darstellen. Fichten weisen jedoch eine geringe Resilienz gegenüber Bränden auf und sind im Alpenraum bereits durch zahlreiche Störfaktoren wie Dürren, Sturmwurf, Schneebruch oder Borkenkäfer gefährdet (Bär et al. 2018; Honkaniemi et al. 2020; Moser et al. 2010). In Kombination mit dem Klimawandel ist anzunehmen, dass der Fichtenanteil in den heimischen Wäldern weiter abnehmen wird (Ganthaler et al. 2014; Lexer et al. 2014; ÖWI 2009). Die generell geringe Anzahl von unkontrollierten Feuern in Laubwäldern hängt mit der herabgesetzten Brennbarkeit heimischer Laubgehölze durch deren Vegetationszusammensetzung sowie mit der raschen Zersetzung der Streu und den teilweise feuchteren Bedingungen am Waldboden zusammen (Schunk et al. 2017; Thonicke und Cramer 2006).

Bei den meisten Waldbränden in Österreich handelt es sich um Entstehungs- und Kleinbrände. Nur 7 % aller Feuer erfassen mehr als einen Hektar. Ein wesentlicher Grund für die geringe Zahl an Großbränden dürfte der Effektivität der Freiwilligen Feuerwehren geschuldet sein. 90 % aller Waldbrände in Österreich können innerhalb von zwanzig Minuten nach der Alarmierung bekämpft werden (D. Pilat, Abteilung Katastrophenschutz und Feuerwehr Graz, persönliche Mitteilung). Unterstützend kommt hinzu, dass in der österreichischen Bevölkerung eine aktive Meldebereitschaft bei verdächtigen Rauchentwicklungen vorhanden ist. Daneben sind die österreichischen Waldflächen gut mit Forststraßen erschlossen, die bei Bodenfeuern als Brandschneisen fungieren und die Brandbekämpfung erleichtern (Narayanaraj und Wimberly 2011; Päätalo 1998). Österreich ist der feucht-warmgemäßigten Klimazone zuzuordnen, woraus ganzjährig eher feuchte Bedingungen sowie – in Verbindung mit konvektiven Prozessen an den Berghängen der Alpen – eine rege Schauer- und Gewittertätigkeit in den Sommermonaten resultieren (Auer et al. 2001). Lange Trockenheit in Verbindung mit starkem Wind sind, im Gegensatz zu südeuropäischen Ländern (z. B. Hernandez et al. 2015), in den alpinen Bereichen Österreichs selten. Sollten jedoch Ausnahmesommer wie in den Jahren 2003 und 2015 häufiger werden (ZAMG 2020), ist

mit intensiveren und großflächigeren Waldbränden zu rechnen (Bedia et al. 2014; Seidl et al. 2014; Wastl et al. 2012).

4.2. Waldbrand-Dokumentation

Die Waldbrand-Dokumentation hat es ermöglicht, die räumliche und zeitliche Verteilung des Waldbrandgeschehens in Österreich, die Brandintensitäten und betroffenen Vegetationstypen umfassend zu untersuchen. Von Vacik et al. (2011) wurde das österreichische Waldbrandregime erstmals in Form einer wissenschaftlichen Studie beschrieben. Eine Auswertung identifizierter Anomalien der letzten Jahre erfolgte durch Müller et al. (2015). Müller und Vacik (2020) haben in ihrem Beitrag aktuelle Eckdaten des österreichischen Waldbrandregimes präsentiert. Wie von Eastaugh und Vacik (2012) festgestellt, handelt es sich bei der österreichischen Waldbrand-Datenbank um eine konsistente Dokumentation von Waldbränden größer als 1000 m² seit 1995. In den letzten Jahren wurden vermehrt Anstrengungen unternommen, auch möglichst alle Entstehungs- und Kleinbrände zu dokumentieren. Es wird vermutet, dass vor dem Beginn der koordinierten Waldbrand-Dokumentation am Institut für Waldbau im Jahr 2008 zahlreiche kleinere Brände nicht in der Datenbank enthalten sind, was sich an den geringeren Fallzahlen vor dem Jahr 2007 zeigt (Abbildung 8). Auch in anderen Ländern sind länger zurückliegende Waldbranddaten nicht konsistent dokumentiert (Hall und Harwood 1989; Podur et al. 2002; San-Miguel und Camia 2009). In den Alpenländern ist die Waldbrand-Dokumentation unterschiedlich organisiert (Müller et al. 2020a). Teilweise existieren, wie in der Schweiz, webbasierte Plattformen für die umfassende Aufarbeitung von Waldbrandereignissen (Pezzatti et al. 2019). Die in Österreich angewandten Erhebungsmethoden sind zeitlich und personell aufwendig, aber derzeit mangels eines behördlichen Auftrags zur Waldbranderfassung der einzige Weg, die Waldbrand-Datenbank aktuell und umfassend zu halten.

Im Rahmen dieser Dissertation wurde die Hypothese aufgestellt, dass jedes Jahr in Österreich zahlreiche Waldbrände mit einem Schwerpunkt im Frühjahr und Sommer verzeichnet werden. Gemäß der durchgeführten Waldbranderhebungen und -auswertungen sind im Schnitt der letzten 28 Jahre in Österreich etwa 150 Waldbrände pro Jahr aufgetreten, die meisten davon in den Frühjahrs- und Sommermonaten. Berücksichtigt man nur den Zeitraum seit Beginn der Waldbrand-Dokumentation am Institut für Waldbau im Jahr 2008, beträgt die mittlere jährliche Anzahl an Waldbränden in Österreich mehr als 200. In der ebenfalls alpendominierten Schweiz werden jedes Jahr rund 110 Waldbrände verzeichnet (Pezzatti et al. 2019). Vacik et al. (2011) konnten für die Periode 2001-2009 im jährlichen Mittel noch 120 Waldbrände in Österreich verzeichnen. Die verbesserte Waldbrand-Dokumentation und eine intensivere Ereignissuche von Entstehungs- und Kleinbränden dürften dazu beigetragen haben, dass in den letzten Jahren mehr Waldbrände dokumentiert worden sind. Es wird daher angenommen, dass der mittlere Anstieg der Anzahl der Waldbrände in den Jahren 2000 bis 2010 (vgl. Abbildung 8) weder auf klimatische Faktoren, respektive den Klimawandel, noch auf mehr Entzündungen durch sozioöko-

nomische Veränderungen zurückzuführen ist, sondern auf der umfassenderen Waldbrand-Dokumentation beruht. Hinsichtlich der Verteilung der Anzahl der Waldbrände im Jahresgang sind Ähnlichkeiten, aber auch Unterschiede im Vergleich zu anderen Alpenländern feststellbar. Oftmals werden im Frühjahr und Hochsommer die meisten Waldbrände verzeichnet (Conedera et al. 2018). In den Nordalpen liegt der Schwerpunkt eher im Juli und August, in den Südalpen im zeitigen Frühjahr oder Spätwinter (Reinhard et al. 2005). Dabei determiniert die Witterung, speziell Trockenperioden und Hitzewellen, das regionale Auftreten von Waldbränden (Jolly et al. 2015; Rodrigues et al. 2020). In Österreich korrelierte eine Häufung an Waldbrandereignissen mit den trocken-heißen Sommern der Jahre 2003, 2013 und 2015 sowie mit niederschlagsarmen Frühlingsmonaten wie 2012 oder 2020 der Fall (ZAMG 2020). In überdurchschnittlich feuchten Monaten ohne Trockenperioden (bspw. Sommer 2020) ereignen sich, unabhängig von der Jahreszeit, kaum relevante Waldbrände.

Eine weitere Hypothese dieser Arbeit betraf die vermutete hohe Relevanz von anthropogen ausgelösten Waldbränden in Österreich. Es konnte gezeigt werden, dass der Mensch für einen Großteil (> 80 %) der Waldbrände verantwortlich ist, wobei in den meisten Fällen Unachtsamkeit oder Fahrlässigkeit als Brandursachen genannt werden können (Abbildung 14). In anderen europäischen Ländern ist der Anteil von anthropogen ausgelösten Waldbränden meist noch höher und liegt mitunter bei über 95 % (Ganteaume et al. 2013).

Zuletzt wurde für diese Dissertation die Hypothese aufgestellt, dass Waldbrände in Österreich besonders häufig auf steilen Südhängen mit Nadelwaldbestand und in den Nachmittagsstunden verzeichnet werden. Die Auswertung der räumlich-tageszeitlichen Hotspots für das Auftreten von Waldbränden in Österreich ergab, dass Brandereignisse tatsächlich vermehrt auf steilen, mit Nadelholz bestockten Südhängen verortet sind und am Nachmittag gehäuft stattfinden (vgl. Kapitel 3.1.1 und 3.1.3). Ähnliche Erkenntnisse fanden sich für den Alpenraum bereits im Rahmen des ALP FFIRS Projektes (Valese et al. 2014). In Südeuropa scheinen Waldbrände bei größerer Hangneigung ebenfalls häufiger zu sein, allerdings zeigen Auswertungen hinsichtlich der Exposition, dass südseitige Hänge mitunter weniger häufig von Bränden betroffen sind, was möglicherweise an der im Vergleich zu Mitteleuropa unterschiedlichen Vegetationsstruktur und den generell trockeneren Bedingungen liegt (Carmo et al. 2011; Moreno et al. 2011). In den Südalpen sowie im mediterranen Raum sind zudem oftmals Laub- und Buschwälder von Bränden betroffen, etwa Kastanienplantagen (*Castanea sativa* Mill.) oder die an Feuer angepassten Macchia-Bestände (Bajocco et al. 2011; Colombaroli et al. 2007; Pezzatti et al. 2009).

Die derzeit zwingend erforderlichen Metadaten für die Aufarbeitung eines Waldbrandereignisses in Österreich, speziell das exakte Datum, schränken die Nutzung älterer Datensätze ein. Beispielsweise existieren Statistiken oder handschriftliche Aufzeichnungen von Feuerwehren und Gemeinden, in denen nur das Monat oder Jahr der aufgetretenen Waldbrände genannt werden. Bei der Aufarbeitung von Waldbrandereignissen, für die als primäre Informationsquelle Medien- oder Einsatzberichte herangezogen werden, fehlen meist die exakten Waldbrandkoordinaten. Entsprechende Nachfragen bei den zuständigen Ortsfeuerwehren führen nicht immer zum Erfolg – auch deshalb, weil in den Einsatzleit-

systemen der Landesfeuerwehrverbände die Eingabe von Koordinaten nur fallweise erfolgt. Dies führt dazu, dass viele Waldbrände nur grob verortet werden können, was sich wiederum auf die Qualität der abgeleiteten Informationen (bspw. auf die topografischen Daten) auswirkt. Herausforderungen in Bezug auf den Umfang und die Qualität von Waldbranddaten sind ebenso aus anderen mitteleuropäischen Ländern bekannt, beispielsweise aus der Schweiz (Pezzatti et al. 2019).

Abgesehen von Waldbränden werden in der österreichischen Waldbrand-Datenbank auch größere Flurbrände erhoben und aufgearbeitet. International wird meist der Weg beschritten, unter dem Überbegriff *wildfire* sämtliche unerwünschten Vegetationsbrände zu erfassen. Speziell in Europa ist es üblich, für Brände im Wald den Begriff *forest fire* zu verwenden (Tedim et al. 2015). In Österreich liegt der Fokus bei der Erfassung von Vegetationsbränden auf unkontrollierten Feuern in Waldgebieten. Dieser Schwerpunkt wird auch deshalb getroffen, da der hohe personelle wie zeitliche Aufwand für die Waldbrand-Dokumentation die Aufarbeitung der deutlich zahlreicheren Flurbrände erschwert.

In der österreichischen Waldbrand-Datenbank ist es möglich, die Brandart *Wald-/Flurbrand* auszuwählen. Diese Kategorie enthält vor allem Brände, die sowohl Wald- als auch Flurflächen betroffen haben. Zudem werden hier unklare Fälle abgelegt, bei denen möglicherweise Wald geschädigt worden ist, sowie Ereignisse, für die nicht endgültig geklärt werden konnte, ob Waldflächen (entsprechend dem österreichischen Forstgesetz) tatsächlich betroffen waren. Die jeweilige Einschätzung hängt primär von dem verfügbaren Fotomaterial in den Medien- und Einsatzberichten ab. Es ist anzunehmen, dass unter *Wald-/Flurbrand* einige Brände abgelegt sind, die tatsächlich abseits von Waldflächen aufgetreten sind. Wenigstens für die letzten zehn, zwölf Jahre – in denen zu den meisten Brandereignissen Fotomaterial verfügbar ist – sollte die Anzahl falsch eingestufter Brände sehr gering sein.

4.3. Analyse der Blitzschlagbrände

Im Rahmen dieser Dissertation wurde ein mehr als zwanzigjähriger Datensatz an Blitzschlagbränden in Österreich verifiziert und analysiert. Dadurch war es möglich, die Bedeutung und die Charakteristiken von natürlich entstandenen Waldbränden im Ostalpenraum abzuleiten.

Als Hypothese wurde formuliert, dass in den Sommermonaten ein hoher Anteil an Blitzschlagbränden zu verzeichnen ist. Müller et al. (2013) konnten zeigen, dass von Juni bis August in manchen Jahren rund 40 % aller Waldbrände in Österreich auf Blitzschläge zurückzuführen sind. Bezogen auf ein ganzes Jahr können es bis zu 30 % sein (Abbildung 8). Im langjährigen Mittel werden in Österreich 15-17 % aller Waldbrände durch Blitzschläge ausgelöst. Diese Werte sind vergleichbar mit Forschungsergebnissen aus Teilen der Schweiz und Italiens und verdeutlichen die Relevanz von natürlich ausgelösten Waldbränden in den Alpen (Conedera et al. 2006; Vacchiano et al. 2018; Valese 2007).

Eine weitere Hypothese im Rahmen dieser Dissertation betraf die Bedeutung der Polarität von Wolke-Erde-Blitzen. Es wurde angenommen, dass die Art der elektrostatischen Entladung nicht entscheidend für das Auftreten von Blitzschlagbränden ist. Hingegen konnte gezeigt werden, dass positive

CG-Blitze rund 20 % aller natürlich ausgelösten Waldbrände entfachen und damit deutlich mehr, als die natürliche Verteilung in den Sommermonaten vermuten lassen würde (Müller und Vacik 2017; Poelman et al. 2016). Bei internationalen Studien wurde zuweilen ein ähnlicher Zusammenhang (Wendler et al. 2011; Wotton und Martell 2005), in anderen Fällen keine erhöhte Entzündungsgefahr durch positive Blitze festgestellt (Larjavaara et al. 2005; Pineda et al. 2014; Vecín-Arias et al. 2016). Eine aktuelle Studie aus der Schweiz identifizierte ebenfalls einen überdurchschnittlich hohen Prozentsatz an positiven Blitzen als vermutlich waldbrandauslösende Entladungen (Moris et al. 2020). Es wird angenommen, dass positive Blitzschläge zumindest im Alpenraum eine höhere Wahrscheinlichkeit für eine Entzündung aufweisen, was möglicherweise auf den gehäuft auftretenden Langzeitstrom (engl. *Long-Continuing-Current*, LCC) bei positiven Gewitterentladungen zurückzuführen ist (Pineda et al. 2014; Schumann et al. 2013).

Zuletzt wurde als Hypothese vermutet, dass geringere Niederschlagsmengen die Entstehung und Ausbreitung von Blitzschlagbränden beeinflussen. Die Untersuchungen im Rahmen dieser Dissertation ergaben, dass geringere Niederschlagsmengen mit einer höheren Entstehungsgefahr von Blitzschlagbränden korrelieren. Dies unterstreicht die Bedeutung der lokalen Trockenheit für die Brandentstehung (Nash und Johnson 1996; Schunk et al. 2017). Hinsichtlich der Brandausbreitung, respektive Flächengröße von Blitzschlagbränden, konnte hingegen kein signifikanter Zusammenhang mit den Niederschlagsmengen festgestellt werden, was möglicherweise eine Folge der Überprägung durch die rasche Brandmeldung und -bekämpfung durch die österreichischen Feuerwehren ist. Ebenso ist es denkbar, dass die fallenden Niederschläge nicht ausreichen, um tiefer liegende Humusschichten, in denen sich der Blitzschlagbrand entwickelt, zu erreichen. Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Blitzschlagbrände im Anfangsstadium bevorzugt unterirdisch als Schwelbrände ausbreiten, bis die Bedingungen an der Oberfläche günstig für die Weiterentwicklung zu einem Boden- oder Kronenfeuer sind (Anderson 2002; Pineda und Rigo 2017).

Für die Verifizierung der Blitzschlagbrände in Österreich wurden CG-Entladungen bis zu zehn Tage vor der Waldbrandmeldung und in einem Radius von zehn Kilometern zum Ausbruchsort des Feuers herangezogen. Ein ähnlicher kombinierter Ansatz aus zeitlichen und räumlichen Aspekten hat sich auch in der kürzlich veröffentlichten Studie von Moris et al. (2020) für die Schweiz bewährt. Im Zuge der Auswertung der österreichischen Blitzschlagbrände konnte gezeigt werden, dass es eine gute Vorab-Einschätzung der Ursache Blitzschlag seitens der Feuerwehren und Behörden gibt. Für einen Großteil der Waldbrände, bei denen Blitzschlag als Ursache vermutet worden war, wurden relevante Blitzschläge identifiziert (Müller et al. 2013).

Für das österreichische Blitzortungssystem ALDIS wird eine hohe Detektionsrate von CG-Blitzen von annähernd 100 % angenommen, zumindest in den letzten Jahren (Schwalt et al. 2018). Allerdings gibt es manche Entladungen, die von ALDIS nicht erkannt werden. Im Speziellen müssen hier Aufwärtsblitze angeführt werden, welche unter Umständen ebenfalls Brände entfachen können (G. Diendorfer, Abteilungsleiter ALDIS, persönliche Mitteilung). Ein solches Ereignis dürfte am 19. Februar

2020 in der Gemeinde Eisenkappel-Vellach (Kärnten) stattgefunden haben, als es im Zuge eines Wintergewitters zu einem Waldbrand im steilen, unwegsamen Gelände gekommen ist. Obwohl ALDIS im fraglichen Gebiet keine Gewitterentladungen registrieren konnte, zeigt entsprechendes Bildmaterial der Feuerwehren eine frische Blitzspur an einer auf der Brandfläche stehenden Fichte.

Während Müller et al. (2013) noch einen Anteil von 15 % Blitzschlagbränden in Österreich ermitteln konnten, zeigt die aktuelle Auswertung mit Daten bis inklusive 2020, dass der langjährige Anteil der Blitzschlagbrände bei 17 % liegt (vgl. Kapitel 3.1.2). Der Trend bei der jährlichen Anzahl der Wolke-Erde-Blitze in Österreich ist seit Jahren rückläufig, wobei 2020 die geringste Anzahl an CG-Blitzen seit Beginn der Aufzeichnungen im Jahr 1992 verzeichnet worden ist (ALDIS 2020). Es wird vermutet, dass die dennoch größere Zahl an Blitzschlagbränden in den letzten Jahren ein Resultat des Klimawandels ist. Höhere Temperaturen und längere Trockenperioden in den Sommermonaten werden durch die damit verknüpfte geringere Bodenfeuchtigkeit als Treiber des Auftretens von Blitzschlagbränden angenommen. Eine ähnliche Hypothese wurde von Conedera et al. (2006) für die Schweiz formuliert. Der fehlende Zusammenhang zwischen einer hohen Blitzdichte und vermehrten Blitzschlagbränden wird darauf zurückgeführt, dass in den besonders gewitteranfälligen Gebieten mehr Niederschläge fallen. Auch andere internationale Studien ergaben, dass eine hohe Blitzdichte nicht mit einer höheren Zahl an Blitzschlagbränden korreliert (z. B. Portier et al. 2019).

Die meist kleinen Brandflächen von Blitzschlagbränden in Österreich können darauf zurückzuführen sein, dass Blitzschlagbrände häufig als Schwelbrände beginnen (Anderson 2002; Pineda und Rigo 2017). Durch die rasche Meldung verdächtiger Rauchentwicklungen im Wald seitens der Bevölkerung sowie ein rasches Eingreifen der Freiwilligen Feuerwehren in Österreich, bleiben Blitzschlagbrände damit oft auf den Ausbruchsort beschränkt.

Die im Vergleich zu anthropogen ausgelösten Waldbränden relativ hohe mittlere Seehöhe von Blitzschlagbränden dürfte das Resultat des größeren Waldbedeckungsgrades im gebirgigen Teil Österreichs und einer ausgeprägteren Gewitteraktivität sein. Auch im Nachbarland Schweiz werden Blitzschlagbrände im Schnitt in höheren Lagen verzeichnet als anthropogen ausgelöste Waldbrände (Conedera et al. 2006). Entsprechend lässt sich nachvollziehen, weshalb drei Viertel aller Blitzschlagbrände in Österreich in Fichtenwäldern auftreten, da die Fichte die höheren Lagen dominiert (ÖWI 2009). Auf der anderen Seite sind durch Gewitteraktivität ausgelöste Waldbrände – ähnlich wie anthropogen verursachte Feuer – deutlich häufiger in kieferndominierten Wäldern zu finden, als deren natürliche Verteilung annehmen lassen würde. Auch hier wird das höhere Entzündungspotenzial von Kieferngesellschaften als Treiber angenommen (vgl. Kapitel 4.1).

Der deutliche Rückgang der Indexwerte von BUI und FFMC am Tag nach dem brandauslösenden Blitzschlag kann dahingehend gedeutet werden, dass es in Österreich kaum sogenannte *Trockengewitter* bzw. trockene Blitzschläge gibt (laut Definition begleitet von weniger als 2-3 Millimeter Niederschlag), welche aber in anderen Gebieten, etwa in Südeuropa oder den USA, von großer Bedeutung für die Brandentstehung sind (Abatzoglou et al. 2016; Pineda und Rigo 2017). Ebenso ist die sommerliche

Gewitteraktivität in Österreich präfrontal am höchsten, wodurch nachfolgend häufig Frontensysteme für Niederschläge sorgen.

Die Überprüfung sämtlicher neu dokumentierten Waldbrandereignisse in Österreich mit unbekanntem Auslöser oder vermuteter Ursache Blitzschlag findet jährlich statt. Dabei wird die bei Müller et al. (2013) beschriebene Methodik angewandt. Waldbrände, bei denen die Auswertung keine relevanten Blitzschläge ergibt oder eine Entstehung durch Gewitteraktivität unwahrscheinlich erscheint, werden in der österreichischen Waldbrand-Datenbank als anthropogen verursachte Feuer abgelegt. Dieses Vorgehen liegt darin begründet, dass abgesehen von Blitzschlägen nur der Mensch als Verursacher von Waldbränden in Europa relevant ist (Ganteaume et al. 2013).

4.4. Integriertes System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr

Die vorliegende und für das IFDS verwendete Gefährdungskarte für Blitzschlagbrände beruht auf den Waldbrand-Datensätzen von 1993 bis 2010. Aufgrund des in den letzten Jahren durchgehenden Monitorings von Blitzschlagbränden und deren räumlichen Verteilung werden im Fall einer Reanalyse mit einer längeren Datenreihe keine markanten Unterschiede bezüglich der Einteilung der Gefährdungsstufen erwartet. Allerdings könnte sich bei weiterführenden Arbeiten zeigen, dass die derzeit gleiche Gewichtung der vier verwendeten Parameter (Seehöhe, Hangneigung, Exposition, Vegetation) anders beurteilt werden muss.

Der am Institut für Waldbau der BOKU Wien entwickelte IFDS-Prototyp ist ein für Mitteleuropa neuartiges System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr im alpinen Raum. Selbst im internationalen Kontext existieren derzeit nur wenige (prä-)operative Systeme mit dem Charakter eines IFDS oder IFRS, beispielsweise in Spanien (Chuvieco et al. 2014), Teilen Vietnams (Van Hoang et al. 2020) oder in Brasilien (Silva et al. 2020). Im mediterranen Raum wurde bereits vor rund zwanzig Jahren der Vorläufer eines integrierten Systems zur Vorhersage der Waldbrandgefahr erfolgreich getestet, wobei Satellitendaten, Karten der Brennstofftypen sowie meteorologische Beobachtungen für die Beurteilung der Gefährdung verwendet worden sind (López et al. 2002).

Das Zusammenwirken und die Qualität der im vorliegenden IFDS-Prototyp verwendeten Datensätze konnte geprüft werden. Mangels Daten zur Vulnerabilität sowie aufgrund nicht zufriedenstellender Modellierungen des Faktors Wind im alpinen Gelände Österreichs, wurden diese beiden Parameter in dem in dieser Arbeit vorgestellten Ansatz weggelassen (Abbildung 7). Für eine umfassende Abschätzung des Waldbrandrisikos ist die Einbindung dieser Faktoren allerdings erforderlich (Chuvieco et al. 2014; Finney 2005). In Gebieten, die einem besonders hohen Waldbrandrisiko unterliegen, wird der Abschätzung der Vulnerabilität und der Ausbreitungsmodellierung von Waldbränden besondere Bedeutung beigemessen, da hier die Notfallbereitschaft der Einsatzkräfte entscheidend für den Schutz von Siedlungen, Infrastrukturen und von Menschenleben ist (Mitsopoulos et al. 2020; Vivalda et al. 2020).

Der momentane Ansatz für das IFDS in Österreich basiert auf einer expertenbasierten Gewichtung der unterschiedlichen verwendeten Datenebenen. Silva et al. (2020) konnten zeigen, dass sich mithilfe der Abschätzung der dynamischen Waldbrandgefahr über maschinelle Lernverfahren gute Vorhersageergebnisse erzielen lassen. Van Hoang et al. (2020) verwendeten in ihrem Waldbrand-Risikomodell eine expertenbasierte multikriterielle Analyse mit dem analytischen Hierarchieprozess (AHP) für die Gewichtung der einzelnen Parameter, wobei sich eine hohe Korrelation zwischen den als gefährdet prognostizierten Gebieten und den realen Waldbrandflächen ergab. Dabei wurden vergleichbare meteorologische, topografische und vegetationskundliche Kriterien verwendet, wie für das hier vorgestellte IFDS.

In der vorliegenden Dissertation wurde die Hypothese aufgestellt, dass es mit den derzeit verfügbaren Daten möglich ist, ein integriertes System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr mit einer räumlichen Auflösung von 100 x 100 m zu konzipieren und bei täglicher Aktualisierung zu betreiben. Dies konnte durch die aktuelle Arbeit bestätigt werden. Eine hohe räumliche und zeitliche Auflösung wird auch von Chuvieco et al. (2014) empfohlen. Durch die allmorgendliche Bereitstellung der neu berechneten Waldbrandindexwerte seitens der ZAMG, wurde die tägliche Aktualisierung des Prototyps bzw. die Neuberechnung der angenommenen Varianten sichergestellt.

Daneben wurde als Hypothese formuliert, dass ein IFDS die Abschätzung des Auftretens von Waldbränden im Vergleich zur alleinigen Verwendung meteorologischer Daten bzw. Waldbrandindizes verbessern kann, wie es auch San-Miguel-Ayanz et al. (2018) nahelegen. Die Validierung des IFDS-Prototyps ergab eine bessere Prognosegüte als die ausschließliche Verwendung von meteorologischen Waldbrandindizes, wie sie derzeit im nationalen Warnsystem der ZAMG implementiert sind (vgl. Kapitel 3.3.2). Die für das IFDS angewandte Methodik ergab Varianten mit unterschiedlichen Schwerpunkten (vgl. Kapitel 2.3.5). Einige im Rahmen des IFDS berechnete Varianten zeigten eine signifikant bessere Vorhersagerate, als es bei Verwendung des kanadischen FWI oder seines Subindex FFMC der Fall war. Bereits Chuvieco et al. (2014) konnten nachweisen, dass ein ähnliches System – in diesem Fall ein integriertes System zur Abschätzung des Waldbrandrisikos – die Fähigkeit besitzt, die Vorhersage des Auftretens von Vegetationsbränden signifikant zu verbessern. Silva et al. (2020) haben gezeigt, dass eine Kombination aus der Abschätzung des Waldbrandrisikos und der aktuellen Waldbrandgefahr die Abbildung von Waldbrand-Hotspots verbessern kann.

Als dritte Hypothese wurde angenommen, dass das Miteinbeziehen möglicher Ursachen, speziell des Faktors Mensch, die Vorhersagegüte bezüglich des Auftretens von Waldbränden optimieren kann. Allerdings erbrachte die Berücksichtigung des menschlichen Einflusses mithilfe der Ergebnisse von Arndt et al. (2013) keine merkbare Verbesserung der Vorhersagerate von Waldbrandereignissen (Müller et al. 2020b), obwohl die meisten Waldbrände in Österreich durch den Menschen ausgelöst werden (vgl. Kapitel 3.1.2). Es wird vermutet, dass eine räumliche Auflösung auf Gemeindeebene die anthropogenen Ursachen in dem verwendeten 100 x 100 m Raster des IFDS nicht zielführend beschreiben kann. Möglicherweise sind anstelle von logistischen Regressionen auch andere Methoden für die Identifizierung des menschlichen Einflusses auf die Entstehungsgefahr von Waldbränden erfolgversprechender, bei-

spielsweise ein Klassifizierungsverfahren wie *Random Forest* oder eine Maximum-Entropie-Methode wie *Maxent* (Molina et al. 2019; Sass 2014). Hingegen konnten Chuvieco et al. (2014) für ihr integriertes System zeigen, dass eine geographisch gewichtete Regressionsanalyse zur Modellierung der Muster anthropogen ausgelöster Vegetationsbrände und ein nachfolgendes logistisches Regressionsmodell gute Ergebnisse erbringen. Eine aktuelle Studie für Indien hat ergeben, dass der analytische Hierarchieprozess als Methode zur Abschätzung des Waldbrandrisikos gegenüber dem statistischen Ansatz der Frequenzanalyse überlegen ist und eine signifikant höhere Vorhersagegüte aufweist (Kayet 2021).

Beim Vergleich der Ergebnisse zur Validierung des IFDS-Prototyps für 2018 und 2019 fällt auf, dass im Jahr 2019 die Fehlalarmrate bei Verwendung des FFMC als Basis für die Variantenberechnung deutlich höher ist, als im Jahr 2018 bei Berücksichtigung des FWI (vgl. Kapitel 3.3.2). Eine Erklärung hierfür dürfte sein, dass der FFMC rascher auf trockene Bedingungen der Streuschicht reagiert als der FWI und demnach öfter höhere Werte (resp. höhere Gefährdungsstufen) aufweist (Van Wagner 1987). Auf der anderen Seite kann mittels des FFMC eine höhere Vorhersagerate erzielt werden. Sowohl der verwendete FWI als auch sein Subindex FFMC sind auf kanadische Verhältnisse kalibriert. Es wird angenommen, dass die Parametrisierung der Waldbrandindizes auf die waldökologischen und naturräumlichen Gegebenheiten des Einsatzgebietes sowie eine Anpassung der Schwellenwerte sowohl die Fehlalarmrate reduzieren, als auch die Vorhersagerate verbessern können, wie Untersuchungen aus anderen Ländern gezeigt haben (Chelli et al. 2015; de Jong et al. 2016; Papagiannaki et al. 2020).

In Österreich existiert derzeit keine flächendeckende Klassifizierung der Brennstofftypen, wie von San-Miguel-Ayanz et al. (2018) für ein integriertes System zur Abschätzung des Waldbrandrisikos gefordert. Neben der verhältnismäßig schwachen Vorhersagerate jener Varianten im IFDS, die den menschlichen Einfluss stark gewichten, ist davon auszugehen, dass auch die derzeit verwendete Datenebene zur Vegetation Einschränkungen aufweist. So werden nur wenige Vegetationstypen unterschieden und es gibt kaum Daten zur Waldstruktur und den vorhandenen Brennstoffmengen. Diese Informationen sind jedoch entscheidend für das zu erwartende Brandverhalten (Chuvieco et al. 2010; San-Miguel-Ayanz et al. 2018). Andererseits werden systematische Fehler in der generierten Kartengrundlage vermutet, etwa falsch klassifizierte Waldtypen oder ein mangelhaftes Mapping der Vegetation an der alpinen Waldgrenze. Verbesserungen bei der Validität und der Genauigkeit der Darstellung der Vegetationstypen in Österreich werden im Rahmen des aktuell laufenden CONFIRM-Projektes über die Auswertung hochaufgelöster Sentinel-Satellitendaten erwartet (Zotta et al. 2020).

Im Zuge der Validierung des IFDS-Prototyps fand sich kein Zusammenhang zwischen größeren Brandflächen und höheren Werten/Gefährdungsstufen von Waldbrandindizes oder berechneten Varianten. Chuvieco et al. (2014) ermittelten für ihr integriertes System zur Abschätzung des Brandrisikos in Spanien einen signifikanten Zusammenhang zwischen den berechneten Indexwerten und den aufgetretenen Brandflächen. Auf der einen Seite wird vermutet, dass der fehlende Konnex bei Betrachtung des österreichischen IFDS der Effektivität der Freiwilligen Feuerwehren geschuldet ist, die auch bei hoher meteorologischer Waldbrandgefahr die meisten unkontrollierten Feuer rasch eindämmen können. Auf

der anderen Seite konnte aufgrund weniger Großbrände im Betrachtungszeitraum nur eine geringe Anzahl an Waldbrandereignissen untersucht werden. Die Jahre 2018 und 2019 brachten zwar überdurchschnittlich hohe Temperaturen und heiße Sommer (ZAMG 2020), gleichzeitig blieben im Gebirgsraum durch wiederholte Schauer- und Gewittertätigkeit lange Trockenphasen aus. Ebenso gab es keine markanten synoptischen Starkwindereignisse (respektive Föhn) in Verbindung mit Trockenheit. Wie Boboulos und Purvis (2009) verdeutlicht haben, ist starker Wind jedoch entscheidend für eine rasche Brandausbreitung.

5. Schlussfolgerungen

Die Waldbrand-Datenbank am Institut für Waldbau, BOKU Wien, ermöglicht die umfassende Beschreibung des derzeitigen und vergangenen Waldbrandregimes in Österreich und stellt eine wichtige Grundlage für ein integriertes Waldbrandmanagement dar. Durch die laufenden Verbesserungen in den letzten Jahren und die stete Aufarbeitung von Waldbrandereignissen hat sie sich als wichtiges Hilfsmittel für Einsatzkräfte, Forstbehörden, das BMLRT, Medienkontakte und die Öffentlichkeitsarbeit etabliert. So konnten behördliche und feuerwehrseitige Statistiken angepasst, durch Waldbrände besonders gefährdete Gebiete identifiziert, erste Schritte für eine Waldbrand-Risikokartierung unternommen und Bewusstseinsbildung über Pressemitteilungen, Workshops, Schulungen sowie über Beiträge im österreichischen Waldbrand-Blog (https://fireblog.boku.ac.at) betrieben werden.

Die Erhebungen zu Waldbrandereignissen in Österreich waren und sind Grundlage weiterführender Arbeiten in der Waldbrandforschung. Datenauszüge der Waldbrand-Datenbank wurden beispielsweise für die Arbeiten von Arpaci et al. (2013), Conedera et al. (2018) oder Horejsi (2019) verwendet. Das öffentliche Web-GIS der österreichischen Waldbrand-Datenbank unter https://fire.boku.ac.at ist derzeit hinsichtlich der Kombination aus Umfang, Aktualität, Datenverfügbarkeit und Funktionalitäten im mitteleuropäischen Kontext einzigartig und erlaubt den einfachen Zugriff auf Statistiken, Grafiken und Informationen zu spezifischen Waldbrandereignissen (Müller und Vacik 2020). In Zukunft soll versucht werden, für Waldbrand-Archivdaten ohne exakte Datumsangabe eine Lösung für die Einspielung in die österreichische Waldbrand-Datenbank zu finden, beispielsweise über vertiefende Recherchen oder eine zufällige/witterungsabhängige Datumsauswahl.

Im Rahmen der aktuellen Kooperation mit dem BMLRT werden eine Absicherung der Waldbranderhebung und die ministeriell unterstützte Verankerung der Waldbrand-Dokumentation am Institut für Waldbau angestrebt. Ebenso soll die Datenerhebung weiter vereinheitlicht und über die Einbindung sämtlicher Landesfeuerwehrverbände sowie des Bundesfeuerwehrverbandes eine teilautomatisierte Übermittlung von Waldbrandereignissen erreicht werden. Neben der finanziellen und personellen Absicherung der Waldbrand-Dokumentation soll in Zukunft nur für jene Waldbrände Anspruch auf Kostenersatz seitens der Feuerwehren bestehen, die in der österreichischen Waldbrand-Datenbank dokumentiert sind. Auf diesem Weg wird eine lückenlose, von Feuerwehrseite getragene Dokumentation von Waldbrandereignissen erwartet. Im Zuge der Überarbeitung der Kostenersatzregelung für die Waldbrandbekämpfung soll auch die Eingabe des Einsatzortes via GPS-Koordinaten zwingend erforderlich werden.

Die Untersuchungen zu Blitzschlagbränden im Ostalpenraum tragen zum Verständnis des österreichischen Waldbrandregimes dar, zeigen die Bedeutung natürlich ausgelöster Waldbrände, die Relevanz positiver Gewitterentladungen sowie den Einfluss der lokalen Trockenheit auf die Brandentstehung. Erstmals konnte eine Gefährdungskarte für Blitzschlagbrände mit einer hohen räumlichen Auflösung von 100 x 100 m erarbeitet und in ein integriertes System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr ein-

gebunden werden. Damit ist es möglich, das Auftreten von natürlich ausgelösten Waldbränden im Kontext einer holistischen Bewertung der Waldbrandgefährdung abzuschätzen und die regionale Entstehungsgefahr exakter zu bewerten.

Der entwickelte IFDS-Prototyp stellt ein innovatives Werkzeug für die Darstellung der Waldbrandgefährdung im Alpenraum dar. Erste Ergebnisse stimmen zuversichtlich, dass das System bessere Vorhersagen liefern kann, als die ausschließliche Verwendung von meteorologischen Waldbrandindizes. Ergänzende Arbeiten aus den laufenden Projektaktivitäten in AFFRI 2 und CONFIRM sollen die Kalibrierung und Parametrisierung der für den IFDS-Prototyp verwendeten Waldbrandindizes auf österreichische Verhältnisse ermöglichen. Im Frühjahr 2021 ist eine Feedbackrunde mit ausgewählten Experten der Feuerwehren, Forstbehörden und Landeswarnzentralen geplant, um die Benutzerfreundlichkeit sowie das Frontend des IFDS-Prototyps an die potenziellen Anwender anzupassen. Daneben sind Optimierungen hinsichtlich der Modellierung des menschlichen Einflusses auf die Brandentstehung erforderlich. Ebenso bedarf es einer akkurateren Darstellung der Vegetation im Hinblick auf die Waldtypen, Brennstoffmengen und das erwartete Brandverhalten. Mittelfristig ist geplant, das derzeitige IFDS um eine Abschätzung der Vulnerabilität bzw. des Waldbrandrisikos zu erweitern, indem Daten zu potenziell betroffenen Siedlungsräumen, Infrastrukturen sowie Schäden an der Vegetation berücksichtigt werden. Damit erfolgt die Umwandlung des IFDS in ein IFRS, ähnlich wie von San-Miguel-Ayanz et al. (2018) gefordert, wodurch eine umfassende Beschreibung des Waldbrandrisikos in Österreich ermöglicht wird.

Für ein integriertes Waldbrandmanagement, wie es auch in Österreich angestrebt wird (Müller et al. 2020a), sind weiterführende Arbeiten notwendig. Beispielsweise existieren in Österreich derzeit kaum langfristige, waldbrandspezifische Präventionsmaßnahmen. Mit Beschluss des Nationalrates vom 07. Juli 2020 wurde das Waldfondsgesetz verabschiedet, welches mit 350 Millionen Euro dotiert ist und unter anderem ein integriertes Waldbrandmanagement vorsieht. Im Rahmen dieses Waldfondsgesetzes und in Kooperation mit dem BMLRT, dem BFW sowie einer nationalen Expertengruppe Waldbrand, sind in den kommenden Jahren verschiedene Schritte in Richtung der Umsetzung eines integrierten Waldbrandmanagements geplant.

Quellenangaben

Abatzoglou J.T., Kolden C.A., Balch J.K., Bradley B.A., 2016. Controls on interannual variability in lightning-caused fire activity in the western US. Environmental Research Letters, 11 (4), 045005. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/4/045005

Albers J., 2012. Comparative Analysis of the Forest Fire Situation in Central-Eastern Europe. Masterarbeit, Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien.

ALDIS, 2020. Jahresübersicht der Wolke-Erde-Blitze in Österreich von 1993 bis 2020. Online unter: https://www.aldis.at/blitzstatistik/diagramme/flashes-bundeslaender-jahresstatistik [05.09.2020]

Anderson K., 2002. A model to predict lightning-caused fire occurrences. International Journal of Wildland Fire, 11 (3-4), S. 163-172.

Andrecs P., Oberndorfer S., 2008. Beurteilung von Naturgefahren – Gefahr, Risiko und Vulnerabilität. BFW-Praxisinformation 15, 5-6.

Arndt N., Vacik H., Koch V., Arpaci A., Gossow H., 2013. Modeling human-caused forest fire ignition for assessing forest fire danger in Austria. iForest, 201(6), S. 315-325.

Arpaci, A., Valese, E., Vacik, H., 2011. Potential Fire Intensities in the Alpine Region based on characteristic fuels in Austria and Italy. In: Working on Fire (Eds.), 5th International Wildland Fire Conference, Sun City, May 9-13, 2011.

Arpaci A., Eastaugh C.S., Vacik H., 2013. Selecting the best performing fire weather indices for Austrian ecoregions. Theoretical and Applied Climatology, 114, S. 393-406. DOI: 10.1007/s00704-013-0839-7

Auer I., Böhm R., Mohnl H., Potzmann R., Schöner W., Skomorowski P., 2001. ÖKLIM. Digitaler Klimaatlas Österreichs. In: Christa Hammerl u. a. (Hrsg.): Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851-2001. Leykam, Wien 2001, ISBN 3-7011-7437-7.

Bajocco S., Pezzatti G.B., De Angelis A., Conedera M., Ricotta C., 2011. Bootstrapping wildfire selectivity for the forest types of Canton Ticino (Switzerland). Earth Interactions, 15, 19 (11 pp.). https://doi.org/10.1175/2011EI387.1

Bär A., Nardini A., Mayr S., 2018. Post-fire effects in xylem hydraulics of Picea abies, Pinus sylvestris and Fagus sylvatica. New Phytologist 217, 1484-1493. https://doi.org/10.1111/nph.14916

Bedia J., Herrera S., Camia A., Moreno J., Gutiérrez J., 2014. Forest fire danger projections in the Mediterranean using ENSEMBLES regional climate change scenarios. Climatic Change, 122 (1-2), S. 185-199. DOI 10.1007/s10584-013-1005-z

Bento-Gonçalves A., Vieira A., 2020. Wildfires in the wildland-urban interface: Key concepts and evaluation methodologies. Science of the Total Environment 707, 135592. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135592

BLE, 2020. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Waldbrandstatistik. Online unter: https://www.ble.de/DE/BZL/Daten-Berichte/Wald/wald.html [11.10.2020]

Boboulos M., Purvis M.R.I., 2009. Wind and slope effects on ROS during the fire propagation in East-Mediterranean pine forest litter. Fire Safety Journal, 44, S. 764-769.

Brenner G., Raggl P., Schreiner I., Simon A., 2015. Der Waldbrand am Absamer Vorberg (Tirol). Wildbach- und Lawinenverbau, Jg. 79/175, S. 175-185. ISBN: 978-3-9503089-9-079

Carmo M., Moreira F., Casimiro P., Vaz P., 2011. Land use and topography influences on wildfire occurrence in northern Portugal. Landscape and Urban Planning 100, S. 169-176.

Chas-Amil M.-L., García-Martínez E., Touza J., 2020. Iberian Peninsula October 2017 wildfires: Burned area and population exposure in Galicia (NW of Spain). International Journal of Disaster Risk Reduction 48, 101623. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101623

Chelli S., Maponi P., Campetella G., Monteverde P., Foglia M., Paris E., Lolis A., Panagopoulos T., 2015. Adaptation of the Canadian Fire Weather Index to Mediterranean forests. Natural Hazards 75, S. 1795-1810. https://doi.org/10.1007/s11069-014-1397-8

Chuvieco E., Aguado I., Yebra M., Nieto H., Salas J., Martín M.P., Vilar L., Martínez J., Martín S., Ibarra P., de la Riva J., Baeza J., Rodríguez F., Molina J.R., Herrera A., Zamora R., 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. Ecological Modelling, 221(1), S. 46-58.

Chuvieco E., Aguado I., Jurdao S., (...), Zapico E., Martínez-Vega F.J., 2014. Integrating geospatial information into fire risk assessment. International Journal of Wildland Fire 23(5), S. 606-619. http://dx.doi.org/10.1071/WF12052

Colombaroli D., Marchetto A., Tinner W., 2007. Long-term interactions between Mediterranean climate, vegetation and fire regime at Lago di Massaciuccoli (Tuscany, Italy). Journal of Ecology 95(4), S. 755-770.

Conedera M., Peter L., Marxer P., Forster F., Rickenmann D., Re L., 2003. Consequences of forest fires on the hydrogeological response of mountain catchments: a case study of the Riale Buffaga, Ticino, Switzerland. Earth Surface Processes and Landforms, 28(2), 117-129. https://doi.org/10.1002/esp.425

Conedera M., Cesti G., Pezzatti G., Zumbrunnen T., Spinedi F., 2006. Lightning-induced fires in the Alpine region: An increasing problem. Forest Ecology and Management, 234. DOI: 10.1016/j.foreco.2006.08.096.

Conedera M., Tonini M., Oleggini L., Vega Orozco C., Leuenberger M., Pezzatti G.B., 2015. Geospatial approach for defining the Wildland-Urban Interface in the Alpine environment. Computers, Environment and Urban Systems, 52, S. 10-20. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.02.003

Conedera M., Krebs P., Valese E., Cocca G., Schun, C., Menzel A., (...), Pezzatti G.B., 2018. Characterizing Alpine pyrogeography from fire statistics. Applied Geography, 98, S. 87-99. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.07.011

Cruz M.G., Alexander M.E., Wakimoto R.H., 2005. Development and testing of models for predicting crown fire rate of spread in conifer forest stands. Canadian Journal of Forest Research 35(7), S. 1626-1639. https://doi.org/10.1139/x05-085

Csontos P., Cseresnyés I., 2015. Fire-risk evaluation of Austrian pine stands in Hungary - effects of drought conditions and slope aspect on fire spread and fire behaviour. Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences, 10(3), 247-254.

DaFNE, 2019. Österreichische Waldbrandinitative II (Austrian Forest Fire Research Initiative II, AFFRI 2), Endbericht. Online unter: https://www.dafne.at/dafne_plus_homepage/index.php?section=dafneplus&content=result&project_id=3469 [21.08.2020]

de Jong M.C., Wooster M.J., Kitchen K., Manley C., Gazzard R., McCall F.F., 2016. Calibration and evaluation of the Canadian Forest Fire Weather Index (FWI) System for improved wildland fire danger rating in the United Kingdom. Natural Hazards and Earth System Sciences, 16, S. 1217-1237. https://doi.org/10.5194/nhess-16-1217-2016

Dowdy A.J., Ye H., Pepler A., Thatcher M., Osbrough S.L., Evans J.P., Di Virgilio G., McCarthy N., 2019. Future changes in extreme weather and pyroconvection risk factors for Australian wildfires. Scientific Reports, 9 (1), 10073. https://doi.org/10.1038/s41598-019-46362-x

Dube O.P, 2009. Linking fire and climate: interactions with land use, vegetation, and soil. Current Opinion in Environmental Sustainability, 1(2), S. 161-169.

Dupire S., Curt T., Bigot S., Fréjaville T., 2019. Vulnerability of forest ecosystems to fire in the French Alps. European Journal of Forest Research, 1-18.

Eastaugh C.S., Vacik H., 2012. Fire size/frequency modelling as a means of assessing wildfire database reliability. Austrian Journal of Forest Science, 129(3-4), S. 228-247.

Extra-Blatt, 2018. Brand in Siegburg – Kanzlerin wünscht Verletzten schnelle Genesung. Rheinische Anzeigeblätter. Online unter: https://www.rheinische-anzeigenblaetter.de/mein-blatt/extra-blatt/siegburg/brand-in-siegburg-kanzlerin-wuenscht-verletzten-schnelle-genesung-31078582 [12.08.2020]

Finney M.A., 2005. The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. Forest Ecology and Management 211 (1-2), S. 97-108. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.02.010

Fréjaville T., Curt T., Carcaillet C., 2018. Higher potential fire intensity at the dry range margins of European mountain trees. Journal of Biogeography, 45 (9), S. 2003-2015. https://doi.org/10.1111/jbi.13386

Ganteaume A., Lampin-Maillet C., Guijarro M., Hernando C., Jappiot M., Fonturbel T., Pérez-Gorostiaga P., Vega José A., 2009. Spot fires: fuel bed flammability and capability of firebrands to ignite fuel beds. International Journal of Wildland Fire 18, S. 951-969. https://doi.org/10.1071/WF07111

Ganteaume A., Camia A., Jappiot M., San-Miguel-Ayanz J., Long-Fournel M., Lampin C., 2013. A review of the main driving factors of forest fire ignition over Europe. Environmental Management 51, S. 651-662. https://doi.org/10.1007/s00267-012-9961-z

Ganthaler A., Bauer H., Gruber A., Mayr M., Oberhuber W., Mayr S., 2014. Effects of the needle bladder rust (Chrysomyxa rhododendri) on Norway spruce – implications for subalpine forests. Journal of European Forest Research 133, 201-211.

Ghassemi-Bönisch S., 2011. Zeitverwendungserhebung 2008/09. Statistische Nachrichten 06/2011, Statistik Austria. Online unter: http://www.statistik.at/web_de/static/subdokumente/b_zve_2008-09_statnachr_06_11.pdf [25.10.2020]

Gobiet A., Kotlarski S., Beniston M., Heinrich G., Rajczak J., Stoffel M., 2014. 21st century climate change in the European Alps – A review. Science of the Total Environment, 493, S. 1138-1151. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050

Goldammer J., Mitsopoulos I., Mallinis G., Woolf M., 2017. Wildfire Hazard and Risk Assessment. Words into Action Guidelines: National Disaster Risk Assessment, Hazard Specific Risk Assessment. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNISDR).

Gossow H., Hafellner R., Vacik H., Huber T., 2009. Major Fire Issues in the Euro-Alpine Region – the Austrian Alps. International Forest Fire News IFFN 38, 1-10, ISSN 1029-0864

Grabherr W., 1936. Die Dynamik der Brandflächenvegetation auf Kalk- und Dolomitböden des Karwendels. Beiheft Botanisches Centralblatt, LV/B 1(2), S. 1-94.

Grima N., 2011. Forest Fire Hazard Mapping in Carinthia (Southern Austria). Masterarbeit, Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien, 64 Seiten.

Hall J.R. Jr., Harwood B., 1989. The national estimates approach to U.S. fire statistics. Fire Technology 25(2): 99-113.

Heel M., 2015. Waldbrände in den Nördlichen Kalkalpen – raumzeitliche Verteilung und Beispiele lokaler Auswirkungen. Dissertation, Universität Augsburg, Fakultät für Angewandte Informatik.

Hernandez C., Drobinski P., Turquety S., 2015. How much does weather control fire size and intensity in the Mediterranean region? Annales Geophysicae, European Geosciences Union, 33 (7), S. 931-939.

Honkaniemi J., Rammer W., Seidl R., 2020. Norway spruce at the trailing edge: the effect of landscape configuration and composition on climate resilience. Landscape ecology, 35(3), 591-606. https://doi.org/10.1007/s10980-019-00964-y

Horejsi M., 2019. Characterisation of the ignition factors of forest fires in Styria. Diplomarbeit / Masterarbeit, Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien, 83 Seiten.

Jolly W.M., Cochrane M.A., Freeborn P.H., Holden Z.A., Brown T.J., Williamson G.J., Bowman D.M.J.S., 2015. Climate-induced variations in global wildfire danger from 1979 to 2013. Nature Communications 2015 (6), 7537.

Kayet N., 2021. Forest fire risk assessment for effective geoenvironmental planning and management using geospatial techniques. In: Shit P.K., Pourghasemi H.R., Das P., Bhunia G.S. (eds) Spatial Modeling in Forest Resources Management. Environmental Science and Engineering, S. 281-295. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56542-8_12

Lahaye S., Curt T., Fréjaville T., Sharples J., Paradis L., Hély C., 2018. What are the drivers of dangerous fires in Mediterranean France? International Journal of Wildland Fire, 27, 155-163.

Larjavaara M., Pennanen J., Tuomi T.J., 2005. Lightning that ignites forest fires in Finland. Agricultural and Forest Meteorology 132, 3-4, S. 171-180. DOI: 10.1016/j.agrformet.2005.07.005

Lexer M.J., Rabitsch W., Grabherr G., Dokulil M., Dullinger S., Englisch J., Essl F., Gollmann G., Gottfried M., Graf W., Hoch G., Jandl R., Kahrer A., Kainz M., Kirisits T., Netherer S., Pauli H., Rott E., Schleper C., Schmidt-Kloiber A., Schmutz S., Schopf A., Seidl R., Vogl W., Winkler H., Zechmeister H., 2014. Der Einfluss des Klimawandels auf die Biosphäre und Ökosystemleistungen. In: Austrian Panel on Climate Change (APCC), Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, S. 467-556.

López A.S., San-Miguel-Ayanz J., Burgan R.E., 2002. Integration of satellite sensor data, fuel type maps and meteorological observations for evaluation of forest fire risk at the pan-European scale. International Journal of Remote Sensing 23(13), S. 2713-2719. https://doi.org/10.1080/01431160110107761

Lovreglio R., Leone V., Giaquinto P., Notarnicola A., 2010. Wildfire cause analysis: Four case-studies in southern Italy. iForest, 3 (1), S. 8-15. https://doi.org/10.3832/ifor0521-003

Maringer J., Ascoli D., Dorren L., Bebi P., Conedera M., 2016. Temporal trends in the protective capacity of burnt beech forests (Fagus sylvatica L.) against rockfall. European Journal of Forest Research, 135(4), 657-673. https://doi.org/10.1007/s10342-016-0962-y

Maxwell J.D, Anson Call A., St. Clair S.B., 2019. Wildfire and topography impacts on snow accumulation and retention in montane forests. Forest Ecology and Management, Volume 432, S. 256-263, ISSN 0378-1127. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.021

Mitsopoulos I., Mallinis G., Dimitrakopoulos A., (...), Eftychidis G., Goldammer J.G., 2020. Vulnerability of peri-urban and residential areas to landscape fires in Greece: Evidence by wildland-urban interface data. Data in Brief 31, 106025. https://doi.org/10.1016/j.dib.2020.106025

Modugno S., Balzter H., Cole B., Borrelli P., 2016. Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland-Urban Interface areas in Europe. Journal of Environmental Management 172, S. 112-126. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.013

Molina J.R., Lora A., Prades C., Rodríguez y Silva F., 2019. Roadside vegetation planning and conservation: New approach to prevent and mitigate wildfires based on fire ignition potential. Forest Ecology and Management, 444, S. 163-173. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2019.04.034

Moreira F., Viedma O., Arianoutsou M., Curt T., Koutsias N., Rigolot E., Barbati A., Corona P., Vaz P., Xanthopoulus G., Mouillot F., Bilgili E., 2011. Landscape – wildfire interactions in southern Europe: Implications for landscape management. Journal of Environmental Management 92: 2389-2402.

Moreno J.M., Viedma O., Zavala G., Luna B., 2011. Landscape variables influencing forest fires in central Spain. International Journal of Wildland Fire 20: 678-689.

Moris J.V., Conedera M., Nisi L., Bernardi M., Cesti G., Pezzatti G.B, 2020. Lightning-caused fires in the Alps: Identifying the igniting strokes. Agricultural and Forest Meteorology, 290, 107990, ISSN 0168-1923. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107990

Moser B., Temperli C., Schneiter G., Wohlgemuth T., 2010. Potential shift in tree species composition after interaction of fire and drought in the Central Alps. European Journal of Forest Research 129, 625-633.

Müller T., 2007. Wirkung von Glasscherben bei der Entzündung von Streuauflagen. Diplomarbeit, Abteilung für Bodenkunde und Bodenphysik, Institut für Geoökologie, TU Braunschweig, 92 S.

Müller M.M., Vacik H., Diendorfer G., Arpaci A., Formayer H., Gossow H., 2013. Analysis of lightning-induced forest fires in Austria. Theoretical and Applied Climatology, 111(1/2), S. 183-193.

Müller M.M., Vacik H., Valese E., 2015. Anomalies of the Austrian Forest Fire Regime in Comparison with Other Alpine Countries: A Research Note. Forests, 2015(6), S. 903-913.

Müller M.M., Vacik H., 2017. Characteristics of lightnings igniting forest fires in Austria. Agricultural and Forest Meteorology, 240-241, 26-34.

Müller M.M., Vacik H., 2020. Waldbrände: unterschätzte Gefahr? Österreichische Forstzeitung, 05/2020, 14-16, ISSN 1012-4667. Online unter: https://www.forstzeitung.at/markt/2020/05/waldbraende--unterschaetzte-gefahr-.html [09.07.2020]

Müller M.M., Vilà-Vilardell L., Vacik H., 2020a. Waldbrände in den Alpen – Stand des Wissens, zukünftige Herausforderungen und Optionen für ein integriertes Waldbrandmanagement. Vollständig

überarbeitete deutsche Fassung des Originals: Forest fires in the Alps – State of knowledge, future challenges and options for an integrated fire management. EUSALP Action Group 8.

Müller M.M., Vilà-Vilardell L., Vacik H., 2020b. Towards an integrated forest fire danger assessment system for the European Alps. Ecological Informatics, 60, 101151, ISSN 1574-9541. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101151

Narayanaraj G., Wimberly M.C., 2011. Influences of forest roads on the spatial pattern of wildfire boundaries. International Journal of Wildland Fire 20(6), S. 792-803. https://doi.org/10.1071/WF10032

Nash C.H., Johnson E.A., 1996. Synoptic climatology of lightning-caused forest fires in subalpine and boreal forests. Canadian Journal of Forest Research, 26 (10), S. 1859-1874.

Oettel J.K., 2012. Forest Fires and Fuel Characteristics of Tyrol (Based on Case Studies). Masterarbeit, Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien.

ÖWI, 2009. Österreichische Waldinventur. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW). Online unter: http://bfw.ac.at/rz/wi.auswahl [07.09.2020]

Papagiannaki K., Giannaros T.M., Lykoudis S., Kotroni V., Lagouvardos K., 2020. Weather-related thresholds for wildfire danger in a Mediterranean region: The case of Greece. Agricultural and Forest Meteorology, 291, 108076. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.108076

Parisien M.-A., Barber Q.E., Hirsch K.G., (...), Arseneault D., Parks S.A., 2020. Fire deficit increases wildfire risk for many communities in the Canadian boreal forest. Nature Communications 11(1), 2121. https://doi.org/10.1038/s41467-020-15961-y

Päätalo M.-L., 1998. Factors influencing occurrence and impacts of fires in northern European forests. Silva Fennica 32(2), S. 185-202.

Pezzatti G.B., Bajocco S., Torriani D., Conedera M., 2009. Selective burning of forest vegetation in Canton Ticino (southern Switzerland). Plant Biosystems, 143(3), S. 609-620. https://doi.org/10.1080/11263500903233292

Pezzatti G.B., Zumbrunnen T., Bürgi M., Ambrosetti P., Conedera M., 2013. Fire regime shifts as a consequence of fire policy and socio-economic development: an analysis based on the change point approach. Forest Policy and Economics, 29, 7-18. https://doi.org/10.1016/j.forpol.2011.07.002

Pezzatti G.B., Bertogliati M., Gache S., Reinhard M., Conedera M., 2019. Swissfire: technisch modernisiert und dank Archivrecherchen inhaltlich erweitert. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen: September 2019, Vol. 170, No. 5, S. 234-241.

Pineda N., Montanyà J., van der Velde O.A., 2014. Characteristics of lightning related to wildfire ignitions in Catalonia. Atmospheric Research 135-136, S. 380-387.

Pineda N., Rigo T., 2017. The rainfall factor in lightning-ignited wildfires in Catalonia. Agricultural and Forest Meteorology 239, S. 249-263. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.016

Podur J.J., Martell D.L., Knight K., 2002. Statistical quality control analysis of forest fire activity in Canada. Canadian Journal of Forest Research 32(2): 195-205.

Poelman D.R., 2014. A 10-year study on the characteristics of thunderstorms in Belgium based on cloud-to-ground lightning data. Monthly Weather Review 142(12), S. 4839-484. https://doi.org/10.1175/MWR-D-14-00202.1

Poelman D.R., Schulz W., Diendorfer G., Bernardi M., 2016. The European lightning location system EUCLID – Part 2: Observations. Natural Hazards and Earth System Sciences, 16, S. 607-616. DOI: 10.5194/nhess-16-607-2016

Portier J., Gauthier S., Bergeron Y., 2019. Spatial distribution of mean fire size and occurrence in eastern Canada: Influence of climate, physical environment and lightning strike density. International Journal of Wildland Fire, 28 (12), S. 927-940. https://doi.org/10.1071/WF18220

Reinhard M., Rebetez M., Schlaepfer R., 2005. Recent climate change: Rethinking drought in the context of forest fire research in Ticino, South of Switzerland. Theoretical and Applied Climatology 82(1-2), S. 17-25. https://doi.org/10.1007/s00704-005-0123-6

Rodrigues M., Trigo R.M., Vega-García C., Cardil A., 2020. Identifying large fire weather typologies in the Iberian Peninsula. Agricultural and Forest Meteorology 280, 107789. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107789

San-Miguel J., Camia A., 2009. Forest fires at a glance: Facts, figures and trends in the EU. In: Birot Y, editor. Living with wildfires: What science can tell us. Joensuu, European Forest Institute. S. 11-18.

San-Miguel-Ayanz J., Costa H., de Rigo D., Libertá G., Vivancos T.A., Durrant T., Nuijten D., Löffler P., Moore P., 2018. Basic criteria to assess wildfire risk at the pan-European level. JRC Technical Reports. EUR 29500 EN, ISBN 978-92-79-98200-2. DOI:10.2760/052345

Sass O., Heel M., Leistner I., Stöger F., Wetzel K.F. Friedmann A., 2012. Disturbance, geomorphic processes and regeneration of wildfire slopes in North Tyrol. Earth Surface Processes and Landforms, 37(8), S. 883-889.

Sass O., 2014. FIRIA – Fire Risk and Vulnerability of Austrian Forests under the Impact of Climate Change. Endbericht. APRP 3rd Call 2010. Online unter: https://www.klimafonds.gv.at/report/acrp-3rd-call-2010 [19.08.2020]

Sass O. (Hrsg.), 2019. Waldbrände in den Nordtiroler Kalkalpen. Innsbrucker Geographische Studien, Bd. 41.

Schulz W., Cummins K.L., Diendorfer G., Dorninger M., 2005. Cloud-to-ground Lightning in Austria: A 10-year Study using Data from a Lightning Location System. Journal of Geophysical Research 110 (D9). DOI: 10.1029/2004JD005332

Schumann C., Saba M.M.F., da Silva R.B.G., Schulz W., 2013. Electric fields changes produced by positives cloud-to-ground lightning lightnings. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, 92, S. 37-42.

Schunk C., Wastl C., Leuchner M., Menzel A., 2017. Fine fuel moisture for site- and species-specific fire danger assessment in comparison to fire danger indices. Agricultural and Forest Meteorology, 234-235, S. 31-47. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.12.007

Schwab U., Steinicke W., 2003. Stadtklimauntersuchung Wien. Magistrat der Stadt Wien, MA 22 Umweltschutz. Online unter: https://www.wien.gv.at/umweltschutz/umweltgut/pdf/stadtklimauntersuchung-wien.pdf [12.12.2020]

Schwalt L., Pack S., Schulz W., 2018. LiOn ground truth data in correlation with ALDIS LLS detections. 34th International Conference on Lightning Protection, ICLP 2018, 8503297.

Scott A.C., Bowman D.M.J.S., Bond W.J., Pyne S.J., Alexander M.E., 2014. Fire on Earth: an introduction, first ed. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey.

Seidl R., Schelhaas M.J., Rammer W., Verkerk P.J., 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. Nature Climate Change 4: 806-810. http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2318

Silva I.D.B., Valle M.E., Barros L.C., Meyer J.F.C.A., 2020. A wildfire warning system applied to the state of Acre in the Brazilian Amazon. Applied Soft Computing Journal, 89, 106075. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.106075

Tedim F., Xanthopoulos G., Leone V., 2015. Chapter 5 - Forest Fires in Europe: Facts and Challenges. In: Wildfire Hazards, Risks and Disasters, Eds.: Shroder J.F., Paton D., Elsevier 2015, S. 77-99. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410434-1.00005-1

Thonicke K., Cramer W., 2006. Long-term trends in vegetation dynamics and forest fires in Brandenburg (Germany) under a changing climate. Natural Hazards, 38 (1-2), S. 283-300. https://doi.org/10.1007/s11069-005-8639-8

Trnka M., Balek J., Štěpánek P., Zahradníček P., Možný M., Eitzinger J., Žalud Z., Formayer H., Turňa M., Nejedlík P., Semerádová D., Hlavinka P., Brázdil R., 2016. Drought trends over part of Central Europe between 1961 and 2014. Climate Research, 70(2), S. 143-160. DOI: 10.3354/cr01420

Ulbig E., Hertel R.F., Böl G.-F. (Hrsg.), 2010. Kommunikation von Risiko und Gefährdungspotenzial aus Sicht verschiedener Stakeholder, Abschlussbericht. Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR), Berlin 01/2010, 158 S. ISBN 3-938163-56-9

Vacchiano G., Foderi C., Berretti R., Marchi E., Motta R., 2018. Modeling anthropogenic and natural fire ignitions in an inner-alpine valley. Natural Hazards and Earth System Sciences, 18, 935-948.

Vacik H., Arndt N., Arpaci A., Koch V., Müller M.M., Gossow H., 2011. Characterisation of forest fires in Austria. Austrian Journal of Forest Science, 128(1), S. 1-32.

Vacik H., Müller M.M., Degenhart J., Sass O., 2020. Auswirkungen von Waldbränden auf die Schutzfunktionalität alpiner Wälder. In: Glade T., Mergili M., Sattler K. (Hrsg.): ExtremA 2019 – Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich, 174-201; V&R Unipress, Vienna University Press, 1. Auflage, Wien. ISBN 978-3-7370-109

Valese E., 2007. Wildland fires in the Alpine Region of Italy: what's old, what's new. What's next? - International Forest Fire News (IFFN) 38.

Valese E., Conedera M., Held A.C., Ascoli D., 2014. Fire, humans and landscape in the European Alpine region during the Holocene. Anthropocene. http://dx.doi.org/10.1016/j.ancene.2014.06.006

Van Hoang T., Chou T.Y., Fang Y.M., (...), Nguyen X.L., Meadows M.E., 2020. Mapping forest fire risk and development of early warning system for NW vietnam using AHP and MCA/GIS methods. Applied Sciences (Switzerland)10(12), 4348. https://doi.org/10.3390/app10124348

Van Wagner C.E., 1987. Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forestry Service, Headquarters, Ottawa. Forestry Technical Report 35, 35 S.

Vecín-Arias D., Castedo-Dorado F., Ordóñez C., Rodríguez-Pérez J.R., 2016. Biophysical and lightning characteristics drive lightning-induced fire occurrence in the central plateau of the Iberian Peninsula. Agricultural and Forest Meteorology, 225, S. 36-47.

Vivalda C., Verda V., Carpignano A., Guelpa E., 2020. A stochastic approach for enhancing forest fire emergency readiness. Proceedings of the 29th European Safety and Reliability Conference, ESREL 2019, S. 3699-3705. DOI: 10.3850/978-981-11-2724-3_0048-cd

Wastl C., Schunk C., Leuchner M., Pezzatti G.B., Menzel A., 2012. Recent climate change: Long-term trends in meteorological forest fire danger in the Alps. Agricultural and Forest Meteorology, 162-163, 1-13.

Wendler G., Conner J., Moore B., Shulski M., Stuefer M., 2011. Climatology of Alaskan wildfires with special emphasis on the extreme year of 2004. Theoretical and Applied Climatology 104, 459-472.

Westerling A.L., Turner M.G., Smithwick E.A.H., Romme W.H., Ryan M.G., 2011. Continued warming could transform Greater Yellowstone fire regimes by mid-21st century. Proceedings of the National Academy of Sciences Aug 2011, 108 (32) 13165-13170. DOI: 10.1073/pnas.1110199108

Wotton B.M., Martell D.L., 2005. A lightning fire occurrence model for Ontario. Canadian Journal of Forest Research, 35 (6), S. 1389-1401.

Zajac B.A., Rutledge S.A., 2001. Cloud-to-ground lightning activity in the contiguous United States from 1995 to 1999. Monthly Weather Review 129(5), S. 999-1019.

ZAMG, 2020. Klimamonitoring der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Online unter: https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/klimamonitoring [07.09.2020]

Zotta R.-M., Atzberger C., Degenhart J., Hollaus M., Immitzer M., Krajnz H., Lick H., Müller M.M., Oblasser H., Schaffhauser A., Schlaffer S., Vacik H., Dorigo W., 2020. CONFIRM – Copernicus Data for Novel High-Resolution Wildfire Danger Services in Mountain Regions. EGU General Assembly 2020, 4-8 May 2020, EGU2020-19288. https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-19288

Zumbrunnen T., Bugmann H., Conedera M., Bürgi M., 2009. Linking Forest Fire Regimes and Climate - A Historical Analysis. Ecosystems 12: 73-86. http://dx.doi.org/10.1007/s10021-008-9207-3

Anhänge

Anhang 1: Characterisation of forest fires in Austria

Vacik H., Arndt N., Arpaci A., Koch V., Müller M.M., Gossow H., 2011. Characterisation of forest fires in Austria. Austrian Journal of Forest Science, 128(1), S. 1–32.

128. Jahrgang (2011), Heft 1, S. 1–32

Austrian Journal of Forest Science
Centralblatt für das gesamte Forstwesen

Characterisation of forest fires in Austria

Charakterisierung von Waldbränden in Österreich

Harald Vacik[a], Natalie Arndt[a]*, Alexander Arpaci[a], Valerie Koch[b], Mortimer Müller[a], Hartmut Gossow[c]

Keywords: database, fire frequency, Ecozones, Alpine region, Austria

Schlagworte: Datenbank, Feuerfrequenz, Ökozonen, Alpenregion, Österreich

Summary

There is an ongoing debate about the increasing number of weather extremes and the associated increased forest fire risk in the temperate mountain forests of Central Europe. In Austria there does not exist something like a real fire regime and therefore a consistent and detailed recording of forest

*Corresponding author (email: natalie.arndt@boku.ac.at)
a University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Department of Forest- and Soil Sciences, Institute of Silviculture, Peter Jordan Str. 82, 1190 Wien, Tel: +43 (0) 1/47654/4081 Fax: +43 (0) 1/47654/4092
b University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Department of Landscape, Spatial and Infrastructure Sciences, Institute of Surveying, Remote Sensing and Land Information
c University of Natural Resources and Life Sciences Vienna, Department of Integrative Biology and Biodiversity Research, Institute of Wildlife Biology and Game Management

fires has not taken place so far. A wildfire database has been established for Austria within the projects related to the Austrian Forest Fire Research Initiative (AFFRI) and the Alpine Forest Fire Warning System (ALP FFIRS) at the University of Natural Resources and Life Sciences which covers now 1660 records for the period between 1993 and 2009. A descriptive frequency analysis has been carried out in order to illustrate the characteristics of the recorded forest fires events in Austria. Results indicate that the recordings of forest fires and fire frequency varied throughout the years and across provinces. Anthropogenic and technical causes made up for the major part of forest fires in Austria lightning-caused forest fires have a share of 18% throughout the whole study period. Spring and summer happened to be the main fire seasons for forest fires in Austria. Most of the forest fires took place between 11 am and 7 pm in the evening. In terms of the duration of fires in days, it was found that fires lasting longer than one day accounted for only a small percentage of forest fires. As regards the size of fires, most of the forest fires reached less than 1 hectare, followed by fires with a size ranging between one and five hectares. Only a small number of municipalities experienced more than ten fires within the study period. In relation to the forest area the highest number of forest fires records has been observed within the Eastern and Southern Rim Alps as well as the Summerwarm East. A majority of fire records exists in the submontane and low montane altitudinal zone. Coniferous forests have been affected by forest fires to a great extent followed by mixed forests. Only a small portion of deciduous forests have been affected by forest fires. The major part of fire ignitions has taken place at south-facing exposures. North facing aspects made up for the second-largest group regarding fire ignitions. The reliability of the available forest fire data in the database proved to be heterogeneous but can be seen as satisfactory. Whereas the data regarding the time, coordinates, size of area burned and cause of fire proofed to be relatively reliable the security of information on the localisation of the ignition point and the tree species affected has been rather low. Therefore further investigations are needed to draw more general conclusions.

Zusammenfassung

Es gibt derzeit eine kontroverse Diskussion um die steigende Anzahl von auftretenden Wetterextremen und ein damit verbundenes erhöhtes Waldbrandrisiko in den gemäßigten Gebirgswäldern Mitteleuropas. In Österreich gibt es kein wirkliches Waldbrandregime, weshalb bis jetzt auch keine einheitliche und detaillierte Aufzeichnung von Waldbränden durchgeführt worden ist. Im Rahmen der Austrian Forest Fire Research Initiative (AFFRI) sowie des Interreg Projektes Alpine Forest Fire Warning System (ALP FFIRS), die derzeit an der Universität für Bodenkultur Wien durchgeführt werden,

wurde deshalb eine Waldbranddatenbank erstellt, die den Zeitraum von 1993 bis 2009 abdeckt und 1660 Fälle umfasst. Darauf aufbauend wurde eine deskriptive Häufigkeitsanalyse zur Charakterisierung von Waldbränden in Österreich durchgeführt. Die Ergebnisse deuten an, dass sich die Aufzeichnung der Waldbrände sowie der Waldbrandhäufigkeit sowohl während der Jahre als auch über die Bundesländer hinweg stark unterscheidet. Menschliche Ursachen waren für einen Großteil der Waldbrände im Untersuchungszeitraum ausschlaggebend; 18% aller Brände waren natürlichen Ursprungs. Die Analyse hat ergeben, dass Frühjahr und Sommer die Hauptsaison für Waldbrände in Österreich waren; ein Großteil der Waldbrände wurde zwischen 11 Uhr vormittags und 19 Uhr abends registriert. Die Waldbranddauer belief sich meist nur auf einen Tag. Die Größe der von Waldbränden betroffenen Fläche lag beim Großteil der Fälle unter einem Hektar. Nur bei einem sehr geringen Prozentsatz war die geschädigte Fläche größer als fünf Hektar. Der Anteil an Gemeinden mit mehr als zehn registrierten Waldbränden ist im Untersuchungszeitraum gering. Die Mehrheit an aufgezeichneten Waldbränden wurde in den Östlichen und Südlichen Randalpen und im Sommerwarmen Osten registriert. Eine Mehrheit der Waldbrände tritt in der sub- und tiefmontanen Höhenzonen auf. Ein Großteil der registrierten Waldbrände ereignete sich in Nadelwäldern, gefolgt von Mischwäldern; in Laubwäldern ereignete sich nur eine kleine Anzahl von Waldbränden. Die Mehrzahl der registrierten Waldbrände wies südliche Expositionen auf gefolgt von nördlichen Expositionen. Die Genauigkeit der Daten kann als ausreichend angesehen werden um Fragen des räumlichen und zeitlichen Auftretens von Waldbränden zu untersuchen. Die Informationen bezüglich der Tageszeit, der geschädigten Fläche und Waldbrandursachen können als relativ verlässlich angesehen werden, während die Qualität der Genauigkeit zur Metainformationen der Verortung und betroffenen Baumart als gering einzustufen sind. Daher sind noch weitere Untersuchungen notwendig, um allgemeine Schlussfolgerungen für die Waldbrandgefahr in Österreich zu ziehen.

1. Introduction

The negative impacts of storm damages, bark beetle infestations and damage by game ungulates on forest ecosystems are often disastrous in Central Europe (Reimoser and Gossow, 1996; Kräuchi et al., 2000; Albrecht et al., 2009). Forest damages caused by natural hazards like avalanches, mudflows or rock fall are an important factor in mountainous areas (Lindner et al. 2010). Particularly in the temperate mountain forests of Central Europe forest fires have played only a minor role so far. Forest fires are a result of complex interactions between ecological factors such as weather, fuel type, forest structure and topography as well as socio-economic factors. Several

international studies have identified various factors such as climate change (Flannigan et al., 2000; Reinhard et al., 2005), human factors (Vega-Garcia et al., 1995, Goldammer, 2002) or land use change due to socioeconomic factors (Badia et al., 2002) potentially influencing forest fire hazard. According to the climatic factors European mountain regions may experience somewhat higher increases in temperature compared to non-mountainous regions. In the Alps temperature increases twice the global average were observed over the last century (Auer et al., 2007). Austria is a Central European country largely dominated by the Alps with a forest cover primarily dominated by coniferous tree species. The forests do not fulfil the characteristics of fire prone ecosystems, nor have they seriously been fire-impacted so far. However, two summer seasons (2003 and 2007) have most recently proved quite well how widespread and rapidly forest fires may happen and that they might become an important issue in the case of the occurrence of certain weather extremes such as a prolonged periods of drought or heat waves (Gimmi et al., 2004; Gossow et al., 2008; 2009). On the other hand Wotton et al. (2004) point out a relation between climate change and people-caused forest fires and not only Badia et al. (2002) emphasize that not climate change plays the most significant role in forest fire probability but rather aspects related to socioeconomic parameters. Moreover Conedera et al. (1996), Conedera and Tinner (2000) and Goldammer (2002) point out that forest fires should not only be associated with an increase in drought periods but also with the human influence on forest structure and fuel availability. In this context it needs to be mentioned that in other international studies the aspect of the slope and the herewith associated forest types were found to play a significant role in the spatial distribution of forest fires (Beaty and Taylor, 2001; Gavin et al., 2003, Huyen and Tuan, 2008). This finding is of major relevance within the analysis of forest fire risk for Austria due to its mostly alpine characteristics, since the aspect plays a major role both in terms of fire ignition related to human activities as well as for fire spread.

Research on forest fire management in mountain areas has been initiated in Switzerland (Berli, 1996; Conedera et al., 1996; Gimmi et al., 2004; Weibel et al., 2009), France (Gatheron, 1950; Meyer, 2005; Genries et al., 2009), Italy (Tiller, 1988; Bovio, 1996; Kuntner, 2001) and Germany (Goldammer et al., 1997; Badeck et al., 2003; Thonicke and Cramer, 2006), but there were no research initiatives related to forest fires in Austria so far. The regional and local dominance of coniferous tree species such as Norway spruce (Picea abies), Scots pine (Pinus sylvestris) and black pine (Pinus nigra austriaca) makes many of the Austrian forests almost boreal-like (Schmidt-Vogt, 1985; 1987; Gossow, 1996) and insofar probably more susceptible to forest fires. Forest fires have not been considered as an important factor for the adap-

tive capacity and vulnerability of mountain ecosystems in Central Europe so far (Lindner et al., 2010). In that context it has to be considered that wildfire patterns are linked to human activities and land use (Conedera et al., 1996) including vegetation management (Prestemon et al., 2002). Especially the analysis of the additional impact of forest fires on natural disturbance regimes at highly vulnerable sites, like those with secondary coniferous forests, can help to understand these risks for future forest management in these areas (Birot, 2009). In the case of the occurrence of large wildfires in the Alpine Area sufficient prophylactic measures specifically against forest fires are in selected cases in place so far. Therefore it is necessary to identify and characterize forest fire „hot spots" and understand the most important factors regarding fire occurrence and ignition in order to develop a proper early warning strategy for Austria.

This paper deals with the characterisation of forest fire records which have been sampled in Austria during the last years in terms of the causes, the seasonality, daytime of occurrence, their localisation, their size as well as forest types affected in the different altitudinal belts of the Ecozones including an assessment of the data reliability. The data and results presented in this study can serve as a basis for further development of a fire hazard model for mountain conditions taking into account the complex interactions between weather, vegetation, topography and socio-economic factors.

2. The wildfire database

In order to characterise recent forest fires in Austria a wildfire database has been established. On one hand information has been gathered through desk search activities by the use of public available information on the internet platforms „www.wax.at" and „www.feuerwehr-news.at" and by screening the compilation of reports on forest fires by fire brigades from various municipalities and provinces available online. This allowed to cover records of forest fires for the years 1993 to 2009 as the historical documentation by the different data providers was limited to that the period. Moreover the Austrian municipalities have been contacted directly via mail with the request to make available any existing information on forest fires within the boundaries of the municipalities. In addition the Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management (BMLFUW) has been contacted to provide information on forest fires, which have been reported by the municipalities for obtaining refund of damages for forest owners. In combining the fire records from different data sources it was tried to avoid a double recording of documented fires. In this context records from different sources having a similar location, date or time of occurrence have been checked for consistency in the database. Due to

the additional means of collecting information on forest fires in Austria it has been possible to document 1502 fires in the database, out of which 1170 fires have been identified as forest fires for the period from 1993 to 2009. Figure 1 shows the number of forest fire records and the share of its data sources for the years 1993 to 2009. Although the recording of forest fires and fire frequency varies throughout the years and across provinces it seems reasonable that large fires (> 1ha) are mostly covered in our database as these events are quite rare in Austria and therefore very well documented. Small fires (< 1ha) and fire records with unknown size of burnt area comprise a big share and probably not all of these forest fires are currently covered within our database. According to the size of the burned area for each fire event the meta- information available from the different data sources was documented ranging from 1m² up to 70 ha. For some fire events, no information on the size of the burnt area was documented in the historical sources. These events were classified as "unknown" and were not included in the analysis were applicable. Therefore the number of recorded forest fires in the database is likely linked to the different meteorological conditions throughout the years, variety of ignition causes, the varying interest for data recording by the municipalities and the different amount of publicly available material in recent years (cf. Brown et al. 2002; Zumbrunnen et al., 2009). Due to still ongoing process of scanning available data bases for historical forest fire records completeness of data cannot be assumed currently. Geographical patterns might therefore be the result of more or less full reporting. Taking these general limitations into account the number of forest fires in the years 2003 and 2007 stand out notably with a higher number (Figure 1).

An old record of wildfire statistics covering the years 1953 to 1991 provided by the Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management (BMLFUW) was not included in the current fire database as the location of the forest fire events was not documented. Therefore it was not possible to use this old data record for further analysis, beside a comparison of seasonal trends in the current manuscript.

In order to be able to collect data related to forest and wildfires in the future an online reporting form has been established where municipalities and fire brigades can directly enter data on wildfires (http://www.wabo.boku.ac.at/affri.html).

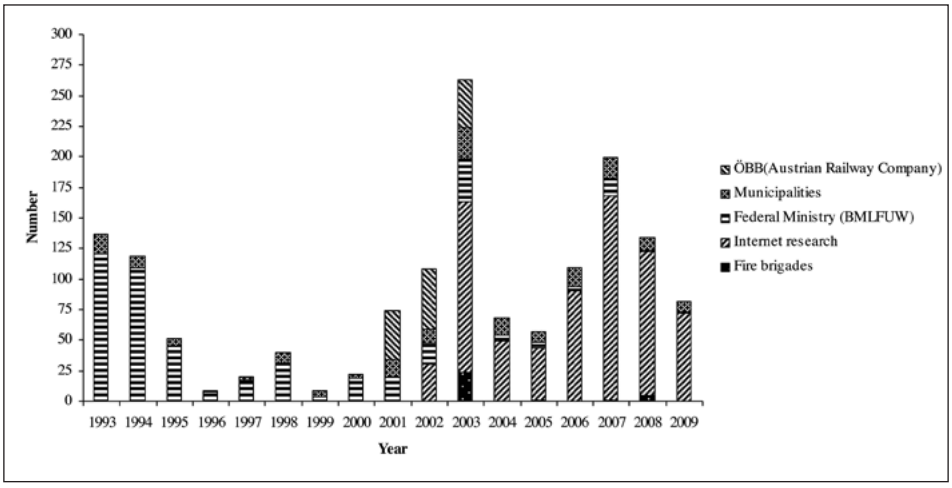


Figure 1: Data Sources of the Austrian forest fire database for the period 1993 to 2009 in Austria.

Abbildung 1: Datenquellen der österreichischen Waldbranddatenbank für den Zeitraum von 1993 bis 2009 in Österreich.

For most of the fire records no exact information was available on the localisation of each event. Comments referring to the place name, parts of addresses as well as hints on the owner allowed us to locate each fire within a certain buffer area. The more accurate the information was the smaller the buffer area for the location was, ranging from 50m up to a 5000 meter radius. Additionally the processed information for each fire event was qualitatively assessed according to its reliability of the start time, the reliability of the causes of ignition as well as the affected tree species. An overall assessment of the uncertainty related to each fire record allowed the classification of the individual events. Table 1 shows the data content included in the forest fire database.

Table 1: Parameters of the Austrian forest fire database.

Tabelle 1: Parameter der österreichischen Waldbranddatenbank.

Field	Content
Fire ID	Consecutive Numbering
Start date	Date of ignition
Year	Year of study period (1993 to 2009)
Month	Month of year of fire start
Day	Day of year of fire start
Time of outbreak	Time of day of ignition
Time of notification	Time of day of notification of fire
UTC_hour	Hour of outbreak UTC time
UTC_minutes	Minute of outbreak UTC time
Duration	Duration of fire in days
Data reliability	Quality assessment of reliability of start time in three categories
Postal code	Postal code of the municipality where fire was recorded
Province	Name of Province
Municipality	Name of Municipality
Latitude	Latitude as of WGS 84, dezimal and Lambert
Longitude	Longitude as of WGS 84, dezimal and Lambert
Date reliability location	Quality assessment of reliability of location in three categories
Size of area damaged	Size of area damaged (m²)
Cause of fire	Artificial, natural or unknown
Detailed causes of fire	Lightning, Self-ignition, Arson, Railway, Campfire, Traditional fire, Controlled fire out of control, Other causes, Unknown
Elevation	Elevation of fire, if known
Tree species	Tree species
Vegetation/forest type	Vegetation/forest type affected
Data reliability tree species	Codes 1, 2 and 3 for three levels of reliability
Eco - Zone	Eco - Zone 1 to 9
Eco - Region	Eco - Region 1.1 - 9.2
Number of fire brigades	Number of fire brigades involved in fire extinction
Number of fire fighters	Number of fire fighters involved in fire extinction
Remarks	Additional information
Origin	Ministry of forests, Municipalities, fire brigades, internet portals of fire brigades
Contacts	Contact details of data suppliers
Data reliability total	Codes 1, 2 and 3 for three levels of reliability

As secondary data maps from the ecozones in Austria (Killian et al. 1993), a digital elevation model and an estimate of the most likely species composition based on the data from the Austrian Forest Inventory (AFI) have been used (cf. Gabler and Schadauer 2002; Bauerhansl et al., 2007). The forest fire database has been linked with the secondary spatial data in order to explore the potential characteristics of the forest fire records for the study period 1993 and 2009. Figure 2 shows the spatial distribution of all recorded fires over the Ecozones in Austria.

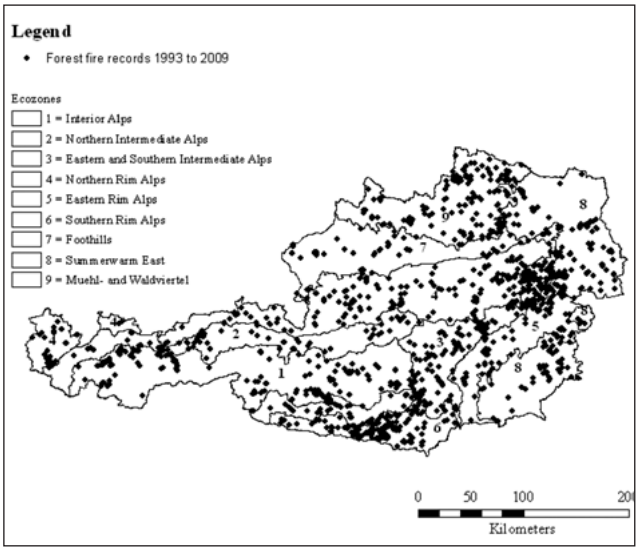


Figure 2: Spatial distribution of fire records over all ecoregions in Austria from 1993 to 2009.

Abbildung 2: Räumliche Verteilung der von 1993 bis 2009 aufgezeichneten Brände über die Wuchsgebiete in Österreich.

3. Characterisation of forest fires

During the period analysed human causes make up for the major part of forest fires in Austria (Figure 3). Out of the 1170 forest fires recorded 40.51 % have been identified as being human caused. The major causes of human caused forest fires range from controlled burning spread out of control, over sparks from braking trains or other railway related activities such as

repair work along the tracks, to arson and cigarettes. For 41.11 % of the recorded forest fires the reason for ignition is unknown due to a shortage in documentation (Figure 3).

Besides human caused forest fires 18 % of forest fires were classified as „natural fires", ignited primarily by lightning strikes. Austria as a predominantly alpine country experiences a high number of thunderstorms with locally very high densities of lightning strikes, which for instance have ignited nearly a quarter of all recorded forest fires in Carinthia within the study period. For Austrian conditions a maximum of lightning caused forest fires (30 %) in the course of the recent years have been observed in 2006 (Müller, 2010).

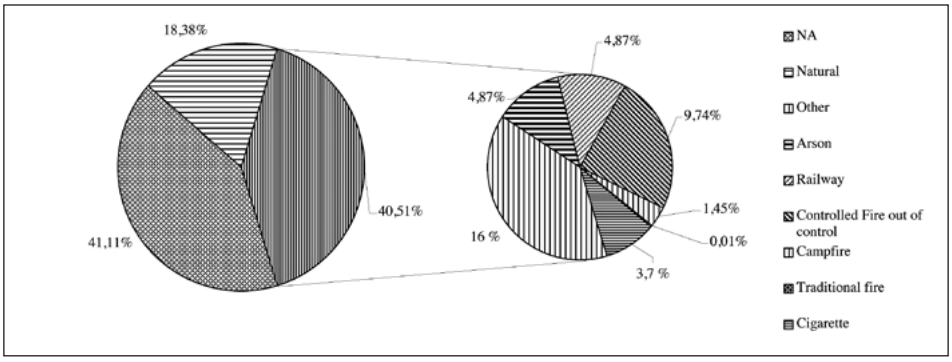


Figure 3: Fire Causes (%) for the period 1993 to 2009 in Austria.

Abbildung 3: Waldbrandursachen (%) für den Zeitraum von 1993 bis 2009 in Österreich.

The number of forest fires in the nine provinces is independent from the amount of forests present in the provinces (Figure 4). The highest number of forest fires per hectare of forest has been recorded for Lower Austria. Styria has the highest forest area compared to the other provinces, but a relatively low number of fires per forest hectare. Salzburg, Upper Austria and Tyrol have a relatively low number of forest fires weighed against the forest area. Vorarlberg and Burgenland - which hold the smallest amount of forest area of all Austrian provinces - are affected quite significantly with a quite large number of fires per forest hectare. The highest number of lightning-caused fires was found in Lower Austria followed by Carinthia and Tyrol, whereas Styria as the province with the highest forest area holds a relatively low number of lightning-caused forest fires (Figure 4).

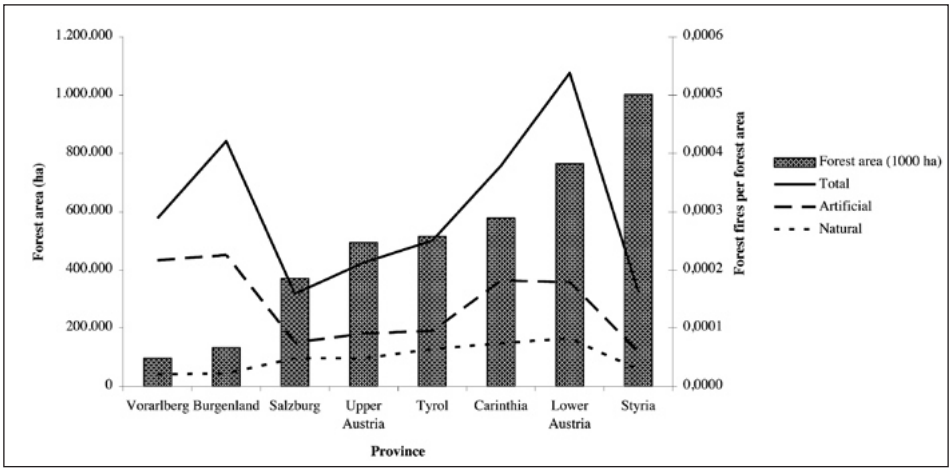


Figure 4: Number of forest fires (anthropogenic, lightning and total) related to forest area for selected provinces of Austria for the period 1993 to 2009.

Abildung 4: Anzahl der Waldbrände (anthropogene, natürliche Ursachen, gesamt) pro Bundesland bezogen auf die Waldfläche (ha) für den Zeitraum von 1993 bis 2009 in Österreich.

Forest fires have been recorded for 619 out of 2357 Austrian municipalities (lowest administration unit in Austria). The major part of municipalities has experienced two to five forest fires per year. A large amount of municipalities has experienced only one forest fire per year and six to ten forest fires respectively over the study period. The years 1993, 2003 and 2007 stand out notably. The share of municipalities experiencing up to five forest fires per year make up for the major part of the recorded forest fires. Even though only a rather low number of municipalities have experienced more than ten forest fires per year the mean share of municipalities experiencing a high number of forest fires (> six per year) lies around 19,6 % in the study period. Figure 5 shows the distribution of the classified number of forest fires per municipality in percent.

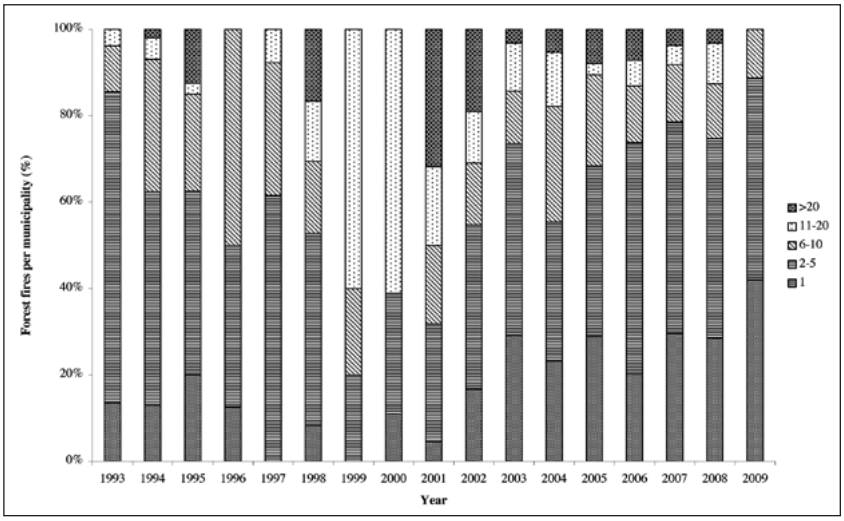


Figure 5: Number of forest fires per municipality (%) for the period 1993 to 2009 in Austria.

Abbildung 5: Anzahl der Waldbrände pro Gemeinde (%) für den Zeitraum von 1993 bis 2009 in Österreich.

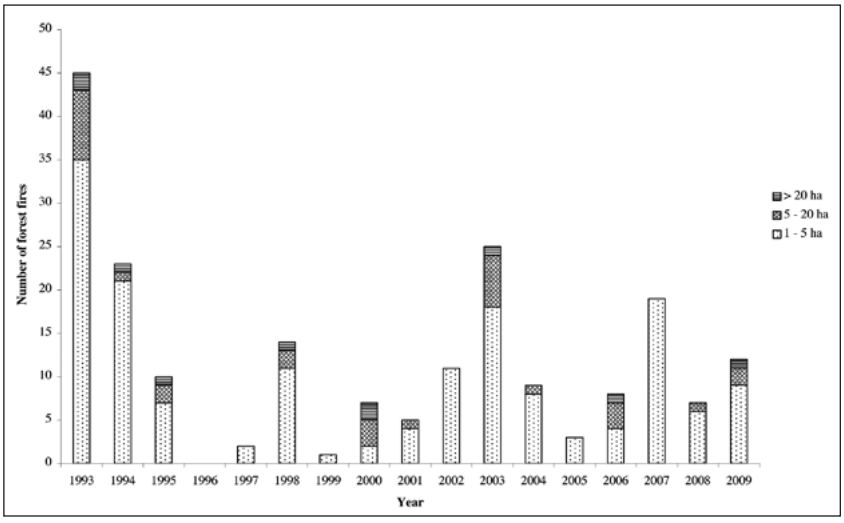


Figure 6: Number of forest fires (> 1 ha) according to the size classes of area burnt (ha) per year for the period 1993 to 2009 in Austria.

Abbildung 6: Anzahl der Waldbrände (> 1ha) in Abhängigkeit von Größenklassen der verbrannten Waldfläche (in Hektar) pro Jahr für den Zeitraum 1993 bis 2009 in Österreich.

As regards the size of area burnt the major part of the forest fires range up to a size of only one hectare. Fire records where the area burned is know and above one hectare cover only a small share of the total number of the recorded forest fires (N=198). The number of recorded large fires (> 20ha) appears to be very low over the whole study period. The share of records where the size of area burnt is not documented is consistently high over the study period. Figure 6 shows the number of forest fires (> 1 ha) according to the size classes of area burnt (ha) over the study period. The years 1993, 1994, 2003 and 2007 show the biggest number of fire records with a size of > 1 ha, which is comparable to the general pattern of the total number of forest fire records in our database (cf. Figure 1).

In terms of the duration of fires (reported in number of days) it was found that 81% of forest fires have been extinguished within one day. Forest fires lasting between two and twenty days only make up an extremely small amount (6 %). As to the season a large number of forest fires have occurred in spring and summer. On average almost 40 % of forest fires have occurred in spring time, 48 % during summer and only a small number of forest fires has taken place during fall and winter. Figure 7 shows the distribution of forest fire by season for the study period 1993 to 2009.

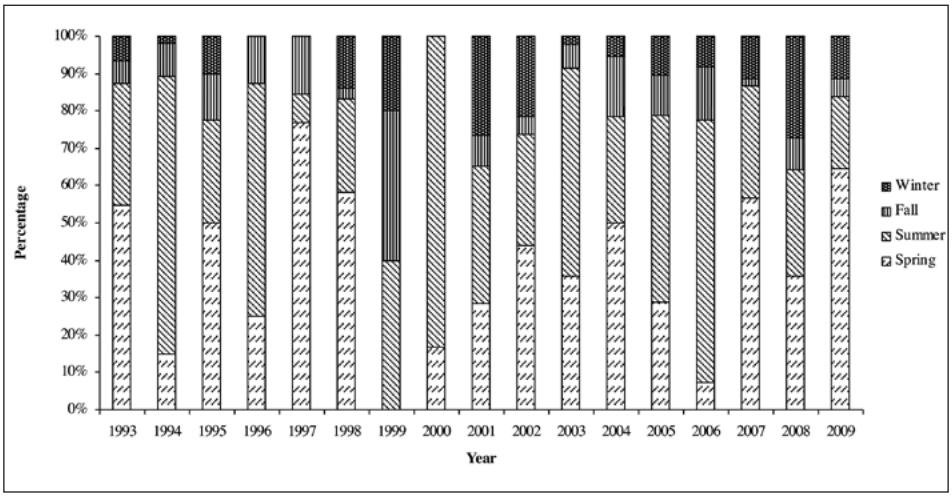


Figure 7: Distribution of forest fires (number of fires in %) by season in Austria for the period 1993 to 2009.

Abbildung 7: Waldbrandverteilung (Anzahl der Waldbrände in %) über die Jahreszeiten für den Zeitraum 1993 bis 2009 in Österreich.

Comparing the fire records of the current database with wildfire statistics covering the years 1957 to 1991 provided from the Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management (BMLFUW) it seems that the number of spring and summer fires is comparatively higher than the amount of winter and autumn fires (Figure 8). Besides that a general decreasing trend of recorded forest fires over the last century can be observed which should be not overestimated as it seems possible that here again the different intensities in forest fire recording are more responsible than any „real" forest fire trend.

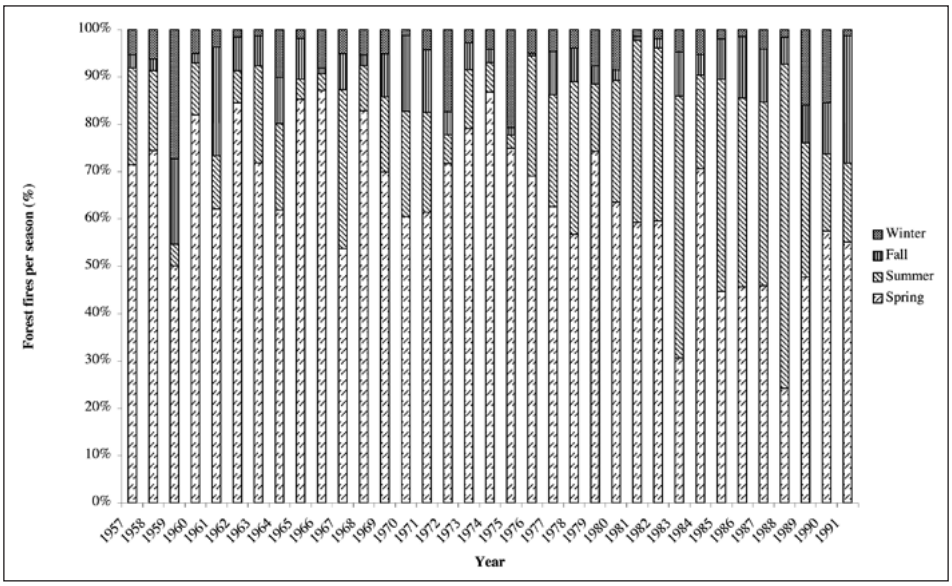


Figure 8: Distribution of forest fires (number of fires in %) by season in Austria for the period 1957 to 1991 (Source: Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management).

Abbildung 8: Waldbrandverteilung (Anzahl der Waldbrände in %) über die Jahreszeiten für den Zeitraum 1957 bis 1991 in Österreich (Quelle: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft).

The majority of forest fires have been observed during the day with a main peak between 13 and 16 pm. In spring and summer the average reported starting times are more concentrated towards the early afternoon with an observed small increase in fire ignitions between 17 and 18 pm. Figure 9 shows the daily course of the start time of forest fires during the seasons.

The daily course of the reported start time of forest fires is lower in fall and winter due to low temperatures, an increase in precipitation, higher humidity and snow cover. In spring and summer the daily course of reported starting time of forest fires is higher than in fall and winter. This supports findings that the number of forest fires is higher during spring and summer times.

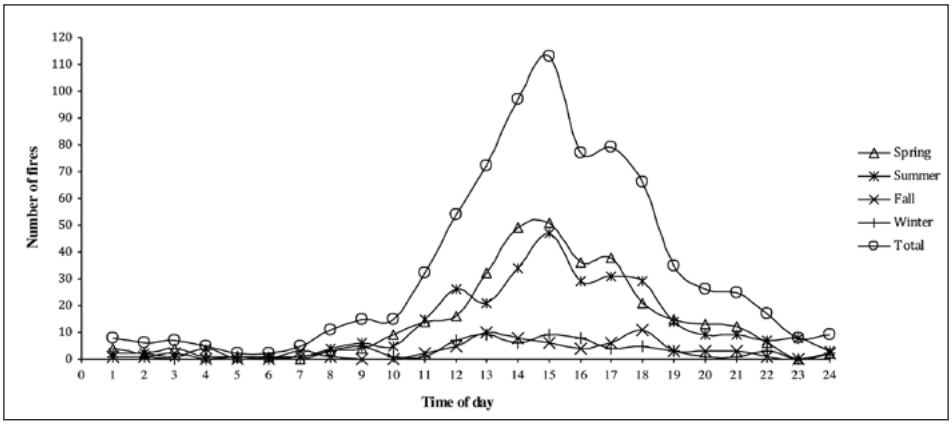


Figure 9: Start time of forest fires in Austria for the period 1993 to 2009 in relation to seasons.

Abbildung 9: Startzeitpunkt der Waldbrände in Österreich für den Zeitraum 1993 bis 2009 nach Jahreszeiten.

Regarding the ecological characterisation of forest communities affected by fires it was observed that the Ecozones and altitudinal zones in Austria have been affected quite differently over the whole study period. As it is important to relate the recorded total number of fires to the forest area table 2 indicates the number of fires per km² (100ha) forest area according to each altitudinal belt and Ecozone. In general an average density of 0.03 forest fire records per forest area is documented in our database so far. As the number of forest fire records is different for each altitudinal zone and Ecozone it becomes evident that the relatively highest number of forest fire records is changing with the amount of forest area in each zone. Within the Ecozones of the Eastern (0.049) and Southern Rim Alps (0.051), and the Summerwarm East (0.046) the highest number of forest fire records can be found in relation to the forest area. In the submontane zone (0.048) and

low montane zone (0.044) the highest densities of occurrence have been observed so far. There were no records observed in the alpine zone.

Table 2: Number of forest fires per km² (100ha) forest area according to altitudinal zones and Ecozones for the period 1993 to 2009.

Tabelle 2: Anzahl der Waldbrände per km² (100ha) Waldfläche in den Höhenstufen und Wuchsgebieten für den Zeitraum 1993 bis 2010.

	colline		submontane		low montane		mid. montane	
	N°	N°/km²	N°	N°/km²	N°	N°/km²	N°	N°/km²
1. Interior Alps	0	0	8	0.088	15	0.037	39	0.031
2. Northern Intermediate Alps	0	0	9	0.021	19	0.020	19	0.020
3. Eastern / Southern Intermediate Alps	1	0.000	13	0.054	45	0.040	43	0.027
4. Northern Rim Alps	0	0	21	0.017	42	0.020	86	0.021
5. Eastern Rim Alps	2	0.016	83	0.052	68	0.070	20	0.023
6. Southern Rim Alps	0	0	52	0.066	20	0.035	11	0.029
7. Foothills	2	0.014	19	0.018	2	0.007	0	0
8. Summer warm East	58	0.039	36	0.022	0	0.000	0	0
9. Muehl- and Waldviertel	2	0.050	49	0.050	71	0.036	9	0.011
N° All records N°/km²	65	0.039	290	0.048	282	0.044	227	0.023

	high montane		low subalpine		high subalpine		NA		all records	
	N°	N°/km²	N°	N°/km²	N°	N°/km²	N°	N°/km²	N°	N°/km²
1. Interior Alps	32	0.020	14	0.011	2	0.004	11	0.002	121	0.023
2. Northern Intermediate Alps	14	0.020	4	0.016	0	0.000	6	0.002	71	0.019
3. Eastern / Southern Intermediate Alps	19	0.015	4	0.005	0	0.000	12	0.002	137	0.026
4. Northern Rim Alps	14	0.010	5	0.008	3	0.008	19	0.002	190	0.019
5. Eastern Rim Alps	4	0.008	0	0	0	0.000	27	0.006	204	0.049
6. Southern Rim Alps	16	0.041	0	0	0	0.000	21	0.009	120	0.051
7. Foothills	0	0	0	0	0	0.000	13	0.009	36	0.025
8. Summer warm East	0	0	0	0	0	0.000	48	0.015	142	0.046
9. Muehl- and Waldviertel	0	0	0	0	0	0.000	18	0.005	149	0.038
N° All records N°/km²	99	0.016	27	0.007	5	0.004	175		1170	0.030

Forest fires have been recorded in coniferous, deciduous and mixed forests from the colline zone up to the high subalpine zones. Figure 10 shows the

share of larger forest fires (> 1ha) in coniferous forests across all altitudinal zones. The major part of forest fire records in mainly coniferous dominated forests were observed in the sub-, low and middle montane altitudinal zones. The number of forest fires in the high montane and low subalpine zone is relatively low, only in some years (1993, 2002, 2003, 2006) larger fires (> 1 ha) have been observed in coniferous forests of the low subalpine zone. Additionally there were several years where no fires (> 1ha) were observed in the colline zone which is the natural range of deciduous forests. As regards deciduous forests it was found that fire records have been observed mainly in the submontane zone followed by the middle montane zone within the study period.

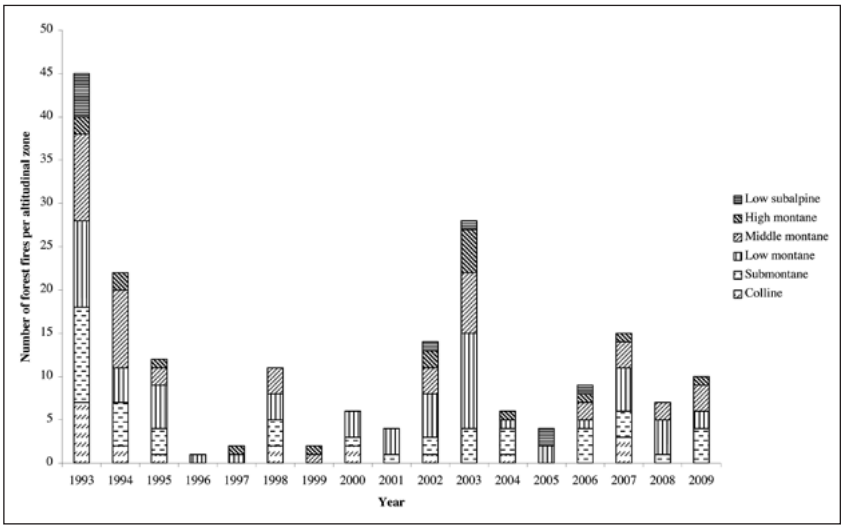


Figure 10: Number of forest fires (> 1 ha) in coniferous forests per altitudinal zone (in %) for the period 1993 to 2009 in Austria.

Abbildung 10: Anzahl der Waldbrände (>1 ha) in Nadelwäldern verteilt über die Höhenstufen (in %) für den Zeitraum von 1993 bis 2009 in Österreich.

With reference to the aspect of the forest fires reported the major part of forest fire ignitions (44%) were taking place at south-facing exposures. The second largest group of forest fire ignition was found at north-facing aspects (35%). However the major part of forest fire ignitions with a north-facing exposure was found to have a North-East aspect (14%). Forest fire

ignitions on eastern (12%) and western (9%) slopes only made up for a relatively small amount. Figure 11 shows the distribution of the reported forest fires according to the aspect.

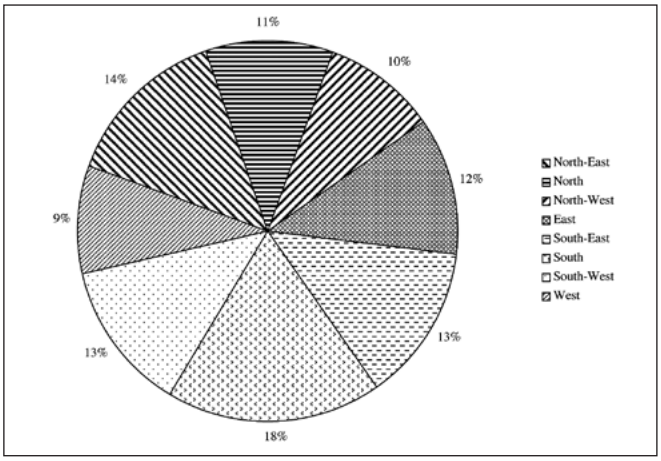


Figure 11: Distribution of forest fire ignitions according to aspect for the period 1993 to 2009.

Abbildung 11: Verteilung der Waldbrände nach der Exposition für den Zeitraum 1993 bis 2009.

Each fire event was qualitatively assessed according to its reliability. As a result it was possible to derive an overall assessment of the uncertainty related to each fire record. Data reliability was divided into three classes with 1 indicating the highest data reliability and 3 indicating the lowest data reliability and measured for the categories time, location, and size of area burned, source of ignition, tree species affected and total data security. The reliability of the underlying data proves to be quite heterogeneous. Information regarding the time and location of the fire, size of area burned and causes of ignition proved to be relatively reliable. The highest insecurity is to be found in the information regarding tree species damaged by forest fire. The overall assessment indicates that most of the cases have a high reliability (category 1) and only a small number of fire records have a low level (category 3) of data security. Figure 12 shows the reliability of forest fire data for the different categories. Due to the fact that data reliability is not available for the forest fire records with unknown causes reliability can be evaluated for the known cases only.

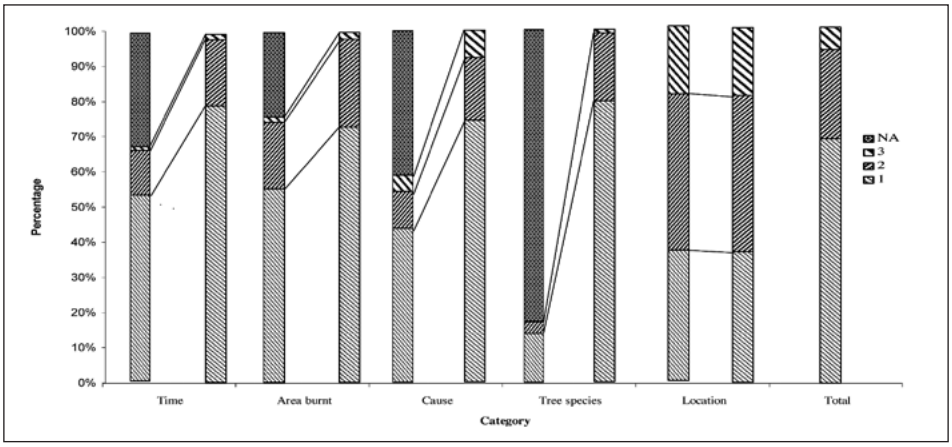


Figure 12: Data reliability (%) of forest fires for the period 1993 to 2009 in Austria.

Abbildung 12: Datensicherheit (%) der Waldbranddaten für den Zeitraum von 1993 bis 2009 in Österreich.

Regarding the localisation of the fire events it was observed that the ignition point for the majority of the forest fires was located in forested areas (89 %). However, there is a small share of fires where the ignition point has been located in other vegetation types and the forests in close distance have been affected as a consequence of the assumed fire spreading behaviour. These fires have been classified according to the related neighbouring vegetation type as forest/railway embankment (4 %), forest/farmland (5 %) and forest/meadow (2 %).

4. Discussion

The data reliability of the forest fire data reported throughout the study period is relatively satisfactory although some factors proved to have a quite low data security. It needs to be stated that the distribution of forest fires throughout the years needs to be looked at carefully since the number of forest fires recorded varies throughout the years. Years, as for instance 1996 and 1999, where only a very low number of forest fires have been recorded, should be seen critical and the results should not be overestimated. As the data sources for the development of the forest fire database are quite heterogeneous with a wide range in data quality and quantity it can be hypothesized that the total number of forest fires might change in relation to

the invested time for studying the archives. Especially the increased number of online platforms and the archive material provided could influence the number of forest fire records. In this context it can be observed that many fire brigades are starting to document their fire management activities in a more systematic way and update their records, which are also made available online. This will allow a more complete and systematic data recording in the future.

Nevertheless we are quite confident that within our research all fires which reached a minimum size of one hectare are included in our database as these forest fires are quite seldom in Austria. However, there are plenty of cases where either no information on the size of the burned area or a very small size (<10m²) is documented. These cases should be used carefully when characterizing the general Austrian forest fire situation (cf. Brown et al 2002). Therefore we had a closer look at the larger fires (> 1ha) in particular (cf. Fig. 6 and Fig. 10) in order to correspond to this limitation. On the other side, 175 forest fires could not be placed within the current forest boundaries due to their inaccurate location. Therefore it was not possible to assign them to specific altitudinal zones and include them in further analysis. This weakness should be improved by a standardized protocol for the documentation of forest fires. The comparison of fire characteristics coming from different fire size classes or different reporting sources is an ongoing process which will allow improved analysis in the future.

The reason for the lack of information and the data insecurity is caused by the fact that a major part of the reporting institutions either do not have a detailed knowledge in forestry to be able to report details on tree species affected or assess the size of area burned adequately. Insecurity is related to the cause of fire as well. In a high number of cases the detailed cause of fire is unknown and not specified, respectively.

According to a detailed analysis of temporal trends, it needs to be considered that the documentation of forest fire records provided by the Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management (BMLFUW) for the time between 1957 and 1993 is showing some shortcomings and has therefore not been included in this analysis. As a matter of fact it is not possible to compare the data of the wildland fire statistics of the BMLFUW with the forest fire records presented in this paper directly due to the low level of data quality and weak spatial localisation of the old records. These old records from former forest fire statistics are only available on the level of the provinces and for the months concerned, but additional details were scarce. Especially as the records were related to reimbursements of forest fire damages, it can be expected that further research and

investigations are needed to improve our fire database in that respect and include a longer time series for future analysis. Nevertheless one may look to the preliminary analysis of this data sample in previous years by Gossow et al. (2008, 2009).

In the so far documented fire records human causes account for a major part of forest fire ignition across Austria. Together with the high population density, the highly developed infrastructure and the eminent significance of tourism human activities play a significant role for forest fire ignition throughout the country. Even though Austria has not been very susceptible to forest fires so far, international studies show that the significance of human activities for forest fire risk is most likely to increase in the future (Barbero et al., 1990; Vega-Garcia et al., 1995; Goldammer 2002). Other studies propose socioeconomic factors such as infrastructure, population density (Brosofske et al., 2007), agricultural activities (Chuvieco et al., 2009) and tourism (Mercer and Prestemon, 2005) in addition to the ecological and climate variables that are typically used in wildfire risk analysis (Veblen et al., 2000; Cardille et al., 2001; Donnegan et al., 2001). Caldararo (2002) and Goldammer (2002) suggest that the human influence on the landscape, forests and ecology - especially activities linked to the transfer of the rural population to the cities and the herewith connected land abandonment - is linked to an altered fire regime. Gimmi et al. (2010) propose to disentangle effects related to climate change and human activities on forest ecosystems and superimpose the human impact over the effects of climate change. As for a large proportion of our fire records the cause of ignition is unknown it is difficult to estimate the total share of natural and human caused forest fires. However, based on the findings of Müller (2010) it can be assumed that the majority of the unknown ignition causes may possibly related to human activities. At this stage of the Austrian Forest Fire Research Initiative it is not possible to relate these findings from international studies to the Austrian forest fire database. However, further analysis of the most likely human factors influencing fire ignition will allow developing a fire hazard model for Austria (cf. Arndt et al., 2009).

Spring and summer fires make up for a major part of forest fires in Austria. The main reason for spring fires is generally associated with the accumulation of dry fuels during winter and the increase in temperature during springtime as well as the local occurrence of weather phenomena like warm and stormy „Foehn“ winds typical for alpine regions (Reinhard et al., 2005). Findings from around the world imply an increase in the number of spring fires in the future (Westerling et al., 2006; Telesca and Pereira, 2010). A high number of summer fires is mainly caused by high temperatures, periods low in precipitation and a decrease in air humidity causing fuels to dry out (Tri-

go et al., 2006; Telesca and Pereira, 2010). In the years 2003 and 2007 a high number of forest fires can be observed, which is comparable to the years 1962, 1976 and 1981 in previous decades (cf. Fig. 8). In 2003 there was - besides two quite typical peaks of fire events in spring (second half of March) and primarily in summer (August) - a third one detectable in the second half of June. This could possibly correspond with the period of summer solstice and ritual fires related to church holidays, which are usually ignited high up in the mountains (Gossow et al., 2008; 2009). In 2007, with the second highest number of recorded forest fires during our study period, again spring fires were dominating. In 2006, forest fire ignitions were mainly found during the summer period. Most of them ignited in a comparatively short fire weather window in July, with a high amount of lightning-caused fires (Müller, 2010).

In spring and summer the number of forest fires reported around the early afternoon is higher than for fall and winter fires, which might be linked with an increase in global radiation and temperatures together with a general decrease of air humidity in spring and summer (Mitscherlich 1981; Talkner et al., 1990; Haeckl, 1993). The daily course of the start time of forest fires resembles the daily course of global radiation, daily temperature and air humidity to a great extent. The increase of global radiation and temperature up to a first maximum in the early afternoon (Kasten, 1977; Talkner et al., 1990) and a smaller peak in the early evening goes together with a decrease in air humidity during the day, which reaches its minimum during the early afternoon (Kessler, 1973; Ross, 1975; Westerling et al., 2006). Preliminary results of a study for the period from 2002 to 2008 indicate that this second small increase probably corresponds to lightning-caused forest fires which show a prominent peak around the late afternoon (Müller, 2010). As a result the early to late afternoon appears to be the most susceptible for fire ignitions.

A major part of forest fires in Austria does not last more than one day neither does it exceed more than five hectares. With reference to the small size of forest area burnt and duration of forest fires in Austria it is assumed that the quick initial attack of fire brigades can explain that finding. The quick extinction is probably made possible due to a higher settlement density and an assumed quick notification of fire brigades in the case of fire. As the legal competence for fire fighting is linked to the individual municipalities, the high number of voluntary fire fighters (> 340.000) and fire brigades (> 4500) in Austria supports the quick response rate additionally. Also the high density of forest roads in Austria with an average of 35 m/ha (Gabler and Schadauer, 2002), which are suited for heavy fire fighting equipment makes the quick arrival of fire fighters at the fire sites understandable. Even tough

the number of municipalities with more than ten reported forest fires per year is still rather small, this development needs to be watched closely in the future, since other international studies have identified several possible drivers influencing fire frequency, size, duration and spatial pattern. Caldararo (2002) and Goldammer (2002) even suggest that the change of landscape, forests and ecology related to human activities may be linked to an altered fire regime.

It is evident that the major part of forest fires recorded in our database is concentrated in a zone comprising the Eastern and Southern Rim Alps and the Summerwarm East. That corresponds quite well to meteorological modelling results from Austria as well as other countries located in the European Alpine region (Lindner et al 2010; Kocmankova et al. 2010). The northern and interior Ecozones are by far less affected by a high number of forest fires. The climatic conditions of the eastern and southern part of Austria are characterised by a more continental and pannonic climate with cold winters and hot and dry summers, whereas the western parts are mainly influenced by an oceanic climate with mild winters, warm summers and high precipitation (Ellenberg, 2010). At regional level the altitudinal zones are superimposing the occurrence of forest fires in the Ecozones. Findings from other studies indicate that altitude plays a significant role for forest fire hazard and fire severity (González and Pukkala, 2007; Bekker and Taylor, 2010). Findings from other parts of the world have shown that a connection between steep and inaccessible terrain and a high forest cover exists for forest fires as well (Southworth and Tucker. 2001). This is partly illustrated quite well by larger forest fires on storm blow-downs on steep terrain in connection with salvage logging operations (Gossow and Frank 2003). The extremely small number of forest fires recorded for the low and high subalpine regions observed in our study could be linked to a relatively low human activity in these altitudinal zones (Grabherr, 1964; Weibel et al., 2009). This may account for the high subalpine zone as well insofar as this ecozone has been remarkably reduced in the past due to anthropo-zoogenic impacts such as the use of open areas for pasturing purposes (Nikolussi and Patzelt, 2008; Pecher et al., 2011). Consequently an effective fire hazard model needs to be established in order to predict the forest fire hazard and related damages in the Austrian mountain forests (cf. Valese et al. 2010).

Forest fires proved to affect conifer forests in Austria to a great extent during the study period. Although fire behaviour and fire intensity is different between Norway Spruce (Picea abies) and Scots Pine (Pinus sylvestris) forests it can be assumed that forest fires may well pose a considerable threat to Austrian conifer forests as they do in other parts of the world (Bergeron et al., 2004; Aleksic et al., 2009; Moser et al., 2010). Since the Austrian forest

cover consists of 67% of coniferous forests (Hauk, 2005) forest fires in general pose a risk to the Austrian forests as well as for the economy and to human well-being.

Natural causes - especially those related to lightning - were found to be of relatively low relevance (18%) as a cause for forest fire ignition for the period 1993 to 2009. Müller (2010) however analyzed a selected data set of forest fires in Austria from 2002 to 2008 and identified an amount of 17% of forest fires with natural causes. Since the 1980´ies a remarkable increase in weather extremes has occurred, including not only floods and winters with extreme snowfall and crown breakages, but also storm blow-down events, bark beetle outbreaks and thunderstorms (Lindner et al. 2010; Lorz et al., 2010). These events represent natural causes for increased fuel amounts, which are relevant in fire ignition and especially spread. In extreme fire weather summers, as in 2003 and 2006, summer fires are dominating, and also the amount of lightning-ignited forest fires became remarkably high, especially in Carinthia (Gossow et al. 2008). However contrary to Müller (2010), who identified Carinthia as holding the highest number of lightning-caused fires followed by Tyrol and Lower Austria our findings reveal that Lower Austria holds the highest number of lightning-caused forest fires followed by Carinthia and Tyrol. According to a different number of forest fire records analysed in both studies these findings need to be further investigated. Conedera et al. (2006) addressed lightning-induced fires as an increasing problem in the Alpine Region as well. In the Central Alps and especially on the southern slope of the Alps lightning fires are common in summer time, have increased in frequency and resulted in increasing costs for their control. For their Swiss and Italian study areas Conedera et al. (2006) found that lightning fires occur at higher elevations on steeper slopes and are usually harder to extinguish because of the limited accessibility in the difficult mountainous terrain.

The predominantly south facing aspect of forest fire ignitions in Austria agree with findings from other international studies, where a significantly higher number of forest fires was recorded on south-facing than on north-facing slopes (cf. Gavin et al., 2003, Huyen and Tuan, 2008). Beaty and Taylor (2001) even suggest shorter fire return intervals and rotations for south facing slopes than for north-facing slopes. The number of forest fires on western slopes was found to be only of medium size. Findings from Taylor and Skinner (1998, 2003) support this finding. In this context we assume that the aspect supports the existence of certain forest types, which are adapted to the prevailing conditions on the site. Gavin et al. (2003) and Beaty and Taylor (2001) indicate that the occurrence of forest types were closely linked to the aspect of a site. It needs to be investigated further

which role a combined significance of aspect and forest type could play for forest fire risk in Austria.

With the current forest fire database of the Austrian Forest Fire Research Initiative it is not possible to reveal a clear picture of the forest fire situation in Austria during the last two decades, since the data quality, which is influenced by a varying reporting intensity and quality does not allow a thorough analysis of trends. However, beside these limitations it can be concluded that prophylactic measures are worth to be set in place in order to reduce potential economic and ecological damages forest fires may cause in Austria.

Acknowledgements

This research has been conducted partly within the frame of the Austrian Forest Research Initiative (AFFRI), which is funded by the Austrian Science Fonds (FWF) with the reference number L539-N14 and the European Project ALP FFIRS (Alpine Forest Fire Warning System), which is funded by the European Regional Development fund of the Alpine Space Program with the reference number 15-2-3-IT. We are very thankful to the valuable comments of an anonymous reviewer which helped to improve an earlier version of this manuscript substantially.

References

Albrecht, A., Schindler, D., Grebhan, K., Kohnle, U. Mayer, H., 2009. Sturmaktiviät über der nordatlantisch-europäischen Region vor dem Hintergrund des Klimawandels – eine Literaturübersicht. Allgemeine Forst und Jagdzeitung 180 (5-6),109-118

Aleksic, P., Krstic, M., Jancic, G., 2009. Forest fires – ecological and economic problem in Serbia. Botanica Serbica 33 (2), 169–176

Arndt, N., Arpaci, A., Gossow, H., Ruiz Rodrigo, P., Vacik, H., 2009. A forest fire hazard based on the estimation of tourist hot spot activities in Austria.

Chuvieco, E., Lasasponara, R., Advances in Remote Sensing and GIS applications in Forest Fire Management Towards an operational use of Remote Sensing in Forest Fire Management, Published for. EARSeL, (European Association of Remote Sensing Laboratories) by Il Segno, Potenza Italy, 51–55, ISBN. 978-88-904367-0-3.

Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T., Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.-M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M.,Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. HISTALP – historical

instrumental climatologically surface time series of the Greater Alpine Region. Int. J. Climatol. 27: 17–46

Badeck F-W., Lasch P., Hauf Y., Rock J., Suckow F., Thonicke K., 2004. Steigendes klimatisches Waldbrandrisiko. AFZ/Der Wald: 90–93

Badia, A., Sauri, D., Cerdan, R., Llurdés, J.-C., 2002. Causality and management of forest fires in Mediterranean Environments: an example from Catalonia. Environmental Hazards 4, 23–32

Barbero, M., Bonin, G., Loisel, R., Quézel, P., 1990. Changes and disturbances of forest ecosystems caused by human activities in the western part of the Mediterranean basin. Plant Ecology 87 2, 151–173

Bauerhansl, C., Koukal, T., Schadauer, K., 2007. Erste österreichweite Waldkarte. Forstzeitung 12, 26–27

Beaty, R.M., Taylor, A.H., 2001. Spatial and temporal variation of fire regimes in a mixed conifer forest landscape, Southern Cascades, California, USA. Journal of Biogeography (28), 955–966

Bekker, M.F., Taylor, A.H., 2010. Fire Disturbance, Forest Structure, and Stand Dynamics in Montane Forests of the Southern Cascades, Thousand Lakes Wilderness, California, USA. Ecoscience 171, 59–72

Bergeron, Y., Gauthier, S., Flannigan, M., Kafka, V., 2004. Fire regimes at the transition between mixed wood and coniferous boreal forest in North western Quebec. Ecology 85 7, 1916-1932

Berli, S., 1996. Brandspuren in den Wäldern der Alpensüdseite - tracce da incendio nei boschi del Sud delle Alpi / Stefan Berli. Hrsg. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Birmensdorf . - Teufen . Flück-Wirth, 1996. – 123 S. ISBN. 3-905620-55-3

Birot, Y., (Ed.), 2009: Living with Wildfires: What Science Can Tell Us – a contribution to the Science-Policy Dialogue, EFI Discussion Paper 15, P. 82.

Bovio, G., 1996. Come proteggerci dagli incendi boschivi / Giovanni Bovio. [Regione Piemonte], Servizio di Protezione Civile . - Torino, 1996 . - 223 S. . - Collana Protezione civile e ambiente

Brosofske, K.D., Cleland, D.T., Saunders, S.C., 2007. Factors influencing modern wildfire occurrence in the Mark Twain National Forest, Missouri. Southern Journal of Applied Forestry 31 (2), 73 – 84

Brown, T., B. Hall, C. Mohrle, Reinbold H., 2002. Coarse assessment of federal wildland fire occurrence data. Program for Climate, Ecosystem and Fire Applications, Desert Research Institute, Reno, Nevada, USA

Calanca, P., Roesch, A., Jasper, K., Wild, M., 2006: Global warming and the summertime evapotranspiration regime of the Alpine region. Climatic Change (79), 65–78

Caldararo, N., 2002. Human ecological intervention and the role of forest fires in human ecology. The Science of the Total Environment, 292, 141–165

Cardille, J.A., Ventura, S.J., Turner, M.G., 2001. Environmental and social factors influencing wildfires in the upper Midwest, United States. Ecological

Applications 11 (1), 111–127

Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Pilar, M., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P., de la Riva, J., Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, J.R., Herrera, M.A., Zamora, R., 2009. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. Ecological Modelling, in press

Conedera, M., Cest, G., Pezzatti, G.B., Zumbrunnen, T., Spinedi, F., 2006. Lightning-induced fires in the Alpine region: An increasing problem. Vth Intern. Conf. on Forest Fire Research, D.X. Viegas (ed.), 1–9.

Conedera, M., Marcozzi, M., Jud, B., Mandallaz, D., Chatelain, F., Frank, C., Kienast, F., Ambrosetti, P., Corti, G., 1996. Incendi boschivi al Sud delle Alpi. Passato, presente e possibili sviluppi futuri. Rapporto di lavoro PNR 31, vdf Hochschulverlag AG, Zürich, 143 pp.

Conedera, M., Tinner, W., 2000. The Interaction Between Forest Fires and Human Activity in Southern Switzerland. Advances in Global Change Research, 2000 (3), 247–261

Donnegan, J.A., Veblen, T.A., Sibold, J.S., 2001. Climatic and human influences on fire history in Pike National Forest, central Colorado. Can. J. For. Res. 31(9), 1526–1539

Ellenberg, H., 2010: Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht; 203 Tabellen, Ellenberg, H., Leuschner, C. (ed.), 6. Aufl. - Stuttgart : Ulmer, 2010 . - XXII, 1333 S. - ISBN: 978-3-8252-8104-5 (UTB)

Flannigan, M.D., Stocks, B.J., Wotton, B.M., 2000. Climate change and forest fires. The Science of The Total Environment, 262 3, 221–229

Flannigan, M.D., Logan, K.A., Amiro, B.D., Skinner, W.R., Stocks, B.J., 2005. Future area burned in Canada. Climatic Change 72, 1–16

Flannigan, M.D., Krawchuk M.A., de Groot W.J., Wotton M.B., Gowman L.M., 2009. Implications of changing climate for global wildland fire, Int. J. Wildland Fire 18, 483–507

Gabler K., Schadauer K., 2002: Methoden der Österreichischen Waldinventur 2000/02 – Grundlagen der Entwicklung, Design, Daten, Modelle, Auswertung und Fehlerrechnung, BWF- Berichte Schriftenreihe der Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, 2006, Nr. 135, 132 pp.

Gatheron, J.-M., 1950. Les incendies de forêts dans les Landes de Gascogne en 1949 . note communiqué à l'Académie d'Agriculture de France, séance du 8 mars 1950 / par J.-M. Gatheron et J. Lavoine . - [Paris], 1950 . - 12 S.

Gavin, D.G., Brubaker, L.B., Lertzman, K.P., 2003. Holocene fire history of a coastal temperate rain forest based on soil charcoal radiocarbon dates. Ecology 84 (1), 186–201

Gimmi, U., Bürgi, M., Wohlgemuth, T., 2004. Wie oft brannte der Walliser Wald im 20. Jahrhundert? Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen 10, 437–440

Gimmi, U., Wohlgemuth, T., Rigling, A., Hoffmann, C.W., Bürgi, M., 2010. Land-use and climate change effects in forest compositional trajectories in a dry Central-Alpine valley. Ann. For. Sci. 67 (701), DOI: 10.1051/forest/2010026

Goldammer, J.G., 2002. Towards international cooperation in managing forest fire disasters in the Mediterranean Region. Intern. Forest Fire News 27, 81–89

Goldammer, J.G., Montag, S., Page, H., 1997: Nutzung des Feuers in mittel- und nordeuropäischen Landschaften. Geschichte, Methoden, Probleme, Perspektiven. - NNA-Berichte 10, (im Druck).

Gossow, H., 1996. Fire-Vegetation-Wildlife Interactions in the Boreal Forest. Goldammer & Furyaev (eds.) Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia, Kluwer Acad. Publishers, 431–444

Gossow, H., Frank, G., 2003. Waldbrand auf Windwurf – eine unheilige Allianz. Österr. Forstz. 114(9), 8–9

Gossow, H., Hafellner, R., Arndt, N., 2008. More forest fires in the Austrian Alps – a real coming danger?, Borsdorf, A., Stötter, J., Veuillet, E., Managing Alpine Future - Proceedings of the Innsbruck Conference, October 2007, 356–362. Verlag der Österr. Akademie der Wissenschaften

Gossow, H., 2008. Regional Alpine Wildland Fire Network – the situation in the Austrian mountain forests. International Forest Fire News ed. Goldammer, J.G. [Wildland Fire Advisry Group / Global Wildland Fire Network, Freiburg, July 4-6, 2008]

González, J.R., Pukkala, T., 2007: Characterisation of forest fires in Catalonia (north-east Spain). Eur. J. Forest Res. 126, 421–429

Gossow, H., Hafellner R., Vacik H., Huber T., 2009. Major Fire Issues in the Euro-Alpine Region – the Austrian Alps. International Forest Fire News IFFN 38, 1-10, ISSN 1029-0864

Grabherr, W., 1964. Waldbrände im Gebiet von Welsberg im Pustertal in der Zeit von 1686–1739. Der Schlern 36

Haeckl, H., 1993. Meteorologie. - 3., verb. Aufl. - Stuttgart : Ulmer, 1993 . - 402 S. . - (Uni-Taschenbücher, 1338) (UTB für Wissenschaft), ISBN: 3-8001-2661-3

Hastenrath, S., 1993. Der Tagesgang von Temperatur und Luftfeuchtigkeit in San Salvador. Pure and Applied Geophysics 56 1, 225-231

Hauck, E., 2005: Holzgewächse in Österreich – Waldinventur 2000/02. BFW Praxis Information Nr. 6 – 2005, 6-10

Huyen, D.T., Tuan, V.A., 2008. Applying GIS and multi criteria evaluation in forest fire risk zoning in Son La Provine, Vietnam. International Symposium on Geoinformatics for Spatial Infrastructure Development in Earth and Allied Sciences 2008

Kocmankova, E., Trnka, M., Eitzinger, J., Formayer, H., Dubrovsky, M., Semeradova, D., Zalud, Z., Juroch, J., Mozny, M., (2010): Estimating the impact of climate change on the occurrence of selected pests in the Central Euro-

pean region. CLIMATE RES. 2010; 44(1): 95-105.

Kasten, F., 1977. Daily and yearly time variation of solar and terrestrial radiation fluxes as deduced from many years records at Hamburg. Solar Energy 19, 589-593.

Kessler, A., 1973. Zur Klimatologie der Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche. Tages- und Jahresgänge in den Klimaten der Erde. Erdkunde 27, 1-10.

Killian W., Müller F., Starlinger F., 1993. Die Forstlichen Wuchsgebiete Österreichs, Eine Naturraumgliederung nach waldökologischen Gesichtspunkten, BWF - Berichte Schriftenreihe der Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, 2006, Nr. 82, 60 pp.

Kräuchi, N., Brang, P., Schönenberger, W., 2000. Forests of mountainous regions: gaps in knowledge and research needs. For. Ecol. Manage. 132 (1), 73–82.

Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolstroem M., Lexer, M.J., Marchetti, M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity and vulnerability of European forest ecosystems. Forest Ecology and Management, 259 4, pp. 698–709.

Lorz, C., Fürst, C., Galic, Z., Matijasic, D., Podrazky, V., Potocic, N., Simoncic, P., Strauch, M., Vacik, H., Makeschin, F., 2010. GIS-based Probability Assessment of Natural Hazards in Forested Landscapes of Central and South-Eastern Europe. Environmental Management, 1-11, DOI 10.1007/s00267-010-9508-0

Marlon, J.R., Bartlein, P.J., Carcaillet, C., Gavin, D.G., Harrison, S.P., Higuera, P.E., Joos, F., Power, M.J., Prentice, I.C., 2008. Climate and human influences on global biomass burning over the past two millennia. Nature Geoscience (1), 697–702

Mercer, D.E., Prestemon, J.P., 2005. Comparing production function models for wildfire risk analysis in the wildland-urban interface. Forest Policy and Economics 7(5): 782–795.

Mitscherlich, G., 1981. Wald, Wachstum und Umwelt. Bd. 2, Waldklima und Wasserhaushalt, 2. Aufl. Frankfurt a. M.

Moser, B., Temperli, C., Schneiter, G., Wohlgemuth, T., 2010. Potential shift in tree species composition after interaction of fire and drought in the Central Alps. Eur. J. Forest Res. 129, 625–633

Müller, M., 2010. Analyse der durch Blitzschlag ausgelösten Waldbrände in Österreich. Master's thesis Institute of Silviculture, Department of Forest and Soil Sciences, University of Life Sciences Vienna

Nicolussi, K.; Patzelt, G. (2006): Klimawandel und Veränderungen an der alpinen Waldgrenze - aktuelle Entwicklungen im Vergleich zur Nacheiszeit. BFW-Praxisinformation 10, April 2006, Wien, S. 3–5

Pausas, J.G., 2004. Changes in Fire and Climate in the Eastern Iberian Peninsula Mediterranean Basin. Climatic Change 63 3, 337–350

Pecher, C., Tasser, E., Ulrike Tappeiner, U., 2010. Definition of the potential tree line in the European Alps and its benefit for sustainability monitoring Ecological Indicators 11 (2), 438-447, doi:10.1016/j.ecolind.2010.06.015.

Prestemon, J.P., J.M. Pye, D.T. Butry, T.P. Holmes, and D.E. Mercer, 2002. Understanding broad scale wildfire risks in a human-dominated landscape. Forest Science 48(4):685–693.

Reimoser, F., Gossow, H., 1996. Impact of ungulates on forest vegetation and its dependence on the silvicultural system. Forest Ecology and Management, 88, 107–119

Reinhard, M., Rebetez, M., Schlaepfer, R. 2005. Recent climate change. Rethinking drought in the context of Forest Fire Research in Ticino, South of Switzerland. Theoretical and Applied Climatology 82 1 – 2, 17–25

Ross, J., 1975. Radiative transfer in plant communities, Vegetation and the atmosphere, Vol. 1 ed. by J.L. Monteith, London Academic Press, 13–55.

Schmidt-Vogt, H., 1987. Die Fichte: ein Handbuch in zwei Bänden, 1. Band: Taxonomie, Verbreitung, Morphologie, Ökologie, Waldgesellschaften - 2., durchges. Aufl., 1987. - XVIII, 647 S., ISBN: 3-490-09916-8

Schumacher, S., Bugmann, H., 2006. The relative importance of climatic effects, wildfires and management for future forest landscape dynamics in the Swiss Alps. Global Change Biology 12, 1435–1450

Sharma, D., Hoa, P.V., Cuong, T.V., Tuyen, T.T., Sharma, N., 2009. Forest fire risk zonation for Jammu district forest division using remote sensing and GIS. 7th FIG Regional Conference Spatial Data Serving People: Land Governance and the Environment – Building the Capacity, Hanoi, Vietnam, 19–22 October 2009

Southworth, J., Tucker, C., 2001. The influence of accessibility, local institutions, and socioeconomic factors on forest cover change in the mountains of Western Honduras

Talkner, P., Weber, R., Roser, W., 1990. Daily temperatures in Switzerland from 1901-1989. Paul Scherrer Institut, Annual Report 1990, Annex V, 78–84.

Taylor, A.H., Skinner, C.N., 1998. Fire history and landscape dynamics in a late-successional reserve, Klamath Mountains, California, USA. Forest Ecology and Management 111 (2-3), 285–301

Taylor, A.H., Skinner, C.N., 2003. Spatial patterns and controls on historical fire regimes and forest structure in the Klamath Mountains, California, USA. Ecological Applications, 13(3), 704–719

Telesca, L., Pereira, M.G., 2010. Time-clustering investigation of fire temporal fluctuations in Portugal. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 10, 661–666

Thonicke K., Cramer W., 2006. Long-term trends in vegetation dynamics and forest fire in Brandenburg (Germany) under a changing climate. Natural Hazards, 38: 283-300, DOI 10.1007/s11069-005-8639-8

Tiller, R., 1988. Vergleichende Untersuchung der Programme des Waldbrandschutzes von Österreich und Italien, Diploma thesis, Institute of Forest Economics and Forest Politics university of Applied Life Sciences Vienna

Trigo, R.M, Pereira, J.C., Pereira, M.G., Mota, B., Calado, T.J., Câmara, C.C., Santo, F.E., 2006. Atmospheric conditions associated with the exceptional fire season of 2003 in Portugal, International Journal of Climatology, 26 (13), 1741–1757

Valese, E., Beck A., Comini B., Conedera M., Cvenkel H., Di Narda N., Ghiringhelli A., Japelj A., Lemessi A., Mangiavillano A., Pelfini F., Pelosini R., Ryser D., Vacik H., Wastl C., 2010. The Alpine Forest Fire Warning System (ALP FFIRS) project. D. X. Viegas (Ed.): Proceedings of the VI International Conf. on Forest Fire Research, 5-19.11.2010, Coimbra, Portugal.

Veblen, T.T., Kitzberger, T., Donnegan, J., 2000. Climatic and human influences on fire regimes in ponderosa pine forests in the Colorado Front Range. Ecological Applications (10), 1178–1195.

Vega Garcia, C., Woodard, P.M., Titus, S.J., Adamowicz, W.L., Let, B.J., 1995. A Logit Model for Predicting the Daily Occurrence of Human Caused Forest Fires. International Journal of Wildland Fire 52 101 – 111

Weibel, P., Reineking, B., Bugmann, H., 2009. Projecting forest fires in mountain forests under climate change. Earth and Environmental Science 6, doi.10.1088/1755-1307/6/8/382005

Westerling, A.L., Hidalgo, H.G., Cayan, D.R., Swetnam, T.W., 2006. Warming and Earlier Spring Increase Western U.S. Forest Wildfire Activity. Science 18, Vol. 13 5789, 940–943

Wotton, B.M., Martell, D.L., Logan, K.A., 2004. Climate Change and People-Caused Forest Fire Occurrence in Ontario. Climatic Change 60 3, 275-295

Zumbrunnen,T., Bugmann, H., Conedera, M. Bürgi M., 2009. Linking Forest Fire Regimes and Climate – A Historical Analysis in a Dry Inner Alpine Valley, Ecosystems (12): 73–86

Anhang 2: Anomalies of the Austrian Forest Fire Regime in Comparison with Other Alpine Countries: A Research Note

Müller M.M., Vacik H., Valese E., 2015. Anomalies of the Austrian Forest Fire Regime in Comparison with Other Alpine Countries: A Research Note. Forests, 2015(6), S. 903–913.

Forests **2015**, *6*, 903-913; doi:10.3390/f6040903

OPEN ACCESS

forests

ISSN 1999-4907

www.mdpi.com/journal/forests

Communication

Anomalies of the Austrian Forest Fire Regime in Comparison with Other Alpine Countries: A Research Note

Mortimer M. Müller [1,*], Harald Vacik [1] and Eva Valese [2]

[1] Department of Forest- and Soil Sciences, University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Institute of Silviculture, Peter Jordan Str. 82, 1190 Vienna, Austria; E-Mail: harald.vacik@boku.ac.at

[2] Veneto Region Civil Protection Bureau, Via Paolucci 34, 30175 Venice, Italy; E-Mail: eva.valese@regione.veneto.it

* Author to whom correspondence should be addressed; E-Mail: mortimer.mueller@boku.ac.at; Tel.: +43-1-47654-4058; Fax: +43-1-47654-4092.

Academic Editor: Jianbang Gan

Received: 10 November 2014 / Accepted: 13 March 2015 / Published: 24 March 2015

Abstract: In recent years, Austria has experienced highly variable forest fire activity with new record values regarding the number of fires and sizes of burned areas. Single seasons in 2011, 2012 and 2013 showed 20-year-peaks and significant differences regarding fire activity. A statistical overview of datasets from Austria, Switzerland, Italy and Slovenia is given, allowing a preliminary comparison between the Alpine countries. Higher temperatures in combination with local dry weather conditions are hypothesized as reasons for the observed anomalies. Further analysis will be done with new climatic data in high spatial resolution from the "AgroDroughtAustria" project to confirm these preliminary findings.

Keywords: forest fire regime; Austria; Alps; alpine region; anomalies; climate change

1. Introduction

Austria is an Alpine Central European country with a forest cover of 47% mainly dominated by coniferous tree species. Forest fires in Austria play no major role compared to the damages and costs by other natural disturbances (e.g., storm, bark beetles). However, they are likely to become more important as expected impacts of climate change, socioeconomic changes and general trends in the provision of

ecosystem services are supposed to evolve [1–7]. The exact consequences of these changes are unclear, due to a lack of knowledge in most of the influencing factors. The best investigated parameters that are coupled with the occurrence of forest fires are the meteorological conditions. Regional climate models suggest an increase in temperature and a reduction of precipitation in summer and autumn, especially in the south and east of Austria, which would likely lead to more frequent forest fires [8–11]. Since the 1980th, longtime trend of yearly mean temperature showed a steady increase, with 2014 being the warmest year ever recorded [12]. Annual precipitation had a high variance in the last decades but mostly increased since 10–20 years and stayed above long term average in recent years.

In 2008 the Institute of Silviculture at the University of Natural Resources and Life Sciences in Vienna started research on forest fires in Austria. Within the projects AFFRI (Austrian Forest Fire Research Initiative), ALP FFIRS (Alpine Forest Fire Warning System) and FIRIA (Fire Risk and Vulnerability of Austrian Forests under the Impact of Climate Change) more than 2700 forest fires were recorded from the period 1993 to 2014. Analysis on the occurrence, distribution, causes and characteristics of forest fires were accomplished [13]. Case studies, fuel investigations and fire behavior modeling followed basic research [14–16]. In 2013 a forest fire database and public accessible Web-GIS were developed to standardize the acquisition of forest fire data and to improve the access to recent findings [17].

In this short communication we want to present preliminary findings regarding the exceptional occurrence of forest fires in Austria and neighboring countries in recent years. What we primarily mean with the term "anomaly" is a deviation from the common rule without considering the amount of deviation of a (meteorological) quantity from the accepted normal value. We want to report an observation from the real world of fires to provide some words of caution.

2. Alpine Fire History

Valese *et al.* [7] showed that there were different fire epochs in the Alps, depending on human influence. Until the Neolithic period, fires were only ignited by lightning, leading to fire return intervals of 300 to 1000 years [18]. Progressively, as human population grew, fire became a tool for adapting the environment [19–21]. Approximately 150 years ago fire suppression policies came up for reasons associated with the protection of timber production [22]. The fire control approach led to a low number of wildfires first, but was followed by a shift to larger and intensified fires in the last decades [7,23].

In the south of Switzerland Tinner *et al.* [24] took pollen and charcoal data from the sediments of two lakes. They pointed out that fire played a major role in the past, at least in the south of the Alps. According to their findings, the occurrence of *Abies alba*, Mill., a species also very common in Austria, decreased according to higher fire frequency about 5000 years ago. Also other studies demonstrated that fires influenced vegetation dynamics in the Alps and changed tree composition [25–27]. Kral [28] investigated sediment and pollen samples from different lakes in Austria. He underlined the high variance of the occurrence of trees and perennials during the last centuries, driven 60% per human influence and 40% per climate. Still, no evidence was given on the potential impact of forest fires.

Many chronicles of municipalities and local field names in Austria hint at devastating forest fires before 1900 [29–32]. Reports of fires with a size up to 3000 hectares are known—almost thirty times as large as the biggest area burned in the past 100 years. Indeed, these examples seem to be exceptions and

do not, according to the small number of events, provide a possibility to compile a historical fire pattern. Nevertheless they indicate a long fire history in the Alps [33].

3. The Austrian Fire Regime

The definition of "fire regime" lacks a clear and established definition, but often includes factors like frequency, intensity, extent, season and type of fire [34,35]. In Austria, the yearly distribution of these attributes greatly depends on regional weather conditions. These conditions are highly variable within the Alpine region, locally and temporally and during the whole year [36,37]. Because homogenized long-term data are missing and the number of yearly forest fires ranges around 200 incidents, most of them below one hectare in size, it is difficult to define a classical fire regime. Anyway, in the last 20 years, the period with a systematic collecting of forest fire data, the highest numbers of forest fires were found in spring, especially in March and April. A second smaller peak correlated with the summer months July and August. The major part of these fires occurred in Lower Austria, Carinthia and Tyrol, the southern and eastern parts of Austria [13]. Although it is difficult to draw conclusions on single years, it was observed that exceptions are becoming the rules in the last fire seasons [38,39]. To explain this phenomenon, we take a closer look at the years 2011, 2012 and 2013—three years which tend to indicate some "fire anomalies".

4. Austrian Forest Fire Anomalies

Table 1 shows the yearly distribution of the number of forest fires and the reported burned area in hectare from 1993 to 2013. The yearly standard deviation of fire incidents was $\sigma = 50$ (spring), 42 (summer) and 10 (autumn), which nearly represents the seasonal mean values of forest fire events. Regarding the burned area, standard deviation ranged from $\sigma = 33.9$ hectares (spring) to 34.8 ha (summer) and 6.1 ha (autumn), wherewith all three values lie above the seasonal mean values of burned area.

What we found in the three years 2011–2013 was a shift of seasonal fire peaks. Each year brought one exceptional strong accumulation of fire events during one season. In 2011 autumn brought along a never seen before outbreak of forest fires, in 2012 the same happened in spring and in 2013 the summer months followed the trend of seasonal fire anomalies (Table 2).

The year 2011 started with an exceptional high number of forest fires in spring. In contrast, summer fires were far below mean values. Then autumn came and brought the driest November ever documented in Austria [40]. Regions above high inversion fog experienced one of the warmest Novembers too. Nearly 50 forest fires burned 27 hectares of forest land between September and November. This sounds not very impressive, but exceeded the average fivefold—and made it the strongest autumn fire season recorded in the Austrian fire database. To test the significance of this pattern, a one-way ANOVA including a Post-hoc-Test considering the Games-Howell-Index was performed ($p < 0.05$). It was shown, that 2011 had a highly significant difference ($p = 0.001$) to most other years. Only the autumn seasons of the years 2006 and 2008, both including 21 forest fires, were not significantly different ($p = 0.16$), as well as the autumn season of 2003 ($p = 0.07$).

Table 1. Numbers of forest fire events per season and seasonal burned area in hectares in Austria from 1993 to 2013.

Year	Spring_*n*	Spring_ha	Summer_*n*	Summer_ha	Autumn_*n*	Autumn_ha
1993	75	55.3	29	27.9	2	0.0 *
1994	15	15.6	80	111.5	10	1.6
1995	24	14.5	15	72.0	8	5.4
1996	13	6.6	8	0.6	1	0.0 *
1997	24	12.5	5	4.1	5	8.2
1998	35	54.5	17	8.9	1	0.7
1999	8	3.2	4	2.4	3	0.1
2000	17	6.6	18	34.8	3	0.0 *
2001	16	16.6	24	4.2	8	0.3
2002	49	63.4	32	17.8	10	0.2
2003	82	123.6	133	58.2	19	4.0
2004	34	9.1	18	5.7	9	1.0
2005	32	9.5	42	4.0	9	0.1
2006	14	0.6	83	73.2	21	10.3
2007	138	29.5	70	20.5	11	0.7
2008	66	10.2	36	0.1	21	0.1
2009	95	70.3	23	0.5	14	0.2
2010	75	44.5	52	4.8	8	0.0 *
2011	150	31.2	45	25.6	45	27.4
2012	184	56.5	48	1.1	8	1.5
2013	10	2.6	172	107.0	10	0.0 *

* = Seasonal burned area < 500 m^2.

Table 2. Number of fire events (first value) and total burned area in hectares (second value) for selected seasons in Austria compared to neighboring Alpine countries. "MeanAut", "MeanSpr" and "MeanSum" show the mean values for the analyzed seasons (autumn, spring and summer) in the last 20 years.

Country	Autumn 2011	MeanAut	Spring 2012	MeanSpr	Summer 2013	MeanSum
Austria	47 *|27 *	11|3	184 *|50	57|23	166 *|107	39|22
Switzerland (North)	3|12 *	3|1	6|2	7|19	16 *|1	9|18
Switzerland (South)	2|0	4|5	8|11	19|187	4|20 *	12|14
Italy (North-East [1])	31|25	19|52	161|708	93|506	98|1482 **	80|238
Italy (North-West [2])	57|221	49|260	200|1096	275|2685	18|10	47|227
Slovenia [3]	13 *|71 *	5|8	68|92	34|105	40|47	32|192

1 = Trentino (only 1999–2013), Veneto, Friuli; 2 = Piemonte, Lombardia (2013 missing), Aosta; 3 = Data from the Slovenia Forest Service/forest fire database; * = Highest value since 1993; ** = Highest 20-year-value for Friuli.

The year 2012 was characterized by the highest number of spring fires ever recorded; and it came up with another surprise: The earliest ever documented lightning induced forest fire, ignited on 24 March. Normally 95% of lightnings—and 98% of lightning induced forest fires—occur in the summer months from May to August [16,41]. The reasons for this lightning fire seemed to be the exceptional dry

conditions combined with high temperatures and strong spring convection, which led to widespread thunderstorm evolution. The extraordinary high number of forest fires was likely caused by a severe drought since several months and the third warmest March ever recorded [42,43]. ANOVA analysis showed, that this season was significantly different to all other years, except for the spring season in 2011 ($p = 0.26$), where besides the drought in autumn another dry spring season occurred and forest fire activity was extraordinary high too.

The year 2013 started with the lowest number of spring fires since 1999 and the lowest burned area ever recorded, caused likely by a wet winter—one of the wettest ever recorded in Southern and Eastern Austria—as well as spring season and sunshine hours far below average [44]. After a flood disaster with heavy rainfall in many parts of Central Europe at the beginning of June, the forest fire year 2013 seemed to have taken an early end. However, from mid-July to mid-August, extremely hot and dry conditions were observed. July 2013 was the sunniest, driest and second warmest in more than 200 years of meteorological investigation in Austria. On the 8 August, temperatures in Austria exceeded 40 degrees Celsius for the first time since the beginning of scientific documentation in the year 1775 [45]. This situation led to an outbreak of 130 forest fires in Austria and a burned area of more than 100 hectares. Both numbers indicate the highest recorded values in the Austrian forest fire database, at least for this time of the year and the homogenized dataset since 1993. The largest fire in summer 2013 burned 53 hectares, which represents the largest area since 2002. ANOVA analysis with the number of seasonal fire events showed that summer 2013 had a highly significant difference ($p = 0.001$) to all other years except for summer 2003 ($p = 0.10$), where a remarkable dry and hot August led to a comparable situation as in summer 2013.

Winter season 2013/2014 continued seasonal anomaly: it was the second warmest winter in Austria since more than 200 years [46]. In the south of the Alps precipitation was far above average, with amounts from 200% to 300% of an ordinary season. On the contrary, the north of Austria experienced very dry conditions with precipitation amounts under 40% of average. This corresponds to the lowest value since 150 years. Likely because of missing winter storms, rare foehn events and the altitude of the dry regions—mostly under 1000 m above sea level and so within the area of fog formation, which leads to wet and therefore unburnable fuel conditions– there were only some small forest fire events recorded.

5. Comparison with Other Alpine Countries

Several authors have identified large and extraordinary forest fires events in the Alpine region in recent years, often associated with heat waves and dry foehn winds, which is generally seen as an indication of a changing climate that may lead to new fire regimes in the Alps [23,47–50]. When comparing the described anomalies of the Austrian forest fire records with datasets from neighboring countries, there could be found some similarities, at least for the eastern parts of the Alpine region (Table 2). In autumn 2011, Slovenia also experienced a new record in number and burned area of forest fires. The north of Switzerland recorded the largest total burned area, but only three forest fires, which corresponds to average. In Italy the north-east saw more fires than in a typical season, yet the burned area was only half of the normal value. For spring 2012, also the north of Italy reported a never seen before lightning fire so early in the year that burned 300 hectares [7] very close to the southern border of Austria. Despite the high number of fires in Austria, there could not be found new record values in other countries. However, extraordinary

high numbers of forest fires were documented in the north-east of Italy and in Slovenia. In north-west Italy and Switzerland, the number and sizes of burned areas stayed below average. In summer 2013, a new record in the number of forest fires was detected in the North of Switzerland. At the same time the fires in the South burned the largest area ever recorded in a summer season. The north-east of Italy experienced above-average numbers of fires and also burned areas, especially in the region bordering Austrian Carinthia (Friuli), while the north-west showed a below-average fire season. Slovenia observed slightly more fires than usual but only a quarter of the mean burned area (Table 2).

6. Discussion

Maybe the observed forest fire "anomalies" reflects the "normality", due to the variance of meteorological conditions in Austria [36,37]. Considering regional climate scenarios which predict more heatwaves and longer drought periods in summer and autumn, fire seasons like in 2011 and 2013 should become more frequent. Still, this future impact on the Alpine region is not that clear. While past regional climate model runs indicated a strong increase in temperature in the future—up to eight degree until 2100 [51,52]—actual findings in the context of IPCC5 pointed to the fact, that global and regional models have difficulties to reproduce the nearly stagnation in temperature increase during the last fifteen years and may overestimate the intensity and duration of heat waves [53,54].

The lightning fire in March 2012 may have been a strange coincidence. Dry periods in spring were frequent in the past, but combined with strong convection not associated with frontal systems—so called heat thunderstorms—they seem to be very rare in March [7]. There is an indication that the number of lightnings will increase with changing climatic conditions, which might influence the ignition patterns of forest fires as well [55].

When comparing the numbers of small forest fires below one hectare in size, there is a discrepancy to older fire data. Because forest fires have become better documented by fire brigades since the evolution of the World Wide Web, more small fires were found and collected. If we only take into account those fires which reached at least one hectare in size, the addressed anomalies and general significance levels from the years 2011, 2012 and 2013 remain unchanged. As a recent study showed, the Austrian fire database since 1993 is consistent regarding fires greater or equal one hectare in size [56]. It has also to be noted, that around half of the reported forest fires in the last 20 years lack information about the burned area. Yet we believe that most of these fires were small in size, as larger fires are generally better documented and can be found in different data sources. However, a sound statistical analysis would require a full data set for all records.

The small number of datasets used in this short communication is also a limitation of the current analysis. Because homogenized forest fire data in Austria is just available from 1993 onwards, we could utilize only 21 years for the analysis. For climate related comparative studies at least 30-year-data are used. However, the collection of forest fire data in Austria—and in other Alpine countries like Italy—is difficult, time-consuming and labor-intensive. A standardized and centralized collection of forest fire incidents does not exist. Additionally, forest structure and ownership are quite small scaled and dispersed. Around 56% of the forests in Austria are privately owned with an average size of less than 5 hectares per owner. However, continuous efforts will be made to enhance the data used for further analyzes, especially regarding the temporal extent.

The differences/similarities between the selected forest fire data for Austria and the neighboring countries may be a result of Alpine weather patterns [52]. Because the eastern parts of the Alps show greater fire anomalies, precipitation during cyclone activity in the northern Mediterranean Sea might lead to wetter conditions in the western and dryer conditions in the eastern Alps. Spring seasons showed an increase in the number of drought periods during the last 20 years [57]. This correlates with more frequent spring fires—the four most active spring seasons occurred in the last seven years [13]. However, a period of 20 years is too short to conclude a tendency. In the late 80s and early 90s of the past century, the number and duration of dry intervals in spring was higher than in recent years. A short statistical overview for Vienna—located at the easternmost border of the Alps—showed that the duration and seasonal occurrence of drought periods in the last 250 years did not change significantly [57]. Indeed, this finding has to be proved with high resolution drought data, available from the "AgroDroughtAustria" project [58].

We hypothesize that it's not precipitation alone, which causes seasonal anomalies and influenced numbers and burned areas of forest fires, but a combination of drought periods and higher temperatures in the eastern Alpine region. To improve knowledge about the possible impact of climate behavior on forest fire occurrence it is planned to perform an analysis in 2015 with new data from the "AgroDroughtAustria" project, funded by the Austrian Climate Research Program, which has the goal to develop a drought monitoring system for Austria. We want therefore enhance the results of recent studies, which analyzed the link between weather and forest fire activity in the Alpine region [59,60].

Another possibility for the seasonal and regional increase of forest fire activity may be found in changed socioeconomic factors, like a shift in outdoor activities. Besides meteorological parameters, socioeconomic effects were found one of the main drivers in the occurrence of forest fires in Austria [5,61]. However, a combined interpretation of the relevant parameters is difficult to achieve on a larger scale as data on infrastructure, population density or other relevant anthropogenic parameters are not available on each scale.

Acknowledgments

We want to thank Marco Conedera (Switzerland) and Anže Japelj (Slovenia) for providing the requested datasets for the years 2011–2013 and Herbert Formayer (Institute of Meteorology) for the provision of meteorological data for Vienna. This research has been conducted partly within the frame of the Austrian Forest Fire Research Initiative (AFFRI), which is funded by the Austrian Science Fonds (FWF) within the Translational Research Program and the reference number L539-N14.

Author Contributions

Mortimer M. Müller compiled the dataset. Mortimer M. Müller and Harald Vacik analyzed the data. Eva Valese contributed with literature review and expert opinion. Mortimer M. Müller wrote the paper, with essential support from Harald Vacik and Eva Valese.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

References

1. Badeck, F.W.; Lasch, P.; Hauf, Y.; Rock, J.; Suckow, F.; Thonicke, K. Steigendes klimatisches Waldbrandrisiko. In *Allgemeine Forstzeitschrift für Wald- und Forstwirtschaft (AFZ—DerWald)*; Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH: Hannover, Germany, 2003.
2. Barriopedro, D.; Fischer, E.M.; Luterbacher, J.; Trigo, R.M.; García-Herrera, R. The hot summer of 2010: Redrawing the temperature record map of Europe. *Scienceexpress* **2011**, doi:10.1126/science.1201224.
3. Moreira, F.; Viedma, O.; Arianoutsou, M.; Curt, T.; Koutsias, N.; Rigolot, E.; Barbati, A.; Corona, P.; Vaz, P.; Xanthopoulus, G.; *et al.* Landscape—Wildfire interactions in southern Europe: Implications for landscape management. *J. Environ. Manag.* **2011**, *92*, 2389–2402.
4. Zumbrunnen, T.; Menéndez, P.; Bugmann, H.; Conedera, M.; Gimmi, U.; Bürgi, M. Human impacts on fire occurrence: A case study of hundred years of forest fires in a dry alpine valley in Switzerland. *Reg. Environ. Chang.* **2012**, *12*, 935–949.
5. Arndt, N.; Vacik, H.; Koch, V.; Arpaci, A.; Gossow, H. Modeling human-caused forest fire ignition for assessing forest fire danger in Austria. *iForest* **2013**, doi:10.3832/ifor0936-006.
6. Seidl, R.; Schelhaas, M.J.; Rammer, W.; Verkerk, P.J. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nat. Clim. Chang.* **2014**, doi:10.1038/nclimate2318.
7. Valese, E.; Conedera, M.; Held, A.C.; Ascoli, D. Fire, humans and landscape in the European Alpine region during the Holocene. *Anthropocene* **2014**, *6*, 63–74.
8. Matulla, C.; Formayer, H.; Haas, P.; Kromb-Kolb, H. Mögliche Klimatrends in Österreich in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts. *Österr. Wasser Abfallwirtsch.* **2004**, *56*, 1–9.
9. Dankers, R.; Hiederer, R. *Extreme Temperature and Precipitation in Europe: Analysis of a High-Resolution Climate Change Scenario*; EUR 23291 EN; Office for Official Publications of the European Communities: Luxembourg, 2008.
10. Lautenschlager, M.; Keuler, K.; Wunram, C.; Keup-Thiel, E.; Schubert, M.; Will, A.; Rockel, B.; Boehm, U. *Climate Simulation with CLM, Scenario A1B Run no.2, Data Stream 3: European Region MPI-M/MaD*; World Data Center for Climate: Hamburg, Germany, 2009.
11. Fischer, E.M.; Schär, C. Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. *Nat. Geosci.* **2010**, doi:10.1038/NGE0866.
12. Central Institute of Meteorology and Geodynamics Vienna. HISTALP Annual Report. Available online: http://www.zamg.ac.at/cms/de/dokumente/klima/dok_news/dok_histalp/jahresbericht-2014 (accessed on 28 January 2015).
13. Vacik, H.; Arndt, N.; Arpaci, A.; Koch, V.; Müller, M.M.; Gossow, H. Characterisation of forest fires in Austria. *Aust. J. For. Sci.* **2011**, *128*, 1–32.
14. Arpaci, A.; Valese, E.; Vacik, H. Potential fire intensities in the Alpine region based on characteristic fuels in Austria and Italy. In Proceedings of the 5th International Wildland Fire Conference, Sun City, South Africa, 9–13 May 2011.
15. Arpaci, A.; Eastaugh, C.S.; Vacik, H. Selecting the best performing fire weather indices for Austrian ecoregions. *Theor. Appl. Climatol.* **2013**, *114*, 393–406.
16. Müller, M.M.; Vacik, H.; Diendorfer, G.; Arpaci, A.; Formayer, H.; Gossow, H. Analysis of lightning-induced forest fires in Austria. *Theor. Appl. Climatol.* **2013**, *111*, 183–193.

17. Vacik, H.; Müller, M.M. Waldbrand-Datenbank für Österreich. *Wildbach Lawinenverbau* **2013**, *172*, 188–189.
18. Pyne, S.J. *Fire: A Brief History*; Jeremy Mills Publishing: Huddersfield, UK, 2001.
19. Carcaillet, C.; Ali, A.A.; Blarquez, O.; Genries, A.; Mourier, B.; Bremond, L. Spatial variability of fire history in subalpine forests: From natural to cultural regimes. *Ecoscience* **2009**, *16*, 1–12.
20. Pausas, J.G.; Keeley, J.E. A burning story: The role of fire in the history of life. *BioScience* **2009**, *59*, 593–601.
21. Bond, W.J.; Woodward, F.I.; Midgley, G.F. The global distribution of ecosystems in a world without fire. *New Phytol.* **2005**, *165*, 525–538.
22. Conedera, M.; Vassere, S.; Neff, C.; Meurer, M.; Krebs, P. Using toponymy to reconstruct past land use: A case study of "brüsáda" (burn) in southern Switzerland. *J. Hist. Geogr.* **2007**, *33*, 729–748.
23. Pezzatti, G.B.; Zumbrunnen, T.; Bürgi, M.; Ambrosetti, P.; Conedera, M. Fire regime shifts as a consequence of fire policy and socio-economic development: An analysis based on the change point approach. *For. Policy Econ.* **2013**, *29*, 7–18.
24. Tinner, W.; Colombaroli, D.; Heiri, O.; Henne, P.D.; Steinacher, M.; Untenecker, J.; Vescovi, E.; Allen, J.R.M.; Carraro, G.; Conedera, M.; *et al*. The past ecology of *Abies alba* provides new perspectives on future responses of silver fir forests to global warming. *Ecol. Monogr.* **2013**, *83*, 419–439.
25. Blarquez, O.; Carcaillet, C.; Bremond, L.; Mourier, B.; Radakovitch, O. Trees in the subalpine belt since 11 700 cal. BP: Origin, expansion and alteration of the modern forest. *Holocene* **2010**, *20*, 139–146.
26. Zumbrunnen, T.; Pezzatti, G.B.; Menéndez, P.; Bugmann, H.; Bürgi, M.; Conedera, M. Weather and human impacts on forest fires: 100 years of fire history in two climatic regions of Switzerland. *For. Ecol. Manag.* **2011**, *261*, 2188–2199.
27. Ascoli, D.; Bovio, G. Tree encroachment dynamics in heathlands of north-west Italy: The fire regime hypothesis. *IForest* **2010**, *3*, 137–143.
28. Kral, F. *Spät- und postglaziale Waldgeschichte der Alpen aufgrund der bisherigen Pollenanalysen*; Institute of Silviculture, University of Natural Resources and Life Sciences: Vienna, Austria, 1979; p. 175.
29. Die Geschichte der Marktgemeinde Brand-Nagelberg. Available online: http://www.brand-nagelberg.at/main.php?menue=gemeinde&geschichte (accessed on 28 January 2015).
30. Salzburg Wiki. Brände (Geschichte). Available online: http://www.salzburg.com/wiki/index.php/Br%C3%A4nde_%28Geschichte%29 (accessed on 28 January 2015).
31. Benediktinerabtei St. Georgenberg-Fiecht. Die Hohe Brücke über den Stallenbach. Available online: https://www.st-georgenberg.at/natur-2/hohe-bruecke.html (accessed on 28 January 2015).
32. Malowerschnig, B.; Sass, O. Long-term vegetation development on a wildfire slope in Innerzwain (Styria, Austria). *J. For. Res.* **2014**, *25*, 103–111.
33. Gobet, E.; Tinner, W.; Hochuli, P.A.; van Leeuwen, J.F.N.; Ammann, B. Middle to late holocene vegetation history of the Upper Engadine (Swiss Alps): The role of man and fire. *Veg. Hist. Archaeobot.* **2003**, *12*, 143–163.

34. Krebs, P.; Pezzatti, G.B.; Mazzoleni, S.; Talbot, L.M.; Conedera, M. Fire regime: History and definition of a key concept in disturbance ecology. *Theory Biosci.* **2010**, *129*, 53–69.
35. Whelan, R.J. *The Ecology of Fire*; Cambridge University Press: Cambridge, UK, 1995.
36. Böhm, R.; Auer, I.; Brunetti, M.; Maugeri, M.; Nanni, T.; Schöner, W. Regional temperature variability in the European Alps: 1760–1998 from homogenized instrumental time series. *Int. J. Climatol.* **2001**, *21*, 1779–1801.
37. Hiebl, J.; Auer, I.; Böhm, R.; Schöner, W.; Maugeri, M.; Lentini, G.; Spinoni, J.; Brunetti, M.; Nanni, T.; Perčec Tadić, M.; *et al*. A high-resolution 1961–1990 monthly temperature climatology for the greater Alpine region. *Meteorol. Z.* **2009**, *18*, 507–530; doi:10.1127/0941-2948/2009/0403.
38. Gossow, H.; Hafellner, R. Es brennt—auch in Österreichs Wäldern. *Fortschr. Landwirt* **2006**, *16*, 14–15.
39. Gossow, H.; Hafellner, R.; Vacik, H.; Huber, T. Major fire issues in the Euro-Alpine region—The Austrian Alps. *Int. For. Fire News* **2009**, *38*, 1–10.
40. Central Institute of Meteorology and Geodynamics Vienna. Wetterrückblick für November 2011. Available online: http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/monatsrueckblick/wetter-rueckblick?monat=11&jahr=2011 (accessed on 28 January 2015).
41. Schulz, W.; Cummins, K.L.; Diendorfer, G.; Dorninger, M. Cloud-to-ground Lightning in Austria: A 10-year study using data from a lightning location system. *J. Geophys. Res.* **2005**, *110*, doi:10.1029/2004JD005332.
42. Central Institute of Meteorology and Geodynamics Vienna. Wetterrückblick für März 2012. Available online: http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/monatsrueckblick/wetter-rueckblick?monat=03&jahr=2012 (accessed on 28 January 2015).
43. Ali, A.A.; Blarquez, O.; Girardin, M.P.; Heĺy, C.; Tinquaut, F.; el Guellab, A.; Valsecchi, V.; Terrier, A.; Bremond, L.; Genries, A.; *et al*. Control of the multimillennial wildfire size in boreal North America by spring climatic conditions. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2012**, *109*, 20966–20970.
44. Central Institute of Meteorology and Geodynamics Vienna. Wetterrückblick für Februar 2013. Available online: http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/monatsrueckblick/wetter-rueckblick?monat=02&jahr=2013 (accessed on 28 January 2015).
45. Central Institute of Meteorology and Geodynamics Vienna. Wetterrückblick für Juli 2013. Available online: http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/monatsrueckblick/wetter-rueckblick?monat=07&jahr=2013 (accessed on 28 January 2015).
46. Central Institute of Meteorology and Geodynamics Vienna. Zweitwärmster Winter der Messgeschichte. Available online: http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/zweitwaermster-winter-der-messgeschichte (accessed on 28 January 2015).
47. Wohlgemuth, T.; Hester, C.; Jost, A.R.; Wasem, U.; Moser, B. Recruitment dynamics following the forest fire near Leuk (Valais). *J. For. Suisse* **2010**, *161*, 450–459.
48. Schär, C.; Vidale, P.L.; Lüthi, D.; Frei, C.; Häberli, C.; Liniger, M.A.; Appenzeller, C. The role of increasing temperature variability in European summer heatwaves. *Nature* **2004**, *427*, 332–336.

49. Conedera, M.; Cesti, G.; Pezzatti, G.B.; Zumbrunnen, T.; Spinedi, F. Lightning-induced fires in the Alpine region: An increasing problem. In V International Conference on Forest Fire Research 2006, Figueira da Foz, Portugal, Coimbra, Portugal, 27–30 November 2006; Viegas, D.X., Ed.; ADAI/CEIF University of Coimbra: Coimbra, Portugal, 2006.
50. Matulla, C.; Formayer, H.; Haas, P.; Kromp-Kolb, H. Possible climate trends in Austria in the first half of the 21st century. *Österr. Wasser Abfallwirtsch.* **2004**, *56*, 1–9.
51. Fischer, A.M.; Weigel, A.P.; Buser, C.M.; Knutti, R.; Künsch, H.R.; Liniger, M.A.; Schär, C.; Appenzeller, C. Climate change projections for Switzerland based on a Bayesian multi-model approach. *Int. J. Climatol.* **2012**, *32*, 2348–2371.
52. Arpaci, A.; Cane, D.; Pezzatti, G.B.; Barbarino, S.; Valese, E.; Conedera, M.; Vacik, H. Suitability of Fire Weather Indices for Alpine conditions: An evaluation based on weather station data. *Int. J. Climatol.* 2015, submitted.
53. Cattiaux, J.; Douville, H.; Peings, Y. European temperatures in CMIP5: Origins of present-day biases and future uncertainties. *Clim. Dyn.* **2013**, *41*, 2889–2907.
54. Vautard, R.; Gobiet, A.; Jacob, D.; Belda, M.; Colette, A.; Déqué, M.; Fernández, J.; García-Díez, M.; Goergen, K.; Güttler, I.; *et al.* The simulation of European heat waves from an ensemble of regional climate models within the EURO-CORDEX project. *Clim. Dyn.* **2013**, *41*, 2555–2575.
55. Yair, Y.; Lynn, B.; Price, C.; Kotroni, V.; Lagouvardos, K.; Morin, E.; Mugnai, A.; Llasat, M.C. Predicting the potential for lightning activity in Mediterranean storms based on the Weather Research and Forecasting (WRF) model dynamic and microphysical fields. *J. Geophys. Res.* **2010**, *115*, doi:10.1029/2008JD010868.
56. Eastaugh, C.S.; Vacik, H. Fire size/frequency modelling as a means of assessing wildfire database reliability. *Aust. J. For. Sci.* **2012**, *129*, 228–247.
57. Formayer, H. Institute of Meteorology, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, Austria. Personal Communication, 2014.
58. Scientific Information System (FIS), University of Natural Resources and Life Sciences Vienna. Available online: https://forschung.boku.ac.at/fis/suchen.projekt_uebersicht?sprache_in=en&menue_id_in=300&id_in=9555 (accessed on 30 January 2015).
59. Zumbrunnen, T.; Bugmann, H.; Conedera, M.; Bürgi, M. Linking forest fire regimes and climate—A historical analysis. *Ecosystems* **2009**, *12*, 73–86; doi:10.1007/s10021-008-9207-3.
60. Wastl, C.; Schunka, C.; Lüpke, M.; Cocca, G.; Conedera, M.; Valese, E.; Menzel, A. Large-scale weather types, forest fire danger, and wildfire occurrence in the Alps. *Agric. For. Meteorol.* **2013**, *168*, 15–25.
61. Arpaci, A.; Malowerschnig, B.; Sass, O.; Vacik, H. Using multi variate data mining techniques for estimating fire susceptibility of Tyrolean forests. *Appl. Geogr.* **2014**, *53*, 258–270.

© 2015 by the authors; licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Anhang 3: Analysis of lightning-induced forest fires in Austria

Müller M.M., Vacik H., Diendorfer G., Arpaci A., Formayer H., Gossow H., 2013. Analysis of lightning-induced forest fires in Austria. Theoretical and Applied Climatology, 111(1/2), S. 183–193.

Theor Appl Climatol
DOI 10.1007/s00704-012-0653-7

ORIGINAL PAPER

Analysis of lightning-induced forest fires in Austria

Mortimer M. Müller · Harald Vacik · Gerhard Diendorfer · Alexander Arpaci · Herbert Formayer · Hartmut Gossow

Received: 31 October 2011 / Accepted: 4 April 2012
© The Author(s) 2012. This article is published with open access at Springerlink.com

Abstract Besides human-caused fires, lightning is the major reason for forest fire ignition in Austria. In order to analyse the causes of ignition and to characterise lightning-induced forest fires, fire records were compared with the real appearance of lightning events by using the Austrian Lightning Detection and Information System for the period from 1993 to 2010. A probability was estimated for each forest fire being caused by lightning by using a decision tree and decision matrices based on flash characteristics (e.g. amplitude, time, location). It could be shown that 15 % of documented forest fires were lightning-caused. Nearly all lightning-caused fires were found during the summer months, whereas almost 40 % of all fires occurring from June to August were naturally caused. Most lightning-caused fires took place in the south and east of Austria. Lightning fires were more frequent at higher altitudes and primarily affected conifer forests. The median burned area was lower than that for anthropogenic forest fires.

M. M. Müller (✉) · H. Vacik · A. Arpaci
Department of Forest and Soil Sciences, Institute of Silviculture,
University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU),
Peter Jordan Str. 82,
1190 Vienna, Austria
e-mail: mortimer.mueller@boku.ac.at

G. Diendorfer
Department ALDIS (Austrian Lightning Detection & Information System), Austrian Electrotechnical Association (OVE),
Kahlenberger Straße 2A,
1190 Vienna, Austria

H. Formayer
Department of Water, Atmosphere and Environment,
Institute of Meteorology,
University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU),
Peter Jordan Str. 82,
1190 Vienna, Austria

H. Gossow
Department of Integrative Biology and Biodiversity Research,
Institute of Wildlife Biology and Game Management,
University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU),
Gregor Mendel Str. 33,
1190 Vienna, Austria

1 Introduction

Particularly in the temperate mountain forests of Central Europe, forest fires have played only a minor role so far. Forest fires are a result of complex interactions between ecological factors such as weather, fuel type, forest structure and topography as well as socioeconomic factors. Several studies have identified various factors such as climate change (Badeck et al. 2003; Flannigan et al. 2000; Reinhard et al. 2005; Wendler et al. 2010), human factors (Vega-Garcia et al. 1995; Goldammer 2002) or land use change due to socioeconomic factors (Badia et al. 2002) potentially influencing forest fire hazard. According to the climatic change, European mountain regions may experience somewhat higher increases in temperature compared to non-mountainous regions. In the Alps, an increase in temperature twice the global average was observed over the last century (Auer et al. 2007). Austria is a Central European country largely dominated by the Alps with a forest cover primarily dominated by coniferous tree species. The forests do not fulfil the characteristics of fire-prone ecosystems nor have they seriously been fire-impacted so far. However, two fire seasons (2003 and 2007) have recently proved quite well that forest fires may happen widespread and rapidly. It seems likely that they might become an important issue in the case of the occurrence of certain weather extremes such as prolonged periods of drought or heat waves (Barriopedro et al. 2011; Fischer and Schär 2010; Gimmi et al. 2004; Gossow and Frank 2003; Gossow et al. 2009). In the

Published online: 01 May 2012

context of the Austrian Forest Fire Research Initiative (AFFRI), one major objective is to identify forest fire "hot spots" in Austria in dependence of vegetation, climate and location and if there is likely a chance for expansion under the effects of climate change. This includes the consideration of fire weather options and topoclimatological aspects, as well as the classification of forest fuels for both, the more fire-sensitive forest types and for more fire-endangered regions, especially in the mountain forests.

An important prerequisite for the intensified forest fire studies in Austria was an improved documentation of such events. Some years ago, fire record data were still rather incomplete and biased (for instance, with respect to fire damage compensation claims, cf. Vacik et al. 2011). Since 2002, the Austrian firefighting brigades started to document their fire attacks on their websites, which improved data access more general. However, the causes of ignition are often unknown (Vacik et al. 2011). Like elsewhere, also in Austria anthropogenic[1] forest/wildland fire causes are dominating. But also naturally ignited forest fires, with lightning flashes as the only relevant natural cause in Austria, play a remarkable role—up to 40 % in the summer months in the last decade on average. These findings are most relevant in the three (so far) evidenced forest fire hot spots in parts of Carinthia, Lower Austria and Tyrol.

In many studies, the number and distribution of lightning-caused forest fires is based on the available information of fire brigades, national authorities and/or the documentation of forest owners (e.g. Castedo-Dorado et al. 2011; Conedera et al. 2006; Hall and Brown 2006). The declaration "lightning fire" is taken as confidential. Nevertheless, it cannot be ruled out that in most data records on forest fires, there might be still some bias in the causes of ignition—especially towards lightning cause—due to inaccurate documentation (e.g. thunderstorm some days ago but no proven ignition), or juridical reasons (e.g. fires caused by humans might have been declared as lightning to prevent possible claims for indemnity). To reduce these uncertainties, it seems to be necessary to compare assumed lightning fires with the real occurrence of flashes at the forest fire locality.

This contribution describes the verification of forest fires caused by lightning, carried out with the help of a combined use of a decision tree and decision matrices, where the most relevant parameters of flashes (e.g. number, multiplicity, distance, time of impact, location accuracy) and their possible relation to forest fires are considered. The objectives of the current study are as follows: (a) to describe the methodological approach taken to detect lightning-caused forest fires in the period from 1993 to 2010 and (b) to characterise lightning-caused forest fires (e.g. time, location, forest types) in Austria.

[1] "Anthropogenic", "artificial" and "human-caused" are used as synonyms, describing all forest fires ignited by the direct (e.g. fires out of control) and indirect (e.g. power lines) influence of humans.

2 Material and methods

2.1 Location of forest fire records

In order to characterise recent forest fires in Austria, a wildfire database has been established (for details, see Vacik et al. 2011). "Forest fires" were defined as uncontrolled fires in wooded areas declared as "forest" by the Austrian forest law (FG 2007), also including clear cuts, blowdowns, small groves and dwarf mountain pine (*Pinus mugo* Turra) areas above timber line. Besides online blogs and homepages from fire brigades, reports from the Austrian Press Agency, the documentation of the Austrian Federal Forests (ÖBF), the Federal Ministry of Agriculture and Forestry, Environment and Water Management, the Austrian Railway Company and archive data from municipalities were used to document information on forest fires in Austria. In many cases, the gained information was incomplete, as the exact time of detection, size of the burned area, concerned tree species or cause of ignition were missing. The location of each forest fire was estimated by the use of road names, distances to important objects (like churches, mountain shelters) or by analysing photos made during the firefighting operations. In any case, the location of a forest fire was linked to a wooded area. As not in all cases information on the exact location of the forest fire was available, a buffer radius was established for each record indicating the accuracy of the documented location. According to the specifics of each fire record, a buffer was placed around the assumed ignition point. The medium buffer radius for all forest fires was around 1,500 m. The highest accuracy according to the location was reached with a resolution of 1″ in the World Geodetic System 1984 (WGS84), which comprises 30 m for the latitude and, in Austria, 20 m for the longitude (Müller 2010). A detailed description of the wildfire database and its characteristics is provided by Vacik et al. (2011).

2.2 Austrian lightning detection and information system lightning detection

The Austrian Lightning Detection and Information System (ALDIS) as lightning location system (LLS) locates and records lightning and thunderstorm activity inside and nearby of Austria. The detection efficiency since 1999 on cloud to ground flashes is 98 %. This makes it one of the best-performing LLS worldwide (ALDIS 2009; Anderson 2002; Biagi et al. 2007; Castedo-Dorado et al. 2011; Diendorfer 2007; Outcalt 2008; Podur et al. 2003). The first detection sensor was put into operation in 1991,

and archived lightning data are available since 1993. Currently, eight sensors are in use, each with an operation range of about 400 km. In 2006, the sensors were replaced by new ones (LS7000), which offer a complete digital signal processing.

The ALDIS basically consists of three components. First are the sensors, which measure and report the angle of field incidence and exact field arrival time at the sensor site. Second is the central lightning processor, which calculates the point of impact. The third is a display system for the graphical view of thunderstorm activity (ALDIS 2009). There are two different methods to determine the point of impact of a lightning stroke: either with magnetic direction finding or with time differences (time of arrival). As ALDIS sensors provide both information (angle and time), a combined method is used, whereby already two sensors are sufficient to calculate the location of a specific lightning stroke. The temporal uncertainty is around 250 ns, and the median location accuracy below 400 m (Diendorfer 2007). Strokes are grouped into flashes using a spatial clustering algorithm where strokes are added to any active flash for a specified time period (usually 1 s) after the first stroke, as long as the additional strokes are within a specified clustering radius (usually 10 km) of the first stroke, and the time interval from the previous stroke is less than a maximum interstroke interval (usually 500 ms). Beside the coordinates of the strike point, the lightning processor provides information on the exact time, the polarity of the flash (positive or negative) and the flash peak current in kiloampere (kA). The value associated with the first return stroke in the flash is assigned by the system as flash peak current.

The coordinates for each forest fire event in the evaluation period from 1993 to 2010 with unknown or assumed lightning cause were used to identify relevant lightning flashes detected by ALDIS, which occurred −10/+1 days prior or after the proposed date of the forest fire and within a buffer radius of 10 km to the location point of the fire. Forest fires declared as human-caused were excluded from the analysis because a previous study has shown that these fires do not correspond to a relevant number of flashes (Müller 2010). Based on the coordinates of the chosen forest fires, a set of parameters for each fire record was established, which provided information about the date and time (to the second) for each lightning, coordinates of the flash in WGS84 (X, Y), strength in kiloampere and charge (positive or negative), number of strokes (n), distance to location point of forest fire (in kilometres), information about the direction of the flash (cloud to ground (CG) or cloud to cloud (CC)) and the median of the half axis of the error ellipse (in kilometres). Table 1 shows the decision matrix according to date and time of flash occurrence.

2.3 Decision tree and decision matrices

The procedure to estimate the probability for a forest fire being ignited by lightning followed a sequence of expert judgements. After the identification of relevant forest fires and the selection of corresponding data from ALDIS, the flashes, which most likely ignited a fire, had to be assessed. In order to identify relevant lightning flashes, a decision tree and related decision matrices were developed based on existing literature (e.g. Diendorfer 2007; Hall and Brown 2006; Larjavaara et al. 2005; Schulz et al. 2005) and on expert judgements of the research team. Each forest fire, respectively lightning flash, was evaluated separately, whereas in case of a higher number of possible flashes related to the recorded forest fire, only the four most relevant flashes were considered based on the following selection criteria: distance of a flash to the location of the forest fire ignition point, date of lightning[2] and size of the error ellipse. As a consequence, up to four flashes could be considered as igniter. The final judgement about each case (if a forest fire was caused by lightning is indicated as “yes”, “uncertain” or “no”) was made after the analysis of these most relevant four flashes.

The procedure to estimate the probability for a forest fire being ignited by lightning was decomposed into four steps. The first step of the decision tree (Fig. 1) leads to a classification in five probability classes and provides an initial estimation of the likelihood for each flash. The used categories are “excluded” (flash eliminated from further analysis), “unlikely”, “possible”, “likely” and “very likely”. Because ALDIS detects around 98 % of all CG flashes in Austria (Diendorfer 2007), it was assumed that lightning could not have been the cause of the forest fire, if there were no flashes detected within the relevant time period. Single positive flashes under 10 kA were excluded from the analysis too, even if they were the nearest events, because studies have shown that these flashes are mostly (more than 90 %) CC and not CG lightnings (Biagi et al. 2007; Diendorfer 2007; Hall and Brown 2006). Additionally, the probability for each lightning flash was estimated by the location accuracy of a specific flash (error ellipse). For each lightning sensor, which is involved in the detection of a stroke, a normally distributed measuring error sigma (σ) for the angle and the time measurement are assumed. In expectation of a likelihood of, e.g. 50 %, the result is an ellipse, wherein the actual point of impact is located. This means that more involved lightning sensors lead to a smaller error ellipse or the wider the error ellipse, the more inexact the point of impact might be. The used ellipse in this study is the 50 % error ellipse of a flash, which is the error

[2] Note that the date of lightning could be the first selection criterion as well, when the information of the fire brigade assumes a certain date without any insecurity.

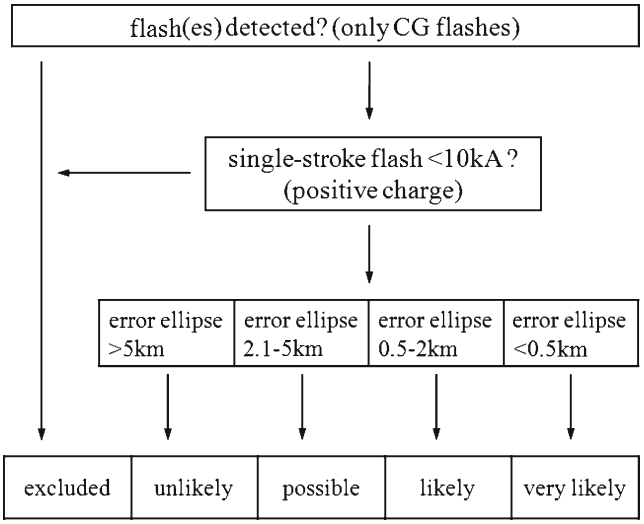


Fig. 1 Decision tree analysing location accuracy for a specific flash (step 1)

ellipse of the first stroke in case of a multi-stroke flash. It is important to note that the error ellipse shows linear distances and does not consider the topography. The applied threshold values are based on the distribution of error ellipse values, the expected influence of the specified location accuracy on the potential wildfire ignition and the assumed buffer radii (Fig. 1 and Table 2).

The second step (Table 1) considers the parameter "time" of the analysed lightning. In the first and most common case, when time and date of the forest fire were certain, all flashes which occurred after and more than 6 days before the detection of the fire were excluded. For flashes which occurred 4–6 days before the fire, the probability category was reduced by two probability classes; flashes which occurred 2–4 days before the fire resulted in a reduction of one class, and only those lightnings which appeared within 48 h before the time of the forest fire detection retained their probability class. This approach is a compromise between studies related to the accuracy of lightning location systems (Larjavaara et al. 2005), possible ignition delays (Duncan et al. 2010; Larjavaara et al. 2005) and the expertise from firefighters, which seem to suggest that lightnings can lead to smouldering fires, which burst into flames even some days later. Moreover, embers in a deep humus layer can last some days, even if firefighters try to damp down the fire (Conedera et al. 2006; Wotton and Martell 2005). Reports with an operating time up to 14 days are found in Austria. This also indicates a possible longer smouldering period after lightning ignition. In case of the assumption that the relevant lightning occurred some days earlier or the fire detection time was uncertain, the probability class was altered (as indicated in the columns 2–4 in Table 1). During the second step, the probability class of the lightning was reduced by one additional class, if the relevant flash concerned a positive single-stroke flash with an amplitude from 10 to 19 kA because of an estimated incorrect CG classification of over 50 % (Biagi et al. 2007).

Step 3 of the evaluation approach consists of four decision matrices—one for each preliminarily defined probability class. The relevant flashes assessed in step 2 were analysed in dependence on the size of the buffer radius of the forest fire and the distance of the flash to the buffer. A flash was classified with an even higher probability: the smaller the buffer and the closer the flash to the assumed location of the forest fire. As the error ellipse, the values of the buffer radius mean linear distances and do not consider the topography. Table 2 shows the classification procedure with "very likely" flashes (probability class after step 2). As it can be seen, lightnings with a distance of more than 2,000 m to the buffer radius of a forest fire are excluded due to the good performance of ALDIS, which means that with a median location accuracy of under 500 m, it is very unlikely that a lightning more than 2 km outside the assumed location of a forest fire could have caused the fire.

Step 4 of the analysis represents the final classification of the evaluated flashes based on the individual assessments of each flash. Table 3 describes the cumulative probability that the recorded forest fire was caused by lightning, considering that in total, the most relevant four flashes were analysed during steps 1, 2 and 3. The probability classes were assigned a value of "1" for "very likely", "0.5" for "likely", "0.2" for "possible" and "0.05" for "unlikely" cases, which led to the final evaluation.

Table 1 Decision matrix according to date and time of flash occurrence (step 2, for details cf. text)

Rated flash (after part 1)	Time/date certain	Date certain, lightning some days ago	Time uncertain, date certain	Time/date uncertain
Flash next day after forest fire	Flash excluded	Flash excluded	Flash excluded	Probability class −1
Flash same day after forest fire	Flash excluded	Flash excluded	Probability class −1	Probability class −1
Flash till 2 days before forest fire	Probability class unchanged	Probability class unchanged	Probability class unchanged	Probability class −1
Flash 2–4 days before forest fire	Probability class −1	Probability class unchanged	Probability class −1	Probability class −1
Flash 4–6 days before forest fire	Probability class −2	Probability class −1	Probability class −2	Probability class −1
Flash 6–10 days before forest fire	Flash excluded	Probability class −2	Flash excluded	Probability class −2

Table 2 decision matrix according to distance of flash occurrence for "very likely" cases (step 3)

Very likely (after part 2)	Distance flash >2,000 m	Distance flash 500–2,000 m	Distance flash <500 m	Flash in range
Buffer radius 5,000 m+	Excluded	Unlikely	Unlikely	Unlikely
Buffer radius 3,000–4,999 m	Excluded	Unlikely	Possible	Possible
Buffer radius 1,500–2,999 m	Excluded	Possible	Possible	Likely
Buffer radius 500–1,499 m	Excluded	Possible	Likely	Very likely
Buffer radius <500 m	Excluded	Likely	Very likely	Very likely

Only the final classes "very likely" and "likely" (and "possible" for those cases, where the data sources suggest lightning fire as cause) were considered as lightning fires. The classes "unlikely" and "excluded" led to the decision that the forest fire was not caused by lightning. Fire events with primary unknown causes which reached the class "possible" (and "unlikely" if the fire brigade declared the fire as lightning-triggered) were considered as "unclear". In the course of the final evaluation, also the estimation by the fire brigades/forest experts regarding assumed causes were considered (primarily for those cases with likely anthropogenic causes). This means that even if the decision tree/matrices reached a "likely", the case was classified as "unclear" if the report of the involved firefighters highly suggests a human-caused fire. With the application of the presented methodological approach of decision trees and decision matrices, it was possible to analyse 964 forest fire events with unknown or assumed lightning cause from 1993 to 2010; 627 cases with known human cause were excluded from the evaluation.

3 Results

3.1 Evaluation of forest fire causes

Eighty-three percent of the forest fires that were supposed as being lightning fires could be classified with a high probability as correct. Seven percent stayed "unclear", and for 10 % of assumed lightning fires ignition through lightning could be ruled out. Five percent of the fires, where the cause was unknown, could be classified with a high probability as being lightning-caused. Here, 7 % remained unclear, too; all other cases had to be excluded. All fire events with unclear causes were assigned to the "excluded" group, which means that they were considered as being not lightning-induced. As a result, 15 % (236 cases) of all recorded forest fires in Austria were caused by lightning from 1993 to 2010.

Table 4 shows the distribution of all analysed flashes per probability class and assigned cause. In each case, the lightning with the highest relevance was analysed first. For that reason, an "excluded" flash means that the whole case (forest fire) was spaced out from the possibility of being lightning induced, whereas no other flash could have gained a higher probability. It has to be said that for more than half of the forest fires, the ALDIS query revealed less than four or even none relevant flashes.

The analysed flashes in the lightning-caused fires are gaining a higher share in the likely, very likely and possible categories than forest fires with unknown cause. Additionally, the probability of being excluded seems to be ten times higher for forest fires with no delivered cause, compared to assumed lightning fires. It is interesting to note, that none of the initially supposed lightning-caused fires that were (according to the information of the fire brigades) very likely true lightning fires (59 cases, 25 % of all assumed lightning fires) had to be excluded after the decision tree application.

Table 3 Final decision matrix according to the probability for a lightning-caused fire (step 4)

Number of flashes	Evaluation of single event (after part 3)	Final evaluation (sum of probability that forest fire was caused by lightning)
1	Very likely	Very likely
2	Likely	Very likely
1	Likely	Likely
3	Possible	Likely
1–2	Possible	Possible
4	Unlikely	Possible
1-3	Unlikely	Unlikely

Table 4 Number and percentage of all analysed lightnings with regard to preliminarily assumed causes of forest fires and flash categories

Flash category	Lightning-caused	%	Cause unknown	%
Excluded	22	3.8	218	41.5
Unlikely	190	33.2	176	33.5
Possible	237	41.4	104	19.8
Likely	89	15.5	26	4.9
Very likely	35	6.1	1	0.3
Sum	573	100	525	100

3.2 Occurrence of lightning caused fires

In absolute numbers, most lightning-caused forest fires occurred in Lower Austria, followed by Carinthia (Fig. 2). Especially in the southern part of Lower Austria in the region of the eastern edge of the Alps and in the South of Carinthia near the border to Italy/Slovenia, a high accumulation of lightning-induced forest fires could be found. Regarding the relationship to the lightning density for Austria in the period from 1992 to 2008 (ALDIS 2009), no clear correlation between the yearly average of the total number of lightning flashes and lightning fires could be detected.

Considering the impact on the forest area (number of lightning fires per square kilometre of forest area), most fires appeared in the South of Austria in Carinthia (0.9 fires per 100 km²), followed by Tyrol (0.8) (Fig. 3). Regarding the absolute number of forest fires and lightning fires per forested area, Salzburg seems to have the highest probability for a lightning-caused fire (23 % of all forest fires).

3.3 Temporal distribution

The yearly distribution regarding the number of lightning fires differs distinctly. A higher number of lightning fires mostly correlated with a higher total number of forest fires (Fig. 4). In years with strong summer drought (e.g. 2003 and 2006), the proportion of lightning fires was higher than in other years as, for instance, those with a high amount of forest fires also in spring (e.g. 2007). The highest percentage of lightning fires regarding the total number of forest fires was found in 2006 (31 %). In relation to the total number of lightings per year, it becomes evident that more lightning flashes do not correlate with a higher number of lightning-caused fires.

Seasonally, nearly all lightning-caused fires were found during the months from May to September. Almost 40 % of all forest fires occurring in the months of June to August are naturally caused, which demonstrates the relevance of the seasonal thunderstorms in Austria. Because not all fire records contained information of the exact time of the event, statistics on the daily distribution had to be done with a smaller amount of cases (Fig. 5). On an average, most lightning fires were documented in the mid-afternoon, with about a 2-h delay, compared to the peak of most human-caused fire reports.

3.4 Burned area, forest type and altitudinal zone

More than one third (35 %) of the human-caused fires as well as lightning fires were lacking information about the size of the burned area (553 and 83 cases). The distribution for all cases (n=1191) with available data shows that around 40 % of lightning fires burned no more than 0.01 ha, while human-caused fires in this category were fewer than 25 %. Fourteen percent of lightning fires affected more than 1 ha (18 % of anthropogenic fires here). Only one lightning fire event (0.7 %) caused a burned area more than 9 ha, while it was 2 % for human-caused fires. Regarding the burned area, the median was 0.02 ha for lightning fires and 0.05 ha for human-caused fires.

Compared to the appearance of human-caused fires, lightning fires were more concentrated on coniferous stands. More than 80 % of all lightning-caused forest fires occurred in pure coniferous stands, while only 65 % of the anthropogenic fires have been ignited in coniferous forests, both corresponding to the high amount of coniferous stands in Austria. Only a small number of lightning fires affected mixed (9 %) and broadleaf forests (9 %). Lightning fires on "open" forest stand areas (e.g. forest area after clear cuts, on salvage-logged blowdowns or disturbances as by bark beetle impacts) were not very relevant (0.5 %).

Significant differences could be found out concerning the altitudinal distribution of human-caused and of lightning fires. As the altitudinal zones depend on the ecozones, it was possible that two lightning fires dropped into the "alpine" zone, a region where normally no forest area exists. These fires and some events from the "high subalpine" zone affected the dwarf mountain pine zone (*P. mugo* Turra), which exceed the alpine tree line. Figure 6 indicates that fires initiated by thunderstorm activity concentrated on the "low montane" and "middle montane" zone (47 %), while human-caused fires were most frequent at the "submontane" zone (39 %). Nearly all cases in the "high subalpine" zone and both events which occurred in the "alpine" zone were lightning-caused. So there is a clear tendency towards higher altitudes concerning lightning fires.

4 Discussion

4.1 Decision tree application

The main sources of our database were reports from fires brigades. The cited causes were either natural (i.e. lightning-caused), unknown or human-caused. A former analysis confirmed that the declaration of "human-caused" is plausible in most cases (Müller 2010). According to the reports of the fire brigades, 242 forest fires were ignited by lightning from 1993 to 2010. It is interesting to note that after our evaluation, the number was nearly the same (236, cf. "Section 3.1"). However, 42 preliminary supposed lightning fires (17 %) had to be excluded due to nonrelevant lightning flashes. Conversely, 36 fires with unknown cause could be assumed as lightning fires. It seems that the declaration "lightning-caused", done by the fires brigades, is correct in over 80 % but cannot be taken as verified in each case. Especially in

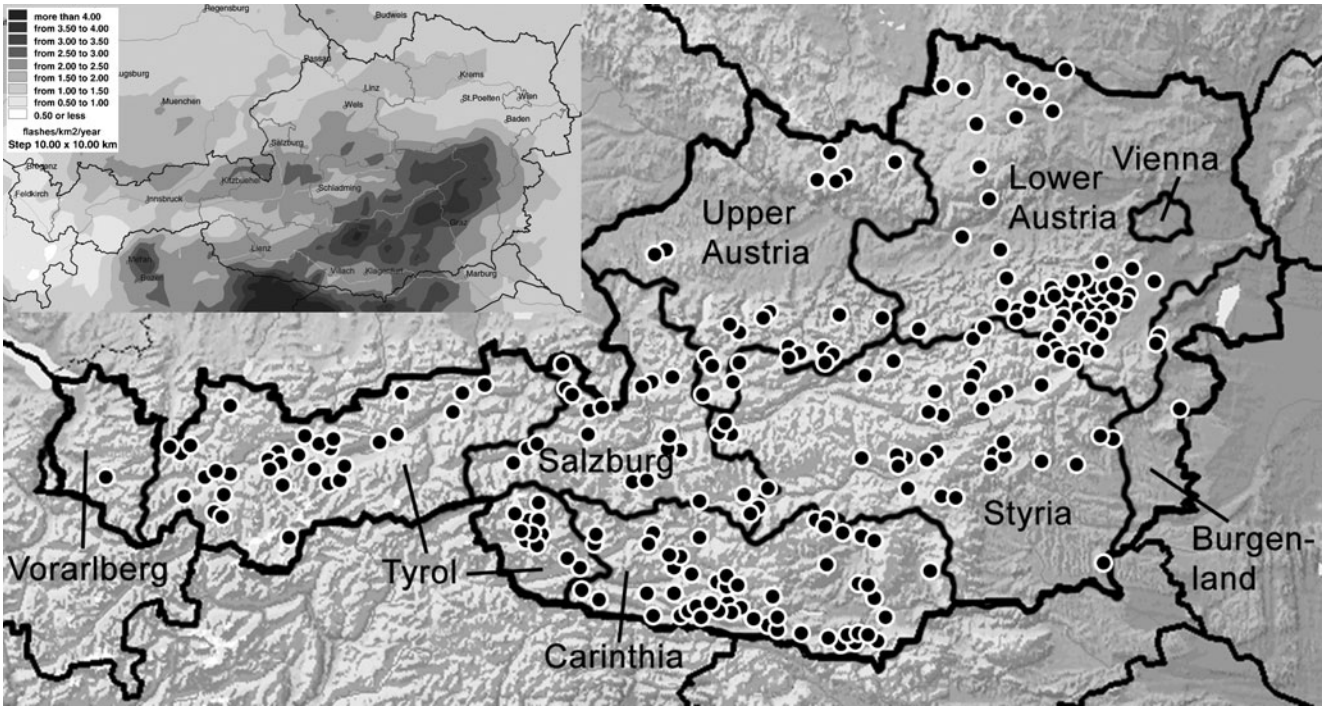


Fig. 2 Spatial distribution of lightning-caused forest fires in Austrian districts from 1993 to 2010 (n=236) and density of lightning flashes from 1992 to 2008 (*small map*)

uncertain cases, a validation based on the presented decision tree approach seems promising.

One problem in the present evaluation was the wide range of the buffer radius for the location of the ignition point since the forest fire database in Austria was assembled from different sources and by several team members. As the estimation of the buffer is partly subjective, some lightning fires may have been erroneously included or excluded due to wrongly considered buffer radii. Another critical point in the analysis was the uncertainty of the date and exact

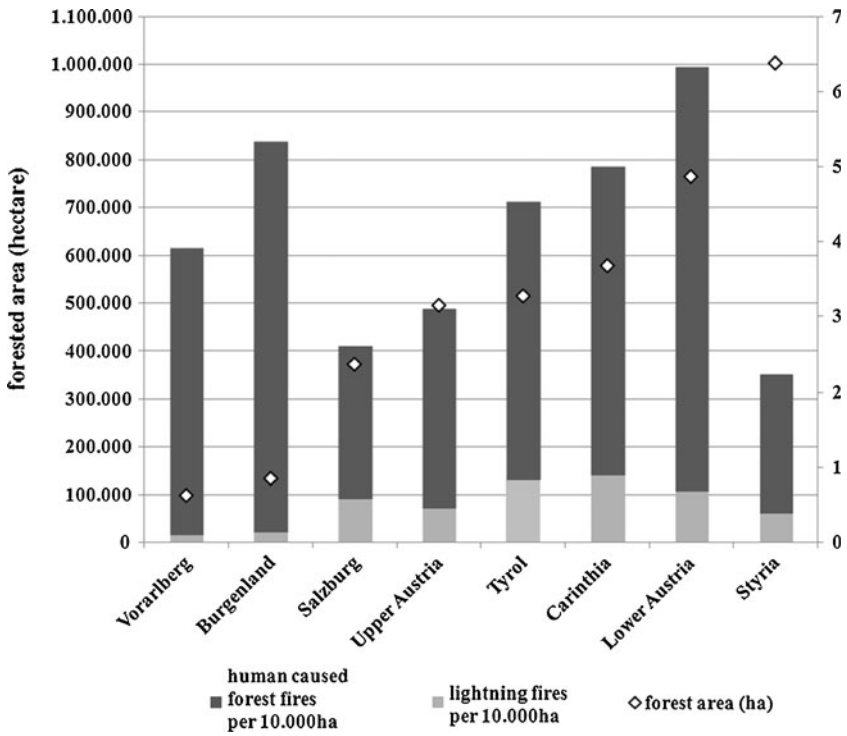


Fig. 3 Human-caused forest fires and lightning fires, related to provinces and forested area (in hectares)

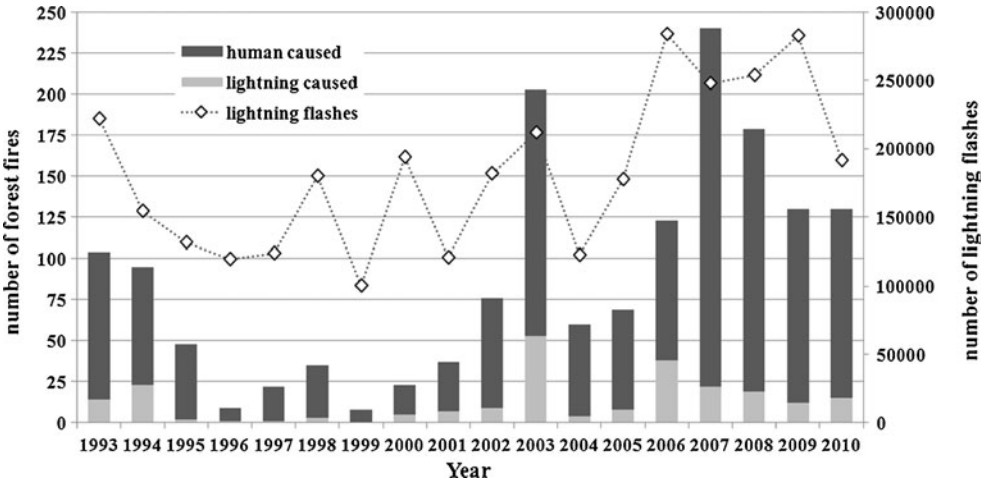


Fig. 4 Yearly distribution of human and lightning-caused forest fires (n=1591) as well as total number of lightning flashes

location of some forest fire events, especially before the year 2000. Hence, it is possible that a few of these fires were wrongly considered as lightning-caused or falsely excluded.

Another uncertainty is related to the detection efficiency (DE) of ALDIS. While studies have shown that DE since 1998 reached clearly above 90 % with an estimated value of 98 % (Schulz et al. 2005; Diendorfer 2007), DE in former years was somewhat lower (around 85 %). For that reason, especially in the time period from 1993 to 1997, some relevant flashes in the query performed by ALDIS might be missing. Nevertheless, we assume that this effect does not influence the results, as thunderstorm activity in the summer months is mostly coupled with a higher number of flashes. Additionally, the data query for some forest fires in the years 1993–1995 gained no information about the error ellipse of the relevant lightnings due to insufficiency of data processor power. For these forest fires (46 in total), the error ellipse was assumed as being "0", leading to a preliminary classification as "very likely". This can be justified by the fact that the location accuracy of forest fires in this time period is worse than in subsequent years, and the performance of ALDIS showed reasonable results from the start of its service in 1993 (Diendorfer 2007).

Larjavaara et al. (2005) first tried to link single flashes to the ignition point of a forest fire. Other studies have not done this so far (Castedo-Dorado et al. 2011; Wotton and Martell 2005). Therefore, it would be promising to apply the approach to other contexts in order to discuss the results derived from these studies. However, when the method would be utilised in other countries, an adaptation according to the used lightning location system, quality and preparation of forest fire data would become necessary.

4.2 Characteristics of lightning fires

The results from the analysis showed a relative amount of 15 % lightning fires in Austria. This percentage seems to be realistic regarding other studies from the alpine region (e.g. Conedera et al. 2006; Valese 2007). Conedera et al. (2006) have described that lightning fires in the whole alpine region of Switzerland make up for about 9 % of all forest fires, while they account for about 25 % in the Canton of Grisons. Valese (2007) has identified that lightnings in the northern parts of Italia near the border to Austria were the cause for around 10 % of all forest fires. It seems reasonable that the high amount of forest area in Austria (nearly 50 % of total land area), the Europe-wide surpassing thunderstorm activity (cf. in Fig. 2, small map), and the local climatologic conditions (e.g. dry inner alpine valleys) play a significant role for the high number of lightning-caused fires as compared to other parts of Europe.

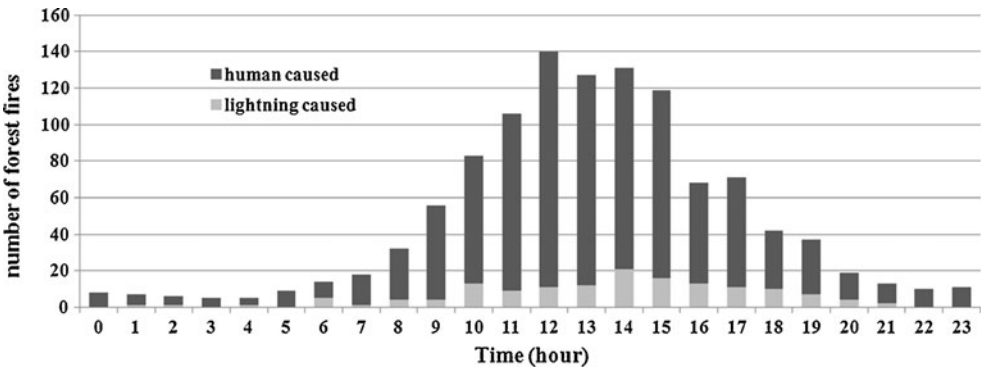


Fig. 5 Daily distribution per hour (UTC) of human-caused and lightning-caused fires (n=1283)

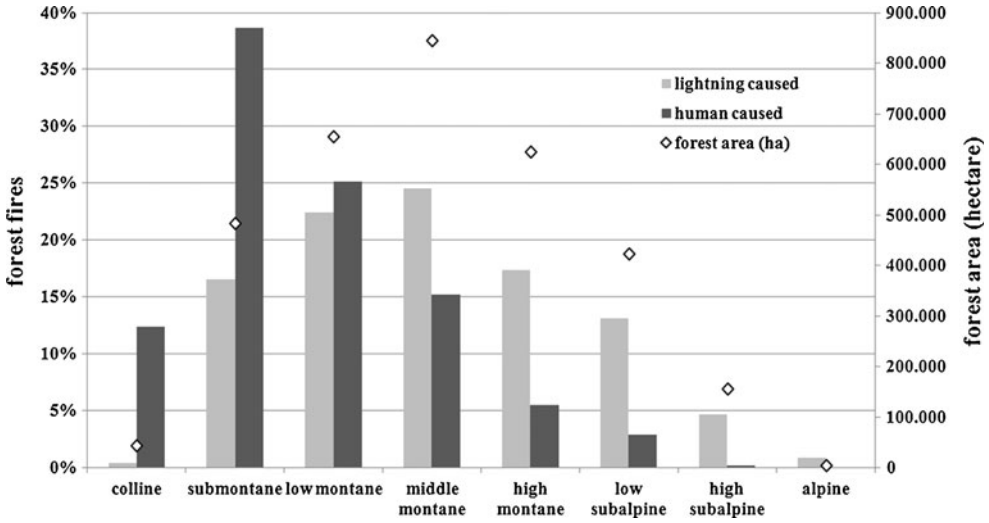


Fig. 6 Frequency of human-caused and lightning-caused fires according to altitudinal zones and forest area (n=1591)

The spatial distribution of lightning fires is not uniform all over Austria. Obviously, lightning fires are more likely in the borderline of regions with higher and lower lightning density, especially in the southern parts of Lower Austria and Carinthia (cf. Fig. 2). This might be linked to the thunderstorm activity in general. While in areas with high lightning densities, high accumulations of precipitation can also be found (which prohibit lightning fires), in the drier edge regions, the possibility for lightning ignition increases. This supports the hypothesis that fuel moisture and drought are more important for ignition through lightning than the total number of lightning flashes (Larjavaara et al. 2005; Rorig and Ferguson 1999). A comparison between weather radar data and lightning location data could help on understanding the relationship between the amount of precipitation and the distribution of flashes in the future.

A reason for the temporal differences between reported lightning fires and human-caused fires during the day (cf. Fig. 5) may be found in the dynamics of thunderstorms. Forest fires ignited by humans are driven by the sun (temporal "hot spot" around 2 or 3 h after noon, naturally the time with highest ground temperatures and lowest humidity in the summer months). Thunderstorm activity normally starts early in the afternoon and reaches its peak around 1500 hours UTC (Schulz et al. 2005). This corresponds well with the most frequent time of reported lightning fires.

Yearly statistics (Fig. 4) show that drought in the summer seems to play a significant role concerning the number of lightning fires. This is consistent with many other studies (e.g. Conedera et al. 2006; Duncan et al. 2010; Le Page et al. 2008; Reinhard et al. 2005; Wendler et al. 2010). Climate scenarios for the future for the alpine region forecast both higher temperatures and, at least in some regions, an increase in number and severity of heat waves (Dankers and Hiederer 2008; Fischer and Schär 2010; Matulla et al. 2004; Wohlgemuth et al. 2008). Carinthia, and in the last years also southern parts of Styria, seem to get more affected by summer drought (Lautenschlager et al. 2005; Lautenschlager et al. 2009; ZAMG 2011). This corresponds to the general high number of forest fires in Carinthia. Keeping all this in mind, the role of lightning-induced forest fires in Austria, and generally in the alpine region, might get more important (Badeck et al. 2003; Conedera et al. 2006; Gossow and Frank 2003; Gossow et al. 2008).

The smaller median size of burned forest area through lightning fires compared to human-caused fires might be the result of both early detection and quick attacking by fire brigades, even in remote areas. During thunderstorm activity, local people seem to have a higher sensibility for natural disturbances, whereas lighting fires are discovered more rapidly. Direct manmade fires might be extinguished by the perpetrator before reported to the fire brigades. However, the Austrian fire brigade network is dense, as is the population in general. Even very small pasture fires are observed early by local people and reported to the authorities. Other explanations are related to the observation that human-caused fires often appear during peaks of heat waves, also in the presence of strong foehn winds, and thunderstorm activity is followed by rain and sometimes coupled with cold fronts that instigate a colder and moister weather period—reasons that may prohibit a larger spread of forest fires. Moreover, lightning fires are more prone to start as underground and/or smouldering fires (Wotton and Martell 2005). A longer smouldering period increases the probability of detection, while coincidently, the burning area stays small. Studies showed that lightning fires may burn larger areas than human-caused fires (Castedo-Dorado et al. 2011; Podur et al. 2003). Indeed, these analyses that are originated in Canada and Southern Europe, regions which comprise larger or horizontally more extended forest areas, provide fewer infrastructures through forest roads and have a lower density of fire brigades compared to Austria. However, the danger of larger burned forest area through lightning fires in Austria may increase in the future if the upward trend in

temperature and maybe also the accumulation of heat waves in the alpine region continues (Dankers and Hiederer 2008; Fischer and Schär 2010; Lautenschlager et al. 2005; Lautenschlager et al. 2009; Matulla et al. 2004; Wohlgemuth et al. 2008).

A reason that lightning fires are more common in coniferous stands than human-caused fires might be that fires in broadleaf forests are often anthropogenic and originate from hot ashes, a pyre or green waste fire that got out of control. It is interesting to note that 18 % of all human-caused fires occurred in broadleaf forests, while there are only 12 % broadleaf forests in Austria (Austrian Forest Inventory (ÖWI) 2000/2002). A previous study from Switzerland found out that lightning fires were more likely to occur in coniferous and mixed coniferous forests, and human-induced forest fires concentrated on deciduous-dominated stands (Reineking et al. 2010). Mixed forests (conifer-dominated forests with broadleaf make up 15 % of the Austrian forests, while broadleaf-dominated forests with conifers are 11 %) were less affected by both lightning and human-caused fires, which might be a tribute to a higher resistance against fire ignition in these forest communities. Pure conifer stands account for 62 % of forested area in Austria. However, 82 % of lightning fires were found in coniferous forests. This emphasises the importance of lightning fires in conifer stands. Also, pure conifer stands are more frequently present in higher altitudes due to their natural range; as lightning-caused forest fires occur at higher levels more often, the relation between coniferous forests and lightning is reasonable.

Comparing the number of lightning-caused fires per altitudinal zone, it becomes evident that the distribution follows the relative share of forested areas within the altitudinal zones. However, at higher altitudes, the relative number of lightning-caused fires is increasing, which underlines the role of the inducing topographic and climatic factors. Human-caused fires show another distribution as they are most frequent at lower altitudes with less forest area. This indicates the importance of anthropogenic influence (cf. Fig. 6). The higher number of lightning fires in mountainous regions might also be a result of more thunderstorm days and increased lightning density (Schulz et al. 2005). Additionally, the human influence, and therefore the anthropogenic ignition probability, at higher altitudes is lower than in the more densely populated valleys, basins and lowlands. The clear tendency towards higher altitudes of lightning-induced forest fires compared to anthropogenic fires is also in line with findings from other studies (Conedera et al. 2006; Keeley 1982).

Acknowledgments This research has been conducted partly within the frame of the AFFRI, which is funded by the Austrian Science Funds within the Translational Research Program with reference number L539-N14, and by the European Project Alpine Forest Fire Warning System, which is funded by the European Regional Development Fund of the Alpine Space Program with the reference number 15-2-3-IT.

Open Access This article is distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License which permits any use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author(s) and the source are credited.

References

Anderson K (2002) A model to predict lightning-caused fire occurrences. Int J Wildland Fire 11:163–172

Auer I, Böhm R, Jurkovic A, Lipa W, Orlik A, Potzmann R, Schöner W, Ungersböck M, Matulla C, Briffa K, Jones P, Efthymiadis D, Brunetti M, Nanni T, Maugeri M, Mercalli L, Mestre O, Moisselin J-M, Begert M, Müller-Westermeier G, Kveton V, Bochnicek O, Stastny P, Lapin M, Szalai S, Szentimrey T, Cegnar T, Dolinar M, Gajic-Capka M, Zaninovic K, Majstorovic Z, Nieplova E (2007) HISTALP—historical instrumental climatologically surface time series of the Greater Alpine Region. Int J Climatol 27:17–46

Austrian Lightning Detection and Information System (ALDIS) (2009) Lightning statistics Austria. http://www.aldis.at. Accessed 12 November 2009

Badeck FW, Lasch P, Hauf Y, Rock J, Suckow F, Thonicke K (2003) Steigendes klimatisches Waldbrandrisiko. Allgemeine Forstzeitschrift für Wald- und Forstwirtschaft (AFZ - DerWald), Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH, Hannover

Badia A, Sauri D, Cerdan R, Llurdés JC (2002) Causality and management of forest fires in Mediterranean Environments: an example from Catalonia. Environ Hazards 4:23–32

Barriopedro D, Fischer EM, Luterbacher J, Trigo RM, García-Herrera R (2011) The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. Scienceexpress. doi:10.1126/science.1201224

Biagi CJ, Cummins KL, Kehoe KE, Krider PE (2007) National Lightning Detection Network (NLDN) performance in southern Arizona, Texas and Oklahoma in 2003–2004. J Geophys Res 112: D05208

Castedo-Dorado F, Rodriguez-Perez JR, Marcos-Menendez JL, Alvarez-Taboada MF (2011) Modelling the probability of lightning-induced forest fire occurrence in the province of León (NW Spain). For Syst 20(1):95–107

Conedera M, Cesti G, Pezzatti GB, Zumbrunnen T, Spinedi F (2006) Lightning induced fires in the Alpine Region: an increasing problem. V International Conference on Forest Fire Research, Coimbra, Portugal

Dankers R, Hiederer R (2008) Extreme temperature and precipitation in Europe: analysis of a high-resolution climate change scenario. Office for Official Publications of the European Communities Luxembourg, EUR 23291 EN

Diendorfer G (2007) Lightning location systems (LLS). In: IX International symposium on lightning protection. Foz do Iguaçu, Brazil, 26–30 November 2007

Duncan BW, Adrian FW, Stolen ED (2010) Isolating the lightning ignition regime from a contemporary background fire regime in east-central Florida, USA. Can J For Res 40:286–297

FG (2007). Forstgesetz 1975, Bundesgesetz vom 3. Juli 1975, mit dem das Forstwesen geregelt wird, StF: BGBl. Nr. 440/1975 last change BGBl. I Nr. 55/2007.

Fischer EM, Schär C (2010) Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. Nat Geosci 3. doi:10.1038/NGE0866

Flannigan MD, Stocks BJ, Wotton BM (2000) Climate change and forest fires. Sci Total Environ 262(3):221–229

Gimmi U, Bürgi M, Wohlgemuth T (2004) Wie oft brannte der Walliser Wald im 20. Jahrhundert? Schweiz Z Forstwes (SZF) 10:437–440

Goldammer JG (2002) Towards international cooperation in managing forest fire disasters in the Mediterranean Region. Int For Fire News IFFN 27:81–89

Gossow H, Frank G (2003) Waldbrand auf Windwurf – eine unheilige Allianz? Oesterreichische Forstztg 114(9):8–9

Gossow H, Hafellner R, Arndt N (2008) More forest fires in the Austrian Alps—a real coming danger? Borsdorf et al. (ed) Managing Alpine future, proceedings innsbruck conference 2007, IGF Forschungsberichte 2:356–362

Gossow H, Hafellner R, Vacik H, Huber T (2009) Major fire issues in the Euro-Alpine Region—the Austrian Alps. Int For Fire News IFFN 38:1–10

Hall BL, Brown TJ (2006) Climatology of positive polarity flashes and multiplicity and their relation to natural wildfire ignitions. In: 19th International lightning detection conference, Tucson, Arizona, USA

Keeley JE (1982) Distribution of lightning- and man-caused wildfires in california. In: Symposium on Dynamics and management of Mediterranean type ecosystems, Pacific southwest forest and range experiment station, forest service, U.S. Department of Agriculture, Berkeley, California

Larjavaara M, Pennanen J, Tuomi TJ (2005) Lightning that ignites forest fires in Finland. Agric For Meteorol. doi:10.1016/j.agrformet.2005.07.005

Lautenschlager M, Keuler K, Wunram C, Keup-Thiel E, Schubert M, Will A, Rockel B, Boehm U (2005) Climate simulation with CLM, climate of the 20th century run no.3, data stream 3: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate

Lautenschlager M, Keuler K, Wunram C, Keup-Thiel E, Schubert M, Will A, Rockel B, Boehm U (2009) Climate simulation with CLM, scenario a1b run no.2, data stream 3: European region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate

Le Page Y, Pereira JMC, Trigo R, Da Camara C, Oom D, Mota B (2008) Global fire activity patterns (1996–2006) and climatic influence: an analysis using the world fire atlas. Atmos Chem Phys 8:1911–1924

Matulla C, Formayer H, Haas P, Kromb-Kolb H (2004) Mögliche Klimatrends in Österreich in der ersten Hälfte des 21. Jahrhunderts. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft (ÖWAW) 56:1–2

Müller MM (2010) Analyse der durch Blitzschlag ausgelösten Waldbrände in Österreich. Master thesis, University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Vienna

Outcalt KW (2008) Lightning, fire and longleaf pine: using natural disturbance to guide management. For Ecol Manag 255:3351–3359

Podur J, Martell DL, Csillag F (2003) Spatial patterns of lightning caused forest fires in Ontario, 1976–1998. Ecol Model 164:1–20

Reineking B, Weibel P, Conedera M, Bugmann H (2010) Environmental determinants of lightning- v. human-induced forest fire ignitions differ in a temperate mountain region of Switzerland. Int J Wildland Fire 19:541–557

Reinhard M, Rebetez M, Schlaepfer R (2005) Recent climate change. Rethinking drought in the context of Forest Fire Research in Ticino, South of Switzerland. Theor Appl Climatol 82(1–2):17–25

Rorig ML, Ferguson SA (1999) Characteristics of lightning and wildland fire ignition in the Pacific Northwest. J Appl Meteorol 38:1565–1575

Schulz W, Cummins KL, Diendorfer G, Dorninger M (2005) Cloud-to-ground lightning in Austria: a 10-year study using data from a lightning location system. J Geophys Res 110

Vacik H, Arndt N, Arpaci A, Koch V, Müller M, Gossow H (2011) Characterisation of forest fires in Austria. Austrian J For Sci 128 (1):1–32

Valese E (2007) Wildland fires in the Alpine region of Italy: what's old, what's new. What's next? Int For Fire News IFFN 38

Vega-Garcia C, Woodard PM, Titus SJ, Adamowicz WL, Let BJ (1995) A logit model for predicting the daily occurrence of human caused forest fires. Int J Wildland Fire 52:101–111

Wendler G, Conner J, Moore B, Shulski M, Stuefer M (2010) Climatology of Alaskan wildfires with special emphasis on the extreme year of 2004. Theor Appl Climatol 104:459–472

Wohlgemuth T, Brang P, Conedera M, Dobbertin M, Kupferschmid-Albisetti A, Moser B (2008) Effekte des Klimawandels auf Windwurf, Waldbrand und Walddynamik im Schweizer Wald. Schweiz Z Forstwes (SZF) 159(10):336–343

Wotton BM, Martell DL (2005) A lightning fire occurrence model for Ontario. Can J For Res 35:1389–1401

Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) (2011) HISTALP Langzeitklimareihen – Oesterreich, Sommerbericht 2011. Historical instrumental climatological surface time series of the greater alpine region (HISTALP), Central Institute for Meteorology and Geodynamics, Department of Climate Research, Vienna

Anhang 4: Characteristics of lightnings igniting forest fires in Austria

Müller M.M., Vacik H., 2017. Characteristics of lightnings igniting forest fires in Austria. Agricultural and Forest Meteorology, 240-241, S. 26–34.

Agricultural and Forest Meteorology 240 (2017) 26–34

Contents lists available at ScienceDirect

Agricultural and Forest Meteorology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/agrformet

Characteristics of lightnings igniting forest fires in Austria

Mortimer M. Müller*, Harald Vacik

University of Natural Resources and Life Sciences, Department of Forest- and Soil Sciences, Institute of Silviculture, Peter Jordan Str. 82, 1190 Vienna, Austria

ARTICLE INFO

Article history:
Received 19 October 2016
Received in revised form 27 March 2017
Accepted 29 March 2017

Keywords:
Lightning fire
Forest fire
Positive lightning
Polarity
Fire weather indices
Fuel moisture

ABSTRACT

Besides anthropogenic causes, lightning is the major reason for forest fire ignition worldwide. Information on lightning characteristics and impact points is missing or controversial, due to the difficulty of lightning stroke localization and the relation to single forest fire events. Austria as an Alpine country experiences a high number of thunderstorms and lightnings, which ignite more than one third of forest fires from June to August. With data from the "Austrian Lightning Detection and Information System" (ALDIS) it was possible to link single lightnings and their characteristics to the location and attributes of individual forest fires. Three subsets with lightning data were compiled and analyzed regarding their strength (kA), polarity (positive or negative) and multiplicity (number of re-strokes). Additional data on the time of ignition, burned area, sea level, exposition and burned vegetation were investigated. Two fire weather sub-indices (FFMC – Fine Fuel Moisture Code and BUI – Build Up Index) of the Canadian FWI (Fire Weather Index) were calculated for the location of the impact point of each lightning and over a period of twenty days, including the day of ignition. Positive lightnings were significantly more likely to induce a fire. Both the FFMC and BUI showed a significant mean decrease after the day of ignition. Precipitation was significant lower at those impact points where forest fires were ignited. Burned area was larger when lightnings ignited during day hours. Most lightning fires occurred at higher altitudes with southerly or western exposition, mainly in stands of Norway spruce (*Picea abies* L.). Pine species were four times more often affected than the natural tree species distribution would assume. The study results contribute to the international discussion on lightning fires and will help to provide recommendations for further modelling studies on the forecast of lightning caused forest fires.

© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Humans and lightnings account for most forest fires ignitions around the world. Especially in regions with summer droughts combined with convective activity, lightnings can ignite a significant proportion of forest fires up to 40% or more (Anderson, 2002; Hall and Brown, 2006) and may be responsible for more than 90% of the area burned (Wendler et al., 2011). Lightnings occur nearly everywhere and are not linked to the living space of humans. The resulting forest fires are often located in remoted and hardly accessible areas, where they are difficult to combat by fire brigades and may lead to devastating and long living crown fires (Flannigan and Wotton, 1991; Kourtz and Todd, 1991; Stocks et al., 2002). Also lightnings may ignite during night time, which hampers firefighting and may increase burned area and fire severity. Moreover, lightning fires have the potential to smoulder undetected over a long time period and burst into flames when weather conditions are suitable for ignition (Conedera et al., 2006; Wendler et al., 2011).

Although lightning fires are frequent in temperate zones with large forested areas, like Canada, the US or some regions in Europe and Asia, information on lightning characteristics and conditions at the impact point is often missing or controversial due to the random nature of lightnings. It is general accepted in scientific literature, that lightnings with long continuing current ignite most fires (Pineda et al., 2014). Other lightning characteristics like the role of positive lightnings, current strength and lightning multiplicity are not that clear. For instance older studies like Fuquay (1980) showed that positive lightnings are more likely to induce forest fires than negatives ones, due to higher current amplitudes, greater probability of a long continuing current and less accompanying precipitation. While some newer studies (e.g. Wendler et al., 2011; Wotton and Martell, 2005) agree with this finding, most research results from the last years found no higher ignition probability of positive lightnings (e.g. Flannigan and Wotton, 1991; Larjavaara et al., 2005; Pineda et al., 2014). Further uncertainties include the role of fuel moisture at the point of lightning impact, as relatively wet conditions may not prevent initial ignition (Dowdy and Mills,

* Corresponding author.
E-mail address: mortimer.mueller@boku.ac.at (M.M. Müller).

http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.020
0168-1923/© 2017 Elsevier B.V. All rights reserved.

2012). One reason for the uncertainties related to fire ignition is the difficulty of lightning stroke localization and linkage to single forest fire events. In case that the individual strokes cannot be analyzed, the driving factors are hard to identify. A first attempt on this issue was done by Larjavaara et al. (2005). However most studies from recent years did not deal with this difficulty. This can lead to a misunderstanding of the role of lightning characteristics, fire weather, determining fuel conditions and of other factors like exposition, topography and ground vegetation.

Central European mountain forests are highly diverse in terms of climate, geology and topography, resulting in various compositions of forest ecosystems and distinct levels of fire susceptibility. Similarly to most regions of the world, anthropogenic forest fire causes are dominating. Nevertheless a high number of thunderstorms and lightnings are observed, which ignite more than 10% of forest fires in regions like southern Switzerland (Conedera et al., 2006), northern Italy (Valese, 2007) and in parts of Spain (Vecín-Arias et al., 2016). In Austria around 15% of annual forest fires and up to 40% in the summer months are ignited by lightning (Müller et al., 2013).

European mountain forests are among the regions which are most affected by climate change (Lindner et al., 2010). For the future an increase in lightning activity is assumed due to global warming (Price 2009; Reeve and Toumi, 1999; Romps et al., 2014). Regional climate models predict an increase in temperature and a reduction of precipitation in summer and autumn, especially in the south and east of Austria (Dankers and Hiederer, 2008; Fischer and Schär, 2010; Lautenschlager et al., 2009; Matulla et al., 2004). In recent years several drought and temperature records occurred in Austria, like the driest July ever recorded in 2013, the very first time temperatures above 40 °C in August 2013 or the largest number of days above 35° in 2015 (ZAMG, 2016). Anomalies in the Austrian forest fire regime were observed as well, which may indicate a shift to more and larger forest fires (Müller et al., 2015).

In this context Austria can serve as a case study for the analysis of lightning caused forest fires in European mountain forests. We want to identify the physical, meteorological and local conditions for lightning caused ignitions to contribute to the discussion on lightning fires and lightning characteristics and to provide recommendations for further modelling studies on the forecast of lightning caused forest fires.

The first aim of the present study was to evaluate the possible impact of polarity, strength and multiplicity of lightnings strokes on the chance of ignition. We hypothesize that currently measurable physical parameters of lightnings are not relevant for ignition and, in particular, that positive lightnings do not ignite more forest fires than negative ones, like recent studies suggest (e.g. Larjavaara et al., 2005; Pineda et al., 2014; Vecín-Arias et al., 2016).

The second aim was to analyze the role of fuel moisture conditions at the point of lightning impact. We hypothesize to find dry conditions at the day of ignition but higher fuel moisture afterwards because of rare dry thunderstorm events in Austria. Precipitation after ignition is therefore assumed to inhibit large lightning fires in Austria, like it was found for other parts of the world (Aldersley et al., 2011; Littell et al., 2009; Nash and Johnson, 1996; Wendler et al., 2011).

Third, the influence of ignition time and ground parameters like altitude, exposition and vegetation are investigated. As southern orientated Norway spruce (*Picea abies*) stands at higher altitudes are primarily affected by lightning fires (Müller et al., 2013) it is assumed that fires on southern to western exposition lead to a larger burned area due to stronger solar radiation and drier fuel conditions in the summer months (Vacik et al., 2011). Also lightnings igniting in the evening or night hours may cause larger burned areas, because of the difficulties of fire suppression.

2. Material and methods

2.1. Forest fire documentation

Within the activities of European (ALP FFIRS) and national (AFFRI, FIRIA) projects the analysis on the occurrence, distribution, causes and characteristics of forest fires were accomplished (Vacik et al., 2011). A wildfire database has been established, as no homogenized and nationwide database on forest fire occurrence existed. The database now includes more than 4000 forest fire incidents from 1540 to 2016, with an almost complete documentation of the last 25 years (Eastaugh and Vacik, 2012). In some cases the collected information was incomplete, for instance the exact time of detection, the cause, the burned area or affected tree species were missing or unknown.

The position, respectively outbreak point, of each forest fire was estimated according to the available information provided by the data source. This information could include maps with marked ignition points, the specification of affected properties, road, valley or mountain names, distances to important local objects like churches, chalets, mountain shelters etc. In some cases it was possible to gain information on the exact outbreak point by using aerial photographs and documenting pictures taken during the firefighting operations. To define the position, WGS84 was chosen as coordinate system. The localization accuracy of each forest fire was estimated by expert judgement in respect of the available information by placing a buffer radius around the assumed ignition point. The highest accuracy can be reached with a resolution of 1" in WGS84, which approximates a buffer of 30 m. The mean localization uncertainty for all recorded forest fires in the Austrian fire database is currently 1500 m, for all records since 1993 it averages at 1350 m and since 2003 the mean localization uncertainty is 1260 m.

Additional information about the forest fires was totally burned area, mainly affected tree species and forest type, altitude and exposition at ignition point. The burned area of lightning fires was investigated in terms of the time of ignition in a 12 h interval, divided in day (06:00 h–18:00 h local time) and night (18:00 h–06:00 h). In this context it has to be remarked that ignition and detection time are not comparable. Ignition time indicates the time of the lighting stroke that caused the fire, while detection time is associated with the time when the forest fire is first observed. Smouldering and undetected fires after lightning ignition may last a couple of days (Conedera et al., 2006; Rorig and Ferguson, 1999; Wendler et al., 2011).

Burned area sizes were also analyzed regarding a possible correlation with the exposition, whereby larger burned areas were assumed to occur from SE to W exposition (against NW to E). Exposition was classified according to south, southwest, west, northwest, north, northeast, east, southeast and flat terrain.

Full information for each record was not always available or could not be acquired. Therefore the number of analyzed forest fires had to be reduced for the current analysis. An estimation of burned area was available for 248 cases (71%). Information on tree species could be collected for 258 fires (74%), data on forest types for 312 events (89%). Altitude and exposition were evaluated for all cases.

2.2. Lightning detection

The Austrian Lightning Detection and Information System (ALDIS) detects thunderstorm activity in and around of Austria. The detection efficiency of cloud to ground (CG) lightnings is well above 90% since 1999, with an estimated efficiency of 98% from 2006 onwards (Diendorfer, 2007; Schulz et al., 2005). This makes ALDIS one of the best performing lightning detection systems worldwide (ALDIS, 2009; Biagi et al., 2007; Castedo-Dorado et al., 2011;

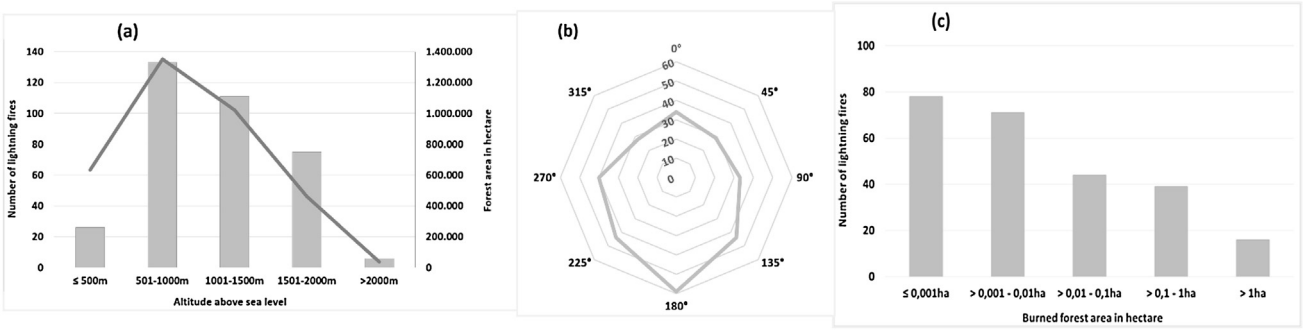


Fig. 1. (a) Altitude and number of lightning fires (bars) and forest area in hectare (line) | n = 351, (b) Exposition and number of lightning fires in Austria, without those events occurring in flat terrain | n = 311, (c) Burned area sizes of lightning fires in hectare | n = 248.

Outcalt, 2008; Podur et al., 2003; Schulz, 2015). The first detection sensor was put into operation in 1991, since 1993 the system works nationwide. Currently eight terrestrial detectors are in use, each with an operation range of about 400 km. In 2006 the sensors were replaced by new ones, which offer a complete digital signal processing.

There are two different methods to determine the point of impact of a lightning: either with Magnetic Direction Finding (MDF) or with time differences (Time of Arrival – TOA). As ALDIS provides both kind of information, a combined approach is used, whereby two sensors are sufficient for an exact location of a specific lightning. The temporally uncertainty is around 250 ns and the median location accuracy is beyond 400 m since 1999 (Diendorfer, 2007), below 300 m since 2007 and around 100 m in recent years (Schulz, 2015). Besides the coordinates of the point of impact, the lightning processor provides information on the impact time, the polarity of the lightning (positive or negative), the current amplitude in kiloampere (kA), and the number and strength of possible re-strokes, which indicate the multiplicity of the lightning (ALDIS, 2009).

2.3. Lightning fire verification

The methodological approach for the verification of forest fires caused by lightning is described in Müller et al. (2013). The coordinates of each forest fire for the study period 1993–2013 with unknown or assumed lightning cause were compared with the data records of ALDIS. Forest fires declared as human caused were excluded from the analysis because a previous study has shown that these fires rarely correspond to relevant lightnings (Müller, 2010). A data query was performed for all lightnings identified by ALDIS. We chose a timeframe of −10/+1 days prior or after the proposed date of the forest fire and a buffer radius of 10 km to the ignition point to consider i) possible fires that smouldered undetected over a longer time period and ii) wrong located forest fires. Based on this query a set of parameters for each fire record was compiled, which provided the following information:

- Date and exact time for each lightning
- Coordinates of the lightning stroke in WGS84 (X, Y)
- Current strength in kiloampere (kA) and charge (positive/negative) of each lightning
- Number of strokes (n)
- Distance to outbreak point of forest fire (km)
- Direction of the lightning – cloud to ground (CG) or cloud to cloud (CC)
- The median of the half-axis of the error ellipse (km)

According to Müller et al. (2013) relevant lightnings were identified by the help of a decision tree and related decision matrices based on existing literature (e.g. Hall and Brown, 2006; Larjavaara et al., 2005; Schulz et al., 2005). The following selection criteria were used: (1) distance to forest fire, (2) date of lightning, (3) size of the error ellipse. The final judgement on each case (if a forest fire was caused by lightning "yes", "uncertain" or "no") was made after the analysis of all (at maximum) five discharges.

To validate the methodological approach, known human-caused forest fires were investigated as well (Müller, 2010). Single positive lightnings under 10 kA were excluded from the analysis, even if they were the nearest events, because studies have shown, that these discharges are mostly (about 90%) CC and not CG-lightnings (Schulz et al., 2005; Diendorfer, 2007). Because ALDIS detects around 98% of all CG-lightnings in Austria, it was assumed that lightning could not have been the cause of a forest fire, if there were no cloud to ground discharges observed.

After the evaluation 351 forest fires could be verified as lightning caused from 1993 to 2013 and were selected for the further analysis.

2.4. Lightning subsets

To analyze the role of lightning characteristics on fire ignition, three different data subsets were compiled. These subsets included the verified lightning data from ALDIS mentioned above. The following information was stored for each lightning: date, time, polarity, amplitude (kA), number of strokes, coordinates (in WGS84) and ID of the corresponding forest fire.

Subset 1 was designed to include only lightnings which likely ignited a forest fire. Only those lightning fires were considered, where just one lightning reached the probability "likely" or "very likely". Hereby a direct relation between a specific lightning and a specific forest fire was possible. In total 133 lightnings, respectively fires (38% of all lightning fires), were included. It was assumed that subset 1 represents a nearly realistic picture of lightnings igniting forest fires. Subset 2 contained the most likely lightning from all other verified lightning fires (n = 218). The "most likely" discharge was identified by the selection criteria mentioned above. Subset 3 was build up from randomly chosen CG-lightnings from the same thunderstorm event and within a radius of 10 km to the point of ignition. To consider possible differences between thunderstorms that may lead to distinct lightning characteristics (Höller et al., 2009; Orville and Silver, 1997; Rakov and Huffines, 2003), the "same" thunderstorm was declared as all lightnings occurring ±30 min to the igniting lightning. This timeframe corresponds to the normal lifespan of a typically single-cell thunderstorm (Chisholm and Renick, 1972). In subset 3 some forest fires had to be excluded, because no other relevant lightnings were detected by ALDIS. Finally 344 lightnings were randomly selected. It was assumed that data in subset 3 matches the normal distribution of lightning characteristics in a typical summer storm.

2.5. INCA, fire weather indices and precipitation

For this study high resolution meteorological data was used from the Central Institute of Meteorology and Geodynamics (ZAMG). INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis) provides actual data and short term forecast of temperature, humidity, rainfall, wind and other parameters on a spatial resolution of 1 × 1 km nationwide and on a temporal resolution of 1 h. INCA data was calculated back on an hourly resolution until 2003 (ZAMG, personal communication).

Because the overall dataset of this study started in 1993, only lightning fires from 2003 onwards could be investigated. For the analysis of the fire weather conditions and the precipitation, the three subsets described were used. However, the number of cases had to be reduced because of the temporal limitation of the available meteorological data mentioned above and led to n = 116 for subset 1, n = 163 for subset 2 and n = 274 for subset 3.

Fuel moisture conditions were characterized by fire weather indices. Two drought indices were calculated for the coordinates of the lightnings/forest fires from −10 to +10 days to the date of fire ignition according to Arpaci et al. (2013). Based on the INCA data set the FFMC (Fine Fuel Moisture Code) and the BUI (Build Up Index) from the Canadian Fire Weather Index FWI (Van Wagner, 1987) were calculated. Both are indicators for fuel moisture, whereby FFMC reflects the upper litter and BUI shows the combined cumulative effects of daily drying, relative humidity and precipitation in deep layer fuels. While FFMC is seen as best indicator for fire ignition (Dowdy and Mills, 2012), BUI should work well for the estimation of fire holdover in Alpine deep layer fuels, as it combines DC (Drought Code) and DMC (Duff Moisture Code), which represent the total amount of fuel available for combustion (Van Wagner, 1987). Moreover FFMC and BUI have shown that they allow predicting forest fires in the summer months in Austria very well (Arpaci et al., 2013) and can serve as a proxy for fuel moisture (Minjian and Vacik, in preparation). Dowdy and Mills (2012) point to the fact that although a fire can survive in just one fuel layer, survival of a lightning ignition is unlikely when DMC shows wet conditions. Indeed they were not able to characterize the lightning causing the fire as was done by Larjavaara et al. (2005) and in our present study.

Precipitation data was available in timeframes of 24 h, with a spatial resolution of 1 km and was analyzed for each ignition point to study the impact of rainfall amounts and dry lightnings. Dry lightnings are defined as discharges in thunderstorms without significant rainfall (less than 0,1 inch (2,5 mm) per square meter according to Dowdy and Mills (2012)). As forest fires in Austria are mostly early detected and suppressed within 24 h, we assumed that a precipitation timeframe of 2 days after ignition is sufficient to identify possible impacts on the size of burned area.

All findings were tested on significance ($p < 0,05$) using the parametric procedure of independent subsets *t*-test and variance analysis with Games-Howell Post-hoc-test.

3. Results

3.1. Characteristics of lightning fires

Altogether 351 lightning fires were analyzed. 84% of all fires occurred in coniferous stands, 14% in mixed stands and 2% in deciduous stands. The share of these stand types in Austria is 59% for coniferous, 27% for mixed stands and 14% for deciduous (Austrian Forest Inventory (ÖWI) 2007–2009). Most lightning fires affected Norway spruce (*Picea abies* L.). 74% or 192 of all fires with available vegetation data were found in coniferous stands dominated by Norway spruce (53% of growing stock in Austria). 56 fire events or 22% occurred in pine dominated stands (*Pinus nigra, Pinus sylvestris, Pinus mugo* and *Pinus cembra*) (6% growing stock). Only 2% of the lightning fires affected larch (*Larix decidua*, 4% growing stock) and also beech stands (*Fagus sylvatica*, 10% growing stock).

Table 1
Lightning characteristics of the different subsets and normal distributions abstracted from the Austrian Lightning Detection and Information System ALDIS.

Lightning characteristics	subset 1	subset 2	subset 3	ALDIS (means)
positive lightnings	21%	12%	8%	9%
negative lightnings	79%	88%	92%	91%
mean amplitude (pos)	38kA	29kA	35kA	27kA
mean amplitude (neg)	15kA	15kA	13kA	14kA
mean number of strokes (pos)	1,6	2	1,6	1,4
mean number of strokes (neg)	2,5	2,5	2,5	2,4

The mean elevation of the ignition points of all lightning fires was 1100 m above sea level, which corresponds to the middle montane altitudinal belt (Fig. 1). The highest ignition point was found at 2300 m, which lies at the upper range of the natural timber line in Austria. The lowest located lightning fire was observed at 240 m. Dependent on the forest area per altitudinal zone lightning fires were observed relatively less frequently below 500 m. Most fires (53%) had a southerly to westerly exposition, 35% a north-westerly to eastern and 12% of lightnings fires occurred in flat terrain.

The mean burned area of all lightning fires from 1993 to 2013 (where areal information was available) was 0,4 ha. Yet most fires were small in size with 60% burning less or equal 0,01 ha (Fig. 1). Only in 16 cases burned areas exceeded one hectare. Larger burned areas were found during the day (0,47 ha) compared to night hours (0,17 ha), but the differences were not significant ($p = 0,19$). Although lightning fires on southerly/western exposition had a higher burned mean size of 0,56 ha compared to those on northern/eastern exposition (0,17 ha), the difference was not significant as well ($p = 0,31$).

3.2. Lightning characteristics

Analysing the lightning characteristics of the three subsets it was found that in subset 1, containing only lightnings which likely ignited a fire, positive lightnings were more than twice as frequent (21%), as the mean distribution in summer thunderstorms (9%) would allow to expect (Table 1). The proportion of positive lightnings in subset 1 is significantly higher ($p < 0,001$) than those in subset 3. The randomly chosen lightnings in subset 3 showed nearly the same proportion of positive lightnings (8%) as the average values of the whole ALDIS dataset (9%).

The mean amplitude of positive lightnings was in all three subsets higher than the average values of the ALDIS data. The highest (but not significant) positive deviation showed subset 1. The mean amplitude of negative lightnings was nearly equal in all subsets and corresponded to the mean ALDIS distribution. The number of strokes in all subsets showed no remarkable variation from the mean. The burned area of lightning fires was investigated in terms of a possible difference between positive and negative lightnings, but no significant difference according to the polarity of lightnings was found ($p = 0,8$).

3.3. Drought indices and precipitation

We analyzed the significance of changing FWI values on day +1 (the day after fire ignition) compared to day 0. This was done to identify the reliability and relevance of (changing) FWI values on lightning ignition and fire survival, primarily to estimate the usability for the forecast of lightning fires. The BUI values showed a mean

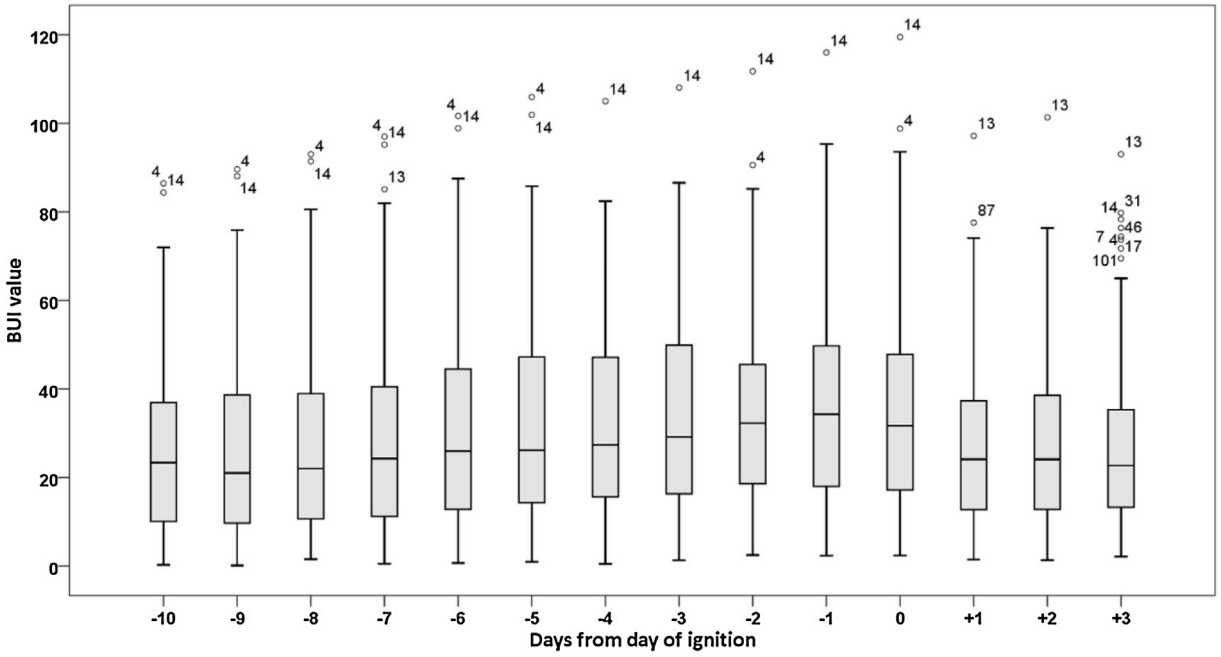


Fig. 2. BUI for subset 1 at point of lightning impact, −10 days to +3 days to the day of fire ignition | n = 115.

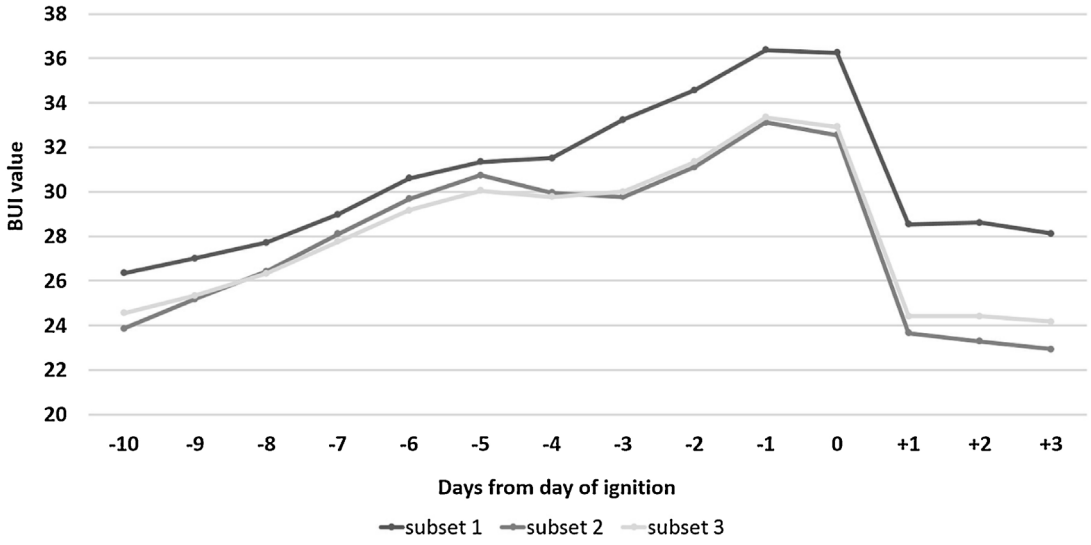


Fig. 3. Mean BUI values for all three subsets at point of lightning stroke from 10 days before fire ignition to 3 days thereafter.

Table 2
Mean BUI and FFMC values for day 0 and day +1 and mean precipitation (millimeter) 24 h and 48 h after ignition for all three subsets.

	BUI_day0	BUI_day1	FFMC_day0	FFMC_day1	Prec_24h	Prec_48h
subset 1	36,2	28,5	77,4	61,8	11,8 mm	14,4 mm
subset 2	32,6	23,7	75,7	57,6	16,0 mm	19,8 mm
subset 3	32,9	24,4	76,2	59,2	14,6 mm	18,3 mm

increase in all three subsets until day −1, the day before fire ignition. On day 0 (fire ignition day) the index values remained steady and dropped notably against the following day (+1). Afterwards slightly declining mean values were observed. In Fig. 2 the distribution of BUI values for subset 1 are shown from −10 to +3 days to fire ignition date. Median values stayed below 40 on all days with outliers mostly under 100. In Fig. 3 mean values of all BUI subsets are shown. Notice the clear drop on day +1. FFMC showed high values already some days before the igniting lightning. On day 0 somewhat lower values were observed, followed by a clear drop on day +1 and a quick mean rise on day +2 (Fig. 4).

We analyzed the significance of decreasing FWI mean values on day +1 compared to day 0. All subsets dropped clearly, however BUI in subset 1 showed no significant decrease ($p = 0{,}10$). BUI in subset 2, in subset 3 and FFMC in all subsets dropped highly significant ($p < 0{,}001$). No clear difference could be found between the three subsets of BUI and FFMC respectively, as all showed similar behavior over time (Table 2).

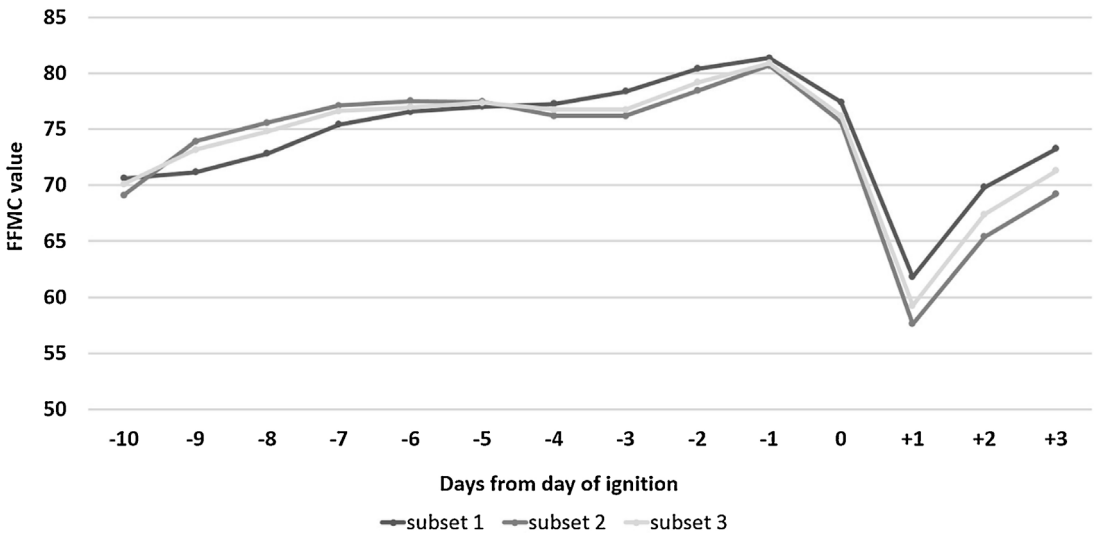


Fig. 4. Mean FFMC values for all three subsets at point of lightning stroke from 10 days before fire ignition to 3 days thereafter.

The rain amounts after fire ignition (24 h and 48 h timeframe) were compared. The means in subset 1 were significant lower (p = 0,01) than in subset 3. The 24 h precipitation mean in subset 1 was also significant lower compared to subset 2 and very significant lower (p = 0,004) regarding the 48 h timeframe of subset 2. Subset 2 and 3 did not show a notable difference. No relevant variation could be found between the mean rain amounts at the impact points of positive and negative lightnings (data not shown).

The burned area of lightning fires was investigated in terms of a possible correlation between BUI values at ignition day and burned area. Higher BUI values on ignition day correlated with higher burned area sizes, indeed this coherence was not significant (p = 0,18). Lower precipitation (24 h/48 h) did not correlate with a greater burned area size. There could not be found a remarkable or significant difference, neither in subset 1 nor in subset 2 (p = 0,7 for 24 h and p = 0,8 for 48 h).

4. Discussion

4.1. Ignition probability of lightnings

Hall and Brown (2006) mentioned three factors of lightning strikes that influence the probability of wildfire ignition: i) polarity of the stroke; ii) multiplicity of the lightning; iii) the existence of a long continuing current (LCC). Others also discussed the mean peak current as relevant parameter (e.g. Vecín-Arias et al., 2016).

We found a clear and significant higher amount of positive lightnings igniting forest fires. Some studies from the last years found no unusual high proportion (e.g. Castedo-Dorado et al., 2011; Hall and Brown, 2006; Flannigan and Wotton, 1991; Larjavaara et al., 2005), while other studies did (e.g. Fuquay 1980; Wendler et al., 2011; Wotton and Martell, 2005).

According to recent investigations positive lightnings have a higher chance for a LCC (Saba et al., 2010; Schumann et al., 2013), which is generally seen as (most) important factor for ignition (Anderson, 2002; Flannigan and Wotton, 1991; Pineda et al., 2014). A LCC cannot be detected by ALDIS or by other lightning location systems, as it would require video observance. This was done in studies of ALDIS for a mountain antenna in Salzburg (Saba et al., 2010) but also by Pineda et al. (2014) in Spain. Here no clear difference could be found between the existence of LCC in positive and negative lightnings, single strokes or multiple ones. Our data doesn't allow to draw conclusions about the role of LCCs, but we assume that its presence and the presumably higher amount of LCCs in positive lightnings led to our finding of a greater ignition probability.

The exclusion of single positive lightnings with a mean peak current under 10kA, as done in our study, can be seen critical, as some relevant lightnings may have dropped out erroneously. Yet studies on lightning detection in Austria showed, that only 10% of these lightnings were correctly classified as cloud to ground discharges (Schulz et al., 2005; Diendorfer, 2007). As we found no realistic methodical approach to filter out the CG-lightnings and in line with previous studies (e.g. De Souza et al., 2009), we decided to exclude those lightnings.

Concerning the amplitude, peak currents of negative lightnings in all our three subsets corresponded to the distribution of the whole ALDIS dataset. Amplitudes of positive lightnings were slightly and not significant above mean values. It seems that lightnings with higher than average peak currents have no greater chance to ignite a wildfire. This is in contrast to recent studies from China (Chen et al., 2015) and Spain (Vecín-Arias et al., 2016) but in line with another Spanish paper (Pineda et al., 2014). We assume that either heterogenic lightning ignition parameters or deficiencies in the datasets used led to these contradictions. In fact we hypothesize that the amplitudes of lightnings are no driving factors for ignition, at least in mountainous regions. Our analysis also identified very weak lightnings that were likely the cause of ignition. A similar result was reported by Pineda et al. (2014).

We also found no extraordinary high multiplicity in those lightnings which ignited forest fires, although negative lightnings with multiple strokes are considered to have LCC more likely (Rakov and Uman, 1990). Flannigan and Wotton (1991) described a correlation of greater stroke number and higher ignition probability, while newer studies came to an opposite conclusion (Larjavaara et al., 2005; Pineda et al., 2014). We assume that lightning multiplicity is not important for fire ignition.

We believe that our methodology allowed a comprehensive view on lightning fire characteristics in Austria and can be transferred to other parts of the world. We were able to compile a subset, containing only lightnings which likely ignited a fire, a rare but expedient approach. Lightning characteristics in thunderstorms are not uniform over time and all over the world (Hall and Brown, 2006; Rakov and Huffines, 2003). This can influence the role of lightning polarity. While similar European studies from Finland and Spain concentrated more on flat terrain (Larjavaara et al., 2005; Vecín-Arias et al., 2016), our study depicts conditions in the eastern Alps and may also be valid for other mountain ranges in the world.

4.2. Fire weather conditions

Several studies tried to find suitable fire weather indices or models to predict lightning fires (e.g. Castedo-Dorado et al., 2011; De Angelis et al., 2015; Wotton and Martell, 2005). These studies are mostly fed by large scale input data on weather conditions and the comparison between fire weather and lightning occurrence more generally.

In our study we tried to analyze the local conditions at the ignition point. We found high mean values of BUI and FFMC on the day of ignition, followed by a significant decrease on the next day. This is likely caused by precipitation during thunderstorm activity and/or the change to cooler, unsettled weather conditions. The missing significance of BUI in subset 1 may be a result of the relatively small subset size. Dowdy and Mills (2012) point to the fact that dry fuel moisture conditions are not primarily important for ignition, but for the survival of a fire. At least for our study area in the Alpine region we can support the finding in a way that high FWI values at the time of ignition, and dry conditions respectively, are relevant for the outbreak of lightning fires.

We found significant lower precipitation amounts in subset 1 compared to the random dataset of subset 3. Therefore precipitation during or after lightning strikes influences the ignition probability, likely because of changing fuel moisture. The missing difference in mean rain amounts at the impact points of positive/negative lightnings indicates that varying precipitation strength has no influence on lightning polarity of CG-flashes. Xu et al. (2013) pointed out that 50% of lightnings occur within heavy-rain cores, still 20% are distributed in light-rain areas. We assume that lightnings occurring outside of the heaviest precipitation are more likely to ignite forest fires. Yet we couldn't distinguish between convective, near-time precipitation during the thunderstorm event and possible following rain some hours later, as only 24 h precipitation data was available.

Interestingly subset 1 was also associated with significant less precipitation than subset 2. Furthermore subset 2 and subset 3 showed no differences in mean precipitation. This may hint at the fact, that several lightnings in subset 2 were wrongly interpreted as lightnings that ignited a fire.

FFMC rose quickly before the fire, stayed high for several days and increased again on day +2. This distribution shows the sensitivity of the FFMC regarding the occurrence of precipitation and short periods of dryer conditions (Wastl et al., 2013). BUI showed a gradual increase before the fire and the highest values on day −1 and day 0. After a clear drop on day +1 constant lower or even slightly declining values were observed, indicating a change to cooler and wetter conditions, which is not unusual in Austrian summers after some days of heat.

Our study showed that BUI is a better predictor for lightning fire ignition than FFMC. The steady increase until the day of ignition is a good indicator for ignition probability, while FFMC stayed high for several days without lightning fire occurrence. In several other studies DMC from the Canadian FWI was used to predict lighting fires (e.g. Anderson, 2002; Nieto et al., 2012; Reineking et al., 2010; Wotton and Martell, 2005). The BUI comprises the duff moisture code (DMC) and drought code (DC), indicating the dryness of all deep layer fuels. Arpaci et al. (2013) have shown the good overall performance of BUI for fire prediction in Austria. We assume that the findings of our current study confirm this result also for lightning fires.

Dry thunderstorms, described as main igniter of forest fires in other parts of the world (Rorig et al., 2007), seem to be rare events in Austria. Lower precipitation did not lead to a larger burned area. This is in contrast to other studies (Aldersley et al., 2011; Littell et al., 2009; Nash and Johnson, 1996; Wendler et al., 2011). One reason for this discrepancy may be the early detection of forest fires in Austria, normally minutes after outbreak. Number and density of fire brigades in Austria is very high – with more than 4.800 volunteer fire brigades on 80.000 square kilometers. In general fire fighters attack the fire within 30 min after alerting, also in remote areas. Another reason for the missing correlation may be the small scaled forest structure in Austria. More than 50% of the Austrian forests are managed by private small scale forest owners, with an average of around nine hectares (Austrian Forest Inventory 2007/2009). This leads to a forest structure consisting of quickly changing species compositions, age classes and numerous forest roads. Altogether this may inhibit rapid fire progression, even under conducive fuel and meteorological conditions.

Considering all our results we assume that i) the significant higher amount of positive lightnings that ignite wildfires is due to a higher chance of LCC and ii) the critical factor for lightning fire ignition is not lightning polarity, but dry conditions (low fuel moisture respectively) at the impact point. The verification of the assumed importance of LCC needs video observations of lightnings that ignite fires – a challenging and time consuming approach that was not possible during our study.

4.3. Impact of lightning fires

Forest fires in Austria play no major role compared to the damages and costs by other natural disturbances (e.g. storm, bark beetles). However, they might become more important regarding expected impacts of climate change and socioeconomic changes (Arndt et al., 2013; Badeck et al., 2003; Barriopedro et al., 2011; Moreira et al., 2011; Seidl et al., 2014; Valese et al., 2014; Zumbrunnen et al., 2012). The yearly distribution of forest fire frequency, intensity, size, pattern, season and severity in Austria depends on local weather conditions. These conditions are highly variable within the Alpine region, locally and temporally and during the whole year.

The mean burned area in Austria for all anthropogenic fires in the study period is with 0,35 ha almost similar to lightning fires. This is in contrast to other countries with a high percentage of lightning fires (e.g. Canada), where lightning fires normally are larger (Flannigan and Wotton, 1991; Wotton and Martell, 2005). However, the small scaled forest structure and dense network of fire brigades seem to inhibit most emerging fires, independent of the cause.

No connection could be found between lightning polarity and burned area size. Higher BUI values on ignition day led to higher burned area sizes, yet this tendency was not significant. A larger dataset may lighten up this picture as other studies found a clearer correlation between higher FWI values and burned area sizes (e.g. Carvalho et al., 2008; Flannigan et al., 2005).

Time analysis showed that forest fires during daytime have the tendency to grow larger than those at night. It seems likely that dryer and windier conditions during sunshine hours have a greater positive effect on the burned area size than the difficulties of fire-fighting at night.

Like in other regions of the temperate climate zone most forest fires in Austria occur in conifer stands which comprise 67% of forest cover (Aleksic et al., 2009; Moser et al., 2010; Oettel, 2012; Vacik et al., 2011). We found a similar picture for lightning fires of which 98% occurred in pure coniferous or mixed forests and only 2% in deciduous stands – mainly beech, which is not as fire prone as the other affected tree species, has less burnable litter and in general more and wetter understory vegetation. Pines were nearly four times more often affected by lightning fires compared to the natural distribution in Austria (22% vs. 6%). As pines are generally seen as fire adapted species (e.g. Verkaik and Espelta, 2006) we assume that southerly exposition of pine stands, dryer fuel conditions and highly flammable needles on the ground led to this finding.

Southern slopes are assumed to be more vulnerable regarding the occurrence of forest fires (Beaty and Taylor, 2001; Gavin et al., 2003). The analysis of exposition and number of lightning fires revealed no significant differences, although fires on SE to W slopes were more frequent. Exposition and burned area size showed no significant trend, however fires on SE to W slopes were larger in size. This is in line with previous findings (Vacik et al., 2011).

Most lightning fires in this study occurred at an altitude around 1000 m above sea level, were rare below 500 m and missing above 2300m. This pattern can be partly explained by the low amount of forests below 500 m and the natural timber line in Austria that runs between 1800 m and 2300 m. It has also to be mentioned that thunderstorm activity is higher and more intense in the mountainous regions of Austria. More detailed information on descriptive lightning fire characteristics in Austria can be found in Müller et al. (2013).

4.4. Connecting lightnings and forest fire

Our study is based on the assumption that connecting single forest fires with single lightnings is viable. This was successfully done by Larjavaara et al. (2005) as well. However, several uncertainties have to be considered. Although the location of forest fire events in Austria is accurate compared to databases from other countries, it can be a source for misinterpretation regarding exposition or altitude. The mean localization uncertainty for all fires is below 1500 m in recent years. Because lightning fires often occur in remoted areas, localization is more difficult and leads to a mean error of 1700 m for natural fires. Yet this uncertainty is not considered to have an impact on our main results.

Another point is the location of lightnings. The localization error of ALDIS has decreased since 1999 from below 500 m (median) to around 100 m in recent years (Schulz, 2015). In combination with the uncertainty related to the fire location, the total mean localization error in our study ranges around 2 km. Compared to other studies from the last years which were operating with data grids of 3–10 km (Dowdy and Mills, 2012; Nieto et al., 2012; Vecín-Arias et al., 2016) our findings are indeed a good approximation.

The used weather model INCA has a spatial and temporal resolution of 1 km and 1 h respectively. The calculated meteorological data is derived from Austrian weather stations, satellite data and precipitation radar. Topography was included to anticipate local phenomena like small scaled valley conditions. It seems that temperature interpolation works well on the 1 km grid, while calculation of precipitation on the same resolution level still contains errors, especially in the mountainous regions. Hence the calculated FWI and precipitation data for this study may show an inconsistent picture in some cases. A larger dataset will allow to confirm our findings in the future.

Finally the methodology used to identify lightning induced forest fires and igniting lightnings in particular can be criticized. While we are quite confident about the selection of those cases, where a good correlation exists between i) presuming lightning as cause, ii) single, nearby lightning events and iii) low location uncertainty (found in subset 1), lightnings in subset 2 may contain several strays which distorted the real distribution of lightnings that ignited wildfires. Also, our relative small number of cases may have caused an image that does not depict the truth. Therefore it is planned to continue our lightning fire study when a larger dataset is available.

Acknowledgements

This research has been conducted partly within the frame of the Austrian Forest Research Initiative II (AFFRI 2), which is funded by the Federal Ministry of Agriculture, Forestry, Environment and Water Management and the federal states. We want to thank Dr. Gerhard Diendorfer from ALDIS, Prof. Dr. Herbert Formayer and MSc. David Leidinger from the Institute of Silviculture, MSc. Alexander Arpaci from UBIMET, and the Central Institute of Meteorology and Geodynamics (ZAMG) for their support in providing the data and fire weather indices for the coordinates of the analyzed lightnings and forest fires. We also want to thank Prof. Dr. Rupert Seidl for reviewing our manuscript and his constructive feedback.

References

Austrian Lightning Detection and Information System (ALDIS), 2009. Lightning Statistics Austria, http://www.aldis.at. (Accessed 12 November 2015).
Aldersley, A., Murray, S.J., Cornell, S.E., 2011. Global and regional analysis of climate and human drivers of wildfire. Sci. Total Environ. 409 (18), 3472–3481.
Aleksic, P., Krstic, M., Jancic, G., 2009. Forest fires – ecological and economic problem in Serbia. Bot. Serb. 33 (2), 169–176.
Anderson, K., 2002. A model to predict lightning-caused fire occurrences. Int. J. Wildland Fire 11 (3–4), 163–172.
Arndt, N., Vacik, H., Koch, V., Arpaci, A., Gossow, H., 2013. Modelling human-caused forest fire ignition for assessing forest fire danger in Austria. iForest 6, 315–332.
Arpaci, A., Eastaugh, C.S., Vacik, H., 2013. Selecting the best performing fire weather indices for Austrian ecoregions. Theor. Appl. Climatol. 114, 393–406, http://dx.doi.org/10.1007/s00704-013-0839-7.
Badeck, F.W., Lasch, P., Hauf, Y., Rock, J., Suckow, F., Thonicke, K., 2003. Steigendes klimatisches Waldbrandrisiko. In: Allgemeine Forstzeitschrift für Wald- und Forstwirtschaft (AFZ – DerWald). Deutscher Landwirtschaftsverlag GmbH, Hannover.
Barriopedro, D., Fischer, E.M., Luterbacher, J., Trigo, R.M., García-Herrera, R., 2011. The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of europe. Sci. Express 332 (6026), 220–224, http://dx.doi.org/10.1126/science.1201224.
Beaty, R.M., Taylor, A.H., 2001. Spatial and temporal variation of fire regimes in a mixed conifer forest landscape, Southern Cascades, California, USA. J. Biogeogr., 955–966.
Biagi, Ch.J., Cummins, K.L., Kehoe, K.E., Krider, Ph.E., 2007. National Lightning Detection Network (NLDN) performance in southern Arizona, Texas and Oklahoma in 2003–2004. J. Geophys. Res. 112, D05208.
Carvalho, A., Flannigan, M.D., Logan, K., Miranda, A.I., Borrego, C., 2008. Fire activity in Portugal and its relationship to weather and the Canadian Fire Weather Index System. Int. J. Wildland Fire 17 (3), 328–338.
Castedo-Dorado, F., Rodriguez-Perez, J.R., Marcos-Menendez, J.L., Alvarez-Taboada, M.F., 2011. Modelling the probability of lightning-induced forest fire occurrence in the province of León (NW Spain). For. Syst. 20 (1), 95–107.
Chen, F., Du, Y., Niu, S., Zhao, J., 2015. Modeling forest lightning fire occurrence in the Daxinganling mountains of northeastern China with MAXENT. Forests, 1422–1438, http://dx.doi.org/10.3390/f6051422.
Chisholm, A.J., Renick, J.H., 1972. The kinematics of multicell and supercell Alberta hailstorms. In: Research Council of Alberta Hail Studies, Report No. 72 -2., pp. 24–31.
Conedera, M., Cesti, G., Pezzatti, G.B., Zumbrunnen, T., Spinedi, F., 2006. Lightning induced fires in the Alpine Region: an increasing problem. In: V International Conference on Forest Fire Research, Coimbra, Portugal.
Dankers, R., Hiederer, R., 2008. Extreme Temperature and Precipitation in Europe: Analysis of a High-Resolution Climate Change Scenario. Office for Official Publications of the European Communities Luxembourg, ISSN 1018-5593, EUR 23291 EN.
De Angelis, A., Ricotta, C., Conedera, M., Pezzatti, G.B., 2015. Modelling the meteorological forest fire niche in heterogeneous pyrologic conditions. PLoS One 10 (2), e0116875, http://dx.doi.org/10.1371/journal.pone.0116875.
De Souza, P.E., Pinto Jr, O., Pinto, I.R.C.A., Ferreira, N.J., dos Santos, A.F., 2009. The intracloud/cloud-to-ground lightning ratio in Southeastern Brazil. Atmos. Res. 91 (2–4), 491–499.
Diendorfer, G., 2007. Lightning location systems (LLS). In: IX International Symposium on Lightning Protection, Foz do Iguaçu, Brazil.
Dowdy, A.J., Mills, G.A., 2012. Atmospheric and fuel moisture characteristics associated with lightning-attributed fires. J. Appl. Meteor. Climatol. 51, 2025–2037.
Eastaugh, C.S., Vacik, H., 2012. Fire size/frequency modelling as a means of assessing wildfire database reliability. Austrian J. For. Sci. 129 (3–4), 228–247.
Fischer, E.M., Schär, C., 2010. Consistent geographical patterns of changes in high-impact European heatwaves. Nat. Geosci. 3, http://dx.doi.org/10.1038/NGE0866.
Flannigan, M.D., Wotton, B.M., 1991. Lightning-ignited forest fires in northwestern Ontario. Can. J. For. Res. 21, 277–287.
Flannigan, M.D., Logan, K.A., Amiro, B.D., Skinner, W.R., Stocks, B.J., 2005. Future area burned in Canada. Clim. Change 72 (1–2), 1–16.
Fuquay, D.M., 1980. Lightning that ignites forest fires. In: Proceedings Sixth Conference on Fire and Forest Meteorology, Seattle, WA, pp. 109–112.
Gavin, D.G., Brubaker, L.B., Lertzman, K.P., 2003. Holocene fire history of a coastal temperate rain forest based on soil charcoal radiocarbon dates. Ecology 84 (1), 186–201.
Höller, H., Betz, H.D., Schmidt, K., Calheiros, R.V., May, P., Houngninou, E., Scialom, G., 2009. Lightning characteristics observed by a VLF/LF lightning detection

network (LINET) in Brazil Australia, Africa and Germany. Atmos. Chem. Phys. 9 (20), 7795–7824.
Hall, B.L., Brown, T.J., 2006. Climatology of positive polarity lightnings and multiplicity and their relation to natural wildfire ignitions. In: 19th International Lightning Detection Conference, Tucson, Arizona, USA.
Kourtz, P.H., Todd, J.B., 1991. Predicting the daily occurrence of lightning-caused forest fires. In: Forestry Canada. Petawawa National Forestry Institute, Chalk River, Ontario, Information Report PI-X-112. 18 p.
Larjavaara, M., Pennanen, J., Tuomi, T.J., 2005. Lightning that ignites forest fires in Finland. Agric. For. Meteorol. 132 (3–4), 171–180, http://dx.doi.org/10.1016/j.agrformet.2005.07.005.
Lautenschlager, M., Keuler, K., Wunram, C., Keup-Thiel, E., Schubert, M., Will, A., Rockel, B., Boehm, U., 2009. Climate Simulation with CLM, Scenario A1 B Run No.2, Data Stream 3: European Region MPI-M/MaD. World Data Center for Climate.
Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., Seidl, R., Delzon, S., Corona, P., Kolström, M., Lexer, M.J., Marchetti, M., 2010. Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. For. Ecol. Manag. 259, 698–709.
Littell, J.S., McKenzie, D., Peterson, D.L., Westerling, A.L., 2009. Climate and wildfire area burned in western U.S. ecoprovinces 1916–2003. Ecol. Appl. 19, 1003–1021, http://dx.doi.org/10.1890/07-1183.1.
Müller, M.M., Vacik, H., Diendorfer, G., Arpaci, A., Formayer, H., Gossow, H., 2013. Analysis of lightning-induced forest fires in Austria. Theor. Appl. Climatol. 111 (1–2), 183–193.
Müller, M.M., Vacik, H., Valese, E., 2015. Anomalies of the austrian forest fire regime in comparison with other alpine countries: a research note. Forests 6 (4), 903–913.
Müller, M.M., 2010. Analysis of Forest Fires Ignited by Lightning in Austria –Master Thesis. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna.
Matulla, C., Formayer, H., Haas, P., Kromp-Kolb, H., 2004. Possible climate trends in Austria in the first half of the 21 st century. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 56 (1–2), 1–9.
Moreira, F., Viedma, O., Arianoutsou, M., Curt, T., Koutsias, N., Rigolot, E., Barbati, A., Corona, P., Vaz, P., Xanthopoulus, G., Mouillot, F., Bilgili, E., 2011. Landscape –wildfire interactions in southern Europe: implications for landscape management. J. Environ. Manag. 92, 2389–2402.
Moser, B., Temperli, C., Schneiter, G., Wohlgemuth, T., 2010. Potential shift in tree species composition after interaction of fire and drought in the Central Alps. Eur. J. For. Res. 129, 625–633.
Nash, C.H., Johnson, E.A., 1996. Synoptic climatology of lightning-caused forest fires in subalpine and boreal forests. Can. J. For. Res. 26 (10), 1859–1874, http://dx.doi.org/10.1139/x26-211.
Nieto, H., Aguado, I., García, M., Chuvieco, E., 2012. Lightning-caused fires in Central Spain: development of a probability model of occurrence for two Spanish regions. Agric. For. Meteorol. 162–163, 35–43.
Oettel, J.K., 2012. Forest Fires and Fuel Characteristics of Tyrol (Based on Case Studies) –Master Thesis. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna.
Orville, R.E., Silver, A.C., 1997. Lightning ground lightning density in the contiguous United States: 1992––95. Monthly Weather Rev. 125, 631–638.
Outcalt, K.W., 2008. Lightning, fire and longleaf pine: using natural disturbance to guide management. For. Ecol. Manag. 255, 3351–3359.
Pineda, N., Montanyà, J., van der Velde, O.A., 2014. Characteristics of lightning related to wildfire ignitions in Catalonia. Atmos. Res. 135–136, 380–387.
Podur, J., Martell, D.L., Csillag, F., 2003. Spatial patterns of lightning caused forest fires in Ontario, 1976–1998. Ecol. Modell. 164, 1–20.
Price, C., 2009. Will a drier climate result in more lightning? Atmos. Res. 91 (2–4), 479–484.
Rakov, V.A., Huffines, G.R., 2003. Return-sroke multiplicity of negative cloud-to-ground lightning lightnings. J. Appl. Meteorol. 42 (10), 1455–1462.
Rakov, V.A., Uman, M.A., 1990. Long continuing current in negative lightning ground lightnings. J. Geophys. Res. 95 (D5), 5455–5470, http://dx.doi.org/10.1029/JD095iD05p05455.
Reeve, N., Toumi, R., 1999. Lightning activity as an indicator of climate change. Q. J. R. Meteorol. Soc. 125 (555 (part A)), 893–903.
Reineking, B., Weibel, P., Conedera, M., Bugmann, H., 2010. Environmental determinants of lightning- v. human-induced forest fire ignitions differ in a temperate mountain region of Switzerland. Int. J. Wildland Fire 19 (5), 541–557.
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 346 (6211), 851–854, http://dx.doi.org/10.1126/science.1259100.
Rorig, M.L., Ferguson, S.A., 1999. Characteristics of lightning and wildland fire ignition in the Pacific northwest. J. Appl. Meteorol. 38, 1565–1575.
Rorig, M.L., McKay, S.J., Ferguson, S.A., 2007. Model-generated predictions of dry thunderstorm potential. J. Appl. Meteorol. Climatol. 46, 605–614.
Saba, M.M.F., Schulz, W., Warner, T.A., Campos, L.Z.S., Schumann, C., Krider, E.P., Cummins, K.L., Orville, R.E., 2010. High-speed video observations of positive lightning lightnings to ground. J. Geophys. Res. 115, D24201, http://dx.doi.org/10.1029/2010JD014330.
Schulz, W., Cummins, K.L., Diendorfer, G., Dorninger, M., 2005. Cloud-to-ground lightning in Austria: a 10-year study using data from a lightning location system. J. Geophys. Res. 110 (D9), http://dx.doi.org/10.1029/2004jd005332.
Schulz, W., 2015. Location accuracy improvements of the Austrian lightning location system during the last 10 years. In: 9th Asia-Pacific International Conference on Lightning (APL), Nagoya, Japan.
Schumann, C., Saba, M.M.F., da Silva, R.B.G., Schulz, W., 2013. Electric fields changes produced by positives cloud-to-ground lightning lightnings. J. Atmos. Sol. Terr. Phys. 92, 37–42.
Seidl, R., Schelhaas, M.J., Rammer, W., Verkerk, P.J., 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. Nat. Clim. Change 4, 806–810, http://dx.doi.org/10.1038/nclimate2318.
Stocks, B.J., Mason, J.A., Todd, J.B., Bosch, E.M., Wotton, B.M., Amiro, B.D., Flannigan, M.D., Hirsch, K.G., Logan, K.A., Martell, D.L., Skinner, W.R., 2002. Large forest fires in Canada, 1959–1997. J. Geophys. Res. 107, 8149, http://dx.doi.org/10.1029/2001JD000484.
Vacik, H., Arndt, N., Arpaci, A., Koch, V., Müller, M.M., Gossow, H., 2011. Characterisation of forest fires in Austria. Austrian J. For. Sci. 128 (1), 1–32.
Valese, E., Conedera, M., Held, A.C., Ascoli, D., 2014. Fire, humans and landscape in the European Alpine region during the Holocene. Anthropocene 6, 63–74.
Valese, E., 2007. Wildland fires in the Alpine Region of Italy: what's old, what's new What's next? Int. For. Fire News IFFN 38.
Van Wagner, C.E., 1987. Development and structure of the Canadian forest fire weather index system. In: Forestry Technical Report 35. Canadian Forestry Service, Headquarters, Ottawa, 35 p.
Vecín-Arias, D., Castedo-Dorado, F., Ordóñez, C., Rodríguez-Pérez, J.R., 2016. Biophysical and lightning characteristics drive lightning-induced fire occurrence in the central plateau of the Iberian Peninsula. Agric. For. Meteorol. 225, 36–47.
Verkaik, I., Espelta, J.M., 2006. Post-fire regeneration thinning, cone production, serotiny and regeneration age in Pinus halepensis. For. Ecol. Manag. 231 (1–3), 155–163.
Wastl, C., Schunk, C., Lüpke, M., Cocca, G., Conedera, M., Valese, E., Menzel, A., 2013. Large-scale weather types, forest fire danger, and wildfire occurrence in the Alps. Agric. For. Meteorol. 168, 15–25.
Wendler, G., Conner, J., Moore, B., Shulski, M., Stuefer, M., 2011. Climatology of Alaskan wildfires with special emphasis on the extreme year of 2004. Theor. Appl. Climatol. 104, 459–472.
Wotton, B.M., Martell, D.L., 2005. A lightning fire occurrence model for Ontario. Can. J. For. Res. 35 (6), 1389–1401.
Xu, W., Adler, R.F., Wang, N., 2013. Improving geostationary satellite rainfall estimates using lightning observations: underlying lightning–rainfall–cloud relationships. J. Appl. Meteorol. Climatol. 52, 213–229.
ZAMG, 2016. Central Institute of Meteorology and Geodynamics Vienna, Monatsrückblicke. Available online: http://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/klima-aktuell/monatsrueckblick (Accessed 28 January 2016).
Zumbrunnen, T., Menéndez, P., Bugmann, H., Conedera, M., Gimmi, U., Bürgi, M., 2012. Human impacts on fire occurrence: a case study of hundred years of forest fires in a dry alpine valley in Switzerland. Reg. Environ. Change 12 (4), 935–949.

Anhang 5: Towards an integrated forest fire danger assessment system for the European Alps

Müller M.M., Vilà-Vilardell L., Vacik H., 2020. Towards an integrated forest fire danger assessment system for the European Alps. Ecological Informatics, 60, 101151, ISSN 1574-9541.

Ecological Informatics 60 (2020) 101151

Contents lists available at ScienceDirect

Ecological Informatics

journal homepage: www.elsevier.com/locate/ecolinf

Towards an integrated forest fire danger assessment system for the European Alps

Mortimer M. Müller[a,*], Lena Vilà-Vilardell[b], Harald Vacik[a]

[a] University of Natural Resources and Life Sciences, Department of Forest- and Soil Sciences, Institute of Silviculture, Peter Jordan Str. 82, 1190 Vienna, Austria. 2 Joint Research Unit CTFC – AGROTECNIO, Ctra de St. Llorenç de Morunys, km 2, 25280 Solsona, Spain.
[b] Joint Research Unit CTFC – AGROTECNIO, Ctra de St. Llorenç de Morunys, km 2, 25280 Solsona, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:
Alpine region
Wildfires
Forest fires
Fire danger assessment
Integrated fire danger

ABSTRACT

In recent years the European Alps experienced higher temperatures, more heatwaves, and more severe wildfires. Improving fire danger assessment for these sensitive ecosystems is a core element of future-oriented fire management strategies in the face of climate change. While meteorological systems are common to predict fire danger in many countries, other factors such as vegetation, topography, lightning occurrence and human impact are generally not considered. We introduce an Integrated forest Fire Danger assessment System (IFDS) for the Alpine country Austria that includes i) daily fire weather index data, ii) a countrywide hazard map for fire ignition through human activities, iii) a lightning fire hazard map, iv) a high-resolution fuel type map, and v) a topography-based estimation of the fire hazard. The system was implemented as an online Web-GIS prototype. The objectives of this contribution are to describe the conceptual approach for the IFDS, to understand the predictive power of different data layers in fire danger rating and to identify potential improvements, especially regarding the role of vegetation and human influence. A first validation was done with 2018–2019 forest fire data. Some variants of the IFDS produced better overall prediction accuracy regarding forest fire ignitions compared to common fire weather indices. They typically performed relatively better when considering the number of false alerts as well. However, correlation between larger burned areas and higher index values was low. Conclusions for the implementation of the IFDS in other Alpine countries are discussed and recommendations for necessary and reliable datasets at high resolution are given.

1. Introduction

In recent years, major wildfires in Australia, Brazil, California and Siberia provided evidence that wildfire occurrence and severity are increasing as the climate changes (Abatzoglou and Williams, 2016; Mariana et al., 2018). Several studies and extraordinary fire events, like the simultaneous outbreak of large forest fires in the Italian region of Piemonte in October 2017, demonstrated that wildfires are also an urgent issue in the European Alps and that frequency and severity will likely increase in the future (Matulla et al., 2004; Moser et al., 2010; Müller et al., 2015; Valese et al., 2014; Wastl et al., 2013). The probability and intensity of forest fires are driven by higher temperatures in combination with longer drought periods, the change in forest management and a more intensive recreational use of forests (Aldersley et al., 2011; Dupire et al., 2019; Flannigan et al., 2005; Vacchiano et al., 2018; Zumbrunnen et al., 2012). Especially mountain protection forests on south-facing slopes are at risk. Forest fire impacts can lead to new avalanche-prone slopes, rockfall events, mudslides and soil erosion. In the future, costs of firefighting, restoration of forests and prevention measures may increase significantly. Many parts of the Alpine forests consist of spruce (*Picea abies* (L.) H. Karst.), a species that already suffers from climate change impacts and will become even more affected if temperature and dryness rise as expected (Lexer et al., 2014). Another major issue in fire prone regions is the Wildland-Urban-Interface (WUI), as wildfires affect urban areas more easily as a result of the usual practice of constructing buildings, infrastructure and homes near or in the vegetation zone (Fox et al., 2018; Sarricolea et al., 2020).

Besides the analysis of wildfire data, precaution measures, an adapted forest management, awareness raising and the collection of empirical data on fire behavior, an improved wildfire danger assessment is a key element to prevent severe fire impacts and high suppression costs for fires (De Angelis et al., 2015). In most European Alpine countries national weather services or authorities provide an assessment of fire danger at national level. There are also attempts to

* Corresponding author.
E-mail address: mortimer.mueller@boku.ac.at (M.M. Müller).

https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2020.101151
Received 17 April 2020; Received in revised form 29 June 2020; Accepted 29 June 2020
Available online 08 September 2020
1574-9541/ © 2020 The Authors. Published by Elsevier B.V. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (http://creativecommons.org/licenses/BY-NC-ND/4.0/).

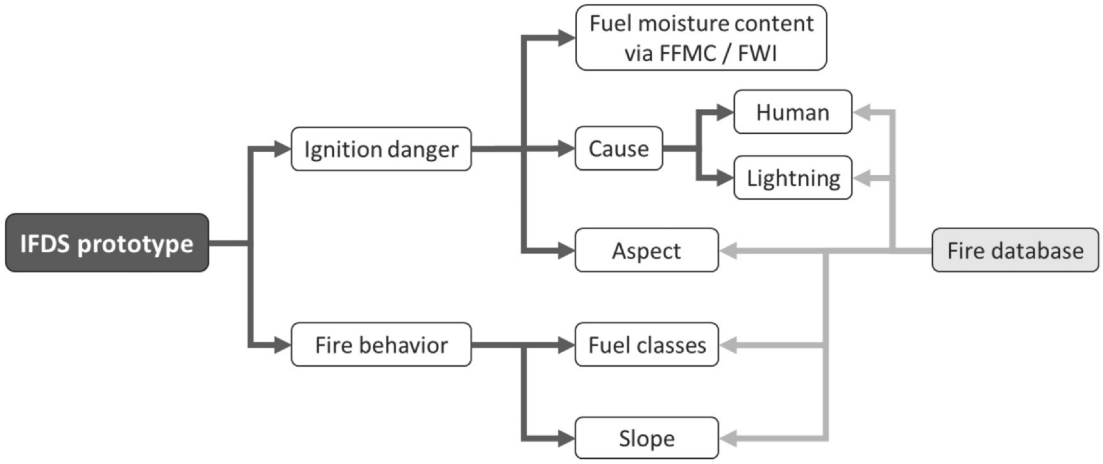


Fig. 1. Schematic illustration of the IFDS prototype and the included data layers.

integrate real-time weather data into GIS platforms to support fire brigades in fighting wildfires (Kalabokidis et al., 2013). Current used fire danger assessment systems in Europe and worldwide have in common that, in most cases, only meteorological data (fire weather indices respectively) are used to predict wildfire danger (De Angelis et al., 2015). There is a need to assess wildfire danger using an integrated and harmonized procedure at European level (Chuvieco et al., 2010; San-Miguel-Ayanz et al., 2018). This procedure has to consider multiple factors, e.g. fire weather, fire causes, vegetation and topography. In the present study, all these factors were considered to estimate fire danger.

For the European Alps, first attempts to include fire causes and potential vulnerabilities into fire danger assessment were done in Switzerland (Conedera et al., 2015). Fire danger modelling in such small-scaled landscapes like the European Alps encounters a number of difficulties. A spatial resolution of 1 km^2 is state of the art of regional weather models but might be insufficient when considering narrow valleys, mountain peaks, and the corresponding effects of temperature, precipitation, wind and solar irradiation on north and south-facing slopes (Carrega, 1995). This leads to an inadequate picture of estimated surface fuel moisture, the crucial part in fire ignition (Schunk et al., 2013; Zhou and Vacik, 2017). Moreover, (fine) fuel moisture is influenced by a number of factors. Besides atmospheric variables and topography, also tree species, vegetation type and structure can alter the fuel moisture (Carrega and Geronimo, 2007; Schunk et al., 2013).

Assessments of wildfire danger often do not consider potential triggers of fires: lightning strikes and human activities. While the direct or indirect anthropogenic influence accounts for nearly all wildfires in southern Europe, about 15% of annual forest fires in the Alps are the result of lightning strikes (Conedera et al., 2006; Müller et al., 2013; Müller and Vacik, 2017). All other wildfires in the Alpine region are most likely anthropogenic caused, often ignited by carelessly discarded cigarettes, pile fires out of control, hot ashes, flying sparks from trains, torn cables of power lines, traditional fires, or arson (Vacik et al., 2011).

Another critical point of currently used fire danger assessment models in the Alpine region is their inappropriate suitability for the winter season and early spring. South-facing slopes are snow-free earlier because of higher temperatures and stronger solar radiation. The fine organic matter from the last year (grass, litter) dries out faster than on north-facing slopes, increasing the probability for an earlier fire ignition in spring (Conedera et al., 2018; Maxwell et al., 2019). This phenomenon cannot be described by current fire danger indices such as the Canadian Fire Weather Index (FWI), as these indices are not intended to be used in the cold season (Van Wagner, 1987).

To overcome the presented issues and to capture all elements of forest fire ignition and fire behavior in a holistic way, the present study introduces an Integrated forest Fire Danger assessment System (IFDS) for the Alpine region. Austria, situated at the eastern border of the Alps, was chosen as case study region. The aim of this study is to i) understand the predictive power of the different datasets used and to ii) discuss potential data insufficiencies. We hypothesize that i) the IFDS has a better fire prediction accuracy than the stand-alone use of meteorological fire weather indices and ii) including the human factor further improves prediction quality.

In our study, we mainly refer to the term *forest fire*, which means an uncontrolled fire independent of size, cause and intensity, affecting forested area. Forest fires are the most relevant type of uncontrolled vegetation fires in the Northern Alps and are used synonym to *wildfires in forested areas*. The term *wildfire* includes all uncontrolled vegetation fires and is used in our study where appropriate. *Aspect* is used as a synonym for *topographical aspect*.

2. Methodological development of the IFDS

The conceptual approach of our IFDS prototype considers the combined use of factors that influence fire ignition danger and fire behavior according to Chuvieco et al. (2010) and San-Miguel-Ayanz et al. (2018). The used datasets and data layers included i) information on forest fire occurrence, retrieved from the Austrian wildfire database, ii) fire weather indices derived from meteorological data, iii) a spatial analysis on the human influence on fire ignition, iv) a lightning fire hazard map, v) an area-wide classification of vegetation to derive a fuel type map, and vi) a high-resolution topography map, where we extracted aspect and slope (Fig. 1). The different combination and weighting of these factors allowed the calculation of several model variants.

2.1. Wildfire database

An Austrian wildfire database was established within the activities of European (ALP FFIRS) and national (AFFRI, FIRIA) funded projects, as no homogenized and nationwide database on vegetation fire occurrence existed (Vacik et al., 2011). The database now contains more than 6500 wildfire incidents, including 5000 forest fires, with an almost complete documentation of 1300 forest fires larger than 0.1 ha since 1993 (Müller et al., 2020). The mean localization error for all recorded forest fires in the Austrian fire database is below 1500 m. Additional information on the recorded fires includes totally burned area, affected tree species and forest type, fire causes, fire behavior, altitude, slope and topographical aspect at ignition point. All fire ignition points are georeferenced in WGS 84. The Austrian forest fire database was used as empirical basis to define the danger classes of the data layers on fire

weather, human influence, lightning induced fires, vegetation, aspect and slope. The data layers implemented in our IFDS were generated during different projects and in different years (Appendix A). Therefore, the respective forest fire records used differ in terms of accuracy and time span. For the IFDS validation, forest fire data of 2018 and 2019 were used.

2.2. Meteorological data

Weather conditions influence fire ignition and fire behavior. The Canadian FWI as predictor of both fire ignition and fire behavior is successfully implemented by several European countries, including the European Forest Fire Information System (EFFIS) hosted by the Joint Research Center (JRC). It consists of several sub-indices, which describe the fuel moisture and wind dependent fire behavior. Arpaci et al. (2013) proved that the FWI and its sub-indices performed best regarding the prediction of forest fire occurrence in Austria compared to other fire weather indices and meteorological variables.

We used fuel moisture as the weather-related proxy for ignition danger (Schunk et al., 2013). In Austria, fire ignition is assumed to be more relevant than fire behavior. There are only few forest fires in Austria, about 200 per year, 95% of which burn less than one hectare and 85% even stay below 0.1 ha – a size, where forest fire behavior is not yet of great importance. Even a fire with a burned area of about ten hectares (which occurs on average every three years) is very small on a global scale. According to forest fire documentation, fire behavior in Austria depends more on vegetation and topography than on meteorological conditions (Vacik et al., 2011). Forest structure in Austria and in other Alpine regions is heterogeneous and often interrupted by forest roads, clear-cuts, alpine pastures or skiing slopes. This enables early and direct intervention and can prevent large fires, where fire behavior prediction is crucial for effective and safe firefighting and evacuation measures (Beck et al., 2002).

The Fine Fuel Moisture Code (FFMC), a sub-index of the FWI, shows better prediction results for fire ignitions than the FWI, also in Austria (Arpaci et al., 2013; Dowdy and Mills, 2012). Daily FFMC data are available since 2019. Therefore, we could use the FFMC as a basis for the calculations of the IFDS variants only in 2019. In 2018, fuel moisture in our model was depicted through the FWI.

The FWI and its sub-indices are estimated by the Austrian Central Institute of Meteorology and Geodynamics (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, ZAMG), using the INCA approach (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis). INCA provides short-term forecasts and analysis of temperature, relative air humidity, rainfall, and other parameters on a spatial resolution of 1 × 1 km nationwide (ZAMG, 2019). The model requires topographic information for a realistic description of the local weather conditions. However, as the resolution is limited to 1 × 1 km, effects of aspect or slope inclination cannot be depicted at a fine-scale. Wind is the most crucial factor regarding fire propagation (Chuvieco et al., 2010). Yet, there is no reliable high-resolution wind model for the mountainous region of Austria available that could be used to model fire behavior. Therefore, the factor wind was excluded in the current approach.

In our IFDS prototype, we defined the FWI and FFMC danger class thresholds based on the analysis of Austrian forest fire data from 2012 to 2018, literature review and expert judgements. Because of the poor performance of the Canadian FWI in late autumn, winter and early spring, thresholds for this index were modified using an expert-based approach to gain better prediction accuracy (Table 1). According to international standards, five danger classes were defined from 1 (very low) to 5 (very high). Lower thresholds were given to the lower danger classes and higher thresholds to the two highest danger classes, in order to record few forest fires in danger class 1 and to avoid a large-scale over-warning with high fire danger (Table 1).

Table 1
Canadian FWI, its sub-index FFMC and the corresponding thresholds of the danger classes used for the IFDS prototype.

	Very low (1)	Low (2)	Moderate (3)	High (4)	Very high (5)
FFMC	< 78	78 < 87	87 < 91	91 < 93	≥ 93
FWI (15.04–15.10)	< 5	5 < 10	10 < 20	20 < 40	≥ 50
FWI (16.10–14.04)	< 2,5	2,5 < 8	8 < 17	17 < 36	≥ 36

2.3. Human impact

Human activities are the most relevant ignition source of wildfires in Europe (Aldersley et al., 2011; Zumbrunnen et al., 2012). In Austria, 85% of all forest fires are anthropogenic caused (Vacik et al., 2011). Arndt et al. (2013) estimated human influence on fire ignition by studying the relationship between touristic activities, infrastructure, forestry and the spatial occurrence of forest fires from 1993 to 2009 using logistic regression. They identified 59 socio-economic variables, which were validated using different models and subsets of forest fire records. In the final model, the variables that significantly contributed to fire ignitions were railroads, forest roads, population density and hiking trail density together with agricultural and forest infrastructure. The authors could explain around 60% of the forest fires causes and prepared a fire hazard map for the whole of Austria at municipal level. This map was used as basis for the human data layer in our model (Appendix A).

2.4. Lightning fires

Lightning strikes are the only relevant natural cause of fire ignition in Europe (Conedera et al., 2006). In Austria, 15% of all forest fires are caused by lightning. During the summer months, the proportion can be up to 50% (Müller et al., 2013). After a validation procedure for lightning strikes that ignited forest fires in Austria from 1993 to 2012 (Müller et al., 2013), spatial lightning fire data was intersected with a high-resolution topographic map and a vegetation map (Albers, 2012; Grima, 2011). The parameters used for danger classification were altitude, slope inclination, aspect and vegetation type. Based on the distribution of lightning fires from 1993 to 2012, a static raster layer with danger classes from 1 to 5 at a spatial resolution of 100 × 100 m was compiled (Appendix B). The combination for the final lightning fire hazard map was done by equal weights (25% per parameter), as currently no studies on the importance of the different factors are available for Austrian conditions.

2.5. Vegetation

Vegetation type, amount, composition, structure and patchiness influence fire behavior (San-Miguel-Ayanz et al., 2018) and are referred to as fuel characteristics (combustible material). In Austria, there is no such fuel type classification available. In our IFDS model, we used a nationwide vegetation map of Austria as basis for the fuel classification. Input datasets were the Austrian National Forest Inventory (BFW 2002) and the Corinne land cover (CLC) map from 2006 with information about forest type (deciduous, coniferous, mixed stands dominated by deciduous or coniferous) and data on biomass load (low, moderate, high). Albers (2012) and Arpaci et al. (2011) provided a map with a spatial resolution of 100 × 100 m, where burnable fuels and non-burnable areas (high-mountainous, lakes, sealed surfaces) were displayed. All burnable fuels were classified into five danger classes according to fire occurrence in Austria from 1993 to 2010 and validated by a study in Tyrol (Oettel, 2012) and Carinthia (Grima, 2011). Agricultural land and meadows were defined as danger class 1. Pure deciduous forests, mixed forests dominated by deciduous trees and sparse

vegetation (e.g. alpine tree line, scattered high-altitude vegetation not mapped as forest) were classified as danger class 2. Danger classes 3 to 5 were assigned to coniferous forests, where pure coniferous forests with high fuel load were given danger class 5.

2.6. Topography

Topographical effects are not depicted in the FWI and FFMC calculations retrieved from ZAMG, but both aspect and slope are essential parameters for fire ignition danger and fire behavior assessment, respectively. Aspect and slope were derived from high-resolution topographic maps, available online at the open data center for Austria (https://www.data.gv.at). We resampled these data layers from their original spatial resolution of 10 × 10 m to 100 × 100 m, to match them with the rest of data layers in our IFDS.

Because of stronger solar radiation and higher temperatures, south-facing slopes are drier than northern ones. This leads to a lower fine fuel moisture content and therefore a higher ignition probability (Conedera et al., 2018; Maxwell et al., 2019). Fuel moisture also affects fire behavior, however, we assumed that its relevance in the Alpine region is higher for fire ignition danger (cf. Section 2.2). We classified the topographical aspect in five danger classes, based on forest fire data from 1993 to 2017. Most fires were recorded on south-facing slopes (danger class 5), followed by southwestern (4) and southeastern slopes (3). Western, northwestern, northeastern and eastern slopes were categorized as danger class 2. Northern slopes had the lowest share of forest fires; therefore, the danger class was defined as very low (1). We excluded all areas with a slope inclination of < 5° from the evaluation, as effects of solar radiation were assumed to be less relevant when slope inclination falls below this value.

Slope inclination contributes to fire behavior (Chuvieco et al., 2010; San-Miguel-Ayanz et al., 2018). It mainly influences the rate of spread and, thus, the burned area (Csontos and Cseresnyés, 2015). We converted slope inclination into fire danger classes based on Albers (2012) and the evaluation of fire records and burned areas from 1993 to 2017. Slopes with an inclination of 40–49° were assessed as danger class 5, since fire spreads faster on steeper slopes. Areas with an inclination of < 10° and ≥ 50° were categorized as danger class 1, because of the lower propagation danger in flat surfaces (Boboulos and Purvis, 2009) and the lack of continuous forest cover in very steep areas. An overview of the classifications and thresholds of the data layers vegetation, slope and aspect is given in Table 2.

2.7. Combination of factors

We combined the data layers shown in Fig. 1 using different weighting approaches (Table 3). This was done to test the sensitivity of the parameters / combinations in predicting forest fire danger. We based the weighting of the variants on results of previous studies in the Alpine context (Albers, 2012; Arpaci et al., 2013; Grima, 2011; Müller et al., 2013; Müller and Vacik, 2017). For variants 1 to 5, the weighting of the factor lightning was altered according to the season. From May 15th to September 15th, lightning was given high relevance (50%), as lightning strikes may ignite up to 50% of all forest fires in Austria during the summer months (Müller and Vacik, 2017). Since almost no lightning fires are documented for the rest of the year, the weighting of the factor lightning was set to zero, leading to 100% human cause. Variant 6 was seen as a control model with equal weighting for all parameters.

2.8. Technical implementation

The IFDS prototype runs on an Ubuntu server and is based on the Python web framework “Django”, which allows an easy management of large amounts of data. The frontend of the Web-GIS application is based on HTML, CSS and JavaScript. JavaScript with its libraries jQuery and Leaflet are used for the client-side functions of the website. The first is a library for the efficient processing of the so-called “document-object model”, i.e. the structure of the webpage, while the latter is used to display the map. Currently, the prototype is available on a password-protected server under https://www.waldbrand.at (“forestfire.at”) (Fig. 2).

With the exception of the FFMC / FWI values, which are daily updated and delivered to the server, the data layers used for the IFDS prototype are of static nature. All datasets are available at a spatial resolution of 100 × 100 m, leading to matrices of 5731 × 2951 cells to cover all of Austria. We converted the FFMC / FWI calculations from the original 1 × 1 km grid to the 100 × 100 m spatial resolution used in the IFDS prototype. For this purpose, the Python framework “Numpy” is used, which was developed especially for large arrays/matrices. For the provision of data layers and calculated indices, “Mapserver”, a free web map tool for converting raw map data into retrievable tiles, was used.

The experimental operation of the IFDS prototype started in spring 2018 and is an ongoing research project. Several improvements have already been implemented on the platform, e.g. a calendar feature, a function to generate new weighting variants, the georeferenced display of documented forest fires, and an analysis tool (Fig. 3).

3. Validation

3.1. Fire events and fire danger

For our analysis, we used 135 forest fires from the year 2018 (annual total 172) and 195 forest fires from 2019 (annual total 235). We did not include other vegetation fires in this study. We compared the number of correct predicted forest fires given by the FFMC, the FWI and all mentioned variants. A correct prediction was defined as a fire occurring in the danger classes 3 (moderate), 4 (high) or 5 (very high). A wrong prediction was defined as a fire occurring in the danger classes 1 (very low) or 2 (low). Since the mean localization error for documented forest fires is several hundred meters, and due to assumed inaccuracies in the data layers used, we decided to compare two approaches: First, we analyzed the 100 × 100 m grid cells where ignition points of forest fires were located. Second, we analyzed the 100 × 100 m grid cells together with the surrounding eight cells, leading to a 300 × 300 m data grid. This procedure was only implemented for the variants, not for the FWI and FFMC data layers with a spatial resolution of 1 × 1 km. The nine-cell approach, the results of which are shown in this paper, led to slightly better prediction results of the variants, likely because it smoothed existing data inaccuracies within single grid cells.

To account for the false alert rate, we counted the number of 100 × 100 m grid cells per danger class and variant on all fire days (days with at least one forest fire). We differentiated between the years 2018 and 2019, as the FWI was the basis for variant calculation in 2018

Table 2
Danger classes, classification and thresholds of the data layers vegetation, slope and aspect implemented in the IFDS prototype.

	Very low (1)	Low (2)	Moderate (3)	High (4)	Very high (5)
Vegetation	Agricultural land meadows	Deciduous / mixed sparse vegetation	Coniferous low fuel load	Coniferous med. Fuel load	Coniferous high fuel load
Slope	< 10° / ≥ 50°	10–19°	20–29°	30–39°	40–49°
Aspect	N	W / NW / NE / E	SE	SW	S

Table 3
Variants of the IFDS and weighting of fire weather indices and parameters according to the used data layers for the summer term 2019. The weighting is divided into Ignition danger (left) and Fire behavior (right). The numbers in bold in the respective left column indicate the weighting for Ignition danger / Fire behavior for the listed variant (row total = 100%). Ignition danger is composed of FFMC, Aspect and Cause (row total = 100%), whereby the cause is divided into Human and Lightning (row total = 100%). Fire behavior consists of Fuel classes and Slope (row total = 100%).

	Ignition danger						Fire behavior		
		FFMC	Aspect	**Cause**				Fuel classes	Slope
					Human	Lightning			
Variant 1	**80%**						**20%**		
		60c	20%	**20%**				75%	25%
					50%	50%			
Variant 2	**80%**						**20%**		
		30%	20%	**50%**				75%	25%
					50%	50%			
Variant 3	**90%**						**10%**		
		70%	20%	**10%**				75%	25%
					50%	50%			
Variant 4	**50%**						**50%**		
		60%	20%	**20%**				75%	25%
					50%	50%			
Variant 5	**100%**						**0%**		
		60%	25%	**15%**				0%	0%
					50%	50%			
Variant 6	**50%**						**50%**		
		34%	33%	**33%**				50%	50%
					50%	50%			

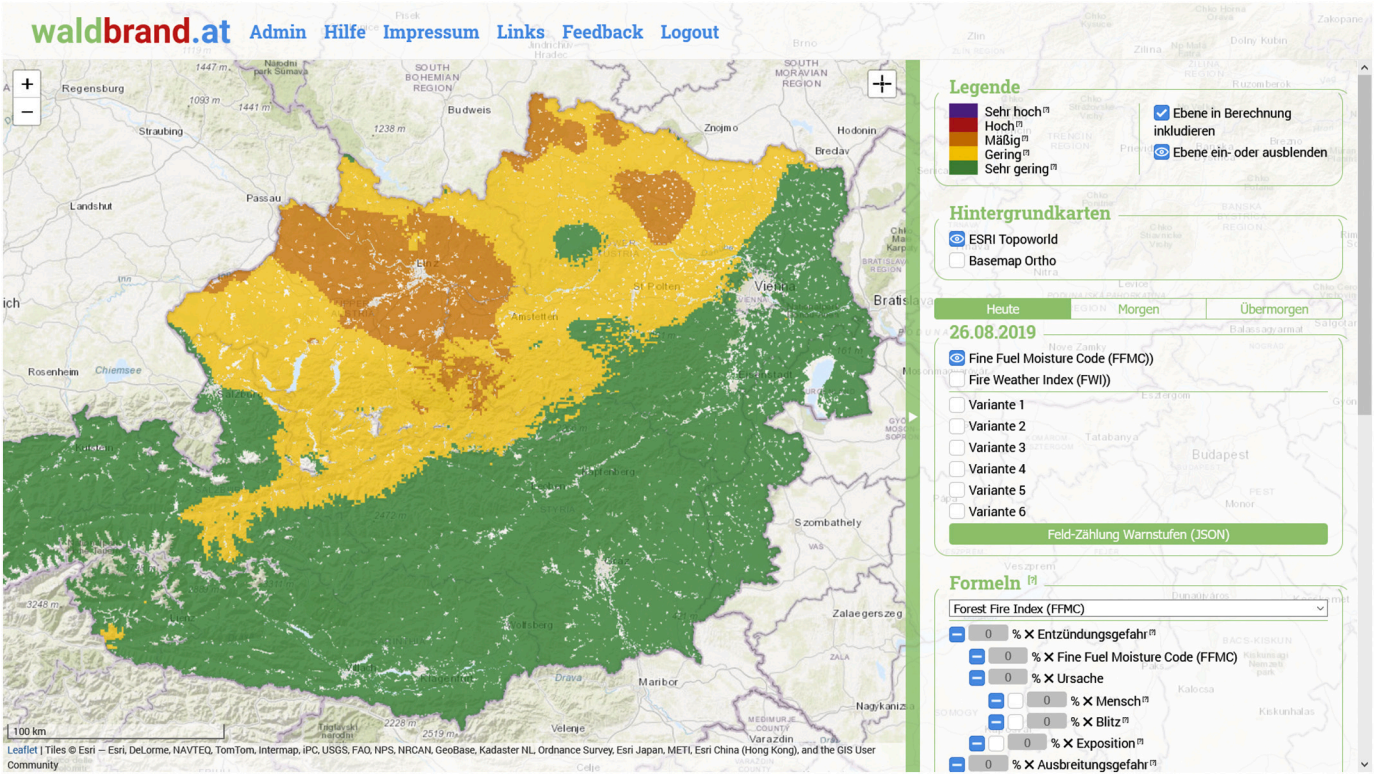


Fig. 2. Screenshot of the Web-GIS application. The colored map represents the FFMC danger classes for August 26, 2019 in the north of Austria. Green colored fields mean a “very low” (1) fire danger, yellow “low” (2) and orange “moderate” (3). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)

and the FFMC was the underlying index in 2019. All cells with a danger class of 3 to 5 were evaluated as false alerts. Data grid cells above timberline and in non-burnable areas were excluded from this investigation.

We applied Pearson's chi square tests to test for significant differences in the performance of the FWI, the FFMC and the variants of the IFDS. We applied linear regressions to analyze the relationship between burned area and the classification of forest fire cases into danger classes according to the different variants. For the linear regressions, we only used forest fires with a burned area greater than or equal to 0.1 ha (n = 22 in 2018; n = 26 in 2019), to filter out the numerous small fires.

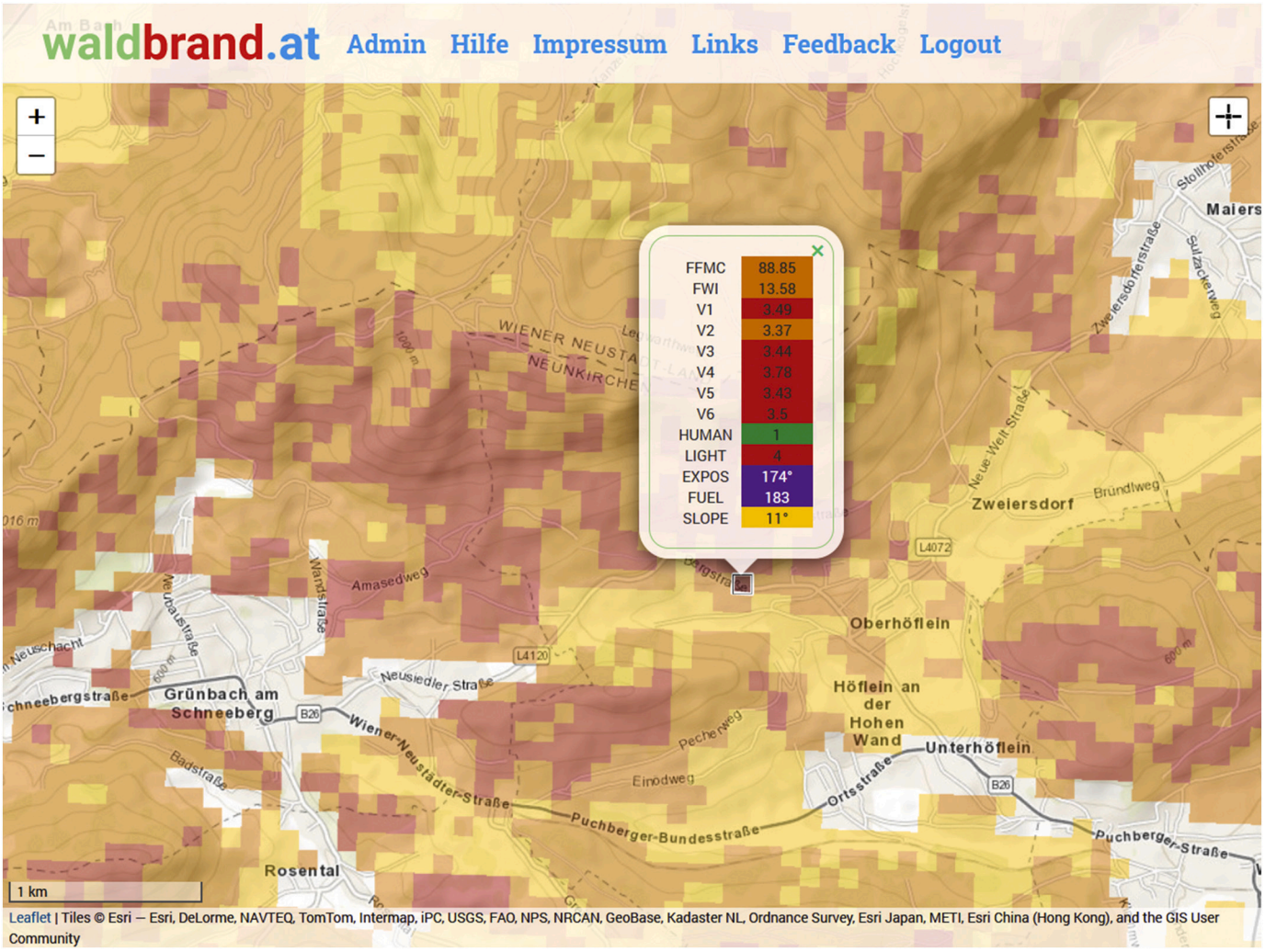


Fig. 3. Screenshot of the Web-GIS prototype for weighting variant 1 on August 19th, 2019. The implemented analysis tool highlights the values of all available data layers for the selected 100 × 100 m grid cell and the selected day (box).

3.2. Findings

We identified clear differences between the performance of the FWI, the FFMC and the IFDS variants. In 2018, the stand-alone FWI had a correct prediction rate of 37% and a false alert rate of 30% (Fig. 4). In other words, by using the FWI, 37% of all forest fires were recorded in grid cells assessed with the danger classes moderate (3), high (4) or very high (5) and 63% were assigned to cells with low (2) or very low (1) danger classes. On the other hand, 30% of all grid cells on fire days were assigned to the danger classes 3–5 without occurring fires.

In 2018, Variant 4 showed the best absolute performance with 50% correct predicted forest fires. This was significantly better ($p < 0.05$) than the FWI, variant 2 and variant 6. Variant 4 also had a lower false alert rate of 16%. Variant 2 performed worst with only 34% correct predictions, but also had a low false alert rate of 16%.

In 2019, the picture was different (Fig. 5). Pearson's chi square results showed that the performance of all variants was significantly better than the FWI ($p < 0.001$) while only variant 4 had a significantly better performance than the FFMC ($p < 0.01$). The stand-alone FWI had the worst correct prediction rate (32%) with 35% false alert rate. The stand-alone FFMC (used for variant calculations in 2019) performed better with 42% correct predicted forest fires and 36% false alert rate. The highest correct prediction rate was again found for variant 4 (58%) with a false alert rate of 28%. Variant 6 showed the second highest correct prediction rate (52%) and also the lowest false alert rate (26%). Variant 2 achieved 51% correctly predicted fires and had a false alert rate of 27%.

No correlations could be found between the burned forest area and the calculated values of the fire weather indices / variants. Higher values of some variants slightly correlated to larger burned areas when applying the nine-cell-approach, however correlation factors were very low (Appendix C).

4. Discussion

4.1. Validation study

With the first version of our IFDS prototype and the preliminary weighting variants, we were able to produce significantly better prediction results than the stand-alone use of the common Canadian fire weather index FWI and its sub-index, the FFMC. Variant 4 performed the best for both years with a possible correct forest fire prediction rate of up to 60%. There were few significant differences between the variants. Variant 4 includes ignition danger and fire behavior with 50% weight each. Fire behavior in our model is primarily driven by the fuel type. The good performance of variant 4 may be due to the fact that most forest fires in Austria ignite in (high-load) coniferous forests. With the current IFDS approach – and especially with variant 4 – it is possible to aim either at a low false alert rate of under 20% by using FWI as basis for calculation, or at a high correct detection rate of about 60% by

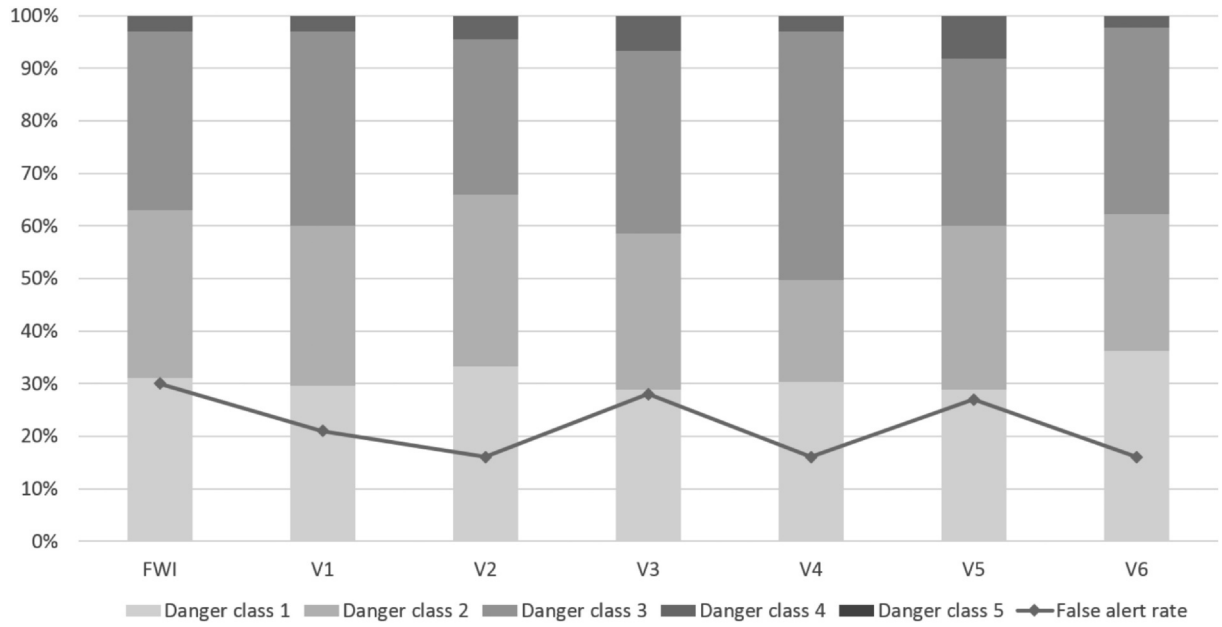


Fig. 4. Validation of the IFDS for 2018. The bars depict the distribution of occurred forest fires per variant and danger class (n = 135). The false alert rate, respectively the percentage of grid cells on fire days in the danger classes 3–5, is indicated by the line.

selecting the FFMC. Both approaches have their justification and can be chosen by fire management experts according to their objectives.

Although we filtered out smaller fires, no correlation could be found between larger burned areas and higher indices/variant values. Besides stochastic effects leading to this picture, Austria has a highly efficient network of voluntary fire brigades. With more than 300.000 active members (of 9 million inhabitants in Austria), about 30 helicopters available and fire brigades in almost every village, the average initial attack time for reported forest fires is under 20 min even in remote areas. This fact helps to keep fires small, even under high fire danger situations. In addition, the years 2018 and 2019 lacked longer periods of drought in combination with windy conditions in the Austrian mountain regions. Therefore, the likelihood of severe and/or large fires was low, resulting in mostly small fires. It is likely that fire prone conditions will increase in the coming years, with more days with high fire danger, also in mountainous regions. A recent study from Portugal pointed out that larger burned areas can be linked to higher values of the Canadian FWI and that resistance to fire spread decreases under more complex topography (Fernandes, 2019).

4.2. Human factor and vegetation

As shown in the current analysis, variant 2 – which includes the highest weight of the human factor – had the worst prediction accuracy in 2018. In 2019, variant 2 led to a higher prediction rate than other variants. However, the differences between the variants were not

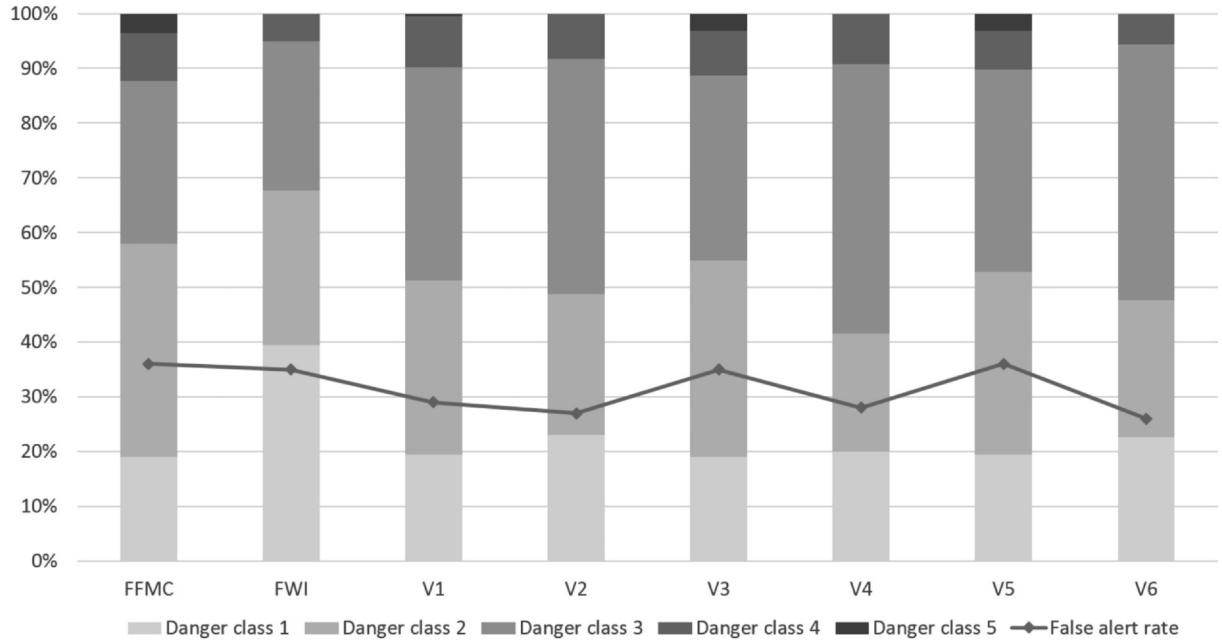


Fig. 5. Validation of the IFDS for 2019. The bars depict the distribution of occurred forest fires per variant and danger class (n = 195). The false alert rate, respectively the percentage of grid cells on fire days in the danger classes 3–5, is indicated by the line.

significant, and variant 4, which only partly considers the human influence, had the best overall prediction accuracy of all variants. These findings are contrary to the fact that 85% of forest fires in Austria are directly or indirectly ignited by humans (Vacik et al., 2011). We assume that the assessment of human impact at the community level with a logistic regression model had some limitations (Arndt et al., 2013). This approach seems to be inadequate because of the highly stochastic nature of fire ignitions. A revised approach to estimate the anthropogenic influence at a spatial resolution of 100 × 100 m would be required.

Although weighting variants including the vegetation layer (e.g. variant 4) showed a good prediction performance, there are some data insufficiencies. Vegetation at the tree line, e.g. mountain pine forests (*Pinus mugo* Turra), are poorly captured by our data layer but are highly flammable, as a recent study in North Tyrol has shown (Sass, 2019). Small forested (or deforested) areas are sometimes not associated with the correct type of vegetation. A differentiation by tree species is necessary, as studies have shown that some species are more fire prone than others (Müller and Vacik, 2017). Efforts are being made to improve the classification of fuel types for Austria with the help of high-resolution Sentinel data and aerial laser scan images (Hollaus et al., 2007).

4.3. FFMC

We preferred to use the FFMC instead of the FWI as a basis for the variant calculation, because we concentrated on fire ignition and the FFMC showed better prediction results for forest fires in Austria. However, the calculation of the FFMC is calibrated for Canadian conditions. At the moment, there is no adaption to Austrian forests. A recent study at the University of Natural Resources and Life Sciences Vienna aims to determine fine fuel moisture content of different forest ecosystems and tries to compare the results with the interpolated FFMC data from the INCA approach (Zhou and Vacik, 2017). This analysis can help to improve the predictive power of the FFMC. A study from Switzerland demonstrated how the use of only meteorological variables produced similar or better results than the Canadian FWI (De Angelis et al., 2015). However, these results do not seem to be transferable to Austrian conditions (Arpaci et al., 2013). The German Weather Service (DWD) is currently working on a new grassland fire index. Such an index may be particularly useful in the winter half-year for mountain regions such as the Alps, as it allows a reasonable estimation of fine fuel moisture beyond the scope of the FFMC and FWI (Müller et al., 2020). An improvement of the prediction accuracy of winter and spring fires may also be achieved by including a high-resolution data layer of the actual snow cover. First attempts of such an approach are currently tested in France and Germany (Müller et al., 2020).

Our model is designed to assess forest fire danger and thus predict uncontrolled fires in forested area. However, with some adjustments, it can also be suitable for predicting wildfires in general, e.g. by including a grassland fire index. Currently, the IFDS is not meant to be used for prescribed burning purposes, as this fire management technique is prohibited in Austria.

5. Conclusions

The IFDS is a new and innovative approach to improve forest fire danger assessment in mountainous and heterogeneous landscapes. The overall performance is strongly driven by the included data layers and the accuracy of the high-resolution data. First results indicated that the IFDS performs better than the use of fire weather indices alone. For the current study, we mainly followed an expert-based approach and did not use machine-learning models, as the spatial data still has some insufficiencies. We were able to describe the relationship between the factors that influence fire ignition and fire behavior, and to learn under which conditions the most accurate results can be achieved. A fire danger assessment approach supported by experts was also used in other studies (Jung et al., 2013; Thompson et al., 2013). As soon as the data quality is improved, the IFDS will be updated with new parameters. Besides scientific and technical optimization, the involvement of stakeholders (e.g. fire brigades, forest authorities, national warning centers) in the development of the system is an essential task for outreach, dissemination and operationalization of the system. In this context, we will ask a selected group of experts for feedback on the performance, usability and reliability of the system in spring 2020. A future use of the IFDS could also be the integration into a decision support system, similar to the approach of Kalabokidis et al. (2013).

Some experts believe that it is almost impossible for regions with a low intensity fire regime like the Northern Alps to design an IFDS (Müller et al., 2020). Together with other experts (Barriopedro et al., 2011; Seidl et al., 2014; Valese et al., 2014; Wastl et al., 2013; Zumbrunnen et al., 2012), we take the view that climate change combined with changes in forest management and increasing recreational activities will alter the current fire regime towards a more fire prone one with a higher number of ignitions and more extreme forest fires, also in the Northern Alps. For this reason, it is important to move towards an integrated fire danger assessment system with a high data reliability and a high spatial resolution, to reflect the small-scale structure of the European Alps.

Funding

This research has been conducted partly within the frame of the "Austrian Forest Research Initiative II" (AFFRI 2), which is funded by DaFNE as a "Bund-Länder-Kooperation" (Transaction number LE.3.2.3/0019-III/2/2015) and within the project “Copernicus Data for Novel High-resolution Wildfire Danger Services in Mountain Regions” (CONFIRM), which is funded by the Austrian Space Applications Programme (ASAP) (Project number 873674).

Declaration of Competing Interest

The authors declare no conflict of interest.

Acknowledgments

We want to thank ZAMG for their support in providing the data and fire weather indices, the graduates of the Polytechnic Donaustadt Mr. Patrick Cipot and Mr. Joseph Wilfer for supporting the technical implementation and Mr. Gergö Dioszegi from the Institute of Geomatics for additional analysis of the ZAMG data.

Appendix A

Data layers, project title, year of creation and timespan of used forest fire data implemented in the current version of the IFDS.

Data layer	Project	Year	Forest fire data
Human	Austrian Forest Fire Research Initiative (AFFRI) – Master thesis	2012	1993–2009

Lightning	AFFRI / Fire Risk and Vulnerability of Austrian Forests under the Impact of Climate Change (FIRIA) – Master thesis	2013	1993–2012
Vegetation	AFFRI / FIRIA / Alpine Forest Fire Warning System (ALP FFIRS)	2013	1993–2010
Aspect	AFFRI 2	2018	1993–2017
Slope	AFFRI 2	2018	1993–2017

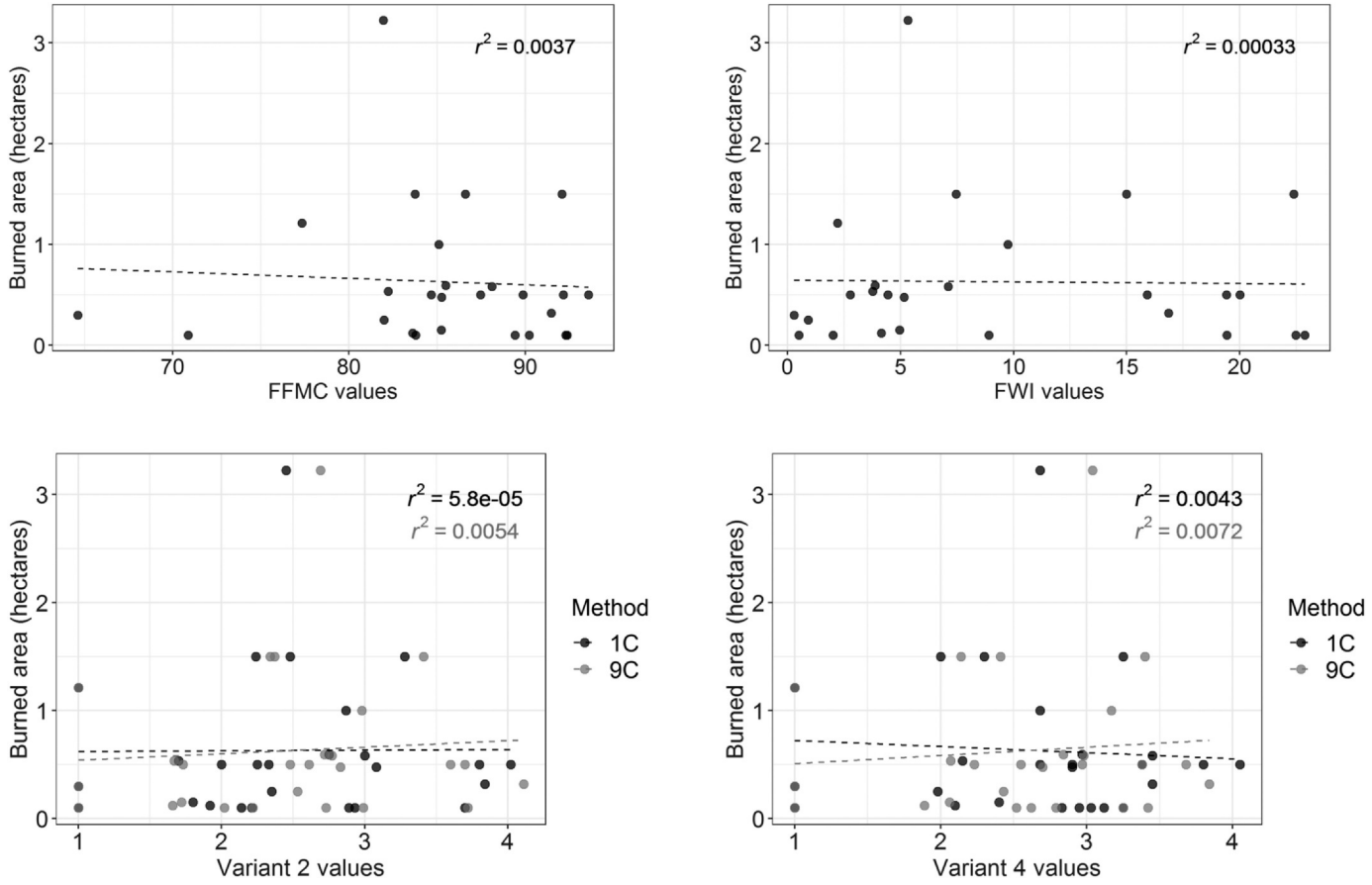
Appendix B

Danger classes, classification and thresholds of the variables used for the lightning fire hazard map implemented in the IFDS prototype.

	Very low (1)	Low (2)	Moderate (3)	High (4)	Very high (5)
Elevation	< 500 m > 2200 m	1800 m – 2200 m	500 m – 800 m	1500 m – 1800 m	800 m – 1500 m
Slope	> 40°	< 10°	30–40°	10–20°	20–30°
Aspect	W / NW / N	E / SW	NE	SE	S
Vegetation type	Deciduous Sparse veg.	Mixed forests	Mountain pine	Coniferous low fuel load	Coniferous high fuel load

Appendix C

Correlation between burned areas of single fires and values of FFMC, FWI and two selected variants in 2019. Shown are only fires greater or equal to 0.1 ha (n = 26). 1C method represents the single-cell-approach, while 9C is the result of the nine-cell-approach.



References

Abatzoglou, J.T., Williams, A.P., 2016. Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. Proc. Natl. Acad. Sci. 113 (42), 11770–11775.

Albers, J., 2012. Comparative Analysis of the Forest Fire Situation in Central-Eastern Europe. Master thesis. Institute of Silviculture, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna.

Aldersley, A., Murray, S.J., Cornell, S.E., 2011. Global and regional analysis of climate and human drivers of wildfire. Sci. Total Environ. 409 (18), 3472–3481.

Arndt, N., Vacik, H., Koch, V., Arpaci, A., Gossow, H., 2013. Modelling human-caused forest fire ignition for assessing forest fire danger in Austria. iForest 6, 315–332.

Arpaci, A., Valese, E., Vacik, H., 2011. Potential fire intensities in the alpine region based on characteristic fuels in Austria and Italy. In: Working on Fire (Eds.), 5th International Wildland Fire Conference, Sun City, May 9-13, 2011.

Arpaci, A., Eastaugh, C.S., Vacik, H., 2013. Selecting the best performing fire weather indices for Austrian ecoregions. Theor. Appl. Climatol. 114, 393–406. https://doi.org/10.1007/s00704-013-0839-7.

Barriopedro, D., Fischer, E.M., Luterbacher, J., Trigo, R.M., García-Herrera, R., 2011. The hot summer of 2010: redrawing the temperature record map of Europe. Scienceexpress. https://doi.org/10.1126/science.1201224.

Beck, J.A., Alexander, M.E., Harvey, S.D., Beaver, A.K., 2002. Forecasting diurnal variations in fire intensity to enhance wildland firefighter safety. Int. J. Wildland Fire 11, 173–192. http://www.publish.csiro.au/WF/WF02002.

Boboulos, M., Purvis, M.R.I., 2009. Wind and slope effects on ROS during the fire propagation in East-Mediterranean pine forest litter. Fire Saf. J. 44 (5), 764–769. https://

doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.03.006.
Carrega, P., 1995. A method for the reconstruction of mountain air temperatures with automatic cartographic applications. Theor. Appl. Climatol. 52, 69–84.
Carrega, P., Geronimo, N., 2007. Risque meteorologique d'incendie de fôret et methodes de spatialisation pour une cartographie a fine echelle. In: Actes du XXeme colloque international de l'Association Internationale de Climatologie. Tunis, September 2007.
Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M.P., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P., de la Riva, J., Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, J.R., Herrera, M.A., Zamora, R., 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. Ecol. Model. 221 (1), 46–58. ISSN 0304-3800. https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017.
Conedera, M., Cesti, G., Pezzatti, G.B., Zumbrunnen, T., Spinedi, F., 2006. Lightning Induced Fires in the Alpine Region: An Increasing Problem. V International Conference on Forest Fire Research, Coimbra, Portugal.
Conedera, M., Tonini, M., Oleggini, L., Vega, Orozco C., Leuenberger, M., Pezzatti, G.B., 2015. Geospatial approach for defining the wildland-urban Interface in the alpine environment. Comput. Environ. Urban. Syst. 52, 10–20. https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2015.02.003.
Conedera, M., Krebs, P., Valese, E., Cocca, G., Schun, C., Menzel, A., Vacik, H., Cane, D., Japelj, A., Muri, B., Ricotta, C., Oliveri, S., Pezzatti, G.B., 2018. Characterizing alpine pyrogeography from fire statistics. Appl. Geogr. 98, 87–99. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.07.011.
Csontos, P., Cseresnyés, I., 2015. Fire-risk evaluation of Austrian pine stands in Hungary - effects of drought conditions and slope aspect on fire spread and fire behaviour. Carpathian J. Earth Environ. Sci. 10 (3), 247–254.
De Angelis, A., Ricotta, C., Conedera, M., Pezzatti, G.B., 2015. Modelling the meteorological Forest fire niche in heterogeneous Pyrologic conditions. PLoS One 10 (2), e0116875. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0116875.
Dowdy, A.J., Mills, G.A., 2012. Atmospheric and fuel moisture characteristics associated with lightning-attributed fires. J. Appl. Meteorol. Climatol. 51, 2025–2037. https://doi.org/10.1175/JAMC-D-11-0219.1.
Dupire, S., Curt, T., Bigot, S., Fréjaville, T., 2019. Vulnerability of forest ecosystems to fire in the French Alps. Eur. J. For. Res. 1–18.
Fernandes, P.M., 2019. Variation in the Canadian fire weather index thresholds for increasingly larger fires in Portugal. Forests 10 (10), 838. https://doi.org/10.3390/f10100838.
Flannigan, M.D., Logan, K.A., Amiro, B.D., Skinner, W.R., Stocks, B.J., 2005. Future area burned in Canada. Clim. Chang. 72 (1–2), 1–16.
Fox, D.M., Carrega, P., Ren, Y., Caillouet, P., Bouillon, C., Robert, S., 2018. How wildfire risk is related to urban planning and fire weather index in SE France (1990–2013). Sci. Total Environ. 621, 120–129. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.174.
Grima, N., 2011. Forest Fire Hazard Mapping in Carinthia (Southern Austria). Master thesis. Institute of Silviculture, University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna, pp. 64.
Hollaus, M., Wagner, W., Maier, B., Schadauer, K., 2007. Airborne laser scanning of Forest stem volume in a mountainous environment. Sensors 7 (8), 1559–1577. https://www.mdpi.com/1424-8220/7/8/1559.
Jung, J., Kim, C., Jayakumar, S., et al., 2013. Forest fire risk mapping of Kolli Hills, India, considering subjectivity and inconsistency issues. Nat. Hazards 65 (3), 2129–2146. https://doi.org/10.1007/s11069-012-0465-1.
Kalabokidis, K., Athanasis, N., Gagliardi, F., Karayiannis, F., Palaiologou, P., Parastatidis, S., Vasilakos, C., 2013. Virtual fire: a web-based GIS platform for forest fire control. Ecological Informatics 16, 62–69. https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.04.007.
Lexer, M.J., Rabitsch, W., Grabherr, G., Dokulil, M., Dullinger, S., Englisch, J., Essl, F., Gollmann, G., Gottfried, M., Graf, W., Hoch, G., Jandl, R., Kahrer, A., Kainz, M., Kirisits, T., Netherer, S., Pauli, H., Rott, E., Schleper, C., Schmidt-Kloiber, A., Schmutz, S., Schopf, A., Seidl, R., Vogl, W., Winkler, H., Zechmeister, H., 2014. Der Einfluss des Klimawandels auf die Biosphäre und Ökosystemleistungen. In: Wien, S. (Ed.), Austrian Panel on Climate Change (APCC), Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, pp. 467–556.
Matulla, C., Formayer, H., Haas, P., Kromp-Kolb, H., 2004. Possible climate trends in Austria in the first half of the 21st century. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft Vol 56 (1–2), 1–9.
Maxwell, J.D., Anson Call, A., St. Clair, S.B., 2019. Wildfire and topography impacts on snow accumulation and retention in montane forests. For. Ecol. Manag. 432, 256–263. ISSN 0378-1127. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.09.021.
Moser, B., Temperli, C., Schneiter, G., Wohlgemuth, T., 2010. Potential shift in tree species composition after interaction of fire and drought in the Central Alps. Eur. J. For. Res. 129, 625–633.
Müller, M.M., Vacik, H., 2017. Characteristics of lightnings igniting forest fires in Austria. Agric. For. Meteorol. 240-241, 26–34. https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.03.020.
Müller, M.M., Vacik, H., Diendorfer, G., Arpaci, A., Formayer, H., Gossow, H., 2013. Analysis of lightning-induced forest fires in Austria. Theor. Appl. Climatol. 111 (1–2), 183–193. https://doi.org/10.1007/s00704-012-0653-7.
Müller, M.M., Vacik, H., Valese, E., 2015. Anomalies of the Austrian Forest fire regime in comparison with other alpine countries: a research note. Forests 6 (4), 903–913. https://doi.org/10.3390/f6040903.
Müller, M.M., Vilà-Vilardell, L., Vacik, H., 2020. Forest fires in the Alps – state of knowledge, future challenges and options for an integrated fire management. In: EUSALP Action Group 8, . https://www.alpine-region.eu/results/forest-fires-alps-state-knowledge-and-further-challenges.
Oettel, J.K., 2012. Forest Fires and Fuel Characteristics of Tyrol (Based on Case Studies). Master thesis. University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna.
San-Miguel-Ayanz, J., Costa, H., de Rigo, D., Libertá, G., Vivancos, T.A., Durrant, T., Nuijten, D., Löffler, P., Moore, P., 2018. Basic criteria to assess wildfire risk at the pan-European level. In: JRC Technical Reports. EUR 29500 EN, https://doi.org/10.2760/052345. ISBN 978-92-79-98200-2.
Sarricolea, P., Serrano-Notivoli, R., Fuentealba, M., Hernández-Mora, M., de la Barrera, F., Smith, P., Meseguer-Ruiz, Ó., 2020. Recent wildfires in Central Chile: detecting links between burned areas and population exposure in the wildland urban interface. Sci. Total Environ. 706, 135894. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135894.
Sass, O. (Ed.), 2019. Sammelband "Waldbrände in den Nordtiroler Kalkalpen – Verbreitung, Geschichte, Regeneration". Innsbrucker Geographische Studien 41.
Schunk, C., Wastl, C., Leuchner, M., Schuster, C., Menzel, A., 2013. Forest fire danger rating in complex topography – results from a case study in the Bavarian Alps in autumn 2011. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 13, 2157–2167. https://doi.org/10.5194/nhess-13-2157-2013.
Seidl, R., Schelhaas, M.J., Rammer, W., Verkerk, P.J., 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. Nat. Clim. Chang. 4, 806–810. https://doi.org/10.1038/nclimate2318.
Thompson, M.P., Scott, J., Helmbrecht, D., Calkin, D.E., 2013. Integrated wildfire risk assessment: framework development and application on the Lewis and Clark national forest in Montana, USA. Integr. Environ. Assess. Manag. 9 (2), 329–342. https://doi.org/10.1002/ieam.1365.
Vacchiano, G., Foderi, C., Berretti, R., Marchi, E., Motta, R., 2018. Modeling anthropogenic and natural fire ignitions in an inner-alpine valley. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. 18, 935–948.
Vacik, H., Arndt, N., Arpaci, A., Koch, V., Müller, M.M., Gossow, H., 2011. Characterisation of forest fires in Austria. Aust. J. For. Sci. 128 (1), 1–32.
Valese, E., Conedera, M., Held, A.C., Ascoli, D., 2014. Fire, humans and landscape in the European alpine region during the Holocene. Anthropocene. https://doi.org/10.1016/j.ancene.2014.06.006.
Van Wagner, C.E., 1987. Development and structure of the Canadian Forest fire weather index system. Canadian forestry service, headquarters, Ottawa. In: Forestry Technical Report 35, (35 p).
Wastl, C., Schunk, C., Lüpke, M., Cocca, G., Conedera, M., Valese, E., Menzel, A., 2013. Large-scale weather types, forest fire danger, and wildfire occurrence in the Alps. Agric. For. Meteorol. 168, 15–25.
ZAMG, 2019. Central Institute of Meteorology and Geodynamics Vienna. INCA. https://www.zamg.ac.at/cms/de/forschung/wetter/inca (accessed on 15. August 2019).
Zhou, M.J., Vacik, H., 2017. Comparisons of fuel stick moisture among forest cover types in eastern Austria. Aust. J. For. Sci. 134, 301–321 (ISSN 0379-5292).
Zumbrunnen, T., Menéndez, P., Bugmann, H., Conedera, M., Gimmi, U., Bürgi, M., 2012. Human impacts on fire occurrence: a case study of hundred years of forest fires in a dry alpine valley in Switzerland. Reg. Environ. Chang. 12 (4), 935–949.