

Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	WINDFALLS
Langtitel:	Wind INduced Disturbances in Forests At Local and Regional Scales
Zitervorschlag:	Lexner, M.J., Formayer, H., Leidinger, D., Lehner, F., Hochauer, C., Pucher, C. 2021. Wind induced disturbances in forests at local and regional scales. ACRP-Endbericht.
Programm inkl. Jahr:	ACRP 10th call, 2017
Dauer:	37 Monate
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	Manfred J. Lexner
Kontaktperson Name:	Manfred J. Lexner
Kontaktperson Adresse:	Institut für Waldbau Peter-Jordan-Strasse 82, 1190 Wien
Kontaktperson Telefon:	0664 8453964
Kontaktperson E-Mail:	mj.lexner@boku.ac.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	Institut für Meteorologie, BOKU Wien
Schlagwörter:	249.999,00 €
Projektgesamtkosten:	249.999,00 €
Fördersumme:	KR17AC0K13770
Klimafonds-Nr:	WINDFALLS
Erstellt am:	29.09.2021

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

Sturm ist einer der relevantesten Störungsfaktoren in temperierten Wäldern und beeinflusst wesentlich die Bereitstellung von Ökosystemleistungen. Sturmbedingte Störungen sind außerdem eng mit Borkenkäferstörungen gekoppelt. Für Szenariosimulationen mit Ökosystemmodellen stehen Temperatur- und Niederschlagsinformationen in guter Qualität zur Verfügung, während Informationen zu Windgeschwindigkeiten keine ausreichende Qualität aufweisen. Grund dafür ist die mangelnde Genauigkeit von Sturmereignissen sowohl räumlich als auch zeitlich in meso-skaligen Klimamodellen, sowohl für Reanalyse als auch für transiente Klimaänderungsszenarien für regional bis kontinentale Anwendungen regionalisieren. WINDFALLS hat zum Ziel, diese Lücke zwischen verfügbarer Information und den Anforderungen an eine realistische Störungssimulation zu schließen.

Für WINDFALLS wurde eine Typologie für spezifische Sturmtypen erarbeitet und die gesammelten Ereignisse damit klassifiziert in (i) Gewitterstürme, (ii) Föhnstürme, und (iii) atlantische Sturmtiefs.

Für diese drei Sturmtypen wurde die Datenbasis aus einerseits meteorologischen Daten zu ausgewählten Sturmereignissen, und andererseits aus aufgetretenen Störungsereignissen im Wald aufgrund von Sturm erstellt.

Mit hochauflösenden Wettermodellen wurden diese ausgewählten Sturmereignisse simulativ rekonstruiert um einen Zusammenhang mit den ungenaueren regionalen Datensätzen herstellen zu können. Mit Hilfe von „finger print“ Methoden konnte auf diese Weise die Genauigkeit von Atlantik- und Föhnstürmen in Klimadatensätzen verbessert werden. Für Gewitterstürme reichen die bisher angewendeten Modellauflösungen derzeit noch nicht aus.

Um die Fähigkeit eines Waldökosystemmodells zu überprüfen, Sturm- und Borkenkäferschäden im österreichischen Wald zu simulieren, wurden 2 Klimadatensätze für die Periode 2003-2019, für die empirische Schadensbeobachtungen auf Bezirksebene zur Verfügung stehen, hergestellt: WF1 mit den ursprünglichen Sturmdateien, WF2 mit der Fingerprint Methode. Die Simulationen ergaben insgesamt eine gute Übereinstimmung von Störungssimulation und Beobachtungsdaten (R^2 zwischen 0.481 und 0.55) für Sturm und Borkenkäfer. Die Unterschiede zwischen den Datensätzen WF1 und WF2 waren gering. Es zeigte sich, dass in WF2 mehr Stürme in den Bergregionen enthalten waren im Vergleich zu WF1.

In einem weiteren Experiment wurde der österreichische Wald bis 2100 unter 3 Klimawandelszenarien inkl. der Fingerprint Methode simuliert und mit einer Simulation unter historischen Klimabedingungen verglichen.

2 Executive Summary

(max. 2 Seiten, Sprache Englisch)

Disturbances in forests have attracted a lot of attention in recent years as important driver of forest ecosystem development and the related provisioning of ecosystem services. It is almost certain that disturbance regimes will intensify in a warming climate.

To study disturbance regimes which emerge from interacting individual disturbance events dynamic forest ecosystem models need to integrate disturbance modules and consider weather data explicitly as driver of disturbance and ecosystem dynamics. While over the last years reliable weather and climate data for ecosystem model applications addressing climate change impacts and the development of adaptation strategies have become available for Austria, the provision of wind speed data for storm damage modelling and simulation remains a huge challenge. While some gridded data for wind speed exists, the quality of the data is generally poor and wind speed data from weather and climate model simulations are not suitable for direct use as driver in spatially explicit forest ecosystem simulation.

WINDFALLS aims to develop a methodology to “translate” weather model and regional climate model (RCM) simulations into wind speed proxies that can then be used as driver in forest storm disturbance and ecosystem modelling. An existing forest ecosystem model will be used to simulate wind and bark beetle damage in Austrian forests and compare model results with observed damage data.

Based on high-resolution weather simulations typical pattern (i.e. finger prints) could be detected for Atlantic und Foehn storms which can then be detected in standard weather or RCM climate change simulations. For local thunderstorms this approach was not yet successful.

To evaluate the ability of a forest ecosystem model to reproduce observed storm and bark beetle disturbances at large scales in Austria two gridded 1x1km data sets for maximum gust windspeed were produced for the period 2003-2019, one with original INCA re-analysis data, one improved data set with the new fingerprinting method.

4 mill ha Austrian forest were simulated in a gridded 1x1km resolution with the PICUS model and simulated storm and bark beetle disturbances compared to observed salvage data at district level. The simulations showed in general good agreement with data. Storm damages were overestimated but correlated well with observations ($R^2 = 0.53 - 0.55$). Simulated bark beetle induced damages showed slightly weaker correlation with observations ($R^2 = 0.48$) but were at very similar absolute cumulative values as observations. In the fingerprint data set there were more storms, particularly in mountain districts. Overall, the difference in storm exposure between the two data sets was low.

In a further experiment Austrian forests were simulated under three transient climate change scenarios until 2100. Disturbance induced damages were compared to those simulated under a historic baseline climate. The storm exposure in the climate change scenarios was substantially lower compared to baseline conditions. This difference was mainly due to a methodological detail in the fingerprinting method. This points at further need for improvement of wind data sets for impact assessments.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Sturm ist einer der relevantesten Störungsfaktoren in temperierten Wäldern und beeinflusst wesentlich die Bereitstellung von Ökosystemleistungen. Sturmbedingte Störungen sind außerdem eng mit Borkenkäferstörungen gekoppelt. Für Szenariosimulationen mit Ökosystemmodellen stehen Temperatur- und Niederschlagsinformationen in guter Qualität zur Verfügung, während Informationen zu Windgeschwindigkeiten keine ausreichende Qualität aufweisen. Damit ist aber eine realistische Simulation von Störungsregimen, die Sturm als Störungsfaktor enthalten nicht möglich.

Das allgemeine Ziel von WINDFALLS ist es, die Fähigkeit, Sturmstörungen in waldbezogenen Studien zur Klimaschutzwirkung von Wäldern und zur Klimawandelanpassung zu verbessern.

Um dies zu erreichen, verfolgt WINDFALLS folgende Teilziele:

- (1) Entwicklung einer Methode um die Sturminformation in Wettermodellen und regionalen Klimamodellen (RCM) zu verbessern und diese dann für Ökosystemsimulationen verfügbar zu machen.
- (2) Einen Vergleich von Störungssimulationen mit ursprünglichen Sturmdaten und mit der verbesserten Methode anhand eines empirischen Vergleichsdatensatzes zu Sturm- und Borkenkäferschäden in Österreich.
- (3) Anwendung der verbesserten Methodik auf transiente Klimawandelszenarios und Simulation des österreichischen Waldes im Klimawandel bis 2100.

4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

(max. 20 Seiten)

WINDFALLS ist in 4 Arbeitspakete gegliedert.

AP1 fokussiert auf das Projektmanagement, die Koordination zwischen den Partnern, dem Institut für Waldbau und dem Institut für Meteorologie sowie das Reporting.

AP2 hat als Aufgabe Datenbasen bereit zu stellen für die klimatischen Analysen (z.B. INCA, ERA5, ÖKS15) sowie Daten zu ausgewählten Sturmschadensfällen und die Schadensstatistiken für die Periode 2003-2019 vom Bundesamt für Wald zu übernehmen und aufzubereiten.

AP3 simuliert ausgewählte Sturmereignisse mit dem hochauflösenden Wettermodell WRF und vergleicht diese detaillierten Ergebnisse mit Windinformation auf weniger hoch aufgelösten Skalen. Es wird mittels einer „finger printing“ Methode angestrebt, die in Wetter und regionalen Klimamodellen enthaltene Windinformation in realistische Böen-Windgeschwindigkeiten zu übersetzen.

Das AP4 schließlich beschäftigt sich mit der Simulation von Sturm- und Borkenkäferstörungen selbst. Es wird mit Hilfe der Österreichischen Waldinventur der gesamte österreichische Wald in repräsentative Waldtypen stratifiziert und diese Waldtypen dann auf einem 1x1 km Raster räumlich verteilt. Zwei Evaluierungsexperimente werden umgesetzt: (1) es werden 2 ausgewählte Sturmereignisse simuliert und mit terrestrischen Erhebungen verglichen. (2) Es wird die Periode 2003-2019 für den gesamten österreichischen Wald simuliert und die Sturm- und Borkenkäferschäden mit den bezirksweisen Statistiken des BFW verglichen. Schließlich werden die von AP3 hergestellten verbesserten Klimawandelszenarios verwendet, um vergleichende Szenario-Simulationen für den österreichischen Wald bis 2100 zu erstellen.

Wichtigste Ergebnisse

Windmodellierung und Erstellung von zukünftigen Windszenarien

Direkte Windinformationen von regionalen Klimamodellen liegen meist nur als Tagesmittelwerte oder als instantane Werte alle 6 oder 12 Stunden vor. Zur Abschätzung von Windwurfereignissen benötigt man jedoch Informationen zu den maximalen Windböen eines Tages, da sich Schwellwerte wie etwa 90 bzw. 120 km/h immer auf die maximalen Windspitzen beziehen. Daher muss Windinformation aus den Modellen statistisch nachbearbeitet werden. Die Windgeschwindigkeit wird in regionalen Klimamodellen, speziell in Gebirgsregionen, aber auch aufgrund der räumlichen Auflösung von derzeit rund 10x10 km systematisch unterschätzt.

Ein Teil der Untersuchung besteht darin festzustellen, ob regionale Klimamodelle Sturmereignisse realistischer abbilden können, wenn man die räumliche Auflösung erhöht. Hierbei wird zwischen atlantischen Stürmen, Föhnstürmen, sowie Stürme im Zusammenhang mit Gewittern differenziert, da diesen Kategorien unterschiedliche Prozesse zugrunde liegen und diese von den Modellen nicht gleich gut aufgelöst werden müssen.

Als zweiter Schritt wird eine Methodik entwickelt, Informationen welche von Regionalen Klimamodellen zur Verfügung stehen, mit Windfeldern zu verknüpfen, welche eine realistische räumliche Struktur und maximale Windspitzen aufweisen. Diese werden dann für die Verwendung in der Waldmodellierung zur Verfügung gestellt.

Hochaufgelöste regionale Windmodellierung

Die hochaufgelösten Windmodellierungen erfolgten mit dem regionalen Model WRF (Skamarock et al., 2005). Die getesteten Konfigurationen sind in Tabelle 1 zusammengestellt, wobei SIM1 die besten Ergebnisse lieferte und für die Fallstudien verwendet wurde. Als Antrieb für die Fallstudien wurde die ECMWF Analyse in der jeweils aktuellen Version verwendet und in zwei Schritten zuerst auf 3 km und danach auf 1 km gerechnet.

Tabelle 1: Zusammenstellung der getesteten WRF Konfigurationen

Simulation/Scheme	SIM1	SIM2	SIM3
Res. of outer domain	3-km	3-km	3-km
Res. of inner domain	1-km	1-km	1-km
Microphysics	New Thompson scheme	Morrison double-moment scheme	WRF Single-Moment 6-class scheme
SW Radiation	RRTMG shortwave	Dudhia scheme	RRTMG shortwave
LW Radiation	RRTMG longwave	RRTM scheme	RRTMG longwave
PBL Scheme	MYJ scheme	MYJ scheme	MYJ scheme
Cumulus Scheme	no cumulus parameterization	no cumulus parameterization	no cumulus parameterization

Atlantische Stürme

Mittels WRF wurden 3 verschiedene Atlantische Stürme nachgerechnet, wobei die Ergebnisse bei allen drei Ereignissen sehr ähnlich waren. Exemplarisch werden die Ergebnisse des Sturms Kyril aus dem Jahr 2007 gezeigt. Dieser Sturm richtete europaweit und auch in Österreich verheerende Schäden an.

Betrachtet man die Windgeschwindigkeiten des ECMWF Analysefeldes zum Zeitpunkt der höchsten Windgeschwindigkeiten in Österreich (

Abbildung 1, links oben), so sieht man sehr glatte Strukturen mit einem Maximum in Oberösterreich und maximalen Windgeschwindigkeiten von 16 m/s. Dies ist eine massive Unterschätzung der realen Maxima. Selbst im INCA Datensatz (

Abbildung 1, links unten) werden zu dem Zeitpunkt Maxima bis zu 25.3 m/s erreicht, wobei dies der 10 m Mittelwind ist. Die gemessenen Windspitzen auf Bergstationen lagen jedoch bei rund 45 m/s.

Diese Unterschätzung der Windgeschwindigkeit im Analysemodell liegt lediglich an der groben räumlichen Auflösung, welches zum damaligen Zeitpunkt bei 25 km lag. Rechnet man dieses Ereignis mit 3 km räumliche Auflösung (

Abbildung 1, rechts oben) so steigen die Windgeschwindigkeiten auf rund 33 m/s stark an und die räumlichen Strukturen spiegeln die Gebirgszüge wider. Verfeinert man die Auflösung auf 1 km so nimmt die Windgeschwindigkeit auf bis zu 56.6 m/s zu und die Gebirgseffekte kommen noch stärker zum Vorschein.

Die WRF Modellergebnisse mit 1 km Auflösung zeigen sehr plausible räumliche Strukturen und die Windgeschwindigkeiten ähneln mehr den Windböen als den 10 min Mittelwind. Dies könnte daran liegen, dass die zeitliche Integration der Gleichungen bei dieser räumlichen Auflösung bereits bei 3 Sekunden liegt und dies ein instantaner Wind ist und nicht ein 10 min Mittel.

Da Regionale Klimamodelle eine ähnliche räumliche Auflösung haben wie das Analysemodell, kann man daraus schließen, dass die systematische

Unterschätzung der Windgeschwindigkeiten zu einem guten Teil durch die räumliche Auflösung verursacht wird. Die grundsätzliche Information über die Sturmintensität ist in den Modellen enthalten und man kann mit statistischen Methoden dem Sturmereignis ein realistischeres Feld der maximalen Windspitzen zuordnen.

WRF-D1 (3km), WRF-D2 (1km) Vs Observed Windspeed 2007011900

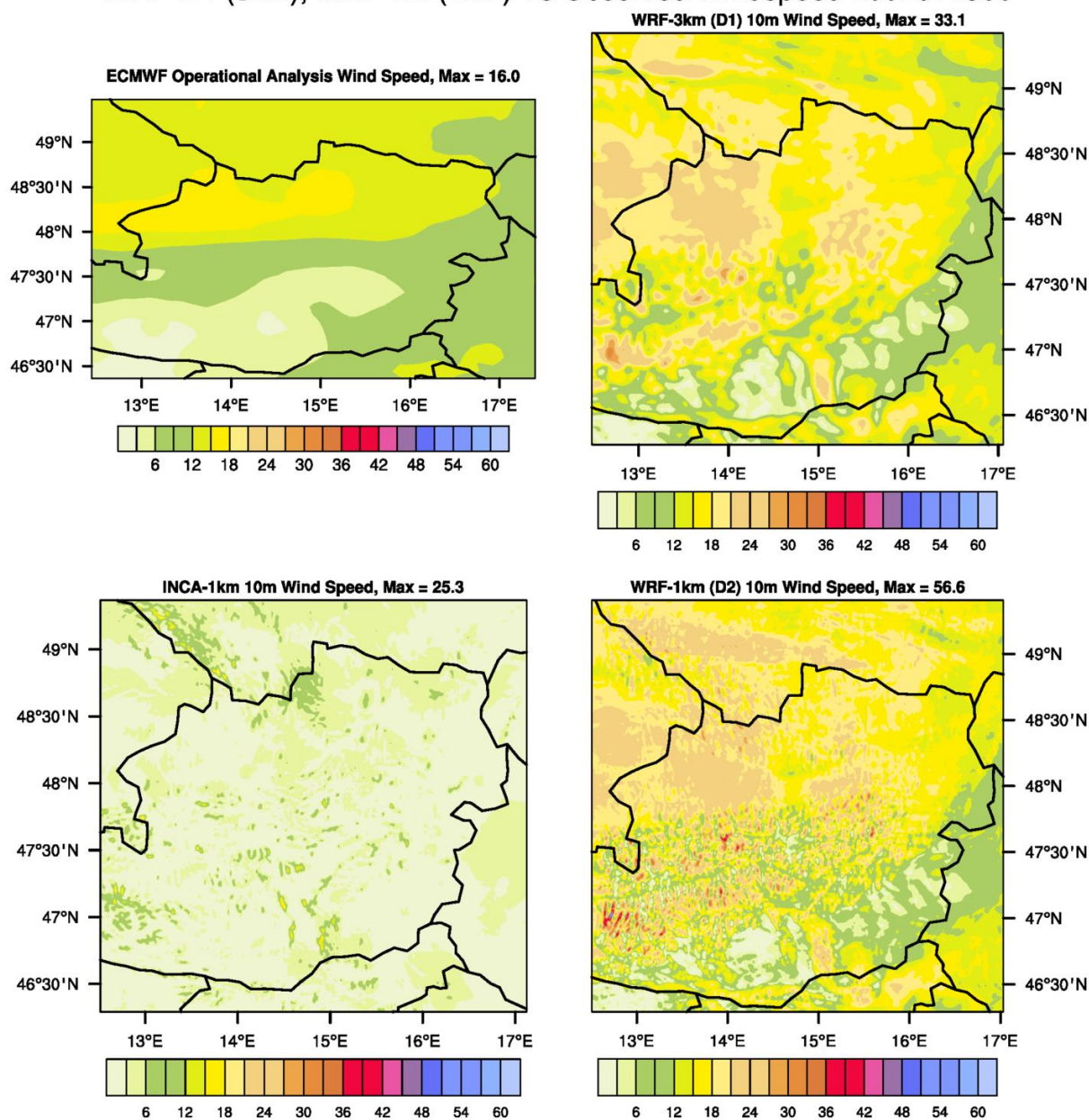


Abbildung 1: Atlantischer Sturm Kyril (19.Jänner 2007 um 0 Uhr). Windgeschwindigkeit aus der ECMWF Analyse mit 25 km räumlicher Auflösung (oben, links), WRF mit 3 km (oben, rechts), WRF mit 1 km (unten, rechts), und INCA 1km (unten links). Mit zunehmender Modellauflösung nimmt die Windgeschwindigkeit signifikant zu. Die Modellwerte scheinen auch plausibler als die INCA Daten.

Föhnstürme

Für Föhnstürme wurden ebenfalls 3 Ereignisse gerechnet und exemplarisch ist der Sturm vom 17. September 2015 dargestellt. Noch extremer als beim Atlantischen Sturm wird dieser Föhnsturm in der Analyse (

Abbildung 2, links oben) die Windgeschwindigkeit unterschätzt. Hier liegt die maximale Windgeschwindigkeit bei 9 m/s. Mit 3 km Auflösung (

Abbildung 2, rechts oben) sehen die räumlichen Strukturen bereits realistischer aus, mit Windmaxima entlang des Alpenhauptkammes und die Maxima erreichen 27.6 m/s. Mit 1 km Auflösung (

Abbildung 2, rechts unten) werden die räumlichen Strukturen noch realistischer und die Windgeschwindigkeit steigt auf 37.7 m/s. Die INCA Daten (

Abbildung 2, links unten) zeigen zwar Windgeschwindigkeiten bis zu 50 m/s, was für den 10 min Mittelwind extrem hoch ist. Hierbei dürfte es sich um eine systematische Überschätzung der Windgeschwindigkeiten auf Berggipfel durch die Anwendung von vertikalen Höhengradienten handeln. Zu diesem Zeitpunkt betrug die gemessene Windgeschwindigkeit am Hohen Sonnblick auf 3106 m, welcher in etwa im östlichen Windmaxima liegt, bei rund 17 m/s und die maximale Windböe bei rund 30 m/s.

Für die Föhnmodellierung kann aufgrund der Ergebnisse dieselbe Schlußfolgerung wie für den Atlantischen Sturm gezogen werden und eine statistische Verbesserung der regionalen Klimaszenarien ist möglich

WRF-D1 (3km), WRF-D2 (1km) Vs Observed Windspeed 2015091712

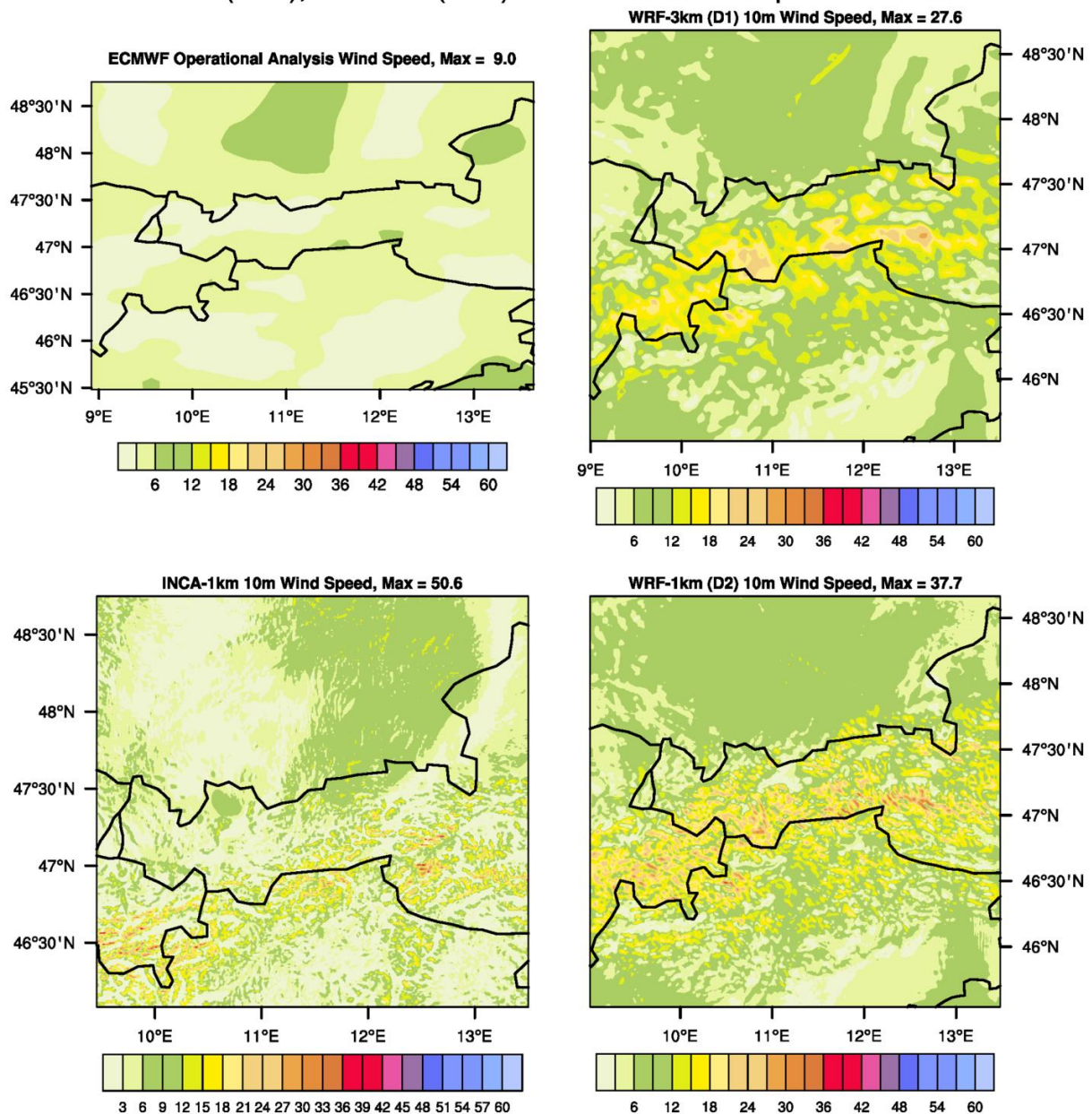


Abbildung 2: Föhnsturm (17. September 2015 um 12 Uhr). Windgeschwindigkeit aus der ECMWF Analyse mit 25 km räumlicher Auflösung (oben, links), WRF mit 3 km (oben, rechts), WRF mit 1 km (unten, rechts), und INCA 1km (unten links). Mit zunehmender Modellauflösung nimmt die Windgeschwindigkeit signifikant zu. Die INCA Daten zeigen bei Föhnlagen vereinzelt extrem hohe Windgeschwindigkeiten an Berggipfeln.

Stürme im Zusammenhang mit Gewitter

Bei Gewitter sind die Ergebnisse leider anders als bei Atlantischen- und Föhnstürmen. Zwar ist WRF, welches im konvektionsauflösenden Modus betrieben wird, in der Lage das Gewitter und die damit verbundene Niederschlagsintensität plausibel abzubilden. Auch hier wurden 3 verschiedene Gewitter modelliert und die Ergebnisse eines Gewitters am 28. Juli 2020 werden exemplarisch gezeigt. Der

maximale Stundenniederschlag erreicht bei 3 km Auflösung (Abbildung 3, links oben) rund 70 mm pro Stunde und mit 1 km Auflösung (Abbildung 3, links unten) sogar 86 mm pro Stunde. Dadurch ist sichergestellt, das WRF eine intensive Gewitterzelle modelliert. Betrachtet man jedoch die dazugehörigen Windfelder (Abbildung 3, rechts), so treten im Umfeld der Gewitterzelle keine hohen Windgeschwindigkeiten auf. Selbst bei 1 km Auflösung erreichen die Maxima gerade einmal 10 m/s und sind damit weit von schadensverursachenden Windgeschwindigkeiten entfernt.

Wir müssen leider daraus schließen, dass mit den derzeitig zur Verfügung stehenden konvektionsauflösenden Modellen, noch keine realistische Abbildung der Starkwinde im Zusammenhang mit Gewittern möglich ist. Daher können auch keine Fingerprints für Gewitter entwickelt werden, da diese kleinräumigen Starkwinde auch durch das Messsystem nicht aufgelöst werden und daher auch keine plausiblen Beobachtungswindfelder zur Verfügung stehen. Gewitterstürme können daher in der weiteren Anwendung und Auswertung von Klimaszenarien nicht berücksichtigt werden.

WRF-D1 (3km) Vs WRF-D2 (1km) Precip & Windspeed 2020072821

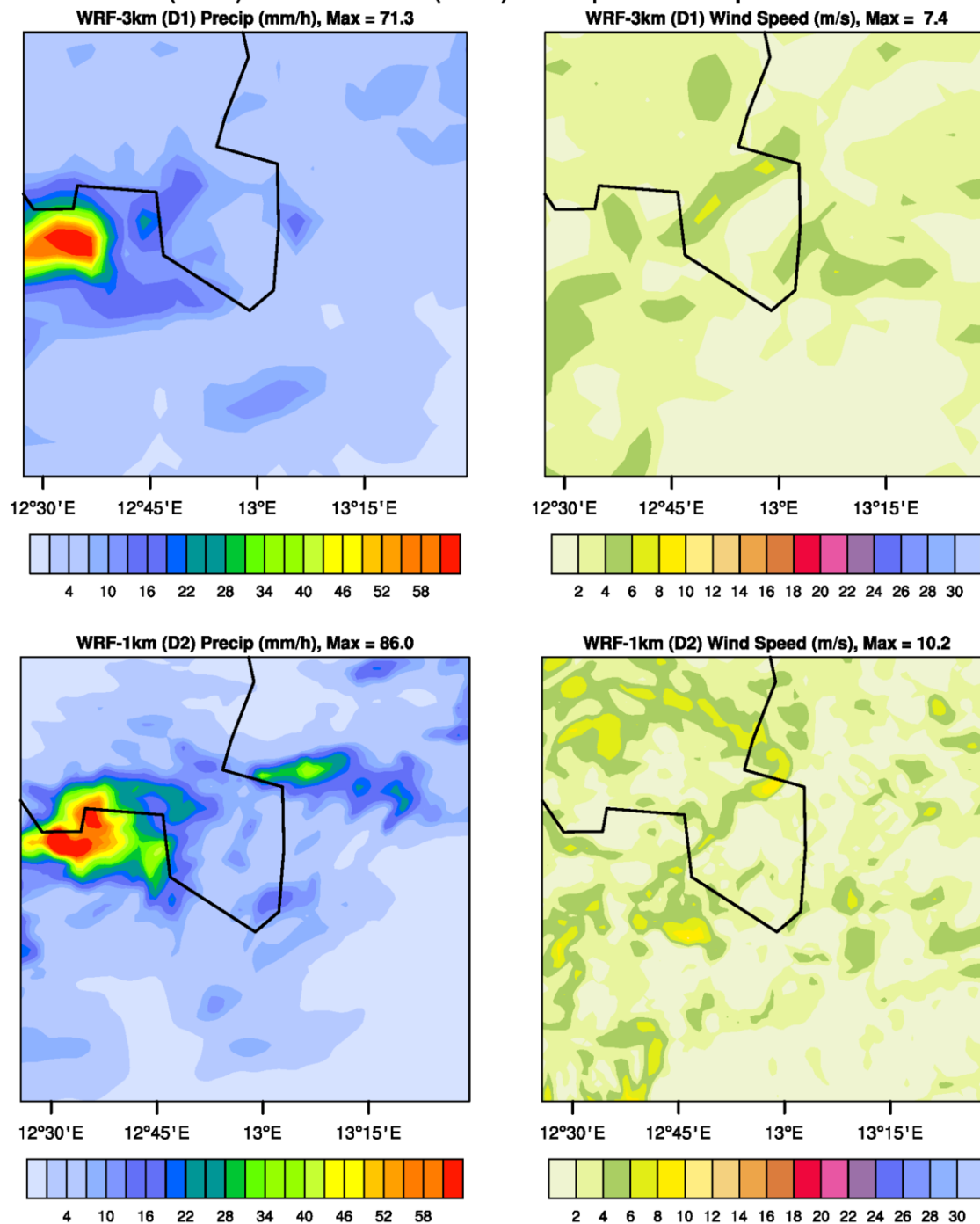


Abbildung 3: Niederschlag (links) sowie Windgeschwindigkeit (rechts) einer Gewitterzelle im Grenzgebiet von Tirol und Bayern (28. Juli 2020 um 21 Uhr). WRF Modellergebnisse mit 3 km (oben) und 1 km (unten). Obwohl das Modell die Niederschlagsintensität der Gewitterzelle realistisch abbildet, zeigt das Windfeld keine hohen Windgeschwindigkeiten im Umfeld der Gewitterzelle.

Fingerprintmethode

Atlantische Stürme

Die Bodenwindfelder für die Fingerprints für Atlantische Stürme beruhen auf den maximalen Windfelder der WRF Modellierung mit 1 km Auflösung für drei Sturmereignisse. Jedem dieser 3 Fingerprints wird das jeweilige Windfeld auf 500 hPa zugeordnet. Da die ausgewählten Sturmereignisse zu den stärksten Stürmen der letzten 20 Jahre zählen sind diese Fingerprints für sehr starke Stürme repräsentativ.

Die Auswahl der Sturmereignisse die durch Fingerprints ersetzt werden erfolgte anhand eines Intensitätskriterium. Da nur starke Stürme große Schäden anrichten und die Fingerprints nur für sie repräsentativ sind, wurde als Schwellwert ein 2 jährliches Ereignis definiert. Hierfür wurden die maximalen Windgeschwindigkeiten in 500 hPa bestimmt aus dem Reanalysedatensatz ERA 5 (Albergel et al., 2018) verwendet und die Jährlichkeit bestimmt.

Für die Anwendung auf regionale Klimaszenarien wurde die Jährlichkeit der maximalen Windgeschwindigkeit auf 500 hPa während der Referenzperiode aus dem Klimamodell bestimmt. Damit erfolgt automatisch eine Fehlerkorrektur der Modellwindgeschwindigkeit für dieses Perzentil. Die jeweilige Windgeschwindigkeit für das 2 jährliche Ereignis bildet dann den Schwellwert für einen atlantischen Sturm.

Föhnstürme

Die Auswahl der Fingerprints für die Föhnstürme ist komplexer, das es ja verschiedene Föhnregionen in Österreich gibt, welche individuelle Fingerprints braucht. Insgesamt haben wir Österreich in 5 Föhnregionen eingeteilt (siehe Abbildung 4), wobei in zwei Regionen sowohl Nord- als auch Südföhn detektiert wird. Kriterium für einen Föhnsturm ist sowohl die Windgeschwindigkeit auf 500 hPa als auch die Windrichtung. Diese muss senkrecht zum Alpenhauptkamm verlaufen. Zusätzlich muss noch ein Schwellwert für den Nord-Süd Bodendruckgradienten überschritten werden. Die Methodik wurde anhand der ERA 5 Reanalyse entwickelt und optimiert. Für die Anwendung auf regionale Klimamodelle wurden die jeweiligen Schwellwerte für jedes Model so optimiert, dass in der Referenzperiode ein ähnliches Verhalten der Föhnstürme auftrat wie in ERA 5.

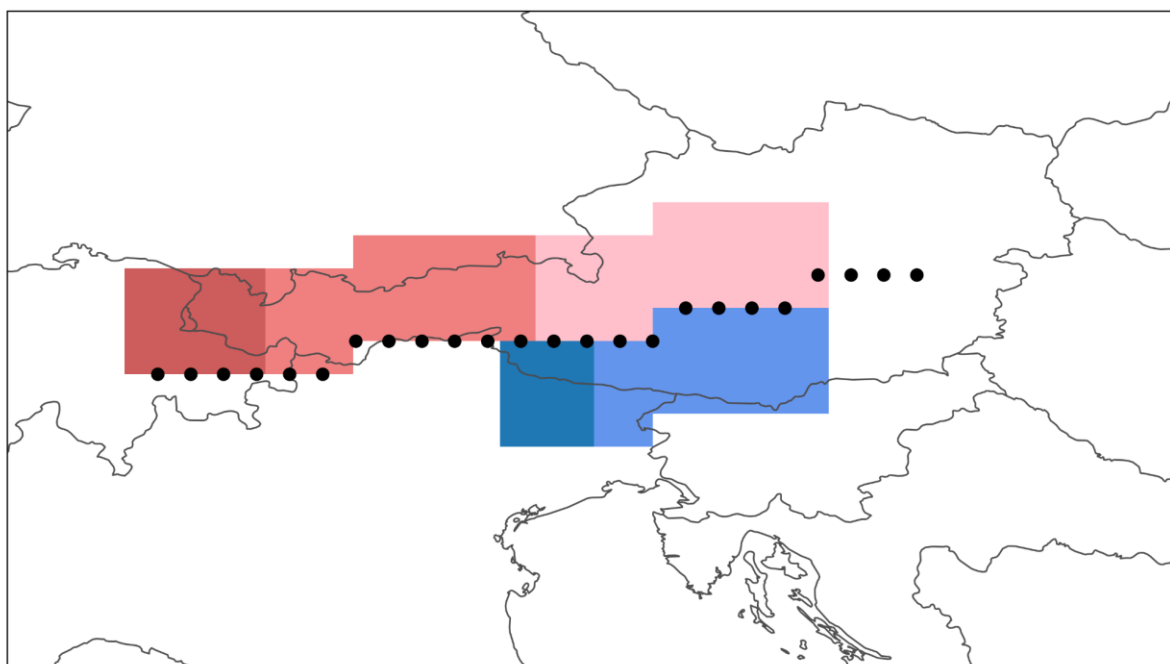


Abbildung 4: Lage der fünf Föhnregionen. Rote Gebiete kennzeichnen Südföhngebiete, blaue Nordföhngebiete.

Die Windfelder der Fingerprints konnten nicht aus hochaufgelösten WRF Modellierungen abgeleitet werden, da die Durchführung einer so großen Anzahl an Modellierungen den Projektumfang gesprengt hätte, daher wurden diese aus den INCA Windfeldern abgeleitet. Hierzu wurden Föhnstürme mittels der Detektionsmethode für jede der Föhnregionen ausgewählt und die verfügbaren INCA Windböen aller Föhnstürme einer Region gemittelt. Für die Anwendung auf regionale Klimamodelle wurde die absolute Windgeschwindigkeit über die 500 hPa Windgeschwindigkeit linear skaliert.

Eine Evaluierung der Fingerprintmethodik durch den Vergleich der Fläche welches jedes Jahr Windgeschwindigkeiten von mehr als 90 km/h aufweist (siehe Abbildung 5) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den direkten INCA maximalen Windböen. In diesem Zeitraum wurden 56 Stürme detektiert und die Windspitzen durch die Fingerprints detektiert. An Tagen ohne detektierten Sturm wurden die INCA Windböen verwendet. Diese 56 Sturmtage sind nur 0.86 % aller Tage des Zeitraumes, decken aber 8.9 % der Fläche welche 90 km/h exponiert ist und sogar 14.1 % der Fläche welche 120 km/h exponiert ist.

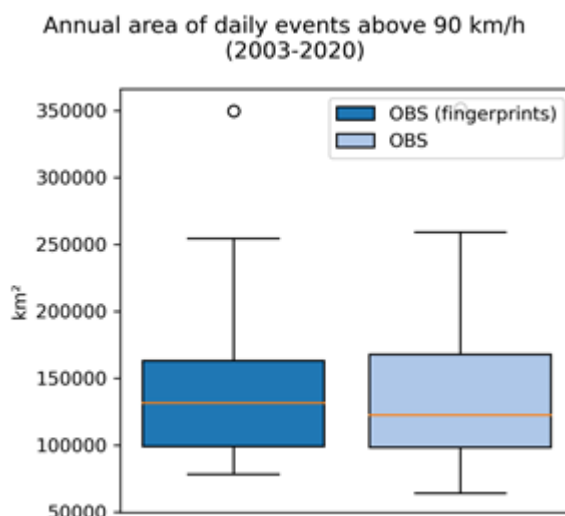


Abbildung 5: Flächen pro Jahr die Windgeschwindigkeiten über 90 km/h ausgesetzt waren berechnet mit den INCA Windböendaten (rechts), sowie mit der Fingerprintmethodik berechnet. Im gesamten Zeitraum wurden 56 Sturmereignisse mittels Fingerprint geschätzt. Die Ergebnisse stimmen sehr gut überein.

Anwendung auf Klimawandelszenarien

Die Zuordnung von Atlantischen Stürmen und Föhnstürmen in der Referenzperiode 1981-2010 liefert aufgrund der impliziten Fehlerkorrektur sehr gute Ergebnisse (siehe Abbildung 6). Bei den Atlantischen Stürmen wird die Häufigkeit fast perfekt von allen drei Modellen repliziert. Die Föhnstürme zeigen bei allen drei Modellen eine Unterschätzung, welche bei zwei Modellen sehr gering ist, bei einem Modell jedoch in der Größenordnung von 30 % liegt.

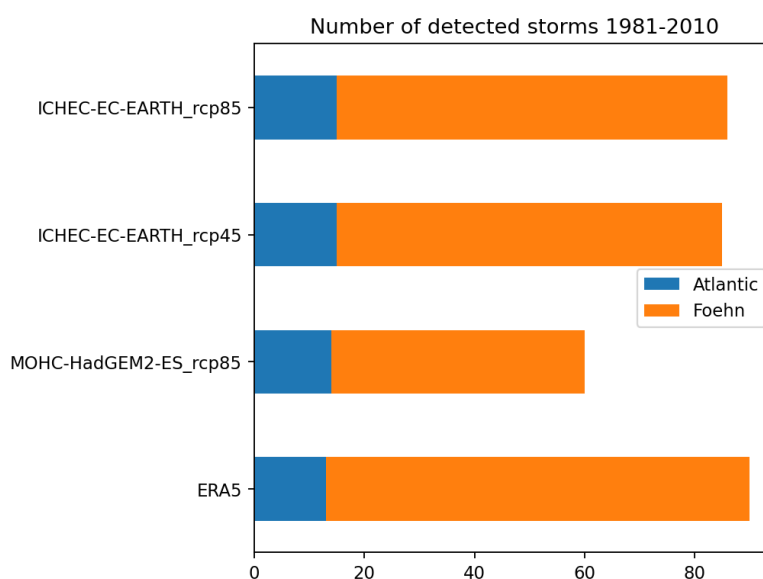


Abbildung 6: Anzahl an Atlantischen- (blau) sowie Föhnstürmen detektiert für den Referenzzeitraum 1981-2010 in der Reanalyse (ERA5) und drei regionalen Klimamodellen. Die Häufigkeit der Atlantischen Stürmen wird von allen drei Klimamodellen gut wiedergegeben, bei den Föhnstürmen unterschätzt ein Modell die Häufigkeit um rund 30 %.

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der Föhn- und Atlantischen Stürmen (Abbildung 7) so sieht man bei beiden Kategorien und allen drei Modellen eine starke dekadische Schwankung, jedoch keinen zeitlichen Trend. Die starken Schwankungen von Jahr zu Jahr und auf dekadischer Zeitebene decken sich mit den historischen Beobachtungen.

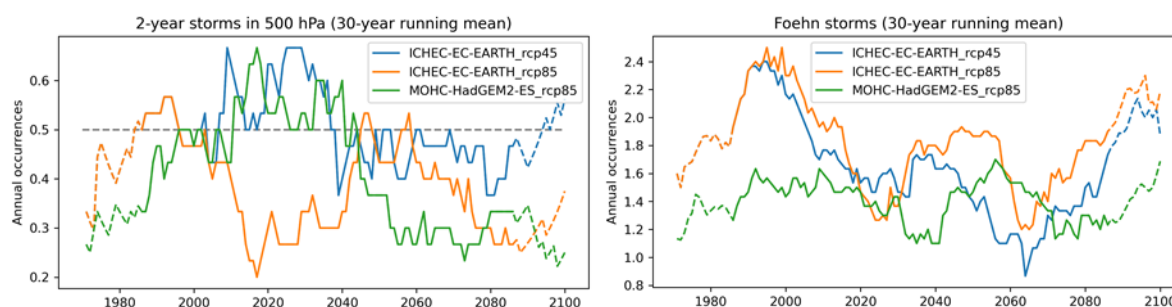


Abbildung 7: Szenarien der zeitlichen Entwicklung des Auftretens von Atlantischen Stürmen (links) und Föhnstürmen (rechts) in Österreich, wie mit der Fingerprint Methodik definiert, während des 21. Jahrhunderts. Die Daten sind durch ein 30jähriges Mittel geglättet. Beide Sturmtypen zeigen in den drei ausgewählten Szenarien keinen zeitlichen Trend, jedoch eine hohe dekadische Variabilität. Dies ist in Übereinstimmung mit historischen Beobachtungen.

Simulation von Sturm- und Borkenkäferschäden

Anhand von zwei Simulationsexperimenten wurde überprüft, wie gut mit den zur Verfügung stehenden Sturm- und Borkenkäferdaten und dem PICUS Waldökosystemmodell Störungen im österreichischen Wald simuliert werden können.

Voraussetzung für die Störungssimulationen ist die Herstellung eines räumlich expliziten Waldzustands im Jahr 2000. Abb. 8 zeigt schematisch das Vorgehen.

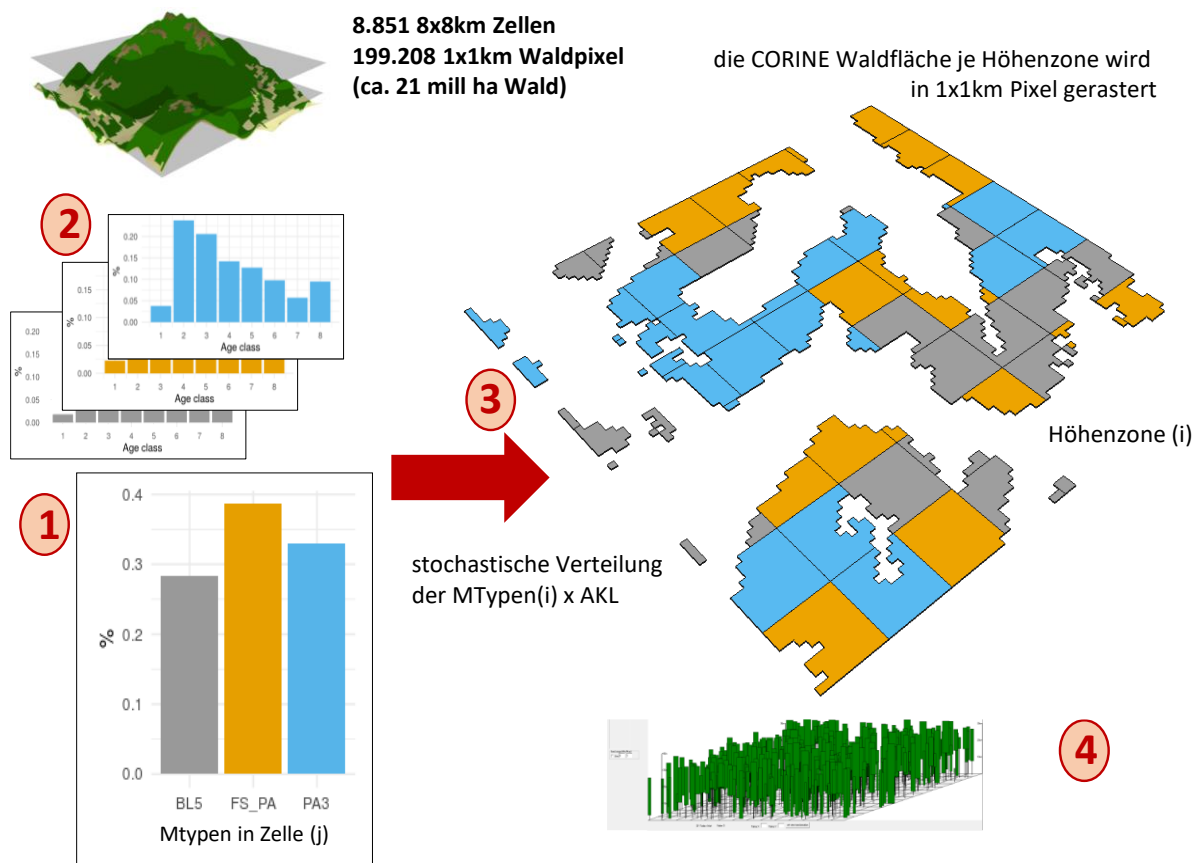


Abb. 8. Herstellung des initialen Zustandes des österreichischen Waldes im Jahr 2000 auf Basis von Daten der Österreichischen Waldinventur (ANFI). (1) aus ANFI daten werden repräsentative Waldtypen extrahiert und in räumliche Starten aus Höhenzone, CORINE-Landcover-Typen und 8x8km Pixeln, Stratifizierung der Waldtypen in den 8x8km Zellen nach Altersklassen (2) und zufällige Verteilung auf den 1x1km grids (3), (4) Generierung einer virtuellen Baumpopulation in jedem grid.

In Experiment 1 wurden zwei spezifische Sturmereignisse in Kärnten simuliert: ein Gewittersturm vom 10. August 2017 und den Föhnsturm Vaja vom 12. November 2018. Mit den mit der Fingerprinting – Methode aufbereiteten Windgeschwindigkeitsdaten auf 1x1km Auflösung konnten die terrestrisch ermittelten und kartierten Sturmschäden im Wald räumlich sehr gut rekonstruiert werden. Abb. 9 zeigt die Simulation und die kartierten Schäden aus dem Föhnsturm Vaja.

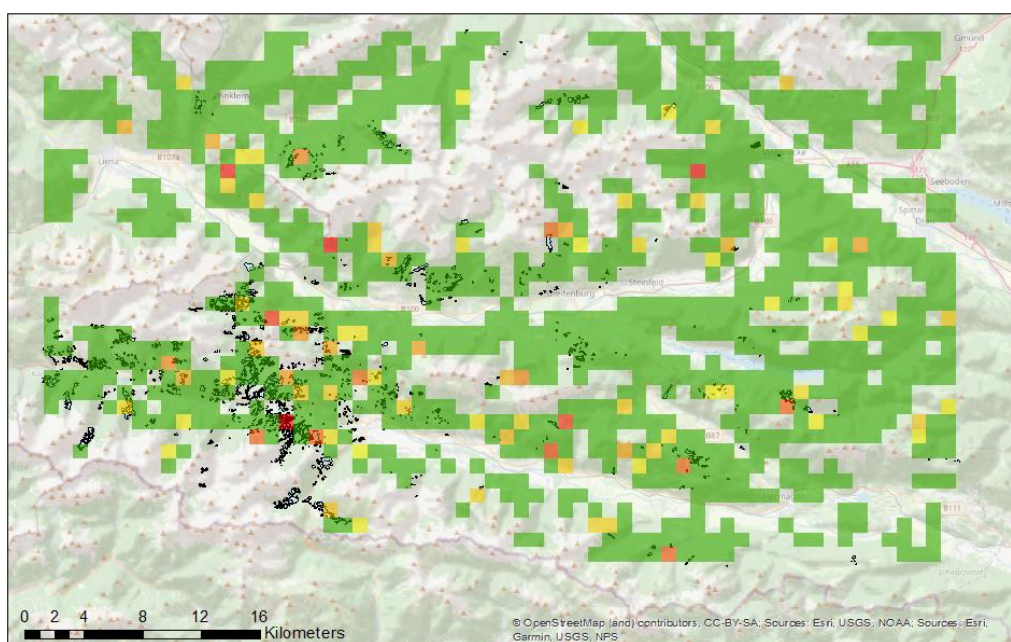


Abb. 9. Simulierter Sturmschaden (gelb-rote Pixel) aus Föhnsturm Vaja (12.11.2018). Schwarze Polygone sind terrestrisch kartierte beobachtete Sturmschäden, grüne Pixel ist Wald ohne Sturmschaden.

In Experiment 2 wurde der gesamte österreichische Wald wie in Experiment 1 in 1x1km Pixel-Auflösung aus Daten der Österreichischen Waldinventur initialisiert und die Sturm- und Borkenkäferschäden für die Periode 2003-2019 simuliert. Verwendet wurden dazu 2 Datensätze zu Windgeschwindigkeiten in 1x1km Auflösung, ein Datensatz mit originalen Windgeschwindigkeiten aus der INCA Reanalyse (WF1), ein weiterer mit der Fingerprinting Methode verbesserter Datensatz (WF2). Die simulierten Sturm- und Borkenkäferschäden wurden mit den bezirksweisen Daten des Waldschadenmonitorings (WSM) verglichen.

Insgesamt berichtet das WSM für die Periode 2003-2019 von 37.1 mill. m³ Sturmschaden. PICUS simuliert mit den beiden Winddatensätzen 51.8 mill. m³ (WF1) bzw. 53.5 mill. m³ (WF2). Dies ist zwar eine deutliche Überschätzung, die Korrelation mit den bezirksweisen Schadensmengen ist jedoch gut, der Anteil der erklärten Varianz durch die Simulation beträgt $R^2 = 0.55$ bzw. 0.53 .

Borkenkäferschäden in Fichtenbeständen werden hauptsächlich durch klimatische Bedingungen und die Verfügbarkeit von Brutmaterial bestimmt. Zusätzlich gibt es eine Verstärkung durch Sturmschäden und fallweise Managementaktivitäten, da dadurch zusätzliches Brutmaterial bereitgestellt werden kann. Tabelle x zeigt kumulierte Sturm- und Borkenkäferschäden aus der Simulation und den Beobachtungen des WSM.

Table 2. Simulierte und beobachtete (WSM) Sturm- und Borkenkäferschäden im österreichischen Wald in der Periode 2003-2019. [mill. m³]

Störungsfaktor	WSM	Simuliert (WF1)	Simuliert (WF2)
Sturm	37.1	51.8	53.5
Borkenkäfer	34.6	30.8	30.6

Die Borkenkäferschäden wurden in der Simulation etwas unterschätzt, die erklärte Variation betrug in beiden Fällen $R^2 = 0.48$. Mit den zunehmenden Sturmschäden in WF2 würde man auch höhere Borkenkäferschäden erwarten. Detailanalysen ergaben, dass die vermehrten Stürme in WF2 in Berglagen auftreten wo Borkenkäfer keine günstigen Entwicklungsbedingungen vorfinden und daher der erwartete positive Feedback durch Sturmschäden nicht auftritt. Ebenfalls dämpfend auf Borkenkäferschäden wirken sich in tieferen Lagen die zunehmenden Sturmschäden aus, da weniger geeignete Wirtsbäume zur Verfügung stehen.

Sturm- und Borkenkäferschäden im Klimawandel

Der österreichische Wald wurde unter historischem Klima und drei Klimawandelszenarios bis 2100 simuliert. Dabei wurden für jeden simulierten Waldtyp zwei Konzepte zur Bewirtschaftung (Großprivatwald, Kleinprivatwald) und ein No-Management-Typ anteilmäßig umgesetzt.

Die im historischen Baseline-Klima simulierten Sturm- und Borkenkäferschäden entsprachen sehr gut den langjährigen Schadholzstatistiken. Abb. 10 zeigt relativ zum Baseline-Klima die Schäden durch Borkenkäfer in den drei Klimawandelszenarios.

Abb. X darunter die Schäden durch Sturm. Während die Borkenkäferschäden in den Klimawandelszenarios zunehmen sind die Sturmschäden in allen drei Klimawandelszenarios deutlich unter denen des Baseline-Klimas.

Aus Abb. 10 geht hervor, dass in den Klimawandelszenarios die Sturm-Exposure deutlich geringer ist als im Basisklima, das aus den Meßwerten der Periode 2003-2020 generiert wurde (vgl. auch Abb. 7).

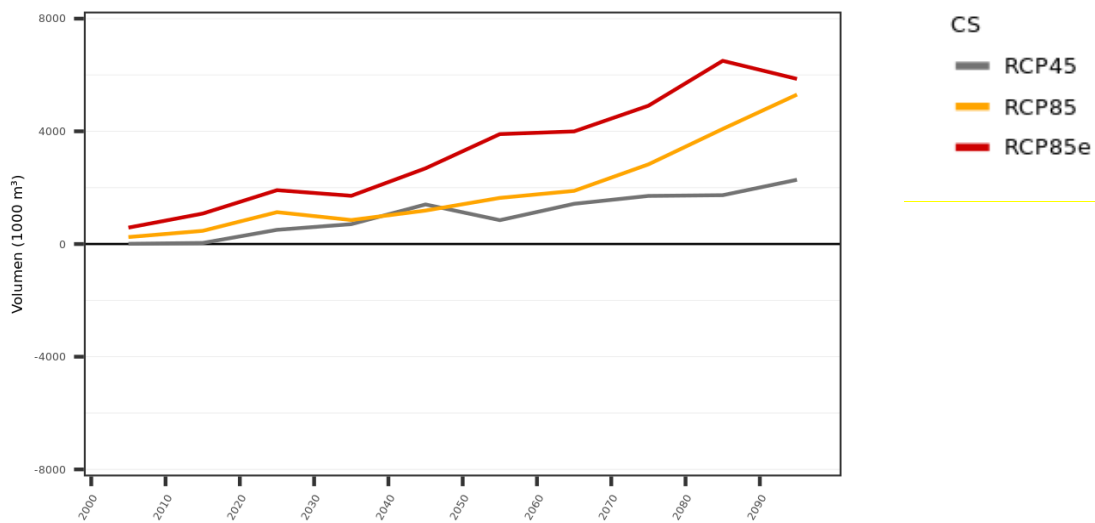


Abb. 10. Simulierte Borkenkäferschäden im österreichischen Wald unter drei Klimawandelszenarios in Relation zu den Schäden unter historischem Baseline-Klima und aktuellen Bewirtschaftungskonzepten.

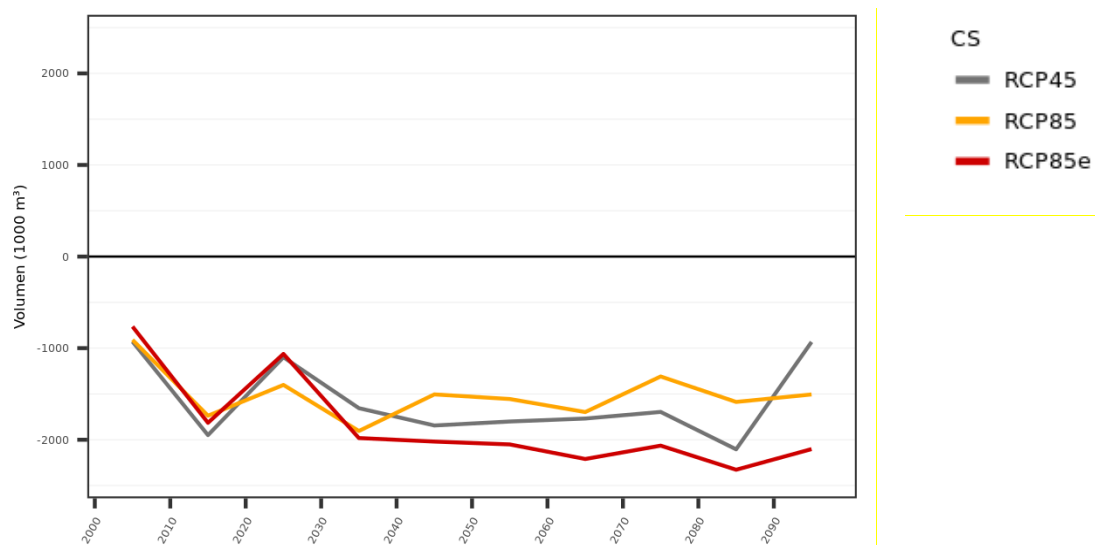


Abb. 11. Simulierte Sturmschäden im österreichischen Wald unter drei Klimawandelszenarios in Relation zu den Schäden unter historischem Baseline-Klima und aktuellen Bewirtschaftungskonzepten.

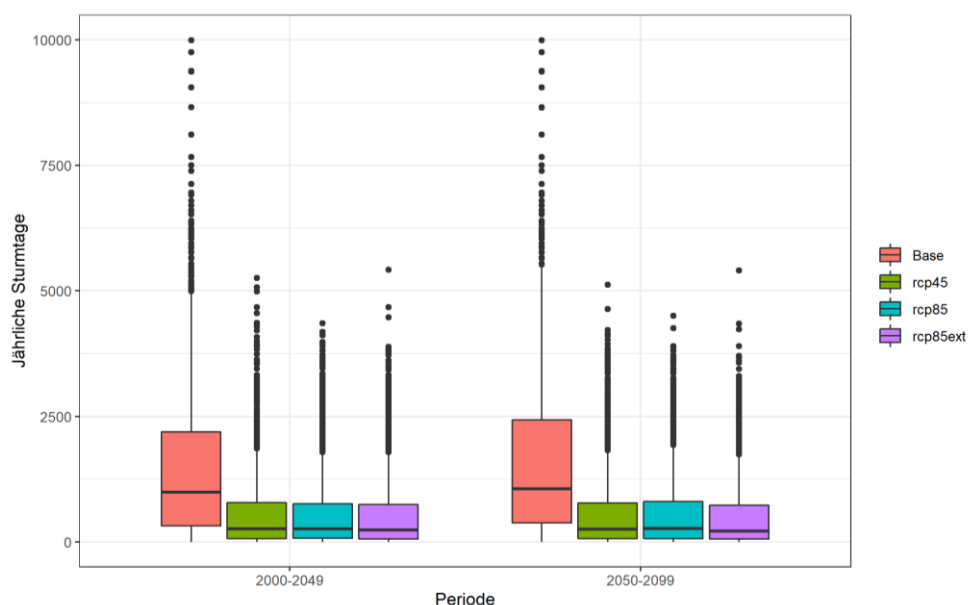


Abb. 12. Exposure in Bezug auf Sturm ausgedrückt durch die Anzahl der Sturmtage (Waldpixel x Stürme >90km/h) im historischen Basisklima und den drei Klimawandelszenarios (incl. Fingerprint Methode).

Eine Umfrage unter Störungsmodellierern mittels eines Fragebogens bestätigte die Bedeutung von verbesserter Berücksichtigung von multiplen Störungsfaktoren in dynamischen Waldökosystemmodellen.

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

(max. 5 Seiten)

Sturmszenarien

Regionale Klimaszenarien liefern aufgrund ihrer räumlichen Auflösung unterschätzte Windgeschwindigkeiten, die grundsätzliche Information über die Intensität des Sturmes ist jedoch in ihnen enthalten. Dies gilt für Atlantische Stürme und Föhnstürme, jedoch nicht für Starkwinde im Zusammenhang mit Gewitter. Diese können derzeit nicht direkt aus den Modellen abgeleitet werden.

Für Atlantische Stürme und Föhnstürme können die maximalen Windspitzen mittels statistischer Methoden abgeleitet werden. Die hier individuell für Atlantische- und Föhnstürme entwickelten Fingerprintmethoden führen zu deutlich realistischeren Windgeschwindigkeiten und räumlichen Muster, als die klassische Fehlerkorrektur, bei der der Tagesmittelwind fehlerkorrigiert wird und anschließend die maximale Windböe mittels Regression geschätzt wird.

Eine Limitierung der Fingerprintmethode bei Föhnstürme stellt die Qualität der verfügbaren gerasterten Windgeschwindigkeiten (INCA) dar. Eine Verbesserung der Windinterpolation in diesem Datensatz und eine historische Nachrechnung mit der verbesserten Methodik um einen homogenen Datensatz zu erhalten, wäre sehr

hilfreich. Dies gilt umso mehr, da belastbare Beobachtungsdaten auch für die Evaluierung der Regionalen Modelle notwendig sind.

Derzeit scheinen unsere WRF Modellwinde mit 1 km Auflösung bei Atlantischen- und Föhnstürmen deutlich plausiblere räumliche Strukturen als auch absolute Windgeschwindigkeiten zu haben, als die INCA Daten.

Die entwickelten Fingerprintmethoden sind für die Fehlerkorrektur für Windspitzen von Klimamodellen geeignet. Die Föhnfingerprints sollten jedoch durch hochaufgelöste Regionalmodellierung abgeleitet werden und nicht aus den INCA Daten. Auch scheint im Nachhinein die Festsetzung der Schwellwerte für die Detektion der Stürme etwas zu hoch. Eine Ersetzung einer höheren Zahl an Stürme hätte die Plausibilität der Klimaszenarien verbessert, da mit der klassischen Fehlerkorrektur deutlich weniger sturmbetroffene Flächen generiert werden. Dies geht jedoch nicht so einfach, da für schwächere Stürme auch die Anzahl der zur Auswahl stehenden Fingerprints erhöht werden muss. Eine weitere Forschung in diese Richtung erscheint uns jedoch sehr sinnvoll.

Störungssimulation

Vier Millionen Hektar Wald wurden in einem stratifizierten Verfahren in 1x1km Auflösung basierend auf Daten der Österreichischen Waldinventur, einem DTM und CORINE Landcover-Typen hergestellt. Jede 1x1km Zelle wurde durch 1-2ha grosse virtuelle Bestände repräsentiert, die die Simulationsentitäten darstellten. Es handelt sich also bei der hergestellten Waldlandschaft noch immer um einen „punkt-basierten“ Inventuransatz, der jedoch eine explizite räumliche Komponente aufweist. Mit dem Klimaparametern inkl. der verbesserten Windgeschwindigkeitsdaten konnten Sturm- und Borkenkäferschäden auf Bezirksebene für die Periode 2003-2019 gut mit dem auf dem Waldökosystemmodell PICUS aufbauenden Simulationskonzept reproduziert werden (R^2 zwischen 0.48 and 0.55). Die absoluten Summenwerte für Borkenkäferschäden waren sehr nahe an den Beobachtungsdaten. Die Sturmschäden wurden deutlich überschätzt. Die gute korrelative Übereinstimmung zwischen Beobachtungen und Simulationsoutput belegt jedoch die interne Konsistenz des Störungsmoduls. Eine neukalibrierung der Gleichungen für Schadenswahrscheinlichkeit und -intensität bietet sich an, um die ursprünglich für Einzelbestände entwickelten Gleichungen für regionale Anwendungen anzupassen. Das Borkenkäfermodul bewährte sich und erzielte sehr gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen. In einer verbesserten Version könnte die Insektenpopulationsdynamik explizit in Mehr-Jahreszyklen berücksichtigt werden. Während Stürme in den Daten direkt einen Sturmschaden auslösen können, beeinflussen in der Realität bei Borkenkäferstörungen zusätzlich die gesetzten Forstschutzmaßnahmen die Schadenshöhe, was eine jahresspezifische Schätzung von Schäden sehr schwierig macht und eine noch höhere Genauigkeit als unwahrscheinlich erscheinen lässt.

C) Projektdetails

6 Methodik

(max. 10 Seiten)

Die in WINDFALLS zur Anwendung gelangenden Methoden wurden bereits in o.g. Kapiteln vorgestellt. Insgesamt kann gesagt werden, dass in AP3 innovative Methoden zur Erkennung von Stürmen in Outputfiles von Wetter- und Klimamodellen entwickelt wurden. Auch in AP4 wurden „state-of-the-art“ Waldökosystemmodelle und Störungsmodule verwendet. Die empirische Datenbasis, die zur Herstellung des Ausgangszustandes des österreichischen Waldes verwendet wurde, ist exzellent. Der methodische Ansatz, die repräsentativen Waldtypen in 1x1km Pixeln zu initialisieren kann als innovativ bezeichnet werden. Damit wurde die räumlich explizite Simulation von Borkenkäfer- und Sturmstörungen ermöglicht für 4 mill ha Wald ermöglicht.

7 Arbeits- und Zeitplan

(max. 1 Seite)

Das WINDFALLS Projekt wurde ursprünglich mit 30 Monaten geplant und am 01.06.2018 begonnen. Wegen Verzögerungen bei der Datenübergabe durch die ZAMG und der Datenaufbereitung durch MitarbeiterInnen-Wechsel sowie allgemeine Verzögerungen durch die Covid19-Einschränkungen an der BOKU wurde die Projektdauer auf 37 Monate verlängert (Projektende: 30.05.2021).

Die meisten Abstimmungstreffen fanden online in Zoom statt. Physische Projekttreffen waren kurzzeitig im Herbst 2020 und im Frühsommer 2021 möglich.

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Tabellarische Angabe von wissenschaftlichen Publikationen, die aus dem Projekt entstanden sind, sowie sonstiger relevanter Disseminierungsaktivitäten.

Am 15. Juli 2020 erschien in der Tageszeitung Die Presse ein Artikel über das WINDFALLS Projekt. In der Folge wurde ein längerer Artikel in der Fachzeitschrift der Land- und Forstbetriebe Österreichs publiziert.

- Lexner, M.J. 2020. Blinde Flecken für Sturm- und Borkenkäferschäden sichtbar machen. Aktuell. Land- u. Forstbetriebe Österreichs 3/20.
- Wind, M., Leidinger, D., Frisch, A., Formayer, H., Lexner, M.J. 2019. WINDFALLS - Sturmschäden im österreichischen Wald: vom kleinräumigen Gewitter zum überregionalen Sturm. Poster am Klimatag 2019.
- Formayer, H., Lehner, F., Leidinger, D. NN (in preparation). Finger-print approach for bias correcting climate change scenarios of Föhn wind in Austria. Planned to be submitted to "Theoretical and Applied Climatology" or „Climatic Change“ in 2022.
- Lexner et al. (in preparation). Simulating wind and bark beetle disturbances in Austrian forests. Demonstration, challenges and prospects. Planned to be submitted to *Environmental Modelling and Software* in 2022.

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

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