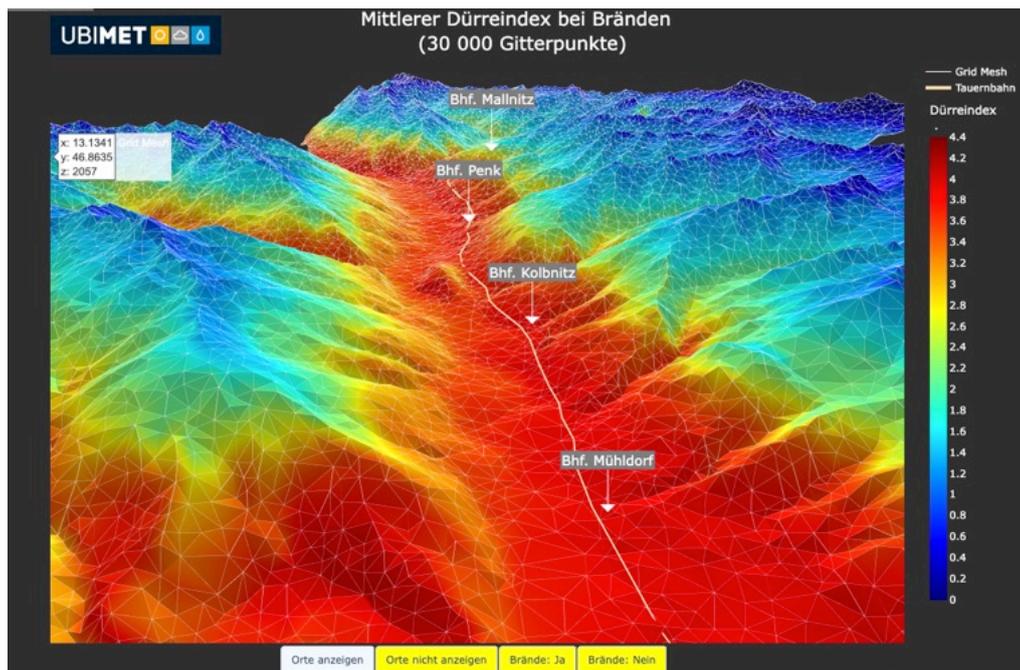


Klimawandelanpassung im Zugverkehr durch Prognose von Extremwetter & klimawandelbedingter Änderungen im Energiedargebot KlimZug

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung 2020
VIF 2020

Juni 2024



Impressum:

Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien
Radetzkystraße 2
1030 Wien

 **Bundesministerium**
Klimaschutz, Umwelt,
Energie, Mobilität,
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG
Praterstern 3
1020 Wien

 **ÖBB**
INFRA

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-
Aktiengesellschaft
Austro Tower
Schnirchgasse 17
1030 Wien

 **ASFiNAG**

Für den Inhalt verantwortlich:

UBIMET GmbH
Donau-City-Straße 11
1220 Wien

 **UBIMET** 
WEATHER MATTERS

Bearbeitung:

Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (HyWa)
Universität für Bodenkultur
Emil-Perels-Haus
Muthgasse 18
1190 Wien

 **BOKU**
Institut für Hydrologie
und Wasserwirtschaft

Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH
Thematische Programme
Sensengasse 1
1090 Wien

 **FFG**
Forschung wirkt.

Klimawandelanpassung im Zugverkehr durch Prognose von Extremwetter & klimawandelbedingter Änderungen im Energiedargebot KlimZug

Ein Projekt finanziert im Rahmen der
Verkehrsinfrastrukturforschung
VIF 2020

Autorinnen und Autoren:

Claudia BENESCH

Michael MOCHART

Auftraggeber:

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

Auftragnehmer:

UBIMET GmbH

Donau-City-Straße 11

1220 Wien

INHALTSVERZEICHNIS

Inhaltsverzeichnis	4
1 EINLEITUNG	5
1.1 Hintergrund.....	5
1.2 Zielsetzungen	5
2 PROJEKTERGEBNISSE	6
2.1 Vorhersage von Extremwetterereignissen und Warnsystem	6
2.1.1 Definition von Extremwetter Szenarien und Möglichkeiten der Vorbereitung	6
2.1.2 Assimilation von GNSS-ZTD-Daten	36
2.1.3 Drohnengetragene Bodenradargeräte für die Bestimmung der Schneehöhe	43
2.1.4 Erweiterung der In-Situ-Messungen	65
2.1.5 Entwicklung eines KI-basierten Kurzzeitprognose-Modells für konvektive Niederschläge.....	73
2.1.6 Entwicklung und Validierung einer Prognose für Dürre und Waldbrandgefahr	76
2.1.7 Entwicklung einer Prognose für kleinräumige Wildbachgefahren	81
2.2 Auswirkungen des Klimawandels auf das Primärenergiedargebot.....	86
2.2.1 Solar- und Windkraft.....	86
2.2.2 Wasserkraft	109
3 AUSBLICK	157
4 LITERATURVERZEICHNIS	159
5 ANHANG	165

1 EINLEITUNG

1.1 Hintergrund

Der Klimawandel schreitet stetig voran und bringt neben der mittlerweile allseits bekannten Steigerung der mittleren Temperaturen auch eine Veränderung der Wetterbedingungen sowie der Intensität und Häufigkeit von Extremwetterereignissen mit sich. Infrastrukturunternehmen wie die ÖBB haben gegenüber solchen Veränderungen eine besondere Risikoexposition, insbesondere weil sich viele relevante Teile des ÖBB-Schienennetzes im Alpenraum befinden. Das ÖBB-Wetterwarnsystem muss durch Einbindung intelligenter Sensorik erweitert werden, um für zukünftige durch den Klimawandel hervorgerufene Wetterereignisse gerüstet zu sein. Zusätzlich beziehen die ÖBB ihren Bahnstrom zu 100% aus erneuerbaren Energien und erzeugen 1/3 des benötigten Stroms selbst aus Wasserkraft. Klimabedingte Änderungen der Wetterverhältnisse können das Dargebot dieser Energiequellen signifikant beeinflussen.

1.2 Zielsetzungen

Die Projektziele von KlimZug teilen sich auf die Themenblöcke „historische Extremwetterereignisse“, „Vorbereitung auf Extremwetterereignisse“ sowie „Primärenergiedargebot“ auf. Bezüglich historischer Extremwetterereignisse war es das Ziel historische Schadensereignisse aus der ÖBB-Ereignisdokumentation zu analysieren, welche inklusive der Auslösung von Naturgefahr-Prozessen zu Behinderungen im Bahnverkehr führen können. Diese Szenarien wurden definiert und in die nächsten Dekaden projiziert und sollen der ÖBB zur besseren Vorbereitung auf Extremwetterereignisse helfen. Im Themenblock „Vorbereitung auf Extremwetterereignisse“ wurden mehrere Teilziele verfolgt. Zunächst wurden neue Messkonzepte getestet und bewertet, darunter die Assimilation von GNSS-ZTD-Daten zur Verbesserung der Niederschlagsprognose, der Einsatz eines drohnengetragenen Bodenradars für die Bestimmung der Schneehöhe sowie In-Situ-Messungen entlang von ausgewählten Streckenabschnitten im ÖBB-Kernnetz. Prognoseseitig war es das Ziel einen KI-basierten Shortrange-Forecast für konvektive Niederschläge zu entwickeln, einen Feuerrisikoindex für das ÖBB-Warnsystem zu testen und ein Abflussmodell für die Prognose von Wildbachgefahren zu optimieren. Bezüglich des Primärenergiedargebots war es das Ziel die Änderungen an PV- und Windkraftstromerzeugung im Zuge des Klimawandels an den Standorten der ÖBB-Kraftwerke zu bewerten. Außerdem sollten

mittels eines hydrologischen Modells die Prognose der klimatisch bedingten Zuflussänderungen zu den ÖBB-eigenen Speicherseen optimiert sowie eine Prognose der Zuflussänderungen zu den Bahnstromlaufwasserkraftwerken abgebildet werden.

Der Endbericht bietet einen Überblick über die im Projekt erzielten Ergebnisse, sowie einen Ausblick über den aktuellen Stand hinaus und weitere Entwicklungsbedarfe der Modelle.

2 PROJEKTERGEBNISSE

2.1 Vorhersage von Extremwetterereignissen und Warnsystem

2.1.1 Definition von Extremwetterszenarien und Möglichkeiten der Vorbereitung

2.1.1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Veränderung des Klimas aufgrund steigender anthropogen verursachter Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre ist bereits spürbar. Der aktuelle IPCC-Report von 2021 (IPCC, 2021) fasst den Status des Klimas wie folgt zusammen:

Jedes der letzten vier Jahrzehnte war wärmer als das jeweilige Jahrzehnt davor. Die globale Oberflächentemperatur war im Zeitraum 2001-2020 um 0,99°C höher und im Zeitraum 2011-2020 um 1,09°C höher als im Vergleichszeitraum 1850-1900, mit einer größeren Zunahme über Land (1,59°C) als über Wasser (0,88°C). Der lokal gemittelte Niederschlag über Land hat wahrscheinlich seit 1950 zugenommen, mit einer schnelleren Rate seit den 1980er Jahren. Aufgrund des Klimawandels haben sich die Vegetationszonen polwärts verschoben und die Vegetationsperiode hat sich im Durchschnitt um 2 Tage pro Dekade seit den 1950er Jahren verlängert. Der vom Menschen verursachte Klimawandel beeinflusst bereits viele Wetter- und Klimaextreme in allen Regionen der Welt. Der Nachweis von beobachteten Veränderungen bei Extremen wie Hitzewellen, Starkniederschläge, Dürren und tropische Wirbelstürme und insbesondere deren Zuschreibung auf menschlichen Einfluss, hat sich seit dem letzten IPCC-Report 2014 verstärkt.

Ziel im KlimZug-Projekt war es, die konkreten Auswirkungen dieser klimatischen Veränderungen auf die ÖBB-Infrastruktur zu quantifizieren. Insbesondere sollte die prozentuelle Zu- bzw. Abnahme von Schäden aufgrund von Extremwetterereignissen in den einzelnen ASC-Regionen des Streckennetzes und für die unterschiedlichen Schadenskategorien analysiert werden und anschließend Anpassungsmaßnahmen und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

2.1.1.2 Datengrundlage

Die Auswirkungen des Klimawandels sind regional sehr unterschiedlich. Um Trends und Auswirkungen des Klimawandels auf die Häufigkeit und Intensität schadenträchtiger Wetterereignisse ableiten zu können sind Klimaprojektionen nötig. Dabei handelt es sich um Modellsimulationen des künftigen Klimas auf Basis bestimmter Treibhausgasszenarien. Die in diesem Zusammenhang am häufigsten verwendeten Emissionsszenarien sind RCP4.5 und RCP8.5. Sie legen bestimmte Konzentrationsverläufe und damit Energiezunahmen bis zum Jahr 2100 fest. Bei dem eher moderaten Szenario RCP4.5 wird von einer Emissionsreduktion ausgegangen, wobei der Ausstoß an Treibhausgasen bis 2070 das heutige Ausmaß unterschreitet. Im Szenario RCP8.5 („business as usual“) kommt es hingegen zu einem sehr hohen Zuwachs des Strahlungsantriebs, da die globale Wirtschaft weiterhin in einem hohen Ausmaß auf fossilen Energieträgern und damit hohen Treibhausgasemissionen beruht (Chimani, 2016).

Für Österreich existieren in diesem Zusammenhang offizielle Klimaprojektionen des ÖKS15 Datensatzes (Chimani, 2016). Diese beruhen auf der Initiative EURO-CORDEX, dem europäischen Zweig des Regional Climate Downscaling Experiment, mit dem Ziel einer koordinierten Erstellung regionaler Klimaszenarien. Antriebsdaten aus globalen Klimamodellen des CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5) werden hierbei mit regionalen Klimamodellen und bestimmten Downscalingverfahren verknüpft. Für die Erstellung der Klimaprojektionen im Zuge des ÖKS15 Datensatzes wurde auf die hochaufgelösten (~12.5 km) Simulationen von insgesamt 13 regionalen Klimamodellen für die beiden genannten Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 zurückgegriffen. Die räumliche Auflösung der downgescalten ÖKS15 Gitterdatensätze liegt schließlich bei 1 km (Chimani, 2016; BMNT, 2017). Für beide Szenarien wurden die Ergebnisse jeweils für die **nahe Zukunft** (2021-2050) und für die **ferne Zukunft** (2071-2100) mit der Periode 1971-2001 verglichen. Die folgenden Punkte konnten dabei als Zusammenfassung abgeleitet werden.

- Alle Modelle zeigen übereinstimmend signifikante Anstiege der jährlichen wie auch saisonalen Mitteltemperatur in ganz Österreich. In der nahen Zukunft ergibt sich für beide Szenarien ein ähnlicher Anstieg der Jahresdurchschnittstemperatur von 1,3 °C in RCP4.5 bzw. 1,4 °C in RCP8.5. Für die ferne Zukunft wird in RCP8.5 mit österreichweit 4,0 °C (höhere Werte im Westen und Süden) eine wesentlich stärker ausgeprägte Temperaturzunahme als in RCP4.5 mit 2,3 °C erwartet. Im Winter ist in beiden Szenarien österreichweit sowohl in der nahen als auch in der fernen Zukunft die

Erwärmung im Mittel am stärksten ausgeprägt (4,4 °C in RCP8.5, 2,4 °C in RCP4.5), im Frühling jeweils am schwächsten (3,7 °C in RCP8.5, 2,1 °C in RCP4.5).

- Für die nahe Zukunft ergibt sich in beiden Szenarien eine verbreitete Zunahme von Hitze- und Sommertagen im österreichweiten Mittel um etwa 4 Tage bzw. 10 Tage. Signifikante Änderungen ergeben sich jedoch nur für Lagen unterhalb von etwa 1000 m. In der fernen Zukunft wird ein wesentlich höherer Anstieg um durchschnittlich 17,4 Hitzetage in RCP8.5 im Vergleich zu 7 Hitzetage in RCP4.5 zusammen mit deutlichen Anstiegen auch in höher liegenden Regionen angezeigt. Stärkste Zunahmen an Hitzetagen sind im Sommer, im Alpenvorland, dem Flach- und Hügelland und dem Klagenfurter Becken (K) zu finden. Zunehmendes Auftreten von Sommer- und Hitzetagen in den Übergangsjahreszeiten. Höchste Änderungen ergeben sich in RCP8.5 in der fernen Zukunft mit einer Zunahme an Sommertagen von 50 Tagen in der Südoststeiermark und im Nordwesten Vorarlbergs sowie mit 37 Hitzetagen in der Südoststeiermark.
- Eine deutliche Verlängerung der Vegetationsperiode ergibt sich in der nahen Zukunft nur im extremeren RCP8.5 Szenario mit einem Durchschnittswert von +20 Tagen in Gesamtösterreich. In der fernen Zukunft und für beide Szenarien zeigen sich signifikante Verlängerungen von 32,7 Tagen in RCP4.5 und 61,1 Tagen in RCP8.5. Im RCP8.5 Szenario entspricht dies einer Vorverlegung des Vegetationsbeginns um durchschnittlich 36,3 Tage. Besonders deutlich tritt die Verlängerung der Vegetationsperiode entlang des Alpenhauptkamms sowie im nördlichen Alpenvorland hervor.
- Die Kühlgradtage nehmen in beiden Szenarien in der nahen Zukunft österreichweit um rund 57 °C (Kd) zu. Diese Tendenz verstärkt sich in der fernen Zukunft, wobei sich die Szenarien nun deutlich unterscheiden: 94 °C (Kd) in RCP4.5 und 221,7 °C (Kd) in RCP8.5. Regionen in höheren Lagen sind weniger stark betroffen. Die größten Anstiege verzeichnen das Alpenvorland, das Klagenfurter Becken sowie der Nordwesten Vorarlbergs. Auch im Gebirge tritt erstmals nennenswert Kühlbedarf auf. Die stärkste Zunahme in der fernen Zukunft in RCP8.5 liegt im Burgenland und der Südoststeiermark mit 310 °C (Kd) (entspricht etwa +180 % bzw. +250 %). Hingegen nehmen die Heizgradtage in ganz Österreich signifikant ab, wobei sich für die nahe Zukunft die beiden Szenarien kaum unterscheiden (Änderung um etwa -10 %). Für die ferne Zukunft beträgt die Abnahme in RCP4.5 durchschnittlich 18 % und etwa 30 % in RCP8.5. Die

Abnahme ist im Hochgebirge und entlang des Alpenhauptkamms am stärksten ausgeprägt.

- Die Zahl der Frosttage nimmt im Gesamtjahr bereits in der nahen Zukunft in beiden Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 signifikant um 20,5 Tage bzw. 24,5 Tage ab. Für die ferne Zukunft des RCP8.5 ergibt sich eine markant stärkere Abnahme von 70 Tagen, im Vergleich zu 41,8 Tagen in RCP4.5. Stärkste Ausprägung in hohen Geländelagen.
- Analog zu den Frosttagen nimmt auch die Zahl der Eistage deutlich ab: in der nahen Zukunft in beiden Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 um 12,6 Tage bzw. 13,3 Tage. In der fernen Zukunft setzt sich diese Entwicklung fort und es ergeben sich Abnahmen um 21,3 Tage (RCP4.5) bzw. 33,7 Tage (RCP8.5).
- Die Änderung der Frost-Tau-Wechseltage von Oktober bis November tritt erst in der fernen Zukunft deutlich hervor. Höchste Abnahmen um 17 Tage ergeben sich entlang der nördlichen Kalkalpen und im Oberinntal, geringste Abnahmen im Alpenvorland und in Hochgebirgslagen über 2800 m. Im Jänner und Februar ergeben sich ebenso erst in der fernen Zukunft größere Gebiete mit signifikanten Änderungen, vor allem in RCP8.5. In den Alpenvorländern und im Klagenfurter Becken (K) werden Abnahmen der Frost-Tau-Wechseltage angezeigt, im Oberinntal (T) und Osttirol Zunahmen von bis zu 16 Tagen (RCP8.5).
- Niederschläge weisen eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität auf. Es ergeben sich im Allgemeinen weniger zuverlässige Aussagen. Österreichweit zeigen sich signifikante Änderungen der Jahresniederschlagssumme erst für die ferne Zukunft und auch nur vereinzelt (RCP4.5) oder in etwas größeren zusammenhängenden Gebieten (RCP8.5). In RCP8.5 nimmt die Niederschlagsmenge im österreichischen Durchschnitt in der fernen Zukunft um 8,7 % zu. Besonders deutliche Änderungen zeigen sich entlang des Alpenhauptkamms sowie im Hochland nördlich der Donau (Böhmische Masse). Die größte Zunahme mit 18 % liegt im Umland von Linz (OÖ).
- Im saisonalen Vergleich zeigen sich nur im RCP8.5 Szenario der fernen Zukunft signifikante Änderungen für größere zusammenhängende Gebiete. Dies gilt im Winter vor allem für Nordostösterreich mit einer Zunahme von durchschnittlich 30 % sowie im Frühling im Bereich der nördlichen Kalkalpen und dem nördlichen Alpenvorland mit einer Zunahme von rund 18 %. Im Sommer zeigen sich bis auf wenige kleinräumige Ausnahmen keine signifikanten oder interpretierbaren Änderungen. Der Herbst liefert nur für kleinere Gebiete des nördlichen Alpenvorlands eine deutliche Änderung mit einer mittleren Zunahme von 18 %.

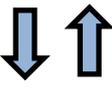
- Für die Niederschlagstage liefern die Modelle kaum interpretierbare Ergebnisse. Einzig für die ferne Zukunft im RCP8.5 werden im Sommer größere zusammenhängende Gebiete vor allem entlang der nördlichen Kalkalpen und im nördlichen Alpenvorland mit einer signifikanten Abnahme von mehr als 4 Tagen sichtbar.
- Signifikante Änderungen in größeren zusammenhängenden Gebieten der maximalen Tagesniederschläge ergeben sich erst in der fernen Zukunft in beiden Szenarien und zeigen eine Zunahme im Jahresdurchschnitt an. Für die maximalen Mehrtagesniederschläge tritt eine Zunahme ebenso erst in der fernen Zukunft und ausschließlich in RCP8.5 deutlich hervor. Die deutlichste Änderung ergibt sich im Winter in weiten Teilen Nord- und Ostösterreichs mit Zunahmen zwischen 20 % und 40 %.
- Für Trockenepisoden und Niederschlagsepisoden liefern die Klimaszenarien keine interpretierbaren Änderungen.
- Für die Globalstrahlung ergeben sich für die nahe Zukunft nur in RCP8.5 im Bereich des Alpenhauptkammes Abnahmen von etwa 2 % im Jahresmittel. In der fernen Zukunft setzt sich der Trend zur Abnahme fort. Es ergeben sich Reduktionen bis zu 7 % im Gebirge in RCP8.5. Stärkste Abnahmen österreichweit zeigen sich im Winter (RCP4.5: 4,8 %; RCP8.5: 8,4 %).

Die Zusammenfassung der Ergebnisse belegt eindrucksvoll den enormen Einfluss, den das globale menschliche Verhalten auf die Zukunft der Klimata in Österreich hat. Die simulierten Klimaänderungen gegen Ende des 21. Jahrhunderts sind im *business-as-usual* Szenario, RCP8.5, etwa doppelt so stark ausgeprägt als im moderateren RCP4.5 Szenario.

Auf sehr ähnliche Ergebnisse kommen auch Dalhammer (2015), Kellermann (2017), das Austrian Panel On Climate Change (APCC 2014) im ersten umfangreichen österreichischen Sachstandsbericht *Klimawandel 2014* (König 2014) sowie das Vorgängerprojekt der Verkehrsinfrastrukturforschung „*clim_ect*“ der Technischen Universität Wien (TU Wien), der Universität für Bodenkultur in Wien (BOKU) und der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) im Endbericht (Fian 2021). Eine Übersicht der klimabedingten Veränderungen der relevanten meteorologischen Phänomene und Parameter ist in Tabelle 1 gegeben (Dalhammer 2015).

Tabelle 1: Übersicht von relevanten meteorologischen Phänomenen und deren klimabedingte Veränderung in Österreich.

Meteorologisches Phänomen	Beschreibung	Trend	Wahrscheinlichkeit des Trends
Temperatur			
Schwankungen	Starke Tagesgänge, bzw. Zunahme der Tag zu Tag Variabilität und Volatilität.		Tagesgang im Sommer wahrscheinlich, Tag-zu-Tag Variabilität sehr unsicher
Frost-/Tauwechsel	Positive Temperaturen bei Tag und Frost bei Nacht		In tiefen und mittleren Höhenlagen ist eine Abnahme, sowie eine zeitliche Verschiebung sehr wahrscheinlich.
Hitzewelle	Mehrere Tage mit Maximaltemperaturen über 30°C		Es ist eine Zunahme der Hitzetage sowie das Auftreten neuer Hitzerekorde in allen Höhenlagen sehr wahrscheinlich
Kältewelle	Mehrere Tage mit Maximaltemperaturen unter 0°C		Es ist eine Abnahme von Kältewellen sehr wahrscheinlich, jedoch können sie bis zum Ende des Jahrhunderts noch auftreten.
Mittlere Temperaturveränderung (Anstieg)	Anstieg der Temperatur		Ein Anstieg der Temperatur zu allen Jahreszeiten ist sehr wahrscheinlich.
Mittlere Temperaturverschiebung der Jahreszeiten	Veränderung des Jahresgangs der Temperatur sowie der phänologischen Phasen		Eine Verlängerung der Vegetationsperiode und damit verbundene Phänophasen ist sehr wahrscheinlich.
Niederschlag			
Starkniederschläge (großräumig)	Großflächige Starkniederschläge über mehrere Tage. Große Flusseinzugsgebiete reagieren		Im Winter ist eine Zunahme möglich bis wahrscheinlich. Im Sommer hingegen unsicher aber möglich, da Mittelmeertiefs zwar generell seltener auftreten werden, aber wenn sie auftreten, können sie zu stärkeren Niederschlägen führen.
Starkniederschläge (kleinräumig)	Kleinräumige Starkniederschläge meist in Verbindung mit Gewittern. Betrifft Gebiete von einigen 10 bis einigen 100 km ²		Die Gewitterintensität wird in einer wärmeren Atmosphäre zunehmen, jedoch sind Aussagen zu Gewitterwahrscheinlichkeit nicht belastbar. Eine Zunahme daher möglich aber unsicher
Trockenheit/-perioden	Längere niederschlagsfreie Perioden verbunden mit hoher		Im Sommerhalbjahr ist eine Zunahme wahrscheinlich.

	Evapotranspiration		
Schneefalls (Nassschnee)	Starker Schneefall bei Temperaturen um den Gefrierpunkt.		Verlagerung sowohl zeitlich als auch räumlich wahrscheinlich. In der zweiten Hälfte des Jahrhunderts ist eine Abnahme in tiefen Lagen wahrscheinlich.
Schneefall (allgemein)	Starker Schneefall		In Höhenlagen über 1500 m ist eine Zunahme wahrscheinlich, in tiefen Lagen hingegen eine Abnahme
Eisregen	Regen fällt auf Untergrund mit Temperaturen unter dem Gefrierpunkt		Aussagen für die nächsten Jahrzehnte unsicher, in der zweiten Jahrhunderthälfte Abnahme wahrscheinlich.
Weitere Klimaparameter			
Verschiebung der Wetterlagen	Veränderung der großräumigen Druckfelder. Auswirkung auf die Witterungsabfolge von		Eine Veränderung der großräumigen Druckfelder mit Auswirkung auf Österreich ist möglich (NAO, Arktische Oszillation).
Wind (großräumig-Atlantische Stürme, Föhn)	Atlantische Orkantiefs die bis zum Alpenraum vordringen, sowie extreme Föhnlagen		Keine Veränderung der Atlantischen Orkantiefs in Österreich wahrscheinlich. Aussagen zu Föhnstürmen derzeit nicht möglich
Wind (kleinräumig-Gewitterstürme)	Sturmböen und Tornados in Verbindung mit Gewitter		Die Gewitterintensität wird in einer wärmeren Atmosphäre zunehmen, jedoch sind Aussagen zu Gewitterwahrscheinlichkeit nicht belastbar. Eine Zunahme daher möglich aber unsicher

Für die Analyse der Auswirkungen der Klimatrends hat die ÖBB UBIMET eine Liste mit im Zeitraum von 1990 bis 2019 aufgetretenen Schadenereignissen der Kategorien Schnee, Lawinen, Vereisung, Hitze, Steinschlag, Murenabgänge, Sturmschäden, Flashfloods und Hochwasser übermittelt. Von denen wurden auf Basis der gewählten Untersuchungsmethodik 2098 Schadensmeldungen für das Projekt als relevant eingestuft und verwertet. Die Datenbank beinhaltet neben der Schadenkategorie auch die genauen Koordinaten, die Zeitpunkte, Länge der eventuell aufgetretenen Streckenunterbrechungen sowie, falls bezifferbar, die Schadenssumme. Die historischen Schadenereignisse der ÖBB inkl. Verortung, Zuordnung zu einer der Schadenkategorien *Flooding*, *Flash-Flood*, *Wind-*

Storm, Mudslide, Falling-Rock, Heat, Icing, Avalanche und Snow Abbildung 1 auf einer Österreich-Karte dargestellt. Die zu beantwortende Frage lautet, ob und falls ja, in welchem Ausmaß sich Schäden dieser Kategorien in einzelnen ASC-Regionen des Streckennetzes innerhalb der nächsten drei Jahrzehnten verändern werden.

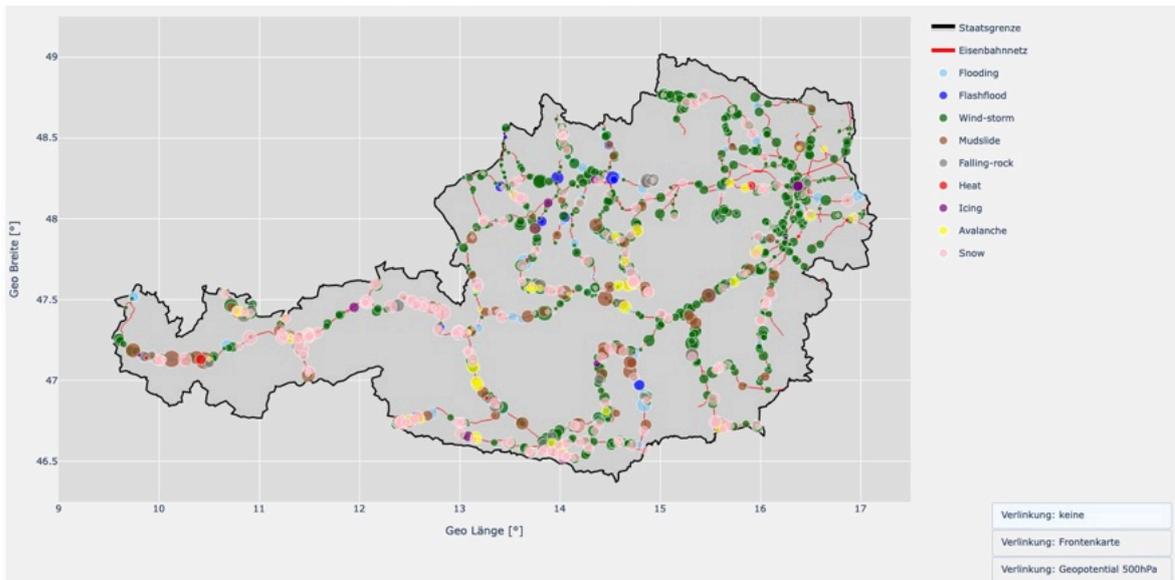


Abbildung 1 Historische Schadenereignisse inkl. Verortung und Zuordnung zu einer der Schadenkategorie.

2.1.1.3 Ergebnisse

In der folgenden Abbildung 2 der prozentuellen Änderungen der Tage mit Schäden und den ASC-Regionen, erkennt man, dass in der Westhälfte Österreichs die Tage mit Schäden laut Klimamodell um 5-10%, im Norden um 3-5% zunehmen werden, während vom Südosten bis in den Nordosten des Landes mit einer Stagnation oder sogar einer leichten Abnahme zu rechnen ist. Dies gilt für die Gesamtbetrachtung über alle Schadenkategorien und Dekaden.

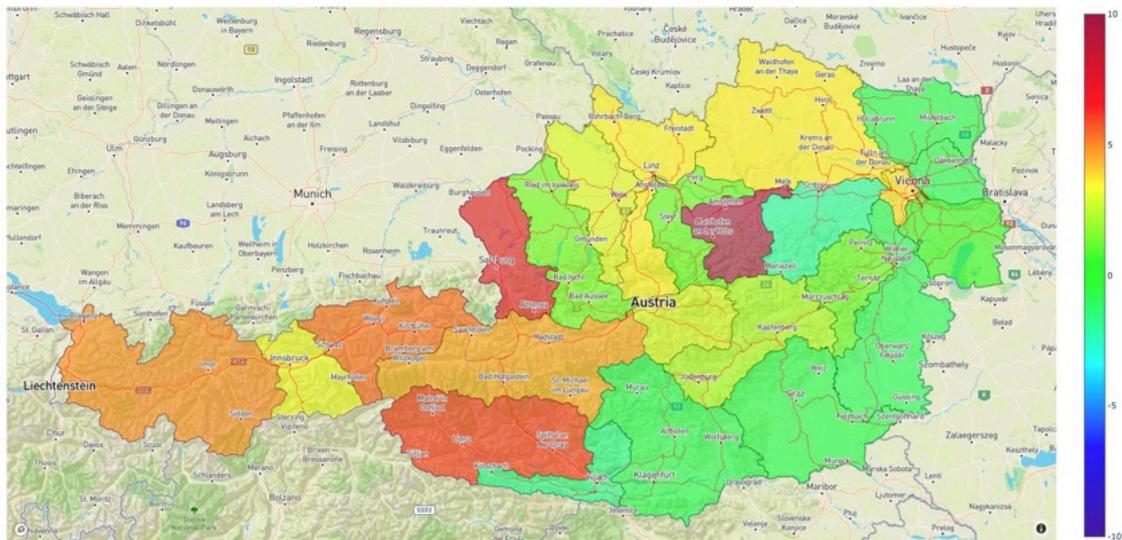


Abbildung 2 Prozentuelle Änderung der Schäden (2021-2050 vs. vor 2020), Alle Kategorien

Darüber hinaus sind in Abbildung 3, Abbildung 4 und Abbildung 5 die prozentuelle Änderung der Schäden in allen Kategorien pro Dekade im Vergleich zu der Periode vor 2020 visualisiert.

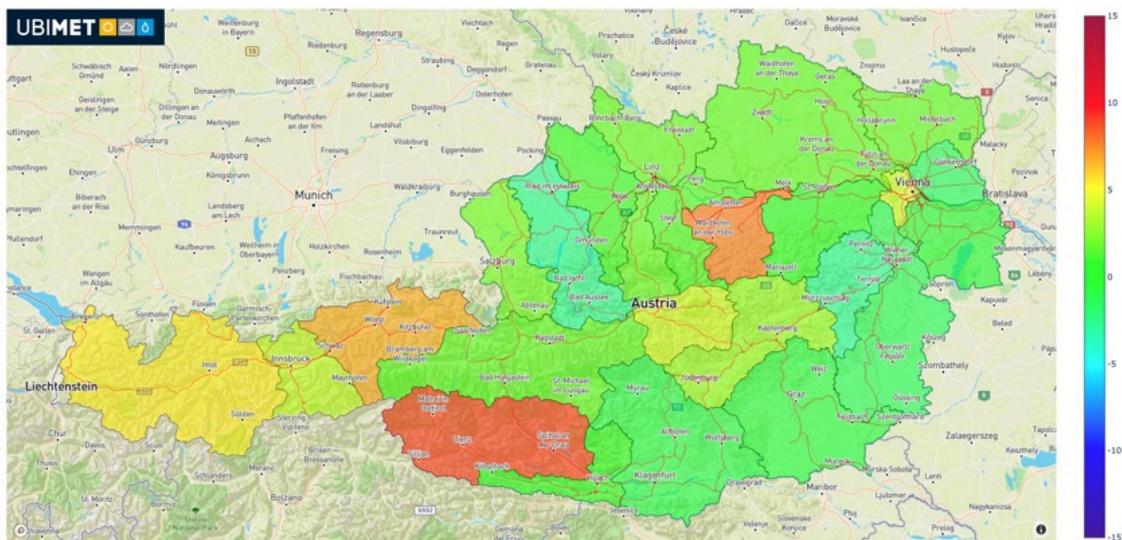


Abbildung 3 Prozentuelle Änderung der Schäden (2021-2030 vs. vor 2020), Alle Kategorien

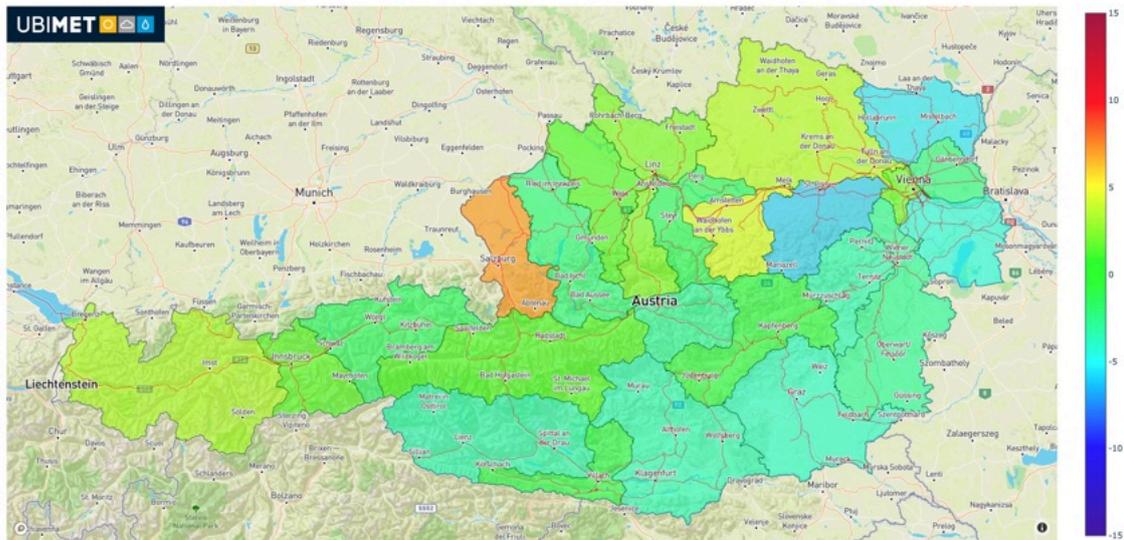


Abbildung 4 Prozentuelle Änderung der Schäden (2031-2040 vs. vor 2020), Alle Kategorien

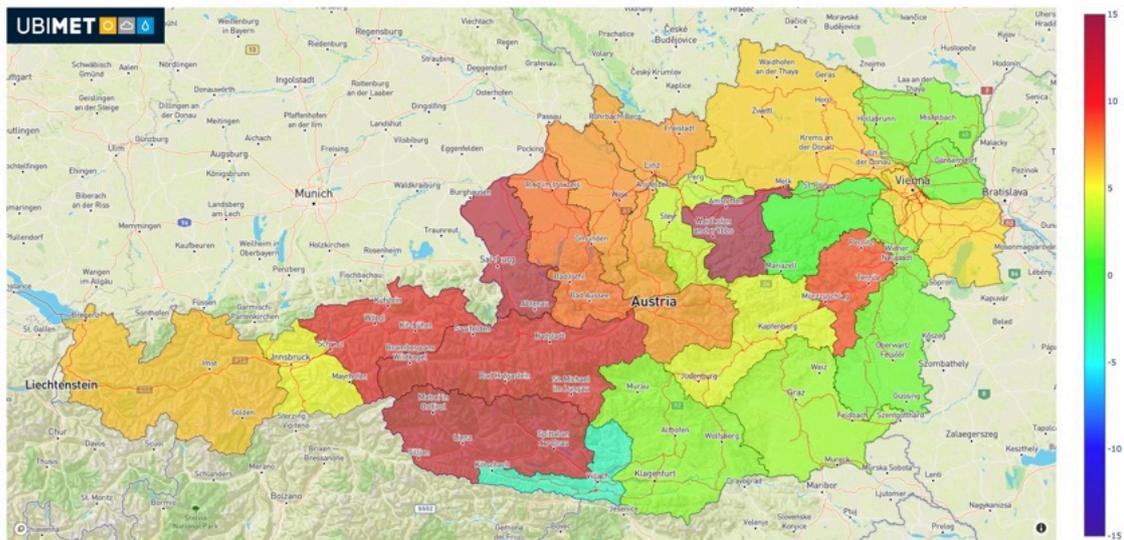


Abbildung 5 Prozentuelle Änderung der Schäden (2041-2050 vs. vor 2020), Alle Kategorien

Folgende wichtige Details sind in Bezug auf diese Analyse anzuführen:

- Die ASC-Region Amstetten sticht hier durch eine hohe relative Zunahme stark hervor, in absoluten Zahlen handelt es sich lediglich um eine Zunahme der Schadenereignisse von 1.62 auf 1.80 Tage/Jahr.
- Im aktuellen Jahrzehnt sind mit Ausnahme der ASC-Regionen Spittal (+9%) und Wörgl (+7%) noch keine sehr starken Änderungen zu erwarten.
- Von 2031-2040 halten sich Zu- und Abnahmen der Schadentage über Österreich verteilt die Waage.

- In der letzten betrachteten Dekade kommt es mit Ausnahme der ASC-Region Villach in ganz Österreich zu teils starken Zunahmen von Schadenereignissen. Im gesamten zentralen Gebiet zwischen dem Tiroler Unterland, Oberkärnten und Oberösterreich ist mit einer Zunahme der Schadenereignisse von 10-15% zu rechnen.

Auch hinsichtlich der einzelnen Schadensklassen wurde die prozentuelle Änderung der Schäden für 2021-2050 im Vergleich zur Periode vor 2020 analysiert, siehe Abbildung 6 bis Abbildung 14. Nicht für alle Schadensklassen und Regionen waren ausreichend historische Schadensdaten vorhanden, um eine valide Prognose der prozentuellen Änderung durchzuführen. Diese Fälle sind in den Abbildung nicht farblich gekennzeichnet.

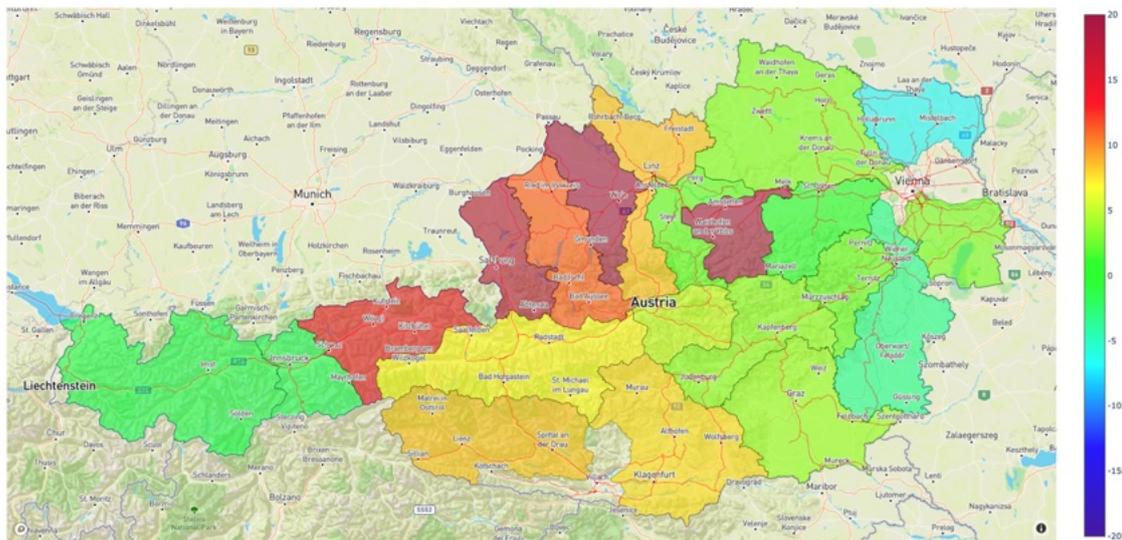


Abbildung 6 Prozentuelle Änderung der Schäden (2021-2050 vs. vor 2020), Kategorie Flooding

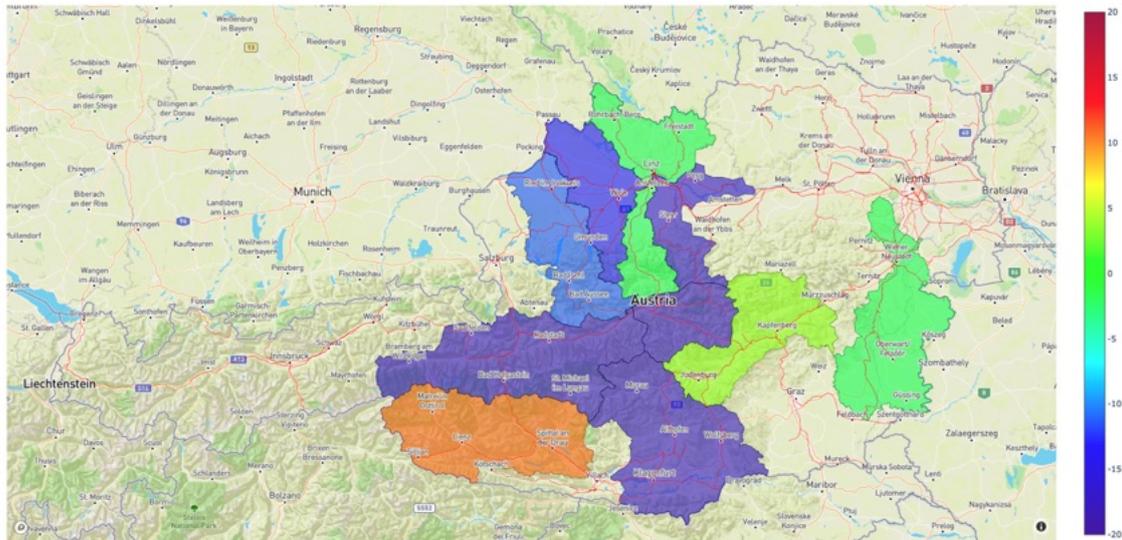


Abbildung 7 Prozentuelle Änderung der Schäden (2021-2050 vs. vor 2020), Kategorie Flashfloods

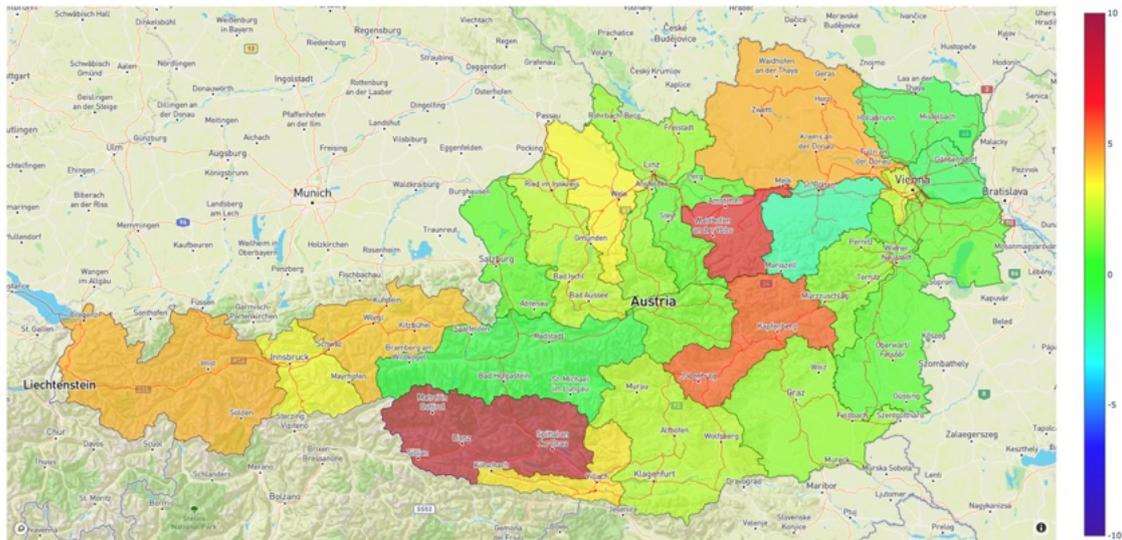


Abbildung 8 Prozentuelle Änderung der Schäden (2021-2050 vs. vor 2020), Kategorie Wind/Sturm

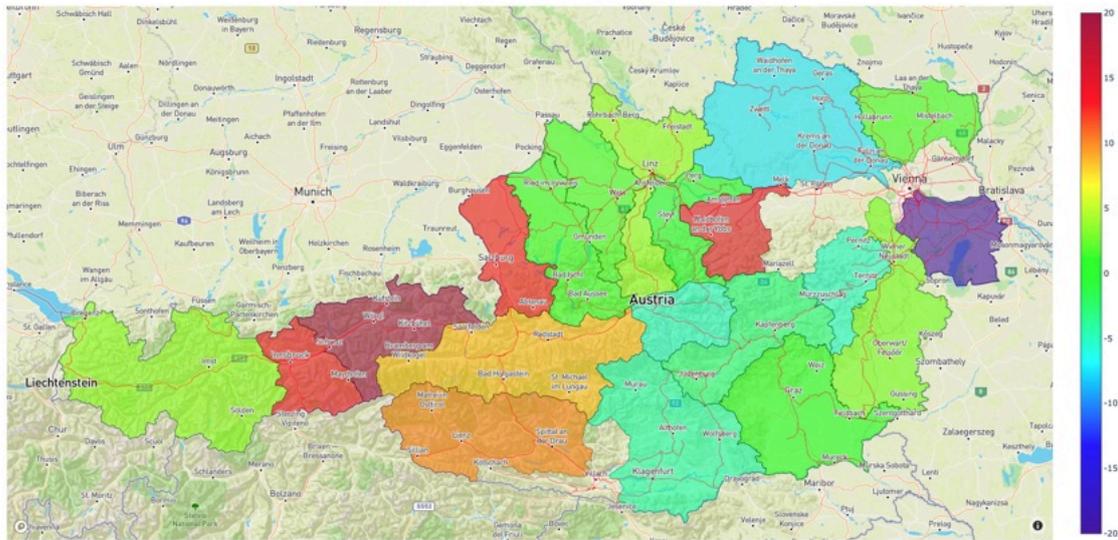


Abbildung 9 Prozentuelle Änderung der Schäden (2021-2050 vs. vor 2020), Kategorie **Mudslides**

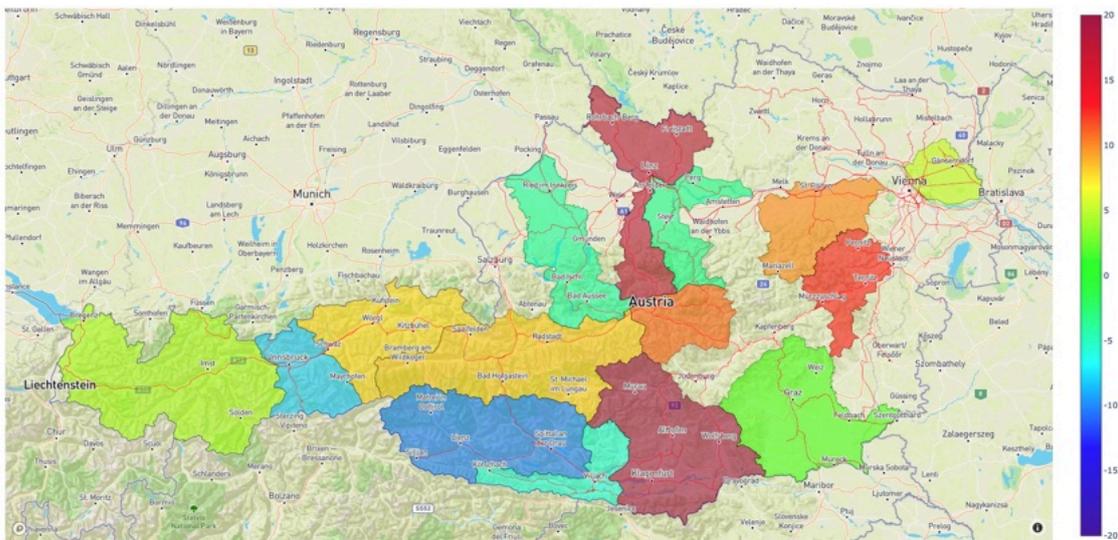


Abbildung 10 Prozentuelle Änderung der Schäden (2021-2050 vs. vor 2020), Kategorie **Falling-rock**

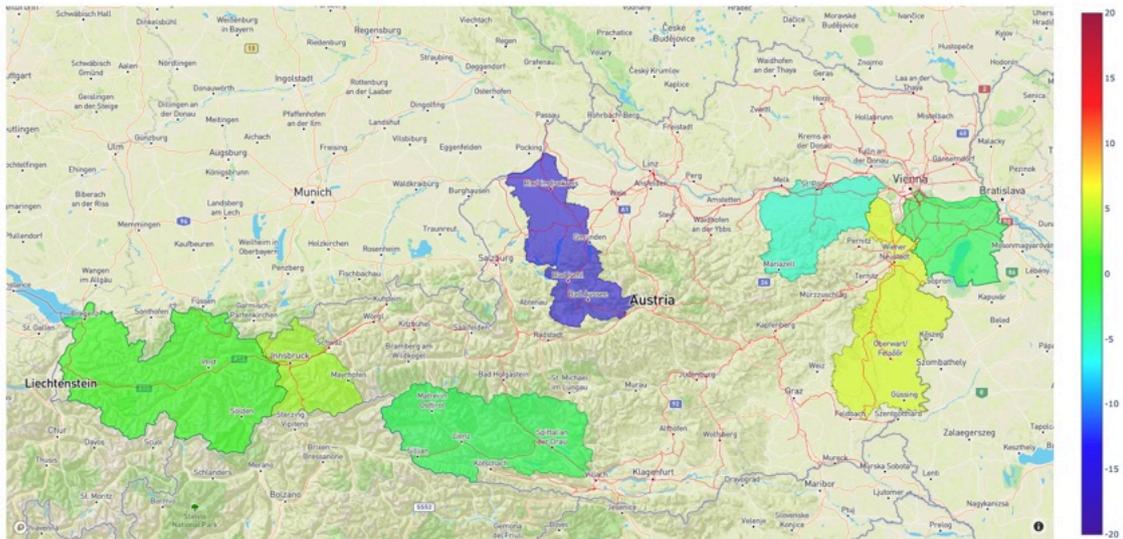


Abbildung 11 Prozentuelle Änderung der Schäden (2021-2050 vs. vor 2020), Kategorie Heat

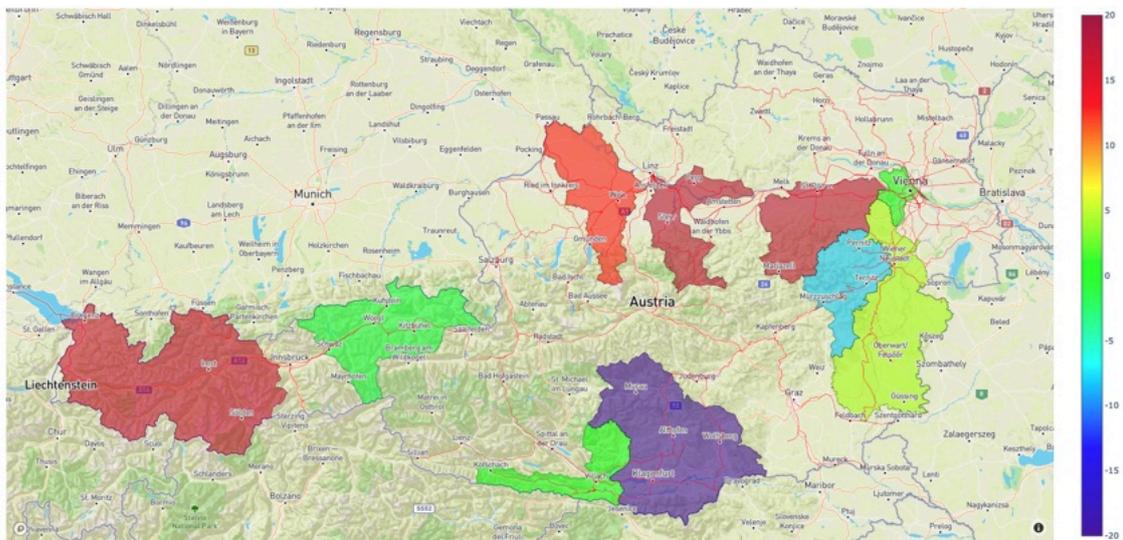


Abbildung 12 Prozentuelle Änderung der Schäden (2021-2050 vs. vor 2020), Kategorie Icing

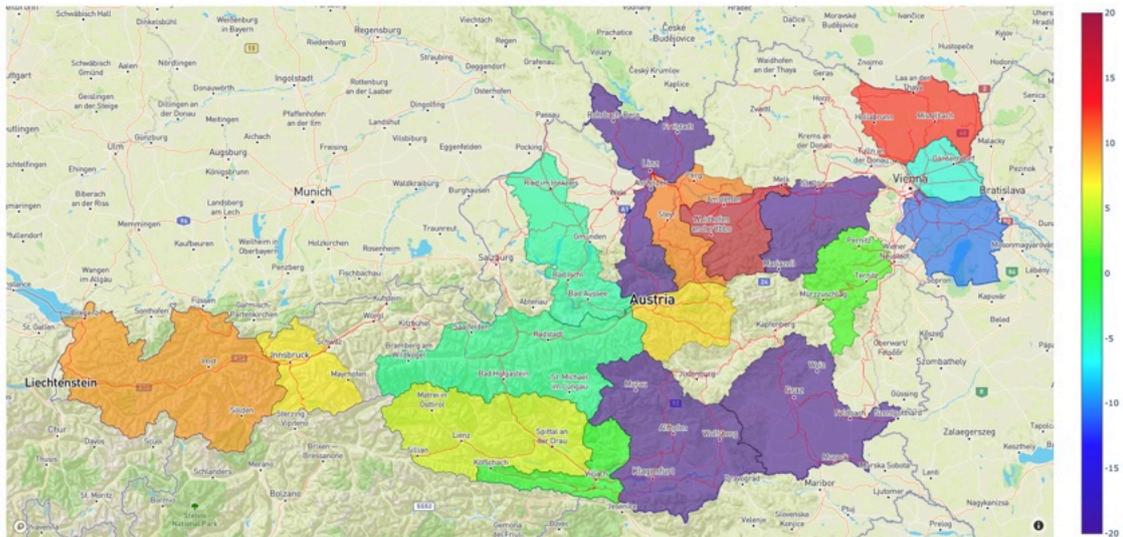


Abbildung 13 Prozentuelle Änderung der Schäden (2021-2050 vs. vor 2020), Kategorie **Avalanche**

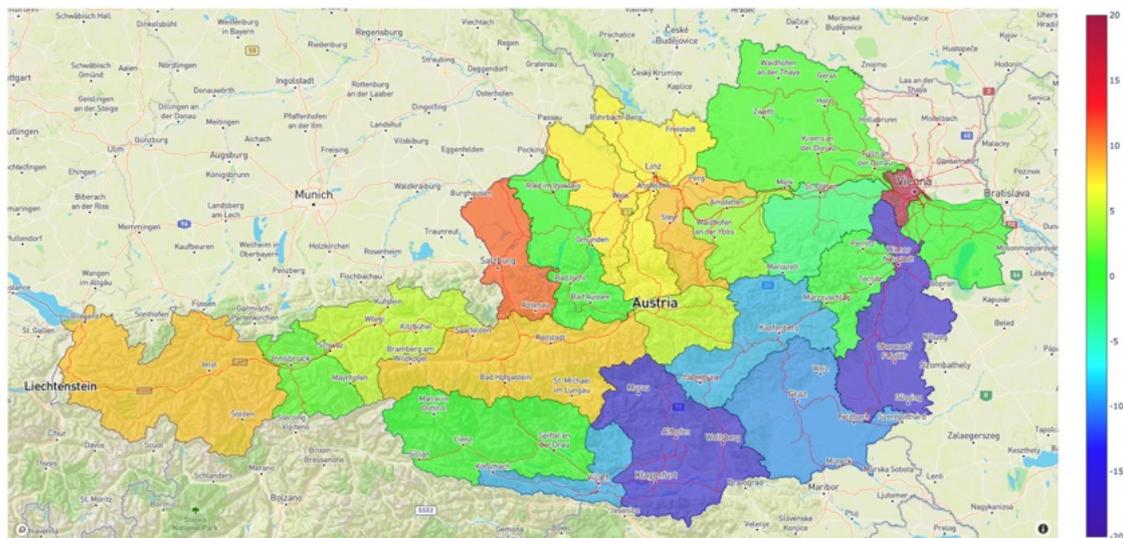


Abbildung 14 Prozentuelle Änderung der Schäden (2021-2050 vs. vor 2020), Kategorie **Snow**

Die wichtigsten Trends und Ergebnisse hinsichtlich der einzelnen Schadenkategorien können folgendermaßen zusammengefasst werden:

- **Flooding (Hochwasser):** Starke Zunahmen der Schadenereignisse von > 15% zwischen dem Tiroler Unterland und dem oberösterreichischen Zentralraum, geringe Zunahmen von bis zu 10% auch südlich der Alpen. Im äußersten Westen und Osten ist hingegen eine leichte Abnahme zu erwarten.

- **Flashfloods (kleinräumige Überschwemmungen):** Hier ist lediglich in Oberkärnten und Osttirol mit einer etwa Zunahme von etwa 10% Schadentagen zu rechnen, in fast allen anderen Regionen mit belastbaren Daten (wo bisher nennenswerte Schäden berichtet wurden) ist mit einer deutlichen Abnahme zu rechnen. Überflutungen treten künftig großflächiger auf und wären dann eher der Kategorie Flooding zuzurechnen.
- **Windstorm (Sturmschäden):** Die stärksten Zunahmen mit +9% sind in Osttirol und Oberkärnten (Nordföhn) zu erwarten, mit leichten Zunahmen dieser Schadenereignisse ist auch in West- und Nordösterreich zu rechnen.
- **Mudslides (Vermurungen):** Der Bereich mit deutlichen Zunahmen von 10-15% an Schadenereignissen umfasst den Bereich entlang der Alpennordseite von Innsbruck bis Salzburg, geringere Zunahmen sind auch beidseits des Alpenhauptkammes in der Tauernregion zu erwarten.
- **Snow (Schäden durch Schneebruch):** Während im Südosten zwischen Villach und Wiener Neustadt vom Winter in den Herbst eine deutliche Abnahme (-10 bis -15%) der mit Schnee assoziierten Schadenereignisse zu erwarten ist, kommt es im Westen und Nordwesten Österreichs zu einer moderaten Zunahme dieser Ereignisse von lokal bis zu 10%. In engen und windgeschützten Tälern kann es bei Starkniederschlag auch bei höheren Ausgangstemperaturen zu einer drastischen Absenkung der Schneefallgrenze kommen, wie etwa im Lesach-, Gail-, Puster-, Drau-, Isel- und Mölltal.

2.1.1.4 Maßnahmen

2.1.1.4.1 Auswirkungen des Klimawandels auf den Bahnverkehr

Die Klimabedingungen und damit einhergehend auch extreme Wetterereignisse wie etwa Hitze, Stürme oder Starkniederschläge verändern sich. Diese beeinflussen eine Vielzahl an unterschiedlichen Wirtschaftszweigen und somit auch unser tägliches Leben. Neben direkten und indirekten Einflüssen des Klimas auf Sektoren wie die Land-, Wasser- oder Energiewirtschaft, sind nicht zuletzt auch Bereiche der Raumordnung und Verkehrsinfrastruktur wesentlich vom Klimawandel betroffen. Sich verändernde klimatische Bedingungen und deren negativen Folgen für die Bahninfrastruktur werden weltweit bereits seit Jahren beobachtet und untersucht.

Seitens der ÖBB wird der technische Wiederbeschaffungswert von Infrastrukturanlagen zum Ende des Jahres 2019 mit rund 45 Milliarden Euro beziffert. Die verschiedenen Anlagentypen beinhalten hierbei Weichen, Gleise, Dächer, Brücken, Tunnel, Gebäude,

Stellwerksanlagen, ETCS (European Train Control System) sowie Oberleitungen und müssen den Anforderungen hinsichtlich Funktionalität, Sicherheit & Qualität sowie Zustand & Substanz entsprechen (ÖBB 2020). Verschiedene Studien (König, 2014; RSSB, 2016; Enei, 2011; Reutter, 2012; Edenhofer, 2021) zeigen den negativen Einfluss des Klimawandels auf den Bahnverkehr – hauptsächlich aufgrund zunehmender Extremwetterereignisse – durch Schäden an der Infrastruktur sowie Unterbrechungen im Betrieb oder Verspätungen in den nächsten Jahren auf. Nemry et. al. (2012) beziffern die zunehmenden Kosten für Verspätungen durch hitzebedingte Schienenverformungen (rail track buckling) und dadurch bedingte Geschwindigkeitsreduzierung auf 44 % für 2040-2070 und auf 79% im Zeitraum 2070-2100 (im Vergleich zum Zeitraum 1991 – 2010).

Im Zusammenhang mit der Bahninfrastruktur und deren laufendem Betrieb sind die in Tabelle 2 angeführten meteorologischen Phänomenen als besonders problematisch bekannt, welche sich durch den Klimawandel in den nächsten Jahren noch verstärken werden. Im Vergleich mit Tabelle 1 ergeben sich die veränderteren Risiken aufgrund des Klimawandels und der einhergehenden Häufung von extremen Wetterereignissen.

Tabelle 2: Auswirkungen des Klimawandels und Extremwetterszenarien auf die Bahninfrastruktur

Extremwetterszenario	Auswirkungen auf die Bahninfrastruktur
Temperatur	
Temperaturschwankungen	<ul style="list-style-type: none"> • Frost-Tauwechsel: Materialermüdung erhöht die Gefahr für z.B. Frostsprengungen und das Auftreten von Steinschlag, Rutschungen und Geröll, Beeinträchtigung der Befahrbarkeit von Streckenabschnitten • Nebelbildung: Eingeschränkte Sicht, Reduktion Fahrgeschwindigkeit und Verspätungen
Hohe Temperaturen/Hitze	<ul style="list-style-type: none"> • Material- und Strukturschäden: Verformungen an Schienen und damit erhöhtes Risiko für Entgleisungen, thermische Expansion von Brücken, Durchhängen von Oberleitungen • Naturgefahren: Erhöhte Gefahr von Vegetations-, Böschungs- und Schwellenbränden durch Funkenschlag entlang von Schienen • Weitere Risiken: Erhöhtes Ausfallrisiko von Kühlanlagen und elektronischen Geräten, Ausdünstungen giftiger Stoffe (z.B. PAKs aus Schwellen)
Niedrige Temperaturen/Frost	<ul style="list-style-type: none"> • Frost: Eingefrorene Weichen und Schäden an Schienen durch Spannungsrisse • Weitere Risiken: Erhöhter Energiebedarf, veränderte Bedingungen bei Bau und Wartung von Infrastruktur durch Kälteeinwirkung
Trockenheit	<ul style="list-style-type: none"> • Brände: In Vegetationsnähe können Brände durch Funkenschlag zu Schäden an Gleisen und Infrastruktur führen • Weitere Risiken: Bodenschwund, Austrocknung von Fundamenten, Instabile Infrastruktur wie z.B. Oberleitungen
Niederschlag	
Stark- und Dauerregen	<ul style="list-style-type: none"> • Überschwemmungen: Überlastungen von Drainagesystemen, Flutung von Unterführungen • Bodenstabilität: Zunehmendes Risiko für Massenbewegungen wie Hangrutschungen und Muren, steigendes Risiko für Erdbeben • Gleisinstabilität: Gefährdung durch Unterspülungen • Weitere Risiken: Beeinträchtigung der Infrastrukturkapazitäten und Erreichbarkeit von

	<p>Industrieanlagen, Auswirkungen auf Bausubstanz durch Hochwasser, z.B. Brückenpfeiler an Flüssen, Ausfälle von Stromkreisen an Gleiskörpern und anderen elektronischen Geräten</p>
Schneefall und Eisregen	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Schneelasten: Schneedruck beeinträchtigt Stabilität von Dächern bis hin zum Einsturz, z.B. bei Wartehallen, Bahnhofsgebäuden und sonstigen Verkehrsinfrastrukturen • Schneebruch: Baumschäden durch Schnee- oder Eislast in der Nähe von Gleisanlagen führt zu Beschädigungen an Oberleitungen oder Schienen, Behinderung von Streckenabschnitten • Lawinen: Erhöhte Risiken durch Lawinen und ähnliche Schäden wie Muren/Hangrutschungen oder präventiven Sperrungen, Betriebsunterbrechungen • Weitere Risiken: Behinderung der Befahrbarkeit von Strecken(abschnitten), massive Verspätungen durch Schnee/Eis, Ausfall von Motoren durch zu hohen Schnee
Stürme	<ul style="list-style-type: none"> • Direkter Sturmschaden: Schäden an hochragenden Anlagen wie Oberleitungen, Schildern, Installationen und Infrastruktur bzw. Gebäuden • Indirekter Sturmschaden: Sturmbruch, Gegenstände, Bäume, Äste oder ähnliches können auf Gleise geweht werden, Beeinträchtigung der Sicherheit und Verfügbarkeit
Blitzeinschläge	<ul style="list-style-type: none"> • Risiken: Durch direkte oder indirekte Blitzeinschläge verursachte Schäden und Gebrechen an elektronischer Infrastruktur oder Gebäuden
Weitere Klimaparameter	
Weitere Klimarisiken	<ul style="list-style-type: none"> • Auftauen Permafrostboden: Erhöhte Gefahr von Hangrutschungen, Steinschlägen und Muren, Instabilität von Infrastruktureinrichtungen • Verlängerte/Veränderte Vegetationsperioden: Ausbreitung invasiver Neophyten führt zu erhöhtem Wartungsaufwand der Infrastruktur, Zeitraum der Blattglätte und Sichtbehinderungen verlängert sich

In Dalhammer werden darüber hinaus noch weitere Auswirkungen und Risiken angeführt, welche bei Projekten die der Umweltverträglichkeitsprüfung (UVP) unterliegen relevant sind. Dazu zählen unter anderem auch Großprojekte wie Straßenbau, Windenergieanlagen, Wasserkraftwerke und Stauanlagen oder (Stark-) Stromleitungen.

Diese sind natürlich auch für das Infrastruktur- und Energiemanagement der ÖBB von Interesse.

2.1.1.4.2 Resilienzerhöhung der Schieneninfrastruktur

Eine proaktive Anpassungsstrategie an häufigere und intensivere Extremwetterereignisse enthält sowohl kurzfristige als auch langfristige Maßnahmen. Da es sich bei Katastrophen in der Regel um wiederkehrende Ereignisse handelt, bilden sie einen Kreislauf, der in die Phasen **Minderung (Mitigation)**, **Vorsorge (Preparedness)**, **Reaktion (Response)** und **Wiederherstellung (Recovery)** inklusive **Wiederaufbau (Reconstruction)** unterteilt werden kann, siehe Abbildung 15 (Alexander, 2022). Die ersten beiden Stadien finden vor dem Eintreten einer Katastrophe statt, die letzten beiden danach. Die ergriffenen Maßnahmen und damit die Planungsverfahren unterscheiden sich für jeden der Zeiträume aufgrund der unterschiedlichen Bedürfnisse. **Minderung** umfasst alle Maßnahmen, die darauf abzielen, die Auswirkungen künftiger Katastrophen zu verringern. Diese unterteilen sich in der Regel in bauliche Maßnahmen (die technischen Lösungen für Sicherheitsprobleme) und nichtbauliche Maßnahmen, zu denen Flächennutzungsplanung, Versicherung, Gesetzgebung und Evakuierungsplanung gehören. Der Begriff **Vorsorge** bezieht sich auf Maßnahmen, die ergriffen werden, um die Auswirkungen von Katastrophen zu verringern, sofern sie vorhergesagt werden oder unmittelbar bevorstehen. Dazu gehören Sicherheitsmaßnahmen wie die Evakuierung gefährdeter Bevölkerungsgruppen und das Absacken von Flussdeichen mit Sandsäcken, wenn das Hochwasser droht (daher ist die Planung der Evakuierung eine Minderungsmaßnahme, während ihre Durchführung eine Form der Vorsorge ist). **Reaktion** bezieht sich auf Notfallmaßnahmen, die sowohl während einer Katastrophe, als auch während der kurzfristigen Folgen ergriffen werden. Das Hauptaugenmerk liegt auf der Rettung und dem Schutz von Menschenleben. Opfer werden gerettet und die unmittelbaren Bedürfnisse der Überlebenden werden erfüllt. **Wiederherstellung** ist der Prozess der Reparatur von Schäden, der Wiederherstellung von Diensten und des **Wiederaufbaus** von Einrichtungen nach einer Katastrophe. Nach großen Katastrophen kann die bis zu 25 Jahre dauern, obwohl bei leichteren Einschlägen oder Katastrophen, die kleinere Gebiete treffen, oftmals weit weniger Zeit benötigt wird. Dieser Zyklus wird auch oftmals durch die „**drei R**“ dargestellt. **Readiness** – auf Extremwetter und -szenarien bzw. Katastrophen vorbereitet sein (Preparedness), **Resilience** – systematische Resilienzerhöhung des gesamten Bahnsystems (Mitigation), und **Recovery** – Notfallpläne

für die rasche und vollständige Wiederherstellung des Bahnbetriebs (Recovery & Reconstruction).

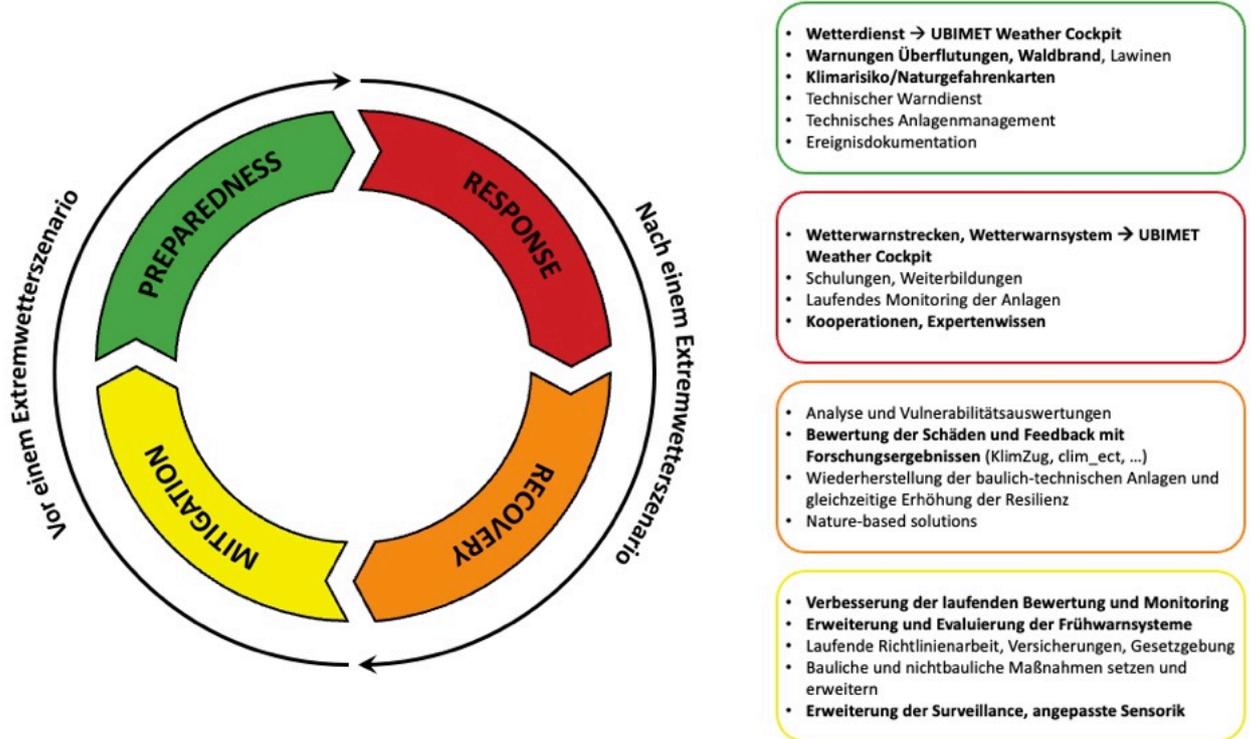


Abbildung 15: Die vier Phasen eines Disaster Management Cycle inkl. Maßnahmenvorschläge zur Erhöhung der Bahnresilienz.

Darüber hinaus gab es bereits zahlreiche Vorprojekte die sich mit der Erhöhung der Resilienz in Eisenbahnbereich beschäftigt haben, wie z.B. „ARISCC“ (Adaption of Railway InfraStructure to Climate Change), „clim_ect“ und „WEATHER“, sowie zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten wie Grass (2018), Kellermann (2017) und Dallhammer (2015).

Gerade im Bereich der Naturgefahren gibt es hier bereits Handlungsempfehlungen und Maßnahmen, um besser auf Extremwetterzenarien und die unterschiedlichen Ereignisse vorbereitet zu sein – **Preparedness, Readiness und Mitigation**. Gerade hier setzt das aktuelle Projekt *KlimZug* an, von Wetterwarnsystemen über Überflutungs- und Waldbrandgefahren bis hin zu Verbesserung der Surveillance und laufenden Prognosen durch neuartige Sensorik. Vorangegangene Projekte wie „ARISCC“ fassen dies wie folgt zusammen:

Es wird dringend empfohlen, Wetterinformations- und Wetterwarnsysteme zu entwickeln, die auf die Bedürfnisse von Bahninfrastrukturbetreibern zugeschnitten sind. Diese Systeme ermöglichen eine wesentlich effizientere Ressourcendisposition, längere Vorwarnzeiten bei Unwetterereignissen und damit eine höhere Aufmerksamkeit und bessere Vorsorge. Vergangene Extremwetterereignisse und deren Auswirkungen auf die Bahninfrastruktur sollten als ein wichtiger Ansatz zur Identifizierung des Systems systematisch dokumentiert und bewertet werden. Parallel dazu sollten geeignete Metriken zur Messung der Auswirkungen entwickelt werden. Für einen einfachen Zugriff und eine komfortable Handhabung sollten die Daten in einer zentralen „Ereignisdatenbank“ gespeichert und mit Hilfe eines GIS visualisiert werden. Eine systematische Gefahrenkartierung ermöglicht die Identifizierung potenziell gefährlicher Situationen für die Bahninfrastruktur und der Orte potenzieller Auswirkungen. Dies bietet eine Evidenzbasis für die Identifizierung gefährdeter Vermögenswerte. Durch die Verwendung des Outputs von Klimamodellen kann die Gefahrenkartierung in die Zukunft extrapoliert und somit für Anpassungszwecke genutzt werden. Eine zentrale Asset-Datenbank für alle relevanten Arten von Eisenbahninfrastruktur-Assets mit detaillierten Informationen über den aktuellen Allgemein- und Instandhaltungsstandard für jedes Asset bietet eine solide Grundlage für die Bewertung von Schwachstellen. Um zu standardisieren und Bewertungsverfahren zu vereinfachen, sollten verschiedene Statusklassen definiert werden, die die Dringlichkeit von Minderungsmaßnahmen widerspiegeln. Die Zusammenführung von Naturgefahrenkarten mit Kenntnissen über vergangene Extremwetterereignisse und den allgemeinen Zustand und Instandhaltungsstandard von Infrastrukturanlagen ermöglicht die Identifizierung der gefährdeten Teile des Eisenbahnsystems. Der Output des Merging-Prozesses sollte als Klimarisikokarten und Vulnerability Map zur Verfügung gestellt werden. Diese können eine gute Grundlage für die Auswahl geeigneter Anpassungsmaßnahmen sein. Eine systematische Risikobewertung für wetter- und klimabezogene Ereignisse sollte unter Berücksichtigung möglicher Auswirkungen auf die Vermögenswerte der Eisenbahninfrastruktur in fünf Dimensionen – Sicherheit, Sachschäden, Menschen, Umwelt, Reputation und finanzielle Verluste – durchgeführt werden. Die Bewertung sollte auf den oben genannten Gefahren- und Vulnerabilitätskarten basieren und Expertenwissen über die zu erwartende Häufigkeit gefährlicher Ereignisse einbeziehen. Eine bequeme Möglichkeit, den Bewertungsprozess zu standardisieren, ist die Verwendung einer Risikomatrix. Regionale Klimamodelle sollten verwendet werden, um zu erwartende zukünftige Klimabelastungen zu identifizieren, da sie die Berechnung möglicher

Auswirkungen auf die Eisenbahninfrastruktur ermöglichen. Relevantes direktes Ergebnis der Modelle sind Trends für Klima- und Wetterparameter und – mit geringerer Sicherheit – Intensitäten und Wiederkehrperioden für extreme Wetterereignisse.

Good Practice Beispiele – welche auch im aktuellen Projekt verfolgt werden – von Wetterwarnungen und -monitoring über eine detaillierte Auswertung von historischen Extremwetterereignissen als Datenbank bis hin zur Kartierung von Naturgefahren um Bereich der Eisenbahninfrastruktur finden sich so z.B. auch auf der Projekt-Webseite von „ARISCC“ <http://www.ariscc.org/index6396.html?id=42>.

Zur Steigerung der **Resilienz**, zusammenfassend für den gesamten **Disaster Management Cycle**, siehe Abbildung 15, finden sich folgende Maßnahmen:

Einer der Kernbestandteile eines effizienten Naturgefahrenmanagementsystems ist eine gut strukturierte und integrierte Datenbank. Diese Datenbank kann sukzessive aufgebaut werden, indem bestehende Datenbanken für Asset Management, Wartungsplanung, Störungen, sowie digitalisierte Bahnnetzdaten miteinander verknüpft werden. Fehlende Elemente wie Ereignisdatenbanken sollten nach Verfügbarkeit integriert werden. Für den laufenden Betrieb sollte die Anpassung an Klimawandelaspekte in die aktuelle Instandhaltungsplanung und insbesondere in die prioritären zeitlichen Entscheidungsverfahren integriert werden. Die Einhaltung guter Wartungsstandards ist bereits ein erster wichtiger Schritt hin zu einer höheren Ausfallsicherheit des Systems. Bei zukünftigen Projekten sollte die Anpassung an den Klimawandel in die Gestaltung der Anlagen integriert werden. Dies kann erreicht werden, indem Anpassungen in die frühen Stadien aktueller Planungsprozesse und insbesondere in die Standard-Schwachstellen- und Risikoanalyse der Projektplanung integriert werden. Integration von Anpassungsaspekten ist hoch relevant für langlebige Eisenbahngüter. Das Spektrum praktischer Anpassungsmaßnahmen reicht von Warnsystemen und Monitoring bis hin zur Verbesserung der Instandhaltungsstandards, der Verstärkung von Schutzbauten und der Änderung von Standards für zukünftige Projekte. Die Priorisierung von Maßnahmen und das Finden der optimalen Kombination für ein Projekt oder eine Bahntrasse hängt von vielen Faktoren ab, wie z.B. vom Typ des Infrastruktur Assets, dem Zeithorizont, Wichtigkeit der Route, finanziellen Einschränkungen, Kosten/Nutzen-verhältnis etc. „Weiche Maßnahmen“, wie z.B. das Echtzeit-Monitoring von gefährdeten Abschnitten und Schnellwarnsystemen können deutlich bessere Kosten-Nutzen-Verhältnisse aufweisen als

„harte Ingenieurlösungen“ wie die Verstärkung von Schutzbauten. Die Umsetzung eines integrierten Naturgefahrenmanagements startet einen Prozess des Kapazitätsaufbaus zur Anpassung des Unternehmens an den Klimawandel. Dieser Prozess kann durch besseren Wissensaustausch innerhalb des Unternehmens und zwischen verschiedenen Infrastrukturbetreibern sowie mit externen Stakeholdern und Partnern verbessert und beschleunigt werden. Gute Praktiken und Pilotprojekte in den verschiedenen Bereichen sollten offen kommuniziert und aktiv geteilt werden. Es ist auch sehr sinnvoll, von denen zu lernen, die jetzt mit den Bedingungen konfrontiert sind, die Sie in Zukunft für Ihre Region erwarten.

Ein optimiertes Risikomanagement steigert die **Resilienz** des gesamten Bahnsystems und der Infrastruktur. Dies wird als Fähigkeit definiert auf unerwartete Ereignisse mit außergewöhnlichen Auswirkungen vorbereitet zu sein. *Ein resilientes Eisenbahnsystem kann auf außergewöhnliche Auswirkungen so reagieren, dass die Grundfunktionen des Systems aufrechterhalten werden können und nach einem zuvor definierten Zeitabschnitt wieder in den Ursprungszustand zurückkehren. Die Resilienz eines Bahnsystems lässt sich mit vier Resilienzeigenschaften beschreiben: Robustheit, Redundanzen, Ressourceneffektivität und die Reaktionsschnelligkeit. Je stärker sich die Ausprägungen der Kriterien dem Bedarf einer Störungssituation nähern, desto resilienter ist das System.*

2.1.1.4.3 Anpassungsmaßnahmen der Schieneninfrastruktur an den Klimawandel

Im Rahmen von diversen Vorprojekten, wie z.B. „WEATHER“, „clim_ect“ und „ARISCC“, haben bereits detaillierte Studien zu den notwendigen Anpassungsmaßnahmen hinsichtlich Extremwettersituation durch den Klimawandel durchgeführt. Diese wurden hier zusammengefasst und entsprechend aufbereitet.

2.1.1.4.3.1 Anpassungen an stärkere Temperaturschwankungen und extreme Hitze

Im Auftrag des deutschen Umweltbundesamtes wurde eine Literaturlauswertung hinsichtlich der ökonomischen Bewertung von Anpassungsmaßnahmen an stärkere Temperaturschwankungen und Hitze vorgenommen. Basierend auf weiteren Studien aus UK, Dobney (2008), Dobeny (2010a), Dobney (2010b), Baker (2010), kann diese wie folgt zusammengefasst werden:

Moderne Gleisanlagen sind bereits heute so konzipiert, dass sie Temperaturschwankungen innerhalb bestimmter Grenzen standhalten können. Bei endlos verschweißten Schienen

wird dies über die Definition der „neutralen Temperatur— bestimmt. So werden die Schienen der Deutschen Bahn AG in einem Temperaturbereich zwischen 20–26 °C verschweißt, innerhalb dessen die mechanischen Spannungen nahezu ausgeglichen sind. Die weiteren Kräfte die von der Temperaturexpansion ausgehen, werden von der Schienenbefestigung aufgenommen und über die Schwelle in den Schotteroberbau weitergeleitet. Ob die heutige Praxis im Schienenbau und in der Wartung und Kontrolle angemessen ist, um den zu erwartenden Temperaturänderungen standzuhalten, wurde für Deutschland bisher nicht im Detail analysiert.

Technische Maßnahmen:

- Reduzierte Geschwindigkeiten im Schienenverkehr, um erhöhte Belastungen der Schieneninfrastruktur zu vermeiden.
- Anpassung des *Heat Stressings*.
- Anpassung der Materialien im Schienenoberbau, z.B. Stahltypen mit höherer Standfestigkeit bei Temperaturschwankungen und extremer Hitze.
- Verbesserungen der Kühlung der Signale, elektronischen Infrastruktur (konstante Kühlung)
- Installation von Ventilatoren um das Funktionieren des Equipments während Phasen extremer Hitze zu gewährleisten
- Endloses Schweißen von Schienen kann das Risiko von Schienenknicken beseitigen
- Vorspannung von Stahl kann entweder thermisch erfolgen, indem der Stahl beim Einbau tatsächlich erhitzt wird oder mechanisch durch Dehnen des Stahls, um die gewünschte Spannung vor dem Befestigen einzuführen
- Gleisaufrüstung: Gleis sollte im Rahmen der normalen Wartung ersetzt werden, Upgrades zur Bewältigung des erhöhten Verkehrsaufkommens oder Ersatz aufgrund von Sturmfluten oder anderer katastrophaler Ereignisse. Die Kosten für das Upgrade des Tracks können je nach Art des Ausbaus variieren und liegen zwischen 0,3 Mio. USD und 1,9 Mio. USD pro Kilometer.
- Einsatz von hitzebeständigem Material, um Schienenknicken und damit Verspätungen, Zugausfälle sowie im schlimmsten Fall Entgleisungen zu vermeiden.
- Auswahl geeigneter Vegetation in der Nähe des Bahnkorridors um die Brandgefahr zu reduzieren

Die Geschwindigkeitsreduktion bei hohen Temperaturen ist bereits Praxis, um einerseits die Schienen zu schonen, aber vor allem um andererseits Entgleisungen aufgrund von

temperaturbedingten Verformungen der Gleise zu vermeiden. Diese Geschwindigkeitsreduktionen führen zu Verspätungen, die enorme Kosten verursachen, siehe Tabelle 2. In den USA untersuchten Chinkowsky 2019 daher die Wirkung von Temperatursensoren in den Gleisanlagen auf die Verspätungskosten. Wenn genau bekannt ist, wo die Gleistemperaturen kritische Werte hinsichtlich der Verformung überschreiten und wo nicht, können die Züge auf den nicht betroffenen Strecken mit normaler Geschwindigkeit fahren. Dadurch reduzieren sich die Verspätungskosten.

Wartungsmaßnahmen:

- Intensive Überwachung der Streckentemperaturen zum frühzeitigen Reagieren (mit Geschwindigkeitsbegrenzungen und kürzeren Zügen für kürzeren Bremsweg und geringere Ladekapazität für niedrigere Stöße auf Gleise) um Schienenknicke und damit Zugausfälle, Gleisblockaden und Entgleisung zu vermeiden.
- Verbesserung der Maßnahmen zur Schadenserkenkung
- Herabsetzen der Wartungsintervalle (häufigere Wartungen)

2.1.1.4.3.2 Anpassungen an stärkere Niederschläge

Technische Maßnahmen:

- Bau von Hangbefestigungen (auf rutsch- und rutschgefährdeten Gleisabschnitten) zur Vermeidung von Erdrutschschäden etc. an Gleisen, Zügen und Personen. Außerdem können durch den Bau von Hangbefestigungen Blockaden von Gleisabschnitten, Ausfälle und Verspätungen vermieden werden.
- Geänderte Planung und Dimensionierung von Entwässerungsstationen und Pumpstationen von Tunneln, von Brücken und Förderkanälen
- Änderungen des Sturm- und Wassermanagements – Ausrüstungen an Brücken, Entwässerungssystemen und Gleisen.
- Bau von unterirdischen Abläufen
- Nutzung von Ökosystemleistungen, z.B. kleine mäandrierende Wasserläufe könnten hohe Wasserstände besser abpuffern als künstliche Entwässerungssysteme
- Bau von Deichen
- Planung neuer Bahnstrecken in weniger gefährdeten Gebieten
- Berücksichtigung von Leitungsverlegungen für Abschnitte mit sehr häufigen Überschwemmungen

- Bau von Böschungen, Schutzwänden und Warnschildern, um Überschwemmungen von Bahngleisen zu vermeiden und Menschen auf mögliche Gefahren hinzuweisen.
- Begrenzung des Baus in stark gefährdeten Gebieten, um Überschwemmungen von Gleisen und die damit verbundenen Risiken zu vermeiden
- Spezielle Maßnahmen für Brücken durch Kolkungen:
 - Steinschüttungen sind die erste Anpassungsmaßnahme, die bis zu einer bestimmten Fließänderung (60 % bzw. 100 % Änderung für nicht sandige bzw. sandige Böden) ausreichend ist.
 - Bei stärkeren Fließänderungen muss das Fundament der Brückenpfeiler mit Beton verstärkt werden.

Nemry et. al. (2012) führen ein weiteres Problem an Brückenbauten auf, dass durch intensive und langanhaltende Niederschläge und den dadurch erfolgenden Anstieg des Wasserspiegels in Flüssen hervorgerufen wird: Durch schnell fließendes Wasser können mitgeführte Sedimente Kolklöcher aushöhlen und das Fundament der Brückenpfeiler freilegen. Dieser sog. Brückenkolk wird im Wesentlichen dadurch induziert, dass das Wasser normalerweise schneller um Pfeiler und Widerlager herumfließt, was sie anfällig für lokale Kolkung macht. Brückenabrieb ist eine der drei Hauptursachen für Brückenversagen. Es wurde geschätzt, dass 60 % aller Brückenausfälle auf Kolkungen und andere hydraulisch bedingte Ursachen zurückzuführen sind.

Wartungsmaßnahmen:

- Erhöhung der Wartungstätigkeiten, um Hindernisse, die zu Überschwemmungen führen, zu vermeiden oder Veränderungen oder Schäden frühzeitig zu erkennen.
- Regelmäßige Entwässerung zur Vermeidung von Verstopfungen im Entwässerungssystem und damit Überschwemmungen von Gleisen oder Überschwemmungen, die die Standsicherheit von Böschungen oder die Standsicherheit des Bodens beeinträchtigen.
- Regelmäßiges Säubern der Vegetation, um Gefahren und Störungen durch umgestürzte Bäume oder Sichtbehinderungen zu antizipieren.
- Häufigere Inspektion von Stahlbrücken auf Korrosion, um Korrosionsschäden frühzeitig entgegenzuwirken.
- Hochwasserabschätzung, Wiederkehrperiode, Bemessungsabfluss und Hochwasserstand müssen bei der Planung von Brücken berücksichtigt werden

- Abflussschätzung (Hochwasserrückkehrperiode), Größe und Abflusskapazität, Querneigung und Freibord sind Bemessungsparameter, die bei der Auslegung von Durchlässen berücksichtigt werden müssen

2.1.1.4.3.3 Anpassungen an häufigere und stärkere Stürme und Hagel

Technische Maßnahmen:

- Änderungen in der Planung und Dimensionierung von Brücken sind erforderlich, um Brücken vor den Auswirkungen der zunehmenden Stürme zu schützen.
- Der Bau von Schutzwäldern oder Schutzbarrieren an Bahnstrecken kann die Windgeschwindigkeit reduzieren, die auf die Bahninfrastruktur prallt.
- Ersatz von Bahnoberleitungen durch integrierte Gleisstromversorgung: Oberleitungen sind am empfindlichsten gegen Sturmschäden; Integration ins Gleis. Hohe Investitionskosten für Gleise und Rollmaterial.
- Nutzung von Ökosystemleistungen: Bäume, die hohen Windgeschwindigkeiten standhalten in der Nähe von Bahninfrastruktur pflanzen.
- Anpflanzung von Pflanzen, die keine oder nur wenig Pflege entlang von Bahnstrecken benötigen.
- Errichtung breiterer Schienenkorridore oder baumfreier Zonen, um die Anfälligkeit für umstürzen-de Bäume zu verringern – möglicherweise kontraproduktiv, da ein breiterer Korridor zu größeren Temperaturunterschieden in der Gleiszone führen kann und dies zukünftige Ziele zur Verringerung der Anfälligkeit für Brände oder Schienenknicken in Frage stellen könnte.

Wartungsmaßnahmen:

- Häufiges Zurückschneiden von Bäumen, um das Risiko von herunterfallenden Blättern und umstürzenden Bäumen zu minimieren

2.1.1.4.3.4 Weitere allgemeine Anpassungsmaßnahmen

Folgend sich noch weitere allgemein gültige Anpassungsmaßnahmen und detaillierte Informationen bzw. Quellen für Infrastrukturbetreiber angeführt:

- Verwendung eines Wettermonitorings- und Frühwarnsystems (Kellermann, 2017; RSSB, 2016).

- Regionale Risikokartierung für Extremwetterereignisse. Risiko- bzw. Betroffenheitsanalyse für Infrastrukturbestand (in Zusammenarbeit mit externen Experten) (Kellermann, 2017; RSSB, 2016; EBA, 2019a; EBA, 2019b).
- Berichterstattung über Wetterereignisse und Überwachung des Anlagenzustands nach Wetterereignissen/Aufbau einer Ereignisdatenbank (Fian, 2021; RSSB, 2016; Kellermann, 2017).
- Entwicklung von GIS-basierten Warnsystemen und Wetteranfälligkeitskarten (in Zusammenarbeit mit externen Experten) (RSSB, 2016; EBA, 2019a; EBA, 2019b).
- Regelmäßiges Training und kontinuierliche Weiterbildung des mit der Infrastruktur beschäftigten Bahnpersonals (Kellermann, 2017).
- Automatisiertes Monitoring der Infrastruktur (z.B. Schienentemperatur, Vegetation, Veränderungen der Geländeoberfläche) durch Sensoren in und entlang der Gleise und v.a. Fernerkundung (ESB, 2019a; ESB, 2019b; Doll, 2011; RSSB, 2016; PIK, 2021).
- Organisatorische Maßnahmen, wie Vorbereitung auf den Umgang mit Verspätungen und Ausfällen (Pik, 2021; ÖBB, 2020).
- Geringere Geschwindigkeiten, kürzere Züge oder geringere Beladung führen zu einer Verkürzung der Bremswege und der Verringerung der Belastung von Schienen. Diese Handlungsoptionen erhöhen jedoch in der Regel den CO₂-Ausstoß und bedürfen daher einer sorgfältigen Abwägung (EBA, 2019a; EBA, 2019; Pik, 2021).
- Erneuerung und Ergänzung von Strecken sowie die Planung von Ersatzstrecken (EBA, 2019a; EBA, 2019b).
- Änderung der Trassenführung. Im Einzelfall sollte die Aufgabe von Strecken in (Hoch-) Risikogebieten nicht ausgeschlossen werden (EBA, 2019a; EBA, 2019b; Doll, 2011).
- Optimiertes Vegetationsmanagement: Anpassung der Landnutzung in der Nähe von Eisenbahnen, um das Risiko von Wind- und Schneebruch von Bäumen und Bränden an angrenzenden Hängen zu mindern (EBA, 2019a; EBA, 2019b; Fian, 2021; RSSB, 2016; Pik, 2021).

2.1.1.4.4 Status der Anpassungsmaßnahmen der ÖBB

Kellermann (2017) untersuchte in seiner Dissertation die Maßnahmen, die die ÖBB zur Verbesserung des Risikomanagements seit dem Hochwasserereignis 2013 an der Mur vorgenommen haben und gibt Empfehlungen für Maßnahmen auf auch auf Europäischem Level. Nachfolgend ist die in der Literaturstudie hinsichtlich der gefundenen Maßnahmen

zusammengefasst und zeigt den derzeitigen Status (Stand August 2021) der ÖBB bei der Umsetzung der Maßnahmen, soweit bekannt.

Maßnahme	Status
Wettermonitoring & Warnsysteme	Seit 2005 nutzt die ÖBB die Prognosen und das Weather Cockpit entwickelt von UBIMET. Dabei werden laufend Verbesserung der Wettermodelle und des Informationssystems implementiert. Im Rahmen des Projektes „KlimZug“ werden ein Feuerrisikomodell, ein Wildwassergefahrenmodell sowie die neuartige und KI-basierte Prognosemodelle für Starkniederschlägen auf Basis neuer Sensorik entwickelt und verbessert.
Ereignisdatenbank	Im Rahmen der Vorprojekts „ <i>clim_ect</i> “ erstellt und ebenso im Projekt „KlimZug“ für weitere ausführlichere Auswertungen genutzt.
Klimawandelstudien und -auswertungen	Klimawandelstudien hinsichtlich Extremwetterszenarien wurden im Rahmen von „ <i>clim_ect</i> “ durchgeführt und sind auf Basis Klimaprojektionen und Schadenereignissen auch Teil des aktuellen Projekts „KlimZug“.
Meteorologisches Messnetz und Sensorik	Dieses ist bereits seit 2008 durch die Zusammenarbeit mit UBIMET im Aufbau und wird laufend erweitert. Auch das aktuelle Projekt „KlimZug“ beschäftigt sich mit dem Ausbau und Einsatz neuartiger Sensorik und Messmöglichkeiten.
Messnetz für Naturgefahren	Wird im Zuge des aktuellen VIF 2020 Projekts „Nanci“ erweitert.
Definition von klaren Verantwortlichkeiten im Krisenfall	Nach 2013 bei den ÖBB bereits eingeführt.
Regelmäßiges Training und Weiterbildung im Bereich Naturgefahrenmanagement	Die ÖBB hat eigene Lawinenkommission mit entsprechend geschulten Mitarbeitern. Weiters arbeiten die ÖBB bereits arbeitet daran, auch eine Kommission für hydrologische Ereignisse aufzubauen.

Strukturelle Schutzverbauungen (z.B. Muren- und Lawinenverbauungen, Dämme, Deiche)	Solche Maßnahmen sind bereits erfolgt und in ständigem Ausbau, siehe „Climate-ADAPT“.
Ausstatten der Züge mit GPS-Systemen	Dies ist bereits erfolgt und sichert, dass zu jeder Zeit die Position der Züge genau erfasst werden kann.
Risiko und Krisenmanagement System	Keine genauen Angaben zum aktuellen Stand gefunden.
Temperatursensoren in Gleisen und an Weichen	Keine genauen Angaben zum aktuellen Stand gefunden.

2.1.2 Assimilation von GNSS-ZTD-Daten

2.1.2.1 Motivation & Zielsetzung

Die ÖBB verfügt über bereits installierte GNSS-Receiver, die für die Niederschlagsdetektion verwendet werden können. Hierbei wird das hohe Genauigkeitspotential von GPS-Messgrößen genutzt, um aus den Phasenmessungen in kontinuierlich beobachtenden Netzen von GPS-Empfängern die Gesamtverzögerung (Zenith-Total-Delays, ZTD) des Signals abzuleiten und dadurch Rückschlüsse auf den Niederschlag zu ziehen.

Ziel in KlimZug war es, diese Daten in das UBIMET eigene NWP-Model RACEVAR zu assimilieren und damit eine Verbesserung der Niederschlagsprognose zu entwickeln.

2.1.2.2 Technische Grundlage

ZTD-Daten können als Gesamtverzögerung des GNSS-Signals, die durch die Troposphäre verursacht wird, verstanden werden. Diese Verzögerung ist als integraler Wert entlang des gesamten Weges durch die Atmosphäre in Zenitrichtung zu verstehen. Man nützt das hohe Genauigkeitspotential der GPS-Messgrößen, um aus den Phasenmessungen in kontinuierlich beobachtenden Netzen von GPS-Empfängern die Gesamtverzögerung (Zenith-Total-Delays, ZTD) abzuleiten. Innerhalb von Referenznetzen fallen eine Unzahl von unabhängigen simultanen Beobachtungen zu Satelliten unter verschiedenen Elevationen an. Unter Voraussetzungen der Kenntnis der Satellitenkoordinaten bei der Auswertung von Doppeldifferenzen in der entsprechenden GPS- Beobachtungsgleichung ist es möglich, die atmosphärische Gesamtverzögerung von den anderen unbekanntem Parametern zu trennen. In weiterer Folge nützt man nun den Effekt der Laufzeitverzögerung und dessen enge Beziehung mit dem Wasserdampf, um auf die Gesamtmenge des Wasserdampfes (IWW) oberhalb der GPS-Empfangsstationen zu schließen.

Für das KlimZug-Projekt wurden GNSS-ZTD (Zenith Total Delays) Daten von 26 Stationen genutzt, die von der TU Wien im Unterauftrag zur Verfügung gestellt wurden. Die Standorte der Stationen sind in Abbildung 16 illustriert.

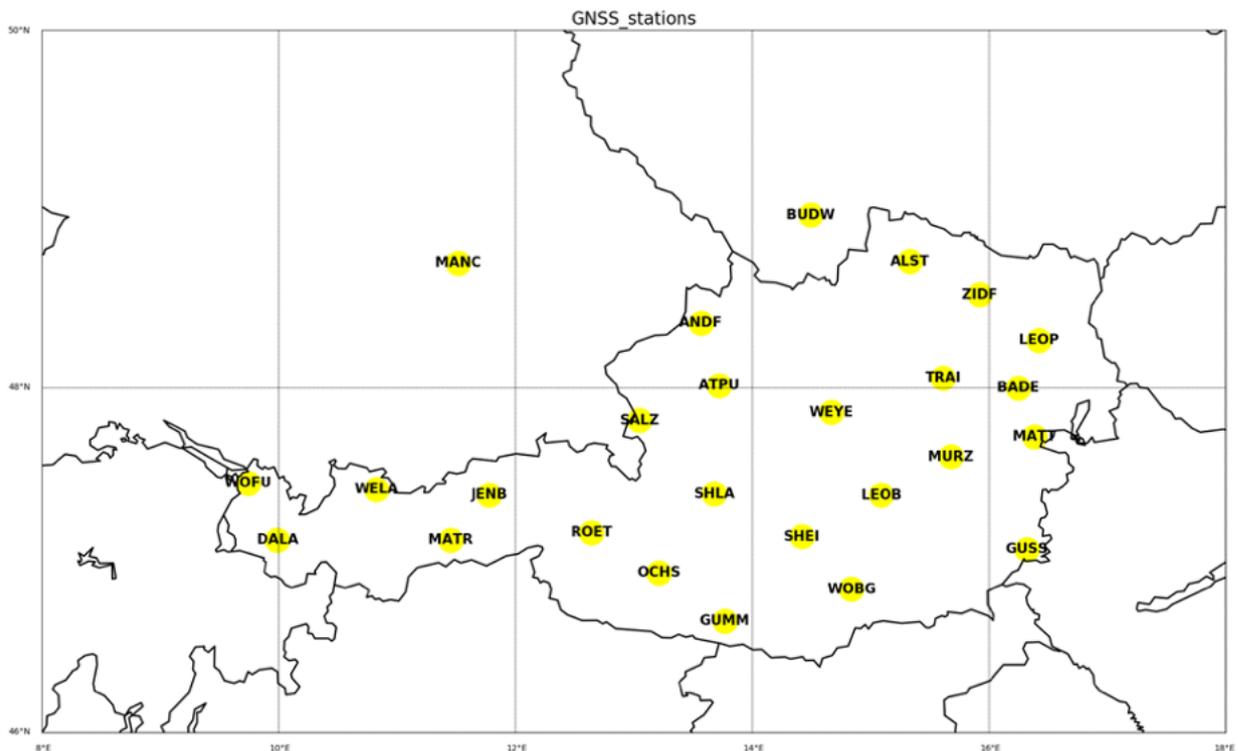


Abbildung 16: GNSS Stationen der ÖBB

In einem ersten Schritt wurden diese Daten hinsichtlich der Aussagekraft genauer analysiert und in Meetings mit der TU Wien mögliche und notwendige post-processing Schritte besprochen. Die Daten liegen in stündlicher Auflösung vor.

2.1.2.3 Ergebnisse

In einem ersten Schritt wurden mehrere numerische Experimente mit verschiedenen Skalierungen für die Länge und Varianz diverser Kontrollvariablen in RACE durchgeführt. Diese zeigten alle eine deutliche Überschätzung der Niederschlagsmenge, selbst für Fallbeispiele mit zu gering vorhergesagter Niederschlagsmenge. In allen Fällen zeigte der Kontrolllauf (ohne assimilierte Daten) eine bessere Übereinstimmung mit den Reanalysedaten, als die Prognosen mit GNSS-Daten. In Abbildung 17 ist beispielhaft ein Ergebnis der Skalierungsexperimente für 15.04.2022 dargestellt, aus welchem die Überschätzung der Niederschlagsrate deutlich hervor geht.

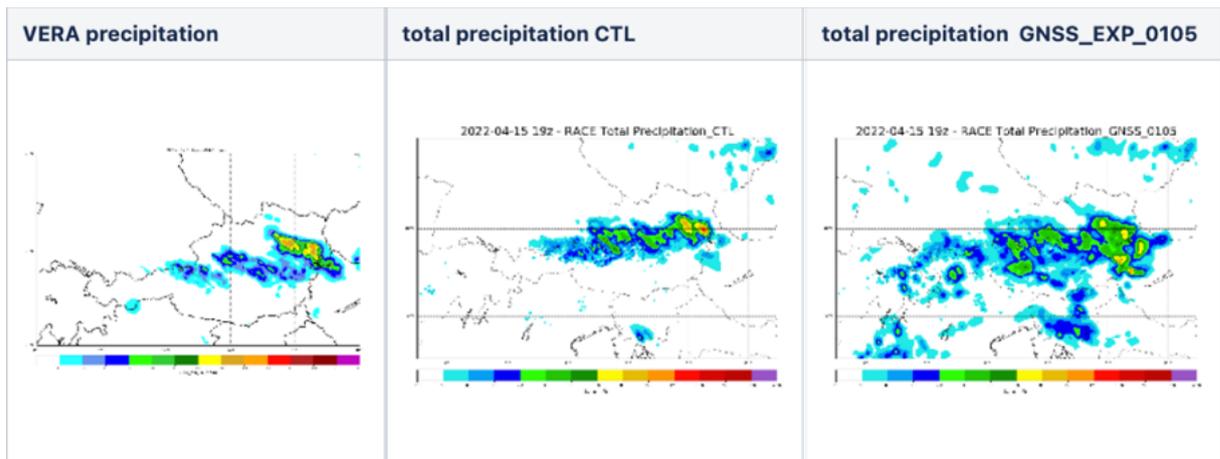


Abbildung 17: Ergebnisse eines Testlaufs mit optimierten Skalierungsparametern (rechts) im Vergleich zum Kontrolllauf (Mitte) und zur Reanalyse (links)

Da die ersten Ergebnisse mit der Assimilation der ZTD-Daten nicht zufrieden stellend waren, wurde eine vertiefende Analyse der ZTD-Daten angestellt. Der Gesamtbeitrag der Laufzeitverzögerung kann als Summe zweier Anteile dargestellt werden:

$$ZTD = ZHD + ZWD$$

wobei ZHD der Zenith Hydrostatic Delay ist und ZWD der Zenith Wet Delay. Den größten Teil der Gesamtverzögerung ZTD macht dabei der Term ZHD aus. Dieser wird weitgehend durch den atmosphärischen Druck bestimmt. Daher kann der Faktor ZHD auch mit ausreichender Genauigkeit aus Oberflächendruckbeobachtungen modelliert werden, z.B. mit der Formel von Saastamoinen (1972):

$$ZHD = \frac{0.0022767 \cdot p_s}{1 - 0.00266 \cdot \cos(2 \cdot \theta) - 0.00028 \cdot H}$$

wobei p_s der Oberflächendruck ist [hPa], θ ist der Breitengrad der Messstation und H ist die Höhe der Messstation bezogen auf das Geoid [km].

ZWD, auf der anderen Seite, steht in direktem Zusammenhang mit dem Wasserdampfgehalt in der Luft und stellt das Signal dar, das für meteorologische Zwecke von Interesse ist. Daher weist der Faktor ZWD - ebenso wie der Wasserdampf - eine hohe zeitliche und räumliche Variabilität auf, was eine präzise Modellierung aus meteorologischen Oberflächenbeobachtungen unmöglich macht. Daher wird die ZWD bei der Schätzung von GNSS-Parametern neben den Stationskoordinaten und dem Fehler der

Empfängeruhr üblicherweise als Unbekannte geschätzt. Kennt man die Gesamtverzögerung ZTD sowie die notwendigen Parameter um ZHD zu berechnen, kann daraus der meteorologisch interessante Teil ZWD abgeleitet werden. Dazu wurde am Anfang die Korrelation zwischen den Niederschlagsraten und den Werten aus der Berechnung von ZTD bzw. ZWD betrachtet. Der betrachtete Zeitraum erstreckt sich hierbei von Oktober 2021 bis Juni 2022. Als Teststation wurde die Messstation in Allentsteig ausgewählt, siehe Abbildung 18.

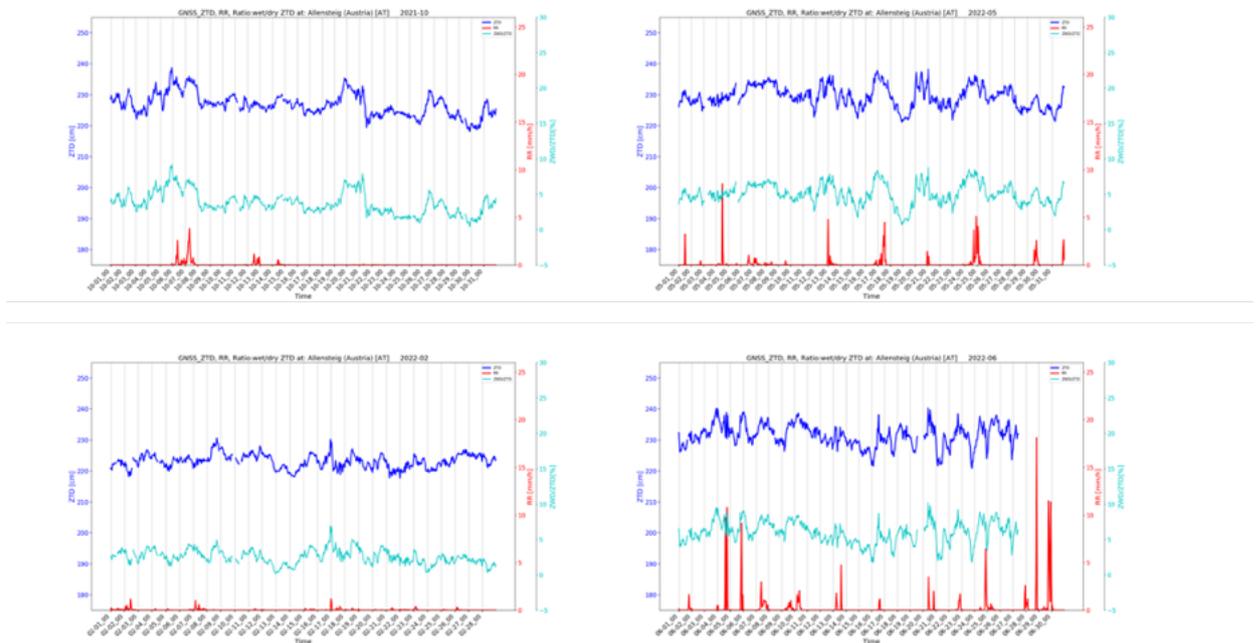


Abbildung 18: Auswertung der ZTD-Daten

Aus diesen Analysen kann abgeleitet werden, dass Niederschlag meist assoziiert ist mit einem Anstieg von ZWD bzw. dem Verhältnis von ZWD und ZTD. Allerdings ist dieser Zusammenhang nicht besonders klar und lässt keinen Umkehrschluss zu. Dies liegt daran, dass die durch das GNSS-Signal extrahierten Daten den Wasserdampfgehalt der Luft angeben und nicht notwendigerweise direkt auf Niederschlag rückschließen. Daher wurden für März 2022 weitere genauere Untersuchungen unternommen. Genauer gesagt, wurden die Laufzeitverzögerung ZTD sowie die Terme ZWD und ZHD der Niederschlagsrate sowie der Bewölkung gegenübergestellt – dies wurde für sämtliche verfügbare Stationen gemacht, siehe Abbildung 19.

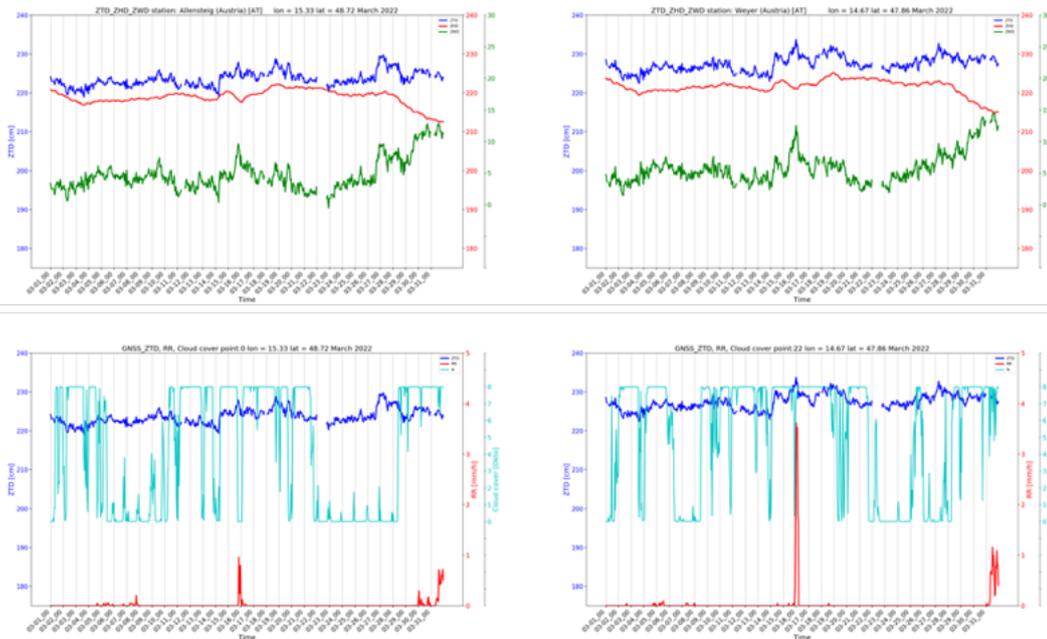


Abbildung 19: Detaillauswertung und Zusammenhang mit Niederschlagsraten bzw. Bewölkung

Daraus lässt sich rückschließen, dass die „Rohdaten“ nicht ohne weitere Prozessierung zur Assimilation in NWP-Modelle verwendet werden können. Viele Studien zeigen, dass die Auswirkungen der Assimilation von GNSS-Daten von der Anzahl der bereits assimilierten Beobachtungen und der Vorverarbeitung sowie der aktuellen Wettersituation bzw. Wetterbedingungen abhängen. Im Weiteren wurde die von Rohm et al. (2019) verwendete Korrektur- und Prozessierungsmethode angewendet. Die Methode schlägt vor die ZTD_{GNSS} folgendermaßen zu prozessieren:

- Besonders große Fehler in den Observationsdaten entfernen: Nach Dymarska et al. (2017) beträgt die geschätzte Standardabweichung der Unterschiede zwischen ZTD_{WRF} und ZTD_{GNSS} ungefähr 10,5 mm. Daher können die formalen Fehler der GNSS ZTD Daten durch einen multiplikativen Faktor von 10,5 m angepasst werden. Observations mit einem Fehler größer als 20 mm können daher entfernt werden (Bennit und Jupp, 2012).
- Assimilation der Daten: ZTD_{GNSS} Daten werden in den 3DVAR-Prozess assimiliert, um Korrekturen zu ermitteln die aus dem „first-guess“ des WRF Modells stammen. Dabei werden die Korrekturen für den Tag als O-B ausgedrückt, wobei O der beobachtet Anteil (ZTD_{GNSS}) und B der „background“ des WRF-Modells ist, ZTD_{WRF} . Diese Korrekturen werden anschließend über den gesamten beobachteten Zeitraum gemittelt, um so einen $(O-B)_{av}$ für jede Station zu bekommen.

- Berechnung der Korrekturen und Berücksichtigung: Die gemittelten und berechneten Abweichungen für jede Station werden berücksichtigt, sodass der systematische Fehler zwischen WRF und GNSS-Daten minimiert wird. Die korrigierten ZTD-Werte, berechnet über $ZTD_{corr} = ZTD_{GNSS} - (O-B)_{av}$ werden anschließend zur Assimilation verwendet.

Im Anschluss wurden verschiedene Testläufe durchgeführt und gegen die VERA-Analyse bei UBIMET verglichen, siehe Abbildung 20.

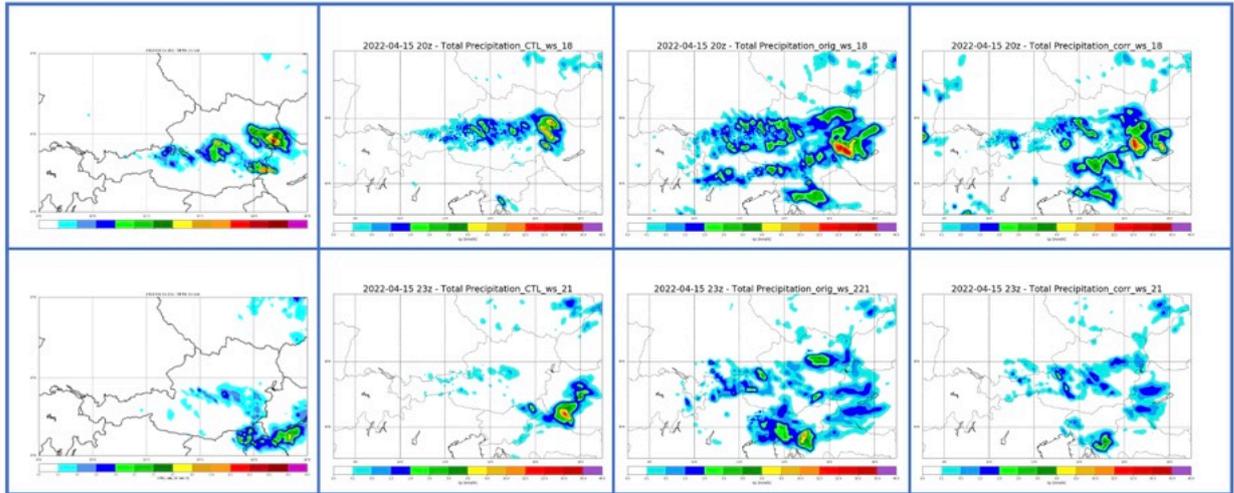


Abbildung 20: Ergebnisse der Assimilation von ZTD-Daten

In der linken Spalte sieht man die VERA-Analyse von Niederschlagsereignissen in Österreich, basierend auf Satelliten- und Radardaten sowie Messstationen. In der zweiten Spalte sieht man die Ergebnisse unserer operativen Vorhersagen, des Control Runs, mittels des UBIMET hauseigenen RACE-Modells und der Assimilation von Satellitenbildern, Radardaten, Messstationen und Blitzdaten. In der dritten und vierten Spalte wurden zusätzlich noch die ZTD-Daten in das numerische Wettermodell assimiliert; einmal ohne Korrektur (3. Spalte) und einmal mit oben beschriebener Korrekturmethode (4. Spalte). Im Allgemeinen kann erkannt werden, dass die Assimilation zusätzlicher ZTD-Daten zu einer signifikanten Überschätzung von Niederschlagsereignissen führt – sowohl in deren Intensität als auch räumlichen Ausbreitung. Die eingeführte Korrekturmethode führt zwar zu einer leichten Verbesserung der Situation, allerdings führt der Control Run dennoch zu erheblich besseren Scores und Vorhersagen.

Im letzten Schritt wurde die Assimilation mit den korrigierten Daten durchgeführt unter Verwendung von „quality control“, d.h. es wurde ein Schwellwert für $(O-B)_{av}$ eingeführt und variiert, oberhalb dessen keine Observationswerte berücksichtigt wurden. Dies hat die Prognosequalität verbessert, da weniger GNSS-Daten assimiliert wurden, eine

Verbesserung gegenüber dem Kontrolllauf konnte jedoch auch damit nicht erreicht werden (siehe Abbildung 21).

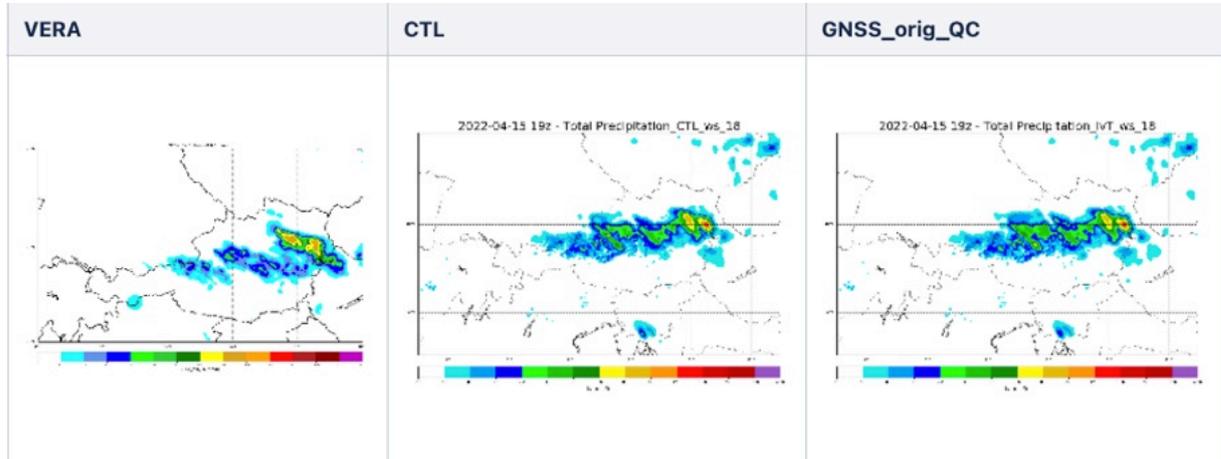


Abbildung 21: Ergebnisse des Testlaufs mit Qualitätskontrolle (rechts) im Vergleich zum Kontrolllauf (Mitte) und zur Reanalyse (links)

2.1.2.4 Fazit

Als allgemeines Fazit der Untersuchungen kann gesagt werden, dass die Assimilation von GNSS-ZTD-Daten zu einem Anstieg des Wasserdampfgehalts bzw. der Feuchtigkeit des Systems führt und damit zu einer Überschätzung des vorhergesagten Niederschlags. Dieses Ergebnis stimmt mit anderen Studien überein, die einen Anstieg der Feuchteverzerrung durch Assimilation von ZTD-Daten zeigen (z. B. Bennitt und Jupp, 2012), was mit der geringen Entfernung (unter 100 km) zwischen GNSS-Stationen zusammenhängen kann (Lindskog et al., 2017). Der vermutete Zusammenhang zwischen hoher Feuchteverzerrung und hoher GNSS-Stationendichte ist insofern problematisch, dass generell für hochauflösende Vorhersagen eine möglichst hohe räumliche Dichte an Informationen für die Datenassimilation vorteilhaft ist. So wird der mögliche positive Impact der Assimilation von GNSS-Daten stark eingeschränkt. Da das bei UBIMET entwickelte und betriebene RACEVAR-Modell bereits mit verschiedenen hochauflösenden Datenquellen und Beobachtungsdaten (wie Radarreflexion, Blitzschlag, Satellitenstrahlung und VERA) betrieben wird, wird die Verwendung von GNSS-ZTD-Daten die Niederschlagsvorhersage voraussichtlich nicht verbessern. Dies stimmt mit anderen Studien überein, die einen geringen bzw. negativen Einfluss der ZTD-Assimilation auf die Vorhersage nahelegen, wenn das System bereits mit meteorologischen Beobachtungen gesättigt ist (z. B. Bennitt und Jupp, 2012). In Gebieten, wo eine solche Vielzahl an Quellen zur Datenassimilation nicht zur Verfügung steht, kann eine Assimilation von GNSS-Daten hingegen als Proxy zur

Verbesserung der Vorhersagegüte von Feuchte- und Niederschlagsparametern dienen, z.B. wenn der Aufbau eines Radarnetzes nicht in Frage kommt, aber eine gewisse Dichte an GNSS-Messpunkten bereits vorhanden ist. Hier muss dann vor allem noch beachtet werden, dass die GNSS-Daten kalibriert in hoher Messqualität vorliegen, was nicht bei jedem GNSS-Empfänger gegeben ist.

2.1.3 Drohnengetragene Bodenradargeräte für die Bestimmung der Schneehöhe

2.1.3.1 Motivation & Zielsetzung

Die Schneehöhe entlang des Bahnnetzes hat großen Einfluss auf die Lawinengefahr sowie den Schmelzwasserabfluss und den damit verbundenen Einfluss auf das Murenrisiko. Bisher wird die Schneehöhe allerdings nur punktuell entweder an wenigen Wetterstationen per Ultraschall, mit moduliertem Laserlicht oder durch manuelle Messungen durch geschultes Personal im Gelände gemessen. Bei hoher Lawinengefahr veranlassen die ÖBB auch Hubschrauberbefliegungen, um sich ein Lagebild machen zu können. Das sind einerseits zu wenige Messungen und andererseits sind diese Maßnahmen zur Bestimmung der Schneehöhe auch sehr zeit- und kostenintensiv. Darum war das Ziel in KlimZug der Test einer neuartigen berührungslosen Schneehöhenmessung in einem Feldexperiment durch die Verwendung eines drohnengetragenen Radargerätes. Durch diese Methode ist die Erfassung der Schneehöhe und einzelner Schneelayer ganzer Transsekte in kurzer Zeit möglich. Die Einsatzbereiche für diese Art von Messungen sind bei den ÖBB vielfältig, angefangen von der Bestimmung des Schneewasseräquivalentes für die Beurteilung des Zuflusses in die ÖBB-eigenen Wasserkraftwerke bis hin zur Schneehöhenmessung in Lawinen-Abbruchgebieten.

2.1.3.2 Feldexperiment

Das gesamte Feldexperiment wurde auf Grundlage des folgenden Designs durchgeführt:

- Auswahl eines geeigneten alpinen Testgeländes: Das ausgewählte Testgelände am Dobratsch in der Nähe von Villach in Kärnten, Österreich, auf einer Höhe von 1730 m mit geeigneten Schneebedingungen, ist das ganze Jahr über mit dem Auto vollständig zugänglich und bietet auch Schutzinfrastruktur für die Montage von Sensoren bei schlechtem Wetter. Das Testgelände für diesen Proof-of-Concept (PoC) an der "Rosstratte" zeichnet sich durch ein insgesamt flaches Gelände aus und hatte eine Größe von ca. 6000m².
- Referenzmessungen der Schneeoberfläche und Geländeoberflächenhöhe sowie Schneetiefe: Punktbasierte Referenzmessungen wurden unter Verwendung eines

hochpräzisen Differential-GNSS zur Messung der Position und Schneeoberflächenhöhe in einem nahezu regelmäßigen Probenraster an 18 Messpunktstandorten durchgeführt. Jeder Standort wurde zusätzlich mit Signal-Spray markiert, und an diesen Standorten wurden Schneetiefenmessungen mit einer Lawinenprobe durchgeführt. Diese markierten Standorte wurden zusätzlich als Kontrollpunkte für eine photogrammetrisch abgeleitete Schneeoberflächenhöhenkarte verwendet. Basierend auf einer Drohnenvermessungsmission können photogrammetrisch eine Schneeoberflächenhöhenkarte und eine Geländeoberflächenhöhenkarte nach vollständiger Schneeschmelze abgeleitet werden. Diese Drohnenvermessungsmission wurde am 30. Mai 2023 mit dem gleichen Flugplan durchgeführt. Basierend auf dem Unterschied zwischen der Geländeoberflächenhöhe und der Schneeoberflächenhöhe wurde eine Schneetiefenverteilungskarte abgeleitet.

- Schneeradar-Messungen: Bodenbasierte Radar-Messungen mit einem Sensor auf einem Schlitten mit linienbasierten Messungen wurden durchgeführt. Zum Vergleich wurden Drohnen-basierte berührungslose Nahbereichs-Radar-Messungen mit einem Radar-Sensor, montiert auf dem LEICA AIBOT AX20 Multirotor-System in 10 m Flughöhe über Grund absolviert. Alle Flüge wurden von einem voll ausgebildeten und erfahrenen Drohnenpiloten im manuellen Modus durchgeführt, aufgrund der sehr niedrigen Flughöhe über dem Boden.
- Analyse: Die Feldmessungen wurden mit Referenzmessungen verglichen und quantitativ analysiert, verglichen und visualisiert, unter Verwendung eines Geografischen Informationssystems (GIS).

Bei der Durchführung des Feldexperiments wurde in einem ersten Schritt das Snow-Radar-System von Mitta erstmals in eine Multikopter-Drohne (Leica AIBOT AX20) integriert. Die Integration des Radar-Sensors erfolgte unter Verwendung eines eigens konstruierten Montagesystems gemäß den bereitgestellten Sensorabmessungsinformationen und wurde vor dem Außenfeldtest unter Laborbedingungen getestet. Abbildung 22 und Abbildung 23 geben ausgewählte Impressionen vom am 23. Februar 2023 durchgeführten Feldtest wieder.



Abbildung 22
Radarintegration,
Testgebiet am Dobratsch
(Rostratte) und
Messschlitten zur
bodenbasierten
Radarmessung



Abbildung 23 Drohnengestützte, "near-surface" Schneemessung; KlimZug-Experten Team (v.l.n.r.): Sander Losnedahl (MITTA), Ulf Scherling (SIENA), Gernot Paulus (SIENA), Markus Jech (UBIMET), Christian Rachoy (ÖBB Infrastruktur), Magnus Dahl Olsen (MITTA)

2.1.3.3 Ergebnisse

2.1.3.3.1 Drohnenbefliegung

- Referenzmessungen (DGNSS) und Digitales Schnee-Oberflächenmodell

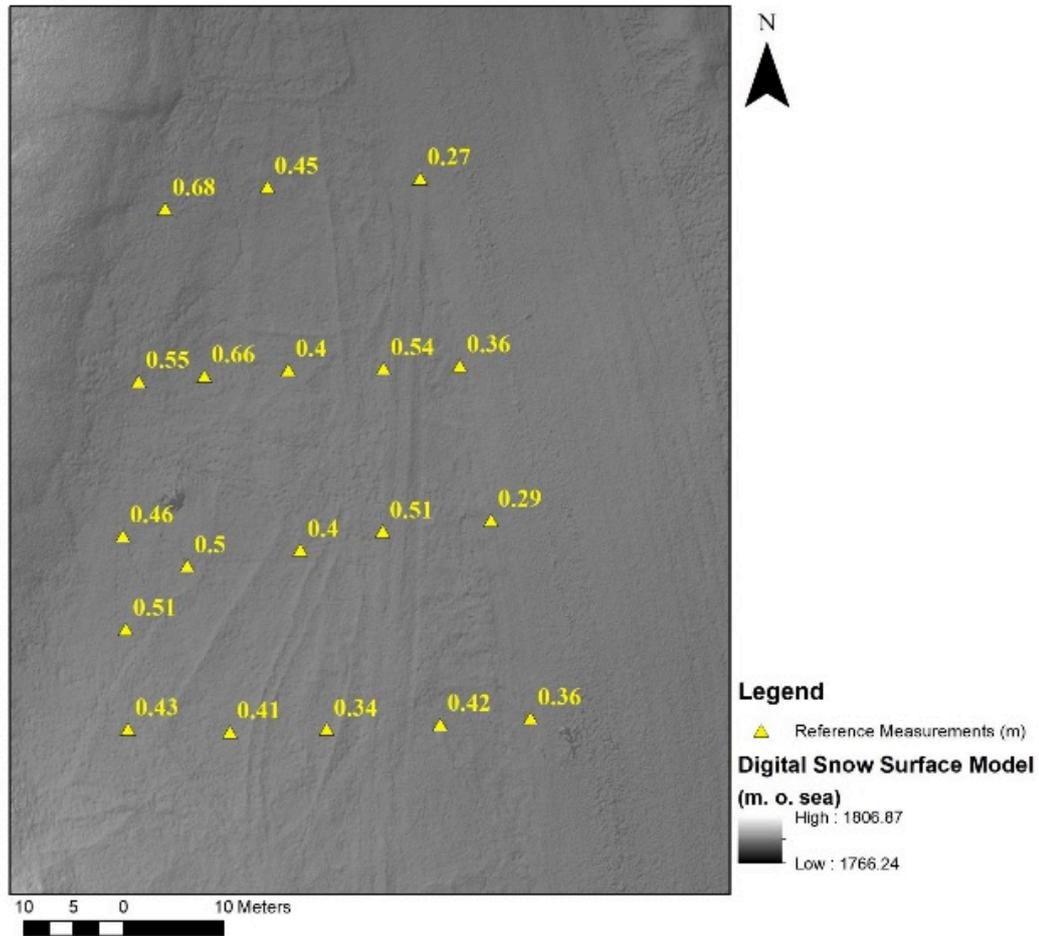


Abbildung 24 Schneeoberflächenmodell abgeleitet durch photogrammetrische Befliegung sowie punktuelle Referenzmessungen mittels Lawinenprobe

- Referenzmessungen und photogrammetrische Schneehöhen (UAS)

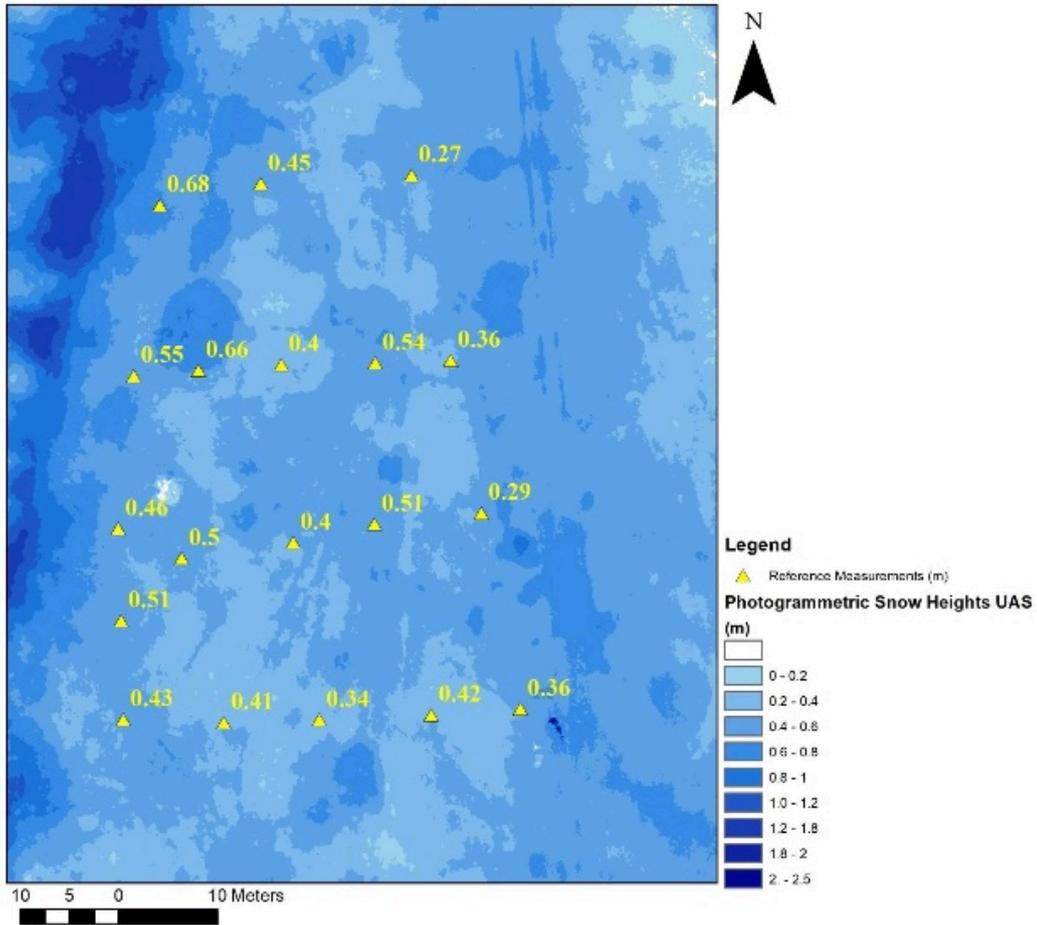


Abbildung 25 Schneehöhenverteilung basierend auf photogrammetrischen Messungen abgeleitet durch Höhe der Schneeoberfläche und Höhe des Geländes unter schneefreien Bedingungen

- Referenzmessungen und bodengestützten Messungen mittels Radarschlitten

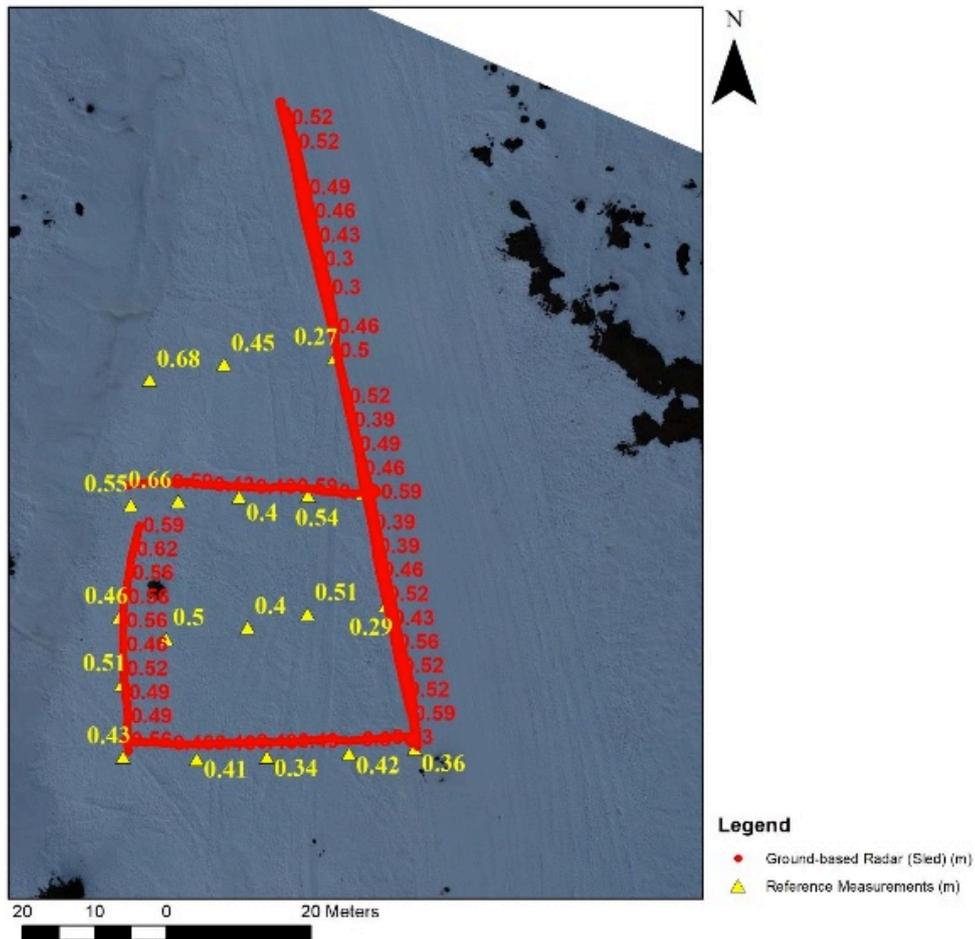


Abbildung 26 Vergleich zwischen bodengestützten Radarmessungen (Schlitten) und Referenzmessungen

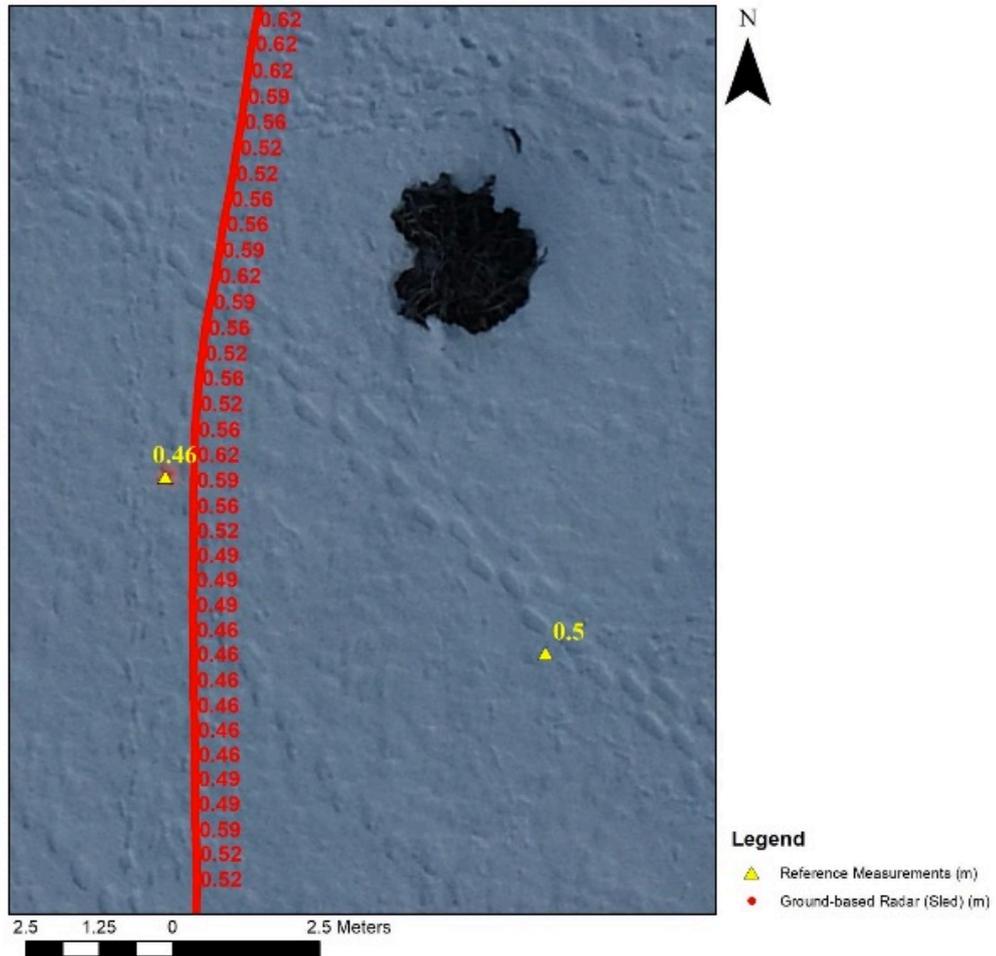


Abbildung 27 Detailabbildung des Vergleichs zwischen bodengestützten Radarmessungen (Schlitten) und Referenzmessungen

- Referenzmessungen und „Near-Surface“ drohnengestützte Radarmessungen

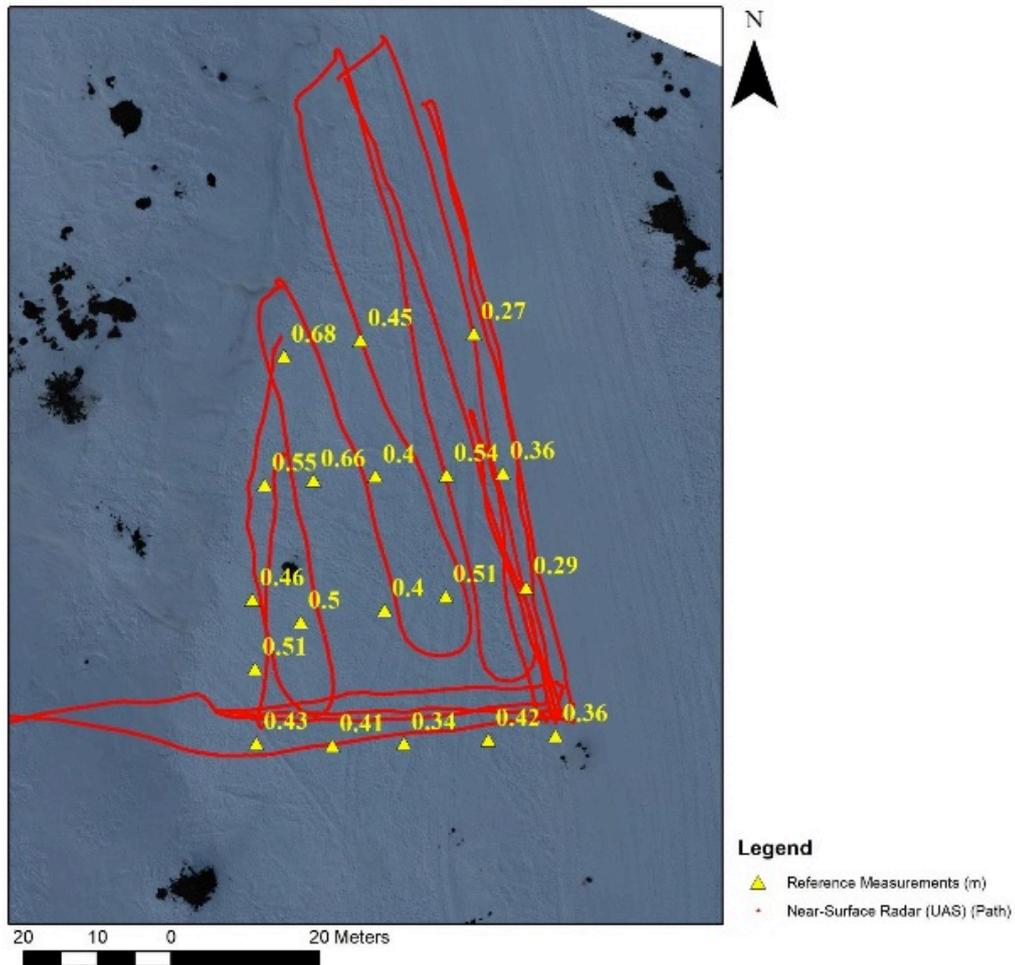


Abbildung 28 Vergleich zwischen oberflächennahen Radarmessungen aus der Luft (UAS) und Referenzmessungen

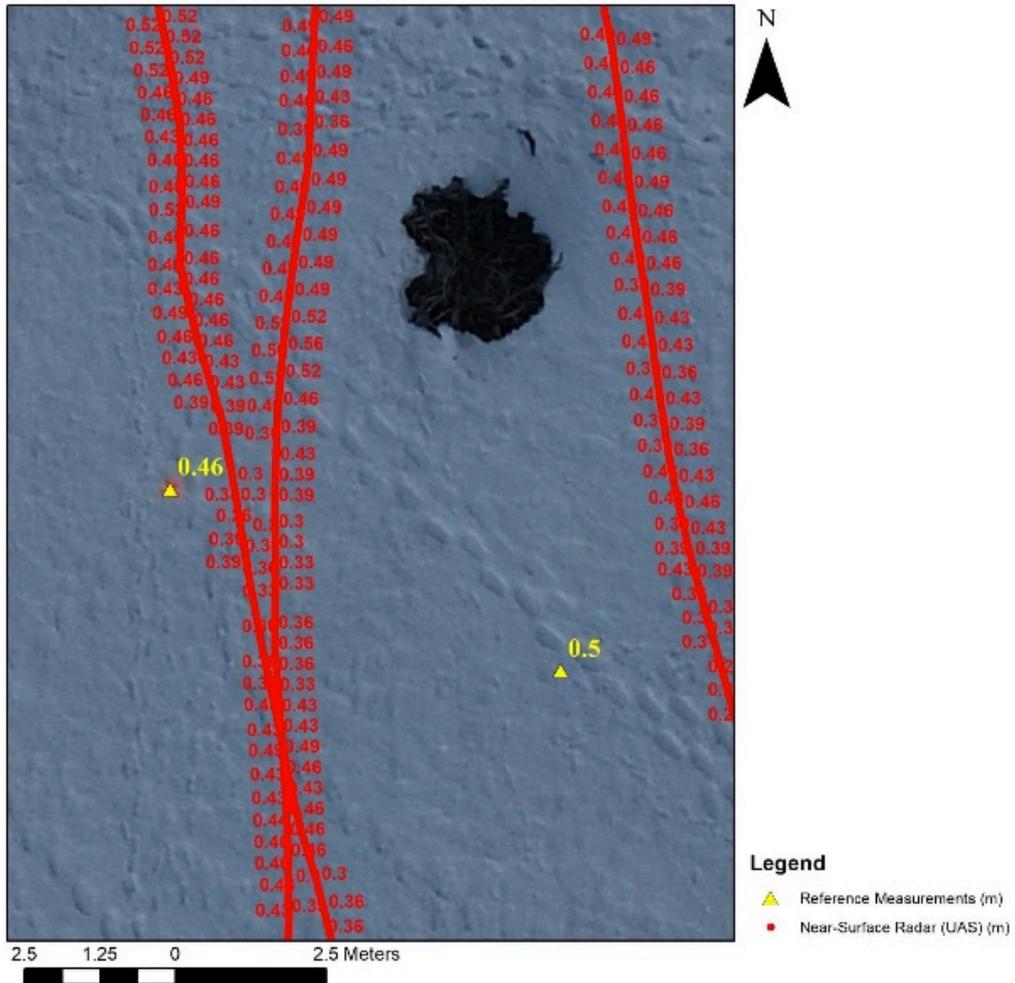


Abbildung 29 Detailabbildung des Vergleichs zwischen oberflächennahen Radarmessungen aus der Luft (UAS) und Referenzmessungen

- Referenzmessungen und Vergleich zu photogrammetrischen Schneehöhen (UAS)

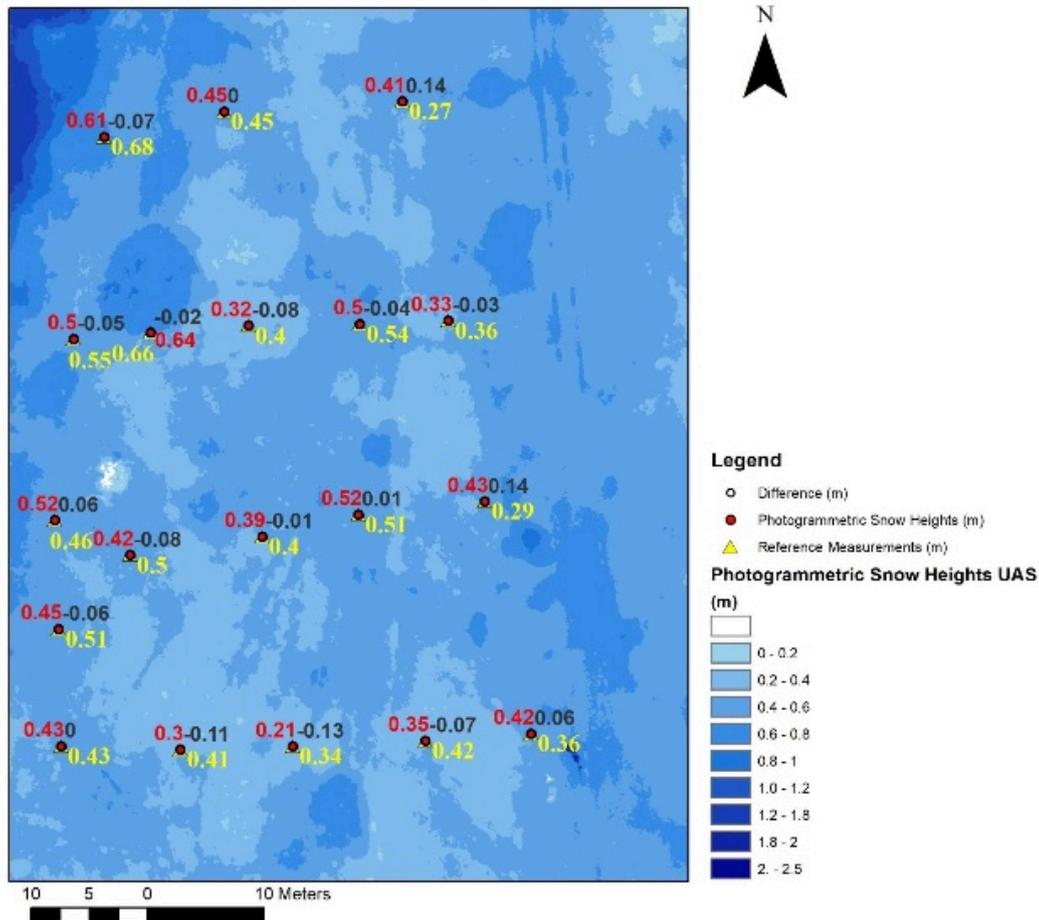


Abbildung 30 Vergleich zwischen Referenzmessungen und photogrammetrisch ermittelten Schneehöhen

2.1.3.3.2 Schneehöhen & Radarmessungen

Mehrere verschiedene Linien von Radar-Daten wurden gesammelt, jede mit ihrem eigenen Zweck. Die Linien 00000-00004 sind Referenz-Schlittenradardaten, die zusammen mit Sonden als „Ground Truth“ für die Drohnenradardaten aus den Linien 00011-00013 verwendet werden. Die Linien 00000 und 00001 enthalten duplizierte Daten, jedoch in umgekehrter Richtung. Daten von Linie 00014 dienen als Höhentest, um zu beobachten, bei welcher Höhe der Signalverlust bei den gegebenen Schneetiefen auftritt. Linie 00015 ist eine Geländeerhebung, die durchgeführt wurde, um festzustellen, ob Daten für ein größeres Gebiet gesammelt werden können, und Linie 00016 ist eine Hügelenerhebung, die

durchgeführt wurde, um Daten zu erhalten, bei denen bekannte Hänge und Schneetäler vorhanden waren.

- Methodik: Sowohl die Drohnen- als auch die Schlittenradardaten wurden mit denselben Verarbeitungsalgorithmen in unserer hausinternen Verarbeitungssoftware verarbeitet. Die Verarbeitung kann in drei Hauptschritte unterteilt werden: Entstörung (Hochpassfilter und Mittelfenstersubtraktion), Verstärkung (t-Pow-Verstärkung) und Clipping (Feature-Enhancer). Die verarbeiteten Daten wurden dann zeitlich interpretiert, und die Tiefe wurde unter Verwendung einer durchschnittlichen Schneegeschwindigkeit von 70% der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum berechnet. Für die Drohrendaten wurde außerdem die "Luftschicht" von der berechneten Tiefe subtrahiert, wobei eine Geschwindigkeit von 299.702.547 m/s in der "Luftschicht" verwendet wurde.
- Ergebnisse Referenzdaten, bodengestützte Messung (Schlitten): Referenz-Radardaten wurden unter Verwendung des üblichen Schlitten-Radar-Setups gesammelt, um sicherzustellen, dass das Radarsystem wie beabsichtigt funktioniert, und um einen Vergleich für die Drohnen-Radardaten zu haben. Insgesamt wurden 5 Linien mit Referenz-Schlitten-Radardaten gesammelt - Linie 00000 und 00001 Duplikate sind, jedoch in entgegengesetzten Richtungen gesammelt wurden; einige Beispiele werden hier erläutert.

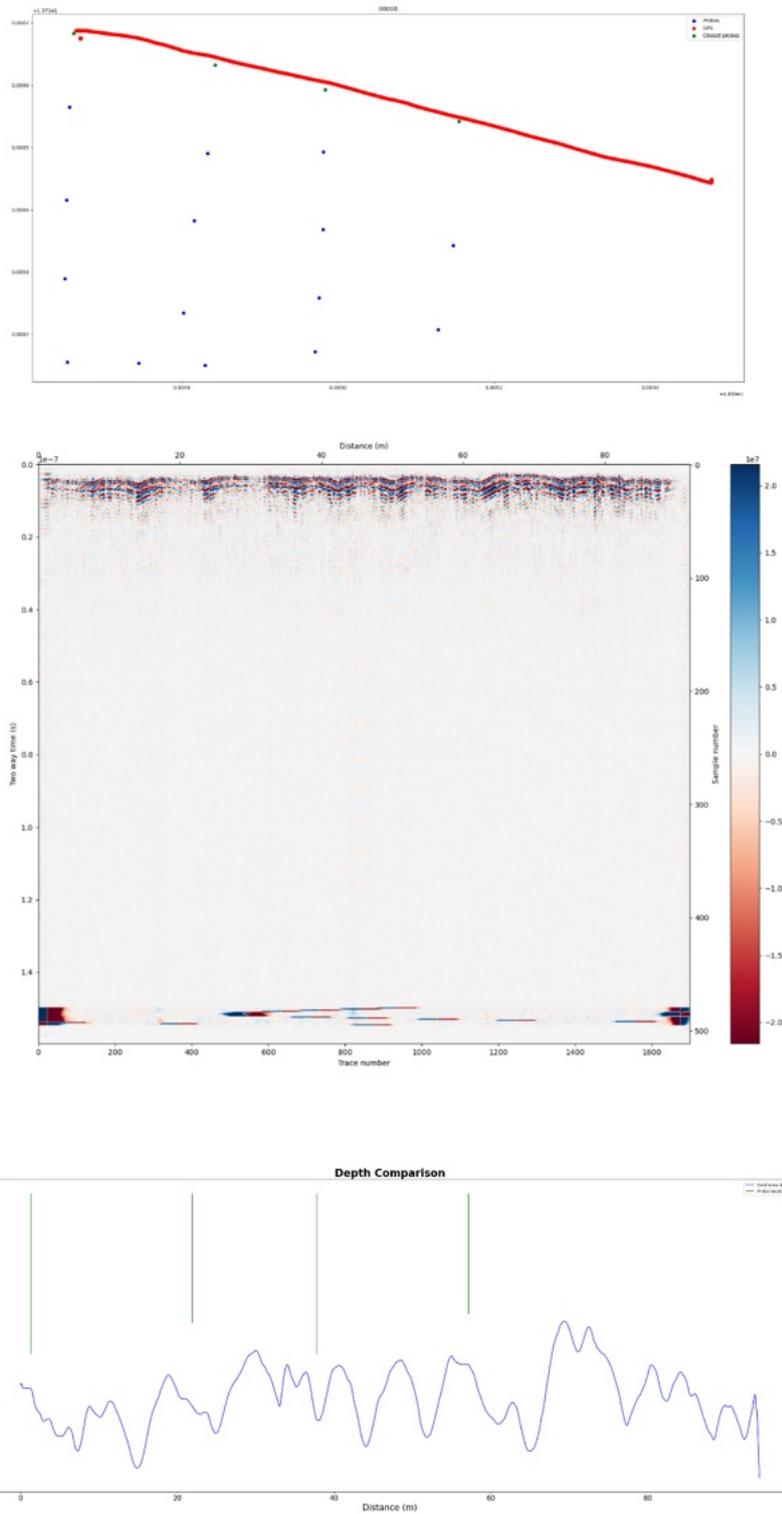


Abbildung 31 Die Abbildungen zeigen die gesammelten Radardaten, das entsprechende Radargramm und das Tiefenmodell. Die Schnee-Boden-Reflexion ist deutlich sichtbar und ein Tiefenmodell konnte daraus abgeleitet werden.

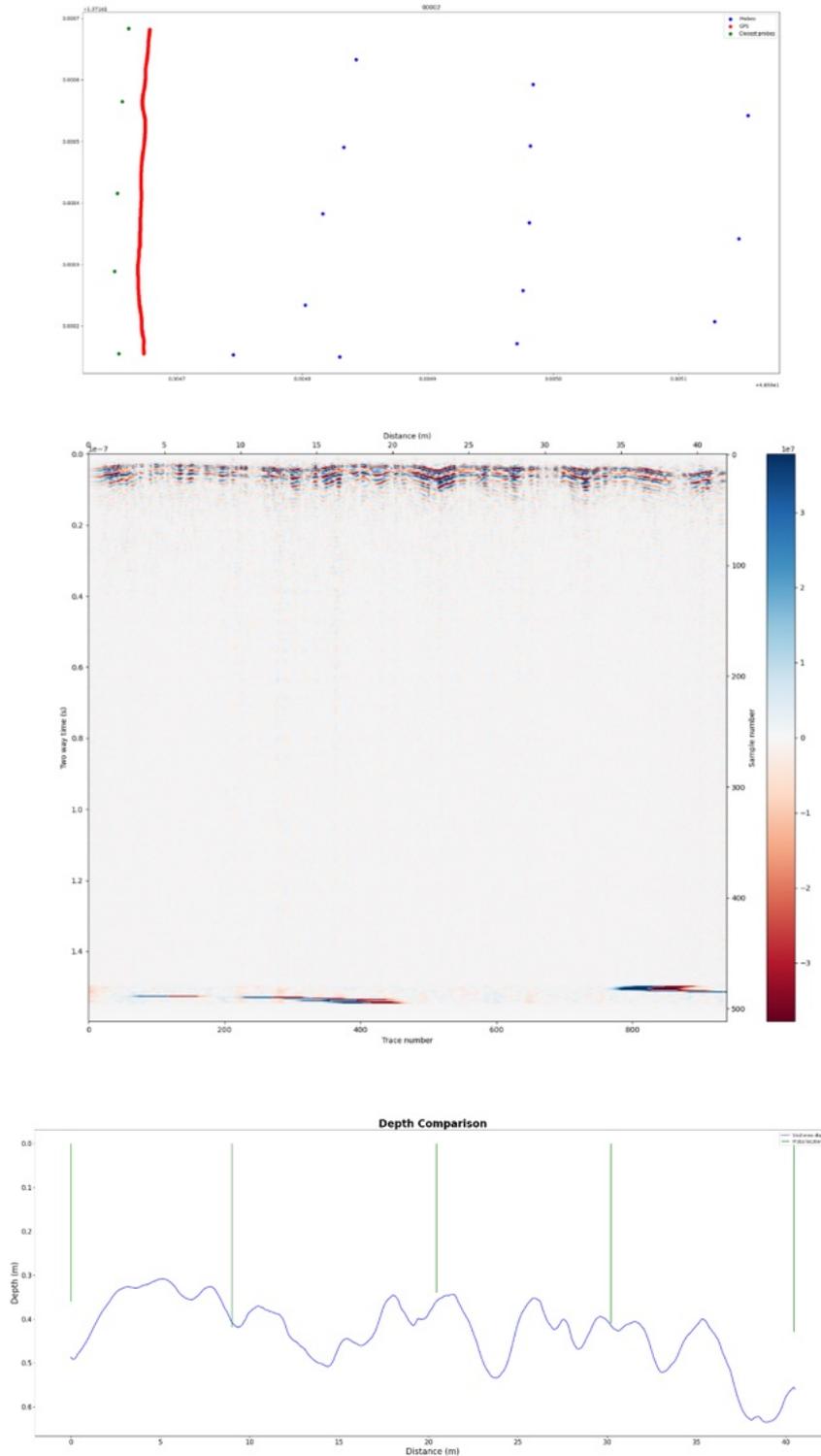


Abbildung 32 Die Abbildungen zeigen die gesammelten Radardaten, das entsprechende Radargramm und das Tiefenmodell. Die Schnee-Boden-Reflexion ist deutlich sichtbar und ein Tiefenmodell konnte daraus abgeleitet werden.

- Ergebnisse drohnengestützte Messungen (UAS): Drohnendaten wurden über demselben Gebiet wie die Referenz-Schlitten-Radardaten gesammelt, um einen Vergleich zu ermöglichen. Zusätzlich wurden ein Höhentest, ein Flächentest und ein Hügelttest durchgeführt, um die Grenzen des Drohnen-Radarsystems zu testen.

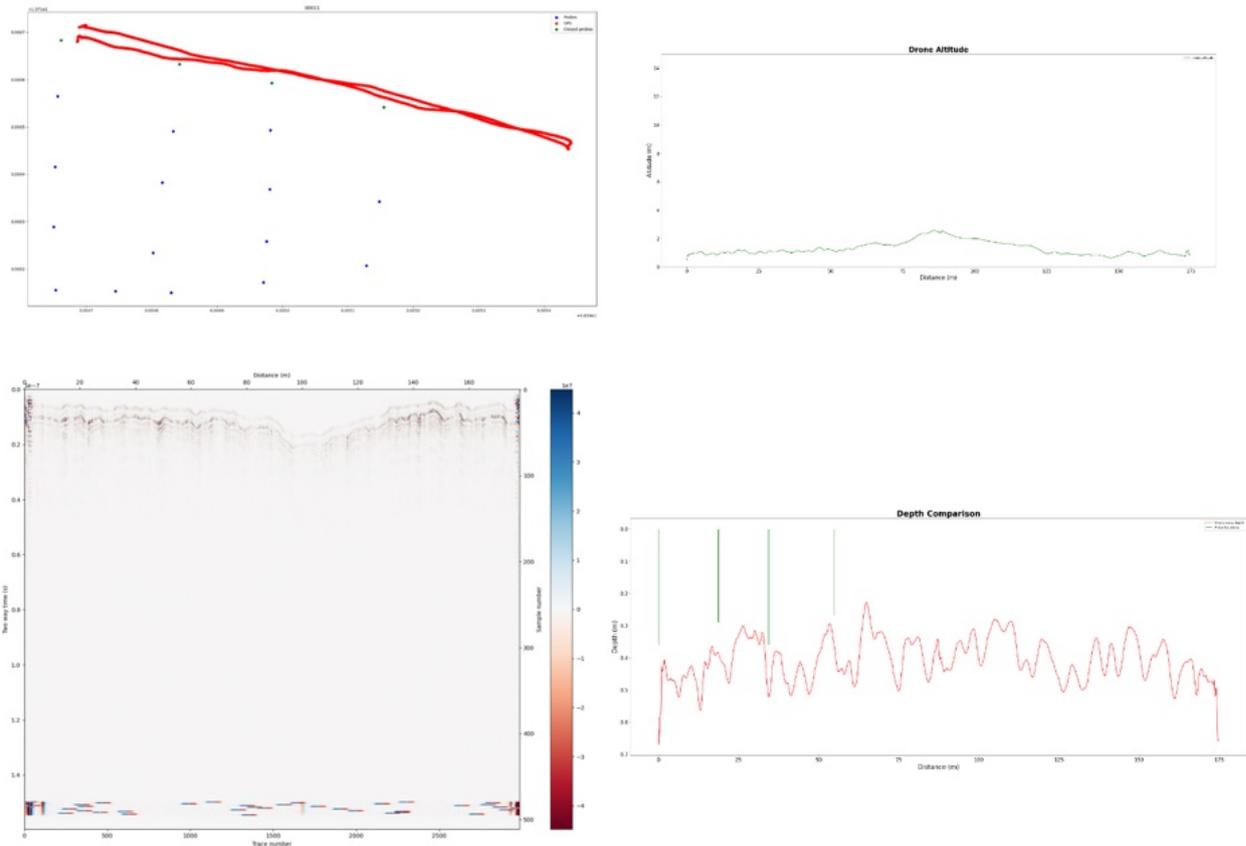


Abbildung 33: Die Abbildungen zeigen den Flugpfad der Drohne (links oben), die Drohnenhöhe (rechts oben), das Radardramm (links unten) und das Tiefenmodell (rechts unten). Deutlich sichtbar sind die Luft-Schnee- und Boden-Schnee-Reflexionen.

- Höhenabhängige Messung: Dieser Test evaluiert die höhenabhängige Genauigkeit, um zu beobachten, wie sich die Signalstärke mit steigender/fallender Höhe ändern würde. Es ist zu erkennen, dass die Flughöhe auf etwa max. 10 Meter gesteigert wurde, während sie auf dem Rückweg auf etwa 0 Meter reduziert wird. Dabei ist zu erkennen, dass entlang des gesamten Pfades die Luft-Schnee- und Schnee-Boden-Reflexionen auf dem Radargramm weiterhin deutlich sichtbar sind. Daraus kann geschlossen werden, dass selbst bei größeren Flughöhen wie z.B. in steilerem Gelände notwendig, noch ein ausreichendes Signal-zu-Rausch Verhältnis gegeben ist und die gemessenen Schneetiefen sehr gut mit den Referenzmessungen übereinstimmen.

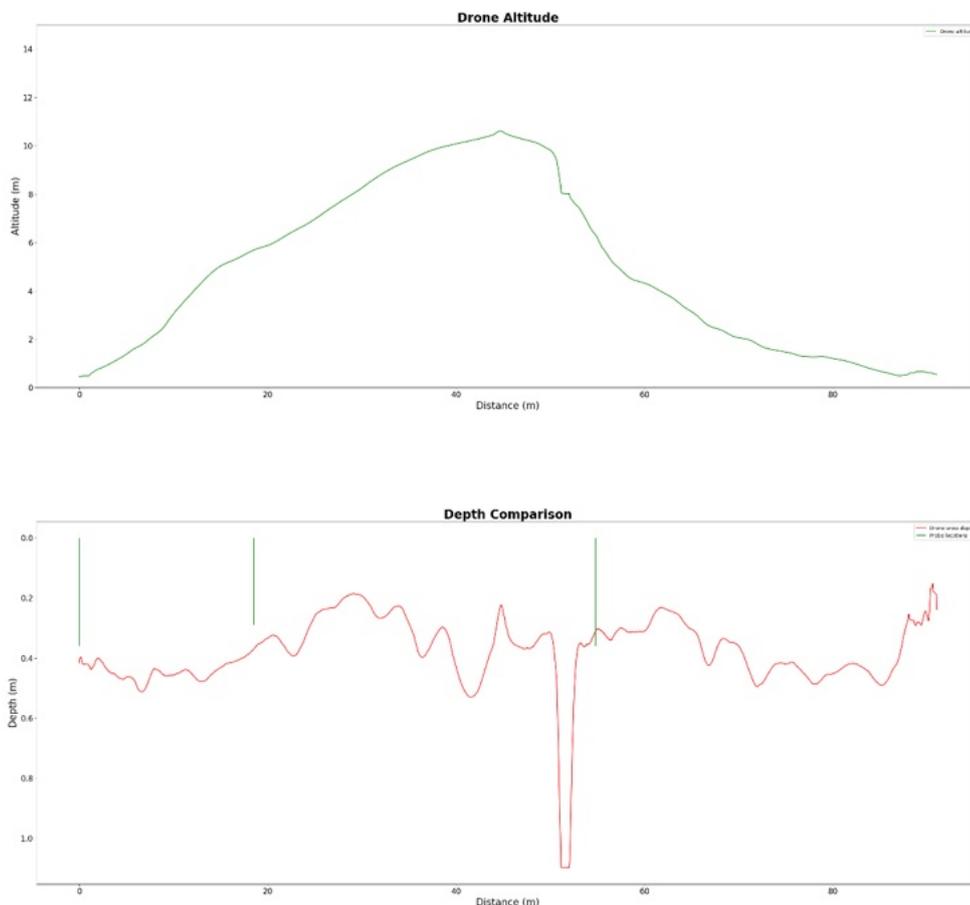


Abbildung 34 Vergleich der Drohnenflughöhe (oben) und der Signalstärke im Radargramm (unten)

- Drohngestützte Messung einer Fläche: Beim folgenden Test wurde die Drohne über ein definiertes Gebiet mittels festgelegten Linienprofilen befliegen, um die Fläche bzw. die Schneetiefe eines Gebietes zu evaluieren. Es ist festzustellen, dass das Signal entlang der gesamten Linie stark ist, da sowohl die Luft-Schnee- als auch die Schnee-Boden-Reflexionen leicht erkennbar sind. Die prozessierten Schneedaten zeigen eine über dem gesamten Gebiet starke Korrelation mit den Referenzmessungen.

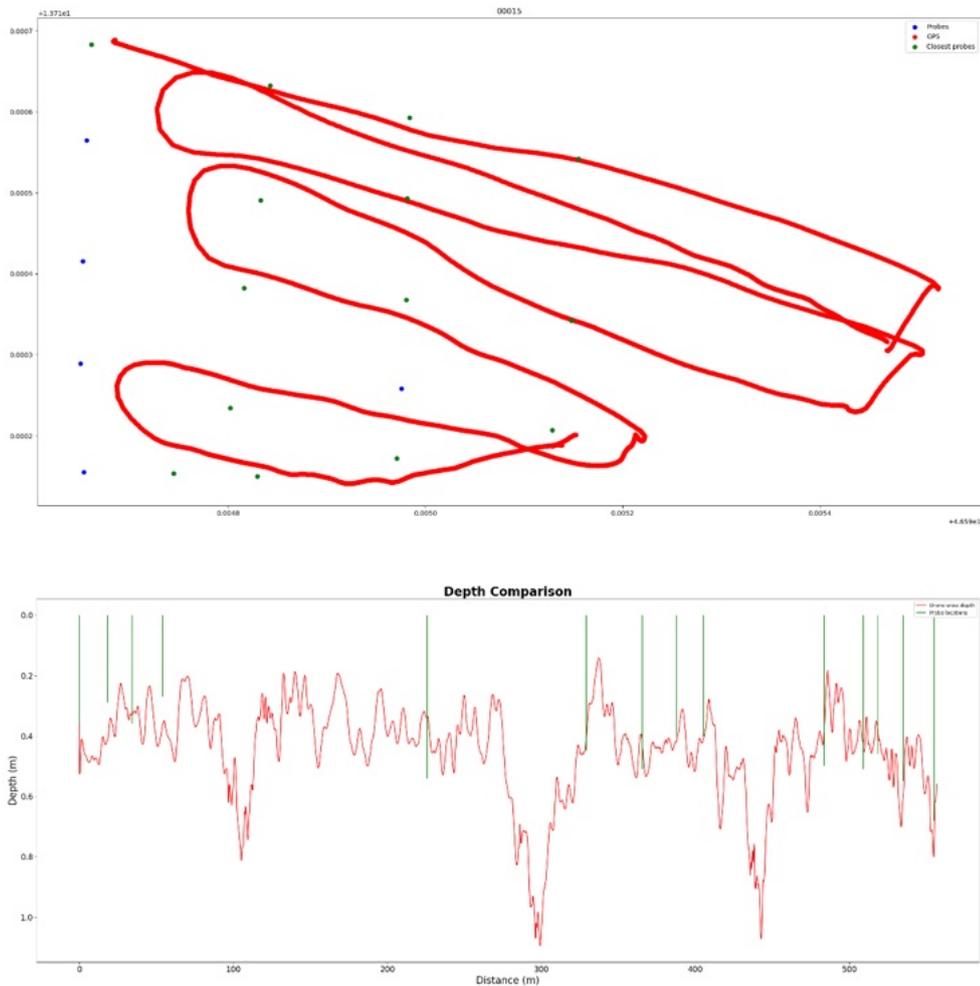


Abbildung 35 Vergleich des Linienprofils des Drohnenflugs (oben) und der Signalstärke im Radargramm (unten)

- Drohngestützte Messung in einem Hang: Dieser Test dient zur Evaluierung der Einsetzbarkeit der drohngestützten Radarmessung in steilem Gelände. Hierbei ist zu beachten, dass während des Auf- und Absteigens die Flughöhe nicht konstant gehalten

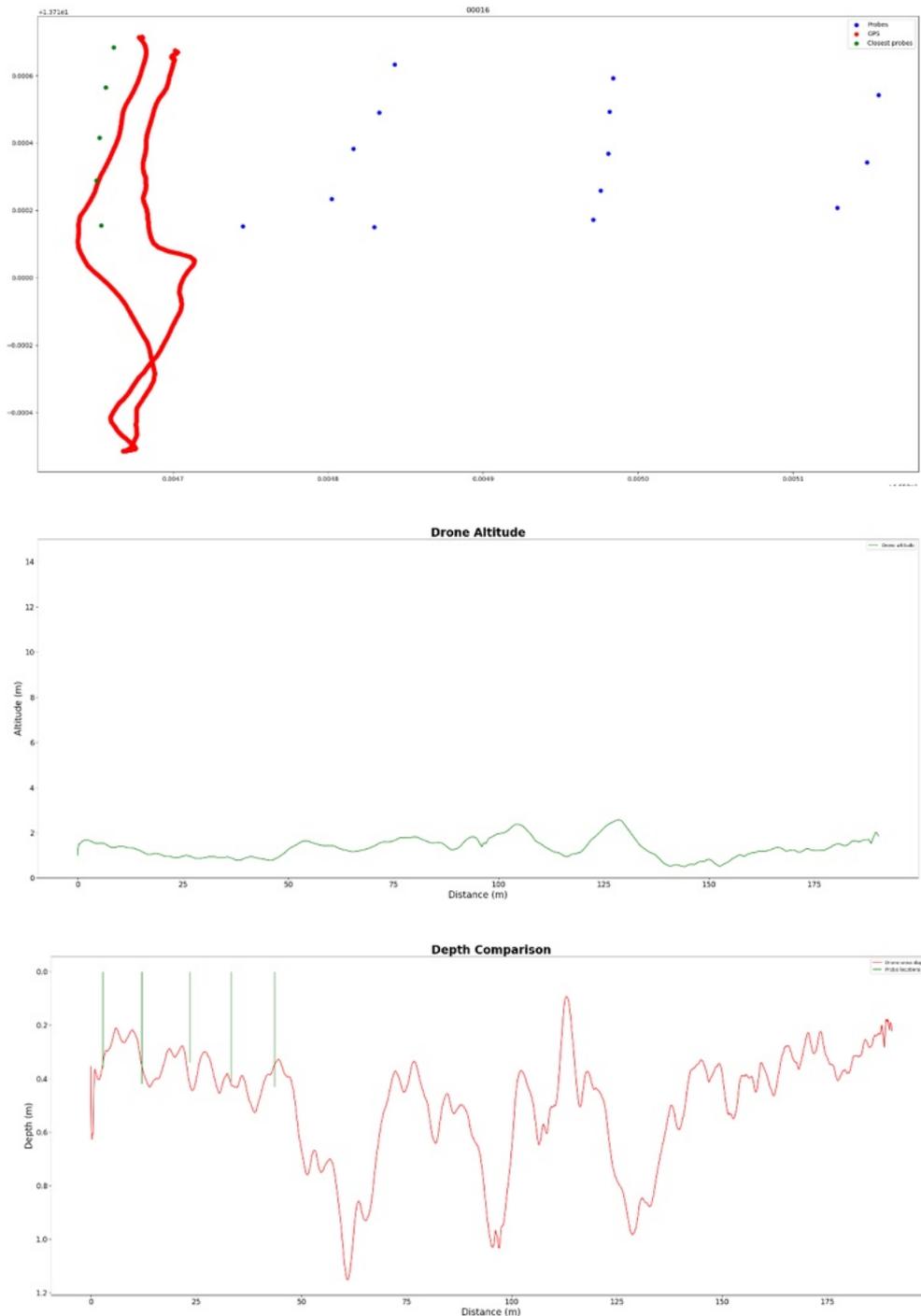


Abbildung 36 Vergleich des Flugpfads (oben), der Drohnenflughöhe (Mitte) und der Signalstärke im Radargramm (unten)

werden kann sowie unterschiedliche Schneesituationen (Schnee sammelt sich üblicherweise am Fuße des Hangs) gegeben sind. Auch hierbei zeigen sich eindeutige Zusammenhänge zu den Referenzmessungen, durchgeführt am Fuße des Hangs.

- Vergleich der Messmethoden: Im Folgenden werden die unterschiedlichen Messkonzepte, Lawinensonden, bodengestützte (Referenz-) Radarmessungen (Schlitten) und drohnengestützte Radarmessungen (UAS) verglichen, um die Nutzbarkeit zu evaluieren und Unterschiede aufzuzeigen. In den folgenden Abbildungen ist zu sehen, dass die bodengestützten Referenzmessungen mittels Schlitten im Allgemeinen sehr gut mit den drohnengestützten Messungen übereinstimmen. Die gilt sowohl in Bezug auf die Schneetiefe, als auch auf topographische Merkmale. Leichte Verschiebungen hinsichtlich der topographischen Gegebenheiten können aus ungenauen GPS-Daten sowie nicht vollständig überlappenden Messungen resultieren. Weiters ist zu erkennen, dass die Referenzdaten mittels Schlitten offenbar größere Schneehöhen liefern als die Daten aufgenommen mittels Drohnen. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die Drohnen- und Schlittendaten unterschiedliche Reflexionspunkte in Bezug auf das Gelände (durch die unterschiedliche Reflexionscharakteristik) aufweisen.

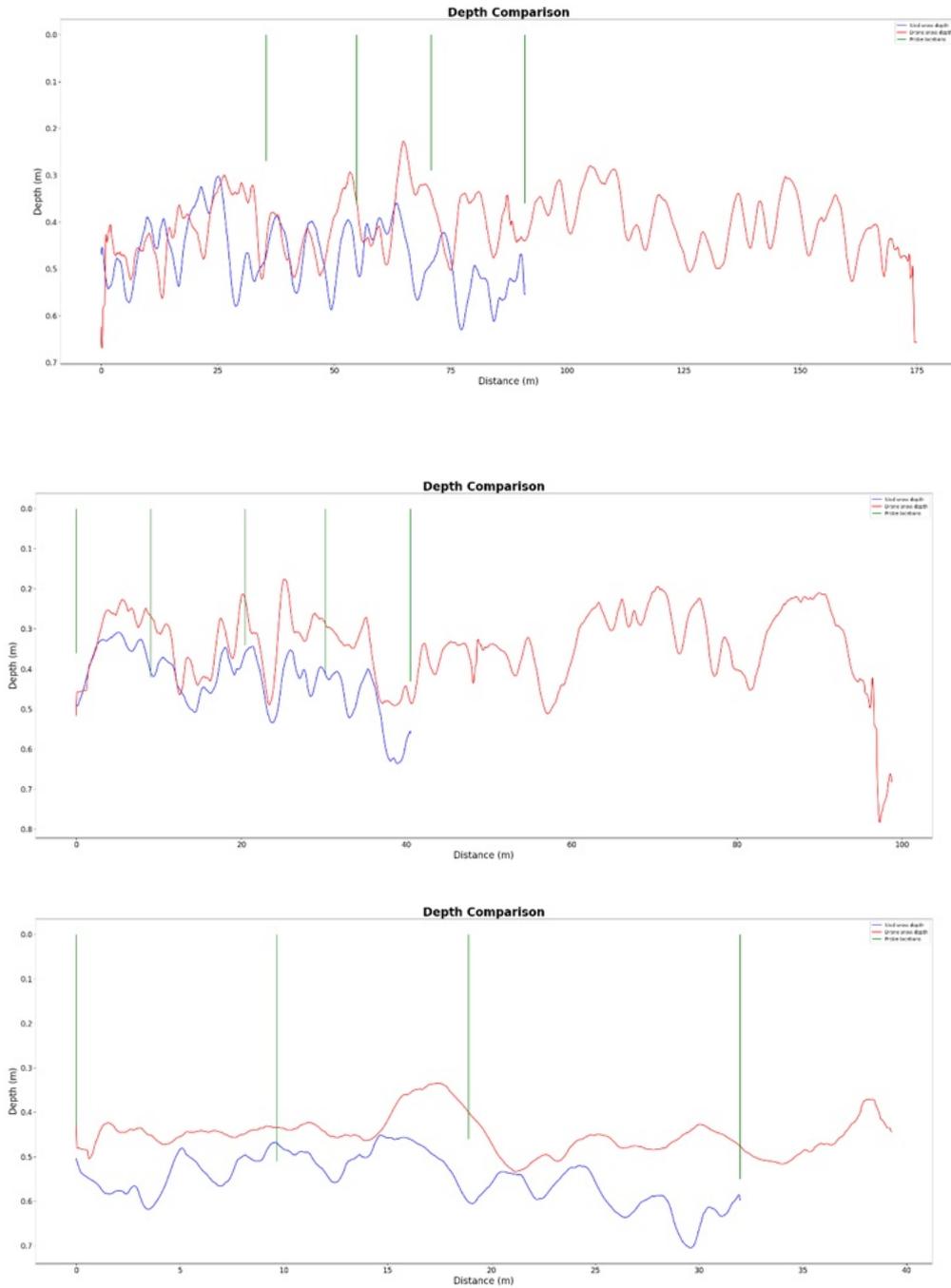


Abbildung 37 Vergleich der bodengestützten Referenzmessungen mittels Schlitten und der drohnengestützten Messungen

- Mögliche Fehlerquellen: Obwohl das Experiment bestmöglich unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt wurde, können feine Unterschiede zu abweichenden Datenauswertungen führen.

Eine Unschärfe ergibt sich aus abweichenden Linienmessungen des Referenzschlittens und des Drohnenpfades. Obwohl der geschulte Drohnenpilot bestmöglich entlang der Schlittenspur flog, können Abweichungen des Pfades, auch wenn nur um wenige Zentimeter, zu einer gewissen Ungenauigkeit bzw. scheinbarem Fehler führen. Dies bedeutet, dass der Vergleich beider Messungen kein direkter 1-zu-1 bzw. quantitativer Vergleich ist, sondern vielmehr als qualitativer Vergleich herangezogen werden kann, um die Ähnlichkeit von Schneetiefen und topographischen Merkmalen zu vergleichen. Analog dazu ergibt sich aus der Genauigkeit von 2 Metern des verwendeten GPS eine gewisse Fehlertoleranz.

Weiters können unterschiedliche Reflexionspunkte zu unterschiedlichen Schneetiefen führen. Die Neigung des Geländes führt zu einer Änderung der Reflexionspunktes durch den vertikalen Versatz des Radars (durch trigonometrische Änderungen). Daher können die Reflexionspunkte der Radarmessungen der Schlitten- und Drohnenmessungen voneinander abweichen, wodurch sich eine weitere Ungenauigkeit ergibt.

2.1.3.3.3 Vergleich der Messungen

Vergleich zwischen photogrammetrische bestimmten Schneehöhenverteilungen und bodengestützten Radarmessungen m ittels Schlitten.

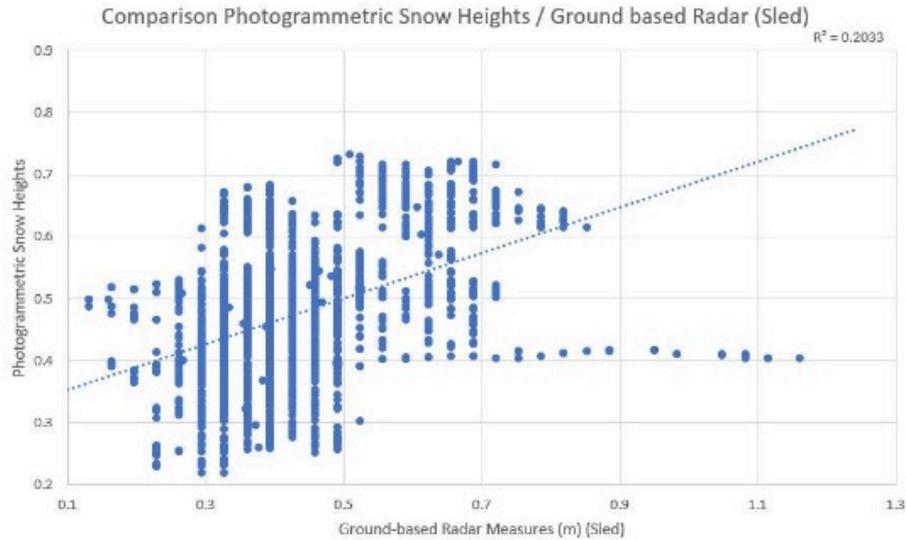


Abbildung 38 Vergleich zwischen photogrammetrische bestimmten Schneehöhenverteilungen und drohnengestützten, „near surface“, Radarmessungen mittels UAS.

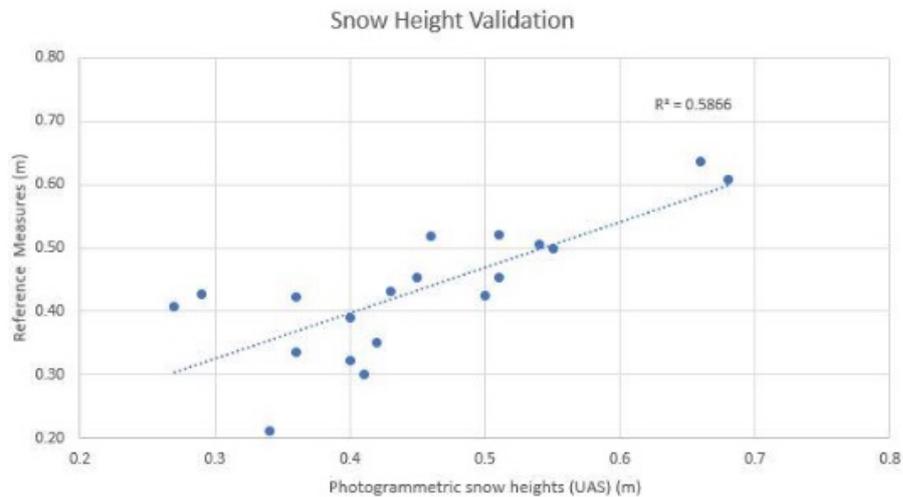


Abbildung 39 Vergleich zwischen punktbasierten Referenzmessungen der Schneehöhe und photogrammetrisch abgeleiteter Schneehöhenverteilung.

2.1.3.4 Fazit

Im Feldtest konnte beobachtet werden, dass das auf der Drohne montierte Radar in der Lage war, ein Signal von ausreichender Stärke zu erzeugen, um eine nasse Schneedecke von bis zu einem Meter Tiefe zu durchdringen. Zudem wurde nachgewiesen, dass die Daten des auf der Drohne montierten Radars in der Lage waren, die Luft-Schnee-Reflexion

von der Schnee-Boden-Reflexion für den Großteil der Messdaten zu differenzieren. Bei flachem Schnee (<10 cm) gestaltete sich diese Aufgabe zwar herausfordernd (niedriges Signal-zu-Rausch Verhältnis), jedoch sind solche Schneetiefen für ein mögliches Lawinenmonitoring nicht relevant. Es wurde ebenfalls festgestellt, dass Geländeunterschiede unter dem Schnee gut erkennbar waren. Die durch drohnengestützte Radarmessungen gewonnenen Schneetiefen entsprachen weitgehend den Lawinensondenmessungen und Referenzdaten (Schlitten), wodurch das Vertrauen in Methodik und deren Anwendbarkeit unter Realbedingungen gestärkt wird.

Angesichts der beiden wichtigsten Faktoren bei der Entstehung von Schneelawinen – dem physikalischen Unterschied zwischen Schneeschichten und dem Winkel zwischen ihnen – sollte ein nachfolgendes Experiment bzw. Feldtest über einer Fläche mit einer Schneedecke aus zwei oder mehr Schichten auf einem abfallenden Hang durchgeführt werden. Ziel des Experiments wäre es, herauszufinden, ob es möglich ist, die physikalischen Unterschiede zwischen den Schichten (relative Amplitude der Schichten) und den Winkel zwischen ihnen zu extrahieren. Hierfür müssen weitere Entwicklungen bei der Prozessierung der Daten bzw. einzelner Features vorgenommen werden. Ein zusätzlicher Amplitudentest sollte über einer größeren Schneedecke durchgeführt werden, um festzustellen, in welcher Höhe das Signal bei einer bestimmten Schneetiefe verschwindet.

2.1.4 Erweiterung der In-Situ-Messungen

2.1.4.1 Motivation & Zielsetzung

Um die Wetter-Datengrundlage zu der ÖBB erweitern war eine Erweiterung und Verdichtung des ÖBB-Messnetzes entlang des Streckennetzes durch In-Situ-Messsensoren geplant. Ziel war es, die neuen gemessenen Daten in das ÖBB-Messnetz und in das UBIMET-WebTool der ÖBB, das Weather Cockpit, zu integrieren. Für die Auswahl der Stationstechnik und den Aufbau bzw. die Standortauswahl gab es einen intensiven Abstimmungsprozess mit der ÖBB. Die ersten beiden stationären Stationen wurden im Pustertal, genauer in Weitlanbrunn und Abfalterbach, installiert. Außerdem wurde eine autarke Messstation in Kolbnitz installiert.

2.1.4.2 Grundlage

Als Hauptkriterien für die Wahl der Wettersensoren wurden folgende Punkte festgelegt:

- Günstiger Preis: Da die Sensoren der Verdichtung des Messnetzes dienen und potentiell in größerer Zahl beschafft werden sollen, ist ein geringer Anschaffungspreis wünschenswert.
- Kompakte Bauform: Bevorzugt werden "All-in-One" Lösungen und Sensoren, die einen geringen Montageaufwand erfordern.
- Weitestgehende Wartungsfreiheit: Möglichst wenig bis keine mechanisch beweglichen Teile, d.h. Niederschlagsmessung per Radar und Windmessung mittels Ultraschallsensoren.
- Kompatibilität mit bestehender Infrastruktur: Die Sensoren sollen sich einfach und unkompliziert in das vorhandene Stationsnetz integrieren lassen. Dies erfordert in erster Linie eine Kompatibilität mit den zur Datenübertragung genutzten Metrilog RTUs.
- Geringer Stromverbrauch: Vor allem für die autarke Teststation ist ein geringer Stromverbrauch zwingend erforderlich.

Unter Berücksichtigung dieser Kriterien fiel die Wahl auf Sensoren der *WSx00-UMB-Reihe* des Herstellers *Lufft*. Diese werden in einer Variante mit SDI-12 Schnittstelle angeboten, welche von den vorhandenen Metrilog RTUs problemlos angesteuert werden kann. SDI-12 erlaubt ebenso die einfache Kombination mehrerer Sensoren an einer RTU.

2.1.4.3 Ergebnisse

2.1.4.3.1 Stationäre Teststationen

Für die stationären Wettersensoren wurden bei den beiden Standorten Abfaltersbach und Weitlanbrunn im Pustertal jeweils einem WS400-Sensor realisiert. Diese befinden sich direkt im Stationsbereich an einem Elektro-Verteilergebäude, an welchem diese mittels eines einfachen Rohrauslegers knapp unter der Dachkante befestigt wurden. Die Stromversorgung (bestehend aus einem 24V-Netzteil, Sicherungen für Sensorelektronik und -heizung und Überspannungsschutz) konnte direkt im vorhandenen Elektroverteiler installiert werden. Alle anderen Bauteile (Wettersensor, Metrilog RTU sowie ein Kabelverteiler) sind direkt am Rohrausleger befestigt, siehe Abbildung 40. Die Montage nahm pro Standort ca. eineinhalb Stunden in Anspruch.



Abbildung 40 Station in Abfaltersbach (links), Weitlanbrunn (Mitte) und der Anschluss im Elektroverteiler (rechts)

Die beiden Stationen wurden in das ÖBB-Sekundärnetz von UBIMET integriert und sind im Weather Cockpit abrufbar, siehe Abbildung 41.

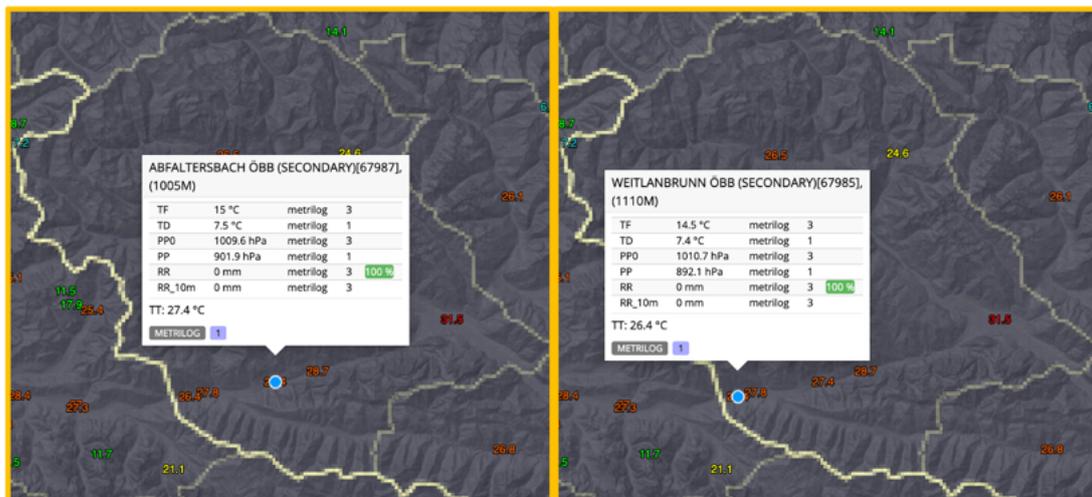


Abbildung 41 Die beiden stationären Messstationen (Weitlanbrunn und Abfaltersbach) im UBIMET Netzwerk

2.1.4.3.2 Autarke Teststation

Am Standort Kolbnitz wurde eine voll-autarke Station realisiert. Der Standort befindet sich auf einer Freifläche am südlichen Ende des Bahnhofs Kolbnitz, siehe Abbildung 42.



Abbildung 42 Standort der autarken Messstation Kolbnitz (links) und die Integration in das Weather Cockpit

Zur Montage dieser Station wurde ein Grundrahmen aus Standard-Gerüstbauteilen (49mm-Stahlrohr, Schraubschellen) konstruiert, der mittels Betonplatten beschwert wurde um eine ausreichende Standsicherheit zu gewährleisten. Dieser Rahmen dient zeitgleich als Unterkonstruktion für ein Solarpanel zur Stromversorgung sowie ein 6m langes 60mm-Stahlrohr als Mast für einen WS600-Kombisensor. Die Standfestigkeit der Konstruktion wird darüber hinaus durch einen bodennah montierten Schaltkasten erhöht, in dem die Pufferbatterien und der Solar-Laderegler untergebracht sind, siehe Abbildung 43.



Abbildung 43 Konstruktion der autarken Messstation

Der WS600-Sensor (Temperatur, Feuchte, Niederschlag, Wind) wurde gewählt, da in diesem zusätzlich zur temperaturabhängigen Heizungssteuerung auch ein niederschlagsabhängiger Modus zur Verfügung steht. Hierbei werden der Wind- und Niederschlagssensor im Normalfall nur einmal pro Tag für etwa 30 Minuten beheizt, um etwaige Reifablagerungen abzuschmelzen. Eine darüber hinaus gehende Heizung erfolgt erst dann, wenn tatsächlich Niederschlag detektiert wird. Dieser Modus kann den

Energiebedarf vor allem im Winter signifikant reduzieren. Der Nachteil dieses Sensors ist jedoch, dass die Temperaturmessung dadurch zwangsläufig in einer Nicht-Standardhöhe (in diesem Fall eben 6m statt den üblichen 2m) erfolgt. Die Konstruktion erlaubt jedoch ohne weiteres die Montage eines zusätzlichen Temperatursensors in Standardhöhe (dieser würde auch kaum zusätzlich Energie benötigen, da er nicht beheizt ist).

Die Stromversorgung der autarken Teststation besteht aus:

- Solarpanel 100Wp
- MPPT Laderegler Victron BlueSolar 75/10
- 2x Blei-Gel Akku 12V 60Ah

2.1.4.4 Fazit

Wintersaison 2022/23: In der ersten Konfiguration (Winter 2022/23) wurden die beiden Batterien in Serie geschaltet, um die zur Heizung empfohlenen 24V Betriebsspannung zu erhalten. Die Elektronik des Sensors wird über einen 15V DC/DC-Wandler versorgt. Der Sensor könnte zwar auch direkt mit 24V versorgt werden, jedoch ist der dauerhaft laufende Ventilator zur Belüftung des Temperatur- und Feuchtesensors direkt an die Versorgungsspannung gekoppelt und verbraucht bei reduzierter Spannung - und dadurch reduzierter Drehzahl - deutlich weniger Energie.

Diese Konfiguration konnte im ersten Winter 2022/23 die Energieversorgung für etwa 85% der Tage gewährleisten. Lediglich nach drei länger (mehrere Tage) anhaltenden Perioden mit starker Bewölkung und Niederschlag kam es zu jeweils mehrtägigen Ausfällen bis die Akkus wieder bis zur Einschaltsschwelle des Ladereglers geladen werden konnten. Der erste dieser Ausfälle kurz nach der Installation dürfte jedoch auf zuvor nicht vollständig geladenen Akku sowie den noch nicht "trainierten" Laderegler (die Ein- und Ausschaltsschwelle werden dynamisch angepasst um den Verschleiß der Akkus zu reduzieren) zurückzuführen sein.

So sank z.B. die Akkuspannung am 23.1.2023 nach mehreren Tagen mit Bewölkung und intermittierendem Niederschlag unter die Abschaltsschwelle von ca. 22V. In den darauffolgenden Tagen konnte aufgrund der anhaltenden Bewölkung nur langsam geladen werden, wodurch es bis zum 29.1.2023 dauerte, ehe die Einschaltsschwelle von ca. 27V erreicht werden konnte, siehe Abbildung 44.

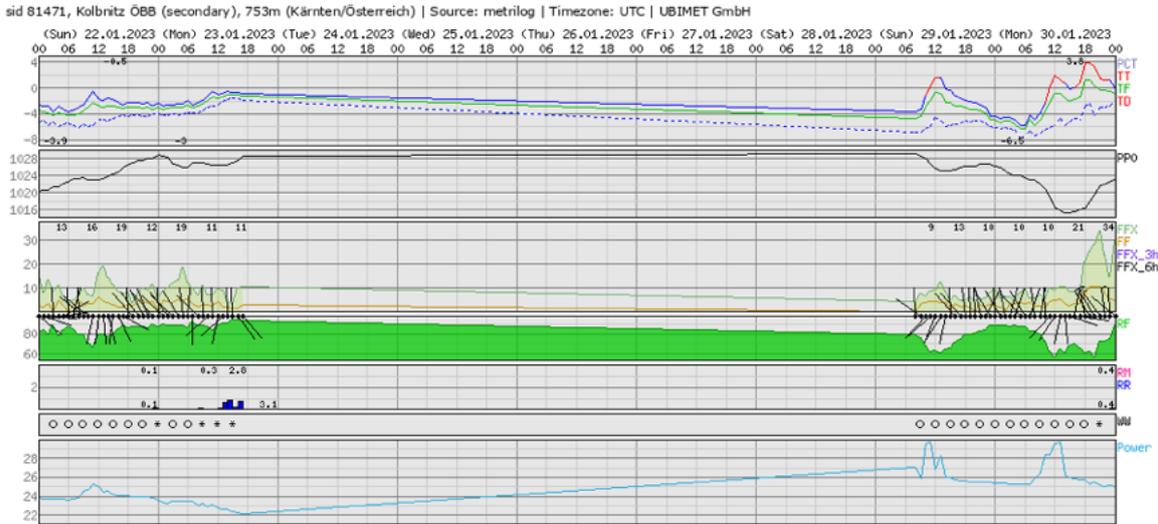


Abbildung 44 Performance autarke Messstation im Jänner 2023.

Generell konnten aber auch längere Niederschlagsereignisse überbrückt werden, sofern es dazwischen ausreichend Sonneneinstrahlung gab, um die Akkus wieder annähernd voll zu laden. Als Beispiel sei hier die Woche zuvor dargestellt, in der es trotz mehrtägiger Niederschläge zu keiner Abschaltung kam, siehe Abbildung 45.

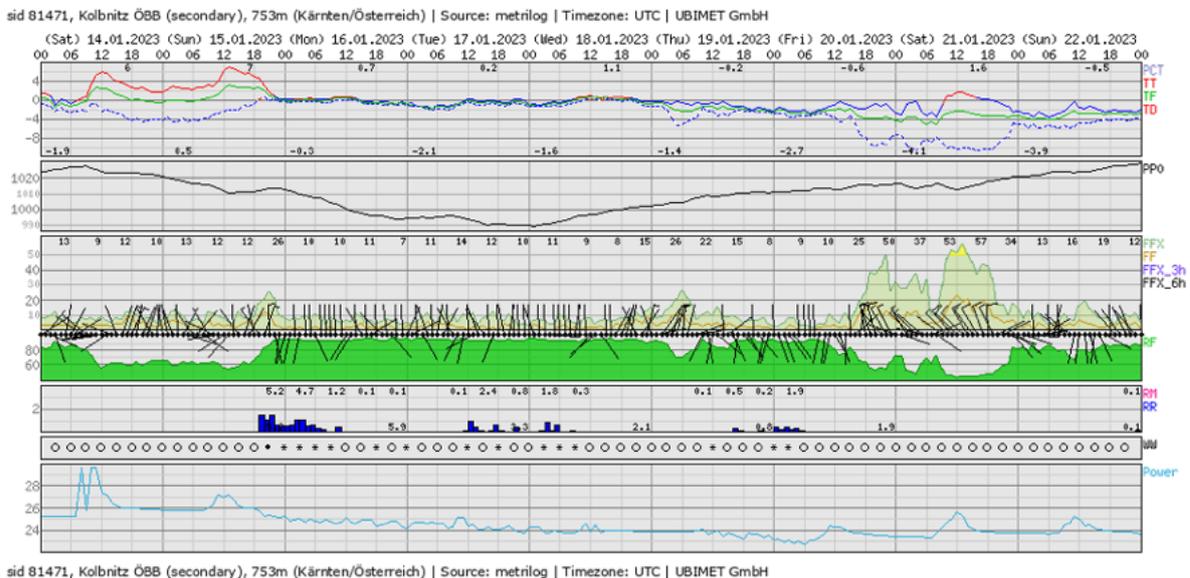


Abbildung 45 Performance autarke Messstation Kolbnitz Winter 2023

Wintersaison 2023/24: Im Folge-Winter (2023/24) wurde eine geänderte Konfiguration mit Parallelschaltung der Akkus und somit nur 12V Heizungsspannung getestet. In dieser

Konfiguration ist die maximale Heizleistung deutlich reduziert (von nominell 40W auf etwa 10W), was je nach Umgebungsbedingungen auch zu einer signifikanten Reduktion der insgesamt aufgewendeten Energie führen kann. Andererseits kann dies aber auch zu Zeiten führen, wo die Heizleistung nicht ausreicht um eine Beeinträchtigung der Sensoren durch Schneeablagerungen zu verhindern. Außerdem wurde die Zieltemperatur für die Heizelemente verringert. Mit dieser neuen Konfiguration im Winter 2023/34 lag der Anteil der fehlenden Daten für fast alle Parameter für jeden der drei Monate Dezember, Jänner und Februar unter 0.1%. Zur Evaluierung, ob dies tatsächlich an der geänderten Konfiguration und nicht an den Wetterbedingungen lag, wurde zur Verifikation der Performance der neuen Konfiguration die Wintermonate Dezember, Jänner, Februar in der Saison 2022/23 und 2023/24 betrachtet und die Performance hinsichtlich der Zuverlässigkeit in den beiden Wintern verglichen (siehe Abbildung 46).

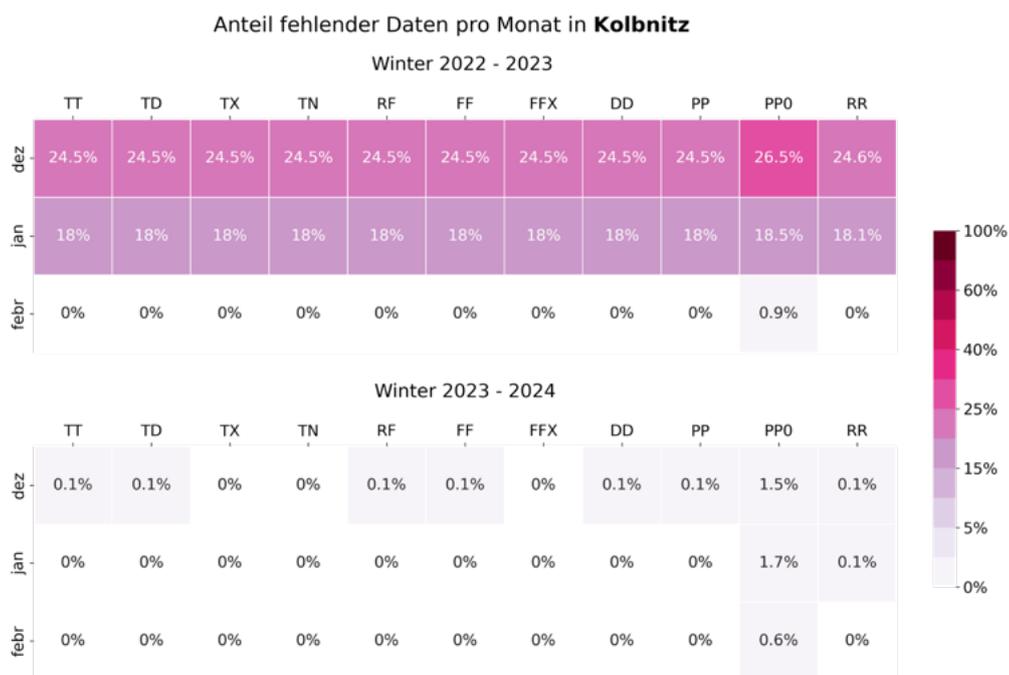


Abbildung 46 Anteil fehlender Datenpunkte je Parameter für jeden Wintermonat (TT: mittlere Temperatur, TD: Taupunktstemperatur, TX: Maximaltemperatur, TN: Temperaturminimum, RF: Relative Luftfeuchtigkeit, FF: Windgeschwindigkeit, FFX: Windböen, DD: Windrichtung, PP: Druck, PP0: Druck auf Meereshöhe, RR: stündliche Niederschlagsrate)

Die Verifikation erfolgte anhand von zwei operativen Messstationen in der Nähe (im selben Tal): im Westen Obervellach und im Osten Spittal/Drau (im Folgenden Spittal genannt). An beiden Stationen liegen die zweijährigen Ausfälle für alle Parameter unter 0,5 %. Aufgrund

des geringen Höhenunterschiedes, der räumlichen Nähe und des hohen Temperatur-Korrelationskoeffizienten (0,88 mit Obervellach und 0,82 mit Spittal) können diese Stationen als Referenzstationen für die Station Kolbnitz herangezogen werden.

Beide größeren Ausfälle im Winter 2022/23 (siehe Abbildung 47, markiert mit blauem und grünem Kreis) sind gekennzeichnet durch einen Temperaturrückgang unter 0°C, Niederschlag in Form von Schnee und eine Zunahme des Bedeckungsgrades, was zu einer kürzeren Sonnenscheindauer und zu einer Verringerung der solaren Einstrahlung und damit zu verminderter Batterieladung führt.

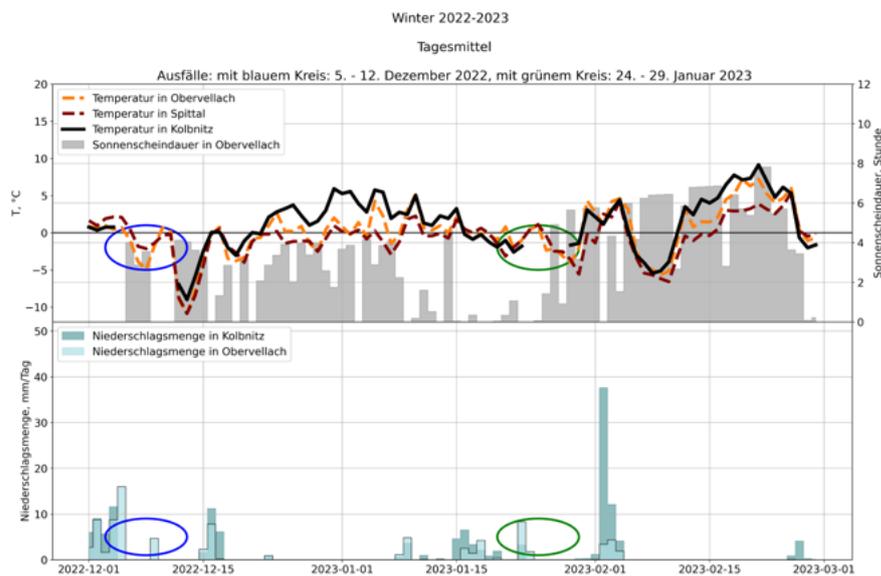


Abbildung 47 Verlauf der Temperatur und Niederschlagsmenge im Winter 22/23

Da die Station auch bei niedrigeren Temperaturen als in diesen Fällen betrieben wird, wurden die Ausfälle eher durch mangelnde Sonneneinstrahlung verursacht und durch niedrigere Temperaturen (insgesamt mit eventueller Abdeckungsmöglichkeit) weiter begünstigt.

Im Winter 23/24 (siehe Abbildung 48) wurden Anfang Dezember 2023 die gleichen Bedingungen beobachtet, die in dem Vorjahr zu den Ausfällen geführt hatten (in der Abbildung durch einen magentafarbenen Kreis gekennzeichnet). Die Messungen wurden trotzdem kontinuierlich durchgeführt und keine Ausfälle festgestellt.

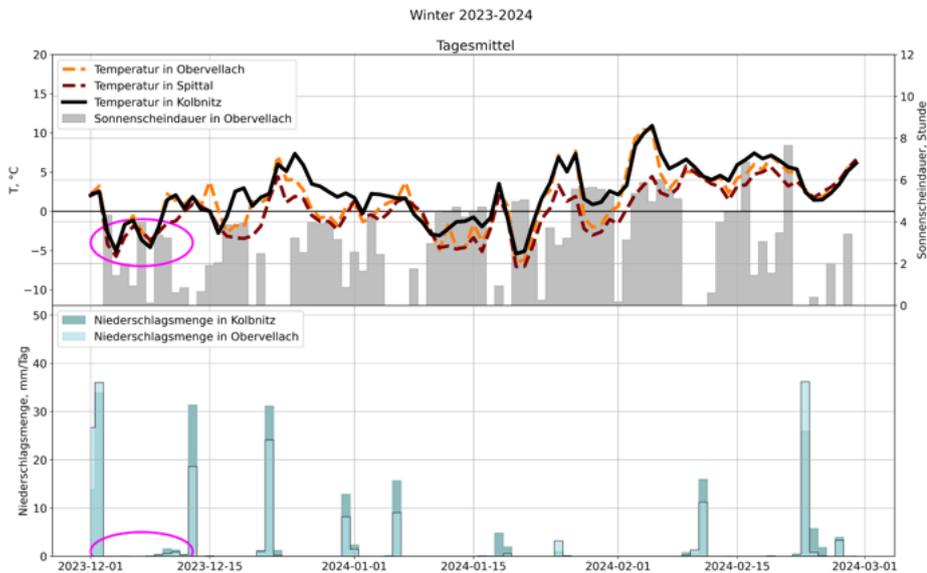


Abbildung 48 Verlauf der Temperatur und Niederschlagsmenge im Winter 23/24

Da ein ähnlicher Fall im Dezember auftrat, der im Vorjahr zu Ausfällen führte, und auch in einigen Monaten (Januar 2023) die Temperatur niedriger war und keine Ausfälle auftraten, kann man sagen, dass die neue Konfiguration der Messstation stabil ist und unter Bedingungen, wie sie im Winter 2023/24 geherrscht haben, im Vergleich zu anderen Messstationen keine signifikant erhöhte Ausfallrate erwartbar ist.

2.1.5 Entwicklung eines KI-basierten Kurzzeitprognose-Modells für konvektive Niederschläge

2.1.5.1 Motivation und Zielsetzung

Konvektive Niederschläge spielen aufgrund ihrer Intensität bei gleichzeitig verminderter raumzeitlicher Vorhersagbarkeit eine wesentliche Rolle in der Risikoexposition von Schieneninfrastruktur gegen hohe Niederschlagsmengen und ihre Folgen (Hochwasser, Hangrutschung, Vermurung). Konvektive Ereignisse können für sich selbst stehen (Gewitter in den warmen Jahreszeiten) oder Subsysteme von flächigen Niederschlagsereignissen darstellen (Südostwind labiler Mittelmeerluft südlich des Alpenhauptkammes auch zunehmend im Herbst und Frühwinter). Im derzeitigen Stand der Technik kommen Radar-, Satelliten und Stationsdaten zum Einsatz, ergänzt um kinematische oder probabilistische Methoden,

die unabhängig von Modellen auf Sequenzen von Radar- und Satellitendaten angewendet werden, um die kurzfristige Verlagerung von konvektiven Zellen zu bestimmen. In KlimZug wurde hier ein neuer Ansatz verfolgt: Mittels umfangreicher historischer Fallstudien an konvektiven Zellen und KI-basierter Algorithmik sollte ein Zusammenhang zwischen der charakteristischen Verlagerung und der Entwicklung der herrschenden Regionalwettersituation abgeleitet werden. Die Absicht war es, damit die Vorhersagedauer für eine realistischere Zugbahn/Entwicklung konvektiver Zellen über eine Stunde anzuheben, was besonders bei größeren Komplexen von Relevanz ist.

2.1.5.2 Grundlage

Für den herkömmlichen Short-Range Forecast, auch Nowcasting genannt, von Niederschlag für die nächsten 90 bis 120 Minuten sind neben Methoden des optical flows – hierzu zählen auch unsere bisherigen Algorithmen zur Kurzzeitprognose des Niederschlags mittels Korrelationsansätzen und Ableitung von Verlagerungsvektoren über die Verknüpfung von räumlichen und zeitlichen Gradienten – seit mehreren Jahren auch Deep Neuronal Nets im Einsatz.

Weit verbreitet in der Literatur sind sogenannte U-Nets, welche eine „Sequence to Sequence“ Regression erlernen. Dabei werden dem Netz als Prädiktoren Sequenzen mit meist 4-8 aufeinanderfolgenden Radarbilder aus der Vergangenheit und als Prädikanten im Training die darauffolgenden 4-8 Radarbilder übergeben. Das U-Net extrahiert durch mehrfach aufeinander folgende Convolution (Faltung) mittels zu erlernender Filter eine zunehmende Anzahl von Features welche am anderen Ende des Netzes durch die Up-Convolution (Entfaltung) wieder zu neuen bzw. den vorherzusagenden Radarfeldern zusammengestellt werden. Dieser Ansatz funktioniert für eine geringe Anzahl von Vorhersageschritten (etwa 6-8) mäßig gut, führt aber unweigerlich zu einer starken Glättung bzw. einem Zerfließen der Niederschlagsstrukturen. Auch die für Vorhersagen von Bild-Sequenzen verwendeten „Convolutional Long-Short-Term-Memory“ Netze, dabei handelt es sich um rekurrente Netze welche den Output immer wieder neu als Input recyceln, leiden unter einer für hohe Ansprüche zu starker Glättung schon nach wenigen Vorhersageschritten. Beide state-of-the-art Methoden berechnen bzw. verwenden intern keine Verlagerungsvektoren die ein in der Natur vorhandenes Mindestmaß an zumindest lokaler Homogenität von Zugrichtung und -geschwindigkeit widerspiegeln und damit zur Erhaltung von lokalen Strukturen beitragen und ein Zerfließen dieser Strukturen dämpfen.

2.1.5.3 Ergebnisse

In KlimZug wurde ein komplett neuartiges neuronales Netz konzipiert, welches durch 3D-Faltungen aus Sequenzen von Radarbildern die bestmöglichen Verlagerungsgeschwindigkeiten extrahieren und diese durch eine weitere Faltung auf das letzte Radarbild der Sequenz anwenden. Darüber hinaus werden aus den Radar-Sequenzen zusätzliche Felder direkt abgeleitet. Diese dienen zur Bestimmung der Evolution der Gewitterzelle, sowohl hinsichtlich deren räumlichen aber auch zeitlichen Strukturen. Diese Kombination ermöglicht realistische Vorhersagen, welche keine zu starke Glättung bzw. Dämpfung erfahren haben.

Die Prognosefelder werden gemeinsam mit den schon vortrainierten Analysen und zeitlich zurückliegenden Vorhersagen sukzessive an das Netz übergeben, um eine erneute Vorhersage für die nächsten Zeitschritte zu erhalten, siehe Abbildung 49.

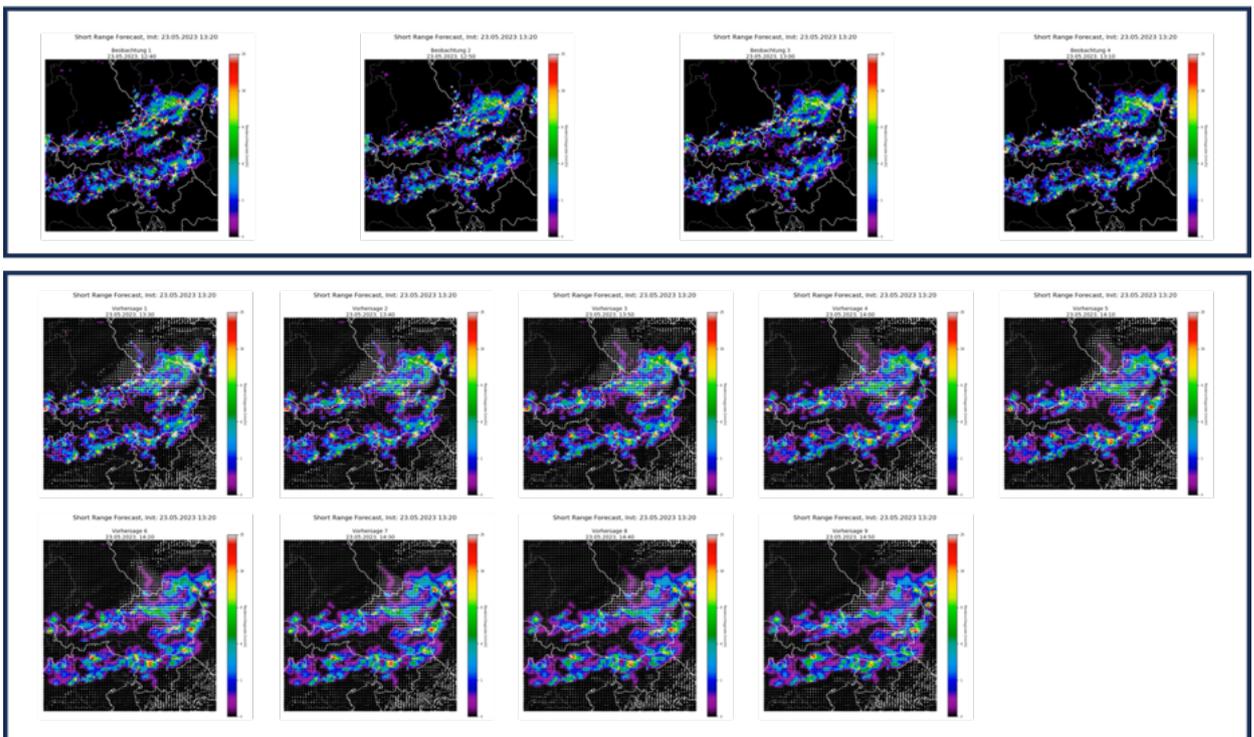


Abbildung 49 Demonstration des entwickelten Nowcasting Algorithmus; oben sind die Beobachtungen zu sehen und unten die Vorhersagen in 15 Minuten Schritten.

Das entwickelte und implementierte Netz zur Vorhersage von lokalen Gewitterzellen ist bereits fertig (vor-)trainiert und wurde der ÖBB in einer Test-Version des UBIMET Weather Cockpits zum prototypischen Betrieb zur Verfügung gestellt.

2.1.5.4 Fazit

Der große Vorteil des KI-basierten Short-Range-Forecasts (SRFC) liegt darin, dass auch die Verlagerungsvektoren alle 10 min neu berechnet werden, wodurch gekrümmte Trajektorien für die Zugbahnen von Wetterfronten berechnet werden können, wohingegen beim operativen SRFC von UBIMET nur geradlinige Ausbreitungen berücksichtigt werden. Extremwetter-Ereignisse werden in der KI-basierten Algorithmik allerdings im Moment noch nicht ausreichend abgebildet und meist unterschätzt. Daher sind noch weitere Entwicklungsschritte nötig, bevor der neue Ansatz in den operativen Betrieb integriert werden kann.

2.1.6 Entwicklung und Validierung einer Prognose für Dürre und Waldbrandgefahr

2.1.6.1 Motivation und Zielsetzung

Das ÖBB-Streckennetz verläuft durch die unterschiedlichsten Landschaftsabschnitte und Ökosysteme was es anfällig für die Gefahr von Waldbränden macht. Darum ist die Modellierung des Brandrisikos im Zusammenhang mit der Eisenbahnsicherheit ein unverzichtbares Instrument zur Risikobewertung. Insbesondere wurde aufgrund von einer Häufung von Bränden zwischen 2010 und 2021 eine besondere Risikoexposition entlang der Südrampe der Tauernstrecke der ÖBB verortet. Projektziel war es daher, für diesen Abschnitt des Streckennetzes, die Brandgefahr unter einer Vielzahl von Faktoren, darunter Wetterbedingungen, Vegetationstypen, Geländemerkmale und historische Branddaten präzise zu modellieren und mittels eines Feuerindex zu quantifizieren, um proaktiv Gebiete bzw. Zeiträume mit erhöhtem Risiko identifizieren zu können und so proaktiv Schutzmaßnahmen ergreifen zu können.

2.1.6.2 Grundlage

Die ÖBB hat UBIMET eine Liste mit Details zu 80 Bränden entlang der Südrampe der Tauernbahn zwischen Mallnitz und Rothenhorn bei Spittal an der Drau zur Verfügung gestellt. Die Brände traten zwischen 2010 und 2021 auf, wobei von den 80 Bränden 56 als Böschungsbrände einzustufen waren und als Grundlage für die Evaluierung der Feuerrisikomodells dienten. Die überwiegende Mehrheit der Brände ereigneten sich auf der Strecke zwischen Penk im Mölltal und Pusarnitz im Lurnfeld. Gemeldet wurden die Tage der Brände sowie die Bahnhöfe, zwischen denen es zur Rauchentwicklung oder zum Feuersausbruch kam.

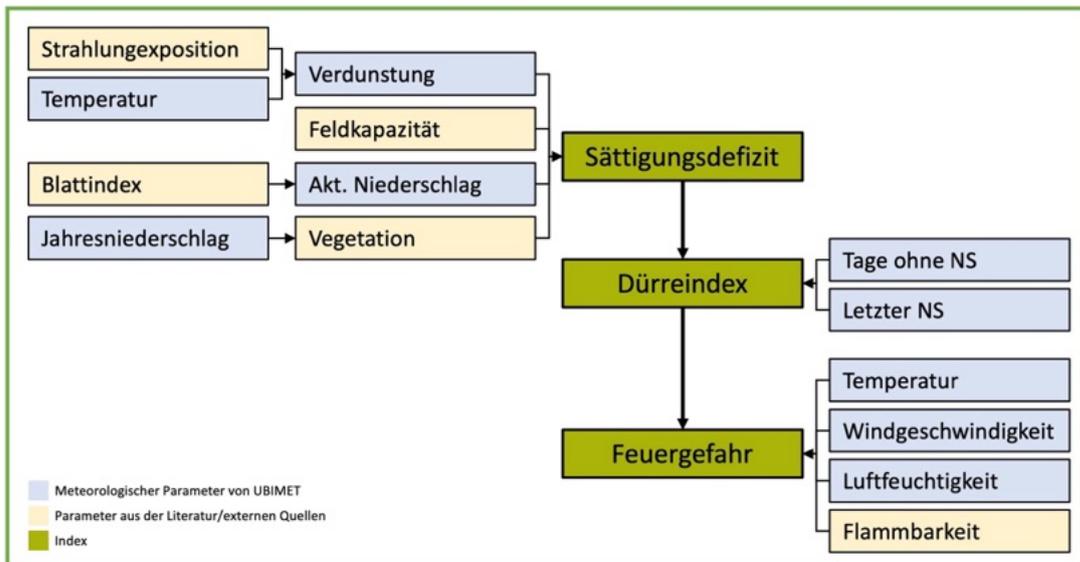


Abbildung 50 Schema des mehrstufigen UBIMET Feuerrisikomodells mit den Parametern Sättigungsdefizit, Dürreindex und Feuerrisiko.

Das UBIMET Feuerrisikomodell (siehe Abbildung 50) berechnet auf Gitterpunktsbasis aus Verdunstung, aktuellen Niederschlag und klimatologischen Jahresniederschlag (drückt Bedarf der vorhandenen Vegetation aus) unter Berücksichtigung des Blattindex (Interzeption des Niederschlages) und der Feldkapazität des Bodens das Sättigungsdefizit in der oberen Bodenschicht. Dieses ist Grundlage für den Dürreindex, welcher zusätzlich noch von der Anzahl an aufeinander folgenden Tagen ohne Niederschlag und der Menge des letzten gefallenen Niederschlags abhängt. Das aktuelle Feuerrisiko berechnet sich aus dem Dürreindex unter Beachtung der aktuellen Werte für Temperatur, Wind und Luftfeuchte mittels eines Regressionsansatzes. Hier wird auch noch der konkrete Typ der Vegetation in Form eines relativen Brennbarkeits- bzw. Entflammbarkeitsindex berücksichtigt, um etwa ein höheres Feuerrisiko für Grasland im Vergleich zu Wäldern bei sonst gleichen Bedingungen zu erhalten. Die Felder mit der höchsten Auflösung von 10 m sind Höhe der Topographie und Landuse sowie alle meteorologischen Parameter die von der Topographie abhängen wie Temperatur, Strahlung oder die Schneehöhe (und Schneeschmelze).

2.1.6.3 Ergebnisse

Innerhalb der Anrainergemeinden der Südrampe der Tauernbahn (Mallnitz, Obervellach, Reißeck, Lurnfeld, Lendorf, Spittal an der Drau) wurden 30 000 Punkte auf einem triangulären Gitter definiert um die Höhenvariation optimal abzubilden (mittlerer Höhenfehler zwischen Gitterpunkten < 2m). Auf diesen Punkten wurden auf täglicher Basis

Sättigungsdefizit und Dürreindex sowie auf stündlicher Basis das Feuerrisiko berechnet. Für die weiteren Auswertungen wurden die Resultate entlang der Bahnstrecke in einem Korridor mit 200 m Breite abgegriffen.

Zusätzlich zum Niederschlag in Form von Regen wurde auch Wasser aus der Schneeschmelze betrachtet. Dafür wurde mit dem UBIMET-Schneemodell, es handelt sich dabei um ein Massenbilanzmodell unter Berücksichtigung von Zuwachs durch Neuschnee sowie Abschmelzung durch Energieaufnahme (Strahlungs- und Wärmeflüsse), in stündlicher Auflösung an diesen 30 000 Punkten Schneehöhe, Schneedichte, Schneemasse und die Menge des Schmelzwassers berechnet.

Die meteorologischen Eingangsdaten Niederschlag, Temperatur, Luftfeuchte, Strahlung, Bewölkung und Windgeschwindigkeit stammen aus dem VERA-Analyseverfahren (Vienna Enhanced Resolution Analysis), welches Stationsbeobachtungen unter Hinzunahme von Fingerprintfeldern (Höhe und Exposition der Topographie, Landuse, Bodenrauigkeit, Radar- und Satellitendaten) auf beliebige Punkte zwischen den Stationspositionen interpoliert.

Nachdem ein hoher Wert des Feuerrisikos nicht zwangsläufig zu einem Brand führen muss, es ist ja immer auch ein Auslöser wie Funkenflug erforderlich, wurden die Parameter des Feuerrisikomodells einerseits für alle Tage mit und andererseits alle Tage ohne Brände abgegriffen und gemittelt bzw. die Verteilungen berechnet und dargestellt. Eine perspektivische Darstellung der mittleren Feuerindizes mit und ohne Brände ist in Abbildung 51 dargestellt. Man erkennt, dass die höchsten Feuerrisiken vor allem in niedrig gelegenen Gebieten und dort bei nach Süden abfallenden Hängen auftreten.

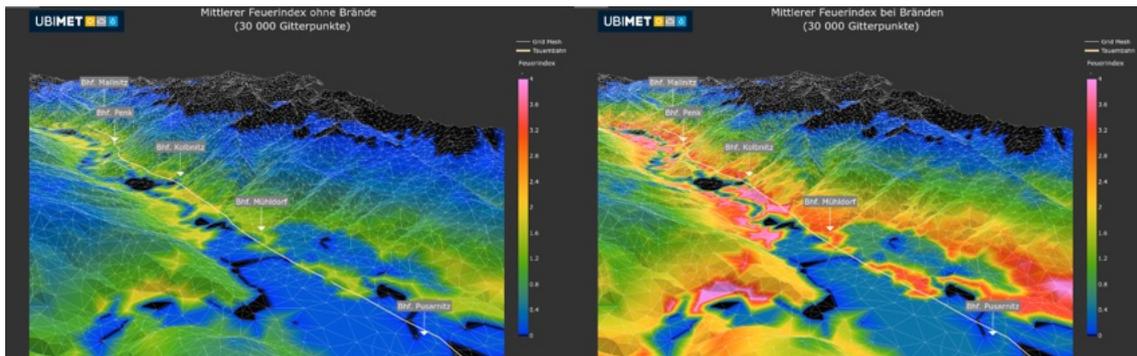


Abbildung 51 Perspektivische Darstellung der Topographie entlang der Südrampe der Tauernbahn. Die Einfärbung wurde nach dem mittleren Feuerrisiko für alle Tage ohne (links) und mit (rechts) Bränden durchgeführt. Man erkennt, dass die höchsten Feuerindizes an den steilen Südhängen, insbesondere zwischen den Bahnhöfen Kolbnitz und Mühldorf im Mölltal auftreten. Schwarz eingefärbt sind Gebiete ohne großflächige Vegetation wie Ortschaften oder das Hochgebirge jenseits der Baumgrenze. Die Strecke der Tauernbahn ist durch die gelbe Linie dargestellt.

Die Verteilung der Werte des Feuerrisikos für alle Tage mit und ohne Brände für alle Punkte entlang der Bahnstrecke ist in Abbildung 52 in Form von Violin-Diagrammen mit integrierten Box-Plots zu sehen. Darin erkennt man, dass bei Fällen mit Bränden sowohl Mittelwert wie auch Median deutlich erhöht sind (Mittelwert 1.88 versus 0.73, Median 1.14 versus 0.34). Auch wenn an Tagen ohne Brände der Maximalwert des Feuerrisikos am höchsten ist (deutlich mehr Fälle ohne Brände, auch bei für Brände günstigen meteorologischen Bedingungen), so zeigt sich dennoch bei Brandsituationen ein relativ gesehen häufigeres Vorkommen von Feuerindizes über einer Schwelle von 2. Der Umstand, dass auch Brände bei sehr niedrigen Feuerindizes aufgetreten sind, ist der Berücksichtigung von Fällen mit sehr lokaler Rauchentwicklung auf extrem steilen und damit lokal schon vorzeitig schneefreien Böschungen geschuldet.

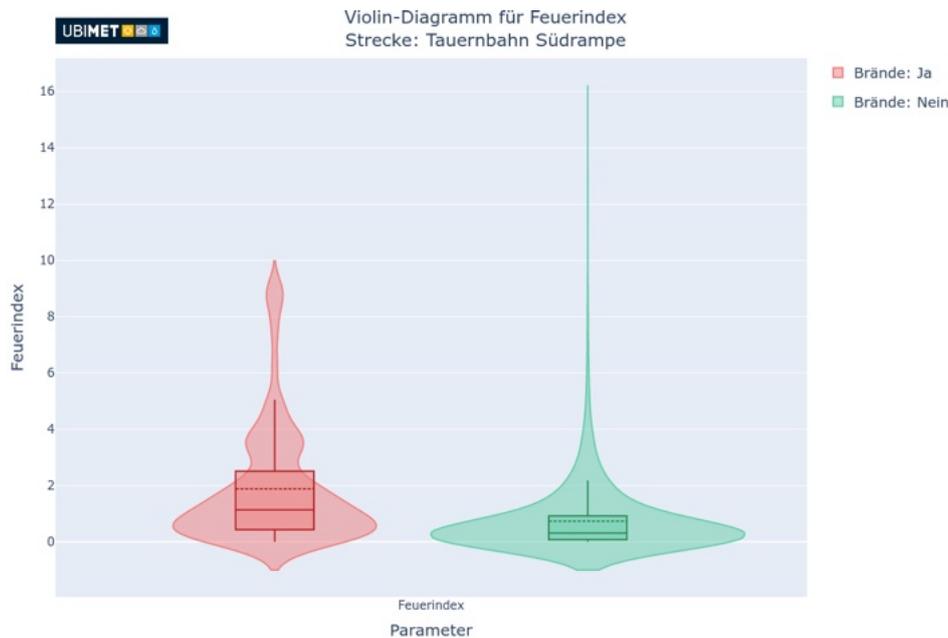


Abbildung 52 Violin-Diagramme mit Box-Plots für das Feuerrisiko für alle Fälle mit (links) und für alle Fälle ohne Brände (rechts). Die horizontale Breite der Violinen entspricht der jeweils auf 100 % normierten Häufigkeit der Fälle mit den auf der y-Achse dargestellten Werten des Feuerrisikos. Die Box-Plots beinhalten jeweils 50% der Fälle (Bereich zwischen 1. und 3. Quartil), die durchgehende Linie entspricht dem Median, die strichlierte Linie dem Mittelwert der Verteilung. Negative Werte des Feuerrisikos treten nicht auf und sind in der Violin-Darstellung lediglich eine Folge der Glättung der Häufigkeitsverteilung.

Interessant ist die Frage, mit welcher Wahrscheinlichkeit an Tagen mit gewissen Werten des modellierten Feuerrisikos entlang der Südrampe der Tauernstrecke tatsächlich mit mindestens einem Brand zu rechnen ist. Für diese Fragestellung wurde für die einzelnen Intervalle des Feuerrisikos der Prozentsatz an Fällen mit Bränden ermittelt und in Abbildung 53 kumulativ dargestellt. Während bei einem geringen Feuerrisiko zwischen 0 und 0.5 in nur etwa 0.35% der Tage ein Brand aufgetreten ist, liegt dieser Anteil bei Werten des Feuerrisikos von über 8.5 schon bei 5%. Daraus folgt, dass das UBIMET-Feuerrisikomodell gut mit der Auftretswahrscheinlichkeit von Bränden korreliert. Bezüglich des Zusammenhanges zwischen Überschreitung eines bestimmten Wertes für das Feuerrisiko und der tatsächlichen Häufigkeit von Bränden zeigt sich sogar über weite Strecken ein linearer Zusammenhang.

Auswertungen dieser Art wurden auch mit dem Sättigungsdefizit und dem Dürreindex vorgenommen, allerdings zeigen sich hier weniger prägnante Zusammenhänge mit dem tatsächlichen Brandrisiko als bei Verwendung des modellierten Feuerrisikos selbst, da nur

dieser sämtliche für eine Brandentwicklung förderlichen Parameter wie geringe Feuchte im Boden und in der Luft, hohe Windgeschwindigkeiten und Temperaturen sowie eine Berücksichtigung der Brennbarkeit der lokalen Vegetation berücksichtigt.

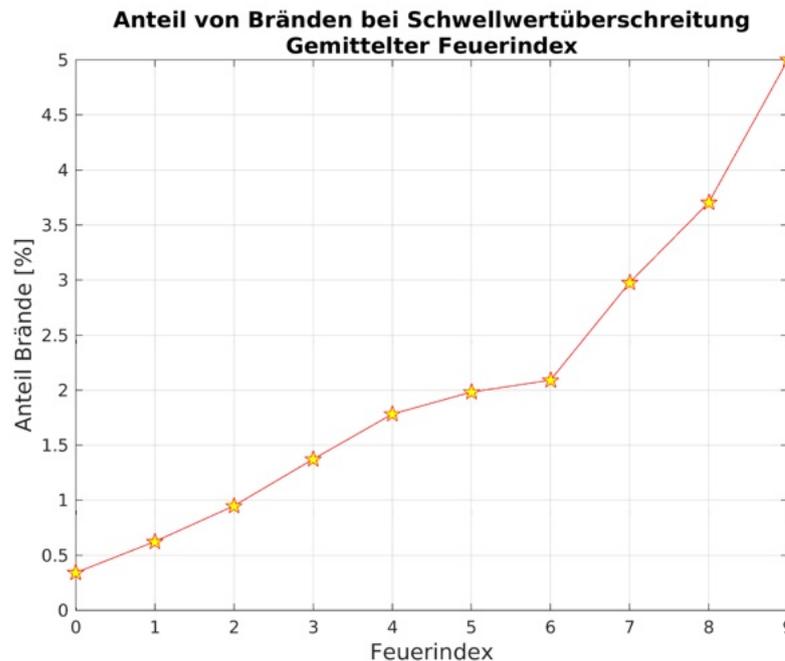


Abbildung 53 Relative Häufigkeit des Auftretens von mindestens einem Brand entlang der Südrampe der Tauernbahn als Funktion der Überschreitung der Werte der modellierten (über den Tag gemittelte) Feuerindizes. Man erkennt eine relativ lineare Zunahme der Feuergefahr mit zunehmenden Feuerindex.

2.1.6.4 Fazit

Die Validierung hat ergeben, dass das UBIMET-Feuerrisikomodell gut mit der Auftretswahrscheinlichkeit von Bränden korreliert. Der aktualisierte Feuerrisikoindex für die Tauernstrecke wurde der ÖBB darum täglich als PDF zur Verfügung gestellt, um für die Entscheidungsgrundlage des operativen Betriebs berücksichtigt werden zu können. Außerdem wurde zu dem Thema des Feuerindex ein Paper für die internationale Konferenz INTERPRAEVENT 2024 eingereicht und für eine Präsentation ausgewählt. Die Ergebnisse wurden von DI Christian Rachoy (ÖBB) präsentiert.

2.1.7 Entwicklung einer Prognose für kleinräumige Wildbachgefahren

2.1.7.1 Motivation und Zielsetzung

Das weitläufige ÖBB-Streckennetz kreuzt an einer Vielzahl von Stellen Wildbäche, von denen eine Gefahr für kleinräumige Überflutungen ausgeht. Darum war es im KlimZug-

Projekt das Ziel, das Überflutungsrisiko von Wildbächen abzuschätzen. Mittels des UBIMET-Oberflächenabflussmodell sollte die Durchflussmenge des Wassers für mehrere Bäche und Flüsse, welche unterhalb des ÖBB-Schienennetzes hindurchfließen, für den Zeitraum von Oktober 2012 bis April 2022 modelliert werden.

2.1.7.2 Grundlage

Bei den für die Studie herangezogenen Gewässern handelt es sich einerseits um 4 Bäche/Flüsse mit vorhandenen eHYD-Mess-Stationen und damit für Verifikationszwecke verfügbaren mittleren täglichen Durchflussmengen sowie um alle mittelgroßen bis großen, die Eisenbahnlinie kreuzenden Bäche im Osttiroler Pustertal. Bei den Gewässern mit eHYD-Stationen handelt es sich um die Windauer Ache, den Gießenbach (beide in Nordtirol) sowie um den Mallnitzer Bach und die Glan (beide in Kärnten). Sämtliche modellierte Gewässer und ihre Einzugsgebiete sind in Abbildung 54 visualisiert.

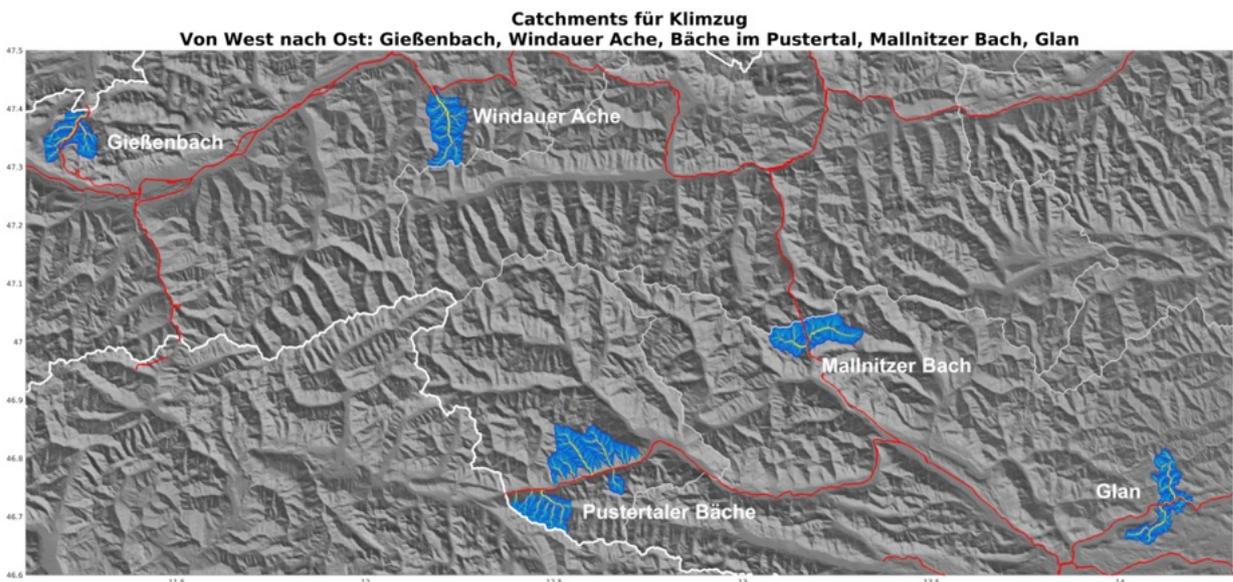


Abbildung 54 Geographische Verteilung der Einzugsgebiete der in diesem Projekt behandelten Gewässer. Die roten Linien stellen die Eisenbahnstrecken dar, die farbigen Gebiete markieren die Größen der lokalen (zu den eingefärbten Punkten gehörenden) Catchments. Bei den Pustertaler Bächen handelt es sich insgesamt um 13 einzelne Wildbäche, für welche es allerdings keine Messzeitreihen gibt. Die Domäne umfasst in etwa die Region zwischen Innsbruck im Nordwesten und Klagenfurt im Südosten des Bildausschnittes.

Ein vollständiges hydrologisches Modell berücksichtigt neben dem Oberflächenabfluss auch den Zwischenabfluss sowie die Wechselwirkung mit dem Grundwasser. Legt man den Fokus aber auf kleine Einzugsgebiete mit größerem Gefälle sowie auf kurzfristige intensive

Niederschlagsereignisse wie konvektiver Starkregen, so nimmt die relative Bedeutung von Zwischenabfluss und Wechselwirkung mit dem Grundwasser im Vergleich zum Oberflächenabfluss signifikant ab.

Konkret handelt es sich beim UBIMET-Abflussmodell um ein Bilanzmodell für die Wasserhöhe innerhalb der einzelnen Zellen mit einer Auflösung von 100x100 m². Die Wasserhöhe wird durch Zuflüsse aus den stromaufwärts gelegenen Zellen erhöht und in Abhängigkeit von Wasserstand, Gefälle und der hydrologischen Bodenrauhigkeit in Form des Abflusses in die nächste stromabwärts gelegene Zelle reduziert. Physikalisch liegt dem Modell eine Kombination aus Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung) und Modellierung der Fließgeschwindigkeit (Fließformel nach Manning und Strickler) zugrunde, wodurch eine nichtlineare Differentialgleichung für die Höhe des Wasserstandes resultiert und numerisch durch Linearisierung und Anwendung des Newton-Verfahrens gelöst wird. Die zeitliche Differenz der Höhe des Wasserstandes kann unter Berücksichtigung der geometrischen Eigenschaften der Gitterzellen einfach in eine Abflussmenge (Dimension m³/s) umgerechnet werden. Die für die Stabilität der Lösung erforderliche zeitliche Auflösung der Rechenschritte beträgt 20 Sekunden. Für Verifikationszwecke werden die hoch aufgelösten Abflusszeitreihen auf Tagesbasis gemittelt und mit den eHYD-Zeitreihen verglichen.

Neben den geometrischen Eigenschaften wie Zellgröße und Gefälle, den Bodeneigenschaften bezüglich hydrologischer Rauigkeit, der Vernetzung der Rasterzellen (für jedes Rasterelement müssen die benachbarten stromaufwärtigen und das nachfolgende Element für den Abfluss ermittelt werden) ist die Kenntnis des pro Zeitintervall auftretenden Wasser-Inputs pro Zelle erforderlich. In erster Linie ist damit der (flüssige) Niederschlag zu verstehen, allerdings ist hier auch das Schmelzwasser zu berücksichtigen. Vor allem im Frühling bei rapider Schneeschmelze durch Föhn oder Warmlufteinbrüche können dabei auch bei sonst trockenen Witterungsverhältnissen große Abflussmengen zustande kommen.

Für diesen Zweck wurde neben der Niederschlagsreanalyse, dabei wurden Stationsbeobachtungen des Niederschlages unter Verwendung der Felder des Niederschlagsradars mittels VERA-Analyse in die Fläche analysiert, auch das UBIMET-Schneemodell verwendet. Bei diesem handelt es sich um ein Massenbilanzmodell, welches sowohl die Höhe, die Masse als auch die Dichte der Schneeschicht auf stündlicher Basis modelliert. Die berücksichtigten Prozesse sind der Neuschneezuwachs (Schneedichte von

Temperatur abhängig), die Setzung der Schneedecke (Zunahme der Dichte bei abnehmender Höhe und konstanter Masse) sowie die Abschmelzung des Schnees aufgrund einer positiven Bilanz der Strahlungs- und Wärmeflüsse. Die für das Schneemodell erforderlichen Parameter wie Temperatur, Niederschlag, Windgeschwindigkeit, Wolkenbedeckung, Luftdruck und Luftfeuchte wurden ebenfalls mit der VERA-Analyse aus Stationsbeobachtungen, Satelliten- und Niederschlagsradardaten gewonnen. Die Strahlung ist hier eine aus der Bewölkung, dem Sonnenstand und der Topographie (Abschattung) abgeleitete Größe.

2.1.7.3 Ergebnisse

Eine Momentaufnahme für das kombinierte Schnee- und Abflussmodell ist in Abbildung 55 für das Kärntner Mölltal für einen Frühlingstag mit starker Schneeschmelze zu sehen. Visualisiert ist die Ausdehnung der Schneedecke sowie die farblich codierte Abflussmenge des Wassers in der Möll und den darin einmündenden Bächen.

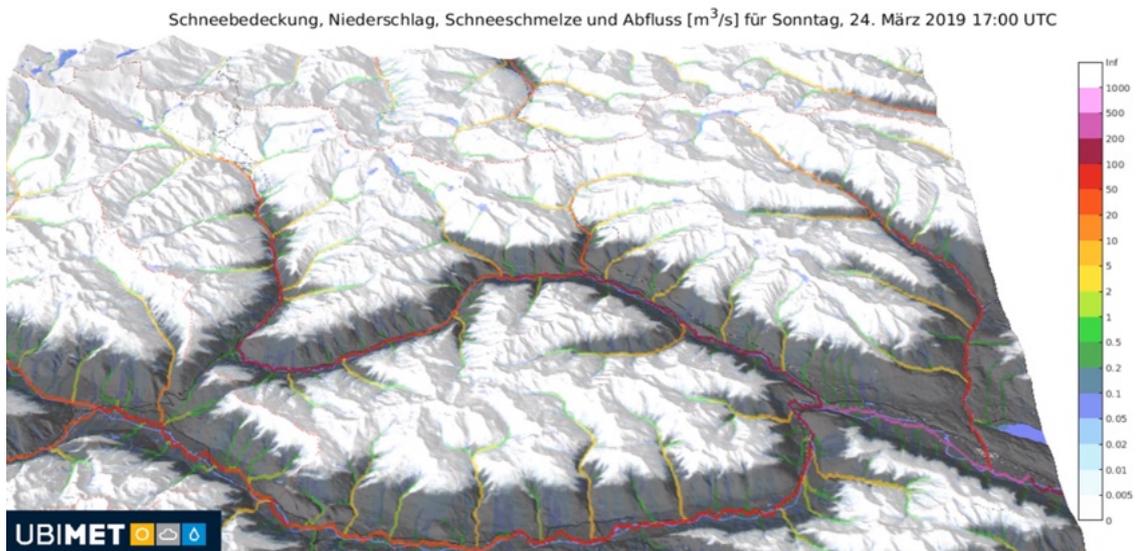


Abbildung 55 Momentaufnahme der Schneebedeckung und des Abflusses für den 24. März 2019 um 17:00 für das Mölltal. Zur Orientierung: links oben im Bild liegt das Großglockner-Massiv, rechts unten ist das westliche Ende des Millstätter Sees zu sehen. An diesem Tag gab es keine Niederschläge, dafür aber Höchsttemperaturen von bis zu 20°C in den Niederungen, was zu einer massiven Schneeschmelze in den Mittelgebirgslagen führte.

Die mit dem hier verwendeten hydrologischen Modell berechneten Abflüsse weisen im Vergleich zur Realität erhöhte Spitzen auf, zudem klingt der Abfluss bei nicht mehr vorhandenen Niederschlag rascher ab als dies in Wirklichkeit der Fall ist. Die Ursache dafür

ist in den nicht berücksichtigten Zwischenabflüssen und der Wechselwirkung mit dem Grundwasser (langfristige Versickerung und Quellschüttung) begründet. Evaluierungen des Modells haben bereits ergeben, dass der langfristige, über den gesamten Evaluierungszeitraum erhobene BIAS meist (Ausnahme Karstregionen) sehr gering ist, was für die qualitativ hochwertige Analyse der Niederschlags- und Schneeschmelzmengen spricht sowie auch ein Beweis für die korrekte Berücksichtigung der Massenerhaltung im Oberflächenabflussmodell ist.

Der mittlere absolute Fehler durch den zu schnellen Abfluss lässt sich reduzieren, wenn die modellierte Abflusszeitreihe durch einen exponentiell abklingenden Filter modifiziert bzw. geglättet wird. Dabei werden vereinfacht ausgedrückt Teile des tagesaktuellen Abflusses mit abnehmendem Gewicht auf die Folgetage verschoben, wobei die Halbwertszeit dieser abklingenden Funktion anhand von Messdaten statistisch ermittelt und auch auf ähnliche Einzugsgebiete übertragen werden kann.

Liegen für ein Einzugsgebiet Messzeitreihen vor, so bietet sich die Verwendung eines speziellen künstlichen neuronalen Netzes (Long Short Term Memory) an. Dabei handelt es sich um ein rekursives Netz, welches den Output des vorangegangenen Zeitschrittes wieder als gewichteten Input für den nächsten Zeitschritt verwendet und auf diese Weise ein Gedächtnis etablieren kann. Dies führt in der Praxis zu einer optimierten und gelernten Art von Glättung der ursprünglichen Abflusszeitreihe.

Abbildung 56 zeigt die gemessene, die direkt modellierte, die mit dem exponentiellen Filter nachbearbeitete sowie eine durch das künstliche neuronale Netz optimierten Zeitreihen der über die einzelnen Tage gemittelten Abflüsse. Man erkennt, dass durch Anwendung des neuronalen Netzes sowohl die Spitzen als auch die Perioden mit geringen Abflüssen gut rekonstruieren kann und sowohl den Fehler von 2.59 auf 1.18 m³/s mehr als halbiert und dabei die Korrelation zwischen gemessener und modellierter Abflusszeitreihe von 0.61 auf 0.73 erhöht.

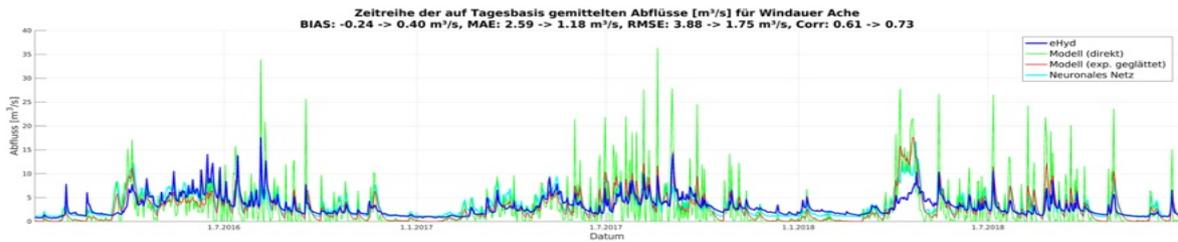


Abbildung 56 Abflusszeitreihen für die Windauer Ache für den Testzeitraum 2016 bis 2018. Die Daten der früheren Jahre wurden für das Training des künstlichen neuronalen Netzes verwendet. Die blaue Linie stellt die von eHYD gemessene Abflusszeitreihe dar, in grün ist der direkte Output des Abflussmodells dargestellt, die mit dem exponentiellen Filter prozessierte Zeitreihe ist rot eingefärbt und der Output des neuronalen Netzes in türkiser Farbe markiert. Man erkennt deutlich, wie die Modifikationen der ebenfalls schon hoch korrelierenden ursprünglichen modellierten Abflusszeitreihe durch die statistische Nachbearbeitung eine deutliche Annäherung an die gemessene Abflusszeitreihe bewirkt.

2.1.7.4 Fazit

Die Prognose der Wildbachgefahr hat erste positive Ergebnisse geliefert. Daher wurde der ÖBB die Prognose der Abflüsse der Wildbäche Windauer Ache, Glan und Kristeinbach per PDF zur Verfügung gestellt, um bei operativen Entscheidungen berücksichtigt werden zu können. Zur Verbesserung der Skalierbarkeit und Präzision der Modelle sind allerdings weitere Entwicklungsarbeiten notwendig.

2.2 Auswirkungen des Klimawandels auf das Primärenergiedargebot

2.2.1 Solar- und Windkraft

2.2.1.1 Motivation und Zielsetzung

Die ÖBB wird durch die Umstellung auf 100% grünen Strom für Bahnhöfe, Büros, Werkstätten und Containerkräne den nächsten Meilenstein in Richtung eines CO₂-freien Konzerns setzen. Für dieses Vorhaben und die proaktive Strategie der ÖBB sind langfristige Prognosen der Energieproduktion als Entscheidungsgrundlage von großer Relevanz. Die Vorhersage der zukünftig zur Verfügung stehenden Energieressourcen, und daraus abgeleitet eine Entscheidungsgrundlage für Handlungsempfehlungen, führt zu verbesserter strategischer Planung der ÖBB-eigenen Stromproduktion und Infrastruktur, einer umfassenderen Standortbewertung und Risikoabschätzung. Die informationsbasierten Entscheidungsgrundlagen führen auch zu größerer Unabhängigkeit/ Autarkie bzgl. Energieproduktion und eröffnen potenziell zukünftig neue Geschäftsfelder.

Darum hatte das Projekt das Ziel, das langfristige Primärenergiedargebots mit Studien über die Auswirkungen des Klimawandels auf zukünftige Energieerzeugung der ÖBB mittels ihrer erneuerbaren Energieerzeugungsanlagen zu prognostizieren. Dies umfasst Speicherseen, Laufwasserkraftwerke, sowie PV- und Windkraftanlagen. Im Detail sollten Szenarien der Änderungen der Kapazitätsfaktoren für Solar- und Windkraft sowie Niederschlagsmengen und der daraus resultierenden Abflüsse beschrieben und daraus die Änderungen der Energieerzeugung abgeleitet werden.

2.2.1.2 Grundlage

Für die Bewertung der klimatischen Entwicklung des Solar- und Windkraftpotenzials wurde ein Datenset an Klimaprojektionen für den europäischen Sektor (Bartok, 2019) verwendet. Darin wurden einzelne Sub-Ensembles ausgewählt und eine BIAS-Korrektur für die Variablen durchgeführt d.h. die Klimaprojektionen wurden in die Vergangenheit gerechnet und so „verschoben“, dass die Projektionen mit den Werten der Gegenwart gut übereinstimmen. Die räumliche Auflösung der betrachteten Klimamodelle beträgt 12 km, die zeitliche Auflösung liegt bei 3 h. Für die Analyse des Windkraftpotenzials konnten die Daten dieser Klimamodelle nicht im alpinen Bereich verwendet werden, da in den Modellen die Reibung überschätzt wurde und die Werte deshalb zu niedrig waren.

Die verwendeten Klimaprojektionen waren für 3 verschiedene Treibhausgaskonzentrationen (THG) ([RCP](#): representative concentration pathway) in der Atmosphäre bzw. der daraus resultierenden Strahlungsleistung verfügbar:

- [RCP2.6](#): Bei diesem Szenario wird davon ausgegangen, dass zeitnah effektive Maßnahmen zur Eindämmung der THG-Emissionen sowie für Carbon Capture ergriffen werden (Klimaschutz-Szenario). Hier wird davon ausgegangen, dass der Strahlungsantrieb gegen Ende des Jahrhunderts auf $2,6 \text{ W/m}^2$ zurück geht und die globale Temperaturzunahme im Vergleich zum vorindustriellen Zeitalter um $1 \text{ }^\circ\text{C}$ zunimmt. Dieses Szenario erscheint aus heutiger Sicht nicht mehr erreichbar.
- [RCP4.5](#): Dies wird auch als mittleres Szenario bezeichnet. Hier steigt der Strahlungsantrieb bis Ende des Jahrhunderts auf $4,5 \text{ W/m}^2$. Um dieses Szenario zu erreichen, sind moderate Anstrengungen zum Klimaschutz notwendig. Die mittlere globale Temperatur wird bis zum Ende des Jahrhunderts um etwa $1,8 \text{ }^\circ\text{C}$ ansteigen.
- [RCP8.5](#): Beim pessimistischen RCP8.5 Szenario, auch Business-as-usual-Szenario genannt, wird davon ausgegangen, dass keine oder nur geringfügige Klimaschutzmaßnahmen ergriffen werden, sodass der Strahlungsantrieb bis Ende

des Jahrhunderts auf $8,5 \text{ W/m}^2$ ansteigt, was einer mittleren, globalen Temperaturerwärmung um $3,7 \text{ }^\circ\text{C}$ entspricht.

Für jedes dieser THG-Szenarien standen mehrere Klimamodelle zur Verfügung, sodass statistische Mittelwerte und Konfidenzintervalle gebildet werden konnten.

Die Klimamodelle überspannen einen Zeitraum von 1950 bis 2099. Betrachtete Parameter sind die Kapazitätsfaktoren (=relative Leistung), d.h. die produzierte Energie über einen bestimmten Zeitraum im Vergleich zum Volllastbetrieb sowie die relative Änderung der Kapazitätsfaktoren. Der Vergleichszeitraum für die Potenzialprognosen beträgt 1990 – 2020.

2.2.1.3 Ergebnisse

Die Analyse von Langzeittrends und saisonalen Zyklen wurde für die in Abbildung 57 (Windkraftpotenzial) und in Abbildung 58 (Solarkraftpotenzial) dargestellten Gitterpunkte gemacht. In diesen Abbildungen sind die Standorte der Solar- und Windkraftanlagen der ÖBB dargestellt, wie sie von den ÖBB an UBIMET übermittelt wurden. Die meisten dieser Anlagen befinden sich in Planung.

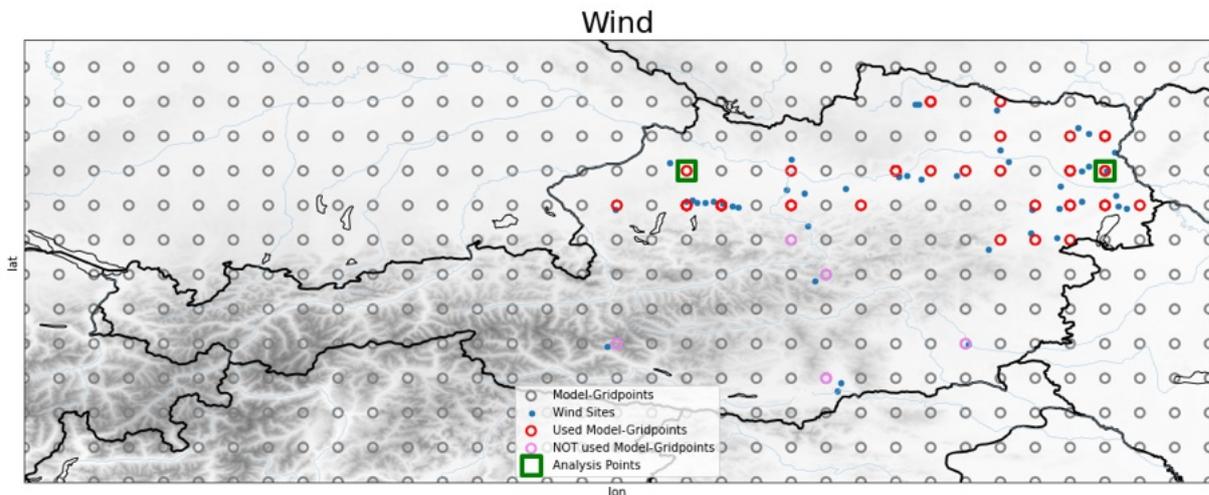


Abbildung 57 Gitterpunkte der Klimamodelle (graue Ringe) im Vergleich zu den (geplanten) Standorten der Solarkraftanlagen der ÖBB (blaue Punkte), Gitterpunkte in der Nähe von ÖBB-Windkraftherzeugungsanlagen (rote Ringe) sowie repräsentative Analysepunkte (grüne Quadrate)

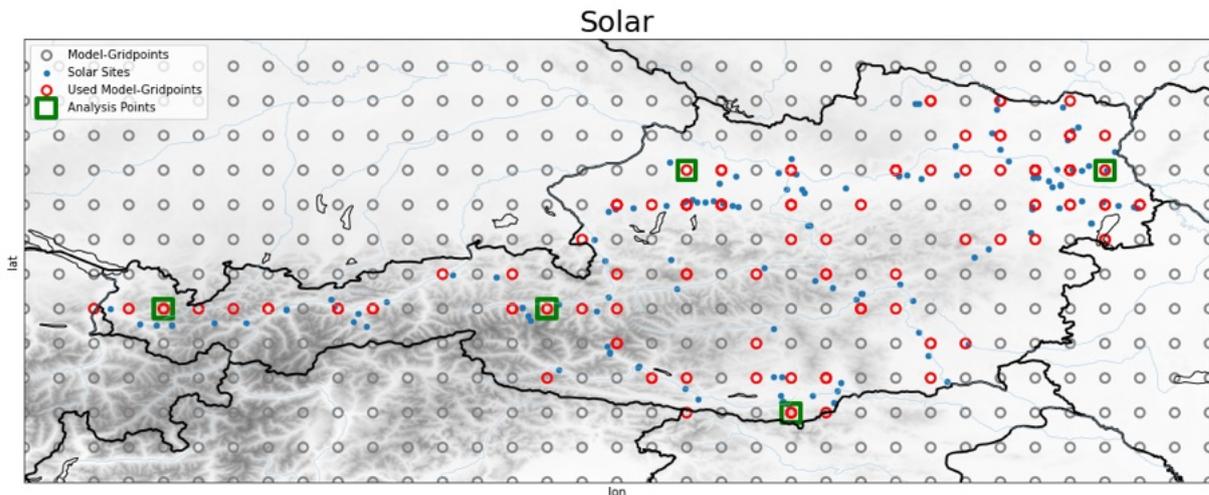


Abbildung 58 Gitterpunkte der Klimamodelle (graue Ringe) im Vergleich zu den (geplanten) Standorten der Windkraftanlagen der ÖBB (blaue Punkte), Gitterpunkte in der Nähe von ÖBB-Solarkraft erzeugungsanlagen (rote Ringe) sowie repräsentative Analysepunkte (grüne Quadrate)

Zur Datenvorbereitung wurden die Standorte der Erzeugungsanlagen auf den jeweils nächstgelegenen Gitterpunkt der Klimamodelle gemappt. Für diese Gitterpunkte wurden Tagesaggregate der Kapazitätsfaktoren für Solar- und Windkraft erstellt. Da die Ergebnisse für benachbarte Gitterpunkte sehr ähnlich sind wurden wenige repräsentative Analysepunkte für die Darstellung ausgewählt. Diese repräsentieren die Gebiete Westösterreich (Arlberg), Zentralösterreich (Glockner) und Südösterreich (Süd) für Solarkraft sowie die Regionen Oberösterreich (OÖ) und Ostösterreich (NÖ Ost) für Solar- und Windkraft. Für Windkraft konnten aufgrund der Modelleinschränkungen alpine Regionen nicht betrachtet werden, der Großteil der (geplanten) Erzeugungsanlagen wird jedoch mit OÖ und NÖ Ost erfasst.

Bezüglich Solarkraftpotenzial zeigt sich bei allen Standorten eine leichte Abnahme der Kapazitätsfaktoren bis zum Ende des Jahrhunderts für RCP4.5 und RCP8.5 (siehe Abbildung 59). Dieser Rückgang ist im hochalpinen Raum etwas stärker ausgeprägt, als in den restlichen analysierten Regionen. Dementsprechend nimmt die Anzahl der Tage pro Jahr, an welchen die mittlere Solarkraftproduktion um 1% abnimmt bezogen auf den mittleren Kapazitätsfaktor pro Tag, in allen Regionen zu. Die Änderungen liegen allerdings im einstelligen Bereich. Bei den Jahresverläufen zeigt sich insbesondere bei den Regionen Arlberg und Glockner, dass die relative Leistung für RCP8.5 vor allem in der 1. Jahreshälfte in den kommenden Jahrzehnten deutlich abnimmt, während in der 2. Jahreshälfte eine Zunahme (Arlberg) bzw. nur geringfügige Veränderung zu erkennen sind (Glockner). Diese Abnahme in der 1. Jahreshälfte lässt sich auch bei den Regionen OÖ, Süd und NÖ Ost

leicht erkennen. Bei RCP4.5 ist eine Abnahme über den gesamten Jahresverlauf erkennbar, die Trends sind aber nicht so stark ausgeprägt, wie bei RCP8.5

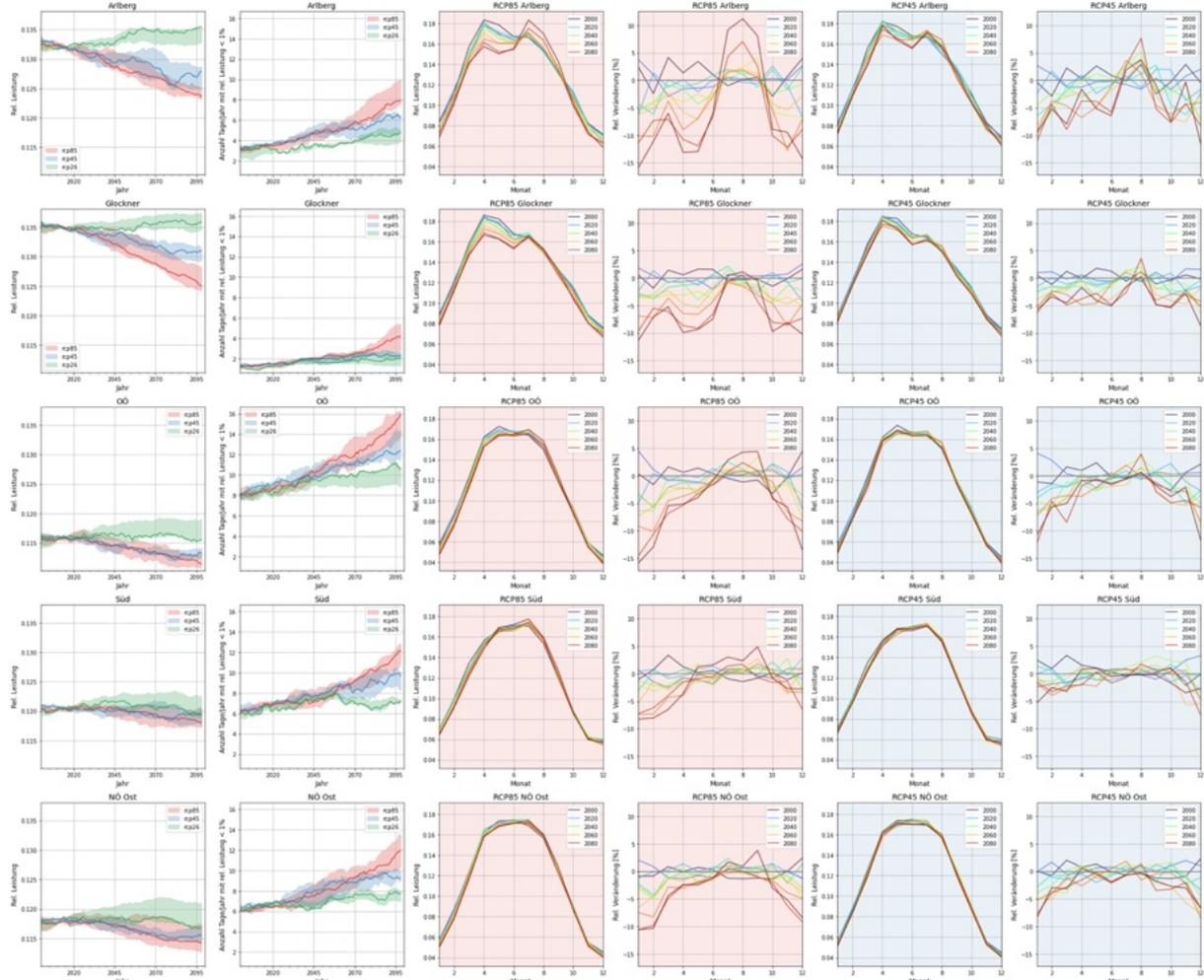


Abbildung 59: Rollierender 30-Jahres-Mittelwert der täglichen relativen Energieprojektionen für verschiedene Klimaszenarien (Linien: Median, schattierte Fläche: Quantile q25 - q75)(Spalte 1); Verlauf der Anzahl der Tage pro Jahr, an welchen die mittlere Solarkraftproduktion um 1% abnimmt bezogen auf den mittleren Kapazitätsfaktor pro Tag (Spalte 2); Verlauf der monatlichen Zyklen der Kapazitätsfaktoren für Solarkraft – Mittelwert über alle Klimamodelle für die Jahre 2000 – 2080 RCP8.5 (Spalte 3); Relative Änderung der monatlichen Zyklen der Kapazitätsfaktoren für Solarkraft – Mittelwert über alle Klimamodelle für die Jahre 2000 – 2080 RCP8.5 (Spalte 4); Verlauf der monatlichen Zyklen der Kapazitätsfaktoren für Solarkraft – Mittelwert über alle Klimamodelle für die Jahre 2000 – 2080 RCP4.5 (Spalte 5); Relative Änderung der monatlichen Zyklen der Kapazitätsfaktoren für Solarkraft – Mittelwert über alle Klimamodelle für die Jahre 2000 – 2080 RCP4.5 (Spalte 6)

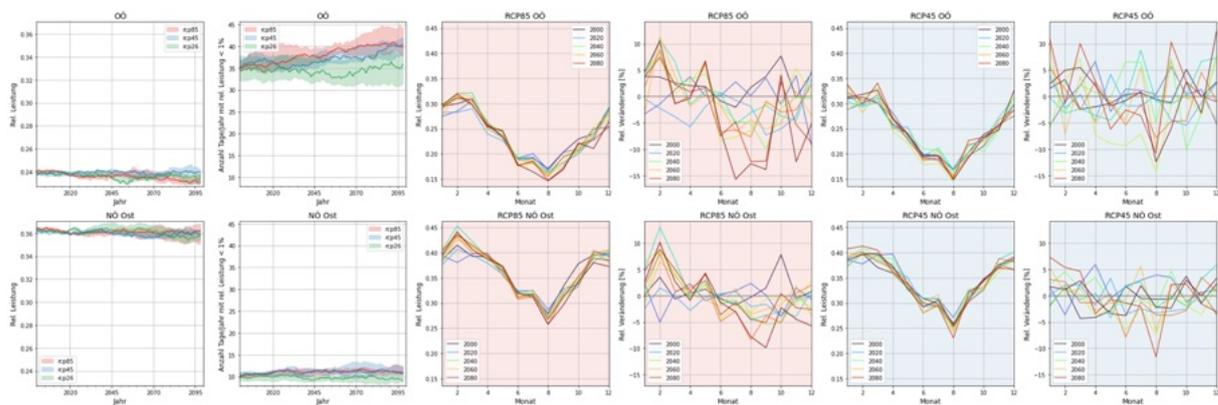


Abbildung 60: Rollierender 30-Jahres-Mittelwert der täglichen relativen Energieproduktion aus Windkraft für verschiedene Klimaszenarien (Linien: Median, schattierte Fläche: q25 - q75)(Spalte 1); Verlauf der Anzahl der Tage pro Jahr, an welchen die mittlere Windkraftproduktion um 1% abnimmt bezogen auf den mittleren Kapazitätsfaktor pro Tag (Spalte 2); Verlauf der monatlichen Zyklen der Kapazitätsfaktoren für Windkraft – Mittelwert über alle Klimamodelle für die Jahre 2000 – 2080 RCP8.5 (Spalte 3); Relative Änderung der monatlichen Zyklen der Kapazitätsfaktoren für Windkraft – Mittelwert über alle Klimamodelle für die Jahre 2000 – 2080 RCP8.5 (Spalte 4); Verlauf der monatlichen Zyklen der Kapazitätsfaktoren für Windkraft – Mittelwert über alle Klimamodelle für die Jahre 2000 – 2080 RCP4.5 (Spalte 5); Relative Änderung der monatlichen Zyklen der Kapazitätsfaktoren für Windkraft – Mittelwert über alle Klimamodelle für die Jahre 2000 – 2080 RCP4.5 (Spalte 6)

Bezüglich des Windkraftpotenzials sind keine eindeutigen Trends für die nächsten Jahrzehnte und auch im Vergleich der RCPs untereinander zu erkennen (siehe Abbildung 60).

In Abbildung 61 ist die relative Änderung der Kapazitätsfaktoren für Solarkraft beim Treibhausgasszenario RCP8.5 für die nächsten Jahrzehnte (in Zeitscheiben von 30 Jahren) dargestellt. Hier zeigt sich wieder die Zunahme in der zweiten Jahreshälfte, welche vor allem in den Morgen- und Abendstunden ausgeprägt ist. Zusätzlich zeigt sich wieder, dass bis Ende des Jahrhunderts die größten Änderungen des Solarkraftpotenzials in den Regionen Arlberg und Glockner zu erwarten sind.

Dieselbe Darstellung für Windkraft (siehe Abbildung 62) zeigt, dass das Windkraftpotenzial vor allem zu Jahresbeginn zunehmen wird, wohingegen in der zweiten Jahreshälfte eher mit einer Abnahme zu rechnen ist. Die Tagesverläufe lassen in dieser Darstellung keinen eindeutigen Trend erkennen.

Zumindest ein leichter Trend bezüglich der Tagesverläufe des Solarkraftpotenzials lässt sich in Abbildung 63 für die Region Arlberg und RCP8.5 erkennen. Dieses nimmt in den Winter- und Frühjahrsmonaten leicht ab, während in den Sommer und Herbstmonaten kaum Veränderungen erkennbar sind. Diese Trends sind in der Region Glockner (siehe Abbildung 64) und OÖ (Abbildung 65) ebenfalls noch klar erkennbar, während in den

Regionen Süd (Abbildung 66) und NÖ Ost (Abbildung 67) kein eindeutiger Trend für die nächsten Jahrzehnte zu erwarten ist.

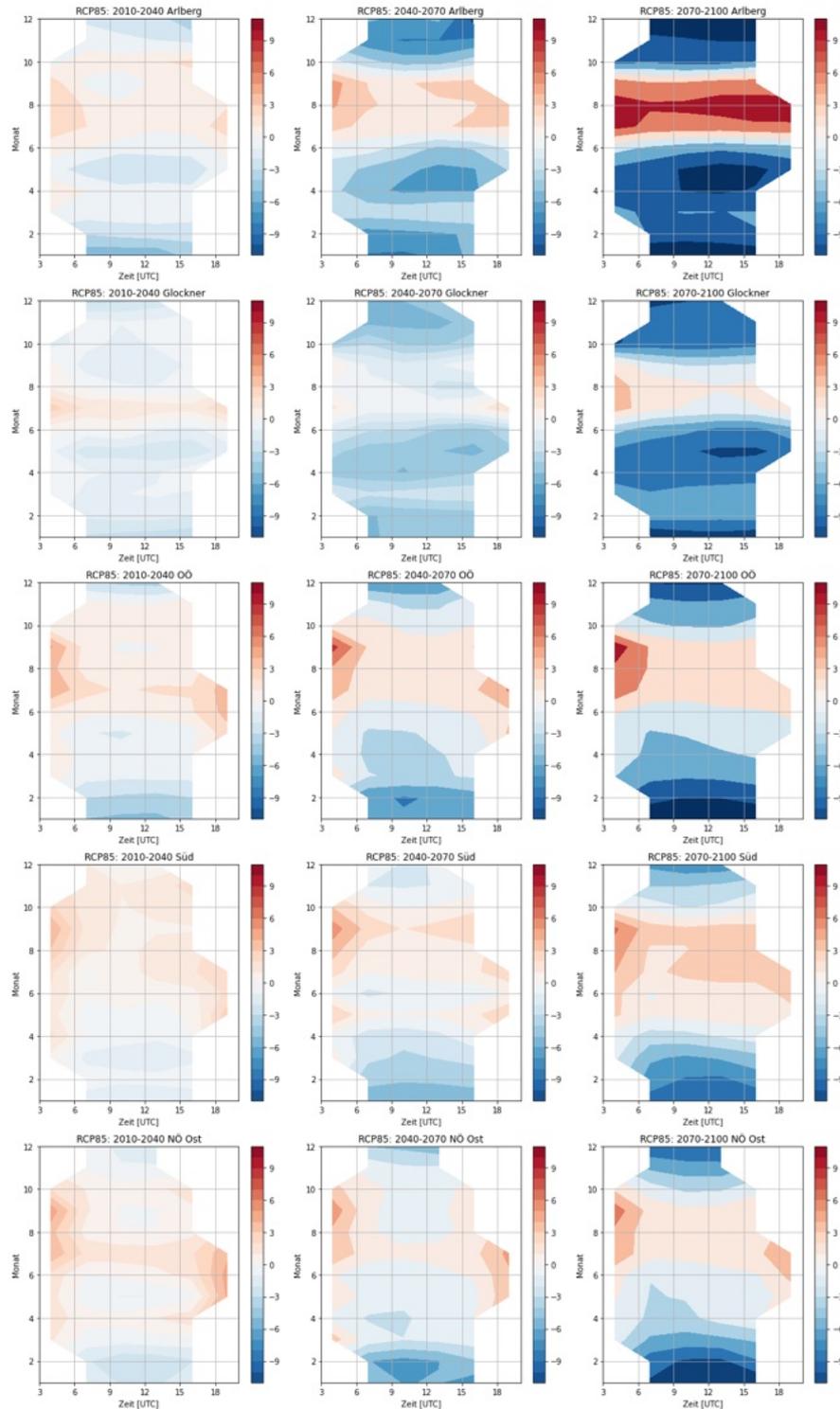


Abbildung 61: Relative Änderung der Kapazitätsfaktoren für Solarkraft [%] – RCP8.5 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1990 – 2020 für die Jahrzehnte 2010 – 2040 (Spalte 1), 2040 – 2070 (Spalte 2), 2070 – 2100 (Spalte 3)

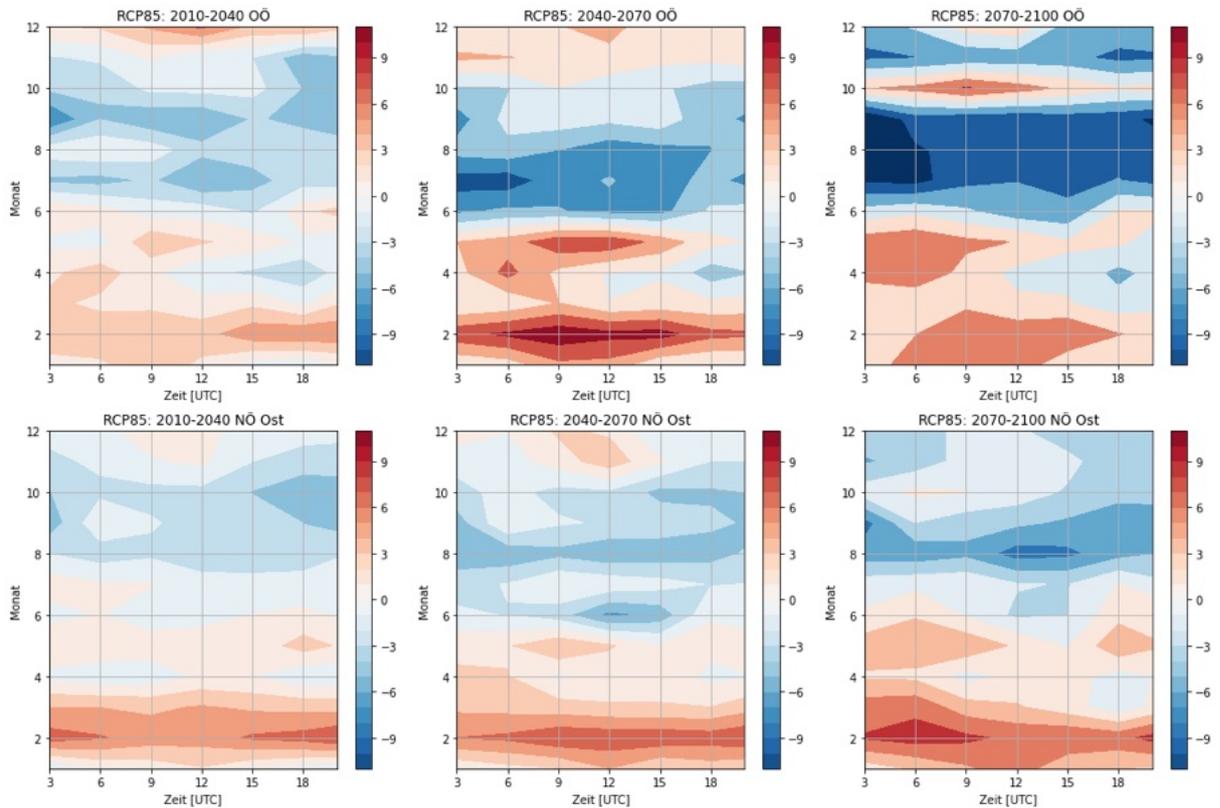


Abbildung 62: Relative Änderung der Kapazitätsfaktoren für Windkraft [%] – RCP8.5 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1990 – 2020 für die Jahrzehnte 2010 – 2040 (Spalte 1), 2040 – 2070 (Spalte 2), 2070 – 2100 (Spalte 3)

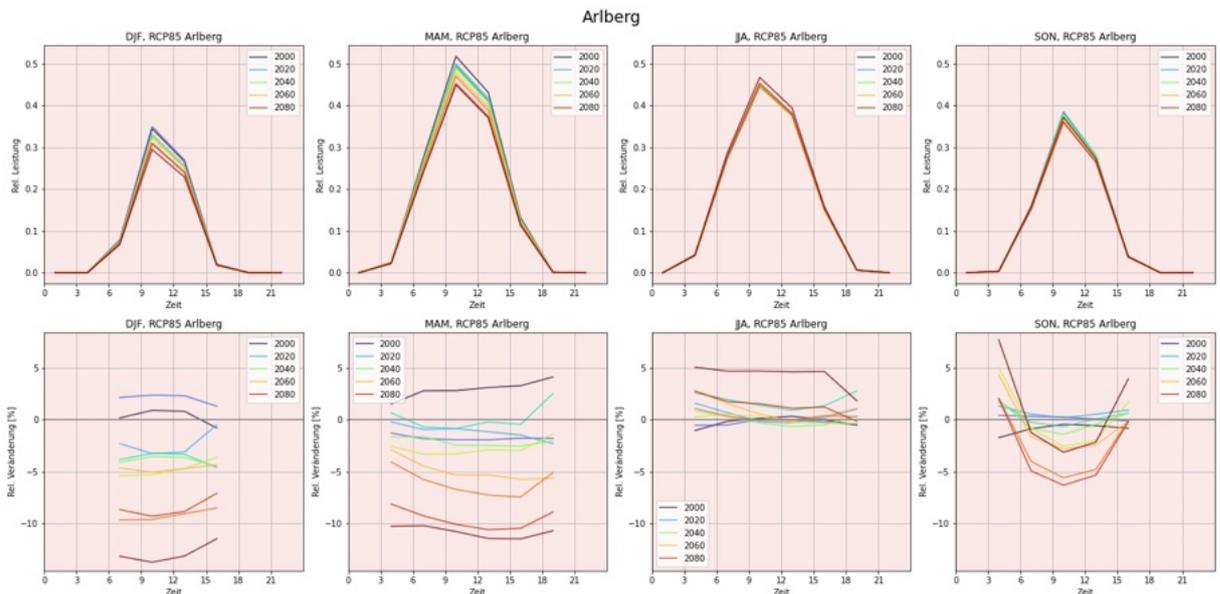


Abbildung 63: Saisonale Kapazitätsfaktoren (Rel. Leistung) für die Region Arlberg sowie relative Veränderung der Kapazitätsfaktoren der Solarkraft für die Jahre 2000 – 2080 – Tagesverläufe für RCP8.5, DJF...Dezember, Jänner, Februar; MAM...März, April, Mai; JJA...Juni, Juli, August; SON...September, Oktober, November

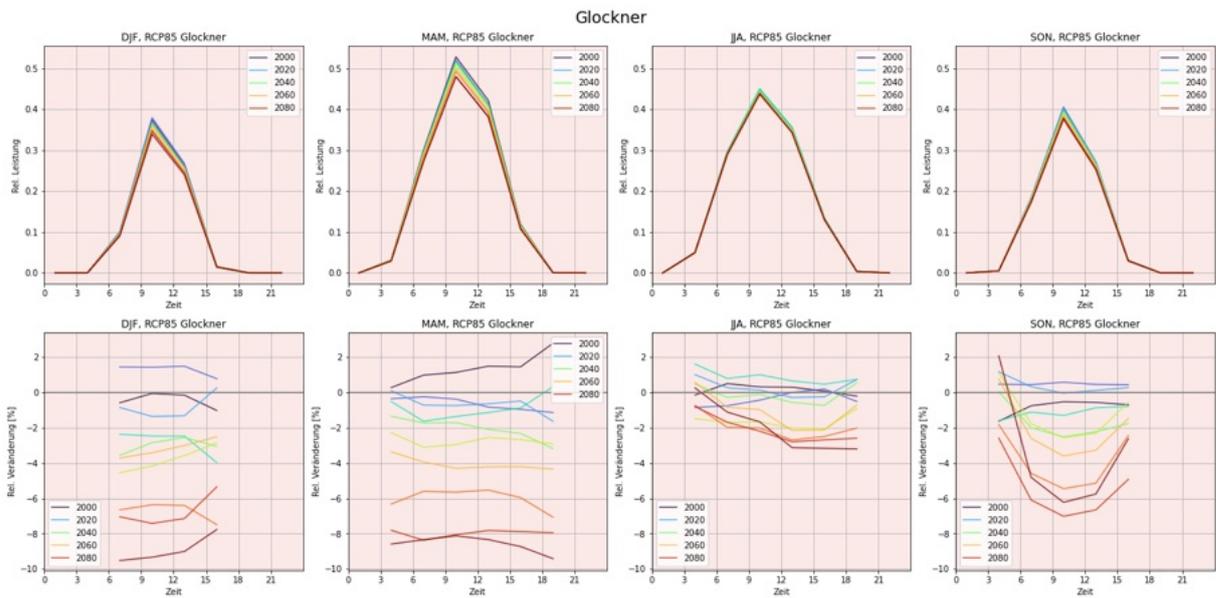


Abbildung 64: Saisonale Kapazitätsfaktoren (Rel. Leistung) für die Region Glockner sowie relative Veränderung der Kapazitätsfaktoren der Solarkraft für die Jahre 2000 – 2080 – Tagesverläufe für RCP8.5, DJF...Dezember, Jänner, Februar; MAM...März, April, Mai; JJA...Juni, Juli, August; SON...September, Oktober, November

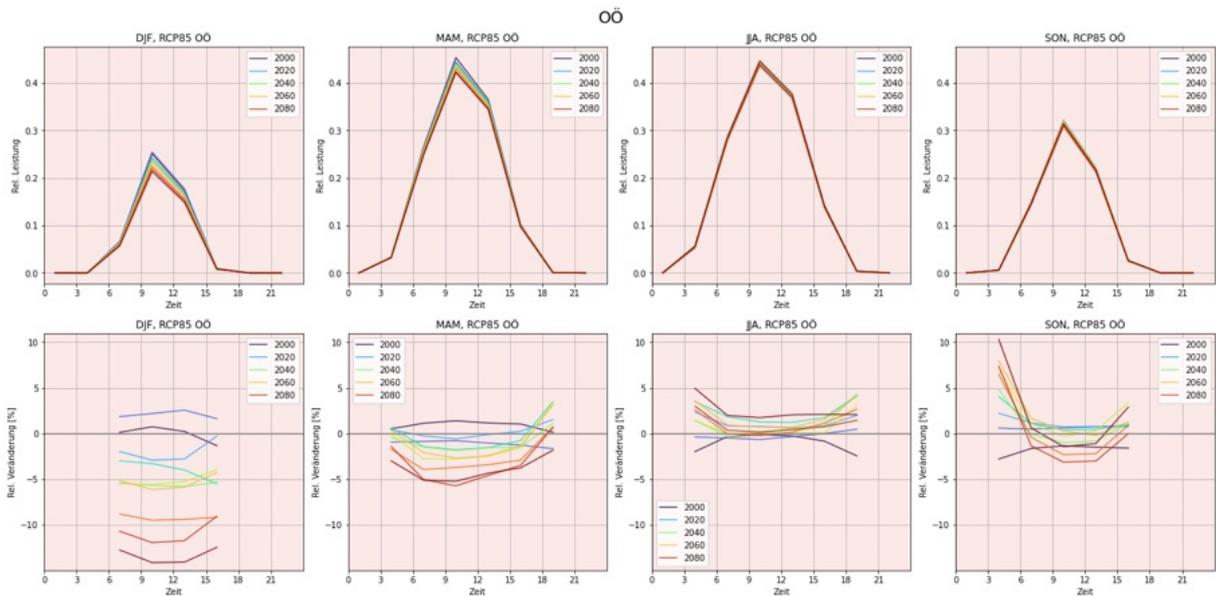


Abbildung 65: Saisonale Kapazitätsfaktoren (Rel. Leistung) für die Region OÖ sowie relative Veränderung der Kapazitätsfaktoren der Solarkraft für die Jahre 2000 – 2080 – Tagesverläufe für RCP8.5, DJF...Dezember, Jänner, Februar; MAM...März, April, Mai; JJA...Juni, Juli, August; SON...September, Oktober, November

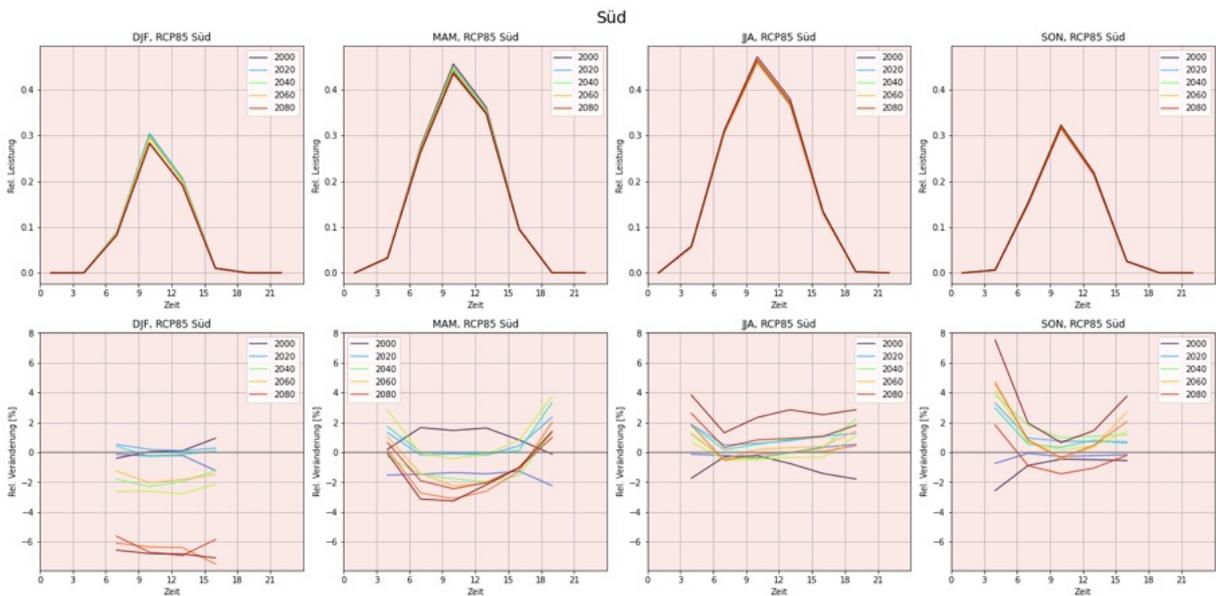


Abbildung 66: Saisonale Kapazitätsfaktoren (Rel. Leistung) für die Region Südösterreich sowie relative Veränderung der Kapazitätsfaktoren der Solarkraft für die Jahre 2000 – 2080 – Tagesverläufe für RCP8.5, DJF...Dezember, Jänner, Februar; MAM...März, April, Mai; JJA...Juni, Juli, August; SON...September, Oktober, November

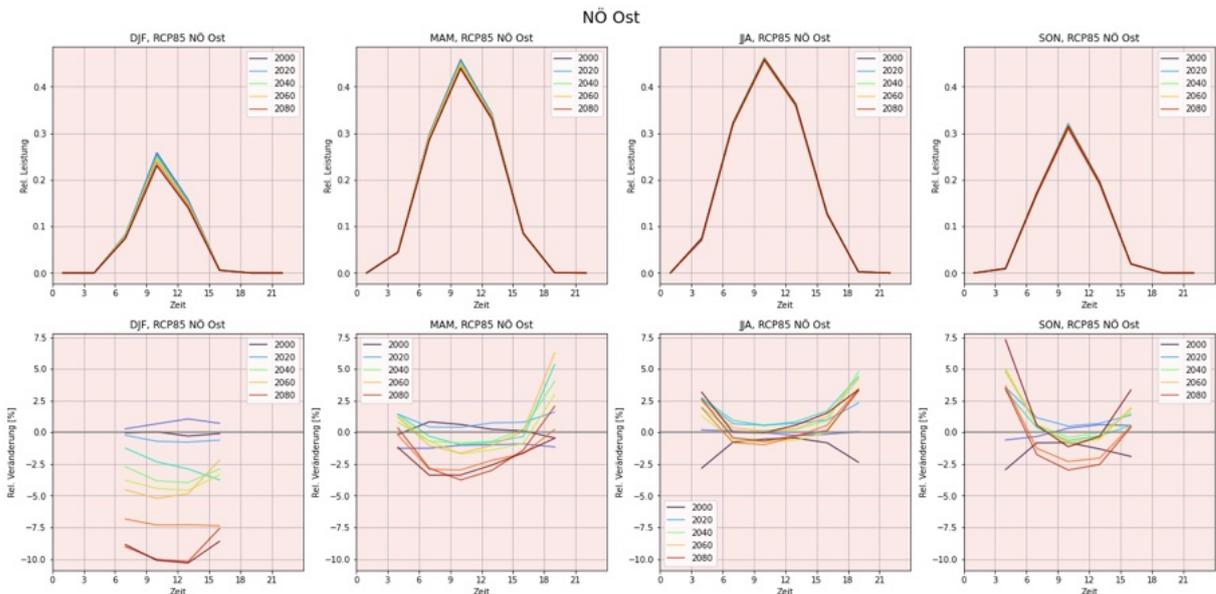


Abbildung 67: Saisonale Kapazitätsfaktoren (Rel. Leistung) für die Region Ostösterreich sowie relative Veränderung der Kapazitätsfaktoren der Solarkraft für die Jahre 2000 – 2080 – Tagesverläufe für RCP8.5, DJF...Dezember, Jänner, Februar; MAM...März, April, Mai; JJA...Juni, Juli, August; SON...September, Oktober, November

Das Windkraftpotenzial zeigt bei RCP8.5 bei den Standorten OÖ (Abbildung 68) und NÖ Ost (Abbildung 69) vor allem eine Abnahme in der Wintersaison, während in den Sommer- und Herbstmonaten eine Zunahme zu erwarten ist. Für die Frühjahrssaison ist kein eindeutiger Trend auszumachen.

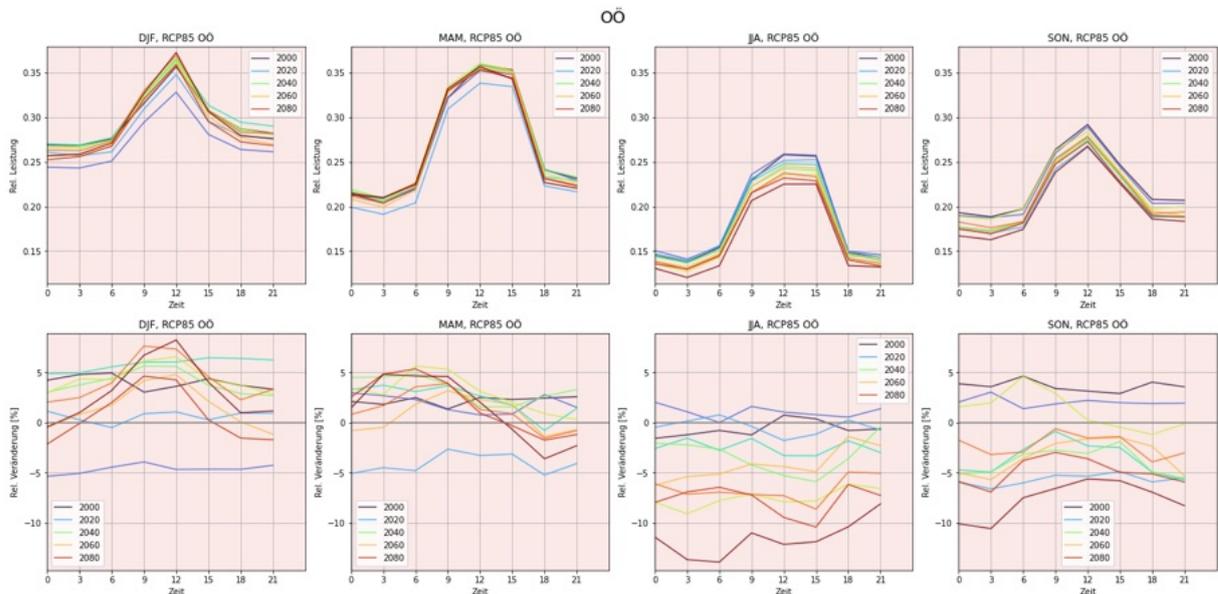


Abbildung 68: Saisonale Kapazitätsfaktoren (Rel. Leistung) für die Region OÖ sowie relative Veränderung der Kapazitätsfaktoren der Windkraft für die Jahre 2000 – 2080 – Tagesverläufe für RCP8.5, DJF...Dezember, Jänner, Februar; MAM...März, April, Mai; JJA...Juni, Juli, August; SON...September, Oktober, November

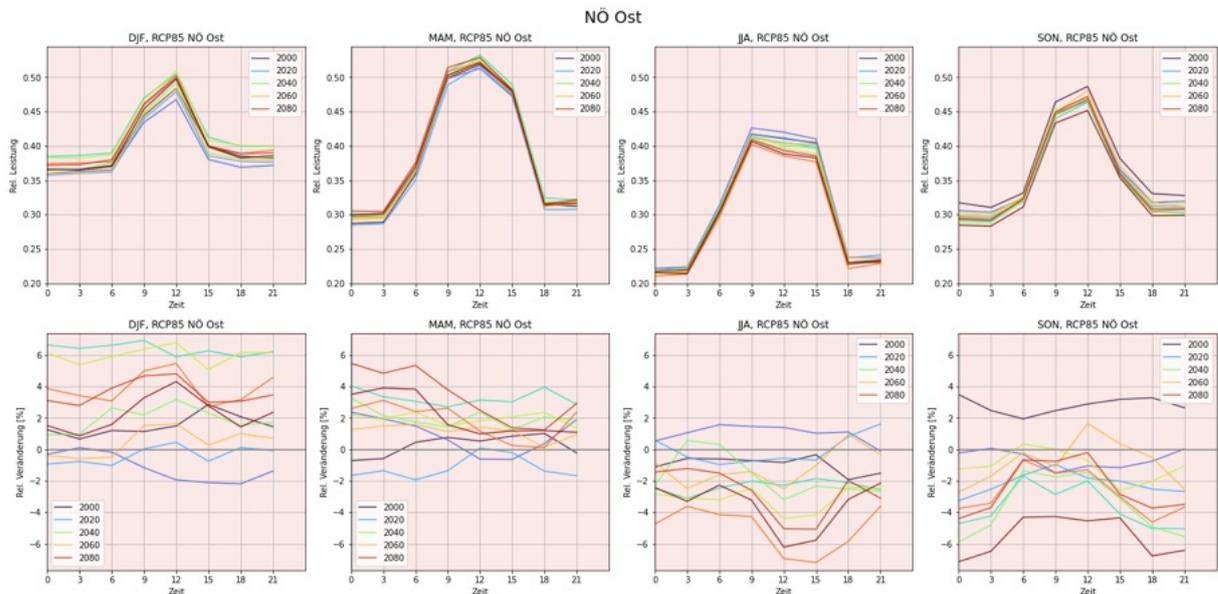


Abbildung 69: Saisonale Kapazitätsfaktoren (Rel. Leistung) für die Region Ostösterreich sowie relative Veränderung der Kapazitätsfaktoren der Windkraft für die Jahre 2000 – 2080 – Tagesverläufe für RCP8.5, DJF...Dezember, Jänner, Februar; MAM...März, April, Mai; JJA...Juni, Juli, August; SON...September, Oktober, November

In Abbildung 70 sind die mittleren, jährlichen, solaren Kapazitätsfaktoren für ganz Österreich dargestellt für die Referenzperiode (1990 – 2020), für 2070 – 2100 sowie die relative Änderung der Kapazitätsfaktoren. In dieser Darstellung ist eine deutliche Abnahme der Solarstromproduktion bis zum Ende des Jahrhunderts zu erkennen, welche insbesondere im alpinen Raum und auch in den Nachbarländern Italien und Schweiz ausgeprägt ist. Die entsprechenden saisonalen Plots lassen erkennen, dass die größten Veränderungen vor allem im Frühling (Abbildung 72) zu erwarten sind, hier sagen die Klimamodelle für ganz Österreich eine Abnahme der Solarproduktion vorher. Im Herbst (Abbildung 74) wird für den alpinen Raum eine Abnahme des Solarpotenzials vorhergesagt, während im restlichen Teil Österreichs von keinen Änderungen auszugehen ist.

Im Sommer (Abbildung 73) dagegen kommt es zwar auch in den alpinen Regionen zu einer Abnahme der Solarkapazität, in anderen Teilen von Österreich nimmt diese hingegen leicht zu. Im Vergleich dazu kommt es im Winter (Abbildung 71) zu einer leichten Abnahme des Solarstrompotenzials in ganz Österreich.

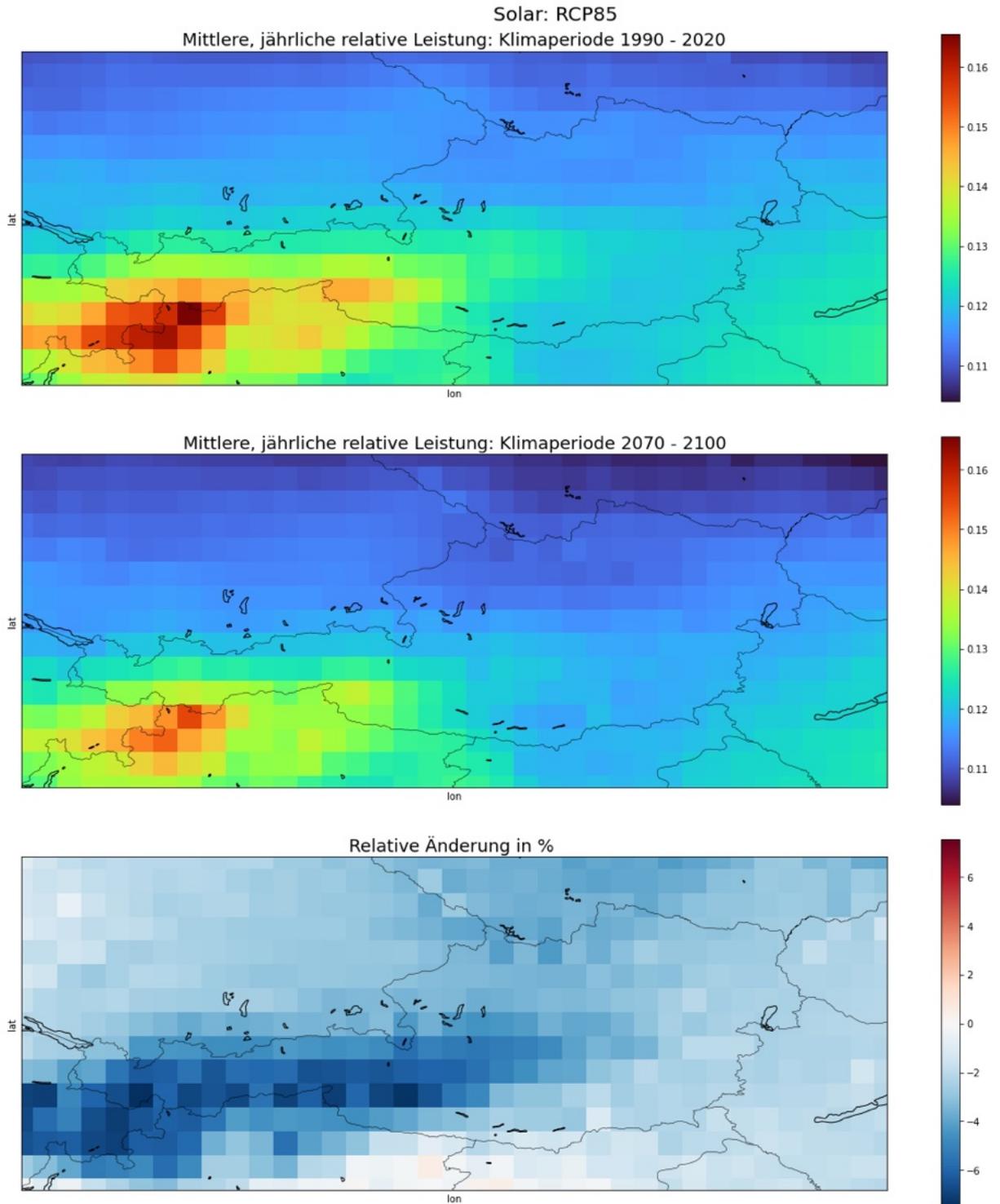


Abbildung 70: Österreich-Karten der mittleren, jährlichen Kapazitätsfaktoren (relative Leistung) für Solarkraft für die Klimaperioden 1990 – 2020 (oben) und 2070 – 2100 (Mitte) sowie relative Änderung der Kapazitätsfaktoren (unten) für RCP8.5

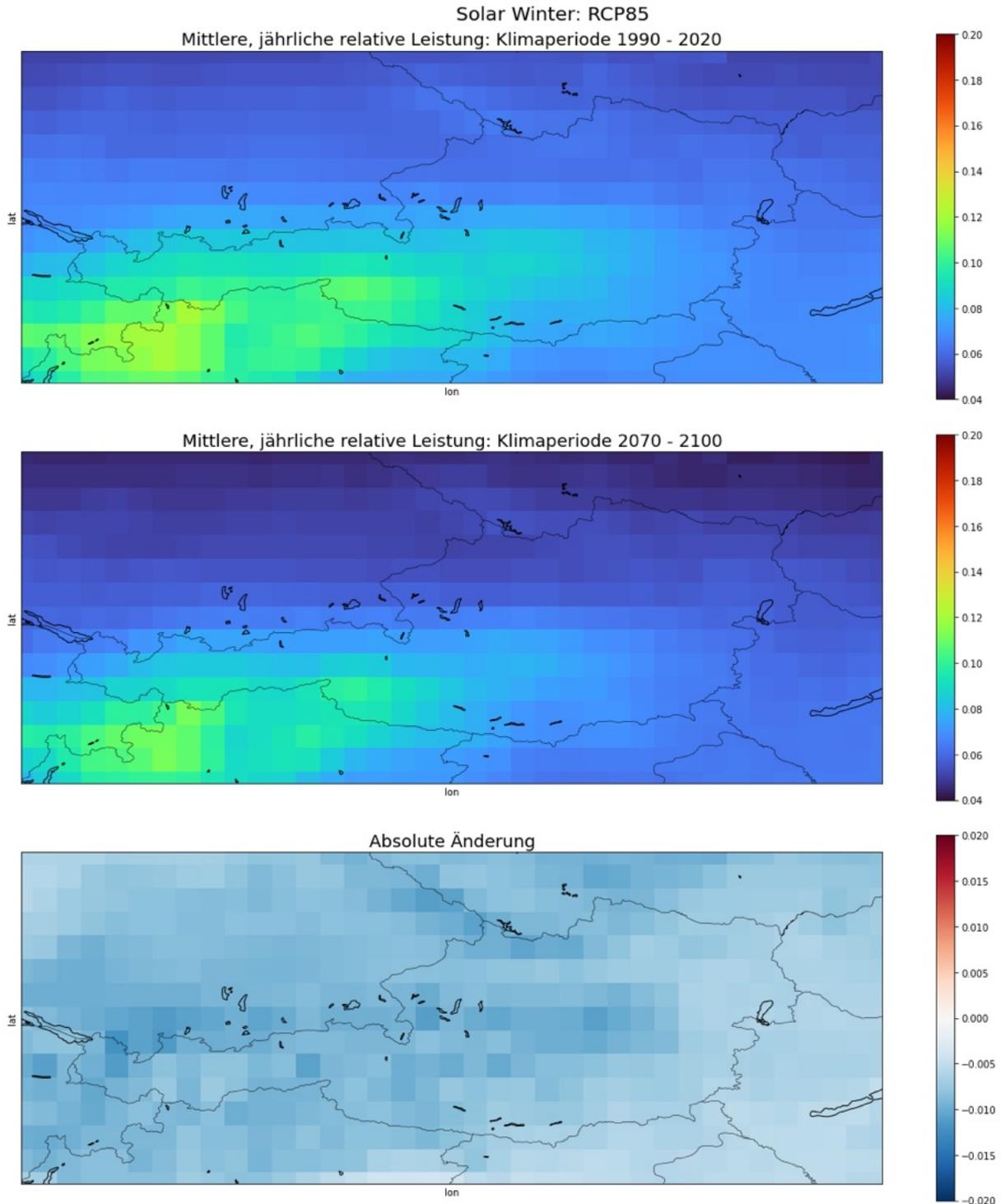


Abbildung 71: Österreich-Karten der mittleren, saisonalen (Winter) Kapazitätsfaktoren (relative Leistung) für Solarkraft für die Klimaperioden 1990 – 2020 (oben) und 2070 – 2100 (Mitte) sowie relative Änderung der Kapazitätsfaktoren (unten) für RCP8.5

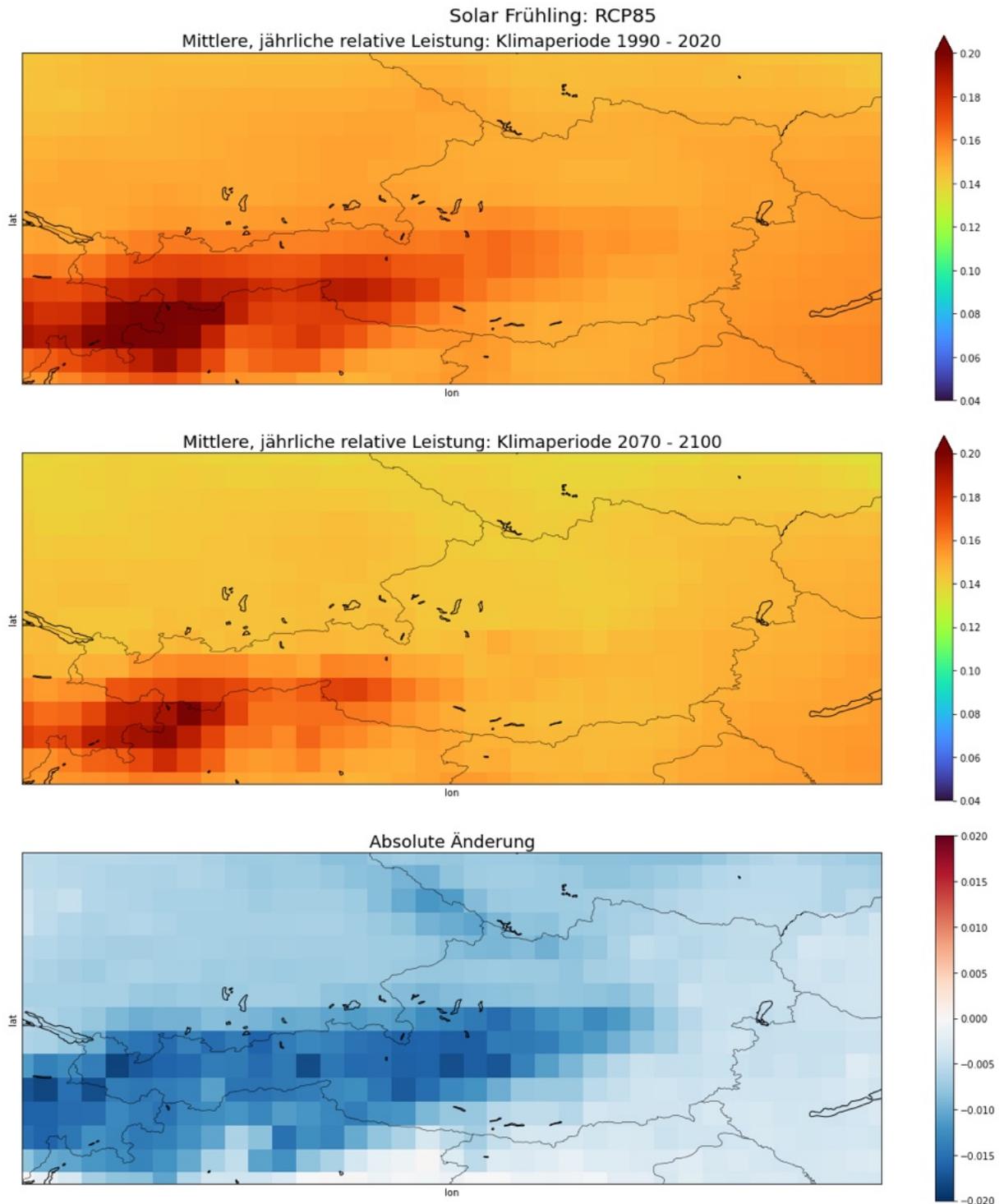


Abbildung 72: Österreich-Karten der mittleren, saisonalen (Frühling) Kapazitätsfaktoren (relative Leistung) für Solarkraft für die Klimaperioden 1990 – 2020 (oben) und 2070 – 2100 (Mitte) sowie relative Änderung der Kapazitätsfaktoren (unten) für RCP8.5

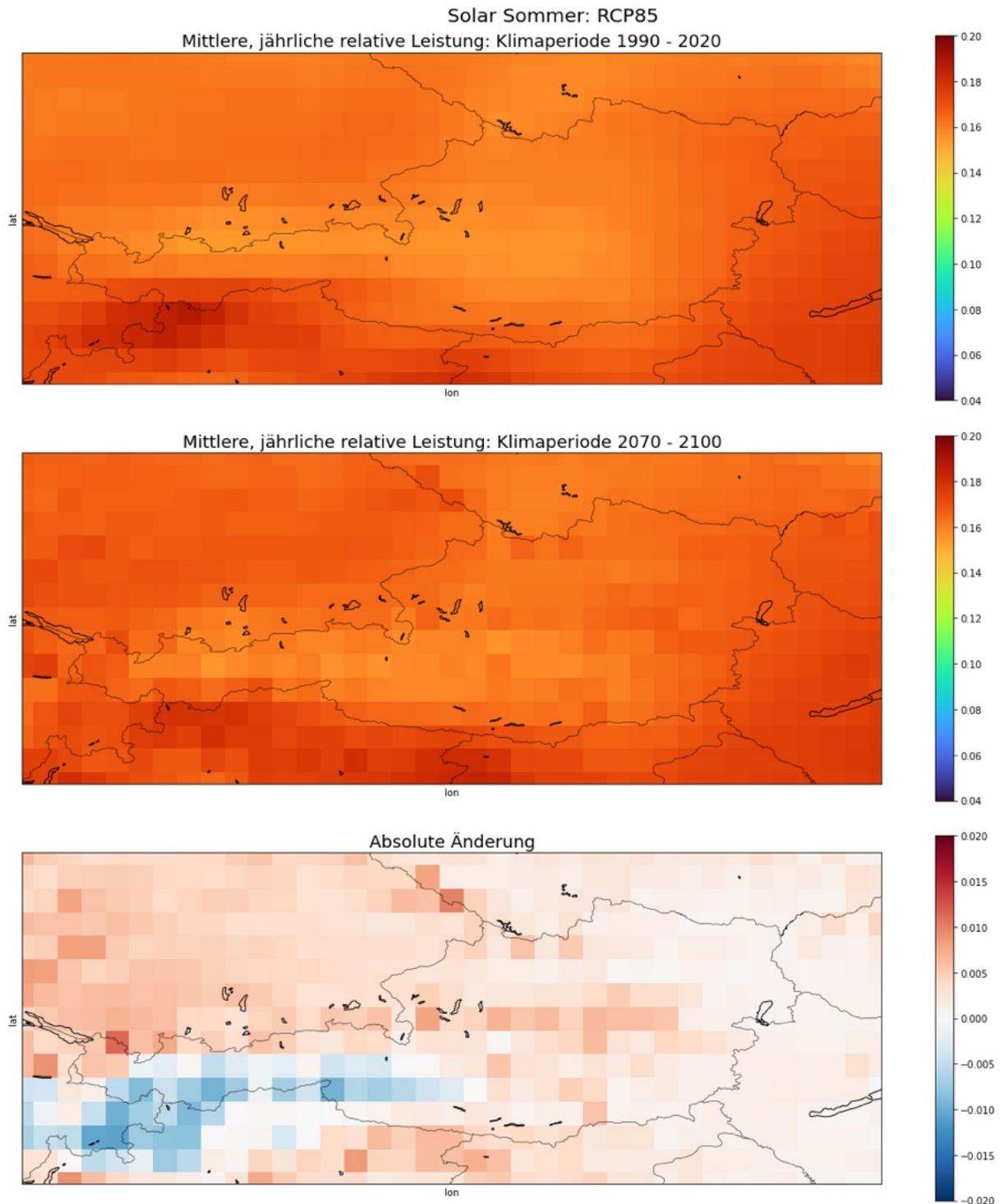


Abbildung 73: Österreich-Karten der mittleren, saisonalen (Sommer) Kapazitätsfaktoren (relative Leistung) für Solarkraft für die Klimaperioden 1990 – 2020 (oben) und 2070 – 2100 (Mitte) sowie relative Änderung der Kapazitätsfaktoren (unten) für RCP8.5

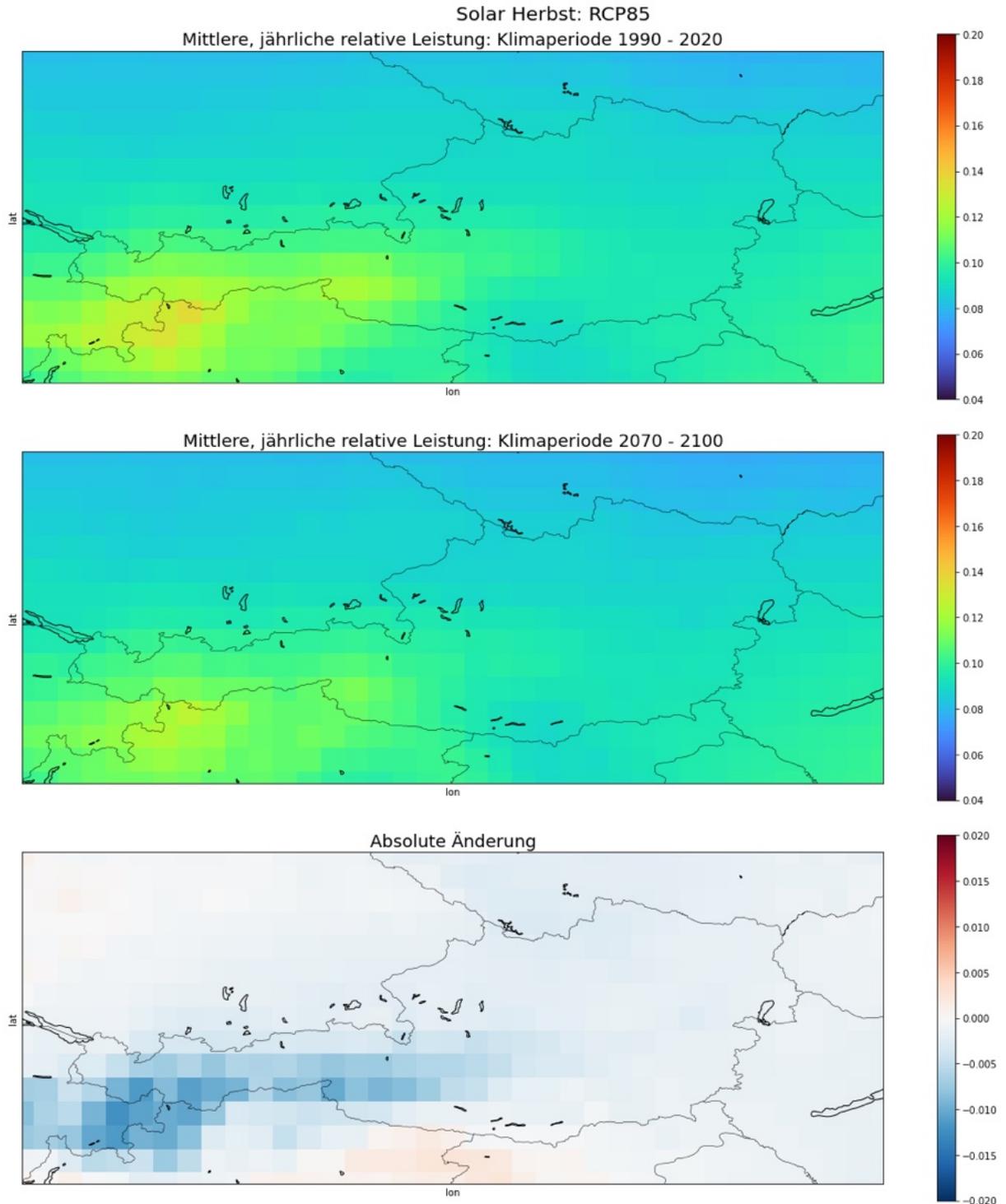


Abbildung 74: Österreich-Karten der mittleren, saisonalen (Herbst) Kapazitätsfaktoren (relative Leistung) für Solarkraft für die Klimaperioden 1990 – 2020 (oben) und 2070 – 2100 (Mitte) sowie relative Änderung der Kapazitätsfaktoren (unten) für RCP8.5

Betrachtet man die mittleren, jährlichen Kapazitätsfaktoren für Windkraft (Abbildung 75) sieht man leichte Abnahmen und leichte Zunahmen, welche keinem eindeutigen Muster folgen. In diesen Darstellungen konnten nur die außeralpinen Bereiche bewertet werden, da in den Klimamodellen die Reibung im alpinen Raum überschätzt wurde und die Werte in dieser Region unplausibel niedrig waren. Der Großteil der Windkraftherzeugungsanlagen der ÖBB befindet sich jedoch ohnehin im Norden und Osten Österreichs. Im Winter (Abbildung 76) und Frühling (Abbildung 77) hingegen ist eine leichte Zunahme der Windkraftkapazität zu erwarten, während im Sommer (Abbildung 78) und Herbst (Abbildung 79) mit leichten Rückgängen zu rechnen ist.

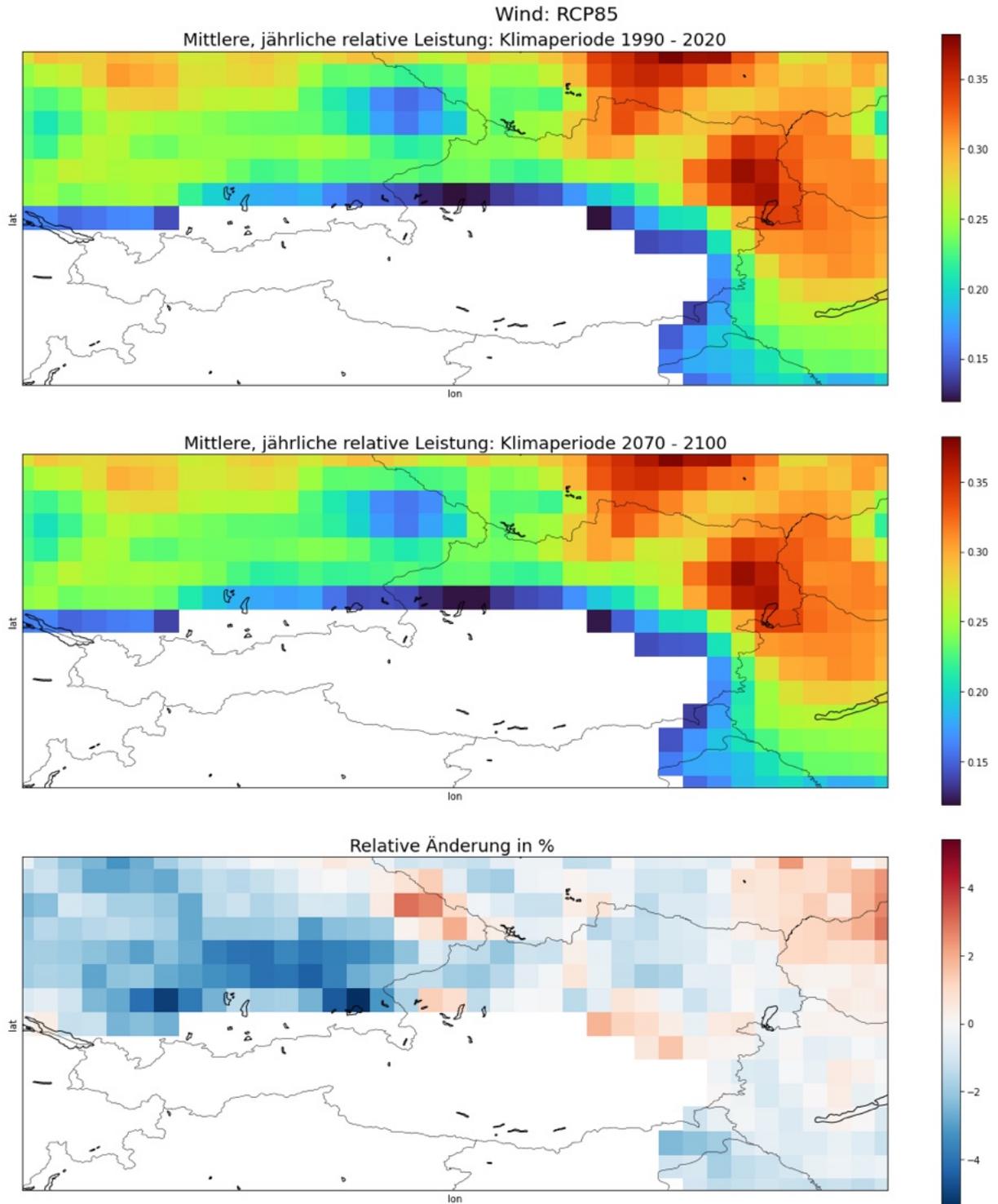


Abbildung 75: Österreich-Karten der mittleren, jährlichen Kapazitätsfaktoren (relative Leistung) für Windkraft für die Klimaperioden 1990 – 2020 (oben) und 2070 – 2100 (Mitte) sowie relative Änderung der Kapazitätsfaktoren (unten) für RCP8.5. Die alpinen Bereiche wurden aus der Darstellung ausgenommen, da in den Modellen die Reibung überschätzt wurde und die Werte in dieser Region zu niedrig waren.

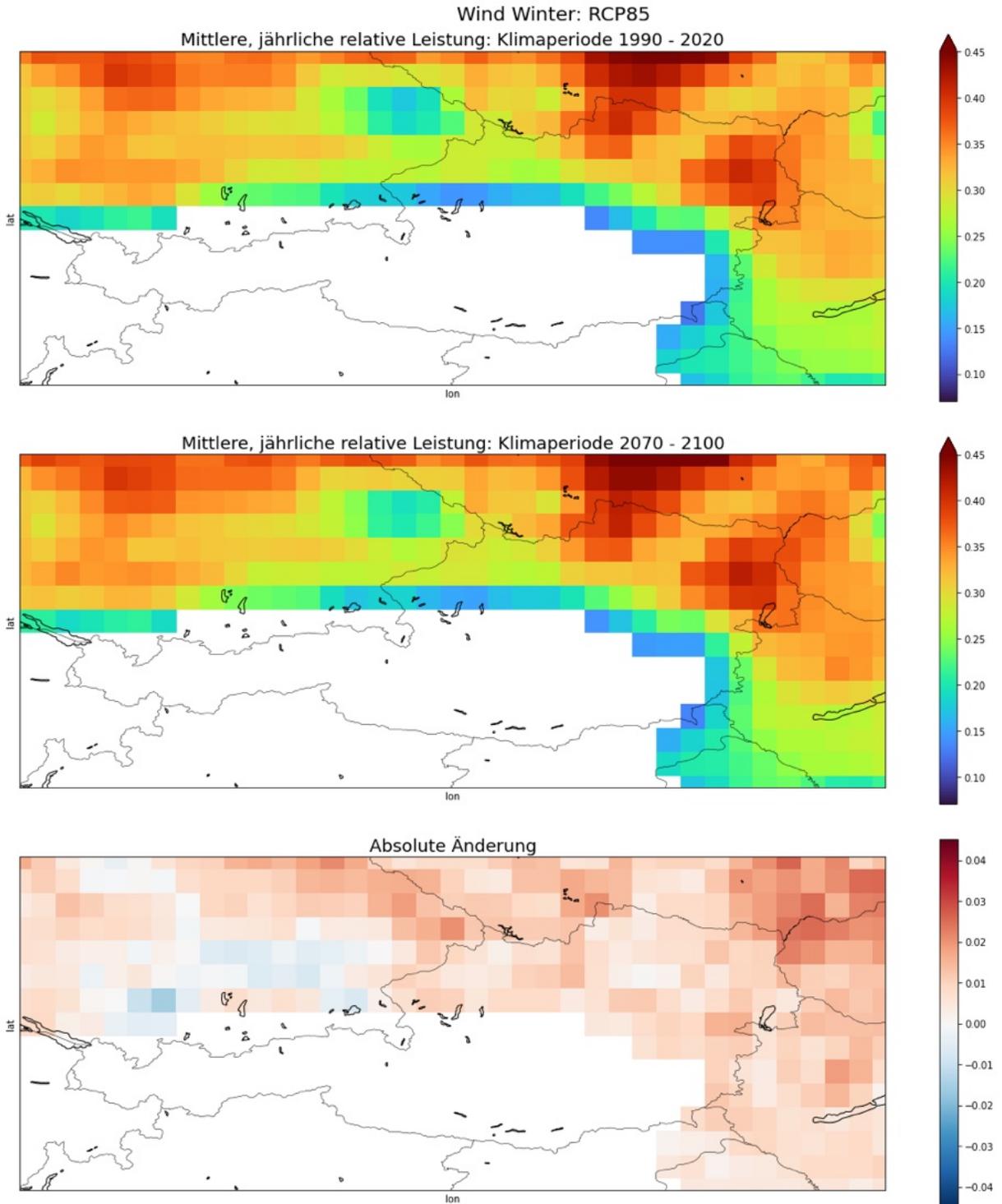


Abbildung 76: Österreich-Karten der mittleren, saisonalen (Winter) Kapazitätsfaktoren (relative Leistung) für Windkraft für die Klimaperioden 1990 – 2020 (oben) und 2070 – 2100 (Mitte) sowie relative Änderung der Kapazitätsfaktoren (unten) für RCP8.5. Die alpinen Bereiche wurden aus der Darstellung ausgenommen, da in den Modellen die Reibung überschätzt wurde und die Werte in dieser Region zu niedrig waren.

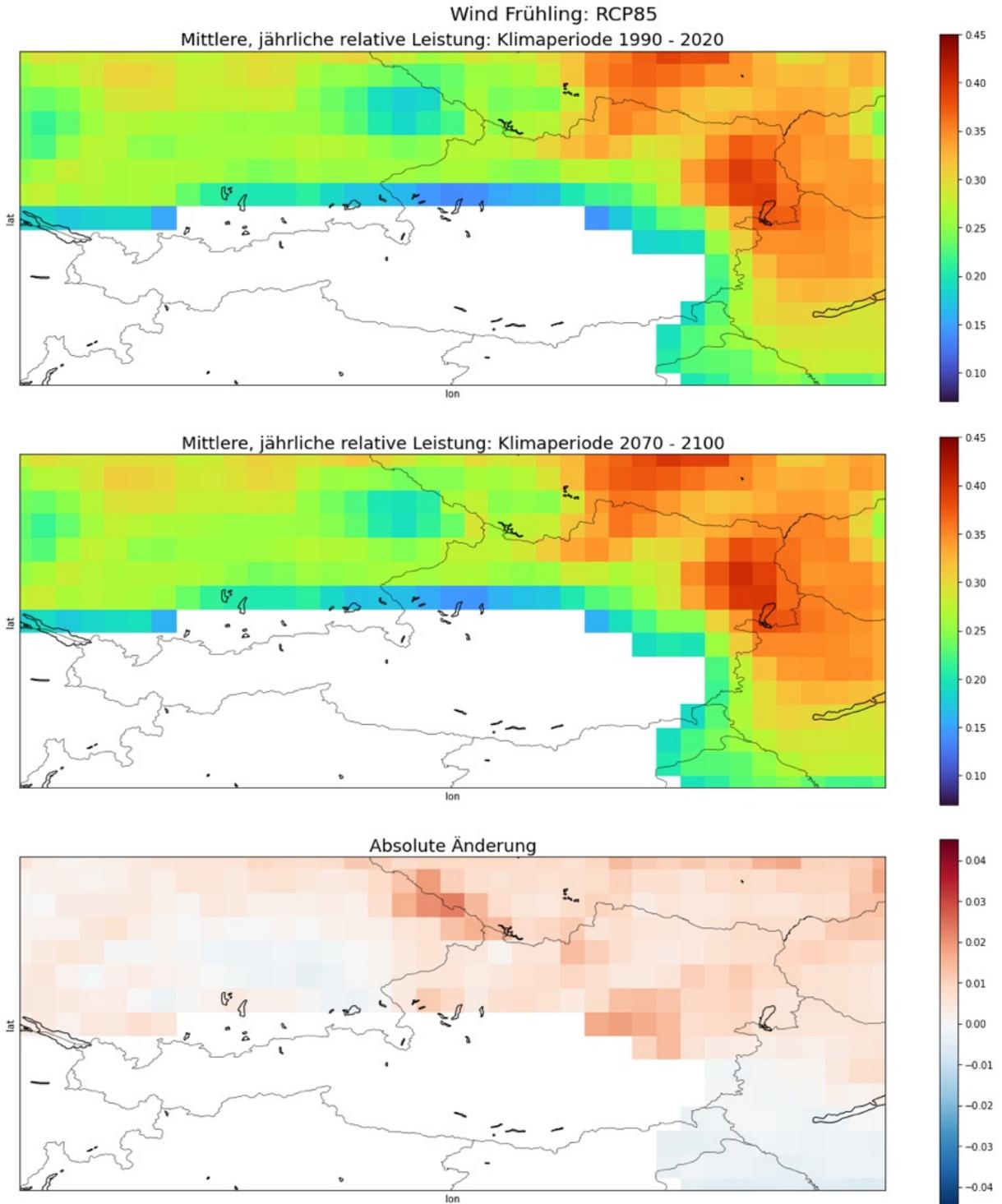


Abbildung 77: Österreich-Karten der mittleren, saisonalen (Frühling) Kapazitätsfaktoren (relative Leistung) für Windkraft für die Klimaperioden 1990 – 2020 (oben) und 2070 – 2100 (Mitte) sowie relative Änderung der Kapazitätsfaktoren (unten) für RCP8.5. Die alpinen Bereiche wurden aus der Darstellung ausgenommen, da in den Modellen die Reibung überschätzt wurde und die Werte in dieser Region zu niedrig waren.

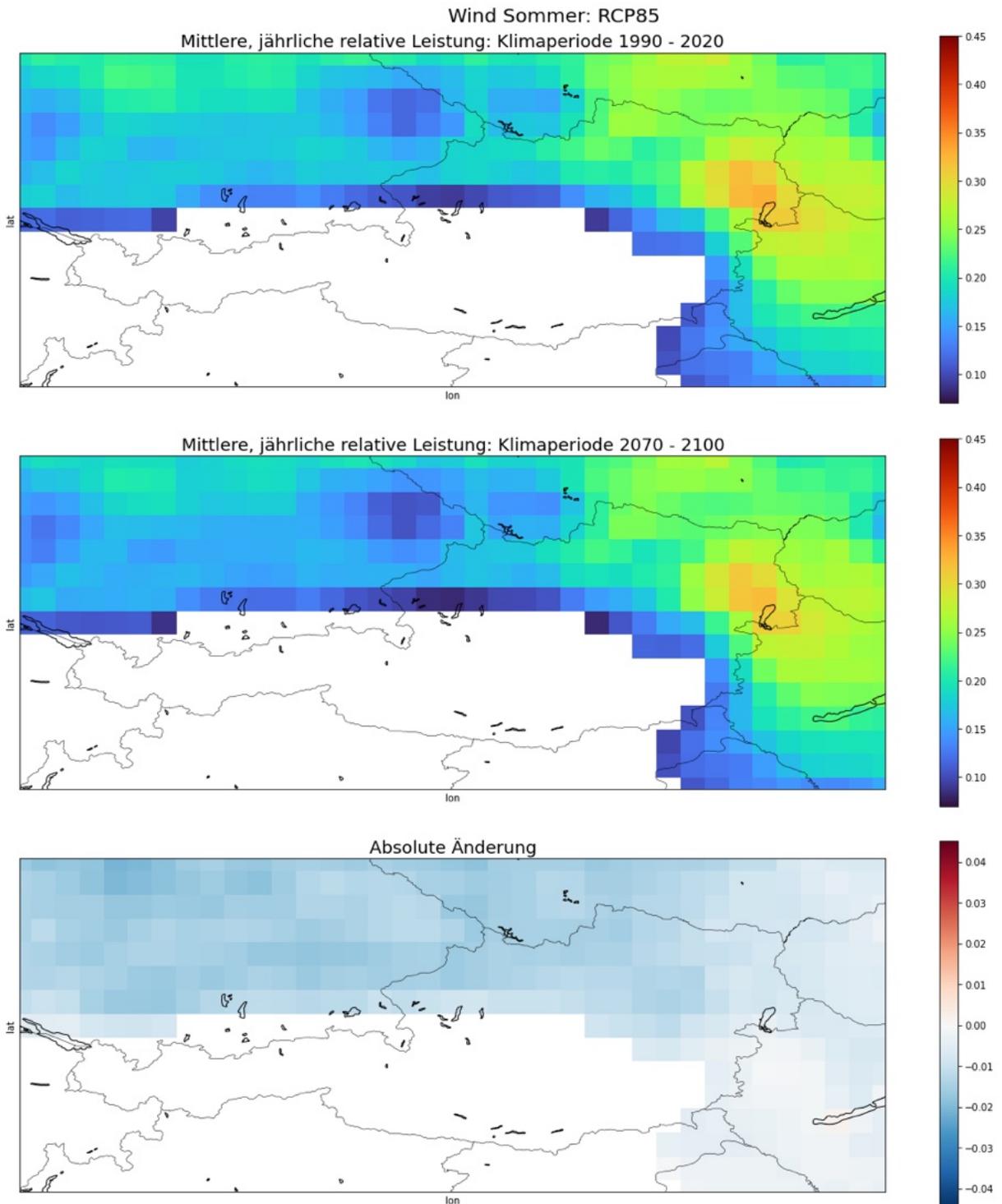


Abbildung 78: Österreich-Karten der mittleren, saisonalen (Sommer) Kapazitätsfaktoren (relative Leistung) für Windkraft für die Klimaperioden 1990 – 2020 (oben) und 2070 – 2100 (Mitte) sowie relative Änderung der Kapazitätsfaktoren (unten) für RCP8.5. Die alpinen Bereiche wurden aus der Darstellung ausgenommen, da in den Modellen die Reibung überschätzt wurde und die Werte in dieser Region zu niedrig waren.

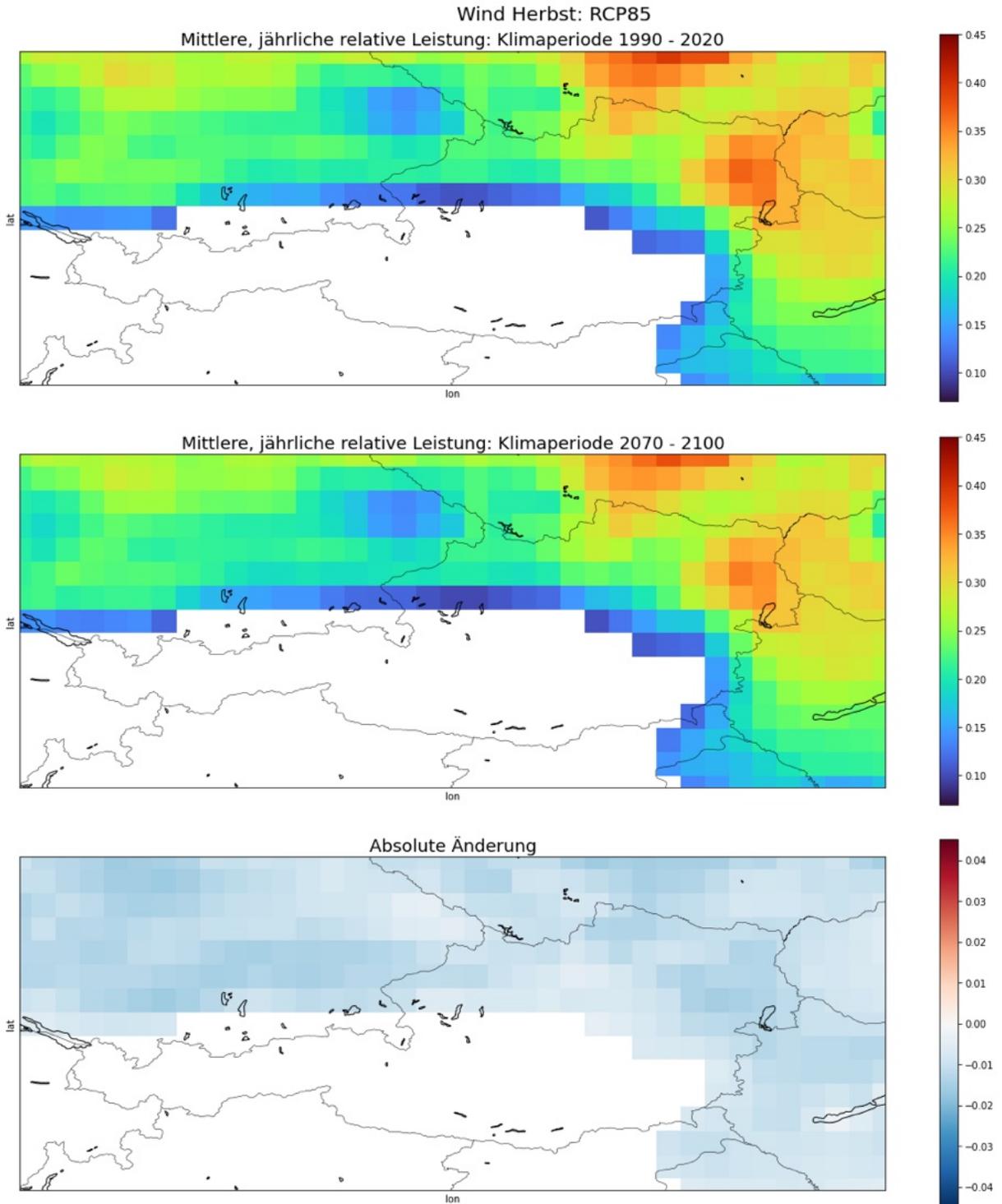


Abbildung 79: Österreich-Karten der mittleren, saisonalen (Herbst) Kapazitätsfaktoren (relative Leistung) für Windkraft für die Klimaperioden 1990 – 2020 (oben) und 2070 – 2100 (Mitte) sowie relative Änderung der Kapazitätsfaktoren (unten) für RCP8.5. Die alpinen Bereiche wurden aus der Darstellung ausgenommen, da in den Modellen die Reibung überschätzt wurde und die Werte in dieser Region zu niedrig waren.

2.2.1.4 Fazit

Solarenergiepotenzial: Langfristige Trends zeigen unterschiedliche Muster für alpine Standorte und umliegende Gebiete. Für die alpinen Standorte (Westösterreich) sind die Trends für die Szenarien RCP4.5 und RCP8.5 signifikant negativ und zeigen einen Rückgang der jährlichen Stromproduktion von 5-7% vom derzeitigen Klima bis zum Ende des Jahrhunderts. Für die anderen Teile Österreichs sind die Trends (für RCP4.5 und RCP8.5) ebenfalls signifikant negativ, aber weniger ausgeprägt mit einem Rückgang der Stromproduktion um 2-4%. In den alpinen Regionen geht diese Verringerung mit einer starken Veränderung des saisonalen Zyklus einher, mit einer Verringerung der Solarenergie im Frühling und Frühsommer um etwa 10%, während die Solarenergieproduktion für den Rest des Jahres nahezu unverändert bleibt.

Eine mögliche Erklärung: Die Klimaerwärmung führt zu verstärkter Konvektion im Alpenraum, siehe (Simon, 2023). Die Solarleistung im Frühjahr/Sommer nimmt ab, da durch weniger Schnee die konvektive Wolkenbildung früher einsetzt. Bezüglich der jährlichen Variabilität konnte kein signifikanter Trend festgestellt werden.

Windenergiepotenzial: Hier zeigen sich keine klaren Trends oder signifikanten Veränderungen bei der jährlichen Windenergieproduktion bis zum Ende des Jahrhunderts. Es ist jedoch ein signifikanter Trend der jährlichen Variabilität ersichtlich, so sinkt die Windkraftproduktion österreichweit im Sommer und Herbst, während sie im Winter und Frühling zunimmt. Dies dürfte mit den klimawandelbedingten Verlagerungen des Jetstreams zu tun haben.

Generell ist bei Klimaprognosen zu beachten, dass die zugrunde liegenden Klimamodelle den bei ihrer Publikation herrschenden Stand der Klimaforschung widerspiegeln. In Zukunft kann es vor allem dann zu Abweichungen kommen, wenn unvorhergesehene Entwicklungen, wie z.B. das frühzeitige Eintreten diverser Kipppunkte, erreicht werden.

2.2.2 Wasserkraft

2.2.2.1 Motivation und Zielsetzung

Die ÖBB produzieren derzeit rund ein Drittel des Bahnstroms mit eigenen Wasserkraftwerken, wobei bereits ein Ausbau der Produktionskapazitäten erfolgt. Im Stubachtal erfolgte 2020 der Baubeginn eines Pumpspeicherkraftwerkes mit 170 Megawatt (MW) (ÖBB-Infra 2019), was die Produktionskapazitäten nennenswert erhöhen wird. Am Standort Obervellach wird durch das Kraftwerk Obervellach II die Produktionskapazitäten an diesem Standort um mehr als 35% erhöht (ÖBB-Infra 2018).

Zu möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie, Wasserwirtschaft und Wasserkrafterzeugung in Österreich gibt es bereits eine Vielzahl an Untersuchungen (z.B. Schädler (1987), Nachtnebel et al. (1999), Hebenstreit (2000), Nachtnebel (2004), Nachtnebel (2008), Stanzel et al. (2010), BMLFUW (2011), APCC (2014), BMLFUW (2017)). Diese Untersuchungen entsprechen jedoch nicht mehr dem Stand der Technik: (i) Als Input wurden für diese Studien nicht mehr aktuelle Klimaszenarien mit grober räumlicher Auflösung und nicht mehr aktuellen Emissionsszenarien verwendet. (ii) Die bestehenden Studien berücksichtigen keine oder nur sehr beschränkt Unsicherheiten, da die Anzahl der verwendeten Klimaszenarien limitiert war. (iii) Hinzu kommt, dass vorliegende Studien die ÖBB-Kraftwerke nicht explizit abdecken und zu Veränderungen in der Energieproduktion aus den Bahnstromanlagen keine Aussagen getroffen wurden.

Bahnstrom wird in Österreich zu 100% aus erneuerbaren Energiequellen hergestellt und es kann erwartet werden, dass hier der Anteil aus PV und Wind eine größere Rolle einnehmen wird. Um auch in den nächsten Jahrzehnten ausreichend Strom für die Sicherstellung des Bahnverkehrs aus erneuerbaren Energien zur Verfügung zu haben, müssen die ÖBB abschätzen können, wie sich die Verteilung von Wind, Niederschlag und Globalstrahlung und der Zuflüsse aufgrund des Klimawandels verändern wird. Diese Prognose und Abschätzung soll daher mit aktuellen Klimaszenarien spezifisch für die ÖBB-Kraftwerke erfolgen. Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse bezüglich der Änderungen in den Zuflüssen zu den Wasserkraftwerken der ÖBB.

Grundsätzlich hat der Klimawandel drei zeitliche Dimensionen auf die alpine Wasserkraftproduktion: (i) Kurzfristig haben vermehrte Starkniederschlagsereignisse, Überschwemmungen oder Muren Einfluss auf den Betrieb und können auch eine (erhöhte) Gefahr für die Betriebssicherheit der Wasserkraftwerke darstellen. (ii) Änderungen der Saisonalität des Zuflusses zu den Speichern und des Abflusses im Allgemeinen, z.B. aufgrund von Änderungen der Schneegrenze oder früherer Schneeschmelze können den Betrieb, z.B. die Bewirtschaftung alpiner Speicher, beeinflussen. (iii) Der Klimawandel hat auch langfristige Auswirkungen, da Gletscher, derzeit wichtige Wasserquellen, verschwinden werden. Diese Änderungen wurden im Rahmen des Vorhabens für die nahe Zukunft bis 2050 quantifiziert, wobei konkret folgende Projektziele im Themenblock „Prognose des Primärenergiedargebot“ behandelt wurden:

- Entwicklung und Validierung von Niederschlags-Abfluss-Modellen für die Einzugsgebiete der ÖBB-Laufwasserkraftwerke für die Vergangenheit

- Aufarbeitung und Analyse von Klimaszenarien verschiedener Emissionsszenarien und Modellkombinationen
- Simulation der hydrologischen Prozesse und Prognose der Zuflussänderungen bis 2050 unter Klimawandel
- Aufbereitung und Analyse der Änderungssignale aufgrund des Klimawandels

Der vorliegende Endbericht dokumentiert die wesentlichen Ergebnisse und Analysen. Im umfassenden **Abbildungsband** als Anhang zu diesem Bericht finden sich zusätzliche Darstellungen der Ergebnisse, z.B. für einzelne Teilgebiete, die hier nicht näher dargestellt werden konnten, sowie zu weiteren simulierten hydrologischen Größen.

2.2.2.2 Grundlage

2.2.2.2.1 Gebietsbeschreibung

Folgende 5 Kraftwerkgruppen und deren Einzugsgebiete werden untersucht:

- Klostertal: KW Spullersee und KW Braz
- Stubaital: Ruetz-KW in Fulpmes
- Stubachtal: KW Enzingerboden, KW Schneiderau, KW Uttendorf I & II
- KW Obervellach I (& II, ab 2023)
- KW Rosenbach

Eine Übersicht der Lage aller Gebiete ist in Abbildung 80 gegeben. Es folgt eine kurze Beschreibung und Übersicht der einzelnen Kraftwerksgruppen, weiteres zur Einzugsgebieteinteilung (Name, Nummerierung, Fläche, Fließwege, etc.) befindet sich in Kapitel 2.2.2.2.3 0.

Die hydrologische Modellierung durch die Wasserkraftnutzung anthropogen stark beeinflusster Einzugsgebiete, wie das Stubachtal, stellt grundsätzlich eine große Herausforderung dar (Wesemann et al. 2018, Wesemann et al. 2018). Natürliche Prozesse der Abflussbildung, die in den Modellen abgebildet werden, sind durch die Über- und Umleitungen und (Zwischen-) Speicherung von Wasser in Speicherseen stark überprägt. Informationen zu diesen Überprägungen sind selten vorhanden. In den Einzugsgebieten der Bahnstromkraftwerke befinden sich Gletscher, die einen wichtigen Beitrag zum Abfluss liefern und entsprechend in den Modellen berücksichtigt wurden.

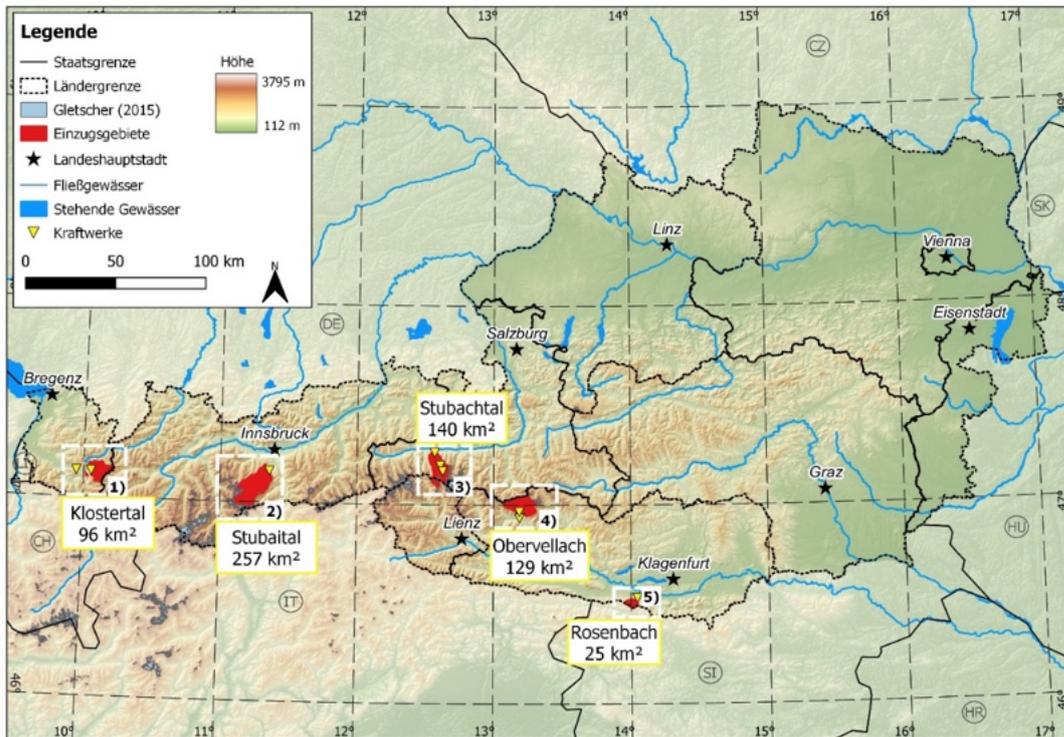


Abbildung 80 Lage der 5 Kraftwerksgruppen der ÖBB.

Klostertal

Im Klostertal in Vorarlberg befindet sich der Speicher Spullersee mit dem Kraftwerk Spullersee. Das abgearbeitete Wasser wird anschließend zusammen mit der Alfenz und einigen weiteren gefassten Gewässern (Spreubach, Vermalentobel, Klemmentobel) im Kraftwerk Braz abgearbeitet. Im Gebiet sind einige Überleitungen vorhanden (sh. Abbildung 81), die im hydrologischen Modell eingebettet sind und der Annahme unterliegen, dass das gesamte Wasser gefasst wird.

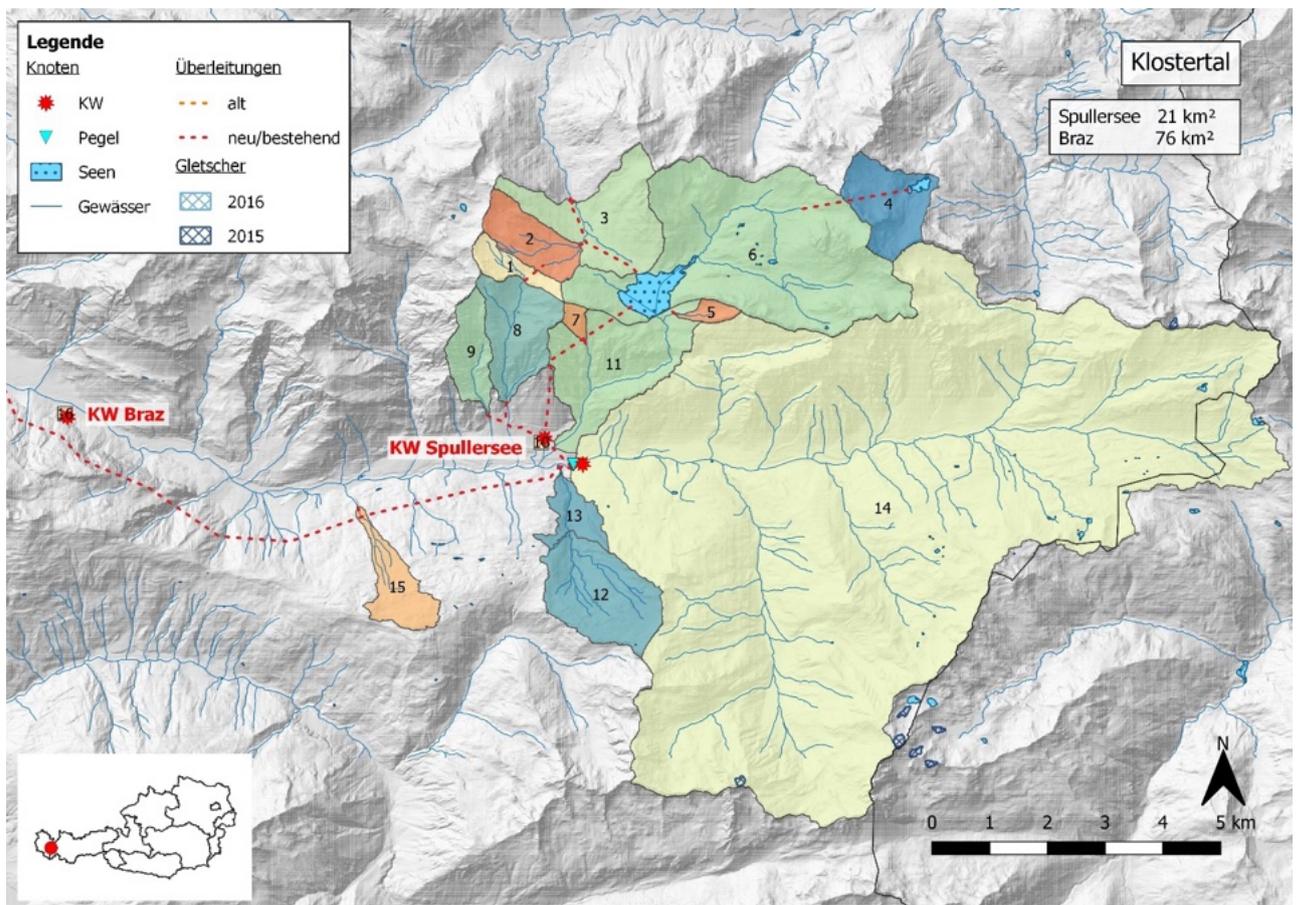


Abbildung 81. Übersicht Kraftwerksgruppe Klostertal mit Einteilung in 16 Untereinzugsgebiete (NB).

Fulpmes/Stubaital

Das Wasser am Pegel Fulpmes aus dem vergletscherten Stubaital wird im Ruetzkraftwerk bzw. Kraftwerk Fulpmes abgearbeitet. Der Alpeinerbach (NB22) wird zur Gänze gefasst und von der TIWAG zur Kraftwerksgruppe Sellrain-Silz übergeleitet. Dies wird im hydrologischen Modell berücksichtigt.

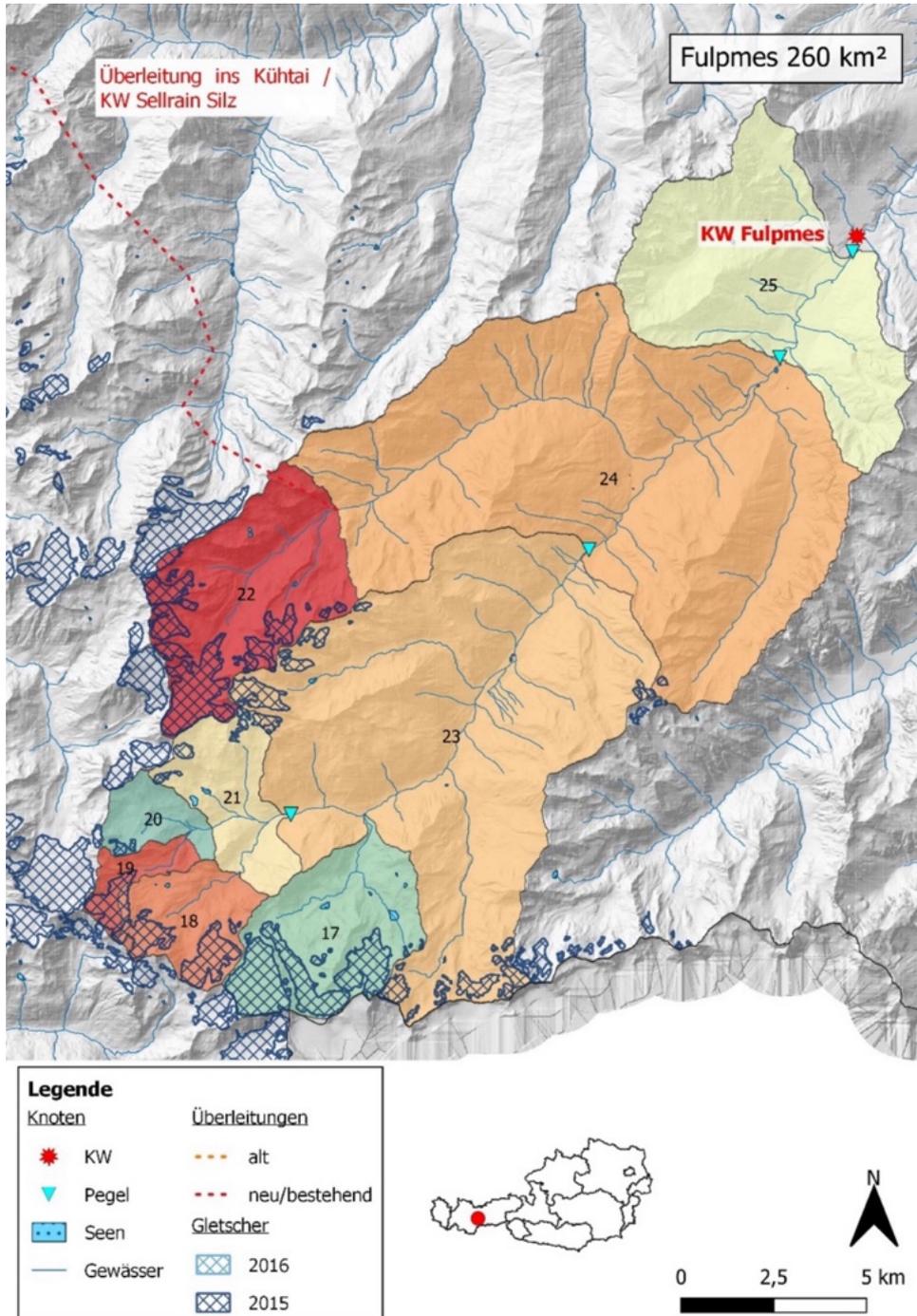


Abbildung 82. Übersicht Einzugsgebiet Stubaital mit Einteilung in 9 Untereinzugsgebiete (NB).

Stubachtal

Die komplexe Kraftwerksgruppe im Stubachtal am Alpenhauptkamm besteht aus der Hauptstufe Kraftwerk Enzingerboden, mit dem dazugehörigen Speicher Tauernmoossee und einigen Vorspeichern (Weißsee, Amersee, Salzplattensee), die über diverse Beileitungen gefasst und übergeleitet werden (sh. Abbildung 83). Das Kraftwerk Schneiderau bildet die Mittelstufe und Uttendorf I bzw. II die Unterstufe der Kraftwerksgruppe. Die starke anthropogene Beeinflussung durch die zahlreichen Überleitungen, sowie der Vergletscherungsgrad bilden hier Besonderheiten für die Modellierung.

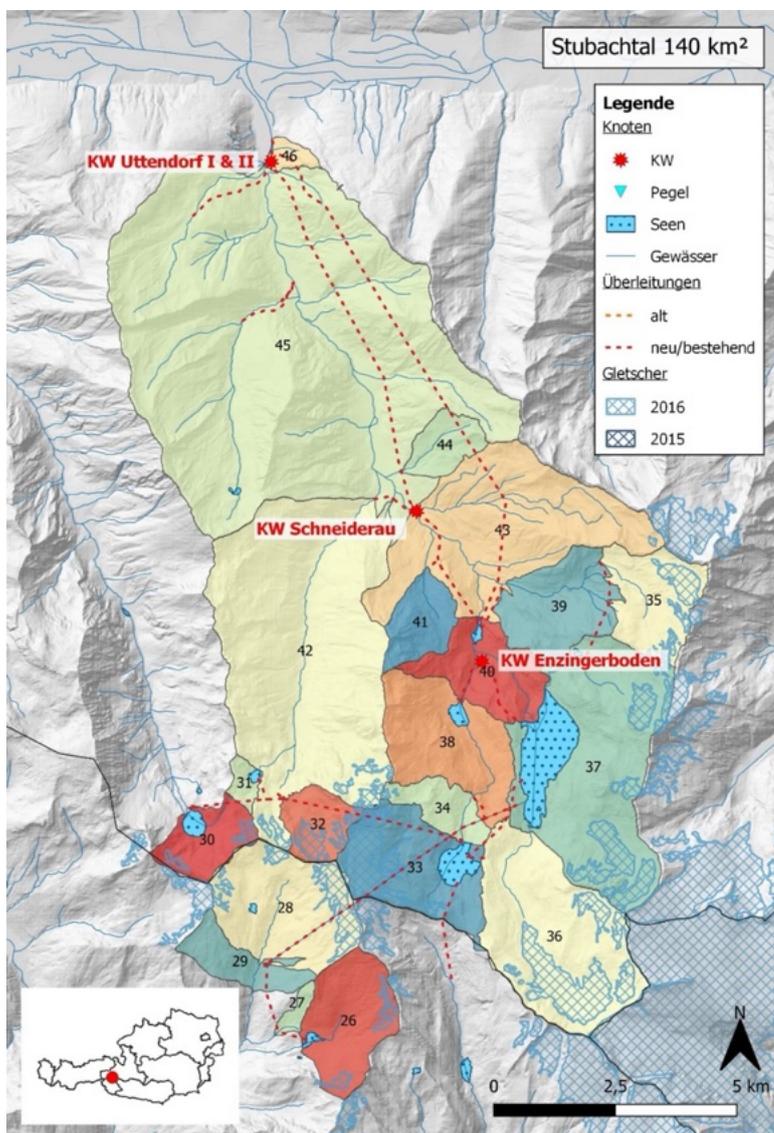


Abbildung 83. Übersicht Kraftwerksgruppe Stubachtal mit Einteilung in 21 Untereinzugsgebiete (NB).

Obervellach

Das sich im Bau befindende Kraftwerk Obervellach II wird die bestehenden Anlagen Obervellach I und Lassach ablösen. In Abbildung 84 sind die neuen sowie alten Kraftwerksstandorte und dazugehörigen Leitungen zu sehen.

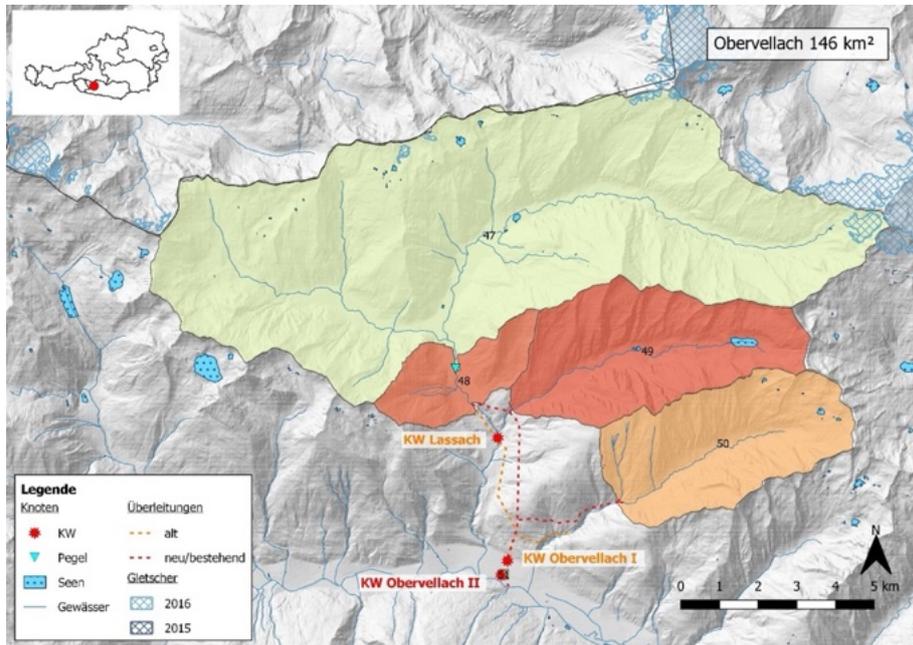


Abbildung 84. Übersicht Einzugsgebiet Obervellach II mit Einteilung in 4 Untereinzugsgebiete (NB).

Rosenbach

Das kleinste Gebiet Rosenbach in Südkärnten mit 25 km² wird nicht weiter in Untereinzugsgebiete unterteilt (sh. Abbildung 85).

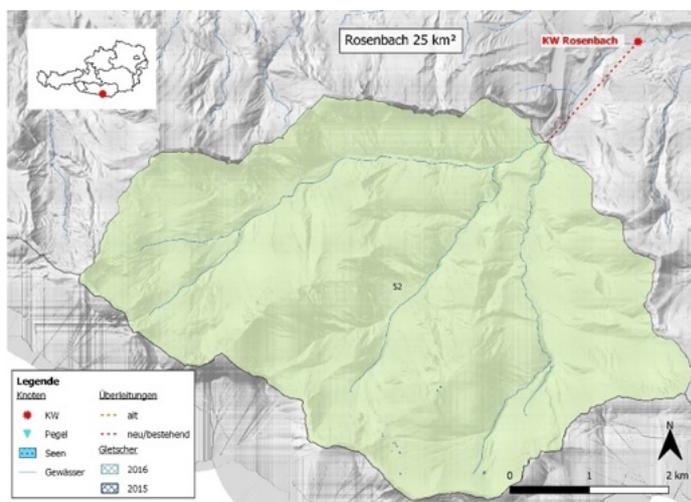


Abbildung 85. Übersicht Einzugsgebiet Rosenbach mit Einteilung in 1 Untereinzugsgebiet (NB).

2.2.2.2.2 Datengrundlage

2.2.2.2.2.1 Meteorologische Eingangsdaten

SPARTACUS

Der SPARTACUS-Beobachtungsdatensatz der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) wurde als meteorologische Eingangsgröße herangezogen. Der Datensatz liegt für den Zeitraum 1961 bis heute vor und enthält tägliche Temperaturminima (Tn) und -maxima (Tx), sowie tägliche Niederschlagssummen (RR). Tn und Tx wurden arithmetisch gemittelt um eine mittlere Tagestemperatur (Tm) zu erhalten. Die Temperaturextrema werden von der ZAMG als Extremwerte einer 24h Periode zwischen 19:00 am Vortag und 19:00 am aktuellen Tag definiert (Hiebl et al. 2016), während der Tagesniederschlag als Niederschlagssumme zwischen 07:00 und 07:00 definiert ist (Hiebl et al. 2018). Die Zeitangaben beziehen sich jeweils auf die mitteleuropäische Zeit (CET \triangleq UTC+1). Um mit den Abflussdaten des HZB (eHYD) welche jeweils für ein Zeitintervall von 00:00 – 00:00 vorliegen, zeitlich konsistent zu sein, werden folgende Gewichtungen für die SPARTACUS-Daten durchgeführt:

Niederschlag:
$$RR.00_t = \frac{7}{24} * RR_{t-1} + \frac{17}{24} * RR_t$$

Temperatur:
$$Tm.00_t = \frac{19}{24} * Tm_t + \frac{5}{24} * Tm_{t+1}$$

Die SPARTACUS-Daten liegen im ncd4-Format vor. Um diese meteorologischen Eingangsdaten den Zellen des NA-Modells zuzuweisen und diese für COSERO lesbar zu machen, wurde das am Institut entwickelte R-Paket aRastoCat verwendet.

ÖKS15

Datensätze aus „ÖKS15 – Klimaszenarien für Österreich“ werden für die Abschätzung möglicher Änderungen in der Zukunft herangezogen. Diese werden für die Simulation mit COSERO entsprechend aufbereitet. Der ÖKS15 Datensatz dient vor allem als Grundlage für die weitere zielgerichtete Umsetzung der Österreichischen Strategie zur Anpassung an den Klimawandel und beinhaltet die Treibhausgasszenarien RCP4.5 und RCP8.5. Das RCP8.5 Szenario, auch als „business-as-usual“ oder „weiter-wie-bisher“ Szenario bezeichnet, würde bei ungebremsten Treibhausgasemissionen eintreten. Hingegen wird bei RCP4.5 mit wirksamen Klimaschutzmaßnahmen gerechnet, bei dem sich die Emissionen bis 2080 im Vergleich mit heute in etwa halbieren. Eine exakte Vorhersage des Klimas ist aufgrund der Komplexität des Klimasystems, der Unzulänglichkeiten im Modellsystem, sowie Unsicherheiten bezüglich der Entwicklung der Emissionen nicht möglich. Um diesen Unsicherheiten zu begegnen, wird ein möglichst großes Ensemble an

Simulationen pro Treibhausgasszenario verwendet. So kann eine mögliche Klimaentwicklung auf eine gewisse Bandbreite eingegrenzt werden (auch wenn das tatsächlich eintretende Klima auch außerhalb dieser Bandbreite liegen kann). Für das vorliegende Projekt stehen je Treibhausgasszenario (RCP) 13 unterschiedliche Klimaprojektionen zur Verfügung. In Summe werden daher 26 Klimaprojektionen für die Zukunftssimulation mit COSERO verwendet. Die genaue Auswahl ist im Anhang zu finden (Tabelle 14).

2.2.2.2.2 Durchfluss- und Wasserstandsdaten

Durchfluss- und Wasserstandsdaten wurden von der ÖBB-Infra, dem Onlineportal des Hydrographischen Dienstes Österreich (eHYD 2022), dem Hydrographischen Dienst (HD) Tirol, und der Tiroler Wasserkraft AG (TIWAG) zur Verfügung gestellt. Die Durchflussdaten für das Stubachtal wurden aus dem Vorgängerprojekt *Hydrologisches Modell für die Zuflussprognose Kraftwerksgruppe Stubachtal* (Herrnegger et al. 2017, Wesemann et al. 2018, Wesemann et al. 2018) übernommen. Eine Übersicht aller Zeitreihen und deren Quellen ist in Tabelle 3 zu sehen.

Tabelle 3. Übersicht der Durchfluss- und Wasserstands-Zeitserien, inkl. Quelle, Koordinaten (EPSG:31255 MGI / Austria GK Central), Beginn- und Enddatum.

Durchfluss						
Gebiet	Name	Quelle	RW_31255	HW_31255	von	bis
Klostertal	Beileitungsstollen Oberer Glong	ÖBB-Infra	-248999.88	229527.51	28.06.2000	30.11.2021
	Beileitung Hangkanal	ÖBB-Infra	-247150.2	229769.6	27.10.2003	01.12.2021
	Beileitungsstollen Zürsersee	ÖBB-Infra	-242356	231114.25	01.01.2000	21.10.2021
	Druckrohrleitung Spullersee	ÖBB-Infra	-247157.66	229068.71	25.11.2003	21.10.2021
	Glongbachfassung (Unterer Glong)	ÖBB-Infra	-249311.36	227395.54	02.09.2020	15.12.2020
	Stelzsbachfassung	ÖBB-Infra	-249650.62	227167.2	02.09.2020	01.12.2021
	Beileitung Vermalenbach	ÖBB-Infra	-248389.14	226247.18	27.10.2003	15.12.2020
	Pegel Klösterle (HZB-Nr. 200592)	eHYD	-248154.33	226313.88	07.01.1998	01.01.2019
	Beileitung Klemmebach	ÖBB-Infra	-251894.11	225559.46	02.09.2020	09.11.2021
	Druckrohrleitung Braz	ÖBB-Infra	-256930.95	227141.49	25.11.2003	22.10.2021
Stubaital	Pegel Mutterbergalm	TIWAG	-164974.36	210575.95	01.01.2009	31.12.2020
	Pegel Krössbach (HZB-Nr. 202283)	eHYD	-156932.54	217773.87	07.01.1991	01.01.2019
	Pegel Kampl (HZB-Nr. 201616)	HD Tirol	-151783.06	222992.42	01.01.1951	01.10.2021
	Pegel Fulpmes (HZB-Nr. 230714)	ÖBB	-149813.85	225868.32	27.10.2003	22.10.2021
Stubachtal	Beimsee	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
	Seetoerlbach	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
	Oberer Landeckbach/Moosbach	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015

	Unterer Landeckbach	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
	Amersee	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
	Salzplattensee	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
	Eisbach/ Oberer Oedt bach	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
	Weisssee	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
	Schotterleitenbach	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
	Oberer Wurfbach	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
	Tauernmoossee	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
	Unterer Wurfbach/ Roetentrogbach	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
	Oedbach	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
	KW Schneiderau	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
	Restwasser Uttendorf	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
	KW Uttendorf Summenpegel	ZPS	-	-	01.01.2003	31.12.2015
Obervellach	Pegel Mallnitz (HZB-Nr. 212381)	eHYD	-12067	204831	01.01.1961	01.01.2019
	Kaponigbach	ÖBB-Infra	-9200.96	200540.42	01.03.1993	07.02.2022
Rosenbach	Rosenbach	ÖBB-Infra	53452.5	153861.47	04.01.2007	22.10.2021
Wasserstand						
Gebiet	Name	Quelle	RW 31255	HW 31255	von	bis
Klostertal	Pegel Zürsersee	ÖBB-Infra	-242082.31	231117.55	08.10.2009	21.10.2021
	Pegel Spullersee	ÖBB-Infra	-246615.41	228933.26	01.01.1999	21.10.2021

2.2.2.2.2.3 Gletscherinformationen

Informationen zu Gletscherflächen und -volumen wurden aus verschiedenen Quellen zusammengetragen. Zur Plausibilitätskontrolle von Größenordnungen von Gletscherschmelzbeiträgen am Gesamtabfluss wurde Koboltschnig et al. (2011) herangezogen. Die Gletscherflächen aus der Österreichischen Gletscherinventur (GI) (Fischer 2015) wurden zur Darstellung in den Karten verwendet. Der Datensatz zu räumlich verteilten Eisdicken in Österreich von Helfricht et al. (2019) wurde als Grundlage für die Abschätzung initialer Eisvolumen herangezogen. Die modellierten Gletschervolumen wurden mit jenen aus Zekollari et al. (2019) abgeglichen und auch danach adjustiert.

2.2.2.2.2.4 Wasserbilanz

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht der Wasserbilanzkomponenten für die modellierten Projektgebiete aus dem digitalen hydrologischen Atlas Österreichs (digHAO) (BMLFUW 2007). Der Werte beziehen sich auf den Zeitraum 1961 – 1990 und geben einen Anhaltspunkt um die in COSERO modellierten Wasserbilanzgrößen zu validieren.

Tabelle 4. Wasserbilanzkomponenten für die Projektgebiete (digHAO) (BMLFUW 2007).

	Klostertal	Stubaital	Stubachtal	Obervellach	Rosenbach
Gebietsniederschlag [mm]	1715	1267	1623	1452	1604
Akt. Gebietsverdunstung [mm]	350	285	289	320	546

Pot. Gebietsverdunstung [mm]	426	363	379	395	590
Mittlere Abflusshöhe [mm]	1364	982	1334	1132	1057

2.2.2.2.5 Digitales Geländemodell

Aufgrund der großen räumlichen Ausdehnung der modellierten Gebiete wurden verschiedene digitale Geländemodelle (DGM) herangezogen, um die orographischen Einzugsgebietsgrenzen zu ermitteln. Eine Übersicht ist in Tabelle 5 gegeben.

Tabelle 5. Übersicht der verwendeten DGM Produkte.

Gebiet	Bundesland	Produkt	Auflösung	Quelle
Klostertal	Vorarlberg	INSPIRE 1m ALS DTM	1 x 1 m	INSPIRE Geoportal Österreich
Fulpmes	Tirol	DGM Tirol, Land Tirol, via Open Government Data	5 x 5 m	Digitales Geländemodell Tirol - Datensätze - data.gv.at
Obervellach	Kärnten	1m, Kacheln, via Land Kärnten / kagis	1 x 1 m	Höhendaten - Download - Land Kärnten (ktn.gv.at)
Rosenbach	Kärnten	1m, Kacheln, via Land Kärnten / kagis	1 x 1 m	Höhendaten - Download - Land Kärnten (ktn.gv.at)
Österreich	-	10 m DEM Österreich Bessel Lambert Coniformal Conic	10 x 10 m	https://www.data.gv.at/katalog/dataset/land-ktn-digitales-gelandemodell-dgm-osterreich#resources

2.2.2.2.6 Landnutzung

Die Landnutzungsklassen basieren auf dem CORINE 2018 Datensatz (Umweltbundesamt 2017). Sie wurden für die Anwendung in COSERO zu 10 Klassen aggregiert (sh. Anhang Tabelle 12). Die COSERO Landnutzung pro Zelle ist in Abbildung 86 und Abbildung 87 zu sehen.

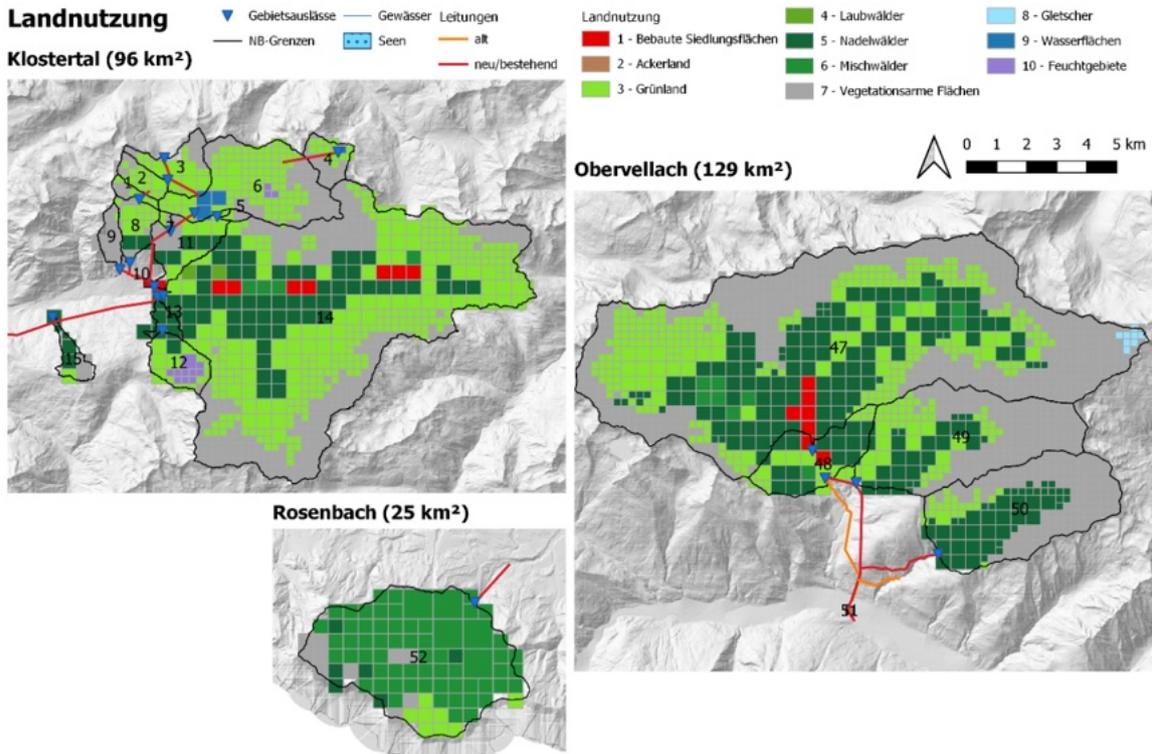


Abbildung 86. Landnutzung im Projektgebiet Klostertal, Obervellach und Rosenbach (Grundlage ist CORINE 2018).

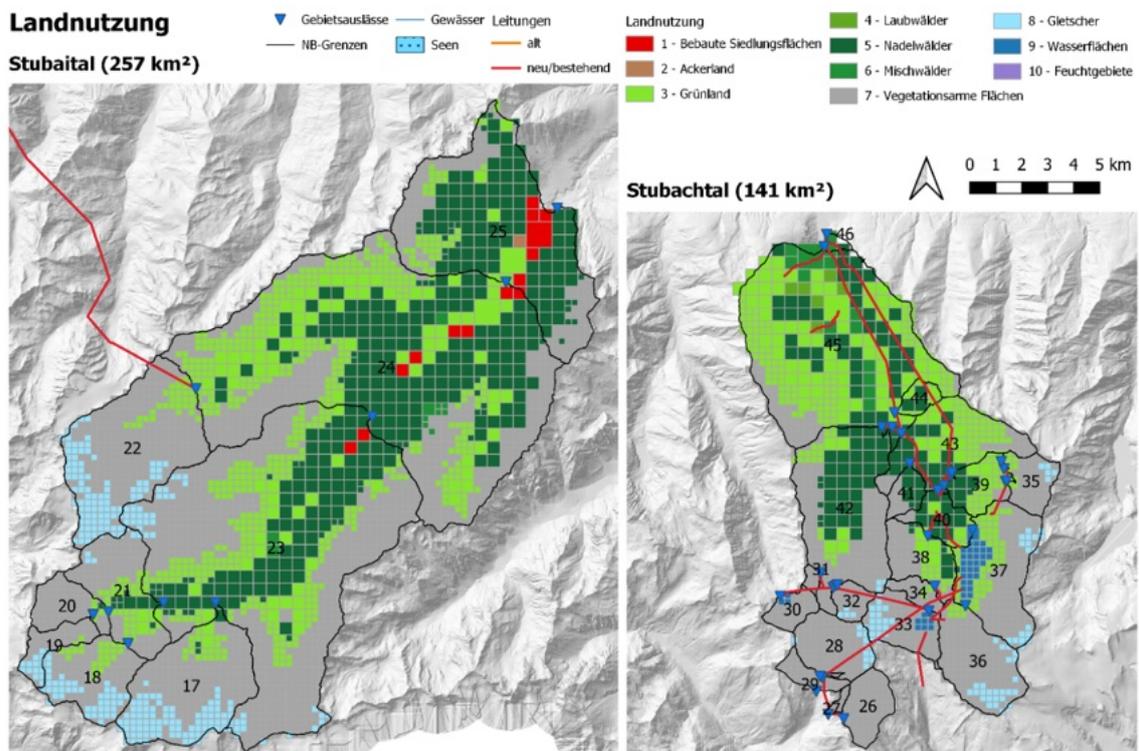


Abbildung 87. Landnutzung im Projektgebiet Stubaital und Stubachtal (Grundlage ist der CORINE 2018).

2.2.2.2.7 Aufbereitung der Datengrundlage zur weiteren Nutzung

Mittelung auf Tageswerte

Viele Zeitreihen weisen eine sehr hohe zeitliche Auflösung auf. Um einheitliche Zeitreihen für die hydrologische Modellierung zu erhalten wurden diese über den Tag arithmetisch gemittelt.

Ermittlung flächenmäßiger Abflussanteile

Für manche unbeobachtete Einzugsgebiete wurde der Abfluss aus dem beobachteten unterliegenden Einzugsgebiet ermittelt, indem man den Abfluss des Unterliegers flächig gewichtet.

NB2 Goldenbergbach

Der Obere Glong (NB1) wird ins NB2 Goldenbergbach übergeleitet, und dieser fließt weiter in den Schützbach (NB3). Die Summe aus NB1, NB2, und NB3 wird erfasst in der Messung des Hangbachkanals.

Um den lokalen Zufluss des NB2 Goldenbergbach zu ermitteln (d.h. ohne beigeleitetes NB1), wird der gemessene Abfluss von NB3 (Q_{NB3}) mit der Fläche von NB2 (A_{NB2}) multipliziert und durch die akkumulierte Fläche von NB3 (A_{NB3_akk}) dividiert:

$$Q_{NB2} = \frac{Q_{NB3} * A_{NB2}}{A_{NB3_akk}}$$

Ermittlung des lokalen Zuflusses Spullersee

Für die Kalibrierung des hydrologischen Modells soll der lokale, natürliche Abfluss ohne Zu- und Beileitungen für das Einzugsgebiet Spullersee verwendet werden. Dieser Abfluss wird jedoch nicht gemessen, sondern muss aus den vorhandenen Messungen von Zu- und Abflüssen sowie vom Wasserstand ermittelt werden. Abbildung 88 veranschaulicht, welche Flüsse berücksichtigt werden müssen und wie sich der lokale Abfluss Q_{EZG} berechnen lässt. Folgende Formel kommt zur Anwendung:

$$Q_{EZG} = \Delta V(W) + (Q_{DRL_{Sp}} - HBF) - Q_{BL_Z} - Q_{BL_{HK_S}}$$

Die Volumensänderungen in Abhängigkeit vom Wasserstand ($\Delta V(W)$), die Druckrohrleitung Spullersee ($Q_{DRL_{Sp}}$), die Hangbachfassung (HBF), die Beileitung Zürsersee (Q_{BL_Z}) und die Beileitung Hangkanal Schützbach ($Q_{BL_{HK_S}}$) müssen berücksichtigt werden. Die Durchflussmessungen der Druckrohrleitung (DRL) beinhalten auch die Hangbachfassung außerhalb des Einzugsgebiets des Spullersees. Dieser selbst wird nicht gemessen. Daher wurde die DRL um den flächenmäßigen Anteil von 2 % abgemindert ($Q_{DRL_{Sp}} - HBF = Q_{DRL_abgemindert}$).

Bei der Berechnung der Abflüsse wurde festgestellt, dass die Wasserstandsmessungen oftmals kleinen Schwankungen in den Messintervallen unterliegen, was zu einer starken Fluktuation der abgeleiteten Volumensdifferenzen zwischen zwei Zeitschritten führt. Man

erhält dadurch sehr unnatürliche Abflussschwankungen, welche so nicht verwendet werden können („Rauschen“, sh. Abbildung 89). Um aussagekräftige lokale Abflüsse zu erhalten sind daher die 24 Stunden Mittelwerte für die Abflüsse in den Speichersee gebildet worden. Dadurch kann, bei geschlossener Wasserbilanz, ein interpretierbarer Hydrograph zur Kalibrierung erstellt und negative Werte ausgeschlossen werden (sh. Abbildung 89).

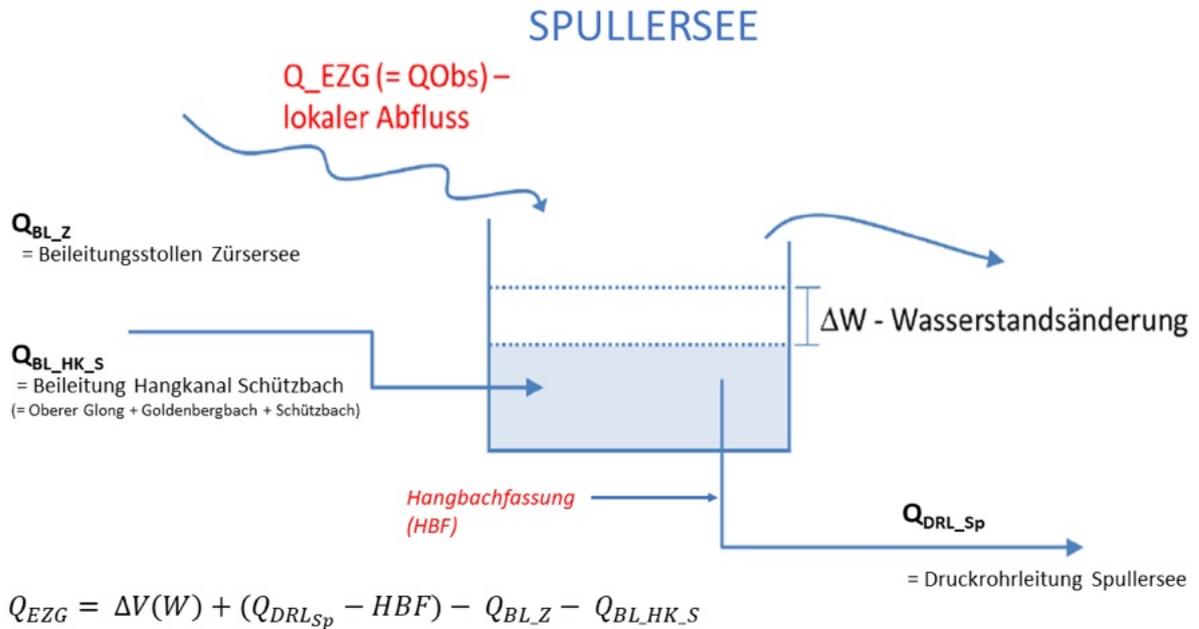


Abbildung 88. Schema der Zu- und Abflüsse des Spullersees (NB6).

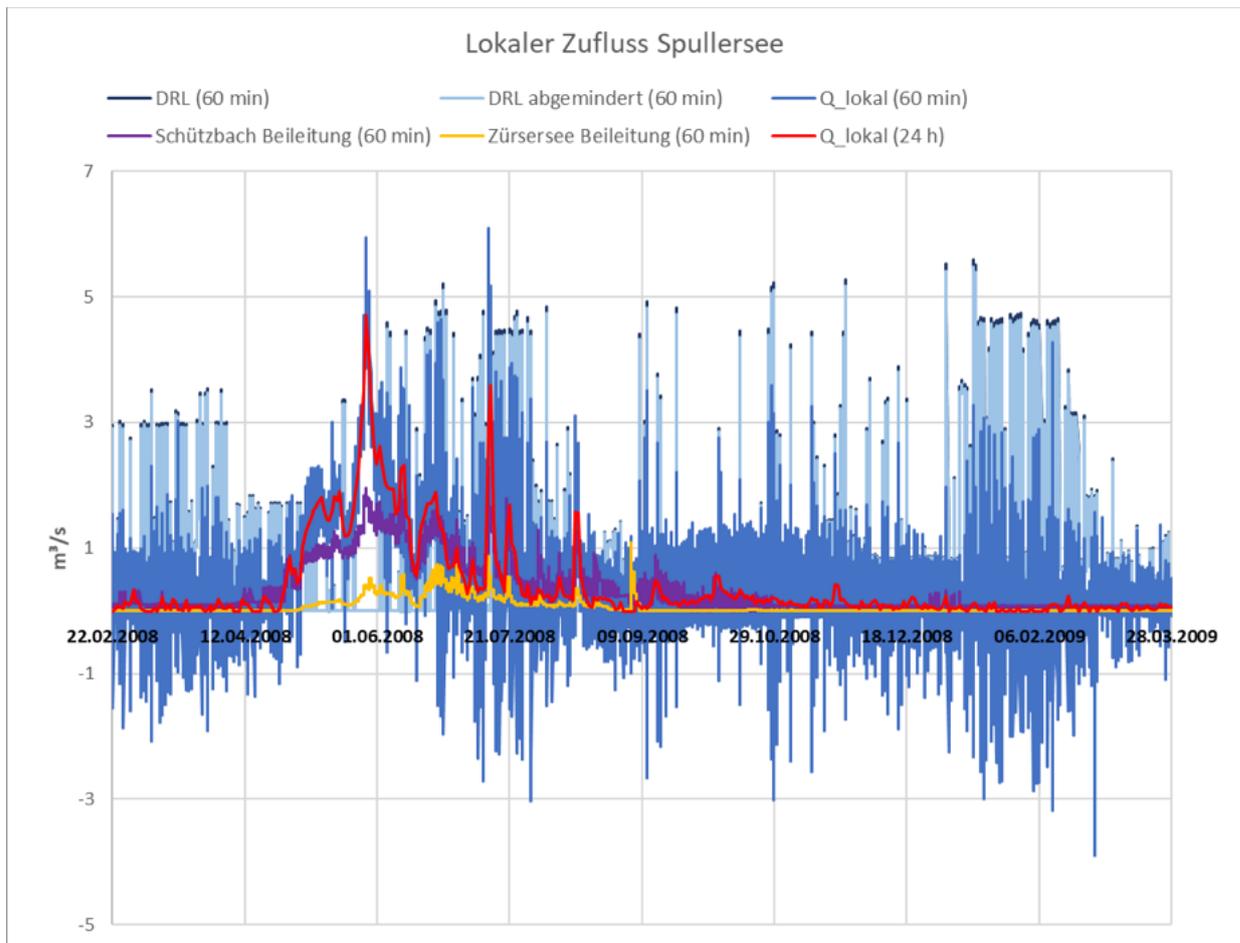


Abbildung 89. Ausschnitt der Ganglinien von Zu- und Abflüssen des Spullersees (NB6, sh. Abbildung 88). Die Volumsänderungen sind nicht dargestellt.

2.2.2.2.3 Methodik und Modellerstellung

2.2.2.2.3.1 Hydrologisches Modell COSERO

COSERO (COntinuous SEmidistributed RunOff Model) ist ein zeit-kontinuierliches, räumlich-verteilt konzeptionelles hydrologisches Modell, das am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (vormals IWHW) entwickelt wurde. Das Konzept ist mit dem HBV Modell (Bergström 1992) vergleichbar. Es werden alle wesentlichen hydrologische Prozesse berücksichtigt und abgebildet. Dazu zählt Schneeakkumulation und -schmelze, Schneetransfer, Gletscherschmelze, Evapotranspiration, Interzeption, Infiltration, zeitliche Dynamik der Bodenfeuchte, Abflussaufteilung in Oberflächen-, Zwischen- und Grundwasserabfluss, „Cell-to-Cell“-Routing zum Gebietsauslass, sowie Translation der Fließwelle im Gerinne (Gerinnerouting). Das COSERO-Modell wurde ursprünglich für die Vorhersage des Abflusses an der Enns in Österreich entwickelt (Nachtnebel et al. 1993). Seitdem erfolgt eine stete Weiterentwicklung in Form universitärer Grundlagenforschung,

aber auch über projektspezifische Anpassungen, wo wesentliche Verbesserungen in das Modell integriert wurden. Dazu zählen unter anderem Verbesserungen im Schneemodul, die Integration eines Gletschermoduls, die Möglichkeit zur automatischen Parameterkalibrierung, oder die Berücksichtigung von verteiltem Routing. Zusätzlich wurden Änderungen im Modell-Code vorgenommen, um Simulationen größerer Gebiete in einer hohen raum-zeitlichen Auflösung zu ermöglichen.

Seit 1993 wurden verschiedene Versionen von COSERO in zahlreichen wissenschaftlichen und kommerziellen Projekten auf der ganzen Welt erfolgreich eingesetzt. Die Simulationen wurden in verschiedenen räumlichen Auflösungen durchgeführt, die von Plot-Skala bis zu Einzugsgebieten von Tausenden von Quadratkilometern reichen. Für Wasserhaushaltsstudien wurde das Modell in einer monatlichen zeitlichen Auflösung, aber auch in einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten für Hochwasservorhersagesysteme angewendet. Ebenso wurde es dazu verwendet, um die Effekte von Klimawandelszenarien auf Abflussregime abzuschätzen (z.B.: Hebenstreit (2000), Stanzel et al. (2010), Frey et al. (2015), Mehdi et al. (2021)).

Die Eingangsdaten sind räumlich verteilte Zeitreihen von Niederschlag und Lufttemperatur. Die räumliche Diskretisierung des modellierten Einzugsgebiets erfolgt auf Subeinzugsgebietsebene. Am Auslass jedes Subeinzugsgebietes wird der simulierte Knotenabfluss ausgegeben. Die Untereinzugsgebiete werden weiter in „Hydrological Response Units“ (HRUs, Wood et al. (1988)) unterteilt. HRUs stellen als Hydrotope die kleinste modellierte homogene Einheit dar und werden in COSERO als Zonen (IZ bzw. NZ) bezeichnet. Wichtige Informationen wie Einzugsgebietsgliederung, Landnutzung, Seehöhe, Hydrogeologie und Bodentyp werden zur Definition der Zonen verwendet. Aktuell nehmen HRUs häufig ein Raster von einem Quadratkilometer ein (Nachtnebel et al. (2009), Schulz et al. (2016)). Der Niederschlag geht in Abhängigkeit einer Grenztemperatur als Regen oder Schnee in die Modellierung ein. Die Schneeschmelze wird anhand eines modifizierten Grad-Tag-Verfahrens berechnet (Frey et al. 2015). Die Lufttemperatur wird zur Abschätzung der potenziellen Evapotranspiration nach Thornthwaite verwendet. Basierend auf der potenziellen Evapotranspiration und dem verfügbaren Wasser des Bodenspeichers, des Interzeptionsspeichers und des Schneespeichers wird die tatsächliche Evapotranspiration berechnet (Herrnegger et al. 2015). Die Zonen bilden die Basis der räumlichen Modellierung. Jede Zone erhält den ihr zugewiesenen Input und hat ein eigenes Parameterset. Innerhalb der Zonen werden die konzeptuellen Module von COSERO durchlaufen, um so einen Zonenabfluss zu generieren. Innerhalb eines Subeinzugsgebiets

wird der Ausfluss der Zonen zum Auslass des Subeinzugsgebiets geroutet. Dort wird noch der Basisabfluss, der über das ganze Subeinzugsgebiet modelliert wird, addiert, um den (Subeinzugs-) Gebietsabfluss QABGEB zu erhalten. QABGEB wird flussabwärts geroutet und durch das Miteinbeziehen der simulierten Abflüsse der Oberlieger erhält man den simulierten Abfluss QSIM.

Wie alle hydrologischen Modelle, erfordert auch COSERO eine Kalibrierung der Modellparameter. Die Kalibrierung beschreibt dabei den Prozess der Schätzung der Modellparameter, so dass das Modell das durchschnittliche Systemverhalten richtig abbilden kann (Klemeš 1983). Nachdem die Informationen zum hydrologischen System normalerweise sehr begrenzt sind, wird als „richtiges Systemverhalten“ eine gute Übereinstimmung zwischen beobachtetem und simuliertem Abfluss angenommen. Dies bedeutet aber nicht zwangsläufig, dass die geschätzten Parameter einzelne Prozesse und Systemzustände richtig wiedergeben, da diese nicht bekannt sind und ausschließlich ein Summenwert, der simulierte Abfluss, zur Konditionierung der Parameter verwendet wird. Formeln und Erläuterungen sind im „RAINFALL – RUNOFF MODELL COSERO Handbook 2015.2“ (Herrnegger et al. 2015) zu finden. Abbildung 90 zeigt die Struktur des Modells, sowie die Lage der Modellflüsse und Systemzustände.

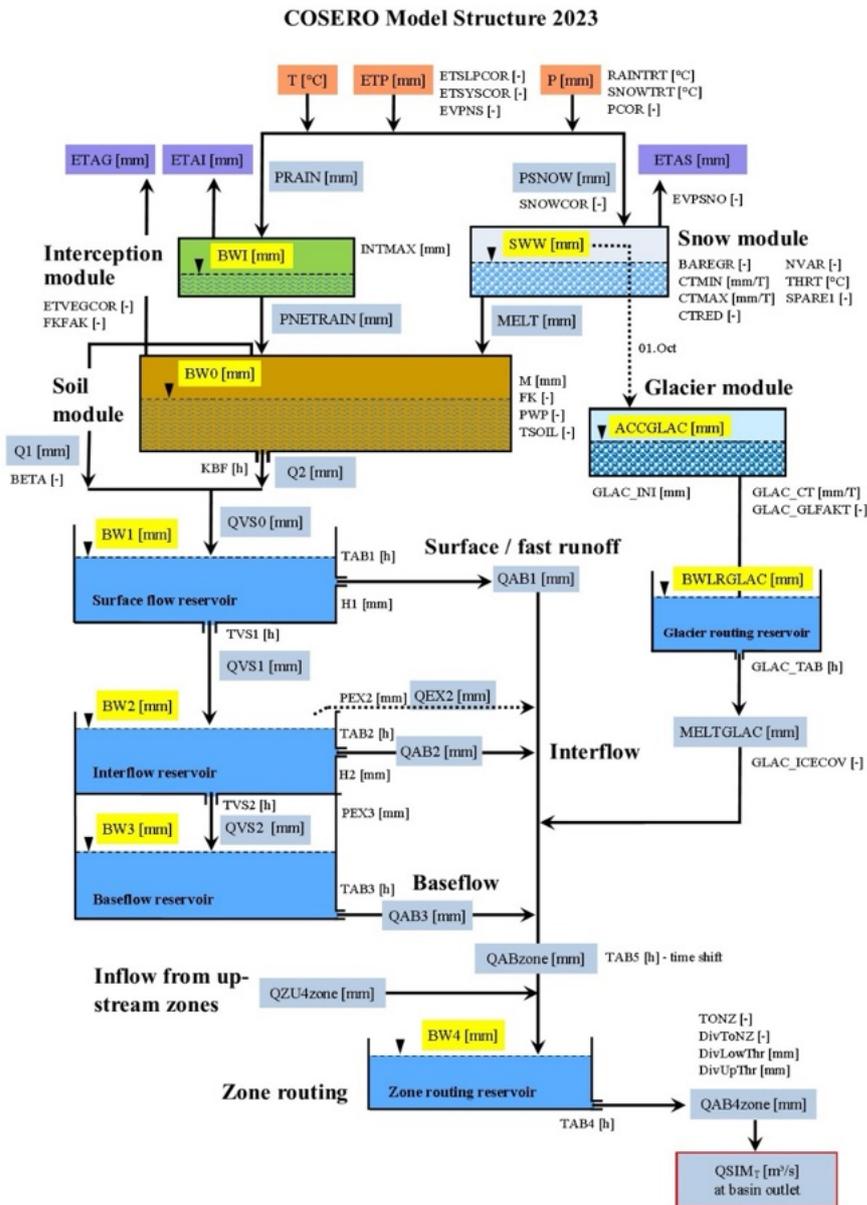


Abbildung 90. COSERO Modellstruktur: Module, Modellparameter, Systemzustände und Massenflüsse

Einzugsgebietsgliederung

Jedes der Projektgebiete wurde in mehrere Untereinzugsgebiete (NB) eingeteilt. Diese sind in Abbildung 91 zu sehen. Die Grenzen aller Untereinzugsgebiete (außer NB52) wurden mit den oben genannten DGMs in ArcGIS Map ermittelt und mit vorhandenen Plänen der ÖBB-Infra abgestimmt. Die Grenze von NB52 Rosenbach wurde aus dem digHAO übernommen. Eine Übersicht der Untereinzugsgebiete mit Nummerierung und Größe ist in Tabelle 7 gegeben. Die Nummerierung erfolgt analog zu den Fließwegen, also ein Gebiet fließt immer in ein Gebiet mit höherer Nummer. Gestartet wurde im Klostertal mit NB1

Obererer Glong bis NB16 KW Braz, über das Stubaital (NB17-25), Stubachtal (NB26-46), Obervellach (NB47-51) bis Rosenbach (NB52). Eine Übersicht der Fließwege ist in Tabelle 8 gegeben: hier sieht man, welches Gebiet im COSERO-Modell wohin entwässert.

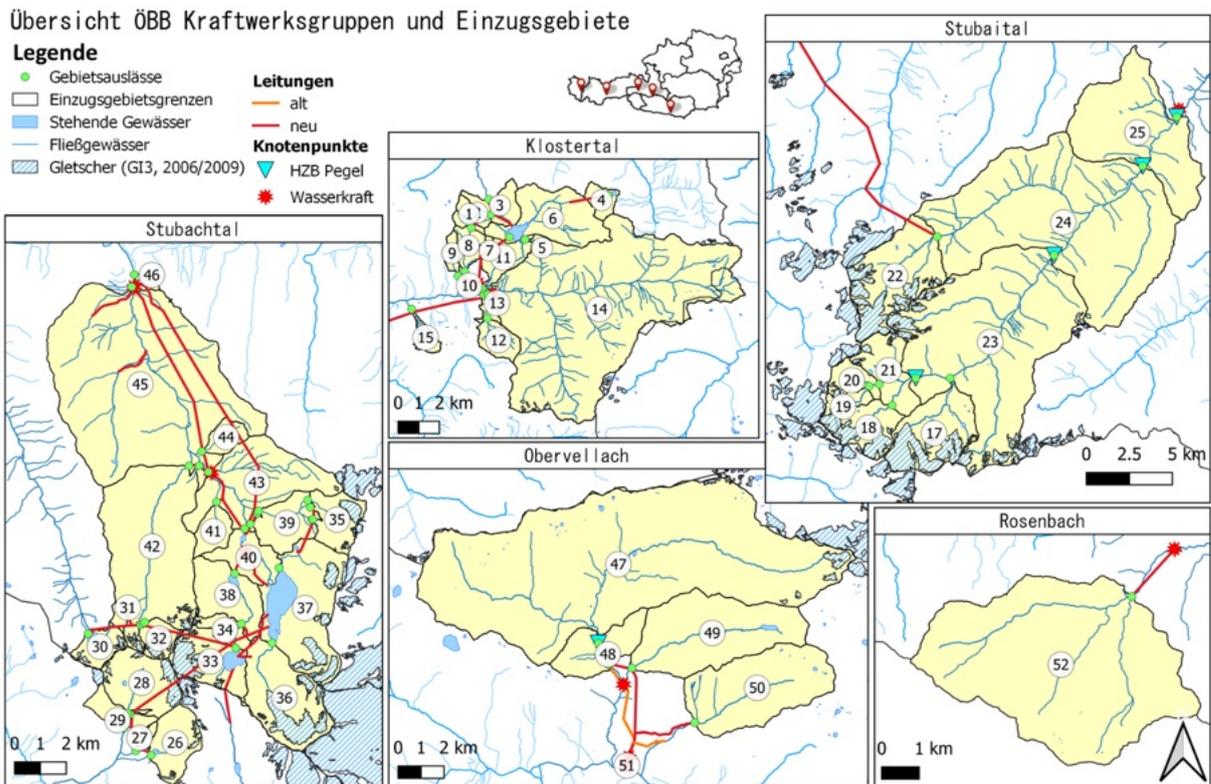


Abbildung 91. Übersicht der Untereinzugsgebiete und deren Nummerierung.

Räumliche Diskretisierung

COSERO führt Berechnungen für einzelne Rasterzellen (HRUs, auch NZ genannt) durch. Anstatt eine fixe Zellengröße zu wählen, wurde die Größe in Abhängigkeit von der Seehöhe der Zelle gewählt. Zellen unter 1000 m Höhe bekamen eine Größe von 1000 x 1000 m, Zellen zwischen 1000 und 2000 m eine Größe von 500 x 500 m, und alle höher als 2000 m gelegenen Zellen eine Größe von 250 x 250 m (siehe Tabelle 6). Dieser höhenabhängige Raster ist ebenfalls in Abbildung 86 zu sehen.

Tabelle 6. Größe der Rasterzellen in Abhängigkeit der Seehöhe.

Seehöhe der Zelle [m]	Zellengröße [m]
> 2000	250 x 250
1000 - 2000	500 x 500
< 1000	1000 x 1000

Tabelle 7. Übersicht aller Untereinzugsgebiete inklusive erste und letzte Rasterzelle (daraus lässt sich die Anzahl der Zellen je Gebiet bestimmen), mittlerer Seehöhe, höchste Zelle im Gebiet, Fläche und akkumulierte Fläche.

NB	Name	Erste Zelle (NZ)	Letzte Zelle (NZ)	Gewässer	Mittlere Seehöhe [m.ü.A.]	Max. Seehöhe [m.ü.A.]	Fläche [km ²]	Kumulierte Fläche [km ²]
1	Oberer Glong	1	10	Glongbach	2230	2371	0.64	0.64
2	Goldenbergbach	11	29	Goldenbergbach	2182	2382	1.37	2.01
3	Schützbach	30	57	Schützbach/ Spullerbach	2181	2604	3.01	5.02
4	Zürsersee	58	91	Überleitung Alpeinerbach	2367	2623	1.88	1.88
5	Goppelbach	92	94	Goppelbach	2163	2299	0.27	0.27
6	Spullersee_ges	95	247	Druckrohrleitung Spullersee	2219	2602	10.90	18.07
7	Hangbachfassug	248	150	Plattnitzerjochbach	2110	2155	0.20	0.20
8	Unterer Glong	151	270	Glongbach	1989	2277	2.08	2.08
9	Stelzistobelbach	271	278	Stelzistobel	1867	2198	1.15	1.15
10	KW Spullersee	279	279	Alfenz	1013	1013	0.00	21.50
11	Spreubach	280	296	Spreubach	1684	2139	3.60	3.60
12	Vermalentobel I	297	322	Vermalentobel	2043	2280	2.87	2.87
13	Vermalentobel II	323	328	Vermalentobel	1433	1610	0.76	0.76
14	Pegel Klösterle	329	939	Alfenz	2106	2816	66.21	94.94
15	Klemmetobel	940	945	Klemmetobel	1585	1982	1.25	1.25
16	KW Braz	946	946	Alfenz	751	751	0.00	96.19
17	Sulzenaubach	947	1226	Sulzenaubach	2737	3413	17.99	17.99
18	Fernaubach	1227	1373	Fernaubach	2789	3263	9.15	9.15
19	Daunkogelfernerbach	1374	1431	Daunkogelfernerbach	2837	3224	3.29	3.29
20	Unterbergbach	1432	1506	Ruetz	2660	3137	4.47	4.47
21	Mutterbergalm	1507	1658	Ruetz	2569	3366	10.31	27.22
22	Alpeinerbach	1659	2041	Oberbergbach	2768	3313	23.49	23.49
23	Krössbach	2042	3036	Ruetz	2409	3346	81.75	126.96
24	Kampl	3037	3904	Ruetz	2146	3122	92.76	219.72
25	Pegel Fulpmes	3905	4193	Ruetz	1994	2697	37.15	256.87
26	Beimsee	4194	4263	Seebach	2627	2955	4.13	4.13
27	Seetoerlbach	4264	4271	Landeckbach	2409	2640	0.40	0.40
28	Oberer Landeckbach/ Moosbach	4272	4371	Landeggbach	2552	2969	6.09	6.09
29	Unterer Landeckbach	4372	4401	Landeggbach	2405	2708	1.90	1.90
30	Amersee	4402	4439	Amerbach	2511	2837	2.22	2.22
31	Salzplattensee	4440	4448	Salzplattensee	2477	2566	0.52	0.52
32	Eisbach/ Oberer Oedtbach	4449	4479	Eisbach/ Oberer Oedtbach	2613	2978	1.85	1.85
33	Weisssee	4480	4569	Weissbach-Stubache	2575	2995	5.45	10.04
34	Schotterleitenbach	4570	4594	Weissbach-Stubache	2406	2812	1.65	1.65
35	Oberer Wurfbach	4595	4656	Wurfbach	2590	3059	3.63	3.63
36	Ödwinkelbach	4657	4810	Tauernmoosbach	2588	3372	9.50	9.50
37	Tauernmoossee	4811	5026	Schwarzkarlkeesbach / Tauernmoosbach	2434	3282	12.91	50.25
38	Gruensee	5027	5094	Weissbach-Stubache	2229	2808	5.47	5.47
39	Unterer Wurfbach/ Roetentrogbach	5095	5137	Wurfbach	2105	2520	4.12	4.12
40	Ausgleichsbecken Enzingerboden	5138	5158	Tauernmoosbach	1874	2331	3.58	63.42
41	Wiegenbachfassung	5159	5176	Wiegenbach	2072	2500	2.03	2.03
42	Oedbach	5177	5389	Ödbach	2196	2896	20.25	20.25
43	KW Schneiderau	5390	5483	Stubache	2090	2866	11.27	96.97
44	Schroffenbach	5484	5488	Schroffenbach	1627	1949	1.54	1.54
45	Restwasser Uttendorf	5489	5773	Stubache	1885	2685	42.32	42.32
46	KW Uttendorf Summenpegel	5774	5776	Stubache	968	1182	0.52	141.35
47	Pegel Mallnitz	5777	6727	Mallnitzbach	2252	3195	85.25	85.25
48	EN Mallnitzbach	6728	6763	Mallnitzbach	1700	2245	6.50	91.75
49	Dösenbach	6764	6998	Dösenbach	2290	2914	19.36	19.36
50	Kaponigbach	6999	7224	Kaponigbach	2303	2827	17.53	17.53

51	KW Obervellach II	7225	7225	Möll	672	672	0.00	128.64
52	Rosenbach	7226	7316	Rosenbach	1340	2091	24.53	24.53

Tabelle 8. Fließwege der Untereinzugsgebiete: Von wo (FROM) nach wo (TO) fließt das Wasser.

	Untersuchungsgebiet Name	FROM			TO	
		NB	Erste NZ	Letzte NZ	NB	NZ
Spullersee	Oberer Glong	NB1	1	10	NB3	55
	Goldenbergbach	NB2	11	29	NB3	55
	Schützbach	NB3	30	57	NB10	279
	Zürsersee	NB4	58	91	NB10	279
	Goppelbach	NB5	92	94	NB10	279
	Spullersee_ges	NB6	95	247	NB10	279
	Hangbachfassung	NB7	248	250	NB10	279
	Unterer Glong	NB8	251	270	NB10	279
	Stelzistobelbach	NB9	271	278	NB10	279
	KW Spullersee	NB10	279	279	KW Braz	948
Braz	Spreubach	NB11	280	296	KW Braz	948
	Vermalentobel I	NB12	297	322	KW Braz	948
	Vermalentobel II	NB13	323	328	KW Braz	948
	Pegel Klösterle	NB14	329	939	KW Braz	948
	Klemmetobel	NB15	940	947	KW Braz	948
	KW Braz	NB16	948	948	KW Braz	0
Fulpmes	Sulzenaubach	NB17	949	1228	NB23	2992
	Fernaubach	NB18	1229	1375	NB21	1627
	Daunkogelfernerbach	NB19	1376	1433	NB20	1506
	Unterbergbach	NB20	1434	1508	NB21	1641
	Mutterbergalm	NB21	1509	1660	NB23	2974
	Alpeinerbach	NB22	1661	2043	0	0
	Krössbach	NB23	2044	3038	NB24	3882
	Kampl	NB24	3039	3906	NB25	4190
Pegel Fulpmes	NB25	3907	4195	KW Fulpmes	0	
Stubachtal	Beimsee	NB26	4196	4265	NB46	5778
	Seetoerbach	NB27	4266	4273	NB46	5778
	Oberer Landeckbach/ Moosbach	NB28	4274	4373	NB46	5778
	Unterer Landeckbach	NB29	4374	4403	NB46	5778
	Amersee	NB30	4404	4441	NB46	5778
	Salzplattensee	NB31	4442	4450	NB46	5778
	Eisbach/ Oberer Oedtbach	NB32	4451	4481	NB46	5778
	Weisssee	NB33	4482	4571	NB46	5778
	Schotterleitenbach	NB34	4572	4596	NB46	5778
	Oberer Wurfbach	NB35	4597	4658	NB46	5778
	Ödwinkelbach	NB36	4659	4812	NB37	4996
	Tauernmoossee	NB37	4813	5028	NB46	5778
	Gruensee	NB38	5029	5096	NB46	5778
	Unterer Wurfbach/ Roetentrogbach	NB39	5097	5139	NB46	5778
	Ausgleichsbecken Enzingerboden	NB40	5140	5160	NB46	5778
	Wiegenbachfassung	NB41	5161	5178	NB46	5778
	Oedbach	NB42	5179	5391	NB46	5778
	KW Schneiderau	NB43	5392	5485	NB46	5778
	Schrofenbach	NB44	5486	5490	NB46	5778
	Restwasser Uttendorf	NB45	5491	5775	NB46	5778
KW Uttendorf Summenpegel	NB46	5776	5778	KW Uttendorf	0	
Obervellach	Pegel Mallnitz	NB47	5779	6729	NB48	6762
	EN Mallnitzbach	NB48	6730	6765	NB51	7227
	Dösenbach	NB49	6766	7000	NB51	7227
	Kaponigbach	NB50	7001	7226	NB51	7227
	KW Obervellach II	NB51	7227	7227	KW Obervellach II	0
Rosenbach	Rosenbach	NB52	7228	7318	KW Rosenbach	0

2.2.2.2.3.2 Niederschlags- und Temperaturkorrektur

Im Zuge der Kalibrierung wurde für einige Einzugsgebiete eine öhen- und jahreszeitabhängige Niederschlagskorrektur durchgeführt. Dies ist aufgrund der großen

Messunsicherheit und häufigen Unterschätzung (*undercatch*) von Niederschlagsmengen oft nötig. Aufgrund der höheren Niederschlagsmengen sowie geringeren Messnetzdicthe steigt der Korrekturfaktor mit der Seehöhe (sh. Abbildung 92). Außerdem ist die Messunsicherheit bei Schnee noch höher als bei flüssigem Niederschlag, weswegen die Korrektur in den Wintermonaten höher angesetzt ist als im Sommer. Die maximal angesetzte multiplikative Korrektur in jedem NB ist im Anhang Tabelle 13 zu finden. Ebenfalls wurde teilweise eine flächige Temperaturkorrektur angesetzt, um eine stetige Schneeakkumulation zu vermeiden. Grund für diese Anpassung ist höchstwahrscheinlich die relative grobe Auflösung der meteorologischen Eingangsdaten (1x1km²). Die genau angesetzte additive Korrekturfaktoren je NB sind im Anhang Tabelle 13 zu finden.

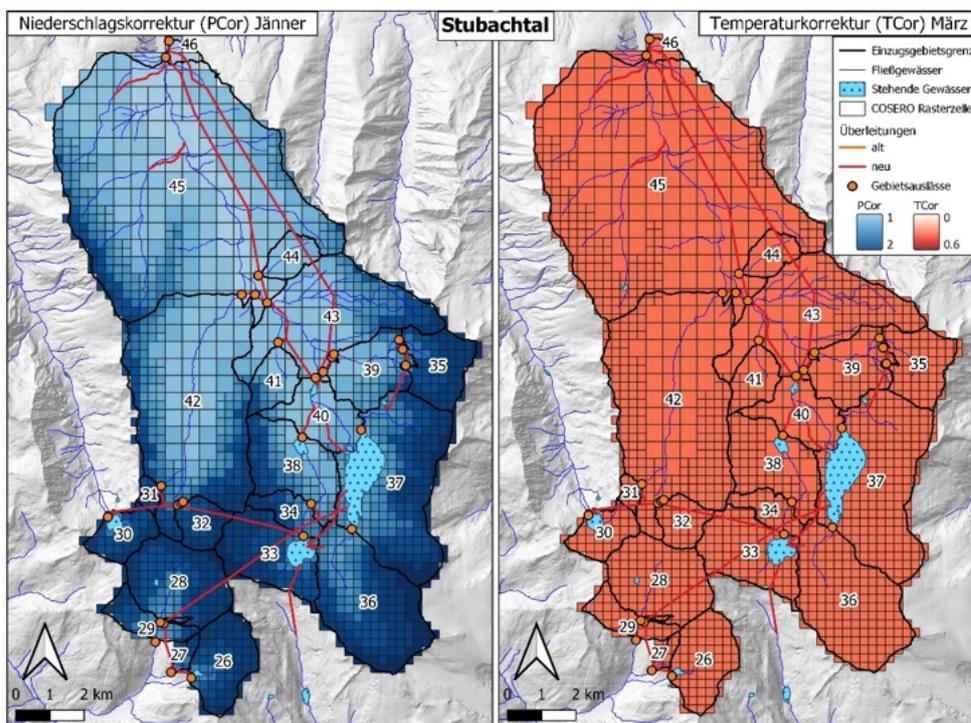


Abbildung 92. Links: Beispiel der flächigen Niederschlagskorrektur im Stubachtal für den Monat Jänner. Rechts: Konstante Temperaturkorrektur im Stubachtal im März.

2.2.2.2.3.3 Gletschermodellierung in COSERO

Um die Veränderung des Gletschervolumens und damit des Schmelzwasseranteils am Gesamtabfluss möglichst realitätsgetreu abzubilden, und vor allem die zu erwartende Abnahme des Gletscherbeitrags in der Zukunft zu berücksichtigen, ist es wichtig das Eisvolumen (bzw. die äquivalente Wassermenge) zu einem Zeitpunkt zu kennen, sowie die Schmelzrate des Gletschers abzuschätzen. Dazu wurde jeder Rasterzelle (HRU) ein Eisvolumen in Form von mm-Wasseräquivalent zugeschrieben. Diese basieren auf

modellierten, räumlich verteilten Eisdicken von (Helfricht et al. 2019) und sind in einer Auflösung von 10x10m² für ganz Österreich vorhanden. Der Datensatz basiert auf den Gletscherflächen der 3. Gletscherinventur, was je nach Gebiet der Gletscherausdehnung im Jahr 2006 oder 2009 entspricht.

In einer GIS-Software wurde die mittlere Eisdicke jeder Zelle ermittelt und mit einer angenommenen Eisdichte von 900kg/m³ in mm Wasseräquivalent umgerechnet (Mittl. Eisdicke [mm] * 0.9 = mm Wasseräquivalent). Nachdem das Initialvolumen bestimmt wurde, wurde mithilfe von modellierten Gletschervolumen von (Zekollari et al. 2019) die Schmelzrate der Gletscher approximiert. Die Autoren modellierten in dieser Studie die zukünftige Entwicklung der Gletschervolumen ab 2017 unter verschiedenen Klimaszenarien des EURO-CORDEX RCM Ensembles. Die Entwicklung der Gletschervolumen über die Jahre wurde als Vergleich zu in COSERO modellierten Volumen herangezogen. Die Zekollari-Volumina bieten auch einen Richtwert in Hinsicht auf den Zeitpunkt des kompletten Abschmelzens der einzelnen Gletscher. Teilweise wurde auch das Initialvolumen der Gletscher anhand von Zekollari angepasst, da die Eisdickenmodellierung kleinräumig Ungenauigkeiten von bis zu 31% aufweist (Helfricht et al. 2019). Die Gletschervolumenentwicklung aus der COSERO Modellierung im Vergleich zur Zekollari Modellierung sind in Abbildung 93 und Abbildung 94 für Stubai- und Stubachtal zu sehen. Insgesamt zeigen die Simulationen der Gletscherschmelze aus dem COSERO Modell sehr zufriedenstellende Ergebnisse.

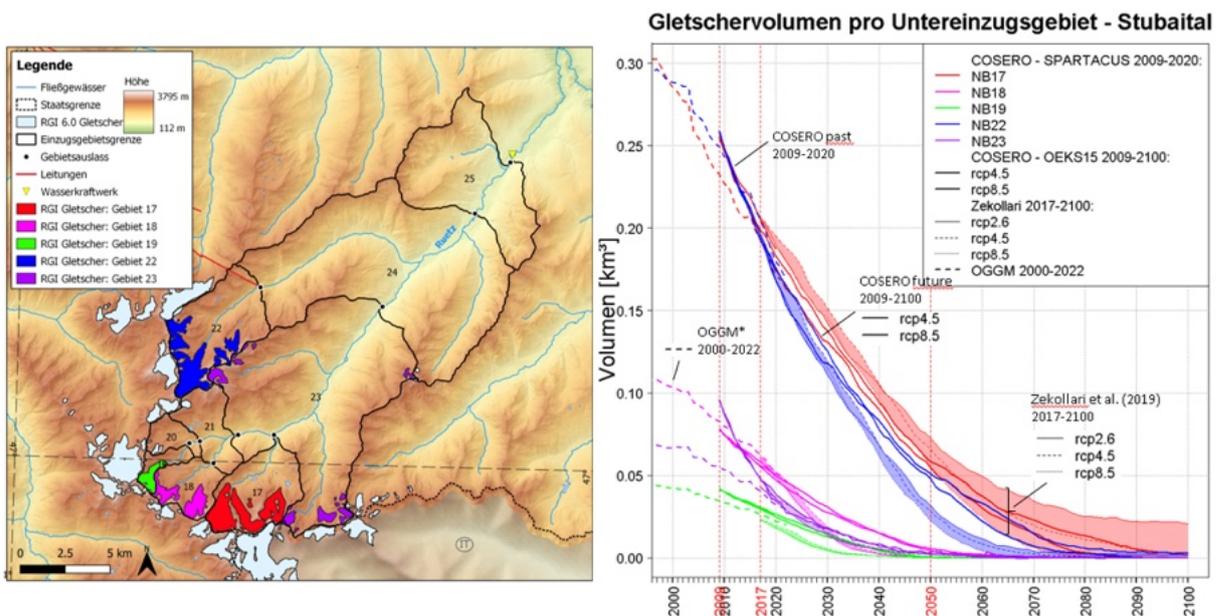


Abbildung 93. Volumen der Gletscher in den Einzugsgebieten des Stubaitals.

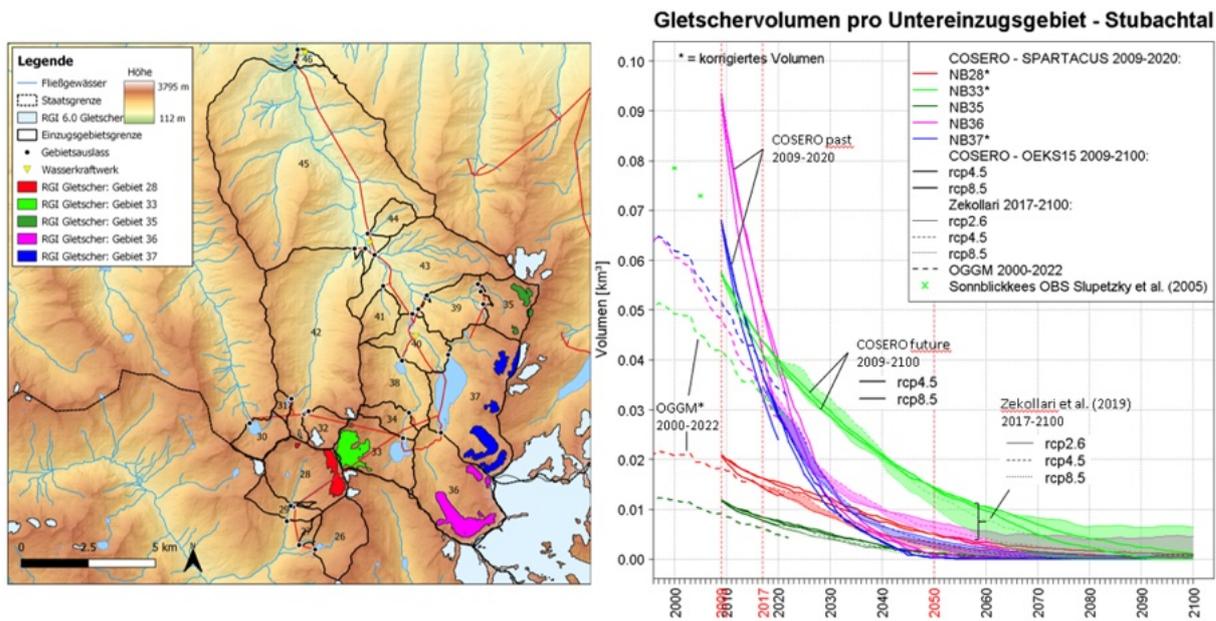


Abbildung 94. Volumen der Gletscher in den Einzugsgebieten des Stubachtals.

2.2.2.2.3.4 Kalibrierung und Validierung auf Basis von Beobachtungen

Insgesamt besteht das hydrologische Modell aus 52 Untereinzugsgebieten und 7316 Berechnungszellen. Durch die Zuweisung räumlicher Information an die Berechnungszellen in einer GIS-Software wird das Projektgebiet mit seinen abflussbestimmenden Eigenschaften im COSERO Modell abgebildet. Unter anderem werden Bodenbedeckung (CORINE), Geländetopographie (Hangneigung und Exposition), Bodenart, sowie die Geologie und einige Bodenparameter, für den Modellaufbau herangezogen. Dadurch wird ein räumlich-verteilter Grundparametersatz gewonnen, der als Basis für die Kalibrierung der Parameter dient. Die Parameter werden iterativ über die Abflussbeobachtungen angepasst. Primär wird darauf geachtet, dass die Wasserbilanz möglichst geschlossen ist, und dass der Basisabfluss richtig wiedergegeben wird. Aber auch Hochwasserscheitel sollen gut abgebildet werden. Ziel ist jedenfalls, dass die hydrologischen Modelle für die verschiedenen Einzugsgebiete der ÖBB-Kraftwerke unser Verständnis zu den hydrologischen Prozessen und Massenflüssen korrekt wiedergeben.

Nach ersten händischen Anpassungen erfolgt eine numerische Optimierung ausgewählter relevanter Parameter. Als Optimierungsalgorithmus wird der Dynamically Dimensioned Search Algorithmus (DDS) verwendet (Tolson et al. 2007). Für die multikriterielle Zielfunktion werden der Nash-Sutcliffe-Efficiency Koeffizient (NSE) und der logNSE eingesetzt. Der Nash-Sutcliffe-Efficiency Koeffizient zielt auf die allgemeine Güte des Modells ab, der logNSE gewichtet hingegen verstärkt Niederwasserperioden. Der NSE wurde mit 0.7 und logNSE mit 0.3 gewichtet. Die Beschreibung und Formeln der

verwendeten Gütekriterien befinden sich im Anhang. Im Anschluss an die numerische Optimierung der Parameter erfolgte eine händische Nachjustierung, um Artefakte aus der Optimierung zu eliminieren und ein möglichst konsistentes räumliches Muster der Parameter und Massenflüsse zu gewährleisten.

Die aus der Modellkalibrierung gewonnenen Parameter wurden für eine unabhängige Periode validiert. Die Kalibrierung und Validierung des Modells erfolgte an den insgesamt 28 Pegeln mit Abflussdaten mit einer Aufwärmphase von 2 Jahren (spin-up). Durch die anthropogene Beeinflussung in zahlreichen Einzugsgebieten (z.B. Speicherbewirtschaftung, Zuflussbegrenzungen) ist neben der Analyse von Gütekriterien und Wasserbilanzen auch eine visuelle Beurteilung notwendig.

Im Mittel ergibt sich für die Kalibrierung (2008-2020) eine Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) von 0.70, eine Kling-Gupta-Effizienz (KGE) von 0.74 und eine Korrelation von 0.86 (sh. Tabelle 9 ohne Summenpegel). Die Validierungsperiode von 1983-2007 weist ähnliche Werte auf (sh. Tabelle 10). Die Werte schwanken von Jahr zu Jahr und zwischen den Stationen, was auf die unterschiedliche Qualität der Messdaten sowie die anthropogene Beeinflussung zurückzuführen ist.

Bei der visuellen Beurteilung der Hydrographen (sh. Abbildungsband) ist grundsätzlich zu erkennen, dass die beobachtete Abflussdynamik vom Modell meist sehr gut wiedergegeben wird. Dies betrifft sowohl ansteigende und abfallende Äste im Hydrographen, Hochwasserspitzen, als auch die Abbildung von Niederwasserperioden. Auch die langjährige mittlere Saisonalität und Wasserbilanz wird vom Modell erfolgreich simuliert. Dies trifft sowohl auf die Zeitpunkte hoher Abflüsse (z.B. Schneeschmelze im Frühjahr), als auch auf Niederwasserperioden zu. Die Gütemaße je Einzugsgebiet (NB) und Jahr sind in und Tabelle 10 zu finden, die Abbildung der langjährig gemittelten Wasserbilanz befinden sich im Abbildungsband.

Es soll nochmals deutlich darauf hingewiesen werden, dass es sich um großteils stark anthropogen beeinflusste Gerinne handelt und das NA-Modell deren Abflussdynamik naturgemäß nicht perfekt abbilden kann. Weiters sind die Messdaten teilweise mit Vorsicht zu genießen. So sind beispielsweise bei einigen Messtellen die Durchflussmengen begrenzt, was in einer scheinbaren Überschätzung der Simulation und niedrigen Gütemaßen resultiert. Manche Datenreihen resultieren aus komplexen Rückrechnungen von Wasserstands- und diversen Beileitungsdaten, oder die Zeitreihen sind recht kurz oder weisen große Schwankungen von Jahr zu Jahr auf. An anderen Messtellen ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass nicht der gesamte Abfluss des Gebietes gefasst wird.

In Anbetracht dessen sind die Ergebnisse doch sehr zufriedenstellend, da bei den qualitativ hochwertigen Messdaten sehr hohe Gütemaße erreicht werden. Es kann angenommen werden, dass die natürliche Dynamik und der natürliche Abfluss sehr gut abgebildet sind.

Tabelle 9. Kalibrierung: NSE Werte für Kalenderjahre (1.1. – 31.12.), Gesamtperiode inkl. 2 Jahre Spin-up (2006 – 2020; Ges) und COSERO (Hydrologische Jahre 2008 – 2020, jeweils 1.9.-31.8.). Bei NB16 und NB46 handelt es sich um stark beeinflusste Summenpegel, daher sind die Gütemaße dementsprechend niedrig und nicht aussagekräftig.

	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	GES	COSERO
NB1	0.76	0.74	0.9	0.91	0.89	0.77	0.82	0.31	0.76	0.84	0.88	0.86	0.79	0.69	0.61	0.79	0.80
NB2	0.85	0.79	0.88	0.89	0.9	0.83	0.89	0.41	0.8	0.91	0.88	0.84	0.86	NA	NA	0.85	0.85
NB3	0.83	0.79	0.87	0.89	0.9	0.86	0.9	0.48	0.81	0.91	0.89	0.83	0.87	NA	NA	0.85	0.86
NB4	0.79	0.35	0.45	0.5	0.54	0.44	0.72	0.52	0.61	0.34	0.47	-0.54	0.36	0.34	0.26	0.46	0.49
NB6	0.83	0.71	0.88	0.9	0.87	0.78	0.89	0.84	0.72	0.91	NA	NA	NA	NA	NA	0.86	0.87
NB14	0.87	0.8	0.86	0.93	0.86	0.84	0.9	0.85	0.82	0.91	0.89	0.73	0.91	0.9	0.67	0.86	0.88
NB16	0.29	-0.55	-0.03	0.26	0.17	0.21	-1.09	-0.01	0.31	0.09	-0.35	-0.29	-0.03	-0.84	-0.04	-0.12	-0.05
NB21	NA	NA	NA	0.34	0.58	0.7	0.74	0.69	0.51	0.48	0.67	0.69	0.68	0.77	0.4	0.63	0.71
NB23	0.89	0.6	0.83	0.62	0.85	0.69	0.77	0.65	0.6	0.68	0.85	0.67	0.77	NA	NA	0.74	0.78
NB24	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.77	0.92	0.63	0.81	0.84
NB25	0.88	0.78	0.91	0.81	0.91	0.84	0.87	0.82	0.75	0.5	0.8	0.78	0.57	0.44	0.52	0.75	0.78
NB26	0.71	0.56	0.8	0.75	0.75	0.64	0.56	0.13	-1.18	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.58	0.59
NB27	0.34	0.45	0.6	0.46	0.39	0.62	0.24	-0.03	-1.43	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.37	0.37
NB28	0.75	0.79	0.9	0.84	0.75	0.86	0.76	0.82	0.66	0.85	NA	NA	NA	NA	NA	0.8	0.80
NB29	0.65	0.65	0.89	0.71	0.69	0.7	0.69	0.77	0.82	0.73	NA	NA	NA	NA	NA	0.74	0.74
NB30	0.68	0.68	0.88	0.77	0.67	0.82	0.68	0.7	0.61	0.82	NA	NA	NA	NA	NA	0.72	0.72
NB31	0.69	0.56	0.82	0.77	0.73	0.78	0.57	0.84	0.62	0.73	NA	NA	NA	NA	NA	0.72	0.71
NB32	0.75	0.75	0.8	0.59	0.8	0.85	0.73	0.68	0.79	0.75	NA	NA	NA	NA	NA	0.75	0.76
NB33	0.66	0.76	0.81	0.74	0.63	0.74	0.65	0.65	0.64	0.73	NA	NA	NA	NA	NA	0.7	0.71
NB34	0.77	0.71	0.86	0.71	0.65	0.74	0.66	0.29	-0.94	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.63	0.63
NB35	0.31	-1.49	-0.61	0.3	0.35	0.46	0.62	-0.32	0.31	-0.55	NA	NA	NA	NA	NA	0.19	0.20
NB37	0.71	0.44	0.66	0.49	0.6	0.67	0.71	0.62	0.58	0.68	NA	NA	NA	NA	NA	0.65	0.64
NB39	-1.12	0.72	0.72	0.81	0.81	0.84	0.8	0.85	0.61	0.78	NA	NA	NA	NA	NA	0.58	0.59
NB42	0.81	0.68	0.8	0.66	0.84	0.75	0.63	0.55	0.65	0.61	NA	NA	NA	NA	NA	0.7	0.71
NB43	0.07	0.56	0.83	0.56	0.7	0.58	0.67	-1.13	-2.37	0.03	NA	NA	NA	NA	NA	0.45	0.46
NB45	0.59	-0.07	0.58	0.7	0.63	0.61	0.82	0.51	0.3	0.66	NA	NA	NA	NA	NA	0.61	0.62
NB46	-1.03	-2.32	-1.66	-1.8	-2.65	-0.75	-0.44	-2.04	-0.44	-1.99	NA	NA	NA	NA	NA	-0.95	-0.87
NB47	0.8	0.85	0.9	0.87	0.91	0.87	0.87	0.91	0.84	0.93	0.83	0.9	0.86	NA	NA	0.87	0.88

Tabelle 10. Validierung: NSE Werte für Kalenderjahre (1.1. – 31.12.), Gesamtperiode inkl. 2 Jahre Spin-up (1981 – 2007) und COSERO (Hydrologische Jahre 1983 – 2007, jeweils 1.9.-31.8.). Bei NB16 und NB46 handelt es sich um stark beeinflusste Summenpegel, daher sind die Gütemaße dementsprechend niedrig und nicht aussagekräftig.

	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	GES	COSERO	
NB1	NA	0.8	0.88	0.61	0.81	0.88	0.84	0.87	0.74	0.82	0.83																			
NB2	NA	NA	-0.21	0.85	0.79	0.88	0.79	0.81	0.82																					
NB3	NA	NA	-0.2	0.85	0.77	0.9	0.79	0.81	0.82																					
NB4	NA	0.24	-0.02	0.01	0.15	0.19	0.15	0.43	0.72	0.35	0.28	0.32																		
NB6	NA	NA	-0.09	0.82	0.82	0.87	0.71	0.83	0.85																					
NB14	NA	0.78	0.8	0.83	0.91	0.76	0.32	0.9	0.85	0.88	0.78	0.83	0.82																	
NB16	NA	NA	-4.85	-0.41	-2.57	-0.25	-0.36	-0.73	-0.63																					
NB23	NA	0.85	0.58	0.57	0.67	0.88	0.53	0.64	0.64	0.45	0.55	0.7	0.56	0.66	0.76	0.72	0.8	0.6	0.68	0.71										
NB24	0.46	0.74	0.65	0.68	0.74	0.74	0.76	0.8	0.58	0.44	0.91	NA	NA	NA	NA	NA	NA	0.72	0.77											
NB25	NA	NA	NA	-1.55	0.83	0.83	0.85	0.78	0.83	0.87																				
NB26	NA	NA	NA	-7.92	0.8	0.78	0.69	0.56	0.74	0.76																				
NB27	NA	NA	NA	NA	0.46	0.36	0.52	0.45	0.46	0.49																				
NB28	NA	NA	NA	-1.66	0.7	0.81	0.87	0.79	0.81	0.81																				
NB29	NA	NA	NA	-2.58	0.74	0.63	0.78	0.65	0.71	0.71																				
NB30	NA	NA	NA	NA	NA	0.47	0.81	0.68	0.63	0.63																				
NB31	NA	NA	NA	NA	NA	0.6	0.81	0.56	0.68	0.67																				
NB32	NA	NA	NA	NA	0.5	0.66	0.74	0.75	0.68	0.69																				
NB33	NA	NA	NA	NA	NA	0.54	0.75	0.76	0.67	0.67																				
NB34	NA	NA	NA	-4.65	0.7	0.76	0.77	0.71	0.74	0.76																				
NB35	NA	NA	NA	NA	NA	0.54	0.71	-1.41	0.52	0.52																				
NB37	NA	NA	NA	NA	NA	0.46	0.71	0.44	0.57	0.57																				
NB39	NA	NA	NA	NA	NA	0.72	0.74	0.73	0.73	0.73																				
NB42	NA	NA	NA	NA	NA	0.61	0.74	0.67	0.68	0.69																				
NB43	NA	NA	NA	NA	NA	0.07	0.7	0.56	0.55	0.57																				
NB45	NA	NA	NA	-0.55	0.59	0.6	0.62	-0.06	0.41	0.44																				
NB46	NA	NA	NA	-1.93	-3.72	-0.98	-1.03	-2.31	-1.63	-1.49																				
NB47	0.3	0.82	0.93	0.9	0.93	0.88	0.88	0.87	0.93	0.86	0.92	0.92	0.88	0.88	0.85	0.78	0.91	0.76	0.85	0.72	0.9	0.88	0.83	0.9	0.78	0.91	0.85	0.84	0.88	

2.2.2.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die simulierten Zeitreihen von hydrologischen Größen und Systemzuständen für die nahe Zukunft (2021-2050) mit den Werten der Referenzperiode (1991-2020) verglichen. In den Unterkapiteln wird zunächst ein Überblick über die Auswirkung der Klimaänderung auf Gebietsebene gegeben. Zuerst die Änderung der Jahreswerte (Jahressummen bzw. -mittel, je nach Variable), und dann wird die saisonale Änderung auf Monatsbasis sowie extreme Abflussereignissen betrachtet. Abschließend findet sich eine zusammenfassende Analyse und Interpretation der Ergebnisse. **Die Ergebnisse und Simulationen aller Untereinzugsgebiete und anderer Modellkomponenten sind im Abbildungsband zu dieser Studie verfügbar.**

Wichtig anzumerken ist, dass hier ÖKS15-Referenzperiode mit ÖKS15-Zukunft verglichen werden, und nicht SPARTACUS-Ergebnisse für die Referenzperiode herangezogen werden. Grund dafür ist, dass ÖKS15 und SPARTACUS sich in der Vergangenheit teilweise stark unterscheiden. Dies ist ein bekanntes Problem und ist regional unterschiedlich stark und in unterschiedlicher Ausprägung vorhanden.

2.2.2.3.1 Änderung der langjährigen Jahresmittel bzw. der Jahressummen hydrologischer Größen

In Tabelle 11 sind die Jahreswerte der Referenzperiode (1991-2020) für diverse Wasserbilanzgrößen, sowie deren absolute Änderung in der Periode 2021-2050, angeführt. Die Ergebnisse sind pro Gebiet aufgelistet und es handelt sich um flächengewichtete Werte. Es folgt eine nähere Betrachtung der Änderungen ausgewählter Größen. Dieselbe Tabelle mit den absoluten Werten für die Periode 2021-2050 (statt Änderungen) ist im Anhang zu finden (Tabelle 15).

2.2.2.3.1.1 Lufttemperatur

Die Klimadaten zeigen unter beiden RCPs eine Zunahme der Temperatur in allen Gebieten. Die Änderung je RCP ist in Abbildung 95 und Abbildung 96 flächig für alle COSERO-Modellierungs-Zellen dargestellt. Die Unterschiede zwischen den RCPs sind bei der Temperatur nur marginal, was die Robustheit der Größenordnung der Änderung erhöht. Die Mediane Zunahme ist in allen Gebieten gleich mit +0.8 °C.

Tabelle 11. Maximaler, minimaler und medianer langjähriger Jahresmittelwert der Referenzperiode (1991-2020) für diverse Wasserbilanzgrößen, sowie deren absolute Änderung in der Periode 2021-2050.

		Flächengewichtete Auswertung über alle Zonen und Untereinzugsgebiete																			
		Klostertal (Braz)				Stubaital (Fulpmes)				Stubachtal (Uttendorf)				Obervellach II				Rosenbach			
		1991-2020		2021-2050		1991-2020		2021-2050		1991-2020		2021-2050		1991-2020		2021-2050		1991-2020		2021-2050	
		Jahreswerte		Absolute Änderung		Jahreswerte		Absolute Änderung		Jahreswerte		Absolute Änderung		Jahreswerte		Absolute Änderung		Jahreswerte		Absolute Änderung	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5
Lufttemperatur [°C]	max	3.0	3.4	+0.8	+0.7	2.0	2.3	+0.9	+0.8	3.2	3.5	+0.8	+0.8	1.9	2.1	+0.9	+0.9	6.4	6.6	+0.8	+1.1
	Median	2.8	2.9	+0.7	+0.8	1.7	1.8	+0.8	+0.8	2.9	3.0	+0.8	+0.8	1.6	1.7	+0.8	+0.8	6.0	6.2	+0.8	+0.8
	min	2.7	2.6	+0.4	+0.8	1.6	1.5	+0.4	+0.8	2.9	2.7	+0.4	+0.8	1.5	1.4	+0.4	+0.7	6.0	5.8	+0.4	+0.7
Niederschlag [mm]	max	2199	2183	+136	+276	1296	1287	+39	+73	2151	2134	+62	+192	1818	1797	+67	+172	1858	1856	-24	+152
	Median	2150	2156	+65	+74	1258	1260	+20	+61	2090	2090	+36	+91	1751	1753	+16	+65	1790	1782	-20	+52
	min	2075	2105	-55	-10	1220	1223	+28	+43	2049	2037	-2	+47	1711	1675	-6	+69	1632	1635	+39	+42
Tatsächliche Verdunstung [mm]	max	377	381	+22	+19	355	360	+27	+24	289	300	+25	+17	310	319	+32	+26	550	553	+16	+24
	Median	372	373	+14	+20	348	350	+19	+20	286	285	+18	+22	302	303	+22	+25	524	527	+19	+20
	min	354	358	+12	-1	343	341	-0	+21	281	279	+3	+8	289	292	+21	+26	504	509	+22	+19
Potentielle Verdunstung [mm]	max	524	534	+19	+11	485	497	+31	+18	534	547	+27	+14	483	492	+28	+18	633	641	+28	+24
	Median	515	518	+23	+19	479	479	+25	+23	528	529	+23	+21	475	477	+25	+23	626	628	+23	+21
	min	512	508	+4	+11	475	471	+7	+23	524	521	+8	+21	470	468	+11	+24	620	618	+15	+22
Simulierter Abfluss [mm]	max	1846	1811	+126	+302	1002	992	-12	+27	1924	1910	+14	+147	1521	1485	+37	+154	1345	1311	-55	+159
	Median	1775	1783	+60	+45	963	971	-26	+4	1858	1855	-5	+40	1441	1448	+2	+42	1262	1264	-31	+21
	min	1700	1723	-63	-22	934	934	-37	-13	1816	1808	-55	-12	1407	1380	-42	+35	1092	1091	+26	+41
Gletscherbeitrag [mm]	max	0	0	0	0	68.33	78.62	-37	-49	84.34	92.61	-55	-64	0	0	0	0	0	0	0	0
	Median	0	0	0	0	60	65	-33	-38	75	79	-48	-53	0	0	0	0	0	0	0	0
	min	0	0	0	0	57.77	57.21	-32	-35	71.76	75.07	-47	-53	0	0	0	0	0	0	0	0
Schneesmelze inkl. Regen [mm]	max	1320	1301	-13	+51	662	669	-16	-4	1199	1237	+9	-7	1073	1081	-17	+41	607	626	-18	-28
	Median	1188	1195	-3	+6	617	596	-32	-11	1137	1111	-16	+22	978	966	-64	-13	568	569	-74	-56
	min	1077	1081	-42	-47	555	546	-40	-6	1082	1067	-74	-64	900	919	-50	-117	495	470	-82	-91
Schneesmelze exkl. Regen [mm]	max	960	950	+13	-2	561	566	-14	-9	1008	1042	-25	-8	816	824	-33	+6	449	438	-22	+1
	Median	893	872	-51	+13	488	469	-39	-4	927	889	-54	+29	679	673	-55	-5	360	346	-74	-50
	min	712	694	-50	-36	407	403	-38	-19	830	826	-50	-53	584	603	-58	-96	289	267	-74	-73
Schneefallmenge [mm]	max	960	950	+1	-8	574	580	-18	-15	1030	1063	-35	-11	835	849	-48	-11	459	446	-22	-0
	Median	903	875	-67	+12	495	476	-42	-9	945	909	-59	+16	683	675	-56	-4	359	346	-70	-48
	min	707	696	-46	-46	407	407	-36	-24	837	837	-53	-61	587	596	-65	-90	274	251	-54	-56
Gletscher-Wasser-äquivalent [mm]	max	0	0	0	0	1359	1360	-732	-783	1266	1247	-793	-815	0	0	0	0	0	0	0	0
	Median	0	0	0	0	1316	1290	-762	-762	1219	1208	-808	-832	0	0	0	0	0	0	0	0
	min	0	0	0	0	1214	1190	-795	-816	1127	1086	-790	-778	0	0	0	0	0	0	0	0
Schnee-Wasser-äquivalent [mm]	max	255	246	+2	-8	136	131	-15	-0	353	363	-78	-65	397	390	-87	-49	72	67	-12	-12
	Median	228	218	-26	-3	113	111	-7	-10	284	281	-29	-33	293	269	-75	-54	60	54	-21	-9
	min	156	150	-9	-12	96	94	-10	-11	241	243	-28	-53	238	225	-58	-67	47	47	-16	-23

Veränderung der mittleren Jahrestemperatur
Vergleich der Periode 1991-2020 mit der Periode 2021-2050

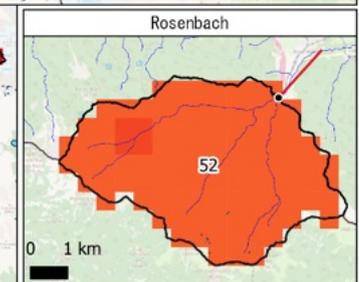
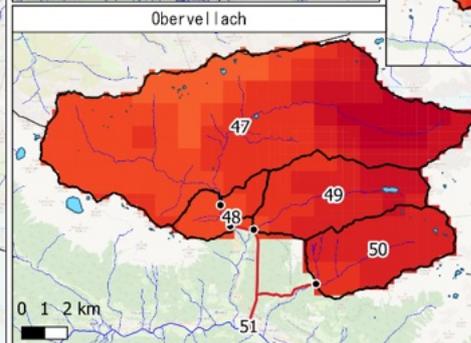
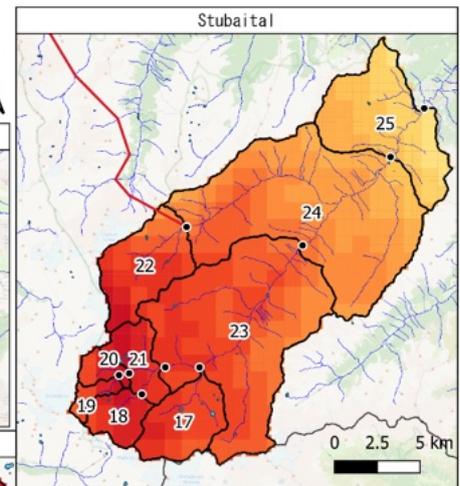
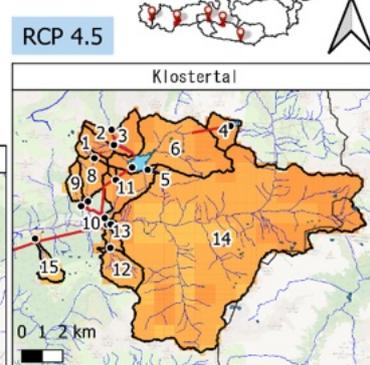
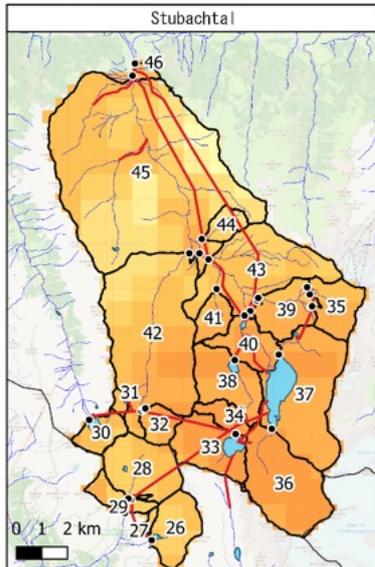


Abbildung 95. Absolute flächenverteilte Veränderung der mittleren Jahrestemperatur unter RCP4.5 für alle Gebiete.

Veränderung der mittleren Jahrestemperatur
Vergleich der Periode 1991-2020 mit der Periode 2021-2050

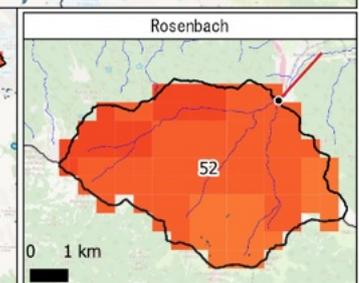
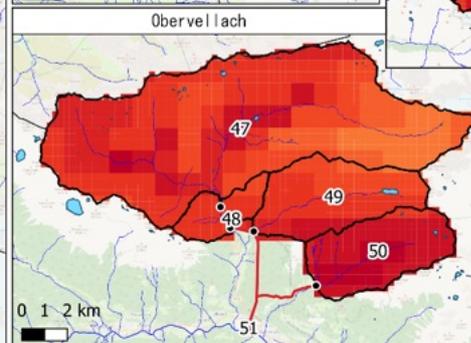
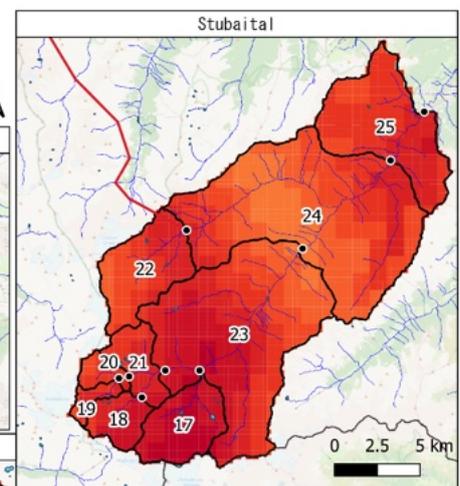
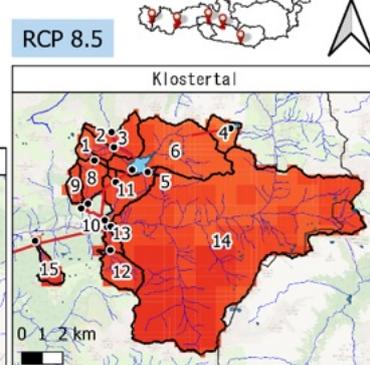
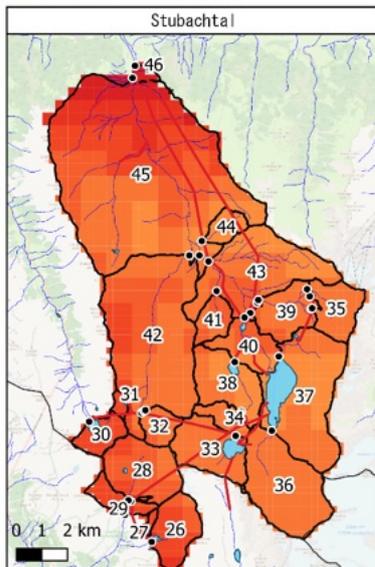


Abbildung 96. Absolute flächenverteilte Veränderung der mittleren Jahrestemperatur unter RCP8.5 für alle Gebiete.

Abbildung 97 zeigt am Beispiel des Einzugsgebietes des Pegels Ruetz die Entwicklung der mittleren Jahrestemperatur für RCP4.5 und RCP8.5. Für die anderen Gebiete wird auf den Abbildungsband verwiesen. Die langjährigen Mittelwerte für jeweils 30-Jahre Perioden werden als gelb-strichlierte Linien dargestellt. In der Periode 1991-2020 ist zu erkennen, dass ein Unterschied zwischen dem Mittelwert der RCMs und dem Spartacus-Datensatz besteht. Die RCMs haben die Vergangenheit im Vergleich zu kühl abgebildet. Die dunkelblaue Linie stellt den Median der verschiedenen RCMs dar. Die blauen Flächen im Hintergrund repräsentieren dabei die Streuung und Bandbreite der RCM-Ergebnisse.

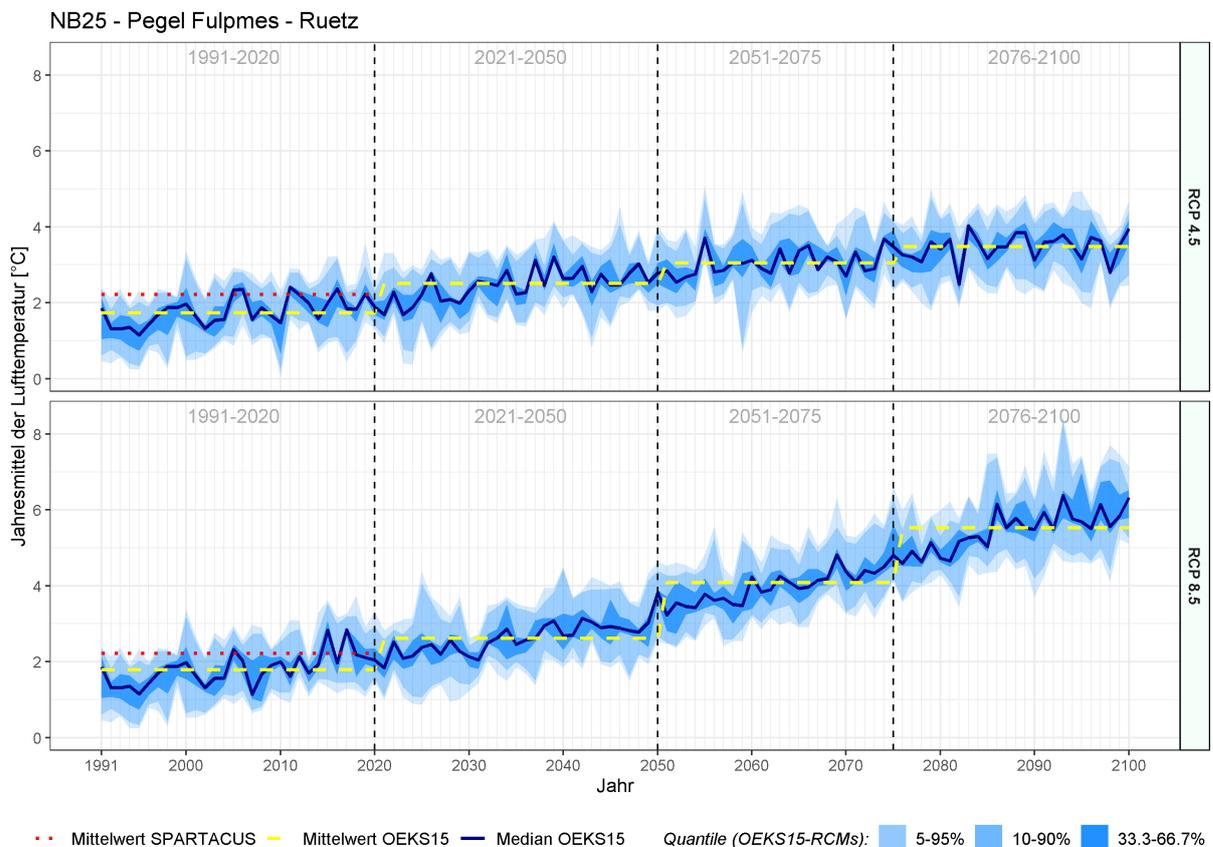


Abbildung 97. Zeitlicher Verlauf der mittleren Jahrestemperatur am Beispiel der Ruetz, dargestellt für RCP4.5 (oben) und RCP8.5 (unten).

2.2.2.3.1.2 Aktuelle Evapotranspiration

Getrieben von der Temperatur- und Niederschlagszunahme nimmt auch die aktuelle Evapotranspiration im Median in allen Gebieten und unter beiden RCPs um ca. +20 mm zu. Abbildung 98 zeigt beispielhaft die Änderungen dieser Wasserbilanzgröße für die Möll. Zu erkennen ist eine deutlich stärkere Zunahme der aktuellen Verdunstung für RCP8.5, was mit der höheren Temperaturzunahme in diesem Emissionsszenario erklärt werden kann. Zu erkennen ist auch, dass für die Periode 1991-2020 im Vergleich zu den Simulationen

mit Spartacus-Daten, eine niedrigere aktuelle Verdunstung mit den RCM-Daten berechnet wird. Dies liegt daran, dass die Temperaturen in den RCMs in dieser Periode im Vergleich kühler waren.

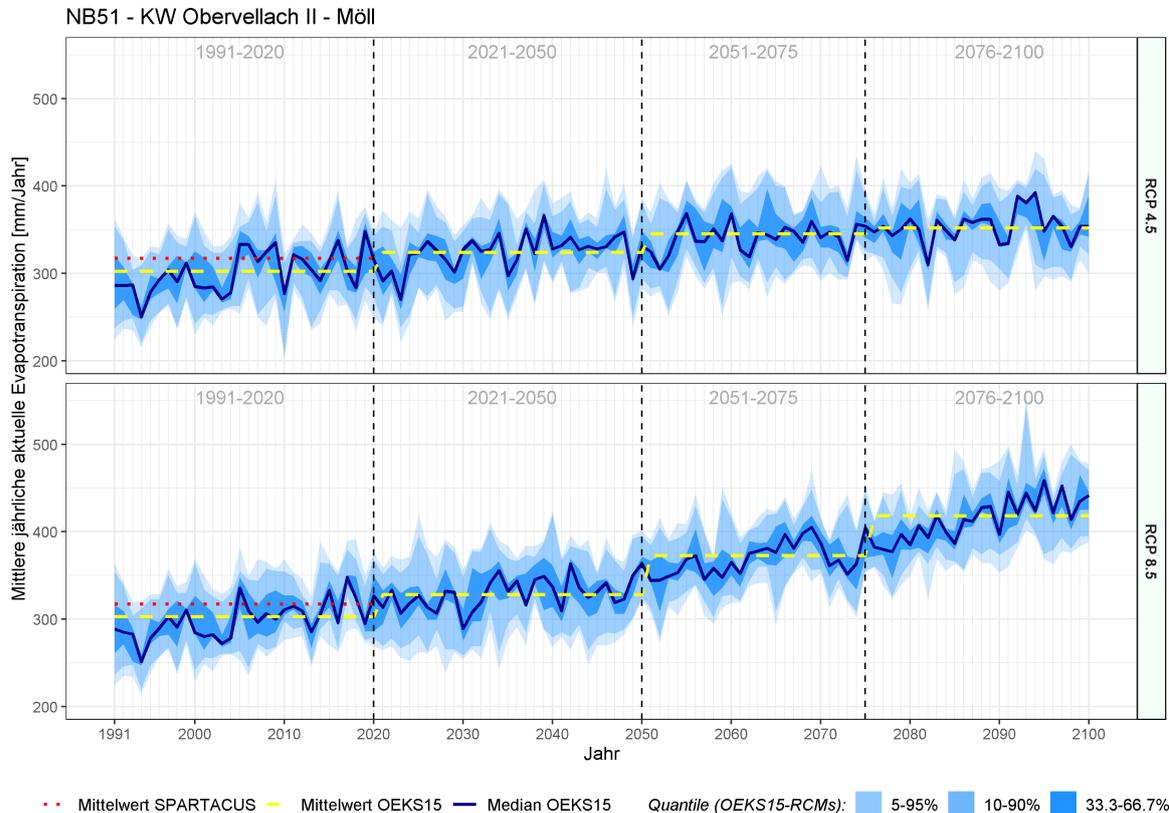


Abbildung 98. Zeitlicher Verlauf der mittleren aktuellen Evapotranspiration am Beispiel der Möll (KW Obervellach II), dargestellt für RCP4.5 (oben) und RCP8.5 (unten).

2.2.2.3.1.3 Niederschlag

Die Klimadaten zeigen unter beiden RCPs eine leichte Zunahme des Niederschlags in allen Gebieten bis auf Rosenbach. Die Änderung je RCP ist in Abbildung 99 und Abbildung 100 flächig für alle COSERO-Zellen dargestellt. Man erkennt eine größere Zunahme unter RCP8.5. Die größte absolute Zunahme im Median ist mit +91 mm im Stubachtal zu verzeichnen. Der geringste Unterschied zwischen den RCPs ist im Klostertal, während der größte im Rosenbach vorliegt.

Veränderung des mittleren Jahresniederschlags
Vergleich der Periode 1991-2020 mit der Periode 2021-2050

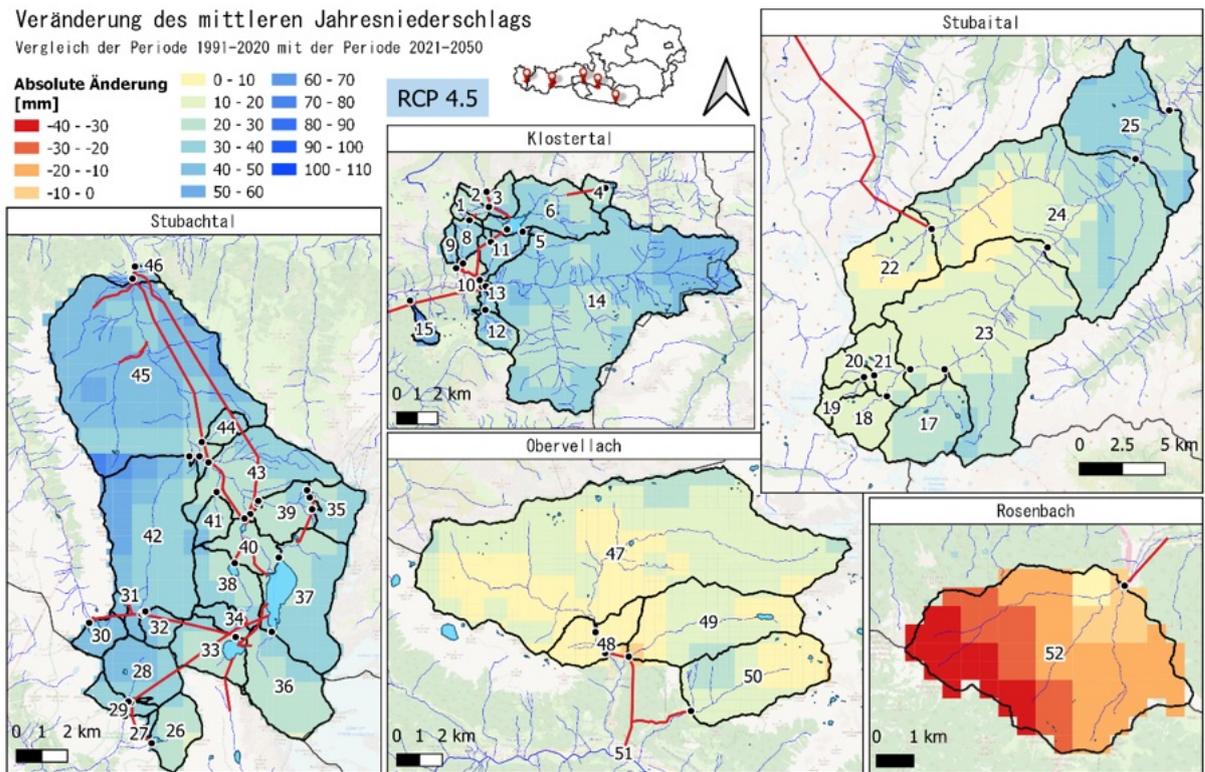
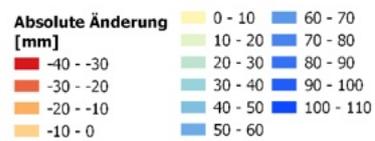


Abbildung 99. Absolute flächenverteilte Veränderung des mittleren Jahresniederschlags unter RCP4.5 für alle Gebiete.

Veränderung des mittleren Jahresniederschlags
Vergleich der Periode 1991-2020 mit der Periode 2021-2050

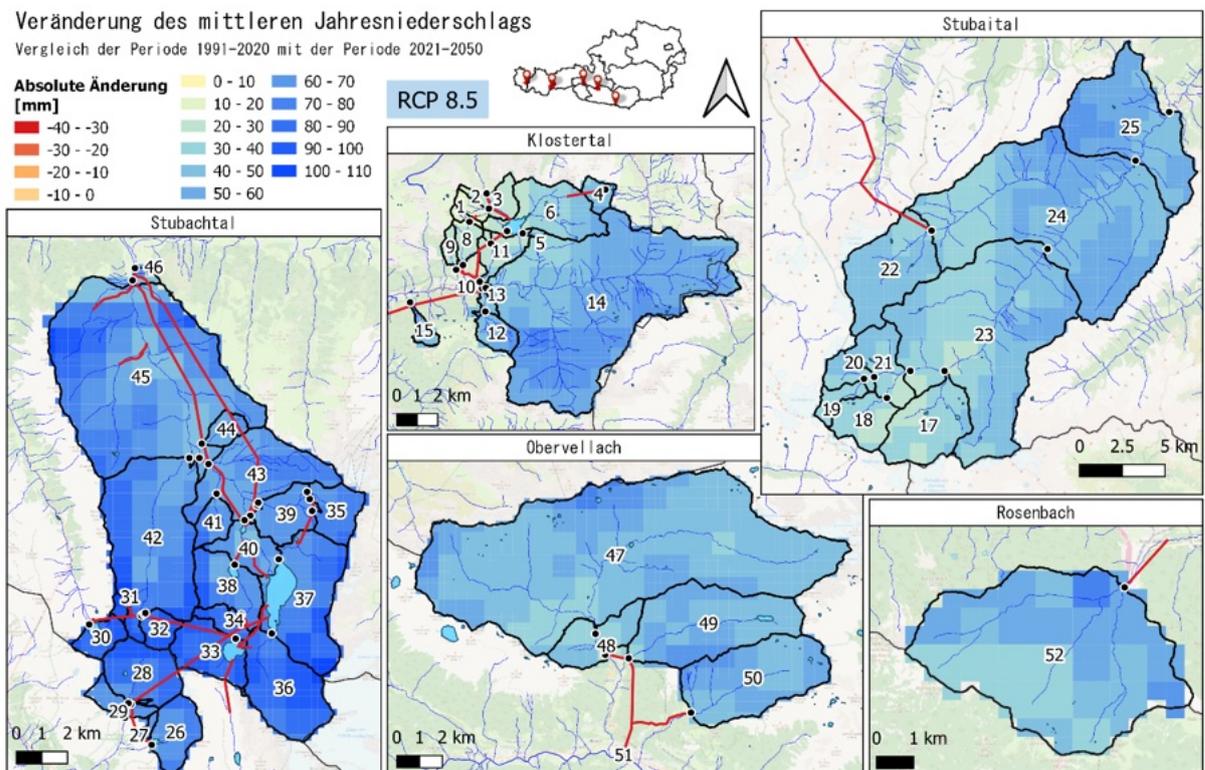
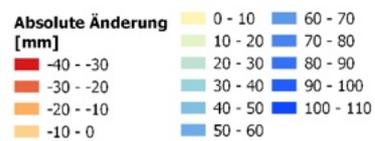


Abbildung 100. Absolute flächenverteilte Veränderung des mittleren Jahresniederschlags unter RCP8.5 für alle Gebiete.

Abbildung 101 zeigt den Verlauf der jährlichen Niederschlagssummen am Beispiel des Einzugsgebietes des KW Braz. Zu erkennen ist eine – im Mittel – leichte Zunahme der langjährigen mittleren Niederschlagssumme.

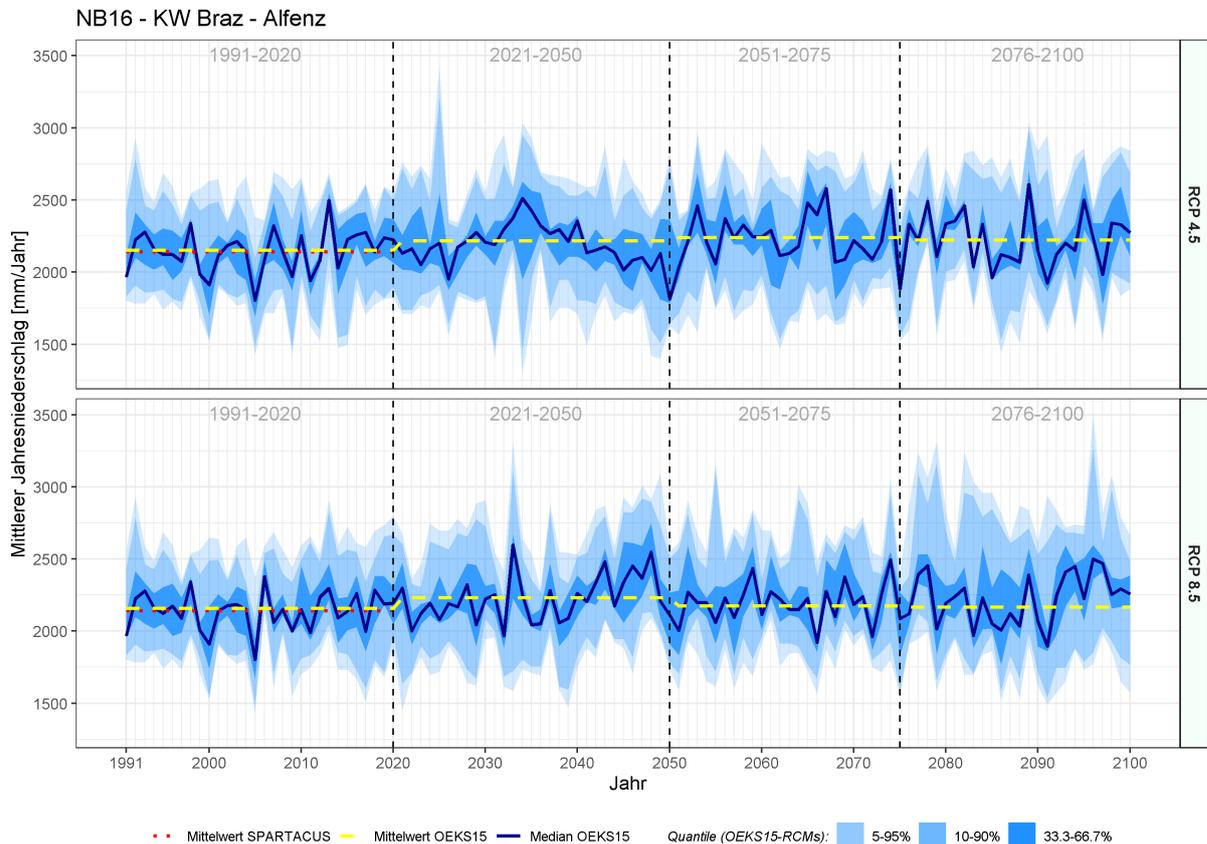


Abbildung 101. Zeitlicher Verlauf der jährlichen Niederschlagssumme am Beispiel KW Braz, dargestellt für RCP4.5 (oben) und RCP8.5 (unten).

2.2.2.3.1.4 Schneefallmenge

Es ist eher eine negative Änderung der Schneefallmenge zu verzeichnen, wobei sich die Werte je nach RCP und Gebiet stark unterscheiden. Im Kloster- und Stubachtal nimmt die Schneefallmenge unter RCP8.5 leicht zu, sonst ist überall eine Abnahme zu verzeichnen. Die Abnahme ist unter RCP4.5 am größten. Man erkennt, dass eine Zunahme des Niederschlags nicht zwingend zu einer Zunahme der Schneemenge führt, in den meisten Fällen fällt dieser Niederschlag als Regen.

2.2.2.3.1.5 Gletscherschmelze

Erwartungsgemäß nimmt der Gletscherbeitrag in der Zukunft in einer ähnlichen Größenordnung im Stubai- und Stubachtal ab. Das reduziert den Anteil der

Gletscherschmelze am Jahresabfluss am Pegel Fulpmes von 6% auf 3%, und im Stubachtal von 4% auf 1%.

Abbildung 102 zeigt den Verlauf mittleren jährlichen Gletscherschmelz für das Stubaital und den Pegel Fulpmes. Zu erkennen ist, dass der Beitrag der Gletscher zum Gesamtabfluss stetig abnimmt und im Wesentlichen ab 2050 nicht mehr vorhanden ist. Es ist zu beachten, dass die Temperaturen in den RCMs im Vergleich zu Spartacus zu niedrige Werte gezeigt haben. Dies wirkt sich auch auf die Simulation der Gletscherschmelze aus, die tendenziell zu niedrig ausfällt. Entsprechend kann erwartet werden, dass der Beitrag der Gletscher zum Gesamtabfluss bereits früher vernachlässigbar sein wird.

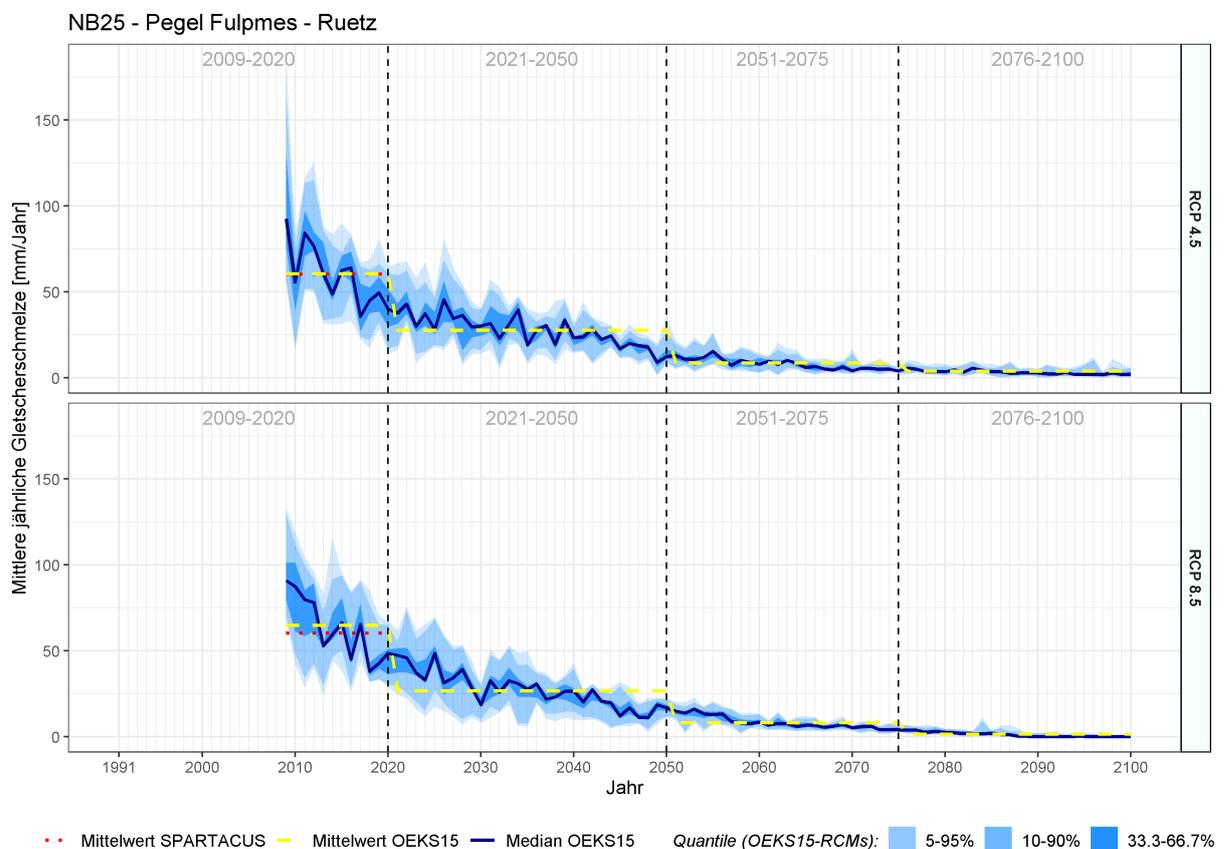


Abbildung 102. Zeitlicher Verlauf der jährlichen Gletscherschmelze am Pegel Ruetz, dargestellt für RCP4.5 (oben) und RCP8.5 (unten).

2.2.2.3.1.6 Abfluss

Ein direkter Zusammenhang zwischen der Ab-/Zunahme im Jahresniederschlag und einer Ab-/Zunahme im Jahresabfluss ist in den unvergletscherten Gebieten Klostertal, Obervellach und Rosenbach zu erkennen. In den vergletscherten Gebieten Stubai- und Stubachtal führt die Niederschlagszunahme nicht zu einem erhöhten Abfluss, da hier noch

der Gletscherrückgang eine Rolle spielt. Die größte absolute Zunahme ist im Klostertal unter RCP4.5 mit +60 mm zu erkennen, während die größte Abnahme mit -31mm im Rosenbach zu verzeichnen ist. Abbildung 103 zeigt exemplarisch die Simulationen für den Abfluss für das KW Braz.

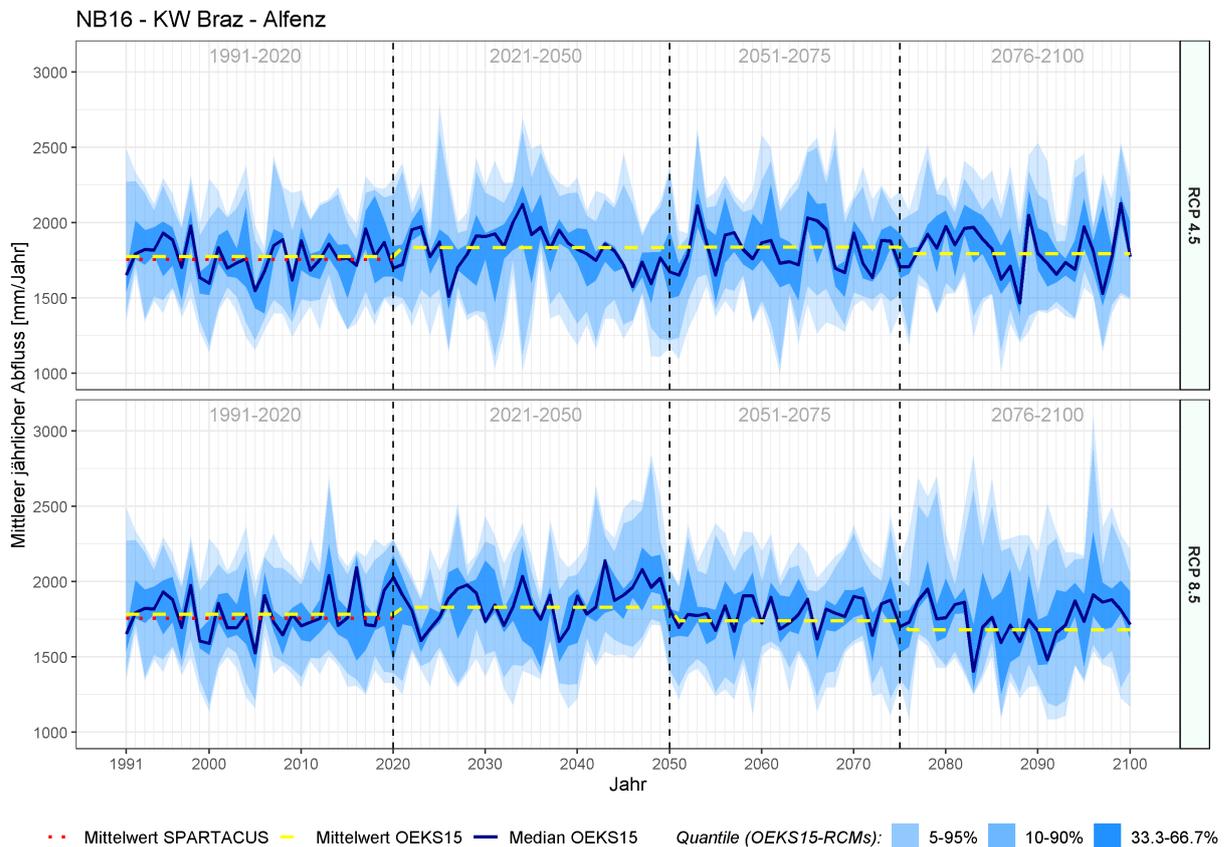


Abbildung 103. Zeitlicher Verlauf des jährlichen Abflusses am KW Braz, dargestellt für RCP4.5 (oben) und RCP8.5 (unten).

2.2.2.3.2 Saisonale Änderung der hydrologischen Größen

Neben der Änderung der Jahressummen und -mittel ist die saisonale Änderung, also die Änderung der Wasserbilanz in den einzelnen Monaten, von Interesse. Durch Änderungen in der Saisonalität treten eventuell Änderungen im Aggregatzustand des Niederschlags auf und somit Veränderungen im Abflussverhalten. Eine genaue Ausführung zu jedem Untereinzugsgebiet befindet sich im Abbildungsband.

2.2.2.3.2.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperatur zeigt einen gleichmäßigen Anstieg übers ganze Jahr in allen Einzugsgebieten mit keiner ausgeprägten Saisonalitätsänderung, wie in Abbildung 104 am

Beispiel Klostertal zu erkennen ist. Die Unterschiede zwischen den RCPs sind vernachlässigbar. Ähnliche Muster ergeben sich in den anderen Gebieten.

2.2.2.3.2 Aktuelle Evapotranspiration

Die ETA zeigt eine geringe Zunahme im Einklang mit der erhöhten Lufttemperatur in den Sommermonaten, wie beispielhaft in Abbildung 105 zu erkennen ist.

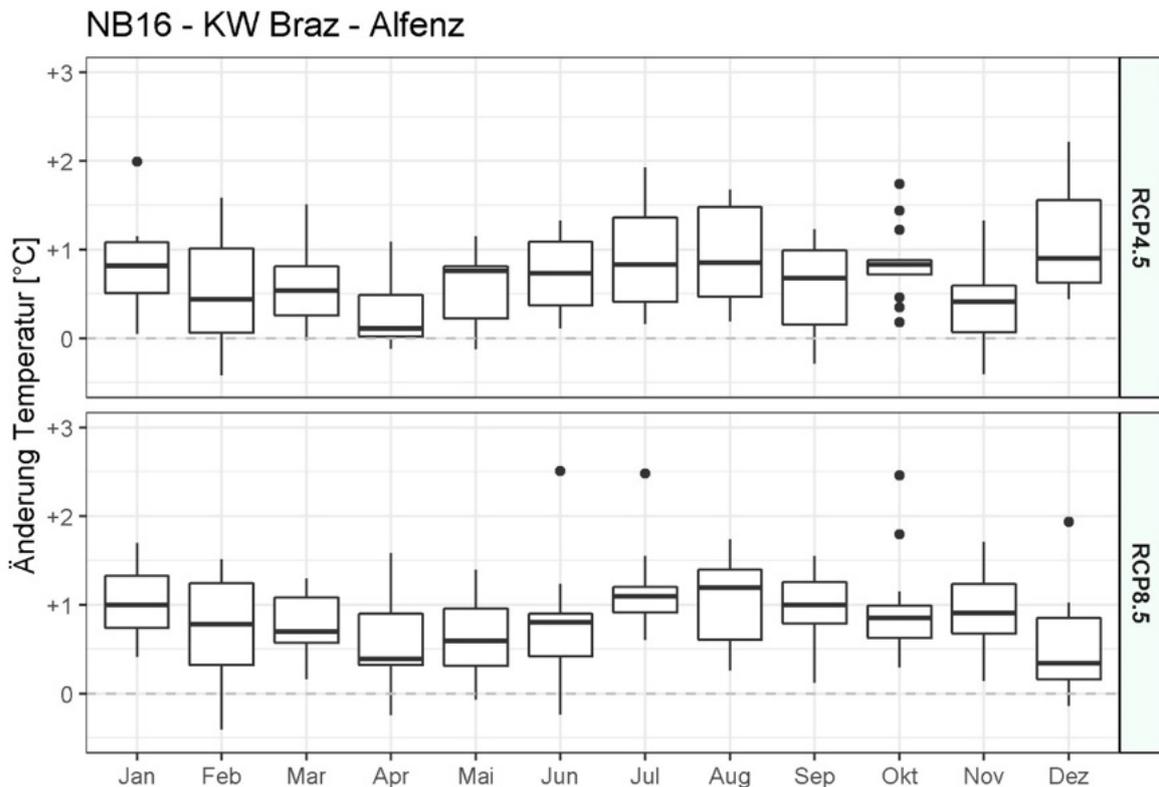


Abbildung 104. Saisonale absolute Änderung der Lufttemperatur im Gebiet Klostertal (Auslass NB16 KW Braz).

2.2.2.3.2.3 Niederschlag

Im Gegensatz zur Temperatur ist beim Niederschlag eine Änderung der Saisonalität zu erkennen. Eine Zunahme in den Monaten Juni und November kann in allen hochalpinen Gebieten verzeichnet werden, ebenso eine leichte Abnahme im Juli (sh. Abbildung 106). Dieser Trend tritt in beiden RCPs auf und setzt sich bis Ende des Jahrhunderts verstärkt fort. Die absoluten Änderungen des Medians bewegen sich maximal im Bereich ± 25 mm.

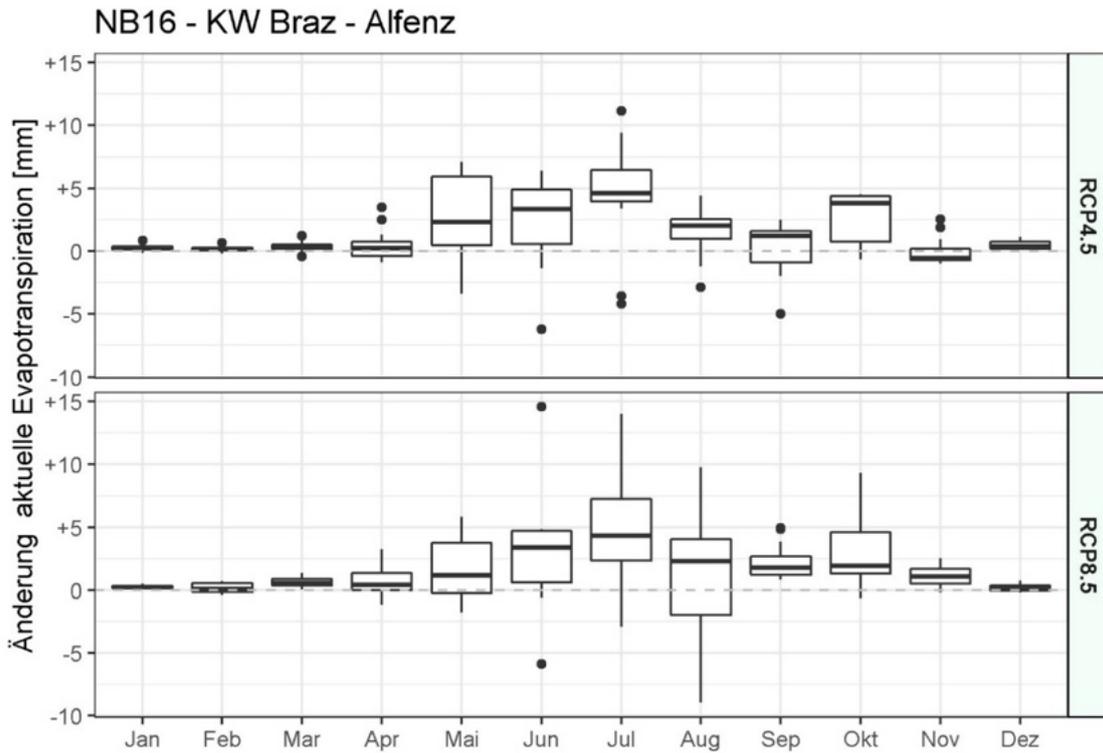


Abbildung 105. Saisonale absolute Änderung der aktuellen Evapotranspiration im Gebiet Klostertal (Auslass NB16 KW Braz).

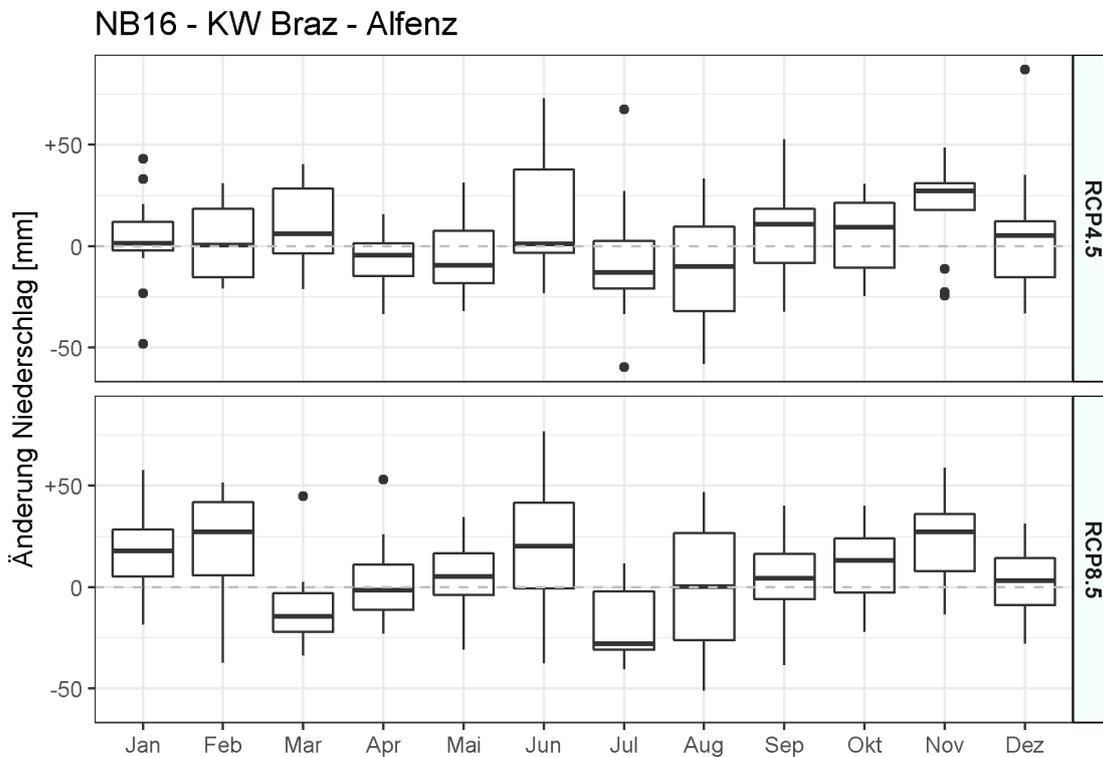


Abbildung 106. Saisonale absolute Änderung des Niederschlags im Gebiet Klostertal (Auslass NB16 KW Braz).

2.2.2.3.2.4 Schneefallmenge

Sowie bei den Jahressummen der Schneefallmenge sind auch die saisonalen Veränderungen je nach Gebiet und RCP unterschiedlich. Im Rosenbach und Obervellach zeigen quasi alle Monate eine negative Änderung. In Kloster-, Stubai- und Stubachtal gibt es in den Wintermonaten teilweise leichte Zunahmen der Schneefallmengen (sh. Abbildung 107). Überall bewegen sich die Änderungen des Medians im ± 25 mm Bereich.

2.2.2.3.2.5 Schneeschmelze

Getrieben von der Temperaturänderung ergibt sich eine Änderung der Saisonalität der Schneeschmelze. Hier ist ein früheres Eintreten, also eine positive Änderung in den Frühlingsmonaten, zu erkennen (sh. Abbildung 108).

2.2.2.3.2.6 Gletscherschmelze

Die Gletscherschmelze verändert sich in jenen Monaten, wo der Gletscher schneefrei ist. Das heißt es ist eine negative Änderung in den Monaten Juni bis Oktober zu sehen (sh. Abbildung 109).

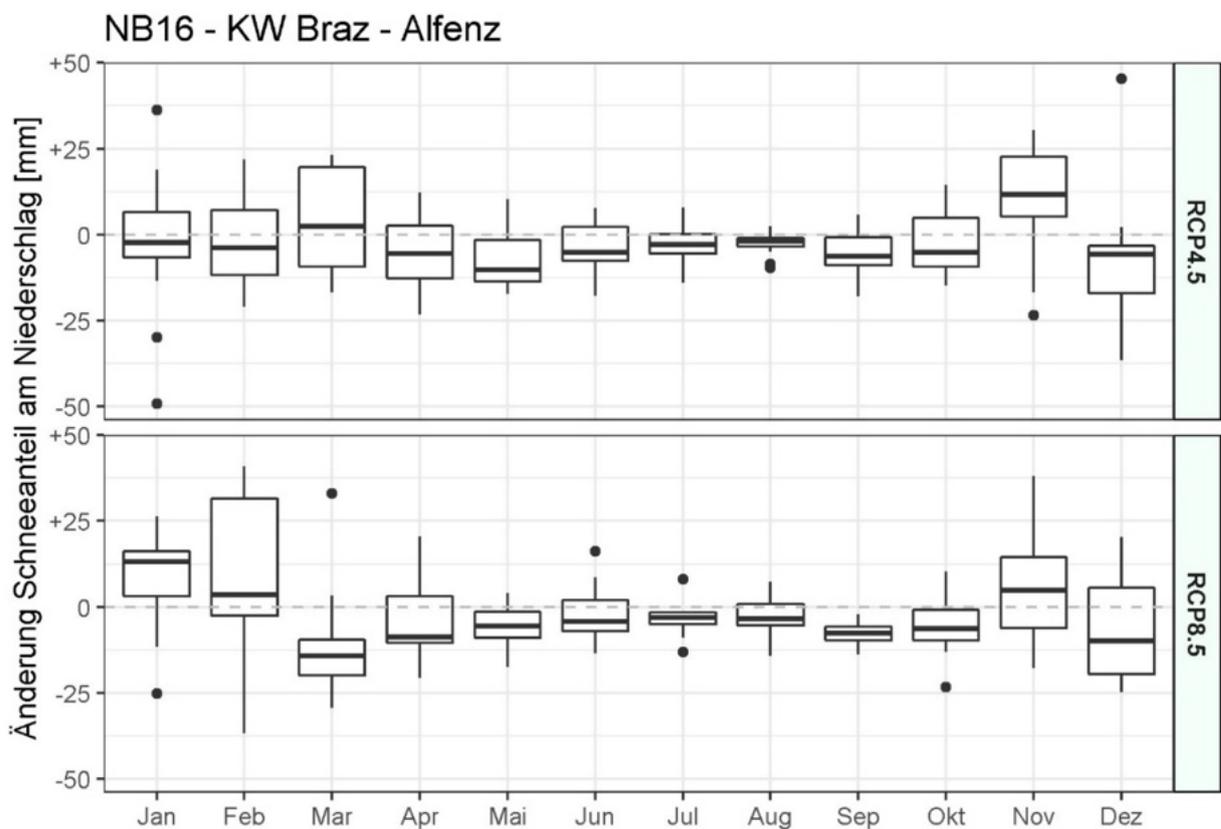


Abbildung 107. Saisonale absolute Änderung der Schneemenge im Gebiet Kloistertal (Auslass NB16 KW Braz).

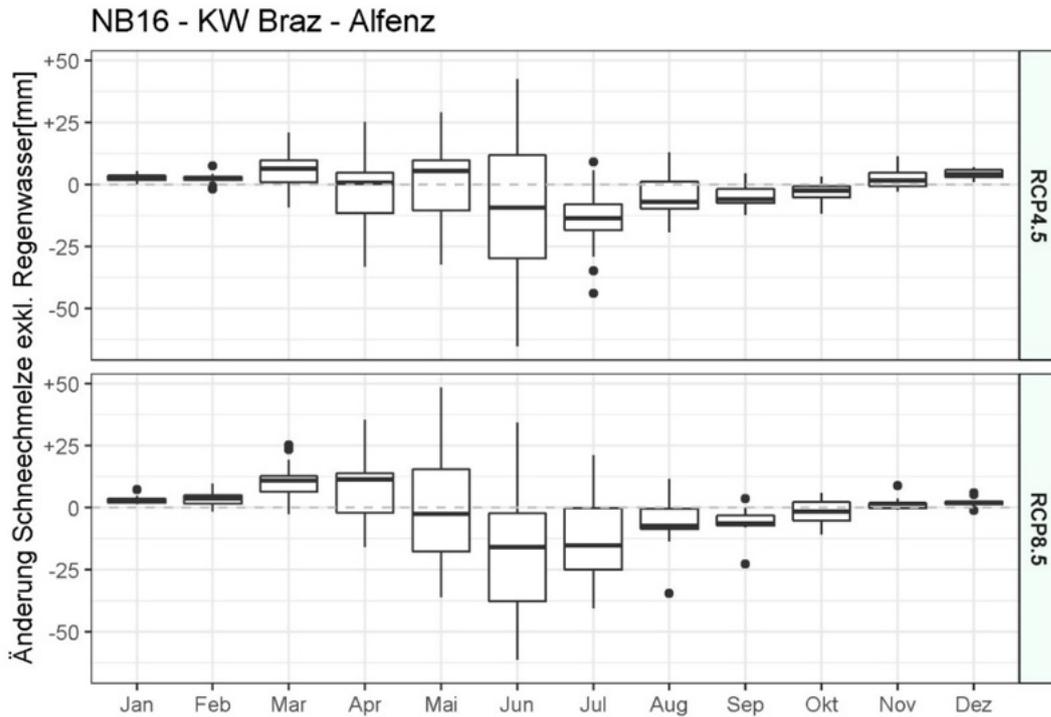


Abbildung 108. Saisonale absolute Änderung der Schneeschmelze im Gebiet Klosters (Auslass NB16 KW Braz).

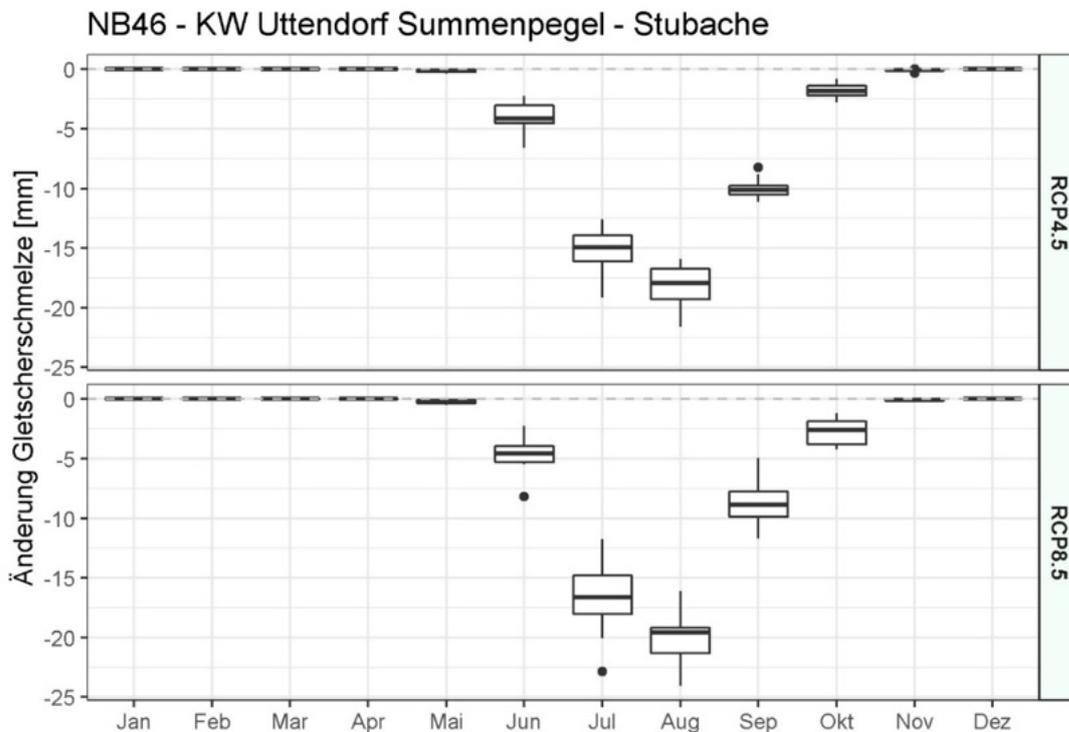


Abbildung 109. Saisonale absolute Änderung der Gletscherschmelze im Gebiet Stubachtal (Auslass NB46 KW Uttendorf).

2.2.2.3.2.7 Abfluss

In den hochalpinen Gebieten ist die Tendenz zu erkennen, dass der Abfluss im Frühjahr zunimmt und im Sommer abnimmt (sh. Abbildung 110). Dies ist durch die früher eintretende Schneeschmelze zu erklären, die demzufolge im Sommer dann fehlt. Verstärkt wird der Effekt in Stubai- und Stubachtal durch den abnehmenden Gletscherbeitrag (sh. Abbildung 111). Diese Tendenz zeigt sich für beide RCPs und wird sich bis zum Ende des Jahrhunderts weiter verstärken. Im niedriger gelegenen Rosenbach Gebiet ist ein anderes Muster zu erkennen. Hier nimmt der Abfluss im Frühjahr bereits ab, was durch die geringeren Schneemengen und damit geringerer Schneeschmelze zu erklären ist (sh. Abbildung 112).

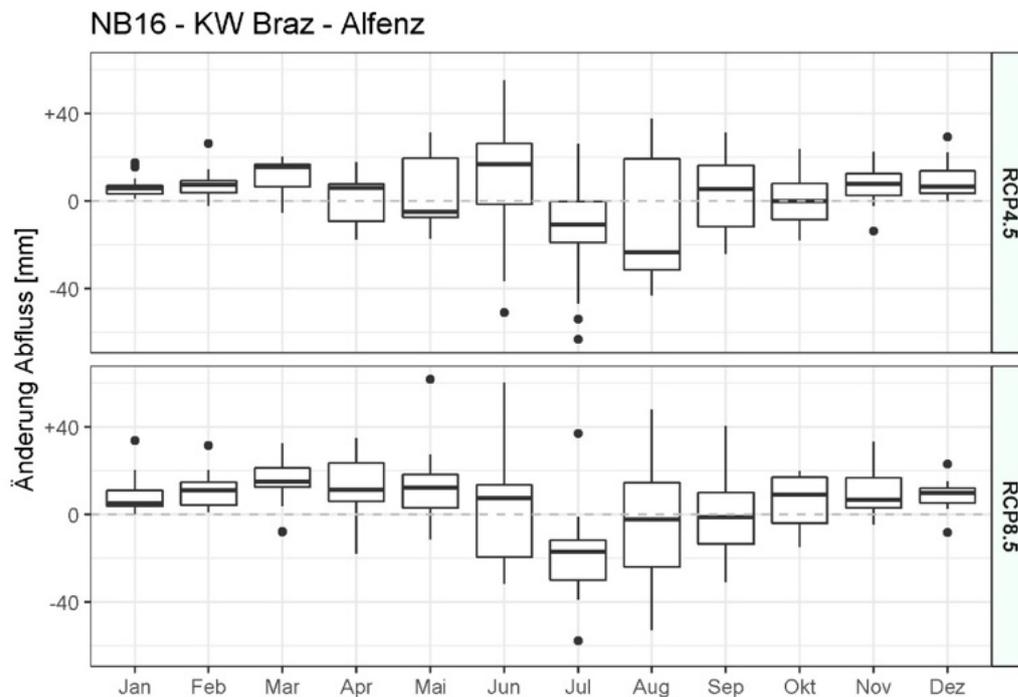


Abbildung 110. Saisonale absolute Änderung des Abflusses im Gebiet Klostertal (Auslass NB16 KW Braz).

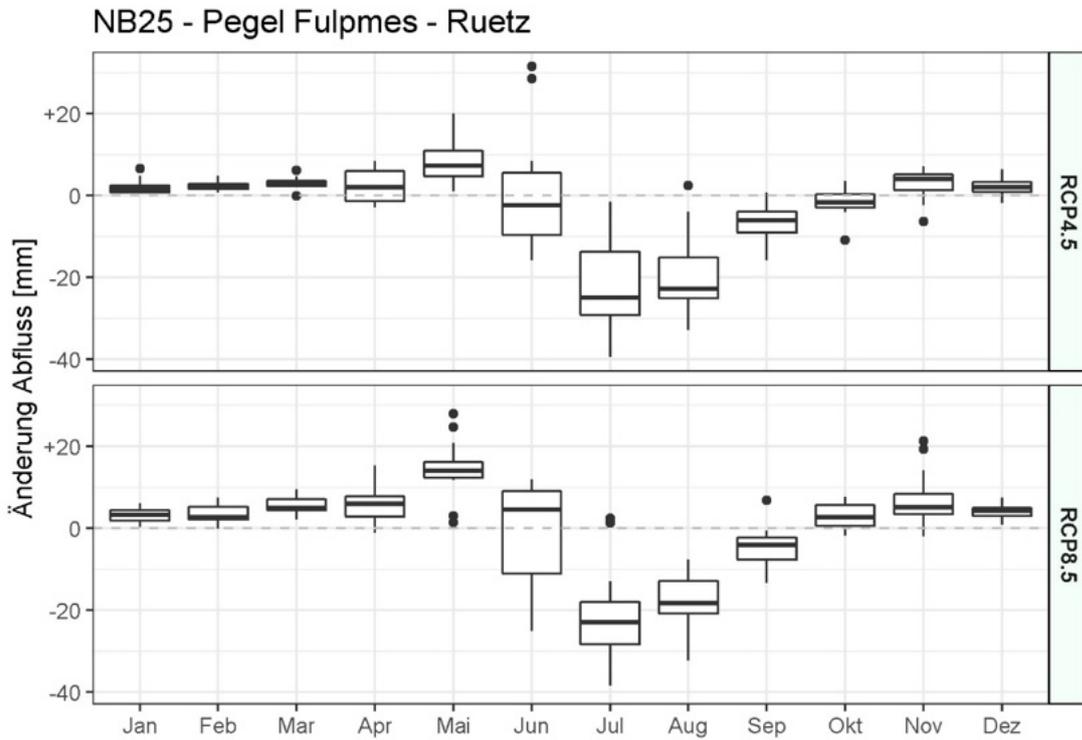


Abbildung 111. Saisonale absolute Änderung des Abflusses im Gebiet Stubaital (Auslass NB25 Pegel Fulpmes).

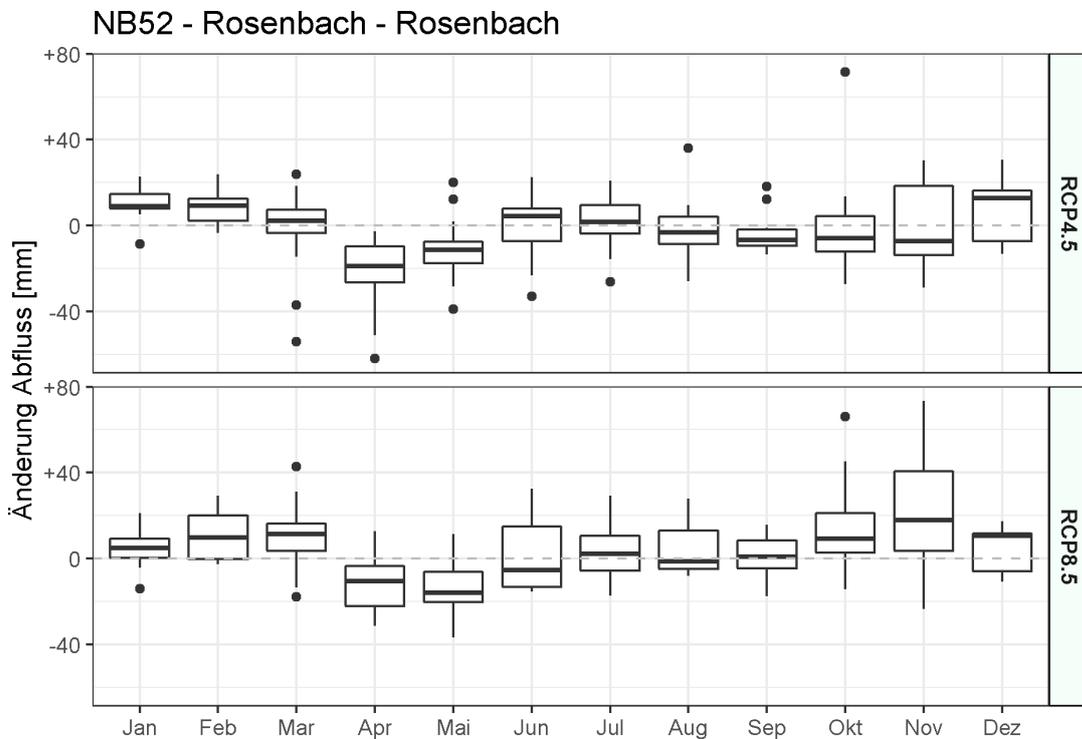


Abbildung 112. Saisonale absolute Änderung des Abflusses im Gebiet Rosenbach (Auslass NB51 Rosenbach).

2.2.2.3.3 Änderung der Niederschlagstage

Abgesehen von der Niederschlagsmenge ist auch die Anzahl der Tage mit Niederschlag und deren Änderung von Bedeutung für das Abflussverhalten. Dazu wurde die Anzahl der Tage im Jahr mit Niederschlag (Schwellenwert 2 mm) berechnet und verglichen. In Abbildung 113 sieht man, dass sich die Anzahl der Regentage in der Periode 2021-2050 im Gegensatz zur Referenzperiode kaum verändert. Um die Häufigkeit von Tagen mit extremen Niederschlägen zu untersuchen, wurde die Anzahl der Tage im Jahr mit Niederschlagsmengen über dem 95%-Quantil ausgewertet. Auch hier sieht man keine signifikante Veränderung in der nahen Zukunft.

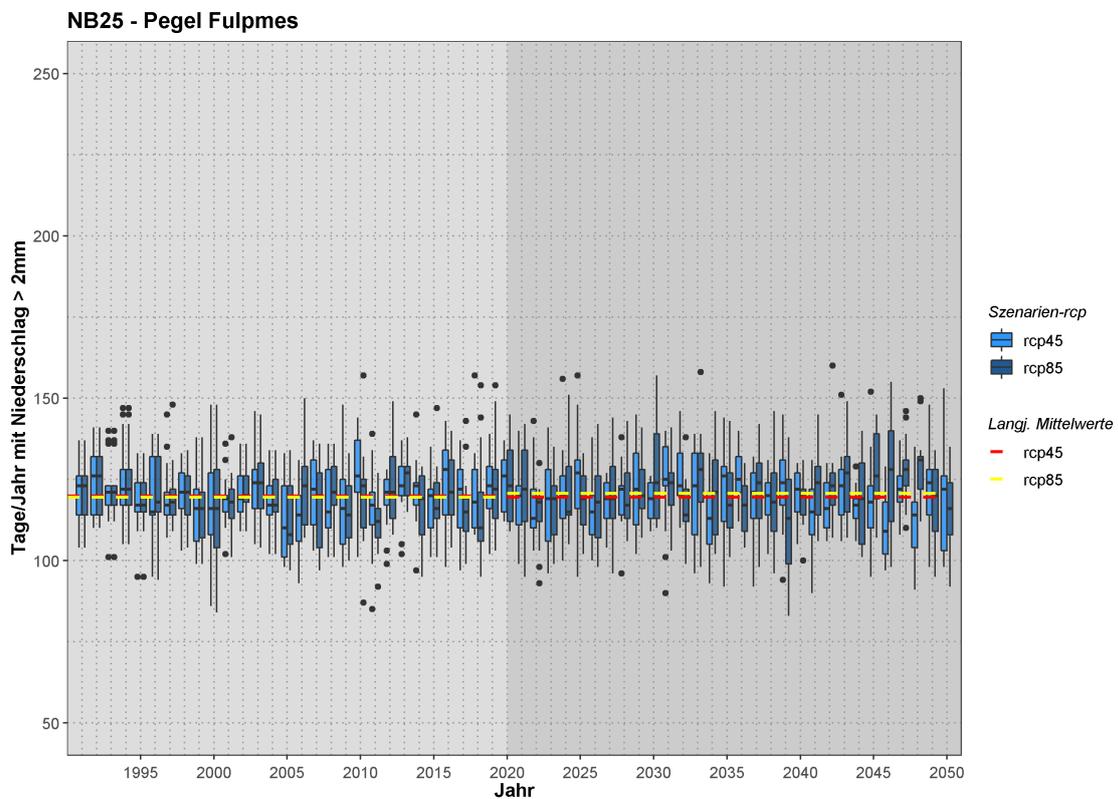


Abbildung 113. Anzahl der Tage/Jahr mit Niederschlag >2mm für die Jahre 1991 bis 2050.

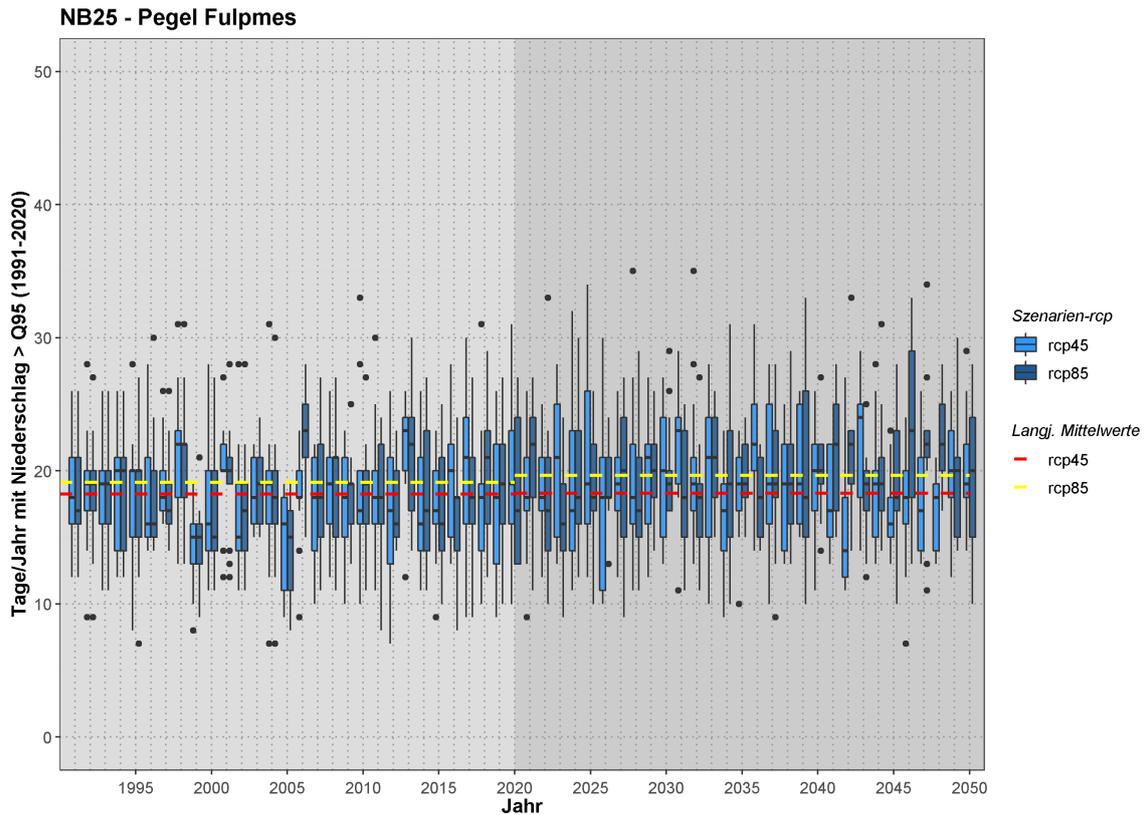


Abbildung 114. Anzahl der Tage/Jahr mit Niederschlag über dem 95%-Quantil für die Jahre 1991 bis 2050.

2.2.2.3.4 Extremereignisse

In Abbildung 115 ist die Bandbreite von einem 100-jährlichen Hochwasser (HQ100) für alle Szenarien in RCP4.5 und RCP8.5 an diversen Pegeln dargestellt. Dazu wurde eine Extremwertanalyse (Gumbelverteilung) auf Basis der jährlichen Maximalabflüsse durchgeführt. Eine Zunahme des Extremabflusses von der Periode 1991-2020 zu Periode 2021-2050 und 2051-2100 ist erkennbar. Im Vergleich zu den simulierten Ergebnissen mit ÖKS15 sind die HQ-Werte aus tatsächlich beobachtetem Abfluss angegeben (rot markiert). Diese unterscheiden sich teilweise stark von den Simulationsergebnissen aufgrund der bereits angesprochenen Unterschiede zwischen SPARTACUS (auf die das Modell in der Vergangenheit kalibriert wurde) und ÖKS15 (mit denen in der Zukunft gerechnet wurde).

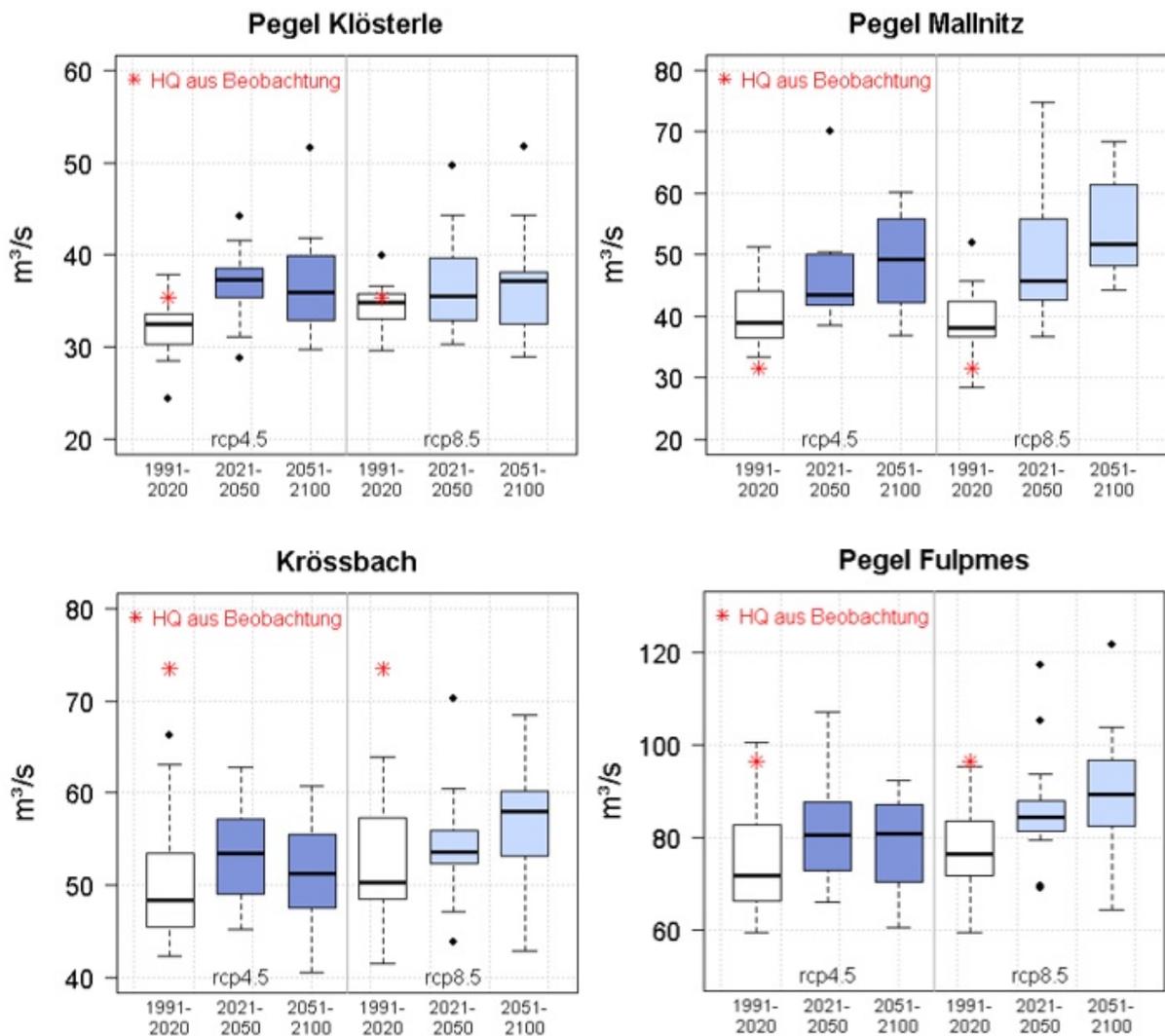


Abbildung 115. Bandbreite eines 100-jährlichen Ereignisses (HQ100) an 4 beobachteten Pegeln.

2.2.2.4 Fazit

Für die langjährigen Mittelwerte ergibt sich im Median ein eindeutiges Bild in Bezug auf Niederschlag und Temperatur. In allen Untersuchungsgebieten gehen die ÖKS15 Daten für beide Treibhausgasszenarios von einer Zunahme des Jahresniederschlags und der mittleren Jahrestemperatur aus.

Die absolute Änderung der Lufttemperatur fällt für alle Gebiete und beide RCPs im Median gleich aus mit einer Zunahme von $+0.8^{\circ}\text{C}$ in der Periode 2021-2050 im Vergleich zur Periode 1991-2020. Beim Niederschlag gibt es regionale Unterschiede, aber alle Zunahmen befinden sich im Bereich von unter 100 mm. Nur im Gebiet Rosenbach ist unter RCP4.5 eine Abnahme von -20 mm simuliert.

Die aktuelle Evapotranspiration (ETA) nimmt mit der steigenden Temperatur und erhöhten verfügbaren Wassermenge im Median in allen Gebieten um etwa +20 mm im Jahr zu. Bei Niederschlag und Abfluss zeigt vor allem RCP8.5 große Bandbreiten im Änderungssignal, vor allem im Klostertal, Stubachtal und Rosenbach.

Die Änderungen im Niederschlag übertragen sich auf den Abfluss in den unvergletscherten Gebieten, sprich eine Zunahme im Niederschlag führt zu einer Zunahme im Abfluss. In den vergletscherten Gebieten wird der Effekt der Niederschlagszunahme durch fehlende Gletscherschmelze gedämpft und der Abfluss nimmt teilweise trotz erhöhtem Niederschlag sogar ab.

Die Schneemengen nehmen nur im Klostertal und Stubachtal unter RCP8.5 leicht zu, in den restlichen Gebieten und Szenarien findet eine Abnahme der Schneemengen, trotz höherem Jahresniederschlag, statt. Die Veränderung der jährlichen Schneeschmelze geht mit dieser Veränderung einher.

In Bezug auf saisonale Änderungen der Wasserbilanzkomponenten sind bei Temperatur und ETA eine positive Zunahme in allen Monaten zu verzeichnen. Beim Niederschlag ist eine Vorverlagerung des niederschlagreichsten Monats von Juli/August auf Juni zu erkennen. Neben der Zunahme im Juni ist auch eine Zunahme im November in allen Gebieten außer Rosenbach vorhanden. Im Rosenbach sind im Wesentlichen keine saisonalen Änderungen zu erkennen. Der Trend der Zunahme im Juni und Winter, sowie Abnahme im Sommer, setzt sich bis Ende des Jahrhunderts fort.

Im Abfluss sind dieselben Tendenzen von Zunahme im Frühjahr und Abnahme im Sommer erkennbar. Diese Änderungen sind aber bislang eher schwach ausgeprägt, die absoluten Werte sind gering. Im Stubaital ist die Veränderung am stärksten ausgeprägt, da hier der Gletscherrückgang im Sommer besonders bemerkbar ist.

In der Saisonalität der Schneeschmelze spiegeln sich diese Änderungen auch wieder. Die Schneeschmelze beginnt in der Zukunftsperiode früher und zeigt somit eine positive Änderung im Frühling. Im Sommer fehlt der bereits geschmolzene Schnee und eine negative Änderung tritt ein. Beim Gletscher ist eine negative Änderung in den Sommermonaten zu verzeichnen.

Das modellierte Gletschervolumen in Stubai- und Stubachtal geht bis 2050 auf grob ein Viertel zurück im Vergleich zu 2020. In den vergletscherten Kopfeinzugsgebieten (z.B. NB17 Sulzenaubach) macht sich das im Jahresabfluss (stark) bemerkbar. Am Gebietsauslass (z.B. NB25 Fulpmes) ist der Einfluss auf den Jahresabfluss gedämpft. Die Gletscher tragen 2050 noch zum Abfluss bei, aber haben einen kleineren prozentmäßigen

Anteil am Gesamtabfluss als in der Vergangenheit. Im Stubaital nimmt der Anteil von 6% auf 3% ab, im Stubachtal geht er von 4% auf 1% zurück.

Eine Analyse der Extremwerte zeigt für alle Gebiete eine Zunahme höherer Abflüsse in der Größenordnung von 5-20%. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse keine wesentliche Veränderung der Niederschlagstage.

Wichtig ist festzuhalten, dass es sich um eine große Bandbreite simulierter Größen handelt, und dass immer die gesamte Bandbreite der Modelle betrachtet werden muss und keine einzelnen Werte. Des Weiteren sind Unsicherheiten in den Größenordnungen erkennbar, wie man beim Vergleich zwischen ÖKS15 und SPARTACUS in der Vergangenheit festgestellt hat. Daher sollten absolute Werte eher mit Bedacht interpretiert werden und bevorzugt relative Änderungssignale als Planungshilfe verwendet werden.

3 AUSBLICK

- Die Thematik der **drohnengetragenen Radarsensorik** zur Bestimmung von Schneehöhen sollte im Zuge eines weiteren Forschungsprojektes weiter untersucht werden hinsichtlich der Erfassung unterschiedlicher Schneeschichten. UBIMET und FH Kärnten hatten diesbezüglich vor, mit Mitta ein weiteres Projekt zu präsentieren. Leider hat sich Mitta aber während der Antragsphase entschieden seine Sensorabteilung aufzulösen. UBIMET und FH Kärnten sind sehr an einem Nachfolgeprojekt interessiert und sind aktuell auf der Suche nach potenziellen (österreichischen) Partnern im Bereich Sensorik gehalten.
- Bezüglich der **In-Situ-Messungen** wurden die Daten der beiden stationären und der autarken Messstationen in das ÖBB-Weather Cockpit integriert. Die geänderte Verschaltung der Akkus über den Winter 23/24 wurde positiv evaluiert, sodass keine Anpassungen am Setup mehr notwendig sind. Die Messstationen bleiben über die Projektdauer hinaus bestehen und auch die gesendeten Wetterdaten werden weiterhin in das ÖBB-Weather Cockpit integriert. Die Wartung der Wetterstationen wird nach Projektende von UBIMET an die ÖBB übergeben, dafür wird eine Wartungsanleitung zur Verfügung gestellt.
- Bezüglich des **KI-basierten SRFC** konnte in einem ersten PoC der erfolgreiche Einsatz von KI-Methoden bei Kurzzeit-Niederschlagsprognosen nachgewiesen werden. Dies ist für die Zukunft ein vielversprechender Ansatz, der jedoch noch einer umfassenden Verifikation mit Live-Daten unterzogen werden muss. Auch sollten an dem Modell noch weitere Entwicklungen vorgenommen werden, um die Prognosegenauigkeit zu verbessern. Insbesondere sollte in einem Folgeprojekt der Algorithmus auf einem aktuellen, mehrjährigen Datensatz zur Berücksichtigung selten auftretender Ereignisse und auch gezielt auf Extremereignisse trainiert werden.
- Die Entwicklungen zum **Feuerrisikoindex** sind auf Modellierungsebene weitgehend abgeschlossen. Eine umfassende Produktprüfung und -entwicklung ist ab Anfang nächsten Jahres möglich. Dafür muss der entwickelte Algorithmus in eine effizientere, nicht-proprietäre Programmiersprache übersetzt und auf ausfallsichere Server migriert werden. Die derzeit stattfindende, projektbezogene tägliche Übermittlung der Feuerrisikokarten im pdf-Format per E-Mail wird mit Projektende eingestellt.
- Die Prognose der **Wildbachgefahren** hat erste positive Ergebnisse gezeigt, es sind jedoch noch weitere Modellentwicklungsarbeiten notwendig. Außerdem muss eine umfassende Validierung des entwickelten Modells mit einem größerem Datensatz

durchgeführt werden. Für diese Schritte ist ein Folgeprojekt empfehlenswert. Die derzeit stattfindende, projektbezogene tägliche Übermittlung der Wildbachgefahrenkarten im pdf-Format per E-Mail wird mit Projektende eingestellt.

- Die Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf das **Primärenergiedargebot** haben für Solarkraft eine leichte Abnahme, für Windkraft eine Stagnation und für Wasserkraft eine leichte Zunahme sowie auch saisonale Veränderungen ergeben. Diese Analysen wurden mit den während der Projektlaufzeit aktuell vorliegenden Klimamodellen berechnet. Aufgrund der hohen Dynamik der klimatischen Veränderungen wird es sehr interessant sein, bei Vorliegen aktualisierter Klimamodelle die Berechnung der Klimaprojektionen zu aktualisieren. Dabei sollte auch insbesondere darauf geachtet werden, die Windprognose im Alpenraum zu verbessern, welche bei der in KlimZug durchgeführten Studie aufgrund von Modelleinschränkungen nicht berücksichtigt werden konnte. Der in KlimZug entwickelte Ansatz ist sehr vielversprechend für zukünftige Anwendungen und Produktentwicklungen, auch hier besteht jedoch noch Forschungsbedarf, sodass ein Folgeprojekt dringend empfohlen wird.
- Auch bezüglich der **Klimaprognose von Extremwitterszenarien** konnten mit Hilfe der in KlimZug genutzten Methodik erste vielversprechende Prognosen bis 2050 berechnet werden. Die dafür verwendeten Schadensdaten der ÖBB erstrecken sich bis zum Jahr 2019. Bei Vorliegen aktuellerer Schadensdaten von Seiten der ÖBB sollte die Methodik in einem folgenden Forschungsprojekt weiterentwickelt werden. Dabei können auch die letztgültigen Klimamodelle verwendet und auch ein Forecast bis Ende des Jahrhunderts gegeben werden.

4 LITERATURVERZEICHNIS

Alexander, D. (2002). **Principles of Emergency Planning and Management**. University of Massachusetts, Amherst: Oxford University Press

APCC (2014): **Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)**. Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 1096 Seiten. ISBN 978-3-7001-7699-2, S. 319 - 329

ARISCC (2011): **Recommendations for Adaptation of Railway Infrastructure to Climate Change**, <http://www.ariscc.org/index294f.html?id=105>

Baker C.J., Chapman L., Quinn A. und Dobney K. (2010): **Climate change and the railway industry: A review. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science**. 2010;224(3):519-528. DOI: <https://doi.org/10.1243/09544062JMES1558>

Bennitt, G. V., & Jupp, A. (2012). **Operational assimilation of GPS zenith total delay observations into the Met Office numerical weather prediction models**. *Monthly Weather Review*, 140(8), 2706-2719.

Bergström, S. (1992). **The HBV model—its structure and applications**. Norrköping, SMHI.

BMLFUW (2007). **Hydrologischer Atlas Österreichs. 3. Lieferung**. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.

BMLFUW (2011). **Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft im Auftrag von Bund und Ländern**. Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

BMLFUW (2017). **Klimawandel in der Wasserwirtschaft- Schwerpunkt Hochwasser, Dürre und Trockenheit**. Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

BMNT – Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2017): **Die österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Teil 1 - Kontext**. Wien, Oktober 2017.

Chimani B., Heinrich G., Hofstätter M., Kerschbaumer M., Kienberger S., Leuprecht A., Lexer A., Peßenteiner S., Poetsch M.S., Salzmann M., Spiekermann R., Switanek M. und Truhetz H. (2016): **ÖKS15 –Klimaszenarien für Österreich. Daten, Methoden und Klimaanalyse**. Projektendbericht, Wien. <https://data.ccca.ac.at/dataset/endbericht-oks15-klimaszenarien-fur-osterreich-daten-methoden-klimaanalyse-v01>

Climate-ADAPT (2017): **Building railway transport resilience to Alpine hazards in Austria.- case study in FP7 project ENHANCE**, <https://climate->

adapt.eea.europa.eu/metadata/case-studies/building-railway-transport-resilience-to-alpine-hazards-in-austria

Dallhammer E., Formayer H., Jiricka A., Keringer F., Leitner M., McCallum S., Schmied J., Stanzer G., Völler S. (2015): **Strategische Unterstützung bei der Projektplanung zur Berücksichtigung von Klimawandelfolgen**, BOKU-Met Report 24, pp. 40, http://www.boku.ac.at/met/report/BOKU-Met_Report_24_online.pdf

Dobney K. (2010a): **Quantifying the effects of an increasingly warmer climate with a view to improving the resilience of the GB railway network: Is a new stressing regime the answer?**, PhD Thesis, University of Birmingham.

Dobney, K., Baker, C.J., Chapman, L. und A. Quinn (2010b): **The future cost to the United Kingdom's railway network of heat-related delays and buckles caused by the predicted increase in high summer temperatures owing to climate change**, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Rail and Rapid Transit, Vol. 224, p. 25-34.

Dobney, K.; Baker, C.J., Quinn, A.D.; Chapman, L. (2008): **Quantifying the effects of high summer temperatures due to climate change on buckling and rail related delays in south-east United Kingdom**, Royal Meteorological Society, vol 16, Iss 2, pp. 245-251

Doll, C., Klug, S., Partzsch, I., Enei, R., Pelikan, V., Sedlacek, N., Maurer, H., Rudzikaite, L., Papanikolaou, A., Mitsakis, V. (2011): **Deliverable 4 - Adaptation Strategies in the Transport Sector**, https://www.weather-project.eu/weather/downloads/Deliverables/WEATHER-D4_Revision-2011-12-14_unapproved-draft.pdf

Dymarska, N., Rohm, W., Sierny, J., Kapłon, J., Kubik, T., Kryza, M., ... & Kosierb, R. (2017). **An assessment of the quality of near-real time GNSS observations as a potential data source for meteorology**. Meteorology Hydrology and Water Management. Research and Operational Applications, 5(1), 3-13.

EBA – Eisenbahn-Bundesamt (2019a): **Anhang 1: Steckbriefe zu einzelnen Klimaauswirkungen. EBA-Forschungsbericht 2018-08a: Untersuchung der Regelwerke für den Bahnbetrieb auf Schwachstellen hinsichtlich des zu erwartenden Klimawandels. Los 1 – Infrastruktur**, Anhang 1: Steckbriefe zu einzelnen Klimaauswirkungen, https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Downloads/DZSF/Veroeffentlichungen/Forschungsberichte/2018/EBA-Forschungsbericht_2018-08a_Anhang_1.html (2021-01-20)

EBA – Eisenbahn-Bundesamt (2019b): **Untersuchung der Regelwerke für den Bahnbetrieb auf Schwachstellen hinsichtlich des zu erwartenden Klimawandels. Teil A, Los 1 – Infrastruktur**, EBA-Forschungsbericht 2018-08. Bonn, März 2019,

https://www.dzsf.bund.de/SharedDocs/Downloads/DZSF/Veroeffentlichungen/Forschungsberichte/2018/EBA-Forschungsbericht_2018-08.pdf?__blob=publicationFile&v=11

Edenhofer, O. und Hoffmann, P. (2021): **Analyse des Klimawandels für die Deutsche Bahn: Studie zur räumlichen Ausprägung in Deutschland.- PIK i.A. DB**, https://www.deutschebahn.com/resource/blob/6249150/5b885297f5d854d53bae429c05de3908/20210618_PIK-Studie-Slides-data.pdf

eHYD. (2022). **eHYD - die aktuelle hydrographische Information**. Retrieved 23.06.2022, from <https://ehyd.gv.at/>.

Enei R, C. Doll C, Klug S, Partzsch I, Sedlacek N, Kiel J, Nesterova N, Rudzikaite L, Papaniko-laou A, Mitsakis V (2011): **Deliverable 2: Vulnerability of transport systems. Main report. Transport Sector Vulnerabilities within the research project WEATHER**, (Weather Extremes: Impacts on Transport Systems and Hazards for European Regions) funded under the 7th framework program of the European Commission. Karlsruhe, 30.9.2010, http://www.weather-project.eu/weather/downloads/Deliverables/WEATHER_Deliverable-2_main-report_20110614.pdf

Fian T., Hauger G, Hörbinger S., Lehner S., Matulla C., Müller H., Rauch H.P. und Wally C. (2021), **Klimawirkanalysen entlang der ÖBB Bahnstrecke**, Endbericht „*clim_ect*“, VIF2018, https://projekte.ffg.at/anhang/61ea7c9ed1f7c_clim_ect_Ergebnisbericht.pdf

Fischer, A. S., Bernd; Stocker-Waldhuber, Martin; Mitterer, Christian; Abermann, Jakob (2015). **The Austrian Glacier Inventories** GI 1 (1969), GI 2 (1998), GI 3 (2006), and GI LIA in ArcGIS (shapefile) format [dataset publication series]. PANGAEA.

Frey, S. and H. Holzmann (2015). **A conceptual, distributed snow redistribution model**. Hydrology and Earth System Sciences 19(11): 4517-4530.

Grass, E. (2018). **Bewertung von Resilienz im Schienenverkehr**, PhD Thesis, Ostfalia-Hochschule für angewandte Wissenschaften, https://elib.dlr.de/124303/1/Masterarbeit_Grass_2018_Bewertung%20von%20Resilienz%20im%20Schienenverkehr.pdf

Gupta, H. V. K., H.; Yilmaz, K. K.; Martinez, G. F. (2009). **Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling**. Journal of Hydrology 377(1): 80-91.

Hebenstreit, K. (2000). **Auswirkungen von Klimaänderungen auf die Hydrologie alpiner Einzugsgebiete**. Wiener Mitteilungen 160.

Helfricht, K., M. Huss, A. Fischer and J.-C. Otto (2019). **Calibrated Ice Thickness Estimate for All Glaciers in Austria**. Frontiers in Earth Science 7.

Herrnegger, M. and J. Wesemann (2017). **Hydrologisches Modell für die Zuflussprognose Kraftwerksgruppe Stubachtal** [Projektbericht]: 164 Seiten.

Herrnegger, M., T. Senoner, D. Klotz, J. Wesemann, H. P. Nachtnebel and K. Schulz (2015). **RAINFALL-RUNOFF-MODEL COSERO** Handbook 2015.2.

Hiebl, J. and C. Frei (2016). **Daily temperature grids for Austria since 1961—concept, creation and applicability**. Theoretical and Applied Climatology 124: 161-178.

Hiebl, J. and C. Frei (2018). **Daily precipitation grids for Austria since 1961—development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling**. Theoretical and Applied Climatology 132(1-2): 327-345.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2021): **Climate Change 2021 – The Physical Science Basis – Summary for Policymakers**, https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SPM.pdf

Kellermann, P. (2017): **Assessing natural risks for railway infrastructure and transportation in Austria**, PhD Thesis, Universität Potsdam, https://publishup.uni-potsdam.de/opus4-ubp/frontdoor/deliver/index/docId/10387/file/kellermann_diss.pdf

Klemeš, V. (1983). **Conceptualization and scale in hydrology**. Journal of hydrology 65(1-3): 1-23.

Koboltschnig, G. R. and W. Schöner (2011). **The relevance of glacier melt in the water cycle of the Alps: the example of Austria**. Hydrology and Earth System Sciences 15(6): 2039-2048.

König, M., Loibl, W., Steiger, R., Aspöck, H., Bednar-Friedl, B., Brunner, K.-M., Haas, W., Höferl, K.-M., Huttenlau, M., Walochnik, J., Weisz, U. (2014): **Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014: Band 2 Kapitel 6: Der Einfluss des Klimawandels auf die Anthroposphäre**, pp. 690 – 692, http://austriaca.at/0xc1aa5576_0x003144ab.pdf

Lindskog, M., Ridal, M., Thorsteinsson, S., & Ning, T. (2017). **Data assimilation of GNSS zenith total delays from a Nordic processing centre**. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(22), 13983-13998.

Mehdi, B., J. Dekens and M. Herrnegger (2021). **Climatic impacts on water resources in a tropical catchment in Uganda and adaptation measures proposed by resident stakeholders**. Climatic Change 164(1-2): 10.

Moriasi, D. N. A., J. G.; Van Liew, M. W.; Bingner, R. L.; Harmel, R. D.; Veith, T. L. (2007). **Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations**. Transactions of the ASABE 50: 885-900.

Nachtnebel, H. P. (2008). **Auswirkungen von möglichen Klimaänderungen auf die Hydrologie und Wasserwirtschaft in einigen österreichischen Regionen.** In: BMLFUW (Hrsg.) 2008: Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft. Wien, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Nachtnebel, H. P., Fuchs, M. (2004). **Beurteilung der hydrologischen Veränderungen in Österreich infolge globaler Klimaänderungen.** Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 56(7-8): 79-92.

Nachtnebel, H. P., K. Hebenstreit, W. Diernhofer and M. Fuchs (1999). **Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf die Wasserkraftnutzung in alpinen Einzugsgebieten.** Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 51(9-10): 262-275.

Nachtnebel, H. P., S. Baumung and W. Lettl (1993). **Abflußprognosemodell für das Einzugsgebiet der Enns und der Steyr** (Handbuch). Wien, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau.

Nachtnebel, H. P., U. Haberl, P. Stanzel, B. Kahl, H. Holzmann and T. Pfaffenwimmer (2009). **Hochwasserprognose Salzach - Hydrologische Abflussmodellierung - Teil 3. In Amt der Salzburger Landesregierung: Hydrisll Hydrologisches Informationssystem zur Hochwasservorhersage im Land Salzburg,** Amt der Salzburger Landesregierung: 341.

Nemry F und Demirel H. (2012): **Impacts of Climate Change on transport: a focus on road and rail transport infrastructures,** Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012, <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC72217>

ÖBB (2020): **ÖBB-Netzzustandsbericht 2019,** <https://infrastruktur.oebb.at/de/unternehmen/zahlen-daten-fakten/netzzustandsbericht.pdf>

ÖBB-Infra. (2018). **Kraftwerk Obervellach, Projektbroschüre.** from <https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahnstrom/kraftwerke-und-frequenzumformer/kraftwerk-tauernmoos/projektbroschuere-tauernmoos.pdf>.

ÖBB-Infra. (2019). **Kraftwerk Tauernmoos, Projektbroschüre.** from <https://infrastruktur.oebb.at/de/projekte-fuer-oesterreich/bahnstrom/kraftwerke-und-frequenzumformer/kraftwerk-tauernmoos/projektbroschuere-tauernmoos.pdf>.

PIK (2021): **Klima-Studie für Deutsche Bahn wird Grundlage für Resilienz-Strategie des Konzerns,** <https://www.pik-potsdam.de/de/aktuelles/nachrichten/klima-studie-fuer-deutsche-bahn-wird-grundlage-fuer-resilienz-strategie-des-konzerns>

Reutter, F. (2012): **Anpassung von Eisenbahninfrastruktur an den Klimawandel: Anreize durch die „Leistungs- und Finanzierungsvereinbarung,** Bachelorarbeit, Universität Oldenburg, <https://www.grin.com/document/231513>

Rohm, W., Guzikowski, J., Wilgan, K., & Kryza, M. (2019). **4DVAR assimilation of GNSS zenith path delays and precipitable water into a numerical weather prediction model WRF**. *Atmospheric Measurement Techniques*, 12(1), 345-361.

RSSB – Rail Safety and Standards Board (2016): **Tomorrow's Railway and Climate Change Adaptation: Executive Report**, London, May 2016, https://www.adaptationscotland.org.uk/download_file/view_inline/390

Schädler, B. (1987). **Long water balance time series in the upper basins of four important rivers in Europe-indicators for climatic changes**. IAHS Publication 168: 209-219.

Schulz, K., M. Herrnegger, J. Wesemann, D. Klotz and T. Senoner (2016). **Kalibrierung COSERO - Mur für ProVis** [Bericht]. Wien, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur.

Stanzel, P. and H. P. Nachtnebel (2010). **Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt und die Wasserkraftnutzung in Österreich**. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 62(9): 180-187.

Tolson, B. A. and C. A. Shoemaker (2007). **Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration**. *Water Resources Research* 43(1).

Umweltbundesamt (2017). **CORINE Landbedeckung 2018**.

Wesemann, J., H. Holzmann, K. Schulz and M. Herrnegger (2018). **Behandlung künstlicher Speicher und Überleitungen in der alpinen Niederschlags-Abfluss-Vorhersage (Dealing with artificial reservoirs and diversions in alpine rainfall-runoff forecasting)**. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 70: 485-496.

Wesemann, J., M. Herrnegger and K. Schulz (2018). **Hydrological modelling in the anthroposphere: predicting local runoff in a heavily modified high-alpine catchment**. *Journal of Mountain Science* 15(5): 921-938.

Wood, E. F., M. Sivapalan, K. Beven and L. Band (1988). **Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling**. *Journal of Hydrology* 102(1-4): 29-47.

Zekollari, H., M. Huss and D. Farinotti (2019). **Modelling the future evolution of glaciers in the European Alps under the EURO-CORDEX RCM ensemble**. *The Cryosphere* 13(4): 1125-1146.

5 ANHANG

Tabelle 12. Aggregation der CORINE-Landbedeckungsklassen (CLC-Code) in 10 COSERO-Klassen (COSERO-Class).

CLC-CODE	Bezeichnung EBENE3 (EN)	Bezeichnung EBENE3 (DE)	COSERO-Class	COSERO-Name
111	Continuous urban fabric	Durchgängige städtische Prägung	1	Bebaute Siedlungsflächen
112	Discontinuous urban fabric	Nicht durchgängige städtische Prägung	1	Bebaute Siedlungsflächen
121	Industrial or commercial units	Industrie- und Gewerbeflächen, öffentliche Einrichtungen	1	Bebaute Siedlungsflächen
122	Road and rail networks and associated land	Straßen-, Eisenbahnnetze und funktionell zugeordnete Flächen	1	Bebaute Siedlungsflächen
123	Port areas	Hafengebiete	1	Bebaute Siedlungsflächen
124	Airports	Flughäfen	1	Bebaute Siedlungsflächen
131	Mineral extraction sites	Abbauflächen	7	Vegetationsarme Flächen
132	Dump sites	Deponien und Abraumhalden	7	Vegetationsarme Flächen
133	Construction sites	Baustellen	7	Vegetationsarme Flächen
141	Green urban areas	Städtische Grünflächen	3	Grünland
142	Sport and leisure facilities	Sport- und Freizeitanlagen	3	Grünland
211	Non-irrigated arable land	Nicht bewässertes Ackerland	2	Ackerland
212	Permanently irrigated land	Regelmäßig bewässertes Ackerland	2	Ackerland
213	Rice fields	Reisfelder	2	Ackerland
221	Vineyards	Weinbauflächen	2	Ackerland
222	Fruit trees and berry plantations	Obst- und Beerenobstbestände	4	Laubwälder
223	Olive groves	Olivenhaine	4	Laubwälder
231	Pastures	Wiesen und Weiden	3	Grünland
241	Annual crops associated with permanent crops	Einjährige Kulturen in Verbindung mit Dauerkulturen	2	Ackerland
242	Complex cultivation patterns	Komplexe Parzellenstrukturen	2	Ackerland
243	Land principally occupied by agriculture, with significant areas of natural vegetation	Landwirtschaftlich genutztes Land mit Flächen natürlicher Bodenbedeckung von signifikanter Größe	2	Ackerland
244	Agro-forestry areas	Land- und forstwirtschaftliche Flächen	3	Grünland
311	Broad-leaved forest	Laubwälder	4	Laubwälder
312	Coniferous forest	Nadelwälder	5	Nadelwälder
313	Mixed forest	Mischwälder	6	Mischwälder
321	Natural grasslands	Natürliches Grünland	3	Grünland
322	Moors and heathland	Heiden und Moorheiden	5	Nadelwälder
323	Sclerophyllous vegetation	Hartlaubbewuchs	6	Mischwälder
324	Transitional woodland-shrub	Wald-Strauch-Übergangsstadien	6	Mischwälder

331	Beaches, dunes, sands	Strände, Dünen und Sandflächen	7	Vegetationsarme Flächen
332	Bare rocks	Felsflächen ohne Vegetation	7	Vegetationsarme Flächen
333	Sparsely vegetated areas	Flächen mit spärlicher Vegetation	7	Vegetationsarme Flächen
334	Burnt areas	Brandflächen	7	Vegetationsarme Flächen
335	Glaciers and perpetual snow	Gletscher und Dauerschneegebiete	8	Gletscher
411	Inland marshes	Sümpfe	10	Feuchtgebiete
412	Peat bogs	Torfmoore	10	Feuchtgebiete
421	Salt marshes	Salzwiesen	10	Feuchtgebiete
422	Salines	Salinen	10	Feuchtgebiete
423	Intertidal flats	In der Gezeitenzone liegende Flächen	10	Feuchtgebiete
511	Water courses	Gewässerläufe	9	Wasserflächen
512	Water bodies	Wasserflächen	9	Wasserflächen
521	Coastal lagoons	Lagunen	9	Wasserflächen
522	Estuaries	Mündungsgebiete	9	Wasserflächen
523	Sea and ocean	Meere und Ozeane	9	Wasserflächen
999	NODATA	No Data / unclassified	999	NODATA
990	UNCLASSIFIED LAND SURFACE	No Data / unclassified	999	NODATA
995	UNCLASSIFIED WATER BODIES	No Data / unclassified	9	Wasserflächen
990	UNCLASSIFIED	No Data / unclassified	999	NODATA

Niederschlags- und Temperaturkorrektur

Tabelle 13. Multiplikative Niederschlagskorrektur (PCOR) und additive Temperaturkorrektur (TCOR) für jedes NB (Zeile) und Monat (Spalte).

NB	PCOR												TCOR											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
14	2	2	2	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	2	2	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	
17	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	0	0	0	0	0	0.5	1.75	1.75	0	0	0	0
18	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	0	0	0	0	0	0.5	1.75	1.75	0	0	0	0
19	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	0	0	0	0	0	0.5	1.75	1.75	0	0	0	0
20	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	0	0	0	0	0	0.5	1.75	1.75	0	0	0	0
21	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	0	0	0	0	0	0.5	1.75	1.75	0	0	0	0
22	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	1.75	1.75	0.5	0.5	0.5	0.5
23	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	0	0	0	0	0	0.5	1.75	1.75	0	0	0	0
24	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	0	0	0	0	0	0.5	1.75	1.75	0	0	0	0
25	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	0	0	0	0	0	0.5	1.75	1.75	0	0	0	0
26	1.42	1.42	1.42	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.42	1.42	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
27	1.36	1.36	1.36	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.36	1.36	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
28	1.42	1.42	1.42	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.42	1.42	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
29	1.37	1.37	1.37	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.37	1.37	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
30	1.39	1.39	1.39	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.39	1.39	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
31	1.34	1.34	1.34	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.34	1.34	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
32	1.42	1.42	1.42	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.42	1.42	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
33	1.43	1.43	1.43	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.43	1.43	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
34	1.39	1.39	1.39	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.39	1.39	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
35	1.44	1.44	1.44	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.44	1.44	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
36	1.50	1.50	1.50	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.50	1.50	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
37	1.48	1.48	1.48	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.19	1.48	1.48	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
38	1.39	1.39	1.39	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.39	1.39	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
39	1.33	1.33	1.33	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.33	1.33	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
40	1.29	1.29	1.29	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.12	1.29	1.29	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
41	1.33	1.33	1.33	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.13	1.33	1.33	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
42	1.41	1.41	1.41	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.41	1.41	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
43	1.40	1.40	1.40	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.40	1.40	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
44	1.22	1.22	1.22	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.22	1.22	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
45	1.36	1.36	1.36	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.36	1.36	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
46	1.07	1.07	1.07	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.03	1.07	1.07	0	0	0.5	1	1.5	2	3	3	2	1	0.5	0
47	1.50	1.50	1.50	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.20	1.50	1.50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
48	1.27	1.27	1.27	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.11	1.27	1.27	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
49	1.43	1.43	1.43	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.43	1.43	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	1.41	1.41	1.41	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.41	1.41	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Verwendete Anpassungsgütekriterien

Nash-Sutcliffe Effizienz (NSE)

Die Nash-Sutcliffe Effizienz ist eine normalisierte Anpassungsgüte, die die relative Größe der Restvarianz („Rauschen“) im Vergleich zur gemessenen Datenvarianz („Information“) bestimmt. Die Formel wurde 1970 von Nash und Sutcliffe eingeführt. Die NSE Werte reichen von $-\infty$ bis 1. Je näher der Wert bei 1 liegt, desto besser passt der simulierte Modelllauf mit dem beobachteten Modelllauf überein. Ein NSE von 1 ist gleichbedeutend mit einer perfekten Anpassungsgüte. Der Wert 0 bedeutet, dass die Modellsimulation so genau ist, wie der Mittelwert der beobachteten Daten. Wenn der NSE kleiner als 0 ist, dann ist der beobachtete Mittelwert ein besserer Prädiktor als das Modell (Moriasi 2007).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - sim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (obs_i - \overline{obs})^2} [-]$$

Kling-Gupta Effizienz (KGE)

Das Anpassungsgütemaß Kling-Gupta Effizienz (KGE) wurde 2009 von Gupta et al. entwickelt. Der KGE kombiniert Korrelation, Bias und die relative Variabilität (Gupta 2009).

$$KGE = 1 - ED$$

$$ED = \sqrt{(r_{sim\ obs} - 1)^2 + (\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

$$\alpha = \frac{\sigma_{sim}}{\sigma_{obs}}$$

$\sigma_{sim,obs}$... Standardabweichung

Verwendete Klimaprojektionen

Tabelle 14. Klimaprojektionen aus den Projekten ÖKS15 und STARC-Impact, die für die Simulationen mit COSERO angewendet werden.

Klimaprojektion	Projekt	RCP	verfügbar ab
SDM_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17	ÖKS15	4.5	01.01.1951
SDM_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_CNRM-ALADIN53	ÖKS15	4.5	01.01.1951
SDM_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp45_r1i1p1_SMHI-RCA4	ÖKS15	4.5	01.01.1971
SDM_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp85_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17	ÖKS15	8.5	01.01.1951
SDM_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp85_r1i1p1_CNRM-ALADIN53	ÖKS15	8.5	01.01.1951
SDM_CNRM-CERFACS-CNRM-CM5_rcp85_r1i1p1_SMHI-RCA4	ÖKS15	8.5	01.01.1971
SDM_ICHEC-EC-EARTH_rcp45_r12i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17	ÖKS15	4.5	01.01.1951
SDM_ICHEC-EC-EARTH_rcp45_r12i1p1_SMHI-RCA4	ÖKS15	4.5	01.01.1971
SDM_ICHEC-EC-EARTH_rcp45_r1i1p1_KNMI-RACMO22E	ÖKS15	4.5	01.01.1951
SDM_ICHEC-EC-EARTH_rcp45_r3i1p1_DMI-HIRHAM5	ÖKS15	4.5	01.01.1951
SDM_ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r12i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17	ÖKS15	8.5	01.01.1951
SDM_ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r12i1p1_SMHI-RCA4	ÖKS15	8.5	01.01.1971
SDM_ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r1i1p1_KNMI-RACMO22E	ÖKS15	8.5	01.01.1951
SDM_ICHEC-EC-EARTH_rcp85_r3i1p1_DMI-HIRHAM5	ÖKS15	8.5	01.01.1951
SDM_IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp45_r1i1p1_IPSL-INERIS-WRF331F	ÖKS15	4.5	01.01.1951
SDM_IPSL-IPSL-CM5A-MR_rcp85_r1i1p1_IPSL-INERIS-WRF331F	ÖKS15	8.5	01.01.1951
SDM_MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp45_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17	ÖKS15	4.5	01.01.1951
SDM_MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp45_r1i1p1_MPI-CSC-REMO2009	STARC-Impact	4.5	01.01.1951
SDM_MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp45_r1i1p1_SMHI-RCA4	ÖKS15	4.5	01.01.1971
SDM_MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp45_r2i1p1_MPI-CSC-REMO2009	STARC-Impact	4.5	01.01.1951
SDM_MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_CLMcom-CCLM4-8-17	ÖKS15	8.5	01.01.1951
SDM_MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_MPI-CSC-REMO2009	STARC-Impact	8.5	01.01.1951
SDM_MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp85_r1i1p1_SMHI-RCA4	ÖKS15	8.5	01.01.1971
SDM_MPI-M-MPI-ESM-LR_rcp85_r2i1p1_MPI-CSC-REMO2009	STARC-Impact	8.5	01.01.1951
SDM_NCC-NorESM1-M_rcp45_r1i1p1_DMI-HIRHAM5	STARC-Impact	4.5	01.01.1951
SDM_NCC-NorESM1-M_rcp85_r1i1p1_DMI-HIRHAM5	STARC-Impact	8.5	01.01.1951

Tabelle 15. Maximaler, minimaler und medianer langjähriger Jahresmittelwert der Referenzperiode (1991-2020) und nahen Zukunft (2021-2050) für diverse Wasserbilanzgrößen.

		Jahreswerte																			
		Klostertal (Braz)				Stubaital (Fulpmes)				Stubachtal (Uttendorf)				Obervellach II				Rosenbach			
		1991-2020		2021-2050		1991-2020		2021-2050		1991-2020		2021-2050		1991-2020		2021-2050		1991-2020		2021-2050	
		RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5	RCP4.5	RCP8.5		
Lufttemperatur [°C]	max	3.0	3.4	3.79	4.1	1.98	2.25	2.83	3.09	3.21	3.48	3.98	4.23	1.87	2.08	2.77	3	6.36	6.56	7.14	7.69
	Median	2.8	2.9	3.5	3.7	1.7	1.8	2.5	2.6	2.9	3.0	3.7	3.8	1.6	1.7	2.5	2.5	6.0	6.2	6.9	7.0
	min	2.7	2.6	3.16	3.38	1.63	1.49	2.06	2.28	2.86	2.71	3.27	3.5	1.49	1.37	1.9	2.1	5.96	5.82	6.32	6.48
Niederschlag [mm]	max	2199	2183	2335	2459	1296	1287	1335	1359	2151	2134	2213	2327	1818	1797	1884	1970	1858	1856	1834	2008
	Median	2150	2156	2216	2230	1258	1260	1278	1321	2090	2090	2126	2180	1751	1753	1767	1818	1790	1782	1770	1833
	min	2075	2105	2020	2095	1220	1223	1248	1266	2049	2037	2047	2084	1711	1675	1704	1743	1632	1635	1671	1676
Tatsächliche Verdunstung [mm]	max	377	381	399	401	355	360	382	384	289	300	314	317	310	319	342	345	550	553	566	578
	Median	372	373	386	393	348	350	367	370	286	285	304	308	302	303	324	328	524	527	543	547
	min	354	358	366	356	343	341	343	362	281	279	284	288	289	292	310	318	504	509	525	528
Potentielle Verdunstung [mm]	max	524	534	543	545	485	497	516	515	534	547	562	561	483	492	511	510	633	641	661	666
	Median	515	518	538	537	479	479	504	503	528	529	552	550	475	477	500	500	626	628	649	649
	min	512	508	516	519	475	471	482	494	524	521	532	542	470	468	481	492	620	618	634	640
Simulierter Abfluss [mm]	max	1846	1811	1971	2112	1002	992	990	1019	1924	1910	1938	2057	1521	1485	1558	1640	1345	1311	1290	1470
	Median	1775	1783	1835	1828	963	971	937	975	1858	1855	1853	1895	1441	1448	1443	1490	1262	1264	1231	1285
	min	1700	1723	1636	1702	934	934	898	921	1816	1808	1761	1796	1407	1380	1364	1416	1092	1091	1118	1132
Gletscherbeitrag [mm]	max	0	0	0	0	68	79	32	29	84	93	30	29	0	0	0	0	0	0	0	0
	Median	0	0	0	0	60	65	27	27	75	79	27	26	0	0	0	0	0	0	0	0
	min	0	0	0	0	58	57	26	22	72	75	25	22	0	0	0	0	0	0	0	0
Schneeschnmelze inkl. P [mm]	max	1320	1301	1307	1352	662	669	646	665	1199	1237	1208	1230	1073	1081	1056	1122	607	626	590	598
	Median	1188	1195	1184	1201	617	596	585	584	1137	1111	1120	1132	978	966	914	953	568	569	493	512
	min	1077	1081	1034	1035	555	546	516	540	1082	1067	1007	1003	900	919	851	802	495	470	413	380
Schneeschnmelze exkl. P [mm]	max	960	950	973	948	561	566	547	557	1008	1042	983	1034	816	824	783	830	449	438	427	440
	Median	893	872	842	885	488	469	449	465	927	889	873	918	679	673	624	668	360	346	285	296
	min	712	694	661	658	407	403	369	384	830	826	780	773	584	603	526	507	289	267	216	195
Schneefall-menge [mm]	max	960	950	961	943	574	580	555	565	1030	1063	995	1052	835	849	788	838	459	446	437	445
	Median	903	875	836	887	495	476	453	468	945	909	886	925	683	675	627	671	359	346	289	298
	min	707	696	661	649	407	407	372	382	837	837	784	776	587	596	522	506	274	251	220	195
Gletscher-Wasser-äquivalent [mm]	max	0	0	0	0	1359	1360	627	577	1266	1247	473	433	0	0	0	0	0	0	0	0
	Median	0	0	0	0	1316	1290	555	527	1219	1208	411	377	0	0	0	0	0	0	0	0
	min	0	0	0	0	1214	1190	420	375	1127	1086	337	308	0	0	0	0	0	0	0	0
Schnee-Wasser-äquivalent [mm]	max	255	246	257	238	136	131	121	130	353	363	276	298	397	390	310	342	72	67	60	55
	Median	228	218	202	215	113	111	105	101	284	281	255	248	293	269	217	216	60	54	39	45
	min	156	150	147	138	96	94	86	84	241	243	213	190	238	225	180	158	47	47	31	23