



universität  
wien

## MASTERARBEIT / MASTER'S THESIS

Titel der Masterarbeit / Title of the Master's Thesis

**„Ableitung von Klimaindizes und Etablierung künftiger  
Entwicklungskorridore potentieller Steinschlagereignisse  
entlang des Schienennetzes der ÖBB Infrastruktur AG “**

verfasst von / submitted by

Christian Wally, BSc

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Master of Science (MSc)

Wien, 2021 / Vienna, 2021

Studienkennzahl lt. Studienblatt /  
degree programme code as it appears on  
the student record sheet:

UA 066 614

Studienrichtung lt. Studienblatt /  
degree programme as it appears on  
the student record sheet:

Masterstudium Meteorologie

Betreut von / Supervisor:

Priv.-Doz. Mag. Dr. Christoph Matulla



# Abstract

Rockfall is a natural hazard process, that affects infrastructure in the alpine region in many ways. Protection measures can be applied more efficiently when the potential for hazard occurrence can be estimated at least for the lifetime of the measure. Using a dataset of historical events along the Austrian railnet timeseries of meteorological parameters are determined to detect characteristic patterns (Climate Indices) for rockfall occurrence using an empirical orthogonal functions (EOF) approach. The next step is validation, where a set of daily precipitation sum and minimum temperature performs in a way, so that it is assumed to be a suitable predictor. Finally the potential for rockfall occurrence until 2100 is determined from GCM projections that have been downscaled to local scale using the analog method. The resulting future climate risk index shows a slightly negative trend for hazard development along the railnet in the alpine region of Austria.

# Zusammenfassung

Steinschlag und Felssturz sind Naturgefahrenprozesse, die vielfältige Auswirkungen auf Infrastrukturanlagen im Alpenraum haben. Die verfügbare Vielfalt an Schutzmaßnahmen kann besonders effizient eingesetzt werden, wenn die Frequenz des Auftretens auf die Lebensdauer der Maßnahme abgeschätzt werden kann. Für einen vorliegenden Datensatz vergangener Ereignisse entlang des österreichischen Schienennetzes werden Zeitserien meteorologischer Parameter (Prädiktoren) ermittelt, aus denen sich mithilfe eines *empirical orthogonal functions*-Ansatzes (EOF) charakteristische Muster (*Climate Indices*) berechnen lassen. In der folgenden Validierungsphase werden verschiedene Prädiktorensätze verglichen, wobei sich eine Kombination aus täglicher Niederschlagssumme und Minimumtemperatur als praktikabel erweist. Darauf aufbauend wird das Potential für das Auftreten von Steinschlagereignissen bis 2100 berechnet, indem das Auftreten ähnlicher Indizes in GCM-Projektionen, die mithilfe der Analogmethode auf regionale Skala gebracht wurden, gesucht wird. Der resultierende Klimarisikoindex weist einen leicht negativen Trend für Felssturzgefahr entlang des Bahnnetzes in der alpinen Region Österreichs auf.

# Inhaltsverzeichnis

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Einleitung</b>                                                   | <b>1</b>  |
| 1.1. Fragestellung . . . . .                                           | 1         |
| 1.2. Naturgefahrenmanagement der ÖBB . . . . .                         | 1         |
| 1.3. Relevante Publikationen . . . . .                                 | 2         |
| 1.4. Klimawandel . . . . .                                             | 3         |
| 1.4.1. Strahlungsantrieb und Zunahme der globalen Mitteltemperatur . . | 4         |
| 1.4.2. Emissionen und Szenarien . . . . .                              | 4         |
| 1.4.3. Klimaprojektionen . . . . .                                     | 7         |
| 1.4.4. Folgen des Klimawandels . . . . .                               | 8         |
| 1.5. Steinschlag . . . . .                                             | 9         |
| 1.5.1. Auslöser . . . . .                                              | 10        |
| 1.5.2. Schutzmaßnahmen . . . . .                                       | 11        |
| 1.5.3. Steinschlag und Klimawandel . . . . .                           | 12        |
| <b>2. Daten</b>                                                        | <b>15</b> |
| 2.1. ÖBB-Ereignisdaten . . . . .                                       | 15        |
| 2.1.1. Kategorisierung . . . . .                                       | 15        |
| 2.1.2. Saisonalität, Regionalität und Höhenabhängigkeit . . . . .      | 19        |
| 2.2. Spartacus . . . . .                                               | 19        |
| 2.3. Event space . . . . .                                             | 21        |
| 2.4. Global Circulation Models . . . . .                               | 22        |
| 2.4.1. Modell ACCESS . . . . .                                         | 22        |
| 2.4.2. Modell TaiESM . . . . .                                         | 22        |
| 2.4.3. Downscaling . . . . .                                           | 23        |
| 2.4.4. Szenarien . . . . .                                             | 23        |
| <b>3. Methoden</b>                                                     | <b>25</b> |
| 3.1. Berechnung der CIs . . . . .                                      | 25        |
| 3.1.1. EOF-Analyse . . . . .                                           | 25        |
| 3.1.2. Auffinden geeigneter Prädiktoren und Validierung . . . . .      | 27        |

|                                                                  |           |
|------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2. Entwicklungskorridore von Schadereignissen (HDCs) . . . . . | 31        |
| 3.2.1. Gaussfilter . . . . .                                     | 31        |
| <b>4. Ergebnisse und Diskussion</b>                              | <b>32</b> |
| 4.1. CIs . . . . .                                               | 32        |
| 4.1.1. Versuche mit univariater EOF Analyse . . . . .            | 32        |
| 4.1.2. Unabhängiger Datensatz . . . . .                          | 37        |
| 4.1.3. Wahl der Prädiktoren und Validierung . . . . .            | 37        |
| 4.2. HDCs . . . . .                                              | 46        |
| 4.2.1. HDCs in der Vergangenheit . . . . .                       | 47        |
| 4.2.2. HDCs aus Klimamodellen . . . . .                          | 50        |
| <b>5. Conclusio und Ausblick</b>                                 | <b>52</b> |
| 5.1. CIs . . . . .                                               | 52        |
| 5.2. HDCs . . . . .                                              | 53        |
| <b>Literatur</b>                                                 | <b>55</b> |
| <b>A. Anhang</b>                                                 | <b>63</b> |
| A.1. ergänzende Abbildungen . . . . .                            | 63        |

# Abbildungsverzeichnis

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| 1.1. Strahlungsantrieb während des Industriezeitalters . . . . .         | 5  |
| 1.2. Veränderung der Treibhausgaskonzentrationen . . . . .               | 6  |
| 1.3. Szenarien für CMIP6 . . . . .                                       | 8  |
| 1.4. SSP und RCP Szenarien . . . . .                                     | 9  |
| 1.5. Übersicht über Folgen des Klimawandels . . . . .                    | 10 |
| 1.6. Beispiele für Schutzmaßnahmen bei Steinschlaggefahr. . . . .        | 14 |
| 2.1. Übersicht über die vorhandenen Ereignisdaten . . . . .              | 17 |
| 2.2. Ablaufschema für die Kategorisierung . . . . .                      | 18 |
| 2.3. Häufigkeit von Ereignissen in Niederschlagsmengen-Klassen . . . . . | 20 |
| 2.4. Räumliche Verteilung der Ereignisse . . . . .                       | 20 |
| 2.5. Saisonale und Höhenverteilung der Ereignisse . . . . .              | 21 |
| 2.6. Aufteilung Österreichs in Regionen . . . . .                        | 22 |
| 4.1. Erste CIs für Niederschlag . . . . .                                | 33 |
| 4.2. Anzahl notwendiger CIs . . . . .                                    | 33 |
| 4.3. RMSE für einzelne Ereignisse . . . . .                              | 35 |
| 4.4. Rekonstruktion einzelner Ereignisse . . . . .                       | 35 |
| 4.5. EOF1 und zugehörige PCs . . . . .                                   | 36 |
| 4.6. EOFs bei Vernachlässigung einzelner Ereignisse . . . . .            | 36 |
| 4.7. CIs aus verschiedenen Datensätzen . . . . .                         | 38 |
| 4.8. Datensätze im Delete-d-Kreuzvalidierungsprozess. . . . .            | 39 |
| 4.9. (P)PCs aus einem für den ersten CI . . . . .                        | 40 |
| 4.10. (P)PCs aus einem für den zweiten CI . . . . .                      | 40 |
| 4.11. Eventspace für ein Ereignis mit euklidischer Distanz . . . . .     | 41 |
| 4.12. Eventspace für ein Ereignis mit Mahalanobisdistanz . . . . .       | 42 |
| 4.13. Verteilung der euklidischen Distanzen . . . . .                    | 43 |
| 4.14. Verschiedene Prädiktoren . . . . .                                 | 45 |
| 4.15. ROC-Diagramm . . . . .                                             | 46 |
| 4.16. CIs aus Minimumtemperatur und Niederschlag . . . . .               | 47 |
| 4.17. Ereignisraum für einen Gitterpunkt . . . . .                       | 48 |

## *Abbildungsverzeichnis*

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| 4.18. Gitterpunkte für die HDC Berechnung . . . . . | 48 |
| 4.19. HDCs für verschiedene Schwellwerte . . . . .  | 49 |
| 4.20. Normierte HDCs 1990-2100 . . . . .            | 51 |
| 4.21. Darstellung der HDCs als Boxplots . . . . .   | 51 |
| A.1. EOF2 . . . . .                                 | 63 |
| A.2. EOF3 . . . . .                                 | 63 |

# Tabellenverzeichnis

|                                                       |    |
|-------------------------------------------------------|----|
| 2.1. Mögliche Ursachen in den Ereignisdaten . . . . . | 16 |
| 3.1. Allgemeine Kontingenztafel. . . . .              | 30 |
| 4.1. Kontingenztafeln . . . . .                       | 42 |
| 4.2. Kennzahlen zu HDCs . . . . .                     | 50 |



# 1. Einleitung

## 1.1. Fragestellung

Durch den rezenten Klimawandel kommt es zu veränderten Intensitäten meteorologischer Prozesse, die verschiedene Naturgefahren auslösen (Alvioli u. a. 2018; Gariano und Guzzetti 2016; IPCC 2014a). Steinschlag ist vor allem im alpinen Bereich relevant und für Infrastrukturanlagen wie Bahnlinien, Straßen oder Stromleitungen eine bedeutende Gefahr. Um Abschätzungen der zukünftigen Veränderungen treffen zu können, stellen sich die Fragen:

- Gibt es charakteristische Muster (*climate indices*, CIs) im zeitlichen Verlauf meteorologischer Felder, die für die ÖBB Infrastruktur AG (ÖBB Infra) relevante, Steinschlagereignisse triggern?
- Wenn ja, wie wird sich die Häufigkeit des Auftretens dieser Muster in naher Zukunft (*near future*, 2036-2065) und ferner Zukunft (*remote future*, 2071-2100) entwickeln?

Diese relative Häufigkeit in der Zukunft wird Entwicklungskorridor (*hazard development corridor*, HDC) genannt. Sie ist einerseits flächendeckend für das ganze Schienennetz, aber auch für eine einzelne Region berechenbar.

## 1.2. Naturgefahrenmanagement der ÖBB

Die ÖBB Infra betreibt ein Schienennetz von etwa 5000 km, das durch nahezu alle Kulturlandschaftsräume Österreichs führt und sich vertikal von 116 m Seehöhe (Purbach am Neusiedlersee) bis 1370 m (Brennerpass) erstreckt. Vor allem in alpinen Bereichen ist es vielfältigen Naturgefahren, wie etwa Überflutungen, Murgängen, Hangrutschungen und Lawinen, aber auch Steinschlägen ausgesetzt (ÖBB-Infrastruktur AG 2018). Um die schädlichen Auswirkungen von Naturereignissen auf den Bahnbetrieb möglichst gering zu halten, betreibt die ÖBB ein Naturgefahrenmanagement, das sich mit Risikoreduktion durch Erstellung einer Naturgefahrenhinweiskarte und der Planung und dem Betrieb von Schutzbauwerken sowie dem Schutzwaldmanagement beschäftigt. Wenn eine Gefahr bereits erkennbar ist, dient ein Alarmsystem der Information beteiligter Mitarbeiterinnen

## 1. Einleitung

und Mitarbeiter. Die Erkennung der Gefahr erfolgt wenn ein vorhandenes Warnsystem auslöst, wenn meteorologische Vorhersagen einen definierten Schwellwert überschreiten, oder die internen Lawinenkommissionen von einer Gefährdung ausgehen. Eine weitere wichtige Funktion ist auch die Ereignisdokumentation, die durch Analyse von bereits vergangenen Ereignissen wichtige Erkenntnisse über den Prozessablauf zulässt und darauf aufbauend Maßnahmen ableiten lässt, die ein ähnliches Ereignis in Zukunft verhindern oder dessen Folgen abschwächen können (Kundela u. a. 2016).

## 1.3. Relevante Publikationen

Es existieren - im Vergleich zu anderen Naturgefahren wie Rutschungen - relativ wenige Arbeiten, die sich mit der Verknüpfung zwischen Steinschlagereignissen und meteorologischen Parametern beschäftigen (Macciotta 2019), wenngleich auch schon seit Längerem an den Auslösern geforscht wird, wie etwa Heim (1931) sowie Bjerrum und Jørstad (1968) beweisen.

In Krautblatter und Moser (2009) wurde ein Zusammenhang zwischen Steinschlagvolumina und 30-minütigen sowie 1-stündigen Niederschlagssummen gefunden. Es wurden jedoch einzelne Hänge im Reintal (Deutschland) beobachtet unter welchen die Steine in einer Auffangeinrichtung gestoppt und gewogen werden.

Delonca u. a. (2014) fanden für eine Bahnlinie auf Réunion Korrelationen zwischen relativer Anzahl jährlicher Steinschlagereignisse und relativem jährlichem Niederschlag sowie zwischen absoluter Anzahl von Steinschlägen und 2-tägigen Niederschlagssummen. Für eine Bahnlinie in der Auvergne (Frankreich) wurde keine Korrelation mit einer Niederschlagsgröße festgestellt. Jedoch wurde eine schwache Korrelation mit der täglichen Minimumtemperatur zwei Tage vor dem Ereignis gefunden.

Ein Ansatz, der dieser Arbeit eher ähnlich ist, wurde von Macciotta u. a. (2015) für eine rund 55 km lange Bahnlinie in den Kanadischen Kordillern erarbeitet. Es wurden typische Zustände von Frost-Tau-Zyklen und Niederschlagssummen gesucht, die beim Auftreten von Steinschlägen herrschten, anschließend wurde beim Auftreten dieser Zustände ein Alarm ausgelöst. Mit diesem Modell war es möglich, 90 % der Ereignisse bei einer Warndauer von 183 Tagen vorherzusagen. Das heißt an 50 % aller Tagen eines Jahres wurde gewarnt und damit fielen die restlichen 10 % der Ereignisse an Tage, an denen keine Warnung ausgesprochen wurde. Als Warnschwelle für Niederschlag wurde eine 3-

Tages-Niederschlagssumme von 2 mm verwendet, was etwa einem halben Prozent des durchschnittlichen jährlichen Niederschlags von 350 mm entspricht. Weiters ist anzumerken, dass alle meteorologischen Messungen von zwei Wetterstationen stammten, die als repräsentativ für die rund 55 km lange Strecke angesehen wurden.

Paranunzio u. a. (2016) verwendeten einen statistischen Ansatz um einen Zusammenhang zwischen Anomalien von Temperatur bzw. Niederschlagssumme und dem Auftreten von Felssturz zu finden. Die Untersuchungen wurden für 41 Ereignisse in den italienischen Alpen durchgeführt, die auf einer Seehöhe von 1500 m bis 4200 m aufgetreten waren. Es zeigte sich einerseits der erwartete Zusammenhang zwischen positiven Temperaturanomalien und Steinschlag in großen Seehöhen, den die Autoren auf das Tauen alpiner Permafrostböden zurückführen. Andererseits wurde auch eine überraschende Zunahme der Ereignisse bei negativen Temperaturanomalien festgestellt, die vor allem im westlichen Teil der Alpen auftrat.

## 1.4. Klimawandel

Klima ist definiert als mittlere Wetterverhältnisse über einen längeren Zeitraum, die den Zustand der Atmosphäre kennzeichnen (Hann 1883; Kraus 2004). Haimberger u. a. (2014) beschreiben das Klimasystem der Erde als „ein dynamisches System, das neben der Atmosphäre auch die Hydro-, Kryo-, Bio- und Lithosphäre umfasst und das durch im Detail nicht vorhersagbare Schwankungen charakterisiert ist“.

Dieses System unterliegt, aufgrund interner Variabilität und veränderlicher Antriebe, einem ständigen Wandel (Claussen 2007; Haimberger u. a. 2014). Die infrage kommenden Antriebe sind: Sonne, Vulkanismus, Treibhausgase, Aerosole und Landnutzungsänderungen (Claussen 2007; IPCC 2014a). Die Sonne, die für den größten Energieeintrag ins System Erde sorgt ist nur für einen geringen Teil der Variabilität verantwortlich. Denn die Zunahme ihrer Strahlungsemission beträgt rund 10 % pro Milliarde Jahre und die Zyklen mit einer Periodendauer von 11, 22, 80 und knapp 200 Jahren betragen nur 0,1 bis 0,3 % des mittleren Strahlungsflusses und tragen kaum zur Erderwärmung bei (Claussen 2007; Solanki u. a. 2004).

Einzelne große Vulkanausbrüche wie etwa der des Tambora 1815 oder des Pinatubo 1991 führen durch starke Emission von Aerosolen zu Abschattung und damit Abkühlung. Der Einfluss eines einzelnen Vulkanausbruchs ist jedoch auf kurze Zeitspannen beschränkt

## 1. Einleitung

und hat vernachlässigbaren Einfluss auf das globale Klima. Von Bedeutung ist jedoch eine generelle Häufung, wie sie als Ursache für die Abkühlung im 17. Jahrhundert vermutet wird. Auch das Ausbleiben von Vulkanausbrüchen kann Klima beeinflussen und wird als mögliche Erklärung für die Erwärmung am Beginn des 20. Jahrhunderts genannt. (Clausen 2007; Briffa u. a. 1998). Der geringe Einfluss von Veränderungen der Sonnenaktivität und des Vulkanismus auf den Strahlungsantrieb ist in Abb. 1.1 deutlich erkennbar.

Die Bodenoberfläche ist maßgebend für Wechselwirkungsprozesse mit der Atmosphäre. Eine veränderte Bodennutzung und die Umgestaltung von Landoberflächen beeinflussen eine Reihe an sie beschreibenden Parametern wie Albedo, Rauigkeit, Dichte, Wärmeleitfähigkeit, Wassertransportvermögen, Oberflächentemperatur und -feuchte (Kraus 2004). Diese Veränderungen können anthropogene, also durch Einfluss des Menschen entstandene, Ursachen haben, wie etwa die Abholzung von Wäldern oder selbst Folge des Klimawandels sein, wie abschmelzendes Meereis oder Gletscherrückgang.

### 1.4.1. Strahlungsantrieb und Zunahme der globalen Mitteltemperatur

Anthropogene und natürliche Einflüsse auf das Klimasystem sind als zusätzlicher Strahlungsantrieb  $RF$  in der Einheit  $W/m^2$  quantifizierbar, der als Störung auf die Energiebilanz der Erde wirkt:  $\Delta T = \lambda RF$ . Dabei ist  $\Delta T$  die Reaktion der globalen Mitteltemperatur auf die Störung  $RF$  und  $\lambda$  wird als Klimasensitivitätsparameter bezeichnet (Myhre u. a. 2013). Ein Überblick über anthropogene und natürliche Anteile am Strahlungsantrieb ist in Abb. 1.1 zu sehen. So ist im globalen Mittel der Strahlungsantrieb von 1750 bis 2011 um  $2,3 W/m^2$  (Unsicherheitsbereich 1,1 bis  $3,3 W/m^2$ ) angestiegen (IPCC 2014a). Das führte in den letzten 100 Jahren zu einer Erhöhung der globalen Mitteltemperatur um etwa  $1 ^\circ C$ , was in erdgeschichtlichen Maßstäben eine sehr große Anstiegsrate ist (Haimberger u. a. 2014). Die Temperaturzunahme führt auch zu Veränderungen weiterer Größen wie z.B. Luftfeuchte, Verdunstung, Bewölkung und Niederschlag (Kraus 2004).

### 1.4.2. Emissionen und Szenarien

Durch anthropogene Aktivitäten kommt es seit Beginn der Industrialisierung Mitte des 19. Jahrhunderts zu einem Anstieg der Emission von Treibhausgasen, wie für Kohlendioxid ( $CO_2$ ), Methan ( $CH_4$ ) und Lachgas ( $N_2O$ ) in Abb. 1.2 zu sehen ist (IPCC 2014a). Dieser

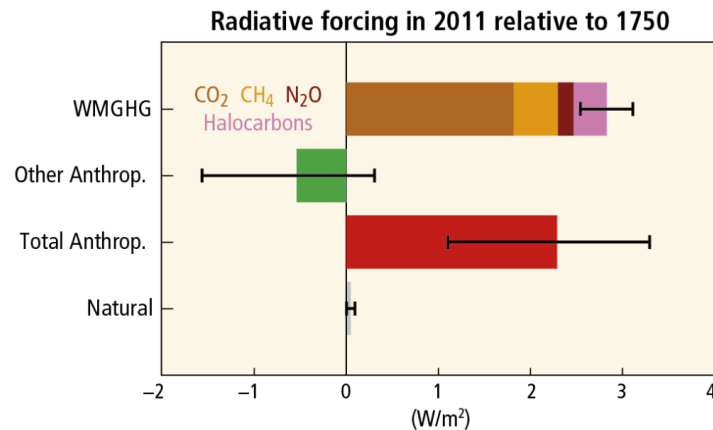


Abbildung 1.1.: Strahlungsantrieb infolge veränderter Treibhausgaskonzentrationen (*well mixed greenhouse gases*, WMGHG). Die Fehlerbalken beschreiben eine Unsicherheit von 5 % bis 95 %. *Other Anthrop.* beschreibt Aerosole, veränderte Albedo durch Landnutzung und veränderte Ozonkonzentration. *Natural forcings* beinhaltet solare und vulkanische Effekte. Quelle: IPCC (2014a)

Anstieg hat weitreichende Auswirkungen auf das Klimasystem der Erde.

Der Strahlungshaushalt der Erde läuft grundsätzlich so ab, dass kurzwellige Sonnenstrahlung von der Erde empfangen wird und im langwelligen Teil des Spektrums Abstrahlung in den Weltraum stattfindet. Aus einem solchen einfachen Modell lässt sich die Gleichgewichtstemperatur der Erde von etwa  $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$  berechnen. Tatsächlich stimmt diese Temperatur gut mit der effektiven Strahlungstemperatur überein, die von einem Messgerät im Weltall beobachtet wird. Auf die Temperatur an der Erdoberfläche hat die Atmosphäre großen Einfluss: In der Atmosphäre wird ein Teil der solaren Strahlung reflektiert, ein anderer transmittiert (zum Boden) und ein weiterer absorbiert. Am Erdboden finden Reflexion und Absorption statt. Sowohl Atmosphäre als auch Boden strahlen selbst im langwelligen Spektrum ab. Auch diese Strahlung verhält sich wie oben beschrieben. Ergänzt man diese Vorgänge in einem Modell liegt die berechnete Temperatur bei etwa  $14\text{ }^{\circ}\text{C}$  ( $287\text{ K}$ ), was der globalen Mitteltemperatur an der Erdoberfläche gut entspricht (Haimberger u. a. 2014; Hantel und Haimberger 2016; Kraus 2004). Neben diesem natürlichen Treibhauseffekt gibt es auch den anthropogenen Treibhauseffekt, der eine Verstärkung der natürlichen Verhältnisse bewirkt und durch Emissionen in die Atmosphäre verursacht wird (Kraus 2004).

Treibhausgase erhöhen die Absorption langwelliger Strahlung Richtung Weltraum und re-emittieren diese, wobei die Emission in Richtung Boden den Treibhauseffekt verschärft.

## 1. Einleitung

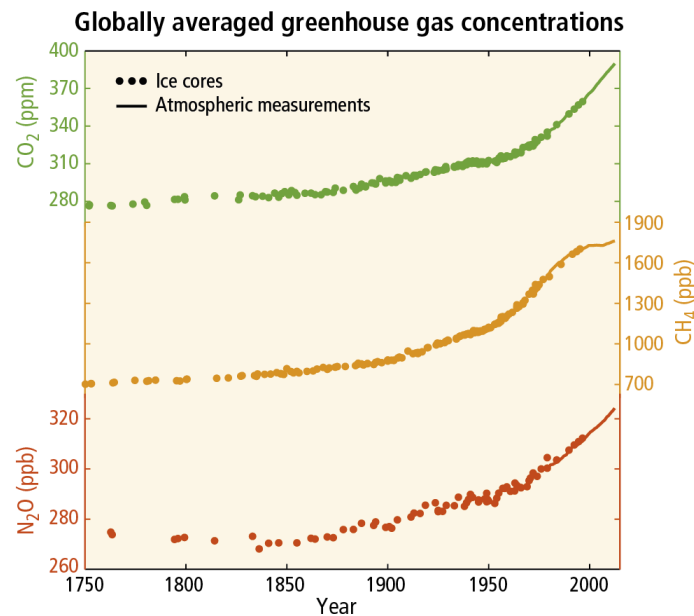


Abbildung 1.2.: Beobachtete Veränderung der Konzentration von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>, grün), Methan (CH<sub>4</sub>, orange) und Lachgas (N<sub>2</sub>O, rot) in der Atmosphäre aus Eisbohrkernen (Punkte) und direkten Messungen (Linien). Quelle: IPCC (2014a)

Dadurch kann weniger Strahlungsenergie in den Weltraum abgegeben werden und es kommt zu einer stetigen Erwärmung der Atmosphäre, bis sich ein neues Gleichgewicht auf höherem Temperaturniveau einstellt (Haimberger u. a. 2014).

Für Prognosen in die Zukunft sind Annahmen über die zukünftigen Entwicklungen der Klimaantriebe nötig, die von sozioökonomischen Entwicklungen abhängig sind. Durch eine Abdeckung eines weiten Bereichs möglicher Entwicklungen sind die Folgen des Klimawandels auf die Gesellschaft und auf Ökosysteme, sowie die Effektivität verschiedener Minderungsstrategien und Anpassungen abschätzbar (Gidden u. a. 2019; O'Neill u. a. 2016b). Darüber hinaus lassen sich auch die Unsicherheiten quantifizieren. Die Erstellung und Verwendung von Szenarien ist immer wieder Veränderungen unterworfen, so arbeiten seit 2009 die Experten verschiedener Wissenschaftsrichtungen parallel an der Szenarientwicklung, was zuvor nacheinander erfolgte (Moss u. a. 2010). Für den fünften *assessment report* (AR5) des *International Panel on Climate Change* (IPCC) wurden die verwendeten Szenarien nach dem anthropogenen *radiative forcing* am Ende des Jahrhunderts benannt (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 und RCP8.5), dabei steht RCP für *representative concentration pathway* (Taylor u. a. 2012). Das *coupled model intercomparison project phase 6* (CMIP6) liefert Klimaprojektionen, die direkt für gesellschaftlichen Themen (Abschwächung des Klima-

wandels und Anpassung an Klimafolgen) relevant sind (Eyring u. a. 2016; O'Neill u. a. 2016b). Für diese Projektionen wurde mithilfe von *integrated assesment models* (IAMs) ein neues Set an Szenarien (*Shared Socioeconomic Pathways*, SSPs) für Emissionen, Gas-konzentrationen und Landnutzung entworfen. Diese Szenarien beginnen im Jahr 2015, anstelle von 2006 für CMIP5 (O'Neill u. a. 2016b; Riahi u. a. 2017).

Die verschiedenen Szenarien werden in einer Szenarienmatrix wie in Abb. 1.3 dargestellt. Hier sind verfügbare Szenarien als Zelle zu sehen: Dunkelblaue (*Tier 1*) bilden die Basis für Klimamodellierung, indem sie einen großen Teil der Unsicherheit in zukünftigen Klimaantrieben abdecken. Die hellblauen Zellen (*Tier 2*) bieten zusätzliche interessante Szenarien und Ensembleläufe. Die weißen Zellen sind in im Zusammenhang mit dem *forcing level* (Zeile der Matrix) zu sehen, in der sie stehen. Sie beschreiben mit welchen Szenarien bei entsprechender Klimapolitik der jeweilige Strahlungsantrieb erreicht werden kann (O'Neill u. a. 2016b). Ein Überblick über SSP-Szenarien und ein Vergleich mit RCPs aus CMIP5 ist an Abb. 1.4 zu sehen. Zusätzlich zu den Szenarien aus Abb. 1.3 stehen mit SSP4-19 und SSP5-19 auch Szenarien zur Verfügung, die den Anstieg der globalen Mitteltemperatur bis 2100 auf 1,5°C und den zusätzlich Strahlungsantrieb auf 1,9 W/m<sup>2</sup> beschränken. (Rogelj u. a. 2018). Eine genauere Beschreibung einzelner, in dieser Arbeit verwendeten Szenarien ist, in Kapitel 2.4.4 zu finden.

### 1.4.3. Klimaprojektionen

Ausgangspunkt für die Betrachtung regionaler Klimaveränderungen sind stets globale Klimamodelle, die selbst nur für die globale und kontinentale Skala relevante Ergebnisse liefern. Das liegt daran, dass viele relevante Phänomene im verwendeten Gitter nicht aufgelöst werden können. Daher ist ein Downscaling auf eine lokale Skala notwendig. Grundsätzlich gibt es dazu zwei Möglichkeiten: einerseits dynamisches Downscaling mithilfe von regionalen Klimamodellen (RCMs), die das globale Modell als Anfangs- und Randbedingung verwenden und darin auf feinerer Skala laufen (Jacob u. a. 2014), andererseits gibt es die Möglichkeit des statistischen Downscalings, das einen ganz anderen Ansatz verwendet, aber dasselbe Ziel hat (Fowler u. a. 2007; Takayabu u. a. 2016). Dazu wird in einer Zeitserie aus der Vergangenheit ein Zusammenhang zwischen lokaler und globaler Skala gesucht und diese Verknüpfung auch in der Zukunft angewandt.

Die Auflösung der lokalen Daten ist so zu wählen, dass relevante Phänomene realistisch aufgelöst werden. Es gibt allerdings keine allgemein gültige Definition für eine *skillful scale*,

## 1. Einleitung

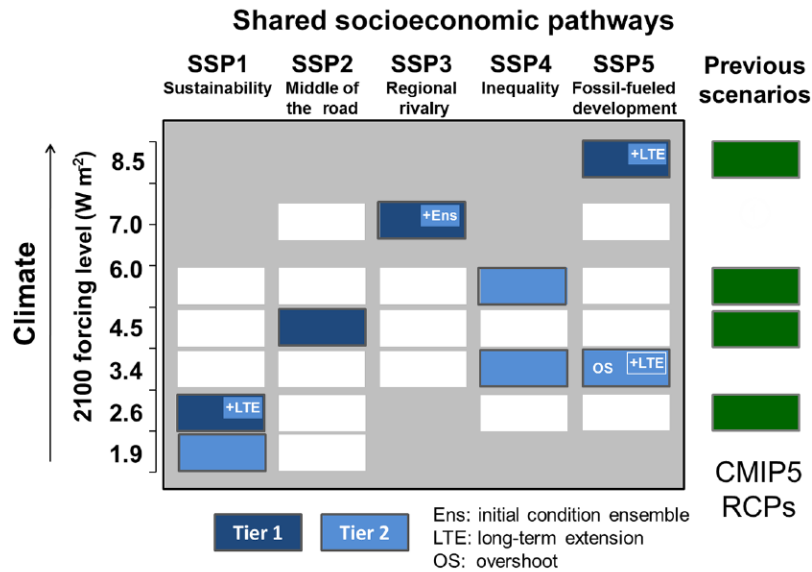


Abbildung 1.3.: SSP-RCP Szenario Matrix. Jede Zelle in der Matrix steht für einen SSP. Blaue Zellen stehen für Szenarien, die als Basis für Klimaprojektionen verwendet werden. Weiße Zellen beschreiben Szenarien, für die Klimainformation aus CMIP5 oder CMIP6 verwendet wurde und die mit Klimapolitik erreichbar sind. Die grünen Zellen am rechten Rand stehen für die RCPs aus CMIP5 und dienen als Vergleich. Quelle: O'Neill u. a. (2016b)

wobei diese oft mit dem 8-fachen Gitterpunktsabstand angegeben wird (Benestad u. a. 2008; Grotch und MacCracken 1991; Matulla u. a. 2008; von Storch u. a. 1993; Takayabu u. a. 2016).

### 1.4.4. Folgen des Klimawandels

Durch den Klimawandel wird es zur Verstärkung bestehender und zur Entwicklung neuer Risiken für menschliche und natürliche Systeme kommen. Fortgesetzte hohe Emissionsraten werden vermutlich zu mehrheitlich negativen Folgen für Biodiversität, Ökosysteme und wirtschaftliche Entwicklung führen und Lebensgrundlagen sowie Nahrungssicherheit gefährden. Einige Risiken sind global relevant, andere nur für einzelne Regionen (IPCC 2014a), wie in Abb. 1.5 ersichtlich.

Konkrete Folgen des Klimawandels sind vor allem in sensiblen Ökosystem bereits heute zu finden. Beispiel dafür sind der Rückgang von Meereis, Permafrost und Gletschern sowie die Gefährdung von Korallenriffen. Eine Zunahme von meteorologischen Extremereignissen wie Hitzewellen, Starkniederschlägen und Überschwemmungen an der Küste sind bereits bemerkbar und die weitere Zunahme gilt als wahrscheinlich (IPCC 2014b). Für

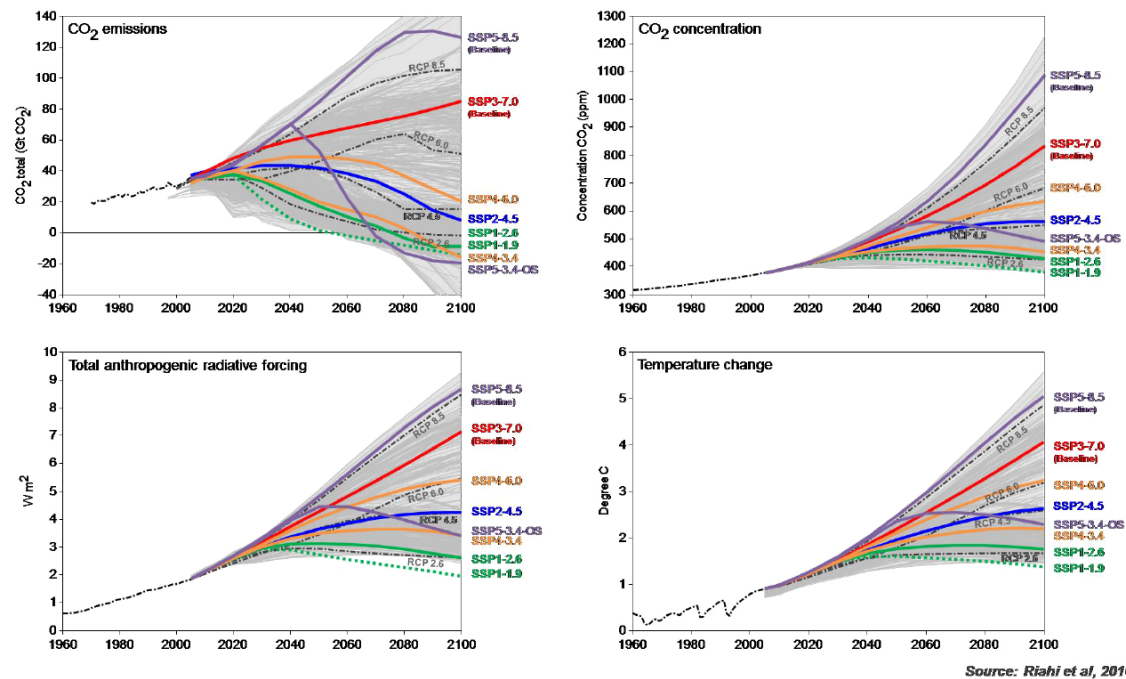


Abbildung 1.4.: Vergleich der verschiedenen SSP und RCP Szenarien für CO<sub>2</sub>-Emissionen und - Konzentrationen, Strahlungsantrieb und Temperaturanstieg. Quelle: O'Neill u. a. (2016b)

Europa ist im Norden mit hoher Wahrscheinlichkeit mit einer Zunahme des Jahresniederschlags zu rechnen, während im Süden die Niederschlagsmengen abnehmen (Kovats u. a. 2014). Im Alpenraum kommt es zum Abschmelzen von Gletschern und zum Auftauen von Permafrostböden und damit zu Verfügbarkeit von Lockermaterial sowie einer Verlagerung potentieller Massenbewegungen in höhere Regionen. Damit ist es nicht unwahrscheinlich, dass Naturgefahren wie Muren, Felsstürze und Rutschungen in Intensität und Anzahl zunehmen (Fuchs 2010).

## 1.5. Steinschlag

Steinschlag bzw. Blockschlag ist laut Definition in Suda und Rudolf-Miklau (2012) das „Fallen, Springen und Rollen von einzelnen, isolierten Steinen (Durchmesser < 0,5 m) und Blöcken (Durchmesser > 0,5 m)“. Felssturz beschreibt ebenda den „Sturz einer Felsmasse, die während des Sturzes bzw. beim Aufprall in Blöcke und Steine fraktioniert wird, wobei die Interaktion zwischen den Komponenten keinen maßgeblichen Einfluss auf die Dynamik des Prozesses hat“. In dieser Arbeit wird Steinschlag synonym mit Blockschlag und Felssturz verwendet, da in sämtlichen vorliegenden Daten nicht - oder nur mit erhebli-

## 1. Einleitung

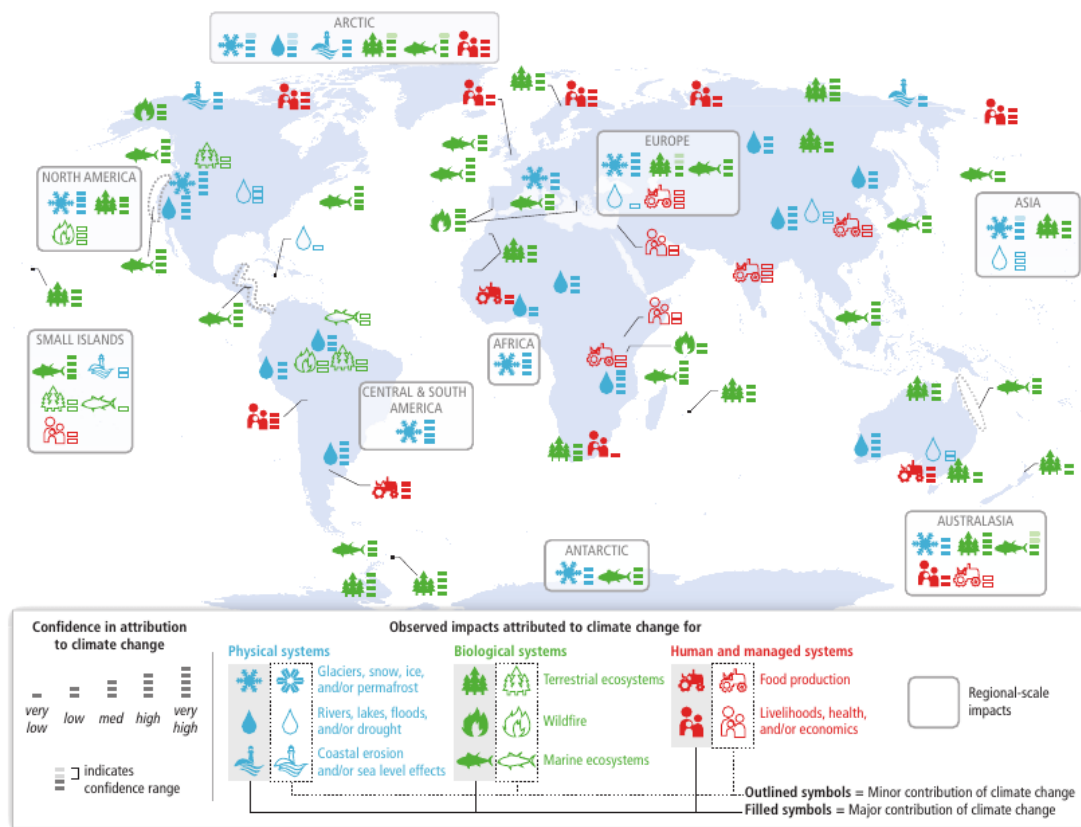


Abbildung 1.5.: Übersicht über mögliche regionale Folgen des Klimawandels. Quelle: IPCC (2014b)

chem Aufwand - auf die Größe des Ereignisses rückgeschlossen werden kann. Für größere Ereignisse ist der Begriff Bergsturz geläufig (Ahnert 2015).

Steinschlag tritt in felsigem, steilen Gelände auf und stellt eine Gefahr für Infrastruktur, Verkehrs- und Kommunikationswege und Menschenleben dar (Dorren u. a. 2005; Heim 1931; Melzner u. a. 2012; Moos u. a. 2017).

Vor jedem Steinschlagereignis kommt es zum Versagen des Felsgefüges, dabei kommen die Versagensmechanismen Fallen, Kippen oder Gleiten in Betracht, die von der räumlichen Orientierung der Trennflächen im Festgestein und dem auslösenden Prozess abhängen (Suda und Rudolf-Miklau 2012).

### 1.5.1. Auslöser

Felsstürze werden durch meteorologische und geologische Bedingungen ausgelöst oder zumindest begünstigt. Dabei kommen als Trigger Frost-/Tauwechsel, Niederschlag, Starkwind, Erdbeben, Eis- oder Wurzeldruck, Schneeschmelze, Aktivitäten von Menschen oder

Wildtieren und fortschreitende Verwitterung des Gesteins in Betracht (Gruner 2008; Krähenbühl 2004; Macciotta 2019; Suda und Rudolf-Miklau 2012). Bereits in frühen Untersuchungen zu diesem Thema stellten sich Niederschlag und Frost-Tau-Wechsel als diejenigen Faktoren heraus, die die größte Relevanz aufweisen (Douglas 1980; Macciotta 2019; Piteau 1977), obwohl etwa Sass (2005) Frost-Tau-Wechsel zwar als begünstigend für Steinschläge sieht, jedoch als unmittelbare Trigger nur Frostverwitterung, Temperaturfluktuationen und Niederschlag nennt. Starker Wind kann zwar direkt mit der Kraft auf den Fels einwirken, die notwendig ist um einen Stein oder Block zu lösen. Häufiger jedoch führt er mittelbar in Verbindung mit Vegetation zu Steinschlägen, indem ein durch Wind geworfener Baum beim Sturz Steine in seinem Wurzelbereich löst (Moos u. a. 2018). Darüber hinaus kann Wind auch Schadereignisse begünstigen, indem eine eventuell vorhandene Schutzwirkung des Waldes durch Windwurf nicht mehr vorhanden ist (Moos u. a. 2017).

Auswertungen der jahreszeitlichen Verteilung zeigen für nahezu alle Regionen und Gesteinsarten das Minimum der Steinschlagaktivität im Sommer (Macciotta 2019). In den Frühjahresmonaten und im Spätherbst treten häufig Maxima auf (Sass und Oberlechner 2012). Sandersen u. a. (1996) erklären diese durch das Auftreten von Temperaturen um den Gefrierpunkt und mit Wasser gefüllten Gesteinsklüften. Dieses Wasser sei im Frühjahr aus Schneeschmelze und im Spätherbst aus Niederschlägen direkt vorhanden. Bei Gruner (2008) wird als Erklärung die Gesteinskontraktion bei tiefen Temperaturen genannt, die zu einer Vergrößerung von Klüften führt, was wiederum das Eindringen von Wasser erleichtert, wobei dieses vor allem aus Schneeschmelze stamme.

### 1.5.2. Schutzmaßnahmen

Im Naturgefahrenmanagement unterscheidet man zwischen aktiven und passiven Maßnahmen. Erstere greifen direkt in den Prozess ein, während passive Maßnahmen wie Raumordnung, Gefahrenzonenplanung und - im Fall von Steinschlag im Gleisbereich - eine temporäre Gleissperre versuchen dessen Auswirkungen zu vermindern. Bei den aktiven Maßnahmen ist eine Unterscheidung in technisch und nicht-technisch sinnvoll. Bei den technischen Maßnahmen sind das Absprengen oder manuelles Losrütteln von absturzgefährdeten Blöcken, die Vernetzung von Felswänden und die Stabilisierung mithilfe von Ankern, Betonbalken oder Spritzbetonschalen im Quellgebiet zu möglich (Wyllie u. a. 2004). Weiter unten im Transfer- oder Ablagerungsbereich sind die Errichtung von Dämmen, Galerien und Steinschlagschutznetzen möglich (Prina Howald u. a. 2017), Beispiele

## 1. Einleitung

sind in Abb. 1.6a und 1.6b zu sehen.

Die Wahl einer passenden Schutzmaßnahme bzw. deren Dimensionierung passiert in Österreich anhand der ONR 24810. Dazu wird das Gelände aufgenommen, ein Bemessungsblock definiert, Schadenfolgeklassen festgelegt und mithilfe von Simulationsprogrammen die Einwirkung der Gesteinsmassen auf das Bauwerk berechnet (*ONR 24810* - 2017). Nicht-technische aktive Schutzmaßnahmen sind auf die Anlage und Bewirtschaftung eines Schutzwaldes beschränkt. Dieser wirkt aktiv auf den Prozess ein, indem er Durchwurzelung des Bodens herstellt, damit erosionsvermeidend wirkt und bereits rollenden oder gleitenden Blöcken Energie durch Treffer entzieht (Moos u. a. 2017). Ein Beispiel ist in Ab. 1.6c zu sehen, wo ein - an einem Baum gestoppter - Block als „stummer Zeuge“ für einen Steinschlagprozess dient.

### 1.5.3. Steinschlag und Klimawandel

Wie bereits in Abschnitt 1.4.4 ausgeführt, hat der rezente Klimawandel eine Vielzahl an Auswirkungen. Ob eine Erhöhung des Steinschlagrisikos dazu gehört, ist nicht abschließend geklärt und vermutlich regional unterschiedlich.

In vergletscherten Regionen und im Bereich des alpinen Permafrostes hat die Zunahme der Mitteltemperatur ein Abschmelzen zur Folge. Dadurch gelangt einerseits Schmelzwasser in Felsklüfte und führt dort zu einem Anstieg des Wasserdrucks, was vor allem während langer Hitzeperioden zu Steinschlägen führt. Andererseits führt auch das direkte Freiwerden von Lockergestein aus der Kryosphäre zu Steinschlägen (Ravel und Deline 2011) und zu murartigen Abflüssen (*periglacial debris flows*), die das Geschiebe in einem Bachbett mit sich führen (Stoffel u. a. 2014). So war in den letzten beiden Dekaden auf der Nordseite der *Aiguilles de Charmonix* im Mt. Blanc-Massiv ein deutlicher Anstieg der Steinschläge aus Permafrost-Regionen zu verzeichnen, wobei eine Korrelation mit Hitzeperioden festgestellt wurde (Ravel und Deline 2011).

In tiefer liegenden Gebieten ist ein Anstieg der Steinschlagereignisse nicht eindeutig feststellbar. Sass und Oberlechner (2012) stellen fest, dass in den letzten Jahrzehnten die Erfassung deutlich verbessert wurde und wesentlich mehr Steinschläge erfasst wurden. Sie fanden keine Korrelation zwischen Temperatur und Steinschlägen, was auch nicht erwartet wurde, da meteorologische Parameter in der Mikroskala direkt am Gestein nicht bekannt waren. Krähenbühl (2004) rechnete nach einer Analyse der Versagensursachen des Gesteins mit einem leichten klimawandelbedingten Anstieg von Steinschlägen, der

allerdings nur andauere bis „die heute kritischen Felsinstabilitäten in den Alpen abgeräumt sind. Dann sei das relative Gleichgewicht wieder eingestellt“. Für die letzten Dekaden zeigt sich jedoch eine Verschiebung der Ereignisse in die Sommermonate, wo sich das sekundäre Maximum verstärken könnte (Sass und Oberlechner 2012). In wärmeren Wintern kann es zu einer Abnahme der Ereignisse kommen, da die Gesteinskontraktion weniger ausgeprägt ist als bei sehr kalten Temperaturen (Gruner 2008).

## 1. Einleitung



(a) Felsverankerung und Spritzbetonschale in Pitten, Niederösterreich. Das Steinschlagschutznetz darauf schützt vor Steinschlag von einem weiter oben liegenden Hang.



(b) Galerie zum Schutz einer Straße bei Maiersdorf, Niederösterreich.



(c) In einem Schutzwald können Bäume gleitende oder rollende Steine stoppen; hier bei Seebenstein, Niederösterreich. Foto: Nicole Samek

Abbildung 1.6.: Beispiele für Schutzmaßnahmen bei Steinschlaggefahr.

## 2. Daten

### 2.1. ÖBB-Ereignisdaten

Grundlage für die weiteren Arbeitsschritte stellen die, von der ÖBB zur Verfügung gestellten, Informationen über Naturereignisse in den Jahren 1990 bis 2019 dar. Diese beinhalten mindestens Informationen über den Tag sowie den Ort des Ereignisses. Die Ortsangabe bezieht sich in den frühen Jahren auf einen Bahnhof bzw. einen Streckenabschnitt zwischen zwei Bahnhöfen. Erst ab 2005 wurde der genaue Streckenkilometer angegeben, was je nach Anzahl gerundeter Nachkommastellen einer Genauigkeit von einem Kilometer bis zu einem Meter entspricht. Die Verortung auf geographische Koordinaten (Breiten- und Längengrad) erfolgte am Institut für Ingenieurbiologie und Landschaftsbau der Universität für Bodenkultur (BOKU). Eine Übersicht über vorhandene Spalten und damit Informationen zu den Ereignisdaten ist in Abb. 2.1 zu sehen. Diese lassen den Schluss zu, dass es in den Jahren 1998 und 2010 eine größere Umstellung in der Datenerfassung gab.

#### 2.1.1. Kategorisierung

Zur Kategorisierung der Daten sind die Felder „Art“ bzw. „Ereignis“ und „Ursache“ enthalten. Einen Überblick über die möglichen Werte gibt Tabelle 2.1. Diese Informationen sind sehr nützlich um die endgültige Kategorisierung vorzunehmen, die Rückschlüsse auf meteorologische Trigger zulässt. Dabei werden beispielsweise die Ursachen „Wind, Sturm“ und „Windbruch“ der Kategorie „Wind“ zugewiesen. Aufwändiger ist die Ursache „Eis, Lawinen, Schneeverwehung, Schneebruch“, die weitere Informationen für eine zuverlässige Einteilung erfordert. Hier kommt von 1998 bis 2010 die Spalte „Ereignis Text“ ins Spiel, die für die späteren Jahre umbenannt wurde in „Ereignis“. Darin gibt es 54 mögliche, relevante Einträge, die einen genaueren Schluss auf das Ereignis zulassen. Mögliche Einträge sind hier zum Beispiel „Entgleisung von NO bzw. NM Fahrten an der Spitze (erstes Fahrzeug)“, „Hineinfahren in Muren, Geröll, Lawinen ohne Entgleisung“ oder „Streckenunterbrechung durch Muren, Überschwemmungen, Geröll“. Die Abkürzungen NM bzw. NO beschreiben die Art der Bahnbetriebsabwicklung von Nebenfahrten, die etwa für Wartungstätigkeiten oder zur Schneeräumung im Gleisbereich durchgeführt werden.

## 2. Daten

| Ursache Text                               |               |      |
|--------------------------------------------|---------------|------|
|                                            | verwendet von | bis  |
| Wind, Sturm                                | 1990          | 2009 |
| Windbruch                                  | 1998          | 2009 |
| Überschwemmung, Unterspülung               | 1998          | 2009 |
| Sonstige Naturereignisse                   | 2001          | 2009 |
| Muren, Überschwemmungen, Geröll            | 1990          | 1997 |
| Mure, Geröll, Felssturz                    | 1998          | 2009 |
| Hitze                                      | 1994          | 1994 |
| Eis, Lawinen, Verwehungen                  | 1990          | 1997 |
| Eis, Lawinen, Schneeverwehung, Schneebruch | 1999          | 2009 |
| Ursache                                    |               |      |
|                                            | verwendet von | bis  |
| Schneebruch                                | 2012          | 2014 |
| (extreme) Hitze                            | 2018          | 2018 |
| Blitzschlag                                | 2011          | 2018 |
| Eis, Lawinen, Schneeverwehung, Schneebruch | 2010          | 2016 |
| Hochwasser                                 | 2013          | 2013 |
| Hochwasser, Überschwemmung                 | 2016          | 2018 |
| Lawinen, Schneeverwehung                   | 2017          | 2018 |
| Mure, Geröll, Felssturz                    | 2010          | 2015 |
| Mure, Geröll, Rutschung                    | 2016          | 2018 |
| Schneebruch                                | 2013          | 2014 |
| Schneebruch, Eisbruch                      | 2016          | 2018 |
| Sonstige Naturereignisse                   | 2010          | 2018 |
| Steinschlag, Felssturz                     | 2016          | 2018 |
| Überschwemmung, Unterspülung               | 2010          | 2015 |
| Unterspülung                               | 2016          | 2018 |
| Wind, Sturm                                | 2010          | 2018 |
| Windbruch                                  | 2010          | 2015 |
| Windbruch, Windwurf                        | 2016          | 2018 |

Tabelle 2.1.: In den Spalten „Ursache Text“ und „Ursache“ sind je nach Jahr verschiedene Einträge zu finden.

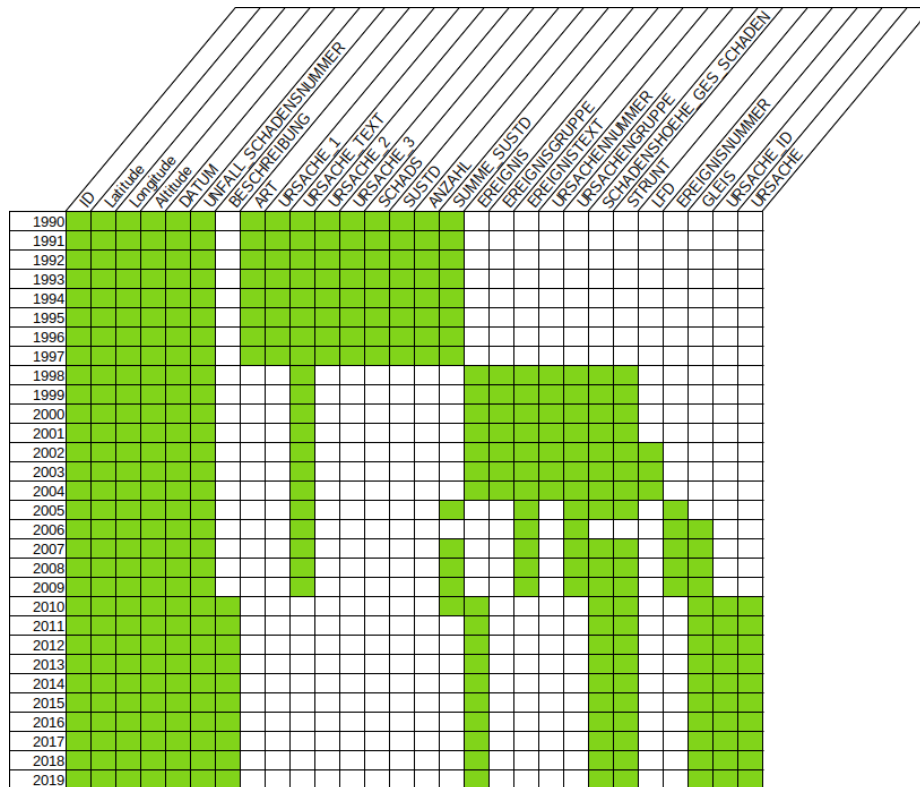


Abbildung 2.1.: Übersicht über die vorhandenen Spalten in den einzelnen Jahren der Ausgangsdaten. Für die hier grün dargestellten Zellen sind Daten verfügbar.

Eine große Herausforderung stellen die Ursachen „Mure, Geröll, Felssturz“ und „Muren, Überschwemmungen, Geröll“ dar, da sowohl ein Steinschlagereignis als auch eine Rutschung/Mure zu einer Streifung oder Entgleisung führen kann. Deshalb wird für die Kategorisierung das Ablaufschema aus Abb. 2.2 gewählt. Da Rutschungen und Murgänge Wasser für Mobilisierung oder Transport benötigen, wird - wenn nicht anders unterscheidbar - bei Vorhandensein von Niederschlag am Ereignistag und dem Tag davor die Kategorie „Rutschung/Mure“ verwendet. Nachteil dieser Methodik ist, dass davon auszugehen ist, dass einige durch Niederschlag verursachte Steinschlagereignisse nicht weiter berücksichtigt werden. Für die Suche nach Presseartikeln wird die Online-Datenbank WISO <https://www.wiso-net.de> verwendet; bei Vorhandensein eines Artikels zum Ereignis wird nach diesem die am geeignetsten scheinende Kategorie gewählt.

Ziel der Kategorisierung ist eine Einteilung der Ereignisse, sodass diese mit meteorologischen Triggern verknüpfbar sind, auch wenn die Trigger in dieser Phase der Arbeit noch nicht abschließend festgelegt sind.

## 2. Daten

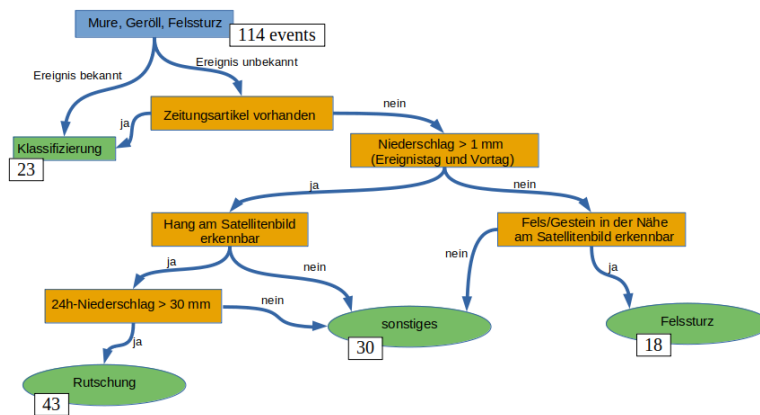


Abbildung 2.2.: Ablaufschema für die Kategorisierung der Ursache „Mure, Geröll, Felssturz“ bei Streifungen und Entgleisungen. Die Zahlen geben die Anzahl der Events in der jeweiligen Kategorie an.

Diese Kategorien sind:

- Hochwasser (154 Ereignisse): Überflutete oder unterspülte Gleisanlagen; Niederschlag an den beiden dem Ereignis vorhergehenden Tagen
- *flash-flood* (29): Konvektive Ereignisse; kein Niederschlag an den beiden dem Ereignis vorhergehenden Tagen
- Wind / Sturm (1190): Vor allem durch Wind umgeworfene Bäume, aber auch Gegenstände im Schienenbereich
- Rutschungen / Muren (168): Gleitende Massenbewegungen und Murgänge in Gewässern
- Steinschlag / Felssturz (68): Fallende, rollende, gleitende oder springende Steine oder Blöcke
- Hitze (13): Bahndammbrände und Schäden an Infrastruktur wie Gleisverwerfungen
- Vereisung (15): Vereisen von wichtigen Bauteilen wie etwa von Bremsleitungen
- Lawine (75): Lawinen und vorsorgliche Gleissperren wegen Lawinengefahr
- Schnee (397): Behinderungen im Bahnbetrieb wegen hoher Schneelage; vor allem Weichenstörungen und Entgleisungen

- nicht-meteorologische Ursache (83): Wetterphänomene können als Ursache ausgeschlossen werden. Ein Beispiel dafür ist eine Überflutung wegen eines Wasserleitungsgebrechens.
- unbekannte / sonstige Ursache (141): Meteorologische Ursache ist möglich bzw. mit sämtlichen zur Verfügung stehenden Informationen nicht zuordenbar.

Für die weitere Arbeit werden ausschließlich die 68 Steinschlagereignisse verwendet.

### 2.1.2. Saisonalität, Regionalität und Höhenabhängigkeit

Bei einer ersten Betrachtung der Steinschlagereignisse lassen sich saisonal eine klare Häufung in den Wintermonaten und regional im alpinen Bereich feststellen, wie in Abb. 2.3 und 2.4 zu sehen ist. Das inneralpine Maximum lässt sich durch das Vorhandensein von steilen Felswänden leicht erklären. Von größerem Interesse ist die Häufung im Winter bei relativ geringen Niederschlagsmengen, erkennbar in Abb. 2.3. Dies lässt die Vermutung zu, dass im Winter Frost ein relevanter Trigger ist. In den Sommermonaten wird bei nahezu allen Ereignissen Niederschlag verzeichnet, der ein weiterer relevanter Auslöser sein kann.

Bei Betrachtung der saisonalen Verteilung und der Höhenverteilung der Ereignisse in Abb. 2.5 findet man ein ähnliches Ergebnis. Zum einen treten die allermeisten Ereignisse im alpinen Bereich auf, was an der roten Farbe der Punkte erkennbar ist. Andererseits ist Häufung im Winterhalbjahr vor allem in höher gelegenen Gebieten offensichtlich. Das deckt sich auch mit einer Untersuchung von Bjerrum und Jørstad (1968) in Norwegen, wonach in gebirgigen Regionen vor allem Frost-Tau-Wechsel als Trigger für Steinschlag gefunden wurde, während in niedrigeren Lagen komplexere Mechanismen wie häufige Temperaturschwankungen oder Wurzeldruck relevant waren.

## 2.2. *Spartacus*

Zur Berechnung der Klimaindizes sind räumlich hochaufgelöste Informationen über mehrere meteorologischen Parameter nötig. Dazu wird der SPARTACUS-Datensatz verwendet. Dieser besteht aus täglichen Temperaturmaxima und -minima sowie täglichen Niederschlagssummen und ist für ganz Österreich auf einem 1x1 km Gitter verfügbar. Der Datensatz geht bis ins Jahr 1961 zurück und wird jährlich um das vorangegangene Jahr

## 2. Daten

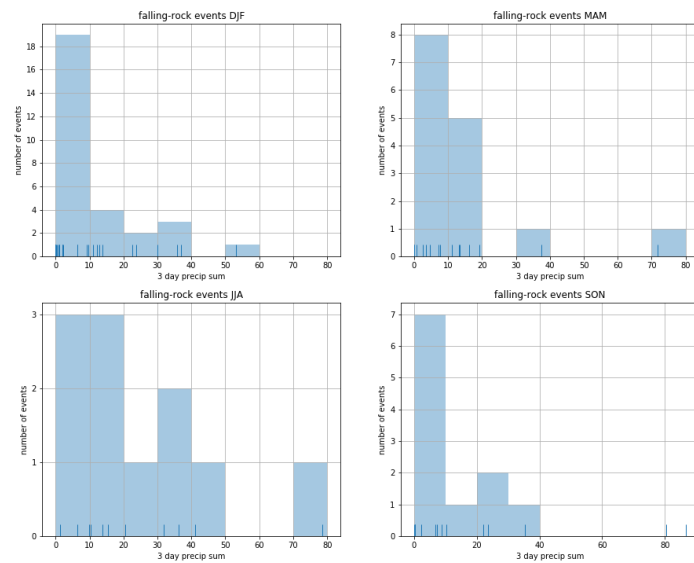


Abbildung 2.3.: Häufigkeit von Ereignissen in Niederschlagsmengen-Klassen in den einzelnen Jahreszeiten. Die 3-Tages Niederschlagssummen der einzelnen Ereignisse sind als kurze vertikale Linien entlang der Ordinate dargestellt.

Steinschlagereignisse entlang des ÖBB Schienennetzes 1990-2019

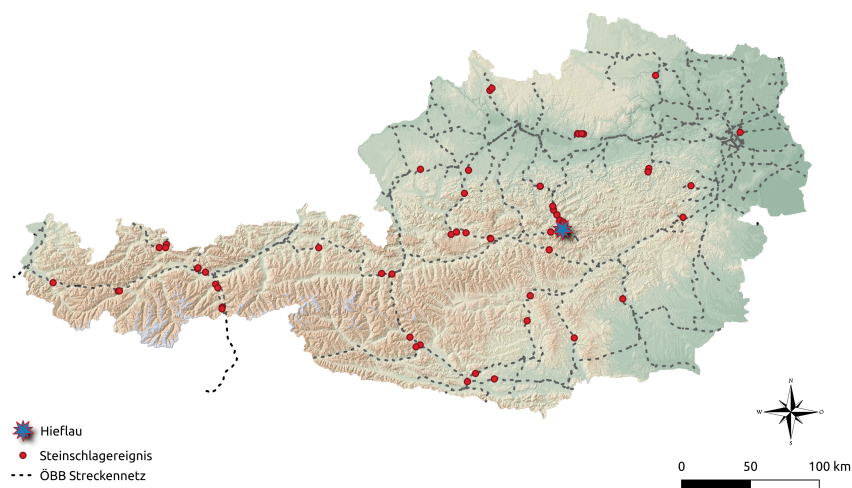


Abbildung 2.4.: Räumliche Verteilung der Ereignisse

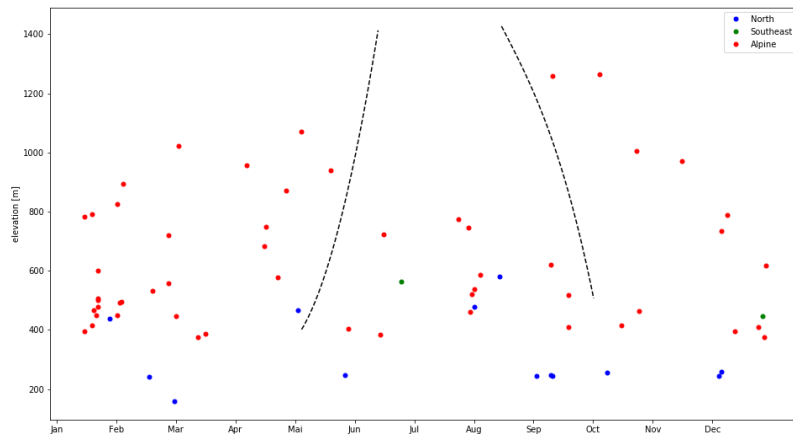


Abbildung 2.5.: Seehöhe und Tag im Jahr des Auftretens. Die gestrichelten Linien stellen eine quadratische Näherung für den letzten bzw. ersten Frost im Jahr dar. Die Farbe der Punkte ist abhängig von der Region des Ereignisses, die in Abb. 2.6 dargestellt sind.

erweitert. Im Gegensatz zu globalen Reanalysen ist die Methode an komplexes Terrain angepasst und verwendet für die Temperaturen ein mit der Höhe nicht lineares Temperaturprofil, was die Auflösung lokalskaliger Inversionen ermöglicht. Für die Temperaturen wird ein Interpolationsfehler (mittlerer absoluter Fehler) von etwa  $1^{\circ}\text{C}$  angeführt (Hiebl und Frei 2016). Die täglichen Niederschlagssummen werden in zwei Interpolationsschritten für die monatlichen Niederschlagssummen und die täglichen Anomalien aus 1249 Stationen für den ersten und 523 Stationen für den zweiten Schritt berechnet. Der resultierende Datensatz eignet sich grundsätzlich für klimatologische Analysen, jedoch ist bei einer Betrachtung einzelner Gitterpunkte, eine Unterschätzung für Starkregen und eine Überschätzung für leichte Niederschlagsereignisse zu erwarten (Hiebl und Frei 2018).

## 2.3. Event space

Als unabhängiger Datensatz zur Validierung der Klimaindizes wird der *event space* aus einer Arbeit von Enigl u. a. (2019) verwendet. In diesem sind Tag und Verortung von 886 Steinschlagereignissen in Österreich von 1990 bis 2019 enthalten, die von der geologischen Bundesanstalt (GBA) erfasst wurden.

Eine Aufteilung des österreichischen Bundesgebiets in *Northern Lowlands* (NL), *Alpine Territory* (AT) und *Southern Basins* (SB) wird ebenfalls nach der Definition aus dieser

## 2. Daten

Publikation von Enigl u. a. (2019) verwendet und ist in Abb. 2.6 zu sehen.

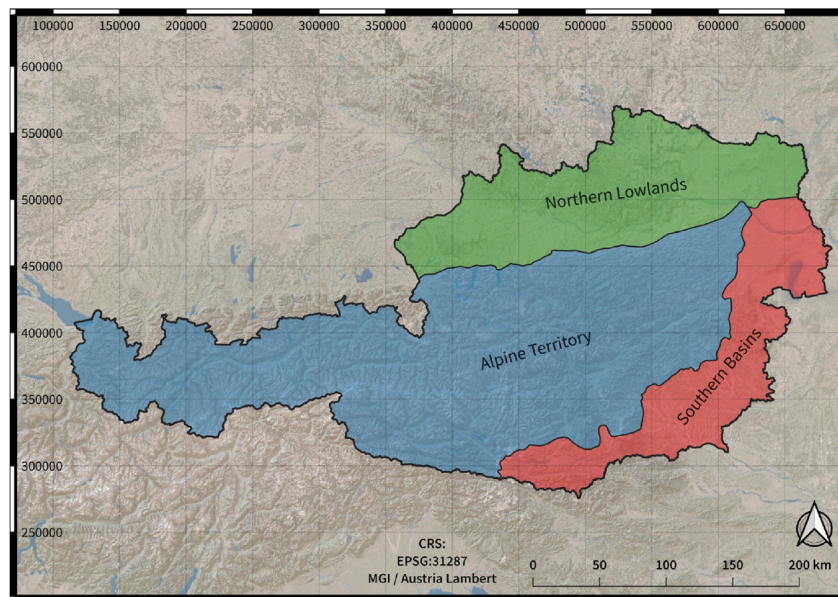


Abbildung 2.6.: Aufteilung Österreichs in 3 Regionen. Aus: Enigl u. a. (2019)

## 2.4. Global Circulation Models

### 2.4.1. Modell ACCESS

Das „*Australian Community Climate and Earth System Simulator coupled model*“ (ACCESS-CM2) ist ein gekoppeltes Atmosphäre-Ozean-Modell, das sich für viele wissenschaftliche Anwendungen eignet (Bi u. a. 2020) und Teil des CMIP6 (Eyring u. a. 2016), das in Abschnitt 1.4.2 näher erläutert wird, ist. Der atmosphärische Teil - das Met Office Unified Model (UM) besteht in der Version 10.6 GA 7.1 aus einem horizontalen Gitternetz mit einer Auflösung von etwa 135 km in mittleren Breiten ( $1,25^\circ$  Breite x  $1,875^\circ$  Länge). Die vertikale Auflösung beträgt 85 Niveaus, von denen 50 unterhalb von 18 km Höhe liegen und sich das höchste in 85 km Höhe befindet, was etwa im Bereich der Mesopause liegt (Bi u. a. 2020).

### 2.4.2. Modell TaiESM

Das „*Taiwan Earth System Model*“ (TaiESM) ist ebenfalls Teil von CMIP6 und weist eine horizontale Gitterdistanz von  $0,9^\circ$  Breite mal  $1,25^\circ$  Länge auf. Vertikal besteht das Modell aus 30 Schichten, die bis 2 hPa reichen, was etwas mehr als 40 km geometrischer

Höhe entspricht. Im historischen Lauf zeigt es eine bessere Performance als der Median aller Modelle aus CMIP5. Allerdings wird Niederschlag im Zeitraum 1979 - 2005 in den Tropen teilweise deutlich überschätzt; in Europa jedoch leicht unterschätzt. Die mittlere Meeresoberflächentemperatur über denselben Zeitraum weist im Modell für weite Teile des Nordatlantiks einen positiven Bias auf (Lee u. a. 2020).

### 2.4.3. Downscaling

Das Downscaling aus den GCM-Daten erfolgt mithilfe der Analogmethode, die im Wesentlichen so funktioniert: Es ist ein Datensatz an historischer Information auf globaler und lokaler Skala sowie ein Datensatz mit Projektionen in die Zukunft auf globaler Skala (aus einem GCM) vorhanden; gesucht wird lokale Information an einem Zeitpunkt. Als *target day* (TD) ist derjenige Zeitpunkt in der Vergangenheit bezeichnet, an dem die globalen Daten am besten mit den globalen Daten am gesuchten Zeitpunkt übereinstimmen. Die lokale Information des TD in der Vergangenheit wird als lokale Information am gesuchten Zeitpunkt verwendet (Matulla u. a. 2008; Zorita und von Storch 1999). Dieser Prozess wird am *Climate Impact Team* (CIT) der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) durchgeführt und fertig aufbereitete Felder werden für diese Arbeit zur Verfügung gestellt.

### 2.4.4. Szenarien

Für die Erstellung der HDCs werden Ensembles verschiedener Modelle und SSPs verwendet. Die Wahl mehrerer unterschiedlicher SSPs ist dabei besonders wichtig, da sie die sozioökonomischen Entwicklungspfade der Menschheit repräsentieren, die sehr vielfältig sind. Ein Überblick über alle SSP-Szenarien, von denen nur einige im weiteren Verlauf verwendet werden, ist in Abb. 1.4 zu sehen. Die für die HDC-Berechnung betrachteten Szenarien werden im Folgenden nach O'Neill u. a. (2016a) beschrieben:

#### SSP 1 - „the green road“

Die Welt entwickelt sich in Richtung Nachhaltigkeit, natürliche Grenzen werden respektiert. Diese Entwicklung wird von der Erkenntnis der ökonomischen Kosten von Umweltzerstörung und Ungleichheit angetrieben. Es kommt zu vermehrter Zusammenarbeit lokaler und internationaler Institutionen, Regierungen und dem privaten Sektor. Es erfolgen

## 2. Daten

Investitionen in Bildung und Gesundheit, wobei die Weltbevölkerung relativ zu anderen Szenarien gering bleibt. Auf Kosten von langsamerer wirtschaftlicher Entwicklung nimmt das menschliche Wohlergehen zu und die wirtschaftliche Ungleichheit innerhalb eines Landes sowie zwischen Ländern wird abgebaut. Der globale Energie- und Ressourcenverbrauch nimmt wegen Investitionen in Technik und veränderten steuerlichen Bedingungen ab. Die Herausforderungen an Klimawandelabschwächung und -anpassung sind gering.

### **SSP 3 - „the rocky road“**

Durch wiederauflebenden Nationalismus kommt es einer Abgrenzung von Ländern und Regionen voneinander. Das Erreichen von Zielen im Hinblick auf Nahrungsmittelsicherheit und Energieverbrauch wird in den einzelnen Regionen versucht, während die Investitionen in Bildung und Technologie abnehmen. Globale Ungleichheiten bleiben bestehen oder nehmen zu; das Bevölkerungswachstum in industrialisierten Ländern ist gering, in Entwicklungsländern hoch.

### **SSP 5 - „the highway“**

Es kommt zu Wirtschaftswachstum und Investitionen in Bildung und Gesundheit, die zu einem raschen technischen Fortschritt führen. Gleichzeitig werden fossile Brenn- und Treibstoffe weiterhin verwendet, innovative Technologien wie Geoengineering setzen sich, wenn nötig, schnell durch. Lokale ökologische und soziale Probleme können effektiv gemanagt werden. Auf globaler Skala gibt es relativ wenig Bemühungen die Auswirkungen des Klimawandels abzuwenden, da dies der wirtschaftlichen Entwicklung entgegensteht. Internationale Mobilität nimmt zu; die Weltbevölkerung erreicht ihr Maximum im 21. Jahrhundert und nimmt anschließend ab. Dieses Szenario stellt wegen dem Wirtschaftswachstum, dem Erreichen von Entwicklungszielen und hoch technisierten Infrastrukturen geringe Herausforderungen an eine Abschwächung des Klimawandels. Die notwendigen Anstrengungen für Anpassungsmaßnahmen sind jedoch hoch, da fossile Brennstoffe ein Rückgrat der Entwicklung bilden und globale Umweltschutzziele fehlen.

## 3. Methoden

### 3.1. Berechnung der CIs

Klimaindizes stellen Beziehungen zwischen regionalskaligen Wetterphänomenen und Schadensereignissen dar. Ein einfaches Beispiel dazu sind Abfolgen von heißen Tagen ( $T_{\max} \geq 30 \text{ °C}$ ) und Tropennächten ( $T_{\min} \geq 20 \text{ °C}$ ), die auf Straßen Bedingungen für Spurrillen und Belagsaufplatzungen erzeugen (Matulla u. a. 2018).

#### 3.1.1. EOF-Analyse

CIs sind mathematisch gesehen *empirical orthogonal functions* (EOFs) der Zeitserien relevanter meteorologischer Parameter. Die EOF Analyse, oder auch *principle component analysis* (PCA) ist eine häufig verwendete multivariate statistische Methode in der Meteorologie. Sie wurde in diesem Zusammenhang erstmals von Obukhov (1947) eingeführt und wurde besser bekannt durch Lorenz (1956), auf den die Bezeichnung EOF-Analyse zurückgeht. Die EOF Analyse verringert einen Datensatz, der viele Variablen enthält in einen (oft deutlich) kleineren Datensatz durch Reduktion der Dimensionen. Dabei stellen die neuen Variablen eine Linearkombination der ursprünglichen dar, die so gewählt sind, dass sie die größtmögliche Varianz der Ausgangsdaten repräsentieren, dabei allerdings miteinander unkorreliert sind (Wilks 2019).

#### Berechnung der EOFs

Ein Eigenwert  $\lambda$  und ein Eigenvektor  $\vec{e}$  einer quadratischen Matrix  $\mathbf{A}$  sind ein Skalar und ein Vektor für die gilt:

$$\mathbf{A}\vec{e} = \lambda\vec{e} \quad (3.1)$$

Wenn  $\mathbf{A}$  nicht-singulär ist, existieren  $K$  Paare von Eigenwerten  $\lambda_k$  und zugehörigen Eigenvektoren  $\vec{e}_k$ , wobei  $K$  die Anzahl der Reihen bzw. Spalten von  $\mathbf{A}$  ist. Die Eigenvektoren  $\vec{e}_k$  haben per Definition die Einheitslänge 1 und sind - falls  $\mathbf{A}$  symmetrisch ist - aufeinander normal. Die Kombination dieser beiden Eigenschaften wird „orthonormal“ genannt (Wilks 2019).

### 3. Methoden

Der K-dimensionale Datenvektor  $\vec{x}$  lässt sich teilen in Mittelwert  $\bar{\vec{x}}$  und Anomalien  $\vec{x}'$ :

$$\vec{x} = \vec{x}' + \bar{\vec{x}} \quad (3.2)$$

Die erste EOF ist der zu dem größten Eigenwert  $\lambda_1$  gehörige Eigenvektor  $\vec{e}_1$ . Er lässt sich durch Minimieren von  $\epsilon_1$  finden:

$$\epsilon_1 = E(\|\vec{x}' - \langle \vec{x}', \vec{e}_1 \rangle \vec{e}_1\|^2) \quad (3.3)$$

Dabei ist  $E()$  der Erwartungswert,  $\|\cdot\|$  die Vektornorm und  $\langle \cdot, \cdot \rangle$  das innere Produkt sodass folgt:  $\|\vec{x}'\|^2 = \langle \vec{x}', \vec{x}' \rangle$ . Gleichung 3.3 beschreibt die Projektion des Vektors  $\vec{x}'$  in einen eindimensionalen Raum, der von  $\vec{e}_1$  aufgespannt wird. Der erste EOF zeigt im K-dimensionalen Raum (Ereignisraum) in Richtung der größten Variabilität; deshalb entspricht Minimieren von  $\epsilon_1$  dem Maximieren der Summe der Varianzen der Elemente von  $\vec{x}'$  im eindimensionalen Unterraum (von Storch und Zwiers 1999; Wilks 2019):

$$\begin{aligned} \epsilon_1 &= E \left( \|\vec{x}'\|^2 - 2\langle \vec{x}', \vec{e}_1 \rangle \cdot \vec{x}'^T \vec{e}_1 + \langle \vec{x}', \vec{e}_1 \rangle \cdot \langle \vec{x}', \vec{e}_1 \rangle \right) \\ &= E \left( \|\vec{x}'\|^2 - \langle \vec{x}', \vec{e}_1 \rangle \cdot \langle \vec{x}', \vec{e}_1 \rangle \right) \\ &= \text{Var} \left( \vec{x}' \right) - \text{Var} \left( \langle \vec{x}', \vec{e}_1 \rangle \right), \end{aligned}$$

wobei das hochgestellte  $T$  den transponierten Vektor beschreibt. Mit  $\mathbf{\Sigma}$ , der Kovarianzmatrix von  $\vec{x}'$  ist:

$$\text{Var} \left( \langle \vec{x}', \vec{e}_1 \rangle \right) = \vec{e}_1^T \mathbf{\Sigma} \vec{e}_1$$

Minimieren der Gleichung 3.3 führt mit der Bedingung  $\|\vec{e}_1\| = 1$  und dem zugehörigen Lagrange-Multiplikator  $\lambda$  zu:

$$\frac{d}{d\vec{e}_1} \left[ \vec{e}_1^T \mathbf{\Sigma} \vec{e}_1 + \lambda(\vec{e}_1^T \vec{e}_1 - 1) \right] = 2\mathbf{\Sigma} \vec{e}_1 + 2\lambda \vec{e}_1 = 0$$

Daraus folgt, dass  $\vec{e}_1$  ein Eigenvektor der Kovarianzmatrix  $\mathbf{\Sigma}$  mit zugehörigem Eigenwert  $\lambda$  ist. Die Kovarianzmatrix  $\mathbf{\Sigma}$  hat mehrere Eigenvektoren, wovon für das Minimieren von  $\epsilon_1$  der Eigenvektor mit dem größten Eigenwert  $\lambda$  verwendet wird.

Ist die erste EOF gefunden kann analog dazu die zweite EOF  $\vec{e}_2$  durch Minimieren von

$$\epsilon_2 = E \left( \left\| \vec{x}' - \langle \vec{x}', \vec{e}_1 \rangle \vec{e}_1 - \langle \vec{x}', \vec{e}_2 \rangle \vec{e}_2 \right\|^2 \right)$$

gefunden werden. Der zweite Eigenvektor  $e_2$  steht normal auf  $e_1$  in Richtung der nächstgrößten Variabilität der Daten (von Storch u. a. 1993; Wilks 2019).

Die Variablen des neuen Datensatzes  $u_k$  - die *principal components* (PCs) - sind die Projektionen des Datenvektors  $\vec{x'}$  auf die Eigenvektoren  $\vec{e}_k$ :

$$u_k = \langle \vec{x'}, \vec{e}_1 \rangle = \vec{e}_1^T \vec{x'}$$

Weiters folgt, dass ein großer Teil der Varianz mit den ersten EOFs beschrieben werden kann, was zu der deutlichen Verringerung der Datenmenge führt. Es zeigt sich, dass sich für die erste EOF oft ein zugrundeliegender physikalischer Prozess identifizieren lässt, was im Allgemeinen jedoch nicht zwingend der Fall ist, da natürliche Prozesse nicht aus orthogonalen Mustern zusammengesetzt sein müssen (von Storch u. a. 1993).

#### 3.1.2. Auffinden geeigneter Prädiktoren und Validierung

In der Arbeit werden verschiedene statistische Methoden verwendet und diverse Kenngrößen berechnet um eine Validierung der CIs zu ermöglichen.

##### Fehlermaße

Der absolute Fehler (*absolute error*) zwischen zwei Vektoren ist definiert als:

$$AE = \sum_i |f_i - o_i|$$

wobei  $f$  und  $o$  Vorhersage- und Beobachtungsdaten sind. Er wird nur selten verwendet, weil der RMSE (*root mean square error*) durch Quadrierung stärker sensitiv für große Abweichungen ist. Der RMSE ist definiert als:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_i (f_i - o_i)^2}, \quad (3.4)$$

worin  $k$  die Anzahl der Vorhersage-Beobachtungs-Wertepaare ist (Nurmi 2003).

### 3. Methoden

#### Distanzen

Die Entfernung zwischen Punkten in einem Koordinatensystem lässt sich auf mehrere Arten ausdrücken. Am geläufigsten ist die euklidische Distanz, bei der zusätzliche Gewichtungsfaktoren berücksichtigt werden können. Sie lautet in der allgemeinen Form für zwei Vektoren  $\vec{x} = x_i$  und  $\vec{y} = x_j$ :

$$d_{i,j} = \sqrt{\sum_{k=1}^K w_k (x_{i,k} - x_{j,k})^2}. \quad (3.5)$$

In dieser Gleichung sind  $w_k$  die Gewichtungsfaktoren; für den Fall, dass für alle  $k$   $w_k = 1$  gilt, ist  $d_{i,j}$  die euklidische Distanz. Entsprechen die Gewichtungsfaktoren den Varianzen wird  $d_{i,j}$  auch Karl-Pearson-Distanz genannt.

Ein anderes Maß für Distanz ist die Cityblock-Distanz als Spezialfall der Minkowski-Metrik mit  $\lambda = 1$ ,

$$d_{i,j} = \left[ \sum_{k=1}^K w_k |x_{i,k} - x_{j,k}|^\lambda \right]^{1/\lambda}, \lambda \geq 1. \quad (3.6)$$

Für den Fall  $\lambda = 2$  wird 3.6 zu der gewichteten euklidischen Distanz Gl. 3.5 (Wilks 2019). Für statistische Zwecke wird auch die Mahalanobis-Distanz MD häufig verwendet, die die Entfernung einzelner Punkte  $x_i$  vom Mittelwert  $\bar{x}$  ausdrückt:

$$MD_i = \sqrt{(x_i - \bar{x})\mathbf{S}^{-1}(x_i - \bar{x})^T}. \quad (3.7)$$

Dabei stellt  $S^{-1}$  die invertierte Varianz-Kovarianz-Matrix dar, die im zweidimensionalen Fall eine 2x2 Matrix aus den Varianzen  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  sowie der Kovarianz  $\sigma_x\sigma_y$  ist:

$$S = \begin{bmatrix} \sigma_x^2 & \sigma_x\sigma_y \\ \sigma_x\sigma_y & \sigma_y^2 \end{bmatrix}.$$

Vereinfacht ausgedrückt berücksichtigt MD die Korrelation in den Daten. Falls die Variablen unkorreliert sind, vereinfacht sie sich zur euklidischen Distanz einzelner Punkte von deren Mittelwert. MD ist nicht berechenbar falls einzelne Variablen redundante Information beinhalten und die Varianz-Kovarianz-Matrix nahezu singulär und damit nicht invertierbar wird (De Maesschalck u. a. 2000).

## Resampling

Es existieren zahlreiche statistische Verfahren um mit Daten aus Stichproben unbekannter Verteilungen zu arbeiten. Einerseits gibt es den klassischen nicht-parametrischen Ansatz, der keine Kenntnis der Verteilung und deren Parametern voraussetzt. Auf der anderen Seite gibt es - im Wesentlichen seit Einführung leistungsfähiger Computer - die Möglichkeit wichtige Parameter der unbekannten Verteilung aus der Stichprobe selbst zu erfahren. Diese Verfahren lassen sich unter dem Begriff Resampling-Methoden zusammenfassen (Wilks 2019). Bekannte Verfahren sind Kreuzvalidierung (*Cross Validation*) sowie das Bootstrap und das Jackknife-Verfahren, die sich in der Methodik ähneln aber unabhängig voneinander entwickelt wurden. (Reimer 2009; Yu 2002)

Bei der Kreuzvalidierung wird eine Stichprobe zufällig in zwei oder mehr Teile geteilt und Testergebnisse durch Vergleich an den Teilen validiert. Für die genaue Durchführung existieren zahlreiche Verfahren, wovon sich das Leave-One-Out-Verfahren, Random-Subsampling, die Delete-d-Kreuzvalidierung und die k-fache Kreuzvalidierung am häufigsten anzutreffen sind. Beim Leave-One-Out-Verfahren werden  $n$  Schätzungen durchgeführt, dabei ist  $n$  auch die Anzahl der Beobachtungen. Bei jeder Schätzung wird eine Beobachtung ausgelassen und aus den anderen prognostiziert. Das Random-Subsampling beruht darauf, dass eine zufällige Anzahl  $k$  an Beobachtungen gezogen wird, während bei der Delete-d-Kreuzvalidierung stets eine feste Anzahl  $d$  gezogen und als Prüfdatensätze (*test sample*) verwendet werden, die aus den verbliebenen (dem *train sample*) geschätzt werden. Die Methodik der k-fachen Kreuzvalidierung (*k-fold cross-validation*) besteht darin, den Datensatz in  $k$  gleich große Teile aufzuteilen, dann einen herauszunehmen und diesen mithilfe der verbleibenden zu prognostizieren. Die Validierung besteht darin den Prognosefehler als Durchschnitt der  $k$  einzelnen Fehler zu berechnen (Kuhlmann 2007).

## Kontingenztabellen

Eine einfache Methode zur Verifikation von Vorhersagen ist die Kontingenztafel. Sie weist für boolesche Variablen, wie etwa Niederschlag ja/nein, 2 x 2 Zellen auf wie in Tab. 3.1 zu sehen ist.

### 3. Methoden

|            | Beobachtung |         |         | SUMME   |
|------------|-------------|---------|---------|---------|
|            |             | ja      | nein    |         |
| Vorhersage | ja          | $a$     | $b$     | $a + b$ |
|            | nein        | $c$     | $d$     | $c + d$ |
|            | SUMME       | $a + c$ | $b + d$ |         |

Tabelle 3.1.: Allgemeine Kontingenztafel.

Ausgehend von dieser Form lassen sich verschiedene Attribute berechnen:

- Der Prozentsatz der korrekten Prognosen (*Proportion Correct*) mit Stichprobengröße  $n = a + b + c + d$ :

$$PC = \frac{a + d}{n}.$$

- Der *Critical Success Index* (CSI) eignet sich besser für seltene Ereignisse. Er weist Werte von 0 (schlechte Prognose) bis 1 (perfekte Prognose) auf und ist definiert als:

$$CSI = \frac{a}{a + b + c}.$$

- Der Bias als Verhältnis zwischen Ja-Vorhersagen und Ja-Beobachtungen:

$$B = \frac{a + b}{a + c}.$$

- Die *Probability of Detection* (POD):

$$POD = \frac{a}{a + c}.$$

- Die *False Alarm Rate* (FAR):

$$FAR = \frac{b}{b + d}.$$

- Darauf aufbauend existieren mehrere Gütemaße wie zum Beispiel der *Peirce Skill Score*

$$PSS = \frac{ad - bc}{(a + c)(b + d)} = POD - FAR.$$

Eine perfekte Prognose weist  $PSS = 1$  auf, für eine Zufallsprognose ist der Wert 0 und wird negativ für Prognosen, die schlechter abschneiden als der Zufall (Wilks 2019, 374ff).

## ROC-Diagramm

Das ROC-Diagramm (*Receiver Operating Characteristic*) ist eine Methode zur graphischen Verifikation einer Vorhersage. Es ist ein Plot mit gleicher Achsenskalierung, der auf der Abszisse FAR und auf der Ordinate POD darstellt. Dabei ist die Fläche A unter der Kurve ein Gütemaß für die Prognose. Eine mögliche Anwendung ist das Auffinden geeigneter Schwellwerte für eine Vorhersage, indem der Punkt mit größter POD bei kleinstmöglichem FAR offensichtlich erkennbar ist.

## 3.2. Entwicklungskorridore von Schadereignissen (HDCs)

### 3.2.1. Gaussfilter

Zur Filterung von Zeitreihen mit hoch- oder niederfrequenten Anteilen existieren Hochpassfilter, Tiefpassfilter und Bandpassfilter. Nach Schönwiese (2013) lassen sich gefilterte Zeitreihenelemente  $\tilde{a}_j$  aus den ursprünglichen  $a_i$  mit

$$\tilde{a}_j = \sum_{k=-m}^{+m} w_k \cdot a_{i+k} \quad \text{mit} \quad \begin{cases} i = 1 + m, \dots, n - m \\ k = -m, -m + 1, \dots, 0, 1, \dots, m \end{cases}$$

berechnen. Dabei ist  $n$  die Länge der Zeitreihe,  $m$  die Weite des Filters und  $w_k$  sind Gewichtungsfaktoren der einzelnen Elemente des Filterfensters. In dieser Arbeit ist ein Tiefpassfilter bei der Etablierung der HDCs angebracht, dessen Funktion es ist hohe Frequenzen aus einer Zeitreihe zu filtern. Konkret wird ein Gaussfilter verwendet, dessen  $w_k$  um das zentrale Gewicht  $w_0$  normalverteilt sind (Schönwiese 2013). Die Berechnung erfolgt in Python 3 mit der Funktion `scipy.ndimage.gaussian_filter1d()`.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

### 4.1. CIs

#### 4.1.1. Versuche mit univariater EOF Analyse

Zu Beginn stehen Versuche zur Berechnung von univariaten EOFs aus den täglichen Niederschlagssummen (RR) des Spartacus-Datensatzes am Tag und am Ort der 68 Steinschlagereignisse. Zeitlich werden der Ereignistag und die 7 vorangegangenen Tage betrachtet. Räumlich geht das Mittel aus dem Gitterpunkt, an dem das Ereignis gemeldet wird und den 4 benachbarten Gitterpunkten in die Analyse ein. Ausgenommen sind Punkte am Rand des Gitters, wo alle verfügbaren Nachbarn in die Mittelung einbezogen werden. Ziel ist es das Verhalten im Hinblick auf Verringerung des Datensatzes und der Anzahl verwendeter CIs zu untersuchen. Die ersten drei CIs sind in Abb. 4.1 zu sehen. Man erkennt die besondere Relevanz des Tages vor dem Ereignis (TD-1) an den relativ hohen Werten von rund  $\pm 0,5$  für alle 3 CIs. An dieser Stelle sei nochmals erwähnt, dass das Vorzeichen bei der Berechnung zufällig gewählt wird. Für die CIs 2 und 3 sind auch an den Tagen TD-6 und TD-7 relative hohe Werte ablesbar, was auf nennenswerten Einfluss der Vorsättigung des Geländes in einigen Fällen hinweisen kann.

#### Anzahl der notwendigen CIs

Bei Betrachtung von 8 Tagen (Ereignistag und die 7 vorangegangenen Tage) bestehen die Niederschlagsdaten aus einer 68x8 Matrix, was 544 Messwerte ergibt. Der volle Datensatz im Ereignisraum besteht ebenfalls aus 544 Skalaren (8 EOFs mit je 68 PCs), aus denen sich der exakte Ursprungsdatensatz rekonstruieren lässt. Durch Verwerfen der höheren EOFs mit geringerer erklärter Varianz sollen nicht ereignisrelevante Störungen in den Messwerten verworfen werden. Dennoch führt es zu einer Abweichung beim Rekonstruieren der ursprünglichen Messwerte. Wie groß der RMSE zwischen dem vollen Datensatz und dessen Rekonstruktion ist, ist in Abb. 4.2 ablesbar, wobei der Fehler mit zunehmender Anzahl der EOFs nahezu linear abnimmt. Wie zu erwarten war ist erst bei Verwendung aller 8 EOFs der Datensatz perfekt rekonstruiert und der RMSE gleich Null.

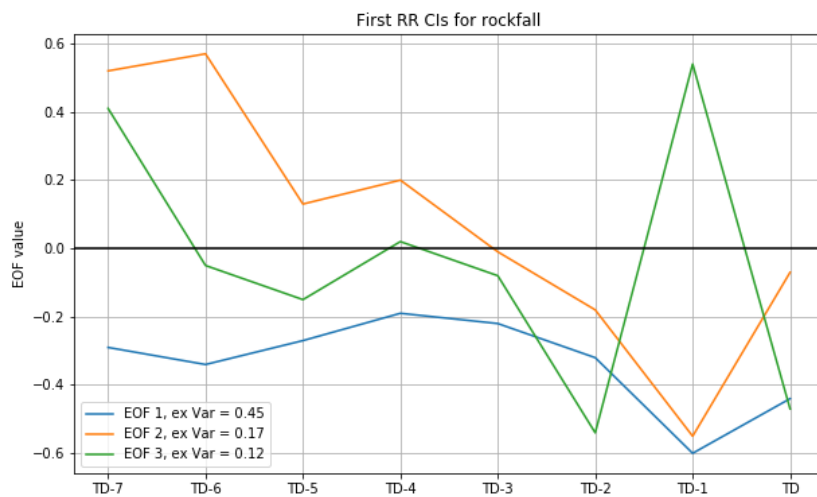


Abbildung 4.1.: Die ersten drei CIs für Niederschlag.

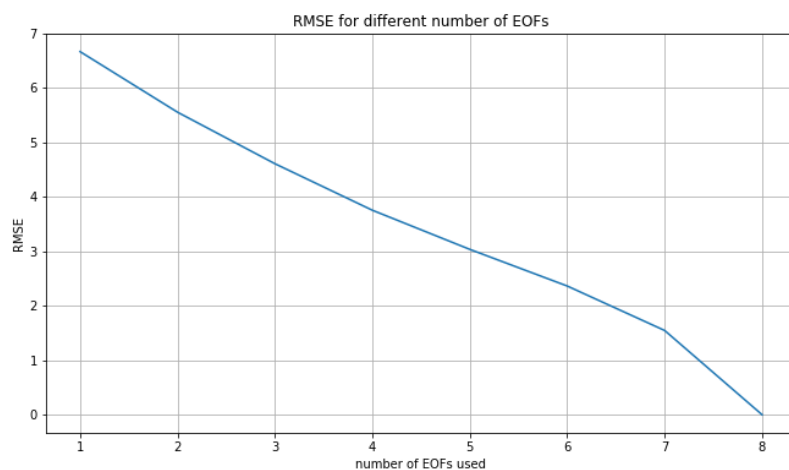


Abbildung 4.2.: RMSE zwischen Ursprungsdatensatz und rekonstruiertem Datensatz bei verschiedener Anzahl an verwendeten EOFs.

##### Verringerung der Anzahl der Ereignisse

Um abschätzen zu können, ob die Anzahl der betrachteten Ereignisse Einfluss auf die CI-Berechnung hat und ob es im Lauf der Zeit eine Änderung der auslösenden Prozesse gegeben haben könnte wird abwechselnd das erste, zweite und dritte Drittel der Ereignisse für die Berechnung der CIs vernachlässigt. In Abb. 4.3 ist der RMSE zwischen ursprünglichen und mit 4 EOFs rekonstruiertem Datensatz für die einzelnen Ereignisse geplottet. Die blaue Linie stellt die Verwendung aller 68 Ereignisse in der Berechnung dar, während für die beiden anderen jeweils ein Drittel ignoriert wurde, weshalb diese nicht für alle Ereignisse dargestellt werden können. Wie das für ein einzelnes Ereignis aussieht ist in Abb. 4.4a am Beispiel des Events Nr. 9 zu sehen. Einerseits kann dieses Beispiel mit 4 EOFs sehr gut dargestellt werden, der RMSE liegt unter 2 wie aus Abb. 4.3 erkennbar ist, andererseits ist auch der Unterschied zwischen den vollen und verringerten Datensatz gering. Für dieses Ereignis liefert der volle Datensatz kaum einen Mehrwert. Im Unterschied dazu ist die Rekonstruktion des Ereignisses Nr. 31 in 4.4b nicht so gut möglich, was ein Hinweis darauf ist, dass dieser Niederschlagsverlauf „untypisch“ für die Kategorie sein dürfte. In der Tat sind Maxima an TD-3 selten zu finden, was an den geringen Werten für TD-3 in Abb. 4.1 deutlich wird. Das lokale Maximum am Vortag des Steinschlags (TD-1) ist jedoch häufig und wird gut rekonstruiert. Auch hier ist allerdings der Unterschied zwischen vollem und reduziertem Datensatz im Vergleich zur Gesamtabweichung von untergeordneter Bedeutung.

Neben der eben geklärten Frage wie sich die Rekonstruktion der Ereignisse bei künstlicher Verkleinerung des Datensatzes verhält ist auch interessant wie sich die CIs selbst und die zugehörigen PCs verändern. In Abb. 4.5 ist zu sehen, dass die Vernachlässigung eines Drittels der Ereignisse zu Veränderungen der ersten EOF führt, obwohl das Maximum an TD-1 bleibt. Für die PCs, die die einzelnen Ereignisse repräsentieren folgt daraus eine deutliche Veränderung. Für die 2. und 3. EOF fallen die Veränderungen noch deutlicher aus, wie anhand der Abb. A.1 und A.2 im Anhang erkennbar ist.

Vernachlässigt man aber nur einzelne Ereignisse vor der Berechnung - was der Fall sein kann wenn ein Steinschlag nicht als solcher erkannt wird und/oder falsch kategorisiert wird - so zeigt sich keine so deutlicher Einfluss auf das Muster der EOFs wie in Abb. 4.6 erkennbar ist. Dennoch kann - wie in Abb. 4.6b - eine Spiegelung um die x-Achse vorkommen, was in weiterer Folge auch zu einem kompensierenden Vorzeichenwechsel bei den PCs führt.

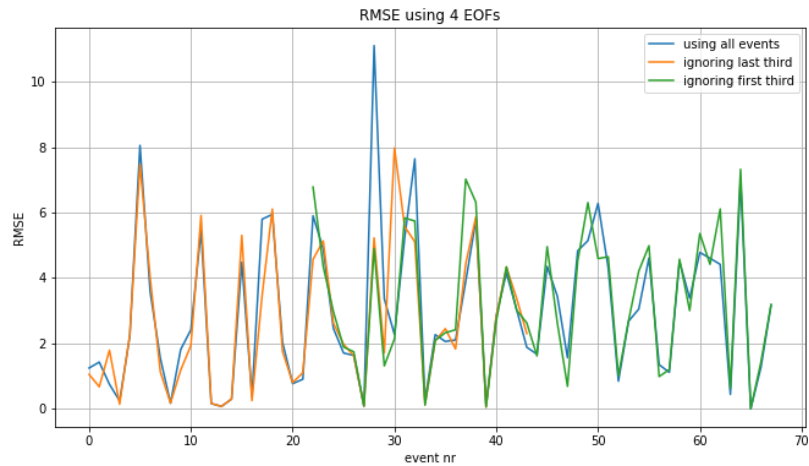
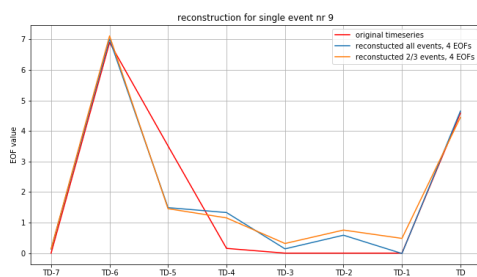
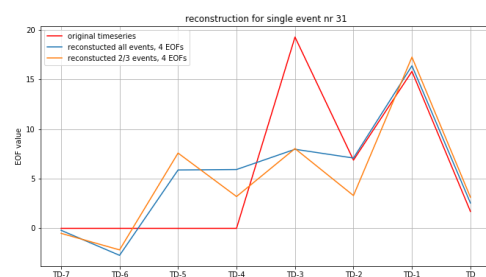


Abbildung 4.3.: RMSE zwischen Ursprungsdatensatz und rekonstruiertem Datensatz für die einzelnen Events mit reduziertem Datensatz in der Berechnung. Die rote Kurve stellt den Niederschlagsverlauf dar, die blaue Kurve die Rekonstruktion aus dem vollen Datensatz und die orange Linie repräsentiert die Rekonstruktion aus einem verringerten Datensatz.



(a) Ereignis Nr. 9, vom 5. Mai 1999 in der Nähe von Bichlbach (Tirol).



(b) Ereignis Nr. 31, vom 9. Oktober 2011 in der Nähe von St. Nikola (Niederösterreich).

Abbildung 4.4.: Rekonstruktion einzelner Ereignisse aus vollem und verkleinertem Datensatz.

#### 4. Ergebnisse und Diskussion

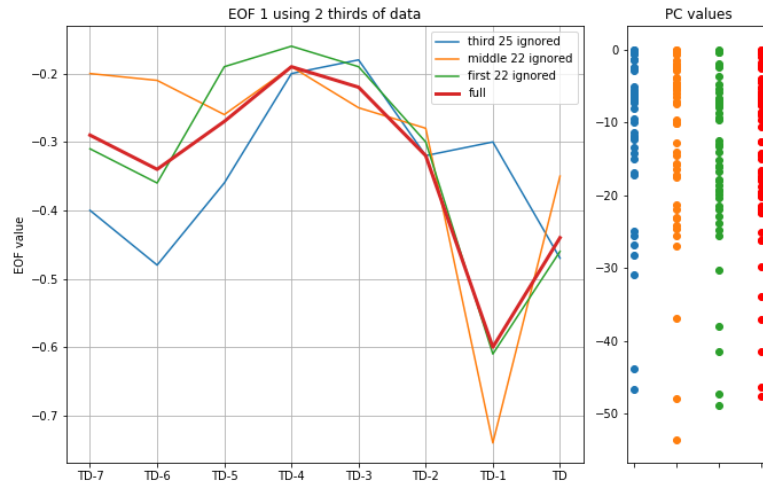
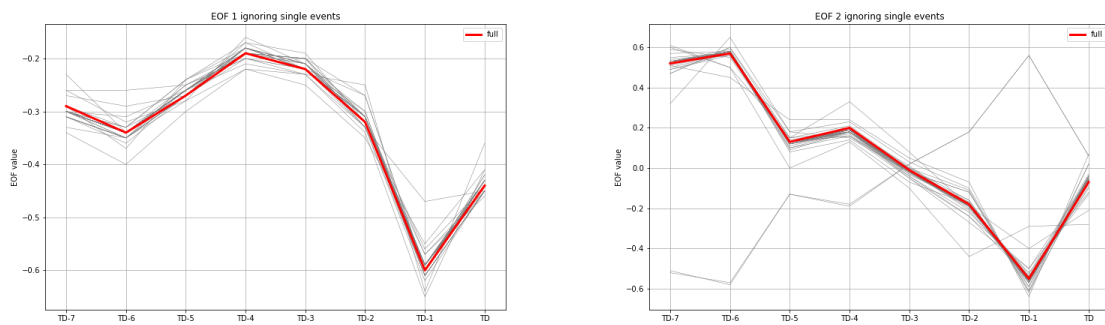


Abbildung 4.5.: EOF1 und die zugehörigen EOFs bei Berechnung unter Verwendung aller 68 Ereignisse sowie mit reduziertem Datensatz.



(a) EOF 1

(b) EOF 2

Abbildung 4.6.: EOFs bei Vernachlässigung einzelner Ereignisse

### 4.1.2. Unabhängiger Datensatz

Zur Überprüfung ob die 68 von der ÖBB erfassten Ereignisse eine ausreichende Grundlage für die Bestimmung der CIs darstellen werden die CIs von einem deutlich größeren unabhängigen Datensatz der GBA berechnet (siehe auch Kapitel 2.3). Ein Vergleich der jeweils ersten drei EOFs ist in Abb. 4.7 zu sehen, die Berechnung erfolgt multivariat für die Prädiktoren tägliche Niederschlagssumme und Temperaturtagesgang. Die CIs des GBA-Datensatzes sind zur leichteren Vergleichbarkeit um die y-Achse gespiegelt dargestellt, da dann die Verläufe einen ähnlichen Charakter aufweisen. Die Spiegelung kommt daher, dass bei der Berechnung der CIs die Richtung der größten Varianz in den Daten gesucht wird, diese jedoch in positiver wie negativer Richtung gleich ist. Als Folge daraus sind die PCs und in weiterer Folge auch die PPCs mit umgekehrtem Vorzeichen behaftet; die physikalische Relevanz der CIs selbst ist unverändert. Die Beschreibung im Folgenden bezeichnet Maxima und Minima bezogen auf den ÖBB-Datensatz. In den CIs aus den Daten der GBA sind Maxima des ÖBB-Datensatzes Minima und umgekehrt. Betrachtet man zunächst den Temperaturtagesgang ( $T_{min} - T_{max}$ ) so zeigt sich für den ersten CI (in Abb. 4.7 blau dargestellt) eine nahezu konstante Linie bei etwa 0,3 mit einer erklärten Varianz von rund 27 % (24 % bei CIs aus GBA-Daten). Daraus lässt sich schließen, dass vor etwa einem Viertel der Ereignisse nahezu konstante Werte des Temperaturtagesganges bis TD-1 verzeichnet wurden, unabhängig von dessen tatsächlicher Amplitude. Erst am Ereignistag selbst ist ein Rückgang der Magnitude - bei den ÖBB Daten deutlich - erkennbar, der für eine Veränderung des Prädiktoren steht. Der zweite CI (in orange dargestellt) zeigt mit 0,3 hohe absolute Werte bei TD-6 und am Ereignistag selbst. Für die tägliche Niederschlagssumme weist der erste CI wie auch beim Temperaturtagesgang kaum relevant hohe absolute Werte auf. Leichter lässt sich der zweite CI interpretieren, der mit erklärter Varianz von rund 13 % an TD-2 und TD-1 hohe absolute Werte größer 0,4 aufweist was auf notwendige Vorsättigung des Bodens vor dem Ereignis hindeuten kann.

### 4.1.3. Wahl der Prädiktoren und Validierung

Im Anschluss an die Berechnung der Niederschlags-CIs werden weitere CIs für verschiedene möglich Prädiktoren berechnet. Konkret werden tägliche Maximum- und Minimumtemperatur, die tägliche Temperaturamplitude ( $T_a = T_{min} - T_{max}$ ) und eine synthetische

#### 4. Ergebnisse und Diskussion

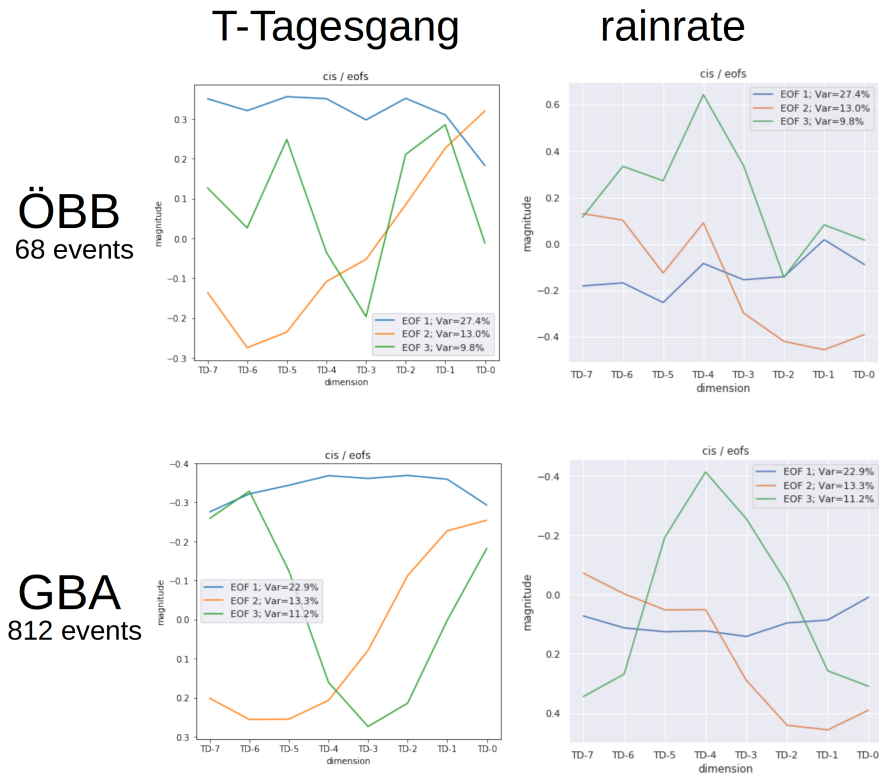


Abbildung 4.7.: CIs für Temperaturtagesgang ( $T_{max} - T_{min}$ ) und tägliche Niederschlags-summe berechnet aus zwei unabhängigen Datensätzen.

Variable „Taft“ verwendet. Letzere entspricht der täglichen Temperaturamplitude, falls ein Frost-Tau-Wechsel erfolgt und sonst ist Null:

$$\text{Taft} = \begin{cases} \text{Ta} & \text{falls } T_{max} > 0 \text{ und } T_{min} < 0 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Im Unterschied zu den Versuchen aus Abschnitt 4.1.1 wird vor der Berechnung der Datensatz normiert, indem der Mittelwert abgezogen und durch die Standardabweichung dividiert wird. Dadurch ist es auch möglich multivariate Prädiktoren zusammenzusetzen. Anschließend wird der aus 68 Ereignissen bestehende Datensatz in 54 Ereignisse geteilt, aus denen die CIs und die PCs berechnet werden. Die restlichen 14 Events, dienen als *test sample* um eine Verifikation zu ermöglichen. Zusätzlich werden aus dem Spartacus-Datensatz zwei Zeitserien ohne Ereignisse extrahiert; die erste ist das *test sample 2*; es stammt von Gitterpunkten an denen es zu einem anderen Zeitpunkt ein Ereignis gab. Zweiteres wird *random sample* genannt. Es handelt sich dabei um eine zufällige Zeitserie

von einem zufälligen Gitterpunkt, dabei wurde um Rechenleistung zu sparen kein Filter verwendet um einen zufälligen Treffer eines Steinschlags zu verhindern, jedoch scheint es unwahrscheinlich, dass aus knapp 2 Milliarden möglicher Zeitserien eine mit Ereignis gewählt wird. Dieser Kreuzvalidierungsprozess wird 100-mal ausgeführt um eine solide Datenbasis für die Validierung zu schaffen; die dabei vorkommenden Datensätze sind schematisch in Abb. 4.8 dargestellt. Aus den *test samples* und dem *random sample* werden die PPCs berechnet.

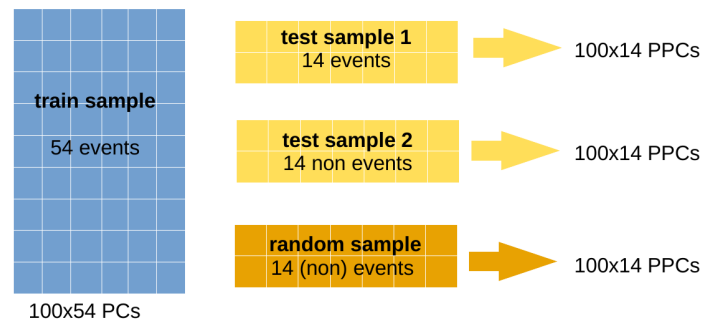


Abbildung 4.8.: Datensätze im Delete-d-Kreuzvalidierungsprozess.

Ein Beispiel für PCs und PPCs ist in den Abb. 4.9 und 4.10 in Form von Violinplots zu sehen. Im linken Plot ist die Verteilung der PCs aus den 100 x 54 Ereignissen erkennbar. Sie repräsentieren die eingetretenen Ereignisse. Rechts davon ist die Verteilung der PPCs aus dem *test sample 1* dargestellt; auch diese repräsentieren eingetretene Steinschläge, jedoch wurden sie nicht zur Berechnung der CIs verwendet. Die beiden rechten Plots stellen die Verteilungen der PPCs bei nicht-ingetretenem Ereignis aus *test sample 2* beziehungsweise *random sample* dar. Die Unterschiede im Hinblick auf den Median, dem 25. und 75. Perzentil sind anhand der dargestellten Boxen erkennbar. Im Idealfall ist irgendeine Unterscheidbarkeit der beiden linken von den beiden rechten Verteilungen ersichtlich. In Abb. 4.9 ist erkennbar, dass die Verteilungen der PPCs der 1. EOF nicht gravierend voneinander abweichen; am ehesten weicht das *random sample* von den anderen ab. Aus Abb. 4.10 ist jedoch für die 2. EOF subjektiv eine deutlich unterschiedliche Verteilung zwischen eingetretenen Ereignissen (beide linke Abbildungen) und Nicht-Ereignissen erkennbar. Das ist für die spätere Unterscheidung von großer Bedeutung.

Es ist auch die Darstellung einzelner oder mehrerer Läufe im Ereignisraum möglich. Dabei werden im zweidimensionalen Fall die beiden ersten EOFs als Achsen verwendet und die PCs und PPCs als Punkte im Koordinatensystem dargestellt, so lässt sich die

#### 4. Ergebnisse und Diskussion

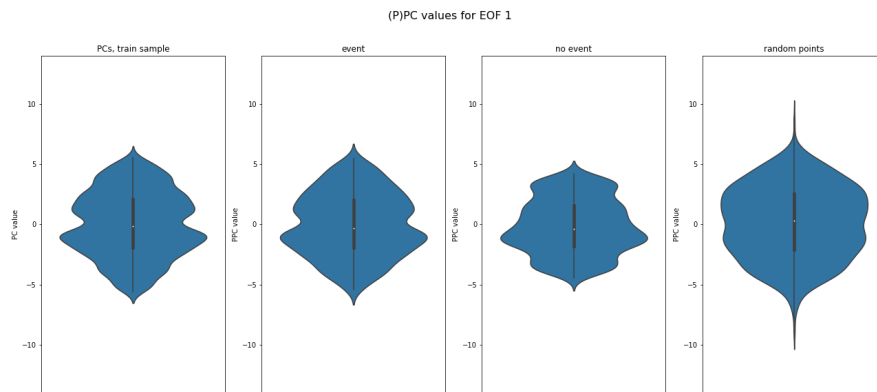


Abbildung 4.9.: PC und PPCs für dem ersten CI. Als Prädiktoren werden die tägliche Temperaturamplitude und täglicher Niederschlag verwendet und 5 EOFs von 8-Tages-Zeitserien betrachtet.

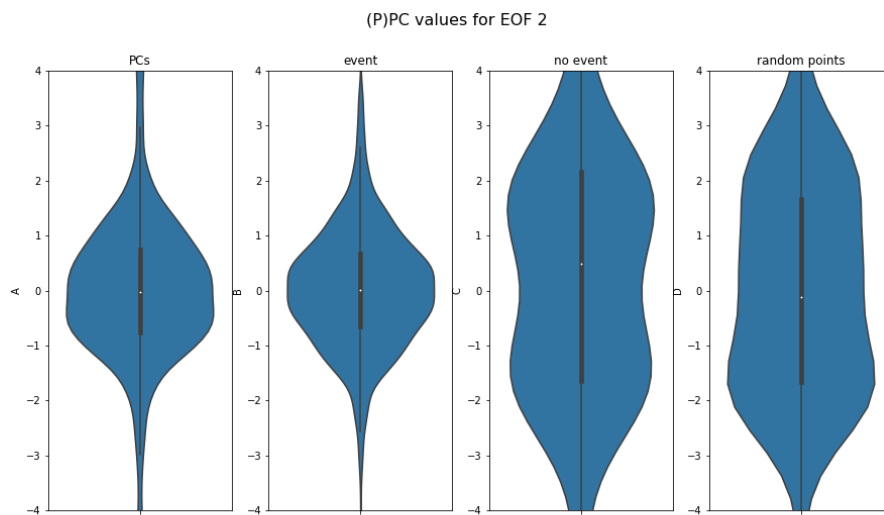


Abbildung 4.10.: PC und PPCs für den 2. CI. Als Prädiktoren werden auch hier die tägliche Temperaturamplitude und täglicher Niederschlag verwendet und 5 EOFs von 8-Tages-Zeitserien betrachtet.

Distanz zwischen PCs und PPCs in den dargestellten Dimensionen einfach erkennen. In Abb. 4.11 sind die PCs und PPCs für Validierungslauf Nummer 1 dargestellt. Ein perfektes Ergebnis würde alle Ereignisse (orange Punkte) innerhalb eines blauen Kreises darstellen, alle Nicht-Ereignisse (grüne Punkte und rote Dreiecke) außerhalb aller Kreise. Der Radius der Kreise stellt einen noch festzulegenden Schwellwert der euklidischen Distanz zum nächsten PC dar.

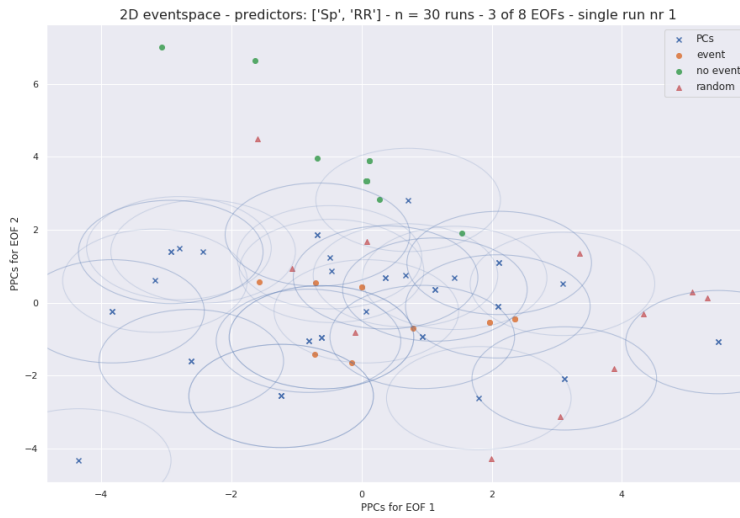


Abbildung 4.11.: Darstellung zweier Dimensionen des eventspace für einen Validierungslauf. Die blauen Kreise um die PCs stellen einen Schwellwert der euklidischen Distanz dar. Die unterschiedliche Achsenskalierung lässt die Kreise oval wirken.

In Abb. 4.12 ist erneut der Lauf Nummer 1 dargestellt, jedoch mit der Mahalanobis-Distanz anstelle der euklidischen Distanzen. Auch hier liegen im Idealfall alle PCs und Ereignisse (blaue Kreuze und orange Punkte) innerhalb der rot gestrichelten Ellipse und die Nicht-Ereignisse (grüne Punkte und rote Dreiecke) außerhalb. Die Größe des Schwellwerts ist auch hier noch festzulegen. Für diesen einzelnen Lauf mit beispielhaft gewähltem Schwellwert schneidet die Verwendung der Mahalanobis-Distanz deutlich besser ab als die euklidischen Distanzen zum jeweils nächsten PC, was jedoch im Allgemeinen so nicht der Fall ist. In diesem Beispiel sind offensichtlich die Flächen innerhalb des Schwellwertes unterschiedlich (Summe aller Kreise in Abb. 4.11 und einzelner Kreis in Abb. 4.12), was sich deutlich auf das Ergebnis auswirkt.

Eine Möglichkeit die Unterschiede zu erfassen ist die Definition eines Alarms, dieser soll ausgelöst sein wenn ein PPC innerhalb des Schwellwerts liegt, so erhält man einen Vektor

## 4. Ergebnisse und Diskussion

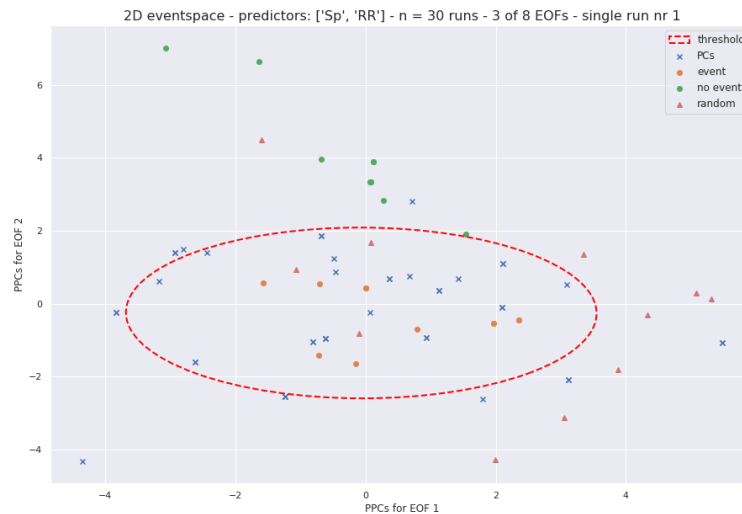


Abbildung 4.12.: Darstellung zweier Dimensionen des eventspace für einen Lauf. Die rot gestrichelte Ellipse um den Mittelwert der PCs stellt einen Schwellwert der Mahalanobis-Distanz dar.

mit binären Einträgen. Ein Alarm ist korrekt ( $a$  in Tab. 4.1), wenn es sich um einen PPC eines Ereignisses handelt. Sonst wird er als falscher Alarm ( $b$ ) kategorisiert. Umgekehrt führen korrekte Nicht-Alarmer zu *correct rejections* ( $d$ ) und beobachtete Ereignisse ohne Alarm werden als *misses* ( $c$ ) bezeichnet. Als Schwellwerte dienen vorerst empirisch ermittelte Werte. Führt man dies für die Läufe aus Abb. 4.11 und 4.12 durch findet man die Kontingenztabellen 4.1.

Euklidische Distanzen aus Abb. 4.11

|            | Beobachtung |    |      | SUMME |
|------------|-------------|----|------|-------|
|            |             | ja | nein |       |
| Vorhersage | ja          | 8  | 14   | 22    |
|            | nein        | 0  | 5    | 5     |
|            | SUMME       | 8  | 19   |       |

Mahalanobis-Distanz aus Abb. 4.12.

|            | Beobachtung |    |      | SUMME |
|------------|-------------|----|------|-------|
|            |             | ja | nein |       |
| Vorhersage | ja          | 8  | 3    | 11    |
|            | nein        | 0  | 16   | 16    |
|            | SUMME       | 8  | 19   |       |

Tabelle 4.1.: Kontingenztabeln zu einem Validierungslauf

Aus den Tabellen lassen sich verschiedene Gütemaße berechnen. Die *Probability of Detection* (POD) ist in beiden Fällen 100 %, die *False Alarm Rate* (FAR) ist für die Mahalanobis-Distanz deutlich niedriger und beträgt 27 %, während sie für die euklidischen Distanzen bei rund 64 % liegt. In weiterer Folge bestätigt der PSS den subjektiven Eindruck wonach in diesem Fall die Mahalanobis-Distanz eine bessere Unterscheidung zwischen Ereignissen und Nicht-Ereignissen liefert. Er liegt für die euklidischen Distanzen bei 26 % und für die Mahalanobis-Distanz bei 84 %.

Betrachtet man wie in Abb. 4.11 die euklidische Distanz zwischen PPCs und jeweils nächst gelegenen PC für alle 100 Läufe mit je 14 PPCs aus der Validierung kann man die Verteilung mithilfe von Violinplots darstellen wie in Abb. 4.13 zu sehen ist. Hier sind deutliche Unterschiede im Hinblick auf Median, 25. und 75. Perzentil offensichtlich. Würde man etwa bei 1,5 einen Schwellwert definieren, sodass alle Ereignisse unterhalb als Ereignis gelten, hätte man bereits eine gute Unterscheidung erreicht, da deutlich mehr tatsächliche Ereignisse (linke Abbildung) kleinere Werte aufweisen als dies bei den beiden rechten Abbildungen der Fall ist.

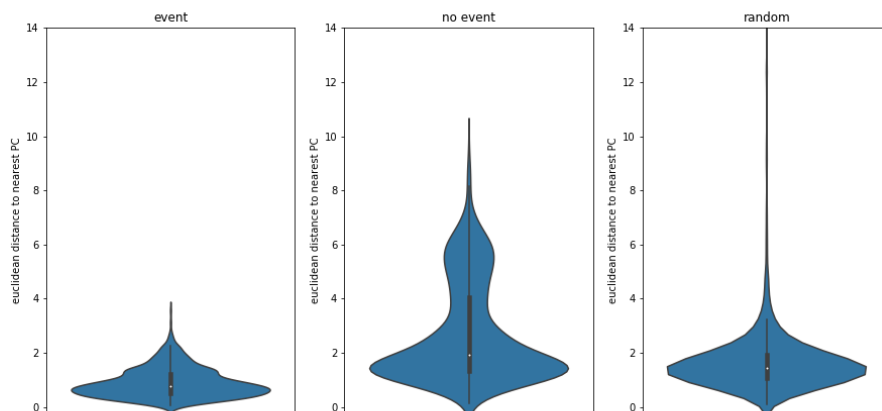


Abbildung 4.13.: Verteilung der euklidischen Distanzen zwischen allen PPCs und dem jeweils nächst gelegenen PC.

Zur Auswahl eines geeigneten Sets an Prädiktoren und einer sinnvollen Anzahl betrachteter EOFs werden alle Läufe betrachtet und für jeden einzelnen Lauf die mittlere Distanz berechnet. Ziel ist es ein Setting zu finden, das eine gute Unterscheidung zwischen Ereignissen und Nicht-Ereignissen ermöglicht indem die jeweilige mittlere Distanz für die ersteren möglichst klein und für zweitere möglichst groß ist zu finden. Darauf aufbauend kann später iterativ ein geeigneter Schwellwert gefunden werden. Die einzelnen versuchten

#### 4. Ergebnisse und Diskussion

Settings sind in Abb. 4.14 zu sehen. Dabei wurde die jeweilige Distanz zu den Event-PPCs auf 1 normiert (erste Spalten). Dadurch sind die beiden weiteren Spalten als Vielfaches dieser Entfernung zu sehen. Möglichst hohe Werte weisen auf gute Unterscheidbarkeit zwischen Ereignis und Nicht-Ereignis hin. Es zeigt sich, dass beide Distanzen dieselben Einstellungen des Modells nahelegen. Konkret sind dies:

- 'Ta','RR'\_[2 of 8] entspricht der Verwendung von täglicher Temperaturamplitude und Niederschlagssumme bei Verwendung von 2 EOFs und Betrachtung von 8 Tagen inklusive Ereignistag selbst.
- 'Ta','RR'\_[3 of 8]
- 'Tn','RR'\_[3 of 8]
- 'Tx','RR'\_[3 of 8]

Für die im nächsten Schritt folgende Berechnung der HDCs wird die Variante mit der Minimumtemperatur verwendet, da so der ressourcenintensive Download von Projektionen der Maximumtemperatur vermieden werden kann ohne nennenswerte Abstriche bei der Modellperformance hinnehmen zu müssen. Ein Vergleich mehrerer Settings bei den HDCs ist aufgrund limitierter Rechenleistung und Speicherkapazität nicht möglich.

Das Auffinden einer solchen möglichst gut geeigneten Alarmschwelle kann durch Betrachtung eines ROC-Diagramms erfolgen. In Abb. 4.15 sind solche Diagramme für das *test sample 2* und das *random sample* für je verschiedene Prädiktorensätze zu sehen. Dabei wird für verschiedene Schwellwerte (Zahlen im Diagramm) eine Kontingenztafel erstellt, POD und POFD berechnet und dargestellt. In Abb. 4.15a wird als eingetretene Ereignisse das *test sample 1* und für die Nicht-Ereignisse das *test sample 2* verwendet und alle 100 Kreuzvalidierungsläufe betrachtet. In Abb. 4.15b ist im Unterschied dazu das *random sample* für nicht beobachtete Ereignisse eingesetzt. Das gewünschte Ergebnis in Form von möglichst hoher POD bei möglichst geringer FAR weist derjenige Punkt auf der Kurve auf, der am nächsten zur linken oberen Ecke des Diagramms liegt (dort ist  $POD = 1$  und  $FAR = 0$ ). Die orange Kurve repräsentiert das Set „tägliche Minimumtemperatur und Niederschlagssumme“ und weist in beiden Abbildungen in vielen Bereichen höheren Skill - also Nutzen - als das vorhin genannte auf, was für dessen Verwendung bei der Berechnung der HDCs spricht. Vergleicht man Abb. 4.15a mit 4.15b so zeigt sich, dass die Verwendung der Gitterpunkte mit bekanntem Ereignis einen deutlich höheren Skill mit sich bringt als zufällig gewählte Gitterpunkte. Dieses Ergebnis ist wenig überraschend, da der Unter-

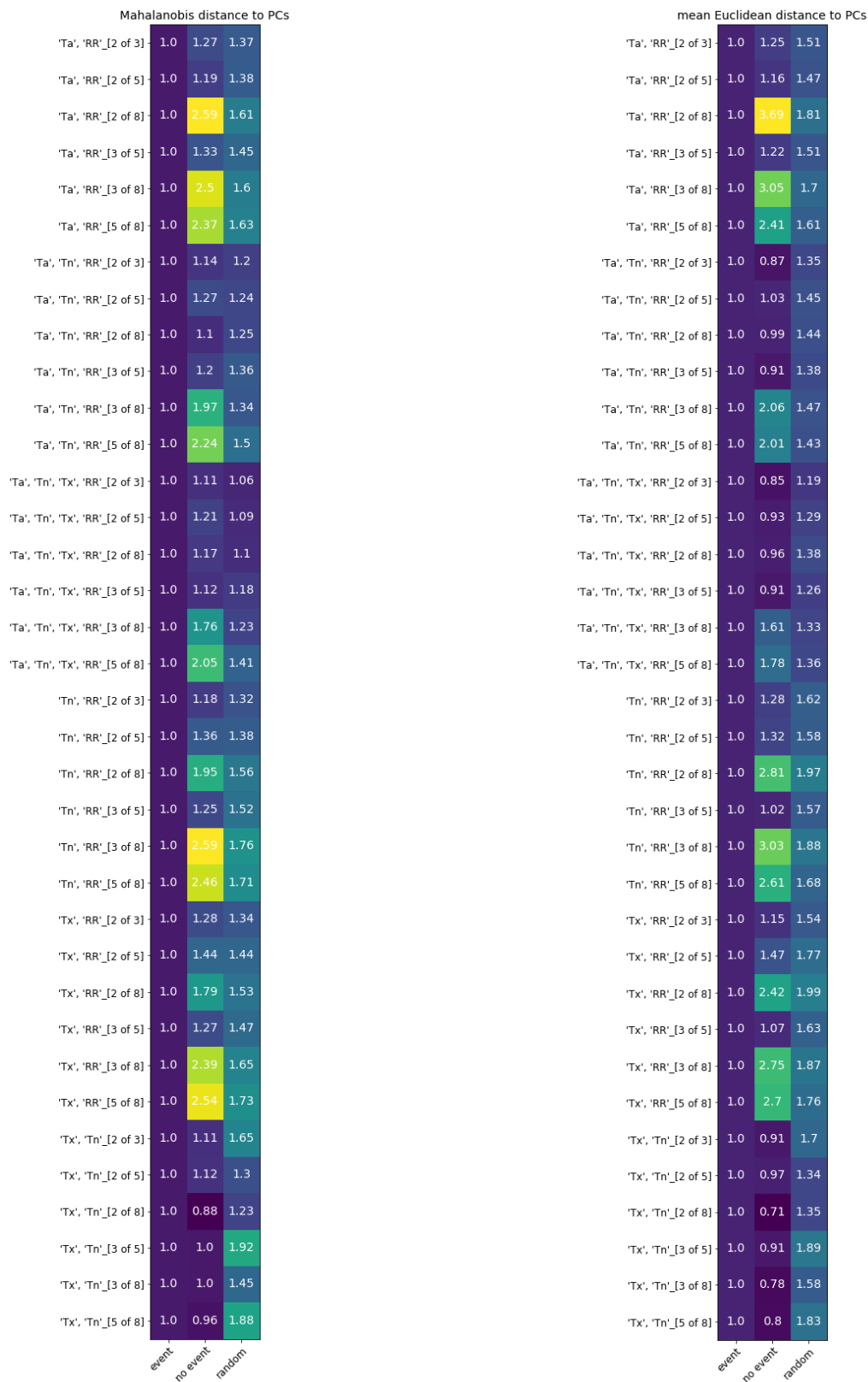


Abbildung 4.14.: Heatmaps für euklidische Distanzen und Mahalanobis-Distanz bei verschiedenen Prädiktorensets. Die Distanzen zu den Ereignis-PCs wurden zur leichteren Übersicht normiert.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

schied alle räumlichen Einflüsse wie Bodenbeschaffenheit, Hangneigung und Mikroklima repräsentiert.

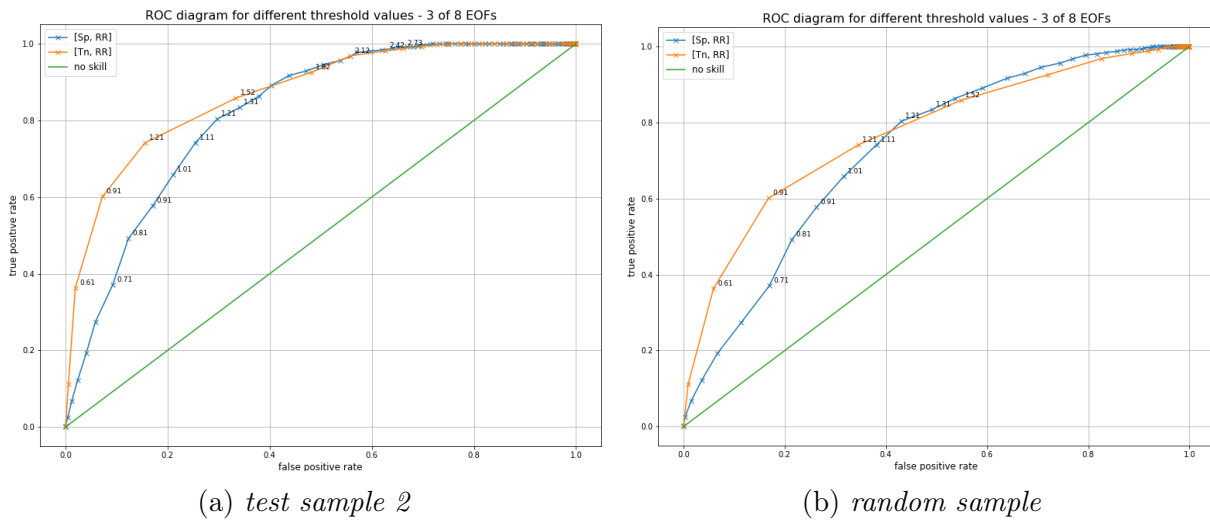


Abbildung 4.15.: ROC-Diagramme eignen sich zum Auffinden von Schwellwerten und zum Modellvergleich. Die teilweise dargestellten Zahlenwerte neben der Kurve stellen Schwellwerte am jeweiligen Punkt dar. Die grüne Linie kennzeichnet eine Prognose ohne Skill (Zufallsprognose).

Die CIs selbst sind in Abb. 4.16 dargestellt. Für die Minimumtemperatur ist der erste CI bei einer erklärten Varianz von 44,9 % erwartungsgemäß eher konstant mit einem leichten Rückgang zum Ereignistag hin. Der 2. CI weist bei deutlich geringerer erklärter Varianz absolut gesehen einen stetigen Anstieg von TD-5 bis zum Ereignistag auf, während die 3. EOF ab TD-2 fallende Werte zeigt. Für die täglichen Niederschlagssummen ist der erste CI ebenfalls der mit Abstand konstanteste; die beiden Weiteren lassen sich als Vorsättigung mit Auslöser am Ereignistag bzw. mit hohen Niederschlagssummen an den beiden dem Ereignis vorangehenden Tagen interpretieren.

## 4.2. HDCs

HDCs stellen das Potential für das Auftreten eines Ereignisses über die Zeit dar. Sie lassen sich berechnen, indem zuerst an einem Gitterpunkt über eine Zeitreihe die PPCs zu den bereits bekannten CIs bestimmt werden. Diese PPCs werden mit den ebenfalls bekannten PCs zu den CIs verglichen und bei Unterschreiten eines Schwellwertes wird ein Ereignis angenommen. Dabei gilt zu beachten, dass HDCs sich nicht zur Prognose eignen, sie geben lediglich an, wie sich das Potential für das Eintreten über die Zeit ändert. Zu

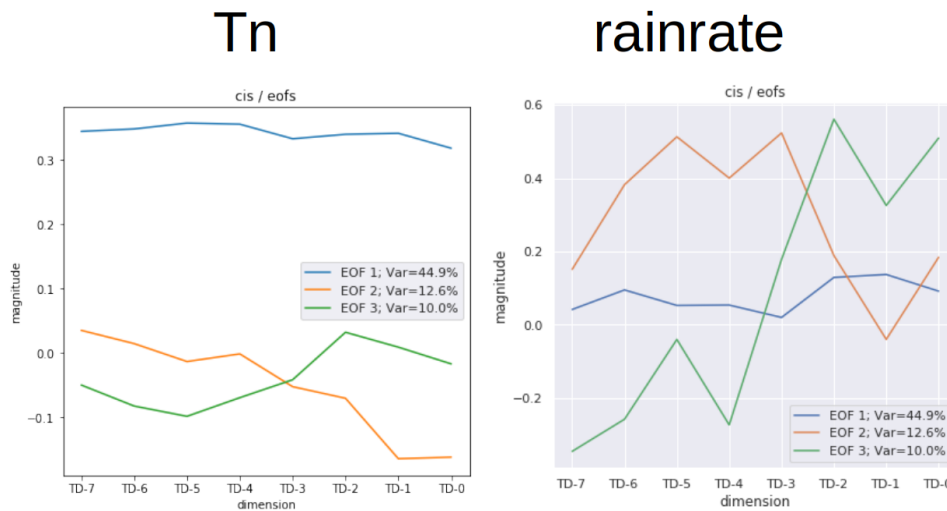


Abbildung 4.16.: CIs für das abschließend gewählte Set an Prädiktoren.

diesem Zweck ist es sinnvoll, stets relative Änderungen zu betrachten, indem der Wert der letzten Periode der Vergangenheit auf 1 normiert wird.

#### 4.2.1. HDCs in der Vergangenheit

Für die Bestimmung der HDCs in der Vergangenheit wird der Spartacus-Datensatz (siehe Kapitel 2.2) verwendet. Die Berechnung der PPCs erfolgt von 8.1.1990, da eine 8-Tages-Zeitreihe für die Bestimmung der 8 EOFs nötig ist und läuft bis 31.12.2019. So entstehen 10950 8-Tages-Zeitreihen, die in den Ereignisraum, aufgespannt von den EOFs, projiziert werden und deren neue Komponenten die gesuchten 10950 x 3 PPCs sind (3 pro Tag weil die restlichen EOFs vernachlässigt werden). Anschließend erfolgt für jeden Tag die Berechnung der euklidischen Distanz des PPC-Punkts zum nächsten der PC-Punkte im dreidimensionalen Ereignisraum. Ein Beispiel für die Verteilungen der PCs und PPCs im Ereignisraum ist in Abb. 4.17 zu sehen; die einzelnen Abbildungen sind achsenparallele Darstellungen. Wie bereits bei der Validierung in Abb. 4.9 zeigt sich auch hier, dass die PPCs für die 1. EOF ähnlich verteilt sind wie die PCs, während Mittelwerte für die 2. und 3. EOF eher Unterschiede aufweisen. Bei Unterschreiten der Alarmschwelle wird der Tag als Ereignistag gewertet. Diese werden monatsweise aufsummiert und als HDC dargestellt nachdem mithilfe einer Gaussfilterung die hochfrequenten Anteile entfernt wurden, die keinen Beitrag zur Interpretierbarkeit liefern.

Diese Vorgehensweise wird für mehrere Gitterpunkte wiederholt. Um ein möglichst repräsentatives Sample an Gitterpunkten zu betrachten wird im Folgenden die Schnittmenge

#### 4. Ergebnisse und Diskussion

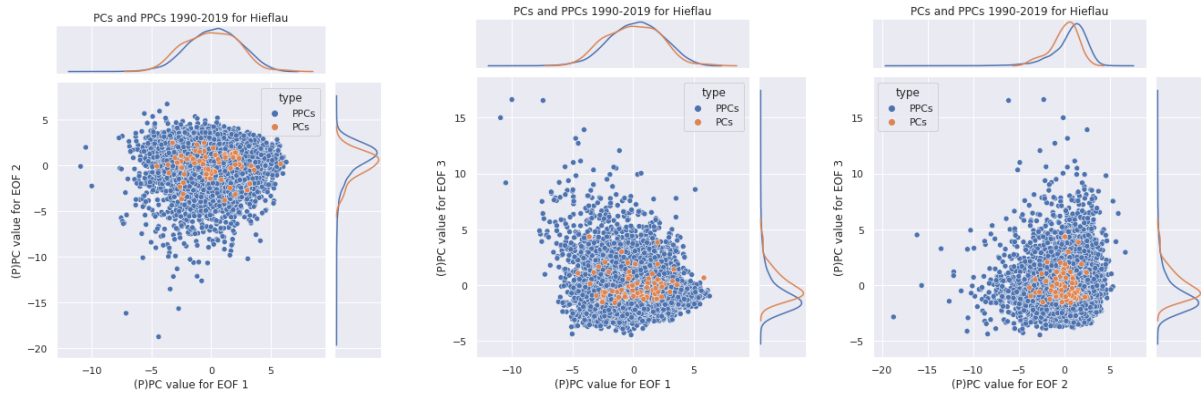


Abbildung 4.17.: Ereignisraum für einen einzelnen Gitterpunkt in Form von achsparallelen Darstellungen des dreidimensionalen Raums. Hier ist ein Punkt in der Nähe von Hieflau gewählt, da in dessen Umgebung einige Ereignisse bekannt sind. Hieflau ist in Abb. 2.4 als Stern dargestellt.

aller Gitterpunkte mit Anteil am Schienennetz mit der Region *Alpine Territory* (AT) und mit einem 7x7 km Gitter untersucht, was den 44 Gitterpunkten entspricht, die in Abb. 4.18 zu sehen sind. Die beiden weiteren in Abb. 2.6 dargestellten Regionen *Southern Basin* und *Northern Lowlands* werden aufgrund der geringen Anzahl aufgetretener Ereignisse nicht berücksichtigt.

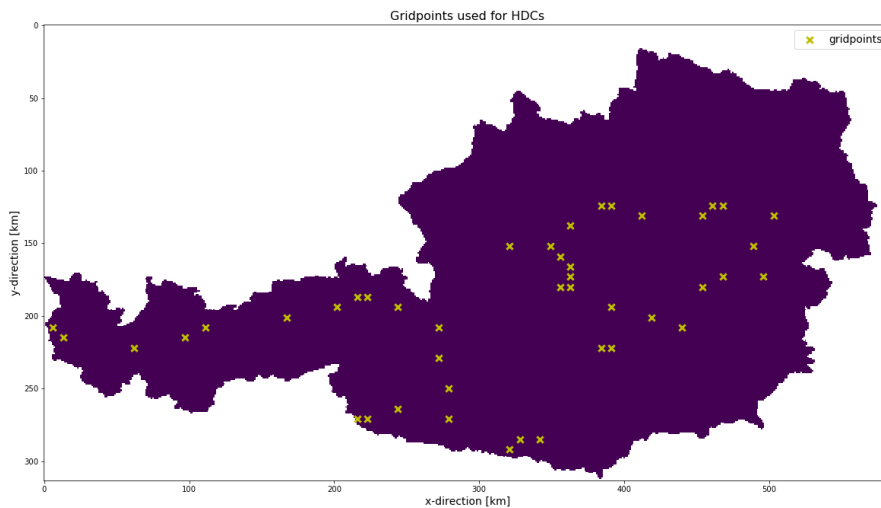


Abbildung 4.18.: Gelb gekennzeichnete Gitterpunkte stammen aus der Schnittmenge von 7x7 km-Gitter, Schienennetz und Region *Alpine Territory*.

Wie bereits erwähnt ist der Schwellwert der Distanz zwischen PCs und PPCs, ab dem ein Tag als Ereignistag gewertet wird noch nicht festgelegt. Abb. 4.19 zeigt HDCs für den Zeitraum von 1990 bis 2019 für 3 verschiedene Schwellwerte  $\theta$ .  $\theta_1 = 0,8824$  (orange dar-

gestellt) ist der mittlere Abstand zwischen 2 PCs im Ereignisraum,  $\theta_2 = 0,92$  (schwarz) lieferte in der Validierung eine hohe POD bei geringer POFD und  $\theta_3 = 1,5$  (grün) wurde bewusst hoch gewählt. Er liefert, wie in Abb. 4.15 erkennbar ist, deutlich weniger Skill als  $\theta_2$ . Zusätzlich ist für den Schwellwert  $\theta_2$  auch ein historischer Lauf des Modells ACCESS auf dem Spartacus-Gitter in Rot dargestellt. Neben der erwartungsgemäß unterschiedlichen Höhe auf der y-Achse (Anzahl der Tage mit Ereignis/Alarm pro Monat) weisen die Mittelwerte aus den 44 Gitterpunkten subjektiv nur kleine Unterschiede in den Verläufen auf. Auch die Variante mit  $\theta_3$  weist bei etwas größerer Standardabweichung  $\sigma$  einen ähnlichen, sehr schwach fallenden, linearen Trend  $k$ , wie die beiden anderen Kurven auf, wie aus Tab. 4.2 zu sehen ist. Da die versetzten Höhen  $d$  für die Darstellung von in der Zukunft liegenden HDCs keine Rolle spielen, weil sie ja normiert wird, ist die Definition eines bestimmten Schwellwerts nicht wesentlich entscheidend für den Verlauf der Korridore. Ein deutlicher Unterschied ist jedoch für den GCM-Lauf erkennbar, der bei etwas höherer Alarmanzahl einen stärker fallenden linearen Trend  $k$  aufweist.

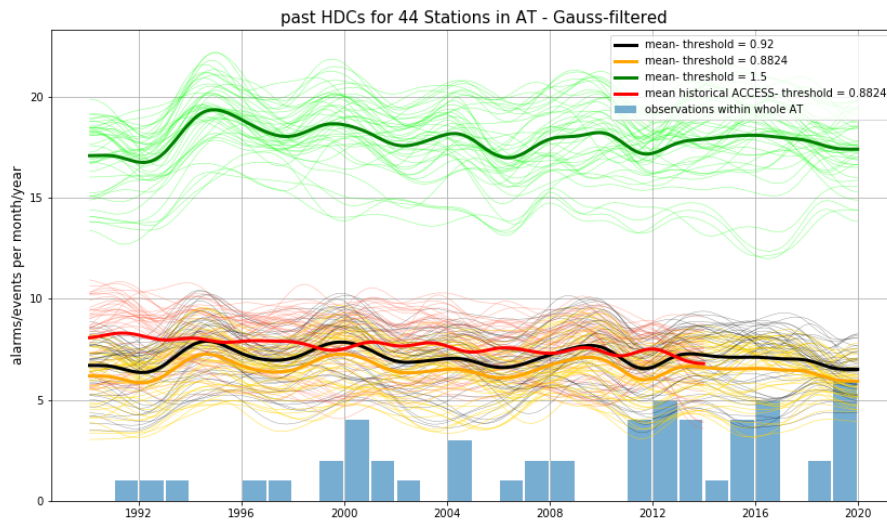


Abbildung 4.19.: HDCs von 1990 bis 2019 für verschiedene, in unterschiedlichen Farben dargestellte Schwellwerte. Die dünnen Linien sind die HDCs an den einzelnen Gitterpunkten aus Abb. 4.18, die dicken Linien entsprechen dem Mittelwert daraus, die blauen Balken kennzeichnen beobachtete Ereignisse.

Betrachtet man in Abb. 4.19 die beobachteten Ereignisse, die in Form der blauen Balken dargestellt sind, so fällt der Anstieg der Events in den letzten 10 Jahren deutlich ins Auge. Es ist jedoch davon auszugehen, dass diese vermehrt erfassten Ereignisse eher

#### 4. Ergebnisse und Diskussion

| $\theta$ | $k[\cdot 10^{-4}]$ | $d$  | $\sigma$ |                   |
|----------|--------------------|------|----------|-------------------|
| 1,5      | -6,75              | 18,0 | 0,58     |                   |
| 0,92     | -4,25              | 7,16 | 0,39     |                   |
| 0,88     | -4,46              | 6,60 | 0,37     |                   |
| 0,88     | -35,4              | 8,11 | 0,33     | ACCESS historisch |

Tabelle 4.2.: Kennzahlen zu den verschiedenen Varianten für den Schwellwert  $\theta$ .  $k$  und  $d$  sind die Parameter einer linearen Regression der Form  $y = k \cdot x + d$  mit mittlerem HDC  $y$  sowie Anzahl der Monate  $x$  und  $\sigma$  ist die Standardabweichung.

nicht auf einen Anstieg der Steinschlagereignisse zurückzuführen sind, sondern eine Auswirkung der verbesserten Datenerfassung darstellen dürfte. In Tabelle 2.1 ist ersichtlich, dass erst seit 2010 eine eigene Kategorie für Felssturz existiert, was die Kategorisierung als Steinschlagereignis erleichtert.

##### 4.2.2. HDCs aus Klimamodellen

Grundlage für die zukünftigen Entwicklungskorridore sind die GCM-Modelle, die mit der Analogmethode auf das Gitter des Spartacus-Datensatzes gebracht wurden. Ansonsten erfolgt die Berechnung analog zu dem Ablauf für die Vergangenheit. Für die Berechnung der HDCs wird aufgrund limitierter Speicher- und Rechenkapazitäten nur eine überschaubare Anzahl an Szenarien und Modellen verwendet. Konkret sind dies je ein Lauf der SSPs 126 und 585 aus dem Modell ACCESS und ein SSP 585-Lauf des Modells TaiESM. Das Ergebnis ist, zusammen mit den historischen Läufen der beiden Modelle und des Spartacus-Datensatzes in Abb. 4.20, zu sehen. Zur Normierung wird der Mittelwert des historischen Laufs des jeweiligen Modells abgezogen und durch dessen Standardabweichung dividiert, was als *climate risk index* bezeichnet werden kann. Der vertikale Versatz im Jahr 2015 stammt von der Gauss-Filterung, die für historische und zukünftige Zeitserien separat berechnet wird. Der Parameter Standardabweichung des Filters wird auf 25 Monate eingestellt, um hochfrequente Anteile an den HDCs herauszufiltern.

Zur besseren Interpretierbarkeit ist eine alternative Darstellung in Form von Boxplots für die *near future* (2036 - 2065) und die *remote future* (2071 - 2100) in Abb. 4.21 geplottet. Für die *near future* ist in beiden Szenarien aus dem Modell ACCESS kein eindeutiger Trend erkennbar, lediglich TaiESM rechnet mit einem Rückgang des Potentials für Felsstürze im Vergleich zum Zeitraum 1990 - 2019. Ein etwas anderes Bild liefert die Projektion in die *remote future*. Hier rechnet ACCESS für das SSP 126 Szenario mit einem

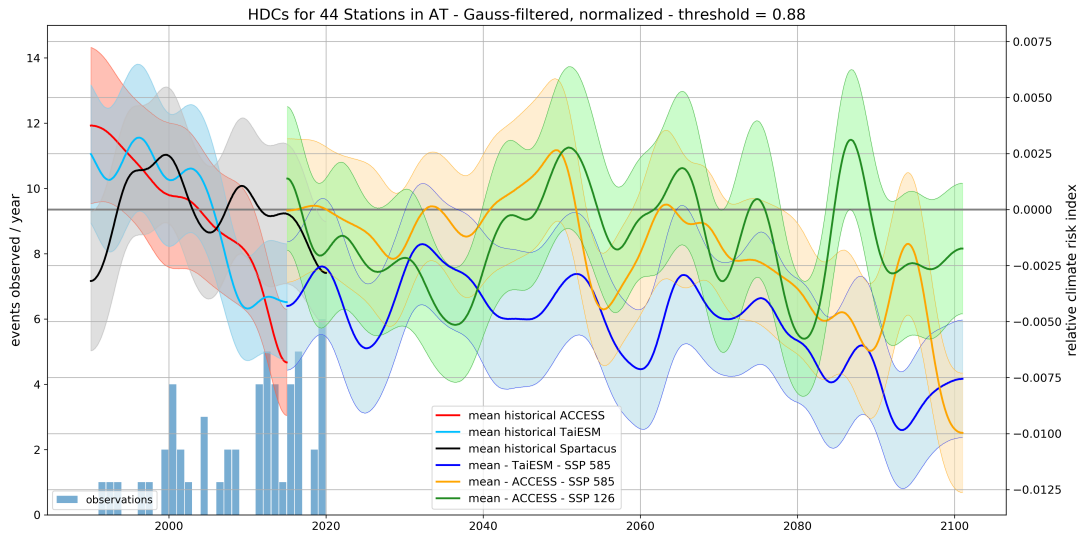


Abbildung 4.20.: HDCs aus Spartacus-Daten, historischen Läufen von GCMs und Projektionen in die Zukunft. Die Balken entsprechen jährlich beobachteten Ereignissen. Die schattierten Bereiche stellen 95%-Konfidenzintervalle dar.

sehr geringen Rückgang des *climate risk index*, während die beiden anderen Läufe einen deutlicheren Rückgang prognostizieren.

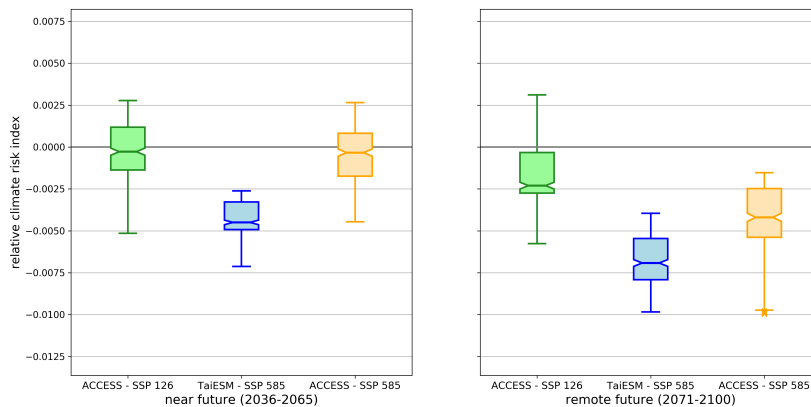


Abbildung 4.21.: Darstellung des *climate risk index* für *near* und *remote future*. Die Farbgebung und die Skalierung der Y-Achse entsprechen denen in Abb. 4.20.

# 5. Conclusio und Ausblick

## 5.1. CIs

Bei den Versuchen zum Verhalten der CIs zeigt sich generell, dass durch die Verwendung von EOFs Felder meteorologischer Parameter auch bei deutlicher Reduktion der vorhandenen Datenmenge gut rekonstruiert werden können. Allerdings kann das Vernachlässigen einzelner Ereignisse bereits zu einem Vorzeichenwechsel führen, der von ebenfalls geänderten Vorzeichen der PCs kompensiert wird. Im Weiteren wird erkennbar, dass die erste EOF eine größere Robustheit gegen einzelne Ereignisse mit vom Gros abweichenden Verlauf aufweist als die weiteren EOFs. Der Vergleich mit dem unabhängigen Datensatz der GBA in Abschnitt 4.1.2 lässt die Folgerung zu, dass die berechneten CIs repräsentativ für Trigger von Steinschlagprozessen in der alpinen Region Österreichs sind.

Die Varianten mit täglicher Temperaturamplitude und Minimumtemperatur sind erwartungsgemäß gut geeignet, um das Auftreten von Steinschlägen zu beschreiben. Bei der Maximumtemperatur ist das durchaus überraschend, da sie als Trigger für Steinschlag in der Literatur kaum zu finden ist. Die Arbeiten zu diesem Thema von Allen und Huggel (2013) sowie von Gruber u. a. (2004) befassen sich mit Höhenlagen, in denen Auftauen alpinen Permafrosts eine Rolle spielt. Eine mögliche Erklärung kann die erhöhte Verfügbarkeit von Schmelzwasser bei hohen Wintertemperaturen sein, das in Klüfte fließen kann, wie in Sandersen u. a. (1996) beschrieben. *Climate indices* zur Beschreibung von Felsstürzen mit Berücksichtigung der Maximaltemperatur bedürfen noch weiterer Untersuchung und ggf. einem genaueren Vergleich mit den Prädiktorensatz aus dieser Arbeit. Die Validierung ist für beide Varianten der Berücksichtigung der Temperatur erfolgreich, wie in Abb. 4.15 zu sehen ist, was eine Eignung der CIs zur Berechnung von HDCs nahelegt. Damit lässt sich die erste grundlegende Fragestellung aus Abschnitt 1.1 beantworten: Ja, es gibt charakteristische Verläufe meteorologischer Parameter, die für die ÖBB relevante Steinschlaggefahren triggern. Das Modell weist für diejenigen Gitterpunkte, an denen Ereignisse verzeichnet wurden, mehr Skill auf als an Zufälligen, wie in Abschnitt 4.1.3 erläutert wird. Das ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass die zufälligen Gitterpunkte auch aus größeren Höhenlagen zur Validierung herangezogen werden und dort andere Triggermechanismen vorkommen.

Das einfachere Modell von Macciotta u. a. (2015) weist ähnlichen Skill für eine kanadische Bahnstrecke auf; es ist in Abschnitt 1.3 näher beschrieben. Jedoch ist es nur für eine etwas mehr als 50 km lange Bahnstrecke gültig. Diese weist zwar unterschiedliche geologische Elemente auf, ist aber im Vergleich zu der Vielzahl an geologischen und geomorphologischen Gegebenheiten entlang des österreichischen Bahnnetzes weit weniger divers. Die CI-Methodik hingegen ist auf einem großen Teil des etwa 5000 km langen ÖBB Netzes anwendbar, sodass der Mehraufwand lohnt.

In dieser Arbeit wird angenommen, dass es über den gesamten Zeitraum zu keiner Veränderung von Auslöseprozessen kommt. Ein Beispiel für einen neuen Prozess ist eine denkbare zunehmende physikalische Verwitterung durch zukünftige Hitzewellen, die in vergangenen Zeitserien nie aufgetreten sind. Eine weitere Quelle für Unsicherheiten stellt die Tatsache dar, dass ein Großteil der beobachteten Ereignisse aus den letzten 15 Jahren stammt, da erst hier die Kategorisierung eines Ereignisses als Felssturz deutlich erleichtert wurde.

Eine weitere Möglichkeit zur Weiterentwicklung des Konzepts der CIs ist die Berechnung regionaler Indizes, was jedoch aufgrund der geringen Anzahl der Ereignisse in den einzelnen Regionen nicht durchgeführt wurde.

## 5.2. HDCs

Zu Beginn dieser Arbeit war es eine große Herausforderung, Schwellwerte ab denen ein Tag als Ereignistag definiert sein soll, zu finden. Es stellt sich abschließend heraus, dass deren Einfluss auf den Verlauf der HDCs jedoch gering ist. Es lässt sich unabhängig davon mithilfe der CIs ein Potential für zukünftige Steinschlag- und Felssturzereignisse eruieren, was die Bearbeitung der zweiten Fragestellung aus Abschnitt 1.1 nach der Häufigkeit ihres Auftretens in der Zukunft ermöglicht.

Beim zeitlichen Verlauf der HDCs ist der negative Trend in der Vergangenheit bemerkenswert. Dieser setzt sich - bei hoher monatlicher Variabilität - auch in den Projektionen für alle verwendeten Modellläufe mehr oder weniger stark fort. Eine mögliche Ursache ist die rezente Klimaerwärmung, die zu einer Verringerung der Anzahl der Frosttage führt, was weniger Frost-Tau-Wechsel zur Folge hat. Diese Hypothese erscheint schlüssig, da der Rückgang für die SSP-585-Läufe, die größere Anstiege der globalen Mitteltemperatur beschreiben, deutlicher ausfällt.

## 5. *Conclusio und Ausblick*

Ein Faktor, der die Qualität der Ergebnisse beeinflusst haben könnte, ist das Fehlen eines Ensembles von mehreren Läufen pro Modell, die die Robustheit deutlich erhöht hätten. Für zukünftige Arbeiten sind wie bei den CIs eine regionale Betrachtung sowie die Einbeziehung weiterer GCMs und Ensembles davon interessante Aufgaben, die vom CIT der ZAMG durchgeführt werden und eine vielversprechende Basis für zukünftige Schutzprojekte der ÖBB darstellen.

# Literatur

- Ahnert, F. (2015). *Einführung in die Geomorphologie*. ger. 5., überarbeitete Auflage. UTB 8103. Stuttgart: UTB Stuttgart. ISBN: 9783838586274.
- Allen, S. und C. Huggel (2013). „Extremely warm temperatures as a potential cause of recent high mountain rockfall“. In: *Global and Planetary Change* 107, S. 59–69. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2013.04.007.
- Alvioli, M., M. Melillo, F. Guzzetti, M. Rossi, E. Palazzi, J. von Hardenberg, M. T. Brunetti und S. Peruccacci (2018). „Implications of climate change on landslide hazard in Central Italy“. In: *Science of The Total Environment* 630, S. 1528–1543. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.02.315.
- Benestad, R. E., I. Hanssen-Bauer und D. Chen (2008). *Empirical-statistical downscaling*. New Jersey: World Scientific Pub Co Inc. 215 S. ISBN: 978-981-281-912-3.
- Bi, D., M. Dix, S. Marsland, S. O’Farrell, A. Sullivan, R. Bodman, R. Law, I. Harman, J. Srbinovsky, H. A. Rashid, P. Dobrohotoff, C. Mackallah, H. Yan, A. Hirst, A. Savita, F. B. Dias, M. Woodhouse, R. Fiedler und A. Heerdegen (2020). „Configuration and spin-up of ACCESS-CM2, the new generation Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model“. In: *JSHESS*. DOI: 10.1071/ES19040.
- Bjerrum, L. und F. A. Jørstad (1968). „Stability of Rock Slopes in Norway“. In: *Norges geotekniske institutt* 79.
- Briffa, K. R., P. D. Jones, F. H. Schweingruber und T. J. Osborn (1998). „Influence of volcanic eruptions on Northern Hemisphere summer temperature over the past 600 years“. In: *Nature* 393.6684, S. 450–455. DOI: 10.1038/30943.
- Claussen, M. (2007). „1. Introduction to climate forcing and climate feedbacks“. In: *Developments in Quaternary Sciences*. Bd. 7. Elsevier, S. 3–11. DOI: 10.1016/S1571-0866(07)80026-1.
- De Maesschalck, R., D. Jouan-Rimbaud und D. Massart (2000). „The Mahalanobis distance“. In: *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* 50.1, S. 1–18. DOI: 10.1016/S0169-7439(99)00047-7.
- Delonca, A., Y. Gunzburger und T. Verdel (2014). „Statistical correlation between meteorological and rockfall databases“. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 14.8, S. 1953–1964. DOI: 10.5194/nhess-14-1953-2014.
- Dorren, L. K., F. Berger, C. Le Hir, E. Mermin und P. Tardif (2005). „Mechanisms, effects and management implications of rockfall in forests“. In: *Forest Ecology and Management* 215.1, S. 183–195. DOI: 10.1016/j.foreco.2005.05.012.
- Douglas, G. R. (1980). „Magnitude frequency study of rockfall in Co. Antrim, N. Ireland“. In: *Earth Surface Processes* 5.2, S. 123–129. DOI: 10.1002/esp.3760050203.

- Enigl, K., C. Matulla, M. Schlögl und F. Schmid (2019). „Derivation of canonical total-sequences triggering landslides and floodings in complex terrain“. In: *Advances in Water Resources* 129, S. 178–188. DOI: 10.1016/j.advwatres.2019.04.018.
- Eyring, V., S. Bony, G. A. Meehl, C. A. Senior, B. Stevens, R. J. Stouffer und K. E. Taylor (2016). „Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization“. In: *Geosci. Model Dev.* 9.5, S. 1937–1958. DOI: 10.5194/gmd-9-1937-2016.
- Fowler, H. J., S. Blenkinsop und C. Tebaldi (2007). „Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling: ADVANCES IN DOWNSCALING TECHNIQUES FOR HYDROLOGICAL MODEL-LING“. In: *Int. J. Climatol.* 27.12, S. 1547–1578. DOI: 10.1002/joc.1556.
- Fuchs, S. (2010). „Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren – Herausforderungen für eine nachhaltige Landnutzung in alpinen Gebieten“. In: *Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich*. Wien: Eigenverlag des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes, S. 169–180. ISBN: 978-3-902084-79-8.
- Gariano, S. L. und F. Guzzetti (2016). „Landslides in a changing climate“. In: *Earth-Science Reviews* 162, S. 227–252. DOI: 10.1016/j.earscirev.2016.08.011.
- Gidden, M. J., K. Riahi, S. J. Smith, S. Fujimori, G. Luderer, E. Kriegler, D. P. van Vuuren, M. van den Berg, L. Feng, D. Klein, K. Calvin, J. C. Doelman, S. Frank, O. Fricko, M. Harmsen, T. Hasegawa, P. Havlik, J. Hilaire, R. Hoesly, J. Horing, A. Popp, E. Stehfest und K. Takahashi (2019). „Global emissions pathways under different socioeconomic scenarios for use in CMIP6: a dataset of harmonized emissions trajectories through the end of the century“. In: *Geosci. Model Dev.* 12.4, S. 1443–1475. DOI: 10.5194/gmd-12-1443-2019.
- Grotch, S. L. und M. C. MacCracken (1991). „The Use of General Circulation Models to Predict Regional Climatic Change“. In: *Journal of Climate* 4.3, S. 286–303. DOI: 10.1175/1520-0442(1991)004<0286:TUOGCM>2.0.CO;2.
- Gruber, S., M. Hoelzle und W. Haeberli (2004). „Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003“. In: *Geophys. Res. Lett.* 31.13. DOI: 10.1029/2004GL020051.
- Gruner, U. (2008). „Klimatische und meteorologische Einflüsse auf Sturzprozesse“. In: *Conference Proceedings. INTERPREVENT*. Bd. 2, S. 147–158. URL: [http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload\\_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2008\\_2\\_147.pdf](http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2008_2_147.pdf) (aufgerufen am 18.08.2020).
- Haimberger, L., P. Seibert, R. Hitznerberger, A. Steiner und P. Weihs (2014). „Das globale Klimasystem und Ursachen des Klimawandels“. In: *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)*. Bd. 1. 3 Bde. Wien, Österreich: Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, S. 173–

226. URL: <https://ccca.ac.at/wissenstransfer/apcc/apcc-aar14/austrian-assessment-report-2014-aar14>.
- Hann, J. v. (1883). *Handbuch der Klimatologie*. Bibliothek geographischer Handbücher. Stuttgart: Engelhorn.
- Hantel, M. und L. Haimberger (2016). *Grundkurs Klima*. Lehrbuch. Berlin Heidelberg: Springer Spektrum. 404 S. ISBN: 978-3-662-48192-9.
- Heim, A. (1931). „Bergsturz und Menschenleben“. ger. In: *(Der) Schweizer Geograph = (Le) géographe suisse* 8.5, S. 126. ISSN: 1016-8311.
- Hiebl, J. und C. Frei (2016). „Daily temperature grids for Austria since 1961—concept, creation and applicability“. In: *Theor Appl Climatol* 124.1, S. 161–178. DOI: 10.1007/s00704-015-1411-4.
- (2018). „Daily precipitation grids for Austria since 1961—development and evaluation of a spatial dataset for hydroclimatic monitoring and modelling“. In: *Theor Appl Climatol* 132.1, S. 327–345. DOI: 10.1007/s00704-017-2093-x.
- IPCC (2014a). *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Hrsg. von R. K. Pachauri und L. Mayer. OCLC: 914851124. Geneva, Switzerland: IPCC. 151 S. ISBN: 978-92-9169-143-2.
- (2014b). „Summary for Policymakers“. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Hrsg. von C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea und L. L. White. Cambridge, United Kingdom, und New York, NY, USA: Cambridge University Press, S. 1–32.
- Jacob, D., J. Petersen, B. Eggert, A. Alias, O. B. Christensen, L. M. Bouwer, A. Braun, A. Colette, M. Déqué, G. Georgievski, E. Georgopoulou, A. Gobiet, L. Menut, G. Nikulin, A. Haensler, N. Hempelmann, C. Jones, K. Keuler, S. Kovats, N. Kröner, S. Kotlarski, A. Kriegsmann, E. Martin, E. van Meijgaard, C. Moseley, S. Pfeifer, S. Preuschmann, C. Radermacher, K. Radtke, D. Rechid, M. Rounsevell, P. Samuelsson, S. Somot, J.-F. Soussana, C. Teichmann, R. Valentini, R. Vautard, B. Weber und P. Yiou (2014). „EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research“. In: *Reg Environ Change* 14.2, S. 563–578. DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2.
- Kovats, R. S., R. Valentini, L. M. Bouwer, E. Georgopoulou, D. Jacob, E. Martin, M. Rounsevell und J.-F. Soussana (2014). „Europe“. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change*. Hrsg. von V. R. Barros, C. B. Field, D. J. Dokken, M. D. Mastrandrea, K. J. Mach, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S.

## Literatur

- Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea und L. L. White. Section: 23. Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA: Cambridge University Press, S. 1267–1326.
- Krähenbühl, R. (2004). „Temperatur und Kluftwasser als Ursachen von Felssturz“. In: *Bulletin fuer Angewandte Geologie* 9.1, S. 19–35. DOI: 10.5169/seals-224989.
- Kraus, H. (2004). *Die Atmosphäre der Erde: eine Einführung in die Meteorologie*. 3., erw. und aktualisierte Aufl. Berlin: Springer. 422 S. ISBN: 978-3-540-20656-9.
- Krautblatter, M. und M. Moser (2009). „A nonlinear model coupling rockfall and rainfall intensity based on a four year measurement in a high Alpine rock wall (Reintal, German Alps)“. In: *Natural Hazards and Earth System Science* 9.4, S. 1425–1432. DOI: 10.5194/nhess-9-1425-2009.
- Kuhlmann, J. (2007). „Ausgewählte Verfahren der Holdout- und Kreuzvalidierung“. In: *Methodik der empirischen Forschung*. Hrsg. von S. Albers, D. Klapper, U. Konradt, A. Walter und J. Wolf. Wiesbaden: Gabler, S. 407–416. DOI: 10.1007/978-3-8349-9121-8\_27.
- Kundela, G., I. Fordinal, F. Mühlböck und C. Rachoy (2016). „The flood warning service of the Austrian Federal Railways“. In: *Conference Proceedings*. INTERPRAEVENT 2016. Bd. 1, S. 935–943. URL: [http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload\\_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2016\\_1\\_935.pdf](http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload_files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2016_1_935.pdf) (aufgerufen am 22.08.2020).
- Lee, W.-L., Y.-C. Wang, C.-J. Shiu, I.-c. Tsai, C.-Y. Tu, Y.-Y. Lan, J.-P. Chen, H.-L. Pan und H.-H. Hsu (2020). „Taiwan Earth System Model Version 1: description and evaluation of mean state“. In: *Geosci. Model Dev.* 13.9, S. 3887–3904. DOI: 10.5194/gmd-13-3887-2020.
- Lorenz, E. N. (1956). „Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction“. In: *Science Report 1, Statistical Forecasting Project, Department of Meteorology, MIT*.
- Macciotta, R. (2019). „Review and latest insights into rock fall temporal variability associated with weather“. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering* 172.6, S. 556–568. DOI: 10.1680/jgeen.18.00207.
- Macciotta, R., C. D. Martin, T. Edwards, D. M. Cruden und T. Keegan (2015). „Quantifying weather conditions for rock fall hazard management“. In: *Georisk* 9.3, S. 171–186. DOI: 10.1080/17499518.2015.1061673.
- Matulla, C., X. Zhang, X. L. Wang, J. Wang, E. Zorita, S. Wagner und H. von Storch (2008). „Influence of similarity measures on the performance of the analog method for downscaling daily precipitation“. In: *Clim Dyn* 30.2, S. 133–144. DOI: 10.1007/s00382-007-0277-2.
- Matulla, C., B. Hollósi, K. Andre, J. Gringinger, B. Chimani, J. Namyslo, T. Fuchs, M. Auerbach, C. Herrmann, B. Sladek, H. Berghold, R. Gschier und E. Eichinger-Vill (2018). „Climate Change driven evolution of hazards to Europe’s transport infra-

- structure throughout the twenty-first century“. In: *Theoretical and Applied Climatology* 133.1, S. 227–242. DOI: 10.1007/s00704-017-2127-4.
- Melzner, S., M. Lotter, N. Tilch und A. Kociu (2012). „Rockfall susceptibility assessment at the regional and local scales as basis for planning site-specific studies in the Upper Moelltal (Carinthia, Austria)“. In: *Berichte der Geologischen Bundesanstalt* 91.
- Moos, C., P. Bebi, M. Schwarz, M. Stoffel, K. Sudmeier-Rieux und L. Dorren (2018). „Ecosystem-based disaster risk reduction in mountains“. In: *Earth-Science Reviews* 177, S. 497–513. DOI: 10.1016/j.earscirev.2017.12.011.
- Moos, C., L. Dorren und M. Stoffel (2017). „Quantifying the effect of forests on frequency and intensity of rockfalls“. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17.2, S. 291–304. DOI: 10.5194/nhess-17-291-2017.
- Moss, R. H., J. A. Edmonds, K. A. Hibbard, M. R. Manning, S. K. Rose, D. P. van Vuuren, T. R. Carter, S. Emori, M. Kainuma, T. Kram, G. A. Meehl, J. F. B. Mitchell, N. Nakicenovic, K. Riahi, S. J. Smith, R. J. Stouffer, A. M. Thomson, J. P. Weyant und T. J. Wilbanks (2010). „The next generation of scenarios for climate change research and assessment“. In: *Nature* 463.7282, S. 747–756. DOI: 10.1038/nature08823.
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestad, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura und H. Zhang (2013). „Anthropogenic and Natural Radiative Forcing“. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Hrsg. von T. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P. Midgley. Cambridge, United Kingdom und New York, NY, USA.: Cambridge University Press. DOI: 10.1017/CB09781107415324.018.
- Nurmi, P. (2003). „Recommendations on the verification of local weather forecasts.“ In: Publisher: ECMWF. DOI: 10.21957/Y1Z1THG5L.
- O’Neill, B. C., E. Kriegler, K. L. Ebi, E. Kemp-Benedict, K. Riahi, D. S. Rothman, B. J. van Ruijven, D. P. van Vuuren, J. Birkmann, K. Kok, M. Levy und W. Solecki (2016a). „The roads ahead: Narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century“. In: *Global Environmental Change* 42, S. 169–180. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2015.01.004.
- O’Neill, B. C., C. Tebaldi, D. P. van Vuuren, V. Eyring, P. Friedlingstein, G. Hurtt, R. Knutti, E. Kriegler, J.-F. Lamarque, J. Lowe, G. A. Meehl, R. Moss, K. Riahi und B. M. Sanderson (2016b). „The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6“. In: *Geosci. Model Dev.* 9.9, S. 3461–3482. DOI: 10.5194/gmd-9-3461-2016.
- ÖBB-Infrastruktur AG (2018). *Geschäftsbericht 2018*. URL: [https://presse.oebb.at/de/dam/jcr:54a09272-2d79-4361-ae69-58f1dc536d6e/OEBB\\_Infra\\_GB2018.pdf](https://presse.oebb.at/de/dam/jcr:54a09272-2d79-4361-ae69-58f1dc536d6e/OEBB_Infra_GB2018.pdf) (aufgerufen am 01.05.2021).

## Literatur

- Obukhov, A. M. (1947). „Статистически однородные поля на сфере (Statistically homogeneous fields on a sphere)“. In: *Uspekhi Mat. Nauk* 2, S. 196–198. URL: <http://mi.mathnet.ru/eng/umn6940>.
- ONR 24810 - (2017). *Technischer Steinschlagschutz - Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung*. Norm.
- Paranunzio, R., F. Laio, M. Chiarle, G. Nigrelli und F. Guzzetti (2016). „Climate anomalies associated with the occurrence of rockfalls at high-elevation in the Italian Alps“. In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 16.9, S. 2085–2106. DOI: 10.5194/nhess-16-2085-2016.
- Piteau, D. R. (1977). „Regional slope-stability controls and engineering geology of the Fraser Canyon, British Columbia“. In: *Landslides*. Geological Society of America. DOI: 10.1130/REG3-p85.
- Prina Howald, E., J. M. Abbruzzese und C. Grisanti (2017). „An approach for evaluating the role of protection measures in rockfall hazard zoning based on the Swiss experience“. In: *Natural Hazards and Earth System Sciences* 17.7, S. 1127–1144. DOI: 10.5194/nhess-17-1127-2017.
- Ravanel, L. und P. Deline (2011). „Climate influence on rockfalls in high-alpine steep rockwalls: The north side of the aiguilles de chamonix (mont blanc massif) since the end of the 'Little Ice Age'“. In: *Holocene* 21.2, S. 357–365. DOI: 10.1177/0959683610374887.
- Reimer, K. (2009). „Bootstrapping und andere Resampling-Methoden“. In: *Methodik der empirischen Forschung*. Hrsg. von S. Albers, D. Klapper, U. Konradt, A. Walter und J. Wolf. Wiesbaden: Gabler Verlag, S. 521–536. DOI: 10.1007/978-3-322-96406-9\_33.
- Riahi, K., D. P. van Vuuren, E. Kriegler, J. Edmonds, B. C. O'Neill, S. Fujimori, N. Bauer, K. Calvin, R. Dellink, O. Fricko, W. Lutz, A. Popp, J. C. Cuaresma, S. Kc, M. Leimbach, L. Jiang, T. Kram, S. Rao, J. Emmerling, K. Ebi, T. Hasegawa, P. Havlik, F. Humpenöder, L. A. Da Silva, S. Smith, E. Stehfest, V. Bosetti, J. Eom, D. Gernaat, T. Masui, J. Rogelj, J. Strefler, L. Drouet, V. Krey, G. Luderer, M. Harmsen, K. Takahashi, L. Baumstark, J. C. Doelman, M. Kainuma, Z. Klimont, G. Marangoni, H. Lotze-Campen, M. Obersteiner, A. Tabeau und M. Tavoni (2017). „The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview“. In: *Global Environmental Change* 42, S. 153–168. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2016.05.009.
- Rogelj, J., A. Popp, K. V. Calvin, G. Luderer, J. Emmerling, D. Gernaat, S. Fujimori, J. Strefler, T. Hasegawa, G. Marangoni, V. Krey, E. Kriegler, K. Riahi, D. P. van Vuuren, J. Doelman, L. Drouet, J. Edmonds, O. Fricko, M. Harmsen, P. Havlik, F. Humpenöder, E. Stehfest und M. Tavoni (2018). „Scenarios towards limiting global mean temperature increase below 1.5 °C“. In: *Nature Clim Change* 8.4, S. 325–332. DOI: 10.1038/s41558-018-0091-3.
- Sandersen, F., S. Bakkehoi, E. Hestnes und K. Lied (1996). „The influence of meteorological factors on the initiation of debris flows, rockfalls, rockslides and rockmass stability“.

- In: *Landslides. Proceedings of the 7th symposium on landslides*. Hrsg. von K. Senneset, S. 97–114.
- Sass, O. und M. Oberlechner (2012). „Is climate change causing increased rockfall frequency in Austria?“ In: *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 12.11, S. 3209–3216. DOI: 10.5194/nhess-12-3209-2012.
- Sass, O. (2005). „Temporal Variability of Rockfall in the Bavarian Alps, Germany“. In: *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* 37.4, S. 564–573. DOI: 10.1657/1523-0430(2005)037[0564:TVORIT]2.0.CO;2.
- Schönwiese, C.-D. (2013). *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*. 5., vollst. überarb. und erw. Aufl. Stuttgart: Borntraeger. 319 S. ISBN: 978-3-443-01069-0.
- Solanki, S. K., I. G. Usoskin, B. Kromer, M. Schüssler und J. Beer (2004). „Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years“. In: *Nature* 431.7012, S. 1084–1087. DOI: 10.1038/nature02995.
- Stoffel, M., D. Tiranti und C. Huggel (2014). „Climate change impacts on mass movements — Case studies from the European Alps“. In: *Science of The Total Environment* 493, S. 1255–1266. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.02.102.
- Suda, J. und F. Rudolf-Miklau, Hrsg. (2012). *Bauen und Naturgefahren: Handbuch für konstruktiven Gebäudeschutz*. Wien: Springer. 510 S. ISBN: 978-3-7091-0680-8.
- Takayabu, I., H. Kanamaru, K. Dairaku, R. Benestad, H. von Storch und J. H. Christensen (2016). „Reconsidering the Quality and Utility of Downscaling“. In: *Journal of the Meteorological Society of Japan* 94A.0, S. 31–45. DOI: 10.2151/jmsj.2015-042.
- Taylor, K. E., R. J. Stouffer und G. A. Meehl (2012). „An Overview of CMIP5 and the Experiment Design“. In: *Bulletin of the American Meteorological Society* 93.4, S. 485–498. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- von Storch, H. und F. W. Zwiers (1999). *Statistical analysis in climate research*. Cambridge ; New York: Cambridge University Press. 484 S. ISBN: 978-0-521-45071-3.
- von Storch, H., E. Zorita und U. Cubasch (1993). „Downscaling of Global Climate Change Estimates to Regional Scales: An Application to Iberian Rainfall in Wintertime“. In: *Journal of Climate* 6.6, S. 1161–1171. DOI: 10.1175/1520-0442(1993)006<1161:DOGCCE>2.0.CO;2.
- Wilks, D. S. (2019). *Statistical methods in the atmospheric sciences*. 4th ed. Cambridge: Elsevier. ISBN: 978-0-12-815823-4.
- Wyllie, D. C., C. W. Mah und E. Hoek (2004). *Rock slope engineering: civil and mining*. OCLC: 57542083. London; New York: Spon Press. ISBN: 978-0-203-49908-5.
- Yu, C. H. (2002). „Resampling methods: Concepts, Applications, and Justification“. In: *Practical Assessment, Research & Evaluation* 8. DOI: 10.7275/9CMS-MY97.

## *Literatur*

Zorita, E. und H. von Storch (1999). „The Analog Method as a Simple Statistical Downscaling Technique: Comparison with More Complicated Methods“. In: *Journal of Climate* 12.8, S. 2474–2489. DOI: 10.1175/1520-0442(1999)012<2474:TAMAAS>2.0.CO;2.

# A. Anhang

## A.1. ergänzende Abbildungen

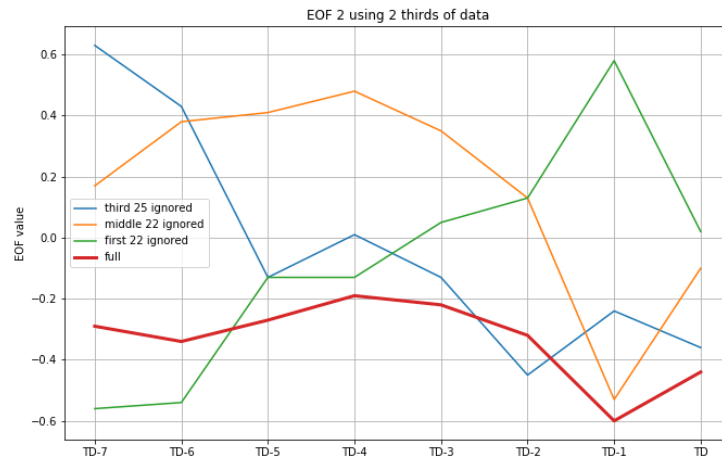


Abbildung A.1.: EOF2 bei Berechnung unter Verwendung aller 68 Ereignisse sowie mit reduziertem Datensatz.

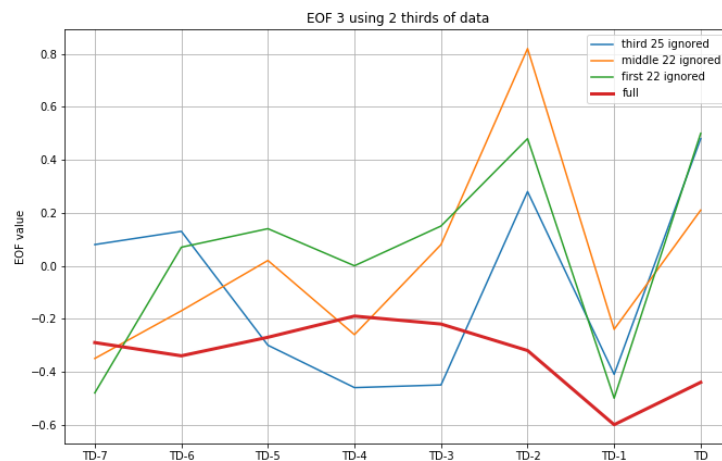


Abbildung A.2.: EOF3 bei Berechnung unter Verwendung aller 68 Ereignisse sowie mit reduziertem Datensatz.