

Publizierbarer Endbericht

Gilt für Studien aus der Programmlinie Forschung

A) Projektdaten

Allgemeines zum Projekt	
Kurztitel:	STREAM
Langtitel:	STorylines of Danube stREAMflow - Assessing future streamflow for different atmospheric circulation responses to greenhouse gases
Zitiervorschlag:	Future Danube Streamflow
Programm inkl. Jahr:	ACRP 14/2022
Dauer:	1.11.2022 – 30.04.2026
KoordinatorIn/ ProjekteinreicherIn:	Wegener Center für Klima und Globalen Wandel, Universität Graz
Kontaktperson Name:	Assoz. Prof. Albert Ossó Castillon
Kontaktperson Adresse:	Brandhofgasse 5 8010 Graz
Kontaktperson Telefon:	+43 316 380 8444
Kontaktperson E-Mail:	albert.osso-castillon@uni-graz.at
Projekt- und KooperationspartnerIn (inkl. Bundesland):	AFRY Austria GmbH (Wien)
Schlagwörter:	Danube, low flow, climate change, jet stream.
Projektgesamtkosten:	277.119,00 €
Fördersumme:	277.119,00 €
Klimafonds-Nr:	C26125
Erstellt am:	17.07.2026

B) Projektübersicht

1 Kurzfassung

Executive Summary

Das Projekt STREAM untersuchte die zukünftigen Veränderungen von Niederschlag, Temperatur und Abfluss der im Einzugsgebiet der oberen Donau in Mitteleuropa auf Grundlage der neuesten Generation von CMIP6-Klimaprojektionen. Das zentrale Ziel bestand darin, Storyline-basierte Projektionen zu entwickeln, die nicht nur die Bandbreite möglicher hydrologischer Veränderungen abbilden, sondern auch die zugrunde liegenden großskaligen atmosphärischen Prozesse berücksichtigen.

Das Projekt verfolgte fünf Ziele:

O1: Die Identifizierung der atmosphärischen Zirkulationsregime und potenziellen Einflussfaktoren, die im Beobachtungszeitraum während des Sommerhalbjahres mit Dürre- und Niedrigwasserbedingungen verbunden sind.

O2: Die prozessbasierte Evaluierung der Fähigkeit von CMIP6-Modellen, die meteorologischen Bedingungen darzustellen, die zu Niedrigwasserereignissen führen.

O3: Die Bewertung zukünftiger Veränderungen hinsichtlich des Auftretens, der Intensität und der Persistenz von Dürre-, Hitze-Dürre- und Niedrigwasserereignissen für unterschiedliche Zirkulations-Storylines, relevante planetarische Einflussfaktoren und verschiedene globale Erwärmungsniveaus.

O4: Die Identifizierung und Bewertung physikalisch plausibler Worst-Case-Szenarien und der damit verbundenen Storylines.

O5: Die Bereitstellung maßgeschneiderter, räumlich verfeinerter und bias-korrigierter CMIP6-Klimaprojektionen für die Klima- und Klimafolgenforschung, gruppiert nach physikalisch aussagekräftigen Storylines.

Alle fünf Ziele wurden erfolgreich erreicht. Das hydrologische Modell COSERO wurde durch verbesserte Prozessabbildung, räumlich harmonisierte Parametrisierung und eine Neukalibrierung unter Berücksichtigung der letzten, sehr heißen Jahre weiterentwickelt. Darüber hinaus wurde ein neues Ensemble von Donau-Abflussprojektionen auf Basis bias-korrigierter Klimadaten aus 25 CMIP6-Modellen erstellt.

Die Analyse der außerordentlich langen Simulationszeitreihe von 1870 bis 2100 führte zu folgenden zentralen Ergebnissen:

Im Verlauf des 20. Jahrhunderts nahm der Niedrigwasserabfluss der Donau bei Wien um etwa 15 % zu. Rund ein Drittel dieser Zunahme lässt sich auf den Betrieb großer alpiner Speicherkraftwerke zurückführen, die in diesem Zeitraum errichtet wurden. Etwa zwei Drittel sind auf die bereits erfolgte Erwärmung zurückzuführen.

Die Zukunftsprojektionen zeigen, für die zweite Hälfte des 21. Jahrhunderts, tendenziell einen Rückgang des Donauabflusses bei Niedrigwasser. Das Ausmaß dieser Abnahme unterscheidet sich erheblich zwischen den Klimamodellen und Emissionsszenarien und ist im Szenario mit hohen Emissionen SSP5-8.5 deutlich stärker ausgeprägt.

Das saisonale Auftreten von Niedrigwasserperioden wird sich voraussichtlich weiter von einem Auftreten überwiegend im Winter im historischen Klima in Richtung Herbst und Spätsommer verlagern.

Bei einem globalen Erwärmungsniveau von +3 °C steigt die durchschnittliche Zahl von Niederwasserereignissen im Sommerhalbjahr von nahezu null im historischen Zeitraum auf etwa drei Ereignisse innerhalb von 30 Jahren. Die extremsten Modellprojektionen zeigen bis zu elf Ereignisse innerhalb von 30 Jahren.

Die Zunahme von Niederwasserereignissen in den hydrologischen Projektionen wird wesentlich durch die Reaktion des nordatlantischen Jetstreams auf den Klimawandel beeinflusst. Modelle, die eine stärkere Veränderung des Jetstreams simulieren, zeigen tendenziell auch eine stärkere Zunahme der Niederwasserereignisse.

Die Klima- und Abfluss-Projektionen wurden wichtigen Stakeholdern präsentiert, darunter, viadonau, VERBUND, das Land Oberösterreich, das Land Niederösterreich, der Nationalpark Donau-Auen sowie das Institut für Hydrobiologie der BOKU University. Die Stakeholder bewerteten die Ergebnisse als hoch relevant für zukünftige Entscheidungen in den Bereichen Flussmanagement, infrastrukturelle Maßnahmen, Schifffahrt, Wasserkraftbetrieb und Klimaanpassung.

STREAM zählt zudem zu den ersten Projekten, die den Klima-Storyline-Ansatz im Rahmen einer umfassenden hydrologischen Folgenabschätzung angewendet haben. Das Projekt lieferte wichtige praktische Erkenntnisse darüber, wie physikalisch konsistente hydrologische Storylines entwickelt, in die Klimafolgenmodellierung integriert und wirksam an Stakeholder kommuniziert werden können.

Zur Unterstützung der breiteren methodischen Weiterentwicklung organisierte STREAM auf der European Climate Change Adaptation Conference (ECCA) 2025 eine eigene Session zu Klimastorylines. Damit trug das Projekt dazu bei, die Lücke zwischen der theoretischen Entwicklung von Storyline-Methoden und ihrer praktischen Anwendung in der Klimafolgen- und Anpassungsforschung zu schließen. Die im Rahmen von STREAM aufgebaute Expertise, die etablierten Kooperationen und die gewonnenen Erkenntnisse werden somit sowohl das zukünftige Management der Donau als auch die Weiterentwicklung storyline-basierter Klimarisikobewertungen unterstützen.

2 Executive Summary

The STREAM project assessed future changes in precipitation, temperature, and Danube River discharge across Central Europe and the Upper Danube Basin using the latest generation of CMIP6 climate projections. Its central aim was to develop storyline-based projections that capture not only the range of possible hydrological changes, but also the large-scale atmospheric processes underlying them.

The project pursued five main objectives:

- **O1:** Identify the atmospheric circulation regimes and potential drivers associated with drought and low-flow conditions during the summer half-year in the observational record.
- **O2:** Conduct a process-based evaluation of the ability of CMIP6 models to represent the meteorological conditions leading to low-flow events.
- **O3:** Assess future changes in the occurrence, severity, and persistence of drought, hot-drought, and low-flow events under different circulation storylines, planetary-scale drivers, and global warming levels.
- **O4:** Identify and evaluate physically plausible worst-case scenarios and their associated storylines.
- **O5:** Provide the climate and impact research communities with tailored CMIP6 projections that are downscaled, bias-corrected, and grouped according to physically meaningful storylines.

All five objectives were successfully achieved. The COSERO hydrological model was updated through improved process representation, spatially harmonized parameterizations and a re-calibration that considered the most recent, very hot years. Applying the updated hydrological model with climate model data, a new daily ensemble of Danube streamflow projections was generated using bias-corrected climate data from 35 CMIP6 models.

The analysis of the long-term simulations for the period 1870-2100 produced the following key findings:

- During the twentieth century, low-flow discharge of the Danube at Vienna increased by approximately 15%. Around one-third of this increase can be attributed to the operation of large Alpine reservoirs constructed during this period, while approximately two-thirds can be attributed to climatic changes.
- Future projections indicate, for the second half of the 21st century, decreasing Danube low flow discharge. The magnitude of the decrease varies substantially between climate models and emission scenarios and is considerably larger under the high-emission SSP5-8.5 scenario.
- The seasonal occurrence of low-flow periods is projected to shift from predominantly in winter in the historical climate towards late summer and autumn.
- At a global warming level of +3°C, the average number of summer half-year low-flow events increases from virtually zero in the historical period to approximately three events per 30 years. The most extreme model projections indicate as many as 11 events per 30 years.
- The projected increase in low-flow occurrence is strongly influenced by the response of the North Atlantic jet stream to climate change. Models simulating a stronger jet-stream response also tend to project a larger increase in low-flow events.

The climatic and hydrological projections were presented to key stakeholders, including viadonau, VERBUND, Land Oberösterreich, Land Niederösterreich, Nationalpark Donau-Auen, and the Institute of Hydrobiology at BOKU University. Stakeholders considered the results highly relevant for future decisions concerning river management, infrastructure interventions, navigation, hydropower operations, and climate adaptation.

STREAM is also among the first projects to apply the climate-storyline approach within a comprehensive hydrological impact assessment. The project generated important practical knowledge on how to construct physically consistent hydrological storylines, integrate them into impact modelling, and communicate conditional climate information effectively to stakeholders.

To support wider methodological development, STREAM organized a dedicated session on climate storylines at the European Climate Change Adaptation Conference 2025. This contributed to bridging the gap between the theoretical development of storyline methods and their application in climate-impact and adaptation research. The expertise, collaborations, and lessons generated through STREAM will therefore support both future management of the Danube River and the broader advancement of storyline-based climate-risk assessment.

3 Hintergrund und Zielsetzung

Die Hitze-Dürre-Ereignisse der letzten Jahre waren zumindest in den vergangenen zwei Jahrtausenden beispiellos und hatten schwerwiegende Auswirkungen auf Mitteleuropa und den Alpenraum. Steigende Temperaturen haben zu deutlichen Trends bei Hitze-Dürren und der Abnahme der Bodenfeuchte geführt. Diese Entwicklungen werden sich den Projektionen zufolge mit dem anthropogenen Klimawandel fortsetzen. Aktuelle Projektionen der CMIP6-Klimamodelle zeigen für Mitteleuropa eine stärkere sommerliche Erwärmung und einen ausgeprägteren Rückgang der Sommerniederschläge als das vorherige CMIP5-Ensemble. Dementsprechend hatten erste hydrologische Klimafolgenmodellierungen für die Donau, die mit einer kleinen Teilmenge des CMIP6-HighResMIP-Modellensembles durchgeführt wurden, einen stärkeren Rückgang des Abflusses im Sommer und Herbst und damit deutlich niedrigere Niederwasserabflüsse in diesen Jahreszeiten ergeben. Daher erschienen weiterführende Untersuchungen des zukünftigen Dürre- und Niederwasserrisikos mit den neuen Projektionen der CMIP6-Klimamodellgeneration notwendig.

Üblicherweise wird die Unsicherheit der zukünftigen Reaktion des Klimas auf Veränderungen der Treibhausgase und Aerosole durch die Analyse von Multimodell-Ensembles von Klimaprojektionen untersucht. In der Klimafolgenforschung werden dazu Daten aus Multimodell-Ensembles in Klimafolgenmodellen verwendet. Eine einfache Analyse des jeweils „nächsten und aktuellsten

Multimodell-Ensembles“ würde jedoch nur unzureichende Einblicke in die Weiterentwicklung des Wissens über den zukünftigen Klimawandel liefern. Der jüngste IPCC-Bericht stellt fest, dass ein Multimodellmittel, ergänzt durch ein Maß für die Modellstreuung, für sich alleine keine geeignete Darstellung der Unsicherheiten darstellt: die statistische Auswertung bildet die Möglichkeit starker oder sogar gegenläufiger Trends nicht ausreichend ab.

Als Alternative wurden physikalische Klima-Storylines vorgeschlagen. Dabei werden die einzelnen Projektionen entsprechend unterschiedlicher zukünftiger Veränderungen gruppiert, die von Veränderungen der großskaligen Einflussfaktoren regionaler Klimaänderungen – beispielsweise Anomalien der Meeresoberflächentemperatur, des Meereises und der großskaligen atmosphärischen Zirkulation – sowie von unterschiedlichen Ausprägungen des Treibhausgasantriebs abhängen.

Bislang lagen keine Projektionen des zukünftigen Abflusses vor, die einen Zusammenhang mit möglichen Zirkulationsreaktionen auf den Treibhausgasantrieb und unterschiedliche Erwärmungsniveaus herstellten. Bestehende Projektionen hoben das „wahrscheinlichste Abflussszenario“ hervor und lieferten breite Unsicherheitsbereiche. Dieser Ansatz wurde jedoch als unzureichend für die Interpretation und Formulierung von Anpassungsoptionen erachtet.

STREAM hat auf Grundlage des neuen CMIP6-Ensembles Storyline-basierte Projektionen von Niederschlag, Temperatur und Abfluss für das obere Donaeinzugsgebiet untersucht und bereitgestellt.

Die Hauptziele dabei waren:

O1: Die Bewertung der Jetstream-Zirkulationsregime und möglicher Einflussfaktoren, die im Beobachtungszeitraum während des Sommerhalbjahres zu Dürrebedingungen und niedrigen Abflüssen führen.

O2: Die prozessbasierte Evaluierung der Fähigkeit von CMIP6- Modellen, die meteorologischen Bedingungen darzustellen, die zu Niederwasser führen.

O3: Die Bewertung zukünftiger Veränderungen des Auftretens, der Intensität und der Persistenz von Dürre-, Hitze-Dürre- und Niederwasserereignissen für unterschiedliche Zirkulations-Storylines, in Abhängigkeit von relevanten planetarischen Einflussfaktoren und unterschiedlichen globalen Erwärmungsniveaus.

O4: Die Bewertung von Worst-Case-Szenarien und den damit verbundenen Storylines sowie Untersuchung ihrer Auswirkungen.

O5: Die Bereitstellung maßgeschneiderter CMIP6-Klimaprojektionen für die breite Klima- und Klimafolgenforschung, die räumlich verfeinert, bias-korrigiert und nach Storylines gruppiert sind und in zukünftigen Studien zur Folgenabschätzung und Anpassungsplanung verwendet werden können.

4 Projektinhalt und Ergebnis(se)

Aktivitäten, Methoden und Ergebnisse in den Arbeitspaketen des Projekts

Das Projekt war in fünf Arbeitspakete (WP; siehe Abbildung 1) gegliedert. Aktivitäten, Methoden und Ergebnisse werden im Folgenden entsprechend dieser WP-Struktur dargestellt.

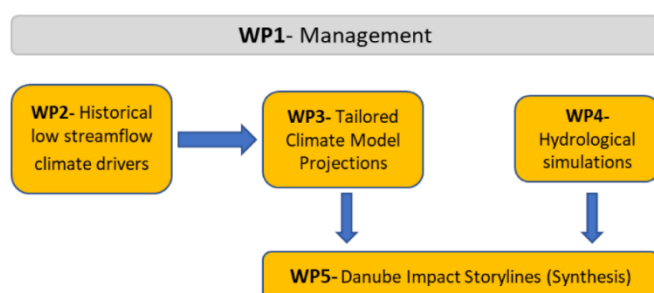


Abbildung 1: Arbeitspakete

WP1 – Management

Die Aufgaben dieses WP umfassten die Koordination und das Management (technischer, rechtlicher, vertraglicher, finanzieller, administrativer und ethischer Aspekte), die Organisation von Projekttreffen, die Erstellung von Berichten und Publikationen sowie die Kommunikation mit der Förderstelle und den Stakeholdern.

Die Teamleitungen von WEGC und AFRY koordinierten erfolgreich die folgenden Aktivitäten:

1. Im Projektverlauf fanden vier Organisationstreffen statt, davon drei virtuell und eines in Präsenz, jeweils unter Beteiligung aller Teammitglieder. Die Treffen dienten sowohl organisatorischen als auch wissenschaftlichen Diskussionen und bildeten den Rahmen für die Planung der nächsten Aktivitäten. Darüber hinaus wurde die regelmäßige informelle Abstimmung zu technischen Projektfragen zwischen den Teams durch E-Mail-Austausch und kurze virtuelle Besprechungen sichergestellt.

2. Im Rahmen der European Climate Change Adaptation Conference (ECCA), einer EU-finanzierten Veranstaltung vom 16. bis 18. Juni 2025 in Rimini, Italien, organisierten wir eine eigene Storyline-Session mit dem Titel „Physical Climate Storylines in Impact and Adaptation Research of Future Climate Extremes“.

3. Zur Präsentation der STREAM-Ergebnisse wurde ein eigener Stakeholder-Workshop in Wien geplant und durchgeführt. Er fand am 19. März 2026 am Standort von AFRY Austria in Wien statt. Die Einladung stieß auf sehr positive Resonanz; teilgenommen haben 16 Personen aus fünf Institutionen: VERBUND, viadonau, Land Oberösterreich, Land Niederösterreich und BOKU.

WP2 – Klimatische Einflussfaktoren historischer Niederwasserabflüsse

Dieses Arbeitspaket konzentrierte sich auf die Identifizierung und Analyse historischer Niederwasserereignisse der Donau sowie auf die Charakterisierung der großskaligen atmosphärischen Einflussfaktoren, die das regionale Hydroklima steuern. Die angewandten Methoden und wichtigsten Ergebnisse der einzelnen Aufgaben werden im Folgenden zusammengefasst.

Literaturrecherche (Task 2.1)

Zu Projektbeginn wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um den Forschungsstand zu Niederwasserperioden im Donaeinzugsgebiet zu bewerten und bestehende methodische Ansätze zur Verknüpfung von Abflussdefiziten mit atmosphärischen Zirkulationsmustern zu untersuchen.

Beschaffung relevanter Wasserstands- und Abflussdaten (Task 2.2)

Tägliche Abflussdaten der Donau wurden von viadonau bereitgestellt. Die Abflussanalysen konzentrierten sich auf den Pegel Korneuburg bei Wien. Dieser Pegel ist besonders relevant, da er die Abflüsse alpin geprägter Zubringer erfasst, bevor die Donau in das flachere Wiener Becken eintritt. Abflussanomalien an diesem Standort wirken sich daher unmittelbar auf sozioökonomische Bereiche

und die Kapazität der Schifffahrt aus. Relevante großskalige atmosphärische, ozeanische und Eisdaten waren am Wegener Center (WEGC) bereits verfügbar.

Identifizierung und Bewertung von Niederwasserereignissen (Task 2.3)

Auf Grundlage historischer beobachteter Abflussdaten von viadonau wurden Niederwasserereignisse identifiziert. Erste statistische Analysen verwendeten Abflussschwellen auf Basis des 10. und 30. Perzentsils. Sie zeigten, dass die anhand dieser Kennwerte definierten Niederwasserereignisse im historischen Referenzzeitraum überwiegend im borealen Winter auftraten. Dies entspricht den typischen alpinen hydrologischen Bedingungen, unter denen die winterliche Schneedecke als natürlicher Speicher wirkt (Abb. 2). Abbildung 2 zeigt außerdem, dass extreme Niederwasserereignisse im Zeitverlauf seltener wurden und sich das Auftreten von Niederwasser insgesamt in Richtung der Sommermonate verlagerte.

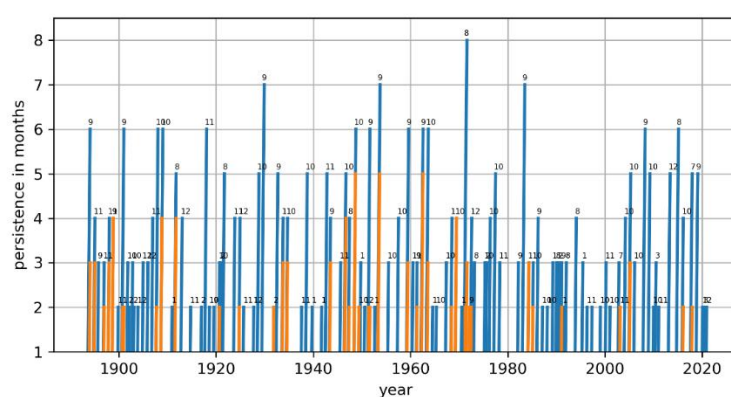


Abbildung 2: Balkendiagramm der identifizierten moderaten Niederwasserereignisse unterhalb des 30. Perzentsils (blaue Balken) und extremen Ereignisse unterhalb des 10. Perzentsils (orange Balken). Die vertikale Achse zeigt die Dauer des Niederwasserereignisses, d. h. die Anzahl aufeinanderfolgender Monate mit einem Abfluss unterhalb des 30. bzw. 10. Perzentsils. Die Zahl über jedem Balken gibt den Startmonat des Ereignisses an.

Zusätzlich untersuchten wir den möglichen Einfluss der Speicherbewirtschaftung auf den Abfluss. Dazu wurde der Abfluss mit dem hydrologischen Modell COSERO (Kling et al., 2015) mit und ohne Berücksichtigung des Talsperrenbetriebs simuliert (Abb. 3). Die Ergebnisse zeigen, dass der Abfluss bei Wien nur sehr schwach durch den Talsperrenbetrieb beeinflusst wird.

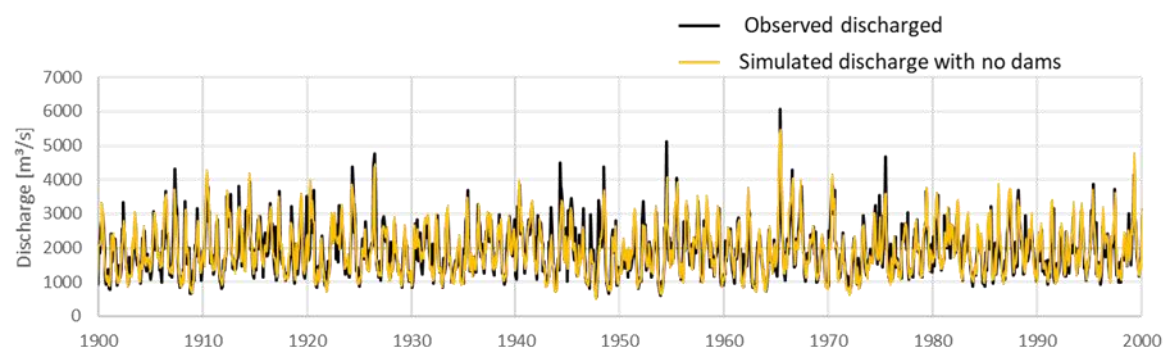


Abbildung 3: Ausschnitt des simulierten Abflusses (m^3/s) ohne Berücksichtigung des Talsperrenbetriebs (dunkelgelb) und des beobachteten Abflusses (schwarz).

Identifizierung der Zirkulationsregime (Task 2.4)

Die großskalige atmosphärische Zirkulation und insbesondere der nordatlantische Jetstream beeinflussen das regionale Hydroklima Europas stark (z. B. Woollings et al., 2010). Im Winter ist ein polwärts verlagelter Jetstream mit warmen und feuchten Bedingungen in Nordeuropa und Skandinavien verbunden, während in Südeuropa kältere und trockenere Bedingungen auftreten

(Wallace und Gutzler, 1981). Im Sommer liegt der Jetstream klimatologisch weiter nördlich. Eine zusätzliche polwärtige Verlagerung des Sommerjetstreams ist mit trockenen und warmen Bedingungen in Nordwest- und Mitteleuropa verbunden, während regional im Mittelmeerraum feuchtere Bedingungen auftreten können (Folland et al., 2009; Bladé et al., 2012).

Das obere Donaueinzugsgebiet liegt in einem hydroklimatischen Übergangsbereich zwischen Nord- und Südeuropa und reagiert daher besonders empfindlich auf Veränderungen der Lage und Stärke des nordatlantischen Jetstreams. Ausgehend von der Literatur untersuchten wir, wie die Variabilität des Jetstreams den Donauabfluss beeinflusst. Als Maß für den eddygetriebenen Jetstream verwendeten wir den zonalen Wind in 850 hPa, im Folgenden U850 (siehe z. B. Woollings et al., 2010). Sein Einfluss auf den Donauabfluss wurde durch Regressionsanalysen zwischen U850 und Niederschlags- und Temperaturindizes untersucht, die in direktem Zusammenhang mit dem Donauabfluss stehen. Die resultierenden Regressionsmuster über dem Nordatlantik zeigen, dass eine Beschleunigung und polwärtige Verlagerung des Winterjetstreams mit höheren Niederschlägen und Temperaturen im Donaueinzugsgebiet verbunden ist (Abb. 4).

Anschließend berechneten wir Indizes für die Lage und Geschwindigkeit des Jetstreams, die in WP3 zur Charakterisierung der Klimastorylines verwendet wurden. Die Jetstreamindizes wurden nach Ceppi et al. (2014) und Harvey et al. (2023) berechnet. Die Jetstreamgeschwindigkeit ist als flächengewichtetes Mittel der Westwinde, $u > 0$, in 850 hPa über dem nordatlantischen Sektor 45° – 65° N, 20° W– 0° E definiert. Die Jetstreamlage wird als mit dem zonalen Wind gewichteter mittlerer Breitengrad des Westwindprofils innerhalb von 40° – 70° N und 30° W– 10° W berechnet. Konkret wird der Jetstreamlagenindex ϕ_{jet} bestimmt, indem zunächst das zonale Mittel der Westwinde in diesem Sektor berechnet und anschließend das Zentrum des Windprofils wie folgt ermittelt wird:

$$\phi_{jet} = \frac{\sum_i (\phi_i * [u]_i^2)}{\sum_i [u]_i^2}$$

Dabei bezeichnet ϕ_i den Breitengrad am Gitterpunkt i und $[u]_i$ die zonal gemittelte Westwindgeschwindigkeit am entsprechenden Breitengrad. Durch das Quadrieren der Windgeschwindigkeit erhalten Breitengrade mit stärkeren Westwinden ein höheres Gewicht, wodurch der Kern des Jetstreams stärker hervorgehoben wird.

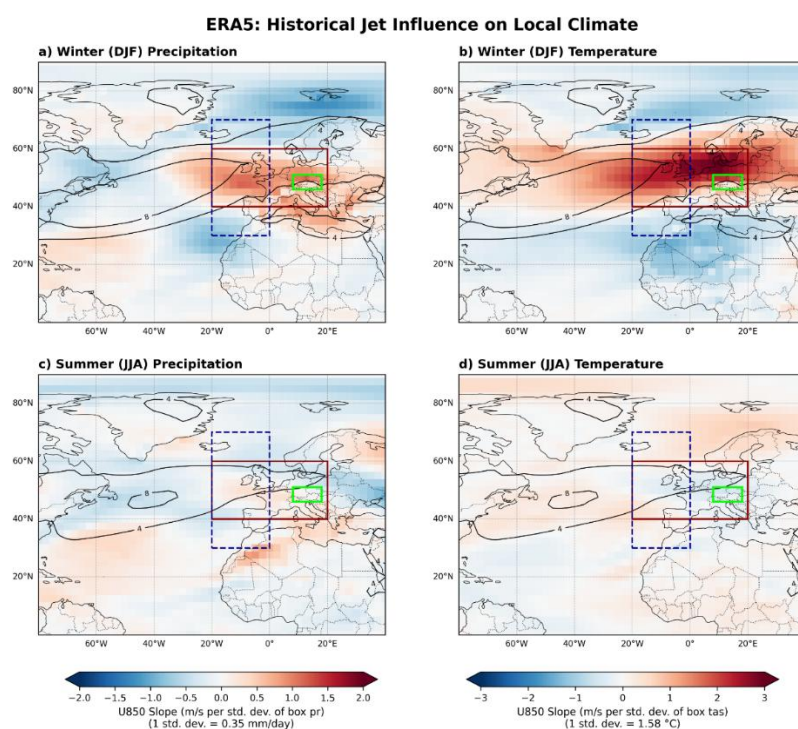


Abbildung 4: Lineare Regressionskarten des angegebenen U850 auf Niederschlags- und Temperaturindizes, die durch Mittelung von Oberflächentemperatur und Niederschlag über das grüne Rechteck berechnet wurden. Die Konturen zeigen das klimatologische U850. Alle Zeitreihen stammen aus der ERA5-Reanalyse für den Zeitraum 1950–2025.

Meilensteine

M2.1 Niederwasserereignisse (LFE) identifiziert: Niederwasserereignisse wurden erfolgreich identifiziert und verschiedene Niederwasserkennwerte (LNWL = 970 m³/s, 30Q10 usw.) systematisch bewertet. (Erreicht)

M2.2 Zugehörige atmosphärische Zirkulationsregime der LFE charakterisiert: Der nordatlantische Jetstream wurde als wichtigster großskaliger atmosphärischer Einflussfaktor für Niederwasserereignisse im Einzugsgebiet identifiziert. (Erreicht)

M2.3 Mit den Zirkulationsregimen verbundene Einflussfaktoren bewertet und für WP3 ausgewählt: Lage (Breitengrad) und Geschwindigkeit des Jetstreams wurden als zentrale Prädiktoren für die maßgeschneiderten Klimamodellprojektionen in WP3 ausgewählt. (Erreicht)

WP3 – Maßgeschneiderte Klimamodellprojektionen

Dieses Arbeitspaket umfasste die Beschaffung, prozessbasierte Evaluierung und Bias-Korrektur aktueller Klimaprojektionen zur Entwicklung zirkulationsbasierter Storylines für das obere Donaeinzugsgebiet. Die resultierenden meteorologischen Felder dienen als direkte Eingangsdaten für die hydrologische Modellierung. Aktivitäten, Methoden und Ergebnisse werden im Folgenden in chronologischer Reihenfolge dargestellt.

Literaturrecherche und Beschaffung von Klimadaten (Tasks 3.1 und 3.2)

Eine gezielte Literaturrecherche identifizierte geeignete Methoden zur Aufbereitung globaler Klimamodellausgaben für regionale Folgenabschätzungen. Darauf aufbauend wurde ein CMIP6-Multimodellensemble vom Portal der Earth System Grid Federation heruntergeladen. Berücksichtigt wurden zwei Shared Socioeconomic Pathways: das Szenario mit mittleren Emissionen SSP2-4.5 und das Szenario mit hohen Emissionen SSP5-8.5. Pro Modell wurde ein Ensemblemitglied beschafft. Der tägliche zonale Wind in 850 hPa (ua850), die 2-m-Lufttemperatur (tas) und der Niederschlag (pr) wurden für den historischen Zeitraum 1960–2014 und den Projektionszeitraum 2015–2100 extrahiert.

Bias-Korrektur und Modellauswahl (Tasks 3.5 und 3.6)

Die CMIP6-Daten wurden zunächst auf die im hydrologischen Modell COSERO verwendeten Teileinzugsgebiete der Donau übertragen (Kling et al., 2015; Abb. 5). Räumliche Überschneidungen zwischen den hydrologischen Einheiten und den Gitterzellen der Klimamodelle wurden berechnet, um die Überlappungsflächen zu bestimmen. Daraus wurden flächengewichtete Mittelwerte von Temperatur und Niederschlag für die Einzugsgebiete abgeleitet.

Bias-Korrektur und Downscaling wurden mit der Scaled-Distribution-Mapping-Methode von Switanek et al. (2017) durchgeführt. SDM ist eine trendbewahrende parametrische Methode, die die beobachtete Verteilung entsprechend den projizierten Änderungen der Rohsimulationen anpasst. Berücksichtigt werden Änderungen der Größenordnung, der Häufigkeit von Niederschlagstagen und der Ereigniswahrscheinlichkeit. Da die Skalierung vom Bias-Korrekturzeitraum abhängt, verringert die Methode das Risiko, das Klimawandelsignal künstlich zu verstärken oder abzuschwächen.

Die Methode wurde anhand HISTALP-basierter Temperatur- und Niederschlagsdaten für 1960–2023 kalibriert. Diese Beobachtungen wurden mittels linearer Regression unter Berücksichtigung höhenabhängiger Temperatur- und Niederschlagsunterschiede auf die hydrologischen Einheiten regionalisiert.

Abbildung 6 zeigt Beispiele der zur Modellevaluierung verwendeten Verifikationsdiagramme. Der Niederschlag des Modells MPI-ESM1-2-LR wird für eine tief gelegene hydrologische Einheit (Abb. 6a) und eine hoch gelegene Einheit (Abb. 6b) dargestellt. Das Rohmodell unterschätzt systematisch intensive Tagesniederschläge, insbesondere in großen Höhen. Dieser Bias tritt in allen hydrologischen Einheiten auf und führt zu einer deutlichen Unterschätzung des mittleren Tagesniederschlags (Abb. 6c).

SDM reduziert den Bias wirksam, wie Q-Q-Diagramme der Roh- und bias-korrigierten Simulationen im Vergleich zu den Beobachtungen zeigen (Abb. 6d).

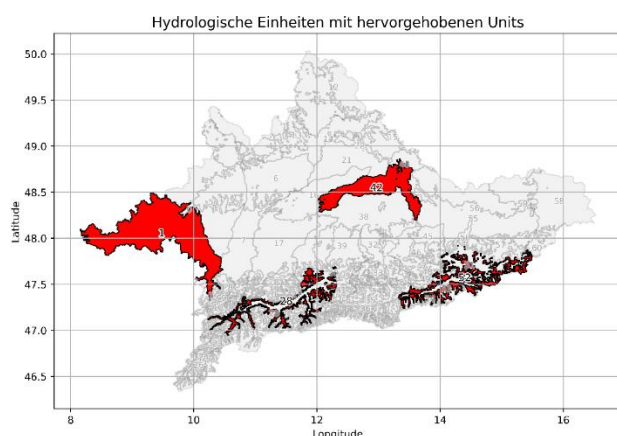


Abbildung 5: Hydrologische Einheiten des COSERO-Modells für das Donaeinzugsgebiet. Rot hervorgehoben sind zwei tief gelegene Einheiten (1 und 42) und zwei hoch gelegene Einheiten (28 und 52), anhand derer im Folgenden die durchgeführte Bias-Korrektur und Modellevaluierung veranschaulicht werden.

Modellauswahl nach der Bias-Korrektur

Regionale Klimaprojektionen unterscheiden sich teilweise, weil Modelle Wettersysteme und zentrale physikalische Prozesse unterschiedlich darstellen (z. B. Shepherd, 2014; Ossó et al., 2024). Modelle mit erheblichen Fehlern bei der Darstellung des gegenwärtigen Klimas liefern voraussichtlich keine verlässlichen Zukunftsprojektionen; grundlegende prozessbedingte Defizite können durch eine Bias-Korrektur nicht behoben werden (z. B. Hall, 2014).

Um geeignete Modelle für das Hauptziel von STREAM – die Analyse von Niederwasserperioden – zu identifizieren, erweiterten wir die Evaluierung über die üblichen Diagnosen der Bias-Korrektur hinaus. Insbesondere untersuchten wir die Trocken- und Feuchtepersistenz, definiert als Dauer trockener bzw. feuchter Perioden. Da die Persistenz von der simulierten Dauer und Häufigkeit relevanter Wettermuster abhängt, ist sie ein indirektes Maß dafür, wie gut die Modelle zentrale Prozesse des regionalen Hydroklimas darstellen.

Das Auswahlverfahren wird anhand eines gut und eines schlecht abscheidenden Modells veranschaulicht (Abb. 7). Die Abbildung vergleicht die beobachteten sowie die rohen und bias-korrigierten Verteilungen der Dauer von Trockenperioden für BCC-CSM2-MR (rechte Teilabbildung) und MPI-ESM1-2-LR (linke Teilabbildung), gemittelt über alle hydrologischen Einheiten.

BCC-CSM2-MR unterschätzt die Dauer von Trockenperioden deutlich, was auf eine unzureichende Darstellung der regionalen Wetterpersistenz hinweist (Abb. 7, linke Teilabbildung). Da die Bias-Korrektur dieses Defizit nicht behebt, wurde das Modell von der weiteren Analyse ausgeschlossen. Die Verteilung der Trockenperiodendauer von MPI-ESM1-2-LR stimmt dagegen besser mit den Beobachtungen überein (Abb. 7f). Dieses Modell wurde daher für die Storyline-Analyse und die nachfolgenden hydrologischen Simulationen beibehalten.

Die endgültigen bias-korrigierten Temperatur- und Niederschlagsdatensätze umfassen den historischen Zeitraum 1960–2014 und die Zukunftsprojektionen 2015–2100 gemäß den SzenarioMIP-Protokollen. Das Ensemble umfasst 31 Modelle für SSP5-8.5 und 25 Modelle für SSP2-4.5.

Erstellung der Storylines (Tasks 3.3 und 3.4)

Die Zirkulationsstorylines wurden mit einem rückwärtsgerichteten, wirkungsorientierten Ansatz erstellt: Ausgangspunkt waren die projizierten hydrologischen Veränderungen, die anschließend auf die zugehörigen großskaligen atmosphärischen Bedingungen zurückgeführt wurden. Dieser Ansatz wurde gewählt, um die Relevanz der Storylines für Stakeholder zu maximieren. Der Donauabfluss hängt nichtlinear von mehreren meteorologischen Variablen ab, insbesondere von Niederschlag und Temperatur, deren relativer Einfluss saisonal variiert. Eine a-priori-Definition von Zirkulationsstorylines, die anschließende Konditionierung von Temperatur oder Niederschlag auf diese Muster und erst danach die Bewertung der Abflusswirkung würde eine zu lange Kausalkette erzeugen.

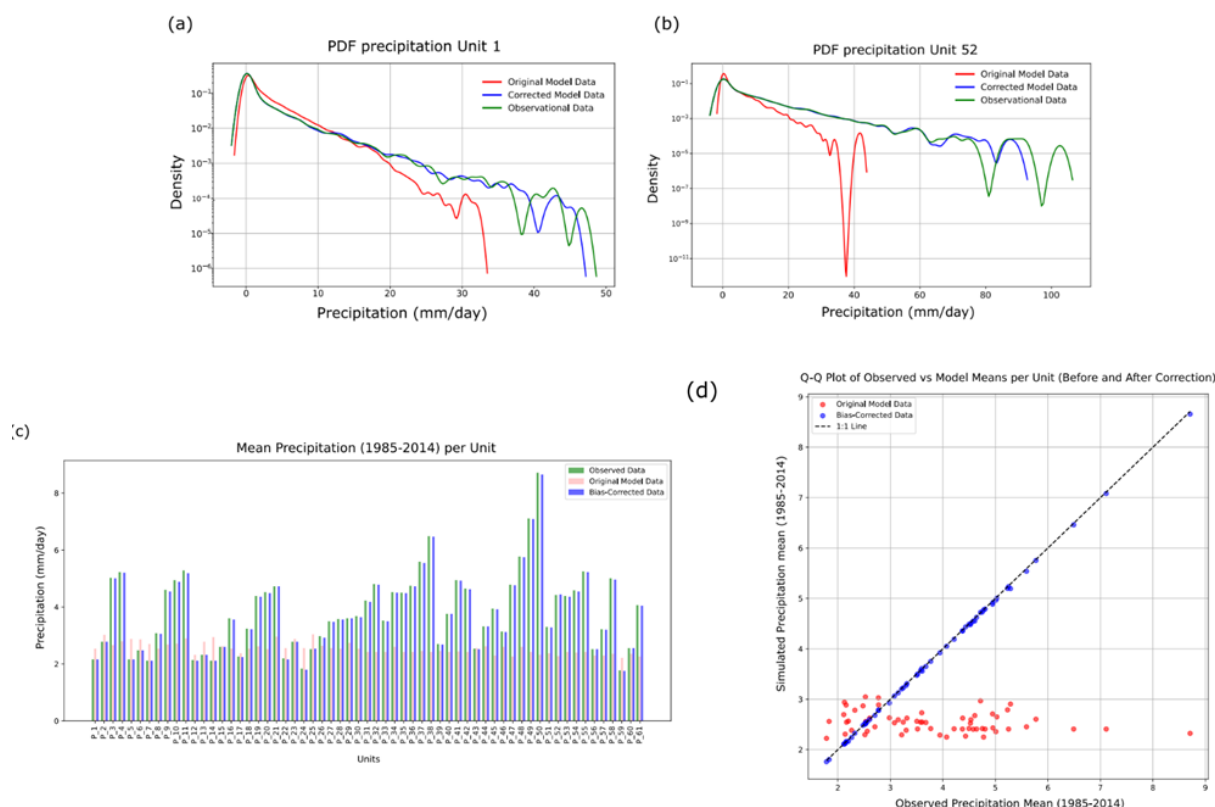


Abbildung 6: (a), (b) Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des beobachteten sowie des rohen und bias-korrigierten Niederschlags von MPI-ESM1-2-LR in der hydrologischen Einheit 1 (tiefe Lage) bzw. 52 (hohe Lage). (c) Beobachteter sowie roher und bias-korrigierter mittlerer Niederschlag von MPI-ESM1-2-LR über alle hydrologischen Einheiten im Kalibrierungszeitraum. (d) Q-Q-Diagramm des beobachteten mittleren Niederschlags gegenüber dem rohen (rote Punkte) und bias-korrigierten (blaue Punkte) Modellniederschlag von MPI-ESM1-2-LR, jeweils über alle hydrologischen Einheiten gemittelt.

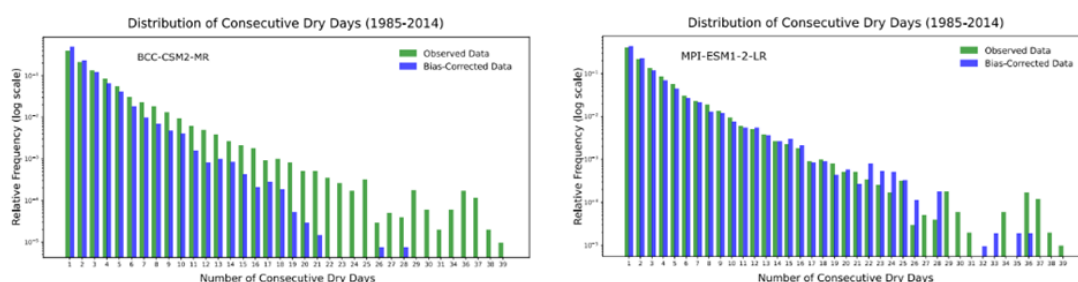


Abbildung 7: Relative Häufigkeit der Dauer aufeinanderfolgender Trockentage (Niederschlag < 1 mm/Tag) für die angegebenen CMIP6-Modelle.

Stattdessen wurden die CMIP6-Modelle anhand der mit COSERO simulierten zukünftigen Niederwassercharakteristika gruppiert. Auf Basis der projizierten Änderungen des 30Q10-Abflussschwellenwerts wurden die Modelle nach der projizierten Häufigkeit von Niederwasserereignissen gereiht. Anschließend wurden mittels Kompositanalyse die großskaligen atmosphärischen Zirkulationsmuster der Modelle mit vergleichsweise hohen bzw. niedrigen Ereignishäufigkeiten bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass ein nordwärts verlagerter und verstärkter nordatlantischer Jetstream sowohl im Winter- als auch im Sommerhalbjahr mit einer Zunahme von Niederwasserereignissen an der Donau verbunden ist (Abb. 8a, b).

Für die endgültigen Storylines bilden die zehn Modelle mit der höchsten projizierten Zahl an Niederwasserereignissen die High-Frequency-Gruppe, während die zehn Modelle mit der niedrigsten Zahl die Low-Frequency-Gruppe bilden. Die Klassifizierung erfolgte getrennt für das Sommer- und Winterhalbjahr, um den unterschiedlichen saisonalen Einflussfaktoren von Niederwasser Rechnung zu tragen.

Um Modelle bei vergleichbaren globalen Erwärmungsniveaus und nicht zu festen Kalenderperioden zu vergleichen, wurden die atmosphärischen Projektionen bei +2 °C und +3 °C gegenüber dem vorindustriellen Referenzzeitraum 1850–1900 ausgewertet. Für jedes Modell wurden die dynamischen Felder über einen 30-jährigen Zeitraum gemittelt, dessen Mittelpunkt das Jahr war, in dem das modellspezifische 31-jährige gleitende Mittel der globalen mittleren Oberflächentemperatur die jeweilige Erwärmungsschwelle erstmals überschreitet (Abb. 8c–f). Dieser Ansatz reduziert den Einfluss unterschiedlicher Klimasensitivitäten und transienter Erwärmungsraten der Modelle. Unterschiede zwischen den Modellen können dadurch vor allem als Unterschiede der dynamischen und regionalen Klimareaktion interpretiert werden (James et al., 2017).

Projections of Zonal Wind Differences and Jet Stream Indices (GWL 3.0°C. SSP5-8.5)

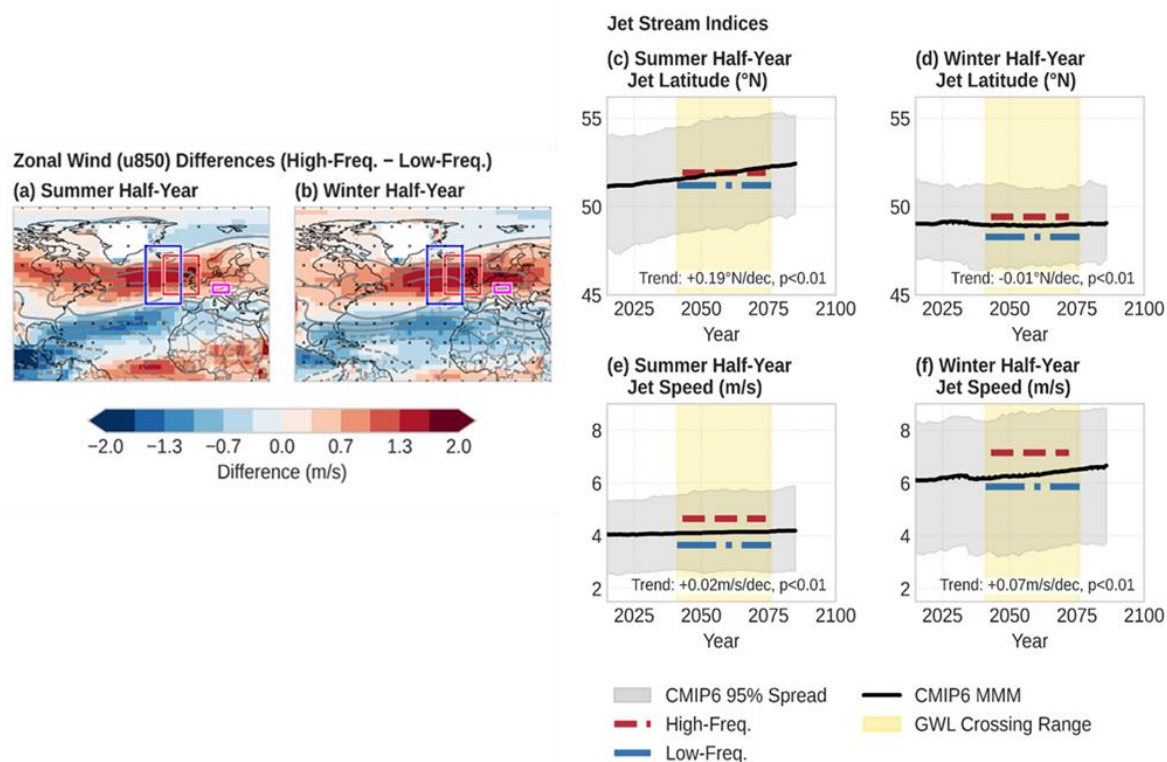


Abbildung 8: Entwicklung des nordatlantischen Jetstreams unter SSP5-8.5 bei +3 °C globaler Erwärmung. Die oberen Karten zeigen Komposittdifferenzen des zonalen Winds in 850 hPa zwischen der High-Frequency- und der Low-Frequency-Gruppe für (a) Sommer und (b) Winter; graue Hintergrundlinien geben das historische Mittel für 1985–2014 an. Punktierung kennzeichnet statistisch signifikante Unterschiede auf dem 5%-Niveau. Die unteren Teilabbildungen zeigen die zeitliche Entwicklung der 30-jährigen gleitenden Mittel von 2015 bis 2100 für die Jetstreamlage im (c) Sommer und (d) Winter sowie für die Jetstreamgeschwindigkeit im (e) Sommer und (f) Winter. Dargestellt sind das Multimodellmittel (durchgezogene schwarze Linie), die 95%-Ensemblebandbreite (graue Schattierung) und horizontale Balken für die Gruppenmittel im Fenster der Erwärmungsschwelle (gelbe Schattierung).

WP4 – Hydrologische Modellierung

WP4 umfasste die Weiterentwicklung und Aktualisierung des hydrologischen Modells für das Einzugsgebiet der Donau bis Wien (obere Donau). Die Hauptziele von WP4 waren:

- die Erweiterung der historischen hydrologischen Simulation um die jüngsten, außergewöhnlich warmen Jahre;
- die Analyse geeigneter Ansätze zur Schätzung der potenziellen Evapotranspiration;
- die Verbesserung und Rekalibrierung des hydrologischen Modells mit Schwerpunkt auf dem saisonalen Abfluss und dem Niederwasser im Sommerhalbjahr.

Im Folgenden werden die angewandten Methoden und die wichtigsten Ergebnisse der WP-Aufgaben dargestellt.

Aufbereitung aktueller meteorologischer Beobachtungen als Modelleingangsdaten (Task 4.1)

Meteorologische Beobachtungen von Niederschlag und Lufttemperatur waren erforderlich, um die jüngsten, außergewöhnlich warmen Jahre zu simulieren und das hydrologische Modell anhand dieser Simulationen neu zu kalibrieren.

Die Lufttemperatur-Eingangsdaten bis 2014 basierten auf einem gerasterten Produkt von GeoSphere Austria, das zuvor von der ZAMG bereitgestellt und aus einem dichten Netz meteorologischer Stationen in Österreich, Deutschland und der Schweiz abgeleitet worden war. Obwohl GeoSphere eine Aktualisierung für die jüngsten Jahre angekündigt hatte, wurde diese nicht fertiggestellt. Um Verzögerungen in WP4 zu vermeiden, entwickelte das STREAM-Team eine alternative Methode zur Verlängerung der Temperaturzeitreihe.

Da die dem Rasterprodukt zugrunde liegenden Stationen weiterhin betrieben werden, wurden die bestehenden HRU-Zeitreihen mit Stationsrohdaten von 15 meteorologischen Stationen verlängert. Für jede Einheit wurde jene Stationszeitreihe mit der höchsten Korrelation ausgewählt und hinsichtlich höhenbedingter Unterschiede angepasst.

Die Niederschlagsdaten wurden anhand von Messungen aus mehr als 120 Stationen in Österreich, Deutschland und der Schweiz aktualisiert. Zunächst wurde der langfristige mittlere Niederschlag räumlich regionalisiert; die zeitliche Variabilität wurde anschließend mithilfe von Niederschlagsanomalien an den Stationen rekonstruiert. Die getrennte Behandlung der räumlichen Regionalisierung und der zeitlichen Rekonstruktion ermöglichte einen robusten Umgang mit der komplexen Topografie und unvollständigen Stationszeitreihen im Einzugsgebiet.

Sensitivitätsanalyse verschiedener Methoden zur Schätzung der potenziellen Evapotranspiration (Task 4.2)

Zur Verbesserung der Simulation des Sommerabflusses in heißen Jahren wurde das Schema für die potenzielle Evapotranspiration (ETP) so überarbeitet, dass unterschiedliche Schätzmethoden verwendet werden können. Der Ansatz benötigt Zeitreihen der Lufttemperatur, langjährige mittlere Monatswerte der Lufttemperatur und der ETP sowie einen Sensitivitätsfaktor, der die Reaktion der ETP auf Temperaturanomalien beschreibt.

Nach einer Literaturrecherche wurden fünf ETP-Schätzungen für das obere Donaeinzugsgebiet getestet:

- **PET_H20:** globaler gerasterter Datensatz auf Basis von Penman–Monteith, erstellt im Projekt earth2observe (Sperna-Weiland et al., 2015);
- **Bisherige Modellschätzung:** die Turc-basierte Methode, die in früheren Versionen des hydrologischen Modells für die obere Donau verwendet wurde;

- **Hydrologischer Atlas Österreich:** regionalisierter Penman–Monteith-Datensatz für Österreich (Dobesch, 2003);
- **CLIMWAT/CROPWAT:** von der FAO bereitgestellte stationsbasierte ETP-Schätzungen;
- **AFRY-Schätzung:** höhenabhängige lineare Regression auf Grundlage der oben genannten Datensätze.

Die Datensätze unterschieden sich erheblich, insbesondere in großen Höhen. Nach Sensitivitätstests der Wasserbilanz wurde die AFRY-Schätzung für die endgültigen Simulationen ausgewählt, da sie räumlich konsistente langjährige ETP-Werte im gesamten Einzugsgebiet und mittlere Schätzwerte in großen Höhen liefert. Die Saisonalität der ETP wurde aus CLIMWAT/CROPWAT-Stationen abgeleitet, wobei getrennte Profile für Höhen unter und über 1.500 m ü. A. verwendet wurden. Auf Basis von Penman–Monteith-Sensitivitätsanalysen an vier ausgewählten Stationen wurde die Reaktion der ETP auf die Lufttemperatur auf 4 % °C⁻¹ festgelegt.

Verbesserung und Rekalibrierung des hydrologischen Modells sowie historische Simulationen bis 2023 (Task 4.3)

Die Verbesserung und Rekalibrierung umfasste: (1) Verbesserungen der Modellstruktur und Prozessdarstellung, (2) Aktualisierung der Eingangsdaten und (3) eine Rekalibrierung der Parameter, um über den gesamten historischen Zeitraum einschließlich der jüngsten Jahre eine hohe Modellgüte sicherzustellen.

Die Algorithmen und die Struktur des Modells wurden wie folgt aktualisiert:

- Der Code wurde von der Softwareversion 2012 auf die Version 2023 aktualisiert;
- 14 große Speicher wurden als eigene Berechnungspunkte mit parametrisierten Betriebsregeln aufgenommen. Dadurch konnten ihre einzelnen und kombinierten Auswirkungen auf das Niederwasser der Donau detaillierter analysiert werden;
- zuvor nicht berücksichtigte Elemente, die die Abflussführung im Einzugsgebiet beeinflussen, wurden ergänzt, darunter Überleitungen, Seen und die Donauversinkung bei Immendingen in Bayern;
- das in Task 4.2 beschriebene überarbeitete ETP-Schema wurde implementiert;
- die Darstellung der Gletscher wurde wesentlich verbessert

Die Aktualisierung der Eingangsdaten für die historischen Simulationen bis 2023 umfasste folgende Datensätze:

- Lufttemperatur und Niederschlag wie oben beschrieben (Task 4.1)
- Beobachtete Abflussdaten der jüngsten Jahre für 16 Pegel im oberen Donaueinzugsgebiet, die bei viadonau, dem österreichischen Hydrographischen Dienst über dessen Online-Datenbank eHYD sowie dem Bayerischen Landesamt für Umwelt (LfU) erhoben wurden.

Die abschließende Rekalibrierung der Modellparameter verfolgte folgende Ziele:

- Harmonisierte räumliche Verteilung der Modellparameter im oberen Donaueinzugsgebiet
- Verbesserte hydrologische Simulationen
- Plausible langfristige Simulation der Gletscherflächen

Bei der manuellen Kalibrierung wurden die Ergebnisse sowohl für den bisherigen Kalibrierungszeitraum 1961–1990 als auch für den Zeitraum unter Einbeziehung der neuen Datensätze 1961–2023 analysiert.

Die resultierenden hydrologischen Simulationen für die Donau bei Wien bilden die beobachteten Eigenschaften sehr gut ab, auch in den jüngsten sehr heißen Jahren. Dies zeigen Abbildung 13 für den Jahresabfluss, Abbildung 14 für den mittleren Monatsabfluss und Abbildung 15 für die Abflussverteilung in Dauerkurven – links für den gesamten Abflussbereich und rechts für den Niederwasserbereich.

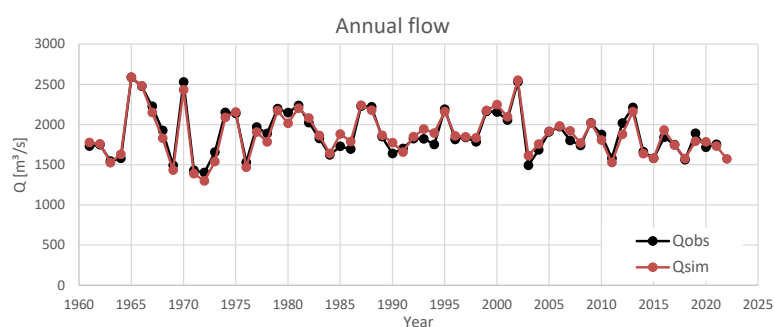


Abbildung 13: Jahresabfluss der oberen Donau bei Wien. Rot: simuliert. Schwarz: beobachtet.

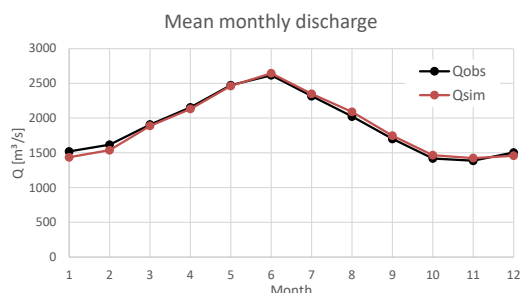


Abbildung 14: Mittlerer Monatsabfluss der oberen Donau bei Wien. Rot: simuliert. Schwarz: beobachtet.

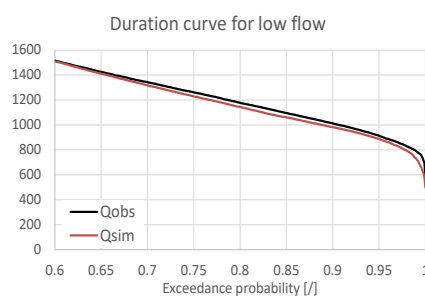
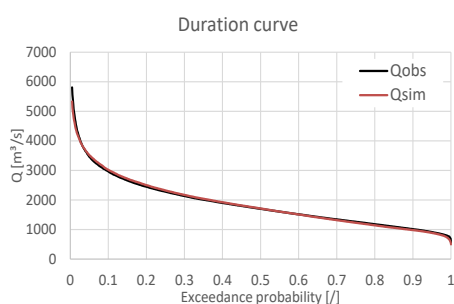


Abbildung 15: Abflussdauerkurven der oberen Donau bei Wien. Links: gesamter Bereich; rechts: Niederwasserbereich. Rot: simuliert. Schwarz: beobachtet.

Eine Auswertung der simulierten Gletscherflächen, zusammengefasst über alle Flächen im Einzugsgebiet der oberen Donau, ist in Abbildung 16 dargestellt. Die in dieser Auswertung als Beobachtungen verwendeten Werte wurden aus Daten und Informationen zahlreicher Quellen zusammengestellt (Groß und Patzelt 2015; Maisch et al. 2000; Patzelt 2015; Kuhn et al. 2013; Fischer et al. 2015; Buckel und Otto 2018; Mannerfelt et al. 2022; Müller et al. 1976; Fischer et al. 2014; Linsbauer et al. 2021).

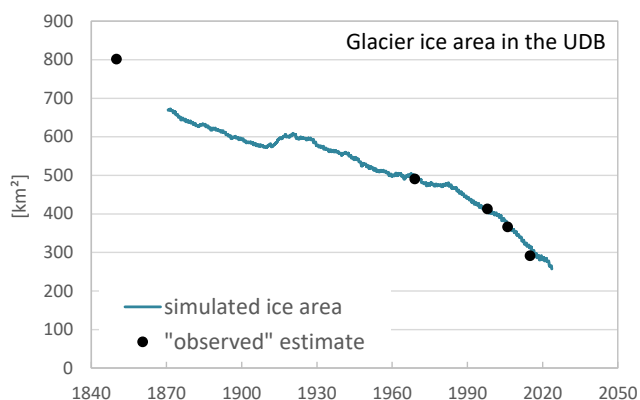


Abbildung 16: Abflussdauerkurve der oberen Donau bei Wien. Links: gesamter Bereich; rechts: Niederwasserbereich. Rot: simuliert. Schwarz: beobachtet.

Veröffentlichung (Task 4.4)

Ansätze und Ergebnisse der historischen hydrologischen Simulationen wurden im Mai 2025 in einem mündlichen Beitrag auf der EGU General Assembly vorgestellt (siehe Kling et al. 2025 in Kapitel 4, Verwertung). Das bei Journal of Hydrology: Regional Studies eingereichte Manuskript (siehe Stanzel et al. 2026 in Kapitel 8,) enthält ein ausführliches Kapitel zu den hydrologischen Modellierungsansätzen und Ergebnissen von WP4.

Meilensteine

M4.1 Geeigneter ETP-Ansatz ausgewählt (erreicht)

M4.2 Historische Simulationen mit erweitertem und rekaliertem hydrologischem Modell abgeschlossen (erreicht).

WP5 – Donau-Klimafolgen-Storylines

Das zusammenführende Arbeitspaket 5 verknüpfte klimatologische Analysen mit den Ergebnissen der hydrologischen Modellierung und verfolgte folgende Ziele:

- Simulation hydrologischer Zukunfts-Szenarien und Analyse in Bezug auf die Storylines
- Identifizierung und Untersuchung plausibler Worst-Case-Szenarien
- Synthese von Klima-Storylines und Abfluss-Storylines
- Stakeholder-Kommunikation

Nach Abschluss der Aktivitäten in WP4 zeigte ein frühes Informationsgespräch mit dem wichtigsten Stakeholder viadonau, dass dessen Fachleute für Wasserwirtschaft hydrologische Simulationsergebnisse in täglicher Auflösung deutlich bevorzugten. Daher wurde die gesamte Analyse mit Tagesdaten durchgeführt und auch die Szenariosimulationen wurden in täglicher zeitlicher Auflösung gerechnet. So konnten sowohl die ursprünglich im STREAM-Projekt vorgesehenen Analysen durchgeführt als auch spezifische, für Stakeholder besonders relevante Abflusskennwerte berechnet werden, allen voran der Q94 (der Abfluss, der im Mittel über 30 Jahre in 94% der Zeit überschritten wird)

Simulation hydrologischer Szenarien und Gruppierung in Storylines (Task 5.1)

Mit den in WP3 erstellten maßgeschneiderten, bias-korrigierten Klimamodelldaten als Eingangsdaten für das hydrologische Modell wurden Szenariosimulationen für die Donau bei Wien durchgeführt.

Für den mittleren Jahresabfluss zeigen die Szenariosimulationen bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts relativ stabile Verhältnisse, gefolgt von einem leichten Rückgang in der zweiten Jahrhunderthälfte. Für 2051–2080 weist der Median des Multimodellensembles (MMM) unter SSP2-4.5 einen geringen Rückgang von –2 % aus, wobei mehrere Modelle auch leichte Abflusszunahmen projizieren (Tabelle 2). Unter SSP5-8.5 ergibt der MMM für denselben Zeitraum einen stärkeren Rückgang von –7 % und die Mehrheit der Modelle zeigt in diesem Szenario mit hohen Treibhausgasemissionen übereinstimmend sinkenden mittleren Abfluss. Gegen Ende des 21. Jahrhunderts wird der Unterschied zwischen den Emissionsszenarien noch deutlicher. Während die MMM-Änderungen unter SSP2-4.5 nahe den heutigen Werten bleiben (–3 % für 2061–2090 und –1 % für 2071–2100), nehmen die Rückgänge unter SSP5-8.5 deutlich zu und erreichen –11 % bzw. –14 %.

Bei den saisonalen Veränderungen gibt es in den hydrologischen Szenariosimulationen eine stärkere Übereinstimmung zwischen den Emissionsszenarien (Abb. 17). Sie zeigen ein klares Muster zunehmender Winterabflüsse und abnehmender Sommerabflüsse. Der projizierte Sommerrückgang ist unter SSP5-8.5 besonders ausgeprägt und stärker als in Simulationen mit früheren

Klimamodellgenerationen. Dies ist auf die von den CMIP6-Modellen projizierte stärkere Sommererwärmung zurückzuführen.

Der Niederwasserabfluss wurde anhand des Kennwerts Q94 analysiert. Dieser ist für die obere Donau besonders relevant, da er von der Wasserstraßengesellschaft viadonau verwendet wird (KWD 2020). Abbildung 18 zeigt, dass sich der Niederwasserabfluss grundsätzlich ähnlich wie der mittlere Abfluss entwickelt: Die Mehrheit der Modelle projiziert in beiden Emissionsszenarien einen Rückgang in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts, der unter SSP5-8.5 stärker ausfällt. Gegen Ende des Jahrhunderts sind die projizierten Rückgänge beim Niederwasserabfluss jedoch größer als beim mittleren Abfluss. Gegenüber dem Referenzzeitraum um 2005 (1991–2020) beträgt der MMM unter SSP2-4.5 –4 % und unter SSP5-8.5 –18 %.

Langfristige hydrologische Simulationen zeigen allerdings, dass der Niederwasserabfluss im 20. Jahrhundert je nach gewähltem Referenzzeitraum um etwa 15–20 % zunahm. Diese historische Zunahme wurde durch zwei Hauptfaktoren verursacht: die wachsende Zahl alpiner Speicher und deren saisonale Bewirtschaftung sowie die mit dem globalen Klimawandel verbundene regionale Erwärmung. Daher bleiben die meisten hydrologischen Szenarien für den zukünftigen Niederwasserabfluss über den historischen Werten des 19. Jahrhunderts. Allerdings zeigen 50 % der SSP5-8.5-Simulationen stärkere Rückgänge: bis Ende des 21. Jahrhunderts fallen die Niederwasserabflüsse darin unter die Werte der vergangenen 150 Jahre.

Während die bisherige Erwärmung zu einer Zunahme des Niederwasserabflusses beitrug, wird die zukünftige Erwärmung voraussichtlich zu sinkenden Niederwasserabflüssen führen. Diese Entwicklung hängt mit einer saisonalen Verlagerung des Auftretens von Niederwasserphasen zusammen. Historisch trat Niederwasser vor allem im Winter auf. Die Erwärmung führte in der Vergangenheit zu verringerter Schneespeicherung und damit zu einem Anstieg des Winterabflusses, der auch zu einem Anstieg des Abflusses während winterlicher Niederwasserperioden führte. In zunehmendem Maß wird zukünftig Niederwasser aber im Spätsommer und insbesondere im Herbst erwartet, nachdem Sommerhitze und Verdunstung die Bodenwasserspeicher erschöpft haben. Eine weitere Sommererwärmung wird daher zu sinkenden Abflüssen im Spätsommer und Herbst beitragen, und damit zu geringerem Abfluss während Niederwasserperioden in diesen Jahreszeiten.

Das Ausmaß der simulierten zeitlichen Verlagerung der Niederwasserperioden wurde anhand des mittleren Auftretenstags aller Niederwassertage bestimmt. Als Niederwassertage galten Tage mit einem Abfluss unter Q94; gezählt wurde ab dem 1. Mai. Die Analyse zeigt für 2051–2080 eine signifikante Verschiebung des Mittels des Multimodellensembles um 34–49 Tage (Tabelle 2).

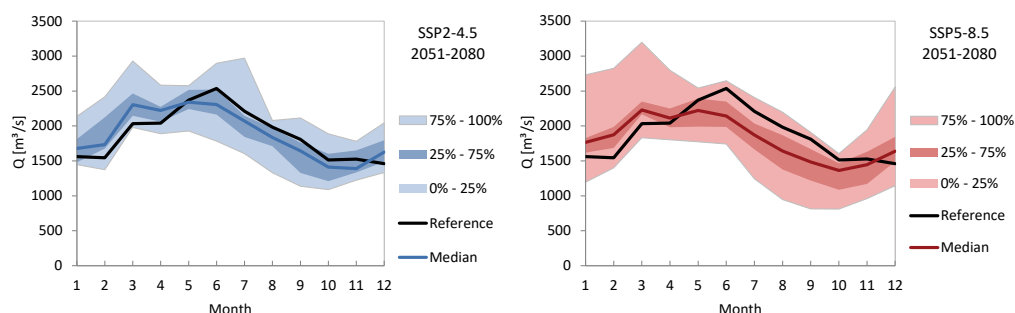


Abbildung 17: Simulierter mittlerer Monatsabfluss der Donau bei Wien und Verteilung im Klimamodellensemble unter SSP2-4.5 (links) und SSP5-8.5 (rechts) für 2051–2081 im Vergleich zum Referenzzeitraum 1991–2021.

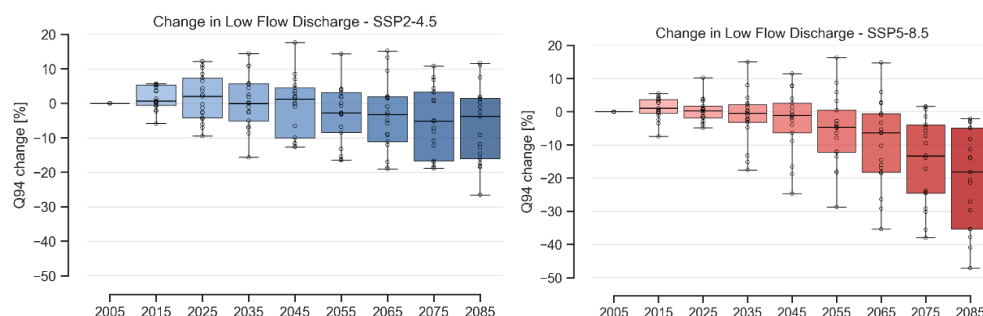


Abbildung 18: Änderung des simulierten Niederwasserabflusses (Q94) der Donau bei Wien in aufeinanderfolgenden 30-Jahres-Zeiträumen; Verteilungen im Klimamodellensemble für SSP2-4.5 (links) und SSP5-8.5 (rechts).

Tabelle 2: Verwendete CMIP6-GCMs und Modellprojektionen der Änderungen von Temperatur (T), Niederschlag (P), mittlerem Abfluss (MQ), Niederwasserabfluss (Q94) und mittlerem Auftretenstag von Niederwasserperioden (mean day of occurrence MDO) für 2051–2080 gegenüber 1991–2020.

2051-2080	dT [°C]		dP [%]		dMQ [%]		dQ94 [%]		dMDO [Tage]	
GCM	2-4.5	5-8.5	2-4.5	5-8.5	2-4.5	5-8.5	2-4.5	5-8.5	2-4.5	5-8.5
ACCESS-CM2	3	3.7	4	5	-1	0	-3	-6	-31	-54
ACCESS-ESM1-5	2.3	3.4	0	-6	-5	-16	-9	-18	-40	-56
CanESM5	2.9	4.4	13	20	15	24	9	15	-8	-55
CESM2	1.7	3.2	-6	-4	-13	-14	-19	-17	-37	-49
CESM2-WACCM	2	3.3	-4	-12	-10	-24	-11	-26	-39	-71
EC-Earth3	2.2	3.7	9	5	8	0	1	-3	-32	-49
EC-Earth3-CC	1.4	2.9	3	0	1	-7	2	-6	-27	-42
EC-Earth3-Veg-LR	1.6	2.5	9	4	11	0	13	3	-47	-60
GFDL-ESM4	1.6	2.5	10	3	12	-1	15	-1	-27	-38
HadGEM3-GC31-LL	2.9	3.9	-1	-1	-6	-9	-12	-19	-42	-41
IITM-ESM	1.2	1.9	2	5	1	4	2	6	-21	-32
IPSL-CM6A-LR	2.8	4.4	3	3	-2	-7	-6	-10	-47	-46
MIROC6	1.6	2.7	1	-1	-2	-8	-3	-5	-23	-58
MIROC-ES2L	2.4	3.1	6	5	4	1	2	-1	-35	-61
MPI-ESM1-2-HR	1.5	2.3	-3	-4	-8	-9	-9	-15	-36	-49
MPI-ESM1-2-LR	1.7	2.3	-4	-2	-11	-6	-5	-16	-34	-15
MRI-ESM2-0	1.6	2.2	0	3	-5	-1	-1	3	-13	-30
NorESM2-MM	1.7	2.5	-4	-10	-11	-21	-17	-29	-25	-31
UKESM1-0-LL	3.7	5.5	-5	-14	-13	-28	-19	-35	-37	-34
MM 25%-Quantil	1.6	2.5	6	5	4	0	2	-1	-25	-34
MM 75%-Quantil	2.8	3.7	-4	-4	-10	-14	-11	-18	-39	-56
MM-Median	1.7	3.1	1	0	-2	-7	-3	-6	-34	-49

Donau-Klimafolgen-Storylines (Tasks 5.2 und 5.3)

Abbildung 19 zeigt die historische und zukünftige Anzahl von 30Q10-Niederwasserereignissen für die beiden in WP3 beschriebenen Storylines. Die Abbildung macht einen deutlichen Unterschied zwischen den beiden Niederwasser-Storylines sichtbar. Die Modelle der High-Frequency-Storyline projizieren mit zunehmender Erwärmung einen deutlichen Anstieg der 30Q10-Ereignisse: Der Median steigt in beiden Jahreszeiten auf etwa 4–5 Ereignisse pro 30 Jahre bei +2 °C und auf rund 8–9 Ereignisse bei +3 °C. Mehrere Modelle dieser Gruppe projizieren bei +3 °C sogar etwa 10–13 Ereignisse. Die Modelle der Low-Frequency-Storyline zeigen dagegen nur eine geringe oder keine Zunahme. Ihr Median bleibt nahe null; die meisten Modelle projizieren selbst bei +3 °C höchstens ein Ereignis pro 30 Jahre.

Die Trennung zwischen den Storylines verstärkt sich mit zunehmender Erwärmung und ist bereits bei +2 °C erkennbar. Im Sommerhalbjahr ist der Gegensatz besonders deutlich, da historische 30Q10-Ereignisse selten sind: Die High-Frequency-Modelle projizieren ein erhebliches neues Auftreten von Niederwasserereignissen im Sommer, während die Low-Frequency-Modelle nahe den historischen Bedingungen bleiben. Im Winter ist die historische Ereignishäufigkeit höher, doch zeigt sich dieselbe divergierende Entwicklung: Die High-Frequency-Storyline zeigt eine starke Intensivierung des Niederwasserauftretens, während die Low-Frequency-Storyline gegenüber dem historischen Median einen Rückgang projiziert. Die Abbildung veranschaulicht somit zwei deutlich unterschiedliche hydrologische Zukünfte, die von der Reaktion des Jetstreams auf den Klimawandel abhängen.

Historical and Future Counts of 30Q10 Low-Flow Events - SSP5-8.5

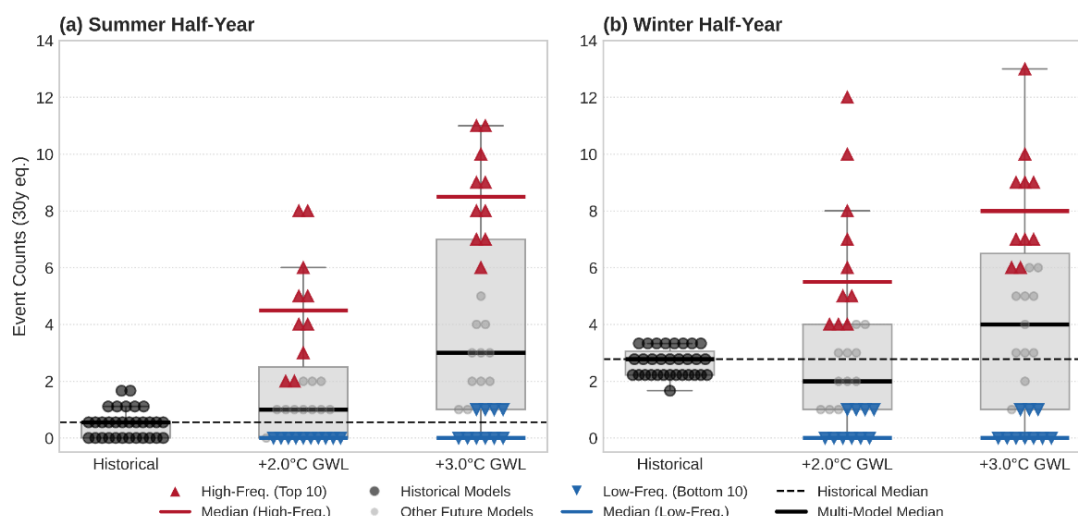


Abbildung 19: Anzahl der 30Q10-Niederwasserereignisse unter SSP5-8.5 für (a) Sommer (Mai–Oktober) und (b) Winter (November–April), für den historischen Zeitraum auf 30-Jahres-Äquivalente skaliert. Der 30Q10-Schwellenwert entspricht dem jährlichen Minimum des 30-tägigen Abflusses mit einer historischen Wiederkehrperiode von zehn Jahren. Graue Boxplots zeigen die CMIP6-Verteilungen für 1960–2014 sowie bei globalen Erwärmungsniveaus von +2 °C und +3 °C; die Boxen geben den Interquartilsabstand an, die Whisker reichen bis zu Werten innerhalb des 1,5-Fachen dieses Abstands. Symbole kennzeichnen einzelne Modelle: historische Simulationen (schwarze Kreise), Modelle der High-Frequency-Storyline (oberste zehn; rote aufwärts gerichtete Dreiecke), Modelle der Low-Frequency-Storyline (unterste zehn; blaue abwärts gerichtete Dreiecke) und übrige Modelle (hellgraue Kreise). Horizontale Linien zeigen den historischen Median (schwarz gestrichelt), den Multimodellmedian (schwarz durchgezogen) sowie die Storyline-Mediane (rot und blau).

Untersuchung von Worst-Case-Abflussszenarien und den zugehörigen Storylines (Task 5.2)

Einzelne Modelle zeigen bis Ende des 21. Jahrhunderts einen ausgeprägten Rückgang des mittleren Abflusses um bis zu –15 % unter SSP2-4.5 und –30 % unter SSP5-8.5.

Für den Niederwasserabfluss projizieren einzelne Modelle bis Ende des 21. Jahrhunderts Rückgänge von bis zu –20 % unter SSP2-4.5 und –40 % unter SSP5-8.5; diese besonders starken Rückgänge sind der „High-Frequency“-Storyline zuzuordnen.

Stakeholder-Workshop (Task 5.4: Vorbereitung der Workshopmaterialien; Task 5.5: Analyse des Stakeholder-Feedbacks)

Auf Grundlage der Ergebnisse aller Arbeitspakete wurden sechs Foliensätze und Präsentationen für den Stakeholder-Workshop im März 2026 erstellt (siehe Kapitel 8). Die Materialien wurden den Teilnehmenden ausführlich präsentiert und mit ihnen diskutiert. Einzelne während der Diskussion angesprochene Punkte wurden anschließend vertieft analysiert, darunter Veränderungen der Dauer von Niederwasserperioden und eine klarere Darstellung der Unterschiede zwischen den mit den beiden Storylines verbundenen Szenarien.

Im Workshop wurde vereinbart, dass die Stakeholder keinen formellen Workshopbericht benötigten, sofern ihnen die präsentierten Folien zur Verfügung gestellt wurden. Dementsprechend wurden die Präsentationen nach der Veranstaltung an alle Teilnehmenden versandt.

Veröffentlichung (Task 5.6)

Ansätze und Ergebnisse der hydrologischen Szenariosimulationen wurden im Mai 2025 in einem Posterbeitrag auf der EGU General Assembly (siehe Stanzel et al. 2026 in Kapitel 8) sowie in einem mündlichen Beitrag bei einem Workshop österreichischer Forscher:innen und Praktiker:innen der Wasserwirtschaft vorgestellt (siehe Stanzel et al. 2026 in Kapitel 8). Der Hauptteil des bei Journal of Hydrology: Regional eingereichten Manuskripts (siehe Stanzel et al. 2026 in Kapitel 8) behandelt die in WP5 durchgeführten hydrologischen Szenariosimulationen.

Analysen zur Storyline-Klassifizierung der Klimamodelle wurden im Mai 2026 auf der EGU General Assembly vorgestellt (siehe Weis et al. 2026 in Kapitel 8) und sind ausführlich in einem bei Environmental Research Letters Manuskript beschrieben (Weis et al. 2026 in Kapitel 8).

Meilensteine

M5.1 Hydrologische Szenariosimulationen und Storyline-Gruppierung abgeschlossen (erreicht)

M5.2 Worst-Case-Szenario identifiziert und analysiert (erreicht)

M5.3 Donau-KlimafolgenStorylines zusammengestellt (erreicht)

M5.4 Stakeholder-Feedback in die Ergebnisse aufgenommen (erreicht)

5 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Wesentliche Projektergebnisse

Die gemeinsame Analyse der neu entwickelten Klima- und hydrologischen Projektionen sowie der erweiterten historischen Simulationen zeigt, dass der Niederwasserabfluss im Verlauf des 20. Jahrhunderts schrittweise um etwa 15 % zunahm. Die Ergebnisse weisen darauf hin, dass rund ein Drittel dieser Zunahme auf den Bau und Betrieb großer alpiner Speicherseen zurückgeführt werden kann, während etwa zwei Drittel klimatisch bedingt sind. Unter historischen Klimabedingungen traten Niederwasserperioden überwiegend im Winter auf, wenn Niederschlag in Form von Schnee gespeichert und der Abfluss saisonal reduziert wurde, durch die Erwärmung in den letzten Jahrzehnten kam es zu einem Anstieg der niedrigen Abflüsse im Winter.

Die Zukunftsprojektionen zeigen eine Umkehr dieses historischen Trends. Sowohl der mittlere Abfluss als auch der Niederwasserabfluss werden im Verlauf des 21. Jahrhunderts voraussichtlich abnehmen, wobei das Ausmaß der Veränderungen zwischen den Klimamodellen und Emissionsszenarien erheblich variiert. Unter dem Hochemissionsszenario SSP5-8.5 fällt der Rückgang insbesondere gegen Ende des Jahrhunderts deutlich stärker aus als unter SSP2-4.5. Die CMIP6-basierten Projektionen bestätigen grundsätzlich frühere Ergebnisse, wonach der Winterabfluss zunimmt und der Sommerabfluss abnimmt. Der im CMIP6-Multimodellmedian projizierte Rückgang des Sommerabflusses ist jedoch stärker als in früheren, auf CMIP5 basierenden Projektionen.

Auch der saisonale Zeitpunkt von Niederwasserbedingungen wird sich voraussichtlich verändern. Während Niederwasserperioden unter historischen Klimabedingungen hauptsächlich im Winter auftraten, werden sie sich zunehmend in den Spätsommer und Herbst verlagern. Diese Verschiebung ergibt sich durch den vielfältigen Einfluss der Erwärmung auf den Wasserkreislauf. In der Vergangenheit verringerten höhere Temperaturen die Schneespeicherung und erhöhten dadurch den Winterabfluss. Bei fortschreitender Erwärmung führen hingegen eine stärkere sommerliche Evapotranspiration und die zunehmende Entleerung der Bodenwasserspeicher zu niedrigeren Abflüssen im Spätsommer und Herbst.

Bei einem globalen Erwärmungsniveau von +3 °C steigt die durchschnittliche Zahl von Niederwasserereignissen im Sommerhalbjahr von nahezu null im historischen Zeitraum auf etwa drei Ereignisse innerhalb von 30 Jahren. Die extremsten Klimamodellprojektionen zeigen bis zu elf Ereignisse innerhalb von 30 Jahren. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass das zukünftige Niederwasserrisiko nicht ausreichend durch den Multimodellmedian allein dargestellt werden kann.

Eine wesentliche Unsicherheitsquelle ist die Reaktion des nordatlantischen Jetstreams auf den Klimawandel. Modelle, die eine stärkere Nordverlagerung und Beschleunigung des Jetstreams simulieren, projizieren tendenziell auch eine deutlich stärkere Zunahme von Niederwasserereignissen an der Donau. Die Entwicklung der großskaligen atmosphärischen Zirkulation wird daher die Stärke der zukünftigen hydrologischen Auswirkungen im oberen Donaueinzugsgebiet wesentlich mitbestimmen.

Schlussfolgerungen

Aus den Projektergebnissen lassen sich folgende zentrale Schlussfolgerungen ableiten:

1. **Der vorherrschende saisonale Charakter des Niederwassers an der Donau verändert sich.** An der Donau bei Wien kommt es zu einer Änderung von von einem hauptsächlich durch winterliches Niederwasser aufgrund von Schneespeicherung geprägten Regime hin zu einem Regime, in dem Niederwasser auch zunehmend im Spätsommer und Herbst auftritt, aufgrund von hohen Temperaturen, hoher Evapotranspiration und entleerten Bodenwasserspeichern.
2. **Das zukünftige Niederwasserrisiko nimmt mit dem globalen Erwärmungsniveau zu.** Trotz erheblicher Unterschiede zwischen den Klimamodellen zeigen die Projektionen eine klare Tendenz zu niedrigeren Niederwasserabflüssen und häufigeren Niederwasserereignissen im Sommerhalbjahr, insbesondere bei hohen Emissionen und höheren globalen Erwärmungsniveaus.
3. **Die Emissionspfade gewinnen gegen Ende des Jahrhunderts zunehmend an Bedeutung.** Die Unterschiede zwischen SSP2-4.5 und SSP5-8.5 sind kurzfristig vergleichsweise moderat, werden jedoch in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts deutlich größer. Eine Begrenzung der globalen Erwärmung würde daher das langfristige Risiko schwerwiegender Niederwasserbedingungen erheblich reduzieren.

4. **Die Unsicherheit der atmosphärischen Zirkulationsentwicklung ist für das regionale hydrologische Risiko von zentraler Bedeutung.** Unterschiede in der projizierten Reaktion des nordatlantischen Jetstreams erklären einen wesentlichen Teil der Bandbreite zukünftiger Niederwasserprojektionen. Klimafolgenabschätzungen, die ausschließlich auf einem Multimodellmittel oder -median beruhen, können daher physikalisch plausible und besonders folgenreiche Entwicklungen verdecken.
5. **Hochwertige Eingangsdaten und eine verbesserte Darstellung hydrologischer Prozesse sind entscheidend für zuverlässige hydrologische Simulationen.** Die Verwendung aktualisierter meteorologischer Daten und Abflussbeobachtungen sowie die verbesserte Berücksichtigung von Speicherseen, Gletschern, Evapotranspiration und Abflussrouting erhöhten die Modellgüte. Gleichzeitig wird dadurch das Risiko reduziert, dass Kalibrierungsparameter Defizite der Eingangsdaten oder der Modellstruktur kompensieren.

Empfehlungen

Auf Grundlage dieser Ergebnisse werden folgende Empfehlungen abgeleitet:

- **Die Anpassungsplanung sollte Niederwasserbedingungen im Spätsommer und Herbst stärker berücksichtigen.** Wasserwirtschaftliche Strategien, die primär auf historischen winterlichen Niederwasserbedingungen beruhen, könnten unter zukünftigen Klimabedingungen nicht mehr ausreichen. Planungen für Schifffahrt, Wasserkraftproduktion, Ökosystemschutz, Kühlwasserbedarf, Bewässerung und weitere Wassernutzungen sollten die erwarteten saisonale Verschiebung ausdrücklich einbeziehen.
- **Entscheidungen sollten anhand mehrerer Emissionsszenarien, globaler Erwärmungsniveaus und physikalisch plausibler Zirkulations-Storylines bewertet werden.** Der Multimodellmedian sollte durch Storylines mit besonders starken Auswirkungen und durch Worst-Case-Storylines ergänzt werden, um Maßnahmen zu identifizieren, die unter einer breiten Bandbreite möglicher zukünftiger Entwicklungen wirksam bleiben.
- **Der Einfluss der großskaligen atmosphärischen Zirkulation sollte in zukünftige Klimarisikobewertungen integriert werden.** Insbesondere sollte die Reaktion des nordatlantischen Jetstreams weiter beobachtet und untersucht werden, da sie eine potenzielle Informationsquelle für die bessere Eingrenzung regionaler hydrologischer Projektionen darstellt.
- **Das hydrometeorologische Monitoring sollte langfristig gesichert und weiter ausgebaut werden.** Lange, konsistente und qualitativ hochwertige Beobachtungsreihen von Niederschlag, Temperatur, Abfluss, Schnee, Gletschern, Bodenfeuchte und Speicherbewirtschaftung sind erforderlich, um neu auftretende Veränderungen zu erkennen, die Modelle regelmäßig zu aktualisieren und Zukunftsprojektionen zu evaluieren.
- **Hydrologische Modelle sollten regelmäßig aktualisiert werden, sobald neue Beobachtungsdaten und Klimaprojektionen verfügbar sind.** Besondere Aufmerksamkeit sollte dabei Prozessen gelten, deren Bedeutung unter fortschreitender Erwärmung zunimmt, darunter Evapotranspiration, Gletscherrückgang, Veränderungen der Schneespeicherung, Bodenfeuchteverluste, Speicherbewirtschaftung und Abflussrouting.
- **Das Potenzial einer koordinierten Speicherbewirtschaftung als Anpassungsmaßnahme sollte geprüft werden.** Der Betrieb von Speicherseen hat zum historischen Anstieg des Niederwasserabflusses beigetragen und könnte zukünftige saisonale Defizite teilweise abmildern. Möglichkeiten, Grenzen und Zielkonflikte mit der Wasserkraftproduktion, dem Hochwasserschutz und ökologischen Zielsetzungen sollten jedoch ausdrücklich bewertet werden.
- **Robuste und flexible Anpassungsmaßnahmen sollten priorisiert werden.** Aufgrund der erheblichen Unsicherheit im Zusammenhang mit Veränderungen der atmosphärischen

Zirkulation sollten Maßnahmen sowohl unter moderaten als auch unter schweren Niederwasser-Storylines angemessen wirksam sein und an neue Beobachtungen und Projektionen angepasst werden können.

Insgesamt zeigen die STREAM-Ergebnisse, dass das zukünftige Niederwasserrisiko an der Donau nicht nur vom Ausmaß der globalen Erwärmung, sondern auch von der regionalen Reaktion der atmosphärischen Zirkulation abhängt. Die Kombination konventioneller Ensembleprojektionen mit prozessbasierter hydrologischer Modellierung und physikalischen Klima-Storylines bietet daher eine aussagekräftigere Grundlage für die Risikobewertung und langfristige Anpassungsplanung als die alleinige Betrachtung einer einzelnen, als am wahrscheinlichsten angesehenen Projektion.

C) Projektdetails

6 Methodik

Forschungsansatz

STREAM verfolgte einen integrierten, prozessbasierten Forschungsansatz, der historische Beobachtungen, Klimamodellanalysen, hydrologische Modellierung, physikalische Klimastorylines und die Einbindung von Stakeholdern miteinander verband. Dieser Ansatz wurde gewählt, da zukünftige Veränderungen des Donauabflusses nicht allein anhand projizierter Änderungen von Niederschlag und Temperatur verstanden werden können. Sie hängen auch vom Zusammenwirken hydrologischer Prozesse – darunter Schneespeicherung, Evapotranspiration, Bodenfeuchteverluste, Gletscherveränderungen, Speicherbewirtschaftung und Abflussrouting – sowie von der Reaktion der großskaligen atmosphärischen Zirkulation auf den Klimawandel ab.

Konventionelle Klimafolgenstudien fassen ein Multimodell-Ensemble häufig anhand seines Mittelwerts oder Medians und eines zugehörigen Streuungsmaßes zusammen. Dieser Ansatz ist zwar für die Beschreibung der zentralen Tendenz eines Ensembles hilfreich, kann jedoch physikalisch plausible, aber gegensätzliche regionale Zukunftsentwicklungen verdecken. STREAM ergänzte die konventionelle Ensembleauswertung daher durch einen wirkungsorientierten Storyline-Ansatz. Die Storylines dienten dazu, unterschiedliche hydrologische Zukunftsentwicklungen zu identifizieren und mit Unterschieden in der Reaktion der nordatlantischen atmosphärischen Zirkulation in Verbindung zu bringen. Diese Kombination ermöglichte sowohl eine quantitative Abschätzung der projizierten Veränderungen als auch eine prozessbasierte Interpretation der für die Anpassungsplanung relevanten Unsicherheiten.

Der methodische Arbeitsablauf umfasste fünf miteinander verknüpfte Komponenten:

1. Analyse historischer Niederwasserereignisse und ihrer atmosphärischen Einflussfaktoren;
2. Beschaffung, Bias-Korrektur und prozessbasierte Evaluierung von Klimamodellprojektionen;
3. Erweiterung und Verbesserung des hydrologischen Modellsystems;
4. Erstellung hydrologischer Projektionen und zirkulationsbasierter Wirkungsstorylines; und
5. Einbindung der Anforderungen von Stakeholdern in die Analyse und Darstellung der Ergebnisse.

Analyse historischer Niederwasserereignisse und Identifizierung atmosphärischer Einflussfaktoren

Die historische Analyse basierte auf täglichen Abflussbeobachtungen der Donau, die von viadonau bereitgestellt wurden. Der Schwerpunkt lag auf der Messstelle Korneuburg bei Wien. Dieser Standort wurde gewählt, da er die Abflüsse der wichtigsten alpinen Zuflüsse erfasst, bevor die Donau in das Wiener Becken eintritt, und daher für Schifffahrt und weitere wasserwirtschaftliche Anwendungen von unmittelbarer Bedeutung ist.

Niederwasserereignisse wurden anhand mehrerer sich ergänzender Indikatoren identifiziert. Die ersten Analysen verwendeten Schwellenwerte auf Grundlage des 10. und 30. Perzentils des beobachteten Abflusses, um extreme und moderate Niederwasserperioden zu unterscheiden. Anschließend wurden weitere Indikatoren, darunter der LNWL-Schwellenwert, Q94 und 30Q10, untersucht, um unterschiedliche wissenschaftliche und operationelle Definitionen von Niederwasser

abzudecken. Der 30Q10-Indikator bezeichnet den niedrigsten jährlichen 30-Tages-Mittelwert des Abflusses, der einer historischen Wiederkehrperiode von zehn Jahren entspricht. Q94 stellt einen für die Wasserwirtschaft an der oberen Donau besonders relevanten Niederwasserindikator dar.

Analysiert wurden die historische Häufigkeit, Dauer, Saisonalität und zeitliche Lage von Niederwasserperioden. Der Einfluss der Speicherbewirtschaftung wurde durch parallele COSERO-Simulationen mit und ohne Berücksichtigung des Speicherbetriebs untersucht. Dadurch konnte der Einfluss wasserwirtschaftlicher Eingriffe von den Auswirkungen klimatischer Variabilität und langfristiger Erwärmung getrennt werden. Mithilfe der historischen Simulationen wurde außerdem untersucht, wie Veränderungen der Schneespeicherung, der Temperatur und weiterer hydrologischer Prozesse die saisonale Verteilung von Niederwasser beeinflussen.

Die großskalige atmosphärische Analyse konzentrierte sich auf den nordatlantischen, durch Wirbelaktivität angetriebenen Jetstream, da dieser einen starken Einfluss auf Temperatur und Niederschlag in Europa ausübt. Der zonale Wind in 850 hPa, im Folgenden als U850 bezeichnet, wurde als Maß für den Jetstream in der unteren Troposphäre verwendet. Es wurden Regressionsanalysen zwischen U850 und regionalen Niederschlags- und Temperaturindizes durchgeführt, die für den Donauabfluss relevant sind. Anschließend wurden Indizes für Jetstream-Geschwindigkeit und Jetstream-Breitenlage berechnet, um Veränderungen der Stärke und Position des nordatlantischen Jetstreams zu charakterisieren. Diese Indizes bildeten die dynamische Grundlage für die spätere Einteilung der Klimaprojektionen in Zirkulationsstorylines.

Klimamodelldaten, Bias-Korrektur und prozessbasierte Evaluierung

Die zukünftige Klimaentwicklung wurde anhand eines CMIP6-Multimodell-Ensembles für zwei gemeinsame sozioökonomische Entwicklungspfade untersucht: das Szenario mit mittleren Emissionen SSP2-4.5 und das Hochemissionsszenario SSP5-8.5. Pro Klimamodell wurde ein Ensemblemitglied verwendet. Tägliche Daten für Niederschlag, bodennahe Lufttemperatur und zonalen Wind in 850 hPa wurden für den historischen Zeitraum 1960–2014 und den Projektionszeitraum 2015–2100 bezogen. Diese Auswahl stellte die für die hydrologischen Simulationen erforderlichen meteorologischen Eingangsdaten bereit und ermöglichte gleichzeitig die Analyse von Veränderungen des nordatlantischen Jetstreams.

Die Klimamodelldaten wurden räumlich auf die im COSERO-Modell verwendeten hydrologischen Einheiten übertragen. Dazu wurden für jede Einheit die räumlichen Überschneidungen zwischen den Klimamodell-Gitterzellen und den hydrologischen Einheiten berechnet. Auf dieser Grundlage wurden flächengewichtete Mittelwerte von Niederschlag und Temperatur abgeleitet.

Bias-Korrektur und räumliche Verfeinerung wurden mit der Methode des Scaled Distribution Mapping durchgeführt. Dieses trenderhaltende parametrische Verfahren korrigiert die statistische Verteilung der modellierten Temperatur- und Niederschlagsdaten, ohne das projizierte Klimaänderungssignal zu verfälschen. Für Niederschlag berücksichtigt die Methode Veränderungen der Niederschlagsintensität, der Häufigkeit von Niederschlagstagen und der Ereigniswahrscheinlichkeit. Die Kalibrierung erfolgte anhand HISTALP-basierter Temperatur- und Niederschlagsbeobachtungen für den Zeitraum 1960–2023. Diese wurden unter Berücksichtigung höhenabhängiger Klimagradianten auf die hydrologischen Einheiten regionalisiert.

Die Modellevaluierung beschränkte sich nicht auf konventionelle Kennwerte wie den mittleren Bias oder die Übereinstimmung statistischer Verteilungen. Eine Bias-Korrektur kann statistische Eigenschaften verbessern, jedoch keine Defizite in der Darstellung der physikalischen Prozesse beheben, die regionale Wetterbedingungen erzeugen. Die Evaluierung berücksichtigte daher

zusätzlich die Persistenz trockener und feuchter Perioden. Diese hängt davon ab, wie gut Klimamodelle die Dauer und Wiederkehr relevanter Zirkulations- und Wetterregime darstellen, und wurde deshalb als prozessorientierter Indikator für die Eignung eines Modells zur Niederwasseranalyse verwendet. Modelle mit erheblichen, auch nach der Bias-Korrektur fortbestehenden Defiziten wurden von der Storyline- und hydrologischen Analyse ausgeschlossen. Das endgültige bias-korrigierte Ensemble umfasste 31 Modelle für SSP5-8.5 und 25 Modelle für SSP2-4.5.

Weiterentwicklung des hydrologischen Modells und historische Simulationen

Das hydrologische Modell COSERO wurde weiterentwickelt, um die relevanten Prozesse für saisonale Abflussveränderungen im Einzugsgebiet der oberen Donau und für die Abbildung von Niederwassersituationen besser darzustellen. Die historischen Simulationen wurden bis 2023 verlängert, sodass auch die jüngsten, außergewöhnlich warmen Jahre in die Modellkalibrierung und -evaluierung einbezogen werden konnten.

Für die Verlängerung der Temperatur-Zeitreihe bis 2023 wurden für jede HRU Korrelationen mit den einzelnen Stationszeitreihen von 15 meteorologischen Stationen berechnet, die am besten korrelierte Station ausgewählt und deren Daten höhenabhängig korrigiert.

Daten von 15 Stationen wurden zur Verlängerung der Modelleingangszeitreihen verwendet (Tabelle 1). Die Korrelationen zwischen Stationsbeobachtungen und HRU-Temperaturen waren im Allgemeinen hoch, wenn die Stationen in der Nähe oder innerhalb der HRU lagen bzw. eine ähnliche Seehöhe aufwiesen (Abb. 9). Mit dieser einfachen und robusten Methode konnten konsistente Temperaturzeitreihen bis August 2023 erstellt werden.

Tabelle 1: Meteorologische Stationen zur Verlängerung der Temperaturzeitreihe

Name	ID	Land	Datenanbieter	Seehöhe [m ü. A.]
Badgastein	BGA	Österreich	Geosphere Austria	1092
Galtür	GAL	Österreich	Geosphere Austria	1587
Kollerschlag	KOL	Österreich	Geosphere Austria	725
Kremsmünster	KRE	Österreich	Geosphere Austria	382
Kufstein	KUF	Österreich	Geosphere Austria	493
Linz-Stadt	LIN	Österreich	Geosphere Austria	263
Obergurgl-Vent	OBG	Österreich	Geosphere Austria	1938
Ried	RIE	Österreich	Geosphere Austria	431
Salzburg-Flughafen	SAL	Österreich	Geosphere Austria	450
Schmittenhöhe	SCH	Österreich	Geosphere Austria	1973
Sonnblick	SON	Österreich	Geosphere Austria	3105
St. Pölten	SPO	Österreich	Geosphere Austria	285
Augsburg	AUG	Deutschland	DWD	463
Regensburg	RBG	Deutschland	DWD	366
Zugspitze	ZUG	Deutschland	DWD	2962

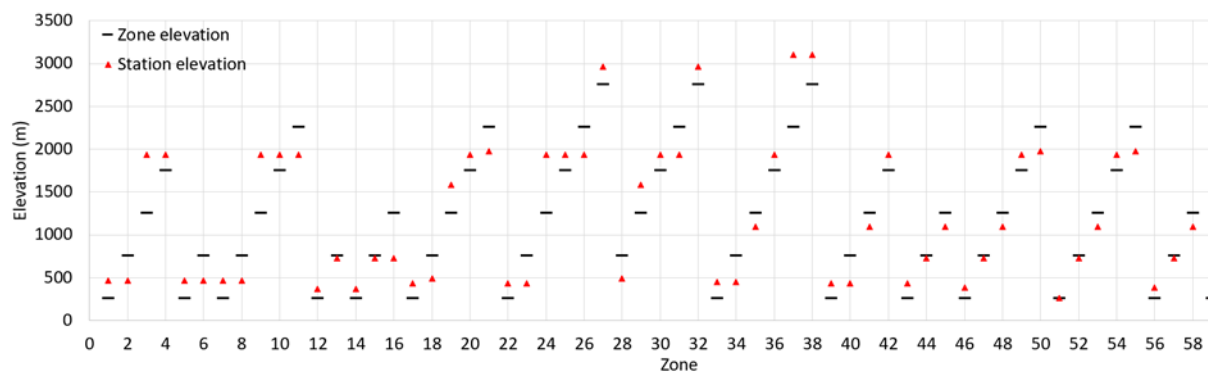


Abbildung 9: Seehöhen der HRUs (Zonen) und der meteorologischen Stationen, deren Daten zur Verlängerung der bestehenden Zeitreihen verwendet wurden.

Die Niederschlags-Eingangsdaten wurden ebenfalls auf der Grundlage von Stationsdaten aktualisiert. Dabei wurden Beobachtungen von mehr als 120 Stationen in Österreich, Deutschland und der Schweiz verarbeitet. Die Daten stammten von HISTALP, GeoSphere Austria, DWD Deutschland und MeteoSwiss. Abbildung 10 zeigt die räumliche Verteilung der verwendeten Stationen im Einzugsgebiet; Abbildung 11 zeigt die zeitliche Entwicklung der Anzahl verfügbarer Stationen.

Für jede Einheit des hydrologischen Modells (HRU) wurde die Niederschlagszeitreihe nach folgendem allgemeinen Verfahren erstellt:

- Schätzung des langjährigen mittleren Jahresniederschlags
- Zeitliche Verteilung des Jahresniederschlags durch Berechnung von Niederschlagsanomalien an den Stationen im erforderlichen Zeitintervall, z. B. monatlich oder täglich, zur Erstellung einer kontinuierlichen Niederschlagszeitreihe.

Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass die beiden komplexen Aufgaben der räumlichen Niederschlagsverteilung (Regionalisierung) und der Schätzung zeitlicher Muster, einschließlich des Umgangs mit Datenlücken in den Stationsdaten, in zwei getrennten Schritten behandelt werden.

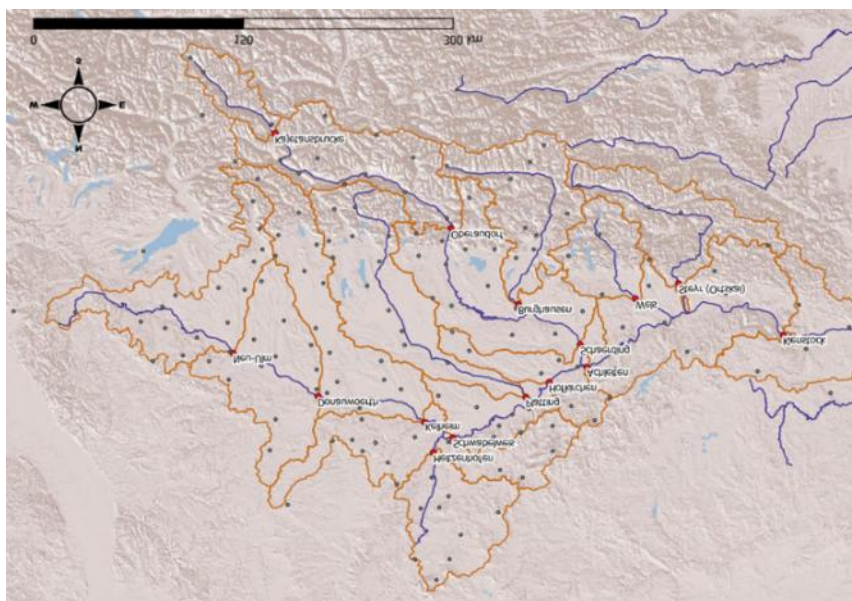


Abbildung 10: Meteorologische Stationen zur Regionalisierung des Niederschlags. Grüne Punkte: Wetterstationen. Rote Punkte: Auslässe der Teileinzugsgebiete des hydrologischen Modells. Orange: Grenzen der Teileinzugsgebiete. Blau: Flussnetz im Donaueinzugsgebiet.

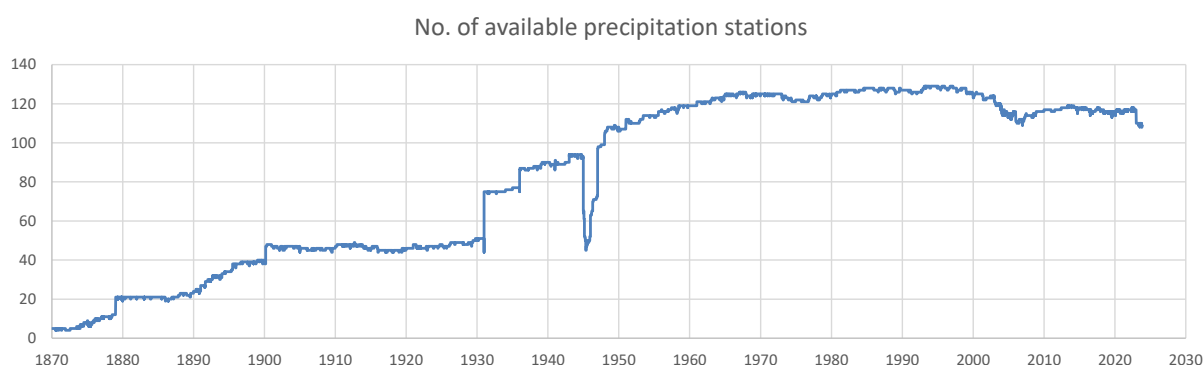


Abbildung 11: Anzahl der verfügbaren Niederschlagsstationen im Donaeinzugsgebiet zwischen 1870 und 2023.

Die Darstellung der potenziellen Evapotranspiration wurde überarbeitet, da diese unter heißen Bedingungen eine zunehmend wichtige Rolle für den Sommerabfluss spielt. Fünf alternative Schätzverfahren wurden untersucht, darunter Penman-Monteith-basierte Datensätze, die in früheren Modellversionen verwendete Turc-Methode, stationsbasierte Schätzungen und eine höhenabhängige regionale Abschätzung. Die Alternativen wurden anhand von Wasserbilanz-Sensitivitätsanalysen verglichen. Das ausgewählte Verfahren lieferte räumlich konsistente Werte für das gesamte Einzugsgebiet, einschließlich der Hochlagen, und berücksichtigte eine temperaturabhängige Reaktion der potenziellen Evapotranspiration.

Die Struktur des COSERO-Modells wurde zusätzlich durch folgende Maßnahmen verbessert:

- Aktualisierung des Modellcodes auf die aktuelle Softwareversion;
- separate Darstellung von 14 großen Speichern als eigene Berechnungspunkte mit parametrisierten Betriebsregeln;
- Einbeziehung von Überleitungen, Seen und der Donauversinkung bei Immendingen;
- Implementierung des überarbeiteten Evapotranspirationsverfahrens; und
- wesentliche Verbesserung der Simulation von Gletschern und ihres Beitrags zum Abfluss.

Das neue Gletschermodule bildet langfristige Veränderungen der Eismasse und die Beiträge der Gletscherschmelze zum Abfluss der oberen Donau besser ab. Einzelne Gletscher oder Gruppen kleinerer Gletscher werden als Berechnungspunkte dargestellt; Gletschermassenbilanz und Gletscherfläche werden in jedem Zeitschritt simuliert. Die Gletscher werden vertikal in Höhenbänder, beispielsweise in 100-m-Intervalle, unterteilt, und die klimatische Massenbilanz wird für jedes Band separat berechnet.

Eis akkumuliert, wenn das simulierte Schneewasseräquivalent einen Schwellenwert überschreitet. Oberhalb dieses Werts wird Schnee mithilfe eines Umwandlungskoeffizienten schrittweise in Eis umgewandelt. Die Eisschmelze ist auf schneefreie Flächen beschränkt und wird aus der Lufttemperatur und Schmelzfaktoren für Gletschereis berechnet.

Die Gletschergeometrie wird mit der Δh -Parametrisierung von Huss et al. (2010) sowie Huss und Hock (2015) aktualisiert, welche die vertikale Umverteilung von Eis aus höheren in tiefere Lagen implizit darstellt. Die Normierung wird aus der Analyse digitaler Höhenmodelle abgeleitet und berücksichtigt daher lokale Gletschereigenschaften. Die Methode bildet mit einem empirischen Ansatz die stärkeren Änderungen der Eisdicke an den Gletscherzungen gegenüber höheren Lagen ab (Abb. 12) und stellt zugleich sicher, dass Eisumverteilung und Flächenänderungen mit der gesamten klimatischen Massenbilanz konsistent bleiben. Das Modell simuliert dadurch für kontinuierliche mehrjährige Läufe

die Veränderungen der vergletscherten Fläche in jedem Höhenband, wenn sich Gletscher zurückziehen oder vorstoßen.

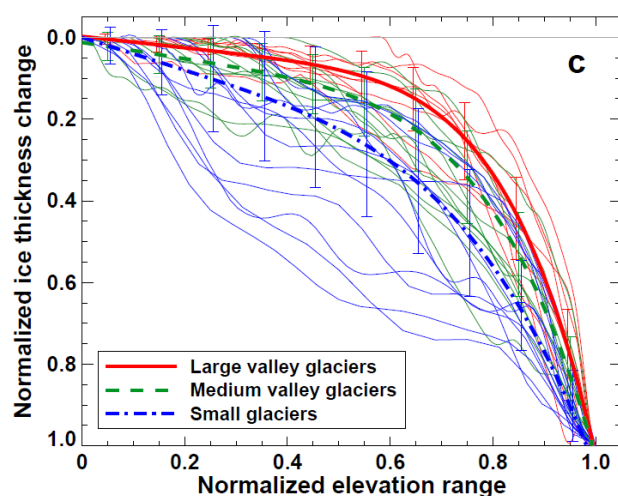


Abbildung 12: Von Huss et al. (2010) eingeführte Δh -Parametrisierung für die Gletschersimulation.

Das hydrologische Modell wurde sowohl für den ursprünglichen Kalibrierungszeitraum als auch für den erweiterten Zeitraum 1961–2023 neu kalibriert. Ziel der Kalibrierung war es, die hydrologische Modellgüte zu verbessern, räumlich konsistente Parameterwerte sicherzustellen und eine plausible langfristige Entwicklung der Gletscher abzubilden. Die Modellgüte wurde anhand des beobachteten jährlichen und monatlichen Abflusses, der vollständigen Abflussdauerlinie, des Niederwasserbereichs der Abflussdauerlinie sowie unabhängiger Abschätzungen der Gletscherfläche bewertet. Dadurch wurde sichergestellt, dass das Modell nicht nur mittlere Bedingungen, sondern auch die für das Projekt zentralen Niederwassereigenschaften angemessen wiedergibt.

Hydrologische Projektionen und Entwicklung der Storylines

Die bias-korrigierten täglichen Temperatur- und Niederschlagsprojektionen wurden als Eingangsdaten für COSERO verwendet, um historische und zukünftige Abflusssimulationen für die Donau bei Wien zu erstellen. Untersucht wurden der jährliche und saisonale mittlere Abfluss, die Höhe des Niederwasserabflusses, Häufigkeit und Dauer von Niederwasserereignissen sowie Veränderungen des saisonalen Zeitpunkts ihres Auftretens. Die Simulationen wurden mit täglicher zeitlicher Auflösung durchgeführt, wodurch operationell relevante Indikatoren wie Q94 und 30Q10 berechnet werden konnten.

Die Zirkulations-Storylines wurden mithilfe eines rückwärtsgerichteten, wirkungsorientierten Ansatzes entwickelt. Anstatt atmosphärische Zirkulationsmuster im Voraus festzulegen und anschließend deren Auswirkungen auf Niederschlag, Temperatur und Abfluss zu bestimmen, begann die Analyse bei den simulierten hydrologischen Auswirkungen. Die Klimamodelle wurden zunächst entsprechend der von ihnen projizierten Häufigkeit von 30Q10-Niederwasserereignissen gereiht. Anschließend wurden die Modelle mit den höchsten und niedrigsten Ereignishäufigkeiten miteinander verglichen, um die mit diesen gegensätzlichen hydrologischen Entwicklungen verbundenen großskaligen Zirkulationsänderungen zu identifizieren.

Dieser Ansatz wurde gewählt, da der Donauabfluss nichtlinear auf Niederschlag und Temperatur reagiert und sich die relative Bedeutung dieser Variablen saisonal verändert. Der Ausgangspunkt bei den hydrologischen Auswirkungen verkürzte die zu untersuchende Wirkungskette und stellte sicher,

dass die Storylines unmittelbar auf die für die Stakeholder relevanten Auswirkungen ausgerichtet waren.

Die zehn Modelle mit der höchsten projizierten Niederwasserhäufigkeit bildeten die **High-Frequency-Storyline**, während die zehn Modelle mit der niedrigsten projizierten Häufigkeit der **Low-Frequency-Storyline** zugeordnet wurden. Die Klassifikation erfolgte getrennt für das Sommer- und Winterhalbjahr, da sich die für Niederwasser verantwortlichen physikalischen Prozesse zwischen den Jahreszeiten unterscheiden. Mithilfe von Kompositanalysen von U850, Jetstream-Breitenlage und Jetstream-Geschwindigkeit wurde untersucht, wie sich die nordatlantische Zirkulation zwischen den beiden Storyline-Gruppen unterscheidet.

Neben festen zukünftigen Zeiträumen wurden die Projektionen auch bei globalen Erwärmungsniveaus von +2 °C und +3 °C gegenüber dem Referenzzeitraum 1850–1900 ausgewertet. Für jedes Modell wurde ein 30-jähriger Zeitraum um jenes Jahr ausgewählt, in dem das 31-jährige gleitende Mittel der globalen Temperatur erstmals den jeweiligen Schwellenwert überschritt. Dieser Ansatz ermöglichte den Vergleich der Modelle bei vergleichbaren Erwärmungsniveaus und verringerte den Einfluss unterschiedlicher Klimasensitivitäten und Erwärmungsraten. Unterschiede zwischen den Modellen konnten dadurch unmittelbarer als Unterschiede in den regionalen und dynamischen Reaktionen interpretiert werden.

Der Ensemblemedian und die Ensemblebandbreite wurden weiterhin als konventionelle Maße der projizierten Veränderungen verwendet. Ergänzend wurden jedoch die beiden Zirkulations-Storylines und einzelne Projektionen mit besonders starken Auswirkungen analysiert. Dadurch konnten sowohl die zentrale Projektion als auch physikalisch plausible Worst-Case-Entwicklungen bewertet werden.

Stakeholder-Einbindung und methodische Synthese

Die Einbindung von Stakeholdern war Bestandteil des Forschungsprozesses und beschränkte sich nicht auf die abschließende Verbreitung der Ergebnisse. Ein früher Austausch mit viadonau zeigte einen klaren Bedarf an hydrologischen Informationen mit täglicher zeitlicher Auflösung. Die Analysen und Szenariosimulationen wurden daher auf Tagesbasis durchgeführt. Dies ermöglichte die Berechnung von Niederwasserindikatoren, die unmittelbar für wasserwirtschaftliche Entscheidungen relevant sind.

Die kombinierten Ergebnisse für Klima, Zirkulationsmuster und Hydrologie wurden anschließend mit Stakeholdern aus den Bereichen Schifffahrt, Wasserkraft, regionale Verwaltung, Ökosystemmanagement und Forschung diskutiert. Die Rückmeldungen wurden zur Weiterentwicklung der Analysen genutzt, unter anderem zur Untersuchung der Dauer von Niederwasserperioden und zur verständlicheren Darstellung der Unterschiede zwischen den gegensätzlichen Storylines.

Insgesamt verbindet die gewählte Methodik Beobachtungen, Klimadynamik, bias-korrigierte regionale Projektionen und prozessbasierte hydrologische Simulationen in einem gemeinsamen Rahmen. Die Verwendung mehrerer Emissionspfade und globaler Erwärmungsniveaus berücksichtigt Szenarienunsicherheiten; das Multimodell-Ensemble bildet Modellunsicherheiten ab; die prozessbasierte Modellevaluierung reduziert den Einfluss unzureichend dargestellter regionaler Prozesse; und der Storyline-Ansatz ermöglicht eine physikalisch interpretierbare Darstellung gegensätzlicher hydrologischer Zukunftsentwicklungen. Dieses integrierte Design war daher für das zentrale Ziel von STREAM besonders geeignet: die Erstellung wissenschaftlich belastbarer und entscheidungsrelevanter Projektionen des zukünftigen Dürre- und Niederwasserrisikos im Einzugsgebiet der oberen Donau.

7 Arbeits- und Zeitplan

Das Projekt lief vom **1. November 2022 bis zum 30. April 2026**. Für das Gesamtprojekt wurde eine kostenneutrale Verlängerung gewährt, da ein Projektmitarbeiter das Wegener Center und die Universität Graz im Oktober 2024 verließ. Sein Ausscheiden führte zu Verzögerungen im Projektverlauf. Sein Nachfolger benötigte zunächst Zeit, um sich in die Arbeiten einzuarbeiten und den aktuellen Projektstand zu erfassen. Er leistete sehr gute Arbeit, konnte die entstandene Verzögerung jedoch nicht vollständig aufholen.

8 Publikationen und Disseminierungsaktivitäten

Publikationen (under review):

Stanzel P., Kling H., Lerche F., Weis V.L., Ossó A. 2026. Upper Danube low flow in the Anthropocene: simulating impacts and changes from 1870 to 2100. Under review from Journal of Hydrology: Regional Studies (30.4.2026)

In Vorbereitung Publikationen:

Weis V.L., Stanzel P., Kling H., Lerche F., de Vries V., Ossó A. Northward-Shifted and Fast Jet Streams Drive Low-Flow Extremes in a Warming Danube River Basin. (Ready to be submitted to Environmental Research Letters)

Präsentationen:

- Ossó A., Persistent Summer North Atlantic jet variability: Dynamical feedbacks and model-observation discrepancies. Oral presentation at the conference “The Role of Atmospheric Dynamics for Climate and Extremes” (Dyn Var). Munich, Oct. 2023.
- Ossó A., Persistent Summer North Atlantic jet variability: Dynamical feedbacks and model-observation discrepancies. Poster presentation at the EGU 2024. Wien, Apr. 2024.
- Weis V., STREAM: Hydrological Trends and Low Flow Analysis in the Upper Danube River Basin. Klimatag 2025, Innsbruck 2025.
- Ossó A., Qualitätssicherung ACRP project STREAM oral presentation. Klimatag 2025, Innsbruck 2025.
- Ossó A. Physical climate storylines. Oral presentation at ECCA 2025, Rimini, 17.6.2025
- Stanzel P., Kling H., Lerche F., Weis V., Ossó A. Future Danube low flow for different circulation storylines. Oral presentation at ECCA 2025, Rimini, 17.6.2025
- Kling H., Stanzel P., Lerche F., Ossó A. Hydrological simulation of Danube River discharge over the last 150 years and future projections with CMIP6 until 2100. Oral presentation at EGU General Assembly 2025, Vienna. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu25-18525>
- Stanzel P., Kling H., Lerche F., Weis V., Ossó A. 2026. Projections of Upper Danube River discharge applying the CMIP6 climate model ensemble and a physical storyline classification. Poster presentation at EGU General Assembly 2026, Vienna. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu26-14487>
- Stanzel P., Kling H., Lerche F., Weis V., Ossó A. 2026. Auswirkungen des Klimawandels auf Gewässer – Wasserführung an der Donau. Oral presentation at „Klimawandel in der Wasserwirtschaft“, 15.4.2026, Vienna, organized by ÖWAV (Austrian Association of Water and Waste Management).

Stakeholder-Workshop:

In der Abschlussphase des Projekts wurde ein Stakeholder-Workshop durchgeführt, um zentrale Stakeholder frühzeitig und umfassend über die wichtigsten Projektergebnisse zu informieren und Rückmeldungen einzuholen. Dieses Feedback wurde bei den abschließenden Projektaktivitäten, insbesondere den finalen Analysen, der Berichterstattung und der Verbreitung der Ergebnisse, berücksichtigt.

Der Workshop fand am **19. März 2026** in einem hybriden Format statt. Die Präsenzveranstaltung wurde in den Büroräumlichkeiten von AFRY Austria in Wien abgehalten.

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

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