

Kli-Ma

Wasserspiegeloptimierung an der March unter besonderer Berücksichtigung des Klimawandels

Regionalisierte Klimastudie für die March - Ergänzung
Auswirkung des Klimawandels auf die
Wassertemperatur

Endbericht

Bestellnummer 20220044

August 2022

Ersteller
Philipp Stanzel
Herbert Weilguni
Harald Kling

Datum
17/08/2022

Telefon
+43 664 828 72 33

Project ID
1190001275

E-mail
philipp.stanzel@afry.com

Report ID
Endbericht Wassertemperatur – August 2022

Kunde
via donau

Berichtsversionen

Ver.	Status	Datum	Erstellt	Geprüft	Unterschr.
01	Entwurf	13/06/2022	PS, HW	HK	
02	Entwurf	21/06/2022	PS, HW	HK	
03	Endbericht	17/08/2022	PS, HW	HK	

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
1.1	Hintergrund und Ziele der Studie	5
1.2	Gewählte Vorgangsweise	5
2	Datensammlung und -beurteilung	7
2.1	Wassertemperatur	7
2.1.1	Hohenau.....	8
2.1.2	Dürnkrut	9
2.1.3	Angern	10
2.1.4	Baumgarten	11
2.1.5	Beurteilung der Wassertemperatur-Messdaten	11
2.2	Lufttemperatur	14
2.3	Abfluss	14
2.4	Klimaprojektionen	15
3	Statistisches Modell der Wassertemperatur.....	18
3.1	Modellkalibrierung	18
3.2	Diskussion der Modellfehler	23
3.3	Referenzsimulation 1981-2010	26
4	Wassertemperatur-Szenarien	27
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	29
6	Literatur.....	30

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Prozesse der Wärmeübertragung zwischen Wasserkörper und Umgebung (Quelle: Laszewski 2013)	6
Abbildung 2: Analyseperioden.....	6
Abbildung 3: Wassertemperatur-Messstellen an der March-Grenzstrecke (Kartenhintergrund: ehyd)	7
Abbildung 4: Station und Zulauf (gekennzeichnet) stromab der Brücke der Marchstraße	8
Abbildung 5: Station und Messung; Sandgewinnung oberhalb Messtation.....	9
Abbildung 6: Station (gekennzeichnet) unterhalb Ollersbach bzw. oberhalb Fähre Angern	10
Abbildung 7: Ollersbach und Altarm oberhalb Ollersbach	10
Abbildung 8: Erneuerte Messtation aufgrund Dükerquerung (Markierungen rechts) .	11
Abbildung 9: Vergleich der Messreihen der Tagesmittelwerte der Wassertemperatur Dürnkrot und Hohenau	12
Abbildung 10: Jahresmittel der 7:00-Wassertemperatur in Dürnkrot, 1965-2021	13
Abbildung 11: 7:00-Werte der Wassertemperatur in Dürnkrot, Auszug aus der manuellen Messung (1990-1999) und der automatischen Messung (2000-2009).....	13
Abbildung 12: Differenzen zwischen Tagesmittel und 7:00-Wert der Wassertemperatur in Dürnkrot, 2000-2021	13
Abbildung 13: Räumliche Zuordnung der verwendeten Daten aus dem Wasserbilanzmodell (Lufttemperatur aus SB14, Abfluss aus CP13 und CP16	15
Abbildung 14: Box-Plots der mittleren Temperaturänderung zwischen 2021-2050 und 1981-2010 (Mittelstrich: Median, Box: 25%-75%-Quantil; Antennen: Minimum und Maximum)	16
Abbildung 15: Mittlere monatliche Temperaturänderung in den beiden Emissionsszenarien; links: Mediane der Änderung in °C zwischen 2021-2050 und 1981-2010, rechts: Änderung in °C für den Median und einzelne Modelle in RCP8.5.	16
Abbildung 16: Simulierte mittlere Monatsabflüsse für die March bei Hohenau, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP8.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen.	17
Abbildung 17: Tägliche Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation (oben) und Abweichung zwischen beiden Reihen (unten)	20
Abbildung 18: Tägliche Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation (oben) und Abweichung zwischen beiden Reihen (unten)	20
Abbildung 19: Mittlere monatliche Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation, sowie Differenz der beiden Reihen	21

Abbildung 20: Mittlere monatliche Wassertemperatur Dürnkrut 2004-2020, Beobachtung und Simulation, sowie Differenz der beiden Reihen	21
Abbildung 21: Trend in der Zeitreihe der mittleren jährlichen Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation	22
Abbildung 22: Trend in der Zeitreihe der mittleren jährlichen Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation	22
Abbildung 23: Simulation und Beobachtung der Wassertemperatur Hohenau 2016-2020 und Vergleich mit anderen Variablen: 1.) Sonnenscheindauer (Wien), 2.) Wasserstand Nové Mlýny, 3.) Schneewasserwert (simuliert) der Subbasins SB05 und SB14, 4.) Abfluss (simuliert) der Knoten CP13 und CP16	24
Abbildung 24: Mittlere Jahreswassertemperatur in der March bei Hohenau in den Szenarien (RCP4.5 und RCP8.5) für 2021-2050; horizontale Linie: Referenzwert 1981-2010 (strichlierte Linie)	28
Abbildung 25: Mittlere Jahreswassertemperatur in der March bei Hohenau in den Szenarien (RCP4.5 und RCP8.5) für 2021-2050; horizontale Linie: Referenzwert 1981-2010	28

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Daten der Wassertemperatur	8
Tabelle 2: Modellgüte für den Vergleich simulierter und beobachteter täglicher Wassertemperatur	23
Tabelle 3: Änderung in der simulierten Wassertemperatur für die March bei Hohenau, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010	27

Abkürzungen

CORDEX	Coordinated Regional Downscaling Experiment (Klimaforschungsprogramm zur Erstellung von RCMs)
CP	Computation Point (Berechnungsknoten des hydrologischen Modells)
GCM	Global Climate Model
KGE'	Modifizierte Kling-Gupta-Efficiency
LT	Lufttemperatur
Q	Abfluss
Q _{SIM}	Simulierter Abfluss
Q _{OBS}	Beobachteter Abfluss
r ²	Bestimmtheitsmaß der Korrelation
RCM	Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathway (Emissionsszenario)
SB	Subbasin (Berechnungseinheit Teileinzugsgebiet des hyd. Modells)
WT	Wassertemperatur
WT _{SIM}	Simulierte Wassertemperatur
WT _{OBS}	Beobachtete Wassertemperatur

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Ziele der Studie

In der regionalisierten Klimastudie für die March wurden mögliche Veränderungen in der Abflussführung der March aufgrund des zukünftigen Klimawandels erarbeitet. Dafür wurden Klimamodellprojektionen zu zukünftigen Veränderungen in der Lufttemperatur und im Niederschlag in einem Wasserbilanzmodell angewendet, um Simulationen des zukünftigen Abflusses zu erhalten. Zu Veränderungen in der Wassertemperatur wurden in der regionalisierten Klimastudie keine Untersuchungen durchgeführt.

Die ermittelten Klimamodellprojektionen für das Marchinzugsgebiet sowie die hydrologischen Szenariensimulationen für die March stellen aber eine gute Grundlage zu solchen Untersuchungen zur zukünftigen Wassertemperatur dar. Ziel dieser ergänzenden Studie ist daher, auf Basis der Ergebnisse der regionalisierten Klimastudie Auswertungen zur möglichen Entwicklung der Wassertemperatur unter dem Einfluss des Klimawandels zu erstellen.

Analog zu den Auswertungen für die Abflussführung soll dabei die Veränderung zwischen der Zukunftsperiode 2021-2050 und der Referenzperiode 1981-2010 untersucht werden, nun in Bezug auf Mittelwert, Saisonalität und der langjährigen Verteilung der Wassertemperatur.

1.2 Gewählte Vorgangsweise

Grundsätzlich ergibt sich die Wassertemperatur eines Flussabschnittes aus der Bilanz des Energieaustauschs mit der Atmosphäre und dem Flussbett, zu dem die in Abbildung 1 dargestellten Prozesse beitragen. Trotz dieses relativ komplexen Zusammenspiels mehrerer physikalischer Prozesse, und des wichtigen Einflusses der Einstrahlung, weist die beobachtete Wassertemperatur eines Flussabschnittes üblicherweise eine sehr hohe Korrelation mit der Lufttemperatur der Umgebung auf (vgl. Laszewski 2013). Viele Modelle der Wassertemperatur basieren daher vor allem auf der Lufttemperatur sowie der Wasserführung des Flusses (die die Wärmekapazität des Gewässers bestimmt; z.B. Hostetler 1991, Webb und Nobilis 1994, Toffolon und Piccolroaz 2015, Gray et al. 2018).

Für die vorliegende Untersuchung liegen aus der regionalisierten Klimastudie beobachtete und simulierte Daten der Lufttemperatur sowie des Abflusses vor. Es wurde daher ein statistisches Wassertemperaturmodell erstellt, das nur diese beiden Inputvariablen benötigt.

Für die Kalibrierung dieses Regressionsmodells der Wassertemperatur wurden beobachtete Daten der Wassertemperatur in der March-Grenzstrecke herangezogen.

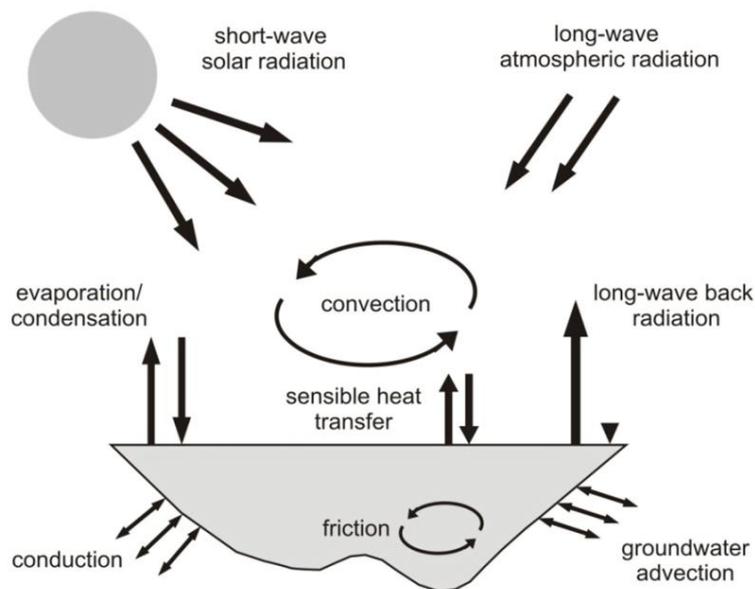


Abbildung 1: Prozesse der Wärmeübertragung zwischen Wasserkörper und Umgebung (Quelle: Laszewski 2013)

Die Vorgangsweise umfasste daher die folgenden Arbeitsschritte:

- Analyse der Beobachtungsdaten der Wassertemperatur (wobei zusätzlich eine Begehung der Messstationen durchgeführt wurde, um Unsicherheiten in der Beobachtung vor Ort zu beurteilen und mit den zuständigen Bearbeitern zu besprechen);
- Erstellung eines statistischen Modells der Wassertemperatur in der österreichisch-slowakischen Grenzstrecke der March;
- Anwendung des statistischen Modells zur Berechnung der zukünftigen Entwicklung der Wassertemperatur bis 2050
- Auswertung der Szenarien der Wassertemperatur (Veränderungen zwischen der Zukunftsperiode 2021-2050 und der Referenzperiode 1981-2010 in Bezug auf Mittelwert, Saisonalität und langjähriger Verteilung der Wassertemperatur)

Abbildung 2 zeigt, analog zur regionalisierten Klimastudie, eine Übersicht über die verschiedenen Analyseperioden. Aufgrund der Verfügbarkeit verlässlicher Wassertemperatur-Beobachtungsdaten ergab sich für das statistische Modell eine etwas kürzere Kalibrierungsperiode (2004-2020) als für das hydrologische Modell.



Abbildung 2: Analyseperioden

2 Datensammlung und -beurteilung

Für die Kalibrierung des statistischen Modells der Wassertemperatur wurden Beobachtungsdaten der Wassertemperatur sowie Daten aus dem Wasserbilanzmodell für Lufttemperatur und Abfluss verwendet.

2.1 Wassertemperatur

Von via donau wurden Beobachtungsdaten der Wassertemperatur in der March-Grenzstrecke für die vier Messstellen Hohenau, Dürnkrot, Angern und Baumgarten zur Verfügung gestellt. Die Lage der Messstellen ist in Abbildung 3 dargestellt, in Tabelle 1 sind die verfügbaren Daten aufgelistet.



Abbildung 3: Wassertemperatur-Messstellen an der March-Grenzstrecke (Kartenhintergrund: ehyd)

Tabelle 1: Verwendete Daten der Wassertemperatur

Station	Messwert	Zeitraum
Hohenau	Tagesmittel	2000-2021
Dürnkrot	7 h-Wert	1964-2021
Dürnkrot	Tagesmittel	2000-2021
Angern	Tagesmittel	2000-2021
Baumgarten	Tagesmittel	2003-2021

Da sich in einer ersten Analyse der Daten einige Unsicherheiten zeigten, wurde am 21.04.2022 eine Begehung der Stationen gemeinsam mit den für diese Messstellen und ihre Daten zuständigen Experten bei via donau (Ludwig Buxer und Wolfgang Kobath) durchgeführt. Dabei wurden Datenlücken, Abweichungen zwischen den Stationen sowie grundsätzliche Informationen zu den Stationen, ihrer technischen Ausstattung im Laufe der Jahrzehnte und die gewonnenen Messreihen besprochen. Die wichtigsten Punkte für die einzelnen Stationen sind im Folgenden angeführt.

2.1.1 Hohenau

Wassertemperatur gemessen: 10,7°C (ca. 9:40)

Wassertemperatur Station: 10,7°C (ca. 9:40)

Wassertemperatur Zulauf: 11,0°C (ca. 10:10)



Abbildung 4: Station und Zulauf (gekennzeichnet) stromab der Brücke der Marchstraße

Bei der Station Hohenau zeigt die Beobachtungsreihe bis 2003 relativ viele Lücken, was mit anfänglichen Schwierigkeiten des neuen Messgerätes ab Oktober 1999 zusammenhängt. 2018 wurde das Rohr des Sensors von Kunststoff auf Metall umgebaut, was aber zu keinen eindeutig erkennbaren Änderungen in den Daten geführt hat. Ein flussauf der Messstation gelegener Zufluss weist nur geringe Abflussführung

und eine ähnliche Wassertemperatur wie die March auf. Es wird davon ausgegangen, dass er keinen relevanten Einfluss auf die Wassertemperatur an der Messstelle hat. Von den via donau - Experten wird die Station Hohenau aufgrund der üblicherweise (und auch am Tag der Begehung) guten Übereinstimmung zwischen manuellen Kontrollmessungen und automatischen Messungen als sehr zuverlässig angesehen.

2.1.2 Dürnkrut

Wassertemperatur gemessen: 11,4°C (ca. 10:50)

Wassertemperatur Station: 11,6°C (ca. 10:50)



Abbildung 5: Station und Messung; Sandgewinnung oberhalb Messtation.

Die Station in Dürnkrut wird wie die Station Hohenau von den via donau - Experten als verlässliche Wassertemperatur-Messstelle angesehen. Üblicherweise liegt eine hohe Übereinstimmung der manuellen Kontrollmessung und der automatischen Messung vor, wobei am Tag der Messung die Station einen um 0,2°C höheren Wert anzeigte (und die Divergenz eigentlich höchstens im Bereich von 0,1°C liegen sollte).

Auch in Dürnkrut wurde 2018 das Rohr des Sensors von Kunststoff auf Metall umgebaut, auch in der Beobachtungsreihe von Dürnkrut erkennt man dabei keinen deutlichen Einschnitt.

Für Dürnkrut liegen auch Daten aus dem Zeitraum vor der Einrichtung der automatischen Messung vor, für die Periode 1964-1999. Diese Daten sind tägliche Messungen eines Beobachters, die jeweils um 7:00 Ortszeit durchgeführt wurden.

2.1.3 Angern

Wassertemperatur gemessen: 12,0°C (ca. 12:20)

Wassertemperatur Station: 10,9°C (ca. 11:20), alte Sonde (läuft noch immer mit)

Wassertemperatur Station: 10,8°C (ca. 11:20), neue Sonde



Abbildung 6: Station (gekennzeichnet) unterhalb Ollersbach bzw. oberhalb Fähre Angern



Abbildung 7: Ollersbach und Altarm oberhalb Ollersbach

Bei der Station Angern ergibt sich üblicherweise, wie am Tag der Begehung, eine deutliche Divergenz von über 1°C zwischen manueller Kontrollmessung und automatischer Messung. Durch den Zufluss des Ollersbach oder den flussauf liegenden Altarm lässt sich dieser Unterschied nicht erklären. Laut den Experten der via donau entsteht der niedrigere Messwert der automatischen Messung eventuell durch die Position der Sonde zwischen den Steinen der Uferverbauung, die zu einer zu starken Sedimentüberdeckung führen könnte. Aufgrund dieser offensichtlichen Messfehler wurden die Daten von Angern nicht in den weiteren Auswertungen berücksichtigt.

2.1.4 Baumgarten

Wassertemperatur gemessen: 11,3°C (ca. 11:40)

Wassertemperatur Station: 10,5°C (ca. 11:40)



Abbildung 8: Erneuerte Messtation aufgrund Dükerquerung (Markierungen rechts)

Die Station Baumgarten ist keine in der Wasserkreislaufserhebungsverordnung (WKEV) ausgewiesene Station, im Gegensatz zu den Stationen Hohenau, Dürnkrot und Angern, deren Daten entsprechend dieser Verordnung von via donau gesammelt und bearbeitet werden müssen. Die Station Baumgarten wurde im Zuge der Errichtung eines Gas-Dükers eingerichtet und ihre Daten werden laut den Experten der via donau nur für den internen Gebrauch, v.a. zu Vergleichszwecken verwendet.

Auch bei dieser Messstelle zeigt sich eine Divergenz zwischen automatischer und Kontrollmessung. Auch hier wird von den zuständigen Experten der via donau vermutet, dass diese Divergenz mit Anlandungen (die zum Schutz des Dükers gewünscht sind) zusammenhängt, die zu einer zu starken Überlagerung der Messsonde mit Sediment geführt haben können. Die Messungen der Wassertemperatur der Station Baumgarten wurden daher in den weiteren Auswertungen nicht verwendet.

2.1.5 Beurteilung der Wassertemperatur-Messdaten

Aufgrund der Informationen zu den Messdaten der Stationen, die bei der Begehung mit den Experten der via donau besprochen wurden, erfolgte eine weitere Analyse der Daten nur für die Messungen der Stationen Hohenau und Dürnkrot.

Der Vergleich der beiden Zeitreihen Dürnkrot und Hohenau (Abbildung 9) zeigt anfänglich relativ deutliche Differenzen, die um 2009 geringer werden und mit dem Beginn des Jahres 2018 einen neuerlichen Sprung aufweisen. Dieser Sprung 2018 fällt zeitlich mit dem Umbau der Rohre von Kunststoff auf Metall zusammen.

Die Tatsache, dass die automatische Messung bei Dürnkrot bei der Besichtigung etwas höher als die manuelle war, könnte darauf hindeuten, dass die automatischen

Beobachtungen der letzten Jahre (die bei Dürnkrot seit 2018, im Gegensatz zu den vorangegangenen Jahren, geringfügig wärmer als bei Hohenau sind) etwas zu hoch liegen.

Insgesamt sind trotz der erkennbaren Inhomogenitäten beide Messreihen sehr ähnlich und werden auch beide von den via donau - Experten als verlässlich eingeschätzt. Da nur aufgrund der Datenanalyse nicht beurteilt werden konnte, welche der beiden Beobachtungsreihen die höhere Qualität aufweist, wurden beide Zeitreihen der automatischen Messung der Wassertemperatur der Stationen Dürnkrot und Hohenau für die Erstellung des statistischen Modells herangezogen.

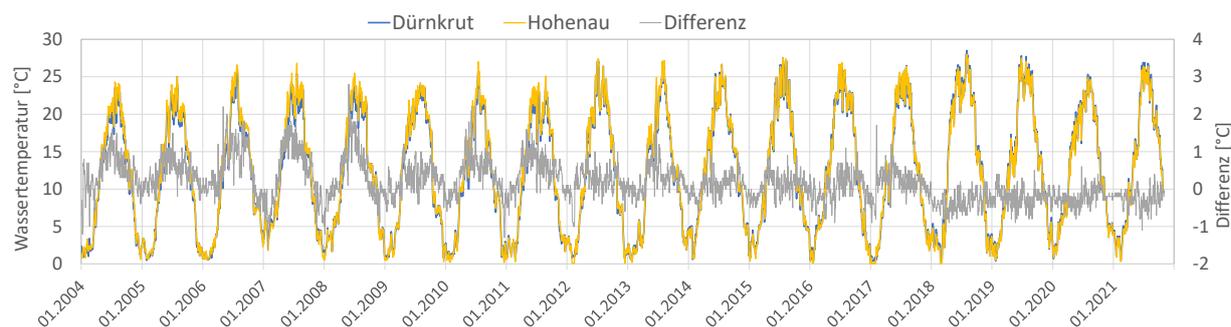


Abbildung 9: Vergleich der Messreihen der Tagesmittelwerte der Wassertemperatur Dürnkrot und Hohenau

Die manuellen 7:00-Beobachtungsdaten der Station Dürnkrot ab 1964 wären aufgrund des langen Beobachtungszeitraums ebenfalls eine gute Grundlage für die Kalibrierung eines Modells. Zur Beurteilung dieser Reihe wurden die 7:00-Werte der kontinuierlichen Messung ab 2000 verwendet, sodass sich eine vollständige Reihe von 7:00 Werten von 1965-2021 ergab (Reihe der Jahresmittel in Abbildung 10). Diese Reihe zeigt zwar eindrucksvoll den Trend der ansteigenden Wassertemperatur seit den 1960er-Jahren, enthält aber auch Brüche und Unsicherheiten. Die 7:00-Werte der kontinuierlichen Messung ab 2000 zeigen z.B. deutlich höhere Winterminima als die händisch gemessenen 7:00-Werte der Jahre 1964-1999 (siehe exemplarische Darstellung der letzten 10 Jahre der manuellen Messung und der ersten 10 Jahre der 7:00-Werte aus der automatischen Messung in Abbildung 11). Insgesamt weist die Reihe 1964-1999 eine sehr hohe Variabilität und mehrfach Perioden mit fragwürdigen Daten (v.a. im Winter) auf.

Der Vergleich der 7:00-Werte mit den Tagesmittelwerten für die Periode 2000-2021 zeigte auch, wie stark der Unterschied zwischen diesen beiden Werten saisonal schwankt (Abbildung 12): von wenigen Zentigraden im Winter bis zu über 1.5°C in heißen Sommern.

Aufgrund dieses saisonal deutlich variierenden Verhältnisses zum Tagesmittelwert der Wassertemperatur und der Unsicherheiten sowohl innerhalb der Reihe 1964-1999 als

auch im Übergang zur Reihe der 7:00-Werte ab 2000 wurde entschieden, diese lange Beobachtungsreihe für die weitere Auswertung nicht heranzuziehen.

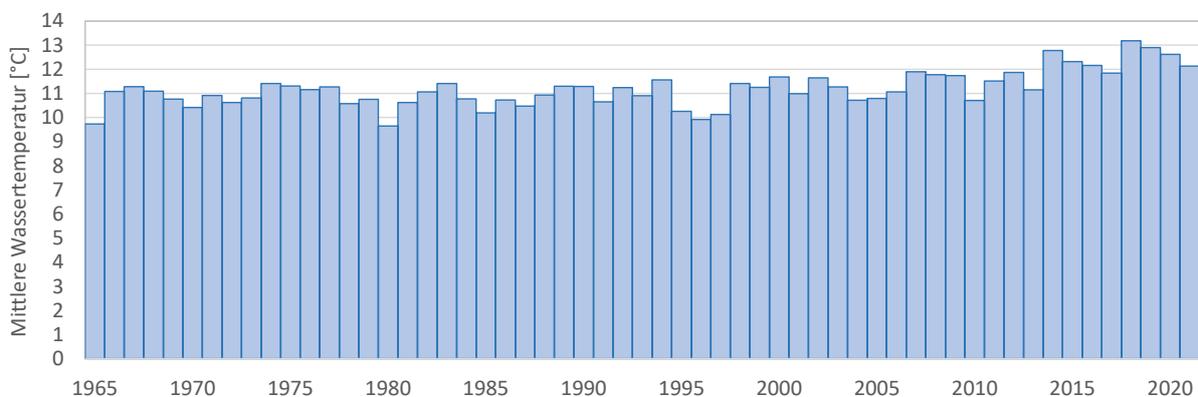


Abbildung 10: Jahresmittel der 7:00-Wassertemperatur in Dürnkrot, 1965-2021

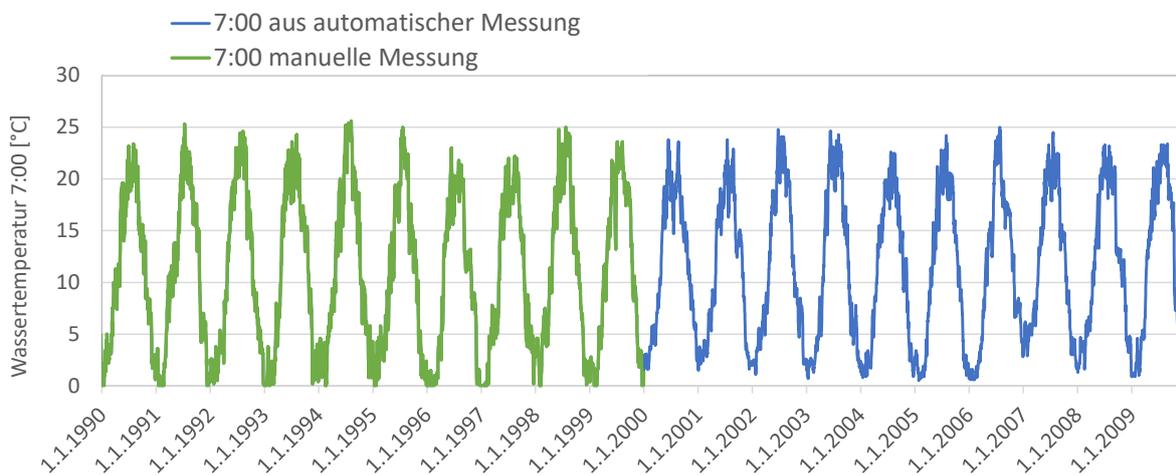


Abbildung 11: 7:00-Werte der Wassertemperatur in Dürnkrot, Auszug aus der manuellen Messung (1990-1999) und der automatischen Messung (2000-2009)

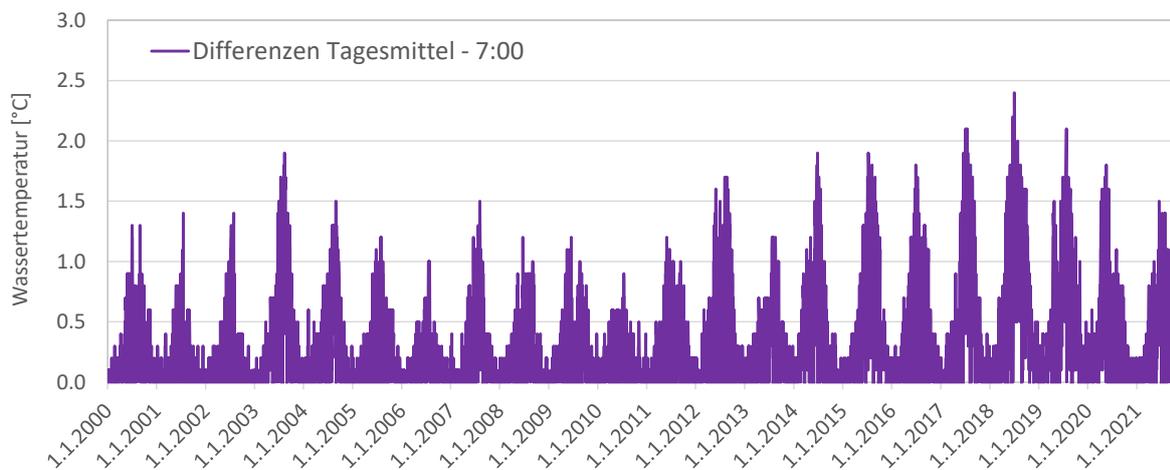


Abbildung 12: Differenzen zwischen Tagesmittel und 7:00-Wert der Wassertemperatur in Dürnkrot, 2000-2021

2.2 Lufttemperatur

Als Daten der Lufttemperatur wurden die Inputdaten des Wasserbilanzmodells verwendet. Diese beruhen für die historische Periode auf einer Regionalisierung von acht Stationen unter Berücksichtigung der Seehöhe (siehe Bericht regionalisierte Klimastudie). Für die Kalibrierung des statistischen Modells der Wassertemperatur wurden die Eingangsdaten der Lufttemperatur für verschiedene räumliche Skalen getestet (gesamtes Einzugsgebiet, mehrere Teileinzugsgebiete, einzelne Teileinzugsgebiete). Schließlich wurde die Lufttemperatur des Teileinzugsgebiets 14 (SB 14 in Abbildung 13) verwendet. Bei diesen Tests zeigte sich ein nur sehr geringer Einfluss der Wahl der räumlichen Zuordnung der Lufttemperatur. Es wurden daher die Daten nur eines Teileinzugsgebiets gewählt, und zwar jenes, das unmittelbar flussauf der Messstelle Hohenau liegt.

2.3 Abfluss

Als Abflussdaten wurden die Simulationsergebnisse des Wasserbilanzmodells für die March herangezogen. Da auch die Zukunftsszenarien nur mit simuliertem Abfluss gerechnet werden können, wurden für die Kalibrierung des Wassertemperaturmodells ebenfalls die Simulationen des Abflusses herangezogen, mit dem Ziel, homogene Inputdaten für die Perioden der Kalibrierung sowie der Szenarienrechnung anzuwenden. In der Kalibrierung des statistischen Modells der Wassertemperatur wurden als Eingangsdaten des Abflusses die Daten verschiedener Modellknoten getestet (Gesamtabfluss der March bei CP 14 Hohenau oder Zuflüsse Dyje@Ladná und Morava@Lanzhot, siehe Abbildung 13). Schließlich wurde der Abfluss beider Zuflüsse verwendet (CP13 bei Ladná und CP16 bei Lanzhot).

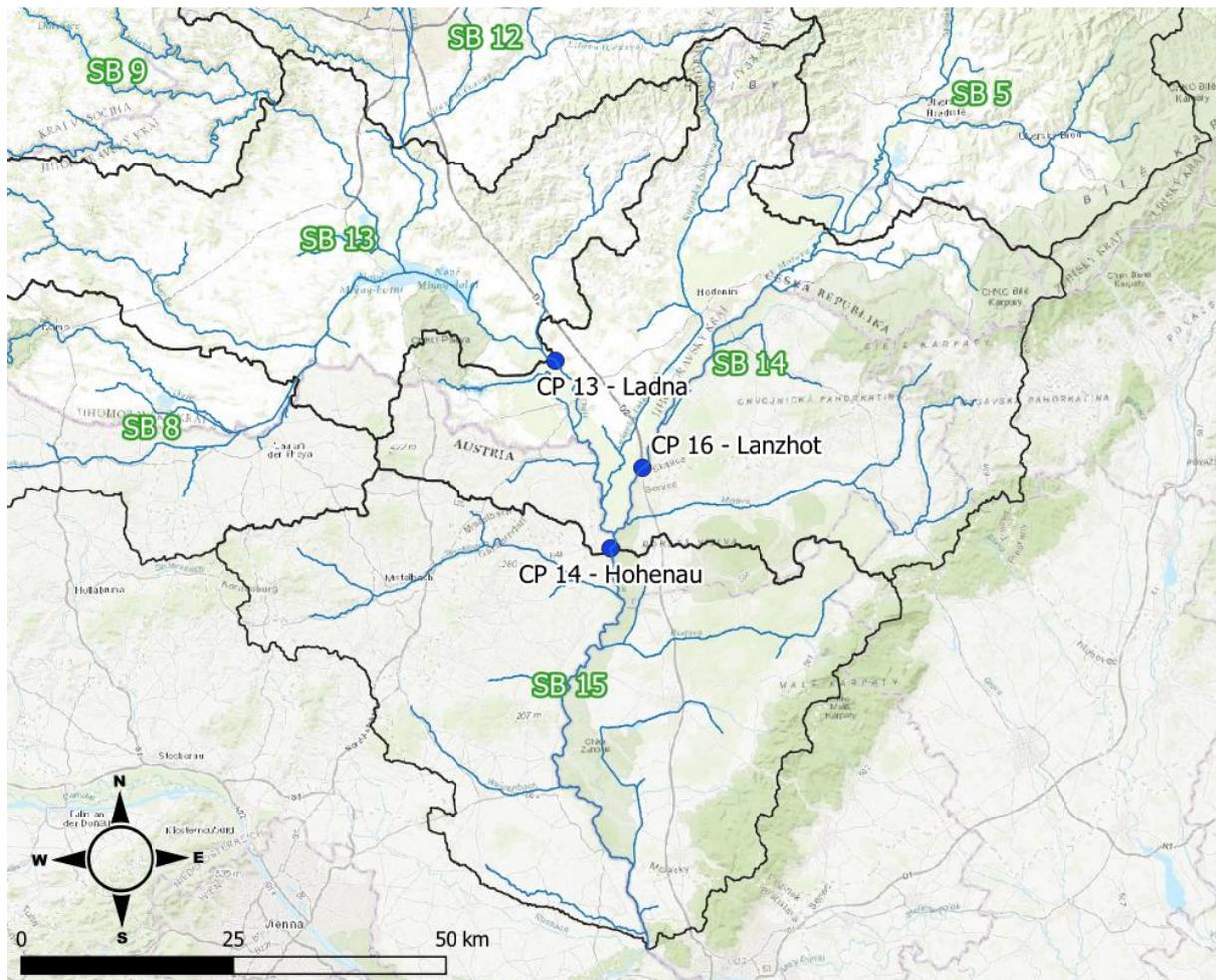


Abbildung 13: Räumliche Zuordnung der verwendeten Daten aus dem Wasserbilanzmodell (Lufttemperatur aus SB14, Abfluss aus CP13 und CP16)

2.4 Klimaprojektionen

Als Eingangsdaten für die Zukunftsszenarien unter dem Einfluss des Klimawandels wurden die Zeitreihen der Lufttemperatur und des Abflusses aus der Modellierung mit dem Wasserbilanzmodell herangezogen. Diese beruhen auf 32 Klimaprojektionen des EURO-CORDEX Modell-Ensembles (Jacob et al. 2014, 16 Klimamodell-Kombinationen aus GCM und RCM, mit jeweils zwei Simulationsläufen für die beiden Emissionsszenarien RCP4.5 und RCP8.5, eine ausführlichere Erläuterung findet sich im Endbericht der regionalisierten Klimastudie).

Die Änderungen in der mittleren jährlichen Lufttemperatur in diesen Emissionsszenarien sind in Abbildung 14 dargestellt, mit Medianwerten von 1.0°C und 1.1°C Erwärmung und einer Bandbreite der Ergebnisse einzelner Modelle von rund 1.2 °C. Die 25%-

Quantil-Werte liegen bei einer Erwärmung von 0.8°C und 0.9°C, die 75%-Quantil-Werte bei 1.1°C und 1.4°C.

Für die Wassertemperatur besonders relevant ist, dass die Änderungssignale für das Marchgebiet keine sehr deutlichen saisonalen Variationen aufweisen (Abbildung 15), mit Schwankungen der Medianwerte von weniger als einem halben Grad um den Jahresmittelwert (Abbildung 15 links), und etwas stärkeren, aber nicht systematischen saisonalen Schwankungen der einzelnen Modelle (Abbildung 15 rechts für RCP8.5). Für andere Regionen Europas zeigen Klimamodellprojektionen deutlich stärkere Anstiege der Lufttemperatur im Sommer, was dann auch besonders starke Wassererwärmung im Sommer zur Folge hat.

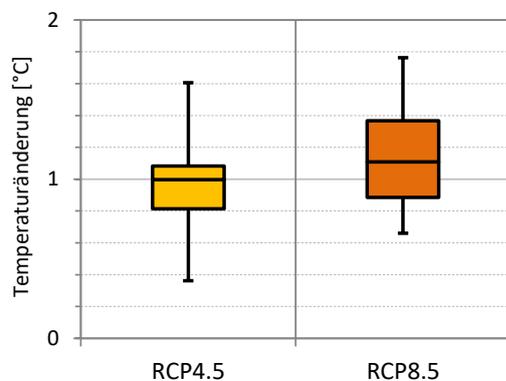


Abbildung 14: Box-Plots der mittleren Temperaturänderung zwischen 2021-2050 und 1981-2010 (Mittelstrich: Median, Box: 25%-75%-Quantil; Antennen: Minimum und Maximum)

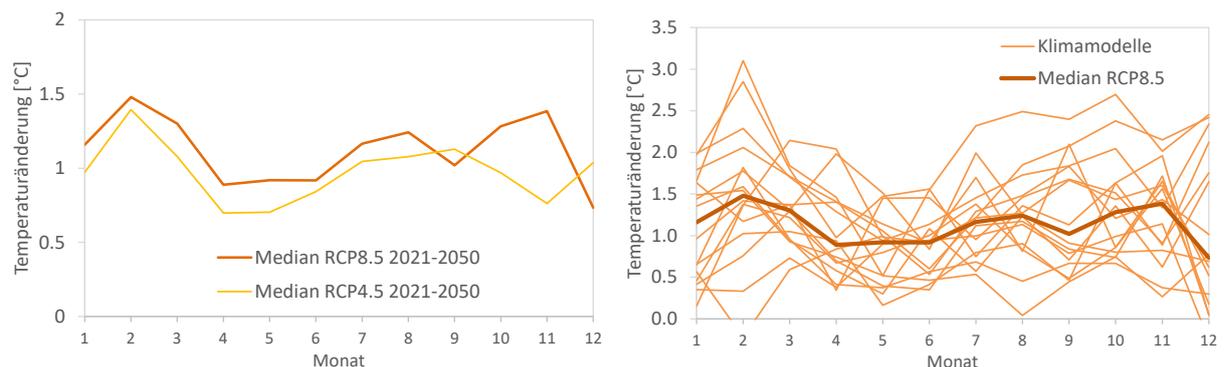


Abbildung 15: Mittlere monatliche Temperaturänderung in den beiden Emissionsszenarien; links: Mediane der Änderung in °C zwischen 2021-2050 und 1981-2010, rechts: Änderung in °C für den Median und einzelne Modelle in RCP8.5.

Die simulierten Änderungen in der Abflussführung in den Zukunftsszenarien sind exemplarisch für Hohenau und das Emissionsszenario RCP8.5 dargestellt (Eingangsdaten für das Wassertemperatur-Modell waren die simulierten Abflüsse für die unmittelbar flussauf liegenden Pegel Ladná (Dyje) und Lanžhot (obere March/Morava)). Die deutlichste Änderung ist der Anstieg des Winterabflusses in den Klimaprojektionen.

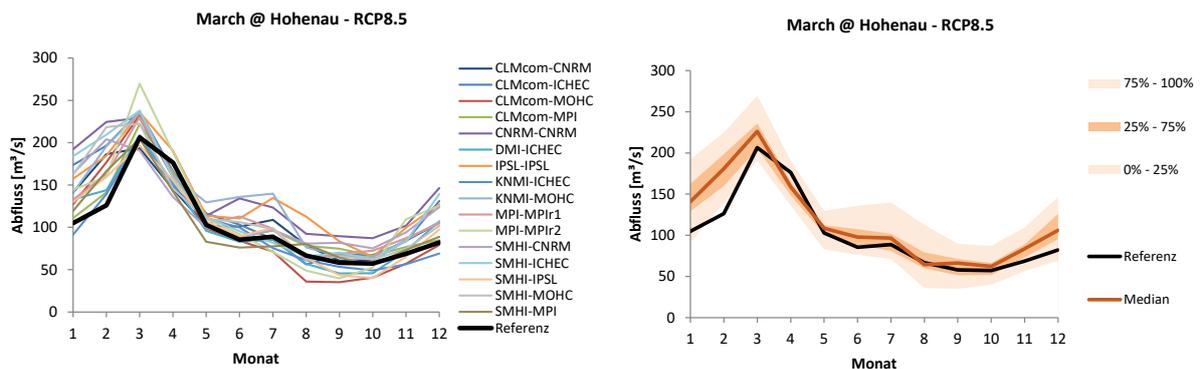


Abbildung 16: Simulierte mittlere Monatsabflüsse für die March bei Hohenau, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP8.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen.

3 Statistisches Modell der Wassertemperatur

Das statistische Modell der Wassertemperatur basiert auf einem Ansatz von Hostetler (1991, in Webb und Nobilis 1994). Diese ursprünglich für monatliche Zeitschritte angewandte multiple Regression berücksichtigt die Lufttemperatur, die Abflussführung sowie die simulierte Wassertemperatur des Vortages. Die Berechnungsformel kann wie folgt angeschrieben werden:

$$WT_t = B_0 + B_1 \cdot Q_t + B_2 \cdot LT_t + B_3 \cdot WT_{t-1}$$

mit	B0 - B3	zu kalibrierende Faktoren
	WT	Wassertemperatur (berechnet)
	Q	Abfluss (beobachtet)
	LT	Lufttemperatur (beobachtet)
	t, t-1	Zeitschritt, vorangegangener Zeitschritt

Im Zuge der Modellkalibrierung wurden auch etwas abgewandelte Formulierungen dieser Berechnungsformel getestet, so z.B.:

- zusätzliche Berücksichtigung der Lufttemperatur des vorangegangenen Zeitschritts;
- Berücksichtigung von zwei Abfluss-Variablen statt einer (Dyje und Morava statt gesamter March, wie dann auch schließlich angewendet);
- getrennte Berechnung der Wassertemperatur für Dyje und Morava, wobei die beiden Zubringer entsprechend ihrer Abflussführung gewichtet wurden.

Die abschließend angewendete Formel wird im folgenden Kapitel zur Kalibrierung angeführt.

3.1 Modellkalibrierung

Für die Modellkalibrierung wurden Wassertemperatur-Daten der Messstationen Dürnkrot (2000-2020) und Hohenau (2004-2020) herangezogen. Bei Hohenau wurden die Jahre 2000-2003 aufgrund der relativ großen Zahl an Datenlücken nicht verwendet. Das Jahr 2021 wurde trotz Verfügbarkeit der Wassertemperaturdaten nicht herangezogen, weil dafür die Daten aus dem Wasserbilanzmodell (Lufttemperatur und Abfluss) nicht mehr auf Beobachtungsdaten, sondern schon auf Klimamodellsimulationen beruhen.

Wie bereits beschrieben, wurden verschiedene Inputdaten getestet (räumliche Zuordnung, Zeitschritt). Die abschließende Parameteroptimierung erfolgte für ein Modell mit Lufttemperaturinput desselben Tages des Subbasin SB14 und Abflussinput der beiden Knoten CP13 (Ladná) und CP16 (Lanzhot). Zusätzlich wurde ein Minimum-Kriterium eingefügt (d.h. eine minimale Wassertemperatur, die sich ergeben darf). Die

Parameteroptimierung erfolgte grundsätzlich automatisch (mit der GRG-Nichtlinear-Funktion des Excel-Solver und dem KGE'-Gütekriterium als Zielfunktion), wobei zusätzlich manuelle Anpassungen der berechneten Parameter durchgeführt wurden, um eine möglichst geringe Abweichung im langjährigen Mittel, eine gute Simulation des saisonalen Wassertemperaturverlaufs sowie gute Abbildung des historischen Trends zu erzielen. Eine etwas bessere Modellanpassung ergab sich mit den Beobachtungswerten für Hohenau (siehe Tabelle 2).

Die Formel mit den kalibrierten Parametern lautet wie folgt:

$$WT_t = 0.268 + 0.0002 \cdot Q_{13,t} - 0.00116 \cdot Q_{16,t} + 0.1837 \cdot LT_t + 0.83 \cdot WT_{t-1}$$

Die kalibrierten Parameter zeigen an, dass einerseits die Wassertemperatur weitestgehend durch die Lufttemperatur beschrieben werden kann, und andererseits die Wassertemperatur eine starke Autokorrelations-Komponente hat (die sich in der stark gedämpften Variabilität der Wassertemperatur gegenüber der Lufttemperatur widerspiegelt.)

Die folgenden Grafiken zeigen Simulation und Beobachtung der Wassertemperatur in Tagesschritten sowie die dazugehörigen Fehler (Abbildung 17 für Hohenau und Abbildung 18 für Dürnkrut), den mittleren saisonalen Verlauf (Abbildung 19 für Hohenau und Abbildung 20 für Dürnkrut) und die Jahresmittelwerte und den langjährigen Trend (Abbildung 21 für Hohenau und Abbildung 22 für Dürnkrut).

Die Abbildung der kontinuierlichen Simulation der Tageswerte zeigt die sehr gute Anpassung des statistischen Modells. Die Darstellung der Fehlerwerte zeigt, dass diese im Allgemeinen klein sind, für einzelne Tage aber auch höhere Werte über 2°C erreichen können.

Für Hohenau (Abbildung 17) zeigt sich keine ausgeprägte systematische Abweichung und auch kein Trend in den Fehlern. In einigen Jahren ergibt sich im Frühling eine leichte Tendenz zur Unterschätzung und im Sommer eine leichte Tendenz zur Überschätzung. Diese Abweichungen führen auch zu geringen Differenzen zwischen den langjährigen simulierten und beobachteten Monatsmittelwerten (Abbildung 19), mit einer geringfügigen Unterschätzung der Frühjahrstemperatur und einer (kaum erkennbaren) Überschätzung der Wassertemperatur im August.

Für Perioden mit länger andauernden größeren Abweichungen (Sommer 2016, Frühling 2018, Frühling 2020) wurde, im Vergleich mit sehr gut abgebildeten Perioden (Sommerhalbjahr 2017, Sommer 2018), nach möglichen Erklärungen für diese Abweichungen gesucht, wie im folgenden Kapitel 3.2 erläutert ist.

Für Dürnkrut (Abbildung 18) zeigt sich ein Trend in den Fehlern, wobei die simulierte Wassertemperatur am Beginn der Zeitreihe überwiegend Überschätzungen aufweist und am Ende überwiegend Unterschätzungen. Dieser Trend im Fehler spiegelt den Trend

der Abweichungen zwischen Dürnkrot und Hohenau wieder (siehe Abbildung 9 in Kapitel 2.1.5). Die Tatsache, dass das Modell der Wassertemperatur die Beobachtungen bei Hohenau besser und konsistenter abbilden kann, spricht für die etwas höhere Qualität und Homogenität der Beobachtungsreihe bei Hohenau.

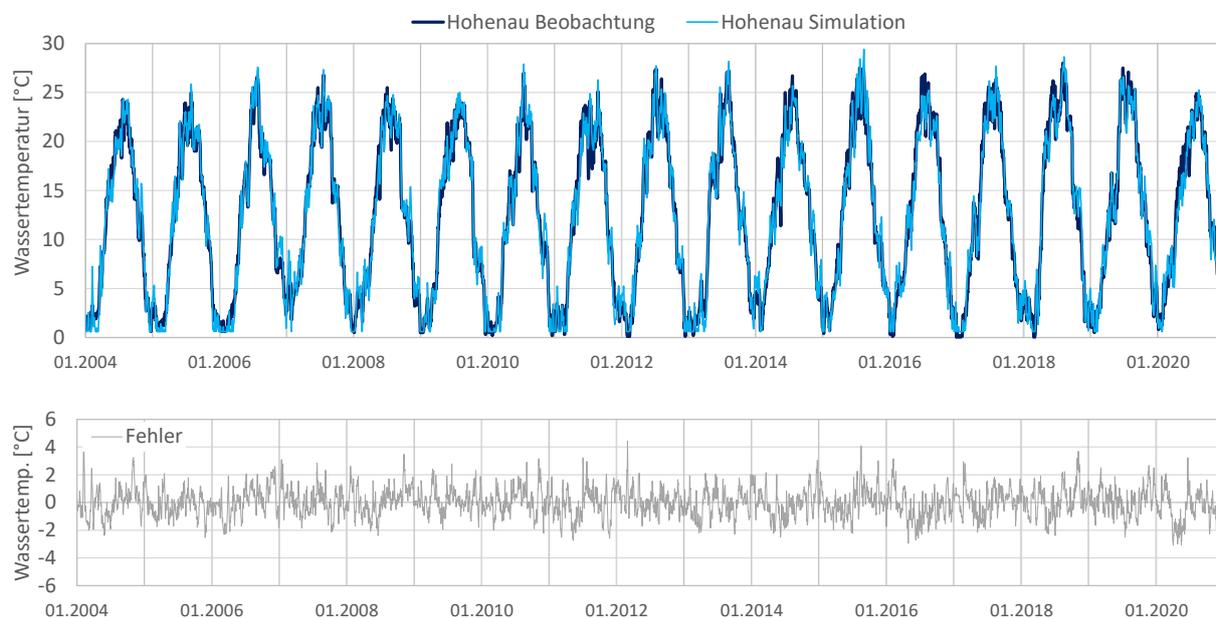


Abbildung 17: Tägliche Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation (oben) und Abweichung zwischen beiden Reihen (unten)

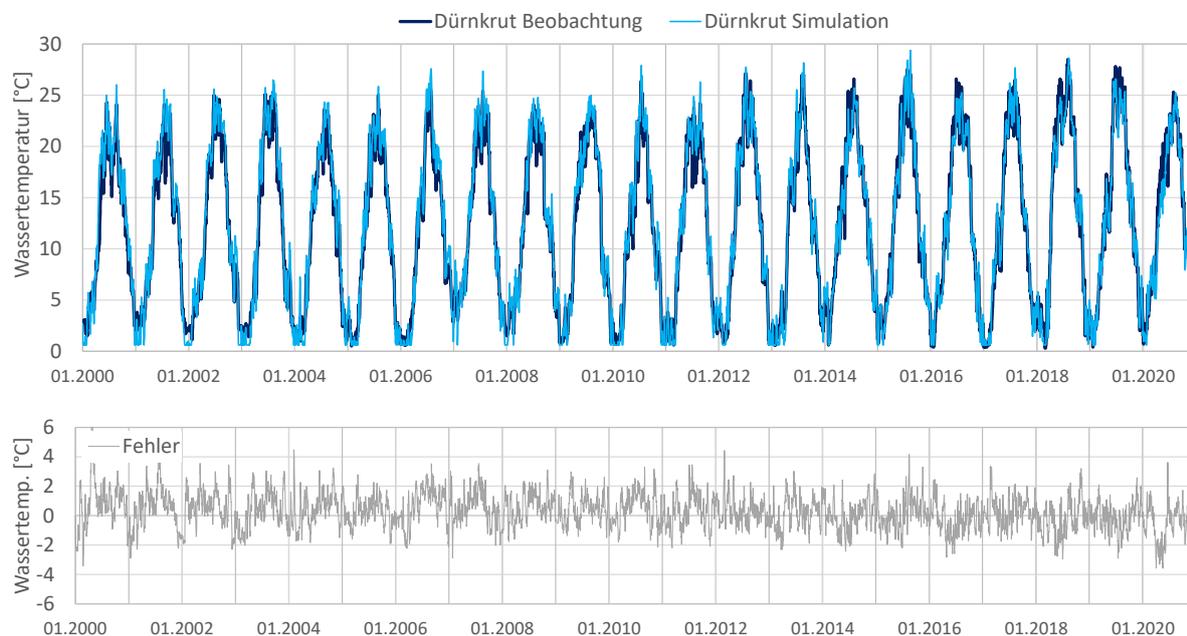


Abbildung 18: Tägliche Wassertemperatur Dürnkrot 2000-2020, Beobachtung und Simulation (oben) und Abweichung zwischen beiden Reihen (unten)

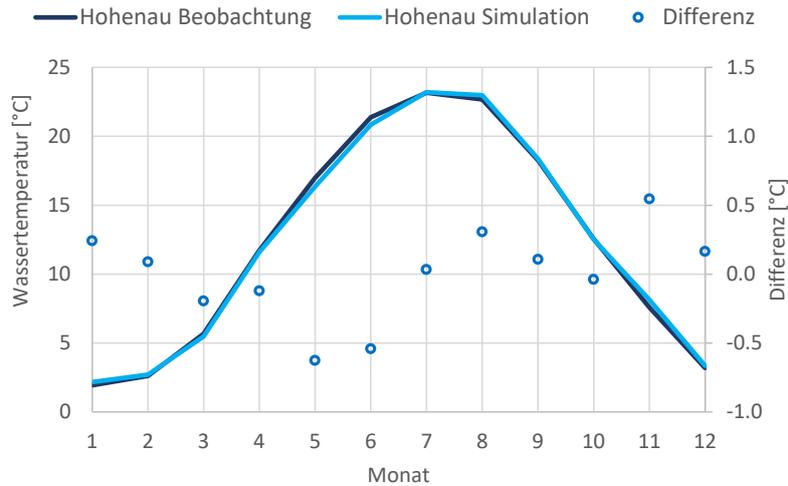


Abbildung 19: Mittlere monatliche Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation, sowie Differenz der beiden Reihen

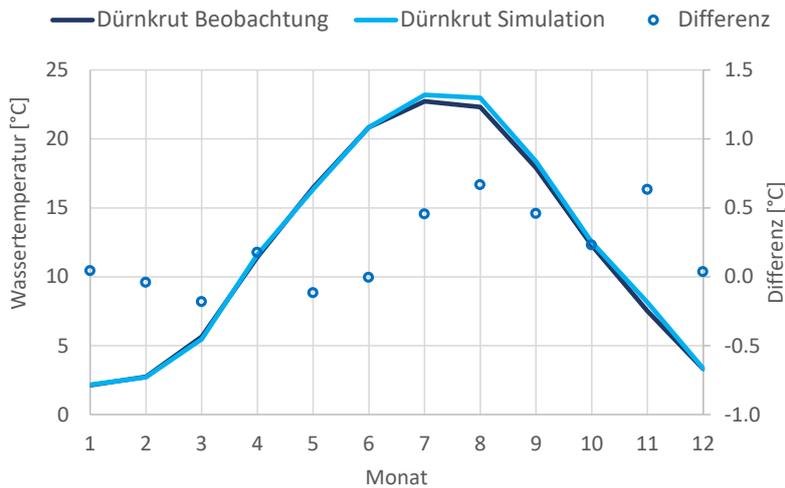


Abbildung 20: Mittlere monatliche Wassertemperatur Dürnkrot 2004-2020, Beobachtung und Simulation, sowie Differenz der beiden Reihen

Die Abweichungen in den mittleren Monatswerten zeigen für Dürnkrot (Abbildung 20) dasselbe Muster wie für Hohenau, nur mit einer insgesamt etwas höheren Simulation, sodass für Dürnkrot keine Unterschätzung im Frühjahr, aber dafür eine etwas höher Überschätzung im Sommer auftritt.

Die Abbildung der Jahresmittel und des Trends für Hohenau in Abbildung 21 zeigt, dass sowohl die inter-annuale Variabilität in der Wassertemperatur als auch ihre langfristige langsame Zunahme im Modell sehr gut abgebildet werden. Für Dürnkrot (Abbildung 22) führt der bereits gezeigte Trend in den Fehlern zu einer schlechteren Abbildung der beobachteten langfristigen Erwärmung in der Simulation.

Aufgrund der sehr guten Simulation des langfristigen Trends für Hohenau, und der bereits diskutierten Trends und Sprünge in den Beobachtungen in Dürnkrot, wird davon ausgegangen, dass der tatsächliche Trend der Wassertemperatur in den Messwerten der Station Hohenau besser abgebildet ist. Auf der Grundlage dieser Einschätzung wird auch die Simulation des Trends in der Wassertemperatur, d.h. der langfristigen Erwärmung, als erfolgreich beurteilt.

Tabelle 2 zeigt einige Gütekriterien der Anpassung für Hohenau und Dürnkrot und bestätigt die Beurteilung der sehr hohen Modellgüte, vor allem für die Messstelle bei Hohenau.

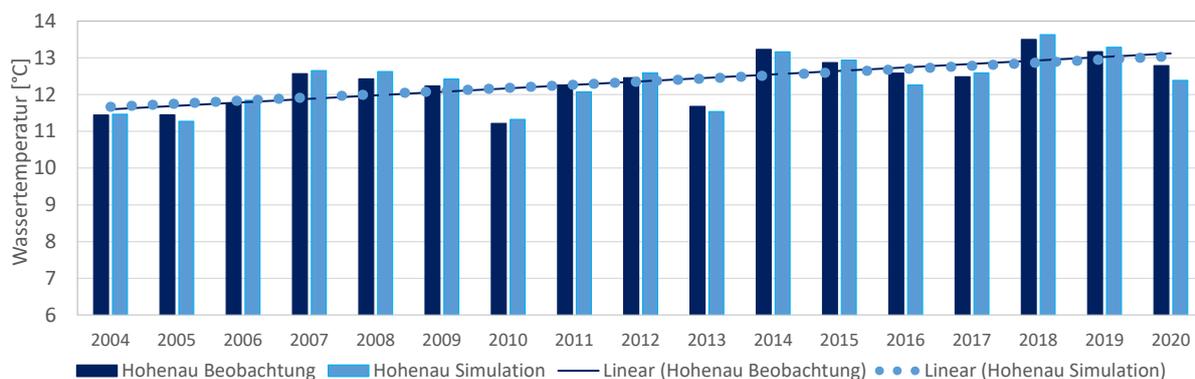


Abbildung 21: Trend in der Zeitreihe der mittleren jährlichen Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation

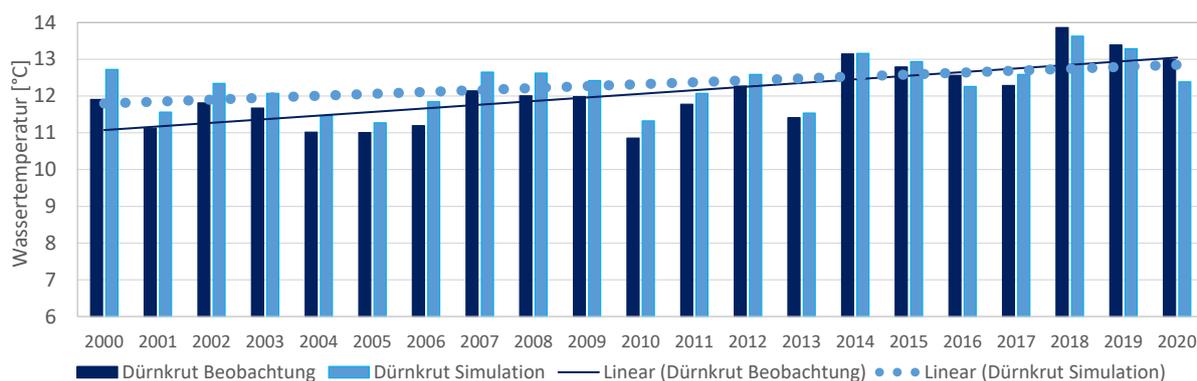


Abbildung 22: Trend in der Zeitreihe der mittleren jährlichen Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation

Tabelle 2: Modellgüte für den Vergleich simulierter und beobachteter täglicher Wassertemperatur

	Hohenau (2004-2020)	Dürnkrut (2000-2020)
Bias (°C)	0.00	0.26
Korrelation	0.992	0.990
r ²	0.984	0.980
KGE'	0.992	0.971

3.2 Diskussion der Modellfehler

Aufgrund der für die Wassertemperatur-Klimawandelstudie gewählten Vorgangsweise, können neben den Lufttemperatur- sowie Abflussdaten aus den Simulationen des Wasserbilanzmodells keine weiteren Variablen in das statistische Modell einbezogen werden. Da sich in der Simulation der Wassertemperatur aber einige Perioden mit etwas schlechteren Simulationsergebnissen zeigten (z.B. Sommer 2016, Frühling und Sommer 2018, Frühling 2020), wurde untersucht, ob andere Variablen diese Abweichungen erklären können. Dabei wurden die folgenden Größen berücksichtigt:

- Sonnenscheindauer (Daten nur für Wien und in Monatsschritten verfügbar), als zusätzliche Information zur Einstrahlung (allerdings ist die Einstrahlung in Form der von ihr teilweise abhängigen Lufttemperatur ohnehin bereits in der Formel berücksichtigt);
- der Wasserstand in Nové Mlýny, als zusätzliche Information zu höheren Abgaben aus dem Speicher, die eine andere Wassertemperatur aufweisen könnten als die natürlichen Zuflüsse (da die Entnahme unterhalb der Seeoberfläche erfolgt, kann erwartet werden, dass das abgegebene Wasser im Sommer etwas kühler ist als natürliche Zuflüsse);
- Schneewasserwerte aus dem unmittelbar oberhalb Hohenau liegenden Subbasin (SB14) sowie aus einem höhergelegenen Subbasin (SB05), da in alpinen Flüssen Perioden starker Schneeschmelze eine niedrigere Wassertemperatur bewirken.

Die Analyse erfolgte anhand der graphischen Darstellungen der Jahre 2016-2020, die die genannten Perioden mit größeren Abweichungen, aber auch Perioden mit sehr guter Simulation (Sommerhalbjahr 2017, Sommerhalbjahr 2019) umfassen. Abbildung 23 zeigt diese Darstellungen sowie zusätzlich eine Darstellung mit dem Abfluss der Knoten CP16 und CP13 (diese sind als Inputdaten in der Simulation enthalten, aber könnten trotzdem für bestimmte Perioden einen besseren Erklärungswert als für den gesamten Kalibrierzeitraum aufweisen).

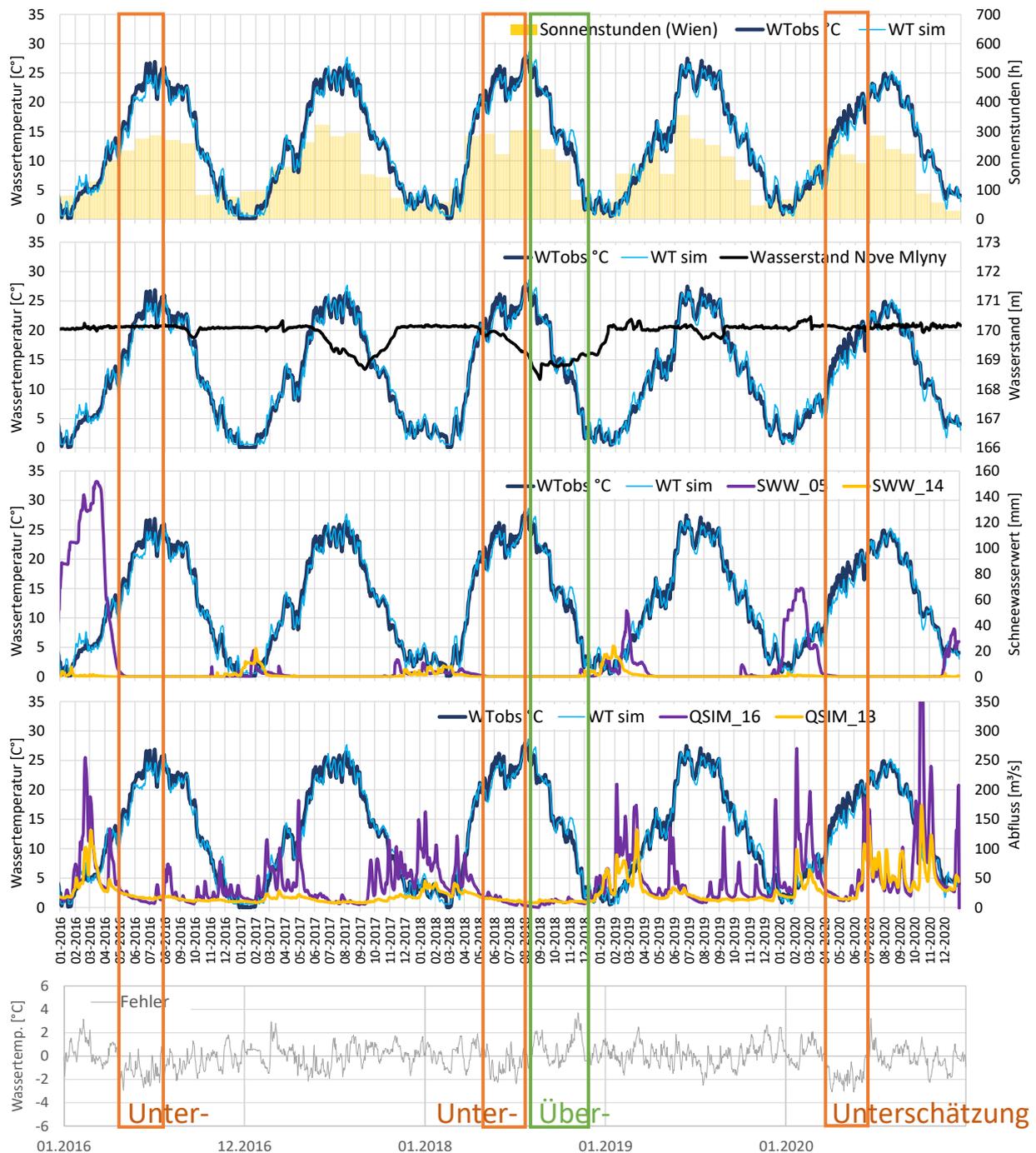


Abbildung 23: Simulation und Beobachtung der Wassertemperatur Hohenau 2016-2020 und Vergleich mit anderen Variablen: 1.) Sonnenscheindauer (Wien), 2.) Wasserstand Nové Mlýny, 3.) Schneewasserwert (simuliert) der Subbasins SB05 und SB14, 4.) Abfluss (simuliert) der Knoten CP13 und CP16

Insgesamt bringt keine der dargestellten Variablen eine Erklärung für die spezifischen Abweichungen im Sommer 2016 (Unterschätzung), Frühling 2018 (Unterschätzung), Sommer 2018 (Überschätzung) und Frühling 2020 (Unterschätzung).

Die monatliche Sonnenscheindauer ist z.B. im Frühjahr 2016 und 2018 tatsächlich relativ hoch und könnte für diese Perioden die Unterschätzung der Wassertemperatur nur aufgrund der Lufttemperatur erklären. Im Frühling 2020 ist die Sonnenscheindauer allerdings relativ gering, und auch hier tritt eine deutliche Unterschätzung auf. Allerdings lagen für diese Untersuchung nur Daten aus Wien vor, die über die Einstrahlung im Gebiet um Hohenau vermutlich nur bedingt aussagekräftig sind.

Mit dem Wasserstand in Nové Mlýny, der bei deutlichem Rückgang anzeigt, dass mehr (tendenziell kühleres) Wasser aus dem Speicher abgegeben wird als zufließt, zeigt sich überhaupt kein zeitlicher Zusammenhang mit Abweichungen in der Simulation der Wassertemperatur.

Die Schneespeicherung im Subbasin 14 weist nur ganz geringe Werte auf, und die Schneeschmelze ist dort bereits mehrere Wochen vor den genannten Perioden der Abweichung abgeschlossen. Die Schneespeicherung in Subbasin 05 zeigt relevante Volumina, aber auch hier fallen Jahre mit starker Schneeschmelze (2016 und 2020) nicht mit den zu erwartenden niedrigeren beobachteten Wassertemperaturen zusammen (im Jahr 2020 ist sogar, im Gegenteil, die Wassertemperatur im Frühling höher als durch das Modell berechnet).

Die Zuflüsse aus Thaya/Dyje und Morava/oberer March zeigen auch kein geeignetes Erklärungsmuster für die Abweichungen. In den Sommerhalbjahren 2016-2019 waren diese grundsätzlich sehr niedrig. Im Sommer 2020 waren die Zuflüsse dann deutlich höher, aber erst nach der Periode der Unterschätzung, während des Sommers, für den die Wassertemperatur im Modell sehr gut abgebildet ist.

Die hier dargestellte kurze Untersuchung möglicher Erklärungen der genannten Abweichungen der simulierten von der beobachteten Wassertemperatur konnte also keine Hinweise auf fehlende Informationen im Regressionsmodell liefern. Den deutlichsten Einfluss könnten lokale Abweichungen in der Lufttemperatur haben, die in den Eingangsdaten des Wasserbilanzmodells aus wenigen Stationen über eine Höhenregression regionalisiert wurde – zur Untersuchung dieses Einflusses lagen in dieser Studie aber keine zusätzlichen lokalen Beobachtungen vor.

Eine noch detailliertere Untersuchung der historischen Beobachtungen der Wassertemperatur und spezifischer wärmerer und kühlerer Perioden in Zusammenhang mit möglichen Einflussfaktoren geht über den Rahmen dieser Klimafolgenstudie hinaus.

Die Abweichungen des Wassertemperaturmodells sind insgesamt sehr niedrig und der geringe saisonal systematische Fehler kann zu einem Großteil auf die in diesem Kapitel dargestellten Perioden zurückgeführt werden. Das statistische Modell wird daher trotz dieser Abweichungen als sehr gut angepasst angesehen und kann für die Szenariensimulationen angewendet werden.

3.3 Referenzsimulation 1981-2010

Zur Berechnung der Referenzzeitreihe 1981-2010 – für den Vergleich mit der Szenariensimulation für 2021-2050 – wurde das Wassertemperaturmodell mit den Eingangsdaten aus dem Wasserbilanzmodell (Inputdaten Lufttemperatur und Simulationsergebnis Abfluss) angetrieben. Die simulierte mittlere Wassertemperatur der Periode 1981-2010 betrug 11.6°C.

4 Wassertemperatur-Szenarien

Die Simulation der Zukunftsszenarien der Wassertemperatur für die 32 Klimaszenarien in den beiden Emissionsszenarien ergab die in Tabelle 3 angeführten Jahresmittelwerte der Wassertemperatur bzw. die entsprechenden Änderungssignale zur Referenzperiode 1981-2010. Die graphische Darstellung der Verteilung der Jahresmittel zeigt Abbildung 24. Der Median der Änderungen für RCP4.5 liegt bei 0.9°C, auf einen Mittelwert von 12.6°C, und für RCP8.5 bei 1.0°C auf 12.7°C. Der Anstieg der Lufttemperatur folgt damit ganz eng dem Anstieg der Wassertemperatur. Zu beachten ist dabei, wie bei der Lufttemperatur, dass diese Änderungssignale sich auf den Mittelwert von 11.6°C der Periode 1981-2010 beziehen. Der Mittelwert der Beobachtung 2004-2010 in Hohenau (sowie der Simulation für diese Periode) betrug aufgrund der sehr warmen 2010er-Jahre bereits 12.4°C.

In der saisonalen Verteilung zeigt sich ein etwas anderes Bild als bei der Lufttemperatur (Abbildung 25). Während der höchste Anstieg der Lufttemperatur in den Projektionen im Winter auftritt, erfolgt er in der Wassertemperatur im Sommer.

Tabelle 3: Änderung in der simulierten Wassertemperatur für die March bei Hohenau, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010

RCM	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 4.5	RCP 8.5
	[°C] WT	[°C] WT	[°C] ΔWT	[°C] ΔWT
CLMcom-CNRM	11.9	12.2	0.3	0.5
CLMcom-ICHEC	12.4	12.5	0.7	0.8
CLMcom-MOHC	13.1	13.3	1.4	1.6
CLMcom-MPI	12.3	12.3	0.6	0.7
CNRM-CNRM	12.4	12.8	0.7	1.1
DMI-ICHEC	12.6	12.9	1.0	1.2
IPSL-IPSL	12.6	12.4	1.0	0.7
KNMI-ICHEC	12.7	12.9	1.0	1.2
KNMI-MOHC	13.2	13.3	1.5	1.6
MPI-MPIr1	12.6	12.4	1.0	0.7
MPI-MPIr2	12.4	12.6	0.8	0.9
SMHI-CNRM	12.1	12.4	0.5	0.7
SMHI-ICHEC	12.6	12.9	0.9	1.3
SMHI-IPSL	12.6	12.8	0.9	1.1
SMHI-MOHC	12.8	13.1	1.1	1.5
SMHI-MPI	12.6	12.5	0.9	0.8
Mittelwert	12.6	12.7	0.9	1.0
Median	12.6	12.7	0.9	1.0

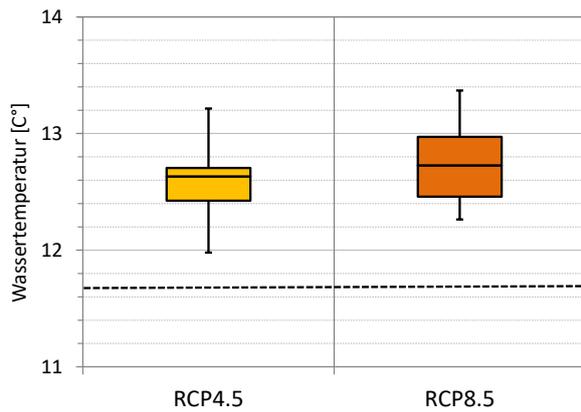


Abbildung 24: Mittlere Jahreswassertemperatur in der March bei Hohenau in den Szenarien (RCP4.5 und RCP8.5) für 2021-2050; horizontale Linie: Referenzwert 1981-2010 (strichlierte Linie)

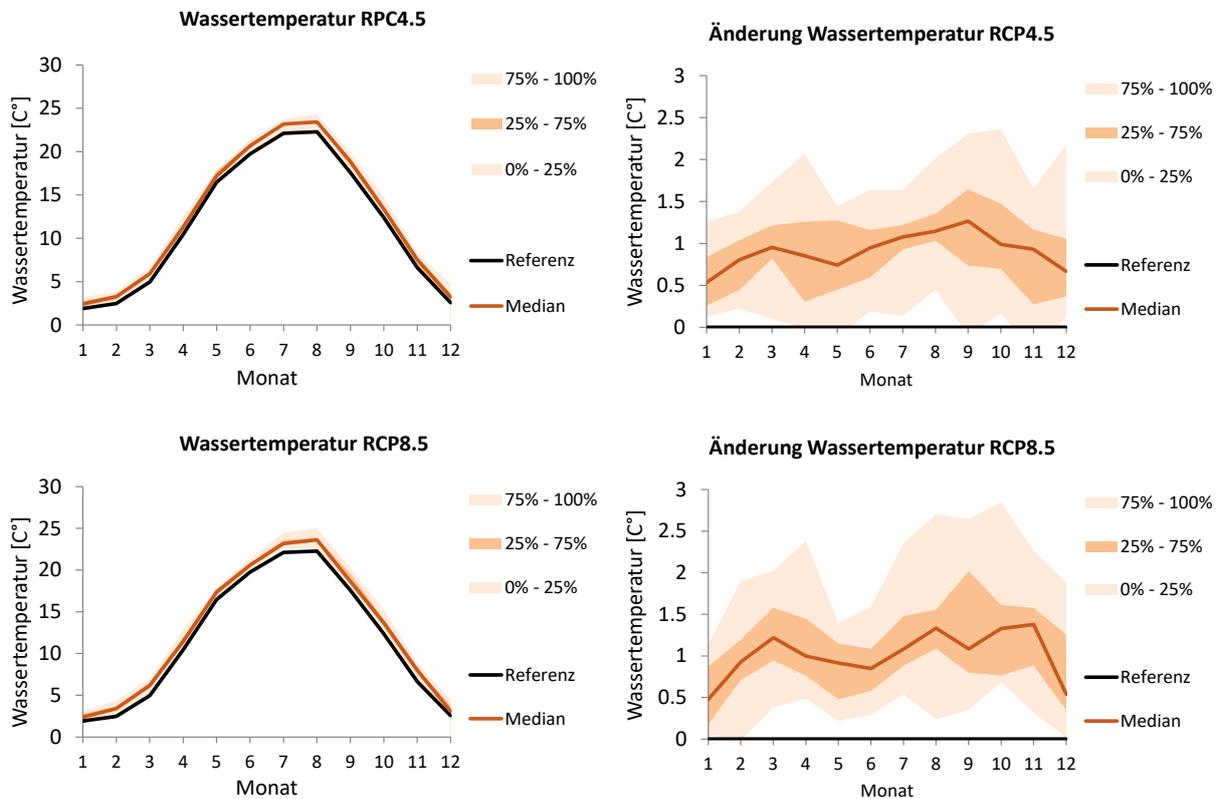


Abbildung 25: Mittlere Jahreswassertemperatur in der March bei Hohenau in den Szenarien (RCP4.5 und RCP8.5) für 2021-2050; horizontale Linie: Referenzwert 1981-2010

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die vorliegende Studie ist eine Ergänzung der regionalisierten Klimastudie für die March und untersucht die Auswirkungen der Klimaänderung auf die Wassertemperatur in der March-Grenzstrecke bis 2050.

Die Analyse der Messreihen der Wassertemperatur zeigte, dass die verlässlichsten Messwerte aus den automatischen Messungen in Hohenau und Dürnkrot vorliegen. Die langjährigen 7:00-Messwerte in Dürnkrot sowie die Messungen in Angern und Baumgarten weisen größere Unsicherheiten auf und wurden daher nicht verwendet.

Die Tagesmittelwerte der Wassertemperatur aus den automatischen Messungen in Hohenau und Dürnkrot wurden daher zur Kalibrierung eines statistischen Modells (lineares Regressionsmodell) der Wassertemperatur verwendet. Eingangsdaten des Modells sind Lufttemperatur und Abfluss, wobei diese beiden Variablen aus der Wasserbilanzsimulation der March verwendet wurden. Dadurch war es möglich, analog zu den Auswertungen der regionalisierten Klimastudie, Werte für die Referenzperiode 1981-2010 und für die Zukunftsperiode 2021-2050 zu berechnen.

Die Szenariensimulationen der Wassertemperatur zeigen einen Anstieg von rund 1°C zwischen diesen beiden Perioden an, ähnlich wie für die Lufttemperatur. Saisonal zeigen sich, trotz der saisonal eher gleichmäßigen Erwärmung der Luft in den Klimamodelldaten, etwas höhere Anstiege der Wassertemperatur im Sommer und Anfang Herbst. Dies hängt mit der höheren spezifischen Wärmekapazität des Wassers im Vergleich zur Umgebungsluft zusammen, die mit einer langsameren Veränderung der Temperatur und damit einer längeren Speicherung der Wärme einhergeht – in der hier durchgeführten statistischen Auswertung zeigt sich dieser Effekt in der hohen Autokorrelation der Wassertemperatur.

Der Median der Simulationen mit den Daten verschiedener Klimamodelle weist im Mittel für 2021-2050 eine mittlere Wassertemperatur von 12.6°C (RCP 4.5) bzw. 12.7°C (RCP 8.5) auf. Aufgrund der sehr warmen 2010er-Jahre betrug der Mittelwert für 2004-2020 an der Station Hohenau aber bereits 12.4°C. Es könnten daher jene Modellrealisierungen eine realistischere Projektion anzeigen, die deutlich höhere Erwärmungen über 1.5°C ergeben. Für die Sommermonate zeigen einige Modelle sogar Erwärmungen von über 2°C an, sodass die absoluten Monatsmittel der Wassertemperatur für Juli und August in diesen Projektionen bereits bei über 24°C liegen.

Grundsätzlich führt der Anstieg der Wassertemperatur, aufgrund des niedrigeren Sauerstoffgehalts in wärmerem Wasser, über das ganze Jahr zu einer langsamen Veränderung der aquatischen Fauna und Flora. Sensible Arten beginnen flussaufwärts in Bereiche auszuweichen, die ihrem Stoffwechsele optimum besser entsprechen, während wärmeliebendere Arten nachdrängen. Im Sommer ist die hohe Wassertemperatur für viele Arten derzeit bereits ein Stressor, und der zukünftig erwartete Anstieg wird die Situation verschärfen.

6 Literatur

Gray B.R., Robertson D.M., Rogala J.T. 2018. Effects of air temperature and discharge on Upper Mississippi River summer water temperatures. *River Research and Applications* 34/6, 506-515. <https://doi.org/10.1002/rra.3278>

Hostetler, S. W., 1991. Analysis and modeling of long-term stream temperatures on the Steamboat Creek Basin, Oregon: implications for land use and fish habitat. *Wat. Resour. Bull.* 27: 637–647.

Jacob D., Petersen J., Eggert B., et al. 2014. EURO-CORDEX: new high-resolution climate change projections for European impact research. *Reg. Environ. Change.* 14, 563-578, doi:10.1007/s10113-013-0499-2

Łaszewski M. 2013. Stream water temperature: a short review with special reference to diurnal dynamics. *Miscellanea Geographica. Regional Studies on Development* 17/1. DOI: 10.2478/v10288-012-0035-0

Toffolon M. und Piccolroaz S. 2015. A hybrid model for river water temperature as a function of air temperature and discharge. *Environ. Res. Lett.* 10 114011. doi: 10.1088/1748-9326/10/11/114011

Webb B.W. und Nobilis F. 1994. Water temperature behaviour in the River Danube during the twentieth century. *Hydrobiologia* 291, 105–113