

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

Juni 2022

Ersteller
Philipp Stanzel
Herbert Weilguni
Harald Kling

Datum
13/06/2022

Project ID
1190001275

E-mail
philipp.stanzel@afry.com

Report ID
Endbericht Wassertemperatur – Juni 2022

Kunde
via donau

Berichtsversionen

Ver.	Status	Datum	Erstellt	Geprüft	Unterschr.
01	Entwurf	13/06/2022	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	11
2.1.4	Baumgarten	12
2.2	Lufttemperatur	12
2.3	Abfluss	12
2.4	Klimaprojektionen	13
3	Statistisches Modell der Wassertemperatur.....	16
3.1	Modellkalibrierung	16
3.2	Diskussion der Modellfehler	19
3.3	Referenzsimulation 1981-2010	22
4	Wassertemperatur-Szenarien	23
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	25
6	Literatur	26

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 (gezeichnet) stromab der Brücke der Marchstraße	8
Abbildung 5: Station und Messung; Sandgewinnung oberhalb Messtation.....	9
Abbildung 6: Vergleich der Messreihen der Tagesmittelwerte der Wassertemperatur Dürnkrut und Hohenau	10
Abbildung 7: Jahresmittel der 7:00-Wassertemperatur in Dürnkrut, 1965-2021	10
Abbildung 8: Station (gezeichnet) unterhalb Ollersbach bzw. oberhalb Fähre Angern	11
Abbildung 9: Ollersbach und Altarm oberhalb Ollersbach	11
Abbildung 10: Erneuerte Messtation aufgrund Dükerquerung (Markierungen rechts)	12
Abbildung 11: Räumliche Zuordnung der verwendeten Daten aus dem Wasserbilanzmodell (Lufttemperatur aus SB14, Abfluss aus CP13 und CP16	13
Abbildung 12: Box-Plots der mittleren Temperaturänderung zwischen 2021-2050 und 1981-2010 (Mittelstrich: Median, Box: 25%-75%-Quantil; Antennen: Minimum und Maximum)	14
Abbildung 13: Mittlere monatliche Temperaturänderung in den beiden Emissionsszenarien; links oben: Mediane der absoluten Simulationswerte in °C, links unten: Mediane der Änderung in °C zwischen 2021-2050 und 1981-2010, rechts unten: Änderung in °C für den Median und einzelne Modelle in RCP8.5.	14
Abbildung 14: 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.	15
Abbildung 15: Tägliche Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation (oben) und Abweichung zwischen beiden Reihen (unten)	18
Abbildung 16: Mittlere monatliche Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation	18
Abbildung 17: Trend in der Zeitreihe der mittleren jährlichen Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation	18
Abbildung 18: 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	20

Abbildung 19: 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)	24
Abbildung 20: Mittlere Jahreswassertemperatur in der March bei Hohenau in den Szenarien (RCP4.5 und RCP8.5) für 2021-2050; horizontale Linie: Referenzwert 1981-2010	24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verwendete Daten der Wassertemperatur	8
Tabelle 2: Modellgüte für den Vergleich simulierter und beobachteter täglicher Wassertemperatur	19
Tabelle 3: Änderung in der simulierten Wassertemperatur für die March bei Hohenau, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010	23

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 Marchezugsgebiet 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 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 des Regressionsmodells der Wassertemperatur wurden beobachtete Daten der Wassertemperatur in der March-Grenzstrecke herangezogen.

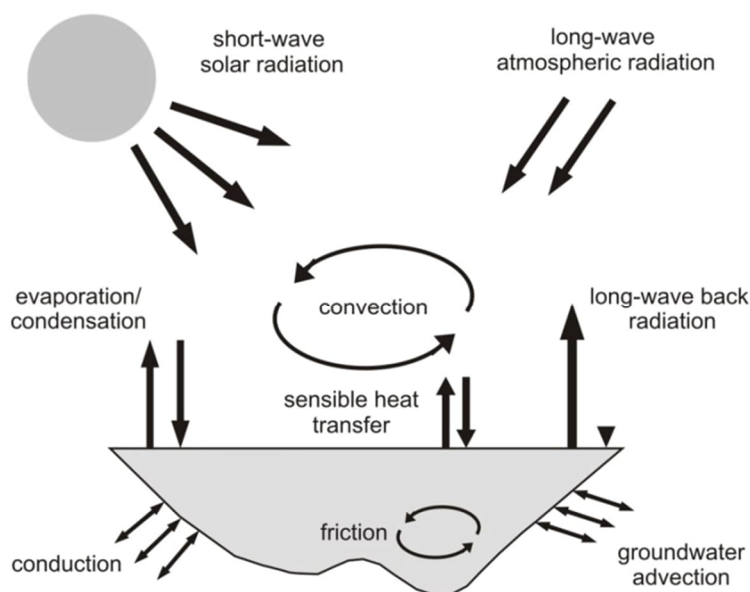


Abbildung 1: Prozesse der Wärmeübertragung zwischen Wasserkörper und Umgebung (Quelle: Laszewski 2013)

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 diesem Abschnitt 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 Verteilung der Wassertemperatur)

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

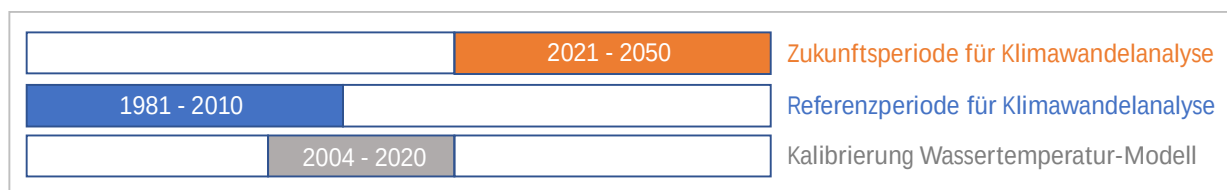


Abbildung 2: Analyseperioden

2 Datensammlung und -beurteilung

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

2.1 Wassertemperatur

Von der 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: ehvd)

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 21.4. eine Begehung der Stationen gemeinsam mit den für diese Messstellen und ihre Daten zuständigen Kollegen (Ludwig Buxer und Wolfgang Kobath) durchgeführt. Dabei wurden Datenlücken, Abweichungen zwischen den Stationen sowie grundsätzliche Informationen zu den Stationen und 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). Dies könnte insofern relevant sein, als dass die Dürnkrut-Daten der letzten Jahre eine geringfügig höhere Temperatur anzeigen, im Vergleich zu Hohenau (siehe Vergleich der beiden Messreihen in Abbildung 6). Davor war, vor allem im Sommer, die Messung in Hohenau höher.

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. Im Vergleich der beiden Zeitreihen Dürnkrut und Hohenau (Abbildung 6) zeigt sich allerdings ein geringfügiger Sprung in der Differenz genau mit dem Beginn des Jahres 2018. Allerdings gab es bereits davor, um 2009, eine Verringerung der Differenzen. Insgesamt sind trotz der erkennbaren geringfügigen Inhomogenitäten beide Messreihen sehr ähnlich und werden auch beide von den via donau - Experten als verlässlich eingeschätzt. Die Zeitreihen der automatischen Messung der Wassertemperatur der beiden Stationen Dürnkrut und Hohenau wurden daher für die Erstellung des statistischen Modells herangezogen.

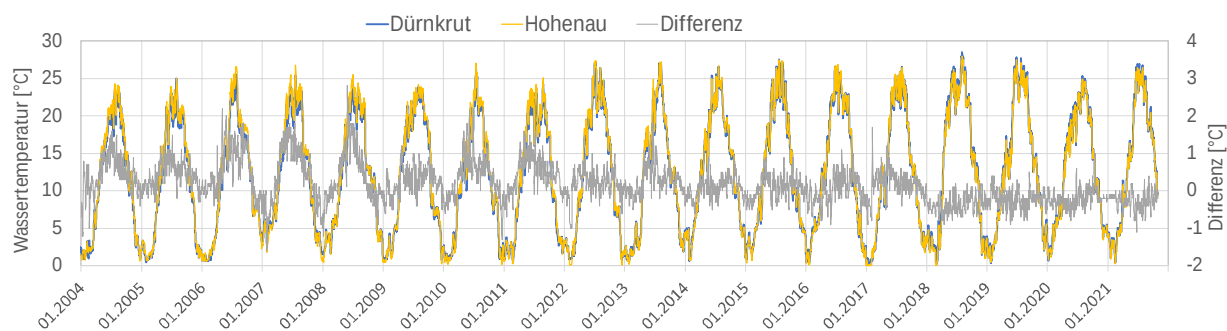


Abbildung 6: Vergleich der Messreihen der Tagesmittelwerte der Wassertemperatur Dürnkrot und Hohenau

Für Dürnkrot liegen auch Daten aus dem Zeitraum vor der Einrichtung der automatischen Messung vor, für die Periode 1964-1999. Diese Daten beziehen sich auf den Messzeitpunkt 7:00. Aufgrund des langen Beobachtungszeitraums wäre diese Zeitreihe eine gute Grundlage für die Kalibrierung eines Modells. Zur Beurteilung dieser Reihe wurden zusätzlich die 7:00-Werte der kontinuierlichen Messung ab 2000 verwendet, sodass sich eine Reihe von ganzen Jahren von 1965-2021 ergab (Abbildung 7). 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 7:00-Werte der Jahre 1964-1999. 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: 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.

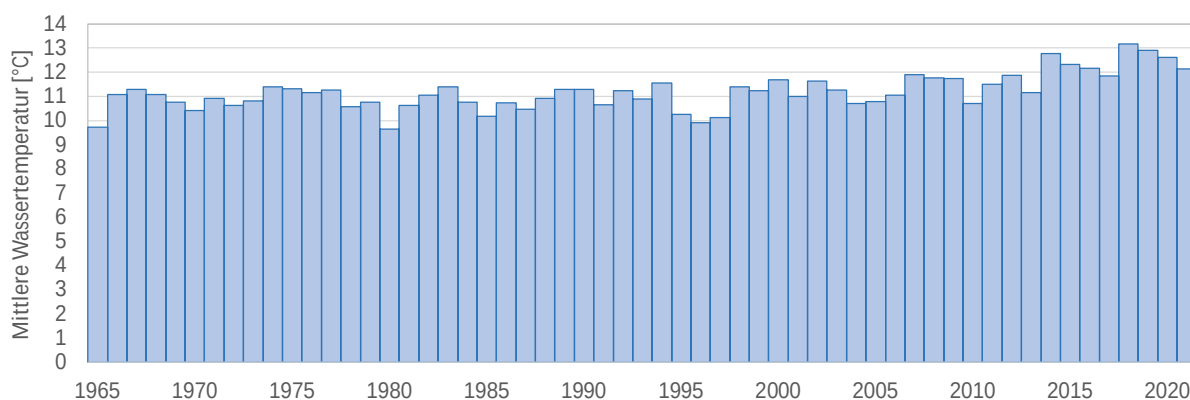


Abbildung 7: Jahresmittel der 7:00-Wassertemperatur in Dürnkrot, 1965-2021

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



Abbildung 9: 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 Alarm lässt sich dieser Unterschied nicht erklären. Eventuell entsteht der niedrigere Messwert der automatischen Messung 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 10: Erneuerte Messtation aufgrund Dükerquerung (Markierungen rechts)

Die Station Baumgarten ist keine offizielle via donau Station, sie wurde im Zuge der Dükerverlegung eingerichtet. Auch bei dieser Messstelle zeigt sich eine Divergenz zwischen automatischer und Kontrollmessung. Auch hier hängt diese Divergenz vermutlich mit Anlandungen im Bereich der Sonde (gewünscht, zum Schutz des Dükers) zusammen, die zu einer zu starken Überlagerung mit Sediment geführt haben können. Die Messungen der Wassertemperatur wurden daher auch in den weiteren Auswertungen nicht verwendet.

2.2 Lufttemperatur

Als Daten der Lufttemperatur wurden die Inputdaten des Wasserbilanzmodells verwendet. Diese beruhen für die historische Periode auf einer Regionalisierung von 8 Stationen unter Berücksichtigung der Seehöhe (siehe Bericht regionalisierte Klimastudie). Für die Kalibrierung des statistischen Modells der Wassertemperatur wurden die Daten mehrere Aggregationsstufen getestet (gesamtes Einzugsgebiet, mehrere Teileinzugsgebiete, einzelne Teileinzugsgebiete). Schließlich wurde die Lufttemperatur des Teileinzugsgebiets 14 (SB 14 in Abbildung 11) verwendet.

2.3 Abfluss

Als Abflussdaten wurden die Simulationsergebnisse des Wasserbilanzmodells für die March herangezogen. Da die Zukunftsszenarien ja nur mit simuliertem Abfluss gerechnet werden können, wurden auch für die Kalibrierung des Wassertemperaturmodells die Simulationen des Abflusses herangezogen, um homogene Inputdaten für die Perioden der Kalibrierung sowie der Szenarienrechnung anzuwenden. In der Kalibrierung des statistischen Modells der Wassertemperatur

wurden die Daten mehrere Modellknoten getestet (Gesamtabfluss der March bei CP 14 Hohenau oder Zuflüsse Dyje@Ladná und Morava@Lanzhot, siehe Abbildung 11). Schließlich wurde der Abfluss der beiden Zuflüsse verwendet (CP13 bei Ladná und CP16 bei Lanzhot).

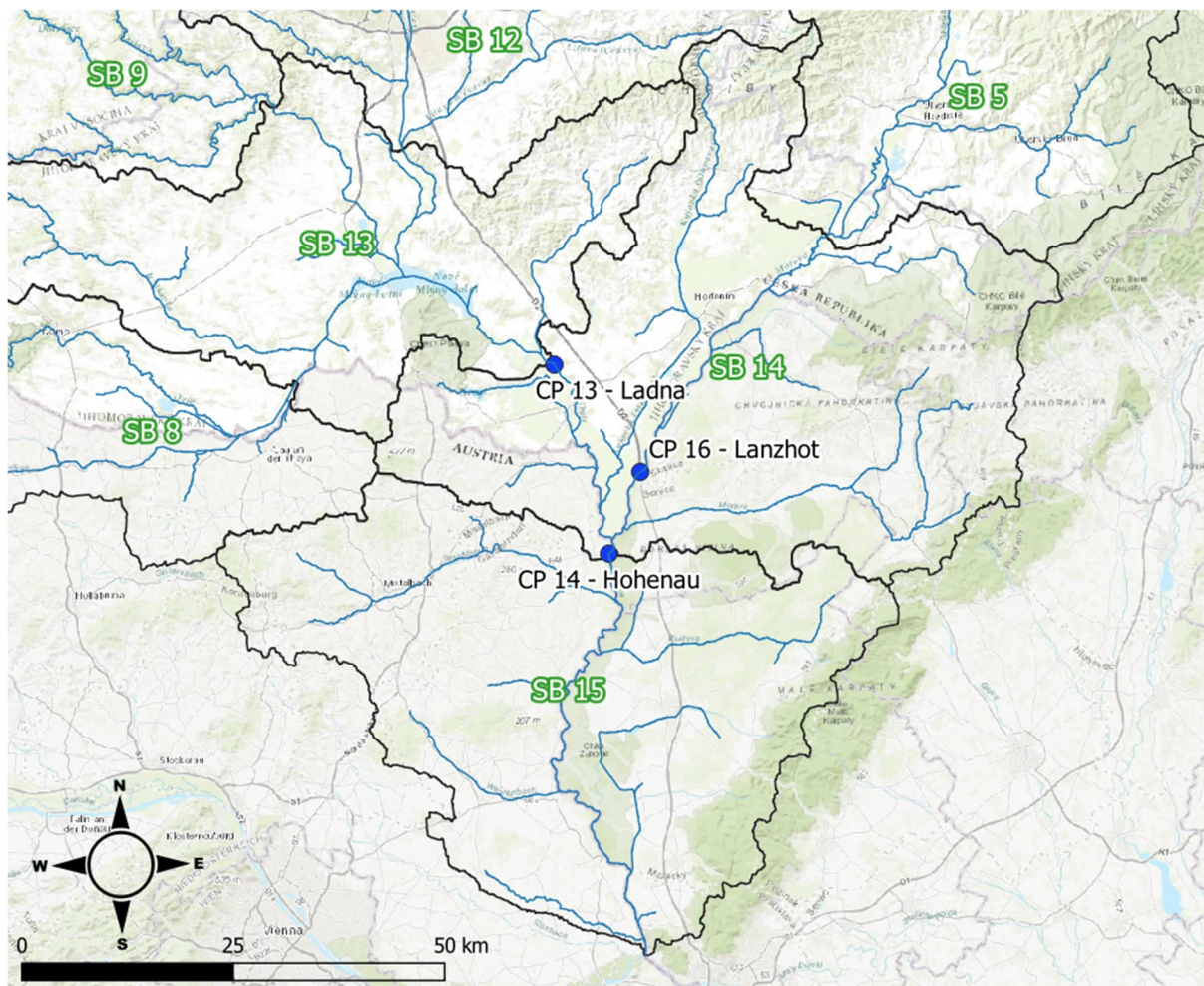


Abbildung 11: Räumliche Zuordnung der verwendeten Daten aus dem Wasserbilanzmodell (Lufttemperatur aus SB14, Abfluss aus CP13 und CP16)

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 Szenarien sind in Abbildung 12 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 keine sehr deutlichen saisonalen Variationen aufweisen (Abbildung 13), mit Schwankungen der Medianwerte von weniger als einem halbes Grad um den Jahresmittelwert (Abbildung 13 links), und etwas stärkeren, aber nicht systematischen saisonalen Schwankungen der einzelnen Modelle (Abbildung 13 rechts für RCP8.5).

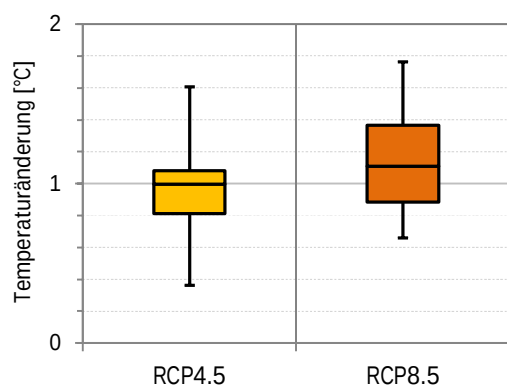


Abbildung 12: Box-Plots der mittleren Temperaturänderung zwischen 2021-2050 und 1981-2010 (Mittelstrich: Median, Box: 25%-75%-Quantil; Antennen: Minimum und Maximum)

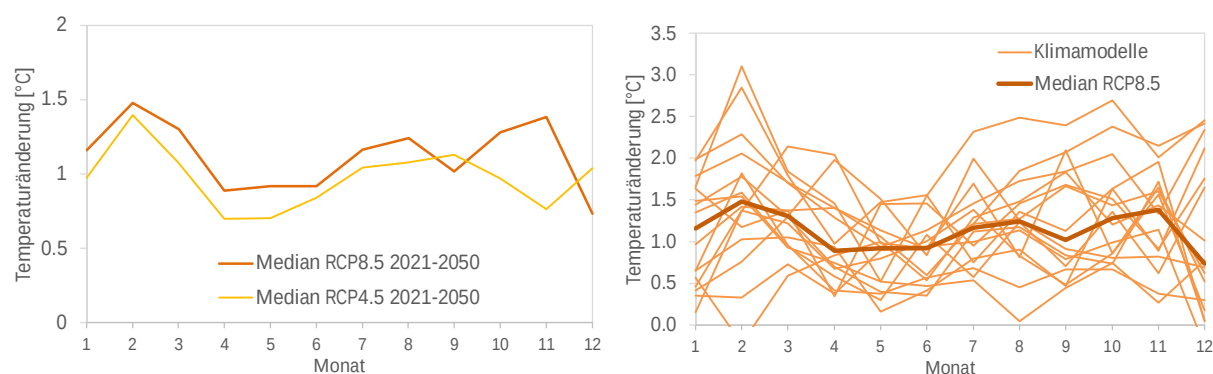


Abbildung 13: Mittlere monatliche Temperaturänderung in den beiden Emissionsszenarien; links oben: Mediane der absoluten Simulationen in °C, links unten: Mediane der Änderung in °C zwischen 2021-2050 und 1981-2010, rechts unten: Änderung in °C für den Median und einzelne Modelle in RCP8.5.

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 Ladrná (Dyje) und Lanžhot (obere March/Morava)). Die deutlichste Änderung ist der Anstieg des Winterabflusses in den Klimaprojektionen.

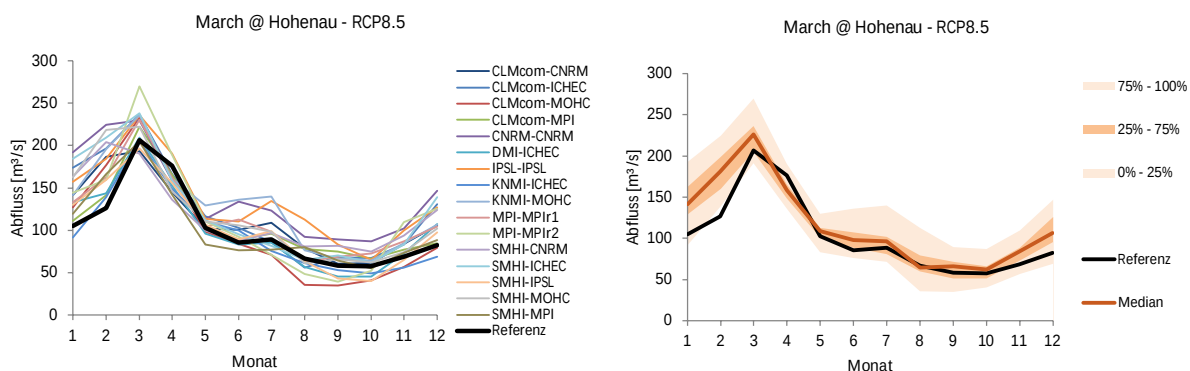


Abbildung 14: Simulierte mittlere Monatsabflüsse für die March bei Hohenau, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP8.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen.

3 Statistisches Modell der Wassertemperatur

Das statistische Modell der Wassertemperatur basiert auf einem Ansatz von Hostetler (1991, in Webb und Nobilis 1994). Die 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
	Q	Abfluss
	LT	Lufttemperatur
	t, t-1	Zeitschritt, vorangegangener Zeitschritt

In der Modellkalibrierung wurden auch etwas abgewandelte Formulierungen getestet, so z.B. Berücksichtigung der Lufttemperatur des vorangegangenen Zeitschritts oder Berücksichtigung von zwei Abfluss-Variablen (Dyje und Morava statt gesamter March) sowie eine getrennte Berechnung der Wassertemperatur für Dyje und Morava und Berechnung für die gesamte March über eine Gewichtung entsprechend der Abflussführung der beiden Zubringer. Die abschließend angewendete Formel wird im folgenden Kapitel zur Kalibrierung angeführt.

3.1 Modellkalibrierung

Für die Modellkalibrierung wurden Daten der Messstationen Dürnkrot (2000-2020) und Hohenau (2004-2020) herangezogen. Bei Hohenau wurden die ersten 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 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.

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 15), den mittleren saisonalen Verlauf (Abbildung 16) und die Jahresmittelwerte und den langjährigen Trend (Abbildung 17).

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. Es 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 16), 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.

Die Abbildung der Jahresmittel und des Trends in Abbildung 17 zeigt, dass sowohl die inter-annuale Variabilität in der Wassertemperatur als auch die langfristige langsame Zunahme der Temperatur sehr gut abgebildet werden.

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

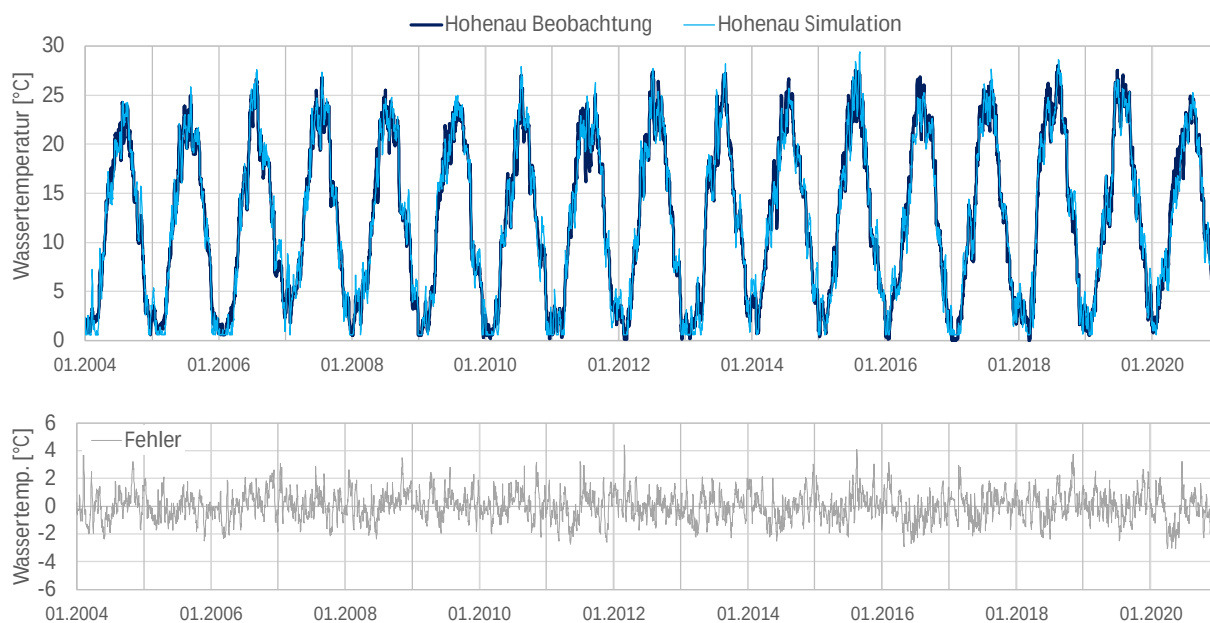


Abbildung 15: Tägliche Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation (oben) und Abweichung zwischen beiden Reihen (unten)

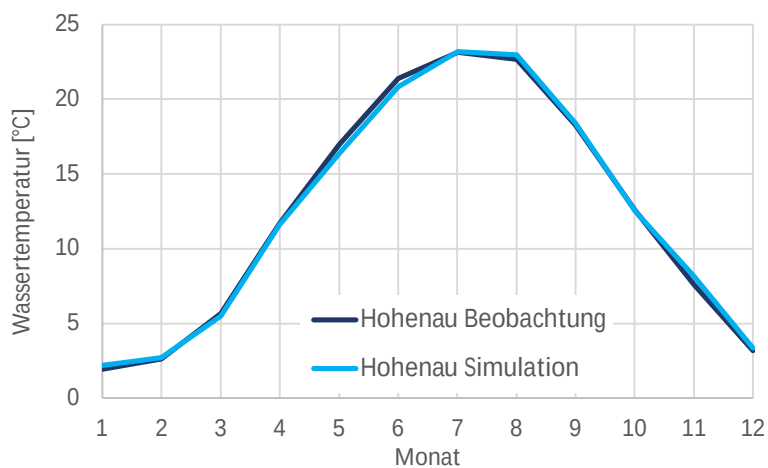


Abbildung 16: Mittlere monatliche Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation

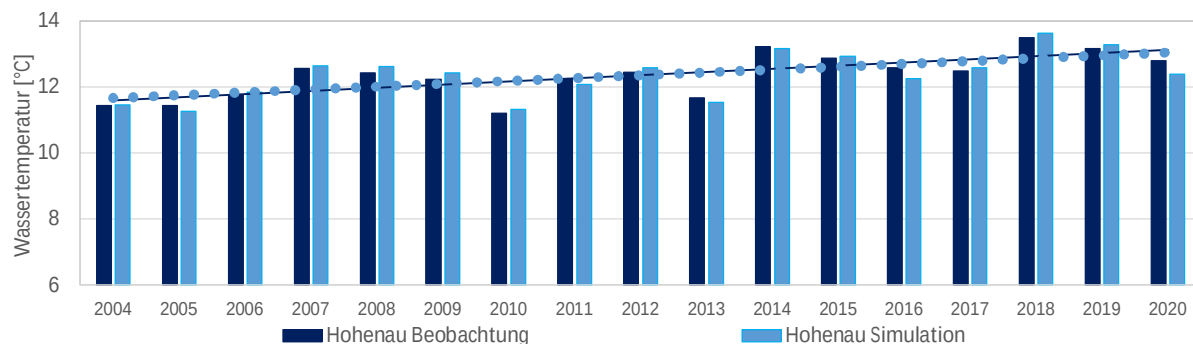


Abbildung 17: Trend in der Zeitreihe der mittleren jährlichen Wassertemperatur Hohenau 2004-2020, Beobachtung und Simulation

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, die Lufttemperatur- sowie Abflussdaten aus den Simulationen des Wasserbilanzmodells heranzuziehen, können grundsätzlich 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 (auch die Lufttemperatur wird natürlich durch die Einstrahlung beeinflusst);
- der Wasserstand in Nové Mlýny, als zusätzliche Information zu höheren Zuflüssen aus dem Speicher, die eine andere Wassertemperatur aufweisen könnten als die natürlichen 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 aufweisen.

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 18 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).

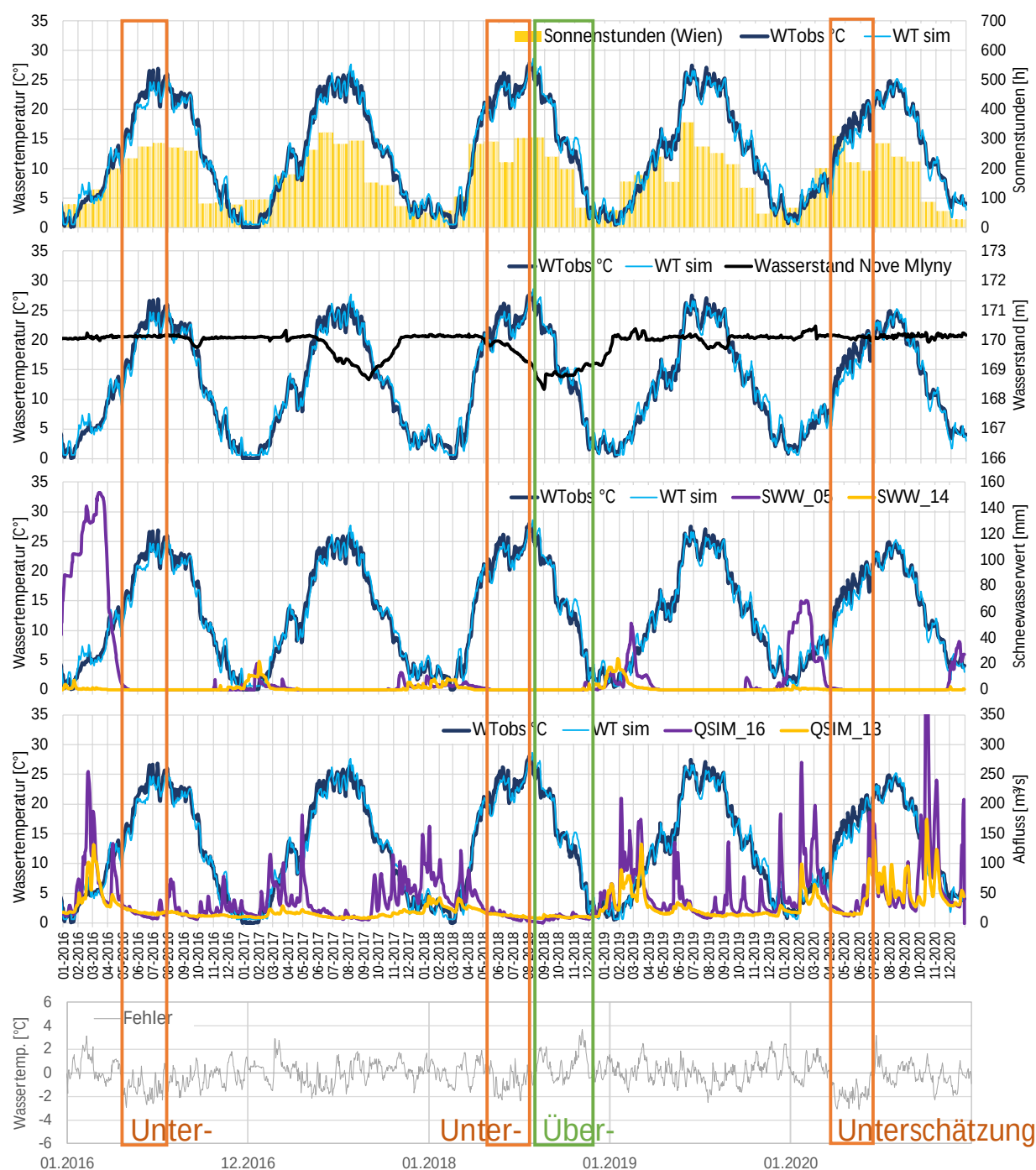


Abbildung 18: Simulation und Beobachtung der Wassertemperatur Hohenau 2016-2020 und Vergleich mit anderen Variablen: 1.) Sonnenscheindauer (Wien), 2.) Wasserstand Nové Mlýny, 3.) Schneewasserwert (simuliert) der Subbasins SB05 und SB14, 4.) Abfluss (simuliert) der Knoten CP13 und CP16

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 nur aufgrund der Lufttemperatur unterschätzte Wassertemperatur 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 einen erhöhten Abfluss aus dem Speicher anzeigt, 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 lange 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 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 1981-2020 – 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. Die graphische Darstellung der Verteilung der Jahresmittel zeigt Abbildung 19. 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 20). 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 [°C] WT	RCP 8.5 [°C] WT	RCP 4.5 [°C] ΔWT	RCP 8.5 [°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

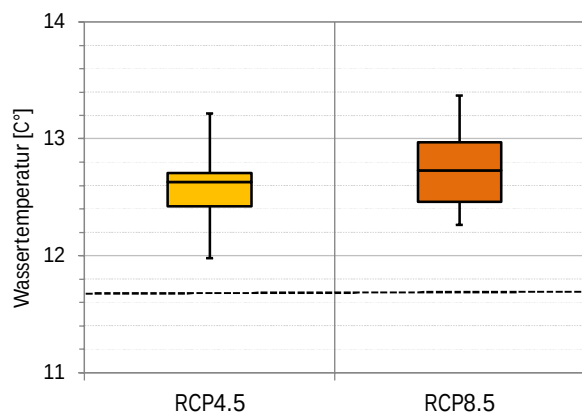


Abbildung 19: Mittlere Jahreswassertemperatur in der March bei Hohenau in den Szenarien (RCP4.5 und RCP8.5) für 2021-2050; horizontale Linie: Referenzwert 1981-2010 (strichlierte Linie)

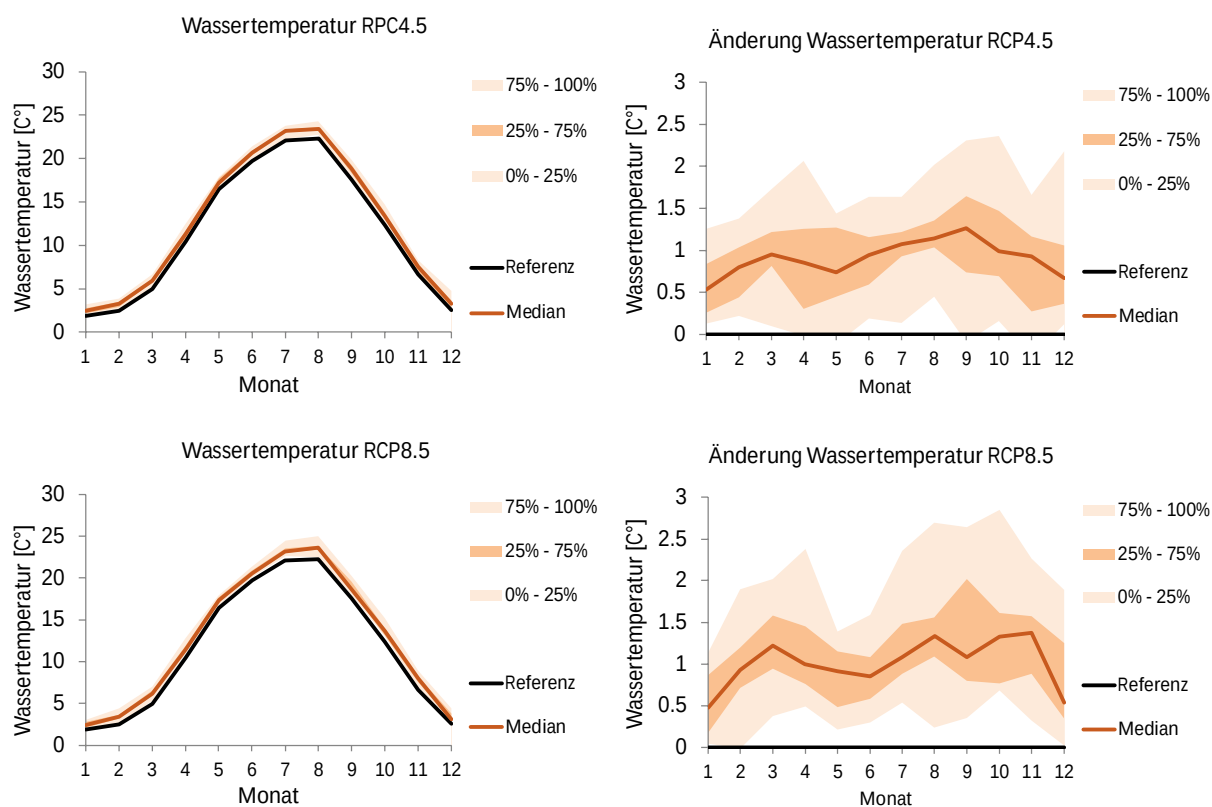


Abbildung 20: Mittlere Jahreswassertemperatur in der March bei Hohenau in den Szenarien (RCP4.5 und RCP8.5) für 2021-2050; horizontale Linie: Referenzwert 1981-2010

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 Dürnkrut vorliegen. Die älteren 7:00-Messwerte in Dürnkrut sowie die Messungen in Angern und Baumgarten weisen größere Unsicherheiten auf.

Die Tagesmittelwerte der Wassertemperatur aus den automatischen Messungen in Hohenau und Dürnkrut wurden daher zur Kalibrierung eines statistischen Modells 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, wie für die Lufttemperatur. Saisonal zeigen sich etwas höhere Anstiege der Wassertemperatur im Sommer. Der Median der Simulationen mit den Daten verschiedener Klimamodelle weist im Mittel für 2021-2050 eine mittlere Wassertemperatur von 12.6°C bis 12.7°C auf, je nach Emissionsszenario und daraus folgender Erwärmung der Lufttemperatur. 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.

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