



# Kli-Ma

## Wasserspiegeloptimierung an der March unter besonderer Berücksichtigung des Klimawandels

### Regionalisierte Klimastudie für die March Endbericht

Bestellnummer 20210085

Februar 2022

via donau  
Österreichische Wasserstraßen-Gesellschaft mbH

**viadonau**

Ersteller

Datum

Philipp Stanzel  
Harald Kling  
Martin Fuchs

23/02/2022

Project ID  
1190001275

E-mail  
philipp.stanzel@afry.com

Report ID  
Endbericht – Februar 2022

Kunde  
via donau

#### Berichtsversionen

Ver.	Status	Datum	Erstellt	Geprüft	Unterschr.
01	Entwurf	30/11/2021	PS, HK	MF	
02	Revision 1	04/02/2022	PS, HK	MF	
03	Endbericht	23/02/2022	PS, HK	MF	

## Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung .....	10
1 Einleitung .....	12
1.1 Hintergrund und Ziele der Studie .....	12
1.2 Gewählte Vorgangsweise .....	12
1.2.1 Arbeitsschritte in der Klimafolgenmodellierung .....	12
1.2.2 Korrektur der Klimamodelldaten.....	14
1.2.3 Untersuchungsperioden .....	15
2 Überblick über vorhandene Studien .....	16
2.1 Literatur .....	16
2.2 INTERREG AT-CZ Projekt Klimawandel Thaya.....	19
3 Wasserbilanzmodell für die March .....	20
3.1 Modellstruktur .....	20
3.2 Zeitliche und räumliche Diskretisierung des March-Modells.....	21
4 Inputdaten .....	25
4.1 Historische Daten.....	25
4.1.1 Abfluss .....	25
4.1.2 Niederschlag .....	26
4.1.3 Lufttemperatur .....	29
4.1.4 Verdunstung .....	31
4.2 Trends in historischen Daten .....	33
4.3 Klimamodelldaten .....	33
5 Modellkalibrierung und historische Simulation .....	38
5.1 Methode der Modellkalibrierung.....	38
5.2 Annahmen im Water Allocation Model .....	39
5.2.1 Annahmen zur Speicherbewirtschaftung .....	39
5.2.2 Annahmen zu Bewässerungsentnahmen.....	40
5.3 Historische Simulation und Modellgüte .....	46
5.4 Referenzsimulation für Klimaänderung .....	55
6 Ergebnisse.....	56
6.1 Analyse der Trends in historischen Daten und Beurteilung .....	56
6.1.1 Lufttemperatur .....	56

6.1.2	Niederschlag .....	57
6.1.3	Abfluss .....	59
6.2	Klima-Sensitivitätsanalyse.....	63
6.3	Klimamodellsimulationen und Klimaänderungssignale.....	65
6.3.1	Historische Klimamodellsimulationen .....	65
6.3.2	Klimaänderungssignale .....	69
6.4	Wasserbilanzsimulation unter Berücksichtigung der Klimaprojektionen .....	75
6.4.1	Änderungen in den einzelnen Komponenten der Wasserbilanz und deren Beurteilung.....	75
6.4.2	Änderungen im Abfluss an den ausgewählten Knoten ..	78
6.4.3	Szenarien höherer Wasserentnahme.....	87
7	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen.....	90
8	Mögliche künftige Anwendungsbereiche des Modells .....	92
9	Literatur.....	93

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Vorgangsweise Klimafolgenmodellierung.....	13
Abbildung 2:	Analyseperioden.....	15
Abbildung 3:	Saisonale und jährliche relative Änderungen in der Abflusshöhe zwischen 2070-2099 und 1961-1990, aus Hanel et al. 2012.....	16
Abbildung 4:	Saisonale relative Änderungen im Abfluss in der March-Grenzstrecke bei Moravský Ján zwischen 2031-2060 und 1971-2000, aus Stagl und Hattermann 2015 .....	17
Abbildung 5:	Saisonale relative Änderungen im Abfluss in der March-Grenzstrecke bei Moravský Ján zwischen einer Periode um 2050 und der Referenzperiode 1971-2000, im Modell E-HYPE mit einem Ensemble aus 4 CORDEX-Klimamodellläufen des Emissionsszenarios RCP8.5, aus Hypeweb <sup>1</sup> .....	18
Abbildung 6:	Skizze der Modellstruktur .....	21

Abbildung 7: Räumliche Diskretisierung des March-Modells in Subbasins (dicke orange Linien), Computation Points (rote Punkte), sowie HRUs abgeleitet nach Höhenzonen (dünne graue Linien) und Teileinzugsgebieten (dünne orange Linien). .....	22
Abbildung 8: HRUs im March-Modell .....	23
Abbildung 9: Landnutzungs- und Bodentypen-Datensätze als Basisinformation für die hydrologische Modellierung. Links: Verteilung von Wald (grün) und Ackerland (rosa) im Vergleich zu den gewählten HRU Grenzen (schwarze Linien) im Gebiet südlich von Kroměříž. Rechts: Verteilung von Braunerde (gelb), Tschernosem (braun), sowie Fluvisol im Gebiet von Brno und Olomouc.....	24
Abbildung 10: Vergleich von Gewässernetz aus Hydrosheds 15s (hellblau) und berechnet auf Basis von Hydrosheds 3s inkl. "stream burning" (dunkelblau). Zusammenfluss der Thaya und Morava bei Hohenau. ....	24
Abbildung 11: Verwendete Niederschlagsstationen .....	27
Abbildung 12: Niederschlagskarte aus dem IHP UNESCO Projekt "WatBal, Regional Cooperation of the Danubian Countries", GIS Datensatz erstellt von Holko et al. mit External Drift Kriging im Jahr 2004, basierend auf hunderten von Stationen im Donauraum. Mittlerer Jahresniederschlag repräsentativ für die Periode 1971-2000..	28
Abbildung 13: Verwendete Temperaturstationen .....	30
Abbildung 14: Vergleich der mittleren jährlichen potentiellen Verdunstung (PET) auf Basis von verschiedenen Datenquellen/Methoden. CROPWAT: PET berechnet für Stationen im Untersuchungsgebiet. H2O: Rasterdaten ausgewertet für 38 Teileinzugsgebiete (sub-catchments). HRU: Regionalisierung für die Zonen des hydrologischen Modells. ....	32
Abbildung 15: Mittlere monatliche potenzielle Verdunstung (PET) bei ausgewählten Stationen berechnet mit Penman-Monteith. PET H2O: Mittelwert der Earth2Observe Rasterdaten für Subbasin 10 des hydrologischen Modells (flussauf von Brno). ....	32
Abbildung 16: Räumliche Ausdehnung der CORDEX-RCMs, rot = Donaeinzugsgebiet .....	35
Abbildung 17: CORDEX-RCM-Gitter mit 12 km Auflösung über dem March-Einzugsgebiet .....	35
Abbildung 18: Strahlungsantrieb („radiative forcing“) in den RCP-Szenarien (Quelle: Cubasch et al. 2013) .....	36
Abbildung 19: Lage der im Modell berücksichtigten Speicher .....	39
Abbildung 20: Im Luftbild identifizierte Entnahmen bzw. Umleitungen (rote Dreiecke). Beispiele: Entnahmen bei Krhovice (Luftbild links unten) und Strážnice (Luftbild rechts oben).....	40
Abbildung 21: Im Modell angenommene Entnahme für Bewässerung. Die Entnahmen bei den Berechnungsknoten CP 13 und 14 wurden während der Kalibrierung des Modells auf Null gesetzt. ....	45
Abbildung 22: Übersichtskarte der im Modell verwendeten Entnahmen bei Berechnungsknoten. Mittlere Jahreswerte. Schwarze Pfeile: Entnahmen für	

Bewässerung. Graue Pfeile: Ausleitungen / Rückleitungen über Kanäle. Rote Punkte: Berechnungsknoten des Modells (CP). Orange Dreiecke: Im Luftbild identifizierte Ausleitungen. Die Lage der Pfeile ist nur symbolhaft und entspricht nicht den tatsächlichen Gegebenheiten vor Ort. .... 46

Abbildung 23: Simulierter und beobachteter täglicher Abfluss 2001-2010 für die obere March/Morava bei Strážnice (oben) und Differenzen zwischen den beiden Zeitreihen 47

Abbildung 24: Simulierter und beobachteter täglicher Abfluss 2001-2010 für die Thaya/Dyje bei Ladná (oben) und Differenzen zwischen den beiden Zeitreihen ..... 47

Abbildung 25: Simulierter und beobachteter täglicher Abfluss 2001-2010 für die March-Grenzstrecke bei Hohenau (oben) und Differenzen zwischen den beiden Zeitreihen . 47

Abbildung 26: Simulierter und beobachteter mittlerer Monatsabfluss (1981-2010) für die obere March/Morava bei Strážnice..... 48

Abbildung 27: Simulierter und beobachteter mittlerer Monatsabfluss (1988-2010) für die Thaya/Dyje bei Ladná..... 48

Abbildung 28: Simulierter und beobachteter mittlerer Monatsabfluss (1986-2010) für die March-Grenzstrecke bei Hohenau ..... 48

Abbildung 29: Simulierte und beobachtete Dauerlinie des täglichen Abflusses (1981-2010) für die obere March/Morava bei Strážnice..... 49

Abbildung 30: Simulierte und beobachtete Dauerlinie des täglichen Abflusses (1988-2010) für die Thaya/Dyje bei Ladná..... 49

Abbildung 31: Simulierte und beobachtete Dauerlinie des täglichen Abflusses (1986-2010) für die March-Grenzstrecke bei Hohenau ..... 49

Abbildung 32: Simulierter und beobachteter jährlicher Abfluss 1981-2020 für die obere March/Morava bei Strážnice ..... 50

Abbildung 33: Simulierter und beobachteter jährlicher Abfluss 1981-2020 für die Thaya/Dyje bei Ladná..... 50

Abbildung 34: Simulierter und beobachteter jährlicher Abfluss 1981-2020 für die March-Grenzstrecke bei Hohenau..... 50

Abbildung 35: Simulierte (rot) und beobachtete (schwarz) Wasserstände 2012-2020 im Speicher Vranov ..... 51

Abbildung 36: Simulierte (rot) und beobachtete (schwarz) Wasserstände 2012-2020 im Speicher Dalešice..... 52

Abbildung 37: Simulierte (rot) Wasserstände 2012-2020 im Speicher Vír 1, beobachtete Daten konnten nicht erhoben werden..... 52

Abbildung 38: Simulierte (rot) und beobachtete (schwarz) Wasserstände 2012-2020 im Speicher Brno ..... 52

Abbildung 39: Simulierte (rot) und beobachtete (schwarz) Wasserstände 2002-2011 im Speicher Nové Mlýny ..... 53

Abbildung 40: Simulierte (rot) und beobachtete (schwarz) Wasserstände 2012-2020 im Speicher Nové Mlýny ..... 53

Abbildung 41: Jahresmittel der Lufttemperatur sowie gleitende 10-Jahres-Mittelwerte 1961-2020 für vier Stationen im (und ums) March-Einzugsgebiet .....	56
Abbildung 42: Jahresmittel (oben), Sommermittel (unten links) und Wintermittel (unten rechts) der Lufttemperatur sowie 20-Jahres-Mittelwerte 1847-2015 für Brno-Turany (Quelle: ZAMG 2021) .....	57
Abbildung 43: Jahressummen des Niederschlags sowie gleitende 10-Jahres-Mittelwerte 1961-2020 für vier Stationen im March-Einzugsgebiet.....	58
Abbildung 44: Jahressummen (oben), Sommersummen (unten links) und Wintersummen (unten rechts) des Niederschlags sowie 20-Jahres-Mittelwerte 1805-2015 für Brno-Turany (Quelle: ZAMG 2021) .....	59
Abbildung 45: Jahresmittelwerte des Abflusses sowie gleitende 10-Jahres-Mittelwerte 1911-2020 für die obere March/Morava bei Moravičany, 1959-2020 für die Thaya bei Raabs und 1951-2020 für die March bei Angern .....	60
Abbildung 46: Jahresmaxima des mittleren täglichen Abflusses sowie gleitende 10-Jahres-Mittelwerte 1911-2020 für die obere March/Morava bei Moravičany, 1959-2020 für die Thaya bei Raabs und 1951-2020 für die March bei Angern .....	61
Abbildung 47: Links: Jahresminima des 7-Tages-Abflusses sowie gleitende 10-Jahres-Mittelwerte 1911-2020 für die obere March/Morava bei Moravičany, 1959-2020 für die Thaya bei Raabs und 1951-2020 für die March bei Angern; rechts: Häufigkeit des Auftretens der 7-Tages-Minima in den einzelnen Monaten, Vergleich zwischen den Perioden 1961-1990 und 1991-2020.....	62
Abbildung 48: Klimasensitivität für die obere March/Morava bei Strážnice, die Thaya/Dyje bei Ladná und die March-Grenzstrecke bei Hohenau: links Änderung im Abfluss aufgrund Temperaturänderung, rechts aufgrund Niederschlagsänderung.....	64
Abbildung 49: Klimasensitivität für das Einzugsgebiet der March bis Hohenau: Änderung in der Saisonalität (links) und im Niederwasserabfluss (rechts) aufgrund von Temperaturänderung (oben) und aufgrund von Niederschlagsänderung (unten).....	64
Abbildung 50: Mittlere Jahrestemperatur seit 1971 in der Beobachtung und in den Klimamodellsimulationen, Mittelwert für das gesamte March-Einzugsgebiet .....	66
Abbildung 51: Mittlere Monatstemperatur für die Referenzperiode 1981-2010 in der Beobachtung und in den Klimamodellsimulationen, Mittelwert für das gesamte March-Einzugsgebiet.....	66
Abbildung 52: Jahresniederschlagssummen im March-Einzugsgebiet seit 1971 in der Beobachtung und in den Klimamodellsimulationen .....	67
Abbildung 53: Mittlerer Monatsniederschlag im March-Einzugsgebiet für die Referenzperiode 1981-2010 in der Beobachtung und in den Klimamodellsimulationen .....	67
Abbildung 54: Mittlerer Monatsniederschlag für die Referenzperiode 1981-2010 in der Beobachtung und in den Klimamodellsimulationen, für die einzelnen Klimamodelle..	68

Abbildung 55: Box-Plots der mittleren Temperaturänderung zwischen 2021-2050 und 1981-2010 (Mittelstrich: Median, Box: 25%-75%-Quantil; Antennen: Minimum und Maximum) .....	70
Abbildung 56: Räumliche Verteilung der Werte des Medians der Temperaturänderung .....	70
Abbildung 57: 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. ....	71
Abbildung 58: Box-Plots der mittleren relativen Niederschlagsänderung zwischen 2021-2050 und 1981-2010 (Mittelstrich: Median, Box: 25%-75%-Quantil; Antennen: Minimum und Maximum) .....	72
Abbildung 59: Räumliche Verteilung der Werte des Medians der Niederschlagsänderung .....	72
Abbildung 60: Mittlere monatliche Niederschlagsänderung in den beiden Emissionsszenarien; oben: Mediane der absoluten Simulationswerte in mm (links RCP4.5, rechts RCP8.5), links unten: Mediane der Änderung in % zwischen 2021-2050 und 1981-2010, rechts unten: Änderung in % für den Median und einzelne Modelle in RCP8.5. ....	73
Abbildung 61: Klimaänderungssignale (Mittelwert im March-Einzugsgebiet) für Temperatur [°C] und Niederschlag [%] für alle angewendeten Klimamodelle, gruppiert nach Emissionsszenarien.....	74
Abbildung 62: Simulierte Wasserbilanzgrößen Niederschlag (1. Reihe), Schneewasserwert SWW (2. Reihe), Verdunstung (3. Reihe) und Abfluss (4. Reihe) für das Einzugsgebiet der March/Morava bei Strážnice, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP8.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen. ....	76
Abbildung 63: Simulierten Wasserbilanzgrößen Niederschlag (1. Reihe), Schneewasserwert SWW (2. Reihe), Verdunstung (3. Reihe) und Abfluss (4. Reihe) für das Einzugsgebiet der Thaya/Dyje bei Ladná, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP8.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen. ....	77
Abbildung 64: Simulierte mittlere Monatsabflüsse (1. Reihe), Dauerlinie (2. Reihe) und Niederwasserbereich der Dauerlinie (3. Reihe) für die March/Morava bei Strážnice, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP4.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen. ....	79
Abbildung 65: Simulierte mittlere Monatsabflüsse (1. Reihe), Dauerlinie (2. Reihe) und Niederwasserbereich der Dauerlinie (3. Reihe) für die March/Morava bei Strážnice, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP8.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen. ....	80

Abbildung 66: Simulierte mittlere Monatsabflüsse (1. Reihe), Dauerlinie (2. Reihe) und Niederwasserbereich der Dauerlinie (3. Reihe) für die Thaya/Dyje bei Ladná, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP4.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen. ....	81
Abbildung 67: Simulierte mittlere Monatsabflüsse (1. Reihe), Dauerlinie (2. Reihe) und Niederwasserbereich der Dauerlinie (3. Reihe) für die Thaya/Dyje bei Ladná, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP8.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen. ....	82
Abbildung 68: Simulierte mittlere Monatsabflüsse (1. Reihe), Dauerlinie (2. Reihe) und Niederwasserbereich der Dauerlinie (3. Reihe) für die March bei Hohenau, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP4.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen. ....	83
Abbildung 69: Simulierte mittlere Monatsabflüsse (1. Reihe), Dauerlinie (2. Reihe) und Niederwasserbereich der Dauerlinie (3. Reihe) für die March bei Hohenau, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP8.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen. ....	84
Abbildung 70: Abflusskennwerte für die Simulationen für die March bei Hohenau, Verteilung der Werte mit Klimamodellen 2021-2050 (Boxplots) im Vergleich mit den Werten der Referenzperiode 1981-2010 (schwarz strichlierte Linie).....	86
Abbildung 71: Mittlere monatliche simulierte Abflüsse 2021-2050 im Median aller Klimamodelle, mit dem MPI-MPIr1-Modell, und in der historischen Referenzsimulation .....	88
Abbildung 72: Simulierter mittlerer Monatsabfluss (links) und Niederwasserbereich der Dauerlinie (rechts für die Szenarien höherer Wasserentnahme und die Referenzszenarien).....	89

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verfügbare Pegeldata (tägliche Abflüsse) .....	26
Tabelle 2: Verwendete Temperaturdaten .....	30
Tabelle 3: Auflistung der angewendeten Klimamodellketten der CORDEX-Domäne EUR-11 .....	34
Tabelle 4: Im Modell berücksichtigte Entnahmen beim Berechnungsknoten Nové Mlýny (CP 18). Werte in m <sup>3</sup> /s. ZEO: Zentrales Entnahmebauwerk. DVT: Netz kleiner Wasserläufe. ....	42
Tabelle 5: Im Modell berücksichtigter Rückfluss in die March über Berechnungsknoten Kanal K7 (CP 28), Bewässerungsentnahmen für Berechnungsknoten Ladná (CP 13) und Bewässerungsentnahmen für Berechnungsknoten Hohenau (CP 14). Werte in m <sup>3</sup> /s. ....	42

Tabelle 6: Im Modell berücksichtigte Entnahmen beim Berechnungsknoten Strážnice (CP 5). Werte in m <sup>3</sup> /s.....	43
Tabelle 7: Im Modell berücksichtigte Entnahmen beim Berechnungsknoten Lanžhot (CP 16). Werte in m <sup>3</sup> /s.....	43
Tabelle 8: Im Modell berücksichtigte Rückleitung beim Berechnungsknoten Angern (CP 17). Die Ausleitungen für Kanäle wurden zuvor bei CP 5 und CP 16 berücksichtigt. Werte in m <sup>3</sup> /s.....	44
Tabelle 9: Im Modell berücksichtigte Bewässerungsentnahmen für den Berechnungsknoten Trávní Dvůr (CP 8). Werte in m <sup>3</sup> /s. ....	44
Tabelle 10: Summe aller im Modell angenommenen Entnahmen für Bewässerung. Linke Spalte: Während Kalibrierung des Modells (historische Simulation) verwendete Entnahmen für Bewässerung. Rechte Spalte: Gesamte Entnahmen für Bewässerung inkl. CP 13 und CP 14 (flussab von Nové Mlýny). Notiz: Diese Tabelle enthält nicht die Entnahmen für Ausleitungen, die weiter flussab wieder zurückgeleitet werden. ....	45
Tabelle 11: Modellgüte für den Vergleich simulierter und beobachteter täglicher Abflüsse (die wichtigsten Pegel sind orange hervorgehoben).....	54
Tabelle 12: Vergleich der Modellgüte an der Thaya mit der Modellgüte von Simulationen der TU Wien.....	55
Tabelle 13: Klimaänderungssignale (Mittelwerte im March-Einzugsgebiet) für Temperatur $\Delta T$ [°C] und Niederschlag $\Delta P$ [%] für alle angewendeten Klimamodelle und beide Emissionsszenarien.....	74
Tabelle 14: Änderung im simulierten NQ für die March bei Hohenau, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010.....	86
Tabelle 15: Änderung im simulierten MQ für die March bei Hohenau, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010.....	87

## Abkürzungen

CHMÚ	Ceský hydrometeorologický ústav (Tschechisches Hydrometeorologisches Institut)
CLIMWAT	Klimadatenbank der Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen FAO, zur Verwendung mit CROPWAT
CMIP	Coupled Modelling Intercomparison Project (Klimaforschungsprogramm zur Vereinheitlichung in der Klimamodellierung)
CORDEX	Coordinated Regional Downscaling Experiment (Klimaforschungsprogramm zur Erstellung von RCMs)
CROPWAT	Software der FAO zur Berechnung von Verdunstung und Bewässerungsbedarf
CP	Computation Point (Berechnungsknoten des hydrologischen Modells)
DVT	Netz kleiner Wasserläufe
ESGF	Earth System Grid Federation (Datenbankensystem zur Bereitstellung von Klimasimulationen)
GCM	General Circulation Model (Global Climate Model)
GRDC	Global Runoff Data Center
HQ <sub>2</sub>	Abfluss eines 2-jährliches Hochwassers
HRU	Hydrological Response Unit (Zonen gleicher hydrologischer Eigenschaften, Zonen im hydrologischen Modell)
HZB	Hydrographisches Zentralbüro (Abteilung I/3 im BMLRT)
IPCC	International Panel on Climate Change
KGE'	Modifizierte Kling-Gupta-Efficiency
KWM	Kennzeichnende Wasserstände March
MQ	Mittelwasserabfluss
NQ	Niederwasserabfluss (94%-Quantil des Abflusses nach KWM 2018)
NQ <sub>min</sub>	Niederwasserabfluss (97.3%-Quantil des Abflusses nach KWM 2018)
NSE	Nash-Sutcliffe-Efficiency
PET	Potentielle Evapotranspiration
Q1	1%-Quantile des Abflusses
Q <sub>SIM</sub>	Simulierter Abfluss
Q <sub>OBS</sub>	Beobachteter Abfluss
RCM	Regional Climate Model
RCP	Representative Concentration Pathway (Emissionsszenario)
WCRP	World Climate Research Program
ZAMG	Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik
ZEO	Zentrales Entnahmebauwerk

## Kurzfassung

Der globale Klimawandel führt zu einer generellen Erwärmung und zu regional unterschiedlichen Veränderungen in der Niederschlagsverteilung. Diese Veränderungen beeinflussen die Abflussbildung und damit die Wasserführung der Flüsse. Ziel der vorliegenden Studie war es, Informationen zu diesen Veränderungen für die Grenzstrecke der March zwischen Österreich und der Slowakei zu erarbeiten (siehe Kapitel 1). Diese Informationen sollen in weiterer Folge in die flussbauliche Planung an der March einfließen. Im Fokus der Untersuchung waren dabei Veränderungen im Mittelwert, in der Saisonalität, in der langjährigen Verteilung sowie in den Kennwerten des Niederwassers. Aussagen zu künftigen Extremereignissen wie Hochwasser und extreme Dürre waren kein Ziel dieser Studie.

Zur Untersuchung der künftig zu erwartenden Veränderungen in der Abflussbildung wurde ein Wasserbilanzmodell für das gesamte March Einzugsgebiet von 26.600 km<sup>2</sup> eingesetzt (siehe Kapitel 3). Dieses Modell berechnet, in täglichen Zeitschritten, aus den Eingangsgrößen Niederschlag und Temperatur den Abfluss der March. Dabei werden in einem eigenen Modul menschliche Beeinflussungen durch Speicherbetrieb und Entnahme von Bewässerungswasser berücksichtigt. Das March-Modell wurde mit Beobachtungsdaten für die Periode 1981-2020 kalibriert und kann die wesentlichen Abflusseigenschaften dieses Einzugsgebiets sehr gut abbilden. Es ist daher gut geeignet, Szenarien des zukünftigen Abflusses unter geänderten Klimabedingungen zu simulieren. Als Zukunftsperiode wurde der Zeitraum 2021-2050 untersucht, der Vergleich erfolgte gegenüber der historischen 30-Jahr-Periode 1981-2010.

Eine Analyse der historischen Beobachtungsdaten (siehe Kapitel 6.1) der Lufttemperatur zeigte eine bereits deutliche Erwärmung in den letzten Jahrzehnten, von ca. 2°C gegenüber den 1960er-Jahren. Die Beobachtungen des Niederschlags und des Abflusses weisen keinen langfristigen Trend auf. In der zweiten Hälfte der 2010er-Jahre kam es aber zu einer Abfolge von trockenen, teilweise sehr trockenen Jahren (z.B. 2018), welchen dann aber wieder ein feuchteres Jahr 2020 folgte.

Informationen über zukünftig erwartbare Klimabedingungen wurden aus den Daten regionaler Klimamodelle abgeleitet (siehe Kapitel 4.3). Die angewendeten Daten der CORDEX-Initiative sind öffentlich verfügbar und stammen aus der neuesten Generation an räumlich hochaufgelösten regionalen Klimamodellen. Aufgrund ihrer kontinentalen Skala weisen die Simulationen der Klimamodelle immer systematische Abweichungen von lokalen klimatischen Verhältnissen auf, die mit in der Wissenschaft üblichen Methoden auf der Basis lokaler Beobachtungsdaten korrigiert wurden. Zur Analyse der Unsicherheit in den Klimaprojektionen wurden Informationen aus 32 verschiedenen Klimamodellläufen herangezogen (16 für ein optimistisches Szenario in Bezug auf die zukünftige Emission von Treibhausgasen, 16 für ein eher pessimistisches Emissionsszenario).

Die Klimamodelle zeigen übereinstimmend eine weitere Erwärmung im Einzugsgebiet der March von rund 1°C für den Zeitraum 2021-2050, verglichen mit 1981-2010, wobei einzelne Klimamodelle auch eine deutlich höhere Erwärmung von bis zu 1.4°C anzeigen. Für Niederschlag zeigen die Klimamodelle ebenfalls übereinstimmend einen geringen Anstieg an. Die relative Änderung im Niederschlag liegt zwischen +3% und +6%, je nach Emissionsszenario. Einzelne Modelle zeigen sogar Anstiege von über +10%.

Mit den klimatischen Eingangsdaten aus den 32 Klimamodellen wurden dann 32 hydrologische Zukunftsszenarien für Thaya und March simuliert. Diese hydrologischen Zukunftsszenarien zeigen in allen Teilen des March Einzugsgebiets einen Anstieg des Winterabflusses, der sich sowohl aus steigenden Niederschlägen als auch aufgrund eines geringeren Schneeanteils wegen der Erwärmung ergibt. Die saisonale Abflussspitze im März steigt vor allem im Thaya-Gebiet deutlich an. Für Sommer und Herbst ergeben sich kaum Veränderungen, einige Modelle zeigen einen leichten Rückgang des Abflusses, einige einen leichten Anstieg. Der auch im Sommer höhere Niederschlag in den Klimaszenarien wird durch die höhere Verdunstung, die in der Wasserbilanz des March Einzugsgebiets eine wesentliche Rolle spielt, verbraucht. Für das Niederwasser ergibt sich daraus keine deutliche Änderung, tendenziell aber eher ein geringer Anstieg (von rund 7% im Modellmittel des höheren Emissionsszenarios). Im Mittelwasser zeigt sich ein stärkerer Anstieg, von 8% bis 14% im Modellmittel je nach Emissionsszenario, wobei die Ergebnisse einzelner Modelle zwischen rund -10% und rund +40% schwanken.

Diese Ergebnisse deuten, trotz der gezeigten Unsicherheiten, für die nähere Zukunft auf keine deutlichen Veränderungen im Abfluss an der March-Grenzstrecke hin. Tendenziell kann sogar eine größere Wasserverfügbarkeit erwartet werden, in geringem Ausmaß auch im Niederwasser.

Szenariensimulationen mit höheren Entnahmen zur Bewässerung zeigen allerdings, dass schon bei einer vollen Ausschöpfung der bereits jetzt bewilligten Entnahmemengen die prognostizierte geringe Aufhöhung des Niederwassers wieder verloren wäre. Eine Erhöhung der Entnahmebewilligungen um 50% würde zu einer deutlichen Reduktion des Niederwasserabflusses führen.

# 1 Einleitung

## 1.1 Hintergrund und Ziele der Studie

Ziel der vorliegenden Studie ist die Erarbeitung von Informationen zu den erwarteten Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der österreichisch-slowakischen Grenzstrecke der March. Diese Informationen sollen im Rahmen des INTERREG V-A Slowakei-Österreich Projekts „Kli-Ma - Wasserspiegeloptimierung an der March unter besonderer Berücksichtigung des Klimawandels“ in die flussbauliche Planung im Mündungsabschnitt der March in die Donau einfließen.

Um den Einfluss des Klimawandels auf die österreichisch-slowakische Grenzstrecke der March (Länge von 69 km) zu untersuchen, muss das gesamte Einzugsgebiet der March (26,600 km<sup>2</sup>) in die Untersuchung miteinbezogen werden.

Als Zeithorizont der Untersuchung wurde der Zeitraum bis 2050 festgelegt.

Als wesentliche Ergebnisse für die nachfolgende Planung sollen Veränderungen in der Abflussführung der March erarbeitet werden – im Mittelwert, in der Saisonalität, in der langjährigen Verteilung sowie vor allem auch in den Kennwerten des Niederwassers.

Die Untersuchung von zukünftigen Extremereignissen wie Hochwasser und extremer Dürre ist nicht Ziel dieser Studie, und es sollen auch keine detaillierten Untersuchungen der Wassernutzung im Einzugsgebiet oder Empfehlungen zur zukünftigen Wassernutzung erfolgen. Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen auch keine Grundlage für Änderungen oder Festlegungen der Kennzeichnenden Wasserstände der March (KWM) sein.

## 1.2 Gewählte Vorgangsweise

### 1.2.1 Arbeitsschritte in der Klimafolgenmodellierung

Als Vorgangsweise wurde eine klassische Klimafolgenmodellierung gewählt, deren Elemente in Abbildung 1 dargestellt sind. Von der Klimaforschung bereitgestellte Klimamodelldaten, für die Vergangenheit wie für die Zukunft, werden für das Untersuchungsgebiet analysiert und mithilfe von lokalen Beobachtungsdaten für die lokalen Verhältnisse adaptiert und korrigiert (Downscaling und Bias-Correction).

Die korrigierten Klimadaten werden dann als Inputdaten für ein hydrologisches Modell des Einzugsgebiets verwendet, das zuvor mit unterschiedlichen räumlichen Grundlagendaten (Geländehöhe, Landnutzung, ...) erstellt und anhand von Beobachtungsdaten kalibriert wurde. Aus den Ergebnissen der hydrologischen Simulationen mit Klimamodelldaten können Veränderungen in der natürlichen Wasserbilanz analysiert werden. Für anthropogen genutzte Flussgebiete ist zusätzlich

der Einfluss des Menschen (durch z.B. Speicherbetrieb und Wassernutzung und -entnahme) zu berücksichtigen.

Als Klimamodelldaten wurden wie bei derartigen Untersuchungen üblich Ergebnisse mehrerer Regionaler Klimamodelle (RCMs), eines sogenannten Ensembles an Klimamodellen, mit hoher räumlicher Auflösung von 12 km angewendet (CORDEX-Klimamodelle, siehe Kapitel 4.3). Die Berücksichtigung der Simulationen und Projektionen mehrerer Klimamodelle, sowie verschiedener Treibhausgas-Emissionsszenarien, ermöglicht eine Analyse der Unsicherheiten der Klimamodellierung.

Eine quantitative Abschätzung der erwartbaren Folgen des Klimawandels für das Untersuchungsgebiet ergibt sich schließlich durch einen Vergleich der Simulationen für die Zukunft (Zukunftsperiode) mit den Simulationen für den Vergleichszeitraum in der Vergangenheit (Referenzperiode).

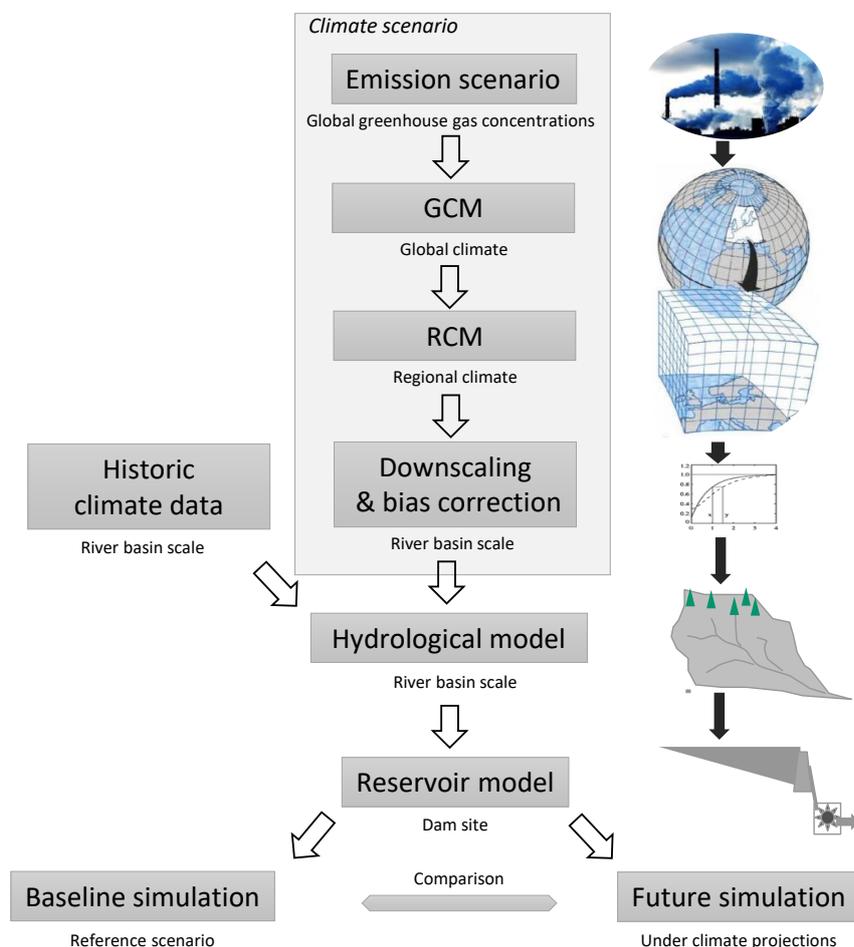


Abbildung 1: Vorgangsweise Klimafolgenmodellierung

### 1.2.2 Korrektur der Klimamodelldaten

Als Methode für das Downscaling bzw. die Korrektur der Klimadaten wurde die Delta-Change-Methode gewählt. Bei diesem Verfahren werden aus den einzelnen Klimamodellen des Modellensembles die Klimaänderungssignale zwischen der gewählten Zukunftsperiode und der historischen Referenzperiode bestimmt. Diese Änderungssignale werden dann den beobachteten Zeitreihen der Referenzperiode aufgeprägt.

Im vorliegenden Projekt werden monatliche Änderungssignale der Temperatur und des Niederschlags abgeleitet und angewendet, für jedes Klimamodell, jedes Emissionsszenario und jede räumliche Einheit des hydrologischen Modells. Für die Temperatur wird das absolute Änderungssignal (in °C) abgeleitet und durch Addition dem Beobachtungswert aufgeprägt. Für den Niederschlag wird das relative Änderungssignal (in %) abgeleitet und durch Multiplikation dem Beobachtungswert aufgeprägt (da eine Subtraktion von Absolutwerten zu negativen Werten führen könnte).

Im Unterschied zu anderen Bias-Korrektur-Methoden bleiben dadurch in der Szenariensimulation die statistischen Eigenschaften der Beobachtungszeitreihe erhalten. Diese Vorgangsweise ist mit Vor- und Nachteilen verbunden.

Als Vorteil wird es im vorliegenden Projekt angesehen, weil ein Fokus auf der Untersuchung von Niederwasserperioden liegt, die stark durch das Persistenzverhalten von Trockenperioden geprägt sind. Gerade die Persistenz im Niederschlag kann in Klimamodellen erst unzureichend abgebildet werden und muss daher für jedes einzelne Modell analysiert und/oder durch aufwendige mehrstufige Methoden korrigiert werden (z.B. Multivariate Recursive Nesting Bias Correction, Mehrotra und Sharma 2015). Aufgrund der unzureichenden Abbildung von Persistenz und interannualer Variabilität ist es auch zweifelhaft, ob die Änderungen in diesen Eigenschaften, welche die Klimamodelle für die Zukunft in den Szenariensimulationen anzeigen, aussagekräftig und verlässlich sind.

Allgemein kann aber als Nachteil angesehen werden, dass Änderungen in der zeitlichen Verteilung der Niederschläge, die sich aus Klimaprojektionen ergeben, mit der Delta-Change-Methode gar nicht berücksichtigt werden. Aufgrund der beschränkten Ressourcen im vorliegenden Projekt wurde der Vorteil der verlässlich anwendbaren und robuste Zukunftsszenarien liefernden Delta-Change-Methode als deutlich überwiegend angesehen.

### 1.2.3 Untersuchungsperioden

Auf der Grundlage der verfügbaren Daten sowie der Festlegung auf einen Zukunftshorizont bis 2050 wurden die Untersuchungsperioden wie folgt gewählt (siehe Abbildung 2):

- Referenzperiode 1981-2010
- Zukunftsperiode 2021-2050

Diese Festlegung basiert auf den folgenden Überlegungen:

- 30-Jahr-Perioden der Auswertung sind gegenüber kürzeren Zeiträumen (wie z.B. den 20-Jahr-Perioden der IPCC-Reports) vorzuziehen. Je länger die untersuchte Periode, umso weniger ist das Ergebnis von zufälligen Schwankungen des längerfristigen Wettergeschehens (Trockenphasen, Kältephasen, etc.) beeinflusst.
- Die Referenzperiode 1981-2010 entspricht der Referenzperiode der meisten Parameter der KWM 2018.
- Die Zukunftsperiode 2021-2050 ermöglicht eine durchgehende Simulation von 1980-2050, da bis zum Ende des Jahres 2020 Beobachtungsdaten vorliegen.
- Die Zukunftsperiode 2021-2050 entspricht auch einer der Untersuchungsperioden aus vorangegangenen Auswertungen an der Donau (Kling et al. 2012, Stanzel et al. 2018), so dass ein direkter Vergleich der Ergebnisse mit dieser und auch anderen Studien möglich ist.

Eine Übersicht über die verschiedenen Analyseperioden zeigt Abbildung 2.



Abbildung 2: Analyseperioden

## 2 Überblick über vorhandene Studien

### 2.1 Literatur

Eine Untersuchung von hydrologischen Klimawandelfolgen speziell für die March liegt nach den in dieser Studie durchgeführten Recherchen noch nicht vor. Es gibt aber großräumigere Untersuchungen, in denen auch Ergebnisse für das March-Einzugsgebiet publiziert wurden

Hanel et al. (2012) untersuchten den Einfluss des Klimawandels auf den Wasserkreislauf in ganz Tschechien. Sie wandten dabei das hydrologische Modell BILAN an und verwendeten Klimamodelldaten der ENSEMBLES-Generation (Vorgänger von CORDEX) sowie ein zusätzliches tschechisches Klimamodell (insgesamt 15 Klimamodellprojektionen des eher pessimistischen Emissionsszenarios A1B mit einer räumlichen Auflösung von 25 km). Die Bias-Korrektur der Klimamodelldaten erfolgte über die Delta-Change-Methode. In den veröffentlichten Ergebnissen verglichen sie die Zukunftsperiode 2070-2099 mit der Referenzperiode 1961-1990. Abbildung 3 zeigt die simulierten saisonalen und jährlichen relativen Änderungen im Abfluss zwischen den beiden Perioden (vermutlich für den Modell-Median, das wird nicht explizit angeführt). Im Bereich des March-Einzugsgebiets ergeben sich deutliche Anstiege des Abflusses im Winter und deutliche Rückgänge im Sommer. In den anderen Jahreszeiten sowie im Jahresmittel werden geringe Rückgänge berechnet. In einer Tabelle dieser Studie wurden die Absolutwerte (in mm) für die Einzugsgebiete der Morava und Dyje zusammengefasst. Die Änderungen im Jahresmittel des Niederschlags betragen darin -27 mm für die Morava und -37 mm für die Dyje (wiederum vermutlich der Median der Modellergebnisse). Detailliertere Informationen zu den Abflüssen in der oberen March/Morava und der Dyje liegen in dieser Publikation nicht vor.

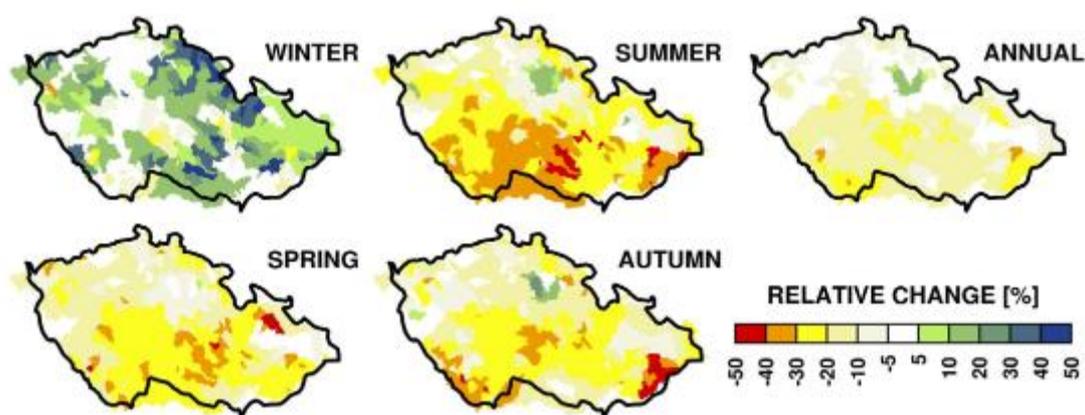


Abbildung 3: Saisonale und jährliche relative Änderungen in der Abflusshöhe zwischen 2070-2099 und 1961-1990, aus Hanel et al. 2012

Stagl und Hattermann (2015) führten eine Klimawandelfolgenstudie für die gesamte Donau durch und veröffentlichen darin auch einige wenige Grafiken zu Zubringern, darunter die in Abbildung 4 wiedergegebene für die March bei Moravský Svätý Ján (dem slowakischen Pegel etwa auf Höhe von Hohenau). Für ihre Simulationen verwendeten sie das hydrologische Modell SWIM in Tagesschritten; für die Kalibrierung verwendeten sie als meteorologische Eingangsdaten den WATCH-Datensatz, eine Kombination aus großräumigen Beobachtungsdatensätzen und dem Reanalyse-Datensatz ERA-40. Dieser global verfügbare Datensatz weist typischerweise Abweichungen von regionalen Beobachtungen auf. Die Modellgüte der Simulation für Moravský Svätý Ján wird von den Autoren mit einer Nash-Sutcliffe-Efficiency von 0,72 bzw. 0,74 angegeben.

Als Klimamodellinput verwendeten Stagl und Hattermann wie Hanel et al. 14 GCM-RCM-Kombinationen aus dem ENSEMBLES-Datensatz unter Emissionszenario A1B. In einer eher unüblichen Vorgangsweise führten sie keine Bias-Korrektur der Klimamodelldaten durch, sondern nutzten sowohl für die Referenzsimulation als auch für die Zukunftsszenarien die unkorrigierten Daten und werteten dann nur die Differenz aus. Aufgrund der teilweise falschen Saisonalität in den Klimamodelldaten werden so allerdings vermutlich Prozessabläufe simuliert, die in der Realität gar nicht oder ganz anders erfolgen.

Die Ergebnisse für Moravský Svätý Ján für die Periode 2031-2060 (Abbildung 4) zeigen einerseits eine relativ große Unsicherheit, andererseits das typische Muster von ansteigenden Abflüssen im Winter und geringen Änderungen (mit einer Tendenz zum Rückgang) in den anderen Monaten. Im Gegensatz zu Hanel et al. 2012 zeigt sich kein deutlicher Rückgang im Sommer, was an der Verwendung eines etwas anderen Modellensembles liegen kann, vermutlich vor allem aber auf die frühere Untersuchungsperiode mit geringerer Erwärmung und daher geringerer Verdunstung im Sommer zurückzuführen ist.

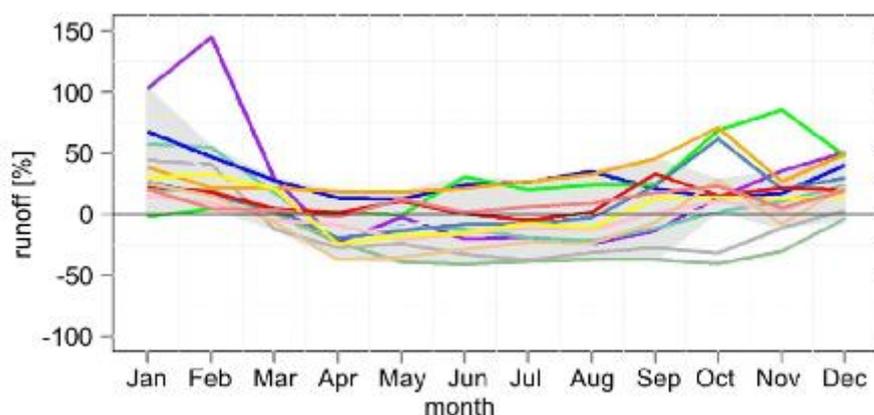


Abbildung 4: Saisonale relative Änderungen im Abfluss in der March-Grenzstrecke bei Moravský Ján zwischen 2031-2060 und 1971-2000, aus Stagl und Hattermann 2015

Ergebnisse einer kontinentalen Studie zum Einfluss des Klimawandels auf das Abflussgeschehen liegen vom schwedischen hydro-meteorologischen Dienst SMHI vor<sup>1</sup>. Dafür wurde das hydrologische Modell E-HYPE für ganz Europa angewendet und mit Klimamodelldaten aus 11 CORDEX-Simulationsläufen (unter drei verschiedenen Emissionsszenarien) angetrieben. Ergebnisse der Klimaszenariensimulationen können auf der Website des Projekts für verschiedene Zeiträume angezeigt werden, Abbildung 5 zeigt die relative Änderung des Abflusses in den 2050er-Jahren im Vergleich zu 1971-2000 für den Pegel Moravský Svätý Ján für RCP8.5. Man erkennt einen starken Anstieg im Winter und geringe Veränderungen im Rest des Jahres, wobei für den Sommer alle Modellsimulationen eine relativ deutliche Abflussabnahme ergeben. Das Klimamodellensemble für jedes einzelne Emissionsszenario ist allerdings klein, mit nur vier Modellen im RCP8.5.

Eine weitere Schwachstelle dieser Auswertung ist die hydrologische Simulation. Für kleinere Flüsse (auf der kontinentalen Skala also auch für die March) weist das E-HYPE Modell eine schlechte Kalibrierungsgüte auf. Für Moravský Svätý Ján wird eine um 36% zu hohe Simulation des mittleren Abflusses angegeben, die beiden Güte-Kriterien Nash-Sutcliffe Efficiency NSE und Kling-Gupta-Efficiency KGE<sup>3</sup> liegen im Bereich von 0,4 bis 0,6, was für eine regionale Auswertung in diesem Gebiet keine ausreichende Güte darstellen würde.

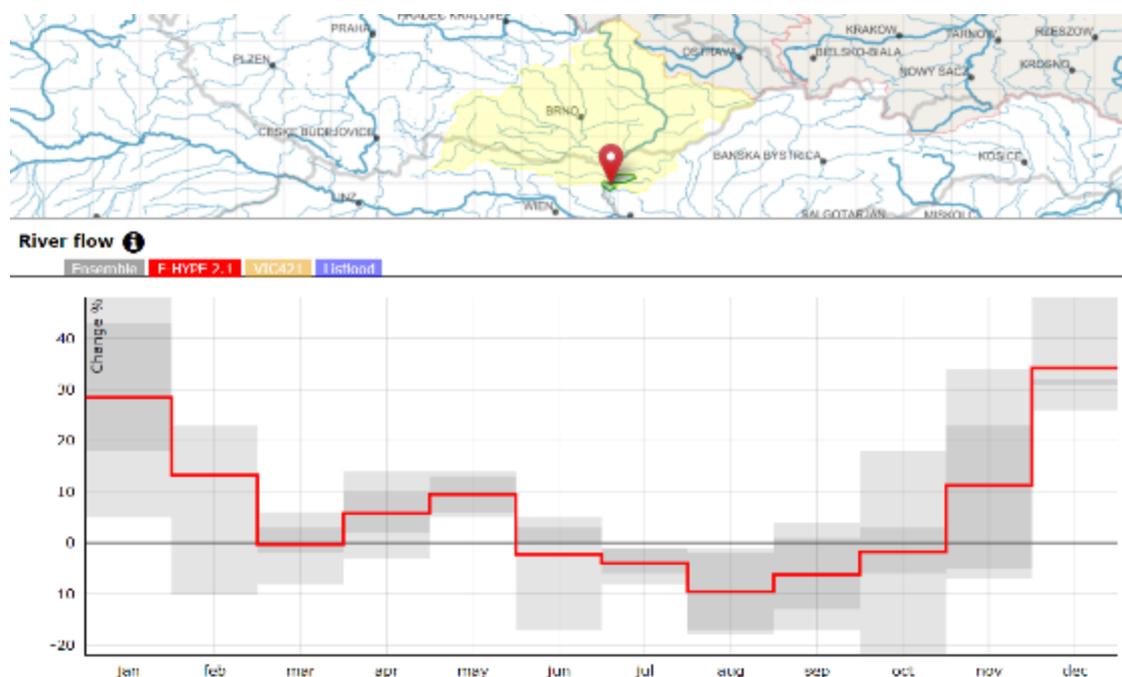


Abbildung 5: Saisonale relative Änderungen im Abfluss in der March-Grenzstrecke bei Moravský Ján zwischen einer Periode um 2050 und der Referenzperiode 1971-2000, im Modell E-HYPE mit einem Ensemble aus 4 CORDEX-Klimamodellläufen des Emissionsszenarios RCP8.5, aus Hypeweb<sup>1</sup>

<sup>1</sup> <https://hypeweb.smhi.se/explore-water/>

## 2.2 INTERREG AT-CZ Projekt Klimawandel Thaya

Gleichzeitig mit der vorliegenden Studie läuft seit 1.1.2020 das INTERREG AT-CZ Projekt „Auswirkungen des Klimawandels auf das Einzugsgebiet der Thaya“, das für einen Teil des Marcheneinzugsgebiets ähnliche Fragestellungen bearbeitet. Der Lead Partner des Projekts ist das Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Projektpartner sind auf österreichischer Seite die Technische Universität Wien und die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), auf tschechischer Seite die Wasserbauverwaltung Povodí Moravy, das hydrometeorologische Institut CHMÚ, die Wasserversuchsanstalt VUVH und das CzechGlobe Institut. Das Projekt wird mit rund 500.000 Euro aus den Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) gefördert und hat eine Laufzeit von 3 Jahren.

Laut der Projekthomepage ist „das übergeordnete Ziel [des Projekts] ... die Prognostizierung und Analyse der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt des grenzübergreifenden Einzugsgebietes der Thaya und hierauf basierend die Erarbeitung einer bilateral abgestimmten Betriebsordnung für die Stauseen in Tschechien für Trockenperioden in der Zukunft.“

Aufgrund der räumlichen und inhaltlichen Überschneidungen des Projekts mit der gegenständlichen Studie, wurde ein (virtueller) gemeinsamer Workshop zum Informationsaustausch abgehalten, bei dem ein Zwischenbericht des Projekts „Auswirkungen des Klimawandels auf das Einzugsgebiet der Thaya“ zur Verfügung gestellt wurde. Zum Zeitpunkt der Erstellung des gegenständlichen Berichts lagen Simulationen des historischen Abflusses in der Thaya durch die TU Wien vor, die in Kapitel 5.3 den vergleichbaren Ergebnissen dieser Studie gegenübergestellt werden.

## 3 Wasserbilanzmodell für die March

### 3.1 Modellstruktur

Für diese Studie wurde das Einzugsgebietsmodell (*River Basin Model*) von AFRY Austria GmbH in Tagesschritten angewendet. Das Modell besteht aus zwei direkt gekoppelten Teilmodellen (Abbildung 6):

- *Water Balance Model* (Niederschlags-Abflussmodell COSERO)
- *Water Allocation Model* (Routing und Wasserressourcen Management)

Das *Water Balance Model* verwendet Niederschlag und Lufttemperatur als Eingangsdaten um die Wasserbilanz anhand einer Reihe von Modulen zu simulieren. Das Schneemodul berücksichtigt die Speicherung und Schmelze von Wasser in der Schneedecke. Das Bodenmodul simuliert die Prozesse der Bodenfeuchte, Evapotranspiration und Abflusentstehung. In drei weiteren Modulen werden die Abflusskomponenten Oberflächenabfluss, Zwischen-Abfluss und Basisabfluss berücksichtigt. Im Modell erfolgt eine räumliche Unterteilung eines Einzugsgebiets in mehrere *Subbasins*, welche wiederum in *Hydrological Response Units* (HRUs) unterteilt sind. In der Terminologie von COSERO werden HRUs als Zonen bezeichnet.

Das *Water Allocation Model* simuliert die Aggregation und das Routing von Abfluss entlang des Gewässernetzes, sowie den Einfluss von Bewirtschaftungsmaßnahmen. Der Einfluss von Speichern auf die Abflussverhältnisse wird im Modell explizit durch das *Water Allocation Model* simuliert. Das Modell erlaubt die Berücksichtigung folgender Einflüsse:

- Speicher inkl. Betriebsregeln (Guide Curve, Target Release, Environmental Flow)
- Ausleitungen (Bewässerung, Entnahmen für Trinkwasser)
- Überleitungen (z.B. von Speichern zu anderen Speichern)
- Gewässer-Routing (Wellentransformation, Fließzeit, Retention in z.B. Auwäldern)
- Wasserbilanz (inklusive Verdunstungsverluste) natürlicher und künstlicher Seen

Die Simulation erfolgt von Berechnungsknoten zu Berechnungsknoten (*Computation Point*, CP) entlang des Gewässernetzes. Die Anzahl der Berechnungsknoten ist frei wählbar, mit der einzigen Einschränkung, dass bei jedem *Subbasin* zumindest ein Berechnungsknoten liegen muss. Berechnungsknoten können auch nachträglich ins Modell eingefügt werden. Dies erlaubt grundsätzlich eine Analyse verschiedenster Szenarien:

- Veränderte Betriebsregeln der Speicher
- Bau neuer Speicher
- Entfernen aller Speicher (Simulation des natürlichen Abflussregimes)
- Neue oder veränderte Entnahmen (aus Speichern oder direkt aus dem Fluss)

Für Speicher und natürliche Seen simuliert das Modell explizit folgende Wasserbilanzkomponenten:

- Zufluss (Zubringer, lateral, sowie gesamt)
- Wasserstand, Wasserfläche, Wasservolumen
- Niederschlag auf und Verdunstung vom Wasserkörper
- Entnahmen und Ausleitungen, Gesamtabfluss bzw. Speicherabgabe

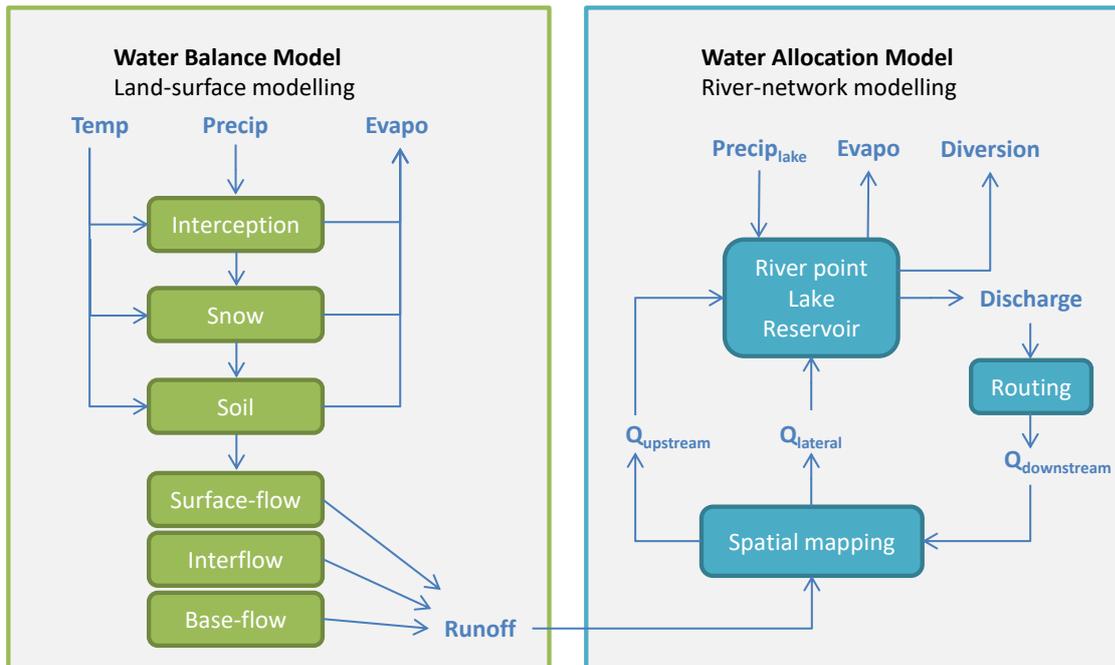


Abbildung 6: Skizze der Modellstruktur

### 3.2 Zeitliche und räumliche Diskretisierung des March-Modells

Das Wasserbilanzmodell für die March wurde für eine Anwendung in täglichen Zeitschritten erstellt.

Die räumliche Diskretisierung erfolgte in 15 Teileinzugsgebiete (in weiterer Folge als Subbasins bezeichnet, siehe Abbildung 7). Die Unterteilung in Subbasins basiert auf der Lage von Pegeln.

Die Subbasins wurden wiederum in insgesamt 78 sogenannte Hydrological Response Units (HRU) unterteilt (Abbildung 8). Diese zweite Unterteilung erfolgte primär nach Höhenzonen, welche mit der Landnutzung (Ackerland/Grünland in tieferen Lagen, Wald in höheren Lagen) und teilweise auch Bodentypen gut korreliert. Zusätzlich wurden in

manchen Subbasins auch die Teileinzugsgebiete kleinerer Zubringer unterschieden. Pro Subbasin ergaben sich maximal sieben HRUs.

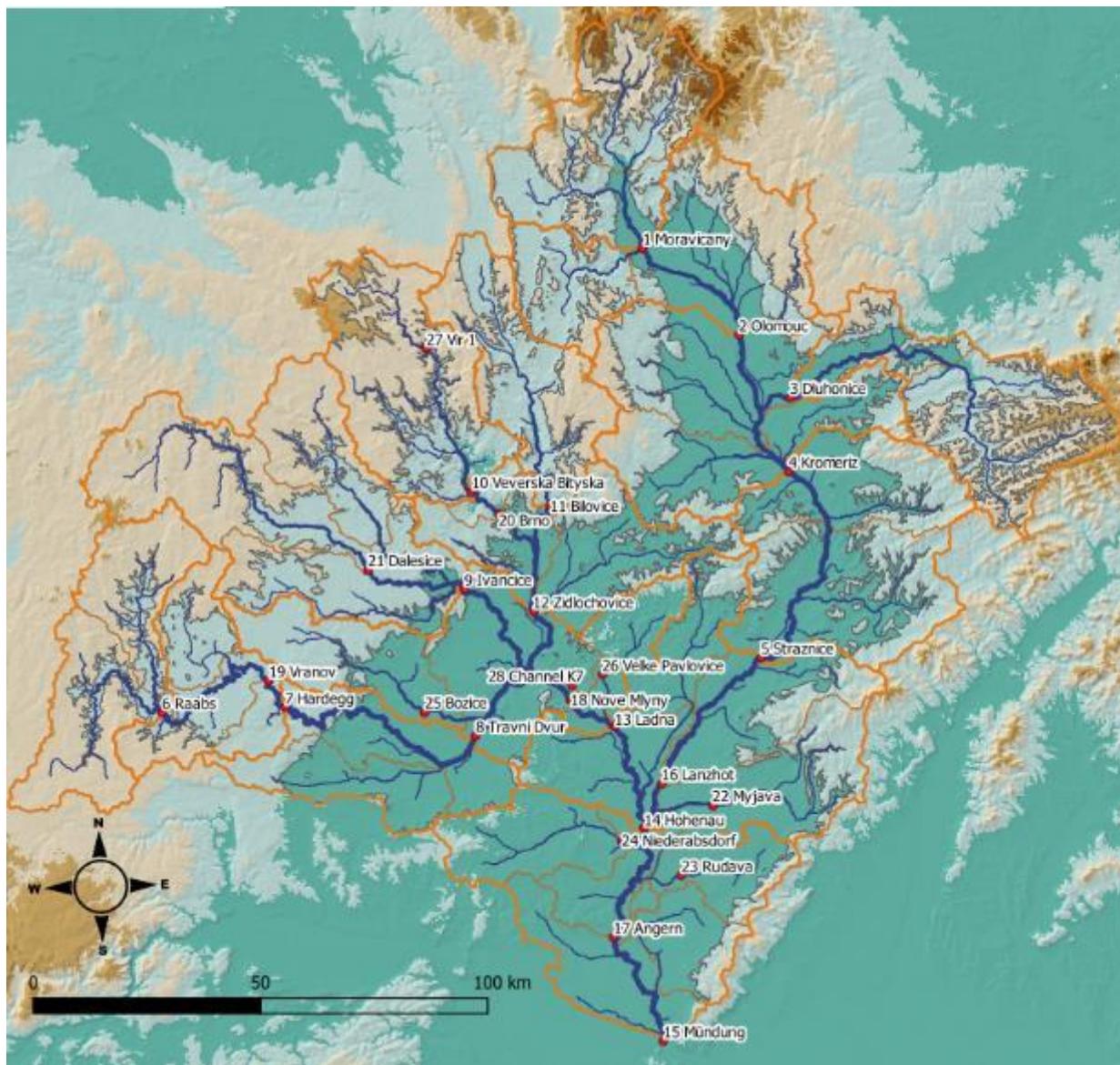


Abbildung 7: Räumliche Diskretisierung des March-Modells in Subbasins (dicke orange Linien), Computation Points (rote Punkte), sowie HRUs abgeleitet nach Höhenzonen (dünne graue Linien) und Teileinzugsgebieten (dünne orange Linien).

Die Analyse der Höhenzonen, Landnutzung und Bodentypen erfolgte auf der Grundlage der folgenden Datensätze (siehe auch Abbildung 9):

- Höhenmodell: Hydrosheds 3s
- Landnutzung: Copernicus Land Cover, CGLOPS-1, Issue I3.3
- Bodentypen: Soil maps of Europe, Joint Research Center, EU

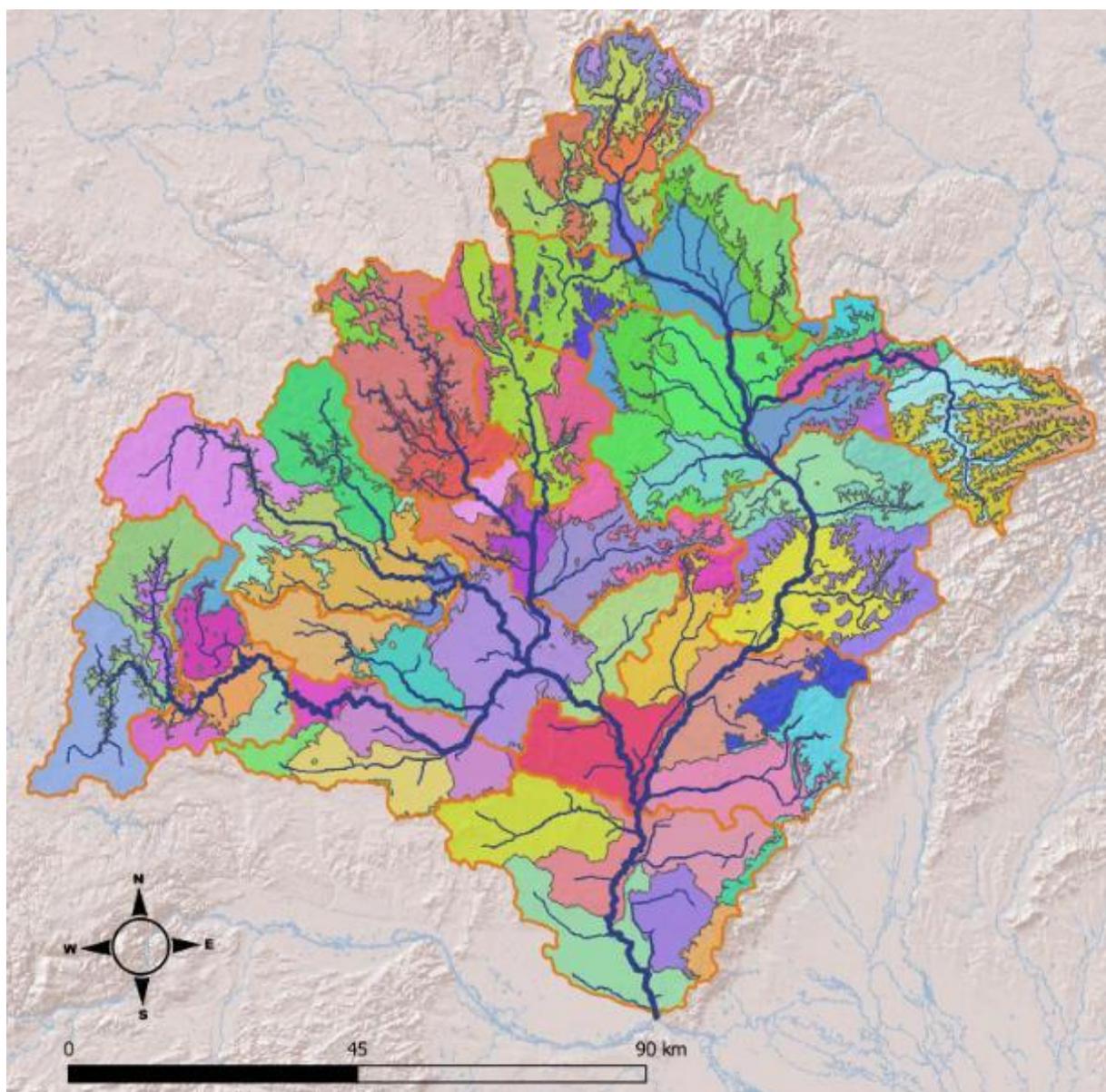
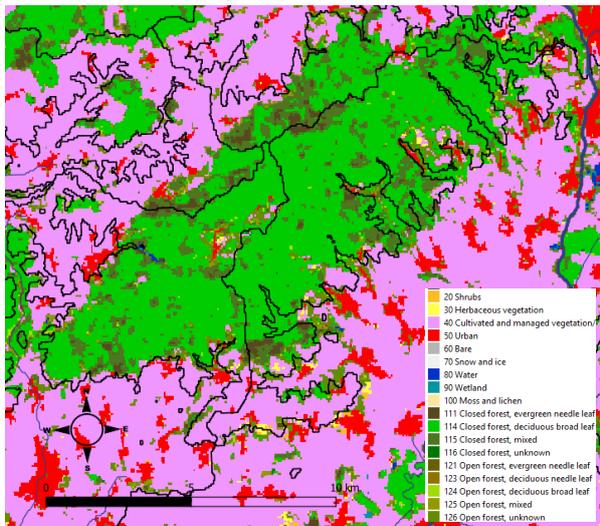


Abbildung 8: HRUs im March-Modell

Das Gewässernetz und die Teileinzugsgebietsgrenzen wurden aus Hydrosheds abgeleitet. In ausgewählten Abschnitten wurde auch durch die Funktion „stream burning“ die Lage des berechneten Gewässernetzes korrigiert, damit dieses mit dem Luftbild übereinstimmt (Abbildung 10). Durch diesen Arbeitsschritt konnte eine sehr gute Übereinstimmung erzielt werden.

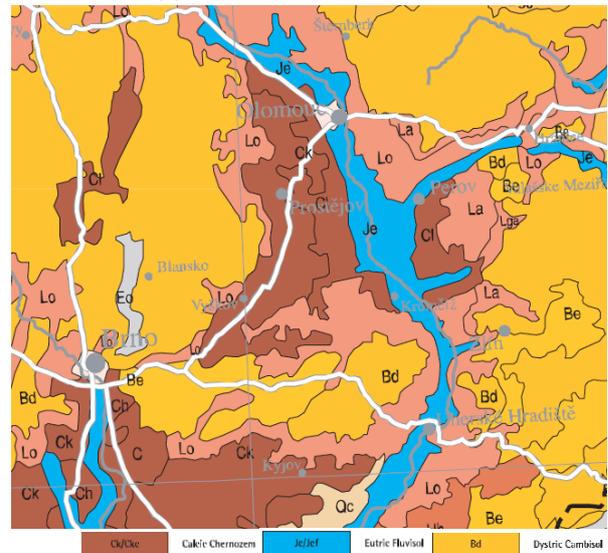
Als Computation Points des March-Modells wurden nicht nur die Gebietsauslässe der einzelnen Subbasins, sondern auch zusätzliche relevante Knoten (z.B. Speicher oder Pegel kleinerer Zubringer) definiert. Insgesamt wurden für die Anwendung in dieser Studie 28 Computation Points verwendet (Abbildung 7), wobei bei zukünftigen Anwendungen weitere Punkte auch später noch eingefügt werden können.

### Landnutzung



Quelle: Copernicus Land Cover, CGLOPS-1, Issue I3.3

### Bodentypen



Quelle: Soil maps of Europe, Joint Research Center, EU

Abbildung 9: Landnutzungs- und Bodentypen-Datensätze als Basisinformation für die hydrologische Modellierung. Links: Verteilung von Wald (grün) und Ackerland (rosa) im Vergleich zu den gewählten HRU Grenzen (schwarze Linien) im Gebiet südlich von Kroměříž. Rechts: Verteilung von Braunerde (gelb), Tschernosem (braun), sowie Fluvisol im Gebiet von Brno und Olomouc.



Abbildung 10: Vergleich von Gewässernetz aus Hydrosheds 15s (hellblau) und berechnet auf Basis von Hydrosheds 3s inkl. "stream burning" (dunkelblau). Zusammenfluss der Thaya und Morava bei Hohenau.

## 4 Inputdaten

### 4.1 Historische Daten

Für die Kalibrierung des hydrologischen Modells wurden Beobachtungsdaten des Abflusses, des Niederschlags, der Lufttemperatur sowie der potenziellen Verdunstung verwendet. Zusätzlich wurden Daten zu den größeren Speichern im Einzugsgebiet gesammelt.

#### 4.1.1 Abfluss

Tabelle 1 listet die verwendeten Pegel, die jeweilige Datenquelle sowie den Beginn und das Ende der täglichen Beobachtungsreihen des Abflusses auf. Die Tabelle listet nur jene Pegel auf, die im Modell abgebildet wurden (CP Nummer). Zusätzliche Pegel sind im Einzugsgebiet verfügbar. Insgesamt ist die Datenverfügbarkeit für die Zielsetzung dieser Studie als sehr gut einzustufen.

Abflussdaten waren für insgesamt 22 Pegel in Tschechien (von Český hydrometeorologický ústav ČHMÚ) und Österreich (vom Hydrographischen Zentralbüro HZB) verfügbar, für den Pegel Moravičany wurde zusätzlich eine lange historische Zeitreihe vom Global Runoff Data Center (GRDC) bezogen. Die Lage der wichtigsten Pegel, die daher auch als Computation Points gewählt wurden, ist in Abbildung 7 ersichtlich.

Tabelle 1: Verfügbare Pegel­daten (tägliche Abflüsse)

CP	Pegel	Daten­quelle	Beginn	Ende
1	Morava @ Moravičany	ČHMÚ, GRDC	1912	2020
2	Morava @ Olomouc	ČHMÚ	1980	2020
3	Bečva @ Dluhonice	ČHMÚ	1980	2020
4	Morava @ Kroměříž	ČHMÚ	1980	2020
5	Morava @ Strážnice	ČHMÚ	1980	2020
6	Thaya @ Raabs	HZB	1959	2017
7	Thaya @ Hardegg	HZB	1977	2017
8	Dyje @ Trávní Dvůr	ČHMÚ	1980	2020
9	Jihlava @ Ivančice	ČHMÚ	1980	2020
10	Svratka @ Veverská Bítýška	ČHMÚ	1980	2020
11	Svitava @ Bílovice	ČHMÚ	1980	2020
12	Svratka @ Židlochovice	ČHMÚ	1980	2020
13	Dyje @ Ladná	ČHMÚ	1987	2020
14	March @ Hohenau	HZB	1986	2020
16	Morava @ Lanžhot	ČHMÚ	1998	2020
17	March @ Angern	HZB	1977	2020
18	Dyje @ Nové Mlýny	ČHMÚ	1989	2020
19	Dyje @ Vranov	ČHMÚ	1980	2020
20	Svratka @ Brno	ČHMÚ	1980	2020
24	Zaya @ Niederabsdorf	HZB	1977	2020
25	Jevišovka @ Božice	ČHMÚ	1980	2020
26	Trkmanka @ Velké Pavlovice	ČHMÚ	1999	2020

#### 4.1.2 Niederschlag

Tägliche Niederschlags­daten wurden von 86 Stationen verwendet, die in Abbildung 11 dargestellt und mit ihrem Namen verzeichnet sind. Die Daten wurden vom ČHMÚ, vom Hydrographischen Dienst (HD) Niederösterreich sowie vom HZB zur Verfügung gestellt. Es wurden die Niederschlags­daten von 1961 bis 2020 (sofern vorhanden) verwendet. Bei 70 Stationen waren die Daten lückenfrei für diesen Zeitraum verfügbar. Die Daten­verfügbarkeit wird sowohl hinsichtlich der räumlichen als auch der zeitlichen Abdeckung als sehr gut bewertet.

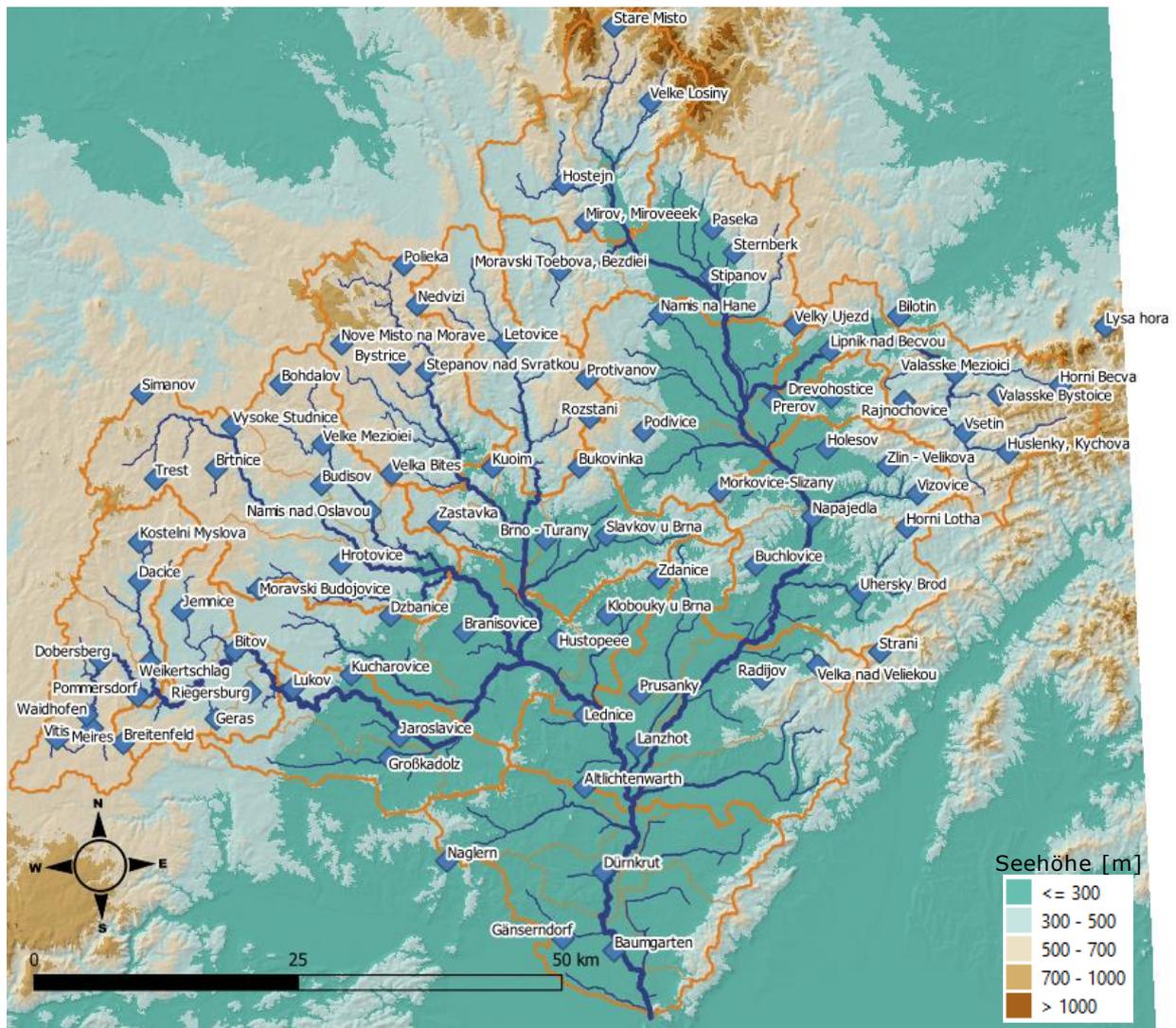


Abbildung 11: Verwendete Niederschlagsstationen

Die Regionalisierung der Stationsniederschlagsdaten erfolgte unter der Verwendung einer räumlich hochaufgelösten (1x1 km Raster) Niederschlagskarte (Abbildung 12). Das räumliche Muster innerhalb eines Subbasins wurde beibehalten, um die Inputs der HRUs des hydrologischen Modells zu berechnen. Der tägliche Niederschlag in jedem Subbasin wurde aus den Stationsdaten als Anomalien (Tageswert in Relation zum mittleren Jahresniederschlag) aufgeprägt. Dazu wurden ca. 2-5 Stationen in jedem Subbasin verwendet. Die Berechnung erfolgte als Mittelung der Anomalien der einzelnen Stationen. Diese Methode ist auch bei Ausfall (Datenlücke) von einzelnen Stationen anwendbar, da sich automatisch die effektive Gewichtung der Stationen (Mittelung der Stationsanomalien) anpasst.

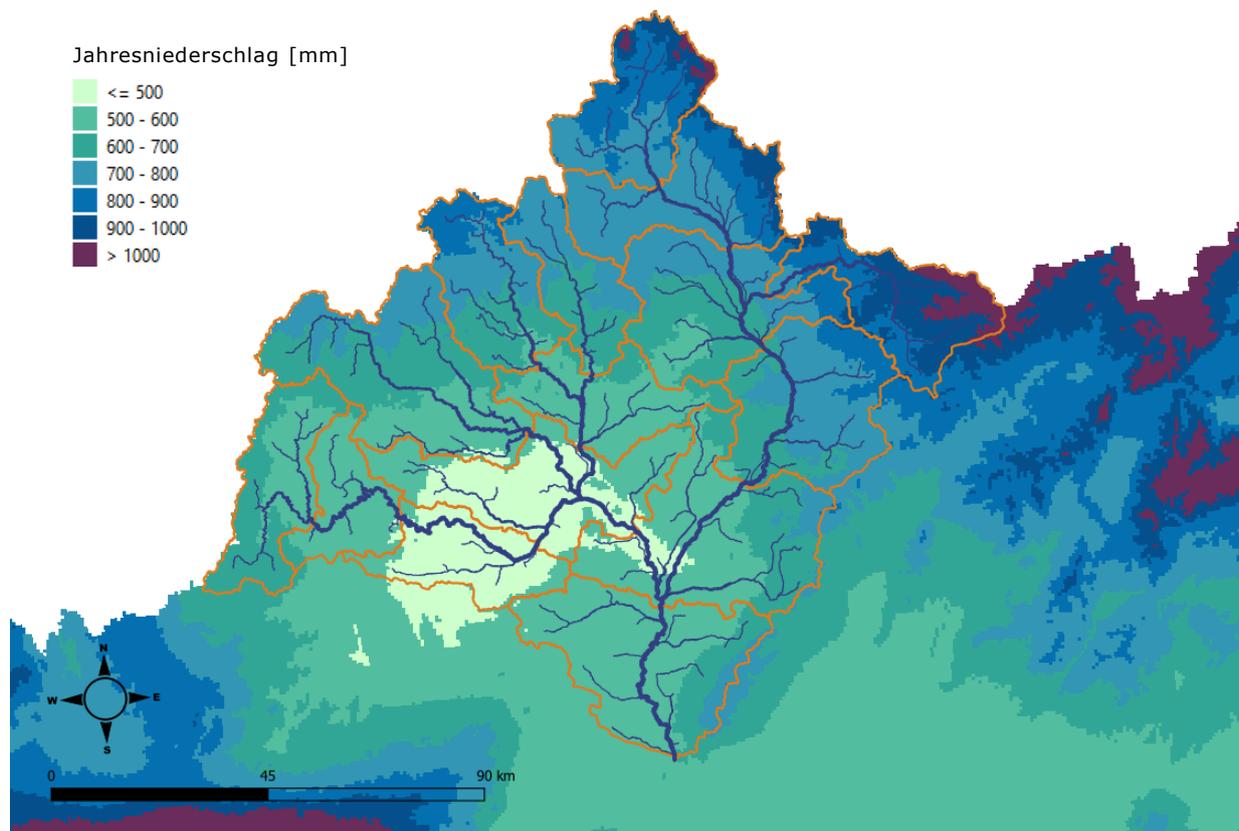


Abbildung 12: Niederschlagskarte aus dem IHP UNESCO Projekt "WatBal, Regional Cooperation of the Danubian Countries", GIS Datensatz erstellt von Holko et al. mit External Drift Kriging im Jahr 2004, basierend auf hunderten von Stationen im Donaunraum. Mittlerer Jahresniederschlag repräsentativ für die Periode 1971-2000.

Die einzelnen Schritte der Methode sind im folgenden nochmals etwas genauer erläutert:

- Schritt 1: Berechnung des langjährigen mittleren Jahresniederschlags in jeder HRU auf Basis einer hochaufgelösten Niederschlagskarte (Abbildung 12).
- Schritt 2: Berechnung des langjährigen mittleren Jahresniederschlags (1971-2000) bei jeder Station.
- Schritt 3: Pro Station und in jedem täglichen Zeitschritt Berechnung des Verhältnisses zwischen Tagesniederschlag und langjährigem mittleren Jahresniederschlag (aus Schritt 2). Dies wird in weiterer Folge als (tägliche) „Anomalie“ bezeichnet.
- Schritt 4: Räumliche Zuordnung von 2-5 Stationen zu jedem Subbasin. Um eine ausgeglichene Zuordnung zu erhalten, wurden teilweise auch Stationen verwendet, die knapp außerhalb der Subbasin-Grenzen liegen (sofern keine anderen Stationen in diesem Teil des Subbasin verfügbar waren).
- Schritt 5: Mittelung der Anomalie (Schritt 3) für alle Stationen eines Subbasin (Schritt 4). Bei Datenausfall erfolgte die Mittelung nur für die verfügbaren

Stationen. Das Ergebnis dieses Schrittes ist eine „räumlich gemittelte tägliche Anomalie“ pro Subbasin.

- Schritt 6: Multiplikation der räumlich gemittelten täglichen Anomalie (Schritt 5) mit dem langjährigen mittleren Jahresniederschlag (Schritt 1) in jeder HRU. Das Ergebnis ist eine tägliche Niederschlagszeitreihe in jeder HRU, mit folgenden Eigenschaften:
  - Die täglichen Zeitreihen sind lückenfrei.
  - Die täglichen Zeitreihen zeigen die zeitliche Dynamik der Stationsdaten.
  - Die räumliche Verteilung der Niederschlagskarte bleibt erhalten, das heißt im langjährigen Jahresmittel sind die HRU Werte gleich der Niederschlagskarte. Dies ist insbesondere in hügeligen/bergigen Regionen mit hohen Niederschlagsgradienten von Vorteil.

In manchen Regionen zeigten die Werte der Niederschlagskarte eine Abweichung zu den mittleren Jahresniederschlägen der Stationsdaten (Vergleich Pixelwert zu Stationswert). Hier wurde eine regionale Anpassung der Jahreswerte der Niederschlagskarte um ca. +/-10% vorgenommen (im Mittel -5% über alle Subbasins), um die HRU Jahresniederschläge zu berechnen (siehe oben Schritt 1).

Als Ergebnis der Datenaufbereitung liegen für jede HRU Niederschlag-Eingangsdaten in täglichen Zeitschritten 1961-2020 vor.

#### 4.1.3 Lufttemperatur

Tägliche Temperaturdaten wurden nur von 8 Stationen verwendet, weil hier eine gute räumliche Abdeckung weniger wichtig ist als eine gute Abdeckung verschiedener Seehöhen im Einzugsgebiet (Abbildung 13, Tabelle 2). Durch die Berücksichtigung der etwas außerhalb des Einzugsgebiets gelegenen Station Lysá hora konnte dies erreicht werden.

Die Regionalisierung (Berechnung der HRU Werte) erfolgte durch lineare Interpolation der Temperatur mit der Seehöhe. Dafür wurden jeder Zone eine hoch- und eine tiefliegende Station zugeordnet.

Als Ergebnis der Datenaufbereitung liegen für jede HRU Lufttemperatur-Eingangsdaten in täglichen Zeitschritten 1961-2020 vor.

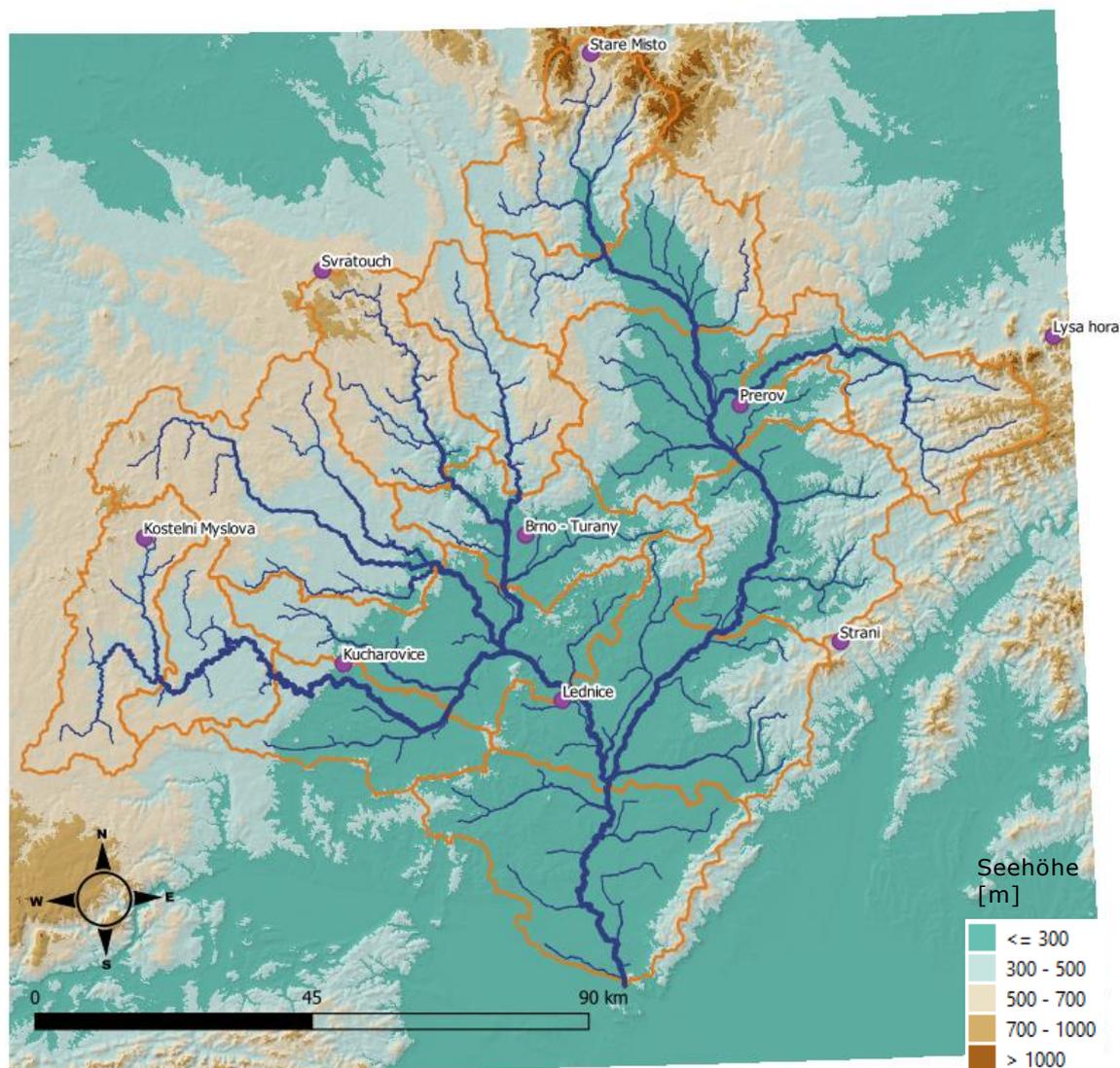


Abbildung 13: Verwendete Temperaturstationen

Tabelle 2: Verwendete Temperaturdaten

Station	Quelle	Zeitraum	Seehöhe
Staré Místo	ČHMÚ	1961-2012	658
Prerov	ČHMÚ	1961-2020	205
Strání	ČHMÚ	1961-2020	385
Kostelní Myslová	ČHMÚ	1961-2020	569
Kuchařovice	ČHMÚ	1961-2020	334
Brno - Tuřany	ČHMÚ, ZAMG	1847-2020	241
Lednice	ČHMÚ	1961-2020	177
Lysá hora	ČHMÚ	1961-2020	1322

#### 4.1.4 Verdunstung

Für die Berechnung der potenziellen Verdunstung wurden verschiedene Datenquellen und Methoden verglichen. Einerseits wurde bei den drei Stationen Brno, Ostrava und Sněžka die potenzielle Verdunstung auf Basis von Penman-Monteith berechnet (verfügbare Stationen in der Region in der CLIMWAT-Datenbank, Berechnung mit CROPWAT). Andererseits wurde die räumliche Verteilung der - potenziellen Verdunstung des Datensatzes Earth2Observe (Rasterdaten, basierend auf Penman-Monteith) analysiert. Der Vergleich in Abbildung 14 zeigt die starke Abhängigkeit der potenziellen Verdunstung von der Seehöhe. Zur Berechnung der mittleren jährlichen potenziellen Verdunstung für jede HRU des Wasserbilanzmodells wurde ein Polynom 3. Ordnung an die Daten angepasst. Die Saisonalität (Verhältnis Monatswert zu Jahreswert) wurde von der für diese Zwecke räumlich gut gelegenen Station Brno-Turany aufgeprägt (siehe auch Abbildung 15).

Als Ergebnis der Datenaufbereitung liegt für jede HRU der langjährige monatliche Mittelwert der potenziellen Verdunstung vor. Die tägliche potenzielle Verdunstung wird im Wasserbilanzmodell für jeden täglichen Zeitschritt aus der täglichen Temperatur-Anomalie berechnet (Abweichung Tagestemperatur vom langjährigen monatlichen Mittelwert). Dazu wurde eine Sensitivität von 5% pro 1°C Temperatur-Anomalie verwendet (auf Basis von Sensitivitäts-Tests mit Penman-Monteith bei ausgewählten Stationen), d.h. für eine Änderung von 1°C in der Temperatur wurde eine Änderung von 5% in der potenziellen Verdunstung angesetzt

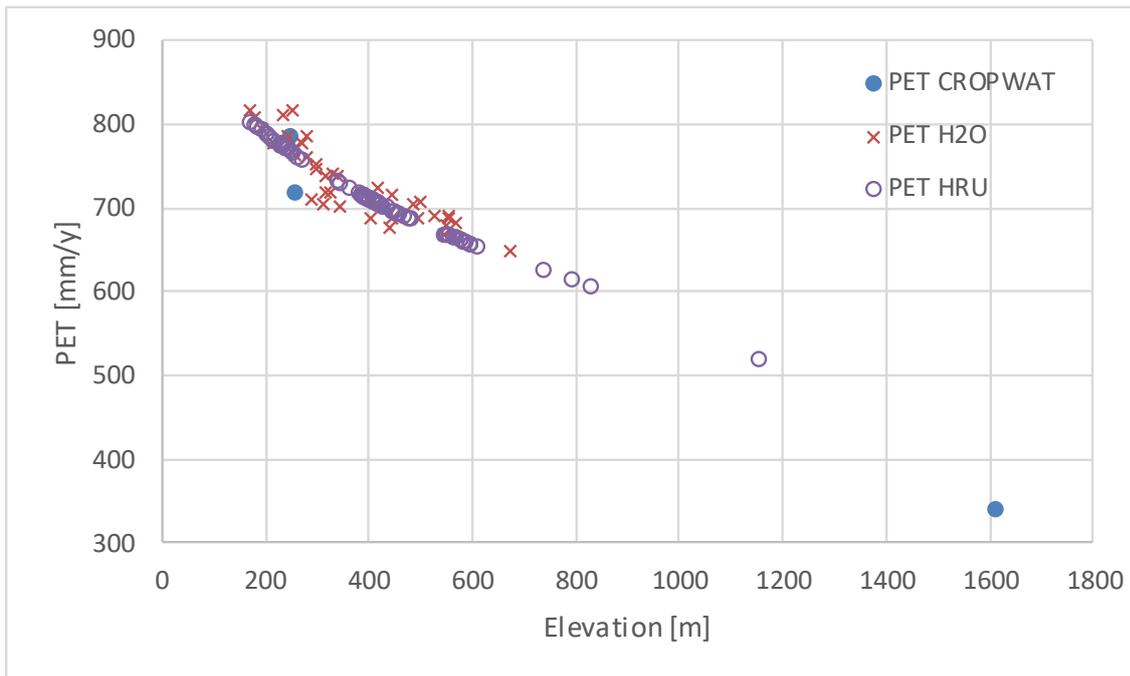


Abbildung 14: Vergleich der mittleren jährlichen potentiellen Verdunstung (PET) auf Basis von verschiedenen Datenquellen/Methoden. CROPWAT: PET berechnet für Stationen im Untersuchungsgebiet. H2O: Rasterdaten ausgewertet für 38 Teileinzugsgebiete (sub-catchments). HRU: Regionalisierung für die Zonen des hydrologischen Modells.

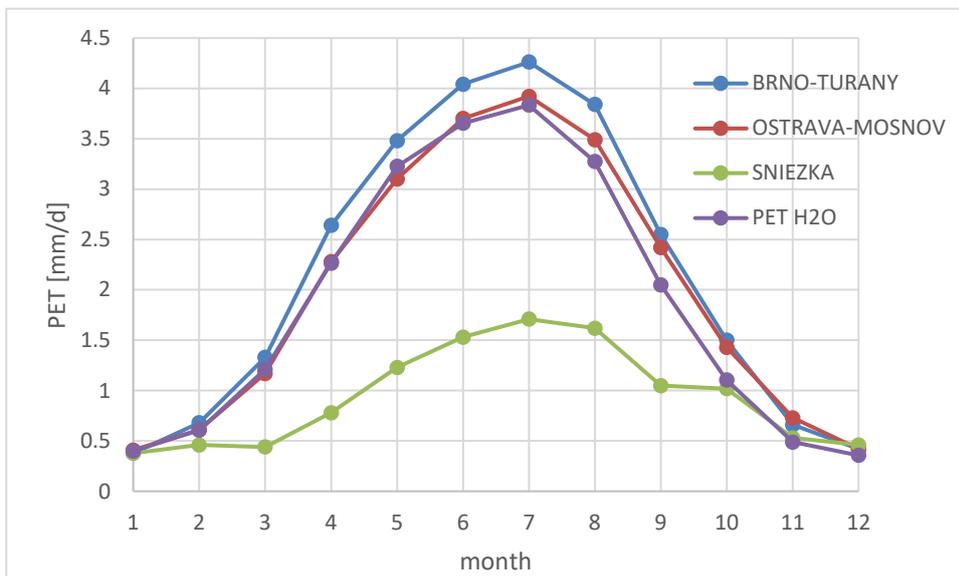


Abbildung 15: Mittlere monatliche potenzielle Verdunstung (PET) bei ausgewählten Stationen berechnet mit Penman-Monteith. PET H2O: Mittelwert der Earth2Observe Rasterdaten für Subbasin 10 des hydrologischen Modells (flussauf von Brno).

## 4.2 Trends in historischen Daten

Sowohl für die meteorologischen Variablen Niederschlag und Lufttemperatur als auch für die Beobachtungen des Abflusses wurden verfügbare langjährige Zeitreihen auf Trends und Veränderungen in der Beobachtungsreihe untersucht. Da der Fokus dieser Studie auf der Untersuchung von Zukunftsszenarien des Abflusses liegt, wurden dabei aber nur einzelne ausgewählte Stationen und Pegel ausgewertet. Die Stationen und Pegel wurden aufgrund langer verfügbarer Beobachtungsreihen und der räumlichen Verteilung im Einzugsgebiet ausgewählt.

Es wurde auch keine statistische Trendanalyse durchgeführt, sondern nur eine qualitative Bewertung von deutlichen Veränderungen vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Kapitel 6.1 zu finden. Eine systematische Untersuchung von Trends und ihrer statistischen Signifikanz an der Vielzahl der verfügbaren Stationen im Einzugsgebiet würde eine eigene Studie im selben oder noch größeren Umfang erfordern.

Eine ausführlichere Untersuchung von Trends in Beobachtungsreihen im Thaya-Einzugsgebiet erfolgt im 3-Jahres-Projekt Klimawandel Thaya.

## 4.3 Klimamodelldaten

Als Klimamodelldaten wurden die Simulationen des EURO-CORDEX Modell-Ensembles (Jacobs et al. 2014) herangezogen. Diese Simulationen für Europa wurden im Rahmen der CORDEX-Initiative (Coordinated Regional Downscaling Experiment, Giorgi et al. 2009) des World Climate Research Program (WCRP) erstellt und stellen bis heute das aktuellste Ensemble an hochauflösenden regionalen Klimasimulationen mit einer großen Anzahl an teilnehmenden Institutionen und Modellen dar. EURO-CORDEX-Simulationen liegen in räumlicher Auflösung von rund 50 km ( $0.44^\circ$ , daher EUR-44) und rund 12 km ( $0.11^\circ$ , EUR-11) vor – für die vorliegende Studie wurden die höher aufgelösten EUR-11-Datensätze herangezogen.

Die EURO-CORDEX-Simulationen sind Simulationen regionaler Klimamodelle (Regional Climate Models, RCMs), die zur Erreichung der hohen räumlichen Auflösung – und damit verbunden idealerweise einer besseren Prozessabbildung – nur ein begrenztes Gebiet abdecken. Die Randbedingungen an den Grenzen der Modelldomäne werden durch Globale Klimamodelle (Global Climate Models, GCMs) definiert. Die Simulationsläufe stellen daher immer eine Kombination aus RCM und antreibendem GCM dar. Die EURO-CORDEX-Simulationen wurden von GCMs der CMIP5-Generation angetrieben (Taylor et al. 2012).

Derzeit gibt es bereits die nächste Generation an GCMs aus CMIP6 (Eyring et al. 2016), allerdings noch kein koordiniertes Ensemble neuer RCM-Simulationen, die mit den CMIP6-Daten angetrieben werden und in der gegenständlichen Studie hätte verwendet werden können.

Die Klimamodelldaten in monatlicher zeitlicher Auflösung wurden vom Datenportal der Earth System Grid Federation (ESGF) heruntergeladen. Tabelle 3 führt alle angewendeten Modelle an. Als Akronym wird in weiterer Folge die Kombination der Namen der Betreiber-Institutionen (RCM-Institut - GCM Institut) verwendet, da diese im Allgemeinen kürzer als die Modellnamen sind. Für das MPI-MPI-Modell, für das zwei Realisierungen (Modellläufe mit unterschiedlichen Startbedingungen und/oder Parametrisierungen) vorliegen, wird zusätzlich die Nummer der Realisierung angeführt.

Der gesamte mit den CORDEX-Modellen abgedeckte räumliche Bereich ist in Abbildung 16 dargestellt (nur ein RCM (ALADIN53 von CNRM) weist eine abweichende Ausdehnung auf). Die Größe der Gitterelemente im Kontext des Marchezugsgebiets ist in Abbildung 17 dargestellt (wobei die genaue Lage der Gitterpunkte zwischen den einzelnen RCMs variiert, der Abstand aber immer dem in Abbildung 17 dargestellten entspricht).

Tabelle 3: Auflistung der angewendeten Klimamodellketten der CORDEX-Domäne EUR-11

Akronym	RCM		GCM	
	Institut	Modell	Institut	Modell
CLMcom-CNRM	CLMcom	CCLM4-8-17	CNRM	CERFACS-CNRM-CM5
CLMcom-ICHEC	CLMcom	CCLM4-8-17	ICHEC	EC-EARTH
CLMcom-MOHC	CLMcom	CCLM4-8-17	MOHC	HadGEM2-ES
CLMcom-MPI	CLMcom	CCLM4-8-17	MPI	M-MPI-ESM-LR
SMHI-CNRM	SMHI	RCA4	CNRM	CERFACS-CNRM-CM5
SMHI-ICHEC	SMHI	RCA4	ICHEC	EC-EARTH
SMHI-MOHC	SMHI	RCA4	MOHC	HadGEM2-ES
SMHI-MPI	SMHI	RCA4	MPI	M-MPI-ESM-LR
SMHI-IPSL	SMHI	RCA4	IPSL	IPSL-CM5A-MR
KNMI-ICHEC	KNMI	RACMO22E	ICHEC	EC-EARTH
KNMI-MOHC	KNMI	RACMO22E	MOHC	HadGEM2-ES
DMI-ICHEC	DMI	HIRHAM5	ICHEC	EC-EARTH
IPSL-IPSL	IPSL	WRF331F	IPSL	IPSL-CM5A-MR
CNRM-CNRM	CNRM	ALADIN53	CNRM	CERFACS-CNRM-CM5
MPI-MPIr1	MPI	REMO2009	MPI	M-MPI-ESM-LR r1i1p1
MPI-MPIr2	MPI	REMO2009	MPI	M-MPI-ESM-LR r2i1p1



Abbildung 16: Räumliche Ausdehnung der CORDEX-RCMs, rot = Donaeinzugsgebiet

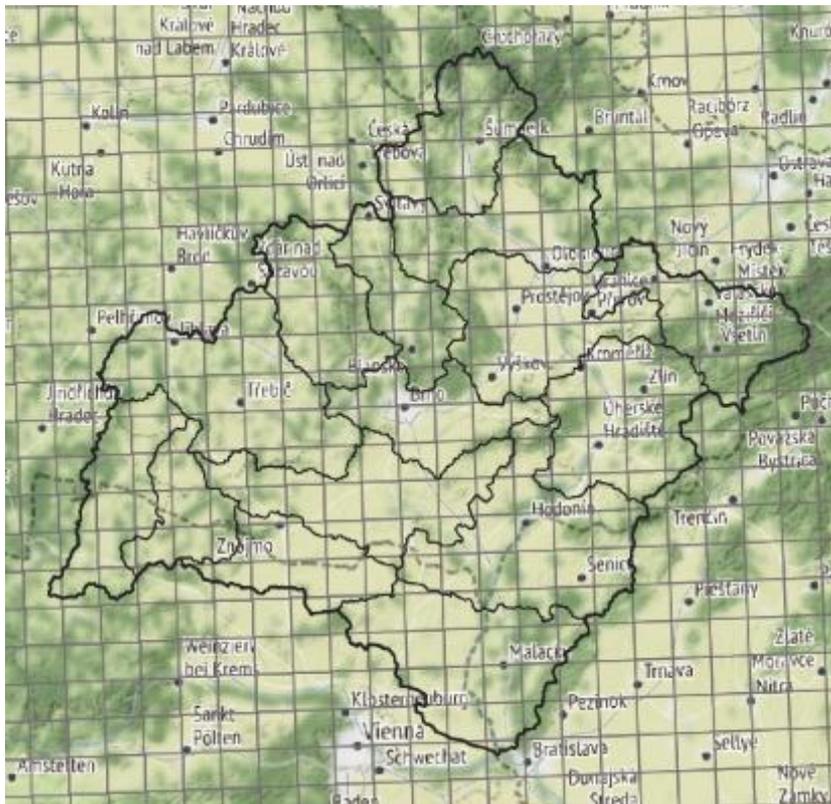


Abbildung 17: CORDEX-RCM-Gitter mit 12 km Auflösung über dem March-Einzugsgebiet

Die Klimaszenarien für das 21. Jahrhundert basieren auf dem Konzept der „Representative Concentration Pathways“ (RCPs), die die zuvor angewendeten SRES-Szenarien (A2, A1B, etc.) abgelöst haben. Vier RCP-Szenarien wurden in der CMIP5-Initiative verwendet (Moss et al. 2010), die zwei RCPs 4.5 und 8.5 sind bei CMIP5 für den „core set of runs“, also die von allen Teilnehmern ausgeführten Modellsimulationen festgelegt. Die Zahlen 4.5 und 8.5 beziehen sich dabei auf die (ungefähre) Höhe des Strahlungsantriebs („radiative forcing“) in  $W/m^2$  am Ende des 21. Jahrhunderts (Abbildung 18). Der Strahlungsantrieb ist ein vom IPCC eingeführtes Maß für die Veränderung der Energiebilanz der Erde im Vergleich zu vor-industriellen Bedingungen, das den Einfluss der Emissionen verschiedener Treibhausgase zusammenfasst.

Für diese Studie wurden Projektionen mit dem optimistischen RCP 4.5 und dem pessimistischen (leider aber aufgrund der anhaltend hohen Emissionen wahrscheinlicheren) RCP 8.5 ausgewertet. Abbildung 18 zeigt auch, dass deutliche Unterschiede zwischen den Szenarien erst in der zweiten Hälfte des 21. Jahrhunderts bestehen und daher die beiden gewählten Szenarien im hier untersuchten Zeitraum noch nicht sehr stark voneinander abweichen.

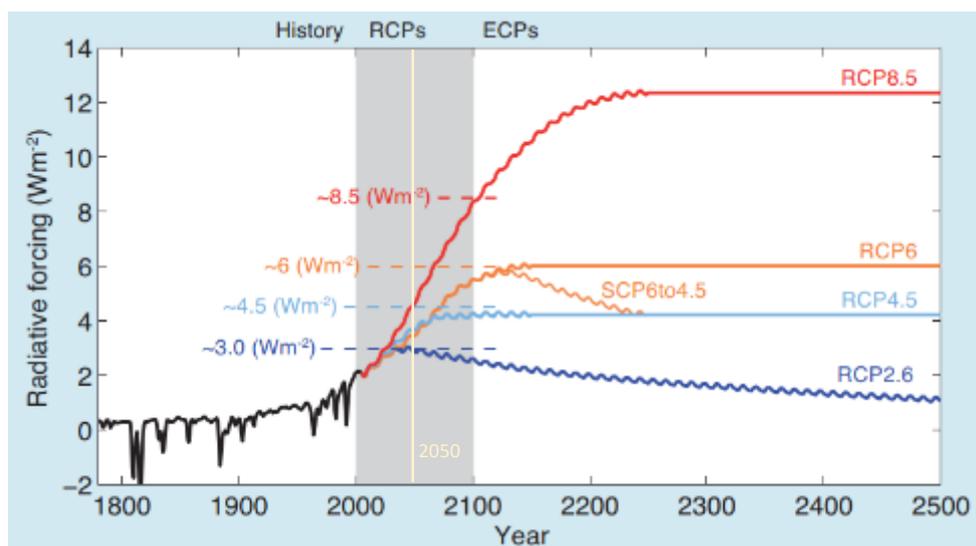


Abbildung 18: Strahlungsantrieb („radiative forcing“) in den RCP-Szenarien (Quelle: Cubasch et al. 2013)

Ziel der Anwendung von Projektionen verschiedener Klimamodelle für jedes der beiden Emissionsszenarien (und verschiedener Realisierungen desselben Modells, wie im Fall des Modells MPI-MPI) ist es, die Unsicherheit in der Simulation des zukünftigen Klimas zu berücksichtigen. Aufgrund der Unterschiede zwischen einzelnen Realisierungen desselben Modells kann mit veröffentlichten Ensembles – in denen üblicherweise nur eine oder zwei Realisierungen jedes Modells enthalten sind – nicht die gesamte Modellunsicherheit abgedeckt werden. Die detaillierte Untersuchung der Unsicherheit in

der Klimamodellierung ist aber eine Aufgabe der Grundlagenforschung und kann in einer Anwendung von Klimadaten zur Untersuchung von Klimafolgen nicht erfolgen.

Das hier angewendete Modellensemble enthält alle CORDEX EUR-11-Modelle, die zum Zeitpunkt des Downloads durch AFRY (2018) zur Verfügung standen. Genau dieses Modellensemble, nach der Fertigstellung der Simulationen der wesentlichen CORDEX-Teilnehmer, wurde in einer Vielzahl anderer wissenschaftlichen Klimafolgenstudien für Europa angewendet und umfasst mit 16 Modellläufen ein ausreichend großes Sample an Klimamodellergebnissen, um die Modellunsicherheit zu berücksichtigen. Eine Ergänzung dieses Ensembles um nachträglich fertiggestellte Modellläufe war aufgrund des zeitlichen Rahmens der vorliegenden Studie nicht möglich.

Aus den Daten der Klimamodelle wurden, wie in Kapitel 6.3 beschrieben, die Klimaänderungssignale für Lufttemperatur und Niederschlag abgeleitet, mit denen die Eingangsdaten der hydrologischen Zukunftsszenarien erstellt wurden.

## 5 Modellkalibrierung und historische Simulation

### 5.1 Methode der Modellkalibrierung

Am Beginn der Modellkalibrierung steht ein Parametersatz des hydrologischen Modells mit a-priori geschätzten Parameterwerten. Aufgrund der langjährigen Erfahrung in der Anwendung des COSERO-Modells in verschiedenen Klimaten (Kling et al. 2015) und in benachbarten Einzugsgebieten (z.B. Kling et al. 2012) sind gute Erfahrungswerte für die A-priori-Schätzung vorhanden.

In der Kalibrierung werden vor allem die folgenden Parameter angepasst: Schneeparameter (Schmelzfaktoren), Bodenparameter (zwei Speicherparameter), Parameter der Abflussbildung (7 Speicherkonstanten und Schwellenwerte).

Die Kalibrierung der Parameter des March-Modells erfolgte in einer Kombination aus automatischen Test-Optimierungsläufen für einzelne Pegel (mit der Methode Shuffled Complex Evolution) und einer manuellen, regionalen Parameter-Anpassung unter Berücksichtigung der Informationen aus den Optimierungsläufen.

Als Periode für die Kalibrierung wurde grundsätzlich die gesamte historische Simulationsperiode 1981-2020 herangezogen (bzw. für Pegel mit kürzerer Datenverfügbarkeit die längste mögliche Periode). Zusätzlich wurde die Simulation für einzelne Dekaden (1981-1990, 1991-2000, 2001-2010, 2011-2020) sowie für den 30-Jahre Zeitraum 1981-2010 evaluiert.

Die Beurteilung der Simulationen erfolgte einerseits grafisch, durch gemeinsame Darstellung von Simulation und Beobachtung, für verschiedene zeitliche Skalen und entsprechende Darstellungen (Zeitreihe jährliche Abflüsse, Saisonalität der Abflüsse, Dauerlinie, tägliche Hydrographen); andererseits durch Berechnung statistischer Kenngrößen. Die finalen Parameterwerte basieren auf der manuellen Kalibrierung und einer ganzheitlichen Betrachtungsweise aller Pegel und Methoden (grafische, statische Evaluierung). Ziel war eine plausible Abbildung der Wasserbilanz in allen Subbasins des Modells, also sowohl in den feuchteren, hügeligen Regionen als auch in den trockeneren, tiefer liegenden Regionen.

Die statistische Evaluierung des simulierten Abflusses im Vergleich zur Beobachtung erfolgte durch die Nash-Sutcliffe-Efficiency NSE (Nash und Sutcliffe 1970) sowie durch die Kling-Gupta-Efficiency KGE' (Gupta et al. 2009, Kling et al. 2012) und ihre Komponenten Korrelation, mittlerer Fehler und Fehler in der Variabilität („multi-objective evaluation“).

## 5.2 Annahmen im Water Allocation Model

Die erste Roh-Version des hydrologischen Modells berücksichtigte den Einfluss von Speichern und Entnahmen nicht. Dies wurde im Zuge der Kalibrierung verfeinert und ist in den folgenden Kapiteln beschrieben.

### 5.2.1 Annahmen zur Speicherbewirtschaftung

Die folgenden Speicher wurden im Modell berücksichtigt (Lage siehe Abbildung 19):

- Vranov, 79,7 hm<sup>3</sup> aktives Speichervolumen
- Dalešice, 63,0 hm<sup>3</sup> aktives Speichervolumen
- Vír 1, 44,1 hm<sup>3</sup> aktives Speichervolumen
- Brno, 13,0 hm<sup>3</sup> aktives Speichervolumen
- Nové Mlýny, 40,6 hm<sup>3</sup> aktives Speichervolumen

Informationen über Speicherinhalt und Stauziel wurden von der Website Povodí Moravy ([www.pmo.cz/portal/nadrze/en/](http://www.pmo.cz/portal/nadrze/en/)) am 15.9.2021 bezogen.

Dokumente über die Betriebsregeln konnten nicht erhoben werden. Sie wurden daher aus den zur Verfügung stehenden Messwerten (z.B. Wasserstände im Speicher, Zu- und Abflüsse) ermittelt und sodann im Modell implementiert. Im Modell wurde ein Vergleich von simulierten und beobachteten Wasserständen sowie simulierten und beobachteten Abflusswerten (beim Speicher oder Pegel flussab) durchgeführt.



Abbildung 19: Lage der im Modell berücksichtigten Speicher

### 5.2.2 Annahmen zu Bewässerungsentnahmen

Angaben zu Bewässerungsentnahmen liegen für Nové Mlýny detailliert vor. Allerdings wurden im Zuge der Bearbeitung auch viele weitere Entnahmen und Ausleitungen in Luftbildern identifiziert, für die keine Daten vorliegen (siehe Beispiele in Abbildung 20).

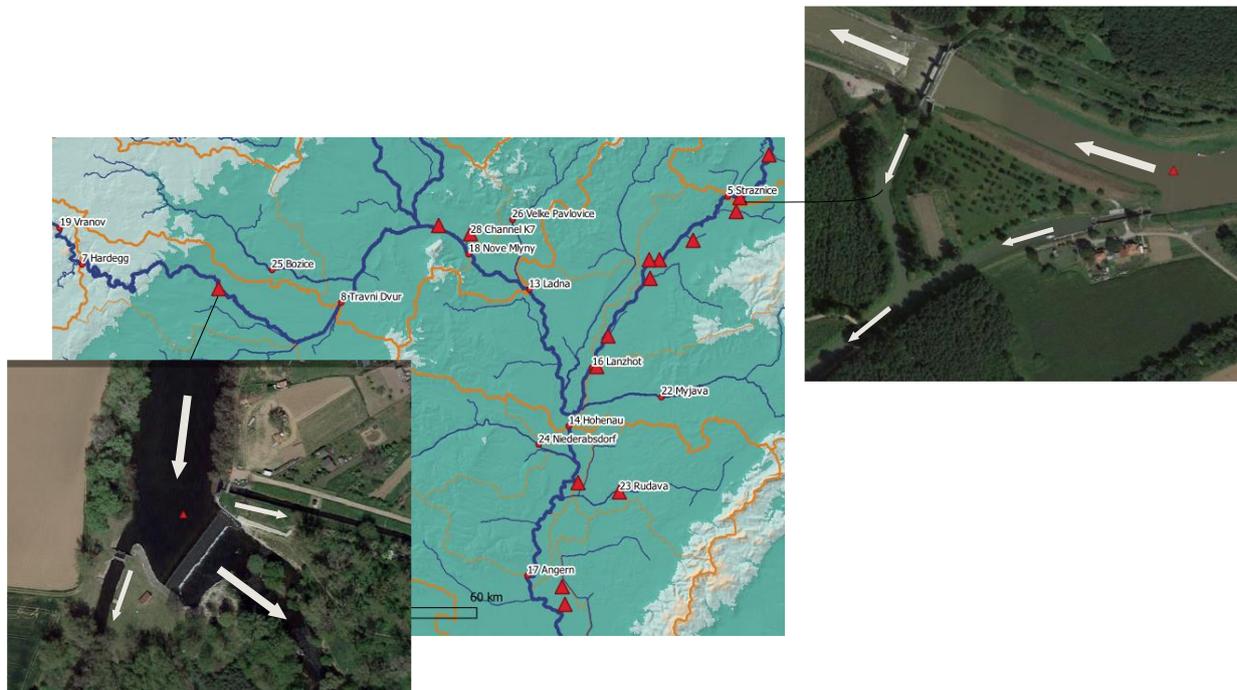


Abbildung 20: Im Luftbild identifizierte Entnahmen bzw. Umleitungen (rote Dreiecke). Beispiele: Entnahmen bei Krhovice (Luftbild links unten) und Strážnice (Luftbild rechts oben).

Es wurde folgende Vorgangsweise zur Berücksichtigung der Entnahmen und Ausleitungen/Umleitungen gewählt:

- Entnahmen bei Nové Mlýny laut Wehrbetriebsordnung (Informationen aus Riocom 2007)
- Entnahmen für Bewässerung Krhovice flussab von Hardegg grob geschätzt (basierend auf Vergleich mit beobachtetem Abfluss weiter flussab).
- Die Ausleitungen bei Strážnice und zahlreichen Kanälen in der Slowakei konnten nur grob berücksichtigt werden. Teilweise werden die March-Pegel durch diese Kanäle umströmt, was bei Niederwasser relevant sein kann. Die Ausleitungen/Rückleitungen von Wasser in diesen Kanälen wurde auf Basis eines Vergleichs von simuliertem und beobachtetem Abfluss bei den Pegeln der March grob geschätzt.

- Im Modell wurden die Ausleitungen/Umleitungen der einzelnen Kanäle nicht explizit abgebildet, sondern nur der Netto-Effekt der Summe aller Kanäle bei den Berechnungsknoten des Modells berücksichtigt. Dies inkludiert:
  - Ausleitungen flussauf von Pegel Trávní Dvůr (CP 8)
  - Kanal umfließt Pegel Ladná (CP 13)
  - Kanal umfließt Pegel Hohenau (CP 14)
  - Kanal umfließt Pegel Lanžhot (CP 16)
  - Einleitung von Kanal in untere March (CP 15)

Die folgenden Tabellen (Tabelle 4 bis Tabelle 9) listen die im Modell berücksichtigten Entnahmen auf. An dieser Stelle sei noch einmal darauf hingewiesen, dass (außer bei Nové Mlýny) keine genauen Daten zu den Entnahmen vorlagen und daher die Werte auf groben Schätzungen beruhen. Die Saisonalität der Bewässerungsentnahmen bei Nové Mlýny wurde auch bei den anderen Bewässerungsentnahmen übernommen. Nur der (geschätzte) Jahresmittelwert der Entnahmen wurde in der Modellerstellung/Kalibrierung angepasst. Die geschätzten Entnahmen in den Tabellen entsprechen der Summe aller Netto-Entnahmen im Zwischeneinzugsgebiet zwischen Berechnungsknoten, und nicht einer einzelnen physischen Entnahme direkt beim Berechnungsknoten.

In der abschließenden Kalibrierung wurden die Entnahmen bei den Berechnungsknoten CP 13 und CP 14 auf Null gesetzt, da scheinbar diese durch Nové Mlýny garantierten Entnahmen momentan nicht oder in nur sehr geringem Maße genutzt werden.

Die Summe aller im Modell angenommenen Entnahmen für Bewässerung sind in Abbildung 21 und Abbildung 22 dargestellt und in Tabelle 10 zusammengefasst.

Tabelle 4: Im Modell berücksichtigte Entnahmen beim Berechnungsknoten Nové Mlýny (CP 18). Werte in m<sup>3</sup>/s. ZEO: Zentrales Entnahmebauwerk. DVT: Netz kleiner Wasserläufe.

Monat	Bewässerung ZEO	DVT via ZEO	Bewässerung Strachotín	Summe Entnahme
1	0	1.2	0	1.2
2	0	1.2	0	1.2
3	0	1.2	0	1.2
4	0.06	1.2	0.02	1.28
5	0.4	1.2	0.08	1.68
6	0.55	1.2	0.09	1.84
7	0.62	1.2	0.1	1.92
8	0.6	1.2	0.1	1.9
9	0.43	1.2	0.07	1.7
10	0	1.2	0	1.2
11	0	1.2	0	1.2
12	0	1.2	0	1.2

Tabelle 5: Im Modell berücksichtigter Rückfluss in die March über Berechnungsknoten Kanal K7 (CP 28), Bewässerungsentnahmen für Berechnungsknoten Ladná (CP 13) und Bewässerungsentnahmen für Berechnungsknoten Hohenau (CP 14). Werte in m<sup>3</sup>/s.

Monat	Rückfluss DVT CP 28	Bewässerung unterhalb Nové Mlýny (CP 13)	Bewässerung CP 14
1	1.2	0	0
2	1.2	0	0
3	1.2	0	0
4	1.2	0.19	0.27
5	1.2	1.35	1.80
6	1.2	1.85	2.45
7	1.2	2.15	2.82
8	1.2	2.06	2.71
9	1.2	1.49	1.96
10	1.2	0	0
11	1.2	0	0
12	1.2	0	0
geschätzter Mittelwert			1

Tabelle 6: Im Modell berücksichtigte Entnahmen beim Berechnungsknoten Strážnice (CP 5). Werte in m<sup>3</sup>/s.

Monat	Bewässerung	Ausleitung Bačův Kanal	Gesamt
1	0	1	1
2	0	1	1
3	0	1	1
4	0.27	1	1.27
5	1.80	1	2.80
6	2.45	1	3.45
7	2.82	1	3.82
8	2.71	1	3.71
9	1.96	1	2.96
10	0	1	1
11	0	1	1
12	0	1	1
geschätzter Mittelwert	1	1	

 Tabelle 7: Im Modell berücksichtigte Entnahmen beim Berechnungsknoten Lanžhot (CP 16). Werte in m<sup>3</sup>/s.

Monat	Bewässerung	zusätzliche Ausleitung für Brodké-Kúty Kanal	Gesamt
1	0	1	1
2	0	1	1
3	0	1	1
4	0.27	1	1.27
5	1.80	1	2.80
6	2.45	1	3.45
7	2.82	1	3.82
8	2.71	1	3.71
9	1.96	1	2.96
10	0	1	1
11	0	1	1
12	0	1	1
geschätzter Mittelwert	1	1	

*Tabelle 8: Im Modell berücksichtigte Rückleitung beim Berechnungsknoten Angern (CP 17). Die Ausleitungen für Kanäle wurden zuvor bei CP 5 und CP 16 berücksichtigt. Werte in m<sup>3</sup>/s.*

Monat	Einleitung über Malolevářský Kanal
1	2
2	2
3	2
4	2
5	2
6	2
7	2
8	2
9	2
10	2
11	2
12	2

*Tabelle 9: Im Modell berücksichtigte Bewässerungsentnahmen für den Berechnungsknoten Trávní Dvůr (CP 8). Werte in m<sup>3</sup>/s.*

Monat	Bewässerung (Krhovice)
1	0
2	0
3	0
4	0.13
5	0.90
6	1.22
7	1.41
8	1.36
9	0.98
10	0
11	0
12	0
geschätzter Mittelwert	0.5

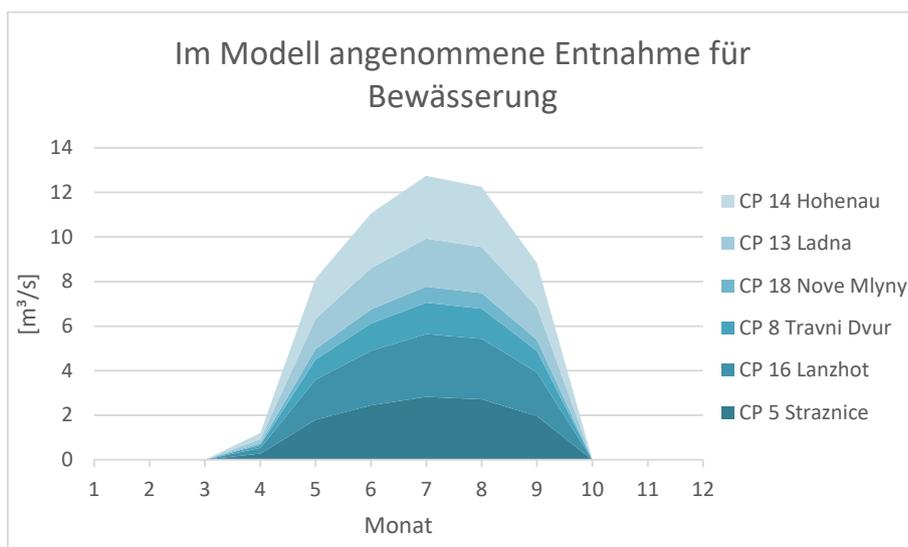


Abbildung 21: Im Modell angenommene Entnahme für Bewässerung. Die Entnahmen bei den Berechnungsknoten CP 13 und 14 wurden während der Kalibrierung des Modells auf Null gesetzt.

Tabelle 10: Summe aller im Modell angenommenen Entnahmen für Bewässerung. Linke Spalte: Während Kalibrierung des Modells (historische Simulation) verwendete Entnahmen für Bewässerung. Rechte Spalte: Gesamte Entnahmen für Bewässerung inkl. CP 13 und CP 14 (flussab von Nové Mlýny). Notiz: Diese Tabelle enthält nicht die Entnahmen für Ausleitungen, die weiter flussab wieder zurückgeleitet werden.

Monat	Summe Entnahmen für Bewässerung bei CP 5, 16, 8, 18	Summe Entnahmen für Bewässerung bei allen Berechnungsknoten (inkl. 13, 14)
1	0	0
2	0	0
3	0	0
4	0.74	1.20
5	4.98	8.12
6	6.76	11.06
7	7.77	12.74
8	7.48	12.25
9	5.39	8.84
10	0	0
11	0	0
12	0	0
Mittelwert	2,76	4,52

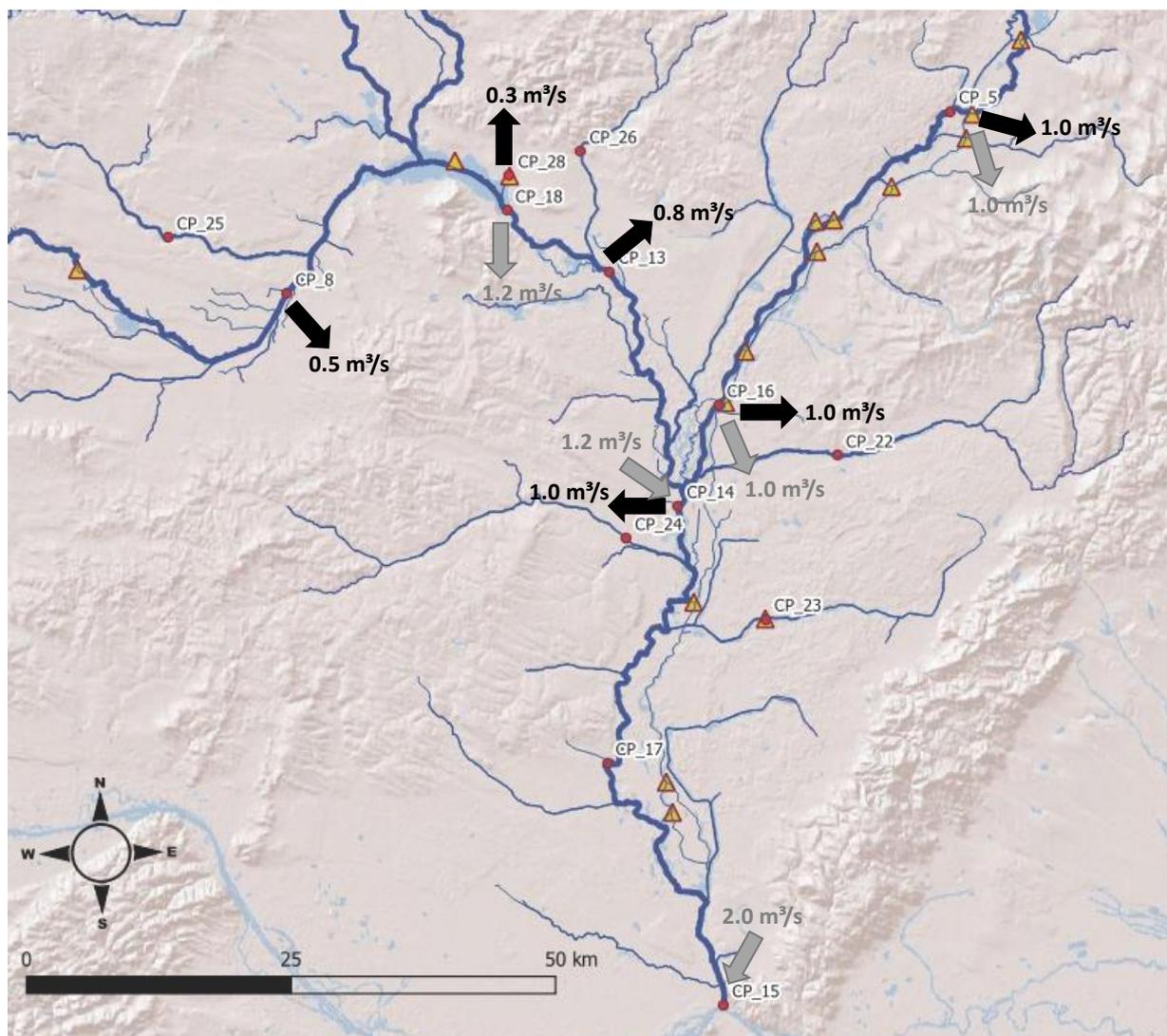


Abbildung 22: Übersichtskarte der im Modell verwendeten Entnahmen bei Berechnungsknoten. Mittlere Jahreswerte. Schwarze Pfeile: Entnahmen für Bewässerung. Graue Pfeile: Ausleitungen / Rückleitungen über Kanäle. Rote Punkte: Berechnungsknoten des Modells (CP). Orange Dreiecke: Im Luftbild identifizierte Ausleitungen. Die Lage der Pfeile ist nur symbolhaft und entspricht nicht den tatsächlichen Gegebenheiten vor Ort.

### 5.3 Historische Simulation und Modellgüte

Der Vergleich von simulierten und beobachteten Abflüssen bei Pegeln zeigt eine gute Übereinstimmung. Dies betrifft sowohl tägliche Hydrographen (Abbildung 23 bis Abbildung 25), Saisonalität (mittlere monatliche Abflüsse, Abbildung 26 bis Abbildung 28), Dauerlinie der täglichen Abflüsse (Abbildung 29 bis Abbildung 31), und Zeitreihen der jährlichen Abflüsse (Abbildung 32 bis Abbildung 34). In allen Abbildungen ist der simulierte Abfluss in rot und der beobachtete Abfluss in schwarz dargestellt.

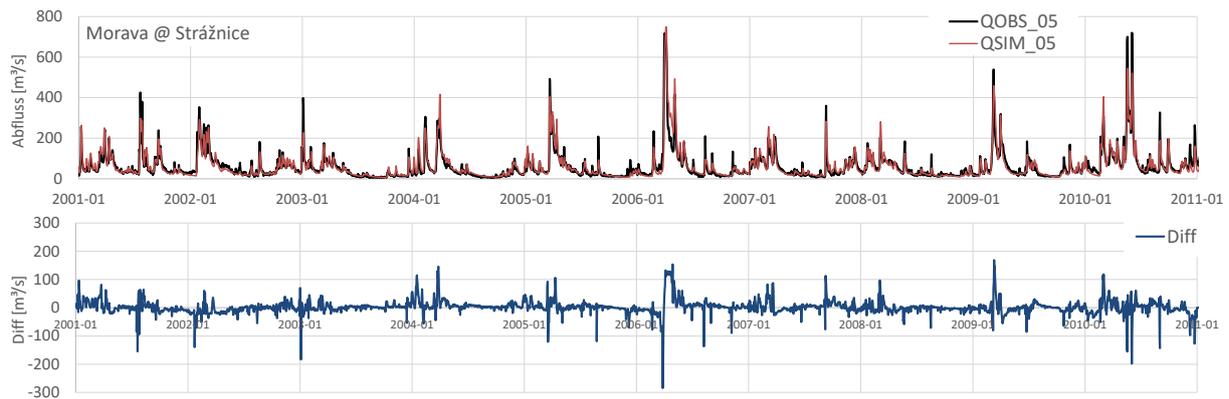


Abbildung 23: Simulierter und beobachteter täglicher Abfluss 2001-2010 für die obere March/Morava bei Strážnice (oben) und Differenzen zwischen den beiden Zeitreihen

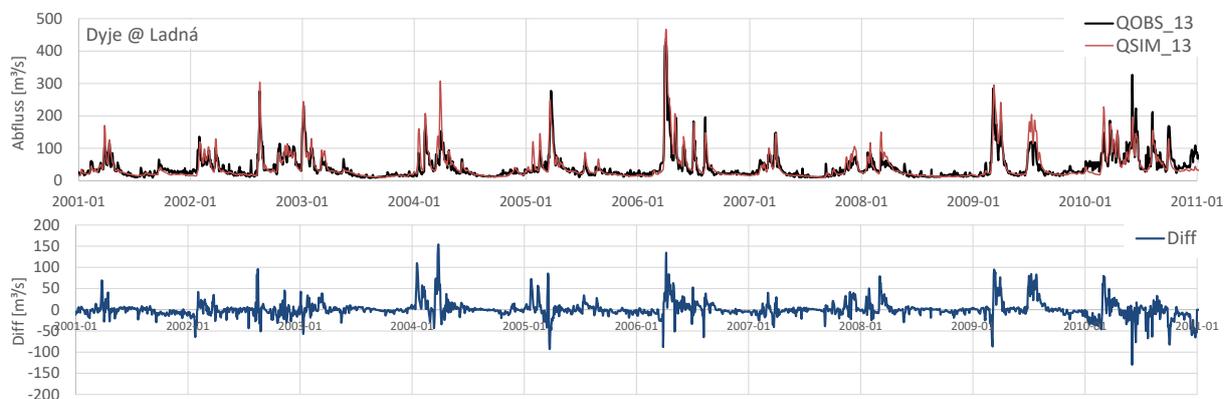


Abbildung 24: Simulierter und beobachteter täglicher Abfluss 2001-2010 für die Thaya/Dyje bei Ladná (oben) und Differenzen zwischen den beiden Zeitreihen

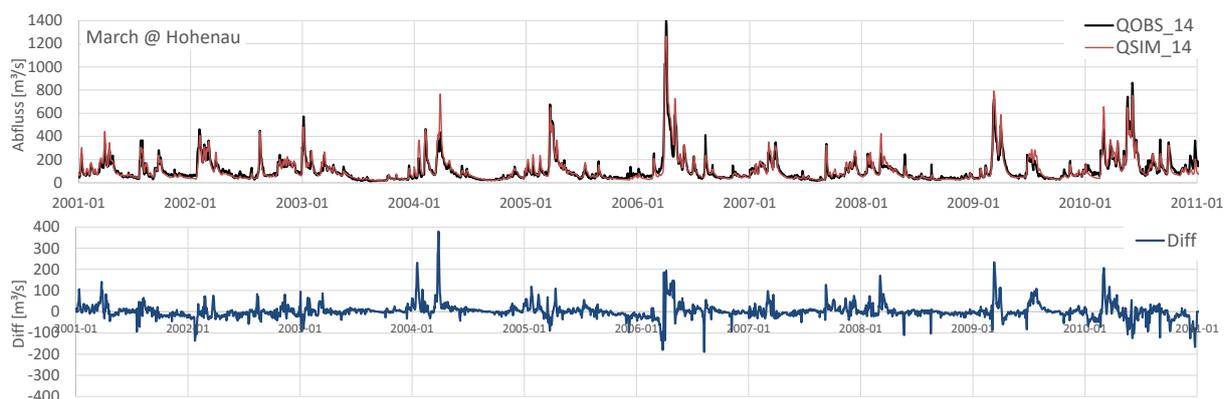


Abbildung 25: Simulierter und beobachteter täglicher Abfluss 2001-2010 für die March-Grenzstrecke bei Hohenau (oben) und Differenzen zwischen den beiden Zeitreihen

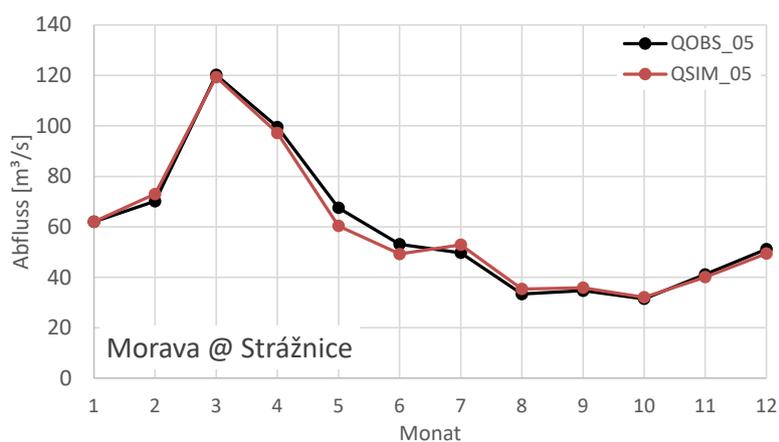


Abbildung 26: Simulierter und beobachteter mittlerer Monatsabfluss (1981-2010) für die obere March/Morava bei Strážnice

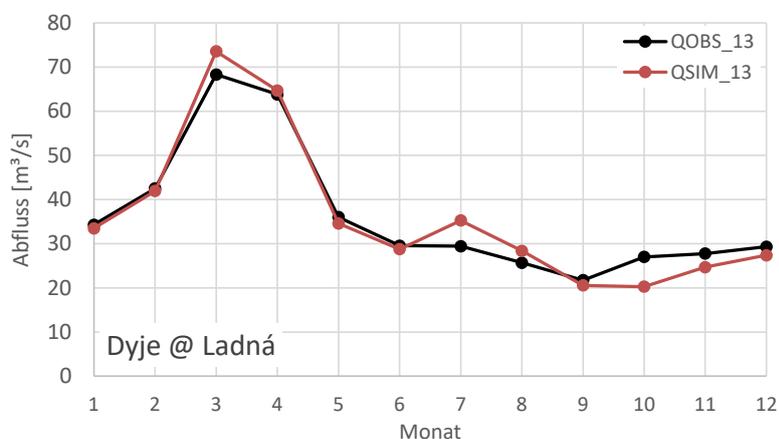


Abbildung 27: Simulierter und beobachteter mittlerer Monatsabfluss (1988-2010) für die Thaya/Dyje bei Ladná

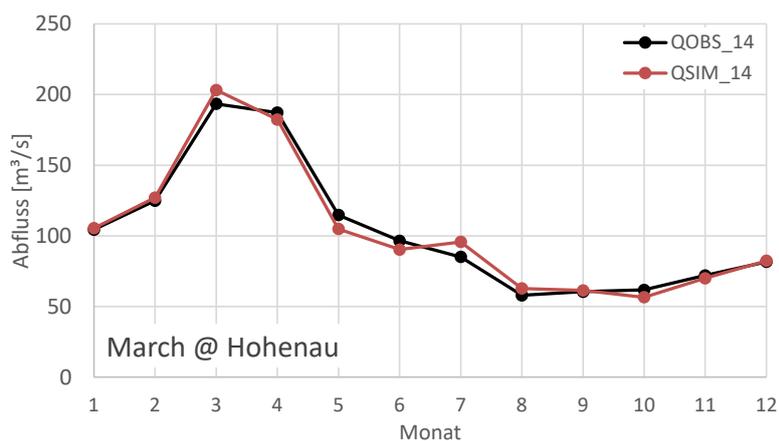


Abbildung 28: Simulierter und beobachteter mittlerer Monatsabfluss (1986-2010) für die March-Grenzstrecke bei Hohenau

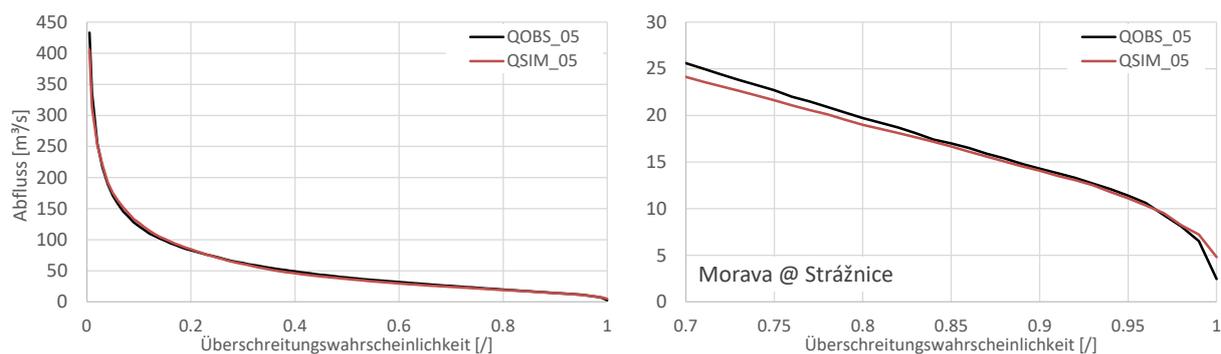


Abbildung 29: Simulierte und beobachtete Dauerlinie des täglichen Abflusses (1981-2010) für die obere March/Morava bei Strážnice

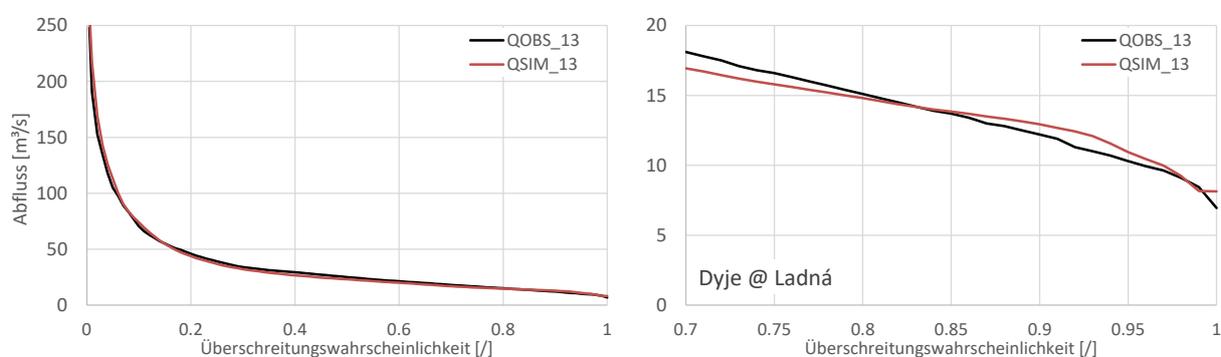


Abbildung 30: Simulierte und beobachtete Dauerlinie des täglichen Abflusses (1988-2010) für die Thaya/Dyje bei Ladná

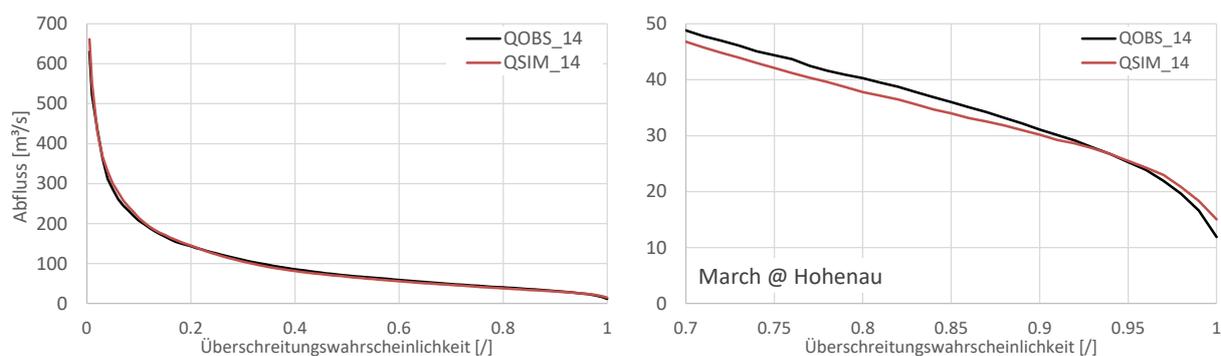


Abbildung 31: Simulierte und beobachtete Dauerlinie des täglichen Abflusses (1986-2010) für die March-Grenzstrecke bei Hohenau

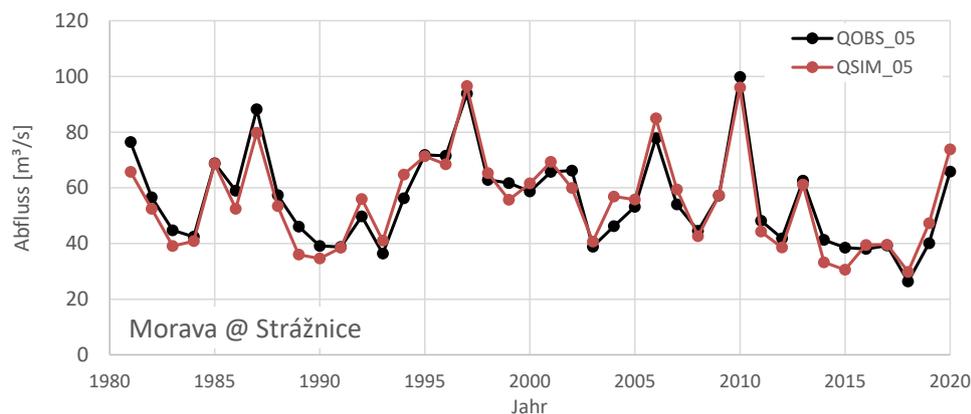


Abbildung 32: Simulierter und beobachteter jährlicher Abfluss 1981-2020 für die obere March/Morava bei Strážnice

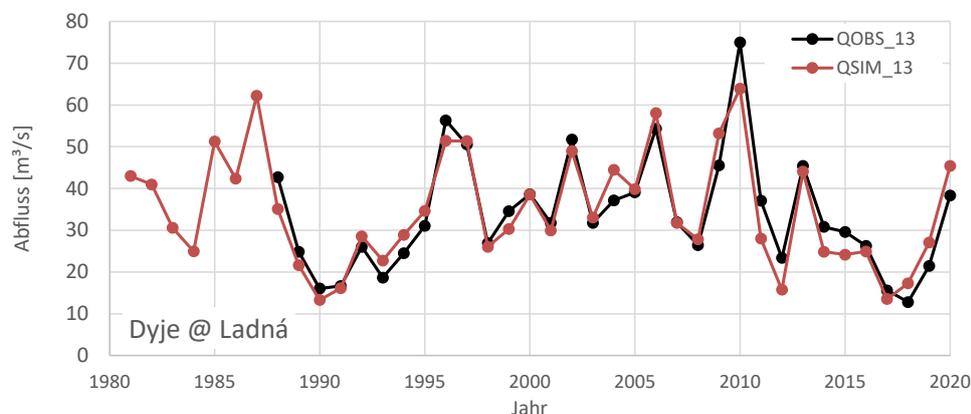


Abbildung 33: Simulierter und beobachteter jährlicher Abfluss 1981-2020 für die Thaya/Dyje bei Ladná

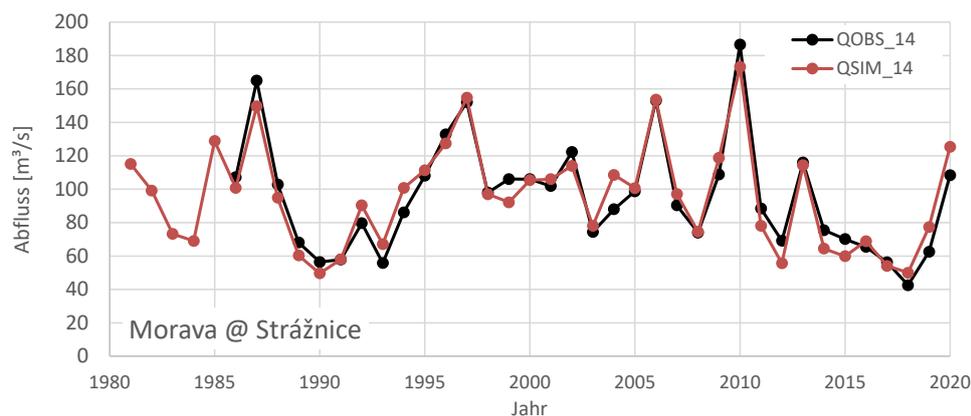


Abbildung 34: Simulierter und beobachteter jährlicher Abfluss 1981-2020 für die March-Grenzstrecke bei Hohenau

Zusätzlich zu den beobachteten Abflussdaten stehen auch beobachtete Wasserstände in den Speichern zur Verfügung. Die simulierten Wasserstände hängen sowohl von den im Modell verwendeten Betriebsregeln als auch vom simulierten Zufluss ab. Eine Übereinstimmung von simulierten und beobachteten Speicherwasserständen ist ein Indikator dafür, dass beide Komponenten (also Zuflusssimulation und Speicherbetrieb) gut im Modell abgebildet sind. Die folgenden Abbildungen zeigen, dass dies für das verwendete Modell in ausreichender Genauigkeit zutreffend ist (Abbildung 35 bis Abbildung 40).

Im Jahresverlauf variiert der Wasserstand in den Speichern um ca. folgende Beträge:

- Vranov: 10 m
- Dalešice: 7 m
- Vír 1: 13 m
- Brno: 4 m
- Nové Mlýny: zumeist < 1 m

Auffällig ist, dass der Wasserstand im Speicher Nové Mlýny zumeist sehr nahe beim Stauziel ist und keine saisonale Schwankung wie bei den anderen Speichern zu erkennen ist. In den Jahren 2017 und 2018 zeigen die beobachteten Wasserstände, dass Nové Mlýny um ca. 1 m abgestaut wurde (Abbildung 40). In der Simulation ergibt sich kein Abstau, da der Zufluss ausreichend groß ist, um die im Modell angesetzten Entnahmen und den vorgeschriebenen Minimalabfluss zu erfüllen. Die tatsächlichen Entnahmen waren entweder größer, der Zufluss geringer, oder der Abstau in Nové Mlýny war eine operative Entscheidung in der Bewirtschaftung des Speichers. Dieses langsame Abstauen über mehrere Wochen hat nur einen sehr geringen Einfluss auf den Abfluss und kann daher in der Abflusssimulation vernachlässigt werden.

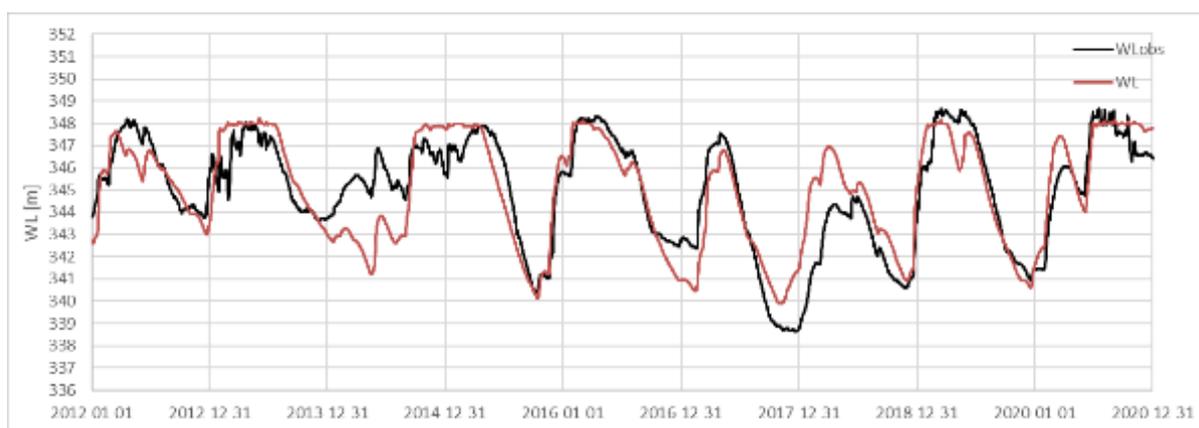


Abbildung 35: Simulierte (rot) und beobachtete (schwarz) Wasserstände 2012-2020 im Speicher Vranov

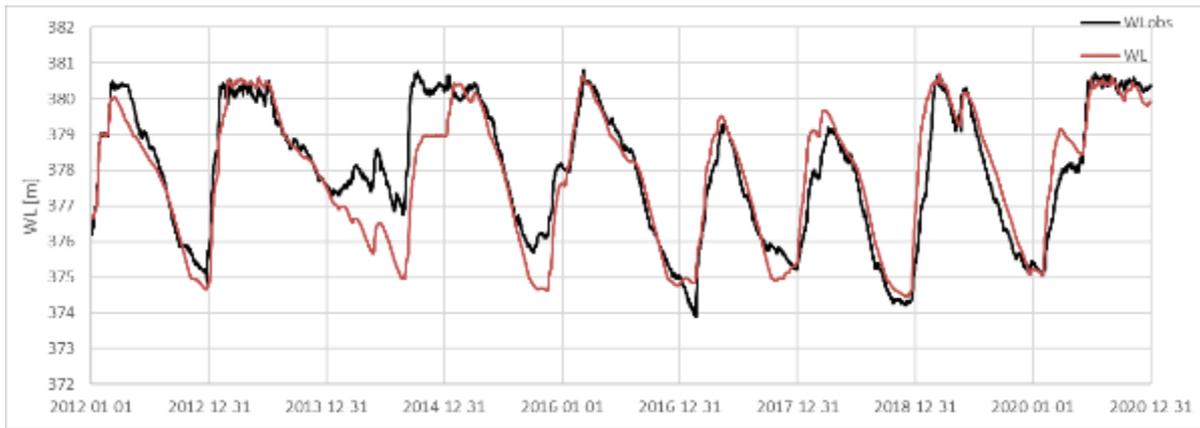


Abbildung 36: Simulierte (rot) und beobachtete (schwarz) Wasserstände 2012-2020 im Speicher Dalešice

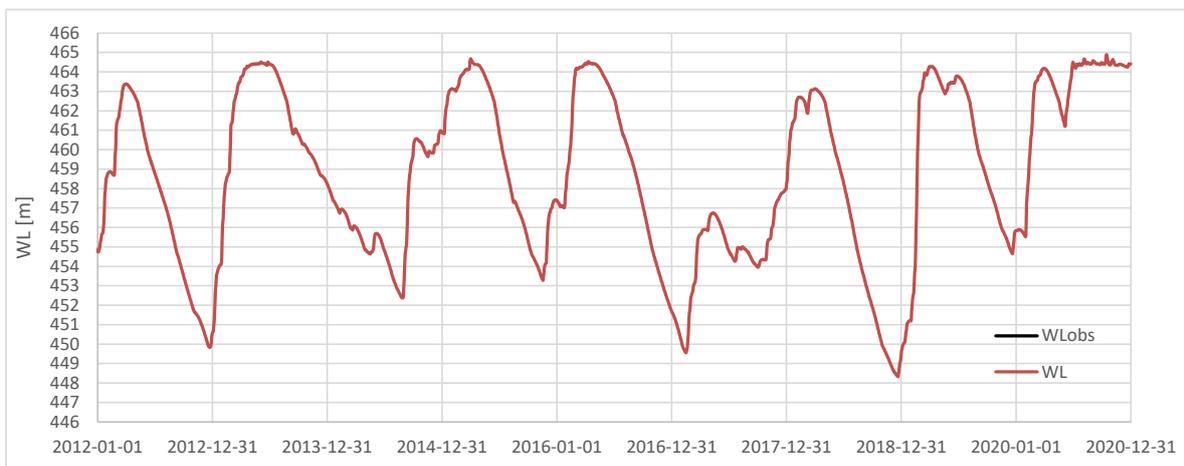


Abbildung 37: Simulierte (rot) Wasserstände 2012-2020 im Speicher Vír 1, beobachtete Daten konnten nicht erhoben werden

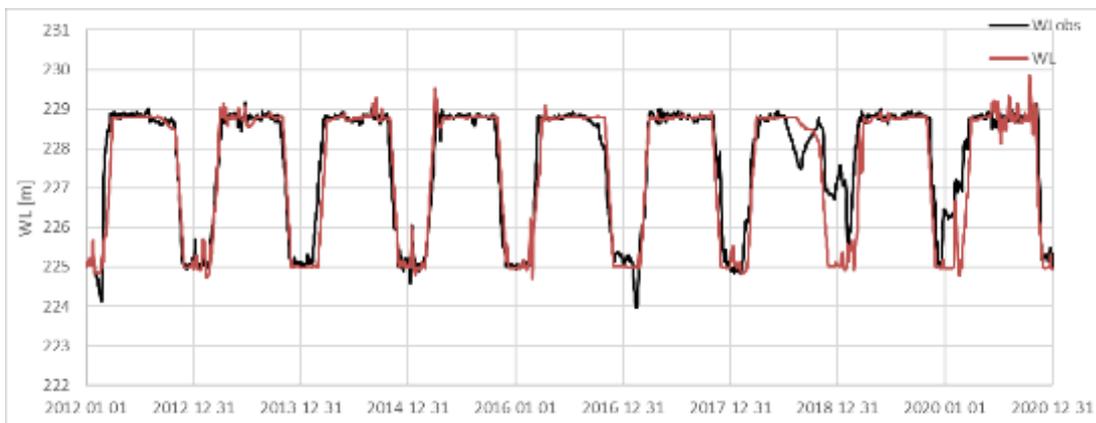


Abbildung 38: Simulierte (rot) und beobachtete (schwarz) Wasserstände 2012-2020 im Speicher Brno



Abbildung 39: Simulierte (rot) und beobachtete (schwarz) Wasserstände 2002-2011 im Speicher Nové Mlýny

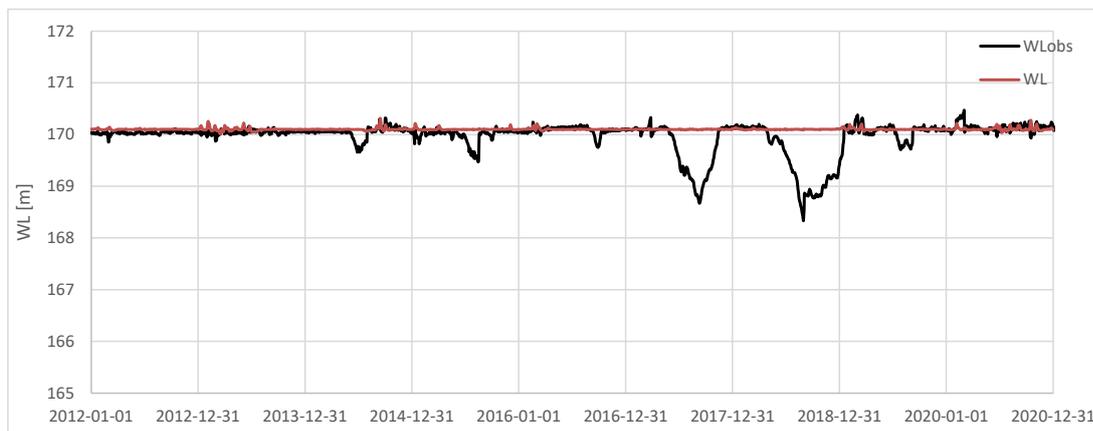


Abbildung 40: Simulierte (rot) und beobachtete (schwarz) Wasserstände 2012-2020 im Speicher Nové Mlýny

Die statistische Evaluierung der Modellgüte ist für verschiedene Kenngrößen in Tabelle 11 aufgelistet. Die folgenden Kenngrößen wurden auf Basis der täglichen Abflüsse ausgewertet:

- Avg\_obs: Mittelwert des beobachteten Abflusses
- Avg\_sim: Mittelwert des simulierten Abflusses
- StdDev\_obs: Standardabweichung des beobachteten Abflusses
- StdDev\_sim: Standardabweichung des simulierten Abflusses
- correl: Korrelation zwischen simuliertem und beobachtetem Abfluss
- beta: „Bias-Ratio“, Verhältnis von Avg\_sim zu Avg\_obs
- alpha: „Variability-Ratio“, Verhältnis von StdDev\_sim zu StdDev\_obs
- gamma: Verhältnis des simulierten und beobachteten Variationskoeffizienten, also Verhältnis von alpha zu beta

- NSE: Nash-Sutcliffe Efficiency (Nash und Sutcliffe 1970)
- KGE': Kling-Gupta Efficiency (Gupta et al. 2009), modifizierte Version (Kling et al. 2012, Verwendung von gamma anstatt alpha für „Variability Ratio“)

Die tabellierten Werte zeigen, dass im Allgemeinen ein hohe Modellgüte erreicht wird. Der Fehler im mittleren Abfluss ist bei den meisten Pegeln kleiner 2%. Die Modellgüte an der Morava ist höher als an der Dyje (siehe z.B. die Werte für NSE). Dies liegt vor allem an den anderen klimatischen Gegebenheiten (feuchtere Gebiete können mit hydrologischen Modellen erfahrungsgemäß besser simuliert werden als trockenere). Einen gewissen Einfluss auf die geringere Modellgüte bei der Dyje hat unter Umständen auch der Speicherbetrieb, der zwar plausibel simuliert wird, aber nicht exakt dem tatsächlichen Betrieb entspricht. Für eine exaktere Darstellung war, wie oben beschrieben, die Datenlage nicht ausreichend gut. Simulationen der TU Wien für das Thayagebiet ergeben, trotz der Fokussierung auf nur dieses Einzugsgebiet, vergleichbare Ergebnisse (in einigen Teileinzugsgebieten etwas bessere, in anderen etwas schlechtere Gütewerte, siehe Tabelle 12).

Für die March bei Hohenau (also nach Zusammenfluss von Morava und Dyje) ist die Modellgüte sehr hoch. Hier ist das Modell für den Evaluierungszeitraum 1981-2010 nahezu ohne Fehler im Mittelwert und die Korrelation zwischen simulierten und beobachteten täglichen Abflüssen liegt bei 0,94. Auch die mit den Parametern NSE und KGE' ermittelte Modellgüte ist als sehr gut einzustufen. Anmerkung: Die optimalen Werte für NSE und KGE' liegen bei 1,0.

*Tabelle 11: Modellgüte für den Vergleich simulierter und beobachteter täglicher Abflüsse (die wichtigsten Pegel sind orange hervorgehoben)*

Location	[m <sup>3</sup> /s] Avg_obs	[m <sup>3</sup> /s] Avg_sim	[m <sup>3</sup> /s] StdDev_obs	[m <sup>3</sup> /s] StdDev_sim	[/] correl	[/] beta	[/] alpha	[/] gamma	[/] NSE	[/] KGE'
Morava @ Moravicaný	17.1	17.1	18.6	16.8	0.91	1.00	0.90	0.90	0.83	0.87
Morava @ Olomouc	26.5	26.8	29.0	26.5	0.92	1.01	0.91	0.90	0.85	0.87
Becva @ Dluhonice	17.4	17.5	28.6	27.8	0.88	1.01	0.97	0.97	0.76	0.87
Morava @ Kromeriz	51.3	51.1	57.9	57.3	0.94	1.00	0.99	0.99	0.88	0.94
Morava @ Straznice	59.5	58.8	66.0	67.7	0.93	0.99	1.02	1.04	0.86	0.92
Thaya @ Raabs	7.9	7.5	12.9	10.5	0.86	0.96	0.82	0.85	0.73	0.79
Thaya @ Hardegg	10.1	10.1	13.4	12.9	0.82	1.00	0.96	0.96	0.66	0.82
Dyje @ Travní Dvůr	11.2	11.1	14.1	14.0	0.86	0.99	0.99	1.00	0.72	0.86
Jihlava @ Ivancice	10.4	10.3	12.1	11.6	0.89	0.99	0.96	0.97	0.78	0.88
Svratka @ Veverska Bítýska	8.3	8.2	9.6	8.7	0.87	0.99	0.90	0.91	0.76	0.84
Svitava @ Bilovice	4.3	4.5	4.9	5.0	0.86	1.05	1.00	0.95	0.71	0.84
Svratka @ Zidlochovice	15.1	15.1	15.4	14.7	0.90	1.00	0.95	0.96	0.80	0.89
Dyje @ Ladná	36.2	36.1	37.1	39.9	0.90	1.00	1.08	1.08	0.79	0.88
March @ Hohenau	103.2	103.4	101.8	109.8	0.94	1.00	1.08	1.08	0.87	0.90
Morava @ Lanzhot	60.9	61.9	69.0	74.0	0.93	1.02	1.07	1.06	0.85	0.91
March @ Angern	107.1	107.4	102.6	109.1	0.94	1.00	1.06	1.06	0.87	0.91

Tabelle 12: Vergleich der Modellgüte an der Thaya mit der Modellgüte von Simulationen der TU Wien

Location	Tageswerte AFRY		Monatswerte AFRY		Monatswerte TU Wien	
	[/]	[/]	[/]	[/]	[/]	[/]
	NSE	KGE'	NSE	KGE'	NSE	KGE'
Thaya @ Raabs	0.73	0.79	0.84	0.92	0.89	0.90
Thaya @ Hardegg	0.66	0.82	0.78	0.87	0.82	0.82
Dyje @ Travni Dvur	0.72	0.86	0.84	0.92	0.86	0.90
Jihlava @ Ivancice	0.78	0.88	0.87	0.92	0.87	0.89
Svratka @ Veverska Bityska	0.76	0.84	0.85	0.92	0.90	0.93
Svitava @ Bilovice	0.71	0.84	0.78	0.79	0.88	0.92
Svratka @ Zidlochovice	0.80	0.89	0.87	0.88	0.89	0.93

## 5.4 Referenzsimulation für Klimaänderung

Die Referenzsimulation für die nachfolgende Analyse der Klimaänderung hat die folgenden Eigenschaften:

- Periode 1981-2010
- Historische Niederschlags- und Temperaturdaten wie in Kapitel 4.1 beschrieben
- Alle Speicher sind aktiv (also auch Nové Mlýny, obwohl erst 1988 in Betrieb genommen), Verwendung der ermittelten Speicherbewirtschaftungsregeln
- Entnahmen (Bewässerung) wie in Kapitel 5.2.2 beschrieben

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Analyse der Trends in historischen Daten und Beurteilung

#### 6.1.1 Lufttemperatur

Aufgrund der generellen Erderwärmung zeigen alle Beobachtungsreihen einen deutlichen Trend zu höheren Lufttemperaturen in den letzten Jahrzehnten. Abbildung 41 zeigt für vier Stationen im und um das March-Einzugsgebiet die Jahresmittelwerte sowie gleitende 10-Jahres-Mittelwerte der Lufttemperatur. Lysá Hora, eine Station die etwas außerhalb des March-Einzugsgebiets im Osten liegt, wurde als höchstgelegene Station der Region berücksichtigt, die anderen Stationen liegen in nördlichen (Svratouch) und westlichen (Kostelni Myslová) Hügellgebieten sowie im zentralen Tiefland (Brno). Der Anstieg der mittleren Temperatur zwischen den ersten beiden Dekaden der Beobachtung (1961-1980) und den letzten beiden (2001-2020) beträgt zwischen 1.7°C (bei Lysá Hora) und 2.2°C (bei Brno). Bei Svratouch und Kostelni Myslová liegt die Erwärmung in dieser Periode mit 1.9°C und 1.8°C zwischen diesen Werten.

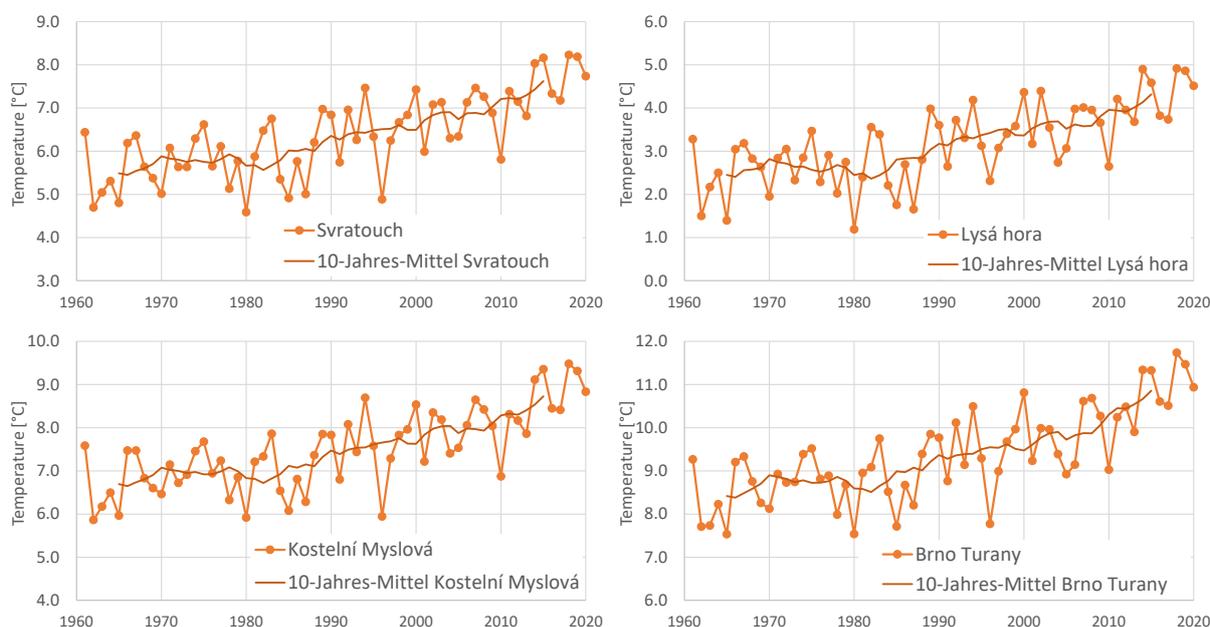


Abbildung 41: Jahresmittel der Lufttemperatur sowie gleitende 10-Jahres-Mittelwerte 1961-2020 für vier Stationen im (und ums) March-Einzugsgebiet

Die Auswertung einer längeren Zeitreihe für Brno-Turany, die im HISTALP-Datensatz der ZAMG vorliegt (1847-2015, siehe Abbildung 42), zeigt, dass 1961-1980 bereits

etwas, aber nur geringfügig wärmer als die präindustriellen Dekaden des 19. Jahrhunderts war, und damit der Großteil der Erwärmung in der Zeitreihe ab 1961 abgebildet ist. Wie in Abbildung 41 ersichtlich waren die Jahre 2018 und 2019 wärmer als alle vorangegangenen seit 1847.

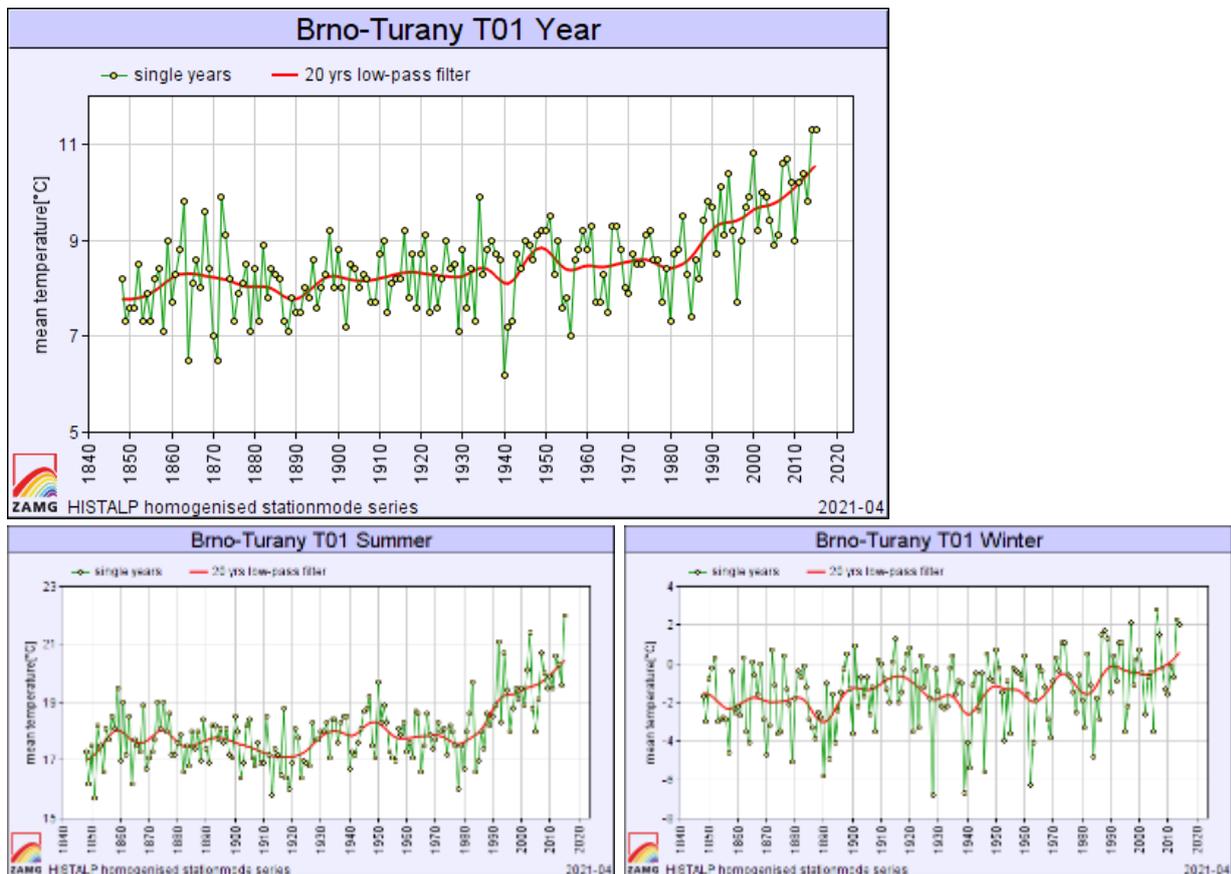


Abbildung 42: Jahresmittel (oben), Sommermittel (unten links) und Wintermittel (unten rechts) der Lufttemperatur sowie 20-Jahres-Mittelwerte 1847-2015 für Brno-Turany (Quelle: ZAMG 2021<sup>2</sup>)

Die Unterscheidung nach Sommer und Winter in Abbildung 42 zeigt, dass die Erwärmung bei Brno in den Sommermonaten etwas stärker war als in den Wintermonaten.

### 6.1.2 Niederschlag

Abbildung 43 zeigt, für die Stationen Kostelni Myslová im Osten, Hoštejn im Norden, Brno im zentralen Tiefland und Zlín im Westen, dass die Jahressummen des Niederschlags seit 1961 keinen erkennbaren Trend aufweisen. Bei Kostelni Myslová und Hoštejn wurden zwischen 2010 und 2020 viele eher trockene Jahre beobachtet. Diese

<sup>2</sup> <https://www.zamg.ac.at/histalp/index.php>, Download im März 2021

Trockenheit zeigt sich dann auch in den beobachteten Abflüssen im nächsten Kapitel. Die besonders lange Zeitreihe für Brno der ZAMG (Abbildung 44) bestätigt auch für Niederschlag diese Schlussfolgerung.

Das 20-Jahres-Mittel ist seit ca. 1950 in etwa auf demselben Niveau. Davor war es seit ca. 1880 um rund 100 mm höher. In den Jahren vor 1880 lag es aber sowohl unter als auch über dem derzeitigen Niveau, sodass insgesamt kein relevanter Trend festgestellt werden kann.

Auch in den Auswertungen für die Sommermonate (Abbildung 44 unten links) und die Wintermonate (Abbildung 44 unten rechts) zeigen sich keine deutlichen Trends in der langjährigen Reihe.

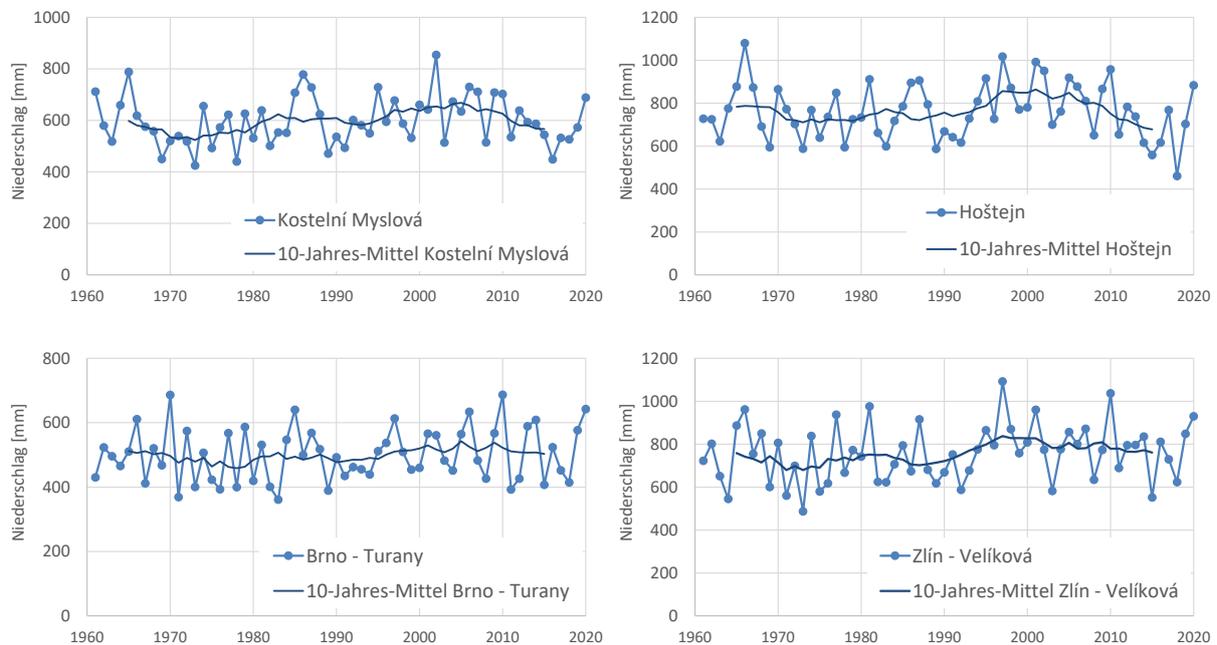


Abbildung 43: Jahressummen des Niederschlags sowie gleitende 10-Jahres-Mittelwerte 1961-2020 für vier Stationen im March-Einzugsgebiet

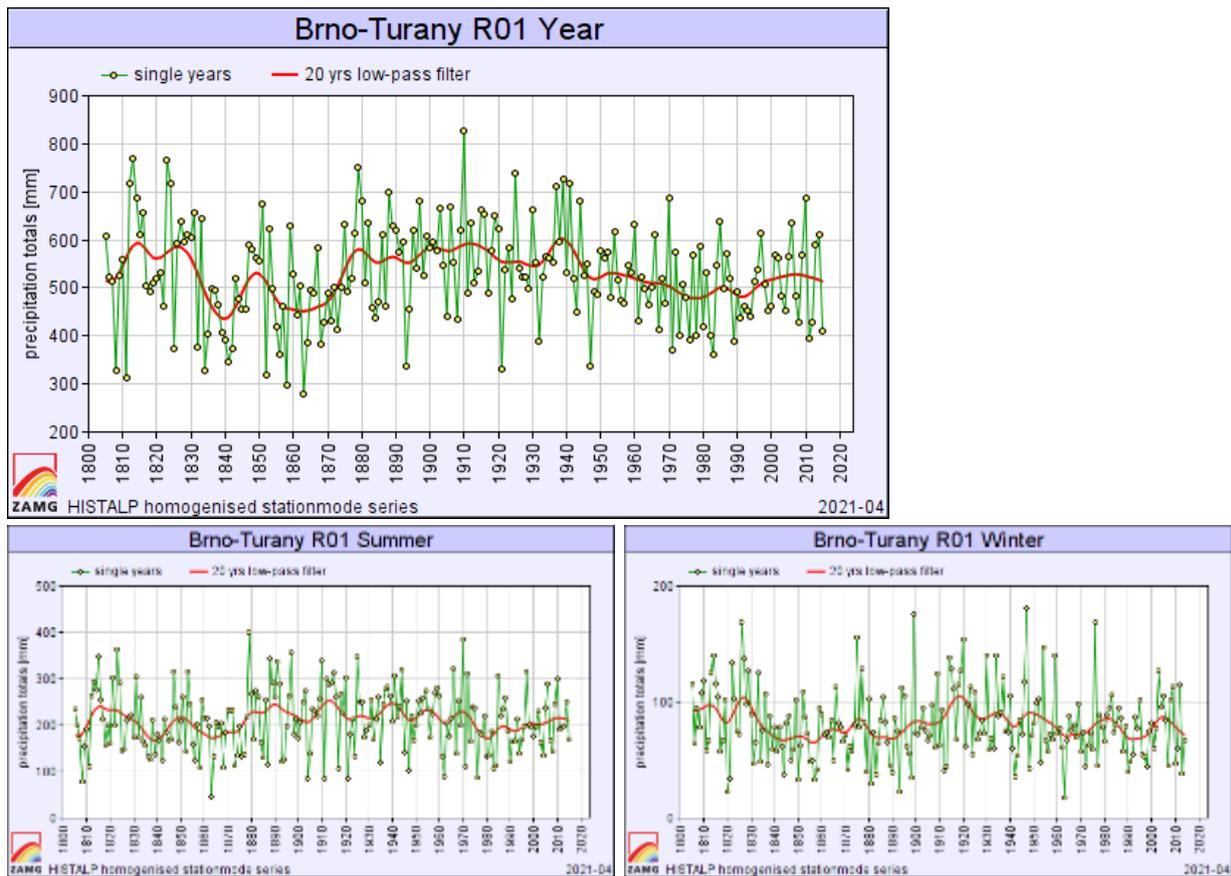


Abbildung 44: Jahressummen (oben), Sommersummen (unten links) und Wintersummen (unten rechts) des Niederschlags sowie 20-Jahres-Mittelwerte 1805-2015 für Brno-Turany (Quelle: ZAMG 2021)

### 6.1.3 Abfluss

Die langjährige Entwicklung des Abflusses wurde für zwei Pegel mit langen Zeitreihen untersucht, für die eine Analyse des Luftbilds keine relevante menschliche Beeinflussung ergab und weiter oben in den Einzugsgebieten der oberen March/Morava (Moravičany) und der Thaya (Raabs) liegen. Außerdem wurden die Beobachtungen am Pegel Angern an der österreichisch-slowakischen Grenzstrecke der March berücksichtigt, der unterhalb der Speicher und Entnahmebauwerke im Einzugsgebiet liegt und daher auch Veränderungen in der menschlichen Wassernutzung beinhaltet.

Abbildung 45 zeigt die Jahresmittelwerte der langjährigen Reihen sowie das gleitende 10-Jahres-Mittel. Trotz ihrer unterschiedlichen Lage und Beeinflussung zeigen die drei Pegel ein übereinstimmendes Bild von deutlichen inter-annualen Schwankungen, aber keinem Trend, zumindest nicht bis zum Jahr 2014. Nach 2014 kam es an allen drei Pegeln zu einer Abfolge von Jahren mit geringen bis sehr geringen Abflüssen. Erst in den Jahren 2019 und 2020 waren die Abflüsse wieder höher. Durch diese Abfolge trockener Jahre zeigt das 10-Jahres-Mittel einen deutlichen Abfall an, der an der Thaya und bei Angern im Vergleich zur oberen March/Morava stärker ausfällt. Hier kam es in

den beiden trockensten Jahren 2017 und 2018 zu historisch niedrigen mittleren Jahresabflüssen. Da die sehr niedrigen Abflüsse auch am unbeeinflussten Oberlauf der Thaya auftraten, liegt die wesentliche Ursache im Zusammenspiel aus geringeren Niederschlägen und höherer Temperatur (und damit Verdunstung) und nicht in menschlichen Beeinflussungen.

Aufgrund der wieder höheren Abflüsse der Jahre 2019 und 2020 kann diese Trockenperiode nicht als langfristiger Trend bezeichnet werden. Wahrscheinlich ist sie aber schon ein Anzeichen der verstärkten klimatischen Variabilität, die allgemein als eine Folge des Klimawandels erwartet wird.

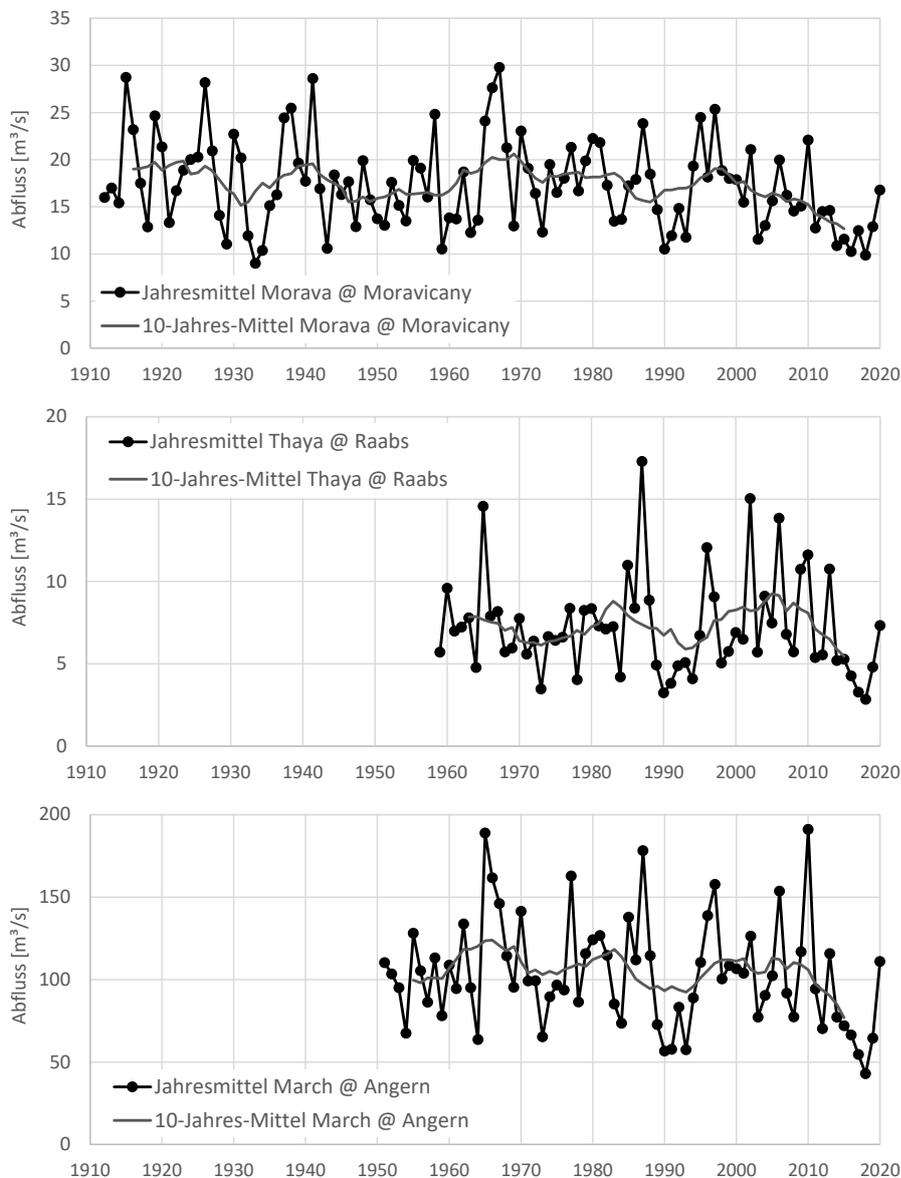


Abbildung 45: Jahresmittelwerte des Abflusses sowie gleitende 10-Jahres-Mittelwerte 1911-2020 für die obere March/Morava bei Moravičany, 1959-2020 für die Thaya bei Raabs und 1951-2020 für die March bei Angern

Abbildung 46 zeigt dieselbe Auswertung für die Jahresmaxima des täglichen Durchflusses. In diesen zeigt sich kein Trend, und die niedrigen Werte in den trockenen Jahren 2015-2018 sind nicht in dem Ausmaß niedriger wie es in der vorangegangenen Abbildung für den mittleren Abfluss ersichtlich ist.

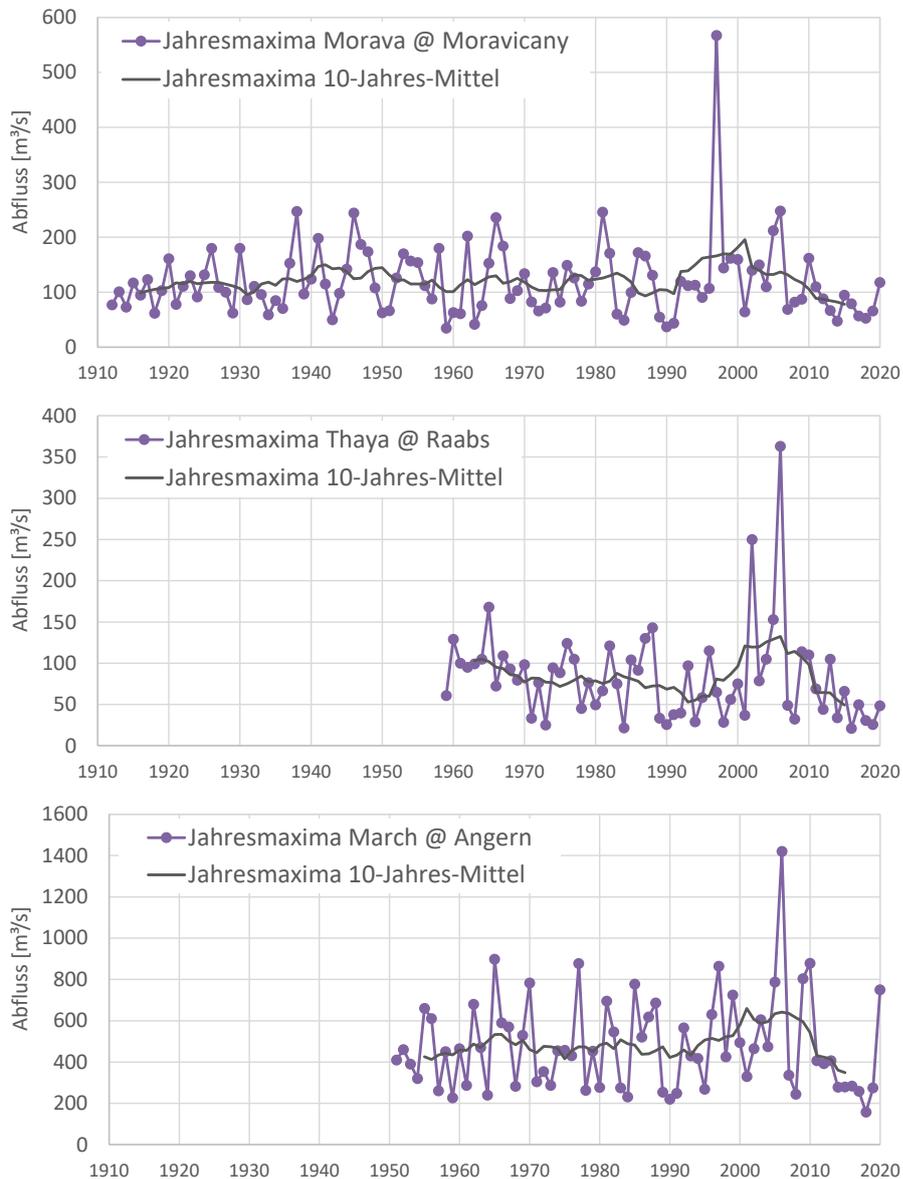


Abbildung 46: Jahresmaxima des mittleren täglichen Abflusses sowie gleitende 10-Jahres-Mittelwerte 1911-2020 für die obere March/Morava bei Moravičany, 1959-2020 für die Thaya bei Raabs und 1951-2020 für die March bei Angern

Abbildung 47 zeigt die Auswertung für Niederwasser (jährliches Minimum des 7-Tages-Abflusses NM<sub>7Q</sub>). An den unbeeinflussten Pegeln zeigt sich auch im Niederwasser kein deutlicher Trend, wobei aber an der Thaya die Niederwasserminima in den trockenen Jahren 2015-2018, aber auch 2019 noch, extrem niedrig waren. Bei Moravičany zeigt sich seit den 1980ern ein relativ deutlicher Rückgang – allerdings nur auf ein Niveau, das schon zwischen 1930 und 1950 vorherrschte, so dass dies eher als langfristige Schwankung anstatt als andauernder Trend interpretiert werden kann.

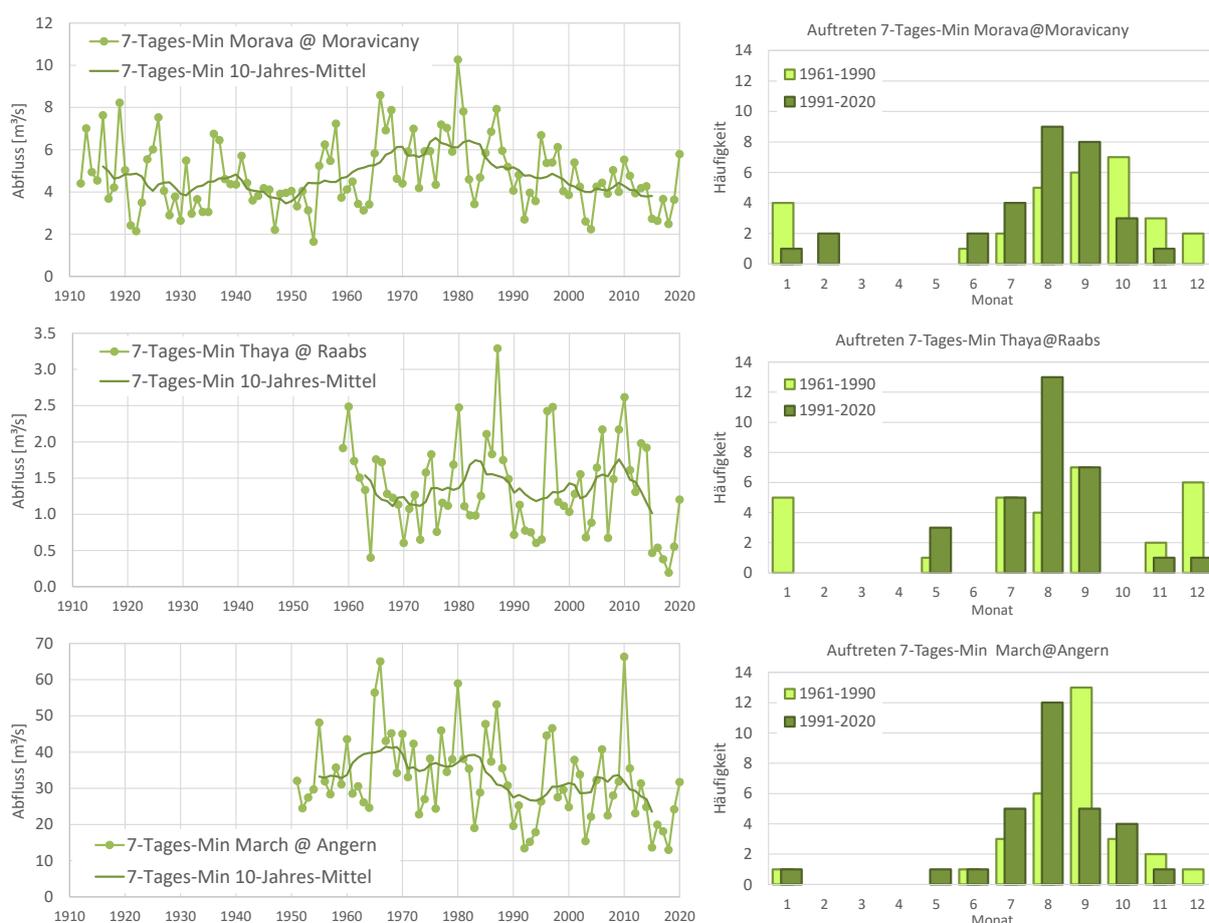


Abbildung 47: Links: Jahresminima des 7-Tages-Abflusses sowie gleitende 10-Jahres-Mittelwerte 1911-2020 für die obere March/Morava bei Moravičany, 1959-2020 für die Thaya bei Raabs und 1951-2020 für die March bei Angern; rechts: Häufigkeit des Auftretens der 7-Tages-Minima in den einzelnen Monaten, Vergleich zwischen den Perioden 1961-1990 und 1991-2020.

Für die March-Grenzstrecke zeigt der Pegel Angern ein ähnliches Verhalten wie Moravičany für die obere March. Was in der Zeitreihe seit 1951 wie ein abnehmender Trend seit den 1980ern aussieht, könnte daher ebenfalls eine längerfristige Schwankung sein. Die Beeinflussung durch wasserwirtschaftliche Maßnahmen im

Oberlauf hat jedenfalls keinen eindeutigen Einfluss auf die Niederwasserminima: der Speicherbetrieb bei Vranov, Dalešice und Vír 1 erhöht den Niederwasserabfluss einerseits; andererseits verursachen die sommerlichen Bewässerungsentnahmen (Khravice, Nové Mlýny, etc.), sowie die Ausleitungen bei Kanälen (Strážnice, etc.) eine Verringerung des Niederwasserabflusses in der March. Diese beiden gegenläufigen Effekte halten sich etwa die Waage. Eine separate Untersuchung mit dem vorliegenden hydrologischen Modell könnte diesen wasserwirtschaftlichen Einfluss auf das Niederwasser quantifizieren (durch gezieltes Ausschalten aller Speicher/Entnahmen). Diese vertiefende Analyse war aber nicht Ziel der vorliegenden Studie und wurde daher nicht durchgeführt.

Viel deutlicher als Veränderungen in der Niederwassermenge sind aber die Veränderungen im zeitlichen Auftreten der Niederwasserextreme (Abbildung 47 rechts). An der oberen March/Morava wie an der oberen Thaya zeigt sich zwischen den Zeiträumen 1961-1990 und 1991-2020 eine deutliche Verschiebung aus den Herbst- und Wintermonaten in die Sommermonate. An der unteren March ist diese Verschiebung von Herbst und Winter in geringerem Ausmaß auch wirksam, zusätzlich kommt es innerhalb der im Sommer auftretenden extremen Niederwasserperioden zu einem früheren Auftreten im August statt im September.

## 6.2 Klima-Sensitivitätsanalyse

Mit dem Wasserbilanzmodell der March kann, unabhängig von den Projektionen der Klimamodelle, die Klimasensitivität der hydrologischen Prozesse im Einzugsgebiet untersucht werden. Dafür wurde die Temperatur in Schritten von 0.5°C um bis zu 4°C erhöht. Für den Niederschlag wurde in Schritten von +/-5% eine Erhöhung und eine Verringerung bis 20% untersucht.

Abbildung 48 zeigt die Veränderung der Ergebnisse für den mittleren Abfluss aufgrund dieser graduellen Veränderungen in Temperatur und Niederschlag an der oberen March/Morava bei Strážnice, an der Thaya/Dyje bei Ladná und an der March-Grenzstrecke bei Hohenau. Für die Temperatur (Abbildung 48 links) zeigt sich eine Veränderung von rund -8% im Abfluss pro °C Erwärmung. Pro 10% Erhöhung im Niederschlag ergibt sich ein Anstieg von rund 30% im Abfluss. Dabei ist für beide Parameter die Sensitivität im Thaya-Einzugsgebiet höher als an der March. Insgesamt zeigen diese Ergebnisse für den Jahresmittelwert die hohe Sensitivität des March-Einzugsgebiets für Klimaveränderungen. Die genaue Ursache dieser Unterschiede zwischen Thaya- und March-Einzugsgebiet, die mit den Bodenverhältnissen, der Landnutzung und der Höhererstreckung und damit Relevanz von Schneeprozessen zusammenhängen können, wurde nicht untersucht, da dies kein Ziel dieser Studie war.

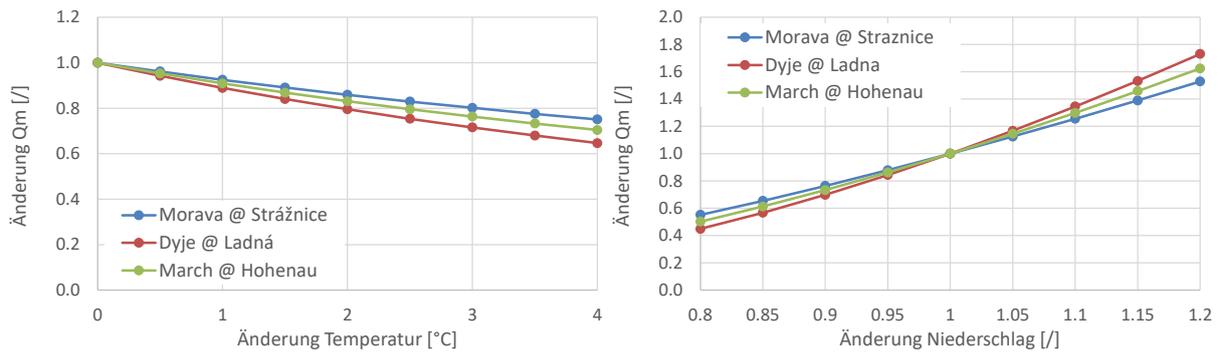


Abbildung 48: Klimasensitivität für die obere March/Morava bei Strážnice, die Thaya/Dyje bei Ladná und die March-Grenzstrecke bei Hohenau: links Änderung im Abfluss aufgrund Temperaturänderung, rechts aufgrund Niederschlagsänderung.

Veränderungen in der Saisonalität des Abflusses sowie speziell im Niederwasserabfluss aufgrund derselben stufenweisen Veränderungen in Temperatur und Niederschlag sind in Abbildung 49 dargestellt. Die Veränderung der klimatischen Eingangsgrößen wurden dabei über das Jahr gleichmäßig verteilt angenommen, um eine eindeutige Interpretation der Ergebnisse zu ermöglichen.

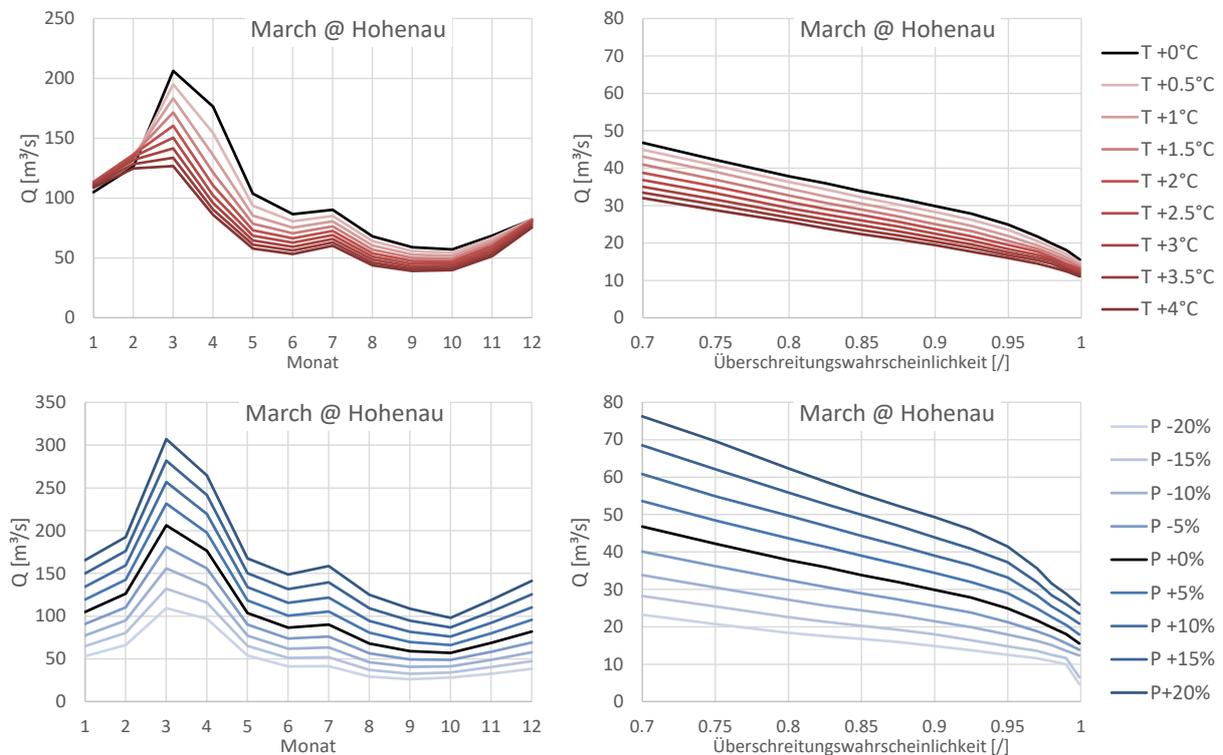


Abbildung 49: Klimasensitivität für das Einzugsgebiet der March bis Hohenau: Änderung in der Saisonalität (links) und im Niederwasserabfluss (rechts) aufgrund von Temperaturänderung (oben) und aufgrund von Niederschlagsänderung (unten).

Die gleichmäßige Skalierung des Niederschlags führt zu der oben bereits gezeigten starken Veränderung im Abfluss, wobei diese auch sehr gleichmäßig über das Jahr verteilt ist (Abbildung 49 unten links). Geringfügig höhere Veränderungen zeigen sich im Frühling, wenn sich Niederschlag und Schneeschmelze überlagern, und geringfügig niedrigere Veränderungen im Winter, wenn der Schneeanteil des Niederschlags nicht sofort abflusswirksam wird. Auch auf das Niederwasser (Abbildung 49 unten rechts) haben Veränderungen im Niederschlag dementsprechend drastische Auswirkungen. Ab einer Reduktion des Niederschlags um 15% kann der verlangte Minimalabfluss bei Nove Mlyny nicht mehr eingehalten werden (da der Speicher trocken fällt) und es kommt somit bei Hohenau zu einer deutlichen Abnahme der niedrigsten Abflusswerte.

Die ausschließliche Erwärmung verursacht geringere, aber ebenfalls deutliche Veränderungen im Niederwasser (Abbildung 49 oben rechts). Saisonal wirkt der Temperaturanstieg unterschiedlich (Abbildung 49 oben links): während die damit einhergehende erhöhte Verdunstung zu einem sehr starken Abflussrückgang in Frühling und Frühsommer führt, bringt im Winter die Erwärmung eine leichte Zunahme des Abflusses wegen des höheren Regenanteils und der geringeren Schneespeicherung.

### 6.3 Klimamodellsimulationen und Klimaänderungssignale

Die Bearbeitung und Auswertung der Klimamodelldaten erfolgte grundsätzlich auf der räumlichen Skala der Subbasins des hydrologischen Modells. Die folgenden Auswertungen zeigen zusammenfassend Ergebnisse für die Mittelwerte im gesamten Marchezugsgebiet – außer in den Karten der Klimaänderungssignale, die deutlich machen, dass die räumliche Variabilität in den Klimasimulationen relativ gering ist. Daher ist diese Mittelung über das gesamte Marchezugsgebiet zulässig und führt zu lediglich geringem Informationsverlust.

#### 6.3.1 Historische Klimamodellsimulationen

Die historischen CORDEX-Klimasimulationen für die Temperatur bilden den im Marchezugsgebiet bereits beobachteten Anstieg der Temperatur (siehe Kapitel 6.1.1) grundsätzlich gut ab (Abbildung 50). Allerdings zeigt die Abbildung, dass die Mehrheit der Simulationen eher „zu kühl“ ist, also mittlere Temperaturen unter denen der Beobachtung aufweisen (was in der weiteren Bearbeitung durch die Bias-Korrektur mittels Delta-Change-Methode berücksichtigt wird). Abbildung 50 zeigt auch deutlich die fortgesetzte Erwärmung im 21. Jahrhundert.

Abbildung 51 zeigt den saisonalen Verlauf der Temperatur in den Modellen und in der Beobachtung, wobei wieder die tendenzielle Unterschätzung der Beobachtungen erkennbar ist, und dass diese im Frühling am stärksten ist.



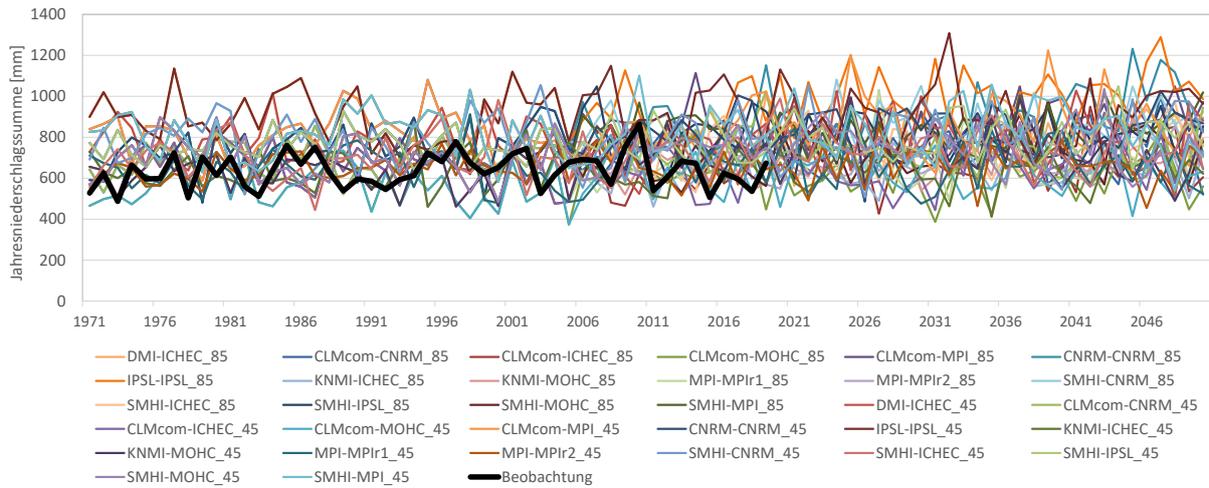


Abbildung 52: Jahresniederschlagssummen im Marchenzugsgebiet seit 1971 in der Beobachtung und in den Klimamodellsimulationen

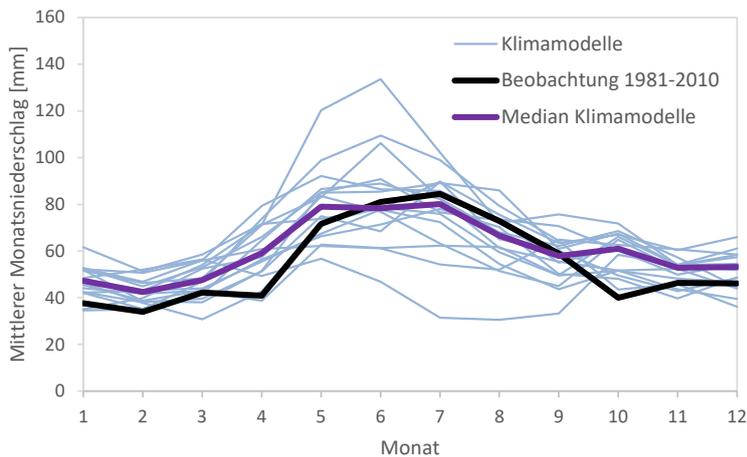


Abbildung 53: Mittlerer Monatsniederschlag im Marchenzugsgebiet für die Referenzperiode 1981-2010 in der Beobachtung und in den Klimamodellsimulationen

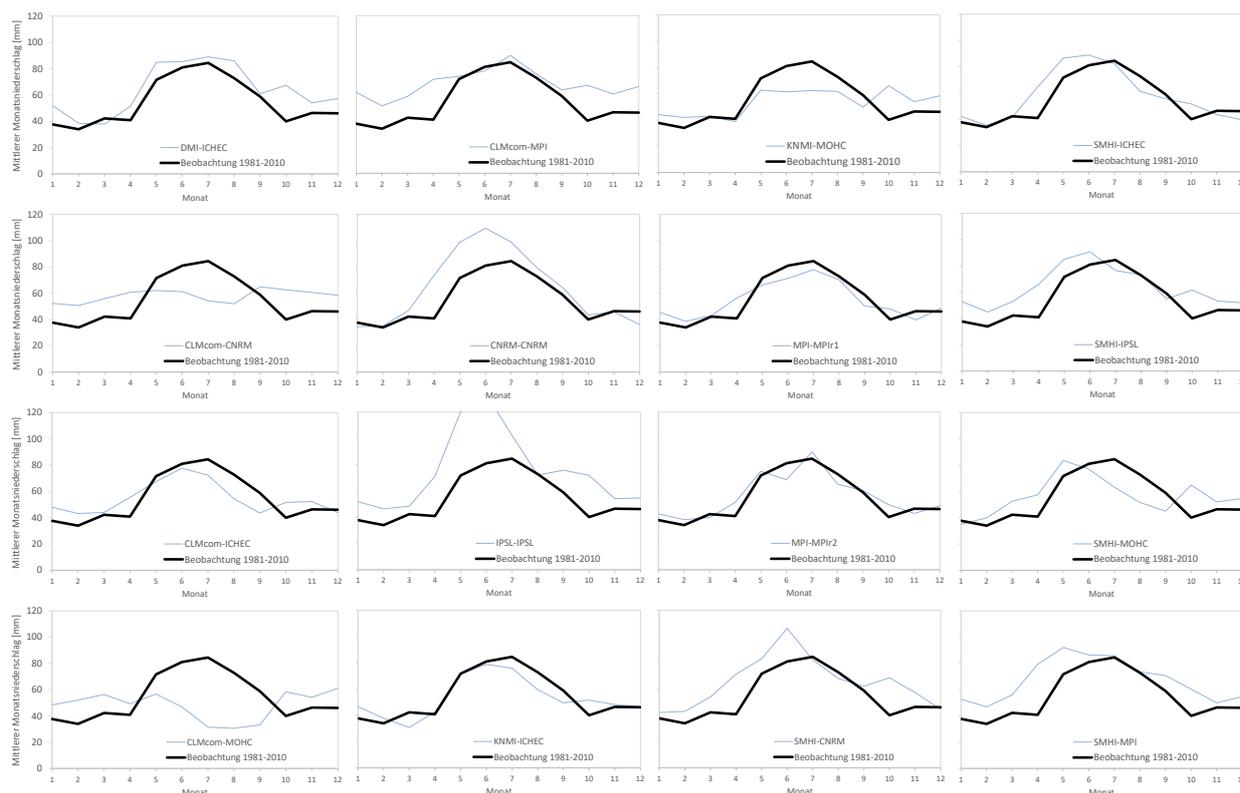


Abbildung 54: Mittlerer Monatsniederschlag für die Referenzperiode 1981-2010 in der Beobachtung und in den Klimamodellsimulationen, für die einzelnen Klimamodelle

Einzelne Modelle, die sehr deutliche Probleme bei der Abbildung der Saisonalität im Niederschlag aufweisen, könnten aufgrund dieser Fehler aus der weiteren Auswertung ausgeschieden werden. Allerdings zeigen eine Reihe von Studien (z.B. Kiesel et al. 2020, Knutti et al. 2010; Giorgi and Coppola 2010), dass man keinen direkten Zusammenhang zwischen der Güte der historischen Simulation und der Zuverlässigkeit des Klimawandelsignals herstellen kann. Außerdem wurde für alle Modelle des angewendeten CORDEX-Modellensembles die Prozessabbildung als ausreichend gut bewertet, um die Modelle in der Analyse der zukünftigen Veränderungen zu berücksichtigen. Es wurden daher alle Modelle für die weitere Bearbeitung herangezogen, und Fehler in der Abbildung der Niederschlagssaisonalität durch die Anwendung monatlicher Delta-Change-Werte korrigiert.

Trotz der gezeigten Fehler in den historischen Klimamodellsimulationen sind die auf den CMIP5-GCMs basierenden CORDEX-Simulationen derzeit die Klimamodelldaten mit der besten Abbildung des vergangenen und zukünftigen regionalen Klimageschehens. Zum Zeitpunkt dieser Studie ist bereits ein neues großes GCM-Ensemble der CMIP6-Generation vorhanden (Eyring et al. 2016). Allerdings liegen noch keine RCM-Simulationen vor, die von den neuen GCMs angetrieben werden. Wenn solche

regionalen neuen Klimamodellläufe vorliegen, kann es sinnvoll sein, die vorliegende Untersuchung mit den neuen Daten zu wiederholen. Dabei könnten auch neue Generation räumlich höher aufgelöster GCMs (HighResMIP, Haarsma et al. 2016), die derzeit fertiggestellt werden, direkt verwendet werden.

In der Darstellung der Jahreswerte der Modellsimulationen im Vergleich mit den Beobachtungen (Abbildung 50 und Abbildung 52) kann man auch deutlich erkennen, dass die Abfolge von warmen und kalten und feuchten und trockenen Jahren in den Simulationen nicht der beobachteten Abfolge entspricht. In jedem Modell herrscht also gewissermaßen ein eigenes „Modell-Wetter“. Darum ist es wichtig, für Vergleiche die statistischen Eigenschaften von möglichst langen Perioden heranzuziehen, da bei kürzeren Perioden das zufällige Verhalten des „Modell-Wetters“ diese Eigenschaften beeinflussen kann. Für die gegenständliche Studie wird ein Vergleich der Zukunftsperiode 2021-2050 mit der Referenzperiode 1981-2010 durchgeführt.

### 6.3.2 Klimaänderungssignale

Die Delta-Change-Werte ergeben sich aus dem Vergleich der Mittelwerte in der Zukunftsperiode 2021-2050 und der Referenzperiode 1981-2010. Da in der gewählten Referenzperiode die letzten 5 Jahre in den Klimamodellläufen bereits zu den Jahren mit hinterlegten Emissionsszenarien zählen, und sich damit für RCP4.5 und RCP8.5 geringfügig unterscheiden, werden diese Klimaänderungssignale für jedes Subbasin, jedes Monat, jedes Klimamodell und jedes Emissionsszenario bestimmt.

Die Verteilung der Klimaänderungssignale der mittleren Jahrestemperatur im gesamten March-Einzugsgebiet, die sich aus den verschiedenen Klimamodellen ergibt, zeigt Abbildung 55. Alle Klimamodelle zeigen eindeutig eine weiter zunehmende Erwärmung an. Gut erkennbar ist auch der zur Mitte des Jahrhunderts noch geringe Unterschied zwischen RCP4.5 und RCP8.5, mit Medianwerten von 1.0°C und 1.1°C Erwärmung. 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. Einzelne Modell zeigen auch deutlich geringere und deutlich höhere Erwärmung.

Wie erwähnt ist die räumliche Verteilung der Änderungssignale im March-Einzugsgebiet relativ gleichmäßig (Abbildung 56). Die Medianwerte aller RCP4.5-Projektionen liegen überall im March-Einzugsgebiet ganz knapp unter 1.0°C, jene der RCP8.5-Projektionen überall knapp über 1.1°C und ganz im Süden und Westen des Einzugsgebiets knapp unter 1.1°C.

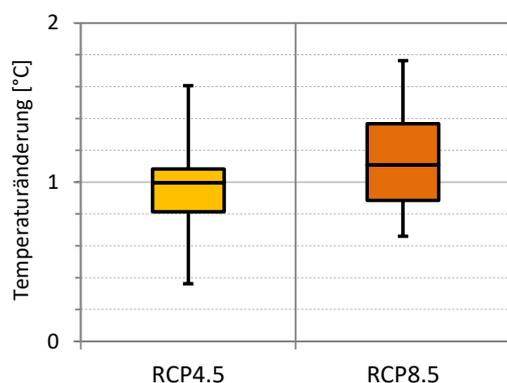


Abbildung 55: Box-Plots der mittleren Temperaturänderung zwischen 2021-2050 und 1981-2010 (Mittelstrich: Median, Box: 25%-75%-Quantil; Antennen: Minimum und Maximum)

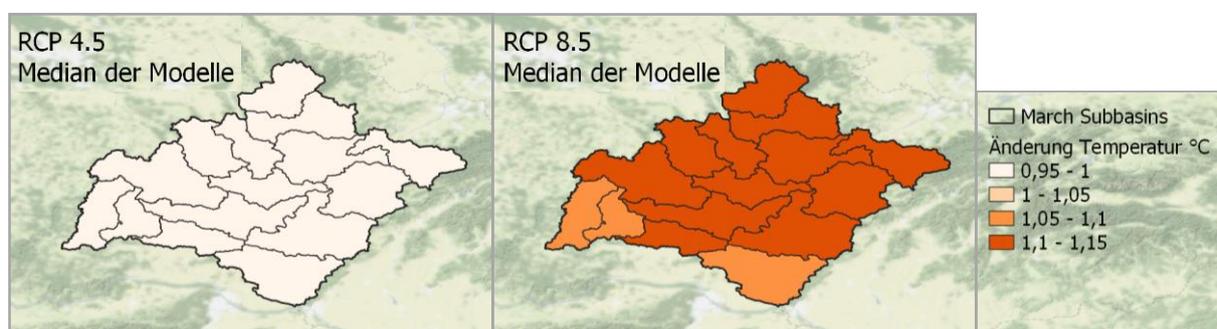


Abbildung 56: Räumliche Verteilung der Werte des Medians der Temperaturänderung

Auch saisonal zeigen sich in den Medianwerten der Änderungssignale keine deutlichen Variationen. Die Mediane der Änderungen in den einzelnen Monaten schwanken in beiden Emissionsszenarien um weniger als ein halbes Grad um den Jahresmittelwert (Abbildung 57 links unten). Die einzelnen Modelle (Abbildung 57 rechts unten für RCP8.5) zeigen aber durchaus stärkere saisonale Schwankungen in den Temperaturänderungssignalen. Dies unterstreicht die Notwendigkeit, in einer detaillierten Klimafolgenstudie alle einzelnen Klimamodelle in der gesamten Modellkette anzuwenden, wenn man die Auswirkungen auf den Abfluss und deren Unsicherheit untersuchen möchte.

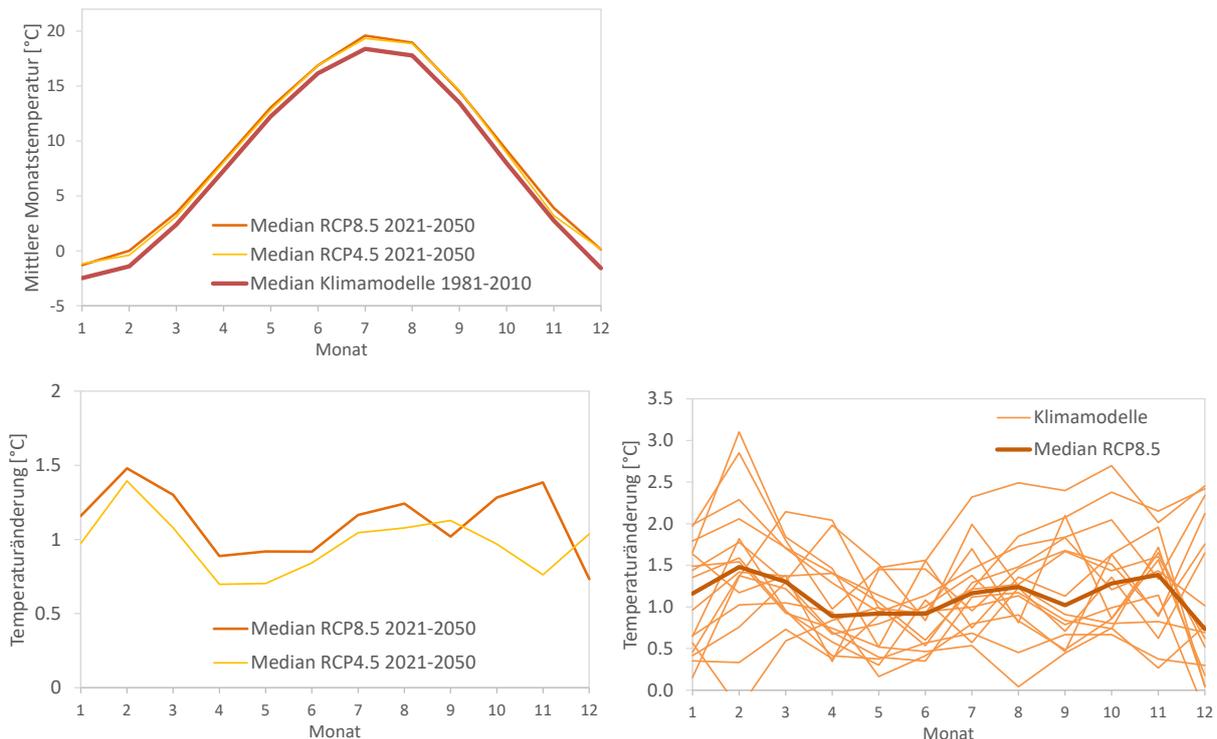


Abbildung 57: Mittlere monatliche Temperaturänderung in den beiden Emissionsszenarien; links oben: Mediane der absoluten Simulationsergebnisse in °C, links unten: Mediane der Änderung in °C zwischen 2021-2050 und 1981-2010, rechts unten: Änderung in °C für den Median und einzelne Modelle in RCP8.5.

Die relative Änderung im mittleren Niederschlag zeigt Abbildung 58, mit Medianwerten von +3% in RCP4.5 und +6% in RCP8.5. Bemerkenswert ist, dass nur eine einzige Modellprojektion, nämlich eine für RCP4.5, ein negatives Vorzeichen, also einen Rückgang im Niederschlag anzeigt (MPI-MPIr2, von dem noch eine weitere Realisierung im Ensemble enthalten ist, die einen – allerdings sehr geringen – Anstieg anzeigt). Insgesamt gibt es also eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen den Modellen, dass der Niederschlag im Marchenzugsgebiet in Zukunft ansteigen wird. Das Ausmaß des Anstiegs ist allerdings unsicher, mit Innerquartilswerten zwischen +1% und +7% im RCP4.5 und zwischen +4% und +9% im RCP8.5. Einzelne Modelle zeigen sogar Anstiege über +10% an.

Die Karte der Medianwerte der Änderung in den einzelnen Teileinzugsgebieten zeigt auch für Niederschlag nur geringe räumliche Unterschiede (Abbildung 59).

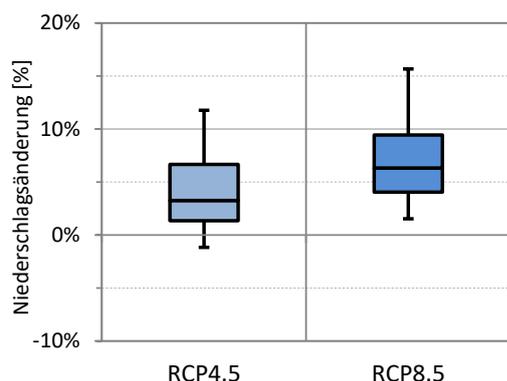


Abbildung 58: Box-Plots der mittleren relativen Niederschlagsänderung zwischen 2021-2050 und 1981-2010 (Mittelstrich: Median, Box: 25%-75%-Quantil; Antennen: Minimum und Maximum)

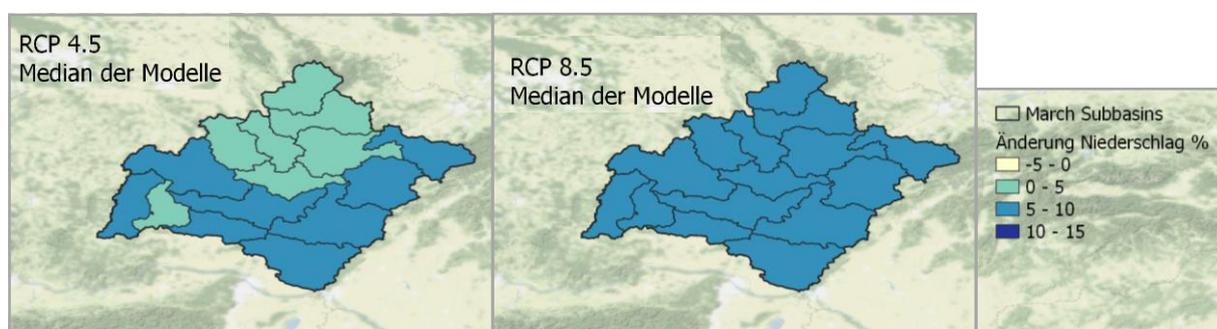


Abbildung 59: Räumliche Verteilung der Werte des Medians der Niederschlagsänderung

In den monatlichen Änderungssignalen des Niederschlags im Gebietsmittel (Abbildung 60) zeigt sich die deutlichste Übereinstimmung und damit der deutlichste Anstieg im ersten Halbjahr von Jänner bis Juni. Im zweiten Halbjahr gibt es stärkere Unterschiede zwischen den einzelnen Modellen (wie exemplarisch für RCP8.5 gezeigt in Abbildung 60 rechts unten), so dass sich hier im Median der Änderungssignale (Abbildung 60 links unten) einerseits relativ starke Schwankungen von Monat zu Monat und andererseits keine deutlich positiven oder negativen Signale zeigen.

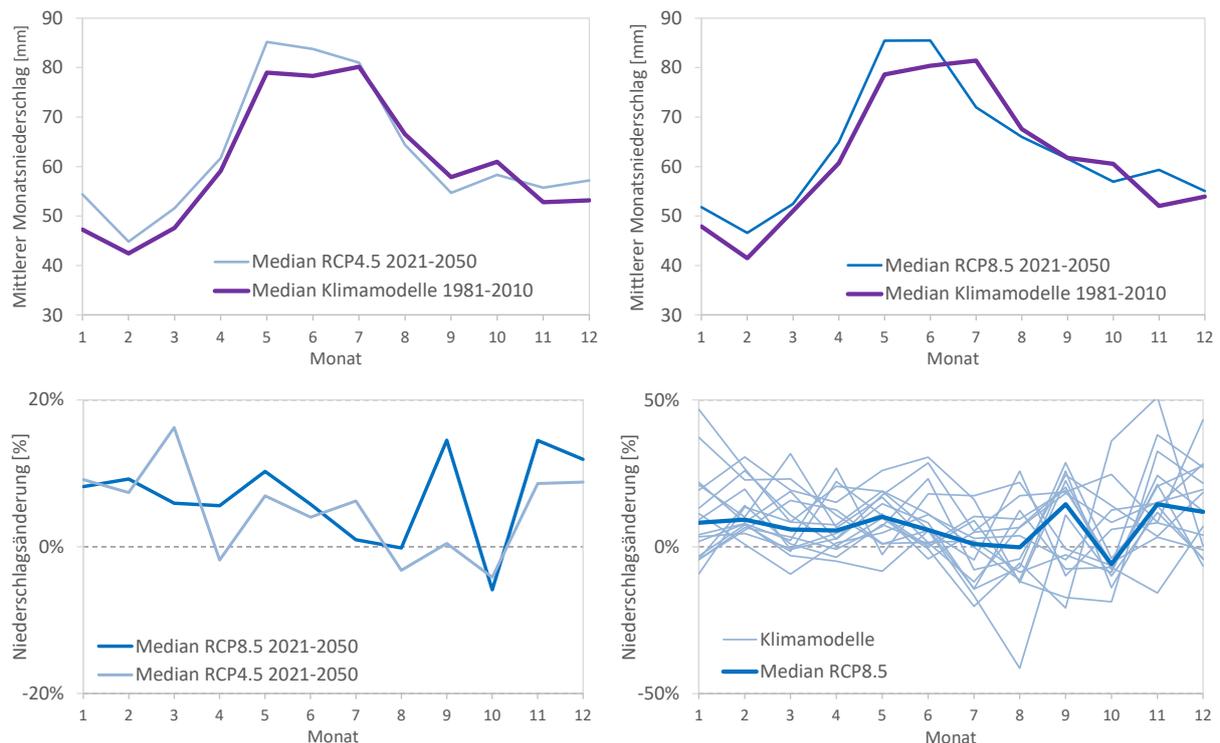


Abbildung 60: Mittlere monatliche Niederschlagsänderung in den beiden Emissionsszenarien; oben: Mediane der absoluten Simulationswerte in mm (links RCP4.5, rechts RCP8.5), links unten: Mediane der Änderung in % zwischen 2021-2050 und 1981-2010, rechts unten: Änderung in % für den Median und einzelne Modelle in RCP8.5.

Eine Zusammenschau der Klimaänderungssignale aus den EURO-CORDEX-Klimamodellen für das Marchezugsgebiet zeigt grafisch Abbildung 61. Darin wird auch noch einmal die geringfügig, aber systematisch stärkere Erwärmung in den RCP8.5-Szenarien deutlich, sowie die allgemeine Übereinstimmung der Modelle, dass bis zur Mitte des 21. Jahrhunderts eine Erwärmung und eine Zunahme des Niederschlags im Marchezugsgebiet erwartet werden kann.

Die in Abbildung 61 grafisch dargestellten und gruppierten Änderungssignale für Temperatur und Niederschlag sind in der Liste in Tabelle 13 den einzelnen Modellen zugeordnet.

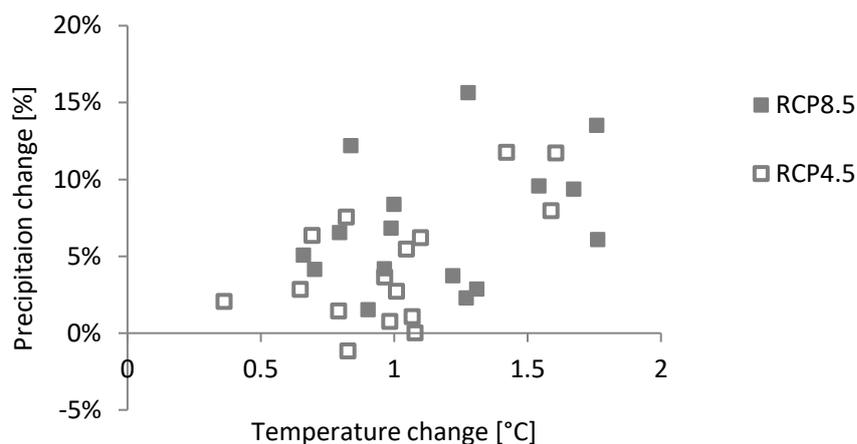


Abbildung 61: Klimaänderungssignale (Mittelwert im March-Einzugsgebiet) für Temperatur [°C] und Niederschlag [%] für alle angewendeten Klimamodelle, gruppiert nach Emissionsszenarien

Tabelle 13: Klimaänderungssignale (Mittelwerte im March-Einzugsgebiet) für Temperatur  $\Delta T$  [°C] und Niederschlag  $\Delta P$  [%] für alle angewendeten Klimamodelle und beide Emissionsszenarien

RCM	RCP 4.5		RCP 8.5	
	[°C] $\Delta T$	[%] $\Delta P$	[°C] $\Delta T$	[%] $\Delta P$
CLMcom-CNRM	0.4	2.0%	0.7	5.1%
CLMcom-ICHEC	0.8	1.4%	1.0	8.4%
CLMcom-MOHC	1.6	8.0%	1.8	6.1%
CLMcom-MPI	0.7	6.4%	0.7	4.1%
CNRM-CNRM	0.8	7.5%	1.3	15.7%
DMI-ICHEC	1.0	2.7%	1.3	2.9%
IPSL-IPSL	1.1	1.1%	0.8	12.2%
KNMI-ICHEC	1.1	0.0%	1.3	2.3%
KNMI-MOHC	1.6	11.7%	1.8	13.5%
MPI-MPIr1	1.0	0.8%	0.8	6.5%
MPI-MPIr2	0.8	-1.2%	1.0	4.2%
SMHI-CNRM	0.6	2.8%	1.0	6.8%
SMHI-ICHEC	1.1	6.2%	1.5	9.6%
SMHI-IPSL	1.0	5.5%	1.2	3.7%
SMHI-MOHC	1.4	11.8%	1.7	9.4%
SMHI-MPI	1.0	3.6%	0.9	1.5%
Mittelwert	1.0	4%	1.2	7%
Median	1.0	3%	1.1	6%

## 6.4 Wasserbilanzsimulation unter Berücksichtigung der Klimaprojektionen

Die im vorangegangenen Kapitel zusammenfassend beschriebenen Änderungssignale wurden den Inputdaten für die Referenzperiode 1981-2010 aufgeprägt, für die beiden Variablen Niederschlag und Temperatur, für jedes Monat (12), für jedes Klimamodell (16), jedes Emissionsszenario (2), und jedes Subbasin des hydrologischen Modells (15) – insgesamt 11.520 Werte. Daraus ergaben sich die Inputdaten für die Zukunftsperiode 2021-2050. Nach der durchgehenden Simulation 1980-2050 wurden die Ergebnisse des hydrologischen Modells für die Zukunftsperiode mit jenen der Referenzperiode (1981-2010) verglichen und so die erwartbaren Veränderungen in der Wasserbilanz und im Abfluss ermittelt.

### 6.4.1 Änderungen in den einzelnen Komponenten der Wasserbilanz und deren Beurteilung

Die Änderungen in der simulierten Wasserbilanz werden für die beiden großen Teileinzugsgebiete der beiden Zubringer zur Grenzstrecke der March dargestellt, für die obere March/Morava bei Strážnice (Abbildung 62) und die Thaya/Dyje bei Ladná (Abbildung 63). Da die Veränderungen für RCP4.5 und RCP8.5 ähnlich sind, werden hier nur die Ergebnisse für RCP8.5 mit seinen etwas stärkeren Änderungen in den Klimadaten gezeigt, weil dadurch die grundsätzlichen Änderungen in den Komponenten der Wasserbilanz deutlicher hervorgehoben werden.

Die Änderungen im Niederschlag in mm entsprechen den im vorangegangenen Kapitel gezeigten relativen Klimaänderungssignalen. Die Veränderung im Schneewasserwert ergibt sich durch Überlagerung der höheren Niederschläge und der höheren Temperaturen, wobei sich im starken Rückgang des Schneewasserwerts in den Wintermonaten deutlich der Einfluss der Erwärmung zeigt. In beiden Einzugsgebieten ergibt sich aus einem Anstieg der Temperatur zwischen 1°C und 1,5°C ein Rückgang im Schneewasserwert um rund 40% im Median der Modellprojektionen. Dies impliziert gleichzeitig einen deutlich höheren Anteil an flüssigem Niederschlag und damit höheren Abfluss, wie in den Abflusssimulationen der Wintermonate deutlich ersichtlich. Außerdem kommt es zu einer früheren Schneeschmelze, was zu einer Erhöhung der saisonalen Abflussspitze im März führt (an der Thaya stärker ausgeprägt als an der oberen March).

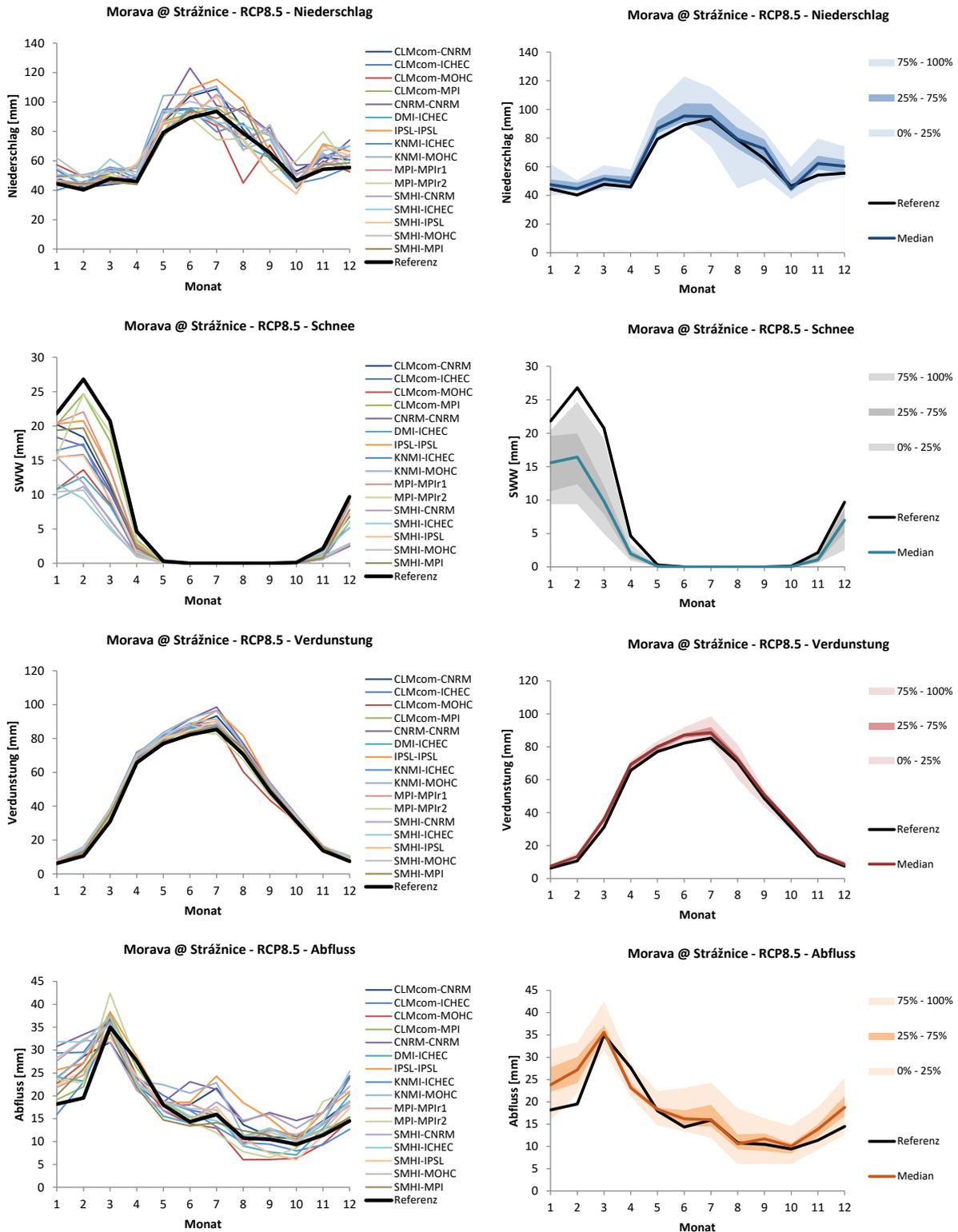


Abbildung 62: Simulierte Wasserbilanzgrößen Niederschlag (1. Reihe), Schneewasserwert SWW (2. Reihe), Verdunstung (3. Reihe) und Abfluss (4. Reihe) für das Einzugsgebiet der March/Morava bei Strážnice, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP8.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen.

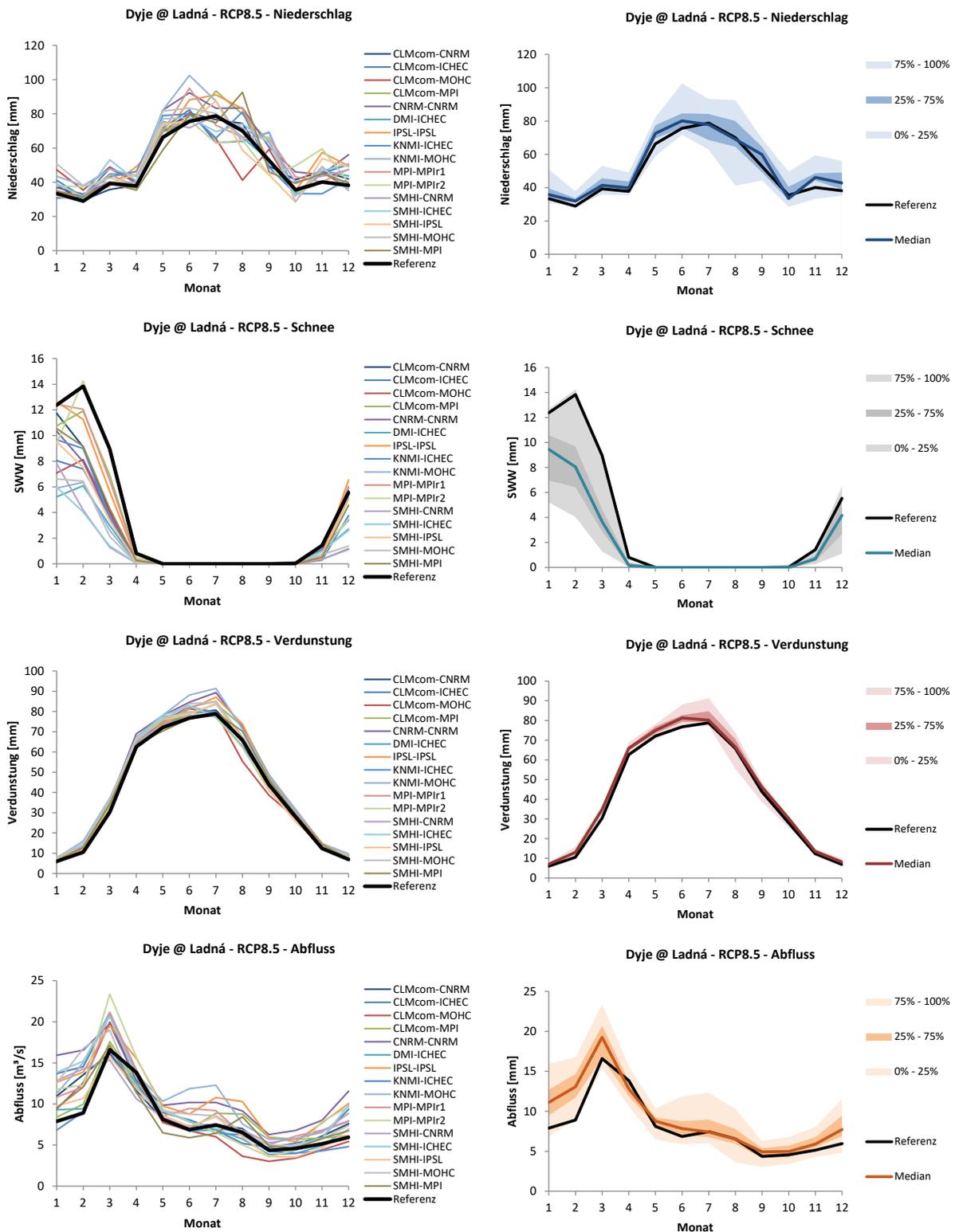


Abbildung 63: Simulierten Wasserbilanzgrößen Niederschlag (1. Reihe), Schneewasserwert SWW (2. Reihe), Verdunstung (3. Reihe) und Abfluss (4. Reihe) für das Einzugsgebiet der Thaya/Dyje bei Ladná, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP8.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen.

Ebenfalls als Auswirkung der Erwärmung steigt die Verdunstung an. Die in Abbildung 62 und Abbildung 63 dargestellte aktuelle Verdunstung steigt vor allem im Frühling und besonders im Frühsommer an, im Spätsommer und Herbst verhindert die nicht mehr ausreichende Wasserverfügbarkeit einen stärkeren Anstieg.

Die gestiegene Verdunstung verbraucht einen Teil der höheren Niederschläge, so dass der Abfluss während Frühling und Sommer nicht oder nur vergleichsweise wenig ansteigt, trotz der von den meisten Modellen angezeigten Erhöhung des Niederschlags.

#### 6.4.2 Änderungen im Abfluss an den ausgewählten Knoten

Aufgrund der beschriebenen Änderungen in der Wasserbilanz und den damit verbundenen Prozessen der Abflussbildung ergeben sich Änderungen im Abfluss von Thaya/Dyje und oberer March/Morava und in weiterer Folge, als Überlagerung dieser Abflüsse sowie der geringen Beiträge der kleinen Zwischeneinzugsgebiete, Änderungen an der unteren March entlang der Grenzstrecke zwischen Österreich und der Slowakei.

Diese Änderungen im Abfluss werden hier für die drei Knoten/Pegel obere March/Morava bei Strážnice, Thaya/Dyje bei Ladná, und March-Grenzstrecke bei Hohenau dargestellt, jeweils für die Saisonalität (mittlerer Monatsabfluss), die gesamte Dauerlinie des Abflusses sowie den Niederwasser-Bereich der Dauerlinie. Beim Pegel Ladná ist in der Dauerlinie deutlich der Einfluss des Speichers Nové Mlýny auf das Niederwasser erkennbar (Minimalwassermenge). Schließlich erfolgt eine Gegenüberstellung der Ergebnisse mit den Kennwerten NQ und MQ der aktuell gültigen KWM 2018.

In der Saisonalität des Abflusses zeigen sich bei allen drei Pegeln die tendenziell gleichen Veränderungen:

- Es kommt zu einem höheren Abfluss im Winter, wobei fast alle Modelle übereinstimmend eine Zunahme anzeigen und nur im Ausmaß der Zunahme variieren. Der Anstieg ist im RCP8.5 stärker als im RCP4.5, aufgrund der höheren Zunahmen von sowohl Niederschlag als auch Temperatur (was zu mehr flüssigem Niederschlag und weniger Schneedecke führt).
- Die saisonale Abflussspitze im Frühling steigt an, wobei dies an der Thaya am stärksten ausgeprägt ist, an der March bei Hohenau weniger stark, und an der oberen March nur wenig. Einige Modelle zeigen an den drei Pegeln keinen Anstieg an. Der geringere Anstieg an der oberen March hängt mit der teilweise größeren Seehöhe im Einzugsgebiet zusammen, da in den höher gelegenen Gebieten auch in Zukunft die Schneeschmelze etwas später auftritt und das Schmelzwasser damit über mehrere Monate verteilt zum Abfluss beiträgt.
- Sommer- und Herbstabfluss bleiben tendenziell gleich oder steigen leicht an, wobei es an allen drei Pegeln einige Modelle gibt, die auch einen Rückgang anzeigen. Trotz des höheren Temperaturanstiegs (und der damit höheren

Verdunstung) in RCP8.5 zeigt dieses Szenario einen tendenziell höheren Abfluss in dieser Saison, aufgrund des höheren Anstiegs der Niederschläge.

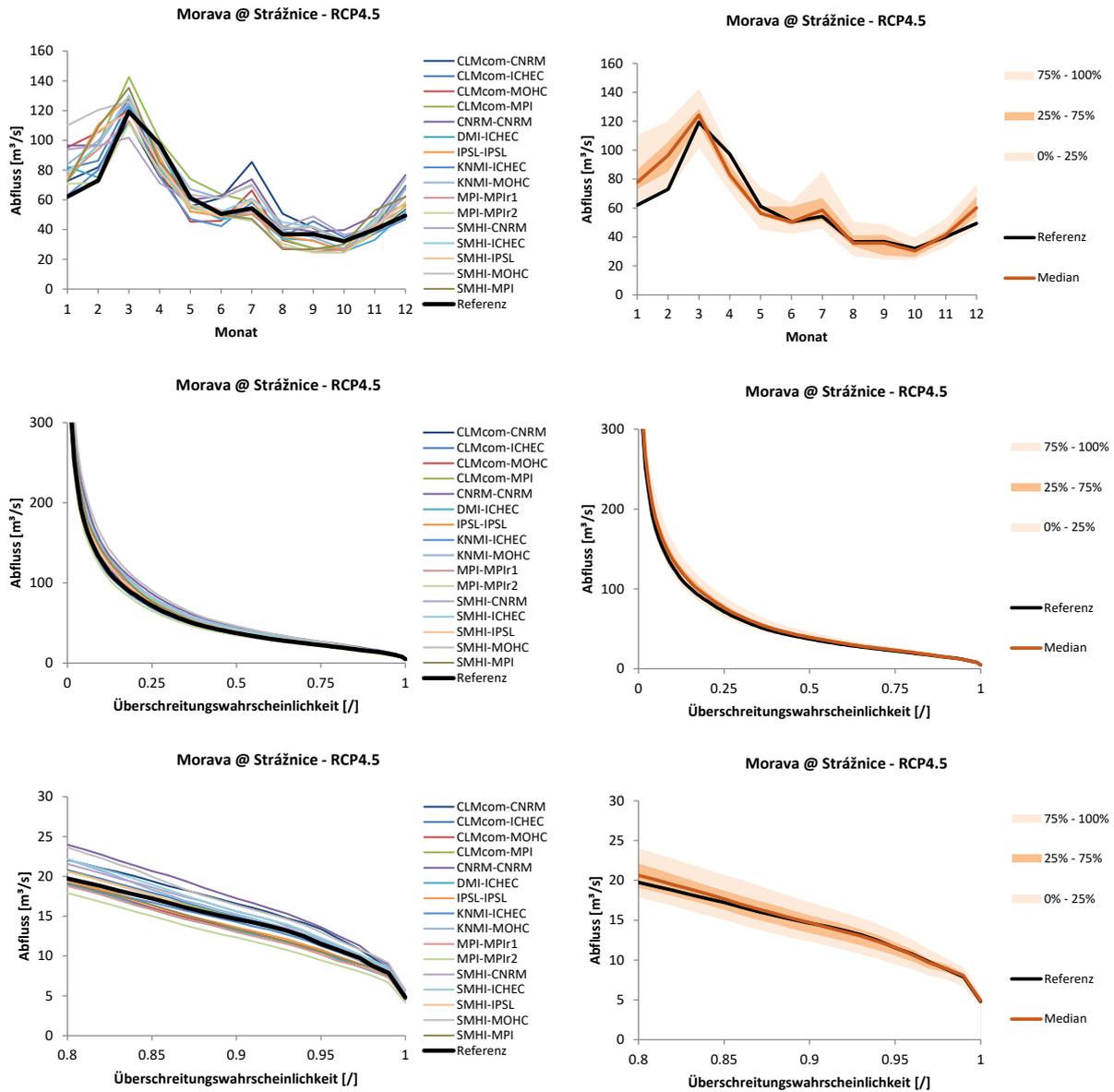


Abbildung 64: Simulierte mittlere Monatsabflüsse (1. Reihe), Dauerlinie (2. Reihe) und Niederwasserbereich der Dauerlinie (3. Reihe) für die March/Morava bei Strážnice, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP4.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen.

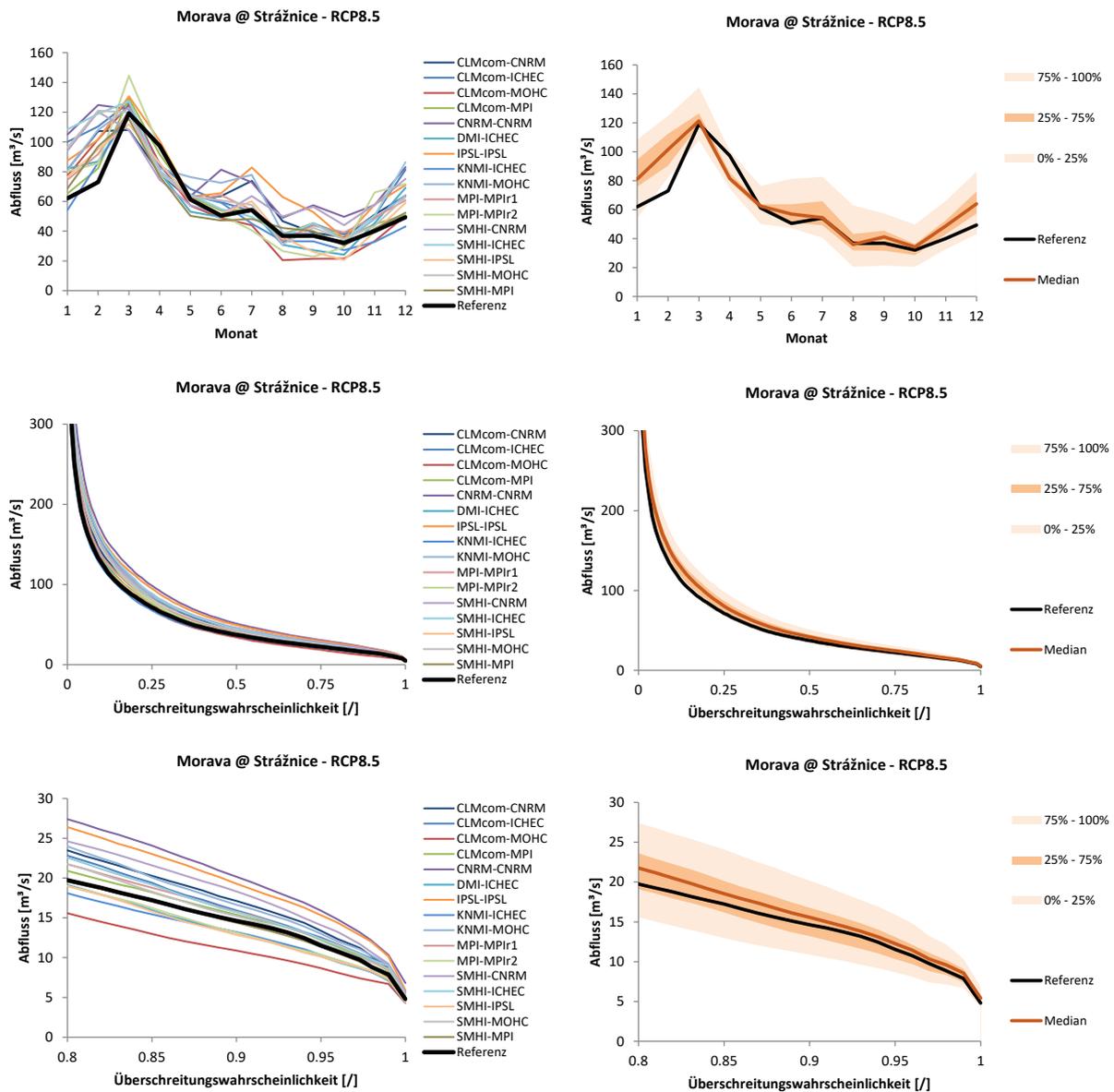


Abbildung 65: Simulierte mittlere Monatsabflüsse (1. Reihe), Dauerlinie (2. Reihe) und Niederwasserbereich der Dauerlinie (3. Reihe) für die March/Morava bei Strážnice, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP8.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen.

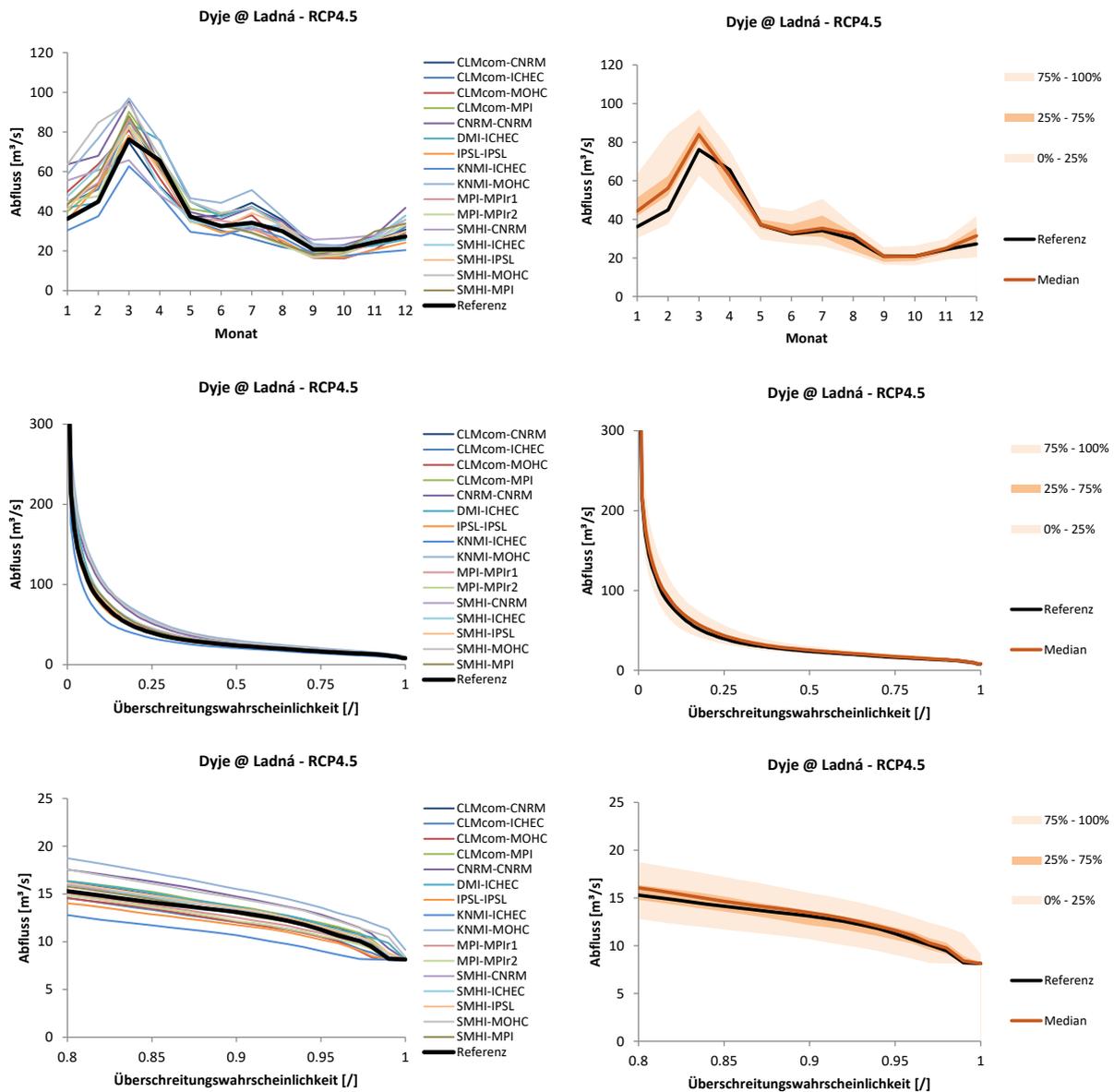


Abbildung 66: Simulierte mittlere Monatsabflüsse (1. Reihe), Dauerlinie (2. Reihe) und Niederwasserbereich der Dauerlinie (3. Reihe) für die Thaya/Dyje bei Ladná, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP4.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen.

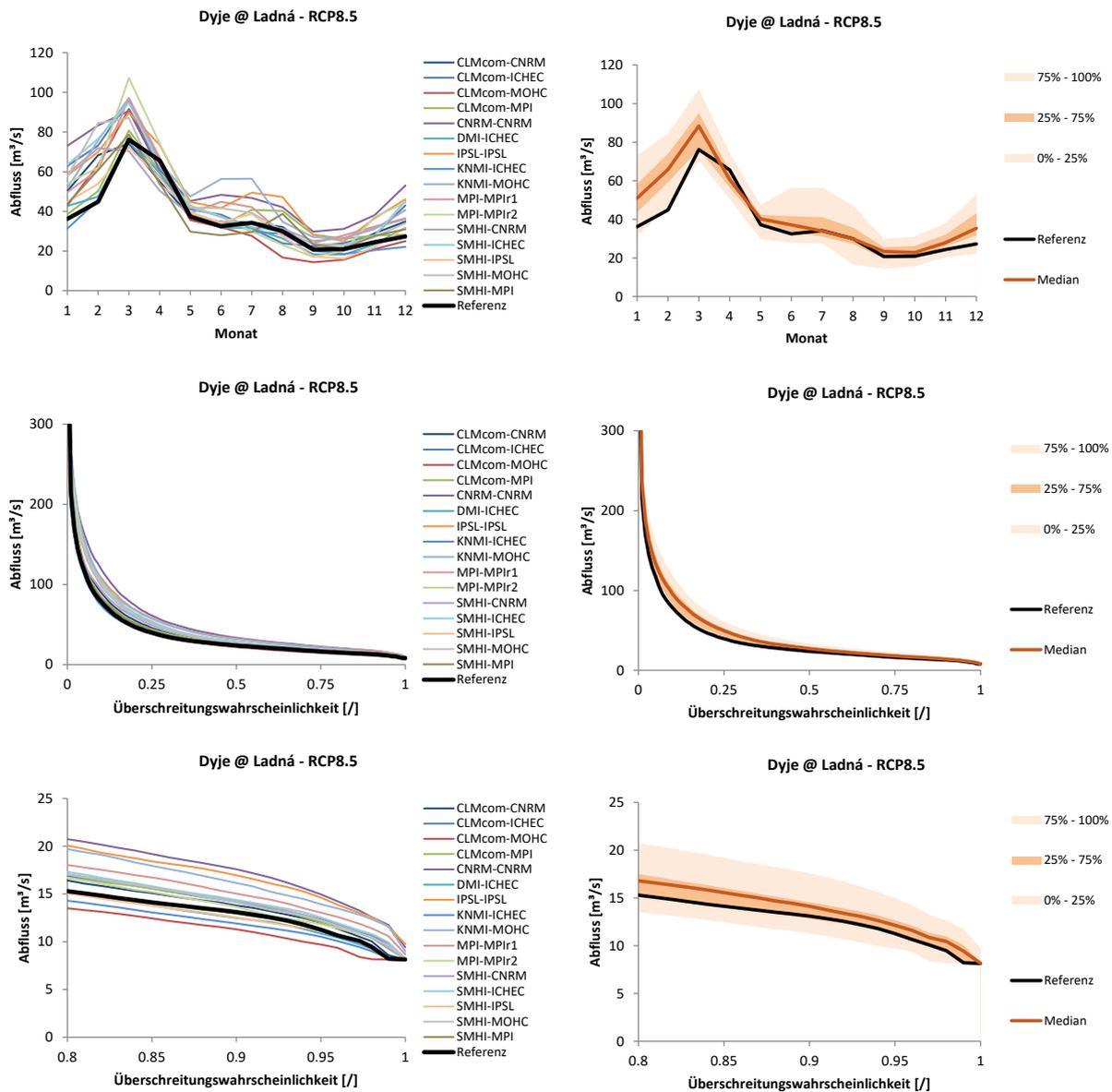


Abbildung 67: Simulierte mittlere Monatsabflüsse (1. Reihe), Dauerlinie (2. Reihe) und Niederwasserbereich der Dauerlinie (3. Reihe) für die Thaya/Dyje bei Ladná, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP8.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen.

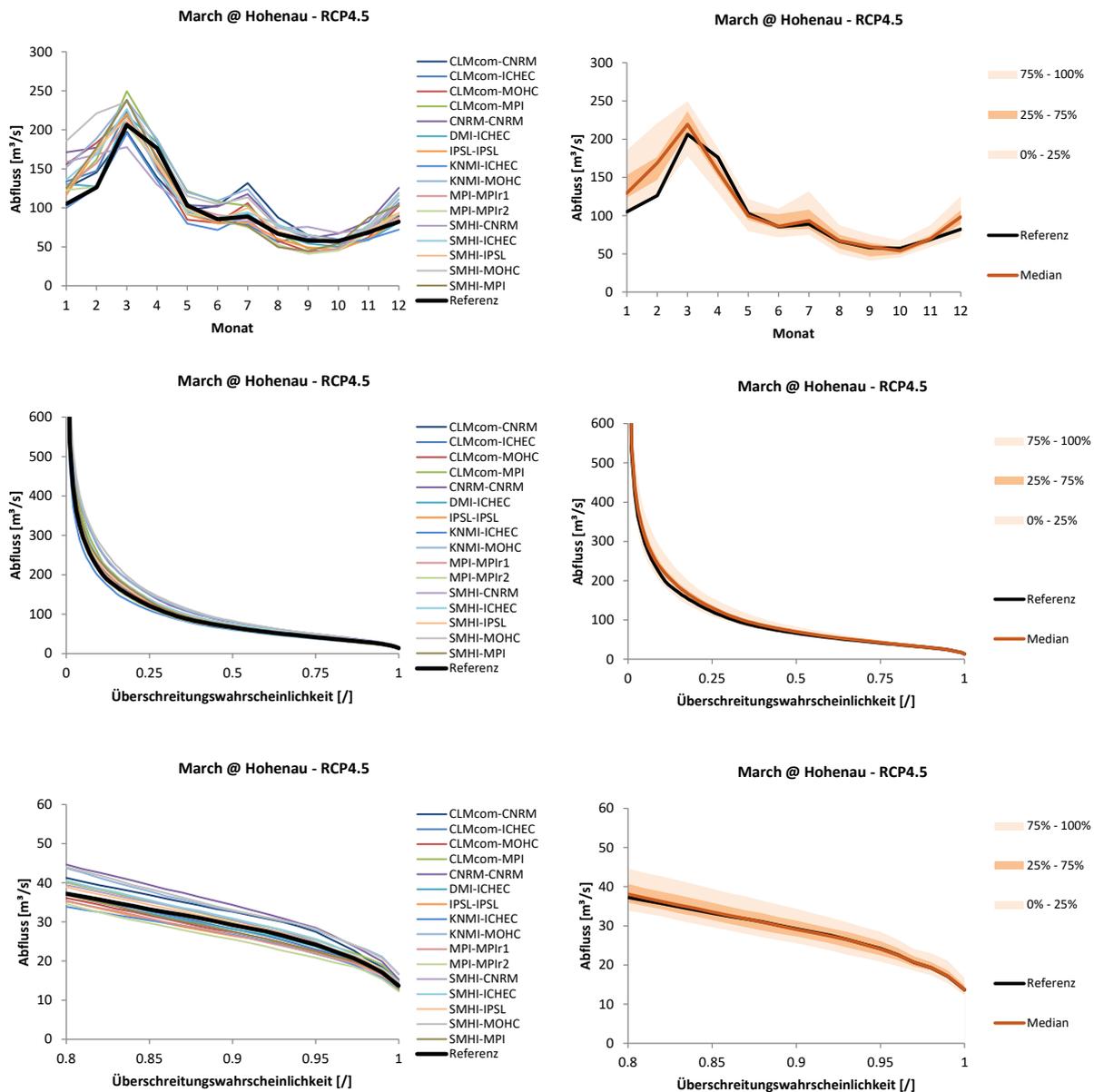


Abbildung 68: Simulierte mittlere Monatsabflüsse (1. Reihe), Dauerlinie (2. Reihe) und Niederwasserbereich der Dauerlinie (3. Reihe) für die March bei Hohenau, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP4.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen.

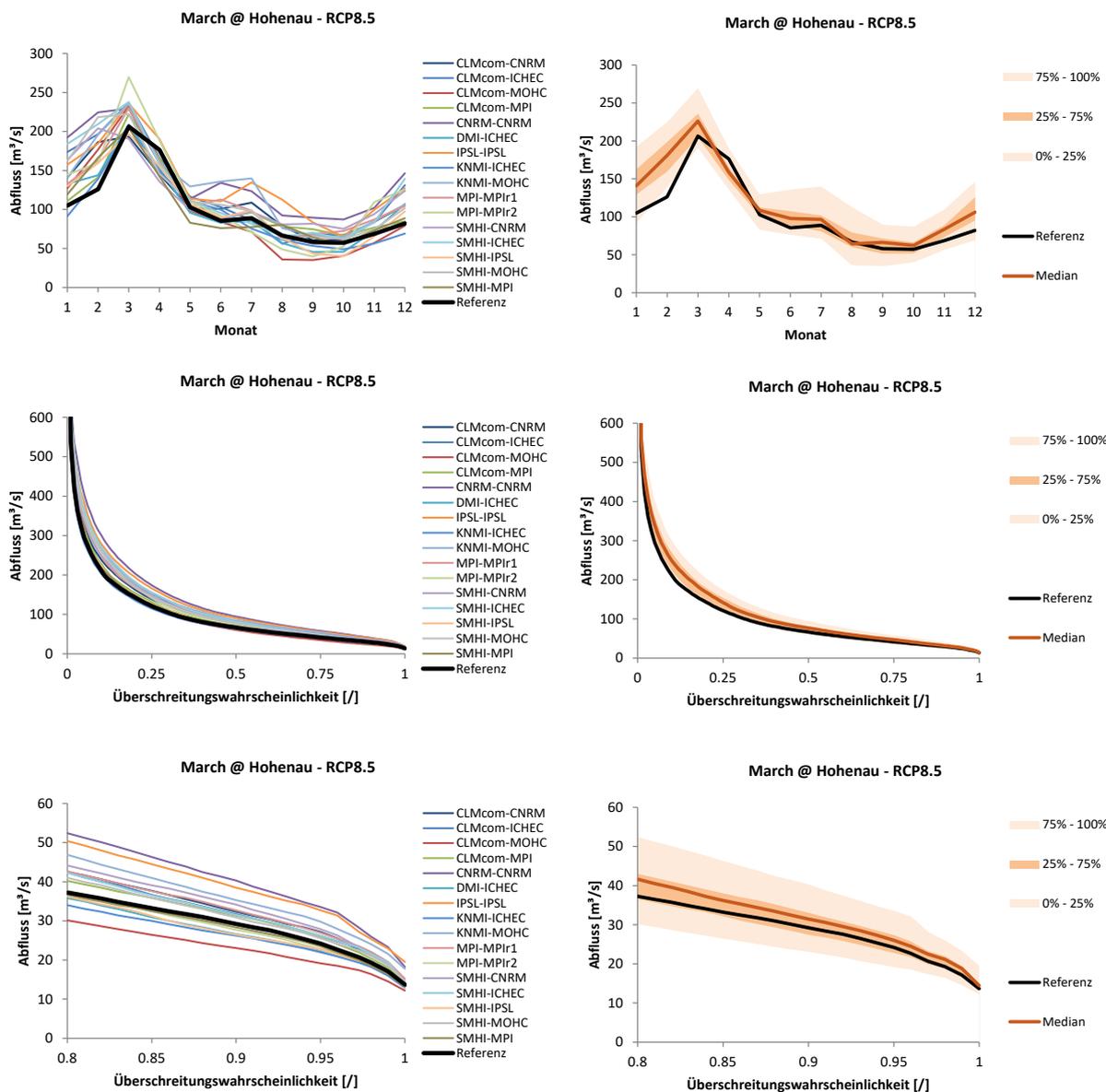


Abbildung 69: Simulierte mittlere Monatsabflüsse (1. Reihe), Dauerlinie (2. Reihe) und Niederwasserbereich der Dauerlinie (3. Reihe) für die March bei Hohenau, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010, RCP8.5; links: einzelne Modellergebnisse, rechts: Zusammenfassung mit Median und Quartilen.

In der gesamten Dauerlinie ergeben für RCP4.5 nur geringfügige Änderungen. Im Bereich höherer Abflüsse zeigen sich für die obere March/Morava bei Strážnice und die March bei Hohenau in den meisten Modellen geringe Anstiege im Abfluss. Für RCP8.5 ergeben sich an allen drei Pegeln relativ deutliche und vor allem bei allen Klimamodellen übereinstimmende Anstiege im gesamten Abflussbereich unterhalb des Median (Überschreitungswahrscheinlichkeit von 0.5).

Auch im Niederwasserbereich mit einer Überschreitungswahrscheinlichkeit von über 0.8 ist an allen drei Pegeln dieser Unterschied zwischen den Emissionsszenarien erkennbar. Für RCP4.5 zeigen die einzelnen Simulationen eine relativ große Unsicherheit in Bezug auf das Vorzeichen der Veränderung. Da Simulationen mit höherem Niederwasser als in der Referenzperiode etwas überwiegen, zeigt der Median an den Zubringern Thaya/Dyje und Morava teilweise einen geringfügigen Anstieg des Niederwassers, für die March bei Hohenau aber praktisch keine Veränderung. Für RCP8.5 überwiegen die Szenariosimulationen mit ansteigendem Niederwasserabfluss deutlicher, sodass der Median der Ergebnisse bei allen drei Pegeln einen Abflussanstieg bis 2050 anzeigt. Allerdings gibt es auch an allen drei Pegeln einige Klimamodelle, aus deren Anwendung eine Abnahme im Niederwasserabfluss resultiert. Insgesamt zeigen die Ergebnisse für Niederwasser, dass bis 2050 erwartet werden kann, dass die höhere Verdunstung im Sommer größtenteils durch höhere Niederschläge kompensiert werden kann und es daher zu keinen deutlichen Abnahmen im Niederwasserabfluss kommen wird. Diese Auswertung bezieht sich allerdings nur auf die allgemeine langjährige Verteilung niedriger Abflüsse – Aussagen über das zukünftige Auftreten einzelner extreme Niederwasserereignisse waren kein Ziel der vorliegenden Untersuchung.

In Bezug auf die Kennwerte NQ und MQ (berechnet entsprechend der Definition der KWM 2018) sind aus diesen Ergebnissen die in Abbildung 70 gezeigten Veränderungen zu erwarten, wobei die dargestellten Werte – sowohl für die Referenzperiode (schwarz strichliert) als auch für die Szenarien (bunte Box Plots) – aus den Simulationsergebnissen für den Pegel Hohenau berechnet wurden. Die gezeigten Werte für die Zukunftsperiode stellen dabei keine neue Berechnung der KWM dar, sondern dienen nur zur Analyse der Tendenzen aufgrund der gegenständlichen Klimaprojektionen.

Für NQ (das 94%-Quantil des Abflusses) zeigt sich, wie oben bereits für generell niedrige Abflüsse beschrieben, kaum eine Veränderung im RCP 4.5, mit einigen ansteigenden und einigen abfallenden Simulationen. Für RCP8.5 zeigen eine deutliche Mehrheit der Modelle einen Anstieg an, sodass der Median der Modellergebnisse deutlich über dem Referenzwert der KWM 2018 liegt. Die Veränderungen in den einzelnen Modellen sowie Median und Mittelwert der NQ-Veränderung für die Simulation bei Hohenau sind in Tabelle 14 angeführt.

Für das Mittelwasser MQ ergibt sich bis zum Jahr 2050 ein deutlicher Anstieg. Sowohl für RCP4.5 als auch für RCP8.5 liegt der gesamte Interquartilbereich (Box) über dem Referenzwert der KWM 2018, mit einem Anstieg im Median von rund 7 m<sup>3</sup>/s (RCP4.5, entspricht 7%) bzw. rund 15 m<sup>3</sup>/s (RCP8.5, entspricht 15%). Alle Ergebnisse für die Simulationen des MQ für Hohenau sind in Tabelle 15 angeführt.

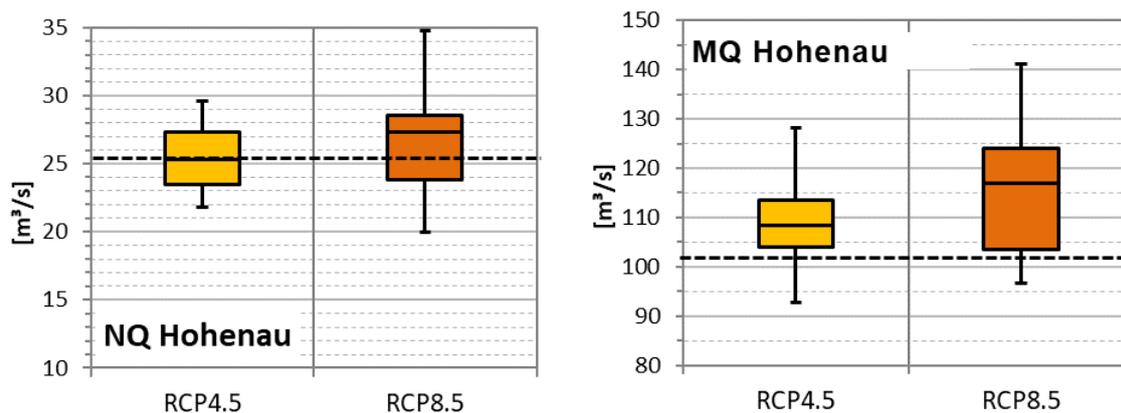


Abbildung 70: Abflusskennwerte für die Simulationen für die March bei Hohenau, Verteilung der Werte mit Klimamodellen 2021-2050 (Boxplots) im Vergleich mit den Werten der Referenzperiode 1981-2010 (schwarz strichlierte Linie)

Tabelle 14: Änderung im simulierten NQ für die March bei Hohenau, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010

RCM	RCP 4.5		RCP 8.5	
	[m <sup>3</sup> /s]	[%]	[m <sup>3</sup> /s]	[%]
	$\Delta Q$	$\Delta Q$	$\Delta Q$	$\Delta Q$
CLMcom-CNRM	3.5	14%	3.0	12%
CLMcom-ICHEC	-1.1	-4%	2.0	8%
CLMcom-MOHC	-1.8	-7%	-5.4	-21%
CLMcom-MPI	1.2	5%	1.9	8%
CNRM-CNRM	4.3	17%	9.4	37%
DMI-ICHEC	-0.5	-2%	-2.2	-9%
IPSL-IPSL	-2.2	-9%	8.8	35%
KNMI-ICHEC	-2.4	-9%	-2.4	-9%
KNMI-MOHC	4.0	16%	5.9	23%
MPI-MPIr1	-2.4	-9%	2.8	11%
MPI-MPIr2	-3.6	-14%	-1.5	-6%
SMHI-CNRM	0.9	3%	3.8	15%
SMHI-ICHEC	1.4	6%	2.1	8%
SMHI-IPSL	0.5	2%	-1.8	-7%
SMHI-MOHC	4.1	16%	1.6	6%
SMHI-MPI	-1.8	-7%	-0.7	-3%
Mittelwert	0.3	1%	1.7	7%
Median	0.0	0%	2.0	8%

Tabelle 15: Änderung im simulierten MQ für die March bei Hohenau, 2021-2050 im Vergleich zu 1981-2010

RCM	RCP 4.5		RCP 8.5	
	[m <sup>3</sup> /s] ΔQ	[%] ΔQ	[m <sup>3</sup> /s] ΔQ	[%] ΔQ
CLMcom-CNRM	7.0	7%	12.2	12%
CLMcom-ICHEC	3.9	4%	21.9	22%
CLMcom-MOHC	6.0	6%	-1.5	-1%
CLMcom-MPI	13.7	13%	7.3	7%
CNRM-CNRM	22.0	22%	39.3	39%
DMI-ICHEC	2.7	3%	0.7	1%
IPSL-IPSL	0.8	1%	32.8	32%
KNMI-ICHEC	-9.1	-9%	-5.2	-5%
KNMI-MOHC	22.4	22%	26.4	26%
MPI-MPIr1	0.6	1%	14.6	14%
MPI-MPIr2	-4.5	-4%	15.8	16%
SMHI-CNRM	6.5	6%	17.7	17%
SMHI-ICHEC	11.0	11%	23.2	23%
SMHI-IPSL	6.8	7%	2.1	2%
SMHI-MOHC	26.3	26%	17.2	17%
SMHI-MPI	7.3	7%	0.8	1%
Mittelwert	7.7	8%	14.1	14%
Median	6.6	7%	15.2	15%

### 6.4.3 Szenarien höherer Wasserentnahme

Als Ergänzung und zum Vergleich mit den reinen Klimawandelszenarien wurden die Auswirkungen von höheren Wasserentnahmen zu Bewässerungszwecken in zwei Szenarien untersucht (siehe Details in Kapitel 5.2.2):

- Szenario 100% Bewässerung: in diesem Szenario wurden die bewilligten Entnahmen an Thaya/Dyje in vollem Umfang sowie die gesamten für diesen Zweck am Speicher Nové Mlýny vorgehaltenen Wasserreserven entnommen. Dies betrifft die im Modell bei den Berechnungsknoten Ladná (CP 13) und Hohenau (CP 14) angesetzten Entnahmen (siehe Tabelle 10).
- Szenario 150%: als potenziell mögliches Zukunftsszenario mit deutlich höheren Entnahmen wurden die Bewässerungsentnahmen (aber nicht die Ausleitungen für Kanäle) gegenüber dem 100%-Szenario um 50% erhöht. Dies bedeutet zusätzliche Bewilligungen zur Wasserentnahme im Umfang von etwas mehr als 2 m<sup>3</sup>/s.

- Das Bewässerungs-Baseline-Szenario, das als Ausgangslage angenommen wurde, beruht auf den in der historischen Simulation angenommenen Entnahmen, die unter den vollen bewilligten Werten liegen (also ohne die für CP13 und CP14 berechneten Entnahmen, siehe Tabelle 10).

Als Klimainputszenario für die Rechnung 2021-2050 wurden die Daten jenes Klimamodells herangezogen, mit dem das Ergebnis für Hohenau mit der Baseline-Bewässerung am nächsten am Median aller Klimamodelle liegt (MPI-MPIr1, siehe Abbildung 71).

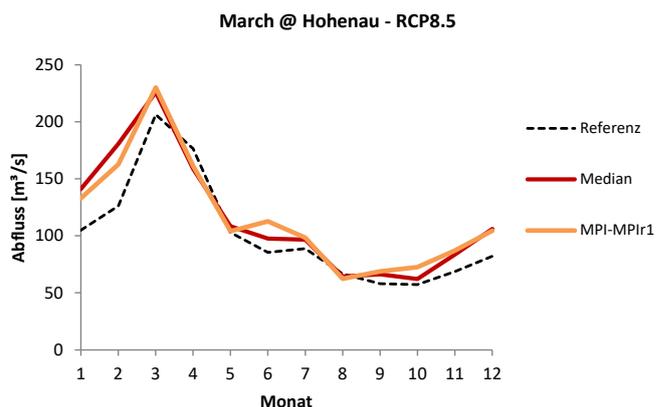


Abbildung 71: Mittlere monatliche simulierte Abflüsse 2021-2050 im Median aller Klimamodelle, mit dem MPI-MPIr1-Modell, und in der historischen Referenzsimulation

Der saisonale Abflussverlauf in Abbildung 72 (links) zeigt, dass die höhere Bewässerung nur im Sommerhalbjahr wirksam ist und es in diesen Monaten zu einer Verringerung des Abflusses kommt. Die starke Auswirkung auf das Niederwasser wird in Abbildung 72 (rechts) deutlich: der Anstieg aufgrund der veränderten Klimabedingungen (von der schwarz strichlierten Referenzsimulation zur roten Klimamodellsimulation mit dem Modell MPI-MPIr1) wird in der Annahme der 100%-Entnahme bereits ausgeglichen. Bei einer Entnahme von 150% sinkt der Niederwasserabfluss trotz höherer natürlicher Wasserverfügbarkeit deutlich unter das derzeitige Niveau in der Referenzsimulation ab.

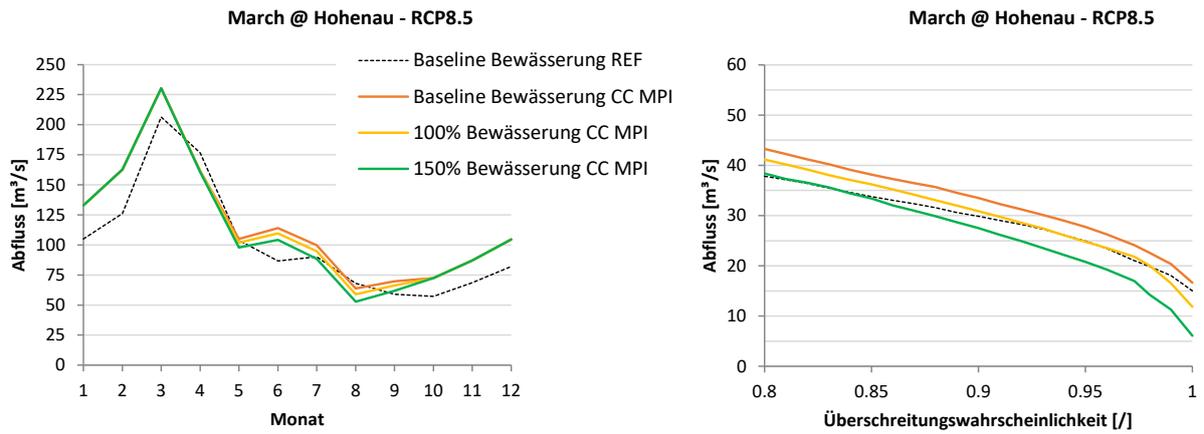


Abbildung 72: Simulierter mittlerer Monatsabfluss (links) und Niederwasserbereich der Dauerlinie (rechts für die Szenarien höherer Wasserentnahme und die Referenzszenarien

## 7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

In der vorliegenden Studie wurden Informationen über den potenziellen Einfluss des Klimawandels auf den Wasserhaushalt der March Grenzstrecke zwischen Österreich und der Slowakei erarbeitet. Dafür wurde eine Klimawandelfolgen-Modellierung angewandt, in der ein hydrologisches und wasserwirtschaftliches Modell des gesamten March-Einzugsgebiets erstellt wurde und in weiterer Folge mit Projektionen mehrerer Klimamodelle angetrieben wurde. Die Klimaprojektionen wurden aus einem Ensemble von 16 Regionalen Klimamodellen der CORDEX-Initiative mit jeweils zwei Szenarien unterschiedlicher Treibhausgasemissionen (RCP4.5 und RCP8.5) abgeleitet. Die Veränderungen wurden für die Zukunftsperiode 2021-2050 im Vergleich zur Referenzperiode 1981-2020 analysiert. Dabei konnten die folgenden wesentlichen Schlussfolgerungen festgestellt werden:

- Das hydrologische und wasserwirtschaftliche Modell der March ist sehr gut geeignet, um den Abfluss im March-Einzugsgebiet zu simulieren.
- Klimawandelprojektionen verschiedener Modelle zeigen für das Marchgebiet zwar eine gewisse Unsicherheit, vor allem in den Niederschlagsprojektionen. Im Vergleich zu anderen Gebieten Europas weisen die CORDEX-Klimamodelle aber hier auch für den Niederschlag eine gute Übereinstimmung auf, und zeigen tendenziell einen geringen Anstieg des Niederschlags an. Am eindeutigsten ausgeprägt ist das Signal hinsichtlich eines Anstiegs des Niederschlags im Winter.
- Der Anstieg der Temperatur für die Zukunftsperiode 2021-2050 wird in beiden Emissionsszenarien nahezu übereinstimmend mit etwa 1°C im Vergleich zu 1981-2010 angegeben.
- Aufgrund des Temperaturanstiegs und den damit verbundenen Änderungen in den Schneeprozessen, vor allem aber aufgrund der Tendenz zu höheren Niederschlägen nimmt der für die Zukunftsperiode simulierte Abfluss im Winter zu. Auch die saisonale Abflussspitze im März nimmt in den meisten Simulationen zu, wobei dies an der Thaya stärker ausgeprägt ist als an der March.
- Für den Abfluss in Sommer und Herbst ergeben die Klimaszenarien-Simulationen eine lediglich geringe Veränderung, wobei einige Klimamodelle eher einen leichten Rückgang, etwas mehr Modelle einen leichten Anstieg anzeigen. Der in den meisten Modellen höhere Niederschlag wird in diesen Jahreszeiten durch höhere Verdunstung kompensiert.
- Für den Niederwasserabfluss ergibt die Mehrheit der Modelle eine lediglich geringe Veränderung am ehesten eine leichte Zunahme. Einige Modelle zeigen aber auch eine geringe Abnahme des Niederwassers an.
- Für das Mittelwasser zeigt sich eine sehr hohe Übereinstimmung der Modelle in Richtung einer Zunahme im Bereich von 10%.

- Die Ergebnisse für häufige Hochwässer (1%-Quantil des Abflusses) zeigen ebenfalls eine deutliche Tendenz zu höheren Abflusswerten, mit nur wenigen Modellen die einen Rückgang aufweisen.
- Szenariensimulationen mit erhöhten Entnahmen für Bewässerungszwecke zeigen, dass zusätzliche Bewässerungsentnahmen trotz höherer Abflusentstehung im Einzugsgebiet zu einer Abnahme des Niederwassers führen könnten.

Die vorliegenden Ergebnisse können nun in die weitere flussbauliche Planung an der March einfließen und stellen damit ein wichtiges Element einer vorausschauenden, klima-informierten Planungspraxis dar. Das im Rahmen dieser Studie erarbeitete March-Modell kann darüber hinaus für weiterführende Untersuchungen angewendet werden, wie abschließend in Kapitel 8 erläutert.

## 8 Mögliche künftige Anwendungsbereiche des Modells

Das im Rahmen dieser Studie erstellte hydrologische und wasserwirtschaftliche Modell der March kann in zukünftigen Studien angewendet werden, um eine Reihe von relevanten Fragestellungen im Detail zu untersuchen. Die folgenden Anwendungen des Modells könnten an der March von Relevanz für künftige Untersuchungen sein:

- Untersuchung von Speicherbetriebsszenarien (z.B. auch auf der Grundlage von geänderten Betriebsregeln, wie sie u.a. im Klimawandelprojekt für die Thaya erarbeitet werden)
- Simulation eines „natürlichen“ Referenzszenarios, durch gezieltes Ausschalten aller Speicher und Entnahmen im Modell. Dies würde erlauben, den Einfluss der wasserwirtschaftlichen Maßnahmen auf das Abflussgeschehen zu quantifizieren.
- Detailliertere Abbildung von weiteren wasserwirtschaftlichen Anlagen (Kanäle, Polder Soutok) und Untersuchung des Einflusses auf den Abfluss in der March
- Erweiterte Untersuchung des Risikofaktors Bewässerung (zusätzlicher Bewässerungsbedarf infolge von Temperaturanstieg und Änderungen in der Landwirtschaft, mögliche Größenordnung nicht angemeldeter Entnahmen, ...)
- Detailliertere Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf das Hochwassergeschehen, wobei auch eine Kopplung mit einem hydraulischen 2D-Modell möglich ist
- Anwendung unter Verwendung zukünftiger Klimamodelldaten (HighRes-MIP, CMIP6, sehr hoch auflösende, sogenannte convection resolving RCMs, 5km)
- Implementierung des March-Modells in einem web-based Decision Support System (DSS), für die Anwendung im grenzübergreifenden Einzugsgebietsmanagement

## 9 Literatur

Cubasch U., Wuebbles D., Chen D., Facchini M.C., Frame D., Mahowald N., Winther J.-G., 2013: Introduction. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V., Midgley P.M. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA

Eyring V., Bony S., Meehl G. A., Senior C. A., Stevens B., Stouffer R. J., and Taylor K. E. 2016. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization, *Geosci. Model Dev.*, 9, 1937-1958.  
doi:10.5194/gmd-9-1937-2016

Giorgi F., Coppola, E., 2010. Does the model regional bias affect the projected regional climate change? An analysis of global model projections. *Clim. Change* 100, 787-795.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s10584-010-9864-z>.

Gupta H.V., Kling H., Yilmaz K.K. and Martinez G.F. 2009. Decomposition of the Mean Squared Error and NSE Performance Criteria: Implications for Improving Hydrological Modelling. *Journal of Hydrology*, 377, 80-91.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.003>

Haarsma R. J., et al. 2016. High Resolution Model Intercomparison Project (HighResMIP v1.0) for CMIP6, *Geosci. Model Dev.*, 9, 4185-4208. <https://doi.org/10.5194/gmd-9-4185-2016>

Hanel M., Vizina A., Máca P., Pavlásek J. 2012. A multi-model assessment of climate change impact on hydrological regime in the Czech Republic. *J. Hydrol. Hydromech.* 60, 152-161. DOI: 10.2478/v10098-012-0013-4

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

Kiesel J., Stanzel P., Kling H., Fohrer N., Jähnig S.C., Pechlivanidis I. 2020. Streamflow-based evaluation of climate model sub-selection methods. *Climatic Change* 163, 1267-1285. <https://doi.org/10.1007/s10584-020-02854-8>

Kling H., Fuchs M., Paulin M. 2012. Runoff conditions in the upper Danube basin under an ensemble of climate change scenarios. *Journal of Hydrology* 424-425 (2012) 264-277.  
doi:10.1016/j.jhydrol.2012.01.011

Kling H., Stanzel P., Fuchs M., Nachtnebel H.P. 2015. Performance of the COSERO precipitation-runoff model under non-stationary conditions in basins with different climates. *Hydrological Sciences Journal* 60 / 7-8.  
<https://doi.org/10.1080/02626667.2014.959956>

Knutti R., Furrer R., Tebaldi C., Cermak J., Meehl G.A., 2010. Challenges in combining projections from multiple climate models. *J. Clim.* 23 (10), 2739–2758  
[doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00526.1](https://doi.org/10.1175/JCLI-D-11-00526.1).

KWM 2018. Die kennzeichnenden Wasserstände der March in der österreichisch-slowakischen Grenzstrecke. Herausgeber: via donau.

Mehrotra R., Sharma A. 2015. Correcting for systematic biases in multiple raw GCM variables across a range of timescales. *Journal of Hydrology* 520 (2015) 214–223.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.11.037>

Moss R.H., Edmonds J.A., Hibbard K.A., et al. 2010. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature* 463, 747–756, doi:10.1038/nature08823

Nash J. E., Sutcliffe J. V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. *Journal of Hydrology.* 10 (3) 282–290. doi:10.1016/0022-1694(70)90255-6.

Riocom 2007. Fachgrundlagen für die österreichische Stellungnahme zur Wehrbetriebsordnung Nové Mlýny – Mit hydrologischen Analysen von Abflussdaten am Pegel Bernhardsthal und Fachbeiträgen zur Ökologie. Riocom im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie

Stagl J.C., Hattermann F.F. 2015. Impacts of Climate Change on the Hydrological Regime of the Danube River and Its Tributaries Using an Ensemble of Climate Scenarios. *Water* 7 (11), 6139–6172. <https://doi.org/10.3390/w7116139>

Stanzel P., Kling, H. 2018. From ENSEMBLES to CORDEX: Evolving climate change projections for Upper Danube River flow. *Journal of Hydrology* 563, 987–999.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.06.057>