

Christoph Klingler, Matthias Bernhardt, Johannes Wesemann, Karsten Schulz & Mathew Herrnegger

Lokale hydrologische Modellierung mit globalen, alternativen Datensätzen

Local hydrological modelling containing global, alternative data sets

Alternative, meteorologische Datensätze aus Fernerkundung und Reanalyse, die nahezu den gesamten Globus abdecken, werden zunehmend verfügbar. Zusätzlich verbessern neue Technologien, sowohl hardware- als auch softwareseitig, laufend die Handhabung der oftmals datenlastigen Produkten. Eine dieser neuen Technologien stellt die Plattform "Google Earth Engine" dar, anhand welcher die zeiträumliche Extraktion von Alternativdatensätzen deutlich vereinfacht wird. Im Rahmen dieser Fallstudie wurden daher zuerst mehrere für die Niederschlag-Abfluss-Modellierung in Frage kommende Alternativdatensätze (Niederschlag, Lufttemperatur sowie potenzieller Evapotranspiration) mittels "Google Earth Engine" extrahiert und prozessiert. Vor der Implementierung der Alternativdatensätze in das hydrologische Modell COSERO erfolgte eine Untersuchung auf deren Eignung zur Abbildung der Klimatologie. Anschließend wurde bei dem bestehenden Niederschlag-Abfluss-Modell (N-A-Modell) der stationsbasierte, räumlich feinaufgelöste, aber nur regional verfügbare meteorologische Datensatz (INCA) durch die extrahierten, gröber aufgelösten, aber dafür nahezu global verfügbaren meteorologischen Alternativdatensätze ersetzt, um eine Aussage über die erzielbare Modellgüte zu erhalten. Als Untersuchungsgebiet diente das Einzugsgebiet der österreichischen Mur aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen hydro-klimatischen Bedingungen. Die Evaluierung der erzielten Modellgüte erfolgte dabei an den 46 Abflusspegeln im Untersuchungsgebiet. Jener Modelllauf, welchem die nur regional verfügbaren INCA-Eingangsdatsätze zugrunde liegen, diente den Modellläufen mit den alternativen Eingangsdaten dabei als Referenz.

Die alternativen Datensätze zeigen bei der N-A-Modellierung vereinzelt bereits mit der bestehenden Basiskalibrierung eine befriedigende Modellgüte. Überraschend gute Ergebnisse hat dabei jener Modelllauf gezeigt, welchem der alternative Niederschlagsdatensatz GSMaP GC zugrunde liegt. Um den Einfluss der Modellkalibrierung auf die Modellgüte zu untersuchen, wurden zudem ausgewählte Modellläufe rekaliert. Die Nash-Sutcliffe-Modellgüte (NSE) der Referenzsimulation mit den INCA-Eingangsdaten konnte zwar meist nicht erreicht werden, liegt beim Modelllauf mit dem zugrundeliegenden Alternativdatensatz GSMaP GC, speziell bei Pegeln mit größeren Einzugsgebieten, oftmals aber nicht weit darunter. Bezüglich des Fehlers in der Abflussbilanz (Bias) konnten mit diesem alternativen Niederschlagsdatensatz teilweise sogar bessere Ergebnisse als mit den INCA-Datensätzen erzielt werden.

Schlagerwörter: Niederschlag-Abfluss-Modellierung, N-A-Modellierung, Fernerkundung, Reanalyse, Google Earth Engine, GLDAS 2.1, CFSv2, NCEP, CHIRPS Daily, GSMaP, TRMM 3B42, INCA, Mur

The availability of alternative, meteorological datasets from remote sensing data and reanalyses with (almost) global coverage is increasing. In addition, new technologies, both on the hardware and software side, continuously improve the handling of these, often very large, datasets. One of these new technologies is the "Google Earth Engine" platform, which significantly simplifies and enhances the time-spatial extraction and processing of alternative datasets. Therefore, several alternative datasets for rainfall, air temperature and potential evapotranspiration were extracted from "Google Earth Engine" for the purpose of rainfall-runoff modelling (R-R modelling). An analysis of their suitability for mapping long-term climatic conditions was carried out before those alternative datasets were implemented in the hydrological model COSERO. The station-based, spatially highly resolved, but only regionally available meteorological dataset (INCA) of the existing R-R model was replaced by the extracted, lower-resolution, alternative datasets. The catchment area of the Austrian Mur was selected as the study area, as it shows several different hydro-climatic conditions. The 46 runoff gauges in the study area were used for evaluating the performance of the runoff simulations by the hydrological model. The existing model run with the high-resolution regional meteorological input datasets was thereby used as a reference.

The almost globally available, alternative datasets showed decent model accuracies in a few cases, already with the basic model calibration. Especially the model run using the alternative GSMaP GC precipitation dataset showed surprisingly good results. In order to investigate the impact of the model calibration on the model performance, COSERO was recalibrated using several alternative datasets as input. The Nash-Sutcliffe (NSE) model performance of the reference simulation could not be reached with the alternative datasets, though the decrease in the Nash-Sutcliffe efficiency was lower than expected, especially for the GSMaP GC dataset. This is particularly valid at gauges with larger catchment areas. The error in the runoff balance (bias) was partially lower with the alternative datasets, compared to the local INCA dataset.

Keywords: Rainfall-Runoff model, R-R modelling, remote sensing, reanalysis, Google Earth Engine, GLDAS 2.1, CFSv2, NCEP, CHIRPS Daily, GSMaP, TRMM 3B42, INCA, Mur

1 Einleitung und Zielsetzung

Niederschlag-Abfluss-Modelle (N-A-Modelle) haben sich in vielen Ländern als probates Instrument für die Planung und Beantwortung maßgebender wasserwirtschaftlicher Projekte und Fragestellungen, wie beispielsweise Dimensionierung von Hochwasserbauwerken, Speicherbewirtschaftung oder Hochwasserprognose etabliert. Für eine verlässliche Prognose des Abflusses ist bei solchen N-A-Modellierungen eine gute Qualität der Eingangsdaten jedoch unabdingbar. In einigen Ländern wurde schon früh der Grundstein für ein dichtes meteorologisches bzw. hydrologisches Messnetz gelegt. Die Hydrographischen Dienste in Österreich feierten beispielsweise im Jahr 2019 ihr 125-jähriges Bestehen. Die dabei gewonnenen Zeitreihen sind in der Gegenwart nun die Basis für die Erstellung zuverlässiger N-A-Modelle. In den meisten Ländern der Welt sind die benötigten meteorologischen als auch hydrologischen Zeitreihen (vor allem Lufttemperatur, Niederschlag und Abfluss) jedoch aufgrund fehlender terrestrischer Messstationen nur begrenzt vorhanden. Zudem ist laut FEKETE et al. (2015) nahezu global eine Verringerung der Dichte des lokalen Beobachtungsnetzes beobachtbar. Gemäß WORLDBANK (2018) befinden sich 80 % des hydrometeorologischen Messnetzes in Ländern mit mittlerem bis niedrigem Einkommen in einem desolaten, sich verschlechternden Zustand oder erfüllen nicht den Bedarf der Nutzer. Aber auch in industrialisierten Nationen mit hohem Einkommen nimmt die Anzahl der hydrologischen Beobachtungen ab. In den USA wurden beispielsweise 2.632 Abflussbeobachtungen mit 30 oder mehr Jahren an Beobachtungen zwischen den Jahren 1972 und 2016 aufgegeben (USGS, 2018).

Die Gebiete der Fernerkundung und der numerischen meteorologischen Modellierungen sind ein sehr dynamischer Forschungsbereich. Daher werden zunehmend Datensätze verfügbar, welche als meteorologischer Eingang für N-A-Modelle verwendet werden können. Diese Datensätze sind dazu noch flächendeckend und meistens global verfügbar. Daher wurden bereits zahlreiche Untersuchungen dem Thema der Implementierung von Datensätzen aus Fernerkundung bzw. Reanalyse in hydrologische Modelle gewidmet. Zu nennen sind unter anderem die Arbeiten von BECK et al. (2017), CAMICI et al. (2018), CHOI et al. (2009), DUETHMANN et al. (2013), EL-SADEK et al. (2011), ESSOU et al. (2017), FUKA et al. (2014), MAZZOLENI et al. (2019), NKIKA et al. (2017), SHARIFI et al. (2019), TAREK et al. (2020) sowie UNIYAL et al. (2019).

Oftmals wird nur ein zeiträumlicher Ausschnitt eines meist global umfassenden Alternativdatensatzes in hydrologische Modelle implementiert. Diese zeiträumliche Extrahierung der benötigten Datenreihen war bis dato meist sehr zeit- und ressourcenaufwändig. Mit der Plattform "Google Earth Engine" ist erstmals ein zentralisierter und einheitlicher Zugriff auf viele dieser global umfassenden Daten möglich geworden. Zudem bietet diese Plattform viele Möglichkeiten für die Bearbeitung der Datensätze, wobei die oftmals rechenlastige Prozessierung durch die Infrastruktur von Google bewerkstelligt wird (GORELICK et al., 2017). Ein bandbreiten-intensives Herunterladen der gesamten Datensätze entfällt dabei ebenfalls.

Kern dieser Fallstudie ist die Analyse von meteorologischen Alternativdatensätzen, welche von der Plattform "Google Earth En-

gine" schnell und unkompliziert extrahiert wurden. Diese Daten werden ebenfalls in ein bestehendes N-A-Modell eines Einzugsgebietes mit sehr guter Datengrundlage implementiert. Für den Zweck der N-A-Modellierung wird dabei das konzeptionelle Modell COSERO (COntinuous SEmi-distributed RunOff) verwendet, welches am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (ehemals Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau) an der BOKU Wien entwickelt wurde (NACHTNEBEL et al., 1993; EDER et al., 2005; HERRNEGGER et al., 2018, 2015a, 2015b, 2012; KLING & NACHTNEBEL, 2009; KLING et al., 2015; STANZEL et al., 2008; WESEMANN et al., 2018a, 2018b). In einem ersten Schritt wird das Einzugsgebiet mit lokalen Datensätzen modelliert, welche die hydrometeorologische Charakteristik gut abbilden. Dafür werden Daten von INCA, das operationelle Analyse- und Nowcasting-System der österreichischen Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG), herangezogen. In einem zweiten Schritt werden die lokalen INCA-Eingangsdaten durch die global verfügbaren Alternativdaten ersetzt. Von "Google Earth Engine" konnten diesbezüglich sechs Alternativdatensätze für den Niederschlag, zwei für die Lufttemperatur sowie ein Alternativdatensatz für die potenzielle Evapotranspiration (ETP) bezogen werden (Tab. 3). Vor der Implementierung der alternativen Datensätze in die N-A-Modellierung werden diese eingehend den nur regional verfügbaren INCA-Daten gegenübergestellt. Dadurch können spätere Defizite bei der Modellierung besser begründet werden.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Analyse, inwiefern Alternativdatensätze, welche aktuell von "Google Earth Engine" bezogen werden können, für den Zweck der N-A-Modellierung verwendbar sind und in welchem Ausmaß sich die erzielbare Modellgüte dabei in Relation zu der Modellgüte der bestehenden N-A-Modellierung mit den lokalen INCA-Daten verändert.

2 Datengrundlage

2.1 Untersuchungsgebiet

Ausgangspunkt für die vorliegende Untersuchung ist das Einzugsgebiet der österreichischen Mur, welches eine Einzugsgebietsfläche von rund 10.340 km² aufweist und damit ca. 12 % der österreichischen Staatsfläche entwässert (Abb. 1). Der höchste Punkt des Einzugsgebietes stellt der Große Hafner mit 3.076 m ü. A. dar, der im Nordwesten liegt. Die Mur verlässt bei Bad Radkersburg auf einer Höhe von rund 197 m ü. A. Österreich und mündet bei der Ortschaft Legrad (Slowenien) in die Drau. Der Abbildung 1 können neben der räumlichen Verteilung der 46 Durchflusspegel im Untersuchungsgebiet auch die unterschiedlichen Höhenstufen entnommen werden. Entlang der nördlichen Einzugsgebietsgrenze zieht sich der Alpenhauptkamm ausgehend von den im Nordwesten gelegenen Hohen Tauern über die Niederen Tauern hin zu der im Nordosten gelegenen Hochschwabgruppe. Bekannte Regionen im deutlich flacheren südlichen Teil des Einzugsgebietes sind beispielsweise das Grazer Becken sowie das Leibnitzer Feld (SCHULZ et al., 2016).

Eine Diskussion der Ergebnisse an allen 46 Pegeln im Projektgebiet ist nicht immer zielführend. Deshalb wird in der Tabelle 1 eine Auswahl an Pegeln aufgelistet, bei welchen eine detailliertere Ergebnisauswertung erfolgt. Die Position der ausgewählten Pegel ist ebenfalls in Abbildung 1 dargestellt, in welcher die betreffenden Pegel in Rot beschriftet sind.

Legende

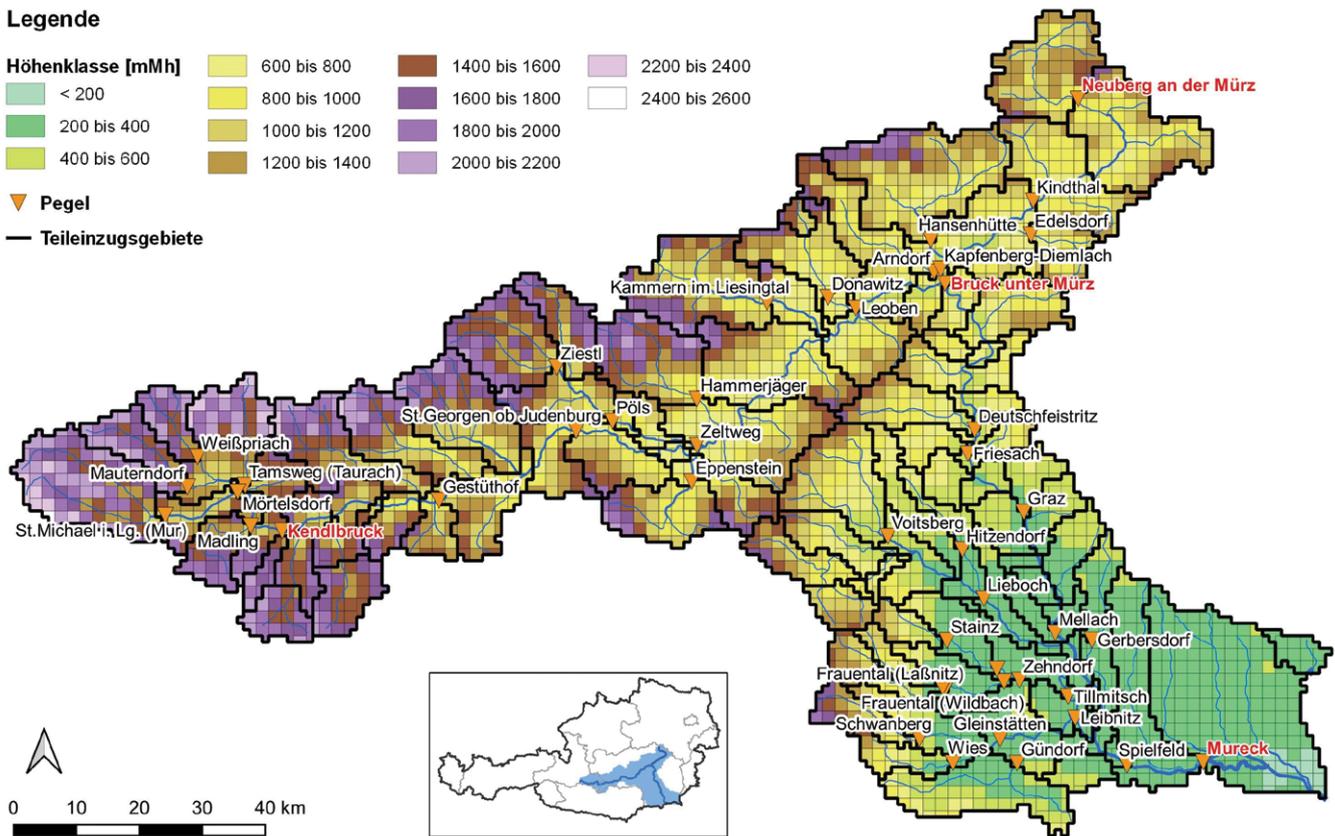
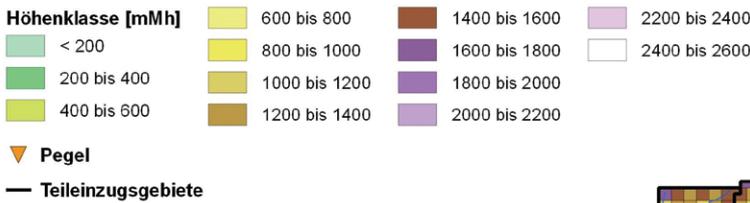


Abbildung 1

Übersicht des Einzugsgebietes der österreichischen Mur und Darstellung des COSERO Modellrasters. Neben den 46 Pegeln im Projektgebiet (mit Pegelnamen) werden auch die 112 Teileinzugsgebiete sowie die einzelnen Höhenstufen der COSERO-Berechnungseinheiten (HRUs) dargestellt. Auf die vier rot beschrifteten Pegel wird bei der Diskussion der Ergebnisse besonderes Augenmerk gelegt.

Overview of the catchment area of the Austrian Mur, including the COSERO model grid. In addition to the 46 gauges (with gauge names), the 112 sub-catchments as well as the different altitude levels of the COSERO modelling units (HRUs) are displayed. Special attention will be paid in the results and discussion sections to the four gauges labeled in red.

Tabelle 1

Auflistung der selektierten Abflusspegel für die Diskussion der Ergebnisse.
List of selected discharge gauges for discussion of results.

Pegelname	HZB-Nr.	EZG-Fläche [km ²]	Anmerkungen
Kendlbruck	203976	955,0	Pegel im Oberlauf der Mur
Neuburg an der Mürz	211227	231,5	beschreibt das Kopfeinzugsgebiet der Mürz
Bruck unter Mürz	211292	6.214,0	Pegel im Mittellauf der Mur inkl. Mürz
Mureck	211490	9.769,9	Pegel im Unterlauf der Mur, beschreibt nahezu das komplette EZG der österr. Mur

Tabelle 2

Mittlere langjährige Wasserbilanz der österr. Mur in der Zeitspanne 1961 bis 1990 (BMLFUW, 2007).
Average long-term water balance of the Austrian Mur for the period 1961 to 1990 (BMLFUW, 2007).

Gebietsniederschlag aus der Wasserbilanz	1.024 mm
Aktuelle Evapotranspiration	545 mm
Potenzielle Evapotranspiration	564 mm
Abfluss	479 mm

Im Untersuchungsgebiet befinden sich neben zahlreichen kleineren Wasserkraftwerken knapp 30 Kraftwerke mit einer Engpassleistung größer als 5 MW. In weiterer Folge sind somit zahlreiche Pegel durch Pumpspeicher- bzw. Schwallbetrieb anthropogen beeinflusst (SCHULZ et al., 2016). Aus der Wasserbilanz können grundlegende hydrologische Kennwerte des Projektgebietes entnommen werden. Laut Tabelle 2 verdunsten im langjährigen Mittel 53 % des jährlichen mittleren Niederschlages, die restlichen 47 % werden über die Mur entwässert (BMLFUW, 2007).

2.2 Terrestrische Eingangsdaten

Neben der Höheninformation werden für das N-A-Modell COSERO auch flächendeckende Datensätze bezüglich Bodentyp, Hydrogeologie sowie Landnutzung benötigt. Das Höhenmodell wurde aus einem ASTER-DGM (ABRAMS et al., 2002) abgeleitet, während die hydrogeologischen Informationen aus

dem "Hydrologischen Atlas Österreich" (BMLFUW, 2007) herangezogen werden.

Im höhergelegenen Projektgebiet sind vor allem die Bodentypen Podsol, Braunerden sowie teilweise auch Rendzinen vorherrschend, während in den südlicher gelegenen und flacheren Regionen Pseudogleye überwiegen. Entlang von größeren Flussläufen liegen oftmals Auenböden vor. Der hinterlegte Bodentyp beeinflusst bei der N-A-Modellierung vor allem die Parametrisierung der Speichereigenschaften des Bodens.

Informationen über die lokale Hydrogeologie sind die Basis für die Parametrisierung und Modellierung etwaiger zentraler Grundwasserspeicher. Die großen Porengrundwasserkörper befinden sich in den Talbereichen entlang der Mur sowie der Mürz. Rund 10 % des gesamten Einzugsgebietes können einem verkarsungsfähigen Grundwasserleiter zugerechnet werden, welche vor allem im nordöstlichen Bereich des Einzugsgebietes anzutreffen sind (BMLFUW, 2007).

Mit knapp 60 % sind Waldflächen flächenmäßig die größte Landnutzungsklasse im Einzugsgebiet der österreichischen Mur. Die Nadelwaldflächen sind in höheren Lagen dominierend, während Ackerland, Misch- und Laubwald in niederen Lagen unterhalb von Graz überwiegen. Durch die vorliegende Landnutzungsklasse wird im N-A-Modell eine vegetationsabhängige Verdunstungskorrektur sowie die Speicherfüllhöhe des Interzeptionsspeichers festgelegt (SCHULZ et al., 2016).

2.3 Lokal verfügbare meteorologische Eingangsdaten – INCA

Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) stellt österreichweit meteorologische Datensätze mit einer räumlichen Rasterauflösung von 1 x 1 km sowie einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten (Niederschlag) bzw. 60 Minuten (z. B. Lufttemperatur) zur Verfügung. INCA (Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis; HAIDEN et al., 2011; HAIDEN & PISTOTNIK, 2009) ist das operationelle Nowcasting-System der ZAMG und verwendet Bodenstations-, Topographie- und Fernerkundungsdaten (Radarniederschlagsfelder, Wolkenbedeckung), um den "first guess" vom Wettervorhersagemodell Aladin zu korrigieren. Dabei wird in Echtzeit an den Messstationen die Differenz zwischen dem "first guess" und der aktuellen Stationsmessung gebildet und sogleich korrigiert. Die gute räumliche Auflösung sowie Flächenabdeckung der Fernerkundungsdaten ist die Grundlage für die Korrektur der "first guess"-Werte zwischen den terrestrischen Messstationen. Die korrigierten Werte werden anschließend wiederum in das Wettervorhersagemodell einbezogen. In der vorliegenden Untersuchung werden ausschließlich Analyse- und keine Nowcastingfelder verwendet. Damit wird der Einfluss von Fehlern aus der numerischen Wettervorhersage minimiert.

2.4 Global verfügbare meteorologische Eingangsdaten – GEE

Voraussetzung für die Auswahl der entsprechenden meteorologischen Alternativdatensätze von der Plattform "Google Earth Engine" (GEE) ist einerseits die Überdeckung mit dem Einsatzzeitraum des bestehenden N-A-Modells von 1. Januar 2003 bis 31. Dezember 2012 und andererseits eine brauchbare räumliche und zeitliche Auflösung der einzelnen Datensätze. In der Tabelle 3 werden die verwendeten Alternativdatensätze zu Nieder-

schlag, Temperatur und potenzieller Evapotranspiration samt Zusatzinformationen aufgelistet. Bei allen Alternativdatensätzen bezüglich Niederschlag (bis auf den nicht-stationsangepassten GSMaP-Datensatz) werden bodengestützte Stationsdaten für eine Feldkorrektur herangezogen. So werden beispielsweise beim Datensatz CHIRPS Daily v2 Stationsdaten von elf terrestrischen Regenmessern im gegenständlichen Untersuchungsgebiet für die Niederschlagskorrektur integriert, wobei diese nicht immer Daten liefern müssen (CHG, 2019). Das Projektgebiet liegt auf einer geografischen Breite um 47° N, daher entspricht z. B. eine räumliche Auflösung von 0,1 Bogengrad etwa einer Rastergröße von 7,7 x 11,1 km.

TCFSv2: NCEP

Das "Climate Forecast System" (CFS) wurde vom "National Centers for Environmental Prediction" (NCEP) entwickelt und ist ein vollständig gekoppeltes Modell, welches die Wechselwirkung zwischen Erdatmosphäre, Ozeanen, Land und Meereis darstellt. Es handelt sich um ein Reanalyse-Produkt. Reanalyse beschreibt das Verfahren der Erstellung langfristiger meteorologischer Datensätze durch Vereinigung von Daten aus Wettervorhersagemodellen sowie historischer Beobachtungsdaten. CFS verwendet dabei Ansätze zur Aufnahme oder Assimilation von Aufzeichnungen aus terrestrisch gestützten Beobachtungen (Stationsdaten), Daten von Wetter-Ballonnen, Flugzeugbeobachtungen als auch aus Satellitenbeobachtungen. Das auf "Google Earth Engine" zur Verfügung stehende Produkt ist eine Verknüpfung aus dem Datensatz "CFS Reanalysis" (SAHA et al., 2010) sowie einer überarbeiteten Version "CFSv2 Forecast" (SAHA et al., 2014). Stichtag des Wechsels ist dabei der 31. März 2011 (GEE NCEP, 2020).

CHIRPS Daily v2

Der Datensatz der "Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations" (CHIRPS) baut auf Ansätzen für Interpolationstechniken sowie hochauflösenden, langzeitlichen Niederschlags-schätzungen auf der Grundlage von "Infrarot-Cold Cloud Duration" (CCD)-Messungen auf. Dabei werden zusätzlich terrestrische Stationsdaten von fünf öffentlichen sowie mehreren privaten Betreibern für den Zweck der Niederschlagskorrektur integriert (FUNK et al., 2015).

GLDAS 2.1

GLDAS (Global Land Data Assimilation System) wurde von der "National Aeronautics and Space Administration" (NASA), dem "Goddard Space Center" (GSFC) sowie der "National Oceanic and Atmospheric Administration" (NOAA) zum Zweck der globalen Assimilation verschiedener Datenprodukte entwickelt (RODELL et al., 2004). Die wesentlichen Eingangsdatensätze für die Assimilation sind dabei für die atmosphärischen Parameter "GDAS" (RODELL et al., 2004), für den Niederschlag "GPCP" (PENDERGRASS, 2016) sowie für die Strahlungsparameter "AGRMET" (MENG et al., 2001). Beim "Global Precipitation Climatology Project" (GPCP) werden auch bodengestützte Stationsdaten für die Niederschlagskorrektur herangezogen (PENDERGRASS, 2016).

GSMaP Reanalysis (GC)

GSMaP ist ein Produkt der "Global Precipitation Measurement" (GPM)-Mission, welche nahezu globale Niederschlagsbeobachtungen ermöglicht. Die Werte werden mit Hilfe von mehrbandigen passiven Mikrowellen- und Infrarotradiometern des Satelliten GPM Core Observatory und mit Hilfe einer Konstellation anderer satellitengestützten Niederschlagsradaren geschätzt.

Tabelle 3
In der vorliegenden Studie verwendete globale alternative Datensätze.
Used alternative global datasets.

Datensatz	Räuml. Auflösung	Zeitl. Auflösung	Geogr. Abdeckung	Einsatzzeitraum	Einheit	Form der Aggregation
Niederschlag						
CFSv2: NCEP SAHA et al. (2014); SAHA et al. (2010)	0,2 Bogengrad	6 Stunden	90°S bis 90°N	01.01.1979 bis Gegenwart	kg/(m ² *s)	Mittelwert des letzten Zeitschritts
CHIRPS Daily v2 FUNK et al. (2015)	0,05 Bogengrad	24 Stunden	50°S bis 50°N	01.01.1981 bis Gegenwart	mm/Tag	Summenwert des letzten Zeitschritts
GLDAS 2.1 RODELL et al. (2004)	0,25 Bogengrad	3 Stunden	90°S bis 90°N	01.01.2000 bis Gegenwart	kg/(m ² *s)	Mittelwert des letzten Zeitschritts
GSMaP AONASHI et al. (2009); OKAMOTO et al. (2005)	0,1 Bogengrad	1 Stunde	60°S bis 60°N	01.03.2000 bis Gegenwart	mm/h	Momentanwert
GSMaP GC AONASHI et al. (2009); OKAMOTO et al. (2005)	0,1 Bogengrad	1 Stunde	60°S bis 60°N	01.03.2000 bis Gegenwart	mm/h	Momentanwert
TRMM 3B42 HUFFMANN et al. (2007)	0,25 Bogengrad	3 Stunden	50°S bis 50°N	01.01.1998 bis 31.12.2019	mm/h	Momentanwert
Lufttemperatur						
CFSv2: NCEP SAHA et al. (2014) SAHA et al. (2010)	0,2 Bogengrad	6 Stunden	90°S bis 90°N	01.01.1979 bis Gegenwart	Kelvin	Momentanwert
GLDAS 2.1 RODELL et al. (2004)	0,25 Bogengrad	3 Stunden	90°S bis 90°N	01.01.2000 bis Gegenwart	Kelvin	Momentanwert
Potenzielle Evapotranspiration						
GLDAS 2.1 RODELL et al. (2004)	0,25 Bogengrad	3 Stunden	90°S bis 90°N	01.01.2000 bis Gegenwart	W/m ²	Mittelwert des letzten Zeitschritts

Der GPM-Algorithmus zur Ermittlung der Niederschlagsrate basiert auf einem Strahlungstransfermodell. Bei diesem Produkt wird ein unkorrigierter sowie ein korrigierter (GC) Datensatz zur Verfügung gestellt. Die tägliche Niederschlags-Akkumulation des korrigierten Datenproduktes (GC – gauge corrected) wird dabei auf die tägliche Niederschlagsmenge von NOAA/CPC-Stationmessungen angepasst (AONASHI et al., 2009; OKAMOTO et al., 2005; GPM, 2014). Dafür wird der Datensatz "CPC Global Unified Gauge-Based Analysis of Day Precipitation" mit einer räumlichen Auflösung von 0,5 Bogengrad verwendet (JAXA, 2017).

TRMM 3B42

Die "Tropical Rainfall Measuring Mission" (TRMM) ist eine gemeinsame Mission der NASA sowie der "Japan Aerospace Exploration Agency" (JAXA) zur Überwachung tropischer Regenfälle. Der Algorithmus 3B42 berechnet dreistündige Schätzungen für die Niederschlagsrate aus Daten von mehrbändigen passiven Mikrowellen- und Infrarotradiometern, welche zusätzlich an bodengestützte Regenmesser angepasst werden (HUFFMAN et al., 2007; HUFFMAN & BOLVIN, 2018). Seit dem 31. Dezember 2019 wird dieses Produkt nicht mehr angeboten. Die Nachfolge basiert auf der "Global Precipitation Measurement" (GPM) Mission (HUFFMAN, 2019).

3 Methodik

3.1 Niederschlag-Abfluss-Modell COSERO

COSERO (COntinuous SEmi-distributed RunOff) ist ein kontinuierliches, halbverteiltetes, konzeptionelles Modell, welches vom

Konzept mit dem HBV-Modell nach BERGSTRÖM (1992) vergleichbar ist. Es berücksichtigt dabei die Akkumulation sowie die Schmelze von Schnee, die aktuelle Evapotranspiration, die Speicherung von Bodenwasser, die Aufteilung des Abflusses in verschiedene Abflusskomponenten als auch das Routing durch eine Kaskade von linearen und nichtlinearen Speichern. Die Berechnung als auch die Zuweisung von Eingangsdaten erfolgt dabei auf der Ebene von Hydrological Response Units (HRU). Die Berechnungsstruktur, welche in jeder HRU identisch aufgebaut ist, kann der Abbildung 2 entnommen werden (HERRNEGGER et al., 2015b). Im vorliegenden COSERO Modell werden die HRUs in Form von regelmäßigen, rechteckigen, 2 x 2 km² großen Rasterzellen räumlich abgegrenzt (Abb. 1).

Der bereits vorliegende und bei einem österreichischen Kraftwerksbetreiber im operativen Einsatz befindliche COSERO-Modellaufbau samt Referenzkalibrierung (SCHULZ et al., 2016) ist die Grundlage dieser Untersuchung. Die vorliegende Untersuchung baut dabei auf einer Modifikation dieses Modellaufbaus (MASSMANN et al., 2019) auf. Diese Modifikation von MASSMANN et al. (2019) wird bis auf den Tausch der meteorologischen Eingangsdaten sowie die Deaktivierung von lokalen meteorologischen Korrekturen bis zur abschließenden Rekalibrierung des Parameterfeldes nicht verändert.

Dieser Modellaufbau weist eine räumliche Diskretisierung von 2 x 2 km² (Größe der HRU's) sowie eine zeitliche Diskretisierung von einer Stunde auf. Im Modell befinden sich 2.859 HRU's welche zu 112 Teileinzugsgebieten (Abb. 1) zusammengefasst sind.

Für die Modellkalibrierung und -validierung werden die 46 Abflusspegel im Projektgebiet herangezogen. In der Kalibrierung wird versucht, die vorab definierten Zielfunktionen durch Variierung bestimmter Modellparameter (z. B. Speicherkonstanten, Infiltrationskapazität, Schmelzfaktor) zu maximieren/minimieren. Bei der Validierung werden die Gütemaße mit diesen Modellparametern für eine unabhängige Periode berechnet, um das vorliegende Modell in einer nicht kalibrierten Periode beurteilen zu können (BEVEN, 2011; KLEMES, 1986).

Die benötigten terrestrischen Geodaten werden im Kapitel 2.2 aufgelistet. Bei den meteorologischen Eingangsdaten sind zwingend Zeitreihen für Niederschlag sowie Lufttemperatur notwendig. Optional kann dem Modell ein Eingangsdatensatz bezüglich der potenziellen Evapotranspiration (ETP) zugewiesen werden. Andernfalls wird die ETP modellintern aus der Lufttemperatur nach dem Ansatz von THORNTHWAITE & MATHER (1957) berechnet (HERRNEGGER et al., 2015b; 2012).

3.2 Implementierung der global verfügbaren, alternativen Eingangsdaten mittels GEE

Um die Alternativdatensätze gemäß Kapitel 2.4 für das N-A-Modell verwenden zu können, müssen die Informationen vom Maßstab einer Rasterzelle des globalen Datensatzes auf die lokale Ebene der einzelnen Rasterzellen des N-A-Modells transferiert werden. Dafür wird der Rasteraufbau des Modells in die Google Earth Engine-Umgebung importiert. Für die Zuweisung von Daten eines in der Regel gröberen, globalen alternativen Datenrasters auf einen importierten und in der Regel feineren Modellraster muss bei Google Earth Engine ein sogenannter "Reducer" mit einem räumlichen Abstand für die Reduzierung definiert werden. Bei der vorliegenden Untersuchung wird der räumliche Abstand des "Reducers" mit 1.000 m festgelegt. Dadurch wird je Zeitschritt der zugewiesene Wert für eine Rasterzelle des Modells ($2 \times 2 \text{ km}^2$) aus den Werten von mindestens vier räumlich korrespondierenden Abtastpunkten des Alternativdatensatzes gemittelt. Um einen Informationsverlust zu vermeiden, sollte der räumliche Abstand des "Reducers" stets kleiner als die Größe einer Zelle des Modellrasters sein. Ein zu kleiner räumlicher Abstand des "Reducers" verlangsamt allerdings die Berechnung auf der Plattform Google Earth Engine. Abschließend wird bei Google Earth Engine eine Tabelle generiert, welche für jede definierte Rasterzelle des Modells eine Zeitreihe beinhaltet. Die jeweilige Auflösung der alternativen und den Globus abdeckenden Datenraster sowie des COSERO-Modellrasters wird in Abbildung 4 veranschaulicht.

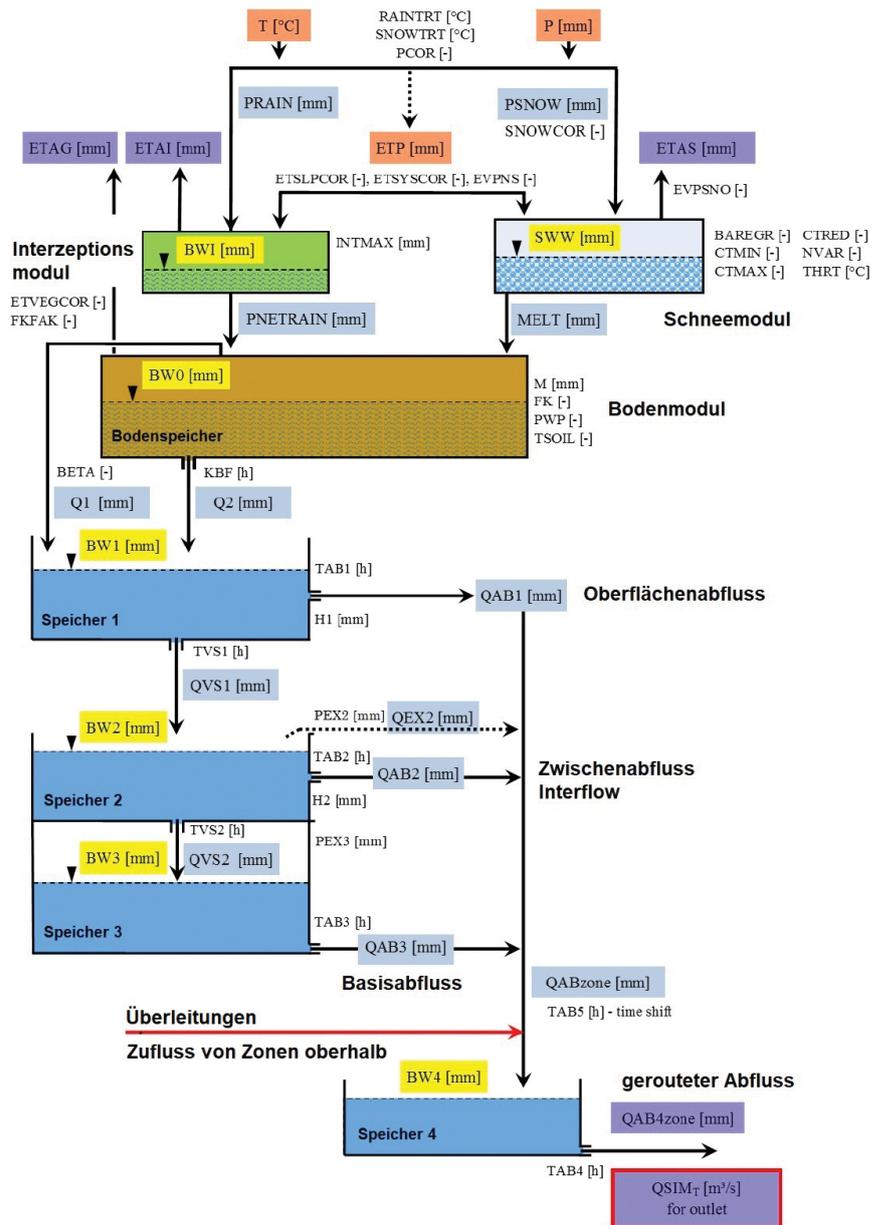


Abbildung 2 COSERO-Modellstruktur inklusive Dateneingänge (rot hinterlegt), relevanter Systemzustände (gelb hinterlegt), Flüsse (blau hinterlegt) und Parameter (HERRNEGGER et al., 2015b). COSERO model structure including inputs (red background), relevant system states (yellow background), fluxes (blue background) and parameters (HERRNEGGER et al., 2015b).

Zu beachten ist des Weiteren die Form der Aggregation sowie die Einheit der aus Google Earth Engine extrahierten Datenreihen (Tab. 3). Das N-A-Modell COSERO erwartet die Temperaturwerte in [°C] als Mittelwerte sowie die Niederschlags- bzw. ETP- Werte in [mm/h] als Summen des folgenden Zeitintervalls. Des Weiteren muss die zeitliche Diskretisierung der meteorologischen Eingangsdatensätze mit jener des Modells übereinstimmen, wodurch eine Angleichung der Datensätze mit der Software R (RCORE TEAM, 2019) notwendig war. So werden die alternativen Temperaturdaten an Zwischenzeitschritten interpoliert, während bei Niederschlags- und ETP-Summen eine gleichmäßige Aufteilung erfolgt.

3.3 Kalibrierung und Validierung

Ziel einer N-A-Modellierung sollte eine möglichst gute Anpassung der simulierten an die observierten Abflusswerte sein. Dafür ist meist eine Kalibrierung der Modellparameter erforderlich, welche manuell oder basierend auf einem Optimierungsalgorithmus erfolgen kann. Um verschiedene Aspekte des Hydrographen möglichst gut abzubilden, können für die Kalibrierung mehrere Zielfunktionen mit einer individuellen Gewichtung festgelegt werden.

Vorerst wird für alle Modellläufe mit Alternativdaten jenes kalibrierte Parameterfeld von MASSMANN et al. (2019) übernommen, welches auf die INCA-Daten angepasst wurde (Referenzkalibrierung), da der INCA-Datensatz die Klimatologie und meteorologischen Bedingungen des Untersuchungszeitraumes im Projektgebiet zufriedenstellend abbildet (BURGHOLZER, 2017; Feiel, 2018; KLOTZ et al., 2017; SCHÖSSWENDTER, 2018; SCHULZ et al., 2016). Nach Beurteilung der ersten Modellierungsergebnisse erfolgt bei zwei Modellläufen mit zugrundeliegenden Alternativdaten eine Rekalibrierung des Parameterfeldes. Ausgewählt wurden dabei Modellläufe, welche im Vergleich zur Referenz mit INCA eine gute sowie eine schlechte Modellgüte erreicht haben. Dadurch soll die Bandbreite der erzielbaren Modellgüte nach Rekalibrierung sowie der Einfluss der Rekalibrierung dargestellt werden. Des Weiteren wird festgelegt, dass für die Rekalibrierung nur jene Modellläufe in Betracht kommen, welchen der optionale Eingangsdatensatz GLDAS 2.1 für ETP zugrunde liegt. Diese Vorgangsweise wird angewendet, da für den empirischen Ansatz nach Thornthwaite langjährige mittlere monatliche Lufttemperaturen zonenweise und flächendeckend vorliegen müssen, welche aber in vielen anderen Regionen der Welt nur schwer erhältlich sind.

3.3.1 Simulationsperioden

Vor der Kalibrierungsphase wird oft eine Spin-Up-Phase definiert, um den initialen Systemzuständen im Modell (z. B. Speicherfüllungen, Basisabfluss) eine Konsolidierung zu ermöglichen. Damit wird gewährleistet, dass die Simulation nicht von den Anfangsbedingungen abhängt. Dies ist notwendig, da zu Beginn der Modellierung noch keine Werte dieser Systemzustände bekannt sind. In Tabelle 4 sind die Simulationsperioden des bestehenden N-A-Modells ersichtlich. Bei Verwendung der Referenzkalibrierung von MASSMANN et al. (2019) entfällt die Kalibrierung, da das Parameterfeld dort schon (auf die INCA-Daten) kalibriert ist. In diesem Fall beginnt unmittelbar nach der Spin-Up-Phase die Validierung.

3.3.2 Gütemaße

Nash-Sutcliffe efficiency (NSE)

Der Wertebereich bei der Nash-Sutcliffe-Effizienz reicht von $-\infty$ bis 1, wobei ein NSE von 1 auf eine exakte Übereinstimmung von zwei Zeitreihen hinweist (NASH & SUTCLIFFE, 1970). Ein negativer NSE spricht für eine schlechtere Schätzung des Modells im Ver-

gleich zum Mittelwert aller Beobachtungen. GUPTA et al. (2009) haben festgestellt, dass der NSE die Tendenz aufweist, hohe Abflüsse zu unter- und geringe Abflüsse zu überschätzen. Der NSE hängt zudem von der Streuung der Zeitreihen ab und ist somit gebietsspezifisch. Dadurch ist ein einzugsgebietsübergreifender Vergleich der NSE-Werte nur bedingt möglich (SCHAEFLI & GUPTA, 2007). Trotz dieser Defizite gehört der NSE zu den am häufigsten verwendeten Gütemaße in der Hydrologie. Laut SCHULZ et al. (2016) kann ab einem NSE $> 0,7$ von einem guten Ergebnis gesprochen werden, MORIASI et al. (2007) setzen den Schwellenwert für ein befriedigendes Ergebnis bei NSE $> 0,5$.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{sim,t} - Q_{obs,t})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs,t} - \bar{Q}_{obs})^2}$$

- n Anzahl der Zeitschritte
- $Q_{sim,t}$ Abflusswert aus der Simulation (COSERO)
- $Q_{obs,t}$ Abflusswert aus den Beobachtungen in der Natur (Pegeldaten)
- \bar{Q}_{obs} Mittelwert aller beobachteten Abflusswerte

Peak-difference coefficient (PDIFF)

Um die Modellgüte bei der Abbildung von Hochwasserscheitelwerten gesondert beurteilen zu können, wird das PDIFF-Kriterium verwendet (BURGHOLZER, 2017; WESEMANN et al., 2018a, 2018b). Das PDIFF Gütemaß ist ident wie das NSE aufgebaut, nur werden dort nicht längere Zeitreihen, sondern einzelne Spitzenwerte in die Berechnung einbezogen. Beim Gütemaß PDIFF wird eine entsprechende Anzahl an observierten Abflussscheitel $Peak_{obs,ih}$ ausgewählt und die dazugehörigen simulierten Abflussscheitel $Peak_{sim,ih}$ in einem Zeitraum von $\pm h$ Tagen gesucht. Um sicherzustellen, dass die Hochwasserereignisse unabhängig voneinander sind, muss zwischen den gewählten observierten Abflussscheitel $Peak_{obs,ih}$ ein zeitlicher Abstand von mindestens h Tagen liegen. Wie beim NSE reicht die Spannweite der möglichen Werte von $-\infty$ bis 1, wobei 1 das Optimum darstellt (BURGHOLZER, 2017).

$$PDIFF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^x (Peak_{sim,ih} - Peak_{obs,ih})^2}{\sum_{i=1}^x (Peak_{obs,ih} - \bar{Peak}_{obs})^2}$$

- x Anzahl der zu berücksichtigenden Hochwasserereignisse
- h Zeitfenster innerhalb dessen der dazugehörige simulierte Scheitelwert gesucht wird

Prozentualer Bias (pBias)

Der pBias gibt die relative Abweichung zwischen Modell (Simulation) und Wirklichkeit (Pegelwert) an und ist somit ein Indikator für einen systematischen Fehler. Ein biasfreies, also ein verzerrungsfreies Modell liegt vor, wenn der Bias den Wert 0 annimmt. Der Bias dient in dieser Arbeit als Grundlage für eine Beurteilung der langzeitlichen Abweichungen in der Abflussbilanz. Positive pBias-Werte sind gleichbedeutend mit einer systematischen Überschätzung und umgekehrt. SCHULZ et al. (2016) setzten das Zielkriterium für ein zufriedenstellendes Ergebnis hinsichtlich der Abflussbilanz bei einer Abweichung von maximal $\pm 20\%$.

$$pBias = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{sim,t} - Q_{obs,t})}{\sum_{t=1}^n Q_{obs,t}} \times 100$$

Tabelle 4
Simulationsperioden des N-A-Modells.
Simulation periods of the R-R model.

Spin-Up-Phase	01.01.2003 bis 31.08.2003
Kalibrierung	01.09.2003 bis 31.08.2009
Validierung	01.09.2009 bis 31.12.2012

- n Anzahl der Zeitschritte
- $Q_{sim,t}$ Abflusswert aus der Simulation (COSERO)
- $Q_{obs,t}$ Abflusswert aus den Beobachtungen in der Natur (Pegeldaten)

3.3.3 Kalibrierung

Das Parameterfeld von COSERO setzt sich aus 67 verschiedenen Modellparametern zusammen. Da eine Vielzahl dieser Parameter a priori definiert werden kann (z. B. Zonenhöhe, Art der Vegetation, etc.) oder nur von diesen abgeleitet werden (z. B. Korrekturfaktor für ETP, maximale Speicherkapazität des Interzeptions-speichers), kommt die Kalibrierung nur bei 17 Parametern zur Anwendung (HERRNEGGER et al., 2015b). Die Kalibrierung erfolgt dabei anhand des DDS (dynamically dimension search) Algorithmus (TOLSON & SHOEMAKER, 2007), welcher sich gut für die Kalibrierung hydrologischer Modelle mit einer Vielzahl an Parametern und langen Laufzeiten eignet (TOLSON & SHOEMAKER, 2007; ARSENAULT et al., 2014). Dieser Algorithmus versucht zuerst die zu kalibrierenden Modellparameter global zu optimieren und wechselt auf eine zunehmend lokalere Ebene, wenn sich die Anzahl der bereits durchgelaufenen Iterationen der Anzahl der maximal zulässigen Iterationen nähert (TOLSON & SHOEMAKER, 2007). Die Anzahl der zulässigen Iterationen wird bei dieser Untersuchung mit 1.000 festgelegt, da sich diese Zahl bei numerischen Untersuchungen im Vorfeld als ausreichend erwiesen hat. Als Zielfunktion für die Kalibrierung (Referenzkalibrierung von MASSMANN et al., 2019 sowie Rekalibrierung) wird das Gütemaß NSE mit einer Gewichtung von 85 % sowie das Gütemaß PDIFF mit einer Gewichtung von 15 % festgelegt, da BURGHOLZER (2017) damit gute Erfahrungen sammelte und so die Tendenz des NSE, hohe Abflüsse zu unterschätzen (GUPTA et al., 2009), abgemindert werden kann.

3.3.4 Validierung

In der Validierung werden die beiden Gütemaße NSE sowie pBias für eine objektive Beurteilung der einzelnen Modellierungsläufe herangezogen. Auf die Verwendung von PDIFF wird bei der Validierung verzichtet, da im Kapitel 4.2.6 auszugsweise modellierte Abflussganglinien rund um Hochwasserereignisse dargestellt und diskutiert werden.

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Vergleich der lokal und global verfügbaren meteorologischen Eingangsdaten

Vor der Implementierung der Alternativdaten in die N-A-Modellierung werden diese dem regionalen INCA-Datensatz bzw. der langjährigen Wasserbilanz (Tab. 2) gegenübergestellt. Dadurch lassen sich etwaige Defizite in den nachfolgenden Abfluss-simulationen, auch bezüglich der Wasserbilanz, besser analysieren und begründen.

4.1.1 Niederschlag

Die beste Übereinstimmung mit INCA hinsichtlich der mittleren monatlichen Niederschlagssummen auf dem Gebiet des gesamten österreichischen Einzugsgebiets der Mur kann laut Abbildung 3 der alternative Datensatz CHIRPS Daily erzielen. Bei diesem Datensatz unterscheiden sich sowohl die mittlere Jahresniederschlagssumme (Abb. 3) als auch die einzelnen mittleren Monatsniederschlagssummen über das gesamte Jahr nur marginal mit jenen von INCA. Der Datensatz GLDAS 2.1 kann zwar bezüglich der mittleren Jahresniederschlagssumme einen ähnlichen Wert wie der Referenzdatensatz INCA erzielen (Abb. 3; Abb. 4, GLDAS 2.1/INCA, Variable A), zeigt jedoch durchschnittlich recht deutliche Unterschätzungen während der Sommer-

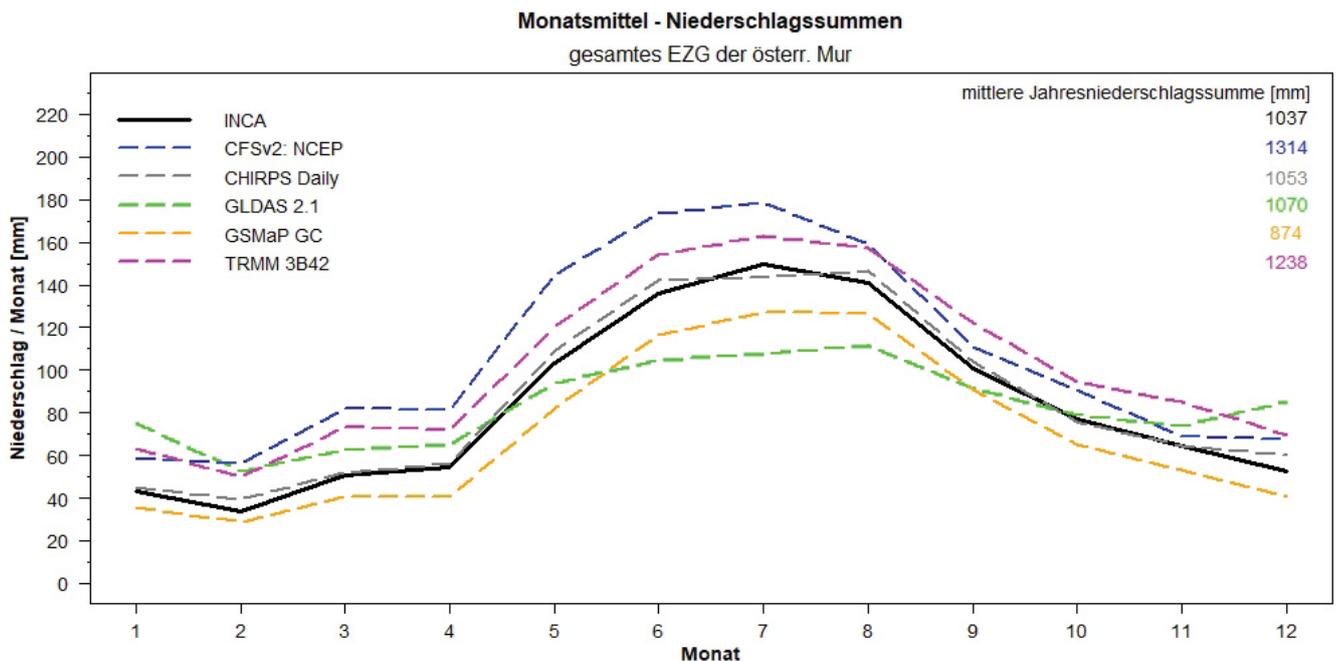


Abbildung 3

Vergleich der mittleren monatlichen Niederschlagssummen der verschiedenen Datensätze für das Einzugsgebiet der österreichischen Mur für die Jahre 2003 bis 2012. Auf der rechten oberen Seite der Abbildung werden die mittleren Jahresniederschlagssummen der einzelnen Datensätze angeführt. Comparison of the mean monthly precipitation sums of the different datasets for the catchment area of the Austrian Mur, including the mean annual precipitation sums of the various datasets in the upper right corner.

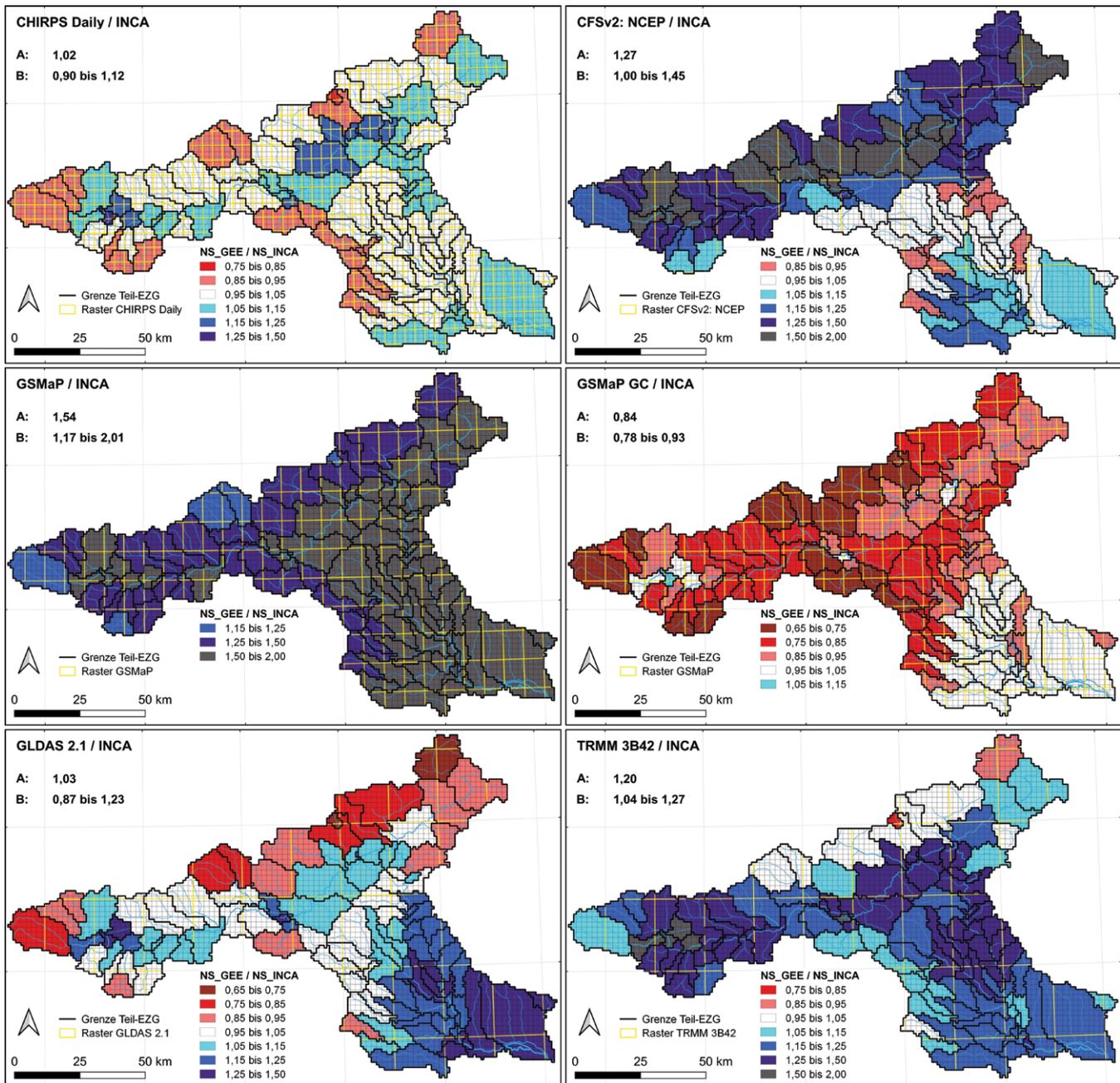


Abbildung 4

Vergleich der mittleren jährlichen Niederschlagssummen der verschiedenen Alternativdatensätze mit jenen des regionalen INCA-Datensatzes für den Zeitraum 2003 bis 2012. Dargestellt wird für jedes Teileinzugsgebiet der Quotient aus alternativem Datensatz (GEE) und INCA-Datensatz (INCA). Auf der linken oberen Seite jedes Plots wird für das gesamte Einzugsgebiet der österreichischen Mur auch jeweils der gewichtete Quotient der mittleren jährlichen Niederschlagssummen (Variable A) sowie die Spanne der gewichteten Quotienten der jährlichen Niederschlagssummen in den einzelnen Jahren 2003 bis 2012 (Variable B) aufgelistet. Die räumliche Auflösung der verschiedenen Alternativdatensätze wird anhand des orangefarbenen Rasters veranschaulicht. *Comparison of the mean annual precipitation sums of the various alternative datasets with those of the INCA dataset for the period 2003 to 2012. The ratio between the alternative dataset (GEE) and the INCA dataset (INCA) is illustrated for every sub-basin. The mean ratio of the mean annual precipitation sums (variable A) as well as the range of the ratios of the annual precipitation sums in the individual years 2003 to 2012 (variable B) are listed in the upper left corner of each plot of the panel. The spatial resolution of the different alternative datasets is illustrated by the orange grid.*

monate sowie Überschätzungen im Winter. Die Datensätze GSMaP GC und TRMM 3B42 bzw. CFSv2: NCEP weisen zwar ein Niederschlagsdefizit bzw. einen Niederschlagsüberschuss im Vergleich zu INCA auf, das Verhältnis zu den mittleren monatlichen Niederschlagssummen des INCA-Datensatzes ist aber über das gesamte Jahr nahezu gleichbleibend. Dies ist ein Indikator

für eine systematische Unter- bzw. Überschätzung des Niederschlags dieser Datensätze gegenüber INCA. Der Gebietsniederschlag aus der Wasserbilanz des Hydrologischen Atlas liegt für den Zeitraum 1961 bis 1990 zum Vergleich laut Tabelle 2 bei 1.024 mm (BMLFUW, 2007).

Um die Abweichungen der global abdeckenden alternativen Datensätze zum regionalen INCA-Datensatz räumlich aufzeigen zu können, wird auf Ebene der 112 Teileinzugsgebiete der Quotient aus den mittleren jährlichen Niederschlagssummen der alternativen Datensätze (NS_GEE) sowie des regionalen INCA-Datensatzes (NS_INCA) für den Untersuchungszeitraum 2003 bis 2012 gebildet und anhand der Abbildung 4 dargestellt.

Auch in der Abbildung 4 zeigt sich, dass der Alternativdatensatz CHIRPS Daily v2 zumindest mit der längerfristigen Niederschlagscharakteristik vom INCA-Datensatz gut übereinstimmt. So weist CHIRPS an rund 90 % aller Teileinzugsgebiete mit maximal ± 15 % Abweichung in Relation zu INCA nur relativ geringfügige Abweichungen bezüglich der mittleren Jahresniederschlagssummen auf. Die mittlere Relation bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet beträgt bei diesem Datensatz nur 1,02, also ein Niederschlagsüberschuss von 2 % im Untersuchungszeitraum (Abb. 4, CHIRPS Daily/INCA, Variable A). Während der nicht-stationsangepasste Datensatz GSMaP laut Abbildung 4 über das nahezu gesamte Einzugsgebiet gegenüber INCA einen deutlichen Niederschlagsüberschuss aufweist, zeigt die stationsangepasste Version GSMaP GC speziell in den höhergelegenen Regionen (siehe Höhenstufen, Abb. 1) ein Niederschlagsdefizit. GLDAS 2.1 signalisiert entlang des Alpenhauptkammes im Norden des Einzugsgebietes im Mittel ebenfalls ein Niederschlagsdefizit, während im Süden hingegen ein Niederschlagsüberschuss vorherrscht. Während bei diesem Datensatz die mittlere Abweichung zu INCA mit einem Quotienten von 1,03 nur gering ausfällt, weisen die Quotienten mit 0,87 bis 1,23 in den einzelnen Jahren 2003 bis 2012 erwartungsgemäß auf größere Abweichungen hin (Abb. 4, GLDAS 2.1/INCA, Variable B).

4.1.2 Temperatur

Im Unterschied zum Niederschlag zeigen sich beim Vergleich der Lufttemperaturen gemäß Abbildung 5 weitaus geringere monatliche Variationen. So liegen auf der Ebene des gesamten Einzugsgebietes der österreichischen Mur die mittleren monatlichen Lufttemperaturen der alternativen Datensätze CFSv2: NCEP sowie GLDAS 2.1 über das ganze Jahr unter jenen des INCA-Datensatzes, wobei die mittlere monatliche Abweichung in den Frühlingsmonaten am größten ausfällt. Der Unterschied zwischen den beiden alternativen Datensätzen ist in Bezug auf die mittleren monatlichen Lufttemperaturen nur marginal. Auf Jahressicht liegen die mittleren Jahreslufttemperaturen dieser beiden Datensätze um $0,9$ °C unter derer von INCA (Abb. 5; Abb. 6, Variable C).

Die räumlichen Gegenüberstellungen der Abweichungen zwischen den mittleren Jahreslufttemperaturen der alternativen Datensätze (Tair_GEE) und des INCA-Datensatzes (Tair_INCA) erfolgt ähnlich wie beim Niederschlag. Nur werden hier teileinzugsgebietsweise keine Quotienten, sondern Differenzen (Tair_GEE – Tair_INCA) gebildet.

Insgesamt zeigt laut Abbildung 6 sowohl CFSv2: NCEP als auch GLDAS 2.1 auf dem gesamten Einzugsgebiet zu geringe mittlere Jahreslufttemperaturen gegenüber INCA, wobei hier GLDAS 2.1 regional ausgeglichene Differenzen gegenüber INCA als CFSv2: NCEP aufweisen kann. Die geringere Spannweite der gewichteten Differenzen der einzelnen Jahre 2003 bis 2012 des Datensatzes GLDAS 2.1 (Abb. 6, GLDAS 2.1 – INCA, Variable D) gegenüber CFSv2: NCEP ist ebenfalls ein Indikator für eine größere Ähnlichkeit von GLDAS 2.1 und INCA.

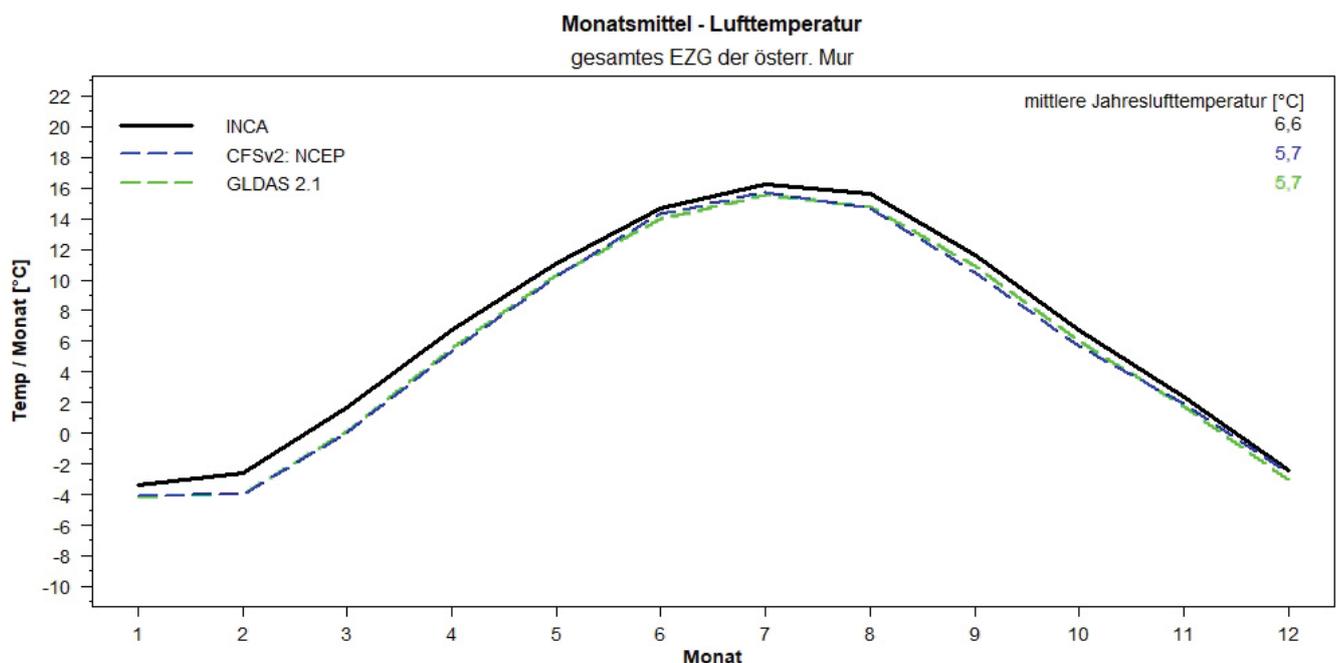


Abbildung 5

Vergleich der mittleren monatlichen Lufttemperaturen der verschiedenen Datensätze für das gesamte Einzugsgebiet der österreichischen Mur. Auf der rechten oberen Seite des Plots werden die mittleren Jahreslufttemperaturen der einzelnen Datensätze angeführt.

Comparison of the mean monthly air temperatures of the different datasets for the entire catchment area of the Austrian Mur, including the mean annual air temperatures of the various datasets in the upper right corner.

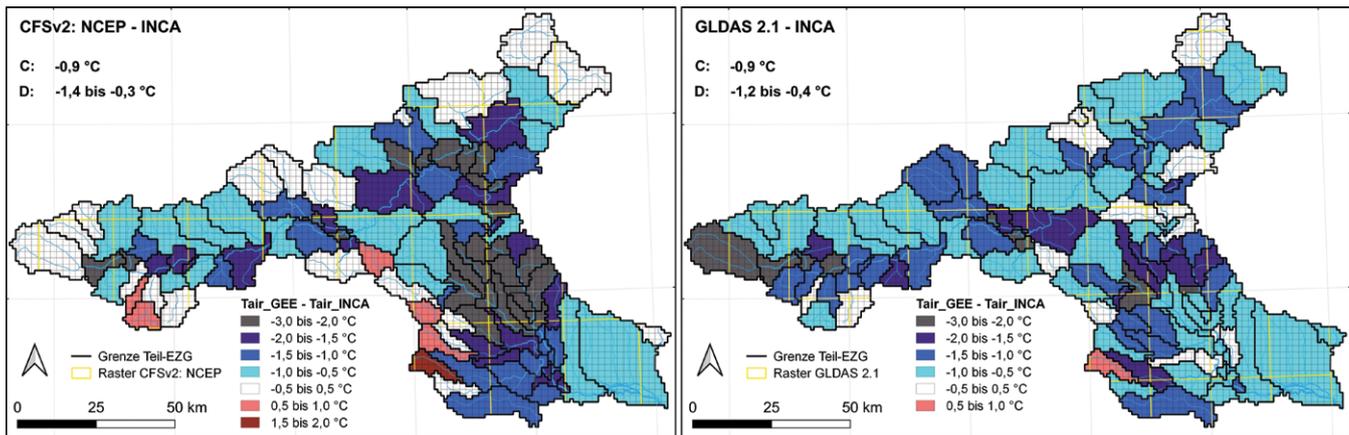


Abbildung 6

Vergleich der jährl. mittleren Lufttemperaturen der verschiedenen Alternativdatensätze mit jenen des regionalen INCA-Datensatzes für den Zeitraum 2003 bis 2012. Dargestellt wird für jedes Teileinzugsgebiet die Differenz aus alternativem Datensatz (GEE) und INCA-Datensatz (INCA). Auf der linken oberen Seite jedes Plots wird für das gesamte Einzugsgebiet der österreichischen Mur auch jeweils die gewichtete Differenz der mittleren jährlichen Lufttemperatur (Variable C) sowie die Spanne der gewichteten Differenzen der Jahresmitteltemperaturen in den einzelnen Jahren 2003 bis 2012 (Variable D) aufgelistet. Die räumliche Auflösung der unterschiedlichen Alternativdatensätze wird anhand des orangenen Rasters veranschaulicht.

Comparison of the mean annual air temperature of the various alternative datasets with those of the INCA dataset for the period 2003 to 2012. The difference of the alternative dataset (GEE) and the INCA dataset (INCA) is shown for every sub-basin. The weighted difference of the mean annual air temperature (variable C) as well as the range of the weighted differences of the annual air temperatures in the individual years 2003 to 2012 (variable D) are listed in the upper left corner of each plot. The spatial resolution of the different alternative datasets is illustrated by the orange grid.

4.1.3 Potenzielle Evapotranspiration

Die potenzielle Evapotranspiration ETP kann bei COSERO entweder als Eingangsdatensatz dem N-A-Modell zugewiesen oder modellintern nach dem Ansatz von THORNTHWAITHE & MATHER (1957) empirisch aus der Lufttemperatur berechnet werden. Da es bei INCA keinen Datensatz bezüglich der ETP gibt, kann nur der ETP-Eingangsdatensatz von GLDAS 2.1 mit den Ergebnissen des Ansatzes nach Thornthwaite unter Anführung des jeweils zugrundeliegenden Datensatzes für die Lufttemperatur verglichen werden.

Während sich gemäß Abbildung 7 bei den mittleren monatlichen ETP-Summen nach dem Ansatz von Thornthwaite deutlich die starre Abhängigkeit von der Lufttemperatur gemäß Abbildung 5 zeigt, weist der ETP-Eingangsdatensatz GLDAS 2.1 über nahezu alle Monate des Jahres deutlich höhere mittlere monatliche ETP-Summen auf. So liegt die mittlere jährliche ETP-Summe im Untersuchungszeitraum 2003 bis 2012 mit dem Ansatz nach Thornthwaite bei maximal 685 mm, während nach dem ETP-Datensatz GLDAS 2.1 auf Jahressicht im Mittel im gesamten Einzugsgebiet der österreichischen Mur 985 mm potenziell verdunsten können (Abb. 7). Laut BMLFUW (2007) (Tab. 2) liegt die mittlere jährliche potenzielle Evapotranspiration für den Zeitraum 1961 bis 1990 bei 564 mm. HERRNEGGER & NACHTNEBEL (2011) haben die mittlere ETP nach dem energiebasierten Ansatz von Penman-Monteith (ASCE-EWRI, 2005) für ganz Österreich im Zeitraum von 2007 bis 2009 ermittelt. Dabei wurde für die Seehöhe von 1000 m Mh (mittlere Seehöhe des EZG der österreichischen Mur) eine mittlere jährliche potenzielle Evapotranspiration von rund 700 mm ermittelt. Zusammenfassend liegen die mittleren ETP-Summen gemäß Abbildung 7 der verschiedenen Methoden recht weit auseinander, wobei die mittleren Jahreswerte der potenziellen Evapotranspiration nach dem Ansatz von Thornthwaite deutlich besser als jene des Alternativdatensatzes GLDAS 2.1 mit dem mittleren Jahreswert aus der Wasserbilanz des Hydrolo-

gischen Atlas (Tab. 2) sowie der Auswertung von HERRNEGGER & NACHTNEBEL (2011) übereinstimmen. Die Unsicherheiten in der Schätzung der ETP, gerade im alpinen Raum, sind hoch. So zeigt sich in HERRNEGGER et al. (2012), dass temperaturbasierte Verfahren zur Ableitung der ETP in alpinen Regionen im Vergleich zu energiebilanzbasierten Verfahren deutlich niedrigere Werte aufweisen. Globalstrahlung, relative Feuchte und Windgeschwindigkeit (meteorologische Parameter, die ETP beeinflussen) weisen räumliche Trends auf, die die deutlich höheren ETP-Werte von energiebilanzbasierten Verfahren in höheren alpinen Lagen erklären. Diese Trends werden in der Temperatur als Summenparameter bei vereinfachten ETP-Ansätzen nicht abgebildet.

4.2 Niederschlag-Abfluss-Modellierung

4.2.1 N-A-Modellierung mit Referenzkalibrierung

In Tabelle 5 werden die Kürzel der durchgeführten Simulationsläufe mit den jeweils verwendeten Eingangsdatensätzen aufgelistet. Für die Referenzsimulation SIM0 werden die feinaufgelösten INCA-Eingangsdaten herangezogen, womit dieser Simulationslauf die Referenz für alle anderen darstellen soll. Beim nicht-stationsangepassten Datensatz GSMaP ist die Zeitreihe im Kalenderjahr 2011 an einigen Zonen für einen längeren Zeitraum lückenhaft, weshalb diese Ergebnisse nur bis zum Jahresende 2010 ausgewertet werden.

In der Abbildung 8 wird die kumulierte Häufigkeit der erzielten Modellgüte (46 Pegel) für alle Modellläufe gemäß Tabelle 5 dargestellt. Das hydrologische Modell wurde dabei mit der Referenzkalibrierung nach MASSMANN et al. (2019) ausgeführt, wobei die Inputzeitreihen verändert wurden.

Abbildung 8 zeigt klar, dass mit der Referenzsimulation SIM0 (INCA) erwartungsgemäß die höchste Modellgüte erreicht wird. Die Spanne bezüglich der erreichten NSE-Werte an den 46 Pegeln liegt bei SIM0 im Bereich von 0,13 bis 0,92. Gemäß Abbildung 8

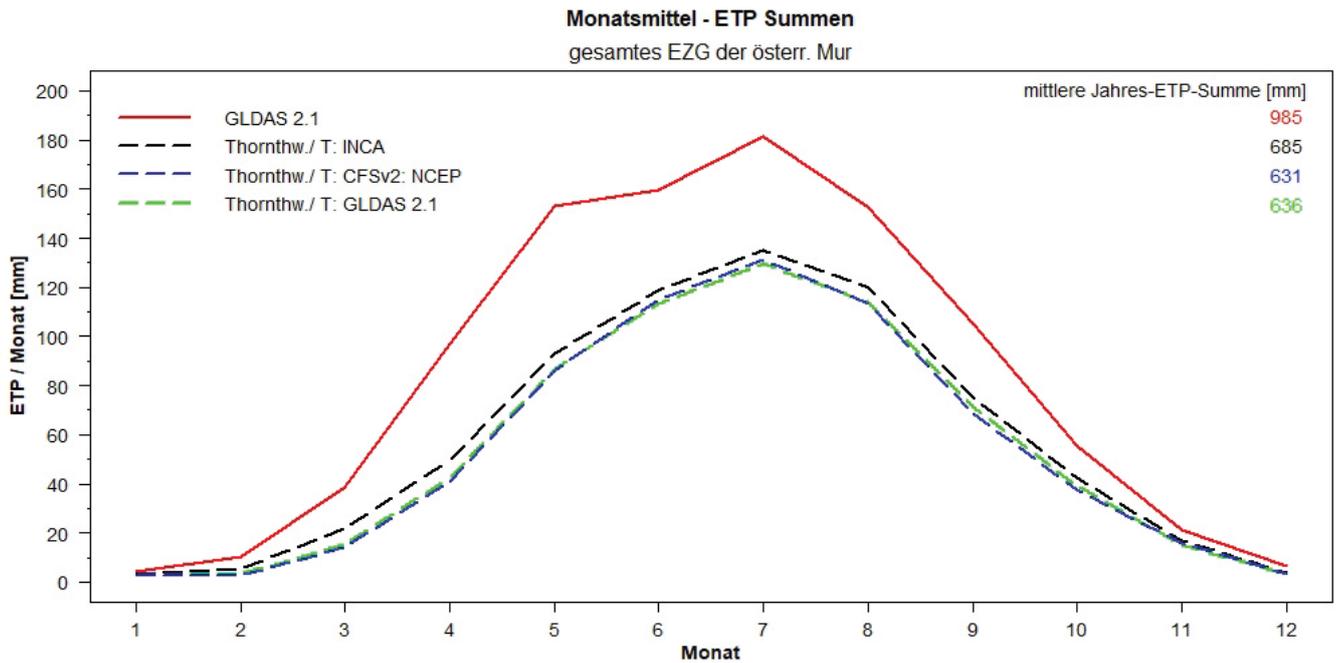


Abbildung 7

Vergleich der mittleren monatlichen potenziellen Evapotranspirationssummen für das gesamte Einzugsgebiet der österreichischen Mur. Auf der rechten oberen Seite des Plots werden die mittleren Jahres-ETP-Summen der einzelnen Datensätze angeführt.

Comparison of the mean monthly ETP sums for the entire catchment area of the Austrian Mur, including the mean annual ETP sums of the various datasets / methods in the upper right corner.

kann mit SIM0 an knapp 40 % der 46 Pegel ein gutes Modellierungsergebnis ($NSE > 0,7$ laut Schulz et al., 2016) erzielt werden. Bei den Modellläufen mit zugrundeliegenden Alternativdaten können mit der Referenzkalibrierung dagegen noch keine guten Modellierungsergebnisse erzielt werden. Jedoch wird eine befriedigende Modellgüte ($NSE > 0,5$ laut MORIASI et al., 2007) mit SIM6 (Niederschlag: GSMaP GC | Temperatur: GLDAS 2.1 | ETP: Thornthwaite) an ca. 30 % aller Pegel, mit SIM10 (Niederschlag: GSMaP GC | Temperatur: GLDAS 2.1 | ETP: GLDAS 2.1) an rund 7 % der Pegel sowie mit SIM5 (Niederschlag: CHIRPS Daily | Temperatur: GLDAS 2.1 | ETP: Thornthwaite) an ca. 15 % erreicht. Beim Modelllauf SIM10 wurde im Gegensatz zur Simulation SIM6 der

optionale ETP-Eingangsdatensatz GLDAS 2.1 anstatt des Ansatzes nach Thornthwaite herangezogen (Tab. 5). Die Verschlechterung der NSE-Modellgüte kann durch die höhere potenzielle Evapotranspiration des ETP-Datensatzes von GLDAS 2.1 im Vergleich zum Ansatz nach Thornthwaite (Abb. 7) und in weiterer Folge auch einer gesteigerten aktuellen Verdunstung begründet werden. Das Resultat einer gesteigerten aktuellen Evapotranspiration ist gemäß Wasserbilanz bei unveränderter Speicherung eine weitere Reduzierung des Abflusses. Der Abfluss beim Modelllauf SIM6 ist im Vergleich zur Referenzsimulation SIM0 aufgrund des Niederschlagsdefizites des zugrundeliegenden Niederschlagsdatensatzes GSMaP GC speziell in höheren Regio-

Tabelle 5
 Kombinationen der meteorologischen Eingangsdatensätze für die N-A-Modellierung sowie der Referenzkalibrierung des Parameterfeldes von MASSMANN et al. (2019).
Combinations of the meteorological input datasets for the R-R modelling and reference calibration by MASSMANN et al. (2019).

Kürzel der Kombination	Niederschlag	Lufttemperatur	ETP
SIM0 (Referenz)	INCA	INCA	THORNTWHAITE & MATHER (1957)
SIM1	GLDAS 2.1	GLDAS 2.1	THORNTWHAITE & MATHER (1957)
SIM2	GLDAS 2.1	GLDAS 2.1	GLDAS 2.1
SIM3	CFSv2: NCEP	CCFSv2: NCEP	THORNTWHAITE & MATHER (1957)
SIM4	CFSv2: NCEP	GLDAS 2.1	THORNTWHAITE & MATHER (1957)
SIM5	CHIRPS Daily	GLDAS 2.1	THORNTWHAITE & MATHER (1957)
SIM6	GSMaP GC	GLDAS 2.1	THORNTWHAITE & MATHER (1957)
SIM7	TRMM 3B42	GLDAS 2.1	THORNTWHAITE & MATHER (1957)
SIM8	GSMaP (bis einschl. 2010)	GLDAS 2.1	THORNTWHAITE & MATHER (1957)
SIM9	CFSv2: NCEP	GLDAS 2.1	GLDAS 2.1
SIM10	GSMaP GC	GLDAS 2.1	GLDAS 2.1

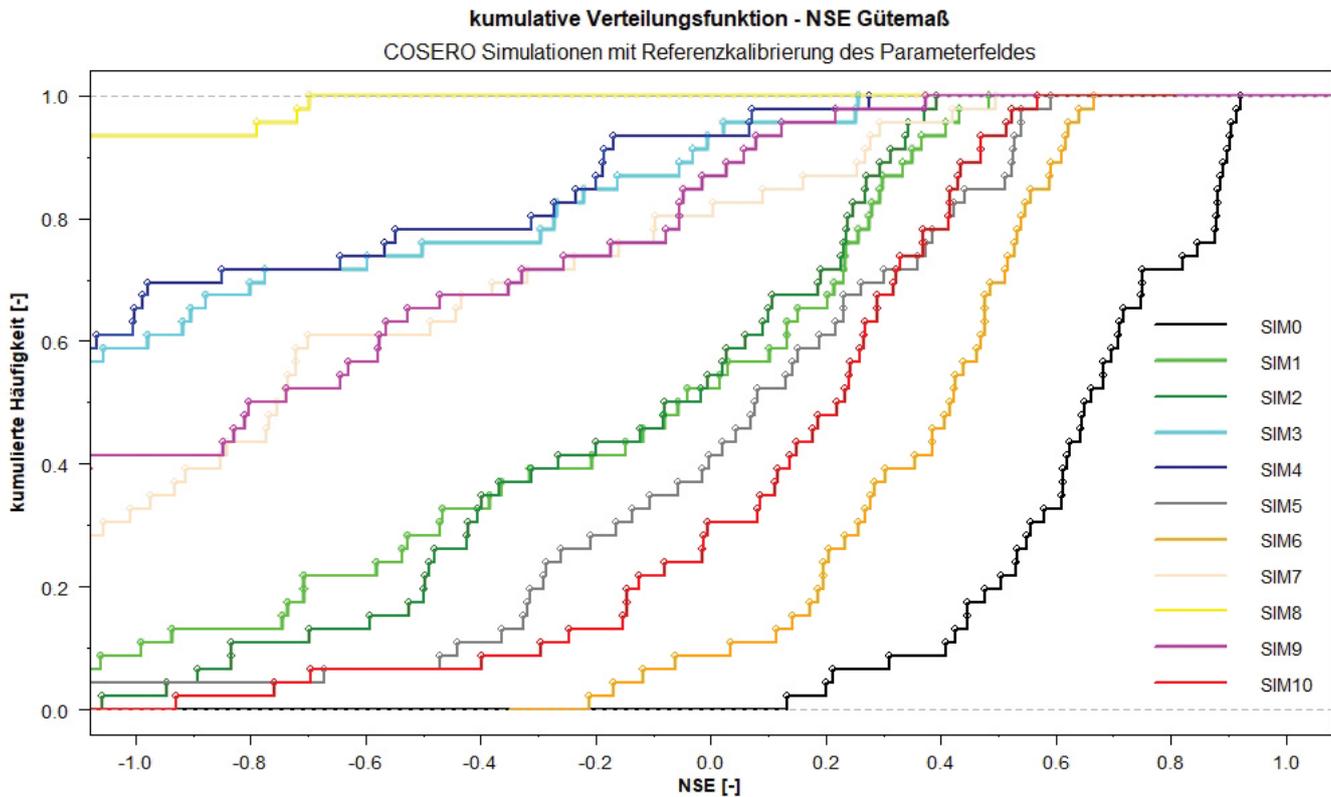


Abbildung 8

Kumulative Verteilungsfunktion der Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) an den einzelnen 46 Pegeln bei Modellierung mit der Referenzkalibrierung des Parameterfeldes. Ein Kreis auf einem Graph kennzeichnet dabei den NSE-Wert an einem Pegel. Je näher sich eine Verteilungsfunktion an eine gedachte senkrechte Linie an der Stelle $NSE = 1,0$ angleicht, desto besser ist die erzielte Modellgüte dieses Modelllaufes.

Cumulative distribution function of the Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) at the 46 gauges for simulations with the reference calibration of the parameter field. A circle on a graph indicates the NSE value at a gauge. The closer a distribution function is to an imaginary vertical line at the position $NSE = 1.0$, the better is the model quality.

nen aber ohnehin schon zu gering (Abb. 4, GSMaP GC/INCA). Bei einer N-A-Modellierung mit einer so geringen zeitlichen Auflösung von nur einer Stunde ist für ein gutes Modellierungsergebnis eine möglichst gute Abbildung der Niederschlagsdynamik notwendig. Der bei SIM5 verwendete Datensatz CHIRPS daily weist laut Tabelle 3 eine zeitliche Auflösung von nur 24 Stunden auf, während diese bei GSMaP GC bei nur einer Stunde liegt. Dadurch lässt sich auch erklären, weshalb SIM5 gemäß Abbildung 8 ein schlechteres Modellierungsergebnis als SIM6 aufweist, obwohl der bei SIM5 zugrundeliegende Datensatz CHIRPS daily die langfristigen Niederschlagsverhältnisse laut Abbildung 3 bzw. Abbildung 4 von allen untersuchten Alternativdatensätzen am besten abbildet.

Die schlechteste NSE-Modellgüte mit der Referenzkalibrierung erreicht laut Abbildung 8 der Modelllauf SIM8, welcher laut Tabelle 5 den nicht-stationsangepassten GSMaP-Datensatz (ohne GC) für die Beschreibung des Niederschlags verwendet. Neben der Simulation SIM8 zeigt auch der Modelllauf SIM4 ebenfalls eine schlechte NSE-Modellgüte. Beim Modelllauf SIM9 wird im Vergleich zum Modelllauf SIM4 anstatt des Ansatzes nach Thornthwaite der optionale ETP-Eingangsdatsatz GLDAS 2.1 verwendet. Diesen beiden Modellläufen liegt der Niederschlagsdatensatz CFSv2: NCEP zugrunde, welcher gemäß Abbildung 4, CFSv2: NCEP/INCA, vor allem in den nördlicheren Regionen des Einzugsgebietes im Mittel deutliche Niederschlagsüberschüsse

gegenüber INCA aufzuweisen hat. Daher kann die Verbesserung der Modellgüte von SIM4 auf SIM9 mit der gesteigerten potenziellen sowie auch aktuellen Verdunstung und in weiterer Folge mit einer Reduzierung des Abflussüberschusses begründet werden.

4.2.2 N-A-Modellierung mit Rekalibrierung

Gemäß der Festlegung in Kapitel 3.3 werden die Modellläufe SIM9 und SIM10 für die Rekalibrierung des Parameterfeldes herangezogen. Beiden liegt der optionale ETP-Eingangsdatsatz GLDAS 2.1 zugrunde und diese stecken die Spannweite zwischen schlechten und relativ guten Modellierungsergebnissen mit Alternativdatensätzen ab. Die Kombinationen der Eingangsdatensätze für die einzelnen Modellläufe werden unter Anführung der Kürzel in der Tabelle 6 aufgelistet.

Die Darstellung der nach der Rekalibrierung erzielten NSE-Modellgüte erfolgt ebenfalls anhand einer kumulativen Verteilungsfunktion in der Abbildung 9. Der Aufbau erfolgt ident wie bei der Abbildung 8, jedoch ist das geänderte Intervall auf der Abszisse zu beachten. Des Weiteren werden die Ergebnisse der Modellläufe SIM0, SIM9x und SIM10x in eine Kalibrierungsphase (.cal) sowie eine Validierungsphase (.val) aufgeteilt, wobei die Validierungsphase relevanter für die Beurteilung der erzielten Modellgüte ist. Die Modellläufe SIM9 sowie SIM10 werden auch in der Abbildung 9 dargestellt, da diese beiden die Ausgangsmo-

Tabelle 6
 Kombinationen der meteorologischen Eingangsdatensätze für die N-A-Modellierung mit einer Rekalibrierung des Parameterfeldes.
Combinations of the meteorological input datasets for R-R modelling with recalibration of the parameter field.

Kürzel der Kombination	Niederschlag	Lufttemperatur	ETP
SIM9x	CFSv2: NCEP	GLDAS 2.1	GLDAS 2.1
SIM10x	GSMaP GC	GLDAS 2.1	GLDAS 2.1

dellläufe für die Rekalibrierung sind und sich so die Auswirkung der Rekalibrierung besser veranschaulichen lässt.

Während durch die Rekalibrierung des Modelllaufes SIM9 keine nennenswerte Steigerung der NSE-Modellgüte laut Abbildung 9 erkennbar ist (SIM9 auf SIM9x.val), bewirkt die Rekalibrierung des Parameterfeldes beim Modelllauf SIM10 eine deutliche Verbesserung der Modellgüte (SIM10 auf SIM10x.val). Zwar wird auch durch die Rekalibrierung die Modellgüte der Referenzsimulation SIM0.val nicht erreicht, laut Abbildung 9 kann aber mit dem rekalibrierten Modelllauf SIM10x.val an ca. 15 % aller 46 Pegel ein gutes Ergebnis (NSE > 0,7 laut SCHULZ et al., 2016) erzielt werden.

4.2.3 Simulationsgüten in Abhängigkeit der Einzugsgebietsgröße

An dieser Stelle wird der Frage nachgegangen, ob die Einzugsgebietsgröße eines Pegels einen Einfluss auf die NSE-Modellgüte

hat. Dazu werden bei den relevantesten Modellläufen die erreichten NSE-Werte der einzelnen Pegel in Abhängigkeit der jeweiligen Einzugsgebietsgröße in der Abbildung 10 dargestellt. Auf die einzelnen Punkte eines jeden Modelllaufes wird eine lineare Regressionsgerade angepasst.

Laut Abbildung 10 zeigt die lineare Regressionsgerade bei den Modellläufen SIM0u.val, SIM9x.val sowie SIM10x.val eine positive Steigung. Dies kann mit einer grundsätzlichen Erhöhung der NSE bei steigender Einzugsgebietsfläche interpretiert werden. Umgekehrt liegt bei den Modellläufen SIM9 sowie SIM10 das Gegenteil, also ein tendenziell sinkender NSE bei zunehmender Einzugsgebietsgröße vor.

Bei einer linearen Regression sollten die Residuen untereinander keine Korrelation aufweisen, näherungsweise normalverteilt sein und über den gesamten Wertebereich in etwa die selbe Streuung aufweisen (LUDWIG-MAYERHOFER, 2019). Da die Gütemaße an den einzelnen Pegeln aber bei einem zusammenhängenden Gewässernetz von den oberstromigen Pegeln beeinflusst werden, sind diese Voraussetzungen für die lineare Regression streng genommen nicht gegeben. Die lineare Regression wird in dieser Arbeit nicht angewendet, um einen etwaigen linearen Zusammenhang zwischen Einzugsgebietsgröße und erreichter NSE herauszufinden, sondern ausschließlich um einen positiven oder negativen Trend zu erkennen.

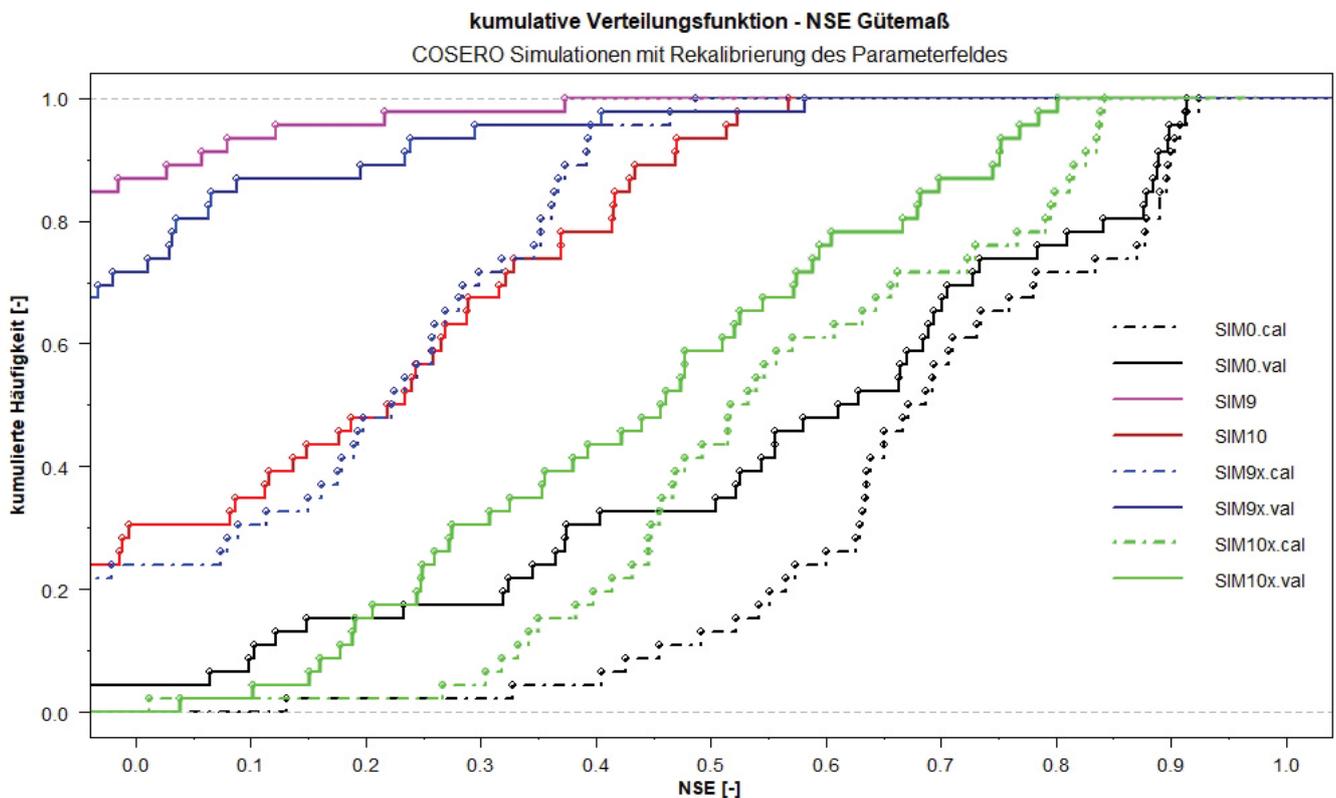


Abbildung 9
 Kumulative Verteilungsfunktion der erreichten Nash-Sutcliffe-Effizienz (NSE) an den einzelnen 46 Pegeln bei Modellierung mit der Rekalibrierung des Parameterfeldes.
Cumulative distribution function of the achieved Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) at the various 46 gauges for modelling with recalibration of the parameter field.

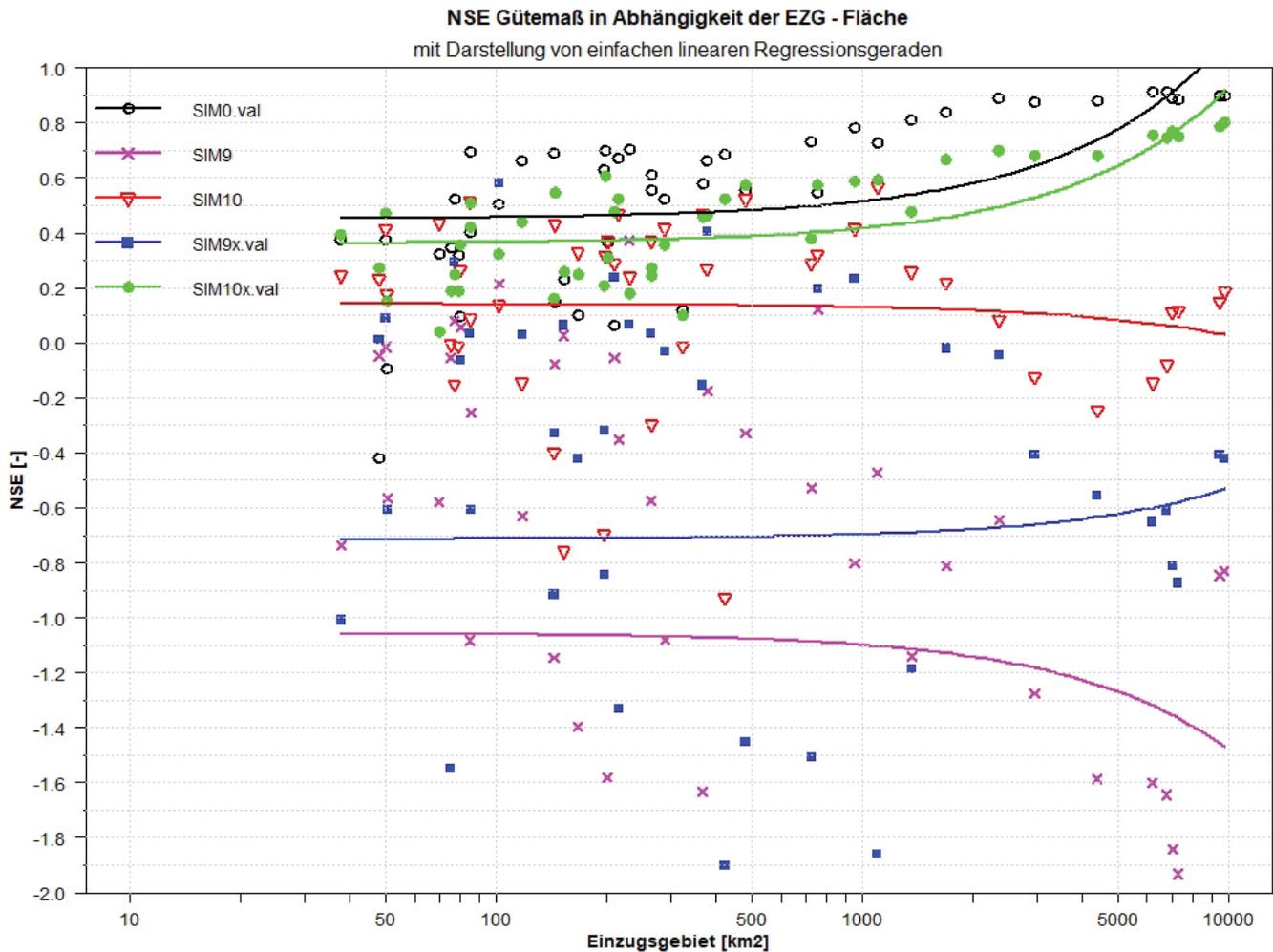


Abbildung 10

Abhängigkeit der Nash-Sutcliffe-Effizienz von der Einzugsgebietsgröße des jeweiligen Pegels, inkl. linearer Regressionsgerade für die einzelnen Modellläufe. Die Skalierung der Abszisse erfolgt aufgrund der Verteilung der Einzugsgebietsgrößen logarithmisch, weshalb die linearen Regressionsgeraden in Form einer gekrümmten Linie erscheinen.

Relationship between the Nash-Sutcliffe efficiency and the size of the catchment of the specific gauges, incl. a fitted linear regression line for every model run. The scaling of the abscissa is logarithmic due to the distribution of the catchment sizes, so the linear regression lines appear curved.

4.2.4 Erzielte Modellgüte an ausgewählten Pegeln

In Tabelle 7 wird die erzielte NSE-Modellgüte der vier selektierten Pegel sowie der ungewichtete Mittelwert aller 46 Pegel aufgelistet.

Bei einem negativen NSE würde der Mittelwert aller Abflussbeobachtungen eine höhere Modellgüte als die durchgeführte Simulation erzielen. Diese Konstellation ist beim Modelllauf SIM9 sowie auch beim rekalierten Modelllauf SIM9x.val bei Betrachtung des ungewichteten Mittelwertes laut Tabelle 7 zutreffend. Daher kann an dieser Stelle die Aussage getroffen werden, dass mit qualitativ schlechten Eingangsdaten selbst durch eine Rekaliierung des Parameterfeldes keine zufriedenstellende Modellgüte erreicht werden kann. Von SIM10 auf SIM10x.val ist hingegen eine deutliche Verbesserung der Modellgüte erkennbar. Begründet werden kann dies in erster Linie durch die Reduzierung des Abflussdefizites aufgrund des Niederschlagsdefizites des zugrundeliegenden alternativen Datensatzes GSMaP GC durch die Rekaliierung des Parameterfeldes (Tab. 8). So steigt der ungewichtete NSE-Mittelwert aller 46 Pegel gemäß Tabelle 7

von 0,12 auf 0,44. Die Referenzsimulation SIM0.val kann zum Vergleich in der Validierungsphase ein ungewichtetes NSE-Mittel von 0,55 aufweisen. Auffällig ist beim Modelllauf SIM10x der große NSE-Spread zwischen Kalibrierungsphase (NSE = 0,66) und Validierungsphase (NSE = 0,18) am Pegel "Neuberg an der Mürz". An den anderen drei ausgewählten Pegeln ist der Spread bei diesem Modelllauf deutlich geringer. Scheinbar wird bei diesem verhältnismäßig kleinen Kopfeinzugsgebiet der Niederschlag nicht ausreichend genau vom alternativen Datensatz GSMaP GC abgebildet. Bei der Referenzsimulation SIM0 ist der NSE-Spread zwischen Kalibrierungs- und Validierungsphase an allen vier ausgewählten Pegeln gering (maximal 0,87 – 0,78 = 0,09 beim Pegel "Kendlbruck"). Der größere Spread beim ungewichteten Mittelwert von 0,14 (0,69 – 0,55) dient aber als Hinweis, dass nicht an allen 46 Pegeln der Spread so gering wie an den vier ausgewählten Pegeln ausfällt.

In der Tabelle 8 wird der prozentuelle Fehler (pBias) zwischen simuliertem und beobachtetem Abfluss an ausgewählten Pegeln sowie das ungewichtete Mittel aller 46 Pegel dargestellt.

Tabelle 7
Auflistung der erreichten Nash-Sutcliffe-Effizienz an ausgewählten Pegeln inkl. ungewichteter Mittel aller 46 Pegel. Ungewichtet bedeutet in diesem Fall, dass die einzelnen Pegel unabhängig von der jeweiligen Einzugsgebietsgröße gleich stark gewichtet werden. Farbskala reicht von $\leq 0,0$ (dunkelrot) über 0,5 (weiß) zu 1,0 (dunkelgrün).
List of achieved Nash-Sutcliffe efficiency at selected gauges incl. unweighted mean of all 46 gauges. Unweighted means that the individual gauges are equally weighted, regardless of the size of the catchment area. Color scale ranges from ≤ 0.0 (dark red) over 0.5 (white) to 1.0 (darkgreen).

Pegel	SIM0	SIM0	SIM9	SIM10	SIM9x	SIM9x	SIM10x	SIM10x
	.cal	.val			.cal	.val	.cal	.val
Kendlbruck	0.87	0.78	-0.80	0.42	0.40	0.12	0.72	0.59
Neuburg a. d. Mürz	0.71	0.71	0.37	0.24	0.49	0.07	0.66	0.18
Bruck u. Mürz	0.92	0.91	-1.60	-0.15	-0.09	-0.65	0.82	0.75
Mureck	0.90	0.90	-0.83	0.19	0.23	-0.42	0.84	0.80
Ungew. Mittelwert aller 46 Pegel	0.69	0.55	-1.12	0.12	0.10	-0.69	0.56	0.44

Tabelle 8
Auflistung der pBias-Werte (%) an ausgewählten Pegeln sowie des ungewichteten Mittels aller 46 Pegel in Prozent. Farbskala von ≤ -20 % (rot) über 0,0 (grün) zu $\geq +20$ % (rot), lt. SCHULZ et al. (2016) liegt der pBias für ein zufriedenstellendes Ergebnis bei maximal ± 20 %. Positive pBias-Werte sind ein Hinweis auf einen modellierten systematischen Abflussüberschuss und umgekehrt. Bei den ungewichteten Mittelwerten ist zu beachten, dass hohe positive und hohe negative pBias-Werte durch die ungewichtete Mittelung auch aufgehoben werden können.
List of pBias values (%) at selected gauges as well as the unweighted mean of all 46 gauges. Color scale from ≤ -20 % (red) over 0.0 (green) to $\geq +20$ % (red), the pBias for a satisfactory modelling result is ± 20 % according to SCHULZ et al. (2016). Positive pBias values indicate a systematic discharge simulation surplus and vice versa. It should be noted that high positive and high negative bias values can also be eliminated by the unweighted averaging.

Pegel	SIM0	SIM0	SIM9	SIM10	SIM9x	SIM9x	SIM10x	SIM10x
	.cal	.val			.cal	.val	.cal	.val
Kendlbruck	-7.9	-13.4	36.5	-39.9	28.1	25.6	-18.5	-17.8
Neuburg a. d. Mürz	-29.8	-11.9	0.1	-55.2	-0.6	3.6	-32.3	-30.2
Bruck u. Mürz	2.5	0.9	58.2	-49.9	44.9	48.6	-5.5	-4.9
Mureck	7.8	6.2	50.9	-40.1	37.0	43.5	-0.3	-2.8
Ungew. Mittelwert aller 46 Pegel	13.6	14.9	43.4	-30.7	32.9	46.9	-0.4	-1.8

Überraschenderweise kann laut Tabelle 8 der rekali-brierte Modelllauf SIM10x.val im Mittel mit -1,8 % geringere Fehler in der Abflussbilanz als die Referenzsimulation SIM0.val mit +14,9 % erzielen. Beim Vergleich von SIM10 mit SIM10x.val zeigt sich wiederum eindeutig die positive Auswirkung der Rekalibrierung des Parameterfeldes. So kann der ungewichtete Mittelwert aller 46 Pegel von -30,7 % (SIM10) auf -1,8 % (SIM10x.val) verringert werden. Im Anbetracht der pBias-Werte von SIM10x an den drei ausgewählten Pegeln an der Mur (Kendlbruck, Bruck unter Mürz sowie Mureck) kann zudem eine Verringerung des systematischen Abflussdefizites mit zunehmendem Fließverlauf der Mur festgestellt werden. Von SIM9 auf SIM9x.val ist keine nennenswerte Verbesserung des Fehlers in der Abflussbilanz durch die Rekalibrierung erkennbar. Die relativ guten Ergebnisse von SIM9 bzw. SIM9x am Pegel "Neuberg an der Mürz" können mit dem Niederschlagsüberschuss des zugrundeliegenden alternativen Datensatzes CFSv2: NCEP gegenüber INCA in dieser Region (Abb. 4, CFSv2: NCEP/INCA) begründet werden.

4.2.5 Auswertung der mittleren monatlichen Abflusshöhen

In der Abbildung 11 erfolgt eine Aggregation der Abflüsse zu mittleren monatlichen Abflusshöhen für den Untersuchungszeitraum 1. Januar 2003 bis 31. Dezember 2012. Anhand dieser Auswertung lassen sich systematische Fehler in der Abflussbilanz der verschiedenen Modellläufe erkennen.

Das Niederschlagsdefizit des alternativen Datensatzes GSMaP GC sowie der Niederschlagsüberschuss von CFSv2: NCEP (Abb. 3,

Abb. 4) spiegelt sich auch in der Abbildung 11 wider, wo die Modellläufe SIM9 bzw. SIM10 deutliche mittlere monatliche Abweichungen zur Observation aufweisen. Durch die Rekalibrierung können vor allem die mittleren monatlichen Abflussdefizite von SIM10 stark reduziert werden (SIM10 auf SIM10x). Bei allen vier Pegeln kann eine Angleichung der mittleren monatlichen Abflusshöhen von SIM10x an jene der Referenzsimulation SIM0 bzw. der Observation festgestellt werden. In der Abbildung 11 zeigt sich zudem die Erkenntnis aus dem Kapitel 4.2.4, wonach die Modellläufe SIM9 sowie SIM9x mit dem zugrundeliegenden alternativen Datensatz für den Niederschlag CFSv2: NCEP am Pegel "Neuberg an der Mürz" in Bezug auf die Abflussbilanz die besten Ergebnisse erzielen können, während die anderen Modellläufe an diesem Pegel starke Abflussdefizite aufweisen.

4.2.6 Auswertung von Hochwasserereignissen

Im Hinblick auf eine Hochwasserprognose ist die Analyse der simulierten Abflussganglinie vor allem in Zeiten rund um ein observiertes Hochwasserereignis von Interesse. Am relevantesten ist dabei die korrekte Abbildung der Dynamik des ansteigenden Astes sowie des Scheitelwertes und dessen Zeitpunkt des Auftretens. An jedem der vier ausgewählten Pegel wird daher der Zeitraum um den größten beobachteten Abflusswert im Untersuchungszeitraum in Abbildung 12 dargestellt.

Wie in der Einleitung beschrieben, werden N-A-Modellierungen oft für den Zweck der Hochwasserprognose verwendet. Anhand der Abbildung 12 kann die Leistungsfähigkeit der

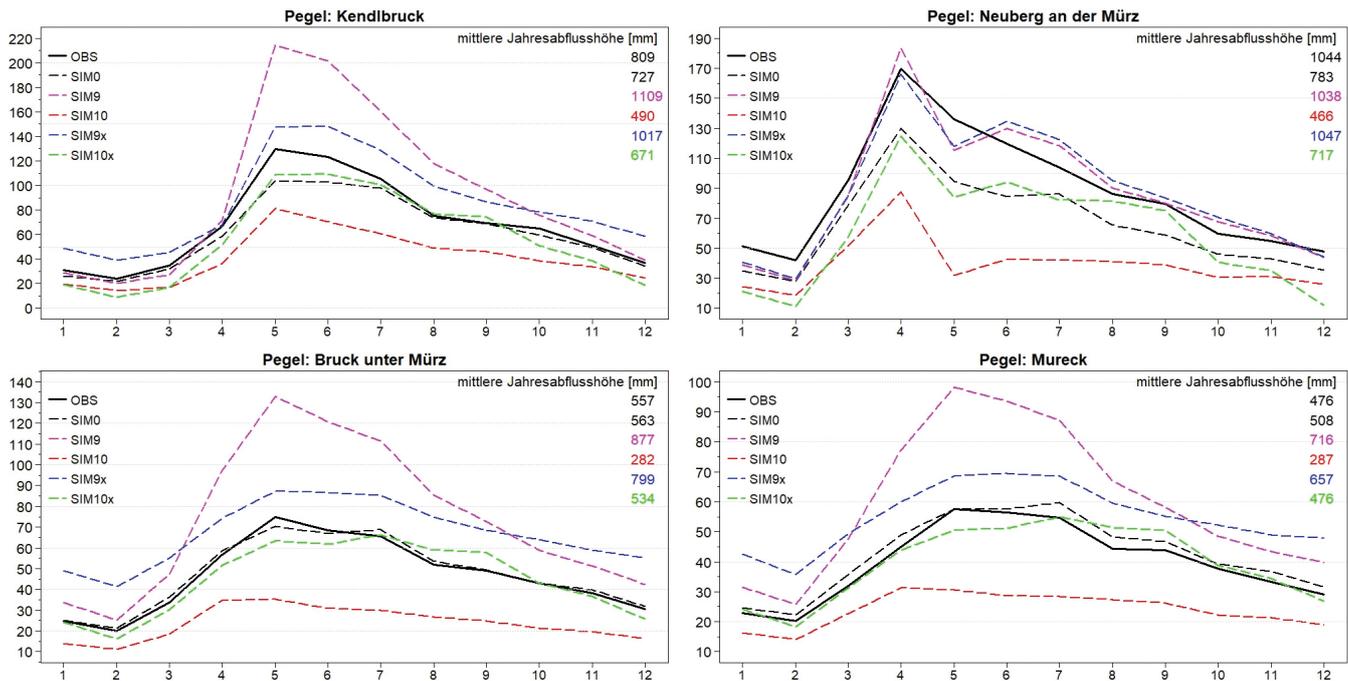


Abbildung 11

Darstellung der mittleren monatlichen Abflusshöhen in [mm] an vier ausgewählten Pegeln von der Beobachtung (OBS) als auch der verschiedenen Simulationsläufe (SIM). Referenz sind dabei die beobachteten Abflusswerte, welche mit dem Kürzel "OBS" gekennzeichnet sind. An der oberen rechten Seite eines jeden Plots ist zusätzlich die korrespondierende mittlere Jahresabflusshöhe angeführt.

Illustration of the mean monthly runoff depths in [mm] at four selected gauging stations showing the observation (OBS) as well as of the different simulation runs (SIM). Reference are the observed discharges, which are marked with the abbreviation "OBS". In the upper right-hand corner of each plot of the panel the corresponding mean annual runoff depths are shown.

N-A-Modellierung rund um das größte beobachtete Hochwasser am jeweiligen Pegel illustriert werden. Wie bei der Untersuchung der mittleren monatlichen Abflusshöhen (Abb. 11) können die Referenzsimulation SIM0 sowie mit einem geringen Abschlag auch die rekali­brierte Simulation SIM10x die besten Ergebnisse an den ausgewählten Pegeln erzielen. Bemerkenswert ist beim Modelllauf SIM10x die recht genaue Abbildung des größten Hochwasserereignisses am Pegel "Kendlbruck". Der Scheitelwert, der Zeitpunkt des Scheitelwertes sowie die Dynamik vor und nach dem Scheitelwert werden nahezu ideal mit diesem Modelllauf abgebildet. Bei der Referenzsimulation SIM0 wird bei den untersuchten vier Pegeln der Zeitpunkt des Scheitelwertes immer recht gut getroffen, während der Modelllauf SIM10x den Scheitelwert beim Pegel "Mureck" um rund 12 Stunden zu früh prognostiziert. Durch die Rekalibrierung des Parameterfeldes konnte bei SIM10 (auf SIM10x) das Modellverhalten rund um die untersuchten Hochwasserereignisse deutlich verbessert werden. Von SIM9 auf SIM9x ist hingegen durch die Rekalibrierung an den untersuchten Pegeln eine Verschlechterung beobachtbar. Dies kann dadurch begründet werden, dass in diesem Fall mit der Rekalibrierung die Verdunstung erhöht wurde, um den systematischen Abflussüberschuss von SIM9 (auf SIM9x) abzuschwächen (Abb. 11).

Bei der Interpretation der Abbildung 12 ist zu beachten, dass der Zeitpunkt des größten Hochwasserereignisses am Pegel "Neuberg an der Mürz" sowie am Pegel "Mureck" noch in der Kalibrierungsphase der N-A-Modellierung liegt. Ein vergleichbares Bild wie beim größten Hochwasserereignis, speziell mit der recht passablen Modellierung von Hochwasserwellen mit der

Referenzsimulation SIM0 sowie mit dem rekali­brierten Modelllauf SIM10x, zeigt sich bei den ausgewählten Pegeln auch beim zweit- sowie drittgrößten beobachteten Hochwasserereignis im Untersuchungszeitraum.

4.3 Transferabilität der Methode

An dieser Stelle ist anzumerken, dass die Untersuchungen im Einzugsgebiet der österreichischen Mur für einen spezifischen Untersuchungszeitraum durchgeführt wurden. Die Übertragbarkeit der in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse auf andere Regionen ist daher nur beschränkt möglich und sollte nur unter Beachtung der geänderten Rahmenbedingungen erfolgen. So stellt beispielsweise das N-A-Modell COSERO tendenziell bei abflussdominierten Einzugsgebieten (EZG der österr. Mur) eine höhere Modellgüte als bei verdunstungsdominierten Einzugsgebieten bereit (SCHULZ et al., 2016). Des Weiteren weisen einige alternative Datensätze in Bezug auf den Niederschlag nur deshalb geringe Abweichungen zum INCA-Datensatz auf, da diese an terrestrische Messstationen angepasst werden ("gauge corrected"). Daher sollte bei Verwendung dieser Alternativdatensätze immer die zugrundeliegende Messnetzdichte sowie die Qualität der Stationswerte in der betreffenden Region untersucht werden. Im Rahmen dieser Arbeit konnte zudem beobachtet werden, dass bei einer N-A-Modellierung eine solide Basis­kalibrierung notwendig ist, sowie mit einer Rekalibrierung des Modellparameterfeldes die erzielte Modellgüte teilweise deutlich verbessert werden kann. Für eine Kalibrierung sind allerdings Pegel­daten (observierte Abflüsse) mit entsprechend langen Aufzeichnungszeiträumen und einer ausreichenden Messqualität im betreffenden Einzugsgebiet erforderlich. Diese

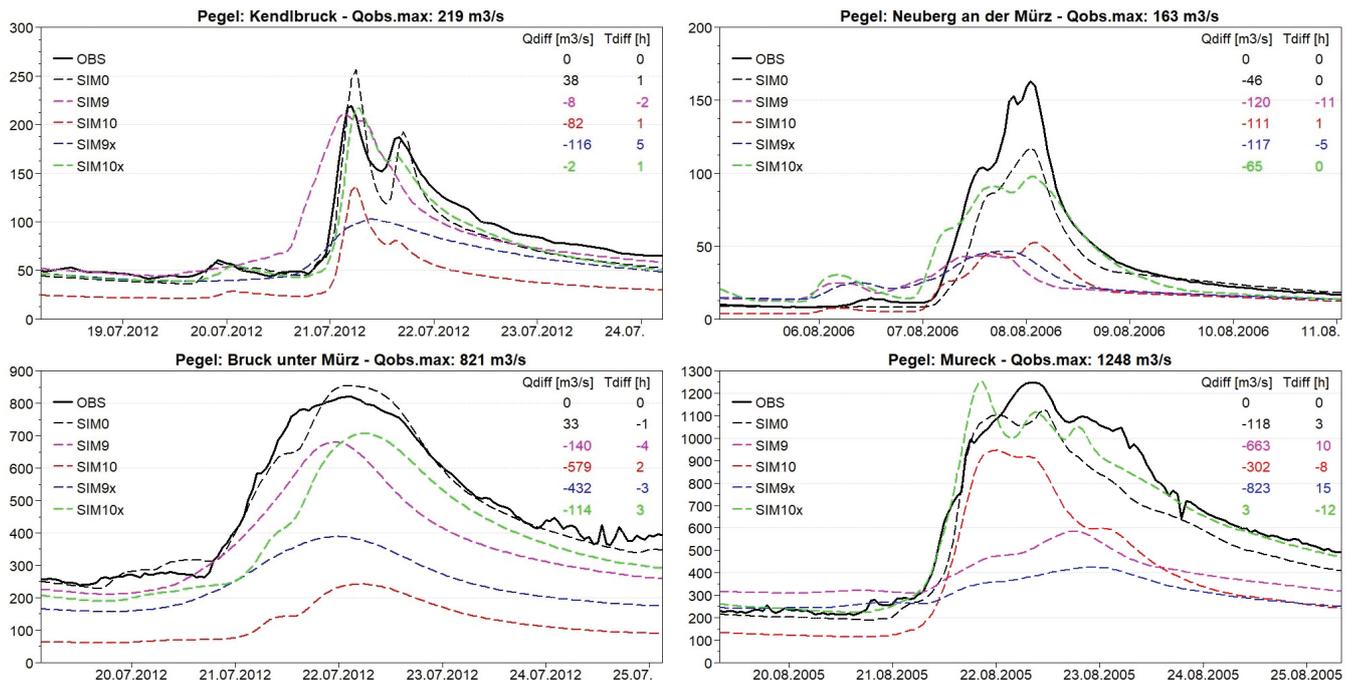


Abbildung 12

Darstellung der Hydrographen in $[m^3/s]$ an vier ausgewählten Pegeln von der Beobachtung (OBS) als auch der verschiedenen Simulationsläufe (SIM) zum Zeitpunkt des größten Hochwasserereignisses im Untersuchungszeitraum. An der oberen rechten Seite der Plots wird die Scheitelwertabweichung (Qdiff) sowie die stündliche Zeitverschiebung zum beobachteten maximalen Abflusswert (Tdiff) aufgelistet. Positive Werte deuten dabei auf ein zu großes bzw. ein zu spätes modelliertes Abflussmaximum hin.

Hydrographs in $[m^3/s]$ at four selected gauging stations showing the observation (OBS) as well as the different simulation runs (SIM) at the moment of the largest flood event in the investigation period. In the upper right side of the plots the peak value deviations (Qdiff) as well as the hourly time shifts compared to the observed maximum discharge value (Tdiff) are shown. Positive values indicate a too large or too late simulated discharge peak.

Daten sind in entlegenen Regionen allerdings oftmals nicht verfügbar.

Bei Übertragung auf andere Regionen und Klimaten sollten zudem relevante Vorarbeiten (BECK et al., 2017; CAMICI et al., 2018; CHOI et al., 2009; DUETHMANN et al., 2013; EL-SADEK et al., 2011; ESSOU et al., 2017; FUKA et al., 2014; MAZZOLENI et al., 2019; NKIAKA et al., 2017; SHARIFI et al., 2019; TAREK et al., 2020; UNIYAL et al., 2019) in Betracht gezogen werden, welche zusätzliche Anhaltspunkte geben. Bei diesen Vorarbeiten werden auch andere interessante Alternativdatensätze wie z. B. MSWEP V2 (BECK, 2017) oder ERA5 (COPERNICUS, 2017) untersucht, welche allerdings zum Zeitpunkt der Ausarbeitung dieser Arbeit noch nicht auf "Google Earth Engine" verfügbar waren und daher auch nicht in die vorliegende Untersuchung einbezogen worden sind. MAZZOLENI et al. (2019) berichten im Rahmen der großskaligen Untersuchung von einer unterschiedlichen Performance mit den individuellen Alternativdatensätzen bei verschiedenen Einzugsgebietscharakteristika. BECK et al. (2017) hingegen präferieren in den meisten Fällen den Alternativdatensatz MSWEP V2. TAREK et al. (2020) konnten mit dem Datensatz ERA5 relativ gute Modellergebnisse in nordamerikanischen Einzugsgebieten erzielen. Der Alternativdatensatz GSMaP GC, welcher in dieser Untersuchung brauchbare Ergebnisse erzielen konnte, wurde bei den gelisteten Vorarbeiten allerdings nicht einbezogen. Daher und auch aufgrund der unterschiedlichen Ausgangsvoraussetzungen (z. B. zeitliche Auflösung der hydrologischen Modelle) ist ein direkter Vergleich schwierig.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

Die Plattform "Google Earth Engine" ist eine auf Cloud-Computing basierende Anwendung und stellt eine umfangreiche, wenn auch nicht vollständige, Sammlung an Datensätzen aus Fernerkundung und Reanalyse unterschiedlicher Anbieter auf einer einheitlichen Plattform zur Verfügung. Mit "Google Earth Engine" ist die zeiträumliche Extraktion und die generelle Bearbeitung dieser oftmals speicher- und rechenintensiven Datensätze (z. B. Satellitenbilder, andere Geo- und Beobachtungsdaten) bedeutend einfacher geworden.

Diese Plattform wurde dabei in dieser Untersuchung verwendet, um global verfügbare meteorologische Alternativdatensätze für die Implementierung in ein bestehendes N-A-Modell zu extrahieren. In weiterer Folge hat sich gezeigt, dass Alternativdatensätze, welche zwar die längerfristige Klimatologie gut abbilden (CHIRPS daily v2), bei der N-A-Modellierung nicht die besten Ergebnisse bereitstellen müssen. Grund dafür ist die zeitliche Auflösung insbesondere der Niederschlags-Datensätze, welche eine wesentliche Rolle für eine gute Performance bei der N-A-Modellierung spielt. Daher zeigten sich die besten Modellierungsergebnisse, abseits des Referenzmodelllaufes mit den lokalen INCA-Daten, bei jenen Simulationen, welche den stationsangepassten Niederschlagsdatensatz GSMaP GC verwenden. Etwaige Niederschlagsdefizite dieses Alternativdatensatzes konnten dabei durch die Rekalibrierung des Parameterfeldes des hydrologischen Modells vermindert werden. Speziell an Pegeln mit größeren Einzugs-

gebieten ($> 1.000 \text{ km}^2$) konnte mit diesem Alternativdatensatz eine Modellgüte erreicht werden, welche nur geringfügig unter jener der Referenzsimulation liegt. Im Hinblick auf die für wasserwirtschaftliche Fragestellungen überaus wichtige Abflussbilanz konnten mit diesem Alternativdatensatz teilweise sogar geringere Fehler (Bias) erreicht werden als mit dem lokalen INCA-Datensatz. In Anbetracht der im Vergleich zu INCA größeren Auflösung des Alternativdatensatzes GSMaP GC werden damit auch Hochwasserereignisse an Pegeln mit größeren Einzugsgebieten überraschend gut abgebildet.

Bei der Untersuchung zeigte der Ansatz nach THORNTHWAITE & MATHER (1957) gegenüber dem Alternativdatensatz GLDAS 2.1 eine bessere klimatologische Abbildung der potenziellen Evapotranspiration. Für diesen Ansatz müssen aber langjährige mittlere monatliche Lufttemperaturen zonenweise und flächendeckend im Projektgebiet vorliegen. Bezüglich der Lufttemperatur können beide Alternativdatensätze die langfristige Klimatologie ausreichend genau abbilden. Bei der N-A-Modellierung ermöglicht der Datensatz GLDAS 2.1 aber geringfügig bessere Ergebnisse aufgrund der höheren zeitlichen Auflösung gegenüber CFSv2: NCEP.

Aufgrund der dynamischen Entwicklungen auf dem Gebiet der Fernerkundung und Reanalyse darf künftig von einer weiteren Verbesserung der zeiträumlichen Auflösungen sowie der Genauigkeit der erfassten bzw. berechneten Messgrößen ausgegangen werden. Doch selbst bei dieser Dynamik ist davon auszugehen, dass bei Datensätzen aus Fernerkundung und Reanalyse noch länger Messwerte von lokalen Bodenstationen zwecks Qualitätssteigerung einbezogen werden müssen. Zusätzlich wird das terrestrische Messnetz für die Kalibrierung der Fernerkundungsdaten benötigt. Zumindest bei der vorliegenden Arbeit waren alle brauchbaren Niederschlags-Datensätze auf terrestrische Stationsdaten angewiesen.

Zusammenfassend kann auf Basis der analysierten Daten im Projektgebiet der österreichischen Mur festgehalten werden, dass sich ausgewählte Alternativdatensätze aus Fernerkundung und Reanalyse für die Abbildung der Klimatologie als auch für die Implementierung in ein hydrologisches Modell durchaus eignen. Zu beachten sind allerdings die Rahmenbedingungen dieser Fallstudie, welche bei Transfer der untersuchten Methode auf andere Regionen und Klimaten eventuell nicht mehr zutreffen.

Conclusion

"Google Earth Engine" is an application based on cloud computing and provides a broad, but not complete, collection of datasets derived from remote sensing and reanalysis of different providers on a uniform platform. With this platform, the time-space extraction and general processing of these often storage-intensive datasets has also become significantly easier.

This platform was used to extract relevant global, alternative meteorological datasets for the implementation in an existing R-R model. It could be shown that the alternative datasets, which represent the long-term climatology well (CHIRPS daily v2), do not necessarily provide the best results in R-R modelling. The reason is the temporal resolution of the precipitation dataset, which is essential for good performance in R-R modelling, especially in an alpine region. The best modelling results were achieved in those

runs, in which the gauge corrected precipitation dataset GSMaP GC was used, of course aside from the reference model run with the local INCA data. Precipitation deficits of this alternative dataset could be reduced by recalibrating the parameters of the hydrological model. The application of the GSMaP GC dataset enabled model qualities which are only slightly below those of the reference simulation, especially at gauges with larger catchment areas ($> 1,000 \text{ km}^2$). Regarding the runoff balance, which is an important factor for water management issues, a lower bias could be achieved with this alternative dataset compared to the local INCA dataset. GSMaP GC also showed a surprisingly good representation of flood events at gauges with larger catchment areas.

The approach of THORNTHWAITE & MATHER (1957) showed a better climatological representation of the potential evapotranspiration than the alternative dataset GLDAS 2.1. But this approach requires the availability of long-term average monthly air temperatures. Regarding the air temperature, both alternative datasets can represent the long-term climatology with sufficient accuracy. In case of R-R simulations, however, GLDAS 2.1 allows slightly better results due to the higher temporal resolution compared to CFSv2: NCEP.

Due to the dynamic developments in the field of remote sensing, a further improvement of the spatiotemporal resolution as well as the accuracy of the measured variables can be expected in the future. However, it can be assumed that valuable alternative datasets from remote sensing and reanalysis will include measured values from local ground stations for a while longer. Data from ground stations are also necessary for calibration of remote sensing data and cannot be substituted. At least all beneficial precipitation datasets in this investigation were dependent on terrestrial station data.

Based on the analysed data in the project area of the Austrian Mur, it can be summarised that selected alternative datasets from remote sensing and reanalysis are quite suitable for mapping climatology as well as for driving a hydrological model. Nevertheless, it is important to consider the conditions of this case study, which might not be valid if the concept is transferred to other regions and climates.

Anmerkungen

Grundlage dieser Fallstudie ist eine gleichnamige Masterarbeit (KLINGLER, 2020), in welcher zusätzliche Untersuchungen, wie beispielsweise eine Anpassung und lokale Korrektur der alternativen Datensätze, durchgeführt worden sind. Auf Anfrage können die Scripts für "Google Earth Engine", mit welchen die zeiträumliche Extraktion der rasterbasierten Alternativdaten erfolgte, gerne zur Verfügung gestellt werden.

Danksagung

Zu danken ist den beiden Gutachtern für ihre konstruktiven Kommentare, welche zu einer wesentlichen Verbesserung des Artikels beigetragen haben. Ein Dankeschön gilt auch dem redaktionellen Team rund um Herrn Dr. Lüllwitz für die reibungslose Zusammenarbeit.

Anschriften der Verfasser

Dipl.-Ing. Christoph Klingler
christoph.klingler@boku.ac.at

Assoc.Prof. Dr. Matthias Bernhardt

Dipl.-Ing. Johannes Wesemann

Univ.Prof. Dipl.Geoökol. Dr.rer.nat. Karsten Schulz

Dipl.-Ing. Dr.nat.techn. Mathew Herrnegger
mathew.herrnegger@boku.ac.at

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft (HyWa)
Muthgasse 18, A-1190 Wien

Literaturverzeichnis

- ABRAMS, M., HOOK, S., & RAMACHANDRAN, B. (2002): Advanced Space Thermal Emission and Reflection Radiometer, ASTER User Handbook. -https://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_user_guide_v2.pdf, Zugriff am: 02.05.2019.
- AONASHI, K., AWAKA, J., HIROSE, M., KOZU, T., KUBOTA, T., LIU, G., SHIGE, S., KIDA, S., SETO, S., TAKAHASHI, N., & TAKAYABU, Y.N. (2009): GSMaP passive, microwave precipitation retrieval algorithm: Algorithm description and validation. - *Journal of Meteor. Soc. Japan* 87A, 119-136 pp.
- ARSENAULT, R., POULIN, A., COTE, P., & BRISSETTE, F. (2014): Comparison of Stochastic Optimization Algorithms in Hydrological Model Calibration. - *Journal of Hydrologic Engineering* 19 (7), 1374-1384 pp.
- ASCE-EWRI (2005): The ASCE standardised reference evapotranspiration equation. - ASCE-EWRI Task Committee Report.
- BECK, H.E., VERGOPOLAN, N., PAN, M., LEVIZZANI, V., VAN DIJK, A.I.J.M., WEEDON, G.P., BROCCA, L., PAPPENBERGER, F., HUFFMAN, G.J., & WOOD, E.F. (2017): Global-scale evaluation of 22 precipitation datasets using gauge observations and hydrological modeling. - *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 21, 6201-6217 pp.
- BECK, H.E. (2017): MSWEP Version 2 documentation. - Tech. rep., Princeton University, www.gloh2o.org, Zugriff am: 08.05.2020.
- BERGSTRÖM, S. (1992): The HBV model – its structure and applications. - SMHI Reports RH No. 4.
- BEVEN, K.J. (2011): Rainfall-runoff modelling: The Primer. - John Wiley & Sons.
- BURGHOLZER, R. (2017): Comparison of manual and automatic Parameter Calibration of the R-R-model COSERO for the Mur Catchment. - Masterarbeit am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, 240 pp.
- BMLFUW (2007): Hydrologischer Atlas Österreichs (digHAO), 3. Lieferung, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- CAMICI, S., CIABATTA, L., MASSARI, C., & BROCCA, L. (2018): How reliable are satellite precipitation estimates for driving hydrological models: A verification study over the Mediterranean area. - *Journal of Hydrology* 563, 950-961 pp.
- CHG (2019): CHIRPS. - <http://legacy.chg.ucsb.edu/data/chirps/#plus8>, Zugriff am: 27.11.2019.
- CHOI, W., KIM, S.J., RASMUSSEN, P.F., & MOORE, A.R. (2009): Use of the North American Regional Reanalysis for Hydrological Modelling in Manitoba. - *Canadian Water Resources Journal* 34, 17-36 pp.
- COPERNICUS (2017): ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. - Dokumentation, Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>, Zugriff am: 08.05.2020.
- DUETHMANN, D., ZIMMER, J., GAFUROV, A., GÜNTNER, A., KRIEGEL, D., MERZ, B., & VOROGUSHYN, S. (2013): Evaluation of areal precipitation estimates based on downscaled reanalysis and station data by hydrological modelling. - *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17, 2415-2434 pp.
- EDER, G., FUCHS, M., NACHTNEBEL, H.P., & LOIBL, W. (2005): Semi-distributed modelling of the monthly water balance in an alpine catchment. - *Hydrological Processes* 19, 2339-2360 pp.
- EL-SADEK, A., BLEIWEISS, M., SHUKLA, M., GULDAN, S., & FERNALD, A. (2011): Alternative climate data sources for distributed hydrological modelling on a daily time step. - *Hydrological Processes* 25, 1542-1557 pp.
- ESSOU, G.R.C., BRISSETTE, F., & LUCAS-PICHER, P. (2017). Impacts of combining reanalyses and weather station data on the accuracy of discharge modelling. - *Journal of Hydrology* 545, 120-131 pp.
- FEIEL, D. (2018): Anwendung des mHM-Modells auf das Einzugsgebiet der Mur. - Masterarbeit am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, 193 pp.
- FEKETE, B.M., ROBERTS, R.D., KUMAGAI, M., NACHTNEBEL, H.P., ODADA, E., & ZHULIDOV, A.V. (2015): Time for in situ renaissance. *Science* 349 (6249), 685-686 pp.
- FUKA, D.R., WALTER, M.T., MACALISTER, C., DEGAETANO, A.T., STEENHUIS, T.S., & EASTON, Z.M. (2014). Using the Climate Forecast System Reanalysis as weather input data for watershed models. - *Hydrological Processes* 28, 5613-5623 pp.
- FUNK, C., PETERSON, P., LANDSFELD, M., PEDREROS, D., VERDIN, J., SHUKLA, S., HUSAK, G., ROWLAND, J., HARRISON, L., HOELL, A., & MICHAELSEN, J. (2015): The climate hazards infrared precipitation with stations-a new environmental record for monitoring extremes. - *Scientific Data* 2, Article Number: 150066 (2015).
- GEE NCEP (2020): CFSV2: NCEP Climate Forecast System Version 2, 6-Hourly Products, Dataset Description. - https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/NOAA_CFSV2_FOR6H, Zugriff am 05.05.2020.
- GPM (2014): Global Satellite Mapping of Precipitation (GSMaP) for GPM, Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD). - https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/algorithm/GSMaPforGPM_20140902_E.pdf, Zugriff am: 02.05.2019.
- GORELICK, N., HANCHER, M., DIXON, M., ILYUSHCHENKO, S., THAU, D., & MOORE, R. (2017): Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. - *Remote Sensing of Environment* 202, 18-27 pp.
- GUPTA, H.V., KLING, H., YILMAZ, K.K., & MARTINEZ, G.F. (2009): Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. - *Journal of Hydrology* 377 (1), 80-91 pp.
- HAIDEN, T., KANN, A., WITTMANN, C., PISTOTNIK, G., BICA, B., & GRUBER, C. (2011): The Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) System and Its Validation over the Eastern Alpine Region. - *Weather Forecast* 26, 166-183 pp.
- HAIDEN, T., & PISTOTNIK, G. (2009): Intensity-dependent parameterization of elevation effects in precipitation analysis. - *Advanced Geoscience* 20, 33-38 pp.
- HERRNEGGER, M., SENONER, T., & NACHTNEBEL, H.P. (2018): Adjustment of spatio-temporal precipitation patterns in a high Alpine environment. - *Journal of Hydrology* 556, 913-921 pp.
- HERRNEGGER, M., NACHTNEBEL, H.P., & Schulz, K. (2015a): From runoff to rainfall: inverse rainfall-runoff modelling in a high temporal resolution. - *Hydrology and Earth System Science* 19, 4619-4639 pp.
- HERRNEGGER, M., SENONER, T., KLOTZ, D., WESEMANN, J., NACHTNEBEL, H.P., & SCHULZ, K. (2015b): Rainfall-Runoff-Model COSERO. - Handbuch am Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur Wien, Österreich.

- HERRNEGGER, M., NACHTNEBEL, H.P., & HAIDEN, T. (2012): Evapotranspiration in high alpine catchments – an important part of the water balance! – *Hydrology Research* 43 (4), 460-475 pp.
- HERRNEGGER M., & NACHTNEBEL H. P. (2011): Wasserbilanzkomponente Verdunstung: Schätzung der vernachlässigten Größe mittels Verwendung hochaufgelöster meteorologischer Inputdaten für Österreich. – In: *Hydrologie & Wasserwirtschaft – von der Theorie Zur Praxis Beiträge zum Tag der Hydrologie*, Hrsg: Günter Blöschl und Ralf Merz.
- HUFFMAN, G.J. (2019): The Transition in Multi-Satellite Products from TRMM to GPM (TMPA to IMERG). – https://gpm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/TMPA-to-IMERG_transition_191101.pdf, Zugriff am: 14.05.2020.
- HUFFMAN, G.J., & BOLVIN, D.T. (2018): Real - Time TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis Data Set Documentation. – https://pmm.nasa.gov/sites/default/files/document_files/3B4XRT_doc_V7_180426.pdf, Zugriff am: 02.05.2019.
- HUFFMAN, G.J., ADLER, R.F., BOLVIN, D.T., GU, G., NELKIN, E.J., BOWMAN, K.P., HONG, Y., STOCKER, E.F., & WOLFF, D.B. (2007): The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: Quasi-Global, Multi-Year, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale. – *Journal of Hydrometeor.* 8 (1), 38-55 pp.
- JAXA (2017): GSMaP Product Format, Version 2.0. – Produktbeschreibung der Japan Aerospace Exploration Agency. https://www.eorc.jaxa.jp/GPM/doc/product/format/en/07.GPM_GSMaP_Product_Format_E.pdf, Zugriff am: 16.05.2019.
- KLEMEŠ, V. (1986): Operational testing of hydrological simulation models. – *Hydrological Sciences Journal* 31 (1), 13-24 pp.
- KLING, H., & NACHTNEBEL, H.P. (2009): A method for the regional estimation of runoff separation parameters for hydrological modelling. – *Journal of Hydrology* 364, 163-174 pp.
- KLING, H., STANZEL, P., & FUCHS, M. (2015): Performance of the COSERO precipitation – runoff model under non-stationary conditions in basins with different climates. – *Hydrological Sciences Journal* 60, 1374-1393 pp.
- KLINGLER, C. (2020): Niederschlags-Abfluss-Modellierung unter Einbeziehung von alternativen, globalen Datensätzen. – Masterarbeit am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, 198 pp.
- KLOTZ, D., HERRNEGGER, M., & SCHULZ, K. (2017): Symbolic Regression for the Estimation of Transfer Functions of Hydrological Models. – *Water Resour. Res.* 53 (11), 9402-9423 pp.
- LUDWIG-MAYERHOFER, W. (2019): Das lineare Regressionsmodell. – In: *Vorlesungsunterlagen Statistik*, Universität Siegen-Philosophische Fakultät. https://www.unisiegen.de/phil/sozialwissenschaften/soziologie/mitarbeiter/ludwig-mayerhofer/statistik/statistik_downloads/statistik_i_8_aktuell.pdf, Zugriff am: 25.06.2019.
- MASSMANN, C., KLOTZ, D., WESEMANN, J., HERRNEGGER, M., & SCHULZ, K. (2019): Impact of changes in spatial resolution on the performance of an operational distributed hydrological model. – *Forschungsbericht (in Ausarbeitung) des Institutes für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien im Auftrag der Verbund Trading GmbH.*
- MAZZOLENI, M., BRANDIMARTE, L., & AMARANTO, A. (2019): Evaluating precipitation datasets for large-scale distributed hydrological modelling. – *Journal of Hydrology* 578, 124076.
- MENG, C.J., HOUSER, P.R., MITCHELL, K., GAYNO, G., RODELL, M., JAMBOR, U., GOTTSCHALCK, J., COSGROVE, B., RADAKOVICH, J., ARSENAULT, K., BOSILOVICH, M., ENTIN, J.K., WALKER, J.P., & PAN, H. (2001): Implementation of the AFWA AGRMET Solar Radiation Scheme in GLDAS. – Abstract im Rahmen des American Geophysical Union Fall Meeting, Abstract ID: H31D-0268.
- MORIASI D.N., ARNOLD, J.G., VAN LIEW, M.W., BINGNER, R.L., HARMEL, R.D., & VEITH, T.L. (2007): Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. – *Transactions of the ASABE*, 885-900 pp.
- NACHTNEBEL, H.P., BAUMUNG, S., & LETTL, W. (1993): Abflußprognosemodell für das Einzugsgebiet der Enns und der Steyr. – Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und konstruktiven Wasserbau, Universität für Bodenkultur Wien, Österreich.
- NASH, J.E., & SUTCLIFFE, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles. – *Journal of Hydrology* 10, 282-290 pp.
- NKIAKA, E., NAWAZ, N., & LOVETT, J. (2017): Evaluating Global Reanalysis Datasets as Input for Hydrological Modelling in the Sudano-Sahel Region. – *Hydrology* 2017 4 (1), 13.
- OKAMOTO, K., IGUCHI, T., TAKAHASHI, N., IWANAMI, K., & USHIO, T. (2005): The global satellite mapping of precipitation (GSMaP) project. – in: *Tagungsband, 25th IGARSS Proceedings*, 3414-3416 pp.
- PENDERGRASS, A. (2016): The Climate Data Guide: GPCP (Daily): Global Precipitation Climatology Project. – <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcp-daily-global-precipitation-climatology-project>, Zugriff am: 12.03.2019.
- R CORE TEAM (2019): R: A language and environment for statistical computing. – R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- RODELL, M., HOUSER, P.R., JAMBOR, U., GOTTSCHALCK, J., MITCHELL, K., MENG, C.J., ARSENAULT, K., COSGROVE, B., RADAKOVICH, J., BOSILOVICH, M., ENTIN, J.K., WALKER, J.P., LOHMANN, D., & TOLL, D. (2004): The Global Land Data Assimilation System. – *Bulletin of the American Meteorological Society* 85 (3), 381-394 pp.
- SAHA, S., MOORTHI, S., WU, X., WANG, J., NADIGA, S., TRIPP, P., BEHRINGER, D., HOU, Y.T., CHUANG, H., IREDELL, M., EK, M., MENG, J., RONGQIAN, Y., MENDEZ, M.P., VAN DEN DOOL, H., ZHANG, Q., WANG, W., CHEN, M., & BECKER, E. (2014): The NCEP Climate Forecast System Version 2. – *Journal of Climate* 27, 2185-2208 pp.
- SAHA, S., MOORTHI, S., PAN, H.L., WU, X., WANG, J., NADIGA, S., TRIPP, P., KISTLER, R., WOOLLEN, J., BEHRINGER, D., LIU, H., STOKES, D., GRUMBINE, R., GAYNO, G., WANG, J., HOU, Y.T., CHUANG, H.J., JUANG H.M.H., SELA, J., IREDELL, M., TREADON, R., KLEIST, D., VAN DELST, P., KEYSER, D., DERBER, J., EK, M., MENG, J., WEI, H., YANG, R., LORD, S., VAN DEN DOOL, H., KUMAR, A., WANG, W., LONG, C., CHELLIAH, M., XUE, Y., HUANG, B., SCHEMM, J.K., EBISUZAKI, W., LIN, R., XIE, P., CHEN, M., ZHOU, S., HIGGINS, W., ZOU, C.Z., LIU, Q., CHEN, Y., HAN, Y., CUCURULL, L., REYNOLDS, R.W., RUTLEDGE, G., & GOLDBERG, M. (2010): The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. – *Bulletin of the American Meteorological Society* 91 (8), 1015-1058 pp.
- SCHAEFLI, B., & GUPTA, H.V. (2007): Do Nash values have value?. – *Hydrological Processes* 21, 2075-2080 pp.
- SCHÖSSWENDTER, J. (2018): Erprobung neuer Verfahren zur Abschätzung von Wiederkehrwahrscheinlichkeiten von Hochwasserereignissen Vergleich der Standard-Hochwasserberechnung nach BMLFUW mit der Upper Boundary-Hochwasserberechnung nach BOTERO und FRANCES. – Masterarbeit am Institut für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien, 84 pp.
- SCHULZ, K., HERRNEGGER, M., WESEMANN, J., KLOTZ, D., & SENONER, T. (2016): Kalibrierung COSERO-Mur für PROVIS. – Abschlussbericht des Institutes für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Universität für Bodenkultur Wien im Auftrag der Verbund Trading GmbH.
- SHARIFI, E., EITZINGER, J., & DORIGO, W. (2019): Performance of the State-Of-The-Art Gridded Precipitation Products over Mountainous Terrain: A Regional Study over Austria. – *Remote Sensing* 2019 11 (17), 2018.
- STANZEL, P., KAHL, B., & HABERL, U. (2008): Continuous hydrological modelling in the context of real time flood forecasting in alpine Danube tributary catchments. – *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 4 (1): 012005.

- TAREK, M., BRISSETTE, F.P., & ARSENAULT, R. (2020): Evaluation of the ERA5 reanalysis as a potential reference dataset for hydrological modelling over North America. – *Hydrology and Earth System Sciences* 24 (5), 2527-2544 pp.
- THORNTHWAITE, C.W., & MATHER, J.R. (1957): Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. – *Publ. Climatol.* 10 (3), 311 pp.
- TOLSON, B.A., & SHOEMAKER, C.A. (2007): Dynamically dimensioned search algorithm for computationally efficient watershed model calibration. – *Water Resources Research* 43, W01413.
- UNIYAL, B., DIETRICH, J., VU, N.Q., JHA, M.K., & ARUMÍ, J.L., (2019): Simulation of regional irrigation requirement with SWAT in different agro-climatic zones driven by observed climate and two reanalysis datasets. – *Science of The Total Environment* 649, 846-865 pp.
- USGS (2018): Streamgage history. - <https://water.usgs.gov/nsip/history.html>, Zugriff am: 19.09.2018.
- WESEMANN, J., HOLZMANN, H., SCHULZ, K., & HERRNEGGER, M. (2018a): Behandlung künstlicher Speicher und Überleitungen in der alpinen Niederschlags-Abfluss-Vorhersage. – *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 70 (9-10), 485-496 pp.
- WESEMANN, J., HERRNEGGER, M., & SCHULZ, K. (2018b): Hydrological modelling in the anthroposphere: predicting local runoff in a heavily modified high-alpine catchment. – *Journal of Mountain Sciences* 15 (5), 921-938 pp.
- WORLDBANK (2018): Assessment of the state of hydrological services in developing countries. – https://www.gfdr.org/sites/default/files/publication/state-of-hydrological-services_web.pdf, Zugriff am: 19.09.2018.