

Kalibrierung und Validierung eines Wasserhaushalts- und Wärmemodells zur Simulation von Fließgewässertempera- turen

Calibration and Validation of a Water Balance and Heat Model for the Simulation of River Temperatures

Masterarbeit im Studiengang M.Sc. Umweltingenieurwissenschaften

von Ole Bay (Matrikelnummer: 2853381)

Tag der Einreichung: 22.07.2023

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. habil. Boris Lehmann

Ansprechperson: M.Sc. Steve Borchardt

Ansprechperson: M.Sc. Jessika Gappisch

Darmstadt



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



WASSERBAU
HYDRAULIK

Fachbereich Bau- und
Umweltingenieurwissen-
schaften

Institut Wasserbau &
Wasserwirtschaft

Fachgebiet Wasserbau und
Hydraulik

Kalibrierung und Validierung eines Wasserhaushalts- und Wärmemodells zur Simulation von Fließgewässertemperaturen

Calibration and Validation of a Water Balance and Heat Model for the Simulation of River Temperatures

Masterarbeit von Ole Bay

Korrigierte Fassung vom 14.10.2023

Veröffentlicht unter CC-BY 4.0 International
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



Master-Arbeit für Herrn Ole BAY (Matr.-Nr. 2853381)

Kalibrierung und Validierung eines Wasserhaus- halts- und Wärmemodells zur Simulation von Fließgewässertemperaturen

Calibration and Validation of a Water Balance and Heat Model for the Simulation of River Temperatures

Veranlassung und Thema

Die natürliche Wassertemperatur der Fließgewässer ist durch die wasserwirtschaftliche Nutzung anthropogen überprägt, was sich auf eine Vielzahl biologischer, physikalischer und chemischer Prozesse in Fließgewässern auswirkt. Künftige Wärmeeinträge durch Klimaveränderungen können die bereits thermisch gestressten aquatischen Ökosysteme zunehmend gefährden und zur Einschränkung anthropogener Nutzungen führen. Um das Ausmaß der erwarteten Veränderungen der Fließgewässertemperaturen durch eine anthropogene Nutzung und der erwarteten Klimaveränderungen abzuschätzen, werden zunehmend Wasserwärmemodelle eingesetzt.

Im Rahmen der Abschlussarbeit soll Herr Bay in einem Wasserwärmemodell an einem Fallbeispiel untersuchen, wie sich eine hydrothermale Nutzung und projizierte Klimaveränderungen auf die Fließgewässertemperaturen auswirken. Durch das hohe Wärmespeichervermögen von Wasser bieten sich insbesondere Oberflächengewässer als erneuerbare Wärmequellen für Wärmenetze an, welche die solare Strahlungsenergie speichern und schwankende Außentemperaturen puffern.

Dazu sammelt und erzeugt der Student die notwendigen Daten und bereitet diese für den untersuchten Modellausschnitt auf. Im nächsten Schritt ist das Wasserwärmemodell mittels geeigneter Zeitreihen zu kalibrieren und zu validieren. Ausgehend von einem Referenzzustand sind die Temperaturänderungen durch eine hydrothermale Nutzung sowie die erwarteten Klimaveränderungen zu simulieren und die Ergebnisse kritisch zu diskutieren. Abschließend sind die durchgeführten Bearbeitungsschritte reproduzierbar als Schritt-für-Schritt-Anleitung zu dokumentieren.

Arbeitsschritte:

- Sichten und Einarbeiten in Wasserwärmemodelle, Wertigkeit von Eingangsdaten und die Bewertung der Modellgüte;
- Sammeln, Prüfen und Erzeugen notwendiger Modelldaten sowie Zeitreihen;
- Kalibrierung und Validierung des Modellausschnitts im Wasserwärmemodell;
- Festlegung eines Referenzzustands und Implementierung von Szenarien für die hydrothermale Nutzung und Klimaveränderungen im Modell;
- Darstellung und Auswertung der Ergebnisse mit geeigneten Werkzeugen;
- Kritische Diskussion der Ergebnisse;
- Erstellung einer Schritt-für-Schritt-Anleitung zur Ergebnisreproduktion.

Modalitäten

Grundsätzlich gelten die Bestimmungen zu Abschlussarbeiten in der Allgemeinen Prüfungsordnung der TU Darmstadt und in der Studienordnung des Fachbereiches 13. Diese Bestimmungen beziehen sich u.a. auf die Aspekte

- Betreuung und Bewertung von Abschlussarbeiten und
- besondere Regelungen bei externen Arbeiten

Der Kandidat hat dafür selbstständig Sorge zu tragen, dass diese Bestimmungen eingehalten werden. Darüber hinaus gelten folgende Randbedingungen:

Referent	Prof. Boris Lehmann FG Wasserbau und Hydraulik lehmann@wb.tu-darmstadt.de	Empfohlene Kenntnisse	- Wasserbau - Numerische Modelle - Wasserhaushalt - Wärmehaushalt
Ansprechpersonen	Steve Borchardt, M.Sc. FG Wasserbau und Hydraulik s.borchardt@wb.tu-darmstadt.de Jessika Gappisch, M.Sc. FG Wasserbau und Hydraulik j.gappisch@wb.tu-darmstadt.de		
Bearbeitungszeitraum	Auslösung nach Vereinbarung, Leistungszeitraum 26 Wochen	Arbeitsbedingungen	- Heimarbeit - Evtl. Tätigkeiten am Fachgebiet

Darmstadt, den 22.12.2022

Prof. Boris Lehmann

Abstract

Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Kalibrierung und Validierung eines Wasserhaushaltsmodells zur präzisen Abbildung der Gewässertemperatur eines Fließgewässers und der Implementierung von Szenarien zur hydrothermalen Nutzung. Angesichts der zu erwartenden klimatischen Veränderungen im 21. Jahrhundert gewinnt die Vorhersagegenauigkeit numerischer Modelle zunehmend an Bedeutung. Ziel dieser Arbeit ist die Anpassung des Modells an aktuelle klimatische und hydrologische Bedingungen. Des Weiteren werden Erkenntnisse über die Fähigkeit des Modells zur Abbildung von Klimaveränderungen und das Potenzial der hydrothermalen Nutzung eines Fließgewässers als nachhaltige Umweltwärmequelle gewonnen.

Die Ergebnisse bestätigen die Bedeutung regelmäßiger Kalibrierungsprozesse für verlässliche Vorhersagen. Das LARSIM-Modell kann erfolgreich Abflusswerte und Gewässertemperaturen des untersuchten Gewässers, der Lahn, abbilden. Zudem zeigt die Implementierung anthropogener Szenarien interessante Ergebnisse. Untersuchungen zur Einleitung von Kühlwasser zeigen, dass die Auswirkungen auf die Gesamtgewässertemperatur gering sind. Die hydrothermale Nutzung von Fließgewässern als Umweltwärmequelle für Wärmenetze weist ein großes Potenzial auf. Die Implementierung von Referenzzuständen, welche die prognostizierten Klimaveränderungen bis zum Jahr 2045 widerspiegeln, zeigt Übereinstimmungen mit den Prognosen des Weltklimarats.

This thesis deals with the calibration and validation of a water balance model for the accurate representation of the water temperature of a stream and the implementation of scenarios for hydrothermal use. In view of the expected climatic changes in the 21st century, the predictive capabilities of numerical models is becoming increasingly important. The objective of this study is to calibrate the model to current climatic and hydrological conditions. Furthermore, insights into the model's capability to simulate climate changes and the potential of hydrothermal utilization of a river as a sustainable environmental heat source are obtained.

The results confirm the importance of regular calibration processes for reliable predictions. The LARSIM model can successfully reproduce discharge values and water temperatures of the investigated watercourse, the Lahn. In addition, the implementation of anthropogenic scenarios shows interesting results. Investigations into the discharge of cooling water show that the effects on the overall watercourse temperature are small. The hydrothermal use of flowing waters as a environmental heat source for heat grids shows great potential. The implementation of reference states, reflecting the projected climate changes up to the year 2045, demonstrates agreements with the projections of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	VI
Abkürzungsverzeichnis	VII
Symbolverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangssituation	2
1.2 Untersuchungsgebiet	2
2 Grundlagen der Modellierung	5
2.1 Modellbegrifflichkeiten und -klassifikationen	5
2.2 Large Area Runoff Simulation Model	8
2.3 Relevanz von Kalibrierung und Validierung	11
2.3.1 Notwendigkeit der Kalibrierung	11
2.3.2 Bedeutung der Validierung	12
2.4 Datenaufbereitung und Modellerstellung	14
2.5 Unterstützende Tools zur Versuchsdurchführung	18
3 Kalibrierung und Validierung	21
3.1 Vorgehen	21
3.2 Gütekriterien zur Bewertung der Modellergebnisse	22
3.3 Kalibrierungsprozess der Abflusskomponenten	26
3.3.1 Niedrigwasserbereich	27
3.3.2 Mittelwasserbereich	30
3.3.3 Hochwasserbereich	33
3.3.4 Flusswärme	37
3.4 Validierungsprozess	43
3.5 Erkenntnisse	49
4 Szenarien	51
4.1 Abbildung von Testreferenzjahren	51
4.2 Einleitung von Kühlwasser	54
4.3 Integration von Seitengewässern	56
4.4 Speisung des Fernwärmenetzes Marburg	59



4.5	Erkenntnisse aus den Szenarien	66
5	Diskussion	69
6	Fazit	71
	Literatur	i
A	Anhang	vii
A.1	Tabellen und Abbildungen	vii
A.2	Mitteilungen	xx

Abbildungsverzeichnis

1.1	Lage des Untersuchungsgebiets im Bundesgebiet Deutschland	3
1.2	Darstellung des Untersuchungsgebiets	4
1.3	Projektstandorte Marburg und Wasserwerke Wehrda	4
2.1	Schematische Darstellung des Wasserhaushalts	6
2.2	Einflussfaktoren auf das Temperaturregime von Fließgewässern	7
2.3	Klassifizierung von LARSIM	9
2.4	LARSIM-Modellschema unter Einbeziehung des Wärmemoduls	10
2.5	Kalibrierungsprozess für die Komponenten Basisabfluss, Interflow, Direkt- abfluss und Wassertemperatur	13
2.6	WWM-Netz des HLNUGs	15
2.7	Darstellung des Einzugsgebiets Lahn bis KW-Gießen mit allen Teileinzugs- gebieten des LARSIM-Modells im Ausgangszustand	16
2.8	Darstellung des gesamten Einzugsgebiets Lahn unter Berücksichtigung aller Messstellen	17
2.9	Ablaufdiagramme der Python-Tools	20
3.1	Verzerrung simulierter zu gemessener Abflussmengen am Pegel Marburg im Ausgangszustand	26
3.2	Exemplarische Darstellung der Abflusskomponenten am Pegel Marburg im Ausgangszustand	28
3.3	Sensitivität vom Kalibrierungsfaktor KG auf $pBias$	29
3.4	Ergebnis der Niedrigwasser-Kalibrierung	30
3.5	Ganglinienseparation	32
3.6	Verzerrung der Abflussmengen aller Kalibrierungsschritte am Pegel Marburg	36
3.7	Exemplarische Darstellung des Gesamtabflusses als Messreihe, im Aus- gangszustand und nach abgeschlossener Kalibrierung der Abflusskompo- nenten	36
3.8	MAKIMA-Interpolation für Messungen am Standort der Wasserwerke Wehrda	38
3.9	Graphische Analyse der Gewässerwärme am Standort der Wasserwerke Wehrda im Ausgangszustand	39
3.10	Graphische Analyse der Wasserwärme am Standort der Wasserwerke Wehr- da nach erfolgter Kalibrierung	44
3.11	Abflusskomponenten Q_B und Q_I im Validierungszeitraum am Pegel Marburg	45
3.12	Gesamtabfluss im Validierungszeitraum am Pegel Marburg	46
3.13	Graphische Analyse der Wassertemperatur am Standort der Wasserwerke Wehrda im Validierungszeitraum	48

3.14	Identity-Line des Gesamtabflusses am Pegel Marburg	49
3.15	Identity-Line der Wassertemperatur am Pegel Marburg	50
4.1	Analyse der Wassertemperaturen der Simulation mit meteorologischen Daten für 2019, TRY2015 und TRY2045	52
4.2	Analyse der monatlichen Wassertemperaturen der Simulation mit meteorolo- gischen Daten für 2019, TRY2015 und TRY2045	53
4.3	Auswirkungen durch die Einleitungen von Kühlwasser	55
4.4	Standort des Mühlkanals Wehrda und des Lohmühlgrabens in Marburg an der Lahn	57
4.5	Fotos der Mühlkanäle an der Lahn	59
4.6	Temperaturänderungen am Pegel Marburg durch die Speisung des Fern- wärmenetzes „Softwarecenter“ aus der Lahn als Umweltwärmequelle . . .	62
4.7	Thermische Entnahmemengen zur Speisung des Fernwärmenetzes „Soft- warecenter“ aus der Lahn als Umweltwärmequelle	63
4.8	Temperaturänderungen am Pegel Marburg durch die Speisung eines Fern- wärmenetzes mit einer 20 MW-Wärmepumpe aus der Lahn als Umweltwär- mequelle bei unterschiedlicher Spreizung	64
4.9	Thermische Entnahmemengen zur Speisung eines Fernwärmenetzes mit einer 20 MW-Wärmepumpe aus der Lahn als Umweltwärmequelle	64
4.10	Temperaturänderungen durch die Speisung eines Fernwärmenetzes mit einer 20 MW-Wärmepumpe bei 6 K-Spreizung bis KW-Gießen	65
4.11	Entwicklung der Gewässertemperatur nach Speisung eines Fernwärmenet- zes mit einer 20 MW-Wärmepumpe bei 6 K-Spreizung bis KW-Gießen	66
4.12	Prognose der jährlichen Gewässertemperatur unter Berücksichtigung der Simulation mit meteorologischen Daten für 2019, TRY2015 und TRY2045 . .	66
4.13	Prognose der jährlichen Gewässertemperatur unter Berücksichtigung der Lahn als Umweltwärmequelle eines Fernwärmenetzes	68
A.1	Graphische Analyse der Wasserwärme am Standort Hainmühle im Aus- gangszustand	ix
A.2	Graphische Analyse der Wasserwärme am Standort Niederwetter im Aus- gangszustand	ix
A.3	Graphische Analyse der Wasserwärme am Standort Ober-Ofleiden im Aus- gangszustand	x
A.4	Verzerrung des simulierten und gemessenen Gesamtabflusses im Validie- rungszeitraum am Pegel Marburg	xi
A.5	Verzerrung des simulierten und gemessenen Gesamtabflusses im Validie- rungszeitraum am Pegel Marburg nach der Simulation von Kalibrierungs- und Validierungszeitraum	xi
A.6	Graphische Analyse der Gewässerwärme am Pegel Ober-Ofleiden im Vali- dierungszeitraum	xii
A.7	Graphische Analyse der Gewässerwärme am Pegel Kranzmühle im Validie- rungszeitraum	xii
A.8	Standort Kranzmühle	xiii

A.9 Standort der Firma Seidel GmbH & Co. KG. in Marburg	xiv
A.10 Bestandsplan Wärmenetz Marburg - Kernstadt	xv
A.11 Bescheinigung des Wärmenetzbetreibers - Stadtwerke Marburg	xviii
A.12 Temperaturänderungen durch die Speisung eines Fernwärmenetzes mit einer 20 MW-Wärmepumpe bei 4 K-Spreizung bis Gießen	xix

Tabellenverzeichnis

2.1	Verwendete Tools	18
3.1	Gütekriterien des Gesamtabflusses im Ausgangszustand und die Zielwerte der Gütekriterien nach Kalibrierung	25
3.2	<i>KG</i> -Parameter vor und nach Kalibrierung je Flussgebietsabschnitt	30
3.3	Auswirkungen der Sensitivitätsanalyse des MWB auf die Gütekriterien	33
3.4	Gebietsparameter vor und nach Kalibrierung MWB	33
3.5	Auswirkungen der Sensitivitätsanalyse des HWB auf die Gütekriterien	34
3.6	Gütekriterien vor und nach Kalibrierung der Abflusskomponenten	37
3.7	Gütekriterien der Wassertemperatursimulation nach Abschnitt 3.3.3	38
3.8	Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse T_{was}	42
3.9	Gütekriterien der Wassertemperatursimulation nach Wasserwärme-Kalibrierung	43
3.10	Gütekriterien der Wassertemperatursimulation nach <i>KGE'</i> -Korrektur	43
3.11	Gütekriterien des Gesamtabflusses im Validierungszeitraum	46
3.12	Gütekriterien der Gewässertemperatur-Simulation im Validierungszeitraum	47
4.1	Monatlich gemittelten Abweichung der Wassertemperatur der TRY zum Ausgangszustand	54
4.2	Monatlich gemittelte Temperatur der Kühlwassereinleitung durch Fa. Seidel GmbH & Co. KG.	54
4.3	Definition der Entnahme und Einleitung in die Lahn zum Betrieb eines Fernwärmenetzes	62
4.4	Abkühlung der Lahn bei unterschiedlichen Spreizung der 20MW-Wärmepumpe	63
A.1	Datenursprung Messdaten 2019-2022	vii
A.2	Kalibrierparameter je Flussgebietsabschnitt im Ausgangszustand aus ta-pe35.dat	viii
A.3	Zuordnung Stationen zu Rasterdaten gemäß DWD (2023)	xiv
A.4	Gebietsinformationen des TGB Mühlkanal Wehrda	xvi
A.5	Gebietsinformationen des TGB Mühlkanal Marburg	xvii

Abkürzungsverzeichnis

Kürzel	Beschreibung	Erstnennung
BBR	Bundesamt für Baumwesen und Raumordnung	51
CDC	Climate Data Center	16
DWD	Deutsche Wetterdienst	51
EZG	Einzugsgebiet	3
GIS	Geoinformationssystem	15
HLNUG	Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie	8
HWB	Hochwasserbereich	26
IPCC	Weltklimarat, engl: Intergovernmental Panel on Climate Change	53
KW-Gießen	Klärwerk-Gießen	3
LARSIM	Large Area Runoff Simulation Model	8
LEG	LARSIM-Entwicklergemeinschaft	8
LISA	Visualisierung von Zeitreihen im LILA-Format	18
MWB	Mittelwasserbereich	26
NWB	Niedrigwasserbereich	26
TEZG	Teileinzugsgebiet	10
TGB	Teilgebiet	19
TRY	Testreferenzjahr	51
TTZ	Technologie- und Tagungszentrum Marburg	59
WHG	Wasserhaushaltsgesetz	6
WHM	Wasserhaushaltsmodell	5
WM	Wärmemodell	5
WW-Wehrda	Wasserwerke Wehrda	3
WWM	Wasserhaushalts- und Wärmemodell	9

Symbolverzeichnis

Kürzel	Einheit	Beschreibung	Erstnennung
A_2	[-]	Schwellenwert des schnellen Direktabflusses	34
β	[-]	Drainageindex für die Tiefenversickerung (in den Basisabflussspeicher)	28
B	[-]	Bestimmtheitsmaß nach Bravais-Pearson	22
B_{1T}	[-]	Steigung der Regressionsgleichung	39
BSF	[-]	Exponent der Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion . .	34
COP	[-]	Leistungszahl	60
EKL, EKR	[-]	Kalibrierfaktoren für die Rauigkeitsbeiwerte auf den Vorländern	34
EKM	[-]	Kalibrierfaktor für den Rauigkeitsbeiwert im Hauptbett . .	34
EQB	[-]	Eichgröße für die Rückhaltekonzstante des Basisabflussspeichers	28
EQD	[-]	Eichgröße für die Rückhaltekonzstante des langsamen Direktabflussspeichers	34
EQD_2	[-]	Eichgröße für die Rückhaltekonzstante des schnellen Direktabflussspeichers	34
EQI	[-]	Eichgröße für die Rückhaltekonzstante des Interflowspeichers	31
$f_{bas} - f_{ak}$	[-]	Faktor für die Zunahme der Tiefenversickerung im Grobporenbereich	28
F_{schatt}	[-]	Beschattungsfaktor	40
F_{Wind}	[-]	Windschutzfaktor	40
GTZ	[K * d]	Grad-Tags-Zahl	60
KG	[-]	Korrekturfaktor für den Gebietsniederschlag	27
KGE'	[-]	Kling-Gupta-Effizienz	24
$lnNSE$	[-]	logarithmierte Nash-Sutcliff-Modelleffizienz	22
NSE	[-]	Nash-Sutcliff-Modelleffizienz	22
$pBias$	[%]	prozentuale Verzerrung	12
Q_B	[m ³ /s]	Basisabfluss	26
Q_D	[m ³ /s]	Direktabfluss	26

Q_I	[m ³ /s]	Interflow	26
$r_{d,max}$	[-]	Index für die laterale Drainage zum Interflowspeicher im Grobporenbereich	31
$r_{d,min}$	[-]	Index für die laterale Drainage zum Interflowspeicher bis zur Feldkapazität	31
T_L	[°C, K]	Lufttemperatur	39
Y_{0T}	[-]	Achsenabschnitt der Regressionsgleichung	39

1 Einleitung

Wasser stellt eine lebenswichtige Ressource dar, die sowohl für Menschen als auch für die Natur unverzichtbar ist. Mit der zunehmenden globalen Erwärmung werden die Auswirkungen von knappen Wasserressourcen immer deutlicher sichtbar und haben immer weiterreichende Konsequenzen (IPCC 2022). Es ist zu erwarten, dass die verfügbaren Wasserressourcen im 21. Jahrhundert sich weiter verknappen und sich das Temperaturregime von Oberflächengewässern und Grundwasser erhöht (BUND 2020, 18). Diese Veränderungen haben bedrohliche Auswirkungen auf Ökosysteme, Flora und Fauna, weshalb es von größter Bedeutung ist, diese Auswirkungen zu minimieren oder weitestgehend zu verhindern (BUND 2020, 19–22).

In Zeiten, in denen die Auswirkungen des Klimawandels immer spürbarer werden und Umweltthemen zunehmend ins Zentrum politischer Diskussionen rücken, gewinnt die Untersuchung des Wasserhaushalts und der Gewässertemperatur in numerischen Modellen an Relevanz. Die Erwärmung von Wasserkörpern hat gravierende Auswirkungen auf die lokalen Ökosysteme und kann zum Biodiversitätsverlust beitragen (BUND 2020, 18).

Das Ziel dieser Arbeit ist die Analyse eines numerischen Modells zur Simulation des Wasserhaushalts mit besonderem Fokus auf die Darstellung der Gewässertemperatur. Mit Blick auf den Einfluss auf Ökosysteme und den Wasserhaushalt ist es von entscheidender Bedeutung, dass die Ergebnisse des untersuchten Modells einer intensiven Kalibrierung und Validierung unterzogen werden, um die Präzision und Zuverlässigkeit ihrer Vorhersagen zu gewährleisten. Zusätzlich werden in dieser Arbeit Szenarien untersucht, um die Auswirkungen des Klimawandels und anthropogener Einflüsse auf Fließgewässer abzuschätzen sowie deren Eignung für die energetische Nutzung zu analysieren.

Schlussendlich geht es um die Fragestellung, inwieweit das gewählte Modell den Realzustand in Bezug auf Abfluss und Temperatur eines Fließgewässers abbilden kann, wie integrierbar Szenarien im Zusammenhang mit Klimawandel und anthropogenen Einflüssen sind und welche Erkenntnisse aus der Untersuchung gezogen werden können.

Im Folgenden wird die Ausgangssituation und das Untersuchungsgebiet dargestellt. Im Kapitel 2 werden die Themenblöcke Modellerstellung und Modellierung erläutert. Dabei werden sowohl die Grundlagen der Modelltheorie und einzelne Modelle selbst erläutert, als auch auf den Modellaufbau und die im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Tools zur Versuchsdurchführung eingegangen. Kapitel 3 befasst sich mit den Prozessschritten der Kalibrierung und Validierung. Nach erfolgter Kalibrierung und Validierung werden im darauffolgenden Kapitel 4 Szenarien zur Nutzung des Modells beschrieben und durchgeführt. Dabei liegt der Fokus auf der Gewässertemperatur und deren Nutzen bzw. den Folgen durch anthropogene Einflüsse. Im Abschnitt 4.5 werden die Ergebnisse der einzelnen Szenarien miteinander in Bezug gesetzt und das Potenzial für die zukünftige Nutzung von

Wärmemodellen evaluiert. Im Kapitel 5 erfolgt eine Diskussion der Durchführung und der Ergebnisse. Diese Arbeit wird mit einem Fazit konkludiert.

1.1 Ausgangssituation

Dieser Abschnitt erläutert den Hintergrund hydrothormaler Nutzung von Fließgewässern und die aktuelle, politische Motivation der Arbeit.

Der Mensch macht sich das Energiepotenzial von Oberflächengewässer zu Nutzen. Neben dem kinematischen und potenziellen Energiepotenzial bietet das Medium Wasser aufgrund der Wärmekapazität auch thermisch ein enormes Nutzungspotenzial. Die hydrothermale Nutzung von Fließgewässern als Wärmequelle bekommt in der breiten Öffentlichkeit stärkere Beachtung. Pionierarbeit leistete dazu das Züricher Rathaus, welches mittels einer der weltweit ersten Wärmepumpen seit 1938 den Fluss Limmat zum Heizen verwendet (Zogg 2008, 26–33). Nach einigen ersten Wärmepumpenprototypen zum hydrothermalen Heizen von Gebäuden in den 1940er Jahren verlor die Technologie aufgrund der weltweit sinkenden Ölpreis zunehmend an Bedeutung (Zogg 2008, 41). Erst seit den letzten Jahren erlebt die Wärmepumpentechnologie einen anhaltenden Aufschwung.

Sowohl in der Forschung als auch in der Politik ist dieses Thema von aktueller Relevanz und Brisanz. Ein Beispiel dafür ist die neue Großwärmepumpe in Mannheim am Rhein, die als Quelle von Umweltenergie genutzt wird (*Rhein liefert Wärmeenergie über neue Großwärmepumpe: Reallabor der Energiewende "Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen"* 2022). Darüber hinaus spiegelt sich der politische Fokus auf die Energieeffizienz in der Energieeffizienz Richtlinie (Richtlinie 2012/27/EU) sowie in der Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) und dem Gesetzesentwurf zum Gebäudeenergiegesetz (Bundeswirtschaftministerium 2023) wider. Diese politischen Maßnahmen betonen die Notwendigkeit, alternative und effiziente Energiequellen wie die Gewässertemperatur zur Erreichung der Energiewende und zur Reduzierung von CO₂-Emissionen zu nutzen.

1.2 Untersuchungsgebiet

In diesem Abschnitt wird das zu betrachtende Untersuchungsgebiet vorgestellt. Der Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit ist das Fließgewässer Lahn.

Bei der Lahn handelt es sich um ein Gewässer der Ökoregion Mittelgebirge. Die Lahnquelle befindet sich auf einer Höhe von 606 m ü.NN im Rothaargebirge und mündet bei Koblenz in den Rhein. Im Flussverlauf entwickelt sie sich von einem grobmaterialreichen, silikatischen Mittelgebirgsbach (LAWA Typ 5) hin zu einem großen Fluss des Mittelgebirges (LAWA Typ 9.2). Bis Gießen wird die Lahn zudem als natürlich geprägtes Fließgewässer kategorisiert. (BfG 2023)

Das 2355,9 km²-große Untersuchungsgebiet befindet sich in Mitteldeutschland und liegt größtenteils in Hessen (vgl. Abbildung 1.1). Es gehört der gemäßigten Klimazone an. Das Gebiet ist primär rural geprägt und teilt sich in Flächen des Mittelgebirges, der Waldgebiete und in landwirtschaftliche Nutzflächen auf. Im betrachteten Gebiet liegen zudem die Mittelstädte Stadtallendorf, Marburg und Gießen. Eine Großstadt gemäß der Stadt-

und Gemeindetypen des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung ist nicht vorhanden.



Abbildung 1.1: Lage des Untersuchungsgebiets im Bundesgebiet Deutschland,
Quelle: eigene Darstellung, erstellt mit QGIS 3.22.12-Białowieża

Das Untersuchungsgebiet umfasst das Einzugsgebiet (EZG) der Lahn von der Quelle bis zum Klärwerk-Gießen (KW-Gießen). In Abbildung 1.2 sind neben den Grenzen des EZG und der Lahn noch die relevanten Gewässer Ohm und Wetschaft dargestellt. Das Ufergebiet der Lahn im betrachteten Untersuchungsgebiet ist größtenteils als Landschaftsschutzgebiete ausgewiesen.

Marburg stellt einen vielversprechenden Standort für die energetische Nutzung von Fließgewässern dar. Die Auftraggeber:innen eines Forschungsprojektes am Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik der TU Darmstadt sind an einer Möglichkeit für die Versorgung der Stadt Marburg mit erneuerbarer Wärme interessiert. Neben dem Pegel Marburg ist daher der Standort der Wasserwerke Wehrda (WW-Wehrda) in Marburg-Wehrda von besonderer Bedeutung (siehe Abbildung 1.3).

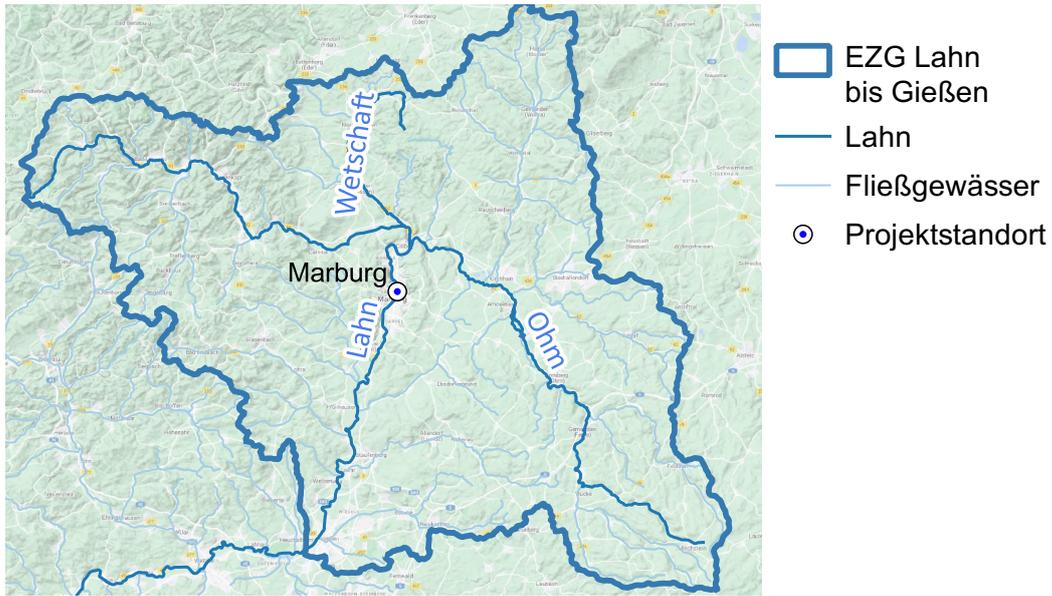


Abbildung 1.2: Darstellung des Untersuchungsgebiets,
 Quelle: eigene Darstellung, erstellt mit QGIS 3.22.12-Białowieża

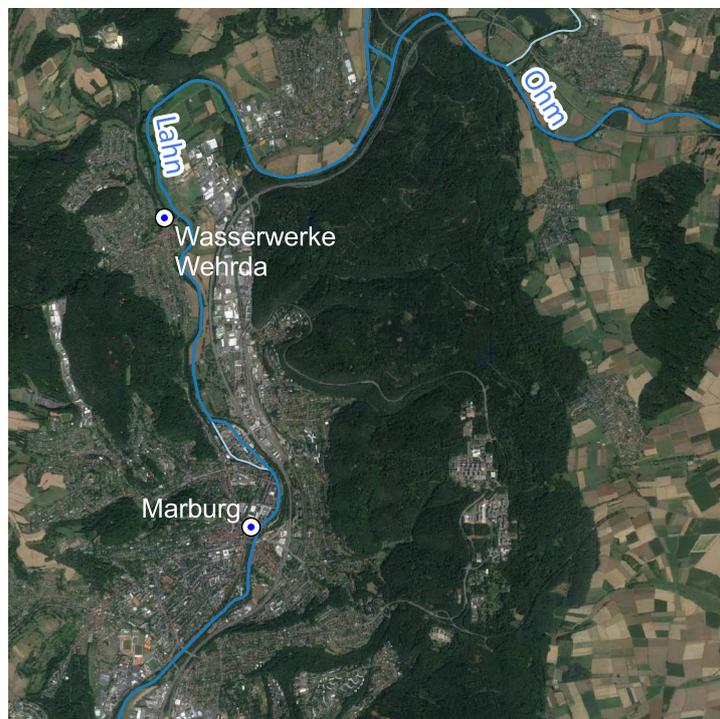


Abbildung 1.3: Projektstandorte Marburg und Wasserwerke Wehrda,
 Quelle: eigene Darstellung, erstellt mit QGIS 3.22.12-Białowieża

2 Grundlagen der Modellierung

Dieses Kapitel behandelt die theoretischen Grundlagen von Wasserwärmemodellen und ihre Relevanz für aktuelle und zukünftige Forschung sowie der Praxis. Besonderer Bezug wird dabei auf unterschiedliche Modelle, Modellansätze und Methoden genommen. Des Weiteren wird auf die Theorie von Kalibrierung und Validierung eingegangen und die Erstellung und Anpassung des zur Verfügung gestellten Modells erläutert. Abschließend wird auf Tools eingegangen, welche im Rahmen dieser Arbeit eingesetzt werden.

2.1 Modellbegrifflichkeiten und -klassifikationen

Eine allgemeine Modelltheorie wurde von Stachowiak (1973) aufgestellt. Er kennzeichnet Modelle durch die drei Merkmale der Abbildung, Verkürzung und des Pragmatismus. Somit stellen Modelle lediglich eine Abstraktion eines natürlichen Reals dar. (Stachowiak 1973, 131–133)

Hydraulische Modelle werden in stochastische und deterministische Modelle unterteilt. Dabei weisen stochastische Modelle im Rahmen ihrer mathematischen Lösbarkeit Zufallsvariablen auf, auf welche deterministische Modelle verzichten (Maniak 2016, 273). Die deterministischen Modelle basieren auf den geophysikalischen Strömungsdynamiken und wurden entwickelt, um die komplexe nichtlineare Dynamik mithilfe der Integration nichtlinearer partieller Differenzialgleichungen darzustellen (Becker 1995, 154). Dies beinhaltet den Versuch, eine angemessene Parametrisierung der physikalischen Eigenschaften zu erreichen, um die Komplexität der nichtlinearen Dynamik bestmöglich darzustellen (Becker 1995, 154).

Bei der Verwendung von deterministischen Modellen spielt die räumliche Auflösung zur Lösung physikalischer Ursache-Wirkung-Effekte eine maßgebende Rolle. Im Zuge ihrer Konzeption können hydraulische Modelle weiter klassifiziert werden. Dabei wird zwischen Black-Box-, Konzept-Modellen und Modellen mit physikalischer Basis unterschieden. (Maniak 2016, 273)

Wasserhaushaltsmodelle (WHM) stellen die Grundlagen für hydraulische Wärmemodelle (WM). Im Gegensatz zu Niederschlags-Abfluss-Modellen modellieren WHM den gesamten Wasserhaushalt eines Einzugsgebietes (siehe Abbildung 2.1). Sie liefern kontinuierliche und prozessorientierte Informationen des gesamten Abflussgeschehens konstant über längere Zeiträume bei diskontinuierlichen Eingangsparametern. Zudem liefern WHM detaillierte Informationen über Teilprozesse, welche bei einem Niederschlag-Abfluss-Modell nicht betrachtet werden. Aufgrund der Langzeitbetrachtung werden WHM zudem zur Speicherbewirtschaftung eingesetzt. (LEG 2022)

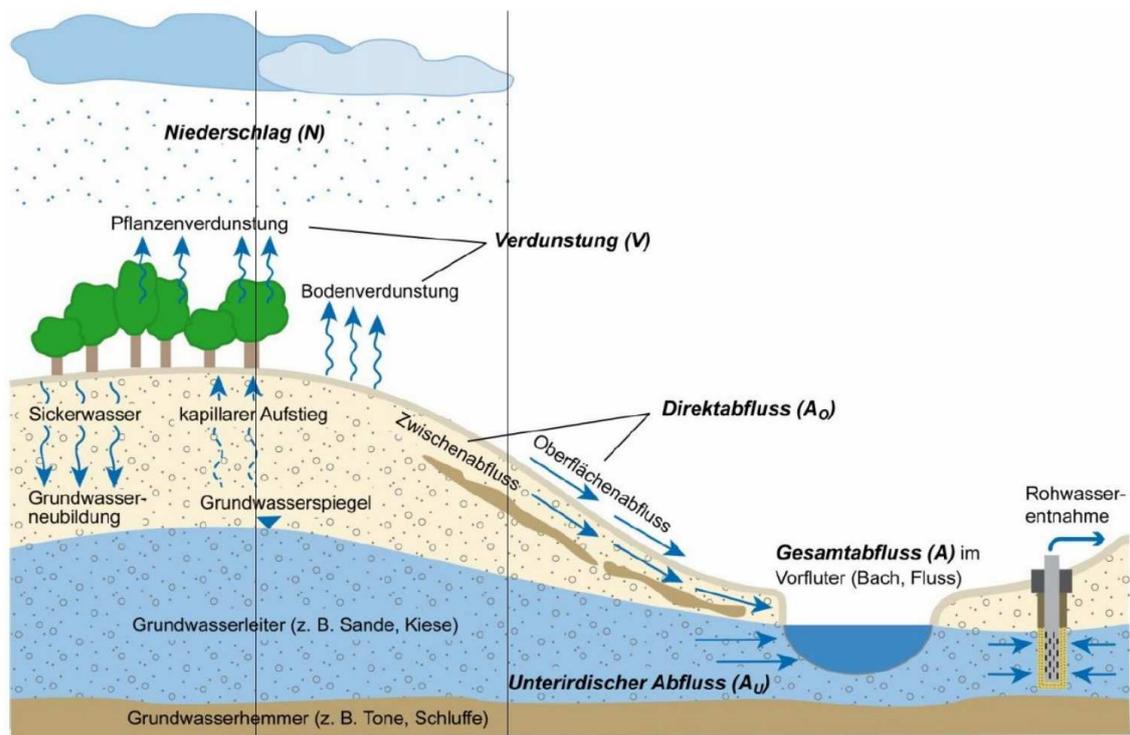


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung des Wasserhaushalts, Quelle: Hergesell (2021)

Die Menge an thermischer Energie eines Fließgewässers hat sowohl natürliche als auch anthropogene Ursachen. Die stärksten natürlichen Einflussfaktoren sind kurz- und langwellige Strahlung, Verdunstung und der Wärmeaustausch des Gewässers vom und zum Gewässerbett und zum direkten Umland (Maniak 2016). Anthropogen hat die Einleitung von Kühl- und Heizwasser starken Einfluss auf den Wärmehaushalt, weshalb die Wärmeeinleitung in Gewässer im Wasserhaushaltsgesetz (WHG) geregelt ist. Bei der Einleitung von Abwasser eines differenzierten thermischen Niveaus entstehen aufgrund unterschiedlichen spezifischen Dichte zum Teil kilometerlange Wärmefahnen (Maniak 2016).

Maniak (2016) beschreibt drei Kriterien, welche beim Einleiten von Kühlwasser in Gewässer zu beachten sind – die maximale Temperatur des Kühlwassers bei Einleitung in den Vorfluter $T_{K,max}$, die maximale Temperatur des Gewässers bei vollständiger Durchmischung $T_{F,max}$ und die maximale Aufwärtsspanne ΔT_F .

Zur Beschreibung des Temperaturregimes von Fließgewässern nennt Caissie (2006) die vier Kategorien atmosphärische Bedingungen, Topographie, Gewässerbett und Abflussbedingungen (vgl. Abbildung 2.2). Die erste Kategorie wird als einflussreichste gelistet, da diese hauptverantwortlich für die natürlichen Wärmeaustauschprozesse sind. Veränderungen des Temperaturregimes werden u. a. durch die menschliche Veränderung der Abflussdynamik oder Vegetation oder durch die Einleitung von Kühlwasser angestoßen. Zudem haben Anlagen der Wasserbewirtschaftung, wie beispielsweise Stauseen, Wehre etc. einen anthropogenen Einfluss auf das Regime. (Caissie 2006)

Global betrachtet haben die atmosphärischen Veränderungen, ausgelöst durch den Klimawandel, einen großen Einfluss auf das Temperaturregime von Fließgewässern. Im Rahmen der Industrialisierung bestätigen Studien das Ansteigen der Gewässertemperaturen bis

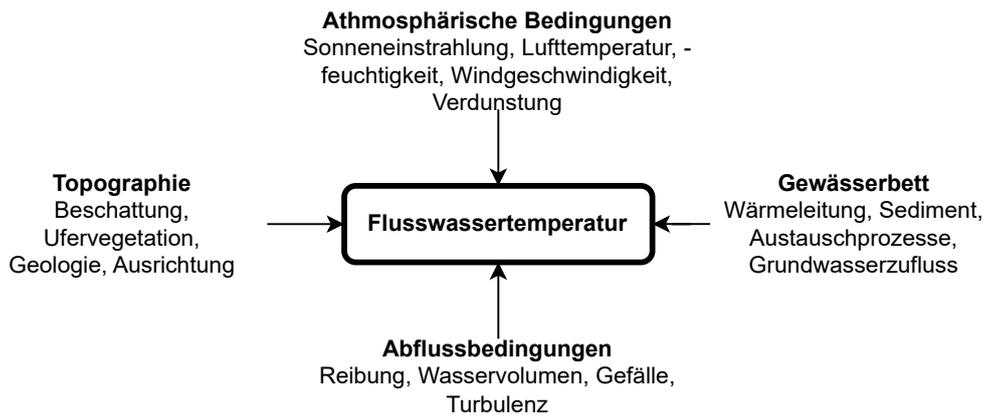


Abbildung 2.2: Einflussfaktoren auf das Temperaturregime von Fließgewässern,
Quelle: verändert nach Caissie (2006)

zum Ende der 1990er Jahre um bis zu 1 °C. Aquatische Ökosysteme reagieren stark auf Temperaturschwankungen. Die Bioproduktivität steigt, während die Eigenschaft Sauerstoff zu binden abnimmt. Daraus resultieren beispielsweise eine erhöhte Algenproduktion, das Sterben sensitiver Arten, die Verschiebung von Wanderverhalten und Laichplätzen von Fischen und die essenzielle Reduktion von Kaltwasser-Habitaten. Hinzu kommen veränderte Abflussverhalten beeinflusst durch klimatische Veränderungen. (Caissie 2006, 1398–1401) Bei der zu erwartenden Klimaerwärmung werden sich die globalen Oberflächengewässer mittels genannter Austauschprozesse zur Umwelt ebenfalls erwärmen. Zum Schutz der aquatischen Ökosysteme ist es daher erforderlich, den Energieeintrag in Gewässer zu minimieren, beispielsweise über verstärkte Beschattung durch Ufervegetation oder schwimmende Photovoltaik (ISE 2023), oder den thermischen Energiehaushalt innerhalb der Oberflächen- und Grundwasserkörper zu reduzieren. Die Darstellung zweiteres wird im Rahmen dieser Arbeit mittels eines numerischen WHM evaluiert.

Die ersten hydraulisch-numerischen Modelle sind in den 1970er Jahren implementiert worden. Unter stetiger Weiterentwicklung entstanden in den 1990er Jahren die WHM. Aktuell sind eine Vielzahl von unterschiedlichen Modellen zur Abbildung des Wasserhaushaltes im Einsatz (LEG 2022).

Im deutschen Raum sind hauptsächlich die Modelle ArcEGMO (in den Landesbehörden von Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt), mGROWA (in Saarland, Nordrhein-Westfalen, Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein) und LARSIM (in Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz, Bayern) vertreten.

ArcEGMO ist eine fortlaufende Weiterentwicklung des EGMO (EinzugsGebietsMOdel)-Modells, das seit 1975 implementiert wurde. Es handelt sich um ein ökohydrologisches Modellierungssystem, das zur Lösung verschiedener Fragestellungen mit zeitlicher und räumlicher Variation entwickelt wurde. Das Modell weist eine hohe Kompatibilität mit Office- und GIS-Anwendungen auf, verzichtet jedoch auf eine grafische Benutzeroberfläche. Als WHM deckt es alle relevanten Prozesse und Teilprozesse des Wasserhaushalts ab. ArcEGMO ist in die Modellebenen Abflussbildung, Direktabfluss, Gewässerabfluss, Grundwasserabfluss und Meteorologie unterteilt und berücksichtigt sowohl anthropogene als auch natürliche Einflüsse. Zur Speisung des Modells werden raum- und zeitbezogene

Daten sowie ein digitales Geländemodell verwendet. Für ArcEGMO sind Ansätze vorgesehen, welche u. a. zur Simulation der Wassertemperatur dienen. Aktuell sind diese nicht umgesetzt. (Büro für Angewandte Hydrologie GmbH 2023)

mGROWA ist ein Wasserhaushaltsmodell, das für den Einsatz in großen Modellgebieten entwickelt wurde. Es basiert auf einem deterministischen, konzeptionellen und rasterbasierten Ansatz, bei dem die Wasserhaushaltsgleichung mit Klima-, Abfluss- und Speichergrößen verwendet wird. Das Modell ermöglicht die Bilanzierung der vertikalen Wasserprozesse, während laterale Flüsse nicht berücksichtigt werden. Die räumliche und zeitliche Verteilung der Klimadaten wie Niederschlag und Verdunstung wird als Eingabe für das Modell benötigt und kann aus verfügbaren regionalen Daten oder Klimasimulationen abgeleitet werden. Das Modell simuliert die tatsächliche Evapotranspiration und den Gesamtabfluss in einem ersten Schritt, wobei verschiedene landnutzungsspezifische Berechnungsmethoden zum Einsatz kommen. Im zweiten Schritt werden die verschiedenen Komponenten des Gesamtabflusses, einschließlich Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss, Abfluss über Drainagen und Grundwasserneubildung, analysiert. Die Grundwasserneubildung wird mithilfe eines Separationsverfahrens bestimmt, das auf Basis von Base-Flow-Indizes arbeitet. Die Größen des Abflusses und der Grundwasserneubildung werden monatlich bilanziert, und das Modell kann mit einer beliebigen räumlichen Auflösung verwendet werden. Zur Abbildung von Gewässertemperaturen sind der Literatur keine Informationen zu entnehmen. (Herrmann et al. 2013, 207–209)

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Large Area Runoff Simulation Model (LARSIM) verwendet. Die Begründung liegt in der umfassenden Funktionalität und der behördlichen Verwendung dieses Modells im Untersuchungsgebiet. Durch die Bereitstellung eines Modellausschnitts durch das Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) kann eine tiefgreifendere Bearbeitung stattfinden. Auf LARSIM wird im folgenden Abschnitt 2.2 explizit eingegangen.

Um den Stand der Technik und Wissenschaft abbilden zu können, werden alle bestehenden Modelle regelmäßig weiterentwickelt und neue Modelle implementiert. Die hier ausführlicher vorgestellten Modelle stellen nur einen Ausschnitt der in Deutschland verwendeten Modelle dar. Es bleibt die Nennung von weiteren Modellen, wie bspw. WaSIM-ETH, J2000 und PANTA RHEI, welche aufgrund ihrer geringen Verbreitung in Deutschland nicht weiter beachtet werden.

2.2 Large Area Runoff Simulation Model

Beim LARSIM handelt es sich um ein in den 1990er Jahren im Rahmen eines Forschungsvorhabens entwickeltes WHM. Die Grundidee ist, vorhandene physikalisch basierte Modelle zu kombinieren und diese leicht und für verfügbare Flächendaten anwendbar zu machen. Es ist als nichtkommerzielle Software entwickelt worden und findet Anwendung in verschiedenen Hochwasserzentralen, Universitäten und Ingenieurbüros. Die kontinuierliche Weiterentwicklung erfolgt durch die LARSIM-Entwicklergemeinschaft (LEG), bestehend aus Hochwasserzentralen in Deutschland, der Schweiz, Frankreich, Österreich und Luxemburg. LARSIM wird vorwiegend zum operationellen Hochwasserschutz eingesetzt, findet jedoch

auch Anwendung beim Betrieb von Stau- und Rückhaltebecken. Für große Gebiete im Süd-Westen Deutschlands sind flächendeckende WHM implementiert. (LEG 2023)

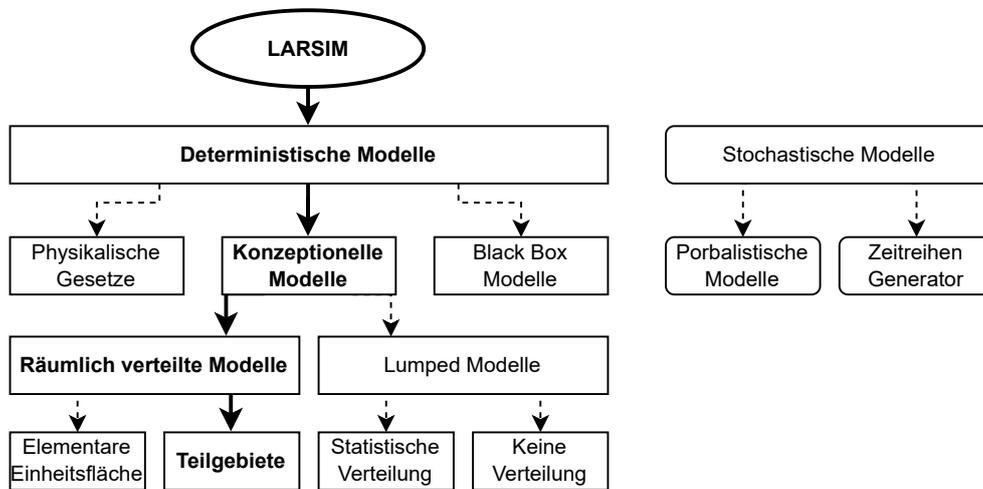


Abbildung 2.3: Klassifizierung von LARSIM nach dem Schema für hydrologische Modelle von Becker (1995), Quelle: verändert nach LEG (2023, 6)

LARSIM wird nach Becker (1995) den deterministischen, konzeptionellen Modellen zugeordnet (vgl. Abbildung 2.3). Das Modell arbeitet mit der Unterteilung des Projektgebiets in Teilgebiet, welche der Mesoskala zugehörig sind. Die Mesoskala zeichnete sich durch eine charakteristische Fläche von 0,01 bis 1.000 km² aus. Im Vergleich zur Mikro- und Makroskala stellt die Mesoskala einen Kompromiss dar, der sowohl die Darstellung kleinräumiger Parametrisierung als auch großflächiger hydrologischer Prozesse ermöglicht. Die Unterteilung in heterogene Teilgebiete findet anhand unterschiedlicher Landnutzungen, Hangneigungen, Bebauungen, Bodentypen und weiterer Faktoren statt. (LEG 2022)

Die Zielsetzung der LARSIM-Implementierung in den 1990er Jahren sind unter anderem die Verwendung etablierter Modellansätze, die Abbildung der hydrologischen Teilprozesse Interzeption, Evapotranspiration, Schneeakkumulation und -schmelze, Bodenwasserspeicherung sowie Abflusskonzentration, Retention und Translation. Die Evapotranspiration wird als entscheidender Faktor genannt, wohingegen in Mitteleuropa untergeordnete hydrologische Prozesse nicht implementiert werden. LARSIM ist sowohl für die Nutzung von raster- als auch flächenbezogener Gebieten vorgesehen und bietet Flexibilität bei der Verwendung von Messdaten für Abflussganglinien. Neben der Forderung Speicher und Flussverzweigungen abbilden zu können, wird die Programmiersprache auf FORTRAN mit dem Zusatz einer akzeptablen Rechenzeit auf Endbenutzer-PCs festgelegt. (LEG 2022, 5–6)

Die LARSIM-Modellstruktur inklusive dem Wärmemodul ist in Abbildung 2.4 abgebildet. Die Verschneidung des WHM mit dem Wärmemodul wird Wasserhaushalts- und Wärmemodell (WWM) genannt. Im Rahmen des WWM erfolgt auf Grundlage der Ergebnisse der Wasserhaushaltssimulationen eine zusätzliche Berechnung der Energiebilanz der Fließgewässer sowie der daraus resultierenden Wassertemperaturen (LEG 2022, 9).

LARSIM wird durch meteorologische Antriebsdaten gespeist. Im ersten Schritt berechnet das WHM darauf aufbauend die Schneespeicher-Füllstände bei Verwendung des Schnee-

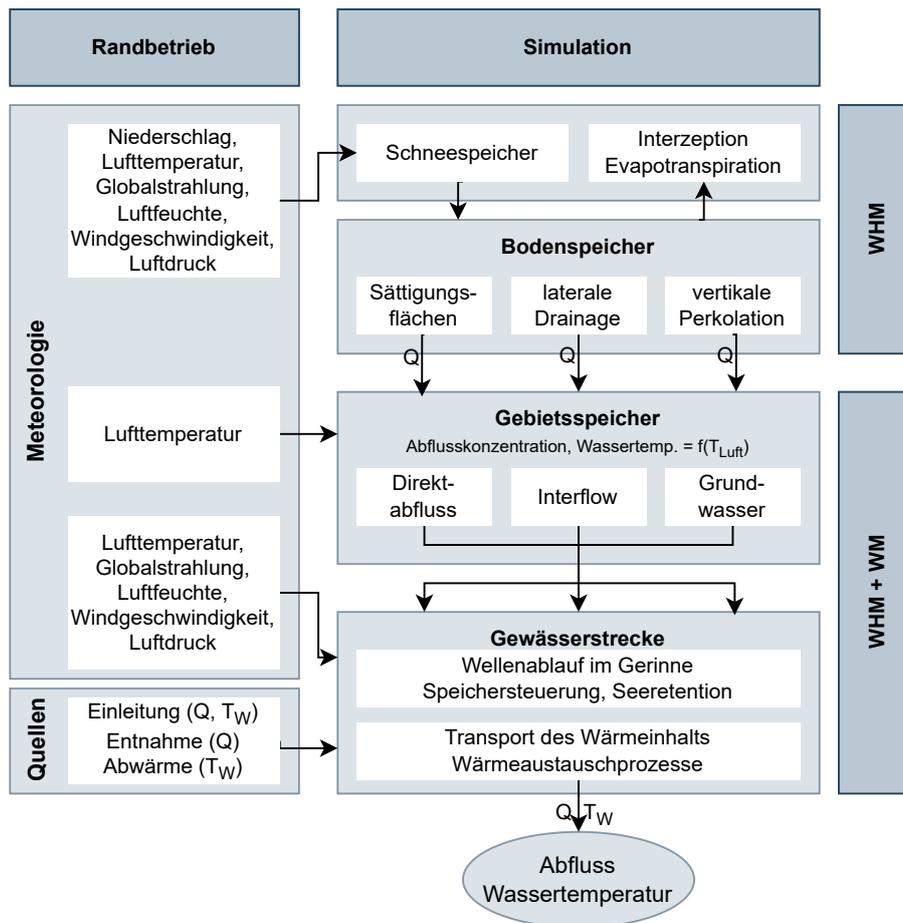


Abbildung 2.4: LARSIM-Modellschema unter Einbeziehung des Wärmemoduls, Quelle: verändert nach LEG (2022, 151)

Moduls, um anschließend die Speicherfüllung der Landnutzungs-Boden-Kompartimente zu bestimmen. Diese haben wiederum einen direkten Einfluss auf Interzeption und Evapotranspiration. Im nächsten Schritt werden die Abflusskomponenten jedes Landnutzungs-Boden-Kompartiments je Teileinzugsgebiet (TEZG) den Gebietsspeichern inkl. der berechneten Wassertemperatur zugeführt. Aus den Gebietsspeichern wird anschließend der im TEZG gebildete Abfluss an Vorfluter, See, Staubecken etc. abgegeben. Unter Berücksichtigung möglicher anthropogener Quellen oder Entnahmen wird so der Gerinneabfluss und die Gewässertemperatur berechnet. LARSIM ist in der Lage unterschiedliche Zeitschritte zwischen 5 min und 1 d zu berechnen. (LEG 2022)

Eine zusätzliche Funktion von LARSIM ist der Betrieb als eventbezogenes Niederschlags-Abfluss-Modell zur Vorhersage von Hoch- und Niedrigwasser. Für diesen Anwendungsfall benötigt LARSIM lediglich Niederschlagswerte (und ggf. Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit bei Berücksichtigung des Schneemoduls). (LEG 2022, 9)

2.3 Relevanz von Kalibrierung und Validierung

Die Erstellung von hydrologischen Modellen beginnt üblicherweise mit der Implementierung der mathematischen Grundbedingungen und der Einbindung von Messdaten, die nach der Datensammlung zur Verfügung stehen. Dieser erste Bearbeitungsschritt ist auch bei großen Datenmengen, wie sie insbesondere bei großflächigen EZG vorkommen, weitgehend bekannt, gut dokumentiert und reproduzierbar. Im Gegensatz dazu folgen die nachfolgenden Schritte der Kalibrierung und Validierung eines hydrologischen Modells jeweils einem modellspezifischen Ansatz, der von der Fragestellung und dem EZG abhängt (Gupta et al. 1999).

2.3.1 Notwendigkeit der Kalibrierung

Das primäre Ziel der Kalibrierung eines hydrologischen Modells besteht darin, die bestmögliche Übereinstimmung zwischen den gemessenen und simulierten Werten zu erreichen und somit die Unsicherheiten bei der Modellvorhersage zu minimieren (Maniak 2016, 408; Engel et al. 2007, 1231). Bei der mathematischen Modellierung dieser Prozesse sind verschiedene Beziehungen und Parameter zu berücksichtigen, die festgelegt werden müssen (Engel et al. 2007, 1230).

Die folgenden Einflussfaktoren stellen Herausforderungen der Modellkalibrierung dar (Engel et al. 2007):

- begrenzte Metadaten
- Messfehler bei der Datenaufnahme
- räumliche Variabilität von Niederschlägen und
- Eigenschaften des Wassereinzugsgebiets

Eine weitere wesentliche Quelle von Fehlern können Anwender:innen selbst sein. Insbesondere manuelle Kalibrierungen sind in dem Vorgehen und der Bewertung durch die Subjektivität der Anwender:innen geprägt (Eckhardt und Arnold 2001).

Da hydrologische Modelle häufig für verschiedene EZG verwendet werden, verfügen sie in der Regel über eine Reihe von weiteren Parametern, die für eine Anpassung des Modellverhaltens an das spezifische EZG angepasst werden (Gupta et al. 1999). Bei diesem Anpassungsprozess werden die Modellparameter anhand eines Vergleichs zwischen den Vorhersagen des Modells für eine bestimmte Konstellation von Einflussfaktoren oder Parametern und den erhobenen Daten für dieselben Bedingungen geschätzt werden (Moriasi et al. 2007; Engel et al. 2007, 1230). Die Anwendbarkeit hydrologischer Modelle für operative Vorhersagen hängt daher von einer adäquaten Modellkalibrierung ab (Gupta et al. 1999).

Zur Evaluierung eines Modells werden üblicherweise sowohl visuelle Vergleiche der simulierten und gemessenen Daten als auch Güte-Statistiken verwendet (Engel et al. 2007). Gütestatistiken reagieren aufgrund der zugrunde liegenden Analytik unterschiedlich stark auf bspw. Hoch- oder Niedrigwasserabflüsse. Für eine effektive Kalibrierung sind daher Analysen verschiedener Statistiken zur vollständigen Erfassung von Zeitreihen erforderlich

(Moriasi et al. 2007, 892). Als numerisches Gütekriterium wird u. a. die prozentuale Verzerrung ($pBias$) der vorhergesagten Werte von den beobachteten Werten verwendet, um die Qualität der Modellanpassung zu bewerten (Engel et al. 2007). Engel et al. (2007) empfehlen zudem die Festlegung von Zielwerten, welche als Orientierung für eine erfolgreiche Kalibrierung dienen. Eine detaillierte Beschreibung aller Gütekriterien ist in Abschnitt 3.2 beschrieben.

Moriasi et al. (2007) setzen die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse vor der Kalibrierung voraus, welche manuell oder automatisch durchgeführt werden kann.

Aufgrund des Zeitvorteils gegenüber der manuellen Kalibrierung erhält die automatische Kalibrierung in der Praxis zunehmende Aufmerksamkeit und Anwendung. Ein Vorteil ist der systematische Ansatz, der Voreingenommenheit seitens der Anwender:innen ausschließt. Im manuellen Kalibrierungsprozess besteht die Gefahr, dass Modellierer:innen zum Erreichen der erwünschten Ergebnisse die Modellparameter ungeachtet der physikalischen, logischen oder realen Gegebenheiten anpassen. Dies führt dazu, dass das Modell das Erreichen der Projektziele und -hypothesen bestätigt, die Realität aber nicht ausreichend abbildet. Eine Übertragung der Modellergebnisse in die Realität ist in dem Fall nicht möglich. (Engel et al. 2007)

Durch die Integration halbautomatischer Tools in den manuellen Kalibrierungsprozess werden potenzielle Fehlerquellen minimiert und der Arbeitsaufwand sowie die Anforderungen an Anwender:innen reduziert (Gupta et al. 1999).

Dennoch ist selbst durch eine ordnungsgemäße Kalibrierung keine vollständige Vermeidung von Modellfehlern zu gewährleisten (Moriasi et al. 2007, 892). Für Anwender:innen besteht die Herausforderung darin, diese Fehler zu identifizieren und zu bewerten.

WHM werden üblicherweise durch eine sukzessive Kalibrierung der hydrologischen Komponenten optimiert. Die Kalibrierung erfolgt in der Regel schrittweise und beginnt mit den hydrologischen Komponenten, gefolgt von weiteren Bestandteilen wie beispielsweise Sedimenten oder Nährstoffen. (Engel et al. 2007, 1231)

Abbildung 2.5 zeigt das methodische Vorgehen der manuellen Kalibrierung im Rahmen dieser Arbeit. Dazu wird der Gesamtabfluss in die Abflusskomponenten unterteilt und schrittweise einzeln analysiert. Die Anpassung der Komponenten-Parameter wird wiederholt, bis die definierten Gütekriterien erreicht sind. Anschließend wird der Bearbeitungsschritt mit der folgenden Abflusskomponente bzw. der Gewässertemperatur analog wiederholt. Die Kalibrierung ist mit Erreichen der definierten Gütekriterien der Gewässertemperatur abgeschlossen.

Eine gängige Methode zur Verwendung ist die Aufteilung der gemessenen Daten in zwei Datensätze zur Kalibrierung und Validierung, wobei beide Datensätze ähnliche Variabilität und Zustände aufweisen (Engel et al. 2007, 1232).

2.3.2 Bedeutung der Validierung

Die Validierung eines Modells bezeichnet den Prozess, bei dem die innere Logik des Modells überprüft wird. Dabei wird sichergestellt, dass es fehlerfrei arbeitet und konsistente Ergebnisse liefert. Dieser Schritt gewährleistet, dass das Modell für den vorgesehenen Zweck korrekt eingesetzt werden kann. (Maniak 2016, 408)

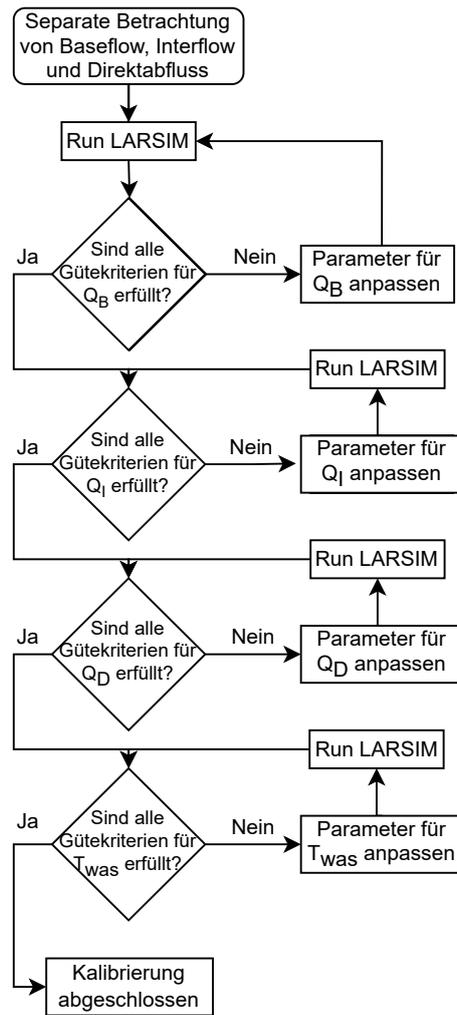


Abbildung 2.5: Kalibrierungsprozess für die Komponenten Basisabfluss, Interflow, Direktabfluss und Wassertemperatur, Quelle: verändert nach Santhi et al. (2001, 1175)

Grundlegend geht es darum, die Realitätstreue des Modells in Situationen unabhängig des Kalibrierungsprozesses durch die Untersuchung der Ganglinienunterschiede zu bestätigen (Buchholz 2020).

Die Validierung basiert auf einer zweiten Beobachtungsperiode, die nicht zur Kalibrierung des Modells verwendet wurde, und verwendet die zuvor kalibrierten Eingangsparameter. Durch diesen Vergleich können Abweichungen des Modells von den Naturbeobachtungen aufgezeigt werden und der Einfluss der zeitvariablen Parameter kann indirekt erfasst werden. (Maniak 2016, 409; Jachner et al. 2007)

Die Bewertung der Validierung kann analog zur Kalibrierung über qualitative und quantitative Methoden erfolgen (Jachner et al. 2007). Als eine qualitative Methode fordern Grimm et al. (1996) eine stärkere Orientierung der Modellhandhabung anhand beobachteter Muster. Eine musterorientierte Bewertung von Modellen erfordert eine subjektive Beurteilung durch die Anwender:innen und setzt daher ein hohes Maß an Qualifikation und Sachverständnis voraus. Der Vergleich zwischen Mustern, die in der Natur beobachtet werden, und Mustern, die durch ein Modell erzeugt werden, liefert skalenunabhängige Erkenntnisse. (Grimm et al.

1996)

Während der Validierung werden oft weniger strenge Bewertungskriterien angewendet, wie von Moriasi et al. (2007) empfohlen. Die Validierung wird mit Modellparametern durchgeführt, welche während der Kalibrierung mit unterschiedlichen Randbedingungen ermittelt wurden und somit nicht auf den Validierungszeitraum angepasst sind. Daher empfehlen Moriasi et al. (2007, 893), die Bewertungskriterien zu lockern, um eine realistische Einschätzung der Leistung des Modells zu erhalten.

Die Relevanz von Messdaten zur Detektion der Realitätstreue ist bekannt. Bennett et al. (2013) beschreiben mit der *cross-validation* und *bootstrapping* zwei Arten zur Validierung bei unzureichenden Realdaten.

Die *cross-validation*-Methode zeichnet sich durch eine beliebig häufige Unterteilung der Datensätze und die Simulation des Modells für jeden Teildatensatz aus. Im Anschluss werden die Gütekriterien für jede Simulation ermittelt. Zur Bewertung werden die gemittelten Gütekriterien aller Simulationen herangezogen. (Kohavi 1995)

Bei der *bootstrapping*-Methode findet eine zufällige Simulation des Modells mit ersetzten Daten oder Datenblöcken statt. Die Analyse der Residuen der ersetzten Daten liefert Erkenntnisse über die Güte der Simulation. (Bennett et al. 2013, 7)

Zur Gewährleistung einer umfassenden Validierung sind dieselben statistischen Kenngrößen wie bei der Kalibrierung zu verwenden. Dies ermöglicht einen direkten Vergleich der Leistung zwischen beiden Prozessen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Statistikwerte, die bei der Validierung gemessen werden, in der Regel niedriger als die bei der Kalibrierung erzielten Werte sind. Dies kann die Beurteilung der Modellleistung erschweren, insbesondere wenn es keine klaren Richtlinien für die Leistungsbewertung gibt. Es ist daher wichtig, bei der Validierung auf eine sorgfältige und kritische Bewertung der Ergebnisse zu achten. (Engel et al. 2007, 1233)

2.4 Datenaufbereitung und Modellerstellung

Im folgenden Abschnitt werden die Bearbeitungsschritte zur Aufbereitung des LARSIM-Modells erläutert. Dazu wird im ersten Schritt das Modell gesichtet und anschließend eine georeferenzierte Darstellung aller relevanten Stationen und Orte erstellt. Abschließend werden die Messdaten sowohl zeitlich als auch mengenmäßig aufbereitet und ergänzt.

Schritt A0 - Modellsichtung

Das HLNUG ist verantwortlich für die WHM und WM der hessischen Gewässer. Es betreibt WWM der hessischen Gewässerabschnitte von Rhein, Main, Nidda, Kinzig, Gersprenz und Mümling (vgl. Abbildung 2.6). Für die Lahn betreibt das HLNUG ein WHM ohne Einbindung eines Wärmemoduls (Kremer 2022).

Der in dieser Arbeit behandelte Modellausschnitt der Lahn von der Quelle in Lahnhof bis zum KW-Gießen (Abbildung 2.7) stellt einen Teil des gesamten WHM Lahn dar. Dieser Ausschnitt wird inkl. der Systemdateien, welche relevant für das Wärmemodul sind, vom HLNUG zur Verfügung gestellt.

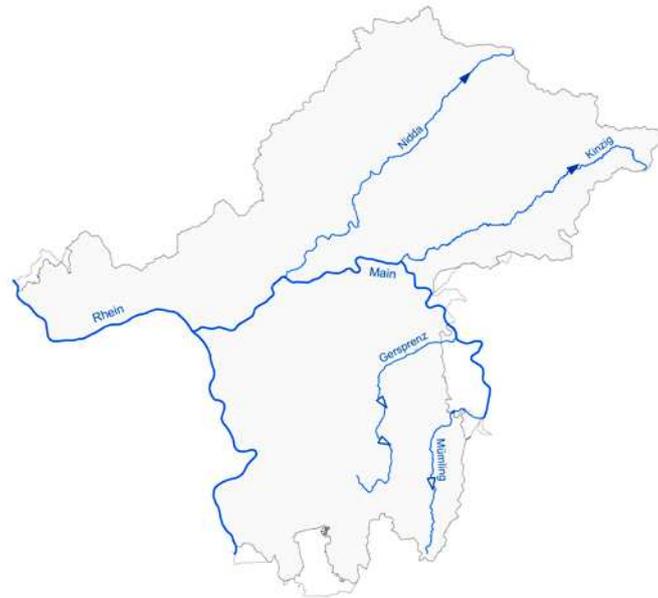


Abbildung 2.6: WWM-Netz des HLNUG,
Quelle: Hydron-GmbH (2023)

Der Modellausschnitt enthält die Unterteilung des EZG in 439 TEZG, wobei das TEZG 1 die Lahnquelle und 439 das KW-Gießen darstellt.

Schritt A1 - Georeferenzierung

Zur Visualisierung wird mit QGIS¹ als Geoinformationssystem (GIS) eine Übersicht des Untersuchungsgebietes erstellt. Dazu wird das EZG, die TEZG und die Messstellen des Modells übernommen und mittels entsprechender Georeferenzierung dargestellt (vgl. Abbildung 2.8). Die zur Verfügung gestellten meteorologischen Daten beinhalten sämtliche Messstellen des HLNUG. Zur besseren Handhabung werden die Daten von nicht im EZG Lahn liegenden Messstellen bereinigt (in Abbildung 2.8 transparent dargestellt). Die Verknüpfung von Systemdateien und den Dateien der Messdaten zur LARSIM-Anwendung findet in der Datei pfade.dat statt. Dies bietet den Vorteil, dass zur Nachverfolgung die Dateien der Messdaten dupliziert, umbenannt (Ergänzung um den Index „_A1“) und von nicht relevanten Messstellen bereinigt werden können. Die Einbindung ins Modell findet anschließend in der Datei pfade.dat statt.

Das Untersuchungsgebiet inkludiert 17 Niederschlagsmessstationen und sechs Lufttemperatur- und Luftfeuchtigkeitsmessstellen. Hinzu kommen 13 Pegel mit drei Wassertemperaturmessstellen. An weiteren drei Standorten werden Windgeschwindigkeit, Luftdruck und Sonnenscheindauer genommen. Im Untersuchungsgebiet ist bislang keine Globalstrahlungsmessstation hinterlegt, sodass die Messdaten von vier regional angrenzende Stationen verwendet werden.

¹Version 3.22.12-Białowieża

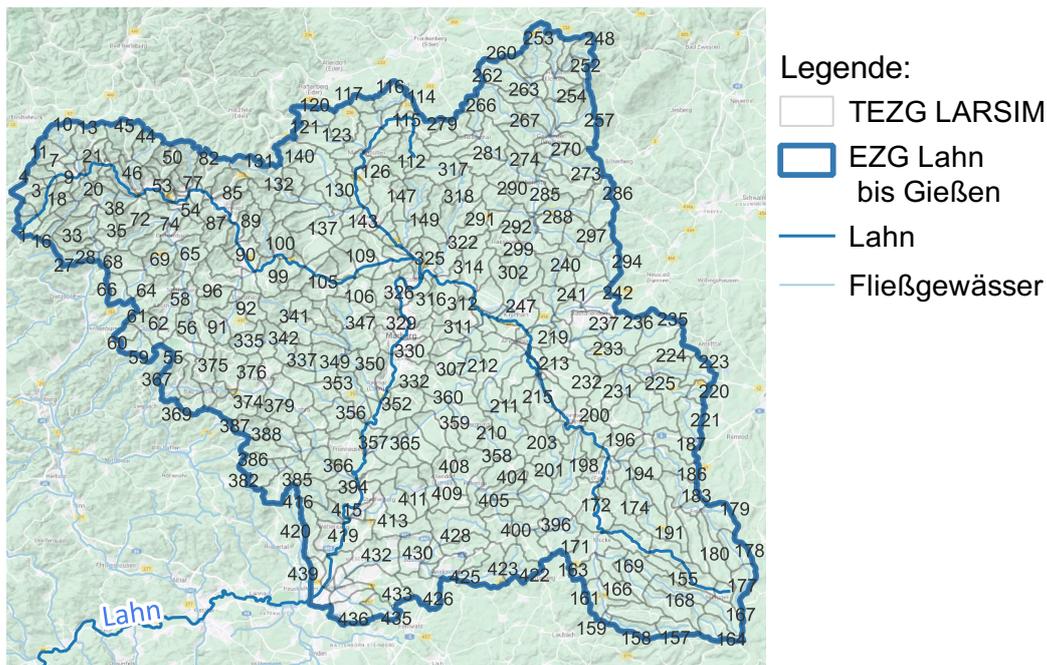


Abbildung 2.7: Darstellung des Einzugsgebiets Lahn bis KW-Gießen mit allen Teileinzugsgebieten des LARSIM-Modells im Ausgangszustand,
Quelle: eigene Darstellung, erstellt mit QGIS 3.22.12-Białowieża

Schritt A2 - Erweiterung der Messdaten bis 2022

Das LARSIM-Modell im Ausgangszustand des HLNUG beinhaltet meteorologische Messdaten bis einschließlich 2018, weshalb die vorhandenen Messdaten im Schritt A2 um den Zeitraum 01.01.2019 bis 31.12.2022 ergänzt werden. Die Daten sind dem Climate Data Center (CDC) des Deutschen Wetterdienstes (DWD 2022a) und dem WISKI-Web des HLNUG (HLNUG 2022) entnommen. Eine Zuordnung der Messstationen zu den Datenquellen ist Tabelle A.1 zu entnehmen.

Bei der Integration der Messdaten in das Modell wird die Datenqualität berücksichtigt. Die Bewertung der Datenqualität variiert je nach ihrer Herkunft. Beim CDC werden die Daten separat anhand von Beanstandungen und Qualitätsprüfungsverfahren bewertet. Im vorliegenden Arbeit werden beanstandete Daten durch Platzhalter ersetzt. Für den Zeitraum von 2019 bis 2022 sind sämtliche Daten, die über das WISKI-Web erhoben wurden, als ungeprüft gekennzeichnet. Im Zuge der Datenaufbereitung werden diese Daten auf das Vorhandensein von Fehlern überprüft und gegebenenfalls durch Platzhalter ersetzt. Zur Integration der Messdaten aus dem Zeitraum 2019-2022 wird die Tabellenkalkulationssoftware Microsoft Excel verwendet. Analog zum vorherigen Schritt werden die Datendateien dupliziert und der Index in der Dateibezeichnung auf „_A2“ gesetzt. Abschließend findet der Verweis auf die erstellten Dateien in pfade.dat statt.

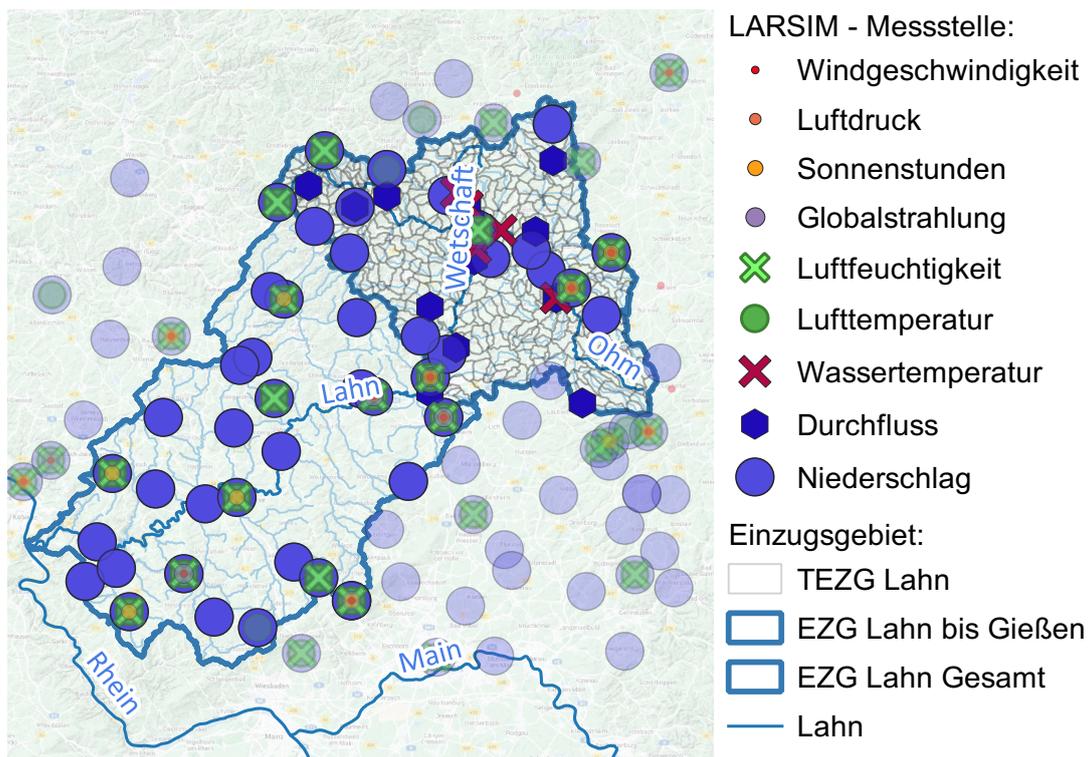


Abbildung 2.8: Darstellung des gesamten Einzugsgebiets Lahn unter Berücksichtigung aller Messstellen, bereinigte Messstellen sind transparent dargestellt, Quelle: eigene Darstellung, erstellt mit QGIS 3.22.12-Białowieża

Schritt A3 - Erweiterung um Messstellen

Im abschließenden Schritt A3 der Datenaufbereitung und Modellerstellung werden die bisherigen Datendateien um weitere Messstellen und Pegel ergänzt. Ergänzt werden

- zwei Pegel: Niederwetter und Freienseen
- drei Wassertemperaturmessstellen: WW-Wehrda, Ober-Ofleiden und Kranzmühle
- eine Globalstrahlungsmessstelle: Gießen-Wettenberg

Die Messstation Niederwetter ist im Modell-Ausgangszustand als Wassertemperaturmessstelle enthalten und wird in diesem Schritt um die Pegeldata ergänzt. Der Pegel Freienseen misst den Durchfluss des Seenbachs. Mit einer Größe von 11 km² ist das EZG dieses Pegels vergleichsweise gering, sodass die pegelzugehörigen Daten des HLNUG (2022) keinen nennenswerten Einfluss auf die Simulation haben.

Die Station Ober-Ofleiden ist im Modell als Pegel hinterlegt und wird um die Wassertemperaturdaten entsprechend der Werte vom HLNUG (2022) ergänzt. Bei der Station Kranzmühle handelt es sich um eine Messstation des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität Darmstadt, welche seit 11.11.2019 betrieben wird. Die Daten dieser Station werden ausschließlich im Abschnitt 3.4 verwendet.

Die Wassertemperaturdaten aus Wehrda entstammen der Messung der dort ansässigen

Tabelle 2.1: Verwendete Tools

Tool	Zweck/Funktion	Beschreibung
LISA (vorhanden)	Visualisierung	Visualisierung von Ganglinien
python_Q (selbst entwickelt)	Datenmanipulation	Datenmanipulation während der Abfluss-Kalibrierung
python_Twas (selbst entwickelt)	Datenmanipulation	Datenmanipulation während der Wassertemperatur-Kalibrierung
Matlab (selbst entwickelt)	Datenverarbeitung	Auswertung von Ergebnissen und Erstellung von Grafiken

WW-Wehrda. Aus Projektgründen sind diese Daten äußerst relevant, da sich keine weiteren Wassertemperaturmessstellen im betrachteten Projektgebiet an der Lahn befinden. Die Station Gießen-Wettenberg ist bereits im LARSIM-Modell eingepflegt und speist das Modell mit Daten zu Niederschlag, Sonnenstunden, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, -druck und -feuchtigkeit. Im Rahmen dieses Bearbeitungsschrittes werden die Globalstrahlungsdaten dieser Station aus DWD (2022a) entnommen und ins Modell eingepflegt. Weitere Stationen sind nicht zu ergänzen. In diesem Zustand wird das Modell im weiteren Rahmen dieser Arbeit verwendet.

2.5 Unterstützende Tools zur Versuchsdurchführung

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Tools verwendet, um die Forschungsziele zu erreichen. Es werden neben eigens entwickelten Programmen ergänzend eine vorhandene, zugängliche Softwarelösung eingesetzt. Die selbst entwickelten Programme übernehmen spezifische Aufgaben im Zusammenhang mit der Datenmanipulation und -auswertung und im Kalibrierungsprozess, wohingegen das vorhandene Tool zur Visualisierung von Ganglinien dienen. Eine Auflistung der Tools ist Tabelle 2.1 zu entnehmen.

Beim Visualisierung von Zeitreihen im LILA-Format (LISA)-Tool handelt es sich um ein von der LEG zur Verfügung gestelltes Tool zur Visualisierung von Daten im LILA-Format (LEG 2023, LILA (Listenformat für LARSIM)). Es ist in der Programmiersprache Java geschrieben und wird in der Version 0.18.3 verwendet. Das LISA-Tool bietet die Möglichkeit der Visualisierung von Dateien im LILA-Spalten-, -Block und -Einzel-Format, sowie der Darstellung von Stationsinformationen und Statistiken der betrachteten Ganglinien. Zudem lassen sich spezifische Designvorlagen bspw. je Datenursprung oder Datenart erstellen, welches die Auswertung erleichtert und für eine Konsistenz in den Grafiken sorgt. (Hunger 2019)

Im Rahmen dieser Arbeit wird das LISA-Tool zur schnellen und oberflächlichen Visualisierung, um Muster und Trends auf einen ersten Blick zu erkennen, genutzt. Die explizite Auswertung der Daten findet in selbst entwickelten Tools (siehe unten) statt, sodass nicht der volle Funktionsumfang des LISA-Tools genutzt wird. Die Ausgabe von Grafiken mittels des LISA-Tools ist bspw. Abbildung 3.2 zu entnehmen.

Zur Durchführung der Kalibrierung werden zwei Tools in Python programmiert. Die Aufgabe dieser Tools ist es, die gebietsspezifischen Parameter, welche während des Kalibrierungsprozesses angepasst werden, zu manipulieren, die Simulation zu starten und die Ergebnisse

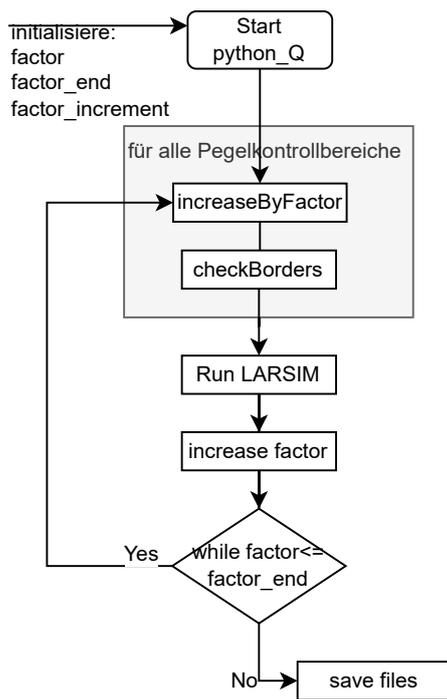
zu sichern. Bei der Erstellung der beiden Tools „python_Q“ und „python_Twas“ werden unterschiedliche Ansätze gewählt, sodass eine Bewertung der beiden Vorgehen stattfinden kann.

Das Tool „python_Q“ kommt bei der Kalibrierung der Abflusskomponenten (vgl. Abschnitt 3.3.1 bis Abschnitt 3.3.3) zum Einsatz. Es definiert eine Klasse namens „PegelControllArea“ und mehrere Parameterdictionaries, eins je Pegelkontrollbereich. Die Parameterdictionaries beinhalten die pegelkontrollbereichsspezifischen Gebietsinformationen der tape35.dat-Datei als Schlüssel-Wert-Paare, sodass auf ein Einlesen dieser Datei verzichtet werden kann. Beim Initialisieren wird je Dictionary eine Klasseninstanz gebildet. Die wichtigsten Funktionen der Klasse sind `increaseByFactor(self, name, factor)` und `checkBorders(self, name, lBorder, uBorder)`. `increaseByFactor(self, name, factor)` multipliziert den Parameter „name“ mit dem Faktor „factor“. Die Funktion `checkBorders(self, name, lBorder, uBorder)` prüft anschließend, ob der Parameter „name“ innerhalb der Parametergrenzen „lBorder“ und „uBorder“ ist und ersetzt ihn ggf. mittels des über- oder unterschrittenen Grenzwertes.

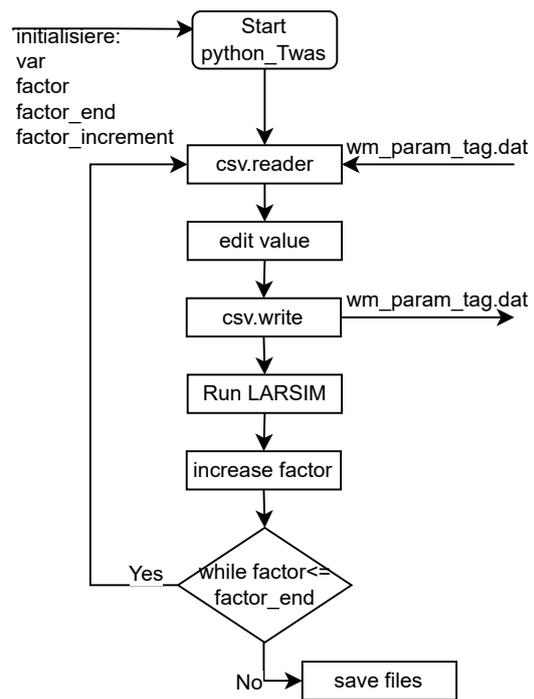
Der Programmablauf (vgl. Abbildung 2.9a) beruht auf einer `while`-Schleife. Es werden Parameterschlüssel, Start- und Endwert und die Schrittweite definiert. Innerhalb der Schleife wird die Funktion `increaseByFactor` für den gewählten Parameter und mit dem Wert der aktuellen Laufvariablen als „factor“ ausgeführt. Darauf hin werden die Parametergrenzen über die Funktion `checkBorders` überprüft. Anschließend wird die LARSIM-Simulation ausgeführt und die Ergebnisdateien aus dem result-Ordner in einen definierten Zielordner kopiert.

„python_Twas“ wird im Kalibrierungsprozess der Flusswärme (vgl. Abschnitt 3.3.4) eingesetzt. Das Tool beruht ebenfalls auf einer `while`-Schleife (Abbildung 2.9b). Im Gegensatz zum Tool „python_Q“ liest dieses Tool die Datei `wm-param-tgb.dat` über die Python-Funktion `csv.reader` ein und überträgt die Daten in ein `data`-Array. Anschließend wird je Schleifendurchlauf die entsprechende Variable jedes Teilgebiet (TGB) mittels der Laufvariable der Schleife multipliziert. Das Datenarray wird nach der Manipulation in eine Datei im Zielverzeichnis übertragen (`csv.write`) und die LARSIM-Simulation gestartet. Abschließend werden die definierten Ergebnisdateien, analog zur vorherigen Funktion, in einen Zielordner kopiert.

Das Vorgehen der beiden Python-Funktionen ist ähnlich, allerdings unterscheiden sie sich maßgebend in der Art der Datenbereitstellung. Im Prozess hat sich gezeigt, dass die zeitgleiche Variation mehrere Parameter in „python_Q“ leichter zu realisieren ist. Nach erfolgreicher Kalibrierung eines Parameters ist dieser Parameter mit einem festen Faktor zu versehen und der folgende Parameter kann über die Laufvariable manipuliert werden. So werden alle Datenstände vom Ausgangsdatensatz ausgehend angepasst. Das Einlesen einer Datei in „python_Twas“ hat hingegen den Vorteil der Nachverfolgbarkeit. Nach erfolgreicher Kalibrierung eines Parameters muss die erstellte Datei als Eingabedatei für den nächsten Parameter verwendet werden. So entsteht für jeden zu kalibrierenden Parameter eine Datei und die Vergleichbarkeit zwischen den Datenständen ist simpler. Eine Ausgabe von Zwischenständen ist beim Tool „python_Q“ ist nur mit Anpassungen im Code möglich. Bei den Matlab-Tools handelt es sich um Skripte, welche die durch „python_Q“ und „python_Twas“ bereitgestellten Ergebnisdateien einlesen und die Gütekriterien (vgl. Abschnitt 3.2)



(a) Tool: python_Q



(b) Tool: python_Twas

Abbildung 2.9: Ablaufdiagramme der Python-Tools,
Quelle: eigene Darstellung

berechnen. Die Ergebnisdarstellungen in Form von Grafiken werden ebenfalls mittels dieser Matlab-Tools erstellt. Dazu werden Funktionen implementiert, welche mittels eines Dateipfades als Übergabeparameter die Ergebnisdateien einlesen und automatisch die Gütekriterien berechnen. So wird der Arbeitsaufwand je Ergebnisdatei minimiert und sichergestellt, dass alle behandelten Daten im gleichen Format vorliegen. Des Weiteren sind Funktionen vorhanden, welche die so eingelesenen Daten auf analoge Weise graphisch aufbereiten.

3 Kalibrierung und Validierung

In diesem Abschnitt wird die Kalibrierung und Validierung des LARSIM-Modells der Lahn bis zum Klärwerk-Gießen (KW-Gießen) behandelt. Dazu wird beginnend das Vorgehen unter Nennung von Randparametern und Zeiträumen festgelegt. Anschließend wird auf Gütekriterien eingegangen, diese beschrieben und kritisch diskutiert.

Den Hauptteil des Kapitels macht die Beschreibung der Kalibrierung aus, welche zwischen Abflusskomponenten und Temperaturregime differenziert. Anschließend wird die Validierung der Ergebnisse durchgeführt. Das Kapitel schließt mit der Bewertung der Kalibrierungs- und Validierungsergebnissen ab.

3.1 Vorgehen

Wie in Abschnitt 2.4 erläutert, ist das zugrundeliegende Modell im operationellen Betrieb beim HLNUG im Einsatz. Das WHM ist für den Zeitraum 1981-2010 kalibriert. Die Systemdateien des Wärmemoduls zur Vervollständigung des WWM wurden nachträglich für die Bearbeitung dieser Arbeit ergänzt (Kremer 2023).

Für die Kalibrierung werden der Pegel Marburg und der Standort der Wasserwerke Wehrda (WW-Wehrda) (siehe Abbildung 1.3) als Projektstandorte fokussiert.

Im zweiten Schritt wird der Kalibrierungszeitraum auf die Jahre 2012 bis einschließlich 2018 definiert. Als Validierungszeitraum werden die anschließenden Jahre 2019 bis einschl. 2022 festgelegt.

Die Wahl der Zeiträume wird durch die klimatischen Veränderungen des 21. Jhd. begründet. Dieses Modell soll Planungssicherheit bei der Nutzung von Flusswärme als hydrothermale Energiequelle liefern, weshalb die Darstellung aktueller, klimatischer Bedingungen besonders wichtig ist.

Die Aufteilung in einen längeren Kalibrierungs- und einen kürzeren Validierungszeitraum folgt dem Vorgehen von Haag et al. (2021). Die Vorhersagekraft klimatischer Modellergebnisse für mittelfristige Zeiträume stützt auf den Vergleich vergangener Ergebnisse mit Realdaten. Zum Teil werden in der Anwendung von WHM insbesondere für den operationellen Hochwasserschutz Kalibrierungszeiträume von >10 Jahren empfohlen (Haag et al. 2021). Dies ist besonders auf das hohe Schadenspotenzial von Hochwasserereignissen, hier ist beispielsweise das Ahrtal-Hochwasser im Juli 2021 zu nennen, und die Relevanz von frühzeitigen Warnungen zurückzuführen.

Das hier behandelte Modell dient dem Zweck der Energienutzung. Daher liegt der Fokus beim Kalibrieren auf der Heizperiode von circa Oktober bis April. Die Abbildung einzelner Starkregen- oder Hochwasserereignisse wird im Rahmen dieser Arbeit im Gegensatz

zum operationellen Hochwasserschutz weniger stark gewichtet. Es ist anzumerken, dass während der Heizperiode häufiger mit hohen Abflüssen zu rechnen ist.

Das Modell wird zur Kalibrierung in die Pegelgebietsabschnitte Biedenkopf, Ober-Ofleiden, Gemünden, Marburg, Etzelmühle und KW-Gießen eingeteilt und beinhalten jeweils den Flussabschnitt bis zum gleichnamigen Pegel.

3.2 Gütekriterien zur Bewertung der Modellergebnisse

Gütekriterien lassen Aussagen über die Genauigkeit von Modellen zu und sind so ein Indiz für die Verlässlichkeit der Modellvorhersagen. Es gibt sowohl graphische als auch statistische Evaluationstechniken.

Moriasi et al. (2007) unterteilen die statistischen Gütekriterien in Standardregression, dimensionslose Verfahren und Fehler-Indizes. Dabei bewerten Standardregressionsstatistiken die lineare Beziehung zwischen simulierten und gemessenen Werten, dimensionslose Verfahren liefern eine relative Modellbewertung und Fehler-Indizes geben quantifizierte Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Daten in der entsprechenden Einheit wieder (Legates und McCabe 1999; Moriasi et al. 2007).

Als Güteparameter der anstehenden Kalibrierung werden das Bestimmtheitsmaß nach Bravais-Pearson (B), die Nash-Sutcliff-Modelleffizienz (NSE), die logarithmierte Nash-Sutcliff-Modelleffizienz ($lnNSE$) und die prozentuale Verzerrung ($pBias$) gewählt. Die Parameter Mittelwert, Standardabweichung und Varianz werden bei der Analyse der Ganglinien mit berechnet und liefern untergeordnete Erkenntnisse. Im Rahmen dieser Arbeit werden dementsprechend die erstgenannten Parameter aufgrund der höheren Gewichtung fokussiert.

Das Bestimmtheitsmaß nach Bravais-Pearson (B) zählt zu den Standardregressionsstatistiken und wird wie folgt berechnet:

$$B = r^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{gem,i} - \overline{Q_{gem}})(Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{gem,i} - \overline{Q_{gem}})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \overline{Q_{sim}})^2} \quad (3.1)$$

mit: $B = r^2 =$ Bestimmtheitsmaß nach Bravais-Pearson [–]

$Q_{gem,i}$ = gemessener Durchfluss zum Zeitpunkt i [m^3/s]

$Q_{sim,i}$ = simulierter Durchfluss zum Zeitpunkt i [m^3/s]

$\overline{Q_{gem}}$ = durchschnittlich gemessener Durchfluss [m^3/s]

$\overline{Q_{sim}}$ = durchschnittlich simulierter Durchfluss [m^3/s]

Das Bestimmtheitsmaß ist angegeben als das Quadrat der Korrelation und hat den Wertebereich $0 \leq B \leq 1$. $B = 1$ stellt das Ergebnis dar, in dem die Modellergebnisse den Naturergebnissen entsprechen. Es beschreibt den Anteil der Gesamtvarianz der gemessenen Daten anhand der durch das Modell gelieferten Daten. Es lässt additive oder proportionale Abweichungen zwischen simulierten und gemessenen Gangreihen außer Acht und ist zudem empfindlich gegenüber Ausreißern. (Legates und McCabe 1999)

Die prozentuale Verzerrung ($pBias$) nach Moriasi et al. (2007) gibt die Abweichung der Summe zwischen gemessenem und simuliertem Abfluss im Verhältnis zur Summe des gemessenen Abflusses an.

$$pBias = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{gem,i} - Q_{sim,i}) * 100 \%}{\sum_{i=1}^n (Q_{gem,i})} \quad (3.2)$$

mit: $pBias$ = prozentuale Verzerrung [–]

$Q_{gem,i}$ = gemessener Durchfluss zum Zeitpunkt i [m^3/s]

$Q_{sim,i}$ = simulierter Durchfluss zum Zeitpunkt i [m^3/s]

Somit ist $pBias$ ein Maß für die generelle Über- oder Unterschätzung eines Modells. Der Wert 0,0 gibt den idealen Wert an. Werte kleiner 0 geben eine generelle Überschätzung und größer 0 eine Unterschätzung des Reals durch das Modell an. Für Simulationen mit monatlichem Zeitschritt kann der $pBias$ -Wert ab $\leq \pm 15 \%$ als gut und ab $\leq \pm 10 \%$ als sehr gut eingestuft werden. (Moriasi et al. 2007)

Die Nash-Sutcliffe-Modelleffizienz (NSE) nach Nash und Sutcliffe (1970) zählt zu den dimensionslosen statistischen Verfahren der Modellbewertung. Der Wert ist definiert als Quotient der Differenz aus Ausgangsvarianz und Restvarianz zur Ausgangsvarianz (Nash und Sutcliffe 1970). Der NSE -Wertebereich geht von $-\infty$ bis 1,0, wobei 1,0 eine perfekte Übereinstimmung angibt. Allgemein gelten Werte zwischen 0,0 und 1,0 als akzeptabel. (Moriasi et al. 2007)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_{gem,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{gem} - Q_{gem,i})^2} \quad (3.3)$$

mit: NSE = Nash-Sutcliffe-Modelleffizienz [–]

$Q_{gem,i}$ = gemessener Durchfluss zum Zeitpunkt i [m^3/s]

$Q_{sim,i}$ = simulierter Durchfluss zum Zeitpunkt i [m^3/s]

Q_{gem} = durchschnittlich gemessener Durchfluss [m^3/s]

Für hydrologische Modelle ist NSE eine verbreitet und zuverlässige Methode, um die Modellgüte zu bewerten. Ein guter NSE -Wert weist auf eine gute Abschätzung des Mittelwertes und eine geringe Varianz hin. Die Studie von McCuen et al. (2006) zeigt, dass Ausreißer in den Ganglinien-Daten die NSE stark nachteilig beeinflussen können. Ein Zeitversatz oder eine Verzerrung der simulierten Daten wirken sich ebenfalls negativ auf die NSE aus. (McCuen et al. 2006)

Für Simulationen mit monatlichem Zeitschritt liefern Moriasi et al. (2007) eine Leistungsbewertung des Faktors NSE , wobei ein Wertebereich von $0,65 < NSE \leq 0,75$ als gut und ein Bereich von $0,75 < NSE \leq 1,00$ als sehr gut gilt (Moriasi et al. 2007, Tabelle 4).

Um die Modellgüte mittels NSE in Bezug auf geringere Abflüsse besser bewerten zu können, wird die logarithmierte Nash-Sutcliff-Modelleffizienz ($lnNSE$) eingeführt. Durch die Logarithmierung des Abflusses $\ln Q$ werden große Abflussmengen weniger stark berücksichtigt und geringe Abflusswerte höher gewichtet. (Hailegeorgis et al. 2015)

$$lnNSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\ln Q_{sim,i} - \ln Q_{gem,i})^2}{\sum_{i=1}^n (\overline{\ln Q_{gem,i}} - \ln Q_{gem,i})^2} \quad (3.4)$$

mit: $lnNSE$ = logarithmierte Nash-Sutcliff-Modelleffizienz [-]
 $\ln Q_{gem,i}$ = logarithmierter, gemessener Durchfluss zum Zeitpunkt i [-]
 $\ln Q_{sim,i}$ = logarithmierter, simulierter Durchfluss zum Zeitpunkt i [-]
 $\overline{\ln Q_{gem}}$ = durchschnittlich logarithmierter, gemessener Durchfluss [-]

Durch das Logarithmieren steigt der Einfluss der Abflussdynamik auf das Ergebnis der Gleichung und die Werte von $lnNSE$ sind schwieriger zu interpretieren.

Die nach Kling et al. (2012) modifizierte Kling-Gupta-Effizienz (KGE') zählt zu den dimensionslosen Kriterien und wird gemäß Gleichung 3.5 berechnet.

$$KGE' = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 + (\beta - 1)^2 + (\gamma - 1)^2} \quad (3.5)$$

mit: KGE' = Kling-Gupta-Effizienz [-]
 $\beta = \frac{\overline{Q_{sim}}}{\overline{Q_{gem}}}$ = Verzerrung [-]
 $\gamma = \frac{\sigma_{sim}/\overline{Q_{sim}}}{\sigma_{gem}/\overline{Q_{gem}}}$ = Variabilitätsverhältnis [-]
 σ_{gem} = Standardabweichung der gemessenen Daten [(m³/s)]
 σ_{sim} = Standardabweichung der simulierten Daten [(m³/s)]
 $\overline{Q_{gem}}$ = durchschnittlich gemessener Durchfluss [(m³/s)]
 $\overline{Q_{sim}}$ = durchschnittlich simulierter Durchfluss [(m³/s)]

Der KGE' -Wert ist abhängig von der Korrelation r zwischen simulierter und gemessener Ganglinie, dem Quotienten β der mittleren simulierten und gemessenen Abflusswerten und dem Quotienten γ der simulierten und gemessenen Streukoeffizienten. Die Modifikationen nach Kling et al. (2012) sollen eine Kreuzkorrelation zwischen der Verzerrung β und dem Variabilitätsverhältnis γ verhindern. (Kling et al. 2012)

Im Vergleich zum NSE ist der Einfluss von Abflussmaxima auf KGE' geringer. Zudem inkludiert KGE' auch die Modellverzerrung und das Variabilitätsmaß. Eine Verbesserung von KGE' lässt Rückschlüsse auf eine Verbesserung dieser Werte zu, was bei NSE nicht gegeben ist. Ein KGE' -Wert von 1,0 definiert Modellergebnisse, welche den Realzustand abbilden. (Gupta et al. 2009)

Der visuelle Vergleich der Ganglinien wird bei der Auswertung insbesondere der Abflusskomponenten stark gewichtet. Für die visuelle Kalibrierung werden im entsprechenden Zeitraum die gemessene und die simulierte Abflussganglinie verglichen. Bei der Betrachtung werden Nass- und Trockenphasen, das Verhalten der Abflusswellen und der Ganglinienverlauf über den gesamten Betrachtungszeitraum berücksichtigt. Für die Kalibrierung der Abflusskomponenten wird im Abschnitt 3.3 eine Methode zur Ganglinienseparation durchgeführt.

Tabelle 3.1: Gütekriterien des Gesamtabflusses im Ausgangszustand und die Zielwerte der Gütekriterien nach Kalibrierung

Pegel Marburg	B	$pBias$	NSE	$lnNSE$	KGE'
im Ausgangszustand	0,9737	-5,0689	0,9702	0,9569	0,9429
Zielwerte	$\geq 0,97$	$\pm 2,0$	$\geq 0,97$	$\geq 0,96$	$\geq 0,94$

Zur Unterstützung der visuellen Auswertung werden die Abflüsse der simulierten und gemessenen Abflussganglinie am Pegel Marburg der Größe nach sortiert und gegeneinander aufgetragen. Zusätzlich wird die prozentuale Abweichung der simulierten zur gemessenen Abflussmenge bezogen auf die gemessene Abflussmenge dargestellt (Gleichung 3.6). Dieser Graph ist ebenfalls ein Indiz für die prozentuale Verzerrung ($pBias$). Die Abszissenachse stellt die Anzahl der Messungen bzw. der Simulationsschritte dar. (vgl. Abbildung 3.1)

$$\Delta[\%] = \frac{Q_{sim,i} - Q_{gem,i}}{Q_{gem,i}} * 100 \% \quad (3.6)$$

mit: Δ = prozentuale Abweichung des simulierten zum gemessenen Abflusses [%]
 $Q_{gem,i}$ = gemessener Durchfluss zum Zeitpunkt i [(m³/s)]
 $Q_{sim,i}$ = simulierter Durchfluss zum Zeitpunkt i [(m³/s)]

Die Identity-Linie wird als weiteres visuelles Instrument der Modellbewertung angewendet. Die Identity-Linie, oder auch 1:1-Linie genannt, zeigt mittels Punktwolke die generelle Übereinstimmung von simulierten und gemessenen Daten. Zusätzlich wird die Punktwolke um eine lineare Trendlinie ergänzt, um systematische Abweichungen identifizieren zu können. Der Winkel der Abszissenachse zur Trendlinie von 45° stellt das Ideal dar (vgl. Abbildung 3.14 und Abbildung 3.15). (Sterner et al. 2002)

Da das WHM bereits für einen früheren Zeitraum kalibriert ist (vgl. Abschnitt 3.1), werden gute Ergebnisse dieses Instruments erwartet.

Bei der Auswertung des Modell-Ausgangszustandes ist ersichtlich, dass das Modell die meisten Abflusswerte überschätzt und die Werte bei besonders geringen Abflussmengen unterschätzt (vgl. Abbildung 3.1). Zudem ist ersichtlich, dass der Scheitelpunkt der simulierten Ganglinie im Vergleich zur gemessenen Ganglinie früher einsetzt und die Krümmung des Graphen im Scheitelpunkt dementsprechend geringer ist. Der Schnittpunkt des Differenz-Graphens liegt bei circa 850 Simulations-/Messdatenpunkten. Die analytischen Gütekriterien unterstützen diese Erkenntnisse aus dem visuellen Abgleich. Im Allgemeinen weisen die simulierte und die gemessene Ganglinie keine signifikanten Differenzen sowohl im Wert als auch in der Variabilität auf. Die Gütekriterien gemäß Tabelle 3.1 bestätigen dies durch Werte $> 0,9$. Die leichte Verschlechterung von $lnNSE$ gegenüber NSE zeigt den Einfluss hoher Abflusswerten auf NSE , welche das Modell gut abbilden kann. Der $pBias$ -Wert des Modells im Ausgangszustand bestätigt die generelle Überschätzung der Abflusswerte.

Das Ziel der Kalibrierung in Bezug auf die analytischen Gütekriterien ist insbesondere eine Verbesserung des $pBias$ -Wertes. Bezüglich Abbildung 3.1 wird eine Verschiebung des Δ -Schnittpunktes auf einen Wert von circa 1250 Simulationsschritten und eine bilanzielle Abschwächung der Überschätzung gefordert.

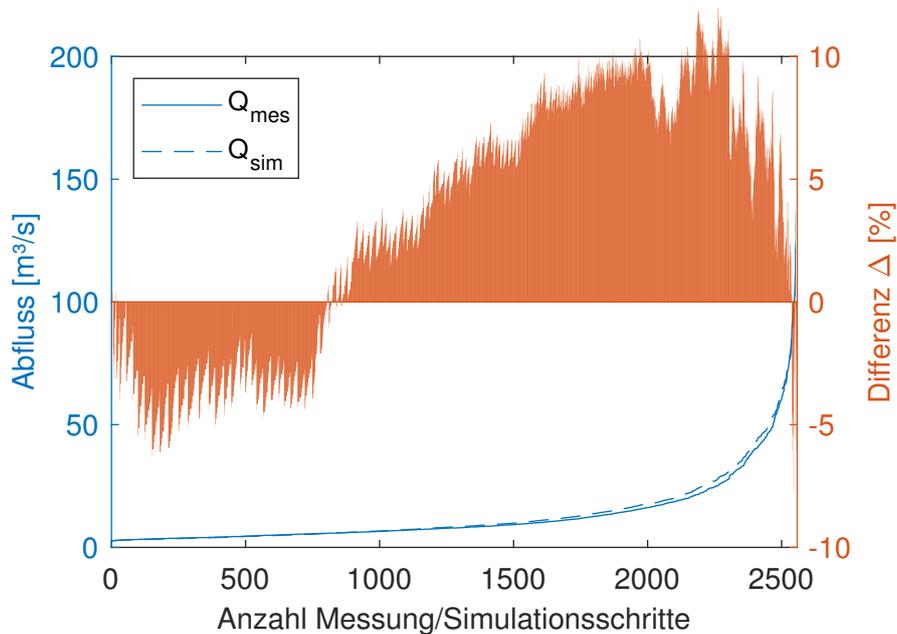


Abbildung 3.1: Verzerrung simulierter zu gemessener Abflussmengen am Pegel Marburg im Ausgangszustand

3.3 Kalibrierungsprozess der Abflusskomponenten

Die Kalibrierung des WHM folgt Haag et al. (2021) und erfolgt anhand der gebietsabhängigen Parameter der tape35.dat-Datei. In dieser Datei sind je Pegelkontrollbereich spezifische Parameter aufgelistet (vgl. Tabelle A.2).

Die Kalibrierung des LARSIM-Modells der Lahn wird der Reihe nach für den Niedrigwasserbereich (NWB), Mittelwasserbereich (MWB), Hochwasserbereich (HWB) und die Flusswärme, welche die Boden- und Gebietsspeicher gemäß Abbildung 2.4 des EZG repräsentieren, durchgeführt. Die Schritte der Kalibrierung sind zudem in Abbildung 2.5 dargestellt.

Zur Kalibrierung der Abflusskomponenten Basisabfluss (Q_B), Interflow (Q_I) und Direktabfluss (Q_D) müssen in LARSIM die Funktionen AUSGABE ABFLUSS GTS, Q-KOMPONENTEN IN GEWAESSESTEILSTRECKEN und TROTZDEM Q-KOMPONENTEN in tape10.dat aktiviert sein (LEG 2023).

Die Funktion AUSGABE ABFLUSS GTS gibt die simulierten Abflusswerte am Ende einer Fließgewässerstrecke aus. Die Wahl der betreffenden Gewässerstrecke erfolgt über die Option "A2QGTS" in der punktausgaben.str-Datei. Ausgegeben werden die simulierten Ganglinien in die Datei gts-abfluss-q.lila. Durch die Option Q-KOMPONENTEN IN GEWAESSESTEILSTRECKEN werden die Abflusskomponenten Q_B , Q_D und Q_I zusätzlich zur simulierten Abflussganglinie in die Datei gts-abfluss-q.lila ausgegeben. Da im Modell drei Rückhaltebecken¹ als Querbauwerke bzw. Talsperren abgebildet sind, sind die Ganglinien der Abflusskomponenten lediglich als „grobe Schätzung“ (LEG 2023, Q-KOMPONENTEN IN GEWAESSESTEILSTRECKEN) zu bewerten. Damit dies nicht zu Anwendungsfehlern

¹bei Kirchhain an der Ohm, Breidenstein an der Perf und Wohratal an der Wohra

führt, überliest LARSIM die Funktion sobald Speicherbauwerke im Modell hinterlegt sind. Die TROTZDEM Q-KOMPONENTEN-Funktion verhindert dieses Überlesen und gibt die Komponenten aus. (LEG 2023, Q-KOMPONENTEN IN GEWAESSERTEILSTRECKEN)

Die LARSIM-Funktion AUSGABE TAPE35 führt eine automatische Kalibrierung durch, wobei die gebietspezifischen Parameter der tape35.dat-Datei angepasst werden (LEG 2023, AUSGABE TAPE35). Im Rahmen dieser Arbeit wird diese Funktion evaluiert und als nicht ausreichend befunden. Die durch das Modell automatisch durchgeführte Kalibrierung generiert verbesserte Güteergebnisse im Vergleich zum Modell im Ausgangszustand, allerdings ist bei der Analyse der tape35.dat-Dateien ersichtlich, dass lediglich der Korrekturfaktor für den Gebietsniederschlag (KG) angepasst wird. Eine Anpassung der weiteren Gebietsparameter (vgl. Tabelle A.2) findet nicht statt. Insbesondere für die Abflusskomponenten Q_B und Q_I wird die visuelle Bewertung der Ganglinien höher gewichtet. Die automatische Kalibrierung kann hier keine Bewertung liefern.

Die in Tabelle 3.1 aufgelisteten Werte der Gütekriterien werden im Allgemeinen als gut bzw. ausreichend definiert (Moriasi et al. 2007, 891). Aufgrund dessen ist die im Folgenden beschriebene Kalibrierung des Abflussregimes als Feinkalibrierung zu definieren. Als explizites Ziel dieser wird die Verbesserung des $pBias$ -Faktors auf einen Wert $-2,0 \leq pBias \leq 2,0$ ohne signifikante Verschlechterung der weiteren Gütekriterien definiert. Ein sehr gutes Ergebnis wird beim Erreichen des $pBias$ -Wertebereichs und einem gleichbleibenden oder verbesserten Niveau der Werte B , NSE , $\ln NSE$ und KGE' erreicht. Eine Auflistung der Zielgütekriterien ist ebenfalls in Tabelle 3.1 dargestellt.

Bei der Feinkalibrierung wird so vorgegangen, dass der aktuell betrachtete Parameter aller Gewässerteilstrecken mit einem Faktor multipliziert wird. Bei ungenügenden Ergebnissen werden pegelgebietsspezifische Anpassungen vorgenommen. Für diesen Fall ist zu berücksichtigen, dass die Prozesse der Abflussbildung und -konzentration mittels der Bodenspeicher verknüpft und voneinander abhängig sind (Haag et al. 2021, 21). Folglich haben Anpassungen von pegelgebietsspezifischen Parametern Auswirkungen auf das unterstromige Abflussgeschehen im Allgemeinen und auf die weiteren Abflusskomponenten im Speziellen.

Die Differenzierung der Ganglinien wird im Folgenden über die Indizes vorgenommen. Die Indizes stellen dabei die eine Kombination aus Faktornamen und dem Faktorwert dar. Beispielsweise steht Q_{KG110} für die Gesamtabflussganglinie, bei welchem die Werte des KG -Parameters mit dem Faktor 1,10 multipliziert werden.

3.3.1 Niedrigwasserbereich

Der Niedrigwasserbereich (NWB) in humiden Klimazonen kann sich über eine Dauer von mehreren Wochen bis wenigen Monaten erstrecken (Maniak 2016, 204). Vor allem für die Auswirkungen des Klimawandels mit häufigeren und länger anhaltenden Dürre- und Trockenperioden ist der Abfluss des NWB repräsentativ. Während dieser Phasen ist der Wasserhaushalt stark unausgeglichen. Durch ausbleibende Regenereignisse bildet der Basisabfluss den größten Teil am Gesamtabfluss von Oberflächengewässern. (Maniak 2016, 201)

Der Basisabfluss ist maßgebend für die Bilanzierung der Abflussmengen über den gesam-

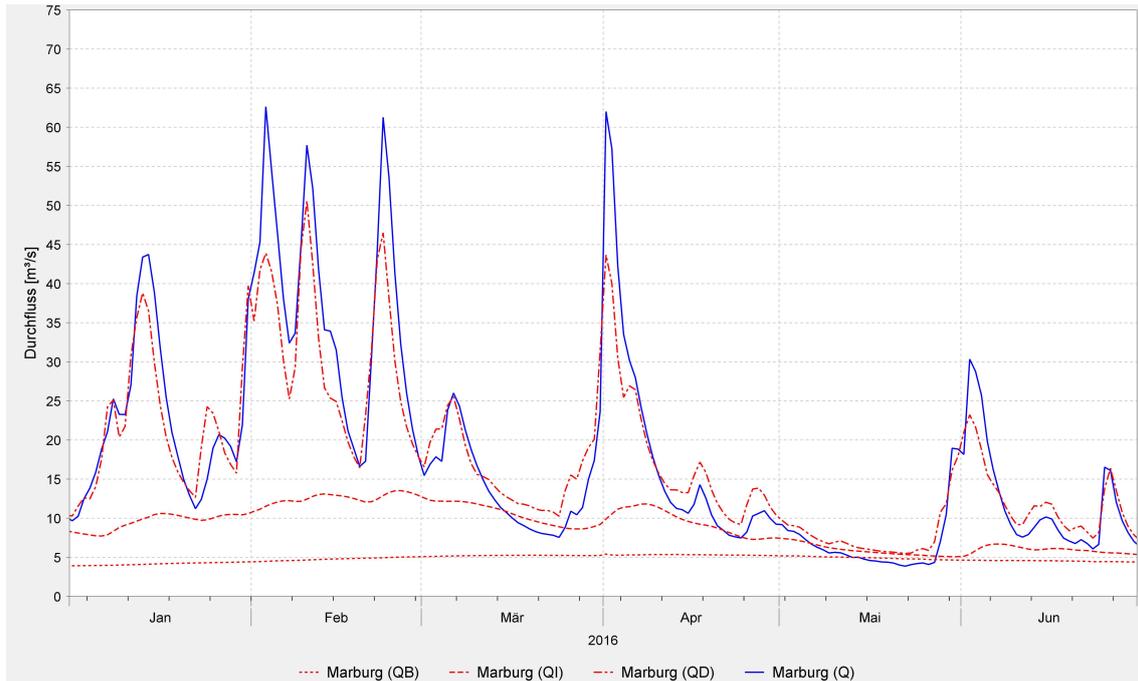


Abbildung 3.2: Exemplarische Darstellung der Abflusskomponenten am Pegel Marburg im Ausgangszustand, erstellt mit LISA

ten Kalibrierungszeitraum. Dementsprechend ist eine Verbesserung des $pBias$ -Wertes ebenfalls in der Kalibrierung des NWB zu erreichen.

Wie zuvor beschrieben, werden die Abflusskomponenten aus den Boden- und Gebietsspeichern ermittelt. Durch die Einstauwirkungen von Quer- und Speicherbauwerken werden die Abflusskomponenten vermischt und es ist keine eindeutige Zuordnung von Anteilen der Abflussmenge zu den Abflusskomponenten möglich. Diese Einschränkungen sind bei der Betrachtung der Abflusskomponenten exemplarisch in Abbildung 3.2 ersichtlich. LARSIM gibt die Q-Komponenten wie folgt aus:

$$Q_B = \text{Basisabfluss}$$

$$Q_I = Q_B + \text{Interflow}$$

$$Q_D = Q_I + \text{Direktabfluss}$$

Abbildung 3.2 zeigt eine deutliche Abweichung zwischen Q_D und der simulierten Abflussganglinie Q , welche auf den Einfluss der Speicher- und Querbauwerke zurückzuführen ist (vgl. Abschnitt 3.3).

Q_B resultiert im Wesentlichen aus dem Bodenspeicher, welcher durch die vertikale Versickerung gefüllt wird (LEG 2022).

Die Variation der Eichgröße für die Rückhaltekonstante des Basisabflussspeichers (EQB), des Drainageindex für die Tiefenversickerung (in den Basisabflussspeicher) (β) bzw. dem Faktor für die Zunahme der Tiefenversickerung im Grobporenbereich ($f_{bas} - f_{ak}$) zeigt plausible Ergebnisse. So zeigt eine pauschale Verringerung aller gebietsspezifischen EQB eine deutlich schneller steigende und höhere Abflussganglinie im Vergleich zum Ausgangszustand. Die Volatilität der Basisabflussganglinie steigt, während eine Erhöhung der

Gebietsspeicher eine deutliche Abflachung dieser Ganglinie zur Folge hat.

Die Faktoren β und $f_{bas} - f_{ak}$ stellen eine phasenweise Veränderung der Q_B -Ganglinie dar. Während trockener Phasen bei geringem Bodenwassergehalt steuert β die Tiefenversickerung. Eine Erhöhung des Faktors β bewirkt, dass die Ganglinie des Basisabflusses erhöht wird. In trockenen Monaten fällt die Erhöhung der Abflussganglinie stärker aus als im restlichen Jahr. Daraus resultiert eine Verschlechterung der Bilanz zwischen gemessener und simulierter Abflussganglinie. $f_{bas} - f_{ak}$ beschreibt die Zunahme bei hoher Bodenfeuchte. Das bedeutet, dass aus einer Erhöhung von $f_{bas} - f_{ak}$ eine Q_B -Zunahme in feuchten Wintermonaten folgt. (Haag et al. 2021)

Da die zur Kalibrierung relevanten Realdaten nicht zur Verfügung stehen und die erzeugten Ganglinien der Abflusskomponenten als grobe Annäherung zu bewerten sind, ist eine Feinkalibrierung des Basisabflusses nicht möglich. Alternativ wird, wie von Haag et al. (2021, 12) beschrieben, die Kalibrierung der Bilanz über den Korrekturfaktor für den Gebietsniederschlag (KG) vorgenommen.

Im Ausgangszustand beträgt $pBias = -5,069\%$, was eine generelle Überschätzung des Modells bedeutet (Moriassi et al. 2007). Dieser Wert wird durch Reduktion des Wasserdargebots verbessert. Die Anpassung vom KG innerhalb der Parametergrenzen von $0,9 - 1,1$ bestätigt dies. Bei einer Verringerung verbessert sich der $pBias$ -Wert bis zu einem Minimum (vgl. Abbildung 3.3). Die Auswertung von Abbildung 3.3 zeigt, dass bei einer Reduktion aller gebietsspezifischen KG -Werte um 6% der minimale $pBias$ -Wert von $-1,429\%$ erreicht wird. Die KG -Werte der Flussgebietsabschnitte vor und nach der entsprechenden Anpassung sind Tabelle 3.2 zu entnehmen. Eine weitere Reduktion führt zu einer Erhöhung der Standardabweichung bei stagnierendem $pBias$ -Wert.

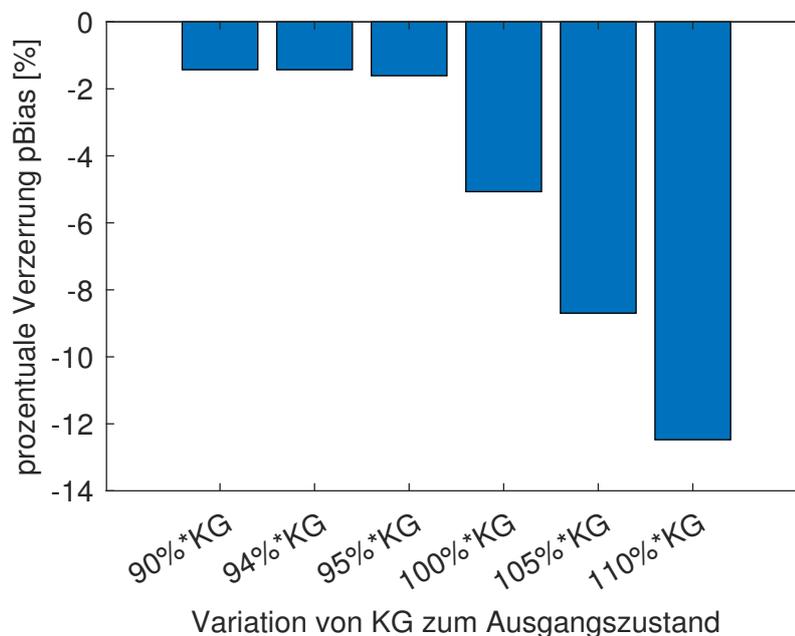


Abbildung 3.3: Sensitivität vom Kalibrierungsfaktor KG auf $pBias$

Die Größenordnung wird einerseits durch die Abbildung 3.3 und andererseits durch die in Abschnitt 3.3 exemplarisch durchgeführte automatische Kalibrierung bestätigt. Die durch die

Tabelle 3.2: KG -Parameter vor und nach Kalibrierung je Flussgebietsabschnitt

Flussgebietsabschnitt	KG vor Kalibrierung	KG nach Kalibrierung
Biedenkopf	1,00	0,94
Ober-Ofleiden	0,98	0,92
Gemünden	1,03	0,97
Marburg	0,95	0,90
Etzelmühle	0,97	0,92
KW-Gießeln	0,97	0,92

LARSIM-Funktion AUSGABE TAPE35 kalibrierten KG -Werte sind im Durchschnitt um 6,8 % geringer gegenüber dem Ausgangszustand. Des Weiteren weist die NWB-Kalibrierung eine Verbesserung des KGE' -Faktors von 0,942 zu 0,974 auf. Bei den restlichen Gütekriterien findet keine signifikante Verbesserung statt.

Abbildung 3.4 zeigt die Veränderungen der Q_B -Ganglinie. Es ist ersichtlich, dass eine Reduktion des Niederschlagsfaktors vor allem in trockenen Sommermonaten weniger Basisabfluss zur Verfügung steht.

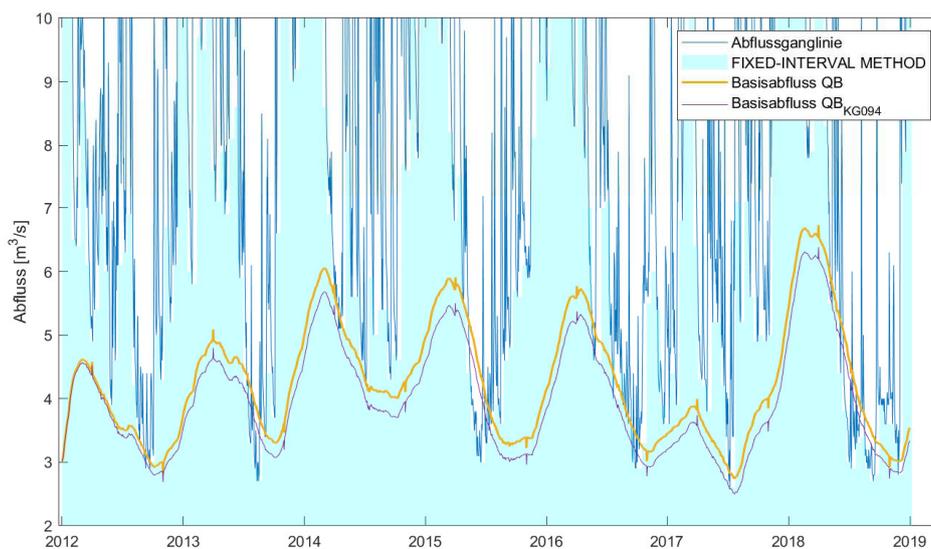


Abbildung 3.4: Ergebnis der Niedrigwasser-Kalibrierung

Die Kalibrierung wird mit den ermittelten Werten für KG gemäß Tabelle 3.2 fortgesetzt.

3.3.2 Mittelwasserbereich

Als Kalibrierung des Mittelwasserbereich (MWB) wird das Verhalten der Abflusskomponente Q_I bewertet. Als Interflow (Q_I) gibt LARSIM die schrittweise Aufsummierung vom Basisabfluss und Zwischenabfluss an. Im Weiteren als Interflow bezeichnet.

Der Interflow bestimmt das Abflussverhalten während der humiden Zeit. Abbildung 3.2 veranschaulicht dies. In der Zeit von Januar bis Mitte April 2016 zeigt sich ein großer Anteil des Interflows. In der zweiten Aprilhälfte bis Ende Mai sinkt der Q_I -Anteil an der

Gesamtabflussmenge deutlich.

Zur Kalibrierung des Interflows werden in LARSIM der Index für die laterale Drainage zum Interflowspeicher im Grobporenbereich ($r_{d,max}$), die Eichgröße für die Rückhaltekonstante des Interflowspeichers (EQI) und optional der Index für die laterale Drainage zum Interflowspeicher bis zur Feldkapazität ($r_{d,min}$) verwendet (Haag et al. 2021). In Ausnahmefällen wird $r_{d,min} \neq 0$ gesetzt, wenn Zwischenabfluss aus dem Bodenspeicher bei Füllung unterhalb der Feldkapazität entsteht (Haag et al. 2021). Im Ausgangszustand des Modells ist dies für die Flussgebietsabschnitte Biedenkopf, Ober-Ofleiden, Marburg und KW-Gießen angegeben.

Bei der Kalibrierung von Q_I tritt, analog zu Abschnitt 3.3.1, die Herausforderung der Vergleichbarkeit mit Realdaten auf, weshalb auf alternative Möglichkeiten gesetzt wird. Zur graphischen Analyse einer Interflowganglinie nach einem Einzelregenereignis liefert Sloto und Crouse (1996) die FIXED-INTERVAL METHOD und die LOCAL-MINIMUM METHOD. Die Methoden verwenden den Parameter N , welcher vereinfacht die Anzahl Tage angibt, die der Oberflächenabfluss nach einem Regenereignis benötigt um aus dem EZG abzufließen. Die Schrittweite der graphischen Betrachtung wird nach Sloto und Crouse (1996) ganzzahlig auf $2N^*$ festgelegt. (Sloto und Crouse 1996)

$$N = 0,82669 * A^{0,2} \quad (3.7)$$

mit: N = Dauer bis der Oberflächenabfluss abgeflossen ist [d]

A = Fläche des EZG [km^2]

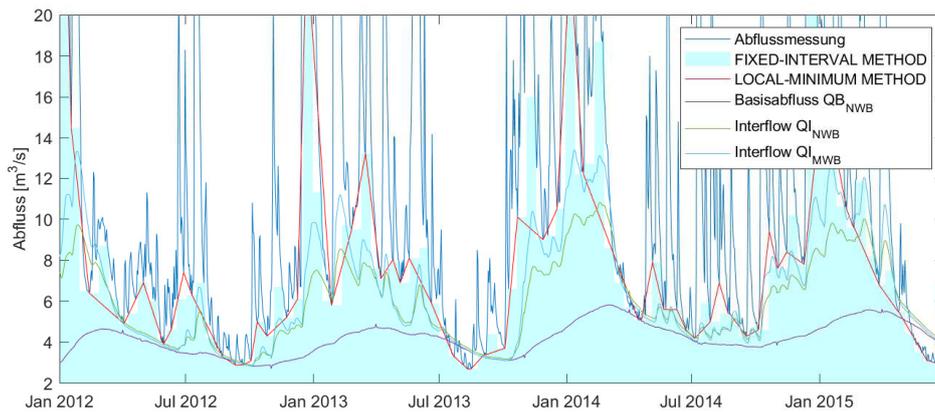
Für das EZG bis zum Pegel Marburg mit einer Fläche $A = 1672,5 \text{ km}^2$ ergibt sich somit eine Schrittweite für ein Einzelregenereignis von $2N^* = 7$ Tagen. Dabei ist zu beachten, dass der Wert $2N^*$ für Einzelregenereignisse gilt. Durch die Überlagerung von Regenereignissen im Bezug auf Häufigkeit und Position innerhalb des Intervalls $2N^*$ -Tagen erfassen die betrachteten Methoden den aktuellen Abfluss als Interflow, obwohl der betrachtete Abfluss stark durch den Direktabfluss eines differenzierten Regenereignisses geprägt ist.

Im betrachteten EZG, insbesondere in den humiden Wintermonaten, ist mit mehr als einem Regenereignis pro Woche zu rechnen. Die Überschneidung von Regenereignissen im EZG und den zugehörigen Abflussverhalten führen zu Fehlern in der Analyse. Eine Variation der Schrittweite hat gezeigt, dass die Anpassung auf $2N^* = 14$ Tage die beste Vergleichbarkeit liefert. Eine Reduktion der Schrittweite lässt den Einfluss des Oberflächenabflusses auf die entstehende Ganglinie verstärken.

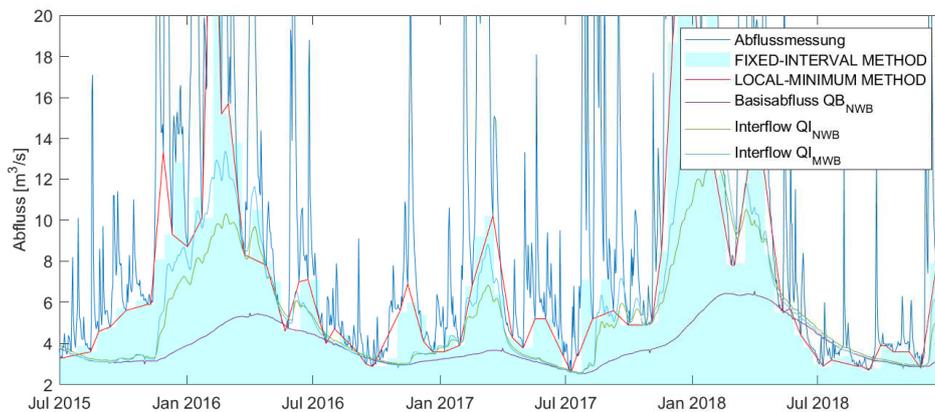
Die **FIXED-INTERVAL METHOD** nach Sloto und Crouse (1996) erfasst den minimalen gemessenen Abfluss im Zeitschritt. Durch das Auftragen über die Zeit wird eine geglättete Ganglinie der minimalen Abflüsse erzeugt.

Die **LOCAL-MINIMUM METHOD** betrachtet im Intervall $2N^*$ lokale Minima. Im Kalibrierungszeitraum wird, ausgehend vom jeweiligen Tag, $\frac{2N^*}{2}$ Tage zurück und voraus geschaut. Stellt der Abflusswert am jeweiligen Tag das Minimum im entsprechenden Zeitraum dar, so wird der Wert als lokales Minimum übernommen. (Sloto und Crouse 1996)

Abbildung 3.5 zeigt die graphische Auswertung zusammen mit der gemessenen Abflussganglinie und dem simulierten Interflow mit kalibrierten KG -Werten.



(a) Zeitraum 01.01.2012 - 30.06.2015



(b) Zeitraum 01.07.2015 - 31.12.2018

Abbildung 3.5: Ganglinienseparation nach Sloto und Crouse (1996)

mit QB_{NWB} : Basisabfluss nach Kalibrierung des Niedrigwasserbereichs

QI_{NWB} : Interflow nach Kalibrierung des Niedrigwasserbereichs

QI_{MWB} : Interflow nach Kalibrierung des Mittelwasserbereichs

Aus dem Ergebnis der Ganglinienseparation (vgl. Abbildung 3.5) wird ersichtlich, dass in den humiden Monaten die simulierte Q_I -Abflusskomponente mit den kalibrierten KG -Werten $Q_{I,NWB}$ sowohl nach der FIXED-INTERVAL als auch nach der LOCAL-MINIMUM METHOD den Zwischenabfluss unterschätzt. Zudem ist vor allem in den Sommermonaten von 2013, 2015 und 2018 ersichtlich, dass der Zwischenabfluss durch das Modell für trockene Phasen überschätzt wird.

Tabelle 3.3: Auswirkungen der Sensitivitätsanalyse des MWB auf die Gütekriterien

	$\pm r_{d,max}$	$\pm EQI$
Erhöhung ¹	Erhöht Abflussspitzen	Abfallende Flanke flacher, Spitzen geringer
Reduktion ¹	Reduziert Abflussspitzen	Abfallende Flanke steiler, Spitzen höher
B	-	-
NSE	-	-
$\ln NSE^2$		$\pm 10^{-4}$
$pBias$	$\mp 10^{-2}$	$\pm 10^{-3}$
KGE'	$\mp 10^{-3}$	$\mp 10^{-4}$

¹ bezogen auf Q_I ² bei Abweichung zu NSE

Aus Abbildung 3.5 und Tabelle 3.3 resultiert das weitere Vorgehen. Als Ziel der MWB-Kalibrierung wird ein höherer Zwischenabfluss in Winter- und ein geringerer in Sommermonaten festgesetzt. Dies wird durch eine Anpassung der Parameter $r_{d,max}$ (nach oben) und EQI (nach unten) erreicht.

Die analytischen Gütekriterien liefern bei entsprechendem Vorgehen eine leichte Verschlechterung zum vorherigen Stand gemäß Abschnitt 3.3.1. Der $pBias$ -Wert reduziert sich um 0,078 %. Die Reduktion der Parameter KGE' , NSE und $\ln NSE$ fällt im Bereich von Tausendstel bis wenige Hundertstel noch geringer aus. Der visuelle Vergleich liefert dagegen deutlich besser zu bewertende Ganglinien (vgl. $Q_{I,MWB}$ in Abbildung 3.5). In Tabelle 3.4 sind die Werte nach Abschluss der MWB-Kalibrierung gelistet.

Tabelle 3.4: Gebietsparameter vor und nach Kalibrierung MWB

Flussgebietsabschnitt	vor Kalibrierung		nach Kalibrierung	
	$r_{d,max}$	EQI	$r_{d,max}$	EQI
Biedenkopf	0,60	300	0,714	243
Ober-Ofleiden	0,30	150	0,357	121,5
Gemünden	0,35	300	0,417	243
Marburg	0,20	2000	0,238	1620
Etzelmühle	0,30	250	0,357	202,5
KW-Gießen	0,20	300	0,238	243

3.3.3 Hochwasserbereich

Als Hochwasserbereich (HWB) wird der Zustand definiert, in welchem der Direktabfluss (Q_D) den stärksten Einfluss auf das Abflussgeschehen hat. Dies trifft vorwiegend auf humiden Wintermonate und während Starkregenereignissen zu.

Als Ziele der HWB-Kalibrierung werden, aufbauend auf der Kalibrierung des MWB, die Reduktion der lokalen Abflussmaxima und Erhöhung der lokalen Abflussminima definiert. Zudem wird festgelegt, dass die Abflusswelle eine schnellere Abnahme aufweisen soll. Die Kalibrierung des HWB startet mit der Sensitivitätsanalyse der Parameter Exponent der Bodenfeuchte-Sättigungsflächen-Funktion (*BSF*), Schwellenwert des schnellen Direktabflusses (*A2*), Eichgröße für die Rückhaltekonstante des langsamen Direktabflussspeichers (*EQD*), Eichgröße für die Rückhaltekonstante des schnellen Direktabflussspeichers (*EQD2*), Kalibrierfaktor für den Rauigkeitsbeiwert im Hauptbett (*EKM*) und Kalibrierfaktoren für die Rauigkeitsbeiwerte auf den Vorländern (*EKL*, *EKR*), welche jeweils um $\pm 20\%$ angepasst werden.

Die Analyse zeigt, dass *A2*, *EQD2*, *EKL*, *EKR* und *EKM* einen sehr geringen bis keinen Einfluss auf die Gütekriterien und den visuellen Vergleich haben. Mittels der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse aus Tabelle 3.5 wird die Reihenfolge der Parameter zur HWB-Kalibrierung definiert. *BSF* hat den signifikantesten Einfluss auf die Abflussganglinie, gefolgt von *EKM* und *EQD*. Dies entspricht der Reihenfolge der anschließenden Kalibrierung.

Für den Faktor *EQD2* ist zu beachten, dass dieser lediglich bei starken Niederschlagsereignissen bei Intensitäten oberhalb von *A2* modelliert wird.

Der Schwellenwert des schnellen Direktabflusses (*A2*) definiert den Wert, ab dem der Abfluss dem schnellen Direktabfluss und nicht dem langsamen Direktabfluss zugeordnet wird. Im Anschluss an die Kalibrierung der drei detektieren Parameter kann für einige Starkregenereignisse, die nicht während einer Phase trockener Böden stattgefunden haben, *EQD2* optional angepasst werden. (Haag et al. 2021)

Tabelle 3.5: Auswirkungen der Sensitivitätsanalyse des HWB auf die Gütekriterien

	\pm BSF	\pm A2	\pm EQD
Erhöhung	Spitzen hoch, Tal runter	-	Spitzen runter, Tal hoch
Reduktion	Spitzen runter, Tal hoch	-	Spitzen hoch, Tal runter
<i>B</i>	$\mp 10^{-4}$	-	$\pm 10^{-3}$ bis $\pm 10^{-4}$
<i>NSE</i>	$\mp 10^{-4}$	-	$\pm 10^{-4}$
$\ln NSE^1$			
<i>pBias</i>	$\mp 10^{-1}$	-	$\mp 10^{-3}$
<i>KGE'</i>	$\mp 10^{-4}$	$\mp 10^{-4}$	$\mp 10^{-3}$
	\pm EQD2	\pm EKM	\pm EKL, EKR
Erhöhung	-	steilerer Abflusskurve	-
Reduktion	-	flacherer Abflusskurve	-
<i>B</i>	-	$\mp 10^{-3}$ bis $\mp 10^{-4}$	-
<i>NSE</i>	-	$\mp 10^{-3}$ bis $\pm 10^{-4}$	-
$\ln NSE^1$		$\mp 10^{-4}$	
<i>pBias</i>	-	$+10^{-2}$ bis $+10^{-3}$	$\pm 10^{-3}$
<i>KGE'</i>	-	$\pm 10^{-3}$	$\mp 10^{-4}$

¹ bei Abweichung zu *NSE*

Der Faktor *BSF* beeinflusst die Bilanz des Abflussverhaltens. Mithilfe des Faktors lässt sich die prozentuale Verzerrung in geringem Maße verbessern. Eine Variation dieses Faktors beeinträchtigt das Wasserdargebot der Gebietsspeicher für den Basisabfluss

und den Interflow. Zur Verbesserung der prozentualen Verzerrung ist eine geringfügige Reduktion des Faktors vorzunehmen. Die Variation zeigt, dass bei einer Reduktion aller gebietsspezifischen BSF -Werte um 4 % eine Modellverbesserung auftritt. Die Gütekriterien und das Abflussverhalten von Q_D liefern, trotz geringfügigen Verschlechterungen des Abflussverhaltens von Q_B und Q_I , bessere Ergebnisse.

Die anschließende Anpassung von EKM bewirkt ein steileres Anstiegen und Abfallen der Abflusswellen. Bei einer Erhöhung um 10 % nähert sich die berechnete Kurve am stärksten der Gemessenen an. EQD wird zur Reduktion der prozentualen Verzerrung und zur Angleichung der Verzerrungskurve (vgl. Abbildung 3.6d) an das Ideal erhöht. Die Kalibrierung mit einer Erhöhung aller EQD -Werte um 12 % liefert plausible Ergebnisse. Dementsprechend werden diese Werte im Folgenden weiter verwendet.

Anschließend erfolgt eine Betrachtung ausgewählter Hochwasserereignisse, insbesondere bezogen auf $A2$ und $EQD2$. Dabei werden die Hochwasserereignisse vom 31.01.2013, 09.11.2013, 02.04.2016 und 04.01.2018 gewählt. Bei den vier genannten Ereignissen handelt es sich um Hochwassereignisse der humiden Jahreszeiten, was darauf schließen lässt, dass die Böden nicht ausgetrocknet sind. Zudem ist anzumerken, dass das HW-Ereignis vom 04.01.2018 nach dem des 06.01.2012 das zweitgrößte Abflussereignis des betrachteten Kalibrierungszeitraumes ist. Das Ereignis vom 06.01.2012 liegt direkt zu Beginn des Kalibrierungszeitraumes. Da trotz des Einlesens von Zustandsdateien eine Einschwingphase der Gebietspeicher nicht ausgeschlossen werden kann, wird das Ereignis vom 06.01.2012 nicht im Rahmen dieser Betrachtung berücksichtigt.

Die Detailanpassung der Parameter $A2$ und $EQD2$ in Bezug auf die gewählten Hochwasserereignisse zeigt ausschließlich am 04.01.2018 eine Verschlechterung durch die Reduktion von $EQD2$. Eine Variation von $A2$ innerhalb logischer Werte hat keinen Einfluss auf das Abflussgeschehen. Das lässt darauf schließen, dass im betrachteten Zeitraum schneller Direktabfluss ausschließlich am 04.01.2018 entsteht.

Die Kalibrierung der Abflussbereiche NWB, MWB und HWB ist mit der Betrachtung der Einzelereignisse abgeschlossen. Die analytischen Gütekriterien sind in Tabelle 3.6 aufgelistet. Das definierte Ziel einer Reduktion des $pBias$ -Wertes innerhalb der Grenzen $-2,0 \leq pBias \leq 2,0$ gemäß Abschnitt 3.3 ist erfüllt. Zudem ist eine tendenzielle Erhöhung der weiteren Gütekriterien, insbesondere des KGE' -Faktors, eingetreten. Abbildung 3.7 stellt zudem die Verbesserung des Abflussverhaltens im Vergleich zum Ausgangszustand des HLNUGs dar, wobei hervorzuheben ist, dass der Fokus beim operationellen Hochwasserschutz sich vom Fokus dieser Arbeit unterscheidet.

Die reduzierte prozentuale Verzerrung ist ebenfalls in Abbildung 3.6 zu erkennen. Der Vergleich zwischen Abbildung 3.6a und Abbildung 3.6d zeigt deutlich, dass sich der Schnittpunkt der Abszissenachse nach rechts verschoben hat. Das in Abschnitt 3.2 definierte Ziel (Schnittpunkt bei 1250 Simulationsschritten) wird mit ≈ 1175 Simulationsschritten annähernd erreicht. Die Flächenbilanz zwischen der Δ -Kurve und der Abszissenachse ist ebenfalls verbessert.

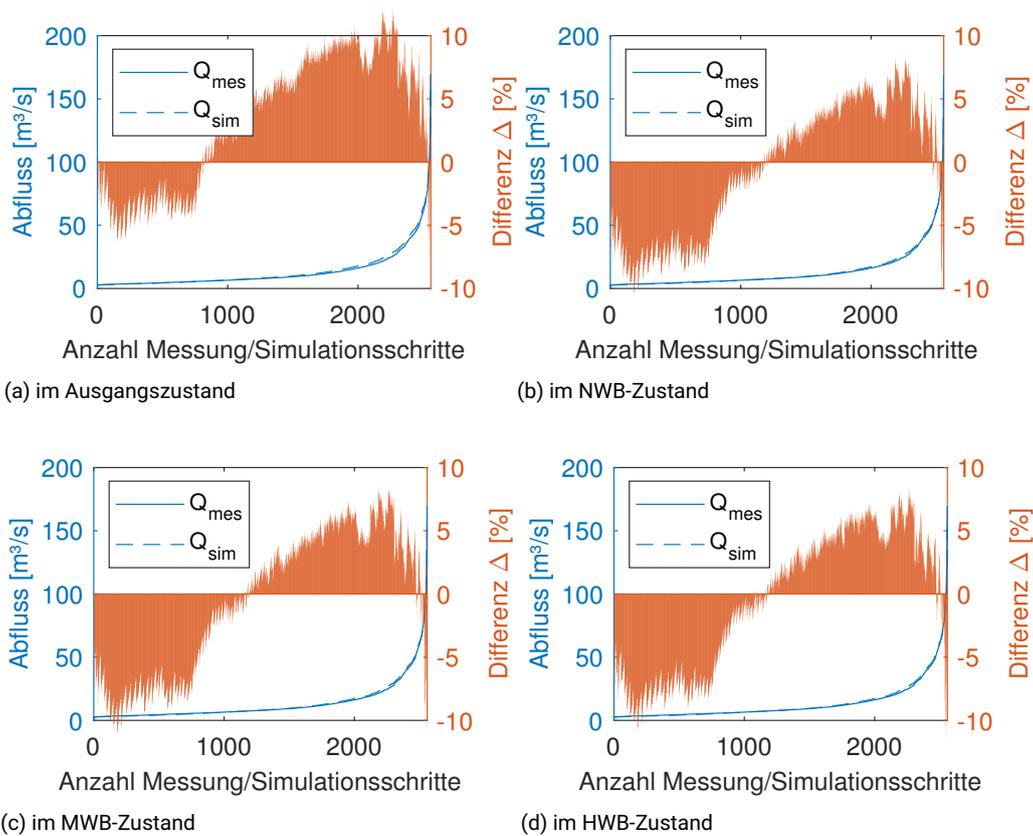


Abbildung 3.6: Verzerrung der Abflussmengen aller Kalibrierungsschritte am Pegel Marburg

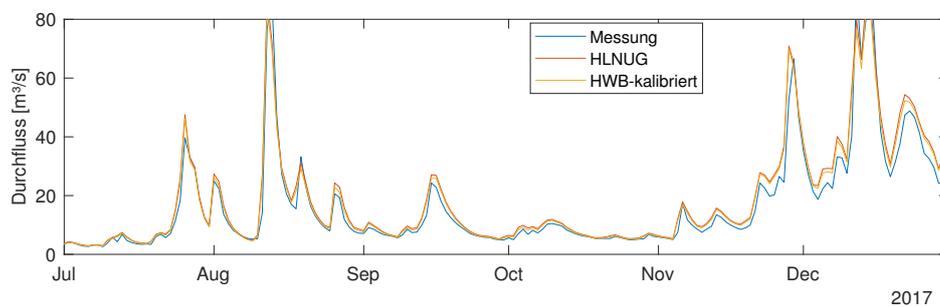


Abbildung 3.7: Exemplarische Darstellung des Gesamtabflusses als Messreihe, im Ausgangszustand und nach abgeschlossener Kalibrierung der Abflusskomponenten für das Jahr 2017, Quelle: eigene Darstellung

Tabelle 3.6: Gütekriterien vor und nach Kalibrierung der Abflusskomponenten

Pegel Marburg	HLNUG-Ausgangszustand	nach HWB-Kalibrierung
<i>B</i>	0.974	0.975
<i>pBias</i>	-5.069	-1.414
<i>NSE</i>	0.970	0.975
<i>lnNSE</i>	0.957	0.960
<i>KGE'</i>	0.943	0.970

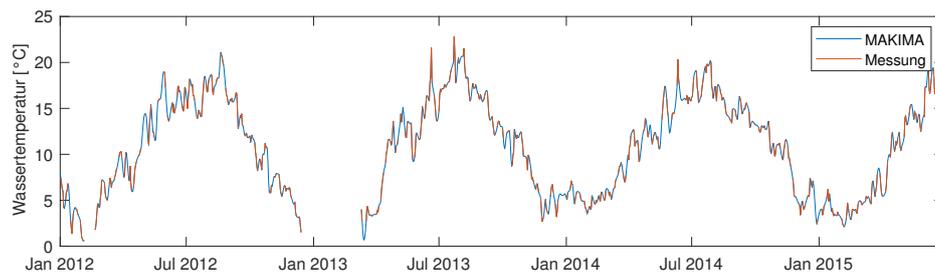
3.3.4 Flusswärme

Für das Projekt ist die Temperatursimulation der Lahn bei Marburg besonders relevant. Das Wasserwärme-Modul von LARSIM wird dementsprechend für den Standort der WW-Wehrda kalibriert (vgl. Abschnitt 1.2 oder Abbildung 1.3). Die Messungen der Wasserwerke fanden jedoch nicht einheitlich und kontinuierlich statt. Da im Projektgebiet weder stromaufwärts noch -abwärts kontinuierliche Gewässertemperaturmessungen durchgeführt wurden, werden die Messungen der Pegel Ober-Ofleiden und Hainmühle an der Ohm und Niederwetter an der Wetschaft ebenfalls mitbetrachtet (vgl. Abschnitt 1.2).

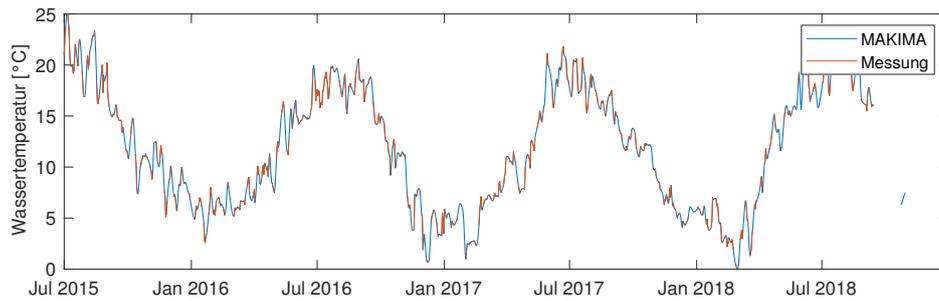
Für diese vier Messstellen gilt, dass die Qualität der Messungen deutliche Defizite im Vergleich zur Durchflussmessung aufweisen. Für Ober-Ofleiden gilt, dass für 2015 sporadische Werte vorliegen und erst ab November 2015 bis zum Ende des Kalibrierungszeitraums durchgängige Messungen vorhanden sind. Messungen am Pegel Hainmühle sind lediglich bis Juni 2016 verfügbar. Selbiges gilt für den Pegel Hainmühle, wobei es für diesen Pegel noch einzelne Messwerte für Herbst 2016, Frühjahr und Sommer 2017 sowie im Frühjahr 2018 vorliegen. Für die Messungen der WW-Wehrda gilt, dass diese über den gesamten Zeitraum sporadisch vorliegen. Um die Güte der Messreihen zu verbessern, werden die gemessenen Temperaturreihen mittels MAKIMA-Verfahren interpoliert (MathWorks 2023). Die Interpolation wird dabei für einzelne Messstellen unter der Bedingung, dass zwischen zwei Messungen maximal zehn Zeitschritte ohne Messwert vorliegen, durchgeführt. Abbildung 3.8 zeigt deutlich, dass dieses Verfahren gut funktioniert. Die gemessene Temperaturreihe passt mit der nach MAKIMA interpolierten Gangreihe überein und die Messlücken sind qualitativ als gut zu bewerten. Die Auswertung der Gütekriterien findet entsprechend nur für Zeitschritte statt, an denen Messwerte oder interpolierte Werte vorhanden sind.

LARSIM bietet für das Wasserwärme-Modul die obligatorische Möglichkeit der Anpassung des Berechnungsintervalls. Über den Parameter `INTERNER_ZS_WM` in der `tape31.dat`-Datei werden Berechnungsschritte je Intervalllänge des WHM definiert. Die Variation hat gezeigt, dass eine Erhöhung dieses Parameters keinen nennenswerten Einfluss auf die Modellgüte hat. Daher wird der voreingestellte Wert $ZS = 6$ beibehalten. (LEG 2023, `INTERNER_ZS_WM`)

Das LARSIM-Modell, welches in seiner Grundlage auf dem ECHAM3-Modell (Deutsches Klimarechenzentrum 1993) beruht, berechnet die Wassertemperatur unabhängig von der Abflussmenge, weshalb die Gütekriterien der vom HLNUG zur Verfügung gestellten Version und der kalibrierten Version nach Abschnitt 3.3.3 für die vier Temperaturmessstellen identisch sind. Tabelle 3.7 zeigt die Gütekriterien zu Beginn der Flusswärme-Kalibrierung.



(a) für den Zeitraum 01.01.2012 - 30.06.2015



(b) für den Zeitraum 01.07.2015 - 31.12.2018

Abbildung 3.8: MAKIMA-Interpolation für Messungen am Standort der Wasserwerke Wehrda

Zu beachten ist, dass aus einer mathematischen Bedingung heraus der $\ln NSE$ -Wert nicht bestimmt werden kann. Für die Kalibrierung der Flusswärme stehen daher lediglich die vier Parameter B , $pBias$, KGE' und NSE zur Verfügung. Sowohl die Analyse der Gütekriterien als auch die graphische Betrachtung zeigen z. T. deutliche Unterschätzungen der Flusswärme durch das Modell.

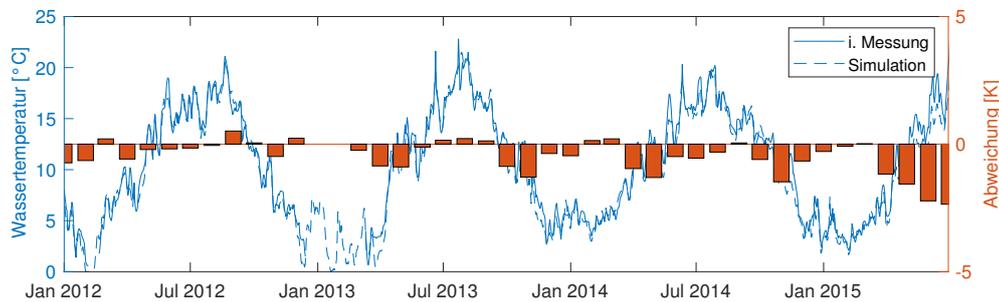
Tabelle 3.7: Gütekriterien der Wassertemperatursimulation nach Abschnitt 3.3.3

	B	$pBias$	KGE'	NSE
Ober-Ofleiden	0,9732	1,9298	0,9088	0,9662
Hainmühle	0,9740	4,0075	0,9153	0,9662
Niederwetter	0,9164	7,3375	0,9139	0,8853
WW-Wehrda	0,9386	6,0362	0,8928	0,9386

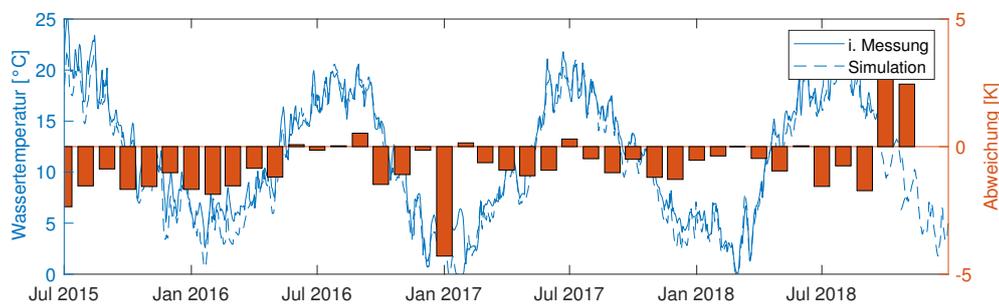
Eine graphische Analyse der Verzerrung von simulierter zur gemessenen Flusswärme entsprechend Abbildung 3.6 liefert keine qualifizierten Erkenntnisse. Durch die inkonsequente Messung im Projektgebiet fehlen Messwerte, wodurch die gemessene Kurve Sprünge aufweist. Die Vergleichbarkeit des Verlaufs der beiden Flusswärme-Kurve ist somit nicht gegeben.

Die Abbildung 3.9 zeigt die grafische Auswertung für den Standort der WW-Wehrda, wobei die gemessene und simulierte Gewässertemperatur gegenübergestellt und die gemittelten Abweichungen je Monat zusätzlich dargestellt werden. Die graphische Analyse zeigt eine systematische Unterschätzung der Gewässertemperaturen an allen betrachteten Pegeln in dem Zeitraum November bis Februar und z. T. in den Frühjahrsmonaten. Für die Messung am Pegel Niederwetter ist zusätzlich eine Unterschätzung von April bis August ersichtliche.

Die Graphen der weiteren Pegel sind Abbildung A.1, Abbildung A.2 und Abbildung A.3 zu entnehmen.



(a) Zeitraum 01.01.2012 - 30.06.2015



(b) Zeitraum 01.07.2015 - 31.12.2018

Abbildung 3.9: Graphische Analyse der Gewässerwärme am Standort der Wasserwerke Wehrda im Ausgangszustand

Im ersten Schritt wird die Berechnungsgrundlage des LARSIM-Modells erläutert. Anschließend wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt und entsprechende zu kalibrierende Parameter definiert. Aus diesen Erkenntnissen lassen sich die Ziele der Flusswärme-Kalibrierung ableiten. Die Gewässertemperaturwerte der Wetschaft am Pegel Niederwetter werden signifikant schlechter abgebildet als die Temperaturen an den weiteren Pegeln (vgl. Abbildung A.2). Aufgrund dessen werden im dritten Schritt die Gewässertemperaturen der Wetschaft optimiert. Dabei geht es explizit um die Erhöhung der simulierten Gewässertemperaturen im Sommer. Als analytisches Ziel für den dritten Schritt wird ein $pBias_{Niederwetter} \leq 5,3$ formuliert. Abschließend wird das Temperaturverhalten im gesamten Lahn-EZG betrachtet.

Um den Einfluss von spezifischen Faktoren zu kennen, werden nachfolgend die Berechnungsgrundlagen des ECHAM3-Modells (Deutsches Klimarechenzentrum 1993) erläutert. Die Gleichung 3.8 gibt die Temperatur des aus den Gebiets Speichern abfließenden Abflusses an (vgl. Abbildung 2.4), wobei neben der Lufttemperatur (T_L) die Faktoren Achsenabschnitt der Regressionsgleichung ($Y0T$) und Steigung der Regressionsgleichung ($B1T$) als Eichfaktoren maßgeblich verantwortlich sind. Bei beiden Faktoren ist zu beachten, dass der Zusatz T ein Index für die einzelnen Gebietspeicher B (Basisabfluss), I (Interflow), D und $D2$ (langsamer und schneller Direktabfluss) ist.

$$T_{W,GS} = f(Y0T_{W,GB}, B1T_{W,GB}, T_L) \quad (3.8)$$

- mit: $T_{W,GS}$ = Wassertemperatur im Gebietsspeicher [°C]
 $B1T_{W,GB}$ = Steigung der Regressionsgleichung [–]
 T_L = Lufttemperatur [°C]
 $Y0T_{W,GB}$ = Achsenabschnitt der Regressionsgleichung [–]

Die Bewegungsgleichung (Gleichung 3.9) zeigt die Temperaturveränderungen entlang des Gewässerbetts und der Zeit auf. Die zur Kalibrierung relevanten Parameter Beschattungsfaktor (F_{schatt}) und Windschutzfaktor (F_{Wind}) beeinflussen die zeitliche Varianz der Temperaturzu- oder -abnahme. F_{schatt} beeinflusst dabei aktiv die kurzweilige Strahlung und F_{Wind} unter anderem indirekt den Strom latenter Wärme (Verdunstung, Kondensation) $H_L = f(K_L)$.

$$\frac{\partial T_W}{\partial t} + u * \frac{\partial T_W}{\partial x} = E_x * \frac{\partial^2 T_W}{\partial x^2} \pm S \quad (3.9)$$

mit $\frac{dT_W}{dt} = \frac{R_K + R_L + H_F + H_L + R_{Sed}}{c_p * \rho_W * h}$

$$R_K = F_{schatt} * (1 - \alpha) * R_C$$

$$K_L = 0,211 + 0,103 * v * F_{Wind}$$

- mit: T_W = Wassertemperatur im Fließgewässer [°C]
 u = Fließgeschwindigkeit [m/s]
 E_x = Longitudinaler Dispersionskoeffizient [m/s]
 S = Quellen-Senken-Term [°C/s]
 R_K = Kurzweilige Strahlungsbilanz [W²/m]
 R_L = Langweilige Strahlungsbilanz [W²/m]
 H_F = Strom fühlbarer Wärme [W²/m]
 H_L = Strom latenter Wärme (Verdunstung, Kondensation) [W²/m]
 R_{Sed} = Wärmeaustausch mit dem Gewässerbett [W²/m]
 c_p = Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [≈ 4200 J/(kg K)]
 ρ_W = Dichte von Wasser [kg/m³]
 h = Mittlere Tiefe der Gewässerstrecke [m]
 F_{schatt} = Abschattungsfaktor des Gewässers [–]
 α = Albedo-Wert [–]
 R_C = Globalstrahlung an der Bodenoberfläche [W²/m]
 K_L = Turbulenter Stoffübergangskoeffizient für Wasserdampf [mm/d/hPa]
 v = Windgeschwindigkeit 10 m über dem Grund [m/s]
 F_{Wind} = Windschutzfaktor [–]

Somit ergeben sich für die Kalibrierung je vier $B1T$ - und $Y0T$ -Werte sowie die Faktoren F_{schatt} und F_{Wind} . In der Ausgangsversion ist darauf zu achten, dass $B1T$ in `wm-param.lila` gebietsspezifisch und $Y0T$ in `wm-param-tgb.lila` teilgebietsspezifisch angegeben wird. Zur Vereinfachung der Kalibrierung werden die $B1T$ -Werte in die teilgebietsspezifische Datei

wm-param-tgb.lila übertragen.

Für die Sensitivitätsanalyse werden die zehn genannten Parameter jeweils für alle TGB um $\pm 20\%$ verändert und die Auswirkungen sowohl graphisch als auch mathematisch analysiert. Tabelle 3.8 zeigt die so gewonnenen Erkenntnisse.

Aus den Erkenntnissen der Tabelle 3.8 lässt sich die Kalibrierung des Wasserwärme-Moduls über folgende Parameter festlegen: F_{schatt} , YOB , YOI , YOD , $B1I$ und $B1D$. Anzumerken ist, dass bei ausreichender Modellgüte auf die Kalibrierung einzelner Parameter verzichtet werden kann.

Im folgenden Schritt wird die Wasserwärme-Kalibrierung für den Pegel Niederwetter durchgeführt. Aufgrund der graphischen Analyse zwischen gemessener und simulierter Temperaturganglinie (vgl. Abbildung A.2) wird für dieses TEZG lediglich die Anpassung vom Beschattungsfaktor (F_{schatt}) veranschlagt. Die graphischen Auswirkungen einer Erhöhung von F_{schatt} wirken den Differenzen der gemessener und simulierter Ganglinien ideal entgegen. Als Ergebnis werden alle F_{schatt} -Werte der zum Pegel Niederwetter gehörenden TEZG im Rahmen ihrer Grenzen (0 – 1) um den Faktor 1,35 erhöht. Dadurch ergeben sich die analytischen Gütekriterien wie folgt:

$$\begin{aligned}B_{Niederwetter} &= 0,9163 \\pBias_{Niederwetter} &= 5,0227 \\KGE'_{Niederwetter} &= 0,9340 \\NSE_{Niederwetter} &= 0,9026\end{aligned}$$

Mit einem $pBias = 5,02$ ist das vorher definierte Ziel von $pBias \leq 5,3$ erfüllt. Durch die Anpassungen im TEZG der Wetschaft verbesserten sich die Gütekriterien am Standort der WW-Wehrda ebenfalls. Der $pBias$ -Wert sinkt von 6,04 % auf 5,34 %.

Für das gesamte EZG wird nun festgelegt, dass im ersten Schritt F_{schatt} erhöht wird, um den $pBias$ -Wert am Standort der WW-Wehrda zu verbessern. Im Anschluss wird zur Anpassung der Ganglinien im Winter $B1D$ verringert.

Bei der Kalibrierung des F_{schatt} -Faktors wird primär $pBias$ als bewertendes Kriterium analysiert. Die Grenzen für F_{schatt} sind definiert von 0 bis 1, wobei 0 für eine komplette Verschattung steht und somit keine kurzweilige Globalstrahlung R_K auf die Gewässeroberfläche trifft. Bei $F_{schatt} = 1$ findet kein Schattenwurf auf die Gewässeroberfläche statt. Zur Kalibrierung des Wasserwärmemoduls wird F_{schatt} schrittweise in gleichen Abständen erhöht und die graphischen Auswirkungen sowie der Parameter $pBias$ betrachtet. Die Analyse zeigt, dass sich bei einer Erhöhung des Beschattungsfaktors von 100 % auf $\approx 130\%$ das $pBias$ -Gütekriterium linear verbessert. Aufgrund dessen wird für den Beschattungsfaktor eine Erhöhung um 28 % festgelegt.

Für den nächsten Faktor wird ein ähnliches Vorgehen gewählt. Für die Bewertung von $B1D$ wird der KGE' -Wert über die Änderung des $B1D$ -Wertes aufgetragen. Die Analyse zeigt einen Knickpunkt der KGE' -Kurve bei einer Reduktion von $B1D$ um 41 %.

Darauf folgend wird der Faktor $Y0D$ zur Verbesserung der Bilanzen und zur Erhöhung der lokalen Temperaturminima im Sommer und Winter erhöht. Die Bewertung findet simultan zu $B1D$ über die Analyse des KGE' -Wertes statt. Die Analyse zeigt ein sehr gutes Ergebnis bei der Erhöhung von $Y0D$ um 34 %. Die Gütekriterien und die graphische Analyse der

Tabelle 3.8: Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse T_{uas}

	\pm YOB	\pm YOI	\pm YOD	\pm YOD2	$\pm F_{schatt}$
Erhöhung	erhöht	erhöht M/NWB	erhöht Täler in Sommer & Winter	-	erhöht in Frühling, Sommer, Herbst
Reduktion	verringert	verringert M/NWB	verringert Täler in Sommer & Winter	-	verringert in Frühling, Sommer, Herbst
<i>B</i>	-	$\mp 10^{-4}$	$\mp 10^{-4}$	-	$\pm 10^{-4}$
<i>NSE</i>	$\pm 10^{-3}$	$\pm 10^{-3}$	$\pm 10^{-3}$	$\pm 10^{-4}$	-
<i>pBias</i>	$\pm 10^{-2}$	$\pm 10^{-2}$	$\pm 10^{-2}$	$\pm 10^{-4}$	$\mp 10^{-2}$
<i>KGE'</i>	$\pm 10^{-2}$	$\pm 10^{-2}$	$\pm 10^{-3}$	$\pm 10^{-4}$	$\pm 10^{-3}$
	\pm B1B	\pm B1I	\pm B1D	\pm B1D2	\pm F_wind
Erhöhung	-	verringert Täler NWB	verringert in Winter,	-	-
Reduktion	-	erhöht Täler NWB	erhöht in Sommer, erhöht in Winter, verringert in Sommer	-	-
<i>B</i>	-	$\pm 10^{-4}$	$\mp 10^{-4}$	-	$\pm 10^{-4}$
<i>NSE</i>	$\mp 10^{-3}$	$\mp 10^{-3}$	-	$\pm 10^{-3}$	$\pm 10^{-3}$
<i>pBias</i>	$\pm 10^{-3}$	$\mp 10^{-3}$	$\pm 10^{-3}$	$\pm 10^{-4}$	$\pm 10^{-2}$
<i>KGE'</i>	$\mp 10^{-4}$	$\mp 10^{-3}$	$\pm 10^{-2}$	$\mp 10^{-4}$	$\pm 10^{-3}$

Tabelle 3.9: Gütekriterien der Wassertemperatursimulation nach Wasserwärme-Kalibrierung

	B	$pBias$	KGE'	NSE
Ober-Ofleiden	0,9712	-1,1952	0,9711	0,9683
Hainmühle	0,9718	1,4632	0,9709	0,9706
Niederwetter	0,9044	0,0081	0,8489	0,8956
WW-Wehrda	0,9542	2,2982	0,9669	0,9519

Temperaturganglinien werden als ausreichend gut bewertet, sodass die Kalibrierung des Wasserwärmemoduls mit den Anpassungen der Parameter F_{schatt} , $B1D$ und $Y0D$ für das gesamte EZG abgeschlossen werden kann. Die kalibrierten Gütekriterien sind in Tabelle 3.9 aufgelistet.

Bei Betrachtung der Gütekriterien ist eine deutliche Abweichung des KGE' -Parameters am Pegel Niederwetter ersichtlich. Die Betrachtung der Zwischenschritte zeigt, dass dieser durch die Anpassung des $B1D$ -Parameters des gesamten EZG zustande kommt. Zur Korrektur dessen wird der $B1D$ -Parameter für das TEZG des Pegels Niederwetter auf den Ausgangswert zurückgesetzt.

Tabelle 3.10: Gütekriterien der Wassertemperatursimulation nach KGE' -Korrektur

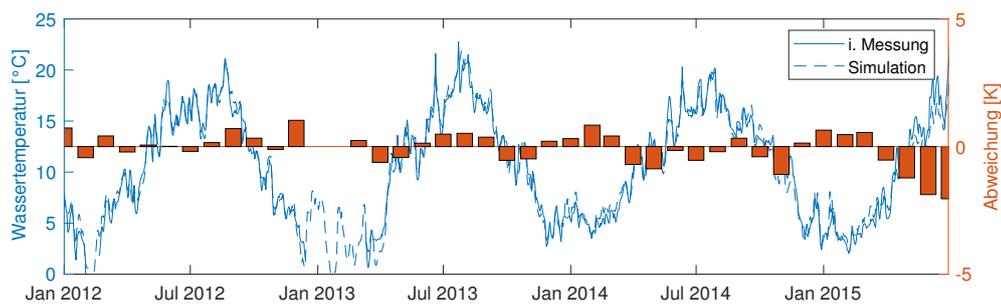
	B	$pBias$	KGE'	NSE
Niederwetter	0,9168	1,7620	0,9499	0,9151
WW-Wehrda	0,9549	2,4331	0,9641	0,9522

Die graphischen Ergebnisse der kalibrierten Gebietsparameter sind Abbildung 3.10 zu entnehmen. Im Vergleich zu Abbildung 3.9 zeigt sich eine deutlich geringere Unterschätzung der Gewässertemperaturen vor allem ab Juli 2015 (vgl. Abbildung 3.10b). Für die erste Hälfte des Kalibrierungszeitraums (vgl. Abbildung 3.10a) zeigt sich eine deutliche Annäherung der monatlichen, gemittelten Temperaturdifferenzen an die Abszissenachse. Dabei bleibt zu erwähnen, dass zyklonale Schwankungen weiterhin vorhanden sind. Den beiden letzten monatlich gemittelten Abweichungen für September und Oktober 2018 liegen unvollständige Messwerte zugrunde, weshalb diese in der Analyse nicht berücksichtigt werden. Der Januar 2017 stellt einen Ausreißer dar, was auf das Fehlen der Globalstrahlungsmesswerte „L_Linden“ und „L_Wetzlar“ zurückzuführen ist.

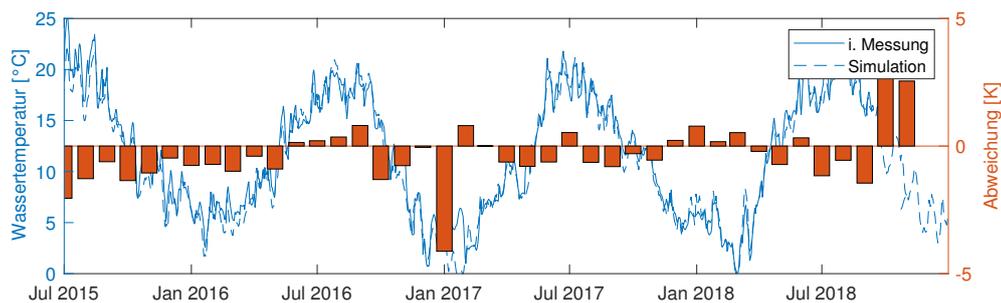
3.4 Validierungsprozess

Die Verwendung eines kalibrierten Modells ohne Validierung wird als unsicher angesehen (Buchholz 2020, 127). Aus diesem Grund wird im Folgenden eine Analyse der Modellvalidierung durchgeführt.

Wie bereits in Abschnitt 3.1 erwähnt, wird das Modell für den Zeitraum vom 01.01.2019 bis 31.12.2022 validiert. Dies entspricht grob den Vorgaben nach Yew Gan et al. (1997). Sie empfehlen für Kalibrierung und Validierung einen Mix aus drei bis fünf Jahren mit unterschiedlichen klimatischen Bedingungen (trockene, durchschnittliche und nasse Jahre) (Yew Gan et al. 1997, 90). Die Jahre 2019, 2020 und 2022 stellten in Deutschland zum Teil neue Hitzerekorde und Rekorder der Sonnenscheindauer auf. Sie gelten als heiße



(a) Zeitraum 01.01.2012 - 30.06.2015



(b) Zeitraum 01.07.2015 - 31.12.2018

Abbildung 3.10: Graphische Analyse der Wasserwärme am Standort der Wasserwerke Wehrda nach erfolgter Kalibrierung des Wärmemoduls

und trockene Jahre, wohingegen das Jahr 2021 als durchschnittliches Jahr bewertet wird. (DWD 2019; DWD 2020; DWD 2021; DWD 2022b)

Durch die Validierung werden die Ergebnisse der Modellkalibrierung kritisch hinterfragt und auf ihre Genauigkeit und Zuverlässigkeit hin überprüft. Dabei müssen die Anwender:innen stets einen Kompromiss zwischen der Qualität der Validierungsergebnisse und dem erforderlichen Aufwand für die Validierungsanalyse finden. (Buchholz 2020)

Im Rahmen dieser Arbeit wird primär die ergebnisbezogene Validierung nach Buchholz (2020) und die Bewertung der Gütekriterien $pBias$ und NSE nach Moriasi et al. (2007, Tabelle 4) angewendet. Eine Überprüfung der Validität des Ausgangszustands des Modells wird bewusst ausgelassen, da davon ausgegangen wird, dass dies keine zusätzlichen Erkenntnisse hervorbringen wird.

Entsprechend dem Vorgehen von Abschnitt 3.3 werden des Weiteren die Abflusskomponenten, der Gesamtabfluss und abschließend die Wassertemperatur an unterschiedlichen Pegeln betrachtet.

Die Abflusskomponenten Basisabfluss (Q_B) und Interflow (Q_I) werden analog zu Abschnitt 3.3.2 mittels FIXED-INTERVALL- und LOCAL-MINIMUM-Method bewertet (vgl. Abbildung 3.11). Q_B zeigt eine ausgeprägte saisonale Variation, die sowohl im Zyklus als auch in der Magnitude als vertrauenswürdig eingestuft wird. Obwohl der saisonale Verlauf des Basisabflusses als glaubwürdig bewertet wird, fällt dennoch eine saisonale Überschätzung in den Sommermonaten 2019 und 2020 auf. Diese Überschätzung kann auf klimatische Bedingungen zurückgeführt werden. Im Juni 2019 wurde in Hessen ein neuer Sonnen-

stundenrekord aufgestellt, während im Juli ein neuer Hitzerekord in Frankfurt gemessen wurde (DWD 2019). Für das Jahr 2020 sind ähnliche Ergebnisse zu verzeichnen. Ab Mai desselben Jahres erlebte Hessen das zweit sonnigste Frühjahr und ein deutliches Defizit an Niederschlagsmengen, was den gesamten Sommer über anhielt. Der August 2020 war der zweitwärmste seit Beginn der Wetteraufzeichnungen und hatte insgesamt 12 Hitzetage. (DWD 2020)

Es ist festzuhalten, dass das Modell akzeptable Ergebnisse für die priorisierten Wintermonate liefert. Dies lässt darauf schließen, dass das Modell grundsätzlich in der Lage ist, den qualitativen Verlauf des Basisabflusses zuverlässig widerzuspiegeln. Es ist jedoch anzumerken, dass während besonders warmer und trockener Sommermonate das Modell eine saisonale Überschätzung des Basisabflusses aufweist. Trotzdem liefert das Modell für die meisten Monate gute Ergebnisse und ermöglicht damit eine zuverlässige Prognose des Basisabflusses.

Der Interflow zeigt über den gesamten Validierungszeitraum einen adäquaten Verlauf und trifft die Analysen nach Sloto und Crouse (1996). Bei diesem Vergleich ist erneut anzumerken, dass aufgrund der Speicher- und Querbauwerke die simulierten Abflusskomponenten lediglich als „grobe Schätzungen“ (LEG 2023, Q-KOMPONENTEN IN GEWAESSERTEILSTRECKEN) anerkannt werden können. Dem ungeachtet stellt der Verlauf der Q_I -Ganglinie sowohl theoretisch als auch erfahrungsgemäß schlüssige Ergebnisse dar.

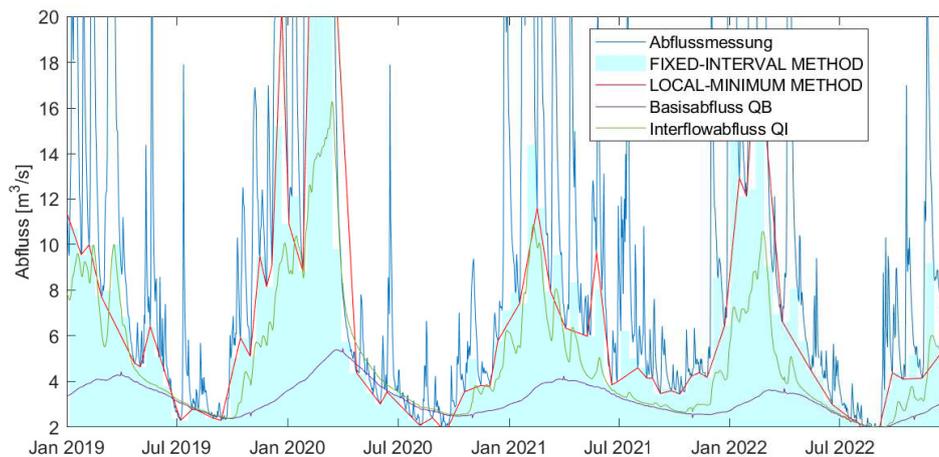


Abbildung 3.11: Abflusskomponenten Q_B und Q_I im Validierungszeitraum am Pegel Marburg

Im Anschluss an die Abflusskomponenten Q_B und Q_I wird der Gesamtabfluss betrachtet. Die analytischen Gütekriterien sind Tabelle 3.11 zu entnehmen. Die Erwartungen von Moriasi et al. (2007, 890), nach welchen sich $pBias$ und NSE im Vergleich zum Kalibrierungszeitraum verschlechtern, werden für $pBias$ bestätigt. Obwohl Moriasi et al. (2007, Tabelle 4) eine Leistungsbewertung der Gütekriterien für monatliche Werte definiert, kann sie als Größenordnung für diese Arbeit ebenfalls verwendet werden. Sie zeigt, dass $pBias$ und NSE als sehr gut gewertet werden können. Der Reduktion des $pBias$ -Wertes lässt auf eine leicht gestiegene Überschätzung des Modells schließen.

Interessant ist, dass der $\ln NSE$ -Wert sich im Vergleich zum Kalibrierungszeitraum um 1,3 %-Punkte verbessert hat. Ein gleichbleibender NSE -Wert lässt darauf schließen, dass

Tabelle 3.11: Gütekriterien des Gesamtabflusses im Validierungszeitraum

Pegel Marburg	B	$pBias$	KGE'	NSE	$lnNSE$
Kalibrierungszeitraum ¹	0,975	-1,414	0,970	0,975	0,960
Validierungszeitraum	0,975	-4,293	0,931	0,974	0,973
Validierungszeitraum ²	0,975	-4,387	0,930	0,974	0,972

¹ gemäß Tabelle 3.6

² Bei Simulation des gesamten Zeitraum 2012-2022

die Abflussspitzen ähnlich gut, und ein verbesserter $lnNSE$ -Wert darauf, dass die Abflussereignisse mit geringeren Mengen besser dargestellt werden.

Wie bereits erwähnt, lässt der $pBias$ -Wert auf eine Überschätzung des Modells im Validierungszeitraum schließen. Dies wird in Abbildung A.4 ebenfalls ersichtlich. Überraschend ist dabei zu erkennen, dass LARSIM über das gesamte Spektrum der Abflussmengen den Realitätszustand überschätzt. Differenzen von $> 10\%$ der geringsten ≈ 300 Messungen lassen auf die Überschätzung des Basisabflusses in den heißen und trockenen Sommermonaten schließen.

Zur Bestätigung dieser Werte wird das Modell für den gesamten Zeitraum 2012-2022 simuliert und die Modellverzerrung für den Validierungszeitraum analog ermittelt. Diese Simulation bestätigt die Verzerrung der Validierung, da keine signifikanten Unterschiede in der Modellverzerrung ersichtlich sind (vgl. Abbildung A.5).

Mit dem Fokus auf die Heizperiode (vgl. Abschnitt 3.1) werden diese Differenzen weniger stark gewichtet und akzeptiert.

Der simulierte und gemessene Gesamtabfluss der Lahn am Pegel Marburg über den gesamten Validierungszeitraum ist Abbildung 3.12 zu entnehmen.

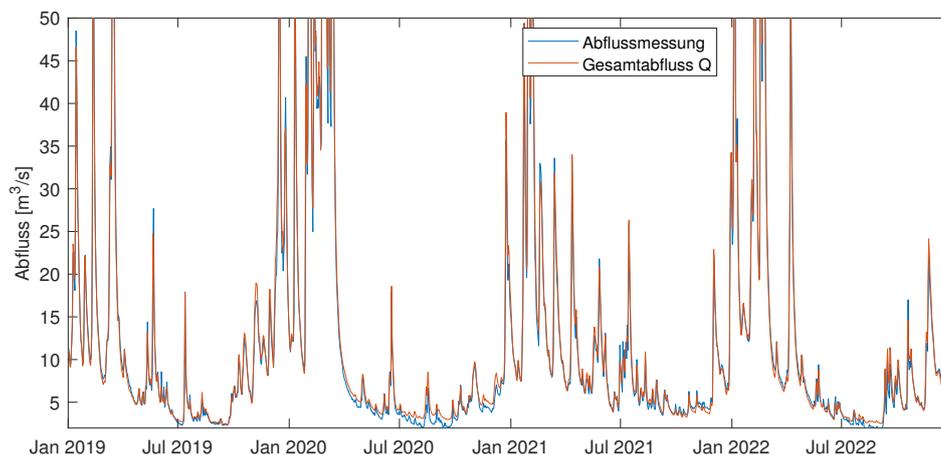


Abbildung 3.12: Gesamtabfluss im Validierungszeitraum am Pegel Marburg

Im Anschluss erfolgt die Überprüfung der Gültigkeit für die Gewässertemperatur. Im Gültigkeitszeitraum der Untersuchung sind keine Messdaten für die beiden Standorte Hainmühle und Niederwetter verfügbar, daher beschränkt sich die Validierung auf die vorliegenden Daten der Standorte WW-Wehrda und Ober-Ofleiden. Für den betrachteten Standort WW-Wehrda ist zusätzlich zu vermerken, dass die verfügbaren Messdaten zur Wassertem-

peratur zeitlich begrenzt verfügbar sind. Die Messungen reichen lediglich von Februar bis Dezember 2019 sowie von April 2021 bis Mai 2022 und werden daher in Abbildung 3.13 zusätzlich kenntlich gemacht. Für Ober-Ofleiden liegen durchgängige Daten vor (vgl. Abbildung A.6). Um die Aussagekraft der Validierung zu stärken, werden zusätzlich zu den vorhandenen Daten die Temperaturmessungen an der Wetschaft am Standort Kranzmühle oberhalb der Ortschaft Wetter, welche seit November 2019 vom Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU Darmstadt durchgeführt werden, berücksichtigt (vgl. Abbildung A.8).

Die Kriterien für die Bewertung der Validitätsperiode am Standort WW-Wehrda sind in Tabelle 3.12 dargelegt. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die von Moriasi et al. (2007, 890) postulierten Vorhersagen ebenfalls bezüglich der Wassertemperatur zutreffend sind. Sowohl $pBias$ als auch NSE verschlechtern sich, wobei die Veränderungen beim $pBias$ signifikant größer ausfallen. Nach der Beurteilung gemäß Moriasi et al. (2007, Tabelle 4), werden beide Werte trotz der Verdopplung von $pBias$ als sehr gut bewertet. Der $pBias$ -Wert weist eine Unterschätzung von 5,18 % in Bezug auf die Realwerte auf. Bei der Analyse von Abbildung 3.13 ist zu erkennen, dass diese Unterschätzung wiederholt im und um den Frühjahrsmonat April auftritt. Daher ist dies bei der praktischen Anwendung des Modells besonders in den Frühjahrsmonaten zu beachten.

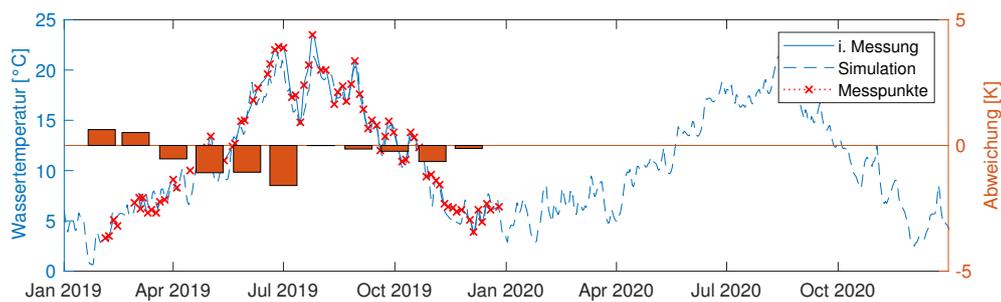
Tabelle 3.12: Gütekriterien der Gewässertemperatur-Simulation im Validierungszeitraum der Standorte Wasserwerke Wehrda, Ober-Ofleiden und Kranzmühle

WW-Wehrda	B	$pBias$	KGE'	NSE
Kalibrierungszeitraum ¹	0,9549	2,4331	0,9641	0,9522
Validierungszeitraum	0,9523	5,6131	0,9359	0,9368
Ober-Ofleiden				
Kalibrierungszeitraum ¹	0,9712	-1,1952	0,9711	0,9683
Validierungszeitraum	0,9590	-2,0039	0,9376	0,9478
Kranzmühle				
Validierungszeitraum	0,9558	3,7855	0,8728	0,9377

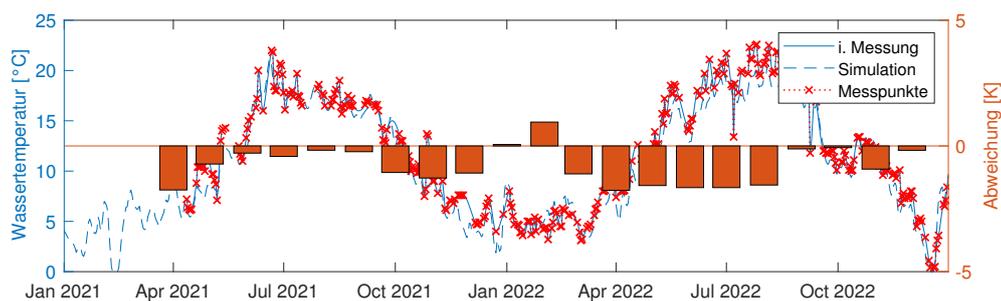
¹ gemäß Tabelle 3.10

Eine graphische Analyse der in Abbildung 3.13 dargestellten simulierten Temperaturkurve zeigt einen überzeugenden, saisonalen Verlauf. Die Temperaturwerte der monatlich gemittelten Daten weisen lediglich eine maximale Abweichung von $\Delta T_{was,max} = -1,76$ K im April 2022 auf, welche außerhalb der Heizperiode akzeptabel ist. Dies unterstreicht die Fähigkeit des Modells, realistische Vorhersagen für die Gewässertemperatur zu generieren. Die betrachtete Abweichung ist vergleichbar mit den Ergebnissen des Kalibrierungsprozesses, die gezeigt haben, dass Modellierungen der Gewässertemperatur aufgrund von physikalischen Prozessen und meteorologischen Bedingungen mit Unsicherheiten behaftet sind. Im Kalibrierungsprozess beträgt die maximale, monatlich gemittelte Abweichung $\Delta T_{was,max} = -2,04$ K, ausgenommen der beschriebenen Ausreißer.

Die Evaluation der simulierten Gewässertemperatur am Pegel Ober-Ofleiden an der Ohm ergab ähnliche Ergebnisse wie am Standort WW-Wehrda. Die Gütekriterien B , KGE' und NSE verschlechtern sich in geringem Maße im Vergleich zum Kalibrierungszeitraum (vgl. Tabelle 3.12). Besonders interessant ist, dass die durch $pBias$ detektierte Überschät-



(a) Zeitraum 01.01.2019 - 31.12.2020



(b) Zeitraum 01.01.2021 - 31.12.2022

Abbildung 3.13: Graphische Analyse der Wassertemperatur am Standort der Wasserwerke Wehrda im Validierungszeitraum

zung im Vergleich zum Standort WW-Wehrda zunimmt. Während das Modell am Standort WW-Wehrda die Gewässertemperaturen stärker unterschätzt, werden sie am Standort Ober-Ofleiden stärker überschätzt.

Die Differenzen der simulierten und gemessenen Temperaturganglinien bestätigen zudem die saisonale Unterschätzung rund um den Monat April. Des Weiteren ist eine spätsommerliche Überschätzung der Gewässertemperaturen ersichtlich. Für die fokussierte Heizperiode liefert das Modell ausgeglichene bis gute Ergebnisse am Pegel Ober-Ofleiden. Die Temperatur-Ganglinien sind Abbildung A.6 zu entnehmen.

Die visuelle Analyse der Gewässertemperaturdaten am Standort Kranzmühle bestätigt die bisherigen Ergebnisse. Eine saisonale Unterschätzung der Wassertemperaturen im Frühjahr wird ebenfalls beobachtet (vgl. Abbildung A.7). Vergleichbare qualitative Gütekriterien wie an den vorher analysierten Standorten sind in Tabelle 3.12 zu erkennen. Ein direkter Vergleich mit dem Kalibrierungszeitraum ist nicht möglich, weshalb diese Ergebnisse lediglich unterstützend anzusehen sind.

Insgesamt zeigt die Validierung der Modellgüte, dass das Modell in der Lage ist, genaue Vorhersagen über die aktuellen klimatischen Bedingungen für die Gewässertemperatur zu liefern. Es ist zu beachten, dass die Vorhersage nicht tagesaktuell erfolgt, sondern als Prognose über einen bestimmten Zeitraum betrachtet werden muss.

3.5 Erkenntnisse

Zum Abschluss des Kalibrierungsprozesses werden in diesem Abschnitt die Erkenntnisse aus der Kalibrierung vom WHM und WM diskutiert.

Wichtig zu benennen bleibt dabei, dass das WHM der Lahn im Ausgangszustand des HLNUG, wie zu erwarten, valide Ergebnisse liefert. Durch die im Allgemeinen geringfügige Optimierung der Gütekriterien ist der Prozess als Feinkalibrierung zu behandeln. Den allgemeinen guten Modellzustand bestätigt die in Abschnitt 3.2 erwähnte Identity-Line (vgl. Abbildung 3.14). Diese visuelle Analysemöglichkeit liefert keine signifikanten Erkenntnisse zur Optimierung des Modells, sondern bestätigt lediglich dessen guten Zustand sowohl im Ausgangszustand als auch im Zustand nach Abschnitt 3.3.3. Die Identity-Line liefert weder nennenswerte Ausreißer der Punktwolke noch große Abweichungen des Winkels der Trendlinie zum Ideal.

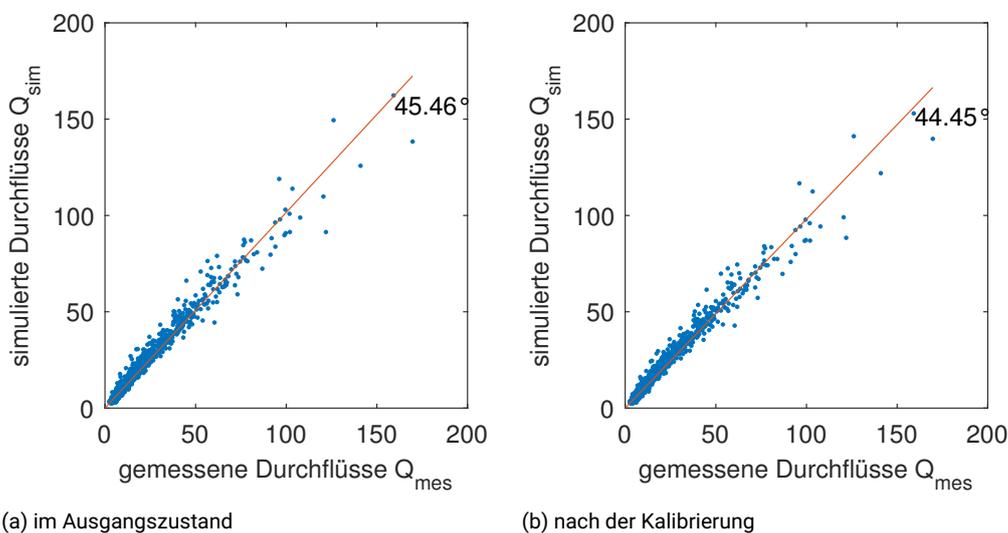


Abbildung 3.14: Identity-Line des Gesamtabflusses am Pegel Marburg

Insbesondere die prozentuale Verzerrung ($pBias$) zeigt das Optimierungspotenzial des WHM. Im Vergleich zum Ausgangszustand verbessert sich dieser Wert um 3,9 %-Punkte. Die graphische Analyse der Verzerrung bestätigt diese Verbesserung zusätzlich (vgl. Abbildung 3.6).

Für das WM gelten andere Voraussetzungen. Dieses ist im operationellen Betrieb nicht kalibriert. Die Ausgangssituation (vgl. Abbildung 3.9) zeigt kontinuierliche sowie saisonale Abweichungen zwischen Simulations- und Realdaten. Für die Kalibrierung des WM bleibt die inkonsistente Datengrundlage der begrenzende bzw. kritische Faktor. Die Aufbereitung der Daten mittels Interpolation oder das Ausweichen auf alternative Messstellen kann Abhilfe schaffen, die Ergebnisse sollten jedoch kritisch betrachtet und hinterfragt werden. Im Rahmen der Kalibrierung treten deutliche visuelle Verbesserungen auf und die analytischen Gütekriterien zeigen ebenfalls durchweg eine Verbesserung. Eine Auswertung der Identity-Line der gemessenen zur simulierten Gewässertemperatur vor und nach der Kalibrierung ist Abbildung 3.15 zu entnehmen. Die Punktwolke zeigt geringfügige Veränderun-

gen, sodass sich die Richtung der maßgebenden Trendlinie ebenfalls geringfügig verändert. Aufgrund der marginalen Differenz ist allerdings keine Bewertung dieser Auswertung vorzunehmen. Die Ergebnisse bestätigen lediglich, dass LARSIM die Gewässertemperaturen gut darstellen kann.

Bei der visuellen Bewertung der Ganglinien handelt es sich um die subjektive Wahrnehmung der Anwender:innen. Eine Verifikation durch weitere Anwender:innen und Fachexpert:innen ist ratsam.

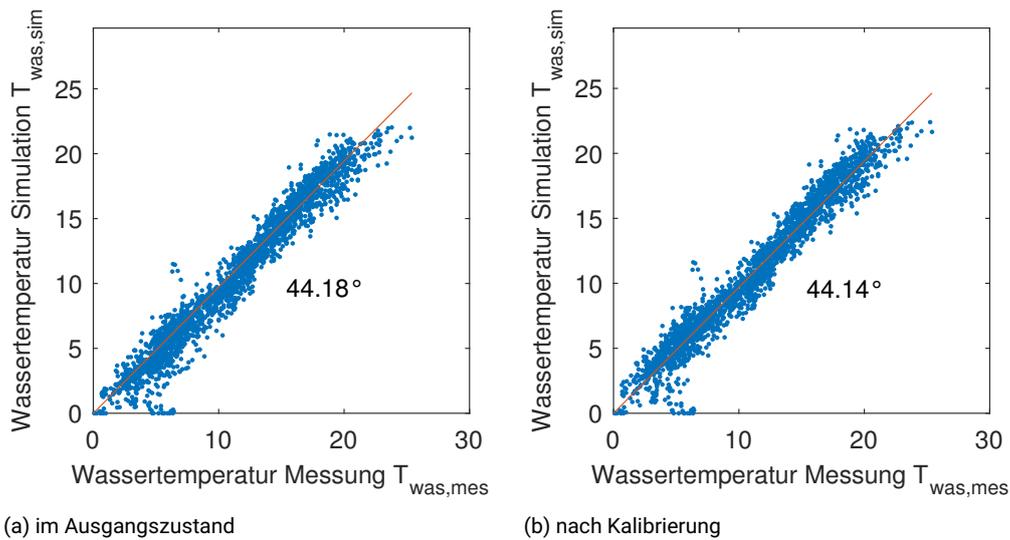


Abbildung 3.15: Identity-Line der Wassertemperatur am Pegel Marburg

Die LARSIM-Struktur ist als Black-Box-Modell zu bewerten, da den Anwender:innen kein Einblick in die Programmstruktur gewährt wird. Dies führt dazu, dass die Reaktion des Modells auf die Variation einzelner Parameter über diffuse Änderungen der Ganglinien identifiziert werden müssen. Es ist nicht auszuschließen, dass die Modellreaktion auf einzelne Parameter falsch oder unvollständig eingeschätzt werden.

4 Szenarien

Das Kapitel 4 behandelt die Integration von wissenschaftlichen und wasserwirtschaftlichen Fragestellungen in das LARSIM-Modell. Dazu werden unterschiedliche sowohl reale als auch fiktive Szenarien evaluiert, welche im Zusammenhang mit dem in dieser Arbeit behandelten Modellausschnitt stehen. Bei den Szenarien handelt es sich um Anpassungen, welche entweder durch die Lahn einen positiven Einfluss auf die allgemeine und industrielle Infrastruktur erhalten oder welche einen positiven Einfluss auf die Ökologie der Lahn haben. Als Betrachtungszeitraum der Szenarien werden die Jahre 2019-2020 gewählt. Dies wird durch eine entsprechende Datengrundlage der Szenarien mit Realbezug begründet.

Für den Ausgangszustand zur Betrachtung der Szenarien wird das nach Abschnitt 3.3.4 kalibrierte Modell verwendet. Nach Kapitel 3 ist das bearbeitete LARSIM-Modell in der Lage, die Durchflussmengen und Gewässertemperaturen verlässlich darzustellen. Auf dieser Grundlage lassen sich Szenarien modellieren und Erkenntnisse ziehen, welche einen wasserwirtschaftlichen und/oder industriellen Nutzen aufweisen können.

4.1 Abbildung von Testreferenzjahren

Ein Testreferenzjahr (TRY) stellt den charakteristischen, klimatologischen Zustand eines Jahres stellvertretend für einen Zeitraum dar. Seit 1986 dienen diese Referenzzustände dem Vergleich und der Prognose klimatischer Bedingungen. Sie finden im Bauwesen große Verwendung bei der energetischen Planung von Gebäuden und der Auslegung von Heizungs- und Lüftungsanlagen. (DWD und BBR 2017, 1–5)

2013 hat das Bundesamt für Baumwesen und Raumordnung (BBR) zuletzt den Deutschen Wetterdienst (DWD) beauftragt, die TRY zu aktualisieren. 2016 hat der DWD die Datensätze für das Testreferenzjahr TRY2015 veröffentlicht. Diese resultieren aus Stationsdaten des DWD der Jahre 1995-2012. Die gewählten meteorologischen Daten werden geglättet und interpoliert, sodass Datensätze in zeitlicher Auflösung von 1 h und räumlicher Auflösung von 1 km² zur Verfügung stehen. (DWD und BBR 2017, 1–5)

Durch die Verwendung unterschiedlicher Klimamodelle konnte der DWD den Datensatz eines prognostizierten Testreferenzjahres TRY2045 erstellen. Dieses TRY soll den Zeitraum 2031-2060 darstellen und ist im Bausektor relevant für die Vorhersage von Elementen mit langen Betriebszeiten. Das TRY2045 hat explizit die Aufgabe, die zu erwartenden klimatischen Veränderungen durch den Klimawandel abzubilden. (DWD und BBR 2017, 4). Die Daten der Testreferenzjahre TRY2015 und TRY2045 sind DWD (2023) entnommen. Es stehen Referenzwerte für relative Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur, Globalstrahlung (aufgelöst in direkte und diffuse Sonnenstrahlung), Luftdruck und Windgeschwindigkeit zur Verfügung. Zur Simulation in LARSIM wird aus den stündlich vorliegenden Daten der

Tagesmittelwert gebildet. Die Strahlungsdaten werden in LARSIM nicht in diffuse und direkte Strahlung unterteilt, sodass diese für die Simulation tageweise als Globalstrahlung aufsummiert werden (Maniak 2016, 44). Die nicht in den TRY abgebildeten Werte Niederschlag, Sonnenstunden, Durchfluss und Wassertemperatur werden aus den Messdaten des Jahres 2019 übernommen.

In LARSIM werden Stationen ortstreu über Koordinaten und die Zuordnung zu TGB definiert. Da die Daten der TRY für 1 km² große Raster zur Verfügung stehen, werden die Raster der Stationen gewählt und die entsprechenden Rasterdaten als Stationsdaten übernommen. Es werden die Stationen Bad Berleburg, Coelbe, Gießen Wettenberg, Lahnhof, Neu Ulrichstein und Wahlen betrachtet. Eine Zuordnung der Rasterdaten gemäß DWD (2023) zu den Stationen ist Tabelle A.3 zu entnehmen.

Die Integration der TRY-Daten in LARSIM findet über die Datendateien im lila-Format statt. Je Datenart wird die entsprechende Datei zweifach dupliziert und die Messwerte der Stationen durch die entsprechenden Daten von TRY2015 bzw. TRY2045 ersetzt. Stationen, welche nicht im EZG bis KW-Gießen liegen, werden nicht mit TRY-Daten, sondern mit Fehlwerten belegt. Die Einbindung dieser Dateien findet per Dateinamen in der Systemdatei `pfade.dat` statt. Zusätzlich wird der Simulationszeitraum im Datensatz 3 der `tape10.dat`-Datei festgelegt. Als Simulationsbeginn (`EREIGNISBEGINN`) wird der 01.01.2019 und als Simulationsende (`EREIGNISENDE`) der 31.12.2019 definiert (`LEG 2023`, Datensatz 3: Einzelparameter für die Simulation).

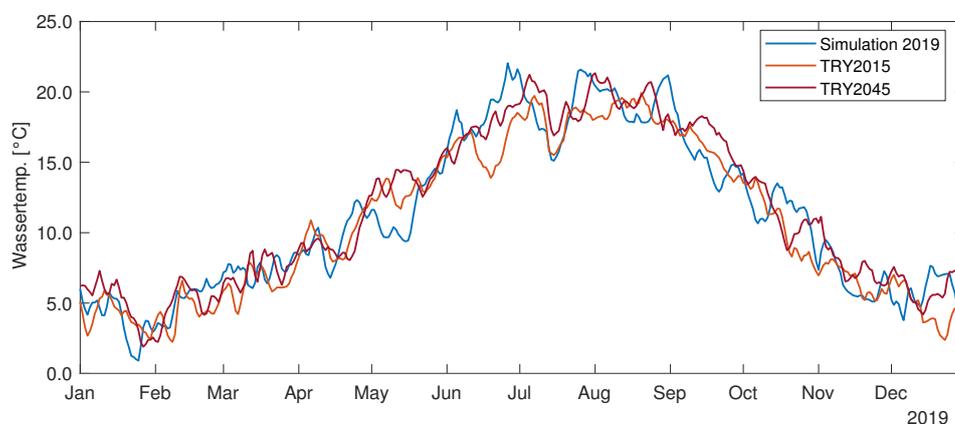


Abbildung 4.1: Analyse der Wassertemperaturen der Simulation mit meteorologischen Daten für 2019, TRY2015 und TRY2045 am Pegel Marburg

Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.1 und Abbildung 4.2 ersichtlich. Abbildung 4.1 zeigt den Temperaturverlauf der Simulationsdurchläufe für TRY2015 und TRY2045 im Vergleich zur Simulation mit meteorologischen Daten für 2019. Wie im Zuge des Klimawandels zu erwarten, ist die Wassertemperatur des TRY2045-Graphens tendenziell höher als die des TRY2015. Auffällig ist, dass die prognostizierte Gewässertemperatur für den Referenzzustand 2045 im April fast durchgängig geringer ist als im Referenzzustand 2015. Ein Grund dafür ist, dass die Werte der diffusen und direkten Sonnenstrahlung des TRY2045 für den Monat April überraschend gering sind. Der Graph des Ausgangszustandes zeigt im Jahresverlauf eine gute Annäherung an die beiden Testreferenzjahre. Zeitweise unterschätzt oder überschätzt dieser die Referenzzustände, dies kann auf jahresspezifische Wetterlagen

zurückgeführt werden.

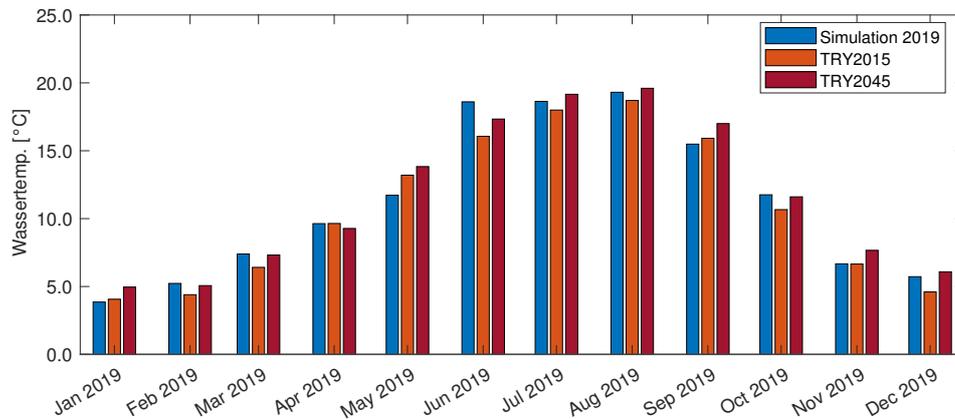


Abbildung 4.2: Analyse der monatlichen Wassertemperaturen der Simulation mit meteorologischen Daten für 2019, TRY2015 und TRY2045 am Pegel Marburg

Die Abbildung 4.2 zeigt die monatlich gemittelten Wassertemperaturen entsprechend der Graphen aus Abbildung 4.1. Die Erhöhung von TRY2045 zu TRY2015 ist in diesem Fall, abgesehen vom Monat April, signifikant zu erkennen. Die Simulationsergebnisse des Ausgangsmodells mit den meteorologischen Messwerten von 2019 ordnen sich im Bereich der Referenzzustände ein. Dieser Abbildung ist ebenfalls zu entnehmen, dass die Ergebnisse für 2019 sich nicht ideal zwischen TRY2015 und TRY2045 positionieren, sondern zeitweise beide Testreferenzjahre über- oder unterschätzen.

Die Differenzen der monatlichen Wassertemperatur zwischen der Simulation mit meteorologischen Daten für 2019 und Testreferenzjahren bzw. zwischen TRY2015 und TRY2045 sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Es ist ersichtlich, dass die Wassertemperaturen der TRY2015-Simulation geringer als die Werte der Simulation mit meteorologischen Daten für 2019 sind, wohingegen die TRY2045-Simulation größtenteils wärmere Wassertemperaturen ausgibt. Interessant ist insbesondere der Vergleich der beiden Testreferenzjahre zueinander. Der Prognose nach wird sich die Wassertemperatur konsequent erhöhen, mit der Ausnahme des Monats April. Im Jahresdurchschnitt besagt die Prognose, dass sich die Wassertemperatur der Lahn unter der Bedingung eines ähnlichen Niederschlagsverhaltens der Jahre 2015 und 2045 um circa 0,9 K erhöhen wird. Diese Prognose trifft die Erwartungen des Weltklimarates (IPCC), nach welchem sich bei einer globalen Erwärmung von 3 °C Oberflächengewässer um 1,2 °C bzw. bei 1,5 °C globaler Erwärmung um 0,8 °C erwärmen (IPCC 2022, 1830). Die Temperaturdifferenz von TRY2015 zum Ausgangszustand 2019 ist signifikant. Die Simulation gibt an, dass die Wassertemperatur im Jahr 2019 knapp 0,5 K wärmer als im TRY2015 ist. Zum Erreichen der prognostizierten Gewässertemperatur des TRY2045 darf sich die Lahn in den Jahren bis 2045 nur noch um 0,4 K erwärmen.

DWD und BBR (2017, 5) weisen darauf hin, dass die meteorologischen Daten der TRY zur Simulation thermischer Anlagen und des Gebäudeverhaltens erstellt sind. Die Verwendung der Daten in abweichender Thematik ist mit Vorsicht zu bewerten. Im Rahmen dieser Arbeit stellen die TRY einen Vergleich zum simulierten Jahr 2019 dar.

Abschließend ist zu beachten, dass das Jahr 2019 ein sehr warmes und regenarmes Jahr ist (DWD 2019). Aus der Simulation geht dementsprechend nicht hervor, ob die Werte der

Tabelle 4.1: Monatlich gemittelten Abweichung der Wassertemperatur der TRY zum Ausgangszustand am Pegel Marburg für 2019

	Gewässertemperatur [°C]	Temperaturdifferenzen ΔT [K]		
		TRY2015 zu Simulation 2019	TRY2045 zu Simulation 2019	TRY2045 zu TRY2015
	Simulation mit meteorologischen Daten für 2019			
Jan	3,86	+0,21	+1,10	+0,89
Feb	5,23	-0,83	-0,16	+0,67
Mrz	7,40	-0,99	-0,08	+0,91
Apr	9,63	+0,01	-0,36	-0,37
Mai	11,72	+1,48	+2,11	+0,63
Jun	18,60	-2,54	-1,27	+1,27
Jul	18,64	-0,64	+0,52	+1,16
Aug	19,31	-0,60	+0,29	+0,90
Sep	15,49	+0,43	+1,51	+1,08
Okt	11,76	-1,09	-0,15	+0,94
Nov	6,67	-0,01	+1,00	+1,01
Dez	5,72	-1,12	+0,36	+1,47
$\overline{\Delta T}$	11,17	-0,47	+0,41	+0,88

Simulation mit meteorologischen Daten für 2019 als Ausreißer anzuerkennen sind oder repräsentativ für die Gewässertemperaturentwicklung stehen.

4.2 Einleitung von Kühlwasser

Die Firma Seidel GmbH & Co. KG. produziert seit knapp 200 Jahren in Deutschland Aluminium- und Kunststoffprodukte. Einer der beiden Produktions- und der Hauptstandort der Firma Seidel GmbH & Co. KG. befindet sich im Marburger Stadtteil Campusviertel (vgl. Abbildung A.9). (Seidel GmbH & Co. KG 2022)

An diesem Standort wird die Lahn zur Abgabe von erwärmten Kühlwasser genutzt. Das Unternehmen leitet jährlich ein Volumen von 17.500 – 18.000 m^3 ein. Die Einleitung kann sowohl kurzfristig als auch über das Jahr verteilt als konstanter Volumenstrom von $2,0 \text{ m}^3/\text{h} = 0,56 * 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ angenommen werden. Die Kühlwassertemperaturen sind Tabelle 4.2 zu entnehmen. (Lotz 2022)

Tabelle 4.2: Monatlich gemittelte Temperatur der Kühlwassereinleitung durch Fa. Seidel GmbH & Co. KG. der Jahre 2016-2021
Quelle: Lotz 2022

Monat	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun
Temp.	24,96 °C*	25,44 °C	25,92 °C*	26,40 °C	26,82 °C	27,50 °C
Monat	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Temp.	27,86 °C*	28,23 °C	26,40 °C	25,92 °C*	25,44 °C	24,90 °C

*: linear interpolierte Werte

Dieses Szenario beschäftigt sich mit der Analyse von Kühlwassereinleitungen mittels

LARSIM. Zu diesem Zweck wird die Option TWAS-EINLEITER JAHRESGANG zusätzlich zur bereits implementierten EINLEITER JAHRESGANG-Option gesetzt. Die Zuordnung der Einleiter-Daten findet in der Datei zuordnung-einleiter-jahresgang.dat statt. Die für die Firma Seidel GmbH & Co. KG. definierte Stationsnummer 999 wird dem TGB 328 zugeteilt. Die Datei einleiter-jahresgang.lila wird um die Station 999 und den konstanten Volumenstrom von $Q_{Seidel} = 0,56 * 10^{-3} m^3/s$ ergänzt. Anschließend wird die Datei twas-einleiter-jahresgang.lila erstellt. Das Layout der Datei ist LEG (2023, LILA (Listenformat für LARSIM)) zu entnehmen. Die Station 999 wird ebenfalls in diese Datei eingetragen und täglich mit den monatlichen Temperaturen gemäß Tabelle 4.2 gespeist.

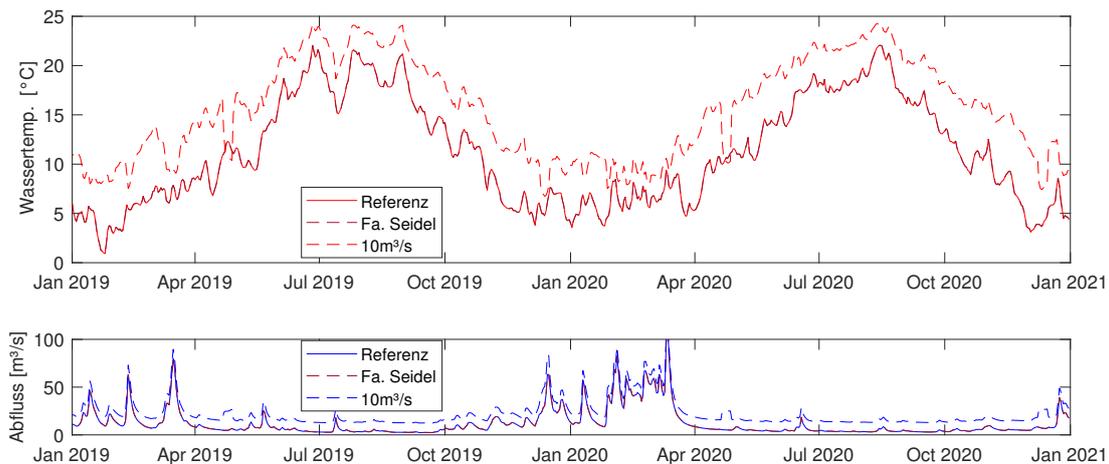


Abbildung 4.3: Auswirkungen durch die Einleitungen von Kühlwasser durch Seidel GmbH & Co. KG. auf die simulierten Gewässertemperatur und Ganglinien am Pegel Marburg

Die Ergebnisse der Simulation sind Abbildung 4.3 zu entnehmen. Es ist ersichtlich, dass die Einleitungen auf das gesamte Gewässer circa 2,5 km stromabwärts am Pegel Marburg keine Auswirkungen haben (Standort in Abbildung A.9). Die maximale Abweichung der simulierten Gewässertemperatur mit und ohne Einleitungen der Firma Seidel GmbH & Co. KG. beträgt $\Delta T = 0,01$ K. Aufgrund der geringen Auswirkungen lässt sich keine Aussage über die Modellfunktionalität treffen.

In einem zweiten Schritt wird der Einleitungsvolumenstrom deutlich auf $Q = 10 m^3/s$ erhöht. Der Wert ist frei gewählt und stellt keinen Zusammenhang zu aktuellen oder geplanten Einleitungen der Firma Seidel GmbH & Co. KG. oder anderen dar. Dieser Schritt soll ausschließlich die Funktionalität des Modells in Bezug auf temperierte Einleitungen nachweisen. Die Anpassung findet in der Datei einleiter-jahresgang.lila statt.

Die Auswirkungen der fiktiven Einleitung von $10 m^3/s$ sind gestrichelt in Abbildung 4.3 dargestellt. Die konstante Erhöhung des Abflusses ist deutlich zu erkennen.

Die Analyse der Gewässertemperatur bei diesem Einleitungs-Volumenstrom und den Temperaturen gemäß Tabelle 4.2 zeigt deutliche Auswirkungen. Die Gewässertemperatur ist durchgängig höher als im Referenzzustand. Die Temperaturdifferenz ist in Wintermonaten, bei generell niedrigerer Gewässertemperatur, höher als in warmen Sommermonaten. Die Abflussvolumina beeinflussen ebenfalls das Ergebnis. Bei geringe Abflussmenge ist die Temperaturdifferenz stärker als bei hohen. Besonders deutlich ist dies während der

Abflusswellen im Frühjahr 2019 und des generell hohen Abflusses im Frühjahr 2020 zu erkennen.

Dies zeigt somit, dass LARSIM die Einleitung von Kühlwasser oder generell erwärmten Wasser qualitativ gut darstellen kann. Es zeigt stromabwärts als saisonal und mengenmäßig realistisch zu bewertende Ergebnisse.

Durch den Vergleich der Einleitungen der Seidel GmbH & Co. KG. und die Einleitung von $10 \text{ m}^3/\text{s}$ kann bestätigt werden, dass die Kühlwassereinleitung in der angegebenen Mengemäßigkeit keinen negativen Einfluss auf die stromabwärts gelegene Gewässerökologie aufweist. Der lokale Einfluss an der Ausleitungsstelle und die eventuelle Entwicklung von Wärmefahnen kann durch LARSIM nicht dargestellt werden. Hierzu eignen sich hydrologische 2D- oder 3D-Modelle besser.

4.3 Integration von Seitengewässern

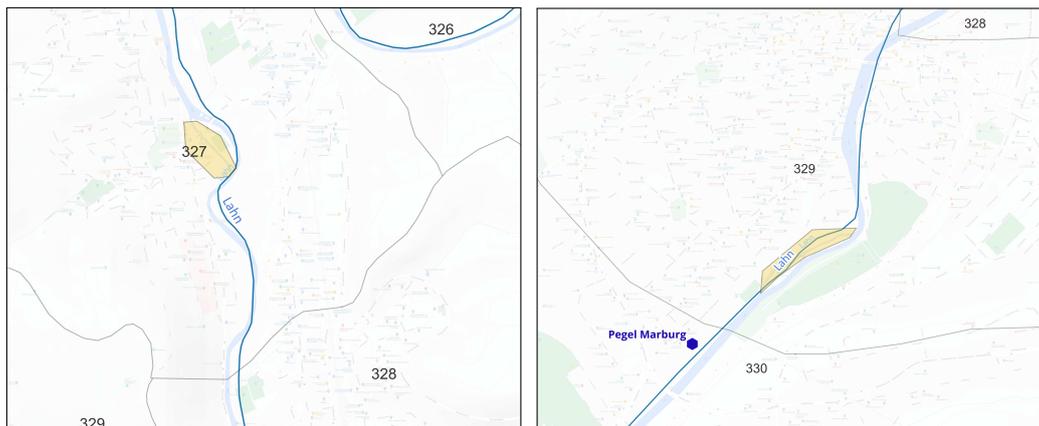
Die Lahn fließt mitten durch das Marburger Stadtbild und prägt dieses. Grafiken aus dem 16. Jhd. zeigen einen breiten, natürlichen Flusslauf mit Mäandern (Merian 1649). Heutzutage ist die Lahn im Stadtgebiet fast ausschließlich begradigt. Es sind die fünf Seitengewässer Schwarzes Wasser, Mittelwasser, Mühlengraben, Mühlkanal Wehrda und der Lohmühlgraben vorhanden. Im LARSIM-Referenzzustand wird ausschließlich das Hauptbett der Lahn dargestellt.

Für diese Arbeit sind der Mühlkanal Wehrda und der Lohmühlgraben von Interesse. Der Mühlkanal Wehrda bietet für die dort ansässigen Wasserwerke die Möglichkeit zur Entnahme und Einleitung von Frisch- und Brauchwasser. Der Lohmühlgraben auf Höhe des Universitätsstadions unterhalb des Grüner Wehrs ist durch die unmittelbare Nähe zum Softwarecenter und dem Anschluss an ein Fernwärmenetz interessant. Das Schwarz- und Mittelwasser sowie der Mühlengraben verlaufen mitten durch den Stadtkern und sind von untergeordneter Bedeutung.

Das Ziel dieses Szenarios ist es, den Mühlkanal Wehrda und den Lohmühlgraben in LARSIM einzupflegen und die Ergebnisse zu evaluieren. Optional ist die industrielle Nutzung dieser Kanäle zu prüfen. Zu diesem Zweck müssen zwei neue TGB definiert werden, wobei gleich mehrere Herausforderungen auftreten.

In LARSIM werden TGB aus einem oder mehreren vorherigen TGB gespeist, die Ausleitung kann aber nur in ein Nachgeordnetes stattfinden. Dies führt vereinfachend dazu, dass die beiden TGB der Mühlenkanäle keine Gewässerteilstrecken aufweisen und somit wie das Quellgebiet eines Nebenarms betrachtet werden. Die Folge daraus ist, dass keine Translation oder Retention des Abflusses entsteht. Mithilfe von Verzweigungen, welche in `tape10.dat` definiert werden, gibt es eine Möglichkeit, die Mühlenkanäle aus dem Hauptbett der Lahn mittels Schwellenwert und prozentualer Ausleitung variable zu speisen (LEG 2022, 150).

Des Weiteren werden Abflusswerte in LARSIM beim Verlassen eines TGB ins Nächste übergeben. Daraus folgt, dass die zwei TGB der Mühlenkanäle in LARSIM nicht ortstreu dargestellt werden können. Rechnerisch wird das TGB des Mühlkanals Wehrda (vgl. Abbildung 4.4a) somit zwischen den TGB 327 und 328 eingebunden. Über bereits erwähnte



(a) Mühlkanal Wehrda

(b) Lohmühlgraben Marburg

Abbildung 4.4: Standort des Mühlkanals Wehrda und des Lohmühlgrabens in Marburg an der Lahn, erstellt mit QGIS 3.22.12-Białowieża

Verzweigung kann ein Teil des Abflusses aus TGB 327 in das Mühlkanal-TGB eingeleitet werden, wohingegen der Hauptabfluss weiterhin dem TGB 328 übergeben wird. Der Abfluss des Mühlkanal-TGB wird ebenfalls an das TGB 328 weitergeleitet. Für den Lohmühlgraben in der Marburger Stadtmitte (vgl. Abbildung 4.4b) gilt selbiges für die TGB 328 und 329. Das TGB des Mühlkanals Wehrda wird entsprechend rechnerisch stromabwärts positioniert und das TGB des Lohmühlgrabens stromaufwärts. Als Pegel Marburg ist in LARSIM der Auslass des TGB 329 definiert. Durch die stromaufwärts gelegene Einbettung des Lohmühlgrabens kann die Auswirkung auf den Pegel Marburg analysiert werden.

Die Implementierung der beiden Mühlkanal-TGB findet in der Datei tape12.dat statt. Diese beinhaltet je Element den Datensatz 9 mit Gebietsinformationen. Der Datensatz beinhaltet standardmäßig drei Zeilen mit Informationen zur Flächen- und Gewässerdefinition. Durch die in tape10.dat gesetzten Optionen WASSERHAUSHALT und PERKOLATION MIT VDB-WERTEN wird der Datensatz um die Zeilen 3b, 4a, 4b, 5a und 5b ergänzt. Somit werden jedem TGB acht Zeilen mit Informationen und Werten zugetragen. (LEG 2023, Datensatz 9: Gebietsdatei)

Die zwei TGB werden aus den jeweils vorherigen TGB abgeleitet. Beiden wird eine eindeutige Flächennummer vergeben und die mittels GIS-Software¹ ermittelte Flächengröße angegeben. Der Wert der Flächengröße wird dem jeweils vorherigen TGB abgezogen. Der zweite und dritte Parameter der Zeile 2 definieren die obere und untere Stationierung der Gewässerteilstrecke. Die untere Stationierung bleibt unverändert, da der Mühlkanal ebenfalls ins folgende TGB speist. Der Wert der oberen Stationierung entspricht der unteren Stationierung plus 1 m (LEG 2023, Stationierung unten KMU). In LARSIM wird so definiert, dass keine Gewässerteilstrecke vorhanden ist. Die restlichen Parameter der zweiten Zeile entfallen. Die Werte der Zeile 3a und 3b zur Definition des Gewässerprofils entfallen ebenfalls. Lediglich der Wert des vertikalen Bodendurchlässigkeitsbeiwerts (VDB) wird angegeben. Alle Daten des Mühlkanal-TGB sind Tabelle A.4 und des Lohmühlgraben-TGB sind Tabelle A.5 im Anhang zu entnehmen. Die Nummerierung aller folgenden TGB wird

¹QGIS 3.22.12-Białowieża

folglich angepasst. (LEG 2023, Datensatz 9: Gebietsdatei)

Über die bereits erwähnten Verzweigungen lassen sich nun die beiden neuen TGB mit einem Abflussvolumen speisen. Im Datensatz 12 der tape10.dat-Datei werden diese definiert. LARSIM unterscheidet zwischen einfachen und erweiterten Verzweigungen. Einfache werden über eine Kombination aus Schwellenwert und prozentualem Abflussanteil gebildet, erweiterte Verzweigungen bestehen aus einer Vielzahl von Kombinationen und bilden somit abflussabhängige Ausleitungen ab. (LEG 2023, Datenkarte 16 (Verzweigungsdaten))

Da keine Realdaten bezüglich der Abflussmengen des Mühlkanals und des Lohmühlgrabens vorhanden sind, werden beide Verzweigungen als einfache Verzweigungen implementiert.

Für den Mühlkanal Wehrda wird ein prozentualer Abfluss von 5 % des Gesamtabflusses ab einem Schwellenwert von $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ definiert. Der Mühlkanal Wehrda ähnelt einem Stillgewässer (vgl. Abbildung 4.5a). Gemäß Maniak (2016) weisen Seen, welche zu den Stillgewässern zählen, einen geringen Austausch von Zu- und Abflüssen und in Teilbereichen Pflanzenbewuchs auf. Beide Kriterien sind in Abbildung 4.5a ersichtlich. Die Auswertung zeigt, dass dies nicht in LARSIM abgebildet wird. Ein Abfluss im Mühlkanal ist, beim Unterschreiten des Gesamtabflusses der Lahn unter $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$, nicht existent. Somit hat der Mühlkanal in der Abbildung durch LARSIM keinen Einfluss auf das Temperaturregime des Gewässers. Aufgrund des realen Stillgewässers mit geringen Austauschprozessen und einer z. T. unbeschatteten Gewässeroberfläche ist mit einem essenziellen Eintrag thermischer Energie durch die Lufttemperatur und die Globalstrahlung zu rechnen. Das simulierte Abflussverhalten lässt auf ein Entwässerungsgraben schließen, welcher nur zeitweise Wasser führt.

Für die Verzweigung in den Lohmühlgraben wird eine konstante Ausleitung von 10 % des Gesamtabflusses ohne Schwellenwert angenommen. Dieser Wert lässt sich aufgrund fehlender Messdaten nicht evaluieren. Die Auswertung der Abflussganglinie zeigt, dass die Ausleitung konstant 10 % des Gesamtabflusses darstellt. Das Modell ist somit in der Lage, einen dauerhaft durchströmten Seitenarm eines Gewässers abzubilden. Abbildung 4.5b zeigt eine Passage des Marburger Lohmühlgrabens. Es ist ein Wehr mit Endschwelle zu erkennen, welche einen Höhenunterschied im Fließabschnitt überbrückt. Die Abbildung bestätigt die Annahme, dass es sich beim Lohmühlgraben um ein Fließgewässer handelt. Die Einbindung des Lohmühlgrabens hat geringe Auswirkungen auf den Unterstrom. Durch die Verzweigung entsteht ein geringer zeitlicher Versatz des umgeleiteten Abflussanteils. Der Versuch, die Verzweigungsvorgaben Schwellenwert und prozentuale Ausleitung zu evaluieren, scheitert aufgrund fehlender Realdaten. Die Untersuchung der Profildaten entlang des Mühlkanals Wehrda bzw. des Lohmühlgrabens für den Kanal und das Gewässerhauptbett führt zu keinen Ergebnissen. Die Idee, die prozentuale Ausleitung anhand des Verhältnisses der durchfließenden Fläche der Kanäle zum Gewässerhauptbett zu bewerten, scheitert aufgrund der vorhandenen Querbauwerke. Angesichts des Fehlens von Realdaten und der erfolglosen Betrachtung der Profildaten bleibt festzuhalten, dass die Ergebnisse dieses Abschnittes rein qualitativ zu bewerten sind. Es können keine quantitativen Aussagen abgeleitet werden, da die vorliegenden Daten nicht ausreichend sind, um eine objektive Analyse durchzuführen.

Die Auswertung der Szenarien zeigt, dass LARSIM Verzweigungen, welche als Fließgewäs-



(a) Wehrda, aufgenommen am 30.05.2023



(b) Marburg, aufgenommen am 28.05.2023

Abbildung 4.5: Fotos der Mühlkanäle an der Lahn,
Quelle: eigene Aufnahme

ser zu definieren sind, gut darstellen kann.

Im Fall von Stillgewässern, beispielsweise Altarmen oder stillgelegten Seitenkanälen ist die Darstellung in LARSIM als Verzweigung nicht repräsentativ. Es ist zu prüfen, ob die Definition dieser Gewässertypen als Seen, welche dem TGB der Verzweigung zugeordnet wird, repräsentative Ergebnisse liefert. Dabei kann auf das bisherige Vorgehen aufgebaut und dem TGB der Verzweigung ein See mit eindeutiger Wasserstands-Abfluss-Beziehung zugewiesen werden. Aufgrund der ungenügenden Datenlage ist diese Betrachtung nicht Teil dieser Arbeit. Zur Definition eines ungesteuerten Sees benötigt LARSIM den Wasserstand, den Speicherinhalt und die Wasserstands-Abfluss-Beziehung, welche nach aktuellem Stand für den Mühlkanal Wehrda nicht zur Verfügung stehen. (LEG 2023, Simulation eines Sees)

4.4 Speisung des Fernwärmenetzes Marburg

Das bisher behandelte Modell kann die Abflussmengen und Gewässertemperaturen der Lahn abbilden. Des Weiteren ist die Abbildung von Verzweigungen und das Einleiten von Kühlwasser begrenzt möglich. Das Szenario dieses Abschnittes beschäftigt sich mit der Speisung eines Fernwärmenetzes durch die Lahn als Umweltwärmequelle.

Beim Speisen des Fernwärmenetzes wird der Lahn mittels einer Wärmepumpe thermische Energie entzogen, wodurch eine reduzierte Gewässertemperatur zu erwarten ist. Durch das Fortschreiten des Klimawandels ist mit erhöhten Gewässertemperaturen zu rechnen (Bender et al. 2017), sodass ein positiver Effekt durch die Entnahme thermischer Energie auf die Gewässerökologie zu erwarten ist.

In diesem Szenario wird geprüft, inwieweit die Lahn als Umweltwärmequelle für das Netz „Softwarecenter“ der Stadtwerke Marburg für die Jahre 2019-2020 dienen kann (vgl. Abbildung A.10). Dieses Fernwärmenetz versorgt das Technologie- und Tagungszentrum

Marburg (TTZ)² mit Wärmeenergie. Aktuell wird es aus dem zentralen Hauptwärmenetz gespeist. Gemäß den Betreiberdaten (vgl. Abbildung A.11) wird das zentrale Hauptwärmenetz lediglich mit einem Deckungsanteil von 1,4 % aus Umgebungswärme gespeist (Stadtwerke Marburg 2023). Die Verbrauchsdaten des Netzes „Softwarecenter“ lassen sich auf eine Wärmepumpe mit thermischer Leistung der Größenordnung 1,1 MW zurückrechnen.

Die zu betrachtende Wärmepumpe wird in diesem Szenario in LARSIM als offenes System implementiert. Dabei wird oberstromig aus dem Hauptbett Flusswasser entnommen und in einen Wärmetauscher eingespeist. Das abgekühlte Wasser wird anschließend unterstromig in das Fließgewässer eingeführt, wodurch keine thermische Beeinflussung der Entnahmestelle entstehen kann. Dieses System bietet sich für die hydrodynamische Modellierung, vor allem mittels LARSIM an, da die Wärmeübertragungsprozesse in geschlossenen oder Bypass-Systemen nicht abbildbar sind. Allerdings weisen diese Systeme ein aufwendiges Genehmigungsverfahren auf, da sie direkt in die Umwelt eingreifen (Kaltschmitt et al. 2020, 713–714).

Die Simulation der Entnahme von Wärmeenergie läuft in vier Schritten ab. Im ersten Schritt werden die täglichen Wärmeverbräuche über eine Gewichtung der monatlichen Verbrauchsdaten der Stadtwerke Marburg mittels der Grad-Tags-Zahl (GTZ)_{20/15}³ berechnet. Über die Leistungszahl (COP) wird der Verbrauch in elektrische und thermische Leistung [MW h/d] aufgeteilt.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{th}}{P_{el}} [-] \quad (4.1)$$

mit: COP = Leistungszahl [-]

\dot{Q}_{th} = Wärmeverbrauch [MW h/d]

P_{el} = elektrische Leistung [MW h/d]

Der Parameter wird mit Bezug auf ein vergleichbares Projekt in Rosenheim auf $COP = 2,9$ festgelegt (Stadtwerke Rosenheim 2022).

Im zweiten Bearbeitungsschritt wird die Simulation des Modells im Zustand gemäß Abschnitt 4.3 ausgeführt. Die simulierten Abflusswerte und Gewässertemperatur der Jahre 2019 und 2020 an der Entnahmestelle in Marburg dienen als weitere Eingangsdaten zur Berechnung der Betriebsdaten der Wärmepumpe.

Anschließend wird im dritten Schritt der benötigte Volumenstrom $Q_{Entnahme}$ und die Wassertemperatur der Rückleitung $T_{Rückleitung}$ über die festgelegte Temperaturspreizung ΔT ermittelt. Die Temperaturspreizung definiert den Wert der Abkühlung des Kühlmediums in der Wärmepumpe zwischen Ein- und Austritt.

$$\dot{Q}_{th,Entnahme} = \dot{Q}_{th} * \left(1 - \frac{1}{COP}\right) \text{ [MW h/d]} \quad (4.2)$$

mit: $\dot{Q}_{th,Entnahme}$ = Entnahmewärmemenge [MW h/d]

\dot{Q}_{th} = Wärmeverbrauch [MW h/d]

COP = Leistungszahl [-]

²angrenzend an den Mühlkanal Marburg, vgl. Abschnitt 4.3

³Raumtemperatur: 20 °C; Außentemperatur, im Tagesmittel: 15 °C

$$Q_{Entnahme} = \frac{\dot{Q}_{th,Entnahme}}{c_p * \Delta T * \rho_W} \text{ [m}^3\text{/d]} \quad (4.3)$$

mit: $Q_{Entnahme}$ = Entnahmevolumenstrom [$\text{m}^3\text{/s}$]
 $\dot{Q}_{th,Entnahme}$ = Entnahmewärmemenge [MW h/d]
 c_p = Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [$\approx 4200 \text{ J}/(\text{kg K})$]
 ΔT = Spreizung [K]
 ρ_W = Dichte von Wasser [kg/m^3]

Für die Spreizung ΔT werden die Werte 2, 4 und 6 K festgelegt. Die Werte entsprechen gängigen Annahmen, wie beispielsweise den Leistungsdaten der Großwärmepumpe am Rhein bei Mannheim (vgl. *Rhein liefert Wärmeenergie über neue Großwärmepumpe: Reallabor der Energiewende "Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen"* 2022).

Bei der Berechnung des Volumenstroms werden Rahmenbedingungen gesetzt. Die Entnahmehöhe darf maximal 10 % des Gesamtabflusses der Lahn betragen. Dies hat zur Folge, dass bei kleinen Durchflüssen der Lahn zum Schutz der Ökosysteme weniger thermische Energie gewonnen wird als das Fernwärmenetz zu diesem Zeitpunkt bedarf. Des Weiteren darf das Wasser zum Schutz vor Vereisung maximal auf eine Temperatur von $T_{min} = 2 \text{ }^\circ\text{C}$ abgekühlt werden. Für die Einleitung in die Lahn gilt daher $T_{Rückleitung} \geq T_{min}$. Daraus folgt, dass bei Gewässertemperaturen der Lahn $T_{Lahn} < T_{min}$ keine Entnahme aus der Lahn stattfinden kann. Bei geringen Gewässertemperaturen $T_{min} < T_{Lahn} < T_{min} + \Delta T$ wird die vorgegebene Spreizung durch die Differenz $\Delta T = T_{Lahn} - T_{min}$ ersetzt.

Des Weiteren wird der Wärmeverbrauch der Sommermonate Juni bis August nicht über die $GTZ20/15$ ermittelt, sondern als konstanter Basisbedarf betrachtet.

Abschließend werden die Tageswerte der Entnahme $Q_{Entnahme}$ inkl. Rückleitung $T_{Rückleitung}$ über die LARSIM-Funktionen VERZWEIGUNG EINLEITUNGSGANGLINIE, VERZWEIGUNG AUSLEITUNGSGANGLINIE und VERZWEIGUNG TWAS-EINLEITUNGSGANGLINIE ins Modell eingebunden. Mittels dieser Funktionen und der Option LILA-EIN SPALTE kann eine Datei im LILA-Spaltenformat (LEG 2023, LILA (Listenformat für LARSIM)) mit allen betrachteten Ganglinien und zugehörigen Temperaturangaben erzeugt werden. Die Gang- und Temperaturlinien werden als unterschiedliche Stationen titulierte, sodass eine Variation der Optionen schnell möglich ist. Alternativ kann je Gang- und Temperaturlinie mittels der Funktion LILA-EIN EINZELN eine einzelne Datei erstellt und eingelesen werden. Da dies für jede Eingabedatei, vor allem die der Messwerte, gilt und diese im LILA-Spaltenformat vorliegen, wird diese Option nicht umgesetzt. (LEG 2023)

Die Datei wird in der Datei pfade.dat unter 'Messdaten: - Verzweigung Ausl.' und 'Messdaten: - Verzweigung Einl.' angegeben. In der Steuerdatei tape10.dat wird im Datensatz 12 anschließend eine Verzweigung und eine Einleitung unter Angabe der betrachteten Station angegeben (vgl. Tabelle 4.3).

Die Simulation liefert die thermischen Auswirkungen der Entnahme auf das Fließgewässer Lahn.

Die Simulationsergebnisse zeigen kaum Auswirkungen auf die Lahntemperatur. Die benötigten Wärmemengen des Netzes „Softwarecenter“ sorgen für eine maximale Abkühlung

Tabelle 4.3: Definition der Entnahme und Einleitung in die Lahn zum Betrieb eines Fernwärmenetzes. 801 stellt die „Station“ des Entnahmevermögens dar und „Station“ 901 die zugehörigen Temperaturwerte,
Quelle: LEG 2023, Datenkarte 16 (Verzweigungsdaten)

*Entnahme ins Fernwärmenetz					
VERZ	-329	441	0.00	0.00	801
*Einleitung aus Fernwärmenetz					
EINL		331			801 901

von 0,04 K (siehe Abbildung 4.6). Die Analyse der Gesamtwärmemenge der Lahn zeigt, dass der Bedarf des Netzes „Softwarecenter“ 0,26 % der vorhandenen Menge im Zeitraum 2019 bis 2020 entspricht.

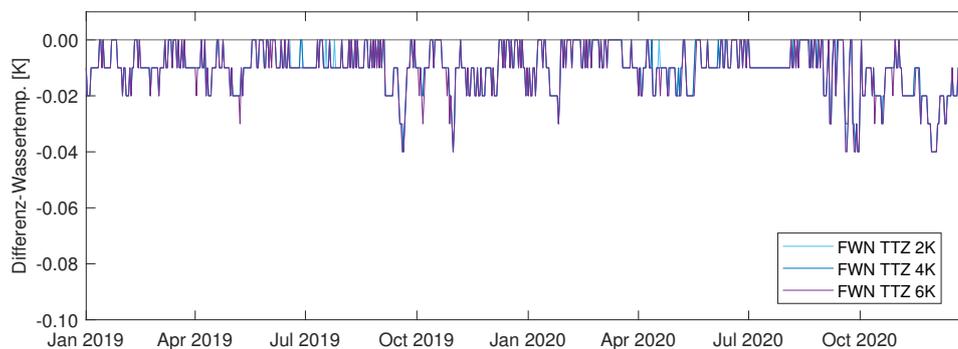


Abbildung 4.6: Temperaturänderungen am Pegel Marburg durch die Speisung des Fernwärmenetzes „Softwarecenter“ aus der Lahn als Umweltwärmequelle

Zur Kontrolle der entnommenen Wärmemenge werden die simulierten Durchflussmengen und die resultierende Abkühlung der Lahn betrachtet.

$$\dot{Q}_{th} = \frac{Q_{sim} * 24 * c_p * \Delta T_{sim}}{\rho_W} \quad (4.4)$$

- mit:
- \dot{Q}_{th} = Wärmeverbrauch [MW h/d]
 - Q_{sim} = simulierter Volumenstrom [m^3/s]
 - c_p = Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [$\approx 4200 J/(kg K)$]
 - ΔT_{sim} = Temperaturunterschied des Gewässers [K]
 - ρ_W = Dichte von Wasser [kg/m^3]

Die nach Gleichung 4.4 berechnete entnommene thermische Menge ist in Abbildung 4.7 als gemittelte Tages- und Monatswerte ersichtlich. Beim Vergleich der Wärmebedarfe und der gemittelten Monatswerte fällt auf, dass die Werte nicht identisch sind. Die berechneten Werte nach Gleichung 4.4 fallen konstant geringer aus, was auf LARSIM zurückzuführen ist. Die Software berechnet die Gewässertemperatur auf zwei Nachkommastellen genau, sodass die Mengendifferenz auf Ungenauigkeiten zurückzuführen ist.

Resultierend auf den bisherigen Ergebnissen und aufbauend auf das Marburger Fernwärmenetz werden weitere Möglichkeiten zur hydrothermalen Nutzung der Lahn evaluiert. Im Rahmen des Reallabors der Energiewende „Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen“

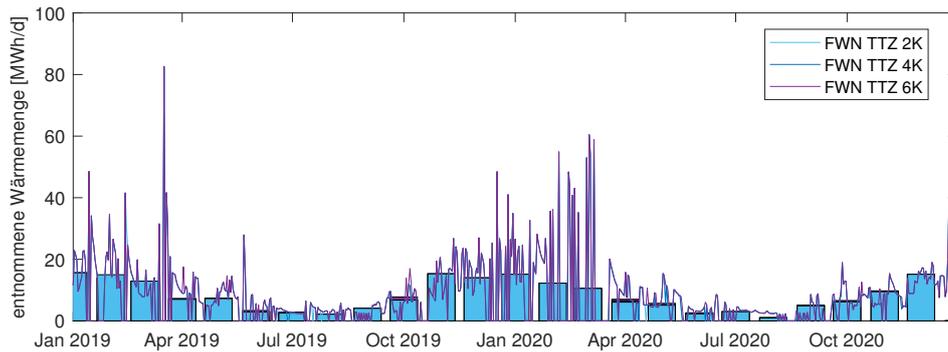


Abbildung 4.7: Thermische Entnahmemengen zur Speisung des Fernwärmenetzes „Softwarecenter“ aus der Lahn als Umweltwärmequelle als gemittelte Tages- und Monatswerten

Tabelle 4.4: Abkühlung der Lahn bei unterschiedlichen Spreizung der 20MW-Wärmepumpe

Spreizung	$\overline{\Delta T_{Lahn}}$	$\Delta T_{Lahn,max}$
2 K	0,09	0,21
4 K	0,17	0,47
6 K	0,22	0,66

des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz werden an fünf Standorten in Deutschland Großwärmepumpen an Fließgewässern errichtet und in bestehende Fernwärmenetze integriert. Die größte Anlage wird in Mannheim gebaut und soll dem Rhein bis zu 20 MW thermische Leistung entnehmen. Sie soll circa 3.500 Haushalte mit Wärmeenergie versorgen können und jährlich 21.000 Tonnen CO₂ einsparen. (*Rhein liefert Wärmeenergie über neue Großwärmepumpe: Reallabor der Energiewende "Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen" 2022*)

Das bisherige Szenario hat gezeigt, dass die Auswirkungen durch die Entnahme der Verbrauchsmengen des Fernwärmenetzes „Softwarecenter“ auf die Lahn sehr gering sind. Daher wird im Folgenden die Simulation mit den Leistungsdaten der Mannheimer Wärmepumpe wiederholt. Dabei wird zur Berechnung von $Q_{Entnahme}$ und $T_{Rückleitung}$ angenommen, dass die Wärmepumpe sowohl über den Zeitraum 2019-2020 als auch den Tagesverlauf konstant mit 20 MW Entnahmelistung betrieben wird. Die Rahmenbedingungen der Berechnung des Netzes „Softwarecenter“ bleiben bestehen.

Die drei Graphen in Abbildung 4.8 zeigen die thermischen Auswirkungen durch den Betrieb der 20 MW-Wärmepumpe mit unterschiedlichen Vorgaben für die Spreizung (2, 4 und 6 K) auf die Lahn am Pegel Marburg. Der Einfluss der Spreizung auf die Gewässertemperatur ist Tabelle 4.4 zu entnehmen, wobei der Mittelwert der Abkühlung $\overline{\Delta T_{Lahn}}$ mit Vorsicht zu betrachten ist. Der Verlauf der Temperaturänderungen zeigt, dass die Auswirkungen auf die Temperatur im Jahresverlauf ab circa April bis November recht konstant sind (vgl. Abbildung 4.8). In den Wintermonaten ist die Vorgabe $T_{min} = 2\text{ °C}$ der limitierende Faktor, sodass die Spreizung auf $\Delta T = T_{Lahn} - T_{min}$ korrigiert wird. Bestätigt wird dieses Verhalten durch die Überlappung der Graphen während dieser Monate.

Abbildung 4.9 zeigt die Kontrolle der entnommenen Wärmemengen mittels Gleichung 4.4 als gemittelte Tages- und Monatswerte. Die typischerweise geringen Abflusswerte der

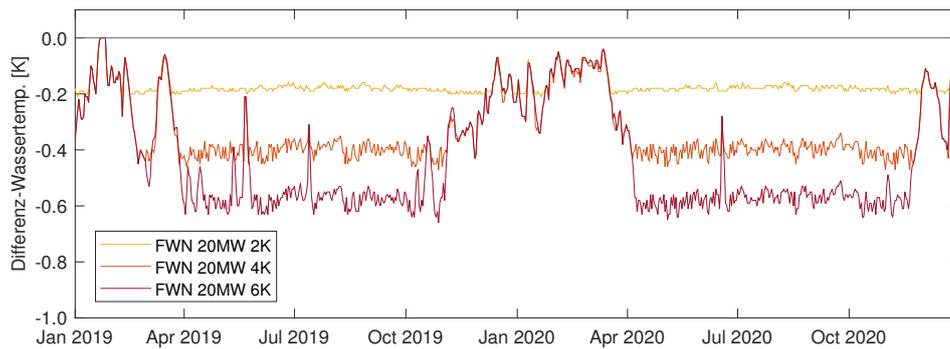


Abbildung 4.8: Temperaturänderungen am Pegel Marburg durch die Speisung eines Fernwärmenetzes mit einer 20 MW-Wärmepumpe aus der Lahn als Umweltwärmequelle bei unterschiedlicher Spreizung

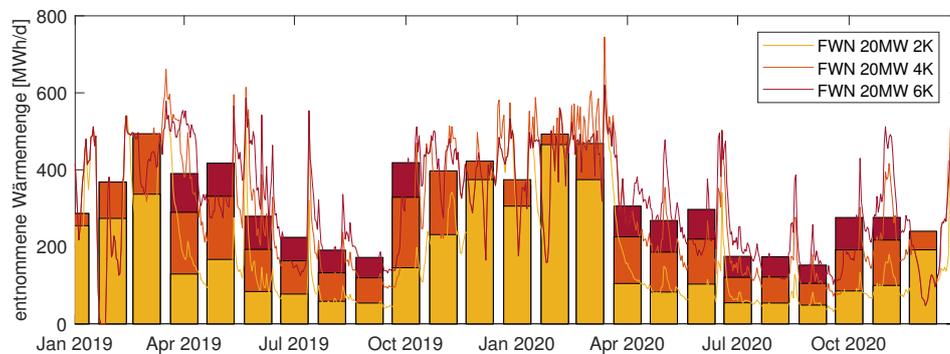


Abbildung 4.9: Thermische Entnahmemengen zur Speisung eines Fernwärmenetzes mit einer 20 MW-Wärmepumpe aus der Lahn als Umweltwärmequelle als gemittelte Tages- und Monatswerten

Sommermonate resultieren in geringe Entnahmemengen. In diesem Zeitraum ist der lineare Einfluss der Spreizung prägnant ersichtlich. Die Wintermonate zeigen, dass trotz der geringen Lahntemperatur mehr Wärmemenge gewonnen werden kann. Die Korrektur der Spreizung resultiert in identischen bzw. verhältnismäßig ähnlichen Monatswerten zwischen 4 K und 6 K bzw. 2 K und 4 K Spreizung. Im Bezug auf die Heizperiode ist dies besonders interessant.

Die Summe der entnommenen Wärmemengen zeigt, dass die LARSIM-Ergebnisse die Vorgaben aus der Berechnung von $Q_{Entnahme}$ und $T_{Rückleitung}$ gemäß Schritt 3 für den aktuellen Fall für 6 K-Spreizung um 8,1 %, für 4 K-Spreizung um 3,9 % und für 2 K-Spreizung um 9,9 % unterschätzen. Wie bereits erwähnt, lässt sich dies auf LARSIM zurückführen. In LARSIM werden Temperaturangaben mit zwei Nachkommastellen betrachtet. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Berechnung der entnommenen Wärmemenge stark sensitiv auf kleine Temperaturänderungen reagiert. Eine Variation der Gewässertemperatur nach Einleitung von $T_{Rückleitung}$ mit $\pm 0,01$ K über den betrachteten Zeitraum resultiert in einer Differenz der Wärmeentnahmemenge um ± 17.540 MW h bzw. $\pm 7,7$ % zum unveränderten Zustand.

Im Mittel zeigt Abbildung 4.9 realistische Ergebnisse und vor allem die Erkenntnis, dass die Lahn eine Quelle nachhaltiger Wärmeenergie sein kann.

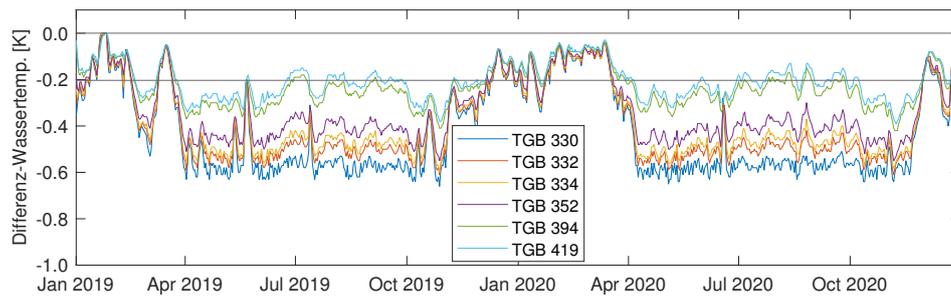


Abbildung 4.10: Temperaturänderungen durch die Speisung eines Fernwärmenetzes mit einer 20 MW-Wärmepumpe bei 6 K-Spreizung bis KW-Gießen
mit: TGB 330: unterhalb Pegel Marburg
TGB 332: Weimar (Lahn)
TGB 334: Argenstein
TGB 352: Roth
TGB 394: Lollar
TGB 419: KW-Gießen

Die Analyse auf den Unterstrom bis KW-Gießen wird abschließend behandelt, wobei explizit auf den Fall der größten Auswirkungen bei 6 K-Spreizung, eingegangen wird. Zum Vergleich werden die Ergebnisse bei 4 K-Spreizung in Abbildung A.12 dargestellt.

In Abbildung 4.10 werden die Gewässertemperaturänderungen des Lahnabschnittes zwischen Marburg und Gießen abgebildet. Die Graphen zeigen die Temperaturdifferenzen im Vergleich zur Simulation ohne Wärmeentnahme. Die Auswirkungen sind, wie zu erwarten, in Marburg (TGB 330) am größten und in Gießen (TGB 419) am geringsten und nähern sich dem Zustand ohne Entnahme wieder an. Gleichzeitig ist ein Erreichen des Zustandes ohne Wärmeentnahme entlang der 27 km langen Fließlänge nicht zu erkennen. Der verhältnismäßig große Sprung zwischen den Graphen TGB 352 und TGB 394 lässt sich auf die längere Fließstrecke und die Mündung der Gewässer Wenkbach, Zvester Ohm und Salzböde in die Lahn zurückführen.

In Abbildung 4.11 wird die Gewässertemperaturentwicklung abgebildet. Dabei wird die Temperaturdifferenz zum vorherigen TGB bezogen auf die entsprechende Fließstrecke als $[K/10 \text{ km}]$ berechnet. Die Grafik zeigt, dass in den Wintermonaten eine konstante Erwärmungsrate aller TGB vorliegt. Für die restliche Zeit gilt, dass die Temperaturerwärmung in den ersten TGB 332, 334 und 352 stärker ausgeprägt ist. Für TGB 394 und insbesondere TGB 419 gelten geringere Erwärmungsraten. Diese sind zum Teil auf die Mündung anderer Gewässer, wie bspw. der Salzböde, Zvester Ohm und Lumda, in die Lahn zurückzuführen. Es bleibt zu erwähnen, dass die Einbindung der Entnahme und Einleitung von Wasser zur Nutzung als Umweltwärmequelle in LARSIM auf mehreren Wegen implementiert werden kann. Für dieses Szenario mit vordefinierten Testjahren erwies sich dieser Weg am geeignetsten. Alternativ besteht die Möglichkeit, Entnahmen mittels negativer Einleitungswerte zu implementieren (LEG 2022, 150). Diese Option ist für die Simulation von Kläranlagen mit konstanten Einleitungen vorgesehen und die Ergebnisse dementsprechend kritisch zu betrachten. Des Weiteren können Jahresgänge als langjähriges Mittel der Aus- und Einleitung definiert und ins Modell eingepflegt werden. Diese Option ist besonders interessant für den operationellen Betrieb und für Betreiber:innen eines entsprechenden Fernwärmenetzes.

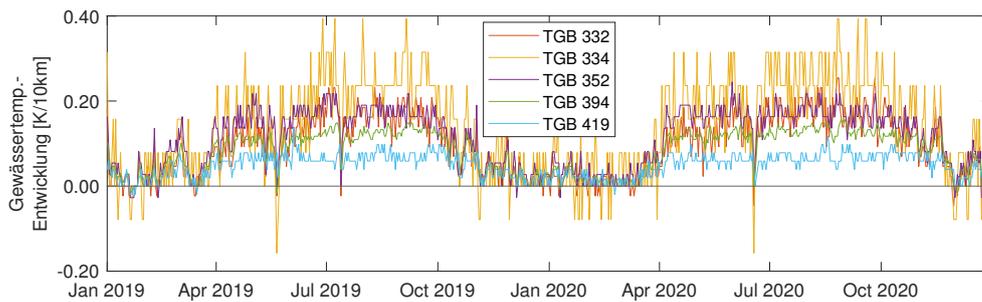


Abbildung 4.11: Entwicklung der Gewässertemperatur durch die Speisung eines Fernwärmenetzes mit einer 20 MW-Wärmepumpe bei 6 K-Spreizung bis KW-Gießen
mit: TGB 332: Weimar (Lahn)
TGB 334: Argenstein
TGB 352: Roth
TGB 394: Lollar
TGB 419: KW-Gießen

4.5 Erkenntnisse aus den Szenarien

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus Kapitel 4 evaluiert. Dazu wird jedes Szenario einzeln im Bezug auf Grenzen und Möglichkeiten betrachtet. Zusätzlich wird auf die Verschneidung passender Szenarien eingegangen.

Abchnitt 4.1 hat gezeigt, dass die Temperaturentwicklung der Lahn bedenklich ist. Die prognostizierte Erhöhung der Gewässertemperatur vom TRY2015 zum TRY2045 um knapp 0,9 K scheint, aufgrund der Temperaturentwicklung von TRY2015 zum Jahr 2019, nicht realistisch. Es bleibt zu prüfen, ob die meteorologischen Daten des TRY2045 zu konservativ angenommen sind oder das Jahr 2019 einen deutlichen Ausreißer darstellt.

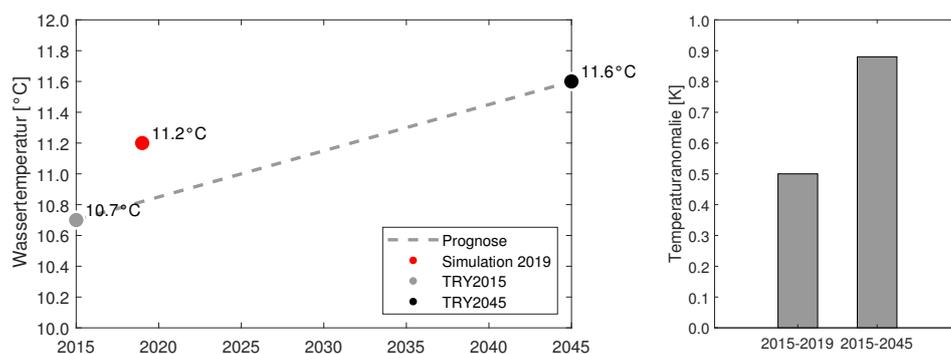


Abbildung 4.12: Prognose der jährlichen Gewässertemperatur unter Berücksichtigung der Simulation mit meteorologischen Daten für 2019, TRY2015 und TRY2045

Abbildung 4.12 zeigt den linearen Temperaturverlauf der Lahn vom TRY2015 zum TRY2045 und die simulierte Gewässertemperatur für das Jahr 2019. In einer qualitativen Bewertung verdeutlicht Abbildung 4.12 eindrücklich die Auswirkungen der Simulationsergebnisse. Die im Jahresdurchschnitt gemittelte, simulierte Gewässertemperatur für das Jahr 2019 zeigt eine deutliche Abweichung zur Prognose durch die TRY. Die Grafik zeigt, dass die Temperaturanomalie zwischen 2015 und 2019 mit 0,5 K etwas mehr als die Hälfte der Anomalie

zwischen 2015 und 2045 mit 0,9 K darstellt. Vor dem Hintergrund dieser Analyse sind die prognostizierten Gewässertemperaturen der TRY in der Größe kritisch zu hinterfragen. Zu beachten bleibt, inwieweit das Jahr 2019 ein Ausreißer in der Gewässertemperaturentwicklung darstellt und ob die Simulation durch gemessene Temperaturwerte bestätigt werden kann. Die Grafik zeigt weiterhin nur den jährlichen Mittelwert der Gewässertemperatur. Schwankungen im Jahresverlauf werden nicht dargestellt.

Die Einleitung von Wasser unterschiedlicher Temperaturen in ein Fließgewässer lässt sich in LARSIM darstellen. Die Simulation bilanziert die Gewässertemperatur aufgrund der Volumenströme. Übertragen in den Realzustand kommt dies einer vollständigen Durchmischung direkt an der Einleitungsstelle gleich. Die globalen Auswirkungen von Einleitungen, unabhängig davon, ob es sich um eine Erhöhung oder Reduktion der Gewässertemperatur handelt, kann die Simulation darstellen. Die lokalen Auswirkungen werden durch dieses Modell nicht dargestellt. Für diesen Zweck ist die Verwendung von hydrologische 3D-Modelle vorgesehen.

Die Relevanz von Fernwärmenetze mit nachhaltigen Umweltquellen wird in Zukunft steigen und, auch wenn Fließgewässer als Wärmequellen nach 1940 an Bedeutung verloren haben, werden Fließgewässer vermehrt in Forschungsprojekten als Wärmequellen erprobt (vgl. *Rhein liefert Wärmeenergie über neue Großwärmepumpe: Reallabor der Energiewende "Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen" 2022*).

Der Abschnitt 4.4 zeigt eine Möglichkeit das Temperaturregime von Fließgewässern nach deren Nutzung als Umweltwärmequelle für Fernwärmenetze abzubilden.

Die Speisung eines Fernwärmenetzes aus einem Kanal ist dabei eine Option, welche bei einer ausreichenden Datendichte schlüssige Ergebnisse liefern kann. Diese Option wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Eine Begründung dafür ist die geringe Datengrundlage für den Mühlkanal in Wehrda und den Lohmühlgraben in Marburg, aufgrund welcher keine Evaluation der Abfluss- und Temperaturwerte dieser Kanäle stattfinden kann. Des Weiteren sorgen die Verbrauchswerte des Netzes „Softwarecenter“ für marginale Auswirkungen auf das Temperaturregime, sodass keine schlüssigen Erkenntnisse gezogen werden können. Bei der Simulation der Wärmepumpe mit 20 MW thermischer Entnahmelistung sind der Entnahmegrenzwert von maximal 10 % des Gesamtdurchflusses und die prozentuale Ausleitung von 10 % des Gesamtabflusses in den Lohmühlgraben die limitierenden Faktoren. In diesem Fall sorgt eine Entnahme aus dem Lohmühlgraben zur Speisung des Fernwärmenetzes potenziell für ein zeitweises Trockenlaufen des Lohmühlgrabens. Dies ist als besonders kritisch für Ökosysteme und Habitate zu bewerten, entsprechend nicht nachhaltig und in diesem Umfang nicht praktikabel ist.

Einen interessanten Aspekt liefert die Verschneidung von Abschnitt 4.4 und Abschnitt 4.1. Im Kern spiegelt Abschnitt 4.1 die Erwärmung eines Fließgewässers durch den Klimawandel wider, wohingegen Abschnitt 4.4 das Fließgewässer durch die Verwendung dessen als nachhaltige Wärmequelle abkühlt. Abbildung 4.13 zeigt die vorherige Abbildung unter Berücksichtigung des Einflusses eines Fernwärmenetzes. Bei dem betrachteten Netz handelt es sich um die Verwendung der 20 MW-Wärmepumpe bei 6 K Spreizung gemäß Abschnitt 4.4.

Die Abkühlung wird gemäß Tabelle 4.4 auf 0,22 K festgelegt. Bei diesem Wert handelt es sich um die, für die Jahre 2019 und 2020 durchschnittlich ermittelte Abkühlung durch das

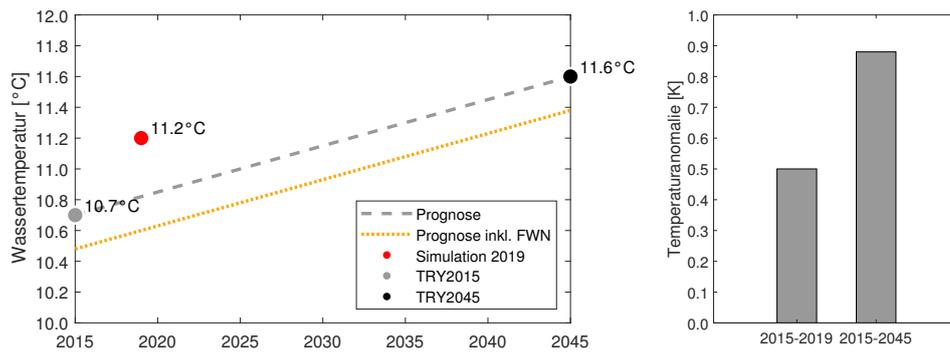


Abbildung 4.13: Prognose der jährlichen Gewässertemperatur unter Berücksichtigung der Lahn als Umweltwärmequelle eines Fernwärmenetzes, ergänzend zu Abbildung 4.12

besagte Fernwärmenetz. Abbildung 4.13 zeigt, dass die Temperaturreduktion durch ein solches Fernwärmenetz die Auswirkungen des Klimawandels nicht auffängt, sondern sie lediglich abschwächt und verlangsamt. Mit Bezug auf die in Abbildung 4.10 dargestellte Temperaturveränderung im Unterstrom ist die Speisung mehrerer Fernwärmenetze entlang eines Fließgewässers durch Flusswärmepumpen für zukünftige Überlegungen interessant, um eine dauerhafte, nicht auf einen Flussabschnitt begrenzte Temperaturreduktion zu erreichen.

Die Szenarien zeigen, dass LARSIM einen essentiellen Beitrag zu zukünftigen Planungs- und Forschungsprojekten leisten kann. Die Ergebnisse sind valide und die Einsatzmöglichkeiten vielfältig.

Aufgrund der Black-Box-Struktur kann LARSIM gut in die Lehre eingebunden werden. Die Datenaufbereitung und -haltung erfolgt separiert von der analytischen Berechnung, wodurch das Modell fehlerunanfälliger ist. Das Funktionsportfolio von LARSIM wird im Rahmen dieser Arbeit nicht ausgeschöpft. Neben den diversen Funktionen, wie bspw. Rückhaltebecken- und Speichersteuerung, Verzweigungen und Gletschermodellierung, liefern die Einsatzmöglichkeiten als Niederschlag-Abfluss-Modell und WHM diverse Möglichkeiten, das Modell in der Forschung und Lehre einzusetzen. Zudem findet es mit wachsender Ausbreitung flächendeckende Verwendung in vor allem Süd-West-Deutschland.

5 Diskussion

Der Einsatz von Modellen ermöglicht eine Abbildung der Realzustände. Bei der Übertragung von Modellerkenntnissen in die Realität müssen jedoch Abweichungen berücksichtigt werden. Diese Grundsätze gelten gleichermaßen für das in dieser Arbeit verwendete Modell. Die Qualität der Modellergebnisse hängt von der sorgfältigen Aufbereitung des Modells ab. Die Kalibrierung ist ein wesentlicher Prozessschritt bei der Modellerstellung, der dazu dient, die Genauigkeit der Modellergebnisse sicherzustellen. Die Bestätigung der Kalibrierung erfolgt durch den Validierungsprozess. In diesem Modell erfolgt die Kalibrierung durch die Faktorisierung von Eichparametern für das gesamte Untersuchungsgebiet. Obwohl sowohl die Gütekriterien als auch die visuelle Analyse gute Ergebnisse liefern, kann eine Kalibrierung für jede im Modell definierte Teilfläche, Zone oder Gebietseinheit einzeln zu Ergebnissen führen, welche den Realitätszustand optimaler darstellen.

Vor dem Hintergrund regelmäßiger Kalibrierungen ist es wichtig, die Aktualität des manuellen Vorgehens zu evaluieren. Obwohl in dieser Arbeit semi-automatische Tools verwendet werden, bleibt die visuelle Bewertung nach wie vor subjektiv. Zukünftig werden automatische Kalibrierungsmethoden an Bedeutung gewinnen und in der Lage sein, Modelle systematischer und zeitsparender zu evaluieren.

Zusätzlich muss die Datenqualität der Gewässertemperatur-Messungen kritisch betrachtet werden. Im untersuchten EZG liegen keine kontinuierlichen und lückenlosen Messungen für den Zeitraum von 2012 bis 2022 vor. Daher wurde versucht, dieses Problem durch Interpolation oder durch die Betrachtung von verschiedenen Messstellen für unterschiedliche Zeiträume zu lösen. Es besteht jedoch die Gefahr, dass aufgrund dieser Vorgehensweise Ergebnisse verfälscht werden.

Das Modell ist in der Lage, den Einfluss unterschiedlicher meteorologischer Zustände darzustellen. Mithilfe der TRY wird eine Projektion der zu erwartenden Abfluss- und Temperaturregime erstellt. Die Ergebnisse dieser Projektion stimmen größtenteils mit den in der Literatur beschriebenen Ergebnissen überein. Allerdings zeigt das Modell einen deutlich stärkeren Anstieg der Gewässertemperatur zwischen TRY2015 und 2019, als von der Projektion vorhergesagt. Insbesondere gegen Ende der 2020er-Jahre nimmt die Häufigkeit von Hitzewellen und Dürrejahren zu. Diese Jahre wurden weder in der Klimaprojektion für TRY2015 noch für TRY2045 berücksichtigt. Es bleibt abzuwarten, ob das Modell ähnliche Ergebnisse liefert, nachdem eine Überarbeitung der TRY durchgeführt wurde, oder, ob sich der steilere Anstieg der Gewässertemperatur, wie ihn das Modell aufzeigt, fortsetzt.

Das verwendete Modell ermöglicht die Darstellung der Auswirkungen von Einleitungen auf das gesamte Gewässersystem. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die lokalen Auswirkungen als besonders kritisch betrachtet werden und in dem gewählten WHM nicht abgebildet werden können. Um die Folgen dieser anthropogenen Einflüsse sowohl auf lokaler als auch

auf globaler Ebene im Flussgeschehen darstellen zu können, ist die Kombination mehrerer Modelle oder die Betrachtung in anderen Modellen erforderlich.

Die Darstellung von Verzweigungen ist möglich. Die Validität der Ergebnisse wird jedoch durch die Datengrundlage begrenzt. Für zukünftige Forschung oder Modelle wird empfohlen, explizite Messwerte im Untersuchungsgebiet zu erfassen. Im Rahmen dieser Arbeit ist es nicht möglich, eine Kalibrierung der Verzweigungen zu Mühlkanälen durchzuführen, daher sollten die Ergebnisse mit Vorsicht interpretiert werden.

Die Nutzung eines Fließgewässers als Umweltwärmequelle für Wärmenetze kann ebenfalls im Modell abgebildet werden. Dafür ist eine Berechnung der Energieentnahme außerhalb der Modellumgebung erforderlich. Aufgrund der kontinuierlichen Weiterentwicklung des LARSIM-Modells besteht zukünftig die Möglichkeit einer Erweiterung durch ein entsprechendes Modul, insbesondere angesichts des zunehmenden politischen und wirtschaftlichen Interesses. Im Rahmen dieser Arbeit werden bestimmte Vereinfachungen und Bedingungen gesetzt, die im Rahmen einer konkreteren Planung weiter evaluiert werden müssen. Es ist zu beachten, dass die Anwendung von Wärmepumpen im offenen System mit komplexeren Genehmigungsverfahren verbunden ist und sowohl Vor- als auch Nachteile bietet. Wie bereits erwähnt, ist es wichtig, die lokalen Auswirkungen der Rückleitung aus der Wärmepumpe in das Fließgewässer zu überprüfen. Es ist auch zu vermeiden, dass Wärmepumpen zur Kühlung von Gebäuden eingesetzt werden, da dies dem nachhaltigen Zweck dieser Arbeit widerspricht und einen negativen Einfluss auf aquatische Ökosysteme haben kann.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das Modell die Möglichkeit bietet, Verzweigungen und den Einfluss von Einleitungen auf das Gesamtgewässer abzubilden. Jedoch sind die Ergebnisse durch die beschränkte Datenbasis und fehlende Kalibrierung bestimmter Aspekte mit Vorsicht zu betrachten. Für zukünftige Untersuchungen empfiehlt sich, die Erfassung spezifischer Messwerte und eine genauere Bewertung der lokalen Auswirkungen, um eine präzisere Planung und Beurteilung der Nutzung von Fließgewässern als Umweltwärmequelle zu ermöglichen.

6 Fazit

Diese Arbeit untersucht ein Wasserhaushalts- und Wärmemodell (WWM) der Lahn. Der Fokus der Bearbeitung liegt auf dem Kalibrierungsprozess und der anthropogenen Nutzung der Gewässertemperatur. Zu diesem Zweck wird das LARSIM-Modell der Lahn, das im operativen Hochwasserschutz beim HLNUG als WHM verwendet wird, erweitert. Zudem werden die Grundlagen numerischer Modelle, die Bedeutung des Kalibrierungs- und Validierungsprozesses sowie die Aufbereitung meteorologischer Daten erläutert.

Der Schwerpunkt liegt auf der schrittweisen Kalibrierung des Modells von 2012 bis 2018 und der Validierung von 2019 bis 2022, wobei besonders die Gewässertemperatur für die hydrothermale Nutzung von Interesse ist. Der Kalibrierungsprozess umfasst dabei die systematische Anpassung der Abflusskomponenten und der Gewässertemperatur.

Als Fazit wird festgehalten, dass, trotz der bereits kommerziell erfolgten Kalibrierung des Modells für einen vorherigen Zeitraum, regelmäßige Kalibrierungen und Anpassungen an veränderte klimatische Bedingungen die Qualität der Vorhersagen erhöhen.

Des Weiteren werden Klimaprognosen untersucht. Hierfür werden die Testreferenzjahre (TRY) des DWD verwendet, welche als Referenzjahre für klimatische Bedingungen dienen. Die Implementierung der TRY für 2015 und 2045 zeigt die prognostizierte Veränderung der Gewässertemperatur durch den Klimawandel auf. Es wird ein Anstieg der Gewässertemperatur um $0,9\text{ °C}$ vom Jahr 2015 zum Jahr 2045 dargestellt, welcher sich mit den Prognosen des IPCC deckt.

Die Simulation mit gemessenen, meteorologischen Daten des Jahres 2019 zeigt im Vergleich zu den simulierten Referenzjahre einen deutlich steileren Temperaturanstieg der Lahn. Dies kann auf ein besonders heißes Jahr 2019 oder auf konservative Prognosen des DWD zurückzuführen sein. Angesichts des Klimawandels ist dies eine Entwicklung, die weitere Beobachtungen erfordert.

Zusätzlich zur Betrachtung der TRY werden Szenarien implementiert, welche die anthropogene Nutzung vom Fließgewässer Lahn abbilden sollen. Dazu wird im ersten Schritt die Einleitung von Kühlwasser simuliert. Die Ergebnisse zeigen, dass die aktuellen Einleitungen im Großraum Marburg keinen negativen Einfluss auf das unterstromige Temperaturregime haben. Zum Nachweis der LARSIM-Funktionalität, Kühlwassereinleitungen abzubilden, wird der Einleitungsvolumenstrom deutlich erhöht. Dies belegt, dass das Simulationsprogramm die Temperaturveränderungen im Gewässer aufgrund von Kühlwassereinleitungen realistisch abbilden kann. Es wird jedoch angemerkt, dass die lokalen Einflüsse der Kühlwassereinleitung im behandelten Modell nicht repräsentiert werden können.

Ein weiteres Szenario untersucht die Nutzung der Lahn als Umweltwärmequelle für ein Wärmenetz. Hierbei wird angenommen, dass eine Wärmepumpe im offenen System dem Fließgewässer thermische Energie entzieht und damit ein Wärmenetz versorgt. Es wird

nachgewiesen, dass die Lahn ohne signifikante Auswirkungen als Quelle für das Teilwärmenetz am Technologie- und Tagungszentrum Marburg dienen kann. Um das volle Potenzial der Lahn zu erforschen, wird die Simulation mit den Werten einer Wärmepumpe mit 20 MW wiederholt. Unter den gesetzten Rahmenbedingungen wird nachgewiesen, dass die Lahn am Standort Marburg ein beträchtliches Energiepotenzial aufweist.

Die Verschneidung der TRY-Betrachtung mit der Speisung eines Wärmenetzes zeigt weiterführend, dass die nachhaltige Nutzung von Fließgewässern als Umweltwärmequelle den Auswirkungen des Klimawandels entgegenwirkt und diese abschwächt. Dadurch wird eine Entlastung der thermisch gestressten aquatischen Ökosysteme erzielt. Die Untersuchung der Gewässertemperatur im Unterstrom nach der Speisung eines Wärmenetzes zeigt zudem, dass die Verwendung mehrerer Wärmepumpen im Flusslauf möglich ist.

Die stetige Weiterentwicklung des Programms LARSIM durch die LEG bietet großes Potenzial für zukünftige Forschungsvorhaben.

Als Ausblick auf künftige Forschung kann die Implementierung einer automatischen Kalibrierung in Betracht gezogen werden. Des Weiteren kann im Bezug auf die hydrothermale Nutzung von Fließgewässern auf diese Arbeit aufgebaut werden. Darüber hinaus bieten sich weitere Forschungsmöglichkeiten bezüglich des lokalen Einflusses einer Wärmepumpennutzung sowie der Abbildung von geschlossenen oder hybriden Wärmepumpensystemen als potenzielle aufbauende Arbeiten an.

Die Arbeit liefert wichtige Erkenntnisse zur hydrothermalen Nutzung von Fließgewässern und betont die Relevanz regelmäßiger Kalibrierungsprozesse angesichts klimatischer Veränderungen. Durch die Implementierung verschiedener Szenarien wird das Gewässerpotenzial für unterschiedliche Anwendungen und ökologische Auswirkungen besser verstanden und gleichzeitig das Potenzial der hydrothermalen Nutzung von Fließgewässern verdeutlicht. Es wird deutlich, dass regelmäßige Kalibrierungsprozesse von entscheidender Bedeutung sind, um das Modell an die dynamischen klimatischen Veränderungen anzupassen und realistische Vorhersagen zu ermöglichen.

Literatur

- Becker, A. (1995). "Problems and progress in macroscale hydrological modelling". In: *Space and time scale variability and interdependencies in hydrological processes*. Hrsg. von Reinder A. Feddes. International hydrology series. Cambridge: Cambridge University Press, 135–144.
- Bender, S., Butts, M., Hagemann, S., Smith, M., Vereecken, H. und Wendland, F. (2017). *Der Einfluss des Klimawandels auf die terrestrischen Wassersysteme in Deutschland: Eine Analyse ausgesuchter Studien der Jahre 2009 bis 2013*. Hrsg. von Climate Service Center Germany. Hamburg.
- Bennett, Neil D., Croke, Barry F.W., Guariso, Giorgio, Guillaume, Joseph H.A., Hamilton, Serena H., Jakeman, Anthony J., Marsili-Libelli, Stefano, Newham, Lachlan T.H., Norton, John P., Perrin, Charles, Pierce, Suzanne A., Robson, Barbara, Seppelt, Ralf, Voinov, Alexey A., Fath, Brian D. und Andreassian, Vazken (2013). "Characterising performance of environmental models". In: *Environmental Modelling & Software* 40, 1–20. doi: 10.1016/j.envsoft.2012.09.011.
- BfG (2023). *Geoportal: Wasserkörpersteckbriefe aus dem 2. Zyklus der WRRL (2016-2021)*. Hrsg. von Bundesanstalt für Gewässerkunde. Koblenz.
- Buchholz, Peter (27. März 2020). "Modellgestützte Analyse und Optimierung". Diss. Technische Universität Dortmund.
- BUND (15. Juni 2020). *Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt: Ein Hintergrunddossier zu den Auswirkungen des Klimawandels auf den Zustand und die Gefährdung der Gewässer in Deutschland und die Folgen für die Nutzungen: BUND-Gewässerpapier*. Hrsg. von Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V.
- Bundeswirtschaftministerium (14. Juni 2023). *Entwurf eines Gesetzes zur Änderung des Gebäudeenergiegesetzes, zur Änderung der Heizkostenverordnung und zur Änderung der Kehr- und Überprüfungsordnung*.
- Büro für Angewandte Hydrologie GmbH, Hrsg. (17. Juni 2023). *Eigenschaften – ArcEGMO*. URL: <https://arcegmo.de/eigenschaften/> (besucht am 17. 06. 2023).
- Caissie, Daniel (2006). "The thermal regime of rivers: a review". In: *Freshwater Biology* 51.8, 1389–1406. doi: 10.1111/j.1365-2427.2006.01597.x.
- Deutsches Klimarechenzentrum, Hrsg. (1993). *The ECHAM3 Atmospheric General Circulation Model: Report No. 6: Model Documentation*. Hamburg.

-
- DWD (30. Dez. 2019). *Deutschlandwetter im Jahr 2019: Drittwärmstes Jahr seit 1881 – Niederschlagsarm und sonnenscheinreich*. Hrsg. von Deutscher Wetterdienst. Offenbach.
- DWD (30. Dez. 2020). *Deutschlandwetter im Jahr 2020: 2020 bestätigt als zweitwärmstes Jahr den fortschreitenden Klimawandel*. Hrsg. von Deutscher Wetterdienst. Offenbach.
- DWD (30. Dez. 2021). *Deutschlandwetter im Jahr 2021: Ein durchschnittliches Wetterjahr - aber mit extremem Dauer- und Starkregen im Juli*. Hrsg. von Deutscher Wetterdienst. Offenbach.
- DWD (23. Sep. 2022a). *Climate Data Center*. Hrsg. von Deutscher Wetterdienst. URL: <https://cdc.dwd.de/portal/> (besucht am 31. 01. 2023).
- DWD (30. Dez. 2022b). *Deutschlandwetter im Jahr 2022: Deutschland erlebt eines der zwei wärmsten Jahre und einen Sonnenscheinrekord*. Hrsg. von Deutscher Wetterdienst. Offenbach.
- DWD (2023). *Klimaberatungsmodul - Produktbestellung*. Hrsg. von Deutscher Wetterdienst. URL: <https://kunden.dwd.de/obt/index.jsp> (besucht am 22. 06. 2023).
- DWD und BBR (2017). *Ortsgenaue Testreferenzjahre von Deutschland für mittlere, extreme und zukünftige Witterungsverhältnisse: Handbuch*. Hrsg. von Deutscher Wetterdienst und Bundesamt für Baumwesen und Raumordnung. Offenbach.
- Eckhardt, Klaus und Arnold, Jeffrey G. (2001). "Automatic calibration of a distributed catchment model". In: *Journal of Hydrology* 251.1-2, 103–109. doi: 10.1016/S0022-1694(01)00429-2.
- Engel, Bernard, Storm, Dan, White, Mike, Arnold, Jeff und Arabi, Mazdak (2007). "A Hydrologic/Water Quality Model Application". In: *Journal of the American Water Resources Association* 43.5, 1223–1236. doi: 10.1111/j.1752-1688.2007.00105.x.
- Grimm, Volker, Frank, Karin, Jeltsch, Florian, Brandl, Roland, Uchmański, Janusz und Wissel, Christian (1996). "Pattern-oriented modelling in population ecology". In: *Science of The Total Environment* 183.1-2, 151–166. doi: 10.1016/0048-9697(95)04966-5. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0048969795049665>.
- Gupta, Hoshin V., Kling, Harald, Yilmaz, Koray K. und Martinez, Guillermo F. (2009). "Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling". In: *Journal of Hydrology* 377.1-2, 80–91. doi: 10.1016/j.jhydrol.2009.08.003. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169409004843>.
- Gupta, Hoshin V., Sorooshian, Soroosh und Yapo, Patrice Ogou (1999). "Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration". In: *Journal of Hydrologic Engineering* 4.2, 135–143. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(1999)4:2(135).
- Haag, Ingo, Johst, Margret, Sieber, Angela und Bremicker, Manfred (6. Apr. 2021). *Leitfaden zur Kalibrierung von räumlich hoch aufgelösten LARSIM-Wasserhaushaltsmodellen für*

den operationellen Einsatz in der Hochwasservorhersage: Kalibrierleitfaden. Hrsg. von LARSIM-Entwicklergemeinschaft (LEG), LUBW, BLfU, LfU RP, HLNUG und BAFU.

Hailegeorgis, Teklu T., Abdella, Yisak S., Alfredsen, Knut und Kolberg, Sjur (2015). "Evaluation of Regionalization Methods for Hourly Continuous Streamflow Simulation Using Distributed Models in Boreal Catchments". In: *Journal of Hydrologic Engineering* 20.11. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001218.

Hergesell, Mario (2. Sep. 2021). *Auswirkungen des Klimawandels auf den Grundwasserhaushalt in Hessen: Beobachtungen und mögliche zukünftige Veränderungen*.

Herrmann, Frank, Chen, Shaoning, Heidt, Lena, Elbracht, Jörg, I, Nicole, Kunkel, Ralf, Müller, Udo, Röhm, Herbert, Vereecken, Harry und Wendland, Frank (2013). "Zeitlich und räumlich hochaufgelöste flächendifferenzierte Simulation des Landschaftswasserhaushalts in Niedersachsen mit dem Model mGROWA". In: *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 57.5. doi: 10.5675/HyWa{\textunderscore}2013,5{\textunderscore}2.

HLNUG (5. Sep. 2022). *WISKI-Web*. Hrsg. von Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie. URL: <https://www.hlnug.de/static/pegel/wiskiweb3/webpublic/#/overview/Wasserstand> (besucht am 31. 01. 2023).

Hunger, Martin (28. Nov. 2019). *Hinweise zur Benutzung von LISA: Viewer für Zeitreihen im LILA-Format*. Hrsg. von Aquantec GmbH und LARSIM-Entwicklergemeinschaft. URL: https://transfer.hochwasser.rlp.de/larsim/?page_id=2314.

Hydron-GmbH, Hrsg. (19. Juni 2023). *Wassertemperaturvorhersagen aus dem Wasserhaushalts- und Wärmemodell LARSIM: Wassertemperatur hessisches Maingebiet*. URL: <https://wassertemperaturvorhersage.hlnug.de/> (besucht am 19. 06. 2023).

IPCC (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaption and Vulnerability*. 1. Aufl. Cambridge, UK und New York, NY, USA: Cambridge University Press. URL: https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf (besucht am 02. 07. 2023).

ISE (2023). *Schwimmende Photovoltaik - Fraunhofer ISE*. Hrsg. von Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. URL: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/leitthemen/integrierte-photovoltaik/schwimmende-photovoltaik-fpv.html> (besucht am 16. 06. 2023).

Jachner, Stefanie, Boogaart, Gerald und Petzoldt, Thomas (2007). "Statistical Methods for the Qualitative Assessment of Dynamic Models with Time Delay (R Package qualV)". In: *Journal of Statistical Software* 22.8. doi: 10.18637/jss.v022.i08.

Kaltschmitt, Martin, Streicher, Wolfgang und Wiese, Andreas, Hrsg. (2020). *Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. 6. Aufl. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg.

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

-
- Kohavi, Ron (1995). "A Study of Cross-Validation and Bootstrap for Accuracy Estimation and Model Selection". In: *Proceedings of the Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence 2*.
- Kremer, Matthias (18. Okt. 2022). AW: Mail vom Kontaktformular: LARSIM-Modell für Master-Thesis: E-Mail. Hrsg. von Ole Bay. E-Mail im Anhang, Abschnitt A.2.
- Kremer, Matthias (31. Jan. 2023). AW: LARSIM kalibriert: E-Mail. Hrsg. von Ole Bay. E-Mail im Anhang, Abschnitt A.2.
- LEG (11. Okt. 2022). *Das Wasserhaushaltsmodell LARSIM: Modellgrundlagen und Anwendungsbeispiele*. Hrsg. von LARSIM-Entwicklergemeinschaft, Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Landesamt für Umwelt Rheinland-Pfalz, Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie und Bundesamt für Umwelt. URL: <http://www.larsim.info/dokumentation/LARSIM-Dokumentation.pdf>.
- LEG (9. Mai 2023). *LARSIM-Hilfe*. Hrsg. von LARSIM-Entwicklergemeinschaft. URL: https://larsim.info/larsimhilfe/hh_start.htm (besucht am 14. 05. 2023).
- Legates, David R. und McCabe, Gregory J. (1999). "Evaluating the use of "goodness-of-fit" Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation". In: *Water Resources Research* 35.1, 233–241. doi: 10.1029/1998WR900018.
- Lotz, Andreas (30. Mai 2022). AW: Wärmeeinleitungen Marburg/Lahn: E-Mail. Hrsg. von Jessika Gappisch. E-Mail im Anhang, Abschnitt A.2.
- Maniak, Ulrich (2016). *Hydrologie und Wasserwirtschaft: Eine Einführung für Ingenieure*. 7. Aufl. Lehrbuch. Berlin und Heidelberg: Springer Vieweg. doi: 10.1007/978-3-662-49087-7.
- MathWorks, Hrsg. (28. Mai 2023). *makima: Modified Akima piecewise cubic Hermite interpolation*. URL: https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/makima.html#mw_e22c9119-5a42-41de-8ecf-48ed54cee501 (besucht am 28. 05. 2023).
- McCuen, Richard H., Knight, Zachary und Cutter, A. Gillian (2006). "Evaluation of the Nash–Sutcliffe Efficiency Index". In: *Journal of Hydrologic Engineering* 11.6, 597–602. doi: 10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:6(597).
- Merian, Matthäus (1649). *Marburg um 1646*. Hrsg. von J.L. Gottfried's Archontologica Cosmica. Kupferdruck. Marburg.
- Moriasi, Daniel N., Arnold, Jeff G., van Liew, Michael W., Bingner, Ron L., Harmel, R. Daren und Veith, Tamie L. (2007). "Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations". In: *Transactions of the ASABE* 50.3, 885–900. doi: 10.13031/2013.23153.
- Nash, J. Eamonn und Sutcliffe, John V. (1970). "River flow forecasting through conceptual models part I – A discussion of principles". In: *Journal of Hydrology* 10.3, 282–290. doi: 10.1016/0022-1694(70)90255-6.

Rhein liefert Wärmeenergie über neue Großwärmepumpe: Reallabor der Energiewende "Großwärmepumpen in Fernwärmenetzen" (5. Apr. 2022). www.energiwendebauen.de, online. URL: <https://www.energiwendebauen.de/news/de/rhein-liefert-waermeenergie> (besucht am 31. 05. 2023).

Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) (22. Dez. 2000). *Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik.*

Energieeffizienz Richtlinie (Richtlinie 2012/27/EU) (25. Okt. 2012). *Richtlinie 2012/27/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Oktober 2012 zur Energieeffizienz, zur Änderung der Richtlinien 2009/125/EG und 2010/30/EU und zur Aufhebung der Richtlinien 2004/8/EG und 2006/32/EG.*

Santhi, C., Arnold, J. G., Williams, J. R., Dugas, W. A., Srinivasan, R. und Hauck, L. M. (2001). "Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources". In: *Journal of the American Water Resources Association* 37.5, 1169–1188. doi: 10.1111/j.1752-1688.2001.tb03630.x.

Seidel GmbH & Co. KG, Hrsg. (2022). *Über uns*. Marburg. URL: <https://www.seidel.de/ueber-uns/> (besucht am 14. 05. 2023).

Sloto, Ronald A. und Crouse, Michèle Y. (1996). *HYSEP: A Computer Program for Streamflow Hydrograph Separation and Analysis*. Hrsg. von U.S. GEOLOGICAL SURVEY. Lemoyne, Pennsylvania. doi: 10.3133/wri964040.

Stachowiak, Herbert (1973). *Allgemeine Modelltheorie*. Wien und New York: Springer.

Stadtwerke Marburg, Hrsg. (12. Apr. 2017). *Wärmenetz Marburg - Kernstadt: Bestandsplan*. Bestandsplan im Anhang, Abbildung A.10. Marburg. URL: https://www.stadtwerke-marburg.de/fileadmin/user_upload/Seiteninhalte/Hausanschl%C3%BCsse_Netze/Hausanschluss_W%C3%A4rme/20170412_W%C3%A4rme-Bestand.pdf (besucht am 22. 05. 2023).

Stadtwerke Marburg, Hrsg. (8. März 2023). *Bescheinigung des Wärmenetzbetreibers: über die energetische Bewertung nach FW 309 Teil 5 & 6*. Bescheinigung im Anhang, Abbildung A.11. Marburg. URL: https://www.stadtwerke-marburg.de/fileadmin/user_upload/Seiteninhalte/Hausanschl%C3%BCsse_Netze/Hausanschluss_W%C3%A4rme/Bescheinigung_Erf%C3%BCllungsgrad_Erneuerbare_Energien_W%C3%A4rmenetze/Bescheinigung_Erf%C3%BCllungsgrad_Erneuerbare_Energien_Marburg-Innenstadt.pdf (besucht am 22. 05. 2023).

Stadtwerke Rosenheim, Hrsg. (30. Sep. 2022). *Großwärmepumpe Rosenheim: Bau- und Betriebserfahrungen*. Rosenheim.

Sterner, Robert W., Elser, James J. und Vitousek, Peter Morrison (2002). *Ecological stoichiometry: The biology of elements from molecules to the biosphere*. Princeton und Oxford: Princeton University Press.

Yew Gan, Thian, Dlamini, Enoch M. und Biftu, Getu Fana (1997). "Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions on hydrologic modeling". In: *Journal of Hydrology* 192.1-4, 81–103. doi: 10.1016/S0022-1694(96)03114-9.

Zogg, Martin (2008). *Geschichte der Wärmepumpe: Schweizer Beiträge und internationale Meilensteine*.

A Anhang

A.1 Tabellen und Abbildungen

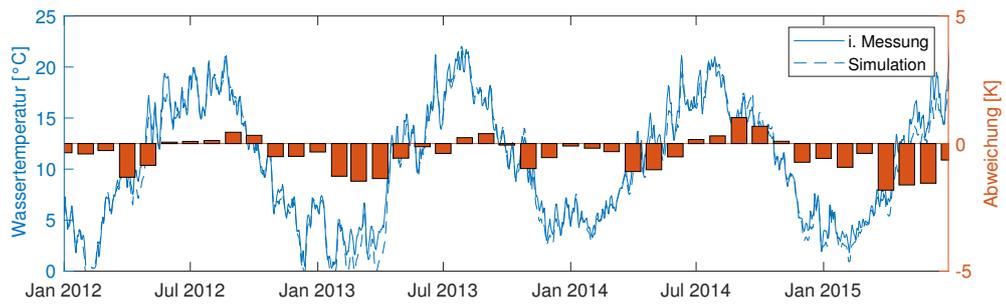
Tabelle A.1: Datenursprung Messdaten 2019-2022

Station	Datenquelle
Amöneburg-Rüdigheim	CDC ¹
Bad_Berleburg	CDC
Bartenhausen	WISKI ²
Biedenkopf	WISKI
Biedenkopf-Sackpfeife	WISKI
BreidenbachN	WISKI
Coelbe	CDC
Dillenburg	CDC
Etzelmühle	WISKI
Feudingen	WISKI
Gemünden_(Felda)-Rülfenrod	WISKI
Giessen-Wettenberg	CDC
Haina-Kloster	WISKI
Hainmühle	WISKI
Kirchhain-Kläranlage	WISKI
Kleiner Feldberg/Taunus	CDC
Lahnhof	CDC
Lollar-Kläranlage	WISKI
Marburg	WISKI
Marburg-Lahnberge	WISKI
Neu-Ulrichstein	CDC
Ober-Ofleiden	WISKI
Sarnau-neu	WISKI
Wettenberg-Krofdorf-Gleiberg-Waldhs.	WISKI
Wetter/Hessen-Amönau	CDC

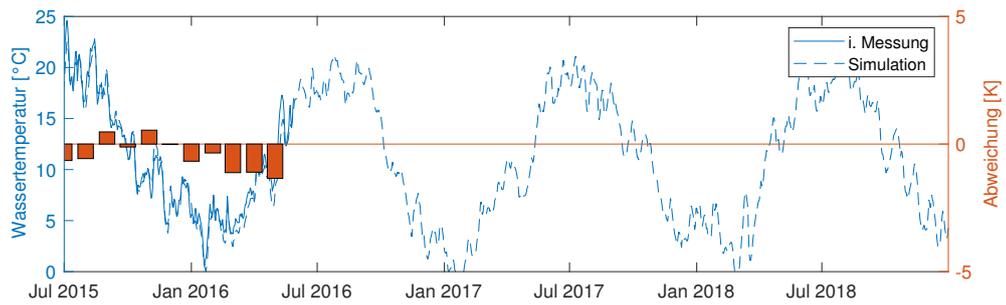
¹ CDC: Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes (DWD) (DWD 2022a) ² WISKI: WISKI-Web des Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie (HLNUG) (HLNUG 2022)

Tabelle A.2: Kalibrierparameter je Flussgebietsabschnitt im Ausgangszustand aus tape35.dat

TGB	Flussgebiets- abschnitt	KG	beta	fbas-fak	EQB	r_dmin	r_dmax	EQI	BSF	A2	EQD	EQD2	EKM	EKL	EKR
85	Biedenkopf	1.00	0.00300	2.0	2500.	0.4	0.60	300.	160.	50.	0.15	1.0	1.0	1.0	1.0
204	Ober-Ofleiden	0.98	0.00400	3.0	20000.	0.4	0.30	150.	130.	70.	0.30	0.8	1.0	1.0	1.0
269	Gemuenden	1.03	0.00800	2.8	16000.	0.0	0.35	300.	140.	90.	0.30	0.6	0.9	0.9	0.9
329	Marburg	0.95	0.00500	2.0	16000.	0.4	0.20	2000.	140.	90.	0.18	1.0	0.9	0.9	0.9
380	Etzelmuehle	0.97	0.00100	3.0	12000.	0.0	0.30	250.	140.	80.	0.15	0.7	0.5	0.5	0.5
439	Giessen-Klaewerk	0.97	0.01100	1.0	12000.	0.4	0.20	300.	140.	90.	0.25	1.0	0.6	0.6	0.6

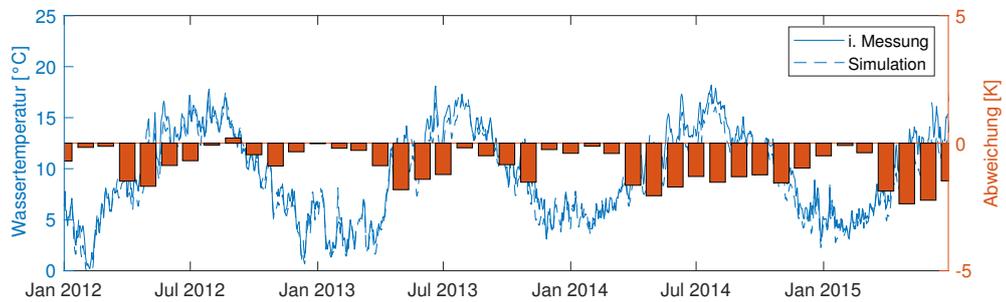


(a) Zeitraum 01.01.2012 - 30.06.2015

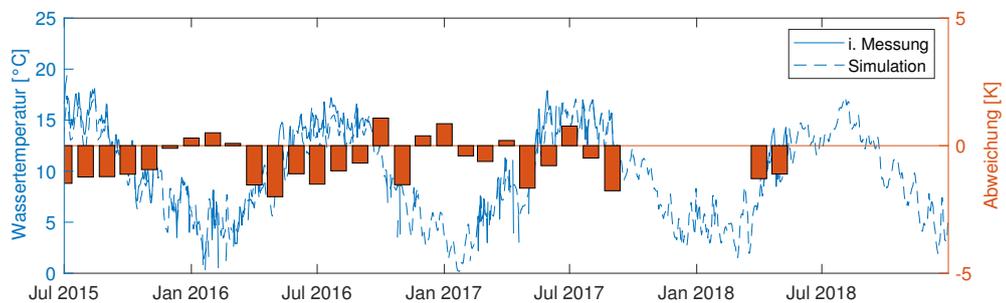


(b) Zeitraum 01.07.2015 - 31.12.2018

Abbildung A.1: Graphische Analyse der Wasserwärme am Standort Hainmühle im Ausgangszustand

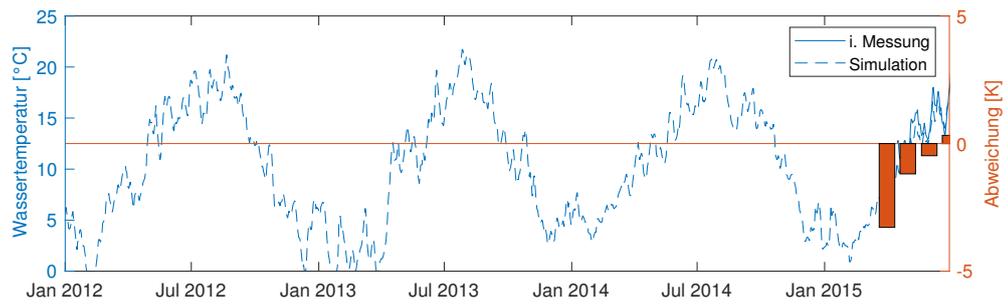


(a) Zeitraum 01.01.2012 - 30.06.2015

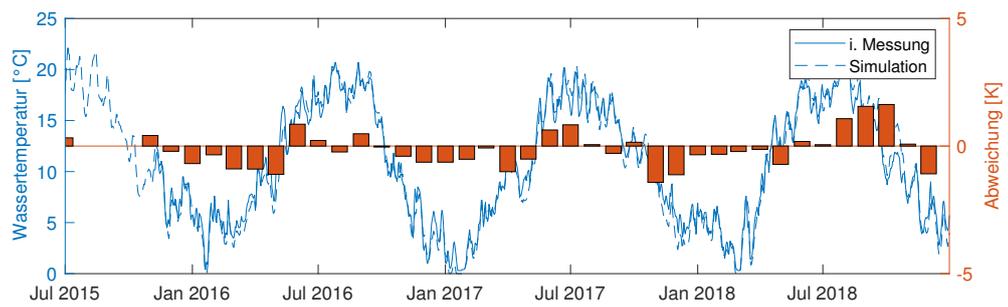


(b) Zeitraum 01.07.2015 - 31.12.2018

Abbildung A.2: Graphische Analyse der Wasserwärme am Standort Niederwetter im Ausgangszustand



(a) Zeitraum 01.01.2012 - 30.06.2015



(b) Zeitraum 01.07.2015 - 31.12.2018

Abbildung A.3: Graphische Analyse der Wasserwärme am Standort Ober-Ofleiden im Ausgangszustand

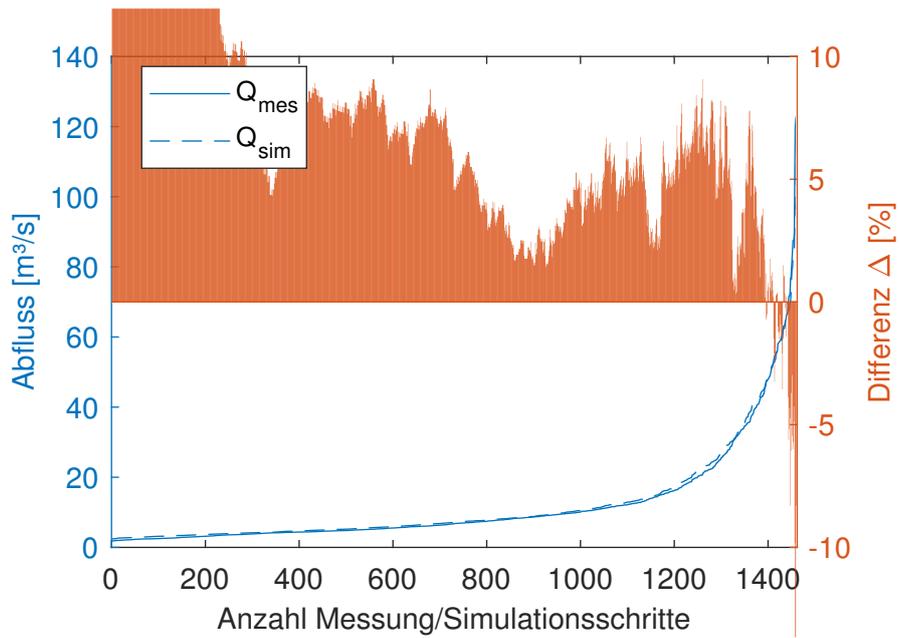


Abbildung A.4: Verzerrung des simulierten und gemessenen Gesamtabflusses im Validierungszeitraum am Pegel Marburg

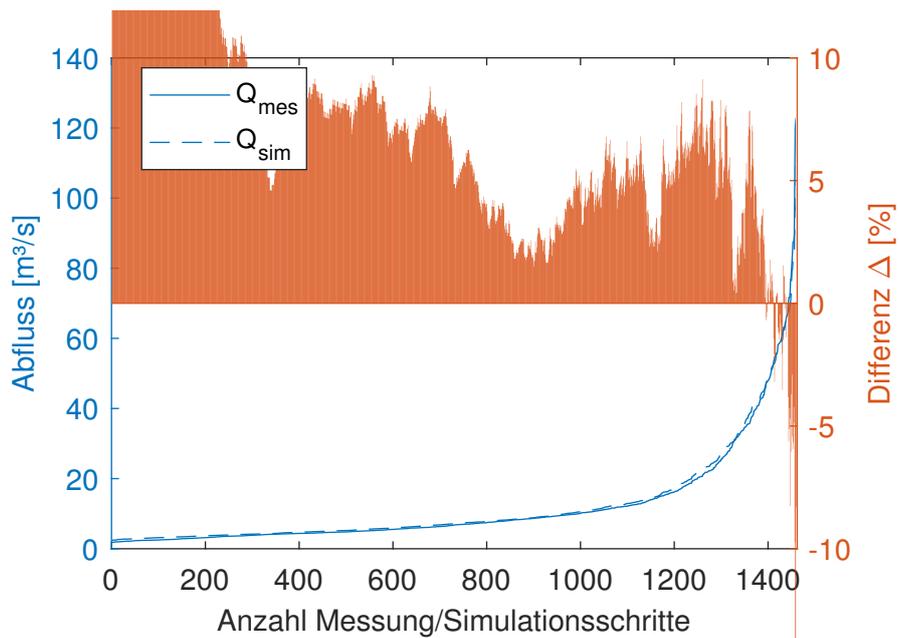
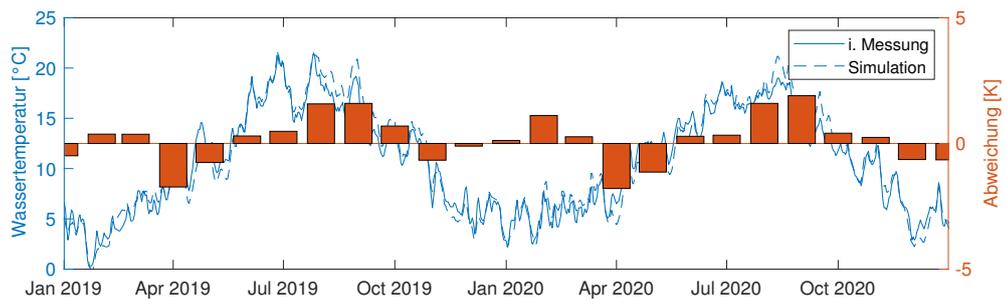
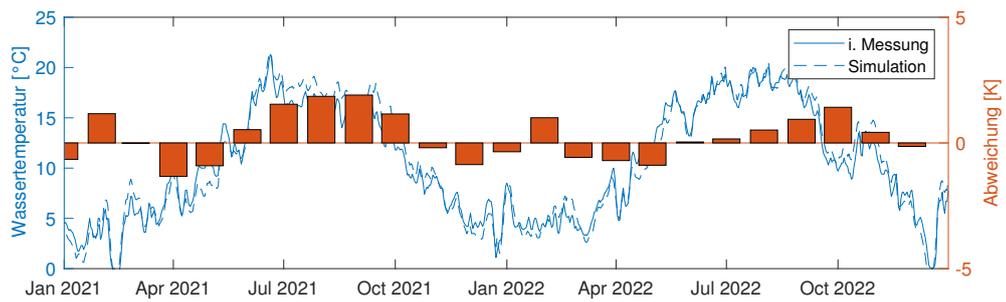


Abbildung A.5: Verzerrung des simulierten und gemessenen Gesamtabflusses im Validierungszeitraum am Pegel Marburg nach der Simulation von Kalibrierungs- und Validierungszeitraum

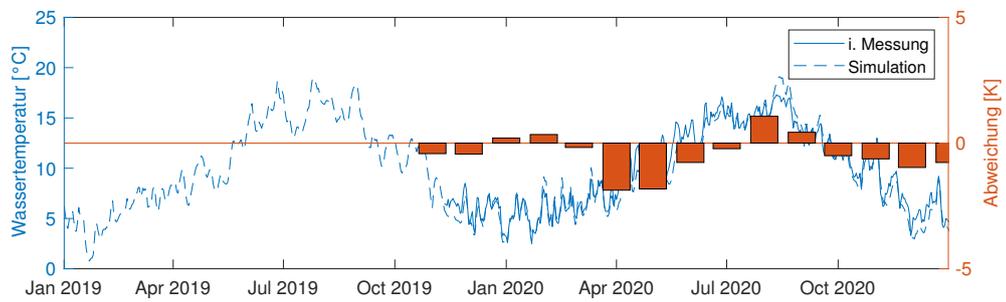


(a) Zeitraum 01.01.2019 - 31.12.2019

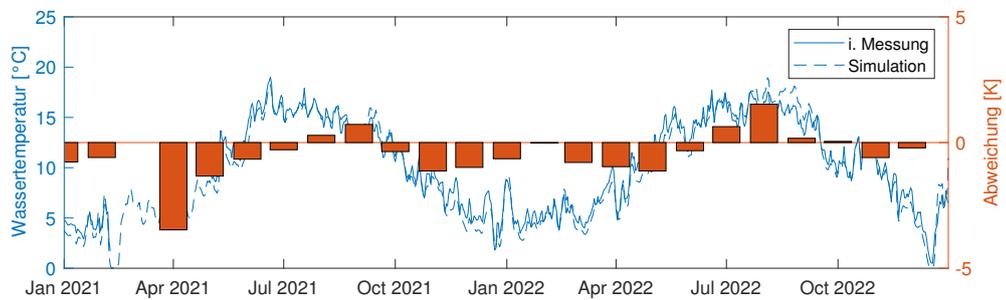


(b) Zeitraum 01.01.2020 - 31.12.2029

Abbildung A.6: Graphische Analyse der Gewässerwärme am Pegel Ober-Ofleiden im Validierungszeitraum



(a) Zeitraum 01.01.2019 - 31.12.2019



(b) Zeitraum 01.01.2020 - 31.12.2020

Abbildung A.7: Graphische Analyse der Gewässerwärme am Pegel Kranzmühle im Validierungszeitraum

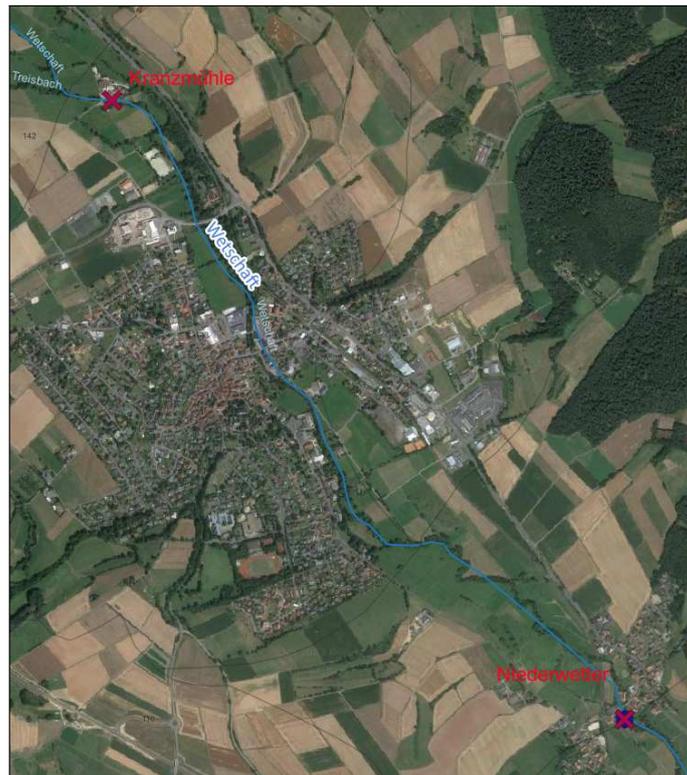


Abbildung A.8: Standort Kranzmühle

Tabelle A.3: Zuordnung Stationen zu Rasterdaten gemäß DWD (2023)

Station	LARSIM- Stationsnr.	Rechtswert ¹ [m]	Hochwert ¹ [m]	Höhenlage ¹ [m über NN]
Bad Berlenburg	H795	3889500	2691500	572
Coelbe	L319	3916500	2677500	186
Gießen	10532	3907500	2649500	185
Wettenberg				
Lahnhof	51159054	3880500	2682500	613
Neu Ulrichstein	10537	3933500	2666500	347
Wahlen	10535	3940500	2672500	335

¹ Koordinatensystem: Lambert konform konisch (DWD 2023)

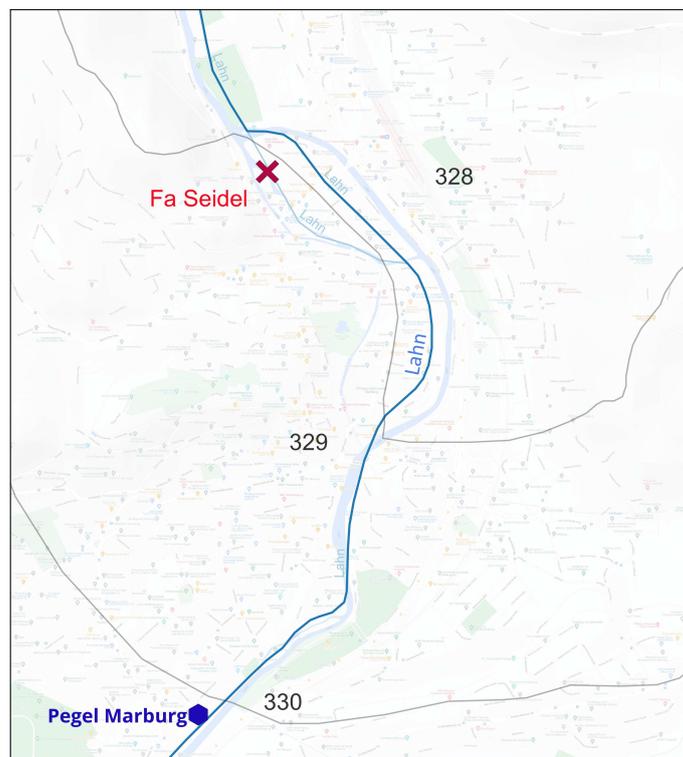


Abbildung A.9: Standort der Firma Seidel GmbH & Co. KG. in Marburg, erstellt mit QGIS 3.22.12-Białowieża

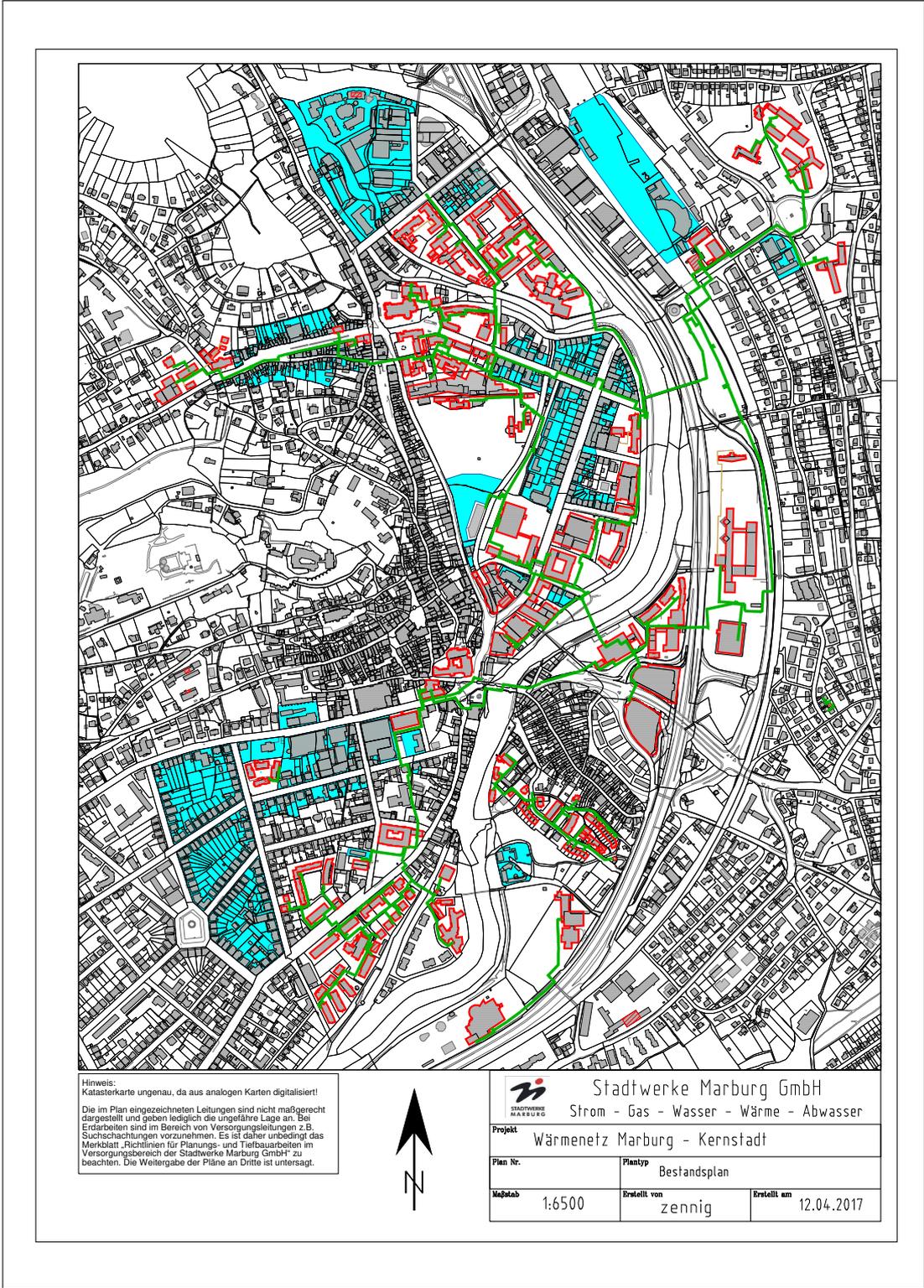


Abbildung A.10: Bestandsplan Wärmesetz Marburg - Kernstadt, (Stadtwerke Marburg 2017)

Tabelle A.4: Gebietsinformationen des TGB Mühlkanal Wehrda

*	Typ: Mühlkanal Wehrda													
	* gesamtes Einzugsgebiet [qkm]	=	0.07											
	* Gerinnebildender Abfluss [cbm/s]	=	0.00											
328	2583130001	0.069	0.365	187.500	185.000	3483.214	5632.789					1		
328	179857	179856										2		
328												3a		
328				VDB	0.53							3b		
328	11.4	1.2	6.4	12.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	10.6	5.6	4a
328	34.2	1.4												4b
328	0	0	0	156	0	0	0	113	182	0	0	142	154	5a
328	137	0												5b

Tabelle A.5: Gebietsinformationen des TGB Mühlkanal Marburg

* Typ: Mühlkanal (Seitenarm) Marburg											
* gesamtes Einzugsgebiet [qkm] = 0.02											
* Gerinnebildender Abfluss [cbm/s] = 0.00											
	330	2583151101	0.021	1.584	347.850	180.150	3484.794	5631.941			
	330	177370	177369						1	2	
	330								3a	3b	
	330	18.5	1.4	6.2	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	28.0	3.7
	330	36.9	1.0								
	330	0	0	0	215	0	0	0	0	127	148
	330	128	0						0		
							VDB	0.53			

Bescheinigung des Wärmenetzbetreibers

über die energetische Bewertung nach FW 309 Teile 5 & 7

		Deckungs- anteil	Pflicht- anteil	Erfüllungs- grad
	MWh	DA	PA	EG
Wärmenetzeinspeisung gesamt	49.641			
aus Kraft-Wärme-Kopplung	39.783	80,1 %		
hiervon aus Erdgas-BHKW	37.231	75,0 %	50 %	150 %
hiervon aus BHKW-Abwärme	2.552	5,1 %	50 %	10 %
aus sonstigen Erzeugern				
hiervon aus Umgebungswärme	702	1,4 %	50 %	3 %
aus Heizöl	0	0,0 %		
Erfüllungsgrad der Fernwärme EG_{FW}				163 %

Die Anforderungen des § 44, GEG 2020 an die Fernwärme sind erfüllt? **JA**

Name des Wärmenetzbetreibers	Stadtwerke Marburg GmbH
Name des Wärmenetzes	Fernwärmenetz Marburg
Lage des Netzes	Marburg
Datenbasis	Planungsdaten
Diese Bescheinigung ist gültig bis	22.02.2030

Stadtwerke Marburg GmbH

Am Krekel 55 · 35039 Marburg

Postfach 2180 · 35009 Marburg

Tel. (06421) 2 05-0 · Fax (06421) 2 05-5 50

E-Mail: info@swmr.de Internet: www.stadtwerke-marburg.de

Marburg, 08.03.2023

Ort, Datum

Unterschrift

Die Berechnung der Zusammensetzung der Wärme¹ wurde durchgeführt von



Technische Universität Dresden

Institut für Energietechnik

Professur für Gebäudeenergietechnik und Wärmeversorgung

Dresden, 23.02.2023

Ort, Datum

Unterschrift

¹ Bericht: Zertifizierung des Primärenergiefaktors und der CO₂-Emissionen nach GEG für das Fernwärmenetz Marburg der Stadtwerke Marburg GmbH. TU Dresden, Februar 2023

Abbildung A.11: Bescheinigung des Wärmenetzbetreibers - Stadtwerke Marburg, (Stadtwerke Marburg 2023)

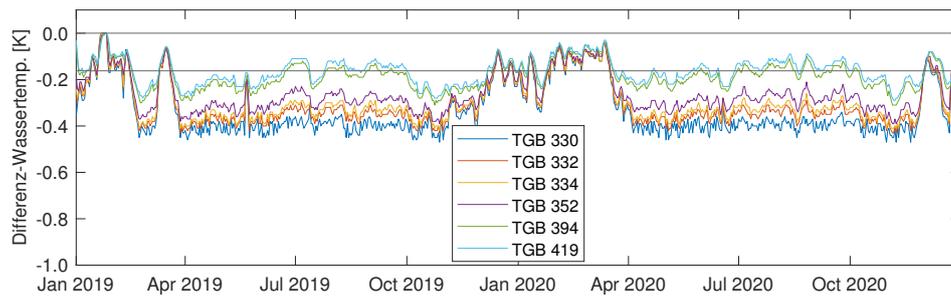


Abbildung A.12: Temperaturänderungen durch die Speisung eines Fernwärmenetzes mit einer 20 MW-Wärmepumpe bei 4 K-Spreizung bis Gießen
mit: TGB 330: unterhalb Pegel Marburg
TGB 332: Weimar (Lahn)
TGB 334: Argenstein
TGB 352: Roth
TGB 394: Lollar
TGB 419: Stadtgrenze Gießen

A.2 Mitteilungen

E-Mail zur Bereitstellung eines LARSIM-Modellausschnittes

Bay.Ole@outlook.de

Von: Matthias.Kremer@hlnug.hessen.de
Gesendet: Dienstag, 18. Oktober 2022 13:36
An: bay.ole@outlook.de
Cc: Dirk.Bastian@hlnug.hessen.de
Betreff: AW: Mail vom Kontaktformular: LARSIM-Modell für Master-Thesis

Hallo Herr Bay,

als Wasserhaushalts- und Wärmemodell kommt LARSIM bei uns aktuell nur in Südhessen und am Main (s. http://wassertemperaturvorhersage.hlnug.de/hlug_wt_infosys_extern/html/index.htm) zum Einsatz.

Für das Lahnggebiet (derzeit nur Wasserhaushaltsmodell) ist diesbezüglich noch keine Kalibrierung erfolgt, es wurden auch keine speziellen Dateien erstellt bzw. Anpassungen zur Inbetriebnahme des Wärmemoduls durchgeführt (Optionen in tape11, Erstellung von tape31, temperatur.stm usw.).

Falls Sie trotzdem Interesse an einem Modellausschnitt haben:

Könnten Sie noch in ein paar Sätzen erläutern, welchen Zweck das Modell in Ihrer Masterthesis erfüllen soll? Dann würde ich mich direkt mit meinem Vorgesetzten abstimmen.

Mit freundlichen Grüßen
Im Auftrag

Matthias Kremer

Matthias Kremer
Diplom-Hydrologe

50 Jahre HLNUG: 1971–2021.



Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Dezernat W3: Hydrologie, Hochwasserschutz
Rheingaustraße 186
D-65203 Wiesbaden

Tel.: +49(0)611 6939-105
Fax: +49(0)611 6939-555
E-Mail: matthias.kremer@hlnug.hessen.de
Internet: www.hlnug.de

Das HLNUG auf Twitter:
https://twitter.com/hlnug_hessen



Von: Ole Bay <bay.ole@outlook.de>
Gesendet: Montag, 17. Oktober 2022 11:02
An: Kremer, Matthias (HLNUG) <Matthias.Kremer@hlnug.hessen.de>
Betreff: Mail vom Kontaktformular: LARSIM-Modell für Master-Thesis

Empfänger Matthias Kremer
Betreff LARSIM-Modell für Master-Thesis
Name Ole Bay
E-Mail bay.ole@outlook.de
Telefon 01607575980
Straße/Nr. Frankfurter Straße 29
PLZ/Ort 64293 Darmstadt
Ihre Nachricht Guten Tag Herr Kremer,
wir sprachen kurz auf dem LARSIM-Anwenderworkshop bezüglich meiner Pläne im Rahmen der Masterthesis ein Flusswärmemodell für die Lahn im Raum Marburg zu erstellen.
Sie stellten mir damals in Aussicht, einen Modellausschnitt zur Verfügung stellen zu können. In Absprache mit meinem Thesis-Betreuenden würde ich gerne davon Gebrauch machen bzw. nachfragen, ob dies möglich sei.
Mit freundlichen Grüßen
Ole Bay
Ich bitte um E-Mail
Datenschutz Ich habe die Datenschutzerklärung gelesen

E-Mail zum Stand der Kalibrierung

Bay.Ole@outlook.de

Von: Matthias.Kremer@hlnug.hessen.de
Gesendet: Dienstag, 31. Januar 2023 16:06
An: bay.ole@outlook.de
Cc: S.Borchardt@wb.tu-darmstadt.de; J.Gappisch@wb.tu-darmstadt.de; Dirk.Bastian@hlnug.hessen.de
Betreff: AW: LARSIM kalibriert

Kennzeichnung: Zur Nachverfolgung
Kennzeichnungsstatus: Gekennzeichnet

Hallo Herr Bay,

nach den mir vorliegenden Informationen wurde für die Kalibrierung des Wasserhaushaltsmodells (WHM) im Jahr 2017 der Zeitraum 1981 bis 2010 verwendet.
Die Erweiterung des tageswertbasierten WHM um den Wärmemodell-Modus fand 2019 statt. Die Optimierung der Parameter des Wasserhaushalts- und Wärmemodells (WWM) erfolgte dann für den Zeitraum 2011 bis 2018.

Mit freundlichen Grüßen
Im Auftrag

Matthias Kremer

Matthias Kremer
Diplom-Hydrologe

Hessisches Landesamt für Naturschutz, Umwelt und Geologie
Dezernat W3: Hydrologie, Hochwasserschutz
Rheingaustraße 186
D-65203 Wiesbaden

Tel.: +49(0)611 6939-105
Fax: +49(0)611 6939-555
E-Mail: matthias.kremer@hlnug.hessen.de
Internet: www.hlnug.de

Das HLNUG auf Twitter:
https://twitter.com/hlnug_hessen



Von: Ole Bay <bay.ole@outlook.de>
Gesendet: Dienstag, 31. Januar 2023 10:01
An: Kremer, Matthias (HLNUG) <Matthias.Kremer@hlnug.hessen.de>
Cc: s.borchardt@wb.tu-darmstadt.de; Jessika Gappisch <J.Gappisch@wb.tu-darmstadt.de>
Betreff: LARSIM kalibriert

Guten Tag Herr Kremer,

ich hätte noch eine kurze Rückfrage zu dem mir bereitgestellten LARSIM-Modell.

Das Modell ist für den Zeitraum von 2012-2018 kalibriert, oder?

Ich habe das mal durchlaufen lassen und folgende Gütekriterien für den Abfluss an der Station Gießen-Klärwerk erhalten:

Bestimmtheitsmaß $r^2=0,9619$

Nash&Sutcliff NSE=0,9613

log Nash&Sutcliff lnNSE=0,9985

Volumeneffizienz VE=0,8659

Freundliche Grüße

Ole Bay

Bay.Ole@outlook.de

Von: Andreas Lotz <andreas.lotz@seidel.de>
Gesendet: Montag, 30. Mai 2022 16:40
An: Jessika Gappisch
Betreff: AW: Wärmeeinleitungen Marburg/Lahn
Anlagen: Abwasservolumina und -temperaturen 2016-2021.xlsx

Guten Tag Frau Gappisch,

anbei sende ich Ihnen die Abwasservolumina und -temperaturen für die Jahre 2016 bis 2021. Die Volumenströme habe ich mangels Aussagekraft aus u. g. Grund nicht mitangegeben. Ich hoffe, die Daten helfen Ihnen weiter.

Viele Grüße
Andreas Lotz

Von: Andreas Lotz
Gesendet: Mittwoch, 25. Mai 2022 16:12
An: Jessika Gappisch <J.Gappisch@wb.tu-darmstadt.de>
Betreff: AW: Wärmeeinleitungen Marburg/Lahn

Guten Tag Frau Gappisch,

die Werte für den Abfluss ergeben sich folgendermaßen: Die Pumpe läuft nicht variabel, sondern kennt nur die Betriebszustände „ein“ ($\approx 10 \text{ m}^3/\text{h}$) und „aus“ ($\approx 0 \text{ m}^3/\text{h}$). Insofern ist die Angabe des Abflusses im Eigenkontrollbericht auch nur eine Momentaufnahme zum Zeitpunkt der Probennahme, die davon abhängt, ob die Pumpe zufällig gerade lief oder nicht. Daher dürfte dieser Wert für Ihre Betrachtungen nur bedingt weiterhelfen. Da unser Abwasser aber relativ konstant anfällt (sowohl auf kurze Sicht als auch im Jahresverlauf gesehen), ist es für Sie wahrscheinlich am sinnvollsten, mit einem Durchschnittswert zu arbeiten, der sich aus der Jahresmenge ergibt. Für 2021 wären das gemäß der von Herrn Miska bereits übermittelten Menge von $17.888 \text{ m}^3/\text{a}$ durchschnittlich gut $2 \text{ m}^3/\text{h}$.

Die Temperaturdifferenz zum Fließgewässer wird von uns nicht bestimmt. Ich nehme an, dass Sie über Quellen verfügen, in denen sich der Temperaturverlauf der Lahn recherchieren lässt.

Dies nur als erste Rückmeldung meinerseits. Die gewünschten Daten der letzten 5 Jahre kann ich Ihnen gerne zusammenstellen, leider allerdings erst am Montag. Bei Bedarf können Sie mich auch gerne unter der u. g. Nummer telefonisch kontaktieren.

Viele Grüße und einen schönen Feiertag
Andreas Lotz

Dr. Andreas Lotz

Eloxaltechnik



Seidel GmbH & Co. KG
Rosenstraße 8
35037 Marburg, Germany

+49 6421604-179
andreas.lotz@seidel.de

EcoVadis CSR Rating: Platinum for Seidel

We have been awarded a platinum medal in recognition of CSR achievement!

Thank you for your support.



Amtsgericht Marburg HRA 1202, Sitz: Marburg

Persönlich haftende Gesellschafterin:
Ritzenhoff GmbH, Sitz: Marburg

Amtsgericht Marburg HRB 1151, Sitz: Marburg
Geschäftsführer: Dr. Andreas Ritzenhoff

Von: Jessika Gappisch <J.Gappisch@wb.tu-darmstadt.de>

Gesendet: Freitag, 20. Mai 2022 10:50

An: Andreas Lotz <andreas.lotz@seidel.de>

Betreff: WG: Wärmeeinleitungen Marburg/Lahn

Sehr geehrter Herr Lotz,

Sie haben netterweise zugestimmt, dass Herr Miska Ihre Kontaktdaten an uns weiterleitet. Vielen Dank dafür. Derzeit führen wir (TU Darmstadt, Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik, AG Flusswärmenutzung) eine wissenschaftliche Studie zur Lahn in Marburg durch. Ziel ist zu entscheiden, ob die Entnahme geringer Wärmemengen aus der Lahn zur Beheizung eines Gebäudes möglich ist. Vor diesem Hintergrund wurde die Firma Seidel als ein Wärmeeinleiter in die Lahn genannt.

Daten zum Abfluss und zur Wassertemperatur aus Ihrem Eigenkontrollbericht 2021 haben wir vorliegen. Ist es möglich, dass Sie uns die Daten auch für die vergangenen 5 Jahre zur Verfügung stellen? Hintergrund ist der, dass es für das Abkühlen von Flusswasser derzeit in Deutschland nur wenige Vorgaben gibt. Interessant wäre es daher, sich die Temperaturdifferenzen (mit zugehörigem Abfluss) zwischen Wärmeeinleitungen und Fließgewässer anzuschauen und diese ggf. als Anhaltspunkt zu nutzen.

Zum Thema „Abfluss“ noch die Frage: Der im Rahmen der Eigenkontrolle erfasste Abfluss beträgt durchweg 10 m³/h, während der des RP variiert. Arbeiten Sie hier mit Durchschnittswerten?

Im Voraus vielen Dank für Ihre Rückmeldung.

Viele Grüße
Jessika Gappisch

Jessika Gappisch
Wissenschaftliche Mitarbeiterin

Technische Universität Darmstadt
Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik

Besucheradresse:
Gebäude L5|01 - Raum 306
Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt

Postadresse:
Franziska-Braun-Str. 7, Postfach 10 06 36, 64206 Darmstadt

Lieferadresse für Pakete:
Zentrale Poststelle Lichtwiese, Alarich-Weiss-Str. 4, 64287 Darmstadt

Fon: +49 6151 16 – 21168
E-Mail: j.gappisch@wb.tu-darmstadt.de



Von: Andreas.Miska@rpgi.hessen.de <Andreas.Miska@rpgi.hessen.de>
Gesendet: Montag, 16. Mai 2022 11:27
An: Jessika Gappisch <J.Gappisch@wb.tu-darmstadt.de>
Cc: andreas.lotz@seidel.de
Betreff: AW: Wärmeinleitungen Marburg/Lahn

Sehr geehrte Frau Gappisch,

im Zuge Ihrer Nachfrage kann ich Ihnen folgende Firma nennen, welche ggf. als Direkteinleiter in die Lahn im Bereich Marburg in Frage kommen könnte.
Die Fa. Seidel in Marburg leitete im Jahr 2021 17.888 m³ Abwasser mit einer Temperatur von 26,3 – 28,7 °C in die Lahn ein. Anbei erhalten Sie einen Ausschnitt der Messwerte, welche im Eigenkontrollbericht der Firma enthalten sind.

Auflistung der Analyseergebnisse im Kalenderjahr 2021

Parameter	Einheit	Grenzwert	Eigenkontrolle (Fa. UEG)			
			18.02.2021	19.05.2021	19.08.2021	30.11.2021
Abfluss	m ³ /h	20	10	10	10	10
Absetzbare Stoffe	ml/l	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	0,2
pH-Wert	-	6,5 - 9,0	7,5	7,6	7,2	7,7
Wassertemperatur	°C	34	26,3	27,8	28,7	26,9

Als Kontaktperson der Fa. Seidel darf ich Ihnen Herrn Dr. Lotz nennen. Diesen erreichen Sie unter:
E-Mail: andreas.lotz@seidel.de
Tel.: 06421604179

Für Rückfragen stehe ich Ihnen gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen
Im Auftrag

Dr. Andreas Miska



Regierungspräsidium Gießen

- Abteilung IV Umwelt -
Dezernat 41.4 "Industrielles Abwasser, wassergefährdende Stoffe, Grundwasserschadensfälle, Altlasten,
Bodenschutz"

Marburger Straße 91
35390 Gießen

Telefon: +49 641 303-4262
Fax: +49 641 303-4103
E-Mail: andreas.miska@rpgi.hessen.de
Internet: <http://www.rp-giessen.de>

Von: Jessika Gappisch <J.Gappisch@wb.tu-darmstadt.de>

Gesendet: Dienstag, 26. April 2022 15:05

An: Müller, Anja (RPGI) <anja.mueller@rpgi.hessen.de>

Betreff: Wärmeeinleitungen Marburg/Lahn

Sehr geehrte Frau Müller,

derzeit führen wir (TU Darmstadt, Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik, AG Flusswärmenutzung) eine wissenschaftliche Studie zur Lahn in Marburg durch. Ziel ist zu entscheiden, ob die Entnahme geringer Wärmemengen aus der Lahn zur Beheizung eines Gebäudes möglich ist. Können Sie mir mitteilen, inwieweit in der Region Marburg (Lahn/Ohm) punktuelle Wärmeeinleitungen (Wärme Kraftwerke, Kläranlagen, Industriebetriebe etc) in die Lahn erfolgen und - falls möglich - in welchem Umfang (Temperaturänderung, Wärmeeintrag, Einleitungsmengen etc.)? Oder liegt für die Lahn möglicherweise ein Wärmelastplan vor?

Wenn Ihnen als Obere Wasserbehörde Aspekte einfallen, die wir weiterhin bei unserer Prüfung einer Nutzung berücksichtigen können, wäre ich Ihnen über die Information sehr dankbar. Gerne können wir uns auch in einem gemeinsamen Gespräch über die Hintergründe der Studie unterhalten.

Schon im Voraus vielen Dank für Ihre Antwort.

Viele Grüße
Jessika Gappisch

Jessika Gappisch
Wissenschaftliche Mitarbeiterin
Technische Universität Darmstadt
Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik
Besucheradresse:
Gebäude L5|01 - Raum 306
Franziska-Braun-Straße 7, 64287 Darmstadt
Postadresse:
Franziska-Braun-Str. 7, Postfach 10 06 36, 64206 Darmstadt
Lieferadresse für Pakete:
Zentrale Poststelle Lichtwiese, Alarich-Weiss-Str. 4, 64287 Darmstadt
Fon: +49 6151 16 – 21168
E-Mail: j.gappisch@wb.tu-darmstadt.de

Erklärung zur Abschlussarbeit gemäß § 22 Abs. 7 APB TU Darmstadt

Hiermit versichere ich, Ole Bay, die vorliegende Master- Thesis gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU Darmstadt ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Mir ist bekannt, dass im Falle eines Plagiats (§38 Abs.2 APB) ein Täuschungsversuch vorliegt, der dazu führt, dass die Arbeit mit 5,0 bewertet und damit ein Prüfungsversuch verbraucht wird. Abschlussarbeiten dürfen nur einmal wiederholt werden.

English translation for information purposes only:

Thesis Statement pursuant to § 22 paragraph 7 of APB TU Darmstadt

I herewith formally declare that I, Ole Bay, have written the submitted thesis independently pursuant to § 22 paragraph 7 of APB TU Darmstadt. I did not use any outside support except for the quoted literature and other sources mentioned in the paper. I clearly marked and separately listed all of the literature and all of the other sources which I employed when producing this academic work, either literally or in content. This thesis has not been handed in or published before in the same or similar form.

I am aware, that in case of an attempt at deception based on plagiarism (§38 Abs. 2 APB), the thesis would be graded with 5,0 and counted as one failed examination attempt. The thesis may only be repeated once.

Datum / Date:

22.07.2023

Unterschrift / Signature:

