

Straßenbauverwaltung Freistaat Bayern Straße / Abschnittsnummer / Station: B 2 / Abschn. 255, Stat. 0,000 – Abschn. 230, Stat. 7,045
<div style="text-align: center;"> B 2 München-Mittenwald Verlegung östlich Garmisch-Partenkirchen mit Wanktunnel Bau-km 0+000 bis Bau-km 4+869 </div>
PROJIS-Nr.: 09 890645 00



FESTSTELLUNGSENTWURF

Hydrologisches Modell Wanktunnel

aufgestellt: Staatliches Bauamt Weilheim	
Scheckinger, Ltd. Baudirektor Weilheim, den 14.02.2025	

B2 OU GAP mit Wanktunnel Hydrologisches Modell Wanktunnel

Auftraggeber: Staatliches Bauamt Weilheim
Münchner Straße 38
D-82362 Weilheim

Auftragsdatum: 16.08.2022

Auftragsnummer: A866

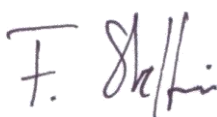
Berichtsnummer: A866-3

Bearbeitung: Dr.-Ing. Ulrich Lang
Dipl.-Ing. Florian Steffinger
Rebecca Zinser, M. Sc.

Leinfelden-Echterdingen, 13.12.2023



Dr. Ulrich Lang



Florian Steffinger



Rebecca Zinser

INHALT

ABBILDUNGSVERZEICHNIS	III
TABELLENVERZEICHNIS	VI
1 Einleitung	1
2 Datengrundlagen	3
2.1 Eingangsdaten für die Verdunstungsberechnung	3
2.2 Windkorrektur	6
2.3 Wasseräquivalent der Schneehöhe	7
2.4 Interpolation von Messungen an Stationen	8
2.5 Berücksichtigung der Geländemorphologie in der Strahlungsberechnung	8
2.6 Niederschlag	9
2.7 Landnutzung	12
2.8 Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums	14
2.9 Weitere Datengrundlagen	15
3 Hydrologisches Modell	16
3.1 Zweck des Modells	16
3.2 Modellaufbau	16
3.2.1 Abgrenzung der Einzugsgebiete	16
3.2.2 Modellsoftware	19
3.2.3 Beschreibung des Modells	19
Simulation der Teileinzugsgebiete	21
Simulation der Gerinne	23
3.3 Parametrisierung	24
3.4 Abflussmessungen	25
3.5 Randbedingungen	27
3.5.1 Potenzielle Verdunstung	27
3.5.2 Berechnung der Schneedecke	29
3.6 Kalibrierung des Modells	30
3.6.1 Ergebnisse des Modells zur Simulation der Schneebedeckung	30
3.6.2 Randbedingungen	37
3.6.3 Bewertungskriterium	38
3.6.4 Kalibrierungsschritt 1: Betrachtung einer Parametrisierung unabhängig von der Geologie	38
Vorgehen	38
Ergebnisse	39
3.6.5 Kalibrierungsschritt 2: Betrachtung einer Parametrisierung unter Berücksichtigung der Geologie	40
Vorgehen	40
Ergebnisse	42
3.6.6 Ganglinien des kalibrierten Modells	43

3.7	Ergebnisse für den Zeitraum ab 2000 am Wankmassiv	46
3.7.1	Berechnete Abflussganglinien	46
3.7.2	Gesamtbilanz der Einzugsgebiete	52
3.7.3	Kartendarstellungen	55
4	Fazit	60
LITERATURVERZEICHNIS		61
Anhang A	Parametrisierung des Verdunstungsmodells und der Interzeption	63
Anhang B	Dokumentation der Kalibrierungsschritte	66
B.1	Kalibrierungsschritt 1	66
B.2	Kalibrierungsschritt 2	69

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1: Klimastationen im Umfeld des hydrologischen Modells	4
Abbildung 2.2: Datenverfügbarkeit des Parameters Sonnenscheindauer (Stundenwerte)	5
Abbildung 2.3: Datenverfügbarkeit des Parameters Temperatur (Stundenwerte)	5
Abbildung 2.4: Datenverfügbarkeit des Parameters Dampfdruck (Tageswerte)	6
Abbildung 2.5: Datenverfügbarkeit des Parameters Wind (Stundenwerte)	6
Abbildung 2.6: Windkorrektur an der DWD-Station 1550 (Tagesmittelwerte)	7
Abbildung 2.7: Vergleich zwischen Schattenwurf im Sentinel 2 Satellitenbild und berechneter Schattenwurf	9
Abbildung 2.8: Vergleich zwischen gemessenem täglichem Niederschlag an der DWD Station Garmisch-Partenkirchen (ID 1550) sowie an der räumlich zugehörigen REGNIE Rasterzelle.	11
Abbildung 2.9: Räumliche Verteilung des Niederschlags im Jahr 2020.	12
Abbildung 2.10: Landnutzungsklassen im Betrachtungsraum aus dem CORINE - Datensatz.	13
Abbildung 2.11: Verteilung der nFKWe-Werte im Umfeld des Modellgebiets.	14
Abbildung 3.1: Einzugsgebiete im Modell	18
Abbildung 3.2: Einzugsgebiete der Pegel Lahnwiesgraben und Kanker für die Kalibrierung des Modells.	19
Abbildung 3.3: Einzugsgebiet des Lahnenwiesgrabens	20
Abbildung 3.4: Umsetzung des Einzugsgebiets Lahnenwiesgraben in HecHMS	21
Abbildung 3.5: Schemaskizze zur Modellierung der Einzugsgebiete	23
Abbildung 3.6: Abfluss am Kanker / Pegel Warmberg	26
Abbildung 3.7: Abfluss am Lahnenwiesgraben / Pegel Burgrain	26
Abbildung 3.8: Berechnetes und gemessenes Wasseräquivalent der Gesamtschneehöhe sowie interpoliertes Tagesmittel der Temperatur an der Station 1550 im Winterhalbjahr 1999/00(Garmisch-Partenkirchen)	31
Abbildung 3.9: Berechnetes und gemessenes Wasseräquivalent der Gesamtschneehöhe sowie interpoliertes Tagesmittel der Temperatur an der Station 1550 im Winterhalbjahr 2000/01 (Garmisch-Partenkirchen)	31

Abbildung 3.10: Berechnetes und gemessenes Wasseräquivalent der Gesamtschneehöhe sowie interpoliertes Tagesmittel der Temperatur an der Station 1550 im Winterhalbjahr 2000/01 (Garmisch-Partenkirchen)	32
Abbildung 3.11: Berechnetes und gemessenes Wasseräquivalent der Gesamtschneehöhe sowie interpoliertes Tagesmittel der Temperatur an der Station 1550 im Winterhalbjahr 2008/09 (Garmisch-Partenkirchen)	32
Abbildung 3.12: Vergleich zwischen berechnetem und gemessenen Wasseräquivalent der Gesamtschneehöhe an Stationen im Zeitraum 1999 bis 2020.	33
Abbildung 3.13: Vergleich zwischen Sentinel Satellitenbild und errechneter Schneebedeckung am 13.02.2019.....	33
Abbildung 3.14: Vergleich zwischen Sentinel Satellitenbild und errechneter Schneebedeckung am 23.03.2019.....	34
Abbildung 3.15: Vergleich zwischen Sentinel Satellitenbild und errechneter Schneebedeckung am 29.1.2018	35
Abbildung 3.16: Vergleich zwischen Sentinel Satellitenbild und errechneter Schneebedeckung am 7.4.2018	36
Abbildung 3.17: Sentinel-Satellitenbild am 19.4.2018	37
Abbildung 3.18: Scatterplot des NSE1-Werts für Lahnenwiesgraben und Kanker	40
Abbildung 3.19: Geologie der Einzugsgebiete.....	41
Abbildung 3.20: Geologie-abhängige Verteilung des GW1 Koeffizients	42
Abbildung 3.21: Scatterplot des NSE1-Werts für Lahnenwiesgraben und Kanker	43
Abbildung 3.22: Gemessene und simulierte Abflussganglinie am Lahnenwiesgraben im Zeitraum 2013 bis 2020	44
Abbildung 3.23: Gemessene und simulierte Abflussganglinie am Kanker im Zeitraum 2013 bis 2020	45
Abbildung 3.24: Abflussganglinie des Schweinbachs für drei Zeiträume	47
Abbildung 3.25: Abflussganglinie des Katzenbachs für drei Zeiträume	48
Abbildung 3.26: Abflussganglinie des Kesselgrabens für drei Zeiträume	49
Abbildung 3.27: Abflussganglinie des Birkelsgrabens für drei Zeiträume	50
Abbildung 3.28: Abflussganglinie des Faukenbachs für drei Zeiträume	51
Abbildung 3.29: Jahresmittel der Abflüsse an den Beobachtungspunkten	52

Abbildung 3.30: Anteile der Bilanzkomponenten in den vier betrachteten Einzugsgebieten.	54
Abbildung 3.31: Mittlerer jährlicher Niederschlag im Modellgebiet	56
Abbildung 3.32: Mittlere jährliche Perkolation vom Grundwasserleiter 1 in den Grundwasserleiter 2	57
Abbildung 3.33: Grundwasserneubildung (Verlustrate aus dem Grundwasserleiter 2).	58
Abbildung 3.34: Mittlerer Abfluss in den Gerinnen	59

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2.1:	Verwendete Datensätze	15
Tabelle 3.1:	Fläche der Einzugsgebiete des hydrologischen Modells	17
Tabelle 3.2:	Parameter für die Modellierung der Teileinzugsgebiete	24
Tabelle 3.3:	Parameter für die Modellierung der Gerinne	25
Tabelle 3.4:	Übersicht Messdaten der Einzugsgebiete Kanker und Lahnenwiesgraben	25
Tabelle 3.5:	Parameter und variierte Bandbreiten	39
Tabelle 3.6:	Parametrisierung der Geologie	42
Tabelle 3.7:	Bilanz der Einzugsgebiete und Summe der Bilanzkomponenten	54

1 Einleitung

Für den Bau und Betrieb des Wanktunnels wird vom Staatlichen Bauamt Weilheim ein Antrag auf Durchführung eines Planfeststellungsverfahrens gestellt. Dieser Antrag enthält den Fachbeitrag Wasserrahmenrichtlinie. Das vorliegende Dokument ergänzt den Fachbeitrag um ein hydrologisches Modell.

Das hydrologische Modell soll in erster Linie als Bilanzmodell dienen, um die Auswirkungen des Baus und des Betriebs des Tunnels auf die Wasserbilanz des Wankmassivs einordnen zu können. Die mit dem hydrologischen Modell ermittelte Grundwasserneubildung bildet die wichtigste Randbedingung des Prinzipmodells Grundwassermodell Wankmassiv (kup, 2023-2). Ferner dient der ermittelte mittlere Abfluss der Gewässer als Grundlage für quantitative Abschätzungen im Fachbeitrag Wasserrahmenrichtlinie (kup, 2023-1).

Der Aufbau eines hydrologischen Modells erfordert zunächst umfangreiche Vorarbeiten. Diese Vorarbeiten umfassen:

- Die Abgrenzung des Modellgebietes erfolgt anhand des hydrologischen Einzugsgebietes des Wankmassivs auf Grundlage von amtlichen Daten des LfUs. Das Modell berücksichtigt dabei die wesentlichen Einzugsgebiete innerhalb des Sonderuntersuchungsgebietes (Planungsgemeinschaft Wanktunnel, 2023-2). Am Fuß des Wankmassivs orientiert sich das Modellgebiet weitgehend am Modellgebiet des nachfolgenden Grundwassermodells Loisachtal.
- Die Unterteilung des Modellgebiets in Einzugs- und Teileinzugsgebiete erfolgt wie die Abgrenzung des Modellgebiets auf Grundlage des amtlichen Datensatzes des LfUs.
- Sammlung, Auswertung und Aufbereitung der Datengrundlagen
- Aufbau und Berechnung eines Verdunstungsmodells
- Berechnung der Schneedecke: Insbesondere in den Höhenlagen des Wankmassivs können bis in den April relevante Schneemengen vorhanden sein. Aufbau und Schmelze der Schneedecke müssen mit geeigneten Methoden abgebildet werden.

Der Aufbau des Einzugsgebietsmodells gliedert sich in folgende Arbeitsschritte:

- Aufbau des Abflussmodells in der Modellsoftware HechMS
- Kalibrierung des Modells anhand der benachbarten Einzugsgebiete des Kankers und des Lahnenwiesgrabens: Direkt am Wank-Massiv existieren keine kontinuierlichen Abflussmessungen
- Berechnung der Einzugsgebiete am Wank-Massiv in stündlicher Auflösung

- Auswertung der Wasserbilanz

Alle Arbeitsschritte werden im Rahmen der nachfolgenden Kapitel dokumentiert.

2 Datengrundlagen

2.1 *Eingangsdaten für die Verdunstungsberechnung*

Für die folgenden Auswertung werden die stündlichen Stationsbeobachtungen des DWDs (DWD Climate Data Center (CDC), 2018) verwendet. Die verwendeten Klimastationen sind Abbildung 2.1 zu entnehmen. Die Stationsdaten decken die Parameter Temperatur, Windgeschwindigkeit und Sonnenscheindauer in unterschiedlichem Umfang ab. Der Parameter Dampfdruck liegt nur als Tageswert vor. Die Anzahl der Stationen mit Messwerten je Tag kann Abbildung 2.2 bis Abbildung 2.5 entnommen werden.

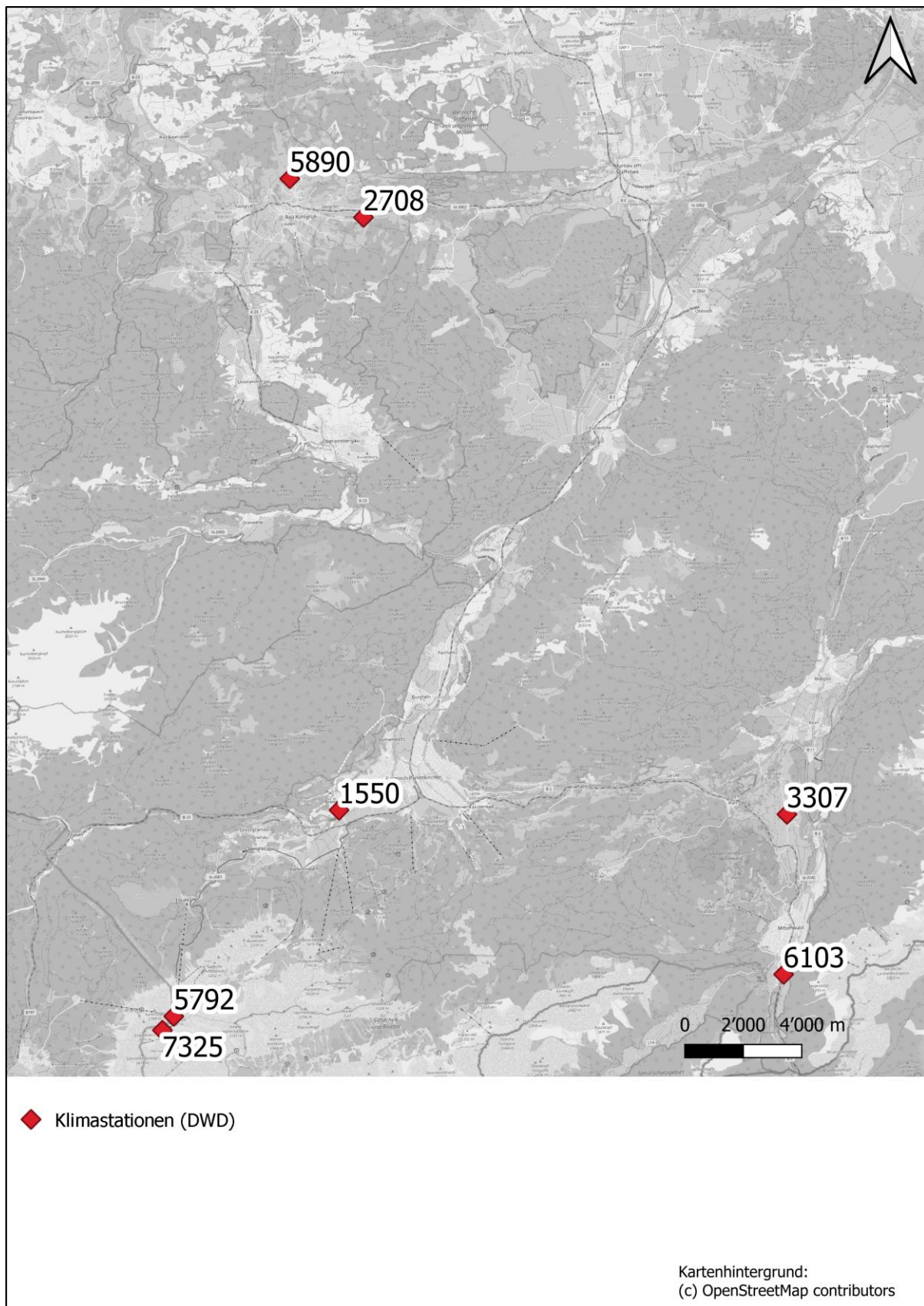


Abbildung 2.1: Klimastationen im Umfeld des hydrologischen Modells

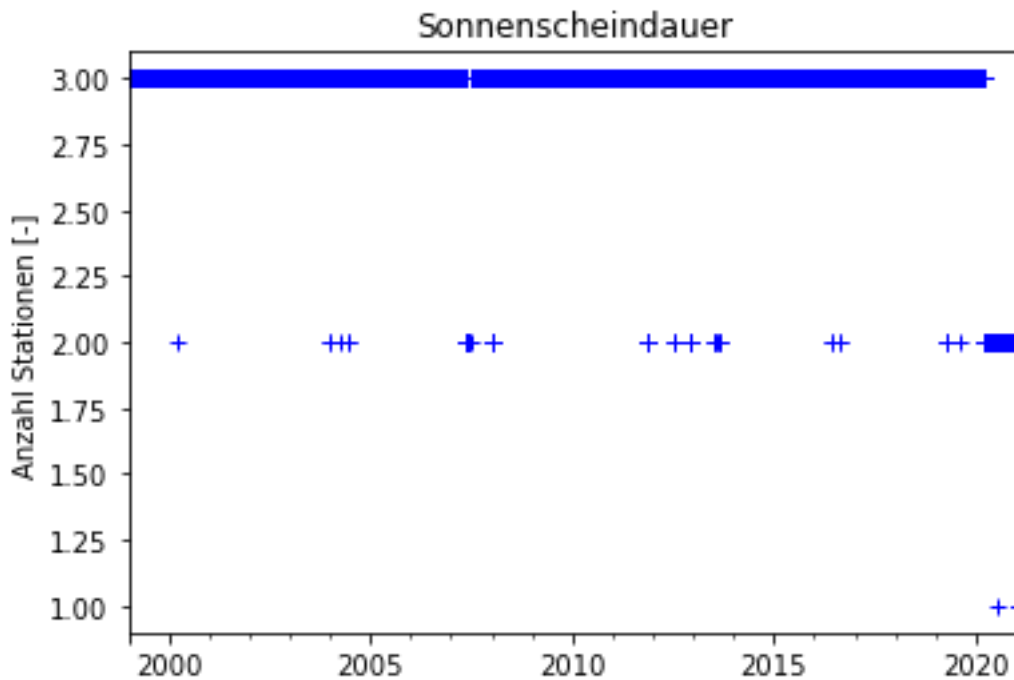


Abbildung 2.2: Datenverfügbarkeit des Parameters Sonnenscheindauer (Stundenwerte)

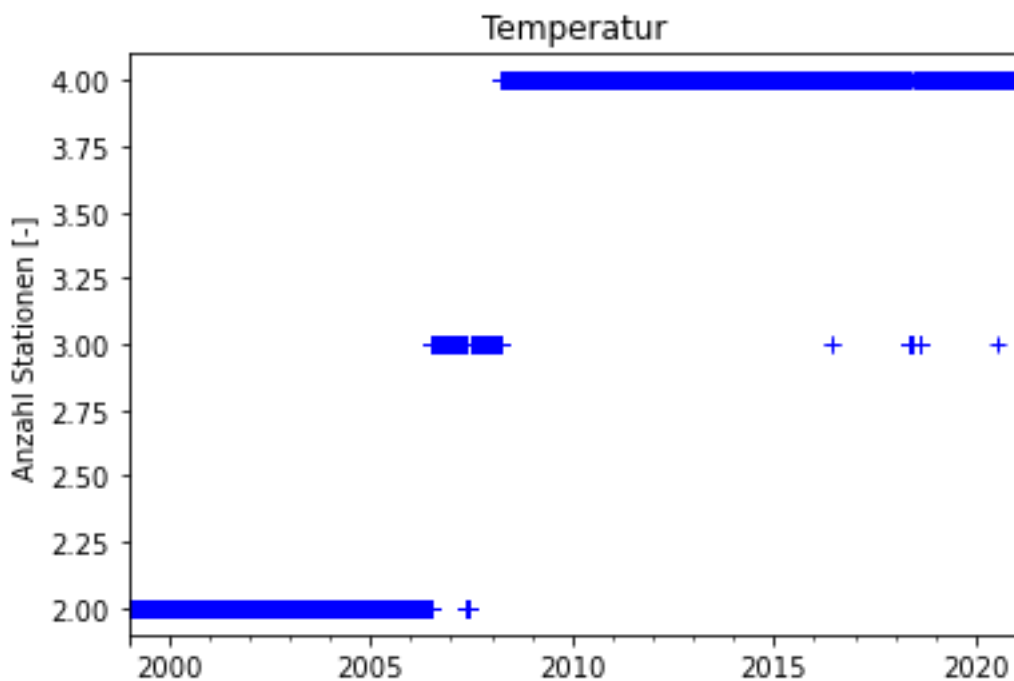


Abbildung 2.3: Datenverfügbarkeit des Parameters Temperatur (Stundenwerte)

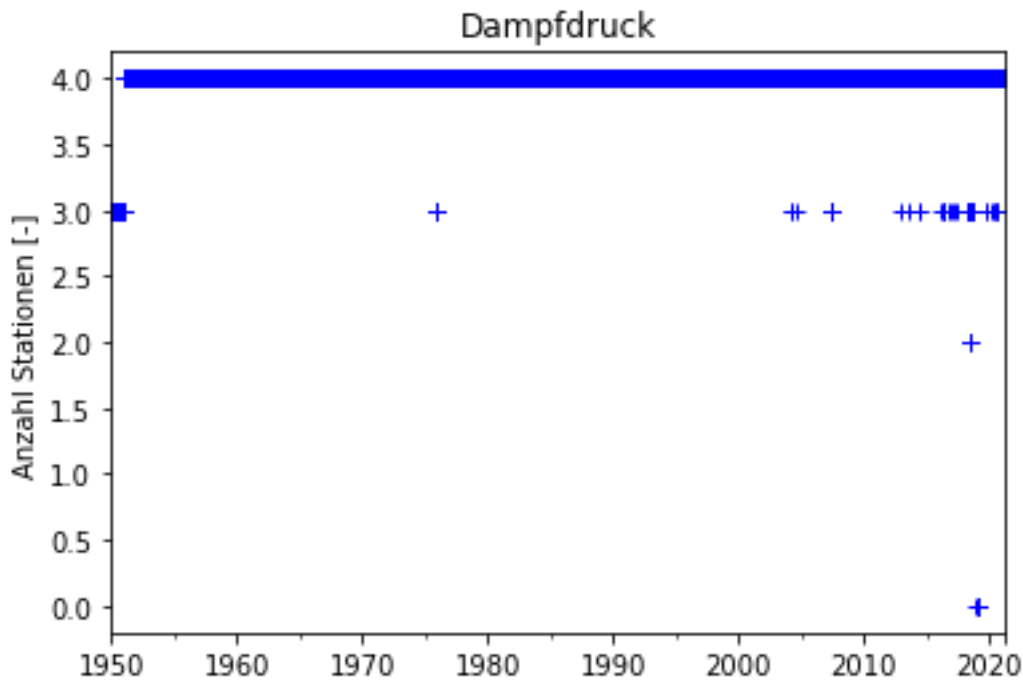


Abbildung 2.4: Datenverfügbarkeit des Parameters Dampfdruck (Tageswerte)

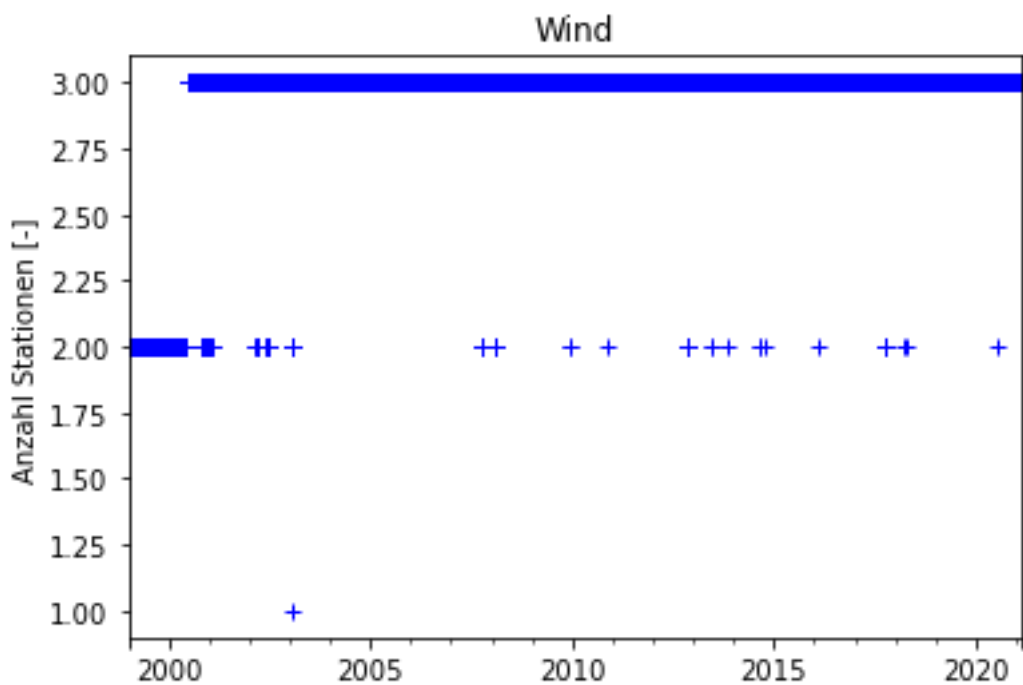


Abbildung 2.5: Datenverfügbarkeit des Parameters Wind (Stundenwerte)

2.2 Windkorrektur

Der Wind nimmt mit zunehmender Höhe über Gelände zu. Da Windmesser an den Messstationen in unterschiedlicher Höhe angebracht sind, müssen die gemessenen

Geschwindigkeit vor der Interpolation auf eine einheitliche Höhe gebracht werden. Dies erfolgt nach Schulla (1997) (basierend auf dem Prandtl'schen Gesetz) mit folgender Formel:

$$v_{2m} = v_{mess} \cdot \frac{2.996}{\ln\left(\frac{z_{mess}}{0.1}\right)}$$

Mit:

v_{mess} , z_{mess} : Gemessene Windgeschwindigkeit und Höhe des Windmessers

Abbildung 2.6 stellt den gemessenen Wind beispielhaft an der Messstelle 01550 in Messhöhe sowie nach der Prandtl-Korrektur in 2 m Höhe dar.

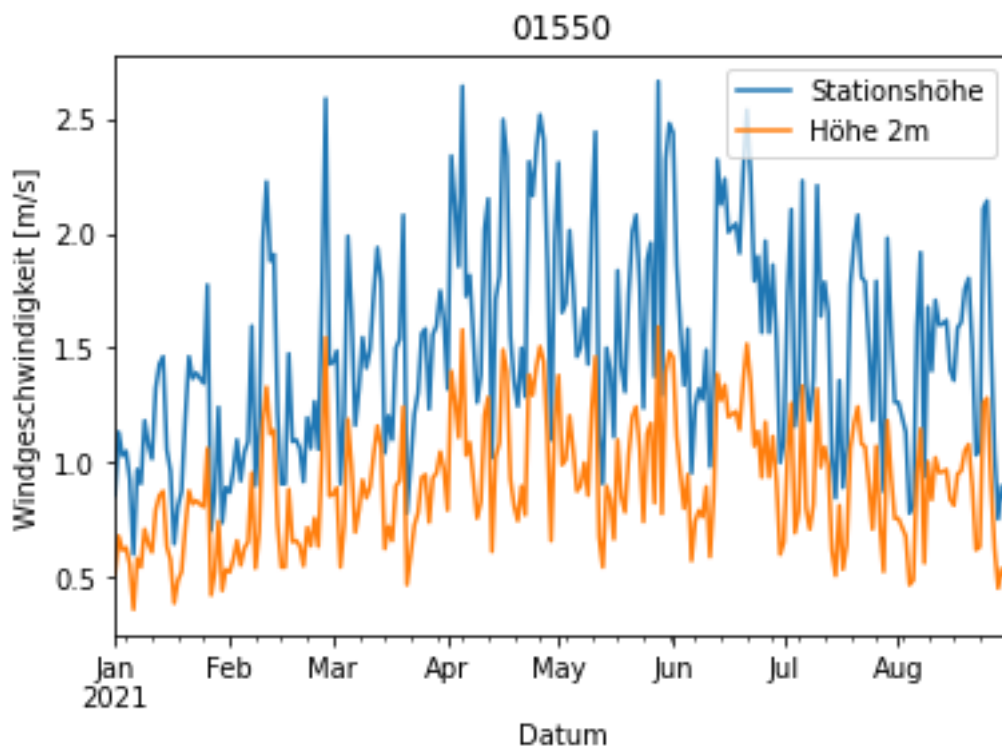


Abbildung 2.6: Windkorrektur an der DWD-Station 1550 (Tagesmittelwerte)

2.3 Wasseräquivalent der Schneehöhe

Für die Kalibrierung des Schneemoduls wird das an zwei DWD-Stationen gemessene Wasseräquivalent der Schneehöhe verwendet (Stationen 2708 und 3307 mit Messdaten im Zeitraum ab 2016). Die Lage der Stationen ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

Ein qualitativer Abgleich der räumlichen Verteilung erfolgt mit Sentinel-Satellitendaten.

2.4 *Interpolation von Messungen an Stationen*

Für die Interpolation von Klimadaten werden je nach Parameter unterschiedliche Interpolationsverfahren angewandt:

- Temperatur: Höhenabhängige Interpolation
- Dampfdruck: Verfahren nach Armbruster (2002), s.u.
- Windgeschwindigkeit: Höhenabhängige Interpolation
- Sonnenscheindauer: Inverse-Distanz-Interpolation

Für die Temperatur-Interpolation ist auch das Verfahren nach Armbruster (2002) vorstellbar. In diesem Fall wurde auf eine höhenabhängige Interpolation zurückgegriffen, da im Modellgebiet eine sehr ausgeprägte Geländemorphologie vorliegt.

Das Verfahren nach Armbruster (2002) berücksichtigt die Lage (klassische IDW-Interpolation) und eine ggf. vorliegende Höhenabhängigkeit der Messdaten.

Zunächst wird tagesweise eine lineare Regression zwischen Stationshöhe und dem gemessenen Parameter durchgeführt (Voraussetzung: Parameter wurde an mindestens 3 Stationen gemessen):

- Besteht eine große Höhenabhängigkeit ($R^2 > 0,8$) wird der Parameter nur aus der Geländehöhe abgeleitet
- Besteht eine geringe Höhenabhängigkeit ($R^2 < 0,3$) wird der Parameter nur über Inverse-Distanz interpoliert
- Im Übergangsbereich ($0,3 < R^2 < 0,8$) wird in Abhängigkeit von R^2 aus beiden Datensätzen eine flächige Verteilung berechnet

Aufgrund der großen Höhenunterschiede im Modellgebiet wurde für die Temperatur eine rein höhenabhängige Interpolation gewählt, obwohl z.B. in GWN-BW (GIT HydroS Consult GmbH, 2012) das Verfahren nach Armbruster als Default-Einstellung hinterlegt ist.

Die Berechnung erfolgt auf einem 50 m-Raster um Einflüsse der Geländemorphologie detailliert abbilden zu können.

2.5 *Berücksichtigung der Geländemorphologie in der Strahlungsberechnung*

Im Modellgebiet kommt es durch die ausgeprägte Geländemorphologie zu Abschattungen. Die Abschattung wird mit dem Plugin „Sunmask“ im Geoinformationssystem QGIS (QGIS.org, 2020) berechnet und zur Anpassung des Rasters der stündlichen Sonnenscheindauer verwendet. Abbildung 2.7 zeigt einen Vergleich zwischen dem Sentinel 2 Satellitenbild am 22.1.2019 (Agricultural color map) und dem mit QGIS berechneten Schattenwurf der Berge. Die Ergebnisse des

„Sunmask“-Plugins sind zu allen betrachteten Zeitpunkten plausibel (weitere Zeitpunkte werden nicht dargestellt).

Weiterhin ist die Netto-Strahlung in der Verdunstungsberechnung abhängig von der Geländeneigung, die zu einer Minderung oder Erhöhung der Netto-Strahlung führen kann. Diese Faktoren werden mit dem ESRI Solar Radiation aus der Spatial Analyst Extension von ArcGIS errechnet.

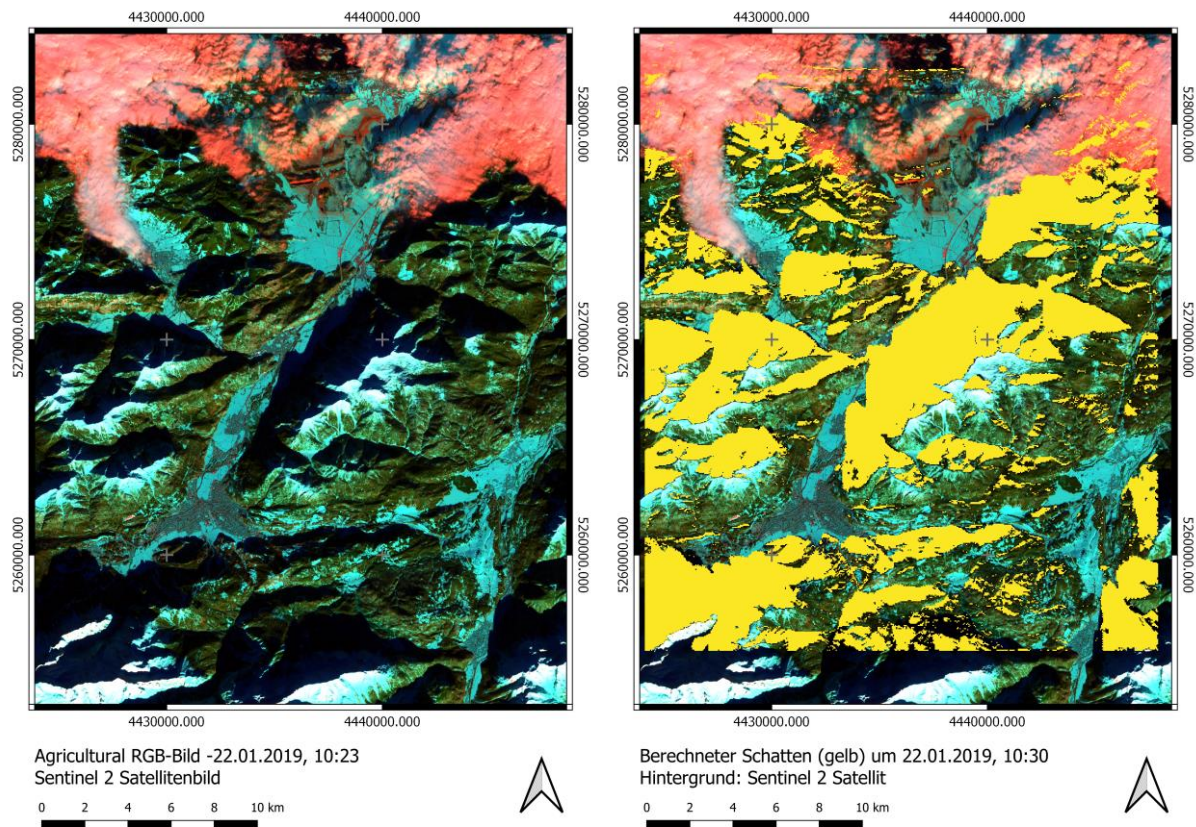


Abbildung 2.7: Vergleich zwischen Schattenwurf im Sentinel 2 Satellitenbild und berechneter Schattenwurf

2.6 Niederschlag

Der DWD stellt auf seiner Homepage räumlich interpolierte Niederschlagsdaten auf Tagesbasis zur Verfügung. Diese regionalisierten Niederschlagsrasterdatensätze (REGNIE) liegen auf einem etwa 1 km-Raster vor. In diesen Datensatz gehen alle haupt- und nebenamtlichen Stationen des DWDs sowie weitere Länderstationen ein. Weil Daten an Stationen nur in unterschiedlichen Zeiträumen vorliegen, schwankt die Anzahl der im Rasterdatensatz berücksichtigten Stationen von Jahr zu Jahr. Im Jahr 2011 wurden für die Generierung der Rasterdatensätze etwa 2000 Stationen verwendet.

Für die räumliche Interpolation der Niederschlagsdaten werden des Weiteren Höheninformationen benötigt, diese gewinnt der DWD aus der Höhenrasterdatei vom Amt für Geoinformationswesen der Bundeswehr (DHM M475).

Das Verfahren zur Generierung der REGNIE-Datensätze umfasst folgende Schritte (und Teilschritte):

- Qualitätsprüfung der Grundlagendaten: In diesem Schritt werden u.a. Daten auf Vollständigkeit und Konsistenz geprüft. Beanstandete Daten werden ggf. von einem Bearbeiter gelöscht, korrigiert oder bei Plausibilität beibehalten.
- Interpolationsfelder: „Das Regionalisierungsverfahren REGNIE zur Regionalisierung von beobachteten täglichen Niederschlagshöhen basiert im Wesentlichen auf der Interpolation von Anomalien in Bezug auf langjährige Mittelwerte und besteht aus zwei Teilschritten“:
 - Berechnung der Hintergrundfelder: Dieser Teilschritt basiert auf einer multiplen linearen Regression der Niederschlagsdaten, die verschiedene Einflussgrößen (Lagedaten und Exposition) berücksichtigt.
 - Berechnung der Niederschlagsfelder: Dieser Teilschritt berechnet aus dem Hintergrundfeld und den mit Stationen besetzten Rasterpunkten Niederschlagswerte für jeden Rasterpunkt.

In Abbildung 2.8 werden exemplarisch Niederschlagsdaten der DWD Station Garmisch-Partenkirchen mit der räumlich nächsten Rasterzelle des REGNIE-Rasters auf Tagesbasis verglichen. Die Niederschläge des REGNIE-Datensatzes entsprechen überwiegend den Stationsdaten. Zum Teil werden jedoch Niederschlagswerte während der Generierung angepasst, dies zeigt sich z.B. in leicht abweichenden Maximalniederschlägen.

Abbildung 2.9 zeigt die räumliche Verteilung des Niederschlags exemplarisch für das Jahr 2020 bezogen auf die Elementarflächen. Die Auswertung zeigt deutlich die Höhenabhängigkeit des Niederschlags.

Da die Berechnung des Bodenwasserhaushaltsmodell auf Stundenbasis erfolgen soll, werden die als Tageswerte vorliegenden REGNIE-Niederschläge mit stündlichen Niederschlagsmessungen der DWD-Station Garmisch-Partenkirchen und der Niederschlagsmessungen am Brunnen 4 moduliert. Fällt z.B. der gesamte Tagesniederschlag am Brunnen 4 zwischen 12 und 13 Uhr wird der gesamte REGNIE-Tagesniederschlag in dieser Stunde angesetzt.

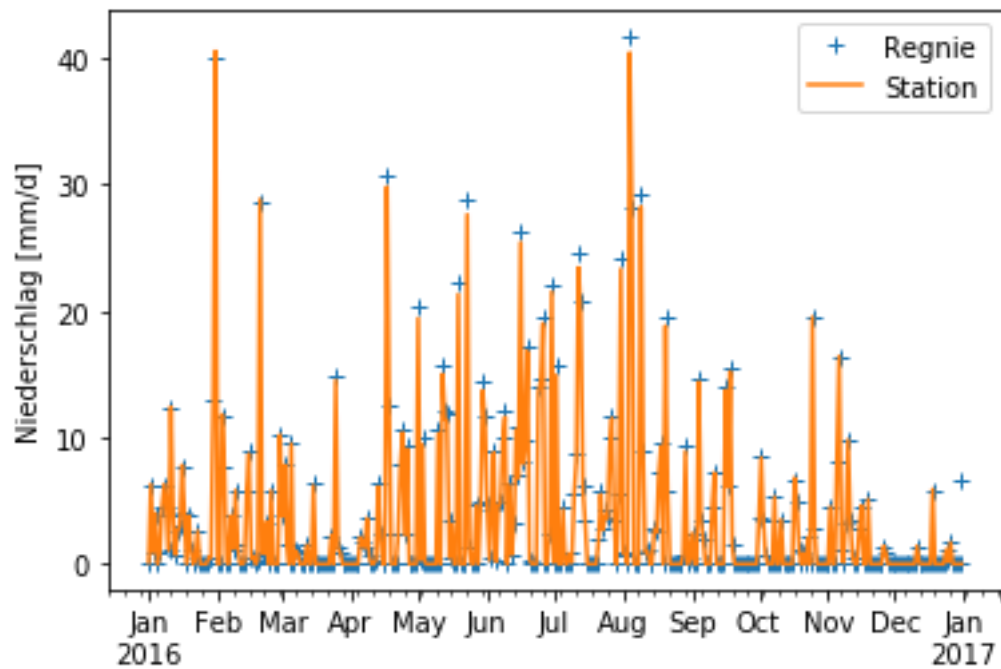


Abbildung 2.8: Vergleich zwischen gemessenem täglichem Niederschlag an der DWD Station Garmisch-Partenkirchen (ID 1550) sowie an der räumlich zugehörigen REGNIE Rasterzelle.

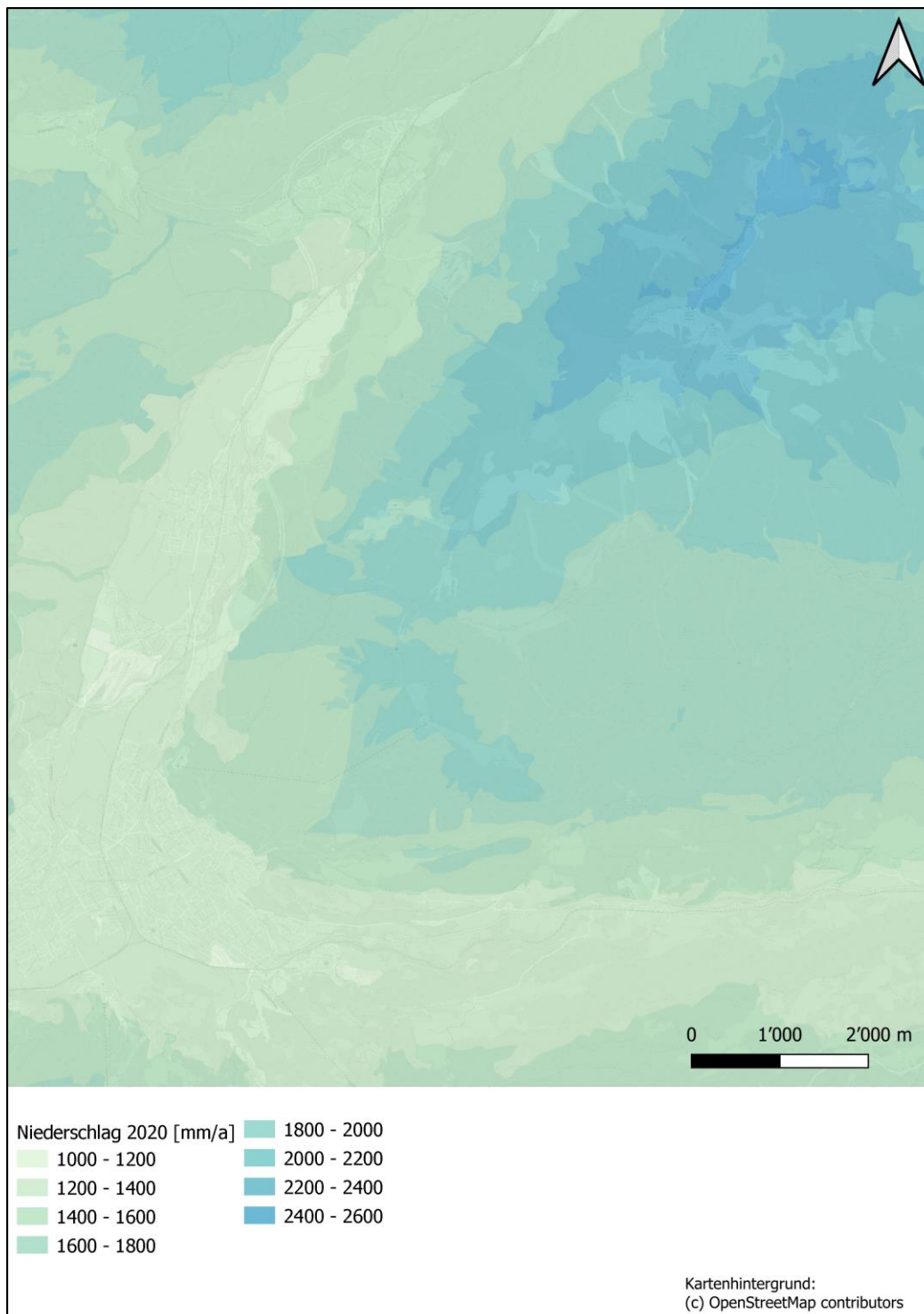


Abbildung 2.9: Räumliche Verteilung des Niederschlags im Jahr 2020.

2.7 Landnutzung

Nach dem Regelwerk ATV-DWK (2002) können Landnutzungen dem europaweit vorliegenden CORINE-Datensatz (Umweltbundesamt, 2012) entnommen werden. Die räumliche Verteilung der im Betrachtungsraum vorkommenden Landnutzungsklassen

des Corine-Datensatzes ist in Abbildung 2.10 dargestellt. Zur besseren Übersichtlichkeit der Landnutzungen wurden die Landnutzungsarten gruppiert. In Abstimmung mit dem Büro NRT wurden die Nutzungen auf etwa 20 Elementarflächen angepasst. Je Landnutzung werden individuelle Parameter zur Verdunstungsberechnung vorgegeben.

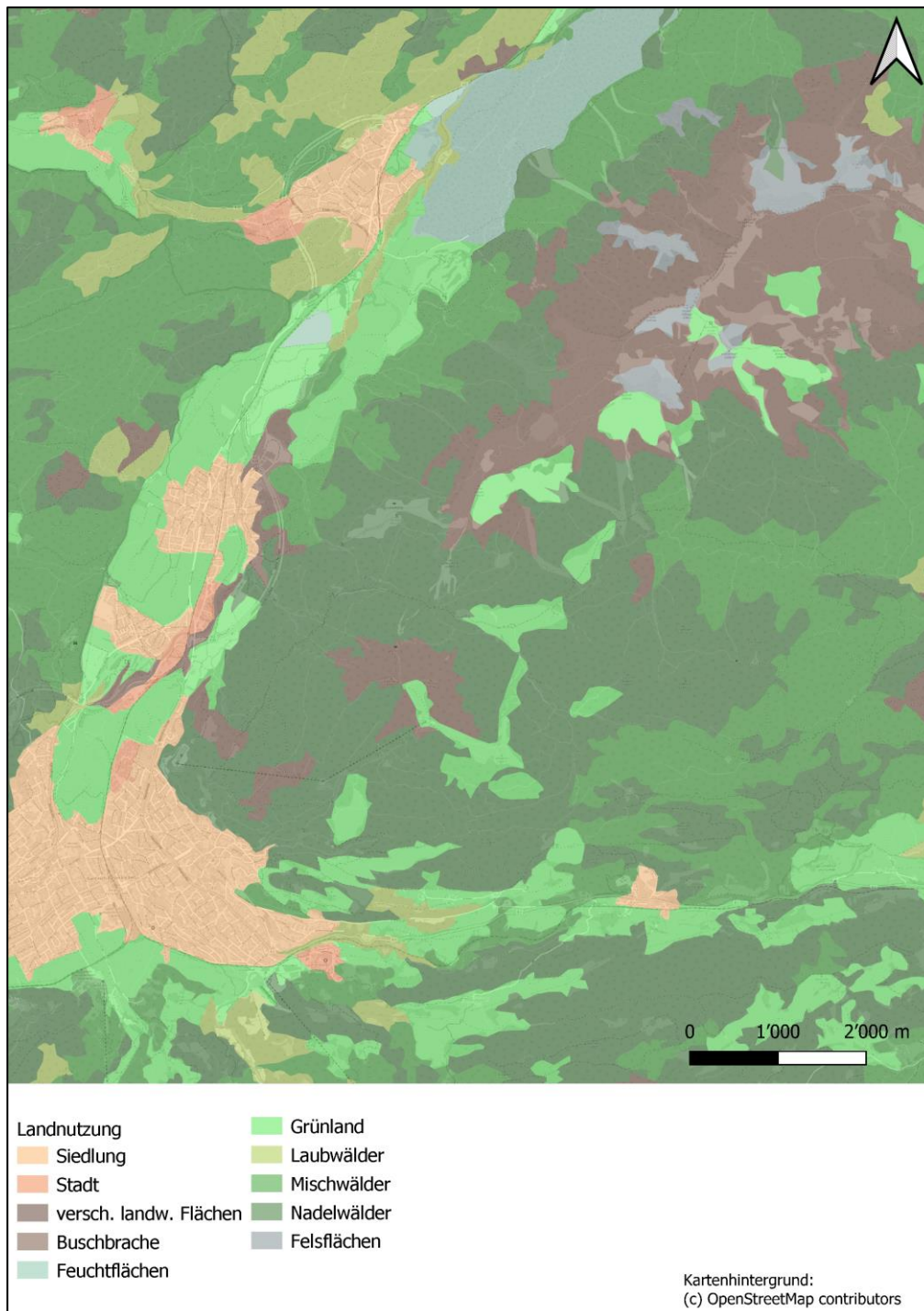
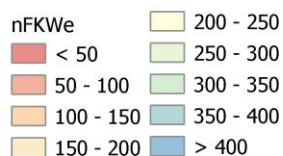
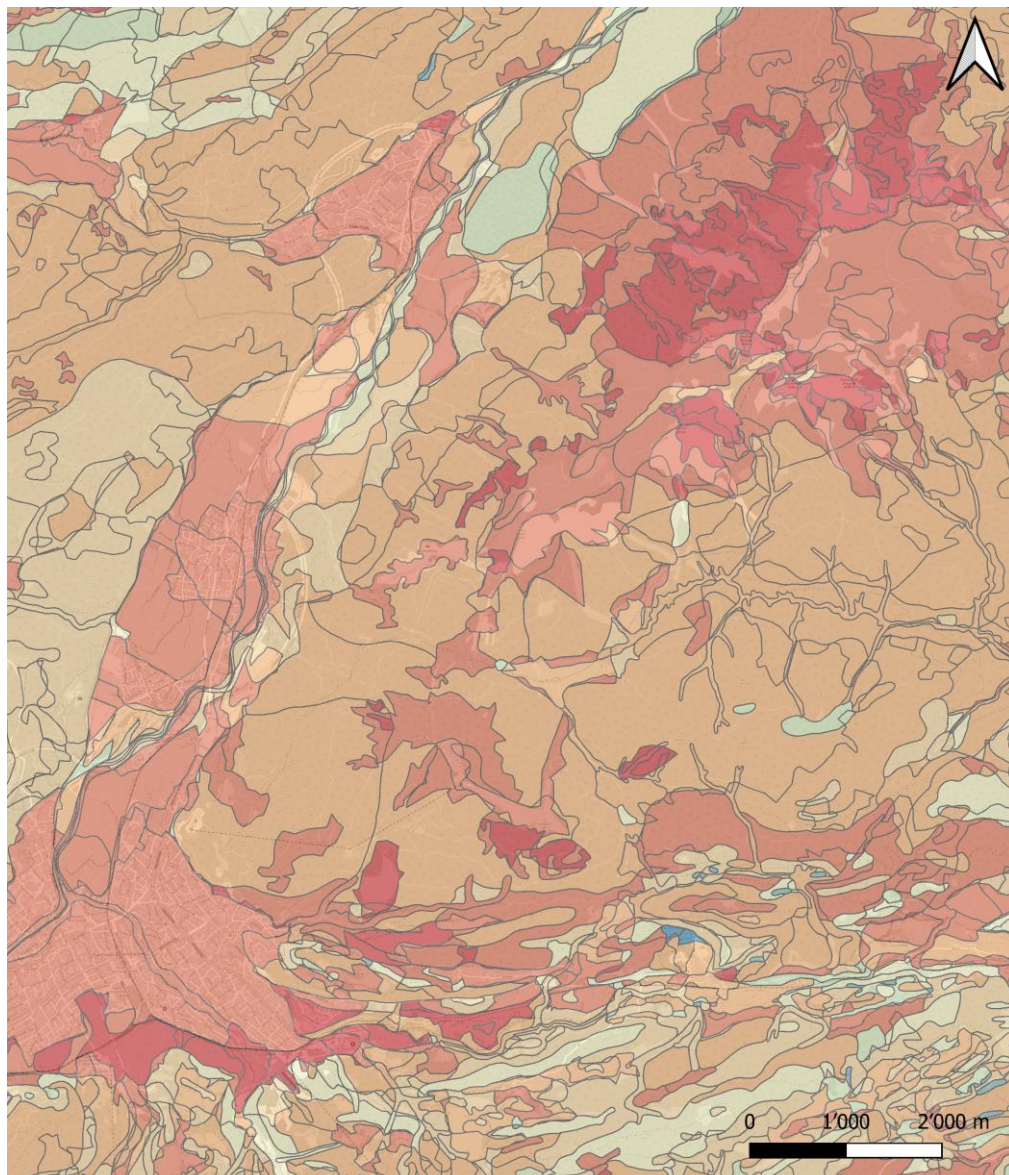


Abbildung 2.10: Landnutzungsklassen im Betrachtungsraum aus dem CORINE-Datensatz.

2.8 Nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums

Die nutzbare Feldkapazität des effektiven Wurzelraums (nFKWe) wurde im Umfeld des Modellgebiets vom LfU zur Verfügung gestellt (LfU, 2019). Der mittlere nFKWe-Wert beträgt im Umfeld des Modellgebiets 128 mm und variiert zwischen 0 und 427 mm.



Kartenhintergrund:
(c) OpenStreetMap contributors

Abbildung 2.11: Verteilung der nFKWe-Werte im Umfeld des Modellgebiets.

2.9 Weitere Datengrundlagen

Tabelle 2.1 zeigt weitere im Modell verwendete Datensätze.

Tabelle 2.1: Verwendete Datensätze

Datensatz		Innerhalb Modellgebiet
Höhenmodell		10x10m Raster
Einzugsgebiete Gerinne	und	Einzugsgebiete 1:25.000 (LfU, 2016)

3 Hydrologisches Modell

3.1 Zweck des Modells

Generell werden in den Einzugsgebieten folgende Abflusskomponenten betrachtet:

- Oberflächenabfluss: Der Oberflächenabfluss umfasst den Direktabfluss und den Basisabfluss aus den Einzugsgebieten. Der Basisabfluss wird aus den lokalen Grundwasservorkommen gespeist, verlässt das Einzugsgebiet jedoch oberirdisch in den Gerinnen.
- Grundwasserneubildung: Die Grundwasserneubildung umfasst das Wasser, das in tiefere Grundwasserschichten vordringt und das Einzugsgebiet ausschließlich unterirdisch verlässt. Wasser, das zwar in die Grundwasseraquifere der Einzugsgebiete infiltriert, diese aber als Basisabfluss verlässt, wird im Modell nicht als Grundwasserneubildung gewertet.

Das vorliegende Modell hat den Charakter eines Bilanzmodells dessen primärer Zweck die langfristige Bilanzierung der Wasserumsätze im Einzugsgebiet ist. Daher kommt es nicht auf eine genaue Nachbildung von Abflussspitzen an. Generell werden nur Tageswerte des Abflusses als Vergleichs- und Kalibriergröße herangezogen.

Die im Bilanzmodell ermittelte Grundwasserneubildung bildet die wichtigste Randbedingung des Grundwassermodells Wankmassiv (kup, 2023-2). Ferner dient der ermittelte mittlere Abfluss der Gewässer als Grundlage für quantitative Abschätzungen im Fachbeitrag Wasserrahmenrichtlinie (kup, 2023-1).

3.2 Modellaufbau

3.2.1 Abgrenzung der Einzugsgebiete

Grundlage für die die Abrenzung des Modellgebietes und die Berechnungen bilden die amtlichen Einzugsgebiete des LfUs.

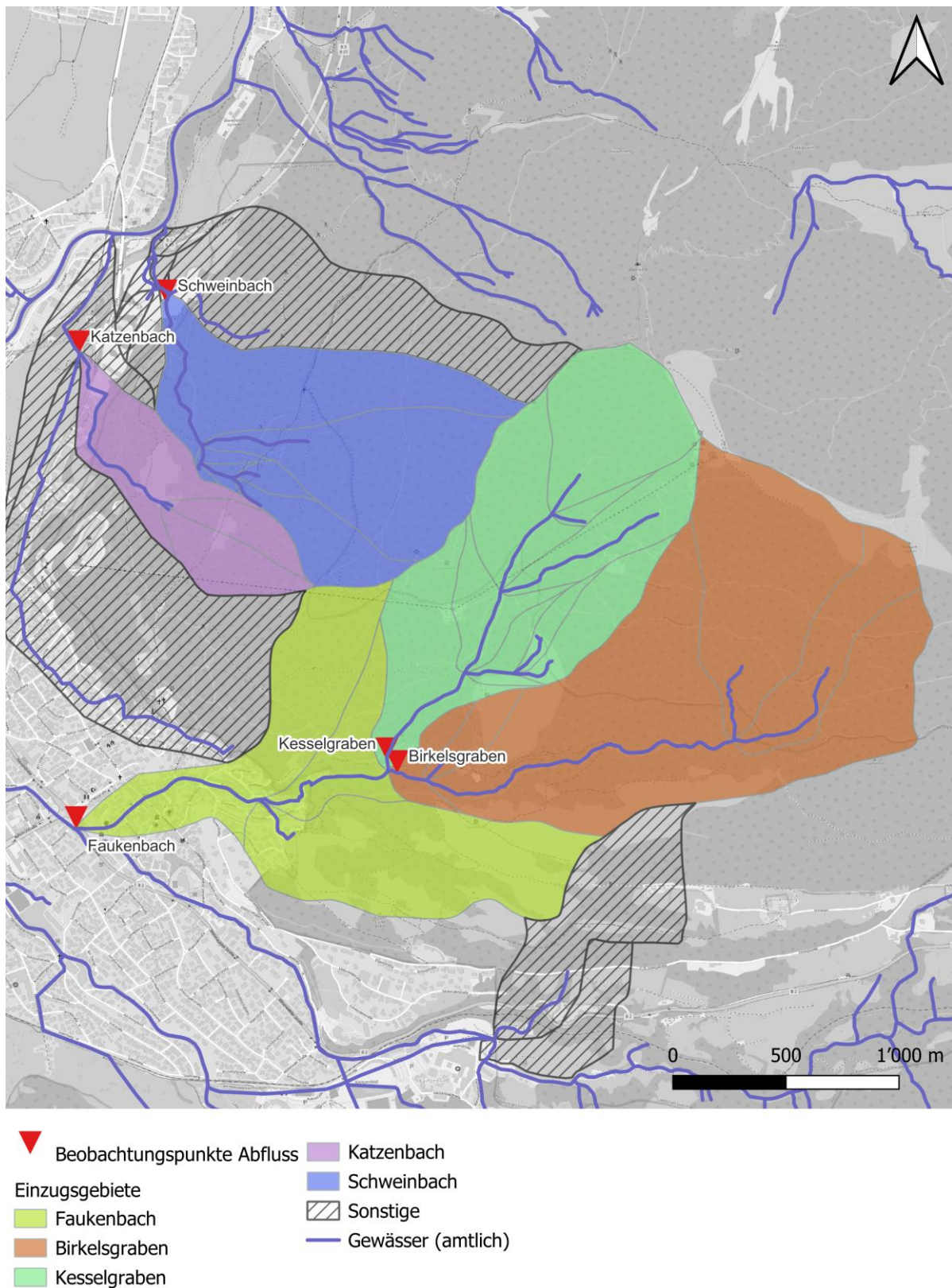
Eine Übersicht über alle relevanten Einzugsgebiete im Modellgebiet gibt Abbildung 3.1. Das Einzugsgebiet Birkelsgraben liegt zum überwiegenden Teil in den Raibler Schichten. Das Einzugsgebiet des Faukenbachs umfasst auch die Einzugsgebiete des Birkelsgrabens und des Kesselgrabens. Für die dargestellten Beobachtungspunkte werden Abflussganglinien berechnet. Die Flächen der Einzugsgebiete sind Tabelle 3.1 zu entnehmen.

In diesen Einzugsgebieten liegen keine kontinuierlichen Messungen von Abflüssen an Gewässern vor. Für die Kalibrierung des Hydrologischen Modells werden deshalb die im nahen Umfeld des Modellgebietes gelegenen Einzugsgebiete der Pegel Kanker und

Lahnwiesgraben herangezogen. Die Einzugsgebiete dieser Abflussmessstellen werden in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Parametrisierungen aus diesen Einzugsgebieten mit Messdaten werden auf die Einzugsgebiete des Wankmassivs übertragen.

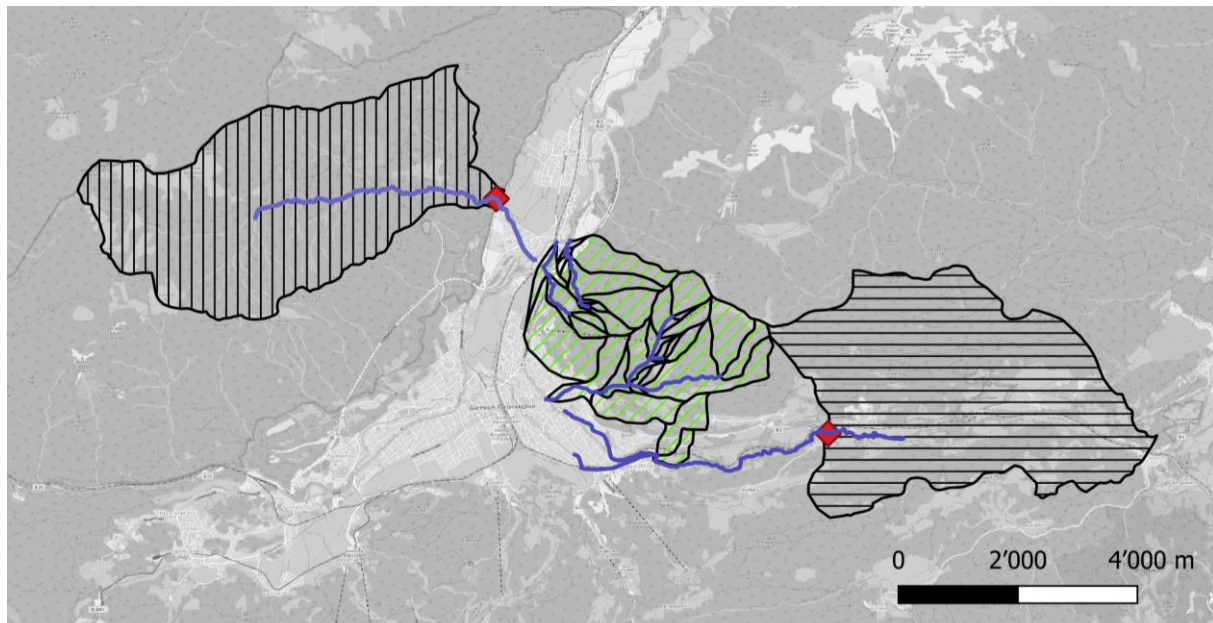
Tabelle 3.1: Fläche der Einzugsgebiete des hydrologischen Modells

Einzugsgebiet	Fläche [km²]
Schweinbach	1.18
Faukenbach	4.88
davon Birkelsgraben	2.17
davon Kesselgraben	1.43
Katzenbach	0.45
Summe	6.51



© OpenStreetMap Contributors, 2023

Abbildung 3.1: Einzugsgebiete im Modell



Modell

- Fließgewässer
- ◆ Abflussmessstellen
- ▨ Einzugsgebiete Tunnelstrecke
- ▤ EZG Pegel Kankerbach
- ▥ EZG Pegel Lahnenwiesgraben

Abbildung 3.2: Einzugsgebiete der Pegel Lahnwiesgraben und Kanker für die Kalibrierung des Modells.

3.2.2 Modellsoftware

Für die Modellierung der Einzugsgebiete wird die Modellsoftware HechHMS in der Version 4.9 verwendet.

3.2.3 Beschreibung des Modells

Umsetzung der Einzugsgebiete in HechHMS

Abbildung 3.3 zeigt das Einzugsgebiet sowie die Unterteilung in Teileinzugsgebiete am Beispiel des Lahnenwiesgrabens, da dieser für die Kalibrierung verwendet wurde. Der Lahnenwiesgraben besteht aus 5 Teileinzugsgebieten sowie einem Hauptsammler (Gerinne). Abbildung 3.4 zeigt die Umsetzung in HechHMS. Abfluss wird in den Teileinzugsgebieten gebildet und in die Gerinne eingespeist. Einige Berechnungsroutinen erfordern eine Unterteilung der Teileinzugsgebiete (Diskretisierung). Diese ist in Form eines regelmäßigen Rasters umgesetzt (s. Abbildung).

Im Folgenden wird die Abflussgenerierung auf Teileinzugsgebietsebene sowie die Wellenverformung in den Gerinnen erläutert.

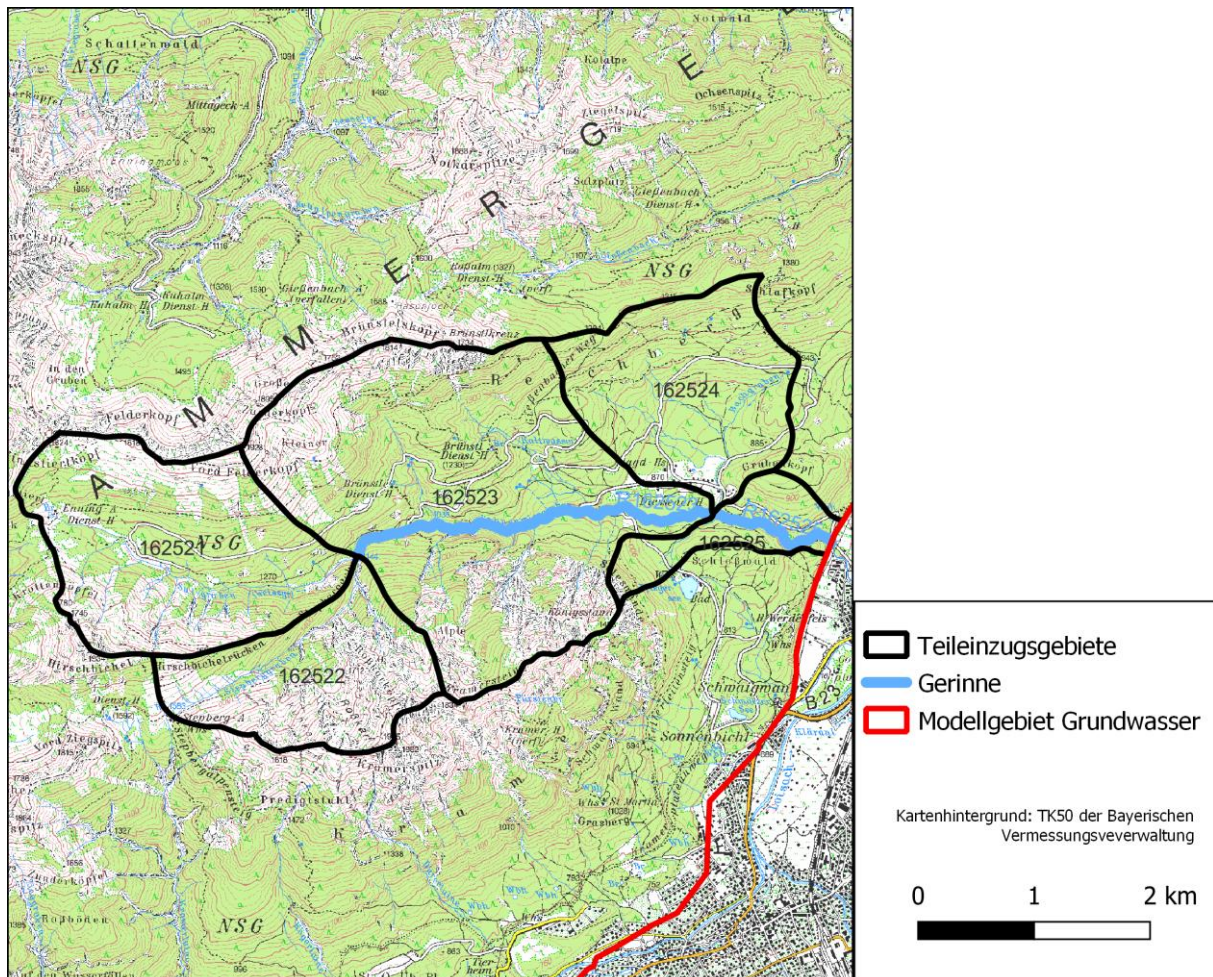


Abbildung 3.3: Einzugsgebiet des Lahnenwiesgrabens

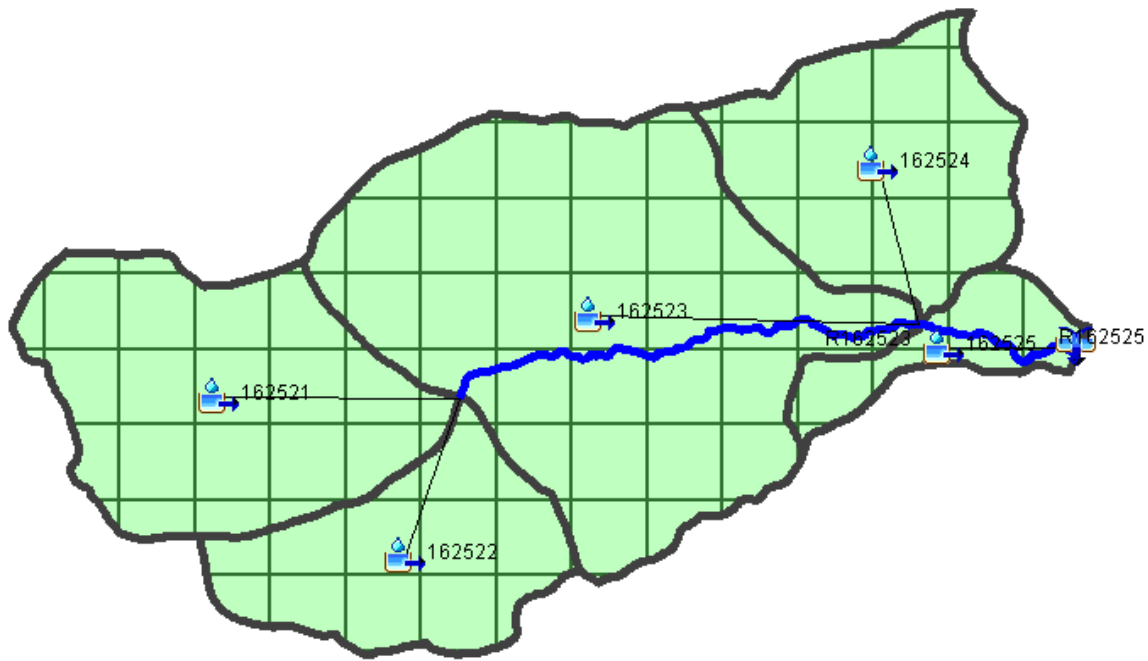


Abbildung 3.4: Umsetzung des Einzugsgebiets Lahnenwiesgraben in HechHMS

Simulation der Teileinzugsgebiete

Die Simulation der Abflussbildung auf Teileinzugsgebietsebene wird in Abbildung 3.5 schematisch dargestellt. Im Folgenden erfolgt die Erläuterung zu den einzelnen Schritten. Niederschlag/Schmelzwasser sowie die potenzielle Evapotranspiration werden aus dem Sickerwassermodell entnommen und als Randbedingungen im Modell angesetzt.

Benetzungsspeicher

Der Benetzungsspeicher wird durch Niederschlagsereignisse gefüllt. Abgebaut wird der Benetzungsspeicher durch die Evapotranspiration. Diese wird aus dem Sickerwassermodell entnommen.

Soil Moisture Accounting

Ist die Aufnahmekapazität des Benetzungsspeicher ausgeschöpft kommt es zur Infiltration in den Bodenspeicher.

Dies wird mit der Komponente Soil-Moisture-Accounting (SMA) nachgebildet. Da der Bodenspeicher in Form des nFKWe-Werts als Raster vorliegen, wird die Variante „Gridded SMA“ gewählt. Das heißt, jedes TE wird zunächst auf einem 500 m-Raster diskretisiert. Für jedes Rasterelement wird ein getrenntes SMA berechnet.

Der Bodenspeicher ist zusätzlich unterteilt in den Tension Storage und Upper Zone Storage. Die Verdunstung wirkt auf das Wasser in beiden Teilspeichern, während eine

tieferer Versickerung nur aus dem Upper Zone Storage erfolgen kann. Wird die maximale Aufnahmekapazität des Bodenspeichers überschritten (max. Infiltrationsrate in den Bodenspeicher oder der Bodenspeicher ist gesättigt) entsteht Direktabfluss.

Die tieferer Versickerung erfolgt in den Grundwasserspeicher 1 und den darunter liegenden Grundwasserspeicher 2. Dieser laterale Grundwasserabfluss (Summe Grundwasserspeicher 1 und 2) tritt als Basisabfluss an den Gewässern aus. Die tiefe Perkolations aus Grundwasserspeicher 2 beschreibt die Grundwasserneubildung. Grundwasserabfluss der als Basisabfluss zutage tritt, wird nicht zur Grundwasserneubildung hinzugerechnet.

Direktabfluss

Die Modellierung des Direktabflusses erfolgt mit der Methode „ModClark“. Hierfür ist eine Definition der Dauer bis zur Konzentration (Time of Concentration – h) sowie ein Speicherkoeffizient (Storage coefficient – h) der Abflusswelle zu definieren. Diese Werte werden auf den längsten Fließweg im TE angewendet. Für Rasterpunkte die sich näher am Gebietsauslass befinden, werden proportional zum kürzeren Fließweg Konzentrationsdauer und Speicherkoeffizient reduziert. Diese beiden Größen werden über die folgenden Formeln abgeschätzt:

$$T = LFL * \frac{1000}{3600} [h]$$

Mit:

T: Time of Concentration
LFL: Longest Flow Path im TE [km]

$$SC = LFL * 1000 * 3.28 * \frac{\left(\frac{1000}{CN} + 1\right)^{0.4}}{1140 * \frac{SLP^{0.5}}{10}}$$

Mit

SC: Storage Coefficient [h]
LFL: Longest Flow Path im TE [km]
CN: CN-Nummer (hier: 80)
SLP: Mittleres Gefälle im Teileinzugsgebiet [M/KM]

(Hydrologic Engineering Center, 2021)

Basisabfluss

Der Basisabfluss eines TEs wird aus dem lateralen Grundwasserfluss gebildet. Für die zeitliche Translation wird die Methode „Linear Reservoir“ verwendet.

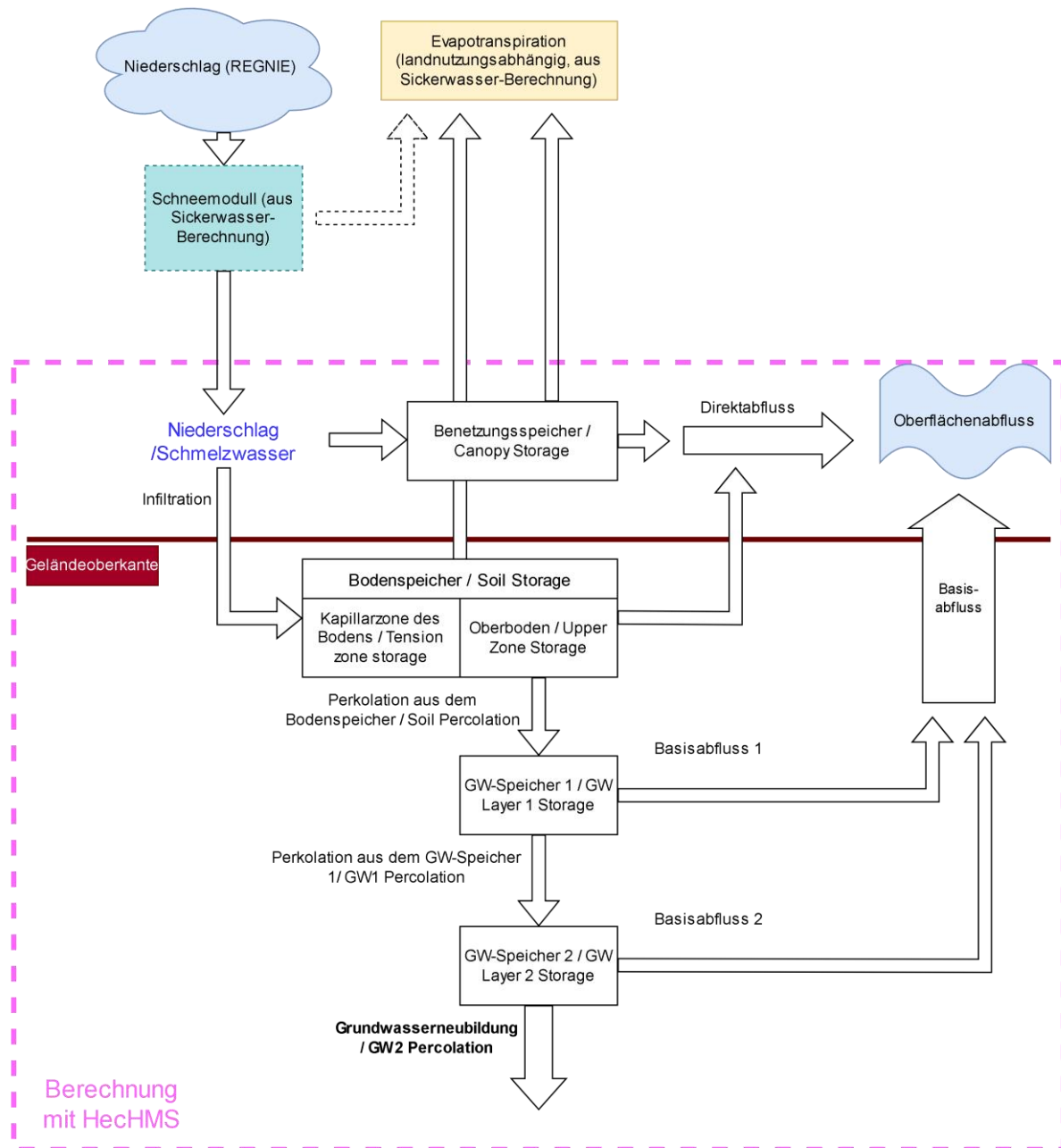


Abbildung 3.5: Schemaskizze zur Modellierung der Einzugsgebiete

Simulation der Gerinne

Die Modellierung der Wellenverformung in den Gerinnen wird mittels der Muskingum-Cunge-Methode umgesetzt, da diese Methode auch die Berücksichtigung eines Verlust durch Infiltration aus dem Gewässer ins Grundwasser in Abhängigkeit der benetzten Fläche erlaubt. Die Breite der Gewässer wird überwiegend auf 1 m angenommen. Ferner wird eine Neigung der Uferböschung von 45° angenommen, sodass sich die benetzte Fläche je nach Wasserstand etwas erhöht.

Da ein Vergleich von gemessenen und modellierten Abflussganglinien auf Tagesbasis erfolgt, ist keine hohe Genauigkeit der zeitlichen Translation in den Gerinnen erforderlich. Streng genommen könnte an den kleineren Gewässern auf eine Berücksichtigung der Gerinne ganz verzichtet werden.

3.3 Parametrisierung

Für die Einzugsgebietsmodellierung mit HechHMS muss eine Vielzahl von Parametern vorgegeben werden. Eine Übersicht über die im Modell verwendeten Parameter geben Tabelle 3.2 und Tabelle 3.3.

Für den Benetzungsspeicher (Canopy Storage) wird ein Wert von 3 mm angenommen.

Der nFKWe-Wert wird als Speicherkapazität des Bodens (Soil Capacity) übernommen (analog zur Sickerwasserberechnung am Talboden).

Gemäß dem Technical Reference Manual von HechHMS sind die beiden Parameter GW 1/2 Capacity Grid (Speicherkapazität) und GW1/2 Storage Coefficient Grid voneinander abhängig. Es wurden daher die Speicher der beiden GW Layer auf jeweils 200 mm festgelegt. Die Speicherkoeffizienten werden im Rahmen der Kalibrierung angepasst.

In den Gerinnen wird ein Mannings Rauigkeitsbeiwert von $0,035 \text{ s/m}^{1/3}$ angenommen. Die Infiltrationskapazität der Gerinne wird mit $0,003 \text{ m}^3/(\text{s} \cdot 1000 \text{ km}^2)$ belegt.

Die verbleibenden Parameter werden im Rahmen der Kalibrierung ermittelt.

Tabelle 3.2: Parameter für die Modellierung der Teileinzugsgebiete

HechHMS Modul	Parameter
Canopy / Simple Canopy	Canopy Storage Capacity
Loss / Soil Moisture Accounting (SMA)	Soil Capacity Grid
	Soil Infiltration Rate
	Soil Tension Zone Capacity
	Soil Percolation Rate
	Groundwater 1 Capacity
	Groundwater 1 Storage Coefficient
	Groundwater 1 Percolation Rate
	Groundwater 2 Capacity
	Groundwater 2 Storage Coefficient

	Groundwater 2 Percolation Rate
Baseflow / Linear Reservoir	GW-1 Baseflow Fraction
	GW-1 Number Reservoirs
	GW-1 Routing Coefficient
	GW-2 Baseflow Fraction
	GW-2 Number Reservoirs
	GW-2 Routing Coefficient
Transform / Modified Clark	Time of Concentration
	Storage Coefficient

Tabelle 3.3: Parameter für die Modellierung der Gerinne

HecHMS-Modul	
Route / Muskingum Cunge	Mannings n
	Channel Loss Percolation Rate

3.4 Abflussmessungen

In den Einzugsgebieten für die Kalibrierung des Modells liegen Messdaten der in Tabelle 3.4 aufgelisteten Abflussmessstellen vor. Die Messreihe des Lahnenwiesgrabens weist eine längere Datenlücke auf. Eine Freigabe von Daten im Zwischenzeitraum konnte beim Autor einer Dissertation zum Lahnenwiesgraben (Morche, 2008) nicht erreicht werden.

Tabelle 3.4: Übersicht Messdaten der Einzugsgebiete Kanker und Lahnenwiesgraben

Name	Von	Bis	Mittelwert [m³/s]	Quelle
Kanker / Warmberg	2013-12-11 15:59:00	2021-09-06 14:00:00	0.32	(LfU, 2021)
Lahnenwiesgraben / Burgrain	1982-11-01 00:00:00	2021-09-06 07:15:00	0.47	(WWA Weilheim, 2021)

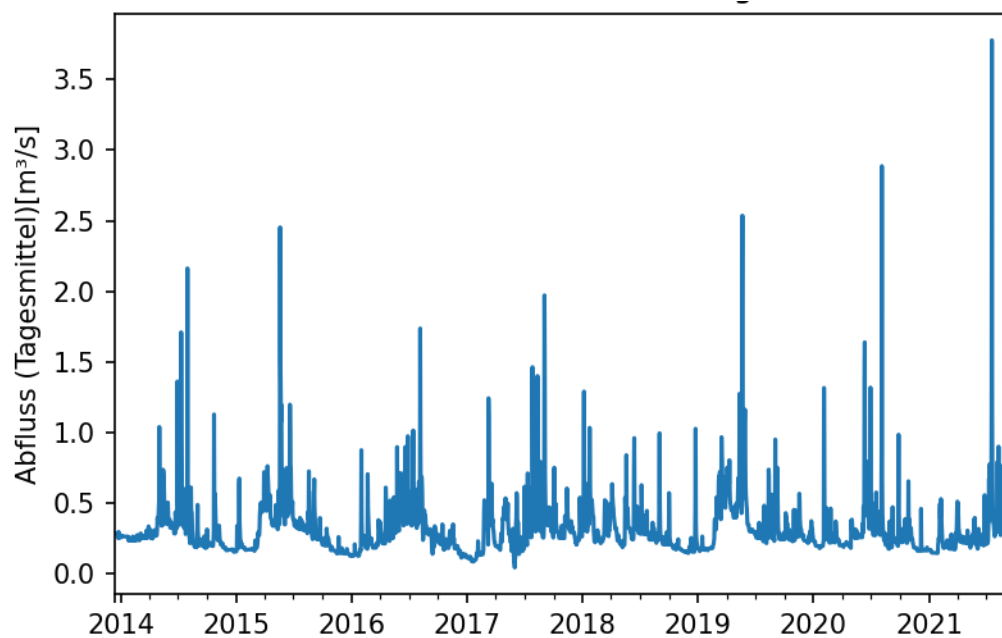


Abbildung 3.6: Abfluss am Kanker / Pegel Warmberg

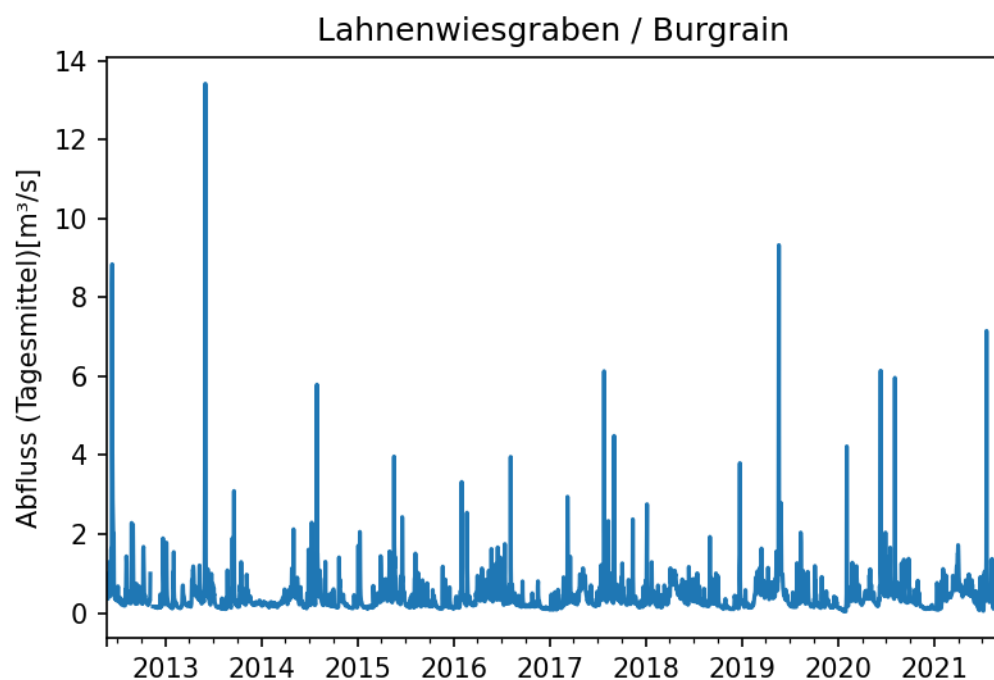


Abbildung 3.7: Abfluss am Lahnenwiesgraben / Pegel Burgrain

3.5 Randbedingungen

3.5.1 Potenzielle Verdunstung

Unter Verdunstung versteht man den Vorgang, bei dem Wasser bei Temperaturen unter dem Siedepunkt vom flüssigen oder festen Zustand in den gasförmigen (Wasserdampf) übergeht. Es werden mehrere Arten von Verdunstung unterschieden. Die Evaporation ist die Verdunstung vom unbewachsenen Boden und von freien Wasserflächen sowie die Verdunstung des auf der Pflanzenoberfläche zurückgehaltenen Niederschlags (Interzeption). Sie wird durch die Sonneneinstrahlung, die Lufttemperatur, die Windbewegung und die Luftfeuchte beeinflusst. Unter Transpiration versteht man die Verdunstung von Pflanzenoberflächen aufgrund biotischer Prozesse. Die Evapotranspiration beinhaltet die Summe von Evaporation und Transpiration. Sie wird durch die gleichen physikalischen Faktoren wie die Evaporation bestimmt, jedoch haben zusätzlich die Vegetation und die Speicherfähigkeit des Bodens einen Einfluss auf die Evapotranspiration.

Die Berechnung der Evapotranspiration basiert auf der nach Monteith erweiterten Formel von Penman („Penman-Monteith-Gleichung“, aus Armbruster, 2002):

$$\lambda \cdot E = \frac{\Delta \cdot (R_N - G) + \rho \cdot c_p \cdot \frac{e_s(T) - e}{r_a}}{\Delta + \gamma \cdot \left(1 + \frac{r_s}{r_a}\right)} \text{ [kJ/m}^2\text{]}$$

Mit:

λ = latente Verdunstungsenthalpie des Wassers [J/kg],

E = Wasserdampffluss [kg/m²/s],

Δ = Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve [hPa/K],

R_N = Nettostrahlung [J/m²/s],

G = Bodenwärmefluss [J/m²/s] (pauschal 0,01 R_N),

ρ = Luftdichte [kg/m³],

c_p = spezifische Wärme der Luft (1005 J/kg/K),

$e_s(T)$ = Sättigungsdampfdruck bei der Temperatur T [hPa],

e = aktueller Dampfdruck [hPa],

γ = Psychrometerkonstante [hPa/K],

r_a = aerodynamischer Widerstand [s/m]

r_c = Bestandswiderstand [s/m].

Die Ableitung der o.g. Größen kann Schulla (1997) und Armbruster (2002) entnommen werden.

Die Nettostrahlung R_N wird aus folgender Strahlungsbilanz errechnet:

$$R_n = (1 - \alpha) \cdot R_G - R_L$$

Mit:

R_G = Globalstrahlung [Whm²]

α = Albedo [-] (landnutzungsabhängiger Parameter, Anhang A)

R_L = langwellige Strahlung [Whm²]

Hierbei errechnet sich die Globalstrahlung (nach ATV-DVWK M504) aus der Sonnenscheindauer. Beim Albedo α handelt es sich um einen landnutzungsabhängigen Parameter.

Die langwellige Strahlung ist die z.B. an der Wolkendecke reflektierte Strahlung und wird mithilfe der folgenden Formel errechnet:

$$R_L = \Delta t \cdot \sigma T^4 \cdot (0,48 - 0.065\sqrt{e}) \cdot (cr_0 + (1 - cr_0) \cdot S_R)$$

Mit:

Δt = Zeitschrittweite [h]

σ = Boltzmann-Konstante (5.67 10⁻⁸ W/m²/K⁴)

T = Temperatur [°C] (Messwert)

e = aktueller Dampfdruck [mbar] (Messwert)

cr_0 = empirischer Parameter (0,23)

S_r = relative Sonnenscheindauer, entspricht dem Quotient von gemessener Sonnenscheindauer und maximal möglicher Sonnenscheindauer. Annahmen zur Ermittlung der maximal möglichen Sonnenscheindauer sind ATV-DVWK M504 zu entnehmen.

Ferner berücksichtigt die Penman-Monteith-Gleichung den aerodynamischen Widerstand r_a und den Bestandswiderstand r_c , hierbei handelt es sich um landnutzungsabhängige Größen. Der aerodynamische Widerstand ist wie folgt definiert:

$$r_a = \frac{4.72 \cdot \left(\ln \frac{z}{z_0}\right)^2}{1 + 0.54u} \text{ [s/m]}$$

Mit:

Z = Höhe über Grund, in welcher die Windgeschwindigkeit gemessen wird (2 m) [m]

Z_0 = aerodynamische Rauigkeitslänge als Parameter für jede Landnutzungsform

U = Windgeschwindigkeit [m/s]

Für den minimalen Oberflächenwiderstand r_s gilt am hellen Tag:

$$\frac{1}{r_s} = \frac{\gamma}{r_{sc}} + \frac{1-\gamma}{r_{ss}}$$

Mit:

r_s = minimaler Oberflächenwiderstand [s/m]

r_{sc} = minimaler Oberflächenwiderstand der Pflanze bei voller Wasserversorgung und dichtem Bewuchs [s/m]

r_{ss} = Oberflächenwiderstand für unbewachsenen Boden (150 s/m)

γ = verdunstungswirksame Vegetationsbedeckung

Die Parameter r_{sc} und z_0 sind landnutzungsabhängig. Die Parametrisierung kann Anhang A entnommen werden.

3.5.2 Berechnung der Schneedecke

Das Schneemodul bildet den Aufbau der Schneedecke durch Schneefall, sowie dessen Abbau durch Evapotranspiration und Schmelze ab. Hierzu wird das in Armbruster (2002) vorgestellte Verfahren weitgehend übernommen. Oberhalb einer Grenztemperatur von 1,6°C fällt der gesamte Niederschlag als Regen, während unterhalb einer Temperatur von -0,4°C der gesamte Niederschlag als Schnee fällt. Im Übergangsbereich zwischen -0,4 und 1,6°C wird der Niederschlag gemäß folgender Formel auf Regen und Schnee verteilt:

$$A_{Schnee} = \frac{1,6-T}{2} \text{ bzw. } A_{Regen} = 1 - \frac{1,6-T}{2}$$

Mit:

T = Temperatur in °C

Die Schneedecke wird durch Evapotranspirationsrate und Schmelzrate gemindert. Für die Evapotranspiration wird die potenzielle Evapotranspiration (siehe Kapitel 3.5.1) angewendet. Bei Vorliegen einer Schneebedeckung wirkt die Evapotranspiration nicht auf die Bodensäule.

Die Schmelzrate berechnet sich nach Armbruster (2002) mit:

$$\text{Schmelzrate} = \text{TGF} * (T - T_{GR})$$

Mit:

TGF: Tag-Grad-Faktor [mm/°C/d], hier: 1,8 mm/°C/d

T_{GR} : Grenztemperatur für Einsetzen der Schneeschmelze [°C], hier -0,5°C

Die Anwendung des Verfahrens auf Stundenwerte führt zu unplausibel hohen Schmelzraten in kurzen Temperaturtagesspitzen. Daher wurde die im Schneemodul verwendete stündliche Temperatur etwas abgesenkt ($T_{\text{Schneemodul}} = 0,3 * T_{\text{Tag,min}} + 0,7 * T_{\text{Stundenwert}}$).

3.6 Kalibrierung des Modells

3.6.1 Ergebnisse des Modells zur Simulation der Schneebedeckung

Die Berechnung der Schneedecke basiert auf dem Temperatur-Datensatz sowie auf den REGNIE-Niederschlagsdaten. Die Anwendung des Schneemoduls ergibt Tageswerte des Wasseräquivalents der Gesamtschneehöhe. Das Wasseräquivalent wird vom DWD an einigen Stationen im Umfeld des Modellgebiets gemessen, sodass gemessene und simulierte Werte miteinander verglichen werden können. Die beste Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung ergibt sich, wenn die Berechnung der Schneedecke auf einer Temperatur zwischen Tagesminimum und -mittel basiert.

Abbildung 3.8 und Abbildung 3.11 zeigen die gemessenen und simulierten Gesamtschneehöhen (Wasseräquivalent in mm) an der Station in Garmisch-Partenkirchen. Die Abbildung zeigt, dass die Phasen mit Schneebedeckung unter Berücksichtigung der zahlreichen Unsicherheiten qualitativ gut abgebildet werden. Es ist kein Trend zu einer generellen Über- oder Unterschätzung erkennbar. Abbildung 3.12 zeigt einen Vergleich der gemessenen und berechneten Tageswerte des Wasseräquivalents an allen Stationen im Umfeld des Modellgebiets im Zeitraum 1999 bis 2020. Die geringste Streuung weist die Station mit der höchsten Relevanz für den Talboden auf (Station 1550 / Garmisch-Partenkirchen). Die Anpassung ist im Mittel ausgeglichen (kein Trend), und für die Anwendung in den hydrologischen Modellen gut geeignet.

Da die Stationen nur die lokalen Schneemengen am Talboden abbilden, wird als zusätzlicher Prüfschritt ein Vergleich mit Satellitendaten durchgeführt. Abbildung 3.13 bis Abbildung 3.16 zeigen Aufnahmen des Sentinel-Datensatzes sowie die räumliche Verteilung der Schneehöhen. Die Auswertung zeigt, dass Zeitpunkte mit einer flächendeckenden Schneedecke sowie mit in die Höhenlagen zurückweichenden Schneedecke gut nachgebildet werden. In Gebieten mit dichtem Nadelwaldbestand kann die Schneedecke im Sentinel-Datensatz teilweise nur schwer festgestellt werden.

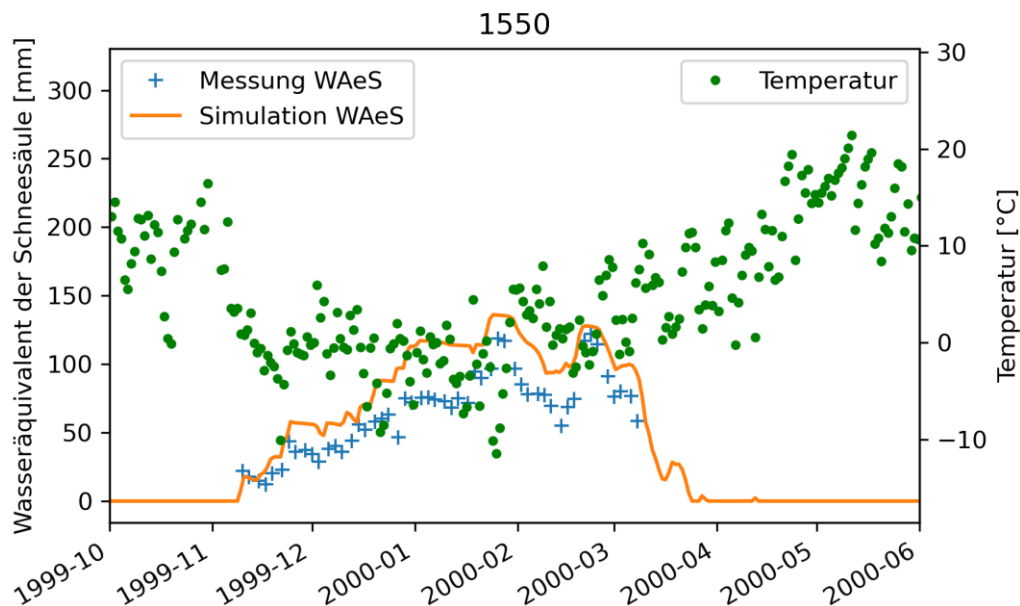


Abbildung 3.8: Berechnetes und gemessenes Wasseräquivalent der Gesamtschneehöhe sowie interpoliertes Tagesmittel der Temperatur an der Station 1550 im Winterhalbjahr 1999/00 (Garmisch-Partenkirchen)

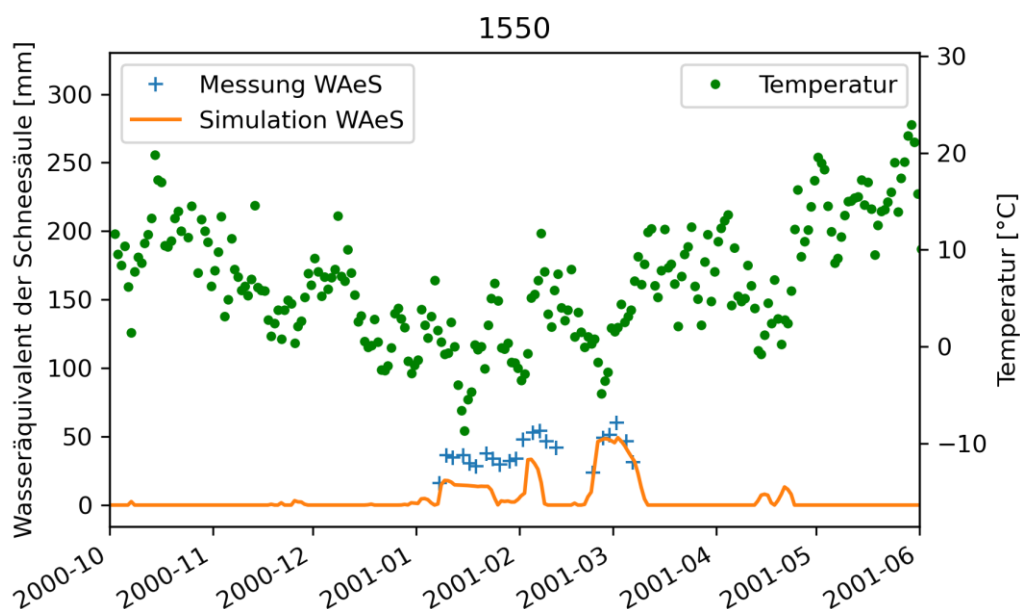


Abbildung 3.9: Berechnetes und gemessenes Wasseräquivalent der Gesamtschneehöhe sowie interpoliertes Tagesmittel der Temperatur an der Station 1550 im Winterhalbjahr 2000/01 (Garmisch-Partenkirchen)

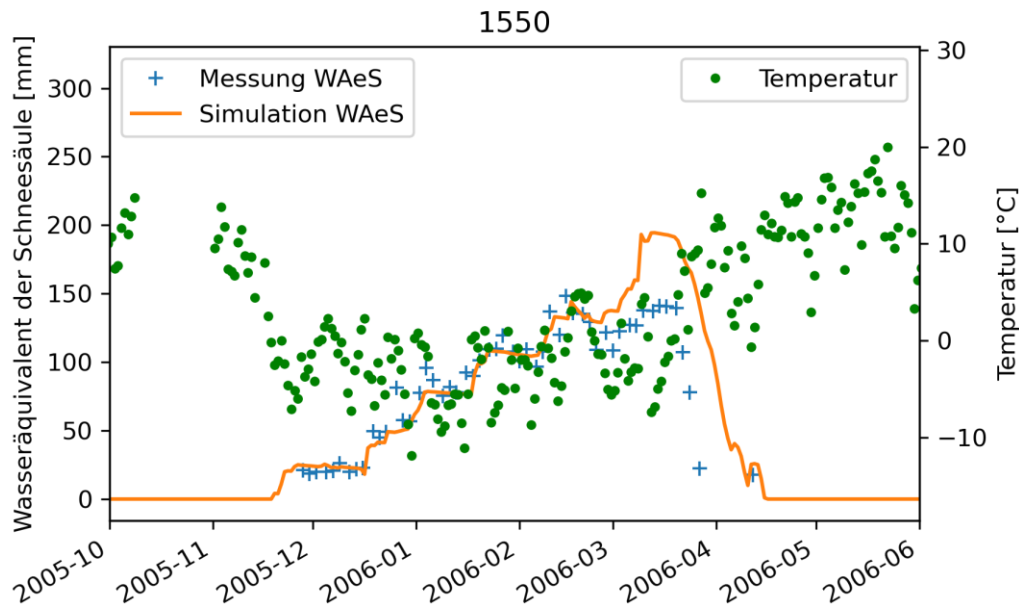


Abbildung 3.10: Berechnetes und gemessenes Wasseräquivalent der Gesamtschneehöhe sowie interpoliertes Tagesmittel der Temperatur an der Station 1550 im Winterhalbjahr 2000/01 (Garmisch-Partenkirchen)

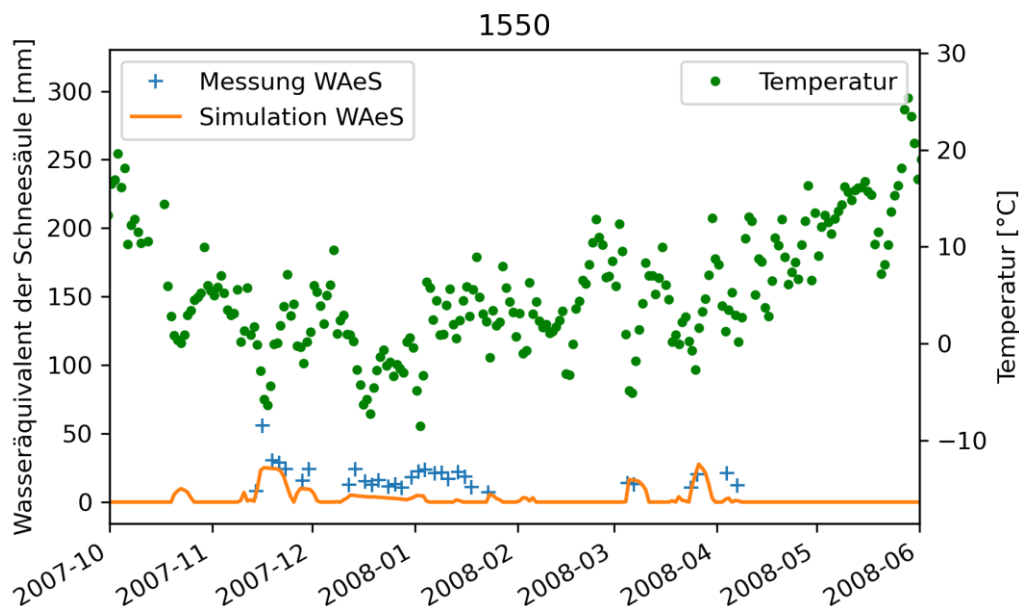


Abbildung 3.11: Berechnetes und gemessenes Wasseräquivalent der Gesamtschneehöhe sowie interpoliertes Tagesmittel der Temperatur an der Station 1550 im Winterhalbjahr 2008/09 (Garmisch-Partenkirchen)

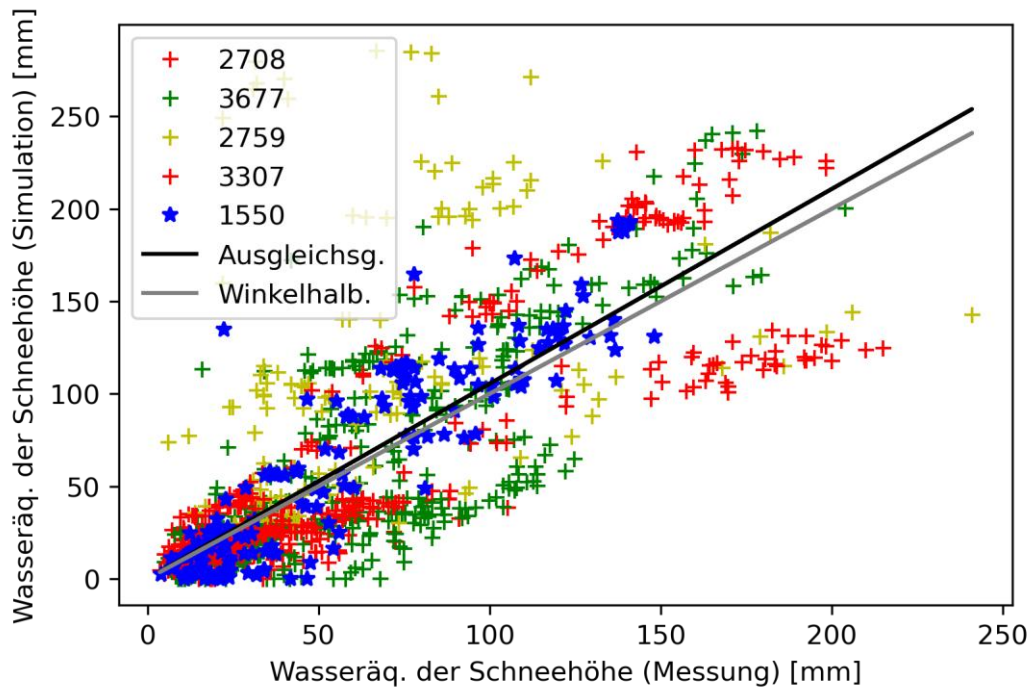


Abbildung 3.12: Vergleich zwischen berechnetem und gemessenen Wasseräquivalent der Gesamtschneehöhe an Stationen im Zeitraum 1999 bis 2020.

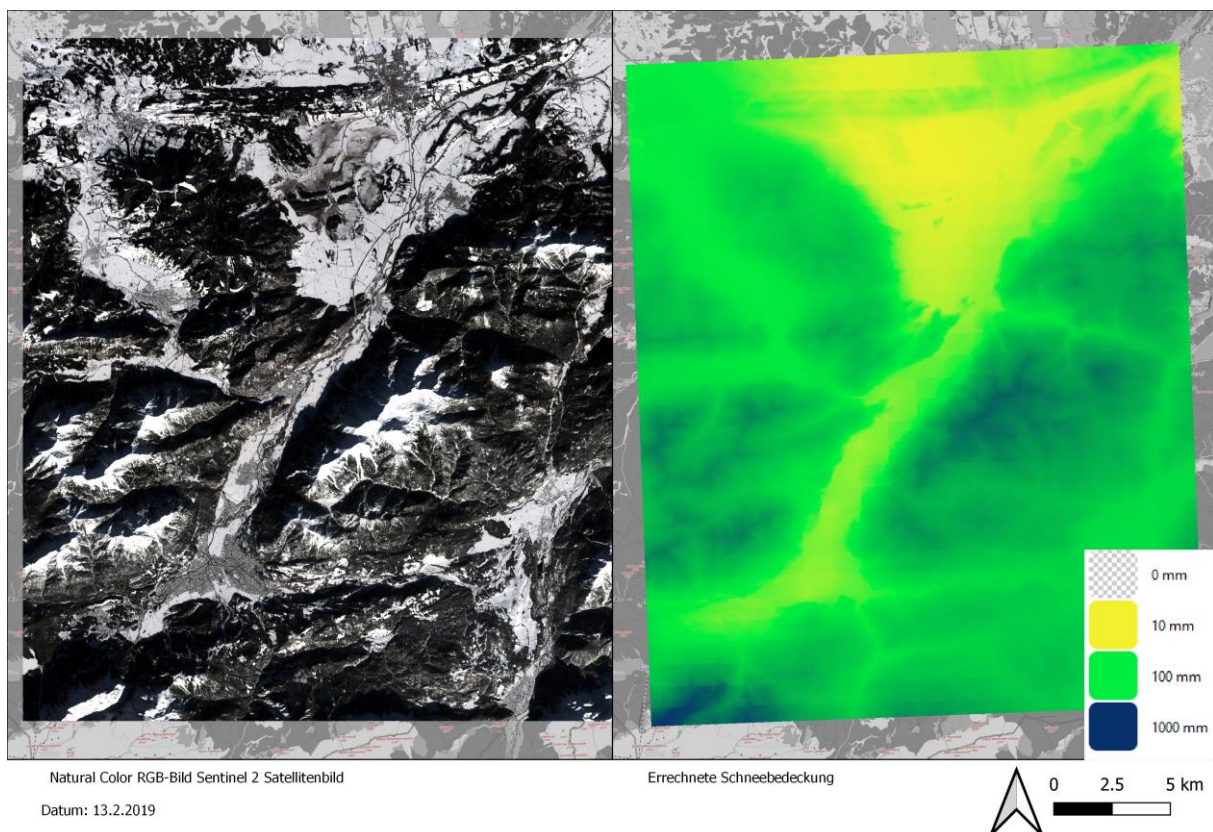


Abbildung 3.13: Vergleich zwischen Sentinel Satellitenbild und errechneter Schneebedeckung am 13.02.2019

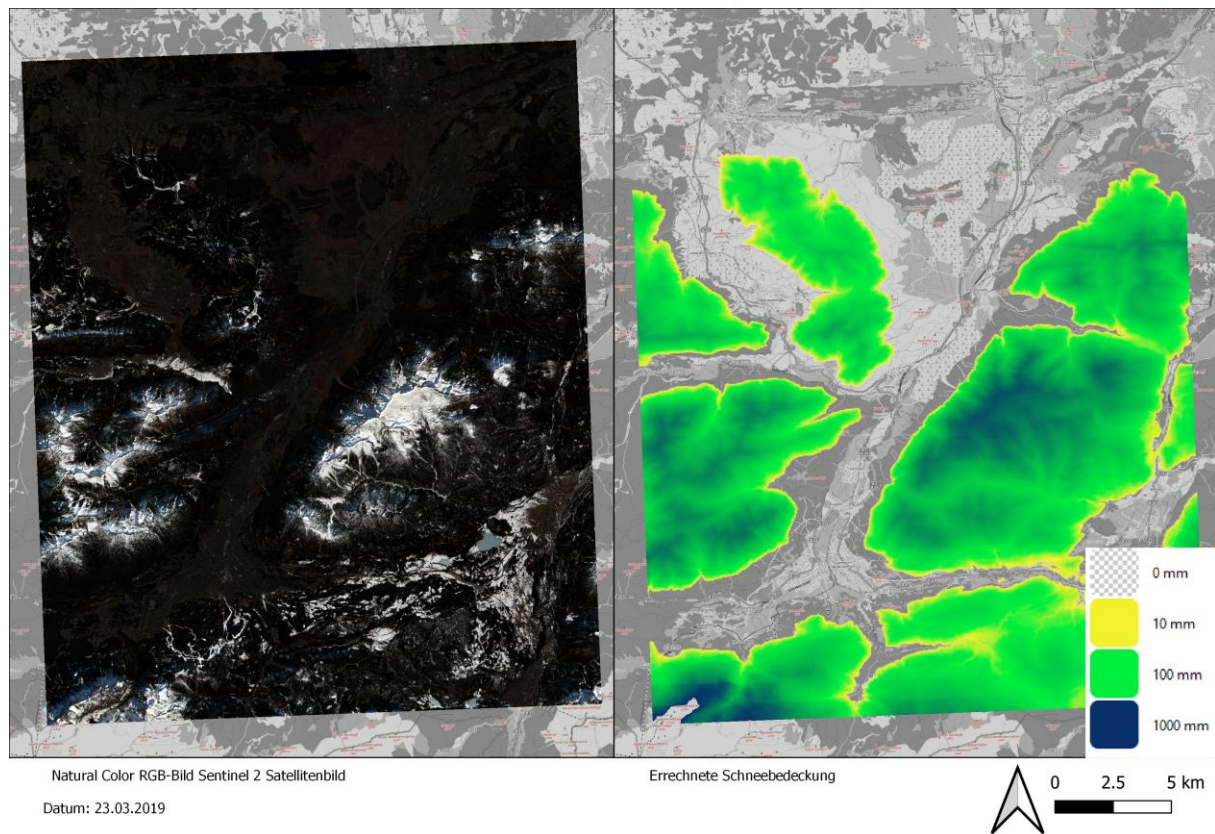


Abbildung 3.14: Vergleich zwischen Sentinel Satellitenbild und errechneter Schneebedeckung am 23.03.2019

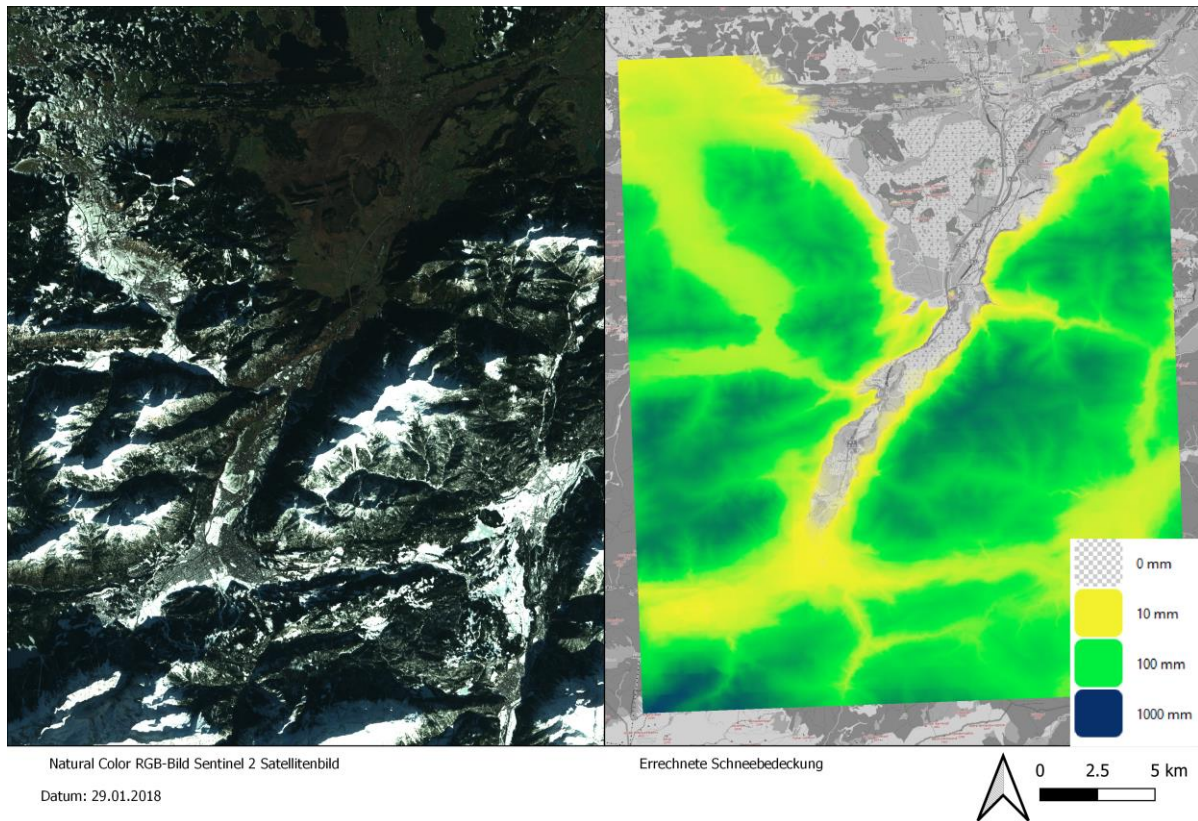


Abbildung 3.15: Vergleich zwischen Sentinel Satellitenbild und errechneter Schneebedeckung am 29.1.2018

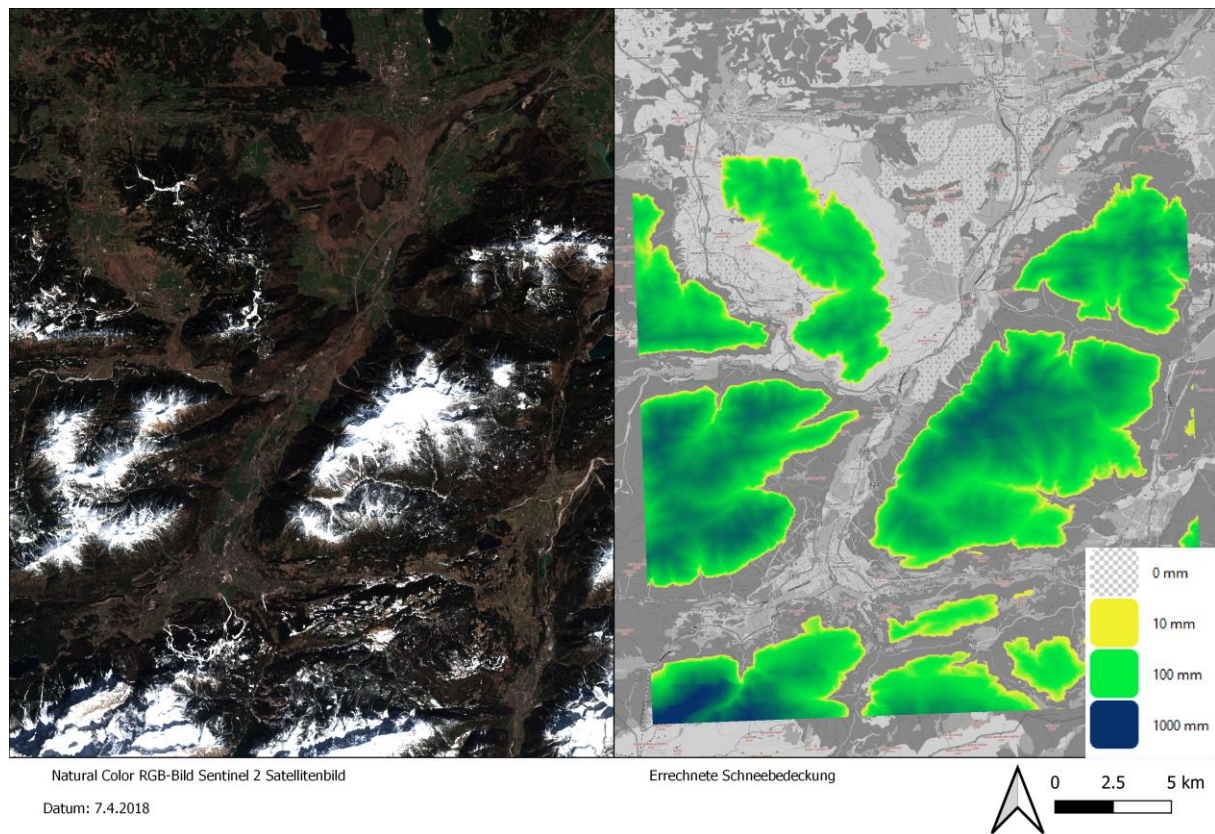


Abbildung 3.16: Vergleich zwischen Sentinel Satellitenbild und errechneter Schneebedeckung am 7.4.2018



Abbildung 3.17: Sentinel-Satellitenbild am 19.4.2018

3.6.2 Randbedingungen

Als Eingangsdaten werden Niederschlagsganglinien und Verdunstungsganglinien benötigt. In HechHMS ist je Teileinzugsgebiet eine Niederschlagsganglinie und eine Verdunstungsganglinie vorzugeben*. Diese werden aus den als Rasterdatensatz vorliegenden Ganglinien des Schmelzwassers und der Verdunstung abgeleitet (s. Kapitel 3.5).

* Die Modellierung auf Grundlage einer Niederschlagsganglinie je Teileinzugsgebiet wird nur im Rahmen der Kalibrierung verwendet. Die Berechnung der Einzugsgebiete am Wankmassiv erfolgt auf Rasterdatenbasis.

3.6.3 Bewertungskriterium

In die Bewertung der Anpassungsgüte gehen folgende Bewertungsgrößen ein:

- Vergleich des mittleren Abfluss
- Modified Nash–Sutcliffe model efficiency coefficient (NSE1): Um den Effekt von

$$NSE_1 = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T |Q_o^t - Q_m^t|}{\sum_{t=1}^T |Q_o^t - \bar{Q}_o|}$$

Extremereignissen zu reduzieren, werden Zähler und Nenner nicht quadriert. Stattdessen werden Absolutwerte herangezogen. Der NSE1 kann Werte zwischen $-\infty$ und 1 annehmen. Im Bereich 0 bis 1 ist die modellierte Ganglinie eine bessere Prognose als der Mittelwert. Je höher der Wert, desto besser ist die Anpassung der modellierten Ganglinie an die Messung. Auf eine genaue Nachbildung der Abflussspitzen wird wenig Wert gelegt, da die Ergebnisse im Wesentlichen als Randbedingung im Grundwassermodell Wankmassiv (kup, 2023-2) verwendet werden.

- Visuelle Bewertung: Hier ist insbesondere die Berechnungsgüte in Niedrigwasserphasen relevant.

Der Abgleich erfolgt an den Messstellen Kanker und Lahnenwiesgraben.

3.6.4 Kalibrierungsschritt 1: Betrachtung einer Parametrisierung unabhängig von der Geologie

Vorgehen

Zunächst wurden in Voruntersuchungen Sensitivitäten und Variationsbreiten der in die Kalibrierung eingehenden Parameter ermittelt. Die Parameter und die ermittelten Bandbreiten sind Tabelle 3.5 zu entnehmen. Da es in HeCHMS keine Implementierung einer automatisierten Parameteranpassung (z.B. PEST) gibt, sind alle möglichen Parameterkombinationen zu berechnen. Durch folgende Maßnahmen wurde der Rechenaufwand reduziert:

- Betrachtung von maximal 5 Werten je Parameter
- Als Nebenbedingung wird angenommen, dass Infiltrationsraten in tieferen Schichten kleiner sind als in darüberliegenden Schichten.

Insgesamt wurden für den Kalibrierungsschritt 1 fast 3000 Modellläufe berechnet.

Tabelle 3.5: Parameter und variierte Bandbreiten

Schicht	Parameter	Typ	Bandbreite
Surface / Soil	Surface Infiltration	Variabel	10 – 30 mm/h
	Soil Capacity	Konstant	nFKWe
	Tension Storage	Variabel	0.35 oder 0.7 * nFKWe
	Soil infiltration	Variabel	5 – 10 mm/h
GW Layer 1	GW1 Storage	Konstant	200mm
	GW1 Coefficient	Variabel	50 – 150 h
	GW1 Percolation	Konstant	5 mm/h
GW Layer 2	GW2 Storage	Konstant	200mm
	GW2 Coefficient	Variabel	200 – 500 h
	GW2 Percolation	Variabel	1 – 1.2 mm/h
	GW2 Baseflow Coeff.	Variable	1000 – 2000 h

Ergebnisse

Abbildung 3.18 zeigt die erzielten NSE1-Werte als Scatter-Plot für den Lahnenwiesgraben und den Kanker. Die beste Anpassung am Lahnenwiesgraben (0,39) erzielt nur einen Wert von ~0 am Kanker. Der beste Wert am Kanker ist 0,17 (Lahnenwiesgraben: 0,34). Daraus folgt, dass eine Regionalisierung der Parametrisierung eine Verbesserung bewirken kann. Da sich diese beiden Simulationsdatensätze ausschließlich in den Parametern GW1 Koeffizient und GW2 Koeffizient unterscheiden, werden diese beiden Koeffizienten einer räumlichen Variierung unterworfen. Die übrigen Parameterwerte werden beibehalten.

Die resultierenden Abflussganglinien des besten Modelllaufs aus Kalibrierungsschritt 1 sind in Anhang B.1 dokumentiert.

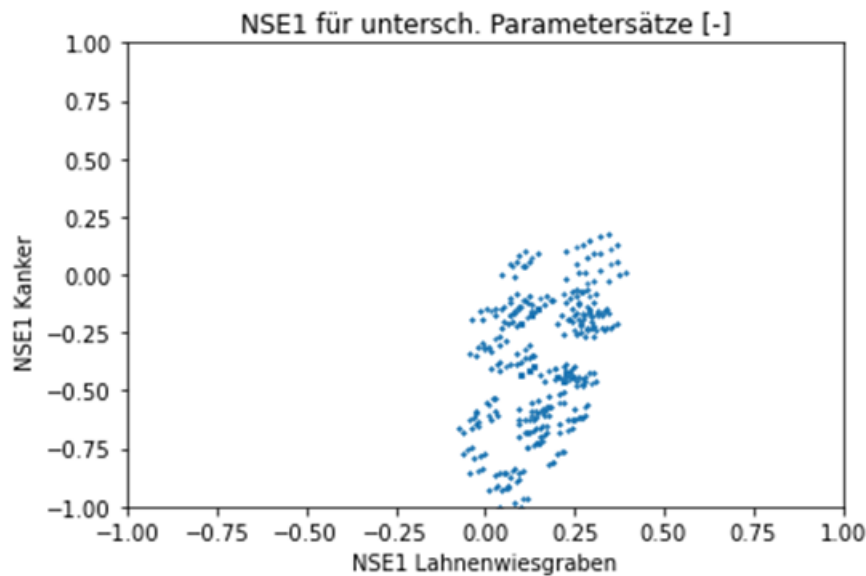


Abbildung 3.18: Scatterplot des NSE1-Werts für Lahnenwiesgraben und Kanker

3.6.5 Kalibrierungsschritt 2: Betrachtung einer Parametrisierung unter Berücksichtigung der Geologie

Vorgehen

Kalibrierungsschritt 1 hat gezeigt, dass eine räumlich einheitliche Parametrisierung zu einer Minderung der Anpassungsgüte je Einzugsgebiet führt. Im Folgenden wird daher eine räumliche Variierung der Parameter GW1 und GW2 Koeffizient eingeführt.

Abbildung 3.19 stellt die Einzugsgebiete auf Grundlage der geologischen Karte dar. Im Einzugsgebiet des Lahnenwiesgrabens dominieren die geologischen Einheiten Hauptdolomit, Plattenkalk und Kössener Schichten. Im EZG des Kankers dominieren die geologischen Einheiten Hauptdolomit, Raibler Schichten, Partnachsichten und Jungmoräne. Es wird deutlich, dass die Einzugsgebiete des Wankmassivs geologisch eher mit dem Einzugsgebiet des Lahnenwiesgrabens vergleichbar sind.

Die Zonierung für die Parametrisierung wurde folgendermaßen definiert:

- Zone 1: Plattenkalk, Wettersteinkalk und Hauptdolomit
- Zone 2: Übrige geologische Einheiten

Innerhalb dieser Zonen wird eine einheitliche Parametrisierung umgesetzt, da keine Messdaten existieren, auf deren Basis eine weitere Differenzierung möglich wäre.

Die Ergebnisse des Kalibrierungsschritts 1 zeigen, dass eine Bandbreite von 75 mm bis 250 mm für die GW Koeffizienten plausibel ist.

Abbildung 3.20 zeigt die räumliche Verteilung der GW1 Koeffizienten für einen Parametersatz. Ausgehend von diesem Datensatz wurden die Werte jeweils innerhalb

der genannten Bandbreite variiert und für beide GW Koeffizienten in jeder möglichen Kombination realisiert.

Hieraus ergeben sich über 3000 Modellläufe, die mit HechHMS berechnet wurden.

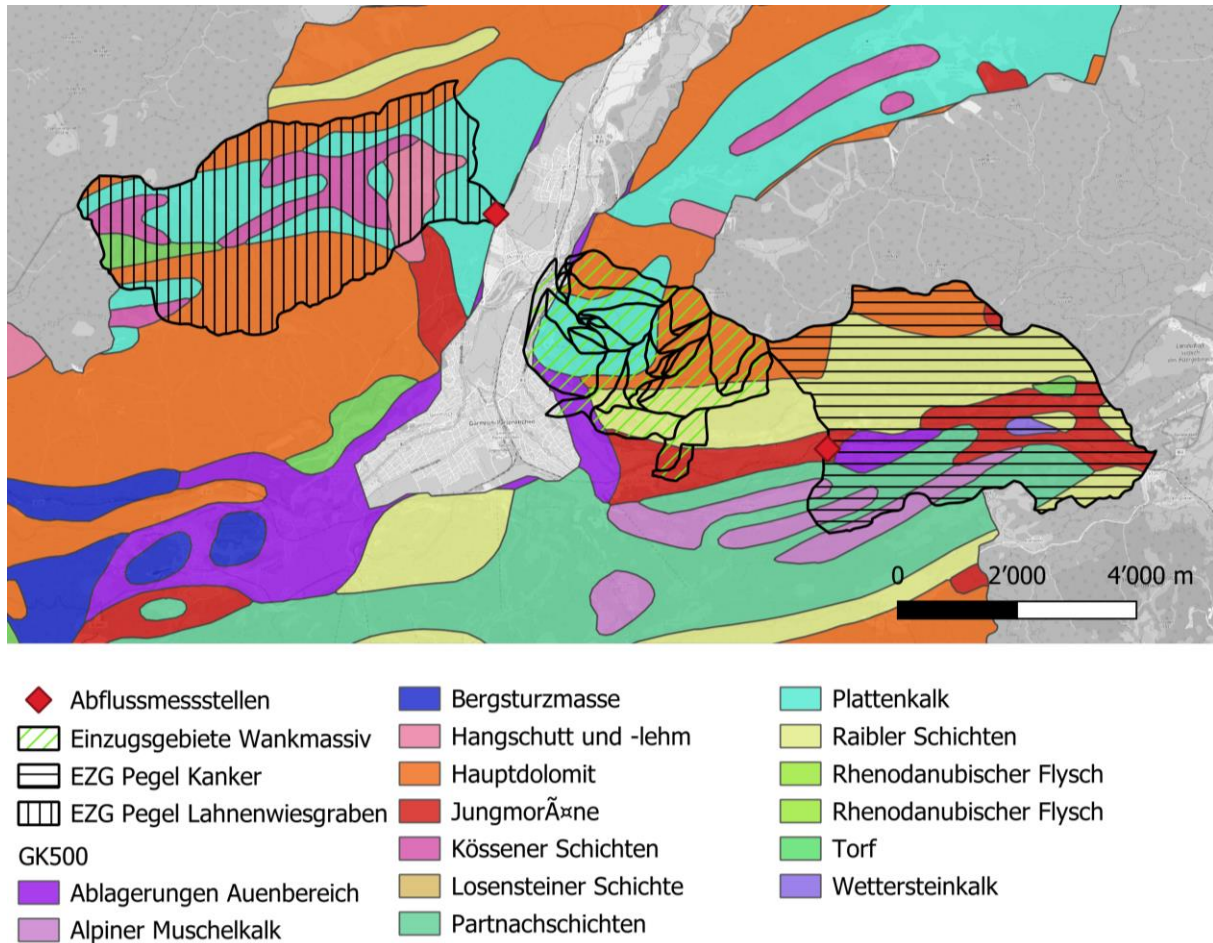


Abbildung 3.19: Geologie der Einzugsgebiete

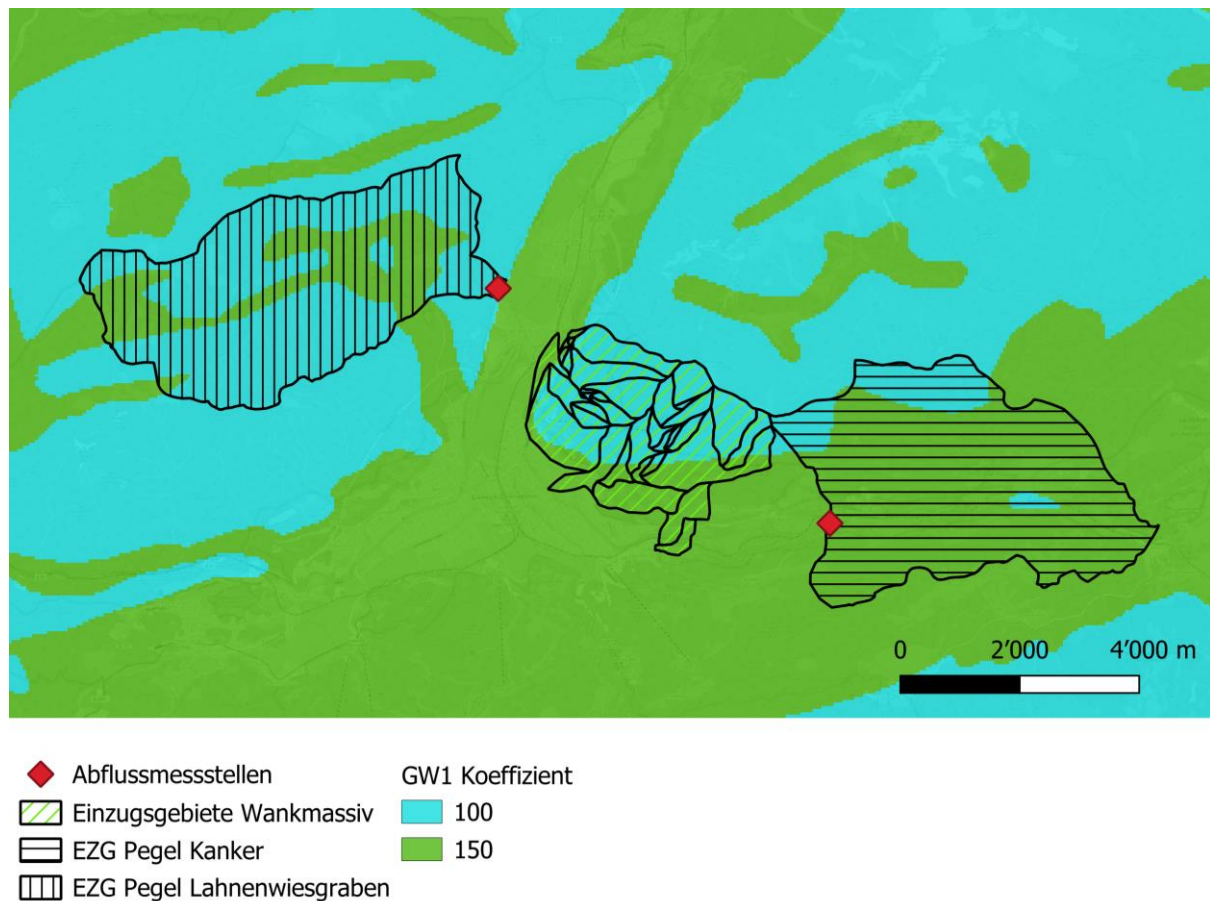


Abbildung 3.20: Geologie-abhängige Verteilung des GW1 Koeffizients

Ergebnisse

Abbildung 3.21 zeigt die erzielten NSE1-Koeffizienten in den beiden betrachteten Einzugsgebieten. Im Vergleich zu den im Rahmen der Kalibrierungsschritt 1 erzielten Ergebnissen kann die Anpassung etwas verbessert werden. Die beste Anpassung erzielt der in Tabelle 3.6 dargestellte Parametersatz.

Tabelle 3.6: Parametrisierung der Geologie

	Zone 1	Zone 2
GW1 Koeffizient	75 h	200 h
GW2 Koeffizient	225 h	200 h

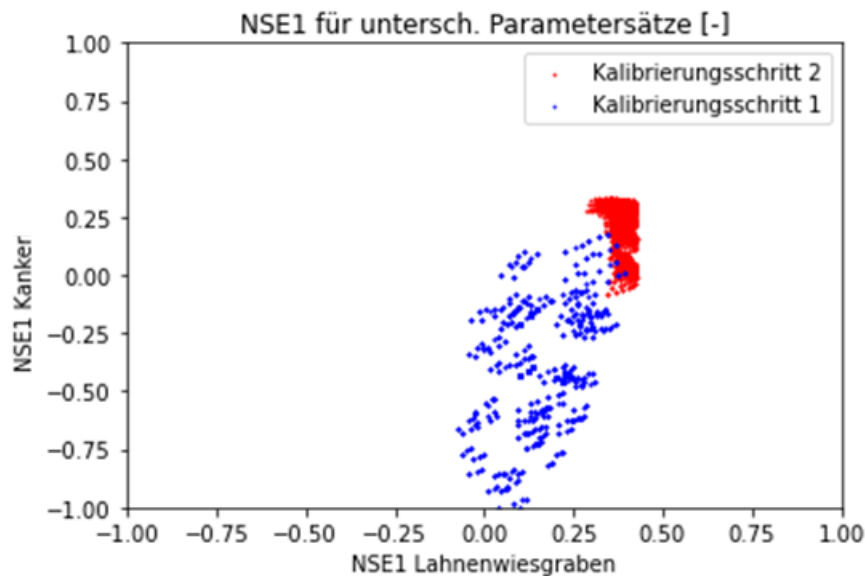


Abbildung 3.21: Scatterplot des NSE1-Werts für Lahnenwiesgraben und Kanker

3.6.6 Ganglinien des kalibrierten Modells

Abbildung 3.22 stellt die Abflussganglinie am Lahnenwiesgraben dar. Die Simulation bildet insbesondere mittlere und niedrige Abflüsse gut nach. Abflussspitzen fallen im gemessenen Datensatz höher aus.

Am Kanker (Abbildung 3.23) ist die Anpassungsgüte insbesondere im Jahr 2014 gering. In der gemessenen Ganglinie sind die Jahre 2014/15 auffällig. Im Jahr 2014 fallen die Basisabflüsse zwischen Phasen mit hohen Abflüssen schnell auf niedrige Werte ab, während dieses starke Abfallen im Jahr 2015 nicht zu beobachten ist. Die simulierte Ganglinie kann diese Effekte nicht nachbilden.

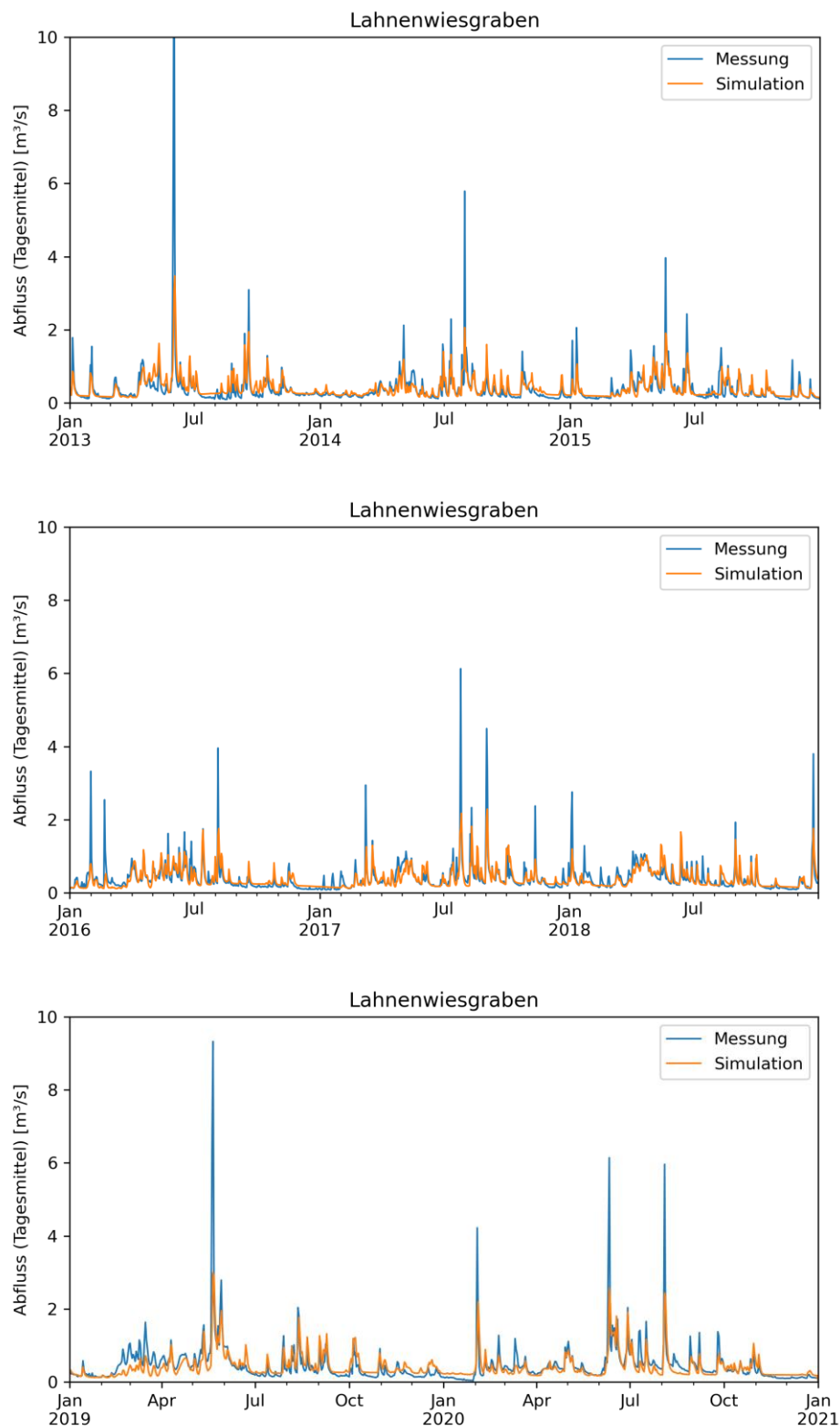


Abbildung 3.22: Gemessene und simulierte Abflussganglinie am Lahnenwiesgraben im Zeitraum 2013 bis 2020

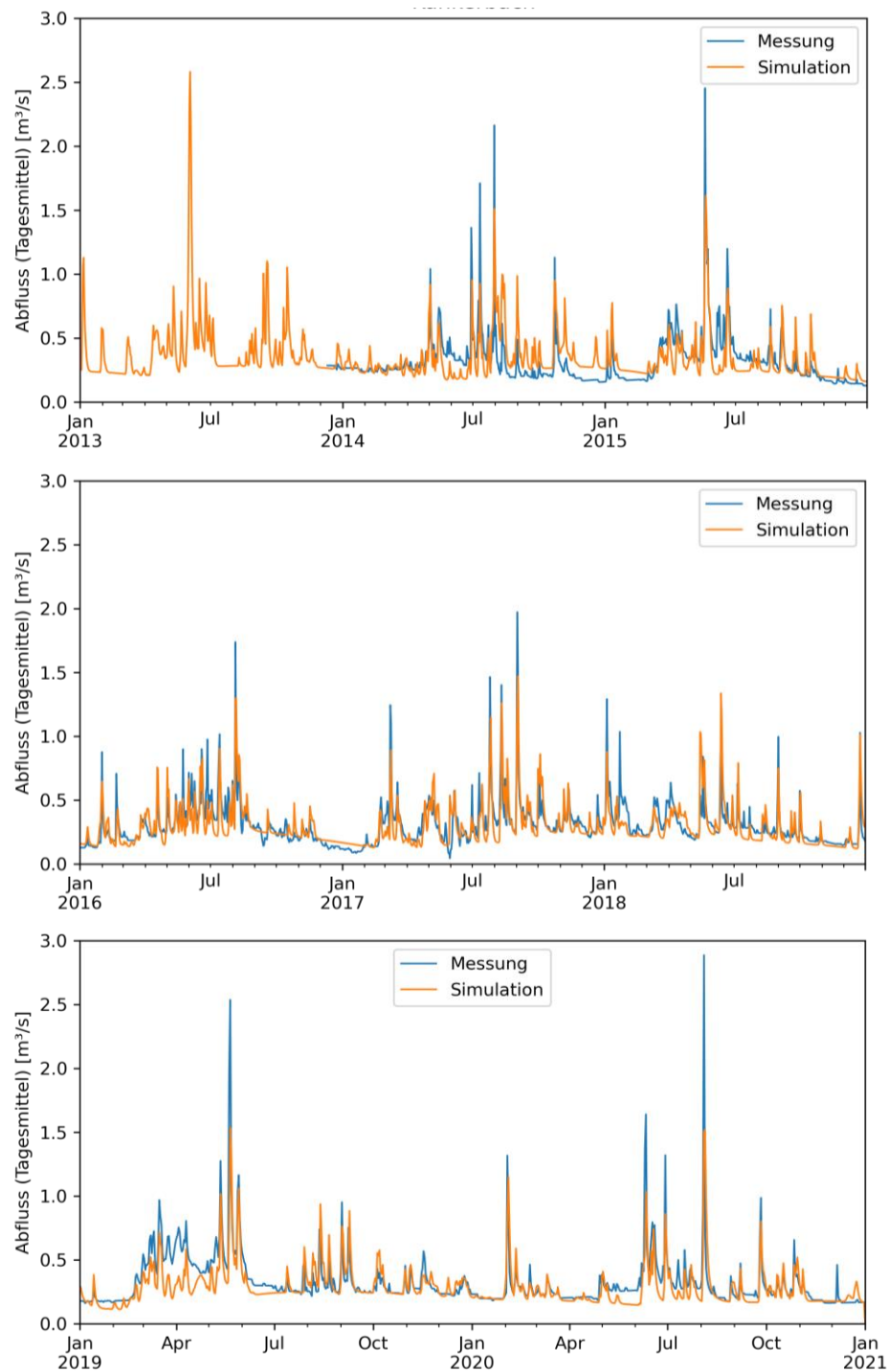


Abbildung 3.23: Gemessene und simulierte Abflussganglinie am Kanker im Zeitraum 2013 bis 2020

3.7 Ergebnisse für den Zeitraum ab 2000 am Wankmassiv

3.7.1 Berechnete Abflussganglinien

Abbildung 3.24 bis Abbildung 3.28 zeigen die Abflussganglinien der fünf betrachteten Einzugsgebiete am Wankmassiv. Es wird jeweils der Gesamtzeitraum dargestellt, sowie exemplarisch Detailansichten der Jahre 2010 bis 2011 und des ersten Quartals 2010. Die Ganglinien zeigen deutlich, dass die Gewässer von periodischem Charakter sind, d.h. zeitweise trockenfallen. Das periodische Trockenfallen tritt im Simulationszeitraum wiederholt im Winterhalbjahr auf.

Abbildung 3.29 stellt die an den Beobachtungspunkten berechneten Jahresmittel des Abflusses dar. Die Abbildung zeigt, dass der Betrachtungszeitraum in den ersten Jahren von hohen Abflüssen geprägt wird, während die folgenden Jahre leicht um den mittleren Abfluss schwanken.

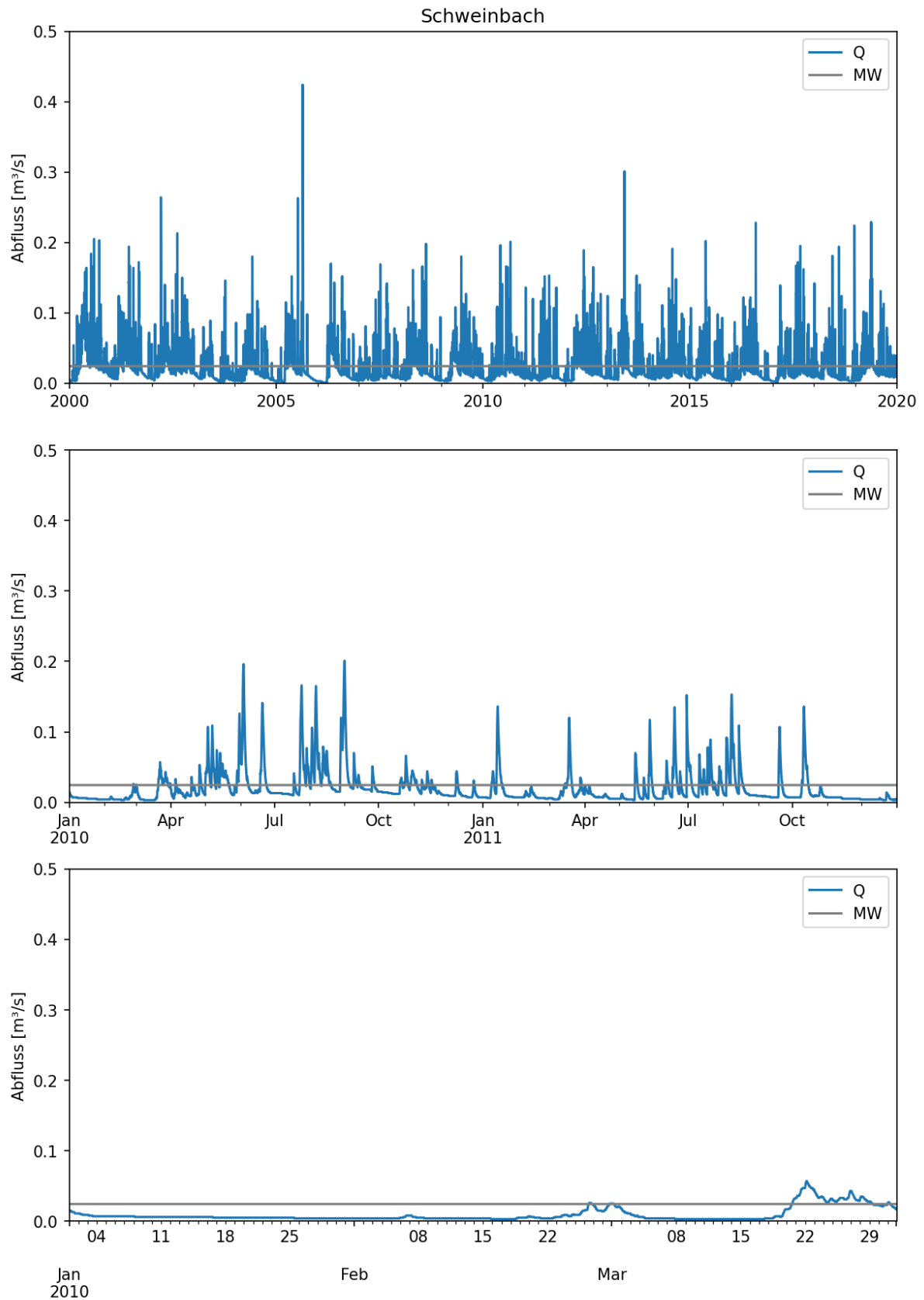


Abbildung 3.24: Abflussgangline des Schweinbachs für drei Zeiträume

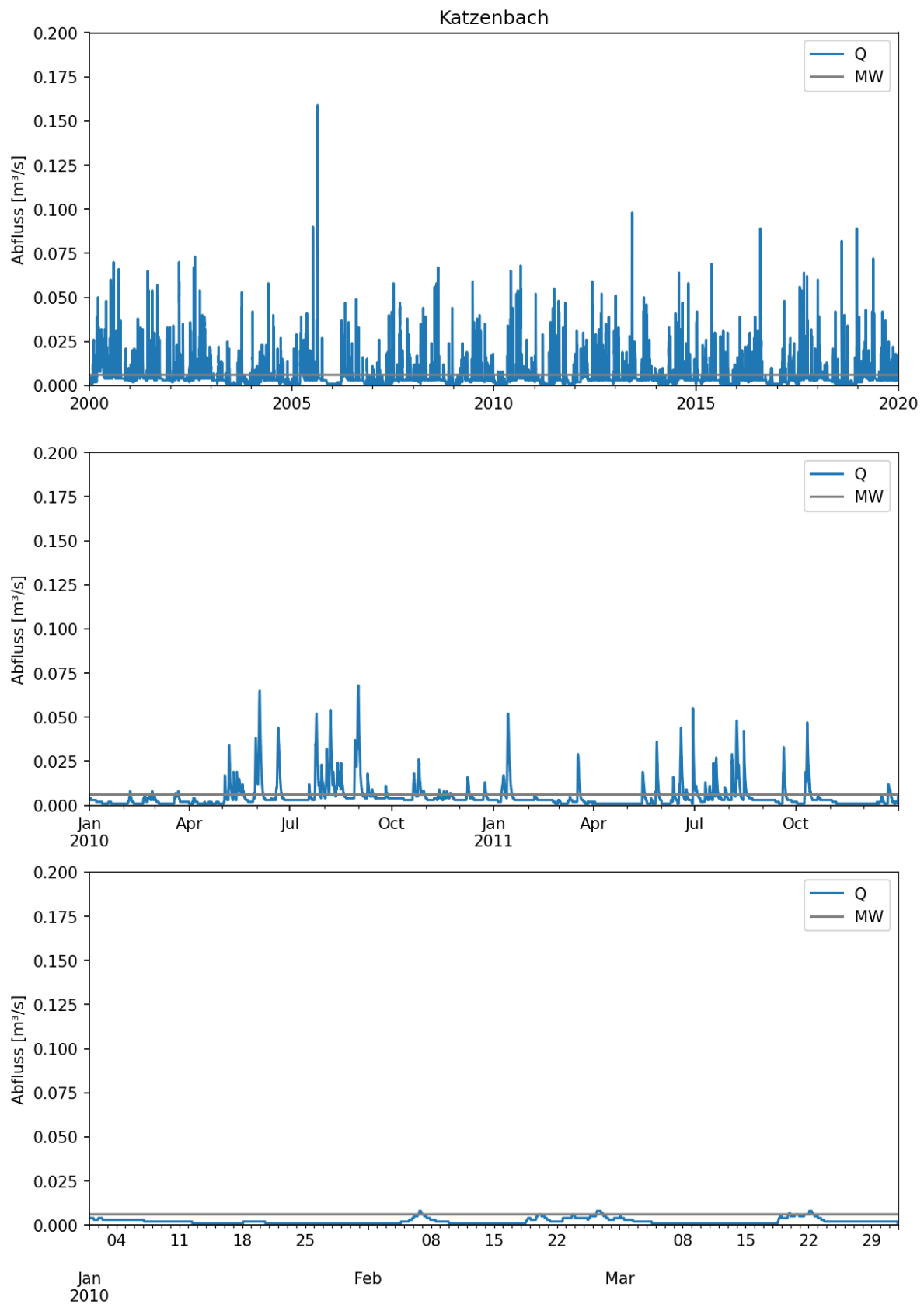


Abbildung 3.25: Abflussgangline des Katzenbachs für drei Zeiträume

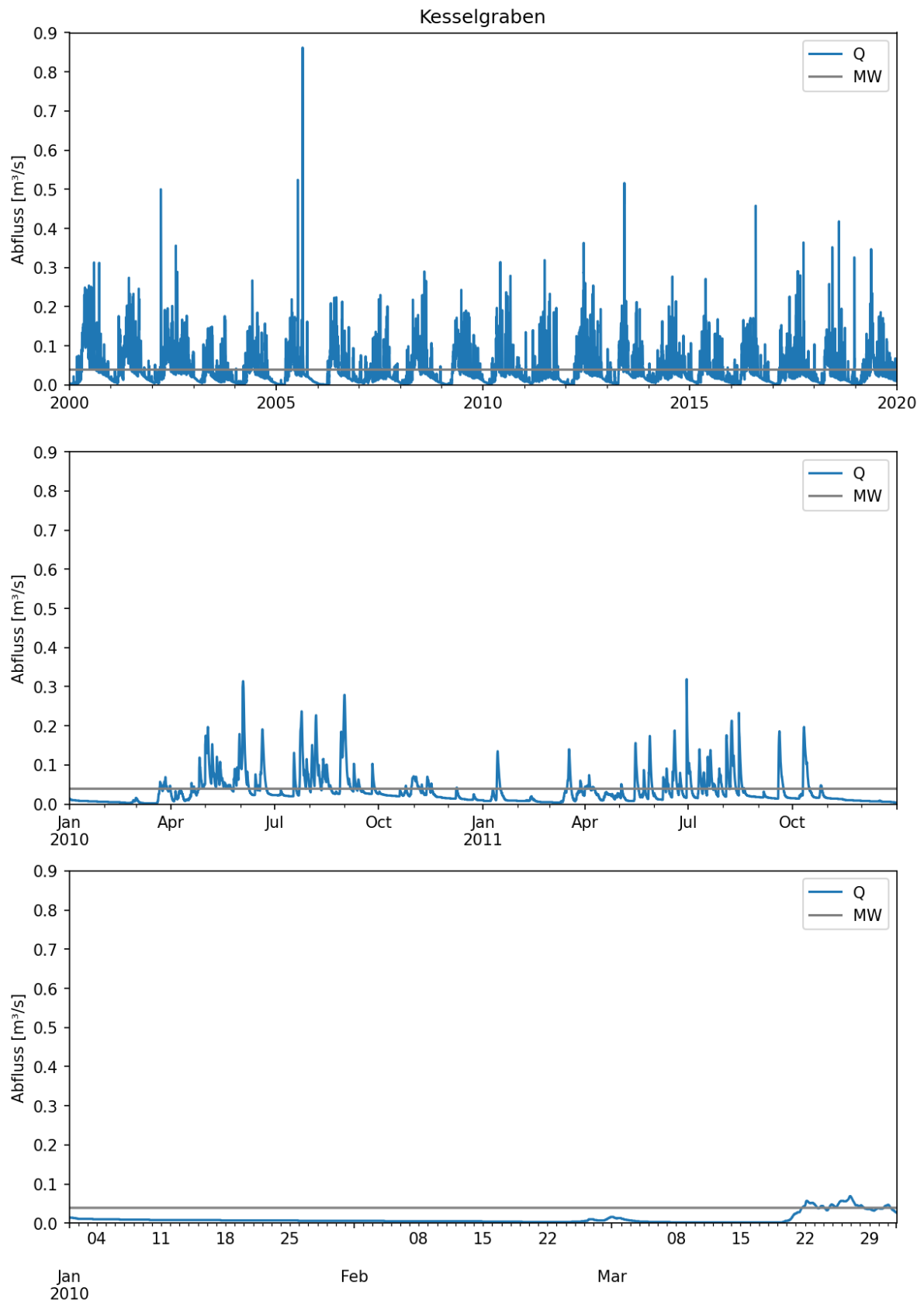


Abbildung 3.26: Abflussgangline des Kesselgrabens für drei Zeiträume

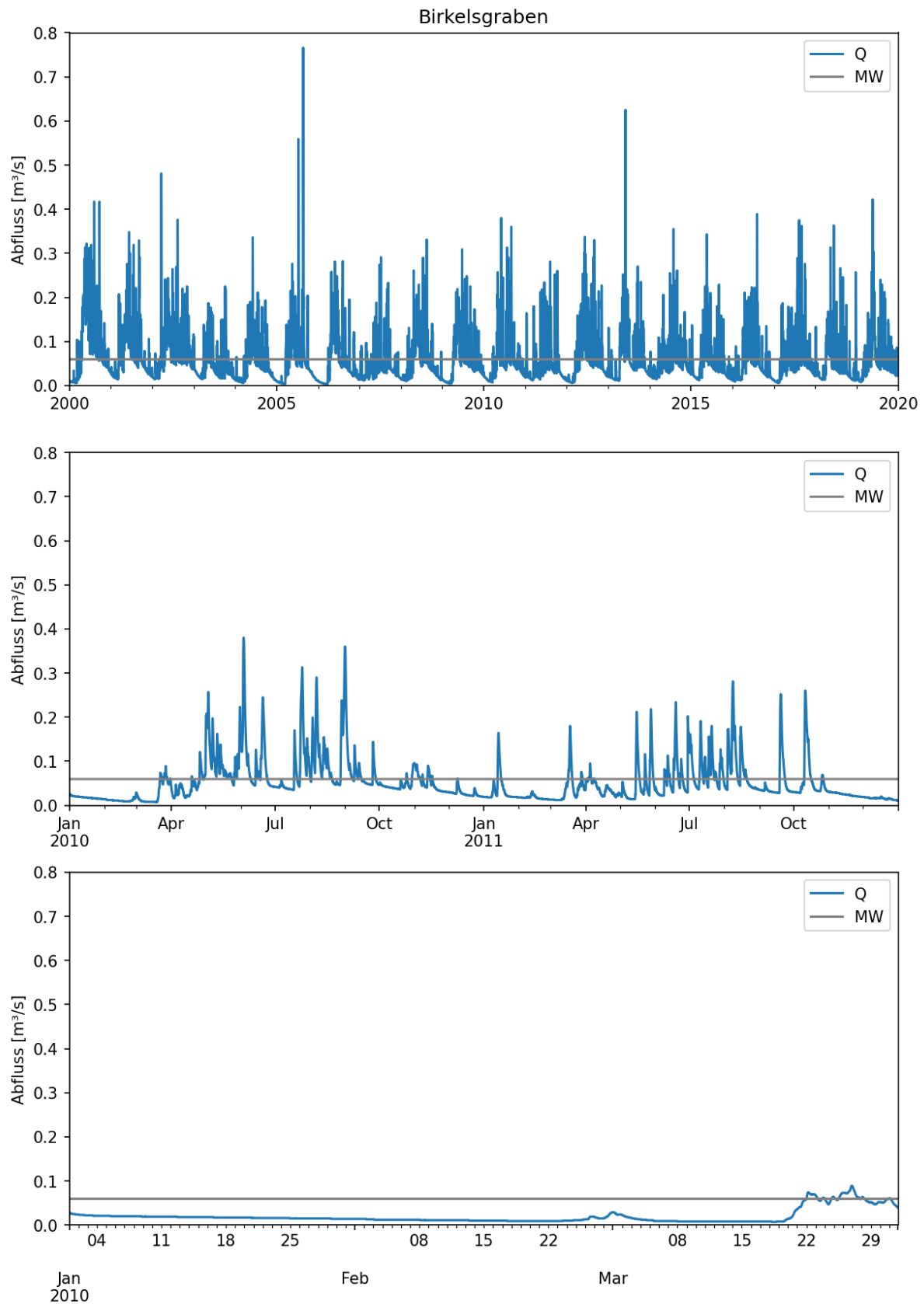


Abbildung 3.27: Abflussgangline des Birkelsgrabens für drei Zeiträume

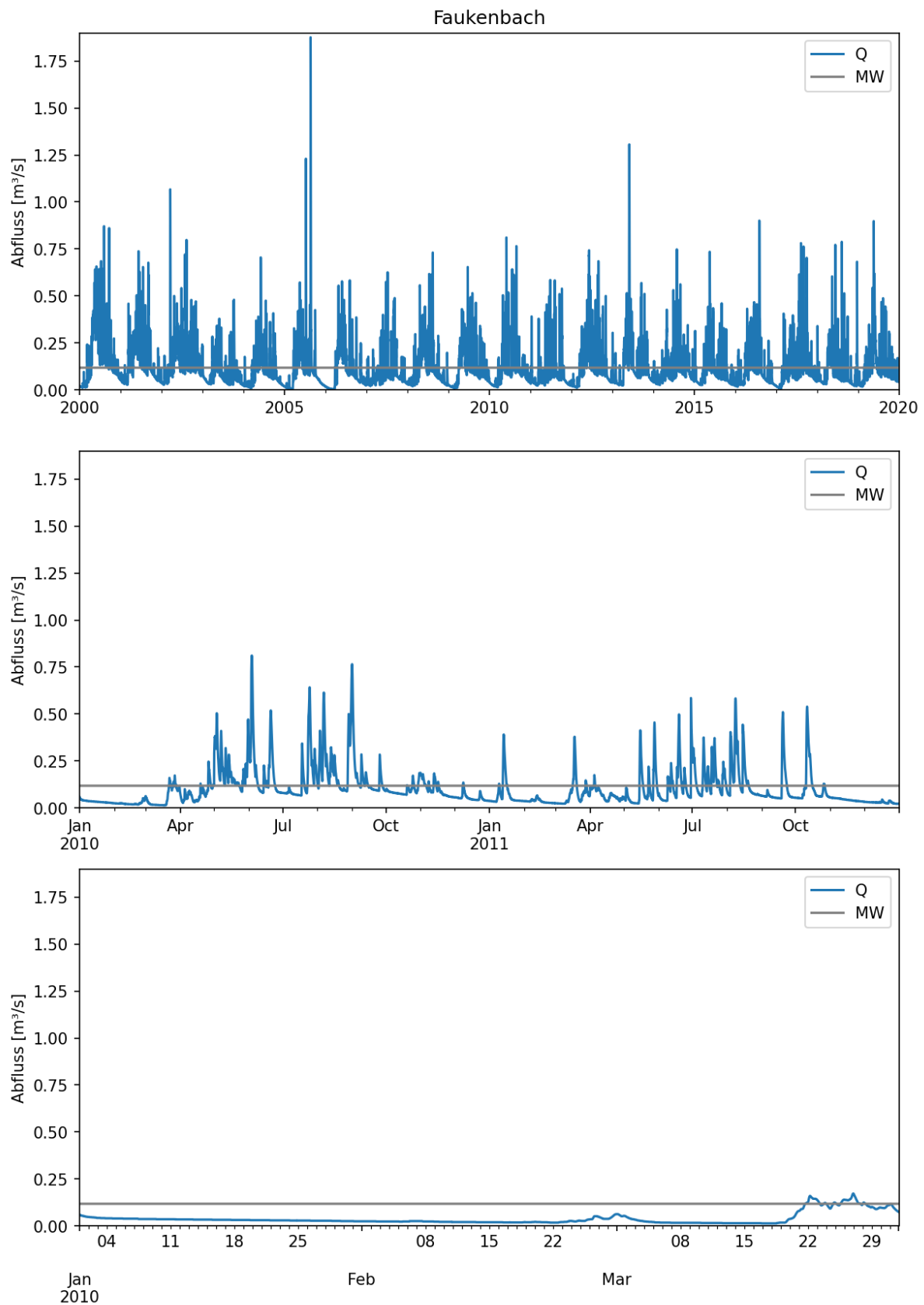


Abbildung 3.28: Abflussgangline des Faukenbachs für drei Zeiträume

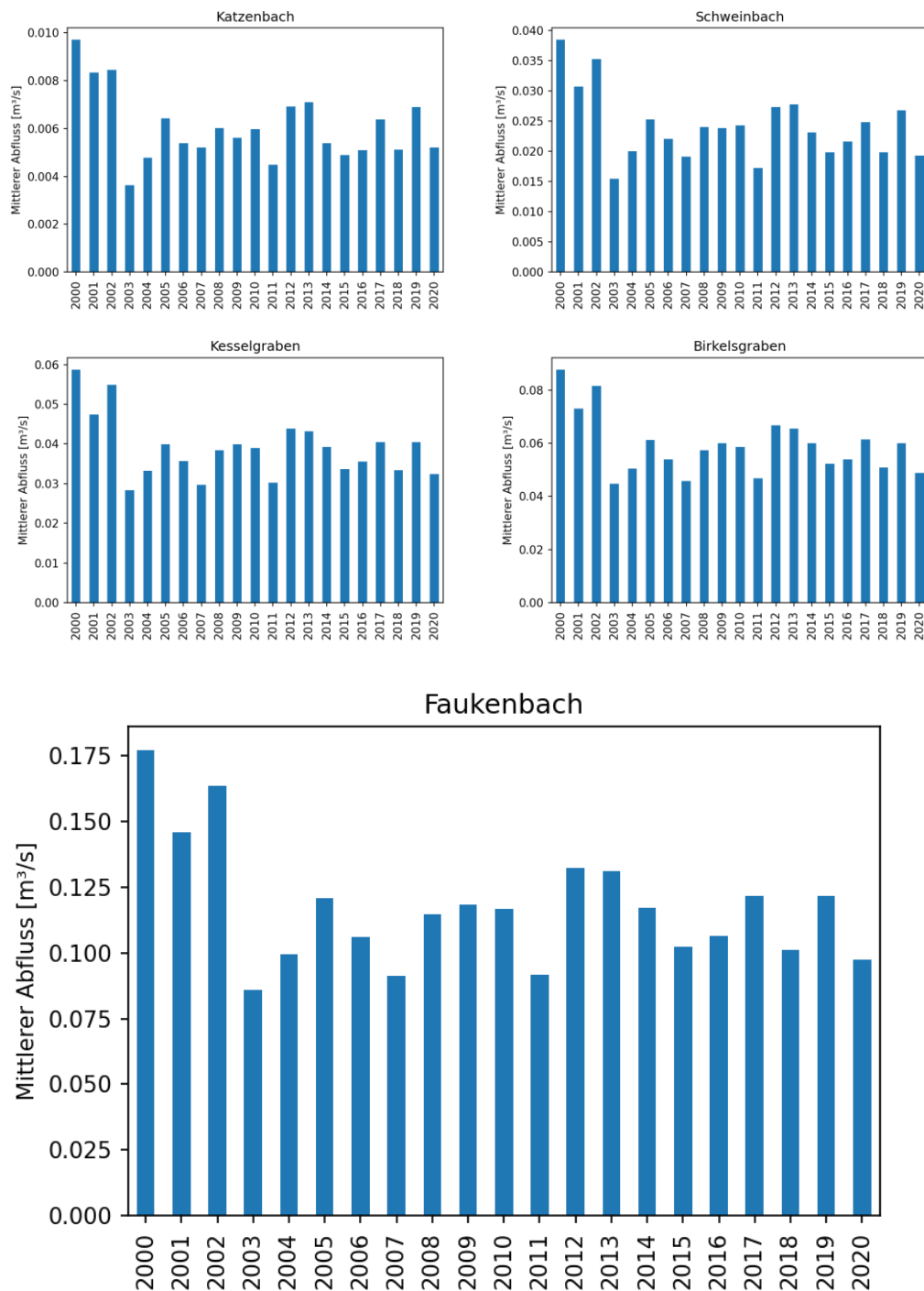


Abbildung 3.29: Jahresmittel der Abflüsse an den Beobachtungspunkten

3.7.2 Gesamtbilanz der Einzugsgebiete

Die folgende Tabelle 3.7 zeigt die Gesamtbilanz der Einzugsgebiete im Zeitraum 2000 bis 2020. Der Oberflächenabfluss entspricht dem am Gebietsauslass im Gewässer abfließenden Wasser. Er wird aus Direktabfluss und den beiden

Basisabflusskomponenten Baseflow 1+2 gebildet. Entlang der Fließstrecke geht Wasser als Infiltration aus dem Oberflächengewässer (OFG) verloren. Die Gesamtbilanz je Einzugsgebiet (Niederschlag = Tatsächliche Verdunstung + Oberflächenabfluss + Infiltration aus OFG + Grundwasserneubildung) ist ausgeglichen. Fehlbeträge (Größenordnung 1 %) ergeben sich aus Speichereffekten in Boden- und Grundwasserspeichern, Modellungenauigkeit sowie aus der Rundung von Nachkommastellen. Weitere Details zu den hier quantifizierten Bilanzkomponenten gibt die Schemaskizze der Modellierung in Abbildung 3.5 (Kapitel 3.2.3).

Abbildung 3.30 stellt die mittleren Bilanzkomponenten im Modellgebiet als Anteile am Niederschlag in einem Kreisdiagramm dar. Die Abbildung verdeutlicht, dass der größte Anteil an Wasser als Verdunstung verloren geht. Die Abbildung zeigt ferner, dass der Direktabfluss für die Gesamtbilanz der Oberflächengewässer im Vergleich zu den Basisabflüssen von mengenmäßig geringer Bedeutung ist. Folglich wird der Oberflächenabfluss im Modell durch die beiden Basisabflüsse bestimmt.

Hinweis: Auch die Abflusskomponenten Basisabfluss 1 und Basisabfluss 2 weisen eine zeitliche Variabilität auf. Je nach lokalen Verhältnissen werden kleine Abflüsse komplett unter der Oberfläche abgeführt, sodass die Gewässer oberflächlich trocken fallen. Dies ist zum Beispiel an den Gewässern Birkelsgraben und Kesselgraben der Fall (nachzulesen im Geologisch-Hydrogeologischen Bericht (ILF Beratende Ingenieure, 2023)).

Tabelle 3.7: Bilanz der Einzugsgebiete und Summe der Bilanzkomponenten

Komponente	Schwein- bach	Fauken- bach	Birkels- graben	Kessel- graben	Katzenbac- h	Summe*
	[m³/s]					
Niederschlag	0.062	0.27	0.126	0.083	0.021	0.353
Tatsächliche Verdunstung	0.023	0.076	0.031	0.021	0.009	0.108
Oberflächenabfluss	0.024	0.118	0.06	0.039	0.006	0.149
Direktabfluss	0.001	0.005	0.003	0.002	0	0.006
Basisabfluss 1	0.014	0.06	0.029	0.023	0.004	0.078
Basisabfluss 2	0.012	0.065	0.032	0.019	0.004	0.081
Infiltration aus OFG	0.002	0.016	0.006	0.005	0.002	0.02
Grundwasser- neubildung	0.012	0.063	0.031	0.019	0.004	0.079

* Das Einzugsgebiet des Faukenbachs umfasst auch die Abflüsse aus den (Teil-) Einzugsgebieten Birkelsgraben und Kesselgraben. Die Gesamtsumme in der letzten Spalte ergibt sich daher aus den Einzugsgebieten Schweinbach, Faukenbach und Katzenbach.

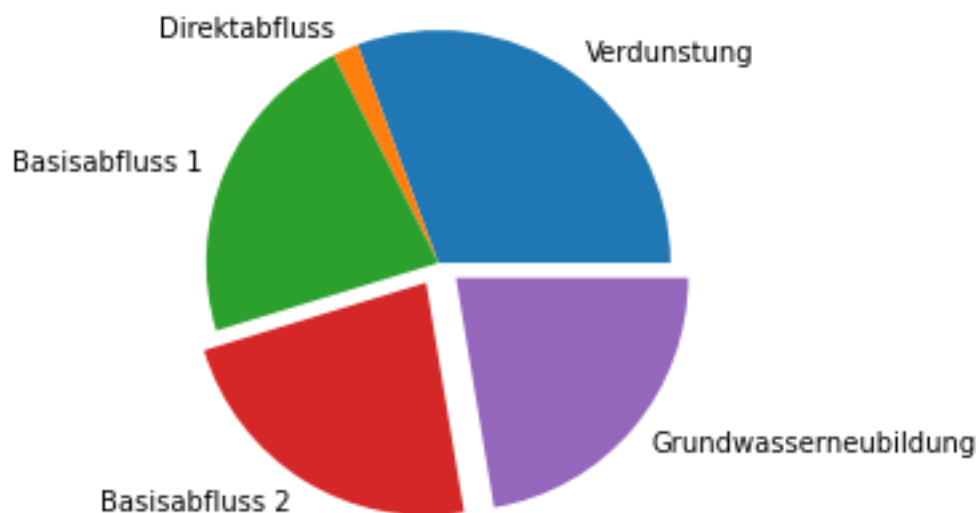


Abbildung 3.30: Anteile der Bilanzkomponenten in den vier betrachteten Einzugsgebieten.

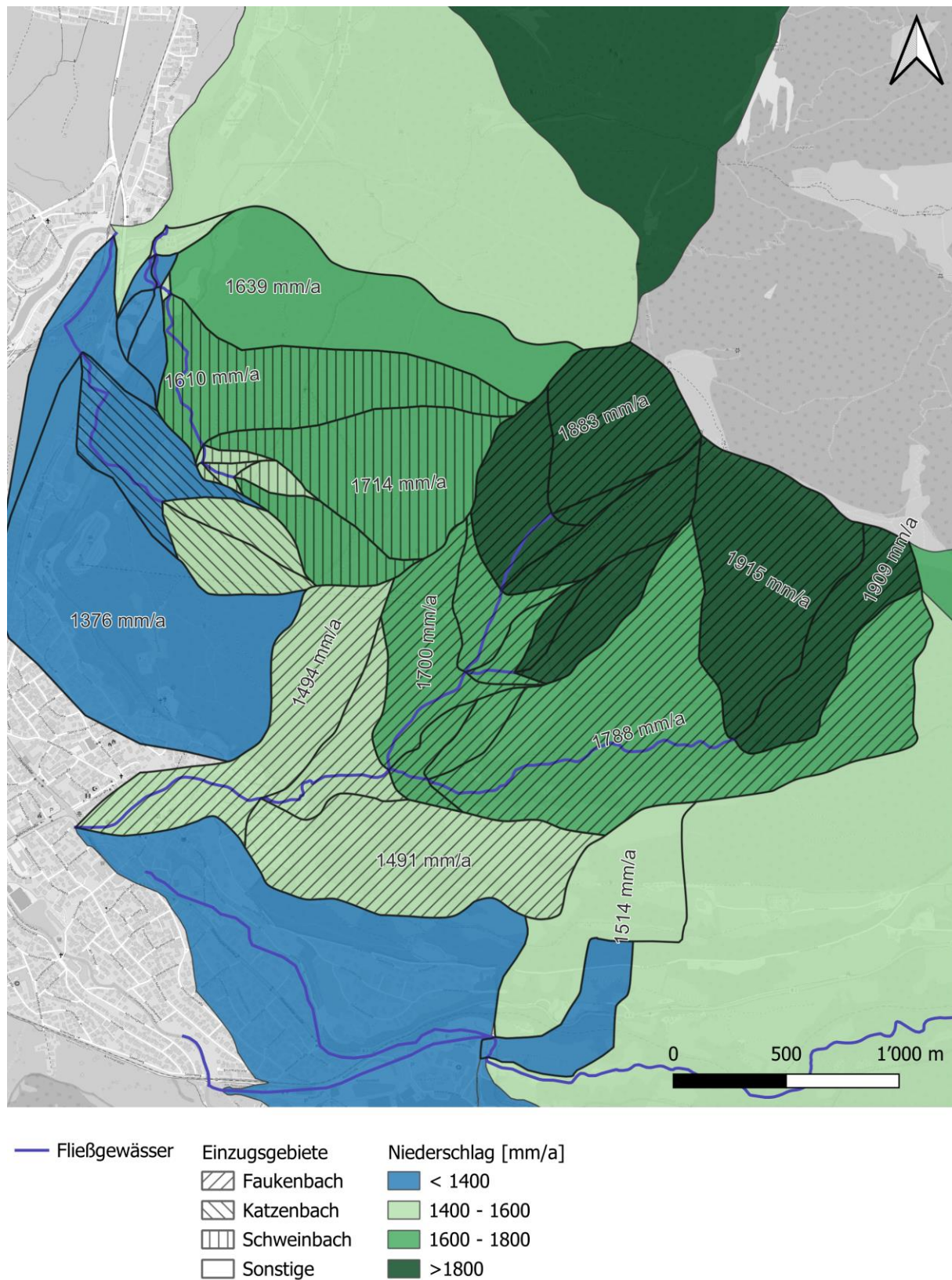
3.7.3 Kartendarstellungen

Im Nachfolgenden sind die relevanten Anteile der Wasserbilanz des hydrologischen Modells flächenhaft dargestellt. Dazu werden Mittelwerte über den betrachteten Zeitraum herangezogen.

Abbildung 3.31 zeigt die räumliche Verteilung des Niederschlags. In dieser Abbildung ist klar erkennbar, dass in den Höhenlagen ein bis zu 500 mm höherer Jahresniederschlag fällt als in den Regionen in Tallage.

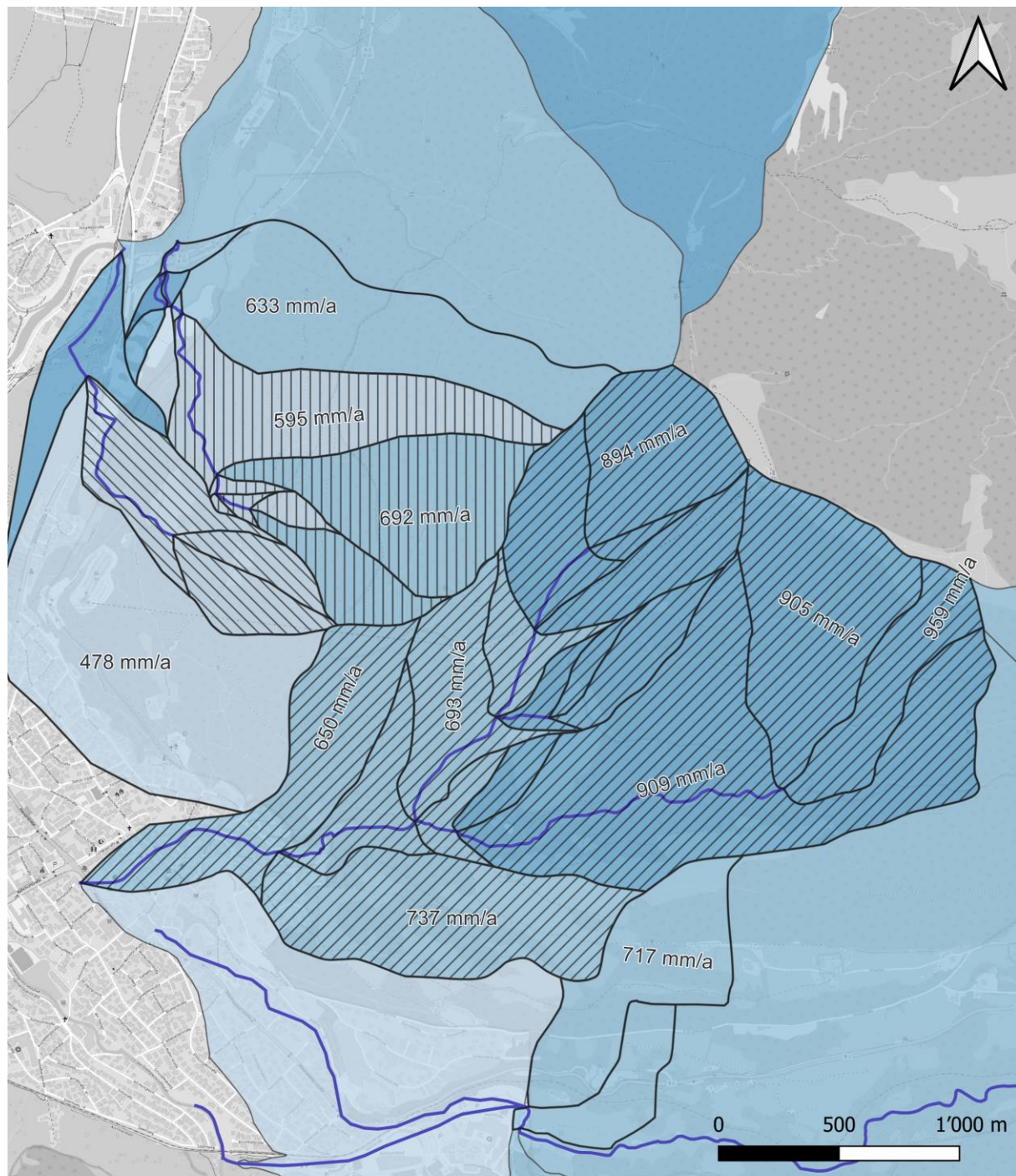
Das Hydrologische Modell basiert auf einer Speicherkaskade, die sich unter anderen aus Grundwasserspeicher 1 und dem Grundwasserspeicher 2 zusammensetzt. Die beiden Grundwasserspeicher sind im hydrologischen Modell bestimmend für die Abflussbildung (siehe Kapitel 3.7.2). Abbildung 3.32 stellt die Perkolation aus dem GW-Speicher 1 in den GW-Speicher 2 räumlich dar. Die höchsten Raten treten in den Bereichen mit den höchsten Niederschlägen (Höhenlagen) auf. Abbildung 3.33 stellt die Grundwasserneubildung, also die Verlustrate aus dem GW-Speicher 2, dar. Diese Rate entspricht der Bilanzkomponente, die ohne Oberflächengewässerpassage aus dem Modellgebiet abfließen würde.

Abbildung 3.34 stellt den mittleren Abfluss in den Oberflächengewässern dar. Die größten Abflüsse treten im Einzugsgebiet des Faukenbachs und des Kankers auf.



© OpenStreetMap Contributors, 2023

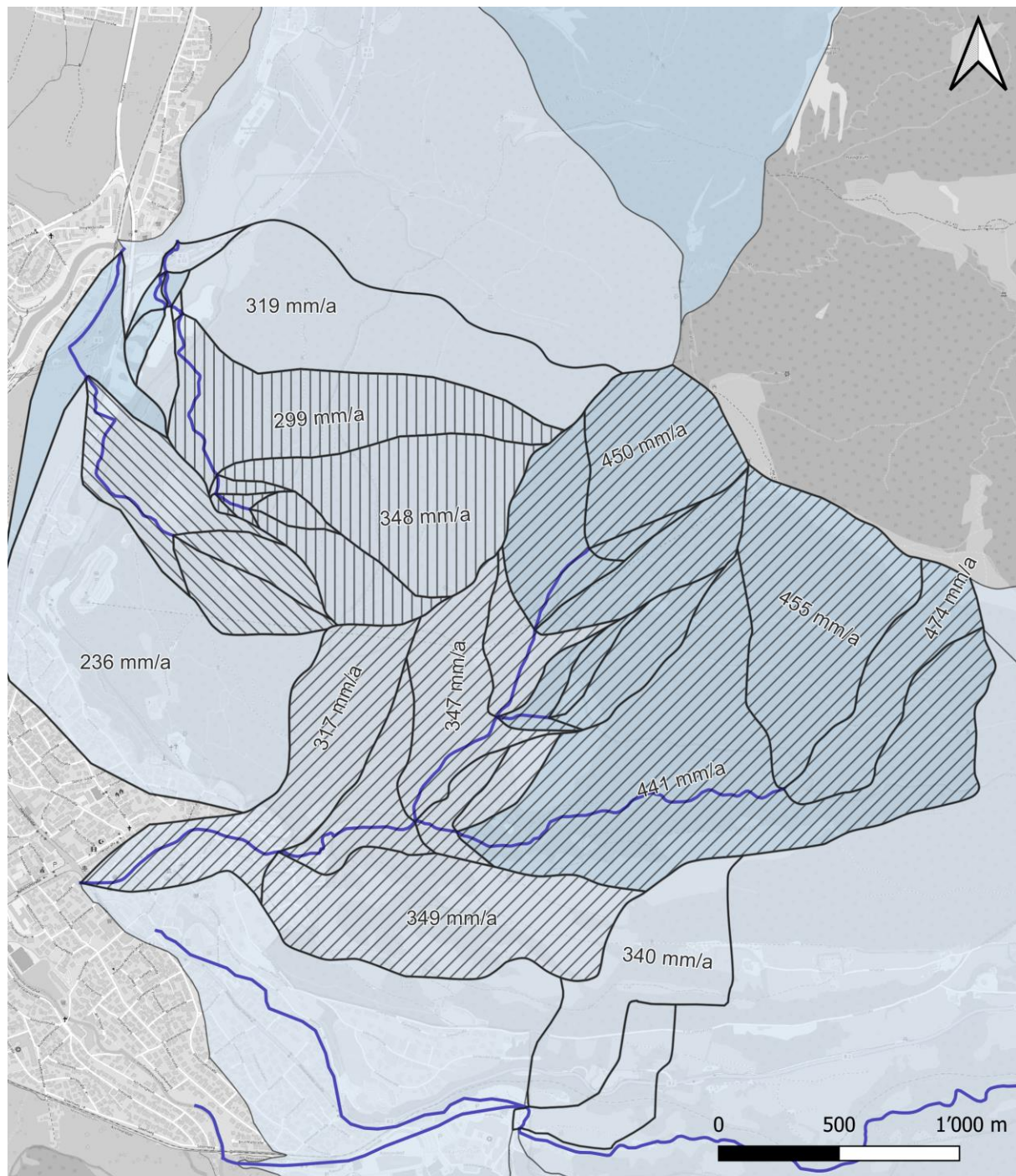
Abbildung 3.31: Mittlerer jährlicher Niederschlag im Modellgebiet



— Fließgewässer	Einzugsgebiete	GWN 1 [mm/a]
	Faukenbach	400 - 600
	Katzenbach	600 - 800
	Schweinbach	800 - 1000
	Sonstige	1000 - 1200

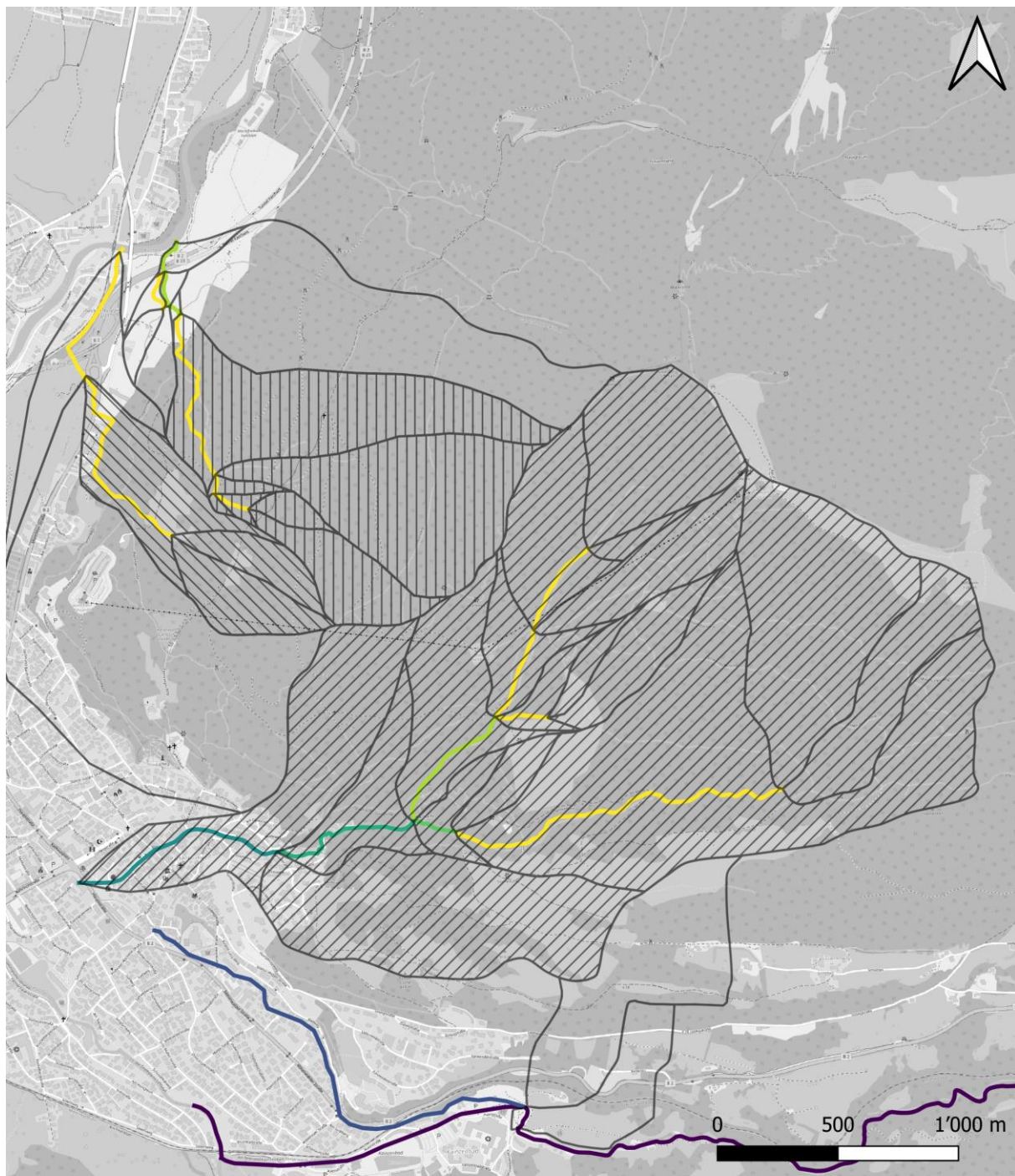
© OpenStreetMap Contributors, 2023

Abbildung 3.32: Mittlere jährliche Perkolation vom Grundwasserleiter 1 in den Grundwasserleiter 2



© OpenStreetMap Contributors, 2023

Abbildung 3.33: Grundwasserneubildung (Verlustrate aus dem Grundwasserleiter 2).



Einzugsgebiete	Abfluss [m^3/s]	
Faukenbach	< 0.025	0.1 - 0.125
Katzenbach	0.025 - 0.05	0.15 - 0.175
Schweinbach	0.05 - 0.075	> 0.2
Sonstige	0.075 - 0.1	

© OpenStreetMap Contributors, 2023

Abbildung 3.34: Mittlerer Abfluss in den Gerinnen

4 Fazit

Für die Untersuchungen am Wankmassiv wurde mit der Modellsoftware HechHMS ein Hydrologisches Modell aufgebaut. Das Modell basiert auf Klima- und Niederschlagsdaten des Deutschen Wetterdiensts und bildet die wesentlichen hydrologischen Prozesse im Modellgebiet ab.

Das hydrologische Modell wurde mit gemessenen Abflussganglinien am Lahnenwiesgraben (Pegel Burgrain) und am Kanker (Pegel Warmberg) kalibriert. Der Kalibrierungsprozess erfolgte in zwei Schritten. Während des zweiten Schrittes der Modellkalibrierung gelang es, die Anpassung weiter zu verbessern, indem die Geologie bei der Zonierung der Parameter berücksichtigt wurde.

Primär wurden die Einzugsgebiete von Schweinbach, Katzenbach und Faukenbach betrachtet. Das Einzugsgebiet des Faukenbachs beinhaltet auch die Teileinzugsgebiete Kesselgraben und Birkelsgraben.

Der mittlere Jahresniederschlag beträgt in den Einzugsgebieten fast 1.700 mm/a. Dieser Niederschlag bewirkt einen mittleren Oberflächenabfluss von etwa 120 l/s im Einzugsgebiet des Faukenbachs. Der geringste Abfluss wurde für das Einzugsgebiet des Katzenbachs mit etwa 6 l/s ermittelt.

Die Ergebnisse des hydrologischen Modells gehen in das Grundwassermodell des Wankmassivs (kup, 2023-2) wie folgt ein:

- Die Perkolation aus dem Grundwasserspeicher 1 wird als Randbedingung im Grundwassermodell Wankmassiv verwendet. Es wird nicht die Perkolation aus dem Grundwasserspeicher 2 (Grundwasserneubildung) verwendet, da das Grundwassermodell Wankmassiv die Bildung des Basisabflusses aus den tieferen Grundwasserleitern (Basisabfluss 2) mitberechnet.
- Die im Grundwassermodell angewandte Perkolation aus dem Grundwasserspeicher 1 entspricht der Summe der Bilanzkomponenten aus Basisabfluss 2 und der Grundwasserneubildung (insgesamt ca. 160 l/s) aus Tabelle 3.7.
- Das Modellgebiet des Grundwassermodells Wankmassiv erstreckt sich über eine Fläche von etwa 18,7 km². Im Vergleich dazu beträgt die Fläche der Einzugsgebiete Faukenbach, Schweinbach und Katzenbach etwa 6,5 km².
- Unter Berücksichtigung der Höhenabhängigkeit des Niederschlags im Modellgebiet des Grundwassermodells Wankmassiv, ergibt sich so eine mittlere Grundwasserneubildung von 435 l/s.

Zusätzlich gehen die berechneten Oberflächenabflüsse des hydrologischen Modells in die Bewertungen im Fachbeitrag WRRL (kup, 2023-1) ein.

LITERATURVERZEICHNIS

- Arbeitskreis KLIWA (Hrsg.). (2012). *Auswirkungen des Klimawandels auf Bodenwasserhaushalt und Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg, Bayern und Rheinland-Pfalz: Untersuchungen auf Grundlage von WETTREG2003- und WETTREG2006-Klimaszenarien*. KLIWA-Berichte, H. 17.
- Armbruster, V. (2002). *Grundwasserneubildung in Baden-Württemberg*. Freiburger Schriften zur Hydrogeologie.
- ATV-DVWK. (2002). *Merkblatt ATV-DVWK-M 504, Verdunstung in Bezug zu Landnutzung, Bewuchs und Boden*, ISBN 3-936514-03-8.
- Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. (2012). *CORINE Land Cover 10 ha*.
- DWD Climate Data Center (CDC). (2020). *Historische tägliche Stationsbeobachtungen (Temperatur, Druck, Niederschlag, Sonnenscheindauer, etc.) für Deutschland, Version v006*.
- DWD, Abteilung Hydrometeorologie. (2013). *REGNIE (REGionalisierte NIEederschläge)- Verfahrensbeschreibung & Nutzeranleitung, interner Bericht im DWD*. Offenbach.
- European Union, European Environment Agency (EEA). (2018). *Copernicus Land Monitoring Service*.
- GIT HydroS Consult GmbH. (2012). *GWN-BW 3.1*.
- Hydrologic Engineering Center. (2010). *HEC-GeoHMS - Geospatial Hydrologic Modeling Extension*.
- Hydrologic Engineering Center. (2020). *HEC-HMS User Manual*. US Army Corps of Engineers. Abgerufen am 23. April 2020 von <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.4>
- Hydrologic Engineering Center. (2021). *HMS Documentation - Estimating unit hydrograph parameters*.
- Hydrology Software Consulting J. Schulla. (2021). *Model Description WaSiM (Water balance Simulation Model)*.
- ILF Beratende Ingenieure. (2023). *GEOLOGISCH – HYDROGEOLOGISCHER BERICHT*.
- ILF Beratende Ingenieure. (2023-2). *Stellungnahme Hydrogeologische Modellvorstellung 03.03.2023*.
- kup. (2023-1). *Bericht A866-1 - B2 OU GAP mit Wanktunnel - Fachbeitrag Wasserrahmenrichtlinie - Gewässerverträglichkeitsprüfung*.
- kup. (2023-2). *Bericht A866-2 - B2 OU GAP mit Wanktunnel - Prinzipmodell*.
- LfU. (2016). *Einzugsgebiete und Fließgewässernetz 1:25.000*. Abgerufen am 9. 9 2021
- LfU. (2019). *Ergebnisse der Grundwasserneubildungsberechnung als shape-Dateien*.
- LfU. (2021). *Gewässerkundlicher Dienst (GKD)*. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU).

- Morche, D. (2008). *Dissertation - Untersuchungen zum fluvialen Sedimenttransport in Einzugsgebieten der nördlichen Kalkalpen (Reintal/Wettersteingebirge und Lahnenwiesgraben/Ammergauer Alpen)*.
- Planungsgemeinschaft Wanktunnel. (2023-1). *Erläuterungsbericht* .
- Planungsgemeinschaft Wanktunnel. (2023-2). *B 2 München-Mittenwald - Wassertechnische Untersuchung - Vorabzug 6/2023* .
- QGIS.org. (2020). *QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project*. Von <http://qgis.org> abgerufen
- Schulla, J. (1997). *Abhandlung zur Erlangung des Titels Doktor der Naturwissenschaften - Hydrologische Modellierung von Flussgebieten zur Abschätzung der Folgen von Klimaänderungen*.
- WWA Weilheim. (2021). *Abflussdaten des Lahnenwiesgrabens (Pegel Burgrain)*.

Anhang A Parametrisierung des Verdunstungsmodells und der Interzeption

Die Verdunstungsberechnung mit der Penman-Monteith-Gleichung erfordert eine landnutzungsabhängige Parametrisierung. Die Parametrisierung orientiert sich an den Annahmen aus Armbruster (2002), Schulla (1997) sowie der Parametrisierung von WASIM (Hydrology Software Consulting J. Schulla, 2021).

Tabelle 1: Parameter ohne Saisonalität

	Titel	Albedo α	f
1	Stadt	0.10	2.00
2	Siedlung	0.10	2.00
3	Ackerland	0.25	1.97
4	Gruenland	0.25	1.97
5	Obstanbau	0.25	2.25
6	versch. landw. Flaechen	0.25	1.97
7	Laubwaelder	0.17	2.92
8	Nadelwaelder	0.12	2.80
9	Mischwaelder	0.15	2.98
10	Buschbrache	0.20	2.49
11	Feuchtfleachen	0.15	2.00
12	Gewaesser	0.05	2.00
13	Schneefleachen	0.38	2.00
14	Fels	0.12	2.00
1	Stadt	0.10	2.00

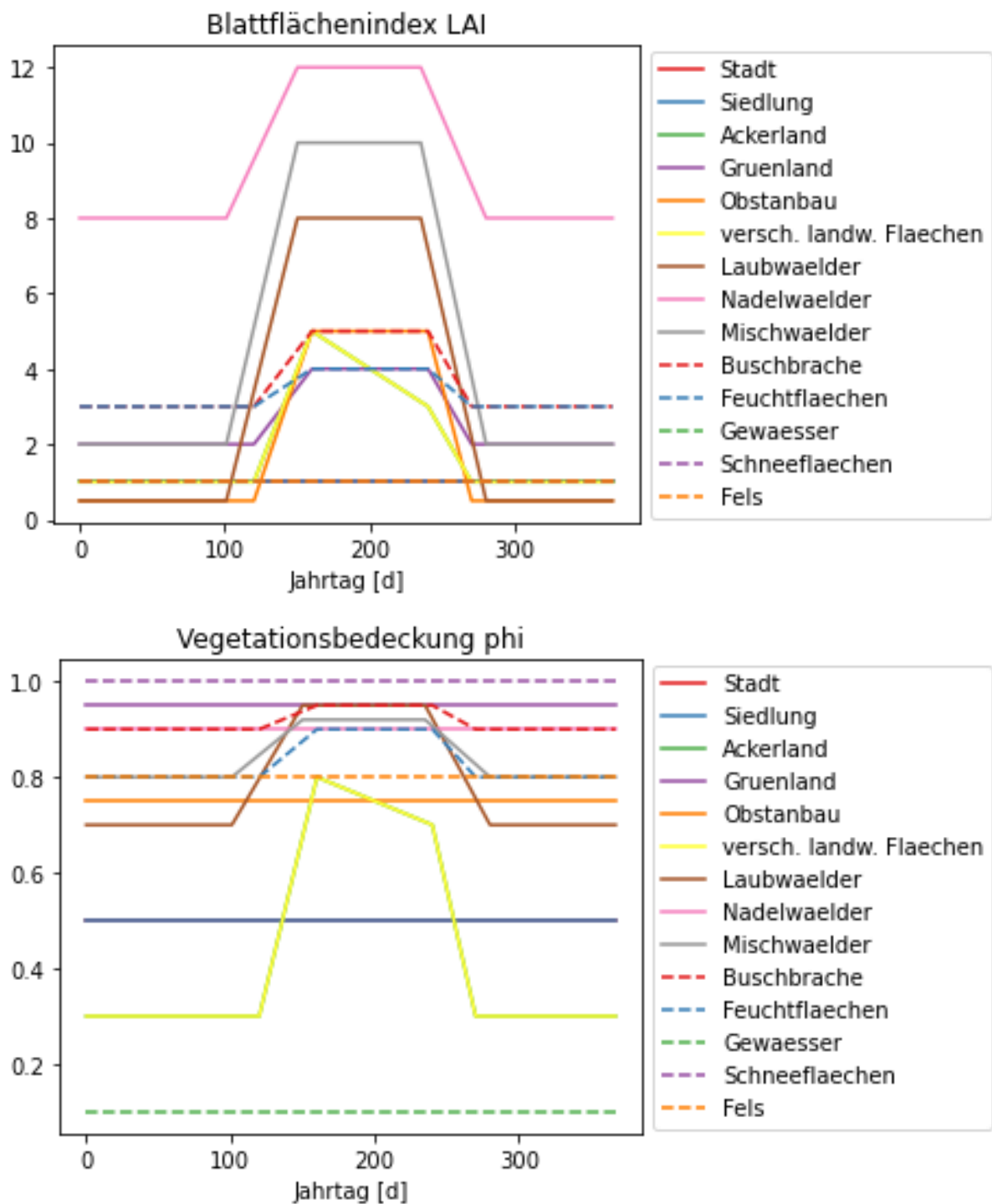


Abbildung A.1: Blattflächenindex LAI und Vegetationsbedeckung phi

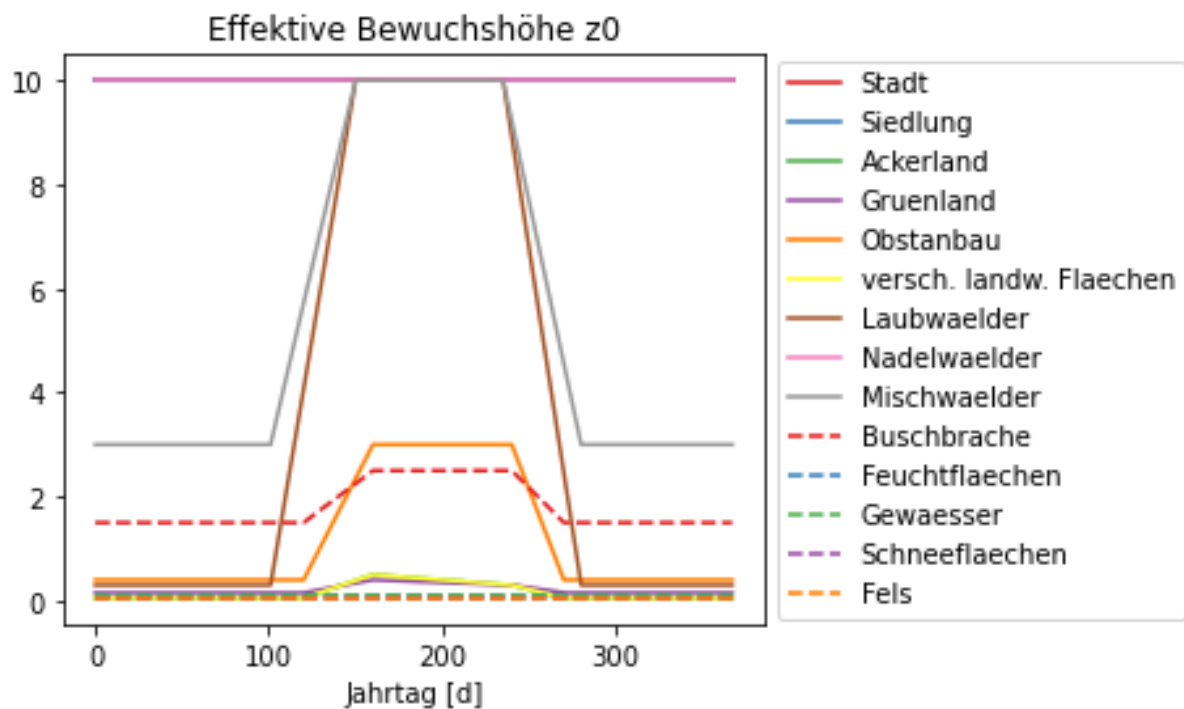
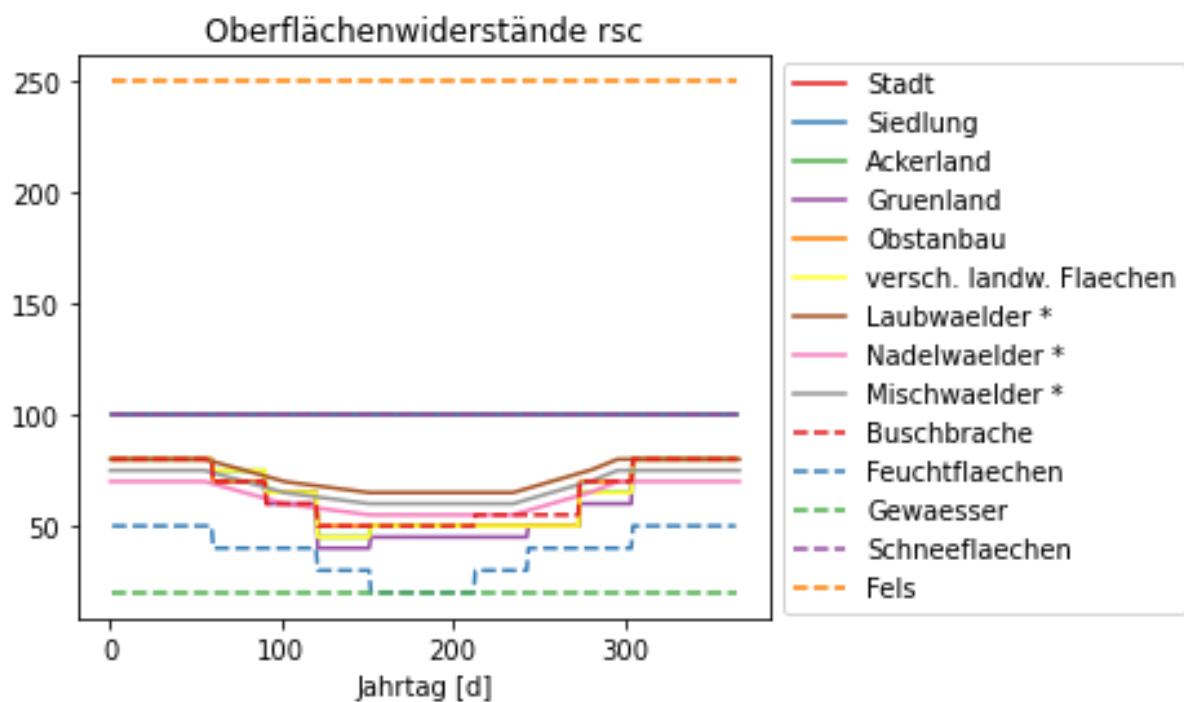
Abbildung A.3: Effektive Bewuchshöhe z_0 

Abbildung A.2: Oberflächenwiderstand r_{sc} . Bei mit einem * versehenen Landnutzungen wurden der Vegetationszeitraum im Vergleich zu Schulla (1997) etwas verkürzt.

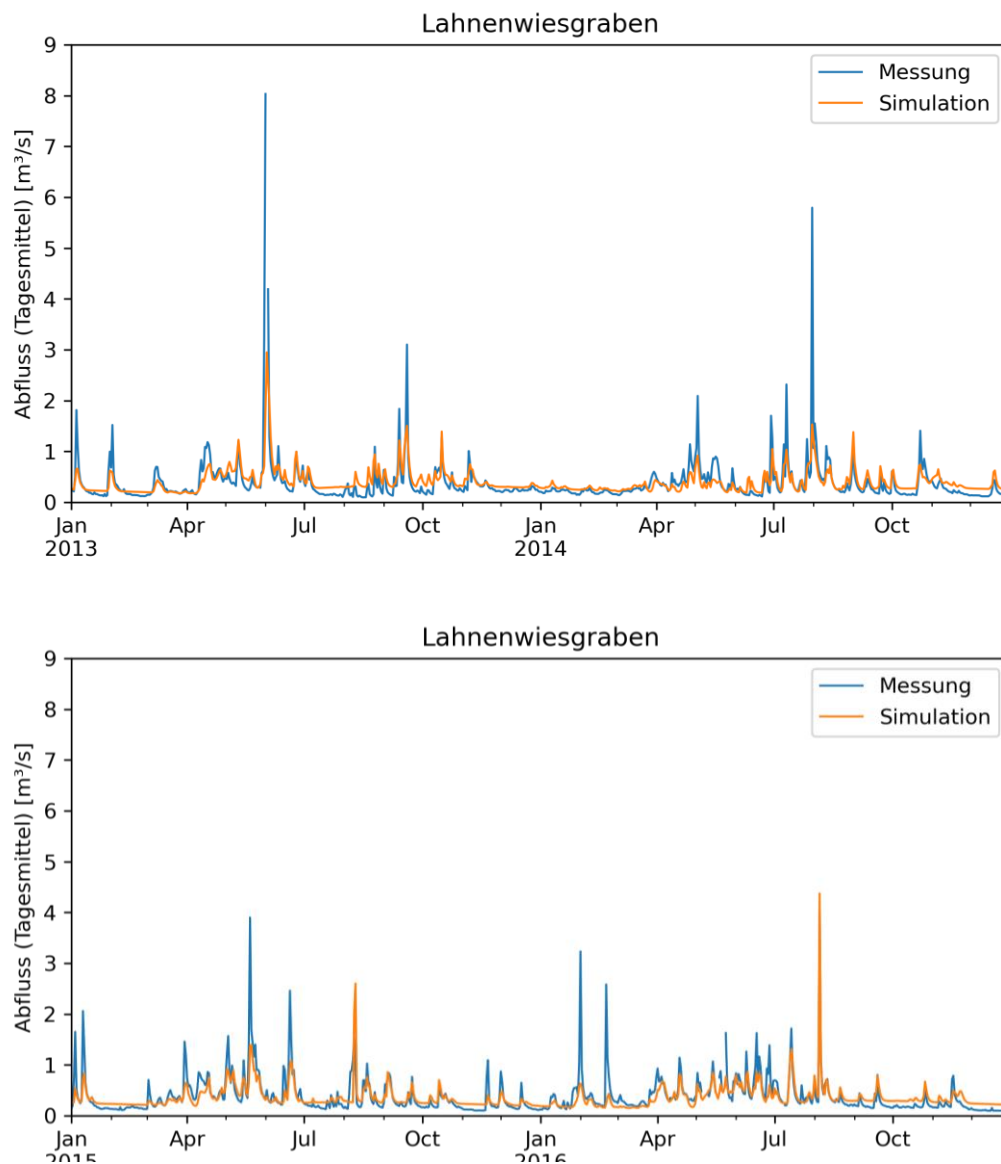
Anhang B Dokumentation der Kalibrierungsschritte**B.1 Kalibrierungsschritt 1**

Abbildung B.1: Abflussganglinien am Lahnenwiesgraben 2013 - 2016

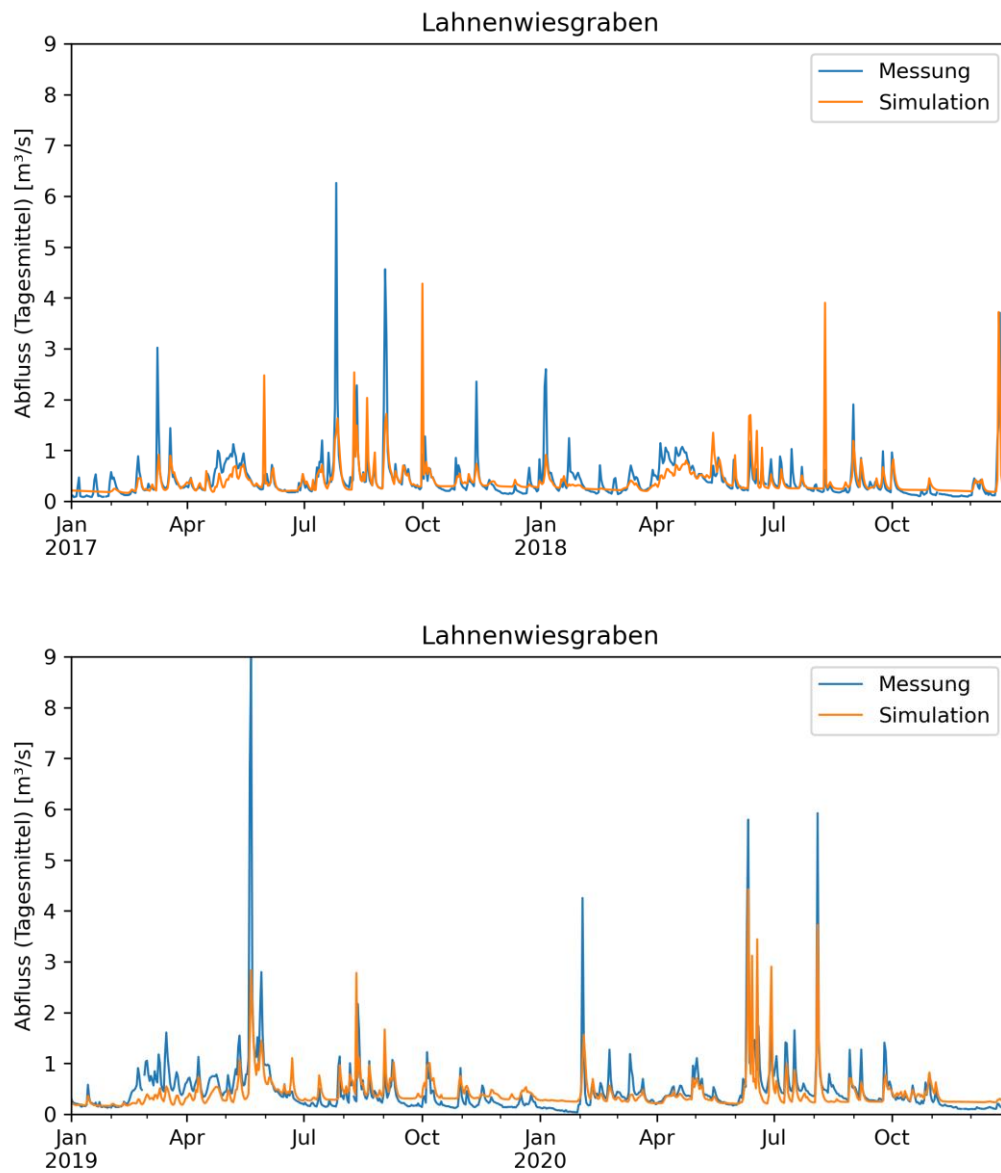


Abbildung B.2: Abflussganglinien am Lahnenwiesgraben 2017 - 2020

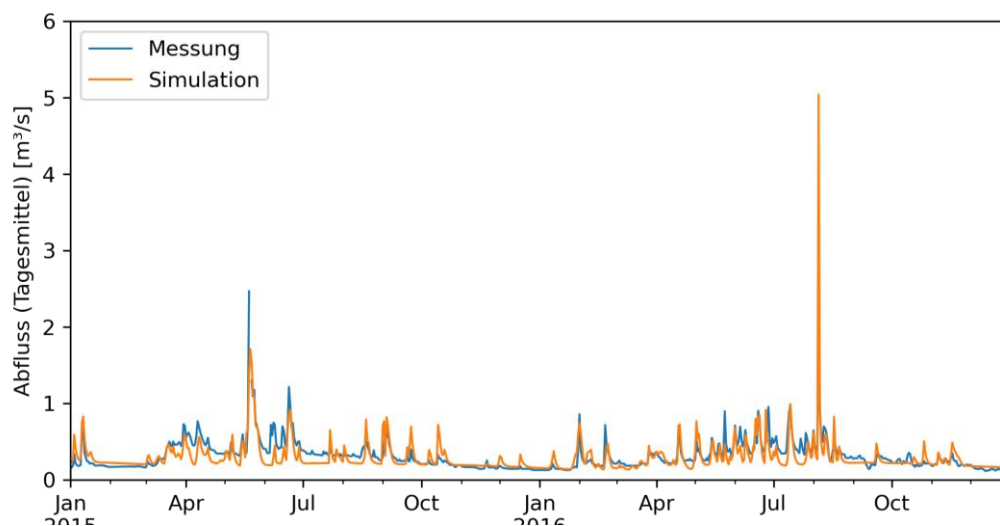
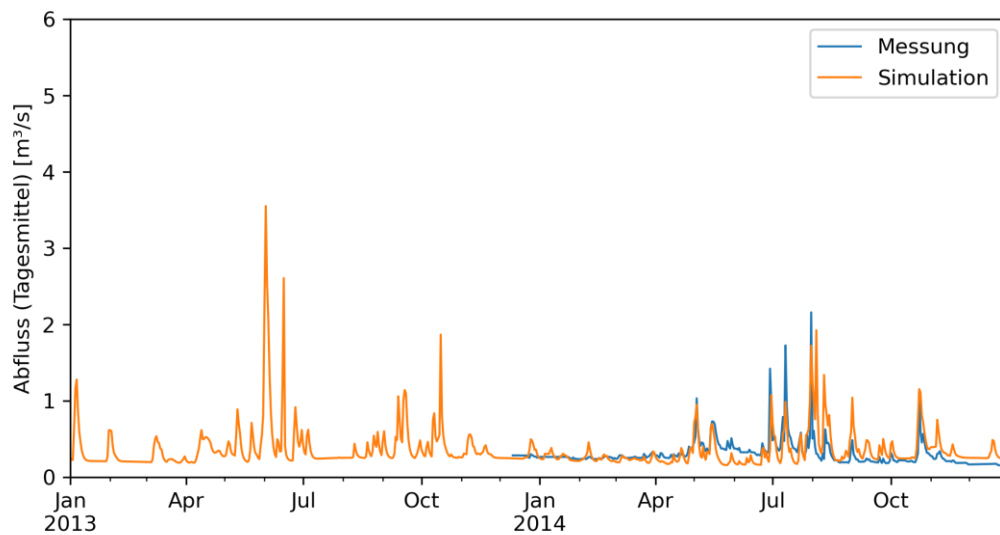
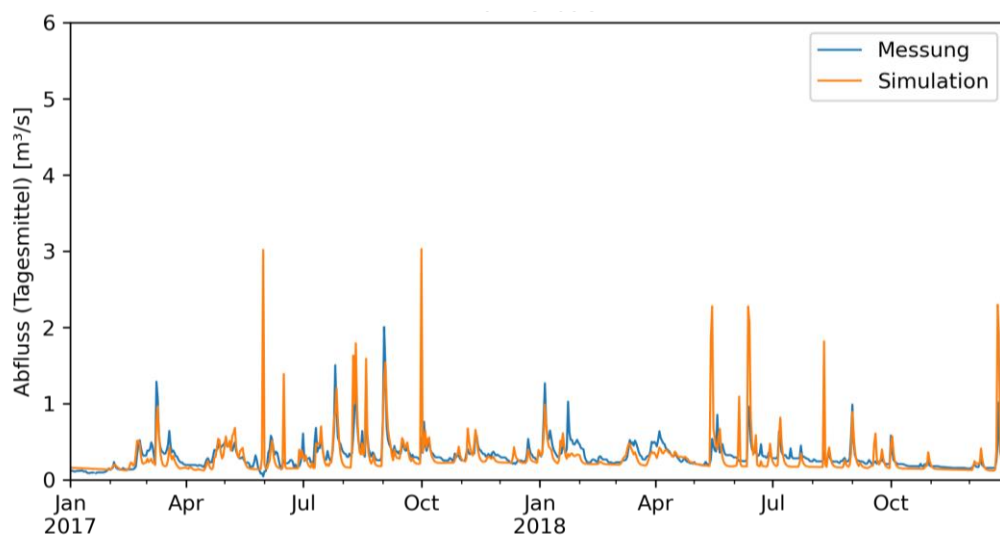


Abbildung B.3: Abflussganglinien am Kanker 2013 - 2016



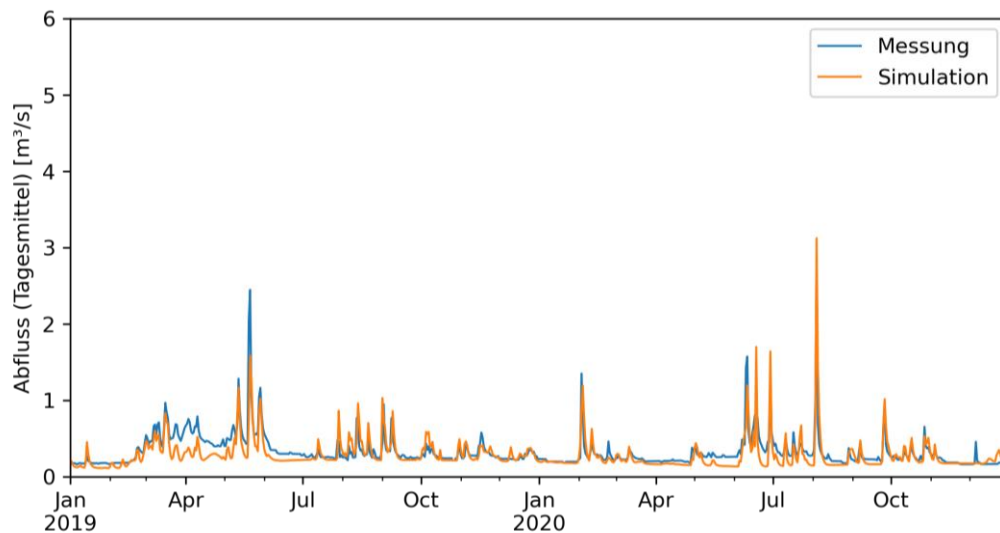


Abbildung B.4: Abflussganglinien am Kanker 2017 - 2020

B.2 Kalibrierungsschritt 2

Tabelle B.1 gibt einen Überblick über die in den Einzugsgebieten erzielte Anpassung. Im Lahnenwiesgraben wird der quadrierende NSE-Koeffizient etwas höher als der auf Absolutwerten basierende NSE-Koeffizient. Die Abweichung der mittleren Abflüsse beträgt in beiden EZG unter 10%. Abbildung B.5: stellt den in den einzelnen Jahren erzielte NSE1-Koeffizient in den beiden Einzugsgebieten dar. Insbesondere am Kanker ist eine hohe Schwankungsbreite erkennbar. Gründe könnten u.a. Probleme in der Schneeschmelze-Berechnung oder Veränderungen an der Messstelle sein (im Kanker ist laut Aussage des WWAs auch der Biber aktiv). Die Abflussganglinien werden im Rahmen von Kapitel 3.6.6 dokumentiert

Tabelle B.1. Statistik der Einzugsgebiete

Einzugsgebiet	MW Mess.	MW Sim.	NSE	NSE1
	[m³/s]	[m³/s]	[]	[]
Lahnenwiesgraben	0.42	0.41	0.51	0.43
Kanker	0.32	0.30	0.56	0.31

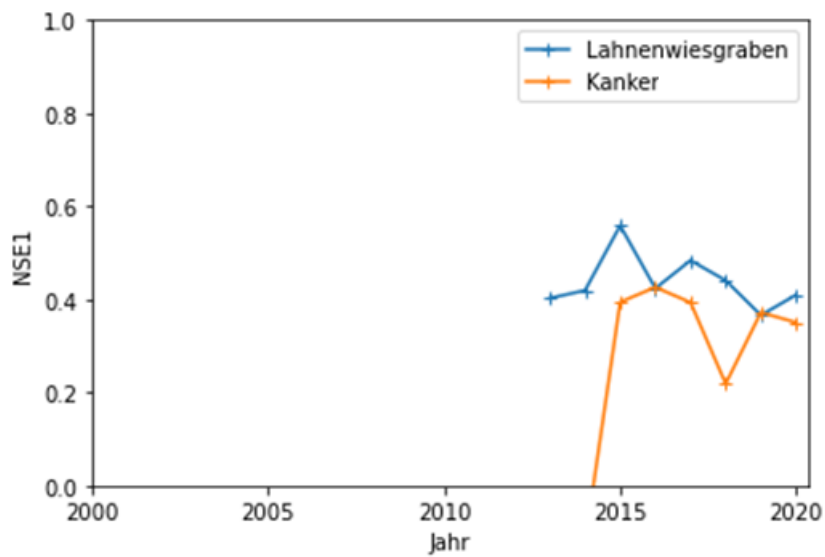


Abbildung B.5: NSE1-Koeffizient nach Jahren