

# Charakterisierung saisonaler Wasserstandsverläufe in einem Tieflandgewässersystem

Abschlussarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science

eingereicht am 26.08.2025

von

Tom Marek Schülke

Matrikel-Nr.: 220201392

**Gutachter:**

Dipl. Ing. Marc Schneider

Satower Str. 48

18059 Rostock

**Zweitgutachter:**

Prof. Dr.-Ing. habil. Jens Tränckner

Satower Str. 48

18059 Rostock

## I. Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit untersucht die jahreszeitliche Wasserstandsdynamik in einem typischen norddeutschen Tieflandgewässersystem am Beispiel der Kleinen Beke in Mecklenburg-Vorpommern. Ziel ist die Ableitung repräsentativer Wasserstände für Trocken-, Normal- und Nassjahre unter Berücksichtigung der Nutzbarkeit angrenzender Grünlandflächen. Hierfür werden umfangreiche GPS-Vermessungen zur geometrischen Erfassung des etwa 1.8 km langen Gewässerabschnitts sowie der einmündenden Gräben durchgeführt. Auf dieser Datengrundlage wird ein hydraulisches Modell entwickelt, das sowohl stationär als auch instationär kalibriert und validiert wird. Die Modellsteuerung erfolgt über eine auf Abflussspenden basierende Übertragung langjähriger Durchflussdaten vom amtlichen Pegel Bröbberow. Die instationäre Simulation über einen Zeitraum von 30 Jahren ermöglicht die Ableitung typischer Wasserstandsdynamiken und Dauerlinien.

Die Modellgüte ist insgesamt hoch, mit Abweichungen im Bereich von 5 bis 10 cm. Lediglich in einem der Gräben treten größere Unsicherheiten auf. Die langjährigen Mittelwasserstände betragen 7.47 m NHN in der Kleinen Beke. In den Gräben liegen sie etwa 10 cm höher. In nassen Jahren liegt der Wasserstand in der Kleinen Beke im Mittel rund 20 cm über dem Niveau von Normal- und Trockenjahren. In den Gräben beträgt diese Differenz etwa 10 cm. Zwischen Normal- und Trockenjahren zeigen sich hingegen nur geringe Unterschiede. Die Analyse der Wasserstandsmediane verdeutlicht, dass es sich bei den angrenzenden Flächen um wechselhaft feuchte Wiesen mit guter Futterqualität handelt. Die Abhängigkeit der Wasserstände in den Gräben von der Kleinen Beke ist deutlich erkennbar. Ein Vergleich mit einem vereinfachten, GIS-basierten Modellansatz ergibt systematische Abweichungen hinsichtlich der Wasserspiegelbreite und Wasserstandstiefe. Die berechneten Wasserstände liegen leicht unter denen des HEC-RAS-Modells. Der GIS-Ansatz erweist sich jedoch grundsätzlich als geeignet zur Abschätzung übergeordneter Wasserstandsentwicklungen. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für weiterführende wasserwirtschaftliche Fragestellungen in vergleichbaren Tieflandeinzugsgebieten.

## II. Abstract

This study examines seasonal water level dynamics in a typical North German lowland water system using the example of the Kleine Beke in Mecklenburg-Western Pomerania. The aim is to derive representative water levels for dry, normal and wet years, taking into account the usability of adjacent grassland areas.

For this purpose, extensive GPS measurements are carried out to record the geometry of the approximately 1.8 km long section of the watercourse and the tributary ditches. Based on this data, a hydraulic model is developed, which is calibrated and validated both in steady and unsteady states. The model is controlled by transferring long-term flow data from the official Bröbberow gauge based on discharge rates. The transient simulation over a period of 30 years enables the derivation of typical water level dynamics and duration curves.

The overall model quality is high with deviations in the range of 5 to 10 cm. Only one of the ditches shows greater uncertainties. The long-term average water levels are 7.47 m NHN in the Kleine Beke. They are about 10 cm higher in the ditches. In wet years, the water level in the Kleine Beke is on average around 20 cm above the level of normal and dry years. In the ditches, this difference is about 10 cm. Between normal and dry years, however, there are only minor differences. Analysis of the water level medians shows that the adjacent areas are variable wet meadows with good forage quality. The dependence of the water levels in the ditches on the Kleine Beke is clearly recognizable. A comparison with a simplified, GIS-based model approach reveals systematic deviations in terms of water level width and water level depth. The calculated water levels are slightly below those of the HEC-RAS model. However, the GIS approach proves to be fundamentally suitable for estimating overall water level developments.

The results serve as a basis for further water management issues in comparable lowland catchment areas.

### III. Inhaltsverzeichnis

I.	<b>Kurzfassung</b> .....	II
II.	<b>Abstract</b> .....	III
III.	<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	IV
IV.	<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	VII
V.	<b>Formelverzeichnis</b> .....	IX
VI.	<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	X
VII.	<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	XII
1.	<b>Einleitung</b> .....	1
2.	<b>Grundlagen</b> .....	3
2.1	Hydraulische Grundlagen .....	3
2.1.1	Strömungsarten und Abflusszustände .....	3
2.1.2	Die Saint-Venant Gleichungen .....	4
2.1.3	Fließgesetze .....	5
2.1.4	Fließwiderstände .....	6
2.2	Wasserstandsverhalten .....	8
2.2.1	Saisonale Dynamik .....	8
2.2.2	Hydrologische Einflussgrößen .....	10
2.3	Grundwasserflurabstand .....	11
2.3.1	Bedeutung des Grundwassers .....	11
2.3.2	Wechselwirkungen .....	14
2.3.3	Anthropogene Einflüsse .....	15
2.4	Grünland .....	17
2.4.1	Klassifizierung .....	17
2.4.2	Moorböden .....	19
3.	<b>Untersuchungsgebiet</b> .....	20
3.1	Standort .....	20
3.2	Bauwerke .....	22
4.	<b>Material und Methoden</b> .....	23
4.1	Datengrundlage .....	23
4.2	Vorbereitende Untersuchungen .....	24
4.2.1	GPS-Vermessung .....	24
4.2.2	Aufbereitung der Vermessungsdaten .....	24

---

4.2.3	Übertragung Durchflussdaten .....	26
4.2.4	Bestimmung der Rauheiten.....	28
4.2.5	Festlegung Trocken- und Nassjahre .....	28
4.3	Modellerstellung HEC-RAS .....	29
4.3.1	Software.....	29
4.3.2	Modellaufbau.....	29
4.3.3	Berücksichtigung von Bauwerken .....	30
4.3.4	Stationäres Modell .....	31
4.3.5	Instationäres Modell .....	31
4.3.6	Modellannahmen.....	32
4.4	Auswertung der instationären Ergebnisse.....	34
4.5	Vergleich mit vereinfachtem Ansatz .....	35
4.5.1	Modellvergleich .....	35
<b>5.</b>	<b>Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>37</b>
5.1	Fließquerschnitte.....	37
5.2	Durchflussübertragung.....	38
5.3	Rauheiten.....	40
5.4	Stationäres Modell .....	42
5.4.1	Hydraulische Parameter.....	42
5.4.2	Modellgüte .....	42
5.4.3	Räumliche Unterschiede .....	43
5.5	Instationäres Modell .....	44
5.5.1	Deskriptive Statistik.....	44
5.5.2	Modellgüte .....	45
5.5.3	Darstellung.....	46
5.5.4	Diskussion.....	48
5.6	Wasserstände .....	49
5.6.1	Saisonaler Verlauf.....	49
5.6.2	Deskriptive Statistik.....	51
5.6.3	Dauerlinien.....	51
5.6.4	Einordnung.....	55
5.7	Vergleich mit GIS-Ansatz .....	57
5.7.1	Sohlhöhen.....	57
5.7.2	Szenario 1: Kalibrierungszeitraum .....	58

5.7.3	Szenario 2: Mittelwasser .....	60
5.7.4	Szenario 3: Sommerhalbjahr .....	62
5.7.5	Szenario 4: Winterhalbjahr .....	64
5.7.6	Beurteilung der Modellergebnisse .....	66
<b>6.</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>69</b>
<b>VIII.</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>72</b>
<b>IX.</b>	<b>Anhang .....</b>	<b>XIII</b>

## IV. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassifizierung des Bewuchses nach DVWK-M 220 (alt) und DWA-M 524 (neu) (Grafik: U. Stefan in (DWA, 2020)).....	7
Abbildung 2: Verlauf der saisonalen Änderungen des Durchflusses ausgewählter Fließgewässer (eigene Darstellung nach (Pegelportal MV, 2025)) .....	9
Abbildung 3: Austauschgrößen zwischen Oberflächen- und Grundwasser (Mey, 2011) ..	15
Abbildung 4: Lage des Untersuchungsgebiets (Quelle Gewässerdaten: (LUNG-MV (b), 2025)) .....	20
Abbildung 5: Brücke bei Neukirchen im Unterlauf des betrachteten Fließgewässerabschnitts der Kleinen Beke nahe Station 21+420 (eigene Aufnahme) .....	22
Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung des Fließquerschnitts 1 (Station 21+420) nahe der Brücke bei Neukirchen (eigene Darstellung).....	25
Abbildung 7: Lage und Stationierung der Querprofile im UG der Kleinen Beke.....	26
Abbildung 8: Monatsmittel für Wasserstand und Durchfluss des amtlichen Pegels Bröbberow für den Zeitraum 1975 bis 2025 .....	27
Abbildung 9: Prinzipdarstellung der Ineffective Flow Areas bei Graben 1 - Profil 0+064 ..	33
Abbildung 10: Sohlhöhen der Fließgewässerabschnitte in zehnfach überhöhter Darstellung entlang der Fließstrecke .....	38
Abbildung 11: Durchflussreihen ermittelt aus der Abflussspende des Pegels Bröbberow und der Einzugsgebietsfläche des jeweiligen Gewässerabschnitts .....	39
Abbildung 12: Unterschiede zwischen gemessenen und modellierten Wasserständen entlang der Gewässerachse .....	43
Abbildung 13: Vergleich der Wasserstandsganglinien zwischen Modell- und Messwerten für den Kalibrierungszeitraum .....	46
Abbildung 14: Monatsmittelwasserstände der Messwerte und des Modells für den Kalibrierungszeitraum .....	47
Abbildung 15: Vergleich der übertragenen und der für das instationäre Modell verwendeten Abflüsse im Grabensystem .....	49
Abbildung 16: Langjährige Monatsmittelwasserstände je Abschnitt, gestrichelte Linie: langjähriger Jahresmittelwasserstand.....	50
Abbildung 17: Mehrjährige Dauerlinien für Pegel P1 an Station 22+122 der Kleinen Beke für Normal-, Trocken- und Nassjahre gemäß (LAWA, 2018).....	52

---

Abbildung 18: Mehrjährige Dauerlinien für Pegel P5 an Station 0+317 des Grabens 2 für Normal-, Trocken- und Nassjahre gemäß (LAWA, 2018).....	53
Abbildung 19: Mehrjährige Dauerlinien für Pegel P7 an Station 0+415 des Grabens 1 für Normal-, Trocken- und Nassjahre gemäß (LAWA, 2018).....	54
Abbildung 20: Modellvergleich Szenario 1 - Längsschnitt der Wasserstände.....	59
Abbildung 21: Modellvergleich Szenario 2 - Längsschnitt der Wasserstände.....	61
Abbildung 22: Modellvergleich Szenario 3 - Längsschnitt der Wasserstände.....	63
Abbildung 23: Modellvergleich Szenario 4 - Längsschnitt der Wasserstände.....	65

**V. Formelverzeichnis**

Formel 1: Saint-Venant Gleichungen.....	4
Formel 2: Fließgesetz nach de Chézy .....	5
Formel 3: Fließgesetz nach Manning.....	5
Formel 4: Fließgesetz nach Darcy-Weisbach .....	5
Formel 5: Wasserbilanz bei übereinstimmenden ober- und unterirdischen EZG (Weiler & Miegel, 2016) .....	10
Formel 6: Abflussspende nach Uhden.....	16
Formel 7: Berechnung der Abflussspende.....	27

## VI. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verkrautungsklasse (n. Nitschke 1972) in (Dörter, 1985).....	7
Tabelle 2: Charakterisierung vergleichbarer Gewässer der Kleinen Beke (FIS-MV, 2025)	10
Tabelle 3: Zuordnung von Feuchtestufen zu Grundwasserflurabständen in Anlehnung an LUNG-MV (2010) und Succow & Joosten (2001), (Schneider, 2024) bearbeitet.....	13
Tabelle 4: Wasserstufen und Wasserstufen-Ausbildungen für Moore und andere Feuchtgebiete (Koska, 2001).....	14
Tabelle 5: Unterteilung der Grünlandstandortfaktoren nach (Dierschke & Briemle, 2008)	17
Tabelle 6: Intensitätsstufen der Grünlandnutzung in Anpassung an landwirtschaftliche Wasserstufen (Alabsi, 2010) nach (Bockholt & Fuhrmann, 1994).....	18
Tabelle 7: Verwendete Daten mit dazugehöriger Quelle .....	23
Tabelle 8: Eingangsrauhigkeiten für das stationäre Modell .....	28
Tabelle 9: Eigenschaften der Durchlässe im Modell.....	30
Tabelle 10: Verwendete Randbedingungen für den stationären Zustand .....	31
Tabelle 11: Graben 1 - Anpassung der Durchflussrandbedingung .....	33
Tabelle 12: Randbedingungen für den Modellvergleich.....	36
Tabelle 13: Geometrische Eigenschaften der Fließquerschnitte je Gewässerabschnitt ...	37
Tabelle 14: Vergleich der Abflussspenden für die Zeitpunkte der Durchflussmessungen 2024 / 2025.....	38
Tabelle 15: Rauheiten für den Vermessungszeitpunkt im April 2025.....	40
Tabelle 16: Abschätzung der Rauheitsbeiwerte nach dem Verfahren von Cowan .....	41
Tabelle 17: Saisonale Rauheitsfaktoren zur Berücksichtigung des Bewuchseinflusses ...	41
Tabelle 18: Mittelwerte ausgewählter hydraulischer Parameter zur Beschreibung des Abflussregimes zum Messzeitpunkt vom 15.04.2025 bis 17.04.2025.....	42
Tabelle 19: Modellgüte für den stationären Zustand zum Messzeitpunkt vom 15.04.2025 bis 17.04.2025. Bias, MAE und RMSE in [m]; $R^2$ ist dimensionslos .....	42
Tabelle 20: Grundlegende statistische Kenngrößen der gemessenen und modellierten Wasserstände in [m NHN].....	45
Tabelle 21: Modellgüte für den instationären Zustand. Bias, MAE und RMSE in [m]; KGE, NSE und $R^2$ sind dimensionslos.....	45
Tabelle 22: Statistische Auswertung der Monatsmittelwerte [m NHN] für den instationären Berechnungszustand .....	51

Tabelle 23: Jahresmediane je Gewässerabschnitt und Zeitraum .....	55
Tabelle 24: Ergebnisse der Rasterstatistik der Höhen [m NHN] des DGM 1 entlang des Transektes .....	55
Tabelle 25: Abstände [cm] unter Flur entlang des Pegeltransektes im UG.....	55
Tabelle 26: Auswertung der Sohlhöhendifferenzen [m] zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell .....	57
Tabelle 27: Vergleich hydraulischer Parameter Szenario 1; A = Fließquerschnitt, v = Fließgeschwindigkeit, WB = Wasserspiegelbreite, $l_{WST}$ = Wasserstandsgefälle.....	58
Tabelle 28: Modellvergleich Szenario 1 – Kennzahlen. Bias, MAE und RMSE in [m]; $R^2$ ist dimensionslos .....	60
Tabelle 29: Vergleich hydraulischer Parameter Szenario 2; A = Fließquerschnitt, v = Fließgeschwindigkeit, WB = Wasserspiegelbreite, $l_{WST}$ = Wasserstandsgefälle.....	60
Tabelle 30: Modellvergleich Szenario 2 - Kennzahlen. Bias, MAE und RMSE in [m]; $R^2$ ist dimensionslos .....	62
Tabelle 31: Vergleich hydraulischer Parameter Szenario 3; A = Fließquerschnitt, v = Fließgeschwindigkeit, WB = Wasserspiegelbreite, $l_{WST}$ = Wasserstandsgefälle.....	62
Tabelle 32: Modellvergleich Szenario 3 - Kennzahlen. Bias, MAE und RMSE in [m]; $R^2$ ist dimensionslos .....	64
Tabelle 33: Vergleich hydraulischer Parameter Szenario 4; A = Fließquerschnitt, v = Fließgeschwindigkeit, WB = Wasserspiegelbreite, $l_{WST}$ = Wasserstandsgefälle.....	64
Tabelle 34: Modellvergleich Szenario 4 - Kennzahlen. Bias, MAE und RMSE in [m]; $R^2$ ist dimensionslos .....	66

**VII. Abkürzungsverzeichnis**

AWS	<i>Absinkwasserstufe</i>
BWS	<i>Basiswasserstufe</i>
DGM	<i>Digitales Geländemodell</i>
DOP	<i>Digitale Orthophotos</i>
DVWK	<i>Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V.</i>
DWA	<i>Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.</i>
DWD	<i>Deutscher Wetterdienst</i>
EZG	<i>Einzugsgebiet</i>
F	<i>Feuchtezahl (nach Ellenberg)</i>
FK	<i>Feldkapazität</i>
GIS	<i>Geoinformationssystem</i>
GOK	<i>Geländeoberkante</i>
GWFA	<i>Grundwasserflurabstand</i>
KGE	<i>Kling-Gupta-Effizienz</i>
LAWA	<i>Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser</i>
LOB	<i>left overbank</i>
LUNG	<i>Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie</i>
MAE	<i>Mean Absolute Error</i>
m NHN	<i>Meter über Normalhöhennull (DHHN 16)</i>
MQ (a)	<i>Mittlerer jährlicher Durchfluss</i>
MQ (m)	<i>Mittlerer monatlicher Durchfluss</i>
nFK	<i>nutzbare Feldkapazität</i>
NSE	<i>Nash-Sutcliffe-Effizienz</i>
PNP	<i>Pegelnullpunkt</i>
PWP	<i>Permanenter Welkepunkt</i>
QP	<i>Querprofil</i>
RMSE	<i>Root Mean Square Error</i>
ROB	<i>right overbank</i>
SPI	<i>Standard Precipitation Index</i>
TGL	<i>Technischen Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen</i>
TLT	<i>Tal-Landschaftstyp</i>
TM	<i>Trockenmasse</i>
UG	<i>Untersuchungsgebiet</i>
WBV	<i>Wasser- und Bodenverband</i>

## 1. Einleitung

Der Wasserhaushalt in Talräumen des Norddeutschen Tieflandes wird maßgeblich durch das Zusammenspiel zwischen oberirdischen Gewässern und dem Grundwasser geprägt. Besonders in Niederungsgebieten beeinflussen die jahreszeitlich variierenden Wasserstände der Fließgewässer den Grundwasserflurabstand (GWFA) und damit entscheidend die hydrologischen Bedingungen für angrenzende Grünlandflächen. Diese Grundwasserflurabstände sind wiederum eng mit der landwirtschaftlichen Nutzbarkeit sowie mit der Vegetationsentwicklung verbunden. Insbesondere in stark anthropogen geprägten Landschaften kommt der Wechselwirkung zwischen Grund- und Oberflächenwasser eine zentrale Bedeutung zu, da sie wesentlichen Einfluss auf die Nutzbarkeit von Grünlandflächen sowie auf deren Vegetationsstruktur und -dynamik nimmt (LfL, 2024).

Vor dem Hintergrund des Klimawandels, zunehmender Wetterextreme und steigender Anforderungen an eine nachhaltige Landnutzung gewinnen diese hydrologischen Wechselwirkungen zunehmend an Bedeutung.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die saisonale Wasserstandsdynamik in einem typischen Vorflutsystem des norddeutschen Tieflands am Beispiel der Kleinen Beke in Mecklenburg-Vorpommern zu analysieren. Im Mittelpunkt steht dabei die hydraulische Modellierung eines etwa 1.8 km langen Gewässerabschnitts einschließlich zweier einmündender Gräben. Auf Basis eigens erhobener Querprofilvermessungen und langjähriger Abflussdaten des amtlichen Beke-Pegels in Bröbberow werden repräsentative Wasserstände für Normal-, Trocken- und Nassjahre simuliert und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Grünlandnutzung bewertet. Die Modellierung erfolgt mithilfe des Programms HEC-RAS und wird durch Wasserstandsdaten der Jahre 2024/25 kalibriert.

Ergänzt wird die Analyse durch eine Literaturrecherche zum Wasserstandsverhalten vergleichbarer Niederungsgewässer sowie zu den Zusammenhängen zwischen Flurabstand und landwirtschaftlicher Nutzbarkeit. Zudem werden statistische Kenngrößen zur Beschreibung der räumlich-zeitlichen Wasserstandsverteilung ermittelt, um die Dynamik des Systems zu charakterisieren.

Zur Einordnung und Bewertung der Aussagekraft unterschiedlicher Modellansätze erfolgt abschließend ein Vergleich der eigenen Modellierungsergebnisse mit den Resultaten eines vereinfachten, am Lehrstuhl entwickelten GIS-orientierten hydraulischen Ansatzes.

Dadurch sollen potenzielle Abweichungen aufgezeigt und die Eignung vereinfachter Berechnungsverfahren für praxisnahe Anwendungen in der Gewässer- und Grünlandbewirtschaftung beurteilt werden.

## **2. Grundlagen**

Zum besseren Verständnis der in dieser Arbeit eingesetzten Methodik und den daraus abgeleiteten Ergebnissen sind grundlegende Kenntnisse der Gerinnehydraulik, der Wasserstandsdynamik sowie des Zusammenspiels von Grundwasserständen und der Nutzbarkeit von Niederungsflächen erforderlich. Im Folgenden werden die wichtigsten theoretischen Grundlagen dieser Themenbereiche erläutert.

### **2.1 Hydraulische Grundlagen**

Die Profile natürlicher Fließgewässer sind aufgrund von Wechselwirkungen zwischen Berandungsmaterial und Strömung unregelmäßig ausgebildet und unterliegen, in Abhängigkeit des vorhandenen Materials, zeitlichen Veränderungen (Jirka & Lang, 2004). Beispielhafte Darstellungen natürlicher Fließquerschnitte sind in (Jirka & Lang, 2004) oder (Heinemann, Feldhaus, & Jokiel, 2024) enthalten.

#### **2.1.1 Strömungsarten und Abflusszustände**

Grundsätzlich handelt es sich beim Abfluss in naturnahen, offenen Gerinnen meist um leicht bis stark ungleichförmigen Abfluss, da Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit in Strömungsrichtung nicht konstant bleiben. Leicht ungleichförmiger Abfluss ist dadurch gekennzeichnet, dass Veränderungen der Wasserspiegellage überwiegend durch Sohl- und Wandreibungen verursacht werden (LfU (b), 2002). Dieser Strömungstyp lässt sich gut auf die hydraulischen Verhältnisse der Kleinen Beke übertragen.

Hinsichtlich der zeitlichen Veränderlichkeit des Abflusses wird zwischen stationären und instationären Strömungen unterschieden. Für die vorliegende Arbeit sind insbesondere instationäre Bedingungen relevant, da die Wasserstände des Gerinnes im Zeitverlauf variieren. Der Fließzustand eines Gerinnes hängt maßgeblich von der dimensionslosen Reynoldszahl ab, die sich unter anderem aus dem hydraulischen Radius ergibt. Bei Reynoldszahlen unter 500 liegt laminare Strömung mit parabolischer Geschwindigkeitsverteilung vor. Ab einem Wert von etwa 500 tritt turbulente Strömung auf, welche durch eine logarithmische Geschwindigkeitsverteilung charakterisiert ist. (Jirka & Lang, 2004)

Für die meisten praktischen Anwendungen in der Gerinnehydraulik sind turbulente Strömungsverhältnisse von Bedeutung, auch im Kontext dieser Arbeit.

Weiterhin wird die Fließbewegung durch die Zustände Strömen und Schießen charakterisiert. Ist die mittlere Fließgeschwindigkeit kleiner als die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oberflächenwellen, liegt strömender Abfluss vor. Ist die mittlere Fließgeschwindigkeit größer

liegt schießender Abfluss vor. Dieses Verhältnis aus mittlerer Fließgeschwindigkeit und Wellenausbreitungsgeschwindigkeit wird durch die Froude-Zahl beschrieben. (LfU (a), 2002)

### 2.1.2 Die Saint-Venant Gleichungen

Die mathematische Grundlage zur Beschreibung instationärer, ungleichförmiger Abflussvorgänge in offenen Gerinnen bilden die Saint-Venant-Gleichungen. Diese Fließbedingungen sind für die vorliegende Arbeit von besonderer Relevanz, weswegen sich die folgenden Ausführungen auf diesen Abfluss beschränken. Stationäre Berechnungsansätze sind beispielsweise in (Heinemann, Feldhaus, & Jokiel, 2024) enthalten. Eindimensionale instationäre, ungleichförmige Strömungen offener Gerinne lassen sich durch die Kombination von Wassertiefe ( $h$ ) und Abfluss ( $Q$ ), Wasserspiegellage ( $z$ ) und Abfluss ( $Q$ ) oder Wassertiefe ( $h$ ) und Fließgeschwindigkeit ( $v$ ) beschreiben (Krebs, 2009).

Die Saint-Venant Gleichungen (Formel 1) stellen eine Kombination des Massen- und Impulserhaltungssatzes dar. Sie ermöglichen die mathematische Beschreibung zeit- und ortsabhängigen Abflusses.

#### Formel 1: Saint-Venant Gleichungen

$$\frac{\partial \left( \frac{Q^2}{A} \right)}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gA \frac{\partial h}{\partial x} - gA(I_E - I_S) = 0$$

$$B \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

In der Veröffentlichung von (Nguyen, 2018) werden numerische sowie vereinfachte Lösungsansätze der Saint-Venant Gleichungen zusammengefasst. (Malcherek, 2019) befasst sich unter anderem mit der Lösung der Gleichungen sowie der Berücksichtigung von Sonderfällen wie dem Auftreten von Wehren, Schützen oder Zuflüssen.

Das Gleichungssystem beruht auf mehreren vereinfachenden Annahmen. Querströmungen werden vernachlässigt, und es wird eine gleichmäßige Geschwindigkeitsverteilung über die Abflusstiefe angenommen. Zudem wird von einem Freispiegelabfluss eines homogenen, inkompressiblen Fluids ausgegangen. Veränderungen im Energiegefälle, der Wasserspiegellage sowie dem Sohlgefälle gelten als gering. Darüber hinaus wird angenommen, dass sich die Gerinnegeometrie und das Längsgefälle über den betrachteten Abschnitt sowie im Zeitverlauf nicht verändern. (Krebs, 2009)

### 2.1.3 Fließgesetze

Zur Beschreibung des Strömungsverhaltens in offenen Gerinnen sind ergänzend zu den Saint-Venant-Gleichungen geeignete Fließgesetze erforderlich. Es existieren drei gängige Koeffizienten zur Beschreibung des hydraulischen Widerstands: der de Chézy-Koeffizient  $C$  [ $m^{1/2}/s$ ], der Manning-Koeffizient  $n$  [ $s/m^{1/3}$ ] und der Darcy-Weisbach Reibungsfaktor  $\lambda$  (Stefanyshyn, Korbutiak, & Khodnevykh, 2021). Im deutschsprachigen Raum wird überwiegend der Strickler-Wert  $k_{st}$  verwendet, welcher das Reziproke des Manning-Wertes darstellt. Mittels empirischer Gleichungen lassen sich diese Reibungskoeffizienten mit der mittleren Fließgeschwindigkeit  $v$  verknüpfen (Formel 2 bis 4):

**Formel 2: Fließgesetz nach de Chézy**

$$v = C \sqrt{R * S_f}$$

**Formel 3: Fließgesetz nach Manning**

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} \sqrt{S_f}$$

**Formel 4: Fließgesetz nach Darcy-Weisbach**

$$v = \sqrt{\frac{8g * R * S_f}{\lambda}}$$

Dabei ist  $v = Q / A$  die mittlere Fließgeschwindigkeit eines Querschnittes [ $m/s$ ],  $Q$  der mittlere Abfluss [ $m^3/s$ ],  $A = B * h$  der durchströmte Querschnitt [ $m^2$ ],  $B$  die mittlere Durchflussbreite [ $m$ ],  $h$  die mittlere Fließtiefe [ $m$ ],  $U$  der benetzte Umfang [ $m$ ],  $R = A / U$  der hydraulische Radius [ $m$ ],  $S_f$  das Energieliniengefälle (oder das Wasserstandsgefälle) und  $g$  entspricht der Fallbeschleunigung [ $m/s^2$ ].

In den meisten Anwendungsfällen werden für die Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit in offenen Gewässern der de Chézy- oder Manning-Koeffizient verwendet. Der Darcy-Weisbach Reibungsfaktor findet eher bei der Berechnung der mittleren Fließgeschwindigkeit in Rohrleitungen Anwendung. (Sturm, 2001)

### 2.1.4 Fließwiderstände

Fließwiderstände eines Gewässers beschreiben jene Widerstände, welche dem Abfluss entgegengesetzt wirken. Ein Widerstand ist beispielsweise die Oberflächenrauheit, definiert durch Größe und Form des Gerinnematerials, welches sich verzögernd auf den Abfluss auswirkt. Vegetation besitzt, in Abhängigkeit von Höhe, Dichte, Verteilung, Steifheit und Art, einen deutlichen Einfluss auf den Abfluss (Kummu, 2002).

Weitere Faktoren sind die Gerinnegröße und -form sowie das Auftreten von Unregelmäßigkeiten im Querschnitt. Sedimentation und Erosion vergrößern beziehungsweise verringern, in Abhängigkeit von Bodenmaterial, Gerinneform und Abfluss, die geometrischen Unterschiede benachbarter Fließquerschnitte und damit die Rauheit. Hindernisse wie Brücken oder Totholz verzögern den Abfluss ebenfalls. Die Wasserstands- und Abflusshöhe wirkt sich auf den Fließwiderstand aus. Steigende Abflusshöhen bedingen meist verringerte Rauheitskoeffizienten. Bei extrem erhöhten Wasserständen, welche über das Flussufer hinaussteigen, kann sich dieser Effekt jedoch wieder umkehren. Die Bildung von Eisschichten kann in den Wintermonaten den Fließwiderstand erhöhen. (Kummu, 2002)

Zur korrekten hydraulischen Berechnung ist die Wahl eines Rauheitskoeffizienten, welcher die genannten auftretenden Fließwiderstände möglichst genau beschreibt, notwendig.

In (Chow, 1959) wurde der Rauheitskoeffizient noch als Konstante behandelt, welche in Abhängigkeit der Materialbeschaffenheit und -zusammensetzung aus Tabellen gewählt wird. Veröffentlichungen wie (Swamee & Rathie, 2004) oder (Meky, Ghoraba, & Rashwan, 2020) bestätigen jedoch, dass der Manning-Koeffizient keine konstante Größe ist, sondern mit den anfangs erwähnten Parametern schwanken kann (Sabah & Bachir, 2023).

Für die Ergebnisse der zugrunde liegenden Arbeit ist die korrekte Berücksichtigung des Einflusses der Vegetation in der Modellierung von zentraler Bedeutung.

Jedoch erweist sich die korrekte mathematische Erfassung des Bewuchses als hydraulische Rauheit als schwierig (Deussfeld, 2005). Der Einfluss des Bewuchses hängt maßgeblich von der Vegetationsentwicklung ab, welche wiederum von Faktoren wie Lichtangebot, Qualität des anstehenden Bodens, Gewässergüte, Gefälle und Wassertemperatur sowie Wassertiefe beeinflusst wird (Dörter, 1985). Tabelle 1 stellt die Verkräutungsklassen sowie zugehörige  $k_{st}$ -Werte nach Nitschke (1972) dar.

Tabelle 1: Verkräutungsklasse (n. Nitschke 1972) in (Dörter, 1985)

Grad	Klasse	Profilfüllung [%]	$k_{st}$ -Wert [ $m^{1/3}/s$ ]
1	ideal sauber	0 - 5	> 35
2	sehr sauber	5 - 10	35 - 31
3	sauber bis ziemlich sauber	10 - 15	31- 27
4	sauber bis mäßig verkräutet	15 - 25	27 - 21
5	mäßig verkräutet	25 -35	21 - 16
6	verkräutet	35 - 50	16 - 9
7	stark verkräutet	50 - 75	9 - 3
8	dicht verkräutet	75 - 100	< 3

Einen zusammenfassenden Überblick über die gängigen Strickler-Werte aus der Fachliteratur in Abhängigkeit von der Gerinnecharakteristik gibt (LfU (a), 2002) oder (Schneider, 2007). Abbildung 1 verdeutlicht die Einteilung des Bewuchses nach DWA-M 524.

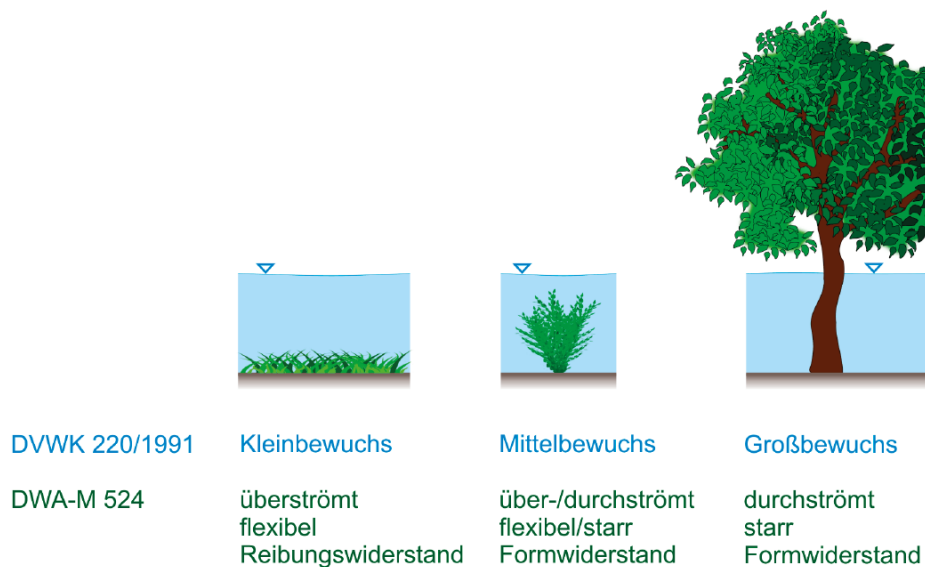


Abbildung 1: Klassifizierung des Bewuchses nach DVWK-M 220 (alt) und DWA-M 524 (neu) (Grafik: U. Stefan in (DWA, 2020))

Grundlage für diese Einteilung ist das Verhältnis aus Pflanzenhöhe zur Wassertiefe. Überströmt bedeutet in diesem Kontext, dass die Pflanzenhöhe nicht größer als 20 % der Wassertiefe ist. Bei durchströmter Vegetation überschreitet die Pflanzenhöhe die Wassertiefe.

Ausgewählte Parameter zur Beschreibung der Eigenschaften dieser biologischen Fließwiderstände sind der Ersatzdurchmesser der Vegetation, die Vegetationsdichte und -anordnung, die Belaubungsdichte des Bewuchses, die Elastizität der Einzelpflanzen, die Porosität und der Formwiderstandsbeiwert  $C_W$ . Ausführliche Erläuterungen dieser Einflussgrößen sind ebenfalls in DWA-M 524 enthalten (DWA, 2020).

Der zeitliche Verlauf beeinflusst ebenfalls die hydraulische Rauheit. Einerseits verändern das Pflanzenwachstum und jahreszeitliche Effekte die zuvor genannten Parameter, andererseits variiert dadurch der Rauheitsbeiwert im Jahresgang. (Dörter, 1985) beschreibt den Zusammenhang zwischen angestrebtem Strickler-Wert und der erforderlichen Häufigkeit von Entkrautungen in landwirtschaftlichen Entwässerungsgräben. Je höher der angestrebte  $k_{st}$ -Wert, desto mehr Krautungen sind erforderlich, da ab April die natürliche Verkrautung stark zunimmt und erst ab Ende August wieder abnimmt, mit einem Minimum im Dezember. Beispielhafte Schwankungen von  $k_{st}$ -Werten zwischen Winter- und Frühjahrshalbjahr für die Nebel, einem organisch geprägten Niederungsfluss bei Gülzow, sind in (Schneider, 2007) enthalten.

## **2.2 Wasserstandsverhalten**

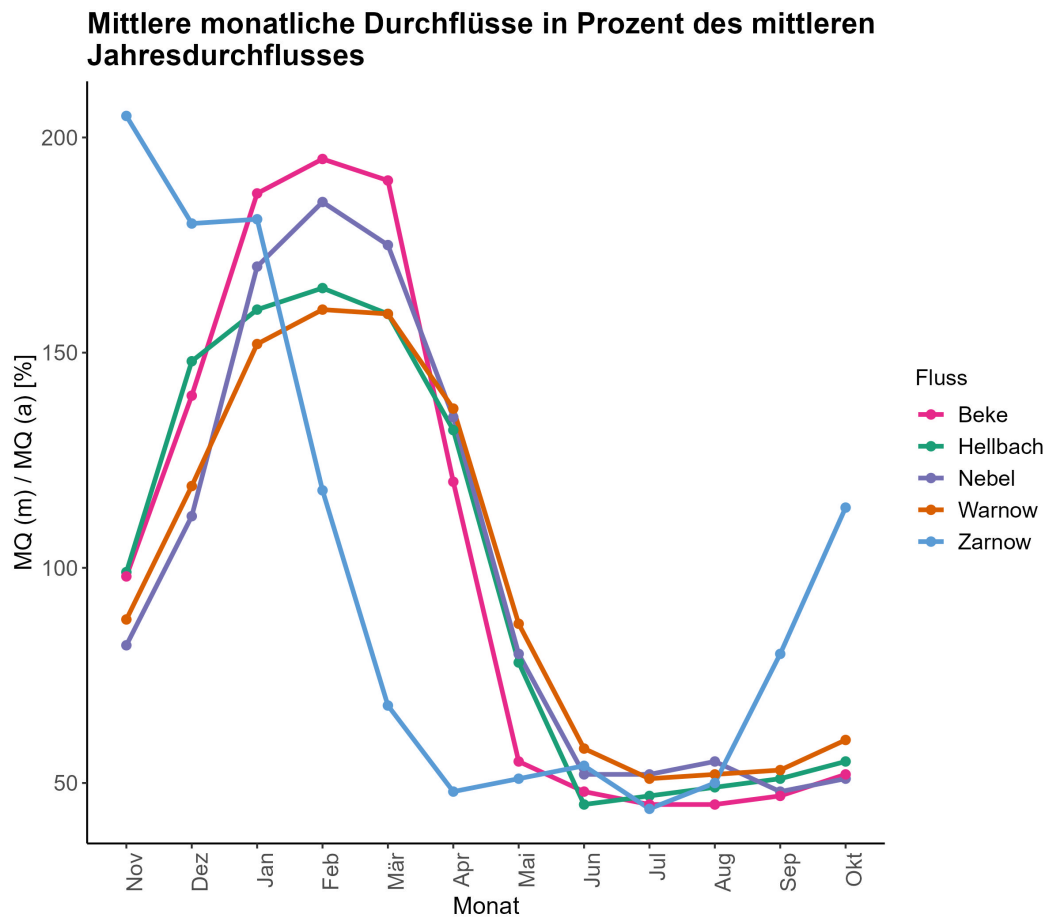
Neben hydraulischen Einflussfaktoren bestimmen hydrologische und klimatische Faktoren die Wasserstandsdynamik in Fließgewässern. Im Folgenden werden zunächst typische Ganglinien für vergleichbare Fließgewässer im norddeutschen Tiefland betrachtet.

### **2.2.1 Saisonale Dynamik**

Zur späteren hydrologischen Einordnung des Wasserstandsverhaltens der Kleinen Beke eignen sich die Gewässersteckbriefe des Pegelportals MVs, welches vom Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Mecklenburg-Vorpommerns (LUNG-MV) betrieben wird. Abbildung 2 zeigt die mittleren monatlichen Durchflüsse (MQ (m)) vergleichbarer Fließgewässer in Relation zum jeweiligen Jahresmittel (MQ (a)). Die Daten beziehen sich auf den Zeitraum 2011 bis 2020.

Die Auswahl der Fließgewässer erfolgt auf Grundlage der geografischen Nähe zum Untersuchungsgebiet sowie der Zuordnung zu ähnlichen LAWA-Gewässertypen. Tabelle 2 enthält weitere Informationen zu den Fließgewässerabschnitten. Anhand der in Abbildung 2 dargestellten Langzeit-Durchflusskurven können die Gewässer einem Durchflussregimetyp zugeordnet werden.

Die Beke gehört zum dynamischen Durchflussregimety, welcher deutliche Wintermaxima aufweist. Das Verhältnis aus MQ (m) zu MQ (a) beträgt im Maximum zwischen 150 % und 200 % im Februar. Die Niedrigwasserextreme sind ähnlich stark ausgeprägt und liegen zwischen 50 % und 70 %. Dieser Durchflussregimety ist typisch für Standorte mit Niederschlagsbegünstigung, geringem bis mittlerem Infiltrationsvermögen und anthropogenen Eingriffen wie Melioration oder Gewässerausbau (Mehl & Thiele, 1998).



**Abbildung 2: Verlauf der saisonalen Änderungen des Durchflusses ausgewählter Fließgewässer (eigene Darstellung nach (Pegelportal MV, 2025))**

Mit Ausnahme der Zarnow zeigen alle betrachteten Fließgewässer ein sehr ähnliches saisonales Abflussverhalten. Zu Beginn des hydrologischen Jahres im November steigen die Durchflüsse an und erreichen etwa im Februar / März ihre Maxima. Danach sinken diese wieder ab und verbleiben von Juni bis Oktober auf einem, im Verhältnis zum jährlichen Mittel, deutlich niedrigeren Niveau.

Tabelle 2: Charakterisierung vergleichbarer Gewässer der Kleinen Beke (FIS-MV, 2025)

Gewässerabschnitt / Pegelstandort	LAWA-Typ
Beke / Bröbberow	12 – organisch geprägter Fluss
Hellbach / Jörnstorf	15 – sand- und lehmgeprägter Tieflandfluss
Nebel / Wolken	12 – organisch geprägter Fluss
Oberwarnow / Rostock	23 – rückstaubeinflusster Ostseezufluss
Zarnow / Reez	14 - sandgeprägter Tieflandfluss

Die maßgeblichen hydrologischen Steuergrößen, welche das saisonale Verlaufsmuster der dargestellten Durchflussganglinien prägen, werden im folgenden Unterkapitel dargestellt.

### 2.2.2 Hydrologische Einflussgrößen

Das Wasserstandsverhalten von Fließgewässern wird maßgeblich durch die in der Wasserbilanz enthaltenen hydrologischen Einflussgrößen bestimmt. Das Strahlungsangebot, und die damit vom Breitengrad abhängige Menge an Energie, gilt als Hauptantriebsgröße des Wasserkreislaufs (Weiler & Miegel, 2016).

Zu den zentralen Parametern zählen Niederschlag ( $N$ ), Evapotranspiration ( $ET$ ), Abfluss ( $Q$ ) sowie Speicheränderungen ( $\Delta S$ ). Wasserbilanzen werden in der Regel für Einzugsgebiete (EZG) erstellt, wobei der Abfluss durch Pegelmessungen erfasst werden kann. Die Ermittlung der Gebietsverdunstung stellt hingegen eine der größten Herausforderungen in der hydrologischen Bilanzierung dar. Für langfristige Mittelwerte kann sie näherungsweise aus der Differenz von Niederschlag und Abfluss bestimmt werden, da Speicheränderungen über längere Zeiträume hinweg vernachlässigt werden können (Weiler & Miegel, 2016).

Die Wasserbilanz für ein ober- und unterirdisch geschlossenes EZG ergibt sich gemäß Formel 5.

**Formel 5: Wasserbilanz bei übereinstimmenden ober- und unterirdischen EZG (Weiler & Miegel, 2016)**

$$N = ET + Q + \Delta S$$

Das langjährige Mittel des Jahresniederschlags in Mecklenburg-Vorpommern beträgt im Zeitraum von 1991 bis 2020 rund 619.8 mm (LUNG-MV, 2023). Aus meteorologischer Perspektive wird ein Trockenjahr als Jahr definiert, in dem die jährliche Niederschlagshöhe die Standardabweichung des mehrjährigen Mittels unterschreitet (LfU, 2016). Dies war bei-

spielsweise im Jahr 2022 der Fall, in dem lediglich 533.5 mm Niederschlag gemessen wurden. Demgegenüber war 2024 mit 753.4 mm ein überdurchschnittlich feuchtes Jahr (LUNG-MV (a), 2025).

Neben meteorologischen und hydrologischen Größen beeinflussen auch physisch-geografische Eigenschaften des Einzugsgebiets die Abflussbildung. Dazu zählen Bodenart, Vegetationsbedeckung, Versiegelungsgrad sowie Hangneigung und -länge. In Mecklenburg-Vorpommern dominieren bindige, oft staunasse oder grundwasserbeeinflusste Böden aus Geschiebelehm und Geschiebemergel (UBA, 2008). Unter natürlichen Bedingungen sind ausgeglichene Abflussverläufe mit hohem Grundwasseranteil zu erwarten. Durch den hohen Anteil an gedrähten, landwirtschaftlich genutzten Flächen, nach Schätzungen der Wasser- und Bodenverbände rund 80 %, entstehen jedoch künstliche Abflussbahnen, die zu deutlich schnelleren Abflussreaktionen auf Niederschlagsereignisse führen (Heiko & Hilgert, 2007).

## **2.3 Grundwasserflurabstand**

Der Grundwasserflurabstand bezeichnet nach (DIN 4049 T1) den lotrechten Höhenunterschied zwischen Geländeoberkante (GOK) und Grundwasseroberfläche. Gespanntes Grundwasser liegt vor, wenn der Grundwasserleiter von einer gering durchlässigen Schicht, beispielweise Geschiebemergel, überlagert wird und der hydrostatische Druck des Grundwassers die Grundwasseroberfläche übersteigt (Hannapel & Limberg, 2007).

### **2.3.1 Bedeutung des Grundwassers**

Die Kenntnis des Grundwasserstandes ist sowohl aus forstökologischer als auch aus landwirtschaftlicher Perspektive von großer Bedeutung. Sie dient beispielweise zur Einschätzung, an welchen Standorten das Grundwasser sich auf das Pflanzenwachstum auswirkt (Hannappel & Riek, 2011). Das Ausmaß dieses Einflusses hängt von artspezifischen Merkmalen wie der Durchwurzelungstiefe sowie von bodenphysikalischen Eigenschaften und der jeweiligen Bodenart ab (Riek, 2001).

Zu den bodenphysikalischen Eigenschaften gehören unter anderem die Feldkapazität (FK), der Permanente Welkepunkt (PWP) und die nutzbare Feldkapazität (nFK). Die Feldkapazität beschreibt den Wasseranteil im Boden, den die Poren gegen die Schwerkraft halten können. Der Permanente Welkepunkt kennzeichnet den Wassergehalt, ab welchem das in den Feinporen enthaltene Wasser nicht mehr pflanzenverfügbar ist. Die Differenz aus FK und PWP

wird als nutzbare Feldkapazität bezeichnet und beschreibt den pflanzenverfügbaren Anteil des Bodenwassers (Amelung, et al., 2018).

(Huang, Zhang, Zhang, & Chen, 2019) unterteilt den Abstand des Grundwassers zur Vegetation in verschiedene Bereiche. Innerhalb des wünschenswerten Bereiches befindet sich der Kapillarsaum in der Nähe der Wurzelzone der Vegetation. Abweichungen von diesem Bereich wirken sich negativ auf die vorhandene Vegetation aus. Ein zu großer Abstand kann zur Bodenaustrocknung und zur Degradation der Vegetation führen, während ein dauerhaft zu geringer Abstand beispielsweise Anoxie verursachen kann.

Die Verfügbarkeit von Wasser bestimmt die Bewirtschaftung landwirtschaftlich genutzter Flächen maßgeblich. Ein verbreitetes Verfahren zur Bewertung der Wasserverfügbarkeit eines Standortes ist die Feuchtezahl (F) nach Ellenberg. Die Ellenberg-Feuchtezahlen reichen von 1-12, je höher die Zahl, desto feuchter der Standort (Ellenberg, et al., 2001). Eine weitere Möglichkeit zur Beschreibung eines Hydrotops ist die Wasserstufen-Ausbildung, welche zusätzlich zum Feuchteniveau die Wechselfeuchte berücksichtigt (Koska, 2001). Als Kriterium der Zuordnung eines Standortes zu einer Wasserstufe dient der Wasserstand. Von besonderer Bedeutung sind die Mediane des feuchten Halbjahres von Winter bis Frühjahr, da dieser Wert die Standortbedingungen der transpirationslosen Phase mit positiver Wasserbilanz ausdrückt. Der Unterschied der Mediane des Winter-Frühjahr-Halbjahres und des Sommer-Herbst-Halbjahres gilt als Maß für die Wechselfeuchte. (Koska, 2001)

In der Biotopkartierungsanleitung (LUNG-MV, 2010) für Mecklenburg-Vorpommern werden den Ellenberg-Feuchtezahlen GWFA und typische Vegetationsformen zugeordnet. Dabei ist nicht jede Zuordnung eindeutig. Tabelle 3 zeigt eine mögliche Zuordnung des Grundwasserflurabstands zur Ellenberg-Feuchtezahl sowie eine Charakterisierung der Feuchtestufen (Schneider, 2024). Die Wasserstufe nach Petersen (1952) in Abhängigkeit des Wasserstandes unter Flur ist ebenfalls dargestellt. Darüber hinaus zeigt sich, dass ab Feuchtestufe VI (mäßig trocken) die landwirtschaftliche Nutzung mit steigender Bodenfeuchte wirtschaftlich zunehmend unattraktiver wird.

**Tabelle 3: Zuordnung von Feuchtestufen zu Grundwasserflurabständen in Anlehnung an LUNG-MV (2010) und Succow & Joosten (2001), (Schneider, 2024) bearbeitet**

Feuchtestufe	GWFA [m] (LUNG-MV, 2010)	Feuchtezahl (F) (Ellenberg, et al., 2001)	Wasserstufe (Petersen, 1952)	Zustand	landwirtschaftliche Nutzbarkeit (Koska, 2001)
I	> 0	9 - 12	6+ / 5+	offenes Wasser	Wasserfläche / aus ökonomischen Gründen nur ausnahmsweise genutzt, Schilf als Reet
II	0.0 - 0.2	7 - 10	4+	nass	aus ökonomischen Gründen eingeschränkte Wiesennutzung
III	0.0 - 0.4	8 - 9	4+ / 3+	sehr feucht	abhängig von tatsächlicher Wasserstufe
IV	0.0 - 0.8	6 - 7	4+ / 3+ / 2+	feucht	abhängig von tatsächlicher Wasserstufe
V	0.2 - 0.5	5 - 6	3+	frisch	Feuchtwiesen und -weiden, zur nasse neigend, gute bis mäßige Futterqualität, eingeschränkte Befahrbarkeit
VI	0.4 - 1.0	4 - 6	2+	mäßig trocken	gut nutzbare Feuchtwiesen und -weiden, nur eingeschränkt für Ackerbau geeignet
VII	0.6 - 1.5	2 - 3	2-	trocken	gute frische Wiesen, Weiden, Äcker; durch geringe Sommertrockenheit kaum beeinträchtigt
VIII	1.0 - 2.5	-	3- / 4-	sehr trocken	Nutzung als Wiese, Weide, Acker, weniger ertragreich

Wie bereits erwähnt gilt der Wasserstand des nassen Halbjahres von Winter bis zum Frühjahr als maßgebendes Kriterium für die Zuordnung zu einer Feuchte- oder Wasserstufe. Insbesondere im norddeutschen Tiefland erfolgt ein Großteil des Gewässerabflusses in Verbindung mit dem Grundwasser (Kluge & Trepel, 2004). Es finden Austauschprozesse zwischen oberflächennahem Grundwasser und oberirdischen Gewässern sowie der ungesättigten Bodenzone statt. Dies hat zur Folge, dass das Grundwasser am Jahreszyklus der Wassermenge im EZG beteiligt ist (Wittenberg, Schöniger, & Schwarze, 2005).

Das oberflächennahe Grundwasser zeigt somit vergleichbare saisonale Schwankungen wie die Fließgewässer, mit denen es in direkter Wechselwirkung steht (siehe Kapitel 2.2.1). Tabelle 4 verdeutlicht die Unterschiede zwischen den Wasserstandsmedianen von Winter bis Frühling und den ganzjährigen Wasserstandsmedianen, in Abhängigkeit von der Wasserstufe.

**Tabelle 4: Wasserstufen und Wasserstufen-Ausbildungen für Moore und andere Feuchtgebiete**  
(Koska, 2001)

<b>Wasserstufe</b>	<b>Wasserstandsmedian Wi - Fr [m]</b>	<b>Jahresmediane der Wasserstände [m]</b>
6+	1.5 - 0.3 ü. Flur	1.4 - 0.2 ü. Flur
5+	0.3 - 0.0 ü. Flur	0.2 - 0.0 ü. Flur
4+	0.0 - 0.15 u. Flur	0.0 - 0.2 u. Flur
3+	0.15 - 0.35 u. Flur	0.2 - 0.45 u. Flur
2+	0.35 - 0.7 u. Flur	0.45 - 0.8 u. Flur
2-	> 0.7 u. Flur	> 0.8 u. Flur

### 2.3.2 Wechselwirkungen

Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben sind die Wechselwirkungen zwischen Fließgewässern und oberflächennahem Grundwasser, insbesondere in Tieflandeinzugsgebieten, von besonderer Bedeutung. Die Austauschprozesse zwischen Oberflächen- und Grundwasser erfolgen in der hyporheischen Zone und werden durch den hydraulischen Gradienten gesteuert (Bronstert, 2016). Das hyporheische Interstitial ist charakterisiert durch eine hohe biogeochemische Aktivität und einem starken Redoxgradienten. In Folge dieser Prozesse kann Kolmation, innerhalb beziehungsweise nahe des Flussbetts, auftreten (Schmalz, 2017). Die Austauschrichtung hängt von den Wasserständen beider Medien ab und kann im saisonalen Verlauf schwanken.

Liegt der Grundwasserstand oberhalb dem Wasserstand des Fließgewässers, exfiltriert das Wasser über das gesamte Gewässerbett bis zur Höhe des Grundwasserstands in das Fließgewässer. Ist der Wasserstand des Fließgewässers höher als im Grundwasser, infiltriert das Wasser aus dem Vorfluter in den Aquifer. Liegt der Grundwasserstand dabei höher als die Gewässersohle, infiltriert das Wasser über die Fließgewässersohle sowie über die durchlässigen Uferbereiche (Mey, 2011).

Liegt der Grundwasserstand unterhalb der Gewässersohle und ist somit durch die ungesättigte Bodenschicht vom Fließgewässer getrennt, ist die Infiltrationsrichtung senkrecht zur Fließgewässersohle gerichtet (Schmalz, 2017).

Im hydrologischen Winterhalbjahr herrschen eher influente Verhältnisse, während im Sommerhalbjahr vermehrt effluente Verhältnisse auftreten. Diese Zustände können jedoch auch in sehr viel kürzeren Zeiträumen schwanken. Zum Beispiel in niederschlagsstarken Zeiten,

wenn der Vorflutwasserstand schneller ansteigt als der Grundwasserstand. In Zeiten mit sehr geringen Niederschlägen sinkt der Fließgewässerwasserstand unter den des Grundwassers, und der Abfluss wird durch den Basisabfluss gespeist. (Mey, 2011)

Diese Wechselwirkungen unterliegen weiterhin räumlichen Variationen. Tendenziell nimmt die Bedeutung der Infiltration von Oberflächenwasser in das Grundwasser flussabwärts zu, was abschnittsweise Abflussdefizite zur Folge haben kann (Schmalz, Tieflandhydrologie, 2016).

Abbildung 3 stellt die Austauschgrößen des Wasserhaushalts, des Abflusses im Gerinne sowie des Grundwassers zusammenfassend dar.

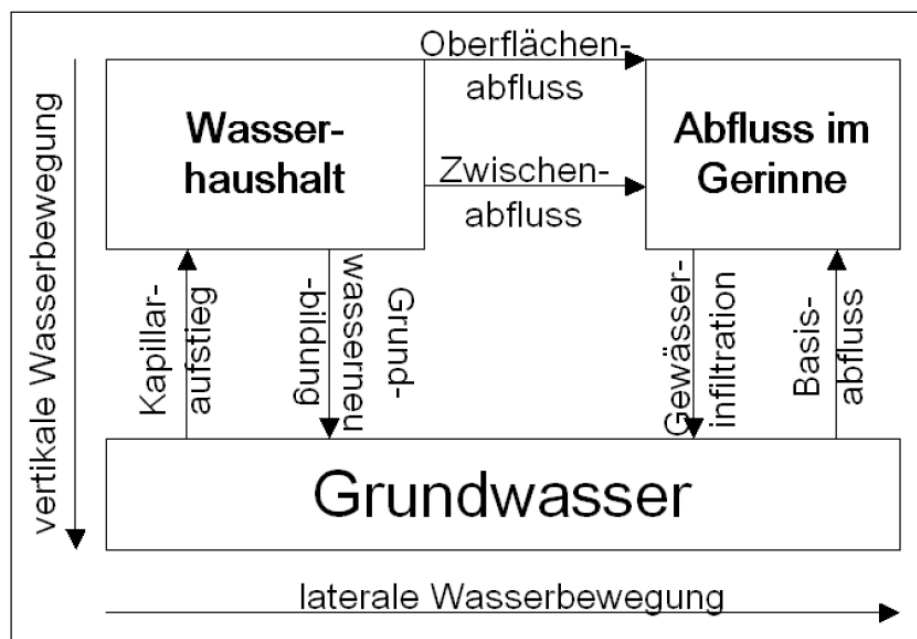


Abbildung 3: Austauschgrößen zwischen Oberflächen- und Grundwasser (Mey, 2011)

### 2.3.3 Anthropogene Einflüsse

Die Lage des Grundwasserspiegels wird darüber hinaus durch anthropogene Maßnahmen beeinflusst. Eine mögliche Form der Beeinflussung sind Binnengräben, welche überwiegend zur Entwässerung von Grünlandstandorten in gefällearmen und grundwasserbeeinflussten Niederungsgebieten Anwendung finden. Die Entwässerungstiefe wird, in Abhängigkeit von der Bodenart, durch den Abstand und die Tiefe benachbarter Gräben bestimmt (Dörter, 1985). Als maßgebliche Größe zur hydraulischen Dimensionierung der Gräben dient der abzuführende Abfluss. Der abzuführende Abfluss ( $M_q$ ) kann in Mitteleuropa mithilfe der empirischen Formel nach Uhden (Formel 6) abgeschätzt werden (Patt & Gonsowski, 2011).

**Formel 6: Abflussspende nach Uhden**

$$M_q = \frac{\frac{7}{6} * h_N - h_V}{31.5} \left[ \frac{1}{s * km^2} \right]$$

Dabei bezeichnet  $h_N$  die Niederschlagshöhe [mm] und  $h_V$  die reale Verdunstungshöhe [mm]. Die Niedrig- und Hochwasserabflussspenden berechnen sich aus der Mittelwasserabflussspende und einem Koeffizienten, welcher von den geografischen Eigenschaften des EZG abhängt (Patt & Gonsowski, 2011). Da es sich um eine Abflussspende handelt, ergibt sich der Gesamtabfluss durch die Multiplikation mit der EZG-Fläche und der Berücksichtigung des Fremdwasserzuflusses. Entwässerungsgräben besitzen meist trapezförmige Querschnitte. Das empfohlene Mindestgefälle liegt bei etwa einem Promille.

Die zulässigen Böschungsneigungen hängen von der anstehenden Bodenart ab und betragen in der Regel 1:1 bis 1:4. Je nach Herstellungsverfahren beträgt die Sohlbreite mindestens 0.25 m bis 0.30 m. Für unkräutete Gräben gelten Strickler-Beiwerte von 30  $m^{1/3}/s$ . Die Strickler-Werte für kräutete Gräben betragen etwa 25  $m^{1/3}/s$  bis 20  $m^{1/3}/s$  (Patt & Gonsowski, 2011).

Wie in Kapitel 2.1.4 erläutert, ist die Bestimmung der Rauheitsbeiwerte räumlich sowie zeitlich mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Die Funktion der Gräben hängt maßgeblich von den durchgeführten Unterhaltungs- und Instandhaltungsmaßnahmen ab, welche meist nur noch im Bereich von kultivierten und landwirtschaftlich genutzten Flächen gerechtfertigt sind (LfU, 2015). Grabensysteme dienen nicht nur der Ableitung überschüssigen Wassers, sondern können zudem, insbesondere in Verbindung mit regulierbaren Staubauwerken wie Wehren, gezielt zur Rückhaltung von Wasser in der Fläche eingesetzt werden. Auf diese Weise übernehmen sie zusätzlich eine Bewässerungsfunktion und tragen zur Stabilisierung des Bodenwasserhaushalts bei.

Neben der offenen landwirtschaftlichen Entwässerung mittels Grabensystemen existiert die Entwässerung durch Dränsysteme. Diese unterirdische Form der Entwässerung bietet den Vorteil, dass es bauartbedingt zu keinem Flächenverlust des zu entwässernden Gebietes kommt (Hunkeler, Grubinger, & Tanner, 1970). Für die vorliegende Arbeit ist diese Entwässerungsform jedoch nicht relevant und wird daher nicht genauer erläutert.

## 2.4 Grünland

In Mecklenburg-Vorpommern gelten ca. 21 % der langjährig landwirtschaftlich genutzten Flächen als Grünland (Alabsi, 2010).

Grünland bezeichnet die landwirtschaftliche Nutzfläche, die als Wiesen und Weiden die Grundlage zur Ernährung des Viehs bilden. Wiesen und Weiden sind vom Menschen geschaffene Ökosysteme, welche sich aufgrund von geregelter Nutzung in einem Gleichgewichtszustand befinden (Nitsche & Nitsche, 1994).

### 2.4.1 Klassifizierung

Grünland wird in Abhängigkeit von der Nutzungsart in Wiesen, Weiden und Biotopgrünland untergliedert. Wiesen werden durch regelmäßige Mahd bewirtschaftet, während Weiden durch die Beweidung von Tieren genutzt werden. Im Gegensatz dazu ist Biotopgrünland von landwirtschaftlicher Nutzung ausgeschlossen und dient primär dem Erhalt von natürlichen Lebensräumen (Mielke & Wohlers, 2019). Tabelle 5 stellt eine Zusammenfassung der Standortfaktoren dar, die maßgeblich die Auswahl und Eignung der jeweiligen Nutzungsart für das Grünland beeinflussen.

Tabelle 5: Unterteilung der Grünlandstandortfaktoren nach (Dierschke & Briemle, 2008)

Primär	Sekundär
Licht	Klima
O <sub>2</sub> -, CO <sub>2</sub> -Verfügbarkeit	Relief
H <sub>2</sub> O-Verfügbarkeit	Boden
Nährstoffe	biotische Einflüsse
Schadstoffe	
Wärmeregime	
Wurzelraum	

Weiterhin kann eine Klassifizierung nach der Nutzungsintensität der Flächen erfolgen. Tabelle 6 zeigt die Intensitätsstufen der Grünlandnutzung in Anpassung der in Kapitel 2.3.1 erwähnten Feuchtezahlen und Wasserstufen.

Tabelle 6: Intensitätsstufen der Grünlandnutzung in Anpassung an landwirtschaftliche Wasserstufen  
(Alabsi, 2010) nach (Bockholt & Fuhrmann, 1994)

Intensität	sehr niedrig sehr extensiv I	niedrig extensiv II	mittel halbintensiv III	hoch intensiv IV	sehr hoch sehr intensiv V
Feuchtezahl nach Ellenberg / Wasserstufe nach Petersen	1, 2, 8, 9 / 4+ ,5+ ,4- ,5-	3, 7 / 3+ ,3-	4, 5, 6 / 2+ ,2-, 1	4, 5, 6 / 2+ ,2-, 1	4, 5, 6 / 2+ ,2-, 1
Weideverfahren	Hütehaltung, Teilzeitweide	Standweide, Koppelweide (1-7 Koppeln)	Umtriebsweide (≥ 8 Koppeln)	zeitweise portionierte Umtriebsweide	Portionsweide
Wiesennutzung	1 Schnitt	1 Schnitt	2 Schnitte	3 Schnitte	> 3 Schnitte
Düngung Niedermoor	Keine	ohne N, gelegentliche Gründüngung P, K	40-100 kg N, Gründüngung nach Entzug	> 100-150 kg N, Gründüngung nach Entzug	> 150 kg N, Gründüngung nach Entzug
Düngung Mineralboden	Keine	40-50 kg N, gel. Gründün- gung P, K, Mg, gelegentliche Kalkung	> 50-150 kg N, Gründüngung, Kal- kung	> 150-300 kg N, Gründüngung, Kal- kung	> 300 kg N, Gründüngung, Kalkung
Narben- verbesserung	Keine	Pflege nach Bedarf (z.B. Schleppen, Nachmahd)	Einsaat / Nachsaat, Pflege	bedarfsweise Neuansaat, besser Nachsaat u. Pflege	turnusmäßige Neuansaat, besser Nachsaat u. Pflege
Wasser- regulierung	Keine	flache Graben- entwässerung, gelegentliche Pflege	Graben- o. Dränenentwässerung, regelmäßige Pflege	Entwässerung u. Anstau	Entwässerung u. Anstau o. Beregnung

Aus Tabelle 6 geht hervor, dass nicht alle Flächen für intensive Bewirtschaftung geeignet sind. Intensive Grünlandbewirtschaftung ist mit hohem Pflege- und Düngeraufwand verbunden. Die Grundwasser- und Niederschlagsverhältnisse müssen in der Vegetationsperiode günstig sein, damit die Flächen befahrbar und trittfest sind. Intensiv bewirtschaftetes Grünland ist nutzungsbedingt artenärmer. Auftretende Gräser sind beispielsweise Weidelgras (*Lolium*), Knäuelgras (*Dactylis glomerata*) oder Lieschgras (*Phleum*). Vorkommende Kräuter sind meist Weiß-Klee (*Trifolium repens*) oder Löwenzahn (*Taraxacum officinale*). Die Entwicklung standortangepasster Pflanzengesellschaften ist nicht mehr möglich. (Nitsche & Nitsche, 1994)

Extensivgrünland entsteht entweder durch ungünstige Standortverhältnisse (Tabelle 5) oder durch Extensivierung intensiv genutzter Flächen mit der Zielsetzung des Arten- und Biotopschutzes (Nitsche & Nitsche, 1994). Die Extensivierung ist gekennzeichnet durch den

Verzicht der Neuansaat, eine Reduzierung der Düngung sowie der Schnitthäufigkeit. Dies entspricht den Richtlinien des Naturschutzes (Alabsi, 2010).

### **2.4.2 Moorböden**

Moorböden sind ein bedeutender Standortfaktor für die Grünlandwirtschaft im Norddeutschen Tiefland. In Mecklenburg-Vorpommern umfassen Moorflächen etwa 290 000 ha, was rund 13 % der Landesfläche entspricht. Etwa 135 000 ha davon werden als Grünland bewirtschaftet (Mrotzek, 2022). Der überwiegende Teil dieser Flächen besteht aus Niedermooeren (ca. 260 000 ha), während Übergangs- und Hochmoore mit etwa 5 000 ha deutlich weniger vertreten sind (LUNG-MV, 2024). Ergänzt wird diese Statistik durch weitere kohlenstoffreiche Böden, die ähnliche Standortbedingungen aufweisen.

Die moorgebundenen Grünlandstandorte werden vorwiegend für die Futterproduktion und Milchviehhaltung genutzt, da die Standorte eine ausreichende Wasserversorgung gewährleisten. Dabei unterscheiden sich die bodenkundlichen Eigenschaften zwischen den Moorarten erheblich. Während Hochmoore durch nährstoffarme Substrate mit geringem Kalk- und Phosphorgehalt sowie einem verzögerten Stickstoffumsatz charakterisiert sind, weisen Niedermooere vergleichsweise nährstoff- und kalkreiche Böden auf. Teilweise sind hier auch hohe Gehalte an Phosphorsäure vorhanden, was sie für die landwirtschaftliche Nutzung besonders geeignet macht. Moorstandorte sind, aufgrund des hohen Wassergehalts, im Frühjahr lange kalt und biologisch träge. Etwa die Hälfte der Stickstoffdüngung eines Jahres erfolgt deshalb bis zum ersten Schnitt. Für Hochmoore sollte die Stickstoffdüngung langfristig 200 kg N / ha und Jahr nicht überschreiten. Aufgrund des hohen Nachlieferungsvermögens an Stickstoff von Niedermooeren, muss häufig nur zum ersten Schnitt gedüngt werden. Auf eine Düngung in den Sommermonaten, bei 3 bis 4 Schnitten, kann ohne größere Ertragsinbußen verzichtet werden. (Mielke & Wohlers, 2019)

Ein optimaler Grundwasserstand für die Nutzung liegt bei etwa 60 bis 70 cm unter Flur, was einem frischen bis mäßig trockenen Boden entspricht. Für Wiesen- und Mähweiden auf solchen Böden sind spezielle Saatgutmischungen mit standortangepassten Arten wie Wiesenschwingel (*Festuca pratensis*), Deutschem Weidelgras (*Lolium perenne*) und Wiesenfuchschwanz (*Alopecurus pratensis*) etabliert, die eine effizientere Nutzung unter den gegebenen hydrologischen Bedingungen ermöglichen (Mielke & Wohlers, 2019).

### 3. Untersuchungsgebiet

#### 3.1 Standort

Das Untersuchungsgebiet (UG) befindet sich im westlichen Teil des Landkreises Rostock in Mecklenburg-Vorpommern und liegt etwa 10 km westlich der Stadt Schwaan. Zum UG gehören ein ca. 1,8 km langer Gewässerabschnitt der Kleinen Beke sowie zwei parallel zur Kleinen Beke verlaufende Entwässerungsgräben (Abbildung 4).

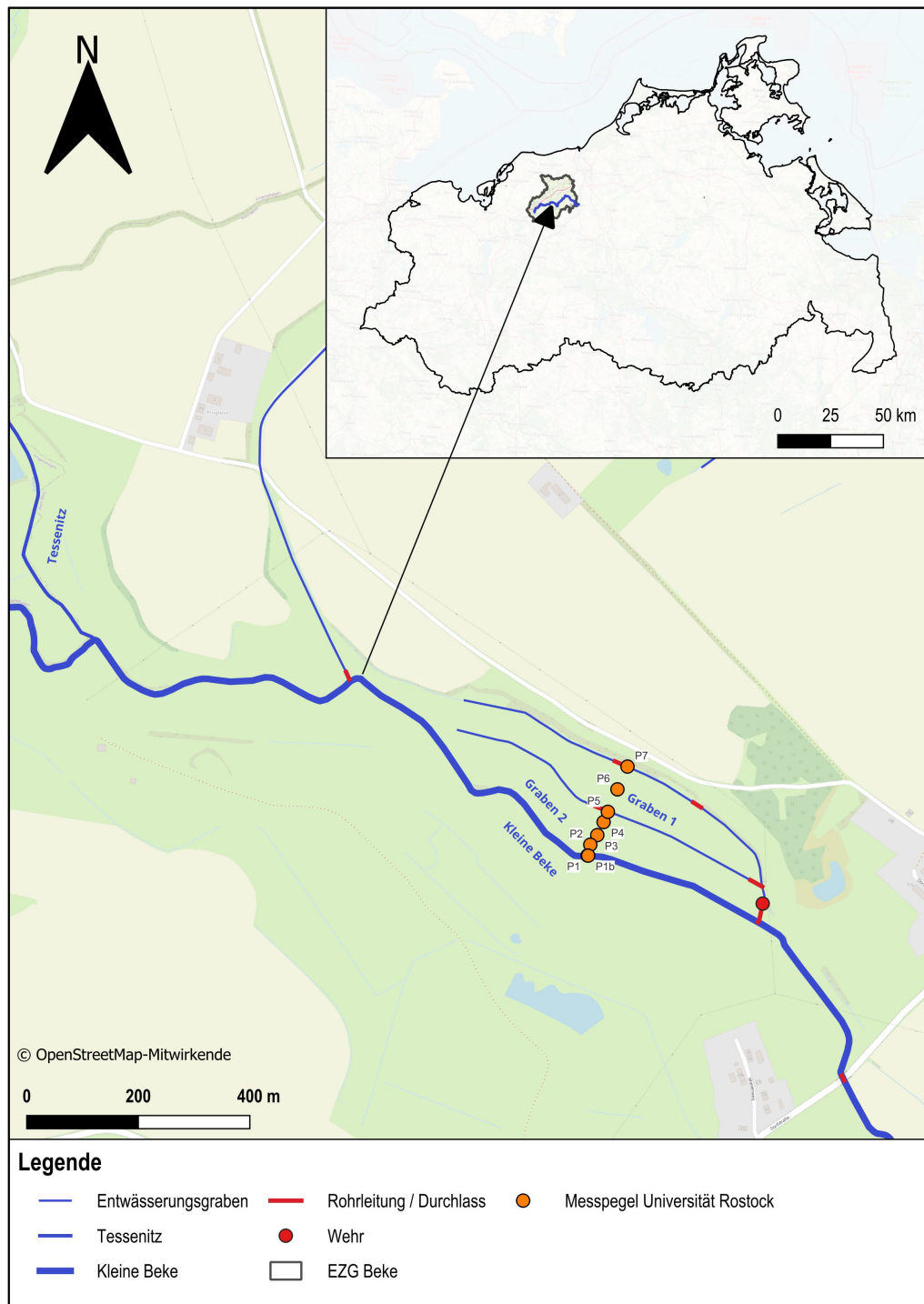


Abbildung 4: Lage des Untersuchungsgebiets (Quelle Gewässerdaten: (LUNG-MV (b), 2025))

Der zuständige Wasser- und Bodenverband (WBV) ist der WBV Warnow Beke. Die Kleine Beke hat ihren Ursprung im Großtessiner See und mündet bei Klein Belitz in die Beke, welche wiederum in die östlich gelegene Warnow mündet. Das EZG der Beke umfasst eine Fläche von etwa 313.64 km<sup>2</sup> (LUNG-MV (b), 2025). Der im Rahmen dieser Untersuchung betrachtete Abschnitt der Kleinen Beke gehört dem 8.91 km langen Mittellauf der Beke (WABE – 0200) an und erstreckt sich vom Einmündungsbereich der Tessenitz bis zu einem flussabwärts gelegenen Abschnitt nördlich von Boldenstorf. Es handelt sich um einen sand- und lehmgeprägten Tieflandfluss (LAWA-Typ 15) und gilt als Fließgewässer 2. Ordnung. Der Wasserkörper ist als natürlich eingestuft, weist jedoch einen unbefriedigenden ökologischen Zustand auf. Grund für diese Beurteilung sind der schlechte Wasserhaushalt und die schlechte Morphologie. Aufgrund der nachweisbaren erhöhten Konzentration an Stickstoff- und Phosphorverbindungen weist der Gewässerabschnitt zudem einen schlechten chemischen Zustand auf (FIS-MV, 2025).

Das UG liegt innerhalb des Niederungs- und Hügellands der Warnow und gehört somit Tal-Landschaftstyp (TLT) 7 an (Mehl & Thiele, 1998). Charakteristische geologische Oberflächensubstrate für diesen TLT sind Geschiebelehm und -mergel. Die dort vorhandenen Moore sind insbesondere als Talmoore der ehemaligen Schmelzwasserabflussbahnen von großer Bedeutung. Die mittlere jährliche Niederschlagshöhe im UG beträgt 603 mm. Die mittlere jährliche tatsächliche Verdunstungshöhe variiert zwischen 423 mm im östlichen und 489 mm im westlichen Teil des UG (BfG, 2025). In Anhang 1 sind die Höhenverhältnisse des UG dargestellt. Die Kleine Beke liegt innerhalb eines Niederungsbereiches, welcher relativ eben ist und Höhen zwischen 7 m NHN und 9 m NHN aufweist. Das Gebiet ist nach Norden und Süden durch deutliche topografische Erhebungen abgegrenzt.

Die Flächennutzung des UG ist in Anhang 2 abgebildet und spiegelt ebenfalls die topografischen Gegebenheiten wieder. Die niedrig gelegenen Bereiche nahe der Kleinen Beke sind nach CORINE Landcover als Wiesen und Weiden eingestuft, wohingegen die höher gelegenen Flächen als nicht-bewässertes Ackerland klassifiziert sind. Diese Einstufung deckt sich mit der tatsächlichen Nutzung. Das Grünland wird als Wiese mit einer Bewirtschaftungsintensität von drei bis vier Schnitten pro Jahr genutzt (Schneider, 2025).

### 3.2 Bauwerke

Im Untersuchungsgebiet befinden sich ein Brückenbauwerk, ein Wehr sowie insgesamt 6 Durchlässe. Die Brücke liegt etwa 400 m südlich der Ortschaft Neukirchen am unteren Rand des betrachteten Abschnitts der Kleinen Beke. Eine Darstellung des Bauwerks ist in Abbildung 5 enthalten.



Abbildung 5: Brücke bei Neukirchen im Unterlauf des betrachteten Fließgewässerabschnitts der Kleinen Beke nahe Station 21+420 (eigene Aufnahme)

Das Wehr befindet sich unmittelbar vor der Einmündung der Entwässerungsgräben in die Kleine Beke. Es ist als Schachtbauwerk ausgebildet, in dem insgesamt vier Wehrtafeln verbaut sind. Die oberen drei Tafeln weisen jeweils eine Breite von 60 cm und eine Höhe von 20 cm auf. Die unterste Tafel besitzt eine Höhe von 60 cm bei gleicher Breite.

Vom Grabensystem führt ein Durchlass zum Wehr sowie ein weiterer vom Wehr zur Kleinen Beke. Zusätzlich enthält das Grabensystem vier weitere Durchlässe. Bei sämtlichen Durchlässen handelt es sich um Betonrohre mit einem Innendurchmesser von 400 mm und einer Wandstärke von etwa 5 cm.

Ebenfalls im Untersuchungsgebiet enthalten sind insgesamt acht Messpegel der Universität Rostock. Diese sind entlang eines Transektes angeordnet und erstrecken sich von der Kleinen Beke bis Graben 1 (Abbildung 4).

## 4. Material und Methoden

Die Beschreibung der Methodik unterliegt der gleichen thematischen Gliederung wie die Darstellung und Diskussion der Ergebnisse. Die verwendeten Dateien für QGIS, Excel, RStudio und HEC-RAS sind dem analogen und digitalen Anhang zu entnehmen.

### 4.1 Datengrundlage

Die für diese Arbeit verwendeten Daten sind in Tabelle 7 zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 7: Verwendete Daten mit dazugehöriger Quelle

Daten	Quelle
Aufbereitete Gewässerdaten EZG Beke	(Schneider, 2025)
Digitales Geländemodell (DGM) 1 m	(LAIv, 2020)
Digitale Orthophotos (DOP)	(LAIv, 2024)
Durchflussdaten Kleine Beke	Eigene Messung
Durchflussdaten Kleine Beke	(Professur für Wasserwirtschaft, 2025)
Durchflussdaten Bröbberow 1975 - 2025	(STALU-MM (a), 2025)
Ergebnisse GIS-Modell	(Schneider, 2025)
Lage Fließgewässer	(LUNG, 2023)
Klimadaten UG Kleine Beke	(Professur für Wasserwirtschaft, 2025)
Pegeldaten Bröbberow 1975 - 2025	(STALU-MM (b), 2025)
Vermessungsdaten Kleine Beke	Eigene Messung

Es wird stets darauf geachtet, dass sich alle Daten mit Raumbezug im gleichen geozentrischen Bezugssystem ETRS 89 / UTM Zone 33N befinden. Der aufbereitete Gewässerdatsatz für das EZG der Beke umfasst einen regelmäßigen Punkt- sowie zwei Linienvektordatsätze, welche als Attribute unter anderem die offizielle Stationierung entlang der Fließgewässerachse sowie die lokale EZG-Fläche eines Punktes enthalten. Die EZG-Flächen wurden mithilfe von Abflussbahn- und Senkenanalysen auf dem DGM 1 ermittelt und weichen demnach leicht von den offiziellen EZG-Angaben des LUNG-MV ab, welche auf dem DGM 5 basieren (Schneider, 2025). Um eine möglichst gute Vergleichbarkeit zwischen den späteren Ergebnissen dieser Untersuchungen und dem vereinfachten Modellierungsansatz von (Schneider, 2025) zu schaffen, werden die EZG-Angaben von Schneider übernommen.

Es liegen Durchflussdaten der Kleinen Beke für den 25.04.2024 an der Station 23+140, flussabwärts der Mündung der Tessenitz in die Kleine Beke am oberen Rand des UG, vor. Zusätzlich wurden am 09.04.2025 an der Station 21+439 flussabwärts des Brückenbauwerks bei Neukirchen am unteren Rand des UG Durchflussmessungen durchgeführt. Die Durchfluss- und Pegeldata des amtlichen Pegels in Bröbberow liegen für den Zeitraum 1975 bis 2025 vor. Dabei weist der Durchflussdatensatz vom 01.11.1982 bis 31.10.1984 eine Lücke auf. Der Pegeldatensatz besitzt eine Lücke vom 01.11.2010 bis zum 31.10.2011.

## **4.2 Vorbereitende Untersuchungen**

Für die hydraulische Modellierung des UG der Kleinen Beke werden verschiedene Eingangsdaten benötigt, welche im Folgenden genauer beschrieben werden.

### **4.2.1 GPS-Vermessung**

Zur Erfassung der Fließgewässergeometrie wurden vom 15.04.2025 bis zum 17.04.2025 GPS-Vermessungen durchgeführt. Die Vermessungen wurden mithilfe eines Leica GS16 GNSS-Rover in Verbindung mit einem Leica GS20 Feld-Controller durchgeführt. Die vom Hersteller angegebene erreichbare Genauigkeit für Echtzeit kinematische Messungen beträgt Horizontal 8 mm + 1 ppm und Vertikal 15 mm + 1 ppm (Leica Geosystems AG, 2022). Insgesamt wurden 72 Querprofile für die Kleine Beke, 12 Querprofile für Graben 1 und 10 Querprofile für Graben 2 vermessen. Grundsätzlich wurde bei allen Querprofilen die Böschungsoberkanten, Böschungszwischenpunkte, Böschungunterkanten, Sohlpunkte sowie der Wasserstand erfasst. Aufgrund von unzugänglichem Gelände konnte an den Profilen 1 bis 6 die rechte Böschungsoberkante sowie an den Profilen 12 und 28 die linke Böschungsoberkante nicht erfasst werden. Für die Erfassung der Durchlässe wurden Rohrsohlen, Rohroberkanten und Wandstärken vermessen.

Zur späteren Darstellung der Brücke im Modell wurde die Breite des Bauwerks in Fließrichtung ermittelt. Außerdem erfasst wurden Lage und Höhe der Widerlager, der Pfeiler und des Überbaus.

### **4.2.2 Aufbereitung der Vermessungsdaten**

Die im Rahmen der Geländeerfassung erhobenen Vermessungsdaten werden zur weiteren Analyse systematisch aufbereitet. Die Aufbereitung erfolgt mithilfe der Open-Source Software QGIS in der Version 3.40.0 „Bratislava“. Als Ergebnis der Vermessung liegen zwei Datensätze im Textformat mit unterschiedlichen Koordinatenreferenzsystemen vor. Zunächst werden die Vermessungsdaten als Vektorlayer nach QGIS importiert. Anschließend

werden alle Punktdaten in das amtliche Koordinatenreferenzsystem ETRS 89 / UTM Zone 33N (EPSG-Code: 25833) reprojiziert und in einem neuen Layer zusammengeführt. Zudem wird ein Linienlayer, welcher die Lage der Querprofile sowie eine eindeutige Profilnummer enthält, erstellt. Die Messpunkte werden anschließend entlang dieses Linienlayers ausgerichtet und jedem Punkt eine Profilnummer zugewiesen. Fehlende Profilpunkte werden durch das DGM 1 des Landesamtes für innere Verwaltung ergänzt. Fehlende oder fehlerhafte Wasserstände werden durch lineare Interpolation zwischen den Wasserständen benachbarter Querprofile geschätzt. Für die Darstellung der Profile wird zudem die Stationierung entlang der horizontalen Achse, innerhalb eines Querschnitts ausgehend von der in Fließrichtung linken Seite, mittels eines Hilfspunktlayers berechnet. Zusätzlich zur eindeutigen Profilnummer wird jedem Querprofil die offizielle Stationsnummer entlang der Gewässerachse zugewiesen. Dafür wird anhand des Punktdatensatzes von (Schneider, 2025) und dem Gewässershapefile ein Lineares Referenzsystem erstellt und die Stationsnummer an den Schnittpunkten der Querprofile mit der Gewässerachse ermittelt. Die Profile der Kleinen Beke beginnen flussabwärts bei Station 21+420 und enden flussaufwärts bei Station 23+214 (siehe Abbildung 7). Eine tabellarische Auflistung aller in QGIS verwendeten Werkzeuge und deren Nutzen ist Anhang 3 zu entnehmen. Abbildung 6 zeigt beispielhaft das Querprofil 21+420 der Kleinen Beke am flussabwärts gelegenen Rand des UG.

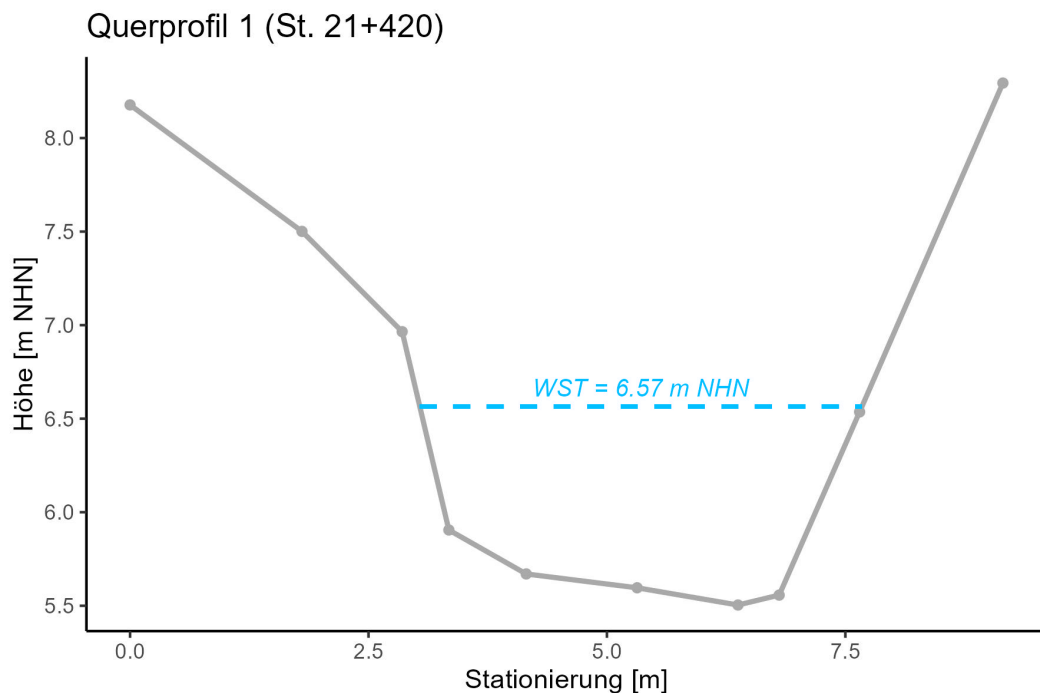


Abbildung 6: Beispielhafte Darstellung des Fließquerschnitts 1 (Station 21+420) nahe der Brücke bei Neukirchen (eigene Darstellung)

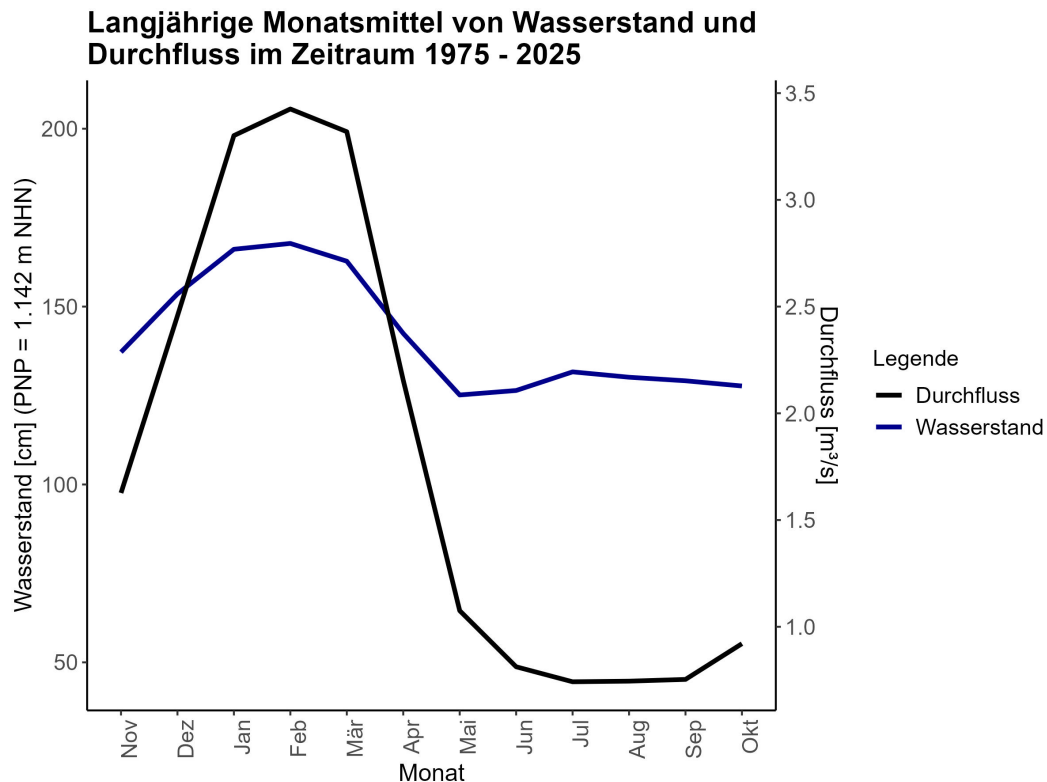


Für die Kleine Beke wird die Einzugsgebietsfläche im mittleren Bereich des UG bei Station 22+122 verwendet. Für die Entwässerungsgräben wird die EZG-Fläche des am flussabwärts gelegenen Punktes verwendet. Als Durchflüsse werden die Durchflussmessungen vom 25.04.2024 sowie 09.04.2025 für die Kleine Beke verwendet. Für den 09.04.2025 liegen zwei Durchflussmessungen vor, von welchen für die Berechnungen das arithmetische Mittel gebildet wird.

#### Formel 7: Berechnung der Abflusspende

$$q = \frac{Q}{A_{EZG}}$$

Anschließend werden die Übereinstimmungen zwischen den Abflusspenden des Pegels in Bröbberow und den anhand der Durchflussmessungen im UG ermittelten Abflusspenden bestimmt. Für die Übertragung der Durchflüsse wird Formel 7 nach den Durchfluss umgestellt und die Abflusspende des Pegels Bröbberow sowie die jeweilige EZG-Fläche eingesetzt. Abbildung 8 veranschaulicht die zeitliche Dynamik des Wasserstands und Durchflusses der Beke am Pegel Bröbberow.



**Abbildung 8: Monatsmittel für Wasserstand und Durchfluss des amtlichen Pegels Bröbberow für den Zeitraum 1975 bis 2025**

#### 4.2.4 Bestimmung der Rauheiten

Die Bestimmung der Rauheiten ist ein iterativer Prozess und maßgeblicher Teil der Modellkalibrierung (siehe Kapitel 4.3). Zunächst wird für den Zeitpunkt der Vermessungen im April 2025 anhand von Literaturwerten die Rauheit ermittelt. Die für das stationäre Modell verwendeten Anfangsrauheiten sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Eingangsrauheiten für das stationäre Modell

Station	$k_{St}$ [ $m^{1/3}/s$ ]
Kleine Beke	20
Graben 1	16
Graben 2	16

Es werden anschließend nach Abschluss der Modellierung statistische Kenngrößen zur Beurteilung der verwendeten Rauheiten berechnet. Außerdem werden die Rauheiten zur Kontrolle nach dem Verfahren von Cowan, zum Beispiel in (LfU (a), 2002), abgeschätzt. Bei zu großen Differenzen zwischen modellierten und gemessenen Wasserständen werden die Rauheiten entsprechend angepasst.

Da im Rahmen dieser Arbeit eine Langzeitmodellierung durchgeführt wird, müssen saisonale Veränderungen der Rauheit des Fließgewässers entsprechend berücksichtigt werden. Hierfür wird das stationäre Modell schrittweise in ein instationäres Modell überführt, welches Änderungen des Durchflusses und der Rauheit mit der Zeit abbilden kann. Als Grundlage zur Bestimmung des jahreszeitlichen Verlaufs der Rauheit dient der Verkrautungsgang mit einer jährlichen Krautung Ende Juli in (Dörter, 1985). Die im April ermittelte Rauheit wird als Winterrauheit festgelegt. Zur Bestimmung des Jahresverlaufs werden die relativen Änderungen zu diesem Wert ermittelt. Die Überprüfung der mit diesen Rauheiten modellierten Wasserstände erfolgt anhand einer Pegelmessreihe der Universität Rostock für den Zeitraum vom 16.05.2024 bis 14.03.2025.

#### 4.2.5 Festlegung Trocken- und Nassjahre

Zur Klassifikation der Jahre nach nass, trocken und normal dient ein durch die Professur für Wasserwirtschaft der Universität Rostock zur Verfügung gestellter Datensatz. Die Einteilung erfolgt anhand des Standard Precipitation Index (SPI), welcher als Kriterium lediglich den Niederschlag berücksichtigt. Aufgrund fehlender Pegeldata für das Jahr 2011 in Bröbberow weist dieser Datensatz zu diesem Zeitpunkt eine Lücke auf (Waltering, 2025). Der Deutsche

Wetterdienst (DWD) klassifiziert das Jahr 2011 für Mecklenburg-Vorpommern als nass (DWD, 2011). Diese Einteilung wird demnach für das Jahr 2011 angewendet.

### 4.3 Modellerstellung HEC-RAS

In diesem Kapitel wird die Erstellung des hydrodynamischen eindimensionalen Modells beschrieben. Es werden grundlegende Schritte und Annahmen bei der Modellierung erläutert.

#### 4.3.1 Software

Die Modellierung erfolgt mithilfe des Programms HEC-RAS in der Version 6.6. HEC-RAS ist eine kostenfreie Software des US Army Corps of Engineers und ermöglicht ein- und zweidimensionale stationäre und instationäre Strömungsberechnungen sowie weitere Berechnungen wie Wassertemperatur- oder Sedimenttransportmodellierungen durchzuführen (US Army Corps of Engineers, Hydraulic Engineering Center).

#### 4.3.2 Modellaufbau

Zu Beginn der Modellerstellung wird dem HEC-RAS-Modell das Koordinatenreferenzsystem ETRS89 / UTM Zone 33N (EPSG-Code: 25833) zugewiesen, um eine korrekte Verarbeitung der Eingangsdaten zu gewährleisten. Zur besseren Übersicht wird eine georeferenzierte Hintergrundkarte aus QGIS importiert.

Anschließend muss die Fließgewässergeometrie erstellt werden. Zur Abbildung des Flusslaufs werden die auf das UG zugeschnittenen Gewässerachsen aus QGIS importiert. Es handelt sich um ein verzweigtes Gewässersystem, weswegen die Definition von Gewässern *River* und Abzweigungen *Reaches* notwendig ist. Die Verknüpfung verschiedener *River* erfolgt durch *Junctions*. Diese Verknüpfung ist bei der Einmündung von Graben 2 in Graben 1 sowie der Einmündung von Graben 1 in die Kleine Beke notwendig. Dabei wird das Fließgewässer in welches eingemündet wird automatisch in zwei *Reaches* ober- und unterhalb der *Junction* aufgeteilt. Für die korrekte Abbildung der Fließrichtung wird die Reihenfolge der Gewässerstützpunkte umgekehrt.

Die Beschreibung des Flussschlauchs erfolgt in HEC-RAS anhand von Querprofilen, sogenannten *Cross Sections*. Das Modell nimmt lineare Geometrieänderungen benachbarter Querschnitte an. Dabei müssen jedem Profil verschiedene Parameter zugewiesen werden. Die Stationierung entlang der horizontalen Achse und die Höhe werden aus den aufbereiteten Vermessungsdaten übernommen. Außerdem wird jeder *Cross Section* eine Stationierung entlang der Gewässerachse hinzugefügt (siehe Kapitel 4.2.2). Aus den daraus resul-

tierenden Abständen wird die *Downstream Length*, der Abstand in Fließrichtung zur nächsten *Cross Section*, festgelegt. Da die GPS-Vermessungen der Querprofile von der linken bis zur rechten Böschungsoberkante reichen, werden diese Punkte im Modell ebenfalls als Uferkanten *left overbank (LOB)* beziehungsweise *right overbank (ROB)* definiert. Zur realistischen Darstellung der Wasserstände werden *Levee-Points* an den höchsten Punkten dammartiger Erhebungen in Querprofilen definiert. Sind derartige Erhebungen nicht vorhanden, wird der höchste Geländepunkt des Profils verwendet. Zur besseren modelltechnischen Darstellung von Ereignissen, bei denen der Wasserspiegel die Höhe der Uferkanten übersteigt, werden alle *Cross Sections* beidseitig um 2 m erweitert und mit den Höheninformationen des DGM 1 verknüpft. Das DGM 1 ist als *RAS Terrain* in HEC-RAS hinterlegt und befindet sich im gleichen Koordinatenreferenzsystem wie das Projekt.

Als letzter Schritt zur Darstellung des Flusslaufs, wird den Querprofilen je nach Abschnitt, die in Kapitel 4.2.4 beschriebenen Rauheiten zugewiesen.

### 4.3.3 Berücksichtigung von Bauwerken

Die Implementierung von Durchlässen erfolgt in HEC-RAS mittels *Inline-Structures* und *Culverts*. Die Parametrisierung der Durchlässe ist in Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 9: Eigenschaften der Durchlässe im Modell

Gewässer	Station	Länge [m]	Durchmesser [mm]	Material	Höhe Einlauf [m NHN]	Höhe Auslauf [m NHN]
Graben 2	0+331	14	400	Beton	6.711	6.641
Graben 2	0+023.3	19	400	Beton	7.194	7.185
Graben 1	0+431.2	15	400	Beton	6.968	6.968
Graben 1	0+271.1	16	400	Beton	7.019	7.001
Graben 1	0+037	29.5	400	Beton	7.095	6.952

Als Rauheit wird allen Durchlässen, gemäß HEC-RAS User Manual, zunächst ein Manning-Wert von 0.013 zugeordnet. Für die Eintritts- und Austrittsverluste an den Rohren werden die Standardwerte von HEC-RAS verwendet.

Für die Darstellung der Brücke bietet HEC-RAS die Möglichkeit mittels *Bridges/Culverts* das Bauwerk zu implementieren. Die Brücke befindet sich im unteren Bereich der Kleinen Beke bei Station 21+451.5. Die Geometrien für Fahrbahn, seitliche Widerlager und Pfeiler werden aus den Punktdaten der Vermessung ermittelt und übertragen. Die Länge des Bauwerks in Fließrichtung im Modell beträgt 8 m. Die Brückenpfeiler weisen eine Breite von 0.7 m auf.

Der Oberbau ist etwa 0.9 m mächtig. Die modelltechnische Umsetzung der Brücke ist Anhang 4 zu entnehmen.

#### 4.3.4 Stationäres Modell

Zunächst wird ein stationäres Modell erstellt, welches die hydraulischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Vermessungen vom 15.04.2025 bis 17.04.2025 möglichst genau abbilden soll. Als Randbedingungen für dieses Modell dienen die gemessenen Wasserstände und die aus der Abflussspende des Pegels Bröbberow ermittelten Durchflüsse.

Da die Durchflussdaten in täglicher Auflösung vorliegen und die Messungen an drei Tagen durchgeführt wurden, wird der Mittelwert des Durchflusses für diese drei Tage als Randbedingung verwendet. Tabelle 10 fasst die Eingangsgrößen für den stationären Zustand zusammen.

Tabelle 10: Verwendete Randbedingungen für den stationären Zustand

Gewässer	Station	Durchfluss [m <sup>3</sup> /s]	Wasserstand [m NHN]
Kleine Beke	23+214	0.428	-
Kleine Beke	21+420	0.428	6.57
Graben 1	0+722	0.00065	-
Graben 1	0+064	0.00097	-
Graben 2	0+620	0.00032	-

Ausgehend von den Ergebnissen der stationären Berechnungen werden Rauheiten und Sedimenthöhen iterativ angepasst. Außerdem angepasst wird die *Depth Blocked* der Culverts, zur Berücksichtigung von Rückstauwirkungen verursacht durch die Lage der Durchlässe im Schlamm. Wie in Kapitel 4.2.4 erwähnt, werden zur Beurteilung des Modells Kenngrößen ermittelt, um die Unterschiede zwischen gemessenen und modellierten Wasserständen einzuordnen. Zu den zu ermittelnden Kenngrößen gehören unter anderem Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), Bias und Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ).

#### 4.3.5 Instationäres Modell

Ausgehend vom vorkalibrierten Zustand der stationären Berechnung für April 2025, wird das Modell in ein instationäres überführt. Die finale Kalibrierung erfolgt anhand von Wasserstandsdaten einer Messstation der Universität Rostock nahe Station 22+122 der Kleinen Beke in täglicher Auflösung. Die Messreihe deckt den Zeitraum vom 16.05.2024 bis 14.03.2025 ab. Es fehlt der Monat April in der Zeitreihe. Dieser wurde jedoch bereits in der

Vorkalibrierung im stationären Zustand berücksichtigt. Ziel ist die Ermittlung von saisonalen Rauheitsfaktoren, welche multipliziert mit den verwendeten Manningwerten, die monatliche Dynamik der Wasserstandsentwicklung abbilden sollen. Für die Beurteilung der Güte werden die in Kapitel 4.3.4 genannten Kenngrößen sowie die Nash-Sutcliffe- und Kling-Gupta-Effizienz ermittelt. HEC-RAS fordert für die instationäre Berechnung mindestens zwei Fließquerschnitte zwischen *Culvert* und *Junction*. Es werden in diesen Bereichen zwei *Cross Sections* eingefügt, welche dem in Fließrichtung nächstgelegenen Querschnitt entsprechen. Die in Kapitel 4.2.3 über die Abflussspende geschätzten Durchflüsse werden als *Flow Hydrograph* an den stromaufwärtsgelegenen Endprofilen als Randbedingung verwendet. Die verwendeten Durchflussreihen sind dem digitalen Anhang 06 zu entnehmen. Als untere Randbedingung an Station 21+420 wird eine *Normal Depth* von 0.0006 verwendet.

Als Startbedingungen werden Durchflusswerte nahe denen des ersten Berechnungszeitrittens verwendet. Der Berechnungszeitritt beträgt zwei Minuten und ist ein Kompromiss zwischen Berechnungsdauer und numerischer Stabilität.

Nach Abschluss der Kalibrierung erfolgt die eigentliche Langzeitsimulation, welche einen Zeitraum von 30 hydrologischen Jahren abdeckt. Die Simulation beginnt am 01.11.1994 und endet am 31.10.2024.

#### **4.3.6 Modellannahmen**

Für die Modellierung des Gewässersystems sind verschiedene Annahmen getroffen worden. Es wird auf die Modellierung des Wehrs (siehe Kapitel 3.2) verzichtet. Dies liegt zum einen daran, dass zu den Zeitpunkten der Begehungen vor Ort das Wehr jeweils vollständig geöffnet war, und zum anderen ist es nicht möglich, die Wehrsteuerung der letzten 30 Jahre sicher zu rekonstruieren. Stattdessen wird ein durchgehendes Rohr von Graben 1 in die Kleine Beke modelliert (siehe Tabelle 9). Nach Aussagen des zuständigen landwirtschaftlichen Leiters des Gebietes ist das Wehr nicht in Benutzung. Im Bereich der Durchlässe wird, im Gegensatz zum stationären Zustand, auf die Verwendung der *Depth Blocked* verzichtet. Die festen Sedimenthöhen werden in den Gräben ebenfalls entfernt. Stattdessen werden bei Profil 0+064 in Graben 1, kurz hinter der Mündung von Graben 2 in Graben 1, *Ineffective Flow Areas* definiert, welche bis zu einer Höhe von etwa 7.5 m NHN permanent wirksam sind. Die *Ineffective Flow Areas* lassen einen 5 cm breiten Schlitz im Profil und sollen den extrem verzögerten vorherrschenden Abfluss in den Gräben simulieren. Das Profil 0+064 ist in Abbildung 9 dargestellt. Dieses Vorgehen ermöglicht, im Gegensatz zur Verwendung eines blockierten Bereichs in den Rohren in Verbindung mit Sedimenthöhen, dass niedrige

Wasserstände in Trockenperioden abgebildet werden können und kein Aufstau bis zu dieser Höhe auftritt.

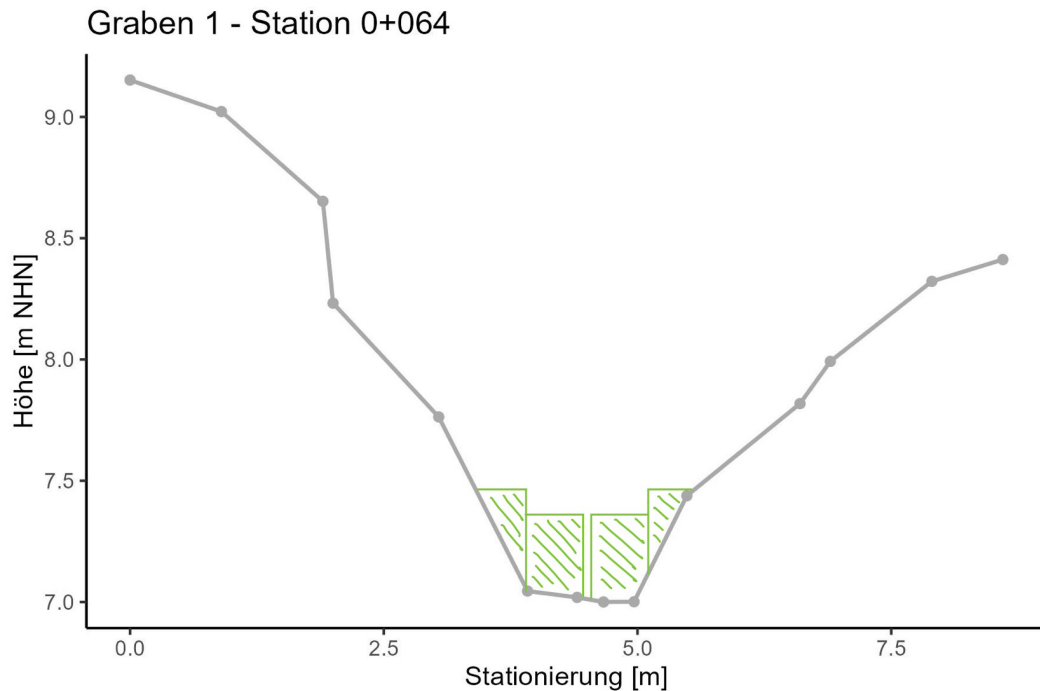


Abbildung 9: Prinzipdarstellung der Ineffective Flow Areas bei Graben 1 - Profil 0+064

In HEC-RAS führen eindimensionale instationäre Berechnungen mit verzweigten Systemen, Durchlässen und Bauwerken häufig zu numerischen Instabilitäten, weswegen für die rechnerische Stabilität folgende Anpassungen vorgenommen werden.

Aufgrund äußerst geringer Durchflüsse, welche im instationären Berechnungszustand nur bedingt abgebildet werden können, erhält Graben 2 als hydraulische Randbedingung dieselbe Durchflussreihe wie Graben 1. Die Durchflussreihe für Graben 1 wird gemäß Tabelle 11 angepasst.

Tabelle 11: Graben 1 - Anpassung der Durchflussrandbedingung

Durchfluss [m <sup>3</sup> /s]	Faktor
≤ 0.0001	15
≤ 0.001	8
≤ 0.005	4

Der rechnerische Abstand benachbarter *Cross Sections* wird auf mindestens 5 m festgelegt. Die tatsächliche Lage der Querschnitte wird nicht verändert.

Insbesondere der Durchlass von Graben 1 in die Kleine Beke verursacht numerische Probleme. Eine mögliche Ursache für diese Instabilitäten sind große Höhenunterschiede zwischen Rohrauslass und nächst gelegenem Profil, weswegen die Höhe des Rohrauslasses um 30 cm abgesenkt wurde. Zur Gewährleistung der numerischen Stabilität des Modells werden die Manning-Werte in den Durchlässen auf einen sehr hohen Wert von 0.1 erhöht. Im unteren Abschnitt der Kleinen Beke werden, für gleichmäßigere Abstände der Fließquerschnitte, insgesamt elf interpolierte *Cross Sections* eingefügt. Außerdem wird eine Interpolierte *Cross Section* zwischen Station 0+038 und 0+064 in Graben 1 eingefügt.

Die in diesem Kapitel beschriebenen Maßnahmen zur Verbesserung der numerischen Stabilität wirken sich nur unwesentlich auf die Modellgüte aus.

#### **4.4 Auswertung der instationären Ergebnisse**

Für die Auswertung der Langzeitsimulation werden aus den Tageswerten der Wasserstände zunächst Monatsmittelwerte bestimmt. Die Betrachtungen erfolgen abschnittsweise. Aus den Monatsmittelwerten werden die mittleren Jahreswasserstände berechnet. Die Auswertung erfolgt für hydrologische Jahre, welche am 01.11. beginnen und am 31.10. enden. Weiterhin wird in der Auswertung zwischen hydrologisch nassen, trockenen und normalen Jahren differenziert (siehe Kapitel 4.2.5).

Neben der Ermittlung statistischer Kenngrößen werden zudem für jeden Monat charakteristische Wasserstände sowie die Abweichung zum langjährigen Mittelwasserstand berechnet. Darüber hinaus werden mehrjährige Dauerlinien für jeden Abschnitt bestimmt. Zur Verdeutlichung der Unterschiede werden für jeden Abschnitt drei Dauerlinien für Normal-, Trocken- und Nassjahre erstellt. Die Dauerlinien werden gemäß (LAWA, 2018) erstellt.

Die Umsetzung der Dauerlinien erfolgt anhand eines R-Skriptes. Das Skript filtert zunächst den jeweiligen Abschnitt aus dem Ergebnisdatensatz der instationären Berechnung. Anschließend wird eine Funktion definiert, welche die Anzahl der hydrologischen Jahre je Klassifikation (normal, nass, trocken) bestimmt, die Wasserstände aufsteigend sortiert und die Unterschreitungsdauer sowie den Rang bestimmt und daraus eine Dauerlinie erstellt. Diese Funktion wird auf jede Kategorie eines Abschnitts angewandt und führt die Ergebnisse der Wasserstände und Unterschreitungsdauern in einem Dataframe zusammen.

Um die modellierten Wasserstände im UG einzuordnen, werden Betrachtungen entlang des in Abbildung 4 dargestellten Transektes von Pegel 1 bis Pegel 7 durchgeführt. Das Transekt

besitzt eine Länge von etwa 175 m. Aus den erzeugten Wasserständen, in täglicher Auflösung, werden die Wasserstandsmediane für Winter- und Sommerhalbjahr sowie der Jahresmedian berechnet.

Zur Bestimmung der Geländeverhältnisse wird ein 10 m Puffer um das Transekt erzeugt. Da für die Auswertung lediglich die Flächen zwischen den Gewässerabschnitten von Relevanz sind, wird die Ausdehnung des Puffers entsprechend angepasst. Als Ergebnis liegen zwei Polygone entlang des Transektes vor, welche als Randbedingung für die finale Rasterstatistik des DGM 1 gelten. Ermittelt werden Mittelwert, Median und minimale sowie maximale Erhebungen des DGMs.

Anschließend erfolgt die Zuordnung des Gebietes zu einer Wasserstufe.

## **4.5 Vergleich mit vereinfachtem Ansatz**

Abschließend erfolgt der Vergleich des Modells mit einem an der Professur für Wasserwirtschaft der Universität Rostock entwickelten GIS-orientierten Modellierungsansatz. Es werden hydraulische Parameter sowie Unsicherheiten ermittelt. Schwerpunkt des Vergleichs sind die erzeugten Wasserstände des GIS-Modells.

### **4.5.1 Modellvergleich**

Der Vergleich erfolgt für den stationären Berechnungszustand. Bei dem GIS-Modellierungsansatz werden einfache Trapezprofile für die Wasserspiegellagenberechnung verwendet. Das GIS-Modell schätzt Sohlhöhen und Wasserspiegelbreiten anhand der Wasserstände und -breiten des DGMs am Befliegungstag hydraulisch. Da die Unterschiede in der Berechnung hauptsächlich in der Gewässergeometrie auftreten, werden alle anderen Parameter beider Modelle einheitlich belassen. Die Querprofile des GIS-Ansatzes sind in einem Abstand von 10 m entlang der Gewässerachse verteilt. Für den Vergleich werden die Profile verwendet, welche denen des HEC-RAS Modells am nächsten sind.

Die Berechnung erfolgt für vier hydrologische Zustände, welche durch charakteristische Durchflüsse und Bewuchsrauhigkeiten gekennzeichnet sind. Die Zeiträume werden so gewählt, dass möglichst repräsentative Wasserstände abgedeckt werden. Die Berechnungen erfolgen für die Durchflüsse vom 15.04.2025 bis zum 17.04.2025, vom Winter- und Sommerhalbjahr des hydrologischen Jahres sowie den Durchfluss des Jahresmittelwasserstandes. Es wird die vereinfachende Annahme getroffen, dass die Mittelwasserstände durch den mittleren Durchfluss erzeugt werden. Zunächst werden die Wasserstände je Szenario für das

HEC-RAS Modell bestimmt. Anschließend erhält das GIS-Modell den Wasserstand des untersten Querprofils des HEC-RAS Modells als Startbedingung für die Berechnung. Da das GIS-Modell bei Profil 1 an Station 21+420 keine hydraulischen Parameter ausgibt, wird das Profil für den Vergleich vernachlässigt. Insgesamt 3 weitere Querprofile werden ebenfalls nicht berücksichtigt, da diese sehr nahe beieinander liegen und somit keine Zuordnung zu einem Profil des GIS-Ansatzes möglich ist.

Die in Tabelle 15 beschriebenen Rauheiten dienen als Grundrauheiten für die entsprechenden Gewässerabschnitte. Zusätzlich dienen die saisonalen Rauheitsfaktoren aus Tabelle 17 als Grundlage zur Ermittlung der Rauheitsfaktoren. Zur Bestimmung der tatsächlichen Rauheit eines Szenarios werden die Rauheitsfaktoren mit den Grundrauheiten multipliziert.

Als Modellrandbedingung dienen die Abflussspenden des Pegels Bröbberow der in Kapitel 4.2.3 beschriebenen Methodik. Für den Kalibrierzeitpunkt wird der Mittelwert der dreitägigen Abflussspenden gebildet. Für die restlichen Zeiträume werden die mittleren Abflussspenden des betrachteten Zeitraumes gebildet. Grundlage für diese Berechnungen ist eine langjährige Durchflussreihe am Pegel Bröbberow vom 01.11.1974 bis 30.04.2025.

Die Randbedingungen für den Modellvergleich sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

**Tabelle 12: Randbedingungen für den Modellvergleich**

<b>Zeitraum</b>	<b>Szenario 1 - Kalibrierung (15.04.2025 - 17.04.2025)</b>	<b>Szenario 2 - Mittelwasser</b>	<b>Szenario 3 - Sommerhalbjahr (Mai - Okt)</b>	<b>Szenario 4 - Winterhalbjahr (Nov - Apr)</b>
<b>Abflussspende [l/(s*km<sup>2</sup>)]</b>	2.89	6.01	2.84	9.16
<b>Rauheitsfaktor</b>	1.0	2.5	3.1	1.8
<b>Startwasserstand (Station 21+420) [m NHN]</b>	6.57	6.70	6.40	6.76

Es werden in der Auswertung zunächst Unterschiede der Sohlhöhen bewertet. Außerdem werden Differenzen hinsichtlich Fließquerschnitt, Fließgeschwindigkeit, Tiefe, Wasserspiegelbreite sowie Wasserstandsgefälle ermittelt. Weiterhin werden Längsschnitte der Wasserstände für jeden Abschnitt erzeugt und statistische Kenngrößen zur Beurteilung der Übereinstimmung ermittelt.

## 5. Ergebnisse und Diskussion

Der thematische Aufbau dieses Kapitels gleicht dem der Methodik. Die Diskussion der Ergebnisse erfolgt direkt in den entsprechenden Unterkapiteln.

### 5.1 Fließquerschnitte

Die Eigenschaften der aufbereiteten, im HEC-RAS-Modell verwendeten Fließquerschnitte sind Tabelle 13 zu entnehmen.

Tabelle 13: Geometrische Eigenschaften der Fließquerschnitte je Gewässerabschnitt

Gewässer / Eigenschaft	Kleine Beke	Graben 1	Graben 2
Anzahl Profile	83	15	12
Anzahl Stützpunkte	12 - 20	11 - 23	11 - 14
Abstand benachbarter Profile [m]	5 - 68	5 - 121	5- 105
Breite [m]	10.1 - 18.9	6.6 - 12.3	6.7 - 8.6
Abschnittslänge [m]	1793	722	620
Sohlgefälle [m/m]	0.00061	0.00177	0.00053

Die relativ großen Abstände benachbarter Querprofile, insbesondere im Bereich der Gräben, sind bedingt durch nur geringfügige Veränderungen im Querschnitt. Das größere Gefälle von Graben 1 im Vergleich zu den anderen Gewässerabschnitten verteilt sich nicht gleichmäßig über die gesamte Strecke. Dies liegt an der Talrandlage des Grabens im UG. Im Bereich von Station 0+000 bis Station 0+528 besitzt der Graben nahezu kein Sohlgefälle. Von Station 0+528 bis 0+722 beträgt die Höhendifferenz ca. 1.2 m. Dieser Wert entspricht in etwa dem gesamten Höhenunterschied der Kleinen Beke im betrachteten Abschnitt. Der Verlauf der Sohlhöhen als Längsschnitt ist in Abbildung 10 veranschaulicht. Es wird deutlich, dass die Gräben mit Sohlhöhen im Bereich von 7.0 m NHN bis 7.2 m NHN leicht höher liegen als die Kleine Beke. Im Abschnitt der Kleinen Beke treten abschnittsweise Kolke auf, welche im Höhenplan durch die ausgeprägten Tiefpunkte abgebildet sind. Die Tiefpunkte in den Gräben sind weniger durch Kolke, sondern durch den Geländeverlauf und stellenweise besonders ausgeprägte Schlamm- und Sedimentschichten zu erklären, welche durch die Vermessung nicht ausreichend genau erfasst wurden. In der Kleinen Beke treten diese Ablagerungen in Kurvenabschnitten im Bereich der Gleitufer beziehungsweise lokal an Abschnitten mit sehr geringen Gefälle und Fließgeschwindigkeiten auf.

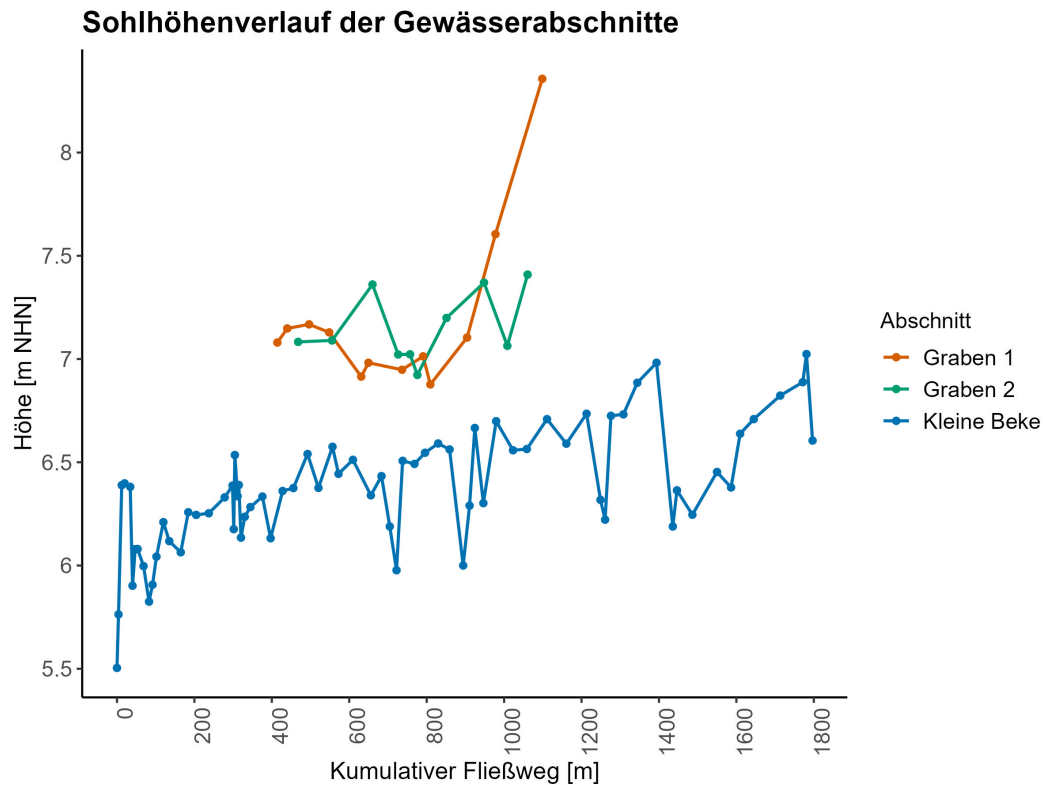


Abbildung 10: Sohlhöhen der Fließgewässerabschnitte in zehnfach überhöhter Darstellung entlang der Fließstrecke

## 5.2 Durchflussübertragung

Die ermittelten Eingangsdaten für die Durchflussübertragung und die daraus resultierenden Abflussspenden sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Ziel war die Ableitung einer langjährigen Durchflusszeitreihe für das UG-Kleine Beke aus den Daten des amtlichen Pegels Bröbberow.

Tabelle 14: Vergleich der Abflussspenden für die Zeitpunkte der Durchflussmessungen 2024 / 2025

	Amtliche Pegeldurchflüsse Bröbberow	Durchflussmessungen Universität Rostock UG-Kleine Beke	Graben 1	Graben 2
<b>A<sub>EZG</sub> [km<sup>2</sup>]</b>	295.87	148.04	0.2261	0.1125
<b>Q [l/s] (25.04.2024)</b>	1786	850	-	-
<b>q [l/(s*km<sup>2</sup>)] (25.04.2024)</b>	6.04	5.74	-	-
<b>Q [l/s] (09.04.2025)</b>	761	344.5	-	-
<b>q [l/(s*km<sup>2</sup>)] (09.04.2025)</b>	2.57	2.33	-	-

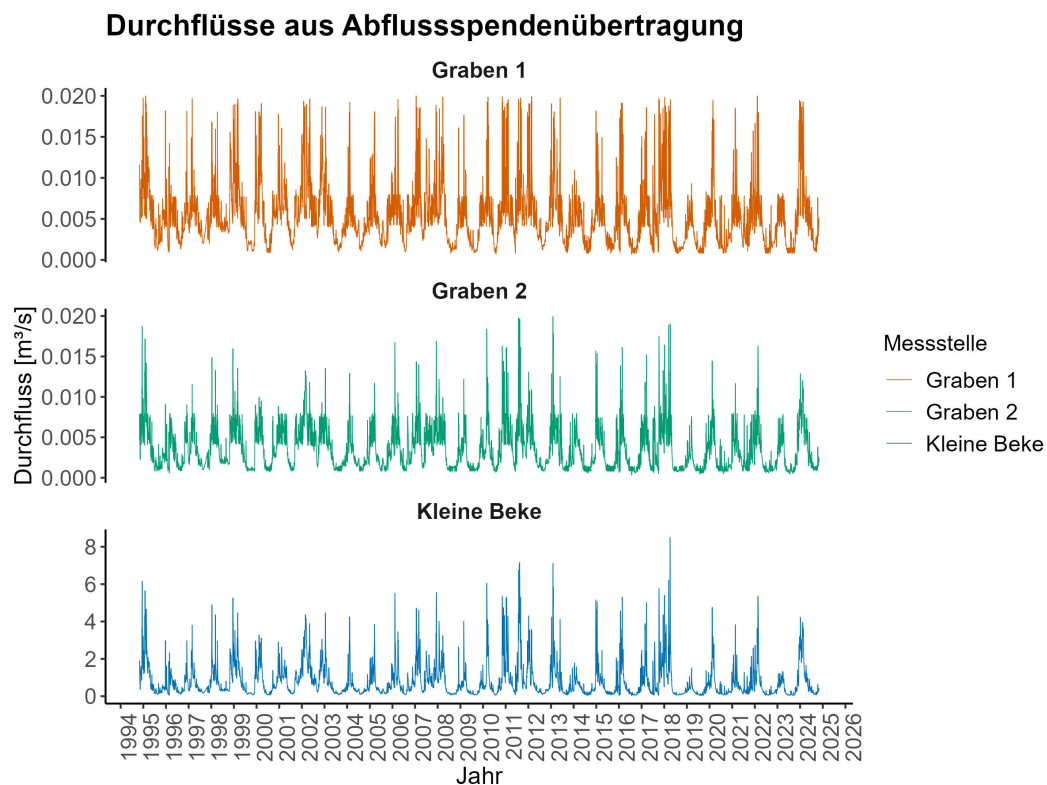
Die ermittelten Abflussspenden für die Kleine Beke liegen am 25.04.2024 um 4.5 % und am 09.04.2025 um 9.5 % unterhalb der Werte des Pegels Bröbberow.

Die geschätzten Durchflüsse unterscheiden sich somit um 44 l/s für den 25.04.2024 und 36 l/s für den 09.04.2025 von den Messwerten. Am 25.04.2024 zeigen die Tagesdurchflusswerte vor und nach der Messung nur geringe Schwankungen. Nach dem Messzeitpunkt am Morgen des 09.04.2025 verdoppeln sich die Durchflusstageswerte und weisen deutlich größere Änderungen auf.

Die Fließstrecke vom UG bis zum Pegel Bröbberow beträgt ca. 14 400 m. Bei einer mittleren Fließgeschwindigkeit von 0.2 m/s beträgt die Laufzeitverschiebung etwa 20 Stunden. Folglich wurde für die Auswertung der Abflussspendenübertragung der Vortageswert des amtlichen Pegels in Bröbberow verwendet.

Die mit dieser Methode beschriebenen Unterschiede zwischen im UG gemessener Abflussspende und der Abflussspende am Pegel Bröbberow sind sehr gering. Somit ist eine einfache flächenabhängige Übertragung der Durchflüsse des Pegels Bröbberow im Bereich der Kleinen Beke auf das UG zulässig und wird im Folgenden angewandt.

Die auf Basis der Abflussspendenübertragung berechneten Durchflussreihen für die Gewässerabschnitte im Untersuchungsgebiet sind in Abbildung 11 dargestellt.



**Abbildung 11: Durchflussreihen ermittelt aus der Abflussspende des Pegels Bröbberow und der Einzugsgebietsfläche des jeweiligen Gewässerabschnitts**

Für die Gräben muss aufgrund der geringen EZG-Größe eine Modifizierung der Abflussübertragung erfolgen. Im Allgemeinen ist diese Art der Durchflussübertragung nur für größere EZG geeignet. Der Fehler wird für sehr kleine EZG, wie denen der Gräben, sehr groß. Die Ursache liegt in der zunehmenden Bedeutung lokaler Standortbedingungen wie beispielsweise dem Grundwassereinfluss, bedingt durch Morphologie und Talrandlage der Gräben. Die Diskussion und Abbildung der angepassten Durchflussreihe als Randbedingung für das hydraulische Modell, insbesondere für Graben 2, erfolgt in Kapitel 5.5.4.

### 5.3 Rauheiten

Für die Erstellung des stationären Modells zum Vermessungszeitpunkt im April 2025 sind die in Tabelle 15 dargestellten Rauheiten ermittelt worden.

Tabelle 15: Rauheiten für den Vermessungszeitpunkt im April 2025

Abschnitt	n [-]	$k_{st}$ [ $m^{1/3}/s$ ]
Kleine Beke (St. 21+420 - St. 21+793)	0.04	25
Kleine Beke (St. 21+793 - St. 23+214)	0.05	20
Graben 1	0.125	8
Graben 2	0.125	8

Die Kleine Beke weist wie zu erwarten geringere Rauheiten als die Entwässerungsgräben auf. Dies liegt unter anderem an den größeren, offeneren Querschnitten, in welchen die relative Rauheit geringer ist, und den im Mittel um etwa zwei Zehnerpotenzen höheren Durchfluss. Die Längsform der Kleinen Beke legt nahe, dass dort zumindest in der Vergangenheit Eingriffe in das Gewässer in Form von Begradigungen durchgeführt worden sind. Diese Eingriffe wirken sich glättend auf die Rauheit aus. Ein Vergleich mit dem Verfahren von Cowan zeigt ähnliche Ergebnisse. Dabei berechnet sich für die Kleine Beke, einem Fluss mit einer natürlichen Sohle und etwas stärkeren Uferbewuchs zum Messzeitpunkt, ein Stricklerwert von etwa  $21 m^{1/3}/s$ . Für die Gräben mit extrem starkem Bewuchs und einer natürlichen Sohle liegt der Stricklerwert bei etwa 8 bis  $11 m^{1/3}/s$ . Die verwendeten Teilbeiwerte sind Tabelle 16 zu entnehmen. Nach den veralteten, aber immer noch zutreffenden Technischen Normen, Gütevorschriften und Lieferbedingungen (TGL) der DDR, lassen sich die Gräben als sehr stark zur Verkräutung neigend einordnen (VEB Ingenieurbüro für Meliorationen, 1981).

Tabelle 16: Abschätzung der Rauheitsbeiwerte nach dem Verfahren von Cowan

Teilbeiwert	Kleine Beke	Gräben
Beschaffenheit Sohlmaterial: $n_0$	0.020 - Erde	0.020 - Erde
Unregelmäßigkeit Sohlmaterial: $n_1$	-	-
Änderungen Querschnittsform: $n_2$	0.002 - schwach	-
Einfluss Hindernisse: $n_3$	-	0.020 - merklich
Einfluss Bewuchs: $n_4$	0.025 - mittel	0.050 - 0.090 - sehr hoch
Mäandrierungsgrad: $m_5$	1.000 - gering	1.000 - gering
$k_{St} [m^{1/3}/s]$	21	8 - 11

Die Faktoren zur Berücksichtigung der saisonalen Schwankungen der Rauheit im instationären Modell sowie die dazugehörige Begründung sind in Tabelle 17 zusammengefasst. Diese Faktoren werden lediglich auf die Kleine Beke angewandt, aufgrund des verwendeten Modellierungsansatzes mithilfe der *Ineffective Flow Areas* für die Gräben.

Tabelle 17: Saisonale Rauheitsfaktoren zur Berücksichtigung des Bewuchseinflusses

Monat	Faktor	Begründung
Januar	2.0	Kalibriert
Februar	2.0	Kalibriert
März	1.5	Kalibriert, Auflösung der letzten Pflanzen
April	1.0	Basis, Alle Pflanzenreste mit Frühjahrshochwasser weggespült
Mai	2.0	Kalibriert, Wachstumsbeginn
Juni	6.0	Kalibriert, Wachstumsmaximum
Juli	4.0	Kalibriert, Wachstumsmaximum / Teilweise Krautung
August	1.5	Kalibriert, Krautung
September	2.0	Kalibriert, Wachstum nach Krautung
Oktober	3.0	Kalibriert, Wachstum nach Krautung
November	2.5	Kalibriert, Absterben der Pflanzen
Dezember	2.0	Kalibriert

Der ermittelte Verkräutergang der Kleinen Beke ähnelt mit den lokalen Wachstumsmaxima im Juni, beziehungsweise im Oktober, sehr stark dem Verlauf des Verkräutergangs für eine jährliche Entkräutung in (Dörter, 1985). Die jährliche Kräutung findet im UG für den betrachteten Zeitraum allerdings Ende Juli / Anfang August statt. Ähnliche Maxima bzw. Minima für den Verkräutergang werden in (Song, Schmalz, & Fohrer, 2017) beschrieben.

## 5.4 Stationäres Modell

### 5.4.1 Hydraulische Parameter

Die Mittelwerte der hydraulischen Parameter zur Beschreibung des Fließregimes für den Vermessungszeitpunkt sind in Tabelle 18 zusammengefasst. Eine detaillierte Auflistung dieser und weiterer Kenngrößen ist dem digitalen Anhang 2 zu entnehmen. Die in den Gräben auftretenden sehr geringen Durchflüsse sind auf Rückstaueffekte und stark reduzierte Fließquerschnitte infolge hoher Sedimentanteile zurückzuführen. Die kleinen Fließquerschnitte in den Gräben werden durch die im Modell berücksichtigten, hohen Sedimenthöhen verursacht, welche wassergesättigt sind und den Abfluss extrem verzögern.

**Tabelle 18: Mittelwerte ausgewählter hydraulischer Parameter zur Beschreibung des Abflussregimes zum Messzeitpunkt vom 15.04.2025 bis 17.04.2025**

Abschnitt	Fließquerschnitt [m <sup>2</sup> ]	Benetzter Umfang [m]	Hydraulischer Radius [m]	Durchfluss [m <sup>3</sup> /s]	Fließgeschwindigkeit [m/s]
Kleine Beke	2.04	4.97	0.41	0.4280	0.24
Graben 1	0.34	2.14	0.11	0.0008	0.02
Graben 2	0.16	1.90	0.08	0.0003	0.01

### 5.4.2 Modellgüte

Die Kenngrößen zur Beschreibung der Güte des stationären Modells sind in Tabelle 19 zusammengefasst.

**Tabelle 19: Modellgüte für den stationären Zustand zum Messzeitpunkt vom 15.04.2025 bis 17.04.2025. Bias, MAE und RMSE in [m]; R<sup>2</sup> ist dimensionslos**

Abschnitt	Anzahl	RMSE	MAE	Bias	R <sup>2</sup>
Kleine Beke	72	0.067	0.056	0.049	0.974
Graben 1	14	0.066	0.056	-0.052	0.987
Graben 2	12	0.033	0.020	-0.012	0.952
Gesamt	98	0.064	0.052	0.027	0.972

Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell- und Beobachtungswerten. Das Bestimmtheitsmaß liegt in allen Abschnitten über 0.95. Der höchste Wert wird in Graben 1 mit 0.987 erreicht. Dies deutet auf eine sehr hohe erklärbare Varianz der Messwerte durch das Modell hin. Die RMSE-Werte liegen mit maximal 0.067 in einem niedrigen Bereich und zeigen, dass die durchschnittliche modellierte Abweichung vom Messwert gering ist. Die geringen Unterschiede zwischen RMSE und MAE deuten auf eine geringe Anzahl systematischer Ausreißer hin. Die Bias-Werte sind in allen Abschnitten kleiner als 5 cm, was auf eine insgesamt geringe systematische Verzerrung hinweist. Während im Bereich der Kleinen Beke eine leichte Überschätzung vorliegt, unterschätzen die Gräben leicht die beobachteten Wasserstände. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse eine sehr gute Modellgüte der kalibrierten stationären Simulation. Das Modell bildet die beobachteten Wasserstände mit hinreichender Genauigkeit ab und kann somit als Grundlage für die Erstellung des instationären Modells dienen.

### 5.4.3 Räumliche Unterschiede

Die räumliche Verteilung der Abweichungen zwischen beobachteten und modellierten Werten ist in Abbildung 12 veranschaulicht.

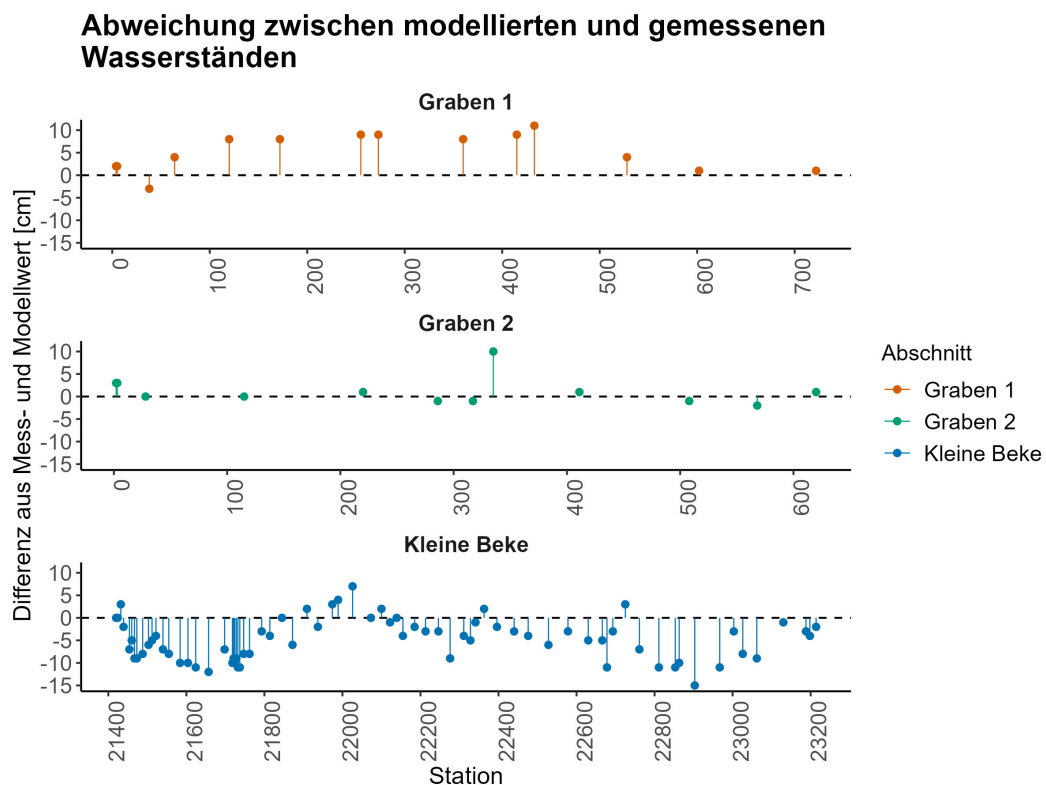


Abbildung 12: Unterschiede zwischen gemessenen und modellierten Wasserständen entlang der Gewässerachse

Die größte Abweichung tritt an Station 22+903 auf und beträgt 15 cm. Allerdings ist anzumerken, dass die Vermessungen inklusive der Wasserstände über einen Zeitraum von drei Tagen stattgefunden haben und das Modell den Mittelwert des Tagesdurchflusses für diesen Zeitraum als Randbedingung besitzt. Die Tagesmittelwerte des Durchflusses am Pegel Bröbberow für den Vermessungszeitraum reichen von 821 l/s bis 912 l/s. Es handelt sich dabei um eher geringe Schwankungen im Abflussregime, welche jedoch ausreichend sind, um Unterschiede in den Wasserständen zu erklären. Zudem ist davon auszugehen, dass auch kurzfristige Schwankungen auf Subtagesskalen zu zusätzlichen Unsicherheiten im Wasserstand führen können. Eine weitere mögliche Ursache sind Ungenauigkeiten beim Vermessen, zum einen aufgrund des Messgeräts, und zum anderen anwendungsbedingte Ungenauigkeiten, wie beispielsweise Abweichungen der Messantenne von der Lotrechten. Die größte Unsicherheit im Modell liegt jedoch in der Berücksichtigung der Schlammhöhen. Diese wurden in der Vermessung nicht ausreichend berücksichtigt und im Rahmen der Modellerstellung geschätzt. Die Darstellung der verwendeten Sedimenthöhen ist Anhang 5 bis 7 zu entnehmen. Die Genauigkeit dieser Annahmen ist aufgrund fehlender Daten schwer einschätzbar und stellt eine Unsicherheitsquelle im Modell dar. Die Höhe in den Durchlässen, welche hydraulisch nicht abflusswirksam ist, wurde ebenfalls abgeschätzt, da diese einen maßgeblichen Einfluss auf den erzeugten Wasserstand in den Gräben hat. Da die Durchlässe an Station 0+271.2 und 0+431.2 (Graben 1) sowie an Station 0+331 (Graben 2) innerhalb einer Schlammschicht liegen, werden lediglich 5 cm abflusswirksame Höhe innerhalb des Durchlasses angenommen. Eine Verifizierung dieser Annahmen wäre nur mit erheblichem methodischen Aufwand möglich.

## **5.5 Instationäres Modell**

### **5.5.1 Deskriptive Statistik**

Zur Einordnung der modellierten Wasserstände wurden grundlegende statistische Kenngrößen für Mess- und Modellwerte berechnet (Tabelle 20). In allen drei Abschnitten liegen die Mittelwerte und Mediane der Modellwerte sehr nahe an den gemessenen Werten, was auf eine gute Reproduktion des allgemeinen Wasserstandsniveaus durch das Modell hindeutet. Die Spannweiten Minimum bis Maximum zeigen insgesamt eine gute Übereinstimmung, wobei das Modell im Abschnitt von Graben 1 leicht höhere Maximalwerte als die Messwerte erzeugt. Die Standardabweichung ist im Modell vergleichbar oder geringfügig höher, was auf eine tendenziell stärkere Schwankung der Wasserstände hinweist. Besonders im Abschnitt der Kleinen Beke ist die Streuung sowohl in Messung als auch Modell am größten

mit etwa 0.32 m. Dies lässt auf eine insgesamt höhere Dynamik in diesem Abschnitt schließen. Auch der Variationskoeffizient bestätigt diese Tendenzen. Die Modellwerte weisen in allen Abschnitten ähnliche relative Streuungen auf wie die Messwerte.

**Tabelle 20: Grundlegende statistische Kenngrößen der gemessenen und modellierten Wasserstände in [m NHN]**

Abschnitt	Typ	Anzahl	Mittelwert	Median	Minimum	Maximum	Standardabweichung	Variationskoeffizient	25 % Quantil	75 % Quantil
Graben 1	Messwert	288	7.497	7.506	7.037	7.798	0.182	0.024	7.436	7.651
Graben 1	Modell	288	7.507	7.510	7.170	8.060	0.184	0.025	7.450	7.570
Graben 2	Messwert	303	7.517	7.544	7.238	7.929	0.104	0.014	7.507	7.556
Graben 2	Modell	303	7.528	7.510	7.280	8.020	0.160	0.021	7.460	7.580
Kleine Beke	Messwert	303	7.438	7.414	6.911	8.170	0.316	0.042	7.194	7.680
Kleine Beke	Modell	303	7.463	7.420	6.950	8.140	0.317	0.042	7.235	7.720

### 5.5.2 Modellgüte

Die Ergebnisse zur Beurteilung der Anpassung des Modellverlaufs an den Messwerten sind in Tabelle 21 zusammengefasst. Die besten Ergebnisse zeigt der Abschnitt Kleine Beke, bei dem das Modell die gemessenen Wasserstände mit hoher Genauigkeit abbildet. Sowohl das Bestimmtheitsmaß ( $R^2 = 0.943$ ) als auch die NSE (0.935) und KGE (0.971) weisen auf eine sehr gute Modellgüte hin. Auch für Graben 1 zeigt das Modell eine insgesamt gute Übereinstimmung mit den Messdaten (NSE = 0.775, KGE = 0.890). Dies weist auf eine verlässliche hydraulische Abbildung des Systems hin.

Im Gegensatz dazu liefert das Modell im Abschnitt Graben 2 eine deutlich geringere Güte. Die niedrige NSE von 0.048 deutet auf erhebliche Abweichungen zwischen Modell und Realität hin.

**Tabelle 21: Modellgüte für den instationären Zustand. Bias, MAE und RMSE in [m]; KGE, NSE und  $R^2$  sind dimensionslos**

Abschnitt	Bias	MAE	RMSE	$R^2$	NSE	KGE
Graben 1	0.010	0.060	0.086	0.793	0.775	0.890
Graben 2	0.011	0.068	0.101	0.622	0.048	0.420
Kleine Beke	0.025	0.057	0.080	0.943	0.935	0.971
Gesamt	0.015	0.062	0.090	0.857	0.836	0.910

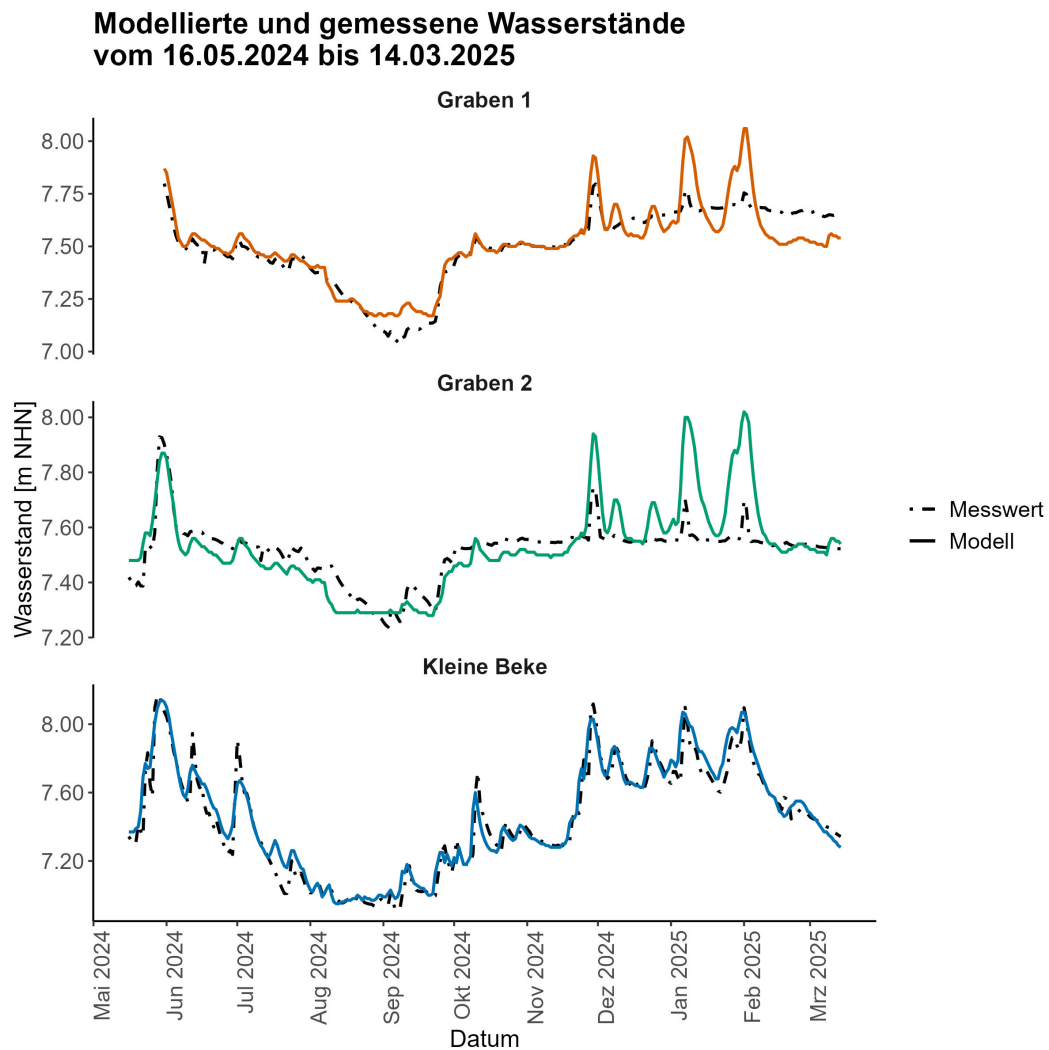
In der Literatur, z.B. (Wouter, Freer, & Woods, 2019), wird eine KGE kleiner 0.5 als schlechte Modellleistung eingestuft. Trotzdem ergibt sich über alle Abschnitte hinweg eine insgesamt gute Modellgüte. Mit einem  $R^2$  von 0.857, einer NSE von 0.836 und einer KGE von 0.910

zeigt sich, dass das Modell die wesentlichen Merkmale des Wasserstandsverlaufs zuverlässig wiedergibt. Ein Vergleich mit anderen Publikationen bestätigt dies. Die Veröffentlichung von (Song, Schmalz, & Fohrer, 2017) umfasst ebenfalls die Abbildung von Tieflandgewässersystemen mithilfe eindimensionaler, instationärer Modellierung in HEC-RAS. Es werden, mit Ausnahme von Graben 2, ähnliche Werte für MAE,  $R^2$  und NSE angegeben und als gut eingeordnet.

Auch die Fehlerkennwerte (Bias = 0.015 m, RMSE = 0.090 m) liegen in einem akzeptablen Bereich und sprechen für die generelle Anwendbarkeit des Modells im untersuchten Gebiet.

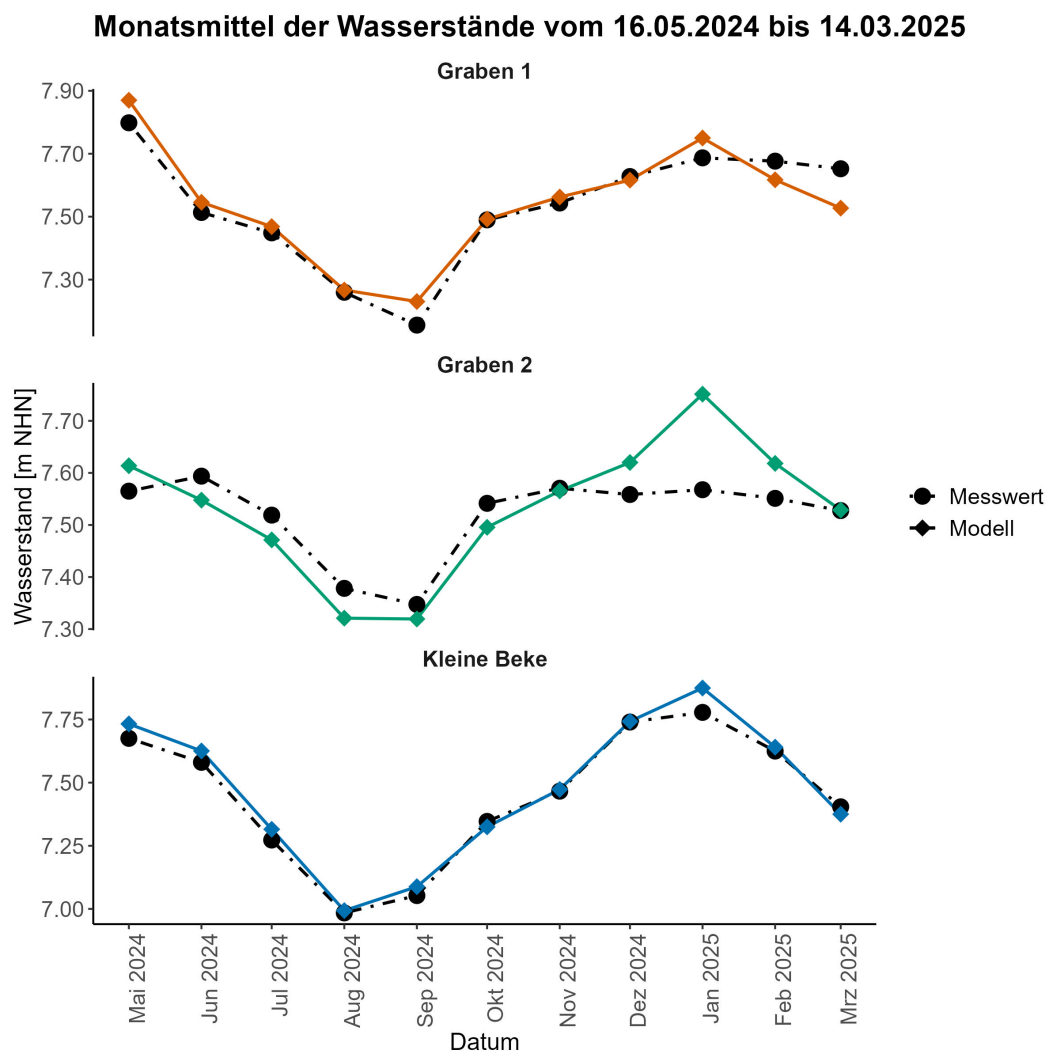
### 5.5.3 Darstellung

Die Erkenntnisse der vorherigen Unterkapitel sind in Abbildung 13 veranschaulicht.



**Abbildung 13: Vergleich der Wasserstandsganglinien zwischen Modell- und Messwerten für den Kalibrierungszeitraum**

Im Kontext der Aufgabenstellung, insbesondere zur Ableitung von Aussagen über die Nutzbarkeit angrenzender Flächen, kommt den Monatsmittelwasserständen eine besondere Bedeutung zu. Der saisonale Verlauf der Monatsmittel im Kalibrierungszeitraum ist in Abbildung 14 dargestellt. Mit Ausnahme des Januars 2024, in dem das Modell die Wasserstände im Graben 2 deutlich überschätzt, zeigt sich eine insgesamt gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messwerten. Das Modell erscheint somit geeignet, saisonale Schwankungen der Monatsmittelwasserstände realistisch abzubilden. Die Ursachen für Differenzen zwischen Mess- und Modellwerten sowie das verwendete Modellierungsverfahren für die Gräben werden im folgenden Unterkapitel diskutiert.



**Abbildung 14: Monatsmittelwasserstände der Messwerte und des Modells für den Kalibrierungszeitraum**

#### 5.5.4 Diskussion

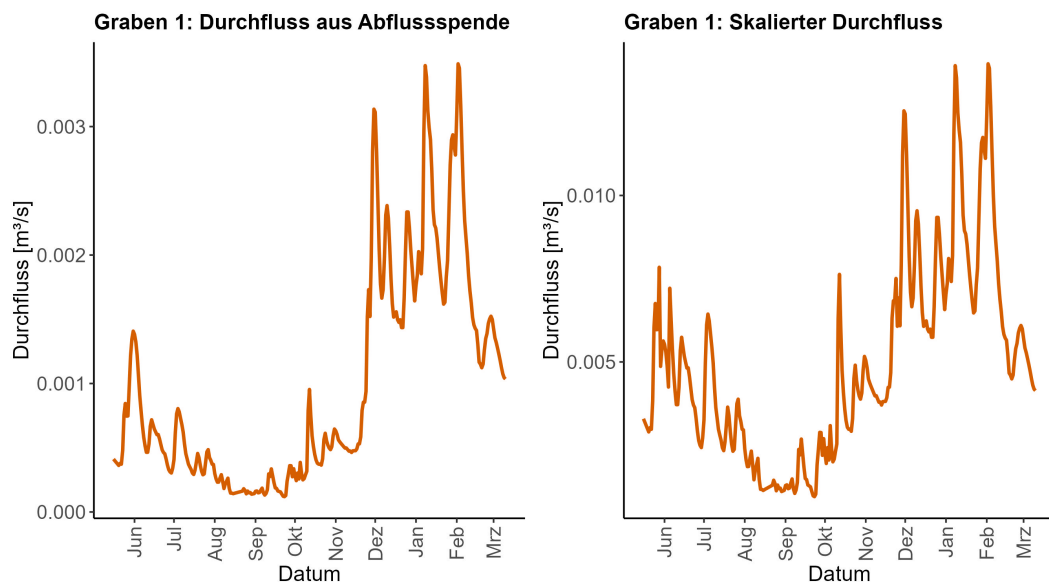
Im Vergleich zum stationären Berechnungszustand (siehe Kapitel 5.4) wurde zur Abbildung der Wasserstandsdynamik im Bereich der Gräben bei Graben 1 - Profil 0+064 ein 5 cm breiter Schlitz, in Form von ineffektiven Fließflächen, in das Modell eingefügt. Diese Modellvariante bietet gegenüber der direkten Abschätzung von Sedimenthöhen in Gräben und Durchlässen mehrere Vorteile. Zwar tragen die Sedimenthöhen und die dadurch blockierten Querschnittsflächen in den Querprofilen und Durchlässen zur Reproduktion des Wasserstands im stationären Zustand bei, sie verhindern jedoch die Abbildung dynamischer Wasserstandsschwankungen unterhalb der Sedimentoberkante bzw. der blockierten Fläche des Durchlasses. Durch die Modellierung eines sehr rauen Schlitzes ( $n = 0.9$ ) in Kombination mit einer zeitabhängigen Anpassung der Rauheitswerte kann das hydrologische Verhalten der Gräben differenzierter erfasst werden. Dabei werden in den Sommermonaten geringere Rauheiten und in den Wintermonaten höhere Rauheiten angesetzt. Dies erscheint auf den ersten Blick widersprüchlich, da die Rauheitsverteilung entgegen der saisonalen Vegetationsentwicklung erfolgt. Die gewählte Parametrisierung ist jedoch erforderlich, um im Winter höhere Wasserstände abbilden zu können. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten ist ein zusätzlicher Zustrom von höher gelegenem Grundwasser im Winter. Im Sommer hingegen werden niedrigere Rauheiten verwendet, um entsprechend niedrigere Wasserstände zu simulieren. Diese können unter anderem durch erhöhte Evapotranspirationsraten sowie durch Infiltration des Grabenwassers in tieferliegende Grundwasserleiter bedingt sein.

Durch diese Methode werden in den Wintermonaten auftretende Wasserstandsspitzen, verursacht durch die angesetzte hohe Rauheit im Bereich des Schlitzes, sowohl in ihrer Amplitude als auch in ihrer Dauer verstärkt. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, wurde versucht, zusätzlich eine Abhängigkeit der Rauheit vom Durchfluss in das Modell zu integrieren. Dieser Ansatz konnte jedoch nicht erfolgreich umgesetzt werden. Ein Grund sind durch zu schnelle Rauheitswechsel verursachte numerische Instabilitäten.

Numerische Instabilitäten werden zudem durch sehr geringe Durchflüsse im Bereich der Gräben verursacht, insbesondere in Graben 2. In den Sommermonaten betragen die aus der Abflussspendenübertragung ermittelten Durchflüsse zeitweise deutlich weniger als 0.1 l/s. Eine Unterschreitung des in HEC-RAS vorgegebenen Mindestdurchflusses von 1 l/s führt jedoch dazu, dass die Dynamik des Grabens geglättet bzw. nicht korrekt abgebildet wird. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wurde für Graben 2 die für Graben 1 ermittelte und entsprechend angepasste Durchflussreihe verwendet. Diese liefert die bestmöglichen

verfügbaren Ergebnisse unter den gegebenen Modellrestriktionen. Die Übertragung der Durchflussreihe erscheint plausibel, da die beiden Gräben räumlich eng beieinander liegen und ähnliche hydrologische Bedingungen aufweisen.

Wie in Kapitel 4.3.6 beschrieben, werden die Durchflüsse der Gräben als Randbedingung zur verbesserten Darstellung der Dynamik und der Verbesserung der Stabilität des instationären Modells angepasst. Die Unterschiede der aus der Abflussspendenübertragung ermittelten und angepassten Durchflüsse sind Abbildung 15 zu entnehmen. Die Verwendung einfacher Faktoren für die Anpassung ist nicht zielführend, da große Durchflüsse hierbei deutlich überschätzt werden. Die Faktoren für die Anpassung wurden so gewählt, dass kleine Durchflüsse vom Modell entsprechend abgebildet werden können und große Durchflüsse trotzdem größer sind als die angepassten kleinen Durchflüsse. Dieses Vorgehen dient der Berücksichtigung von Schwankungen im Wasserstand.

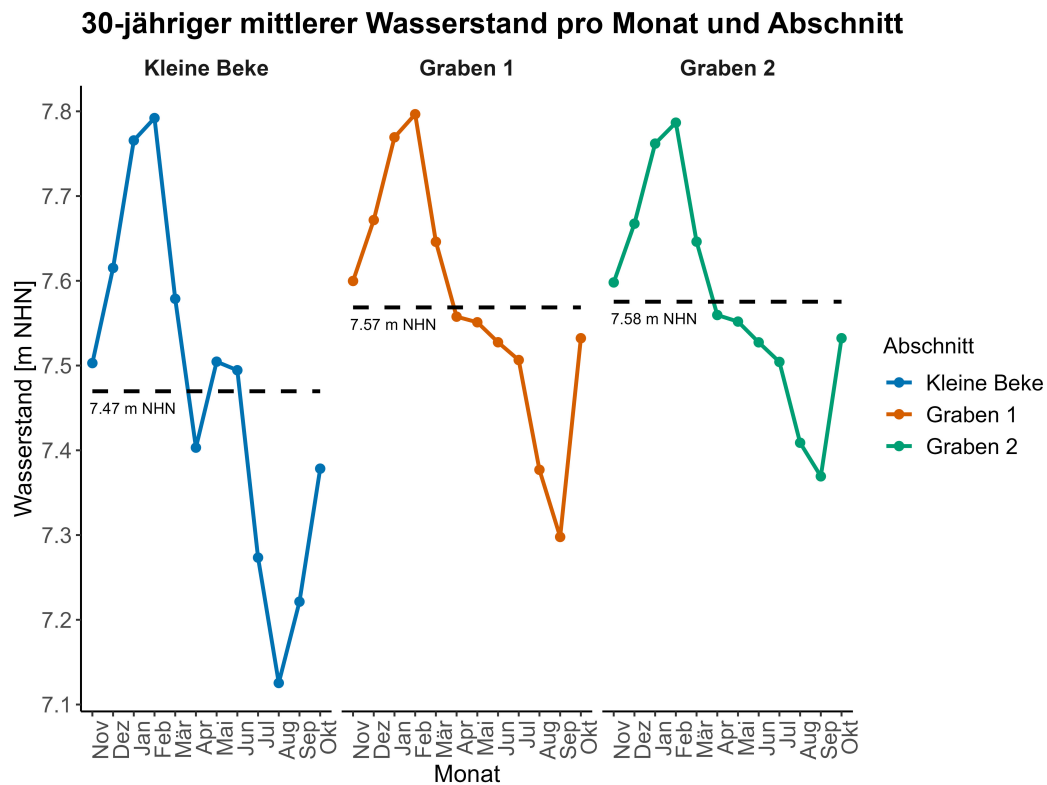


**Abbildung 15: Vergleich der übertragenen und der für das instationäre Modell verwendeten Abflüsse im Grabensystem**

## 5.6 Wasserstände

### 5.6.1 Saisonaler Verlauf

Abbildung 16 verdeutlicht den Verlauf der mittleren Wasserstände je Monat im hydrologischen Jahr. Außerdem dargestellt ist das arithmetische Mittel der Jahresmittelwasserstände der 30-jährigen Simulationsreihe.



**Abbildung 16: Langjährige Monatsmittelwasserstände je Abschnitt, gestrichelte Linie: langjähriger Jahresmittelwasserstand**

Der Wasserstand verläuft in allen drei Teilabschnitten sehr ähnlich und weist ausgeprägte Maxima im Winterhalbjahr bzw. ausgeprägte Minima im Sommerhalbjahr auf (siehe Kapitel 2.2.1). Die Wasserstände der Kleinen Beke unterliegen im mittleren Jahresverlauf den größten Schwankungen. Änderungen des Durchflusses im saisonalen Verlauf wirken sich gedämpft auf die Wasserstände aus. Diese Dämpfung ist unter anderem auf die jahreszeitlichen Änderungen der Bewuchsrauhigkeiten sowie auf bei hohen Durchflüssen auftretende größere Wasserstandsgefälle zurückzuführen. Diese haben wiederum höhere Fließgeschwindigkeiten zur Folge. Die Verläufe für die Gräben 1 und 2 sind nahezu identisch. Der mittlere Jahreswasserstand der Kleinen Beke liegt etwa 10 cm unter denen der Gräben. Zudem nimmt der Wasserstand, im Gegensatz zum Grabensystem, in den Monaten Mai und Juni leicht zu. Ein ähnlicher Verlauf des Durchflusses vergleichbarer Tieflandgewässer für dynamische Durchflussregimetypern ist in (Mehl & Thiele, 1998) enthalten. Die niedrigsten Wasserstände werden in der Kleinen Beke im Mittel mit 7.14 m NHN im August erreicht. In den Gräben tritt das Minimum mit 7.30 m NHN für Graben 1 bzw. 7.36 m NHN für Graben 2, im September auf. Diese Verzögerung tritt auf, da in der Kleinen Beke zunächst ein gewisser Wasserstand erreicht werden muss, um das Wasserstandsverhalten in den leicht höhergelegenen Gräben zu beeinflussen.

### 5.6.2 Deskriptive Statistik

Die statistische Auswertung der Monatsmittelwasserstände zeigt deutliche Unterschiede zwischen den verschiedenen Jahrestypen sowie zwischen den Gewässerabschnitten (Tabelle 22). Mit 19 Jahren ist der überwiegende Anteil der hydrologischen Jahre als normal klassifiziert. Weiterhin sind 7 Jahre als nass und 4 Jahre als trocken eingestuft.

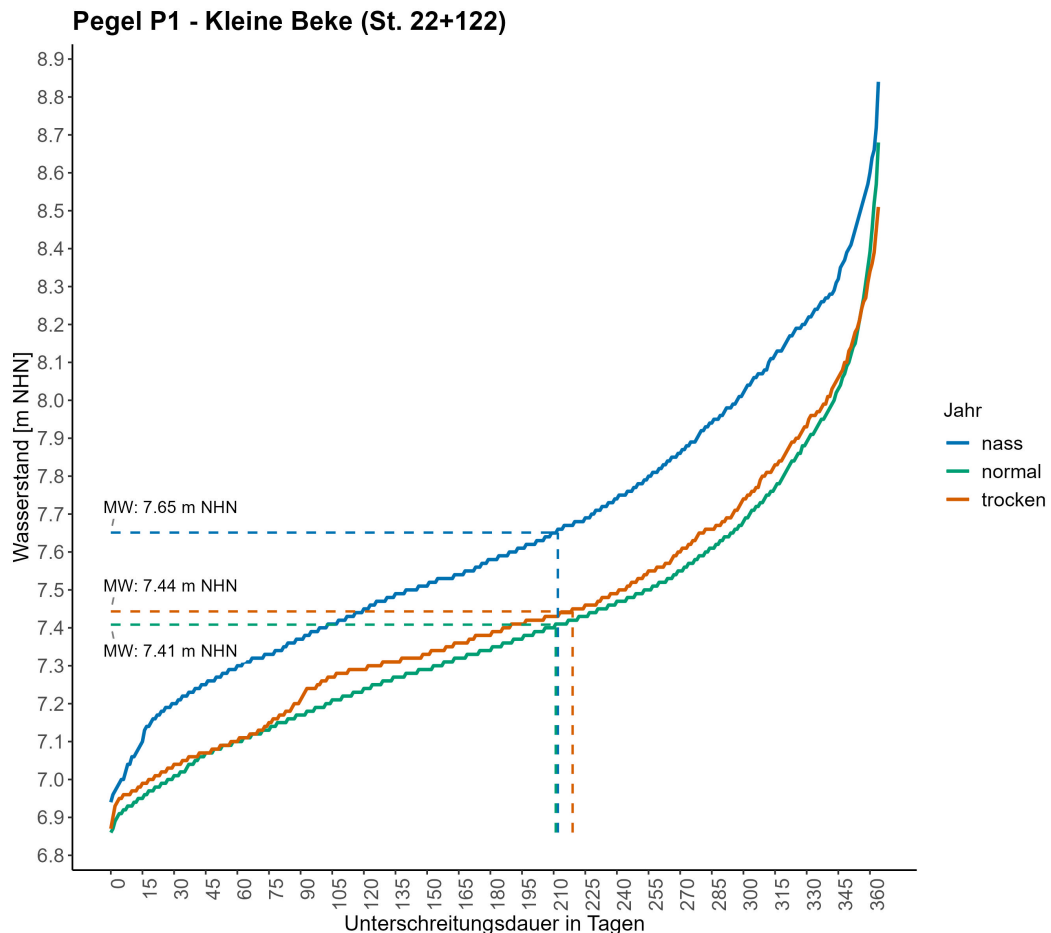
**Tabelle 22: Statistische Auswertung der Monatsmittelwerte [m NHN] für den instationären Berechnungszustand**

Abschnitt	Jahr	Mittelwert	Median	Standardabweichung	Minimum	Maximum	Anzahl
Beke	nass	7.65	7.63	0.32	6.99	8.42	84
Beke	normal	7.41	7.37	0.29	6.92	8.24	228
Beke	trocken	7.44	7.41	0.30	6.98	8.13	48
Graben 1	nass	7.66	7.57	0.26	7.23	8.42	84
Graben 1	normal	7.54	7.51	0.19	7.20	8.27	228
Graben 1	trocken	7.55	7.53	0.20	7.21	8.12	48
Graben 2	nass	7.66	7.57	0.24	7.32	8.38	84
Graben 2	normal	7.55	7.51	0.17	7.30	8.23	228
Graben 2	trocken	7.55	7.53	0.18	7.31	8.09	48

Insgesamt sind unter nassen Bedingungen jeweils die höchsten Mittelwerte zu verzeichnen, während die Werte in der Normal- und Trockenphase etwas geringer ausfallen. Die Wasserstände in den trockenen und normalen Jahren weisen nur geringfügige Unterschiede auf. Beispielsweise sind die maximalen Wasserstände in Normaljahren etwa 10 cm höher als in Trockenjahren. Die Mediane liegen in allen Fällen nahe an den Mittelwerten, was auf weitgehend symmetrische Verteilungen hindeutet. Die Standardabweichungen und Spannweiten zeigen, dass die Kleine Beke im Vergleich zu den Gräben eine höhere Variabilität aufweist. Auffällig ist zudem, dass in der Beke der Mittelwert in der Trockenphase geringfügig über dem der Normalphase liegt.

### 5.6.3 Dauerlinien

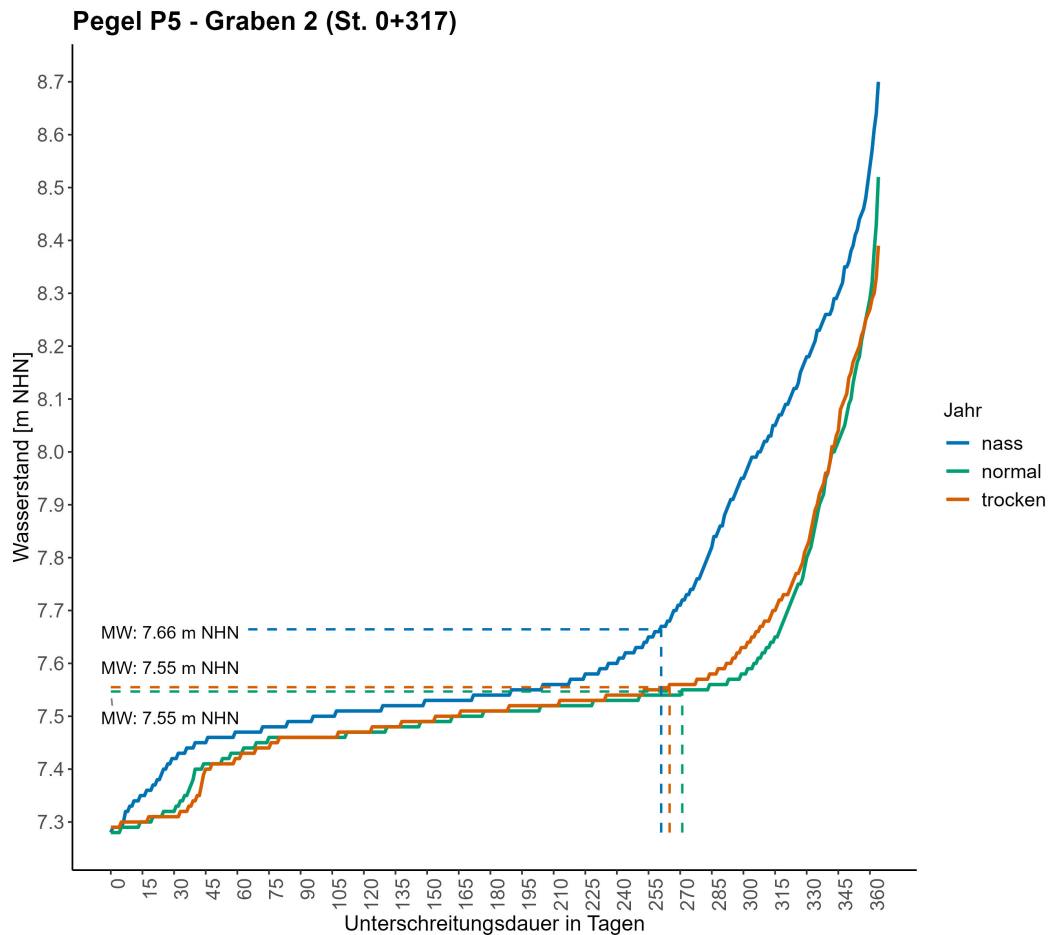
Die mehrjährigen Dauerlinien verdeutlichen die in Kapitel 5.6.2 beschriebenen Erkenntnisse (siehe Abbildung 17 bis 19).



**Abbildung 17: Mehrjährige Dauerlinien für Pegel P1 an Station 22+122 der Kleinen Beke für Normal-, Trocken- und Nassjahre gemäß (LAWA, 2018)**

Die Dauerlinien der Normal- und Trockenjahre weisen nur geringfügige Unterschiede auf. Für die Kleine Beke ist in nassen Jahren der Wasserstand um etwa 20 cm erhöht. Der mittlere Jahreswasserstand der nassen und normalen Jahre wird an 210 Tagen unterschritten. In den trockenen Jahren an etwa 217 Tagen. Folglich ist der Wasserstand im Jahresverlauf nicht symmetrisch verteilt, sondern es treten vermehrt niedrige Wasserstände in Kombination mit wenigen hohen Wasserstandsereignissen auf. Der Anstieg der Dauerlinien nimmt ab Unterschreitungsdauern größer 300 Tage deutlich zu. Eine mögliche Ursache für die geringen Unterschiede zwischen Trocken- und Normaljahren ist die Zuordnung der Kleinen Beke zum dynamischen Durchflussregimetyp, welcher unter anderem durch einen deutlichen Einfluss des Basisabflusses auf den Gesamtabfluss gekennzeichnet ist (Mehl & Thiele, 1998). (Krause, Bronstert, & Zehe, 2007) legen ebenfalls dar, dass der Anteil des oberflächennahen Grundwassers am Gesamtabfluss in Tieflandeinzugsgebieten bei Niedrigwasser im saisonalen Verlauf bis zu 30 % betragen kann. Die geringere Dynamik des Grabensystem-

tems spiegelt sich in den flacheren Verläufen der Dauerlinien wider. Wie bereits bei der Kleinen Beke zeigen sich auch hier kaum Unterschiede zwischen Normal- und Trockenjahren. In nassen Jahren liegt der Wasserstand etwa 10 cm höher. Der mittlere Jahreswasserstand wird, je nach Graben und Jahr, an 255 bis 270 Tagen unterschritten. Trotz dieser hohen Unterschreitungsdauer verlaufen die Dauerlinien relativ flach, was darauf hinweist, dass die Wasserstände über weite Zeiträume nur leicht unterhalb des Jahresmittelwerts liegen.

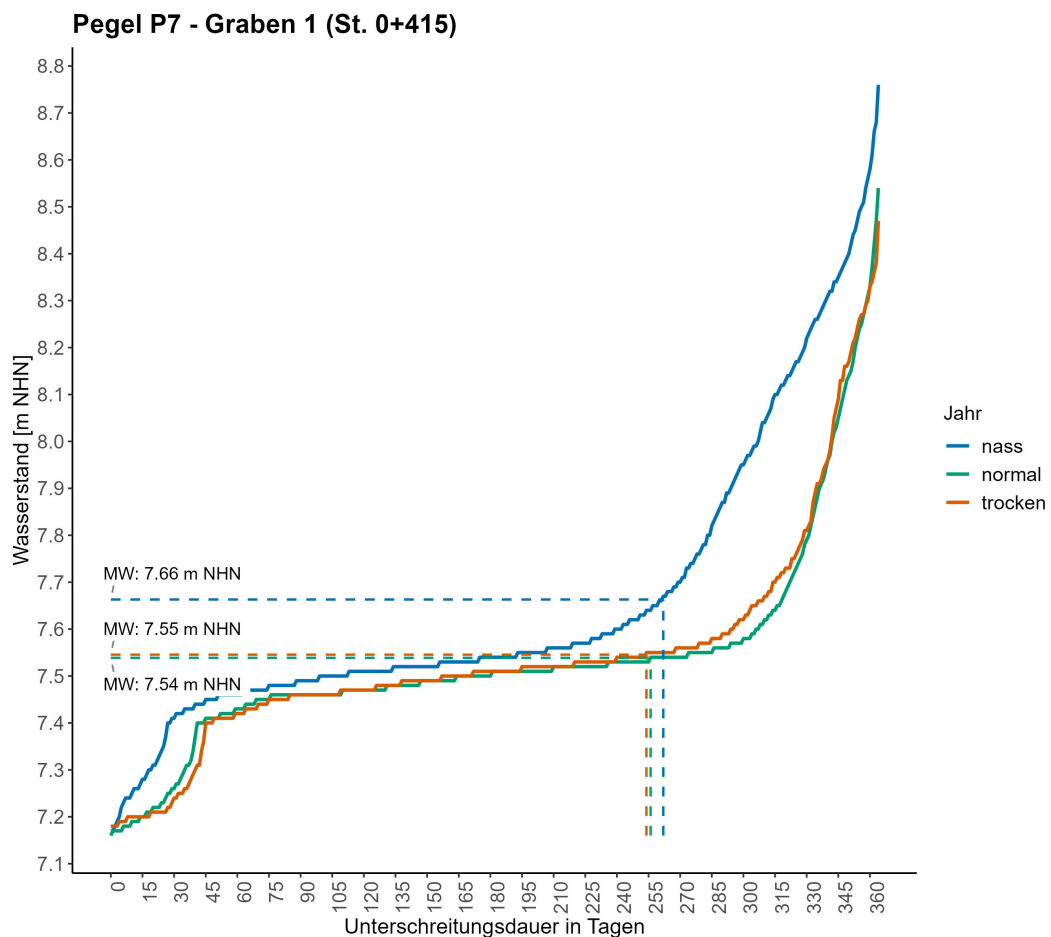


**Abbildung 18: Mehrjährige Dauerlinien für Pegel P5 an Station 0+317 des Grabens 2 für Normal-, Trocken- und Nassjahre gemäß (LAWA, 2018)**

Aus den Dauerlinien lässt sich ableiten, dass die Gräben in Normal- und Trockenjahren für etwa einen bis eineinhalb Monate nahezu trockenfallen. An den übrigen Tagen liegen die Wasserstände knapp unter dem mittleren Niveau. Ab etwa 8.00 m NHN bei Graben 1 bzw. 7.80 m NHN bei Graben 2 ist der Verlauf der Dauerlinien nicht mehr repräsentativ, da angrenzende Flächen im Modell nicht berücksichtigt wurden und der Wasserstand daher deutlich überschätzt wird. In Normal- und Trockenjahren liegen die Wasserstände an etwa 30

Tagen über der Geländehöhe angrenzender Flächen, was zu Überflutungen führt. In Nassjahren verdoppelt sich diese Überflutungsdauer auf rund 60 Tage. Die Modellwerte stimmen mit den Beobachtungen des landwirtschaftlichen Leiters der AG Jürgenshagen mbH überein.

Die Wechselwirkungen zwischen Oberflächen- und Grundwasser im Fließgewässer-Grabensystem sind beispielsweise in (Lewandowski, Lischeid, & Nützmann, 2009) beschrieben und abgebildet. Diese Veröffentlichung zeigt auf, dass in einem vergleichbaren Tieflandeinzugsgebiet das Grundwasser im saisonalen Verlauf meist in das Fließgewässer exfiltriert. Infiltrationsereignisse treten meist nur über sehr kurze Zeiträume auf. Änderungen im Grundwasser werden hauptsächlich in gedämpfter und verzögerter Form durch Wasserstandsschwankungen des angrenzenden Fließgewässers sowie durch Grundwasserneubildung in Folge von Niederschlagsereignissen verursacht.



**Abbildung 19: Mehrjährige Dauerlinien für Pegel P7 an Station 0+415 des Grabens 1 für Normal-, Trocken- und Nassjahre gemäß (LAWA, 2018)**

### 5.6.4 Einordnung

Die Jahresmediane der Wasserstände des HEC-RAS-Modells je Gewässerabschnitt und Zeitraum sind in Tabelle 23 zusammengefasst.

Tabelle 23: Jahresmediane je Gewässerabschnitt und Zeitraum

Abschnitt	Zeitraum	Wasserstandsmedian [m NHN]
Kleine Beke	Ganzjährig	7.41
Kleine Beke	Sommerhalbjahr	7.28
Kleine Beke	Winterhalbjahr	7.53
Graben 1	Ganzjährig	7.51
Graben 1	Sommerhalbjahr	7.46
Graben 1	Winterhalbjahr	7.55
Graben 2	Ganzjährig	7.51
Graben 2	Sommerhalbjahr	7.46
Graben 2	Winterhalbjahr	7.55

Tabelle 24 verdeutlicht die topografischen Gegebenheiten entlang des Transektes. Die Flächen besitzen im Mittel eine Erhebung von etwa 7.88 m NHN. Die genaue Lage und Ausdehnung der Flächen entlang des Transektes ist Anhang 8 zu entnehmen.

Tabelle 24: Ergebnisse der Rasterstatistik der Höhen [m NHN] des DGM 1 entlang des Transektes

Fläche	Mittelwert	Standardabweichung	Minimum	Maximum
Kleine Beke - Graben 2	7.881	0.168	7.145	8.436
Graben 2 - Graben 1	7.887	0.112	7.533	8.320

Die daraus resultierenden Flurabstände sind Tabelle 25 zu entnehmen.

Tabelle 25: Abstände [cm] unter Flur entlang des Pegeltransektes im UG

Abschnitt	Basiswasserstufe (Winter-Frühjahr-Median)	Jahresmedian	Absinkwasserstufe (Sommer-Herbst-Median)
Kleine Beke	-35	-47	-60
Graben 2	-33	-37	-42
Graben 1	-33	-37	-42

Die Absinkwasserstufe (AWS) beträgt im Sommer-Herbst-Halbjahr Stufe „2+“ und liegt somit eine Stufe unter der Basiswasserstufe (BWS), welche Stufe „3+“ angehört. Die Grundwasserhältnisse im UG sind demnach Wasserstufe 3+/2+, wechselhaft feucht, zuzuordnen (Stegmann, 2005). Im Winter dominieren feuchte und im Sommer mäßig feuchte Verhältnisse. Es handelt sich um Wiesen gut nutzbarer Futterqualität.

Für an hohe Feuchte angepasste Arten, z.B. *Filipendula ulmaria*, ist im Frühjahr und Sommer noch ausreichend Wasser vorhanden (Koska, 2001). Echte Nässezeiger treten in dieser Wasserstufe aufgrund von Konkurrenzkampf und verringerter Wasserverfügbarkeit nicht mehr auf. Da der obere Teil des Hauptwurzelraumes in Stufe 3+ fast ständig mit Luft versorgt ist, können gegen Dauernässe tolerante Arten, wie z.B. *Urtica dioica*, auffällige Anteile erreichen (Koska, 2001). Im Sommerhalbjahr ist der Hauptwurzelraum nur kurzzeitig und der untere Wurzelraum dauerhaft mit Wasser in Kontakt. Diese Wasserhältnisse dominieren die Arten der frischen Böden. In sehr trockenen Jahren ist es möglich, dass der untere Wurzelraum kapillar versorgt wird und der Hauptwurzelraum trockenfällt.

Wie in den vorangegangenen Kapiteln bereits erwähnt, unterliegt die Kleine Beke einer ausgeprägten saisonalen Wasserstandsdynamik, welche sich ebenfalls auf die vorkommenden Arten angrenzender Flächen auswirkt. Jedoch treten, bedingt durch kleinräumige topografische Unterschiede, entlang des Transektes unterschiedlich günstige Bedingungen zur Grünlandnutzung auf. Entlang des Pegeltransektes liegen die niedrigsten Flächen etwa 40 cm unterhalb des Wasserstandmedians des Winterhalbjahres. Insbesondere der Bereich um Pegel 5 liegt etwa 30 cm unterhalb der restlichen Flächen des Transektes. An diesen Stellen sind die Grünlanderträge des ersten Schnitts deutlich geringer. Allerdings verzeichnen diese Flächen für die darauffolgenden Schnitte die höchsten Erträge, da im Trockenem Halbjahr die beste Wasserversorgung vorhanden ist. In diesen Bereichen sind vermutlich eher Moorgräser wie der Wiesen-Fuchsschwanz (*Alopecurus pratensis*) oder Rohrschwingel (*Festuca arundinacea*) anzutreffen. Aus landwirtschaftlicher Sicht sind Gräser wie das Deutsche Weidelgras (*Lolium perenne*) aufgrund höherer Energie- und Futterwerte wünschenswert.

Das Grünland im UG wird mit einer Intensität von drei bis vier Schnitten pro Saison bewirtschaftet. Für diese Anzahl der Schnitte liegt der Stickstoffbedarfswert für die Düngung zwischen 190 und 245 kg N / ha. Das Ertragsniveau beträgt 80 bis 90 dt TM / ha (Mielke & Wohlers, 2019). Nach Tabelle 6 entspricht dieses Nutzungsverhalten einer intensiven Grünlandbewirtschaftung.

## 5.7 Vergleich mit GIS-Ansatz

Zunächst werden die Sohlhöhen beider Modelle verglichen, da sich diese in den betrachteten Szenarien nicht ändern. Anschließend erfolgt die Auswertung der Szenarien. Die räumliche Verteilung der in den Ergebnistabellen beschriebenen Unterschiede der hydraulischen Parameter ist Anhang 9 bis 12 zu entnehmen.

### 5.7.1 Sohlhöhen

Die Unterschiede der Sohlhöhen beider Modelle sind in Tabelle 26 dargestellt.

Tabelle 26: Auswertung der Sohlhöhendifferenzen [m] zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell

Abschnitt	Mittelwert	Median	Max. negative Abweichung	Max. positive Abweichung	Standardabweichung	Profile
Kleine Beke	-0.37	-0.45	1.97	0.81	0.57	67
Graben 1	-0.39	-0.41	0.69	0.06	0.20	12
Graben 2	-0.13	-0.09	0.69	0.19	0.27	10

Im Bereich von Graben 2 sind die Unterschiede der Sohlhöhen mit einer Differenz von 13 cm am geringsten. Die größten Unterschiede treten mit einer mittleren Differenz von 39 cm bei Graben 1 auf. Die maximalen Abweichungen treten im Bereich der Kleinen Beke auf. Die maximale negative Abweichung beträgt 1.97 m bei Station 22+761 und die maximale positive Abweichung 0.81 m bei Station 23+003. Die Profile beider Modelle mit den größten Differenzen liegen 1 m bzw. 3 m auseinander.

Die maximale Differenz der Sohlhöhen benachbarter Querprofile in der Kleinen Beke für das HEC-RAS-Modell beträgt 0.89 m an Station 21+439.

Die unterschiedlichen Sohlhöhen entstehen durch den Berechnungsansatz des vereinfachten Modells. Es werden anhand des DGMs Wasserspiegelbreiten für die Modellierung geschätzt. Diese geschätzten Breiten unterschreiten die tatsächlich gemessenen Breiten der Querprofile deutlich (siehe Anhang 9 bis 12). Im Bereich der Gräben werden die Breiten vom GIS-Modell um 1 bis 2 m unterschätzt. Bei der Kleinen Beke ist die Abweichung mit 3 bis 4 m im Mittel deutlich größer. Als Folge dessen werden die Tiefen bei gegebenen Startwasserstand am untersten Querprofil deutlich überschätzt. Eine mögliche Erklärung dieser Unterschiede sind ausgeprägte Schilfzonen im Böschungsbereich, insbesondere bei der Kleinen Beke, welche selbst in der vegetationslosen Periode auftreten und die Abschätzung der Breiten mittels DGM deutlich erschweren. Ein weiterer Grund könnte in der verwendeten Spline liegen, welche nach (Schneider, 2025) die Breiten tendenziell unterschätzen.

### 5.7.2 Szenario 1: Kalibrierungszeitraum

Die Unterschiede der hydraulischen Parameter sind in Tabelle 27 gegenübergestellt.

Tabelle 27: Vergleich hydraulischer Parameter Szenario 1; A = Fließquerschnitt, v = Fließgeschwindigkeit, WB = Wasserspiegelbreite,  $l_{wst}$  = Wasserstandsgefälle

Parameter	Abschnitt	GIS-Ansatz			HEC-RAS		
		Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum
A [m <sup>2</sup> ]	Kleine Beke	2.10	3.46	0.39	2.07	5.43	0.42
	Graben 1	0.29	0.41	0.04	0.14	0.46	0.01
	Graben 2	0.30	0.42	0.03	0.16	0.65	0.01
v [m/s]	Kleine Beke	0.24	1.09	0.12	0.24	1.03	0.08
	Graben 1	0.01	0.02	0.00	0.02	0.06	0.00
	Graben 2	0.01	0.03	0.00	0.01	0.02	0.00
Tiefe [m]	Kleine Beke	1.02	2.38	0.21	0.61	1.25	0.15
	Graben 1	0.37	0.58	0.01	0.08	0.19	0.01
	Graben 2	0.24	0.57	0.04	0.13	0.43	0.01
WB [m]	Kleine Beke	3.27	6.30	2.00	4.64	7.83	3.37
	Graben 1	1.48	2.70	0.80	1.78	3.00	0.71
	Graben 2	1.71	2.50	0.80	1.89	3.32	1.04
$l_{wst}$ [m/m]	Kleine Beke	0.00061	0.00339	0.00010	0.00107	0.03308	0.00002
	Graben 1	0.00210	0.00902	0.00010	0.00505	0.03801	0.00000
	Graben 2	0.00066	0.00269	0.00010	0.00119	0.00565	0.00000

Die Unterschiede der Fließquerschnitte sind im Mittel mit maximal 0.15 m<sup>2</sup> bei Graben 1 gering. Ebenfalls gering sind die Differenzen der Fließgeschwindigkeiten mit maximal 0.01 m/s. Trotz der guten mittleren Übereinstimmung dieser Parameter weichen die Maximalwerte des GIS-Ansatzes zum Teil deutlich vom HEC-RAS Modell ab. Der maximale Fließquerschnitt des GIS-Ansatzes beträgt nur etwa 63 % des Maximalwertes des HEC-RAS Modells.

Die Ursachen der Unterschiede für Tiefe und Wasserspiegelbreite wurden bereits im vorherigen Unterkapitel erläutert. Aufgrund des sehr niedrigen Wasserspiegelgefälles sind die absoluten Differenzen gering, obwohl das Gefälle im GIS-Ansatz im Mittel über alle Abschnitte etwa die Hälfte des HEC-RAS Modells beträgt.

Der Verlauf der Wasserstände beider Modellansätze ist in Abbildung 20 veranschaulicht.

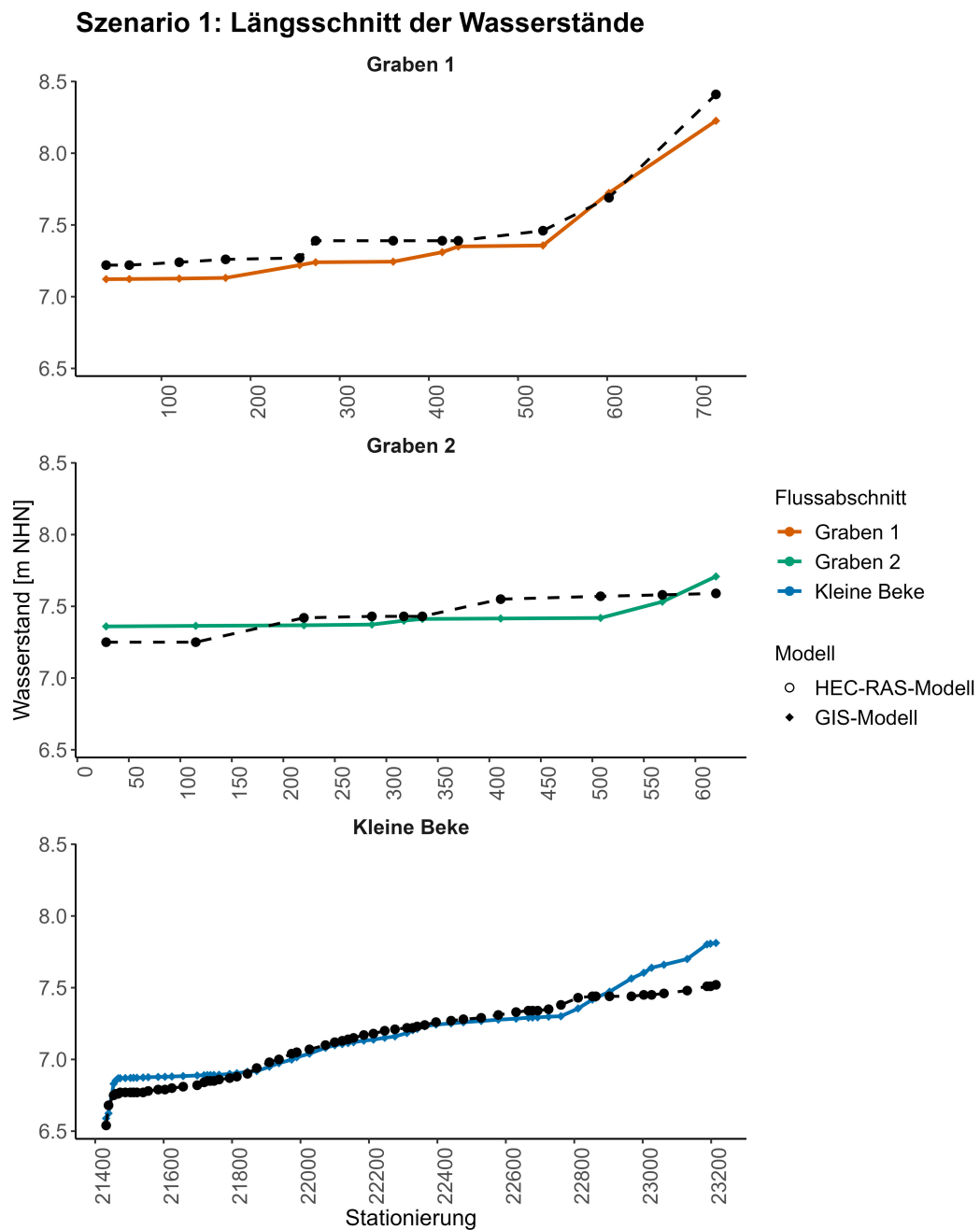


Abbildung 20: Modellvergleich Szenario 1 - Längsschnitt der Wasserstände

Tabelle 28 enthält die Kennzahlen zur Verdeutlichung der Übereinstimmung beider Modelle.

Tabelle 28: Modellvergleich Szenario 1 – Kennzahlen. Bias, MAE und RMSE in [m]; R<sup>2</sup> ist dimensionslos

Abschnitt	RMSE	MAE	Bias	R <sup>2</sup>	Anzahl QP
Kleine Beke	0.096	0.070	0.035	0.902	67
Graben 1	0.111	0.102	-0.096	0.970	12
Graben 2	0.095	0.083	-0.015	0.430	10

### 5.7.3 Szenario 2: Mittelwasser

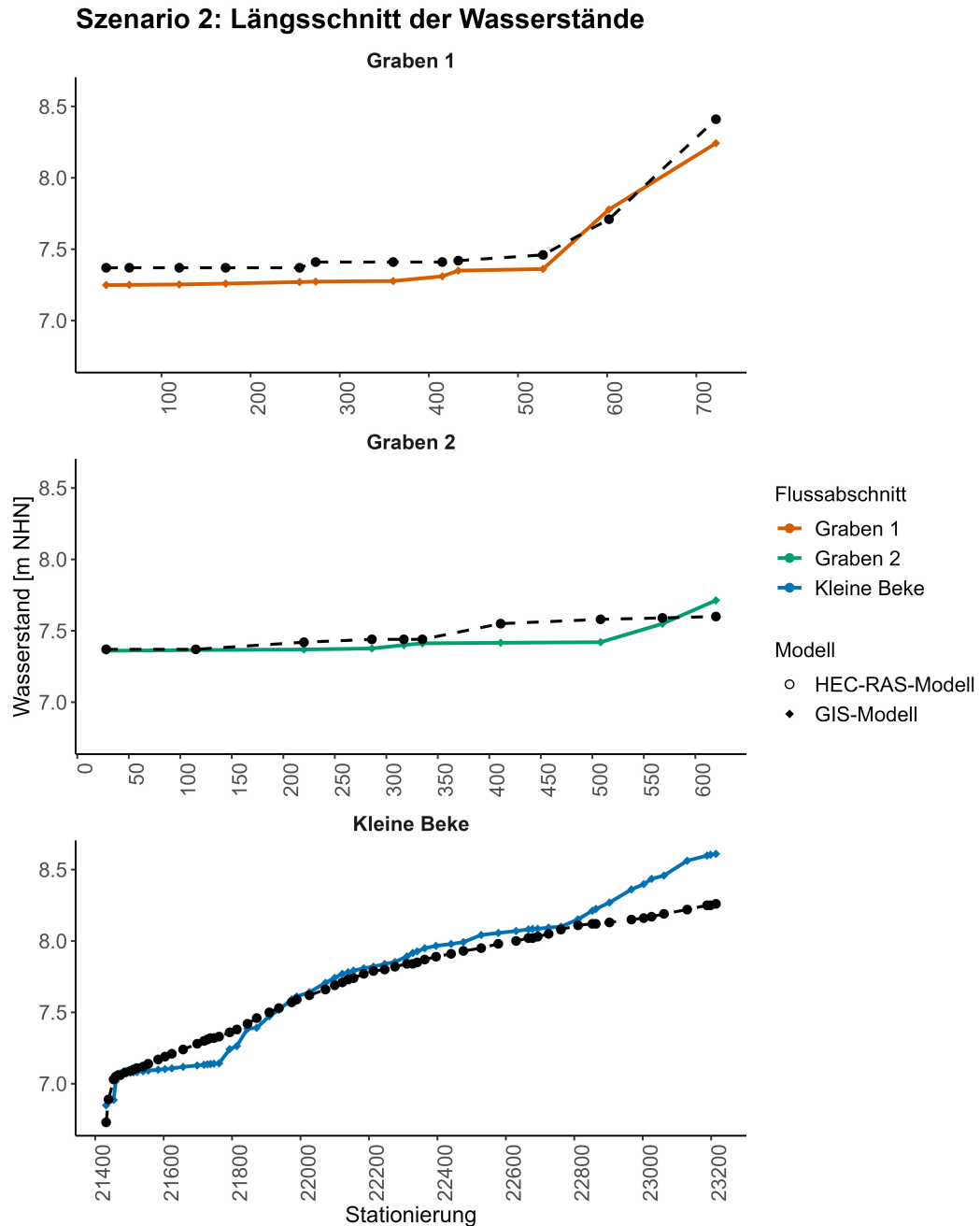
Die hydraulischen Parameter für das Mittelwasser-Szenario sind in Tabelle 29 zusammengefasst.

Tabelle 29: Vergleich hydraulischer Parameter Szenario 2; A = Fließquerschnitt, v = Fließgeschwindigkeit, WB = Wasserspiegelbreite, l<sub>wst</sub> = Wasserstandsgefälle

Parameter	Abschnitt	GIS-Ansatz			HEC-RAS		
		Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum
A [m <sup>2</sup> ]	Kleine Beke	4.10	6.35	0.45	5.20	10.05	1.20
	Graben 1	0.36	0.71	0.06	0.24	0.51	0.01
	Graben 2	0.30	0.42	0.05	0.20	0.68	0.02
v [m/s]	Kleine Beke	0.38	3.01	0.21	0.19	0.74	0.09
	Graben 1	0.00	0.02	0.00	0.02	0.12	0.00
	Graben 2	0.00	0.02	0.00	0.01	0.04	0.00
Tiefe [m]	Kleine Beke	1.56	3.18	0.43	1.16	1.93	0.34
	Graben 1	0.43	0.70	0.05	0.14	0.27	0.01
	Graben 2	0.24	0.57	0.04	0.16	0.44	0.01
WB [m]	Kleine Beke	4.27	7.90	2.10	6.98	9.78	4.46
	Graben 1	1.59	2.90	0.90	1.93	3.08	0.81
	Graben 2	1.72	2.50	0.80	1.99	3.32	1.09
l <sub>wst</sub> [m/m]	Kleine Beke	0.00103	0.01297	0.00010	0.00151	0.03339	0.00011
	Graben 1	0.00043	0.00238	0.00010	0.01995	0.16700	0.00000
	Graben 2	0.00065	0.00270	0.00010	0.00386	0.02550	0.00000

Die Unterschiede für Fließquerschnitt und -geschwindigkeit sind in diesem Szenario im Bereich des Grabensystems gering. Für die Kleine Beke werden die Fließquerschnitte leicht

unterschätzt. Das Wasserstandsgefälle beider Modelle ist nahezu identisch für die Kleine Beke. Im Grabensystem ist das Gefälle deutlich geringer als im HEC-RAS Modell insbesondere für Graben 1. Die Unterschiede der Wasserstandsverläufe sind in Abbildung 21 verdeutlicht.



**Abbildung 21: Modellvergleich Szenario 2 - Längsschnitt der Wasserstände**

Die Kennzahlen für die Übereinstimmung beider Wasserstandsreihen sind Tabelle 30 zu entnehmen.

Tabelle 30: Modellvergleich Szenario 2 - Kennzahlen. Bias, MAE und RMSE in [m]; R<sup>2</sup> ist dimensionslos

Abschnitt	RMSE	MAE	Bias	R <sup>2</sup>	Anzahl QP
Kleine Beke	0.131	0.096	0.033	0.971	67
Graben 1	0.115	0.112	-0.101	0.963	12
Graben 2	0.082	0.065	-0.042	0.558	10

### 5.7.4 Szenario 3: Sommerhalbjahr

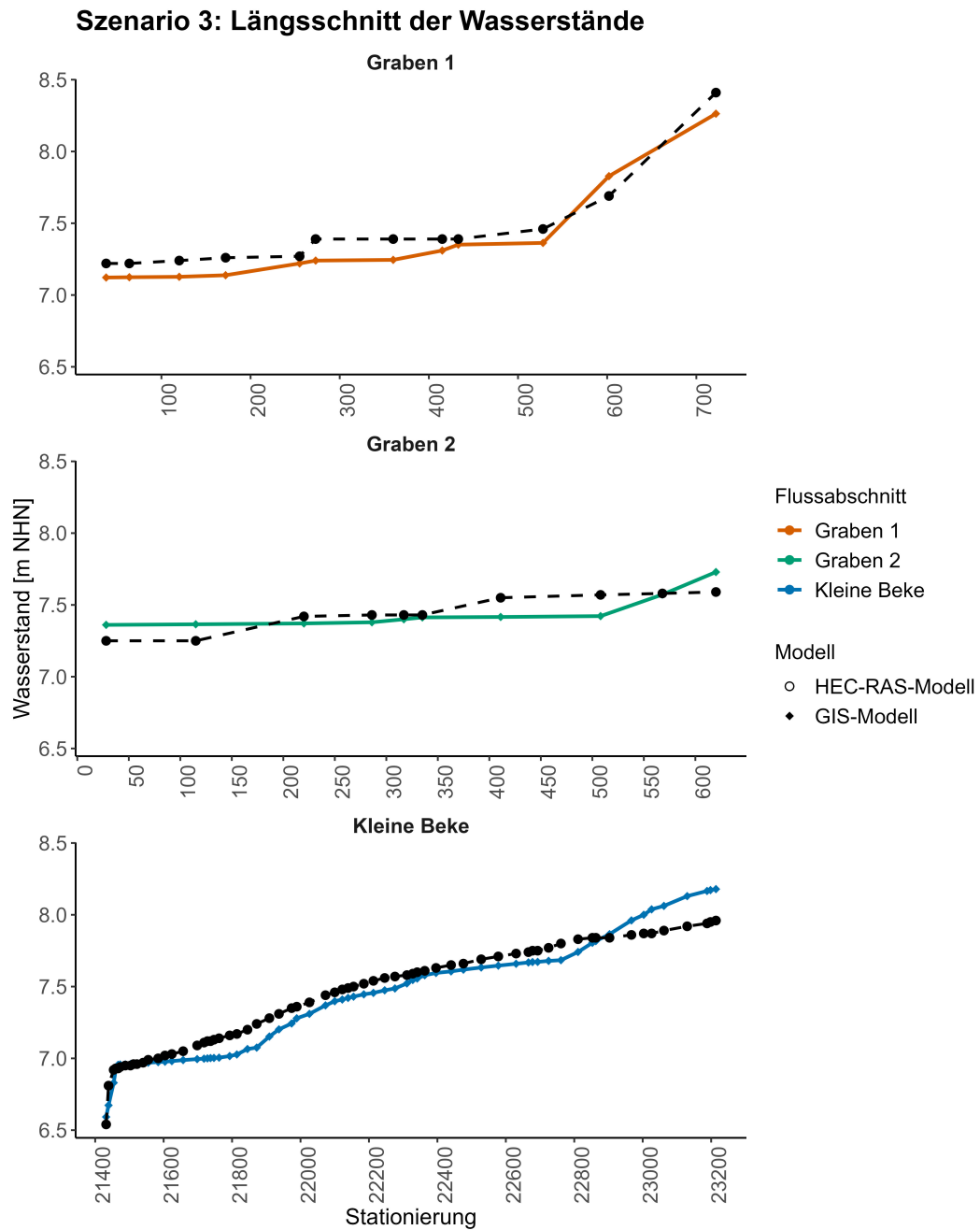
Tabelle 31 fasst die hydraulischen Parameter beider Modelle für Szenario 3 zusammen.

Tabelle 31: Vergleich hydraulischer Parameter Szenario 3; A = Fließquerschnitt, v = Fließgeschwindigkeit, WB = Wasserspiegelbreite, l<sub>wst</sub> = Wasserstandsgefälle

Parameter	Abschnitt	GIS-Ansatz			HEC-RAS		
		Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum
A [m <sup>2</sup> ]	Kleine Beke	2.93	4.45	0.39	3.74	8.00	0.41
	Graben 1	0.30	0.41	0.09	0.14	0.46	0.01
	Graben 2	0.31	0.42	0.06	0.16	0.65	0.01
v [m/s]	Kleine Beke	0.17	1.07	0.09	0.13	1.02	0.05
	Graben 1	0.00	0.01	0.00	0.02	0.06	0.00
	Graben 2	0.00	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00
Tiefe [m]	Kleine Beke	1.27	2.76	0.26	0.93	1.65	0.15
	Graben 1	0.38	0.58	0.07	0.08	0.19	0.01
	Graben 2	0.25	0.57	0.06	0.13	0.43	0.01
WB [m]	Kleine Beke	3.72	7.10	2.00	5.82	8.83	3.80
	Graben 1	1.49	2.70	0.90	1.78	3.00	0.71
	Graben 2	1.73	2.50	0.90	1.89	3.32	1.04
l <sub>wst</sub> [m/m]	Kleine Beke	0.00108	0.01928	0.00010	0.00554	0.31626	0.00007
	Graben 1	0.00116	0.00572	0.00010	0.00497	0.03702	0.00000
	Graben 2	0.00064	0.00267	0.00010	0.00119	0.00565	0.00000

In Szenario 3 gelten nahezu identische Aussagen wie im vorherigen Szenario. Die Fließgeschwindigkeit ist, mit Ausnahme von zwei Querprofilen im Brückenbereich, der Parameter

mit der größten Übereinstimmung. Der Fließquerschnitt sowie die Wasserspiegelbreite werden systematisch vom GIS-Ansatz unterschätzt. Die Tiefe wird überschätzt. Das Fließgefälle wird in diesem Szenario in allen Abschnitten im Mittel unterschätzt. Abbildung 22 veranschaulicht die Wasserstände für das Sommerszenario.



**Abbildung 22: Modellvergleich Szenario 3 - Längsschnitt der Wasserstände**

Tabelle 32 enthält die statistischen Kennzahlen zur Beurteilung der Genauigkeit beider Modelle.

Tabelle 32: Modellvergleich Szenario 3 - Kennzahlen. Bias, MAE und RMSE in [m]; R<sup>2</sup> ist dimensionslos

Abschnitt	RMSE	MAE	Bias	R <sup>2</sup>	Anzahl QP
Kleine Beke	0.100	0.083	-0.036	0.954	67
Graben 1	0.112	0.106	-0.083	0.948	12
Graben 2	0.095	0.080	-0.007	0.440	10

### 5.7.5 Szenario 4: Winterhalbjahr

Die hydraulischen Parameter der Modelle für das nasse Halbjahr sind in Tabelle 33 dargestellt.

Tabelle 33: Vergleich hydraulischer Parameter Szenario 4; A = Fließquerschnitt, v = Fließgeschwindigkeit, WB = Wasserspiegelbreite, l<sub>wst</sub> = Wasserstandsgefälle

Parameter	Abschnitt	GIS-Ansatz			HEC-RAS		
		Mittelwert	Maximum	Minimum	Mittelwert	Maximum	Minimum
A [m <sup>2</sup> ]	Kleine Beke	3.85	5.89	0.41	5.55	10.51	1.41
	Graben 1	0.33	0.60	0.04	0.35	0.69	0.01
	Graben 2	0.31	0.42	0.06	0.23	0.69	0.02
v [m/s]	Kleine Beke	0.27	2.18	0.15	0.27	0.96	0.13
	Graben 1	0.00	0.03	0.00	0.04	0.32	0.00
	Graben 2	0.00	0.02	0.00	0.01	0.05	0.00
Tiefe [m]	Kleine Beke	1.50	3.09	0.40	1.21	1.99	0.38
	Graben 1	0.40	0.66	0.03	0.19	0.32	0.01
	Graben 2	0.25	0.57	0.05	0.18	0.45	0.01
WB [m]	Kleine Beke	4.16	7.70	2.00	7.26	10.01	4.63
	Graben 1	1.54	2.90	0.90	2.07	3.37	0.56
	Graben 2	1.72	2.50	0.80	2.06	3.43	1.12
l <sub>wst</sub> [m/m]	Kleine Beke	0.00102	0.01403	0.00010	0.00137	0.02465	0.00012
	Graben 1	0.00124	0.00711	0.00010	0.05428	0.64928	0.00000
	Graben 2	0.00068	0.00295	0.00010	0.00296	0.02575	0.00000

Für Szenario 4 sind alle in Szenario 3 zur Beschreibung der hydraulischen Parameter getroffenen Aussagen gültig. Die Längsschnitte der Wasserstände sind in Abbildung 23 dargestellt.

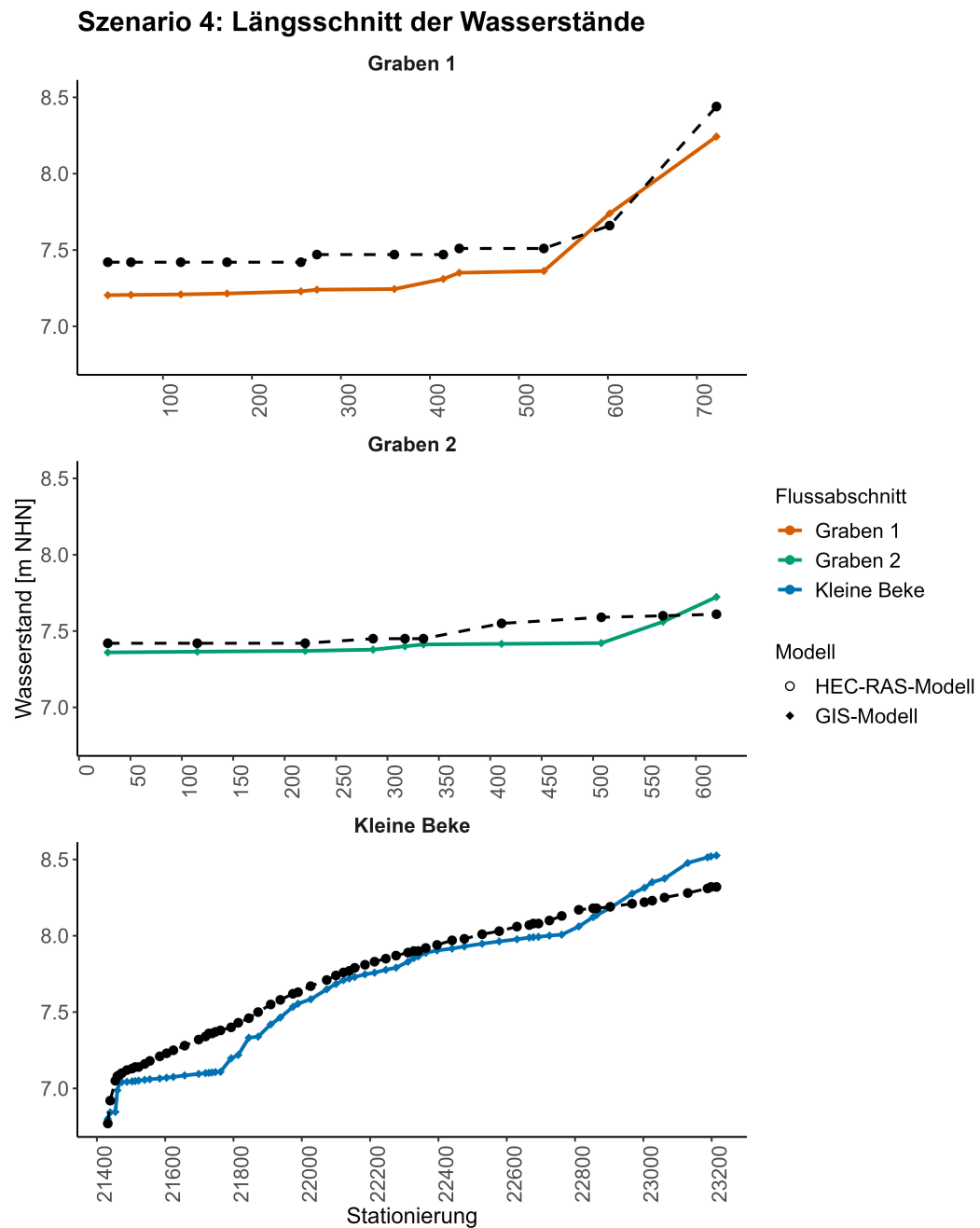


Abbildung 23: Modellvergleich Szenario 4 - Längsschnitt der Wasserstände

Die Kenngrößen zur Beurteilung der Wasserstände des vereinfachten Modellansatzes sind Tabelle 34 zu entnehmen.

Tabelle 34: Modellvergleich Szenario 4 - Kennzahlen. Bias, MAE und RMSE in [m]; R<sup>2</sup> ist dimensionslos

Abschnitt	RMSE	MAE	Bias	R <sup>2</sup>	Anzahl QP
Kleine Beke	0.130	0.111	-0.074	0.970	67
Graben 1	0.191	0.186	-0.173	0.928	12
Graben 2	0.089	0.078	-0.055	0.597	10

### 5.7.6 Beurteilung der Modellergebnisse

Der Verlauf der Wasserstände weist sowohl für die Kleine Beke als auch für Graben 1 die größte Übereinstimmung zwischen den beiden Modellen auf. In allen Szenarien liegen die Bestimmtheitsmaße bei über 0.9, was auf einen sehr starken linearen Zusammenhang hinweist.

Für Graben 2 hingegen liegen die R<sup>2</sup>-Werte zwischen 0.430 und 0.597, was auf einen mäßig ausgeprägten linearen Zusammenhang der Modellrechnungen schließen lässt. Der GIS-Modellierungsansatz neigt dazu, mit Ausnahme der oberen 100 m des Grabenabschnittes, die Wasserstände deutlich zu glätten. Tatsächlich treten jedoch, bedingt durch Schlammablagerungen und geringe topografische Unterschiede, Veränderungen des Wasserspiegels in Fließrichtung auf. Obwohl dieser Verlauf nicht abgebildet wird, liefert das Modell in diesem Bereich mit einem maximalen MAE von 8.3 cm und einem maximalen RMSE von 9.5 cm in den Szenarien 1 und 3, die geringsten Abweichungen der betrachteten Abschnitte vom HEC-RAS-Modell.

Im Bereich von Graben 1 wird die auftretende Dynamik des Wasserstandverlaufs entlang der Gewässerachse ebenfalls leicht geglättet. Allerdings bildet das GIS-Modell den grundsätzlichen Verlauf deutlich besser ab als bei Graben 2.

Der untersuchte Abschnitt der Kleinen Beke wurde bewusst so gewählt, dass am in Fließrichtung unteren Ende ein kleiner Bereich mit größerem Gefälle vorliegt. Dadurch sollen mögliche Fehler in der Abschätzung des Sohlgefälles als Randbedingung für das erste Querprofil abgefangen werden. Trotzdem treten flussaufwärts dieses Geländesprungs deutliche Abweichungen auf. Im mittleren Bereich der Kleinen Beke stimmen die Wasserstände beider Modelle sehr gut überein. Jedoch überschätzt der GIS-basierte Berechnungsansatz ab etwa Station 22+800 die auftretenden Wasserstände deutlich.

Die auftretenden Differenzen für Kleine Beke sowie Graben 1 sind für die Szenarien 2 und 4, bzw. immer, wenn vergleichsweise viel Wasser im System ist, am größten. Tendenziell werden die Wasserstände vom GIS-Modell unterschätzt. Dies könnte daran liegen, dass die

vermessenen Profile im Sohlbereich relativ schmal sind und sich erst mit zunehmender Höhe im Böschungsbereich aufweiten. Die Trapezprofile des GIS-Modells besitzen eine solche Abstufung nicht. Ein Parameter, um diesem Problem entgegenzuwirken, ist die Neigung der Böschung. Allerdings wird die korrekte Bestimmung der Böschungsneigung zusätzlich durch die in Kapitel 5.7.1 beschriebenen Unsicherheiten der Abschätzung von Wasserspiegelbreite und -tiefe erschwert.

Eine weitere mögliche Ursache sind Glättungen des GIS-Modells von Gefälleänderungen im Gewässer. Dies liegt vermutlich an der DGM basierten Wasserstandskorrektur des GIS-Modells. Dabei wird in Fließrichtung der Gewässer geprüft, ob flussabwärts gelegene Profile einen niedrigeren Wasserstand besitzen als das Oberwasserprofil. Falls diese Bedingung nicht zutrifft, erfolgt eine Korrektur bis zum nächst niedrig gelegenen Wasserstand. In dem zu korrigierenden Abschnitt wird der Wasserstand linear zwischen Ober- und Unterwasserstand interpoliert. Vermutlich werden somit in den tendenziell gefälleärmeren Gewässern der Tiefebene mit ausgeprägten Talräumen für den Großteil der Fließstrecken die Wasserstände eher wie im mittleren Bereich der Kleinen Beke geschätzt. Deutliche Unterschiede in den erzeugten Wasserständen sind besonders für kurze Abschnitte mit vergleichsweise großen Gefälleänderungen zu erwarten.

Der Zweck des GIS-Modellansatzes die Abschätzung von Wasserständen für gesamt Mecklenburg-Vorpommern. Folglich ist eine Bewertung der Wasserspiegelbreiten und Wasserstände anhand eines einzelnen Datensatzes, wie dem der Kleinen Beke, nicht zielführend. Unter der Annahme, dass die Abweichung vom GIS-Modell im Mittel 10 cm beträgt (siehe Tabelle 28 bis 34) und das HEC-RAS-Modell selbst einen mittleren Fehler von 5 cm (siehe Tabelle 19) gegenüber den Messwerten aufweist, ergibt sich ein theoretischer maximaler Fehler von bis zu 15 cm für den vereinfachten Ansatz im Vergleich zu den Messwerten im April 2025. In der Praxis ist jedoch mit einem geringeren Fehler zu rechnen, sofern sich die Modellabweichungen nicht kumulativ, sondern zumindest teilweise kompensierend verhalten.

Trotz der teils deutlichen Abweichungen einzelner hydraulischer Parameter, erzeugt das GIS-Modell Wasserstände, welche zur weiteren Analyse, beispielsweise zu Fragestellungen hinsichtlich des Managements landwirtschaftlich genutzter Flächen, durchaus geeignet sind. Insbesondere für großräumige Untersuchungen bietet sich diese Modellierungsvariante an. Weitere mögliche Anwendungsfelder könnten in der Planung von Wiedervernässungsmaßnahmen, in Vorplanungen vor der Durchführung aufwändiger Vermessungen oder als In-

tegration in größere hydrologische Gesamtmodelle liegen. Ein großer Vorteil dieses Modellierungsansatzes besteht in dem vergleichsweise geringen Aufwand zur Erzeugung der Wasserstände, da die Notwendigkeit von Vermessung, Durchflussmessung und Modellierung entfällt. Dies hat allerdings zur Folge, dass lokale Besonderheiten nicht ausreichend berücksichtigt werden können. Dies ist wiederum für Fragestellungen mit hohem Anforderungsgrad an die Genauigkeit von Relevanz.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit ist die Abbildung der saisonalen Wasserstandsdynamik in einem typischen norddeutschen Tieflandgewässersystem am Beispiel der Kleinen Beke in Mecklenburg-Vorpommern anhand einer hydraulischen Langzeitsimulation vom 01.11.1994 bis 31.10.2024. Im Mittelpunkt steht die Ableitung repräsentativer Wasserstände für Trocken-, Normal- und Nassjahre sowie deren Bewertung im Hinblick auf die landwirtschaftliche Nutzbarkeit angrenzender Grünlandflächen.

Als Datengrundlage dienen umfangreiche GPS-Vermessungen im Untersuchungsgebiet. Erfasst wurden insgesamt 72 Querprofile der Kleinen Beke, 12 Profile von Graben 1 sowie 10 Profile von Graben 2. Zusätzlich wurden hydraulisch relevante Bauwerke wie Durchlässe und eine Brücke erfasst. Auf Basis dieser Geometriedaten wurde ein stationäres hydraulisches Modell in HEC-RAS erstellt und anhand von Rauheitswerten und Sedimenthöhen kalibriert. Anschließend erfolgte die Überführung in ein instationäres Modell, das mit einer etwa einjährigen Wasserstandsmessreihe der Universität Rostock weiter kalibriert wurde. Als Modellrandbedingungen dienen die Durchflussdaten des amtlichen Pegels Bröbberow, welche mittels Abflusspende auf das Untersuchungsgebiet übertragen wurden. Monatlich differenzierte Rauheitsfaktoren ermöglichen die Abbildung saisonaler Vegetationsentwicklungen. Die Einteilung in hydrologische Jahre in Trocken-, Normal- und Nassjahre erfolgt auf Grundlage langjähriger Niederschlagsdaten (Waltering, 2025).

Die Modellergebnisse wurden mit einem neu entwickelten, vereinfachten GIS-basierten Verfahren zur Wasserstandsschätzung verglichen. Der Vergleich umfasst vier unterschiedliche Wasserstandsszenarien.

Der betrachtete Abschnitt der Kleinen Beke ist rund dreimal so lang wie die modellierten Grabensegmente. Alle untersuchten Gewässerabschnitte weisen ein sehr geringes Sohlgefälle auf. Die Übertragung der Abflusspenden zeigt sich für die Kleine Beke als gut geeignet, während die Anwendung auf die Gräben, aufgrund der sehr kleinen Einzugsgebiete, nur eingeschränkt möglich ist. Die kalibrierten Strickler-Werte liegen für die Kleine Beke zwischen  $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  im Oberlauf und  $25 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  im Unterlauf. In den Gräben wird ein Strickler-Wert von  $8 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$  verwendet. Die Rauheitswerte wurden zusätzlich anhand des Verfahrens nach Cowan plausibilisiert. Der monatliche Verlauf der Rauheitsfaktoren spiegelt die typische saisonale Entwicklung wider, mit einem Minimum im April und einem Maximum im Juni, beeinflusst durch eine im Juli erfolgte Krautung.

Sowohl das stationäre als auch das instationäre Modell erreichen insgesamt eine sehr gute Modellgüte. Die Abweichungen zu den gemessenen Wasserständen beträgt meist zwischen 5 und 10 cm. Lediglich für Graben 2 im instationären Zustand wird eine mäßige Übereinstimmung erzielt. Dennoch erlaubt das Modell ausreichend genaue Aussagen über die landwirtschaftliche Nutzbarkeit der angrenzenden Grünlandflächen. Im Simulationszeitraum sind 19 hydrologische Jahre als normal, 7 Jahre als nass und 4 Jahre als trocken klassifiziert.

Der langjährige mittlere Wasserstand der Kleinen Beke beträgt 7.47 m NHN. Die Gräben liegen im Mittel rund 10 cm höher, weisen jedoch geringere jahreszeitliche Schwankungen auf. Die Wasserstandsdynamik ist geprägt von ausgeprägten Maxima im Februar und Minima im August. In nassen Jahren liegen die Wasserstände der Kleinen Beke um etwa 20 cm höher gegenüber Trocken- und Normaljahren, während in den Gräben Differenzen von etwa 10 cm modelliert wurden. Die nahezu deckungsgleichen Dauerlinien für Normal- und Trockenjahre deuten auf ein durch den Basisabfluss dominiertes Abflussregime hin (Mehl & Thiele, 1998)

Für die landwirtschaftliche Nutzung ergeben sich Basiswasserstände von etwa 35 cm unter Flur im Winterhalbjahr. Die Absinkwasserstände liegen im Bereich von 42 cm unter Flur in den Gräben und 60 cm unter Flur in der Kleinen Beke. Die umliegenden Flächen lassen sich somit als wechselhaft feucht einordnen und bieten günstige Bedingungen für eine extensive Grünlandnutzung mit hochwertigem Futterertrag. Die hydrologische Steuerung dieser Flächen erfolgt in erster Linie über den Wasserstand der Kleinen Beke, während die Gräben eine untergeordnete Funktion übernehmen.

Der Vergleich mit einem vereinfachten GIS-basierten Verfahren zeigt teils deutliche Unterschiede, insbesondere bei der geometrischen Beschreibung der Fließquerschnitte. Die Wasserspiegelbreiten werden systematisch unterschätzt, während die Wassertiefen tendenziell überschätzt werden. Die Sohlhöhen des GIS-Modells tendieren dazu den tatsächlichen Verlauf zu glätten. Der Wasserstandsverlauf wird insgesamt gut erfasst. Die resultierenden Wasserstände liegen tendenziell unter denen des HEC-RAS-Modells. In Abschnitten mit großen Gefälleänderungen treten deutliche Abweichungen auf. Der maximale mittlere Fehler gegenüber den im April 2025 gemessenen Wasserständen beträgt 15 cm. Der GIS-Ansatz eignet sich somit primär für großmaßstäbliche Fragestellungen im Bereich des landwirtschaftlichen Wassermanagements, ist jedoch für Anwendungen mit hohen Genauigkeitsanforderungen weniger geeignet.

Aus den Ergebnissen dieser Arbeit ergeben sich mehrere Ansatzpunkte für weiterführende Betrachtungen:

- **Kopplung mit einem Grundwassermodell:** Eine Verknüpfung der Oberflächenwasserstände mit einem Grundwassermodell könnte eine differenziertere Bewertung der Flurnutzbarkeit ermöglichen, insbesondere im Hinblick auf die Verfügbarkeit weiterer Grundwassermesspegel zwischen den Gewässerabschnitten
- **Verbesserung der Abflussschätzung in kleinen Einzugsgebieten:** Weitere Durchflussmessungen im Grabensystem sowie alternative Regionalisierungsansätze könnten die Modellgüte, insbesondere in Graben 2, deutlich erhöhen.
- **Berücksichtigung variabler Sedimenthöhen:** Während die Modellierung mit ineffektiven Fließflächen für langfristige Fragestellungen robuster erscheint, da zeitliche Veränderungen in den Schlammhöhen nicht abgebildet werden müssen, wäre für kurzfristige Fragestellungen eine exaktere Erfassung dieser von Vorteil.
- **Validierung des GIS-Ansatzes an weiteren Gewässern:** Um die systematischen Abweichungen der Wasserspiegelbreiten und -tiefen besser einzuordnen, sind weitere Untersuchungen an vergleichbaren Tieflandgewässern in Mecklenburg-Vorpommern erforderlich.

Das in dieser Arbeit entwickelte Modellierungskonzept ist grundsätzlich übertragbar und lässt sich gezielt weiterentwickeln, um wasserwirtschaftliche Fragestellungen auch in vergleichbaren Tieflandeinzugsgebieten zu beantworten.

## VIII. Literaturverzeichnis

- Alabsi, E. (2010). *Untersuchungen zu Fragen der Schnitt- und Weidenutzung in Abhängigkeit von Düngungsintensität und Grünlandstandort*. Rostock: Universität Rostock.
- Allende, I. (2008). *Das Siegel der Tage*.
- Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., . . . Wilke, B.-M. (2018). *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde*. Springer-Verlag GmbH Deutschland, ein Teil von Springer Nature 2018. doi:[https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3_6)
- Baumann, A. (2023). *Moore für den Klimaschutz: Bedeutung, Gefährdung und Schutz der natürlichen CO<sub>2</sub>-Senken in Baden-Württemberg*. Bodensee: Baden-Württemberg - Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft.
- BfG. (2025). Hydrologischer Atlas Deutschland. Koblenz. Abgerufen am 15. Mai 2025 von <https://geoportal.bafg.de/mapapps/resources/apps/HAD/index.html?lang=de>
- Bockholt, R., & Fuhrmann, U. (1994). Intensitätsstufen der Grünlandnutzung zur Verständigung mit Naturschutzbehörden, Planungsbüros für Landschaftsgestaltung und Landwirtschaftsämtern.
- Bronstert, A. (2016). Abflussbildung in der Landschaft. In N. Fohrer, H. Bormann, K. Miegel, M. Casper, A. Bronstert, A. Schumann, & M. Weiler, *Hydrologie* (S. 143-163). Bern: Haupt Verlag.
- Chow, V. T. (1959). *Open-Channel Hydraulics*. Mc-Graw Hill Book Company Inc.
- Deussfeld, N. (2005). Geschwindigkeitsmessungen in Strömungen mit mittlerem, flexiblem Bewuchs. In *Schriftenreihe zur Wasserwirtschaft* (Bd. 43). Graz: Technische Universität Graz. Abgerufen am 28. April 2025
- Dierschke, H., & Briemle, G. (2008). *Kulturgrasland*. Stuttgart: Eugen Ulmer KG.
- DIN 4049 T1. (12 1992). DIN 4049 Teil 1: Hydrologie: Grundbegriffe. Berlin.
- Dörter, K. (1985). *Landwirtschaftliche Meliorationen*. Berlin: VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag.
- DWA. (2020). *Merkblatt DWA-M 524 - Hydraulische Berechnung von Fließgewässern mit Vegetation*. Hennef: Druckhaus Köthen GmbH & Co KG. Abgerufen am 28. April 2025
- DWD. (2011). Pressemitteilung - Deutschlandwetter im Jahr 2011. Offenbach.

- DWD. (2025). Klimadaten Tageswerte - aktuell. Rostock. Abgerufen am 26. Juni 2025 von [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/climate/daily/kl/historical/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/climate/daily/kl/historical/)
- Ellenberg, H., Weber, H. E., Düll, R., Wirth, V., Werner, W., & Paulißen, D. (2001). *Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa* (3. Ausg.). Göttingen: Verlag Erich Goltze GmbH & Co KG.
- FIS-MV. (2025). WRRRL Wasserkörper-Steckbrief Fließgewässer Mecklenburg-Vorpommern - Bewirtschaftungszeitraum 2022-2027. Abgerufen am 15. Mai 2025 von [https://fis-wasser-mv.de/charts/steckbriefe/rw/rw\\_wk.php?schema=reporting\\_bp3&fg=WABE-0200](https://fis-wasser-mv.de/charts/steckbriefe/rw/rw_wk.php?schema=reporting_bp3&fg=WABE-0200)
- FIS-MV. (29. April 2025). *WRRRL-Steckbriefe*. Von <https://fis-wasser-mv.de/charts/steckbriefe/neu/fg/index.html> abgerufen
- Hannapel, S., & Limberg, A. (2007). Ermittlung des Flurabstands des oberflächennahen Grundwassers in Berlin. *Brandenburgische Geowissenschaftliche Beiträge 1-2007*, 65-74. Abgerufen am 2. Mai 2025 von [https://www.hydor.de/downloads/PDF/veroeffentlichungen/Ermittlung\\_Flurabstand\\_2007.pdf](https://www.hydor.de/downloads/PDF/veroeffentlichungen/Ermittlung_Flurabstand_2007.pdf)
- Hannappel, S., & Riek, W. (2011). *Berechnung des Flurabstandes des oberflächennahen Grundwassers der Waldfläche Brandenburgs für hydrologisch typische Zeiträume*. BfG für Fachverwaltungen des Bundes und der Länder. Abgerufen am 2. Mai 2025 von <https://www.hywa-online.de/berechnung-des-flurabstandes-des-oberflaechennahen-grundwassers-der-waldflaeche-brandenburgs-fuer-hydrologisch-typische-zeitraeume/#>
- Heiko, H., & Hilgert, T. (Dezember 2007). Dränabflüsse - Der Schlüssel zur Wasserbilanzierung im nordostdeutschen Tiefland. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung* 51 (6). Abgerufen am 30. April 2025 von <https://www.hywa-online.de/draenabfluesse-der-schluessel-zur-wasserbilanzierung-im-nordostdeutschen-tiefland/>
- Heinemann, E., Feldhaus, R., & Jokiel, C. (2024). *Hydraulik für Bauingenieure*. Köln: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. Abgerufen am 22. April 2025 von <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-8348-2360-1.pdf>
- Huang, F., Zhang, Y., Zhang, D., & Chen, X. (2019). *Review Environmental Groundwater Depth for Groundwater-Dependent Terrestrial Ecosystems in Arid/Semiarid Regions: A Review*. International Journal of Environmental Research and Public

- Health. Abgerufen am 2. Mai 2025 von [https://www.researchgate.net/publication/331491472\\_Environmental\\_Groundwater\\_Depth\\_for\\_Groundwater-Dependent\\_Terrestrial\\_Ecosystems\\_in\\_AridSemi-arid\\_Regions\\_A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/331491472_Environmental_Groundwater_Depth_for_Groundwater-Dependent_Terrestrial_Ecosystems_in_AridSemi-arid_Regions_A_Review)
- Hunkeler, K., Grubinger, H., & Tanner, E. (1970). *Landwirtschaftliches Meliorationswesen*. Bern: Buchverlag Verbandsdruckerei Bern AG Bern.
- Jirka, G. H., & Lang, C. (2004). *Gerinnehydraulik*. Karlsruhe: IfH, Universität Karlsruhe. Abgerufen am 22. April 2025
- Kluge, W., & Trepel, M. (2004). Geohydrologische Einbindung von Niederungen in die Landschaft. *Wasserwirtschaft* 94(5), S. 9-14. Von [https://www.researchgate.net/publication/291006566\\_Geohydrologische\\_Einbindung\\_von\\_Niederungen\\_in\\_die\\_Landschaft](https://www.researchgate.net/publication/291006566_Geohydrologische_Einbindung_von_Niederungen_in_die_Landschaft) abgerufen
- Koska, I. (2001). Ökohydrologische Kennzeichnung. In M. Succow, & H. Joosten, *Landschaftsökologische Moorkunde* (S. 92-111). Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung (Nägele u. Obermiller).
- Krause, S., Bronstert, A., & Zehe, E. (2007). Groundwater–surface water interactions in a North German lowland floodplain – Implications for the river discharge dynamics and riparian water balance. Potsdam. Abgerufen am 27. Juli 2025 von <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002216940700529X?via%3Dihub>
- Krebs, P. (2009). *Vorlesungsskript Abwasserentsorgung I WS09/10 - Abfluss in offenen Gerinnen*. Dresden. Abgerufen am 23. April 2025 von [https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/isi/sww/ressourcen/dateien/lehre/dateien/abwasserbehandlung/uebung\\_ws09\\_10/Uebung\\_SV\\_Herleitung.pdf?lang=en](https://tu-dresden.de/bu/umwelt/hydro/isi/sww/ressourcen/dateien/lehre/dateien/abwasserbehandlung/uebung_ws09_10/Uebung_SV_Herleitung.pdf?lang=en)
- Kummu, M. (2002). *ROUGHNESS CHARACTERISTICS AND VELOCITY PROFILE IN VEGETATED AND NONVEGETATED CHANNEL*. Espoo: HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY. Abgerufen am 28. April 2025
- LAiV. (2020). *Geländemodelle*. Abgerufen am 15. Mai 2025 von <https://www.laiv-mv.de/Geoinformation/Geobasisdaten/Gelaendemodelle/>
- LAiV. (2024). *WMS Digitale Orthophotos MV (WMS\_MV\_DOP)*. Abgerufen am 7. Januar 2025 von [https://www.geoportal-mv.de/portal/Suche/Metadatenuebersicht/Details/WMS%20Digitale%20Orthophotos%20MV%20\(WMS\\_MV\\_DOP\)/b6a74a2b-9d69-4f74-ba53-21111da7851f](https://www.geoportal-mv.de/portal/Suche/Metadatenuebersicht/Details/WMS%20Digitale%20Orthophotos%20MV%20(WMS_MV_DOP)/b6a74a2b-9d69-4f74-ba53-21111da7851f)

- LAWA. (2018). Leitfaden zur Hydrometrie des Bundes und der Länder – Pegelhandbuch. Stuttgart.
- Leica Geosystems AG. (2022). Leica Viva GS16 - Datenblatt. Heerbrugg, Schweiz.
- Lewandowski, J., Lischeid, G., & Nützmann, G. (6. März 2009). Drivers of water level fluctuations and hydrological exchange between groundwater and surface water at the lowland River Spree (Germany): field study and statistical analyses. *HYDROLOGICAL PROCESSES*, S. 2117– 2128.
- LfL. (2024). *Öko-Landbautag 2024 - Angewandte Forschung und Entwicklung für den ökologischen Landbau in Bayern* (Bd. 5). (B. Messerer, & W. Pflanz, Hrsg.) Freising-Weihenstephan: Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT). Abgerufen am 14. April 2025 von [www.lfl.bayern.de/oekolandbautag-2024](http://www.lfl.bayern.de/oekolandbautag-2024)
- LfU (a). (2002). *Hydraulik naturnaher Fließgewässer Teil 1 - Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren*. Karlsruhe. Abgerufen am 22. April 2025
- LfU (b). (2002). *Hydraulik naturnaher Fließgewässer Teil 2 - Neue Berechnungsverfahren für naturnahe Gewässerstrukturen*. Karlsruhe. Abgerufen am 22. April 2025
- LfU. (2015). *Arbeitshilfe - Unterhaltung von Gräben*. Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU). Abgerufen am 8. Mai 2025 von <https://www.lfu.bayern.de/wasser/gewaessernachbarschaften/themen/graeben/doc/arbeitshilfe.pdf>
- LfU. (2016). *Niedrigwasser in Bayern - Grundlagen, Veränderung und Auswirkungen*. Augsburg. Abgerufen am 1. Mai 2025 von <https://www.nid.bayern.de/files/docs/niedrigwasserbericht.pdf>
- LUNG. (2023). *Kartenportal Umwelt Mecklenburg-Vorpommern*. Von <https://www.umweltkarten.mv-regierung.de/atlas/script/index.php> abgerufen
- LUNG-MV (a). (6. Februar 2025). *Pressemitteilung - Feuchter Herbst, normaler Winter: Hydrologische Lage in MV*. Abgerufen am 1. Mai 2025 von <https://www.regierung-mv.de/Landesregierung/lm/Aktuell/?id=208378&processor=processor.sa.pressemitteilung>
- LUNG-MV (b). (2025). *MV Gewaesser WMS*. Güstrow. Abgerufen am 14. Mai 2025 von [https://www.umweltkarten.mv-regierung.de/script/mv\\_a3\\_gewaesser\\_wms.php?SERVICE=WMS&REQUEST=GetCapabilities](https://www.umweltkarten.mv-regierung.de/script/mv_a3_gewaesser_wms.php?SERVICE=WMS&REQUEST=GetCapabilities)
- LUNG-MV. (2010). *Anleitung für die Kartierung von Biotypen und FFH-Lebensraumtypen in Mecklenburg-Vorpommern*. Güstrow: Landesamt für Innere Verwaltung

- Mecklenburg-Vorpommern Zentrale Druckerei. Abgerufen am 5. Mai 2025 von <https://www.lung.mv-regierung.de/static/LUNG/Dateien/fachinformationen/natur/lebensraum/biotopkartieranleitung2010.pdf>
- LUNG-MV. (20. September 2023). Wasserhaushaltbericht 2022 - Bericht zur meteorologischen und hydrologischen Lage in Mecklenburg-Vorpommern im hydrologischen Jahr 2022. Güstrow. Abgerufen am 2025. Mai 1 von [https://www.lung.mv-regierung.de/static/LUNG/Dateien/fachinformationen/wasser/hydrologie/whh\\_bericht\\_2022.pdf](https://www.lung.mv-regierung.de/static/LUNG/Dateien/fachinformationen/wasser/hydrologie/whh_bericht_2022.pdf)
- LUNG-MV. (7. März 2024). Moore in Mecklenburg-Vorpommern Datenlage und Einordnung - 27. Gewässersymposium des LUNG M-V. Güstrow. Abgerufen am 9. Mai 2025 von [https://www.lung.mv-regierung.de/static/LUNG/dateien/publikationen/wasser/symposium/27\\_symposium/03\\_20240307\\_hennings\\_gewaessersymposium.pdf](https://www.lung.mv-regierung.de/static/LUNG/dateien/publikationen/wasser/symposium/27_symposium/03_20240307_hennings_gewaessersymposium.pdf)
- Malcherek, A. (2019). *Fließgewässer - Hydraulik, Hydrologie, Morphologie und Wasserbau*. Neubiberg: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. doi:<https://doi.org/10.1007/978-3-658-27000-1>
- Mehl, D., & Thiele, V. (1998). *Fließgewässer- und Talraumtypen des Norddeutschen Tieflands*. Berlin: Parey Buchverlag .
- Meky, M., Ghoraba, S., & Rashwan, I. (2020). Effect of Water Depth Change on Manning Coefficient for Partially-Filled Circular Culverts. *Mansoura Engineering Journal: Vol. 40 : Iss. 2 , Article 11*. doi:<https://doi.org/10.21608/bfemu.2020.101243>
- Mey, S. (2011). *Dissertation - Simulation von Wassermangelsituationen im Nordostdeutschen Tiefland mittels gekoppelter Oberflächen- und Grundwassermodelle*. Berlin: Humboldt-Universität zu Berlin.
- Mielke, H., & Wohlers, W. (2019). *Praxishandbuch Grünland Nutzung und Pflege*. Clenze: ERLING Verlag GmbH & Co. KG.
- Mrotzek, A. (5. November 2022). Moore in Mecklenburg-Vorpommern. Universität Greifswald. Abgerufen am 9. Mai 2025 von [https://www.hs-nb.de/storages/hs-neubrandenburg/studiengaenge-fachbereiche/SG\\_NLP/Naturschutztage\\_Vortraege/2022/Vortrag\\_-\\_Almut\\_Mrotzek.pdf](https://www.hs-nb.de/storages/hs-neubrandenburg/studiengaenge-fachbereiche/SG_NLP/Naturschutztage_Vortraege/2022/Vortrag_-_Almut_Mrotzek.pdf)

- Nguyen, L. D. (2018). *River modeling for control tasks in water systems - Dissertation*. Ilmenau: Technische Universität Ilmenau. Abgerufen am 23. April 2025 von [https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt\\_derivate\\_00040525/ilm1-2018000056.pdf](https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00040525/ilm1-2018000056.pdf)
- Nitsche, S., & Nitsche, L. (1994). *Extensive Grünlandnutzung*. Radebeul: Neumann.
- Patt, H., & Gonsowski, P. (2011). *Wasserbau - Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen*. Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- Pegelportal MV. (29. April 2025). *Pegelkarte*. Von [https://pegelportal-mv.de/pegel\\_mv.html](https://pegelportal-mv.de/pegel_mv.html) abgerufen
- Petersen, A. (1952). *Die neue Rostocker Grünlandschätzung*. Berlin: Akademie-Verlag.
- Professur für Wasserwirtschaft. (2025). *Geodaten UG Kleine Beke*. Rostock: Universität Rostock.
- Rektor. (2008). *Universität im Umbau*. *Ostseezeitung*.
- Riek, W. (2001). *Auswirkungen von Grundwasserabsenkungen auf das Zuwachsverhalten der Kiefer*. Abgerufen am 2. Mai 2025 von [https://www.researchgate.net/publication/259974639\\_Auswirkungen\\_von\\_Grundwasserabsenkungen\\_auf\\_das\\_Zuwachsverhalten\\_der\\_Kiefer](https://www.researchgate.net/publication/259974639_Auswirkungen_von_Grundwasserabsenkungen_auf_das_Zuwachsverhalten_der_Kiefer)
- Sabah, S., & Bachir, A. (2023). Manning's roughness coefficient in a truncated triangular open-channel flow section. *Water Practice & Technology Vol 18 No 4*, 845. doi:doi:10.2166/wpt.2023.044
- Schmalz, B. (2016). Tieflandhydrologie. In N. Fohrer, H. Bormann, K. Miegel, M. Casper, A. Bronstert, A. Schumann, & M. Weiler, *Hydrologie* (S. 263-274). Bern: Haupt Verlag.
- Schmalz, B. (2017). *Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt. Abgerufen am 6. Mai 2025 von [https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/wasser/Veranstaltungen/2017/4\\_Grundwassertag2017/SCHMALZ\\_Wechselwirkungen\\_Grund\\_Oberflaechenwasser.pdf](https://www.hlnug.de/fileadmin/dokumente/wasser/Veranstaltungen/2017/4_Grundwassertag2017/SCHMALZ_Wechselwirkungen_Grund_Oberflaechenwasser.pdf)
- Schneider, M. (2007). *Einfluss von Parameter-Unsicherheiten auf die Genauigkeit berechneter Wasserspiegellagen - Diplomarbeit*. Rostock: Universität Rostock.
- Schneider, M. (2024). *Seminar 04 –Probleme der kulturtechnischen Entwässerung - Lehrmaterial*. Universität Rostock.
- Schneider, M. (2025). *persönliche Kommunikation*.

- Song, S., Schmalz, B., & Fohrer, N. (2017). Seasonality of Roughness - the Indicator of Annual River Flow Resistance Condition in a Lowland Catchment. Abgerufen am 1. Juli 2025
- STALU-MM (a). (2025). Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg: Durchflussdaten Pegel Bröbberow / Beke. Rostock.
- STALU-MM (b). (2025). Staatliches Amt für Landwirtschaft und Umwelt Mittleres Mecklenburg: Pegeldaten Pegel Bröbberow / Beke. Rostock.
- Stefanyshyn, D., Korbutiak, V., & Khodnevych, Y. V. (September 2021). Estimating the Chezy roughness coefficient as a characteristic of hydraulic resistance to flow in river channels: a general overview, existing challenges, and ways of their overcome... *Environmental Safety and Natural Resources*. doi:<http://dx.doi.org/10.32347/2411-4049.2021.3.16-43>
- Stegmann, H. (2005). Die Quellmoore im Sernitztal (NO-Brandenburg) – Genese und anthropogene Bodenveränderungen - Inauguraldissertation. Greifswald.
- Sturm, T. W. (2001). *Open Channel Hydraulics*. Georgia Institute of Technology. Abgerufen am 24. April 2025 von <https://venkatasai.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/03/open-channel-hydraulics-by-terry-w-sturm-www-civilengforall-com.pdf>
- Swamee, P., & Rathie, P. (2004). Exact Solutions for Normal Depth Problem. *Journal of Hydraulic Research Vol. 42*. Abgerufen am 28. April 2025
- UBA. (2008). Bodenübersichtskarte von Deutschland 1:5.000.000. Abgerufen am 1. Mai 2025 von <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/421/dokumente/uebersichtskarte.pdf>
- US Army Corps of Engineers, Hydraulic Engineering Center. (kein Datum). HEC-RAS. Abgerufen am 16. Juni 2025 von <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- VEB Ingenieurbüro für Meliorationen. (1981). TGL 36873/02. Bad Freienwalde: Ministerium für Land-, Forst-, und Nahrungsgüterwirtschaft.
- Waltering, N. H. (2025). persönliche Kommunikation. Rostock: Universität Rostock.
- Weiler, M., & Miegel, K. (2016). Globaler und regionaler Wasserkreislauf. In N. Fohrer, *Hydrologie*. utb. Abgerufen am 30. April 2025 von <https://www.utb.de/doi/abs/10.36198/9783838545134-1-11>

- Wittenberg, H., Schöninger, M., & Schwarze, R. (2005). Grundwasserabfluss. In A. Bronstert, *Abflussbildung - Prozessbeschreibung und Fallbeispiele* (S. 22-39). Hennef: Fachgemeinschaft in der DWA.
- Wouter, J., Freer, J., & Woods, R. (2019). Technical note: Inherent benchmark or not? Comparing Nash-Sutcliffe and Kling-Gupta efficiency scores. Bristol: Hydrology and Earth System Sciences. Abgerufen am 30. Juni 2025 von <https://hess.copernicus.org/preprints/hess-2019-327/hess-2019-327.pdf>

## IX. Anhang

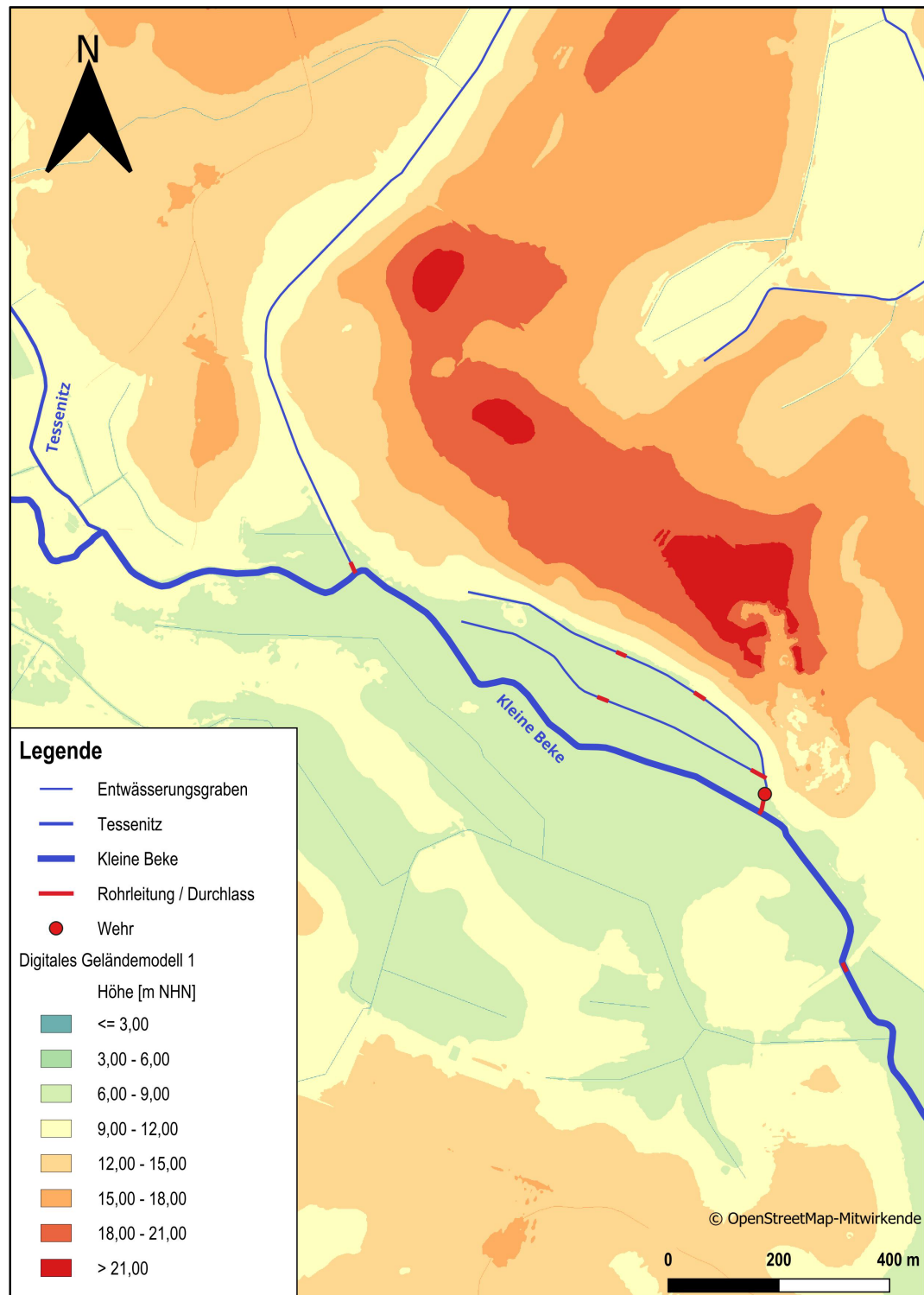
### Analoger Anhang

Anhang 1: Topografische Karte des Untersuchungsgebiets (Quelle DGM1: (LAIv, 2020)) .....	XIV
Anhang 2: Landnutzungskarte nach CORINE LandCover.....	XV
Anhang 3: Verwendete QGIS-Werkzeuge (Version 3.40.0).....	XVI
Anhang 4: Darstellung des Brückenbauwerks in HEC-RAS (Version 6.6).....	XVII
Anhang 5: Modellerte Sedimenthöhen Kleine Beke (Oberlauf: Station 21+814 bis 23+214) .....	XVIII
Anhang 6: Modellerte Sedimenthöhen Graben 1 (Station 0+000 bis 0+722).....	XIX
Anhang 7: Modellerte Sedimenthöhen Graben 2 (Station 0+000 bis 0+620).....	XX
Anhang 8: Pegeltransekt und Ausdehnung der ausgewerteten Flächen .....	XXI
Anhang 9: Modellvergleich - Szenario 1 .....	XXII
Anhang 10: Modellvergleich - Szenario 2 .....	XXV
Anhang 11: Modellvergleich - Szenario 3 .....	XXVIII
Anhang 12: Modellvergleich - Szenario 4 .....	XXXI

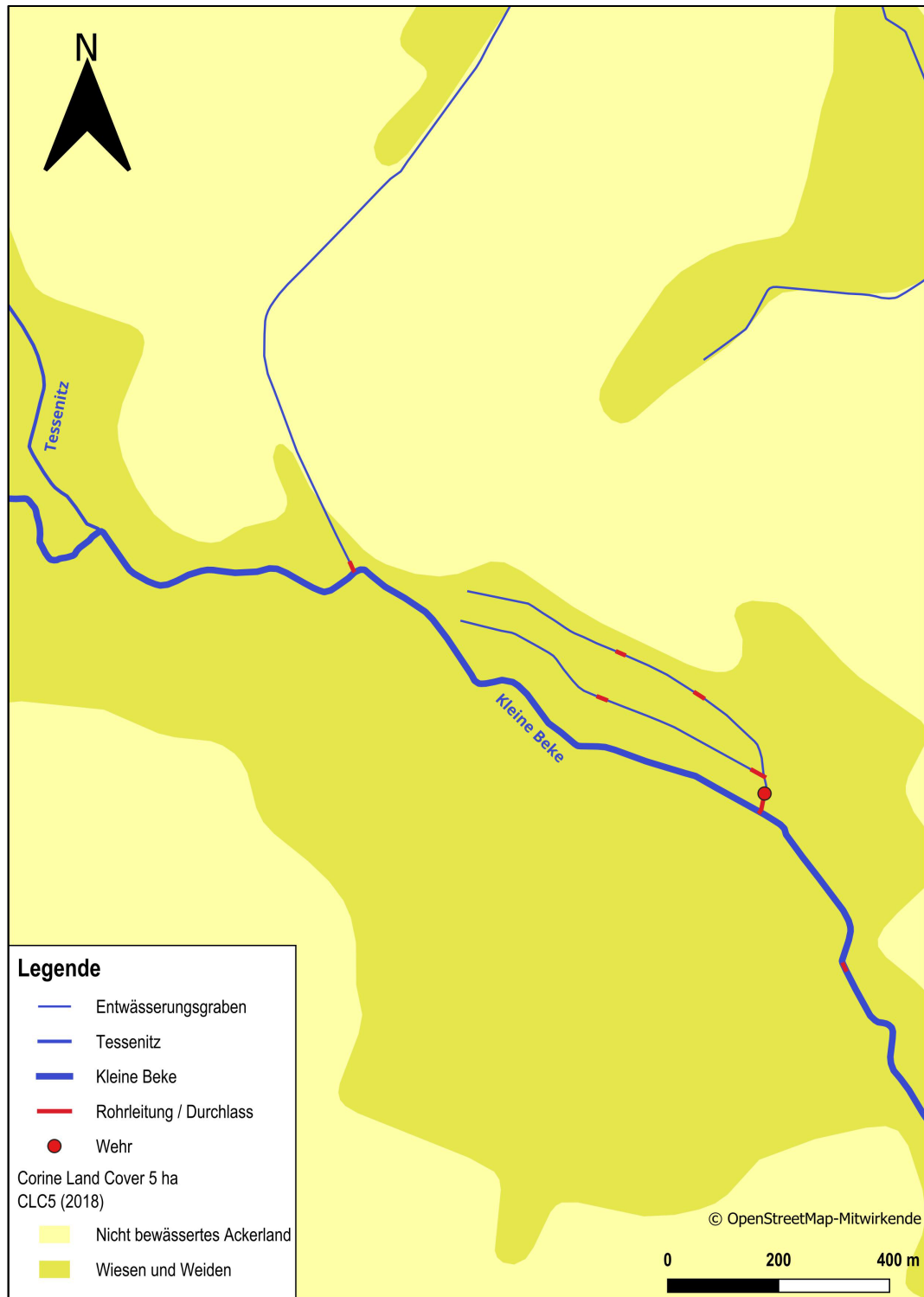
### Digitaler Anhang

01_Erlaeuterung_Anhang	
02_HEC_RAS	
03_QGIS	
04_R_Skripte	
05_Querprofile	
06_Excel	

Anhang 1: Topografische Karte des Untersuchungsgebiets (Quelle DGM1: (LAIv, 2020))



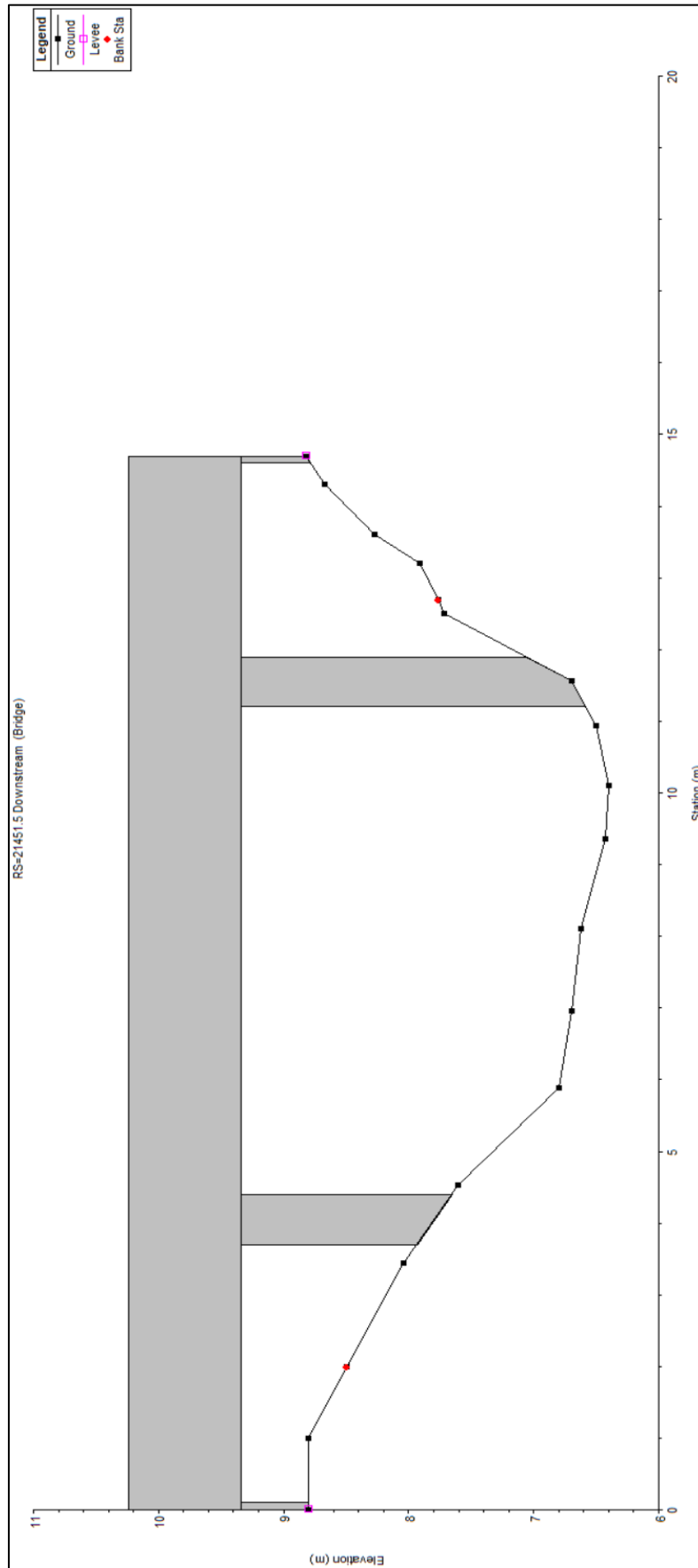
## Anhang 2: Landnutzungskarte nach CORINE LandCover



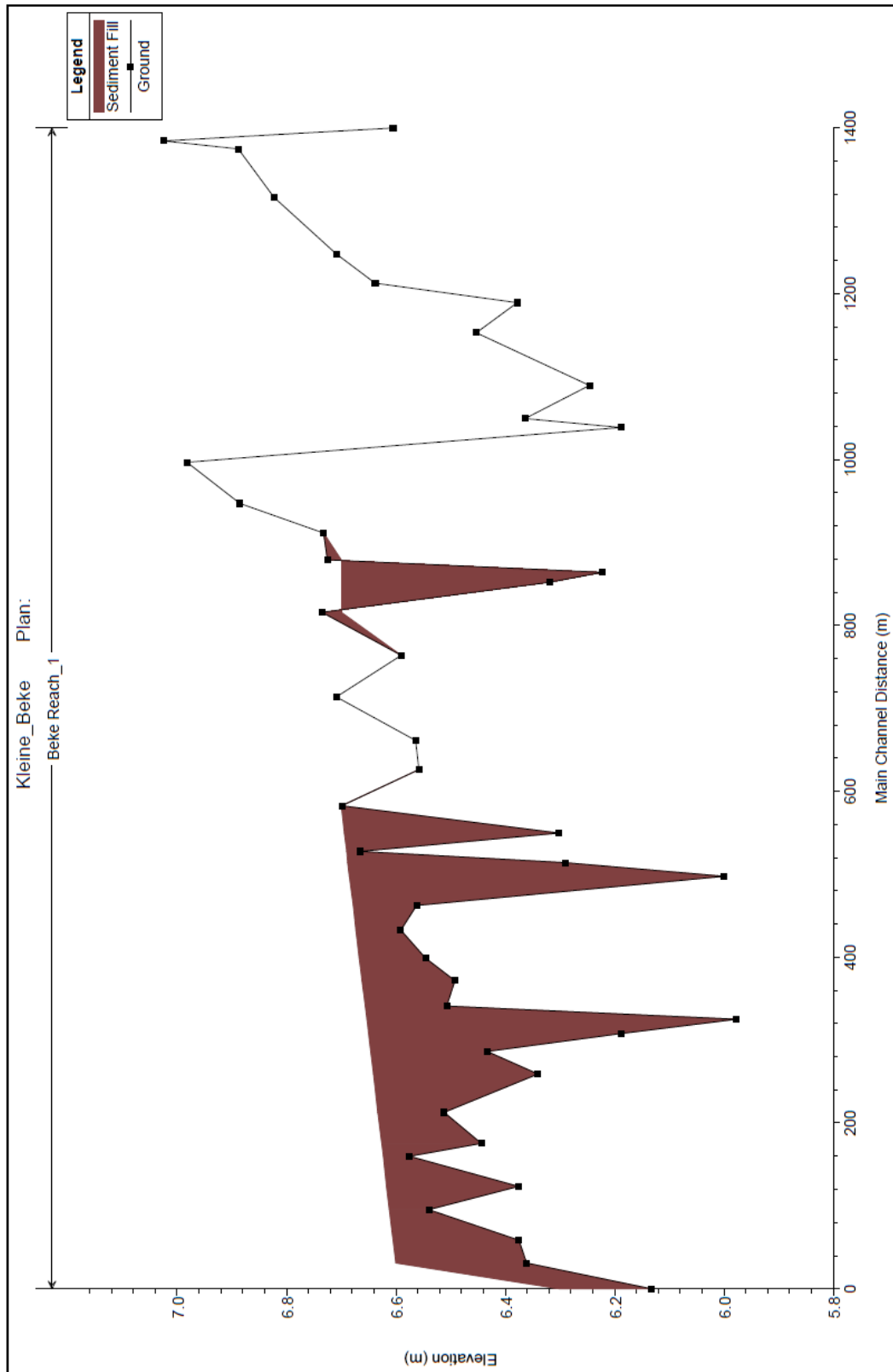
## Anhang 3: Verwendete QGIS-Werkzeuge (Version 3.40.0)

Werkzeug	Zweck
Abstand zum nächsten Knoten (Punkte)	Ermittlung Stationierung ausgehend von in Fließrichtung linker Querprofilseite
Attribute nach nächstem verknüpfen	Zuweisen einer Stationsnummer zu den Querprofilen
Attribute nach Position verknüpfen	Messpunkten eine Querprofilnummer zuweisen
Feldrechner	Reprojizierte Koordinaten der Messpunkte abspeichern (\$x, \$y)
Geometrien auf Layer einrasten	Messpunkte auf ein Querprofil verschieben
Linien Schnittpunkte	Ermittlung Schnittpunkte Gewässerachse und Querprofile
Layer reprojizieren	Layer in einheitliches KRS überführen (EPSG-Code: 25833)
LRS	Erweiterung zur Ermittlung der Querprofilstationierung entlang der Gewässerachse aus einem Punktlayer mit bekannten Stationswerten
Puffer	1,5 m Radius um Querprofile
Punktlayer aus Tabelle erzeugen	Messpunkte als Layer in QGIS importieren (Attribute: X, Y, Z, Code)

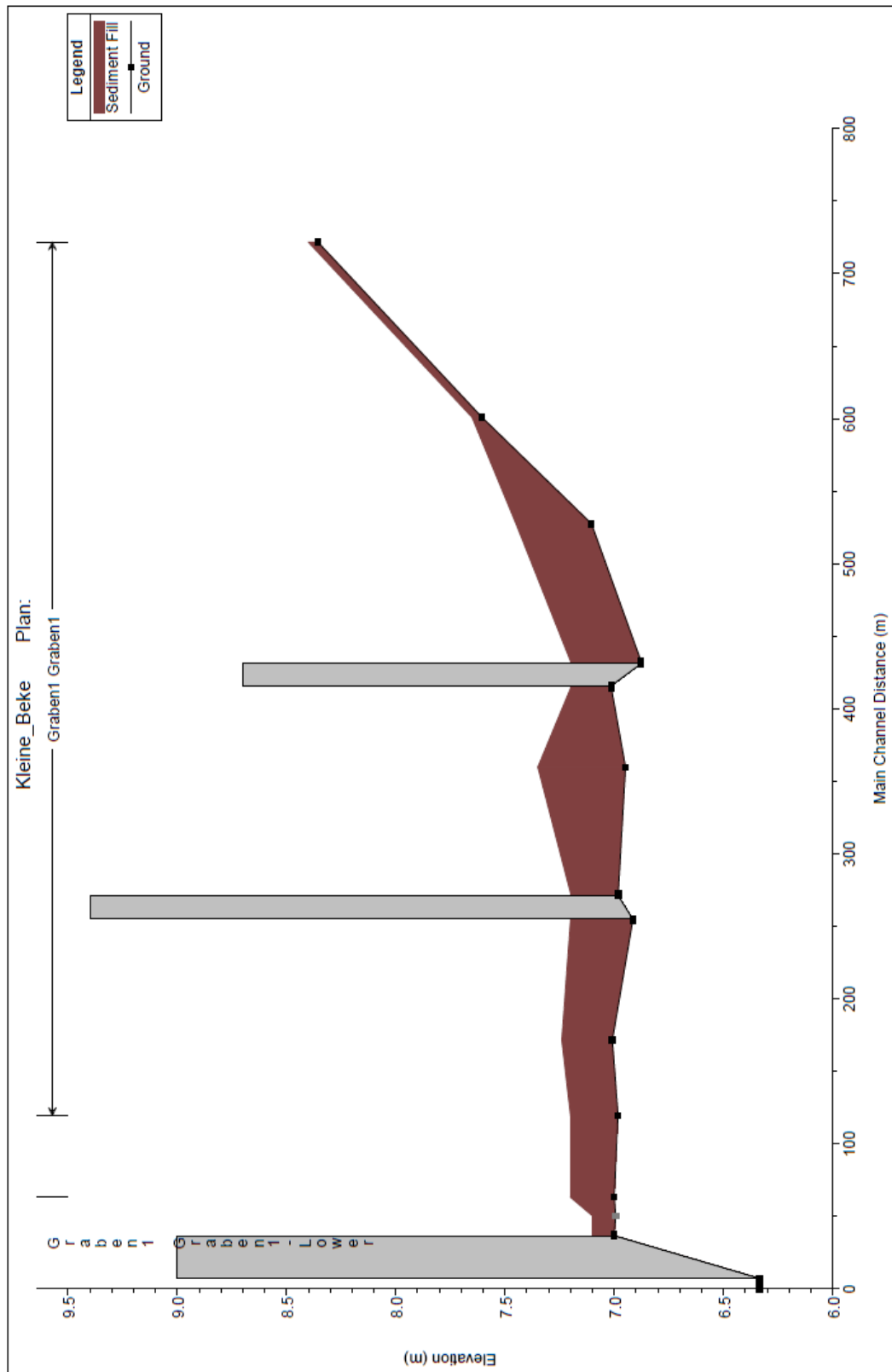
Anhang 4: Darstellung des Brückenbauwerks in HEC-RAS (Version 6.6)



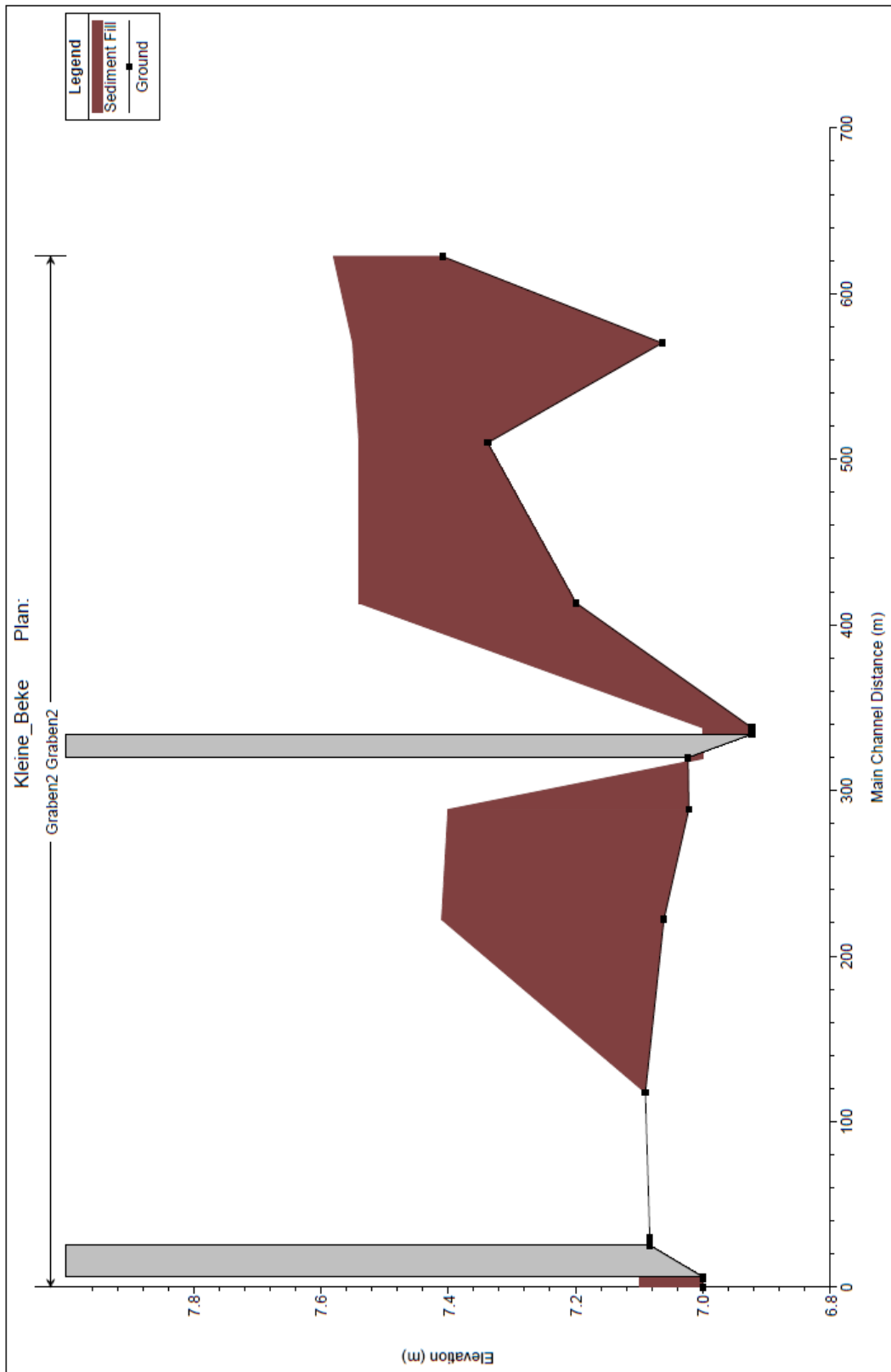
Anhang 5: Modellerte Sedimenthöhen Kleine Beke (Oberlauf: Station 21+814 bis 23+214)



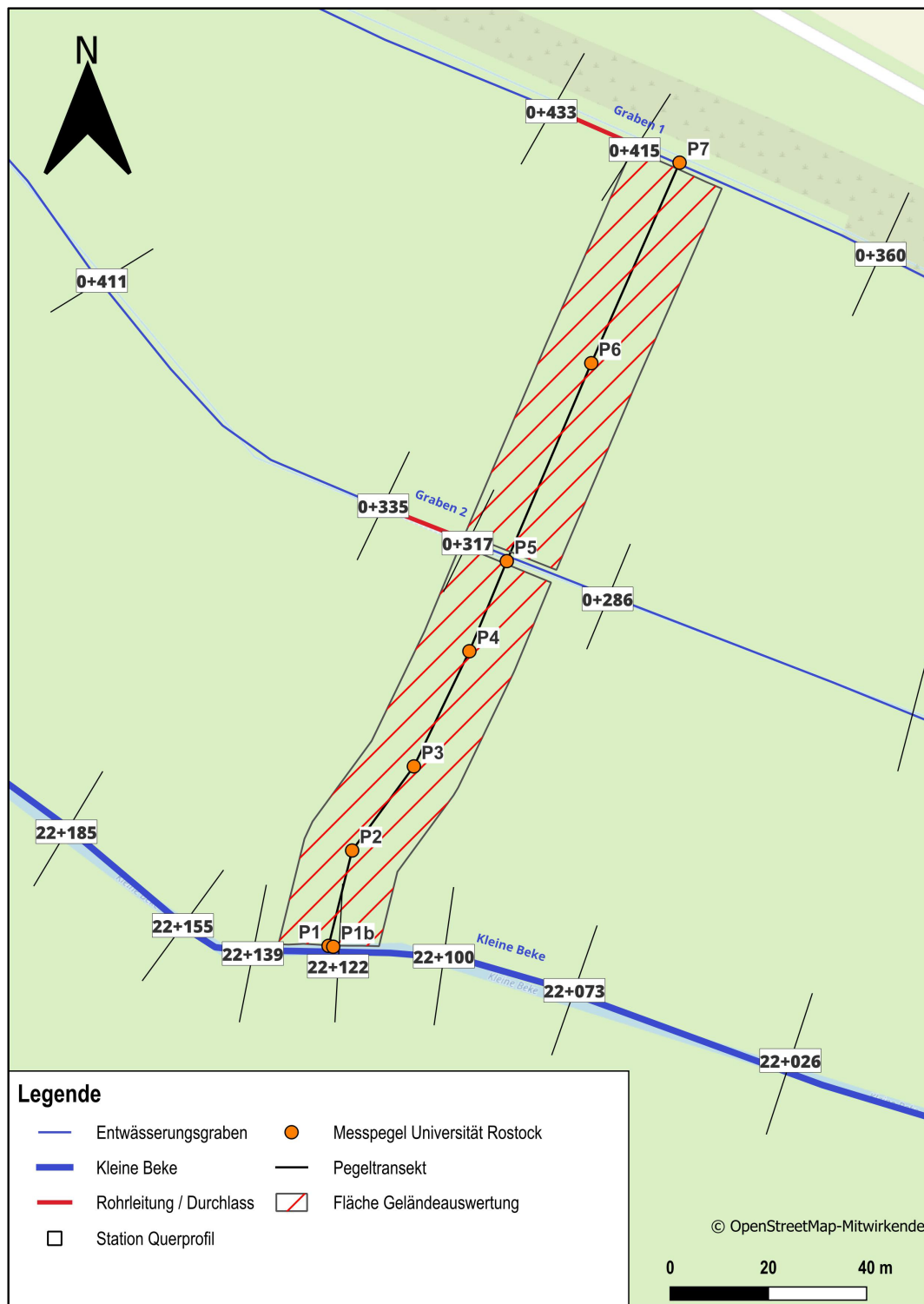
Anhang 6: Modellerte Sedimenthöhen Graben 1 (Station 0+000 bis 0+722)



Anhang 7: Modellerte Sedimenthöhen Graben 2 (Station 0+000 bis 0+620)

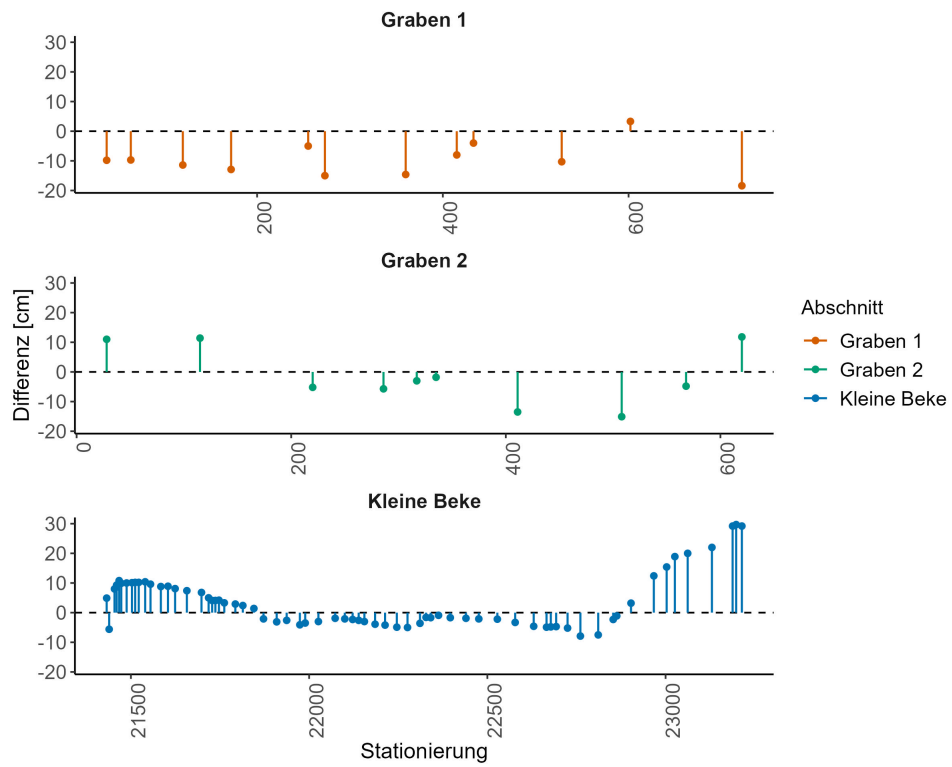


Anhang 8: Pegeltransekt und Ausdehnung der ausgewerteten Flächen

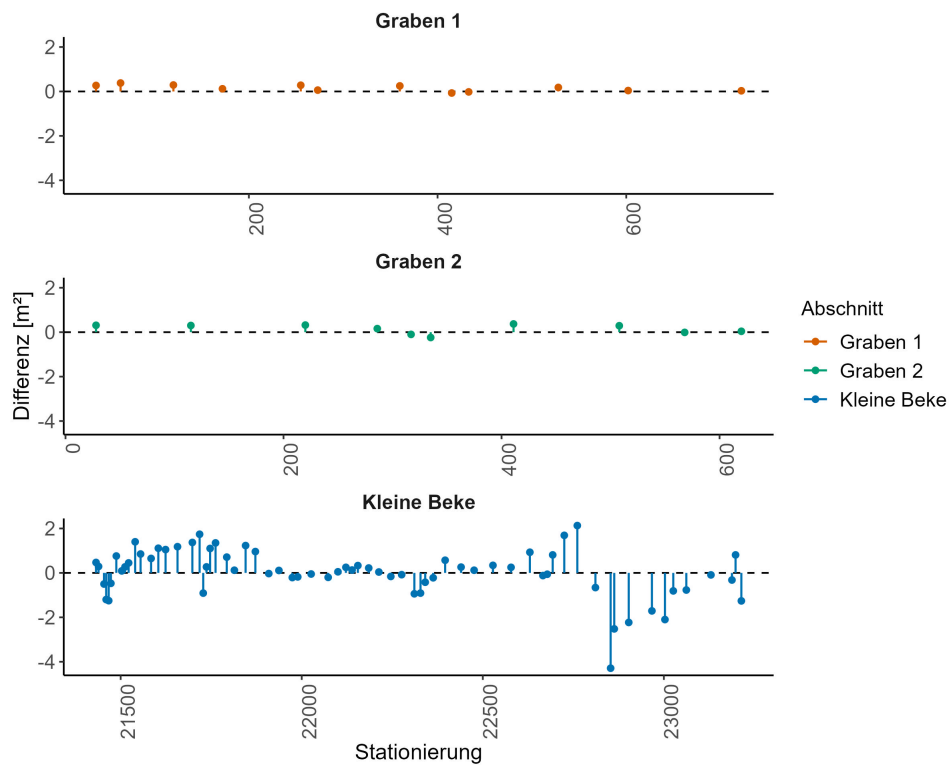


Anhang 9: Modellvergleich - Szenario 1

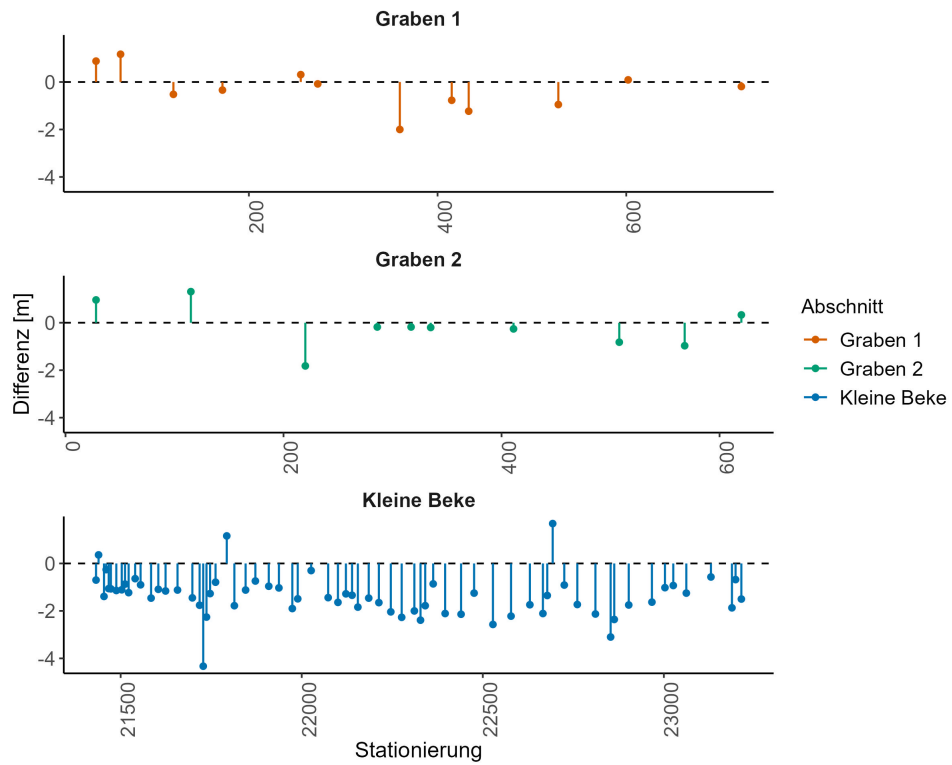
Szenario 1: Wasserstandsdifferenz zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell



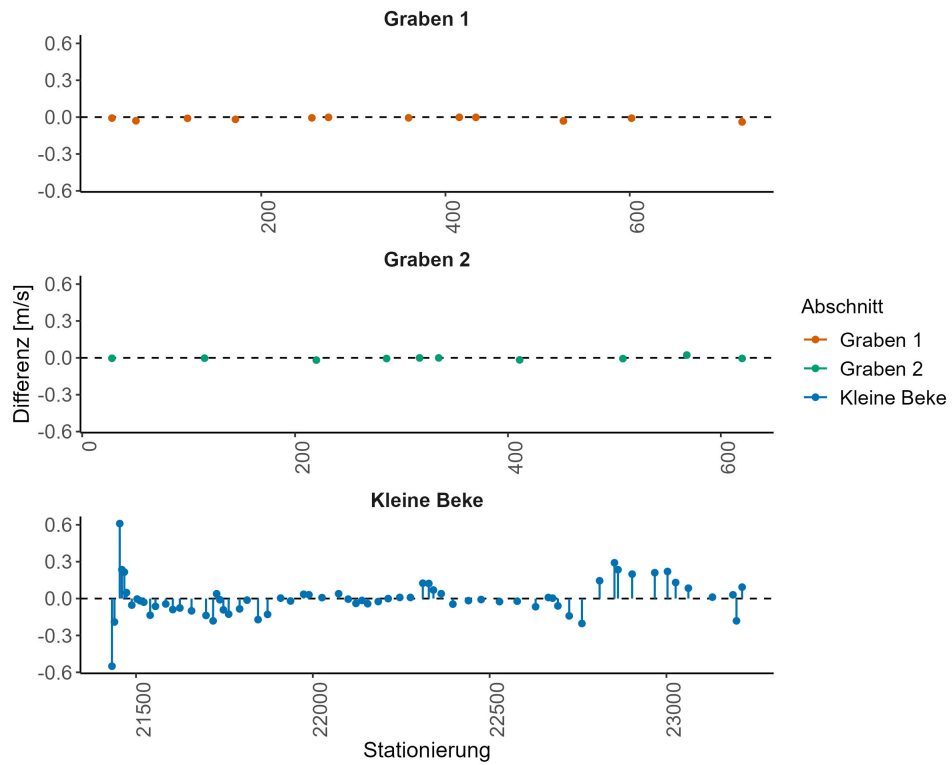
Szenario 1: Differenz der Fließquerschnitte zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell



**Szenario 1: Differenz der Wasserspiegelbreiten zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell**



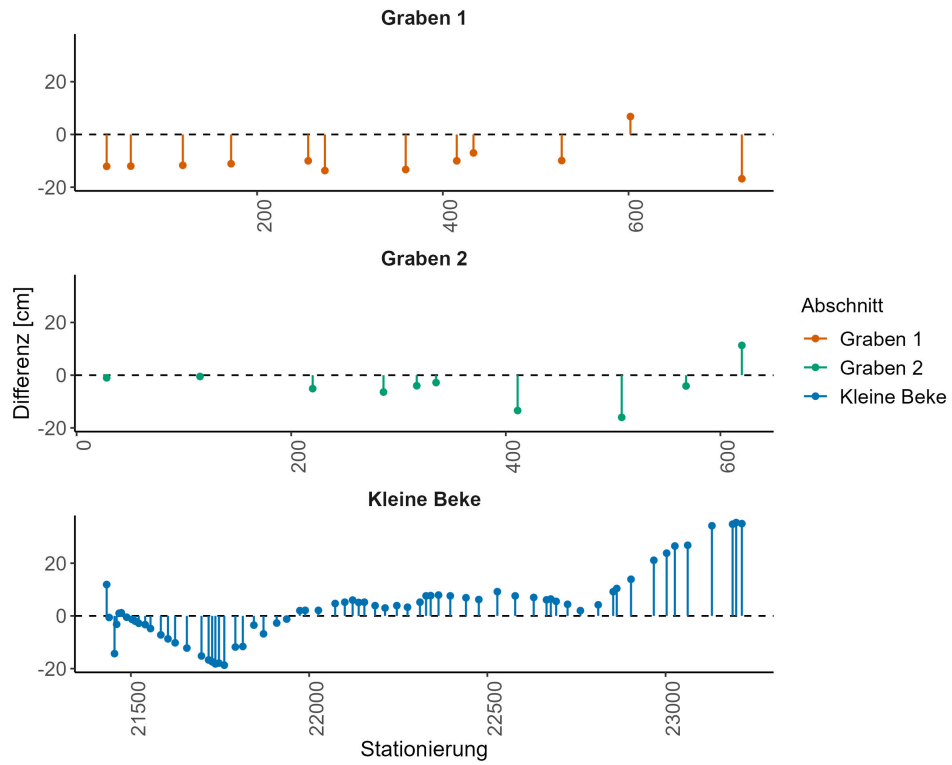
**Szenario 1: Differenzen der Fließgeschwindigkeiten zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell**



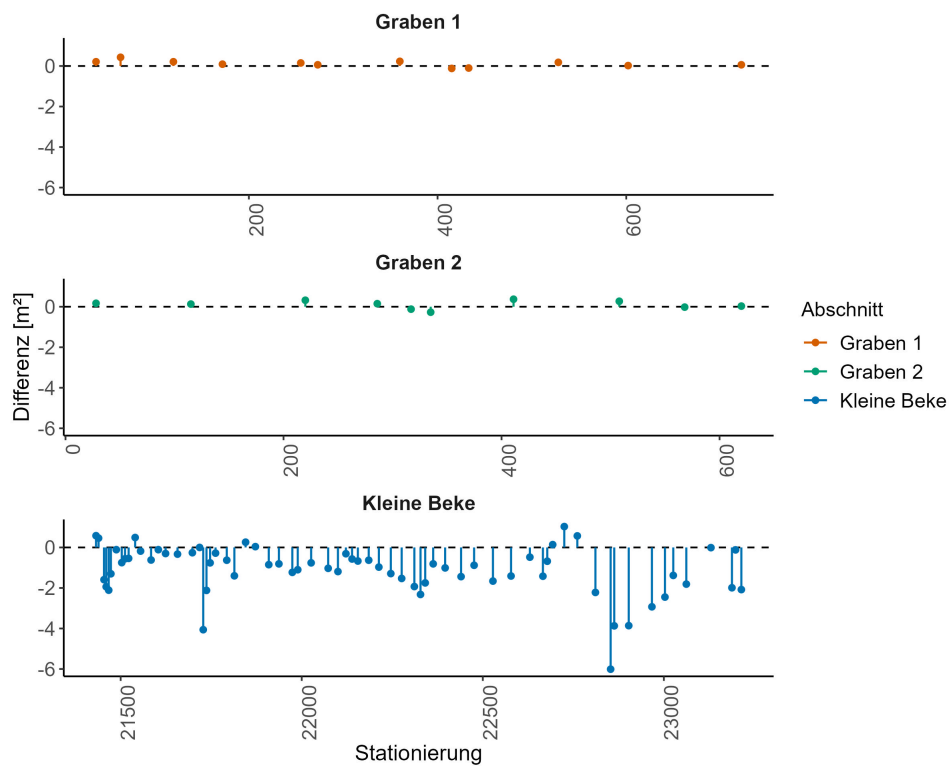


Anhang 10: Modellvergleich - Szenario 2

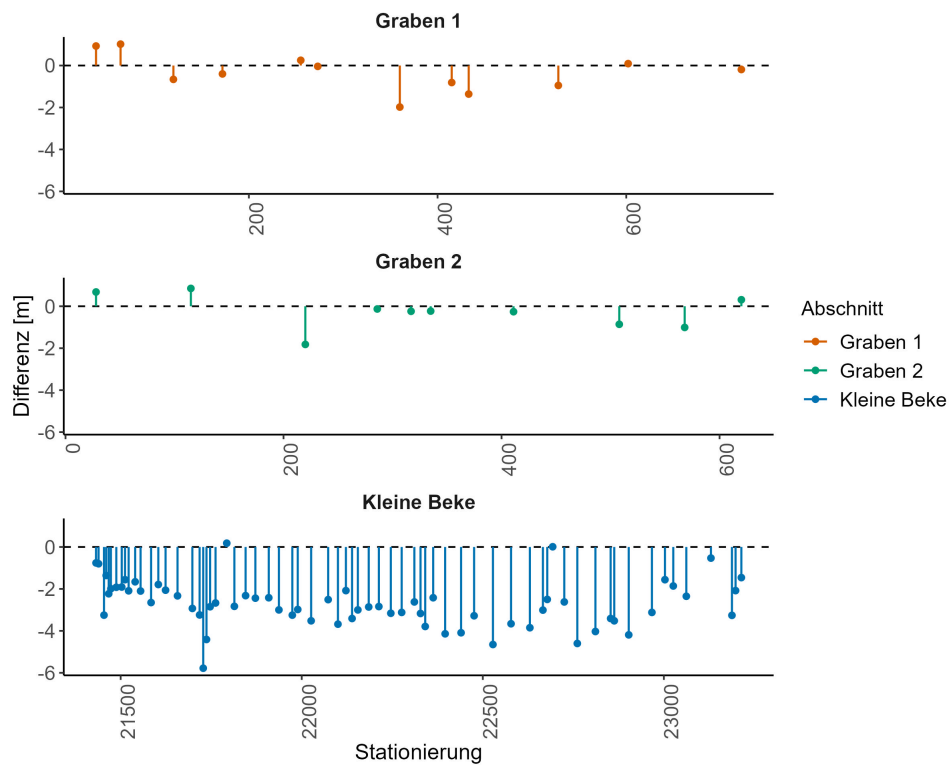
Szenario 2: Wasserstandsunterschied zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell



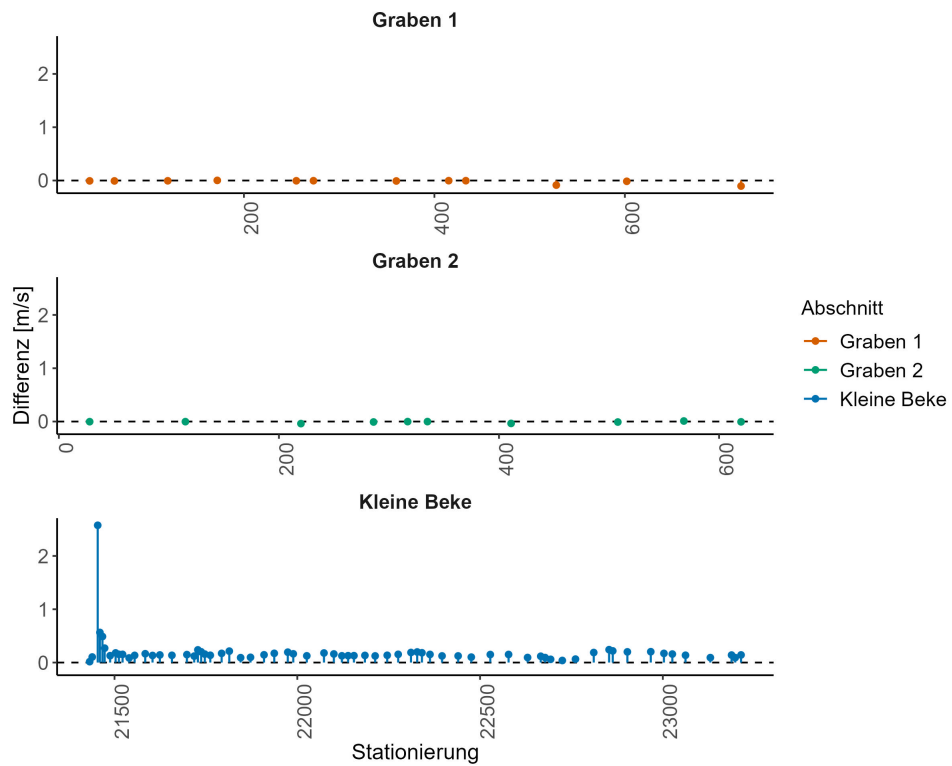
Szenario 2: Differenz der Fließquerschnitte zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell



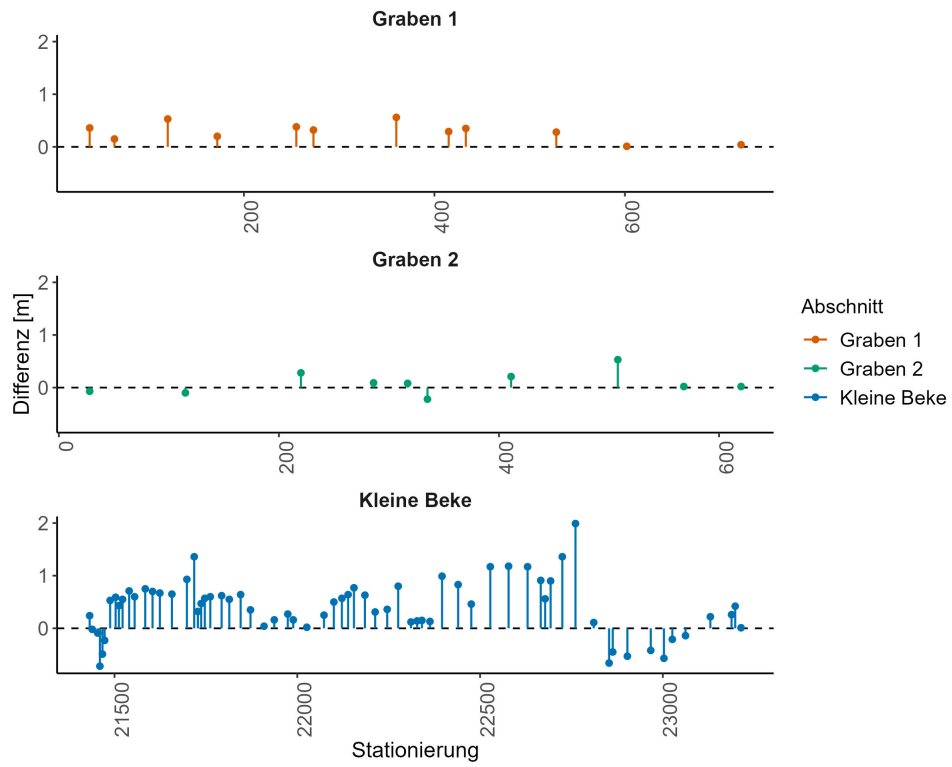
**Szenario 2: Differenz der Wasserspiegelbreiten zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell**



**Szenario 2: Differenzen der Fließgeschwindigkeiten zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell**

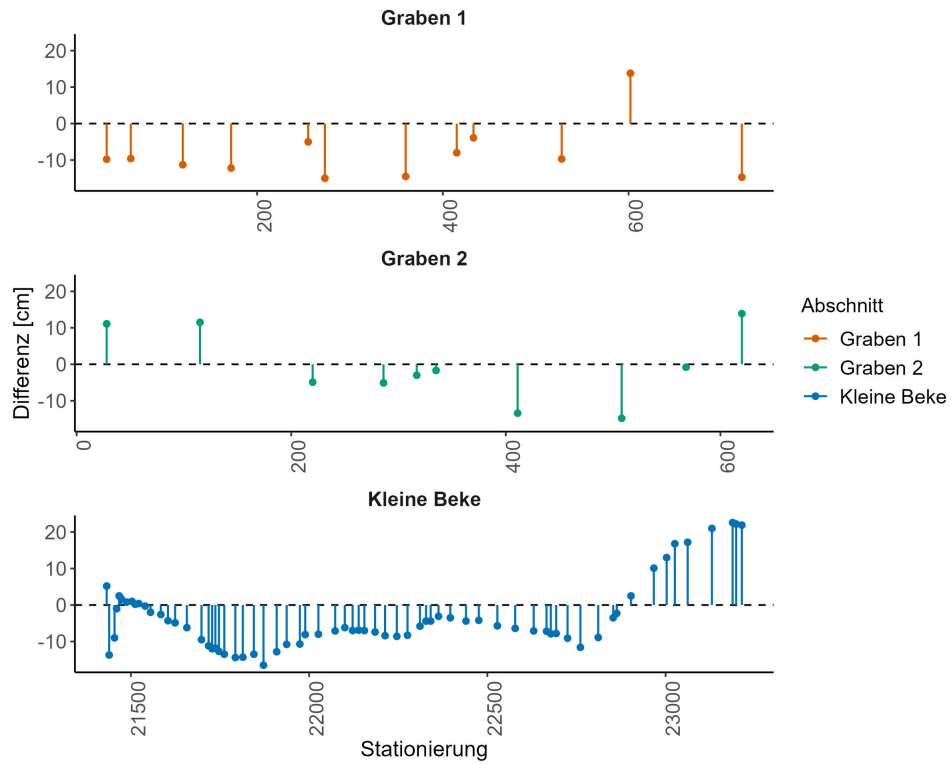


**Szenario 2: Differenzen der Tiefen zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell**

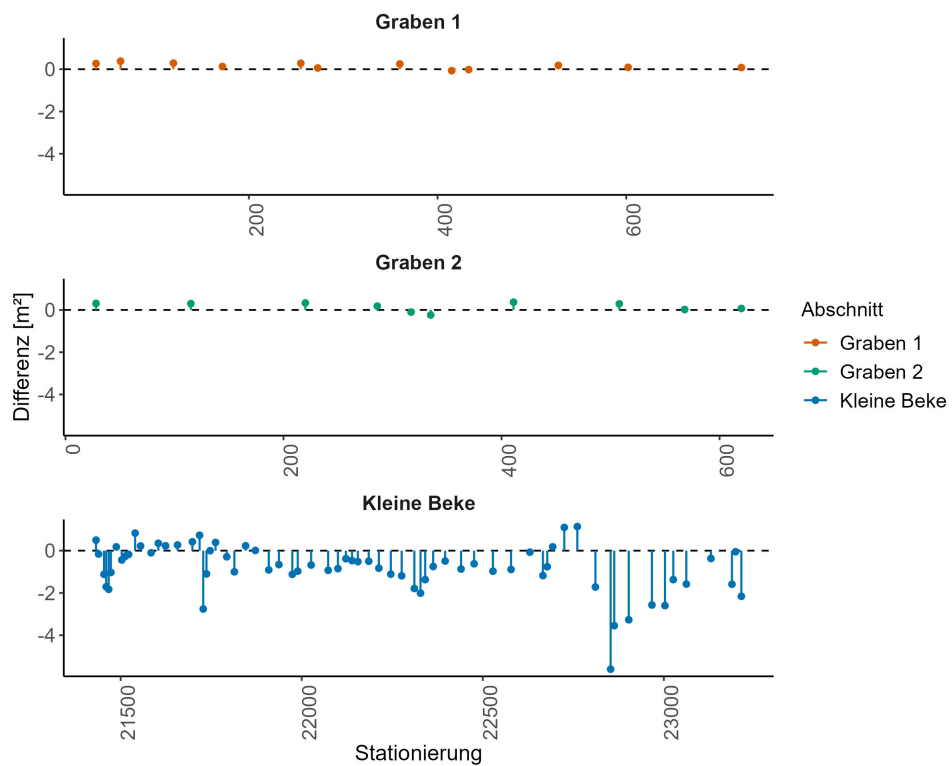


Anhang 11: Modellvergleich - Szenario 3

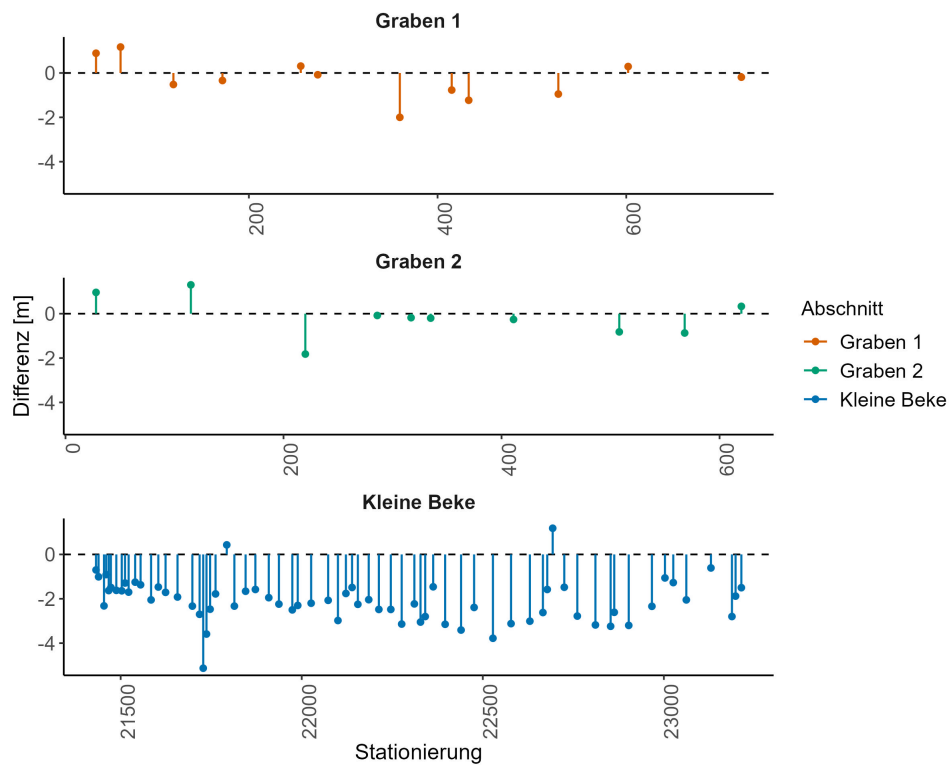
Szenario 3: Wasserstandsunterschied zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell



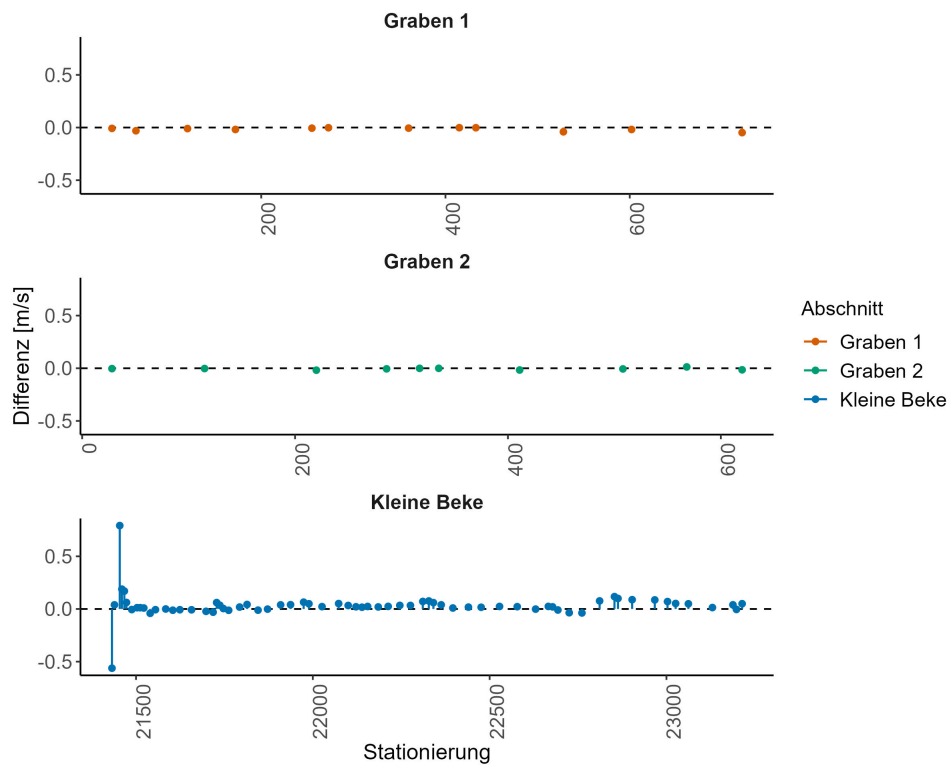
Szenario 3: Differenz der Fließquerschnitte zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell



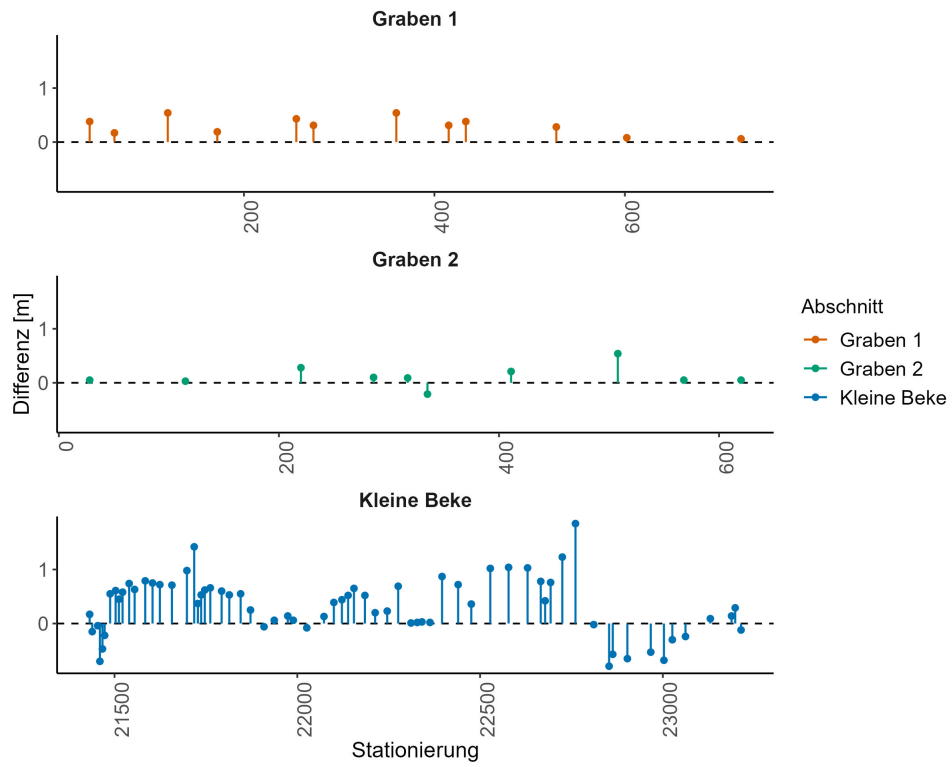
**Szenario 3: Differenz der Wasserspiegelbreiten zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell**



**Szenario 3: Differenzen der Fließgeschwindigkeiten zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell**

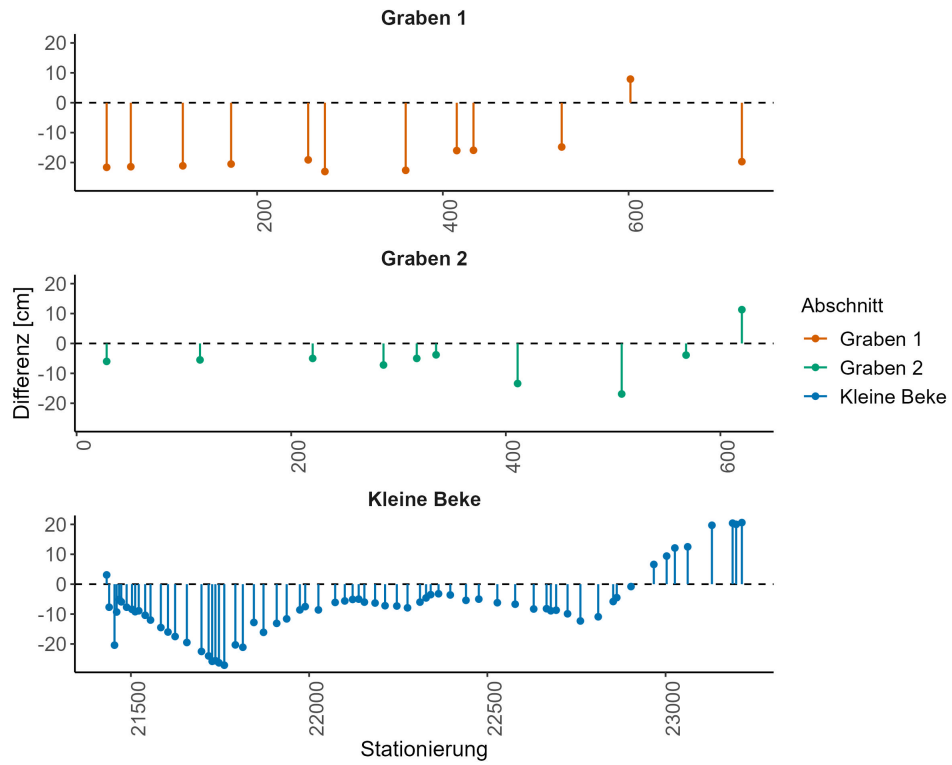


**Szenario 3: Differenzen der Tiefen zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell**

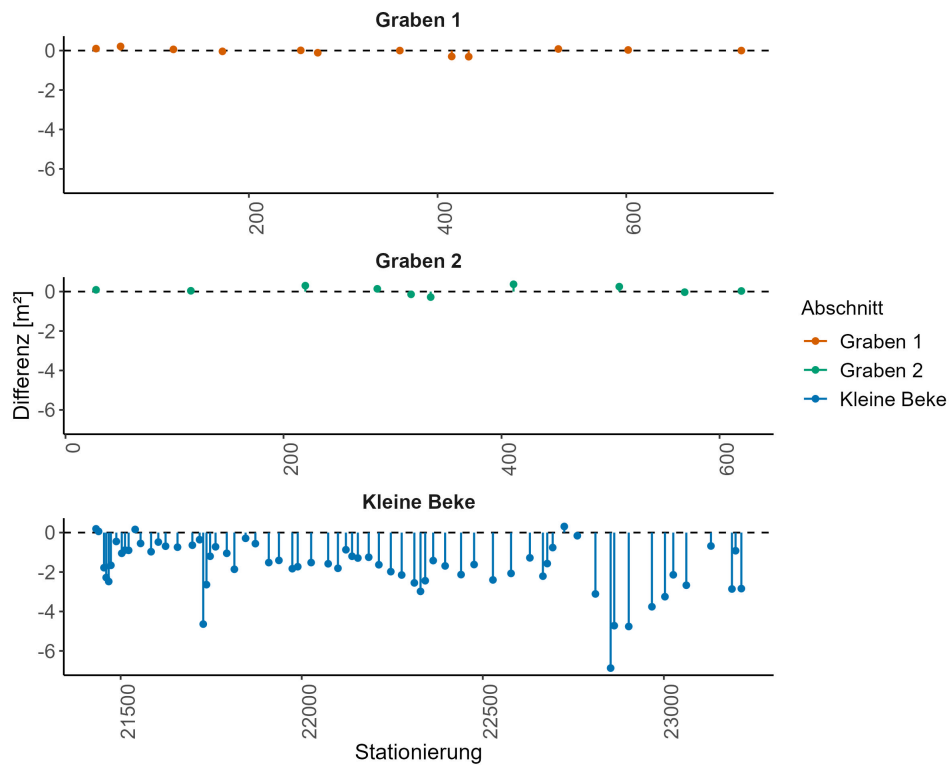


Anhang 12: Modellvergleich - Szenario 4

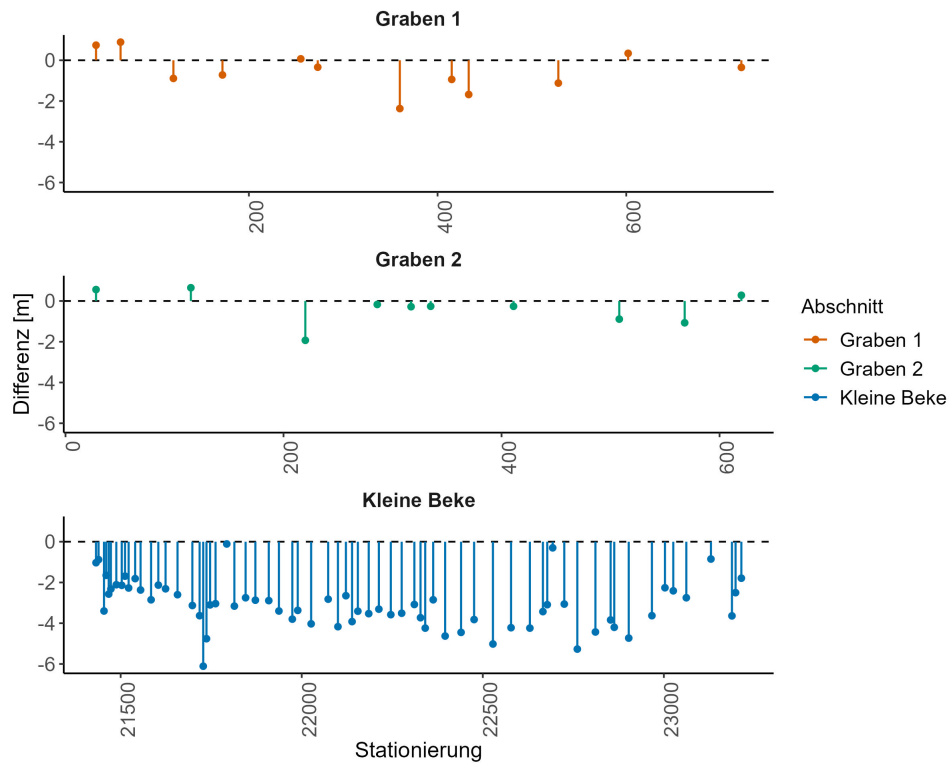
Szenario 4: Wasserstandsdifferenz zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell



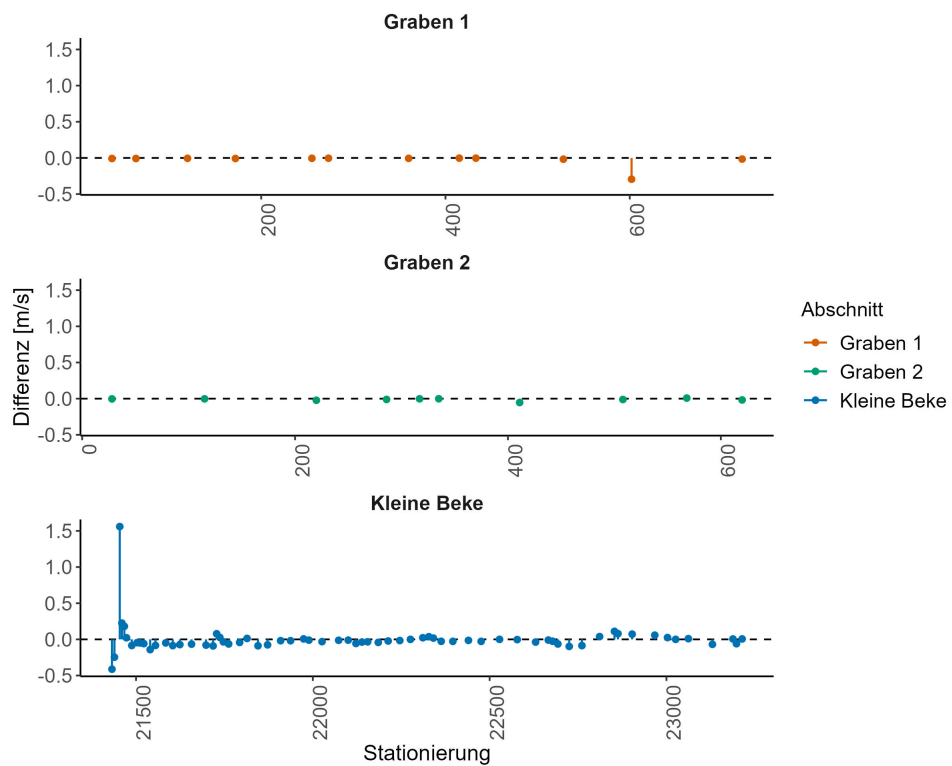
Szenario 4: Differenz der Fließquerschnitte zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell



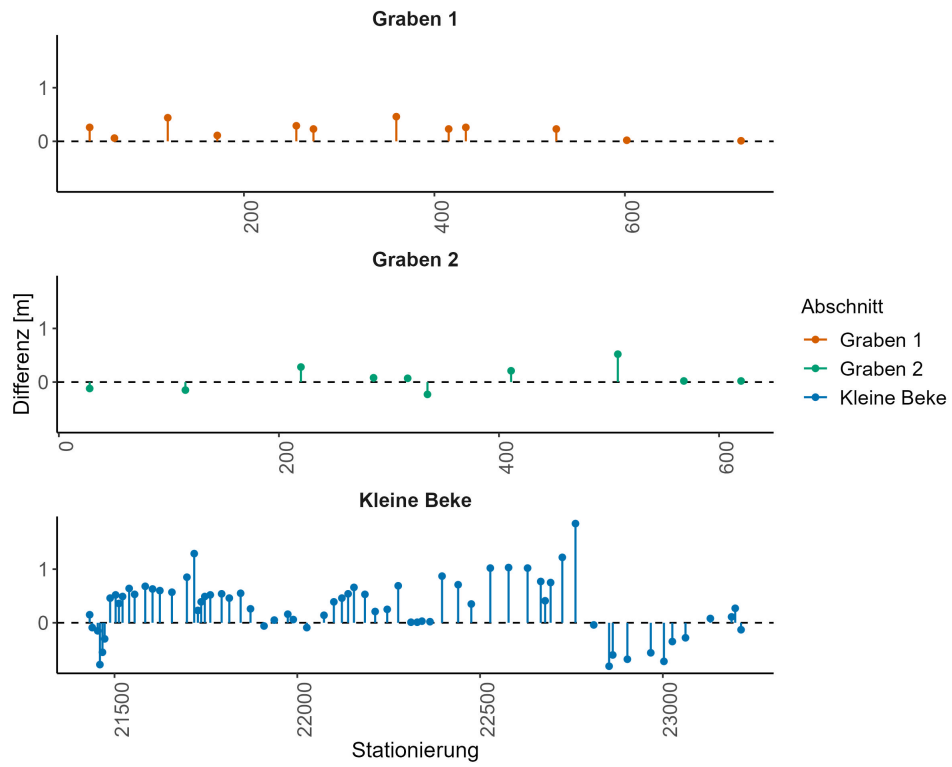
**Szenario 4: Differenz der Wasserspiegelbreiten zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell**



**Szenario 4: Differenzen der Fließgeschwindigkeiten zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell**



**Szenario 4: Differenzen der Tiefen zwischen GIS- und HEC-RAS-Modell**



## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit bestätige ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Die Stellen der Arbeit, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach anderen Werken entnommen sind, wurden unter Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Ort, Datum Unterschrift