

Professur für Hydrologie

Der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Christian Bernhart

Tiefenanalyse ausgewählter Abschnitte der Binnenelbe

Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg i. Br., Februar 2017

Professur für Hydrologie
der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.

Christian Bernhart

Matrikel-Nr. 3112234

Tiefenanalyse ausgewählter Abschnitte der Binnenelbe

Masterarbeit in Kooperation mit der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

Referent: Prof. Dr. Markus Weiler

Korreferent: Prof. Dr. Frank Preusser

Betreuung seitens der BAW: Dipl.-Ing. Petra Faulhaber

Masterarbeit unter Leitung von Prof. Dr. Markus Weiler

Freiburg i. Br., Februar 2017

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	V
Tabellenverzeichnis	IX
Anhangsverzeichnis	XI
Zusammenfassung.....	XIII
1 Einleitung.....	1
1.1 Einzugsgebiet und Hydrologie der Elbe	1
1.2 Geschiebetransport und Sohlenvariabilität.....	6
1.3 Ausbau und Schiffbarkeit der Elbe	10
1.4 Echolot-Messsysteme zur Peilung von Flusssohlen.....	11
2 Problemstellung und Zielsetzung	14
3 Betrachtete Teilabschnitte der Elbe	16
3.1 Lage und Kurzcharakterisierung der Streckenabschnitte	16
3.2 Kornzusammensetzung und Beweglichkeit der Flusssohle	19
4 Methoden und Vorgehensweisen	22
4.1 Datenauswahl/Datengrundlage.....	22
4.2 Datenaufbereitung	23
4.2.1 Neurasterung der Daten.....	24
4.2.2 Auswahl gleicher Auswerteelemente („Ausdünnen“)......	24
4.2.3 Normierung zur Auswertung von Tiefen	25
4.2.4 Auslesen von Wassertiefen	26
4.2.5 Gefiltertes Auslesen von Wassertiefen	28
4.3 Datenauswertung	29
4.3.1 Abdeckungsgrad der Daten	30
4.3.2 Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen	30
4.3.3 Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Wassertiefen	31

4.3.4	Auswertung des durchschnittlichen Kammweges.....	32
4.3.5	Räumliche Verteilung von Fehlflächen	33
4.3.6	Fehlfläche pro Tiefenschicht.....	33
4.3.7	Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel	34
4.3.8	Vergleich mit anderen Daten.....	35
4.4	Auswertung von Elbe-km 510 – 530.....	35
5	Ergebnisse.....	36
5.1	Elbe-km 40 – 60	36
5.1.1	Datengrundlage	36
5.1.2	Abdeckungsgrad der Daten	36
5.1.3	Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen	37
5.1.4	Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Wassertiefen	38
5.1.5	Auswertung tiefenbestimmender Stellen	39
5.1.6	Räumliche Verteilung von Fehlflächen	44
5.1.7	Fehlfläche pro Tiefenschicht.....	45
5.1.8	Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel	46
5.2	Elbe-km 220 – 240	48
5.2.1	Datengrundlage	48
5.2.2	Abdeckungsgrad der Daten	48
5.2.3	Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen	49
5.2.4	Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Wassertiefen	50
5.2.5	Auswertung tiefenbestimmender Stellen	51
5.2.6	Räumliche Verteilung von Fehlflächen	56
5.2.7	Fehlfläche pro Tiefenschicht.....	57
5.2.8	Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel	58
5.3	Elbe-km 320 – 340	60
5.3.1	Datengrundlage	60
5.3.2	Abdeckungsgrad der Daten	61

5.3.3	Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen	61
5.3.4	Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Wassertiefen	63
5.3.5	Auswertung tiefenbestimmender Stellen	63
5.3.6	Räumliche Verteilung von Fehlflächen	68
5.3.7	Fehlfläche pro Tiefenschicht.....	69
5.3.8	Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel	70
5.4	Elbe-km 420 – 440	72
5.4.1	Datengrundlage	72
5.4.2	Abdeckungsgrad der Daten	73
5.4.3	Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen	73
5.4.4	Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Wassertiefen	74
5.4.5	Auswertung tiefenbestimmender Stellen	75
5.4.6	Räumliche Verteilung von Fehlflächen	80
5.4.7	Fehlfläche pro Tiefenschicht.....	81
5.4.8	Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel	82
5.5	Elbe-km 510 – 530	84
5.5.1	Datengrundlage	84
5.5.2	Auswertung tiefenbestimmender Stellen	84
5.5.3	Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel	85
5.6	Vergleich mit anderen Daten.....	87
6	Diskussion	89
6.1	Interpretation der Ergebnisse.....	89
6.2	Unsicherheiten der Ergebnisse	94
7	Fazit.....	98
8	Quellenverzeichnis	100
9	Anhang.....	105
	Ehrenwörtliche Erklärung.....	120

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1.1:	Verlauf der Elbe inklusive den Einzugsgebieten bedeutender Nebenflüsse	2
Abbildung 1.1.2:	Quotient aus langjährigen Mittelwerten aus Monats- und Jahresabfluss	4
Abbildung 1.1.3:	Abflussregime entlang des Rheins.....	5
Abbildung 1.1.4:	Abflussquotienten (MQ_{Monat}/MQ_{Jahr}) entlang der Elbe und des Rheins.....	6
Abbildung 1.2.1:	Substratverteilung der Elbesohle	7
Abbildung 1.2.2:	Längsschnitt der Geschiebefracht	9
Abbildung 1.2.3:	Vergleich zwischen mittleren Korngrößen dm der Sohle und des Geschiebes	9
Abbildung 1.4.1:	Einzelstrahl-Echolotung	12
Abbildung 1.4.2:	Auslegersysteme.....	13
Abbildung 1.4.3:	Fächerecholot	13
Abbildung 3.1.1:	Übersichtskarte der betrachteten Teilabschnitte	16
Abbildung 3.1.2:	Domfelsen zwischen Elbe-km 325,5 und 326.....	18
Abbildung 3.1.3:	Gefälleverlauf zwischen Elbe-km 320 und 340	18
Abbildung 3.2.1:	Kornzusammensetzung der Flusssohle mit Markierungen der betrachteten Teilabschnitte	20
Abbildung 4.1.1:	Auswirkung von Brückenabschattungen auf Peilungen	23
Abbildung 4.2.1:	Weitergabe von Datenlücken durch das „Ausdünnen“	24
Abbildung 4.2.2:	Ausschnitt der drei konstruierten Linienzüge	27
Abbildung 4.2.3:	Beispielhaftes 30x100-m-Polygon entlang des mittleren Linienzugs.....	28
Abbildung 4.2.4:	Ausschnitte aus den berechneten Ausgabedateien von FIKS	28
Abbildung 4.2.5:	Darstellung der Wassertiefen zwischen Elbe-km 332 und 332,5	29
Abbildung 4.3.1:	Vergleich der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten	32
Abbildung 5.1.1:	Abflussganglinie am Pegel Dresden (Elbe-km 55,63) inklusive betrachteter und aussortierter Peilungen	36
Abbildung 5.1.2:	Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen der verschiedenen Peilungen zwischen Elbe-km 40 und 60	37

Abbildung 5.1.3:	Unterschreitungswahrscheinlichkeit von Wassertiefen der einzelnen Peilungen inklusive der angenommenen Solltiefe von 1,6 m unter GIW zwischen Elbe-km 40 und 60.....	38
Abbildung 5.1.4:	Kammweg entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs mit maximalem Schwankungsbereich zwischen Elbe-km 40 bis 60	41
Abbildung 5.1.5:	Kammweg entlang des linken Fahrrinnenbereichs mit maximalem Schwankungsbereich zwischen Elbe-km 40 bis 60	42
Abbildung 5.1.6:	Kammweg entlang des rechten Fahrrinnenbereichs mit maximalem Schwankungsbereich zwischen Elbe-km 40 bis 60	42
Abbildung 5.1.7:	Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 40 und 60 darstellen.....	43
Abbildung 5.1.8:	Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des linken Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 40 und 60 darstellen.....	43
Abbildung 5.1.9:	Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des rechten Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 40 und 60 darstellen.....	44
Abbildung 5.1.10:	Kumulierte Fehlflächen der Peilungen zwischen Elbe-km 40 bis 60	45
Abbildung 5.1.11:	Verteilung der Fehlflächen pro Tiefenschicht entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs des Abschnitts von Elbe-km 40 bis 60.....	46
Abbildung 5.1.12:	Wasserspiegelverläufe im Längsschnitt zwischen Elbe-km 40 und 60.....	47
Abbildung 5.1.13:	Differenz zwischen W(MeQ) und W(GIQ) von Elbe-km 40 bis 60	47
Abbildung 5.2.1:	Abflussganglinie am Pegel Wittenberg (Elbe-km 214,14) inklusive betrachteter und aussortierter Peilungen	48
Abbildung 5.2.2:	Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen der verschiedenen Peilungen zwischen Elbe-km 220 und 240.....	50
Abbildung 5.2.3:	Unterschreitungswahrscheinlichkeit von Wassertiefen der einzelnen Peilungen inklusive der angenommenen Solltiefe von 1,6 m unter GIW	51
Abbildung 5.2.4:	Durchschnittlicher Kammweg entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs von Elbe-km 220 - 240 mit maximalem Schwankungsbereich	53
Abbildung 5.2.5:	Durchschnittlicher Kammweg entlang des linken Fahrrinnenbereichs von Elbe-km 220 - 240 mit maximalem Schwankungsbereich.....	54
Abbildung 5.2.6:	Durchschnittlicher Kammweg entlang des rechten Fahrrinnenbereichs von Elbe-km 220 – 240 mit maximalem Schwankungsbereich	54
Abbildung 5.2.7:	Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 220 und 240 darstellen.....	55

Abbildung 5.2.8:	Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des linken Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 220 und 240 darstellen.....	55
Abbildung 5.2.9:	Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des rechten Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 220 und 240 darstellen.....	56
Abbildung 5.2.10:	Kumulierte Fehlflächen der Peilungen zwischen Elbe-km 220 und 240	57
Abbildung 5.2.11:	Verteilung der Fehlflächen pro Tiefenschicht entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs von Elbe-km 220 – 240.....	58
Abbildung 5.2.12:	Wasserspiegelverläufe im Längsschnitt zwischen Elbe-km 220 und 240.....	59
Abbildung 5.2.13:	Differenz zwischen W(MeQ) und W(GIQ) von Elbe-km 220 bis 240	59
Abbildung 5.3.1:	Abweichung von Fahrrinne 2013 (rot) zu Fahrrinne 2008 (grün).....	60
Abbildung 5.3.2:	Abflussganglinie am Pegel Magdeburg (Elbe-km 326,67) inklusive betrachteter und aussortierter Peilungen	61
Abbildung 5.3.3:	Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen von verschiedenen Peilungen zwischen Elbe-km 320 und 340.....	62
Abbildung 5.3.4:	Unterschreitungswahrscheinlichkeit von Wassertiefen der einzelnen Peilungen inklusive angenommener Solltiefe von 1,6 m unter GIW	63
Abbildung 5.3.5:	Kammweg entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs mit maximalem Schwankungsbereich zwischen Elbe-km 320 und 340	65
Abbildung 5.3.6:	Kammweg entlang des linken Fahrrinnenbereichs mit maximalem Schwankungsbereich zwischen Elbe-km 320 und 340	66
Abbildung 5.3.7:	Kammweg entlang des rechten Fahrrinnenbereichs mit maximalem Schwankungsbereich zwischen Elbe-km 320 und 340	67
Abbildung 5.3.8:	Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 320 und 340 darstellen.....	67
Abbildung 5.3.9:	Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des linken Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 320 und 340 darstellen.....	68
Abbildung 5.3.10:	Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des rechten Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 320 und 340 darstellen.....	68
Abbildung 5.3.11:	Kumulierte Fehlflächen der Peilungen zwischen Elbe-km 320 und 340	69
Abbildung 5.3.12:	Verteilung der Fehlflächen pro Tiefenschicht entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 320 und 340.....	70
Abbildung 5.3.13:	Wasserspiegelverläufe im Längsschnitt zwischen Elbe-km 320 und 340.....	71
Abbildung 5.3.14:	Differenz zwischen W(MeQ) und W(GIQ) von Elbe-km 320 bis 340	71

Abbildung 5.4.1:	Abflussganglinie am Pegel Wittenberge (Elbe-km 453,98) inklusive betrachteter und aussortierter Peilungen	72
Abbildung 5.4.2:	Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen von verschiedenen Peilungen zwischen Elbe-km 420 und 440.....	74
Abbildung 5.4.3:	Unterschreitungswahrscheinlichkeit von Wassertiefen der einzelnen Peilungen inklusive der angenommenen Solltiefe von 1,6 m unter GIW des Teilabschnitts von Elbe-km 420 bis 440	75
Abbildung 5.4.4:	Durchschnittlicher Kammweg entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs von Elbe-km 420 - 440 mit maximalem Schwankungsbereich	77
Abbildung 5.4.5:	Durchschnittlicher Kammweg entlang des linken Fahrrinnenbereichs von Elbe-km 420 - 440 mit maximalem Schwankungsbereich.....	78
Abbildung 5.4.6:	Durchschnittlicher Kammweg entlang des rechten Fahrrinnenbereichs von Elbe-km 420 - 440 mit maximalem Schwankungsbereich.....	78
Abbildung 5.4.7:	Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 420 und 440 darstellen.....	79
Abbildung 5.4.8:	Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des linken Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 420 und 440 darstellen.....	80
Abbildung 5.4.9:	Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des rechten Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 420 und 440 darstellen.....	80
Abbildung 5.4.10:	Kumulierte Fehlflächen der Peilungen zwischen Elbe-km 420 und 440	81
Abbildung 5.4.11:	Verteilung der Fehlflächen pro Tiefenschicht entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 420 und 440.....	82
Abbildung 5.4.12:	Wasserspiegelverläufe im Längsschnitt zwischen Elbe-km 420 und 440.....	83
Abbildung 5.4.13:	Differenz zwischen W(MeQ) und W(GIQ) von Elbe-km 420 bis 440	83
Abbildung 5.5.1:	Abflussganglinie am Pegel Neu Darchau (Elbe-km 536,44) inklusive betrachteter und aussortierter Peilungen	84
Abbildung 5.5.2:	Wasserspiegelverläufe im Längsschnitt zwischen Elbe-km 510 und 530.....	86
Abbildung 5.5.3:	Differenz zwischen W(MeQ) und W(GIQ) von Elbe-km 510 bis 530	86
Abbildung 5.6.1:	Beispielhafte Darstellungen der Peilung 2014 um Elbe-km 44,5. Oben: Darstellung des WSV; Unten: eigene Darstellung;.....	88
Abbildung 6.2.1:	Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Peilung 2016 (Elbe-km 40 - 60), inklusive Unsicherheitsbereich.....	96

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1.1:	Durchschnittliche Gefälle der fünf betrachteten Teilabschnitte der Elbe	17
Tabelle 3.1.2:	Hydrologische Kenngrößen der Referenzpegel.....	17
Tabelle 4.1.1:	Übersicht der Anzahl betrachteter Peilungen pro Teilabschnitt sowie der dadurch abgedeckte Zeitraum.....	23
Tabelle 5.1.1:	Kurtosis und Schiefe der Häufigkeitsverteilungen des Teilabschnitts von Elbe-km 40 bis 60.....	38
Tabelle 5.2.1:	Kurtosis und Schiefe der Häufigkeitsverteilungen von Elbe-km 220 - 240	50
Tabelle 5.3.1:	Kurtosis und Schiefe der Häufigkeitsverteilungen von Elbe-km 320 - 340	62
Tabelle 5.4.1:	Kurtosis und Schiefe der Häufigkeitsverteilungen von Elbe-km 420 - 440	74
Tabelle 6.1.1:	Durchschnittliche zeitliche Standardabweichung der betrachteten Teilabschnitte	90
Tabelle 6.2.1:	Überschreitungswahrscheinlichkeiten (UWK) von 1,6 m unter GIW der jeweils aktuellsten betrachteten Peilungen sowie die maximalen Unsicherheiten.....	96

Anhangsverzeichnis

Anhang 1:	Mittlere Wassertiefe zwischen Elbe-km 40 und 60.....	105
Anhang 2:	Gefilterte mittlere Wassertiefe zwischen 0 und 1,6 m unter GIW von Elbe-km 40 bis 60	106
Anhang 3:	Zeitliche Standardabweichung zwischen Elbe-km 40 und 60	107
Anhang 4:	Mittlere Wassertiefe zwischen Elbe-km 220 und 240.....	108
Anhang 5:	Gefilterte mittlere Wassertiefe zwischen 0 und 1,6 m unter GIW von Elbe-km 220 bis 240.....	109
Anhang 6:	Zeitliche Standardabweichung zwischen Elbe-km 220 und 240	110
Anhang 7:	Mittlere Wassertiefe zwischen Elbe-km 320 und 340.....	111
Anhang 8:	Gefilterte mittlere Wassertiefe zwischen 0 und 1,6 m unter GIW von Elbe-km 320 bis 340.....	112
Anhang 9:	Zeitliche Standardabweichung zwischen Elbe-km 320 und 340	113
Anhang 10:	Mittlere Wassertiefe zwischen Elbe-km 420 und 440.....	114
Anhang 11:	Gefilterte mittlere Wassertiefe zwischen 0 und 1,6 m unter GIW von Elbe-km 420 bis 440.....	115
Anhang 12:	Zeitliche Standardabweichung zwischen Elbe-km 420 und 440	116
Anhang 13:	Mittlere Wassertiefe zwischen Elbe-km 510 und 530.....	117
Anhang 14:	Gefilterte mittlere Wassertiefe zwischen 0 und 1,6 m unter GIW von Elbe-km 510 bis 530.....	118
Anhang 15:	Zeitliche Standardabweichung zwischen Elbe-km 510 und 530	119

Zusammenfassung

Die Hydrologie der Elbe ist geprägt durch ein Wechselspiel von Hochwasserereignissen im Frühjahr, bedingt durch Schneeschmelze in den höheren Lagen des Einzugsgebietes, und darauffolgenden ausgeprägten Niedrigwasserperioden. Besonders in den Bereichen der Elbe, in denen die Flusssohle aufgrund der Kornzusammensetzung leicht beweglich ist, können Hochwasserereignisse die Geometrie der Flusssohle umgestalten, wodurch sich dementsprechend die Wassertiefen ändern. Gerade für der Schifffahrt kann es dadurch zu Tiefeneinschränkungen kommen, beispielsweise durch Geschiebeablagerungen innerhalb der genutzten Fahrrinne.

Gegenstand dieser Arbeit ist eine Tiefenanalyse von fünf jeweils 20 km lange Abschnitte, die sich über den Bereich der freifließenden deutschen Elbe verteilen und dadurch unterschiedliche Charakteristiken aufweisen. Basierend auf der Auswertung von flächenhaften Sohlpeilungen wurde untersucht, wie sich die Tiefenverhältnisse über die Jahre verändern und ob die Variabilität der Flussgeometrie Auswirkungen auf die für die Schifffahrt verfügbaren Wassertiefen hat, bzw. wo wiederholt für die Schifffahrt tiefeneinschränkende Stellen liegen. Betrachtet wurde dabei die Fläche innerhalb der von der Schifffahrt genutzten Fahrrinne. Als Bezugswasserspiegel für die Berechnung der Wassertiefen diente der GIW2010. Des Weiteren wurde geprüft, ob unterschiedliche Wasserspiegellagen gleichwertig verlaufen, also mit gleichbleibendem Abstand, oder ob die Wahl eines anderen Bezugswasserspiegels zu zusätzlichen tiefenbestimmenden Stellen führt.

Die Arbeit konnte zeigen, dass die zeitliche Variabilität der Flusssohle mit zunehmendem Flusskilometer ansteigt. Die sich über die Jahre ändernden Geometrien der Flusssohle können dadurch Auswirkung auf die Lage und das Ausmaß von tiefenbestimmenden Stellen haben. Die Lage von sich wiederholenden Tiefeneinschränkungen wird hauptsächlich durch Charakteristiken der jeweiligen Teilabschnitte beeinflusst. Während im Bereich des Oberlaufs vor allem der enge Flusslauf zu Tiefeneinschränkungen der seitlichen Fahrrinnenbereiche führt, sorgen in den anderen betrachteten Teilabschnitten lokale Besonderheiten wie Kurvenreichtum oder Felsen im Flussbett für tiefenbestimmende Stellen. Zudem konnte gezeigt werden, dass unterschiedliche Wasserspiegellagen nicht zwingend gleichförmig verlaufen, die Wahl eines neuen Bezugswasserspiegels somit lokal zu zusätzlichen tiefenbestimmenden Stellen führen kann.

Schlüsselwörter: Elbe, Tiefenanalyse, Flusssohlengeometrie, tiefenbestimmende Stellen, flächenhafte Peildaten, Bezugswasserspiegel, GIW2010, FIKS;

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit dem Thema, wie sich Teilabschnitte der Flusssohle der Elbe und die daraus resultierenden Tiefenverhältnisse über die Jahre hinweg entwickelt haben. Im nachfolgenden Teil der Einleitung werden daher grundlegende Charakteristiken der Elbe, wie beispielsweise die Hydrologie oder die Zusammensetzung der Sohle, beschrieben, um ein Verständnis für die Faktoren zu erlangen, die Einfluss auf die Veränderlichkeit der Flusssohle haben.

1.1 Einzugsgebiet und Hydrologie der Elbe

Die Elbe ist mit einer Länge von 1.094 km und einer Gesamteinzugsgebietsfläche von 148.268 km² das viertgrößte Fließgewässer Mitteleuropas (IKSE, 2005). Die Quelle befindet sich im Riesengebirge in Tschechien auf einer Höhe von 1.386,3 m ü. NHN. Auf tschechischem Gebiet durchfließt die Elbe eine Strecke von 367 km, bevor sie bei Schmilka in Sachsen die tschechisch-deutsche Grenze erreicht. Auf ihrem Weg durch Deutschland legt sie eine Distanz von 727 km zurück, ehe sie bei Cuxhaven in die Nordsee mündet (siehe Abbildung 1.1.1). Im Folgenden beziehen sich Angaben der Kilometrierung stets auf den in Deutschland verlaufenden Teil der Elbe, mit Elbe-km 0 bei Schmilka.

Die Elbe kann entlang ihres Verlaufs in verschiedene Abschnitte unterteilt werden, entsprechend den sich ändernden Charakteristiken. Die folgende Einteilung wurde von der Internationalen Kommission zum Schutz der Elbe (IKSE) vorgenommen. Als Obere Elbe wird der Abschnitt zwischen Quelle und Hirschstein-Seußlitz bei Elbe-km 96 bezeichnet. Das 54.000 km² große Einzugsgebiet der Oberen Elbe besteht zu einem Großteil aus Hügelland und Mittelgebirgen, wie dem Mittelgebirgsmassiv, dem Elbsandsteingebirge und, zwischen Pirna (Elbe-km 35) und Meißen (Elbe-km 85), dem Mittelgebirgsvorland, wodurch das Einzugsgebiet durch schmale Täler ohne Vorländer geprägt ist (Büchle, 2015). Höhen von 1.000 m ü. NHN werden nur in Gipfel- und Kammlagen überschritten. Die höchste Erhebung ist dabei die Schneekoppe im Riesengebirge (1.602 m ü. NHN). Nennenswerte Zuflüsse entlang der 463 km langen Oberen Elbe (93 km auf deutscher Seite) sind die Moldau und die Eger, wobei beide der Elbe noch vor Erreichen der deutschen Grenze zufließen.

Mit Eintritt der Elbe in das Norddeutsche Tiefland bei Elbe-km 93 beginnt die Mittlere Elbe. Ihr ca. 81.000 km² großes Einzugsgebiet ist größtenteils durch Flachland mit Höhen unter 200 m ü. NHN geprägt, was ein flaches Gefälle von durchschnittlich 17 cm/km und ein starkes Ausschwingen des Flusslaufs zur Folge hat (SCHWARTZ et al., 2015). Während der ersten 105 km der Mittleren Elbe fließen keine nennenswerten Nebenflüsse zu. Die Schwarze Elster bei Elbe-km 198,5 stellt den ersten größeren Zufluss dar. Ihr folgen die Mulde bei Elbe-km 259,6, die Saale bei Elbe-km 290,7 und die Havel bei Elbe-



Abbildung 1.1.1: Verlauf der Elbe inklusive den Einzugsgebieten bedeutender Nebenflüsse (Quelle: IKSE, 2005)

km 438. Das mittlere Gefälle hat sich im Bereich der Havel auf 0,13 m/km verringert und der Fluss mäandriert in weiten Schleifen. Die Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) unterteilt die Mittlere Elbe aufgrund der sich ändernden Charakteristiken, wie beispielsweise die Abnahme des Gefälles, in eine Obere und eine Untere Mittelelbe. Die Grenze zur Unteren Mittelelbe liegt bei dem Zufluss der Havel (Elbe-km 438) (SCHWARTZ et al., 2015).

Ab Elbe-km 585,9 beginnt die Untere Elbe mit dem Wehr Geesthacht. Die Untere Elbe zeichnet sich dadurch aus, dass das Abflussverhalten durch die Tideschwankungen beeinflusst ist, weshalb dieser Bereich auch Tideelbe genannt wird. Durch das Wehr Geesthacht soll diesen Schwankungen eine künstliche Grenze gesetzt werden. Die Einzugsgebietsgröße der Unteren Elbe beträgt ca. 13.000 km² und besteht überwiegend aus Flachland mit Höhen kleiner 75 m ü. NHN.

Von ihrer Quelle bis zum Übergang zur Tideelbe wird die Elbe auch als Binnenelbe bezeichnet.

Das Einzugsgebiet der Elbe gehört der gemäßigten Klimazone an und liegt im Übergangsbereich zwischen kontinental und maritim geprägtem Klima. Das kontinentale Klima im Bereich der Oberen und Mittleren Elbe ist durch niedrige Niederschlagsmengen, vor allem im Flachland, und hohen Temperaturunterschieden zwischen Sommer und Winter gekennzeichnet. Das maritime Klima im

Bereich der Unteren Elbe führt dagegen zu höheren Niederschlagsmengen sowie milderem Winter. Die durchschnittliche Niederschlagsmenge des Einzugsgebietes der Elbe liegt bei 628 mm/a, wobei diese entlang des Flusslaufs variiert. Im Bereich des mittleren Berglandes werden beispielsweise Niederschlagsmengen von 700 – 850 mm/a erreicht, in Hochlagen der Mittelgebirge sogar mehr als 1.000 mm/a. Der Maximalwert liegt bei 1.700 mm/a in den Kammlagen des Riesen- und Isergebirges. Im Bereich der Tideelbe liegen die Niederschlagsmengen aufgrund des maritimen Klimas, ähnlich dem mittleren Bergland, zwischen 700 – 850 mm/a. Auf zwei Dritteln des Einzugsgebietes der Elbe fallen dagegen unter 550 mm/a, vor allem in den Bereichen der Mittleren Elbe, die durch das kontinentale Klima geprägt sind und teilweise im Regenschatten von Gebirgen liegen, beispielsweise im Bereich des östlichen Harzvorlandes im Einzugsgebiet der Saale (IKSE, 2005).

Diese ungleiche Verteilung des Niederschlags spiegelt sich auch in den Abflussspenden (Anteil des Niederschlags, der pro km² des Einzugsgebietes zum Abfluss beiträgt) entlang der Elbe wider. Während diese im Bereich der Kammlagen der Mittelgebirge zwischen 30 und 40 l/s*km², in Höhenlagen von 400 – 600 m ü. NHN und entlang der Tideelbe bei 10 – 15 l/s*km² liegen, beträgt sie in den niederschlagsärmsten Bereichen der Mittleren Elbe weniger als 2 l/s*km². Die mittlere Abflussspende liegt bei 5 bis 6 l/s*km² (IKSE, 2005). Die Höhenlagen der Oberen Elbe bilden somit die wichtigste Einflussgröße des Elbeabflusses, in Form von hohen Niederschlagsmengen, sowie der hier stattfindenden Schneespeicherung bzw. Schneeschmelze. Abbildung 1.1.2 zeigt die Quotienten aus langjährigem Mittel der Monatsabflüsse (MQ_{Monat}) und langjährigem Mittel des Jahresabflusses (MQ_{Jahr}) an drei Pegelstellen entlang der Elbe. Dabei ist zu sehen, dass die Abflussspitzen gerade im Bereich der Oberen Elbe zwischen März und Juni liegen, also durch den Schmelzprozess bedingt sind. Entlang des Flussverlaufs flacht dieser Effekt ab, was durch den Zustrom weiterer Nebenflüsse verursacht wird. Des Weiteren verschieben sich die positiven Quotienten weiter in Richtung Wintermonate, was daran liegt, dass die Schneeschmelze in flacheren Gebieten früher stattfindet, bzw. Niederschlag nicht in Form von Schnee gespeichert wird, sondern als Regen fällt. Der Abfluss der Elbe entspricht somit einem pluvio-nivalen Abflussregime, das hauptsächlich durch Regen und Schnee beeinflusst ist. Nach der Schneeschmelze sinken die Pegelstände schnell ab, da - abgesehen von den Höhenlagen - im Einzugsgebiet nur wenig Niederschlag fällt. Das hat zur Folge, dass Niedrigwasserperioden in der Elbe nichts Ungewöhnliches sind. „Auch für die Schifffahrt gesperrte große Flüsse aufgrund geringer Wasserstände treten regelmäßig auf“ (IKSE, 2005). Laut Berechnungen von ROERS et al. (2015) wird der Niederschlag und damit der Abfluss im Elbeeinzugsgebiet aufgrund des Klimawandels weiter sinken, sich die Niedrigwassersituation somit verstärken. Je nach verwendetem Modell wurde ein Rückgang zwischen 10 und 30 % berechnet.

Auch Hochwasserereignisse sind maßgeblich durch das Einzugsgebiet der Oberen Elbe beeinflusst. Gerade wenn zur Zeit der Schneeschmelze Niederschlag in Form von Regen fällt („rain-on-snow“), führt dies häufig zu Hochwasserereignissen. Dementsprechend finden 70 – 80 % aller Hochwasser im Winterhalbjahr statt, ein Großteil davon im März. Im Sommer können lang anhaltende, flächige Regenereignisse zu Hochwasser führen. Räumlich begrenzte sommerliche Starkniederschläge können in den Nebenflüssen zwar Hochwasser zur Folge haben, für die Gesamtelbe sind diese jedoch nicht von Bedeutung. „Ohne Hochwasser aus der Oberen Elbe entstehen demzufolge selbst bei sehr hohem Zufluss der Mittleren Elbe [...] keine Hochwasser“ (IKSE, 2005).

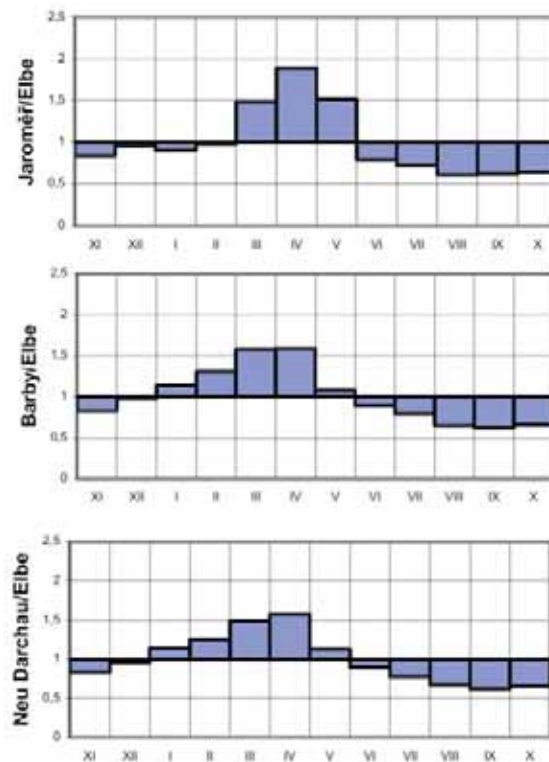


Abbildung 1.1.2: Quotient aus langjährigen Mittelwerten aus Monats- und Jahresabfluss (MQ_{Monat} / MQ_{Jahr}). Dargestellt sind die Pegel Jaroměř (Elbe-km 287,5, bezogen auf die gesamte Elbe), Barby (Elbe-km 294,8) und Neu Darchau (Elbe-km 536,4). (Quelle: IKSE, 2005)

Um die Besonderheit der Hydrologie der Elbe herauszustellen, wird diese hier mit der einer anderen großen Wasserstraße in Deutschland verglichen, dem Rhein. Der neuntgrößte Fluss Europas (HIRSCHFELD, 2003) setzt sich zusammen aus dem Alpenrhein von seinen Quellen bis zum Bodensee, dem Hochrhein vom Bodensee bis zur deutschen Grenze, dem Oberrhein bis Bingen, dem Mittelrhein bis Bonn, dem Niederrhein bis zur niederländischen Grenze und dem Rheindelta, das den letzten Abschnitt bis zur Mündung in die Nordsee darstellt. Der Abfluss des Rheins setzt sich dabei entlang seines Verlaufs aus unterschiedlichen Komponenten zusammen. Alpen-, Hoch- und Oberrhein sind

glazial bzw. nival geprägt. Das heißt, der abflussrelevante Niederschlag wird in Form von Schnee in den hohen Lagen gespeichert und erst im Mai/Juni durch Schneeschmelze freigesetzt. Je weiter man sich von den Alpen entfernt, desto stärker ist das Abflussregime pluvial geprägt. Das heißt, dass der abflussrelevante Niederschlag des Winters nicht als Schnee gespeichert wird, sondern ungehindert abfließen kann, wodurch sich der maximale Abflusspeak eher in Richtung Wintermonate verschiebt. Abbildung 1.1.3 zeigt diese Entwicklung entlang des Rheins. Die KHR (2007) kommt zu dem Ergebnis, dass die nivale Grundprägung des Abflusses bis zur Mainmündung erhalten bleibt, ehe durch den Zufluss von Main und Mosel im Mittelrhein das pluviale Regime dominiert. Durch diese Kombination aus nivalem und pluvialem Abfluss ist die Niedrigwasserphase deutlich reduziert.

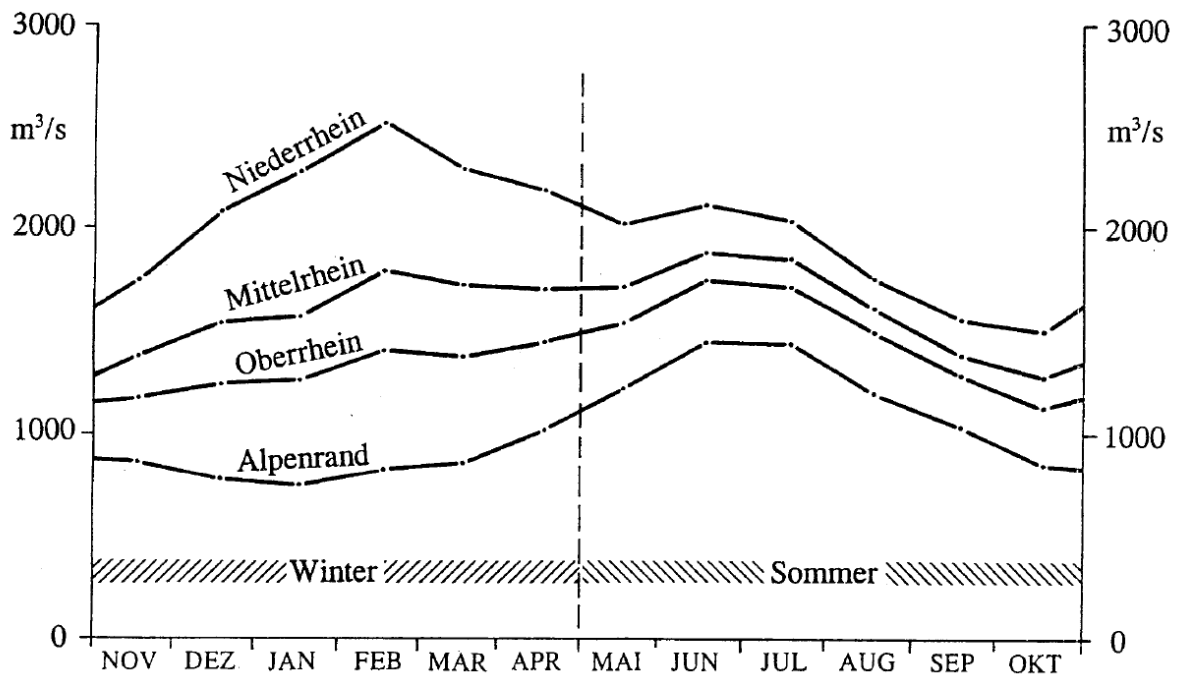


Abbildung 1.1.3: Abflussregime entlang des Rheins (Quelle: IKS, 2012)

Wie Abbildung 1.1.4 zeigt, ist der Abfluss dadurch über das gesamte Jahr betrachtet ausgeglichener verteilt, wobei auch hier zu sehen ist, dass der Abfluss entlang des Rheins zunehmend pluvial geprägt ist. Da diese pluviale Komponente entlang der Elbe aufgrund des geringen Niederschlags in großen Teilen des Einzugsgebietes deutlich geringer ausfällt, beschränken sich die Monate mit Abflüssen über Mittelwasser lediglich auf diejenigen, in denen Schneeschmelze stattfindet. Die Niedrigwasserphase ist somit sowohl zeitlich, als auch in der Spannweite zwischen Hoch- und Niedrigwasser deutlich ausgeprägter. MALLE (1990) fasst in Bezug auf die Niedrigwasserperiode zusammen: „Der charakteristische Unterschied beider Flüsse liegt beim Niedrigwasser. Während dieses bei der Elbe über Monate unter die halbe Mittelwasserführung absinkt, tritt ein so starker Rückgang am Rhein nur kurzfristig auf.“

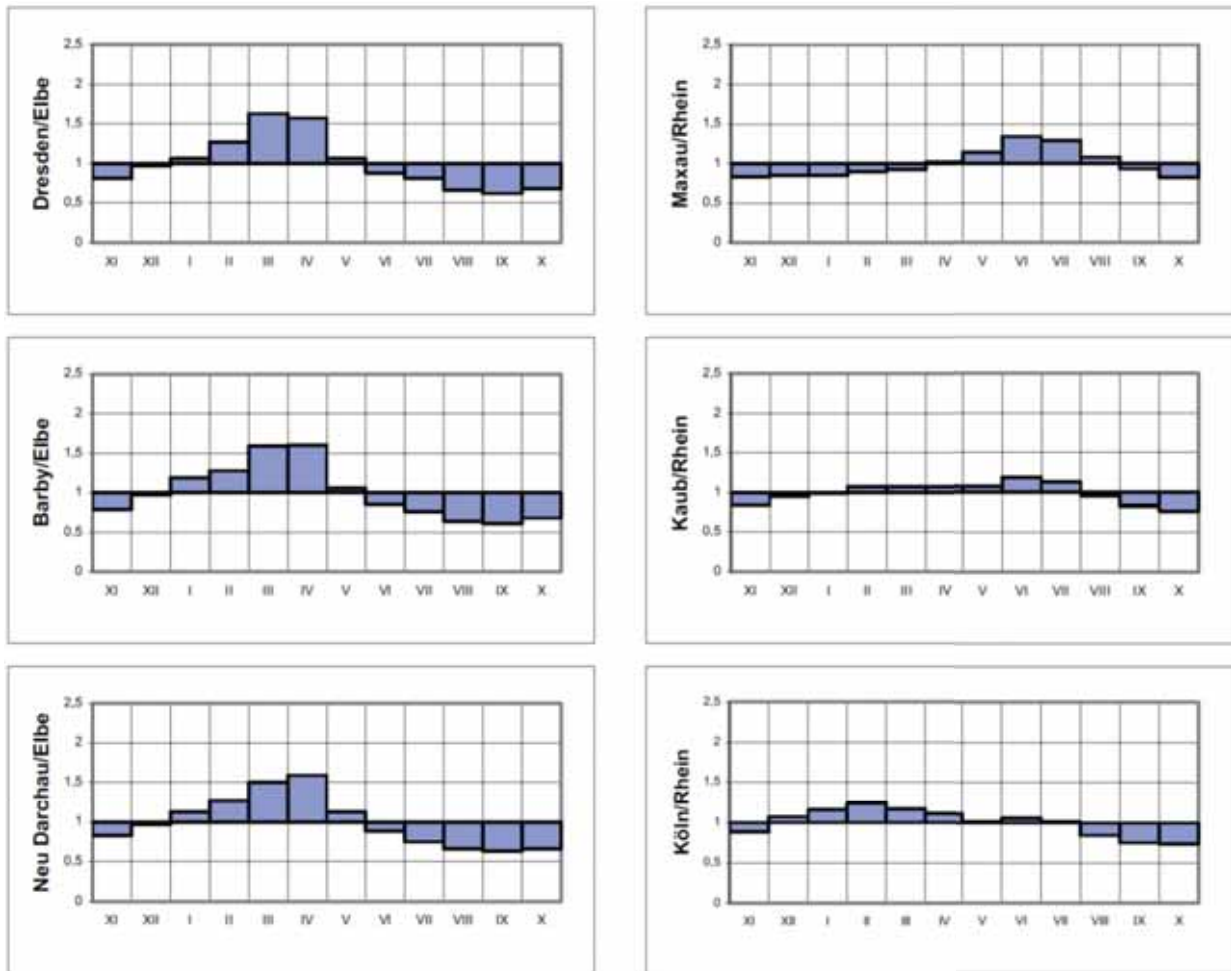


Abbildung 1.1.4: Abflussquotienten (MQ_{Monat}/MQ_{Jahr}) entlang der Elbe und des Rheins (Quelle: IKSE, 2005)

1.2 Geschiebetransport und Sohlenvariabilität

Die Substratzusammensetzung einer Flusssohle bildet die Grundlage für den Geschiebetransport eines Fließgewässers. Abbildung 1.2.1 zeigt die Substratzusammensetzung entlang der Elbe ab der deutschen Grenze. Die Flusssohle im Oberlauf ist demnach durch Grobkies (30-60 %), Mittelkies (15-30 %) sowie Steine mit 150 mm Kantenlänge geprägt (NAUMANN et al., 2015). Die Sohle ist dabei durch die grobe Zusammensetzung wie abgeplastert, sodass sich Material aus der Sohle nur bei großen Hochwasserereignissen lösen kann. Auch zu Beginn des Mittellaufs ändert sich wenig, der Grobkiesanteil beträgt immer noch zwischen 20 und 60 % mit vereinzelt Steinen, sodass die Sohle nach wie vor abgeplastert ist. Mit dem Anschneiden des Urstromtals der Elbe unterhalb von Riesa (Elbe-km 108,4) und den dort vorliegenden pleistozänen und holozänen Flussschottern sowie den Talsanden, verringert sich der mittlere Korndurchmesser d_m von 25 auf 15 mm (BFG, 2004). In Torgau bei Elbe-km 154,6 sorgt eine Gebirgsauftragung für einen kleinräumigen Anstieg der

Kornzusammensetzung. Durch die Schwelle, die der Fels im Flussbett darstellt, verringert sich oberstromig die Transportkraft des Gewässers, wodurch gröberes Material nicht mehr transportiert werden kann. Entlang des weiteren Verlaufs nimmt die durchschnittliche Korngröße weiter ab, wobei diese im Mündungsbereich der Schwarzen Elster (Elbe-km 198,5) bei 7 mm liegt. Bis ca. Elbe-km 300 ändert sich der Hauptbestandteil der Sohle von den Kiesen hin zum Grobsand. Ähnlich wie der Fels in Torgau ragen auch in der Stadtstrecke in Magdeburg drei Felsen in die Elbe (Domfels, Strombrückenfels, Herrenkrugfels), was einen lokalen Anstieg der Korngröße der Sohle zur Folge hat. Der mittlere Korndurchmesser steigt dabei zwischen Elbe-km 323,5 und 328 auf 5 – 16 mm an (NAUMANN et al., 2015). Abgesehen von diesem lokalen Anstieg setzt sich der Trend der kleiner werdenden Korngrößen weiter fort. Bei einem d_m zwischen 0,5 und 1 mm beträgt der Feinkiesanteil zwischen Elbe-km 500 und 540 nur noch 5 bis 10 % (NAUMANN et al., 2015). Die rückstauende Wirkung des Wehrs Geesthacht macht sich je nach Abfluss ab Lauenburg (Elbe-km 564) durch geringere Fließgeschwindigkeiten bemerkbar. Die dadurch verringerte Transportkraft der Elbe führt zu einer erhöhten Sedimentation, wodurch der mittlere Korndurchmesser der Sohle auf 0,3 – 0,7 mm abnimmt.

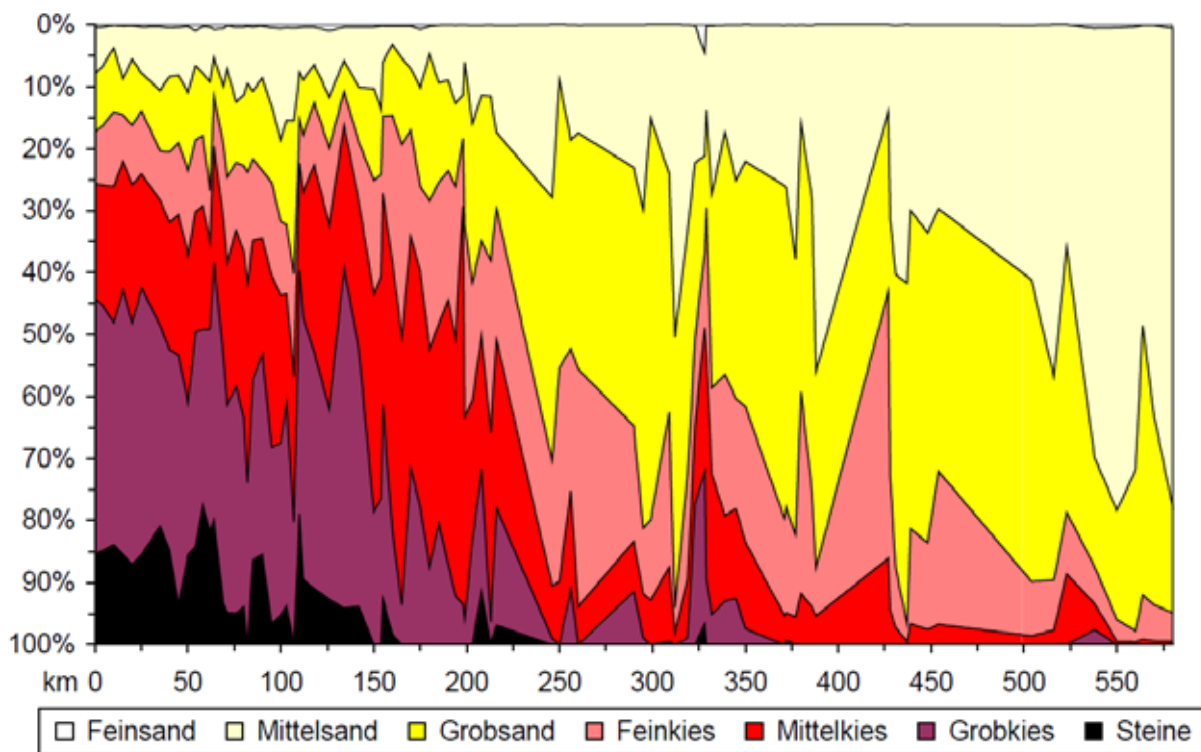


Abbildung 1.2.1: Substratverteilung der Elbesohle (Quelle: BFG, 2004)

Abbildung 1.2.2 zeigt einen Längsschnitt der Geschiebefracht entlang der deutschen Elbe. Dabei ist eine stetige Zunahme der transportierten Fracht von der Oberen Elbe bis ca. Elbe- km 320 zu erkennen. Wenig Geschiebe wird vor Mühlberg (Elbe-km 120) transportiert, was zum einen damit

zusammenhängt, dass die Sohle im Oberlauf stark zugepflastert ist und somit kaum Material aus der Sohle gelöst werden kann. Zum anderen verhindern Staustufen im Bereich der tschechischen Elbe sowie im deutschen Einzugsgebiet, dass Sediment von oberhalb eingetragen wird. Vergleicht man die mittleren Korndurchmesser der Sohle mit dem des Geschiebes (siehe Abbildung 1.2.3), so wird deutlich, dass das transportierte Material nicht dem der Sohle entspricht. Die Fracht muss somit durch die Nebenflüsse in die Elbe gelangen (NEUMANN, 2015). In Form von Transitgeschiebe wird sie ohne Interaktion mit der abgepflasterten Flusssohle über diese transportiert.

Im weiteren Verlauf nähern sich der d_m der Sohle und des Geschiebes einander, was bedeutet, dass zunehmend Material aus der Sohle gelöst und abtransportiert wird. Das liegt daran, dass im Oberlauf aufgrund der abgepflasterten Sohle ein Defizit im Geschiebetransport vorliegt und nach dem Ende dieses Bereichs mit Eintritt in das Urstromtal der Elbe dieses Defizit ausgeglichen werden will. Wegen der erhöhten Erosion ab Elbe-km 120 wird dieser Bereich „Erosionsstrecke“ genannt. Wurde früher lediglich der Bereich zwischen Elbe-km 120 und 230 so bezeichnet, umfasst sie heute die Strecke von Elbe-km 120 bis 290 (FAULHABER, 2015). FAULHABER (1998) konnte bei der Untersuchung der Sohlentwicklung in diesem Bereich feststellen, dass sich die Sohle hier im Durchschnitt jährlich um 1 bis 2 cm eintieft. Zudem ist bekannt, „dass die Bereiche höchster Erosionsintensität sich stromab bewegen“ (FAULHABER, 2015).

Ab Elbe-km 320 steigt die mittlere Korngröße der Sohle im Vergleich zu der des Geschiebes kurzzeitig stark an, wie in Abbildung 1.2.3 zu sehen ist. Grund dafür sind unter anderem die Felsen entlang des Abschnitts, die einerseits für eine Erhöhung des mittleren Korndurchmessers sorgen und andererseits verhindern, dass Erosion stattfindet und somit das Geschiebe ohne Interaktion mit der Sohle weitertransportiert wird (BFG, 2004). Im Bereich nach der Felsenstrecke erhöht sich die Erosion wieder, was eine zunehmende Annäherung zwischen d_m der Sohle und dem d_m des Geschiebes zur Folge hat.

Eine weitere Besonderheit stellt die Strecke zwischen Elbe-km 508,1 und 520,9 dar. Während die davor und danach liegenden Bereiche der Elbe im Zuge des Niedrigwasserausbaus reguliert wurden, ist der Fluss in diesem Bereich aus historischen Gründen nicht ausgebaut worden und somit noch freifließend. Der Bereich heißt daher „Reststrecke“ (HENTSCHEL, 1996). Aufgrund des sich hier ändernden Flussquerschnitts verliert die Elbe an Fließgeschwindigkeit und damit an Transportkraft, was eine Ablagerung der transportierten Fracht zur Folge hat. Da dieses Material sehr fein ist (siehe Abbildung 1.2.3), kann es permanent umverlagert werden, was die Ausbildung von alternierenden Bänken und Dünen zur Folge hat, welche 300 bis 400 m/a talwärts wandern (HENTSCHEL, 1996; BFG, 2004).

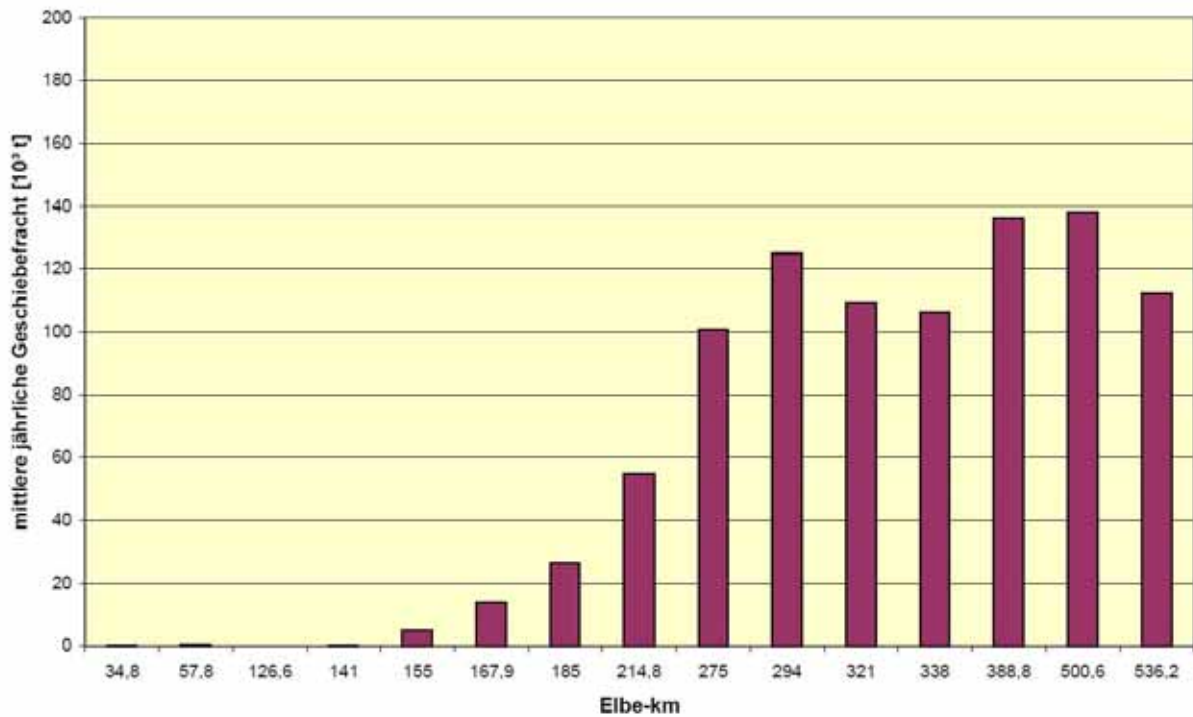


Abbildung 1.2.2: Längsschnitt der Geschiebefracht (Quelle: BFG, 2004)

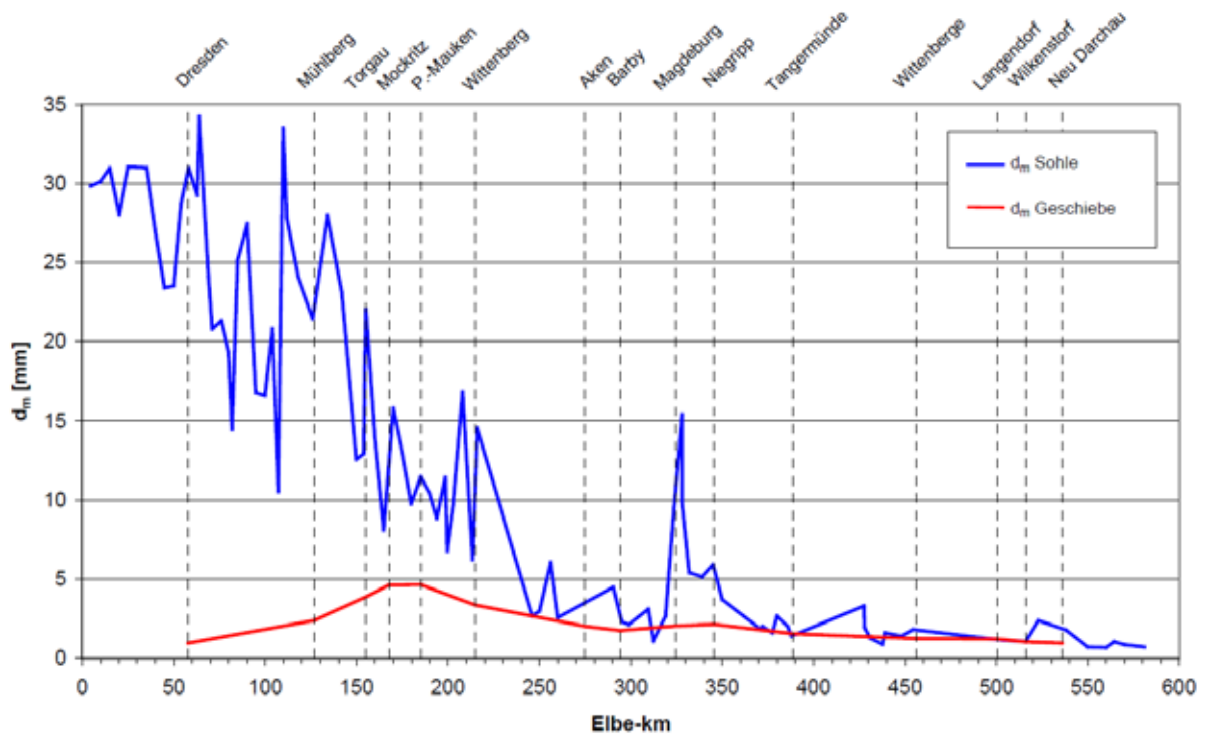


Abbildung 1.2.3: Vergleich zwischen mittleren Korngrößen d_m der Sohle und des Geschiebes (Quelle: BFG, 2004)

Die Kombination aus der Hydrologie und der teilweisen Beweglichkeit der Flusssohle der Elbe können zu Problemen für die Schifffahrt führen. Durch Hochwasserereignisse im Frühjahr kann die Flusssohle,

je nach lokaler Kornzusammensetzung, umverlagert werden und zu Sedimentablagerungen im Bereich der Fahrrinne führen. Während des Hochwasserereignisses sind diese Ablagerungen für die Schifffahrt irrelevant, da der Wasserstand für ausreichend Abstand zwischen Schiff und Flusssohle sorgt. Im Anschluss an ein Hochwasserereignis werden die Ablagerungen jedoch erst nach und nach durch den Abfluss abgetragen. Gerade in den ausgeprägten Niedrigwasserperioden der Elbe, in denen der Wasserstand im Vergleich zu den Abflüssen des Frühjahrshochwassers stark absinkt (vgl. Abbildung 1.1.2), können die noch vorhandenen Ablagerungen zu Problemen der Schiffbarkeit führen (FAULHABER et al., 2008).

1.3 Ausbau und Schiffbarkeit der Elbe

Die Bedeutung der Elbe für die Schifffahrt ist seit jeher sehr hoch, ist sie doch zum Beispiel der einzige Anschluss Tschechiens an die Nordsee. Wichtig für die Schifffahrt ist dabei, vor Antritt der Fahrt Informationen über die Wasserstände entlang des Flussverlaufs zu erhalten, um beispielsweise maximale Beladungen planen zu können. Die Wassertiefen der Fahrrinne ändern sich jedoch einerseits mit dem Ort, andererseits am gleichen Ort über die Zeit durch hydrologische und morphologische Veränderungen. „Damit an frei fließenden Flüssen mit veränderlicher Flussbettgestalt der Schifffahrt trotz der örtlichen und zeitlichen Variabilität der verfügbaren Wassertiefe verlässliche Angaben zur Verfügung stehen, müssen vereinfachte Bezugsgrößen zur Orientierung definiert werden“ (FAULHABER et al., 2008). Zu diesem Zweck wird entlang der Elbe der „Gleichwertige Wasserstand“ (GIW) als Bezugswasserspiegel berechnet. Er gibt den Wasserstand wieder, der durchschnittlich (bezogen auf ein langjähriges Mittel von mindestens 20 Jahren (BAW/BFG, 2012)) an 20 eisfreien Tagen im Jahr nicht unterschritten wird. Er stellt somit die Abflusssituation im mittleren Niedrigwasserbereich dar. Zur genauen Ermittlung des GIW werden verschiedene Bezugspegel entlang des Flussverlaufs ausgewählt, für die Wasserstands-Abfluss-Beziehungen vorliegen. Für jede dieser Pegelstationen wird der Abfluss ermittelt, der an 20 eisfreien Tagen im Jahr nicht unterschritten wird, der sogenannte „Gleichwertige Abfluss“ (GIQ). Basierend auf aktuellen Wasserstands-Abfluss-Beziehungen, Wasserspiegelmessungen und gegebenenfalls hydronumerischer Modelle, werden die gleichwertigen Wasserstände $W(GIQ)$ (vereinfacht „GIW“ genannt) bei den jeweiligen Bezugsdurchflüssen GIQ entlang der Fließstrecke berechnet (FAULHABER et al., 2008). Als Information zum aktuellen Wasserstand kann nun beispielsweise der Schifffahrt angegeben werden, um wie viel Meter bzw. Zentimeter der GIW derzeit über- oder unterschritten ist. Da sich die hydrologischen und morphologischen Gegebenheiten entlang der Elbe über die Zeit ändern, muss auch der GIW in regelmäßigen Abständen zwischen 10 und 30 Jahren überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Die letzte Berechnung fand 2010 statt. Eine detaillierte Beschreibung ist in BAW/BFG (2012) zu finden.

Der GIW dient nicht nur zu Informationszwecken, an ihn sind auch Zielvorgaben des Flussbaus gebunden. Um eine durchgehende Schiffbarkeit der Elbe gewährleisten zu können, wurde Anfang der 1990er Jahre das Ziel formuliert, eine durchgängige Wassertiefe von 1,6 Meter unter GIW und eine Fahrrinnenbreite von 50 Meter zu erreichen. Um Mindesttiefen und damit geeignete Schifffahrtsbedingungen zu erreichen, wurden bereits seit dem 19. Jahrhundert strombauliche Maßnahmen wie der Bau von Buhnen und Parallelbauwerken errichtet. Nach dem Elbe-Hochwasser von 2002 wurde der Ausbau der Elbe jedoch eingestellt und als neues Ziel der Erhalt der Schifffahrtsbedingungen wie vor dem Hochwasserereignis gesetzt (BAW, 2005). Das bedeutet, dass Fahrrinnenbreiteneinschränkungen in Kauf genommen werden müssen. Oberhalb von Dresden beträgt die Fahrrinnenbreite grundsätzlich 40 Meter und unterhalb von Dresden 50 Meter. Im Bereich der Stadtstrecke von Magdeburg beträgt die Fahrrinnenbreite aufgrund des größeren Gefälles nur 35 Meter (BVBW, 2005). Im Rahmen des GESAMTKONZEPT ELBE (2017) wurde als neues Tiefenziel eine Mindesttiefe von 1,4 m unter GIW₂₀₁₀ vereinbart, welches durch lokale Ergänzungen und Anpassungen des bestehenden Stromregelungssystems erreicht werden soll.

Da vor allem geringe Wassertiefen der Schifffahrt Probleme bereiten, sollen die meisten Bauwerke Abflüsse bei Niedrigwasser regulieren (FAULHABER, 2013a). Weil sich die hydrologischen Verhältnisse über die Zeit ändern, müssen auch die Bauwerke entsprechend nachjustiert werden. Nach FAULHABER (2013b) sind einige Bauwerke seit dem 19. Jahrhundert nicht angepasst worden und liegen bis zu einem Meter zu hoch. Geschiebemanagement ist vor allem dort möglich, wo bauliche Maßnahmen nicht umgesetzt werden können. Entlang der „Reststrecke“ zwischen Elbe-km 508 und 521 werden beispielsweise Unterhaltungsbaggerungen betrieben, um die anfallenden Sandbänke zu minimieren und eine permanente Fahrrinne gewährleisten zu können (BAW, 2015a). Entlang der „Erosionsstrecke“ zwischen Elbe-km 120 und 290 wird der Elbe hingegen kontinuierlich ein Sand-Kiesgemisch zugeführt, um das Geschiebedefizit auszugleichen und eine weitere Tiefenerosion zu vermeiden. Des Weiteren sollen hier im Rahmen des sogenannten „Sohlstabilisierungskonzeptes“ Buhneninstandsetzungen und Anpassungen an aktuelle Bauwerkssollhöhen, Deckwerkinstandsetzungen mit Sohlsicherung und Vorlandabgrabungen zur Aufweitung des Flussquerschnitts getätigt werden (AUSEE, 2014). Aktuell ist die Elbe auf deutschem Gebiet zwischen Elbe-km 121 und 566,2 durch ca. 6.900 Buhnen und 327 km Uferdeck- und Parallelwerke verbaut (SCHWARTZ et al., 2015).

1.4 Echolot-Messsysteme zur Peilung von Flusssohlen

Um ein Bild der Flusssohle und den gegebenen Tiefenverhältnissen zu erhalten, werden Peilungen mittels Echolot-Messsysteme durchgeführt. Seit den 1990er Jahren werden dabei zunehmend flächenhafte Peilungen verwendet. Im Folgenden werden die drei gängigen Verfahren kurz vorgestellt.

Bei der Echolotmessung wird ein Schallimpuls vertikal zur Wassersäule aus einem Schwinger gesendet, der an der Unterseite des Messschiffs befestigt ist. Der Schallimpuls wird am Gewässerboden reflektiert und an der Empfängereinheit des Schwingers aufgenommen. Über die benötigte Laufzeit lässt sich die Wassertiefe berechnen. Unterschieden wird dabei in Einzelstrahl- und Mehrstrahl-Echolotungen (RIECK, 2008).

Einzelstrahl-Echolotung

Bei der Einzelstrahl-Echolotung besitzt das Messschiff lediglich einen Schwingerkopf, sodass nur ein Messstrahl lotrecht ausgesendet wird (siehe Abbildung 1.4.1). Bei dieser Variante werden Profile anhand vorgegebener Linien in Längs- und Querrichtung gefahren, wobei der Linienabstand je nach Aufgabenstellung variiert. Das Problem ist dabei, dass zwischen den Peillinien keine Informationen vorliegen, also eine mangelnde Datendichte gegeben ist. Der Vorteil ist hingegen, dass die Messungen nur gering durch Rollen und Stampfen des Schiffes beeinflusst werden (RIECK, 2008). Da die Einzelstrahl-Echolotung eher ungenau in Bezug auf flächenhafte Sohlenerfassung ist, wird sie hauptsächlich zur Kontrolle sowie Ergänzung nicht kritischer Messbereiche genutzt (MIC, 2013)

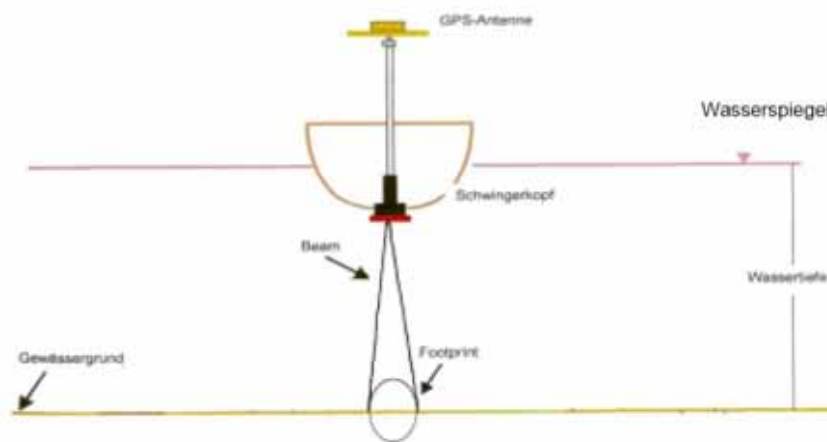


Abbildung 1.4.1: Einzelstrahl-Echolotung (Quelle: RIECK, 2008)

Auslegersysteme (Mehrstrahl-Echolotung)

Bei dem Prinzip der Auslegersysteme sind mehrere Einzelschwinger an zwei Auslegerarmen montiert, die jeweils an der Back- und Steuerbordseite des Schiffes angebracht sind (siehe Abbildung 1.4.2). Dadurch ist eine höhere Datendichte als bei herkömmlichen Einzelstrahl-Peilungen gegeben. Nachteile sind dabei jedoch, dass eine starke Strömung zur Einschränkung der Manövrierfähigkeit führt und dass die Messungen durch Rollen und Stampfen des Schiffes beeinflusst werden, wodurch

Bewegungssensoren erforderlich sind. Die Messgenauigkeit der Auslegersysteme variiert je nach Hersteller um 2 – 6 cm (RIECK, 2008).

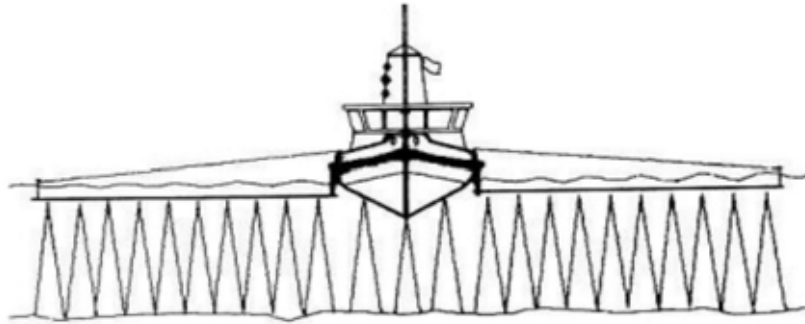


Abbildung 1.4.2: Auslegersysteme (Quelle: RIECK, 2008)

Fächerecholot (Mehrstrahl-Echolotung)

Je nach Messschiff befinden sich bei der Fächerecholotung ein bzw. zwei Schwingerköpfe am Bug (siehe Abbildung 1.4.3). Anders als bei der Einzelstrahl-Echolotung ist es dabei jedoch möglich, mehrere Schallimpulse gleichzeitig fächerartig abzusenden. Der Linienabstand, in dem gemessen wird, ist dabei abhängig von der Fächerbreite und der damit abgetasteten Fläche. Bei einer größeren Wassertiefe wird dementsprechend ein größerer Teil des Gewässergrunds erfasst. Ein Vorteil der Fächermessung liegt darin, dass eine große Anzahl an Daten gewonnen werden kann und somit eine hochauflösende Erfassung der Flusssohle ermöglicht wird (MIC, 2013). Nachteile sind jedoch eine mangelhafte Zuverlässigkeit der Randstrahlen sowie ein starker Einfluss durch das Rollen und Stampfen des Schiffes, wodurch Bewegungssensoren an den Schiffen zwingend nötig sind. Die Messungenauigkeit bei Fächerecholoten liegt zwischen 5 und 7 cm (RIECK, 2008).

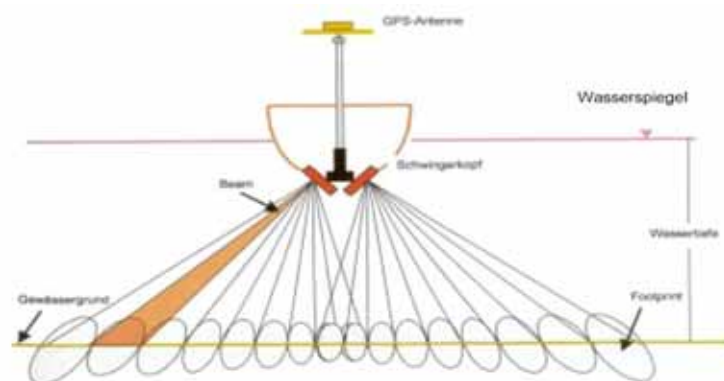


Abbildung 1.4.3: Fächerecholot (RIECK, 2008)

2 Problemstellung und Zielsetzung

Die Elbe ist hydrologisch gesehen durch große Hochwasserereignisse im Frühjahr, bedingt durch Schneeschmelze in den höheren Lagen des Einzugsgebietes, sowie durch eine darauffolgende ausgedehnte Niedrigwasserperiode geprägt. In anderen Flusssystemen, wie beispielsweise dem Rhein, ist dieser ausgeprägte Unterschied zwischen Hoch- und Niedrigwasserabfluss aufgrund von alpinen Zuflüssen nicht gegeben, was zu einer eher ausgeglichenen Wasserführung führt. Das hat zur Folge, dass die Sohlengeometrie und deren Variabilität für die Schifffahrt eine eher untergeordnete Rolle spielt. Durchgeführte Tiefenanalysen im Rhein, wie beispielsweise durch die AG MITTELWASSERLINIEN (2015), beschränken sich daher häufig auf die Auswertung von Wassertiefen in Bezug auf eine durchschnittliche Flusssohle. Andere Untersuchung, die die Schifffbarkeit von Binnengewässern prüfen, legen ihr Hauptaugenmerk auf die Eigenschaften des Schiffes selbst, wie zum Beispiel dem Einsinkverhalten oder dem Raumbedarf. In VBW (2013) sind dabei die für die Schifffahrt verfügbaren Wassertiefen in einem freifließenden Binnengewässer hauptsächlich von den sich ändernden Abflussverhältnissen abhängig. Gerade bei der Elbe wäre es jedoch nicht nur wichtig zu betrachten, welche Auswirkungen unterschiedliche Abflüsse auf die verfügbaren Wassertiefen haben. Wegen der ausgeprägten Niedrigwasserperiode ist die Schifffahrt auf Kenntnisse zur Struktur der Flusssohle angewiesen. Besonders in den Bereichen der Elbe, in denen die Flusssohle aufgrund der dort gegebenen Kornzusammensetzung beweglich ist, können Hochwasserereignisse zu einer Umgestaltung der Sohle führen. Diese Umgestaltung kann in den Niedrigwasserperioden wiederum zu einer Tiefeneinschränkung der Schifffahrt führen, beispielsweise durch eine Geschiebeablagerung innerhalb der genutzten Fahrrinne.

Ziel dieser Arbeit ist es daher, basierend auf flächenhaften Peildaten der Flusssohle zu prüfen, welche unterschiedlichen für die Schifffahrt tiefenbestimmende Stellen sich aus verschiedenen Sohlengeometrien bezogen auf einen gleichbleibenden Bezugswasserspiegel ergeben. Betrachtet werden dabei fünf jeweils 20 km lange Teilabschnitte der Elbe, die sich über den freifließenden Teil der Binnenelbe zwischen deutscher Grenze und Elbe-km 530 verteilen und dabei die unterschiedlichen Charakteristiken der Elbe vertreten. Im Detail soll geprüft werden:

- (1) Wie unterscheiden sich die Tiefenverhältnisse über die Jahre in den einzelnen Peilungen der betrachteten Teilabschnitte?
- (2) Wo und in welchem Ausmaß treten entlang eines Teilabschnitts für die Schifffahrt wiederholt relevante Tiefeneinschränkungen auf?

- (3) Verlaufen verschiedene Wasserspiegellagen gleichwertig (mit konstant gleichbleibendem Abstand) oder können unterschiedliche Bezugswasserspiegellagen innerhalb der betrachteten Teilabschnitte zu zusätzlichen tiefenbestimmenden Stellen führen?

Die hier durchgeführte Tiefenanalyse erfolgt innerhalb der von der Schifffahrt genutzten Fahrrinne. Der Fokus liegt dabei auf der Auswirkung von sich ändernden Sohlengeometrien auf die für die Schifffahrt relevanten Wassertiefen. Fahrdynamische Eigenschaften des Schiffs werden dabei nicht berücksichtigt. Zudem ist es nicht Ziel der Arbeit, eine neue, verkehrlich geeignete Fahrrinne auszuweisen. Des Weiteren bezieht sich die Arbeit ausschließlich auf die Auswertung von Wassertiefen innerhalb der Fahrrinne. Breitereinschränkungen der Fahrrinne werden dabei nicht genauer analysiert.

3 Betrachtete Teilabschnitte der Elbe

3.1 Lage und Kurzcharakterisierung der Streckenabschnitte

Für die in dieser Arbeit durchgeführte Tiefenanalyse wurden entlang der deutschen Binnenelbe fünf jeweils 20 km lange Teilabschnitte ausgewählt, die sich über die Obere und Mittlere Elbe verteilen (siehe Abbildung 3.1.1). Die betrachteten Abschnitte wurden so gewählt, dass sie jeweils unterschiedliche Charakteristiken der Elbe repräsentieren. Damit soll bezweckt werden, dass ein Bild darüber gewonnen werden kann, wie die Variabilität der Flusssohle, und damit einhergehend der Wassertiefen, durch die verschiedenen Charakteristiken beeinflusst wird.

Die folgende Kurzcharakteristik fokussiert auf Aspekte, die für die Tiefenanalyse von Bedeutung sind. Die detaillierten Flussverläufe der betrachteten Teilabschnitte sind in Anhang 1, Anhang 4, Anhang 7, Anhang 10 und Anhang 13 dargestellt.

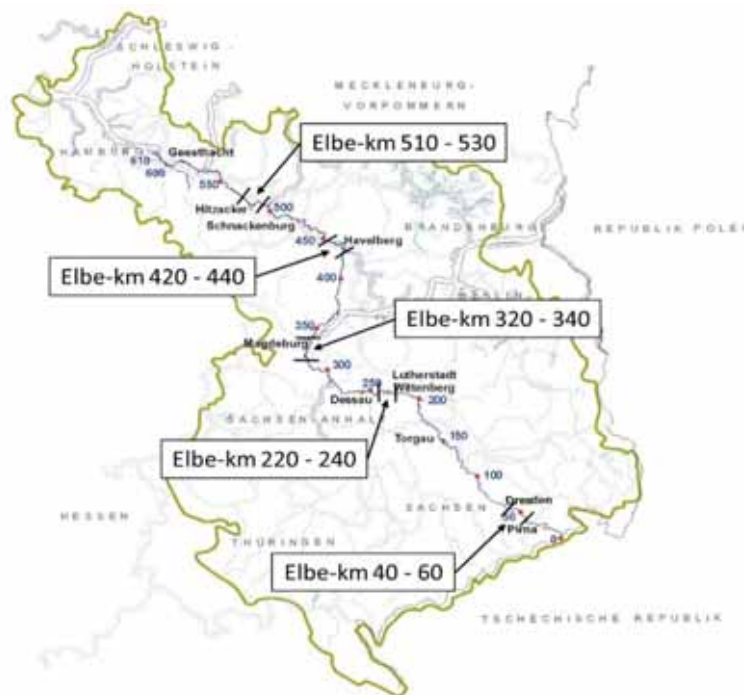


Abbildung 3.1.1: Übersichtskarte der betrachteten Teilabschnitte

Der von Südosten nach Nordwesten verlaufende Streckenabschnitt von Elbe-km 40 bis 60 befindet sich im Bereich der Oberen Elbe und beinhaltet die Stadtstrecke von Dresden. Entsprechend der Charakteristik der Oberen Elbe folgt der Flusslauf einer engen Gebirgsstrecke ohne große Vorländer (BÜCHELE, 2015). Das durchschnittliche Gefälle des Streckenabschnitts liegt bei 0,27 ‰ (siehe Tabelle 3.1.1). Der Ausbau des Mittelwasserbettes erfolgte hier mit Längswerken und Schwellen. Alle anderen

betrachteten Abschnitte sind im Mittelwasserbett überwiegend durch Buhnen als Regelungsbauwerke geprägt (SCHWARTZ et al., 2015). Der für diesen Streckenabschnitt gewählte Referenzpegel zeigt einen mittleren Abfluss (MQ) von 331 m³/s (siehe Tabelle 3.1.2).

Tabelle 3.1.1: Durchschnittliche Gefälle der fünf betrachteten Teilabschnitte der Elbe

Elbe-km	durchschn. Gefälle [‰]
40 - 60	0,27
220 - 240	0,23
320 - 340	0,23
420 - 440	0,17
510 - 530	0,13

Tabelle 3.1.2: Hydrologische Kenngrößen der Referenzpegel (GIQ: Gleichwertiger Abfluss; MNQ: Mittlerer Niedrigwasserabfluss; MQ: Mittlerer Abfluss; MHQ: Mittlerer Hochwasserabfluss); MNQ, MQ und MHQ beziehen sich auf die Jahresreihen zwischen 1971 bis 2005, der GIQ auf die Jahresreihen zwischen 1991 und 2010; Sämtliche Daten wurden von der BAW übergeben;

Elbe-km	Referenzpegel (Elbe-km)	GIQ [m³/s]	MNQ [m³/s]	MQ [m³/s]	MHQ [m³/s]
40 - 60	Dresden (55,63)	118	116	331	1470
220 - 240	Wittenberg (214,14)	140	139	365	1430
320 - 340	Magdeburg (326,67)	219	235	556	1880
420 - 440	Tangermünde (388,26)	219	237	564	1840
420 - 440	Wittenberge (453,98)	251	294	688	1970
510 - 530	Neu Darchau (536,44)	255	281	694	1940

Elbe-km 220 bis 240 liegt bereits im Bereich der Mittleren Elbe und ist Teil der sogenannten „Erosionsstrecke“ der Elbe, die durch eine anhaltende Eintiefung der Stromsohle geprägt ist (WSV, 2009). Die von Ost nach West verlaufende Strecke verbindet die beiden Städte Wittenberg und Coswig. Der Abschnitt ist besonders durch seinen Kurvenreichtum geprägt. Innerhalb der Strecke liegen sieben Kurven, wobei Links- und Rechtskurven im ständigen Wechsel gegeben sind. Das sinkende durchschnittliche Gefälle auf 0,23 ‰ sowie die Zunahme des Abflusses (vgl. Tabelle 3.1.2) führen zu einer Zunahme der Gewässerbreite im Vergleich zu dem vorherigen Streckenabschnitt.

Der dritte in die Tiefenanalyse einbezogene Teilabschnitt liegt zwischen Elbe-km 320 und 340. Er schließt den Verlauf der Elbe durch die Stadtstrecke von Magdeburg ein. Innerhalb der Stadtstrecke ragen drei Felsen in die Elbe. Der Domfelsen befindet sich zwischen Elbe-km 325,5 und 326. Ihm folgen die Felsen bei der Strombrücke zwischen Elbe-km 326,5 und 327 sowie der Herrenkrugfelsen zwischen Elbe-km 329,2 und 329,5. Abbildung 3.1.2 zeigt den Domfelsen, der entlang des linken Flussufers in die Elbe ragt. Wie zu sehen ist, wird die Flussbreite durch den Felsen eingeschränkt, was vor allem bei

Niedrigwasser Auswirkungen auf die Schifffahrt hat. Zu derartigen Einschränkungen führen auch die anderen beiden Felsen.



Abbildung 3.1.2: Domfelsen zwischen Elbe-km 325,5 und 326 (Quelle: GEODATENDIENST DER WSV)

Die Felsenbereiche wirken sich dabei auch auf das lokale Gefälle aus, wie Abbildung 3.1.3 zeigt. Während das durchschnittliche Gefälle des gesamten Streckenabschnitts bei 0,23 ‰ liegt, steigt das Gefälle im Bereich der Felsen auf bis zu 0,7 ‰ an.

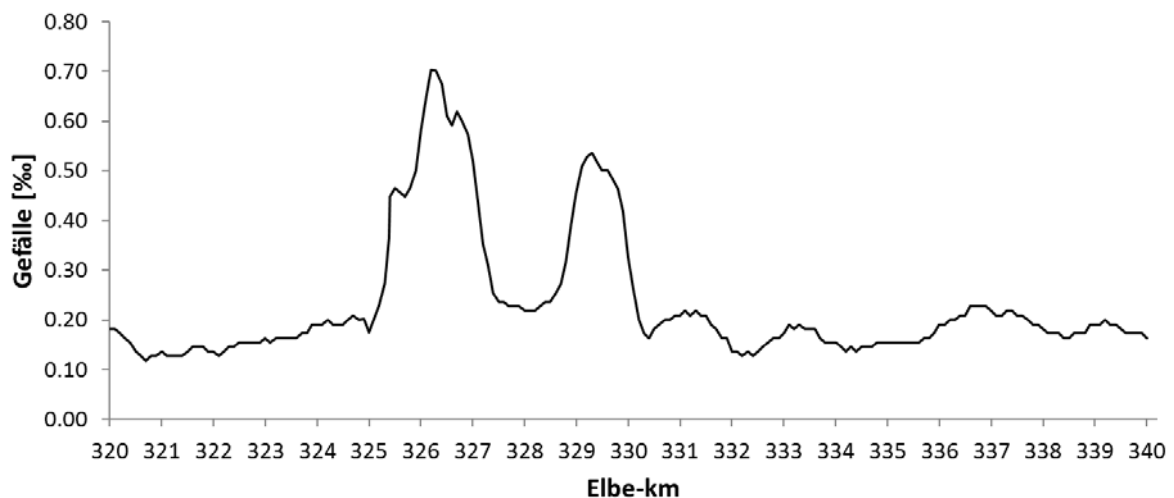


Abbildung 3.1.3: Gefälleverlauf zwischen Elbe-km 320 und 340

Die Zuströme der Mulde (bei Elbe-km 259,6) und der Saale (Elbe-km 297,78) bewirken eine Zunahme des Abflusses zwischen den betrachteten Abschnitten von Elbe-km 220 bis 240 und Elbe-km 320 bis 340. Durch den Abzweig der Alten Elbe bei Elbe-km 322,8, welcher ab Mittelwasser durchströmt wird, ändert sich vorübergehend das Abflussverhalten entlang des Hauptstroms der Elbe. Bei Elbe-km 329,1 mündet die Alte Elbe wieder in den Hauptstrom.

Elbe-km 420 bis 440 liegt nach der Elbeklassifikation der WSV im Übergangsbereich zwischen Oberer und Unterer Mittelelbe (SCHWARTZ et al., 2015). Dabei entspricht der Flussverlauf einer Flachlandstrecke mit weiten Vorländern, wobei das durchschnittliche Gefälle bei 0,17 ‰ liegt. Für diesen Teilabschnitt der Elbe sind in Tabelle 3.1.2 zwei Pegel angegeben. Die Zunahme des Abflusses zwischen Pegel Tangermünde und Pegel Wittenberge soll dabei den Einfluss der Havel auf den Abfluss der Elbe aufzeigen. Die Havel mündet bei Elbe-km 438 in die Elbe. Entsprechend der Wehrsteuerung der Havel wird gegebenenfalls bereits über das Wehr Neuwerben bei Elbe-km 427,8 der Elbe Wasser zugeführt.

Zwischen dem vierten betrachteten Abschnitt (Elbe-km 420 bis 440) und dem fünften Teilabschnitt (Elbe-km 510 bis 530) kommen keine nennenswerten Zuflüsse mehr hinzu, sodass sich die hydrologische Situation kaum verändert (siehe Tabelle 3.1.2). Der Bereich zwischen Elbe-km 510 und 530 umschließt den Übergang der sogenannten „Reststrecke“ (bis Elbe-km 521) zu dem im Zuge der Niedrigwasserregelung ausgebauten Bereich. Entlang der „Reststrecke“ ist die Streichlinienbreite (Streichlinie ist die „planmäßige seitliche Begrenzung des Wasserspiegels im Bereich des Abflussquerschnitts beim Ausbauabfluss, z.B. die gedachte Verbindungslinie entlang der Bühnenköpfe“ (GESAMTKONZEPT ELBE, 2017)) um ca. 45 m größer als in den benachbarten Bereichen. Der Ausbau hatte zur Folge, dass sich die Fließgeschwindigkeiten aufgrund der seitlichen Einengung durch die Bauwerke im mittleren Fahrrinnenbereich erhöhen. Die Erhöhung der Fließgeschwindigkeit bewirkt wiederum einen Anstieg der Transportkraft des Flusses, wodurch die Sedimentation von Geschiebe verringert wird. Da dies im Bereich der „Reststrecke“ nicht der Fall ist, führen die dort geringeren Fließgeschwindigkeiten zu langsamerem Geschiebetransport in unterschiedlichen Transportformen (Dünen, alternierende Bänke) und Sedimentation.

3.2 Kornzusammensetzung und Beweglichkeit der Flusssohle

Die Kornzusammensetzung der Flusssohle der Elbe ändert sich entlang des Flusslaufes. Abbildung 3.2.1 zeigt diese Kornzusammensetzung und hebt dabei die im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Teilabschnitte hervor. Dabei ist ersichtlich, dass sich die Zusammensetzung hin zu feinerem Material verschiebt. Im Abschnitt zwischen Elbe-km 40 und 60 dominieren die Grob- und Mittelkiese mit

zusammen ca. 50 % die Flusssohle, wobei auch ein Steinanteil von bis zu 20 % gegeben ist. Feinkiese und Sande machen in der Summe nur ca. 30 % der Sohle aus. Aufgrund des groben Materials ist die Flusssohle kaum beweglich, wobei lediglich bei großen Hochwasserereignissen lokal Material aus der Flusssohle gelöst wird (FAULHABER, 2013b).

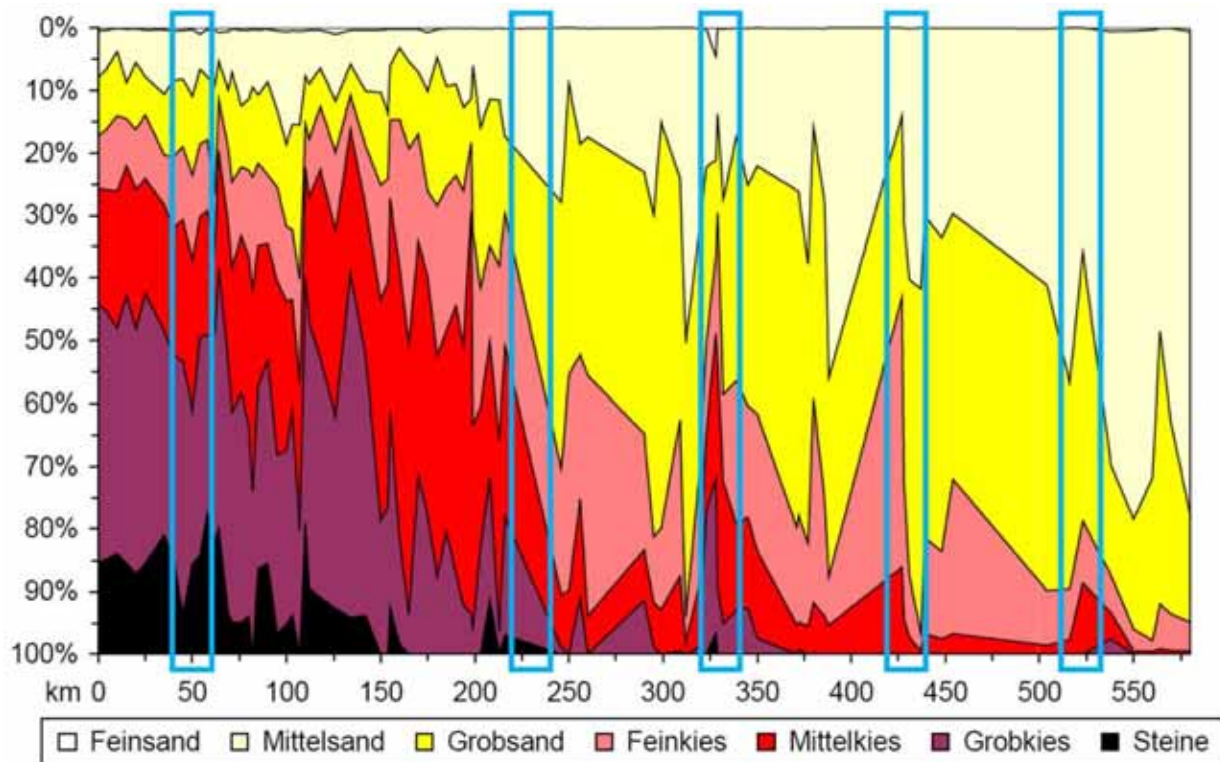


Abbildung 3.2.1: Kornzusammensetzung der Flusssohle mit Markierungen der betrachteten Teilabschnitte (hellblaue Umrandungen) (Quelle: BFG, 2004)

Bis zum Teilabschnitt zwischen Elbe-km 220 und 240 haben sich die Verhältnisse der Zusammensetzung bereits geändert. Der Anteil von Steinen sinkt auf unter 5 %. Ebenso ist vor allem der Anteil von Grobkies im Schnitt auf ca. 10 % gesunken. Dem gegenüber nehmen vor allem die Grob- und Mittelsande zu, sodass sie in der Summe bis zu 60 % der Kornzusammensetzung ausmachen. Das Substrat der Sohle wird somit feinkörniger. Aufgrund der Feinkörnigkeit des Sohlmaterials sind einige Anteile bei allen Abflüssen in Bewegung, wodurch im Bereich des Gewässerbettes ständig Bodenumlagerungen stattfinden (BAW, 2007).

Im dritten betrachteten Abschnitt zwischen Elbe-km 320 und 340 nimmt die Korngröße der Flusssohle lokal zu. Grund dafür sind die drei Felsen (Domfels, Strombrückenfels, Herrenkrugfels), die in diesem Bereich in die Elbe ragen und als Schwelle fungieren. Der Flussstrom verliert dadurch an Transportkraft, wodurch gröberes Material nicht mehr abtransportiert werden kann. Dementsprechend steigen Grob- und Mittelkies zusammen auf 50 % der Kornzusammensetzung an, während die Sandfraktion

zusammen auf 30 % sinkt. Unmittelbar nach der Felsenstrecke geht vor allem der Anteil an Grobkies wieder auf ca. 5 % zurück.

Im Bereich zwischen Elbe-km 420 und 440 spielen Grobkies und Steine keine Rolle mehr. Stattdessen dominieren vor allem Feinkies, Grobsand und Mittelsand die Kornzusammensetzung. Mit Zustrom der Havel bei Elbe-km 438 erlangt die Elbe einen Anstieg der Transportkraft, wodurch Feinkies stärker abtransportiert und somit auf unter 5 % der Kornzusammensetzung absinkt. Vor allem der Anteil an Grobsand nimmt im Gegenzug auf ca. 50 % zu. Die feinkörnige Sohle ist dabei sehr mobil, wobei Geschiebetransport bei allen Abflüssen stattfindet (BFG, 2004)

Im fünften betrachteten Teilabschnitt von Elbe-km 510 bis 530 dominieren Mittel- und Grobsand mit einem Anteil von bis zu 90 % die Kornzusammensetzung. Im Übergangsbereich der „Reststrecke“ und des niedrigwasserregulierten Bereichs bei Elbe-km 521 steigen Mittel- und Feinkiese lokal zusammen auf ca. 20 % an, nehmen im weiteren Verlauf jedoch zugunsten von Mittelsand wieder ab. Auch in diesem Bereich der Elbe führt die Feinkörnigkeit der Sohle dazu, dass bei allen Abflüssen Geschiebetransport gegeben ist. Vor allem die schnelle Resuspension von Sand kann leicht zu einer Umlagerung von großen Dünen bis hin zu alternierenden Bänken führen (BFG, 2004).

4 Methoden und Vorgehensweisen

4.1 Datenauswahl/Datengrundlage

Die Grundlage für die Durchführung einer Tiefenanalyse der Elbe bildet ein Fundus aus flächenhaften Peildaten, die der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) durch die Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter (WSA) zur Verfügung stehen. Zuständig für die im Rahmen der hier relevanten Teilabschnitte der Elbe sind das WSA Dresden von Elbe-km 0 bis 290,7, das WSA Magdeburg von Elbe-km 290,7 bis 502,2 und das WSA Lauenburg von Elbe-km 502,2 bis 607,5. Die Rohdaten der Peilungen wurden bereits bearbeitet und von den WSA überwiegend in einem gerasterten Zustand übergeben. Die Datensätze liegen dabei in 1x1 m-Rastern oder 2x2 m-Rastern vor.

Die Auswahl der für die Tiefenanalyse weiterverarbeiteten Daten wird anhand von zwei Kriterien getroffen. Zum einen wird darauf geachtet, dass Start- und Enddatum einer Peilung für einen Auswerteabschnitt einen Abstand von zwei Monaten nicht überschreitet, um gewährleisten zu können, dass sich die hydrologischen und damit bettbildenden Gegebenheiten während des Peilvorgangs nicht maßgeblich verändern. Der Zeitraum der Peilung wird mit den Abflussdaten des entsprechenden Bezugspegels des jeweiligen Streckenabschnitts abgeglichen, um die Peilung hydrologisch einordnen und starke Schwankungen im Abflussverhalten ausschließen zu können. Des Weiteren werden die Daten auf Vollständigkeit geprüft, das heißt, die 20 km langen Abschnitte sollen möglichst lückenlos dargestellt werden. Einige Datenlücken sind dabei jedoch unausweichlich, beispielsweise in Bereichen von Brücken, da es durch deren „Abschattung zu Abrissen des GPS-Empfangs“ (IB SCHMID, 2013) kommen kann (siehe Abbildung 4.1.1). Gerade bei der Fehlflächenberechnung im späteren Verlauf der Analyse sind diese Bereiche zu berücksichtigen, da hier keine Angaben zur Sohle vorliegen (Datenlücke).

Pro Streckenabschnitt wird darauf geachtet, dass eine Mindestanzahl von Peilungen zur Verfügung steht, um eine belastbare Aussage über die jeweiligen Gegebenheiten und gegebenenfalls Entwicklungen der Sohle treffen zu können. DITTRICH et al. (2016) kommen in einer Untersuchung mit dem Schwerpunkt zur Erfassung von Sohlstrukturen (Dünen) zu dem Ergebnis, dass eine Mindestanzahl von fünf Peilungen gegeben sein sollte, damit eine statistische Aussage noch sinnvoll möglich ist. Dieser Mindestwert wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit übernommen. Tabelle 4.1.1 zeigt die betrachteten Teilabschnitte der Elbe, die jeweilige Anzahl berücksichtigter Peilungen sowie den Zeitraum, aus dem die Peilungen stammen. Genutzt wurden überwiegend Peilungen ab 2004, da die flächenhafte Peilmethode erst ab 1998 schrittweise im Routinebetrieb eingesetzt wurde.

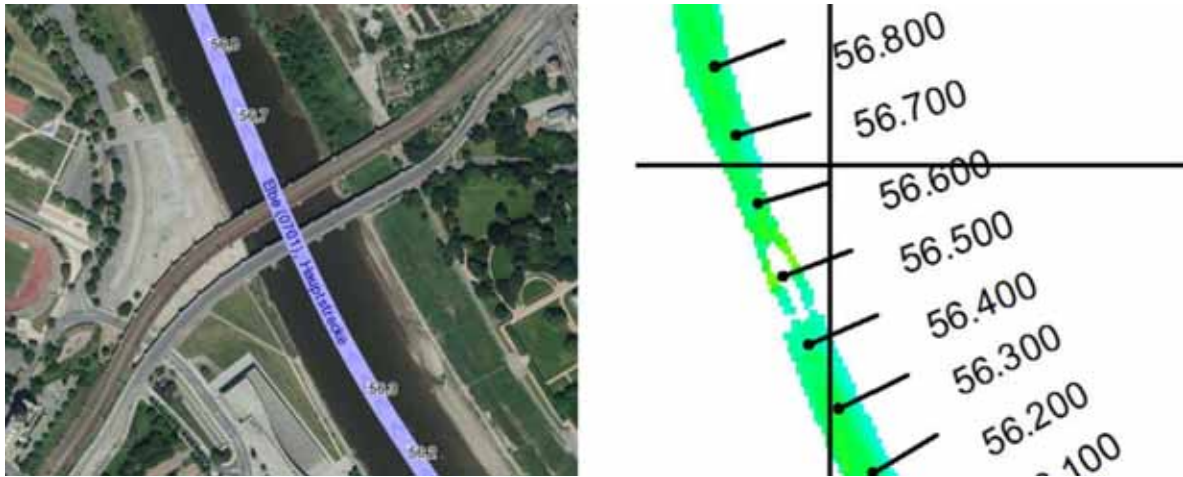


Abbildung 4.1.1: Auswirkung von Brückenabschattungen auf Peilungen. Dargestellt ist der Bereich um die Marienbrücke in Dresden zwischen Elbe-km 56,4 und 56,7 sowohl im Luftbild (Quelle: GEODATENDIENST DER WSV) als auch in den Peildaten.

Tabelle 4.1.1: Übersicht der Anzahl betrachteter Peilungen pro Teilabschnitt sowie der dadurch abgedeckte Zeitraum

Elbe-km	Anzahl Peilungen	abgedeckter Zeitraum
40 - 60	10	2002 - 2016
220 - 240	14	1998 - 2016
320 - 340	7	1998 - 2015
420 - 440	11	2004 - 2016
510 - 530	7	2007 - 2016

4.2 Datenaufbereitung

Die Datenaufbereitung sowie die visuelle Darstellung der flächenhaften Peildaten erfolgt mit dem BAW-eigenen Programm FIKS (Flächiges, interpoliertes Koordinaten Schema). Das Programm dient „der Darstellung und Auswertung von flächig verteilten Daten“ (BAW, 2010), wobei die Originaldaten auf ein regelmäßiges Gitternetz interpoliert und so zu einem Geländemodell verarbeitet werden. Den Flächenelementen werden im Zuge der Berechnung Attribute, wie zum Beispiel geodätische Höhen, Geschwindigkeiten oder Temperaturen, zugewiesen (BAW, 2010). Im Rahmen dieser Arbeit, die zum Ziel hat, Wassertiefen entlang der Elbe zu analysieren, ist ausschließlich die geodätische Höhe von Interesse. Eine weitere Auswertung der berechneten Daten erfolgt im Anschluss mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel.

Das Hauptziel der Arbeit ist es, tiefenbestimmende Stellen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Peilungen herauszuarbeiten und zu bewerten. Aus diesem Grund muss eine Vergleichbarkeit der Daten zwischen den Jahren geschaffen werden. Dazu erfolgen verschiedene Schritte zur Datenauswertung.

4.2.1 Neurasterung der Daten

Da die Peilungen in verschiedenen Rastergrößen vorliegen, wird im ersten Schritt eine Neurasterung mittels FIKS vorgenommen, sodass alle flächenhaften Peildaten eines Teilabschnitts auf demselben Rasternetz liegen. Gewählt wird ein 2x2 m Raster. Zur Berechnung eines Rasterelements werden in einem Umkreis von 3 Meter (kreisförmiges Suchfeld) sämtliche Datenpunkte der Eingabedabei herangezogen und entsprechend nach ihrem inversen Abstandsquadrat gewichtet. Dabei werden alle Datenpunkte berücksichtigt, bei denen in mindestens einem angrenzenden Quadranten ein weiterer Datenpunkt vorhanden ist. Dadurch soll verhindert werden, dass Informationen über die seitlichen Bereiche der Peilungen wegfallen.

4.2.2 Auswahl gleicher Auswerteelemente („Ausdünnen“)

Nachdem alle Peildaten eines Streckenabschnitts auf demselben Gitternetz liegen, werden im nächsten Schritt alle Datenpunkte aussortiert, die nicht in allen Peilungen eines Streckenabschnitts vorhanden sind. Somit werden nur jene Datenpunkte für die weitere Auswertung genutzt, die in allen Peilungen belegt sind. In FIKS wird dieses Vorgehen als „Ausdünnen“ bezeichnet. Dieser Schritt bringt den Vorteil mit sich, dass eine Vergleichbarkeit zwischen den Datensätzen geschaffen wird, da alle Peilungen nun exakt dieselbe Anzahl von Datenpunkte aufweisen. Der Nachteil dieser Methode ist, dass sich eventuell vorhandene Datenlücken einer Peilung durch das „Ausdünnen“ auf alle anderen Peilungen übertragen, wie Abbildung 4.2.1 zeigt. Gerade Messungen, die bei Niedrigwasserbedingungen gefahren wurden und somit einen schmäleren Fahrrinnenbereich darstellen, als dies bei Peilungen bei größeren Abflussbedingungen der Fall ist, reduzieren durch das „Ausdünnen“ die Breiten aller Peilungen.

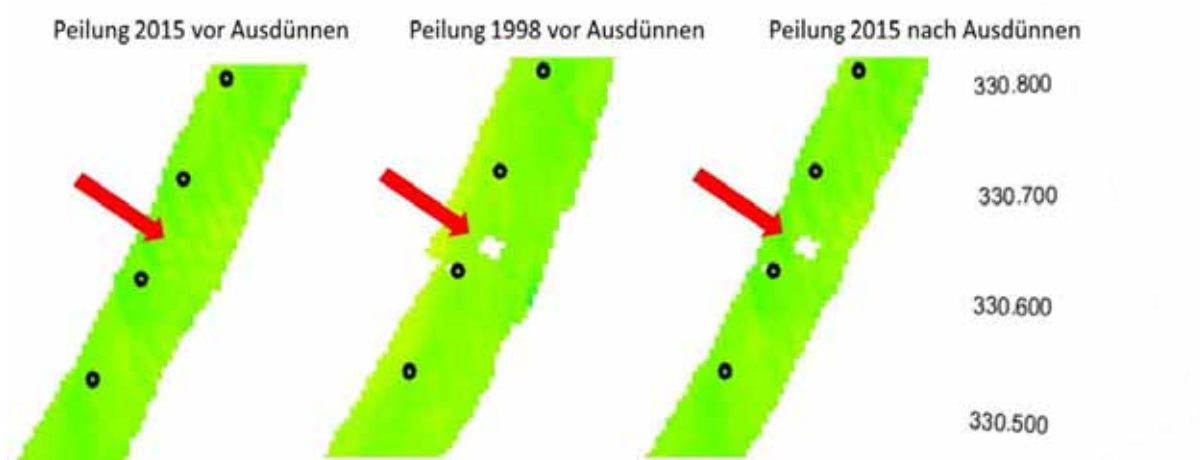


Abbildung 4.2.1: Weitergabe von Datenlücken durch das „Ausdünnen“ am Beispiel der zwei Peilungen von 2015 und 1998 entlang der Strecke von Elbe-km 330,5 und 330,8

4.2.3 Normierung zur Auswertung von Tiefen

Die Auswertung tiefenbestimmender Stellen erfolgt mit Hilfe von Wassertiefen und nicht über die geodätischen Höhen, in der die Peilungen vorliegen. Grund dafür ist, dass dadurch Gefälleunterschiede entlang der Flussabschnitte entfallen. Zudem lassen sich dadurch die Tiefen unterschiedlicher Streckenabschnitte direkt miteinander vergleichen.

Die Wassertiefen werden im Rahmen dieser Arbeit auf den „Wasserstand des gleichwertigen Abflusses“, kurz W(GIQ), bezogen. In der Praxis wird dieser Wasserstand zumeist vereinfacht als „Gleichwertiger Wasserstand“ (GIW) bezeichnet. Auch im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird die Bezeichnung „GIW“ verwendet, gemeint ist dabei jedoch stets W(GIQ). Genutzt wird im Rahmen dieser Arbeit der GIW2010, der auf der letzten Aktualisierung im Jahr 2010 basiert.

Sich ändernde Flussquerschnitte können bei gleichbleibendem Abfluss Auswirkungen auf den Wasserstand haben. Dementsprechend könnte auch der GIW zwischen den Jahren schwanken. Um eine Vergleichbarkeit der Flusssohlen der einzelnen Peilungen zu erhalten, wird sich jedoch konstant auf die gleichbleibende Wasserspiegellage des GIW2010 bezogen. Es wird somit die Annahme getroffen, dass dieser über die Jahre keinen Schwankungen unterliegt und für alle Peilungen gleichermaßen gültig ist.

Die Daten für den GIW2010 entstammen BAW/BFG (2012). Sie liegen dort als geodätische Höhen für Hektometerprofile (100 m) vor. Die verfügbaren Höhen des GIW2010 werden als Grundlage zum Rastern des Bezugswasserspiegels genutzt. Diese werden dazu in FIKS mit derselben Konfiguration neu berechnet, die für die Rasterung der flächenhaften Peilungen genutzt wurde, sodass der Bezugswasserspiegel danach ebenfalls in einem 2x2 m Raster vorliegt. Die Querprofile werden im nächsten Schritt mittels FIKS linear interpoliert, um einen flächigen Bezugswasserspiegel zu erhalten.

Da sowohl Peildaten als auch Bezugswasserspiegellagen auf demselben Gitternetz vorliegen, kann die Differenz zwischen den beiden geodätischen Höhen gebildet werden, um die Wassertiefen bezogen auf den GIW2010 zu erhalten. Dabei werden die Peildaten von dem Bezugswasserspiegel abgezogen, um mit positiven Werten weiterrechnen zu können. Datenlücken, die in den Peildaten vorliegen, werden dabei durch FIKS nicht berücksichtigt und in die generierten Datensätze der Wassertiefen übertragen.

Im weiteren Verlauf der Arbeit wird der GIW2010 als GIW bezeichnet.

4.2.4 Auslesen von Wassertiefen

Die berechneten Wassertiefen können in FIKS die Grundlage für weitergehende Berechnungen bilden. Beispielsweise kann für jedes Rasterelement der Mittelwert aus den Werten aller Peilungen gebildet werden, sodass die mittlere Wassertiefe entlang des Flussabschnitts dargestellt werden kann. Des Weiteren kann die zeitliche Standardabweichung der Peilungen berechnet werden. Dabei wird jeweils die Standardabweichung aller Werte eines Elements berechnet. Die zeitliche Standardabweichung kann zur Beschreibung der Sohlendynamik herangezogen werden.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführte Auswertung der tiefenbestimmenden Stellen soll insbesondere im Hinblick auf die Schifffahrt erfolgen. Aus diesem Grund erfolgt die weitere Analyse der Wassertiefen ausschließlich in der von der Schifffahrt genutzten Fahrrinne. Dabei wird sich auf jeweils eine Fahrrinne pro Streckenabschnitt beschränkt. Zwar kann die Fahrrinne über die Jahre entlang eines Abschnitts variieren, um einen direkten Vergleich zwischen den Wassertiefen der einzelnen Peilungen zu erhalten, muss jedoch eine gleichbleibende Auswertefläche gegeben sein. Somit wird hier die vereinfachte Annahme getroffen, dass die gewählte Fahrrinne des jeweiligen Abschnitts für sämtliche Peilungen gültig ist. Die Lage der Fahrrinnen wurde durch die jeweiligen Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter übergeben.

Um eine detaillierte Auskunft über die räumliche Verteilung der Tiefenverhältnisse zu erhalten, wird die Fahrrinne in einen mittleren, einen linken und einen rechten Untersuchungsbereich unterteilt. Der mittlere Untersuchungsbereich umfasst dabei eine Breite von 30 m, die beiden seitlichen von jeweils 10 m, sodass durchgehend ein Breitenbereich von 50 m (= Fahrrinnenbreite) betrachtet wird. Zur Umsetzung dieses Ansatzes werden in FIKS drei Linienzüge benötigt, die jeweils in der Mitte des entsprechenden Untersuchungsbereichs verlaufen. Basierend auf Rechts- und Hochwerten der linken und rechten Begrenzung der ursprünglichen Fahrrinne werden die Koordinaten der drei Linienzüge berechnet. Abbildung 4.2.2 zeigt beispielhaft die drei konstruierten Linienzüge auf dem Teilabschnitt zwischen Elbe-km 320 und 320,5.

Entlang der Linienzüge kann FIKS flächige Kenngrößen der Wassertiefe berechnen. Die Bereiche, in denen diese berechnet werden sollen, werden durch definierte Polygone vorgegeben. Im Rahmen der Arbeit beträgt die Mittelungslänge der Auswerteflächen 100 m, mit einer Breite von 30 m in der Mitte und 10 m an den Seiten. Abbildung 4.2.3 zeigt eine solche definierte 30x100 m Auswertefläche bezogen auf den mittleren Linienzug. Die Schrittweite, mit der die Auswertefläche auf dem Linienzug für die nächste Berechnung verschoben wird, beträgt hier 100 m. Dadurch ist eine lückenlose Analyse der betrachteten 100 m Abschnitte gewährleistet. Die erstellte Ausgabedatei enthält für jede 100 m lange Auswertefläche die durchschnittliche, minimale und maximale Wassertiefe, die räumliche Standardabweichung der Wassertiefe innerhalb des betrachteten Polygons, die Anzahl der Elemente,

die in die Berechnung mit einfließen sowie die Anzahl an Elementen, die maximal in der Auswertefläche liegen können. Der obere Teil in Abbildung 4.2.4 zeigt einen beispielhaften Ausschnitt einer Ergebnisdatei bei einer Betrachtung der kompletten Wassertiefe. Eine berechnete Auswertefläche des mittleren Linienzugs umfasst 3.000 m², ein seitliches 1.000 m². Da die Daten in einem 2x2 m Raster vorliegen, entspricht das theoretisch 750 Elementen pro mittlerem Polygon und 250 pro seitlichem Polygon. In der Praxis liegen Polygon und Rasterpunkte jedoch nicht deckungsgleich übereinander, wodurch ein Polygon mehr oder weniger Rasterpunkte beinhalten kann, wie die maximal mögliche Anzahl Elemente eines Polygons („El-PGZ“) in Abbildung 4.2.4 zeigt. Diese Abweichung liegt lediglich im Bereich von 1 – 2 Elemente.

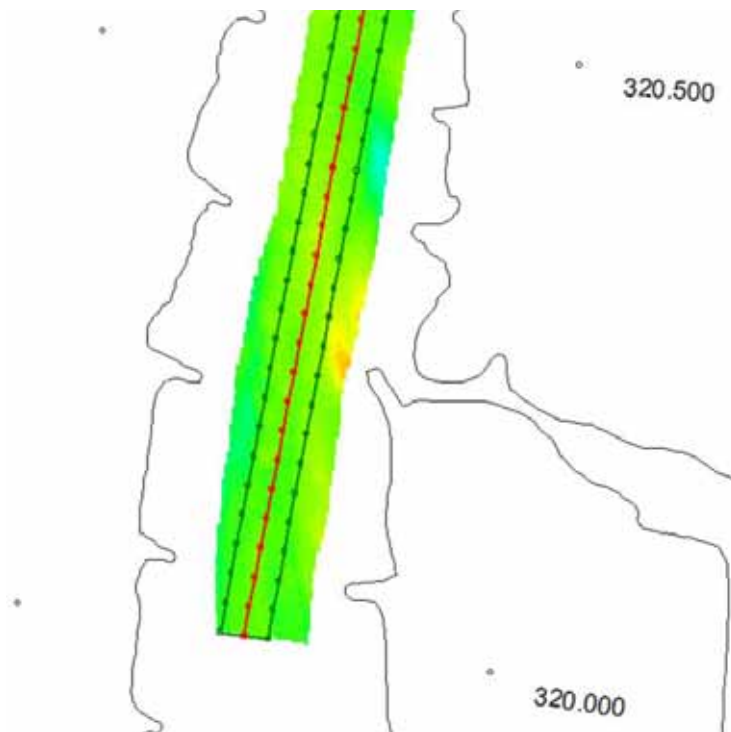


Abbildung 4.2.2: Ausschnitt der drei konstruierten Linienzüge zwischen Elbe-km 320 und 320,5, wobei beiden seitlichen Linienzüge jeweils grün sind und der mittlere Linienzug rot.

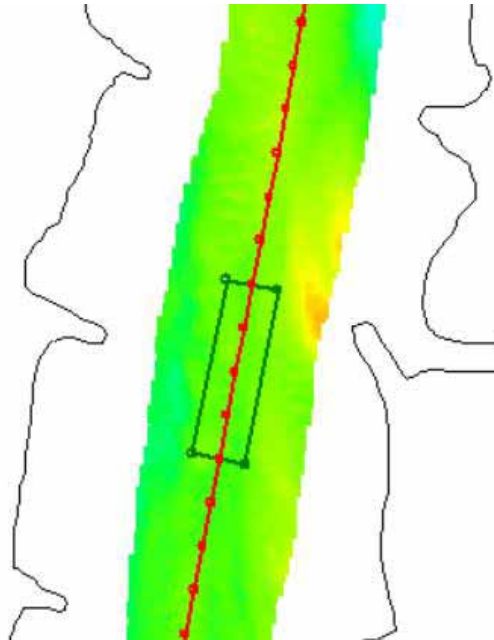


Abbildung 4.2.3: Beispielhaftes 30x100-m-Polygon entlang des mittleren Linienzugs

Ohne Wertefilter

PL	Koor.x	Koor.y	Station	Länge	Mittel	Minimum	Maximum	St.Abw.	Elemente	El-PGZ
488	4478368.877	5782695.062	332.158	12100.00	1.8931	1.3257	2.2630	0.148	751	751
492	4478377.864	5782794.918	332.258	12200.00	2.0815	1.5497	2.3962	0.213	751	751
496	4478386.851	5782894.776	332.358	12300.00	2.1135	1.5362	2.7775	0.345	751	751

Mit Wertefilter

PL	Koor.x	Koor.y	Station	Länge	Mittel	Minimum	Maximum	St.Abw.	Elemente	El-PGZ
488	4478368.877	5782695.062	332.159	12100.00	1.4995	1.3257	1.5789	0.071	17	751
492	4478377.864	5782794.918	332.259	12200.00	1.5744	1.5497	1.5886	0.011	10	751
496	4478386.851	5782894.776	332.359	12300.00	1.5745	1.5362	1.5989	0.019	16	751

Abbildung 4.2.4: Ausschnitte aus den berechneten Ausgabedateien von FIKS für den mittleren Linienzug. Oben: Berechnungen über komplette Wassertiefe; Unten: Berechnungen mit Wertefilter zwischen Wassertiefe 0 und 1,6 m unter GIW

4.2.5 Gefiltertes Auslesen von Wassertiefen

Über einen Wertefilter kann die darzustellende Tiefe in FIKS eingegrenzt werden. Dadurch ist es beispielsweise möglich, nur Bereiche zu betrachten, in denen gewisse Wassertiefen nicht erreicht werden. Diese Bereiche werden hier als „Fehltiefen“ bezeichnet. Als Fehltiefen werden im Rahmen dieser Arbeit jene Tiefen betrachtet, die eine Mindesttiefe von 1,6 m unter GIW nicht erreichen. Abbildung 4.2.5 zeigt den Vergleich zwischen gefilterter und ungefilterter Wassertiefe im Bereich zwischen Elbe-km 332 und 332,5, wobei der mittlere Linienzug (rot) als Orientierung dienen soll.

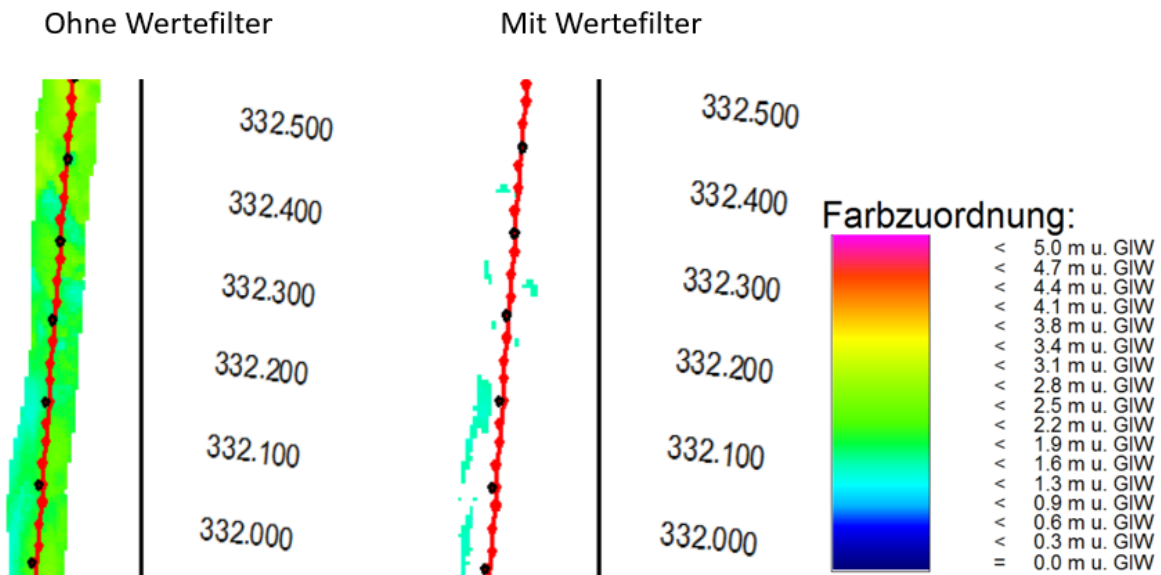


Abbildung 4.2.5: Darstellung der Wassertiefen zwischen Elbe-km 332 und 332,5. Links: komplette Wassertiefe inklusive mittlerem Linienzug; Rechts: gefilterter Bereich zwischen 0 und 1,6 m unter GIW inklusive mittlerem Linienzug.

4.3 Datenauswertung

Die Datenauswertung zielt darauf ab, Bereiche des Flussbetts aufzuzeigen, die zu Sedimentanlagerung neigen und somit tiefenbestimmende Stellen ausbilden können. Nach BAW (2015b) müssen für die Auswertung von Sohlpeilungen vergleichbare Sohlzustände betrachtet werden, welche möglichst nach einer langen Niedrigwasserperiode aufgenommen wurden. Große Hochwasserereignisse können hingegen vorübergehend eine Umgestaltung des Flussbettes bewirken und somit ein nicht repräsentatives Bild der Flusssohle darstellen. Aus diesem Grund werden Peilungen, die unmittelbar nach einem Hochwasserereignis gefahren wurden, im Rahmen der Auswertung nicht weiter berücksichtigt. Durch Abgleich mit der Abflussganglinie des jeweiligen Bezugspegels werden diese ausfindig gemacht und aussortiert. Da es jedoch keinen Grenzwert gibt, der besagt, ab welchem Abfluss die Flusssohle hochwasserbeeinflusst ist, bzw. wie lange nach einem Hochwasserereignis diese noch dadurch beeinflusst ist, erfolgt die Auswahl der hochwasserbeeinflussten Peilungen nach eigenem Ermessen. Die Auswahl orientiert sich dabei an dem MHQ des jeweiligen Referenzpegels. Eine Peilung wird dabei aussortiert, wenn deren Aufnahmedatum nicht mindestens ein halbes Jahr nach dem letzten Hochwasserereignis liegt, das den MHQ des Referenzpegels überschritten hat.

Um die in Kapitel 2 formulierten Ziele erfüllen zu können, wird eine Datenauswertung mit mehreren Schritten durchgeführt. Die Datenauswertung beruht auf den Ergebnissen, die in FIKS berechnet und ausgelesen wurden. Deren weitere Verarbeitung und Darstellung erfolgt mit dem Tabellenkalkulationsprogramm Microsoft Excel.

4.3.1 Abdeckungsgrad der Daten

Datenlücken oder Breitereinschränkungen können dazu führen, dass nicht alle Elemente der betrachteten Flächen innerhalb eines Polygons mit Daten belegt sind. Im ersten Schritt wird daher ausgewertet, wie viel Prozent der maximal möglichen Elemente tatsächlich betrachtet werden, um ein Bild zu erhalten, wie aussagekräftig weitere Auswertungen sind. Die Gesamtheit aller möglichen Elemente bildet die Summe der maximalen Anzahl Elemente pro Filterpolygon entlang eines Linienzugs (vgl. Abbildung 4.2.4). Die Summe aller tatsächlich betrachteten Elemente wird dabei im Anschluss als Prozent von der Grundgesamtheit angegeben. Der Abdeckungsgrad wird für die Auswerteflächen jedes Linienzugs separat berechnet und angegeben.

4.3.2 Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen

In diesem Schritt soll ein Überblick über die Tiefenverhältnisse der einzelnen Peilungen gewonnen werden und wie diese sich voneinander unterscheiden. Wie oft welche Wassertiefen dabei während der einzelnen Peilungen auftreten, wird durch die Berechnung der Häufigkeitsverteilung ermittelt. Die Berechnung der Häufigkeitsverteilung erfolgt über die gesamte Fahrrinnenbreite von 50 m. Dazu werden die Wassertiefen aller Rasterelemente in Klassen eingeteilt und die Anzahl der Elemente pro Klasse berechnet. Die Klassifizierung wird hier in Schritten von 10 cm vorgenommen, sodass beispielsweise alle Wassertiefen die sowohl > 1 m unter GIW als auch ≤ 1,1 m unter GIW in einer Klasse zusammengeführt werden. Die Anzahl an Elementen pro Klasse geteilt durch die Gesamtanzahl an Elementen ergibt die Dichte der Häufigkeiten. Sie stellt somit den Anteil der Elemente innerhalb einer Größenklasse dar. Die Summe der Dichten aller Größenklassen ergibt 1. Der Verlauf der Kurve der Häufigkeitsverteilung gibt Auskunft über die Verteilung der Wassertiefen: je flacher und breiter sie ist, desto größer ist die Spannbreite der vorhandenen Werte, je höher und enger sie ist, desto näher liegen die Werte beieinander, was eine geringere Variabilität der Tiefen bedeutet. Die Wölbung / Kurtosis

$$k = \left(\frac{n(n+1)}{(n-1)(n-2)(n-3)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^4 \right) - \frac{3(n-1)^2}{(n-2)(n-3)} \quad (1)$$

(n = der Anzahl Klassen, x_i = Häufigkeit einer Klasse i und s = Standardabweichung von x) quantifiziert diese Steilheit im Vergleich zu der einer Normalverteilung. Eine Kurtosis größer 0 weist auf eine schmale und spitze Verteilung hin, ein Wert kleiner null dagegen auf eine flache und breite Verteilung.

Über die Schiefe

$$g = \frac{n}{(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i - \bar{x}}{s} \right)^3 \quad (2)$$

($\bar{x}$ = Mittelwert von x) lässt sich ausdrücken, ob die Kurve rechtsschief ($g > 0$) oder linksschief ($g < 0$) verläuft, also eine Asymmetrie um den Mittelwert gegeben ist. Ist der Graph beispielsweise rechtsschief (rechte Seite fällt flacher ab als linke) tendiert die Verteilung zu Werten größer dem Mittelwert. „Werte um die Null weisen darauf hin, dass die Schiefe und Wölbung nicht von der einer Normalverteilung abweichen“ (DORMANN, 2013).

4.3.3 Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Wassertiefen

Mithilfe der Unterschreitungswahrscheinlichkeit p lassen sich Aussagen treffen, mit welcher Wahrscheinlichkeit Wassertiefen, beispielsweise 1,6 m unter GLW, unterschritten werden. Gerade der Vergleich der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten von unterschiedlichen Peilungen kann auf Veränderungen und eventuelle Tendenzen zwischen den Jahren hindeuten. Die Berechnung der Unterschreitungswahrscheinlichkeit erfolgt über die komplette Fahrrinnenbreite von 50 m. Zur Berechnung wird die Verteilung nach Weibull verwendet, wobei die Wassertiefen aller Elemente der Größe nach aufsteigend sortiert und mit einem Rang r von 1 bis n durchnummeriert werden. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit p wird durch

$$p = \frac{r}{n+1} \quad (3)$$

berechnet. Wegen der großen Datenmenge von fast 200.000 Elementen je Peilung würden Berechnungen und Darstellungen mit Excel nicht mehr verzögerungsfrei ausführbar sein. Aus diesem Grund wird der Datensatz reduziert. Grundlage für diese Entscheidung ist das „Gesetz der großen Zahlen“, das besagt, dass sich der Durchschnittswert bei hinreichend großer Stichprobe nahe dem Erwartungswert stabilisiert, sodass ab einer gewissen Datenmenge das Hinzufügen weiterer Datenpunkte keinen statistischen Mehrwert mehr hat (FAHRMEIR et al., 2016). Zwar ändert sich dadurch die absolute Anzahl an Messwerten, das relative Verhältnis von r zu n jedoch nur geringfügig. Zur Auswahl der Datenpunkte wird das statistisch legitime Prinzip der „systematischen Ziehung“ verwendet (FAHRMEIR et al., 2016), wobei die Wassertiefen aller Elemente der Größe nach sortiert werden und jeder 20. Wert ausgewählt wird. Dadurch reduziert sich der Datensatz auf ca. 10.000 Elemente. Wie Abbildung 4.3.1 zeigt, hat die Reduktion der Datenpunkte keine erkennbare Auswirkung auf die Berechnung der Unterschreitungswahrscheinlichkeit.

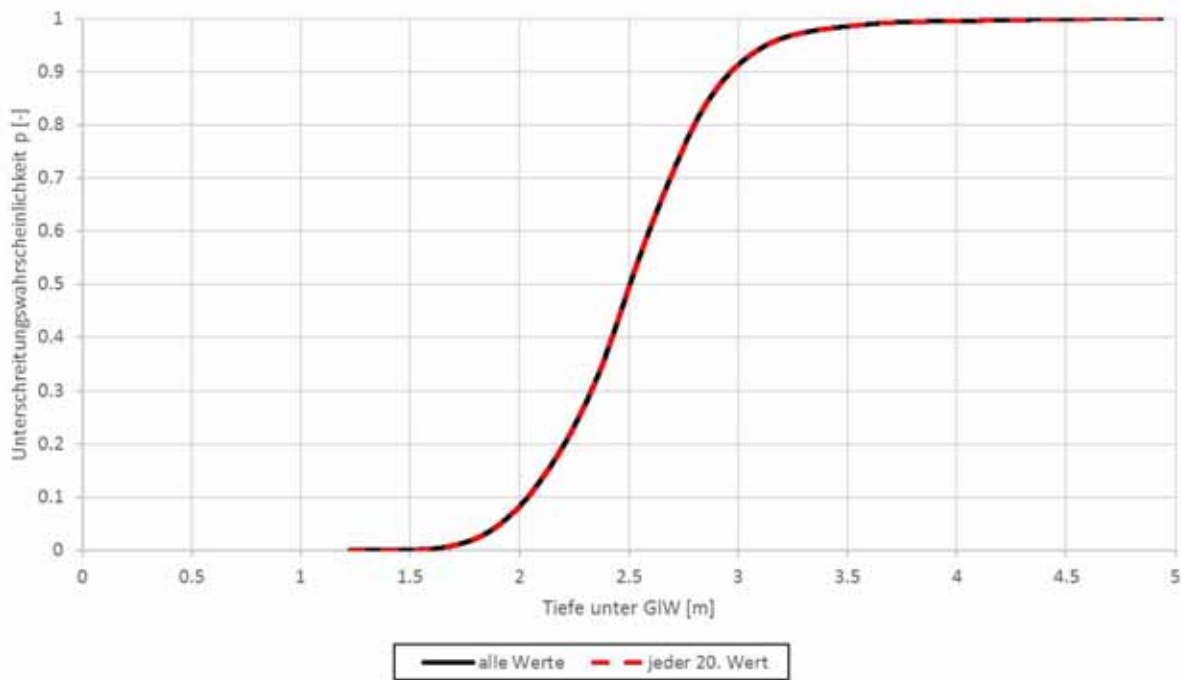


Abbildung 4.3.1: Vergleich der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten, berechnet basierend auf allen Werten (schwarze Linie) und auf lediglich jedem 20. Wert (rote Linie)

4.3.4 Auswertung des durchschnittlichen Kammweges

Unter dem Begriff Kammweg wird hier kein Weg im eigentlichen Sinne verstanden. Der Kammweg stellt in dieser Auswertung die jeweils flachsten Stellen der Flusssohle entlang des Flussverlaufs dar, die nicht zwingend auf einer schifffahrtsrelevanten Linie liegen. Da der Fokus der Arbeit im Besonderen auf der Auswertung tiefenbestimmender Stellen bei unterschiedlichen Geometrien liegt, spielt der Kammweg hier eine wichtige Rolle, um solche ausfindig zu machen. Für die Berechnung des Kammwegs wird in diesem Fall die flachste Stelle pro durch ein 100-m-Polygon umrandete Auswertefläche verwendet. Die Kammwege werden für den mittleren Bereich und die beiden seitlichen Bereiche der Fahrrinne separat betrachtet. Die Kammwege der einzelnen Peilungen entlang einer Strecke werden gemittelt, um den Verlauf eines durchschnittlichen Kammwegs zu erhalten. Über ihn lässt sich feststellen, in welchen Bereichen im Durchschnitt die Mindesttiefe von 1,6 m unter GIW nicht erreicht wird. Ergänzend wird der maximale Schwankungsbereich aller Kammwege berechnet, um die Variabilität des Kammwegs aufzuzeigen.

Die Kammwege werden im nächsten Schritt genutzt, um permanente Problemstellen ausfindig zu machen, also Bereiche, in denen Fehltiefen über den betrachteten Zeitraum wiederholt auftreten. Für jede 100 m lange Auswertefläche wird dabei ermittelt, in wie vielen Peilungen die Mindesttiefe von 1,6 m unter GIW entlang unterschritten wird, unabhängig von dem Ausmaß der Unterschreitung. Die Auswertung erfolgt separat für den mittleren Bereich und die beiden seitlichen Bereiche der Fahrrinne.

4.3.5 Räumliche Verteilung von Fehlflächen

Die Berechnung von Fehlflächen, also der Flächen, auf denen die Mindesttiefe von 1,6 m unter GLW unterschritten wird, erfolgt über die in Kapitel 4.2.5 erzeugte Ausgabedatei (siehe Abbildung 4.2.4). Der Wertefilter beschränkt dabei das Auslesen der Daten auf den Tiefenbereich zwischen 0 und 1,6 m unter GLW. Über die in der Ausgabedatei angegebene Anzahl von betrachteten Elementen (Spalte „Elemente“) kann berechnet werden, wie groß die Fehlfläche ist. Da die Daten in einem 2x2 m Raster vorliegen, ergibt die Anzahl der Elemente multipliziert mit 4 die Fehlfläche in m². So stellen 17 Elemente beispielsweise eine Fehlfläche von 68 m² dar.

Zur Lokalisierung von Fehlflächen entlang des Flussverlaufs werden diese in kumulierter Form dargestellt. Je nach Ausmaß der Fehlfläche steigt die Summenkurve dabei unterschiedlich stark an, wobei größere Fehlflächen einen stärkeren Anstieg zur Folge haben. Für die Berechnung werden jeweils pro 100-m-Abschnitt die Fehlflächen der seitlichen und mittleren Filterflächen addiert, sodass sich für den 20 km langen Teilabschnitt insgesamt 200 Fehlflächenwerte ergeben. Die Fehlfläche wird sowohl als absoluter Wert in m² als auch prozentual, bezogen auf die Gesamtfläche der Fahrrinne, angegeben. Zur Berechnung der Fahrrinnenfläche wird hier die Anzahl aller Elemente genutzt, die sich beim Auslesen der Daten (siehe Kapitel 4.2.4) innerhalb der betrachteten Filterpolygone befanden (vgl. Abbildung 4.2.4). Das bringt den Vorteil mit sich, dass Seiteneinschränkungen direkt mitberücksichtigt werden. Datenlücken innerhalb der Fahrrinne, beispielsweise unter Brücken, führen dabei zu einer Reduktion der Gesamtanzahl an Elementen und somit zu einer Verringerung der Fahrrinnenfläche. Bezogen auf die Gesamtanzahl von Elementen (mehr als 200.000) ist dieser Effekt jedoch vernachlässigbar.

4.3.6 Fehlfläche pro Tiefenschicht

Neben der Aussage darüber, in welchen Bereichen sich Fehlflächen entlang der Teilabschnitte befinden, ist auch von Interesse, in welcher Tiefe wie viel Fehlfläche gegeben ist. Dadurch kann beispielsweise abgeschätzt werden, welchen Mehraufwand das Erreichen einer neu festgelegten Mindestwassertiefe mit sich bringen würde.

Da Flussquerschnitte entlang der Elbe oft durch Dreiecksprofile geprägt sind, sind Fehltiefen in der Fahrrinnenmitte für die Schifffahrt besonders einschränkend, da ein Ausweichen entlang des seitlichen Fahrrinnenbereichs häufig nicht möglich ist. Einschränkungen in den Seitenbereichen können hingegen durch Überhol- und/oder Begegnungsverboten der Schiffe umgangen werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Auswertung, wie viel Fehlfläche/Fehlvolume sich in welcher Tiefenschicht befindet, daher auf den 30 m breiten mittleren Bereich der Fahrrinne beschränkt.

Für die Analyse wird die Tiefe zwischen 0 und 1,8 m unter GIW betrachtet, wobei die Fehlfläche immer für 10 cm-Bereiche berechnet wird, also beispielsweise zwischen 1,2 und 1,3 m unter GIW. Diese Analyse kann theoretisch für jedes 100 m-Polygon separat betrachtet werden. Auf Grund der Datenfülle beschränkt sich die hier durchgeführte Analyse jedoch auf die Betrachtung des gesamten 20 km Abschnittes.

Die Auswertung der Fehlflächenverteilung bis zu einer Tiefe von 1,8 m unter GIW soll zeigen, wie hoch der Mehraufwand wäre, wenn man eine Mindesttiefe von 1,8 m unter GIW anstreben würde.

4.3.7 Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel

Die Angabe von Bezugswasserständen entlang eines Flusslaufes sind beispielsweise für die Schifffahrt interessant, um die maximal mögliche Beladung planen zu können und die daraus resultierende Eintauchtiefe des Schiffes zu berechnen. Dabei stellt sich jedoch die Frage, ob Wassertiefen bei unterschiedlichen Abflüssen stets gleichförmig verlaufen oder ob sich, beispielsweise durch lokale Gefälleunterschiede, die Gleichwertigkeit der Wasserspiegellagen verändert, sodass daraus bei unterschiedlichen Abflüssen verschiedene tiefenbestimmende Stellen resultieren.

Um zu analysieren, ob unterschiedliche Bezugswasserspiegel entlang der betrachteten Teilabschnitte der Elbe zusätzliche tiefenbestimmende Stellen zur Folge haben, wird jeweils der Verlauf des $W(GIQ(1991/2010))$ (Niedrigwasser) und der Wasserstand des Median des Abflusses $W(MeQ(1971/2010))$ im Längsschnitt betrachtet. Eine Ungleichwertigkeit, also ein nicht konstant verlaufender Abstand zwischen den beiden Wasserspiegellagen, wird als Indiz für zusätzliche tiefenbestimmende Stellen gewertet. Dazu werden die Differenzen zwischen $W(MeQ)$ und $W(GIQ)$ berechnet, sowie der daraus resultierende mittlere Abstand. Die zugrundeliegenden Datensätze enthalten dabei die Wasserspiegellagen in 100 m Schritten. Da die Differenzen zwischen den Bezugswasserspiegellagen durchgehend Schwankungen aufweisen, diese jedoch häufig nur sehr gering ausfallen und somit zu keinen tiefenbestimmenden Stellen führen, wird ein Schwellenwert benötigt der mindestens erreicht werden muss, um von einer tiefenbestimmenden Stelle sprechen zu können. Aufgrund der sich ändernden Abflüsse bzw. Wasserstände entlang der Elbe, ändert sich auch kontinuierlich der Abstand zwischen $W(MeQ)$ und $W(GIQ)$. Ein absoluter Schwellenwert, der von Abschnitt zu Abschnitt angepasst werden muss, erscheint im Hinblick auf die angestrebte Einheitlichkeit der Analyse für die einzelnen Teilabschnitte als nicht sinnvoll. Der Schwellenwert wird daher so gewählt, dass er sich automatisch den gegebenen Abflussbedingungen des Teilabschnitts anpasst. Im Rahmen dieser Arbeit wird somit als tiefenbestimmende Stelle betrachtet, wo der mittlere Abstand der beiden Bezugswasserspiegel um mindestens 10 % unterschritten wurde. Für einen

mittleren Abstand von 1 m zwischen W(MeQ) und W(GIQ) würde somit beispielsweise ein Abstand kleiner 90 cm als tiefenbestimmende Stelle gewertet werden.

4.3.8 Vergleich mit anderen Daten

Um herauszustellen, ob die eigenen Berechnungen der Wassertiefen in FIKS nicht fehlerbehaftet sind, werden diese mit anderen Daten verglichen. Als Vergleich dient dazu eine Untersuchung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsämter, die Fehlflächen der Peilungen 2014/2015 entlang der Elbe in Form von Flächenpeilplänen zusammengestellt haben. Die Flächenpeilpläne beziehen sich auf Wassertiefen unter GLW2010, wobei Tiefen von 0 bis 1,6 m unter GLW dargestellt sind. Ein Plan bildet dabei jeweils einen Teilabschnitt der Elbe von 1 und 2 km inklusive der Fahrrinne ab. Den Flächenpeilplänen wird die in FIKS eingelesene und neu gerasterte Peilung von 2014 gegenübergestellt, die für jeden Teilabschnitt der Elbe vorliegt. Die Darstellung wird mittels Wertefilter in FIKS ebenfalls auf den Bereich zwischen 0 und 1,6 m unter GLW beschränkt, sodass ein direkter Vergleich zwischen den Flächenpeilplänen und eigenen Berechnungen durchgeführt werden kann. Da die Ergebnisse der Wasser- und Schifffahrtsämter lediglich als Pläne vorliegen, erfolgt der Vergleich rein visuell.

4.4 Auswertung von Elbe-km 510 – 530

Die genannten Vorgehensweisen wurden für alle Teilabschnitte gleichermaßen durchgeführt. Eine Ausnahme bildet der Teilabschnitt zwischen Elbe-km 510 und 530. Auf Grund der hohen Sohldynamik der „Reststrecke“, ist hier keine feste Fahrrinne gegeben. Da jedoch die hier genutzte Auswertungsmethode auf einer Fahrrinne basiert, ist dieses Verfahren für den Teilabschnitt von Elbe-km 510 – 530 nicht möglich. Um dennoch Aussagen über diesen Bereich treffen zu können, wird die Auswertung in reduzierter Form durchgeführt. Dazu werden in FIKS alle betrachteten Peilungen gemittelt, sodass eine durchschnittliche Flusssohle dargestellt wird. Des Weiteren wird die zeitliche Standardabweichung aller Elemente zwischen den Peilungen berechnet und dargestellt. Über die Darstellung der gemittelten Flusssohle und der zeitlichen Standardabweichung lässt sich ableiten, in welchen Bereichen durchschnittlich tiefenbestimmende Stellen vorliegen und wie variabel diese sind.

Da für den Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel keine Fahrrinne benötigt wird, kann dieser für den Abschnitt von Elbe-km 510 – 530 unverändert durchgeführt werden.

5 Ergebnisse

5.1 Elbe-km 40 – 60

5.1.1 Datengrundlage

Zur Konstruktion der in FIKS benötigten Linienzüge lag für den Abschnitt von Elbe-km 40 – 60 die Fahrrinne von 2005 vor, die für die Berechnung verwendet wurde.

Abbildung 5.1.1 zeigt die Abflussganglinie des Pegels Dresden bei Elbe-km 55,63 sowie eine Einordnung der betrachteten Peilungen in die hydrologische Situation. Die Peilungen von September 2002 und August 2013 wurden dabei unmittelbar nach Hochwasserereignissen gefahren, die den MHQ von $1470 \text{ m}^3/\text{s}$ jeweils mehrfach überschritten. Da Hochwasserereignisse den Normalzustand der Flusssohle vorübergehend umgestalten, wurden diese beiden Peilungen für die Analyse als ungeeignet betrachtet und aussortiert. Die Tiefenauswertung von Elbe-km 40 – 60 wurde somit mit neun Peilungen zwischen 2004 und 2016 durchgeführt.

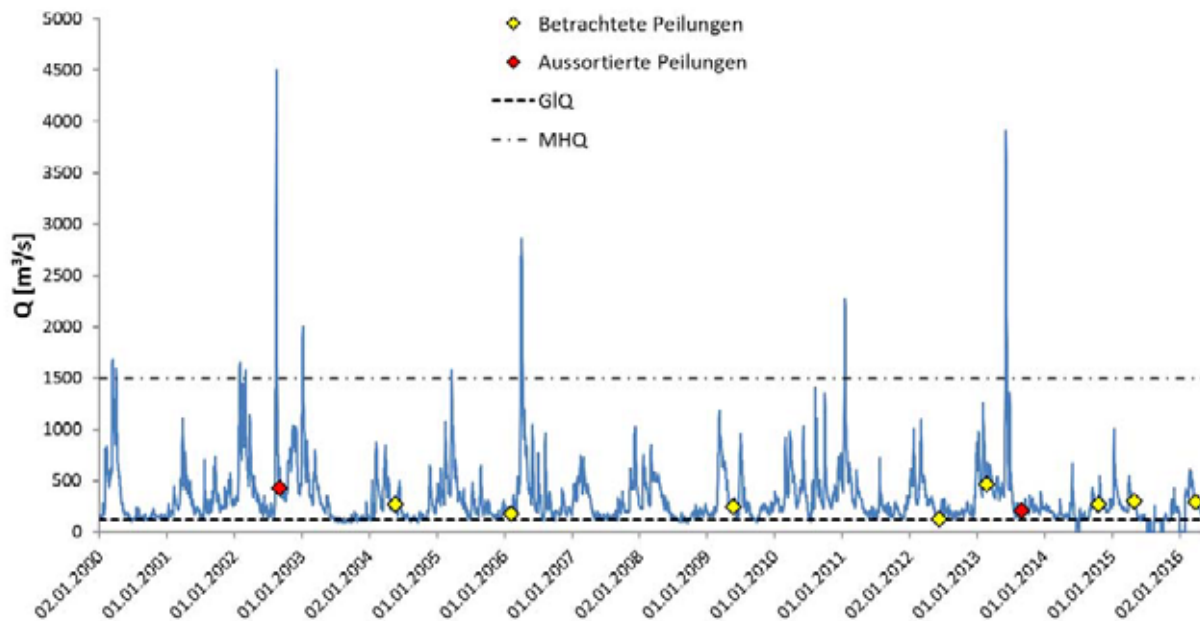


Abbildung 5.1.1: Abflussganglinie am Pegel Dresden (Elbe-km 55,63) inklusive betrachteter und aussortierter Peilungen

5.1.2 Abdeckungsgrad der Daten

Im Rahmen der Auswertung wurde entlang des 20 km Abschnitts durchgehend eine Fahrrinnenbreite von 50 m betrachtet, wobei diese in einen linken und rechten Bereich mit jeweils 10 m Breite und einen mittleren Bereich mit 30 m Breite unterteilt wurde. Zur Abschätzung der Qualität und Aussagekraft der erzielten Ergebnisse wurde in einem ersten Schritt berechnet, wie viel Prozent der

betrachteten Fahrrinne tatsächlich durch Rasterelemente abgedeckt ist. Der mittlere Fahrrinnenbereich ist dabei zu 98 % mit Elementen abgedeckt, die beiden seitlichen Bereiche jeweils zu 95 %.

5.1.3 Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen

Wie die Häufigkeitsverteilungen der Wassertiefen in Abbildung 5.1.2 zeigen, schwanken die Wassertiefen im Abschnitt von Elbe-km 40 - 60 zwischen 0,8 und 4 m unter GIW, wobei die maximale Tiefe in der Peilung 2004 gegeben ist, die minimale Tiefe sowohl 2004 als auch 2006 und 2009. Die maximalen Dichten liegen zwischen 1,7 m unter GIW in den Jahren 2009 bzw. 2006 und 1,9 m unter GIW im Jahr 2013. Die meisten Wassertiefen lassen sich damit in diesem Tiefenbereich finden. Die maximalen Dichten steigen dabei von der Peilung von 2004 bis 2016 kontinuierlich an. Das zeigen auch die Kurtosis-Werte (Tabelle 5.1.1). Abgesehen von 2015 steigt die Kurtosis von 1,3 in 2004 auf 2,8 in 2016 an, die Kurven spitzen sich somit im Vergleich zu einer Normalverteilung weiter zu und verengen sich um eine Tiefe von 1,8 m unter GIW. Wie Abbildung 5.1.2 zeigt, wird dabei gerade der Anteil an Wassertiefen kleiner 1,8 m unter GIW geringer und nähert sich der Wassertiefe von 1,8 m unter GIW an. Diese Entwicklung, dass die Wassertiefen mit den Jahren zunehmen, zeigt sich auch darin, dass sich die Kurven der Häufigkeitsverteilungen entlang der x-Achse nach rechts verschieben. Die Werte der Schiefe bestätigen dies: Die Rechtsschiefe (Schiefe größer 0) nimmt kontinuierlich zu, was bedeutet, dass die Verteilungen zunehmend in Richtung von Wassertiefen größer dem Mittelwert tendieren.

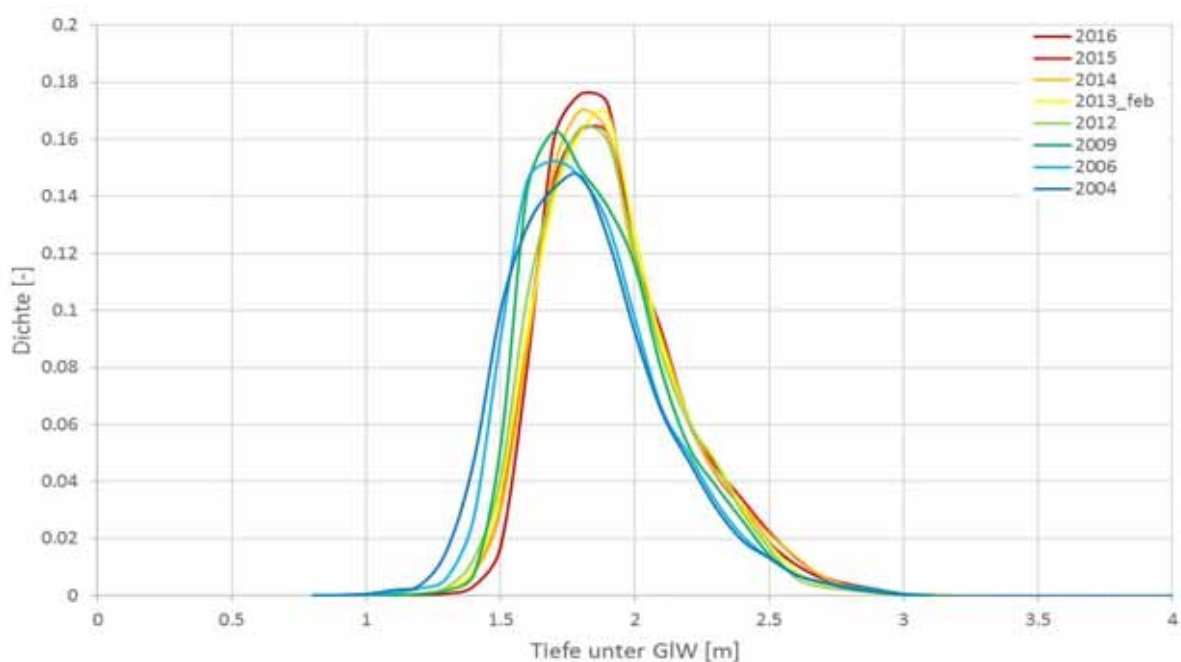


Abbildung 5.1.2: Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen der verschiedenen Peilungen zwischen Elbe-km 40 und 60

Tabelle 5.1.1: Kurtosis und Schiefe der Häufigkeitsverteilungen des Teilabschnitts von Elbe-km 40 bis 60

Peilung	Kurtosis	Schiefe
2016	2.8	2.0
2015	2.2	1.8
2014	2.5	1.9
2013_feb	2.2	1.8
2012	2.0	1.8
2009	1.8	1.8
2006	1.6	1.7
2004	1.3	1.6

5.1.4 Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Wassertiefen

Die Entwicklung hin zu zunehmenden Wassertiefen zeigt sich auch in den berechneten Unterschreitungswahrscheinlichkeiten, die in Abbildung 5.1.3 dargestellt sind. Die angenommene Solltiefe von 1,6 m unter GIW besitzt 2004 eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 30,1 %. Bis 2016 sinkt dieser Wert kontinuierlich auf 10,1 % ab. Die Peilungen unterscheiden sich dabei vor allem im Bereich geringer Wassertiefen, wie der Vergleich der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten der Solltiefe zeigt. Mit zunehmenden Wassertiefen nähern sich die Kurven einander an, bis sie etwa ab einer Tiefe von 2,5 m unter GIW nahezu identisch verlaufen. Es lässt sich also festhalten, dass gerade im Bereich geringer Wassertiefen kontinuierliche Veränderungen über die Jahre stattfanden.

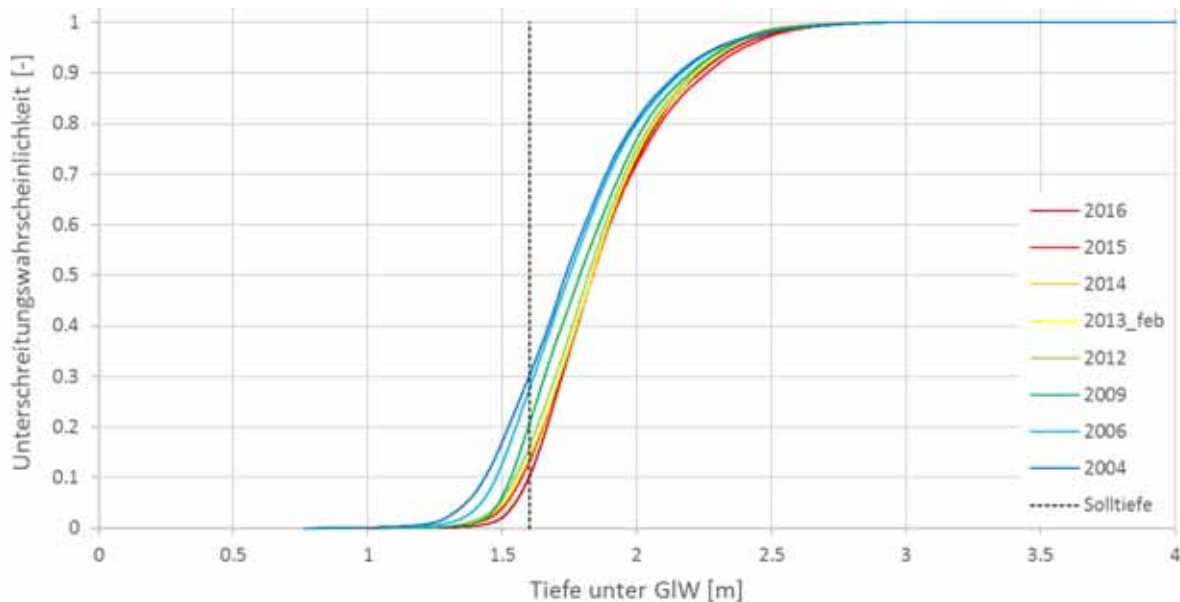


Abbildung 5.1.3: Unterschreitungswahrscheinlichkeit von Wassertiefen der einzelnen Peilungen inklusive der angenommenen Solltiefe von 1,6 m unter GIW zwischen Elbe-km 40 und 60

5.1.5 Auswertung tiefenbestimmender Stellen

Dass tiefenbestimmende Stellen im Abschnitt zwischen Elbe-km 40 und 60 vorliegen, haben die beiden vorherigen Kapitel bereits gezeigt. Nun gilt es zu klären, wo diese entlang des Flussverlaufs auftreten. In Anhang 1 ist die mittlere Wassertiefe der neun betrachteten Peilungen dargestellt. Anhang 2 zeigt den Ausschnitt der gemittelten Wassertiefe zwischen 0 und 1,6 m unter GIW. Dabei wird ersichtlich, dass vor allem die Seitenbereiche tiefenbestimmende Stellen darstellen und das nahezu entlang des gesamten Abschnitts. Besonders in Kurvenlagen bilden sich entlang der Gleithänge (Kurveninnenseite) Bereiche mit flachen Wassertiefen aus, wie beispielsweise zwischen Elbe-km 50,5 und 54 oder zwischen Elbe-km 58,5 und 60. Auch im mittleren Bereich des Flussverlaufs treten wiederholt tiefenbestimmende Stellen auf. Teilweise sind diese lokal begrenzt, wie beispielsweise bei Elbe-km 41, 42, 43,2 oder zwischen 49 und 49,5. Teilweise umfassen Fehltiefen im mittleren Bereich des Flussverlaufs jedoch ganze Abschnitte, wie dies zwischen Elbe-km 44,3 und 45,7 der Fall ist. Auch zwischen Elbe-km 54 und 56,5 treten wiederholt Wassertiefen kleiner als 1,6 m unter GIW auf. Hier gilt es zu beachten, dass größere Bereiche mit Datenlücken vorliegen, bedingt durch Brücken. Die Flusssohle ist hier somit nicht vollständig dargestellt.

Die in Anhang 3 dargestellte zeitliche Standardabweichung gibt Auskunft darüber, wo Schwankungen zwischen den Wassertiefen der einzelnen Peilungen und der mittleren Wassertiefen vorliegen, die Flusssohle hier somit variabel oder stabil ist. Die zeitliche Standardabweichung entlang des gesamten Teilanschnitts der Elbe liegt bei durchschnittlich 0,07 m. Im Bereich des Abzweigs zum Nebenarm Pillnitz bei Elbe-km 42 kommt es lokal zu einer überdurchschnittlichen Schwankung der Wassertiefen mit einer Standardabweichung von bis zu 0,48 m. Im weiteren Verlauf zwischen Elbe-km 42,5 und 43,5 erhöht sich die Standardabweichung über die komplette Flussbreite bis maximal 0,4 m bei Elbe-km 43, wo der Nebenarm Pillnitz dem Hauptstrom wieder zufließt. Weitere Bereiche mit erhöhten zeitlichen Standardabweichungen liegen im Bereich der Loschwitz Brücke sowie stromabwärts davon zwischen Elbe-km 49,79 und 51, entlang der Rechtskurve zwischen Elbe-km 53,5 und 56, in dem sich vier Brücken befinden (Albertbrücke (Elbe-km 54,45), Carolabrücke (Elbe-km 50,06), Augustbrücke (Elbe-km 55,63), Marienbrücke (Elbe-km 56,51)) sowie in der Linkskurve zwischen Elbe-km 58,5 und 60.

In Bereichen, in denen durchschnittlich Fehltiefen auftreten, kann eine geringe Standardabweichung besagen, dass die Sohle hier stabil ist und diese Fehltiefen permanent vorliegen. Das ist bei Elbe-km 41 sowie in dem Abschnitt zwischen Elbe-km 44,3 und 45,7 der Fall. Die restlichen genannten Bereiche, die im Durchschnitt mit Fehltiefen behaftet sind, zeigen hingegen steigende Standardabweichungen. Auf die Analyse permanenter Fehltiefen wird im späteren Verlauf dieses Kapitels genauer eingegangen.

Generell kann festgehalten werden, dass sich die zeitliche Standardabweichung vor allem lokal erhöht. Der Großteil der Strecke zeigt hingegen eine zeitliche Standardabweichung kleiner dem Mittelwert von 0,7 m.

Der Kammweg zeigt die geringsten Tiefen pro betrachtetem 100 m Abschnitt, also jeweils die tiefenbestimmende Stelle. Abbildung 5.1.4, Abbildung 5.1.5 und Abbildung 5.1.6 zeigen die Kammwege des mittleren, linken und rechten Fahrrinnenbereichs. Zu den Kammwegen sind jeweils die maximalen Abweichungen zwischen den Jahren eingezeichnet. Des Weiteren ist die hier angenommene Solltiefe von 1,6 m unter GIW eingezeichnet. Basierend auf dem aktuellen Gesamtkonzept der Elbe ist ebenfalls die aktuelle Mindesttiefe von 1,4 m unter GIW eingezeichnet. Dieser Wert dient dabei Orientierung, im weiteren Verlauf wird dabei jedoch nicht näher auf ihn eingegangen.

Die Wassertiefen entlang des mittleren Kammwegs schwanken um einen Mittelwert von 1,6 m unter GIW mit maximal 2,25 m unter GIW bei Elbe-km 49,7 und minimal 1,13 m unter GIW bei Elbe-km 59,6 (siehe Abbildung 5.1.4). Der Verlauf des Kammwegs ist dabei ungleichmäßig, sodass zwischen aufeinanderfolgenden Werten häufig Sprünge bis zu 0,5 m liegen, wie beispielsweise im Bereich zwischen Elbe-km 42 und 43 oder zwischen Elbe-km 49 und 50. Bereiche, in denen über längere Abschnitte konstante Tiefen vorherrschen, sind nicht gegeben. Einzig die Bereiche zwischen Elbe-km 43,4 und 45,5 sowie zwischen 54,1 und 57,7 weisen über längere Abschnitte tiefenbestimmende Tiefen auf, die oberhalb von 1,6 m unter GIW liegen. Der Schwankungsbereich zeigt jedoch, dass gerade geringe Wassertiefen zwischen den Jahren variieren, beispielsweise bei Elbe-km 54,5. Die Kammwege weichen dabei im Vergleich zum durchschnittlichen Kammweg nach unten stärker ab (durchschnittlich 0,12 m) als nach oben (durchschnittlich 0,09 m).

Entlang des linken Fahrrinnenbereichs liegen die tiefenbestimmenden Tiefen im Durchschnitt bei 1,5 m unter GIW, wobei die durchschnittlich flachste Stelle eine Wassertiefe von 1 m unter GIW aufweist (Elbe-km 43), die durchschnittlich tiefste 2,08 m unter GIW (Elbe-km 57,8) (siehe Abbildung 5.1.5). Ähnlich dem durchschnittlichen Kammweg des mittleren Fahrrinnenbereichs, ist auch der durchschnittliche Kammweg des linken Fahrrinnenbereichs durch Sprünge der Wassertiefen gekennzeichnet, beispielsweise zwischen Elbe-km 42,5 und 43,4 oder zwischen Elbe-km 47,1 und 48. Im Vergleich zur Fahrrinnenmitte wird, trotz dieser Sprünge entlang des Kammwegs, die hier angenommene Mindesttiefe von 1,6 m unter GIW nicht überschritten, wie beispielsweise zwischen Elbe-km 43,4 und 45,7 oder zwischen Elbe-km 50,8 und 53,5. Geringe Wassertiefen weisen dabei einen höheren Schwankungsbereich auf als große Tiefen. Auffällig ist der Bereich zwischen Elbe-km 50,7 und 53,4. Trotz Wassertiefen kleiner 1,6 m unter GIW liegt die durchschnittliche Differenz zwischen oberem

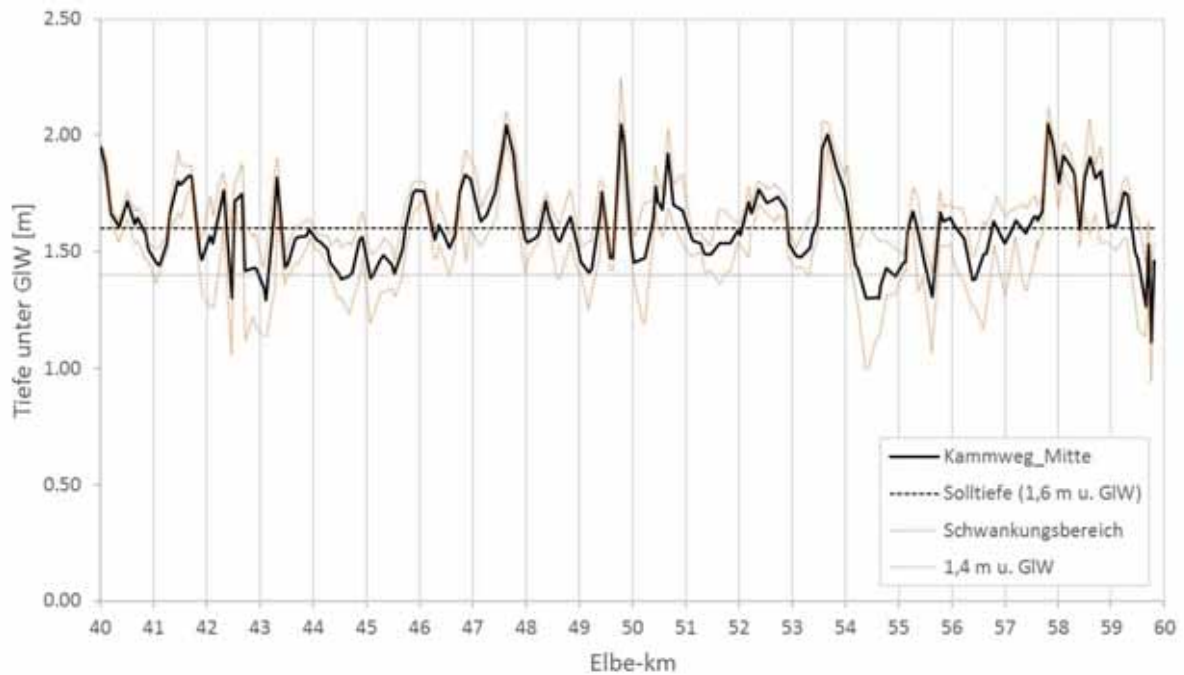


Abbildung 5.1.4: Kammweg entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs mit maximalem Schwankungsbereich zwischen Elbe-km 40 bis 60

und unterem Schwankungsbereich nur bei 0,15 m. Die geringen Wassertiefen sind in diesem Bereich somit als stabil zu bewerten.

Der durchschnittliche Kammweg entlang des rechten Fahrrinnenbereichs (siehe Abbildung 5.1.6) weist eine mittlere Tiefe von 1,55 m unter GIW auf. Bei Elbe-km 40,3 liegt im Schnitt die flachste Stelle mit 1,01 m unter GIW, bei Elbe-km 47,6 die tiefste mit 2,1 m. Die zweitflachste Stelle liegt bei Elbe-km 53 mit einer Tiefe von 1,12 m unter GIW. Der Schwankungsbereich liegt hier bei beiden Stellen bei maximal 0,17 m Abweichung, die beiden tiefenbestimmenden Stellen sind somit über die Jahre kaum veränderlich. Im Bereich der Rechtskurve zwischen Elbe-km 43,4 und 45,8 liegen die Wassertiefen durchgehend unter 1,6 m unter GIW. Ebenso in der Rechtskurve zwischen Elbe-km 53,9 und 57,1, in dem die durchschnittliche tiefenbestimmende Stelle nur bei Elbe-km 55,6 (Augustbrücke) die Mindesttiefe überschreitet. Der Schwankungsbereich zeigt an, dass die tiefenbestimmenden Tiefen hier jedoch nicht konstant sind.

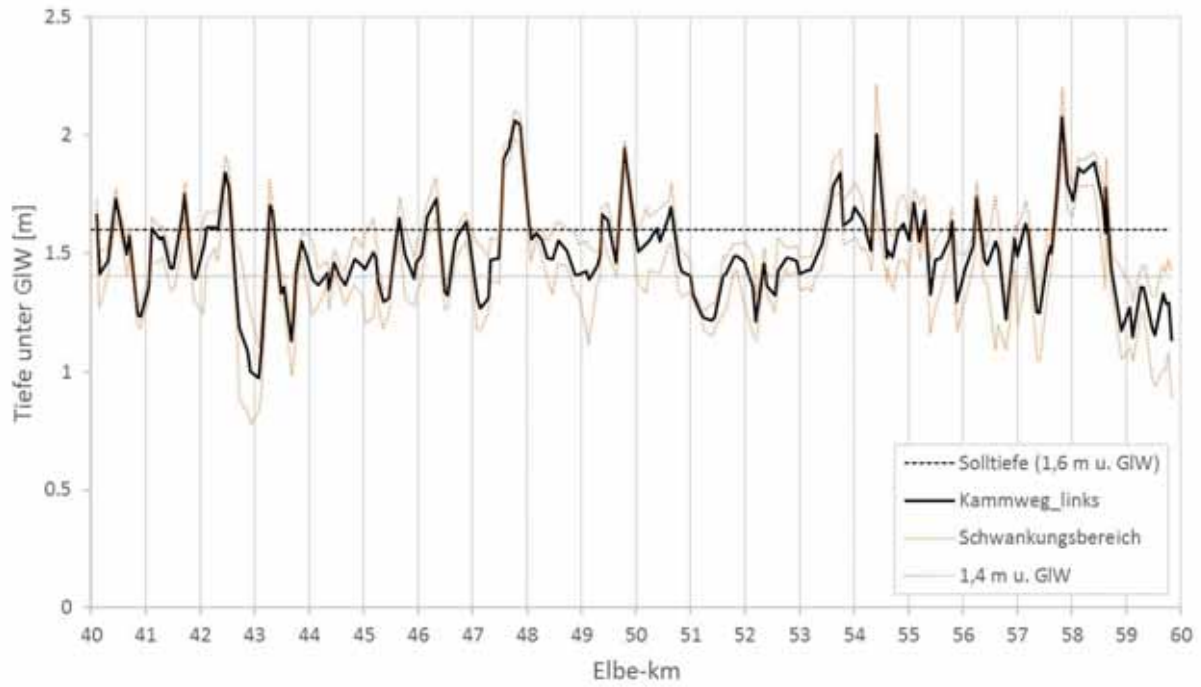


Abbildung 5.1.5: Kammweg entlang des linken Fahrrinnenbereichs mit maximalem Schwankungsbereich zwischen Elbe-km 40 bis 60

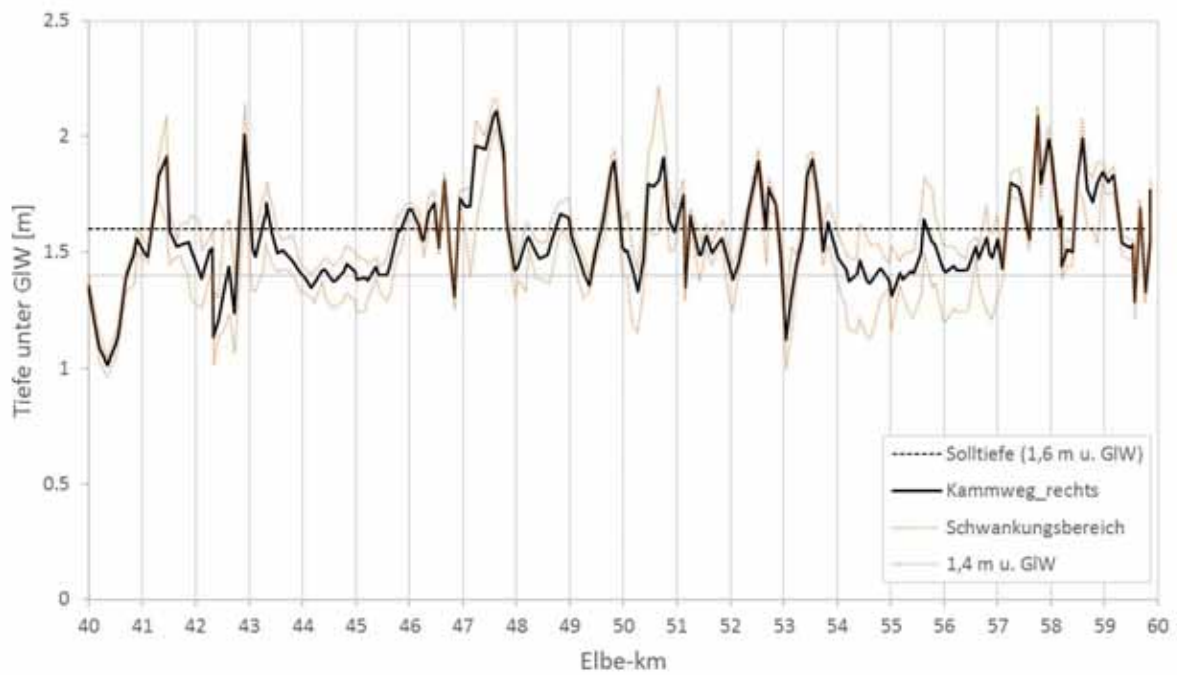


Abbildung 5.1.6: Kammweg entlang des rechten Fahrrinnenbereichs mit maximalem Schwankungsbereich zwischen Elbe-km 40 bis 60

Abbildung 5.1.7, Abbildung 5.1.8 und Abbildung 5.1.9 verdeutlichen für die drei Fahrrinnenbereiche, in wie viel Prozent aller Peilungen mindestens eine Fehltiefe in einem 100 m langen Abschnitt vorliegt.

Sie geben somit Auskunft darüber, wo permanente Fehltiefen vorliegen. Dabei bestätigt sich, dass im mittleren Fahrrinnenbereich vor allem zwischen Elbe-km 43,4 und 45,5 und im Brücken- und Kurvenbereich zwischen Elbe-km 54,1 und 55,5 längere Abschnitte mit permanenten Tiefeneinschränkungen liegen. Der Abschnitt zwischen Elbe-km 55,5 und 57,7 weist zwar auch Fehltiefen auf, allerdings mit einer geringeren Häufigkeit. Entlang des restlichen mittleren Fahrrinnenbereichs treten vereinzelt immer wieder permanente Fehltiefen auf. Abbildung 5.1.8 und Abbildung 5.1.9 verdeutlichen indes, dass im Teilabschnitt von Elbe-km 40 bis 60 vor allem die seitlichen Fahrrinnenbereiche nahezu durchgehend permanente Fehltiefen aufweisen. Unterschiede zwischen beiden Seitenbereichen sind dabei hauptsächlich in Kurvenbereichen gegeben. In der Linkskurve zwischen Elbe-km 46,4 und 47,4 liegen am rechten Prallhang deutlich weniger permanente Fehltiefen vor, als das beim linken Gleithang der Fall ist. Ähnliches ist in der Linkskurve zwischen Elbe-km 50,7 und 53,3, in der Rechtskurve zwischen Elbe-km 54 und 57 sowie in der Linkskurve zwischen 58,7 und 59,9 zu beobachten.

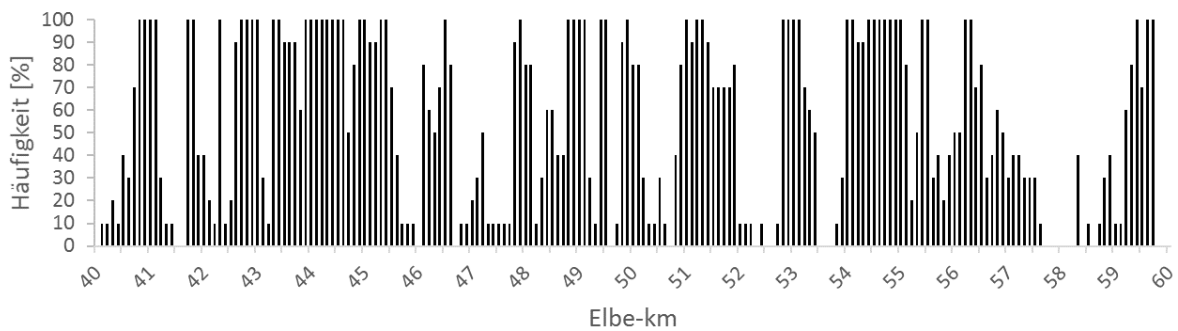


Abbildung 5.1.7: Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 40 und 60 darstellen

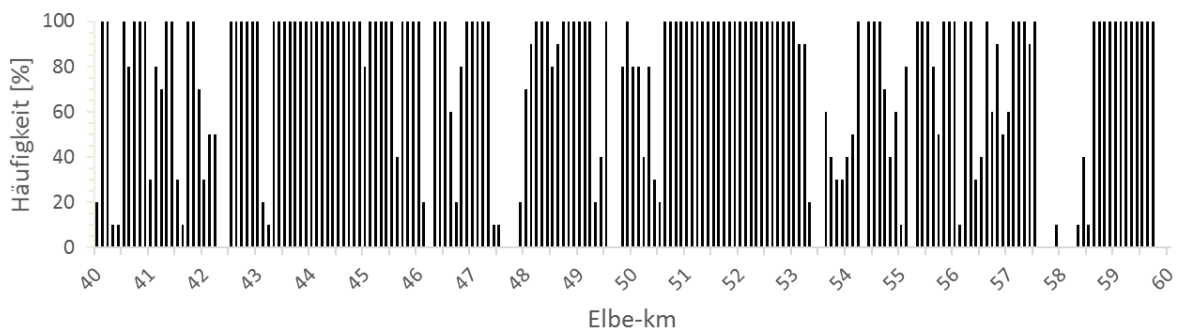


Abbildung 5.1.8: Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des linken Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 40 und 60 darstellen

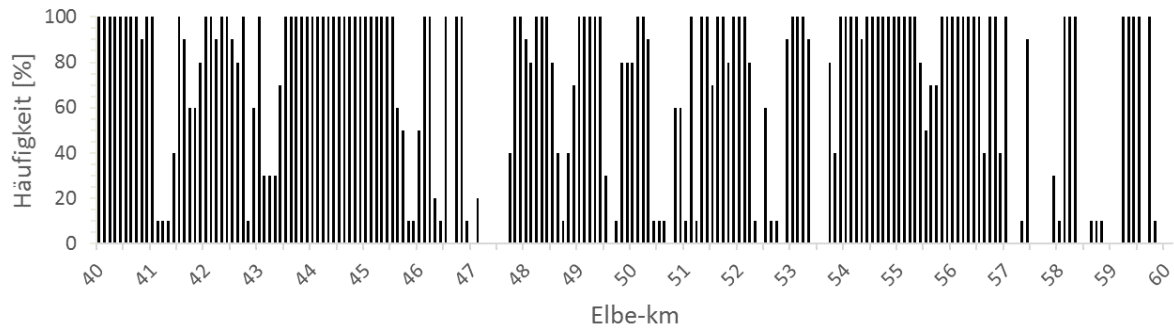


Abbildung 5.1.9: Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des rechten Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 40 und 60 darstellen

5.1.6 Räumliche Verteilung von Fehlflächen

In den bisherigen Ergebnissen wurde die jeweils flachste Tiefe pro ausgewertetem 100 m Abschnitt betrachtet, um die Größenordnungen der tiefenbestimmenden Tiefen zu erhalten. Nun soll dargestellt werden, welche Flächenanteile innerhalb der Fahrrinne eine Mindesttiefe von 1,6 m unter GIW nicht erreichen und somit Fehlflächen bilden. Abbildung 5.1.10 stellt die Fehlflächen entlang des Teilabschnitts von Elbe-km 40 – 60 als Summenkurve dar. Ersichtlich ist, dass die Fehlflächen bezogen auf die Gesamtfahrrinne zwischen den Peilungen variieren, wobei, abgesehen von 2015, die Fehlfläche seit 2004 von insgesamt 29,7 % (285.850 m²) auf 9,8 % (94.548 m²) in 2016 sank. Alle Kurven steigen dabei kontinuierlich an, was vor allem den durchgehenden Fehlflächen der seitlichen Fahrrinnenbereiche geschuldet ist. Vor allem im Bereich zwischen Elbe-km 44 und 45,5 erhöht sich die Fehlfläche im Vergleich zum vorherigen und nachfolgenden Bereich. Ebenfalls stärkere Anstiege befinden sich in den Bereichen zwischen Elbe-km 49 und 50,5 sowie 54 und 55. Der Anstieg und somit die Größe der Fehlfläche unterscheidet sich hier zwischen den Peilungen. Während bis 2012 Sprünge zu sehen sind, verlaufen die Kurven der aktuelleren Peilungen gleichmäßig, was eine Reduktion der Fehlflächen in diesen Bereichen bedeutet. Zu beachten ist dabei, dass zwischen Elbe-km 54 und 55 eine Datenlücke vorliegt, bedingt durch die Albertbrücke bei Elbe-km 54,4. Die Sohle wird hier nur zu einem Teil dargestellt, weshalb die tatsächliche Fehlfläche in diesem Bereich auch größer ausfallen könnte.

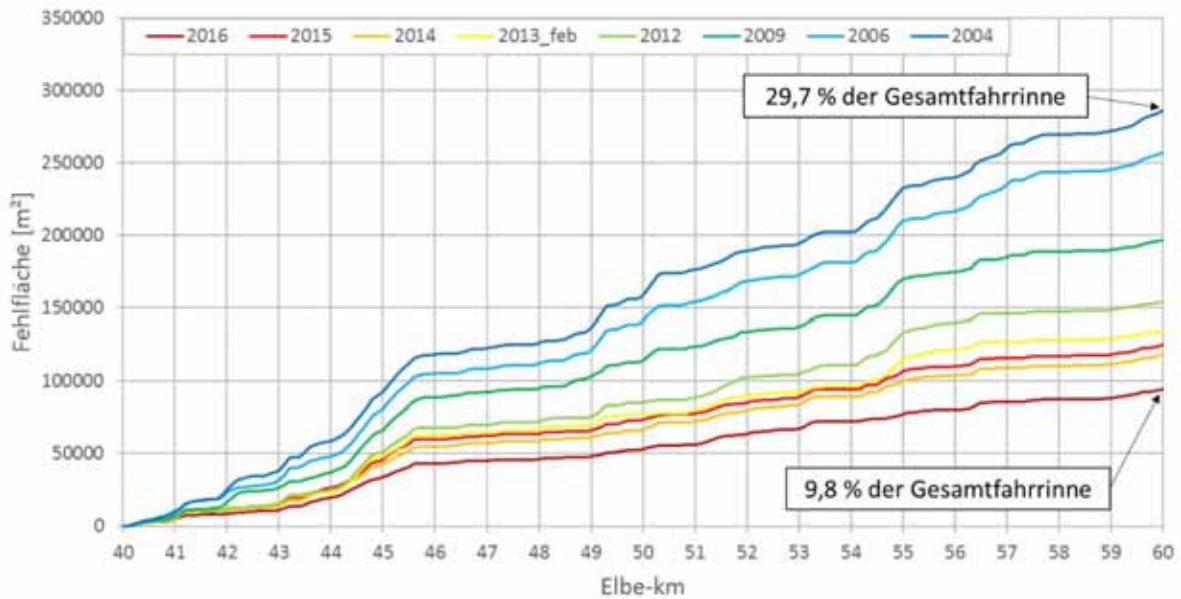


Abbildung 5.1.10: Kumulierte Fehlflächen der Peilungen zwischen Elbe-km 40 bis 60

5.1.7 Fehlfläche pro Tiefenschicht

Die Fehlfläche pro Tiefenschicht im mittleren Fahrrinnenbereich verteilt sich in den neun Peilungen unterschiedlich, wobei Abbildung 5.1.11 zeigt, dass spätestens ab einer Tiefe von 1,5 m unter GIW jede der betrachteten Peilungen einen Anstieg der Fehlfläche aufweist. Zu beachten ist, dass die Darstellung erst bei 1 m unter GIW beginnt, da der Fokus auf dem Anstieg der Fehlflächen pro Tiefenschicht liegt und zwischen 0 und 1 m unter GIW ein solcher Anstieg nicht gegeben ist. Die Peilung von 2004 verzeichnet ab 1,2 m unter GIW den ersten Anstieg, gefolgt von 2006 ab 1,3 m unter GIW. Die Peilung von 2012 steigt ab 1,4 m unter GIW stärker an als die Peilung von 2009 und liegt mit einer Fehlfläche von ca. 271.800 m² bei der Wassertiefe von 1,8 m unter GIW über der von 2009 (ca. 264.500 m²), obwohl Abbildung 5.1.10 zeigt, dass die Fahrrinne von 2009 stärker durch Fehlflächen eingeschränkt wird. Grund sind die seitlichen Fahrrinnenbereiche, die für den höheren Fehlflächenanteil von 2009 in Abbildung 5.1.10 sorgen, in Abbildung 5.1.11 jedoch nicht berücksichtigt werden.

Anhand der Kurven ist, abgesehen von 2012 und 2015, einerseits eine Tendenz hin zu geringeren Fehlflächen zu erkennen und andererseits hin zu steigenden Wassertiefen. Der Anstieg der Fehlfläche nimmt dabei bei allen Peilungen mit zunehmender Wassertiefe zu, wobei der Verlauf einem exponentiellen Wachstumsmodell ähnelt. Für die Peilung von 2016 steigt die Fehlfläche zwischen 1,4 m unter GIW und 1,6 m unter GIW beispielsweise um ca. 28.276 m² an, während der Zuwachs von 1,6 m unter GIW und 1,8 m unter GIW ca. 187.284 m² beträgt und damit mehr als sechsmal so groß ist. Bezogen auf die Peilung von 2016 wäre aktuell entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs eine Mindesttiefe von 1,5 m unter GIW gegeben.

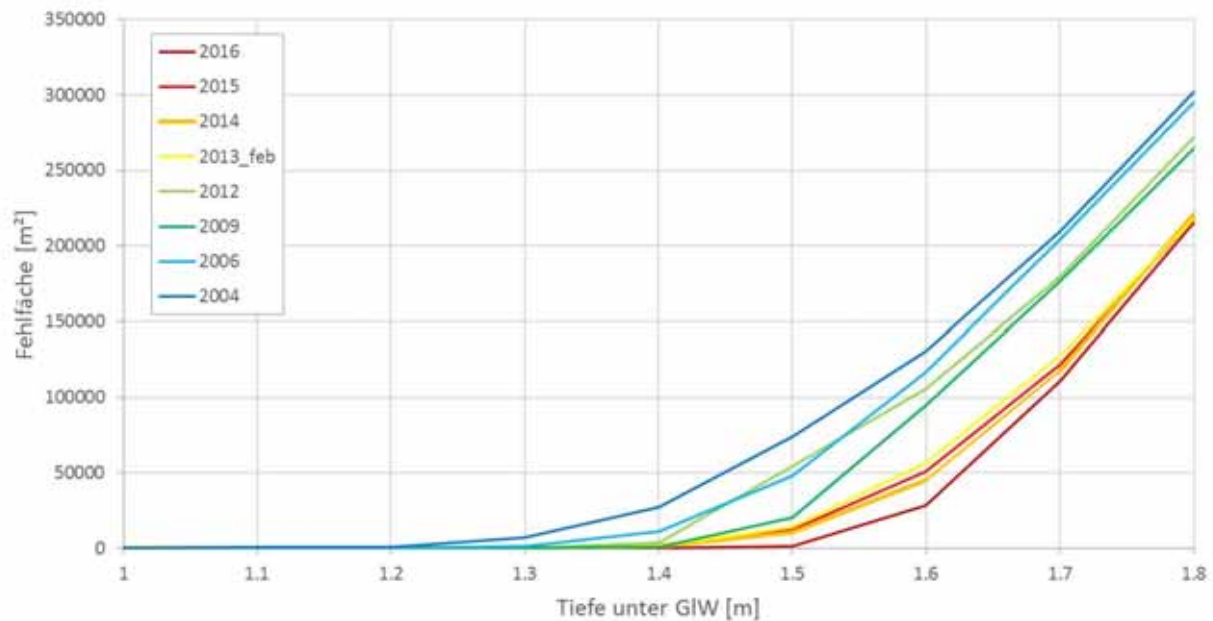


Abbildung 5.1.11: Verteilung der Fehlflächen pro Tiefenschicht entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs des Abschnitts von Elbe-km 40 bis 60

5.1.8 Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel

Der Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel soll zeigen, ob verschiedene Wasserstände parallel verlaufen, also mit einem konstanten Abstand, oder ob die Abstände variieren und sich dadurch bei unterschiedlichen Bezugswasserspiegeln verschiedene tiefenbestimmende Stellen ergeben. Wie Abbildung 5.1.12 zeigt, verläuft der Wasserspiegel vom Median des Abflusses ($W(\text{MeQ})$) und der des Gleichwertigen Abflusses ($W(\text{GIQ})$) bei dieser Auflösung des Schaubilds in nahezu konstantem Abstand. Die Darstellung der Differenz in Abbildung 5.1.13 zeigt dabei jedoch, dass die Wasserspiegellagen einen ungleichwertigen Verlauf aufweisen. Die Differenz steigt im Verlauf des Abschnitts von anfänglich 0,72 m bei Elbe-km 40 auf 0,81 m bei Elbe-km 60, wobei die Differenz ständigen Schwankungen unterliegt. Als tiefenbestimmende Stellen werden hier die Differenzen angesehen, die die durchschnittliche Differenz (0,74 m) um 10 % der durchschnittlichen Differenz unterschreiten. In diesem Fall entspricht der Grenzwert einer Differenz von 0,67 m. Der Abschnitt von Elbe-km 41,8 und 42,2 im Bereich des Abzweigs des Nebenarm Pillnitz stellt nach dieser Definition eine zusätzliche tiefenbestimmende Stelle bei $W(\text{MeQ})$ dar (siehe rote Markierung in Abbildung 5.1.13). Im restlichen Verlauf treten keine zusätzlichen tiefenbestimmenden Stellen bei $W(\text{MeQ})$ auf.

ERGEBNISSE

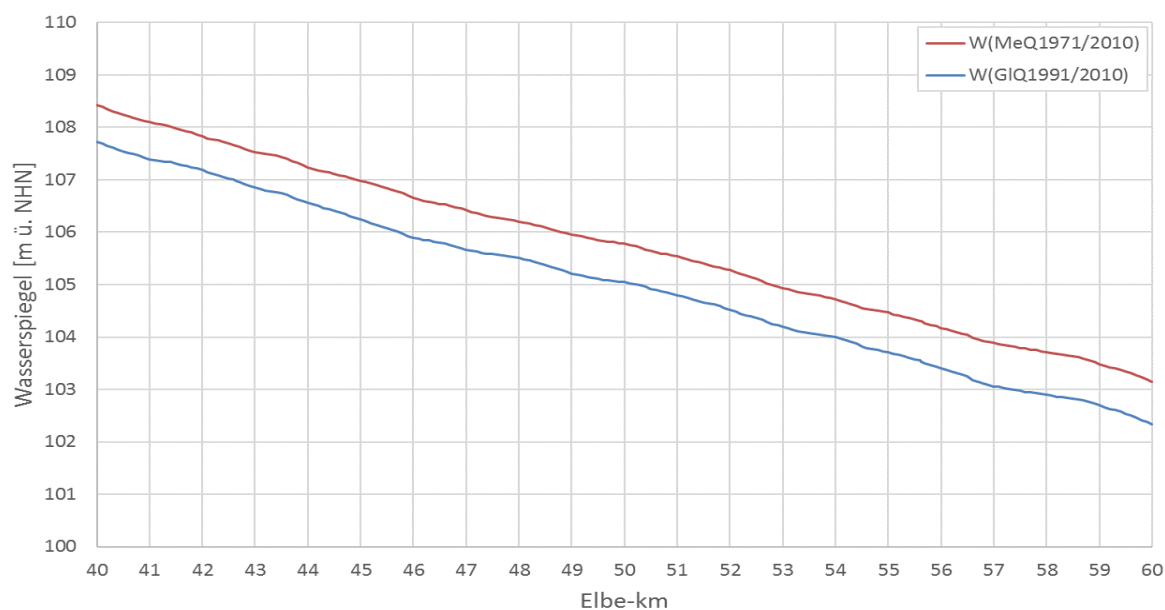


Abbildung 5.1.12: Wasserspiegelverläufe im Längsschnitt zwischen Elbe-km 40 und 60; rote Linie: Wasserspiegel vom Median des Abflusses zwischen 1971 und 2010 ($W(\text{MeQ}1971/2010)$); blaue Linie: Wasserspiegel des Gleichwertigen Abflusses zwischen 1991 und 2010 ($W(\text{GIQ}1991/2010)$)

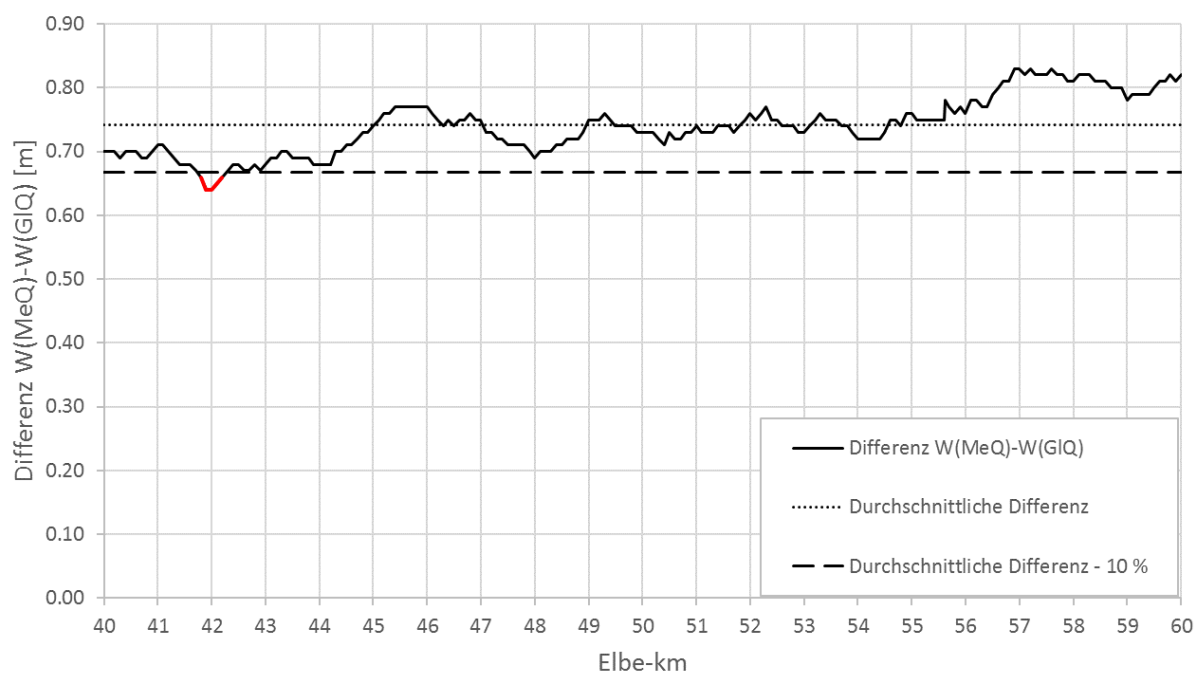


Abbildung 5.1.13: Differenz zwischen $W(\text{MeQ})$ und $W(\text{GIQ})$ von Elbe-km 40 bis 60

5.2 Elbe-km 220 – 240

5.2.1 Datengrundlage

Für den Teilabschnitt von Elbe-km 220 bis 240 stand die Fahrrinne von 2005 zu Verfügung, die als Grundlage für die Tiefenauswertung der Strecke dient.

Für die Auswertung tiefenbestimmender Stellen entlang des Streckenabschnitts standen insgesamt 14 Peilungen zur Verfügung, die in Abbildung 5.2.1 entlang der Abflussganglinie des Referenzpegels Wittenberg bei Elbe-km 214,14 dargestellt werden. Die Peilungen von 2002, 2010 und 2013 wurden dabei aufgrund der vorhergegangenen Hochwasserereignisse aussortiert, wodurch für die Analyse noch elf Peilungen im Zeitraum zwischen 1998 und 2016 vorhanden sind. Zum Zeitpunkt der Arbeit waren die plausibilisierten Abflussdaten des Augusts 2016 noch nicht vorhanden, weshalb die genaue Abflusssituation der Peilung von August 2016 nicht angegeben wird. Da im Sommer 2016 jedoch Niedrigwasserbedingungen herrschten, wird die Peilung in die Auswertung einbezogen.

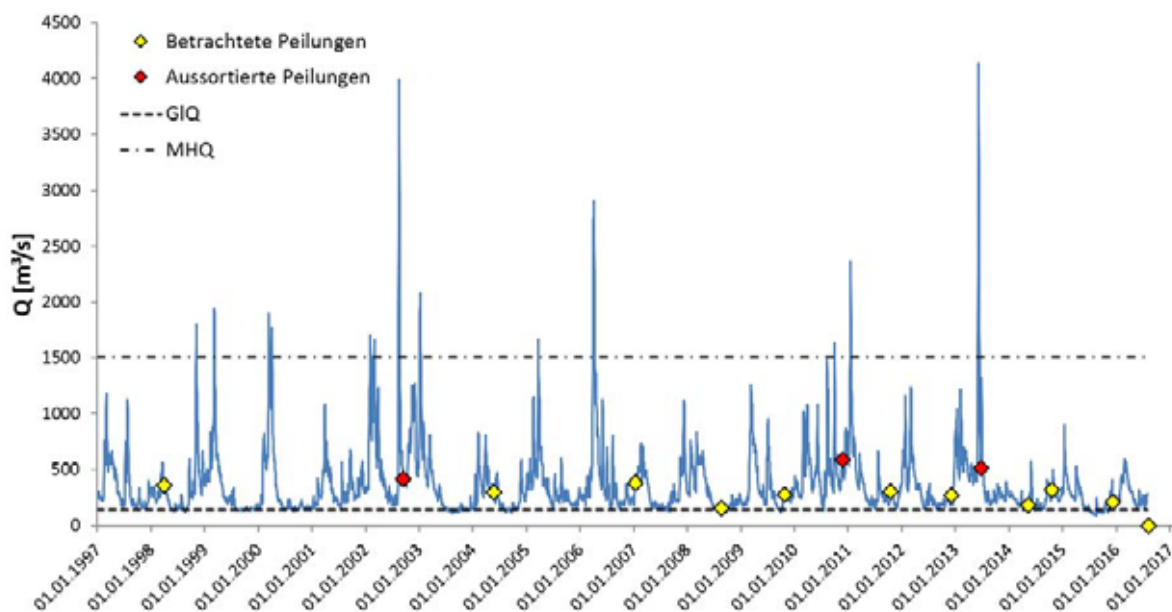


Abbildung 5.2.1: Abflussganglinie am Pegel Wittenberg (Elbe-km 214,14) inklusive betrachteter und aussortierter Peilungen

5.2.2 Abdeckungsgrad der Daten

Zur Auswertung der Wassertiefen wird die verwendete Fahrrinne in einen linken, einen mittleren und einen rechten Bereich unterteilt. Der mittlere Fahrrinnenbereich ist dabei zu 99 % durch Daten abgedeckt, der linke zu 90 % und der rechte zu 89 %. Der Verlust von 10 bzw. 11 % entlang der seitlichen Bereiche ist teilweise einzelnen Peilungen geschuldet, die Breitereinschränkungen bedingt durch Niedrigwasser während der Peilung hinnehmen mussten. Da nur diejenigen Rasterelemente

betrachtet wurden, die in allen Peilungen vorhanden sind, wurden diese Breitereinschränkungen auf die anderen Peilungen übertragen.

5.2.3 Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen

In den betrachteten Peilungen liegt die geringste Tiefe bei 0,7 m unter GlW (Peilung 1998), die größte Tiefe bei 5,7 m unter GlW (Peilungen 2009 und 2004). Abbildung 5.2.2 zeigt die Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen zwischen diesen beiden Extremwerten. Zu beachten ist, dass die x-Achse hier nur bis 4 m unter GlW reicht. Der Grund dafür ist, dass ab einer Tiefe von 4 m unter GlW keine Unterschiede mehr zwischen den Kurven der Häufigkeitsverteilungen vorliegen. Durch die Verringerung der x-Achse lässt sich der Bereich, in dem sich die Kurven unterscheiden, besser darstellen.

Die maximalen Dichten liegen zwischen 1,7 m unter GlW im Jahr 2009 und 2 m unter GlW im Mai 2014. Lässt man diese zwei Peilungen außen vor, so ist zu erkennen, dass sich der Bereich der maximalen Dichte von 1,8 m unter GlW zwischen 1998 und 2007 auf 1,9 m unter GlW in den Jahren 2011 bis 2016 verschiebt. Die Werte der Kurtosis zeigen dabei ein uneinheitliches Bild (siehe Tabelle 5.2.1): zwischen den Jahren 1998 und 2012 schwanken die Werte von Jahr zu Jahr, wobei keine Entwicklung auszumachen ist. Betrachtet man jedoch nur die Peilungen zwischen 2014 und 2016, so ist ein kontinuierlicher Anstieg von 2 auf 2,8 festzustellen. Die Häufigkeit von Wassertiefen verdichtet sich somit um die Tiefe von 1,9 m unter GlW. Generell ist eine Bewegung der Häufigkeitsverteilungen entlang der x-Achse zu beobachten, wobei diese Bewegung nicht der Chronologie der Peilungen entspricht. Berücksichtigt man nur die älteste Peilung von 1998 sowie die beiden aktuellsten Peilungen von 2016, so ist eine Verschiebung entlang der x-Achse mit den Jahren festzustellen. Allerdings folgen die dazwischen liegenden Peilungen nicht diesem Muster, weshalb nicht von einer eindeutigen Entwicklung hin zu größeren Wassertiefen ausgegangen werden kann. Das zeigt sich auch in den Werten der Schiefe: Zwar sind alle Kurvenverläufe rechtsschief, zunehmende Schiefewerte und somit eine Verschiebung hin zu größeren Wassertiefen im Vergleich zum Mittelwert sind jedoch nicht gegeben.

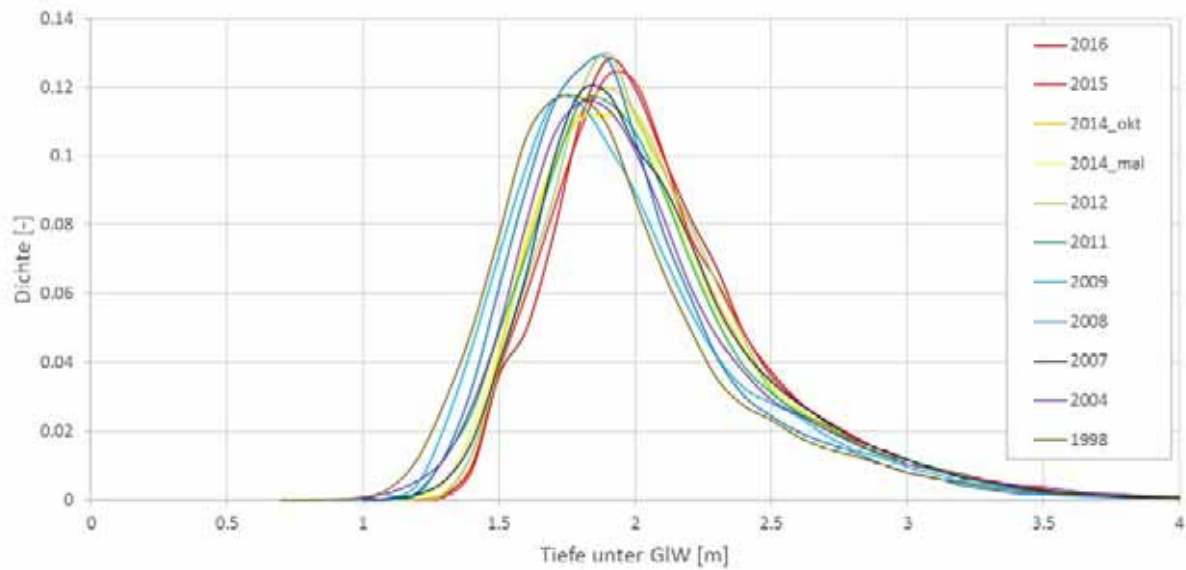


Abbildung 5.2.2: Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen der verschiedenen Peilungen zwischen Elbe-km 220 und 240

Tabelle 5.2.1: Kurtosis und Schiefe der Häufigkeitsverteilungen von Elbe-km 220 - 240

Peilung	Kurtosis	Schiefe
2016	2.8	1.9
2015	2.5	1.9
2014_okt	2.2	1.9
2014_mai	2.0	1.8
2012	2.7	1.9
2011	2.3	1.8
2009	2.4	1.9
2008	2.9	2.0
2007	2.4	1.9
2004	2.7	1.9
1998	2.5	1.9

5.2.4 Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Wassertiefen

Die Unterschiede der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten von Wassertiefen der einzelnen Peilungen ist in Abbildung 5.2.3 dargestellt. Auch hier ist zu beachten, dass die x-Achse nicht den maximalen Tiefenbereich bis 5,7 m unter GlW darstellt. Bezogen auf die Solltiefe von 1,6 m unter GlW liegt die geringste Unterschreitungswahrscheinlichkeit bei 9,8 % in der Peilung 2016, die größte bei 27,6 % in der Peilung 1998. Ein eindeutiger Trend hin zu einer geringeren Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 1,6 m unter GlW ist dabei jedoch nicht zu erkennen. Zwar liegt auch bei der Peilung von 2015 eine Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 10,7 % vor, zwischen den

Peilungen von 2004 bis 2014 ist aber keine Entwicklung zu geringeren Unterschreitungswahrscheinlichkeiten zu erkennen.

Die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten, und damit die Wassertiefen der Peilungen, unterscheiden sich vor allem im Bereich geringer Wassertiefen zwischen 1,3 und 2,5 m unter GIW. Ab einer Tiefe von 3 m unter GIW unterscheiden sich die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten nur noch um 1,9 % zwischen 95,9 % (Peilung 2004) und 97,8 % (Peilung 2008).

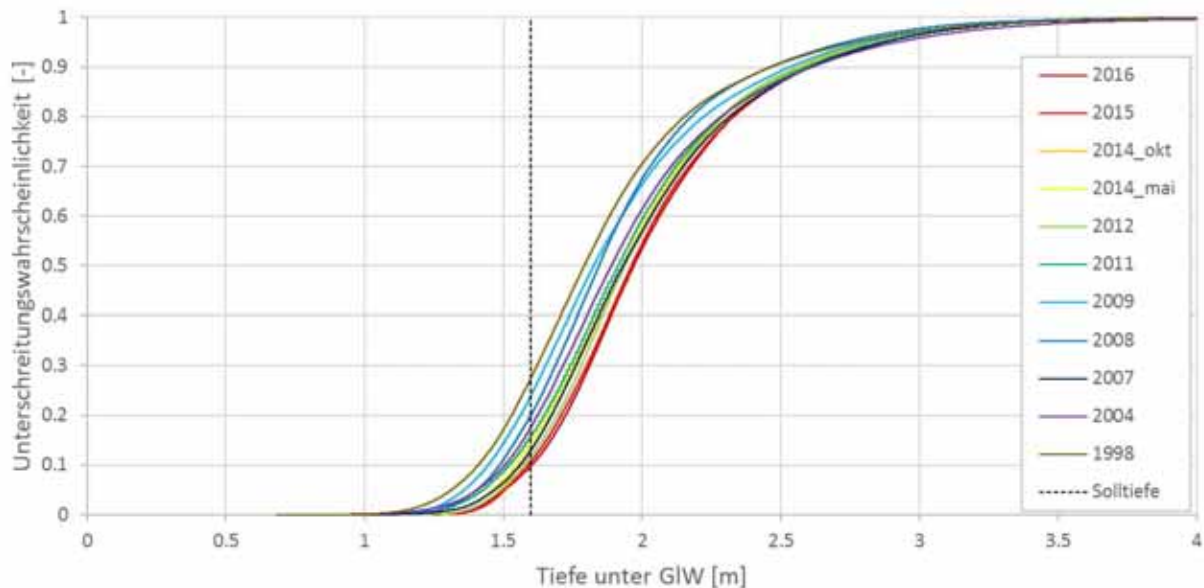


Abbildung 5.2.3: Unterschreitungswahrscheinlichkeit von Wassertiefen der einzelnen Peilungen inklusive der angenommenen Solltiefe von 1,6 m unter GIW

5.2.5 Auswertung tiefenbestimmender Stellen

Der Teilabschnitt zwischen Elbe-km 220 und 240 ist geprägt durch eine Abfolge von Links- und Rechtskurven. Anhang 4 zeigt, welche durchschnittlichen Wassertiefen entlang der Strecke gegeben sind. Anhang 5 stellt die durchschnittlichen Wassertiefen dar, die zwischen 0 und 1,6 m unter GIW liegen. Aus den beiden Darstellungen wird ersichtlich, dass die Wassertiefen vor allem in den Kurvenbereichen Unterschiede aufweisen. In der Rechtskurve bei Elbe-km 226,2 wird am Prallhang beispielsweise eine Wassertiefe von ca. 4,5 m unter GIW erreicht, während am Gleithang eine Wassertiefe von ca. 1,1 m unter GIW gegeben ist. Dieses Muster ist auf jede Kurve innerhalb des Streckenabschnitts übertragbar, wobei sich das Ausmaß der Fehlflächen und der Fehltiefen zwischen den Kurven unterscheidet. Da Links- und Rechtskurven immer im Wechsel vorliegen, wechseln die Fehlflächen dementsprechend durchgehend zwischen linkem und rechtem Fahrrinnenbereich. Besonders ausgeprägt scheinen die Fehlflächen dabei vor allem zwischen Elbe-km 220,8 und 221,9, 224,5 und 225,5 sowie zwischen Elbe-km 233,6 und 235,8, wo sich eine Furt befindet.

Anhang 6 zeigt die zeitliche Standardabweichung der Wassertiefen, bezogen auf die betrachteten elf Peilungen. Diese schwankt entlang des Abschnitts um eine mittlere Standardabweichung von 0,13 m. Die zeitliche Standardabweichung steigt vor allem im Bereich von Kurvenlagen. In der Rechtskurve zwischen Elbe-km 225,9 und 226,7 steigen die Werte hin zum Prallhang beispielsweise auf maximal 0,9 m an. Gleiches ist im Bereich um Elbe-km 222,5 zu beobachten, wo die Standardabweichung in Richtung des Prallhangs zunimmt. Zwischen Elbe-km 223,2 und 223,5 steigt sie im Übergangsbereich zwischen einer Rechts- und einer Linkskurve ebenso an, wobei vor allem die Wassertiefen der seitlichen Fahrrinnenbereiche vom Durchschnitt abweichen. Weitere Bereiche mit erhöhter Standardabweichung liegen bei Elbe-km 230 sowie zwischen Elbe-km 232,2 und 233,2, wobei sich beide Bereiche ebenfalls in Kurvenlagen befinden.

Im Vergleich zum Teilabschnitt von Elbe-km 40 bis 60, wo ein Anstieg der zeitlichen Standardabweichung vor allem lokal auftritt, wird hier die durchschnittliche zeitliche Standardabweichung von 0,13 m nicht nur lokal, sondern entlang längerer zusammenhängender Strecken überschritten.

Der durchschnittliche Kammweg in Abbildung 5.2.4 zeigt das Ausmaß der tiefenbestimmenden Tiefe pro 100 m Abschnitt entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs. Die Wassertiefen schwanken um einen Mittelwert von 1,57 m unter GIW mit maximal 2 m unter GIW bei Elbe-km 332,9 und minimal 1,21 m unter GIW bei Elbe-km 235,7. Dabei zeichnen sich drei Bereiche ab, in denen die hier angenommene Mindesttiefe von 1,6 m unter GIW über einen längeren Abschnitt unterschritten wird: in den Linkskurven von Elbe-km 220,6 bis 222,3 und Elbe-km 224,5 bis 226 sowie entlang der Rechtskurve zwischen Elbe-km 233 und 236,5. In den dazwischen liegenden Bereichen schwanken die Wassertiefen des durchschnittlichen Kammwegs, wobei die Solltiefe teilweise unterschritten, teilweise überschritten wird.

Der Schwankungsbereich zeigt, dass die Wassertiefen der Kammwege der einzelnen Peilungen von dem durchschnittlichen Kammweg abweichen können, wobei die Abweichung hin zu geringeren Tiefen mit durchschnittlich 0,24 m höher ausfällt, als zu größeren Tiefen (0,18 m). Die maximalen Abweichungen liegen dabei in Bereichen, in denen die Wassertiefe des durchschnittlichen Kammwegs die Solltiefe unterschreitet. Bei Elbe-km 225,6 liegt die maximale Abweichung 0,62 m unter dem durchschnittlichen Kammweg, bei Elbe-km 235,5 und 236,4 sind es jeweils 0,58 m. Gerade Tiefen, die bereits unter der Mindestwassertiefe von 1,6 m unter GIW liegen, können daher in einzelnen Jahren noch geringer ausfallen.

Die durchschnittliche Wassertiefe des gemittelten Kammwegs des linken Fahrrinnenbereichs liegt bei 1,57 m unter GIW. Die geringste durchschnittliche Wassertiefe liegt bei Elbe-km 236,3 mit 1,07 m unter

GIW, die größte bei Elbe-km 227,3 mit 2,45 m unter GIW. Wie Abbildung 5.2.5 zeigt, verlaufen die Wassertiefen dabei entsprechend dem Kurvenverlauf der Strecke. Im Bereich von Linkskurven sinken die Werte unter die Solltiefe, wie beispielsweise zwischen Elbe-km 224,5 und 226 oder zwischen Elbe-km 228 und 230,1. Im Bereich von Rechtskurven, in denen die linke Fahrrinnenseite im Bereich des Prallhangs liegt, steigen die Wassertiefen hingegen an, wie beispielsweise zwischen Elbe-km 231,5 und 233,6.

Der durchschnittliche Kammweg entlang des rechten Fahrrinnenbereichs, dargestellt in Abbildung 5.2.6, liegt mit einer mittleren Tiefe vom 1,63 m unter GIW tiefer als der des linken Fahrrinnenbereichs. Der Tiefenverlauf folgt dabei dem entgegengesetzten Muster des Kammwegs der linken Seite. In Linkskurven sinkt die durchschnittliche Wassertiefe des Kammwegs und erreicht beispielsweise bei Elbe-km 228,5 die maximale Tiefe von 2,84 m unter GIW. Entlang von Rechtskurven stellt der rechte Fahrrinnenbereich hingegen den Gleithang dar, wodurch die Wassertiefen hier abnehmen. In der langgezogenen Rechtskurve zwischen Elbe-km 232 und 236 liegt beispielsweise die flachste Stelle des Gesamtabschnitts mit 1,13 m unter GIW bei Elbe-km 234,5.

Die Schwankungsbereiche beider seitlicher Kammwege nehmen vor allem im Bereich flacher Wassertiefen zu, wobei die Abweichung hin zu geringeren Wassertiefen stärker gegeben ist, als hin zu größeren Wassertiefen. Die Abweichungen des linken Fahrrinnenbereichs sind dabei mit durchschnittlich 0,27 m nach unten und 0,21 m nach oben höher als die des rechten Fahrrinnenbereichs, die nach unten durchschnittlich 0,23 m betragen und nach oben 0,18 m.

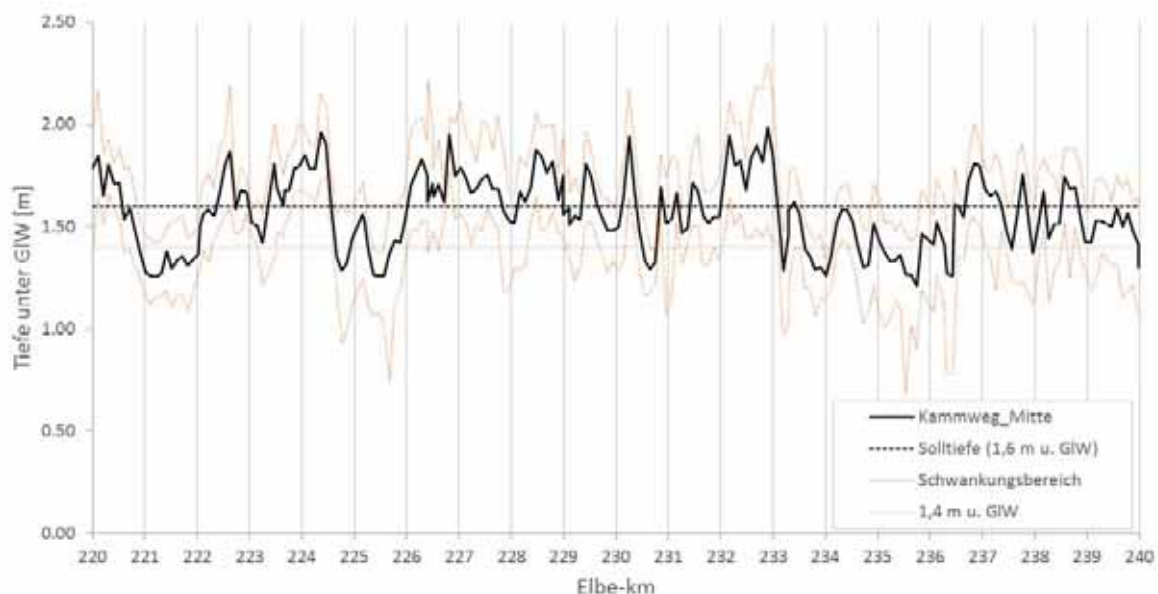


Abbildung 5.2.4: Durchschnittlicher Kammweg entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs von Elbe-km 220 - 240 mit maximalem Schwankungsbereich

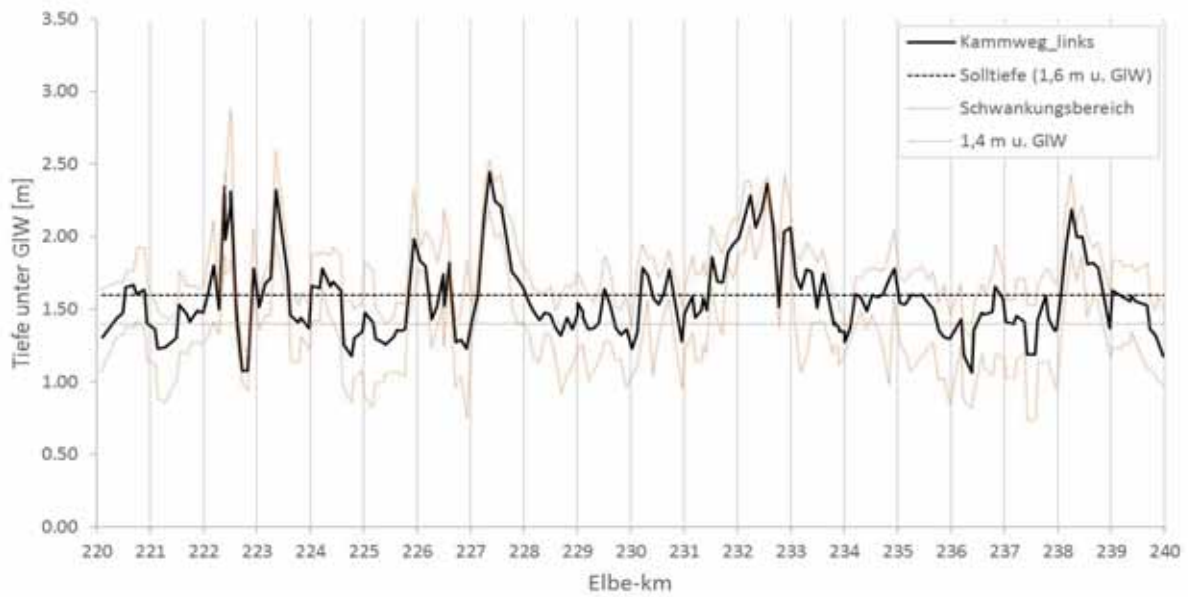


Abbildung 5.2.5: Durchschnittlicher Kammweg entlang des linken Fahrrinnenbereichs von Elbe-km 220 - 240 mit maximalem Schwankungsbereich

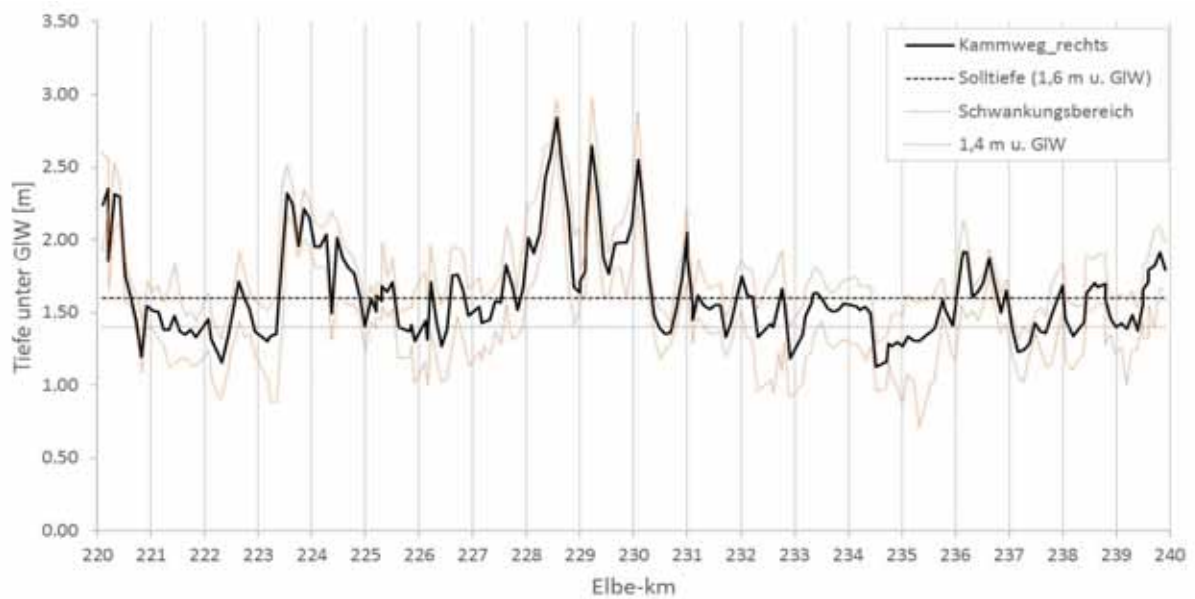


Abbildung 5.2.6: Durchschnittlicher Kammweg entlang des rechten Fahrrinnenbereichs von Elbe-km 220 – 240 mit maximalem Schwankungsbereich

Abbildung 5.2.7, Abbildung 5.2.8 und Abbildung 5.2.9 zeigen, mit welcher Häufigkeit eine Fehltiefe die tiefenbestimmende Stelle pro 100 m Abschnitt über die Jahre darstellt. Liegt eine Häufigkeit von 100 % vor, so bedeutet das, dass innerhalb eines 100 m Abschnitts in jeder der elf betrachteten Peilungen mindestens ein Element eine Wassertiefe kleiner 1,6 m unter GIW gegeben ist. Permanente Fehltiefen liegen entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs hauptsächlich in den Übergangsbereichen zwischen zwei Kurven. Das zeigt sich beispielsweise von Elbe-km 221 und 222 zwischen der Links- und Rechtskurve oder von Elbe-km 224,6 bis 225,7 (siehe Abbildung 5.2.7). Vor allem zwischen Elbe-km

233,5 und 236,5 sind vermehrt permanente Fehltiefen über einen längeren Abschnitt gegeben. Es handelt sich hierbei um den Bereich zwischen zwei Rechtskurven, gefolgt vom Übergangsbereich zwischen Rechts- und Linkskurve. Die permanenten Fehlstellen entlang der seitlichen Fahrinnenbereiche in Abbildung 5.2.8 (linker Fahrinnenbereich) und Abbildung 5.2.9 (rechter Fahrinnenbereich) unterlegen zudem, dass Fehltiefen in den Randbereichen hauptsächlich in Kurvenbereichen vorliegen. So zeigt beispielsweise die Linkskurve zwischen Elbe-km 224,5 und 226 im Bereich des linken Fahrinnenbereichs einen nahezu zusammenhängenden Bereich mit permanenten Fehltiefen, während der rechte Fahrinnenbereich nur vereinzelt von permanenten Fehltiefen betroffen ist. Ähnliche Bilder zeigen sich in der Linkskurve zwischen Elbe-km 228 und 230, in der Rechtskurve zwischen Elbe-km 232 und 234, in der Rechtskurve zwischen Elbe-km 235 und 236 sowie in der Linkskurve zwischen Elbe-km 236 und 237. Ein auffälliger Bereich liegt zwischen Elbe-km 221 und 222. Trotz Kurvenlage beinhalten alle drei Fahrinnenbereiche permanente Fehlstellen.

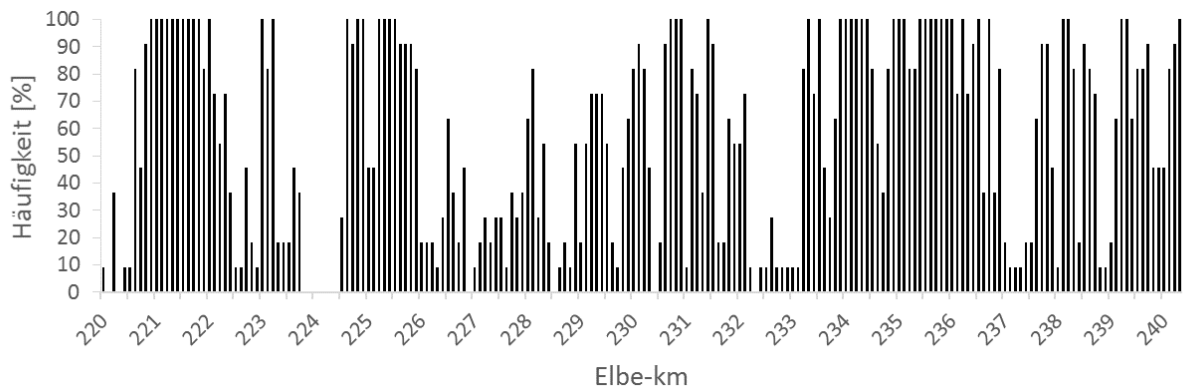


Abbildung 5.2.7: Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des mittleren Fahrinnenbereichs zwischen Elbe-km 220 und 240 darstellen

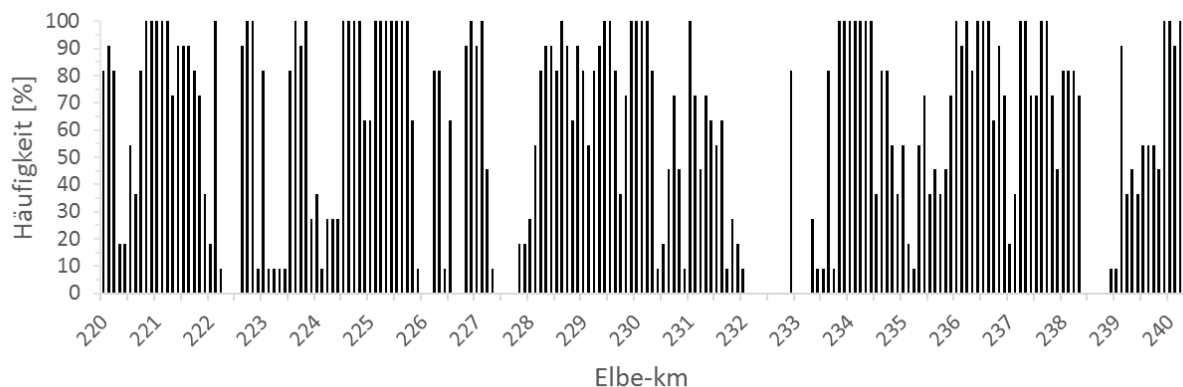


Abbildung 5.2.8: Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des linken Fahrinnenbereichs zwischen Elbe-km 220 und 240 darstellen

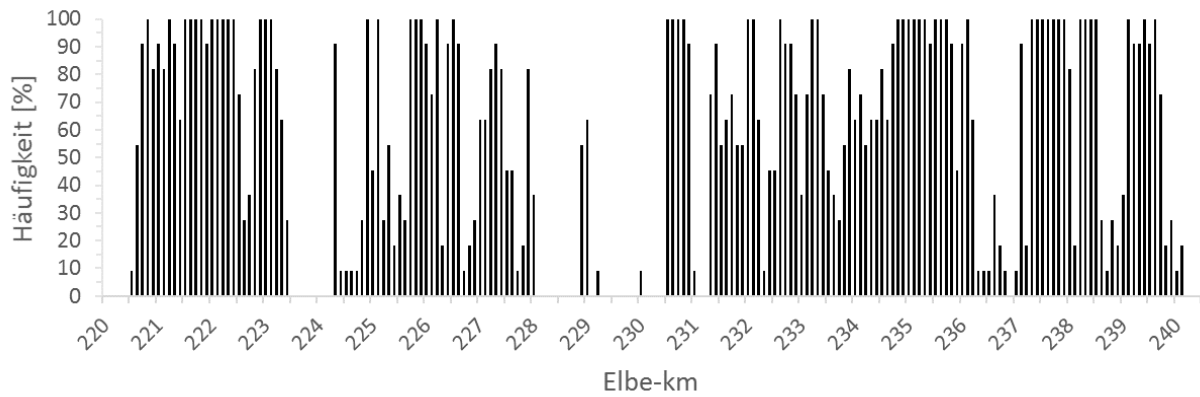


Abbildung 5.2.9: Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des rechten Fahrinnenbereichs zwischen Elbe-km 220 und 240 darstellen

5.2.6 Räumliche Verteilung von Fehlflächen

Wie Abbildung 5.2.10 zeigt, unterscheidet sich hauptsächlich das Ausmaß der Fehlfläche zwischen den verschiedenen Peilungen. Während bei der Peilung 1998 26,9 % (261.355 m²) der Gesamtfahrrinne Fehlfläche darstellt, liegt dieser Wert bei der Peilung von 2016 bei 9,4 % (91.016 m²). Zwischen Elbe-km 221 und 222 steigen sämtliche Kurven deutlich an, was einen Bereich erhöhter Fehlfläche bedeutet. Bis Elbe-km 222 liegen dabei in Peilung 2009 bereits 45.344 m² Fehlfläche vor, 2004 sind es 32.713 m². Entlang der Linkskurve zwischen Elbe-km 224,5 und 226 folgt ein weiterer vergleichsweise starker Anstieg der Fehlfläche. Bei den älteren Peilungen von 1998 bis 2009, ausgenommen 2007, ist ein größerer Anstieg zu erkennen, als dies bei den aktuellsten beiden Peilungen von 2015 und 2016 der Fall ist. Diese Entwicklung setzt sich auch entlang des weiteren Verlaufs fort. Zwischen Elbe-km 230,5 und 230,8 zeigen alle Peilungen einen lokal verstärkten Anstieg der Fehlfläche, wobei diese 2004 mit 7.352 m² am größten und im Oktober 2014 mit 2.988 m² am geringsten ausfällt. Ab Elbe-km 233 folgt der nächste erhöhte Anstieg der Kurven. Während dieser sich in den Peilungen von 1994 und 2009 bis Elbe-km 240 durchzieht, zeigen die restlichen Peilungen ab Elbe-km 236 wieder ein Abflachen des Kurvenverlaufs.

Obwohl die Peilung von 1998 den größten und die von 2016 den geringsten Anteil an Fehlfläche aufweist, ist über die Jahre jedoch kein Trend hin zu geringeren Fehlflächen erkennbar, da die Größe der Gesamtfehlfläche nicht durchgehend mit steigender Jahreszahl abnimmt.

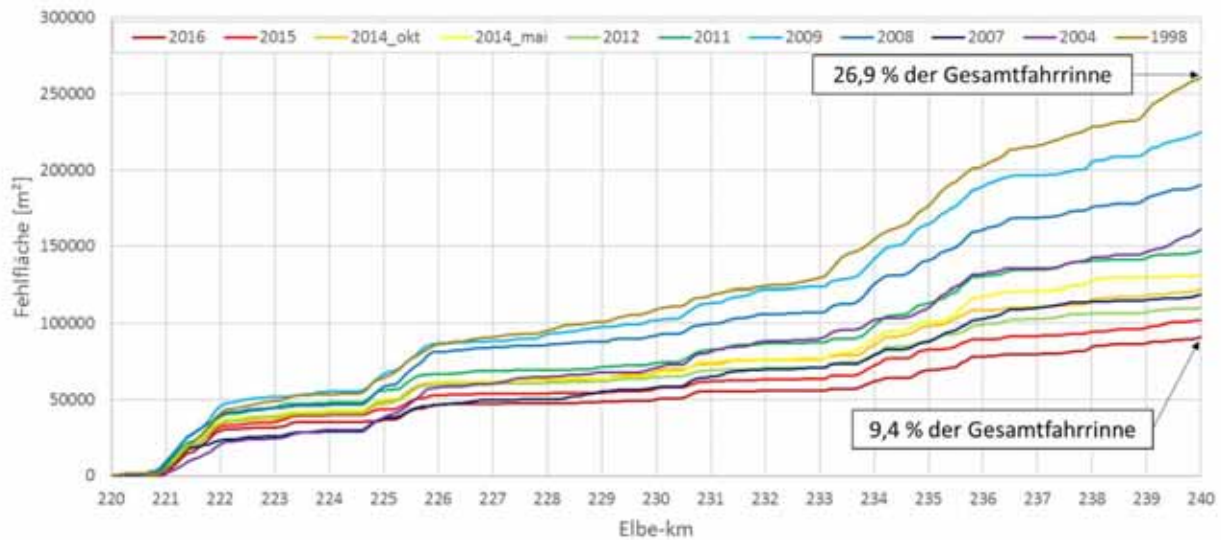


Abbildung 5.2.10: Kumulierte Fehlflächen der Peilungen zwischen Elbe-km 220 und 240

5.2.7 Fehlfläche pro Tiefenschicht

Der Anteil an Fehlfläche nimmt innerhalb des mittleren Fahrrinnenbereichs mit steigender Wassertiefe zu, wie Abbildung 5.2.11 verdeutlicht. Erste sichtbare Anstiege zeigen die Kurven der Peilungen von 1998 und 2004 ab einer Tiefe von 1,2 m unter GIW. Ab einer Tiefe von 1,4 m unter GIW weisen sämtliche Peilungen Fehlflächen auf, wobei in der Peilung von 2015 mit 4.272 m² die geringste Fehlfläche in dieser Tiefe gegeben ist, in der Peilung von 2009 mit 39.540 m² die größte. Die Verläufe der Kurven der einzelnen Peilungen unterscheiden sich dabei. Betrachtet man beispielsweise die Fehlflächen der Peilungen von 2009 und 2007 in einer Tiefe von 1,4 m unter GIW, so ist die Fehlfläche der Peilung von 2007 mit 6.804 m² um fast das 6-fache kleiner. Doch während die Steigung bei der Peilung von 2009 ab 1,5 unter GIW kontinuierlich geringer wird, weist die Peilung von 2007 einen Anstieg ähnlich dem exponentiellen Wachstumsmodell auf. Bei einer Tiefe von 1,8 m unter GIW beträgt die Differenz der Fehlflächen der beiden Peilungen nur noch 4.420 m² (Peilung 2009: 133.368 m²; Peilung 2007: 128.948 m²). Die Verteilung der Fehlflächen über die Tiefe ist somit über die Jahre variabel.

Für die aktuellste Peilung von 2016 kann der Anstieg der Fehlfläche mit der Tiefe zwischen 1,4 m unter GIW und 1,7 m unter GIW als nahezu konstant angesehen werden, wobei die Fehlfläche pro 0,1 m Tiefe um durchschnittlich 20.744 m² ansteigt. Zwischen 1,7 und 1,8 m unter GIW steigt die Fehlfläche jedoch mit 33.804 m² um mehr als die Hälfte an.

Auch in dieser Auswertung der Fehlfläche pro Tiefenschicht ist über die Jahre keine eindeutige Entwicklung hin zu geringeren Fehlflächen und höheren Wassertiefen entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs zu erkennen.

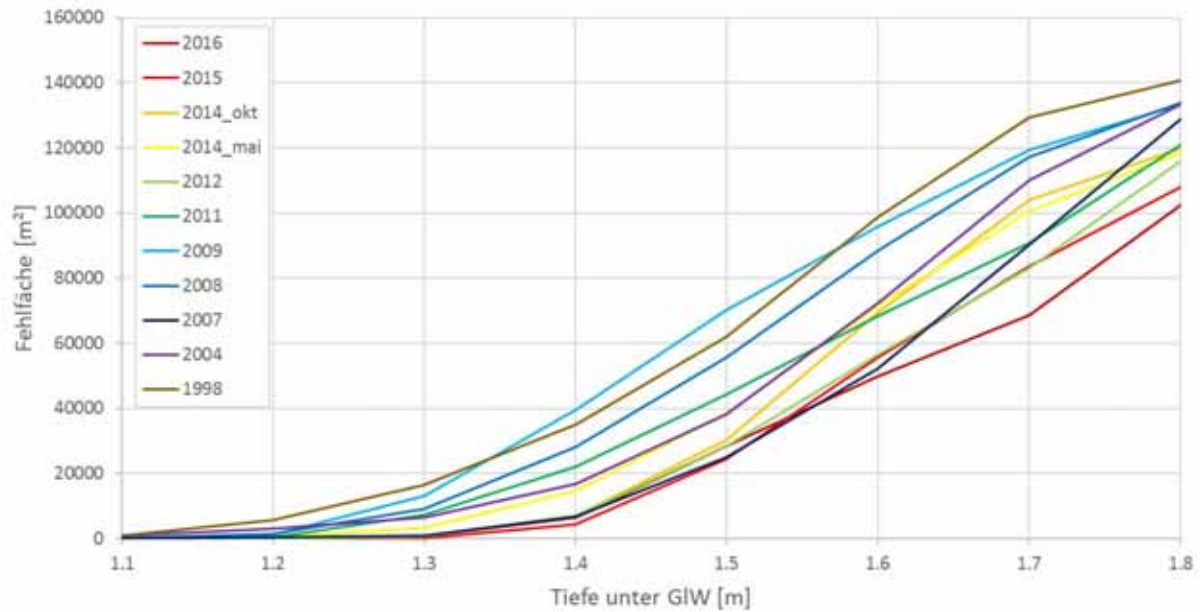


Abbildung 5.2.11: Verteilung der Fehlflächen pro Tiefenschicht entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs von Elbe-km 220 – 240

5.2.8 Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel

Der Wasserstand des Medians des Abflusses $W(\text{MeQ})$ und der Wasserstand des Gleichwertigen Abflusses $W(\text{GlQ})$, dargestellt in Abbildung 5.2.12, verlaufen im Mittel mit einem Abstand von 1 m. Wie Abbildung 5.2.13 zeigt, sinkt die Differenz entlang des Teilabschnitts der Elbe, wobei ab Elbe-km 231,5 Werte unter dem Durchschnitt vorliegen. Die beiden Wasserspiegellagen verlaufen somit ungleichwertig. Basierend auf der hier angenommenen Bedingung, dass eine zusätzlich tiefenbestimmende Stelle bei $W(\text{MeQ})$ gegenüber $W(\text{GlQ})$ dann vorliegt, wenn die Differenz zwischen den beiden Wasserspiegellagen die durchschnittliche Differenz um 10 % (hier 0,9 m) unterschreitet, liegen zwischen Elbe-km 220 und 240 keine zusätzlichen tiefenbestimmenden Stellen bei $W(\text{MeQ})$ vor, welche durch unterschiedliche Bezugswasserspiegellagen bedingt sind. Die geringste Differenz der beiden Wasserspiegellagen liegt mit 0,91 m bei Elbe-km 234,5.

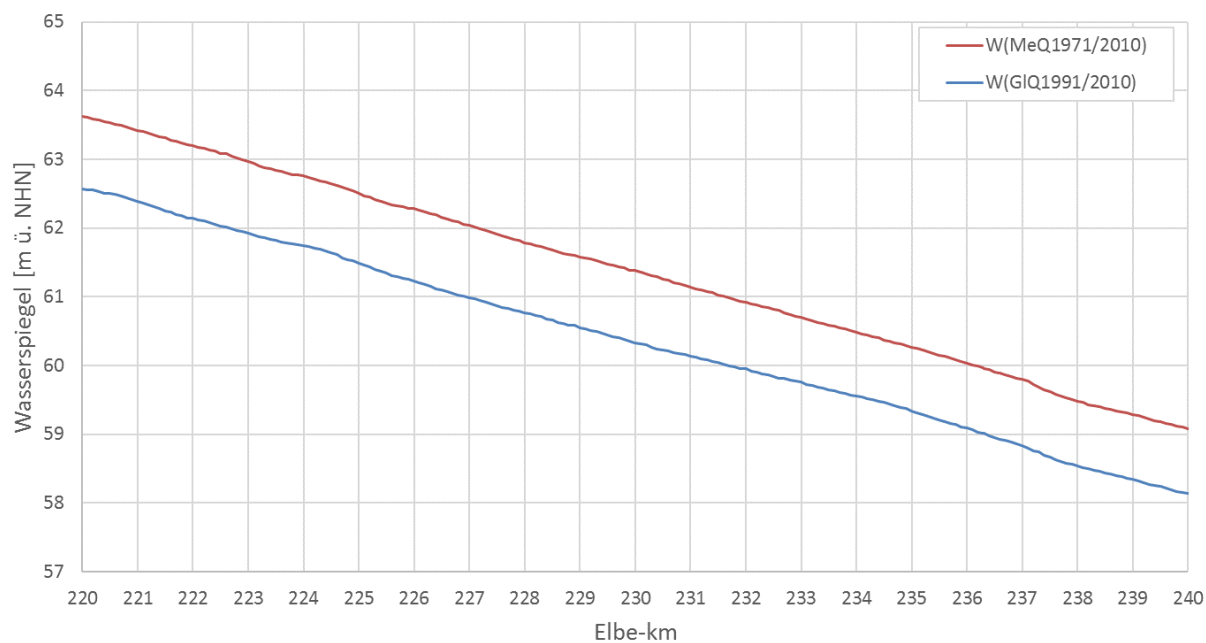


Abbildung 5.2.12: Wasserspiegelverläufe im Längsschnitt zwischen Elbe-km 220 und 240; rote Linie: Wasserspiegel vom Median des Abflusses zwischen 1971 und 2010 ($W(\text{MeQ}1971/2010)$); blaue Linie: Wasserspiegel des Gleichwertigen Abflusses zwischen 1991 und 2010 ($W(\text{GIQ}1991/2010)$)

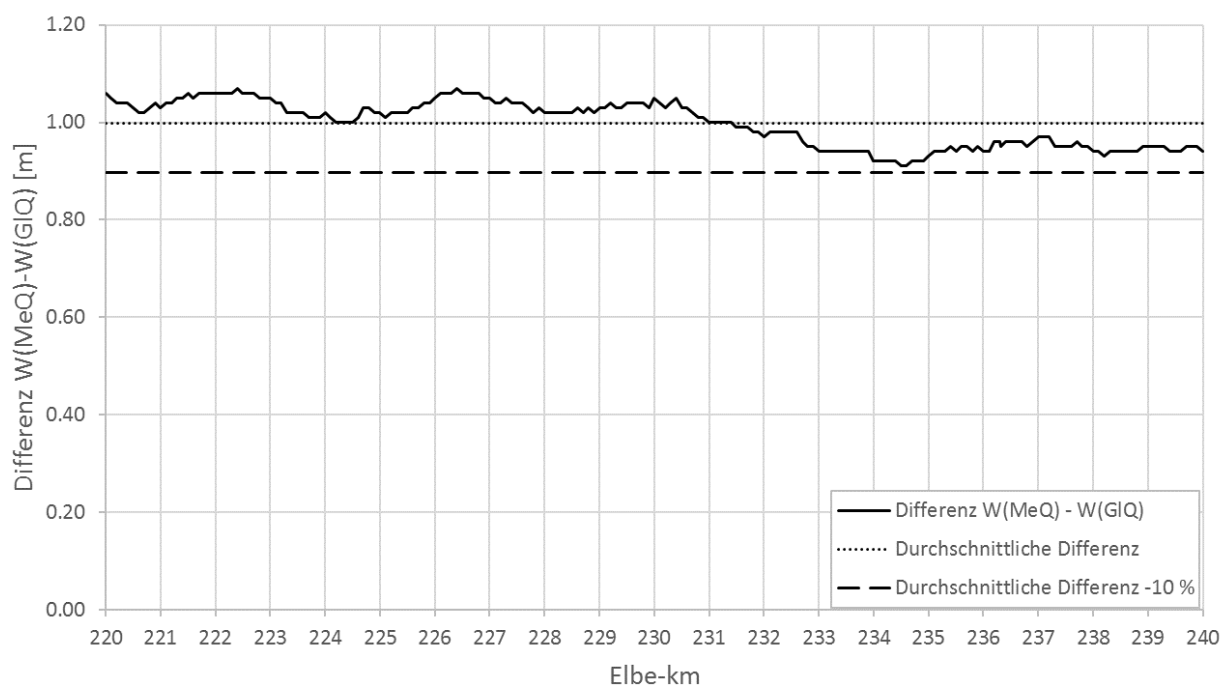


Abbildung 5.2.13: Differenz zwischen $W(\text{MeQ})$ und $W(\text{GIQ})$ von Elbe-km 220 bis 240

5.3 Elbe-km 320 – 340

5.3.1 Datengrundlage

Für die Auswertung des Streckenabschnitts von Elbe-km 320 bis 340 stand sowohl die Fahrrinne von 2008 als auch von 2013 zur Verfügung. Wie Abbildung 5.3.1 zeigt, kann die Lage der Fahrrinnen variieren. Unterschiede liegen dabei zwischen Elbe-km 323,8 und 324,8 sowie zwischen Elbe-km 336 und 338,4 vor. Die maximale Abweichung der Fahrrinnenmittelpunkte liegt mit 11 m bei Elbe-km 324. Da die Fahrrinne von 2013 einem aktuelleren Stand entspricht, wurde diese für die Konstruktion der Linienzüge und der darauf basierenden Auswertung der Wassertiefen verwendet.

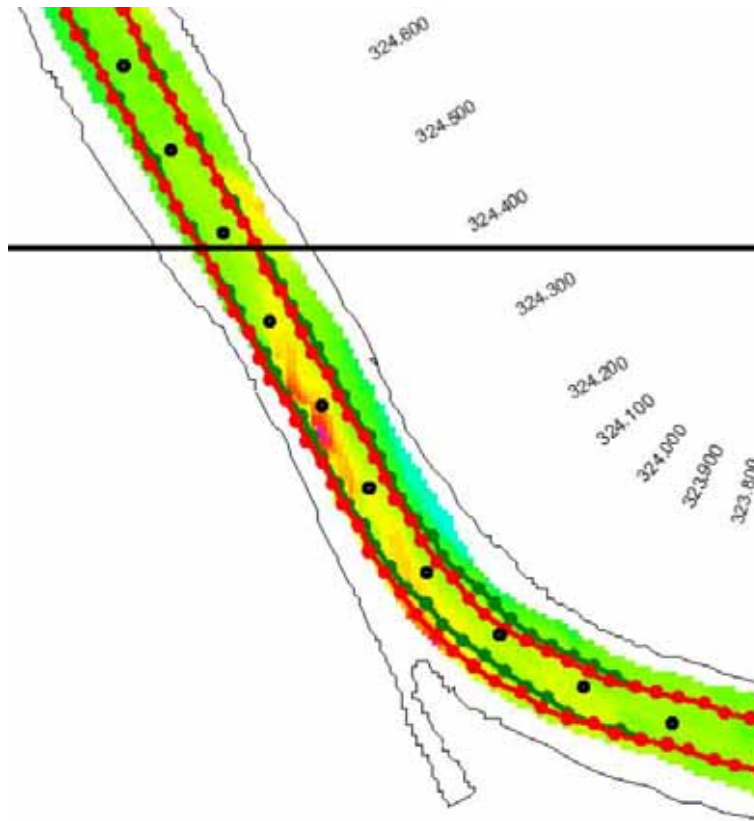


Abbildung 5.3.1: Abweichung von Fahrrinne 2013 (rot) zu Fahrrinne 2008 (grün)

Zur Auswertung der Wassertiefen entlang des Streckenabschnitts standen sieben Peilungen zwischen 1998 und 2015 zur Verfügung, welche den 20 km langen Abschnitt zusammenhängend darstellen. Generell sind in diesem Bereich deutlich mehr Peilungen vorhanden, die meisten stellen dabei jedoch nur Teilabschnitte da, beispielsweise beginnend ab Elbe-km 330. Die aktuellste Peilung von 2016 war zum Zeitpunkt der Auswertung noch nicht vorhanden. Die Peilung von 2011 wurde aussortiert, da sie unmittelbar nach einem Hochwasserereignis gefahren wurde, wie die Abflussganglinie der

Pegelstation Magdeburg (Elbe-km 326,67) in Abbildung 5.3.2 zeigt. Somit gingen in die Tiefenanalyse sechs Peilungen ein.

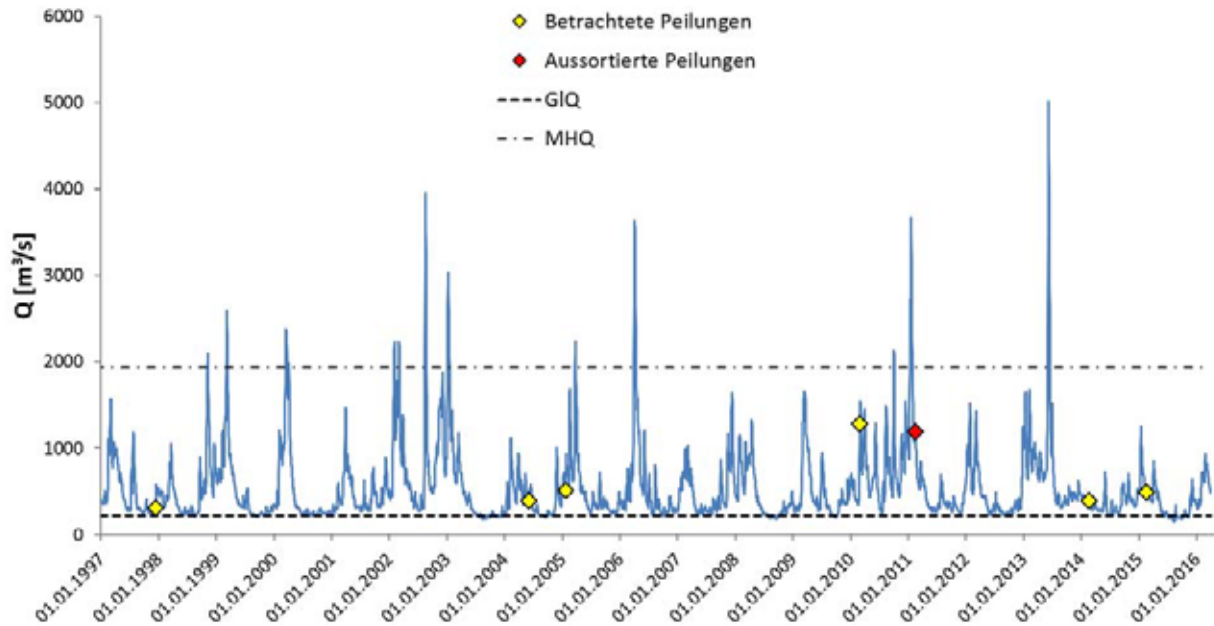


Abbildung 5.3.2: Abflussganglinie am Pegel Magdeburg (Elbe-km 326,67) inklusive betrachteter und aussortierter Peilungen

5.3.2 Abdeckungsgrad der Daten

Zur Abschätzung der Qualität der Ergebnisse wird berechnet, wie viel Prozent des mittleren und der beiden seitlichen Fahrrinnenbereiche tatsächlich mit Datenpunkten bedeckt sind. Der linke und rechte Fahrrinnenbereich weist dabei jeweils einen Abdeckungsgrad von 93 % auf, der mittlere Fahrrinnenbereich von 98 %. Die Einschränkungen der äußeren Fahrrinnenbereiche kommen dabei vor allem innerhalb der Stadtstrecke von Magdeburg zustande, wo auch die offiziell ausgewiesene Fahrrinne aufgrund der dortigen Gegebenheiten teilweise keine 50 m Breite erreicht.

5.3.3 Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen

Die Wassertiefen der Peilungen im Streckenabschnitt von Elbe-km 320 bis 340 verteilen sich zwischen maximal 5 m unter GIW in der Peilung von 2015 und minimal 1,1 m unter GIW in den Peilungen von 1998, 2004 und 2005 (siehe Abbildung 5.3.3). Die maximale Dichte einer Häufigkeitsverteilung gibt an, welche Wassertiefe am häufigsten gegeben ist. In den Peilungen von 2015 und 2014 liegt diese jeweils bei einer Tiefe von 2,5 m unter GIW, in den Peilungen von 2010, 2005 und 1998 jeweils bei 2,4 m unter GIW und 2004 bei 2,6 m unter GIW. Vergleicht man die Häufigkeitsverteilungen der ältesten Peilung von 1998 mit der aktuellsten von 2015, so ist zu erkennen, dass sich die Kurve von 2015 entlang der x-

Achse nach rechts verschoben hat, größere Wassertiefen somit häufiger gegeben sind. Die dazwischen liegenden Peilungen folgen dieser Kurvenverschiebung entlang der x-Achse jedoch nicht entsprechend ihrer Chronologie, weshalb keine eindeutige Entwicklung hin zu größeren Wassertiefen gegeben ist.

Die Werte der Schiefe in Tabelle 5.3.1 zeigen, dass sämtliche Häufigkeitsverteilungen rechtsschief sind und somit alle hin zu größeren Wassertiefen im Vergleich zum Mittelwert tendieren. Abgesehen von einem geringen Anstieg in 2005 sind die Schiefewerte aller Peilungen dabei identisch. Die Werte der Kurtosis bewegen sich zwischen 0,4 in der Peilung von 2010 und 1,2 in der Peilung von 2005. Sämtliche Verteilungen verlaufen somit im Vergleich zu einer Normalverteilung spitzer zusammen, was bedeutet, dass sich die Dichte von Werten in einem Bereich der Wassertiefen konzentriert. Wie die Werte der Kurtosis in Tabelle 5.3.1 zeigen, variiert das Ausmaß der Verengung dabei zwischen den Jahren.

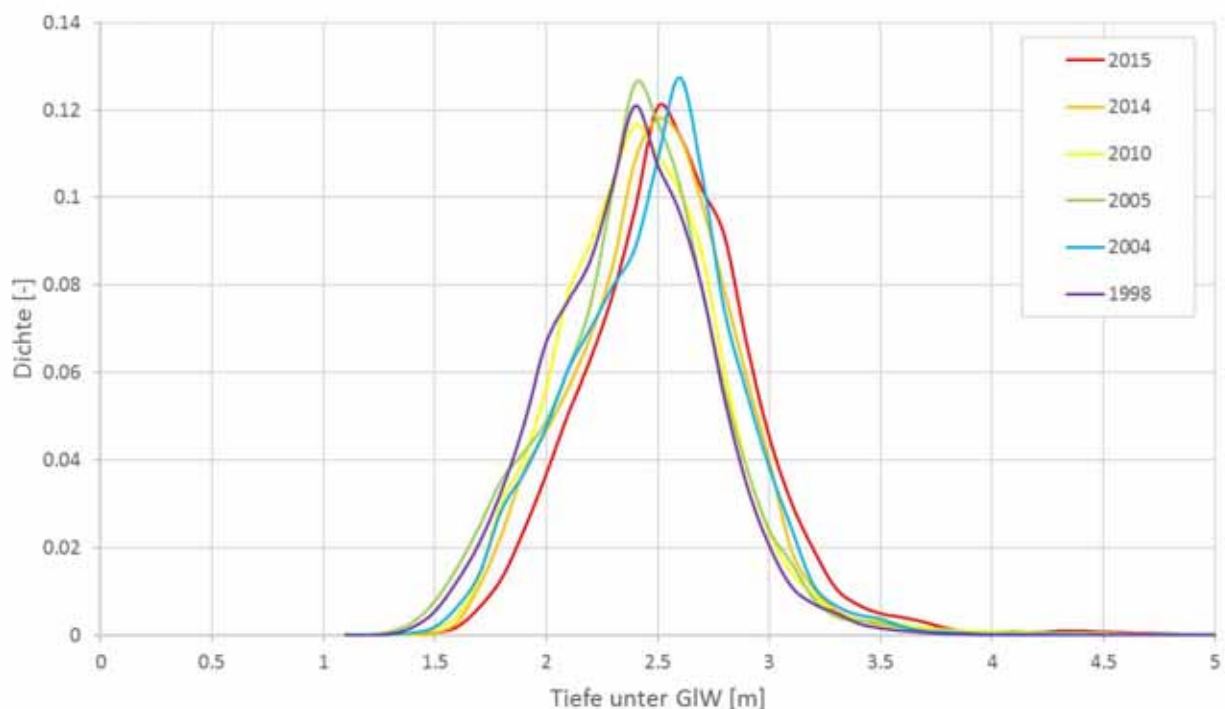


Abbildung 5.3.3: Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen von verschiedenen Peilungen zwischen Elbe-km 320 und 340

Tabelle 5.3.1: Kurtosis und Schiefe der Häufigkeitsverteilungen von Elbe-km 320 - 340

Peilung	Kurtosis	Schiefe
2015	0.7	1.4
2014	0.6	1.4
2010	0.4	1.4
2005	1.2	1.5
2004	0.8	1.4
1998	0.5	1.4

5.3.4 Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Wassertiefen

Die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten in Abbildung 5.3.4 zeigen, dass die hier angenommene Solltiefe von 1,6 m unter GlW kaum unterschritten wird. Die maximale Unterschreitungswahrscheinlichkeit dieser Tiefe liegt bei 2,7 % in der Peilung von 2005, gefolgt von 1998 mit 2%. Die geringste Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Solltiefe liegt bei 0,2 % in der Peilung von 2015. Eine Entwicklung hin zu geringeren Unterschreitungswahrscheinlichkeiten ist dabei erst zwischen den Jahren 2010 und 2015 von 0,6 % auf 0,2 % zu erkennen. Da dieser Zeitraum jedoch lediglich drei Peilungen umfasst, und der Unterschied mit 0,4 % gering ist, kann von keiner eindeutigen Entwicklung gesprochen werden.

Die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten unterscheiden sich vor allem im Tiefenbereich zwischen 2 und 3 m unter GlW, wobei beispielsweise eine Tiefe von 2,4 m unter GlW 2015 zu 37,2 % unterschritten wurde, 1998 hingegen um 57,6 %. Mit zunehmender Wassertiefe laufen die Kurven wieder zusammen, sodass sich die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten ab einer Tiefe von 3,5 m unter GlW nur noch um maximal 1,3 % unterscheiden.

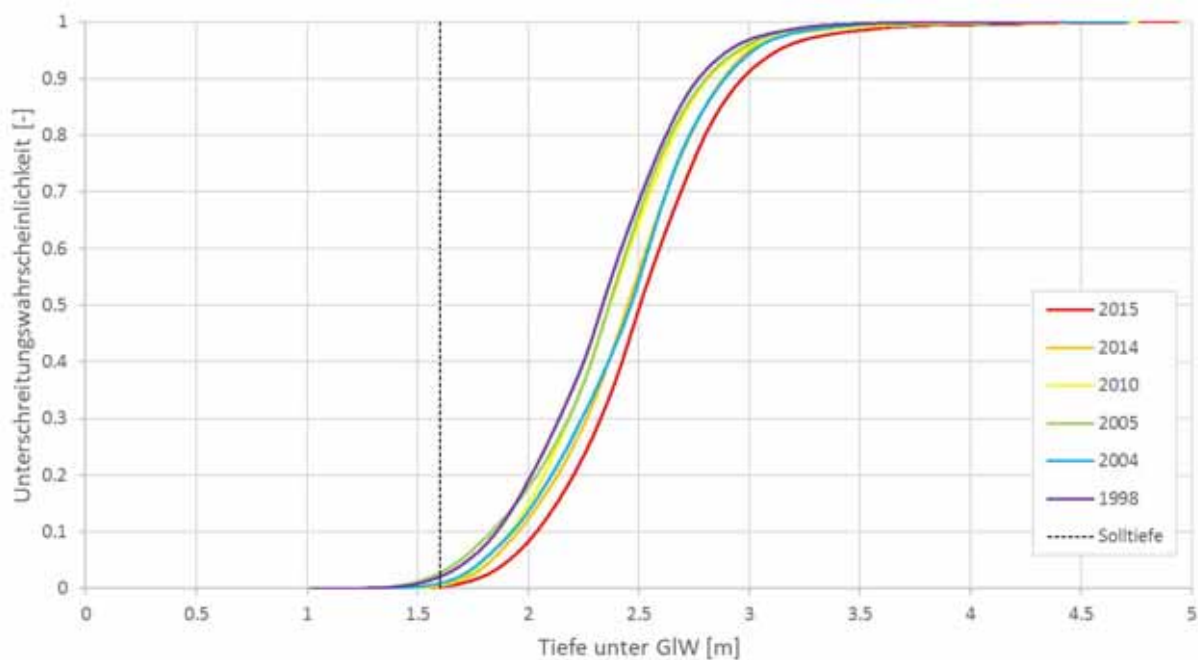


Abbildung 5.3.4: Unterschreitungswahrscheinlichkeit von Wassertiefen der einzelnen Peilungen inklusive angenommener Solltiefe von 1,6 m unter GlW

5.3.5 Auswertung tiefenbestimmender Stellen

Der Teilabschnitt von Elbe-km 320 bis 340 beinhaltet die Stadtstrecke durch Magdeburg. Anhang 7 zeigt die durchschnittliche Wassertiefe entlang dieses Streckenabschnitts basierend auf den sechs

betrachteten Peilungen. Anhang 8 stellt dabei heraus, wo die Mindesttiefe von 1,6 m unter GIW im Durchschnitt nicht erreicht wird. Zwischen Elbe-km 320,9 und 321,4 liegt entlang des Gleithangs in der Linkskurve ein Abschnitt mit seitlicher Fehlfläche. Ähnliches ist zwischen Elbe-km 324 und 324,3 zu beobachten, wobei sich die Fehlfläche entsprechend der Rechtskurve im rechten Randbereich befindet (Gleithang). Bei Elbe-km 325,8 ragt der Domfelsen in die Elbe. Durch die Verengung der Fahrrinne kommt es hier beidseitig zu Fehltiefen. Gleiches gilt im Bereich der Strombrücke bei Elbe-km 326,56 und dem dort auftretenden Felsen. Auch hier liegen sowohl im linken als auch im rechten Fahrrinnenbereich Fehltiefen vor. Bei Elbe-km 327,3 fließt der Altarm Zollelbe dem Hauptstrom zu. Hier kommt es in den Randbereichen des Hauptstroms zu Fehltiefen. Auch im Bereich der Jerusalembrücken zwischen Elbe-km 327,71 und 327,75 kommt es entlang des linken Flussbereichs im Durchschnitt zu Tiefeneinschränkungen. Im weiteren Verlauf führen der Herrenkrugfelsen von Elbe-km 329,3 bis 329,55 sowie die Herrenkrugbrücke bei Elbe-km 329,35 zu Fehlflächen, ehe bei der von rechts einmündende Alten Elbe (Elbe-km 327) weitere, zu geringe Wassertiefen im rechten Flussbereich folgen. Weitere Fehlflächen liegen entlang des Gleithangs der Linkskurve zwischen Elbe-km 330,8 und 332,1 sowie im Bereich der Einfahrt zum Industriehafen bei Elbe-km 332,8 vor.

Anhang 9 zeigt die zeitliche Standardabweichung der sechs Peilungen entlang des 20 km langen Teilabschnitts, die im Durchschnitt 0,15 m beträgt. Länger zusammenhängende Bereiche mit überdurchschnittlicher zeitlicher Standardabweichung befinden sich im Kurvenbereich zwischen Elbe-km 320,5 und 324,5 sowie zwischen der Einfahrt zum Handelshafen Magdeburg bei Elbe-km 330 und dem Verlassen des Stadtgebiets Magdeburg bei Elbe-km 334,5. Die maximale zeitliche Standardabweichung liegt dabei mit 0,8 m bei Elbe-km 333,6, also unmittelbar nach dem Abzweig des Rothenseer Verbindungskanals. Zwar liegt hier im Durchschnitt keine Fehltiefe vor, durch die hohe zeitliche Standardabweichung kann dies jedoch temporär der Fall sein.

Der durchschnittliche Kammweg entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs, dargestellt in Abbildung 5.3.5, weist bei einer durchschnittlichen Tiefe von 1,98 m einen Maximalwert von 2,55 m unter GIW bei Elbe-km 323,9 auf. Die geringste Tiefe liegt mit 1,42 m unter GIW bei Elbe-km 329,4. Der durchschnittliche Kammweg zeigt dabei, dass vor allem in den Bereichen zwischen Elbe-km 325,5 und 327,6 sowie zwischen Elbe-km 329,2 und 333,6 geringe Wassertiefen gegeben sind, die teilweise die Mindesttiefe von 1,6 m unter GIW unterschreiten. Ab Elbe-km 333,6 beträgt die Tiefe des durchschnittlichen Kammwegs nahezu durchgehend 2 m unter GIW, wobei die Mindesttiefe entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs nicht mehr unterschritten wird. Auch im Bereich zwischen Elbe-km 320 und 325,5 wird die Mindesttiefe entlang des durchschnittlichen Kammwegs nicht unterschritten. Der Schwankungsbereich zeigt hier jedoch, dass Kammwege einzelner Peilungen bis Elbe-km 323 vom mittleren Kammweg abweichen, sodass entlang dieses Abschnitts in einzelnen Jahren auch Fehltiefen

erreicht wurden. Die geringste Wassertiefe liegt dabei mit 1,39 m unter GIW bei Elbe-km 321,5. Der Schwankungsbereich deutet aber auch an, dass die Kammwege in diesem Bereich durchaus größere Tiefen aufweisen können. Die durchschnittliche Schwankungsbreite in diesem Bereich bis Elbe-km 323 liegt bei 0,55 m.

Insgesamt liegen oberer und unterer Schwankungsbereich zwischen Elbe-km 320 und 340 jeweils durchschnittlich 0,2 m vom mittleren Kammweg entfernt.

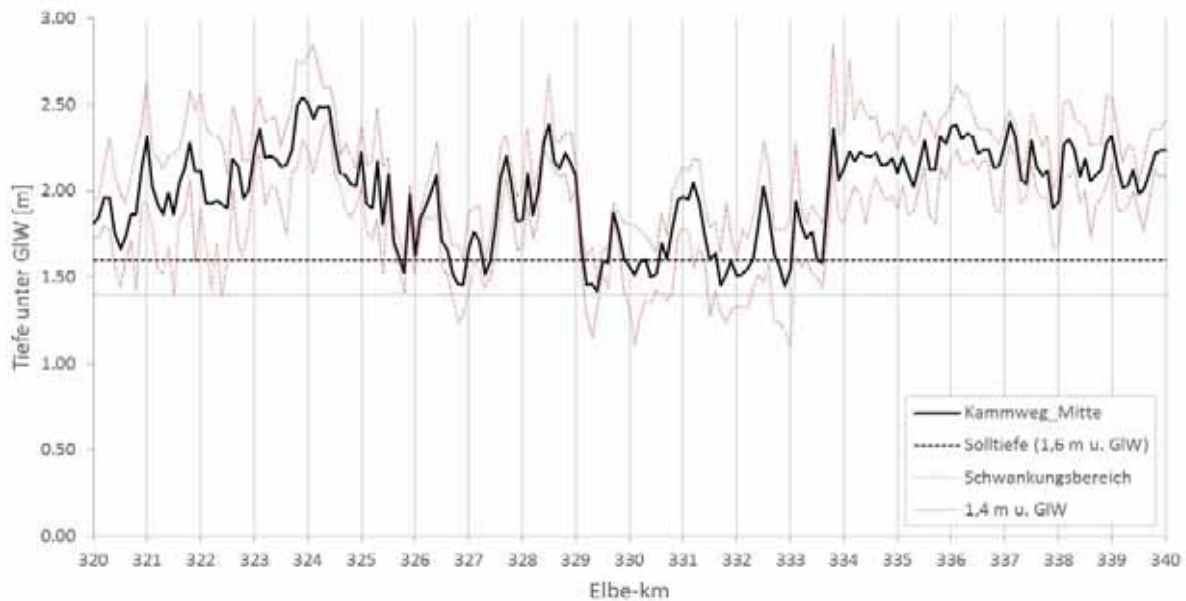


Abbildung 5.3.5: Kammweg entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs mit maximalem Schwankungsbereich zwischen Elbe-km 320 und 340

Die durchschnittlichen Kammwege der seitlichen Fahrrinnenbereiche weisen einen ähnlichen Verlauf wie der durchschnittliche Kammweg des mittleren Fahrrinnenbereichs auf, da auch hier die Bereiche geringer Wassertiefen in etwa zwischen Elbe-km 325,5 und 327,6 sowie zwischen Elbe-km 329,2 und 333,6 liegen. Die durchschnittliche Tiefe entlang des gemittelten Kammwegs des linken Fahrrinnenbereichs liegt bei 2,01 m unter GIW. Mit 0,72 m unter GIW liegt die geringste Tiefe bei Elbe-km 329,3. Die größte Tiefe beträgt 2,81 m unter GIW bei Elbe-km 324,1. Im Bereich zwischen Elbe-km 320 und 322,5 unterschreitet der durchschnittliche Kammweg des linken Fahrrinnenbereichs die Mindesttiefe zwar nicht, der Schwankungsbereich zeigt jedoch, dass die Wassertiefen in den einzelnen Peilungen variieren können, sodass Fehltiefen gegeben sein können. Generell liegt der durchschnittliche Schwankungsbereich hin zu geringeren Wassertiefen mit 0,21 m etwas über dem hin zu größeren Wassertiefen (0,2 m).

Der durchschnittliche Kammweg des rechten Fahrinnenbereichs liegt im Mittel bei einer Tiefe von 2,03 m unter GIW. Die geringste Tiefe mit 0,96 m unter GIW liegt bei Elbe-km 325,6, Elbe-km 320,9 bildet mit 3,19 m unter GIW die tiefste Stelle. Während der durchschnittliche Kammweg des rechten Fahrinnenbereichs zu großen Teilen dem Verlauf der anderen beiden Fahrinnenbereiche ähnelt, unterscheidet er sich von ihnen vor allem im Bereich zwischen Elbe-km 320 und 323. Abgesehen von Elbe-km 320,4 wird die Solltiefe hier nicht einmal durch den Schwankungsbereich unterschritten.

Die durchschnittliche Differenz zwischen mittlerem Kammweg des rechten Fahrinnenbereichs und unterem Schwankungsbereich liegt bei 0,22 m, zwischen mittlerem Kammweg und oberem Schwankungsbereich beträgt sie 0,21 m.

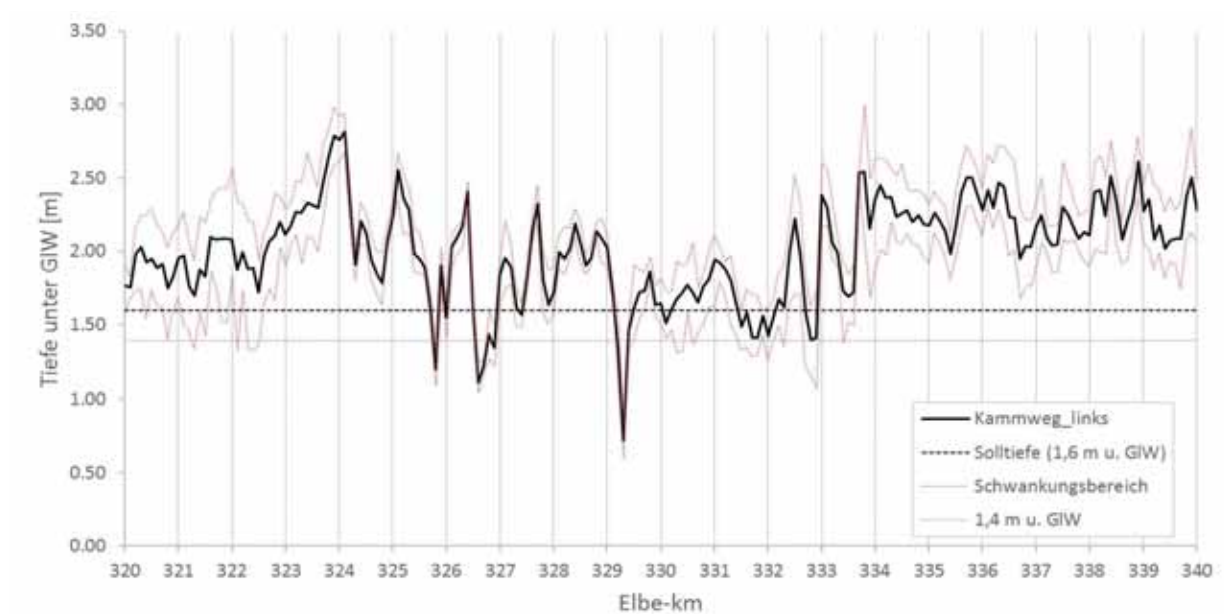


Abbildung 5.3.6: Kammweg entlang des linken Fahrinnenbereichs mit maximalem Schwankungsbereich zwischen Elbe-km 320 und 340

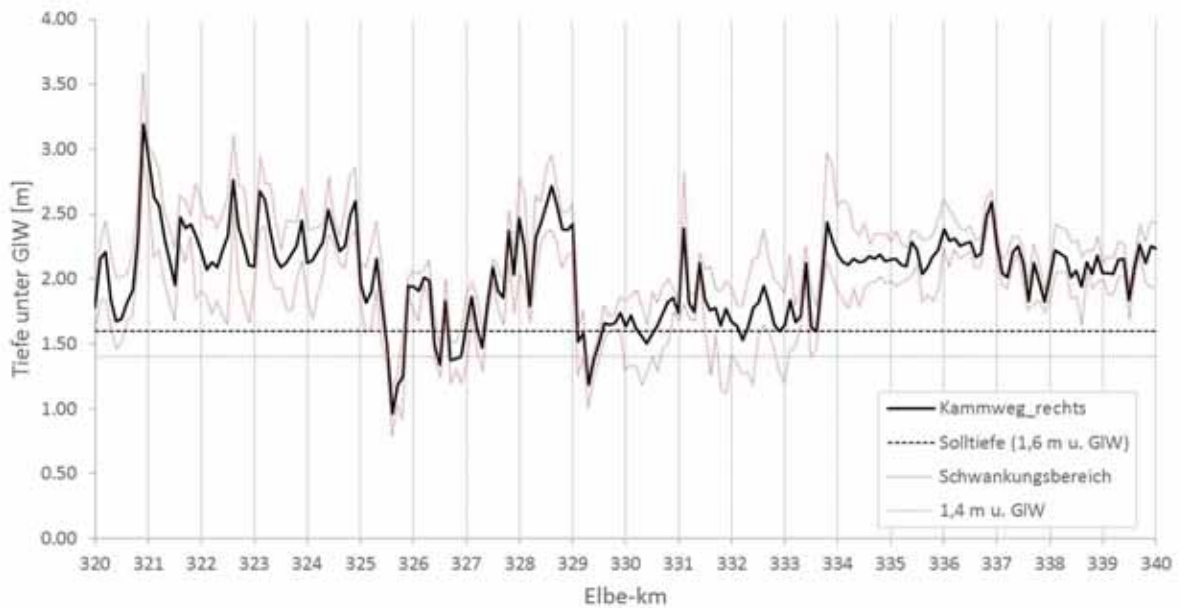


Abbildung 5.3.7: Kammweg entlang des rechten Fahrrinnenbereichs mit maximalem Schwankungsbereich zwischen Elbe-km 320 und 340

Permanente Fehltiefen entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs liegen im Abschnitt zwischen Elbe-km 320 und 340 nur an zwei Stellen vor: im Bereich des Zustroms des Altarms Zollelbe bei Elbe-km 327,3 sowie unterhalb der Herrenkrugbrücke bei Elbe-km 329,4. Keine permanenten aber dennoch häufig auftretenden Fehltiefen befinden sich im Bereich des Domfelsen bei Elbe-km 325,8 und im Bereich der Strombrücke bei Elbe-km 326,65 und dem dort in die Elbe ragenden Felsen. Des Weiteren liegen unterhalb des Herrenkrugstegs (Elbe-km 330,07) sowie zwischen Elbe-km 331,4 und 333,6 wiederkehrende Fehltiefen.

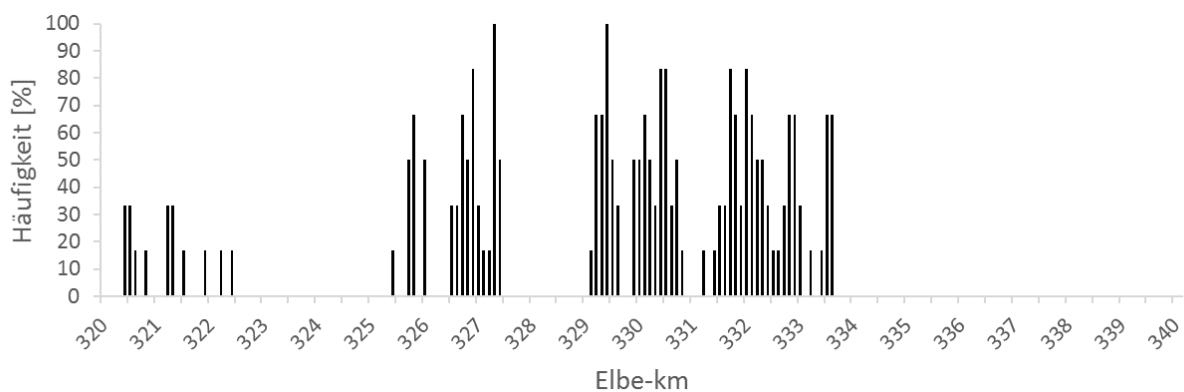


Abbildung 5.3.8: Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 320 und 340 darstellen

Die seitlichen Fahrrinnenbereiche zeigen beide permanente Fehltiefen in den Bereichen der drei Felsen Domfelsen (Elbe-km 325,8), Strombrückefelsen (Elbe-km 326,7) und Herrenkrugfelsen (Elbe-km 329,2 bis 329,5). Im rechten Fahrrinnenbereich treten dabei bereits ab der Hubbrücke bei Elbe-km 325,46 permanente Fehlstellen auf. Die Schaubilder zeigen zudem, dass Fehltiefen im Bereich zwischen Elbe-km 331,5 und 333 im linken Fahrrinnenbereich häufiger auftreten als im rechten Fahrrinnenbereich. Ab Elbe-km 334 sind keine Fehltiefen mehr zu verzeichnen.

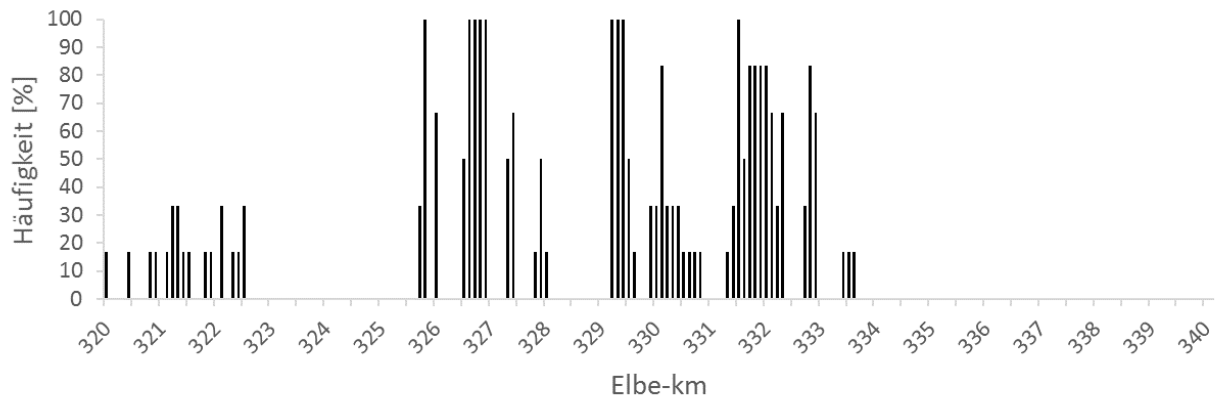


Abbildung 5.3.9: Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des linken Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 320 und 340 darstellen

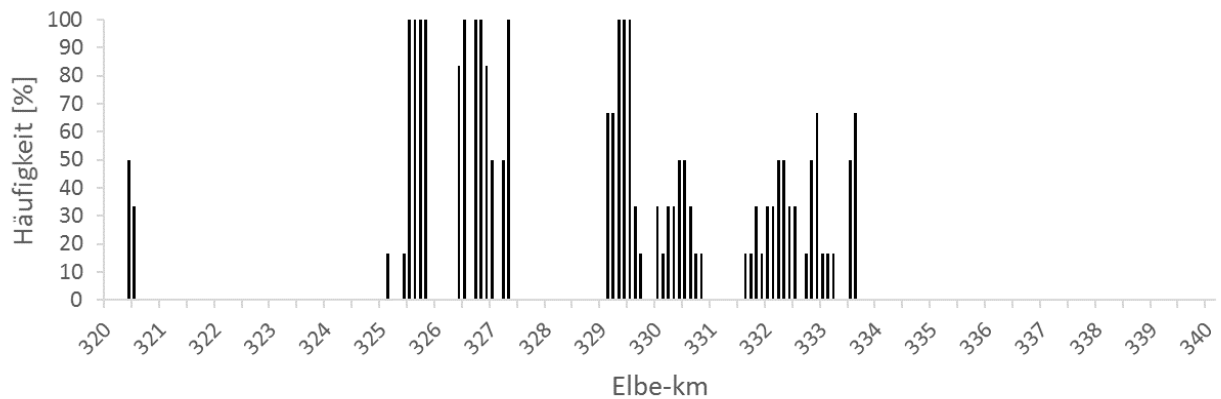


Abbildung 5.3.10: Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des rechten Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 320 und 340 darstellen

5.3.6 Räumliche Verteilung von Fehlflächen

Fehltiefen nehmen entlang des Streckenabschnitts von Elbe-km 320 bis 340 in der Peilung von 2005 insgesamt einen Anteil von 2,8 % (27.340 m²) der Gesamtfahrrinne ein (siehe Abbildung 5.3.11). Dieser Wert stellt die maximal beobachtete Gesamtfehlfläche dar. Der geringste Wert liegt mit 0,4 % (3.828 m²) bei der Peilung von 2015. Die Fehlflächen der Peilungen unterscheiden sich dabei nicht nur

in ihrem Gesamtausmaß, auch ihr Auftreten und lokales Ausmaß variieren. In Peilung 2015 und 2004 treten erste Fehlflächen ab Elbe-km 325,5 auf. Die Peilung von 2010 weist bis zu dieser Stelle dagegen bereits eine Fehlfläche von 972 m² auf. Besonders auffällig sind die Kurvenverläufe der Peilungen von 2005 und 1998, die ab Elbe-km 326,5 stärker als die restlichen vier Peilungen ansteigen. Bis Elbe-km 330 zeigen beide Kurven einen ähnlichen Verlauf. Zwischen Elbe-km 330 und 330,8 liegt in Peilung 2005 eine Fehlfläche von 9.560 m², in Peilung 1998 1.320 m². Zwischen Elbe-km 331,7 und 332,5 zeigt hingegen die Peilung von 1998 einen Anstieg um 10.568 m² während dieser bei der Peilung von 2005 2.396 m² beträgt. Bei der Peilung von 2015 liegt die Fehlfläche zwischen Elbe-km 330 und 330,8 bei 128 m² und zwischen Elbe-km 331,7 und 332,5 bei 1.056 m². Gerade das Ausmaß von Fehlflächen unterscheidet sich somit zwischen den Jahren. Ab Elbe-km 333,6 liegt in keiner Peilung mehr Fehlfläche innerhalb des betrachteten Fahrrinnenbereichs vor.

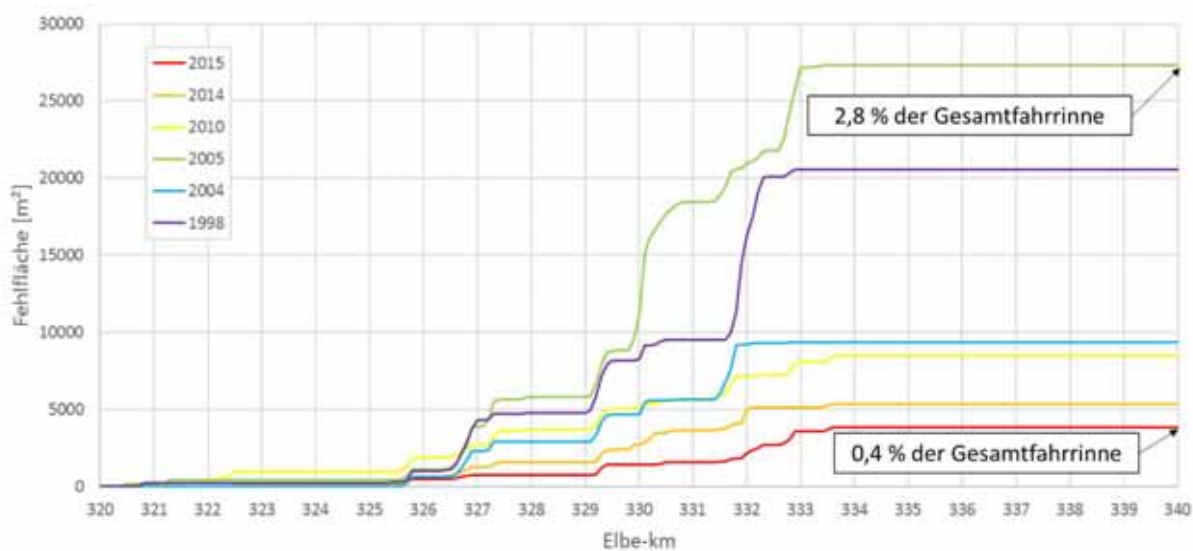


Abbildung 5.3.11: Kumulierte Fehlflächen der Peilungen zwischen Elbe-km 320 und 340

5.3.7 Fehlfläche pro Tiefenschicht

Die Verteilung der Fehlfläche pro Tiefenschicht ist in Abbildung 5.3.12 dargestellt. Die Peilungen von 2005 und 1998 zeigen nicht nur in der Summe die größten Fehlflächen entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs (2005: 13.980 m² bis 1,6 m unter GIW; 1998: 9.584 m² bis 1,6 m unter GIW), sie weisen auch die geringsten Wassertiefen auf. Während die Peilungen 2015, 2014 und 2010 beispielsweise erst zwischen einer Tiefe von 1,5 und 1,6 m unter GIW sichtbar ansteigen, sind in den Peilungen 2005 und 1998 bereits 5.856 m² bzw. 3.144 m² Fehlfläche zu verzeichnen. Der Verlauf sämtlicher Kurven ähnelt dabei dem eines exponentiellen Wachstumsmodells, wobei die Steigung zwischen den Peilungen variiert. Bei der aktuellsten der betrachteten Peilungen von 2015 steigt die

Fehlfläche zwischen 1,4 und 1,6 m unter GlW beispielsweise um 836 m². Zwischen 1,6 und 1,8 m unter GlW steigt die Fehlfläche um 9.232 m², der Zuwachs ist somit mehr als elfmal so groß.

Abgesehen von der Peilung 2005 ist zwischen 1998 und 2015 ein Rückgang der Fehlfläche im mittleren Fahrrinnenbereich zu erkennen. Allerdings beruht diese Beobachtung lediglich auf fünf Peilungen und ist somit unsicher.

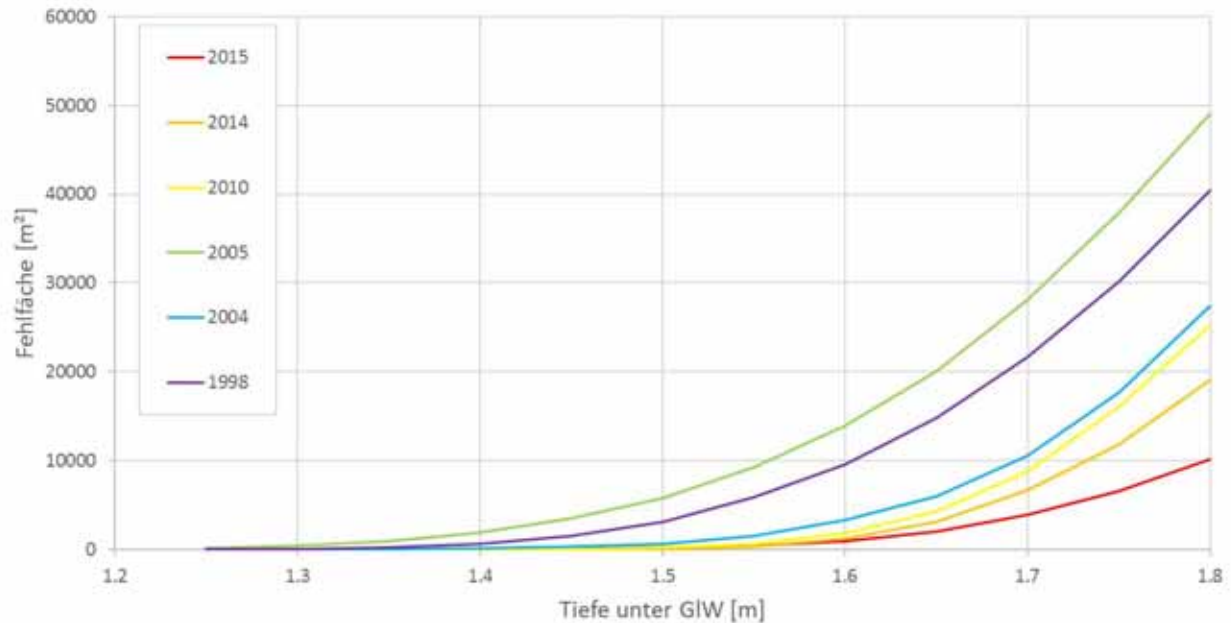


Abbildung 5.3.12: Verteilung der Fehlflächen pro Tiefschicht entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 320 und 340

5.3.8 Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel

Die Verläufe der beiden Bezugswasserspiegel W(MeQ) und W(GIQ), dargestellt in Abbildung 5.3.13, zeigen in den Bereichen des Domfelsens, des Strombrückefelsens und des Herrenkrugfelsens Sprünge auf, also in den Bereichen, in denen neben der Verringerung der Flussbreite auch ein Anstieg des Gefälles zu verzeichnen ist (siehe Abbildung 3.1.3). Bei geringen Wasserständen, wie dem W(GIQ), hat der Domfelsen eine größere Stauwirkung als dies bei höheren Wasserständen, wie dem W(MeQ), der Fall ist. Die beiden Wasserspiegellagen verlaufen dementsprechend nicht parallel. Wie Abbildung 5.3.14 zeigt, sinkt hier die Differenz der beiden Bezugswasserspiegel um mehr als 10 % unter die durchschnittliche Differenz (1,16 m), wodurch der Bereich zwischen Elbe-km 322,6 und 329,3 zu zusätzlichen tiefenbestimmenden Stellen bei W(MeQ) führt. Die geringste Differenz liegt bei Elbe-km 325,7 mit 0,87 m.

Im weiteren Verlauf des Teilabschnitts von Elbe-km 320 bis 340 sind keine tiefenbestimmenden Stellen des W(MeQ) gegenüber dem W(GIQ) gegeben, wobei die Differenz der beiden Wasserspiegellagen ab

Elbe-km 330 konstant über dem Durchschnitt liegt. Eine Gleichwertigkeit der Wasserspiegellagen ist dabei nicht gegeben, wobei die Differenz ab Elbe-km 333 konstantere Werte um 1,3 m annimmt.

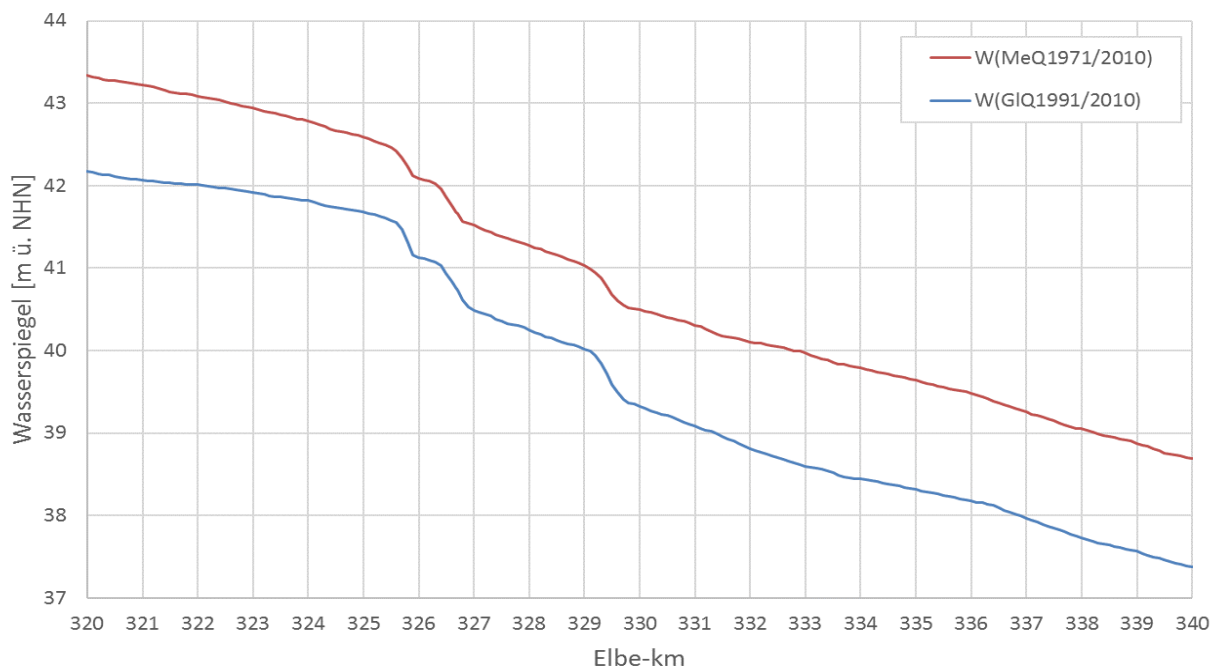


Abbildung 5.3.13: Wasserspiegelverläufe im Längsschnitt zwischen Elbe-km 320 und 340; rote Linie: Wasserspiegel vom Median des Abflusses zwischen 1971 und 2010 ($W(\text{MeQ}1971/2010)$); blaue Linie: Wasserspiegel des Gleichwertigen Abflusses zwischen 1991 und 2010 ($W(\text{GIQ}1991/2010)$)

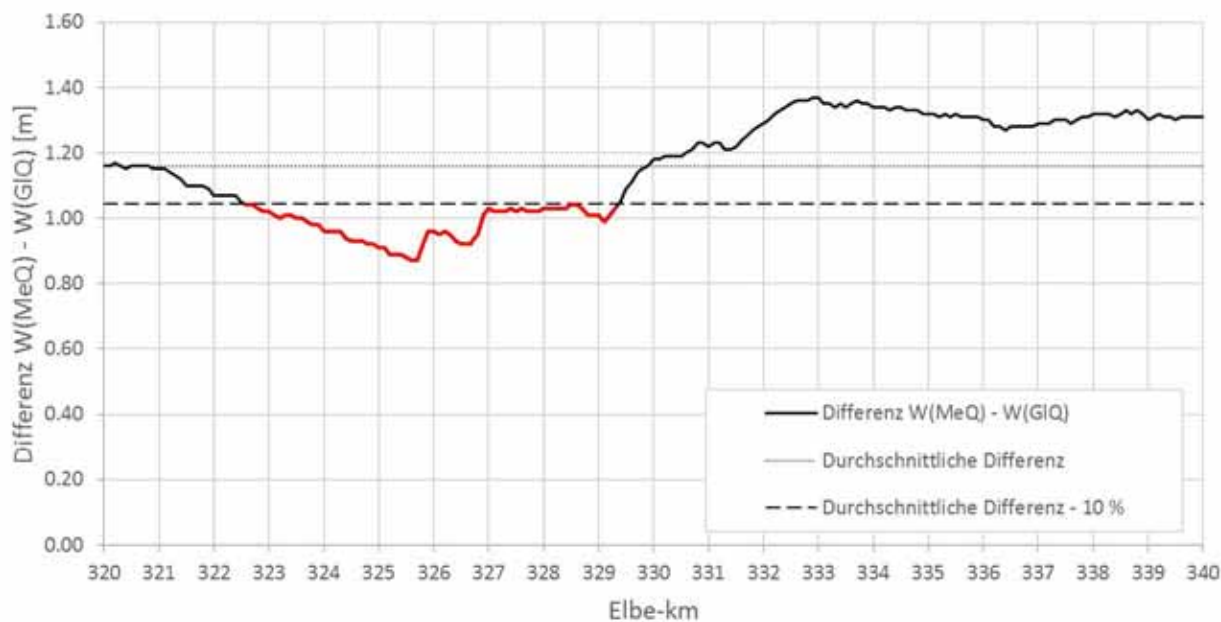


Abbildung 5.3.14: Differenz zwischen $W(\text{MeQ})$ und $W(\text{GIQ})$ von Elbe-km 320 bis 340

5.4 Elbe-km 420 – 440

5.4.1 Datengrundlage

Für den Teilabschnitt von Elbe-km 420 bis 440 stand die Fahrrinne von 2013 zur Verfügung, welche für die Konstruktion der in FIKS benötigten Linienzüge verwendet wurde.

Für die Tiefenanalyse des Elbeabschnitts standen neun Peilungen zwischen 2004 und 2016 zur Verfügung, die in Abbildung 5.4.1 entlang der Abflussganglinie des Referenzpegels Wittenberge (Elbe-km 453,98) dargestellt sind. Der Abgleich der Peilungen mit deren hydrologischen Vorgeschichte beschränkte sich dabei auf den Referenzpegel Wittenberge. Der in Kapitel 3.1 erwähnte Pegel Tangermünde (Elbe-km 388,26) wurde nicht weiter betrachtet.

Aufgrund der Beeinflussung des unmittelbar vorausgegangenen Hochwasserereignisses, wurde die Peilung von September 2013 aussortiert und nicht berücksichtigt, sodass für die Auswertung letztlich acht Peilungen herangezogen wurden. Für die Peilung im Oktober 2016 lagen zum Zeitpunkt der Ausarbeitung noch keine plausibilisierten Abflussdaten des Pegels vor. Da sich der Sommer 2016 in Deutschland durch Niedrigwasserbedingungen ausgezeichnet hat, werden die Peilungen in die Auswertung mit einbezogen.

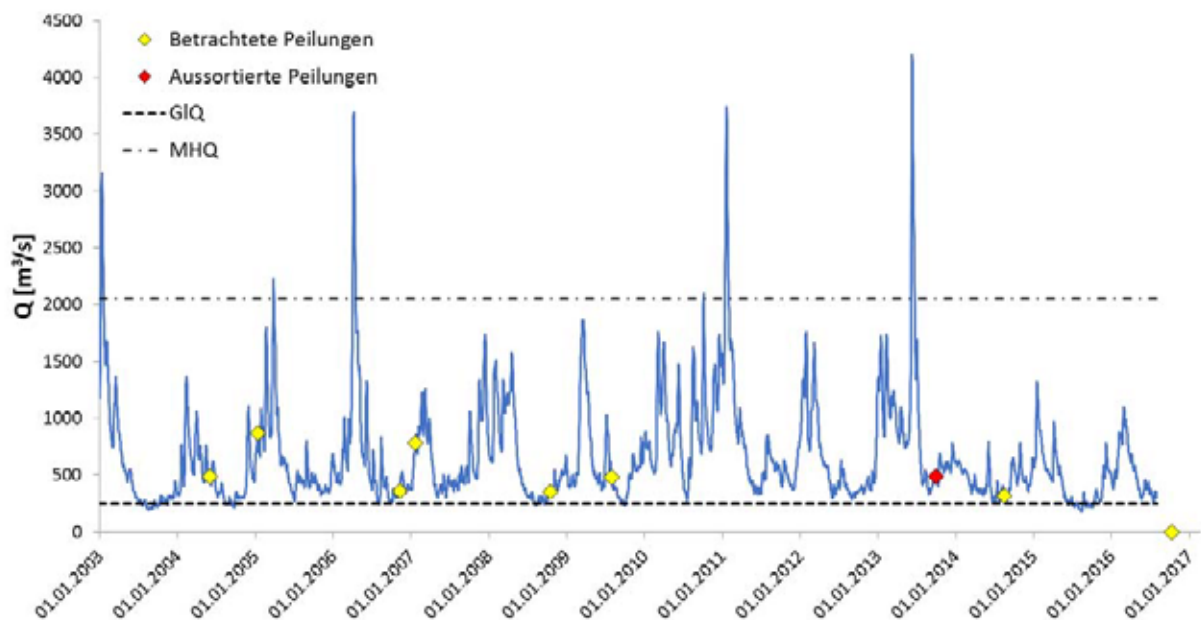


Abbildung 5.4.1: Abflussganglinie am Pegel Wittenberge (Elbe-km 453,98) inklusive betrachteter und aussortierter Peilungen

5.4.2 Abdeckungsgrad der Daten

Die betrachteten Daten decken 98 % des linken, 99 % des mittleren und 96 % des rechten Fahrrinnenbereichs ab.

5.4.3 Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen

Die Wassertiefen im Teilabschnitt von Elbe-km 420 und 440 liegen zwischen minimal 0,9 m unter GlW (Peilung 2013) und maximal 5 m unter GlW (Peilung 2004). Die Häufigkeitsverteilungen der einzelnen Peilungen sind in Abbildung 5.4.2 dargestellt. Zu beachten ist, dass der dargestellte Bereich der x-Achse auf 1 bis 4 m unter GlW reduziert wurde, um die Unterschiede der einzelnen Häufigkeitsverteilungen besser aufzeigen zu können. Die Extremwerte werden somit nicht abgebildet.

Die Wassertiefe mit den höchsten Dichtewerten schwankt zwischen den Peilungen zwischen 2 und 2,1 m unter GlW. Wie die Werte der Kurtosis in Tabelle 5.4.1 zeigen, verteilen sich die Werte der Wassertiefen in den einzelnen Peilungen unterschiedlich um die jeweilige Wassertiefe mit der maximalen Dichte. Während die Peilung von 2014 mit 1,9 den geringsten Kurtosiswert aufweist, die Wassertiefen somit am meisten streuen, liegt in Peilung 2015 mit 3,9 der höchste Kurtosiswert und somit die geringste Streuung vor. Die Schwankung der Kurtosiswerte zwischen den Jahren zeigt, dass die Flusssohle in diesem Abschnitt beweglich sein muss, sodass sich die Verteilung der Wassertiefen ständig ändert. Das lässt sich auch daran belegen, dass der größte Sprung zwischen 2014 und 2015 zu erkennen ist, also zwischen zwei aufeinanderfolgenden Jahren.

Sämtliche Kurven der Häufigkeitsverteilungen weisen eine Rechtsschiefe auf (siehe Tabelle 5.4.1), die Verteilungen tendieren somit zu größeren Tiefen im Vergleich zum Mittelwert. Die Schiefewerte bewegen sich dabei zwischen 1,7 und 2,2, wobei diese beiden Extremwerte ebenfalls die beiden Peilungen von 2014 und 2015 vorweisen. Auch die Schiefewerte schwanken zwischen den Peilungen. Eine Entwicklung hin zu größeren Tiefen ist somit nicht festzustellen.

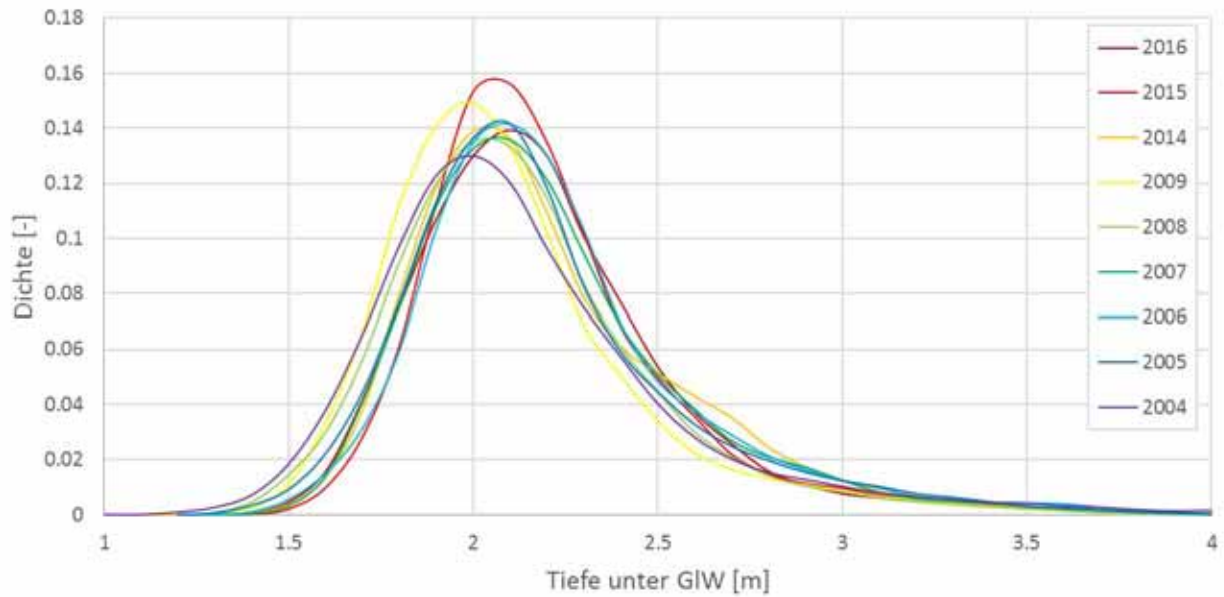


Abbildung 5.4.2: Häufigkeitsverteilung der Wassertiefen von verschiedenen Peilungen zwischen Elbe-km 420 und 440

Tabelle 5.4.1: Kurtosis und Schiefe der Häufigkeitsverteilungen von Elbe-km 420 - 440

Peilung	Kurtosis	Schiefe
2016	2.5	1.9
2015	3.9	2.2
2014	1.9	1.7
2009	3.3	2.1
2008	2.6	1.9
2007	2.6	1.9
2006	3.2	2.1
2005	3.2	2.0
2004	2.4	1.9

5.4.4 Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Wassertiefen

Entsprechend der Häufigkeitsverteilungen zeigen auch die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten der Wassertiefen, dargestellt in Abbildung 5.4.3 (Anmerkung: angepasste x-Achse auf Bereich zwischen 1 und 4 m unter GIW), ein variables Bild. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit der hier angenommenen Solltiefe von 1,6 m unter GIW schwankt zwischen minimal 1,2 % in der Peilung von 2015 und maximal 6,7 % in der Peilung von 2004. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeiten der restlichen sieben Peilungen verteilen sich zwischen diesen zwei Werten. Eine Entwicklung der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten entsprechend der Chronologie der Peilungen in eine bestimmte Richtung ist dabei nicht gegeben.

Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit von 1,6 m unter GIW liegt in der aktuellsten Peilung von 2016 bei 2,1 %.

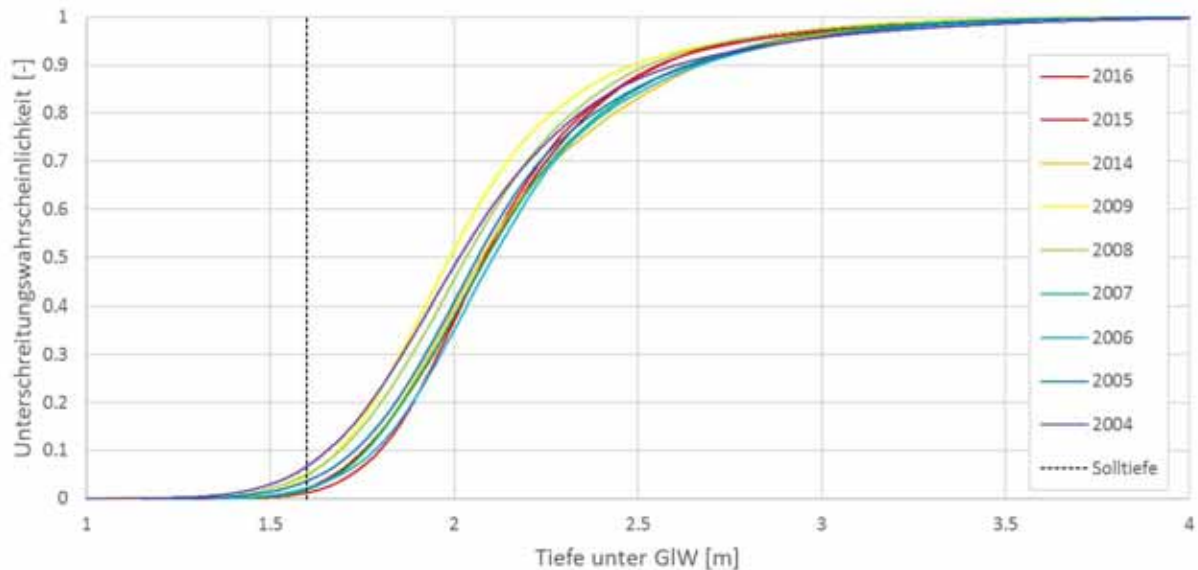


Abbildung 5.4.3: Unterschreitungswahrscheinlichkeit von Wassertiefen der einzelnen Peilungen inklusive der angenommenen Solltiefe von 1,6 m unter GIW des Teilabschnitts von Elbe-km 420 bis 440

5.4.5 Auswertung tiefenbestimmender Stellen

Der Flussabschnitt zwischen Elbe-km 420 und 440 ist in Anhang 10 mit der mittleren Wassertiefe aller neun Peilungen dargestellt. Die Verteilung der Wassertiefen folgt dabei dem Kurvenverlauf der Strecke: entlang von Rechtskurven sinken die Wassertiefen vom rechten Uferbereich (Gleithang) zum linken Uferbereich (Prallhang), wie beispielsweise zwischen Elbe-km 429,5 und 431. Entlang von Linkskurven ist dieses Bild genau umgekehrt, sodass die Wassertiefen von linkem zu rechtem Uferbereich zunehmen, z.B. Elbe-km 426 und 427,5.

Anhang 11 zeigt die gemittelte Wassertiefe zwischen 0 und 1,6 m unter GIW entlang des Streckenabschnitts. Dabei ist auffällig, dass die hier angenommene Solltiefe nur in wenigen zusammenhängenden Bereichen unterschritten wird. Elbe-km 420,2 bis 420,5 stellt einen solchen Bereich dar. Ebenso der Bereich zwischen Elbe-km 423 und 423,5, unmittelbar nach dem Zustrom des UHW (Untere Havel-Wasserstraße) Schleusenkanals bei Elbe-km 422,8. Bei Elbe-km 437 verengt sich der Flussschlauch, sodass auch hier über eine Länge von ca. 200 m Wassertiefen unter 1,6 m unter GIW erreicht werden. Bei Elbe-km 438 mündet die Havel in die Elbe. Im Bereich des Zustroms kommt es im Durchschnitt zu Fehltiefen.

Generell kommt es entlang des Abschnitts der Elbe vereinzelt zu Unterschreitungen der 1,6 m unter GIW. Diese Bereiche sind dabei jedoch teilweise so klein, dass sie in der Darstellung kaum zu erkennen

sind (beispielsweise bei Elbe-km 436), bzw. teilweise aufgrund der Auflösung in FIKS nicht dargestellt werden können.

Die zeitliche Standardabweichung, dargestellt in Anhang 12, liegt im Durchschnitt bei 0,18 m. Die höchste zeitliche Standardabweichung von 0,74 m liegt zwischen Elbe-km 427 und 427,5. Im Bereich der Havelmündung bei Elbe-km 438 steigt sie ebenfalls an und erreicht ein lokales Maximum von 0,56 m. Im darauffolgenden Bereich bis Elbe-km 440 bleibt die zeitliche Standardabweichung mehrheitlich überdurchschnittlich. Generell weist der Streckenabschnitt länger zusammenhängende Bereiche auf, in denen die durchschnittliche zeitliche Standardabweichung nur lokal begrenzt unterschritten wird, wie beispielsweise zwischen Elbe-km 427 und 435. Eine Veränderlichkeit der Sohle ist somit über größere Streckenabschnitte gegeben.

Die durchschnittlichen tiefenbestimmenden Tiefen pro betrachteter 100 m Auswertefläche entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs liegen im Mittel bei 1,72 m unter GIW und sind in Abbildung 5.4.4 als Kammweg dargestellt. Die geringste Tiefe liegt bei Elbe-km 420,3 mit 1,38 m unter GIW, die größte Tiefe mit 2,64 m unter GIW bei Elbe-km 438,3, also unmittelbar nach dem Zufluss der Havel.

Der Verlauf des durchschnittlichen Kammwegs ist geprägt durch ein ständiges Ansteigen und Fallen der Wassertiefen, wobei die hier angenommene Solltiefe von 1,6 m unter GIW wiederholt unterschritten wird. Mit Zunahme der Kurvenradien zwischen Elbe-km 433 und 438 beginnen sich die Schwankungen in den Wassertiefen zu verringern.

Wie der Schwankungsbereich in Abbildung 5.4.4 zeigt, weichen die Kammwege der betrachteten Peilungen durchaus vom durchschnittlichen Kammweg ab, wobei die durchschnittliche Abweichung nach oben und unten bei jeweils 0,26 m liegt.

Der durchschnittliche Kammweg entlang des linken Fahrrinnenbereichs, dargestellt in Abbildung 5.4.5, weist eine durchschnittliche Wassertiefe von 1,77 m unter GIW auf, mit einer maximalen Tiefe von 2,63 m unter GIW bei Elbe-km 430,3 und einer minimalen Tiefe von 1,32 m unter GIW bei Elbe-km 423,2. Rechtskurven in den Bereichen zwischen Elbe-km 424 und 426 sowie zwischen Elbe-km 429,5 und 431 sorgen für lokale Anstiege der Wassertiefen. Ebenso sorgen das Wehr Neuwerben bei Elbe-km 427,8 sowie der Zufluss der Havel bei Elbe-km 438 für eine lokale Zunahme der Wassertiefe.

Der Schwankungsbereich der einzelnen Kammwege liegt im Vergleich zum durchschnittlichen Kammweg sowohl nach unten als auch nach oben im Mittel bei 0,3 m. Dabei zeigt der Bereich bei Elbe-km 427,1 die maximale Abweichung von 1,1 m hin zu größeren Wassertiefen.

Die Wassertiefen des durchschnittlichen Kammwegs entlang des rechten Fahrrinnenbereichs, dargestellt in Abbildung 5.4.6, sind von dem Krümmungsverlauf des Elbe-Abschnitts abhängig.

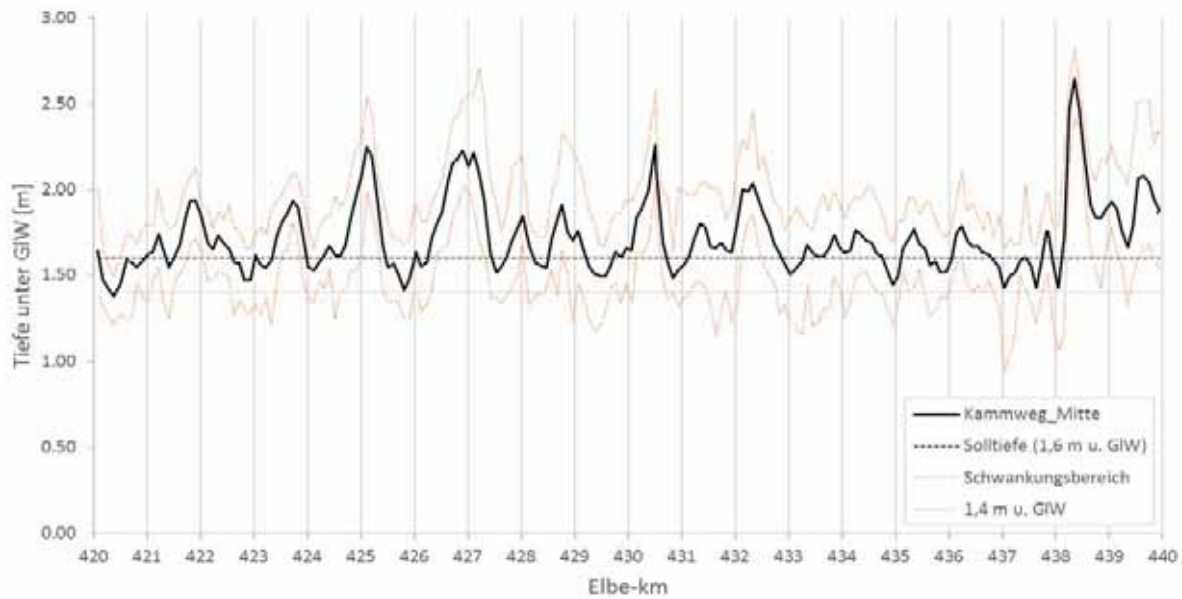


Abbildung 5.4.4: Durchschnittlicher Kammweg entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs von Elbe-km 420 - 440 mit maximalem Schwankungsbereich

Rechtskurven, wie beispielsweise zwischen Elbe-km 424 und 425, sorgen für eine Abnahme der Wassertiefen und einer teilweisen Unterschreitung von 1,6 m unter GIW. Linkskurven führen hingegen zu einer Zunahme. Besonders die nahezu im 90°-Winkel verlaufende Linkskurve zwischen Elbe-km 426 und 427,5 führt zu einem lokalen Anstieg der Wassertiefe auf 3,13 m unter GIW bei Elbe-km 326,9. Die maximale Wassertiefe entlang des durchschnittlichen Kammwegs liegt jedoch mit 3,69 m unter GIW bei Elbe-km 438,3, also im Bereich der Havelmündung. Die geringste Tiefe von 1,39 m unter GIW liegt bei Elbe-km 437. Im Durchschnitt liegen die tiefenbestimmenden Tiefen pro betrachtetem 100 m Abschnitt bei 1,82 m unter GIW und somit über denen der anderen beiden Fahrrinnenbereiche. Der Schwankungsbereich gleicht mit durchschnittlich 0,3 m nach oben und unten jedoch dem des linken Fahrrinnenbereichs.

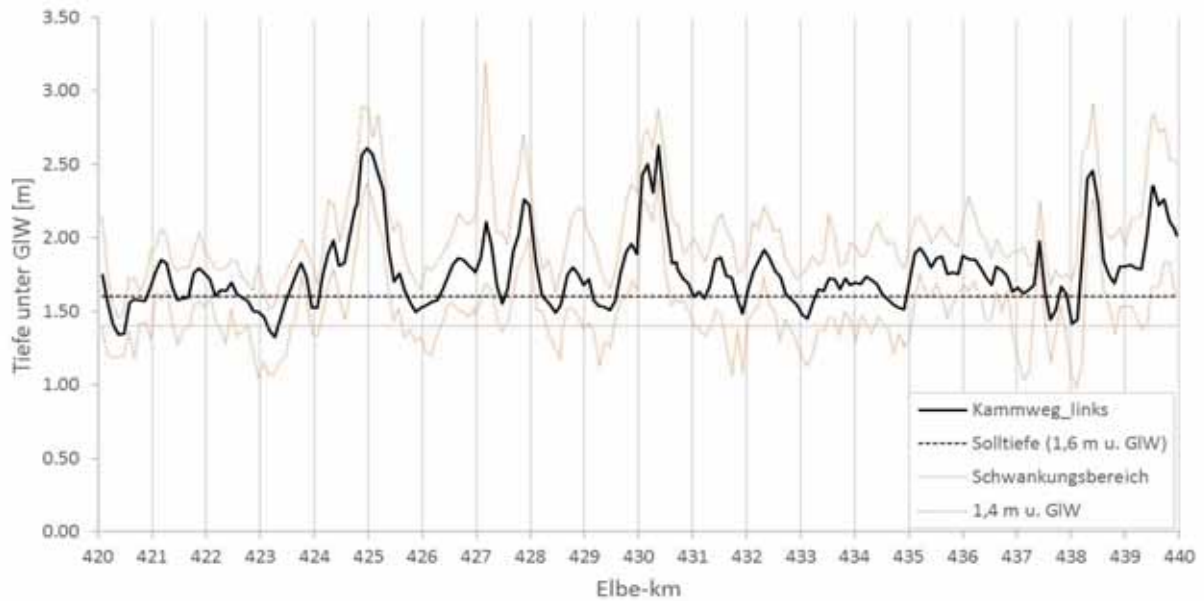


Abbildung 5.4.5: Durchschnittlicher Kammweg entlang des linken Fahrrinnenbereichs von Elbe-km 420 - 440 mit maximalem Schwankungsbereich

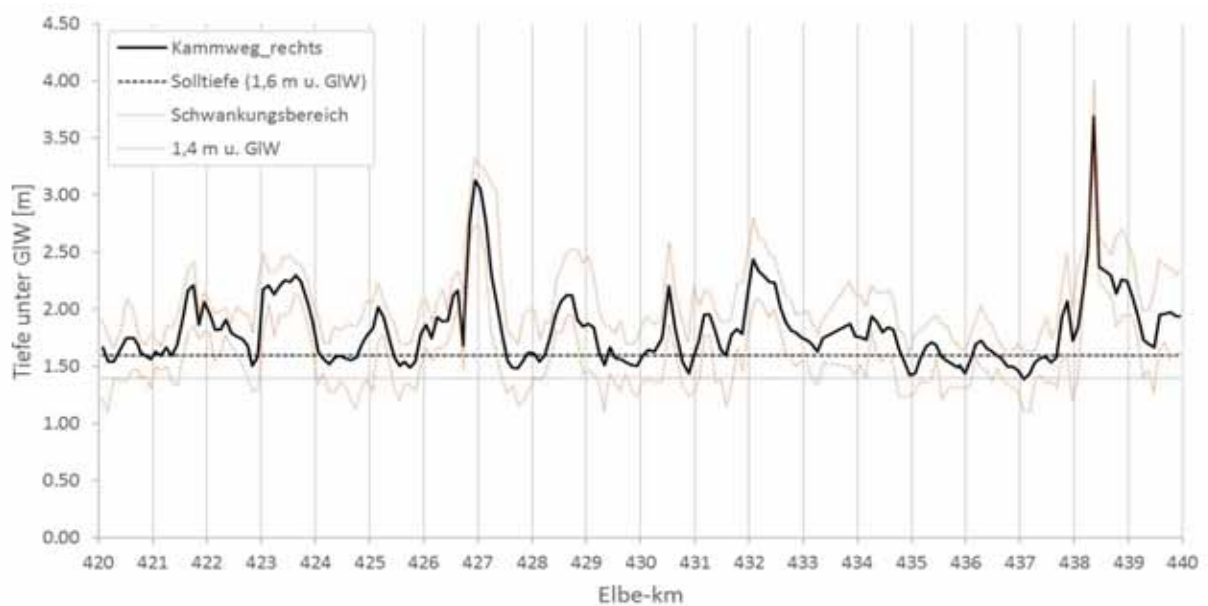


Abbildung 5.4.6: Durchschnittlicher Kammweg entlang des rechten Fahrrinnenbereichs von Elbe-km 420 - 440 mit maximalem Schwankungsbereich

Betrachtete 100 m Abschnitte, in denen in allen neun Peilungen mindestens ein Rasterelement eine Wassertiefe kleiner 1,6 m unter GIW aufweist, sind entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs nur zwischen Elbe-km 420,2 und 420,3 gegeben (siehe Abbildung 5.4.7). Keine permanenten Fehlstellen, aber Stellen mit steigender Häufigkeit von Fehltiefen befinden sich in den Bereichen der Zuströme des UHW Schleusenkanals (Elbe-km 422,8), des Wehr Neuwerben (Elbe-km 427,8) und der Havel (Elbe-km

438). Des Weiteren steigt die Häufigkeit in den Übergangsbereichen zwischen zwei Kurven, beispielsweise zwischen der Rechts- und Linkskurve bei Elbe-km 426.

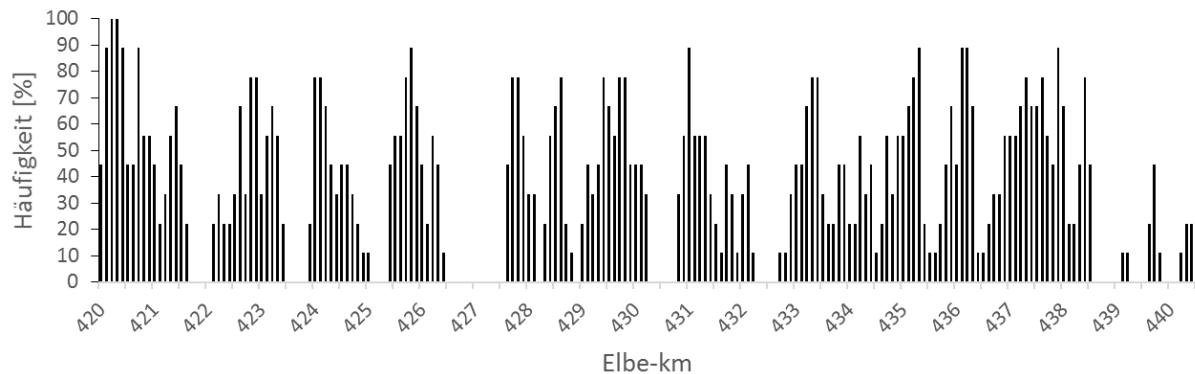


Abbildung 5.4.7: Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 420 und 440 darstellen

Permanente Fehltiefen entlang des linken Fahrrinnenbereich liegen zwischen Elbe-km 420,2 und 420,4 sowie entlang der Linkskurve bei Elbe-km 423,1 und 423,2, also unmittelbar nach dem Zustrom UHW Schleusenkanals (Elbe-km 422,8) (siehe Abbildung 5.4.8). Im rechten Fahrrinnenbereich liegt hingegen nur eine permanente Fehlstelle vor, die sich in der Rechtskurve bei Elbe-km 436,7 befindet (siehe Abbildung 5.4.9). Auffällig ist der Bereich um Elbe-km 426: In allen drei Fahrrinnenbereichen treten hier über die Jahre wiederholt tiefenbestimmende Tiefen kleiner 1,6 m unter GIW auf. Ansonsten zeichnen sich die beiden seitlichen Bereiche dadurch aus, dass die Stellen mit wiederholt auftretenden Fehltiefen vor allem zwischen den Seiten wechseln. Beispielsweise steigt die Häufigkeit, mit der eine Fehltiefe die tiefenbestimmende Stelle bildet, zwischen 432,5 und 434 im linken Fahrrinnenbereich auf maximal 78 % bei Elbe-km 433 an, während das Maximum von 33 % in diesem Bereich entlang des rechten Fahrrinnenbereichs bei Elbe-km 433 liegt. Ab Elbe-km 435,5 steigt die Häufigkeit einer Fehltiefe als tiefenbestimmende Stelle eines 100 m Abschnitts entlang des rechten Fahrrinnenbereichs an, während sie, abgesehen von Elbe-km 438, entlang des linken Fahrrinnenbereichs sinkt. Dieses Muster wiederholt sich beispielsweise zwischen Elbe-km 422 und 424 sowie direkt im Anschluss zwischen Elbe-km 424 und 425.

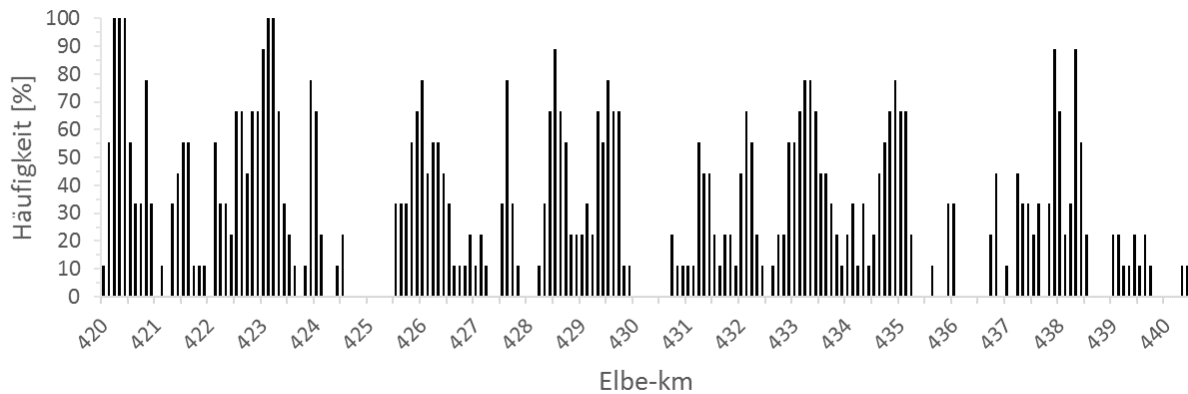


Abbildung 5.4.8: Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des linken Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 420 und 440 darstellen

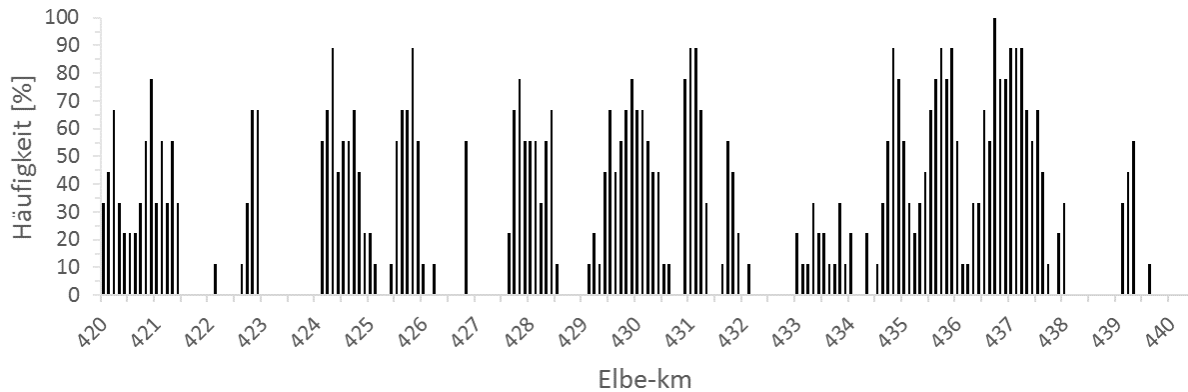


Abbildung 5.4.9: Häufigkeit, mit der Fehltiefen die tiefenbestimmenden Tiefen entlang des rechten Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 420 und 440 darstellen

5.4.6 Räumliche Verteilung von Fehlflächen

Die räumliche Verteilung der Fehlflächen ist in Abbildung 5.4.10 als Summenkurve dargestellt. Die Peilung von 2004 weist mit einer Gesamtfehlfläche von 69.224 m² (6,9 % der Gesamtfahrrinne) den Maximalwert auf. Die geringste Gesamtfehlfläche ist mit 12.712 m² (1,3 % der Gesamtfahrrinne) in der Peilung von 2015 gegeben. Die Verläufe der einzelnen Summenkurven zeigen einen heterogenen Verlauf, da sich sowohl das Auftreten, als auch die Größe der Fehlfläche (und damit der Anstieg der Kurven) zwischen den Jahren unterscheiden. Im Bereich zwischen Elbe-km 420 bis 420,5 liegt zum Beispiel in allen Peilungen eine Fehlfläche vor. Die Größe der Fehlfläche variiert jedoch zwischen 1.620 m² (Peilung 2007) und 10.996 m² (Peilung 2008) um mehr als das Sechsfache. Diese Unterschiede sind dabei nicht nur lokal zu beobachten, sondern auch über längere Bereiche. In der Peilung von 2006 liegt beispielsweise auf der 7 km langen Strecke zwischen Elbe-km 426 und 433 eine Fehlfläche von 852 m². In der Peilung des Vorjahres von 2005 beträgt die Fehlfläche im selben Abschnitt hingegen 15.016 m². Auch in der Peilung von 2015 ist beispielsweise im Bereich zwischen Elbe-km 428 und 440 eine

Gesamtfehlfläche von 2.824 m² gegeben. In der vorangegangenen Peilung von 2014 lag dieser Wert noch bei 13.512 m², in der darauffolgenden Peilung von 2016 wieder bei 8.848 m². Die Verteilung und das Ausmaß von Fehlflächen können zwischen den Jahren somit deutlich schwanken.

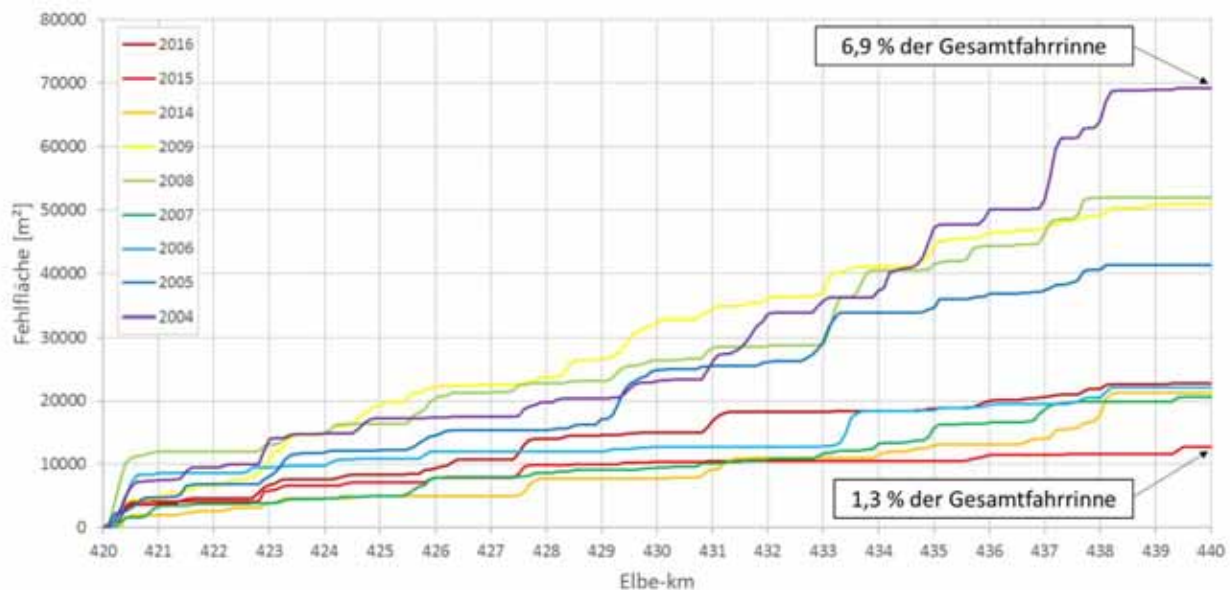


Abbildung 5.4.10: Kumulierte Fehlflächen der Peilungen zwischen Elbe-km 420 und 440

5.4.7 Fehlfläche pro Tiefenschicht

Die Verteilung der Fehlfläche pro Tiefenschicht im mittleren Fahrrinnenbereich ist in Abbildung 5.4.11 dargestellt. Der erste sichtbare Anstieg eines Kurvenverlaufs ist zwischen 1,2 und 1,3 m unter GIW in der Peilung von 2004 gegeben. Der Zuwachs der Fehlfläche beträgt hier 1.420 m². Generell zeigt die Peilung von 2004 in jeder Tiefenschicht den größten Fehlflächenwert im Vergleich zu den restlichen acht betrachteten Peilungen, sodass in ihr entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs eine Fehlfläche von insgesamt 131.040 m² gemessen wurde. Den letzten sichtbaren Anstieg zeigt die Peilung von 2015 ab einer Tiefe von 1,5 m unter GIW mit einem Zuwachs von 804 m². Diese Peilung weist mit einer Gesamtfehlfläche von 56.348 m² den geringsten Wert aller Peilungen auf.

Sämtliche Verteilungskurven ähneln in ihrem Verlauf dem eines exponentiellen Wachstumsmodells. Das bedeutet, dass der Zuwachs an Fehlfläche pro betrachteter 10 cm Tiefenschicht mit steigender Tiefe zunimmt. Die aktuellste Peilung von 2016 hat zwischen 1,4 und 1,6 m unter GIW beispielsweise einen Zuwachs von 8.544 m². Zwischen 1,6 und 1,8 m unter GIW versechsfacht sich der Zuwachs auf 35.912 m².

Die Darstellung der Fehlflächenverteilung pro Tiefenschicht verdeutlicht, dass sich die Peilungen voneinander unterscheiden. Diese Unterschiede folgen dabei jedoch keinem Muster, wie

beispielsweise der Chronologie der Peilungen. Ein Trend, beispielsweise hin zu geringeren Fehlflächen, ist dementsprechend nicht gegeben.

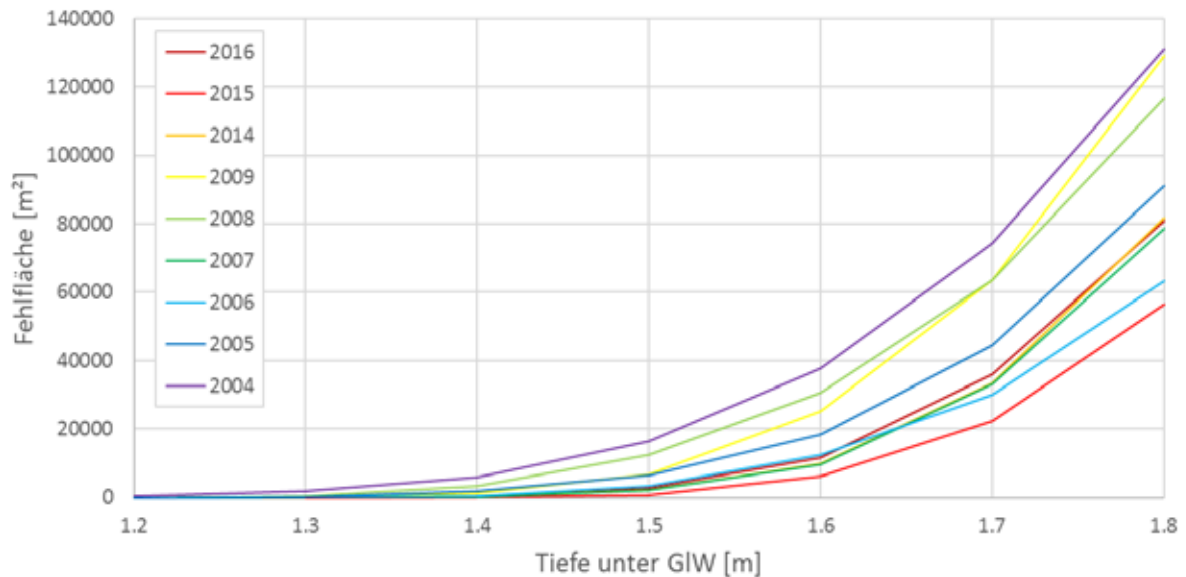


Abbildung 5.4.11: Verteilung der Fehlflächen pro Tiefenschicht entlang des mittleren Fahrrinnenbereichs zwischen Elbe-km 420 und 440

5.4.8 Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel

Die Längsprofile der beiden Bezugswasserspiegel W(MeQ) und W(GIQ) sind in Abbildung 5.4.12 dargestellt und verlaufen im Durchschnitt mit einem Abstand von 1,25 m. Wie Abbildung 5.4.13 zeigt, ist die Differenz der beiden Wasserspiegellagen bis Elbe-km 435 überwiegend unter dem Durchschnitt. Ab Elbe-km 435 steigt die Differenz an, bis bei Elbe-km 438,7 die maximale Differenz von 1,4 m erreicht wird. Entlang des Flussabschnitts unterschreitet die Differenz nie die durchschnittliche Differenz um 10 %, wodurch in diesem Teilabschnitt der Elbe keine tiefenbestimmenden Stellen bei W(MeQ) gegenüber dem W(GIQ) gegeben sind. Im Vergleich zu den bisher betrachteten Teilabschnitten der Elbe, sind die Schwankungen der Differenz zwischen beiden Wasserspiegellagen in diesem Abschnitt am geringsten, wobei zwischen Elbe-km 427 und 431,6 nahezu eine Gleichwertigkeit gegeben ist.

ERGEBNISSE

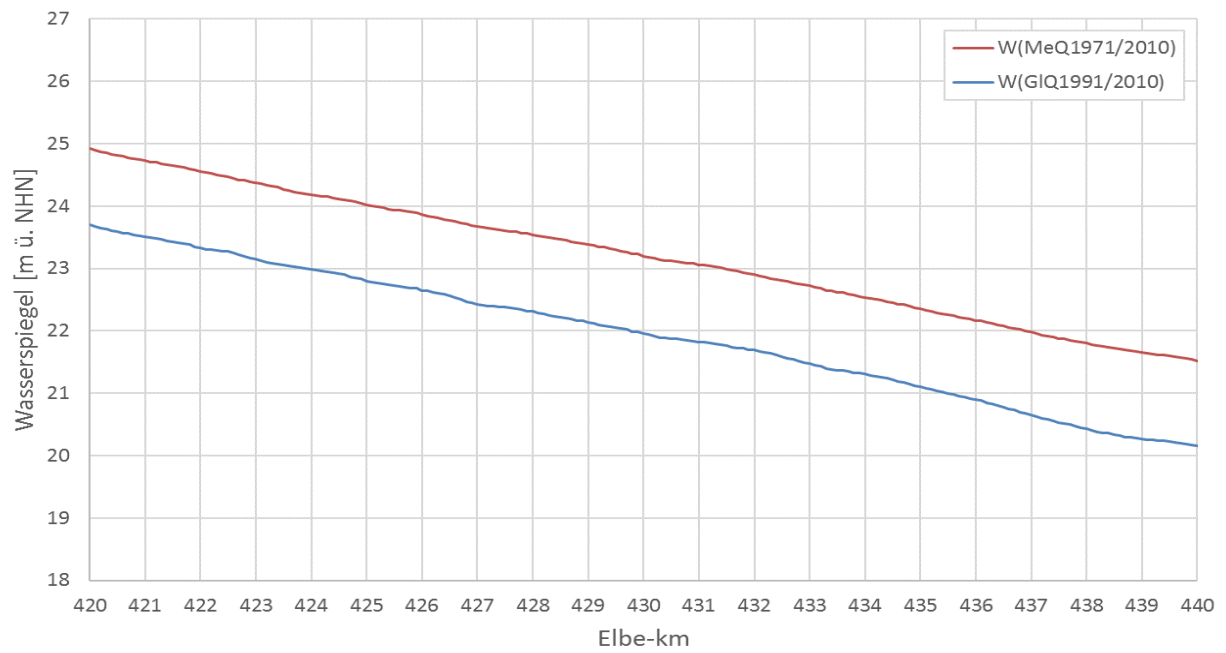


Abbildung 5.4.12: Wasserspiegelverläufe im Längsschnitt zwischen Elbe-km 420 und 440; rote Linie: Wasserspiegel vom Median des Abflusses zwischen 1971 und 2010 ($W(\text{MeQ}1971/2010)$); blaue Linie: Wasserspiegel des Gleichwertigen Abflusses zwischen 1991 und 2010 ($W(\text{GIQ}1991/2010)$)

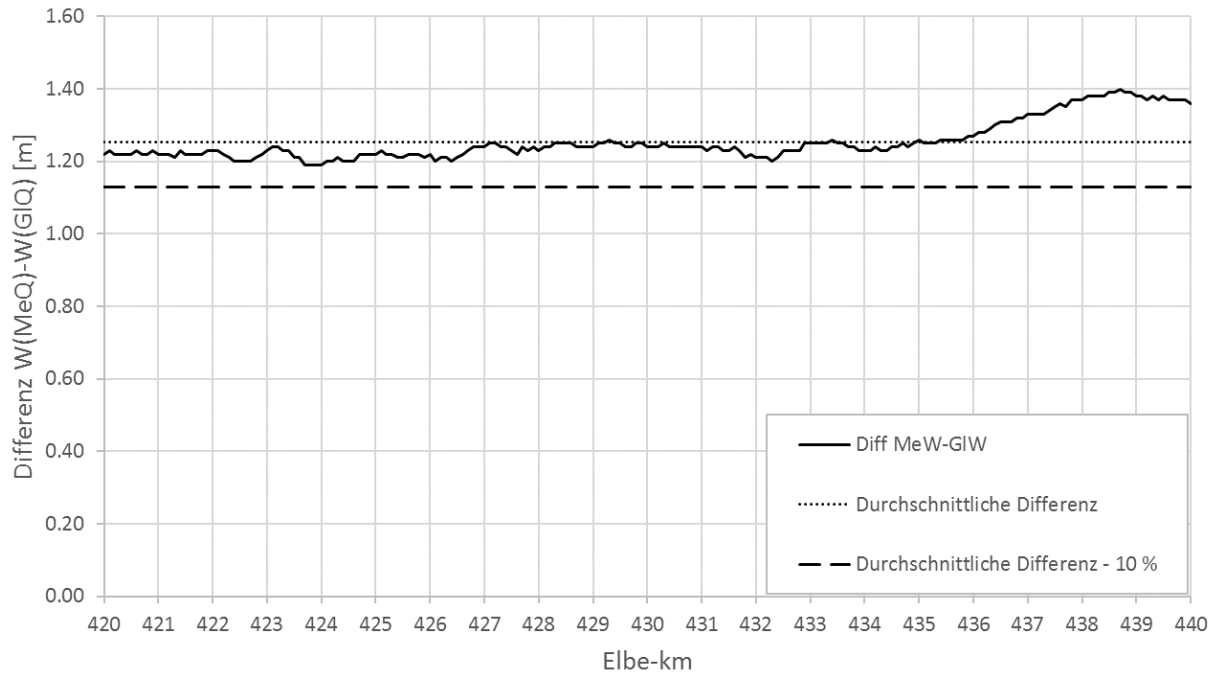


Abbildung 5.4.13: Differenz zwischen $W(\text{MeQ})$ und $W(\text{GIQ})$ von Elbe-km 420 bis 440

5.5 Elbe-km 510 – 530

5.5.1 Datengrundlage

Die Tiefenauswertung für den Teilabschnitt von Elbe-km 510 bis 530 wurde in reduziertem Umfang durchgeführt, da sich in diesem Bereich, aufgrund der beweglichen Flusssohle, die Schiffahrtsbedingungen und damit einhergehend die ausgewiesene Fahrrinne ständig ändern. Aus diesem Grund wurden Auswertungen, die auf den konstruierten Linienzügen basieren, nicht durchgeführt. Die Analyse beschränkt sich auf die durchschnittlichen Wassertiefen entlang des kompletten Flussverlaufs, deren zeitliche Standardabweichung sowie auf den Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserstände.

Zur Berechnung standen sieben Peilungen zwischen 2007 und 2016 zur Verfügung. Die Peilungen von 2008, 2009 und 2010 wurden dabei nach Hochwasserereignissen gefahren. Aufgrund der geringen Anzahl von sieben Peilungen, wurden diese drei Peilungen jedoch auch berücksichtigt.

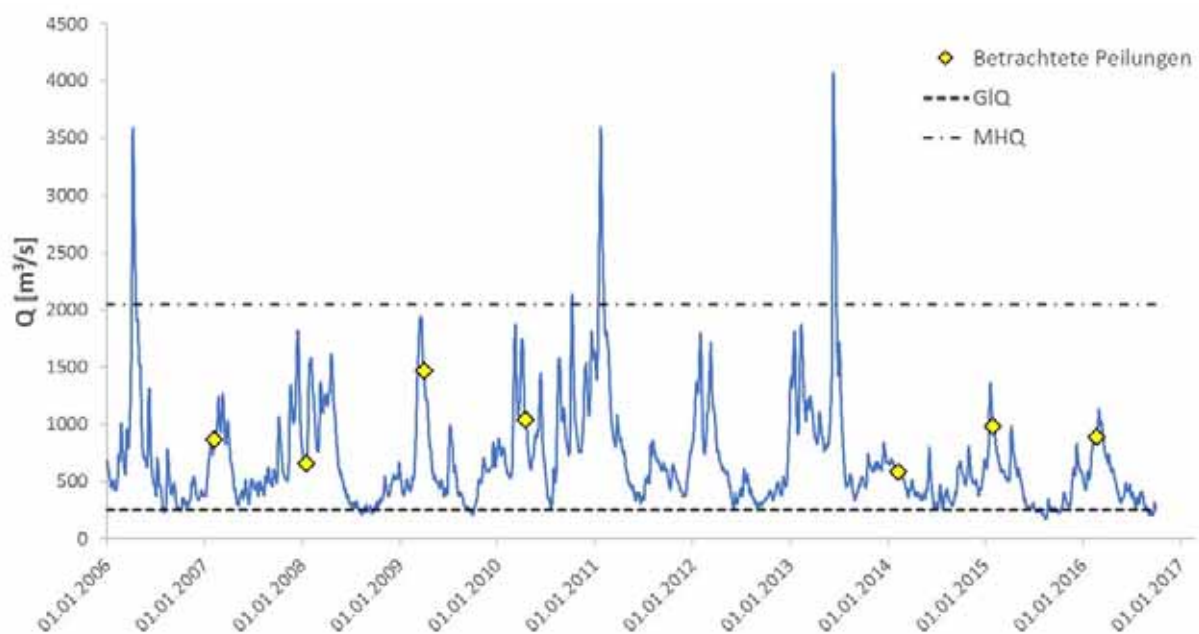


Abbildung 5.5.1: Abflussganglinie am Pegel Neu Darchau (Elbe-km 536,44) inklusive betrachteter und aussortierter Peilungen

5.5.2 Auswertung tiefenbestimmender Stellen

Zur Auswertung tiefenbestimmender Stellen wurden in FIKS die durchschnittlichen Wassertiefen aller Peilungen berechnet, welche in Anhang 13 entlang des Streckenabschnitts dargestellt sind. Wie bereits in vorherigen Abschnitten ist auch hier ersichtlich, dass die Wassertiefen entlang des Prallhangs zunehmen und zum Gleithang hin abnehmen, beispielsweise in der Linkskurve zwischen Elbe-km 513 und 515 oder in der Rechtskurve zwischen Elbe-km 518 und 520. Auch bei Kurven mit größeren Radien ist dies erkennbar, beispielsweise in der Linkskurve zwischen Elbe-km 526 und 527,5. Des Weiteren

zeigt die Abbildung die zwei unterschiedlichen Streckencharakteristiken auf: Während der Abschnitt der Elbe ab Elbe-km 521 im Zuge des Niedrigwasserausbaus reguliert wurde, ist dies im vorhergehenden Abschnitt, der sogenannten „Reststrecke“ (zwischen Elbe-km 508,1 und 520,9), nicht geschehen. Der Ausbau hat zur Folge, dass sich der Abfluss bei Niedrigwasser auf den mittleren Fahrrinnenbereich konzentriert, Sedimentation dadurch verringert wird und größere Wassertiefen erzielt werden können. Das zeigt sich auch in Anhang 14, in dem die mittleren Wassertiefen zwischen 0 und 1,6 m unter GIW dargestellt sind. Zwischen Elbe-km 510 und 520 befinden sich Fehlflächen vor allem im Bereich der Gleithänge in Kurvenlagen. Dabei liegen diese nicht nur in den seitlichen Flussbereichen, sondern reichen bis in die Flussmitte. Ab Elbe-km 521 reduzieren sich die Fehlflächen und beschränken sich dabei auf die Randbereiche des Flussquerschnitts, wobei wiederum hauptsächlich die Gleithänge betroffen sind.

Die durchschnittliche Wassertiefe zwischen Elbe-km 510 und 530 beträgt 1,98 m unter GIW. Die durchschnittliche zeitliche Standardabweichung der Peilungen zum Mittelwert liegt bei 0,49 m. Wie Anhang 15 zeigt, unterscheiden sich dabei vor allem die Randbereiche und der mittlere Flussverlauf voneinander. Entlang der mittleren Flussschlauchs liegt die zeitliche Standardabweichung durchgehend unter dem Durchschnittswert und bewegen sich größtenteils zwischen 0,2 und 0,3 m. Damit übersteigen diese Bereiche mit „geringer“ zeitlicher Standardabweichung dennoch sämtliche durchschnittliche zeitliche Standardabweichungen der restlichen betrachteten Teilabschnitte der Elbe.

Zu den Randbereichen hin machen sich die alternierenden Bänke bemerkbar. Besonders im Bereich der Reststrecke steigt die zeitliche Standardabweichung mit zunehmender Entfernung von der Flussmitte an, wobei teilweise Werte von 1 m überschritten werden. Mit Beginn des Niedrigwasserausbaus ab Elbe-km 521 nimmt die zeitliche Standardabweichung in den Randbereichen wieder kontinuierlich ab.

Auffällig ist der Bereich zwischen Elbe-km 510 und 513. Die zeitliche Standardabweichung der Randbereiche unterscheiden sich kaum und weisen dabei durchgehend unterdurchschnittliche Werte auf. Ausgeprägte alternierende Bänke, wie im darauffolgenden Abschnitt, scheinen hier in diesem Ausmaß nicht gegeben.

5.5.3 Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel

Abbildung 5.5.2 zeigt die Verläufe der beiden Bezugswasserspiegel $W(\text{MeQ})$ und $W(\text{GIQ})$ im Längsschnitt. Die durchschnittliche Differenz zwischen beiden Wasserspiegellagen liegt bei 1,28 m, wobei die maximale Differenz von 1,37 m bei Elbe-km 527,8 erreicht wird. Die geringste Differenz von 1,19 m liegt bei Elbe-km 512,1 (siehe Abbildung 5.5.3). Die Differenz steigt dabei nahezu kontinuierlich

an und überschreitet ab Elbe-km 519,7 den Durchschnittswert. Wie Abbildung 5.5.3 zeigt, wird die durchschnittliche Differenz entlang des Streckenabschnitts nie um 10 % unterschritten. Zusätzliche tiefenbestimmende Stellen bei $W(\text{MeQ})$ gegenüber dem $W(\text{GlQ})$ sind somit, nach der hier angenommenen Definition, entlang des Teilabschnitts von Elbe-km 510 bis 530 nicht gegeben. Mit Beginn der niedrigwasserregulierten Strecke ab Elbe-km 521 nähern sich die beiden Wasserspiegellagen bis Elbe-km 526 einer Gleichwertigkeit an.

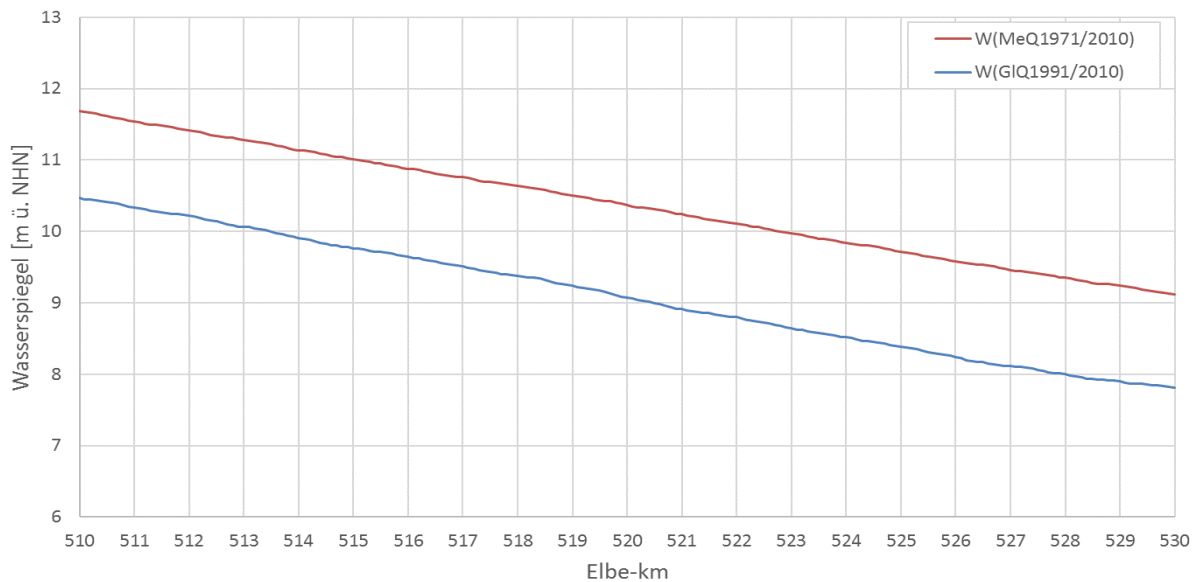


Abbildung 5.5.2: Wasserspiegelverläufe im Längsschnitt zwischen Elbe-km 510 und 530; rote Linie: Wasserspiegel vom Median des Abflusses zwischen 1971 und 2010 ($W(\text{MeQ}1971/2010)$); blaue Linie: Wasserspiegel des Gleichwertigen Abflusses zwischen 1991 und 2010 ($W(\text{GlQ}1991/2010)$)

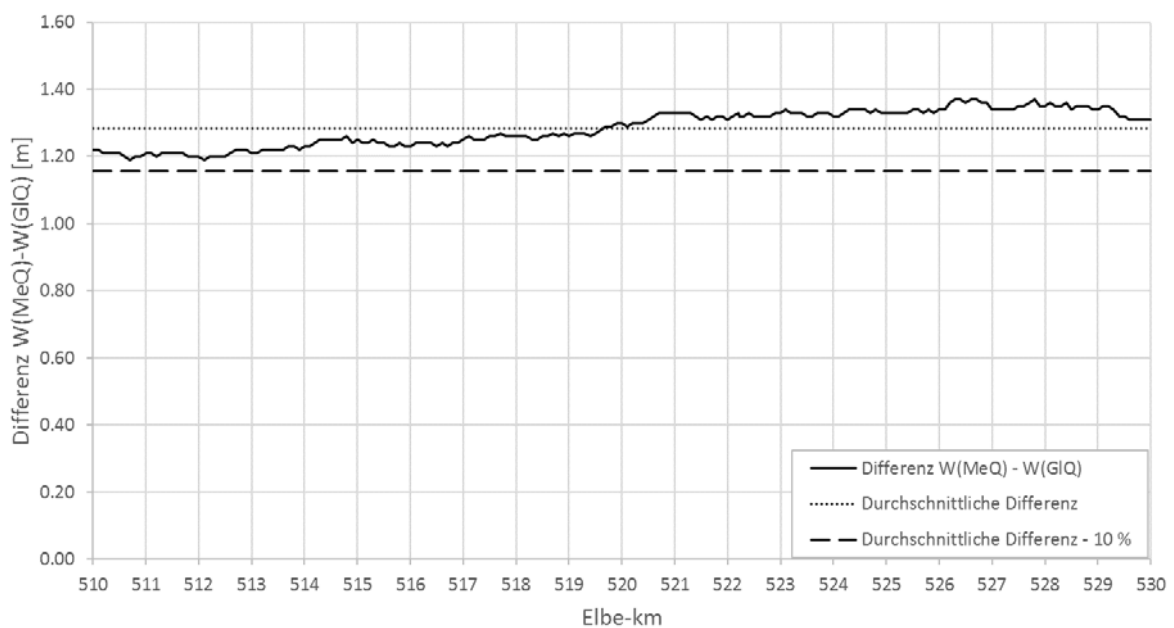


Abbildung 5.5.3: Differenz zwischen $W(\text{MeQ})$ und $W(\text{GlQ})$ von Elbe-km 510 bis 530

5.6 Vergleich mit anderen Daten

Sämtliche dargestellten Ergebnisse beruhen auf den in FIKS eingelesenen Peildaten. Um zu validieren, ob diese Daten korrekt eingelesen und dargestellt werden, werden für alle betrachteten Teilabschnitte die Peildaten von 2014 zwischen 0 und 1,6 m unter GLW dargestellt und mit Flächenpeilplänen des WSV visuell verglichen. Diese stellen ebenfalls die Peilung von 2014 in diesem Tiefenbereich dar. In Abbildung 5.6.1 ist dieser Vergleich beispielhaft für den Abschnitt um Elbe-km 45,5 dargestellt. Die Gegenüberstellung zeigt, dass die beiden Darstellungen die Fehltiefen nahezu identisch abbilden. Die Darstellung des WSV zeichnet die Fehlflächen dabei detaillierter, sodass vor allem die Randbereiche von Fehlflächen besser dargestellt werden. Ursache hierfür könnte eine unterschiedliche Rasterung der Daten sein, sowie Unterschiede in den zur Darstellung genutzten Programmen. Die visuelle Überprüfung der Daten wurde für alle untersuchten Teilabschnitt der Elbe durchgeführt, wobei sich der Unterschied in der detaillierten Darstellung der Fehlflächenrandbereiche in allen Abschnitten zeigt. Abgesehen von diesen Abweichungen stellen die Flächenpeilpläne und die selbst eingelesenen Peildaten dieselben Fehltiefen dar. Somit können die auf den Peilungen basierenden Ergebnisse als validiert angesehen werden.

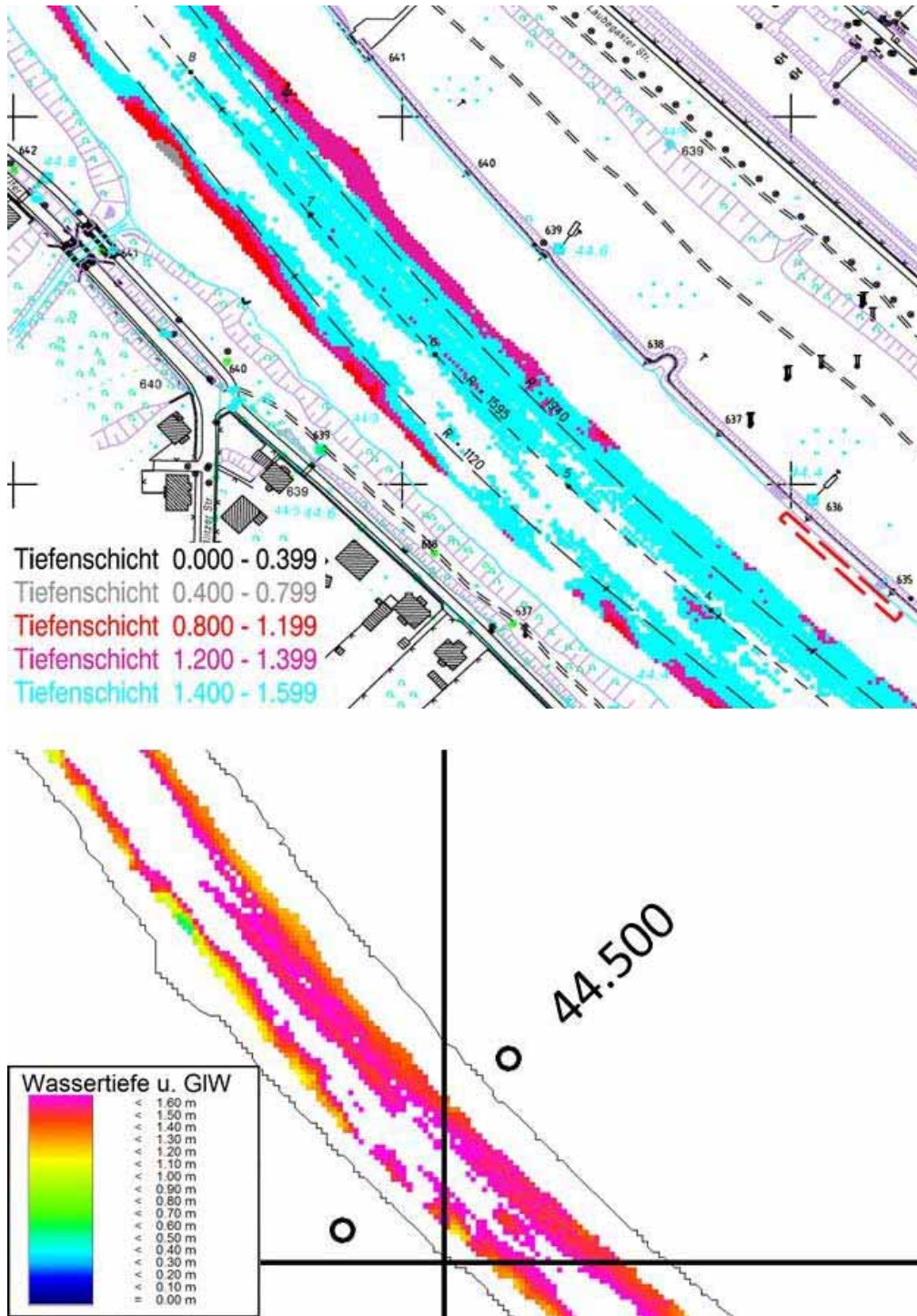


Abbildung 5.6.1: Beispielhafte Darstellungen der Peilung 2014 um Elbe-km 44,5. Oben: Darstellung des WSV; Unten: eigene Darstellung;

6 Diskussion

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Tiefenanalyse für insgesamt fünf Teilabschnitte der Elbe durchgeführt. Im Folgenden werden die Ergebnisse diskutiert. Zuerst erfolgt deren Interpretation. Im Anschluss daran wird auf Unsicherheiten der Ergebnisse eingegangen.

6.1 Interpretation der Ergebnisse

Wie in der Beschreibung der einzelnen Teilabschnitte in Kapitel 3 dargestellt wurde, unterscheiden sich die Charakteristiken der fünf betrachteten Bereiche. Das zeigt sich auch in den hier berechneten durchschnittlichen zeitlichen Standardabweichungen der Abschnitte, welche in Tabelle 6.1.1 dargestellt sind. Die durchschnittliche zeitliche Standardabweichung steigt mit zunehmendem Flusskilometer von 0,07 m zwischen Elbe-km 40 und 60 auf 0,49 m zwischen Elbe-km 510 und 530 an. Die errechnete Zunahme der Variabilität folgt dabei der sich ändernden Kornzusammensetzung der Flusssohle. Die zunehmende Verfeinerung der Kornzusammensetzung entlang des Flussverlaufs (vgl. Abbildung 3.2.1) führt zu einer erhöhten Beweglichkeit der Flusssohle und somit zu größeren Schwankungen zwischen den Jahren.

Die Umgestaltung der Flusssohle und die daraus resultierende zeitliche Standardabweichung können dabei auf zwei Arten ablaufen. Zum einen durch kurzfristige Entwicklungen der Flusssohle, beispielsweise durch Hochwasser oder anthropogene Maßnahmen. Für längere Abschnitte könnten solche Entwicklungen zum Beispiel durch Kolke in Krümmungen und Buhnen oder sich bewegende Transportkörper verursacht sein. Zum anderen kann die durchschnittliche zeitliche Standardabweichung durch langfristige Entwicklungen beeinflusst sein, also durch Trends, die überwiegend in Form von Erosion stattfinden. Während langfristige Entwicklungen beispielsweise eine kontinuierliche Zunahme von Wassertiefen ergeben, sind kurzfristige Entwicklungen der Flusssohle nur vorübergehend, was zu Schwankungen der Wassertiefen zwischen den Jahren führt.

Ob die durchschnittliche zeitliche Standardabweichung eines Abschnitts durch lokale Schwankungen der Wassertiefen oder lang anhaltende Trends beeinflusst ist, muss für jede Strecke gesondert bewertet werden.

Tabelle 6.1.1: Durchschnittliche zeitliche Standardabweichung der betrachteten Teilabschnitte

Elbe-km	durchschn. zeitl. Standardabw. der Tiefe [m]
40 - 60	0.07
220 - 240	0.13
320 - 340	0.15
420 - 440	0.18
510 - 530	0.49

Elbe-km 40 - 60

Im Abschnitt zwischen Elbe-km 40 bis 60 liegt die geringste durchschnittliche zeitliche Standardabweichung vor (vgl. Tabelle 6.1.1), bedingt durch das grobe Material der Flusssohle, das eine Abpflasterung der Sohle verursacht. Dennoch zeichnet sich eine kontinuierliche Eintiefung der Flusssohle ab, da die Wassertiefen, bezogen auf den GLW2010, kontinuierlich zunehmen. Dies zeigt sich beispielsweise in der Abnahme der Unterschreitungswahrscheinlichkeit der hier angenommenen Mindesttiefe von 1,6 m unter GLW (siehe Abbildung 5.1.3). Ein Blick auf die räumliche Verteilung der zeitlichen Standardabweichung in Anhang 3 ergibt, dass zeitliche Veränderungen der Flusssohle vor allem lokal begrenzt sind, wobei Ursachen hierfür Abzweige, Einmündungen, Kurvenlagen und Brücken darstellen. Beim Großteil der Strecke bleibt die zeitliche Standardabweichung hingegen unterhalb des Durchschnittswertes von 0,7 m. Diese lokalen Schwankungen zeigen sich auch entlang der Fehlflächensummenkurven in Abbildung 5.1.10, in denen alle Kurven zwar in nahezu den gleichen Bereichen Fehlflächen aufweisen, das Ausmaß des Anstiegs jedoch teilweise zwischen den Jahren variiert, wie beispielsweise beim Abzweig zum Nebenarm Pillnitz bei Elbe-km 42. Mit Ausnahme der Peilung von 2015 zeigen sämtliche Peilungen mit zunehmender Aktualität eine Abnahme der Fehlflächengrößen. Es kann somit ein Trend hin zu geringeren Fehlflächen angenommen werden.

Neben der zeitlichen Variabilität der Flusssohle ist im Teilabschnitt von Elbe-km 40 bis 60 auch eine räumliche Variabilität über den Flussquerschnitt gegeben, da Fehltiefen vor allem in den seitlichen Fahrrinnenbereichen, weniger aber im mittleren Fahrrinnenbereich zu finden sind. Abbildung 5.1.8 und Abbildung 5.1.9 zeigen dabei, dass gerade diese Fehltiefen in weiten Teilen permanent vorliegen. Dieses Bild passt zu der Charakteristik des Teilabschnitts, der zur Oberen Elbe gehört und sich durch einen engen Flussverlauf ohne große Vorländer auszeichnet (BÜCHELE, 2015).

Elbe-km 220 – 240

Der Streckenabschnitt von Elbe-km 220 bis 240 ist Teil der sogenannten „Erosionsstrecke“. Dementsprechend passt der Anstieg der durchschnittlichen zeitlichen Standardabweichung im Vergleich zum vorherigen Abschnitt ins Bild (vgl. Tabelle 6.1.1). Der Anstieg der zeitlichen Standardabweichung ist dabei nicht auf lokale Schwankungen der Flusssohle zurückzuführen, wie dies zwischen Elbe-km 40 und 60 der Fall ist. Zwischen Elbe-km 220 und 240 wird die durchschnittliche zeitliche Standardabweichung von 0,13 m entlang längerer zusammenhängender Abschnitte überschritten.

Betrachtet man lediglich die ältesten und die aktuellsten Peilungen, so ist ein Anstieg der Wassertiefen bezogen auf den GIW2010 und somit eine Eintiefung der Flusssohle zu erkennen (vgl. Abbildung 5.2.2 und Abbildung 5.2.3). Die Schwankungen zwischen den Peilungen von 2004 und 2009 zeigen aber auch, dass diese Eintiefung und Erosion keinesfalls kontinuierlich stattfindet, was auch in WSV (2009) beschrieben ist.

Neben der zeitlichen ist auch in diesem Abschnitt eine räumliche Variabilität der Wassertiefen gegeben. Anders als im Abschnitt zwischen Elbe-km 40 und 60, in dem insbesondere der Flussquerschnitt zu Tiefeneinschränkungen geführt hat, ist im Abschnitt zwischen Elbe-km 220 und 240 vor allem der Flussverlauf mit seinen ausgeprägten Kurven dafür verantwortlich. Wie Anhang 4 zeigt, sinken die Wassertiefen entlang der Gleithänge, während sie in den Bereichen der Prallhänge ansteigen. In den Übergangsbereichen von zwei Kurven verschieben sich die geringen Wassertiefen zwischen den seitlichen Fahrrinnenbereichen und führen dabei teilweise zu Fehltiefen im Bereich der mittleren Fahrrinne. Vor allem die Kurvenbereiche zwischen Elbe-km 221 und 222 sowie zwischen 224,5 und 226 führen dabei lokal zu Fehlflächen, was die Anstiege der Fehlflächensummenkurven zeigen (vgl. Abbildung 5.2.10). Auch die in BAW (2007) erwähnte Tiefeneinschränkung durch eine Furt zwischen Elbe-km 233 und 236 sind darin deutlich zu erkennen.

Elbe-km 320 – 340

Die durchschnittliche zeitliche Standardabweichung steigt im Vergleich zu den beiden vorherigen Abschnitten leicht an (vgl. Tabelle 6.1.1). Der Anstieg ist dabei hauptsächlich durch zwei Streckenabschnitte bedingt: zwischen Elbe-km 320,5 und 324,5 sowie zwischen Elbe-km 330 und 334,5. Hier steigen die Werte entlang längerer Abschnitte über den Mittelwert von 0,15 m und über schreiten diesen teilweise deutlich, mit einem lokalen Maximalwert von 0,8 m bei Elbe-km 333,6. Zu beachten ist hier jedoch, dass in diesem Abschnitt nur sechs Peilungen betrachtet wurden. Einzelne Peilungen fallen beispielsweise bei den Berechnungen der durchschnittlichen Wassertiefen oder der

durchschnittlichen zeitlichen Standardabweichung stärker ins Gewicht. Betrachtet man beispielsweise die Fehlflächensummenkurven in Abbildung 5.3.11, so ist zu sehen, dass sich die beiden Peilungen von 1998 und 2005 deutlich in der Höhe der Gesamtfehlfläche unterscheiden und dadurch einen Anstieg der durchschnittlichen zeitlichen Standardabweichung verursachen. Warum sich die beiden Peilungen insbesondere ab Elbe-km 329 in diesem Maß von den anderen Peilungen unterscheiden, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geprüft werden. Da sich bei Elbe-km 329,5 der Zufluss der Alten Elbe befindet, liegt jedoch die Vermutung nahe, dass durch den Zufluss Sediment in den Hauptstrom eingetragen wurde und dies zu Fehltiefen geführt hat.

Generell ist in diesem Abschnitt der Elbe die geringste Anzahl von Fehltiefen im Vergleich zu den anderen betrachteten Teilabschnitten zu verzeichnen. Das lässt sich zum Beispiel an den Unterschreitungswahrscheinlichkeiten (Abbildung 5.3.4) zeigen oder am Verlauf der Kammwege (Abbildung 5.3.5, Abbildung 5.3.6, Abbildung 5.3.7). Fehltiefen treten in den Bereichen der Felsen sowie zwischen Herrenkrugbrücke und der Zufahrt zum Rothenseer Verbindungskanal auf. Vor allem entlang der Felsen weisen die seitlichen Fahrrinnenbereiche Fehltiefen auf. Der Schwankungsbereich der Kammwege sowie die zeitliche Standardabweichung (Anhang 9) deuten dabei auf die unterschiedlichen Kornzusammensetzungen der Flusssohle hin. Die BFG (2004) beschreibt, dass entlang der Felsen wegen des gröberen Materials der Sohle eine verminderte Interaktion des Geschiebes mit der Sohle stattfindet, während unmittelbar nach der Felsenstrecke eine erhöhte Erosion aufgrund des Geschiebedefizits vorliegt. Ergänzend kommt dazu, dass durch die Alte Elbe bei Elbe-km 329,5 Sediment eingetragen werden kann. Unter welchen Umständen genau Sediment eingetragen wird, ist laut BAW (2015b) jedoch nicht bekannt. Entsprechend steigt die Variabilität der Sohle an. Beim Ausmaß des Schwankungsbereichs gilt es allerdings auch hier zu berücksichtigen, dass die Peilungen von 1998 und 2005 ab Elbe-km 329 deutlich mehr Fehlfläche aufweisen, als dies in den anderen Peilungen der Fall ist, wie die Fehlflächensummenkurve (Abbildung 5.3.11) zeigt. Dementsprechend sind die Schwankungsbereiche stark durch diese beiden Peilungen beeinflusst.

Elbe-km 420 – 440

In der Charakterisierung der Flussstrecke in Kapitel 3 wurde beschrieben, dass die Flusssohle aufgrund der Feinkörnigkeit bereits bei geringem Abfluss in Bewegung gerät. Diese Beweglichkeit und Variabilität der Flusssohle zeigt sich zum einen in der im Vergleich zu den vorangegangenen Streckenabschnitten angestiegenen durchschnittlichen zeitlichen Standardabweichung (vgl. Tabelle 6.1.1). Zum anderen lässt sie sich beispielsweise auch in den Häufigkeitsverteilungen der Wassertiefen (Abbildung 5.4.2) oder der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten (Abbildung 5.4.3) erkennen. Diese

verschieben sich zwischen den Peilungen, allerdings nicht ihrer Chronologie entsprechend. Die Variabilität der Sohle zeigt sich auch in der Analyse der permanenten Fehltiefen (Abbildung 5.4.7, Abbildung 5.4.8, Abbildung 5.4.9): Entlang des gesamten Streckenabschnitts lagen nur in acht aller betrachteten 100 m langen Abschnitte permanente Fehlstellen vor. Und auch die Fehlflächensummenkurven (Abbildung 5.4.10) zeigt, dass sowohl das Auftreten als auch das Ausmaß von Fehlflächen zwischen den Jahren deutlich variiert. Gerade in diesem Teilabschnitt der Elbe sollte daher die sich ändernde Geometrie der Flusssohle im Hinblick auf die für die Schifffahrt verfügbaren Wassertiefen berücksichtigt werden.

Elbe-km 510 – 530

Die „Reststrecke“ zeichnet sich laut Literatur dadurch aus, dass die Sohle aufgrund ihrer Feinkörnigkeit bei nahezu jedem Abfluss in Bewegung ist und es leicht zu einer Umlagerung von großen Dünen bis hin zu alternierenden Bänken kommen kann (BFG, 2004). Die durchschnittliche zeitliche Standardabweichung von 0,49 m bestätigt diese Variabilität und Beweglichkeit der Sohle (vgl. Tabelle 6.1.1). Vor allem die Randbereiche zeigen, bedingt durch die alternierenden Bänke, eine hohe Dynamik, wobei die zeitliche Standardabweichung teilweise über 1 m liegt (siehe Anhang 15). Die Wassertiefen entlang des mittleren Bereichs zeigen hingegen mit zeitlichen Standardabweichungen zwischen 0,2 und 0,3 m deutlich geringere Schwankungen auf. Allerdings liegen selbst diese „geringeren“ Werte noch über sämtlichen durchschnittlichen zeitlichen Standardabweichungen der anderen betrachteten Teilabschnitte.

Auffällig ist dabei der Bereich zwischen Elbe-km 510 und 513. Die zeitliche Standardabweichung liegt hier unter dem Durchschnitt, was nicht den Erwartungen der variablen Sohle der „Reststrecke“ entspricht. Alternierende Bänke sind hier somit nicht in dem Ausmaß gegeben, wie dies im anschließenden Bereich der Strecke der Fall ist. Weshalb das so ist, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geprüft werden. Denkbar wäre jedoch, dass hier verstärkt Geschiebewardirtschaftung in Form von Geschiebeentnahme stattfindet.

Bemerkbar macht sich zudem der Übergang zwischen unausgebauter „Reststrecke“ und dem niedrigwasserregulierten anschließenden Bereich. Während entlang der „Reststrecke“ in allen Bereichen der Fahrrinne Fehlfläche auftritt, sorgt die anschließende Niedrigwasserregulierung dafür, dass im Bereich der mittleren Fahrrinne die Wassertiefen steigen und im Durchschnitt hier keine Fehltiefen mehr auftreten (siehe Anhang 14). Diese beschränken sich nun auf die seitlichen Fahrrinnenbereiche. Die zeitliche Standardabweichung zeigt dabei auch, dass der Niedrigwasserausbau zu einer Verminderung der Sohlvariabilität in den Randbereichen sorgt, wodurch die zeitliche Standardabweichung kontinuierlich abnimmt.

Vergleich unterschiedlicher Bezugswasserspiegel

Durch den Vergleich der Wasserspiegellagen des Median des Abflusses ($W(\text{MeQ})$) und des Gleichwertigen Abflusses ($W(\text{GlQ})$) sollte geprüft werden, ob unterschiedliche Bezugswasserspiegel Gleichwertigkeit aufweisen, also einen gleichbleibenden Abstand zueinander halten, oder ob diese zu zusätzlichen tiefenbestimmenden Stellen bei $W(\text{MeQ})$ führen. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass eine durchgehende Gleichwertigkeit der Wasserspiegellagen in keinem der betrachteten Abschnitte gegeben ist. Dabei ist festzustellen, dass die Gleichwertigkeit mit steigendem Gefälle der Flusssohle abnimmt. Besonders der lokale Anstieg des Gefälles entlang der Felsenstrecke in Magdeburg führt zu zusätzlichen tiefenbestimmenden Stellen bei $W(\text{MeQ})$. Aber auch zwischen den restlichen Abschnitten zeigen sich Unterschiede im Zusammenhang mit dem Gefälle. Entsprechend dem abnehmenden durchschnittlichen Gefälle zwischen den Teilabschnitten, verlaufen auch die Kurven der Wasserspiegeldifferenzen glatter, mit Ausnahme des Anstiegs der Differenz durch den Zufluss der Havel. Dementsprechend kann also festgehalten werden, dass unterschiedliche Bezugswasserspiegel besonders bei lokalen Gefälleunterschieden durchaus zu zusätzlichen tiefenbestimmenden Stellen führen können und dies bei der Berechnung von verfügbaren Wassertiefen berücksichtigt werden sollte.

6.2 Unsicherheiten der Ergebnisse

Von der Peilung der Flusssohle bis zur Berechnung der Wassertiefen erfolgen zahlreiche Bearbeitungsschritte, die jeweils mit Unsicherheiten behaftet sein können und somit auch die Ergebnisse beeinflussen können. Bereits die Peilung kann schon durch Messungenauigkeiten beeinflusst sein, wie in Kapitel 1.4 beschrieben wurde. Des Weiteren wurden die Daten bereits überarbeitet und gerastert von den Wasserstraßen- und Schifffahrtsämtern übergeben, sowie im Rahmen der Arbeit nochmals neugerastert, um eine Vergleichbarkeit der Daten zu erzeugen. Zudem wurden zur Berechnung der Wassertiefen verschiedene Annahmen getroffen, wie zum Beispiel die, dass der fixe GIW_{2010} für jede Peilung unverändert gültig sei. Darüber hinaus können die Randbedingungen einer Peilung zu einer im Rahmen dieser Auswertung ungewollten Beeinflussung der Flusssohle führen. Beispielsweise wurden die ausgewerteten Peilungen unter anderem nach dem Kriterium ausgewählt, dass die Flusssohle nicht durch kurz zuvor (weniger als sechs Monate) aufgetretene Hochwasserereignisse ($\text{Abfluss} > \text{MHQ des Referenzpegels}$) beeinflusst wurde. Die Entscheidung, welche Peilungen durch Hochwasser beeinflusst sind, erfolgte dabei subjektiv durch den Abgleich der Abflussganglinie des jeweiligen Referenzpegels. Ob und wie lange die Flusssohle durch ein Hochwasserereignis tatsächlich beeinflusst wurde, konnte dabei nur grob abgeschätzt werden.

Somit kann es sein, dass Peilungen betrachtet wurden, die nachhaltig durch ein Hochwasser beeinflusst wurden, das allerdings länger als sechs Monate zurücklag. Des Weiteren können neben der hydrologischen Vorgeschichte einer Peilung auch anthropogene Einflüsse auf die Flusssohle einwirken, die im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden konnten. Anzuführen wären hier beispielsweise durchgeführte Baumaßnahmen oder Geschiebemanagement, also Geschiebeentnahme oder -zugabe.

Im Folgenden wird näher darauf eingegangen, welche Auswirkungen Messungenauigkeiten des Peilvorgangs sowie die Berechnung von Wassertiefen in Bezug auf einen konstanten Bezugswasserspiegel auf die Ergebnisse haben können.

Unsicherheiten der Peilungen

Wie bei der Vorstellung der Messmethoden von Peilungen in Kapitel 1.4 bereits erwähnt, können bei den Messungen mittels Fächerecholot oder Auslegersystemen Messungenauigkeiten auftreten. Da beide Messmethoden für die hier ausgewerteten Peilungen verwendet wurden, können dementsprechend auch die Ergebnisse fehlerbehaftet sein. Abbildung 6.2.1 zeigt den Unsicherheitsbereich der Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Peilung von 2016 im Abschnitt zwischen Elbe-km 40 und 60, wenn man eine maximale Messungenauigkeit von 7 cm annimmt, was laut RIECK (2008) der Fall sein kann. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit der hier angenommenen Solltiefe von 1,6 m unter GIW liegt bei der Peilung bei 10,1 %. Der Unsicherheitsbereich schwankt dabei jedoch zwischen Unterschreitungswahrscheinlichkeiten von 3,7 bis 20,8 %. Die Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Solltiefe hat in diesem Abschnitt somit einen Unsicherheitsbereich von 17,1 %.

Tabelle 6.2.1 zeigt, dass die Abweichungen der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten von Abschnitt zu Abschnitt variieren. Der größte Unsicherheitsbereich bezogen auf die Solltiefe liegt zwischen Elbe-km 40 und 60 vor. Der geringste Unsicherheitsbereich liegt mit 0,5 % beim Abschnitt zwischen Elbe-km 320 bis 340. Die unterschiedlichen Ausmaße der Schwankungsbereiche der einzelnen Streckenabschnitte ergeben sich dadurch, dass die Solltiefe von 1,6 m unter GIW in verschiedenen Steigungsbereichen der Kurvenverläufe der Unterschreitungswahrscheinlichkeiten liegt. Mit größerer Steigung nimmt auch der Schwankungsbereich zu. Das liegt daran, dass in diesen Wassertiefen mehr Messwerte vorliegen und somit auch mehr Unsicherheiten gegeben sein können.

Es zeigt sich also, dass durch Messungenauigkeiten bedingte Unsicherheiten je nach betrachtetem Streckenabschnitt durchaus Auswirkungen auf die Aussage nach der Häufigkeit von Fehltiefen haben.

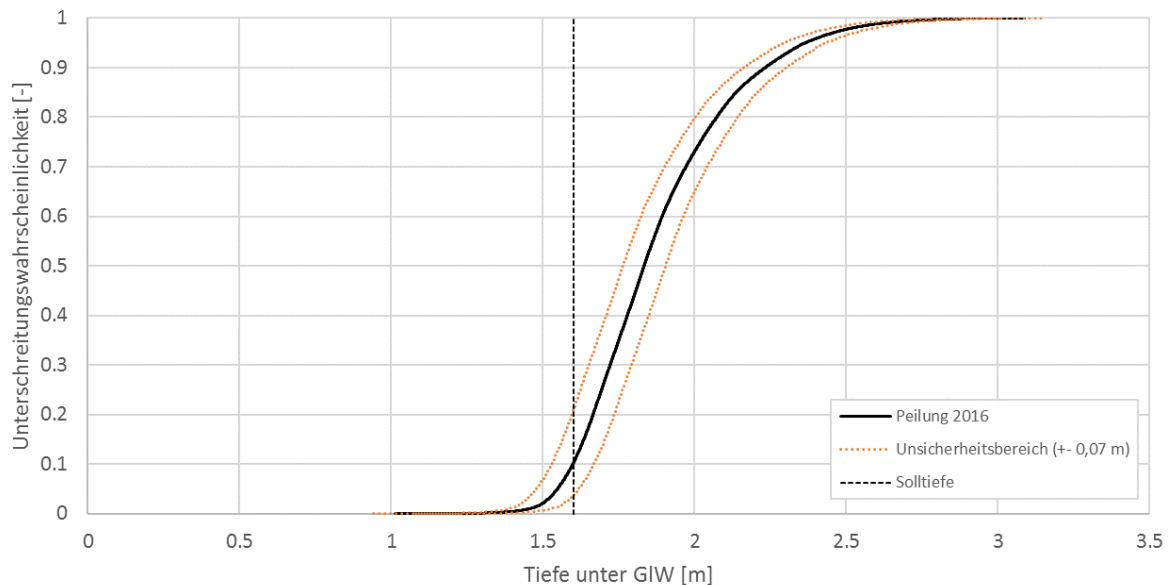


Abbildung 6.2.1: Unterschreitungswahrscheinlichkeit der Peilung 2016 (Elbe-km 40 - 60), inklusive Unsicherheitsbereich

Tabelle 6.2.1: Unterschreitungswahrscheinlichkeiten (UWK) von 1,6 m unter GIW der jeweils aktuellsten betrachteten Peilungen sowie die maximalen Unsicherheiten

Elbe-km	Peilung	UWK - 7 cm	UWK	UWK + 7 cm
40 - 60	2016	20.8	10.1	3.7
220 - 240	2016	14.7	9.8	6.2
320 - 340	2015	0.6	0.2	0.1
420 - 440	2016	4.7	2.1	0.8

GIW2010 als fixer Bezugswasserstand

Im Rahmen dieser Arbeit wurde der GIW2010 als fixer Bezugswasserstand verwendet, auf den sich die berechneten Wassertiefen beziehen. Dabei wurde zur Vereinfachung die Annahme getroffen, dass der GIW2010, der auf Abflussdaten zwischen 1991 und 2010 beruht, für alle Peilungen gleichermaßen gültig sei. Dies ist in der Realität jedoch nicht zwingend der Fall. Durch Veränderungen der Geometrien des Flussbetts über die Zeit können sich trotz gleichbleibendem Abfluss die Wasserspiegellagen ändern. Eine Eintiefung der Flusssohle über einen längeren Zeitraum hätte beispielsweise zur Folge, dass sich dadurch auch die Wasserspiegellage nach unten verschiebt. Dementsprechend müsste eigentlich auch die Wasserspiegellage des GIW angepasst werden. In BAW (2012) ist beispielsweise

dargestellt, dass die Abweichungen zwischen dem GlW2010, bezogen auf eine Wasserspiegelfixierung von November 2005, und dem GlW2010, bezogen auf die Mittelung aller betrachteten Wasserspiegelfixierungen, bei 18 % der Werte größer als 5 cm ist. Wenn somit Aussagen über verfügbare Wassertiefen einzelner Peilungen bezogen auf einen über die Zeit gleichbleibenden Bezugswasserspiegel getroffen werden, kann es sein, dass die tatsächlich vorhandenen Wassertiefen über- oder unterschätzt werden. Der betrachtete Teilabschnitt zwischen Elbe-km 40 und 60 zeigt beispielsweise über die Zeit eine kontinuierliche Zunahme der Wassertiefen. Das kann nun bedeuten, dass die Wassertiefen innerhalb des Fahrrinnenbereichs tatsächlich zugenommen haben, beispielsweise durch bauliche Maßnahmen, oder aber, dass sich durch eine Eintiefung der Flusssohle die Wassertiefen vergrößern, da der Bezugswasserspiegel GlW unverändert bleibt. Im zweiten Fall wäre die Aussage, dass die Wassertiefen mit der Zeit zunehmen somit nicht zwangsläufig korrekt. Generell ist in allen betrachteten Teilabschnitten zu beobachten, dass die Wassertiefen der aktuellsten Peilung im Vergleich zu der ältesten Peilung zugenommen haben. In einem weiteren Schritt wäre daher zu prüfen, ob diese Zunahme der Wassertiefen auch bei auf die Peilungen angepassten Gleichwertigen Bezugswasserständen gegeben wäre.

7 Fazit

Die Tiefenanalyse ausgewählter Abschnitte der Elbe hat gezeigt, dass die Betrachtung der Flusssohle aufgrund ihrer Variabilität sinnvoll ist, da sie teilweise Schwankungen unterliegt, was zu einer Beeinflussung von verfügbaren Wassertiefen führen kann. Das Ausmaß der Schwankungen folgt dabei den sich ändernden Charakteristiken der Flusssohle: Der im Bereich der Oberen Elbe liegende Abschnitt zwischen Elbe-km 40 und 60 weist aufgrund der durch das grobe Material abgeplasterten Flusssohle die geringsten Schwankungen auf. Mit zunehmendem Flusskilometer und der damit einhergehenden Verfeinerung der Kornzusammensetzung der Flusssohle steigt die Schwankung der Tiefenverhältnisse zwischen den Jahren, was sich beispielsweise an der kontinuierlichen Zunahme der durchschnittlichen zeitlichen Standardabweichung zeigt.

Auch das Auftreten geringer Wassertiefen, die die im Rahmen dieser Arbeit angenommenen Mindestwassertiefe von 1,6 m unter GLW2010 nicht erreichen, hängt maßgeblich von der Streckencharakteristik des jeweiligen Teilabschnitts ab. Der Gebirgsstreckencharakter der Oberen Elbe mit seinem engen Flussverlauf und den fehlenden Vorländern führt dazu, dass Fehlfächen zwischen Elbe-km 40 und 60 vor allem entlang der seitlichen Bereiche der betrachteten Fahrrinne auftreten. Fehlfächen im Abschnitt zwischen Elbe-km 220 und 240 sind hingegen hauptsächlich mit dem engen Kurvenverlauf dieses Abschnitts zu begründen, wodurch sich vor allem die Gleithänge in den Kurvenlagen durch geringe Wassertiefen auszeichnen. Der Abschnitt von Elbe-km 420 bis 440 ist insbesondere durch die Feinkörnigkeit der Sohle geprägt, aufgrund derer die Flusssohle bereits bei geringen Abflüssen beweglich ist, was zu einer hohen Variabilität der Tiefen zwischen den betrachteten Peilungen führt. Sowohl Auftreten und Ausmaß von Fehlfächen unterscheiden sich dabei von Jahr zu Jahr, dies zeigt beispielsweise die geringe Anzahl von permanenten Fehlstellen. Besonders in diesem Abschnitt sollte die sich ändernde Geometrie der Flusssohle im Hinblick auf die für die Schifffahrt verfügbaren Wassertiefen berücksichtigt werden.

Die Wassertiefen der Abschnitte von Elbe-km 320 bis 340 und von Elbe-km 510 bis 530 sind vor allem durch lokale Besonderheiten geprägt. Im Bereich von Magdeburg sind hier insbesondere die Felsen zu nennen, die entlang der seitlichen Fahrrinnenbereiche zu geringen Wassertiefen und permanenten Fehlstellen führen. Im Abschnitt zwischen Elbe-km 510 und 530 macht sich der Niedrigwasserausbau am Elbe-km 521 bemerkbar, der dafür sorgt, dass die Fehlfächen im Vergleich zu dem unausgebauten Bereich der „Reststrecke“ zurückgehen und sich auf die seitlichen Fahrrinnenbereiche beschränken. Die zeitliche Standardabweichung zeigt dabei auch, dass entlang des gesamten Streckenabschnitts vor allem die seitlichen Fahrrinnenbereiche aufgrund von alternierenden Bänken einer hohen Dynamik ausgesetzt sind.

Der Vergleich der Wasserspiegelverläufe von W(GIQ) und W(MeQ) hat verdeutlicht, dass diese keineswegs gleichwertig (konstanter Abstand) verlaufen müssen, sondern maßgeblich vom Gefälle der Strecke abhängen. Insbesondere der lokale Gefälleanstieg entlang der Felsenstrecke in Magdeburg macht dies deutlich. Unterschiedliche Bezugswasserspiegel können somit zu zusätzlichen tiefenbestimmenden Stellen führen.

Trotz Unsicherheiten, die sich beispielsweise aus Messungenauigkeiten oder der Annahme eines für alle Peilungen gleichermaßen gültigen Bezugswasserspiegels GIW2010 ergeben, kann festgehalten werden, dass für die Berechnung von für die Schifffahrt verfügbaren Wassertiefen die sich ändernde Geometrie der Flusssohle berücksichtigt werden sollte. Auch auf die Wahl des Bezugswasserspiegels sollte geachtet werden, da unterschiedliche Wasserspiegellagen im Vergleich zum GIW2010 nicht gleichwertig verlaufen müssen und zu zusätzlichen tiefenbestimmenden Stellen führen können.

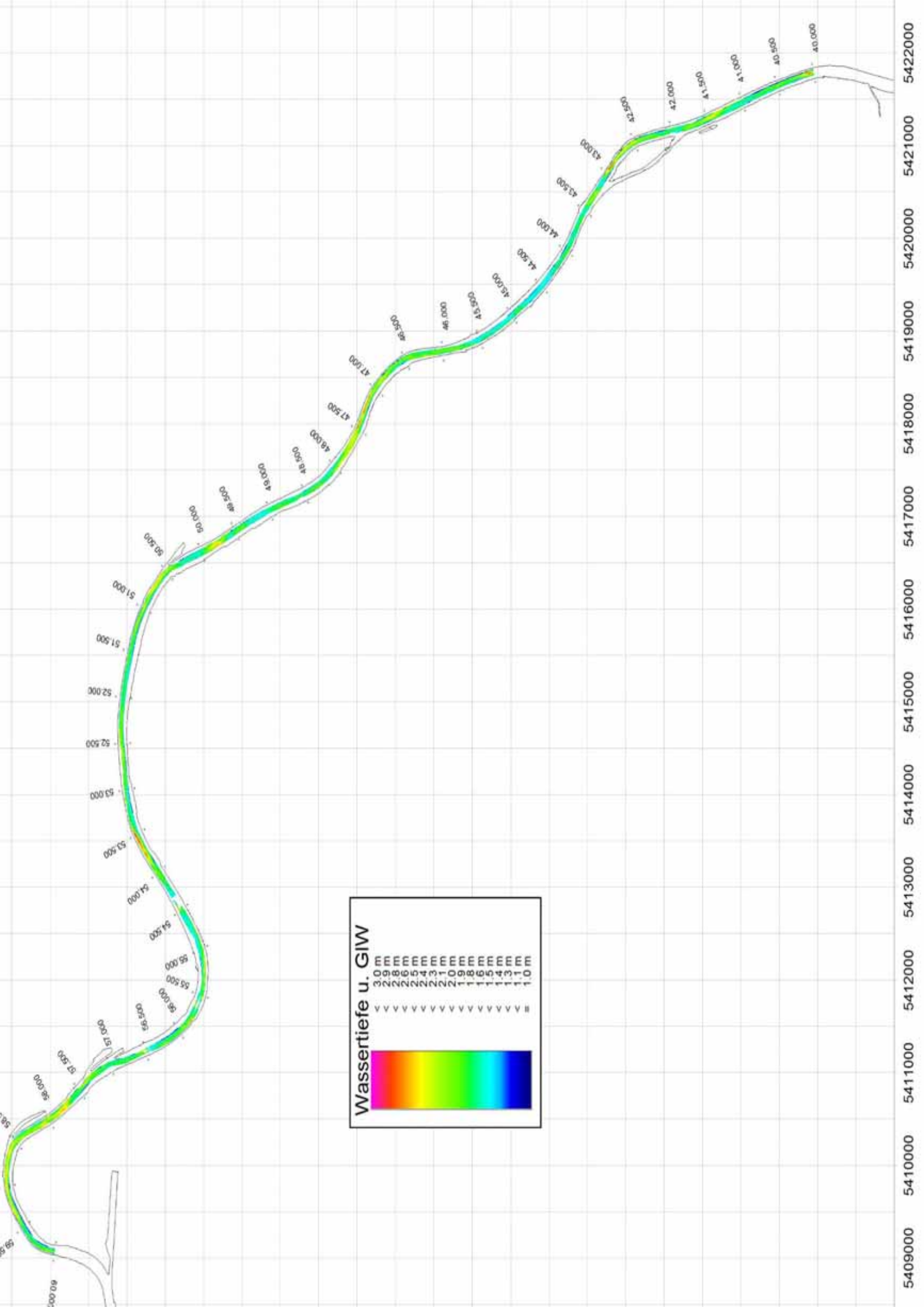
8 Quellenverzeichnis

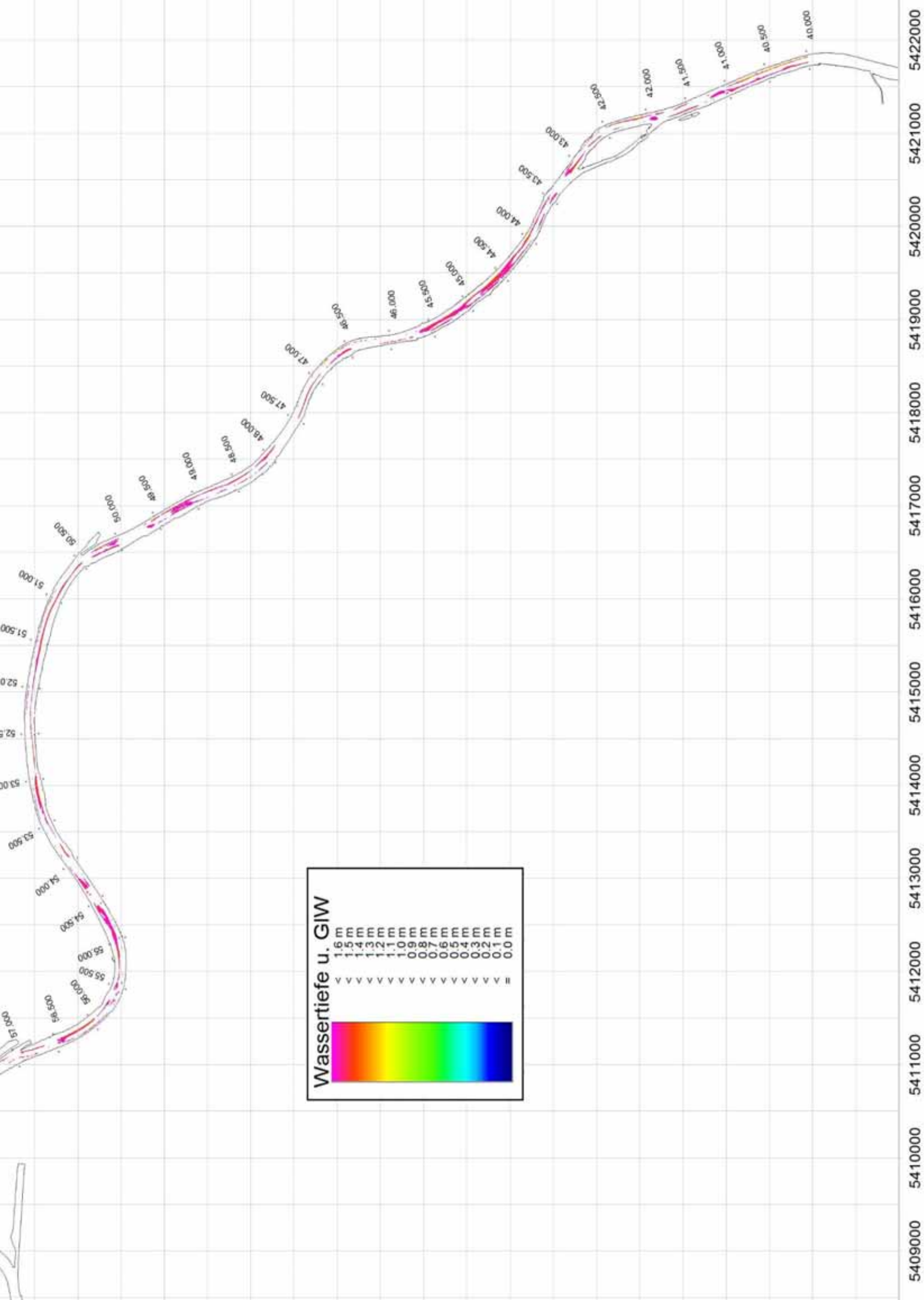
- AG MITTELWASSERLINIEN (2015): Der freifließende Rhein – Ermittlung von gleichwertigen Mittelwasserlinien am freifließenden Rhein, Kurzbericht Ergebnisse Teil 2, Tiefenanalyse – Version 1.0; Bericht; September 2015;
- AUSEE (ARBEITSGRUPPE UMSETZUNG DES SOHLSTABILISIERUNGSKONZEPTES EROSIONSTRECKE DER ELBE) (2014): Erosionsstrecke der Elbe – Umsetzung des Sohlstabilisierungskonzeptes, Tätigkeitsbericht 2010 bis 2012; Bericht; Dresden, Magdeburg, Koblenz, Karlsruhe, Juli 2014;
- BAW (BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU) (2005): Voruntersuchung zum Regelungssystem der deutschen Binnenelbe El-km 0 bis 569,3; Bericht; Karlsruhe, April 2005;
- BAW (BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU) (2007): Begutachtung des Elbe-Abschnitts Coswig (Elbe-km 220,2 – 245,6) mit Hilfe eines 2D HN Modells, Teil 1: Istzustandsanalyse bis zum Ausuferungsabfluss; Bericht; Karlsruhe, Juli 2007;
- BAW (BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU) (2010): Fiks Handbuch; Bericht; Karlsruhe, Juli 2010;
- BAW (BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU) (2015a): Gewässermorphologische Situation El-km 502-586 – Datengrundlage für FTM; Bericht; Karlsruhe, September 2015;
- BAW (BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU) (2015b): Streckenanalyse der Elbe – El-km 330 bis 335; Bericht; Karlsruhe, Dezember 2015;
- BAW (BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU) / BFG (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERSCHUTZ) (2012): Pflege des niedrigen und mittleren Bezugswasserstades der Elbe – GIW2010, Bauwerkssollhöhe2010; Bericht; Karlsruhe und Koblenz, Januar 2012;
- BFG (BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERSCHUTZ) (2004): Feststofftransport und Flussbettentwicklung der Elbe; Bericht BFG-1431; Koblenz, September 2014;
- BÜCHELE, B. (2015): Gewässerform und Strukturen entlang des Flusslaufes; in: Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Band 2: Struktur und Dynamik der Elbe; S. 34 – 49; Weißensee Verlag, Berlin;

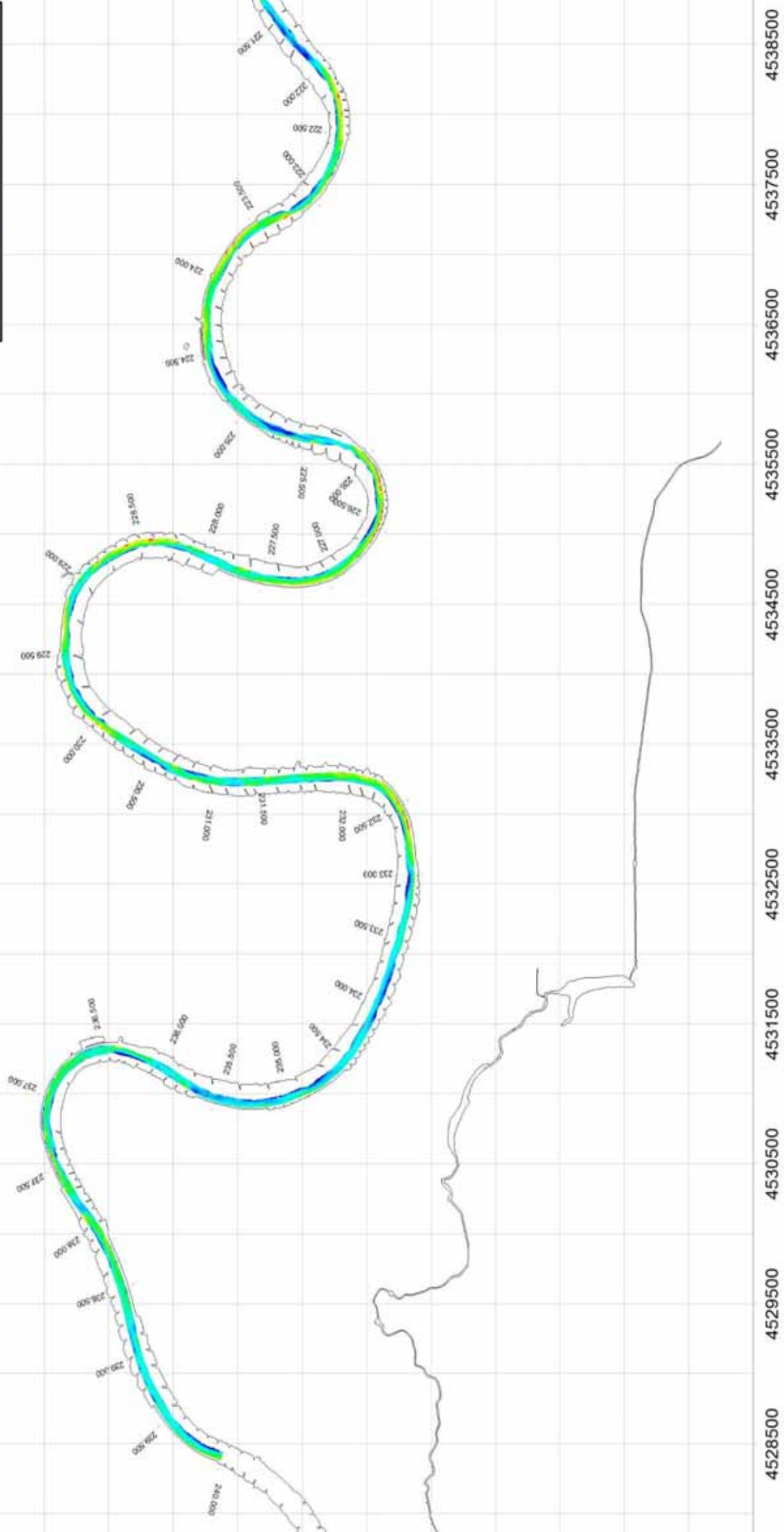
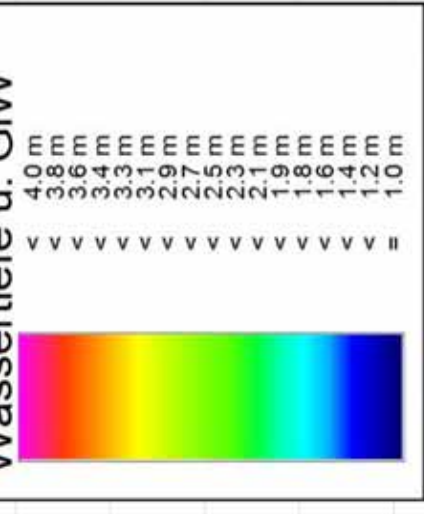
- BVBM (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN) (2005): Grundsätze für das Fachkonzept der Unterhaltung der Elbe zwischen Tschechien und Geesthacht mit Erläuterung; Bonn, Mai 2005;
- DORMANN, C. (2013): Parametrische Statistik – Verteilungen, maximum likelihood und GLM in R; Springer Spektrum; Berlin, Heidelberg 2013;
- DITTRICH, A.; NIEWERTH, S. (2016): Erstellung einer Arbeitsanleitung für die Erfassung von Sohlenstrukturen; Bericht; Braunschweig, April 2016;
- FAHRMEIR, L.; HEUMANN, C.; KÜNSTLER, R.; PIGEOT, I.; TUTZ, G. (2016): Statistik – Der Weg zur Datenanalyse, 8. Auflage; Springer Spektrum; Berlin, Heidelberg 2016;
- FAULHABER, P. (1998): Entwicklung der Wasserspiegel- und Sohlenhöhen in der deutschen Binnenelbe der letzten 100 Jahre – Einhundert Jahre „Elbestromwerk“; in: Gewässerschutz im Einzugsgebiet der Elbe – 8. Magdeburger Gewässerschutzseminar; S. 217 – 220;
- FAULHABER, P. (2013a): Niedrigwasserereignisse an der Elbe und ihre Bedeutung für den Ausbau des Flusses; in: Veranstaltungen 1/2013, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 60-68;
- FAULHABER, P. (2013b): Wechselspiel von Geschiebetransport und Regelungssystem an der deutschen Binnenelbe; in: Veranstaltungen 3/2013 „Geomorphologische Prozesse unserer Flussgebiete“, Herausgeber Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, S. 88-100;
- FAULHABER, P. (2015): Ursachen und Auswirkungen der Sohlenerosion; in: Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Band 2: Struktur und Dynamik der Elbe; S. 184 – 188; Weißensee Verlag, Berlin;
- FAULHABER, P.; FINKE, W.; GABRIEL, T. (2008): Zum niedrigen Bezugswasserstand „GIW“ an der deutschen Binnenelbe; in: Binnenschifffahrt – ZfB, Nr. 12; S. 64 – 67;
- GEODATENDIENST DER WSV; Link: <<http://atlas.wsv.bund.de/clients/desktop/>> zuletzt aufgerufen am 22.02.2017;

- GESAMTKONZEPT ELBE (2017): Strategisches Konzept für die Entwicklung der deutschen Binnenelbe und ihrer Auen; Link:
<http://www.gesamtkonzeptelbe.bund.de/Web/GkElbe/DE/Informationen/Ergebnis/Gesamtkonzept.pdf?__blob=publicationFile&v=5> zuletzt aufgerufen am 22.02.2017
- HENTSCHEL, B. (1996): Alternierende Kiesbänke in der Elbe-„Reststrecke“; in: Ökosystem Elbe – Zustand, Entwicklung und Nutzung – 7. Magdeburger Gewässerschutzseminar; S. 391 – 393;
- HIRSCHFELD, M. (2003): Isotopen- und Hydrochemie des Rheinsystems: Saisonale Variationen als Konsequenz dynamischer Prozessabläufe des kontinentalen Kohlenstoff- und Wasserkreislaufes; in: Kölner Forum für Geologie und Paläontologie; Geologisches Institut der Universität zu Köln;
- IB (INGENIEURBÜRO) SCHMID (2013): Bericht zu den Sondermessungen auf der Elbe bei HW in Messabschnitten im Bereich Elbe-km 410 bis 450 – Schwerpunkt Bühnenfelder; Bericht;
- IKSE (Internationale Kommission zum Schutz der Elbe) (2005): Die Elbe und ihr Einzugsgebiet – Ein geographisch-hydrologischer und wasserwirtschaftlicher Überblick; Magdeburg;
- IKSR (INTERNATIONALE KOMMISSION ZUM SCHUTZ DES RHEINS) (2012): Nachweis der Wirksamkeit von Maßnahmen zur Minderung der Hochwasserstände im Rhein – Umsetzung des Aktionsplans Hochwasser 1995 – 2010 einschließlich Vorausschau für 2020 sowie 2020+; Bericht Nr. 199; Koblenz;
- KHR (INTERNATIONALE KOMMISSION FÜR DIE HYDROLOGIE DES RHEINGEBIETES) (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert – Analyse, Veränderungen, Trends; Bericht Nr. I-22;
- MALLE, K. G. (1990): Vergleich von Elbe und Rhein – Gegenüberstellung der Gütedaten; in: Zeitschrift für Umweltchemie und Ökotoxikologie, Nr. 2; S. 92 – 96;
- MIC, L.-M. (2013): Gegenüberstellung hydrographischer Messmethoden zur Gewässergrundmessung von Fließgewässern und Seen; Diplomarbeit; Departement für Bautechnik und Naturgefahren an der Universität für Bodenkultur Wien;
- NAUMANN, S.; GÖLZ, E. (2015): Fest- und Schwebstoffhaushalt; in: Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Band 2: Struktur und Dynamik der Elbe; S. 66 – 91; Weißensee Verlag, Berlin;

- RIECK, A. (2008): Vergleichende Untersuchungen zur Gewässervermessung auf der Elbe; Diplomarbeit an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden (FH);
- ROERS, M.; WECHSUNG, F. (2015): Neubewertung der Auswirkungen des Klimawandels auf den Wasserhaushalt im Elbegebiet; in: Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, 59. Jahrgang, Heft 3, Juni 2015; S. 109 – 119;
- SCHWARTZ, R.; KOFALK, S.; SCHOLTEN, M.; FAULHABER, P.; SCHOLZ, M. (2015): Entwicklung und heutiger Zustand von Fluss und Aue; in: Konzepte für die nachhaltige Entwicklung einer Flusslandschaft, Band 2: Struktur und Dynamik der Elbe; S. 9 – 33; Weißensee Verlag, Berlin;
- VBW (VEREIN FÜR EUROPÄISCHE BINNENSCHIFFFAHRT UND WASSERSTRASSEN E.V.) (2013): Fahrdynamik von Binnenschiffen; Schifffahrtsverlag „Hansa“ GmbH & Co.KG, Hamburg, Juli 2013;
- WSV (WASSERSTRASSEN- UND SCHIFFFAHRTSVERWALTUNG DES BUNDES) (2009): Sohlstabilisierungskonzept für die Elbe von Mühlberg bis zur Saalemündung; Magdeburg, Dresden, Koblenz, Karlsruhe, März 2009;



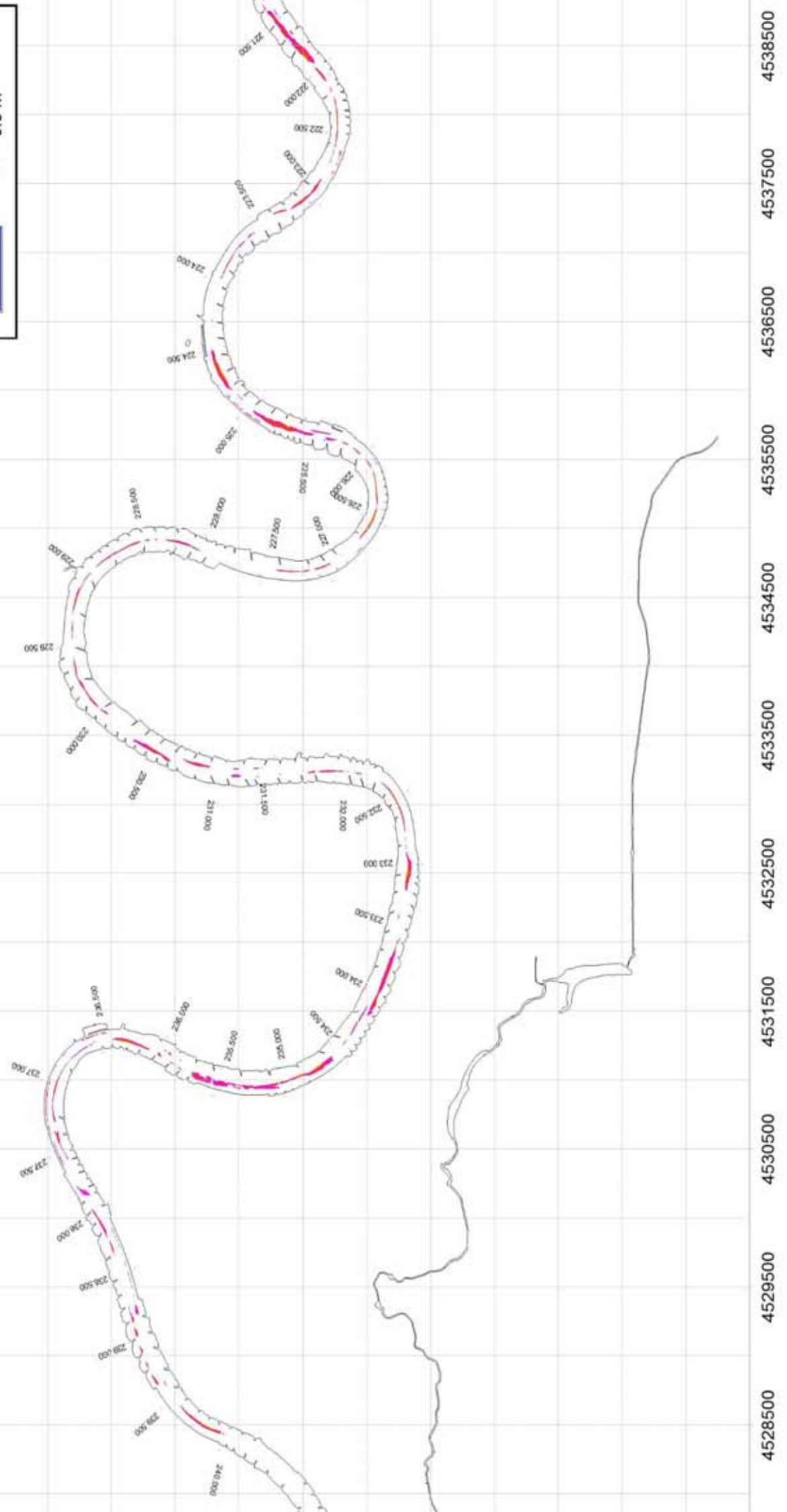


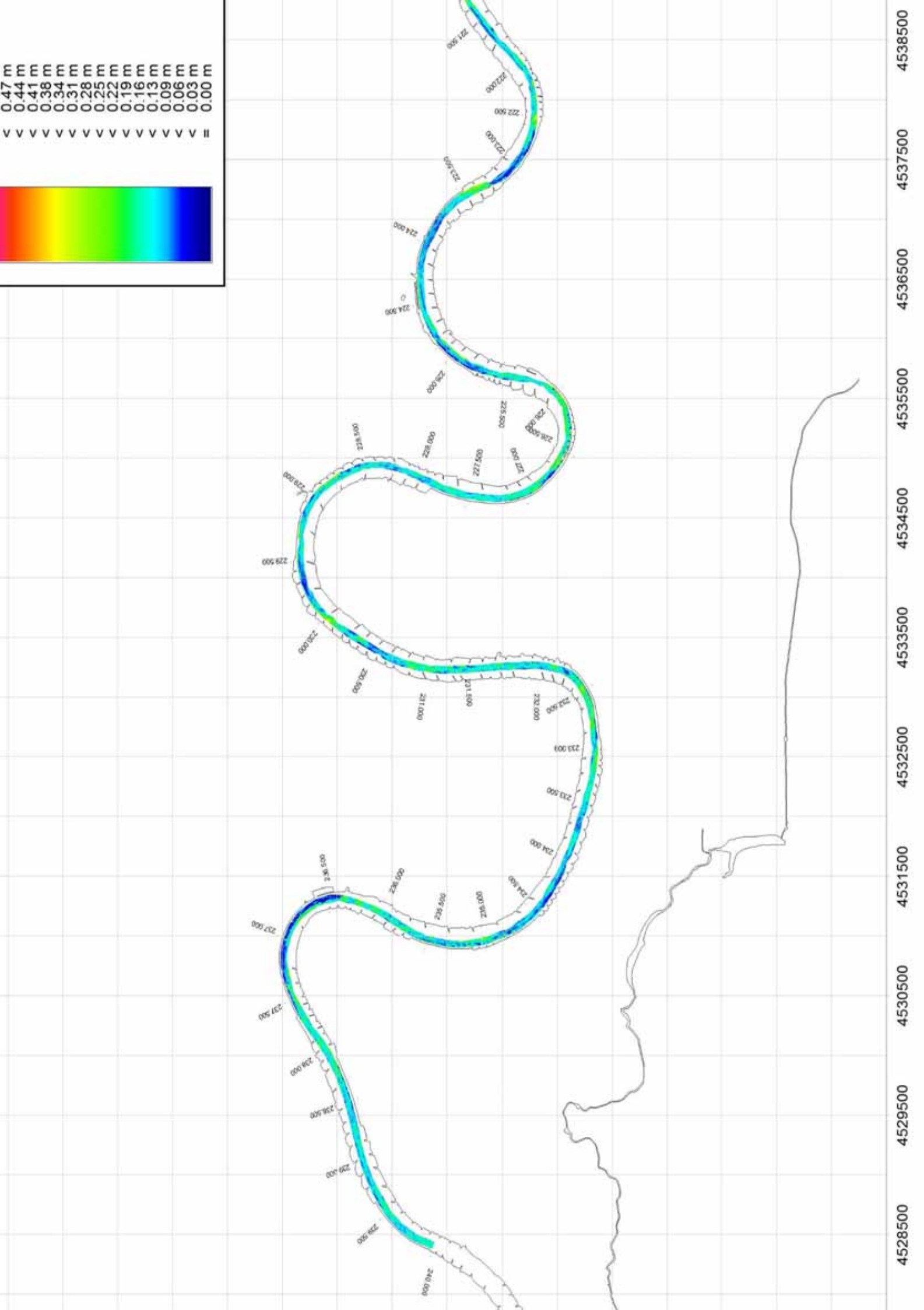


Wassertiefe u. GIW



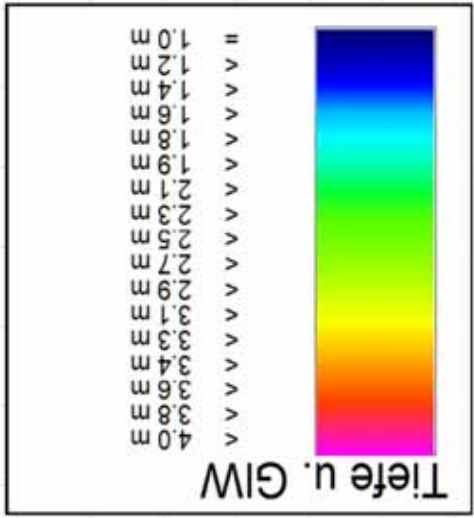
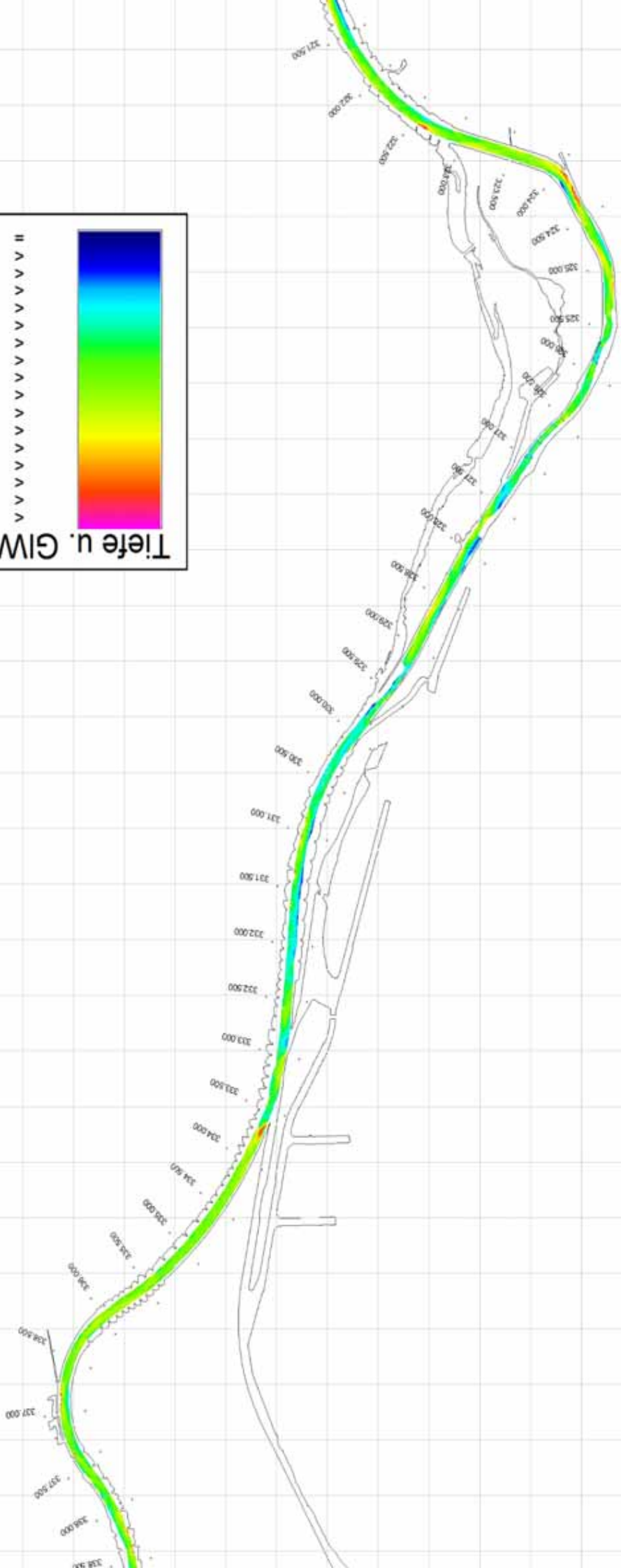
1.6 m
1.5 m
1.4 m
1.3 m
1.2 m
1.1 m
1.0 m
0.9 m
0.8 m
0.7 m
0.6 m
0.5 m
0.4 m
0.3 m
0.2 m
0.1 m
0.0 m



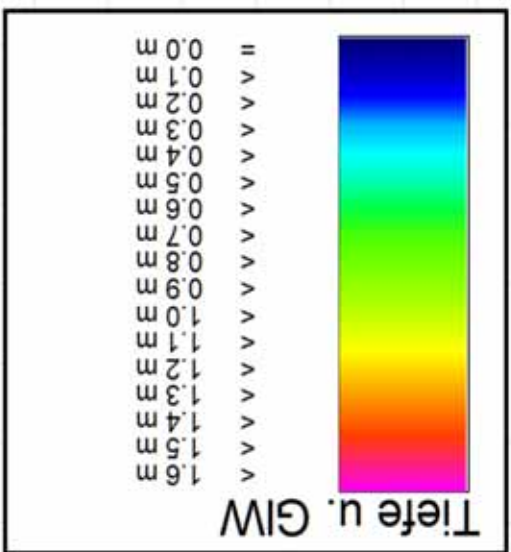
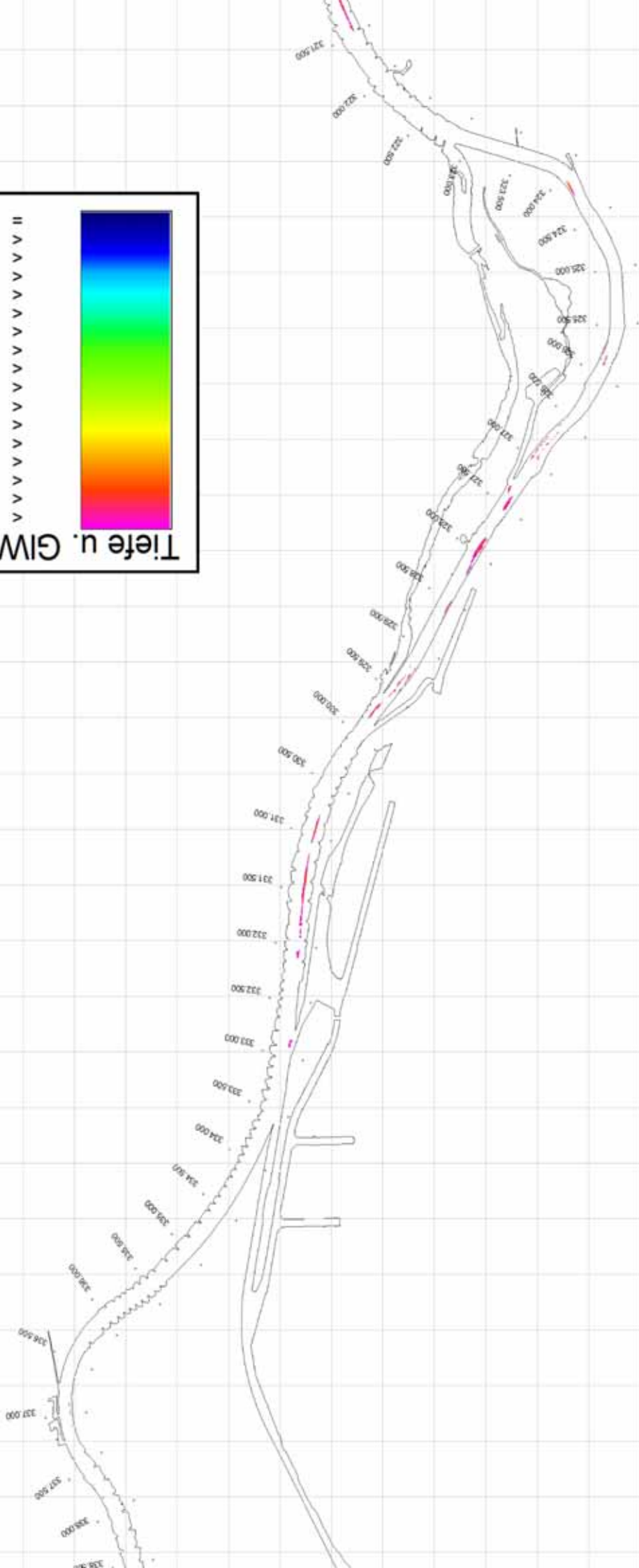


Hochwert [m]

5774500
5775000
5775500
5776000
5776500
5777000
5777500
5778000
5778500
5779000
5779500
5780000
5780500
5781000
5781500
5782000
5782500
5783000
5783500
5784000
5784500
5785000
5785500
5786000
5786500
5787000
5787500
5788000

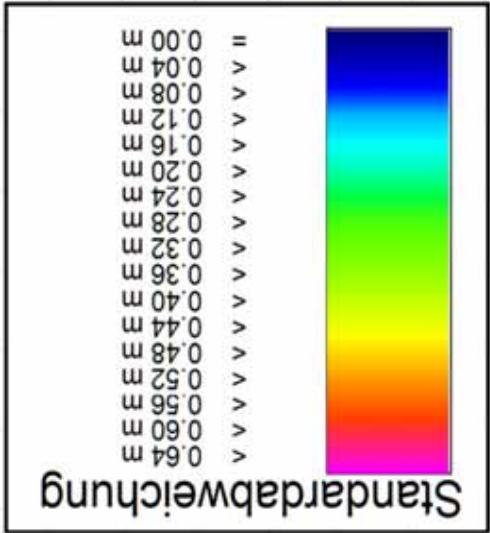
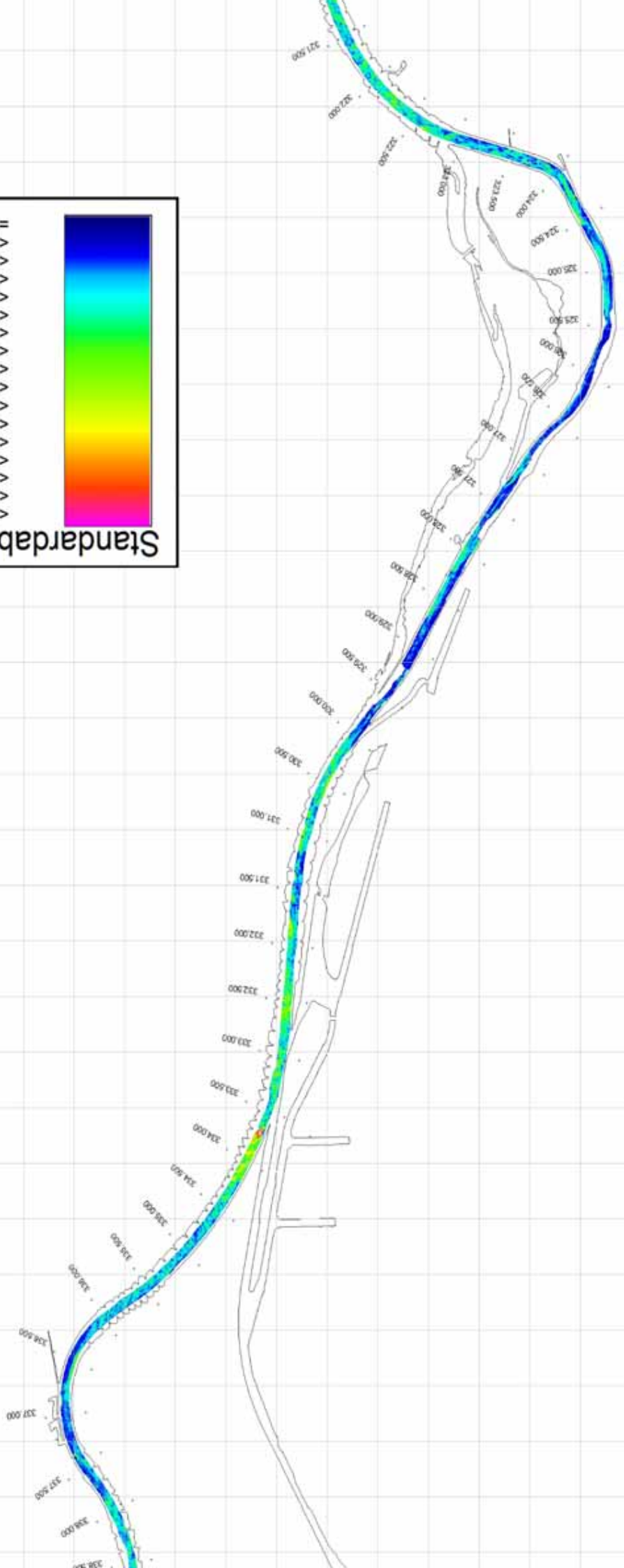


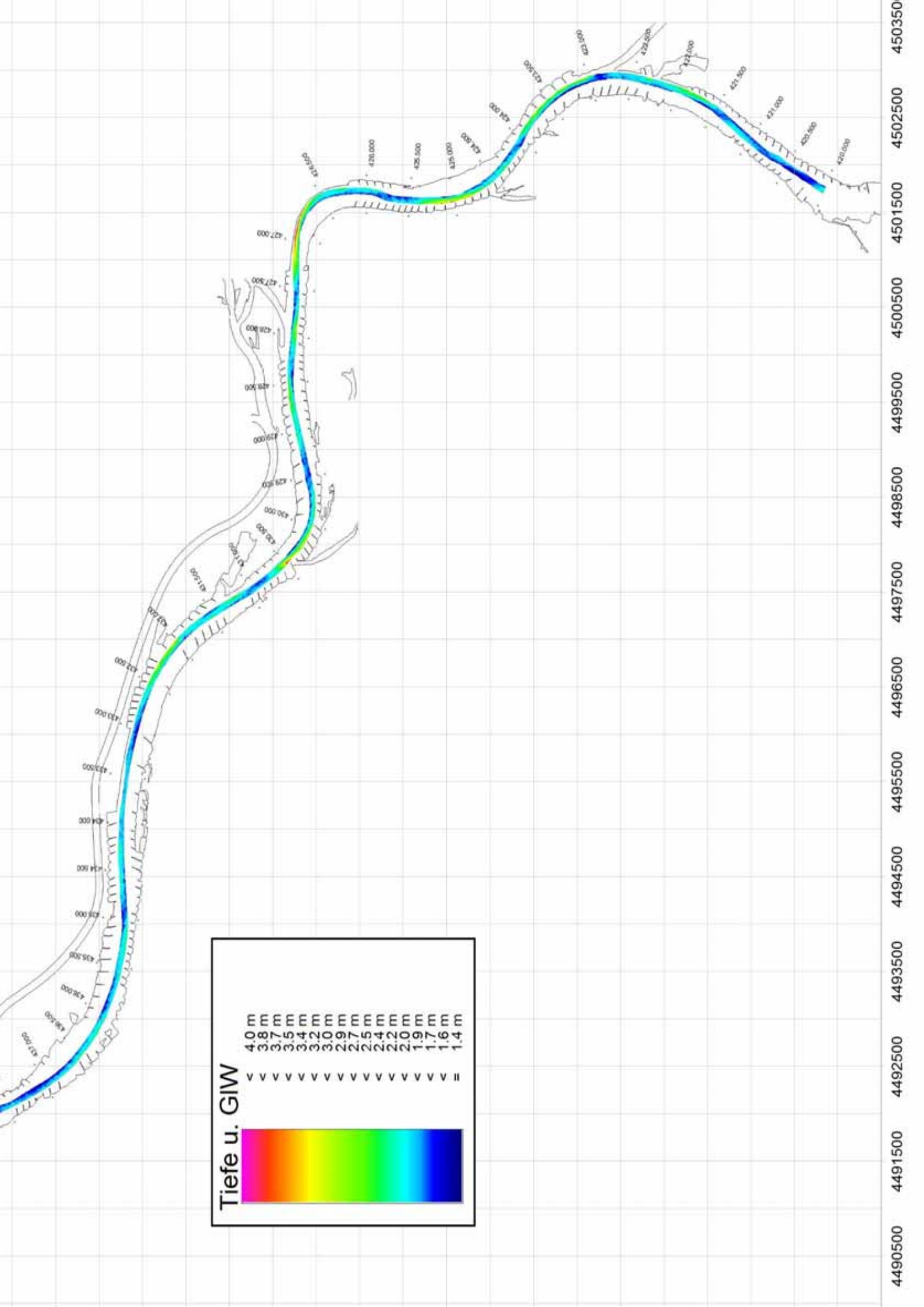
5774500 5775000 5775500 5776000 5776500 5777000 5777500 5778000 5778500 5779000 5779500 5780000 5780500 5781000 5781500 5782000 5782500 5783000 5783500 5784000 5784500 5785000 5785500 5786000 5786500 5787000 5787500 5788000

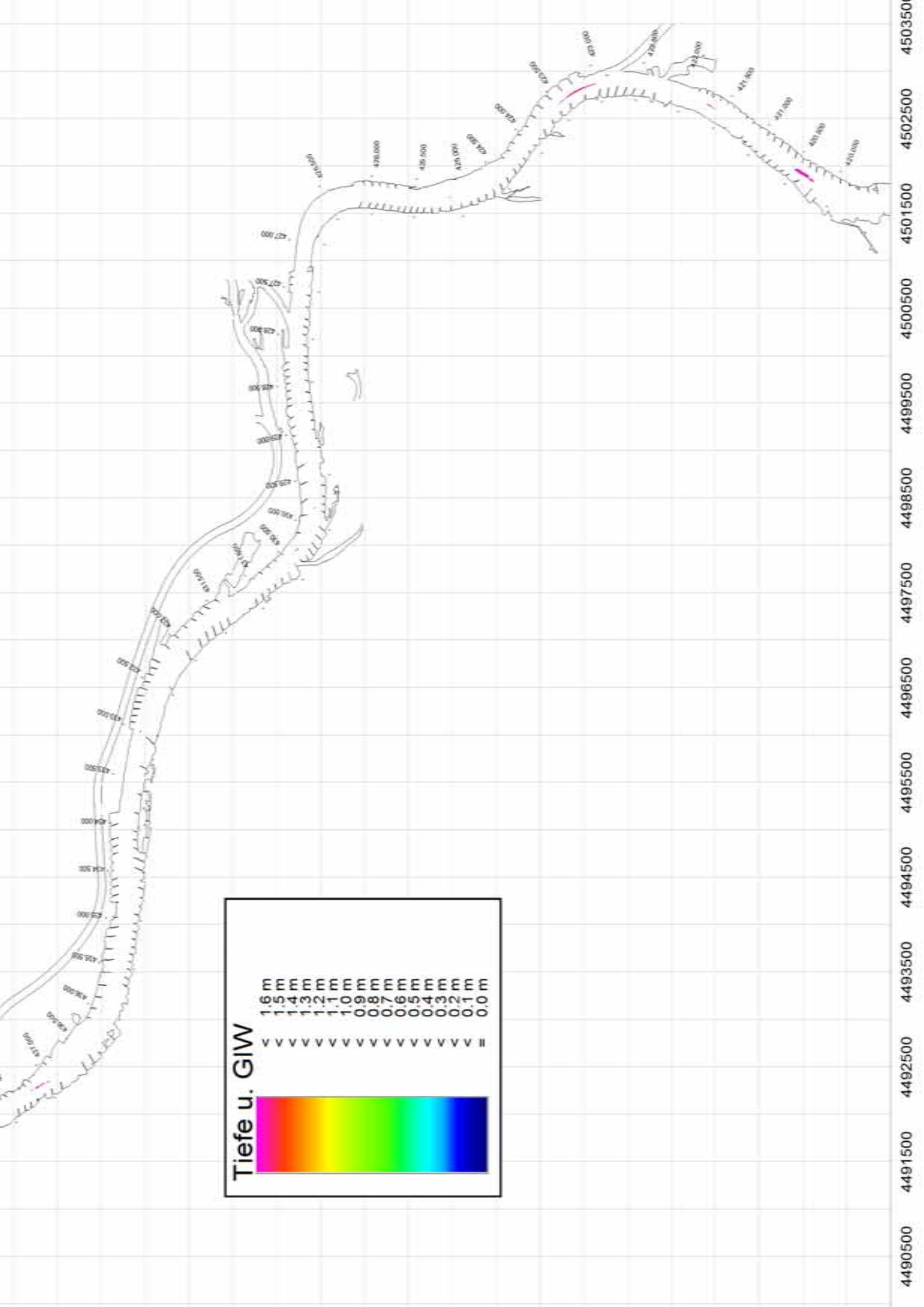


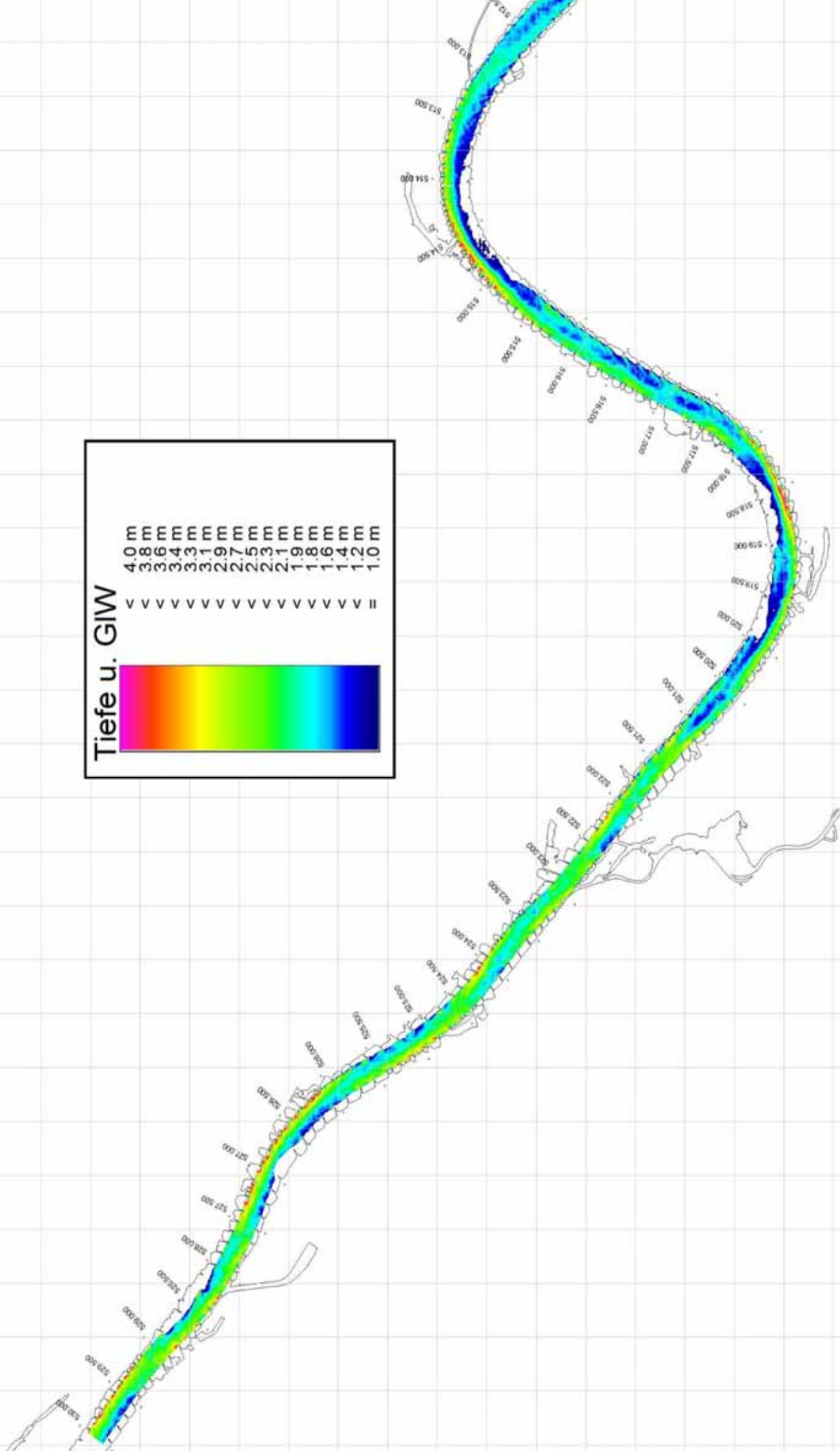
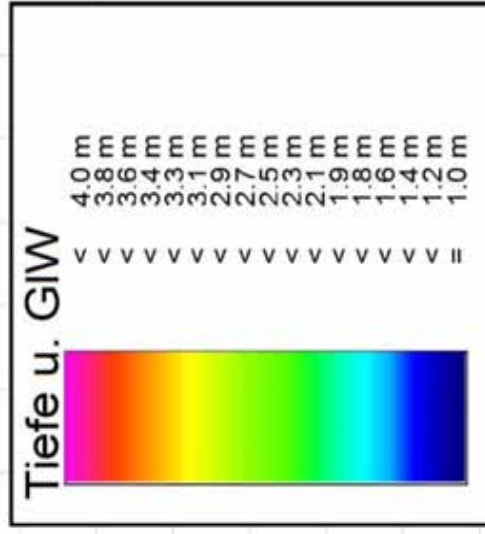
Hochwert [m]

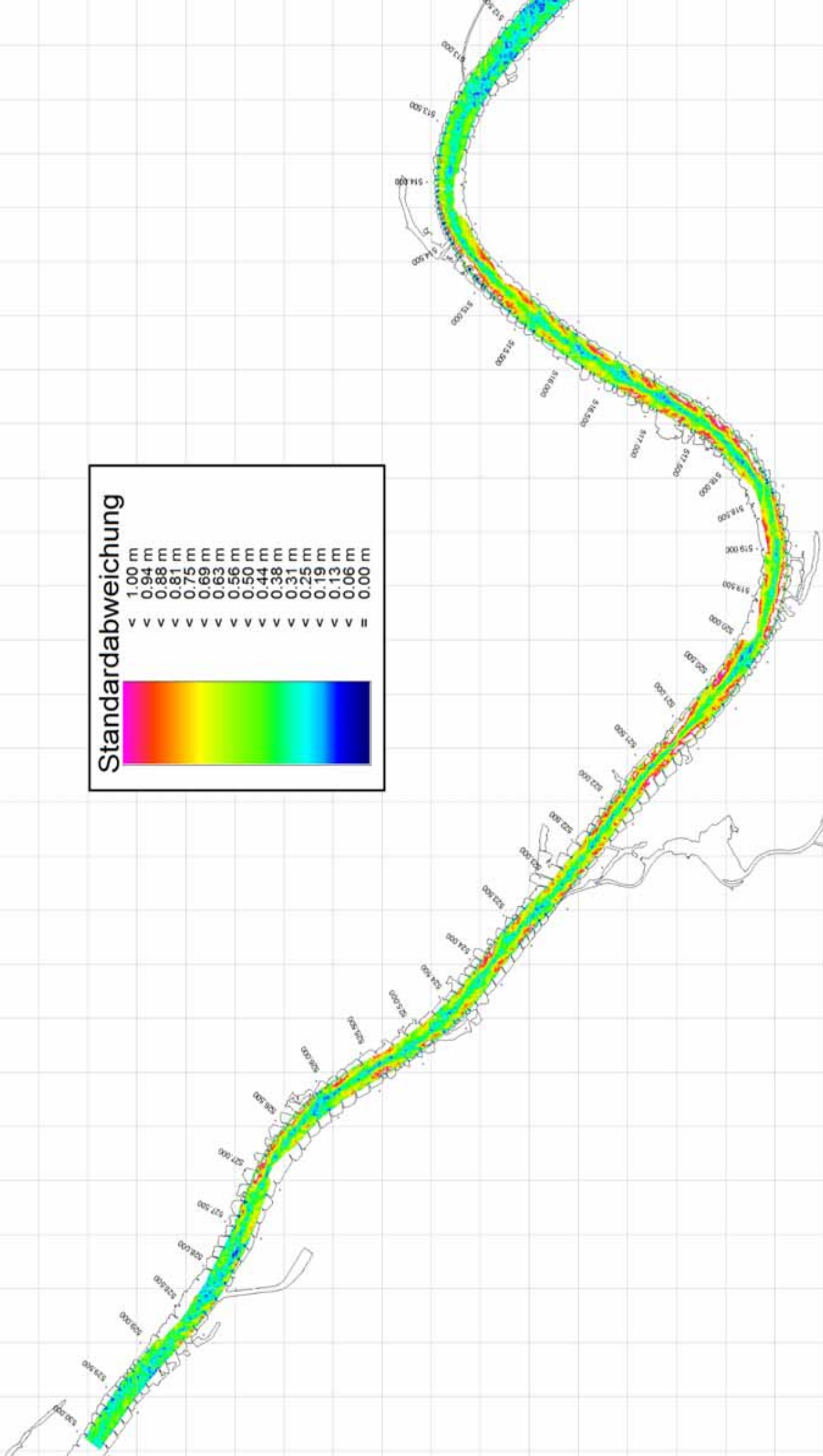
5774500
5775000
5775500
5776000
5776500
5777000
5777500
5778000
5778500
5779000
5779500
5780000
5780500
5781000
5781500
5782000
5782500
5783000
5783500
5784000
5784500
5785000
5785500
5786000
5786500
5787000
5787500
5788000











444

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass die Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel angefertigt wurde.

Freiburg, 24. Februar 2017

Christian Bernhart