

## **Analyse des Einflusses von Uferverbauungen auf die Wellenverhältnisse am Bodenseeufer**

Auftraggeber: Kanton Thurgau  
Amt für Umwelt  
CH-8510 Frauenfeld

Auftragsdatum: 24.01.2020

Auftragsnummer: A757


Berichtsnummer: A757-1

Bearbeitung: Dr.-Ing. Ulrich Lang  
Dipl.-Ing. Stefan Mirbach

Stuttgart, 22.07.2020



Dr. Ulrich Lang



Stefan Mirbach

**INHALT**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	II
1 Einleitung.....	1
2 Modellaufbau .....	2
2.1 Implementierung der Uferverbauung .....	2
2.2 Simulationszeiträume .....	4
3 Modellergebnisse .....	5
3.1 Prinzipmodell.....	5
3.2 Modellrechnungen Bodensee .....	7
4 Zusammenfassung .....	25
LITERATURVERZEICHNIS.....	27

**ABBILDUNGSVERZEICHNIS**

Abbildung 2.1: Uferbereiche mit Verbauungen der Stufen 4 und 5 nach IGKB (2009).....	2
Abbildung 2.2: Detailansicht der im Modell implementierten Uferverbauung bei Friedrichshafen.....	3
Abbildung 2.3: Ausgewählte Simulationszeiträume (grau hinterlegt) mit Windgeschwindigkeiten bei Konstanz in den Jahren 2015 bis 2017 (Quelle Winddaten: Hans-Ertel-Zentrum für Wetterforschung).....	4
Abbildung 3.1: Berechnete signifikante Wellenhöhen im Prinzipmodell mit reflektierendem Uferabschnitt; Draufsicht auf einen horizontalen Ausschnitt des Sees am östlichen Ufer; gestrichelte Linie stellt die in Abbildung 3.2 verwendete Schnittführung dar .....	5
Abbildung 3.2: Berechnete signifikante Wellenhöhen im Prinzipmodell mit und ohne reflektierendem Uferabschnitt entlang eines Längsschnitts (Lage siehe Abbildung 3.1) .....	6
Abbildung 3.3: Mit dem Wellenpropagationsmodell berechnete Wasserspiegelauslenkungen durch das Wellenfeld mit und ohne Uferreflektion zu einem Zeitpunkt; das Ufer befindet sich bei $x = 200$ m.....	7
Abbildung 3.4: Mit dem Wellenpropagationsmodell berechnete signifikante Wellenhöhe mit und ohne Uferreflektion; das Ufer befindet sich bei $x = 200$ m.....	7
Abbildung 3.5: Maximalwerte der berechneten signifikanten Wellenhöhe auf dem Bodensee in den Jahren 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung .....	8
Abbildung 3.6: Differenz der Maximalwerte der berechneten signifikanten Wellenhöhe auf dem Bodensee in den Jahren 2015-2017 mit und ohne Einfluss der Uferverbauung .....	8
Abbildung 3.7: Maximalwerte der berechneten signifikanten Wellenhöhe auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN) .....	10
Abbildung 3.8: Differenz der Maximalwerte der berechneten signifikanten Wellenhöhe auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit und ohne Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN) .....	11

Abbildung 3.9: Maximalwerte der berechneten Wellenlänge auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN).....	12
Abbildung 3.10: Differenz der Maximalwerte der berechneten Wellenlänge auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit und ohne Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN) .....	13
Abbildung 3.11: Maximalwerte der berechneten Wellenperiode auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN) .....	14
Abbildung 3.12: Differenz der Maximalwerte der berechneten Wellenperiode auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit und ohne Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN) .....	15
Abbildung 3.13: Maximalwerte der berechneten Wellenperiode auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN) .....	16
Abbildung 3.14: Differenz der Maximalwerte der berechneten Orbitalgeschwindigkeit auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit und ohne Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN).....	17
Abbildung 3.15: Anteil der Zeiträume in den Jahren 2015-2017, in denen die sohlnahe, maximale Orbitalgeschwindigkeit den angenommenen Grenzwert für Resuspension von 8 cm/s überschreitet mit Berücksichtigung des Einfluss der Uferverbauung (oben) sowie Differenz der maximalen Orbitalgeschwindigkeiten mit und ohne Einfluss der Uferverbauung .....	18
Abbildung 3.16: Quantile der berechneten (a) signifikanten Wellenhöhe, (b) Wellenlänge, (c) Wellenperiode und (d) maximalen, sohlnahen Orbitalgeschwindigkeit auf der 1 m-Tiefenlinie im Zeitraum 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung .....	19
Abbildung 3.17: Differenzen der Quantile der berechneten (a) signifikanten Wellenhöhe, (b) Wellenlänge, (c) Wellenperiode und (d) maximalen, sohlnahen Orbitalgeschwindigkeit auf der 1 m-	

---

Tiefenlinie im Zeitraum 2015-2017 mit und ohne Einfluss der Uferverbauung .....	20
Abbildung 3.18: 90%- und 95%-Quantile der berechneten (a) signifikanten Wellenhöhe, (b) Wellenlänge, (c) Wellenperiode und (d) maximalen, sohnahen Orbitalgeschwindigkeit auf der 1 m-Tiefenlinie im Zeitraum 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung .....	21
Abbildung 3.19: Differenzen der 90%- und 95%-Quantile der berechneten (a) signifikanten Wellenhöhe, (b) Wellenlänge, (c) Wellenperiode und (d) maximalen, sohnahen Orbitalgeschwindigkeit auf der 1 m-Tiefenlinie im Zeitraum 2015-2017 mit und ohne Einfluss der Uferverbauung .....	22
Abbildung 3.20: Berechnete signifikante Wellenhöhe (linke Spalte) und maximale, sohnahne Orbitalgeschwindigkeit (rechte Spalte) bei Rorschach während des Westwindereignisses vom 31. März 2015; oben: Modellergebnisse ohne Einfluss der Uferverbauung; unten: Modellergebnisse mit Einfluss der Uferverbauung .....	23
Abbildung 3.21: Berechnete signifikante Wellenhöhe (linke Spalte) und maximale, sohnahne Orbitalgeschwindigkeit (rechte Spalte) bei Friedrichshafen während des Westwindereignisses vom 31. März 2015; oben: Modellergebnisse ohne Einfluss der Uferverbauung; unten: Modellergebnisse mit Einfluss der Uferverbauung .....	24

## 1 Einleitung

Mit dem in BodenseeOnline verwendeten Wellenmodell SWAN wurden bereits die Wellenverhältnisse auf dem Bodensee in den Jahren 2015, 2016 und 2017 nachgebildet und darauf basierend die Wellenverhältnisse räumlich und zeitlich differenziert quantifiziert und analysiert. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf Auswertungen in der Ufer- und Flachwasserzonen gelegt und unter anderem aufgezeigt, welchen Einfluss die verschiedenen Ufertypen, z. B. Steilufer oder Flachwasserzone, auf das Wellenfeld ausüben. Bei Uferabschnitten mit ausgeprägter Flachwasserzone dissipieren hohe Wellen fast vollständig vor dem Erreichen des Ufers, während bei entsprechend steileren Ufern die gesamte Wellenenergie am Ufer ankommt. Dies wirft die Frage auf, welchen Einfluss eine Reflektion der Wellen durch Uferverbauungen auf die Wellenhöhen und Erosionsprozesse in der Uferzone ausübt. In den bisherigen, seeweiten Modellberechnungen wurden diese Prozesse nicht berücksichtigt und eine vollständige Dissipation der Wellenenergie am Ufer angenommen. Mit Hilfe eines Reflektionskoeffizienten, der je nach Typ der Uferverbauung variiert, kann aber der Einfluss der Uferverbauung auf das vorgelagerte Wellenfeld im Modell berücksichtigt werden. Die Ergebnisse dieses Modells sind im vorliegenden Bericht dokumentiert.

Um den Einfluss des Reflektionskoeffizienten im Modell aufzuzeigen, wird zunächst ein Prinzipmodell aufgebaut. Die Ergebnisse daraus werden zudem mit einem Wellenpropagationsmodell, mit dem einzelne Wellenzüge berechnet werden können, nachgerechnet und validiert. Auf Grundlage der Daten der Uferkartierung und -bewertung der IGKB (IGKB 2009, Stand der Daten: 2017) wird im bestehenden Wellenmodell des Bodensees die Uferverbauung berücksichtigt. Mit diesem Modell werden anschließend die Zeiträume mit Windereignissen im bisher betrachteten Zeitraum der Jahre 2015 bis 2017 berechnet und die Ergebnisse mit den bereits vorliegenden Ergebnissen der Modellrechnungen ohne Einfluss der Uferverbauung verglichen.

## 2 Modellaufbau

Für die Modellierung der Wellenverhältnisse auf dem Bodensee wird das numerische Wellenmodell SWAN verwendet, das von der TU Delft entwickelt wird (SWAN Group 2019a, 2019b). Hierfür wird die Modellkonfiguration des im Vorgängerprojekt aufgebauten Modells größtenteils übernommen. Die Wind- und Wasserstandsrandbedingungen bleiben unverändert. Im Folgenden werden die Änderungen, die durch die Berücksichtigung der Uferverbauung entstehen, beschrieben. Für eine Beschreibung des allgemeinen Modellaufbaus wird auf den Vorgängerbericht verwiesen.

### 2.1 Implementierung der Uferverbauung

Im Aktionsprogramm Bodensee mit Schwerpunkt Ufer- und Flachwasserzone der IGKB wurde der Bodensee in Abschnitten von jeweils 50 Metern anhand von verschiedenen Einzelkriterien erfasst und bewertet (IGKB 2009, Aktualisierung der Daten im Jahr 2017). Als eines dieser Kriterien wurden die Uferverbauungen rund um den See erfasst und mit Hilfe einer fünfstufigen Skala bewertet und eingeordnet. Einen Einfluss auf die Wellenreflektion ist bei den Stufen 4 und 5 zu erwarten. In Stufe 4 fallen Blockböschungen und niedrige Mauern, in Stufe 5 vertikale, größere Mauern und Wände. Abbildung 2.1 zeigt die Uferbereiche mit diesen beiden Klassifizierungen rund um den See. Bei den Stufen 1 bis 3 wird davon ausgegangen, dass diese flachen Ufer ohne Reflexionsmöglichkeit für Wellen sind.

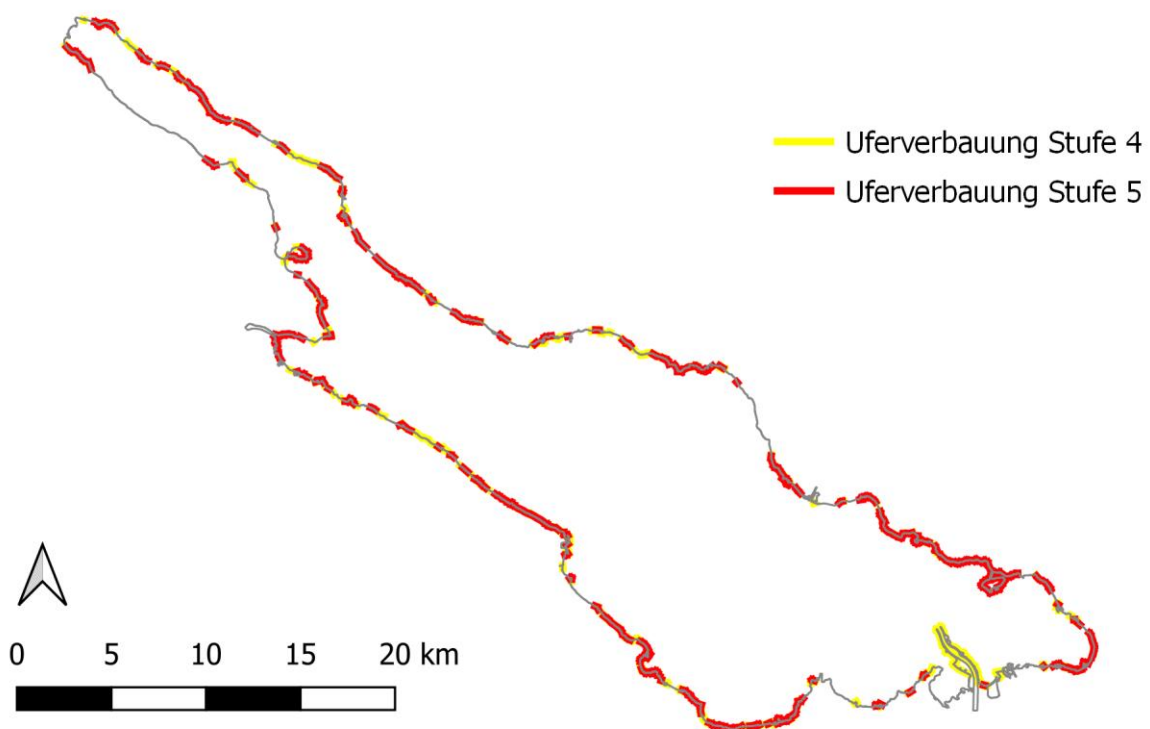


Abbildung 2.1: Uferbereiche mit Verbauungen der Stufen 4 und 5 nach IGKB (2009)



Die in Abbildung 2.1 dargestellte Klassifizierung wurde ins Wellenmodell übertragen. Dort gibt es die Möglichkeit, Hindernisse zu platzieren, die mit einem Reflektionskoeffizienten versehen werden können. Diese Hindernisse liegen nicht direkt auf den Modellgitterlinien, sondern müssen zwischen Gitterpunkten platziert werden. Abbildung 2.2 zeigt exemplarisch die im Modell implementierten Abschnitte mit Uferverbauung im Stadtgebiet Friedrichshafen. Hafenbecken und ähnliche Strukturen, die durch Mauern vor Welleneinfluss geschützt sind, wurden im Modell nicht berücksichtigt. Diese Strukturen waren teilweise im Vorgängermodell vorhanden, daher unterscheidet sich das Modellnetz des aktuellen Modells vom Vorgänger geringfügig.

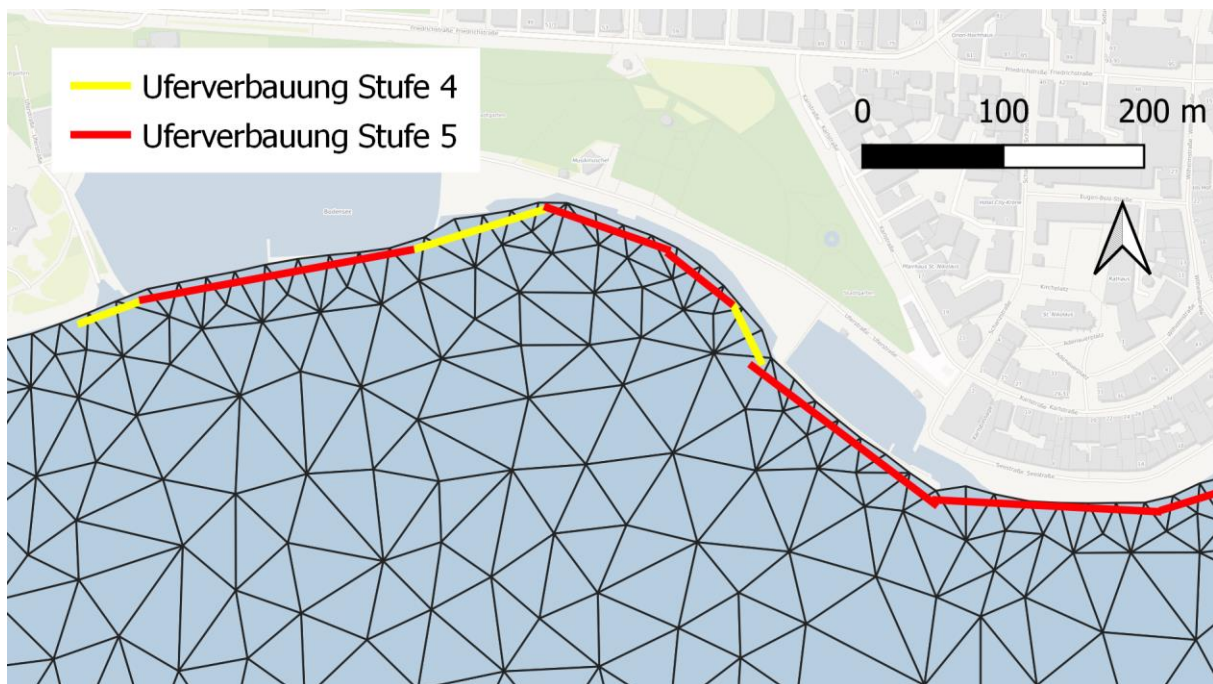


Abbildung 2.2: Detailansicht der im Modell implementierten Uferverbauung bei Friedrichshafen

Der Anteil der am Ufer reflektierten Wellen hängt neben der Uferverbauung auch von der Wassertiefe sowie der Charakteristik des Wellenfelds ab (Muttray et al. 2006). Höhere Wellenperiodendauern und nicht-brechende Wellen führen zu einer höheren Reflektion. Für Blockschüttungen wird ein Wertebereich zwischen 0,2 und 0,6 angegeben. Für die vorliegenden Modellrechnungen wurde für die Uferverbauungen der Stufe 4 daher ein konstanter Wert von 0,5 angesetzt. Für vertikale Wände und Mauern werden in der Literatur Reflektionskoeffizienten zwischen 0,9 und 1,0 angegeben (z. B. Negm und Nassar 2016). Im Modell wurde für die Uferverbauungen der Stufe 5 ein Wert von 0,9 verwendet.



## 2.2 Simulationszeiträume

Da insbesondere die windstarken Zeiträume bei der Untersuchung des Einflusses der Uferverbauung auf das Wellenfeld von Interesse sind, wurden für die Modellrechnungen nur diese Zeiträume ausgewählt. Damit kann auch die Berechnungsdauer von einigen Monaten auf wenige Wochen verringert werden. Abbildung 2.3 zeigt grau hinterlegt die Berechnungszeiträume in den Jahren 2015 bis 2017 zusammen mit den Windverhältnissen bei Konstanz.

Für die Auswertungen der Modellergebnisse, die den gesamten Zeitraum betrachten, wurden in den nicht neu berechneten Zeiträumen die Ergebnisse der bestehenden Modellergebnisse ohne Einfluss der Uferverbauung verwendet.

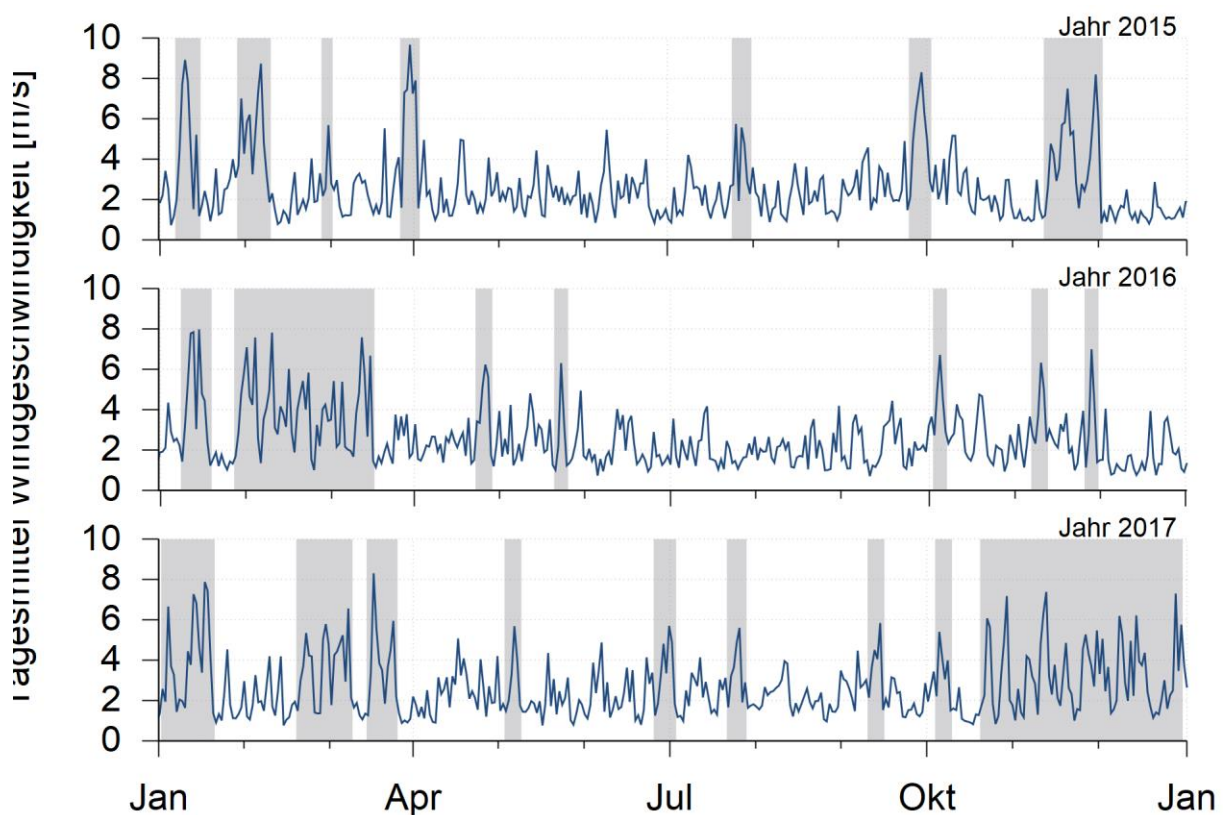


Abbildung 2.3: Ausgewählte Simulationszeiträume (grau hinterlegt) mit Windgeschwindigkeiten bei Konstanz in den Jahren 2015 bis 2017 (Quelle Winddaten: Hans-Ertel-Zentrum für Wetterforschung)

### 3 Modellergebnisse

#### 3.1 Prinzipmodell

Zunächst soll an einem einfachen Prinzipmodell die Wirkung der Reflektion im Modell aufgezeigt werden. Hierzu wurde ein Modell eines rechteckigen Sees mit einer West-Ost-Ausdehnung von 40 km, einer Süd-Nord-Ausdehnung von 10 km sowie einer Wassertiefe von 20 m aufgebaut. Am östlichen Rand wurde eine 200 m breite Flachwasserzone mit einer Wassertiefe von 2 m definiert. Der Übergang zur Wassertiefe im Tiefenwasser verläuft linear. Als Randbedingung wurde ein Westwindereignis mit einer Windstärke von konstant 5 m/s verwendet. Am Ostufer wurde ein 250 m langer Uferabschnitt mit einem Reflektionskoeffizienten von 1 (vollständige Reflektion) angesetzt.

Abbildung 3.1 zeigt die berechneten signifikanten Wellenhöhen in einem Ausschnitt des Sees am östlichen Ufer mit dem reflektierenden Uferabschnitt. Nördlich und südlich davon sind die vom Ufer unbeeinflussten Wellenhöhen zu sehen. Dort nimmt aufgrund der Dissipation der Wellenenergie in der Flachwasserzone 200 m vor dem Ufer die Wellenhöhe von ca. 28 cm auf ca. 25 cm leicht ab. Im Bereich des reflektierenden Ufers hingegen nimmt sie signifikant zu. Dort liegen die Maximalwerte bei ca. 33 cm, was einer Zunahme um ca. 30 % im Vergleich zu den Wellenhöhen bei nicht-reflektierendem Ufer entspricht. Abbildung 3.2 zeigt nochmals die signifikanten Wellenhöhen mit und ohne Uferreflektion entlang der mit der gestrichelten Linie in Abbildung 3.1 angegebenen Schnittführung.

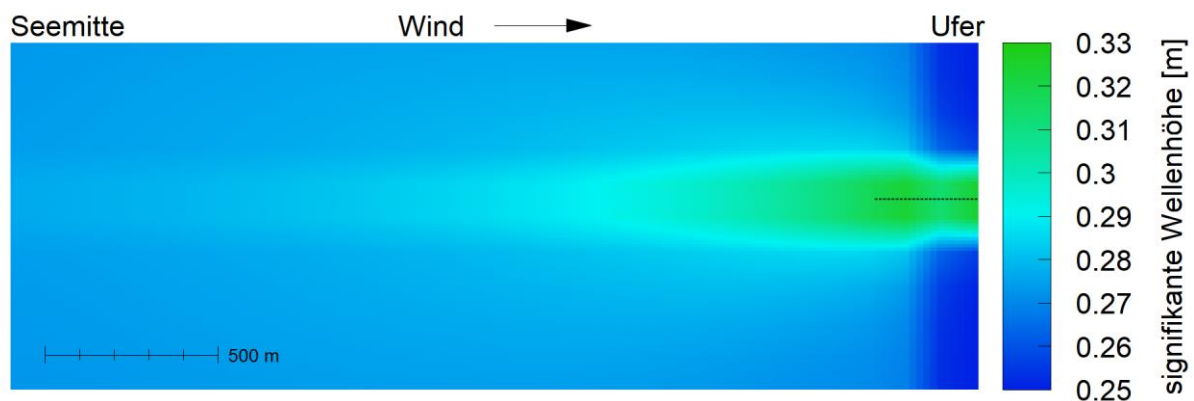


Abbildung 3.1: Berechnete signifikante Wellenhöhen im Prinzipmodell mit reflektierendem Uferabschnitt; Draufsicht auf einen horizontalen Ausschnitt des Sees am östlichen Ufer; gestrichelte Linie stellt die in Abbildung 3.2 verwendete Schnittführung dar

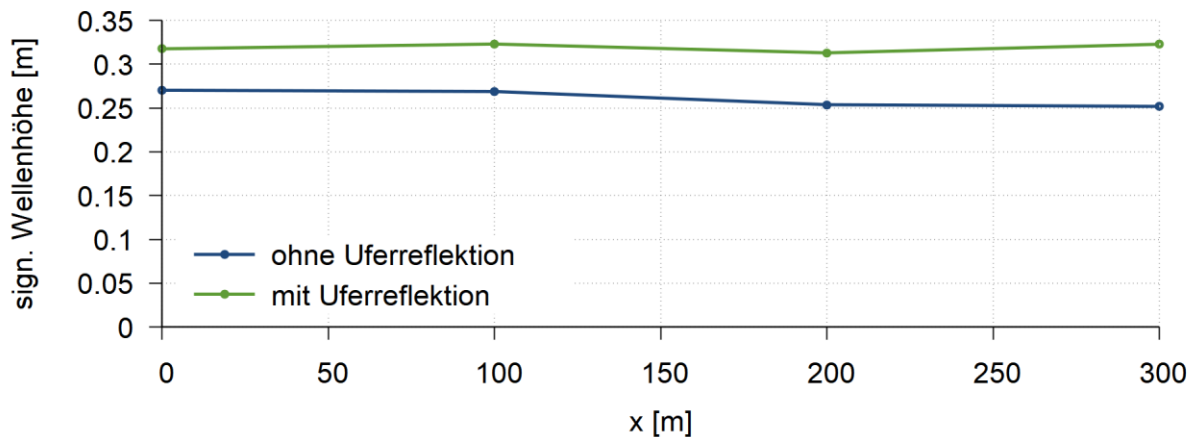


Abbildung 3.2: Berechnete signifikante Wellenhöhen im Prinzipmodell mit und ohne reflektierendem Uferabschnitt entlang eines Längsschnitts (Lage siehe Abbildung 3.1)

Um diese Berechnungsergebnisse zu plausibilisieren, wurden Vergleichsrechnungen mit einem Wellenpropagationsmodell durchgeführt, das die Ausbreitung einzelner Wellenzüge berechnen kann. Hierfür wurde das Modell SWASH verwendet, das wie auch das Wellenmodell SWAN von der TU Delft entwickelt wird (Zijlema et al. 2011). Es wurde ein 1D-Prinzipmodell aufgebaut, das nur den 200 m langen und 2 m tiefen Bereich der Flachwasserzone des oben beschriebenen SWAN-Prinzipmodells abbildet. Am westlichen, seeseitigen Rand wurde eine Wellenrandbedingung angesetzt, die ein realistisches Wellenspektrum mit denselben Charakteristika wie an dieser Position im SWAN-Modell generiert. Der östliche Modellrand wurde in zwei Modellvarianten mit und ohne Wellenreflektion definiert. Abbildung 3.3 zeigt eine Momentaufnahme der durch den berechneten Wellengang ausgelenkten Wasseroberfläche. Im Vergleich zum SWAN-Modell sind einzelne Wellenzüge mit unterschiedlichen Frequenzen und Amplituden sichtbar, die sich überlagern. Die Wellenhöhen mit Uferreflektion sind erkennbar höher als im Modelllauf ohne Uferreflektion. Um eine Vergleichbarkeit mit den SWAN-Ergebnissen zu ermöglichen, wurde aus den Wellenamplituden über einen dreistündigen Zeitraum die signifikante Wellenhöhe berechnet (Abbildung 3.4). Die Werte liegen in derselben Größenordnung wie die SWAN-Ergebnisse. Ohne Uferreflektion betragen die signifikanten Wellenhöhen in der ufernahen Hälfte des Modellgebiets zwischen 20 und 30 cm, mit Uferreflektion liegen sie ca. 20-30 % höher. Die vom SWAN-Prinzipmodell berechneten Wellenhöhen werden somit vom Wellenpropagationsmodell bestätigt.

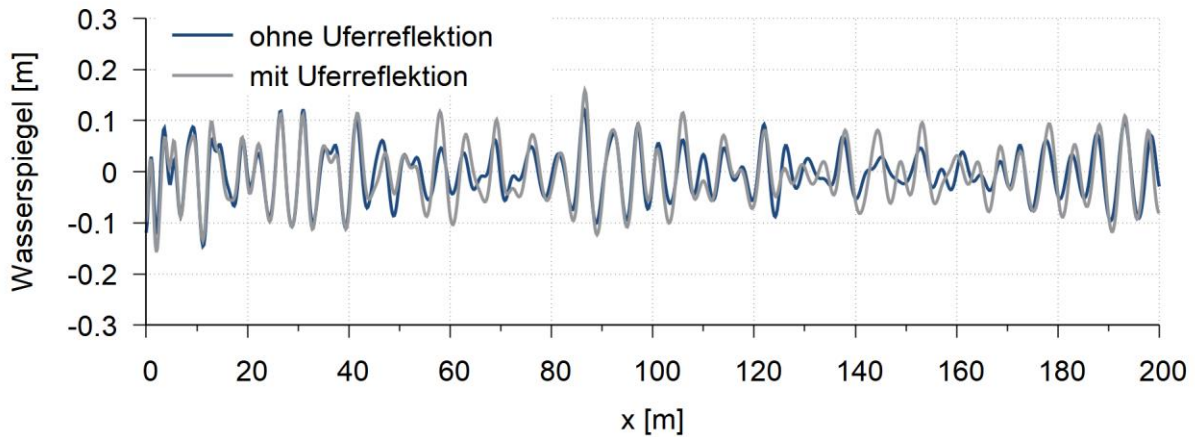


Abbildung 3.3: Mit dem Wellenpropagationsmodell berechnete Wasserspiegelauslenkungen durch das Wellenfeld mit und ohne Uferreflektion zu einem Zeitpunkt; das Ufer befindet sich bei  $x = 200$  m

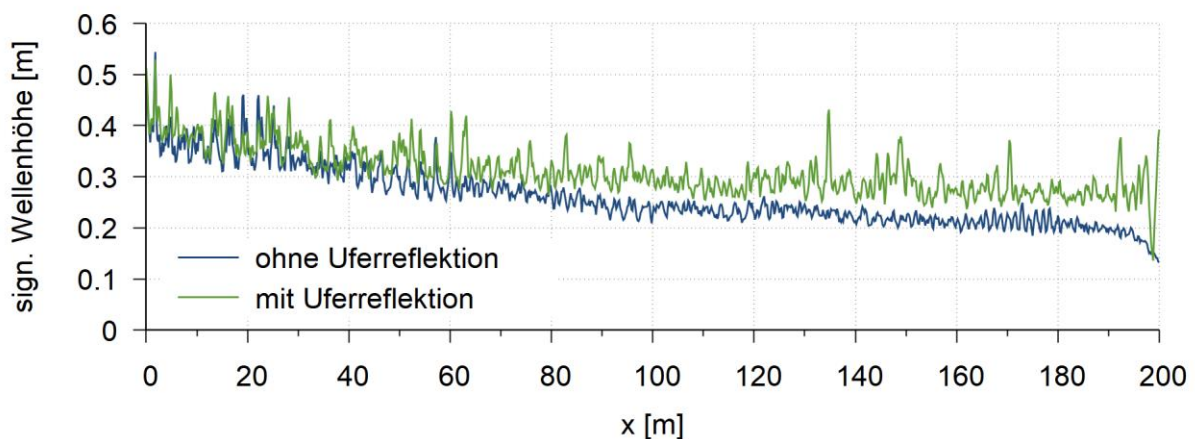


Abbildung 3.4: Mit dem Wellenpropagationsmodell berechnete signifikante Wellenhöhe mit und ohne Uferreflektion; das Ufer befindet sich bei  $x = 200$  m

### 3.2 Modellrechnungen Bodensee

Bei den folgenden Auswertungen der Modellrechnungen mit berücksichtigter Uferverbauung sollen in erster Linie die Unterschiede zu den Modellergebnissen aus dem Vorgängermodell ohne Uferverbauung aufgezeigt werden. Für eine umfassende Analyse der Wellenverhältnisse unabhängig vom Einfluss der Uferverbauung wird daher auf den Vorgängerbericht verwiesen.

Abbildung 3.5 zeigt die Maximalwerte der berechneten signifikanten Wellenhöhen mit Einfluss der Uferverbauung im Gesamtzeitraum 2015-2017. In Abbildung 3.6 sind die Differenzen zu den Maximalwerten ohne Ufer einfluss dargestellt. Signifikante Anstiege der Wellenhöhen korrelieren erwartungsgemäß mit den Uferabschnitten mit Verbauung. Dies betrifft insbesondere die Bereiche mit größeren Ortschaften, z. B. Überlingen, Meersburg, Friedrichshafen, Kressbronn, Lindau, Bregenz, Rorschach,

Romanshorn und Konstanz. Die größten Anstiege treten an Steilufern auf, da dort die auftretenden signifikanten Wellenhöhen aufgrund der fehlenden Dissipation relativ groß sind. Deutlichste Beispiele hierfür sind die Uferabschnitte bei Bregenz und Rorschach.

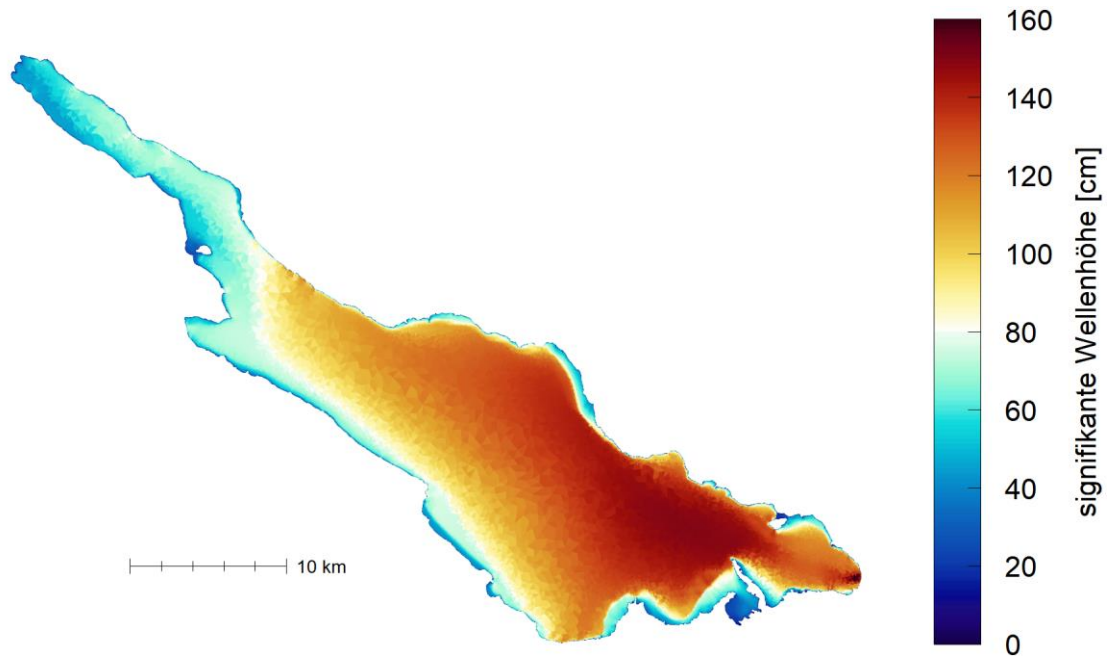


Abbildung 3.5: Maximalwerte der berechneten signifikanten Wellenhöhe auf dem Bodensee in den Jahren 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung

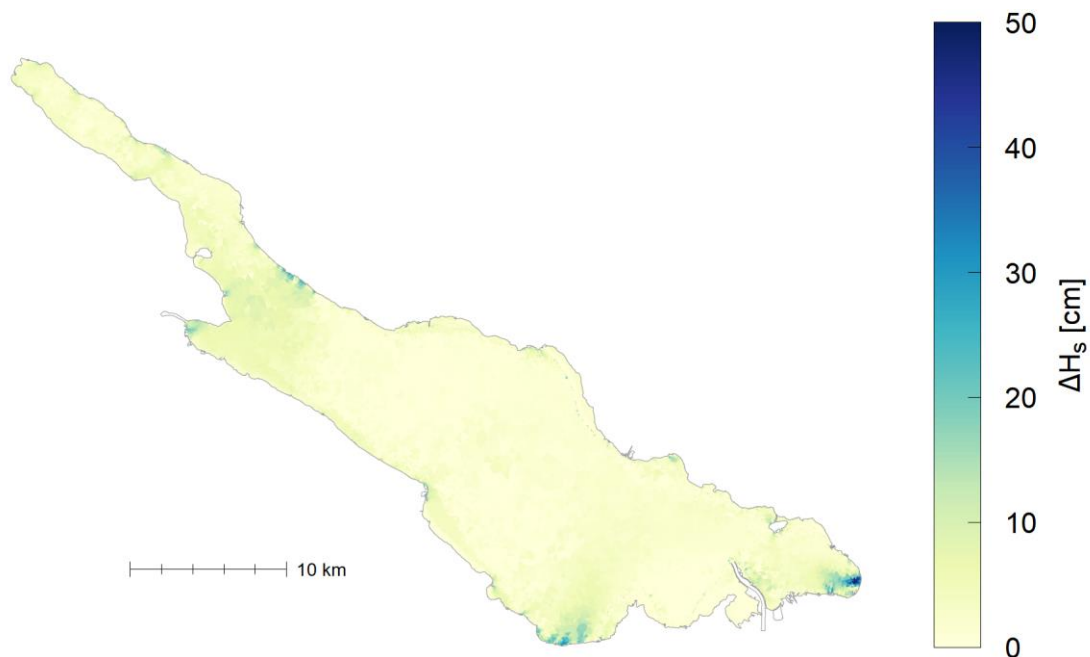


Abbildung 3.6: Differenz der Maximalwerte der berechneten signifikanten Wellenhöhe auf dem Bodensee in den Jahren 2015-2017 mit und ohne Einfluss der Uferverbauung

Abbildung 3.7 zeigt die maximal auftretenden signifikanten Wellenhöhen mit Einfluss der Uferverbauung auf den Tiefenlinien in 1 m, 2 m, 5 m und 10 m Wassertiefe bezüglich des mittleren Wasserspiegels von 395,21 m ü.NN. Abbildung 3.8 stellt die Differenzen dieser Wellenhöhen zu den Werten ohne Einfluss der Uferverbauung dar. Ein Anstieg der Wellenhöhen im Vergleich zu den Modellergebnissen ohne Ufererfluss ist insbesondere in den bereits oben genannten Uferabschnitten zu beobachten.

Im Vergleich zu den Tiefenlinien-Abbildungen im Vorgängerbericht wurden hier die Werte auf der Uferlinie (0 m-Tiefenlinie) nicht dargestellt, da diese wie in Kapitel 2.1 beschrieben durch die Implementierung der Uferverbauung im Modell beeinflusst werden und damit nicht vergleichbar sind mit den Ergebnissen des Vorgängermodells.



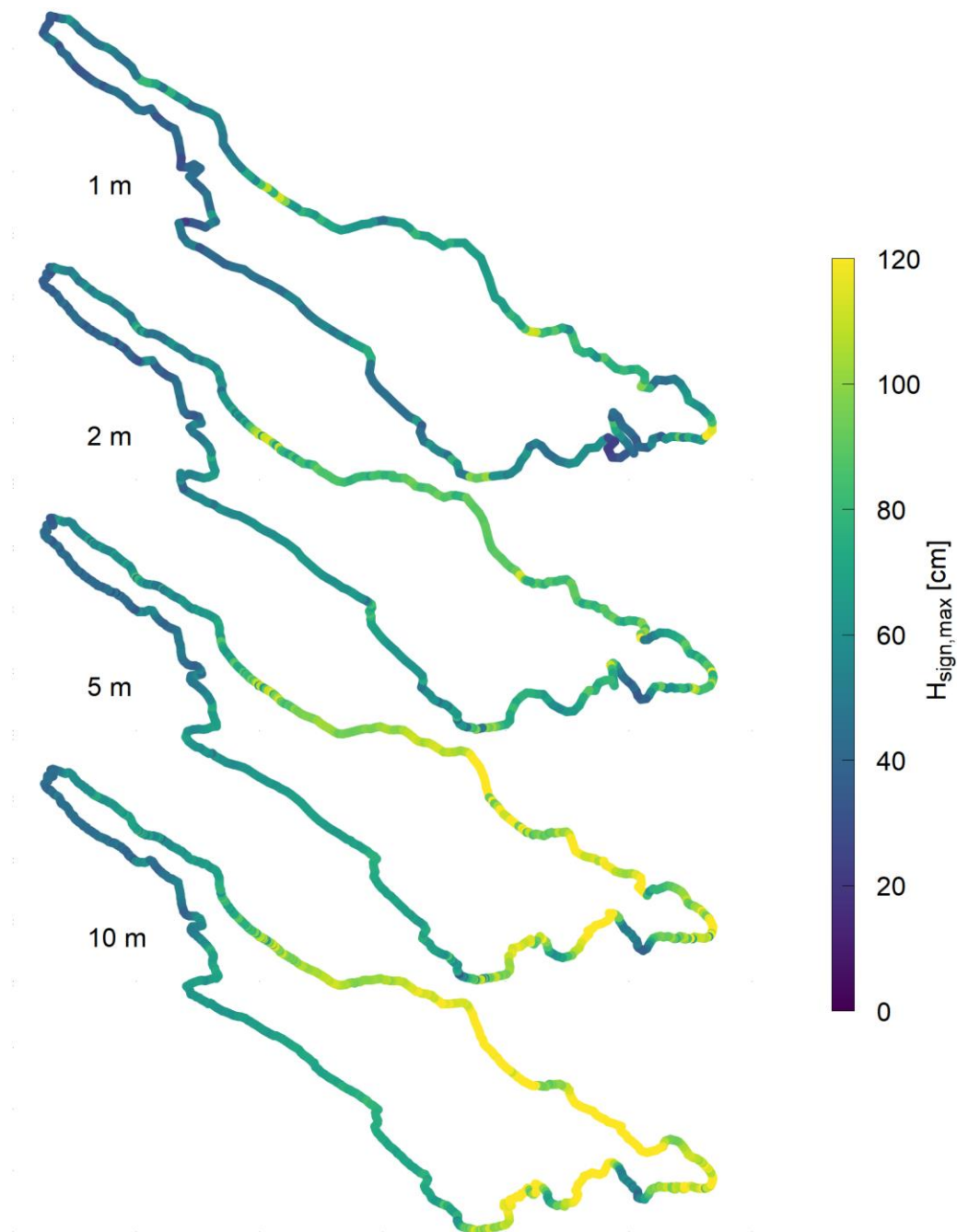


Abbildung 3.7: Maximalwerte der berechneten signifikanten Wellenhöhe auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN)



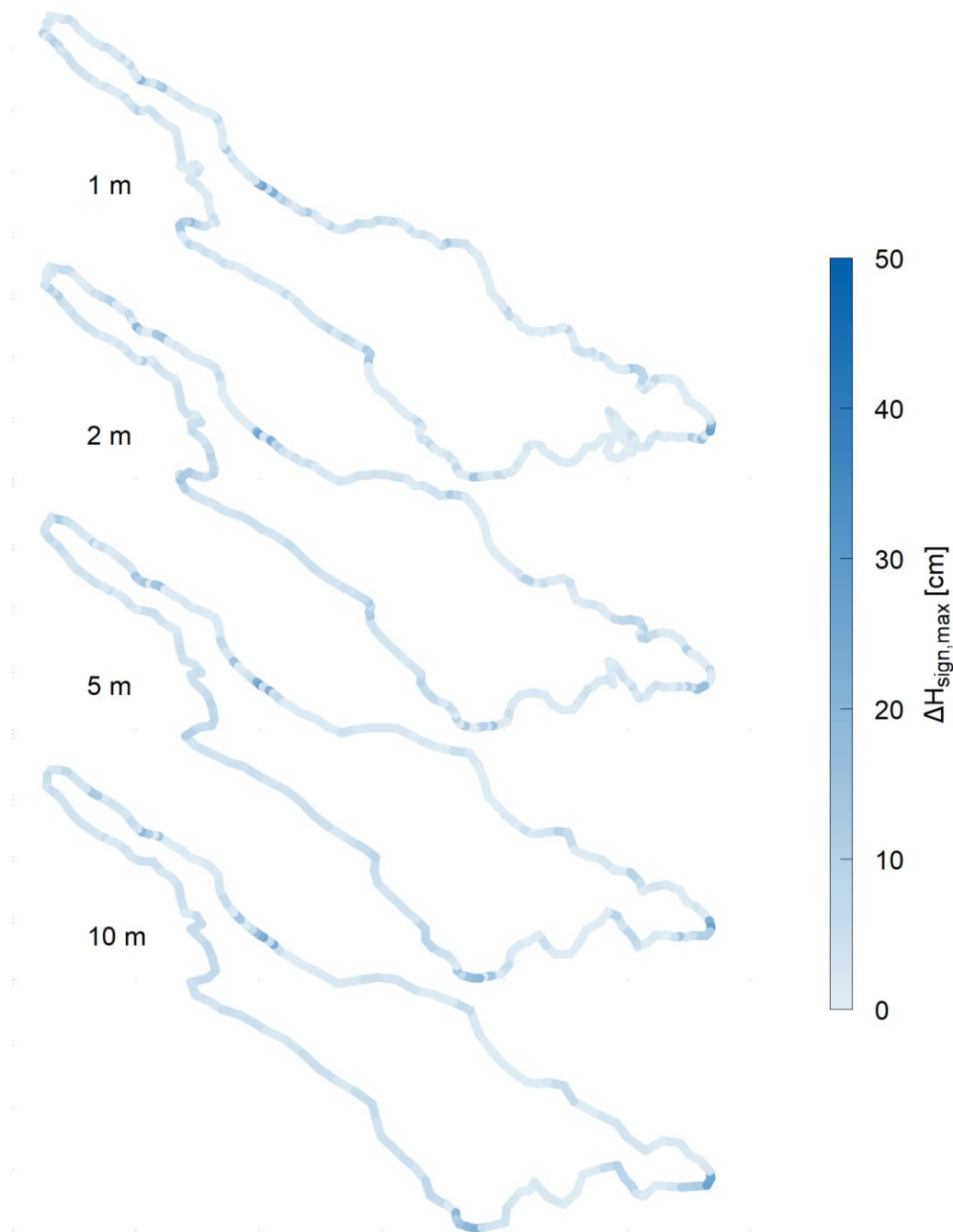


Abbildung 3.8: Differenz der Maximalwerte der berechneten signifikanten Wellenhöhe auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit und ohne Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN)

Analog zu den obigen beiden Abbildungen zeigen Abbildung 3.9 bzw. Abbildung 3.10 die maximal auftretenden Wellenlängen mit Einfluss der Uferverbauung bzw. die Differenz zum Modellauf ohne Einfluss der Uferverbauung auf den Tiefenlinien in 1 m, 2 m, 5 m und 10 m Wassertiefe. In Abbildung 3.11 und Abbildung 3.12 sind analog die maximalen Wellenperioden bzw. deren Differenzen und in Abbildung 3.13 und Abbildung 3.14 die maximalen Orbitalgeschwindigkeiten und deren Differenzen

dargestellt. Wellenlänge und -periode sowie Orbitalgeschwindigkeiten steigen mit zunehmender Wellenhöhe an. Daher korrelieren die Abschnitte mit größeren Wellenhöhen mit den Abschnitten mit größeren Wellenlängen und -perioden.

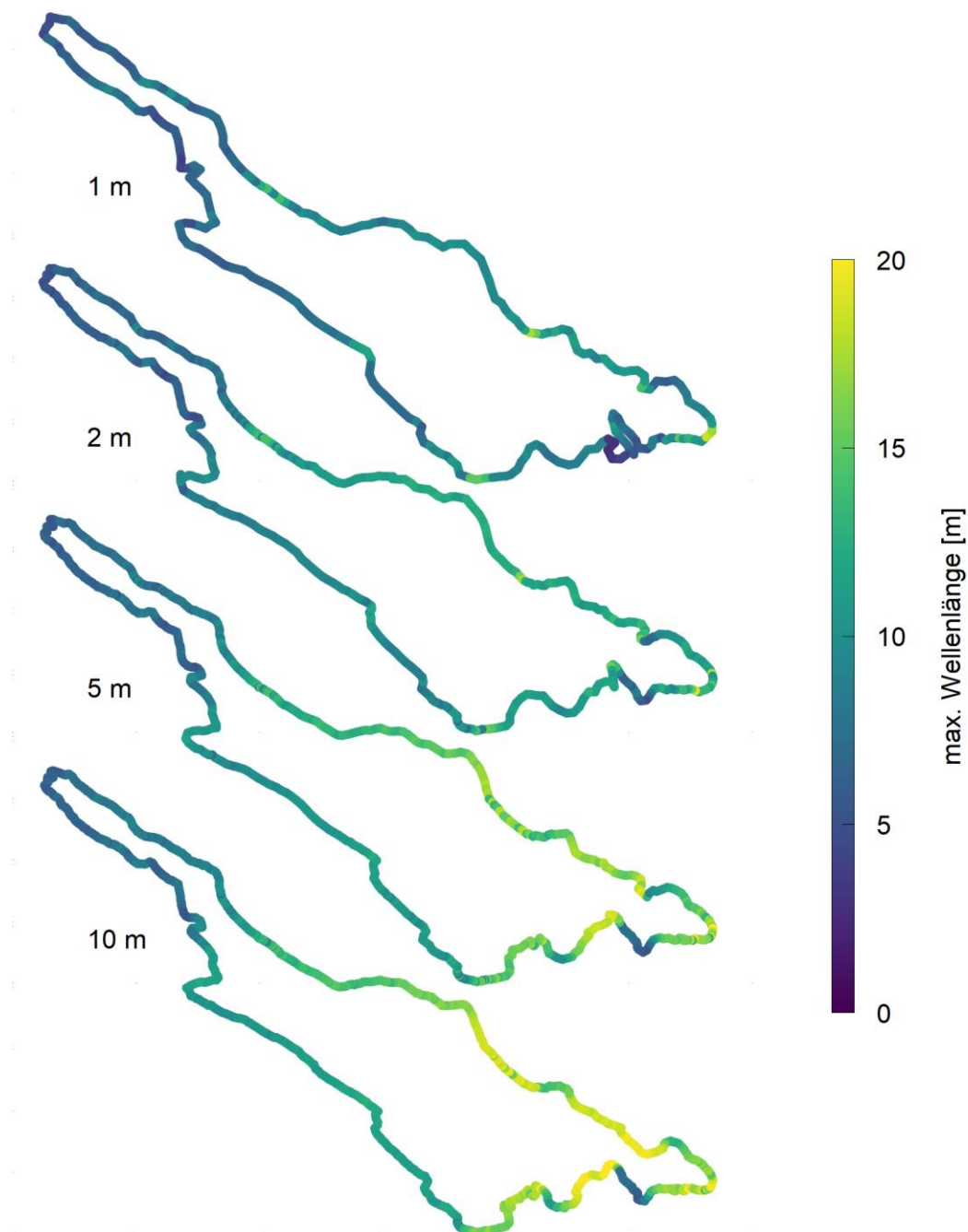


Abbildung 3.9: Maximalwerte der berechneten Wellenlänge auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN)

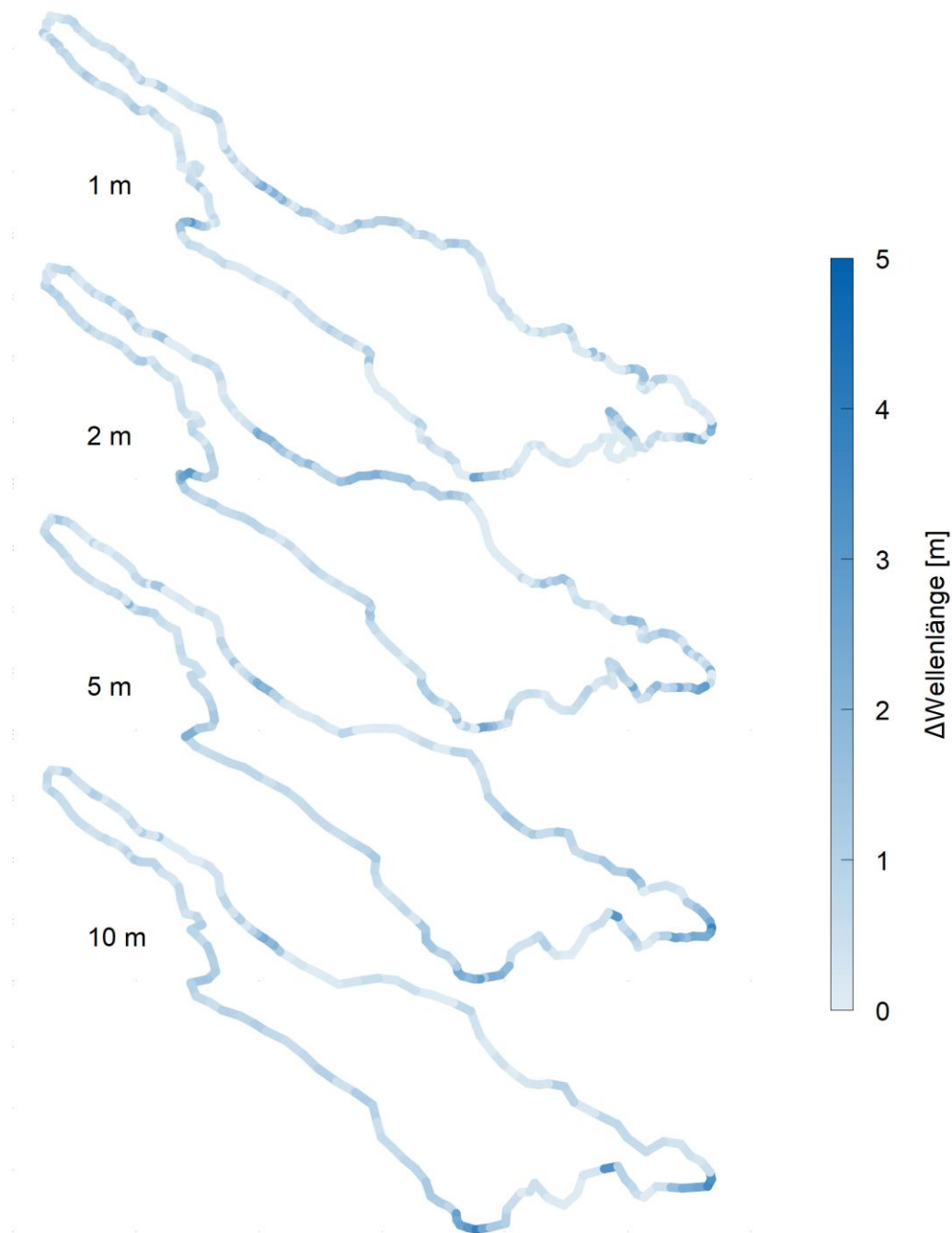


Abbildung 3.10: Differenz der Maximalwerte der berechneten Wellenlänge auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit und ohne Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN)

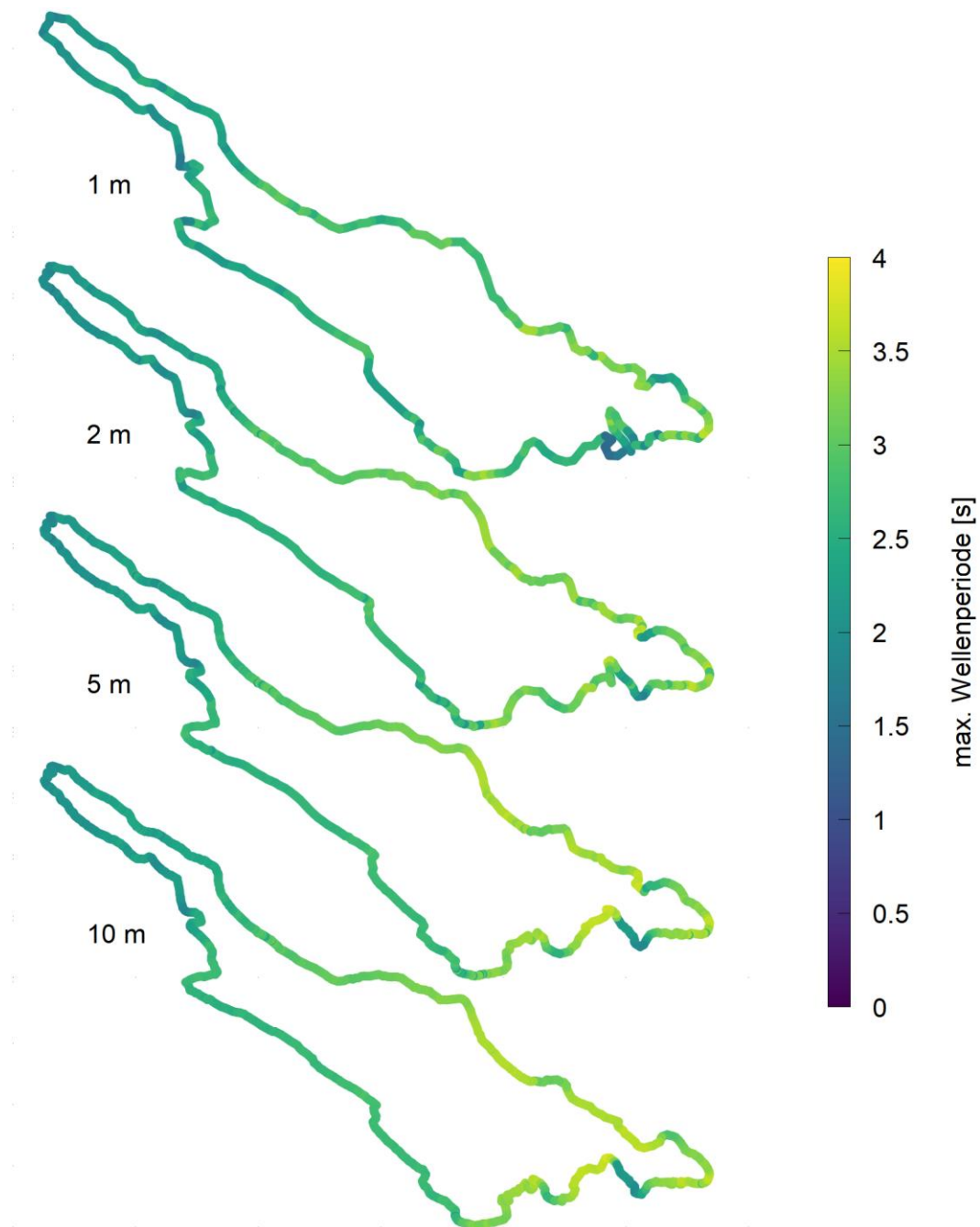


Abbildung 3.11: Maximalwerte der berechneten Wellenperiode auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN)

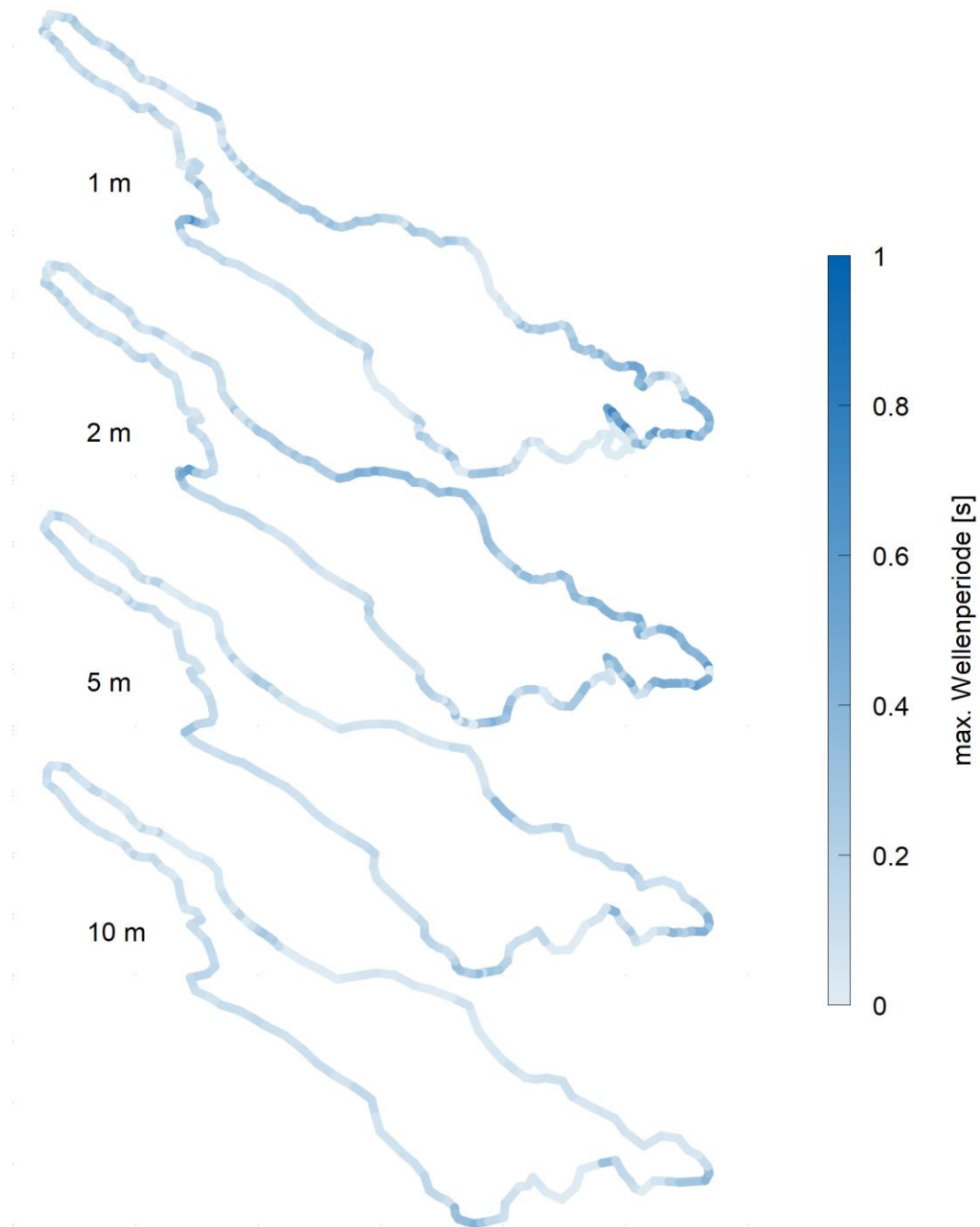


Abbildung 3.12: Differenz der Maximalwerte der berechneten Wellenperiode auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit und ohne Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN)

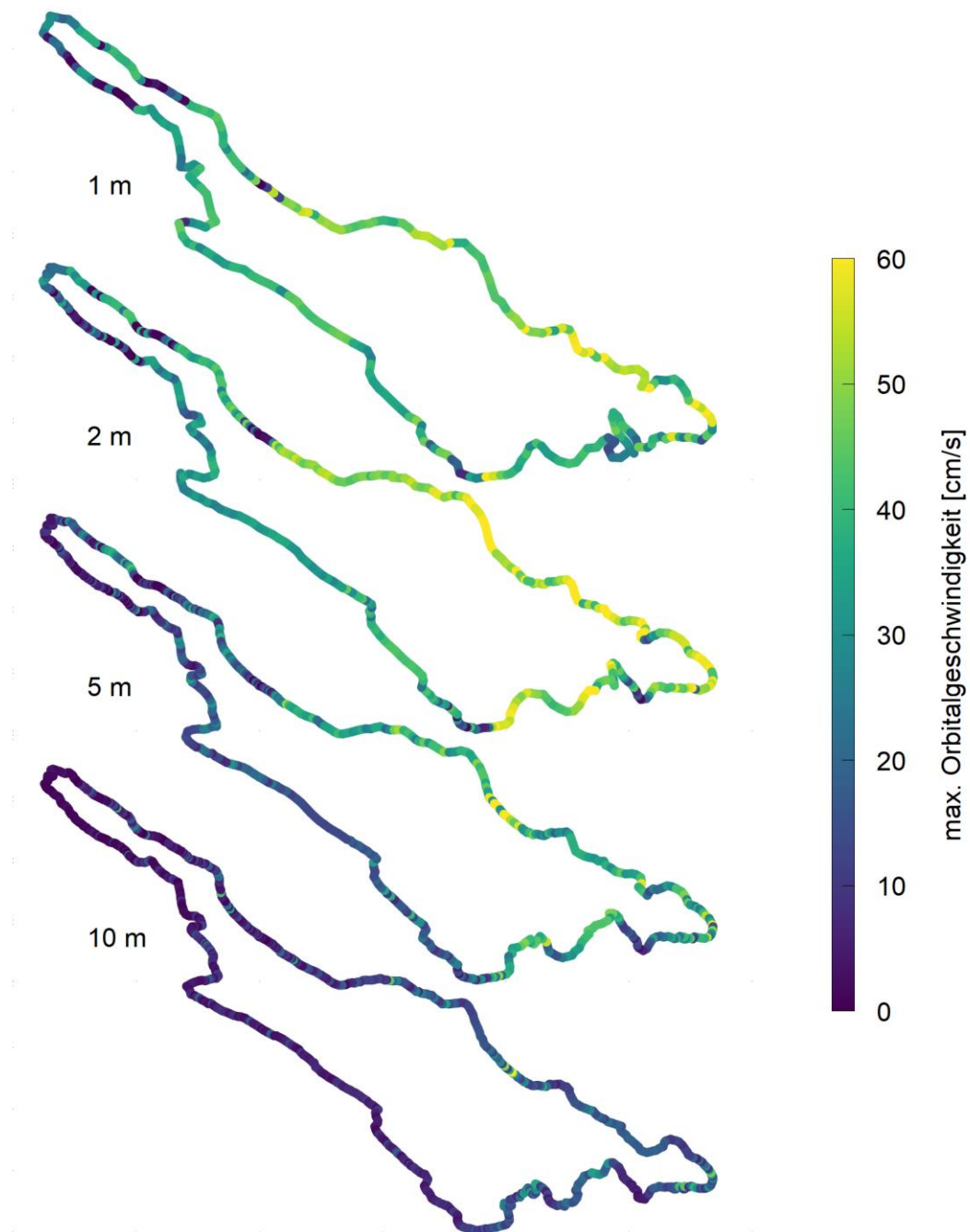


Abbildung 3.13: Maximalwerte der berechneten Wellenperiode auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN)

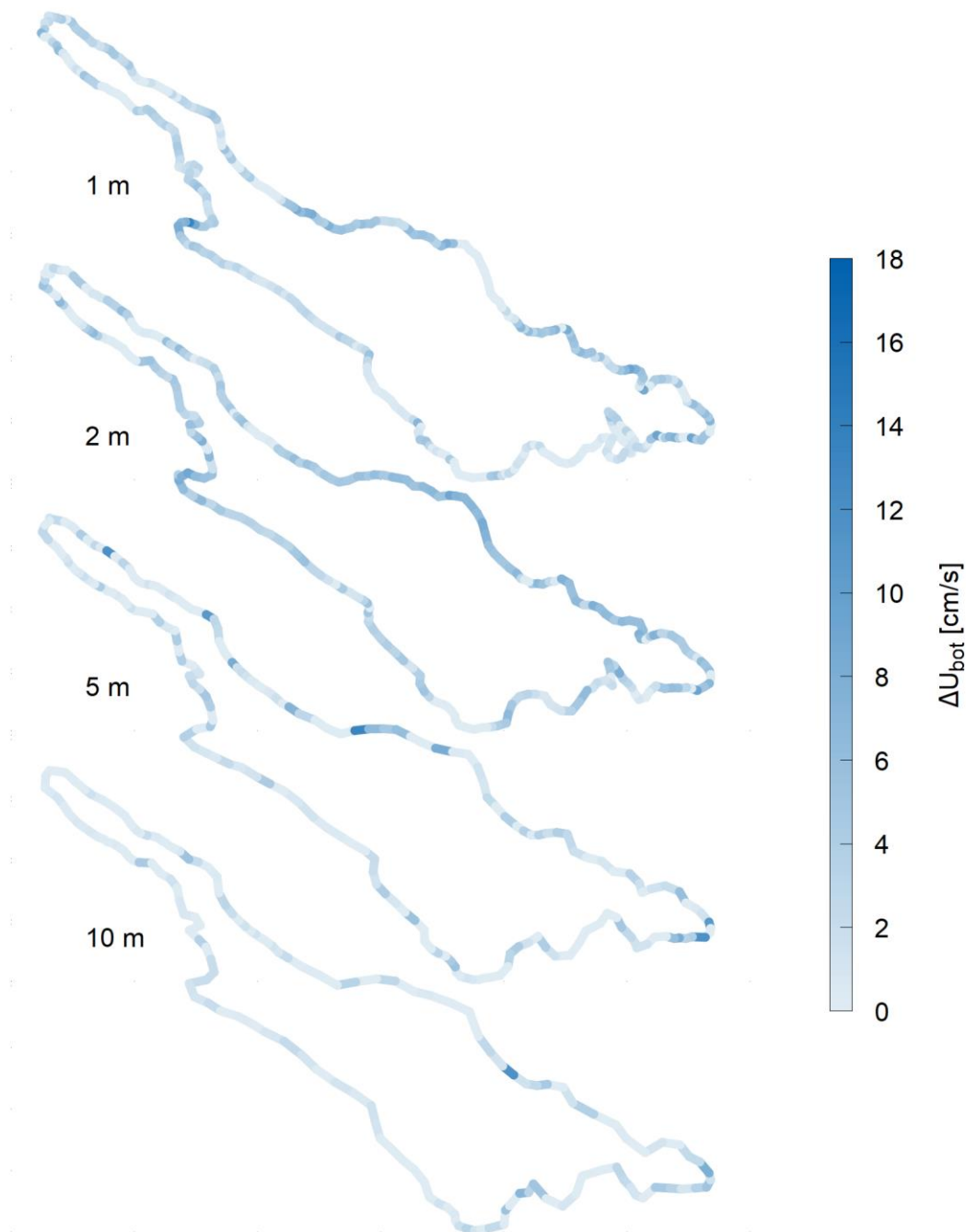


Abbildung 3.14: Differenz der Maximalwerte der berechneten Orbitalgeschwindigkeit auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 mit und ohne Einfluss der Uferverbauung (Tiefenangabe bezieht sich auf mittleren Wasserspiegel von 395.21 m ü.NN)

Analog zu den Auswertungen des Vorgängerberichts wurde aus den Simulationsergebnissen mit Uferverbauung der prozentuale Anteil der Zeiträume in den Jahren 2015-2017 ermittelt, in dem die sohlnahe, maximale Orbitalgeschwindigkeit den Grenzwert für die Resuspension von 8 cm/s überschreitet. Näheres zur Auswertemethodik ist im Vorgängerbericht aufgeführt. Abbildung 3.15 zeigt oben die Ergebnisse auf der 1 m- und 2 m-Tiefenlinie sowie



unten die Differenz zu den Modellergebnissen ohne Uferverbauung. Neben der Wellenhöhe hängt die sohnnahe Orbitalgeschwindigkeit auch vom Ufertyp und dessen Verlauf der Wassertiefen ab. Daher zeigen sich an Steilufern wie bei Rorschach und Meersburg nur geringe Veränderungen im Vergleich zu den Modellergebnissen ohne Uferverbauung. Die größten Änderungen sind an Uferabschnitten mit Verbauung und vorgelagerter Flachwasserzone zu erwarten. Zu diesen Abschnitten gehören z. B. die Ufer bei Kreuzlingen, Konstanz und der Mainau. Ein gewisses Rauschen in den Differenzen entsteht auch dadurch, dass die Modellnetze und somit die Wassertiefen der Elementknoten nicht identisch sind.

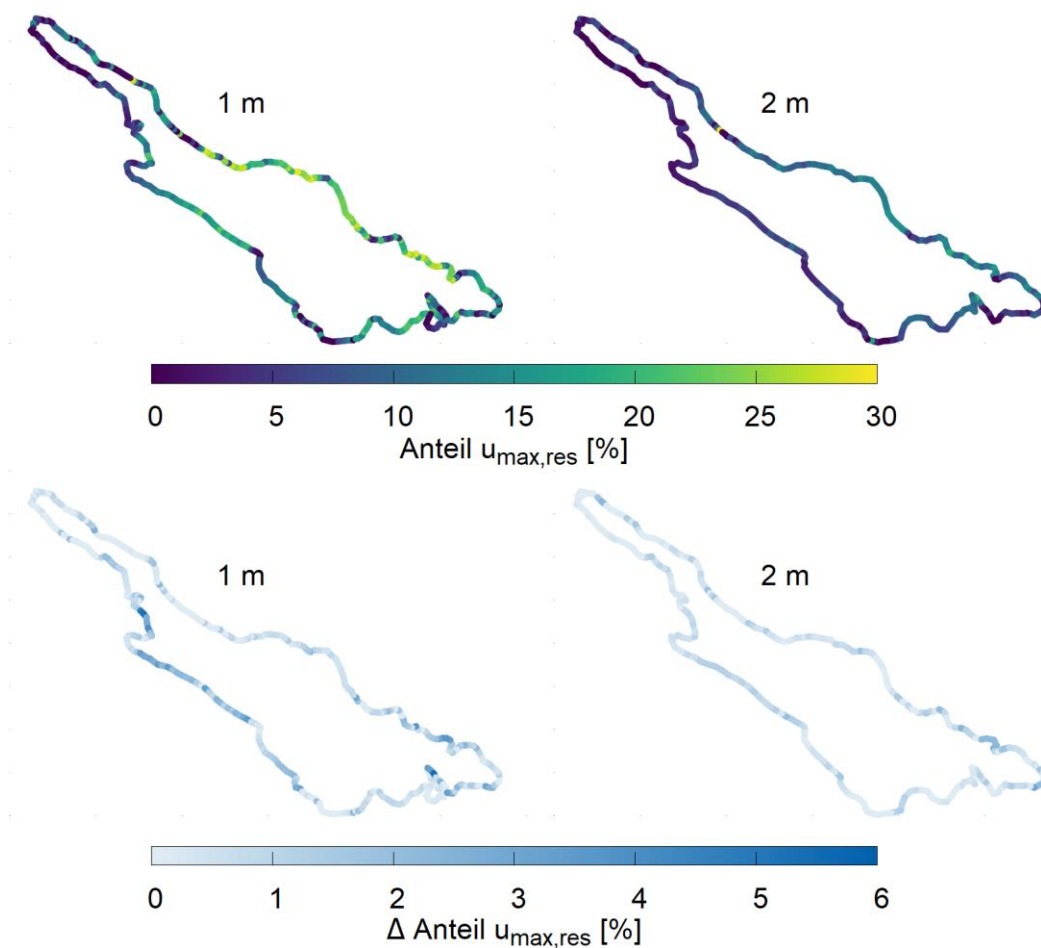


Abbildung 3.15: Anteil der Zeiträume in den Jahren 2015-2017, in denen die sohnnahe, maximale Orbitalgeschwindigkeit den angenommenen Grenzwert für Resuspension von 8 cm/s überschreitet mit Berücksichtigung des Einfluss der Uferverbauung (oben) sowie Differenz der maximalen Orbitalgeschwindigkeiten mit und ohne Einfluss der Uferverbauung

Abbildung 3.16 zeigt die Quartile der verschiedenen Wellenparameter über den betrachteten Zeitraum 2015-2017 auf der 1 m-Tiefenlinie, Abbildung 3.17 die Differenzen von den Modellergebnissen ohne Uferverbauung. Abbildung 3.18 zeigt

analog die Werte der 90 %- und 95 %-Quantile sowie Abbildung 3.19 deren Differenzen. Mit zunehmendem Quantil nehmen auch die Differenzen zu den Modellrechnungen ohne Uferinfluss zu, da nur die Zeiträume mit Windereignissen neu berechnet wurden. Anhand dieser statistischen Werte kann abgeleitet werden, mit welchen Veränderungen bei den Auftretswahrscheinlichkeiten der Wellenparametern gerechnet werden muss.

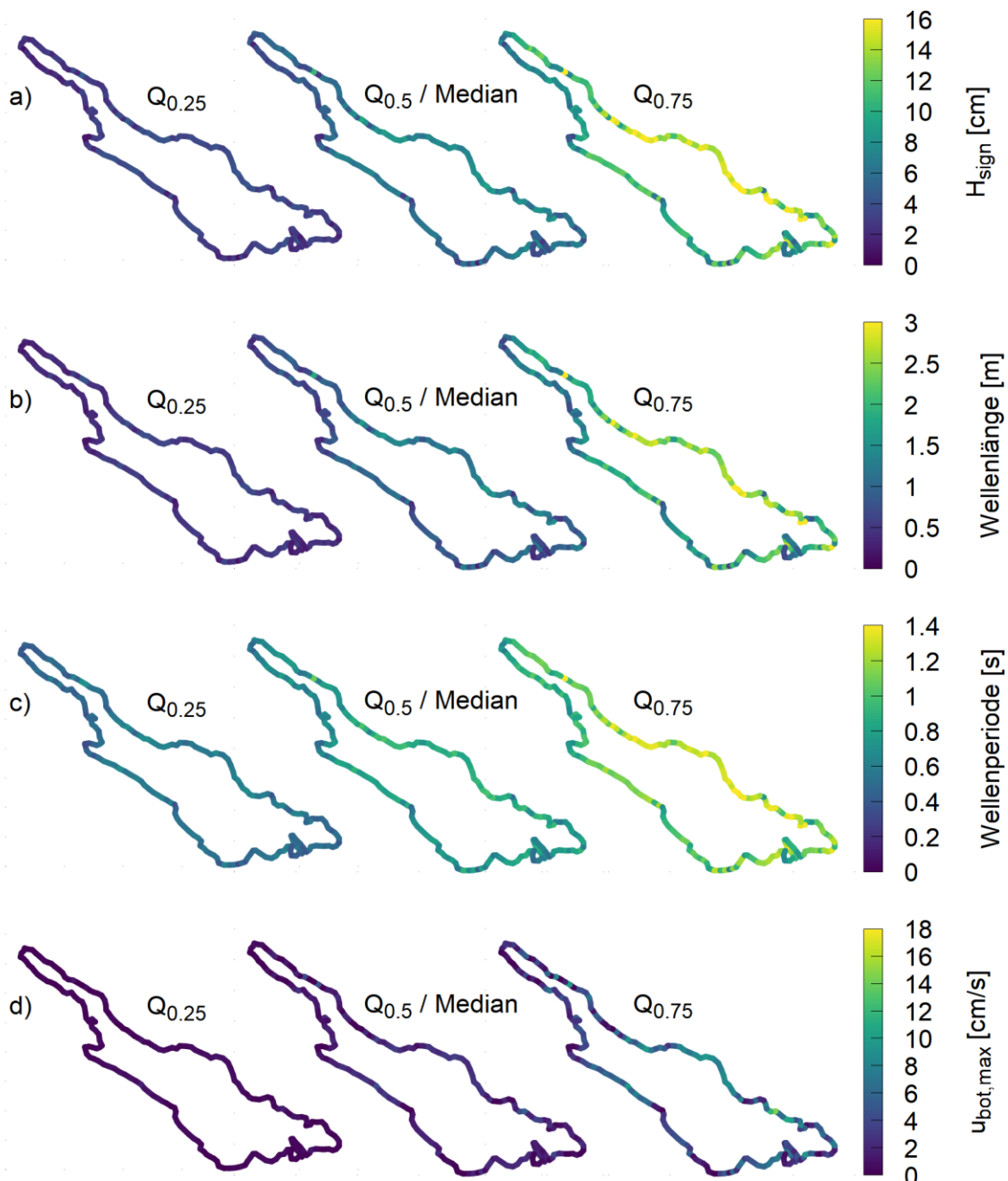


Abbildung 3.16: Quantile der berechneten (a) signifikanten Wellenhöhe, (b) Wellenlänge, (c) Wellenperiode und (d) maximalen, sohnahen Orbitalgeschwindigkeit auf der 1 m-Tiefenlinie im Zeitraum 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung

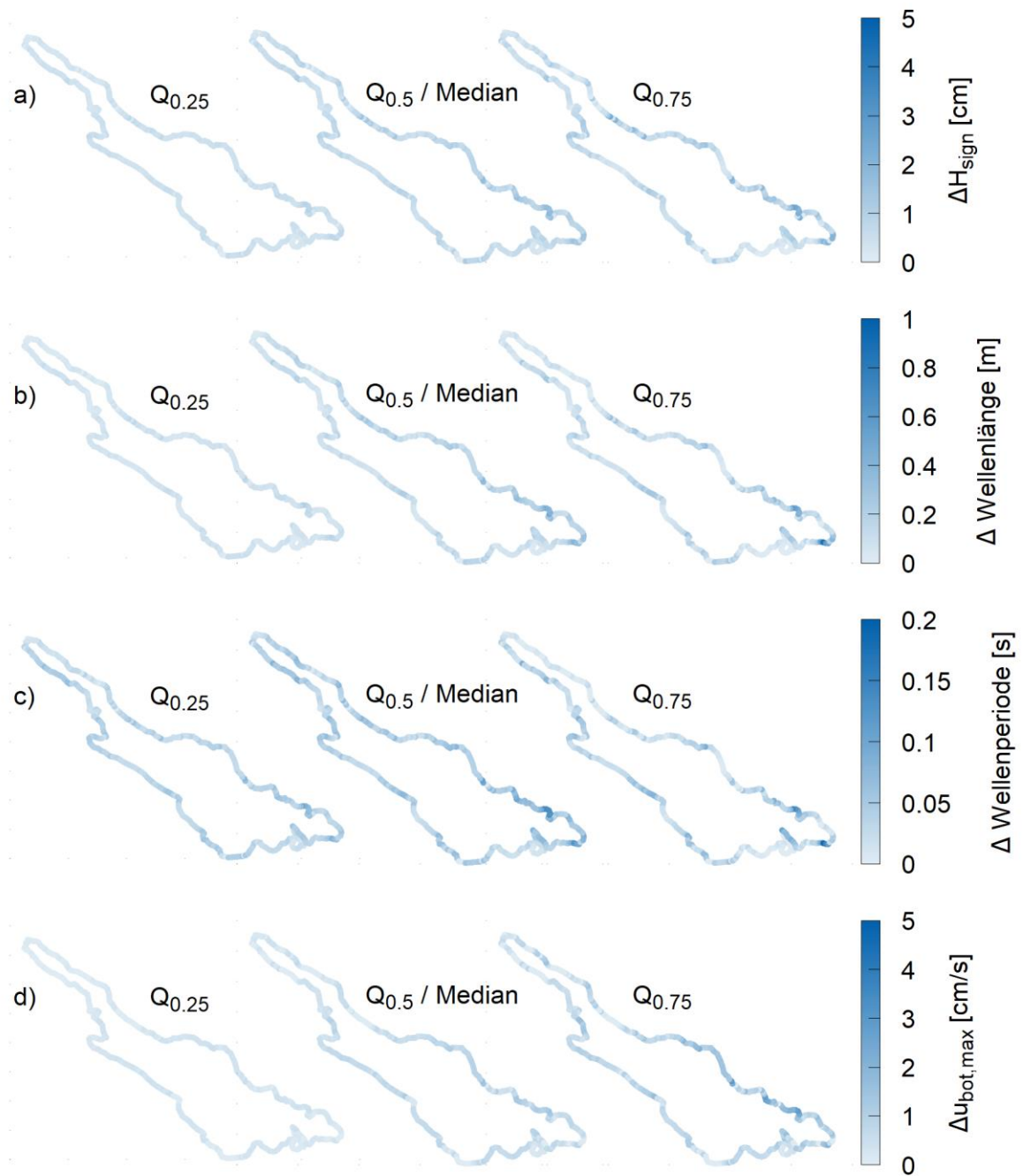


Abbildung 3.17: Differenzen der Quantile der berechneten (a) signifikanten Wellenhöhe, (b) Wellenlänge, (c) Wellenperiode und (d) maximalen, sohnahen Orbitalgeschwindigkeit auf der 1 m-Tiefenlinie im Zeitraum 2015-2017 mit und ohne Einfluss der Uferverbauung

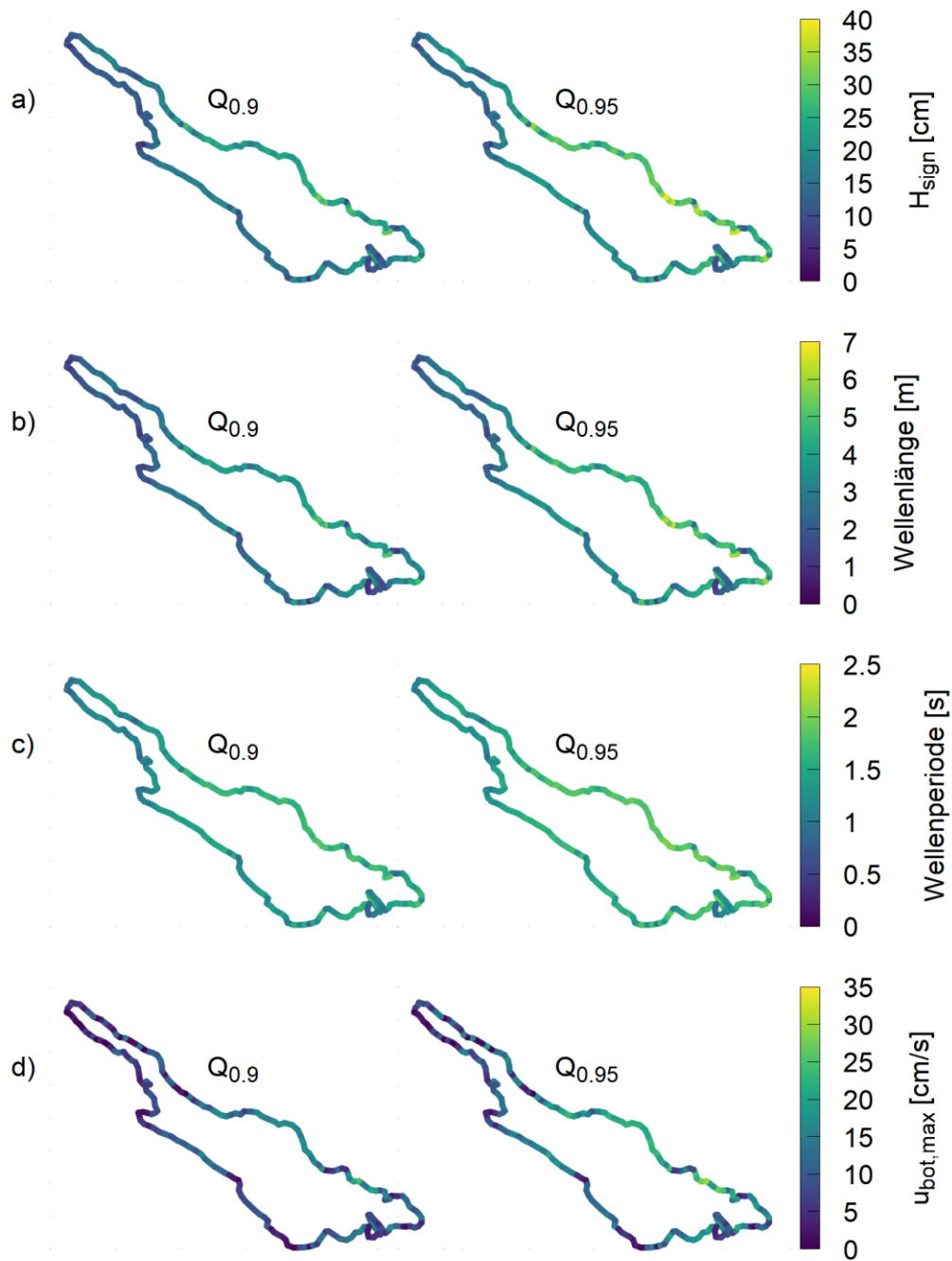


Abbildung 3.18: 90%- und 95%-Quantile der berechneten (a) signifikanten Wellenhöhe, (b) Wellenlänge, (c) Wellenperiode und (d) maximalen, sohnahen Orbitalgeschwindigkeit auf der 1 m-Tiefenlinie im Zeitraum 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung

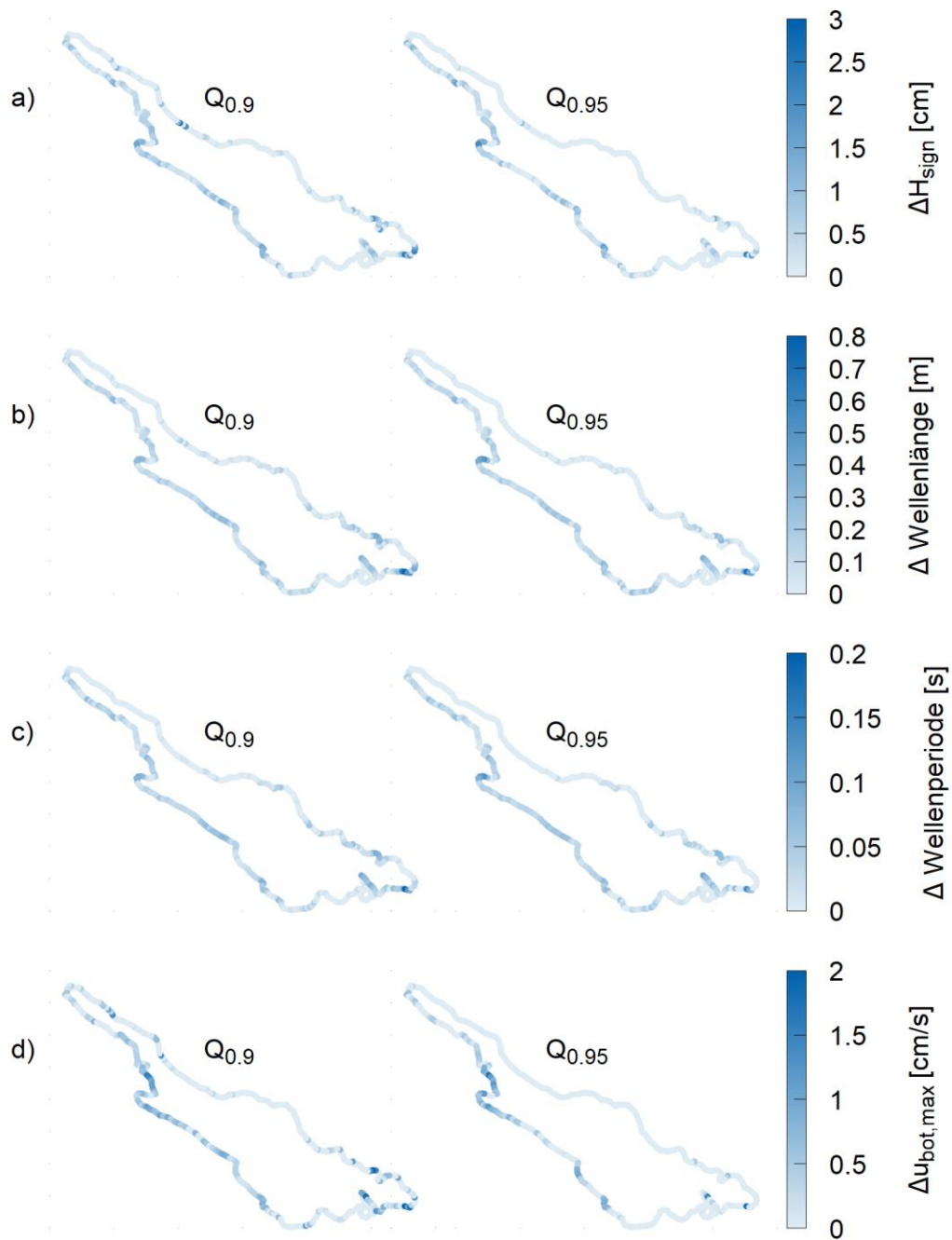
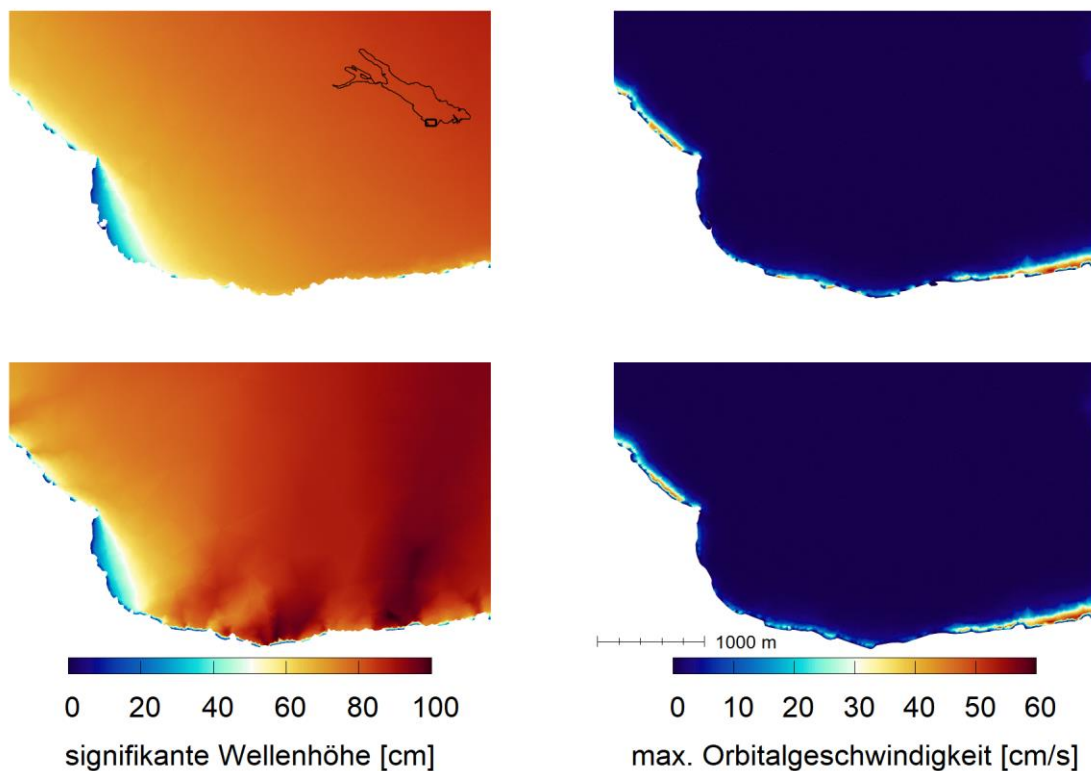


Abbildung 3.19: Differenzen der 90%- und 95%-Quantile der berechneten (a) signifikanten Wellenhöhe, (b) Wellenlänge, (c) Wellenperiode und (d) maximalen, sohnahen Orbitalgeschwindigkeit auf der 1 m-Tiefenlinie im Zeitraum 2015-2017 mit und ohne Einfluss der Uferverbauung

Im Vorgängerbericht wurden exemplarisch signifikante Wellenhöhen und Orbitalgeschwindigkeit während eines Windereignisses am 31. März 2020 für die drei unterschiedlichen Ufertypen Flachufer (Eriskircher Ried), mittelsteiles Ufer (Fischbach) und Steilufer (Rorschach) dargestellt. Die Unterschiede zu den Modellerngebnisse mit Uferverbauung zu diesem Zeitpunkt sind nur beim Uferabschnitt in Rorschach signifikant, da dort keine Wellendissipation im

Uferbereich auftritt. Abbildung 3.20 zeigt die Ergebnisse beider Modelle in diesem Bereich. Anhand der Wellenhöhen ist der Einfluss der Uferverbauung deutlich zu erkennen. Aufgrund des steil abfallenden Ufers treten erhöhte Orbitalgeschwindigkeiten nur in einem schmalen Bereich entlang der Uferlinie auf. Besser ist der Einfluss der Uferverbauung auf die Orbitalgeschwindigkeiten an mittelsteilen Ufern mit Verbauung zu erkennen. Abbildung 3.21 zeigt exemplarisch die Situation bei Friedrichshafen zum selben Zeitpunkt mit ohne Einfluss der Uferverbauung. Im Bereich der Uferpromenade und der Yachthäfen zentral im Bild ist der Einfluss der Uferverbauung auf die Wellenhöhen deutlich zu erkennen. In diesen Bereichen steigt auch die Orbitalgeschwindigkeit signifikant an.



*Abbildung 3.20: Berechnete signifikante Wellenhöhe (linke Spalte) und maximale, sohnnahe Orbitalgeschwindigkeit (rechte Spalte) bei Rorschach während des Westwindereignisses vom 31. März 2015; oben: Modellergebnisse ohne Einfluss der Uferverbauung; unten: Modellergebnisse mit Einfluss der Uferverbauung*



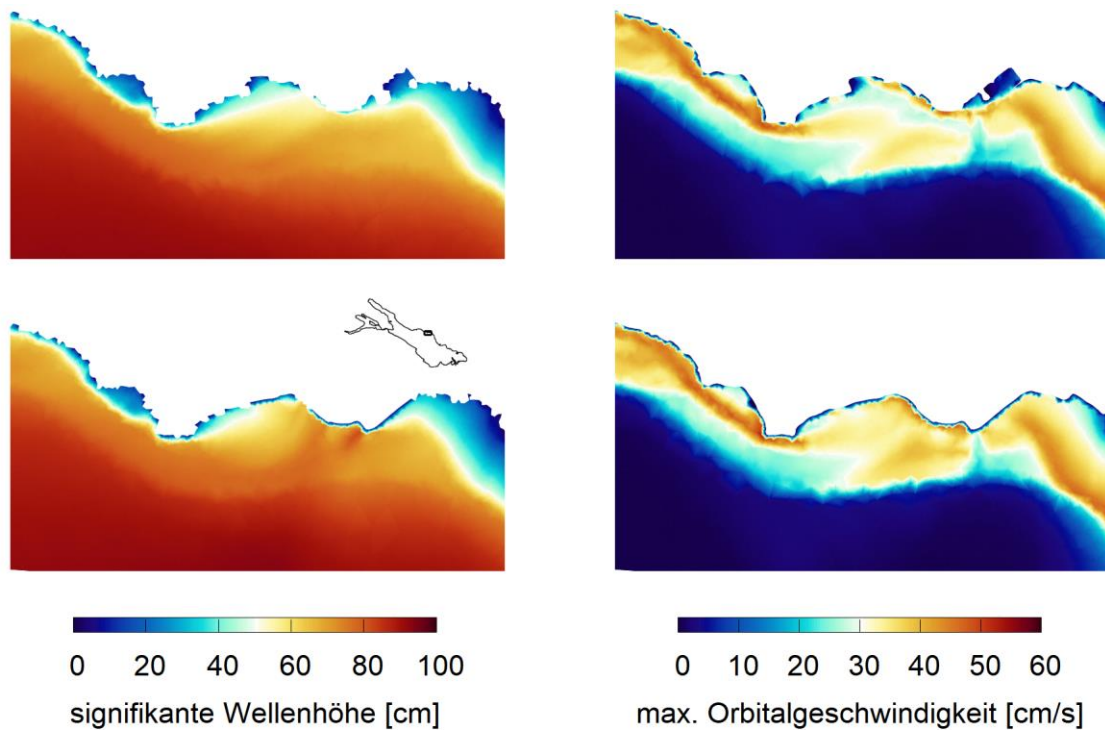


Abbildung 3.21: Berechnete signifikante Wellenhöhe (linke Spalte) und maximale, sohlnahe Orbitalgeschwindigkeit (rechte Spalte) bei Friedrichshafen während des Westwindereignisses vom 31. März 2015; oben: Modellergebnisse ohne Einfluss der Uferverbauung; unten: Modellergebnisse mit Einfluss der Uferverbauung



## 4 Zusammenfassung

In einer vorangegangenen Modellstudie wurden die Wellenverhältnisse der Jahre 2015, 2016 und 2017 auf dem Bodensee nachgebildet, um die auftretenden Wellenverhältnisse auf dem See und insbesondere in der Uferzone räumlich differenziert zu quantifizieren. Dieses Modell wurde nun aufgegriffen und weiterentwickelt, um den Einfluss der Uferverbauung auf das Wellenfeld zu berücksichtigen.

Im Aktionsprogramm Bodensee mit Schwerpunkt Ufer- und Flachwasserzone der IGKB wurde die Uferverbauung rund um den Bodensee in Abschnitten von jeweils 50 Metern erfasst und bewertet (IGKB 2009). Diese Daten dienen als Grundlage für die Implementierung der Uferverbauung im Modell. Von einem signifikanten Einfluss auf die Wellenreflektion kann bei den Stufen 4 und 5 der Bewertungsskala ausgegangen werden. Diese bezeichnen Blockböschungen und niedrige Mauern bzw. vertikale, größere Mauern. Die Reflektionskoeffizienten wurden gemäß Werten aus der Literatur mit 0,5 für Verbauungen der Stufe 4 und mit 0,9 für Verbauungen der Stufe 5 angesetzt.

Um den Einfluss der Wellenreflektion auf die Modellergebnisse aufzuzeigen, wurde zunächst ein vereinfachtes Prinzipmodell mit konstantem Wind und einer Flachwasserzone mit und ohne Wellenreflektion am Ufer aufgebaut. Mit Uferreflektion liegen die signifikanten Wellenhöhen im Uferbereich um etwa 30 % höher als bei der Modellrechnung ohne Ufererfluss. Mit zunehmendem Abstand vom Ufer gleichen sich die Werte an, signifikante Unterschiede lassen sich bis einige hundert Meter Uferabstand erkennen. Diese Ergebnisse wurden mit Hilfe von Modellrechnungen mit einem Wellenpropagationsmodell, mit dem die Ausbreitung einzelner Wellenzüge berechnet werden kann, unter vergleichbaren Wellenbedingungen geprüft und bestätigt.

Für die Berechnungen mit dem aktualisierten Wellenmodell des Bodensees wurden die windstarken Zeiträume der Jahre 2015 bis 2017 ausgewählt. Die Auswertung der Modellergebnisse orientiert sich an den Analysen des Vorgängerberichts, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Bei den berechneten, maximal auftretenden Wellenhöhen im betrachteten Zeitraum sind deutliche Anstiege der Wellenhöhe mit Berücksichtigung der Uferverbauung zu verzeichnen. Diese Bereiche korrelieren mit den Uferabschnitten mit Verbauung. Dies betrifft insbesondere die Bereiche mit größeren Ortschaften, z. B. Überlingen, Meersburg, Friedrichshafen, Kressbronn, Lindau, Bregenz, Rorschach, Romanshorn und Konstanz. Die größten Anstiege treten an Steilufern auf, da dort auch die auftretenden signifikanten Wellenhöhen aufgrund der fehlenden Dissipation relativ groß sind. Deutlichste Beispiele hierfür sind die Uferabschnitte bei Bregenz und

Rorschach. Mit größerer Wellenhöhe nehmen auch die Wellenlänge, -perioden und in flacheren Bereichen die Orbitalgeschwindigkeiten zu. Daher korrelieren die Abschnitte mit größeren Wellenhöhen mit den Abschnitten mit größeren Wellenlängen, -perioden und Orbitalgeschwindigkeiten. Damit nehmen an den entsprechenden Uferabschnitten auch die Zeiträume zu, in denen aufgrund der Wellenbewegungen mit Resuspension des Sediments zu rechnen ist. Besonders betroffen hiervon sind Uferabschnitte ohne ausgeprägte Flachwasserzone, an denen ein Großteil der Wellenenergie aufgrund der fehlenden Dissipation das Ufer erreicht und dort bei entsprechender Verbauung reflektiert wird.

**LITERATURVERZEICHNIS**

Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) (2009): Limnologische Bewertung der Ufer- und Flachwasserzone des Bodensees. Blauer Bericht Nr. 55 (<https://www.igkb.org/aktuelles/bodensee-wasser-informationssystem-bowis/uferbewertung-und-renaturierung/>)

Muttray, M., Oumeraci, H., ten Oever, E. (2006). Wave reflection and wave run-up at rubble mound breakwaters. Proceedings of the Coastal Engineering Conference. 10.1142/9789812709554\_0362.

Negm, A., Nassar, K. (2016): Determination of Wave Reflection Formulae for Vertical and Sloped Seawalls Via Experimental Modelling. Procedia Engineering, Volume 154, S. 919-927, <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.502>.

SWAN Group (2019a): SWAN Scientific and technical documentation – SWAN Cycle III version 41.31, Delft University of Technology, Delft, Netherlands. (verfügbar unter <http://www.swan.tudelft.nl>)

SWAN Group (2019b): SWAN User Manual – SWAN Cycle III version 41.31, Delft University of Technology, Delft, Netherlands. (verfügbar unter <http://www.swan.tudelft.nl>)

Zijlema, M., Stelling, G. and Smit, P., (2011): SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters. Coast. Engng., 58, 992-1012.