

Analyse der Wellenverhältnisse entlang des Ufers vom Untersee

Auftraggeber: Kanton Thurgau
Amt für Umwelt
CH-8510 Frauenfeld

Auftragsdatum: 03.09.2020

Auftragsnummer: A786

Berichtsnummer: A786-1

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

Stuttgart, 28.01.2021



Dr. Ulrich Lang



Stefan Mirbach

INHALT

| | |
|---------------------------------------------|----|
| ABBILDUNGSVERZEICHNIS | II |
| 1 Einleitung..... | 1 |
| 2 Modellaufbau | 2 |
| 2.1 Modellnetz | 2 |
| 2.2 Implementierung der Uferverbauung | 2 |
| 2.3 Simulationszeiträume | 3 |
| 2.4 Randbedingungen | 3 |
| 3 Modellergebnisse | 5 |
| 4 Zusammenfassung | 15 |
| LITERATURVERZEICHNIS..... | 16 |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 2.1: Im Wellenmodell des Untersees verwendetes, unstrukturiertes Dreiecksgitter mit hochaufgelöstem Uferbereich | 2 |
| Abbildung 2.2: Uferbereiche mit Verbauungen der Stufen 4 und 5 nach IGKB (2017)..... | 3 |
| Abbildung 3.1: Maximalwerte der berechneten signifikanten Wellenhöhe auf dem Untersee in den Jahren 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung | 6 |
| Abbildung 3.2: Maximalwerte der berechneten signifikanten Wellenhöhe auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 (Tiefenangabe bezieht sich auf den mittleren Wasserspiegel von 394,96 m ü.NN) | 7 |
| Abbildung 3.3: Maximalwerte der berechneten Wellenlänge auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 (Tiefenangabe bezieht sich auf den mittleren Wasserspiegel von 394,96 m ü.NN)..... | 8 |
| Abbildung 3.4: Maximalwerte der berechneten Wellenperiode auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 (Tiefenangabe bezieht sich auf den mittleren Wasserspiegel von 394,96 m ü.NN) | 9 |
| Abbildung 3.5: Maximalwerte der berechneten, sohnahen Orbitalgeschwindigkeit auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 (Tiefenangabe bezieht sich auf den mittleren Wasserspiegel von 394,96 m ü.NN)..... | 11 |
| Abbildung 3.6: Anteil der Zeiträume in den Jahren 2015-2017, in denen die sohnahne, maximale Orbitalgeschwindigkeit den angenommenen Grenzwert für Resuspension von 8 cm/s überschreitet | 12 |
| Abbildung 3.7: Quantile der berechneten (a) signifikanten Wellenhöhe, (b) Wellenlänge, (c) Wellenperiode und (d) maximalen, sohnahen Orbitalgeschwindigkeit auf der 1 m-Tiefenlinie im Zeitraum 2015-2017 | 13 |
| Abbildung 3.8: 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 | 14 |

1 Einleitung

Für den Bodensee-Obersee wurde in Modellstudien die zu erwartende räumlich und zeitlich variable Wellencharakteristik aufgezeigt und analysiert (Kobus und Partner 2019 und 2020). Besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Verhältnisse in der Uferzone geworfen, indem zum einen diese Bereiche im Modell hoch aufgelöst und zum anderen die Auswirkungen von Uferverbauungen auf die Wellenverhältnisse berücksichtigt wurden.

Analog dazu sollen nun auch die Wellenverhältnisse des Untersees im Modell untersucht werden. Die Vorgehensweise wird dabei eng an die Modellstudie des Obersees angelehnt, um eine gute Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu erzielen. Hierzu wird zunächst ein Modellnetz des Untersees mit hoch aufgelöster Uferzone aufgebaut und die Uferverbauung im Modell auf Grundlage der Daten der Uferkartierung und -bewertung der IGKB (IGKB 2017) implementiert. Die Randbedingungen werden von denselben Datenquellen wie im Vorgängermodell verwendet. Mit diesem Modell werden die Wellenverhältnisse auf dem Untersee im dreijährigen Zeitraum von 2015-2017 nachgebildet und analog zu den Vorgängerberichten statistisch ausgewertet.

2 Modellaufbau

Für die Modellierung der Wellenverhältnisse auf dem Untersee wird das numerische Wellenmodell SWAN verwendet, das von der TU Delft entwickelt wird (SWAN Group 2019a, 2019b). Dieses Modell wird seit mehreren Jahren im Informationssystem BodenseeOnline verwendet, das im Rahmen des gleichnamigen Forschungsprojektes mit Förderung durch das Deutsche Bundesministerium für Bildung und Forschung und die Deutsche Forschungsgemeinschaft entwickelt wurde (Lang et al. 2008a, 2008b, 2008c). Die Vorgehensweise für den Modellaufbau des Untersees entspricht den vorangegangenen Modelluntersuchungen für den Bodensee-Obersee (Kobus und Partner 2019 und 2020).

2.1 Modellnetz

Um eine bestmögliche Auflösung der Uferzone bei akzeptablen Rechenzeiten zu erzielen, wurde ein unstrukturiertes Dreiecksgitter generiert, dessen Zellgrößen als Funktion der Wassertiefe definiert wurden. Somit können die Ufer- und Flachwasserbereiche hoch aufgelöst werden, während im Freiwasser eine gröbere Modellauflösung verwendet werden kann. Abbildung 2.1 zeigt das Modellnetz des Untersees.

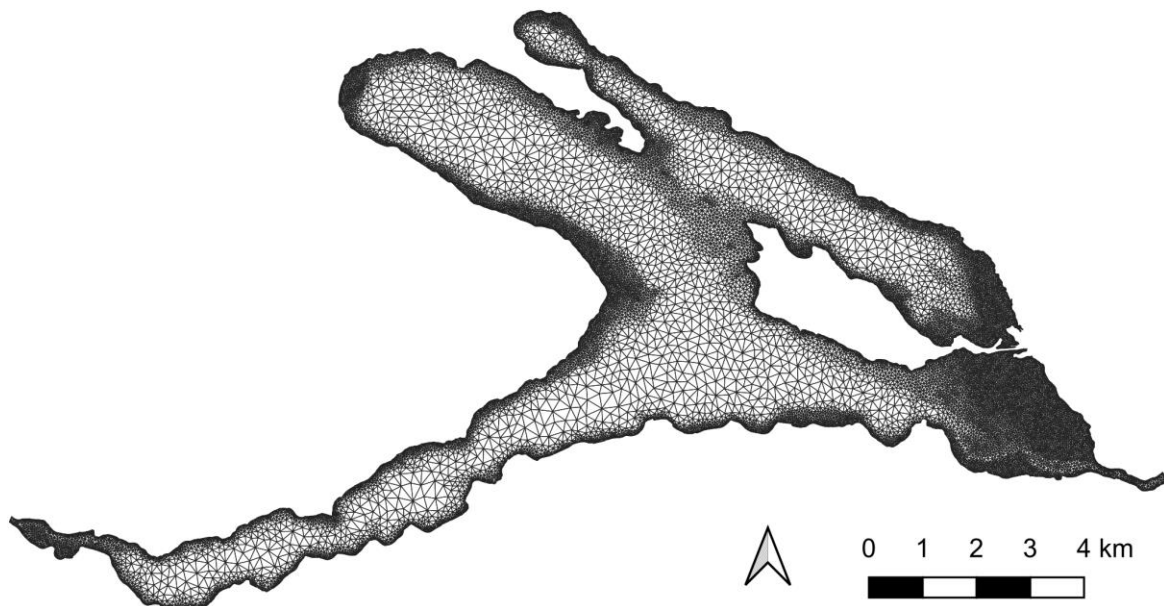


Abbildung 2.1: Im Wellenmodell des Untersees verwendetes, unstrukturiertes Dreiecksgitter mit hochaufgelöstem Uferbereich

2.2 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 2017). Als eines dieser

Kriterien wurden die Uferverbauungen rund um den See erfasst und mit Hilfe einer fünfstufigen Skala bewertet und eingeordnet. Bei den Stufen 1 bis 3 wird davon ausgegangen, dass es sich dabei um flache Ufer ohne Reflexionsmöglichkeit für Wellen handelt. 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 2.2 zeigt die Uferbereiche mit diesen beiden Klassifizierungen rund um den Untersee. Die Verbauung dieser Uferabschnitte wurde im Modell mit Reflektionskoeffizienten berücksichtigt. Dabei wurden die in der Vorgängerstudie zum Bodensee-Obersee verwendeten Reflektionskoeffizienten von 0,5 für Stufe 4 und 0,9 für Stufe 5 übernommen.

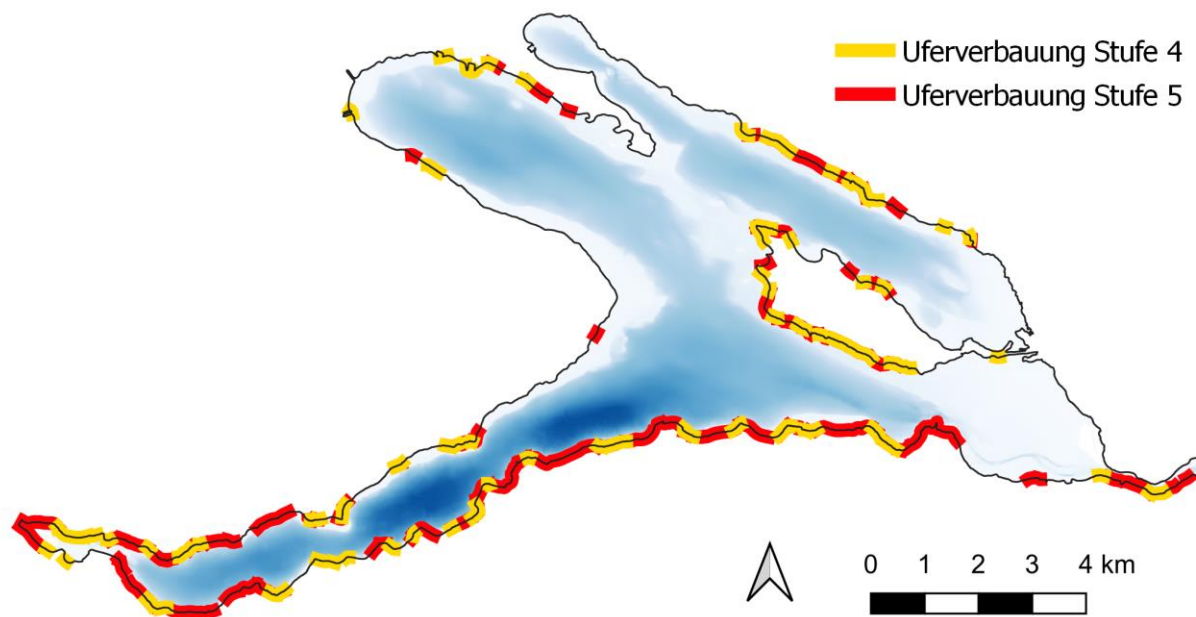


Abbildung 2.2: Uferbereiche mit Verbauungen der Stufen 4 und 5 nach IGKB (2017)

2.3 Simulationszeiträume

Mit dem Modell werden die Wellenverhältnisse auf dem Untersee der drei Jahre 2015, 2016 und 2017 nachgebildet. Jedes Jahr wird in einem separaten Modelllauf berechnet. Zu Beginn wird zunächst das stationäre Wellenfeld zum Anfangszeitpunkt berechnet, anschließend erfolgt eine instationäre Berechnung mit Zeitschritten im 20-Minuten-Intervall über das gesamte Jahr. Die Modellergebnisse zu allen relevanten Wellenparametern werden stündlich ausgegeben.

2.4 Randbedingungen

Für die Berechnungen wurden zweidimensionale Winddaten aus den Reanalyseberechnungen des Wettermodells COSMO-REA6 des Hans-Ertel-Zentrums für Wetterforschung (HErZ) und des Deutschen Wetterdiensts (DWD) verwendet. Diese Daten liegen in einer Gitterauflösung von 6 km und stündlichen

Zeitschritten vor. Damit wird dieselbe Datenbasis wie in den Modellen zum Bodensee-Obersee verwendet.

Der im Modell verwendete Verlauf der Wasserstände im Untersee stammt von den Messdaten des von der LUBW betriebenen Pegels Radolfzell.

3 Modellergebnisse

Mit den größten Wellenhöhen ist, wie auch am Obersee, bei Westwindereignissen zu rechnen, da diese mit den höchsten Windgeschwindigkeiten einhergehen. Im Gegensatz zum Obersee ist allerdings die Wirklänge des Windes über dem See und somit auch die zu erwartenden Wellenhöhen geringer. Abbildung 3.1 zeigt die an jedem Punkt im Untersee maximal auftretenden, signifikanten Wellenhöhen im Untersee über den Simulationszeitraum der Jahre 2015-2017. Die signifikante Wellenhöhe ist statistisch definiert als das arithmetische Mittel aus dem höchsten Drittel der Wellen. Tatsächlich ist das Wellenfeld insbesondere während Windereignissen sehr unregelmäßig ausgebildet und beinhaltet Wellen mit verschiedenen Höhen, Längen, Richtungen und Geschwindigkeiten, die sich gegenseitig überlagern oder aufheben. Die signifikante Wellenhöhe wurde definiert, um die Wellenhöhe anzugeben, die ein Beobachter als maßgebende Wellenhöhe schätzen würde. Dies bedeutet, dass einzelne Wellenzüge noch größere Höhen als die angegebene signifikante Wellenhöhe erreichen können. Folgende Schlussfolgerungen lassen sich aus Abbildung 3.1 ableiten:

- Die maximal erreichten signifikanten Wellenhöhen im Untersee liegen bei 70 cm und sind bei Westwindereignissen am südwestlichen Ufer der Reichenau zu erwarten, da dort die höchsten Wirklängen des Windes über dem See erzielt werden.
- Lokal können auch am Südufer des Untersees hohe Wellen bis 70 cm aufgrund der Wechselwirkung mit der Uferverbauung der Stufe 5 und der damit einhergehenden Wellenreflektion erreicht werden.
- Mit den geringsten Wellenhöhen ist in Seeteilen mit sehr kleiner Windwirklänge zu rechnen, z. B. beim Seeauslauf bei Stein am Rhein und im westlichen Teil des Gnadensees, sowie in ausgedehnten Flachwasserzonen wie z. B. beim Wollmatinger Ried östlich der Reichenau.
- Ein lokal begrenzter Anstieg der Wellenhöhen aufgrund der Uferverbauung macht sich insbesondere bei den Ortschaften am Südufer des Untersees, am Südufer der Reichenau sowie am Nordufer des Gnadensees bei Allensbach bemerkbar.

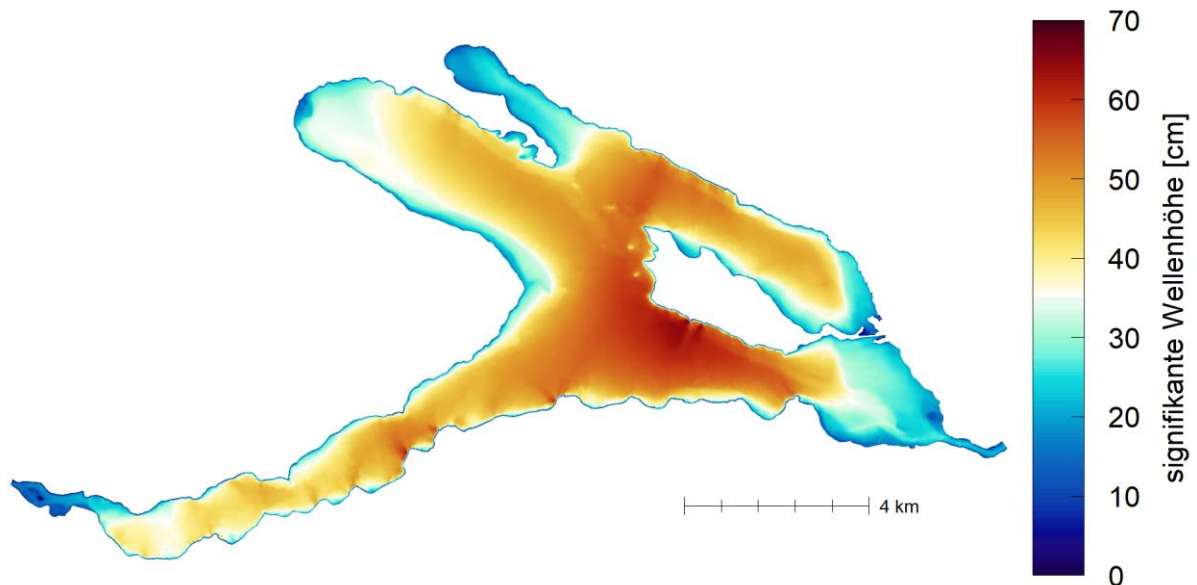


Abbildung 3.1: Maximalwerte der berechneten signifikanten Wellenhöhe auf dem Untersee in den Jahren 2015-2017 mit Einfluss der Uferverbauung

Abbildung 3.2 zeigt die im Untersuchungszeitraum maximal auftretenden signifikanten Wellenhöhen auf den Tiefenlinien bei 1, 2, 5 und 10 m Wassertiefe. Die Wassertiefen beziehen sich auf den mittleren Seewasserstand von 394,96 m ü.NN an der Messstation Radolfzell der LUBW. Gut zu erkennen sind die Bereiche mit den höchsten zu erwartenden Wellenhöhen am Südufer der Reichenau und lokal am schweizerischen Ufer. Die Wellenhöhen nehmen flacher werdenden Tiefenlinie ab, da die Wellenenergie durch Sohlreibung und Brechung der Wellen dissipiert wird. Abbildung 3.3 und Abbildung 3.4 zeigen analog die Maximalwerte der Wellenlänge und der Wellenperiode auf den vier Tiefenlinien. Beide Größen korrelieren mit der Wellenhöhe, daher sind in Bereichen mit hohen Wellenhöhen auch hohe Wellenlängen und -perioden anzutreffen. Beim Eintritt in flaches Wasser nehmen beide ab.

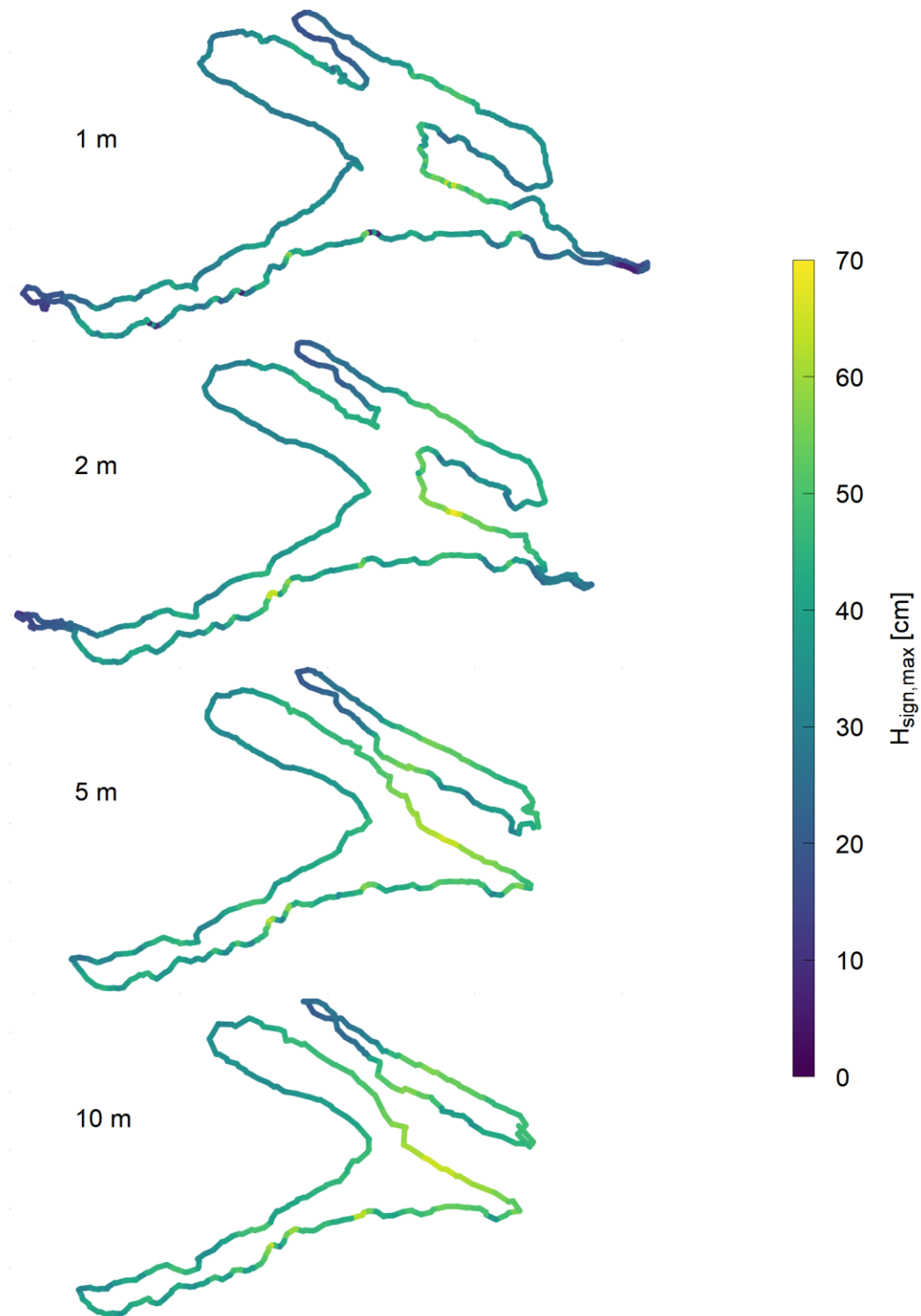


Abbildung 3.2: Maximalwerte der berechneten signifikanten Wellenhöhe auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 (Tiefenangabe bezieht sich auf den mittleren Wasserspiegel von 394,96 m ü. NN)

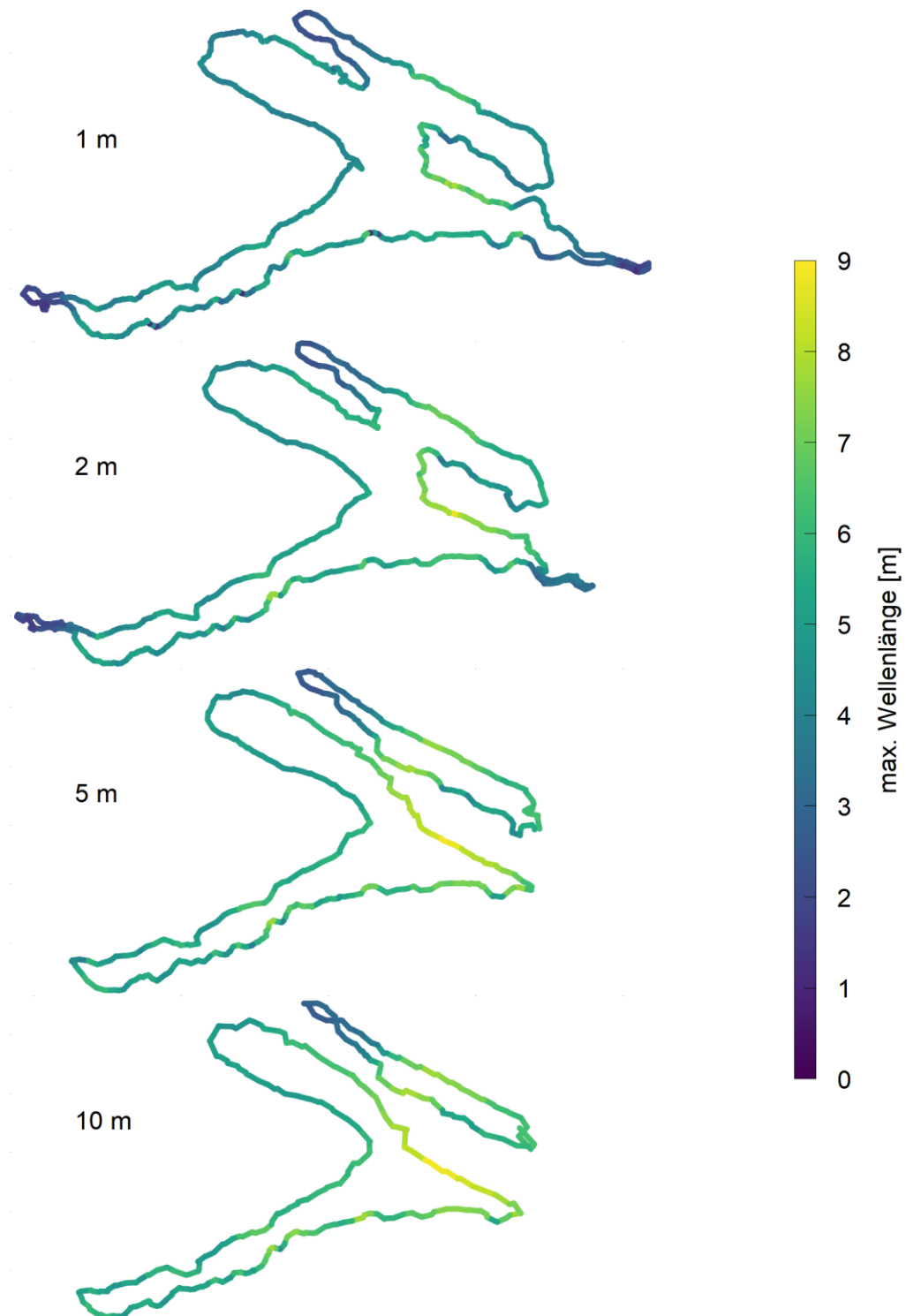


Abbildung 3.3: Maximalwerte der berechneten Wellenlänge auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 (Tiefenangabe bezieht sich auf den mittleren Wasserspiegel von 394,96 m ü.NN)

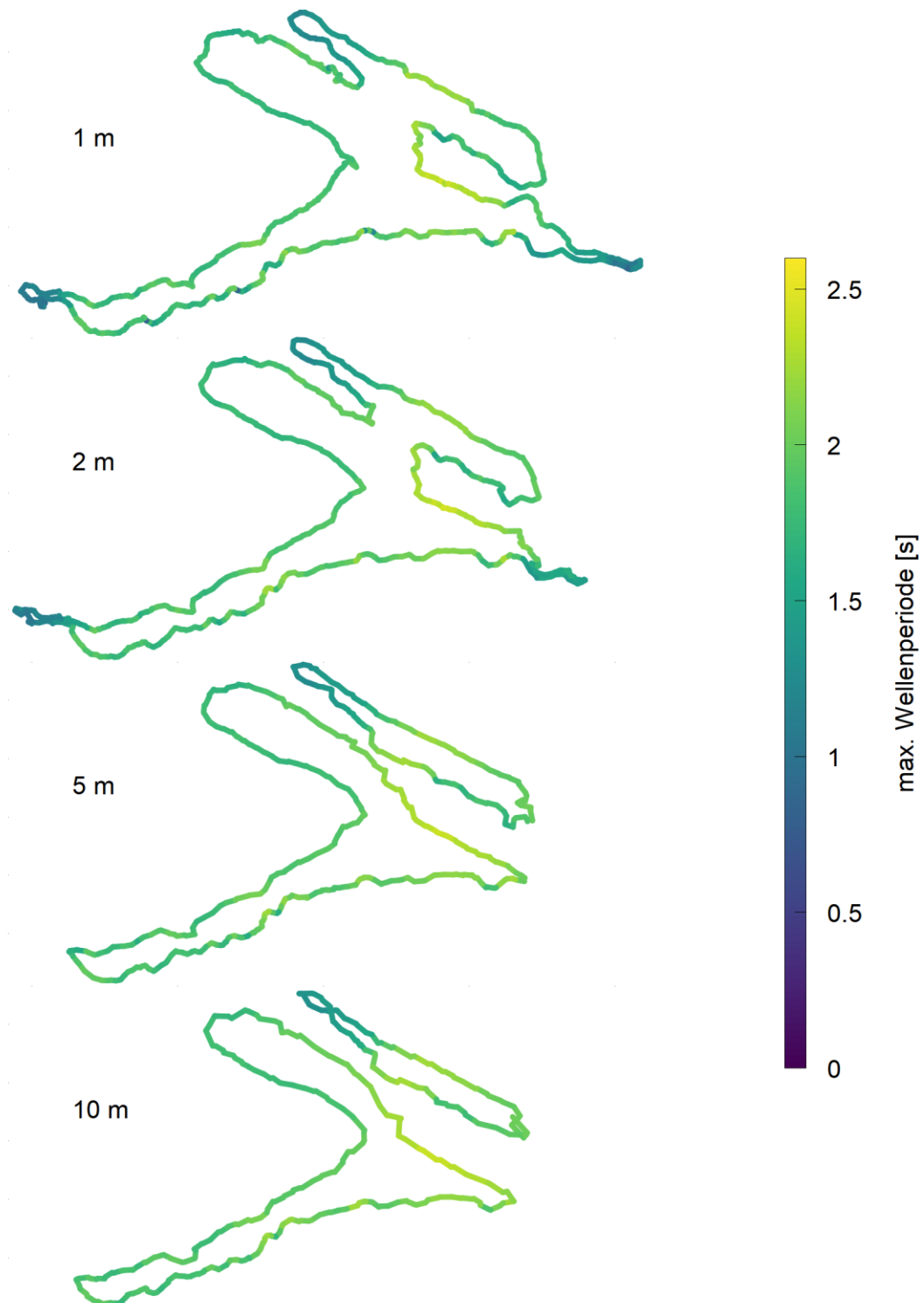


Abbildung 3.4: Maximalwerte der berechneten Wellenperiode auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 (Tiefenangabe bezieht sich auf den mittleren Wasserspiegel von 394,96 m ü.NN)

Beim Eintritt hoher Wellen in die flache Uferzone nehmen die sohnahen Orbitalgeschwindigkeiten und somit auch der Verlust an Wellenenergie durch Reibung zu. Dies ist anhand der maximalen sohnahen Orbitalgeschwindigkeiten im

Untersuchungszeitraum auf den verschiedenen Tiefenlinien in Abbildung 3.5 gut zu erkennen. Auf der 10 m-Tiefenlinie sind die maximal auftretenden Orbitalgeschwindigkeiten vernachlässigbar klein. Bis zur 1 m-Tiefenlinie stiegen diese aber stark an. Im Bereich des Südufers der Reichenau, bei am Nordufer des Gnadensees bei Allensbach sowie lokal am schweizerischen Ufer ist bei starken Westwindereignissen mit maximalen Orbitalgeschwindigkeiten von bis zu 45 cm/s zu rechnen.

Die durch die Orbitalgeschwindigkeiten hervorgerufenen Sohlschubspannungen können, je nach Ausmaß und Sohlbeschaffenheit, zur Resuspension von Sediment führen. Bei Windereignissen ist daher die flache Uferzone oft eingetrübt. In den Vorgängerberichten zu den Wellenverhältnissen am Obersee wurde eine Orbitalgeschwindigkeit von 8 cm/s definiert, ab der mit Resuspension gerechnet werden muss. Dieser Wert stützt sich auf eine Studie zur welleninduzierten Resuspension in der Flachwasserzone Litoralgarten bei Konstanz (Hofmann et al. 2011). Abbildung 3.6 zeigt prozentual den Anteil an Zeiträumen, in denen dieser Wert erreicht bzw. übertroffen wird für die 1 m- und 2 m-Tiefenlinie. An den bereits identifizierten Bereichen mit hohen Wellenhöhen tritt etwa in 10-15 % der Zeit welleninduzierte Resuspension auf. Mit den höchsten Werten ist am Übergang vom tiefen Freiwasser zur flachen Uferzone zu rechnen. Dies bedeutet, dass bei gleichen Welleneigenschaften die Resuspension in 1 m Wassertiefe bei einem abrupten Übergang zum flachen Ufer höher sein wird als mit vorgelagerter Flachwasserzone mit Wassertiefen von 1-2 m.

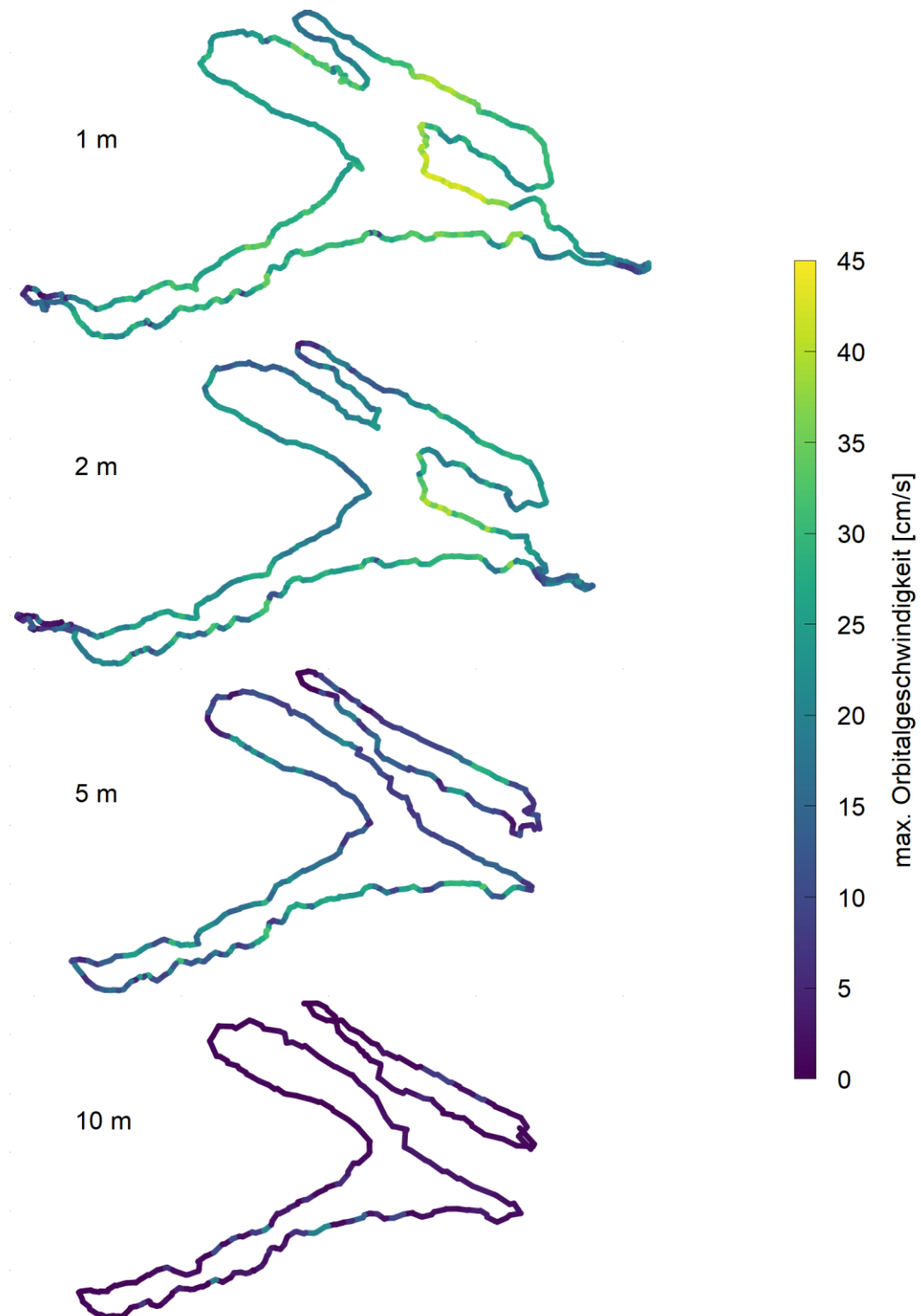


Abbildung 3.5: Maximalwerte der berechneten, sohnahen Orbitalgeschwindigkeit auf verschiedenen Tiefenlinien in den Jahren 2015-2017 (Tiefenangabe bezieht sich auf den mittleren Wasserspiegel von 394,96 m ü.NN)

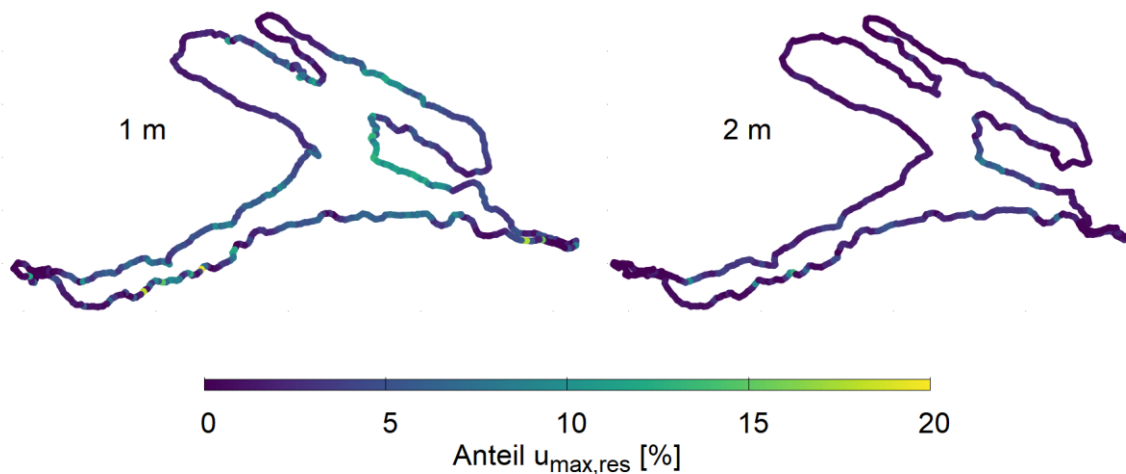


Abbildung 3.6: Anteil der Zeiträume in den Jahren 2015-2017, in denen die sohlnahe, maximale Orbitalgeschwindigkeit den angenommenen Grenzwert für Resuspension von 8 cm/s überschreitet

Bislang wurden die während Starkwindereignissen maximal zu erwartenden Wellenverhältnisse aufgezeigt. Die meiste Zeit über liegen allerdings deutlich gemäßigte Wind- und Wellenverhältnisse auf dem Untersee vor. Dies zeigt Abbildung 3.7 anhand der Quartile der verschiedenen Wellenparameter über den Untersuchungszeitraum auf der 1 m-Tiefenlinie. Daraus lässt sich ablesen, dass in 50 % der Zeit Wellenhöhen von weniger als 5 cm vorliegen. Beim 75 %-Quartil steigt der Wert nur um wenige Zentimeter auf ca. 8 cm an. Dabei werden Orbitalgeschwindigkeiten von maximal 6 cm/s erreicht. Sedimentresuspension ist also nicht zu erwarten.

Etwas stärker steigen die Werte bei den 90 %- und 95 %-Quantilen an (Abbildung 3.8). Mit Wellenhöhen von über 20-25 cm ist also in ca. 5 % der Zeit am Südufer der Reichenau und lokal am schweizerischen Ufer zu rechnen. Dort sind gleichzeitig die Orbitalgeschwindigkeiten groß genug, um die Resuspension von Sediment auszulösen.

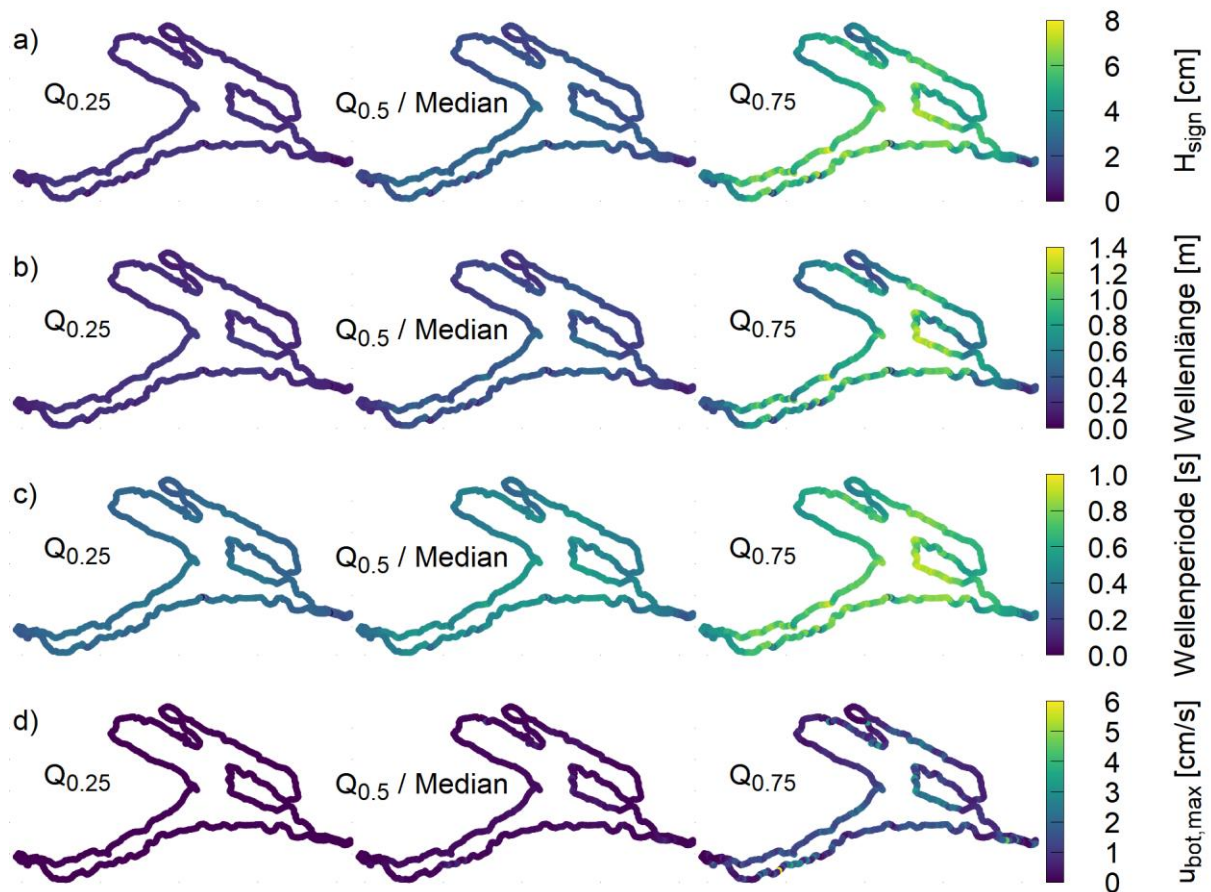


Abbildung 3.7: Quantile der berechneten (a) signifikanten Wellenhöhe, (b) Wellenlänge, (c) Wellenperiode und (d) maximalen, sohnahen Orbitalgeschwindigkeit auf der 1 m-Tiefenlinie im Zeitraum 2015-2017

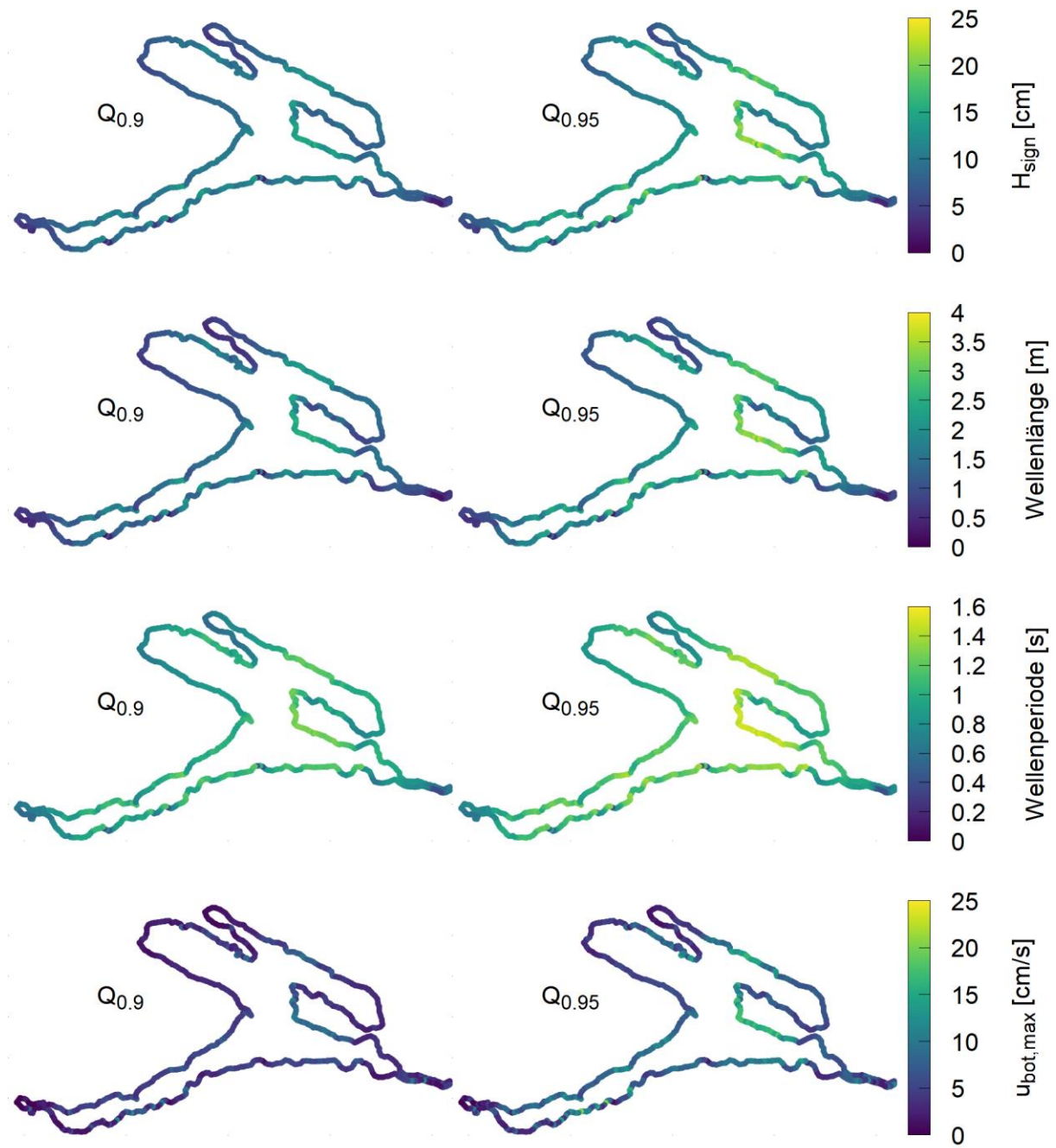


Abbildung 3.8: 90%- und 95%-Quantile der berechneten (a) signifikanten Wellenhöhe, (b) Wellenlänge, (c) Wellenperiode und (d) maximalen, sohnahen Orbitalgeschwindigkeit auf der 1 m-Tiefenlinie im Zeitraum 2015-2017

4 Zusammenfassung

Analog zu Vorgängerstudien für den Bodensee-Obersee wurden die Wellenverhältnisse der Jahre 2015, 2016 und 2017 auf dem Untersee nachgebildet, um die dort auftretenden Wellenverhältnisse räumlich differenziert zu quantifizieren. Beim Modellaufbau wurde analog zu den Vorgängermodellen vorgegangen. Es wurde ein unstrukturiertes Dreiecksgitter mit höherer Auflösung in Bereichen mit geringer Wassertiefe verwendet. Als Windrandbedingungen wurde ein zweidimensionales Windfeld aus den Daten der Reanalyseberechnungen des Wettermodells COSMO-REA6 des Hans-Ertel-Zentrums für Wetterforschung (HErZ) und des Deutschen Wetterdiensts (DWD) verwendet. Der zeitlich variable Wasserstand im See wurde anhand der Messdaten des Pegels Radolfzell berücksichtigt (Quelle: LUBW). Die Uferverbauung wurde auf Grundlage der Daten der Uferkartierung und -bewertung der IGKB (IGKB 2017) im Modell mittels Reflektionskoeffizienten für die Stufen 4 und 5 der Bewertungsskala der IGKB implementiert. Der Untersuchungszeitraum umfasst die Jahre 2015, 2016 und 2017.

Mit den höchsten Wellenhöhen ist am Untersee, wie auch am Obersee, bei Westwindereignissen zu rechnen. Die maximal erreichten signifikanten Wellenhöhen im Untersee liegen bei ca. 70 cm und treten am südwestlichen Ufer der Reichenau auf, da dort die höchsten Wirklängen bei Westwindereignissen über dem See erzielt werden. Lokal können vergleichbare Wellenlängen auch am Südufer des Untersees aufgrund der Wechselwirkung mit der Uferverbauung der Stufe 5 und der damit einhergehenden Wellenreflektion auftreten. Etwas geringer sind die zu erwartenden Wellenhöhen am Nordufer des Gnadensees bei Allensbach. Hier werden Werte von ca. 60 cm erreicht.

Ufernah ist bei diesen extremen Wellenereignissen an den genannten Orten mit sohnnahen Orbitalgeschwindigkeiten von bis zu 45 cm/s zu rechnen. Die durch die Orbitalgeschwindigkeiten hervorgerufenen Sohlschubspannungen können, je nach Ausmaß und Sohlbeschaffenheit, zur Resuspension von Sediment führen. Bei Windereignissen ist daher die flache Uferzone oft eingetrübt. Geht man von einem Resuspensionsbeginn bei Orbitalgeschwindigkeiten von 8 cm/s aus, so tritt an diesen Orten etwa in 10-15 % der Zeit welleninduzierte Resuspension auf.

Die meiste Zeit über sind die Wind- und Wellenverhältnisse auf dem Untersee allerdings deutlich gemäßiger. Die Auswertung verschiedener Quantile der Wellenhöhe zeigt, dass in 75 % der Zeit Wellenhöhen von ca. 8 cm nicht überschritten werden. Dabei werden Orbitalgeschwindigkeiten von maximal 6 cm/s erreicht. Sedimentresuspension ist also in diesen Zeiträumen nicht zu erwarten.

LITERATURVERZEICHNIS

Hofmann, H., Lorke, A., and Peeters, F. (2011): Wind and ship wave-induced resuspension in the littoral zone of a large lake, *Water Resour. Res.*, 47, W09505, doi:10.1029/2010WR010012.

Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee (IGKB) (2017): Limnologische Bewertung der Ufer- und Flachwasserzone des Bodensees. Blauer Bericht Nr. 55, Datenaktualisierung 2017 (<https://www.igkb.org/aktuelles/bodensee-wasser-informationssystembowis/uferbewertung-und-renaturierung/>)

Kobus und Partner (2019): Analyse der Wellenverhältnisse des Bodenseeufers. Abschlussbericht im Auftrag des Kanton Thurgau

Kobus und Partner (2020): Analyse des Einflusses von Uferverbauungen auf die Wellenverhältnisse am Bodenseeufer. Abschlussbericht im Auftrag des Kanton Thurgau

Lang, U., Paul, T. (2008a): Zustandsbeschreibung und Prognose mit der Daten- und Methodenbank BodenseeOnline. In: *Wasserwirtschaft* 98, Heft 10, S. 39-44.

Lang, U.; Kobus, H.; Mehlhorn, H. (2008b): BodenseeOnline als Entscheidungs- und Unterstützungssystem. In: *Wasserwirtschaft* 98, Heft 10, S. 45-48.

Lang, U., Kobus, H., Mehlhorn, H., Rothhaupt, K.-O., Scheuermann, W., Paul, T., Eder, M., Rinke, K., Schick, R., Kempke, S., Krass, C., Schmidt, F., Wolf, T., Huber, A. (2008c): Verbundforschungsvorhaben BodenseeOnline – Ein Informationssystem zur Vorhersage der Hydrodynamik

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>)