

Auswirkungen von Schiffswellen auf die Stabilität von Uferböden – Ein neues Messsystem zur Quantifizierung von Spannungen im Wasser und dem gesättigten Boden

Impact of ship waves on soil embankments – A new measurement system for quantifying stresses in water and saturated soils

Roland Riggert^{1*}, Heiner Fleige¹, Nina Stoppe-Struck², Rainer Horn¹

¹ Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 24118 Kiel, Deutschland

² Institut für Bodenkunde, Leibniz Universität Hannover, 30419 Hannover, Deutschland

* Korrespondierender Autor: r.riggert@soils.uni-kiel.de

Received: 26 April 2019, received in revised form: 23 July 2019, accepted: 24 July 2019

Zusammenfassung

Bei der Renaturierung von Flüssen und dem Rückbau von befestigten Uferanlagen müssen neben ökologischen Aspekten auch die Uferstabilitäten berücksichtigt werden. Es stellt sich die Frage, ob an viel befahrenen Wasserschiffahrtsstraßen der von Schiffen erzeugten Wellenschlag zur Erosion und Degradation von Uferböden führt. Um verlässliche Stabilitätsbewertungen der Ufer durchführen zu können, müssen neben den Bodenstabilitätsparametern außerdem die einwirkenden Kräfte quantifiziert werden. Aus diesem Grund wurden Spannungsmessungen von Schiffswellen im Nord-Ostsee-Kanal bei Kiel vorgenommen. Für die Bestimmung der drei raumgerichteten Hauptspannungen σ_1 , σ_2 und σ_3 , der mittleren Normal- (MNS) und der oktaedrischen Scherspannung (OCTSS) wurde eine modifizierte Form des Stress-State-Transducer-System (SST) entwickelt und erstmalig eingesetzt. Die Neukonstruktion (Watt-SST) mit einem austauschbaren Akku und wasserabgedichteten Messkomponenten ermöglicht den Einsatz im Wasser und im wassergesättigten Boden. Die Sensorköpfe wurden unter und über der mittleren Wasseroberfläche positioniert, um den Wellenschlag und eine mögliche Sogwirkung quantifizieren zu können. Während zwei Messperioden wurden verschiedene Schiffstypen (Containerschiff, Fähre, Frachter und Katamaran) gemessen. Die Ergebnisse zeigten je nach Schiffstyp unterschiedliche Wellenmuster (Periode sowie Ausprägung) und Spannungswerte von bis zu 3 kPa. Die ersten Ergebnisse verdeutlichen außerdem, dass eine Optimierung hinsichtlich Einbau und Platzierung der Sensoren im Wasser und Boden erfolgen muss, wenn die maximalen Spannungsspitzen beim Brechen einer Welle erfasst werden sollen.

Schlagworte: Schiffswellen, Bodenstabilität, Spannungsmessungen, Hauptspannungen, Stress State Transducer System

Summary

The renaturation of river and coastal embankments needs to include ecological aspects and the stability of shorelines. The impact of waves caused by heavy ship traffic could lead to erosion processes and to the degradation of soils along the coast. To evaluate the stability of shorelines it is necessary to quantify soil stability parameters as well as stress impacts of the waves. Therefore, stress measurements of ship waves were carried out at Kiel Canal. In order to determine the three main stresses (σ_1 , σ_2 , and σ_3), the averaged mean stress (MNS), and the octahedral shear stress a new developed stress state transducer system was firstly tested. This newly constructed system (Mudflat-SST) is equipped with an exchangeable battery for long time measurements and waterproof, which allows measurements in water and saturated soils. The sensors heads were placed above and below the middle water level for determining the effect of waves and a potential drag effect. During two periods, different types of ships were measured such as container vessel, cargo ship, ferry, and catamaran. Maximum stress impacts of 3 kPa were determined. The results show different kind of waves regarding their period or expression for the different ship types. In order to quantify the maximum stress impact of breaking waves, further research is needed to optimize sensor head's location in the water and saturated soil.

Keywords: ship waves, soil stability, stress impacts, mean stresses, stress state transducer system

1. Einleitung

Um gemäß der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (2000/60/EG, 2000) wieder einen naturnahen Zustand der Gewässer zu erzielen, werden vielerorts befestigte Ufer von Flüssen, Seen oder Kanälen zurückgebaut (Teiber-Siessegger, 2011). Maßgeblich für eine positive Entscheidung zum naturnahen Rückbau an Wasserschiffahrtsstraßen ist jedoch die Frage, in wie weit ein unbefestigtes Ufer stabil gegenüber äußeren Einwirkungen wie zum Beispiel Wellenschlag ist. Für diese Beurteilung müssen im Wesentlichen Stabilitätsuntersuchungen an Uferböschungen durch die einwirkende Belastung quantifiziert werden.

Neugebauer (2015) führte umfassende Stabilitätsuntersuchungen entlang der Tideelbe in Deutschland von der Elbe-Mündung bei Cuxhaven bis Geesthacht durch. In der Studie wurden an 24 Standorten die Stabilitätsparameter „Trockenrohdichte“, „Vorbelastung“ und „Scherspannung“ erfasst und bewertet. Diese Parameter, in Ergänzung mit dem Eindringwiderstand, werden in der Literatur häufig genutzt, um Bodenstabilitäten bevorzugt in land- und forstwirtschaftlichen Systemen zu charakterisieren (Schjonning et al., 2016; Cambi et al., 2017; Riggert et al., 2017; Seehusen et al., 2019). Durch die Bestimmung des Kompressibilitätsindex simulierte Neugebauer (2015) im Labor außerdem eine Belastung in Form von zyklischen Wellen. Weiterführende Untersuchungen im gleichen Untersuchungsgebiet auf der Mikroskala mit rheologischen Analysen wurden von Stoppe (2015) durchgeführt.

Für die Bestimmung der Belastungen durch Wellen oder Gezeiten auf die Uferböschungen sind aufwendigere Untersuchungen nötig. Das Wasserschiffahrtsamt Hamburg (2007) untersuchte beispielsweise die Wasserstandsänderung bei der Passage von mehreren Schiffen. Mit diesen Messungen kann jedoch nur der statische Wasserdruck der Welle bestimmt werden. Mit Bestimmung des statischen Wasserdrucks ermittelten auch Liedermann et al. (2014) die Wellenhöhe verschiedener Schiffstypen am Ufer der Donau bei Hainburg. In der Studie wurden statische Wasserdrücke von bis zu 3 kPa gemessen, was einer Wellenhöhe von 30 cm entspricht. Bei Versuchen im Wellenkanal in Hannover wurden von Zhang and Horn (1995) als Folge des Wellenbrechens jedoch Drücke von bis zu 20 kPa gemessen.

Um folglich die gesamte Energie (kinetisch und statisch), welche bei Anlanden der Wellen auf den Boden übertragen wird, zu quantifizieren, müssen zeitgenaue und hochauf-

lösende Spannungsmessungen durchgeführt werden. Das Stress State Transducer System (Horn et al., 1992) ist ein Messsystem, welches aufgrund seiner speziellen Konstruktion in der Lage ist, Spannungen im dreidimensionalen Raum zu erfassen und richtungsspezifische Belastungsvektoren zu erstellen. Das System wurde jedoch in der Vergangenheit ausschließlich zur Untersuchung der Auswirkungen von Forst- und Landmaschinen eingesetzt (Horn et al., 2007; Seehusen et al., 2014; Riggert et al., 2016). Für den Einsatz im wassergesättigten Boden bzw. im Wasser musste das System entsprechend modifiziert werden.

Riggert et al. (2019) entwickelten auf Grundlage von Bodenstabilitätsüberlegungen von Horn and Fleige (2003) ein Bewertungsschema, um interne Bodenstabilitäten anhand der Parameter „Vorbelastung“ und „Scherspannung“ und externe Belastung in Form von 1. Hauptspannung und Scherspannung in Relation zu setzen und eine mögliche Bodendegradation zu bestimmen. Mit einem modifizierten Spannungsmesssystem, wie in dieser Arbeit getestet, wären die Voraussetzungen gegeben, um das Bewertungsschema auch auf Uferböden zu übertragen und mögliche Instabilitäten durch Wellenschlag zu bestimmen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist daher die Konstruktion eines Messsystems zum Einsatz in wassergesättigten Böden und im freien Wasser. Darüber hinaus sollen erste Messungen durchgeführt werden, bei denen die unterschiedlichen Raumspannungen (Haupt- und Scherspannungen) von Wellen verschiedener Schiffe quantifiziert werden. Der Nord-Ostsee-Kanal ist die meist befahrene Schifffahrtsstraße der Welt und im Rahmen der Erweiterung des Kanals sind auch hier Stabilitätsbewertungen erforderlich, um die Böschungen entsprechend zu konstruieren. Jährlich passieren rund 30.000 Schiffe den Kanal, wobei ca. 40 % auf Mehrzweckfrachter, 25 % auf Tanker und 16 % auf Container entfallen (WSV, 2017). Die Vielfalt der Schiffe soll genutzt werden, um die Wellenbilder von unterschiedlichen Schiffstypen zu bestimmen und somit eine mögliche Degradation von Uferböden durch Wellenschlag oder Sogwirkung abzuschätzen.

2. Material und Methoden

2.1 Messsystem

Das neu konstruierte Messsystem Watt-SST gleicht vom Aufbau dem Stress State Transducer System (SST-Kiel3).

Das auf dem Dehnungsmessstreifenprinzip (DMS) basierende Messsystem wurde nach Vorarbeiten von Harris (1960) erstmals von Nichols et al. (1987) als Methode zur Erfassung des Bodendrucks vorgestellt. Seither ist das System kontinuierlich weiterentwickelt (Horn et al., 1992; Kühner, 1997; Gräsele, 1999; Zink 2009; Riggert 2015) und sowohl zur Bestimmung der Spannungsverhältnisse unter landwirtschaftlichen Maschinen (u. a. Semmel and Horn, 1994; Wiermann et al., 2000; Fazeakas, 2005; Zink et al., 2010) als auch unter Forstmaschinen (Riggert et al., 2013; Vossbrink and Horn, 2004) erfolgreich eingesetzt worden.

Um den Spannungszustand in einem bestimmten Punkt im Boden zu berechnen, werden, gemäß der von Nichols et al. (1987) beschriebenen Orientierung der Messzellen zueinander, Spannungsmessungen in sechs unabhängigen Raumrichtungen vorgenommen. Anhand der gemessenen Normalspannungen können die drei raumgerichteten Hauptspannungen ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) sowie die Invarianten der mittleren Normalspannung (σ_{oc}) und die oktaedrische Scherspannung (τ_{oc}) errechnet werden. Ein Abgleich mit bodenphysikalischen Messgrößen wie der Vorbelastung oder dem Scherwiderstand könnten eine Aussage zu Stabilitätszuständen des untersuchten Bodens ermöglichen. Um dieses Messsystem im wassergesättigten Bodenbereich bzw. im Wasser einzusetzen, mussten Modifikationen vorgenommen werden.

In dem mit der Firma UGT und der Bundesanstalt für Gewässerkunde neu entwickelten Watt-SST wurden die Dehnmesstreifen durch hochempfindliche und wasserdichte Druckaufnehmer ersetzt, indem sie durch das Aufbringen einer Silikonmasse auf dem Sensorgehäuse gegen Wassereintrich geschützt sind. Die verbauten Druckaufnehmer können Drücke zwischen 0 und 2000 hPa mit einer Rate von bis zu 40 Hz messen und sind somit in der zeitlichen und in der messbaren Auflösung sensibler als die Vorgängerversionen. Um beispielsweise den Einfluss der Gezeiten entlang der Tideelbe bei der Passage von Schiffen zu berücksichtigen, ist das System für eine dauerhafte Messung konzipiert worden. Das mit bis zu drei Sensoren ausgestattete Watt-SST kann durch einen austauschbaren Akku (Laufzeit ca. 100 Stunden) eine dauerhafte Messung gewährleisten. Die Auslesung der Daten erfolgt mit einem mobilen Feld-PC über eine W-LAN-Schnittstelle am ebenfalls wasserdicht verbauten Messrechner (Abbildung 1).

2.2 Untersuchungsgebiet und -aufbau

Das neue Messsystem wurde erstmals im Bereich der Kanalfähre in Landwehr (Kilometer 86,8) am Nord-Ostsee-Kanal in der Nähe von Kiel eingesetzt und getestet. Die Watt-SST Sensoren wurden an einem Gestell (Abbildung 1) in einem auslaufenden befestigten Flachwasserbereich des Kanals gesetzt. Zukünftige Messungen



Abbildung 1. Bild des neukonstruierten Messsystems Watt-SST mit Austausch-Akku, Messrechner und Sensorgestell zur Quantifizierung von Spannungen

Figure 1. Picture of the new measurement system Mudflat-SST with measurement computer, exchangeable battery, and framework for sensor heads to quantify stress impacts

sollen entlang des Nord-Ostsee-Kanals und der Tideelbe auch an unbefestigten Uferböschungen unter Berücksichtigung der Ufereigenschaften durchgeführt werden. Aus der Anordnung am Gestell ergibt sich folgende Sensorbeziehung/-lage zueinander: Sensor 1 ist am Gestell ganz unten montiert, mit einer Distanz von ca. 10 cm zum Gestellfuß. Über Sensor 1 befindet sich mit einem Abstand von ca. 5 cm Höhe Sensor 2. Das Gestell wurde für den ersten Messtag (18.12.2018) so platziert, dass Sensor 2 ca. 2–3 cm unter der Wasseroberfläche liegt. Für den zweiten Messtag (18.01.2019) gilt der identische Aufbau, nur dass zusätzlich ein 3. Sensor weitere 5 cm über Sensor 2 platziert wurde und somit über der Wasseroberfläche lag. Die Wassertemperatur betrug zu den Messzeiten zwischen 4 und 5 °C. Während der Testmessungen wurden mehrere Schiffe erfasst, welche den Messbereich mit einer Geschwindigkeit nahe der Geschwindigkeitsbegrenzung (15 km/h) zwischen 10 und 15 km/h passierten. Bei den erhobenen Messwerten handelt es sich um Einzelwerte, welche nicht statistisch ausgewertet werden können. Für zukünftige Untersuchungen ist jedoch eine Gruppierung von Schiffstypen vorgesehen, sodass signifikante Unterschiede herausgearbeitet werden können.

2.3 Gemessene Schiffe

Die *Agnes Essberger* (Abbildung 2 a) ist ein Tank-Schiff mit 126 m Länge, 19 m Breite und 6 m Tiefgang. Das Schiff wurde im Jahr 2006 gebaut, besitzt eine Gesamttragfähigkeit von 11.340 Tonnen und fährt unter portugiesischer Flagge. Die *Agnes Essberger* passierte die Messstelle am 18.12.2018 gegen 11.30 Uhr. Am selben Tag wurde der britische Katamaran *Deveron* mit einer Länge von 20 m, einer Breite von 7 m und einem Tiefgang von 1,6 m gemessen (Abbildung 2 b). Das Containerschiff *Ida Rambow*, welches unter deutscher Flagge fährt, besitzt eine Gesamttragfähigkeit von 13.709 Tonnen bei Abmaßen von 149 m Länge, 23 m Breite und 8,4 m Tiefgang. Das Schiff wurde im Jahr 2007 gebaut und passierte das Messsystem am 18.01.2019 (Abbildung 2 c). Die *Kamelia* ist ein Frachtschiff, welches unter maltesischer Flagge fährt und eine Gesamttraglast von 5049 Tonnen besitzt (Abbildung 2 d). Das Schiff wurde 1999 gebaut und erstreckt sich über 95 m Länge, 13 m Breite, bei einem Tiefgang von 3,9 m (vesselfinder, 2019). Dieses Schiff wurde ebenfalls am 18.01.2019 im Nord-Ostsee-Kanal gemessen.



Abbildung 2. Die Schiffe *Agnes Essberger* (a), *Deveron* (b), *Ida Rambow* (c) und *Kamelia* (d) bei der Passage am 18.12.2018 bzw. 18.01.2019 an der eingerichteten Messstelle am Nord-Ostsee-Kanal bei Kiel

Figure 2. The ships *Agnes Essberger* (a), *Deveron* (b), *Ida Rambow* (c) and *Kamelia* (d) passing the measuring point at Kiel-Canal on 18.12.2018 respectively 18.01.2019

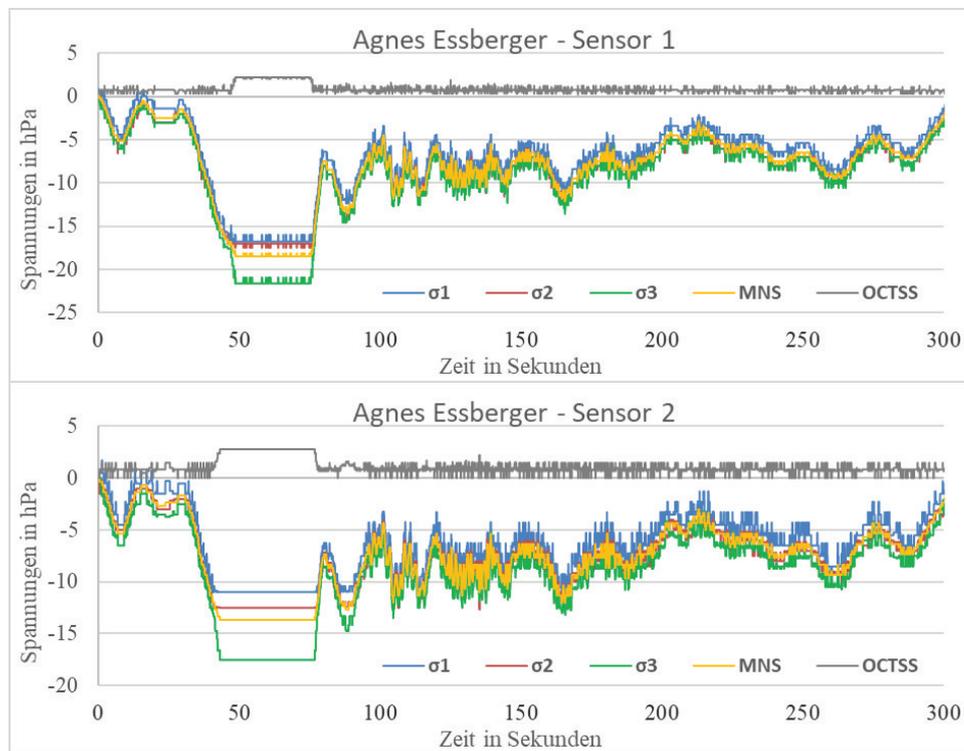


Abbildung 3. Verlauf der drei Hauptspannungen (σ_1 , σ_2 , σ_3), der mittleren Normalspannung (MNS) und der oktaedrischen Scherspannung (OCTSS) der Sensorköpfe bei Durchfahrt der *Agnes Essberger*

Figure 3. Main stresses (σ_1 , σ_2 , σ_3), averaged normal stress (MNS), and octahedral shear stress (OCTSS) from the sensor heads during the pass of *Agnes Essberger*

3. Ergebnisse

In Abbildung 3 sind die drei errechneten Hauptspannungen (σ_1 , σ_2 , σ_3), die mittlere Normalspannung (MNS) und die oktaedrische Scherspannung (OCTSS) farbspezifisch für Sensor 1 und Sensor 2 bei Durchfahrt der *Agnes Essberger* dargestellt. Bei Sensor 1 fallen die Hauptspannungen sowie die MNS nach ca. 30 Sekunden um rund 20 hPa ab, befinden sich anschließend ca. 25 Sekunden auf einem Niveau, bevor sie wieder ansteigen. Im folgenden Verlauf lassen sich für alle vier Spannungskomponenten kleinere Wellenbewegungen beobachten. Nach rund 300 Sekunden wird das Ausgangsniveau wieder erreicht. Bei σ_3 ist das Minimum von $-21,6$ hPa zu verzeichnen. Die OCSST (Sensor 1) verläuft bei einem Wert knapp über 0 hPa nahezu konstant über die gesamte Messperiode.

Der Sensor 2 zeigt einen identischen Gesamtverlauf der fünf Spannungen wie Sensor 1, jedoch lassen sich in der Ausprägung Unterschiede feststellen (Abbildung 3, unten). Obwohl beim zweiten Sensorkopf ebenso ein Abfall der Spannungen zu beobachten ist, beträgt dieser nur rund 15 hPa. Auch das Minimum wurde mit $-17,5$ hPa für

die dritte Hauptspannung gemessen, fällt jedoch weniger ausgeprägt als bei Sensor 1 aus. Das abgesenkte Plateau der vier sich verändernden Spannungen beginnt bei rund 45 Sekunden und dauert bis ca. 77 Sekunden und ist somit rund sieben Sekunden länger. Die OCTSS verläuft im Vergleich zu Sensor 1 identisch und bildet ebenso ein Maximum-Plateau bei einem Wert von ca. 2 hPa in der gleichen Zeitspanne aus. Bis zum Ausgangsniveau von σ_1 , σ_2 , σ_3 und MNS vergehen auch rund 300 Sekunden.

Für die Durchfahrt des Katamarans *Deveron* sind die Ergebnisse der Sensoren 1 und 2 in Abbildung 4 dargestellt. Im Vergleich zur *Agnes Essberger* sind die Spannungsverläufe beider Sensoren nahezu identisch, und beide Sensoren weisen keine deutliche Abnahme der Spannungen auf. Bis auf die OCTSS verlaufen die anderen Spannungen in einer ausgedehnten Wellenform mit einem Wellenberg ($+2,3$ hPa) bei rund 60 Sekunden und einem Wellental bei rund 135 Sekunden (-5 hPa) über die gemessene Dauer von rund 180 Sekunden. Allerdings fallen kurze periodische Wellen nach ca. 100 Sekunden bis 180 Sekunden auf. Die drei Hauptspannungen sowie die MNS durchlaufen annähernd alle drei Sekunden einen An- und Abstieg von ca. 5 hPa.

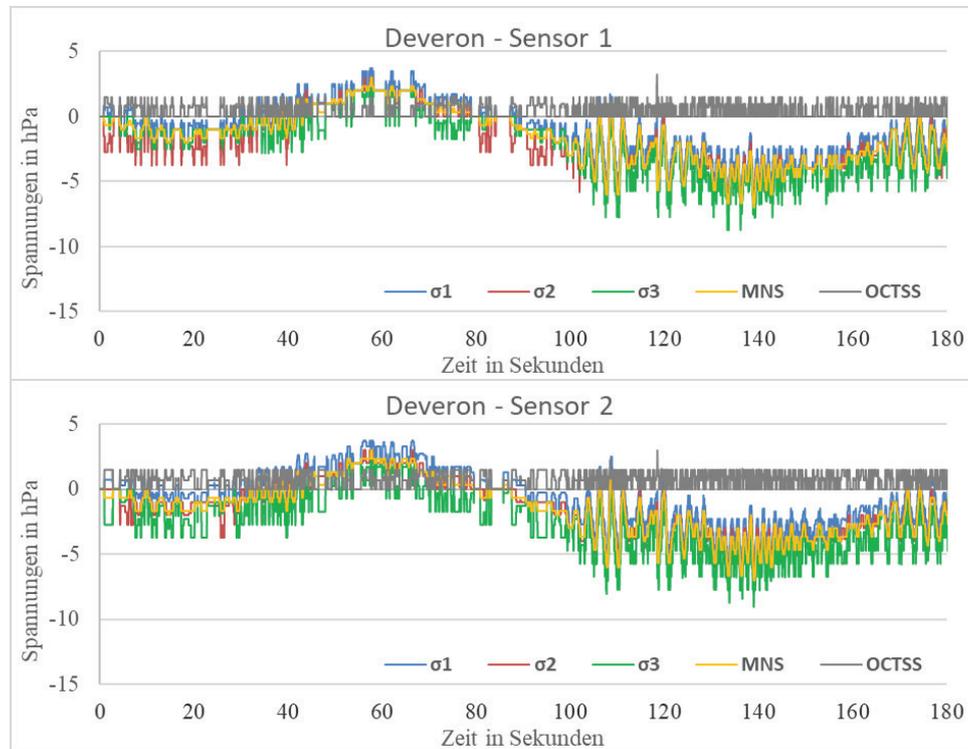


Abbildung 4. Verlauf der drei Hauptspannungen (σ_1 , σ_2 , σ_3), der mittleren Normalspannung (MNS) und der oktaedrischen Scherspannung (OCTSS) der Sensorköpfe bei Durchfahrt der *Deveron*

Figure 4. Main stresses (σ_1 , σ_2 , σ_3), averaged normal stress (MNS), and octahedral shear stress (OCTSS) from the sensor heads during the pass of *Deveron*

Wie zuvor bei der *Agnes Essberger* ist keine Bewegung der OCTSS zu verzeichnen. Sie verläuft über die gesamte Messperiode bei Werten zwischen 0 und 1 hPa nahezu konstant. Das Containerschiff *Ida Rambow* erzeugte bei der Passage ein ähnliches Wellenabbild der Spannungen wie die *Agnes Essberger* (Abbildung 5). Die OCTSS schwankt bis auf das maximale Plateau (Werte bei 3,5 hPa) wieder konstant zwischen 0 und 1 hPa bei allen drei Sensoren. Die anderen vier Spannungen der Sensoren 1 und 2 fallen zunächst analog zur *Agnes Essberger* ab, bilden ein Minimum-Plateau aus und steigen anschließend wieder an. Wie auch bei dem ersten Schiff fällt der Minimumwert bei Sensor 1 mit -18 hPa (σ_3) niedriger aus als der Minimumwert bei Sensor 2 mit -12 hPa (σ_3). Das Minimumplateau ist bei Sensor 2 ca. 15 Sekunden länger zu beobachten. Anders als bei der *Agnes Essberger* steigen die Spannungen jedoch innerhalb weniger Sekunden (5 bis 10 Sekunden) wieder auf den Ursprungswert an. Auffällig ist ein Zwischenhoch von σ_3 , gemessen am Sensor 1, während des Minimum-Plateaus. Neben σ_3 reagieren auch alle anderen Spannungen, jedoch weniger ausgeprägt. Nachdem die Spannungen den Ausgangszustand wieder erreicht haben,

lassen sich fünf bis sechs kleine Wellen mit einer Periode von rund sechs Sekunden beobachten (Schwankung von rund 5 hPa). Nach rund 180 Sekunden verzeichnen beide Sensoren ein Wellental (Werte bei ca. -5 hPa) und nach 290 Sekunden einen Wellenberg (Werte bei 10 hPa). Der Sensor 3 zeigt bei positiven Spannungswerten einen identischen Verlauf wie zuvor die beiden anderen Sensoren mit. Ein kleiner Unterschied ist jedoch, dass σ_1 im Vergleich zu den anderen Hauptspannungen etwas erhöht ist. Allerdings lassen sich bei Sensor 3 aufgrund seines Einbaus über der mittleren Wasserlinie folglich keine ausgeprägten Negativwerte beobachten.

In Abbildung 6 sind die Messwerte der drei Sensoren während der Durchfahrt des Transportschiffes *Kamelia* dargestellt. Ähnlich wie bei den anderen beiden Frachtschiffen ist auch bei der *Kamelia* (insbesondere für Sensor 1 und 2) zunächst eine deutliche Abnahme der drei Hauptspannungen sowie der MNS zu erkennen. Die OCTSS zeigt wie auch zuvor bis auf das leicht ausgeprägte Maximal-Plateau keine Veränderungen. Die Abnahme der anderen Spannungen geht jedoch deutlich langsamer vonstatten als bei der *Agnes Essberger* bzw. der *Ida Rambow*.

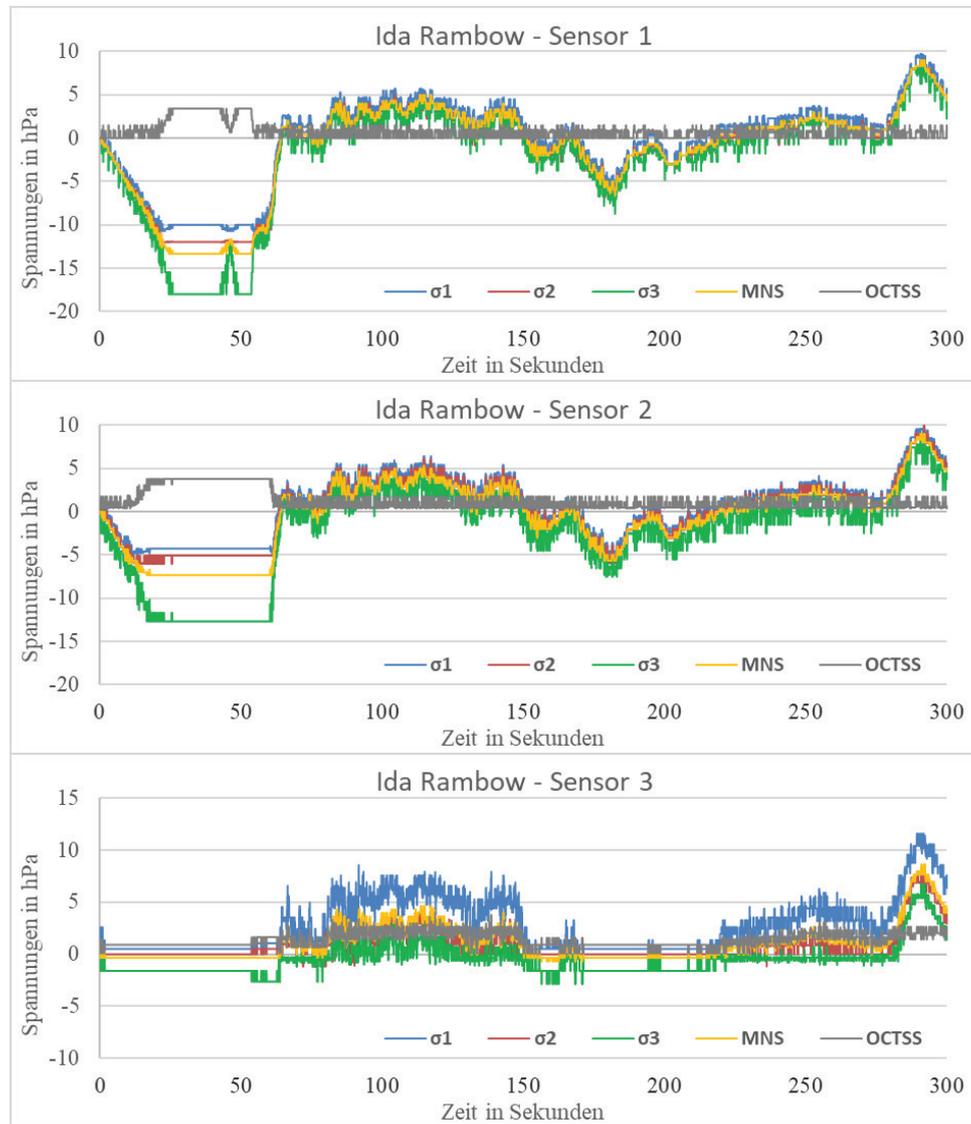


Abbildung 5. Verlauf der drei Hauptspannungen (σ_1 , σ_2 , σ_3), der mittleren Normalspannung (MNS) und der oktaedrischen Scherspannung (OCTSS) der Sensorköpfe bei Durchfahrt der *Ida Rambow*

Figure 5. Main stresses (σ_1 , σ_2 , σ_3), averaged normal stress (MNS), and octahedral shear stress (OCTSS) from the sensor heads during the pass of *Ida Rambow*

Das Minimum-Plateau wird bei Sensor 1 erst nach 120 Sekunden, bei Sensor 2 nach ca. 110 Sekunden und bei Sensor 3 nach 100 bzw. 30 Sekunden erreicht. Die anhaltende Zeit dieses Plateaus ist jedoch mit der Dauer bei den anderen Schiffen zu vergleichen. Die Minimalwerte werden bei allen Sensoren von der dritten Hauptspannung erzielt und folgen dem Muster von abnehmender Ausprägung von Sensor 1 (-20 hPa) zu Sensor 2 (-15 hPa) zu Sensor 3 (-5 hPa). Nach dem Minimum-Plateau steigen die Spannungen wieder an, jedoch nicht sofort zurück aufs Ausgangsniveau, welches erstmalig wieder nach ca. 190 Sekunden durch einen Wellenberg

erreicht wird. Dieses Muster wurde bereits bei der *Agnes Essberger* beobachtet.

Nach dem Wiederanstieg folgen zunächst sehr kurzperiodische Wellen (bis ca. Sekunde 220) mit einer Wellenperiode von ca. 3 Sekunden. Diese Wellentypen wurden zuvor bei der Passage der *Deveron* beobachtet. Im Anschluss lassen sich langwellige Wasserbewegungen mit einer Periode von 20 bis 30 Sekunden bis zum Ende der Messung nach 420 Sekunden beobachten. Erst zu diesem Zeitpunkt erreichen die verschiedenen Spannungen wieder das Ausgangsniveau, welches zuvor nur von Wellbergen erreicht bzw. auch leicht überschritten wurde.

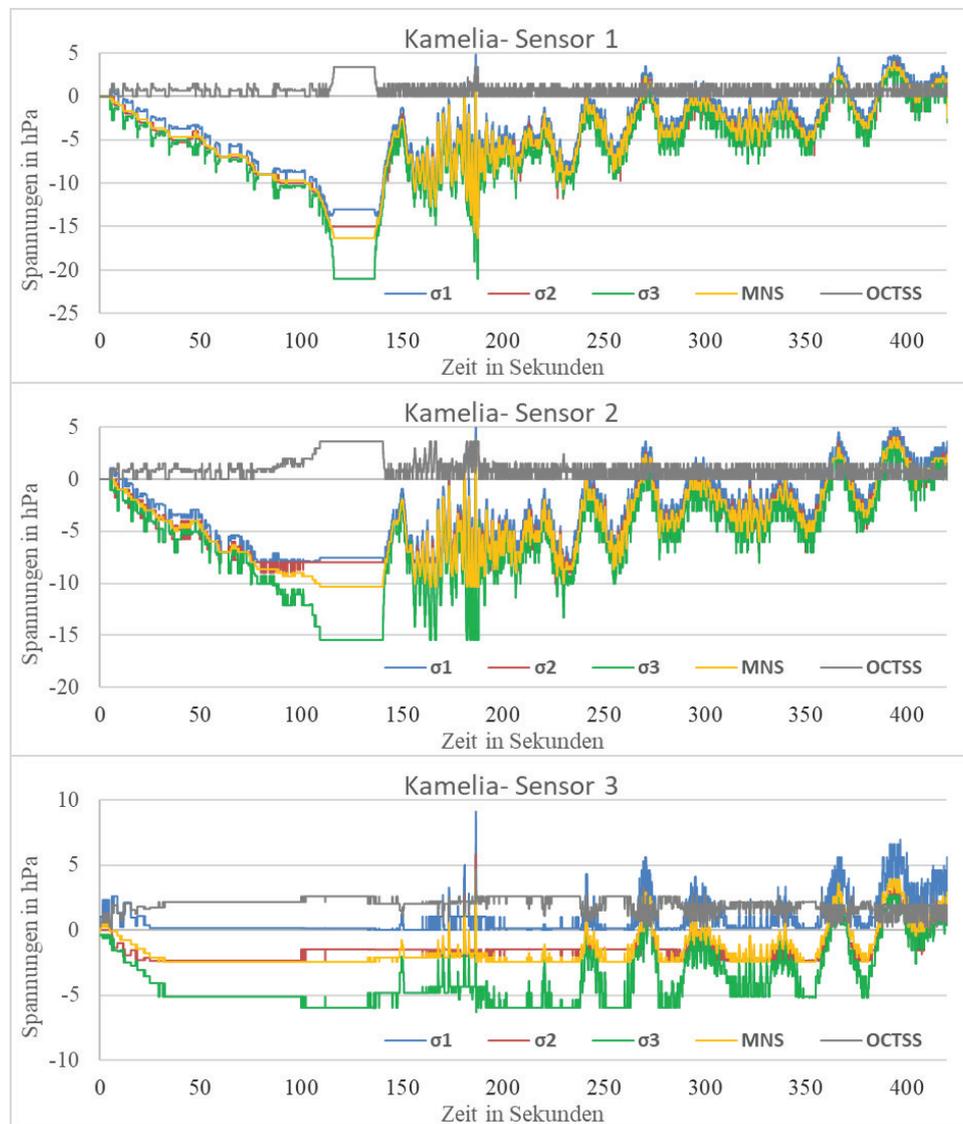


Abbildung 6. Verlauf der drei Hauptspannungen (σ_1 , σ_2 , σ_3), der mittleren Normalspannung (MNS) und der oktaedrischen Scherspannung (OCTSS) der Sensorköpfe bei Durchfahrt der *Kamelia*

Figure 6. Main stresses (σ_1 , σ_2 , σ_3), averaged normal stress (MNS), and octahedral shear stress (OCTSS) from the sensor heads during the pass of *Kamelia*

4. Diskussion

Im Vergleich zu den Ergebnissen der bisherigen SST-Messungen in Land- und Forstwirtschaft fallen die gemessenen Werte am Nord-Ostsee-Kanal deutlich geringer aus. Während zum Beispiel Zink et al. (2010), Riggert et al. (2017) und Seehusen et al. (2019) Werte von bis 1000 kPa feststellen, werden in der vorliegenden Arbeit nur Werte von knapp 3 kPa gemessen. Die Untersuchungen von Liedermann et al. (2014) unterstützen die vorliegenden

Messwerte als Folge des schiffsinduzierten Wellenschlags, denn auch in der Studie liegen die gemessenen Drücke bei maximal 3 kPa. Der Grund für die große Differenz zur Land- bzw. Forstwirtschaft lässt sich mit dem abweichenden Einsatz bzw. Versuchsaufbau begründen. In den zuvor zitierten Arbeiten wurden Überfährungsversuche mit Maschinen von bis zu 40 Mg Gesamtgewicht bzw. von bis zu 6,6 Mg Radlast durchgeführt und die Spannungen direkt unter der Fahrspur gemessen. Die dargestellten Werte sind dabei absolute Spannungsspitzen, welche nur

für einen Bruchteil einer Sekunde auf dem Boden gelastet haben. Die am Ufer gemessenen Schiffswellen erreichen bei Weitem nicht diese Maximalwerte, lasten jedoch kontinuierlich als Wassersäule auf den Uferböden. Die oktaedrische Scherspannung (OCTSS) tendiert sogar häufig gegen null, was auf den einheitlichen hydrostatischen Druck an jedem Druckaufnehmer zurückzuführen ist. Nur bei stark variierenden Hauptspannungskomponenten lassen sich auch Peaks bei der OCTSS erkennen. In Kombination mit der festgestellten Sogwirkung (negative Spannungswerte) können Schiffswellen in Abhängigkeit von der Bodenstabilität dennoch zu Erosionsprozessen am Uferboden beitragen, da eine mögliche Degradation zusätzlich von den Bodenstabilitäten entlang der Ufer abhängig ist.

Bei Messungen des Wasser- und Schifffahrtsamtes Hamburg entlang der Tideelbe wurden Pegelmessungen während der Durchfahrt von verschiedenen Schiffstypen durchgeführt (WSA-Hamburg, 2007, 2016). Die Ergebnisse zeigen analog zur vorliegenden Arbeit bei einem Katamaran viele kurze periodische Wellen, aber keine Abnahme des Pegelstandes während der Passage. Bei größeren Containerschiffen ist diese Abnahme jedoch zu verzeichnen. Je größer die Schiffe werden, desto ausgeprägter fällt sie aus und erreicht bei Schiffen der Post-Panamax-Klasse ihr Maximum. Es folgen lange und kurze periodische Wellen. Diese Wellensysteme werden von Flügge and Uliczka (1996) als Primär- und Sekundärwellen beschrieben. Des Weiteren können langperiodische vorauslaufende Schallwellen, der Bugstau vor dem Schiffskörper und der seitliche Absink am Schiff während einer Schiffspassage beobachtet werden. Der Absink wird in der vorliegenden Arbeit durch das Minimumplateau der Spannungsmessungen charakterisiert. Die Ausprägung der Wellensysteme, des Bugstaus und des Absinks sind insbesondere von der Schiffsgeschwindigkeit, dem Passierabstand, den Schiffsabmessungen und den Fahrwasserhältnissen wie zum Beispiel der Sohlbreite oder der Wassertiefe abhängig (Nanson et al., 1994; BAW, 1996). In der umfassenden Studie von Liedermann et al. (2014) werden je nach Schiffstypenklasse ebenfalls die charakteristischen Wellenbilder beschrieben. Außerdem verdeutlicht die Studie den Zusammenhang von zunehmenden Geschwindigkeiten und zunehmenden Wellenhöhen sowie von zunehmendem Uferabstand und abnehmender Wellenhöhe. Ein Vergleich mit den untersuchten Schiffen in der vorliegenden Arbeit zeigt, dass die untersuchten Schiffe (Container, Tanker, Frachter) am Nord-Ostseekanal deutlich größer ausfallen, jedoch ähnlich hohe Wellen bzw. Drücke erzeugen. Ein möglicher Grund für diesen

Effekt können die erhöhten Geschwindigkeiten der Schiffe auf der Donau sein. Dieser Vergleich zeigt auf, dass bei zukünftigen Messungen mit dem Watt-SST weitere Parameter erhoben werden müssen, um die Ursachen der einwirkenden Kräfte auf die Uferböden besser differenzieren zu können. Dazu gehören beispielsweise auch armierende Effekte durch Wurzeln in der Uferböschung. Eine Studie von Stokes et al. (2009) verdeutlicht den positiven Effekt von Wurzeln auf die Stabilität von Hangböden. Dabei können direkte Effekte, welche beispielsweise durch die Wurzelarchitektur und die Verzahnung mit dem Boden entstehen, sowie indirekte Effekte, wie die durch die Wurzeln verursachte schnellere Austrocknung und Aggregation des Bodens, unterschieden werden. Beide Effekte führen nach Stokes et al. (2009) zum Anstieg des Scherwiderstandes und somit zu einer erhöhten Stabilität am Hang. Ebenso scheint es möglich, die Energie der auftreffenden Wellen durch Pflanzenbewuchs um bis zu 40 % zu minimieren (Schmidt-Wygasch and Heuner, 2018). Für eine qualitative Stabilitäts- oder Erosionsbewertung müssen folglich zusätzlich bodenphysikalische und strukturelle Parameter wie die Vorbelastung, der Scherwiderstand oder die Trockenroh-dichte erfasst werden.

Neugebauer (2015) hat an verschiedenen Uferstandorten entlang der Tideelbe bereits Vorbelastungswerte von unter 10 kPa als Folge von hohen Bodenfeuchtigkeiten (Matrixpotenzial bei -3 kPa) und Trockenroh-dichten von unter $0,8 \text{ g cm}^{-3}$ gemessen. Mithilfe einer zyklischen Belastung, welche Wellen simuliert, errechnete Neugebauer (2015) den Kompressibilitätsindex als Funktion des Matrixpotenzials und verdeutlichte geringere Stabilitäten mit zunehmender Bodenfeuchtigkeit. Dieser Zusammenhang wurde auch bereits von anderen Autoren bestätigt (Baumgartl and Horn, 1991; Peng et al., 2004; Han et al., 2006). Außerdem zeigt Neugebauer (2015), dass es bereits unterhalb der Vorbelastungswerte zu plastischen Verformungsprozessen als Folge der zyklischen Belastung kommen kann. Horn (1990) führt dieses Verhalten auf gekoppelte hydraulische und mechanische Prozesse zurück. Als Folge der Inkompressibilität des Wassers, scherenden Bewegungen und schlechten hydraulischen Bodeneigenschaften können dadurch Porenwasserüberdrücke entstehen, die zur Destabilisierung beitragen. Porenwasserüberdrücke können aber auch als Folge eines Hochwasserereignisses zur Destabilisierung der Uferbereiche führen (Ullrich et al., 1986; Rinaldi et al., 2004). Die Entstehung eines Porenwasserüberdruckes hängt von der Textur und der Lagerungsdichte ab, da in feinkörnigen Substraten überschüssiges Porenwasser lang-

samer abgeleitet werden und in einer Bodenverflüssigung resultieren kann (Lade and Yamamuro, 1997; Casagli et al., 1999; Rinaldi and Casagli, 1999; Zhai and Horn 2019). Die Arbeit von Zhang and Horn (1995) zeigt außerdem, dass die in der vorliegenden Arbeit gemessenen 3 kPa noch keine Maximalwerte darstellen. Zhang and Horn (1995) führten Untersuchungen im Wellenkanal durch und ermittelten beim Brechen einer Welle Drücke von bis zu 20 kPa. Verantwortlich für die höheren Werte ist die kinetische Energie, welche beim Brechen erzeugt wird. Führböter and Witte (1991) berichten in ihrer Arbeit von drei unterschiedliche Wellenbrecharten: Schwallbrecher, Sturzbrecher und Reflexionsbrecher, welche anhand der Brechkennzahl klassifiziert werden können. Einfluss auf die Energie der Wellen haben nach Führböter (1986, 1991) insbesondere die Wellenhöhe, die Periode in der die Wellen auflaufen, die Wassertiefe und die Böschungsneigung des Ufers. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die auf das Ufer wirkenden Kräfte in Form von Schiffswellen, obwohl sie in Bezug zu anderen Systemen relativ gering ausfallen, ausreichen, um eine destabilisierende Wirkung zu erzeugen und Erosionsprozesse zu fördern. Um die maximalen Drücke, die Scherkräfte sowie die Sogwirkung (in Form von σ_s) im Verlauf des Auflaufes der Welle zeitabhängig zu erfassen, muss der Einbau der Watt-SST-Sensoren entsprechend der Uferausformung und der Wellenhöhe weiter getestet und optimiert werden. Zukünftig werden die Sensoren nicht nur im Wasser, sondern auch im Bereich der Wellenbrechung direkt am Ufer eingesetzt. Für eine abschließende hydraulische und gekoppelte mechanische Stabilitätsbewertung müssen dann zusätzlich noch Parameter der Bodenstabilität sowie der zeitlichen Änderung der Porenwasserdrücke mittels Tensiometer erfasst werden.

5. Fazit

Die Ergebnisse zeigen unterschiedliche Wellenmuster und Spannungseinträge in Abhängigkeit vom Schiffstyp. Bei kleineren Schiffen wie dem Katamaran wurden geringere Spannungsdifferenzen bestimmt. Die gemessenen Frequenzen der Wellen weisen außerdem auf sogenannte Sekundärwellen hin, welche auch bei den größeren Schiffen zu beobachtet sind. Bei Container- und Frachtschiffen sind jedoch zusätzlich Primärwellen zu erkennen. Des Weiteren sind die maximalen Spannungsdifferenzen, folglich der Absenk seitlich der Schiffe, größer. Die gemessenen Spannungswerte fallen deutlich geringer aus als die

Spannungseinträge aus land-oder forstwirtschaftlichen Systemen. Allerdings zeigt die Literatur, dass die Stabilitätsparameter von Böden im wassergesättigten Bereich der Ufer deutlich geringer ausfallen als ihre Referenzen aus Land- und Forstwirtschaft und somit eine Destabilisierung und Erosion der Uferzone als Folge von schiffserzeugten Wellen wahrscheinlich ist. Im Vergleich zu anderen Studien im Wellenkanal erreichen die Spannungswerte in der vorliegenden Arbeit nur ca. 15 % der Maximalwerte, da keine Messungen beim Brechen der Wellen durchgeführt wurden. Um zukünftig die maximalen Belastungen durch das Brechen einer Welle zu quantifizieren, müssen die Spannungsmessungen nicht nur im Wasser, sondern zusätzlich auch im gesättigten Boden, direkt am Übergang zwischen Ufer und Wasser, vorgenommen werden. Außerdem sollten für eine Stabilitätsbewertung der Ufer im gleichen Zuge bodenmechanische Parameter wie die Vorbelastung oder Scherparameter sowie die Porenwasserdrücke bestimmt werden.

Acknowledgments

Wir bedanken uns bei der Bundesanstalt für Gewässerkunde für die konstruktive Zusammenarbeit und die zur Verfügung gestellten Mittel bei der Entwicklung für das neue Spannungsmesssystem (Watt-SST).

Literatur

- 2000/60/EG, R (2000): Richtlinie 2000/60/EG des europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik. <https://eur-lex.europa.eu/>.
- Baumgartl, T. und R. Horn (1991): Effect of Aggregate Stability on Soil Compaction. *Soil and Tillage Research* 19, 203–213.
- BAW (1996): Anpassung der Fahrwinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschiffahrt. Ermittlung und Bewertung ausbaubedingter Änderungen der schiffserzeugten Belastungen – Schiffswellen und Strömungen. Bundesamt für Wasserwirtschaft (BAW), Nr. 95 52 3422/95 52 3423.
- Cambi, M., Hoshika, Y., Mariotti, B., Paoletti, E., Picchio, R., Venanzi, R. und E. Marchi (2017): Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur*

- L. seedling performance in an experimental field. *Forest Ecology and Management* 384, 406–414.
- Casagli, N., Rinaldi, M., Gargini, A. und A. Curini (1999): Pore water pressure and streambank stability: Results from a monitoring site on the Sieve River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms* 24, 1095–1114.
- Fazekas, O. (2005): Bedeutung der Bodenstruktur und Wasserspannung als stabilisierende Kenngrößen gegen intensive mechanische Belastungen in einer Parabraunerde aus Löss unter Pflug- und Mulchsaat. *Schriftenreihe – Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, Bd. 67, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 170 S.
- Flügge, G. und K. Uliczka (1996): Schiffbedingte Wellen unter spezifischen Randbedingungen von Seewasserstraßen. *Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen* 9, 75–90.
- Führböter, A. (1986): Model and Prototype Tests for Wave Impact and Run-up on a Uniform 1-4 Slope. *Coastal Engineering* 10, 49–84.
- Führböter, A. (1991): Wellenbelastung von Deich- und Deckwerksböschungen. *Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft* 47, 225–282.
- Führböter, A. und H.-H. Witte (1991): Die dynamische Verweilzeit und ihre Beziehung zum Wellenauflauf und -ablauf an einer Deichböschung 1:n = 1:6. *Die Küste*. 52, 1–31.
- Gräse, W. (1999): Numerische Simulation mechanischer, hydraulischer und gekoppelter Prozesse in Böden unter Verwendung der Finite Elemente Methode. *Schriftenreihe – Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, Bd. 48, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 433 S.
- Han, H.-S., Page-Dumroese, D.S., Han, S.-K. und J. Tirocke (2006): Effect of slash, machine passes, and soil moisture on penetration resistance in a cut-to-length harvesting. *International Journal of Engineering Science* 17, 11–24.
- Harris, W.L. (1960): Dynamic stress transducers and the use of continuum mechanics in the study of various soil stress-strain relationships. PhD thesis, Michigan State University, East Lansing.
- Horn, R. (1990): Aggregate characterization as compared to soil bulk properties. *Soil and Tillage Research* 17, 265–289.
- Horn, R., Johnson, C., Semmel, H., Schafer, R. und M. Lebert (1992): Räumliche Spannungsmessungen mit dem Stress State Transducer (SST) in ungesättigten aggregierten Böden – theoretische Betrachtungen und erste Ergebnisse. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde* 155, 269–274.
- Horn, R. und H. Fleige (2003): A method for assessing the impact of load on mechanical stability and on physical properties of soils. *Soil and Tillage Research* 73, 89–99.
- Horn, R., Vossbrink, J., Peth, S. und S. Becker (2007): Impact of modern forest vehicles on soil physical properties. *Forest Ecology and Management* 248, 56–63.
- Kühner, S. (1997): Simultante Messung von Spannungen und Bodenbewegungen bei statischen und dynamischen Belastungen zur Abschätzung der dadurch induzierten Bodenbeanspruchung. *Schriftenreihe – Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, Bd. 39, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 231 S.
- Lade, P.V. und J.A. Yamamuro (1997): Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands. *Canadian Geotechnical Journal* 34, 918–928.
- Liedermann, M., Tritthart, M., Gmeiner, P., Hinterleitner, M., Schludermann, E., Keckeis, H. und H. Habersack (2014): Typification of vessel-induced waves and their interaction with different bank types, including management implications for river restoration projects. *Hydrobiologia* 729, 17–31.
- Nanson, G.C., Vonkrusenstierna, A., Bryant, E.A. und M.R. Renilson (1994): Experimental Measurements of River-Bank Erosion Caused by Boat-Generated Waves on the Gordon River, Tasmania. *Regulated Rivers* 9, 1–14.
- Neugebauer, T. (2015): Bodenphysikalische Untersuchungen an Uferböden der Tideelbe als Grundlage für die Pronose des Kompressibilitätsindex als Maß für den Widerstand gegen Wellenschlag. *Schriftenreihe – Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde Universität Kiel*, Bd. 109, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 114 S.
- Nichols, T.A., Bailey, A.C., Johnson, C.E. und R.D. Grisso (1987): A Stress State Transducer for Soil. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 30, 1237–1241.
- Peng, X.H., Horn, R., Zhang, B. und Q.G. Zhao (2004): Mechanisms of soil vulnerability to compaction of homogenized and recompacted Ultisols. *Soil and Tillage Research* 76, 125–137.
- Riggert, R., Fleige, H., Kietz, B., Gaertig, T. und R. Horn (2013): Einfluss von üblichen Forst- und Spezialmaschinen auf die Bodenstruktur und -stabilität. *Berichte der DBG: Böden – Lebensgrundlage und Verantwortung*. 7.–12. September, Rostock.
- Riggert, R. (2015): Spannungseinträge unter Holzrntemaschinen und Auswirkungen auf bodenphysikalische

- Parameter. Schriftenreihe –Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bd. 84, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 171 S.
- Riggert, R., Fleige, H., Kietz, B., Gaertig, T. und R. Horn (2016): Stress distribution under forestry machinery and consequences for soil stability. *Soil Science Society of America Journal* 80, 38–47.
- Riggert, R., Fleige, H., Kietz, B., Gaertig, T. und R. Horn (2017): Dynamic stress measurements and the impact of timber harvesting on physical soil properties. *Australian Forestry* 80, 255–263.
- Riggert, R., Fleige, H. und R. Horn (2019): An Assessment Scheme for Soil Degradation Caused by Forestry Machinery on Skid Trails in Germany. *Soil Science Society of America Journal*, doi:10.2136/sssaj2018.07.0255.
- Rinaldi, M. und N. Casagli (1999): Stability of stream-banks formed in partially saturated soils and effects of negative pore water pressures: the Sieve River (Italy). *Geomorphology* 26, 253–277.
- Rinaldi, M., Casagli, N., Dapporto, S. und A. Gargini (2004): Monitoring and modelling of pore water pressure changes and riverbank stability during flow events. *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 237–254.
- Schjonning, P., Lamande, M., Munkholm, L.J., Lyngvig, H.S. und J.A. Nielsen (2016): Soil precompression stress, penetration resistance and crop yields in relation to differently-trafficked, temperate-region sandy loam soils. *Soil and Tillage Research* 163, 298–308.
- Schmidt-Wygasch, C. und M. Heuner (Hrsg.) (2018): Die Ufer der Tideelbe im Wechselspiel von Mensch und Umwelt. Vegetation, Boden und deren Ökosystemleistungen. Ergebnisse der BfG-Forschungsprojekte *Elb-Service* und *tibass* sowie Zwischenergebnisse des Makrophytenmonitorings der Beweissicherung Tideelbe. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, Deutschland.
- Seehusen, T., Borresen, T., Rostad, B.I., Fleige, H., Zink, A. und H. Riley (2014): Verification of traffic-induced soil compaction after long-term ploughing and 10 years minimum tillage on clay loam soil in South-East Norway. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science* 64, 312–328.
- Seehusen, T., Riggert, R., Fleige, H., Horn, R. und H. Riley (2019): Soil compaction and stress propagation after different wheeling intensities on a silt soil in South-East Norway. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B – Soil & Plant Science* 69, 343–355.
- Semmel, H. und R. Horn (1994): Möglichkeiten zur Bestimmung der mechanischen Belastbarkeit und der Druckfortpflanzung im Boden im Hinblick auf die Ableitung von bodentyp- und maschinenspezifischen Grenzwerten. *Landbauforschung Völkenrode* 147, 41–61.
- Stokes, A., Atger, C., Bengough, A.G., Fourcaud, T. und R.C. Sidle (2009): Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides. *Plant and Soil* 324, 1–30.
- Stoppe, N. (2015): Rheologische Untersuchungen an tidebeeinflussten Uferböden der Elbe als Grundlage für die Entwicklung mikromechanischer Pedotransferfunktionen. Schriftenreihe – Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bd. 106, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 151 S.
- Teiber-Siessegger, P. (2011): The Shore of Lake Constance: Condition, Evaluation and Renaturation. *Wasserwirtschaft* 101, 10–17.
- Ullrich, C.R., Hagerty, D.J. und R.W. Holmberg (1986): Surficial Failures of Alluvial Stream Banks. *Canadian Geotechnical Journal* 23, 304–316.
- Vesselfinder (2019): ship tracking. www.vesselfinder.com.
- Vossbrink, J. und R. Horn (2004): Modern forestry vehicles and their impacts on soil physical properties. *Soil and Tillage Research* 79, 207–219.
- Wiermann, C., Werner, D., Horn, R., Rostek, J. und B. Werner (2000): Stress/strain processes in a structured unsaturated silty loam Luvisol under different tillage treatments in Germany. *Soil and Tillage Research* 53, 117–128.
- WSA-Hamburg (2007): Gefährdung durch Sog und Wellenschlag. Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg, www.wsa-hamburg.wsv.de.
- WSA-Hamburg (2016): Wellen- und Strömungsmessungen im Rahmen von Makrophytenuntersuchungen. Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg, Bericht Nr. 0219-05 Rev. 01.
- WSV (2017): Der Nord-Ostsee-Kanal – international und leistungsstark. Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung der Bundes, www.gdws.wsv.bund.de.
- Zhai, X. und R. Horn (2019a): Dynamics of pore functions and gas transport parameters in artificially ameliorated soils due to static and cyclic loading. *Geoderma* 337, 300–310.

Zhang, H. und R. Horn (1995): Bewertung von Vorlandbewirtschaftungsverfahren nach bodenphysikalischen Kriterien. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben des Landesamtes für Wasserhaushalt und Küsten Schleswig-Holsteins.

Zink, A. (2009): Bodenstabilität und Auswirkungen dynamischer Lasteinträge auf physikalische Eigenschaften von Ackerböden unter konservierender und konventioneller Bodenbearbeitung. Schriftenreihe – Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde, Bd. 84, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, 132 S.

Zink, A., Fleige, H. und R. Horn (2010): Load Risks of Subsoil Compaction and Depths of Stress Propagation in Arable Luvisols. *Soil Science Society of America Journal* 74, 11733–11742.