

# Welleninduzierte Spannungsverteilung in Sedimenten und Böden gezeitenbeeinflusster Ufer der Tideelbe – SpaTE

Anneka Mordhorst, Heiner Fleige, Rainer Horn

Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel

im Auftrag der

Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Koblenz



## Abschlussbericht

Az.: U3/Z1/162.02/020/015

März 2023

Zitiervorschlag: Mordhorst, A., Fleige, H., Horn, R. (2023). Welleninduzierte Spannungsverteilung in Sedimenten und Böden gezeitenbeeinflusster Ufer der Tideelbe – SpaTE. Projektbericht im Auftrag der BfG.  
doi 10.5675/Spannungen\_Boden\_Wellen

## Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis.....</b>	<b>ii</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>iv</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Material und Methoden .....</b>	<b>4</b>
2.1 Beschreibung des Messsystems .....	4
2.2 Beschreibung des Untersuchungsstandortes.....	5
2.2.1 Messkampagnen mit dem Watt-SST (Arbeitspaket 1 und 2).....	6
2.2.2 Bodeneigenschaften der Sensorstandorte .....	7
2.3 Datenauswertung (Arbeitspaket 3).....	8
2.3.1 Aufbereitung der Spannungsmessdaten .....	8
2.3.2 Berechnung von Haupt- und Scherspannungen .....	9
2.3.3 Statistische Berechnungen.....	10
2.3.4 Weitere Einflussparameter und Messparameter .....	11
2.3.5 Integration der AIS-Daten.....	11
2.3.6 Bestimmung der Biomasse in der Pionierzone .....	13
2.4 Bodenmechanische Untersuchungen .....	14
2.4.1 Entnahme von Bodenproben.....	14
2.4.2 Laborversuche zur Untersuchung der mechanischen Stabilität.....	14
<b>3 Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>16</b>
3.1 Absolute Spannungswerte und -verläufe im Uferboden über mehrere Tidezyklen.....	16
3.2 Spannungsänderungen im Uferboden durch schiffsbedingte Wellenbelastung .....	19
3.2.1 Haupt- und Scherspannungen im Uferboden durch schiffsbedingte Wellenbelastung.	20
3.2.2 Einfluss verschiedener Schiffsparameter auf die Spannungseinträge im Uferboden ...	26
3.3 Mechanische Stabilität der Uferböden .....	30
3.3.1 Vorbelastung und zyklische Kompressibilität .....	30
3.3.2 Scherwiderstand .....	31
3.4 Unterirdische Biomasse an den Sensorpositionen.....	32
<b>4 Bewertung der Uferstabilität gegenüber hydromechanischer Belastung.....</b>	<b>34</b>
<b>5 Zusammenfassung.....</b>	<b>38</b>
<b>6 Ausblick und Empfehlungen.....</b>	<b>39</b>
<b>7 Literatur.....</b>	<b>41</b>

## Anhang

## Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1:** Schematisierte Darstellung eines typischen Wellenbildes, das durch ein vorbeifahrendes Schiff erzeugt wird (nach WSA Hamburg, 2003, leicht verändert)..... 2
- Abbildung 2:** Komponenten des Watt-SST (links) und Frontansicht eines Sensorkopfes (rechts) mit den 6 Drucksensoren, die Druckspannungen in den Raumrichtungen  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  sowie  $\sigma_{n1}$ ,  $\sigma_{n2}$ ,  $\sigma_{n3}$  messen..... 5
- Abbildung 3:** Spannungsmessungen mit dem Watt-SST in drei Messkampagnen (MK) an der Tideelbe in Hollerwettern (Blickrichtung flusswärts). Darstellung der drei Sensortiefen S1, S2, S3 ober-/unterhalb der Geländeoberfläche sowie den drei Einbaupositionen des Watt-SST entlang der Uferzone vom Brackwatt zur Brackrohmarsch (Schema unten, von links nach rechts landwärts). Die wenige cm mächtige Uferkante entspricht der Vegetationskante..... 7
- Abbildung 4:** Position der am Sensor-Standort Hollerwettern vorbeigefahrenen Schiffe ( $n = 377$ ), für die ein Wellensignal mit dem Watt-SST eindeutig erfasst wurde. Messkampagne (MK) 1 = 249, MK 2 = 0, MK 3 = 128 Schiffe..... 12
- Abbildung 5:** Entnahme von Wurzelproben ( $n = 4$ ) in einem 50 x 50 cm Plot in der Pionierzone mit dem Wurzelbohrer (links) und anschließender Bestimmung fraktionierter ober- und unterirdischer Biomasse im Labor (rechts). ..... 13
- Abbildung 6:** Zeitlicher Verlauf der tiefenspezifischen Spannungen in x-Richtung ( $\sigma_x$ ) über mehrere Tidezyklen (WS = Wasserstand über Pegelnullpunkt) an unterschiedlichen Positionen der Uferzone (Brackwatt in der Pionierzone mit Strandsimse und im vegetationslosen Watt sowie Brackrohmarsch in der Schilfzone) im Zuge der drei Messkampagnen (MK1–3) in Hollerwettern. Sensor S1: -25 cm und S2: -15 cm im Boden, S3: +10 cm (während der Hochwasserphase im Wasser)..... 17
- Abbildung 7:** Maximale (positive Druckspannungen) und minimale (negative Zugspannungen) Spannungsänderungen in z-Richtung ( $\Delta\sigma_z$ ) in den 3 Sensortiefen (S1, S2, S3), die durch schiffsbedingte Wellenereignisse im vegetationslosen Watt ( $n = 128$ ) und in der Pionierzone mit Strandsimse ( $n = 249$ ) des Uferbereichs in Hollerwettern verursacht wurden..... 20
- Abbildung 8:** Kumulative Häufigkeit der Minimal- und Maximalwerte der 1. Hauptspannung ( $\Delta\sigma_1$ ), die als maximale Druck- und Zugspannungen (Max und Min  $\Delta\sigma_1$ ) durch Schiffswellen in 15 und 25 cm Bodentiefe im Brackwatt der beiden Sensorstandorte eingetragen wurden ( $n = 377$ ). ..... 22
- Abbildung 9:** Einfluss des Schiffstyps und erzeugten Wellenmusters der Kategorien A–D auf den Verlauf der berechneten Hauptspannungen ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ), mittleren Normalspannung (MNS) und der oktaedrischen Scherspannung (OCTSS) des Sensorkopfes 1 in 25 cm Bodentiefe.  $G$  = Fahrgeschwindigkeit über Grund,  $PA$  = Passierabstand,  $L$ ,  $B$ ,  $T$  = Länge, Breite, Tiefgang des Schiffs. Fahrtrichtung = flussabwärts. .... 24
- Abbildung 10:** Zusammenhang zwischen Schiffstyp und dessen erzeugten Wellenmuster (Kat A–D) anhand der relativen Häufigkeit von Wellenmuster (a) und Schiffstyp (b). Kat A = Hoher Absunk und Primärwelle > Sekundärwelle, Kat B = Leichter Absunk und Sekundärwelle > Primärwelle, Kat C =

Kaum Absenk und schwach ausgeprägtes Primär- und Sekundärwellensystem, Kat D = Kaum Absenk und stark ausgeprägtes Sekundärwellensystem. ....	25
<b>Abbildung 11:</b> Maximales Delta der Spannungseinträge der 1. Hauptspannung ( $\Delta\sigma_1$ ), der mittleren Normalspannung ( $\Delta\text{MNS}$ ) und der oktaedrischen Scherspannung ( $\Delta\text{OCTSS}$ ) auf den Uferboden in 15 cm Bodentiefe (Fro-Horizont) in Abhängigkeit vom schiffserzeugten Wellenmuster der Kategorie A–D (vgl. Abbildung 9, Anzahl (n) pro Wellenkategorie).....	26
<b>Abbildung 12:</b> Einfluss des Schiffstyps auf die welleninduzierten Zunahmen (Druckspannungen) und Abnahmen (Zugspannungen) der 1. Hauptspannung ( $\Delta\sigma_1$ ) (a) und der oktaedrischen Scherspannung ( $\Delta\text{OCTSS}$ ) in 15 cm Bodentiefe (Fro-Horizont) (b). n = Anzahl der Schiffe pro Schiffstyp, Schiffseigenschaften siehe Tabelle 5.....	27
<b>Abbildung 13:</b> Lineare Korrelation zwischen verschiedenen Schiffparametern und maximalem Spannungseintrag durch generierte Schiffswellen (1. Hauptspannung, $\Delta\sigma_1$ ) in 15 cm Bodentiefe (Fro-Horizont) im vegetationslosen Watt (n = 128) und in der Pionierzone mit Strandsimse (n = 249). GüG = Geschwindigkeit über Grund. ....	28
<b>Abbildung 14:</b> Lineare Korrelation zwischen verschiedenen Schiffparametern und maximalem Scherspannungseintrag durch generierte Schiffswellen ( $\Delta\text{OCTSS}$ ) in 15 cm Bodentiefe (Fro-Horizont) im vegetationslosen Watt (n = 128) und in der Pionierzone mit Strandsimse (n = 249). GüG = Geschwindigkeit über Grund.....	29
<b>Abbildung 15:</b> Vorbelastungswert ( $P_v$ ) und zyklische Kompressibilität ( $C_n$ ) bei 20 kPa von auf -6 kPa vorentwässerten Bodenproben aus 15 cm Tiefe im vegetationslosen Watt und in der Pionierzone mit Strandsimse an der Tideelbe in Hollerwettern (n = 6).....	30
<b>Abbildung 16:</b> Mohr-Coulomb'sche Bruchgerade von auf -6kPa vorentwässerten Bodenproben aus dem vegetationslosen Watt und der Pionierzone mit Strandsimse an der Tideelbe in Hollerwettern zur Ableitung des Scherwiderstandes (T), Winkel der inneren Reibung ( $\varphi$ ) und Kohäsion (c) bei zunehmender Normalspannung (n = 7-15) pro Schergerade.....	31
<b>Abbildung 17:</b> Scherwiderstand ( $\tau$ ) und maximales Matrixpotenzial (Max $\psi_m$ ) bei einer Normalspannung von 20 kPa von auf -6 kPa vorentwässerten Bodenproben aus dem vegetationslosen Watt und in der Pionierzone mit Strandsimse. Proben mit ZB wurden unmittelbar vor dem Schertest zyklisch mit 20 kPa (50 Zyklen) belastet.....	32
<b>Abbildung 18:</b> Stabilitätsmodell zur Bewertung der Uferstabilität im vegetationslosen Watt und in der Pionierzone mit Strandsimse gegenüber maximalen Spannungseinträgen der 1. Hauptspannung ( $\Delta\sigma_1$ ) durch Schiffswellen ohne und mit Berücksichtigung des Wasserhöhendrucks bei niedrigem ( $\Delta$ TWD MIN, Szenario B, Berechnung siehe Gleichung 7) und hohem Tidenhub ( $\Delta$ TWD MAX, Szenario C, Berechnung siehe Gleichung 8) an der Tideelbe in Hollerwettern. TWD = Tideabhängiger Wasserhöhendruck, $P_v$ MW = Mittlere mechanische Stabilität (Mittelwert der Vorbelastung bei einem Matrixpotenzial ( $\psi_m$ ) = -6 kPa), $P_v$ STA = Arithmetische Standardabweichung der Vorbelastung. $\Delta\sigma_1 > P_v$ MW = instabile Verhältnisse (roter Bereich), $\sigma_1 > P_v$ MW- $P_v$ STA = Schwankungsbereich der Stabilität (hellroter Bereich), $\Delta\sigma_1 < P_v$ MW- $P_v$ STA = stabile Verhältnisse (weißer Bereich). ....	35

**Abbildung 19:** Stabilitätsmodell zur Bewertung der Uferstabilität gegenüber schiffswelleninduzierten Scherbelastungen (OCTSS) im vegetationslosen Watt und in der Pionierzone mit Strandsimse.  $\tau$  entspricht dem aus der Mohr-Coulomb'schen Bruchgerade (siehe Abbildung 16) berechneten Scherwiderstand bei mit dem Watt-SST gemessener maximaler Normalspannung (MNS) während eines Schiffswellenereignisses an der Tideelbe in Hollerwettern..... 36

## Tabellenverzeichnis

**Tabelle 1:** Geographische Positionen des Watt-SSTs in der Uferzone in Hollerwettern, Zeitraum sowie Anzahl vollständig erfasster Tidehochwasserphasen (THW) und Schiffswellen-ereignisse (SWE) der durchgeführten Messkampagnen (MK.) ..... 6

**Tabelle 2:** Bodeneigenschaften und Horizontfolgen der Sensorstandorte in Hollerwettern. EC = elektrische Leitfähigkeit, CaCO<sub>3</sub> = Calciumcarbonat. Iwb = Brackwatt, MRb = Brackrohmarsch. F bzw. G = Horizont am Gewässergrund bzw. mit Grundwasser-einfluss unter oxidierenden (o) und reduzierenden Bedingungen (r) in Abhängigkeit der Sauerstoffverfügbarkeit. tb = tidal-brakisch, e = carbonathaltig (> 2 % Carbonat), II = Römische Ziffer, die einen Wechsel des Ausgangssubstrats kennzeichnet. .... 8

**Tabelle 3:** Spannweiten der Minimal (MIN)- und Maximalspannungen (MAX) aller Tideniedrig- und Tidehochwasserphasen einer Messkampagne (MK) sowie die mittlere Spannungsdifferenz durch Tidehub und Wellenschlag pro Tidehochwasserphase innerhalb einer Messkampagne. Min = Minimalwert, Max = Maximalwert, MW = arithmetischer Mittelwert, STA = arithmetische Standardabweichung..... 18

**Tabelle 4:** Spannweiten der Maximalspannungseinträge ( $\Delta\sigma$ ) durch schiffsbedingte Wellenbelastungen in den drei Sensortiefen im Uferboden des vegetationslosen Watts (n = 128) und in der Pionierzone mit Strandsimse (n = 249).  $\sigma_1$  = 1. Hauptspannung, MNS = Mittlere Normalspannung, OCTSS = Oktaedrische Scherspannung. MW = arithmetischer Mittelwert, STA = arithmetische Standardabweichung, MIN/MAX = geringster/größter Maximalspannungseintrag eines Wellenereignisses. .... 21

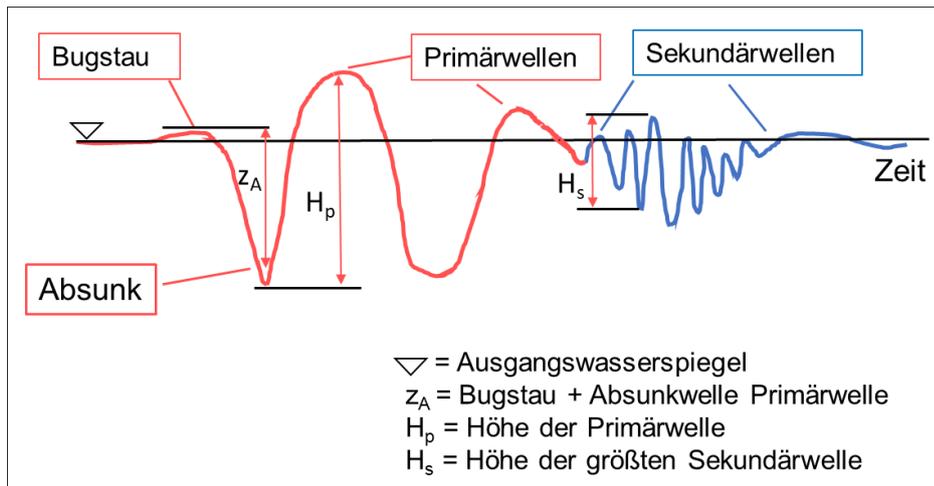
**Tabelle 5:** Eigenschaften der am Standort Hollerwettern vorbeifahrenden Schiffe, die Spannungsänderungen im Boden verursacht haben. MW = Arithmetischer Mittelwert, STA = Standardabweichung. GüG = Geschwindigkeit über Grund, L, B, T = Länge, Breite, aktueller Tiefgang, PA = Passierabstand. n = Anzahl an Schiffen. .... 23

**Tabelle 6:** Mittlere Gesamtmenge (Trockenmasse in g und in k pro m<sup>2</sup>) mit Standardabweichung (+/-) der unterirdischen Biomasse in der Pionierzone mit Strandsimse (Bo = Bolboschoenus maritimus) und in der Schilfzone (Ph = Phragmites australis), Anzahl der Wiederholungen = 4. Im vegetationslosen Watt ist keine (abgestorbene) Biomasse vorhanden. Die oberirdische Biomasse wurde nur in der Pionierzone bestimmt..... 33

## 1 Einleitung und Zielsetzung

Entlang von viel befahrenen Bundeswasserstraßen wie der Tideelbe werden Uferböden ständig hydromechanisch belastet. Dabei wirken zusätzlich zum hydrostatischen Druck durch den Tidenhub auch hochdynamische Drücke auf den Uferboden, die durch die Strömung sowie Wind- und Schiffswellen verursacht werden. Wellenbewegung und -brechung an der Bodenoberfläche des Ufers verursachen erosive Kräfte (Scherkräfte) im Boden, die zu einem kontinuierlichen Bodenabtrag am Ufer führen (Bauer et al., 2002; Mao und Chen, 2020; Priestas et al., 2015; Scarpa et al., 2019). Damit verbunden sind auch negative Folgen für Flora und Fauna, die mit Habitats- und Biodiversitätsverlusten verbunden sind (Almström und Larson, 2020; Gabel et al., 2017). In Abhängigkeit von den Standorteigenschaften wurde festgestellt, dass beispielsweise geringe Wellenhöhen von 6–25 cm in feinkörnigen Wattsedimenten (Schluff) und geringer Wassertiefe (0,5 m) zu Erosionsraten von bis zu 0,22 mm pro Schiffspassage führen (Bauer et al., 2002), während sich die Gefahr der Ufererosion auf sandigen Böden erst ab einer Wellenhöhe > 30 cm erhöht (Nanson et al., 1994).

An Bug, Heck und Längsseite von fahrenden Schiffen werden unterschiedliche **Wellensysteme** erzeugt, die von der Dimension und Fahrdynamik der Schiffe abhängen (Dempwolff et al., 2022; Meyers et al., 2021; Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, 2003). Die Wellensysteme wurden in mehreren Studien bereits ausführlich erläutert (Bundesanstalt für Wasserbau, 1996; Dempwolff et al., 2022; Flügge und Uliczka, 1996; Mao und Chen, 2020; Oebius, 2000; Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, 2003) und sind in Abbildung 1 schematisch dargestellt: Beim fahrenden Schiff kommt es durch die Verdrängung des Wassers zu Druck- und Wasserspiegeländerungen um den Schiffskörper, die zu veränderten Strömungsverhältnissen durch Verdrängung und Rückströmung im Umfeld des Schiffs führen. Änderungen des Wasserspiegels werden durch die zeitliche Abfolge von Bugstau, Absunk, Primärwellen- und Sekundärwellensystem gekennzeichnet. Der Bugstau tritt direkt am Schiffskörper auf, wobei durch die Anspannung des Wasserspiegels eine langperiodische Schwallwelle (Frontwelle) vorausgeht. Der Absunk (englisch „drawdown“) ist energetisch bedingt und beschreibt eine Absenkung des Wasserspiegels seitlich am Schiff. Die langperiodische Primärwelle kennzeichnet die erneute Anhebung des Wasserspiegels, die als ausgleichender Prozess am Heck des Schiffs generiert wird. Kurzperiodische Sekundärwellen entstehen durch die kurzfristigen Druckänderungen am Schiff und setzen sich aus Schrägwellen und Heckquerwellen zusammen.



**Abbildung 1: Schematisierte Darstellung eines typischen Wellenbildes, das durch ein vorbeifahrendes Schiff erzeugt wird (nach WSA Hamburg, 2003, leicht verändert)**

Dempwolff et al (2022) leiten ab, dass die **kritische Belastungsgrenze** des Ufers von Binnen- und Küstenwasserstraßen meist durch die vom Schiff erzeugte Primärwelle überschritten wird. In bisherigen Wellenmessungen an Flussufern von Wasserstraßen wurden die Änderungen des Wasserstands bzw. des statischen Wasserdrucks als Folge vorbeifahrender Schiffe erfasst (Davis et al., 2009; Liedermann et al., 2014; Schröder et al., 2018; Ulm et al., 2020; Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, 2003). Gemessene Wasserdrücke erreichen beispielsweise am Ufer der Donau Werte von bis zu 30 hPa (entspricht 30 cm Wasserhöhe) (Liedermann et al., 2014), während an der Unterelbe bei stark exponierter Lage Wellenhöhen bis zu 109 cm (entspricht 109 hPa) erfasst wurden, die durch große Schiffe der Panmax-Klasse erzeugt wurden (Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, 2003). Für einen anderen Standort an der Unterelbe (Juelsand) wiesen Melling et al. (2020) vergleichbar hohe Primärwellen (d.h. > 100 cm) nach, jedoch waren 90% der gemessenen Primärwellenhöhen kleiner als 50 cm. Eine erosive Wirkung durch Schiffswellen ist nicht nur dem Anstieg des Wasserspiegels, sondern auch der Absenkung des Wasserspiegels als Folge des Absunks seitlich am Schiff zugewiesen. In Untersuchungen von Ulm et al. (2020) wurde berechnet, dass 10 % des Sedimenttransportes im Nord-Ostsee-Kanal auf Strömungsänderungen durch den Schiffsverkehr zurückzuführen ist, der einen Absenk zwischen 7 und 101 cm im Kanalbett erzeugt. Für die Tideelbe liegen die Werte für die maximale Absenkhöhe zwischen 50 und 120 cm am Fahrwasserrand (Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, 2016).

Ob es zur Uferdegradation durch Erosion kommt, hängt allerdings nicht nur von den Welleneigenschaften, sondern auch von weiteren Eigenschaften und Bedingungen, z.B. dem Wasserstand, der Uferneigung und Bodenstabilität ab (Gabel et al., 2017). Uferböden der Tideelbe weisen generell eine geringe **Bodenstabilität** auf, wie es die Ergebnisse der statischen und zyklischen Belastungsversuche an Bodenproben ausgesuchter Standorte von Neugebauer (2015) belegen. Sehr sensibel reagieren hier feinkörnige Böden gegenüber

zyklischer Belastung, wodurch eine hohe Empfindlichkeit gegenüber dynamisch wirkenden Wellenbelastungen abgeleitet werden kann.

Destabilisierend wirken hier vor allem die Porenwasserüberdrücke, die als Folge der Inkompressibilität des Wassers und geringer Wasserleitfähigkeit während der zyklischen und insbesondere scherenden Belastung auftreten (Huang et al., 2021; Mordhorst et al., 2012; Neugebauer, 2015; Taukoor et al., 2019). Schwankende Wasserstände, z.B. durch den Tidenhub oder Wellenschlag, führen zu ständigen Änderungen des Matrixpotenzials im Boden, die für die Bewertung der Uferfestigkeit zu berücksichtigen sind (Casagli et al., 1999). Auch kurzzeitig auftretende Porenwasserüberdrücke können ein Versagen der Uferstabilität herbeiführen, gerade wenn es zur Bodenverflüssigung kommt (Okusa, 1985; Rinaldi et al., 2004; Taukoor et al., 2019).

Um die Stabilität eines naturnahen, unbefestigten Ufers an der Tideelbe gegenüber den hydromechanischen Belastungen durch Schiffswellen zu bewerten, wurden in diesem von der Bundesanstalt für Gewässerkunde Koblenz (BfG) beauftragten Vorhaben Spannungsmessungen mit Hilfe von sogenannten **3D-Wellenschlagsensoren** (Stress State Transducer Sensoren (Spannungszustandaufnehmer): „Watt-SST“) durchgeführt, die für mehrere Dauermessungen an unterschiedlichen Uferpositionen am rechten Elbeufer des Standortes Hollerwettern (Elbe-km 681) installiert wurden. Die für den Einsatz unter Wasser und im wassergesättigten Boden konstruierte Messsensorik ermöglicht es, die Spannungsverteilung im Wasser und wassergesättigten Boden in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu erfassen und den variablen, dreidimensionalen Spannungszustand abzubilden (Riggert et al., 2019a, 2019b). Die ersten Untersuchungen von Riggert et al. (2019a, b) zeigten, dass die schiffscharakteristischen Wellenformen zu unterschiedlichen Verläufen der Haupt- und Scherspannungen führen, die den Uferboden damit unterschiedlich stark belasten.

**Ziel des Vorhabens** ist die Quantifizierung von Spannungsänderungen im Boden durch schiffserzeugte Wellenbelastungen und die Berechnung von Haupt- und Scherspannungen einzelner schiffserzeugter Wellenereignisse in unterschiedlichen Tiefen. Da die Höhe der Wellenbelastung von den Schiffscharakteristika wie der Fahrgeschwindigkeit und Dimension des Schiffes beeinflusst wird (Dempwolff et al., 2022; Meyers et al., 2021; Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, 2003), findet eine Verschneidung der Spannungsdaten mit den Schiffsdaten statt, die über das Automatische Identifikationssystem (AIS) erfasst wurden. Die von den Schiffen per UKW gesendeten Informationen ermöglichen einen Datenaustausch über Position und Bewegung der Schiffe, der weltweit auf allen Weltmeeren standardisiert ist und vorrangig der Verkehrssicherheit dient. Das AIS-Küstennetz wird von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) betrieben, die die erforderliche AIS-Infrastruktur errichtet hat und AIS-Daten auf Anfrage bereitstellt.

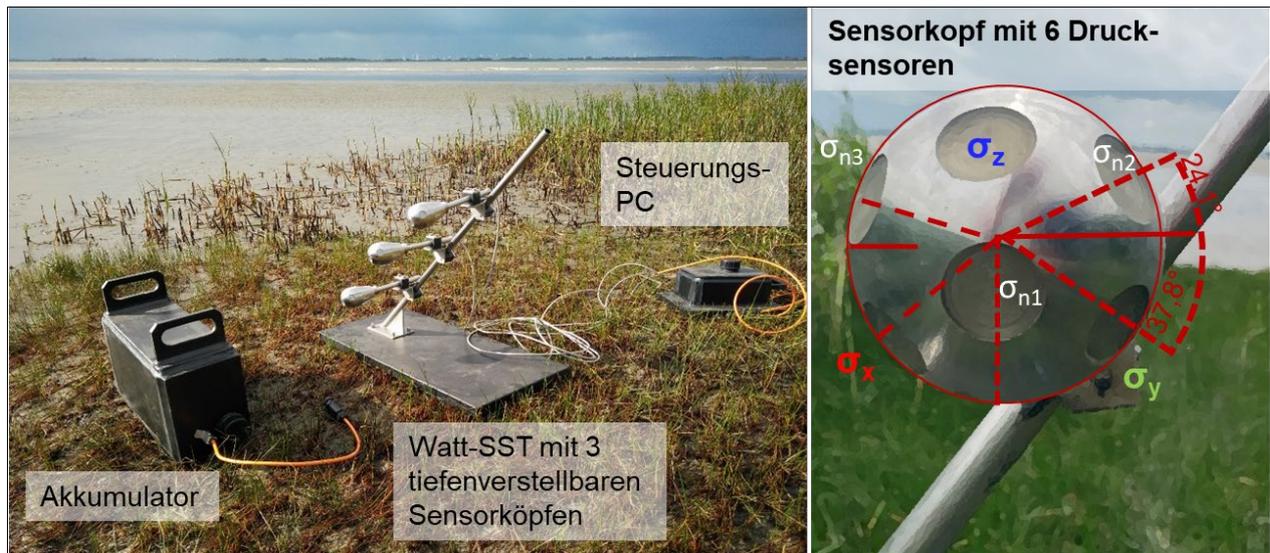
Inwieweit dabei die mechanische Stabilität des Bodens (d.h. der Widerstand gegenüber einer äußeren Lasteinwirkung) übertroffen wird, lässt sich aus den aktuellen Spannungsdaten im Vergleich mit den an ungestörten Bodenproben (Stechzylinderproben) bestimmten Kenngrößen wie der Vorbelastung und den Scherwiderstandskenngrößen (Winkel der inneren Reibung und Kohäsion) unter Berücksichtigung der aktuellen Wassersättigungsgrade ableiten. Damit kann eine Mindeststabilität für den Uferboden festgelegt werden, die u.a. für den Rückbau von Uferbefestigungen im Zuge von Renaturierungsmaßnahmen gewährleistet sein muss.

Als weitere Einflussfaktoren auf die Spannungsverteilung sind neben den Strömungseigenschaften der Tideelbe (Fließgeschwindigkeit und -richtung des Wassers) auch die Ufertopographie (Uferform, Exposition) und -vegetation zu berücksichtigen. Besonders letztere tragen zur Dämpfung der Wellen bei, so dass die Wirksamkeit von natürlichem Küstenschutz durch die Ufervegetation saisonal zu betrachten ist (Schoutens et al., 2020). Demzufolge ist durch das Absterben der oberirdischen Biomasse bei gleichzeitig häufiger auftretenden Sturmereignissen die Schutzfunktion von Uferböden besonders im Winter herabgesetzt.

## **2 Material und Methoden**

### **2.1 Beschreibung des Messsystems**

Die spezielle Anordnung der insgesamt 6 Sensoren pro Sensorkopf im Stress State Transducer System macht es möglich, Spannungen im dreidimensionalen Raum zu erfassen und richtungsspezifische Belastungsvektorgößen zu erstellen (Horn et al., 1992). Das Messsystem wurde in der Vergangenheit ausschließlich zur Untersuchung der Druckverteilung im Boden durch Forst- und Landmaschinen eingesetzt (z.B. Horn et al., 2003; Riggert et al., 2016; Zink et al., 2010) und für den Einsatz unter Wasser und im wassergesättigten Boden modifiziert. Das „Watt-SST“ besteht aus wasserabgedichteten Messkomponenten, einem austauschbaren Akku und kann tiefenvariabel unter und über der mittleren Wasseroberfläche (im freien Wasser und im wassergesättigten Boden) installiert werden (Abbildung 2). Auf diese Weise lässt sich die räumliche und zeitliche Spannungsverteilung durch Wellenschlag und Sog (z.B. durch den Absink seitlich am Schiff) mit einer Aufzeichnungsfrequenz von 30–35 Hz erfassen.



**Abbildung 2: Komponenten des Watt-SST (links) und Frontansicht eines Sensorkopfes (rechts) mit den 6 Drucksensoren, die Druckspannungen in den Raumrichtungen  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  sowie  $\sigma_{n1}$ ,  $\sigma_{n2}$ ,  $\sigma_{n3}$  messen.**

Über die von Nichols (1987) beschriebene Orientierung der Drucksensoren zueinander können Spannungswerte in sechs unabhängigen Raumrichtungen ( $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  sowie  $\sigma_{n1}$ ,  $\sigma_{n2}$ ,  $\sigma_{n3}$ ) erfasst werden, worüber der Spannungszustand in einem bestimmten Punkt im Boden berechnet und über Haupt- und Scherspannungen abgebildet werden kann (siehe Kapitel 2.3.2).

## 2.2 Beschreibung des Untersuchungsstandortes

Die Messkampagnen fanden am schleswig-holsteinischen Ufer der Tideelbe in Hollerwettern (Elbe-km 681) statt. Landwärts folgt auf das vegetationslose Watt eine Zone von Pionierröhricht, häufig dominiert von Strandsimse (*Bolboschoenus maritimus*), die in höheren Lagen von der Schilfzone (*Phragmites australis*) abgelöst wird. Der Standort wurde im Jahr 2021 als Sandwatt mit tiefgründiger Schlickauflage charakterisiert (Grundmann et al., 2022).

Die Sensoren wurden an verschiedenen Uferpositionen ca. 140 m westlich des Standortes im Projekt „Makrophytenmonitoring“, in dem ebenfalls Wellenmessungen über mehrere Jahre durchgeführt wurden, eingebaut (u.a., Schröder et al., 2018, Grundmann et al., 2022). Das Ufer ist südwest-exponiert und weist eine Uferneigung von etwa 1:85 innerhalb der Röhrichtzonen auf (Grundmann et al., 2022). Anhand von jährlich durchgeführten UAS-Bildflügen mit Drohnen (Universität Rostock) nimmt die absolute Höhe über NN der vorgelagerten Wattfläche von der Uferkante (0,3 m) mit größerer Entfernung in Richtung Fahrrinne auf ca. -0,4 m in 110 m Entfernung ab (Grenzdörffer und Naumann, 2022). Bei diesen Untersuchungen konnte außerdem eine Veränderung des Ufers in Hollerwettern von einer eher konkav gewölbten (2019–2021) zu einer konvex geformten Uferform in 2022 festgestellt werden (Grenzdörffer und Naumann, 2022).

## 2.2.1 Messkampagnen mit dem Watt-SST (Arbeitspaket 1 und 2)

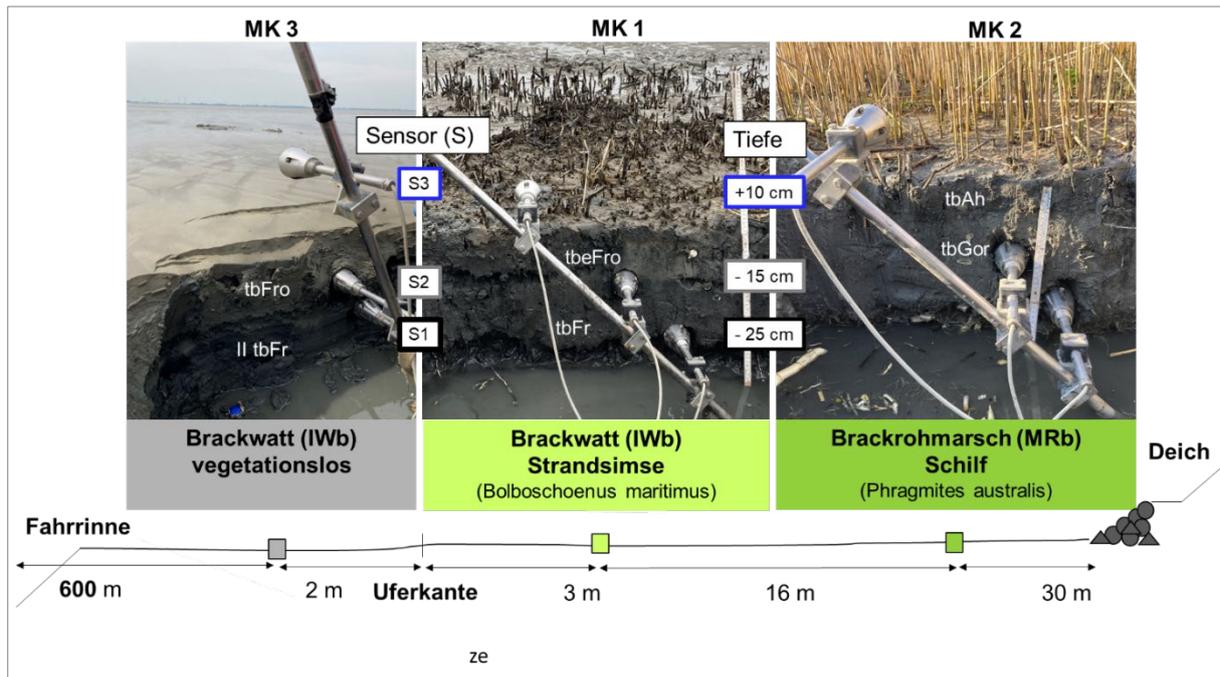
Die Sensorik wurde in einer 2-wöchigen Testphase hinsichtlich ihrer Funktionsfähigkeit und der gewonnene Datensatz auf Plausibilität überprüft (Arbeitspaket 1). In den im Frühjahr 2021 gestarteten Messkampagnen wurden mehrwöchige Dauermessungen von 3–6 Wochen an unterschiedlichen Positionen im vegetationsloses Watt, in der Pionierrohricht- und in der Schilfzone durchgeführt (Tabelle 1).

In der ersten Messkampagne MK 1 wurde das Watt-SST über 6 Wochen von Mitte März – Ende April 2021 im vorderen Uferbereich der Pionierzone, dominiert von der Gewöhnlichen Strandsimse (*Bolboschoenus maritimus*) und 3 m vom Rand der Uferkante zum vegetationslosen Watt, installiert.

**Tabelle 1: Geographische Positionen des Watt-SSTs in der Uferzone in Hollerwettern, Zeitraum sowie Anzahl vollständig erfasster Tidehochwasserphasen (THW) und Schiffswellenereignisse (SWE) der durchgeführten Messkampagnen (MK).**

MK	Uferzone	Koordinaten	Zeitraum	Anzahl THW	Anzahl SWE
1	Pionierzone mit Strandsimse	53°50'17.0"N 9°21'31.9"E	16.3.2021– 30.4.2021	35	249
2	Schilfzone	53°50'17.5"N 9°21'33.0"E	2.3.2022 – 31.3.2022	33	0
3	Vegetationsloses Watt	53°50'17.1"N 9°21'32.0"E	19.5.2022 – 7.6.2022	29	128

In MK 1 konnten die Spannungsverläufe von 35 vollständigen Tidehochwasserphasen aufgezeichnet werden. Allerdings konnten längere Messphasen (> 4 Tage) aufgrund vermehrt auftretender Mess-Stopps, bei der die Datenaufzeichnung am Steuerungs-PC unterbrochen wurde, nicht generiert werden. Das Gerät wurde zwecks Behebung des Messfehlers nach 6 Wochen ausgebaut und zum Hersteller UGT (Umwelt-Geräte-Technik GmbH, Müncheberg) transportiert. Es folgte eine längere Reparaturphase, die zu Verzögerungen im Projektverlauf führten, weil das Messgerät erst im Folgejahr (März 2022) wieder einsatzfähig war. In den darauffolgenden Messkampagnen wurde die Sensorik in der Schilfzone (MK 2, 19 m hinter der Uferkante landwärts) und im vegetationslosen Watt (MK 3, 2 m vor der Uferkante flusswärts) in den jeweils gleichen Tiefen ober- und unterhalb der GOF installiert (Abbildung 3). Die drei Sensorköpfe wurden in 3 Tiefen eingebaut: S3 = +10 cm oberhalb der Geländeoberfläche (GOF), S2 = -15 cm und S1= -25 cm im Boden.



**Abbildung 3: Spannungsmessungen mit dem Watt-SST in drei Messkampagnen (MK) an der Tidelbe in Hollerwettern (Blickrichtung flusswärts). Darstellung der drei Sensortiefen S1, S2, S3 ober-/unterhalb der Geländeoberfläche sowie den drei Einbaupositionen des Watt-SST entlang der Uferzone vom Brackwatt zur Brackrohmarsh (Schema unten, von links nach rechts landwärts). Die wenige cm mächtige Uferkante entspricht der Vegetationskante.**

## 2.2.2 Bodeneigenschaften der Sensorstandorte

Die Bodenprofile an den drei Sensorstandorten wurden nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (Ad-hoc-AG Boden, 2005) beschrieben und klassifiziert. Die Bodensubtypen nahe der Uferkante liegen im Gezeiteneinflussbereich und sind als Brackwatt anzusprechen, der Bodensubtyp in der Schilfzone entspricht einer Brackrohmarsh (Tabelle 2). Die Bodenart ist im vegetationslosen Brackwatt Feinsand bis schwach schluffiger Sand und nach Reineck und Siefert (1980) als Sandwatt zu klassifizieren. Durch die Schlickauflage ist der oberste Bodenhorizont des vegetationslosen Brackwatts deutlich feinkörniger (sandig-lehmiger Schluff, Uls) als der in der Pionierzone und ist damit nach Reineck und Siefert (1980) als Schlickwatt anzusprechen. Der Feinkornanteil nimmt im darunterliegenden Bodenhorizont wieder ab (Mischwatt). Das Brackwatt ist durch Horizonte am Gewässergrund (F-Horizonte) mit hydromorphologischen Merkmalen definiert. An beiden Positionen wurde ein Fro/Fr-Profil vorgefunden, in dem im oberen Horizont durch das zeitweilige Trockenfallen bei Niedrigwasser oxidierende Bedingungen (Fro) dominieren, während im darunterliegenden meist wassergesättigten Bereich reduzierende Bedingungen (Fr) vorherrschen.

**Tabelle 2: Bodeneigenschaften und Horizontfolgen der Sensorstandorte in Hollerwettern. EC = elektrische Leitfähigkeit, CaCO<sub>3</sub> = Calciumcarbonat. IWb = Brackwatt, MRb = Brackrohmarsh. F bzw. G = Horizont am Gewässergrund bzw. mit Grundwassereinfluss unter oxidierenden (o) und reduzierenden Bedingungen (r) in Abhängigkeit der Sauerstoffverfügbarkeit. tb = tidal-brakisch, e = carbonathaltig (> 2 % Carbonat), II = Römische Ziffer, die einen Wechsel des Ausgangssubstrats kennzeichnet.**

MK	Uferzone	Bodentyp	Tiefe (Horizont)	Bodenart	pH in CaCl <sub>2</sub>	EC [μS cm <sup>-1</sup> ]	CaCO <sub>3</sub> [%]
3	Vegetationsloses Watt	IWb	15 cm (tbeFro)	Uls	7,1	576	5,48
			25 cm (II tbeFr)	Su2	7,2	371	2,55
1	Pionierzone mit Strandsimse	IWb	15 cm (tbeFro)	fS	7,4	218	2,13
			25 cm (tbFr)	fSms	7,4	192	1,57
2	Schilfröhricht	MRb	15 cm (tbeGor)	Su2	7,0	402	2,26
			25 cm (tbGor)	fS	6,9	284	0,58

## 2.3 Datenauswertung (Arbeitspaket 3)

### 2.3.1 Aufbereitung der Spannungsmessdaten

Die Aufbereitung, Visualisierung und Auswertung der Messdaten erfolgt mit der Software MATLAB (Mathworks, R2020b). Pro Tag werden 2.710.290 Werte pro Drucksensor (6 Drucksensoren und 1 Temperatursensor pro Sensorkopf) aufgezeichnet, was knapp **60 Mio Werte pro Tag** ergibt. Es wurden quellcodebasierte Skripte erstellt, mit denen die Rohdaten eingelesen und den definierten Spannungsrichtungen S<sub>x</sub>, S<sub>y</sub>, S<sub>z</sub> ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ) sowie Sn1, Sn2 und Sn3 ( $\sigma_{n1}, \sigma_{n2}, \sigma_{n3}$ ) zugeordnet werden. Die Skripte können auf Anfrage bei der BfG (Referat U3 „Vegetationskunde, Landschaftspflege“) eingesehen werden.

Für die Visualisierung und Synchronisierung mit weiteren Einflussparametern (Pegelhöhen, Wetter-, Schiffsdaten) muss nachträglich eine Datumsangabe in das Zeitformat integriert und auf eine einheitliche Zeitzone (MEZ bzw. MESZ) formatiert werden.

Als problematisch erwies sich der Umgang mit vom Gerät erzeugten positiven und negativen Spannungsspitzen in unterschiedlicher Höhe (Messfehler). Diese konnten über individuelle MATLAB-Funktionen aus dem Datensatz eliminiert werden. Ein Teil der Spannungspeaks konnte über Grenzwertverfahren (z.B. Überschreiten von Spannungswerten >2000 hPa) bereinigt werden. Spannungspeaks, die nur unwesentlich über dem Wertebereich liegen, wurden über dynamische Berechnungsverfahren identifiziert und geglättet (z.B. 3-faches Überschreiten des Mittelwertes unter Berücksichtigung der zeitlich variablen Spannungsänderungen zwischen Tidehoch- und Tideniedrigwasser). Fallweise musste manuell geprüft werden, ob es sich um welleninduzierte Extremwerte oder vom Gerät produzierte Messfehler handelt.

Die Datensätze der drei MKs wurden auf identische Weise vollständig (hochauflösend in 30-35 Hz Taktung) aufbereitet und in verschiedene Zeitabschnitte unterteilt, um sowohl die Spannungsverläufe mehrerer hintereinander folgenden Tidehoch- und Tideniedrigwasserphasen (ca. 6–8 THWs), als auch einzelner THW-Phasen mit selektierten Schiffswellenereignissen zu visualisieren und statistisch auszuwerten.

### 2.3.2 Berechnung von Haupt- und Scherspannungen

Für die Beschreibung des dreidimensionalen Spannungszustands im Boden werden die Spannungskomponenten in der x, y und z-Ebene jeweils in Normalspannung ( $\sigma_n$  bzw.  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ) und Schubspannung ( $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ ) unterteilt. Aus den drei Normal- und drei Schubspannungen werden die drei Hauptspannungen ( $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ ) in den drei Raumrichtungen mit dem Programm „SST\_KIEL\_XP“ auf Basis der Gleichungen 1–4 errechnet (Horn et al., 1992; Riggert et al., 2016; Zink et al., 2010). Zur Charakterisierung werden im Anschluss die zwei Invarianten der Spannungsmatrix, die mittlere Normalspannung (MNS) nach Gleichung 5, und die oktaedrische Scherspannung (OCTSS,  $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ ) nach Gleichung 6 verwendet (Koolen, 1994):

$$\sigma_n = (l^2)\sigma_x + (m^2)\sigma_y + (n^2)\sigma_z + 2(l)(m)\tau_{xy} + 2(m)(n)\tau_{xz} + 2(n)(l)\tau_{xy} \quad \text{Gleichung 1}$$

$$\tau_{xy} = -\left(\frac{3}{4}\right)(\sigma_{n2} + \sigma_{n3}) + \left(\frac{1}{2}\right)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad \text{Gleichung 2}$$

$$\tau_{xz} = -\left(\frac{3}{4}\right)(\sigma_{n1} + \sigma_{n3}) + \left(\frac{1}{2}\right)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad \text{Gleichung 3}$$

$$\tau_{xy} = -\left(\frac{3}{4}\right)(\sigma_{n1} + \sigma_{n2}) + \left(\frac{1}{2}\right)(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z) \quad \text{Gleichung 4}$$

$$MNS = \frac{1}{3}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3) \quad \text{Gleichung 5}$$

$$OCTSS = \frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} \quad \text{Gleichung 6}$$

Die Buchstaben l, m und n entsprechen hierbei den Richtungskosini zwischen der Senkrechten auf einer gegebenen Fläche und der x-Richtung (l), der y-Richtung (m) und der z-Richtung (n). Wenn der durch den Wasserspiegel generierte Wasserdruck senkrecht über dem Sensor steht, beschreiben die Normalspannungskomponente MNS sowie die tangentielle Spannungskomponente OCTSS den vollständigen Spannungszustand im Boden.

Um die von Schiffswellen erzeugten Spannungsänderungen für einzelne Wellenereignisse zu ermitteln, wurden die Zeiträume des Wellensignals und die weiteren Eingangsgrößen ( $S_z, S_x, S_y, S_{n3}, S_{n1}$  und  $S_{n2}$ ) aus dem Datensatz in MATLAB manuell extrahiert und in das Programm „SST\_KIEL\_XP“ eingelesen. Die ersten 10 Sekunden vor Auftreten des

Wellensignals wurden gemittelt und als „Ausgangsspannung“ definiert, die sich vorrangig aus dem aktuell herrschenden hydrostatischen Druck (Luft- und tideabhängigen Wasserhöhendruck) sowie Strömungsdruck zusammensetzt. Die zusätzlich dazu auftretenden Abnahmen (Sogwirkung, z.B. durch Absenk seitlich am Schiff) und durch Wellenschlag erzeugten Zunahmen der Hauptspannungen ( $\Delta\sigma_{1,2,3}$ ), mittleren Normalspannung ( $\Delta\text{MNS}$ ) und Scherspannungen ( $\Delta\text{OCTSS}$ ) können damit in den 3 Sensortiefen berechnet werden.

### 2.3.3 Statistische Berechnungen

Tiefenspezifische Spannungseinträge durch individuelle Schiffswellenereignisse ( $n = 377$ ) werden über die Berechnung des Minimal-, Maximal- und arithmetischen Mittelwerts und der Standardabweichung der verschiedenen Spannungskomponenten beschrieben.

Für jede vollständig mit den Spannungssensoren aufgezeichnete Tidehochwasserphase wurden die Minimal- (d.h. Beginn der Tidehochwasserphase, bevor der Sensor überflutet wird) und Maximalspannungseinträge (während der Tidehochwasserphase) pro Spannungsrichtung  $S_x, S_y, S_z$  ( $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ) sowie  $S_{n1}, S_{n2}$  und  $S_{n3}$  ( $\sigma_{n1}, \sigma_{n2}, \sigma_{n3}$ ) je Sensortiefe ( $S_1, S_2, S_3$ ) berechnet, aus der sich die maximalen Änderungen des Spannungszustandes durch den Tidenhub (bzw. der Überflutungshöhe) ermitteln lassen. Ohne die Berücksichtigung von Wasserdruckänderungen durch Schiffswellen nimmt dieser Wert mit steigender Überflutungshöhe (d.h. zunehmender Wassersäule) bei auflaufendem Tidehochwasser zu und ist zur Tidehochwasserzeit maximal. Der absolute Spannungseintrag in den Uferboden setzt sich daher aus dem hydrostatischen Druck (TWD = tidenabhängiger Wasserhöhendruck) und den zusätzlich wirkenden hydrodynamischen Wasserdrücken durch Strömungs-, Wind- und Schiffswellen zusammen, der damit nicht mehr als statische, sondern auch als dynamische Belastung zu betrachten ist. Um beide Komponenten (statisch und dynamisch) bei der Bewertung der Uferstabilität zu berücksichtigen, werden 2 Szenarien betrachtet, die sich aus der Spannungsdifferenz ( $\Delta\sigma_{x,y,z}$ ) zwischen Hoch- und Niedrigwasser (Tidenhub) für eine Uferposition ableiten lassen und die schiffswellenerzeugten Spannungseinträge bei hohem ( $\Delta\text{TWD MAX}$ ) und niedrigem Tidenhub ( $\Delta\text{TWD MIN}$ ) beschreiben. Die Spannungsdifferenz durch einen niedrigen bzw. hohen Tidenhub ergibt sich aus Subtraktion bzw. Addition von arithmetischem Mittelwert (MW) pro Raumrichtung ( $\Delta\sigma_{x,y,z}$ ) und der Standardabweichung (STA) und wird standortspezifisch berechnet:

Szenario niedriger Tidenhub:

$$\Delta\text{TWD MIN} = \Delta\sigma_{x,y,z}(\text{MW}) - \Delta\sigma_{x,y,z}(\text{STA}) \quad \text{Gleichung 7}$$

Szenario hoher Tidenhub:

$$\Delta\text{TWD MAX} = \Delta\sigma_{x,y,z}(\text{MW}) + \Delta\sigma_{x,y,z}(\text{STA}) \quad \text{Gleichung 8}$$

### **2.3.4 Weitere Einflussparameter und Messparameter**

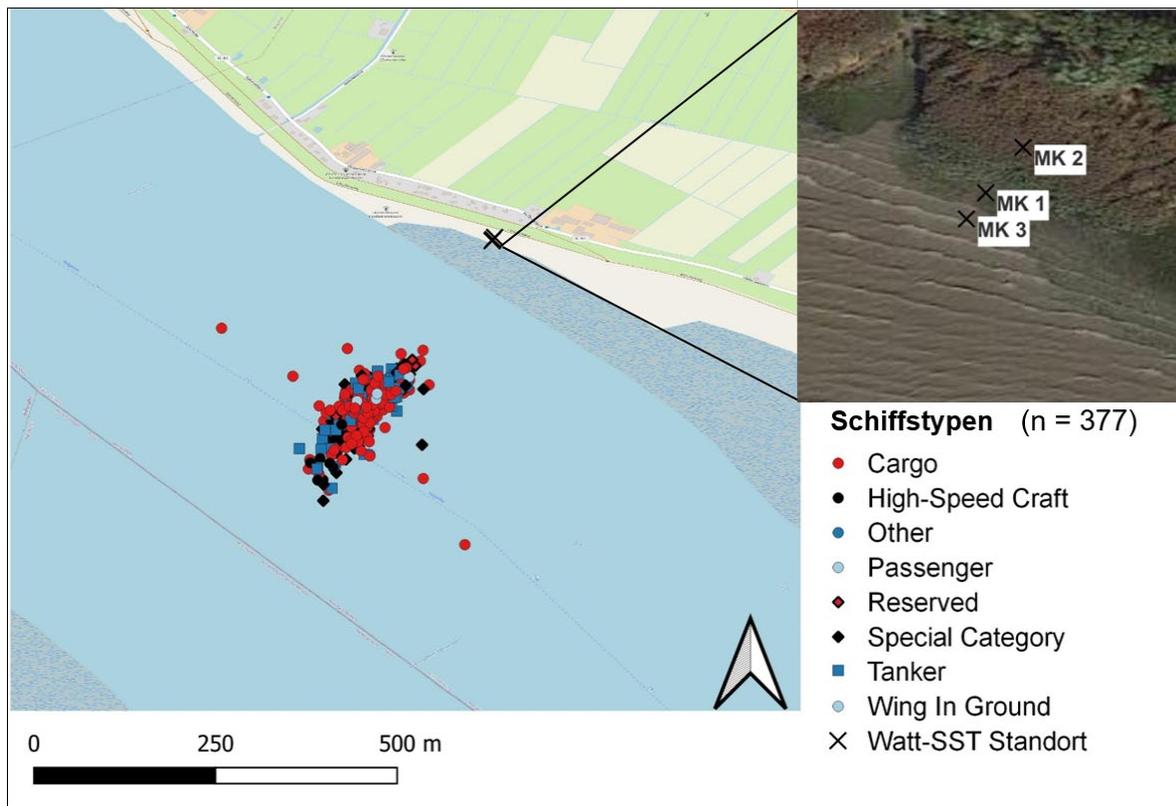
Für die Datenauswertung und -evaluierung wurden ausgewählte standortspezifische Messdaten herangezogen wie die gezeitenabhängigen Wasserhöhen (frei verfügbare Daten vom BSH (2022) zur Vorausberechnung der Zeiten und Höhen in 10-Minuten-Schritten mit dem Pegelnullpunkt (PNP) als Bezugsniveau am nächstgelegenen Standort Brokdorf) sowie stündliche Wetterdaten, insbesondere von Luftdruck, Windgeschwindigkeit und Windrichtung des Deutschen Wetterdienstes (DWD, 2022) der nächstgelegenen Wetterstation Itzehoe.

### **2.3.5 Integration der AIS-Daten**

Schiffsdaten über das Automatische Identifikationssystem (AIS) wurden auf Anfrage bei der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) für die Messzeiträume 2021 und 2022 Standort Hollerwettern in kodierter Form bereitgestellt. Mit Hilfe eines in der Programmiersprache Python erstellten Programms (persönliche Information S. Sommer, BfG) konnten die AIS-Signale dekodiert und über Abfragefunktionen mit den Spannungsmessungen des Watt-SST verknüpft werden. Über vom Schiff gesendete Zeitstempel und Positionsangaben lassen sich die verschiedenen Spannungsmuster im SST-Datensatz konkret einer Schifffassage zuordnen, solange nicht mehrere Schiffe zeitgleich bzw. in kurzen Zeitabständen den Sensorstandort passieren. Im Python-Programm wird die über den Längen- und Breitengrad (im WGS 84 Koordinatenbezugssystem) definierte Position des Schiffes mit der geringsten Distanz zum Sensorstandort erfasst. Die Position der Schiffe wurde im Anschluss mit Hilfe eines geografischen Informationssystems (QGIS) verifiziert (Abbildung 4).

Die vom Schiff gesendeten Parameter (1) Schiffstyp, (2) Geschwindigkeit über Grund (GüG), (3) Schiffslänge und -breite, (5) Passierabstand (PA), (6) Fahrtrichtung und (6) aktueller Tiefgang werden aus dem AIS-Signal ausgelesen und gehen in die weitere Datenauswertung ein. Für die tatsächliche Fahrgeschwindigkeit im Wasser ist die Fahrgeschwindigkeit über Grund noch mit der Strömungsgeschwindigkeit in der Fahrrinne der Tideelbe zu verrechnen (Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, 2003).

In den drei Messkampagnen wurden die Schiffsdaten von insgesamt 377 Schifffassagen mit den Spannungsmessdaten aus 100 Tidehochwasserphasen verknüpft. Wurde ein Wellenereignis durch mehrere vorbeifahrende Schiffe verursacht, konnten die Spannungsdaten nicht in der ereignisbezogenen Auswertung der Haupt- und Scherspannungen berücksichtigt werden, da eine exakte Zuordnung der Schiffe nicht möglich war bzw. nicht auszuschließen ist, dass die Spannungsänderungen im Boden durch mehrere sich überlagernde Wellenmuster hervorgerufen wurde.



**Abbildung 4: Position der am Sensor-Standort Hollerwettern vorbeigefahrenen Schiffe (n = 377), für die ein Wellensignal mit dem Watt-SST eindeutig erfasst wurde. Messkampagne (MK) 1 = 249, MK 2 = 0, MK 3 = 128 Schiffe.**

Da ein vorbeifahrendes Schiff ein unterschiedliches Wellenmuster erzeugt, das sich in den Spannungsverläufen im Wasser bzw. im Boden widerspiegelt, wurden repräsentative Spannungsmuster in **4 Wellenkategorien** (Kat A – Kat D) eingeteilt, die sich in der Ausprägungsform von langperiodischen Primärwellen und kurzperiodischen Sekundärwellen unterscheiden.

- **Kat A:** Hoher Absunk und **stark ausgeprägtes Primärwellensystem**, Maximalspannungseintrag durch die Primärwelle verursacht
- **Kat B:** Leichter Absunk und **schwach ausgeprägtes Primärwellensystem**, das durch Sekundärwellen überlagert wird, Maximalspannungseintrag durch die **Sekundärwelle** verursacht
- **Kat C:** Kaum Absunk, **schwach ausgeprägtes Primär- und Sekundärwellensystem**, Maximalspannungseintrag entweder durch Primär- oder Sekundärwellen verursacht
- **Kat D:** Kaum Absunk, **stark ausgeprägtes Sekundärwellensystem**, Maximalspannungseintrag durch die Sekundärwelle verursacht

Der Einfluss von verschiedenen Schiffparametern auf die Spannungskomponenten wurden mit Hilfe von linearen Korrelationen untersucht und die maximal erzeugten Haupt- und Scherspannungen für unterschiedliche Schiffstypen über Boxplots dargestellt.

### 2.3.6 Bestimmung der Biomasse in der Pionierzone

Nach dem Ausbau des Watt-SST am Ende der Messkampagne MK1 (Ende April 2021) und MK2 (Ende März 2022) wurden Wurzelbodenproben zur Bestimmung der unterirdischen Biomasse mit einem Wurzelbohrer (Metallrohr mit Rückhaltefeder, Leihgabe von der BfG) in unmittelbarer Nähe der Sensorposition in der Pionier- und Schilfzone entnommen (Abbildung 5). In der Pionierzone wurde zusätzlich die oberirdische Biomasse erfasst. Um den Einfluss von Pflanzenwurzeln auf die Bodenstabilität und Höhe der welleninduzierenden Spannungseinträge für verschiedene Messpositionen innerhalb und außerhalb des Vegetationsbereiches genauer abbilden zu können, wurden diese zusätzlichen Untersuchungen jenseits der Leistungsbeschreibung als hilfreich erachtet.

Der entnommene Bohrkern wurde in die Tiefenabschnitte 0–15 cm (= Fro-Horizont) und 15–30 cm (= Fr-Horizont) unterteilt, die unterirdische Biomasse im Anschluss im Labor mit Leitungswasser und Rundsieben (Maschenweite 630  $\mu\text{m}$  und 2 mm) ausgewaschen und in Wurzeln und Rhizome getrennt. Die ober- und unterirdische Biomasse wurde nach Trocknung bei 105°C über 48 Stunden gravimetrisch bestimmt und auf die Fläche ( $\text{m}^2$ ) hochgerechnet.



**Abbildung 5: Entnahme von Wurzelproben (n = 4) in einem 50 x 50 cm Plot in der Pionierzone mit dem Wurzelbohrer (links) und anschließender Bestimmung fraktionierter ober- und unterirdischer Biomasse im Labor (rechts).**

## **2.4 Bodenmechanische Untersuchungen**

### **2.4.1 Entnahme von Bodenproben**

Im Anschluss an die Messkampagnen MK1 und MK3 fand zusätzlich zur Leistungsbeschreibung eine Beprobung der Fro und Fr-Horizonte analog zu den Positionen des 2. (S2) und 3. Sensors (S1) statt, bei der sowohl gestörte sowie ungestörte Bodenproben (bis zu 30 große und 7 kleine Stechzylinder) entnommen wurden. Die Probenentnahme mit Stechzylindern aus dem Fr-Horizontes war aufgrund hoher Wassersättigung des Bodens nicht möglich. Die großen Stechzylinder (236 cm<sup>3</sup>) dienten zur Untersuchung der mechanischen Stabilität (Kapitel 2.4.2), an den kleineren Stechzylindern (100 cm<sup>3</sup>) wurden die Trockenrohdichte (Trocknung bei 105 C über 24 Stunden) und Porengrößenverteilung (pF/WG-Kurve) bestimmt (siehe Hartge und Horn, 2009).

An den gestörten, luftgetrockneten und auf < 2 mm gesiebten Proben wurde die Bodentextur mittels Sieb- und Schlämmanalyse, der Calciumcarbonat-Gehalt mit der Scheibler-Apparatur, die elektrische Leitfähigkeit (EC) in einer 1:2,5 Bodensuspension und der pH-Wert in 0,01 M CaCl<sub>2</sub>-Suspension bestimmt (siehe Blume et al., 2011).

### **2.4.2 Laborversuche zur Untersuchung der mechanischen Stabilität**

Die großen Stechzylinder wurden vorab auf ein definiertes Matrixpotenzial ( $\psi_m$ ) von -6 kPa (z.T. -3 kPa) auf keramischen Platten vorentwässert, um den stabilisierenden bzw. destabilisierenden Einfluss des Porenwassers während der Belastungsversuche zu berücksichtigen.

#### **2.4.2.1 Vorbelastung**

Die mechanische Belastbarkeit wurde über das Druck-Setzungs-Verhalten einer Bodenprobe in einem dränierten Ödometerversuch in einer pneumatischen Multistep-Drucksetzungsanlage erfasst (z.B. Peth et al., 2010). Die Auflast wird für 90 min konstant gehalten und stufenweise von 10 auf 400 kPa gesteigert. Zusätzlich zum Setzungsverhalten wurde während des Belastungsversuches das Matrixpotenzial über Mikrotensiometer elektronisch erfasst. Über das Verfahren nach Casagrande (1936) wird die Eigenstabilität (Vorbelastungswert,  $P_v$ ) der Bodenprobe bzw. des Horizontes (n = 6) ermittelt. Die Klassifizierung der Eigenstabilität erfolgte nach DVWK (1997).

#### **2.4.2.2 Zyklische Kompressibilität**

Die Ermittlung der zyklischen Belastbarkeit erfolgte ebenfalls in der pneumatischen Multistep-Drucksetzungsanlage unter dränierten Bedingungen. Hierbei wird die Bodenprobe mit konstanter Auflast von 20 kPa im 30 s-Intervall 50 Mal abwechselnd be- und entlastet, wobei

1 Zyklus eine Be- und Entlastungsphase umfasst. Als Maß für die zyklische Setzungsempfindlichkeit eines Horizontes ( $n = 6$ ) wird der Steigungskoeffizient einer linearen Regressionsfunktion ( $C_n$ ) ermittelt (Peth und Horn, 2006). Hierzu wird die jeweilige Porenziffer ( $e$ ) des Endsetzungswertes nach jeder Entlastung mit Ausnahme des 1. Zyklus  $e_u^1$  gegen die log-transformierte Zyklenzahl ( $N$ ) aufgetragen (Gleichung 9).

$$e(N) = C_n \cdot \log N + e_u^1 \quad \text{Gleichung 9}$$

### 2.4.2.3 Scherwiderstand

Bei Scherbeanspruchung findet neben der vertikalen auch eine horizontale Belastung des Bodens statt. Die mechanische Belastbarkeit bei Scherung wurde in einem Kastenscherversuch an vorkonsolidierten Bodenproben bei einer konstanten Normalspannung von 20, 50, 100, 200 und 400 kPa und horizontaler Scherverschiebung mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit von 0,2 mm/min ermittelt (Hartge und Horn, 2009). Zur Ermittlung der maximalen Scherbeanspruchung eines Bodenhorizontes wird der jeweilige maximale Scherwiderstand ( $\tau$ ) gegen die applizierte Auflast  $\sigma_n$  ( $n \leq 3$  pro Auflast) dargestellt und die Scherparameter Reibungswinkel ( $\varphi$ ) und Kohäsion ( $c$ ) aus der Linearfunktion der Bruchgerade (Gleichung 10) berechnet.

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \varphi + c \quad \text{Gleichung 10}$$

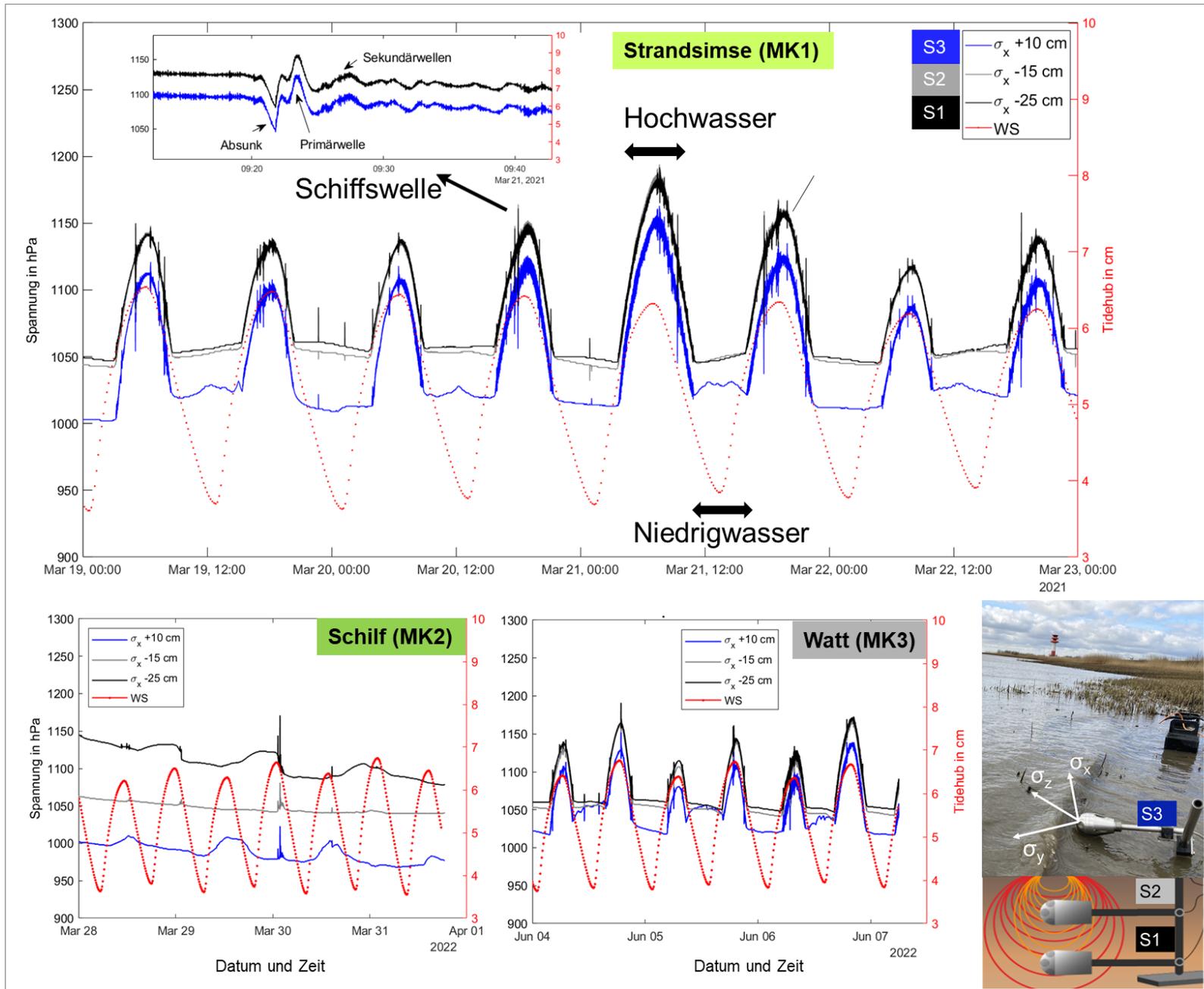
Zusätzlich wurden die Scherversuche an zuvor zyklisch belasteten Bodenproben (siehe Kapitel 2.4.2.2) durchgeführt und unter einer konstanten Normalspannung von 20 kPa geschert ( $n = 6$ ).

### 3 Ergebnisse und Diskussion

#### 3.1 Absolute Spannungswerte und -verläufe im Uferboden über mehrere Tidezyklen

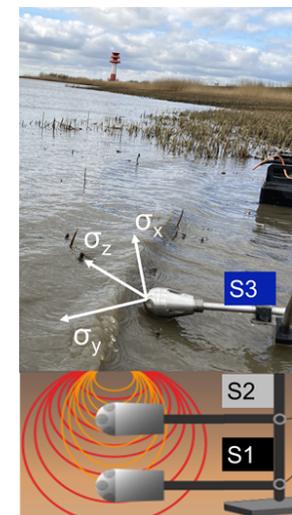
Die in den drei Messkampagnen MK1, MK2 und MK3 erfassten tiefenspezifischen Spannungsverläufe in x-Richtung, d.h. schräg in Richtung Elbe (stromaufwärts) gerichtet, sind für aufeinanderfolgende Tidezyklen (6–8 Hoch- und Niedrigwasserphasen) in Abbildung 6 dargestellt. Hier spiegelt der Sensorkopf S3, der 10 cm oberhalb der Geländeoberfläche (GOF) installiert ist, während der Niedrigwasserphase den Schwankungsbereich des atmosphärischen Luftdrucks (MK1: 1019 +/- 4 hPa, MK2: 1008 +/- 7 hPa, MK3: 1012 +/- 5 hPa, DWD, 2022 Station Itzehoe) wider. Mit zunehmender Wassersäule (Wasserhöhendruck) durch den Tidenhub steigt der Spannungswert kontinuierlich bis zum Tidehochwasserzeitpunkt an und verläuft damit deckungsgleich zum Verlauf der gezeitenspezifischen Wasserstände (WS) über Pegelnullpunkt (PNP) (rote Linie in Abbildung 6).

Laut Gezeitenkalender vom BSH liegt der berechnete WS (über PNP) bei Tideniedrigwasser im Mittel bei 3,7 m und steigt bei Tidehochwasser auf 6,5 m an, was einem mittleren Tidenhub (MTH) von 2,8 m und somit einer Zunahme des statischen Wasserdrucks von 280 hPa entsprechen würde. Im Uferbereich reduziert sich die Höhe des WS durch die leicht ansteigende Geländeoberfläche landwärts. Aus den gemessenen Spannungsdifferenzen zwischen mittlerem Tidehoch- und -niedrigwasser lässt sich eine Zunahme der Spannung am Sensor 3 durch den Tidenhub auf maximal 140 hPa im vegetationslosen Watt ableiten (Tabelle 3a). Wellenmessungen von der BfG im Rahmen des Makrophytenmonitorings in Hollerwettern erfassten einen mittleren Wasserstand an der Vegetationskante von 118 cm (Schröder et al., 2018). Da zusätzlich zum Wasserhöhendruck (118 cm Wassersäule) noch der Strömungsdruck zu berücksichtigen ist, liegen die Spannungswerte des Sensor 3 (10 cm über Geländeoberfläche) folglich höher (140 hPa). Landwärts nimmt der Wasserstand ab, so dass sich die Spannungen durch den abnehmenden Wasserhöhendruck in folgender Reihenfolge reduzieren: S3 Watt (Tabelle 3a) > S3 Strandsimse (Tabelle 3c) > S3 Schilf (Tabelle 3b). Am Messstandort in der Schilfzone (MK2) finden nur an Tagen zu Zeiten des Neu- (18.3.2022) und Vollmondes (1.4.2022) welleninduzierte Spannungsveränderungen während der Springflut statt, an den anderen Tagen zeigen die Datensätze keine 2-malige Überflutungen mehr pro Tag an (max. 1x am Tag).



**Abbildung 6: Zeitlicher Verlauf der tiefenspezifischen Spannungen in x-Richtung ( $\sigma_x$ ) über mehrere Tidezyklen (WS = Wasserstand über Pegelnullpunkt) an unterschiedlichen Positionen der Uferzone (Brackwatt in der Pionierzone mit Strandsimse und im vegetationslosen Watt sowie Brackrohmarsch in der Schilfzone) im Zuge der drei Messkampagnen (MK1–3) in Hollerwettern.**

**Sensor S1: -25 cm und S2: -15 cm im Boden, S3: +10 cm (während der Hochwasserphase im Wasser).**



**Tabelle 3: Spannweiten der Minimal (MIN)- und Maximalspannungen (MAX) aller Tideniedrig- und Tidehochwasserphasen einer Messkampagne (MK) sowie die mittlere Spannungsdifferenz durch Tidehub und Wellenschlag pro Tidehochwasserphase innerhalb einer Messkampagne. Min = Minimalwert, Max = Maximalwert, MW = arithmetischer Mittelwert, STA = arithmetische Standardabweichung.**

**a) MK 1 (Brackwatt, Pionierzone mit Strandsimse)**

Tiefe (cm)	Sensor	MIN $\sigma_{x,y,z}$ [hPa]			MAX $\sigma_{x,y,z}$ [hPa]			$\Delta$ $\sigma_{x,y,z}$ (MAX-MIN) [hPa]	
		Min	MW	STA	Max	MW	STA	MW	STA
+10	Sx S3	995	1007	6	1168	1131	23	124	23
+10	Sy S3	1002	1015	6	1178	1142	22	126	23
+10	Sz S3	1006	1016	6	1172	1136	22	120	22
-15	Sx S2	1034	1047	8	1210	1171	23	124	24
-15	Sy S2	1037	1049	7	1211	1172	24	123	24
-15	Sz S2	1027	1040	7	1202	1163	24	123	23
-25	Sx S1	1051	1066	9	1210	1179	22	113	22
-25	Sy S1	1039	1052	7	1209	1172	23	120	23
-25	Sz S1	1047	1064	9	1204	1175	21	111	22

**b) MK 2 (Brackrohmarsch, Schilfzone)**

Tiefe (cm)	Sensor	MIN $\sigma_{x,y,z}$ [hPa]			MAX $\sigma_{x,y,z}$ [hPa]			$\Delta$ $\sigma_{x,y,z}$ (MAX-MIN) [hPa]	
		MIN	MW	STA	MAX	MW	STA	MW	STA
+10	Sx S3	968	985	12	1050	1031	12	46	5
+10	Sy S3	982	1001	14	1076	1055	14	54	4
+10	Sz S3	999	1016	11	1070	1052	11	36	6
-15	Sx S2	1039	1051	9	1086	1067	13	16	14
-15	Sy S2	1031	1042	9	1078	1059	14	17	15
-15	Sz S2	1041	1063	16	1146	1113	31	50	17
-25	Sx S1	1065	1093	16	1171	1136	26	43	24
-25	Sy S1	1035	1048	9	1085	1067	12	19	15
-25	Sz S1	1055	1068	9	1102	1084	11	16	12

**c) MK 3 (Brackwatt, vegetationslos)**

Tiefe (cm)	Sensor	MIN $\sigma_{x,y,z}$ [hPa]			MAX $\sigma_{x,y,z}$ [hPa]			$\Delta$ $\sigma_{x,y,z}$ (MAX-MIN) [hPa]	
		MIN	MW	STA	MAX	MW	STA	MW	STA
+10	Sx S3	991	1000	6	1225	1137	32	137	33
+10	Sy S3	1008	1018	7	1245	1157	32	138	34
+10	Sz S3	996	1014	11	1241	1154	32	140	36
-15	Sx S2	1059	1069	4	1290	1206	32	137	33
-15	Sy S2	1036	1044	5	1267	1182	32	138	33
-15	Sz S2	1035	1043	4	1279	1186	33	143	34
-25	Sx S1	1040	1048	4	1268	1183	32	135	32
-25	Sy S1	1045	1052	4	1275	1188	32	136	33
-25	Sz S1	1043	1064	13	1295	1209	33	146	38

Die höheren Spannungen während der fünften Hochwasserphase (zum Zeitpunkt der Nipptide 21.3.2021) in MK1 stehen vorrausichtlich mit stärkeren Winden vorherrschend aus Nordwest (Windstärke 4 bft, DWD, 2022) in Zusammenhang, die in den Gezeitenberechnungen vom BSH nicht berücksichtigt sind, aber durchaus höhere Wasserstände abweichend vom mittleren Tidehochwasser verursachen können (vgl., BSH, 2021).

An allen drei Messstandorten steigen die absoluten Spannungen mit zunehmender Bodentiefe (15 bis 25 cm) durch die darüber liegende Boden- und Wassersäule erwartungsgemäß an (Abbildung 6). Werden die Spannungen in 10 cm über der Bodenoberfläche in den drei Raumrichtungen ( $\sigma_{x,y,z}$ ) zueinander und über alle Tidehochwasserphasen hinweg betrachtet, weisen die drei Uferpositionen die größte Spannung in y-Richtung (MAX  $\sigma_y$ ,  $S_y$ ), d.h. schräg in Richtung Elbe (stromabwärts) gerichtet, auf (Tabelle 3). In den darunterliegenden Bodentiefen ist keine eindeutige Richtungsabhängigkeit der Spannungen auszumachen.

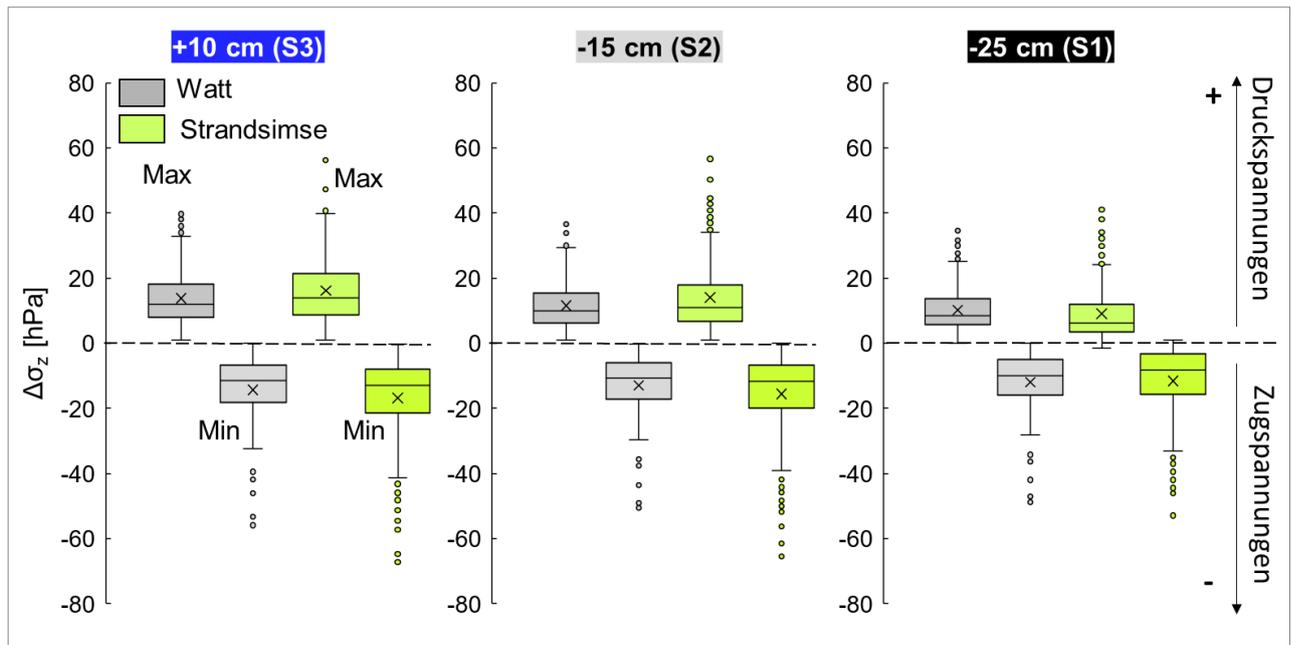
Die mittlere Spannungsdifferenz zwischen der Tideniedrig- und Tidehochwasserphase nimmt aufgrund abnehmender Überflutungshöhe des Ufers landeinwärts ab und reduziert sich in y-Richtung von 138 hPa im vegetationslosen Watt auf 126 hPa in der Pionierzone und 54 hPa in der Schilfzone (Tabelle 3).

### **3.2 Spannungsänderungen im Uferboden durch schiffsbedingte Wellenbelastung**

Durch ein vorbeifahrendes Schiff werden typische Wellenmuster mit charakteristisch langperiodischen Primär- und kurzperiodischen Sekundärwellen generiert (siehe Spannungsspitzen im Ausschnitt von Abbildung 6 oben), wobei sowohl der Schiffstyp als auch die Lage am Ufer unterschiedliche Spannungshöhen im Wasser bzw. im Boden hervorrufen. In der Schilfzone konnten keine eindeutigen Spannungseinträge auf Schiffswellen zurückgeführt werden. Im vegetationslosen Watt und in der Pionierzone ließen sich pro Tidehochwasserphase Wellenbelastungen von bis zu 14 Schiffen im Uferboden eindeutig ausmachen (siehe Abbildung Anhang 1 als Beispiel).

Wasserspiegeländerungen am Schiff, erzeugt durch Absenk seitlich am Schiff und darauffolgenden Primär- und Sekundärwellen, verursachen negative („Sogwirkung“) und positive Spannungsänderungen bis in die untere Sensortiefe (S1) (Abbildung 7).

Sowohl positive (Maximalwerte) als auch negative (Minimalwerte)  $\Delta\sigma_z$ -Werte fallen im höher gelegenen Uferbereich der Pionierzone mit Strandsimse etwas höher aus als im vegetationslosen Watt. Mit der Tiefe gleichen sich die Spannungswerte zwischen den beiden Uferpositionen an bzw. nehmen im Mittel in 25 cm sogar im vegetationslosem Watt gegenüber der Pionierzone zu.



**Abbildung 7: Maximale (positive Druckspannungen) und minimale (negative Zugspannungen) Spannungsänderungen in z-Richtung ( $\Delta\sigma_z$ ) in den 3 Sensortiefen (S1, S2, S3), die durch schiffsbedingte Wellenereignisse im vegetationslosen Watt (n = 128) und in der Pionierzone mit Strandsimse (n = 249) des Uferbereichs in Hollerwettern verursacht wurden.**

Abgesehen davon, dass es sich um zeitlich getrennte Datensätze handelt, kann die Ursache für die höheren Spannungswerte oberhalb der GOF (S3) der höhere Energieeintrag beim Brechen der Wellen an der leicht angehobenen Uferkante im vorderen Bereich der Pionierzone im Vergleich zum etwas tieferliegenden vegetationsfreien Watt sein. Die Spannungseinträge in z-Richtung von S3 (= mittig oben, rechtwinklig zum Ufer in Richtung Tideelbe ausgerichtet, siehe Abbildung 2) können als Druckspannungen von + 57 hPa und Zugspannungen von bis -67 hPa im Wasser 10 cm oberhalb der GOF differenziert werden. Die maximalen Spannungsänderungen im darunterliegenden Boden (15 cm Tiefe, Fro-Horizont) sind vergleichbar hoch und erst in 25 cm Tiefe (Fr-Horizont) leicht reduziert (- 53 bis + 41 hPa).

### 3.2.1 Haupt- und Scherspannungen im Uferboden durch schiffsbedingte Wellenbelastung

Die als Folge von Wellenbelastungen durch vorbeifahrende Schiffe erzeugten maximalen Zunahmen der 1. Hauptspannung ( $\Delta\sigma_1$ ), mittleren Normalspannung ( $\Delta MNS$ ) und oktaedrischen Scherspannungen ( $\Delta OCTSS$ ) sind in Tabelle 4 für alle 3 Sensortiefen zusammengefasst. Während sich die Maximalspannungseinträge von  $\sigma_1$ , MNS und OCTSS an den beiden Messstandorten im Mittel (MW) nur wenig unterscheiden ( $\sigma_1$ , MNS = 13 – 18 hPa, OCTSS = 5–8 hPa), sind in der Pionierzone (Strandsimse) höhere Maximalspannungswerte (MAX) im Boden ( $\sigma_1$  bis zu 63 hPa, OCTSS bis zu 35 hPa) im Vergleich zum vegetationslosen

Watt ( $\sigma_1 = 39$  hPa, OCTSS = 13 hPa) zu verzeichnen. Die geringsten Unterschiede zwischen beiden Messstandorten zeigen die Werte der mittleren Normalspannung (MNS-Werte). Mit Ausnahme des Maximalwerts der OCTSS nehmen die schiffsbedingten Spannungseinträge mit zunehmender Sensortiefe (+10 > -15 > -25 cm) ab (Tabelle 4).

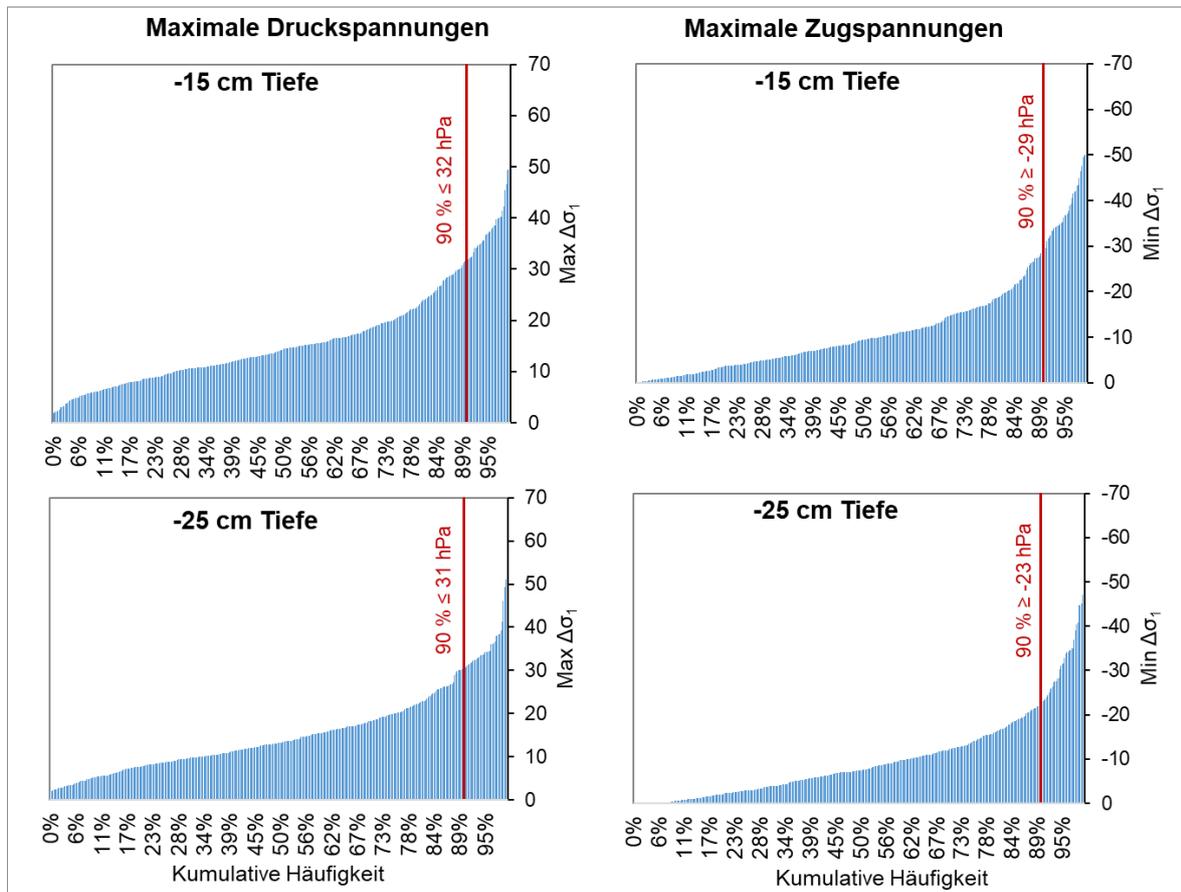
**Tabelle 4: Spannweiten der Maximalspannungseinträge ( $\Delta\sigma$ ) durch schiffsbedingte Wellenbelastungen in den drei Sensortiefen im Uferboden des vegetationslosen Watts (n = 128) und in der Pionierzone mit Strandsimse (n = 249).  $\sigma_1 = 1$ . Hauptspannung, MNS = Mittlere Normalspannung, OCTSS = Oktaedrische Scherspannung. MW = arithmetischer Mittelwert, STA = arithmetische Standardabweichung, MIN/MAX = geringster/größter Maximalspannungseintrag eines Wellenereignisses.**

Uferzone	Sensortiefe [cm]	$\Delta\sigma_1$ [hPa]				$\Delta$ MNS [hPa]				$\Delta$ OCTSS [hPa]			
		MW	STA	MIN	MAX	MW	STA	MIN	MAX	MW	STA	MIN	MAX
Watt	+10	16	9	3	42	13	8	1	39	5	5	1	28
	-15	13	8	2	39	12	8	1	36	3	2	1	13
	-25	14	7	2	38	11	7	1	35	4	2	1	12
Strandsimse	+10	18	11	3	62	16	10	2	58	5	4	1	30
	-15	18	11	2	63	13	11	0	54	6	2	2	17
	-25	16	8	2	57	10	9	-1	45	8	4	1	21

In 15 cm Bodentiefe liegen 90 % der vom Schiff erzeugten Druckspannungen (Max  $\Delta\sigma_1$ ) unterhalb von 32 hPa, während 90 % der vom Schiff erzeugten Zugspannungen (Min  $\Delta\sigma_1$ ) einen Wert von -29 hPa nicht überschreiten (d.h. 90 % der Werte sind weniger stark negativ als -29 hPa) (Abbildung 8 oben). In 25 cm Bodentiefe reduziert sich der Wertebereich nur leicht, so dass 90 % der Werte unterhalb von 31 hPa (Druckspannung) bzw. -23 hPa (Zugspannung) liegen. 1 % der  $\Delta\sigma_1$  sind hingegen > 47 hPa (15 cm Tiefe) bzw. 46 hPa (25 cm Tiefe) (Druckspannung) bzw. < -50 hPa (15 cm Tiefe) bzw. < -46 hPa (25 cm Bodentiefe) (Zugspannung).

Die gemessenen Spannungsbeträge stehen in Übereinstimmung mit den Messwerten aus dem vom WSV Hamburg (2016) erstellten Gutachten, das u.a. eine statistische Auswertung zur Höhe der Primär- und Sekundärwellen sowie des Absunks am Ufer in Hollerwettern umfasst. Die größte Belastung ging hier von den Primärwellen aus, die zu 90 % kleiner als 40 cm sind, während 90 % der Daten einen Absunk  $\leq 25$  cm aufwiesen. Demzufolge sind die in den Boden eingetragenen Druckspannungen mit 32 hPa nur geringfügig niedriger als es durch die Höhe der Primärwelle (40 hPa) erklärt werden könnte. Die durch den Absunk hervorgerufenen Zugspannungen (-29 hPa) erzeugen dabei eine Sogwirkung in 15 cm Bodentiefe, die etwas höher als die vom WSV Hamburg (2016) gemessene Absunkhöhe ist (d.h. -25 hPa). Diese geringen Unterschiede zwischen den gemessenen Druck- und

Spannungswerten sind unter Berücksichtigung der Messposition und -höhe und der horizontspezifischen Spannungsverteilung im Boden weitgehend nachvollziehbar.



**Abbildung 8: Kumulative Häufigkeit der Minimal- und Maximalwerte der 1. Hauptspannung ( $\Delta\sigma_1$ ), die als maximale Druck- und Zugspannungen (Max und Min  $\Delta\sigma_1$ ) durch Schiffswellen in 15 und 25 cm Bodentiefe im Brackwatt der beiden Sensorstandorte eingetragen wurden (n = 377).**

Die gemessenen Spannungsbeträge stehen in Übereinstimmung mit den Messwerten aus dem vom WSV Hamburg (2016) erstellten Gutachten, das u.a. eine statistische Auswertung zur Höhe der Primär- und Sekundärwellen sowie des Absunks am Ufer in Hollerwettern umfasst. Die größte Belastung ging hier von den Primärwellen aus, die zu 90 % kleiner als 40 cm sind, während 90 % der Daten einen Absunk  $\leq 25$  cm aufwiesen. Demzufolge sind die in den Boden eingetragenen Druckspannungen mit 32 hPa nur geringfügig niedriger als es durch die Höhe der Primärwelle (40 hPa) erklärt werden könnte. Die durch den Absunk hervorgerufenen Zugspannungen (-29 hPa) erzeugen dabei eine Sogwirkung in 15 cm Bodentiefe, die etwas höher als die vom WSV Hamburg (2016) gemessene Absunkhöhe ist (d.h. -25 hPa). Diese geringen Unterschiede zwischen den gemessenen Druck- und Spannungswerten sind unter Berücksichtigung der Messposition und -höhe und der horizontspezifischen Spannungsverteilung im Boden weitgehend nachvollziehbar.

Die für die Wellenbelastung verantwortlichen Schiffe sind unterschiedlichen **Schiffstypenklassen** zugehörig, die sich in ihrer Dimension und Fahrdynamik unterscheiden. Die Eigenschaften der 377 ausgewerteten Schiffe sind Tabelle 5 zu entnehmen. Die meisten Schiffe (58 %) sind als Stückgutschiffe, z.B. Fracht- und Containerschiffe, ausgegeben (Klasse „Cargo“), die im Durchschnitt größer sind als die anderen Schiffstypen, z.B. „Tanker“ oder „Spezialschiffe“ (Klasse „Special Category“) und mit höherem Tiefgang fahren. Der größte Frachter (Klasse „Cargo“) hat eine Länge (L) von 400 m und eine Breite (B) von 62 m und zählt damit zu den größten Schiffen weltweit (vgl. HMM Algeciras, Kapazität von 23.964 Standardcontainern). Es fährt mit einem Tiefgang (T) von bis zu 14 m. Dahingegen ist der Halunder-Jet („High-Speed Craft“) mit einer Länge von 57 m deutlich kleiner und fährt mit geringem Tiefgang (1,8 m), ist aber mit einer Maximalgeschwindigkeit von 64 km h<sup>-1</sup> über Grund wesentlich schneller unterwegs.

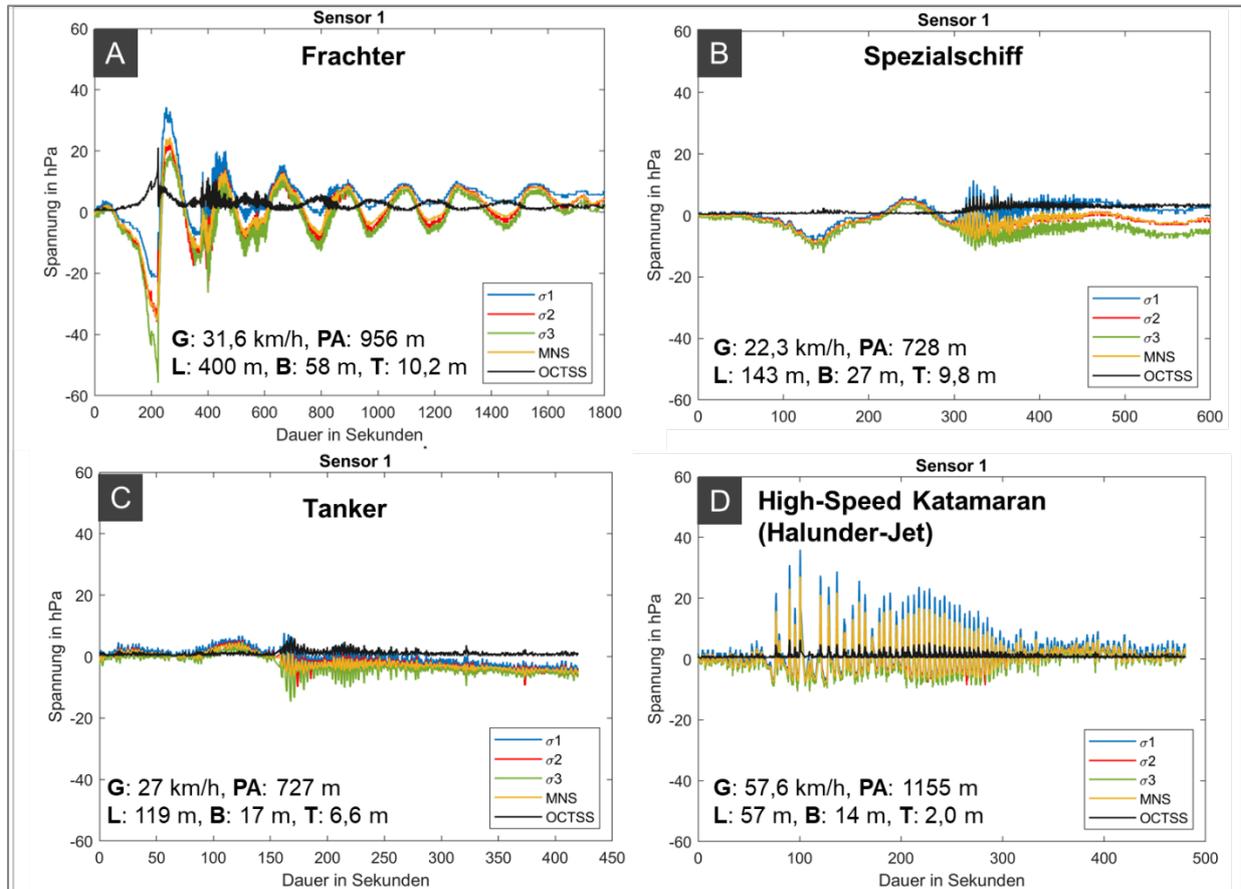
**Tabelle 5: Eigenschaften der am Standort Hollerwettern vorbeifahrenden Schiffe, die Spannungsänderungen im Boden verursacht haben. MW = Arithmetischer Mittelwert, STA = Standardabweichung. GüG = Geschwindigkeit über Grund, L, B, T = Länge, Breite, aktueller Tiefgang, PA = Passierabstand. n = Anzahl an Schiffen.**

AIS-Klasse (Schiffstyp)	n	GüG [km h <sup>-1</sup> ]		L [m]		B [m]		T [m]		PA [m]	
		MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA	MW	STA
Cargo	219	25	5	238	108	34	15	9,5	3,3	856	118
Tanker	65	23	4	120	47	18	8	5,8	2,3	859	145
Special Category	65	24	5	108	50	21	8	7,8	3,0	881	150
High-Speed Craft	8	60	4	57	0	14	0	1,8	0,7	1092	149
Passenger	7	20	3	119	0	23	0	7,2	1,4	860	169
Other	7	27	3	246	62	36	10	7,3	1,0	800	86
Reserved	5	22	7	224	176	33	24	7,6	5,2	816	186
Wing in Ground	1	15	-	100	-	11	-	1,2	-	809	0
<b>Total</b>	<b>377</b>	<b>25</b>	<b>7,0</b>	<b>188</b>	<b>108</b>	<b>29</b>	<b>15</b>	<b>8,3</b>	<b>3,5</b>	<b>864</b>	<b>135</b>

Die vom Schiff erzeugten Wellenbelastungen dauern je nach Intensität über einen Zeitraum von 3 – 30 min (durchschnittlich 11 min) an. Im vegetationslosen Watt und in der Pionierzone treten Abnahmen (Sogwirkung, z.B. durch Absunk seitlich am Schiff) und Zunahmen der Haupt- und Scherspannungen (durch Wellenschlag) auf, die sich in verschiedene Wellenkategorien (A–D, siehe Kapitel 2.3.5) unter Berücksichtigung der am Heck und Bug des Schiffes ausgebildeten langperiodischen Primär- (Heckwelle) und kurzperiodischen Sekundärwellen (Schräg- und Heckquerwellen) einteilen lassen (vgl. Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, 2016). Die typischen Wellenmuster der Wellenkategorien A–D sind exemplarisch für 4 verschiedene Schiffstypen in Abbildung 9 veranschaulicht.

Ein deutlicher Absunk und die dadurch generierte Primärwelle treten häufig für große Stückgutschiffe (Frachter) mit hohem Tiefgang auf (Abbildung 9, Kat A), während kleinere Schiffe wie Tanker oder Spezialschiffe (z.B. Baggerschiffe), geringere Änderungen des

Wasserspiegels erzeugen und die Wellenbelastungen durch Sekundärwellen verursacht werden (Kat B, C).



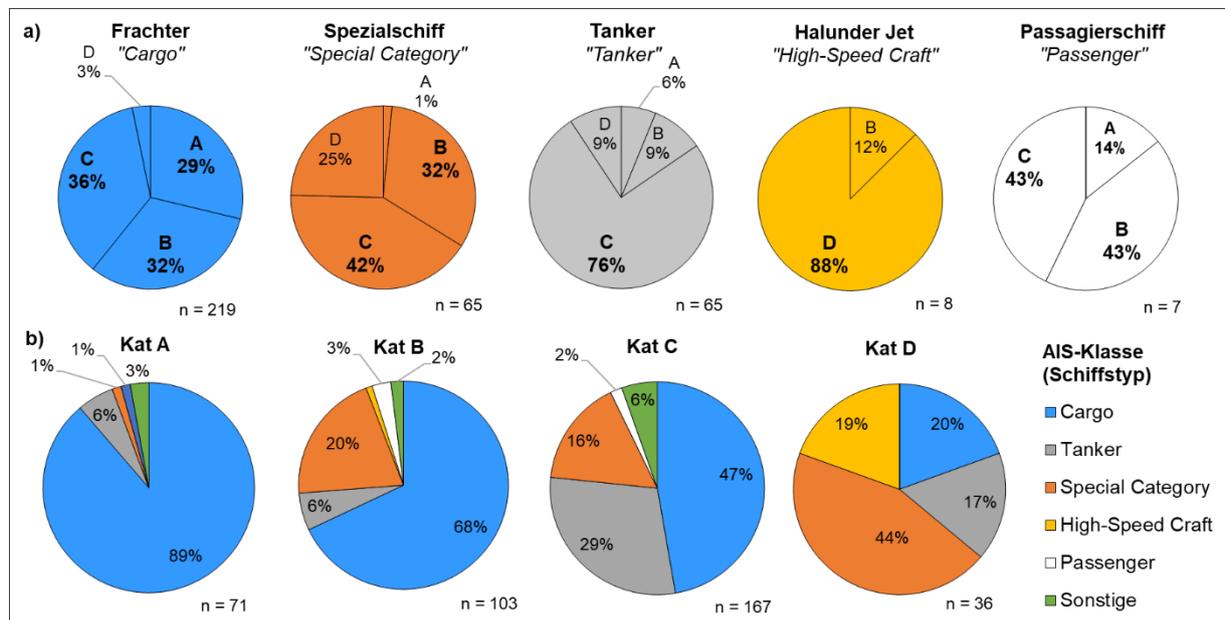
**Abbildung 9: Einfluss des Schiffstyps und erzeugten Wellenmusters der Kategorien A–D auf den Verlauf der berechneten Hauptspannungen ( $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$ ), mittleren Normalspannung (MNS) und der oktaedrischen Scherspannung (OCTSS) des Sensorkopfes 1 in 25 cm Bodentiefe. G = Fahrgeschwindigkeit über Grund, PA = Passierabstand, L, B, T = Länge, Breite, Tiefgang des Schiffs. Fahrtrichtung = flussabwärts.**

Charakteristische Unterschiede im Wellenbild ergeben sich für Schiffe in Verdrängerfahrt (Kat A–C), d.h. der Schiffsrumpf liegt unter der Wasseroberfläche und verdrängt das Wasser, und Gleitfahrt, d.h. das Schiff hebt sich bei zunehmender Geschwindigkeit aus dem Wasser (vgl. Kat D) (Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, 2003). Die Schiffe in Verdrängerfahrt wie z.B. Frachter (Kat A), Spezialschiffe (Kat B) und Tanker (Kat C) generieren weitere Unterschiede im Wellenbild in Abhängigkeit von der Schiffsgeometrie und Fahrodynamik. So deutet sich bei gleichem Tiefgang der exemplarisch ausgewählten Schiffe aus Kat A und Kat B an, dass sowohl die Schiffsgröße als auch die Fahrgeschwindigkeit einen Einfluss auf die Höhe der Primärwellen haben. Das schnellere Schiff erzeugt deutlich höhere Spannungseinträge als das langsamere Schiff ähnlichen Tiefgangs.

Bei bestimmten Schiffen in Verdrängerfahrt (vgl. Kat A) ist vor dem Absunk auch eine leichte Spannungszunahme durch den Bugstau zu erkennen, die insbesondere von der Bugform

abhängt und beispielsweise durch einen Wulstbug vermindert werden kann (International Navigation Association, 2008). Bei Gleitfahrt mit hoher Fahrgeschwindigkeit wie mit dem High-Speed Katamaran "Halunder Jet" führen die erzeugten Sekundärwellen zu schnell aufeinanderfolgenden Spannungsspitzen von über 20 hPa der 1. Hauptspannung ( $\sigma_1$ , vgl. Kat D).

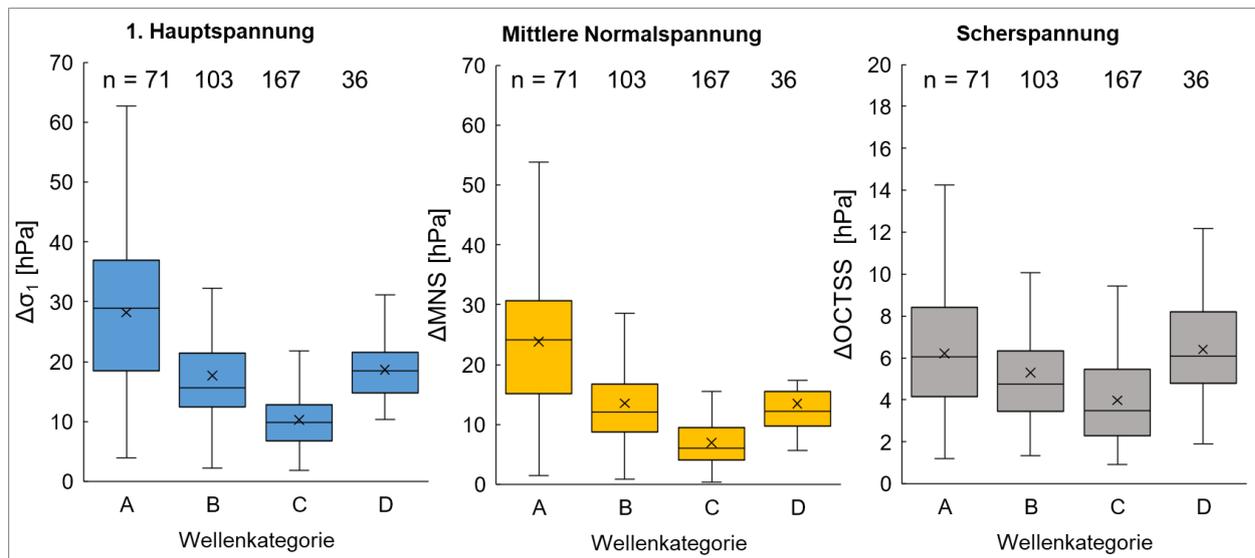
Während der Schiffstyp „High-Speed Katamaran“ ausschließlich durch ein baugleiches Schiff, dem „Halunder Jet“, vertreten ist, variieren Bauart und Fahrdynamik innerhalb der übrigen Schiffstypen. Insbesondere Frachter („Cargo“) und Spezialschiffe („Special Category“) unterscheiden sich in ihrer Schiffsdimension und -geometrie (vgl. Tabelle 5), so dass das erzeugte Wellenmuster nicht nur einer Wellenkategorie zuzuordnen ist (Abbildung 10a).



**Abbildung 10: Zusammenhang zwischen Schiffstyp und dessen erzeugten Wellenmuster (Kat A–D) anhand der relativen Häufigkeit von Wellenmuster (a) und Schiffstyp (b). Kat A = Hoher Absenk und Primärwelle > Sekundärwelle, Kat B = Leichter Absenk und Sekundärwelle > Primärwelle, Kat C = Kaum Absenk und schwach ausgeprägtes Primär- und Sekundärwellensystem, Kat D = Kaum Absenk und stark ausgeprägtes Sekundärwellensystem.**

Ausgeprägte Primärwellen sind zu 89 % auf große Frachter mit einer durchschnittlichen Länge von 341 m und Breite von 45 m bei einem aktuellen Tiefgang von 12 m (vgl. Tabelle Anhang 1) erzeugt (Abbildung 10b), während eine Reduzierung der Schiffsdimension und des Tiefgangs bei Frachtern dazu führt, dass Wellenmuster der Kategorie B (L = 251 m, B = 36 m, T = 10 m) und Kategorie C (L = 151 m, B = 23 m, T = 7 m) generiert werden. Aufgrund ihrer differenzierten Funktion als Militär-, Bagger- oder Tauchschiiff, entsprechen die Spezialschiffe oft nicht den konventionellen Schiffsformen, wodurch generierte Sekundärsysteme in sehr unterschiedlicher Dimension (Kat B–D) ausfallen. Das typische Wellenbild für Tanker entspricht zu 76 % der Kat. C, d.h. es werden vergleichsweise geringe Spannungseinträge verursacht.

Welchen Einfluss das Wellenmuster auf die maximalen Haupt- und Scherspannungseinträge ( $\Delta\sigma_1$ ,  $\Delta\text{OCTSS}$ ) sowie die Werte der mittleren Normalspannung ( $\Delta\text{MNS}$ ) im Fro-Horizont des Uferbodens hat, ist in Abbildung 11 zusammengefasst. Die höchsten Spannungseinträge für  $\sigma_1$ , OCTSS und MNS werden durch das Auftreten eines ausgeprägten Primärwellensystems verursacht (Kat. A). An beiden Uferpositionen werden die größten Druck- (maximal  $\Delta\sigma_1$ ) und Zugspannungen (minimal  $\Delta\sigma_1$ ) durch Wellenbelastungen der Kat. A erzeugt, nur, dass diese im vegetationslosen Watt geringer ausfallen als in der Pionierzone mit Strandsimse (Tabelle Anhang 2). Sowohl durch den seitlichen Absenk als auch die darauffolgenden Primär- und Sekundärwelle(n) (vgl. Abbildung 9, Kat A) treten Scherbelastungen in 15 cm Bodentiefe auf. Scherspannungen werden aber auch durch Sekundärwellen verursacht (Kat D), die etwa für Spezialschiffe oder den High-Speed Katamaran charakteristisch sind. Insgesamt wirken sich die Art der Wellensysteme weniger stark auf die Höhe der Scherspannungen aus, so dass auch bei schwacher Wellendynamik (Kat C) vergleichbar hohe Scherspannungen im Boden auftreten.



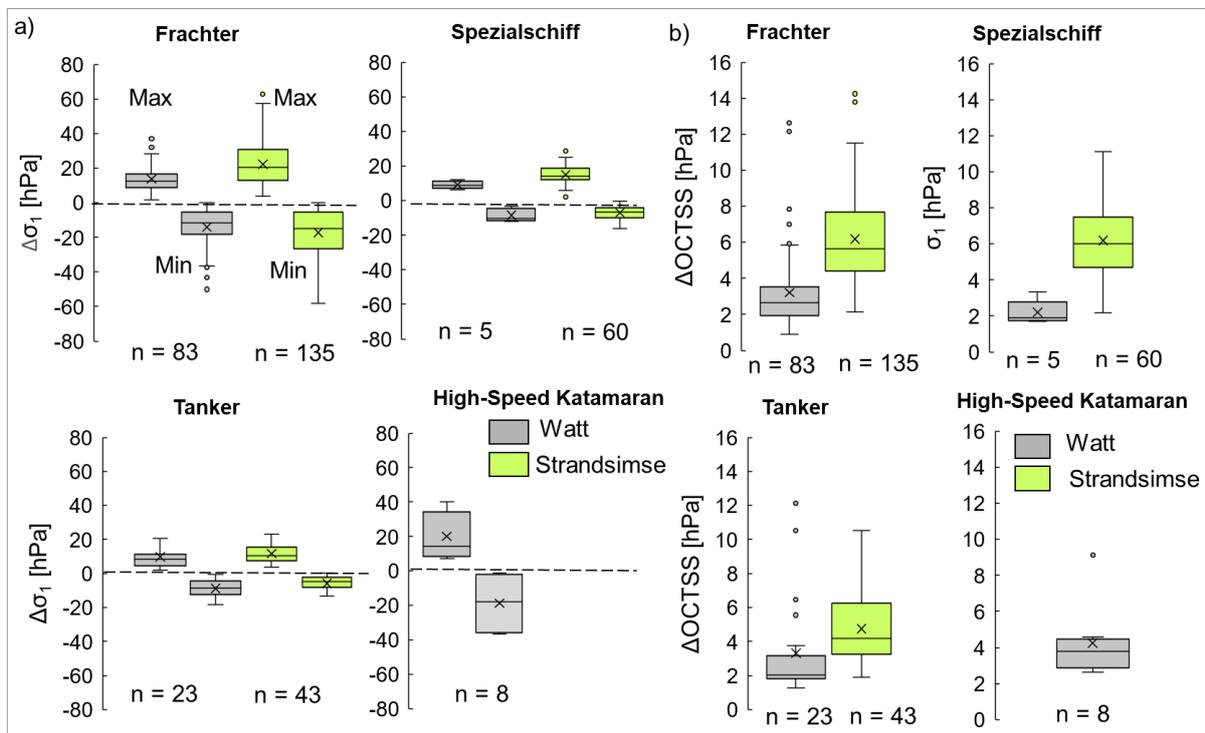
**Abbildung 11: Maximales Delta der Spannungseinträge der 1. Hauptspannung ( $\Delta\sigma_1$ ), der mittleren Normalspannung ( $\Delta\text{MNS}$ ) und der oktaedrischen Scherspannung ( $\Delta\text{OCTSS}$ ) auf den Uferboden in 15 cm Bodentiefe (Fro-Horizont) in Abhängigkeit vom schiffserzeugten Wellenmuster der Kategorie A–D (vgl. Abbildung 9, Anzahl (n) pro Wellenkategorie).**

### 3.2.2 Einfluss verschiedener Schiffsparemeter auf die Spannungseinträge im Uferboden

Im Folgenden wird der Einfluss verschiedener Schiffstypen und deren Eigenschaften hinsichtlich der Größe und Fahrdynamik auf den Spannungseintrag im Uferboden in 15 cm Bodentiefe der Fro-Horizonte näher untersucht. Die Maximalbelastungen der 1. Hauptspannung ( $\Delta\sigma_1$ ) fallen am stärksten für vorbeifahrende Frachter (Klasse „Cargo“) aus (Abbildung 12a), die bis zu 400 m Länge aufweisen und teilweise mit hohem Tiefgang fahren

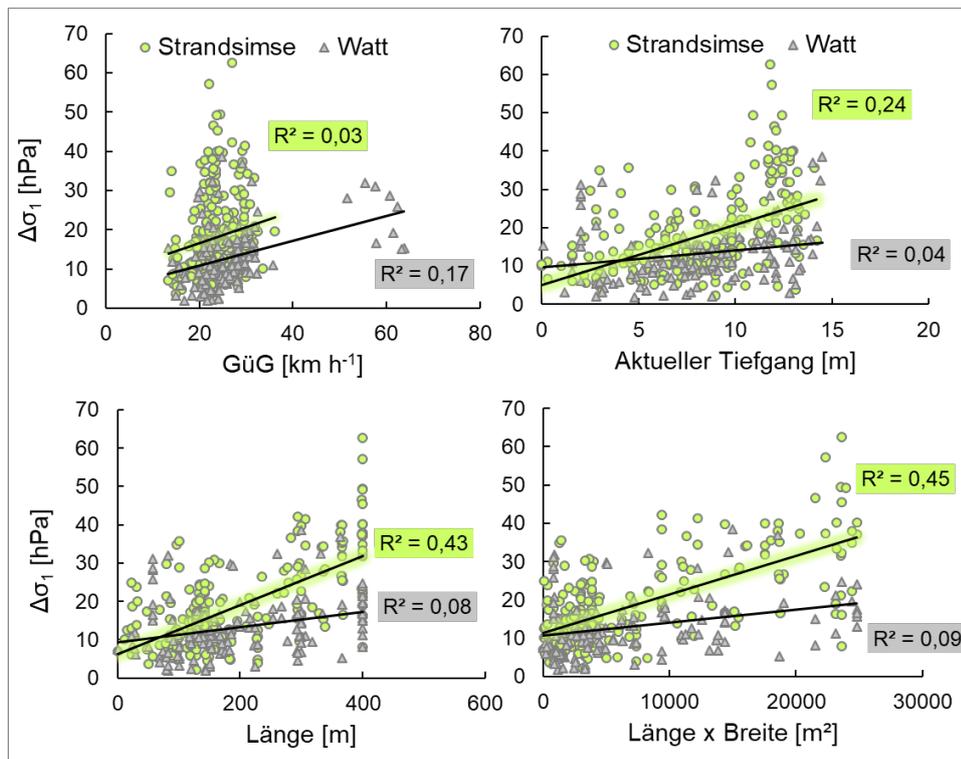
(vgl., Tabelle 5) (Maximalwert  $\Delta\sigma_1 = 62$  hPa). Auch der High-Speed Katamaran verursacht im Mittel vergleichbar hohe Spannungseinträge bis zu 40 hPa. Beide Schiffstypen erzeugen auch die größten Zugspannungen von bis -50 hPa. Bei Verdrängerfahrt wie z.B. für große Frachter, verursacht der Absink seitlich am Schiff eine Sogwirkung, die als Zugspannung erfasst ist, während bei Gleitfahrt (Klasse „High-Speed Katamaran“) die mehrfach hintereinander folgenden Sekundärwellen (über ca. 3 min) einen kurzfristigen Wechsel zwischen Druck- und Zugspannungen im Boden verursachen.

Die maximalen Scherspannungen im Fro-Horizont (Pionierzone) liegen je nach Schiffstyp zwischen 11 (Klasse „Spezialschiff“) und 15 hPa (Klasse „Frachter“). Im Fro-Horizont des vegetationslosen Watts sind die maximalen Scherspannungen im Mittel für die betrachteten Schiffstypen geringer als in der Pionierzone. Die mit dem High-Speed Katamaran erzeugten Wellenbelastungen verursachen Scherspannungen, die vergleichbar bzw. im Mittel sogar höher liegen als nach diejenigen, die durch große Frachter verursacht wurden (Abbildung 12b). In der darunterliegenden Bodentiefe im Fr- Horizont nehmen die  $\sigma_1$ -Werte ab, während die Scherspannungen angestiegen sind (siehe Abbildung Anhang 2). Die größte Scherspannung von 21 hPa in 25 cm Bodentiefe wird durch Wellenbelastungen des Schiffstyps „Cargo“ verursacht.

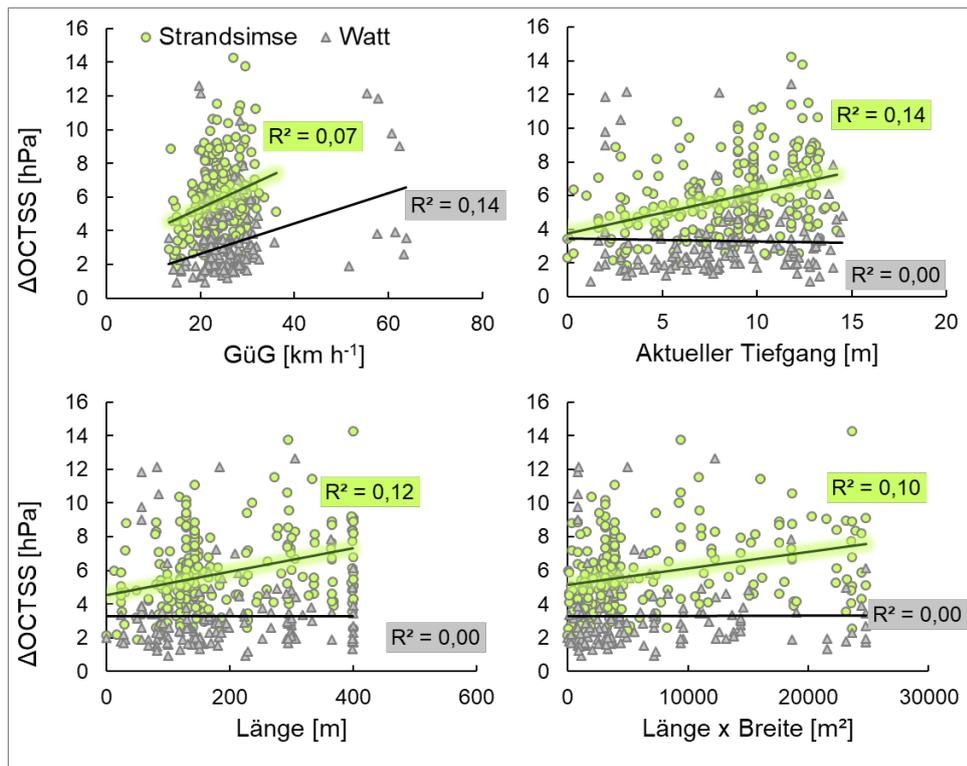


**Abbildung 12: Einfluss des Schiffstyps auf die welleninduzierten Zunahmen (Druckspannungen) und Abnahmen (Zugspannungen) der 1. Hauptspannung ( $\Delta\sigma_1$ ) (a) und der oktaedrischen Scherspannung ( $\Delta O_{CTSS}$ ) in 15 cm Bodentiefe (Fro-Horizont) (b). n = Anzahl der Schiffe pro Schiffstyp, Schiffseigenschaften siehe Tabelle 5.**

Korrelationsanalysen zeigen, dass die Schiffsgröße, ausgedrückt über Länge und Breite, den größten Einfluss ( $R^2 = 0,45$ ) auf die maximalen Spannungseinträge ( $\Delta\sigma_1$ ) hat, wobei der Größeneffekt nur in der Pionierzone, aber nicht im vegetationslosen Watt sichtbar ist (Abbildung 13). Auch der aktuelle Tiefgang ist von Bedeutung ( $R^2 = 0,24$ ) für den Spannungseintrag in der Pionierzone. Die Fahrgeschwindigkeit zeigt den geringsten Einfluss und gewinnt im vegetationslosen Watt an Bedeutung, wobei hier auch die hohen Fahrgeschwindigkeiten des High-Speed Katamarans (Halunder-Jet) eingehen, der während der Messkampagne 1 (Pionierzone) nicht gefahren ist oder aufgrund der Mess-Stopps vom Gerät nicht aufgezeichnet wurde. Ein ähnliches Bild zeigt sich für die Beziehung von Scherspannungen und Schiffsparametern, wobei die Stärke des Zusammenhangs deutlich geringer ( $R^2 \leq 0,14$ , Abbildung 14) ausfällt als für die 1. Hauptspannung. Ursächlich hierfür könnte der Einfluss der Fließgeschwindigkeit auf die Scherspannung sein, die durch Wellen und Strömungen zunimmt und die erosive Wirkung auf den Uferboden verstärkt (Gabel et al., 2017).



**Abbildung 13: Lineare Korrelation zwischen verschiedenen Schiffsparametern und maximalem Spannungseintrag durch generierte Schiffswellen (1. Hauptspannung,  $\Delta\sigma_1$ ) in 15 cm Bodentiefe (Fro-Horizont) im vegetationslosen Watt ( $n = 128$ ) und in der Pionierzone mit Strandsimse ( $n = 249$ ). GüG = Geschwindigkeit über Grund.**



**Abbildung 14: Lineare Korrelation zwischen verschiedenen Schiffparametern und maximalem Scherspannungseintrag durch generierte Schiffswellen ( $\Delta$ OCTSS) in 15 cm Bodentiefe (Froh-Horizont) im vegetationslosen Watt ( $n = 128$ ) und in der Pionierzone mit Strandsimse ( $n = 249$ ). GüG = Geschwindigkeit über Grund.**

Die Ergebnisse stehen daher u.a. im Einklang mit vergangenen Wellenmessungen an der Unterelbe, die herausstellen, dass vor allem die großen Schiffe (Panmax-Klasse) den größten Absenk und die größte Primärwellenhöhe erzeugen, während die Belastung durch kleinere Schiffe auf generierte Sekundärwellen zurückzuführen ist, da diese oft näher an ihrer kritischen Rumpfgeschwindigkeit (Höchstgeschwindigkeit bei Verdrängern) und aufgrund des geringeren Tiefgangs mit kürzerer Distanz zum Ufer fahren können (Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, 2003).

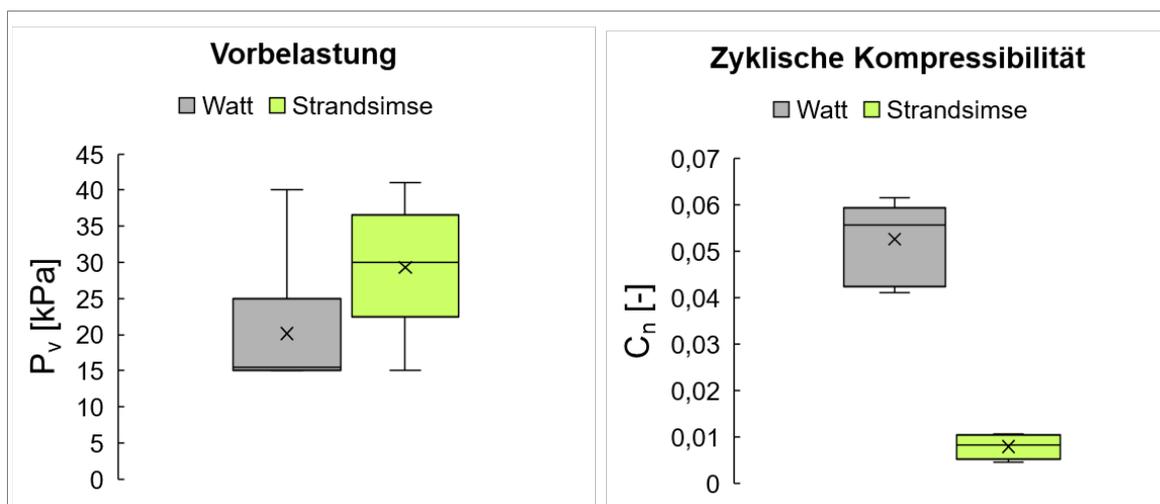
Weitere Studien bestätigen, dass die Schiffslänge bzw. der Schiffsquerschnitt den größten Einfluss auf die vom Schiff verursachten Primärwellenperiode (und -höhe) ausüben (z.B. Almström und Larson, 2020; Dempwolff et al., 2022; Melling et al., 2020). Wie auch bei Almström und Larson (2020) zeigen die Korrelationsanalysen in Abbildung 13, dass die Schiffsgröße (Länge x Breite) den größten Einfluss auf die Wellenhöhe bzw. die durch die Wellen verursachten Spannungseinträge im Uferboden haben, während die Effekte der Fahrgeschwindigkeit gering ausfallen. Herbich und Schiller (1984) haben festgestellt, dass sich die Fahrgeschwindigkeit eher bei kleineren Schiffen auswirkt, während bei größeren Schiffen zusätzlich auch der aktuelle Tiefgang ursächlich für die Ufererosion ist.

Nach Almström und Larson (2020) hat der Abstand zum Ufer (Passierabstand) einen größeren Einfluss auf den Absenk als die Fahrgeschwindigkeit. Weder eine Zunahme der Spannungseinträge noch eine Abnahme durch den Absenk (Daten nicht gezeigt) konnte allerdings bei Reduzierung des Passierabstandes zum Ufer in Hollerwettern festgestellt werden. Zudem spielen sowohl weitere Schiffparameter wie die Rumpfgeometrie, Bugform oder Antriebsart als auch der Wasserstand und die Grundströmung (Richtung und Fließgeschwindigkeit der Tideelbe) eine entscheidende Rolle für die Wellenhöhe bzw. Wellenenergie und den wirkenden Kräften auf den Uferboden (Almström und Larson, 2020; International Navigation Association, 2008; Schröder et al., 2018; Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg, 2003).

### 3.3 Mechanische Stabilität der Uferböden

#### 3.3.1 Vorbelastung und zyklische Kompressibilität

Die untersuchten Fro-Horizonte der beiden Brackwattprofile weisen unter feuchten Bedingungen ( $\psi_m = -6$  kPa) wie die meisten Uferböden der Tideelbe eine „geringe“ mechanische Stabilität auf (Neugebauer, 2015). Der Fro-Horizont im vegetationslosen Watt ist dabei instabiler ( $P_v = 20$  kPa,  $P_v$ -Klasse „sehr gering“ nach DVWK 1997) als der in der Pionierzone mit Strandsimse ( $P_v = 29$  kPa,  $P_v$ -Klasse „gering“ nach DVWK 1997, Abbildung 15). Bedingt durch die feinkörnigere Textur weist der Fro im vegetationslosen Watt (Bodenart: Uls) eine deutlich geringere Trockenrohdichte von  $0,83$  g cm<sup>-3</sup> und damit ein höheres Gesamtporenvolumen auf als der Fro in der Pionierzone aus Feinsand (Tabelle Anhang 3).

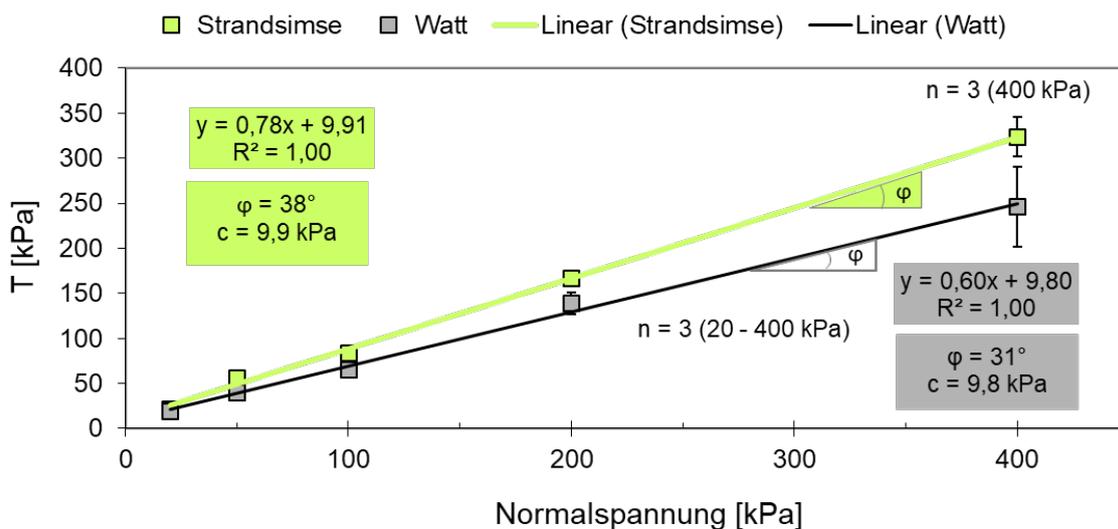


**Abbildung 15: Vorbelastungswert ( $P_v$ ) und zyklische Kompressibilität ( $C_n$ ) bei 20 kPa von auf -6 kPa vorentwässerten Bodenproben aus 15 cm Tiefe im vegetationslosen Watt und in der Pionierzone mit Strandsimse an der Tideelbe in Hollerwettern (n = 6).**

Vor allem die größere Menge an leicht komprimierbaren weiten Grobporen erklärt die größere Verformbarkeit unter mechanischer Belastung. Dies äußert sich besonders in einer deutlich (5-fach) höheren Kompressibilität gegenüber zyklischer Belastung (Abbildung 15). Mechanische Untersuchungen an Bodenproben mit einer geringen Vorentwässerung (-3 kPa) zeigten keine wesentlichen Veränderungen der mechanischen Kenngrößen im Vergleich zur Vorentwässerung bei -6 kPa (Abbildung Anhang 3).

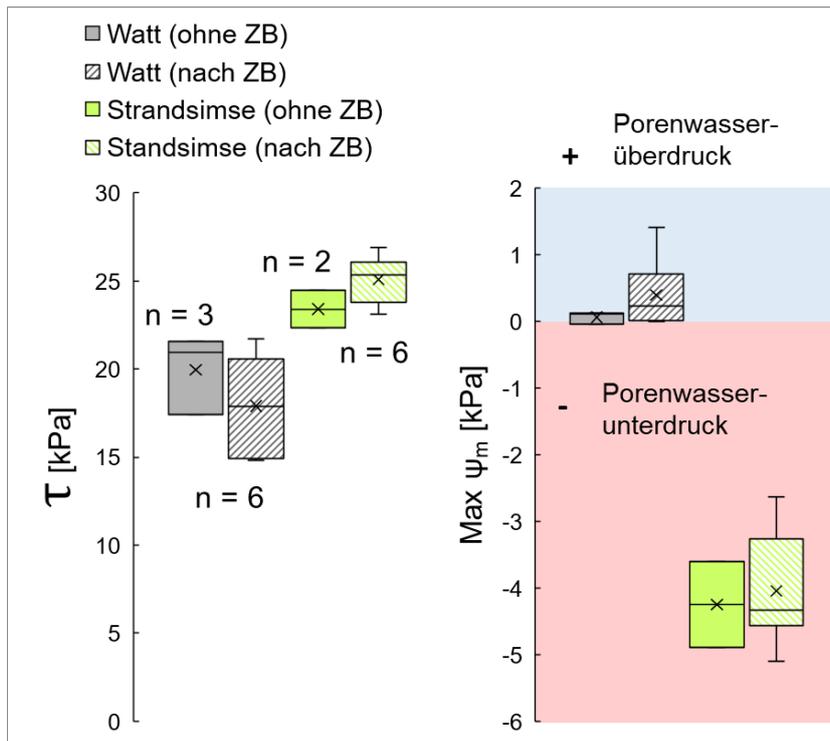
### 3.3.2 Scherwiderstand

Anhand der Schergeraden (Mohr-Coulomb'sche Bruchgeraden) lassen sich ein höherer Reibungswinkel ( $\varphi$ ) von  $38^\circ$  im Fro-Horizont in der Pionierzone mit Strandsimse im Vergleich zum vegetationslosen Watt ( $\varphi = 31^\circ$ ) unter konsolidiert „drainierten“ Bedingungen nach statischer Kompression ableiten. Die Kohäsionswerte ( $c$ ) von ca. 9 kPa unterscheiden sich hingegen kaum (Abbildung 16).



**Abbildung 16: Mohr-Coulomb'sche Bruchgerade von auf -6kPa vorentwässerten Bodenproben aus dem vegetationslosen Watt und der Pionierzone mit Strandsimse an der Tideelbe in Hollerwettern zur Ableitung des Scherwiderstandes (T), Winkel der inneren Reibung ( $\varphi$ ) und Kohäsion (c) bei zunehmender Normalspannung (n = 7-15) pro Schergerade.**

Wenn hingegen zyklische und schernde Belastungen kombiniert werden, verstärken sich die Unterschiede im Verformungsverhalten der beiden Horizonte. Der Fro-Horizont des vegetationslosen Watts zeigt einen verringerten Scherwiderstand durch die vorhergehende zyklische Beanspruchung. Diese hohe Verformbarkeit im Vergleich zum Fro-Horizont in der Pionierzone steht zudem mit dem Auftreten von positiven Porenwasser(über)drücken während der zyklischen (nicht gezeigt) und scherenden Belastung in Verbindung (Abbildung 17 rechts).



**Abbildung 17:** Scherwiderstand ( $\tau$ ) und maximales Matrixpotenzial ( $\text{Max } \psi_m$ ) bei einer Normalspannung von 20 kPa von auf -6 kPa vorentwässerten Bodenproben aus dem vegetationslosen Watt und in der Pionierzone mit Strandsimse. Proben mit ZB wurden unmittelbar vor dem Schertest zyklisch mit 20 kPa (50 Zyklen) belastet.

### 3.4 Unterirdische Biomasse an den Sensorpositionen

Eine intakte Ufervegetation erhöht die Widerstandsfähigkeit des Ufers gegenüber hydromechanischen Belastungen. Während die oberirdische Biomasse dazu beiträgt, dass Wellenhöhen und Strömungsgeschwindigkeiten durch die oberirdische Biomasse reduziert werden (Carus et al., 2023; Heuner et al. 2019; Schoutens et al., 2019), kann die unterirdische Biomasse (Pflanzenwurzeln, -rhizome) die Erosionsempfindlichkeit mindern, indem der Scherwiderstand des Uferbodens erhöht wird. Dadurch werden insbesondere sandige, d.h. kohäsionsarme Böden deutlich stabiler (Evans et al., 2022; Gobinath et al., 2021; Schoutens et al., 2019; Trükmann et al., 2009; Yu et al., 2021).

Die in der Pionierzone dominante Vegetation ist die Strandsimse (*Bolboschoenus maritimus*). Rhizome wurden ausschließlich im Fro-Horizont gefunden, im Fr-Horizont nimmt die unterirdische Biomasse deutlich ab. Insgesamt ergibt das für die beprobte Tiefe von 0–30 cm eine Gesamtmasse (Wurzeln und Rhizome) von 2,8 kg pro  $\text{m}^2$  (Tabelle 6).

In der Schilfzone steigt die unterirdische Biomasse mit der Tiefe, und liegt hinsichtlich der Gesamtmenge von 14 kg pro  $\text{m}^2$  deutlich höher. Ein stabilisierender Einfluss von Pflanzenwurzeln ist daher insbesondere für die Schilfzone, aber in abgeschwächter Weise auch für die obere Sensortiefe (-15 cm Tiefe) durch die Pioniervegetation (Strandsimse) zu

erwarten, während im vegetationslosen Watt auch keine abgestorbene unterirdische Biomasse mehr zu erkennen war.

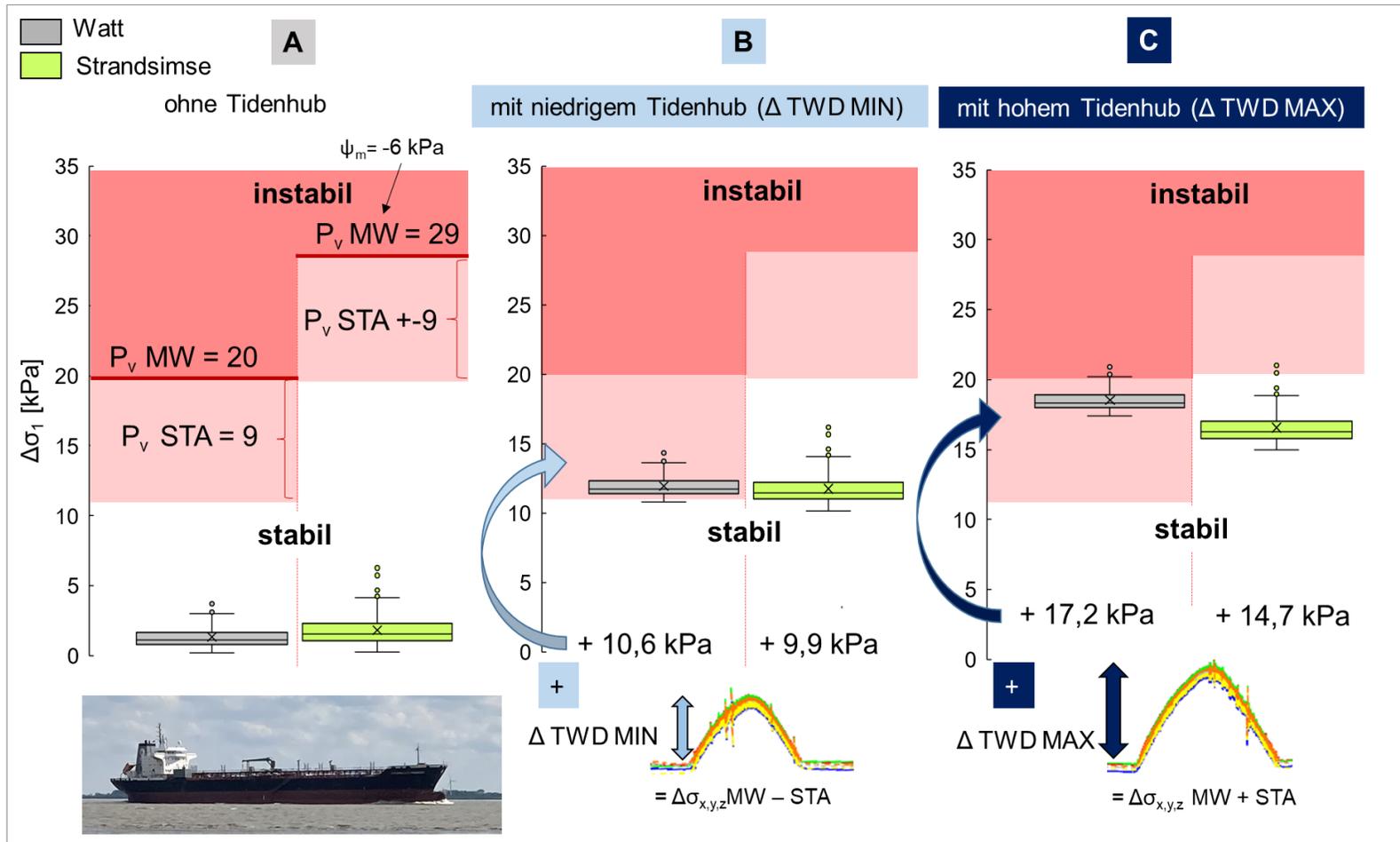
**Tabelle 6: Mittlere Gesamtmenge (Trockenmasse in g und in k pro m<sup>2</sup>) mit Standardabweichung (+/-) der unterirdischen Biomasse in der Pionierzone mit Strandsimse (Bo = *Bolboschoenus maritimus*) und in der Schilfzone (Ph = *Phragmites australis*), Anzahl der Wiederholungen = 4. Im vegetationslosen Watt ist keine (abgestorbene) Biomasse vorhanden. Die oberirdische Biomasse wurde nur in der Pionierzone bestimmt.**

Uferzone	Art	Tiefe [cm]	Rhizom [g]	Wurzel [g]	Gesamt-biomasse [g]	Gesamt-biomasse [kg m <sup>-3</sup> ]	Gesamt-biomasse (30 cm) [kg m <sup>-2</sup> ]
		> 0	-	-	23,45	-	-
Strandsimse	Bo	0–15	<b>3,6</b> +/- 3,2	<b>2,0</b> +/- 1,0	<b>5,6</b> +/- 4,1	<b>7,5</b> +/- 5,4	<b>2,8</b>
		15–30	<b>0</b> +/- 0	<b>1,3</b> +/- 0,8	<b>1,3</b> +/- 0,8	<b>1,7</b> +/- 1,0	
Schilf	Ph	0–15	<b>8,0</b> +/-5,6	<b>7,1</b> +/- 3,5	<b>15,0</b> +/- 8,2	<b>19,9</b> +/- 10,9	<b>14,0</b>
		15–30	<b>16,0</b> +/-5 ,8	<b>4,2</b> +/- 2,6	<b>20,2</b> +/- 7,9	<b>26,8</b> +/- 10,5	

## 4 Bewertung der Uferstabilität gegenüber hydromechanischer Belastung

Wenn die mechanische Bodenstabilität geringer als die gezeigten hydromechanischen Belastungen ist, kann es zu Ufererosion kommen. Im nächsten Schritt wird daher überprüft, ob und inwieweit die Spannungseinträge durch Schiffswellen die mechanische Eigenfestigkeit des Uferbodens überschreiten. Hierfür werden die Ergebnisse der zusätzlich für das Projekt durchgeführten mechanischen Untersuchungen an Stechzylindern herangezogen, die aus den Fro-Horizonten (2. Sensortiefe) entnommen wurden. Die mechanische Belastbarkeit bei vertikaler (Vorbelastung) und scherender Belastung (Kohäsion und Winkel der inneren Reibung) wird mit den schiffswelleninduzierten Maximalspannungseinträgen ( $n = 377$ ) der 1. Hauptspannung ( $\Delta\sigma_1$ ) (Abbildung 18) und der oktaedrischen Scherspannung ( $\Delta\text{OCTSS}$ ) (Abbildung 19) in 15 cm Tiefe (Fro-Horizont) verglichen. Zur Vergleichbarkeit werden die Spannungswerte des Watt-SST in die Einheit kPa ( $1 \text{ kPa} = 10 \text{ hPa}$ ) umgerechnet. Da die mechanischen Untersuchungen an vorentwässerten Bodenproben (3–6 kPa) durchgeführt wurden, handelt es sich um einen maximalen Stabilitätswert, da zum Zeitpunkt der Wellenbelastung meistens nahe wassergesättigte Bedingungen vorherrschen, die die Eigenstabilität des Bodens grundsätzlich herabsetzen (Fazekas und Horn, 2005; Huang et al., 2022, 2021; Neugebauer, 2015).

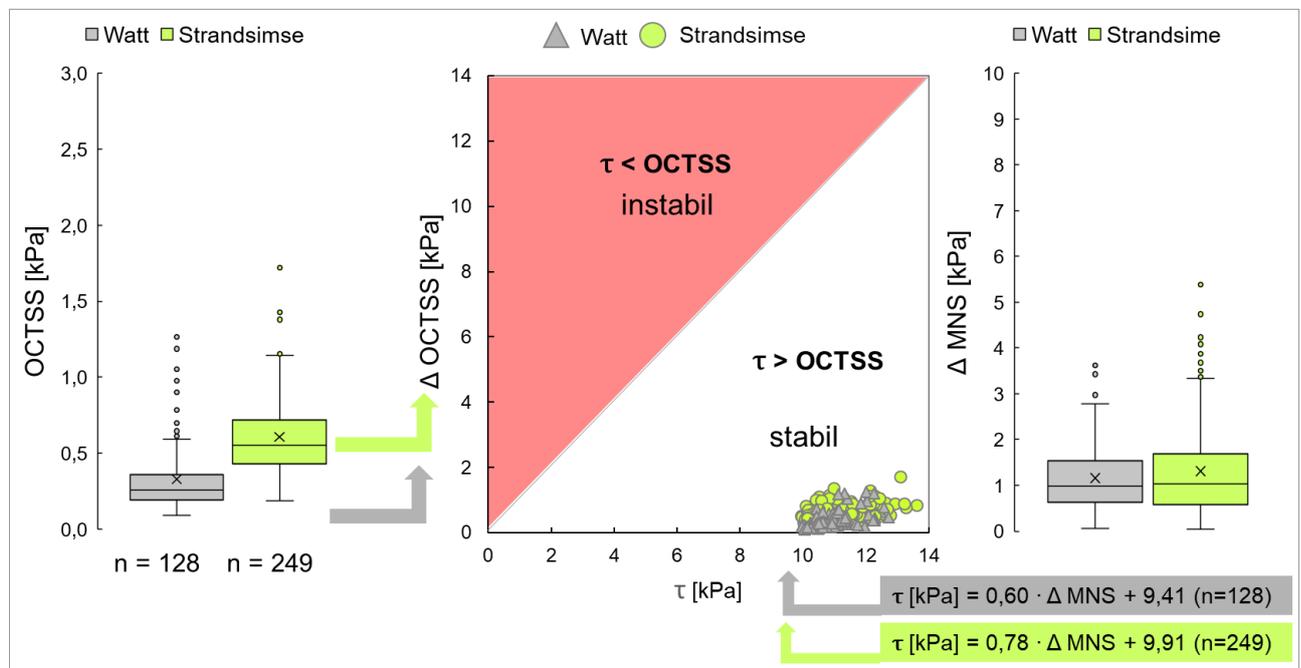
Es werden 3 Szenarien (A, B, C) betrachtet: Abbildung 19 A zeigt die **maximalen Spannungseinträge der 1. Hauptspannung** ( $\Delta\sigma_1$  in kPa), die allein durch Schiffswellen verursacht wurden. Diese Werte liegen deutlich unterhalb der Eigenstabilität ( $P_v$ -Wert), d.h. die beiden untersuchten Uferböden sind stabil genug, um die äußeren Lasteinträge kompensieren zu können. Betrachtet man zusätzlich zu den Spannungseinträgen durch Schiffswellen auch den gleichzeitig wirkenden tideabhängigen Wasserhöhendruck ( $\Delta \text{TWD}$ ) bei niedrigem (Gleichung 7) und hohem Tidenhub (Gleichung 8), steigen die Gesamtspannungseinträge auf den Uferboden an. Der vom TWD erzeugte Spannungseintrag ist durch die größere aufliegende Wassersäule im vegetationslosen Watt (vor der Uferkante flusswärts) entsprechend höher als in der Pionierzone (hinter der Uferkante landwärts). Dies führt dazu, dass die Spannungseinträge bereits im Schwankungsbereich der Belastbarkeit (untere Standardabweichung des  $P_v$ -Wertes, „hellroter Bereich“) liegen. Bei hohem Tidenhub (Abbildung 19C) wird die **kritische Belastungsgrenze** ( $\Delta\sigma_1 > P_v$ -Wert, „roter Bereich“) des Fro-Horizontes im vegetationslosen Watt durch übermäßige Wellenbelastungen, etwa durch vorbeifahrende große Frachter verursacht, überschritten.



**Abbildung 18: Stabilitätsmodell zur Bewertung der Uferstabilität im vegetationslosen Watt und in der Pionierzone mit Strandsimse gegenüber maximalen Spannungseinträgen der 1. Hauptspannung ( $\Delta\sigma_1$ ) durch Schiffswellen ohne und mit Berücksichtigung des Wasserhöhendrucks bei niedrigem ( $\Delta \text{TWD MIN}$ , Szenario B, Berechnung siehe Gleichung 7) und hohem Tidenhub ( $\Delta \text{TWD MAX}$ , Szenario C, Berechnung siehe Gleichung 8) an der Tideelbe in Hollerwettern. TWD = Tideabhängiger Wasserhöhendruck,  $P_v \text{ MW}$  = Mittlere mechanische Stabilität (Mittelwert der Vorbelastung bei einem Matrixpotenzial ( $\psi_m$ ) = -6 kPa),  $P_v \text{ STA}$  = Arithmetische Standardabweichung der Vorbelastung.  $\Delta\sigma_1 > P_v \text{ MW}$  = instabile Verhältnisse (roter Bereich),  $\sigma_1 > P_v \text{ MW} - P_v \text{ STA}$  = Schwankungsbereich der Stabilität (hellroter Bereich),  $\Delta\sigma_1 < P_v \text{ MW} - P_v \text{ STA}$  = stabile Verhältnisse (weißer Bereich).**

Besonders gegenüber zyklischer Belastung, zu der es vor allem durch hohe kurzperiodische Sekundärwellen z.B. beim Vorbeifahren des High-Speed Katamarans kommt, weist der Fro-Horizont des vegetationslosen Watts eine hohe Verformungssensibilität bei vergleichbar geringen Spannungseinträgen von 20 kPa auf. Dies belegen die durchgeführten Laboruntersuchungen, die gezeigt haben, dass die zyklische Kompressibilität (bei einer Auflast von 20 kPa) des Fro-Horizontes im vegetationslosen Watt um ein 5-faches höher ist als die des Fro-Horizontes in der Pionierzone (Abbildung 15).

Zusätzlich werden durch Wellenbewegungen **scherende Belastungen** ( $\Delta$ OCTSS) erzeugt, die bei Überschreiten des mobilisierbaren Scherwiderstands ( $\tau$ ) zu einer Scherverformung im Boden führen. Das Verformungsverhalten bei Scherung kann in Abhängigkeit von der zeitgleich aufgebrauchten Normalspannung (MNS) und den Materialeigenschaften Kohäsion und Reibungswinkel beschrieben werden. In Abbildung 19 werden die durch Schiffswellen erzeugten Maximalwerte der OCTSS dem mobilisierbaren  $\tau$  der Fro-Horizonte jeweils gegenübergestellt. Werte oberhalb der 1:1 Linie spiegeln instabile Verhältnisse wider, liegen die Werte unterhalb der 1:1-Linie, ist der Boden stabil. Für beide Uferpositionen zeigt sich, dass die  $\tau$ -Werte im Boden höher als die maximalen OCTSS-Werte liegen und beide Uferböden diesem Ansatz zufolge stabil gegenüber einer scherenden Belastung sind. Allerdings ist in dieser Darstellungsweise der Effekt reduzierender Scherwiderstände bei vorgehender zyklischer Belastung noch nicht berücksichtigt (vgl. Abbildung 17).



**Abbildung 19: Stabilitätsmodell zur Bewertung der Uferstabilität gegenüber schiffswelleninduzierten Scherbelastungen (OCTSS) im vegetationslosen Watt und in der Pionierzone mit Strandsimse.  $\tau$  entspricht dem aus der Mohr-Coulomb'schen Bruchgerade (siehe Abbildung 16) berechneten Scherwiderstand bei mit dem Watt-SST gemessener maximaler Normalspannung (MNS) während eines Schiffswellenereignisses an der Tideelbe in Hollerwettern.**

Es ist davon auszugehen, dass sich mit zunehmendem Belastungsdruck und Matrixpotenzial (höhere Wassersättigung) das Ausmaß der Deformation und Porenwasserdrücke bei zyklischer und scherender Belastung noch weiter erhöht (Huang et al., 2022, 2021). Unter dem Aspekt der Ufererosionsgefahr sind daher die dynamisch wirkenden Porenwasser(über)drücke nicht zu vernachlässigen. Kommt es zu einer stetigen Zunahme der Porenwasserdrücke durch kurzzeitige Spannungseinträge, erweist sich insbesondere der Fro-Horizont im vegetationslosen Watt als hoch empfindlich gegenüber einer darauffolgenden scherenden Belastung. Da diese Sensibilität in Verbindung mit hohen Porenwasser(über)drücken steht (Abbildung 17), können Prozesse der Bodenverflüssigung dazu beitragen, dass der Scherwiderstand selbst bei geringen Auflasten herabsetzt wird und auch scherende Spannungseinträge (OCTSS) nicht mehr kompensiert werden können.

In der Pionierzone wurden die OCTSS-Einträge in 15 cm Bodentiefe möglicherweise durch den stabilisierenden Effekt der Pflanzenwurzeln abgeschwächt (siehe Kapitel 3.4). In 25 cm Bodentiefe sind keine Rhizome und deutlich weniger Wurzeln der Strandsimse vorhanden (Tabelle 6), dafür nimmt die OCTSS im Vergleich zur 15 cm Bodentiefe wieder zu (Tabelle 4). Insgesamt erweist sich der Uferboden in der Pionierzone damit nicht nur stabiler, sondern ist unter Berücksichtigung des niedrigeren tideabhängigen Wasserhöhendrucks durch die geringere Überflutungshöhe im Vergleich zum vegetationslosen Watt auch geringeren Gesamtdrücken bei einem Schiffswellenereignis ausgesetzt. Dies ergibt ein übereinstimmendes Bild in Bezug auf die Ergebnisse der UAS-Bildflüge der Uni Rostock (im Auftrag der BfG) und kann zur Erklärung herangezogen werden, dass sich die Gewässerkante in der Pionierzone im Jahresvergleich 2021/2022 nur geringfügig verändert hat (Grenzdörffer und Naumann, 2022). Erweitert sich der Sedimentationsbereich vom bereits betroffenen vegetationslosen Watt landwärts bis in die (Pionier)Röhrichtzone, könnte dies allerdings die Eigenstabilität des Uferbodens in der Pionierzone negativ beeinflussen.

## 5 Zusammenfassung

Im Frühjahr 2021 und 2022 wurden mehrwöchige Messkampagnen mit dem Watt-SST an verschiedenen Uferpositionen (im vegetationslosen Watt, in der Pionierzone mit Strandsimse und in der Schilfzone) an der Tideelbe in Hollerwettern (Elbe-km 381) durchgeführt, um den Spannungseintrag und damit die Veränderung des dreidimensionalen Spannungszustandes sowohl durch die Gezeiten als auch von schiffserzeugten Wellen im Uferboden zu erfassen. Aus den umfangreichen Messdaten (60 Mio Werte pro Tag) wurden die richtungsspezifischen Spannungsänderungen von insgesamt 100 Tidehochwasserphasen sowie die Haupt- und Scherspannungen von 377 schiffsbedingten Wellenereignissen in drei Tiefen berechnet. Um zu bewerten, ob der naturnahe Uferboden stabil gegenüber hydromechanischen Belastungen ist, wurden die durch Schiffswellen und Tidenhub erzeugten Gesamtspannungseinträge (1. Hauptspannung und Scherspannung) in 15 cm Bodentiefe mit Stabilitätskennwerten wie der Vorbelastung und dem Scherwiderstand verglichen, die anhand von zusätzlich für das Projekt entnommenen ungestörten Bodenproben (Stechzylinder) untersucht wurden.

Die richtungsabhängigen Gesamtspannungseinträge ( $\leq 15$  kPa) im Uferboden reduzieren sich landwärts aufgrund des abnehmenden Wasserstandes, während die schiffsbedingten Spannungseinträge der 1. Hauptspannung in der Pionierzone ( $\Delta\sigma_1 \leq 6,3$  kPa) höher ausfallen als im vegetationslosen Watt ( $\Delta\sigma_1 \leq 3,8$  kPa). In der Schilfzone wurden keine schiffsbedingten Spannungseinträge mehr festgestellt. Die für die Wellenbelastung verantwortlichen Schiffe sind unterschiedlichen Schiffstypenklassen zugehörig, die sich in ihrer Dimension und Fahrtdynamik unterscheiden und charakteristische Wellenmuster (Primär- und Sekundärwellensysteme) erzeugen. Aufgrund des hohen Datenumfanges konnte eine Klassifizierung in vier Wellenkategorien (Kat A–D) vorgenommen werden, die den Verlauf der Haupt- und Scherspannungen im Boden widerspiegeln. Insbesondere vorbeifahrende Riesenfrachter mit hohem Tiefgang verursachen hohe Primärwellen (Kat A), die mitunter zu den höchsten Spannungseinträgen in den Uferboden führen. Unter Berücksichtigung des zeitenabhängigen Wasserhöhendruckes und der Uferposition liegen diese z.T. im kritischen Grenzbereich hinsichtlich der Uferstabilität. Kleinere (Fracht)-Schiffe erzeugen überwiegend Sekundärwellen. Diese sind für den Schiffstyp Tanker generell schwächer ausgeprägt (Kat. C) als für Spezialschiffe (Kat. B und D) und den High-Speed Katamaran „Halunder Jet“ (Kat. D).

Eine Überschreitung der mechanischen Stabilität betrifft vorrangig den Uferboden im vegetationslosen Watt (Fro-Horizont), der nicht nur wegen des fehlenden Stabilisierungseffekts durch Pflanzenwurzeln, sondern aufgrund seiner feinkörnigeren Textur deutlich empfindlicher gegenüber mechanischer Belastung reagiert als der Fro-Horizont in der Pionierzone mit Strandsimse. Selbst geringe Auflasten (20 kPa) führen unter feuchten Bedingungen zu einer erheblichen Deformation des Bodens, wenn die Belastung zyklisch

erfolgt (Laborversuch). In Uferböden ist diese zyklische Belastungsart vergleichbar mit den mehrfach aufeinanderfolgenden Spannungseinträgen durch kurzperiodische Sekundärwellen, z.B. der Wellenkategorie D, die insbesondere durch den High-Speed Katamaran „Halunder Jet“ erzeugt werden. Zwar liegen die gemessenen Scherspannungen noch deutlich unter den aus der Schergerade abgeleiteten Scherwiderständen, doch ist davon auszugehen, dass sich die Scherwiderstände unter (nahe) wassergesättigten Bedingungen bei Zusammenwirkungen von zyklischen und scherenden Kräften noch weiter reduzieren.

## 6 Ausblick und Empfehlungen

Anhand des Datensatzes konnte der **Belastungsgrad** des Uferbodens in Abhängigkeit von charakteristischen Schiffswellenmustern (Kategorie A–D) und Schiffstypenklassen abgebildet werden. Die Ergebnisse können als Grundlage genutzt werden, um die Mindeststabilität (Vorbelastungswert  $> 1$ . Hauptspannung und Scherwiderstand  $>$  Scherspannung) bzw. die kritische Belastungsgrenze für vergleichbare Uferbereiche an der Tideelbe vorherzusagen.

Die Messungen haben gezeigt, dass die schiffsbedingten Spannungseinträge im Uferboden in der Pionierzone mit Strandsimse aktuell kompensiert werden können, da die kritische Belastungsgrenze (Vorbelastungswert und Scherwiderstand des Bodens) nicht überschritten wird. Der Erhalt der Vegetation als Pufferzone stellt daher eine wichtige Maßnahme des natürlichen Küstenschutzes dar, um die Spannungseinträge durch Schiffswellen aber auch durch einen Anstieg des Tidenubs im Zuge der Fahrrinnenanpassung oder des Klimawandels abzuschwächen. Nimmt allerdings die Sedimentation von feinkörnigerem Material zu, wie bereits im vegetationslosen Watt geschehen, landwärts weiter zu, reduziert sich die Eigenstabilität gegenüber den mechanischen Spannungseinträgen. Die Erosionsgefahr ist insbesondere im Winterhalbjahr gegeben, wenn zugleich der Effekt der Wellenreduktion durch die oberirdische Biomasse in der Pionierzone am geringsten ist und die Wahrscheinlichkeit von Hochwasserereignissen zunimmt.

Eine Zunahme der Primärwellenhöhe und -häufigkeit durch Erweiterung von Größe und Tiefgang (Transportgewicht) der vorbeifahrenden Schiffe birgt daher für erosionsgefährdete Uferstandorte immer mehr die Gefahr, dass die Eigenstabilität der Uferböden überschritten wird. Auch kleine Schiffe sollten trotz ihres geringen Tiefgangs einen Mindestabstand zum Ufer einhalten und/oder die Fahrgeschwindigkeit anpassen, um die Belastungshöhe und -frequenz der generierten Sekundärwellen und damit die erosiv wirkenden Scherkräfte auf den Boden gering zu halten.

Für den Aufbau eines standortübergreifenden **Stabilitätsmodells** für Watten und Rohmarschen für naturnahe Ufer der Tideelbe sollten zukünftig weitere Untersuchungen an **erosionsgefährdeten Standorten**, die ggf. schon eine Abbruchkante aufweisen, vorgenommen werden. Dazu zählen u.a. feinkörnigere Böden, Ufer mit stärkerer Exposition und Hangneigung und/oder mit geringerem Abstand zur Fahrrinne. Vorzugsweise sollten dabei Standorte gewählt werden, für die bereits Messdaten zur mechanischen Stabilität aus vorherigen Projekten vorliegen, um die kritische Belastungsgrenze (maximale Spannungseinträge) texturspezifisch in Abhängigkeit vom Vorbelastungswert und Scherwiderstand zu definieren.

## 7 Literatur

- Ad-hoc-AG Boden, 2005. Bodenkundliche Kartieranleitung: Ad-hoc-AG Boden der Geologischen Landesämter und der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe der Bundesrepublik Deutschland, 5th ed. Schweizerbart'sche, E., Stuttgart.
- Almström, B., Larson, M., 2020. Measurements and Analysis of Primary Ship Waves in the Stockholm Archipelago, Sweden. *Journal of Marine Science and Engineering* 8, 743. <https://doi.org/10.3390/jmse8100743>.
- Bauer, B.O., Lorang, M.S., Sherman, D.J., 2002. Estimating Boat-Wake-Induced Levee Erosion using Sediment Suspension Measurements. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 128, 152–162. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-950X\(2002\)128:4\(152\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-950X(2002)128:4(152)).
- Blume, H.-P., Stahr, K., Leinweber, P., 2011. *Bodenkundliches Praktikum*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrogeographie (BSH), 2021. Wasserstandsvorhersagedienst Hamburg vom 7.11.2021. [https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand\\_und\\_Gezeiten/Sturmfluten/\\_Anlagen/Downloads/Nordsee\\_Sturmflut\\_20211107.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bsh.de/DE/THEMEN/Wasserstand_und_Gezeiten/Sturmfluten/_Anlagen/Downloads/Nordsee_Sturmflut_20211107.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
- Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), 2022. Download von Gezeitendaten für den Standort Brokdorf (Elbe). [https://www.bsh.de/DE/DATEN/Gezeiten/gezeiten\\_node.html](https://www.bsh.de/DE/DATEN/Gezeiten/gezeiten_node.html).
- Bundesanstalt für Wasserbau, 1996. Anpassung der Fahrrinne der Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt Ermittlung und Bewertung ausbaubedingter Änderungen der schiffserzeugten Belastung - Schiffswellen und Strömungen - (No. BAW-Nr. 94 52 3422/23). Hamburg.
- Casagli, N., Rinaldi, M., Gargini, A., Curini, A., 1999. Pore water pressure and streambank stability: results from a monitoring site on the Sieve River, Italy. *Earth Surf. Process. Landforms* 24, 1095–1114. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1096-9837\(199911\)24:12<1095::AID-ESP37>3.0.CO;2-F](https://doi.org/10.1002/(SICI)1096-9837(199911)24:12<1095::AID-ESP37>3.0.CO;2-F).
- Casagrande, A., 1936. Discussion of "The determination of the pre-consolidation load and its practical significance". *Proceedings of the first international conference on soil mechanics and foundation engineering*. Vol. 3, S. 60 – 64.
- Carus et al., 2023. Naturraumtypische Ufer der Tideelbe- Boden und Vegetation im Fokus. Ergebnisse der Forschungsprojekte Uferfunk, SpaTe, und DyNaMo sowie Zwischenergebnisse des Makrophytenmonitorings der Fahrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe 2019-2021. Anwenderband, BfG-2139. Bundesanstalt für Gewässerkunde, <https://dx.doi.org/10.5675/BfG-2139>
- Davis, S.E., Allison, J.B., Driffill, M.J., Zhang, S., 2009. Influence of Vessel Passages on Tidal Creek Hydrodynamics at Aransas National Wildlife Refuge (Texas, United States): Implications on Materials Exchange. *Journal of Coastal Research* 252, 359–365. <https://doi.org/10.2112/07-0946.1>.
- Dempwolff, L.-C., Melling, G., Windt, C., Lojek, O., Martin, T., Holzwarth, I., Bihs, H., Goseberg, N., 2022. Loads and effects of ship-generated, drawdown waves in confined waterways - A review of current knowledge and methods. *Journal of Coastal and Hydraulic Structures* 46 Pages. <https://doi.org/10.48438/JCHS.2022.0013>.
- Deutscher Wetterdienst (DWD), 2022. Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes der Wetterstation Itzehoe (Stations-ID 2429). [https://opendata.dwd.de/climate\\_environment/CDC/observations\\_germany/](https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany/).

- DVWK, 1997. Gefügestabilität ackerbaulich genutzter Mineralböden Teil II: Auflastabhängige Veränderung von bodenphysikalischen Kennwerten 235.
- Evans, B.R., Brooks, H., Chirol, C., Kirkham, M.K., Möller, I., Royse, K., Spencer, K., Spencer, T., 2022. Vegetation interactions with geotechnical properties and erodibility of salt marsh sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 265, 107713. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2021.107713>
- Fazekas, O., Horn, R., 2005. Zusammenhang zwischen hydraulischer und mechanischer Bodenstabilität in Abhängigkeit von der Belastungsdauer. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 60–67.
- Flügge, G., Uliczka, K., 1996. Schiffsbedingte Wellen unter den spezifischen Randbedingungen von Seewasserstraßen, in: Technische Universität Dresden, Institut Für Wasserbau Und Technische Hydromechanik (Hg.): Wellen., 9. Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik, Dresden, pp. 75–90.
- Gabel, F., Lorenz, S., Stoll, S., 2017. Effects of ship-induced waves on aquatic ecosystems. *Science of The Total Environment* 601–602, 926–939. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.206>.
- Gobinath, R., Ganapathy, G.P., Akinwumi, I.I., 2021. Stabilisation of natural slopes using natural plant root as reinforcing agent. *Materials Today: Proceedings, International Conference on Advanced Materials and Modern Manufacturing* 39, 493–499. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.227>.
- Grenzdörffer, G. und Naumann, M., 2022. Bericht UAS-Bildflüge Makrophytenmonitoring 2022.
- Grundmann, M., Degen, B., Fried, O., Behnke, C., 2022. Untersuchungen zur Erfassung von Veränderungen der Makrophytenbestände unter Berücksichtigung von Wellenschlag / Wellenbelastung im Bearbeitungsgebiet Tideelbe. Endbericht- Ergebnisse 2021, im Auftrag vom Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Hamburg (WSA).
- Hartge, K.H., Horn, R., 2009. Die physikalische Untersuchung von Böden. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
- Herbich, J.B., Schiller, R.E.Jr., 1984. Surges and Waves Generated by Ships in a Constricted Channel. *Coastal engineering*, 3213–3226.
- Heuner, M., Carus, J., Schröder, B., Temmerman, N. (2019). Ufersicherung durch natürlichen Pflanzenbewuchs - Erkenntnisse von der Tideelbe. Konferenzbeitrag HTG Kongress in Lübeck.
- Horn, R., Johnson, C., Semmel, H., Schafer, R., Lebert, M., 1992. Räumliche Spannungsmessungen mit dem Stress State Transducer (SST) in ungesättigten aggregierten Böden - theoretische Betrachtungen und erste Ergebnisse. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.* 155, 269–274. <https://doi.org/10.1002/jpln.19921550405>
- Horn, R., Way, T., Rostek, J., 2003. Effect of repeated tractor wheeling on stress/strain properties and consequences on physical properties in structured arable soils. *Soil and Tillage Research* 73, 101–106. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(03\)00103-X](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(03)00103-X).
- Huang, X., Horn, R., Ren, T., 2021. Deformation and pore water pressure change during static and cyclic loading with subsequent shearing on soils with different textures and matric potentials. *Soil and Tillage Research* 209, 104909. <https://doi.org/10.1016/j.still.2020.104909>.
- Huang, X., Horn, R., Ren, T., 2022. Soil structure effects on deformation, pore water pressure, and consequences for air permeability during compaction and subsequent shearing. *Geoderma* 406, 115452. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115452>.

- International Navigation Association (Ed.), 2008. Considerations to reduce environmental impacts of vessels: PIANC report n° 99. PIANC Secrétariat Général, Bruxelles.
- Koolen, A.J., 1994. Mechanics of soil compaction. In: Soane, B.D., van Ouwerkerk, C. (Eds.), *Soil Compaction in Crop Production, Developments in Agricultural Engineering*, vol. 11. Elsevier, Amsterdam, pp. 23–44.
- Liedermann, M., Tritthart, M., Gmeiner, P., Hinterleitner, M., Schludermann, E., Keckeis, H., Habersack, H., 2014. Typification of vessel-induced waves and their interaction with different bank types, including management implications for river restoration projects. *Hydrobiologia* 729, 17–31. <https://doi.org/10.1007/s10750-014-1829-1>.
- Mao, L., Chen, Y., 2020. Investigation of Ship-Induced Hydrodynamics and Sediment Suspension in a Heavy Shipping Traffic Waterway. *JMSE* 8, 424. <https://doi.org/10.3390/jmse8060424>.
- Melling, G., Jansch, H., Kondziella, B., Uliczka, K., Gätje, B., 2020. Evaluation of optimised groyne designs in response to long-period ship wave loads at Juellssand in the Lower Elbe Estuary 28. <https://doi.org/10.18171/1.089103>.
- Meyers, S.D., Luther, M.E., Ringuet, S., Raulerson, G., Sherwood, E., Conrad, K., Basili, G., 2021. Ship wakes and their potential shoreline impact in Tampa Bay. *Ocean & Coastal Management* 211, 105749. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2021.105749>.
- Mordhorst, A., Zimmermann, I., Peth, S., Horn, R., 2012. Effect of hydraulic and mechanical stresses on cyclic deformation processes of a structured and homogenized silty Luvis Chernozem. *Soil and Tillage Research* 125, 3–13. <https://doi.org/10.1016/j.still.2012.06.008>.
- Nanson, G.C., Von Krusenstierna, A., Bryant, E.A., Renilson, M.R., 1994. Experimental measurements of river-bank erosion caused by boat-generated waves on the Gordon river, Tasmania. *Regulated Rivers: Research & Management* 9, 1–14. <https://doi.org/10.1002/rrr.3450090102>.
- Neugebauer, T., 2015. Bodenphysikalische Untersuchungen an Uferböden der Tideelbe als Grundlage für die Prognose des Kompressibilitätsindex als Maß für den Widerstand gegen Wellenschlag (Schiffenreihe des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde Nr. 109). Universität zu Kiel, Kiel.
- Nichols, T. A., Bailey, A.C., Johnson, C. E., Grisso, R., 1987. A stress state transducer for soil. *Transactions of the ASAE*, 30, 1237-1241.
- Oebius, H., 2000. Charakterisierung der Einflussgrößen Schiffsumströmung und Propellerstrahl auf die Wasserstraßen. *Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe*, 7–22.
- Okusa, S., 1985. Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments. *Geotechnique* 35, 517–532.
- Peth, S., Horn, R., 2006. The mechanical behavior of structured and homogenized soil under repeated loading. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 169, 401–410. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521942>.
- Peth, S., Nellesen, J., Fischer, G., Horn, R., 2010. Non-invasive 3D analysis of local soil deformation under mechanical and hydraulic stresses by  $\mu$ CT and digital image correlation. *Soil and Tillage Research* 111, 3–18. <https://doi.org/10.1016/j.still.2010.02.007>.
- Priestas, A., Mariotti, G., Leonardi, N., Fagherazzi, S., 2015. Coupled Wave Energy and Erosion Dynamics along a Salt Marsh Boundary, Hog Island Bay, Virginia, USA. *JMSE* 3, 1041–1065. <https://doi.org/10.3390/jmse3031041>.
- Reineck, V.H.-E., Siefert, W., 1980. Faktoren der Schlickbildung im Sahlenburger und Neuerker Watt. In: *Die Küste* 35. Heide, Holstein: Boyens. S. 26-51.

- Riggert, R., Fleige, F., Kietz, B., Gaertig, T., Horn, R., 2016. Stress Distribution under Forestry Machinery and Consequences for Soil Stability. *Soil Science Society of America Journal* 80, 38–47. <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.03.0126>.
- Riggert, R., Fleige, H., Stoppe-Struck, N., Horn, R., 2019a. Auswirkungen von Schiffswellen auf die Stabilität von Uferböden – Ein neues Messsystem zur Quantifizierung von Spannungen im Wasser und dem gesättigten Boden. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* 70, 99–111. <https://doi.org/10.2478/boku-2019-0009>.
- Riggert, R., Fleige, H., Stoppe-Struck, N., Horn, R., 2019b. Spannungsmessungen im wassergesättigten Boden – Ein neues Messsystem. *Berichte der DBG*.
- Rinaldi, M., Casagli, N., Dapporto, S., Gargini, A., 2004. Monitoring and modelling of pore water pressure changes and riverbank stability during flow events. *Earth Surface Processes and Landforms* 29, 237–254. <https://doi.org/10.1002/esp.1042>.
- Scarpa, G.M., Zaggia, L., Manfè, G., Lorenzetti, G., Parnell, K., Soomere, T., Rapaglia, J., Molinaroli, E., 2019. The effects of ship wakes in the Venice Lagoon and implications for the sustainability of shipping in coastal waters. *Sci Rep* 9, 19014. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55238-z>.
- Schoutens, K., Heuner, M., Fuchs, E., Minden, V., Schulte-Ostermann, T., Belliard, J.-P., Bouma, T.J., Temmerman, S., 2020. Nature-based shoreline protection by tidal marsh plants depends on trade-offs between avoidance and attenuation of hydrodynamic forces. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 236, 106645. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106645>.
- Schoutens, K., Heuner, M., Minden, V., Schulte Ostermann, T., Silinski, A., Belliard, J.-P., Temmerman, S., 2019. How effective are tidal marshes as nature-based shoreline protection throughout seasons? *Limnology and Oceanography* 64, 1750–1762. <https://doi.org/10.1002/lno.11149>
- Schröder, U., Fuchs, E., Heuner, M., Schmidt-Wygasch, C., Terweij, A., 2018. 1. Zwischenbericht “Makrophytenmonitoring”: Einfluss des schifferzeugten Wellenschlages auf emerse Makrophyten der Tideelbe am Beispiel dreier exponierter Standorte - Ist-Zustand 2015; Untersuchungen im Rahmen des Planfeststellungsbeschlusses zur Fahrrinnenanpassung. <https://doi.org/10.5675/BFG-1945>.
- Taukoor, V., Rutherford, C.J., Olson, S.M., 2019. Cyclic Behavior of a Reconstituted Gulf of Mexico Clay, in: *Geo-Congress 2019. Presented at the Eighth International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 313–321. <https://doi.org/10.1061/9780784482100.032>.
- Trükmann, K., Horn, R., Reintam, E., 2009. Impact of roots on soil stabilisation in grassland. *ISTRO18th Triennial Conference Proceedings, June 15-19, 2009 in Izmir, Türkei*.
- Ulm, M., Niehüser, S., Kondziella, B., Arns, A., Jensen, J., Uliczka, K., 2020. Field Measurements in the Kiel Canal, Germany: Ship Waves, Drawdown, and Sediment Transport. *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.* 146, 04020020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WW.1943-5460.0000577](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WW.1943-5460.0000577).
- Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg (WSA), 2003. *Wellenmessungen an der Unterelbe - Schiffswellenmessungen (Gutachten)*. Hamburg.
- Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg (WSV), 2016. *Wellen- und Strömungsmessungen im Rahmen von Makrophytenuntersuchungen. Zusammenfassung der Ergebnisse (Gutachten) (No. Bericht Nr. 0219-05 Rev. 01)*.

- Zink, A., Fleige, H., Horn, R., 2010. Load Risks of Subsoil Compaction and Depths of Stress Propagation in Arable Luvisols. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 74, 1733–1742. <https://doi.org/10.2136/sssaj2009.0336>.
- Yu, G.-A., Li, Z., Yang, H., Lu, J., Huang, H.Q., Yi, Y., 2020. Effects of riparian plant roots on the unconsolidated bank stability of meandering channels in the Tarim River, China. *Geomorphology* 351, 106958. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.106958>

# Anhang

## Abbildungen

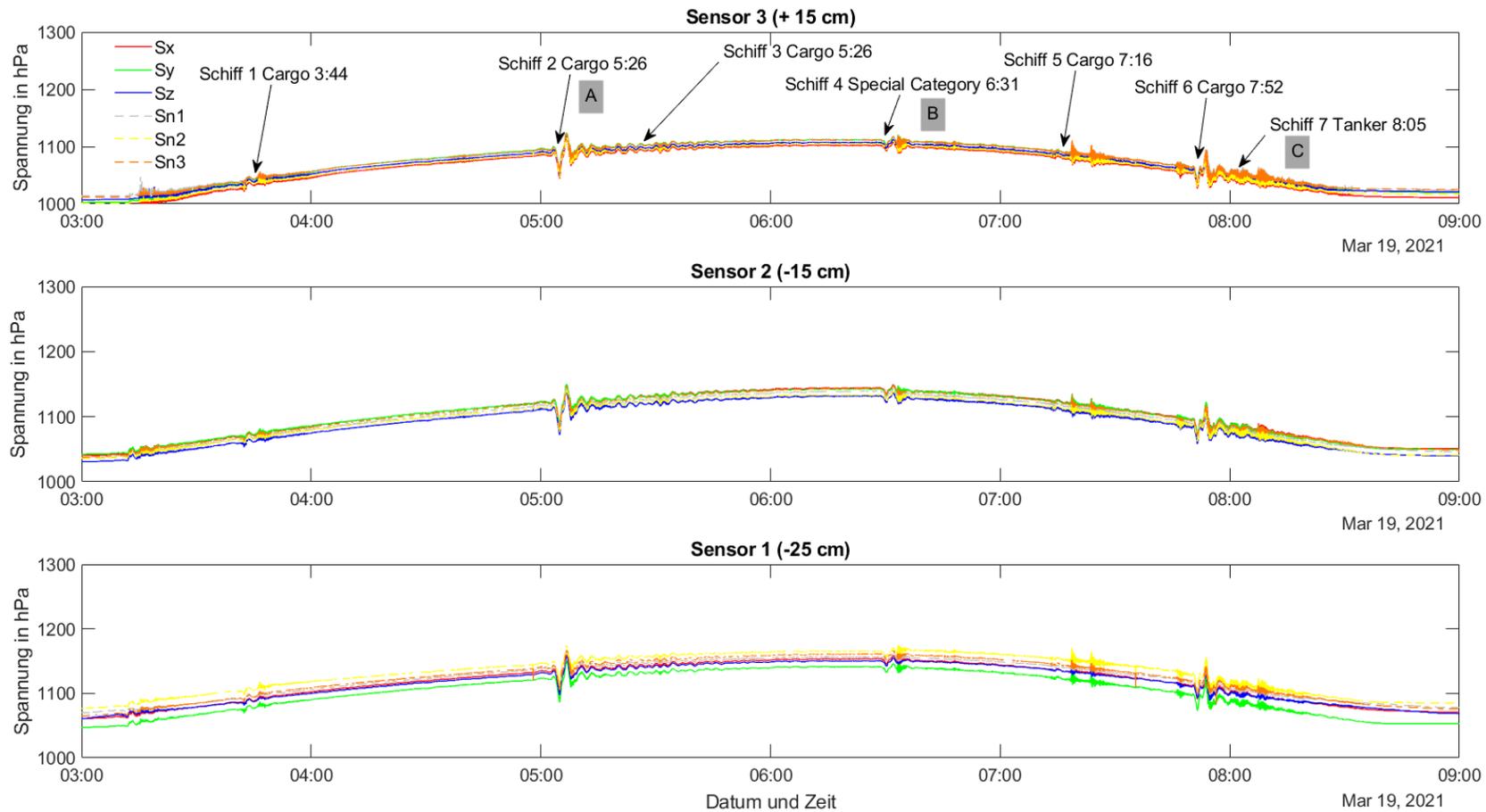
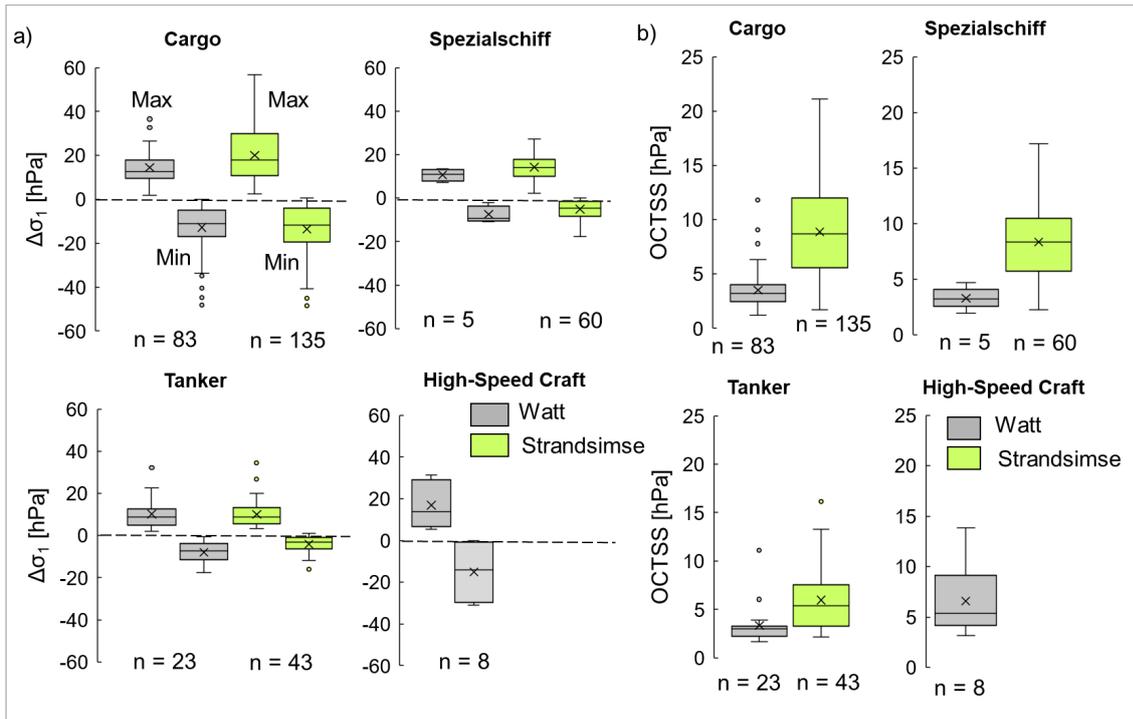
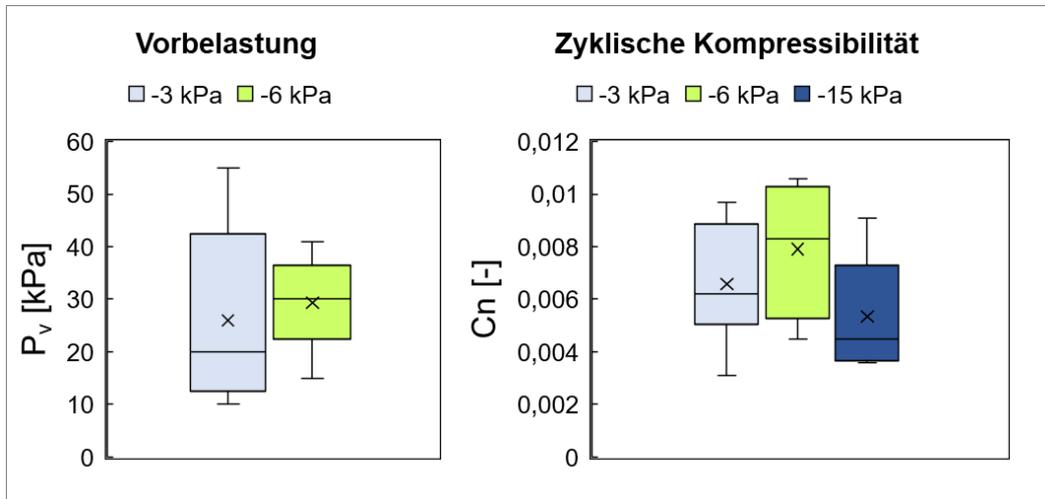


Abbildung Anhang 1: Zeitlicher Spannungsverlauf der 6 Drucksensoren pro Tiefe an den in unterschiedlicher Tiefe positionierten Sensorköpfen S1–S3 sowie den auftretenden Spannungsspitzen durch welleninduzierende Schiffspassagen während einer Tidehochwasserphase am 19.3.2021 an der Tideelbe in Hollerwetter.



**Abbildung Anhang 2: Einfluss des Schiffstyps auf die welleninduzierten Zunahmen (Druckspannungen) und Abnahmen (Zugspannungen) der 1. Hauptspannung ( $\Delta\sigma_1$ ) (a) und der oktaedrischen Scherspannung ( $\Delta\text{OCTSS}$ ) in 25 cm Bodentiefe (Fr-Horizont) (b). n = Anzahl der Schiffe pro Schiffstyp, Schiffseigenschaften siehe Tabelle 5.**



**Abbildung Anhang 3: Vorbelastung ( $P_v$ ) und zyklische Kompressibilität ( $C_n$ ) des Fro-Horizontes in der Pionierzone bei unterschiedlichem Vorentwässerungsgrad (Matrixpotenzial)**

## Tabellen

**Tabelle Anhang 1: Schiffstypen (AIS-Klasse) und deren Charakteristika (Mittlere Länge (L), Breite (B), aktueller Tiefgang (T), Geschwindigkeit über Grund (GüG) und mittlerer Passierabstand (PA) in Abhängigkeit vom erzeugten Wellenmuster (Kat. A–D, vgl. Abbildung 9).**

<b>Kat</b>	<b>AIS-Klasse</b>	<b>n</b>	<b>L</b> [m]	<b>B</b> [m]	<b>T</b> [m]	<b>GüG</b> [km h <sup>-1</sup> ]	<b>PA</b> [m]
A	Cargo	63	341	49	12	25	838
	Other	1	119	23	8	25	1057
	Passenger	1	300	48	8	31	840
	Reserved	1	48	9	2	15	602
	Special Category	1	28	9	5	14	721
	Tanker	4	129	19	4	24	875
B	Cargo	70	251	36	10	25	834
	High-Speed Craft	1	57	14	2	61	783
	Passenger	3	269	41	8	27	738
	Reserved	2	313	43	12	29	955
	Special Category	21	129	24	9	22	808
	Tanker	6	186	28	8	22	754
C	Cargo	79	151	23	7	24	886
	Other	6	119	23	7	19	827
	Passenger	3	206	26	7	26	848
	Reserved	2	224	34	6	19	785
	Special Category	27	95	19	7	25	931
	Tanker	49	110	17	6	23	869
D	Wing In Ground	1	100	11	1	15	809
	Cargo	7	153	21	7	31	899
	High-Speed Craft	7	57	14	2	60	1136
	Special Category	16	107	21	8	26	902
	Tanker	6	128	19	6	22	872

**Tabelle Anhang 2: Einfluss des schiffsbedingten Wellenmusters (Kat. A–D, vgl. Abbildung 9) auf die Druck- und Zugspannungen ( $\Delta\sigma_1$ ) und Scherspannungen (OCTSS) durch schiffsbedingte Wellenbelastungen in 15 cm Bodentiefe im Uferboden des vegetationslosen Watts ( $n = 128$ ) und in der Pionierzone mit Strandsimse ( $n = 249$ ). MW = arithmetischer Mittelwert, STA = arithmetische Standardabweichung, MIN/MAX = geringster/größter Spannungseintrag eines Wellenereignisses.**

Uferzone	Kat	n	Zugspannungen ( $\Delta\sigma_1$ ) [hPa]			Druckspannungen ( $\Delta\sigma_1$ ) [hPa]			Scherspannungen ( $\Delta$ OCTSS) [hPa]		
			MIN	MW	STA	MAX	MW	STA	MAX	MW	STA
Watt	A	16	-50,1	-24,3	17,1	38,55	19,85	9,3	10,5	3,7	2,6
	B	38	-35,3	-17,2	7,1	32,32	15,60	7,0	12,6	4,1	2,5
	C	64	-18,5	-7,1	4,6	20,47	8,86	4,4	7,2	2,4	1,2
	D	10	-13,1	-9,2	3,2	31,88	20,49	8,1	12,2	5,5	4,0
Stand-simse	A	55	-58,2	-28,3	11,3	62,63	30,61	11,2	14,3	6,9	2,3
	B	65	-56,1	-12,9	9,2	49,44	18,91	8,9	13,8	5,9	2,0
	C	103	-17,8	-4,6	3,8	30,16	11,18	4,7	11,1	5,0	1,9
	D	26	-13,2	-8,1	3,7	24,74	17,96	3,8	10,6	6,8	1,9

**Tabelle Anhang 3: Trockenrohdichte ( $\rho_t$ ) Porengrößenverteilung der Fro-Horizonte aus dem vegetationslosen Watt und aus der Pionierzone. Porengrößenklassen entsprechen: wGP = weite Grobporen ( $> 50 \mu\text{m}$ ), eGP = enge Grobporen ( $10 - 50 \mu\text{m}$ ), MP= Mittelporen ( $0,2 - 10 \mu\text{m}$ ) FP = Feinporen ( $< 0,2 \mu\text{m}$ ).**

Uferzone	$\rho_t$ [g cm <sup>-3</sup> ]	GPV	wGP	eGP [Vol-%]	MP	FP
Watt	0,83	67,0	13,5	3,9	39,3	10,3
Strandsimse	1,61	38,5	2,7	22,5	6,1	7,2