

**Betrachtungen aus geotechnischer Sicht zu den Ergebnissen der
Unterwasserdokumentation (ROV) vom 29. August 2000**

Jan Laue

Dr.-Ing

Zürich / Rösraih, Januar, 2001

Inhaltsverzeichnis

0. Grundlagen
1. Fragestellung
2. Zustand des Meeresbodens im Bereich der Estonia unter besonderer Berücksichtigung der dokumentierten Schüttungen im Sommer 1996
3. Grundsätzliches zum Materialverhalten von unter Wasser geschüttetem Sand
4. Betrachtungen zur aktuellen Lage der Estonia
5. Unregelmäßigkeiten des Meeresbodens an der Bordwand in Höhe der Scheuerleiste Steuerbord Abschnitt 5
6. Zusammenfassung

0. Grundlagen

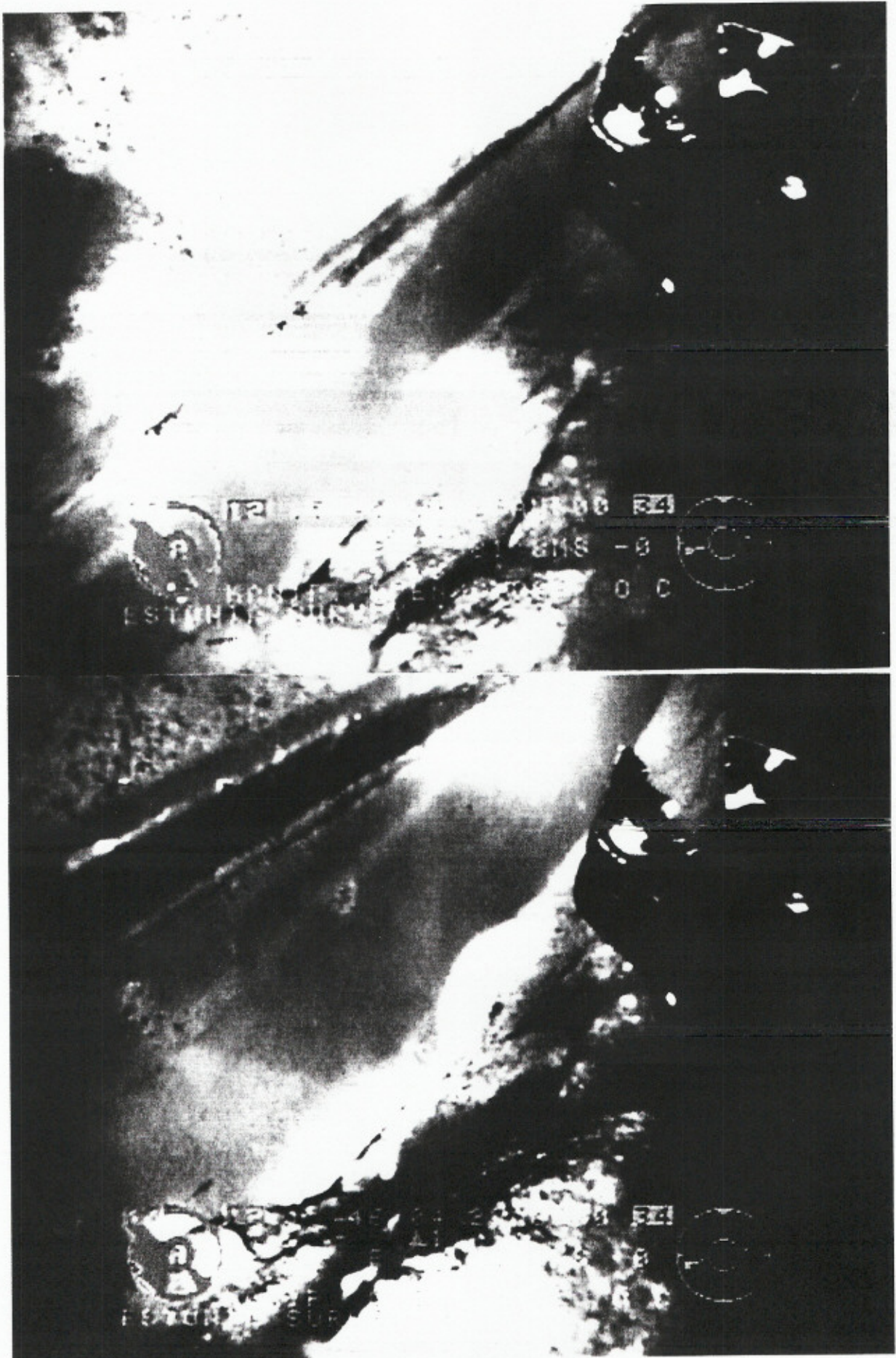
Dieser Bericht beruht auf den Betrachtungen nachfolgend aufgeführter Unterlagen

- a) Report der deutschen Expertenkommission über den Untergang der ESTONIA sowie der dazugehörigen Anlagen (CD, 1998, im folgenden deutsche Expertenkommission).
- b) Bericht der geotechnischen Kommission und Gruppe (NGI, Geodelft, Nordic Marine Contractors) zum Setzungsverhalten der künstlichen Schüttung und zum Verformungsverhalten der Schüttung auf dem Meeresboden (September 1996, im folgenden geotechnische Kommission, bzw. Dokumentation der Schüttung).
- c) Photo und Videoaufnahmen eines ROV vom 29. August 2000 sowie vergleichende Aufnahmen von 1994.
- d) Schüttvorgaben und parallele Messungen der Meeresoberfläche (Frachter Livonia – Covering of the Estonia) Summer 1996.
- e) Vaid, Vortrag im November 2000 an der ETH Zürich zum Einfluß der "Sample Preparation on the liquefaction capability of river sand".
- f) Durchgeführte Einbauversuche in einer geotechnischen Trommelzentrifuge im Rahmen von Diplomarbeiten (E. Grämiger, 2001: *Einbauverfahren und Bodenerkundung im Sand in der geotechnischen Zentrifuge Zürich*. Diplomarbeit, Institut für Geotechnik, ETH-Zürich und A. Ducksch, 2001: *Setzung von Flachfundamenten in Sand auf der Basis von Versuchen in der Trommelzentrifuge Zürich*. Diplomarbeit, Institut für Geotechnik, ETH-Zürich).
- g) Untersuchung zum Reibungswinkel von Normsand, interne Dokumentation, Ruhr – Universität Bochum.

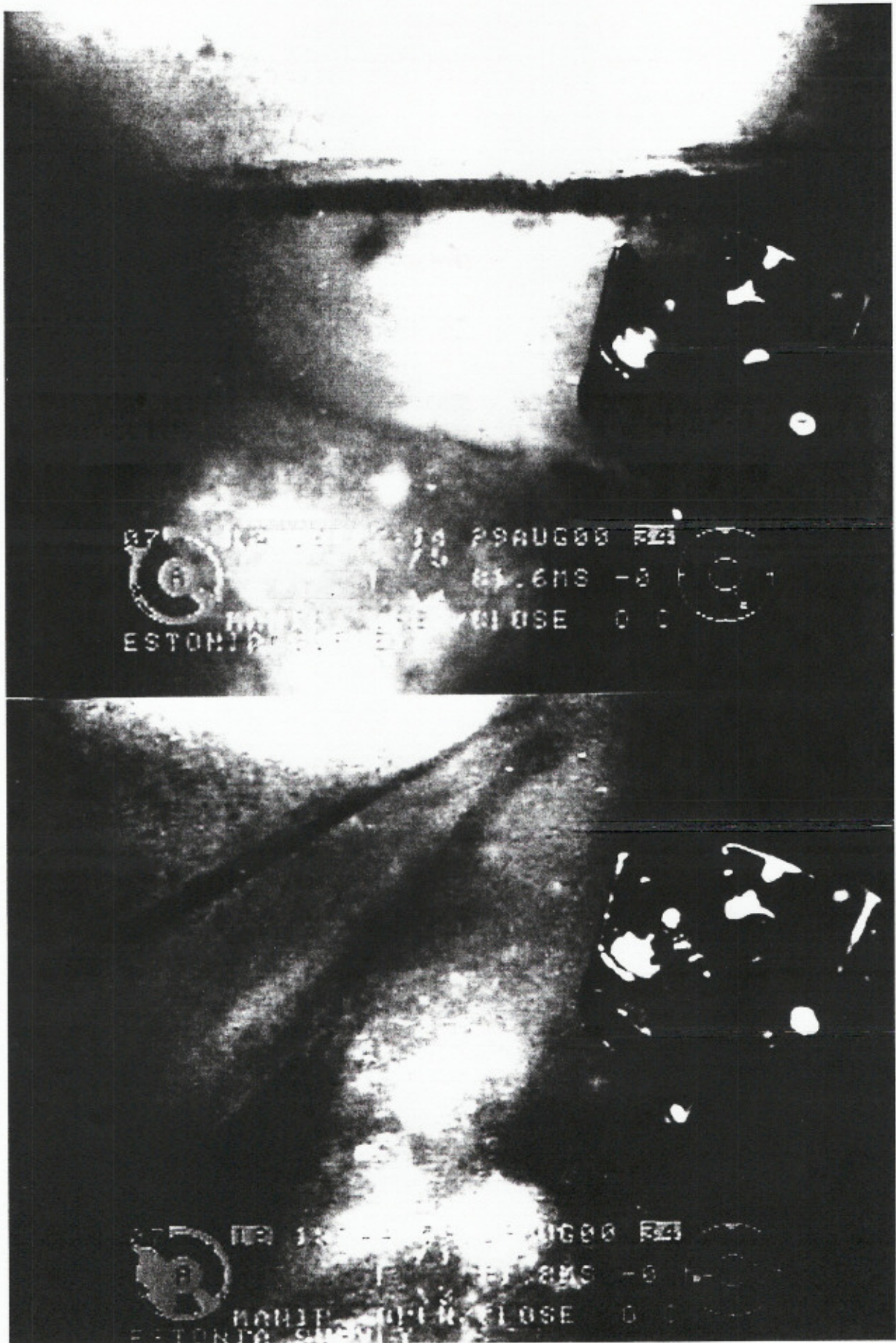
1. Fragestellung

Auslöser für die Betrachtungen die in diesem Bericht durchgeführt werden ist eine, in den Videoaufnahmen des ROV vom 29.8.2000, festzustellende Bruchmuschel in Höhe der Scheuerleiste Steuerbord Abschnitt 5 der zwischen 110° und ca. 140° um die Längsachse gedreht liegenden Estonia. Diese Bruchmuschel, eine Vertiefung im Sandboden an der Schiffswandung (Vergleich Bild 1), ist räumlich begrenzt. Sie stellt im Vergleich zu den umgebenden Bodenbereichen außerhalb des Schiffes wie auch im weiteren Umfeld vor- und nach der Fuge Sand - Schiffsrumpf eine starke Unregelmäßigkeit dar. Im Rahmen dieses Berichtes soll die mögliche Entstehung dieser "Bruchmuschel" erklärt werden.

Zur Erklärung ist es daher notwendig eine kurze Zusammenfassung des aktuellen Zustandes des Meeresbodens aus geotechnischer Sicht vorzunehmen. Hierzu gehört insbesondere auch eine, soweit aus den vorhandenen Unterlagen mögliche, Bestandsaufnahme der künstlichen Eingriffe die zu Änderungen der Meeresoberfläche im Bereich der Estonia geführt haben. Dazu stehen die Berichte über die Schüttung im Sommer 1996 sowie anschließend durchgeführte Untersuchungen zur Verfügung. Weitere Erkenntnisse ergeben sich aus dem Vergleich einiger Bilder aus den Jahren 1994 mit neuem Bildmaterial vom August 2000. Zur Erklärung und Eingrenzung der Ursachen zur Entstehung der Bruchmuschel ist es weiter notwendig kurz die Unterschiede im Materialverhaltens von unter Wasser geschüttetem Sand im Vergleich zu on Shore geschütteten oder im Labor hergestellten Sandproben zu erläutern.



Bilder 1a: Aufnahmen der zentralen Bruchmuschel (ROV, 29.8.2000)



Bilder 1b: Aufnahmen der Ränder der Bruchmuschel (ROV 29.8.2000)

2. Betrachtung des Zustandes des Meeresbodens im Bereich der Estonia

In den Untersuchungsberichten aus den Jahren 1996 wie auch aus den Angaben im Gutachten Estonia (Aussagen der ersten Taucher von 1994) wird der Meeresboden, auf dem die Estonia zu liegen gekommen, ist als mud- (abgelagerte Schwebstoffe und ggf. Sande) bzw. boulder clay (Geschiebemergel, ein Ton Sand Gemisch welches in der Regel eiszeitlich vorbelastet ist) beschrieben.

Aus den Aufnahmen des Meeresbodens von 1994 sind weiter einige Steine und Felsen ersichtlich. Die Meeresoberfläche ist dabei wellenförmig und mit einzelnen Tälern durchsetzt. Die Unterschiede liegen zwischen ca. 60 und 90 Meter unter der Wasseroberfläche im weiteren Umfeld der Estonia. In den Tallagen werden im geotechnischen Bericht von 1996 sehr weiche Tone erwähnt, die hier vorher nicht angetroffen oder bemerkt worden sind. Diese sind im Rahmen der geotechnischen Untersuchungen von Delft Geotechnics (1996) analysiert worden und dürften den Schichten gleichen in welche die Estonia bereichsweise eingedrungen ist.

Der „muddy clay“ (Schlamm) ist nicht tragfähig. Es werden sich bei Belastung große Setzungen einstellen bzw. der Schlamm wird einfach verdrängt. Der darunter befindliche Geschiebemergel kann in Abhängigkeit der geologischen Vorbelastung in unterschiedlichen Steifigkeiten vorkommen. In der Regel ist er als tragfähiger Boden anzusehen. Da von einer stabilen Lage der Estonia zwischen 1994 und 1996 berichtet wird ist davon auszugehen, dass der Geschiebemergel tragfähig ist. Dabei wird in den Untersuchungsberichten die durch die Marine Contractors initiiert wurden „auf die anscheinende Lage der Estonia auf einem sehr stabilen Bereich des Meeresbodens“ explizit hingewiesen.

Aus den Plänen die zur Überprüfung der Schüttungen erstellt wurden ergibt sich für die Höhenkoordinaten in Längsrichtung der Estonia eine Höhendifferenz von ca. 10 Metern im originalen Meeresuntergrund.

Im Gegensatz zu der anscheinend stabilen Lage der Estonia werden aufgrund der Messungen nach der ersten künstlichen Schüttung insbesondere in den Tallagen im weiteren Umfeld der Estonia auftretende Setzungen der künstlichen Schüttung und der eingebauten Geotextilien beschrieben und durch Messungen verifiziert.

Der Grund der Schüttung und der mit den Arbeiten im Juni – Juli 1996 angestrebte Bodenaufbau soll nachfolgend kurz beschrieben werden:

Im Jahre 1996 wurden künstliche Aufschüttungen eingebracht. Diese Sandaufschüttungen, die im Juni und Juli 1996 erfolgten, sollten Geotextilien stabilisieren, die Last aus einer möglichen Einkofferung mit Beton oder einem anderen Material des Schiffes über Spreizspannungen in den Untergrund auf eine grosse Fläche verteilen sollen. Weiter erlaubt der Einsatz von Geotextilien eine stabilere Oberfläche unter gleichmässigeren Bedingungen. Diese Geotextilien wurden mit sogenannten Ankern (Felsblöcken oder anderen schweren Körpern, penetration strings), die an den äusseren Rändern der Geotextillagen eingebracht wurden am Meeresboden fixiert. Die anschliessende Phase der Aufschüttung ist gut dokumentiert, wobei sich parallel zur Aufschüttung aus der Messung der Meeresoberfläche (Survey's) starke lokale Setzungen und Freilagen der Textilien festgestellt worden sind. Ebenfalls konnte die Fuge zwischen einzelnen Matten der Geotextilien nicht geschlossen werden. Aufgrund der dokumentierten Lage der Geotextilien ist der weite Bereich ersichtlich, in dem der Meeresboden abgedeckt werden sollte. Dies erklärt weshalb trotz der grossen Menge von 380606 m³ eingeschwemmtem (abgekipptem) Sand nur eine geringe zusätzliche Überdeckung des Meeresbodens respektive des Geotextiles erreicht wird (Zwischen 10 und maximal 30 cm im Vergleich der Bohrungen). Weiter ist festzustellen das der direkte Umgebungsbereich der Estonia nicht von Geotextilien bedeckt ist, und somit in der ersten Phase dieser Schüttungen nicht oder nur gering planmässig mit Sand überdeckt werden sollte.

Die zur Überprüfung der erreichten Schüttung durchgeführten Bohrungen reichen nur sehr gering in den Boden hinein. Es werden nur jeweils einige Dezimeter (Zwischen 10 und maximal in Einzelfällen 50 cm im Vergleich der Bohrungen) gebohrt, wobei diese Untersuchungen dazu dienen die Dicke der erreichten Sandschicht und deren

Durchmischung mit dem weichen Schlamm zu überprüfen. Neben der Erkenntnis, dass die Schichtdicke der künstlichen Aufschüttung nur sehr gering ist, liefern sie Aussagen über die Kornform des eingelagerten Sandes, die als eckig angesehen werden kann. Weiter stehen an dem Sand die Ergebnisse von Triaxialversuchen zur Verfügung auf deren Aussagekraft im folgenden Kapitel eingegangen wird.

Wie die Aufschüttung nach dem Jahr 1996 fortgesetzt wurde und wo weitere Sandlagen eingebracht wurden kann auf Basis der vorliegenden Unterlagen nicht beschrieben werden. Aus der Betrachtung der Photos und dem Vergleich insbesondere an einem Stein (Felsen) aus den Jahren 1994 und 2000 (Bilder 2, 1994 und 3, 2000) sowie der ROV Aufzeichnungen vom 29.8.2000 ist jedoch davon auszugehen, dass weitere Schüttungen unternommen wurden. Die Sandschüttung reicht nunmehr bis an die Estonia heran. Die aktuelle Sandschicht auf dem Meeresboden erscheint aus den vorhandenen Unterlagen eine größere Mächtigkeit als nur Dezimeter aufzuweisen und sie sollte locker gelagert sein (Siehe hierzu Kapitel 3).

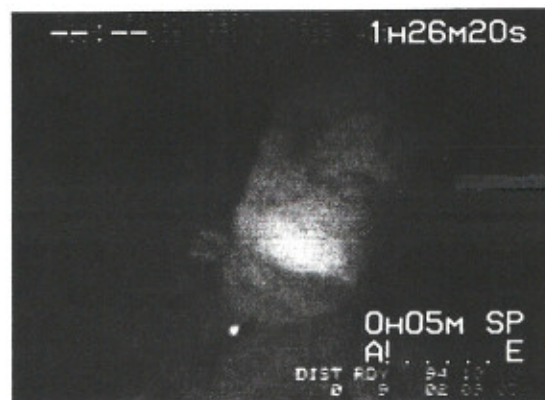


Bild 2: Aufnahme eines Felsens 1994 (ROV 10.10.1994)

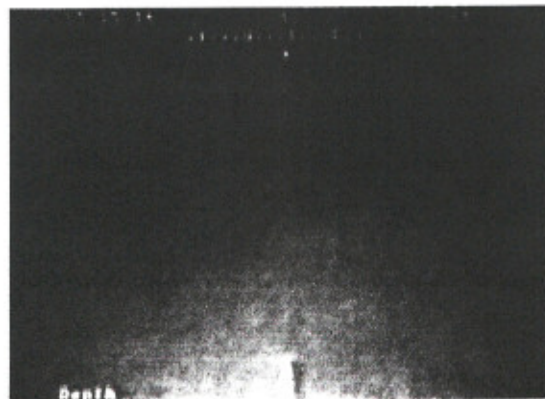


Bild 3: Aufnahme des vermutlich gleichen Felsens 2000 (ROV 24.8.2000)

3. Grundsätzliches zum Materialverhalten von unter Wasser geschüttetem Sand

Um die beobachtete und dokumentierte Bruchmuschel zu beschreiben soll kurz das Materialverhalten von unter Wasser aufgeschütteten Sandes beschrieben werden. Dieses Materialverhalten bietet eine der Grundlage der abschließenden Begründung zur Entstehungsgeschichte der Bruchmuschel.

Beim Einbringen von Sand durch Abkippen oder auch durch Aufspülen sedimentiert der Sand auf der Meeresoberfläche ab. Er konsolidiert dabei nur unter seinem durch den Auftrieb reduzierten Eigengewicht und erhält damit Lagerungsdichten, die sich im lockersten Bereich des möglichen befinden. Diese Lagerungsdichte wie auch die Art der Ablagerung bestimmen damit das Materialverhalten der Sandlage. Fahrzeugspuren eines Unterwasserfahrzeuges weisen auf eine sehr lockere Lagerungsdichte der Aufschüttung hin (Bild 4).

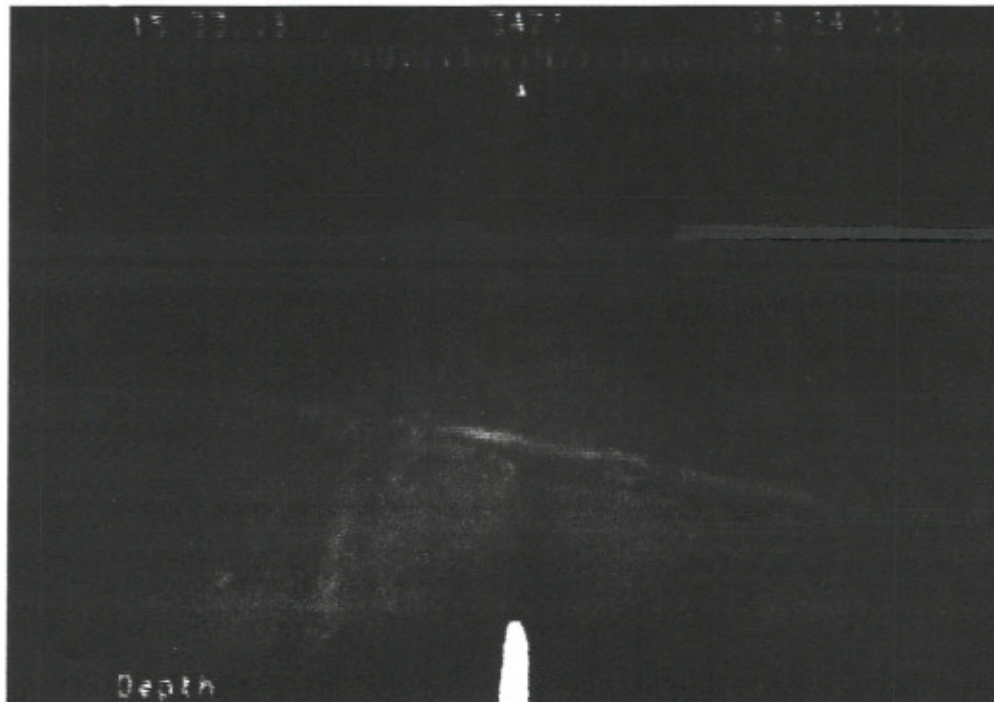


Bild 4: Spuren eines Unterwasserfahrzeuges (ROV 24.8.2000)

Die Methode des Einbaus unter Wasser wird in vielen Labors verwendet um das Materialverhalten von Sand unter lockeren Bedingungen zu untersuchen, wobei es schwierig ist die Lagerungsdichten im Labor abzubilden die sich unter in situ Randbedingungen einstellen. Die im Labor bestimmten Reibungswinkel von max. 35° lassen sich daher nur bedingt auf die reale Situation übertragen. Es ist von einem geringeren Reibungswinkel vor Ort auszugehen. Bei der Sedimentation des Sandes stellt sich ein kleiner Schüttwinkel einer Böschung als kritischer Reibungswinkel ein.

Interessanterweise zeigt ein unter Wasser eingebrachtes Material eine andere Steifigkeits- und Festigkeitscharakteristik als ein mit anderen Techniken eingebautes Material (Trockeneinbau – Proktoreinbau). Untersuchungen von Vaid (2000) zeigen am Beispiel eines Flusssandes, dass ein unter Wasser eingebrachter Sand trotz der lockeren Lagerungsdichte ein dilatantes Verhalten bzw. eine größere Anfangsfestigkeit bei kleinen Lasten aufweist als vergleichbare Proben die unter anderen Randbedingungen eingebaut werden. Die Herstellung der Probe für die von den Nordic Marine Contractor in Auftrag gegebene Untersuchungen werden leider in den Protokollen der Versuche nicht beschrieben. Ebenso fehlen die Referenzdichten zur Bestimmung der relativen Lagerungsdichte. Im Bild 5 wird der Einfluss der relativen Lagerungsdichte auf den Reibungswinkel an einem mit dem eingeschwemmten Sand qualitativ vergleichbarem Feinsand dargestellt.

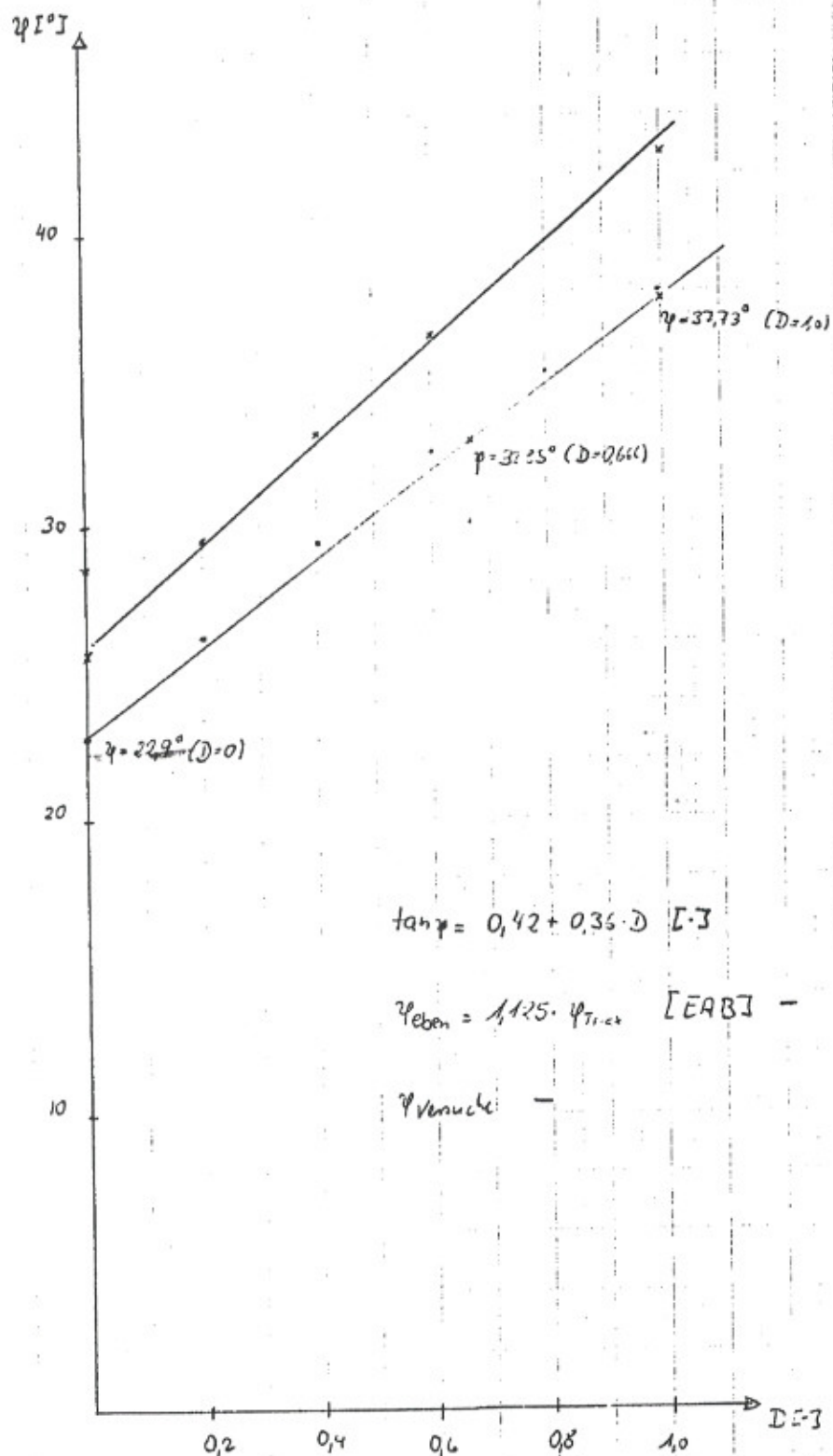


Bild 5: Abhängigkeit des Winkels der inneren Reibung von der Lagerungsdichte aus Versuchen an Normsand und empirischen Formeln (Schürmann, 1995)

4. Betrachtungen zur aktuellen Lage der Estonia

Die Estonia ist in SSW - NO Richtung mit einer Neigung von 110° Grad auf dem Meeresboden zu liegen gekommen. Diese Lage ergibt sich aus einer Zeichnung von Smit Engineering (Bild 6) aus dem Jahre 1994. Im Rahmen der Untersuchungen der nachträglich durchgeführten ersten Schüttung wurde keine Änderung der Lage wie auch kein weiteres Einsinken der Estonia bis zum August 1996 festgestellt. Dies bedeutet, dass die Lagerung der Estonia zwischen 1994 und 1996 stabil gewesen ist.

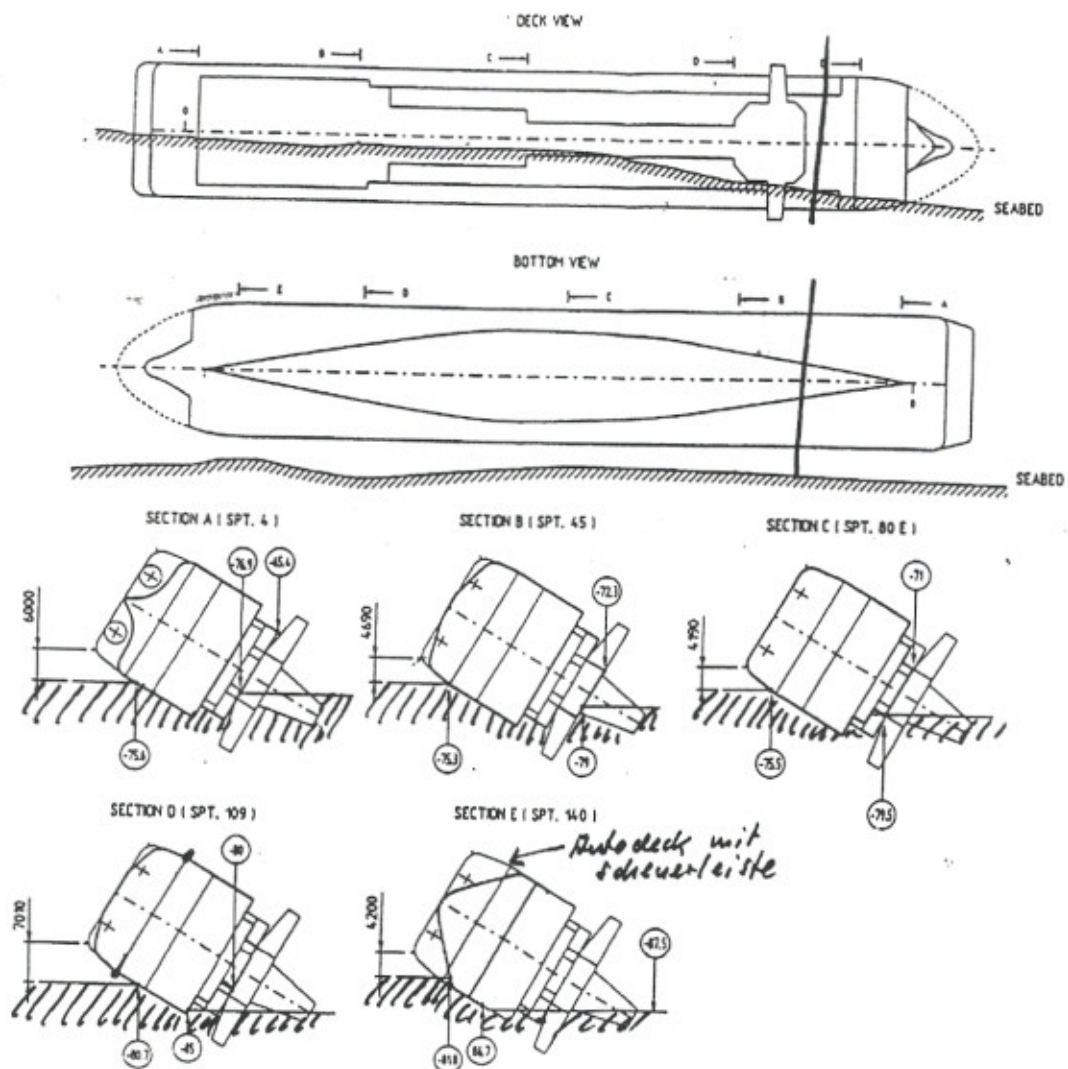


Bild 6: Skizze der Lage der Estonia (Smit Engineering, 1994)

Wie bereits festgestellt, reicht die künstliche Aufschüttung bis an den Schiffsrand der Estonia an der Steuerbordseite. Bis auf eine Bruchmuschel am 5. Kompartiment ist diese Schicht auf einer homogenen Höhe zu finden. Die Unregelmäßigkeit an der

Bordwand wird im nächsten Abschnitt behandelt. Aus den Ergebnissen der ROV Mission vom 29.8. 2000 ließe sich folgern, dass aufgrund der aktuellen Lage der Estonia relativ zur Sandaufschüttung eine Veränderung der Krängung der Estonia von 110° auf 140° eingestellt hat. Es ist jedoch auch möglich, dass sich dieses aus einer optischen „Täuschung“ ergibt und lediglich die Sandauffüllung gegen den Schiffsrumpf der Estonia gespült wurde und daher geneigt ist. Diese Möglichkeit wird in den weiteren Betrachtungen nicht weiterverfolgt, verändert jedoch den möglichen horizontalen Druck aus der Aufschüttung.

Da die Lagetreueheit der Estonia wie bereits im Abschnitt 2 beschrieben zwischen 1994 und 1996 gegeben war und der Untergrund unter der aktuellen Lage der Estonia tragfähig ist können zunehmende Verformungen der Estonia ohne große äußere Kräfte nicht möglich sein. Eine einwirkende Sandaufschüttung von einigen Metern ungleich auf dem Schiff verteilt dürfte hierzu nicht ausreichen. Für die genaue Interpretation der Bruchmuschel wäre eine Messung der aktuellen Lage der Estonia von Vorteil.

5. Unregelmäßigkeiten des Meeresbodens an der Bordwand in Höhe der Scheuerleiste Steuerbord (Bruchmuschel)

Aufgrund einer Abkipfung von Sanden entsteht eine locker gelagerte Schicht, die sich an den Rändern unter einem Böschungswinkel einstellt. Diese Schicht ist locker gelagert und weist eine geringe Festigkeit auf. An der Fuge zwischen Schiffsrumpf und Sand stellt sich in weiten Bereichen eine durchgehende gleichmäßige Schicht des Sandes ein. Diese ist unterbrochen von der im Bild 1 bereits gezeigten Unregelmäßigkeit (Bruchmuschel). Dabei ist die Sandablagerung entweder durch weiteres Abkippen von Material entstanden (von der Meeresoberfläche) oder aber durch Aufspülen bereits früher abgekipptem Material. Insbesondere bei einer anzusetzenden Lagetreueheit (d.h. weiteres Verbleiben der Estonia auf 110°) ist von einer Auf – Anspülung auszugehen, da reines vertikales Absetzen nur schwer einen gleichmäßigen Verbund Sand – Schiff erreichen könnte. Im folgenden sollen nun

verschiedene Ursachen, die zur Entstehung dieser Unregelmäßigkeit im Meeresboden geführt haben diskutiert werden.

Die Aufnahmen des ROV's weisen auf ein Versagen in der Aufschüttung nach dem Einbau der Sandaufschüttung nahe des Schiffsrumpfes hin. Dies ergibt sich insbesondere aus den Abrisskanten am Übergang der bestehenden „gleichmäßigen“ Sandschicht und der Bruchmuschel (Bilder 1a). Ebenso ist der Winkel der Bruchmuschel im oberen Bereich größer als in den tieferen Lagen soweit dies von der vorgegebenen Perspektive aus ersichtlich ist. Dies weist auf die bereits im Kapitel 3 erwähnte höhere Festigkeit unter kleinen wirksamen Spannungen hin. Die Form und auch die Ausdehnung der Bruchmuschel deutet dabei auf ein Nachrutschen der Sandaufschüttung. Dieses Nachrutschen kann mehrere Ursachen haben wobei alle mit einem Materialentzug zusammenhängen. Von entscheidender Bedeutung bei der Interpretation ist dabei die Lage des Schiffes.

Ursachen für den Materialentzug können dabei Hohlräume im Boden, weiche Böden unter der Schüttung oder auch Hohlräume an der Seite der Aufspülung oder Aufschüttung sein. Weitere Möglichkeiten wie äußere Einflüsse sind nur als Triggerereignis möglich. Ein händisches Erstellen der Bruchmuschel kann aufgrund der Form der Bruchmuschel ausgeschlossen werden.

Die Form der Bruchmuschel weist wie bereits erwähnt darauf hin, dass die Bruchmuschel nachträglich entstanden ist. Ein Entstehen der Bruchmuschel im Einklang mit der Aufspülung kann aufgrund der Unregelmäßigkeit der Abrutschkante ausgeschlossen werden.

- Hohlräume im Boden unterhalb der Aufschüttung oder unterhalb des Schiffskörpers:

Die räumliche Begrenztheit der Bruchmuschel lässt darauf schließen, dass Hohlräume im Untergrund oder sogar unterhalb des Wracks nicht die Ursache für den Bodenentzug sein können. Eine Setzungsmulde würde sich geometrisch erheblich anders darstellen, wobei insbesondere die Ausdehnung größer wäre als auch keine Abrisskanten (Bilder 1a) sondern ein „sanfter“ Übergang von

benachbarten Bereichen der Oberfläche festzustellen wäre. Insbesondere Hohllagen unterhalb der Estonia sind dabei aufgrund der großen weiteren Tiefe des Schiffskörpers auszuschließen.

- weiche Böden unterhalb der Schüttung

Eine weitere Ursache für Hohlräume könnten Unregelmäßigkeiten im ursprünglichen Bodenaufbau darstellen (Zum Beispiel bereichsweise vorhandene weiche Schichten). Diese Schichten neigen unter Belastung zum seitlichen Ausweichen (Auspressen) oder zu Setzungen. Das seitliche Ausweichen setzt ebenfalls wieder einen vorhandenen Hohlraum voraus. Setzungen würden zu gleichmäßigeren Verformungsfiguren an der Oberfläche führen.

- Hohlräume an der Seite der Aufschüttung / Aufspülung

Ein Hohlraum im Randbereich der Aufschüttung der nicht weit unter der Oberkante der aktuellen Schüttung liegt wäre eine dritte Möglichkeit für einen Bodenentzug. Dieses kann unter den gegebenen Randbedingungen nur eine Öffnung im Schiffsrumpf sein, die ein Abfließen von einer begrenzten Menge Material der Aufschüttung/Aufspülung zulässt. Aufgrund der anzutreffenden Verformungsfigur der Bruchmuschel ist diese relativ nah zur Meeresoberfläche anzusetzen, wobei sich aufgrund der vorhandenen Bilddokumentation die genaue Tiefen in der Bruchmuschel wie auch die Größe einer möglichen Öffnung nicht abschätzen läßt. Da die Form der Bruchmuschel auf ein Versagen nach der Herstellung der zusätzlichen Aufschüttung hinweist sind dann für diesen Bodenentzug die notwendigen Triggerereignisse zu diskutieren. Dabei ist die Lage des Schiffes und die Art der Aufschüttung von Bedeutung.

Die diesen Betrachtungen zugrundegelegte Situation ist im Bild 7 dargestellt. Vereinfachend ist die Meeresoberfläche horizontal eingetragen. Die Schiffsneigung wird mit 140° bzw. 150° variiert dargestellt. Dabei kann sich ein „Böschungsbruch an der Schiffswandung einstellen.

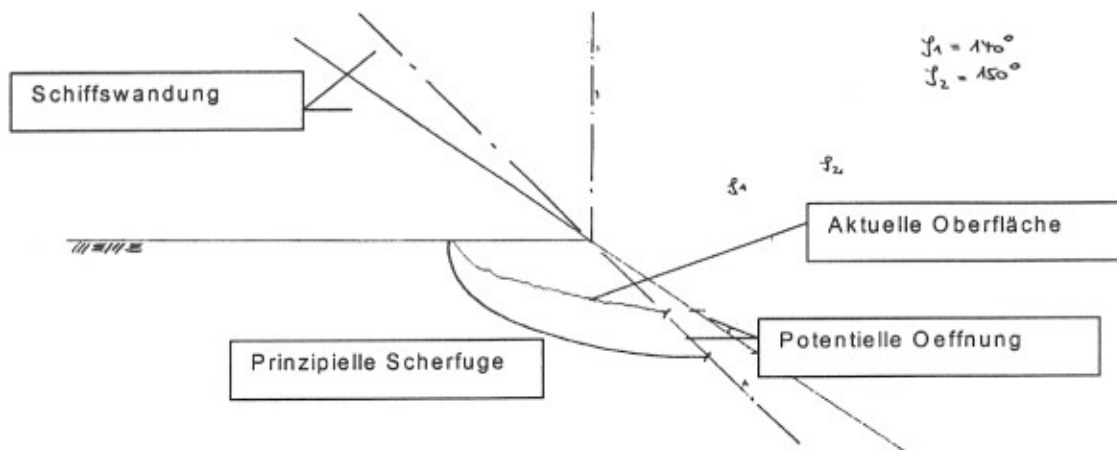


Bild 7: Schematische Darstellung der aktuellen Situation

Die Aufschüttung bewirkt einen seitlichen Druck auf die Schiffswandung. Diese bringt die haltenden Gegenkräfte auf. Bei einer flachen Lage des Schiffskörpers reicht eine kleine Gegenkraft, die der Aufschüttung widersteht. Mit zunehmender Schiffsneigung wird die vom Schiff aufzubringende Gegenkraft größer. Bei kleinen Schiffsneigungen von ca. 110° kann ein Gewölbe um einen begrenzten Hohlraum ausreichen, eine zeitweise ausreichende Stabilität der Aufschüttung zu gewährleisten. Bei größeren Schiffsneigungen muss ein eventuell vorhandener Hohlraum zunächst während der Aufspülung/Aufschüttung verschlossen gewesen sein. Dies kann zum Beispiel durch ein bestehendes Loch, welches zugestellt war, bzw. deren Öffnung nur zu schwach verschlossen wurde geschehen. Eine Möglichkeit wäre, dass in einer bestehenden Schwächung des Rumpfes Teile weggebrochen sind, die den Sand während des Schüttvorganges vorher gestützt haben. Dies ist aufgrund der durch die Sandschüttung aufgebrauchten Horizontalkräfte nur schwer vorstellbar, da es sich um bei der Schiffshaut um eine Stahlhaut handelt. Außerdem erscheint aus der Auswertung des vorhandenen Bildmaterials die Größe der Mulde zu groß als das Stahl oder ein anderes festes Material durch den geringen Sanddruck in Bewegung und damit zum Versagen gebracht werden kann. Die daher wahrscheinlichste Möglichkeit ist die, dass ein bestehendes Loch in der Schiffshaut provisorisch vor

Beginn der Schüttphase geschlossen worden ist. Dies kann zum Beispiel mit Bodenmaterial welches händisch in eine Öffnung gefüllt wird geschehen sein. Das verwenden von Holz oder anderen "herumliegenden" Teilen ist ebenfalls unwahrscheinlich.

Diese Möglichkeit einer Öffnung in der Schiffswand ist daher als logischste Ursache für die Unregelmäßigkeit der Sandlage an der Schiffswand anzusehen. Da damit auch die Randbedingung des Bodenentzuges erfüllt ist. Der Boden kann nach Versagen des Gewölbes bzw. einer provisorisch geschlossenen Öffnung in einen ausreichend großen Hohlraum eintreten und dort eine stabile Böschung ausbilden, die ein weiteres voranschreiten der Bruchmuschel verhindert. Dieser ausreichend große Hohlraum wäre hier mit dem Fahrzeugdeck gegeben.

Als Ursache der Entstehung der Bruchmuschel nach Abschluss oder gegen Ende der Aufspülungen sind Lastumlagerungen und ggf. Kriechverformungen des Sandes anzusehen. Die anzusetzenden Reibungswinkel bei einer zunehmenden Verformung und auch Last verringern sich. Hierbei ist auch auf die Herstellung der Aufschüttung einzugehen. Bei reinem Sand ist von relativ geringen kritischen Reibungswinkeln auszugehen, wobei eine anfänglich höhere Festigkeit festzustellen ist. Unter der Voraussetzung, dass es sich um aufgespültes Material handelt, ist der Reibungswinkel noch geringer als bei sandigen Böden aufgrund der Beimengungen von „muddy clay“. Für die Durchführung von Berechnungen wären daher sowohl Proben der aktuellen Anschüttung wie auch eine Einmessung der Lage der Estonia notwendig.

6. Zusammenfassung

Die oben dargestellten Betrachtungen lässt folgendes Szenario der Entstehung der Bruchmuschel mit größter Wahrscheinlichkeit zu:

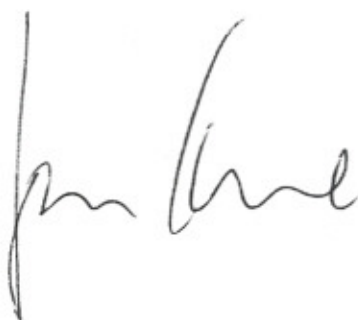
a) Der Einbruch des offenkundig sandigen bzw. schluffig/sandigen Bodens kann nur nach Abschluss der Schüttungen oder kurz vor Beendigung der Schüttung bzw. Aufspülung entstanden sein. Aufgrund der Kante am Rande der Bruchmuschel hin zum bestehenden Boden wie auch an der Abrisskante an der Fuge Boden - Schiffskörper im unteren Bereich der einsichtbaren Bruchmuschel ist von einem Bodenentzug durch oberflächennahe Hohlräume auszugehen. Aufgrund der steileren Abrisskante im Boden ist ein Entstehen nach Abschluss bzw. gegen Ende des Einbaus gegeben. Eine Schüttung im Bereich eines offenen Hohlraumes würde zu merklich kleineren Schüttwinkeln (Sand unter Wasser) führen.

b) wie unter a gesagt muss ein Bodenentzug durch einen Hohlraum entstanden sein. Dieser Hohlraum muss am Anfang der Schüttung verschlossen gewesen sein, bzw. ein Gewölbe hat bei kleinen Kräften bei nur geringer Neigung der Estonia ausgereicht um die erforderlichen Gegenkräfte zu halten. Diese Öffnung kann sich dann unter Last und/oder Lastumlagerung oder durch andere Einwirkungen geöffnet. Von einem Hohlraum im Untergrund ist dabei aus zwei Gründen nicht auszugehen. Durch die Lage der Bruchmuschel direkt am Schiff kann dieser Hohlraum nur sehr nahe am Schiff oder direkt unter dem Schiff liegen. Da bis zur (aktuellen) Unterseite des Schiffes jedoch noch ca. 15 Meter liegen dürfte eine Setzungsmulde hier erheblich größer sein und nicht die sich darstellende scharfkantige Form aufweisen. Hohlräume durch Freilagen an der alten Meeresoberfläche können auch ausgeschlossen werden, da diese bereits vorher aufgefallen sein müssten und bereits durch die Aufschüttung oder Spülung überdeckt worden wären.

c) Da ein Hohlraum im umgebenden Boden nahezu ausgeschlossen werden kann bleibt als einzige Möglichkeit des Bodenentzuges eine Schwächung bzw. eine Öffnung im Rumpf des Schiffes. Aufgrund der anzutreffenden Verformungsfigur ist diese relativ nah zur Meeresoberfläche anzusetzen, wobei sich aufgrund der Bilder die genaue Tiefenlage nicht abschätzen lässt. Die Bilder 1a lassen jedoch aufgrund

der Fuge Boden-Schiff die Vermutung zu, dass diese Öffnung recht Nahe am tiefsten Punkt der Bruchmuschel beginnt. Die Ursache für den Bruch können Lastumlagerungen darstellen, die sich nach weiterer Erhöhung der Schüttung mit der Zeit einstellen und das Gefüge im Boden verändern. Es muss hier nochmals darauf hingewiesen werden, dass eine unter Wasser sedimentierte Schicht sehr weich ist und daher keine große Stabilität aufweist. Als Triggerereignis reichen daher unabhängig von einer einfachen Gewichtszunahme der Schüttung/Aufspülung schon kleinste andere äußere Ereignisse aus um einen Bruch der Schüttung in einen Hohlraum zu verursachen. Dieses können zum Beispiel auch Vibrationen oder ein Fortsetzen der Schüttung an anderer Stelle sein.

Für eine genauere Analyse der Bruchmuschel ist es notwendig das Material der Schüttung oder der Aufspülung zu kennen, um die Parameter für eine notwendige Berechnung zu ermitteln. Die vorhandene Dicke der Schüttung weist jedoch daraufhin, dass nach dem dokumentierten Schüttungen mehr Material im Bereich der Estonia abgekippt worden ist bzw. dorthin transportiert oder gespült wurde. Für die Bestimmung der Stabilität ist eine Vermessung der Lage der Estonia erforderlich. Aussagen für die Ursachen einer möglichen Öffnung im Schiffsrumpf werden hier nicht getroffen. Die Größe der Öffnung dürfte jedoch ausreichend groß sein um den vorhandenen Bodenentzug und die Breite der Bruchmuschel zu rechtfertigen.



Jan Laue, Zürich/Rösrath Januar 2001