

Copyright ©

Es gilt deutsches Urheberrecht.

Die Schrift darf zum eigenen Gebrauch kostenfrei heruntergeladen, konsumiert, gespeichert oder ausgedruckt, aber nicht im Internet bereitgestellt oder an Außenstehende weitergegeben werden ohne die schriftliche Einwilligung des Urheberrechtlichsinhabers. Es ist nicht gestattet, Kopien oder gedruckte Fassungen der freien Onlineversion zu veräußern.

German copyright law applies.

The work or content may be downloaded, consumed, stored or printed for your own use but it may not be distributed via the internet or passed on to external parties without the formal permission of the copyright holders. It is prohibited to take money for copies or printed versions of the free online version.

Chemisch-physikalische Daten der Alttertiär-Tone um Fehmarn und der „innere Küstenzerfall“.

Von ERICH WASMUND.

(Mit 2 Abbildungen)

Meereskundliche Arbeiten der Universität Kiel Nr. 8. (ab 1936)

Meeresgeologische Forschungsstelle Kitzberg Nr. 3*)

Inhalt

	Seite
1. Bautechnische Bedeutung	243
2. Bauschanalysen	245
3. Rationelle Analyse	247
4. Röntgenoptische Untersuchung	248
5. Kolloidchemischer Befund.	249
6. Bodenphysikalische Werte.	250
7. Tiefbau und Küstenschutz	256
8. Der innere Küstenzerfall	260
Literatur	263

1. Bautechnische Bedeutung.

Der Tarras, wie das durch Salzwasserbohrungen allgemeiner bekannte Gestein in Ostholstein genannt wird, kommt in Wagrien und auf der Insel Fehmarn meist von Grundmoräne bedeckt vor. An einigen Stellen streicht er oberflächlich aus, auch an der Küste. Das gleiche gilt vom dänischen Teil seines Verbreitungsgebietes, wo er auf der Nordseite des Fehmarnbelts an der SW-Küste von Laaland auftritt, und im Süden von Langeland, Arö und Fünen den Untergrund bildet. Auch weiter nach Norden zieht er sich auf der ganzen Ostseite des Kleinen Belts bis nach Nordfünen hin. Die Lagerungsverhältnisse sind im einzelnen noch ungeklärt, oft liegt glazigene Verschleppung vor. Es sind sehr fossilarme blaugrüne hochplastische Tone von großer, oft 100 m übersteigender Mächtigkeit.

Petrographisch und stratigraphisch gehört der Tarras etwa in die gleiche Stufe wie der dänische plastiker, der englische Londonclay und der flämische Ypernton. Auf Grund von Überlegungen, die bei WASMUND 1933 dargestellt sind, kommt als Alter für den Tarras das untere Mittelpaläozän in Frage.

MERTZ (1928b) hat die Altersstellung des entsprechenden dänischen Vorkommens (sog. Kleiner Belt-Ton) kürzlich ausführlicher behandelt, als ich es (WASMUND 1933) auf Grund ihrer gleichzeitigen Ausführungen (MERTZ 1928a) konnte. Die Autorin kommt auf Grund anderer Argumente als meiner damaligen ebenfalls zu der Auffassung, die Kl. Belt-Tone z. T. für älter als London-Ton zu halten, und stellt den Beginn ihrer Sedimentation im Gegensatz zur herrschenden Meinung, in Übereinstimmung mit meiner Auffassung, in das Mittelpaläozän. GOTTSCHÉ hielt übrigens schon in einem am 2. 3. 1898 in der Deutschen Geologischen Gesellschaft gehaltenen Vortrag den Tarras wie den Beltton für Paläozän, wie ich nachträglich feststellte.

In meiner letzten Arbeit nahm ich für das dort neu beschriebene Festlandsvorkommen von Tarras bei Großenbrode am Fehmarnsund einen Zusammenhang mit dem bisher von der Insel bekannten

*) Nr. 2 · P. GROSCHOPF, Moor und Torf im Bauwesen. — Der Straßenbau. Nr. 14, 1936.

Alttertiärton an. Da ein paläontologischer Vergleich aus Mangel an Fossilien nicht in Frage kommt, begann ich eine Untersuchung des Meeresbodens zwischen Insel und Festland. Außerdem veranlaßte ich chemische und physikalische Untersuchungen der Tone auf beiden Seiten des Sundes, um Vergleichsmaterial zu bekommen. Da die erstgenannten Untersuchungen in absehbarer Zeit noch nicht abgeschlossen werden können, stelle ich hier zunächst die chemischen und physikalischen Daten zusammen, da sie auch praktischen wasserbaulichen und tiefbautechnischen Wert haben. Die chemischen Analysen wurden durch die Anorganische Abteilung des Chemischen Instituts der Universität Kiel ausgeführt, ich verdanke das dem lebenswürdigen Entgegenkommen von Herrn Prof. Dr. MUMM. die bodenphysikalischen Werte sowie die auf kolloidchemischem und röntgenoptischem Wege erhaltenen Daten wurden durch die Erdbauabteilung der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau in Berlin und durch das Laboratorium für bauwissenschaftliche Technologie der Technischen Hochschule Charlottenburg gewonnen, die für die Tarrastone im Rahmen einer größeren Gemeinschaftsarbeit (SEIFERT u. a. 1935) Interesse zeigten. Ein Teil dieser Zahlen ist dort schon veröffentlicht, Herr Prof. EHRENBURG war so freundlich, die Bearbeitung zu veranlassen und mir die Resultate zu überlassen. Diese ausgezeichnete gründliche Arbeit ist geologisch so wenig brauchbar, weil die untersuchten Substanzen nur konventionell benannt sind, und nichts über Herkunft und Altersstellung erwähnt wird. Für den praktischen Zweck war das im Augenblick zwar nebensächlich; es verhinderte aber jede geologische Auswertung; es sei denn, sie erfolgt nachträglich, wie das hier für die dänischen und holsteinischen Alttertiärtonen geschieht. Aus den ermittelten Werten habe ich weiter eine Anzahl der Konstanten berechnet und angegeben.

Die praktische Bedeutung der um die Wende Paläozän-Eozän im heutigen Gebiet der Beltsee entstandenen marinen Tone ist durch die Schwierigkeiten bekannt geworden, die mit dem Bau der Brücke über den Kleinen Belt in Dänemark verbunden waren. Auch bei uns hätten diese Tone praktische Bedeutung für die angewandte Geologie. Die wirtschaftsgeologische Bedeutung des Tarras, der in seiner Eigenschaft als Bleichton (Walkerde, Fullererde) seit einigen Jahren abgebaut wird, habe ich bereits in der erwähnten Arbeit dargestellt. Versuche, den Tarras zu keramischen Zwecken auszubeuten, schlugen fehl. Eine Grube zwischen Burg auf Fehmarn und Mummerdorf wurde vor Jahren in einer Aufräumung des Tarras in der Geschiebemergeldecke angelegt, ebenso eine Bohrung niedergebracht, die Arbeiten aber bald eingestellt. — Der Tarras tritt an einigen Stellen der Küste der Gewässer um Fehmarn direkt an die See heran, entweder im Verband des diluvialen Geschiebemergelkliffs, oder streckenweise allein Abfälle zum Strand bildend. Wo das der Fall ist, ist der Küstenabbruch und damit der Landverlust erheblich höher als an den normalen Diluvialstrecken. Da glazigen eingewalzte Schollen von Tarras gelegentlich vorkommen, können solche Zonen geringsten Widerstandes im Sinn des Küstenschutzes auch an neuen Stellen auftreten, die üblichen Mittel des Seebaues versagen hier. Es braucht nicht näher ausgeführt werden, daß in hydrologischer und bautechnischer Hinsicht die Alttertiärtonen bei der seestrategischen Lage Fehmarns auch von wehrgeologischer Bedeutung für die Küstenverteidigung sind. Mittel zur Abhilfe zu finden, setzt Kenntnis des Verhaltens der Tone im aufgeschlossenen Zustand und der Ursachen voraus. Dazu sollen diese Zeilen ein Beitrag sein.

An drei Stellen sind die Tarrasvorkommen am Strand so ausgedehnt, daß sie auf die morphologische Ausbildung des Kliffs Einfluß haben: am Ostufer von Klausdorf bis Katharinenhof an der Ostküste Fehmarns, bei Großenbrode an der Enge des Fehmarnsunds und am hohen Ufer westlich von Heiligenhafen im Übergangsgebiet von der Hohwachter Bucht zum Fehmarnsund. Die Frage, wie weit die Ausbildung

des Fehmarnsundes mit dem Auftreten des Alttertiärs zusammenhängt, soll in einer späteren Arbeit erörtert werden. An der Nordseite des Fehmarnsundes von Staberhuk bis zur Sundenge tritt im Kliff kein Tarras auf. Aus bestimmten Gründen beschränken wir die Untersuchung auf Material von Großenbrode und von Katharinenhof.

2. Bauschanalysen.

Empirische Analysen wurden ausgeführt an drei Proben: frischem Tarras vom Steilabfall bei Katharinenhof (2 Analysen), frischem Tarras aus der Walkerdegrube von Großenbrode (3 Analysen) und verwittertem Tarras von einer Koppel in der Nähe dieser Grube (3 Analysen). Da die Abweichungen dieser 8 Analysen immer unterhalb 1%, meist unter 0,5% liegen, verzichten wir auf die Wiedergabe im einzelnen und geben für jede der drei Proben nur die Mittelwerte. Im folgenden sind die Proben bezeichnet als K (Katharinenhof), G I (Großenbrode frisch) und G II (Großenbrode verwittert).

Der angegebene Wassergehalt bezieht sich auf lufttrockene Substanz. Er ist natürlich nur von relativem Wert, da abhängig von der Zeit, der Austrocknung, von Temperatur und Feuchtigkeitsgehalt im Labor statt in freier Luft usw. (vgl. richtige Zahlen, S. 252). Im übrigen ist die Zusammensetzung der bei 110° getrockneten Substanz:

Tabelle 1.

%	K	G I	G II
Wassergehalt, lufttrocken	6,0	7,6	6,1
Glühverluste	6,9	6,7	7,6
SiO ₂	54,4	57,6	57,2
(Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃)	(35,2)	(28,4)	(30,8)
Al ₂ O ₃	30,8	18,8	13,6
Fe ₂ O ₃	4,3	9,6	17,2
CaO	wenig, nicht bestimmt	—	1,8
MgO	3,4	4,4	1,4
	99,8	98,1	98,8

Die qualitativen Analysen ergaben für G I außer dem quantitativ bestimmten noch etwas organische Substanz und Spuren von Titan und Schwefel. Die Sesquioxyde wurden als Ganzes bestimmt, dann das Aluminiumoxyd getrennt und das Eisen als Oxyd berechnet.

Übereinstimmung herrscht in allen Proben weitgehend, lediglich der Tonerdegehalt ist bei K erheblich höher als bei G, auch den Eisengehalt bestimmen gewisse Differenzen, die aber kaum wesentlichen Unterschied zwischen den frischen Proben von Insel und Festland darstellen. Wenn man die Sesquioxyde als Ganzes betrachtet, um beim Vergleich zunächst methodische Fehler auszuschließen, fallen die Unterschiede nicht ins Gewicht. Die Bauschanalyse zeigt ohne weiteres, daß es sich nach der elementaren Zusammensetzung um das gleiche Sediment auf beiden Seiten des Fehmarnsundes handelt.

Der Glühverlust ist höher als man erwarten könnte, denn organische Substanz kann höchstens in geringen Spuren oder durch Verunreinigung vorhanden sein. Ein Teil der Glimmer wird im Glühverlustwasser enthalten sein. Über die Hälfte der

anorganischen Substanz macht die Kieselsäure aus. Wie die späteren Daten zeigen werden, kommt sie am wenigsten in Form von Quarz vor, der offenbar nur in den größeren Fraktionen eine Rolle spielt, Feldspäte und vor allem die eigentlichen Tonmineralien haben den größten Anteil daran. Wir kommen darauf noch zurück.

Hingegen ergibt die Trennung der Sesquioxyde verschiedene Werte, die einer Deutung bedürfen. Die empirische Analyse ermittelt lediglich die Metalle, so erscheint Fe mit niedrigen Werten in den unverwitterten Tönen K und G I, aber erheblich höher in G II. Das Eisen ist dabei als Fe_2O_3 berechnet, was für den verwitterten Ton wohl in der Form $\text{Fe}_2(\text{OH})_3$ zutrifft, nicht aber für die frischen Proben, denn hier zeigt die mikroskopische Analyse zahlreich Pyrit. Das Eisen kommt also hier tatsächlich als Sulfid, nicht als Oxyd vor. Da aber das spezifische Gewicht von Schwefel-eisen höher ist als das von Eisenhydroxyd, so kommt in die Analyse von G II prozentual mehr hinein, so entsteht ein scheinbarer höherer Eisengehalt im verwitterten Tarras gegenüber dem frischen Ton.

Die Manganwerte sind für unsere Zwecke von geringer Bedeutung; sie stammen, wie die Spuren Kalziumoxyd, aus dem Feldspat; hingegen sind über den Kalkgehalt einige Bemerkungen angebracht. KIRCHHOFF und KUMM gaben eine kritische Grenze für die Rutschneigung von Tönen an; bei einem Gehalt von $>8\%$ Erdalkalien ($\text{CaO} + \text{MgO}$) rutschten Tone nicht; bei geringerem Gehalt besteht Rutschgefahr. Von verschiedenen Seiten wurde nachgewiesen, daß dieser Regel kein gesetzlicher Wert zukommt; sie gilt in einer großen Zahl von Fällen, so auch bei den Tarrasproben. Der nachgewiesene Kalkgehalt ist äußerst gering, zahlenmäßig nur bei G II faßbar. Das widerspricht der stattgefundenen Verwitterung nicht, der Kalk ist wohl durch Verunreinigung mit Geschiebemergel an der Ackeroberfläche zu erklären. An der Verwitterung ist, abgesehen von der oberflächlichen Entnahmestelle, kein Zweifel, der zu Brauneisen verwitterte Schwefelkies hat den Ton von dunkelgrauem Blaugrün in das für feinverteiltes Ferrohydroxyd typische Braungelb überführt. Im übrigen kommt schwach kalkhaltiger Tarras örtlich beschränkt sowohl auf Fehmarn als auf den dänischen Inseln vor. GAGEL schloß seine letzte Arbeit über den Tarras mit den Worten: „Sehr auffallend ist bei den Untereozäntonen in der Umgebung des Südwestbaltikums der großenteils außerordentlich geringe oder fehlende Kalkgehalt, ebenso wie bei den Palaeozäntonen. . . . Woher es kommt, daß sie trotz ihrer marinen Ablagerung größtenteils so kalkarm sind, ist mir noch ein unerklärtes Rätsel“.

Man könnte das von einer fennoskandischen Landoberfläche ableiten, aus deren Denudationsmaterial diese Tone sich bildeten. Außerdem aber besteht die Möglichkeit der Abgabe des Ca nach erfolgter Sedimentation im Meerwasser. Darüber sagt die empirische Analyse nichts, die kolloidchemische Untersuchung ergab aber einen derart beträchtlichen Na-Gehalt, daß an einen Austausch des NaCl-Gehaltes des Meerwassers gegen das vorher an Ton gebundene Ca gedacht werden muß. Der gegenseitige Ersatz wird durch die fast gleichen Ionenradien von Natrium und Kalium erleichtert.

3. Rationelle Analyse.

Sie gibt das Verhältnis von Tonsubstanz zu Feldspat und Quarz an und ist im Verein mit anderen Methoden auch heute noch brauchbar. Man muß das Ergebnis allerdings ergänzungsweise auswerten, die rationelle Methode allein vermag ebenso wenig wie alle anderen mineralogischen, physikalischen und chemischen Methoden alle Einzelbestandteile genügend zu erkennen und zu kennzeichnen. Man ging allerdings noch bis vor kurzem bei der allgemein üblichen Anwendung dieser Methode, Tone durch Behandlung mit Säuren aufzuschließen, von der unrichtigen Voraussetzung aus, daß die lösliche kaolinartige „Tonsubstanz“ im wesentlichen ein mit Quarz verunreinigtes Zersetzungsprodukt der Feldspäte sei. Es hat sich aber gezeigt, daß neben dem unlöslichen Quarz Ortoklas von HCl und H_2SO_4 angegriffen wird, neben anderen Fehlerquellen, die CORRENS betont. „Das schließt nicht aus, daß die rationelle Analyse für technische Zwecke in geeigneter Form heute noch das wichtigste Hilfsmittel ist“ (CORRENS 1933 a).

Rationelle Analysen liegen vor von K, GI und GII; sie lassen im Gegensatz zu den Bauschanalysen den Verwitterungsprozeß des festländischen Tarras gut erkennen. Die „Tonsubstanz“ wurde mit Schwefelsäure aufgeschlossen, der aus unveränderter Substanz bestehende Rückstand wurde mit Fluß- und Schwefelsäure abgeraucht. Es verblieb nach Glühen zwecks Überführen des Aluminiumsulfats in Aluminiumoxyd und Herauslösen des Kaliumsulfats ein Rest. Die „lösliche“ „Tonsubstanz“ gibt also einen Anhaltspunkt für die weitgehend ausgelösten Silikate; der nach Herauslösen des K_2SO_4 und Glühen verbliebene Rest wird als aus $Al_2(SO_4)_3$ in Al_2O_3 überführte Substanz angesehen. Unter dieser Annahme läßt sich dann der unlösliche Anteil von „Feldspat“ und „Quarz“ berechnen. Es wurden 2—3 Bestimmungen gemacht, deren Abweichungen voneinander ebenfalls so gering sind, daß wir nur die Mittelwerte angeben.

Tabelle 2.

‰	K	GI	GI I
„Tonsubstanz“	89,9	80,9	79,5
Rückstand	10,1	19,1	20,5
	100,0	100,0	100,0
Al_2O_3 Rest		2,9	1,45
„Feldspat“	3,1	15,8	7,8
„Quarz“	7,0	3,3	12,7

Aus der rationellen Analyse geht deutlich hervor, daß durch den Verwitterungsvorgang des Tons zu Tarras-Lehm der Feldspat zersetzt wurde und dadurch eine relative Anreicherung der Quarzbestandteile erfolgte. Es ist dabei anzunehmen, wofür auch die folgenden Feststellungen sprechen, daß es sich bei diesen Rückstandsbestandteilen um grobere Fraktionsanteile handelt. Hingegen tritt Feldspat bei dem Vorkommen K an der Inselküste ganz zurück, ohne daß der Quarzanteil dadurch besonders hervortritt.

4. Röntgenoptische Untersuchung.

Die kolloidale Dimension der Mineralbestandteile des Tons macht mikroskopisch-petrographische Untersuchung weitgehend illusorisch, während durch die Messung ihrer Röntgeninterferenzen alle mengenmäßig bedeutenderen kristallinen Bestandteile auch in feinsten Fraktion erkannt werden. Die Röntgenanalyse bezieht sich auf die Fraktion „ $<2\mu$ “, die für das kolloidphysikalische Verhalten auch besonders wichtig ist. Dagegen gibt die Röntgenaufnahme im „Anlieferungszustand“ die Begleitstoffe, die den größten Teil der Gesamtsubstanz ausmachen und für die Eigenschaften mitberücksichtigt werden müssen. Näheres über theoretische Vorstellungen und Untersuchungsmethoden (auch über die folgenden Abschnitte bei SEIFERT u. a. 1935). Wir geben hier die Werte für den unverwitterten Tarras von Großenbrode (Fehmarnsund). Die Bauschanalyse (und die folgenden mechanischen Analysen) sowie die Lagerungsverhältnisse gestatten die Annahme der faziellen und lithologischen Altersgleichheit der Vorkommen um Fehmarn, so daß die Untersuchung eines Vorkommens genügt. Jedoch hat die genannte Berliner Anstalt gleichzeitig auch dänischen Plastikler gleichen Alters vom Kleinen Belt untersucht, und da es sich nach allem geologisch um das gleiche Gestein handelt, stellen wir die Belttone (B und D) mit G I in Vergleich.

Tabelle 3.

	Quarz	CaCO ₃	Kaolinit	unbekanntes Tonmaterial	Montmorillonit	Im Anlieferungszustand vorherrschend
B	sehr wenig	kein	kein	mittel	—	Tonsubstanz und wenig Quarz
G I	mittel	wenig	vielleicht	—	viel	grober Quarz und Montmorillonit
(D)	viel	kein	Spur?	—	viel	feiner Quarz und Montmorillonit

Die Ergebnisse stimmen mit denen der empirischen und rationellen Analyse in bezug auf das Auftreten von Quarz und Kalk in Großenbrode überein. Der Charakter der eigentlichen Tonsubstanz wird aber wesentlich deutlicher erkannt, Feldspat wurde röntgenographisch in keiner Probe gefunden! Die Feinfraktion wird also beim wägrischen Tarras aus Montmorillonit gebildet, während beim dänischen Beltton das „unbekannte Tonmineral T“ an seine Stelle tritt. Dieses im Röntgenbild mit Glaukonit und anderen Mineralien ähnliche, nicht quellfähigem Montmorillonit nahestehende Mineral ist in Bleichton und Fullererde schon anderwärts (SEIFERT u. a. S. 12) gefunden worden; seine Natur ist noch nicht genügend geklärt. Keineswegs ist daraus aber eine grundsätzliche Verschiedenheit der verglichenen Tone über die üblichen regionalen Unterschiede hinaus abzuleiten. Die Anwesenheit amorpher gelartiger Tonsubstanz, die ich (WASMUND 1933) für wichtiger als die kristallinen Bestandteile hielt — der üblichen Vorstellung der Tonzusammensetzung aus einem Gemenge kieselsaurer und Tonerde-Gele folgend —, ist zwar nicht ausgeschlossen, aber röntgenologisch nicht nachzuweisen. Eine kristallographische Untersuchung des Baus der Tonmineralien ist natürlich bei ihrer Kleinheit nicht durchzuführen; es darf aber angenommen werden, daß auch hier wie bei anderen Tönen der Wassergehalt zum Teil auf dem Reichtum an schuppenförmigen Mineralien beruht, die leichter als etwa runde Quarzkörner sind und mächtigere Wasserhüllen tragen.

5. Kolloidchemischer Befund.

Aufbau und Verhalten zum Wasser hängt von der Art der an der Oberfläche der Tonminerale adsorbierten Kationen ab. Tonteilchen, die mit zweiwertigen Kationen (Kalzium) abgesättigt sind, sind gekrümelt, die Einzelkörner schließen sich zusammen und lassen Wasser und Gase leicht zirkulieren. Die Absättigung mit einwertigen Kationen (besonders Natrium) hat bindige Einzelstruktur zur Folge, das die Bewegung von Flüssigkeiten im Gefüge auf das stärkste verhindert. Na-Ionen dissoziieren beim Einbringen von Ton zehnmal so stark wie Ca-Ionen in die Flüssigkeit; so ist die Wasserbindefähigkeit und damit alle technischen Eigenschaften abhängig von der Summe der adsorbierten Kationen (als S-Wert bezeichnet, ausgedrückt in Milliäquivalent Kationen je 100 g Trockensubstanz). Die Zusammensetzung dieses S-Wertes ist für diese Zwecke ebenso wichtig, wir führen von Erdalkalien und Alkalien die wesentlichsten an, für die gleichen Proben wie im vorigen Abschnitt.

Tabelle 4.

	CaCo ₃ bzw. MgCo ₃ -Gehalt in ‰	Na im Komplex in ‰	Na in H ₂ O in ‰	Na in NH ₄ Cl in ‰	S = Wert in ‰
B	~ 3	5,0	12,0	17,0	30
GI	2,9	3,6	4,6	7,5	31
(D)	0	5	10	14	25

Die Gehalte an Alkalien sind relativ niedrig und spielen offenbar nur eine Nebenrolle für die Frage der Hydratationskräfte. Der Na-Gehalt ist bei den beiden dänischen Tonen erheblich höher als bei dem holsteinischen Tarras. Im S-Wert kommt das nicht zum Ausdruck, woraus geschlossen werden darf, daß die hohe Komplexbelegung durch stärkere Anwesenheit mehrwertiger Kationen (Al, Fe) zustandekommt.

Trotz der Unterschiede in den Na-Zahlen sind die in Vergleich gebrachten alttertiären Tone sich weitgehend ähnlich und stehen in bezug auf die Wasserbindefähigkeit ganz allein da. Setzt der geringere Na-Gehalt GI diese an der Kristalloberfläche etwas herab, so wird sie wieder gesteigert durch den hohen Gehalt an Montmorillonit, der durch Quellung auch im Kristall Wasser zu binden vermag.

Es ist nun interessant, die angeführten Zahlen der 3 Proben mit 28 anderen Tonproben, die (SEIFERT u. a.) gemeinsam untersucht wurden, in Beziehung zu setzen. Der durchschnittliche S-Wert beträgt für diese übrigen Proben 13, nur eine davon erreicht den Wert 30. Keine der 28 Proben erreicht den Wert 1 im Na-Gehalt im Komplex, nur 3 erreichen ihn für Na in H₂O, dasselbe gilt für Na-Gehalt in Na₄Cl. Der allen alttertiären Tonen der Beltsee gemeinsame ungewöhnlich hohe Na-Gehalt ist also nicht nur ein Beweis für die stratigraphische Zusammengehörigkeit des plastiker und des Tarras, sondern erklärt auch die physikalischen Eigenschaften, die so ganz aus dem Gewohnten herausfallen, und die uns im folgenden beschäftigen. Auf den möglichen Austausch von Na gegen Ca im marinen Sediment wurde schon oben hingewiesen.

6. Bodenphysikalische Werte.

Es stehen 8 Korngrößenuntersuchungen zum Vergleich zur Verfügung. Die Proben B (Belttton), G I (Großenbroder Tarras) und D (dänischer Na-Ton von Rösnaes am Kl. Belt) wurden mit der Pipettmethode nach KÖHN ($<20\mu$) und der Spülmethode nach SCHULZE-H. ($>20\mu$) bestimmt (SEIFERT u. a. 1935). Die übrigen Werte werden aus WASMUND 1933 hier eingesetzt (die Zahlen der Probe Kleiner Belt enthalten dort einen Druckfehler). Die Probe B₂ stammt ebenfalls vom Kleinen Belt, die Korngrößen sind von E. L. MERTZ „bestimmt durch Schlämmung und Siebung“. Die beiden Werte K und Kl wurden von der Preuß. geol. Landesanstalt (GAGEL 1912) leider nicht nach den jetzt international angenommenen ATTERBERG-Meßgrößen bestimmt, so daß sie nur bedingt verglichen werden können. Es ist Tarras von Katharinenhof (K), unter der Verwitterungsrinde entnommen, und Tarras einer Bohrung vom Klingenberg auf Fehmarn (Kl) aus 12 m Tiefe. Dabei werden die Fraktionen 0,2—0,1/0,1—0,05/0,05—0,01 praktisch hinreichend genau als Mehlsand (0,2—0,02) zusammengefaßt; in den allein vorhandenen Schluffwerten sind auch die nicht bestimmten Rohtonmengen enthalten.

Tabelle 5.

	Sand 2,0—0,2	Mehlsand 0,2—0,02	Schluff 0,02—0,002	Rohton <0,002
B Belttton	—	—	20	80
G I Tarras Großenbrode	Spur	16	27	57
D Dän. Na-Ton von Rösnaes, Kl. Belt	—	14	20	66
B ₂ plastik ler Belttton	—	0,1	8,1	91,2
K Tarras Katharinenhof	0,3	62,1		37,3
Kl Tarras Klingenberg	—	6,6		93,4
London Clay (1 b nach MERTZ 1928)	2	33	27	38
K ₂ Tarras Katharinenhof	0,7	26,2	40,2	32,9

Das Ergebnis zeigt ziemlich starke Verschiedenheiten, auch innerhalb der drei holsteinischen und der drei dänischen Proben. Zwei Belttone und der Ton von Klingenberg in NO-Fehmarn stehen sich im Feinheitsgrad relativ nahe, es sind alles Bohrproben. D (vom Kleinen Belt) und G I (Fehmarnsund) haben beide noch 86% bzw. 84% $<0,02$ mm. Nur die Probe von Katharinenhof ist relativ grob. Es kann Verunreinigung vorliegen, da sie nach GAGEL direkt unter dem Ackerboden entnommen wurden. Außerdem wußte man damals noch nicht, daß bei ausgetrockneten Laborproben die Korngrößenbestimmung unrichtig wird, wahrscheinlich liegt dieser Fehler vor. Wir haben deshalb für das gleiche Vorkommen in K₂ die Korngrößen nach der Pipettmethode neu bestimmt. Eine Wiederholung der Bestimmung mit der Aräometermethode ergab so abweichende Werte, daß wir vor Klärung der Ursachen von der Wiedergabe absahen. Auch die Verschiedenheit der angewandten Schlämm-Methoden kann Unterschiede erklären. Wechselnde Korngrößen kommen auch in gleicher Fazies und Gegend vor, wie andere Korngrößenbestimmungen von Belttönen (MERTZ 1926, 1928) zeigen. Der London Clay (Lokalität Bank von England, London) zeigt (neben anderen Varietäten, bei MERTZ 1928 angegeben), daß die Korngrößen nach

Fazies und regionaler Lage sowie Teufe in altersgleichen Alttertiärtonen schwanken.

Das mittlere spezifische Gewicht der Kornmasse ist nur für G I mit 2,63 bestimmt worden. Ich berechne daraus die Raumkonstanten, die angenähert für alle untersuchten Tone des Alttertiärs der Beltsee gelten werden. Für K_2 bestimmten wir nachträglich denselben Wert als sehr ähnlich, $s=2,55$.

Ist das wirkliche spezifische Gewicht $=s$ und bei wassergesättigtem Boden der Wassergehalt W in % zur Totalsubstanz, so ist für den Tarras von Großenbrode

Tabelle 6.

$$\begin{aligned} \text{das Raumgewicht } \gamma &= \frac{100s}{100 + W(s-1)} = 1,83 \\ \text{das Porenvolumen } n &= \frac{W}{100} \cdot \gamma = 0,49 \\ \text{die Porenziffer } \epsilon &= \frac{n}{1-n} = 0,96 \end{aligned}$$

Das Verhältnis von Hohlraum zum Gesamtraum des Bodenkörpers n ist also 0,5 : 1 und das Verhältnis von Hohlraum zum Raum der festen Bestandteile ist praktisch 1 : 1.

Für die Plastizitätsgrenzen im Sinne von ATTERBERG liegen die Zahlen für B, G I, D und B_2 vor. Die 3 ersten Werte stammen aus den Untersuchungen von SEIFERT, die Totalsubstanzwerte von G I stellte Prof. EHRENBURG zur Verfügung. Die Werte von B_2 sind von E. L. MERTZ veröffentlicht worden, ohne nähere veröffentlichte Angabe der angewandten Methode und Berechnungsweise (vgl. unten). Unter den Plastizitäts- oder Konsistenzgrenzen versteht man die Wassergehalte der Tone bei Zustandsgrenzformen, d. h. Übergang zwischen fester, plastischer und flüssiger Form. Die obere Grenze ist die Fließgrenze, die untere die Ausrollgrenze (= Festigkeitsgrenze), d. h. der Zustand des Zerbröckelns beim drahtförmigen Ausrollen der Substanz. Beide Grenzen werden i. A. angegeben im Verhältnis Wassergehalt zur Trockenmasse des Materials. Die Differenz zwischen den Wassergehaltsprozenten der oberen und der unteren Plastizitätsgrenze ist die sog. Plastizitätszahl.

Tabelle 7.

	Fließgrenze	Festigkeitsgrenze	Plastizitätszahl	
B_2	60	27	33	} in % zur Totalsubstanz (=Trockenmasse + Wasser)
G	47	24	(23)	
B_3	87	26	61	
B	130	41	89	} in % zur Trockensubstanz
D	119	32	87	
G_1	89	33	56	
London Clay	56	20	37	

Die beiden Belttone sind derart verschieden, daß man annehmen muß, es handelt sich bei den Werten von L. MERTZ nicht um Trockensubstanz. Die Wassergehalte zur Totalsubstanz von G I stehen ihnen auch ziemlich nahe. Auf Anfrage teilte Frau ELLEN LOUISE MERTZ freundlichst mit, daß es sich bei den Plastizitätszahlen tatsächlich um %-Werte von Totalsubstanz handelt (vgl. MERTZ 1928a). Wir gaben deshalb (B_3) aus MERTZ 1928b weitere Werte eines Tons vom Kl. Belt und eines Londontons

an. Der letzte unterscheidet sich von den westbaltischen Tönen nur durch die geringen Wassergehalte, die zum Fließen ausreichen. Im übrigen sind D und G I sich nur im Grenzwert zwischen plastischer und fester Konsistenz ähnlich, während im Fließwert und vor allem der Plastizitätszahl der dänische plastischer (B + D) dem Tarras G I überlegen ist und ungewöhnlich hohe Zahlen erreicht, die von über 30 anderen untersuchten Tönen bei SEIFERT nicht erreicht werden. Die Plastizitätszahl gibt eine Grundlage zum Vergleich des Feinheitsgrads der Töne, diluviale Moränentone haben nach MERTZ eine Plastizitätszahl von 8—10 (12).

Die Verformbarkeit des Bodens wird ermittelt durch die Verhältniszahl

$$q = \frac{\text{Fließgrenze} - \text{Wassergehalt}}{\text{Plastizitätszahl}}$$

Diesen Wert berechnen wir für die Trockensubstanz:

$$(G_1) \quad q = \frac{89 - 36,6}{56} = 0,9.$$

Es gilt dabei die Regel, daß das Bodenmaterial zum Fließen neigt, wenn q sich Null nähert, und ist um so spröder und härter, je mehr q den Wert 1 überschreitet.

Wassergehalt und Wasserbindung, d. h. der ‰-Gehalt an Wasser im natürlichen anstehenden Verband und die Flüssigkeitsaufnahmefähigkeit quellbarer Stoffe werden für B, B₂, G I, D zusammengestellt, für B₂ nach MERTZ (nach liebenswürdiger schriftlicher Mitteilung in ‰ zur Totalsubstanz, beim Wassergehalt, hingegen die Hygroskopizitätszahl in ‰ Trockensubstanz).

Tabelle 8.

	Natürlicher Wassergehalt in		Wasser- bindung
	‰ zur Total- substanz	‰ zur Trocken- substanz	
B ₂	(31,7)	—	(21,4—23,8)
B	—	—	247
G I	26,8	36,6	155
D			215
K ₁			90

Der natürliche Wassergehalt ist demnach beim Ton vom Kleinen Belt und beim Tarras vom Fehmarnsund ziemlich ähnlich und erheblich höher als der Mittelwassergehalt dänischer Moränentone mit 11,9. Dadurch werden die an frischem Material gewonnenen Zahlen der Bauschanalyse (S. 245) gegenstandslos.

Die Zahlen für die Wasserbindung sind für B, G I und D mit dem Gerät nach O. SCHMIDT bestimmt worden, wo die Probe Flüssigkeit direkt aufsaugt, während die Hygroskopizitätszahl für B₂ durch die Wassergehaltszunahme im Raum mit konstantem Wasserdampfdruck bestimmt wurde. Deshalb die Verschiedenwertigkeit der Zahlen. Die Zahlen sind im Vergleich außerordentlich hoch, von 28 Tonproben der verschiedensten Herkunft sind es die drei höchsten Werte. Entsprechend den übrigen Werten hat G I kein derart hohes totales Oberflächenareal der Partikel wie die dänischen Töne. Nicht besonders hoch liegt der Wert für den Tarras von Katharinenhof (K₁), den wir mit derselben Methode bestimmten. Ähnliche Werte sind von tertiärem

Wiener Tegel oder quartärem Gavelton bekannt. Der Gehalt an Tonmineralien ist demnach für die bodenmechanischen Eigenschaften noch entscheidender wie die Wasserbindungsfähigkeit.

Der Schubwiderstand wurde für B, G I und D bestimmt. Der Wert ist ein Maß für den gegenseitigen Verschiebungswiderstand der Einzelteilchen, der sich aus Haftfestigkeit und Reibung zusammensetzt, die beide wieder durch das Bodenwasser in allen seinen Formen beeinflußt werden. Dadurch ist eine klare Abhängigkeit dieses bautechnisch so wichtigen Wertes nicht nur von den physikalischen, sondern auch von den kolloidchemischen Verhältnissen gegeben. Die Werte sind mit dem Apparat nach KREY gewonnen, wo Tonproben in sich unter zunehmender Belastung abgeschert werden, unter langsamer Anpassung des jeweiligen der Scherkraft und der Belastung entsprechenden Wassergehalts. Es würde zu weit führen, die Berechnung der einzeln zu trennenden Faktoren und die experimentelle Gewinnung der Beiwerte darzulegen; ich verweise auf die Darlegungen bei SEIFERT und die einschlägigen Lehrbücher von KREY, EHRENBERG, v. TERZHAGI u. a. Im übrigen genügen nach graphischer Darstellung der Schubwiderstandsbestimmung für G I die für B, G I und D angegebenen Hauptwerte. In der Zeichnung sind die Schubwiderstandswerte für „gewachsenen“ Tarras bei gleichbleibendem Wassergehalt und für aufbereiteten dem Bodendruck angepaßten Wassergehalt bei veränderlichen Bodenbelastungen v angegeben, außerdem die Haftfestigkeit KS . Daraus ergeben sich die Beiwerte. Sie sind:

Tabelle 9.

	B	G I	D
c = Schubfestigkeitsbeiwert	0,29	0,26	0,29
ks = Haftfestigkeitsbeiwert	0,18	0,14	0,18
g = Reibungsbeiwert	0,11	0,12	0,11

Die Haftfestigkeit der Einzelteilchen wird durch chemische Bindung, molekulare und kapillare Kräfte bestimmt und nimmt zu mit wachsendem Tongehalt und abnehmendem Wassergehalt. Die Reibung nimmt mit abnehmender Korngröße ab. Da für G I der Tongehalt geringer, der Wassergehalt kaum geringer als für die dänischen Tone ist, erreicht er sie in der Haftfestigkeit nicht ganz. Hingegen übertrifft er sie etwas in der Reibung wegen der im Vergleich größeren Zusammensetzung. Keine von sonst untersuchten 28 Tonproben erreichte die 3 angegebenen Haftwertigkeitsbeiwerte, während umgekehrt die 3 Reibungsbeiwerte die niedrigsten unter 31 Werten sind. Die Summe beider, d. h. der Schubfestigkeitsbeiwert, ist infolgedessen für den Vergleich nicht bezeichnend. Reibung und Haftfestigkeit sind abhängig vom Bodenwasser. Über die Rolle des Kristallwassers (Montmorillonit) und der Ionenbelegung wurde schon gesprochen. Die Hydratationskräfte werden bei unseren Proben durch den geringen Quarzgehalt — Quarz lagert schwächere Wasserhüllen an als Ton — und den hohen Gehalt an einwertigen Basen (Na) verstärkt. Es sind also mechanische, kolloidale und chemische Faktoren, die in Beziehung zum technischen Verhalten stehen.

Schließlich wurde auf Anregung von Herrn Reg.-Baurat EHRENBERG von der preuß. Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau in Berlin noch ein Bodendichtungsversuch durchgeführt. Die Art der Ausführung und Berechnung ergibt sich aus folgender Darstellung, die mir der Vorsteher der Abt. Erdbau freundlichst zur Verfügung stellte.

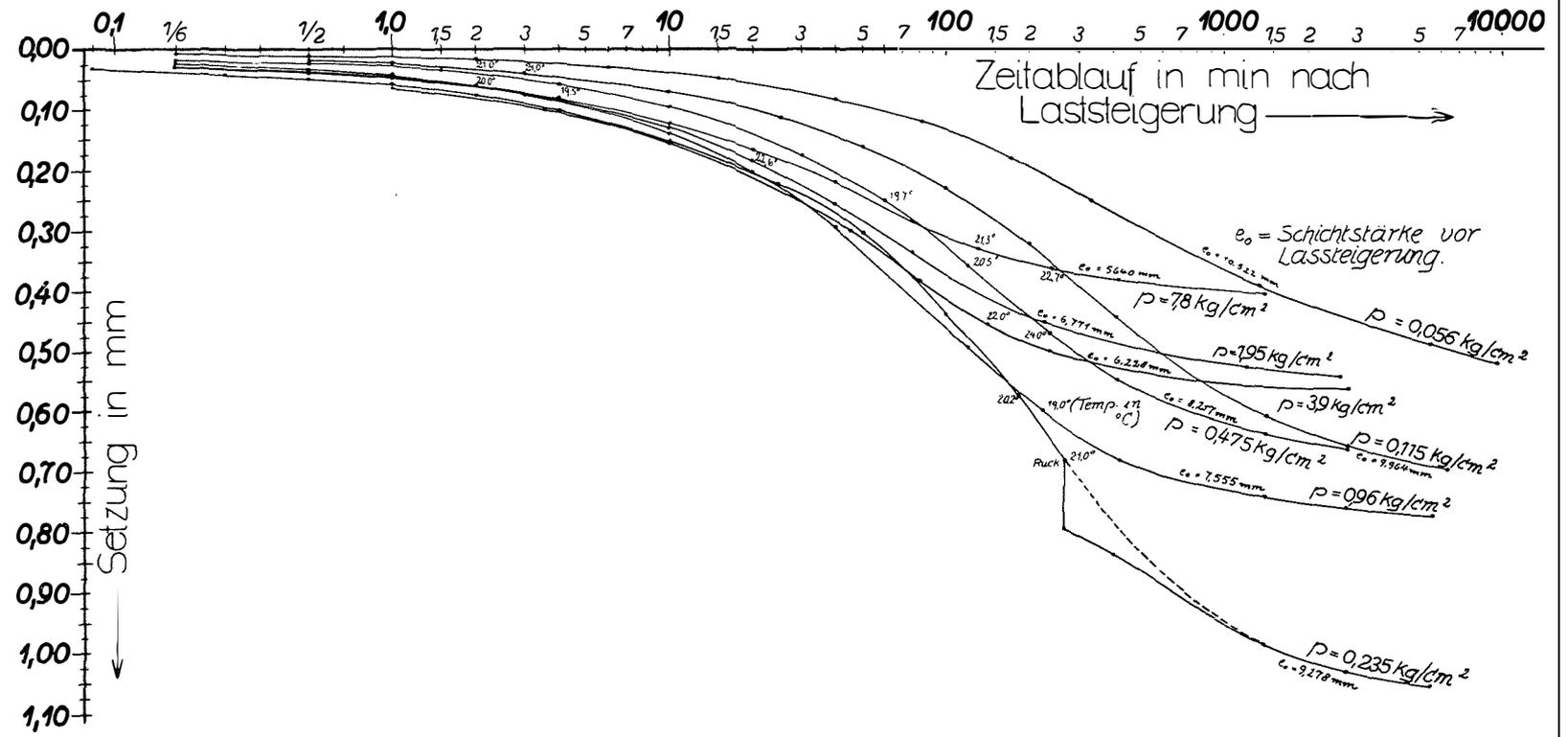


Abb. 1. Bodenverdichtungsversuch (Druckpotenzialercurven für Tarras vom Fehmarnsund G1).

„Der Boden wurde breiig aufbereitet und in etwa 10–12 mm starker Schicht am Grunde eines ihn seitlich begrenzenden Zylinders von 70 mm \varnothing mit einem im Zylinder beweglichen, dicht abschließenden Kolben belastet. Das Wasser, das dem Ton dabei abgepreßt wurde, konnte durch poröse Glasfilter im Boden des Zylinders und an der Stirnfläche des Kolbens entweichen. Die Zusammenpressung der Probe wurde mit Zeißschen Meßinstrumenten (in $\frac{1}{100}$ mm) nach bestimmten Zeiten gemessen und daraus für jede Laststufe die Zeitsetzungskurve halblogarithmisch aufgetragen. Diese Art der Auftragung hat den Vorteil, daß man aus dem Verlauf der Kurve das Endmaß der Setzung, wie es sich etwa nach Ablauf von einem Jahr ergeben würde, einigermaßen genau bestimmen kann. Aus den Setzungen lassen sich die Veränderungen der Porenziffer des Bodens bestimmen. Unter Porenziffer wird das Verhältnis des Hohlraumes zur festen Masse verstanden. Ist das Porenvolumen $=n$ in %, der gesamten Masse, so ist $\epsilon = n/(100 - n)$ oder $n = \epsilon/(100 + \epsilon)$. Es wurde nun aus den Messungen für jede Setzung am Abschluß einer Laststufe die Porenziffer errechnet. Diese Porenziffern werden in Beziehung zu den Belastungen gleichfalls halblogarithmisch aufgetragen. Es ergibt sich eine von links nach rechts fallende Druckporenzifferkurve und nach dem Entlasten eine nach links steigende Schwellporenzifferkurve. Die Kurven haben einen angenähert geradlinigen Verlauf von der Form $= a - m \log p$ und der Richtung $d\epsilon/dp = m/(\ln 10 \cdot p)$ mit dem reziproken Wert $dp/d\epsilon = (-\ln 10 \cdot p)/m$. Dieser Wert ist die Verdichtungszahl des Bodens (bezogen auf die Porenziffer) $V_\epsilon = -dp/d\epsilon$; bezogen auf lineare Veränderungen erhält man die lineare Verdichtungszahl $V = V_\epsilon(1 + \epsilon)$, die bei der Bodenverdichtung eine ähnliche Rolle spielt, wie der Elastizitätsmodul bei der Formänderung elastischer Körper. Das Gleiche gilt für die Schwellzahl. Man erhält aus den Versuchen (für $p=1,0$) die Verdichtungszahl $V_\epsilon = 2,94 \text{ kg/cm}^2$ und die Schwellzahl $S_\epsilon = 7,6 \text{ kg/cm}^2$. Es sind das für Ton sehr geringe Werte. Sie werden bei den von uns ausgeführten Versuchen nur noch unterboten von dem Ton aus dem Untergrund der Brücke über den Kleinen Belt mit $V_\epsilon = 1,76$ und $S_\epsilon = 5,86 \text{ kg/cm}^2$.

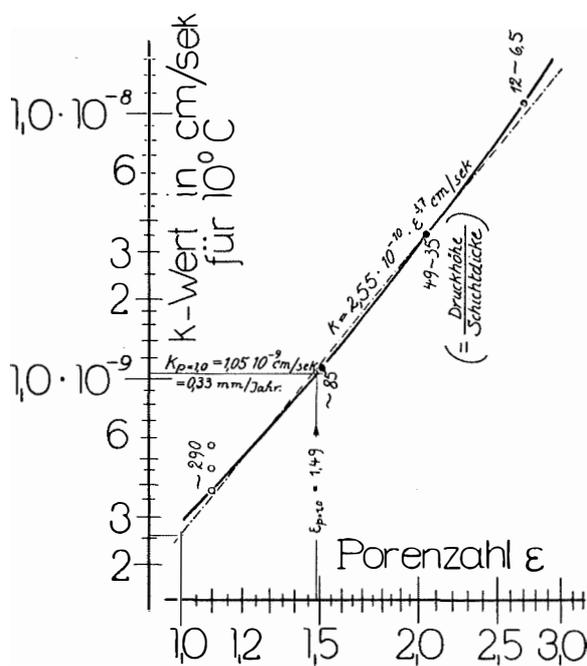


Abb. 2. Wasserdurchlässigkeits-Versuch an Tarras G_1 (Großenbrode).

Ferner ist logarithmisch darstellbar die Beziehung zwischen der Porenziffer ϵ und der Durchlässigkeitsziffer des Bodens. Die Durchlässigkeit ist am Ende eines Belastungszustandes dadurch gemessen worden, daß auf die verdichtete Probe von der Fläche F der Druck einer Wassersäule von bestimmter Höhe H wirkte und die Menge Q des durch die Probe von der Stärke h fließenden Wassers gemessen wurde. Nach DARCY ist dann $Q = k \cdot F \cdot H/h$. Hierbei ist k die Durchlässigkeitsziffer oder die Sicker-geschwindigkeit bei dem Gefälle $J = H/h = 1,0$. Man erhält für den Ton einen Wert $k = 2,55 \cdot 10^{-11} \times \epsilon 3,7 \text{ cm/sec}$, das ist eine sehr kleine Zahl. Der Ton ist also entsprechend seinem hohen Gehalt an Tonmineral außerordentlich wenig durchlässig.“

Die S. 253 angeführten Schubwiderstands-Kurven können hier nicht wiedergegeben werden, stehen jedoch Interessenten auf Wunsch zur Verfügung.

7. Tiefbau und Küstenschutz.

Die bisherigen Angaben haben gezeigt, daß es sich beim holsteinischen Tarras und dem plastiker, seinem dänischen Äquivalent, um ungewöhnlich feine hochplastische Tone handelt. Gemeinsam ist ihr röntgenoptischer, mineralogischer, chemischer und physikalischer Befund, die Unterschiede sind normale Faziesdifferenzen. Etwas höhere Werte im Ca-Gehalt, niedrigere im Na-Gehalt und etwas gröbere Kornfraktionen scheinen auf landnähere Entstehung des Tarras hinzudeuten. Das widerspricht nicht unbedingt unserer früheren Annahme (WASMUND 1933), daß der Tarras aus der Kaolin- und Basaltdecke der verwitterten alttertiären Landoberfläche Südschwedens, vor allem Schonens, stammt. Denn wir haben zu gleicher Zeit auch mit ähnlich gebauten Festlandsauftragungen weiter südlich zu rechnen, die heute nicht aufgeschlossen bzw. abgesunken sind.

Die geschilderten Eigenschaften machen nicht nur die Eignung des hochdispersen Tarras zu adsorptiv wirkenden bleichenden Erden verständlich, sondern auch die bautechnischen Schwierigkeiten. Die wichtigste praktische Frage ist das Verhalten zum Wasser. Der Boden des Kleinen Belts besteht nach dänischen Bohrungen aus „Belton“, ähnliches vermute ich für Teile des Fehmarnsundes und Fehmarnbelts. Überall an den Küsten dieser Meerengen steht Tarras an. Wie weit er wirklich anstehend, wie weit er glazigen umgearbeitet oder verschleppt ist, ist schwer zu entscheiden. Entgegen den Voraussagen der dänischen Geologen stieß man beim Bau der Brücke über den 40 m tiefen Kleinen Belt im Alttertiärton in großem Umfang auf diluviale Findlinge! Sollte die Bildung eines Teils der Belte und Sunde mit den Eigenschaften der alttertiären Tone in Zusammenhang stehen? Dafür spricht der starke Küstenrückgang an den heutigen Tarraskliffs.

Diese für die Geologie und den praktischen Seebau gleich wichtige Frage wird der Lösung näher geführt durch Versuche über die Wasserlagerungsfähigkeit verschiedener Tone, die die Berliner Versuchsanstalt durchgeführt hat. Proben von tertiärem Wiener Tegel (Brackwassersediment), Belton (B) und Tarras (G I) wurden belastet, bis ein Teil des Wassergehaltes entwich, dann entlastet und Versuchskörper unter Wasser gelegt. Die Zunahme der Wasseraufnahme wurde bis zu dem Stillstand gemessen. Beim Tegel wie bei anderen Tonen erfolgte eine gewisse Wasseraufnahme bis zur Grenze ohne Zustandsänderung nach 3 Wochen. Die Na-haltigen Belttone und Tarras-tone nahmen begierig Wasser auf und zerfielen nach kurzer Zeit im Gegensatz zu allen anderen Proben. Die Versuche sollen fortgesetzt werden. Sie stimmen überein mit den Höchstwerten für Wasserbindefähigkeit, die die Na-Tone erreichten.

So wird verständlich, daß Tarras sich nicht verändert, solange er unter der normalen Diluvialdecke liegt. Wird er an der Küste durch die Tätigkeit des Meeres aufgeschlossen, so ist schneller Küstenrückgang an den betroffenen Stellen die Folge. Wird er als Baugrund benutzt, so ist er unbrauchbar, solange er mit der Atmosphäre und damit den Hydrometeoren und der Luftfeuchtigkeit in Verbindung steht. Nur völlige Abdichtung, wo sie technisch möglich ist, schützt gegen ständiges Verformen und Ausfließen unter dauernder Wasseraufnahme.

Wird durch die Bleichtongrube bei Großenbroder Fähre Tarras-Abraum über das Kliff in See gekippt, so „zergeht“ die Schütte in kürzester Zeit. Es ist die praktische

Anwendung der Eigenschaften dieser Tone und die abraumtechnisch einfachste Lösung. Im Norden von Fehmarn wird Tarras kaum angetroffen, in den Teilen SO der Linie von der Orther Bucht zu Ohlenborgs Huk verursacht er allenthalben Bau-schwierigkeiten. In Landkirchen, in Bisdorf zeigten Bauwerke auf Tarras Sackungserscheinungen und Risse. An der Bahnstrecke bei Wulfen sackt der Schienenweg. Die Scheunen auf Gut Katharinenhof wurden rissig, bis man bei allen neuen Bauwerken grundsätzlich folgende Methode anwandte: Es wird tief ausgehoben, rings herum dräniert und dann eine 75—100 cm mächtige Sandschicht aufgebracht. Seitdem wird gute Standfähigkeit erzielt. Diese Schicht dient offenbar nicht nur als standfester Boden mit hohem Reibungswert, sondern auch als EntwässerungsfILTER für den liegenden Tarras. Die Sanddecke wirkt nicht nur als wasserabsaugendes Luftpolster, sondern durch gleichmäßige Lastverteilung als Ankerplatte. Dafür einige Beispiele. Wir beschränken uns in dem Bericht auf Dinge, die GAGEL in seinen Arbeiten noch nicht gebracht hat. Die wenigen Stellen, wo der Tarras an der Festlandküste in Linsen und Schollen ausstreicht, sind zur Zeit kaum von wasserbaulicher Bedeutung. Typisch ist das zirkusartige Zurückweichen der Diluvialkliffs durch Ausbrechen von Nischen, die ihrerseits wieder Grundwasseraustritte an sich ziehen, so den Rückgang lokal verstärken und damit auch den Gesamtwiderstand der so unterbrochenen Klifflinie herabsetzen. Am eindrucksvollsten sind aber die Vorgänge am Tarraskliff von Katharinenhof auf Fehmarn.

Das Kliff erreicht eine höchste Höhe von 14 m und reicht von Staberhuk bis zum Klingenberg bei Klausdorf in einer Länge von mehreren km. Der Tarras steht in verschiedenen Farbschattierungen von blaugrün bis braungrau stellenweise an, in gleichmäßiger Beschaffenheit, gelegentlich enthält er kopfgroße Tongeoden. Die Decke des sehr kalkreichen Geschiebemergels ist bei Katharinenhof höchstens 50 cm mächtig, in den Ackerfurchen hinter dem kleinen Wald tritt der Tarras zutage. Diese Diluvialdecke ist so reich an Geschieben, das GAGEL schon von einem „Pflaster“ spricht. Infolgedessen ist der Strand reich mit Findlingen besät. Das Aussehen des Kliffs, das ich in verschiedenen Jahreszeiten besuchte, ändert sich mit der Wetterlage und der Zeit sehr stark. Bei NO-Sturm wird alles übersandet, nur in den Einschnitten der Grundwasseraustritte liegt der Tarras auch auf der Strandplatte frei. Bei günstigen Verhältnissen kann man auch sehen, daß der grüne Tarras unter den Wasserspiegel hinausgeht, wie weit er in See reicht, ist unbekannt. Ich habe (WASMUND 1937) gelegentlich meiner Taucherbeobachtungen in der Steinfischerei davon berichtet, daß vor der Ostküste die Findlingsblöcke so dicht liegen, daß der Taucher unter Wasser in 5—8 m an der Fehmarn-Ostküste stellenweise kaum Fuß fassen kann.

Nach Aussagen des früheren Besitzers von Katharinenhof, Herrn Rittmeister a. D. LÖSENER, und dem Förster STEFFEN beträgt der jährliche Landverlust bei dem Gutswald jetzt etwa 3 m. Das ist eine sehr hohe Zahl, besonders für Schleswig-Holstein. Sie wurde an 2 Punkten wegen der Strandjagd nachgemessen und betrug an 2 etwas vorspringenden Teilen des hohen Ufers in der Nähe der Waldränder 30 m von 1917 bis 1930. Noch zu der Zeit, als die Insel aus dänischer Hand kam und preußisch wurde (vor 60—70 Jahren), gab es hier kein Kliff. Der Wald ging flach in Wiesen über, die 150 m weiter draußen als Schafweiden benutzt wurden. Erst seitdem der Tarras von

der See angeschnitten wird, nimmt der Küstenrückgang ständig zu. Die Gründe sind nach den Ergebnissen der vorhergehenden Abschnitte verständlich: Die See greift hier zwar stärker an als an den meisten Küstenstrecken der Herzogtümer, weil sie lang auslaufend aus der offenen Ostsee kommt. Andererseits sind Oststürme auch seltener und schwächer als die aus den Westquadranten. Aber der Hauptgrund ist die Gier dieses hochhygroskopischen Tones, Wasser aufzusaugen, und sein schneller Zerfall unter dem Einfluß des eingedrungenen Wassers. Der Tarras zieht Wasser aus den Spritzern der Brandung, aus dem Regen und der Luftfeuchtigkeit an, das Kliff wird so viel weniger unterwühlt oder ausgekehlt, sondern es fließt einfach aus. Bei Frost blättert der Ton in millimeterdünnen unzähligen Blättchen auf, das Eis dringt mit dem Auge sichtbar am senkrechten Hang mehrere cm tief ein. Die Folgen bei Tauwetter lassen sich vorstellen. Im Sommer entspricht diesen Vorgängen dauernder Wechsel zwischen Schrumpfung und Quellung, je nach dem Überwiegen von Verdunstung oder Niederschlag.

Das ganze Ufergebiet im Südosten Fehmarns wird nicht von außen langsam angenagt, sondern zerfällt innerlich, und diese Zermürbung geht äußerlich sichtbar über 100 m ins Land hinein! Am Steilufer fließen ganze Kliffstrecken aus. Die Erdschlipfe tragen auf ihrem Rücken die Geschiebemergeldecke mit Findlingen und Bäumen ins Meer hinaus. Überall stehen auch im Innern des Waldes Pappeln und Eschen schief, unter dem Einfluß des im Wurzelbereich und darunter vor sich gehenden Erdfließens. Ich habe bei starkem Nordoststurm ganze Teile des Waldes schwanken sehen! Streckenweise ist der Strand dann nicht begehbar. Ist der Tarras schon im Lande trotz Bodenbildung so zäh, daß die Scholle kilometerlang nicht am Pflug abreißt, so bleibt man in dem Erdschlipfbrei am Strand unrettbar stecken. Pferde und Boote müssen mit Ketten herausgezogen werden; es sind schon Pferde verloren gegangen. Tiefe Risse und Schluchten greifen in das bewaldete Land — es ist die einzige Waldparzelle auf der Insel — ein, der Zerfall greift schon auf die Felder über und zerreißt die Dränröhren. Ganz frische Spalten klaffen 1 m tief. Der Weg vom Gutshof zum Pavillon zeigt regelrechten Treppenverwurf, Sprunghöhen der einzelnen Verwerfungen bis zu 1 m Höhe. Diese Sackungen sind über Nacht plötzlich entstanden. Quellen versitzen, Rinnsale verlegen sich, andere Wasseraustritte treten neu auf. Eine der Schluchten ist so breit geworden, daß sie als Fischerläger für große Boote benutzt wird, wenn der Strand nicht „grün“ und keine Stubben draußen unter Wasser sperren. Das ganze Gebiet ist also, wie diese Angaben zeigen, in stärkster innerer Bewegung begriffen, die Oberflächenformen zeigen eine in Norddeutschland fremdartige Morphologie junger Scheintektonik. Eine Formenwelt voller Spalten und Sprünge, Rutschungen und an Verwerfungen absitzender Terrassen bietet ein Bild wie junge tektonisch-seismisch bewegte Landschaften Kaliforniens.

Es scheint an der deutschen Ostseeküste einen Parallelfall zu geben: das Kliff vor dem Leuchtturm auf dem hohen Nordteil der Insel Hiddensee bei Rügen. Der Leuchtturm steht 195 m vom Kliff entfernt und zeigte bedrohliche Risse im Mauerwerk, so daß er polizeilich gesperrt werden mußte. Sichtbare Risse im Erdboden treten bis 85 m weg vom Hochufer auf. Geologische Gutachten kamen zu widersprechendem Ergebnis: ELBERT hielt das Diluvium für standfest, JÄKEL erklärte es als „unprüf-

bares Haufwerk“. „Durch erneute Aufgrabungen und kleinere Bohrungen bis etwa 2 m tief neben dem Leuchtturm wurde im Jahre 1925 nochmals nachgewiesen, daß der Turmberg einen erstklassigen Baugrund aus mergeligem Ton darstellt (BRUCHMÜLLER)“. Probebohrungen von derartiger Flachheit sagen nach unseren heutigen baugrundmechanischen Anschauungen gar nichts über Standfestigkeit aus. Grundwasserhorizonte, Tonbänke als Gleitflächen waren schon früher bekannt, dazu kommen unsere heutigen Auffassungen über den inneren Küstenzerfall. Und auf Hiddensee kommt nicht nur Geschiebemergel, sondern auch interglazialer fetter Cyprinton vor!

Die Ursachen für diesen Zerfall sind durch die hier zusammengestellten Ergebnisse aller denkbaren Untersuchungsmethoden, die zur Klärung Erfolg versprochen, bekannt. Daraus ergibt sich die Frage nach der Abhilfe und ihrem notwendigen Umfang. In der Wasserversorgung gibt es nur ein Mittel: stößt eine Bohrung auf Tarras, ist sie aufzugeben und an geeigneterem Ort anzusetzen. Die größte bisher erbohrte Mächtigkeit des Tarras auf Fehmarn ist 53 m, er wurde nicht durchsunken. Wenn überhaupt wasserhaltig, enthält er höchstens Sole. Tiefbautechnisch sind die Mittel oben angegeben, wenn möglich, ist Tarras als Baugrund zu vermeiden, sonst hilft tiefes Ausheben, Verfüllen und Dränieren der Baugrube. Wasserbaulich ist zunächst die Frage, wieweit ein Uferschutz, der meist nur mit großem Kostenaufwand durchzuführen ist, lohnend ist. Dazu ist zu sagen, daß unsere Untersuchungen eins mit Sicherheit ergeben: Wenn irgendwo am Ufer auch nur ein schmales oder geringmächtiges Vorkommen von Tarras durch die Brandung oder den Kliffrückgang angeschnitten wird, lohnt sich sofortiger Verbau. Denn von da ab nimmt der Rückgang rapide zu und wandelt sich vom normalen Uferrückzug in Küstenzerfall. Man wird durch Bohrungen die Ausbreitung der meist kuppig sich aufwölbenden Tarrasoberfläche feststellen, um nicht wegen einer kleinen Scholle unrentable Arbeiten zu veranlassen. Man muß sich die Tarrasoberfläche und die sie verdeckende heutige Grundmoränendecke vorstellen wie ein unregelmäßig kuppig gearbeitetes mit Butter verstrichenes Knäckebrötchen. Ufermauern an sich sind zwecklos und würden in kurzer Zeit isoliert vor den weiter sich bewegenden und verfließenden Tonmassen im Wasser stehen oder selber mitgeschoben werden. Notwendig ist luftdichtes Abfangen des Aufschlusses; diese Packung kann dann durch Mauern oder Bermen gegen die See gesichert werden. Ein Schutz des Fehmarners Südostufers ist zur Zeit wohl nur schwer möglich, wäre aber vor Jahrzehnten leichter durchführbar gewesen. Zur Zeit besteht wohl größte, aber noch vermeidbare Gefahr für die Küstenstrecke am Festland von Elandsort bis zum Fährhafen auf einer Strecke von kaum 1 km Länge. Heute besteht dieser Süduferteil des Fehmarnsunds nur an einer kleinen Steile aus Tarras, der aderartig nach NO zur Insel unter dem Meeresspiegel hinzieht. Aber dicht hinter dem Ufer ist durch Bohrungen (vgl. WASMUND 1933) weite Ausbreitung des Tarras dicht unter der Oberfläche festgestellt. Ein Wasserbruch in die Walkerdegrube bei ungewöhnlicher Sturmflut wäre durchaus möglich und würde genügen, um auch hier den Vorgang des „inneren Küstenzerfalls“ unaufhaltsam einzuleiten, dessen Ursachen in diesem Aufsatz geklärt werden sollten.

8. Der innere Küstenzerfall.

Die Untersuchung des Tarras in den verschiedensten Richtungen sollte auch methodische Fragen klären. Es ergibt sich, daß für meeresgeologische Fragen der Kliffbildung, des Küstenrückganges usw. die durchgeführten chemischen Untersuchungen wenig zur Lösung beitragen können. Am wichtigsten sind die bodenphysikalischen (erdbaumechanischen) Werte. Diese Feststellung erleichtert die künftigen Arbeiten. Wir sind jetzt durch die Einrichtung eines Meeresgeologischen Laboratoriums instand gesetzt, diese Untersuchungen in Zukunft selber mit eigener Apparatur durchzuführen. So diene der Tarras mit seinen Extremwerten auch dazu, zu klären, welche Methoden erfolgversprechend bei künftigen vergleichenden Arbeiten an umfangreichem Material anzuwenden sind.

Die künftigen Arbeiten gehen von einer Hypothese aus, die besagt, daß die an den Extremwerten der Alttertiär-Tone gewonnene Auffassung vom „inneren Küstenzerfall“ allgemeinere Geltung hat. Wenn sich diese Meinung bewahrheitet, hat das für die wasserbauliche Praxis des Küstenschutzes erhebliche Folgen. Wir werden demnächst die ersten Ergebnisse einer Untersuchung veröffentlichen, die P. GRÖSCHOPF an Diluvialkliffs der Kieler und Lübecker Bucht durchführte.

Die Hypothese vom „inneren Küstenzerfall“ besagt folgendes: Nicht die Brandung, nicht die See mit Wellen und Strom nagt die Küsten an, schafft die Steilkiffs und verlegt sie zurück. Das ist nicht Normalfall, sondern Folge extremer Sturmfluten oder besonders exponierter Lage, etwa Steilabfall zu tiefen stromreichen Rinnen und starker häufiger Brandung. Steilabfälle sind an sich das Produkt des inneren Zerfalls des Gesteins, d. h. ein Ausgleichzustand zwischen petrographisch-mechanischer Struktur und Textur mit dem Wassergehalt der Luft. Jede offene Gesteinsfläche muß unter dem Angriff der Atmosphären zerfallen, besonders junge unkonsolidierte Gesteine. Der Zerfall im humiden Klima wird aber durch die Vegetation aufgehalten, die sich bei Ausbildung des natürlichen Böschungswinkels ansetzt. Vegetation setzt also Erstickten der Geländestufe im eigenen Schutt voraus. Und das wird oft verhindert durch bewegtes Wasser: im Binnenland durch Flüsse, an der Küste durch die See. Das Meer spielt im wesentlichen nur die passive Rolle des Schutttransporteurs, Seegang und Küstenversatzstrom schaffen die Absturzmassen am Kliffuß weg; es können sich keine Pflanzen ansiedeln; die Gesteinsoberfläche bleibt weiter der Feuchtigkeit der Luft ausgesetzt, die wohl am Strand durch Spritzer und Verdunstung in der Strandzone heraufgesetzt ist, und zerfällt weiter. Das Steilkiff stürzt also weiter ab und geht zurück.

Es liegt nahe, das Problem der Schichtstufen-Landschaften in Verbindung mit dieser Theorie der Klifferhaltung und der landwärtigen Wanderung der Küstenstufen zu bringen, und es leuchtet ein, daß eine innere Verwandtschaft beider Fragen besteht. Es würde aber die Frage vorzeitig komplizieren, die erst nachher erörtert werden soll, wenn für unsere Hypothese mehr Beweismaterial vorliegt.

Eine gewisse Komplizierung liegt schon dadurch vor, daß das Wasser als Sicker-, Grund- und Quellwasser — wie auch von anderen hervorgehoben — mehr oder weniger zum Zerfall beiträgt. Auch deshalb haben wir den Tarras als Ausgangspunkt genommen, in dem kaum Wasser von oben oder innen her zirkulieren kann. Auch wechselnder Auf-

bau des Kliffs (Sand, Mergel usw.) erschwert es, die Bedingungen des inneren Küstenzerfalls rein zu erfassen, wenn man nicht derartige lithologisch bedingte Pfeiler und Schwächezonen zu dem Komplex des inneren Aufbaues und seines Zerfalls hinzurechnen will. Es wird ferner mit Aufgabe der Zukunft sein, die morphologischen Folgen und Kennzeichen des inneren Küstenzerfalls zu beschreiben. Manche morphologischen Merkmale der Steilküsten sind sicherlich zugunsten der „Brandungstheorie“ gedeutet worden. Ein Beispiel sind die sogenannten „Brandungshohlkehlen“, deren Darstellung in eintöniger Folge in Lehrbüchern und Küstenbeschreibungen wiederkehrt. Ich bin nicht der Überzeugung, daß Hohlkehlen durchweg der Brandung ihre Existenz verdanken. Stark bewegte See zerschlägt und zertrümmert, höhlt aber nie mit feinmechanischem Lineal eine Kehle aus. Die Hohlkehlen sind in den allermeisten Fällen Schliffhohlkehlen, gelegentlich auch durch Korrosion entstanden. Man kann das letzte z. B. allseitig an Betonklötzen im Wasser sehen. Hohlkehlen entstehen da, wo Geröll durch Gezeiten- oder Küstenversatzstrom an Steilabfällen entlang geführt wird, wohin die Geröllmassen bei hohem Wasserstand am Kliff entlang bewegt werden. Das ist auch der Grund, warum sie an Felsküsten häufig auftreten (Helgoland), ebenso wie an Flußufeln (aus gleichen Ursachen), selten aber an Ton- und Mergelkliffs. Bisher habe ich die Beobachtung gemacht, daß diese Kennzeichen der abradierenden Wirkung der Sturmsee und Brandung nur an Küstenstrecken mit Geröllstrandwall gebunden ist. Wir werden auch diese Frage weiter verfolgen.

Was würde die Erkenntnis von der primären Bedeutung des inneren Küstenzerfalls, überragend an Wirksamkeit vor allem aktiven Zugriff des Meeres, nur unter Mitwirkung von Grundwasser, Frost usw., wasserbaulich bedeuten? HEISER referierte kürzlich über Küstenschutzwerke gegen marine Angriffsfaktoren nach Berichten aus 8 europäischen Ländern für den 15. Internationalen Schiffahrtskongreß in Venedig 1931. Danach werden niedrige Steilküsten, wie bei uns normal, i. A. durch Längswerke wirksam geschützt, die mehr oder weniger dicht am Ufer verlaufen müssen. Nach diesen Berichten hat der Seebau Formen und Bedeutung des inneren Küstenzerfalls noch nicht erkannt.

Alle Schutzmaßregeln müssen von folgender Erwägung ausgehen. Kliffs sind offene Wunden ohne die schützende Haut der Vegetation. Man kann Plomben und Pflaster daraufkleben, womit man, auch ärztlich gesehen, nur die Vergrößerung der Wunde eine zeitlang aufhält, aber keinen Heilungsvorgang einleitet. Die Heilung kann nur darin bestehen, durch natürlichen Bewuchs Zerfall und Ausfluß abzdämmen und den Verband wieder zur Ruhe zu bringen, indem man Luft und Wasser durch eine Haut (aus Pflanzendecke und Bodenschicht) abhält. Dazu ist natürlich ökologische Eignung der Pflanzendecke erforderlich.

Wir gewinnen hieraus noch eine andere Erkenntnis. Überall da, wo die Vegetation auf abfallendem Gelände fehlt, tritt im nivalen Klima der Arktis Solifluktion ein. Sie ist aber keineswegs direkt klimatisch gebunden, wie man i. A. annimmt, und sicher kein Merkmal polarer oder hochalpiner Landschaft. Solifluktion tritt sofort überall im humiden Klima ein, wo fließendes oder stehend bewegtes Wasser den Absturzschnitt bei Schichtstufen und Reliefstufen wegräumt und dadurch die Ausbildung mit natürlichem Böschungswinkel und damit des Pflanzenschutzes verhindert. Das Zurück-

weichen der Stufen tritt in Form von Steilwänden im humiden und nivalem Klima als Folge des Bodenfließens ein, sowie die Vegetation fehlt. Es ist weiter zu untersuchen, wieweit Ähnlichkeiten von Steilküsten und Geländestufen in bezug auf die Abhängigkeit von der humiden Form der hydrographisch bedingten Solifluktion bestehen.

Dämme, Mauern, Wälle, Wellenbrecher und Bühnen aller Art dienen also selten der Heilung, können nicht vorbeugen, sondern bestenfalls eine zeitlang Schäden verhindern. Hinter ihnen, die keinen sicheren Abschluß gegen die Luftfeuchtigkeit gewähren, schwärt der Prozeß des inneren Zerfalls weiter, zuerst langsam, dann nach Offenliegen neuer Wundstellen schnell, bis das Schutzwerk frei im Wasser liegt und nur noch etwas mechanischen Schutz gewährt. Zu empfehlen sind einfache Maßnahmen: besonders gefährdete Stellen (z. B. Alttertiärton) sind rechtzeitig am Freilegen zu verhindern. Hier können Baumaßnahmen angebracht sein. Unter Umständen muß zwischen aufgerissener Tonoberfläche und Schutzwerk eine Schutzschicht aus Sand und Humus aufgebracht werden. In allen anderen Fällen bestehender Steilkiffs scheint die sicherste Maßnahme zunächst rigoros: Statt Errichtung plombierender Bauten auf Strand und Vorstrand, Abschrägung des gesamten Kliffs bis über den natürlichen Böschungswinkel und Zurücknahme der Fußlinie um einen Betrag von ca. 5—15 m, d. h. über die Linie des Winterhöchstwassers hinaus, ferner sofortige Bepflanzung mit Grassoden, ähnlich wie beim Deichbau. Dadurch verliert der Eigner zunächst sehr viel Land, hat aber die Sicherheit, dann auf lange Sicht gesichert zu sein, denn das Kliff wird tot und wandert nicht mehr, den 10—30 m breiten Landstreifen würde er auch so verlieren. Ähnliches bewirkt die Natur in Buchten, vor denen sich der Strand durch Küstenversatzzufuhr verbreitert. Die vorgeschlagene Maßnahme wird nur in 2 Fällen kein Dauererfolg sein: bei Küstensenkung und bei Abtragung des Strandes selbst durch Abrasion. Diese findet ihre praktische Grenze nach Schaffung einer genügend breiten Abrasionsterrasse, beide Vorgänge sind überdies i. A. erheblich langsamer wirksam als der Kliffrückgang, der an den deutschen Ostseeküsten 1 m im Jahr öfter übersteigt, und zwar nicht nur an offenen Seeküsten, sondern auch tief in geschützten Buchten und Förden, wo kaum Seegang wirkt.

Literatur.

- BRENNER, TH. Mineraljorderternas fysikaliska egenskaper. Fennia 54, 5, Helsingfors 1931.
- BRUCHMÜLLER, —. Der Umbau des Leuchtturms Dornbusch auf der Insel Hiddensee. — Die Bautechnik, 9, S. 156. 1931.
- CORRENS, C. W. Untersuchungen an Tonen. — Sitzber. Abh. Naturf. Ges. Rostock, 3F, 4, 1933.
- GAGEL, C. Geologische Notizen von der Insel Fehmarn und aus Wagrien. III. — Jhrb. Preuß. Geol. La. 32, 2, 1911.
- HEISER, —. Die Verteidigung der Küsten gegen das Meer an Küsten mit und ohne vorwiegende Sinkstoffführung. — Die Bautechnik. 10, 1932.
- . Uferschutzbau an der deutschen Ostseeküste. — Die Bautechnik. 5, 1927.
- MERTZ, E. L. Metoder til Undersøgelse af Lerets fysiske Egenskaber. Danm. Geol. Unders. II, 44, Kopenhagen 1926.
- . Lillebeltsler og Londonclay. — Ebenda II, 51, 1928b.
- . Physikalische Eigenschaften von einigen dänischen Tonen. — Ebenda V, 4, 1928a.
- SCHAPER, G. Vom Bau der zweigleisigen Eisenbahn- und Straßenbrücke über den Kleinen Belt. VDI.-Ztschr. 77, 1933.
- SCHAPER, G. Die Bohr- und Spüleinrichtungen für die Gründung der Pfeiler der neuen Brücke über den Kleinen Belt. Ebenda 1933.
- SEIFERT, R., EHRENBERG, J., TIEDEMANN, B. u. a. Bestehen Zusammenhänge zwischen Rutschneigung und Chemie der Tonböden? Mitt. Preuß. Versuchsanstalt Wasserbau und Schiffsbau. Berlin 1935, Jahrg. 20.
- WASMUND, E. Gewinnung von „Bleichton“ (Walkerde) im alttertiären Tarras am Fehmarnsund. — Schr. Naturw. Ver. f. Schl.-Holst. 20, 1, 1933.
- . Steinfischerei durch Taucher vor der schleswig-holsteinischen Ostseeküste. — Geologie der Meere und Binnengewässer, H. 2, Berlin 1937. (Im Druck.)
- WEDLER, —. Die Eisenbahn- und Straßenbrücke über den Kleinen Belt. Zbl. d. Bauverw. 55, 1935.