

Über die physikalischen Eigenschaften der das Brodtener Ufer aufbauenden Bodenarten und ihre Bedeutung für den Steiluferrückgang und für die Errichtung eines Uferschutzwerks

Von Alfred Dücker

1. Einleitung
2. Kennziffernmäßige Beschreibung der am Aufbau des Kliffs beteiligten Bodenarten:
 - a) Kornverteilung
 - b) Zustandsform
 - c) Wasseraufnahmevermögen
 - d) Scherfestigkeit
3. Der geologische Aufbau des Kliffs und die Lagerungsverhältnisse der Bodenarten
4. Die Stabilitätsverhältnisse des Kliffs
5. Die Veränderlichkeit der Festigkeitswerte
 - a) der Einfluß des Oberflächenwassers
 - b) der Einfluß des Grund- und Sickerwassers
 - c) die Mitwirkung des Klimas
 - d) die Einwirkung des Meeresswassers
 - e) der biologische Einfluß
6. Zusammenfassung und Stellungnahme zu den geplanten Schutzmaßnahmen

1. Einleitung

Durch die Planung einer massiven Uferwand, bzw. eines aus flachgeböschtem Deckwerk bestehenden Uferwerks zum Schutz des Brodtener Ufers, sah sich die Untersuchungsstelle beim Wasser- und Schifffahrtsamt in Lübeck veranlaßt, im Rahmen einer planmäßigen Durchforschung des Gesamtfragenkomplexes über die Ursachen des Steiluferrückgangs auch den Einfluß der physikalischen Eigenschaften der das Kliff aufbauenden Bodenarten quantitativ zu ermitteln. Mit der Durchführung dieser Aufgabe wurde die Bundesanstalt für Wasser-, Erd- und Grundbau — Außenstelle Hamburg — beauftragt.

Für die Untersuchung standen 43 Bodenproben zur Verfügung, die an verschiedenen Stellen aus neu angelegten Schürfgruben in der Steiluferwand in ungestörtem Zustand entnommen wurden. Ihre Größe betrug $10 \times 10 \times 15$ cm bzw. $15 \times 15 \times 25$ cm; sie wurden mit einem Spatel sorgfältig aus der Schurfwand herausgearbeitet, mit einem passenden Holzbehälter umgeben und mit Paraffin luftdicht abgeschlossen. Lediglich dreizehn nichtbindige Bodenproben wurden mit Hilfe eines Stahlzylinders von 12 cm Durchmesser gewonnen, der in den zumeist lockeren Untergrund leicht eingedrückt werden konnte. Von der Untersuchung der gelegentlich im Hangenden des Kliffs auftretenden holozänen Ablagerungen, wie Flachmoortorf, Faulschlamm, Wiesenkalk u. a., wurde Abstand genommen.

Unter Ermittlung insbesondere der Kornverteilung, der Plastizität, des Wasseraufnahmevermögens, der Scherfestigkeit und der Frostbeständigkeit*), sollte im wesentlichen das Verhalten des Geschiebemergels

- a) oberhalb des Wasserspiegels,

*) Die Versuche wurden im wesentlichen nach den in der Bodenmechanik üblichen Vorschriften durchgeführt. Methodische Einzelheiten mögen aus: CASAGRANDE-FADUM (1) oder SCHULTZE-MUHS (4) entnommen werden.

- b) in ruhigem und bewegtem Wasser mit und ohne Steinabdeckung und
- c) nach Errichtung eines Uferschutzwerks
geklärt werden.

2. Kennziffernmäßige Beschreibung der am Aufbau des Kliffs beteiligten Bodenarten

a) **Kornverteilung.** An dem Aufbau des Brodtener Ufers sind im wesentlichen Bodenarten glazigenen bzw. fluvioglazigen Ursprungs beteiligt. Wie aus den in dem Konzentrationsdreieck zusammengefaßten Ergebnissen der Sieb- und Schlämmanalysen hervorgeht (Abb. 1), bestehen sie entweder aus 40 v. H. bis 60 v. H. Siebkorn ($> 0,06$ mm) und 60 v. H. bzw. 40 v. H. Schlämmkorn ($< 0,06$ mm) oder aus 5 v. H. Siebkorn und 95 v. H. Schlämmkorn. Dabei handelt es sich einmal um glazigene, ungleichförmige Ablagerungen der Grundmoräne ($U = 30$ bis 60) („Lehme“ in Abb. 1) und zum anderen um gleichförmige ($U = 5$), als

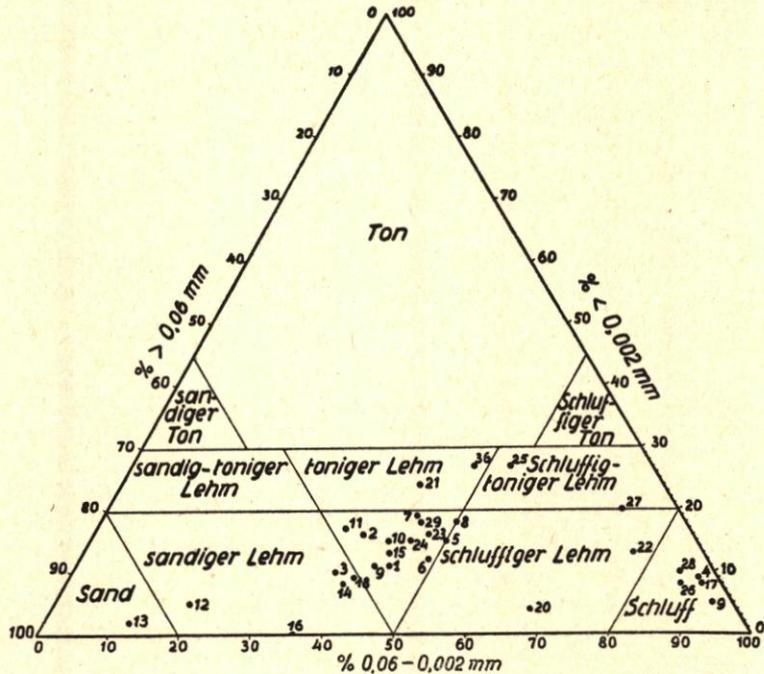


Abb. 1. Die Kornzusammensetzung der Bodenproben Nr. 1 bis 30 aus verschiedenen Teilen des Brodtener Ufers und ihre Einordnung in das Dreieck-Koordinatensystem. Die meisten Böden sind Lehme, wie aus der Häufung der Punkte in dem kleinen Dreieck für „Lehm“ (ohne nähere Bezeichnung) hervorgeht

Staubckenabsätze zu deutende Sedimente („Schluff“ und „schluffiger Lehm“ in Abb. 1). Der durchschnittliche Gesamt-Sandkornanteil aller Bodenarten ist mit etwa 30 bis 35 v. H. zu veranschlagen, wovon etwa 60 v. H. der Feinsand-Kornfraktion $0,2$ bis $0,06$ mm angehören. Innerhalb eines Profils läßt sich beobachten, daß die Sandkornkomponente im großen und ganzen vom Liegenden zum Hangenden zugunsten des Schluffkornanteils abnimmt (Abb. 2), wobei auch der Feinstkornanteil unter 2μ eine leichte Zunahme erfährt. Diese Erscheinung hängt offensichtlich mit der Entstehung des hangenden Geschiebemergels zusammen, auf die weiter unten eingegangen wird.

b) Zustandsform. Der Plastizitätsindex (I_w), der sich aus der Differenz des Wassergehaltes bei der Fließgrenze (F_w) und der Plastizitätsgrenze (P_w)

$$I_w = F_w - P_w$$

ergibt, vermittelt einen Anhaltspunkt über die Zustandsform der Bodenarten. Er schwankt im allgemeinen zwischen 10 und 17. Lediglich der im Bereich der heutigen Verwitterungsvorgänge liegende hangende Geschiebelehm (siehe Abb. 3, Probe Nr. 22) mit einem Plastizitätsindex von 30 und der gelegentlich als Scholle in der Moräne einverleibte Kreidemergel mit

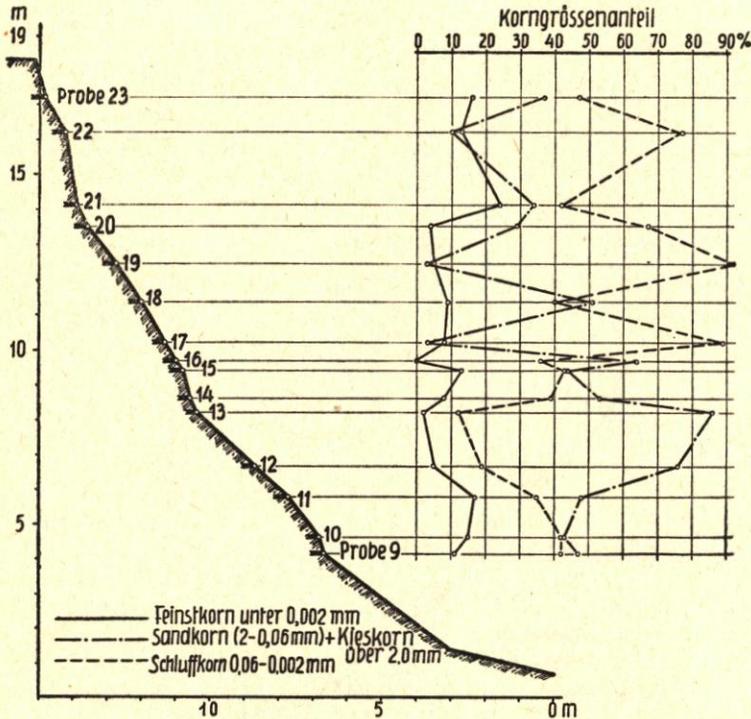


Abb. 2. Der Anteil an Sand, Schluff und Feinstkorn (Ton) innerhalb der Bodenproben aus Station 25,0—50 in profilgerechter Aufeinanderfolge

einer Plastizitätsziffer von 3,7 fallen aus dem allgemeinen Rahmen heraus. Innerhalb des Querprofils läßt sich feststellen, daß die Werte der Fließ- und Plastizitätsgrenze entsprechend der Sandkornabnahme vom Liegenden zum Hangenden hin zunehmen. Dabei ist zu erkennen, daß fast alle Proben eine sehr feste Konsistenz aufweisen, da ihr natürlicher Wassergehalt stets nahe bzw. sogar vielfach unterhalb der Plastizitätsgrenze liegt.

c) Wasseraufnahmevermögen. Die Werte der Wasserbindung (Enslinwert) zeigen, daß die Zeit bis zum Erreichen der im Endzustand aufgenommenen Wassermenge klein ist. Diese Erscheinung läßt darauf schließen, daß Tonminerale mit hohem Wasseraufnahmevermögen mengenmäßig nicht in Erscheinung treten. Vielmehr bewegen sich die angesaugten Wassermengen und die erforderlichen Zeiten zur Erreichung des Endzustands in einem Bereich, der im wesentlichen Mischungen aus Quarz und Kaolinit bzw. Illit gleichkommt (vgl. ENDELL [2]). Selbstverständlich sagt diese Schlußfolgerung nichts aus über die wirkliche Natur der vorhandenen Tonminerale, da die ermittelten Enslinwerte weitgehend von dem hohen Quarzmineralanteil bestimmt werden. Welche Tonminerale daher im einzelnen an dem Aufbau der Brodtener Bodenarten beteiligt und für ihren bodenphysikalischen Charakter ausschlaggebend sind, läßt sich nur auf Grund einer quantitativen röntgenographischen Unter-

suchung feststellen. Der relativ hohe Enslinwert der Probe Nr. 22 (Abb. 3) dürfte vermutlich auf die Anwesenheit neu gebildeter Tonminerale zurückzuführen sein, die mit den Bodenbildungsvorgängen in der Zeit nach dem Rückzug des letzten Eisvorstoßes in Zusammenhang stehen. Dabei zeigt sich, daß eine Abhängigkeit des Wasseraufnahmevermögens von der Kornfeinheit, d. h. von dem Kornanteil unter 2μ nicht besteht. Während zum Beispiel die

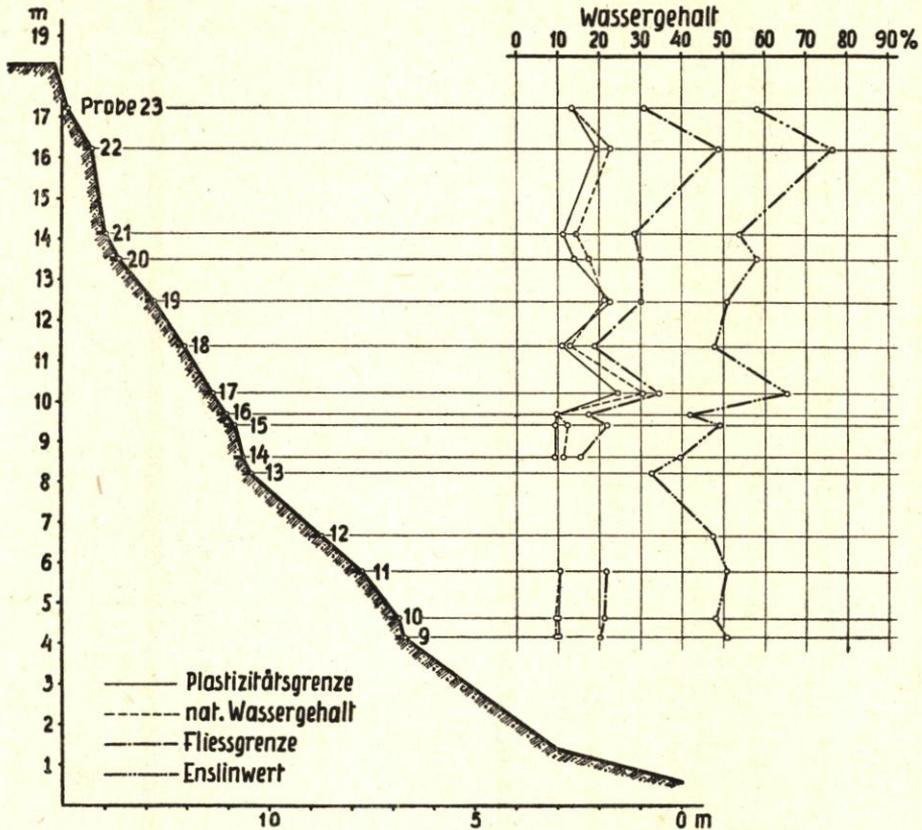


Abb. 3. Der natürliche Wassergehalt der Bodenproben bei Station 25,0—50 in profilgerechter Aufeinanderfolge im Vergleich zum Wassergehalt an der Plastizitätsgrenze und der Fließgrenze sowie zum Enslinwert

Probe Nr. 21 mit einem Kornanteil von 24 v. H. unter 2μ nur einen Wassergehalt bei Sättigung von 54 v. H. aufweist, erreicht die Probe Nr. 22 mit nur 13 v. H. an Korngrößen unter 2μ den höchsten überhaupt gefundenen Enslinwert von rund 76 v. H. Die genetisch verschiedenen Bodenarten dagegen heben sich durch einen für sie charakteristischen Enslinwert voneinander ab. So lassen sich die schluffigen Beckenabsätze trotz ihres geringen, 10 v. H. kaum überschreitenden Kornanteils unter 2μ deutlich von den übrigen Bodenarten unterscheiden. Das gleiche gilt beispielsweise für den Kreidemergel (Probe Nr. 30), der wahrscheinlich auf Grund fast fehlender Tonminerale einen auffällig geringen Wassersättigungswert besitzt, obwohl sein Kornanteil unter 2μ den höchsten Wert (27 v. H.) aller Bodenproben erreicht.

d) Scherfestigkeit. Der für die Standfestigkeit des Steilufers maßgebende physikalische Festigkeitswert des Bodens ist die Scherfestigkeit (τ_0), die sich aus dem normalen Druck (σ) mal dem Tangens des Winkels der inneren Reibung (ϱ) plus Kohäsion (c)

$$\tau_0 = \sigma \cdot \tan \varrho + c$$

zusammensetzt. Über die Größenordnung der Scherfestigkeit unterrichtet die Tabelle 1.

Tabelle 1
Zusammenstellung der Scherfestigkeiten der wichtigsten Bodenarten vom Brodtener Ufer

Probe-Nr.	Kennzeichen	Geologische Bezeichnung	natürl. Wassergeh. v. H.	Raumgewicht t/m ³	Porenziffer ϵ	Winkel d. inneren Reibung	Kohäsion c
24	WLü/1-17/1a	Geschiebemergel	9,5	2,18	0,374	Max. =	Max. =
9	WLü/1-17/1b	Geschiebemergel	10,7	2,21	0,330	28° 30'	0,55
	WLü/1-25/1	Geschiebemergel	9,9	2,15	0,352	Min. =	Min. =
29	WLü/1-21/2	Geschiebemergel	18,8	2,06	0,540	26° 30'	0,1
25	WLü/1-17/2	Kreidemergel	15,4	2,18	0,404	28° 50'	0,75
26	WLü/1-17/3	Mergelsand	21,2	2,06	0,543	Max. =	Max. =
28	WLü/1-21/1a	Mergelsand	20,9	2,04	0,575	29° =	0,45
	WLü/1-21/1b	Mergelsand	24,3	2,00	0,660	Min. =	Min. =
	WLü/1-21/1c	Mergelsand	24,8	2,02	0,673	25° =	0

Wie Abbildung 4 zeigt, schwankt die mit Hilfe der MOHR'schen Spannungskreise festgestellte Kohäsion c für den Geschiebemergel je nach seinem Wassergehalt zwischen 0,1 und

Geschiebemergel
ungestörte Proben Nr.:

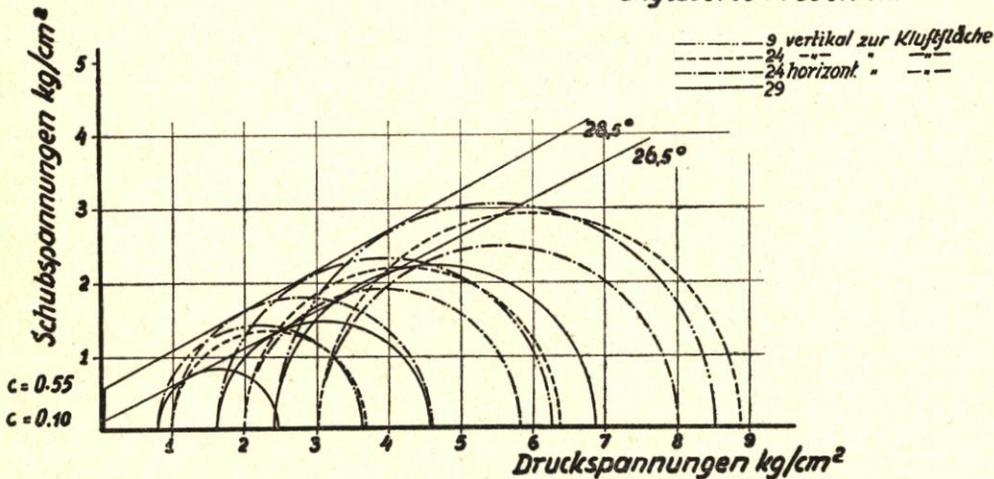


Abb. 4. Die Ergebnisse der dreiaxialen Bestimmungen der Scherfestigkeit (Winkel der inneren Reibung ρ und Kohäsion c) verschiedener Geschiebemergelproben aus dem Liegenden des Brodtener Ufers

0,55 kg/cm². Der Winkel der inneren Reibung bewegt sich zwischen 26 Grad und 28 Grad. Ähnliche Ziffern weisen auch die in dem Geschiebemergelkomplex eingelagerten, bzw. als Scholle auftretenden, schluffigen Staubeckenabsätze und Kreidemergel auf. Dabei ist zu beachten, daß der „natürliche Böschungswinkel“ des Steilufers nicht mit dem Reibungswinkel des Bodens identisch ist, da zum Beispiel der Geschiebemergel infolge seiner Bindigkeit auch noch eine Kohäsion besitzt, die ihrerseits von dem Gefügewiderstand und der Haftfestigkeit der einzelnen Bodenteilchen beherrscht wird.

Die Ursachen der Massenbewegungen müssen mithin auf Faktoren zurückgeführt werden, die eine weitgehende Änderung der Scherfestigkeit im Gefolge haben, durch die die Massen zum Abgleiten gezwungen werden. Da die Scherfestigkeit, und zwar vornehmlich die Kohäsion, weitgehend durch eine Änderung des Bodenwassergehaltes beeinflusst werden kann, erscheint es notwendig, das hydrologische Moment in den Vordergrund der Betrachtungen über die Ursachen des Kliffrückgangs zu stellen.

5. Die Veränderlichkeit der Festigkeitswerte

a) Einfluß des Oberflächenwassers

Mehr oder weniger tief eingefurchte Regenrunsen in den abgestürzten Schuttmassen, ausgewaschene und vertiefte Klüfte in dem Geschiebemergel deuten mit Nachdruck auf eine lineare, meist vertikale Erosionswirkung des oberflächlich abfließenden Wassers hin. Besonders dort, wo ein gesammelter Abfluß am Steilufer in die Ostsee einmündet, wie das am Mühlbachtal nördlich des Dorfes Brodten der Fall ist, oder wie oft mangelhaft verbaute Drainageleitungen zeigen, beobachtet man eine stark rückschreitende Erosion, die zur Entstehung von Einschnitten und tiefen Schluchten führt. Wenn auch dadurch zweifellos ein gewisser Bodenverlust eintritt, so spielt dieser im großen und ganzen gesehen für den Kliffrückgang doch nur eine untergeordnete Rolle, da eine wesentliche Änderung der physikalischen Eigenschaften des Bodens infolge der dynamischen Wirkung des abfließenden Wassers nicht eintritt.

b) Einfluß des Grund- und Sickerwassers

Die abtragende Wirkung des Grundwassers einschließlich des periodisch verstärkt auftretenden Sickerwassers wird durch zahlreiche, an der Kliffböschung zu beobachtende Grundwasseraustritte unterstrichen. Hierbei dürfte das im Raume der Hermannshöhe vorhandene Sandgebiet als das rückwärtige Einzugsgebiet des Grundwassers aufgefaßt werden. Als Grundwasserleiter kommen die im Liegenden des hangenden Geschiebemergels auftretenden sandigen Beckenabsätze in Frage. Da die Lagerungsverhältnisse dieser Schichten starke Stauchungs- und Abscherungserscheinungen aufweisen, sind die damit dem Grundwasser zugewiesenen Wege außerordentlich kompliziert und vielgestaltig. Dies lassen auch die zeitlich und räumlich stark wechselnden Grundwasseraustritte erkennen. Dort, wo das Grundwasser am Steilufer ungehindert ausfließen kann, wie es besonders im Winter durch die Entstehung eines „Eisbartes“ sichtbar wird, werden infolge der hydrostatischen Druckwirkung besonders die sehr feinsandigen Beckenabsätze mehr oder weniger stark ausgespült (Abb. 6). Dadurch entstehen in der Kliffwand Höhlungen, die schließlich bei entsprechendem Ausmaß der Ausschlämmungen einen Absturz der hangenden Schichten im Gefolge haben. Nischenförmige Ein- und Abbrüche sind daher die überaus kennzeichnenden Erscheinungsformen dieser Grundwassererosion.

Werden durch die abgestürzten Schuttmassen die Austritte des Grundwassers vorübergehend abgesperrt, so versickert das Wasser in die zerrütteten, in ihrer Struktur weitgehend gelockerten Bodenmassen. Der vordem wirksam gewesene Belastungsdruck der überlagernden Schichten ist zum größten Teil verschwunden, so daß der Boden eine weitgehende Aufnahmebereitschaft für das Wasser zeigt. Die Folge ist ein allmähliches Durchweichen bis an die Grenze des Fließzustandes, so daß der Boden infolge der erreichten Nullreibung breiartig abgleitet.

Infolge der gestörten Lagerungsverhältnisse der wasserführenden Beckenabsätze tritt aber das Grundwasser immer nur an einigen örtlich begrenzten Stellen des Steilufers aus. In den überaus größten Teilen des Kliffs wird es gestaut, indem es das vorhandene Spaltensystem des Geschiebemergels völlig erfüllt. Hierbei übt das Wasser auf die Seitenflächen der einzelnen Geschiebemergelschollen den vollen hydrostatischen Druck aus, der beispielsweise bei einer Spaltentiefe von 3,0 m auf den Wert von

$$\frac{\gamma_w \cdot h^2}{2} = \frac{1 \cdot 3^2}{2} = 4,5 \text{ t/m}^2$$

ansteigen kann. Zum anderen ist mit der Wasserüberflutung des Spaltensystems eine Raum-

änderung des Bodenmaterials verbunden (Abb. 11), die besonders dort, wo der natürliche Wassergehalt des Geschiebemergels niedrig ist, eine Erweiterung der Klüfte im Gefolge hat. Außerdem wird durch die Wasseraufnahme des in Schollen gegliederten Bodenmaterials die Scherfestigkeit infolge der Herabsetzung der Kohäsion soweit vermindert, daß die Bodenmassen durch ihr Eigengewicht — vermehrt um das Gewicht des das Kluftsystem erfüllenden Wassers — durch den hydrostatischen Druck auf einer zumeist vorgebildeten alten Scherfläche abgleiten werden. Entsprechend der nur langsam eintretenden Wasseraufnahme des Bodens entlang der Kluftflächen erfolgen die Schollenabbrüche gleichfalls nur langsam. Sie machen sich auf der Steilhangoberkante schon lange Zeit vorher durch uferparallel verlaufende Risse und Spalten kenntlich (Abb. 7).

c) Mitwirkung des Klimas

Die zerstörende Tätigkeit des Grundwassers wird noch wesentlich verstärkt durch die Mitwirkung extremer Temperaturschwankungen. Insbesondere die im negativen Temperaturbereich sich abspielenden Vorgänge sind von großem Einfluß auf die morphologische Umgestaltung des Steilufers. Dabei sind zwei grundsätzlich verschiedene Erscheinungen zu unterscheiden:

1. Spaltenfrost. Sofern der Boden als geschlossenes System vom Gefriervorgang erfaßt wird, wie es der Fall sein kann, wenn das in sehr feinen Haarrissen stehende Sickerwasser gefriert, treten mit abnehmender Temperatur immer größer werdende Druckwirkungen auf. Bei -5 Grad C betragen sie bereits über 600 at und erreichen ihren maximalen Wert von 2115 at bei -22 Grad C. Da aber nicht angenommen werden kann, daß ein derart hoher Druck von dem bereits von Natur aus stark zerrütteten Geschiebemergel überstanden wird, kommt es durch Erweiterung des Spaltensystems sehr rasch zu einer Druckentlastung. Die Spaltenfrostwirkung im Geschiebemergel besteht mithin in einem Wettlauf zwischen der Druckzunahme beim Gefriervorgang und der Entlastung des Systems durch die Möglichkeit der Auflockerung des Gefüges. Auf diese Weise können besonders an sehr steilen Uferböschungen ganze Bodenschollen zum Absturz gebracht werden, wie dies zur Zeit des Frostes immer wieder beobachtet wird.

2. Bodenfrost. Wie bereits eingangs gezeigt, besitzen die das Steilufer aufbauenden Bodenarten einen erheblichen Schluffkornanteil, der durchschnittlich wenigstens 25 v. H. bis 30 v. H. beträgt. Damit ist der Boden des Brodtener Ufers für Erscheinungen vorbestimmt, die den sogenannten frostempfindlichen Bodenarten zukommen. Wie aus den in Abbildung 8 dargestellten Gefrierversuchsergebnissen, die an ungestört entnommenen Bodenproben erzielt wurden, hervorgeht, zeigt der gefrorene Boden einen erheblich größeren Wassergehalt als der ungefrorene Boden. Durch den Gefriervorgang werden aus dem Untergrund bzw. aus dem Grundwasser- oder Stauwasserhorizont mehr oder weniger große Wassermengen entnommen und bis in die Höhe der jeweiligen Frostgrenze gefördert, wo sie parallel zur Null-Grad-Isotherme in Form von reinen, millimeter- bis zentimeterstarken Eisschichten und Eislinsen zur Auskristallisierung gelangen. Neben der damit verbundenen Volumenausdehnung des Bodens (Abb. 9) parallel zur Geländeoberfläche, die aber auf die morphologische Umgestaltung des Steilufers von untergeordneter Bedeutung ist, kommt es bei Frostaufgang im Frühjahr zu einer Wasserübersättigung des Bodens, die, wie aus Abbildung 8 hervorgeht, zum Teil weit über die Fließgrenze des Bodens hinausgeht. Dabei wird der Gefügewiderstand und die Haftfestigkeit der einzelnen Bodenteilchen völlig aufgehoben, so daß die Standfestigkeit des Bodens mehr oder weniger verschwindet. Entsprechend der Reibung in einer zähen Flüssigkeit strebt der Boden einem Gleichgewichtszustand zu, der praktisch einem natürlichen Böschungswinkel von nahezu Null gleichkommt. Die Folge ist ein Abfließen der Bodenmassen, das verheerende Ausmaße annehmen kann. Es kommt dabei zur Entstehung von Schlammströmen, die — vergleichbar mit den Solifluktionserscheinungen arktischer Gebiete — sich hangabwärts wälzen und als Muren den Kliffuß völlig unter sich begraben, wie dies Abbildung 10 in eindrucksvoller Weise erkennen läßt.

Die Betrachtungen zeigen also, daß das Grundwasser infolge seiner hydrostatischen und kryostatischen, den Strukturverband des Bodens auflockernden Druckwirkung und infolge der

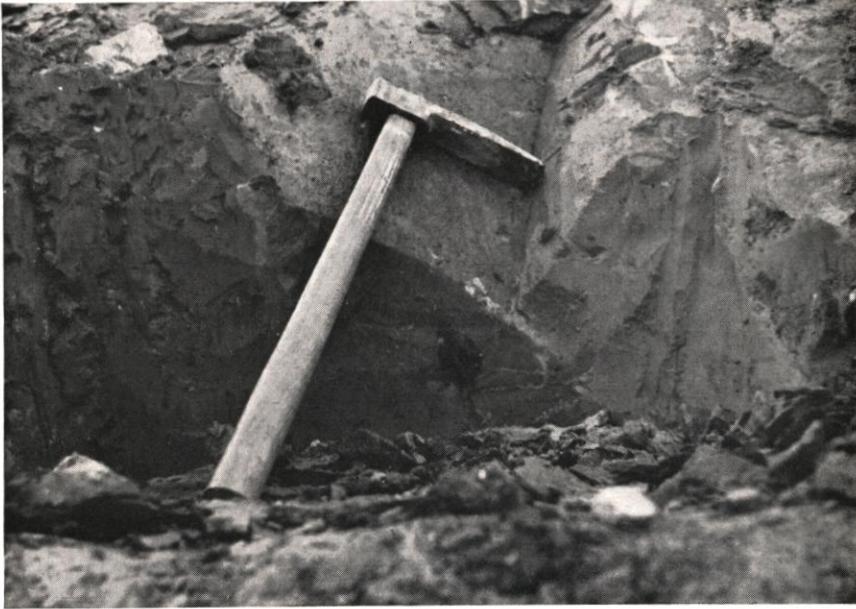


Abb. 5 (oben). Als Kluft- und Gleitfläche ausgebildete Grenz-Mergelsandscholle (rechts) und Geschiebemergel (links) im Profil bei Station 25,0—50

Aufn. Dücker 10. 10. 1949

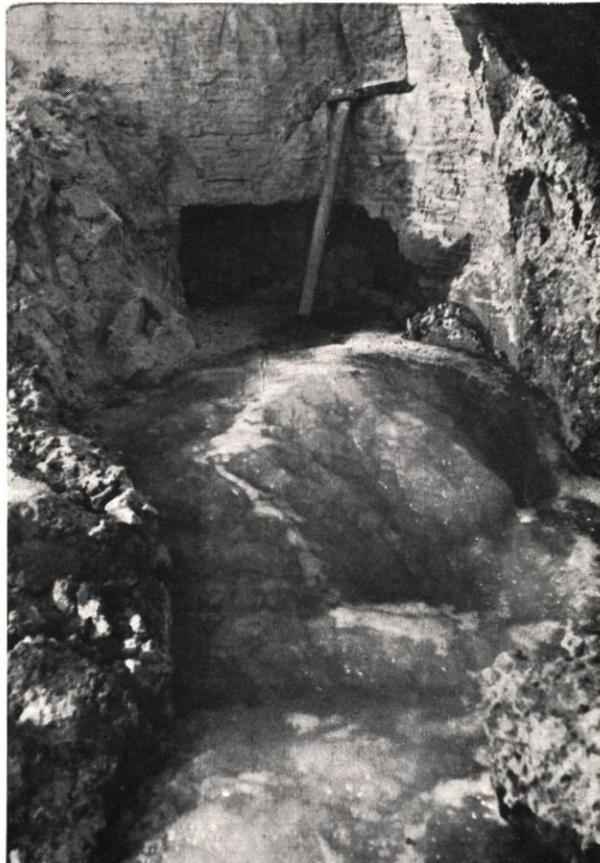


Abb. 6 (rechts). Aus der Kliffwand austretendes Grundwasser, das infolge der Auspülung feinkörniger Bodenteilchen zur Bildung einer Höhlung führt, die bei genügender Größe zu nischenartigen Abbrüchen Veranlassung gibt

Aufn. Dücker 28. 1. 1950



Abb. 7 (links). Auf einer vorgezeichneten Gleitfläche gelöste und im Abrutschen befindliche Bodenscholle

Aufn. Dücker 28. 1. 1950

Abb. 10 (unten). Über den Vorstrand gewälzte Schlamm-Mure bei Frostaufgang, die sich infolge übermäßig starker, durch den Gefriervorgang bedingter Wasseranreicherung bildete

Aufn. Dücker Februar 1950



mit der Wasseraufnahme verbundenen Verminderung der Kohäsion und Erhöhung des Eigengewichtes des Bodens ein wichtiger und wesentlicher Faktor des durch Schollenabbrüche gekennzeichneten Steiluferrückganges ist.

d) Einwirkung des Meereswassers

Würde man sich das Brodtener Ufer nicht als Steilufer an der See, sondern als tiefen Einschnitt in einer Moränenlandschaft vorstellen, so würde eine unter 45 Grad hergestellte Böschung in verhältnismäßig kurzer Zeit in ihren eigenen Schuttmassen ertrinken. Nach Herausbildung einer flachen, natürlichen Böschung käme der Brodtener „Einschnitt“ zur Ruhe. Durch die stark exponierte Lage des Brodtener Ufers innerhalb der Lübecker Bucht wird jedoch durch den Einfluß des Meeres eine natürliche Böschungsbildung verhindert.

Dabei kann die Ostsee nur dann einen unmittelbaren Einfluß auf die Morphologie des Steilufers nehmen, wenn durch stürmische Winde Wasserstandserhöhungen hervorgerufen werden, die zu einer Überflutung des Strandes und damit zu einer Einwirkung auf die Kliffwand führen. Stürmische, zumeist aus Nordost und Ost kommende Winde verursachen einen erheblichen Wasserstau, dessen gestaltender Einfluß auf die Morphologie des Steilufers sich

- a) in einer Materialverfrachtung und
- b) in einer Abrasionswirkung

geltend macht. Hierbei werden zunächst die am Kliffuß angereicherten Absturzmassen von der Brandung angegriffen, aufgearbeitet und durch den Küstenversatzstrom abtransportiert. Die Geschwindigkeit, mit der das abgestürzte Schuttmaterial fortgeräumt wird, ist abhängig von der Wasseraufnahmefähigkeit, der Durchlässigkeit und dem Ausmaß der Zerstörung und Vernichtung der ursprünglichen Struktur und Textur der Bodenmassen. Größere, zusammenhängende Geschiebemergelschollen vermögen der Einwirkung der Brandung längere Zeit hindurch standzuhalten. Kleinere Schollen und Bruchstücke werden in der Brandung zu einzelnen Geschiebemergelgeröllen umgeformt und nach und nach abgerollt. Je weitgehender aber das ursprüngliche Gefüge des abgerutschten Bodens durch die Faktoren der Atmosphärien zerstört ist, desto schneller wird der Boden von der angreifenden See erfaßt und fortgeräumt, so daß in verhältnismäßig kurzer Zeit der gewachsene Geschiebemergel des Kliffußes — völlig reingewaschen — von der vollen Wucht der Brandung getroffen wird. Es entstehen dann meist glatte, nach oben immer steiler werdende Abrasionsflächen, die das innere gleitflächenstruierte Gefüge des Geschiebemergels deutlich hervortreten lassen. Dabei bilden sich gelegentlich auch Schliffhohlkehlen heraus, die aber nur selten größeren Umfang erreichen, so daß eine den Absturz fördernde Unterhöhlung des Kliffußes nicht stattfindet. Dagegen weisen die durch Auskolkung lockerer Bodenarten (Sand und Schluff) und einzelner Geschiebe und Findlinge entstandenen Höhlungen, die man als „Schwapplöcher“ bezeichnet, auf eine nennenswerte morphologische Folgeerscheinung der Brandung hin. Sie können beträchtliche Ausmaße erreichen, indem sie oft mehrere Meter tief in das Steilufer hineinragen und dabei zum Nachbrechen der hangenden Schichten führen. Trotzdem kann aber gesagt werden, daß der unmittelbare Einfluß einer Wasserstandserhöhung in der Lübecker Bucht sich in der Hauptsache auf die Forträumung des abgestürzten Bodens beschränkt und somit die Voraussetzungen für ein weiteres Nachbrechen neuer Massen schafft, während der unmittelbare Einfluß auf den Kliffrückgang nur gering zu sein scheint.

Eine besondere Bedeutung kommt der Brandungswirkung am submarinen Grund zu. Wie entsprechende Versuche gezeigt haben (Abb. 11), wird ein vom Wasser bedeckter Geschiebemergel mit einem Wassergehalt etwas unterhalb der Plastizitätsgrenze in seiner oberflächennahen Schicht unter Volumenzunahme völlig durchtränkt und durchweicht. Eine Bestätigung dieses Versuchsvorganges zeigen die Beobachtungen, die davon berichten, daß die aus dem Geschiebemergel bestehende Abrasionsfläche eine schmierige, schlammige Oberfläche aufweist. Sobald durch stürmische Nordostwinde das Wasser in stärkere Bewegung gerät, wird die oberflächlich erweichte Schicht der Abrasionsfläche angegriffen, aufgearbeitet und fortgeführt. Durch die Aufwirbelung der feinsten Tonteilchen nimmt das Wasser eine braungraue Färbung an, die sich als mehr oder weniger breites Band vor dem Ufer kenntlich macht. Das Ergebnis dieser

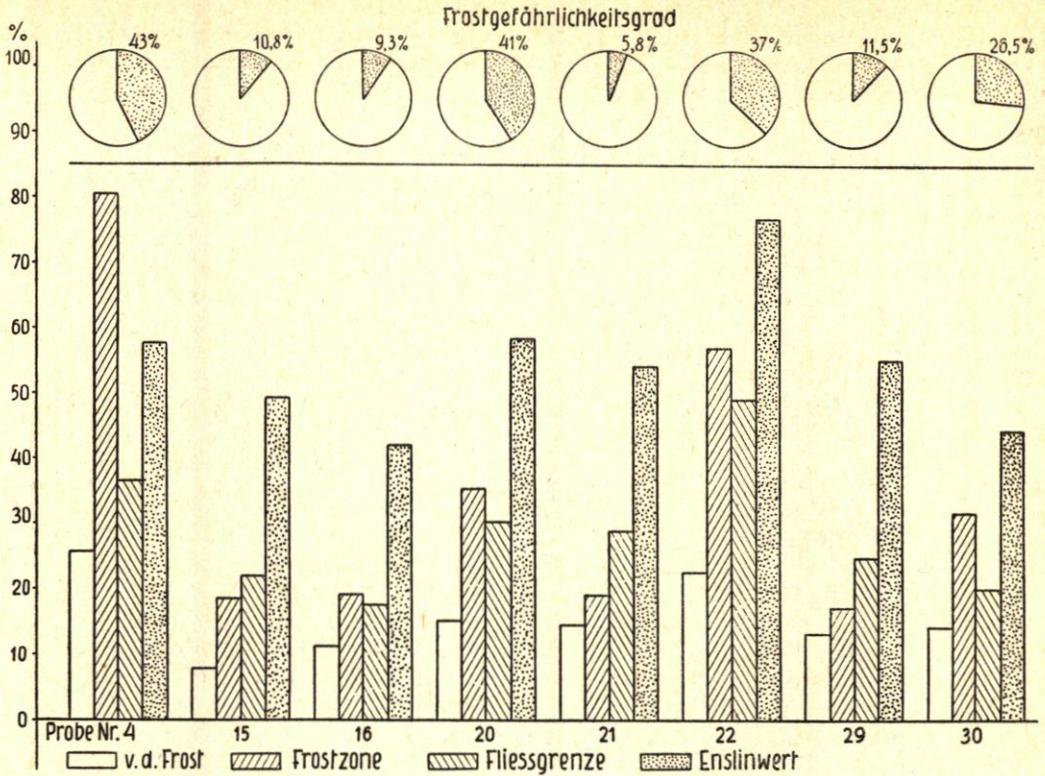


Abb. 8. Ergebnisse der Gefrierversuche mit ungestörten Bodenproben (Nr. 4, 15, 16, 20, 21, 22, 29, 30). Gegenüberstellung des natürlichen Wassergehaltes (vor dem Gefrieren) und des durch Frostwirkung erhöhten Wassergehaltes (nach dem Gefrieren) mit dem Wassergehalt an der Fließgrenze und dem Enslinwert.

$$\text{Frostgefährlichkeitsgrad } F \% = \frac{\text{Frosthebungsbeitrag} \cdot 100}{\text{Frosteinbringungsbeitrag}}$$

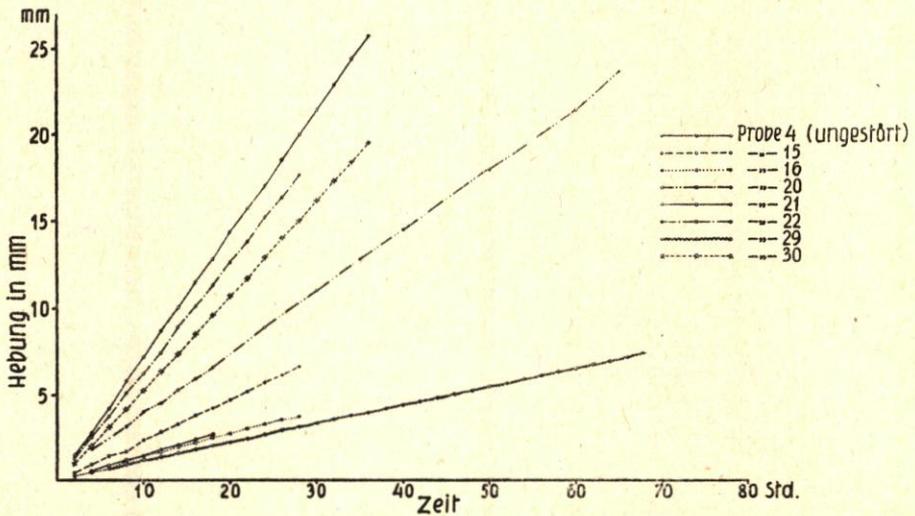


Abb. 9. Frosthebungsverlauf ungestörter Bodenproben aus dem Brodtener Ufer (Nr. 4, 15, 16, 20, 21, 22, 29, 30)

submarinen Abrasion ist mithin die Freilegung neuer Oberflächen des Geschiebemergels, die damit erneut der Wasseraufnahme zugänglich und der Erweichung ausgesetzt sind. Mit der erfolgten Tieferlegung des Unterwasserstrandes geht ein Vorrücken der Mittelwasserstrandlinie gegen das Ufer im gleichen Maße einher.

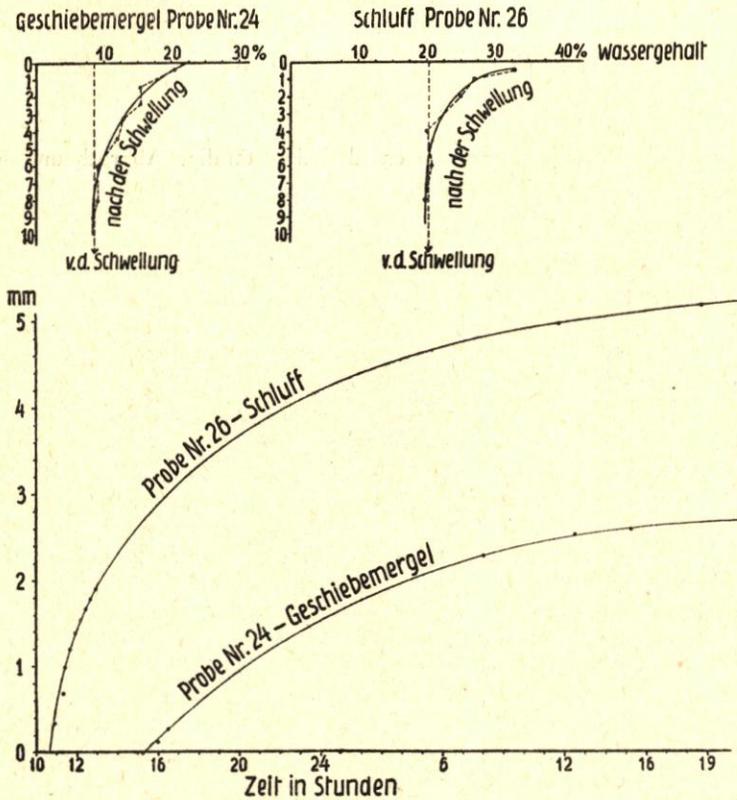


Abb. 11. Zeitlicher Verlauf der Schwellung des von Wasser überfluteten Geschiebemergels und Schluffes (unten) sowie Änderung des Wassergehaltes innerhalb der Bodenproben von Zentimeter zu Zentimeter (oben)

Neben der flächenhaften, tangentialen Abtragung des unmittelbar an die Uferlinie sich anschließenden Teiles des Meeres kommt es in der ufernahen Zone durch eine stärkere Erosionswirkung der Brandung, unterstützt durch die hydrostatische Druckwirkung in den spaltenreichen Schwächezonen des schollenartig zerstückelten Geschiebemergels, zur Herausbildung örtlich begrenzter submariner Kliffs von etwa einem halben Meter Höhe. Durch die Sogwirkung der rückströmenden Brandungswelle wird dabei das Kluftsystem des Geschiebemergels morphologisch besonders scharf markiert und hervorgehoben.

e) Der biologische Einfluß

Der biologische Einfluß auf die Abtragung des Steilufers ist nur gering. Es sei jedoch in diesem Zusammenhang auf die Mitwirkung des Menschen hingewiesen, soweit sich diese auf die Steinfischerei und Steinentnahme bezieht. Während die am Strand und in der ufernahen Zone vorkommenden großen Gesteinsblöcke als Wellenbrecher wirken und damit dem Steilufer einen gewissen Schutz bieten, bilden die auf der submarinen Abrasionsfläche liegenden Steine einen schützenden Panzer gegen die Erweichung und Abtragung des Geschiebemergels, womit die tangentielle Erosion der Plateauoberfläche weitgehend verhindert, zumindest aber

beträchtlich verzögert wird. Andererseits sei aber erwähnt, daß die in der Strandzone vorkommenden kleineren Geschiebe und Gerölle sehr leicht von der Brandung erfaßt werden und dabei, gegen die Uferwand geschleudert, aktiv die Abrasionswirkung der Brandung unterstützen und erhöhen.

6. Zusammenfassung und Stellungnahme zu den geplanten Schutzmaßnahmen

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, daß der ständige Abbruch und Rückgang des Brodtener Ufers nicht als eine unmittelbare Folge der physikalischen Eigenschaften des Bodensmaterials anzusehen ist. Die Bestimmungen der Scherfestigkeit lassen erkennen, daß das Steilufer unter den gegebenen Bedingungen mit einem hohen Grad an Sicherheit als standfest angesprochen werden kann, trotz der geringen plastischen Eigenschaften und der verhältnismäßig hohen Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens. Von einem „inneren Zerfall“ der Küste, wie es die Hypothese von WASMUND (8) fordert, kann im Falle des Brodtener Ufers nicht gesprochen werden. Erst wenn durch wirksame Faktoren, zu denen insbesondere die örtlichen geologischen und hydrologischen Gegebenheiten gehören, die physikalischen Eigenschaften des Bodens sich ändern, sind die Voraussetzungen für den Steiluferrückgang erfüllt. Dabei ist durch die Schub- und Druckwirkung des vorrückenden Inlandeises auf den Untergrund ein stark zerstückelter Grundmoränenkomplex geschaffen worden, der Kluft-, Scher- und Absonderungsflächen aufweist, die mit etwa 50 Grad bis 80 Grad zur See hin einfallen. Dem Oberflächen-, Sicker- und Grundwasser sind damit Wege gewiesen, die zu Ausspülungen, Unterhöhungen, hydrostatischen Druckwirkungen und zu einer Verminderung der Kohäsion führen. Hinzu kommen die jahreszeitlich bedingten Erscheinungen des Spalten- und Bodenfrostes, die zu einer erheblichen Auflockerung des Bodengefüges und damit zu einem Abgleiten des Bodens Veranlassung geben. Die abgeflossenen und abgestürzten Bodenmassen werden durch den Küstenversatzstrom mehr oder weniger rasch fortgeräumt. Voraussetzungen hierfür sind sowohl die stark exponierte Lage des Brodtener Ufers innerhalb der Lübecker Bucht als auch durch Nordostwinde bedingte Wasserstandserhöhungen. Dabei kommt der Brandungswirkung am submarinen Grund erhöhte Bedeutung zu, durch die die Mittelwasserstrandlinie gegen das Ufer vorrückt. Diese Erscheinung ist für den Bestand des zum Schutz des Brodtener Ufers geplanten Bauwerks von ausschlaggebender Bedeutung. Auf Grund der vorliegenden Bohrungen kann damit gerechnet werden, daß auf der gesamten Uferstrecke der Baugrund aus Geschiebemergel besteht. Durch seinen niedrigen, nahe der Plastizitätsgrenze liegenden Wassergehalt besitzt er eine sehr feste Konsistenz, so daß der Baugrund als sehr gut anzusehen ist. Bei einer Belastung des Untergrundes durch eine Uferschutzmauer von etwa 2,0 m Breite und 3,0 m Höhe wäre bei einem geschätzten E-Wert von 400 bis 600 mit Setzungen von 3 bis 5 mm zu rechnen, die bereits während der Errichtung des Bauwerks auftreten. Somit wären gegen die Errichtung einer massiven Uferwand grundsätzlich keine Bedenken zu erheben. Es ist jedoch zu berücksichtigen, daß infolge der submarinen Abrasion der Brandung die vorrückende Mittelwasserstrandlinie den Fuß der Ufermauer im Laufe der Zeit bloßlegt, auskolkt und schließlich zum Einsturz bringt. Die gleichen Bedenken sind gegen die Errichtung eines aus flachgeböschtem Deckwerk mit wasserseitiger Spundwand bestehenden Uferwerks zu erheben, bei dem die Spundwände durch die Tieferlegung der Schorre in den Bereich der Unterspülung gelangen. In welchem Zeitraum diese Zerstörungen eintreten können, läßt sich jedoch nicht sagen, da genaue Beobachtungen über das Ausmaß der Brandungswirkungen am submarinen Grund fehlen.

Schriftenverzeichnis

1. CASAGRANDE und FADUM: Notes on Soil Testing for Engineering Purposes. — Nr. 8, Graduate School of Engineering Harvard University 1940, übersetzt von P. Siedek, Selbstverlag der Bundesanstalt für Wasser-, Erd- und Grundbau, Hamburg 1949.
2. ENDELL, K.: Die Quellfähigkeit der Tone im Baugrund und ihre bautechnische Bedeutung. Die Bautechnik, H. 19, Berlin 1941.
3. GROSCHOFF, P.: Physikalische Bedingungen des Kliffrückganges an der Kieler und Lübecker Bucht. — Kieler Meeresforschungen 1, S. 335—342, Kiel 1936.
4. SCHULTZE, E. und MUHS, H.: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten, Springer-Verlag, Berlin 1950.
5. TAYLOR, D. W.: Fundamentals of Soil Mechanics, John Wiley & Sons, II. Auflage, S. 459, New York 1949.
6. TERZAGHI, K. und PECK, R. B.: Soil Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons, Inc., New York 1948.
7. TERZAGHI, K.: Theoretical Soil Mechanics, II. Auflage, John Wiley & Sons, Inc., New York 1944.
8. WASMUND, E.: Chemisch-physikalische Daten der Alttertiärtonne um Fehmarn und der ‚innere Küstenzerfall‘. Kieler Meeresforschungen 1, S. 243—263, Kiel 1936.