

Interdisziplinäre Erforschung des Deichvorlandes im Forschungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“

Von HEIE F. ERCHINGER, HANS-GERD COLDEWEY und CORNELIUS MEYER

Zusammenfassung

Die große Bedeutung des Deichvorlandes (ostfriesisch: Heller) für den Küstenschutz, zunehmende Abbrüche sowie die angestrebte Aufgabe seiner Bewirtschaftung und Pflege im „Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer“ waren Anlaß für die Durchführung des interdisziplinären, durch den BMFT geförderten KFKI-Forschungsvorhabens „Erosionsfestigkeit von Hellern“. In mehreren Teilprojekten haben Küsteningenieure, Bodenkundler und Botaniker von 1989 bis 1994 umfangreiche Untersuchungen durchgeführt und für Handlungsempfehlungen wichtige Ergebnisse ermittelt.

Der zunehmende Hellerabbruch konnte als Folgeerscheinung häufigerer Sturmfluten und höherer Tidehochwasserstände erklärt werden. Für unterschiedlich hohe Lahnungen konnten die erzielte Seegangsdämpfung, die sich einstellende Auflandung und die Verringerung des Kanntenabbruchs quantifiziert werden. In einem Seewasserversuchskanal wurden die Auswirkungen einer langfristigen Strömungsbelastung auf die Helleroberfläche und die Wirkung des Seegangs auf die Hellerkante ergründet.

Auf verschiedenen Hellerflächen mit unterschiedlichem Bodenaufbau konnte der Einfluß von Begrüppung und unterschiedlich intensiver Beweidung auf die Sedimentationsraten und deren Kornzusammensetzung, auf Durchlüftung und Aggregatstabilität des Bodens, auf Entwicklung des Wurzelsystems sowie die Verteilung der unterirdischen Biomasse und damit auf den Bodenwiderstand festgestellt werden. Des weiteren wurde auch die Zunahme der Treibselmenge, die sich bei zurückgehender Hellernutzung einstellt, ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, daß einerseits den Managementwünschen des Naturschutzes bei breiten Hellern weit entgegen gekommen werden kann, daß aber andererseits die Entwässerung des Deiches und des deichnahen Vorlandstreifens durch Begrüppung und Pflege-Nutzung sowie die Sicherung der Hellerkante im Interesse des Küstenschutzes nicht behindert werden dürfen.

Summary

The multi-disciplinary KFKI-research project „Erosion resistance of marsh lands“ was funded by the German Ministry for Research and Technology. Basis of the project is the growing importance of the marshy dike foreshore (Heller) for coastal protection and the increasing erosion in this area provided the necessary challenge for coastal zone management in the lower Saxony Wadden Sea National Park and triggered the investigation. Coastal engineers, geologists and biologists carried out extensive investigations between 1989 and 1994. The results led to important recommendation for management.

Increasing erosion of the marsh land has been attributed to the rising frequency of storm tides and high water levels. The effect of reclamation dike elevation on wave energy dissipation, the resulting sedimentation and reduction of erosion was quantified. The long-term current load on a marshy surface and the effect of waves on the marsh land edge was investigated in a sea water experimental flume.

For marsh land surfaces with various soil structures the effect of drainage ditches and different types of live stock utilization on sedimentation rates and its grain distribution, on aeration and soil stability, on root development, the sub-soil biomass and, subsequently, on soil resistance was defined. Moreover, the increase of flotsam volume with decreasing utilization of marsh land was determined.

Results show, that the conservation and protection aspect in coastal zone management could be observed for wide marsh foreshores. On the other hand, neither drainage of the dike and its immediate foreshore through ditches nor maintenance/utilization and the protection of the marsh land edge must be neglected for reasons of coastal protection.

Inhalt

1. Einleitung und Problemstellung	2
2. Gliederung des Forschungsvorhabens	4
2.1 KFKI-Projektgruppe	4
2.2 Teilprojekt „Koordination und Logistik, Naturmessungen, hydrologische und morphologische Untersuchungen“	4
2.3 Teilprojekt „Bodenkundliche und bodenphysikalische Untersuchungen“	5
2.4 Teilprojekt „Botanische Untersuchungen“	5
2.5 Teilprojekt „Modellversuche im Seewasserversuchskanal“	5
3. Die Untersuchungsgebiete	5
3.1 „Versuchsfelder Leybucht“	6
3.2 Buscherheller	10
3.3 Neßmerheller	11
4. Tidehochwasserstände, Sturmfluten und Überflutungshäufigkeiten	11
5. Sedimentation auf Hellern und Lahnungsfeldern	14
5.1 Sedimentation auf Hellern am Beispiel der „Versuchsfelder Leybucht“	14
5.2 Auflandung auf Lahnungsfeldern bei Lahnungen unterschiedlicher Höhe	17
6. Belastung und Abbruch von Hellerkanten	19
6.1 Strömungsmessungen	19
6.2 Seegangsmessungen	21
6.3 Abbruch der Hellerkanten	22
7. Bodenkundliche und bodenphysikalische Untersuchungen	24
7.1 Einflüsse von Geländehöhe, Begrüppung, Beweidung und Bodenart auf die Entwicklung der Hellerböden	24
7.2 Bodenphysikalische Parameter	27
8. Botanische Untersuchungen	30
8.1 Pflanzensoziologische Aspekte	30
8.2 Unterirdische Biomasse und ihre Abhängigkeit von der Beweidung der Heller	32
8.3 Einfluß der unterirdischen Biomasse auf den Bodenwiderstand der Heller	32
8.4 Treibsel	36
9. Untersuchungen im Seewasserversuchskanal	36
9.1 Strömungsbelastung	36
9.2 Wellenbelastung	39
10. Folgerungen für Handlungsempfehlungen	40
11. Verzeichnis der Berichte und Veröffentlichungen	42
11.1 Schlußberichte	42
11.2 Weitere Berichte und Veröffentlichungen	42
11.3 Schriftenverzeichnis (Auswahl)	43

1. Einleitung und Problemstellung

Die zwischen der MThw-Linie und dem Deich- bzw. Dünenfuß auf Teilen der Inselrückseiten gelegenen oder den Deichen an der Festlandküste vorgelagerten Salzwiesen werden in Ostfriesland als „Heller“ bezeichnet. Sie sind für viele Tier- und Pflanzenarten als einmaliger Lebensraum von großer ökologischer Bedeutung und stellen damit einzigartige und besonders schützenswerte Biotope dar. Darüber hinaus haben die Heller seit jeher eine große Bedeutung für den Küstenschutz und somit für die Sicherheit des Landes. Im Übergangsbereich vom Meer zum Land wird auf diesem – vielfach künstlich geschaffenen – Kulturland

durch flächenhafte Brandung bereits ein Teil der Seegangsenergie umgewandelt und somit die hydrodynamische Deichbelastung durch Wellenangriff beträchtlich reduziert. Die Gefahr des Wellenüberlaufs und der Deichzerstörung bei Sturmfluten wird somit erheblich herabgesetzt. Darüber hinaus ist das Deichvorland hinsichtlich erforderlicher Materialentnahmen oftmals unverzichtbar für die Deichunterhaltung, insbesondere für die Beseitigung von Sturmflutschäden.

Für den Erhalt einer festen Helleroberfläche mit einer kurzen, geschlossenen Grasnarbe hielt man bisher eine Beweidung für am besten geeignet. Allerdings ist im Interesse des Naturschutzes die Nutzung der Heller im letzten Jahrzehnt hinsichtlich des Flächenanspruchs und der Nutzungsintensität beträchtlich reduziert worden. Die im „Nationalpark Niedersächsisches Wattenmeer“ angestrebte völlig natürliche Entwicklung der Salzwiesen mit Aufgabe jeglicher Bewirtschaftung und Begrüppung führt zwangsläufig zu Konflikten zwischen Küsten- und Naturschutz. Die neuen Forderungen lassen die Frage aufkommen, ob Änderungen der Pflege und Bewirtschaftung in Hinblick auf die Erhaltung und die Entwicklung der Heller grundsätzlich vertretbar ist.

Zusätzliche Brisanz erhielt diese Thematik durch die Tatsache, daß seit Mitte der 80er Jahre an vielen Stellen ein verstärkter Hellerabbruch festgestellt wurde. Dies betrifft vor allem die Hellerkante des Buscherhellers in der Leybucht, die nach jahrzehntelanger Stabilität plötzlich abzubrechen begann, sowie den Neßmerheller, der vor allem im Westteil außerordentlich starken Abbrüchen unterlag.

Um die Zusammenhänge zu erforschen und die komplexen Fragestellungen zu klären, die sich aus einer Änderung der Bewirtschaftung von Vorlandflächen und den damit verbundenen Konsequenzen ergeben, wurde 1988 das interdisziplinäre Forschungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“ eingerichtet. Konkrete Ziele dieses umfangreichen Forschungsprojektes sollten sein, die Belastung der Hellerkante und -oberfläche zu ermitteln, Abbruch- und Sedimentationsvorgänge zu erfassen, die Wirksamkeit von Sicherheitsmaßnahmen zu bewerten sowie die Wirkung von Begrüppung und Beweidung auf die Boden- und Pflanzenentwicklung zu klären und deren Einfluß auf die Erosionsfestigkeit von Hellern zu ergründen. Die natürlichen und anthropogenen Einflußfaktoren, die die Festigkeit der Salzwiesen beeinflussen, sollten dabei im wesentlichen auf der Basis von Vor-Ort-Messungen auf repräsentativen Salzwiesenflächen, aber auch unter kontrollierten Bedingungen im Strömungs- und Wellenkanal ermittelt werden. Damit sollten schließlich grundlegende Beurteilungs- und Entscheidungskriterien gewonnen werden, die künftig als Grundlage für Empfehlungen für die Sicherung und Pflege sowie das Management des Deichvorlandes – vor allem im Interesse des Küstenschutzes – unter Beachtung der ökologischen Faktoren verwendet werden.

Die Finanzierung dieses Projektes des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI), an dem u.a. Küsteningenieure, Bodenkundler und Botaniker beteiligt waren, durch den Bundesminister für Forschung und Technologie (BMFT) hat es ermöglicht, das Forschungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“ durchzuführen. Dafür sei den befürwortenden und bewilligenden Personen und Stellen gedankt.

Diese Veröffentlichung wurde auf Grundlage des Verbundberichtes und der Schlußberichte der einzelnen Teilprojekte erstellt. Es versteht sich von selbst, daß in einem solchen Artikel nicht sämtliche Aspekte und Ergebnisse eines derartig umfangreichen und breit angelegten Projekts wiedergegeben und diskutiert werden können. Für weitergehende Informationen und eine intensivere Auseinandersetzung mit den Ergebnissen des Projekts stehen u.a. auch die Berichte der Teilprojekte und der auf deren Grundlage angefertigte Verbundbericht zur Verfügung (siehe Abschnitt 11). Diese liegen dem BMFT, dem KFKI und der Technischen Bibliothek Hannover vor.

2. Gliederung des Forschungsvorhabens

2.1 KFKI-Projektgruppe

Für das Forschungsvorhaben hat das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KFKI) eine interdisziplinäre Projektgruppe berufen. Diese setzte sich wie folgt zusammen:

- Dipl.-Ing. H. F. ERCHINGER LBD (Obmann), Norden;
- Prof. Dr.-Ing. A. FÜHRBÖTER †, Braunschweig;
- Prof. Dr. H. GEBHARDT, Oldenburg;
- Dipl.-Ing. V. PETERSEN ORBR, Husum, später Kiel;
- Dipl.-Ing. G. RAGUTZKI, Norderney, und
- Prof. Dr. D. J. VON WILLERT, Münster.

Aufgrund der komplexen Thematik und der unterschiedlichen Untersuchungsschwerpunkte empfahl sich die Bildung folgender Teilprojekte:

- Koordination des Projektes sowie Logistik, hydrologische und morphologische Untersuchungen durch das Staatliche Amt für Insel- und Küstenschutz, Norden (StAIK) mit LBD Dipl.-Ing. H. F. ERCHINGER (Obmann), Dipl.-Ing. H.-G. COLDEWEY, Dipl.-Ing. F. SCHMIDT (bis 12/91) und Dr. C. MEYER (ab 3/92).
- Bodenkundliche Untersuchungen am Fachbereich Biologie der Universität Oldenburg mit Prof. Dr. H. GEBHARDT (Obmann) und Dr. U. FRANK.
- Bodenphysikalische Untersuchungen am Niedersächsischen Landesamt für Ökologie, Forschungsstelle Küste, Norderney, mit Dipl.-Ing. G. RAGUTZKI und Dipl.-Geol. O. OTTEN (bis 1990).
- Botanische Untersuchungen am Institut für Angewandte Botanik der Westfälischen Wilhelms Universität Münster mit Prof. Dr. D. J. VON WILLERT (Obmann), Dr. F. A. AUSTENFELD und Dr. W. STEINKE.
- Modelluntersuchungen im Seewasserversuchskanal (Hydromechanik und Hydraulik) durch das Leichtweiß-Institut der TU Braunschweig mit Prof. Dr.-Ing. A. FÜHRBÖTER, Dr.-Ing. H.-H. DETTE, Dr.-Ing. H. MANZENRIEDER, Dr.-Ing. M. SCHULZE (ab 9/90), Dr.-Ing. H. H. WITTE (bis Ende 89) und Dipl.-Ing. U. KOTZBAUER (bis 12/91).

2.2 Teilprojekt „Koordination und Logistik, Naturmessungen, hydrologische und morphologische Untersuchungen“

Neben der Koordination der Teilprojekte und der Bereitstellung der Infrastruktur wurden morphologische Untersuchungen durchgeführt und hydrologische Daten erfaßt. Schwerpunkte lagen u. a. auf der Messung von Wasserständen, des Seeganges, von Strömungsgeschwindigkeiten sowie der Erfassung von Veränderungen der Hellerkanten und -oberflächen und der Sedimentation auf den Hellerflächen.

Ziele dieser Messungen waren u. a.,

- die hydrodynamische Belastung der Hellerkante und -oberfläche vor Ort zu erfassen,
- die Zusammenhänge zwischen Watthöhe, Abbruchrate, Seegangsbelastung und Schutzwirkung von Lahnungen verschiedener Höhe zu ergründen und
- die Auflandungsvorgänge in Lahnungsfeldern zu untersuchen.

2.3 Teilprojekt „Bodenkundliche und bodenphysikalische Untersuchungen“

Aufgabe dieses Teilprojektes war es, die vorkommenden Böden zu beschreiben sowie deren Entwicklungsstand und Erodierbarkeit zu begutachten. Hierzu wurden an einem breiten Spektrum von Böden unterschiedlicher Entwicklungsstufe eine Vielzahl von bodenmorphologischen sowie bodenchemischen und -physikalischen Untersuchungen durchgeführt. Dabei wurden auch die Auswirkungen der Hellerbewirtschaftung durch Beweidung und Begrüppung auf die Prozesse der Bodenentwicklung erfaßt.

2.4 Teilprojekt „Botanische Untersuchungen“

Das Institut für Angewandte Botanik ging der Frage nach, wie sich die Pflanzen und insbesondere ihre unterirdische Biomasse (Wurzeln, Rhizome) in unterschiedlichen Böden in Abhängigkeit von Nutzung und Begrüppung im Jahresverlauf entwickeln und inwieweit die Vegetation, einschließlich der unterirdischen Biomasse, zur Festigkeit der Salzwiesen beiträgt. Ergänzende Messungen des Wassergehaltes und des Bodenwiderstandes dienten der näheren Charakterisierung der Stabilität des Bodenkörpers. Auch die Zusammensetzung des Treibseils am Deich und auf dem Heller wurde untersucht.

2.5 Teilprojekt „Modellversuche im Seewasserversuchskanal“

Die Festigkeit von Hellerflächen wurde in physikalischen Ausschnittsmodellen im Maßstab 1:1 untersucht. Diese Untersuchungsmethode sollte eine möglichst naturgetreue Dauerbelastung eines überfluteten Hellers ermöglichen und ferner die Druckschlagbelastung einer Hellerkante durch Seegang simulieren können. Damit bei einer Dauerbelastung eines eingetauchten Hellerbodenkörpers keine erheblichen Veränderungen der Pflanzen und des Bodens etwa durch osmotische Vorgänge und dergleichen eintreten konnten, wurden diese Versuche mit Seewasser durchgeführt. Die Versuchsanlage wurde im Bereich des Speicherbeckens für die Außentiefspülung in Neßmersiel errichtet. Das Ziel dieser Untersuchungen bestand in der Beschreibung und Quantifizierung der Abläufe und Einflußgrößen, die für die Festigkeit derartiger Böden von Bedeutung sind. Ausgehend von der direkten Beobachtung erfolgten vertiefte Analysen der höherdynamischen Prozesse durch den Einsatz spezifischer, teilweise neu entwickelter Meßverfahren.

3. Die Untersuchungsgebiete

Die trittfesten Hellerflächen an der ostfriesischen Küste werden – mit Ausnahme von Teilflächen im Dollart – ausschließlich als Jungviehweide genutzt. Die Auswirkungen einer Extensivierung oder gar Einstellung der Weidenutzung konnten daher in diesem Küstenraum untersucht werden (Abb. 1). Die eingangs erwähnten starken Hellerabbrüche seit Mitte der 80er Jahre waren am Buscherheller in der Leybucht und am Neßmerheller beobachtet worden. Auch aus diesen Gründen bot es sich an, die Vor-Ort-Untersuchungen und Naturmessungen auf diesen Hellern beiderseits der Stadt Norden durchzuführen (Abb. 2).

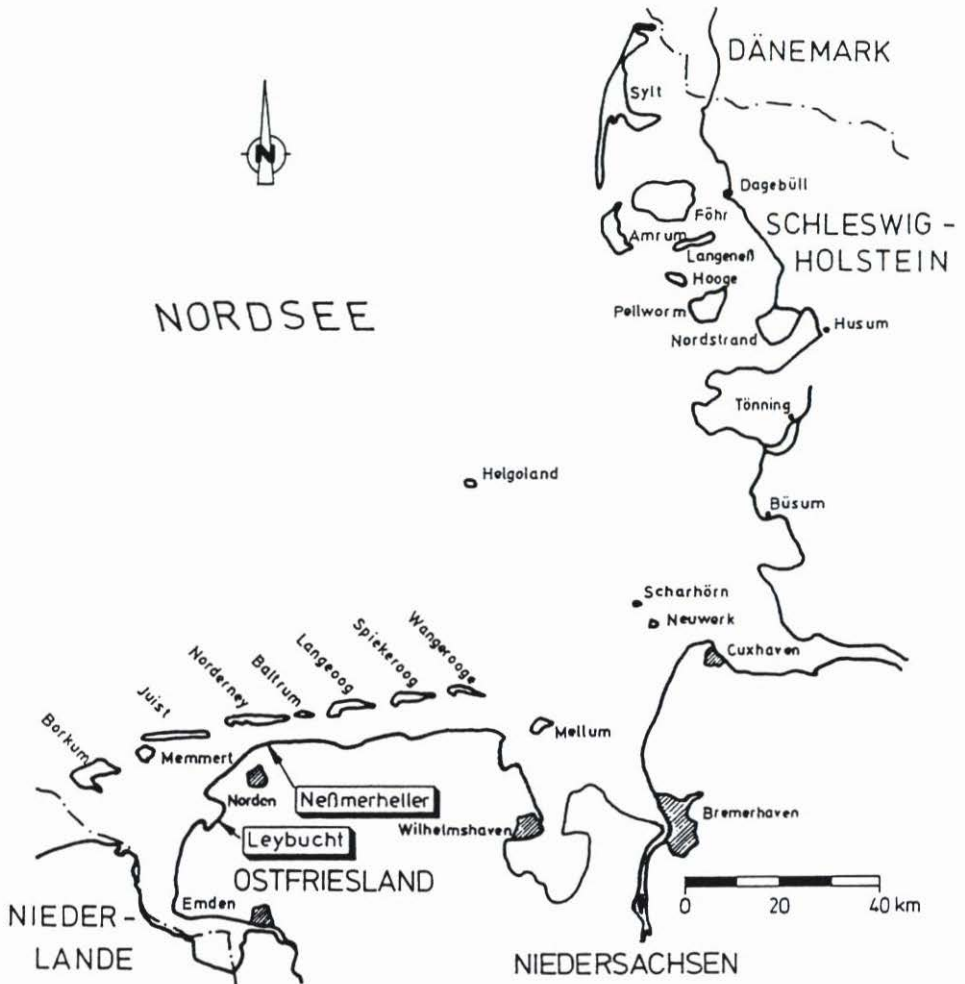


Abb. 1: Übersichtskarte mit den Untersuchungsgebieten „Leybucht“ und „Neßmerheller“ an der ostfriesischen Küste

Drei verschiedene Hellerflächen wurden als Untersuchungsgebiete ausgewählt. Dies waren:

- die „Versuchsfelder Leybucht“ (Abb. 3 u. 4), eine etwa 30 ha große Hellerfläche in der östlichen Leybucht,
- der Buscherheller in der nördlichen Leybucht (Abb. 5) sowie
- der Neßmerheller an der Nordküste Ostfrieslands (Abb. 6) hinter dem Rückseitenwatt der Insel Norderney.

3.1 „Versuchsfelder Leybucht“

Lage: Die „Versuchsfelder Leybucht“ liegen im östlichen Teil der Leybucht, einer offenen Wattenmeerbucht an der oberen Osterems (Abb. 3 u. 4).

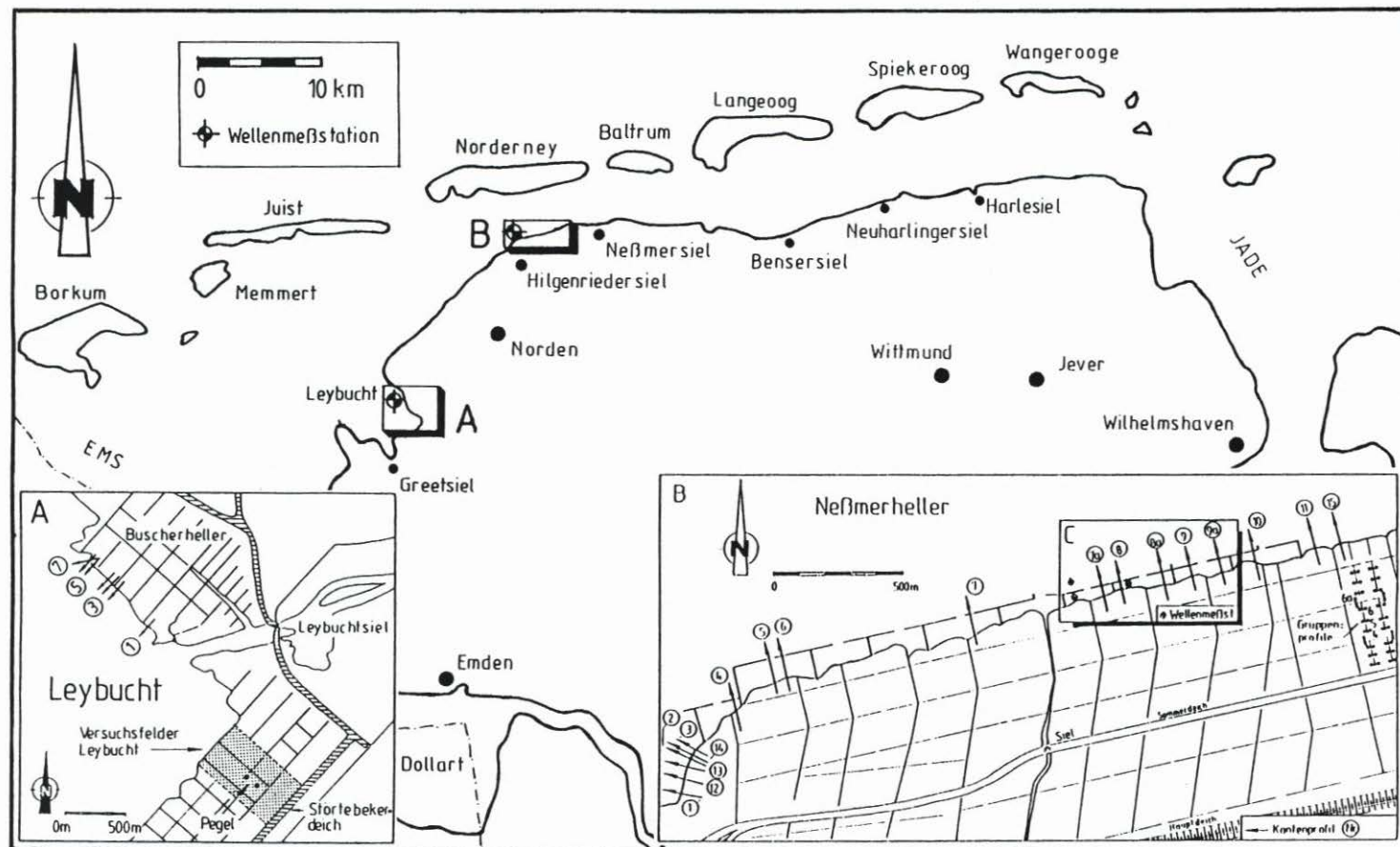


Abb. 2: Lageplan der Untersuchungsgebiete mit Pegeln, Wellenmeßstation und Vermessungsprofilen

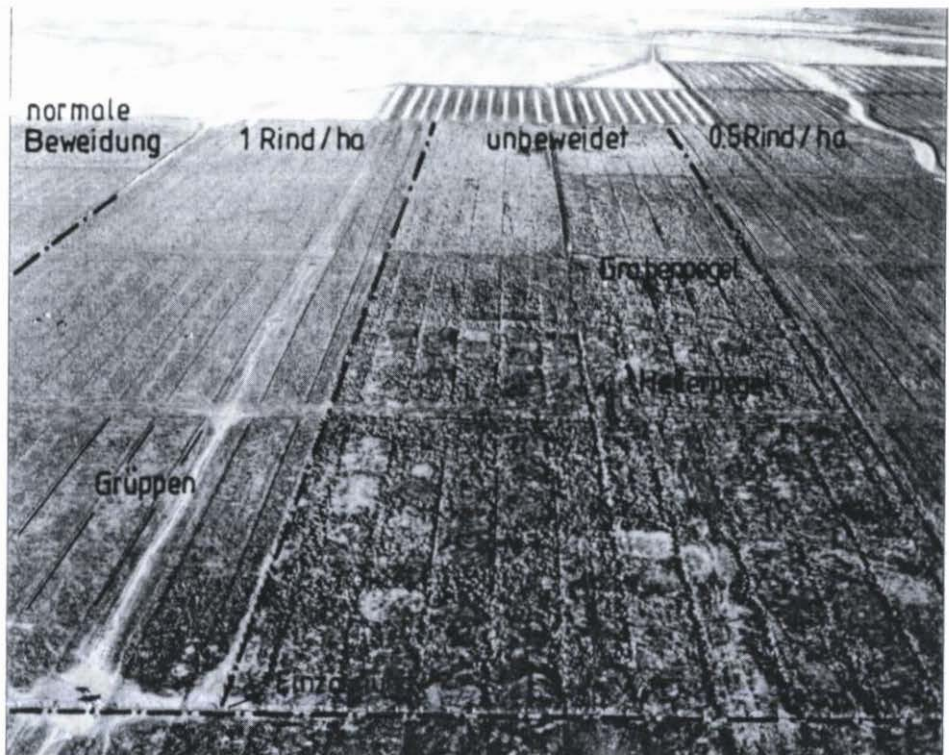


Abb. 3: Versuchsfelder Leybucht aus der Vogelperspektive

Topographie: Im unteren Bereich der Salzwiese steigt das Gelände von der MThw-Linie (NN + 1,3 m) auf rund 100 m auf NN + 1,70 m und weiter auf etwa 600 m in Richtung Hauptdeich relativ geringfügig auf ca. 1,8 m NN und dann bis zum Hauptdeich wieder stärker auf über NN + 2,0 m an. Der tiefer gelegene Bereich wird im folgenden als untere, der höhere entsprechend als obere Salzwiese bezeichnet. Die tiefergelegenen Bereiche werden im Mittel (der hydrographischen Jahre 1988 bis 1993) 300–340mal pro Jahr, die höchsten Gebiete nur noch 20–30mal pro Jahr überflutet.

Bodenart: Tongehalte von 25 % bis über 50 % kennzeichnen den sehr bindigen Boden der Versuchsfelder. Die Böden sind – trotz deutlich zunehmenden Tongehalts von der MThw-Linie zum Deichfuß – immer der Bodenartengruppe „schluffiger Ton“ zuzuordnen.

Vegetation: Vorwiegend *Astero tripolii*-, *Agropyretum repentis*- sowie *Festucetum rubrae*-Gesellschaft in der oberen und *Puccinellietum maritimae*-Gesellschaft in der unteren Salzwiese.

Nutzung: Die „Versuchsfelder Leybucht“ wurden mit den umliegenden Vorlandflächen bis 1980 intensiv beweidet und dann für Versuchszwecke als drei ca. 10 ha große Teilflächen für eine unterschiedliche Beweidung (unbeweidet, 0,5 Rind/ha und 1 Rind/ha) eingerichtet (Abb. 4). Das sich westlich anschließende Gebiet ist in den Beweidungsvergleich eingeschlossen. Dieser Bereich wird zwar auch im Mittel mit 1 Rind/ha beweidet, jedoch führt hier der durch den Verlauf des Brutgeschehens gesteuerte Viehauftrieb zu einer differenzierten Beweidungsintensität. Die Beweidung erfolgt, wie auch in den anderen Untersuchungsgebieten, jeweils in den Monaten Mai bis September/Okttober.

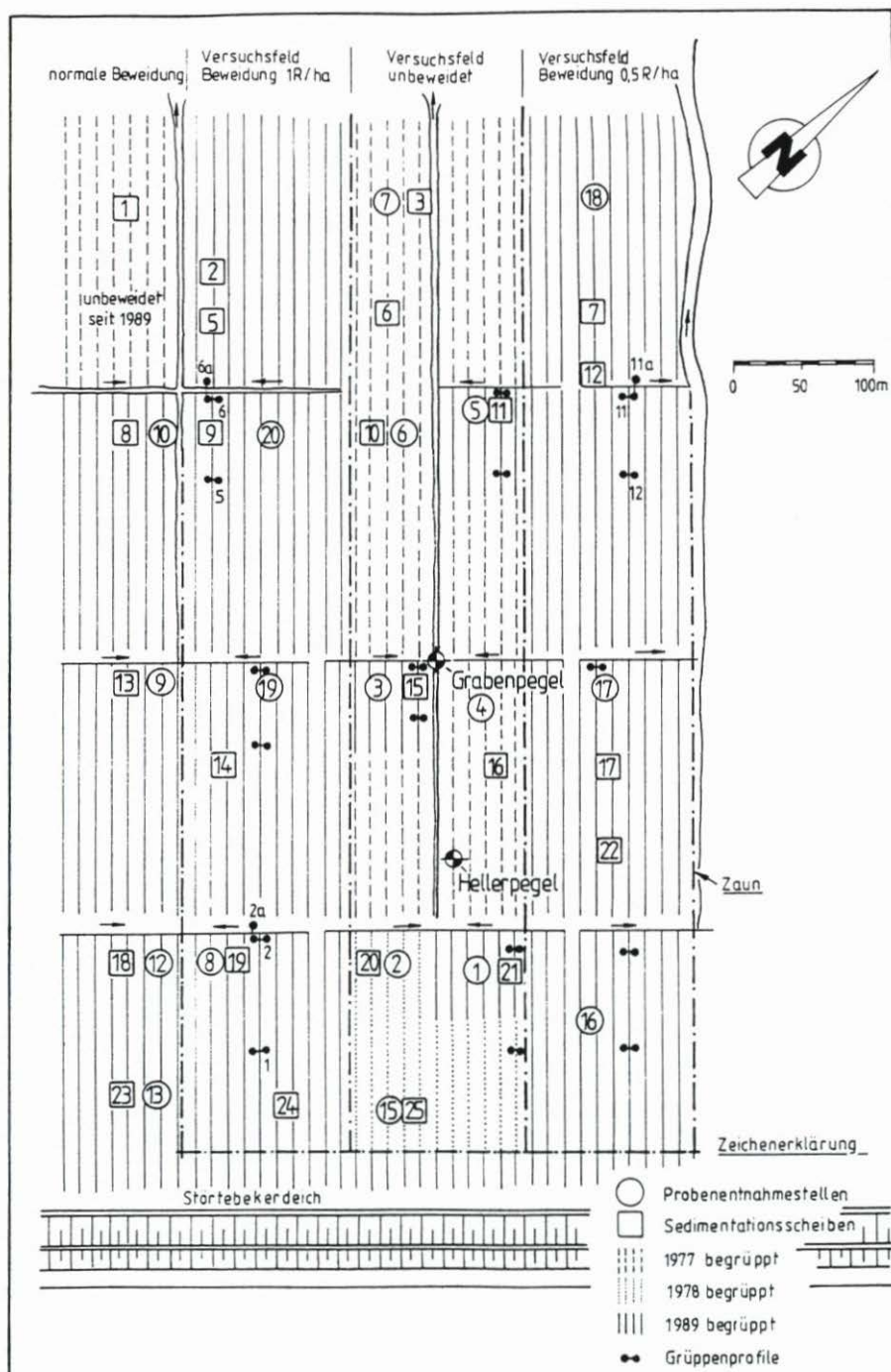


Abb. 4: Versuchsfelder Leybucht mit 4 Teilflächen unterschiedlicher Beweidungsintensität und unterschiedlichen Gruppenzustandes sowie Lage der Meß- und Beprobungspunkte. 1978 und früher begrüßt entspricht „unbegrüßt“

Begrüppung: Die einzelnen Versuchsflächen bestehen aus jeweils 10 schmalen Beeten von ca. 11 m Breite mit dazwischenliegenden Gruppen, die seit unterschiedlich langen Zeiträumen nicht mehr geräumt wurden. Während das unbeweidete Versuchsfeld 1977/78 zum letzten Mal begrüppelt wurde, sind die Gruppen auf den Feldern mit 0,5 und 1 Rind/ha Beweidung auf ganzer Länge, und auf dem sich westlich anschließenden „normal“ beweideten Feld bis auf den seewärtigen Bereich 1989 nochmals aufgereinigt worden. Diese Begrüppung war notwendig, um die Flächen ausreichend trittfest für die Beweidung zu erhalten. Für die Untersuchungen boten sich damit Flächen mit und ohne Begrüppung an.

3.2 Buscherheller

Lage: Am nördlichen Rand der Leybucht (Abb. 2 u. 5).

Topographie: Für den untersuchten Bereich des Buscherhellers läßt sich das Hellerniveau einheitlich mit durchschnittlich 1,85 m NN angeben. Die Fläche wird im Mittel (1988 bis 1993) 55mal im Jahr überflutet.

Bodenart: Lehmiger Boden mit einem Schluffanteil in der Regel von 30–55 %. In tieferen Bodenhorizonten kann der Feinsandanteil auf über 70 % steigen.

Vegetation: *Puccinellio maritimae/Salicornietum ramosissimae*-Gesellschaft. Eine Besonderheit des Buscherhellers ist die Ausbildung sogenannter Salzpfannen. Da diese im Frühjahr vegetationsarmen Stellen mit einer Flächenausdehnung von maximal einigen Quadratmetern wenige Zentimeter unter dem Hellerniveau liegen, bleibt nach Überflutungen das Wasser in diesen muldenförmigen Vertiefungen längere Zeit stehen. Während der Vegetationsperioden können Pionierpflanzen die Salzpfannen zeitweise wieder besiedeln.

Nutzung: Beweidung mit etwa 1 Rind/ha.

Begrüppung: Eine Begrüppung im Untersuchungsbereich erfolgte zuletzt im Jahr 1985.

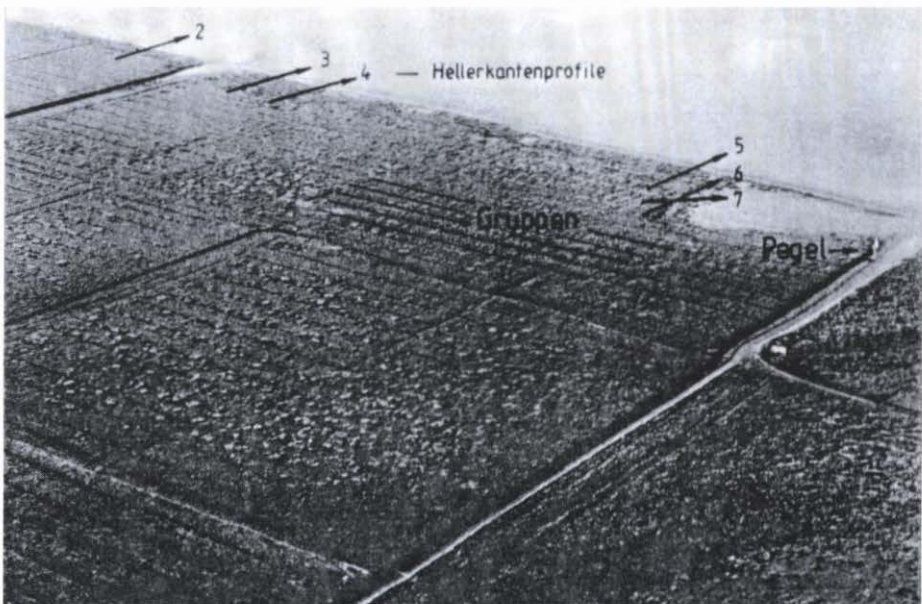


Abb. 5: Buscherheller aus der Vogelperspektive

3.3 Neßmerheller

Lage: An der Nordküste Ostfrieslands zwischen Hilgenriedersiel und Neßmersiel (Abb. 2 u. 6).

Topographie: Die Salzwiese liegt im Mittel auf etwa NN + 2,0 m. Höhenlagen an der Hellerkante von über 2,3 m NN führen streckenweise zu einem zum Deich gerichteten Gefälle.

Bodenart: Schluffig bis schluffig-lehmiger Sand, wobei der Sandanteil meist erheblich über 50 % liegt. Der Tongehalt beträgt nur selten mehr als 5 %.

Vegetation: *Juncetum gerardii*-Gesellschaft. Ähnlich den Salzpflanzen des Buscherhellers treten am Neßmerheller, der sich durch einen vergleichsweise sandreichen Boden auszeichnet, vegetationsarme Bereiche auf, auf denen sich aber im Laufe des Untersuchungszeitraumes die Vegetationsdecke wieder schloß.

Nutzung: War der Untersuchungsbereich bis 1990 noch durchweg mit 1 Rind/ha beweidet, sind Teile der Hellerflächen mittlerweile aus der Beweidung herausgenommen.

Begrüppung: Ein Teil des Neßmerhellers wurde 1983, der andere 1985 zum letzten Mal begrüppt.

4. Tidehochwasserstände, Sturmfluten und Überflutungshäufigkeiten

Das MThw am Pegel Neßmerheller berechnet sich für den Zeitraum 1987–1993 zu 6,31 m PN. Am Pegel Buscherheller ergibt sich für den gleichen Zeitraum ein MThw von 6,32 m PN. Für längerfristige Betrachtungen der Entwicklung des mittleren Hochwassers bietet sich der Pegel Norderney an. Das MThw für den gleichen Zeitraum beträgt hier 6,17 m PN und liegt somit um 14 bzw. 15 cm niedriger als an den genannten Festlandspegeln. Bei Betrachtung der langfristigen Entwicklung des MThw am Pegel Norderney (Abb. 7), die

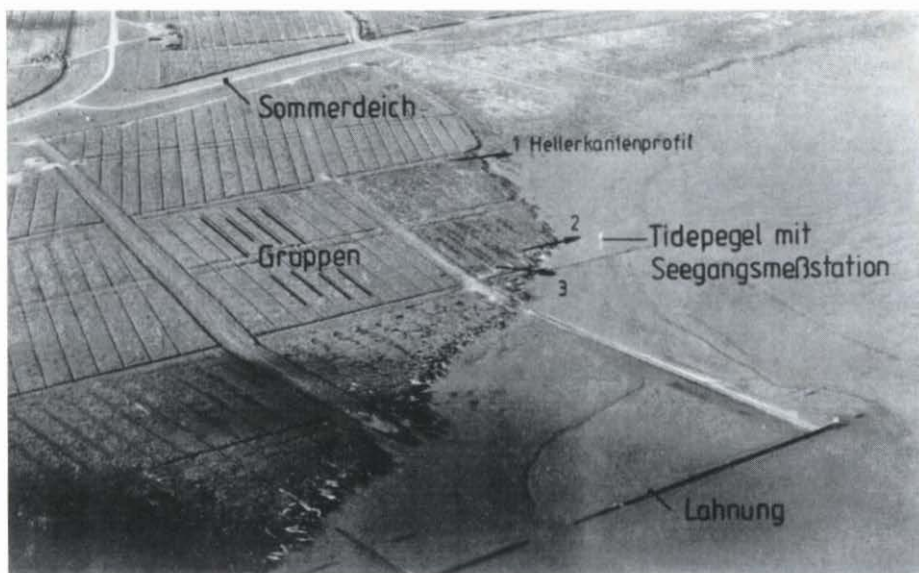


Abb. 6: Neßmerheller aus der Vogelperspektive

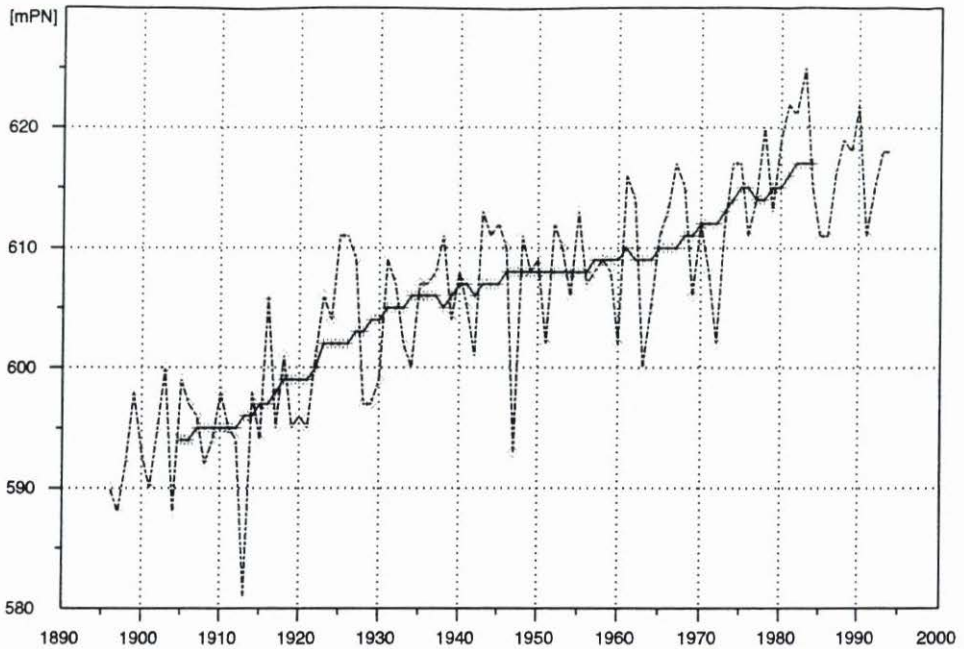


Abb. 7: MThw am Pegel Norderney (jährliche und 19jährige gleitende Mittel)

qualitativ zweifellos auch für die übrigen Pegel des Untersuchungsraumes übertragbar ist, ist die steile Anstiegsphase von 1970 bis 1983, dem Jahr des bisher gemessenen höchsten jährlichen MThw, von besonderer Bedeutung. 1983 stieg das MThw auf eine Höhe von $\text{PN} + 6,25$ m und lag damit 13 cm über dem zehnjährigen MThw der Vorjahre 1966/75. Nach dieser Anstiegsphase stellte sich das MThw auf einem hohen Niveau ein, das etwa dem Mittelwert des Meßzeitraums entspricht. Der in den vorausgegangenen Kapiteln erwähnte verstärkte Hellerabbruch durch höhere Seegangsbelastung an der Hellerkante läßt sich somit zum großen Teil als Folge des deutlich angestiegenen MThw erklären.

Die Wasserstände am Neßmerheller wurden durch Pegel auf dem Heller und am Hellerrand ab einer Marke von 1,6 m NN erfaßt. Abb. 8 verdeutlicht, daß Sturmflutwasserstände vor allem in den Herbst- und Wintermonaten auftreten, während in den Monaten März bis August vor allem Kantenfluten (rd. $\text{MThw} + 0,6$ m) und vereinzelt Windfluten (rd. $\text{MThw} + 1,0$ m) zu erwarten sind. In den letzten Jahrzehnten haben die Häufigkeit und Schwere von Sturmfluten deutlich zugenommen. Die Zahl der Sturmtiden mit Scheitelwasserständen von mindestens $\text{NN} + 2,00$ m hat sich z. B. am Pegel Norderney von jährlich durchschnittlich 10 in den 50er und 60er Jahren auf je 16 in den letzten beiden Jahrzehnten, d. h. um 60 %, erhöht (Abb. 9). Im Jahr 1990 war mit 31 Sturmtiden über $\text{NN} + 2,0$ m die bisher höchste Sturmflutaktivität dieses Jahrhunderts zu verzeichnen. Bemerkenswert ist dabei insbesondere die überdurchschnittliche Zunahme schwerer bzw. sehr schwerer Sturmfluten ($\text{NN} + 3,3$ m und höher) seit Anfang der 70er Jahre.

Die Überflutungshäufigkeit von Hellerflächen ist abhängig von deren Höhenlage, die in den Untersuchungsgebieten überwiegend zwischen $\text{NN} + 1,7$ m und 2,2 m liegt. Entsprechend kann die Häufigkeit der Hellerüberflutungen aus Abb. 8 abgelesen werden. Dabei weist das Jahr 1990 – entsprechend der lebhaften Sturmflutaktivität – die größte Häufigkeit

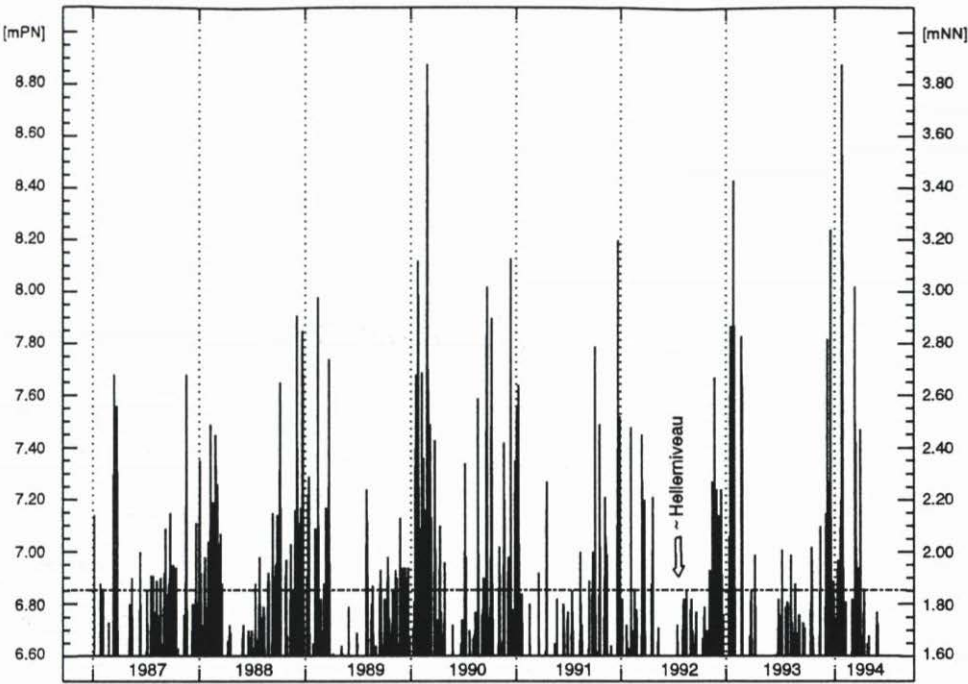


Abb. 8: Tidehochwasser über 1,60 m NN während des Untersuchungszeitraumes 1987–1994 am Pegel Neßmerheller

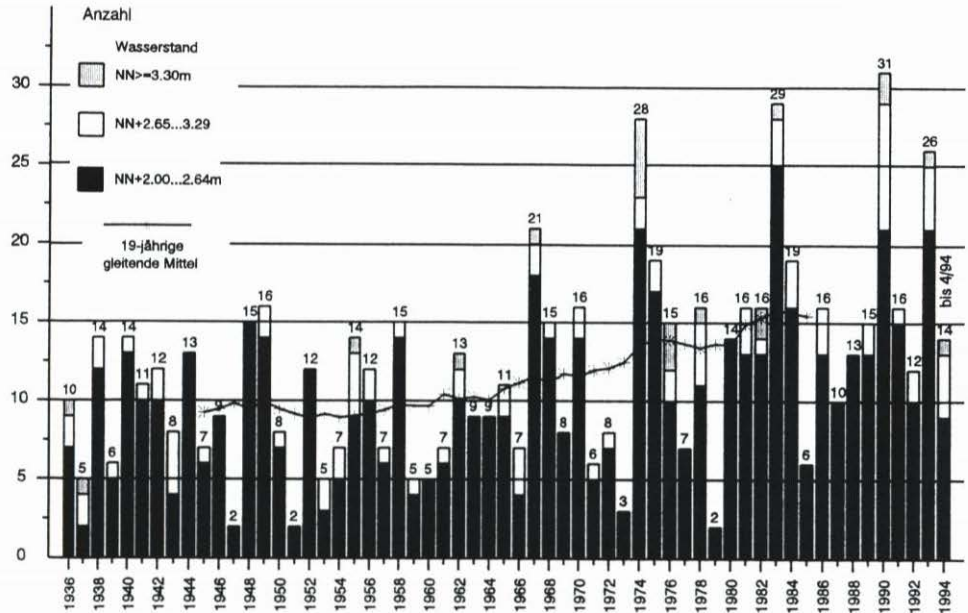


Abb. 9: Überschreitungshäufigkeit von Sturmtiden über NN + 2,0 m am Pegel Norderney

an Hellerüberflutungen auf. So wurden die „Versuchsfelder Leybucht“ im Zeitraum 1989 bis 1994 jährlich zwischen 17 (1992) und 54 mal (1990) überflutet.

Auf den „Versuchsfeldern Leybucht“ wird seit Oktober 1988 der Wasserstand auf einem unbeweideten Feld in einer Grütpe („Grabenpegel“) und auf der Helleroberfläche eines unbeweideten und unbegrüpten Feldes („Hellerpegel“) registriert. In Abhängigkeit von Geländehöhe und Umfang der Begrüpfung sind erhebliche Unterschiede in der Überflutungsdauer festzustellen. Übersteigt der Wasserstand die Helleroberfläche, zeigen die Wasserstandsganglinien beider Pegel einen gleichförmigen Verlauf. Wird dieser Wasserstand jedoch nicht erreicht, zeichnen sich unterschiedliche Verlaufsmuster ab. Auf den unbegrüpten Salzwiesen kommt es zu einem leicht verzögerten Zufluß, aber vor allem zu einem deutlich langsameren Rückgang des Wasserstandes, so daß der Salzwassereinstau auf diesen Flächen gegenüber begrüpten Flächen erheblich länger andauert (Abb. 10). Im Untersuchungszeitraum dauerten die Überflutungen auf dem begrüpten Heller jährlich zwischen 56 und maximal 226 Stunden, wobei dieser Höchstwert 1990 registriert wurde. Auf unbegrüpten Hellerflächen dauerte die Überflutung im gleichen Jahr nach den Registrierungen des Hellerpegels dagegen 250 Stunden.

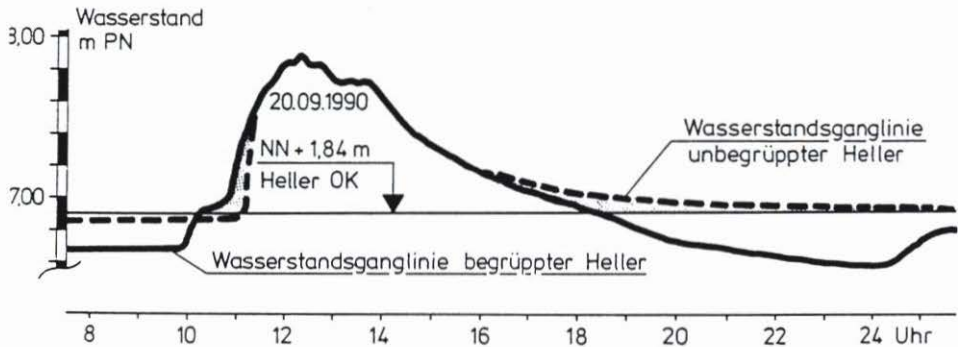


Abb. 10: Wasserstandsganglinien begrüpter und unbegrüpter Heller der „Versuchsfelder Leybucht“

5. Sedimentation auf Hellern und Lahnungsfeldern

5.1 Sedimentation auf Hellern am Beispiel der „Versuchsfelder Leybucht“

Auf den „Versuchsfeldern Leybucht“ wurde seit August 1989 die Veränderung des Hellerniveaus registriert, um zum einen generelle Aussagen über die Niveauentwicklung treffen zu können, zum anderen den Einfluß unterschiedlicher Beweidungsintensität auf Sedimentationsprozesse zu spezifizieren.

Da durch Hellerüberflutungen Sediment zugeführt wird, bestimmen die Zahl der Überflutungen und die vom Sedimentgehalt abhängigen Ablagerungen den Anstieg des Hellerniveaus. Auf den „Versuchsfeldern Leybucht“ ist eine deutlich positive Sedimentbilanz in den überflutungreichen Herbst- und Wintermonaten feststellbar. Demgegenüber kann eine negative Entwicklung des Hellerniveaus in den Sommermonaten beobachtet werden (Abb. 11). Seltene Überflutungsereignisse, geringe Niederschlagsmengen und hohe Temperaturen im Sommer führen zu einer Schrumpfung und Kompaktion des sehr tonreichen Sediments und

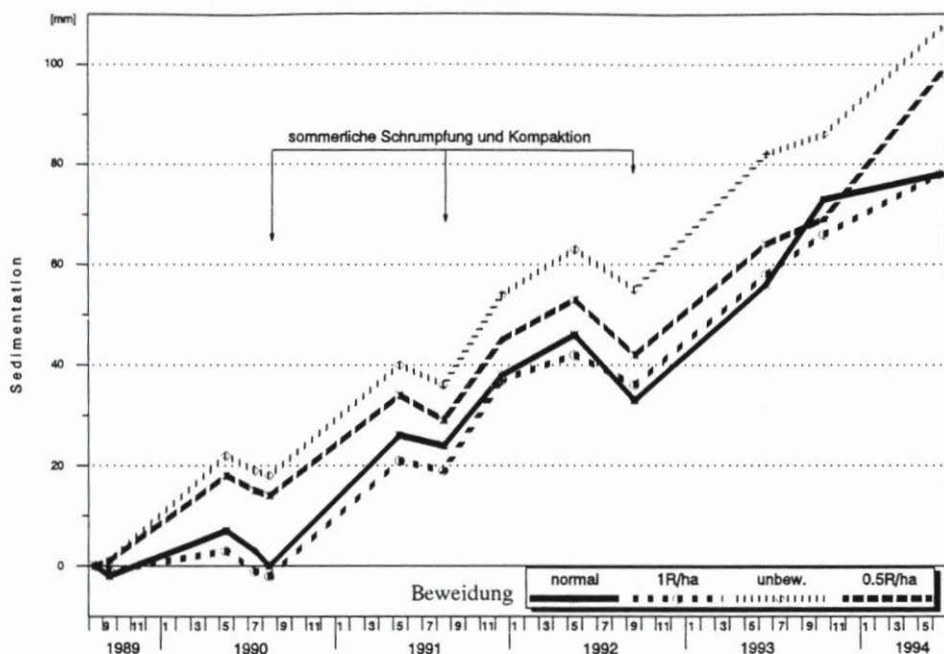


Abb. 11: Sedimentation auf den „Versuchsfeldern Leybucht“ bei unterschiedlicher Beweidungsintensität

verursachen dadurch den Rückgang im Hellerniveau. Auffallend ist, daß das Hellerniveau nicht in linearer Abhängigkeit von der Zahl und Dauer der Hellerüberflutungen ansteigt. So wurden z. B. im Winter 1989/90 bei häufigen Hellerüberflutungen mit insgesamt 141 Stunden Dauer über NN + 2,0 m (Abb. 12) nur 21 mm auf unbeweidetem Heller abgelagert, während im Winter 1991/92 bei nur 92 Stunden Überflutungsdauer über NN + 2,0 m die Sedimentationshöhe 28 mm betrug. Vielmehr dürften die besonders hohen Sedimentfrachten, die bei einzelnen schweren Sturmfluten bewegt und auf dem Heller abgelagert werden, die Ablagerungsraten einzelner Jahre erheblich beeinflussen.

Die Sedimentation betrug auf den Versuchsflächen Leybucht von 8/89 bis 6/94

- auf unbeweideten Hellerflächen 107 mm,
- auf mit 0,5 Rind/ha beweideten 98 mm und
- auf mit 1 Rind/ha und „normal“ beweideten 78 mm.

Dennoch zeichnet sich eine signifikante Abhängigkeit der Sedimentationsrate von der Beweidungsintensität insgesamt undeutlicher ab, als diese Zahlen vermuten lassen. Nachdem im Sommer 1990 die erheblich höheren Sedimentationsbeträge auf dem unbeweideten und dem mit 0,5 Rind/ha beweideten Feld eine klare Abhängigkeit von der Beweidungsintensität andeuteten, verlief die Niveauentwicklung bis Mitte 1992 auf allen vier Versuchsfeldern ähnlich. Erst für den Zeitraum von September '92 bis Juni '94 ist auf dem unbeweideten Versuchsfeld gegenüber den anderen Versuchsfeldern wieder eine deutlich höhere Sedimentation festzustellen. Die Vermutung liegt nahe, daß nach Orkanfluten auf dem Vorland im höheren und dichteren Bewuchs unbeweideter Hellerflächen mehr und vielleicht auch größeres Sediment verbleibt als auf beweideten Flächen. Allerdings sind die Meßzeiträume zu gering, um bereits generalisierende Aussagen treffen zu können. Insbesondere bei ungenutzten Hellern

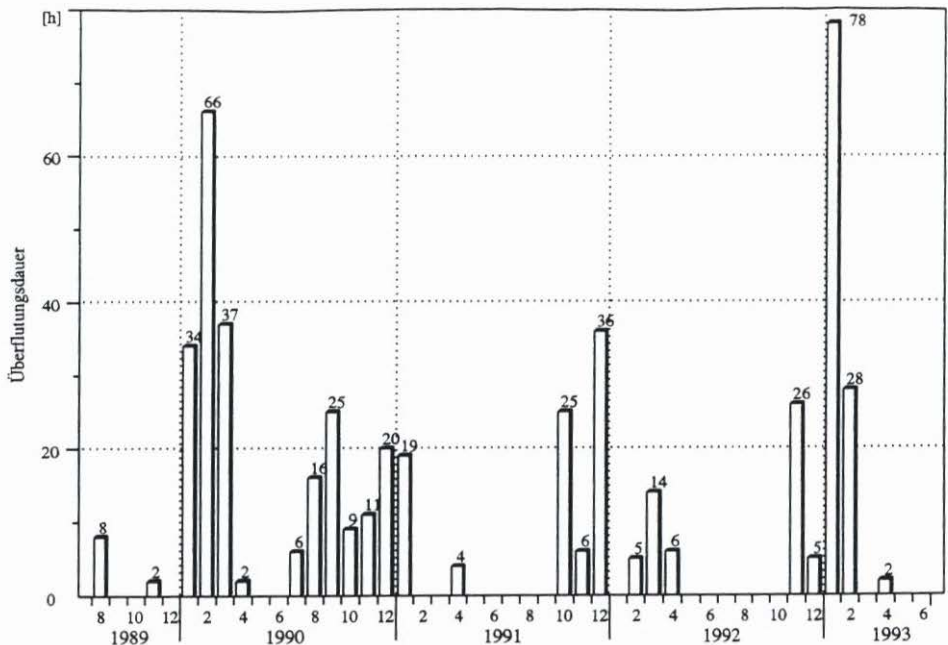


Abb. 12: Überflutungsdauer der „Versuchsfelder Leybucht“; Wasserstände am Grabenpegel über NN + 2,00 m

konnten zwischen den Sedimentablagerungen jeweils Schichten abgestorbener Pflanzen festgestellt werden, die ohne Beweidung in erheblich größerem Umfang anfallen und nicht durch den Viehtritt zertreten und vermengt werden. Diese Schicht wird jeweils bei der Messung der Sedimentationsraten mit erfaßt und bildet damit einen gewissen Anteil der höheren Sedimentationsraten bei ungenutzten Hellern.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß in den vier Jahren auf diesen etwa 0,4 m über MThw liegenden Hellerflächen in der östlichen Leybucht die Auflandungsrate etwa 1,5 bis 2,0 cm/Jahr betrug. Auf den anderen Versuchsflächen wurde sie nicht ermittelt, kann aber als wesentlich geringer angenommen werden.

Die auf den Versuchsfeldern bei Hellerüberflutungen abgelagerten Sedimente wurden in den Jahren 1990 und 1991 wiederholt granulometrisch untersucht und die Korngrößenspektren untereinander und mit denen des Oberbodens (Ablagerungen vor 8/89) verglichen. Die Ergebnisse werden hier am Beispiel der Probeentnahmestellen 10, 6 und 5 (siehe Abb. 4), die parallel zur Hellerkante in einem Abstand von 230 m liegen, vorgestellt:

Im Zeitraum 8/89 bis 5/90 kamen mit einem 5–20 % niedrigeren Tongehalt deutlich grobkörnigere Sedimente als in den vorangegangenen Jahren zur Ablagerung, während sich in der Zeit von 8/90 bis 5/91 wieder feinkörnigeres Sediment auf dem Heller absetzen konnte, das sich in der Korngrößenzusammensetzung dem ursprünglichen Oberboden annähert. Diese zeitabhängige Varianz in der Körnung dürfte im wesentlichen auf Unterschiede in der Sturmflutaktivität zurückzuführen sein. So haben die im 1. Quartal 1990 überdurchschnittlich oft aufgetretenen Sturmfluten, darunter zwei Orkanfluten, offensichtlich zur Auflandung eines grobkörnigeren Materials geführt als die relativ selteneren Hellerüberflutungen bei weniger schweren Sturmfluten im Winter 1990/91.

Es kann davon ausgegangen werden, daß sich auf dem Heller in Wintern ohne Orkanfluten relativ feines Material unabhängig von der Nutzungsintensität relativ gleichmäßig abgelagert. Bei Orkanfluten mit großer Wasserturbulenz lagert sich auch gröberes Material ab. Dieses Prinzip ist anhand von Sturmflutschichtungen an Abbruchkanten alter Heller gut nachvollziehbar. Das abgelagerte, sehr feine Material wird bei solchen schweren Sturmfluten offenbar durch die starke Turbulenz z. T. wieder resuspendiert, und zwar bei niedrigem Bewuchs stärker als bei hohem, so daß unbeweidete Flächen mit entsprechend höherem Bewuchs nach stürmischen Wintern eine höhere Sedimentationsrate aufweisen als stärker genutzte Flächen.

5.2 Auflandung auf Lahnungsfeldern bei Lahnungen unterschiedlicher Höhe

Im März 1993 wurden drei Wellenmeßstationen am Neßmerheller installiert, wobei ein Gerät unmittelbar vor der die Hellerkante schützenden Lahnung und je ein weiteres Gerät in zwei benachbarten Lahnungsfeldern mit unterschiedlichen Lahnungshöhen eingerichtet wurden. Die Oberkante des westlichen Feldes lag auf MThw, die des östlichen auf MThw + 0,3 m. Die durchgeführten Messungen ermöglichten es, die Seegangsverhältnisse im freien Watt vor den Lahnungen zu ermitteln und die Wellendämpfung durch die unterschiedlichen Lahnungshöhen zu vergleichen.

Es konnte festgestellt werden, daß durch die westliche, niedrige Lahnung (Oberkante auf Niveau des MThw) bei Wasserständen zwischen MThw und MThw + 0,85 m die signifikante Wellenhöhe H_s um ca. 25 % und durch die Lahnung mit der „klassischen“ Lahnungshöhe von MThw + 0,3 m H_s um ca. 50 % abgenommen hat (Abb. 13). Bei den höchsten Wellen innerhalb der einzelnen Meßzyklen fällt der Dämpfungsgrad naturgemäß noch stärker aus: Für $H_{\max}$ ergibt sich ein Dämpfungsgrad von bis zu 35 % bei der niedrigen bzw. 60 % bei der höheren Lahnung. Die Bauhöhe der Lahnungen hat folglich einen ganz erheblichen Einfluß auf die Wellendämpfung.

Abb. 14 verdeutlicht die Seegangsdämpfung durch die niedrige Buschlahnung (Oberkante = MThw) für Wasserstände bis zu 0,85 m über der Lahnung. Die signifikante Wellenhöhe im Lahnungsfeld (H_{SL}) wird im dimensionslosen Verhältnis zur signifikanten Wellenhöhe im vorgelagerten Watt (H_{SW}) als Ordinate aufgetragen und in Beziehung gesetzt zum Verhältnis H_{sw}/d_L auf der Abszisse. Dabei bezeichnet d_L die Wassertiefe über der Lahnung zur Meßzeit. In dem Diagramm sind die Werte H_s/d (Ausgangswellenhöhe/Wassertiefe im Watt) für vier Stufen unterschieden.

Der Transmissionsgrad T_0 (H_{SL}/H_{SW}) nimmt mit steigendem H_{sw}/d_L -Wert ab. Entsprechend nimmt der Dämpfungsgrad $T = 1 - T_0$ zu. Trotz der geringen Höhe und Breite des Lahnungsbauwerkes wird die Wellenhöhe H_s für alle Fälle, in denen sie das 0,6fache der Wassertiefe über der Lahnung überschreitet ($H_{sw}/d_L > 0,6$), deutlich verringert. So betrug der Dämpfungsgrad bei

$$\begin{aligned} 0,6 < H_{sw}/d_L < 1,0: & T = 0 \text{ bis } 80 \% \\ 1,0 \leq H_{sw}/d_L < 1,5: & T = 20 \text{ bis } 80 \% \\ H_{sw}/d_L \geq 1,5: & T = 35 \text{ bis } 80 \%. \end{aligned}$$

Lediglich bei sehr niedrigen Wellenhöhen mit $H_{sw}/d_L < 0,6$ kann für einen Teil der Werte im Lahnungsfeld eine Aufsteilung des Seegangs beobachtet werden ($H_{SL}/H_{SW} > 1,0$). Die Lahnung führt zu einem ganz erheblichen Abbau der Seegangsenergie, fördert folglich einen deutlichen Rückgang des Hellerabbruchs und bewirkt eine starke Auflandung.

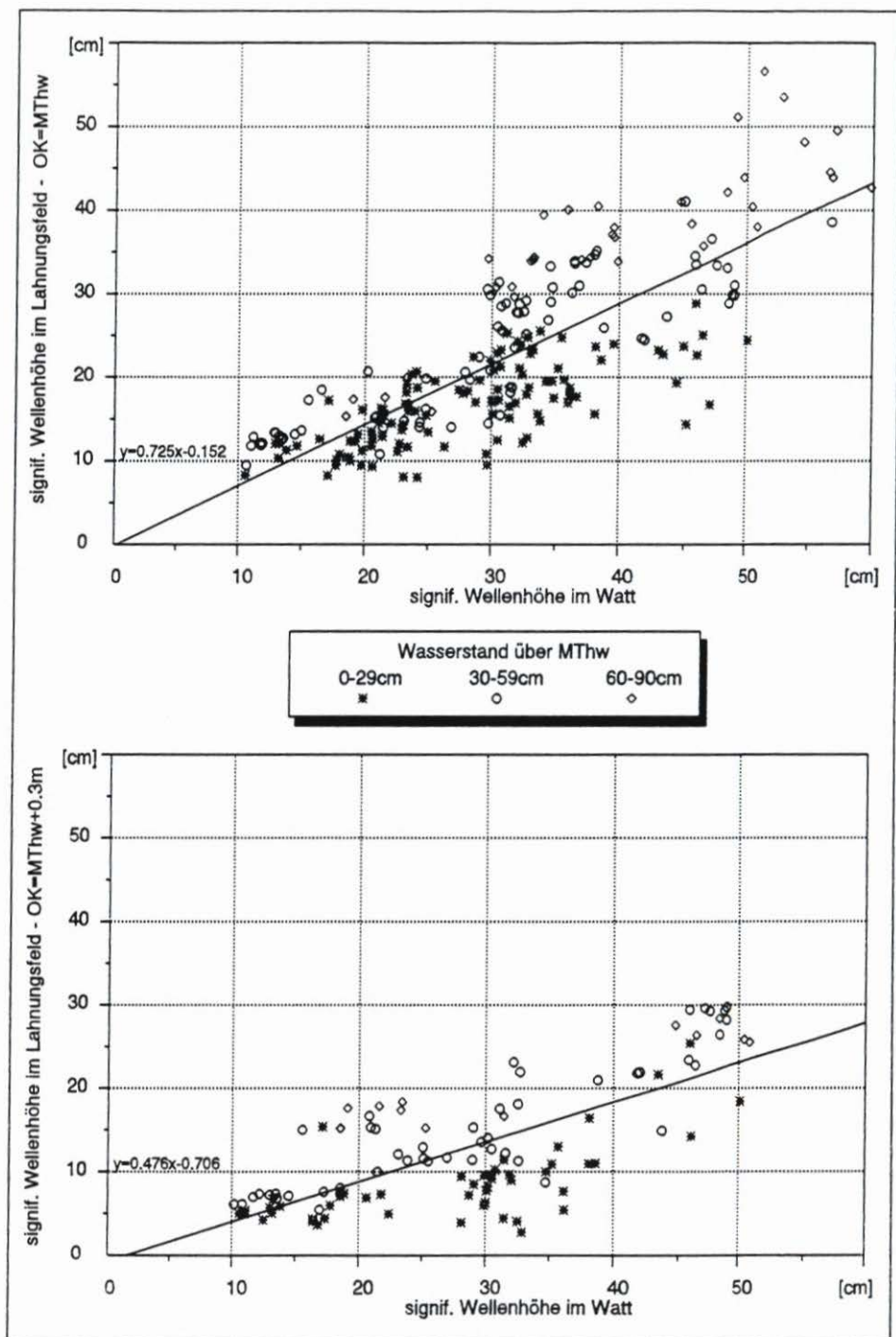


Abb. 13: Einfluß von Lahnungen unterschiedlicher Höhe auf die Wellendämpfung; signifikante Wellenhöhe H_s bei Lahnungsoberkante = MThw (oben) bzw. = MThw + 0,3 m (unten)

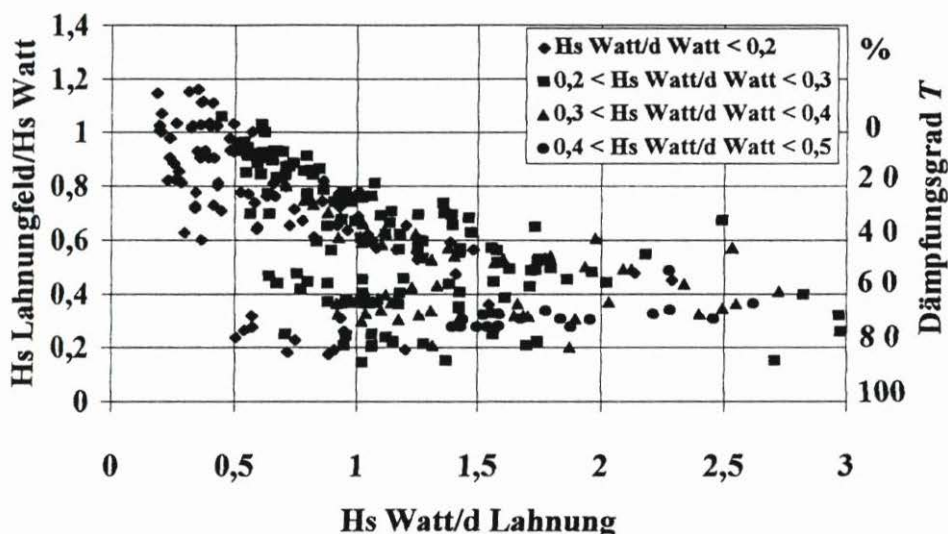


Abb. 14: Seegangsdämpfung durch eine Buschlahnung mit einer Oberkante auf Höhe des MThw

Dieses konnte auch am Beispiel des Baus einer Lahnung im Bereich des Neßmerhellers mit einer Oberkante von 1,6 m NN, also etwa 30 cm über dem MThw, nachvollzogen werden. Dieser Lahnungsbau ermöglichte es, die Veränderung des Wattniveaus innerhalb der Lahnungsfelder über die Zeit zu registrieren. Während der Bauzeit führten Störungen zu einer anfänglich uneinheitlichen Entwicklung der Wattoberfläche. Nach weitgehender Fertigstellung der Lahnung Ende Oktober '91 war ein starker Anstieg des Wattniveaus – einhergehend mit einer deutliche Abnahme des Hellerabbruches – zu beobachten, der bis Anfang Mai 1992 fast unvermindert anhielt (Abb. 15). Daran schlossen sich in den Sommermonaten 1992 Zeiten mit Watthöhenabnahmen an, die ihre Ursache in der Kompaktion des rasch sedimentierten und wasserübersättigten Sediments haben dürften und begünstigt waren durch die langanhaltenden ruhigen und warmen Witterungsbedingungen mit Ostwindlagen und niedrigen Tidewasserständen. Ein Anstieg des Wattniveaus war dann erst wieder ab Anfang Oktober '92 festzustellen. Durch die erheblich gestiegene hydrodynamische Belastung des Watts durch winterliche Sturmtiden wurde das Sedimentangebot um ein Vielfaches erhöht und stand somit für die Ablagerung in der künstlichen Sedimentfalle „Lahnungsfeld“ zur Verfügung. Die Wellendämpfung durch die Lahnung bewirkte eine erhebliche Wasserberuhigung, so daß unmittelbar hinter der Lahnung ein Großteil der Sedimentfracht ausfiel. Dadurch stellte sich innerhalb des Lahnungsfelds auch ein Oberflächengefälle in Richtung auf die Hellerkante ein.

6. Belastung und Abbruch von Hellerkanten

6.1 Strömungsmessungen

Die Strömungsmessungen wurden an verschiedenen Standorten am Neßmer- und Buscherheller durchgeführt. Auf der Helleroberfläche wurde die Strömung in Abständen von 1 bis 6 m zur Abbruchkante bei Überflutung des Hellers gemessen. Auch am Fuß der Ab-

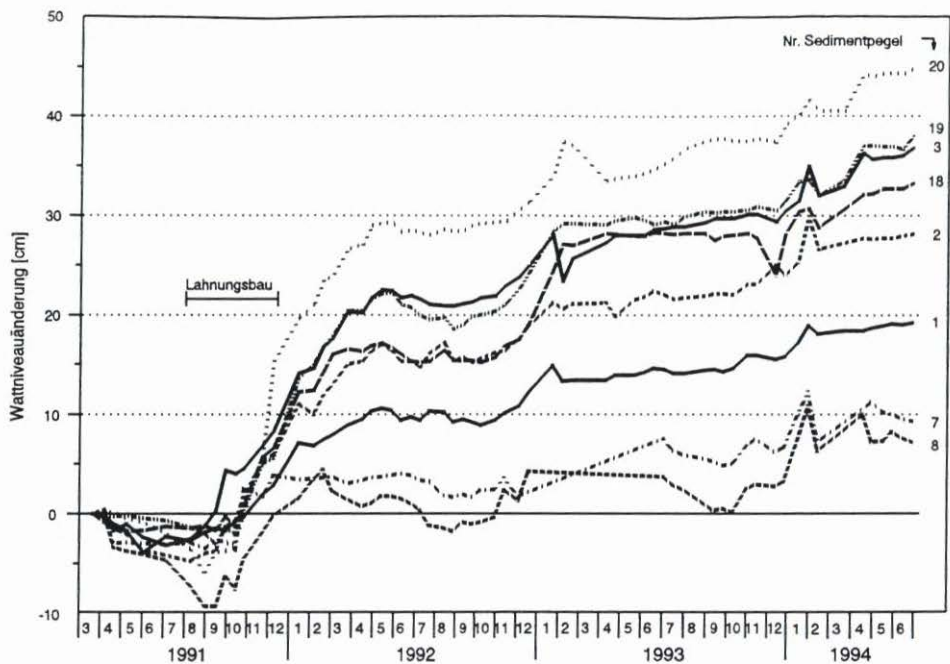


Abb. 15: Entwicklung des Wattniveaus in den Lahnungsfeldern nach dem Bau der Lahnung

bruchkante und auf dem Wattboden, etwa 50 m vor der Hellerkante, wurden die Strömungen registriert. Der fortschreitende Abbruch der Hellerkante erforderte von Zeit zu Zeit ein Umsetzen der Sensoren.

Im Watt wird Strömung durch Tide und Winddrift sowie durch seegangsbedingte Orbitalbewegungen hervorgerufen. Die gemessenen Geschwindigkeiten überschreiten Beträge von 20 cm/s nur ausnahmsweise. Am Fuß der *Hellerkante* des Neßmerhellers schwanken die Strömungsgeschwindigkeiten im Tideverlauf dagegen zwischen 10 und 50 cm/s, können aber durchaus Spitzenwerte von 60 cm/s erreichen. Mit steigenden Wasserständen ist auch ein Anstieg der Strömungsgeschwindigkeit zu beobachten, der seine Ursache hauptsächlich in der zunehmenden Wellenaktivität hat. Die zum Zeitpunkt der Stromkenterung kurz nach Erreichen des maximalen Wasserstandes zu erwartende leichte Strömungsberuhigung ist nur selten und dann undeutlich erkennbar. Auf der *Helleroberfläche* wird das Strömungsbild durch Schwallströmungen brechender Wellen bestimmt, die Geschwindigkeiten mit Spitzen von über 500 cm/s verursachen können. Derartige Werte werden aber nur dann erreicht, wenn bei entsprechendem Seegang der Heller nur wenige Dezimeter hoch überflutet ist. In den Phasen zwischen den Brechern treten als Folge des Gegengefälles zum Wellental Rückströmungen auf, die Geschwindigkeiten von weniger als 20 cm/s aufweisen. Mit steigenden Wasserständen geht die Belastung der Helleroberfläche durch seegangsinduzierte Strömungsspitzen erheblich zurück, da die zunehmende Wasserbedeckung die Schwallströmung abpuffert. Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten liegen nun in der Regel unter 120 cm/s, können aber noch Werte von 200 cm/s erreichen. In Sturm- und Orkanfluten werden die höchsten Strömungsbeträge gemessen, wenn der Wasserstand auf bzw. geringfügig über dem Hellerniveau (1,6–1,8 m NN) liegt und der Boden durch Schwallströmung belastet wird.

Nachdem der Heller mehr als etwa 4 dm mit Wasser bedeckt ist, fällt die Strömungsgeschwindigkeit deutlich ab. Die Maximalgeschwindigkeiten innerhalb eines einminütigen Zeitintervalls erreichen Spitzen von 200 cm/s nur noch ausnahmsweise und liegen im Mittel bei 85 cm/s. Für die mittlere Strömungsgeschwindigkeit, integriert über einen entsprechenden Zeitraum, ergeben sich höchstens noch Beträge von 60 cm/s, in der Regel werden 35 cm/s nicht überschritten.

Die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten auf dem Buscherheller überschreiten nur selten Werte von 240 cm/s und liegen damit etwa 50 % niedriger als auf dem Neßmerheller. Die im Vergleich zum Neßmerheller insgesamt wesentlich geringere Strömungsbelastungen sind auf das wesentlich höhere Niveau des vorgelagerten Watts und die daraus resultierende deutlich geringere Seegangsbelastung zurückzuführen.

6.2 Seegangsmessungen

Am *Neßmerheller* wurde die Seegangmeßanlage ursprünglich im Oktober 1989 in einem Abstand von etwa 10 m vor der Hellerkante installiert. Im Laufe der Zeit hat sich der Abstand durch den Kantenabbruch auf fast das Doppelte vergrößert, was allerdings keine wesentliche Veränderung des Wattniveaus mit sich brachte. Die Meßwerterfassung erfolgte ab einem Wasserstand von 6,0 m PN, entsprechend einer Wassertiefe von etwa 50 cm am Meßpfahl.

Die naturgemäß zu erwartende Zunahme der Wellenhöhen mit steigenden Wasserständen zeichnet sich auch hier deutlich ab (Abb. 16). Die maximale Wellenhöhe H_{MAX} beträgt bei ausgereiftem Seegang etwa 50 % der Wassertiefe, die signifikante Wellenhöhe $H_{1/3}$ etwa 30 % der Wassertiefe. Dieses Verhältnis von Wellenhöhen zu Wassertiefen ist auch von anderen Seegangsmessungen bekannt und deutet auf einen Gleichgewichtszustand hin (NIEMEYER, 1987). Eine Belastung der Hellerkante stellen vor allem solche Wellen dar, die die Kante unmittelbar treffen und ihre Energie hier mehr oder weniger schlagartig abgeben. Während sogenannter Kantenfluten entstehen bei Wassertiefen von z. B. $d = 1,3$ m signifikante Wellenhöhen von etwa 40 cm, Einzelwellen können noch bis zu einer maximalen Höhe von 1 m vorkommen. Der Verhältniswert $H/d = 1$ (FÜHRBÖTER, 1974) ist jedoch nicht erreicht worden. Es ist jedoch nicht auszuschließen, daß dieser Wert in Kantennähe bei weiter abnehmender Wassertiefe in Einzelfällen erreicht werden kann. Die bei weiter steigenden Wasserständen auftretenden Spitzengeschwindigkeiten für die Strömung dürften von Wellen mit $H_{1/3}$ von 40 bis 60 cm und H_{MAX} bis 120 cm verursacht werden, die bei etwa 1,5 m Wassertiefe im Watt auf der Helleroberfläche nahe der Hellerkante brechen.

Am *Buscherheller* erfolgte die Wellenregistrierung in einem kleinen Priel in einem Abstand von etwa 20 m zum Heller. Da hier der Übergang vom Watt zum Heller nicht als ausgeprägte Kante, sondern als Böschung geformt ist, kann eine Beeinflussung der Wellenaufzeichnungen durch reflektierte Wellen noch im stärkeren Maße als am Neßmerheller vernachlässigt werden. Aufgrund des hohen Wattniveaus von etwa NN + 1,0 m erfolgt die Wellenmessung erst ab einem Wasserstand von 6,60 m PN (28 cm über MThw). Da am Buscherheller der Seegang erst seit Mitte 1991 aufgezeichnet worden ist und das sturmreiche Frühjahr 1990 somit nicht erfaßt wurde, konnten Wellenmessungen nur bis zu maximalen Wasserständen von etwa 8,10 m PN, entsprechend Wassertiefen am Wellendraht von etwa zwei Metern, durchgeführt werden. Die unter diesen Bedingungen registrierten maximalen Wellenhöhen lagen bei etwa 80 cm. Es deutet sich jedoch an, daß der Seegang bei größeren Wassertiefen nicht die Mittelwerte des Neßmerhellers $H_{MAX}/d = 0,5$ erreicht. Unter Berück-

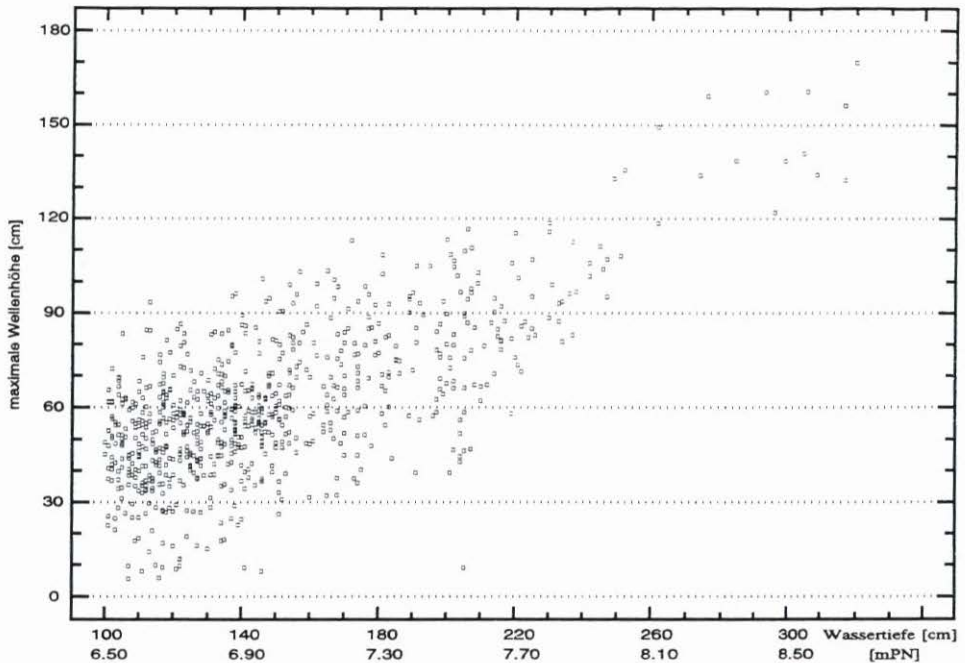


Abb. 16: Abhängigkeit der maximalen Wellenhöhe vom Tidewasserstand (Neßmerheller)

sichtigung des gegenüber dem Neßmerheller um 50 bis 70 cm höheren Wattniveaus ergibt sich eine um mindestens 30 % geringere Seegangsbelastung des Hellers bei Kantenfluten.

Bei Kantenfluten mit Wasserständen zwischen 6,60 und 6,80 m PN liegt das im Priel gemessene H_{MAX} meist zwischen 30 und 40 cm, im Einzelfall auch bis zu 60 cm. Mit steigendem Wasserstand wird der Zustand erreicht, bei dem das Niveau der Hellerkante (ca. 1,9 m NN) überschritten wird. Die auch zuweilen am Buscherheller registrierten hohen Strömungsgeschwindigkeiten bei Wasserständen um 2,0 m NN, entsprechend einer Wassertiefe von einem Meter am Wellendraht, werden durch den Auflaufschwall von Wellen mit Höhen von maximal 70 cm verursacht.

6.3 Abbruch der Hellerkanten

Zur Überwachung und Beurteilung der Hellerkantenabbrüche wurden bereits seit 1985 am Neßmerheller 20, am Buscherheller seit 1987 sieben Kantenprofile regelmäßig vermessen. Um den Einfluß unterschiedlich hoher Lahnungen auf den Kantenabbruch erfassen zu können, wurden im August 1991 drei weitere Kontrollprofile angelegt. Die morphologische Ausbildung der Hellerkante sowie das Niveau der vorgelagerten Wattflächen stellten nicht nur deutliche Unterscheidungsmerkmale zwischen Neßmerheller und Buscherheller dar, sondern begründeten auch das verschiedene Abbruchverhalten der Kanten. So bestehen im Abbruchverhalten deutliche Unterschiede zwischen Hellerkanten hinter niedrigem Watt (NN + 0,5 m) und hohem Watt (NN + 0,9 m) sowie zwischen durch Lahnungen geschützten und ungeschützten Hellerkanten.

Die ermittelten exakten Abbruchraten des *Neßmerhellers* sind in Abb. 17 dargestellt. Nach der von der Topographie und dem Schutzfaktor „Lahnung“ bestimmten Abbruchintensität können drei Gruppen von Hellerprofilen unterschieden werden. Diese sind in Tab. 1 aufgeführt. In dieser Tabelle sind zwei Zahlen besonders bemerkenswert: Die Hellerkante brach nach den Messungen von 1985 bis 1991 hinter *niedrigem* Watt und *ohne* schützende Lahnung etwa 3 m pro Jahr ab. 1991 wurde dieser Bereich durch eine

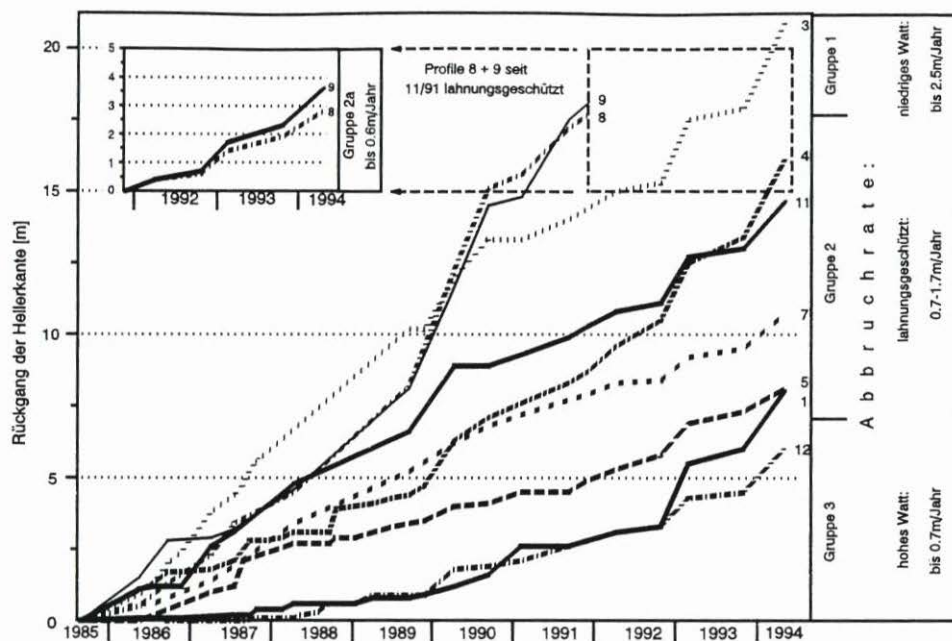


Abb. 17: Summenlinien des Kantenabbruchs in Meßprofilen des *Neßmerhellers* (Lage siehe Abb. 2)

Tab. 1: Abbruchraten des *Neßmerhellers* in Abhängigkeit von dem Schutzsystem (Topographie und Lahnungsschutz)

Gruppe	Profil	Schutzsystem	mittlere Abbruchrate
1	3	Niedriges Watt (ca. NN + 0,5), ohne vorgelagerte Buschlahnung	rd. 2,5
1 a	8, 9	Niedriges Watt (ca. NN + 0,5), bis 1991 ohne vorgelagerte Buschlahnung	rd. 3,0
2	4, 11, 7 5, 1	Niedriges Watt (ca. NN + 0,5 m) mit vorgelagerter Buschlahnung (OK = MThw)	bis 1,7
2 a	8, 9	Niedriges Watt (ca. NN + 0,5 m) ab 1991 mit vorgelagerter Buschlahnung (OK = MThw + 0,3 m)	rd. 0,6
3	12	Hohes Watt (ca. NN + 0,9 m) ohne vorgelagerte Buschlahnung	bis 0,7

Buschlahnung mit einer Oberkante von MThw + 0,3 m geschützt. Das Abbruchverhalten veränderte sich seit der Fertigstellung dieser Lahnung schlagartig: Die Abbruchrate ging auf 0,6 m pro Jahr zurück, auch ohne daß die Wathöhe sich im schützenden Lahnungsfeld schon auf ein höheres Niveau eingestellt hatte. Der wesentlich bessere Schutz der Hellerkante durch eine Lahnung mit einer „klassischen“ Oberkantenhöhe von MThw + 0,3 m wird dadurch deutlich hervorgehoben.

Die Hellerkante des *Buscherhellers* unterscheidet sich nicht nur in der Form, sondern auch in der Abbruchintensität grundlegend von der des *Neßmerhellers*. Der Übergang vom relativ hoch gelegenen Watt (ca. NN + 1,1 m) zum Heller ist nicht durch die Ausbildung einer Steilkante, sondern vielmehr durch einen flachen, etwa 1:50 geneigten Geländeanstieg auf NN + 1,8 bis 2,0 m charakterisiert. Innerhalb des fünfjährigen Erfassungszeitraumes von 7/87 bis 8/92 ist an sieben Profilen mit festgelegten Meßpunkten nur eine geringfügige, kaum meßbare Erosion festzustellen. Das ist in erster Linie darauf zurückzuführen, daß hier – im Gegensatz zur schlagartigen Energieabgabe an der Kante des *Neßmerhellers* – die Wellenenergie durch das hohe Wattniveau und den allmählichen Übergang zum Heller mehr oder weniger gleichmäßig abgegeben und dadurch auf einen breiteren Streifen verteilt wird.

7. Bodenkundliche und bodenphysikalische Untersuchungen

7.1 Einflüsse von Geländehöhe, Begrüppung, Beweidung und Bodenart auf die Entwicklung der Hellerböden

Die Böden der drei Untersuchungsgebiete sind nach der „Bodenkundlichen Kartieranleitung“ dem Bodentyp „See- oder Salzmarsch“ zuzuordnen. Eine weitere Klassifizierung der untersuchten, semiterrestrischen Marschenböden auf der Subtypenebene ist wegen der geringen Divergenz der Gliederungsmerkmale und deren Veränderbarkeit im Jahresverlauf nicht sinnvoll. Entscheidende Bedeutung für die Entwicklung der Grundwasserböden des Deichvorlandes haben die Faktoren Geländehöhe, Begrüppung, Beweidung und Bodenart. Die bestehenden Unterschiede in der Bodenentwicklung sind an der in Tab. 2 aufgeführten Horizontierung der Profile zu erkennen und werden im folgenden kurz skizziert.

Die *Geländehöhe* gibt die Mächtigkeit des über dem ständig nassen, reduktomorphen Unterboden (Gr-Horizont) anstehenden extrovertiert redoximorphen Oberbodens vor und bestimmt den Meereseinfluß auf bodenbildende Prozesse wie Belüftung, Oxidation, Entsalzung, Umladung der Sorbenten, Sackung und Gefügeausbildung. Im Gegensatz zu den Versuchsflächen *Buscherheller* und *Neßmerheller* sind auf den „Versuchsfeldern Leybucht“, die sich durch einen besonders bindigen Boden auszeichnen, bereits markante, von der Geländehöhe abhängige Unterschiede in der Bodenentwicklung festzustellen; diese können anhand der Horizontabfolge bei zwei verschiedenen Standorten auf der unbeweideten und unbegrüpften Fläche beschrieben werden.

Das Bodenprofil aus der unteren Salzwiese der „Versuchsfelder Leybucht“ (Standort 4, siehe Abb. 4) zeigt einen erst sehr geringen Entwicklungsstand. Der AiGo-Horizont weist durch Eisenoxide hervorgerufene, rostrot gefärbte Konkretionen und Rostflecken auf. Der sich anschließende Gro-Horizont mit seinen Oxidations- und Reduktionsmerkmalen geht in ungefähr 45 cm Tiefe in einen durch reduzierte Schwefeleisen-Verbindungen geprägten, tiefschwarzen Gr-Horizont über. Im höher gelegenen, deichnahen Bereich (Standort 2, siehe Abb. 4) ist der Boden deutlich weiter entwickelt. Hier hat sich bereits ein ca. 15 cm

Tab. 2: Bodenhorizonte der untersuchten Hellerprofile für die Standorte (St. Nr.) gem. Abb. 4³

„Versuchsfelder Leybucht“														
unbeweidet unbegrüppt			unbeweidet begrüppt			0,5 R/ha begrüppt			1 R/ha begrüppt			normal begrüppt		
St. Nr.	Horiz.	Tiefe (cm)	St. Nr.	Horiz.	Tiefe (cm)	St. Nr.	Horiz.	Tiefe (cm)	St. Nr.	Horiz.	Tiefe (cm)	St. Nr.	Horiz.	Tiefe (cm)
2	Ah	-15	1	Ah	-15	16	AiGo	-6	8	AiGo	-6	12	AiGo	-8
	Go1	-40		Go1	-35		Go1	-40		Go	-23		Gro	-25
	Go2	-75		Go2	-60		Go2	-60		Gor	-60		Gor	-60
	Gr	> 75		Gr	> 60		Gr	> 60		Gr	> 60		Gr	> 60
4	AiGro	-20	3	Ah	-7	17	AiGro	-6	19	AiGro	-5	9	AiGro	-6
	Gro	-45		Go	-30		Go	-40		Go	-22		Gro	-20
	Gr	> 45		Gor	-45		Gro	-60		Gor	-37		Gor	-50
				Gr	> 45		Gr	> 60		Gr	> 37		Gr	> 50
6	AiGro	-10	5	Ah	-7	18	AiGo	-5	20	AiGo	-5	10	AiGo	-6
	Go	-20		Go	-30		Go	-35		Go	-22		Gro	-18
	Gro	-45		Gor	-45		Gro	-48		Gor	-35		Gor	-35
	Gr	> 45		Gr	> 45		Gr	> 48		Gr	> 35		Gr	> 35
7	AiGo	-13												
	Gro	-45												
	Gr	> 45												
Buscherheller						Neßmerheller								
außerhalb der Salzpfannen			innerhalb einer Salzpfanne			seit 1988 unbeweidet			1 R/ha					
St. Nr.	Horiz.	Tiefe (cm)	St. Nr.	Horiz.	Tiefe (cm)	St. Nr.	Horiz.	Tiefe (cm)	St. Nr.	Horiz.	Tiefe (cm)			
1	AiGo	-8	2	Gro	-5	3	Ai	-5	4	Ai	-5			
	Gor1	-30		Gor1	-20		Go1	-35		Go1	-35			
	Gor2	-65		Gor2	-55		Go2	-80		Go2	-80			
	Gr	> 65		Gr	> 55		Gr	> 80		Gr	> 80			

³Ah: Mineralischer Oberboden mit 0,6–15,0 Gew.% org. Substanz (h = humos)
Ai: Initialstadium der Humusanreicherung im Oberboden mit < 0,6 Gew.% org. Subst., oder < 2 cm Mächtigkeit bei > 0,6 Gew. % org. Subst.
Go: Grundwasserbeeinflusster Oxidationshorizont mit > 10 Flächen% Rostflecken oder/und Carbonatflecken; entstanden im Grundwasserschwankungsbereich, einschließlich des geschlossenen Kapillarraums (o = oxidiert)
Gr: im ständigen Grundwasserbereich des Bodens unter Reduktionsbedingungen entstandener G-Horizont, < 5 Flächen% Rostflecken (r = reduziert), ausschließlich an Wurzelbahnen
Gro: G-Horizont mit 5–10 Flächen% Rost- und/oder Carbonatflecken außerhalb von Wurzelbahnen
Gor: G-Horizont mit < 5 Flächen% Rost- und/oder Carbonatflecken außerhalb von Wurzelbahnen

³Ah: Mineralischer Oberboden mit 0,6–15,0 Gew.% org. Substanz (h = humos)

Ai: Initialstadium der Humusanreicherung im Oberboden mit < 0,6 Gew.% org. Subst., oder < 2 cm Mächtigkeit bei > 0,6 Gew.% org. Subst.

Go: Grundwasserbeeinflusster Oxidationshorizont mit > 10 Flächen% Rostflecken oder/und Carbonatflecken; entstanden im Grundwasserschwankungsbereich, einschließlich des geschlossenen Kapillarraums (o = oxidiert)

Gr: im ständigen Grundwasserbereich des Bodens unter Reduktionsbedingungen entstandener G-Horizont, < 5 Flächen% Rostflecken (r = reduziert), ausschließlich an Wurzelbahnen

Gro: G-Horizont mit 5–10 Flächen% Rost- und/oder Carbonatflecken außerhalb von Wurzelbahnen

Gor: G-Horizont mit < 5 Flächen% Rost- und/oder Carbonatflecken außerhalb von Wurzelbahnen

mächtiger, humoser Ah-Horizont ausgebildet, der keine Rostflecken und Konkretionen mehr aufweist. Darunter folgt ein gut durchlüfteter und entsprechend nur Fe-geprägter Go-Horizont, der erst in 75 cm Tiefe in einen Gr-Horizont übergeht. Außer in ihrer Horizontabfolge unterscheiden sich die Böden profilmorphologisch auch in ihrer Gefügeform. So weist der Boden der unteren Salzwiese noch kein Aggregatgefüge auf, während im Oberbo-

den der oberen Salzwiese bereits eine deutliche Krümelgefügebildung auftritt und der Go-Horizont hier Übergänge vom Kohärent- zum Polyedergefüge zeigt.

Kurz zusammengefaßt: Mit ansteigendem Hellerniveau nimmt die Mächtigkeit der durchlüfteten, über dem ständig nassen Reduktionshorizont anstehenden Bodenschicht zu und gleichzeitig die Überflutungshäufigkeit und -dauer logarithmisch ab. Durch die sich mit zunehmender Geländehöhe verbessernde Belüftung des Bodens werden die Prozesse der Pedogenese intensiviert und das Wurzelwachstum gefördert. Beide Vorgänge führen zur Stabilisierung des Hellers.

Die *Begrüpfung* bewirkt eine schnellere Entwässerung des Deichvorlandes, eine Absenkung des Grundwasserspiegels sowie eine im Jahresmittel deutlich verbesserte Bodendurchlüftung und ist somit ebenfalls von signifikanter Bedeutung für die bodenbildenden Prozesse und damit für die Festigkeit des Hellers. Außerdem bewirkt der Aushub eine Erhöhung der Hellerfläche, die wiederum zu einer verbesserten Bodenentwicklung führen kann. Auf der *unbeweideten* Versuchsfläche ist dieser Einfluß aufgrund der geringfügigen Niveauunterschiede (1 bis 3 cm) zwischen den begrüpten und unbegrüpften Standorten jedoch zu vernachlässigen. Dies gilt vor allem für Flächen der oberen Salzwiese, während im tiefer gelegenen Gelände (Standort 3) deutlich positive Auswirkungen der Begrüpfung auf pedogenetische Prozesse zu beobachten sind. Während bei einer fehlenden Begrüpfung der Oberboden starken Grundwassereinflüssen ausgesetzt ist und sich noch im Initialstadium seiner Entwicklung befindet, hat das intakte Grüppensystem hier zu Ausbildung eines ca. 7 cm mächtigen Ah-Horizonts mit Übergängen vom Subpolyeder- zum Krümelgefüge geführt.

In bezug auf *Beweidung* ist auf den begrüpten Versuchsflächen eine Abnahme der Bodenentwicklung mit zunehmender Beweidungsintensität festzustellen. Sie ist im wesentlichen auf den oberen Profilbereich beschränkt und dort sowohl in den Böden der unteren als auch der oberen Salzwiese zu beobachten. Stärkere Beweidung führt dabei auf stark bindigen Böden zu Bodenverdichtung, reduziert die Durchlüftung des Bodens und erhöht den Grad der Wassersättigung. Eine Beweidung der Hellerfläche mit mehr als 1 Rind/ha hat im Oberboden von stark bindigen Böden im Bereich der „Versuchsfelder Leybucht“ sogar zur Ausbildung einer sauerstoffarmen Reduktionszone geführt, die mit einer Verringerung der Wurzelentwicklung verbunden ist.

Im Gegensatz dazu führt eine extensive Beweidung mit 0,5 Rind/ha auf den stark bindigen Böden der „Versuchsfelder Leybucht“ zu deutlich gemäßigten Veränderungen der Bodeneigenschaften und -entwicklungen. So weisen die Profile der mit 0,5 Rind/ha beweideten Fläche nur einen schwach ausgebildeten, noch deutlich grundwasserbeeinflussten AiGo-Horizont mit dichtgelagertem Polyeder- bis Subpolyedergefüge auf und unterscheiden sich damit aufgrund des geringen Viehbesatzes im mäßigen, aber erkennbaren Umfang von den Profilen der unbeweideten und begrüpten Versuchsflächen, die gut strukturierte Ah-Horizonte aufweisen. Mit Zunahme der Beweidungsintensität von 0,5 auf 1 Rind/ha auf dem Buscher- und Neßmerheller sind keine profilmorphologisch markanten Auswirkungen verbunden. Erst bei sehr intensiver (normaler) Beweidung kommt es zu einer weiteren, morphologisch erkennbaren Veränderung im Profil.

Beim Faktor *Bodenart* sind Aussagen zur körnungsabhängigen Bodenentwicklung auf den verschiedenen Untersuchungsflächen nur sehr begrenzt möglich, da sowohl der Buscherheller als auch der Neßmerheller – letzterer mit Ausnahme des aus der Beweidung herausgenommenen Bereiches – auf ihrer gesamten Fläche mit 1 Rind/ha beweidet werden. Allgemein ist eine mit zunehmender Körnung geringfügig abnehmende Entwicklung des Oberbodens von der mit 1 Rind/ha beweideten Versuchsfläche Leybucht über den Buscherheller

zum Neßmerheller zu beobachten. Das Initialstadium der Genese (Ai/AiGo-Horizonte) wurde aber auf keiner der Untersuchungsgebiete überschritten. Auf den unbeweideten Teilbereichen des Neßmerhellers konnten über einen Zeitraum von vier Jahren keine Veränderungen in der Bodenentwicklung festgestellt werden. Dagegen haben sich auf der unbeweideten Versuchsfläche Leybucht in einem ähnlichen Zeitraum sehr deutliche bodenmorphologische Unterschiede zwischen den unbegrüpften und begrüpften Bereichen ausgebildet. Es kann damit gefolgert werden, daß die Entwicklung des tonigen Bodens der Leybucht bei der Konstellation „unbeweidet/begrüpft“ bedeutend schneller abläuft als die Entwicklung des sandigen Bodens des Neßmerhellers.

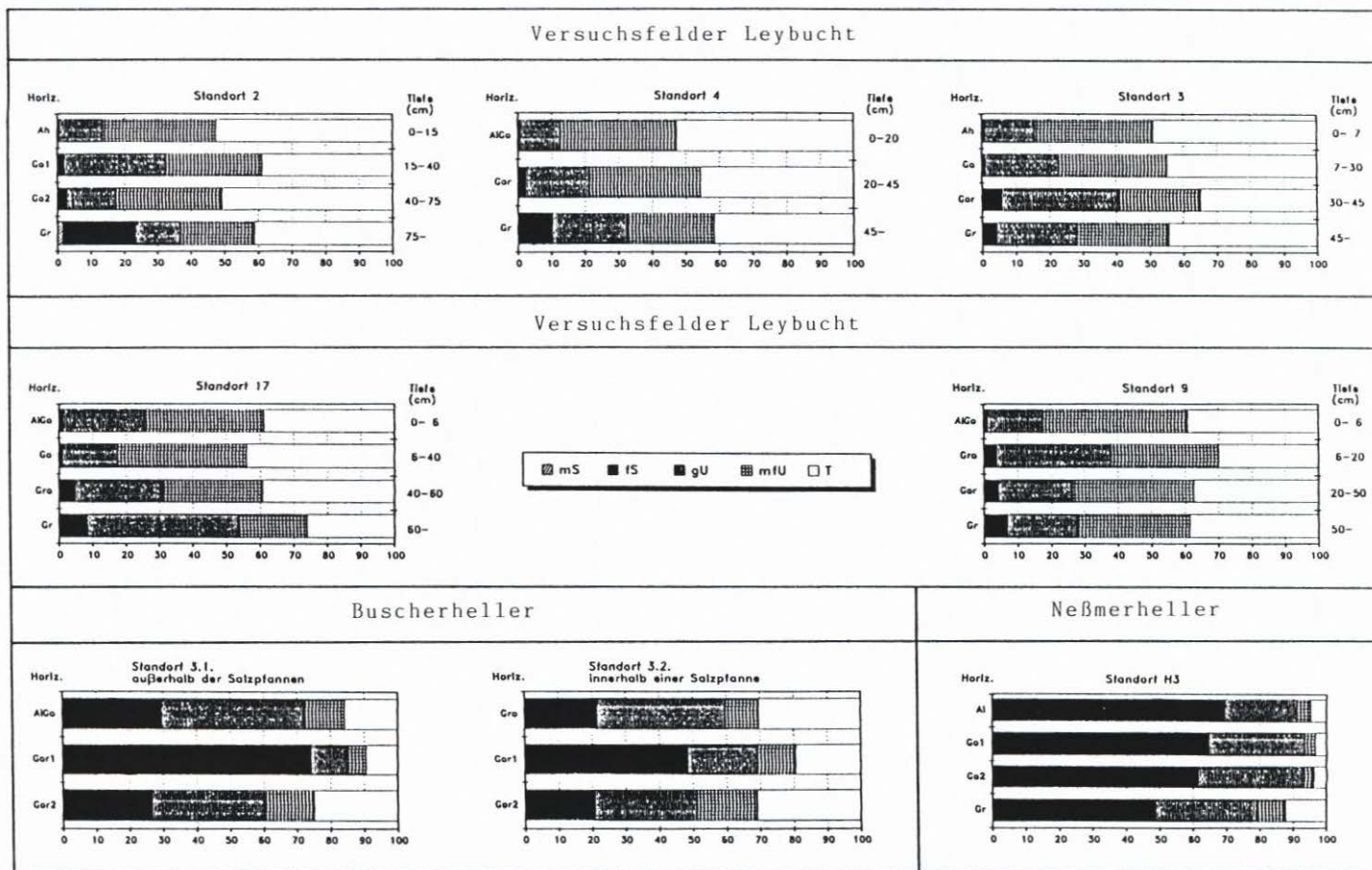
7.2 Bodenphysikalische Parameter

Die *Korngrößenanalysen* verdeutlichen, daß auf den „Versuchsfeldern Leybucht“ ausschließlich schluffig-tonige Sedimente – Bodenartengruppe schluffiger Ton (uT) – zur Ablagerung gekommen sind. Dennoch ist eine vom Standort und der Bewirtschaftung abhängige Varianz in der Körnung ersichtlich. So nimmt erwartungsgemäß mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit der Tonanteil auf allen Versuchsflächen deichwärts deutlich zu (Abb. 18). Aber auch die Beweidung übt einen Einfluß auf das Kornspektrum aus. So nimmt der Tonanteil von der unbeweideten Fläche in Seenähe zur beweideten um 5 %, in Deichnähe sogar um 17 % zugunsten des Schluffanteils ab. Dagegen beeinflusst die Begrüpfung offensichtlich das Kornspektrum nur geringfügig, führt aber in der oberen Salzwiese immerhin zu einer leichten Erhöhung des Tonanteils, während in der unteren Salzwiese die Schluffablagerung begünstigt wird.

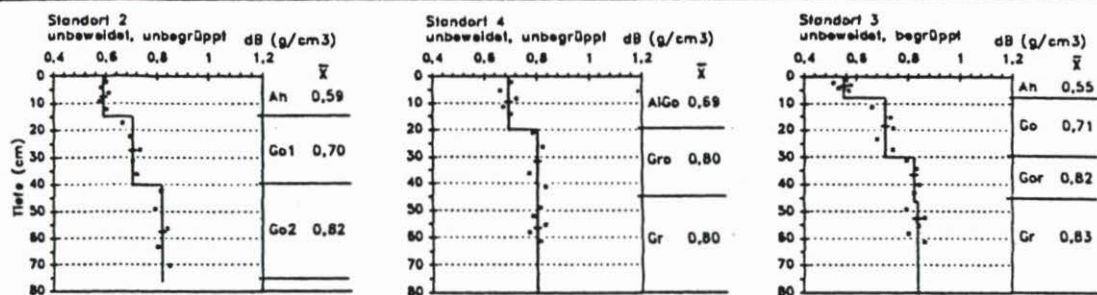
Im Boden des Neßmerhellers dominieren die Feinsandanteile. Sie nehmen mit der Tiefe von 70 auf 50 % ab, bei gleichzeitiger Zunahme der Ton- und Schluffgehalte. Die Bodenartengruppe ist dem schluffigen/schluffig-lehmigen Sand zuzuordnen. Eine Beeinflussung des Korngrößenspektrums durch Begrüpfung konnte nur in der unteren Salzwiese auf den „Versuchsfeldern Leybucht“ festgestellt werden.

Auf allen Standorten der drei Untersuchungsgebiete steigt die *Lagerungsdichte* als Resultat der Bodenentwicklungs- und Setzungsprozesse vom Oberboden (A-Horizont) zum Unterboden (G-Horizont) deutlich an (Abb. 19). Für die „Versuchsfelder Leybucht“ ist eine signifikante Abnahme der Lagerungsdichte im Oberboden mit zunehmender Geländehöhe charakteristisch. Auf den beweideten Flächen ist hierfür hauptsächlich die deichwärts abnehmende Korngröße der Sedimente und die damit verbundene Zunahme des Porenvolumens verantwortlich zu machen. Weiterhin ist mit zunehmender Beweidungsintensität ein deutlicher Anstieg der Lagerungsdichte im Oberboden erkennbar. Lediglich auf dem normal beweideten Feld ist eine auffällig starke Zunahme im obersten Horizont des Unterbodens charakteristisch, dann sinkt die Lagerungsdichte auf das Niveau der weniger intensiv beweideten Flächen (Abb. 19). Offensichtlich wird der Viehtritt auf den mit 0,5 und 1 Rind/ha beweideten Parzellen durch die Vegetationsnarbe zum größten Teil abgepuffert und eine stärkere Verdichtung des Unterbodens verhindert. Dagegen werden Vegetation und Oberboden bei intensiverer Beweidung stark beansprucht. Die Hufe sinken tiefer ein und führen zu der beschriebenen Kompression im oberen Bereich des Unterbodens.

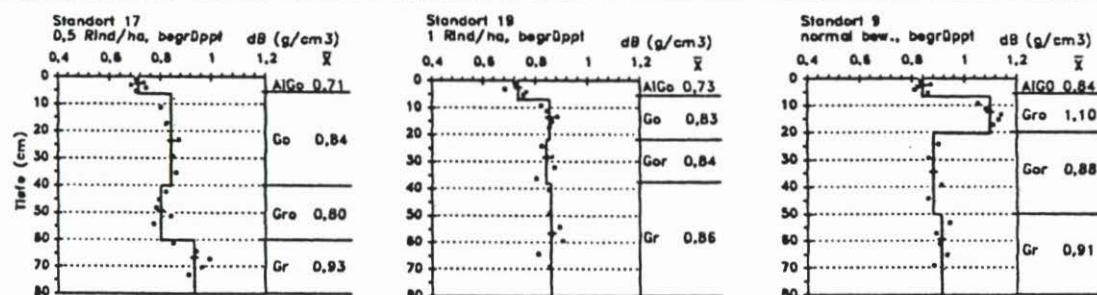
Erwartungsgemäß nimmt die Lagerungsdichte von den tonigen Böden der „Versuchsfelder Leybucht“ über den lehmigen Boden des Buscherhellers zum sandigen Boden des Neßmerhellers sowohl im Ober- als auch im Unterboden signifikant zu, im Unterboden aber auf einem deutlich höheren Niveau. Offensichtlich hat die Genese des Oberbodens – obwohl



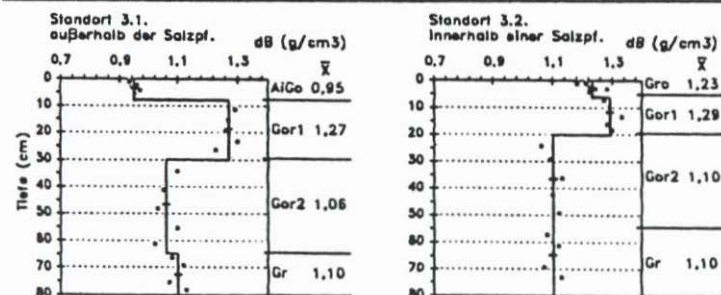
Versuchsfelder Leybucht



Versuchsfelder Leybucht



Buscherheller



Neßmerheller

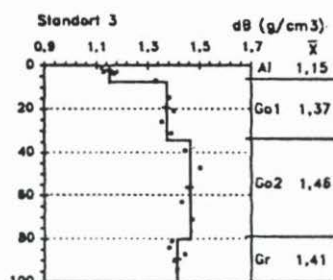


Abb. 19: Lagerungsdichte repräsentativer Standorte auf den drei Untersuchungsgebieten

auf allen Untersuchungsflächen noch im Initialstadium befindlich – bereits eine Abnahme der Lagerungsdichte induziert.

Der Wassergehalt der untersuchten Böden unterliegt, in kausaler Beziehung zu den Witterungsbedingungen und den Hellerüberflutungen, jahreszeitlichen Schwankungen. Sie führen zu den niedrigsten Wassergehalten in den trockenen Sommermonaten und den höchsten in den niederschlags- sowie überflutungsreichen Wintermonaten. Zunehmende Geländehöhe bedingt stets, Begrüppung in den meisten Fällen eine Abnahme des Wassergehaltes. Jedoch zeigt sich, daß ein Grüppensystem nicht nur eine entwässernde, sondern z. T. auch

eine bewässernde Funktion ausüben kann und dadurch sogar zu einem über dem Niveau der unbegrüpften Parzellen liegenden Wassergehalt führen kann. Entsprechend der körnungsbedingten Abnahme des Porenvolumens von den „Versuchsfeldern Leybucht“ über den Buscherheller zum Neßmerheller ist auch ein Rückgang im Wassergehalt zu verzeichnen.

Die *Aggregatstabilität* gibt Auskunft über die Widerstandskraft eines Bodengefüges gegen erhöhte Beanspruchung, wie sie durch Strömung und Wellenschlag verursacht wird (KUNTZE et al., 1983). Sie ist daher ein wichtiges Maß für die Erosionsfestigkeit der untersuchten Deichvorlandböden.

Mit Ausnahme der normal beweideten Versuchsfläche in der Leybucht nimmt die Aggregatstabilität auf allen Untersuchungsgebieten vom Unter- zum Oberboden deutlich zu, was im wesentlichen auf die verklebende Wirkung der im Oberboden akkumulierten organischen Substanzen zurückzuführen ist. Trotz der deutlichen Beziehung zwischen organischer Substanz und Aggregatstabilität ist diese nicht statistisch sicherbar. Hierfür sind zum einen die auf das Bodengefüge bzw. die Bodenentwicklung einflußnehmenden Faktoren Geländehöhe, Bewirtschaftungsform und Bodenart verantwortlich zu machen, zum anderen zeigen erhebliche jahreszeitliche Schwankungen, daß die Aggregatstabilität von weiteren, sehr variablen Bodenparametern, wie z. B. dem Wassergehalt (Schrumpfung bzw. Quellung), abhängig ist (Abb. 20).

Auf der im natürlichen Zustand belassenen Versuchsfläche Leybucht ist die mit ansteigendem Gelände zunehmende Bodenentwicklung mit einer deutlichen Erhöhung der Aggregatstabilität verbunden. Eine der höheren Geländelage gleichwertige Bedeutung ist der Begrüppung beizumessen, die sich durch die Bildung eines Subpolyeder-/Krümelgefüges ebenfalls positiv auf die Aggregatstabilität im Oberboden auswirkt.

Beweidung verursacht auf den „Versuchsfeldern Leybucht“ durch die Zerstörung des Bodengefüges eine erhebliche Abnahme der Aggregatstabilität, so daß auf der normal (= intensiv) beweideten Fläche die geringsten Werte erreicht werden. Weiterhin nimmt mit zunehmender Korngröße die Aggregatstabilität von den Versuchsfeldern zum Neßmerheller stark ab. Parallel dazu gewinnt die stabilisierende Wirkung der organischen Substanzen im Oberboden an Bedeutung.

8. Botanische Untersuchungen

8.1 Pflanzensoziologische Aspekte

Die Ergebnisse der pflanzensoziologischen Untersuchungen, die im August 1990 durchgeführt wurden, lassen sich wie folgt zusammenfassen:

In den nicht beweideten Flächen der „*Versuchsfelder Leybucht*“ trat die typische Zonierung der Pflanzengesellschaften des Deichvorlandes am deutlichsten auf. Nach der Verlandungszone, die von der Queller-Gesellschaft, aber auch von Salzschlickgras-Wiesen geprägt war, folgten die verschiedenen Stadien des Andelrasens (Standorte 5 u. 6, siehe Abb. 4), die flächenmäßig den größten Teil der Versuchsfelder einnahmen. Auf den höher gelegenen Bereichen der Versuchsfelder waren hauptsächlich Rotschwingel-Andelrasen ausgebildet (Standorte 1 u. 2, siehe Abb. 4). An diesen beiden unbeweideten Standorten war *Agropyron repens* ssp. *mar.* eindeutig dominant. Diese Art fand unter Ausschluß der Beweidung hier anscheinend optimale Wachstumsbedingungen vor und entwickelte dichte, vitale Bestände. Gegenüber diesen unbeweideten Bereichen zeichneten sich Standort 20 (Bereich des Andelrasens) und 8 (Rotschwingelwiese) im beweideten Areal der „*Versuchsfelder Ley-*

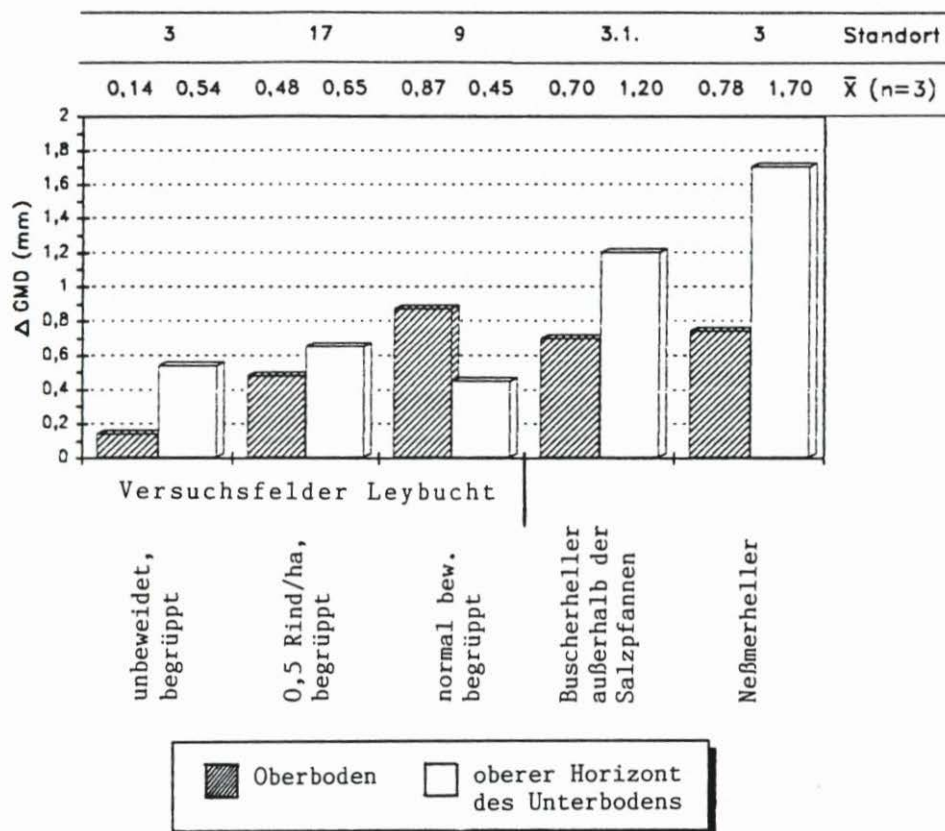


Abb. 20: Aggregatstabilität im Boden repräsentativer Standorte auf den drei Untersuchungsgebieten

bucht“ durch eine Erhöhung der Artendichte aus. Die Pflanzengemeinschaft von Standort 20 war durch das *Puccinellietum maritimae* charakterisiert, wobei im Vergleich zu Standort 5 und 6 zusätzlich *Suaeda maritima*, *Salicornia stricta*, *Cochlearia anglica* und *Spergularia salina* vertreten waren.

Auf dem *Buscherheller* kam die typische Ausprägung des Andelrasens nur sehr vereinzelt und kleinflächig vor. Im Bereich der Salzpflanzen (eingesenkte, vegetationsarme Bereiche) war die Zusammensetzung der Vegetation charakterisiert durch die Assoziation des *Puccinellio maritimae*-*Salicornietum ramosissimae*, in der *Puccinellia maritima*, *Suaeda maritima*, *Aster tripolium*, *Spergularia maritima* und *Salicornia stricta* dominierten.

Ein Teil des *Neßmerhellers* wurde 1989 aus der Beweidung herausgenommen. Hier war mit einer mittleren Artenzahl von 8 das bei weitem breiteste Artenspektrum vorhanden. Der Vegetationstyp konnte durch die Assoziation des *Juncetum gerardii* beschrieben werden. Der Heller war insbesondere in Nähe der Abbruchkante durchsetzt von vegetationsarmen Bereichen. Dabei waren nicht nur die Gesamt-Deckungsgrade der beiden Standorte unterschiedlich hoch, auch die Anteile der Arten variierten. So war z. B. im Inneren der vegetationsarmen Stellen die Deckung von *Festuca rubra* und *Agrostis stolonifera* geringer als außerhalb, dagegen traten *Salicornia stricta*, *Suaeda maritima*, *Triglochin maritimum*, *Spergularia salina* und *Puccinellia maritima* vermehrt auf.

8.2 Unterirdische Biomasse und ihre Abhängigkeit von der Beweidung der Heller

Die unterirdische Biomasse setzt sich aus Mikroorganismen, tierischen Organismen und Pflanzenteilen zusammen. Im Rahmen dieses Projektes wurde nur der Beitrag der Vegetation zur unterirdischen Biomasse bearbeitet. Er umfaßt lebende und tote Wurzeln, Rhizome und überschlickte bzw. eingetretene oberirdische Pflanzenteile. Die vertikale Verteilung der unterirdischen Biomasse wurde im Rahmen dieses Projektes an zehn Standorten kontinuierlich untersucht. Es galt die Frage zu beantworten, ob sich in Abhängigkeit von Standortfaktoren wie Beweidung oder Begrüpfung ein bestimmtes vertikales Verteilungsprofil ergibt. Obwohl deutlich gezeigt werden konnte, daß die vertikale Verteilung der Biomasse auf den Hellerflächen (jahres-) zeitlich nicht stabil ist, ergaben sich standorttypische Verteilungsprofile.

So ließ sich der Einfluß der Begrüpfung auf den unbeweideten Versuchsfeldern Leybucht untersuchen, wo die Standorte 1 und 5 (Abb. 4) vor Beginn der Untersuchungen im April 89 neu begrüpft wurden, die Standorte 2 und 6 dagegen nicht. Wie aus Abb. 21 hervorgeht, wies der begrüpfte Standort bis auf den Bereich von 10 bis 16 cm Bodentiefe den höheren Biomassegehalt auf als der unbegrüpfte Standort. Diese Abweichungen sind allerdings nicht im statistischen Sinne signifikant.

Der Einfluß der Beweidung auf die vertikale Verteilung der unterirdischen Biomasse konnte auf den Versuchsfeldern Leybucht an unbeweideten und begrüpften bzw. beweideten und begrüpften Standorten erarbeitet werden. Dabei waren die vertikalen Verteilungen unterirdischer Biomasse an den unbeweideten und beweideten Standorten in typischer Weise voneinander verschieden. Abb. 22 zeigt, daß an den unbeweideten Standorten mit 70 % der größte Teil der unterirdischen Biomasse in der Bodenschicht von 0 bis 10 cm konzentriert war. Der Gehalt an Biomasse in der Bodenschicht von 10 bis 20 cm war mit ca. 30 % dagegen nur noch gering. In ca. 10 cm Tiefe befand sich eine markante Übergangszone, die zwei Bodenschichten mit unterschiedlichem Biomassegehalt voneinander trennte. Eine derartige Übergangszone war an den beweideten und begrüpften Standorten nicht vorhanden. Hier nahm der Gehalt an unterirdischer Biomasse mit zunehmender Bodentiefe zwar ebenfalls ab, doch nicht so rapide wie an den unbeweideten Standorten. Im Bereich von 10 bis 20 cm Bodentiefe waren hier immer noch mehr als 40 % der Gesamt-Biomasse vorhanden.

8.3 Einfluß der unterirdischen Biomasse auf den Bodenwiderstand der Heller

Die unterirdische Biomasse, der Bodenwassergehalt, der Bodenwiderstand und weitere Parameter des Bodens sind deutlichen jahreszeitlichen Änderungen unterworfen. Sie alle tragen in komplexer Weise und mit gegenseitigen Abhängigkeiten zur Festigkeit des Salzwiesenbodens bei. Dies erschwert die Quantifizierung des Beitrages der unterirdischen Biomasse. Geht man davon aus, daß der Penetrationswiderstand in erster Linie von der Textur und dem Wassergehalt des Bodens sowie der Durchwurzelungsintensität bestimmt wird, sollte es möglich sein, in einer multiplen Analyse den Einzelbeitrag der unterirdischen Biomasse am gemessenen Gesamtwiderstand des Bodens abzuschätzen. Diese Analyse wird im folgenden für Sommer- und Winterhalbjahr getrennt vorgestellt:

Die Situation im Winterhalbjahr (Oktober bis März) ist durch einen relativ niedrigen Bodenwiderstand gekennzeichnet, dessen erstes Maximum in 7 cm Bodentiefe liegt. Erst ab 15 cm Tiefe führt eine erneute Zunahme des Bodenwiderstandes zu vergleichbar hohen Wer-

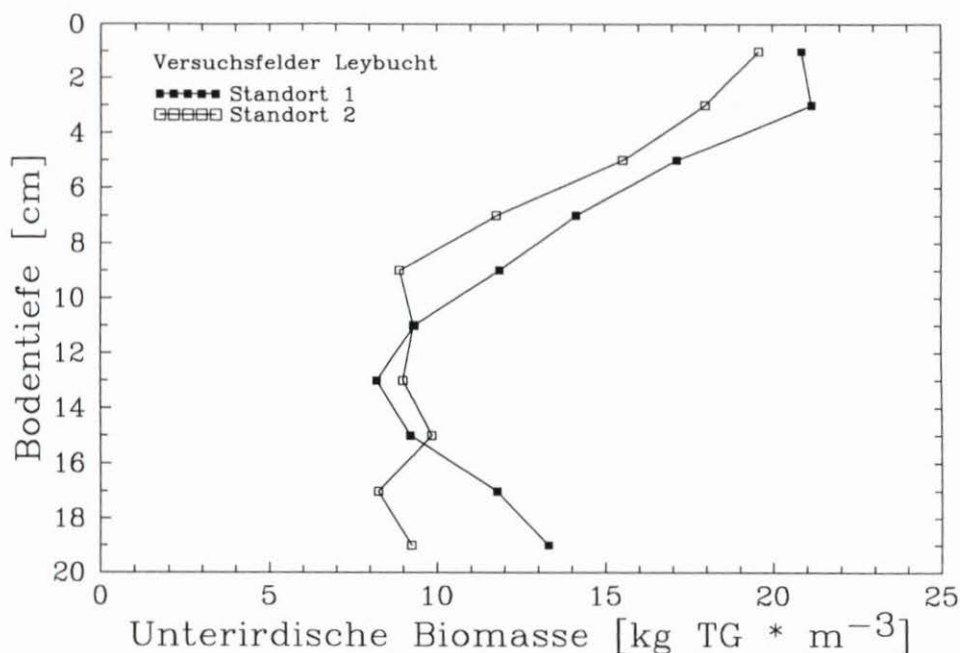


Abb. 21: Durchschnittliche vertikale Verteilung der unterirdischen Biomasse an den Standorten 1 (be-grüpft) und 2 (unbe-grüpft)

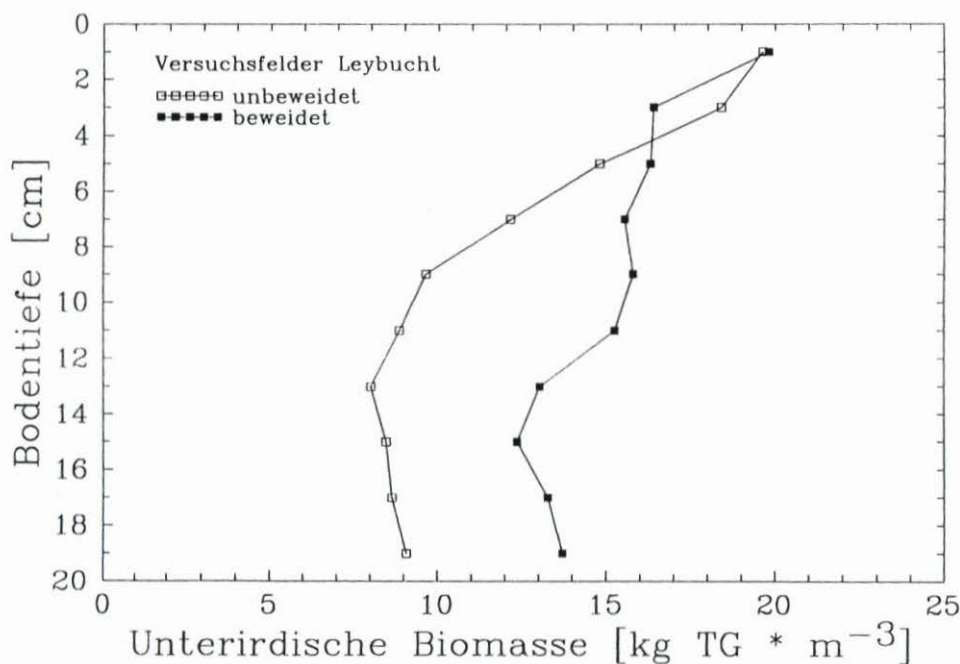


Abb. 22: Durchschnittliche vertikale Verteilung der unterirdischen Biomasse von unbeweideten und beweideten Standorten der Versuchsfelder Leybucht

ten. Der Gehalt an unterirdischer Biomasse nimmt bis 13 cm Bodentiefe ab, um danach wieder anzusteigen. Der Bodenwiderstand sinkt mit zunehmender Bodentiefe, während die Lagerungsdichte stetig ansteigt (Abb. 23). Im Sommerhalbjahr (April bis September) ist der Bodenwiderstand relativ hoch, sein Maximum liegt deutlich in 3 cm Bodentiefe, danach nimmt er ab. Der maximale Gehalt unterirdischer Biomasse befindet sich direkt unter Bodenoberfläche. Mit zunehmender Bodentiefe geht der Gehalt unterirdischer Biomasse zurück. Der Bodenwassergehalt nimmt ab 7 cm Tiefe geringfügig ab, und in der Lagerungsdichte hat sich im Vergleich zum Winterhalbjahr nichts verändert. Sie nimmt mit zunehmender Bodentiefe stets zu.

Der Bodenwassergehalt wirkt als dominierender Faktor auf den Bodenwiderstand ein. Erreicht der Wassergehalt im Boden extrem niedrige oder hohe Werte, so können Einflüsse der unterirdischen Biomasse leicht überdeckt werden. Die Lagerungsdichte, ein weiterer Pa-

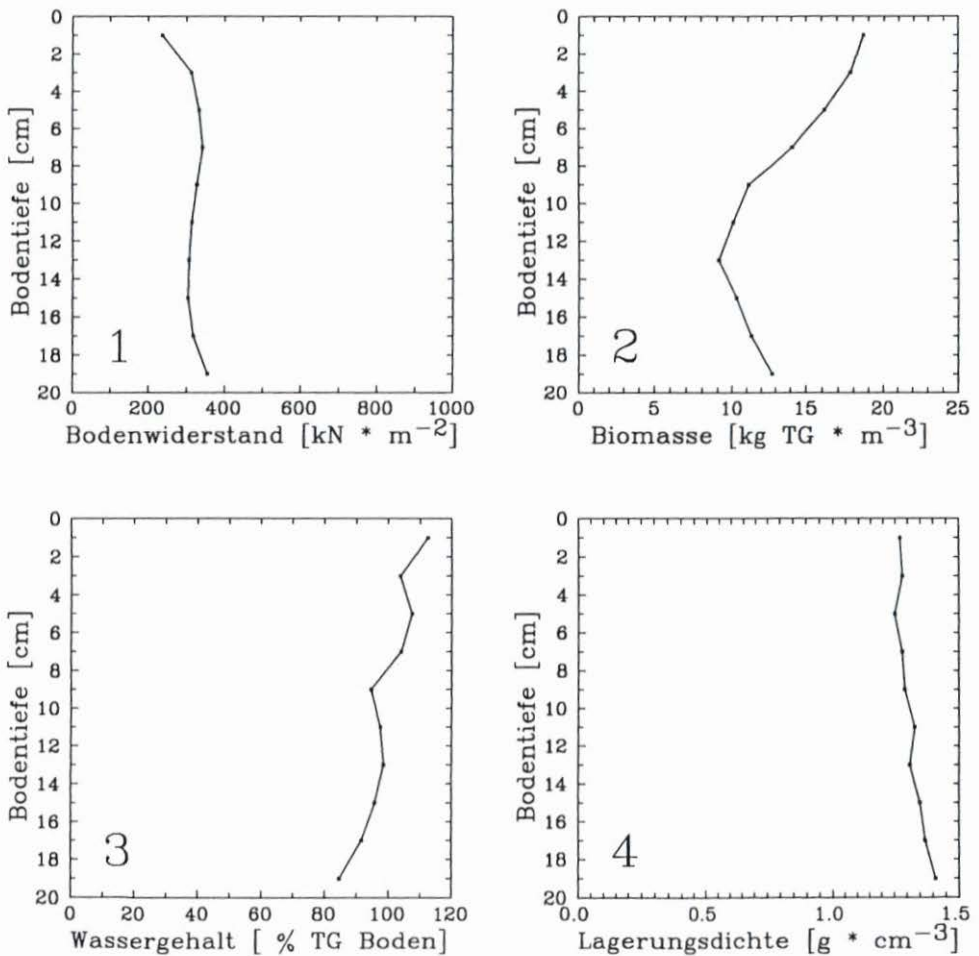


Abb. 23: Verlauf von Bodenwiderstand (1), Gehalt unterirdischer Biomasse (2), Bodenwassergehalt (3) und Lagerungsdichte (4) im Winterhalbjahr (Oktober bis März)

parameter, der den Bodenwiderstand beeinflusst, kann vernachlässigt werden, da keine bedeutende Änderungen im Verlauf des Jahres beobachtet werden konnten. Bei der Beschränkung auf den Einfluß des Wassergehaltes müßte ohne Berücksichtigung anderer Parameter der Bodenwiderstand sowohl im Winterhalbjahr als auch – etwas weniger deutlich – im Sommerhalbjahr mit zunehmender Bodentiefe stetig ansteigen. Tatsächlich ist aber diese Stetigkeit nicht gegeben: Im Winter befindet sich das Maximum des Bodenwiderstandes in 7 cm Bodentiefe, im Sommer ein sehr ausgeprägtes Maximum in 3 cm Tiefe. Auch unter ausschließlicher Berücksichtigung der Lagerungsdichte wäre ein anderer als der gemessene Verlauf des Bodenwiderstandes zu fordern. Aufgrund einer Exponentialbeziehung zwischen Lagerungsdichte und Bodenwiderstand bewirkt eine Erhöhung der Lagerungsdichte stets eine Erhöhung des Bodenwiderstandes. Tatsächlich aber wurden die maximalen Bodenwiderstände in den oberen Bodenschichten gemessen.

Auf den unbeweideten „Versuchsfeldern Leybucht“ war es am ehesten möglich, einen positiven Zusammenhang zwischen der unterirdischen Biomasse und dem gemessenen Bodenwiderstand herzuleiten. Abb. 24 stellt das Ergebnis der Regressionsanalyse dar, das auf den Mittelwerten dieser Parameter beruht. Danach war auf den „Versuchsfeldern Leybucht“

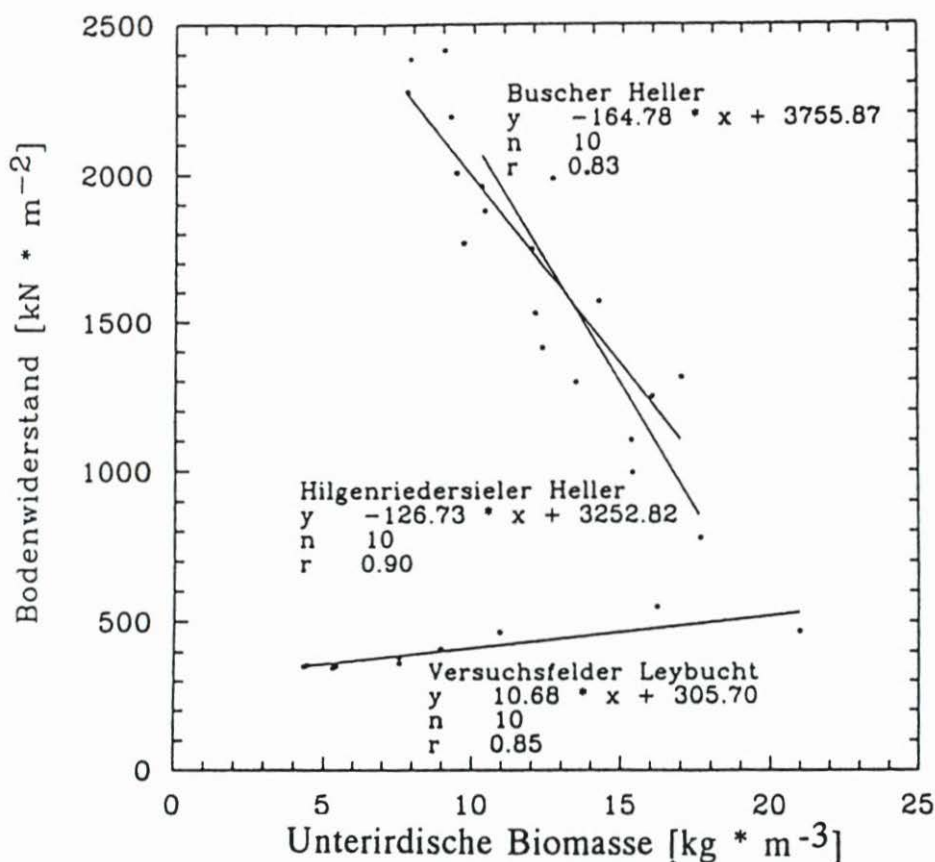


Abb. 24: Zusammenhang zwischen unterirdischer Biomasse und gemessenem Gesamtstand des Bodens in den Untersuchungsgebieten „Versuchsfelder Leybucht“, Buscherheller und Neßmerheller

mit einer Zunahme an unterirdischer Biomasse eindeutig ein Anstieg im Bodenwiderstand verbunden. In den beiden anderen Untersuchungsgebieten war ein derartiger Zusammenhang dagegen nicht zu beobachten. Der Bodenwiderstand dieser Salzwiesen war im Vergleich zu dem der „Versuchsfelder Leybucht“ aufgrund von Bodenentwicklung und Bewirtschaftung bereits um den Faktor 2 bis 5 erhöht; Bodenwiderstände in dieser Höhe können das Penetrationsvermögen der Wurzeln bereits erheblich begrenzen. Dies führte zu einem gänzlich verschiedenen Zusammenhang: Bei einer Zunahme im Bodenwiderstand ist hier eine Abnahme im Gehalt an unterirdischer Biomasse zu verzeichnen.

8.4 Treibsel

Die Rücknahme der Beweidungsintensität bzw. der gänzliche Verzicht auf Beweidung im Deichvorland hat aus der Sicht des Küstenschutzes und nicht zuletzt auch unter ökonomischen Gesichtspunkten eine bisher noch nicht genannte Relevanz für die Zunahme von Treibsel an den Deichen. Der sich nach Hellerüberflutungen entlang des Spülsaums abgelagerte Teek führt zur Beschädigung oder gar zum Absterben der Grasnarbe. Damit ist die Stabilität der Deichaußenböschung in diesen Bereichen reduziert, und potentielle Schwachstellen bei Sturmfluten werden geschaffen.

Die Gegenüberstellung der seit 1978 vorliegenden Daten über die jährlich anfallenden Teekmengen in der Leybucht und der Anzahl an Weidetieren zeigt, daß der Rückgang in der Beweidungsintensität zu einer deutlichen Treibselzunahme geführt hat (Abb. 25). So hat sich die Teekmenge der Jahre 1990/93 gegenüber dem Zeitraum 1978/84 verdoppelt, während sich die Zahl der Weidetiere hingegen halbiert hat. Weitere Untersuchungen im Bereich der Leybucht haben u. a. ergeben, daß sich der Teek aus Pflanzen der Salzwiesen zusammensetzt, und daß bei Sturmfluten keine größeren Treibselmengen in die Leybucht eingetragen werden. Das durch Sturmfluten auf den Salzwiesen der Leybucht angespülte Pflanzenmaterial stammt von den Vorländern der Leybucht selbst.

9. Untersuchungen im Seewasserversuchskanal

9.1 Strömungsbelastung

Die Untersuchungen im Seewasserversuchskanal bzw. Wellenkanal hatten das Ziel, den Einfluß der botanischen und pedogenen Faktoren auf die Erosionsfestigkeit der untersuchten Hellerflächen qualitativ und quantitativ darzustellen.

Mit einer ausgedienten Schöpfwerkspumpe konnten bis zu $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ abgesetztes Seewasser in die 50 m lange Betonversuchsrinne gefördert werden. Die großvolumigen, jeweils etwa 500 kg schweren Hellerbodenproben (Länge:Breite:Höhe = 100:70:40 cm, d. s. $0,3 \text{ m}^3$) wurden als ungestörte Proben mit einer speziell dafür gefertigten Form im Heller gewonnen und in einer Reihe von drei Proben auf drei Meter Länge in den Kanal, der mit seitlichen Sichtscheiben ausgestattet war, eingebaut (Abb. 26). Der Querschnitt des Versuchskanals von $0,7 \times 1,4 \text{ m}$ war durch allmähliche Einschnürung zur Sichtstrecke soweit verringert, daß über den Proben im Druckgerinne Strömungsgeschwindigkeiten bis $4,5 \text{ m/s}$ erzeugt werden konnten. Auch bei längeren Versuchseinstellungen konnte das salzige Milieu für Pflanzen und Boden erhalten bleiben. Es wurden Bodenproben aus den drei Versuchsgebieten von Flächen mit unterschiedlicher Nutzung untersucht.

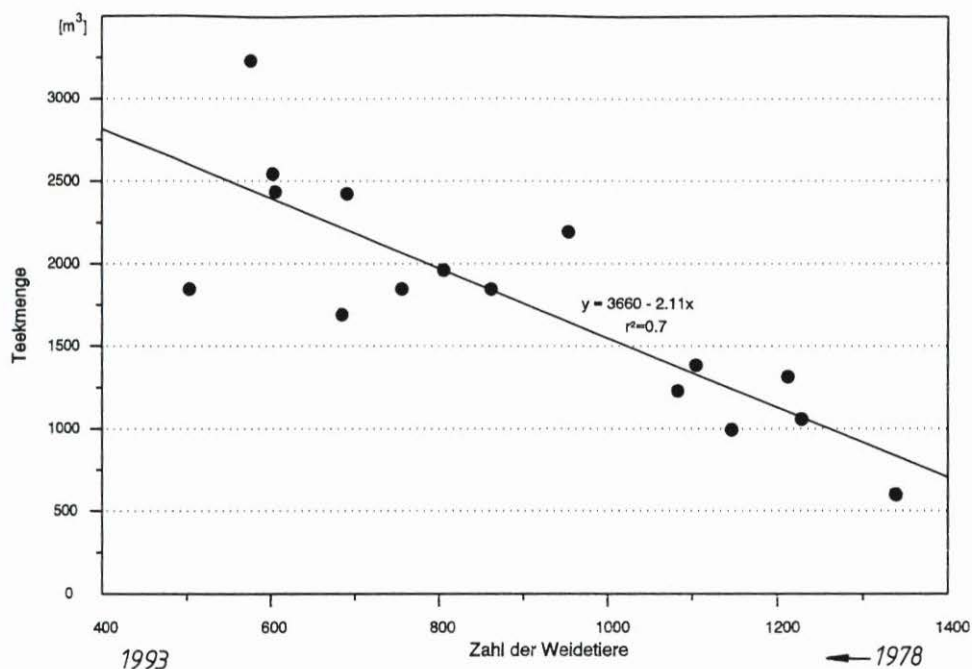


Abb. 25: Abhängigkeit der Teekmenge von der Beweidungsintensität bezogen auf die östliche Leybucht



Abb. 26: Der Seewasserversuchskanal am Spülbecken für die Außentieferräumung in Neßmersiel. Im Vordergrund: Meßstrecke mit Sichtscheiben

In einer ersten Versuchsphase wurden die unterschiedlichen Bodenproben mit einer Strömungsgeschwindigkeit von bis zu 3,0 m/s belastet. Die Strömungsgeschwindigkeit entspricht der maximalen Geschwindigkeit innerhalb des gemessenen Strömungsprofils. Diese Strömungsgeschwindigkeit wurde als Dauerbelastung ca. 15 Stunden beibehalten. Die hydraulischen Parameter wie Strömungsgeschwindigkeit und Druckschwankungen sowie der Zustand des Bewuchses und Bodens wurden anhand von Messungen bzw. Foto- und Videoaufnahmen festgehalten. Anschließend wurde die Strömungsgeschwindigkeit bis zu einer Extrembelastung von 4,5 m/s gesteigert. In einer abschließenden Versuchsreihe wurde die in Strömungsrichtung gesehen dritte und letzte Probe so angehoben, daß im Übergang von der zweiten zur dritten Probe ein Geländesprung von 6 cm und anschließend von 10 cm entstand (Kantenversuche). Hierdurch wurden ausgeprägte Störstellen simuliert und der Boden dem direkten Strömungsangriff ausgesetzt.

Im Laufe der Strömungsversuche an einer Bodenprobe konnten infolge der Ausspülung von Bodenteilchen zunächst gewisse Einblicke in den Bodenaufbau gewonnen und Rückschlüsse auf die Bodenentwicklung gezogen werden. So weist der Boden des unbeweideten Versuchsfeldes eine Schichtung aus aufgeschlicktem Sediment und dazwischen eingeschlossenem, weitestgehend unverrottetem ehemaligen Bewuchs auf. Dieser geschichtete Bodenaufbau war vor Ort noch in Tiefen bis zu 60 cm unterhalb der Oberfläche zu erkennen. In den beweideten Versuchsfeldern wird diese Schichtung zum Teil durch den Viehtritt zerstört und das Pflanzenmaterial in den Boden eingearbeitet. Der Vergleich der Bodenproben aus dem unbegrüpften Bereich (Standort 6) und einem vergleichbaren begrüpften Bereich (Standort 5) zeigt einen unterschiedlichen Bodenaufbau. Da für das Bodenleben durch die Entwässerung günstigere Bedingungen geschaffen worden sind, ist die in den begrüpften Bereichen festzustellende Schichtung sowie die fehlende Verbindung der Schichten untereinander nicht so ausgeprägt.

Die Untersuchungen zur Belastungswirkung durch Strömung zeigten durchgehend, daß eine Erosion der Hellerböden durch eine stationäre bzw. quasi-stationäre Überströmung nahezu ausgeschlossen werden kann. Dies gilt auch für Bodenproben, die für entsprechende Untersuchungen durch künstliche Bewuchsreduzierungen gezielt geschwächt wurden. Die Probenkörper wurden bei den Versuchen über mehrere Stunden mit Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu 4,5 m/s belastet. Derartige Geschwindigkeiten liegen oberhalb der in der Natur gemessenen Dauerwerte bzw. der zu erwartenden Belastungsgrößen. Zugeordnete Naturmessungen in den Untersuchungsgebieten weisen einen Wertevorrat bis ca. 1,0 m/s aus, Strömungsspitzen von über 5 m/s treten allein als singuläre und kurzfristige Belastungsspitzen unter Seegangsbedingungen auf.

Auch die Ausbildung eines positiven Geländesprunges als ausgeprägte größere Störstelle führte unter stationärer Strömung nur bei wenigen Proben zu Auswaschungen. Die lokalen Erosionen kamen bei den untersuchten Bodenproben im Anschluß an eine Stabilisierungsphase dauerhaft zum Stillstand. Dem Wurzelwerk und dem schichtweise eingeschlossenen Pflanzenmaterial ist dabei zweifelsfrei die maßgebende erosionsmindernde Wirkung beizumessen. Die mit der Bodenentwicklung verbundene biogene Sedimentstabilisierung führt zu einer Erhöhung der Hellerfestigkeit. Mit zunehmender Aggregatstabilität des Krümelgefüges im Laufe der Bodenentwicklung in Verbindung mit einem ausgeprägten Wurzel- bzw. Kornfaserwerk sowie durch die gute Abschirmung des Bewuchses gegenüber den Strömungskräften bildet sich ein Verbundwerk, das auch bei partiellen Störungen in seiner Gesamtheit erhalten bleibt; die überdeckten älteren Horizonte weisen dies unter Belastung aus.

Da sowohl die Bodenentwicklung als auch die Beweidungsart und die Entwässerung die Bodenstruktur und die Wurzelaktivität bestimmten, führt eine abnehmende Beweidungs-

tensität trotz geringerer Bodenverdichtung nicht zwangsläufig zu einem Verlust an Festigkeit. Im Vergleich der unterschiedlich bewirtschafteten Standorte auf den Versuchsfeldern Leybucht zeigten die Bodenproben aus dem extensiv beweideten, deichnahen Bereich die höchsten Festigkeiten. Bei geringer Bodenentwicklung konnten insbesondere an Proben aus den niedriger gelegenen, unbegrüpften Bereichen des unbeweideten Versuchsfeldes vereinzelt Auswaschungen hervorgerufen werden. Die hier auftretende Wechsellagerung aus Sediment und abgestorbenen Pflanzen bzw. ehemaligen Hellerhorizonten zeigte nur einen geringen Verbund untereinander und reagierte daher auf die Strömungsbelastung empfindlich. Bei Strömungsgeschwindigkeiten um etwa 3 m/s trat bei einigen dieser Proben schlagartig flächenhafte Erosion auf. Der Boden wurde dabei in einer 10 cm dicken Schicht abgeschoben bzw. „teppichartig“ aufgerollt. Vergleichbare begrüpfte Bereiche zeigen hingegen eine höhere Festigkeit.

Die durch den oberirdischen Teil des Bewuchses beeinflusste Strömung kann zu Turbulenzen führen, die bereits oberhalb der Helleroberfläche eine Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit bewirken. Die optimale Abschirmung wird dabei von einem Bewuchs erreicht, der möglichst hoch und elastisch ist, ohne daß sich aber die damit verbundene Abnahme der Bestandsdichte negativ bemerkbar macht. Diese Voraussetzungen werden auf den Versuchsfeldern Leybucht bei einer Beweidung mit 0,5 Rind/ha und 1 Rind/ha erfüllt, aber auch auf den unbeweideten Parzellen am Neßmerheller. Der Bewuchs auf den normal beweideten Flächen übt eine geringere abschirmende Wirkung aus, so daß hier eine höhere Strömungsbelastung für den Boden abgeleitet werden kann.

9.2 Wellenbelastung

Die Seegangsbelastung der Hellerkante wurde in einer Wellenrinne im Leichtweiß-Institut der Technischen Universität Braunschweig ebenfalls im Maßstab 1:1 simuliert.

Die Ergebnisse zeigen, daß im Gegensatz zur Strömungsbelastung, die nur in Ausnahmen zu einer nennenswerten, begrenzten Erosion der Hellerflächen führt, durch den Seegang auf verschiedene Weise eine instationäre Belastung des Hellers hervorgerufen werden kann. Die Größe der Belastung in Verbindung mit der Wirkdauer kann die Hellerfestigkeit partiell überschreiten. So weisen die Untersuchungen im Wellenkanal aus, daß der Heller bei Wellenbelastung besonders an der Hellerkante gefährdet ist. Die flächenhaften Belastungen durch Strömungen an der Helleroberfläche werden somit bei Wellenwirkung auf eine kritische Linienlast an der Hellerkante zurückgeführt. Dies ist für den Bestand der Hellerflächen von substantieller Bedeutung.

Ausgehend von den Ergebnissen der Strömungsuntersuchungen und den Naturmessungen konzentrierten sich die Untersuchungen zur Wellenbelastung auf Proben aus der Hellerkante vom Neßmerheller und vom Buscherheller. Diese Großproben wurden verschiedenen Belastungsformen ausgesetzt. Die stärksten Belastungen der Hellerkante traten bei vor der Hellerkante brechenden Wellen auf, die mit ihrer Brecherzunge direkt auf die Kante schlugen (Druckschlagbelastung). Bei den anderen Belastungsformen wird der Heller und insbesondere die Hellerkante allein durch die Schwallströmung brechender Wellen beansprucht.

Die zugehörigen Naturmessungen weisen aus, daß für die entsprechenden extremen Belastungen der Hellerkante relativ kleine Wellen bei entsprechenden Wasserständen, i. d. R. auf dem Niveau des mittleren Tidehochwasserstandes (MThw), die Voraussetzung bilden. Ausgehend von diesen Ergebnissen wurden die Großproben mit mittleren Wellenhöhen von

0,2 m und Wellenperioden von 2 s beansprucht. Die gemessene, mittlere Druckschlaghöhe in den Versuchen betrug rd. 0,4 bar. Dies entspricht einer Flächenbelastung von 4 t/m^2 , die Spitzenwerte erreichten sogar ein Belastungsniveau bis ca. 18 bar bzw. 180 t/m^2 . Die zugehörigen maximalen Strömungsgeschwindigkeiten des Auflaufschwells der brechenden Welle lagen in diesen Untersuchungen bei ca. 3 m/s.

Sowohl an Proben vom Neßmerheller als auch vom Buscherheller führte der Seegang bereits nach einigen Minuten zu ausgeprägten Erosions- und Auflösungserscheinungen in Form von Erosionsmulden. In bezug auf Entwicklungsfortschritt und -intensität sind deutliche Unterschiede festgestellt worden. Durch Auswaschen des sandigen Bodenmaterials bildete sich am Neßmerheller bereits nach einigen Minuten knapp unterhalb des Ruhewasserspiegels im Bereich der maximalen Druckschlagbelastung eine Erosionsmulde. Die in diesen Hohlräumen wirkenden Druckschläge in Verbindung mit der starken aufwärts gerichteten Strömungskomponente führten dazu, daß der Boden nach oben hin durchbrochen und zusammen mit der Grasnarbe ausgetragen wurde. In diesem Falle ist eine negative Wirkung des Verbundes zu erkennen. Nachdem die Grasnarbe einmal zerstört war, wurde die Probe auf annähernd der gesamten Höhe abgetragen. Die Auswaschungen der freiliegenden ehemaligen Hellerhorizonte als Teil der Wechschelschichtungen bewirkten nachfolgend eine auffällige Erosionshemmung, indem sie die Druckschläge durch die Gesamtelastizität und die gebundenen Wasserflächen dämpften und zugleich die Stabilität der Oberfläche gegenüber der Strömungsbelastung absicherten.

Der bindigere Boden des Buscherhellers wies bei den Wellenversuchen eine vergleichsweise hohe Stabilität auf. Im Gegensatz zu den sandigen Bodenproben vom Neßmerheller wurde hier der Boden weniger durch Auswaschung als vielmehr durch das Ausbrechen größerer Brocken erodiert. Auch bei diesen Proben kam es im Bereich des Ruhewasserspiegels zu Auskolkungen. Die Druckschlagwirkung und der Strömungsangriff der an der Böschung hochschießenden Wassermassen führten dann ebenfalls zu einem Durchbrechen der Grasnarbe. Die Auflösungsprozesse nahmen über die Zeit ab und kamen während der Versuche zum Stillstand.

10. Folgerungen für Handlungsempfehlungen

Auf der Grundlage der skizzierten Forschungsergebnisse sollen für die Pflege und Sicherung von Deichvorland bzw. Salzwiesen Folgerungen für Handlungsempfehlungen entwickelt werden. Dabei werden die Erkenntnisse aus den hydrologischen, morphologischen, bodenkundlichen und botanischen Forschungsergebnissen zugrunde gelegt und in die relevanten natur- und ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen eingearbeitet.

Die große Bedeutung der Hellerflächen für die Belange des Küsten- und Naturschutzes sowie der relativ geringe Bestand solcher Areale erfordern eine verantwortungsvolle Sicherung der vorhandenen Hellerflächen. Allen auftretenden Kantenabbrüchen sollte daher entgegengewirkt bzw. die Neubildung von Hellerflächen unterstützt werden. Hierfür eignen sich nach den vorliegenden Erfahrungen Lahnungen vor den Abbruchbereichen. Sie sollten mit der Oberkante auf 0,3 m über MThw angelegt werden, da sie so zu einer stärkeren Wellendämpfung und einer verstärkten Auflandung der Lahnungsfelder führen und gefährdete Hellerkanten deutlich wirksamer gegen Abbruch schützen. Vor dem Neßmerheller betrug die Abbruchrate hinter derartigen Lahnungen rund 0,6 m/Jahr. Ohne Lahnung wurde bei nahezu gleichen Verhältnissen die fünffache, bei Lahnungen mit der Oberkante auf MThw die dreifache Abbruchrate ermittelt.

Mit einem Lahnungssystem, ggf. aus mehreren Lahnungsfeldern hintereinander bestehend, können die das Deichvorland belastenden Seegangskräfte bei Kanten- und normalen Fluten erheblich verringert werden und – insbesondere bei einem mehrfeldrigen System – ein allmählicher Übergang vom niedrigen Watt zum höher gelegenen, begrünten Deichvorland erreicht werden. Da die Seegangsbeanspruchung der Hellerkante durch die Lahnung und die im gleichen Sinne wirkende Aufhöhung im Lahnungsfeld verringert wird, sollten die Aufhöhung und Stabilisierung der Sedimente im Lahnungsfeld sowie die Wasserauf- und -ableitung sichergestellt werden.

Die Beanspruchung der Hellerkante durch Wellenwirkung ist abhängig von der Höhenlage des vorgelagerten Wattes sowie von der Häufigkeit erhöhter Wasserstände und wirksamer Seegangsenergie. Regelmäßige Vermessungen sind daher zur Erfassung der morphologischen Entwicklung des Wattes notwendig.

Eine Gefährdung der untersuchten Hellerflächen durch Oberflächenerosion als Folge reiner Überströmung kann nach den vorliegenden Forschungsergebnissen für breite Hellerflächen mit einer gesicherten Oberflächenentwässerung als gering eingestuft werden. Auf pflegerische Maßnahmen sollte jedoch nicht gänzlich verzichtet werden, um auch bei langandauernder bzw. zunehmender Belastung den Bestand zu erhalten.

Generell ist eine ausreichende Wasserableitung vom gesamten Heller sicherzustellen, da die Begrüppung sich in vielerlei Hinsicht positiv auswirkt. Dies gilt in ganz besonderem Maße für den deichwärtigen Vorlandbereich, der bei schweren Sturmfluten infolge der Wellenreflexion und durch Turbulenzen besonders stark beansprucht wird. Dies ist ferner wichtig für den seeseitigen Streifen der Hellerkante, auf dem bei Überflutung von wenigen Dezimetern hohe Schwallströmungen auftreten. Eine zügige Entwässerung unterstützt nicht zuletzt auch das schnelle Absickern des Salzwassers aus dem während der Sturmfluten durchfeuchteten Deichkörper. Die Gruppen sollten bei dafür geeigneten Böden mit dem schonenden Trapezprofil hergestellt werden. Quergräben und Hauptgräben müssen eine ausreichende Tiefe erhalten, um eine kurzfristige Wiederholungsbegrüppung und entsprechend häufige Störungen der Lebensgemeinschaften auf Beeten und in Gruppen zu vermeiden. Die Begrüppung wirkt sich ebenfalls positiv auf die Bodenstruktur aus und fördert die Aggregatstabilität und Krümelstruktur des Bodens sowie die Wurzelbildung und verbessert so die Erosionsstabilität. Diese günstige Wirkung der Begrüppung ist bei der Hellerpflege zu berücksichtigen.

Da bei Deichschäden durch Sturmfluten vielfach salzverträgliche Soden und geeigneter Kleiboden im deichnahen Vorlandstreifen gewonnen werden müssen, ist hier neben einer guten Entwässerung auch die Bildung eines festen Bodens mit einer geschlossenen und tiefwurzelnden Grasnarbe zu fördern. Im Konsens zu den Forderungen nach einer Begrüppung steht auch der Einfluß einer extensiven Beweidung mit 0,5 bis 1 Rind/ha. Dieses fördert die stabilisierende Wirkung der Boden- und Pflanzenentwicklung. Um sowohl eine Schwächung des Deichfußes als auch der Hellerkante zu vermeiden, sollten die Entnahmebereiche für Kleiböden bei derartig erforderlichen Maßnahmen in einem Abstand von mindestens 50 m vom Deichfuß bzw. von der Hellerkante gewählt werden. Durch einen Anschluß an das Grüppensystem muß die Wiederaufschlickung wirkungsvoll unterstützt werden.

Die Auflandung der Hellerflächen ist von Bedeutung für die Entwicklung höherer Hellerbereiche, da

- ihre Wirkung für den Küstenschutz dadurch zunimmt,
- sie auch bei einem stärkeren MThw-Anstieg eine Flächenbrandung fördern und
- sie eine positive Wirkung auf Boden- und Pflanzenentwicklung haben und damit zur Stabilisierung beitragen.

Die Auflandung sollte daher durch eine strukturierte Wasserauf- und -ableitung in einem intakten Grüppensystem gefördert werden.

Bei stärker auflandenden äußeren Hellerbereichen ist die Entwässerung des niedriger liegenden Deichfußes besonders zu beachten. Auch zur Vermeidung von Salzpfannen, die in der Helleroberfläche einen Schwachpunkt mit verminderter Widerstandskraft darstellen, ist eine ausreichende Begrüppung wichtig.

Den Pflanzenwurzeln kommt bei der Erosionsfestigkeit der Hellerflächen eine erhebliche Bedeutung zu. Sie bilden mit dem Boden ein Verbundsystem (bewehrte Erde) und erhöhen so die Widerstandskraft des Bodens beträchtlich. Durch eine Begrüppung wird die Wurzelbildung in der Tiefe und Menge deutlich gefördert. Die festgestellte jahreszeitliche Wurzelndynamik mit stärkerer Wurzelentwicklung im Winter ist in Anbetracht der analog verlaufenden stärkeren Sturmflutbelastung im Winterhalbjahr ein Vorteil. Diesem Ergebnis des Projektes ist bei der Pflege der Heller ebenfalls Rechnung zu tragen.

Eine extensive Beweidung des Hellers – auf stark bindigen Böden von 0,5 Rind/ha, im übrigen von 1 Rind/ha – wirkt sich positiv auf ein breiteres Artenspektrum, auf die Bodenentwicklung mit stabilerem Bodengefüge und auf eine gleichmäßigere Verteilung der Biomasse im Boden aus. Sie bewirkt ferner den intensiven Verbund der Schichten aus Sediment und abgestorbenen Pflanzen auf dem Heller und die endogene Festigkeit innerhalb des Bodens. Dies erhöht wiederum die partielle und integrale Erosionsfestigkeit. Sie vermindert darüber hinaus den Anfall an organischem Treibsel von den Deichvorländern beträchtlich.

11. Verzeichnis der Berichte und Veröffentlichungen

11.1 Schlußberichte

- ERCHINGER, H. F., COLDEWEY, H.-G., FRANK, U., MANZENRIEDER, H., MEYER, C., SCHULZE, M. u. STEINKE, W.: Verbundbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“. Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen, Kiel, und Staatl. Amt für Insel- und Küstenschutz, Norden, und Technische Bibliothek Hannover, 1994.
- ERCHINGER, H. F., COLDEWEY, H.-G. u. MEYER, C.: Hydrologische und morphologische Untersuchungen, Endbericht. – Staatl. Amt f. Insel- u. Küstenschutz, Norden, 1994.
- FRANK, U. u. GEBHARD, H. U.: Bodenkundliche Untersuchungen, Endbericht. – Abt. Bodenkunde des Fachber. Biol., Univ. Oldenburg, 1992.
- FÜHRBÖTER, A., KOTZBAUER, U., MANZENRIEDER, H. u. SCHULZE, M.: Hydromechanik und Hydraulik, Bericht Nr. 732. – Leichtweiß-Inst. f. Wasserbau der TU Braunschweig, 1992.
- STEINKE, W. u. VON WILLERT, D. J.: Botanische Untersuchungen, Endbericht. – Inst. f. Angew. Botanik, Univ. Münster, 1993.

11.2 Weitere Berichte und Veröffentlichungen

- COLDEWEY, H.-G. u. ERCHINGER, H. F.: Deichvorland: Seine Entwicklung zwischen Ems und Jade und die Untersuchungen im Forschungsvorhaben „Erosionsfestigkeit von Hellern“. – Die Küste, 54, 1992.
- ERCHINGER, H. F.: Intaktes Deichvorland für Küstenschutz unverzichtbar. – Wasser und Boden, H. 2, 1994.
- ERCHINGER, H. F., COLDEWEY, H.-G., MEYER, C. u. SCHMIDT, F.: Hydrologische und morphologische Untersuchungen, Teilbericht 3. – Staatl. Amt f. Insel- u. Küstenschutz, Norden, 1992.

- ERCHINGER, H. F. u. MEYER, C.: Hydrologische und morphologische Untersuchungen, Teilbericht 4. – Staatl. Amt f. Insel- u. Küstenschutz, Norden, 1993.
- ERCHINGER, H. F. u. SCHMIDT, F.: Hydrologische und morphologische Untersuchungen, Teilbericht 1. – Staatl. Amt f. Insel- u. Küstenschutz, Norden, 1990.
- ERCHINGER, H. F. u. SCHMIDT, F.: Hydrologische und morphologische Untersuchungen, Teilbericht 2. – Staatl. Amt f. Insel- u. Küstenschutz, Norden, 1990.
- FRANK, U.: Einfluß von Nutzungsänderungen auf die initiale Marschbodenentwicklung im Deichvorland der Leybucht / Ostfriesland. – Mitt. Dtsch. Bodenkundl. Gesellsch., 72: 895–898, 1993.
- FRANK, U. u. GEBHARD, H. U.: Bodenkundliche Untersuchungen, Zwischenbericht 1991. – Abt. Bodenkunde des Fachber. Biol., Univ. Oldenburg, 1992.
- FRANK, U., GEBHARD, H. u. WINKLER, U.: Bodenkundliche Untersuchungen, Zwischenbericht 1989. – Abt. Bodenkunde des Fachber. Biol., Univ. Oldenburg, 1990.
- FRANK, U., GEBHARD, H. u. WINKLER, U.: Bodenkundliche Untersuchungen, Zwischenbericht 1990. – Abt. Bodenkunde des Fachber. Biol., Univ. Oldenburg, 1991.
- FÜHRBÖTER, A. u. KOTZBAUER, U.: Hydromechanik und Hydraulik, 1. Zwischenbericht. – Leichtweiß-Inst. f. Wasserbau der TU Braunschweig, 1990.
- FÜHRBÖTER, A., KOTZBAUER, U. u. SCHULZE, M.: Hydromechanik und Hydraulik, 2. Zwischenbericht. – Leichtweiß-Inst. f. Wasserbau der TU Braunschweig, 1991.
- KAMP, T.: Analyse der Vegetationsstruktur im Deichvorland mit Hilfe der Rhizotron-Technik. – unveröff. Dipl.-Arb., Univ. Münster, 1991.
- OTTEN, O.: Die sedimentologische Kartierung des Hilgenriedersieler Watts. – unveröff. Dipl.-Arb., Univ. Kiel, 1990.
- RICHTER, S.: Zusammensetzung und Herkunft des Teeks in der Leybucht. – unveröff. Dipl.-Arb., Univ. Münster, 1990.
- RIESE, C.: Charakterisierung der unterirdischen Biomasse einer Salzwiese (Hilgenriedersieler Heller). – unveröff. Dipl.-Arb., Univ. Münster, 1991.
- SCHOLAND, M., AUSTENFELD, F. A. u. VON WILLERT, D. J.: Underground biomass and its influence on soil shear strength in a grazed and an ungrazed German coastal marsh. In: D. Atkinson (Hrsg.), *Plant Root Growth – An Ecological Perspective*: 341–348, 1991.
- SCHULZE, M. u. MANZENRIEDER, H.: Erosionsfestigkeit von Deichvorländern – Untersuchungen im Seewasserversuchskanal Neßmersiel. – Mitt. Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 132, 1994.
- STEINKE, W. u. VON WILLERT, D. J.: Botanische Untersuchungen, Zwischenbericht 1989. – Inst. f. Angew. Botanik, Univ. Münster, 1989.
- STEINKE, W. u. VON WILLERT, D. J.: Botanische Untersuchungen, Zwischenbericht 1990. – Inst. f. Angew. Botanik, Univ. Münster, 1990.
- STEINKE, W. u. VON WILLERT, D. J.: Botanische Untersuchungen, Zwischenbericht 1991. – Inst. f. Angew. Botanik, Univ. Münster, 1991.

11.3 Schriftenverzeichnis (Auswahl)

- BAKKER, J.: Effects of grazing and hay-making on Waddensea saltmarshes. Proc. of the Sec. Tri-lat. Working Conf. on Saltmarsh Management in the Wadden Sea Region, 1989 in Romo, Denmark. Ed. C. H. Ovesen. Hsg. Ministry of the Environment, The National Forest and Nature Agency, 1990.
- BRONGERS, M., DE VRIES, Y. u. BAKKER, J. P.: Der Einfluß unterschiedlicher Beweidungsintensitäten auf die Salzwiesenvegetation in der Leybucht (Niedersachsen). *Natur und Landschaft* 65, Nr. 6, 311–314, 1990.
- COLDEWEY, H.-G.: Morphologische Entwicklung von Hellern/Deichvorländern zwischen Ems und Jade in den letzten 25 Jahren. – Workshop Küstenmorphologie, Oldenburg, 1989.
- DIECKMANN, R.: Bedeutung und Wirkung des Deichvorlandes für den Küstenschutz. In: N. KEMPE, J. LAMP u. P. PROKOSCH. *Salzwiesen: Geformt von Küstenschutz, Landwirtschaft oder Natur?* – WWF-Deutschland, Tagungsbericht 1, Husum, 1987.
- ERCHINGER, H. F.: Dünen, Watt und Salzwiesen. Norden, 1985.

- ERCHINGER, H. F.: Salzwiesenbildung und -erhaltung – Lahnungsbau und Begrüppung für den Küstenschutz. – In: KEMPF, N., LAMP, J. u. PROKOSCH, P. (Hrsg.), Salzwiesen: Geformt von Küstenschutz, Landwirtschaft und Natur?, WWF-Tagungsbericht 1.
- ERCHINGER, H. F.: Funktion und Bedeutung der Salzwiesen. In: Umweltvorsorge Nordsee. Hsg. Niedersächsisches Umweltministerium, Hannover, 1987.
- ERCHINGER, H. F.: Saltmarsh Management in respect of coastal protection demands in Niedersachsen. Proc. of the Sec. Trilat. Working Conf. on Saltmarsh Management in the Wadden Sea Region, 1989 in Rømø, Denmark. Ed. C. H. OVESEN. Hsg. Ministry of the Environment, The National Forest and Nature Agency, 1990.
- ERCHINGER, H. F.: Sturmfluten, eine zunehmende Bedrohung der Küste als Folge von Klimaveränderungen. – Hansa, H. 12/1992.
- ERCHINGER, H. F.: Küsteningenieurwesen. – In: Bretschneider, Lecher, Schmidt: Taschenbuch der Wasserwirtschaft. 1993.
- ERCHINGER, H. F., COLDEWEY, H.-G. u. PROBST, K.: Empfehlungen für eine wirksame Außentiefräumung als Ergebnis des Forschungsvorhabens „Tiefenstabilisierung von Außentiefs“. – Die Küste, H. 47, 1988.
- FÜHRBÖTER, A.: Einige Ergebnisse aus Naturuntersuchungen in Brandungszonen. In: Mitt. Leichtweiß-Inst. für Wasserbau der TU Braunschweig, H. 40/1974, S. 331–371.
- FÜHRBÖTER, A.: Über mikrobiologische Einflüsse auf den Erosionsbeginn von Sandwatten. – Wasser und Boden, 35 (3): 106–116, 1983.
- GIANI, L.: Entwicklung und Eigenschaften von Marschböden im Deichvorland der südlichen Nordseeküste. – unveröff. Habil., Univ. Oldenburg, 1991.
- HABER, B.: Über den Erosionsbeginn bei der Überströmung von flexiblen Rauhigkeitselementen. – Mitt. d. Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 74, 1982.
- HEINZELMANN, C. H.: Hydraulische Untersuchung über den Einfluß benthischer Diatomeenfilme auf den Strömungswiderstand und Transportbeginn ebener Sandsohlen. – Techn. Ber. Ingenieurhydrol. u. Hydraul., Inst. für Wasserbau, Tech. Hochschule Darmstadt, 48: 1–153, 1992.
- IRMLER, U. u. HEYDEMANN, B.: Die ökologische Problematik der Beweidung von Salzwiesen an der Niedersächsischen Küste – am Beispiel der Leybucht. – Naturschutz u. Landschaftspflege in Nieders., 15, 1986.
- IRMLER, U., HEYDEMANN, B. u. WRAGE, H. A.: Veränderungen der Wirbellosenfauna in Salzwiesen durch Beweidung. – In: Salzwiesen, geformt von Küstenschutz, Landwirtschaft oder Natur?, WWF-Tagungsbericht, 1: 243–254, 1987.
- JENSEN, A.: The effect of cattle and sheep grazing on salt marsh vegetation at Skallingen, Denmark. – Vegetat., 60: 37–48, 1986.
- KAMP, W. D.: Foreland management in regard of coastal protection at the North Frisian Coast. Proc. of the Sec. Trilat. Working Conf. on Saltmarsh Management in the Wadden Sea Region, 1989 in Rømø, Denmark. Ed. CLAUS HELWEG OVESEN. Hsg. Ministry of the Environment, The National Forest and Nature Agency, 1990.
- KUNTZE, H., NIEMANN, J., ROESCHMANN, G. u. SCHWERTDFEGER, G.: Bodenkunde. – Stuttgart, 1983.
- MANZENRIEDER, H.: Die biologische Verfestigung von Wattflächen aus der Sicht des Ingenieurs. – Mitt. Leichtweiß Inst. für Wasserbau, TU Braunschweig, 79: 135–195, 1983.
- NIEMEYER, H.: Seegang und Biotopzonierung in Wattgebieten. In: Umweltvorsorge Nordsee, Niedersächsischer Umweltminister, S. 171–184, 1987.
- RAHMANN, M., RAHMANN, H., KEMPF, N., HOFFMANN, B. u. GLOGGER, H.: Auswirkungen unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung auf die Flora und Fauna der Salzwiesen an der ostfriesischen Wattenmeerküste. – Senckenb. maritima, 19 (3/4): 163–193, 1987.
- ROOK, B.: Landschaftsökologische Untersuchung eines anthropogen gestörten amphibischen Lebensraumes – am Beispiel der Salzwiesen und der Verlandungszone im Bereich der Leybucht. – unveröff. Dipl.-Arb., Univ. Hannover, 1986.
- SCHERFOSE, V.: Salzmarsh-Pflanzengesellschaften der Leybucht – Einflüsse der Rinderbeweidung und Überflutungshäufigkeit. – Drosera, 89 (1/2): 105–112, 1989.
- SCHOLAND, M.: Einfluß der Beweidung auf die Wurzelarchitektur von Hellerpflanzen der Leybucht. – unveröff. Dipl.-Arb., Univ. Münster, 1988.
- STÄHLER, D.: Jahreszeitlicher Verlauf des Gesamtstickstoffgehaltes in Biomasse und Boden von Hellerflächen. – unveröff. Dipl.-Arb., Univ. Münster, 1990.

- STEINKE, W.: Direkte und indirekte Bestimmung von Wurzelbiomasse. – unveröff. Dipl.-Arb., Univ. Münster, 1989.
- WILKENS, H., ANDRES, H. G., FAUBEL, A., GILLANDT, L., HARTWIG, E., HÜPPOP, O., MARTENS, J. M. u. SCHULZ, K.: Ökologische Analyse der Leybucht. – Arb. Forsch. Norderney, 8: 144 S., Norderney, 1983.
- ZANKE, U.: Grundlagen der Sedimentbewegung. – Berlin, 1982.