

Kuratorium für Forschung
im Küsteningenieurwesen

Hindenburgufer 247
24106 Kiel

17. AUG. 1998

170 2. DEZ. 1998

1-1

BUNDESMINISTERIUM
FÜR
BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE
-Meerestechnik-

SONDERUNTERSUCHUNGEN HERBST 1994
AUF NORDERNEY ZU SEDIMENTOLOGISCHEN UND
MORPHOLOGISCHEN FRAGESTELLUNGEN

von

Heiko Knaack

NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE
-Forschungsstelle Küste-

Teilbericht zum Schlußbericht des KFKI - FV MTK 0545A "Vorstrand- und
Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerks-Systemen", August 1995

№ 32864 kt

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Ziele	1
2	Methodik	2
2.1	Sedimentologie	2
2.2	Höhenänderungen des Strandess	4
2.3	Einzelzeiten-Untersuchungen	5
3	Ergebnisse	7
3.1	Änderungen in der Sedimentologie	7
3.2	Höhenänderungen des Strandess	18
3.3	Einzelzeiten-Untersuchungen (22.09.94 bis 07.10.94) im Bühnenfeld D1-E1	21
4	Zusammenfassung	40
5	Literaturverzeichnis	41

1 Veranlassung und Ziele

Auf Grund der Struktur des Norderneyer Seegats und bedingt durch Brandungs- und Gezeitenkräfte unterliegt der Westkopf der Insel Norderney einer anhaltenden strukturellen Erosion seiner Sandstrände [THILO & KURZAK 1952; HOMEIER 1964]. Dieser Erosion wird seit den fünfziger Jahren durch wiederholte Strandauffüllungen in Ergänzung zu den seit Mitte des vorherigen Jahrhunderts geschaffenen festen Schutzbauwerken entgegengewirkt [z.B. KRAMER 1959; ERCHINGER 1986; KUNZ & STEPHAN 1992].

Bereits die 6. Aufspülung 1989 wurde durch ein intensives Forschungsprogramm begleitet, initiiert durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen und finanziert durch das Bundesministerium für Forschung und Technologie. Basierend auf den seinerzeit erreichten Erkenntnissen wurde bei der nachfolgenden Aufspülung 1992 versucht, den Vorstrandbereich mit aufzufüllen um die Effektivität zu erhöhen. Auch diese kombinierte Strand- und Vorstrandauffüllung wurde in Fortsetzung des vorhergehenden Projektes von einem KFKI-Forschungsvorhaben "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerks-Systemen" begleitet. Ziele der Untersuchungen waren zum einen die Überprüfung und gegebenenfalls Verbesserung der Effektivität der kombinierten Aufspülung, zum anderen, und hiermit verknüpft, sollten weiterführende generelle Erkenntnisse über die hydrodynamisch-morphologischen Wechselwirkungen an Stränden gewonnen werden.

Der vorliegende Bericht befaßt sich mit sedimentologischen und morphologischen Untersuchungen, die im Herbst 1994 in Weiterführung bisheriger Arbeiten durchgeführt wurden. Die Untersuchungen sollten das Verständnis der Prozesse des Sedimenttransportes und der Morphodynamik verbessern. Die Darstellung umfaßt die Fortsetzung der monatlichen Sedimentbeprobungen entlang von vier Strandprofilen sowie Untersuchungen im Bühnenfeld D1-E1 über mehrere Einzelzeiten im September/Oktober 1994 in Anlehnung an die Untersuchungen vom Oktober 1993 (siehe Schlußbericht zum Teilprojekt Sedimentologie). Zusätzlich wurde in diesem Bühnenfeld über ca. vier Monate ein sogenannter Sandstandpegel eingesetzt, um punktuell die Höhenänderungen des Strandess zu erfassen und die Eignung des Gerätes hinsichtlich der Untersuchung von Sohlfluktuationen zu überprüfen.

2 Methodik

2.1 Sedimentologie

Seit Sommer 1988 werden an den Stränden Norderneys monatlich Sedimentproben entnommen, um einen Überblick über die dortigen sedimentologischen Veränderungen zu bekommen. Die Probenentnahme erfolgt auf dem Mittenprofil der Bühnenfelder E-D, ZBI-A, D1-E1 und S1-T1 (siehe Abb. 1) jeweils an der Hochwasser-, Mittelwasser- und Niedrigwasserlinie. Ende 1990 und 1991 wurden über einen Zeitraum von mehreren Monaten keine Proben entnommen, so daß für diese Zeitabschnitte keine Daten vorliegen. Fehlen nur die Proben einzelner Monate, so wurde dies in den Abbildungen nicht extra gekennzeichnet und die Werte wurden interpoliert.

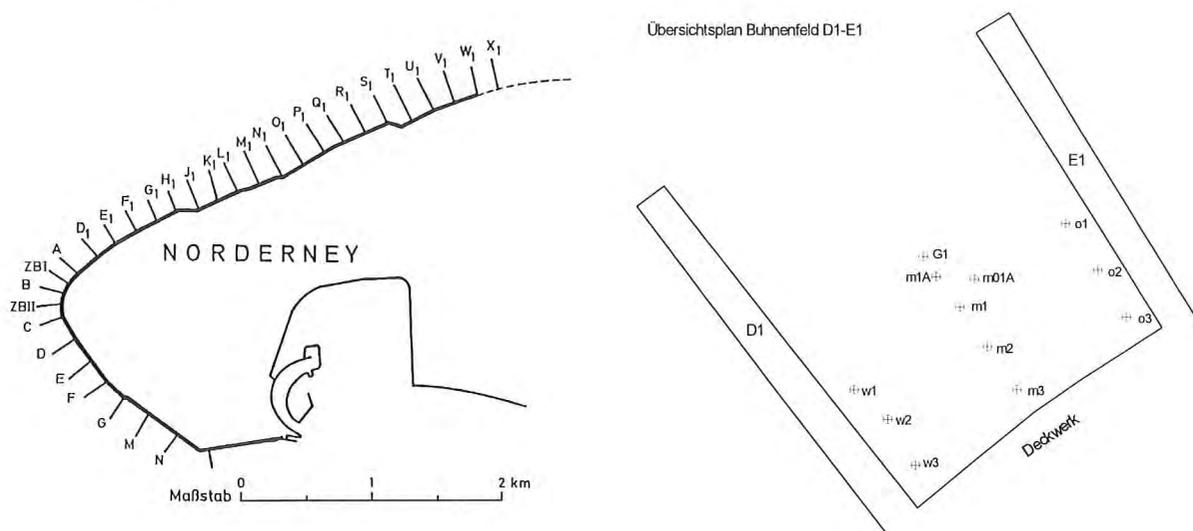


Abb. 1: Lageplan der Bühnenfelder und Übersichtsplan des Bühnenfelds D1-E1

Zur Untersuchung wurden die Sedimentproben durch mehrfaches Spülen entsalzt und durch Trockensiebung (Siebsatz: 3,5, 3,25, 3, 2,5, 2, 1,5, 1, 0,5, 0, -1 phi) die Korngrößenverteilung ermittelt. Der Karbonatgehalt des Sandes wurde mittels der Scheibler-Methode [SCHULTZE & MUHS 1967] bestimmt. Die Schwerminerale wurden in Anlehnung an VEENSTRA & WINKELMOLEN [1976] aus der Korngrößenfraktion 0,106-0,125 mm mit dem Frantz-Magnetscheider [McANDREW 1957] abgetrennt und der prozentuale Gewichtsanteil an dieser Größenfraktion berechnet.

Als sedimentologische Kennwerte wurden aus der Korngrößenverteilung bestimmt:

a) als mittlere Korngröße der Median = d_{50} (mm)

Zwischen der bei den nachfolgenden Parametern benutzten Einheit phi (Φ) und der Korngröße in der Einheit Millimeter besteht folgender Zusammenhang:

$$d_{\Phi} = -\log_2(d_{\text{mm}})$$

Die Werte Φ_5 , Φ_{16} , etc. in den Formeln symbolisieren die entsprechenden Perzentilen der kumulativen Häufigkeitsverteilung der Korngrößen einer Probe in der Einheit phi.

b) Sortierung (So) nach FOLK & WARD [1957], Klasseneinteilung nach FOLK [1964]:

$$S_o = \frac{\Phi_{84} - \Phi_{16}}{4} + \frac{\Phi_{95} - \Phi_5}{6,6} \quad [\Phi]$$

sehr gut sortiert:	< 0,35
gut sortiert:	0,35 bis < 0,50
mäßig gut sortiert:	0,50 bis < 0,71
mäßig sortiert:	0,71 bis < 1
schlecht sortiert:	1 bis < 2
sehr schlecht sortiert:	2 bis < 4
extrem schlecht sortiert:	> 4

Die Sortierung ist ein Maß für die Streubreite der am Aufbau des Sediments beteiligten Korngrößen. Ein Sediment, daß nur aus einer einzigen Korngröße besteht, hätte eine Sortierungswert von $S_o = 0$ phi.

c) Schiefe nach INMAN [1952], Klasseneinteilung nach FOLK [1964]:

$$S_k = \frac{\Phi_{16} + \Phi_{84} - (2\Phi_{50})}{\Phi_{84} - \Phi_{16}}$$

stark grob schief:	-1,0 bis < -0,3
grob schief:	-0,3 bis < -0,1
symmetrisch:	-0,1 bis < 0,1
fein schief:	0,1 bis < 0,3
stark fein schief:	0,3 bis < 1,0

Mit den dimensionslosen Parametern Schiefe und Kurtosis (s.u.) wird die Abweichung der Korngrößenverteilung von der Normalverteilung beschrieben. Die Schiefe gibt die Asymmetrie der Verteilungskurve wieder: symmetrische Korngrößenverteilungen haben einen Wert von $S_k = 0$; Verteilungen mit einer Asymmetrie in Richtung der feineren Korngrößen haben positive Schiefen, d.h. im feinkörnigen Bereich sind mehr Korngrößenklassen vorhanden als im grobkörnigen; bei einer Asymmetrie in Richtung grober Korngröße (ein "Überschuß" an größeren Körnern) ist die Schiefe negativ. Minimal bzw. maximal mögliche Werte sind -1 bzw. +1.

d) Kurtosis nach FOLK & WARD [1957], Klasseneinteilung nach FOLK & WARD [1957]:

$$K = \frac{(\Phi_{95} - \Phi_5)}{2,44(\Phi_{75} - \Phi_{25})}$$

sehr flachgipfelig (very platykurtic):	< 0,67
flachgipfelig (platykurtic):	0,67 bis < 0,90
normalgipfelig (mesokurtic):	0,90 bis < 1,11
steilgipfelig (leptokurtic):	1,11 bis < 1,50
sehr steilgipfelig (very leptokurtic):	1,50 bis < 3,00
extrem steilgipfelig (extremely leptokurtic):	> 3

Die Kurtosis beschreibt das Verhältnis der Spannweite zwischen den feinsten und den größten Korngrößen zur Streuung im mittleren Teil einer Korngrößenverteilung. Ein Sediment mit Normalverteilung der Korngröße hat eine Kurtosis von $K=1$; Verteilungen mit einer stärkeren Zentrierung weisen Werte >1 auf, bei einem flacheren Verlauf der Häufigkeitskurve im mittleren Teil ist die Kurtosis <1 . Kleinster mathematisch möglicher Wert ist 0,41; nach oben gibt es theoretisch keine Begrenzung; Werte über $K=5$ sind jedoch selten [FOLK 1964].

2.2 Höhenänderungen des Strandes

Zur quasi kontinuierlichen Beobachtung der Höhenänderungen am Strand wurde ein Sandstandpegel der Firma SANYO SOKKI Co., vertrieben durch die ARGUS GmbH Oldenburg, eingesetzt. Er besteht aus 61 optischen Sensoren, die sich jeweils aus einem Signalgeber auf der einen und einem Empfänger auf der anderen Seite einer 0,8 cm breiten Nut zusammensetzen. Die Sensoren sind in einem Vierkantpfahl (Querschnitt 3 x 2,8 cm) in einem Abstand von 2,5 cm übereinander angeordnet, die gesamte Meßhöhe beträgt 1,5 m. Am Kopf des Pfahls ist ein wasserdichtes Gehäuse befestigt, in dem die Stromversorgung, der Datenspeicher und die Steuerungseinheit untergebracht sind (Abb. 2).

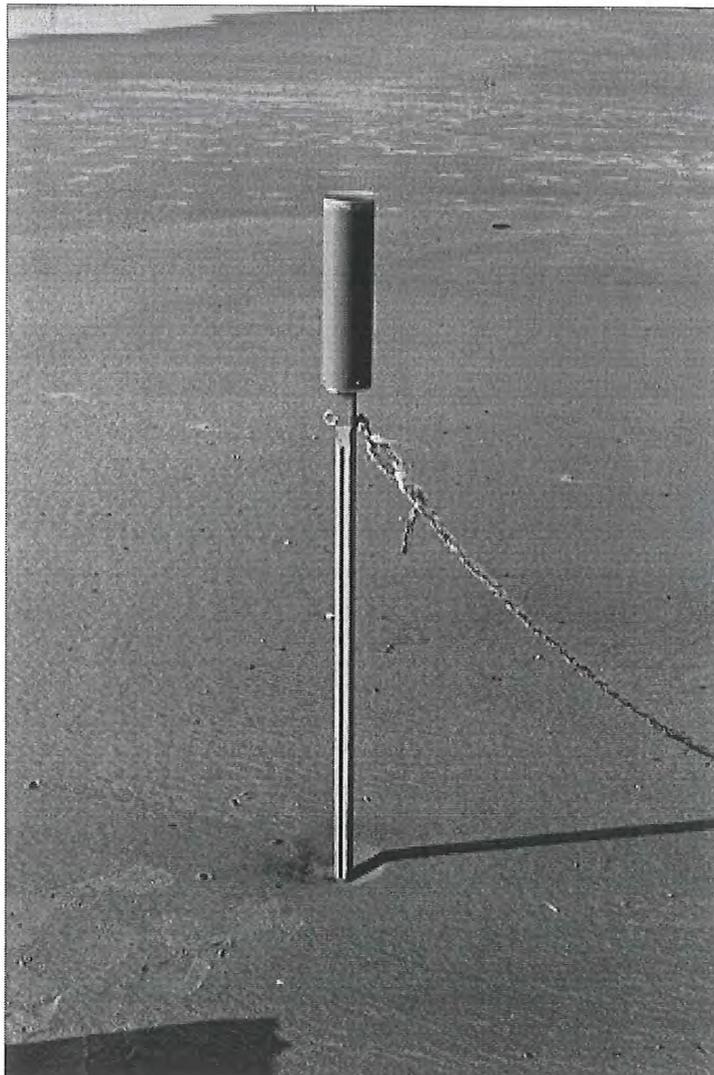


Abb. 2: Sandstandpegel im Bühnenfeld D1-E1

Befindet sich ein Sensor unter der Bodenoberfläche so wird die Nut mit Sediment gefüllt und der Signalweg ist unterbrochen. Eine Messung besteht aus vier direkt aufeinander folgenden, jeweils 2 Sekunden langen Lichtsignalen. Registriert wird die Anzahl der in jeder Höhenstufe empfangenen Signale (0 - 4). Die Intervalllänge zwischen den Messungen ist zwischen 10 Minuten und 6 Stunden in mehreren Stufen wählbar. Der Pegel wurde an zwei Positionen im Bühnenfeld D1-E1 betrieben. Er wurde am 12.09.94 ca. 20 Meter nordnordöstlich der Station m1 (siehe Abb. 1) eingespült und blieb dort bis zum 21.10.94 (Position m01A). Anschließend wurde der Pegel versetzt und stand vom 28.10.94 bis 17.11.94 etwa zwei Meter westlich des Schraubpfahls m1. Die Messungen erfolgten im kürzest möglichen Intervall von 10 Minuten und wurden nur zum Auslesen der Daten ein- bis zweimal die Woche für jeweils knapp eine Stunde unterbrochen. Ab dem 23.11.94 bis zum 06.01.95 wurde der Pegel an der Position neben der Station m1 mit einem längeren Meßintervall von 30 min betrieben. An den jeweiligen Standorten wurde die Gerätehöhe mehrfach eingemessen, um Fehlinterpretationen durch eine etwaige Setzung des Gerätes auszuschließen.

Bei der Interpretation der Meßergebnisse ist zu beachten, daß mit einem Abstand der Sensoren von 2,5 cm die vertikale Auflösung des Pegels relativ gering ist und Differenzbildungen zwischen zwei Messungen eine Unsicherheit von fast 5 cm enthalten. Die von MANZENRIEDER & SNIPPE [1991] erwähnte "Noniusfunktion" der Anzahl der registrierten Impulse im Grenzbereich Boden - Wasser zur Höhenabschätzung zwischen den Sensoren konnte nicht festgestellt werden.

Die Messungen des Pegels werden durch zwei Faktoren beeinträchtigt. Zum einen bildet sich um den Pfahl ein Kolk, dessen Tiefe beim Trockenfallen während des Niedrigwassers etwa 3-4 cm betrug, sich aber bei wechselnden Strömungsverhältnissen vermutlich ändert. Zum anderen werden gelegentlich einzelne Sensoren durch in der Nut verklemmte Muschelbruchstücke blockiert, so daß die Grenze Wasser-Boden falsch angezeigt wird. Dieser Fehler konnte jedoch in den meisten Fällen an den Daten erkannt und eliminiert werden.

2.3 Einzeltiden-Untersuchungen

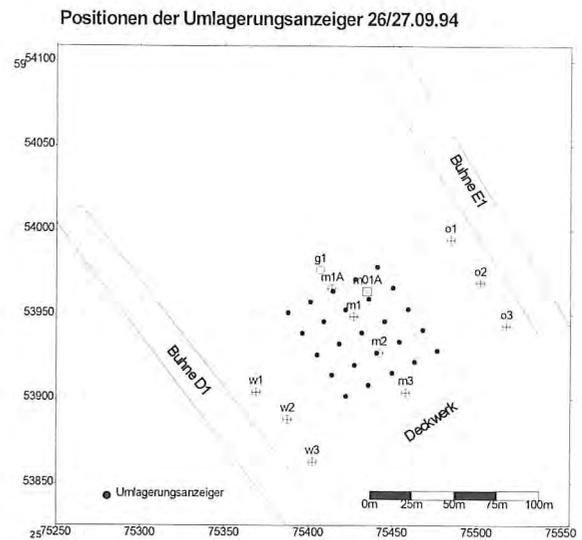
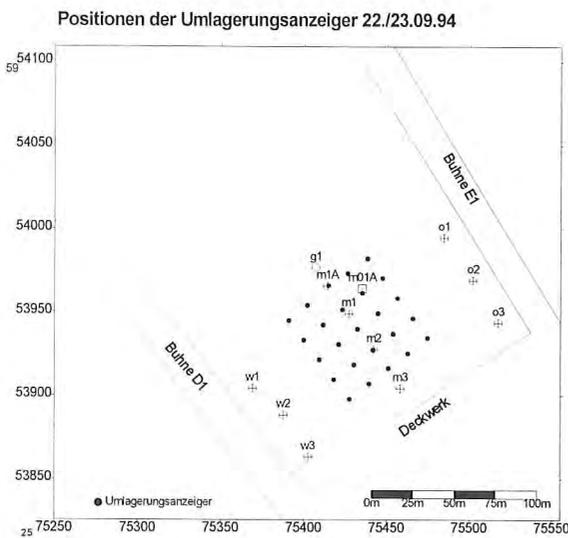
Im Zeitraum vom 22.09.94 bis 07.10.94 wurden fünf Einzeltiden-Untersuchungen im Bühnenfeld D1-E1 vorgenommen.

Zur Bestimmung der morphologischen Änderungen wurde das gesamte Bühnenfeld wiederholt tachymetrisch aufgenommen; insgesamt erfolgten elf Geländevermessungen.

Die Umlagerungsintensität des Sandes über fünf einzelne Tiden wurde mit Umlagerungsanzeigern gemessen [GREENWOOD et al. 1980; EITNER 1993]. Es wurden jeweils 25 Umlagerungsanzeiger in einem Feld von 60 x 60 m (Raster 5 x 5, Abstand ca. 15 m) in der Mitte des Bühnenfelds eingesetzt (Abb. 3). Diese Meßpunkte erstreckten sich etwa zwischen NN-0,8 m und NN+0,2 m und wurden jeweils tachymetrisch eingemessen. Am 26.09. abends und 27.09.94 morgens konnten die fünf am weitesten seewärts eingebauten Umlagerungsanzeiger wegen eines zu hohen Wasserstands nicht abgelesen werden; zu diesen Terminen liegen somit nur jeweils Daten von 20 Punkten vor. Ein Vergleich der mit den Umlagerungsanzeigern durch Addition der Erosions- und Sedimentationsraten bestimmten Netto-Umlagerung mit den tachymetrisch ermittelten Höhendifferenzen ergab eine befriedigende Übereinstimmung. Im Mittel liegen die Unterschiede zwischen den beiden Methoden unter deren

Genauigkeit von ± 1 cm (Umlagerungsanzeiger) bzw. $\pm 1,5$ cm (Tachymetrie) [EITNER 1993].

Die Probenentnahme für die sedimentologischen Untersuchungen erfolgte an den Standpunkten der Umlagerungsanzeiger. Das Material wurde jeweils bis zu der durch den entsprechenden Anzeiger angegebenen Sedimentationshöhe entnommen, um Proben des in der jeweiligen Tide umgelagerten Sandes zu gewinnen. Eine Ausnahme bilden die Proben vom 26.09.94 morgens; da von den Umlagerungsanzeigern noch keine Tiefenangaben vorlagen, wurden zu diesem Termin die oberen zwei Zentimeter des Strandes beprobt. An den Sedimentproben wurden im Labor die oben genannten Größen bestimmt.



(Hinweis: seewärts gelegene Reihe der Umlagerungsanzeiger wegen erhöhtem Tnw nicht ablesbar / beprobbar.)

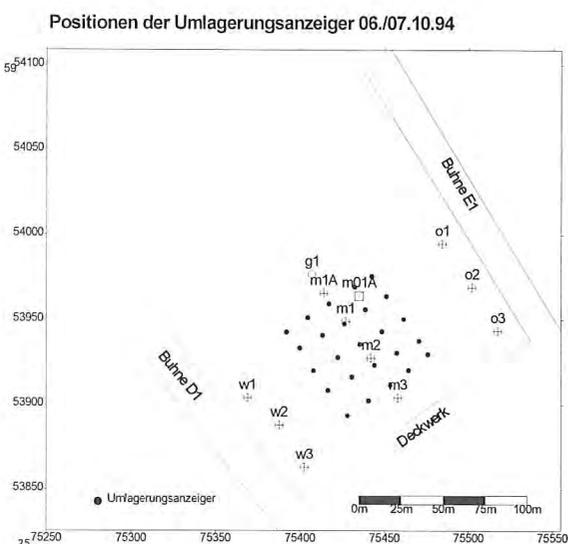


Abb. 3: Positionen der Umlagerungsanzeiger/Beprobungsstellen für die Einzeltiden-Untersuchungen

3 Ergebnisse

3.1 Änderungen in der Sedimentologie

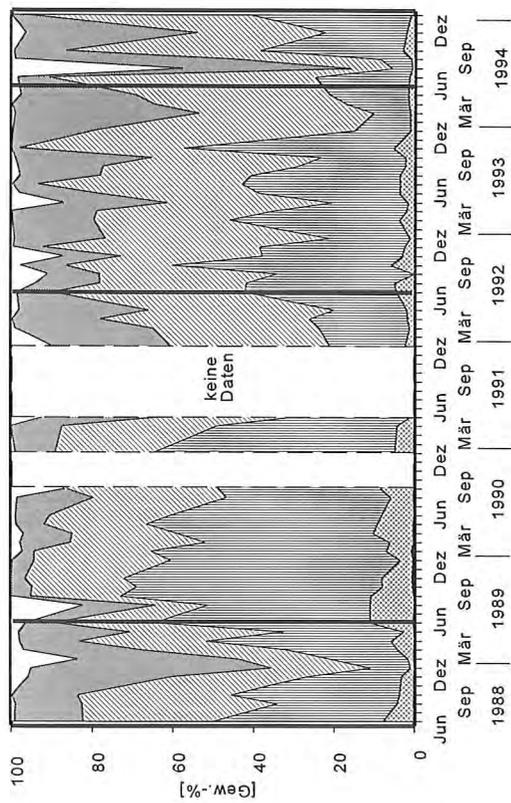
Über die zeitlichen Veränderungen der Korngrößenverteilungen und anderer sedimentologischer Parameter am Norderneyer Strand und den Einfluß der Strandauffüllungen werden an der Forschungsstelle Küste (FSK) des Niedersächsischen Landesamtes für Ökologie seit 1988 Untersuchungen durchgeführt. Ergebnisse für die Zeit vor 1994, auf die im folgenden teilweise zurückgegriffen wird, sind bei WESTHOFF [1990], EITNER et al. [1992] und EITNER [1993] veröffentlicht. Es zeigte sich, daß die Aufspülungen einen deutlichen Einfluß auf die Zusammensetzung der Strandsedimente hatten und zu einer Verfeinerung des Sandes führten. Erst einige Zeit nach einer Auffüllung, zum Teil erst nach mehreren Jahren, stellte sich wieder eine Korngrößenverteilungen ein, die in etwa derjenigen vor der jeweiligen Aufspülung entsprach.

Buhnenfeld E-D

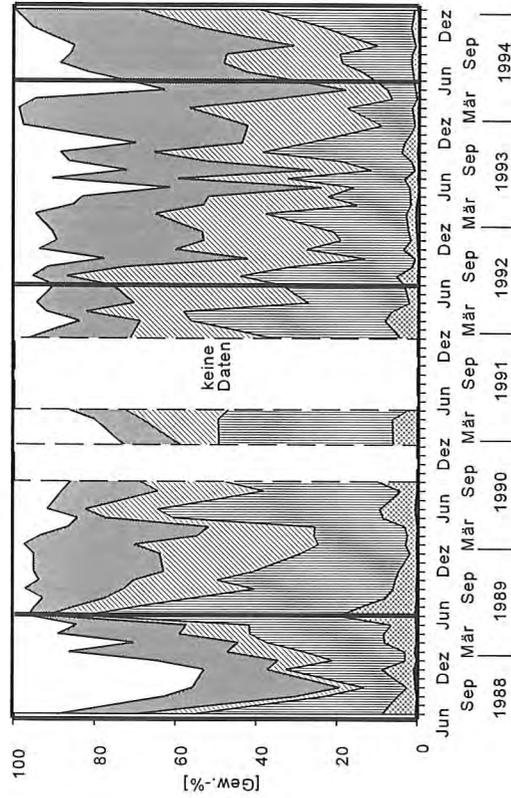
Die Sedimente in diesem Buhnenfeld sind im Vergleich zu denen der anderen Strandabschnitte feinkörniger entsprechend der in diesem Strandbereich geringeren Wellenbelastung [NIEMEYER 1986]. Die relativ größten Sedimente finden sich an der Mittelwasserlinie; dort sind auch die zeitlichen Schwankungen der mittleren Korngröße am stärksten. An der Niedrigwasserlinie schwankt die mittlere Korngröße nur wenig um einen d_{50} -Wert von 0,15 mm (Abb. 4).

Obwohl das Buhnenfeld bei den Aufspülungen nicht mit zum Aufspülbereich gehörte, sind Auswirkungen der Auffüllungen von 1989 und 1992 auf die Korngrößenverteilung der Strandsedimente festzustellen. 1989 wies das Aufspülmaterial Korngrößen auf von $d_{50} = 0,15$ bis $d_{50} = 0,18$ mm [ERCHINGER & LAUE 1990] mit einem Mittelwert von 0,17 mm [RAGUTZKI & WESTHOFF 1990]; 1992 hatte der aufgefüllte Sand Korngrößen zwischen $d_{50} = 0,15$ mm und $d_{50} = 0,39$ mm [EITNER 1992] bei einem Mittelwert von 0,20 mm. Auf Grund des in diesem Strandbereich südostwärts gerichteten Längstransports [KURZAK et al. 1949; THILO & KURZAK 1952] wurde feines Aufspülmaterial aus dem unmittelbar angrenzenden Aufspülbereich (1989 zwischen Buhnen D und J1, 1992 zwischen den Buhnen D und L1 [ERCHINGER & TILLMANN 1992]) in das Buhnenfeld E-D verfrachtet und führte zu einer Verfeinerung der Strandsedimente an der Hochwasserlinie. Nach etwa eineinhalb bis zwei Jahren stellte sich wieder eine Korngrößenverteilung ein, die der ursprünglichen ähnlich war. Die Aufspülung 1994 zwischen den Buhnen A bis O1 [STAIK 1994], bei der Material mit mittleren Korngrößen von $d_{50} = 0,17$ bis $d_{50} = 0,31$ mm eingebaut wurde (nach Untersuchungen der FSK an Spülgutproben genommen durch das Staatliche Amt für Insel- und Küstenschutz, Norden), hatte keinen eindeutigen Einfluß auf die Korngrößenverteilung im Buhnenfeld E-D. Die frühere Lage des Divergenzbereichs etwa zwischen den Buhnen A und C [KURZAK et al. 1949; THILO & KURZAK 1952; KUNZ & STEPHAN 1992], von dem aus der Längstransport in entgegengesetzte Richtungen einerseits nach Südosten andererseits nach Nordosten erfolgt, hätte einen Materialtransport aus dem Aufspülbereich von 1994 in das Feld E-D nicht zugelassen. In den letzten Jahren ist jedoch eine Verlagerung des Divergenzbereiches nach Osten zu beobachten [WESTHOFF 1990; EITNER et al. 1993], so daß ein solcher Transport prinzipiell möglich ist. Das Fehlen einer erkennbaren Beeinflussung durch die Aufspülungen 1994 im Buhnenfeld E-D, im Gegensatz zu den beiden vorhergehenden Auffüllungen, ist vermutlich zum einen auf den geringeren Unterschied zwischen dem

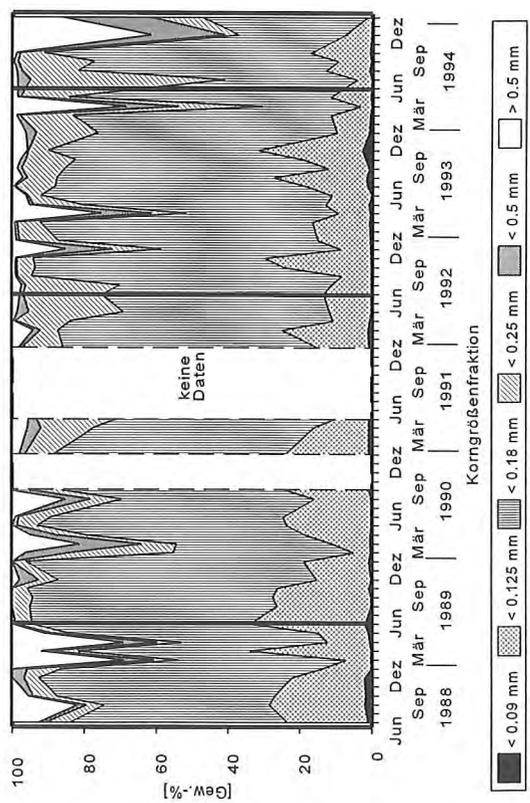
E-D: Hochwasserlinie



E-D: Mittelwasserlinie



E-D: Niedrigwasserlinie



E-D: Median (d50)

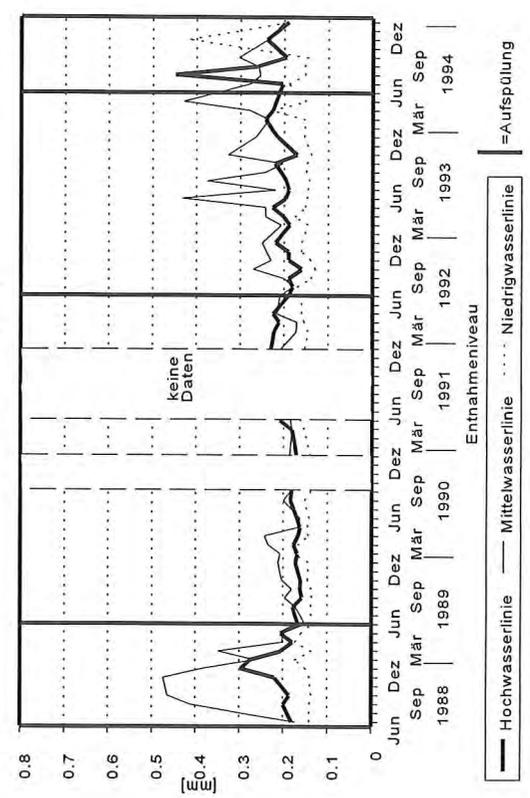
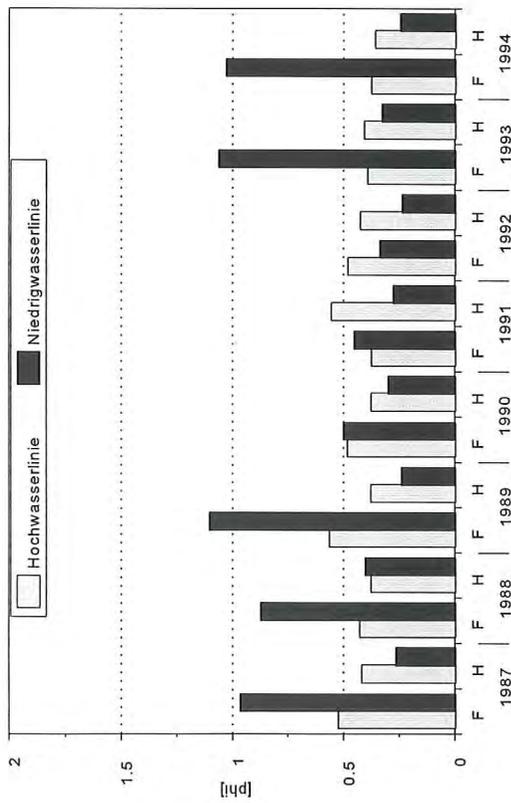
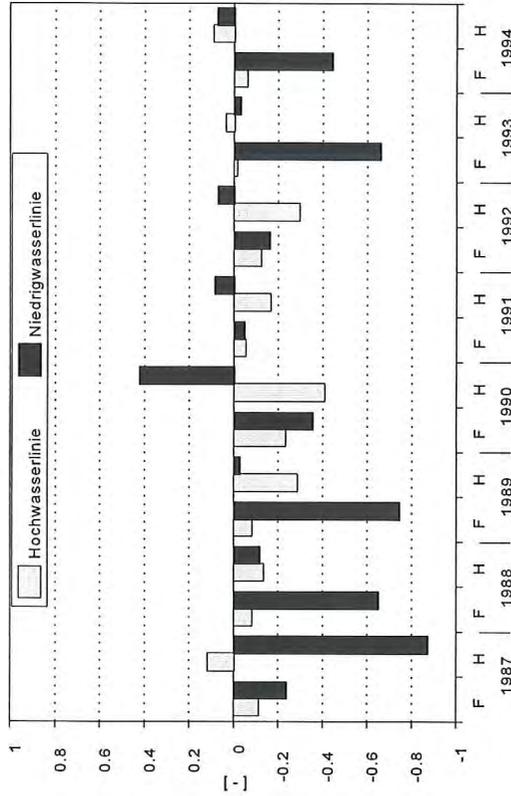


Abb. 4: Zeitliche Veränderungen der Korngrößenverteilung und der mittleren Korngröße d_{50} im Bühnenfeld E-D

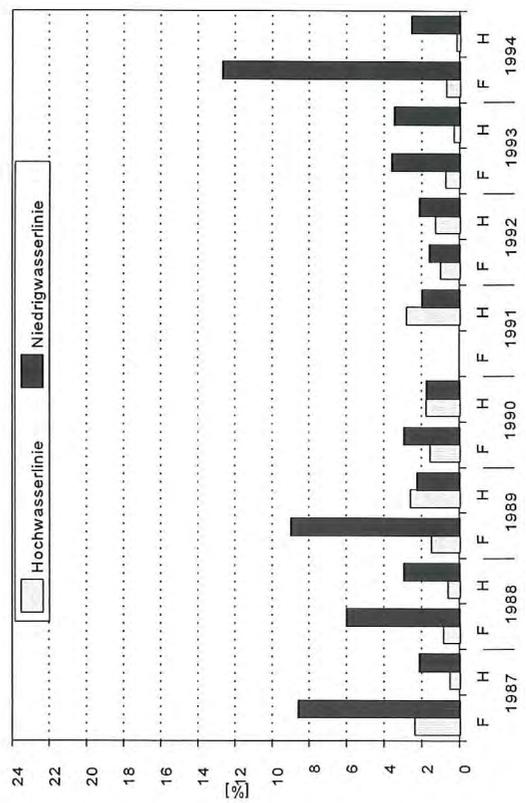
E-D: Sortierung (phi)



E-D: Schiefe (phi)



E-D: Karbonatgehalt



E-D: Schwermineralegehalt

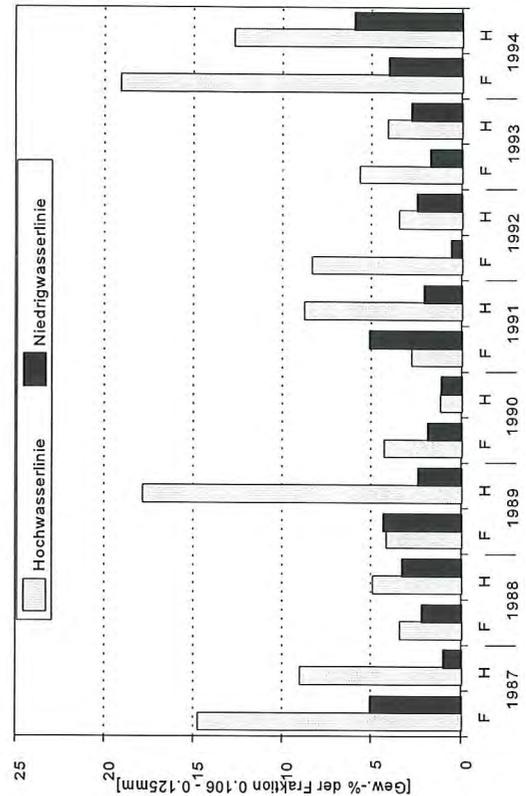


Abb. 5: Jahreszeitliche Änderungen (F = Frühjahr, H = Herbst) der Sortierung, der Schiefe, des Karbonatgehalts und des Schwermineralegehalts im Bühnenfeld E-D

aufgespülten Material und dem im Feld E-D vorhandenen Sand zurückzuführen, zum anderen auf die im Vergleich zu 1989 und 1992 erheblich größere Distanz zu dem aufgespülten Bereich (siehe auch Bühnenfeld S1-T1).

Die Sortierung der Sande im Bühnenfeld ist im allgemeinen gut; im Frühjahr ist sie, vermutlich infolge der größeren Variabilität des Seegangs während des Winters, schlechter als im Herbst (Abb. 5). Die saisonale Änderung ist an der Niedrigwasserlinie am stärksten ausgeprägt; dort treten im Frühjahr auch mäßige bis schlechte Sortierungen auf. Dies geht mit einer Zunahme des Karbonatgehalts einher und ist auf einen erhöhten Anteil von Schill zurückzuführen. Von diesen Proben mit hohem Schillanteil abgesehen, ist der Karbonatgehalt im Bühnenfeld E-D aber gering; er liegt unter 4 %.

Die Schiefe der meisten Proben aus dem Bühnenfeld E-D ist negativ, wie es für Strandsedimente typisch ist [FOLK 1966; BULLER & McMANUS 1979]. Die Werte zeigen eine breite Streuung von fast symmetrisch bis stark grob schief, vereinzelt treten auch positive Schiefen auf; ein Grund hierfür ist nicht erkennbar.

Der Schwermineralanteil ist im allgemeinen an der Hochwasserlinie höher als an der Niedrigwasserlinie; eindeutige jahreszeitliche Abhängigkeiten konnten nicht festgestellt werden (Abb. 5). Die genauen Vorgänge, die zu einer Anreicherung von Schwermineralen in den höheren Strandbereichen führen, sind noch nicht geklärt, eine zusammenfassende Darstellung gibt EITNER [1993].

Bühnenfeld ZBI-A

In diesem Bühnenfeld steigt die Korngröße von der Hochwasserlinie zur Niedrigwasserlinie an. Die mittlere Korngröße ist, insbesondere an der Niedrigwasserlinie, starken Schwankungen unterworfen (Abb. 6). Die Sortierung ist im allgemeinen an der Niedrigwasserlinie schlechter als an der Hochwasserlinie und schwankt zwischen gut sortiert und schlecht sortiert (Abb. 7). Die Zunahme der Korngröße und die Verschlechterung der Sortierung vom oberen zum unteren Bereich des intertidalen Strandes entsprechen den in der Literatur angegebenen Tendenzen [KING 1972; DAVIS 1978]. Die Schiefe ist wiederum meist negativ mit einer relativ geringen Schwankungsbreite; erst ab 1991 treten vereinzelt auch positive Werte auf.

Auch in diesem Bühnenfeld ist an der Hochwasserlinie eine deutliche Verfeinerung des Sandes durch die Aufspülungen festzustellen. Nach 1989 stellte sich die ursprüngliche Korngrößenverteilung erst kurz vor der neuen Aufspülung 1992 wieder ein, deren Einfluß wiederum noch zu Beginn 1994 zu erkennen war. Die Auswirkungen der Aufspülung von 1989 sind auch an der Mittel- und Niedrigwasserlinie an einer Veränderung der Strandsedimente zu erkennen, während die Aufspülung des östlich angrenzenden Bereichs im Jahr 1994 in keinem der drei untersuchten Niveaus des Feldes ZBI-A deutliche Veränderungen der Korngrößenverteilungen hervorgerufen hat. Die hohe natürliche Variabilität der Korngrößenverteilung in diesem Bühnenfeld überdeckt vermutlich eine Beeinflussung durch lateral verfrachtetes Aufspülmaterial. Der Karbonatgehalt nahm nach der Aufspülung 1989 stark ab und liegt seitdem mit wenigen Ausnahmen unter 5 % (Abb. 7). Da das Aufspülmaterial meistens viel Schill enthält, wäre eher eine gegenteilige Entwicklung zu erwarten gewesen. Der Schill hat sich hier nicht an der Strandoberfläche angereichert. Der Schwermineralgehalt zeigt keine Abhängigkeit von den Aufspülungen; im allgemeinen enthalten aber die Frühjahrsproben mehr Schwerminerale als die Proben aus dem Herbst. Wiederum sind die Schwermineralgehalte an der Hochwasserlinie höher als an der Niedrigwasserlinie.

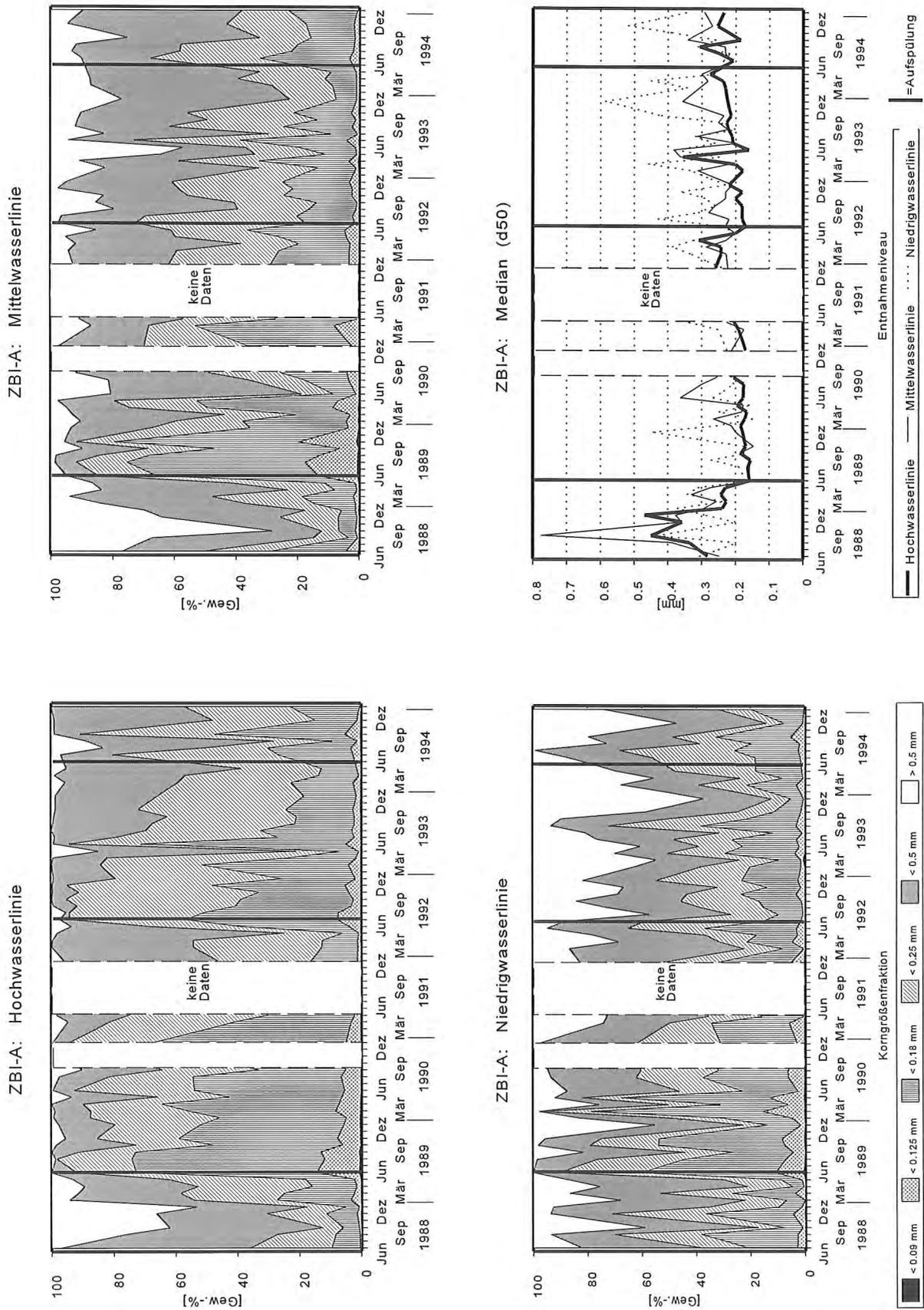


Abb. 6: Zeitliche Änderungen der Korngrößenverteilung und der mittleren Korngröße d_{50} im Bühnenfeld ZBI-A

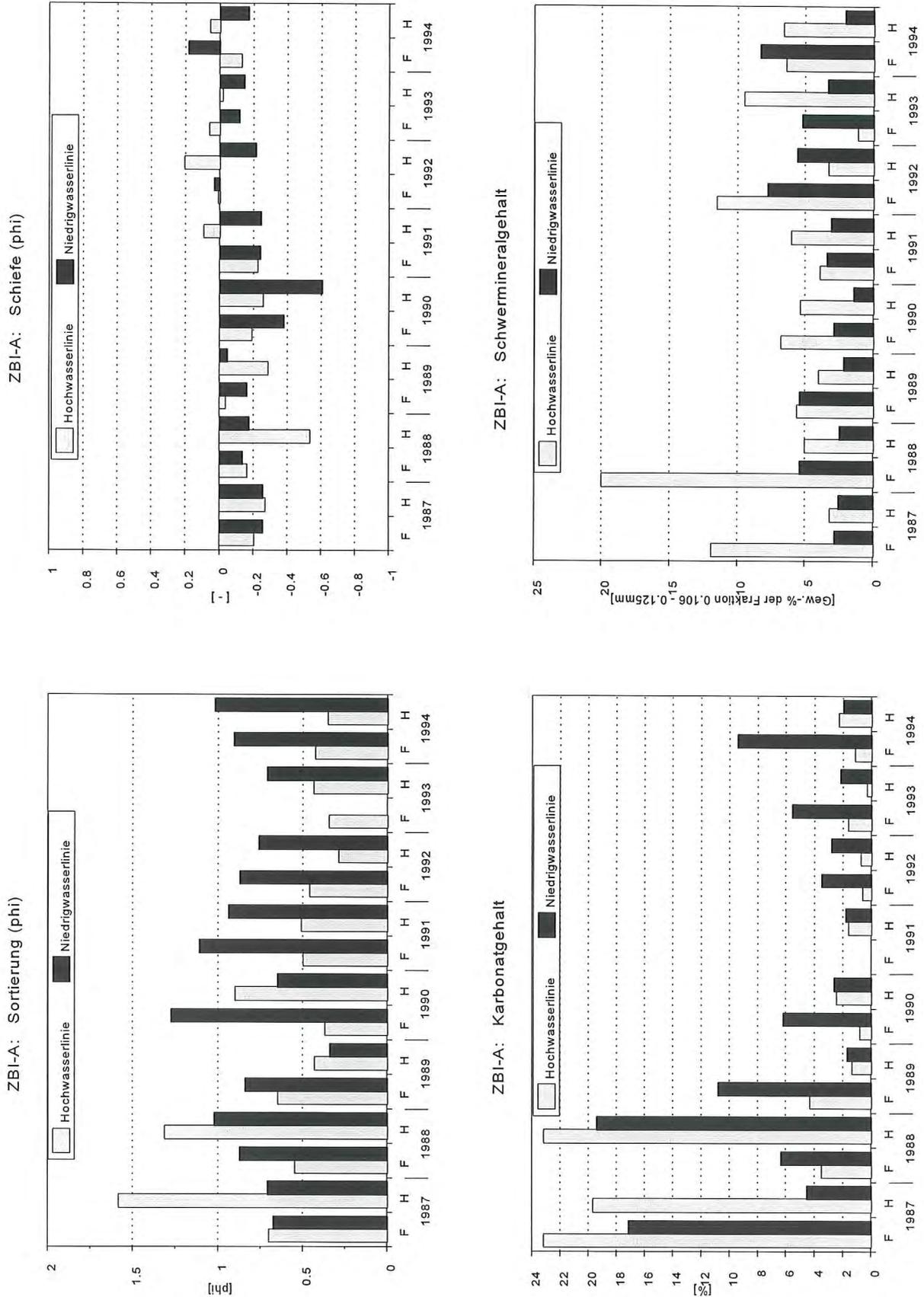


Abb. 7: Jahreszeitliche Änderungen (F = Frühjahr, H = Herbst) der Sortierung, der Schiefe, des Karbonatgehalts und des Schwermineralegehalts im Bühnenfeld ZBI-A

Buhnenfeld D1-E1

Die Sedimentverteilung in diesem Buhnenfeld wurde durch die Aufspülungen beeinflusst. Im Gegensatz zu den beiden oben erläuterten Buhnenfeldern gehörte dieses Buhnenfeld 1994 mit zum Aufspülbereich, so daß eine deutliche Veränderung der Sedimente infolge der Auffüllung zu erkennen ist (Abb. 8). Das im Vergleich zu dem im Buhnenfeld vorhandenen Sediment feinere Aufspülmateriale verschob die Korngrößenverteilungen des Strandsands hin zu kleineren Korngrößen. An der Hochwasserlinie, an der meistens kleinere d_{50} -Werte als an den anderen Probenpunkten zu finden waren, zeigte sich die deutlichste Veränderung. Es dauerte nach 1989 fast 2 Jahre und nach 1992 ein Jahr bis sich in etwa eine Sedimentverteilung einstellte, die ähnlich derjenigen unmittelbar vor den Aufspülungen war. Die Beeinflussungen im Niveau der Niedrigwasserlinie waren weniger deutlich und sind kaum von den natürlichen Schwankungen zu unterscheiden.

Eine Veränderung der Sortierung und der Schiefe durch die Aufspülungen ist nicht erkennbar. Wie auch in den anderen Buhnenfeldern ist die Sortierung an der Niedrigwasserlinie schlechter als an der Hochwasserlinie und liegt meistens über 0,5 phi, die Sedimente erreichen also höchstens eine mäßig gute Sortierung. Die Schiefe ist, mit wenigen Ausnahmen symmetrischer Korngrößenverteilungen, negativ und erreicht nur in wenigen Fällen stark negative Werte (Abb. 9).

Der Karbonatgehalt der Proben nahm, wie im Buhnenfeld ZBI-A, nach der Aufspülung 1989 ab; im Frühjahr 1994 wurden allerdings wieder hohe Werte von über 12 % gemessen. Dies ging einher mit einer deutlichen Zunahme der mittleren Korngröße und des Anteils der Fraktion > 0,5 mm im Winter/Frühjahr 1993/1994. Diese Änderungen wurden durch Schill und Schillbruch verursacht, der sich an der Strandoberfläche anreicherte. Ein großer Teil des Muschelschalenmaterials am Nordweststrand wurde während der zurückliegenden Aufspülungen in den Strand eingebaut und war ursprünglich nicht in diesen Mengen vorhanden [EITNER 1993].

Saisonale Veränderungen der Korngrößenverteilung sind an der Niedrigwasserlinie zu erkennen: die Sortierung der Sande ist, mit Ausnahmen, im Herbst schlechter als im Frühjahr; der Schwermineralanteil ist im Frühling größer als im Herbst. Auffällig sind die ungewöhnlich hohen Schwermineralgehalte von über 20 % (von der Fraktion 0,106-0,125 mm) an der Hochwasserlinie in den drei Frühjahrsproben von 1992 bis 1994 (Abb. 9). Eine Erklärung für diese hohen Werte konnte nicht gefunden werden.

Buhnenfeld S1-T1

Die sedimentologischen Kennwerte in diesem Buhnenfeld veränderten sich nur wenig im Laufe der Zeit. Die mittlere Korngröße an allen drei Entnahmeniveaus schwankt im allgemeinen zwischen 0,2 und 0,3 mm (Abb. 10). Die Sortierung ist an der Hochwasserlinie meistens gut, an der Niedrigwasserlinie mäßig gut. Die Werte der Schiefe schwanken um 0; die Korngrößenverteilungen sind also annähernd symmetrisch. Der Karbonatgehalt ist, mit Ausnahme einiger Proben von der Niedrigwasserlinie, auffallend gering und liegt unter 2 %. Wie auch in den anderen Buhnenfeldern ist der Anteil an Schwermineralen im Frühjahr etwas höher als im Herbst; die Unterschiede zwischen Hoch- und Niedrigwasserlinie sind gering (Abb. 11).

Dieser Strandbereich wurde während der Aufspülungen nicht mit aufgefüllt, so daß nur eine mittelbare Beeinflussung durch Verfrachtung von Aufspülmateriale möglich gewesen wäre. Eine deutliche Verfeinerung des Sandes infolge der Aufspülungen in diesem über 1 km von den Aufspülungen entfernten Buhnenfeld konnte nicht festgestellt werden; EITNER [1993] weist jedoch auf eine leichte Verfeinerung an der Hochwasserlinie zwei Jahre nach der Auffüllung von 1989 hin.

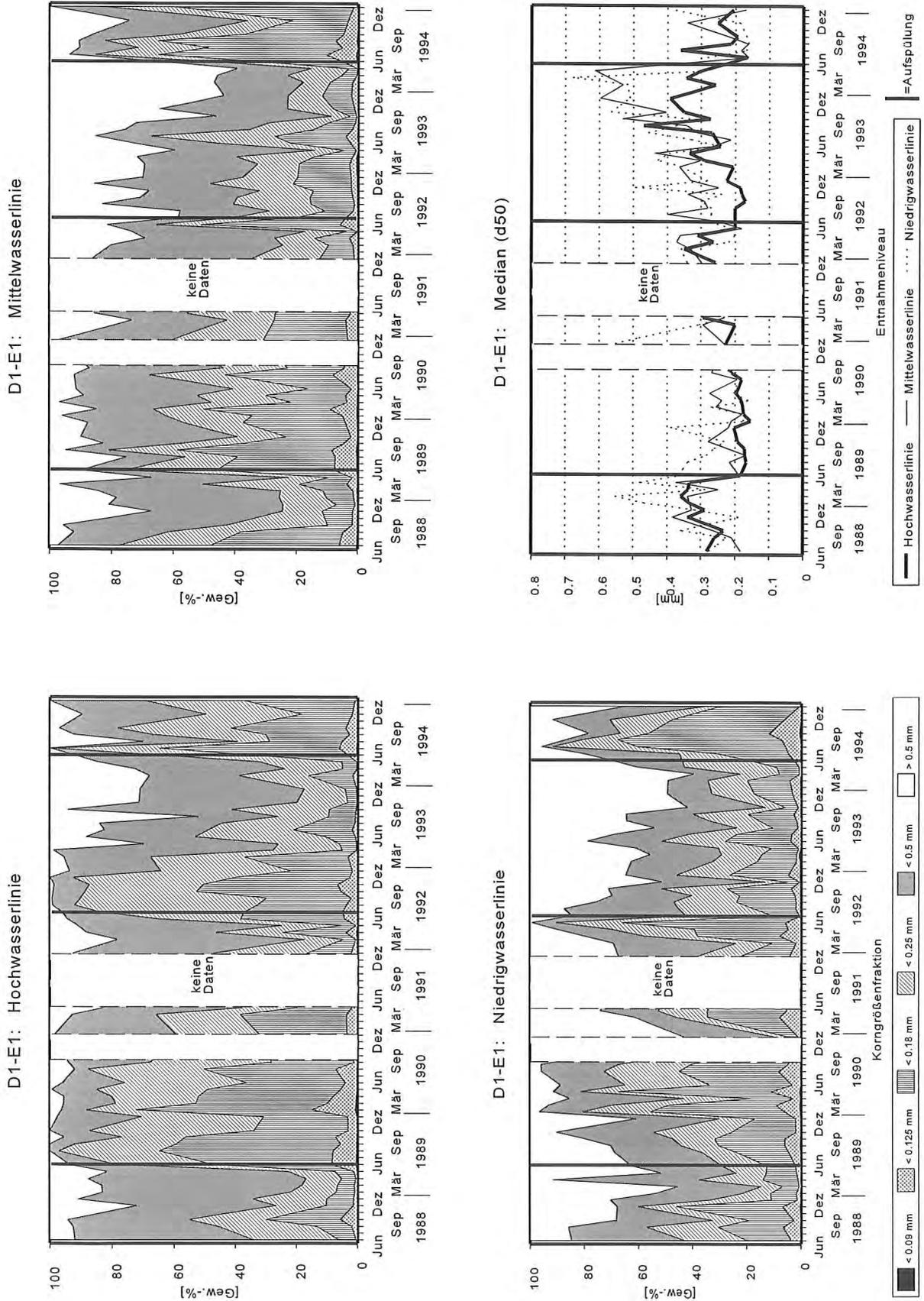
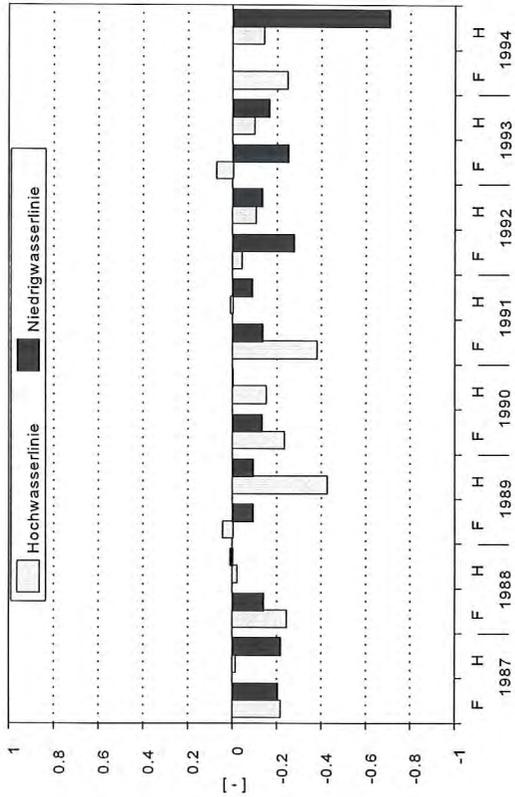
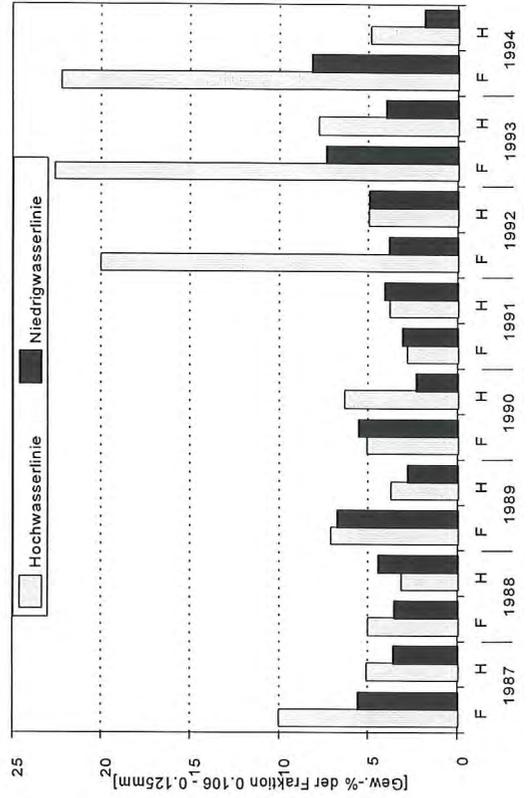


Abb. 8: Zeitliche Änderungen der Korngrößenverteilung und der mittleren Korngröße d_{50} im Buhnenfeld D1-E1

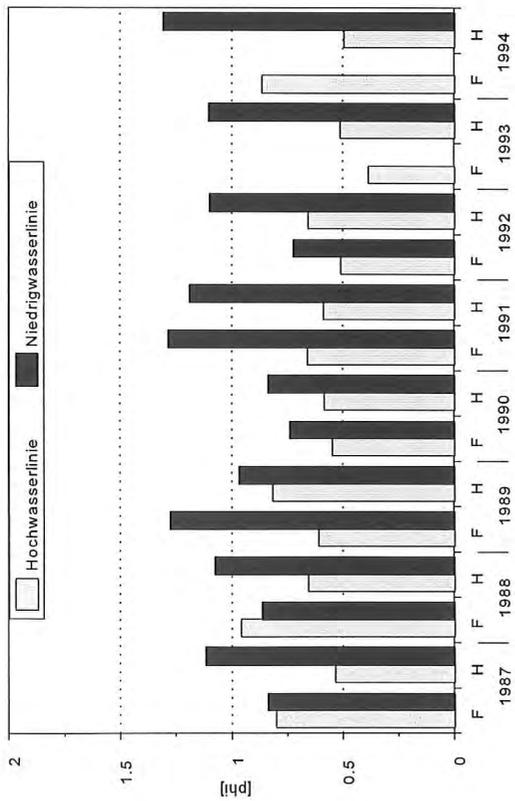
D1-E1: Schiefe (phi)



D1-E1: Schwermineralgehalt



D1-E1 Sortierung (phi)



D1-E1: Karbonatgehalt

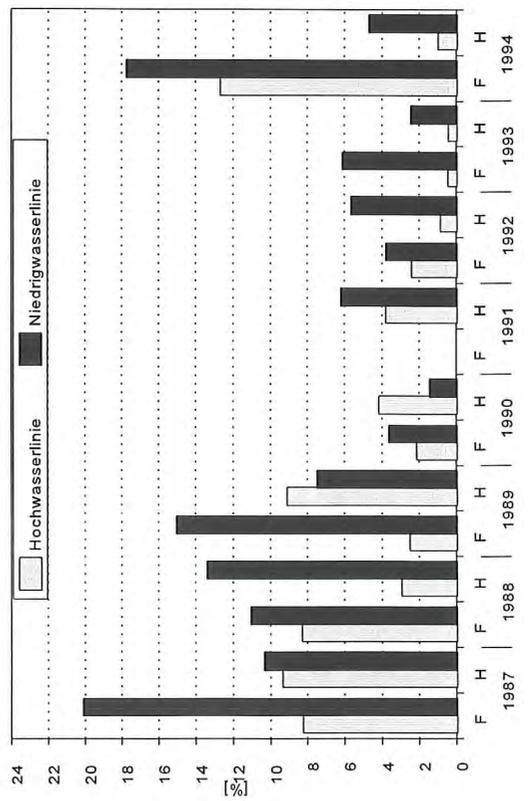


Abb. 9: Jahreszeitliche Änderungen (F = Frühjahr, H = Herbst) der Sortierung, der Schiefe, des Karbonatgehalts und des Schwermineralgehalts im Bühnenfeld D1-E1

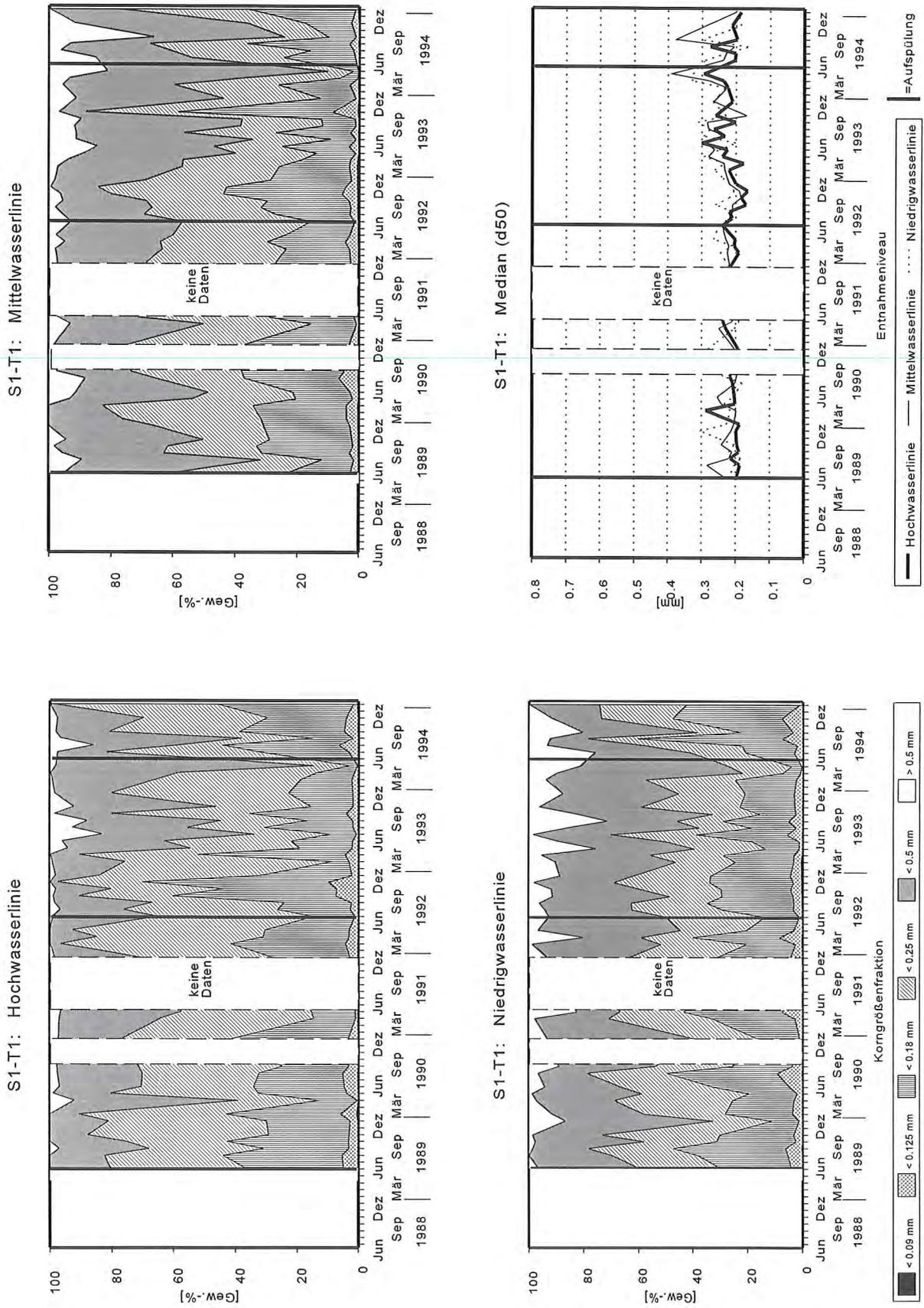


Abb. 10: Zeitliche Veränderungen der Korngrößenverteilung und der mittleren Korngröße d_{50} im Bühnenfeld S1-T1

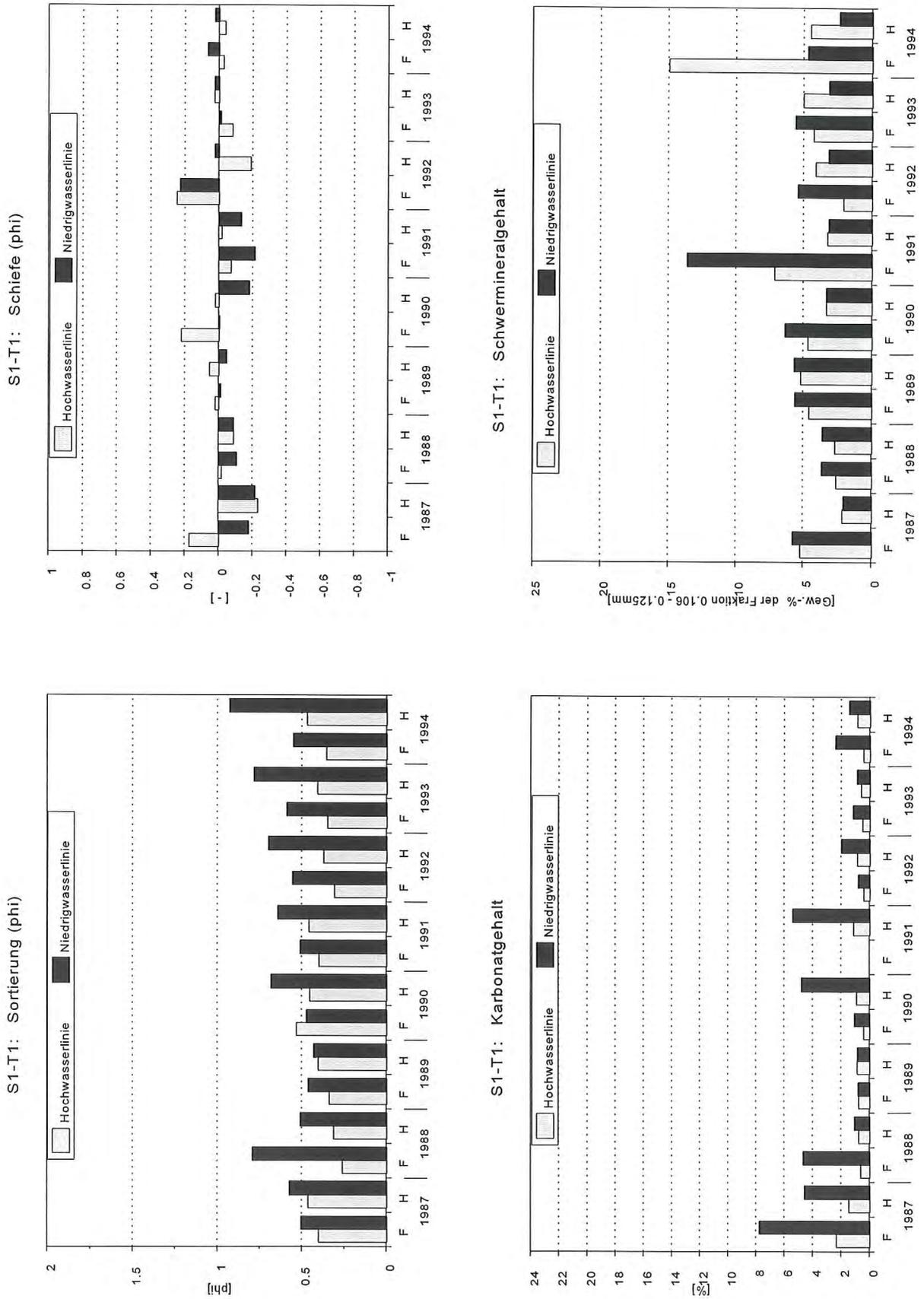


Abb. 11: Jahreszeitliche Änderungen (F = Frühjahr, H = Herbst) der Sortierung, der Schiefe, des Karbonatgehalts und des Schwermineralegehalts im Bühnenfeld S1-T1

3.2 Höhenänderungen des Strandes

Die Untersuchungen mit dem Sandstandpegel zeigten Änderungen der Strandhöhe zum einen im Verlauf einzelner Tiden und zum anderen über Zeiträume von mehreren Tagen.

Über den Zyklus einer Tide erfolgt im allgemeinen bei Flut eine Erosion und bei Ebbe eine Sedimentation. Im "Idealfall" wird nach dem Trockenfallen des Strandes wieder die gleiche Sensorhöhe erreicht wie beim vorherigen Niedrigwasser (Abb. 14). Zur Zeit des Tidenhochwassers sind die Höhenänderungen gering und der Pegel zeigt ein relatives Minimum an. Erosionsvorgänge während der Flutphase einer Tide wurden in der Vergangenheit bereits bei "sheet flow"-Untersuchungen von YU et al. [1991] beobachtet. Eine verstärkte Bodenbewegung bei bestimmter Wasserüberdeckung zeigten auch die im Oktober 1993 in diesem Bühnenfeld (D1-E1) durchgeführten Untersuchungen mit Heißfilmsonden [MÜLLER 1993; NIEMEYER et al. 1994]. Die Mächtigkeit der während einer Tide umgelagerten Sandschicht ist unterschiedlich. Bei einigen Tiden wurde vom Pegel nur eine Veränderung von einem Sensorabstand angezeigt, d.h. die Dicke der zuerst erodierten und dann wieder sedimentierten Schicht betrug nur wenige Zentimeter (siehe Anmerkungen zur Auflösung). Die größte gemessene Umlagerungstiefe während einer Tide betrug $20 \pm 2,5$ cm und wurde vom 01.10. mittags zum 02.10.94 morgens aufgezeichnet (Abb. 12).

Länger anhaltende Höhenänderungen traten z.B. zwischen dem 14.09. und dem 16.09.94 ein. In dieser Zeit nahm die Strandhöhe am Standort des Pegels um ca. 20 cm ab; eine Wiederaufhöhung bis zum Ausgangsniveau erfolgte in den folgenden 10 Tagen. Vom 27.09. auf den 28.09. wurden innerhalb eines Tages ebenfalls ca. 20 cm abgetragen, aber an den nächsten drei Tagen wieder aufsedimentiert. Vom 12. bis 18.10. nahm die Strandhöhe am Pegel trotz relativ ruhigen Wetters um ca. 30 cm ab (Abb. 12).

An der neuen Position zwei Meter westlich der Station m1 (siehe Abb. 1) wurde vom 28.10.94 bis zum 06.01.95 gemessen (Abb. 13). Eine deutliche Niveauänderung wurde vom 31.10. bis 02.11. erfaßt. Über einen Zeitraum von drei Tiden wurden zwischen 15 und 20 cm erodiert und anschließend wieder aufgehöhht. Dem schloß sich bis zum 13.11. eine Phase mit sehr geringen Höhenänderungen von wenigen Zentimetern an. Vom 13. auf den 15.11. nahm das Niveau um den Sandstandpegel um ca. 10 cm ab, stieg aber anschließend wieder auf den alten Stand an. Mitte Dezember stieg die Strandhöhe erst etwas an, um dann innerhalb von zwei Tagen um über 40 cm abzunehmen. Wiederum erfolgte in den nachfolgenden Tagen ein Anstieg auf die alte Höhe. Zu Beginn des Jahres 1995 nahm die Höhe an der Position des Pegels bei starker Seegangbelastung [GLASER & MÜNKEWARF 1995] um weitere 30 cm zu. Somit beträgt die maximale gemessene Höhendifferenz des Strands an dieser Position des Sandstandpegels 70 cm (Abb. 13).

Die vom Sandstandpegel angezeigten Höhendifferenzen über mehrere Tage sind nicht auf Niveauänderungen im gesamten Bühnenfeld zurückzuführen, sondern auf Veränderungen einzelner morphologischer Strukturen (s.u.). So wurden z.B. die vom Pegel angezeigten Höhenänderungen vom 27./28.09.94 durch die Einebnung einer flachen Schwelle verursacht (siehe Abb. 16). Auch die Höhenabnahme vom 12. bis 18.10. ist nach visuellen Beobachtungen auf den Abtrag eines flachen Riffs in diesem Bereich und die Ausbildung eines vom Deckwerk aus nahezu stetig fallenden Strandprofils zurückzuführen. Die Erhöhung des Strandes im Bereich des Pegels Anfang

Januar 1995 spiegelt die Ausbildung eines "Winterprofils" [BASCUM 1954] als Reaktion des Strandes auf die stärkere Seegangsbelastung wieder.

Im Rahmen der Meßkampagne im September/Oktober 94 wurden in der Mitte des Bühnenfelds über fünf Einzeltiden Untersuchungen der Umlagerungsintensität durchgeführt, die einen Vergleich mit den Ergebnissen des Sandstandpegels ermöglichen. Die bei diesen Messungen verwendeten Umlagerungsanzeiger messen über eine Tide die maximale Erosionstiefe und die Höhe der nachfolgenden Sedimentation. Für einen Vergleich stehen somit 10 Werte eines ca. 5 m vom Pegel entfernten Umlagerungsanzeigers zur Verfügung (jeweils ein Wert für die Erosion und einer für die Sedimentation über fünf Tiden). Sechs der 10 Werte stimmen mit den vom Sandstandpegel über diese Tiden gemessenen Höhenänderungen überein, vier Werte des Umlagerungsanzeigers sind kleiner als die vom Pegel angegebenen Höhendifferenzen. Diese Abweichungen sind vermutlich auf die relativ geringe Auflösung des Sandstandpegels zurückzuführen. Desweiteren zeigten die Untersuchungen mit den Umlagerungsanzeigern, daß die Beträge für Erosion und Sedimentation kleinräumig stark schwanken können und somit über die Entfernung von 5 m schon Unterschiede von mehreren Zentimetern möglich sind. Solche kleinräumigen Änderungen der Erosion und Sedimentation verdeutlichen, daß die punktuellen Messungen des Sandstandpegels kaum Aussagen über die Entwicklung größerer Bereiche oder das gesamte Bühnenfeld zulassen.

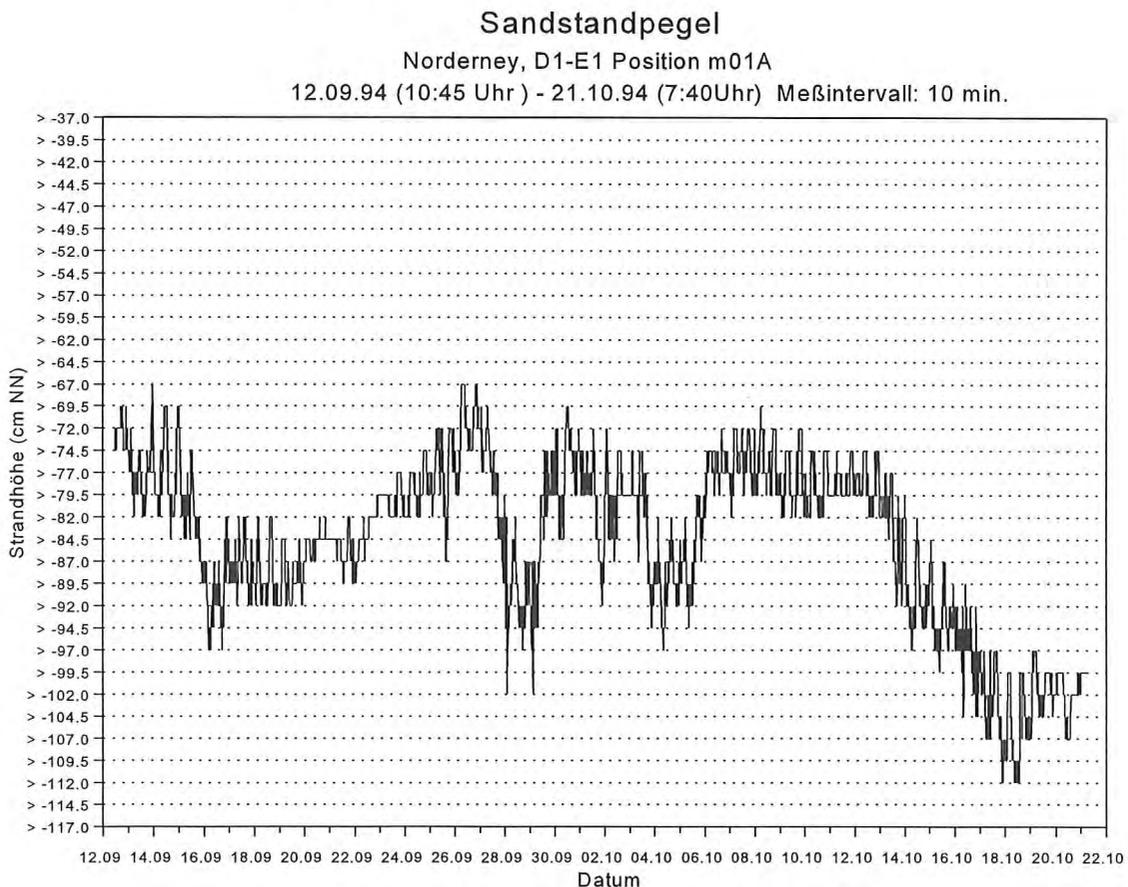


Abb. 12: Höhenänderungen des Strandes an der Position m01A

Sandstandpegel
 Norderney, D1-E1 2m westlich m1
 28.10.94 (10:35 Uhr) - 06.01.95 (9:00 Uhr)

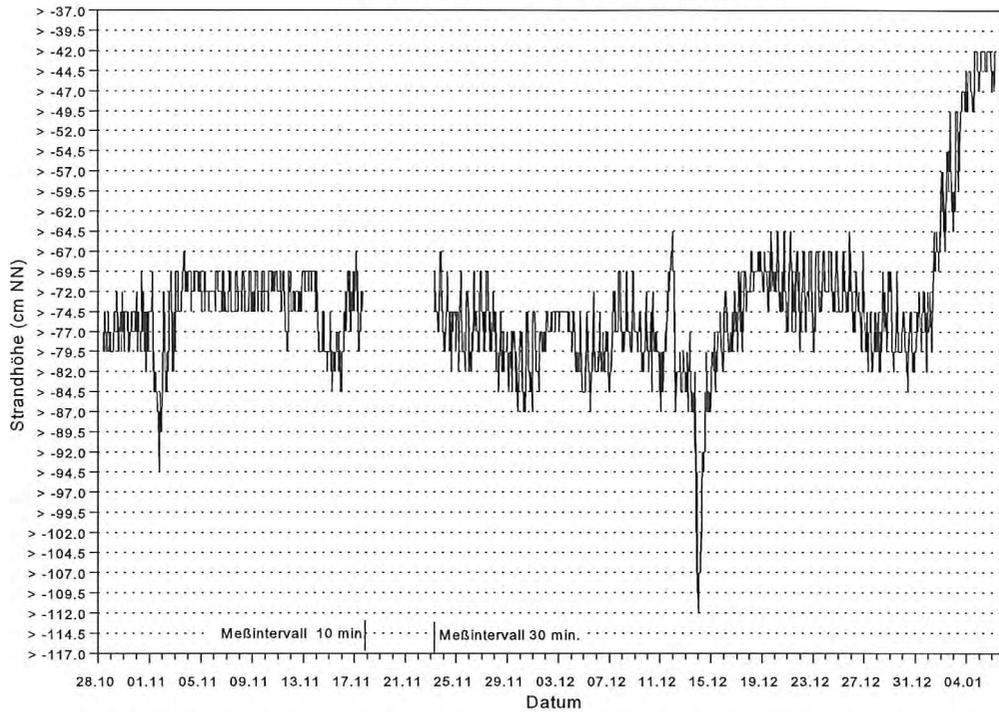


Abb. 13: Höhenänderungen des Sandes an der Position zwei Meter westlich m1

Sandstandpegel
 Ausschnitt
 19.12.94 (7:00 Uhr) - 27.12.94 (7:00 Uhr) Meßintervall: 30 min.

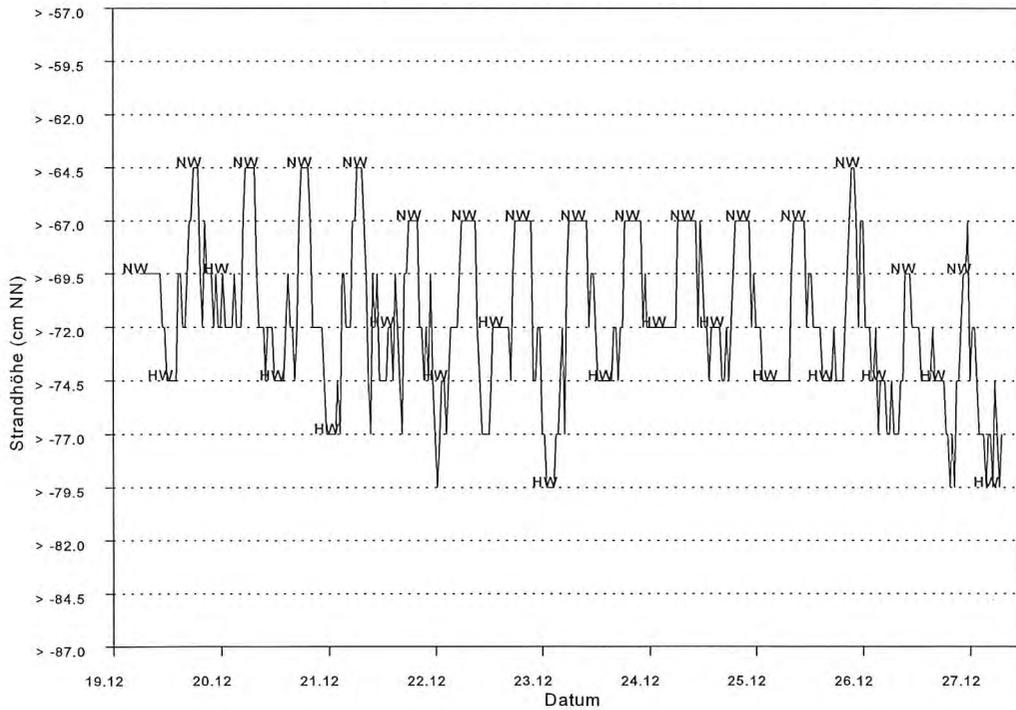


Abb. 14: Ausschnitt aus den in Abb. 13 dargestellten Meßergebnissen des Sandstandpegels (NW = Niedrigwasser, HW = Hochwasser)

3.3 Einzeltiden-Untersuchungen (22.09.94 bis 07.10.94) im Bühnenfeld D1-E1

Topographie

Als auffälligste morphologische Änderung während des zweiwöchigen Untersuchungszeitraums zeigten die tachymetrischen Aufnahmen den wiederholten Auf- und Abbau eines flachen Strandriff-Rinnen-Systems (Abb. 15, 16 und 17). Die Rinne verlief etwa parallel zum Deckwerk, zwischen den Schraubpfählen m1 und m2 hindurch und drehte mit Annäherung an die Bühne E1 nach Norden. Dieses Riff-Rinnen-System war im westlichen Bereich des Bühnenfelds nur schwach ausgebildet, nach NE vertiefte sich die Rinne und wurde deutlicher erkennbar. Das mit den Umlagerungsanzeigern untersuchte Gebiet reichte seewärts bis auf die Schwelle hinauf. Es konnten folgende Änderungen beobachtet werden: bis zum 26.09. abends formte sich ein flaches Riff-Rinnen-System aus, das sich dann bis zum 28.09. wieder zurückbildete. Am 29.09. zeigte die Topographie eine nahezu gleichmäßig seewärts geneigte Strandoberfläche, bereits am 30.09. begann sich erneut ein Riff-Rinnen-System herauszubilden. Zum Zeitpunkt der nächsten Vermessung am 05.10. war die Rinne schwach ausgebildet und vertiefte sich bis zum 06.10. weiter, um bis zum 07.10. wieder etwas an Ausprägung zu verlieren.

Insgesamt nahm die Strandhöhe im oberen Bereich des Strandes während des Untersuchungszeitraums um 10-20 cm ab. Zwischen den Schraubpfählen m1 und m1A, im Bereich um NN-0,7 m, war hingegen keine ausgeprägte Abnahme der Strandhöhe festzustellen. Dies entspricht den Messungen mit dem in diesem Bereich stehenden Sandstandpegel.

Auf Grund der erfaßten Strukturen ist der Strand nach der Einteilung von WRIGHT & SHORT [1984] als "ridge and runnel" (Strandriff-Rinnen-System) bzw. "low tide terrace" (Niedrigwasserplateau)-Zustand zu bezeichnen. Dies entspricht der niedrigsten Energiestufe innerhalb der intermediären Zustände nach dieser Klassifikation. Bei der Zuordnung ist jedoch zu beachten, daß die Strandentwicklung hier durch die Bühnen und Aufspülungen beeinflusst ist, die Klassifikation nach WRIGHT & SHORT solche Einflüsse aber nicht einbezieht.

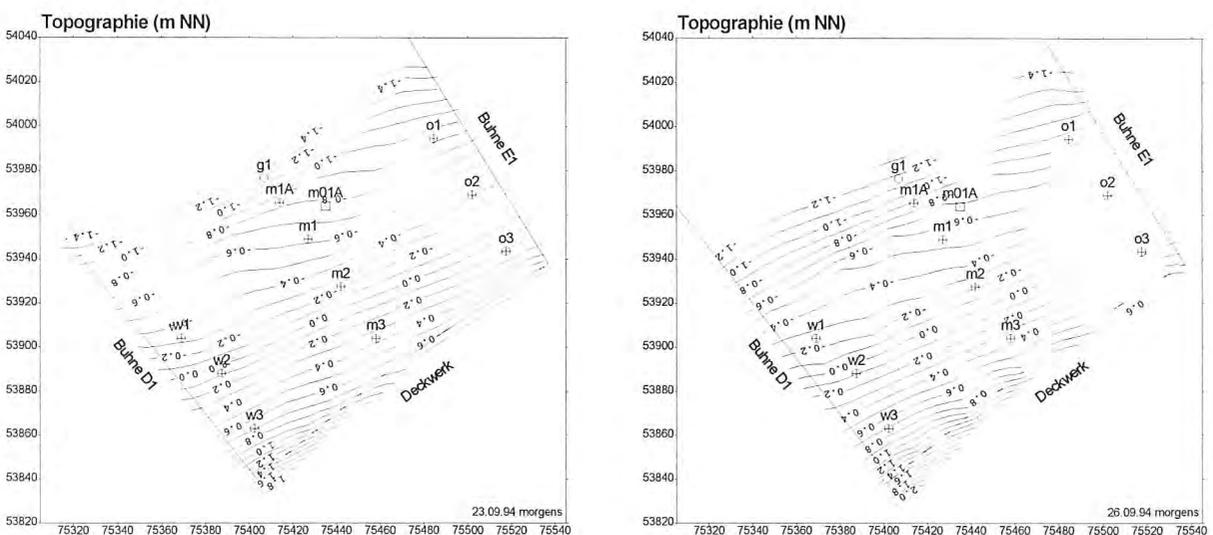


Abb. 15: Änderung der Topographie im Bühnenfeld D1-E1 vom 23.09. zum 26.09.94

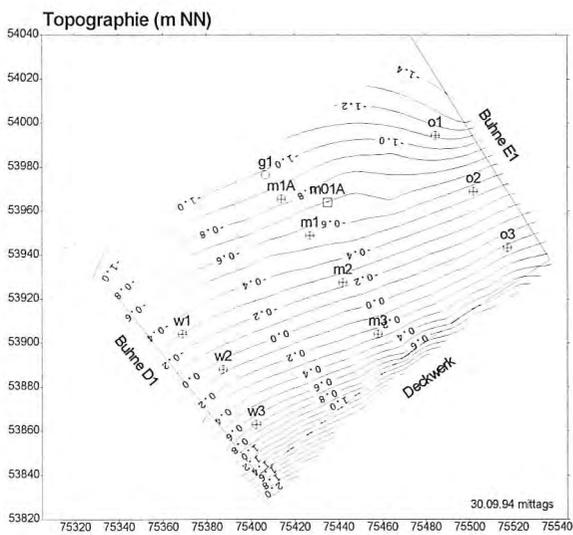
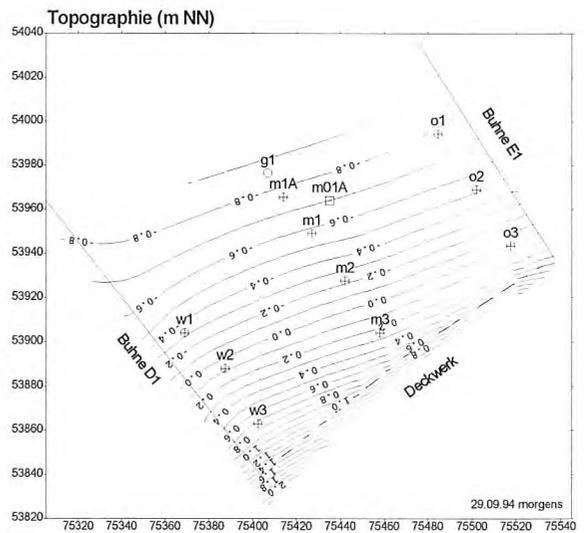
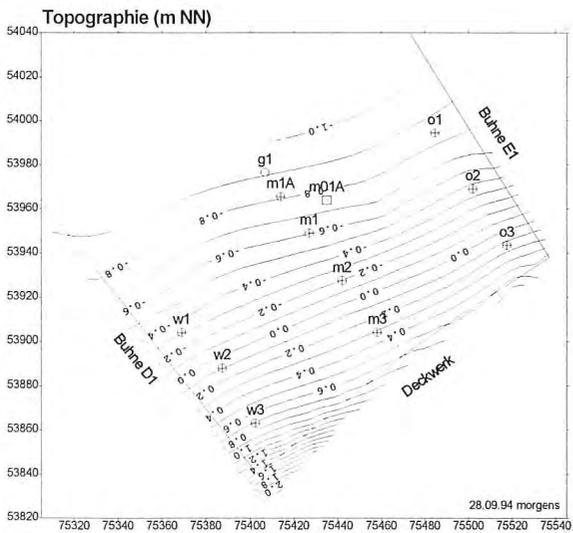
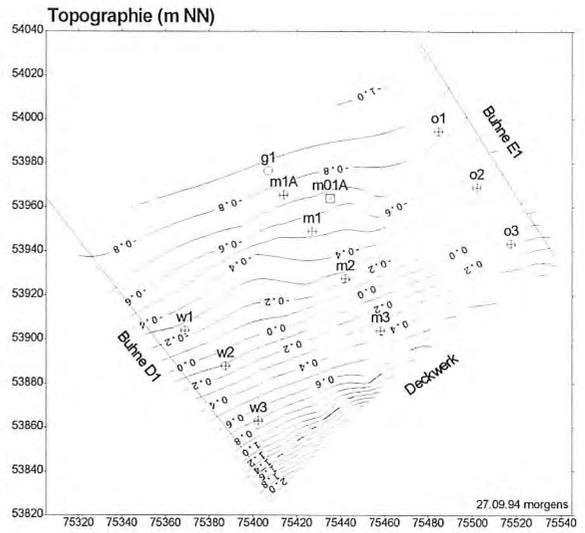
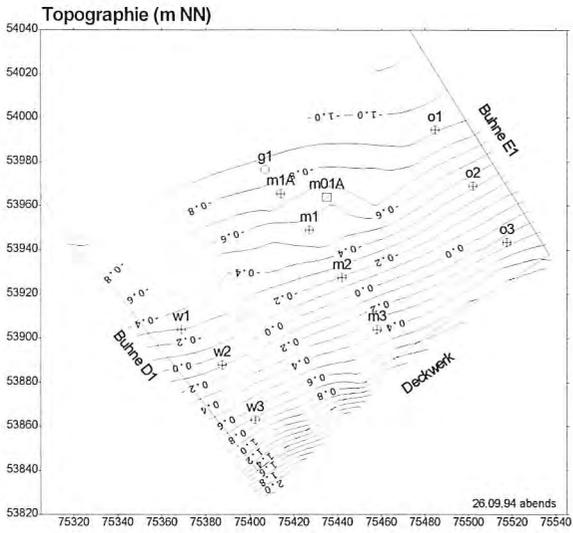


Abb. 16: Änderungen der Topographie im Bühnenfeld D1-E1 vom 26.09. bis 30.09.94

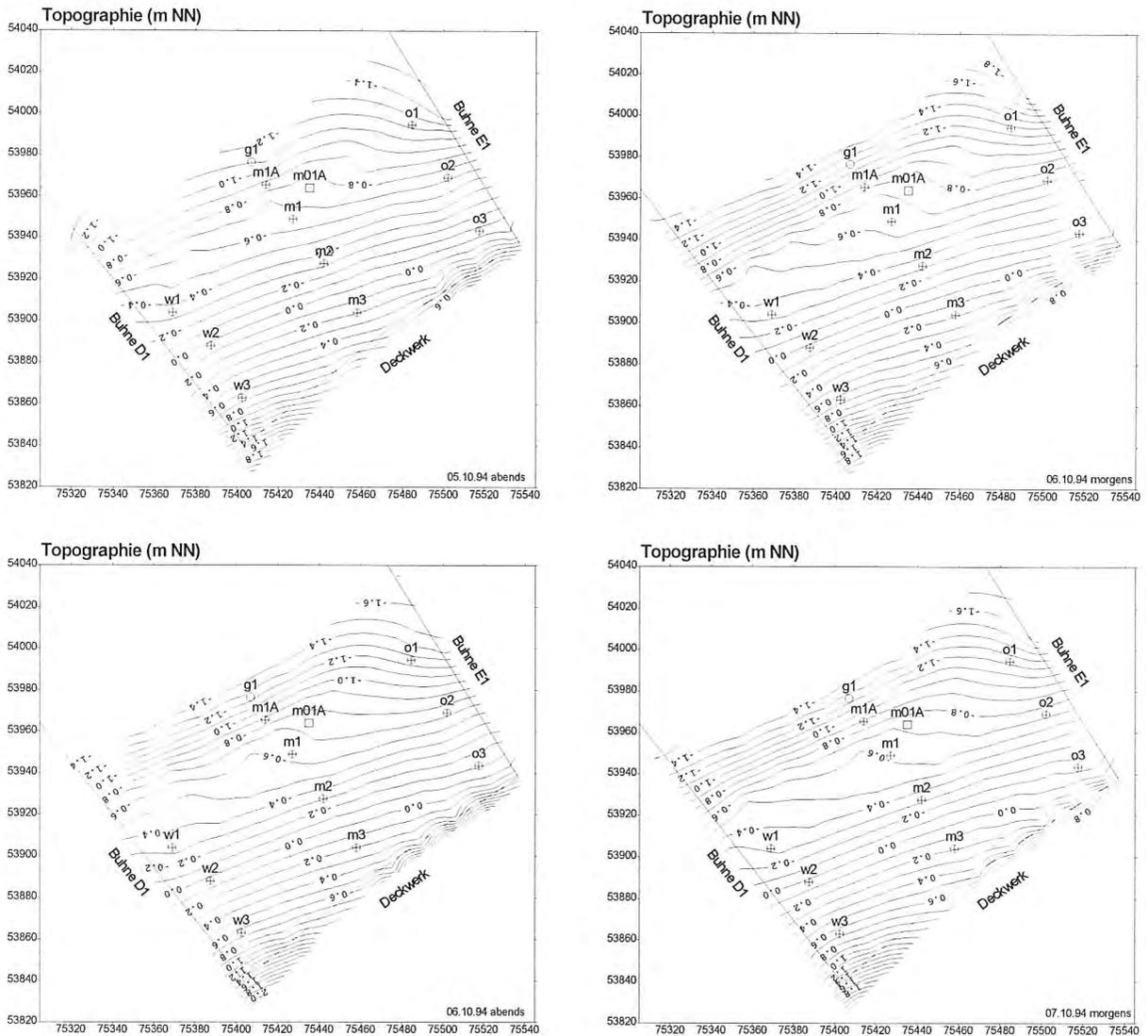


Abb. 17: Änderungen der Topographie im Bühnenfeld D1-E1 vom 05.10. bis 07.10.94

Umlagerungsintensität

Die Erosions- und Sedimentationsraten während der untersuchten Einzeltiden waren in dem Teil des Bühnenfeldes, der mit den Umlagerungsanzeigern untersucht wurde (siehe Abb. 3, 18 bis 22), gering. Die höchsten Erosions- bzw. Akkumulationswerte wurden während der Tide vom 06.10. zum 07.10. mit -8 cm bzw. +9 cm gemessen (Abb. 22). Generell ergaben die Messungen im mittleren Bereich des untersuchten Gebietes nur kleine Erosions- und Sedimentationsraten, in Richtung See und Deckwerk nahm deren Intensität leicht zu. Im allgemeinen waren beide Vorgänge vom Betrag ausgeglichen, so daß nur eine geringe Nettoumlagerung festgestellt werden konnte. Eine Ausnahme bildete der nordöstliche Teil des Untersuchungsgebietes; dort wurde während der drei Tiden 26.09. morgens - 26.09. abends - 27.09. morgens und 06.10. morgens - 06.10. abends jeweils eine Gesamtakkumulation von über 5 cm festgestellt (Abb. 19 bis 21). Diese Zunahmen sind im Zusammenhang mit den oben beschriebenen Änderungen des flachen Riff-Rinnen-Systems zu sehen.

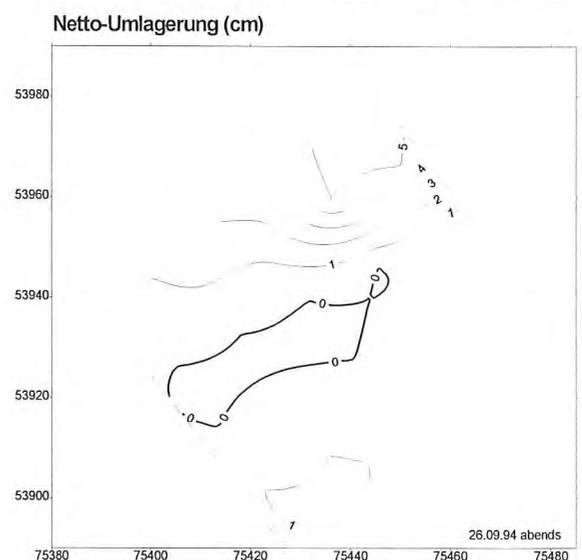
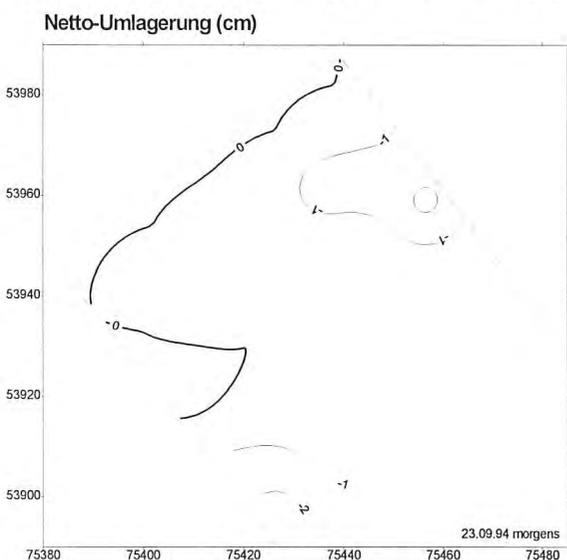
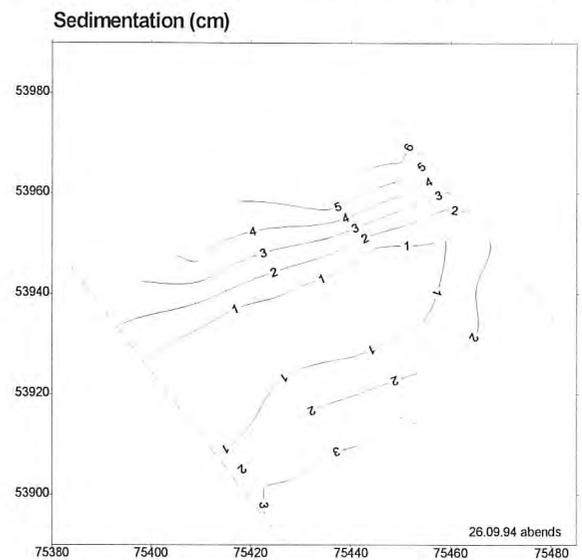
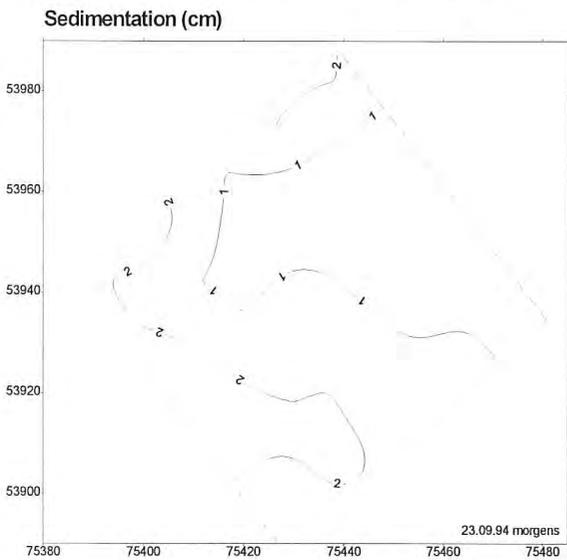
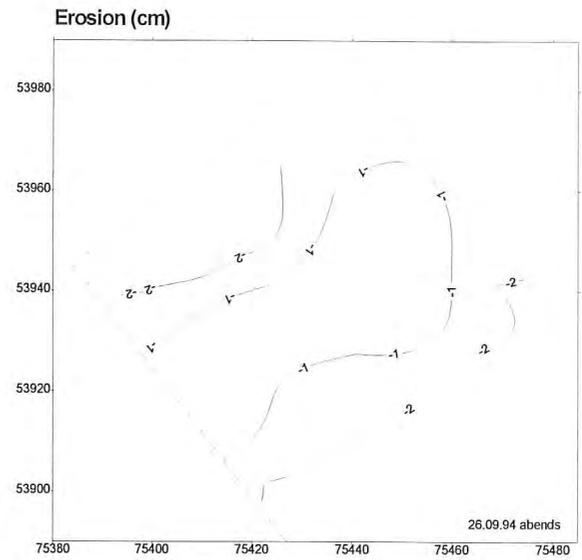
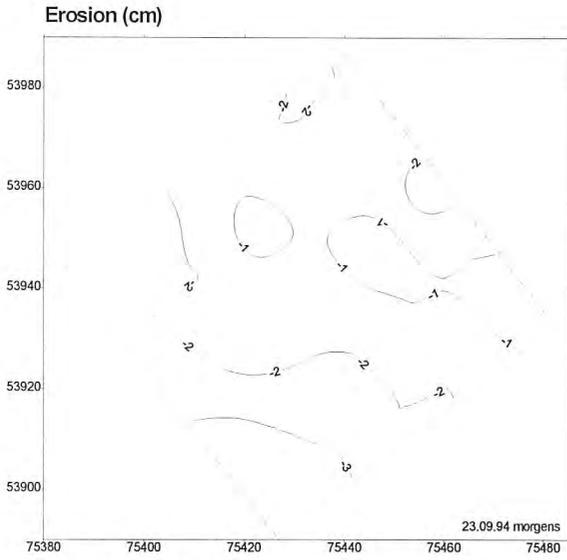


Abb. 18: Umlagerungsintensität vom 22.09. abends zum 23.09.94 morgens

Abb. 19: Umlagerungsintensität vom 26.09. morgens zum 26.09.94 abends

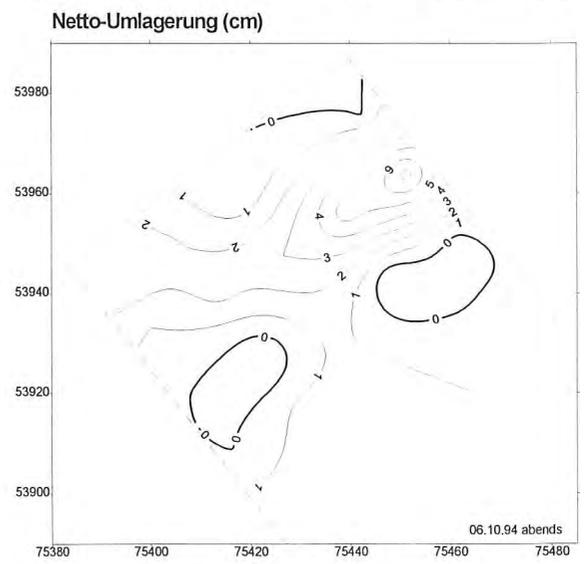
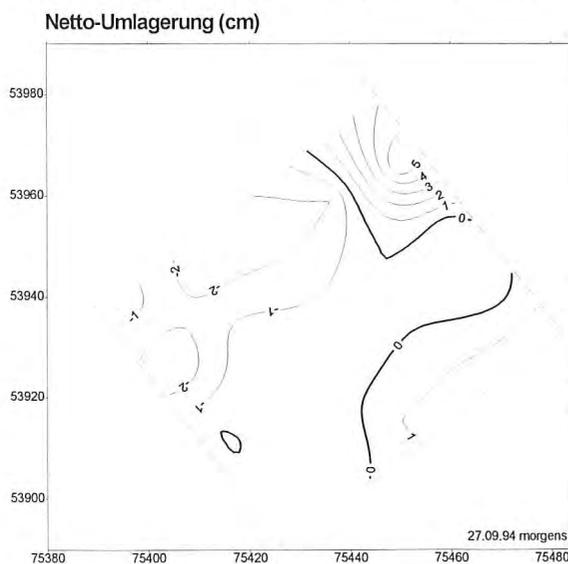
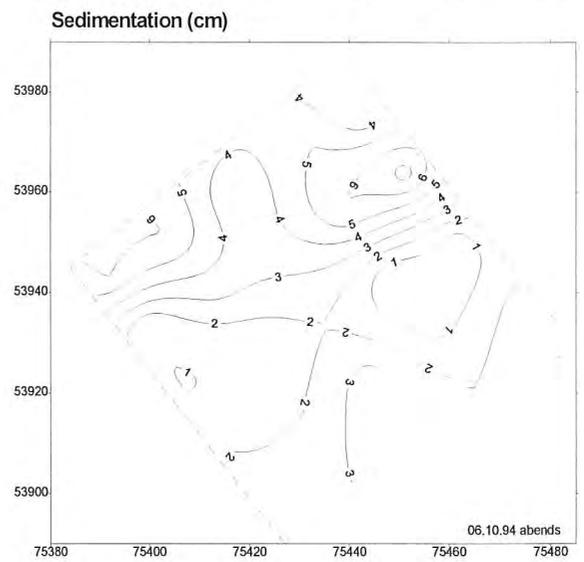
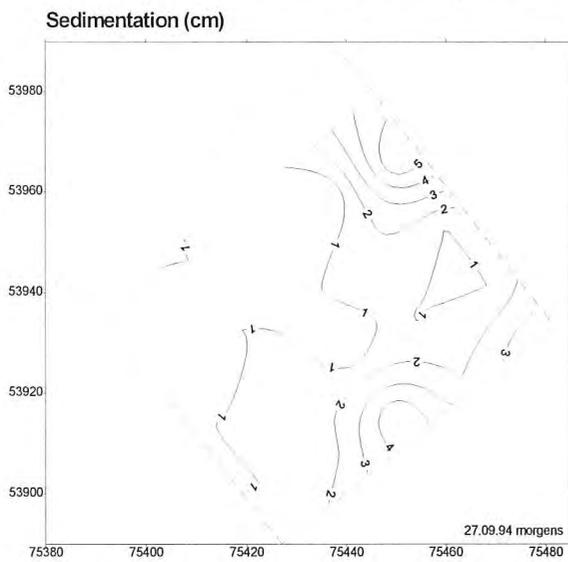
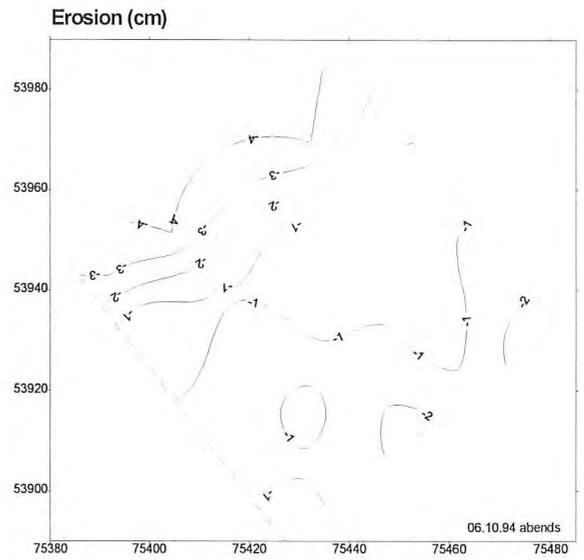
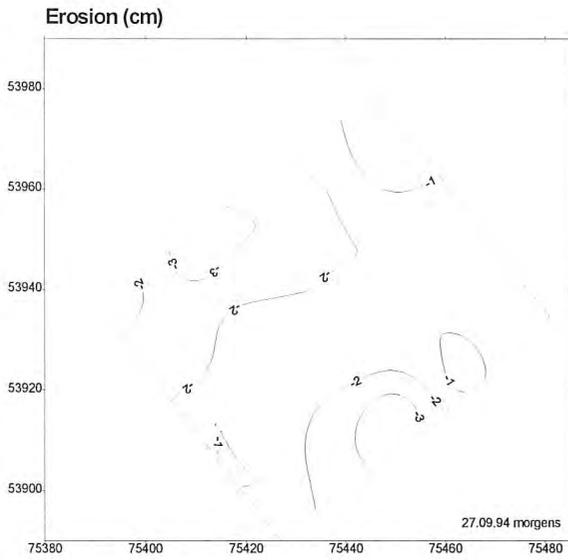


Abb. 20: Umlagerungsintensität vom 26.09. abends zum 27.09.94 morgens

Abb. 21: Umlagerungsintensität vom 06.10. morgens zum 06.10.94 abends

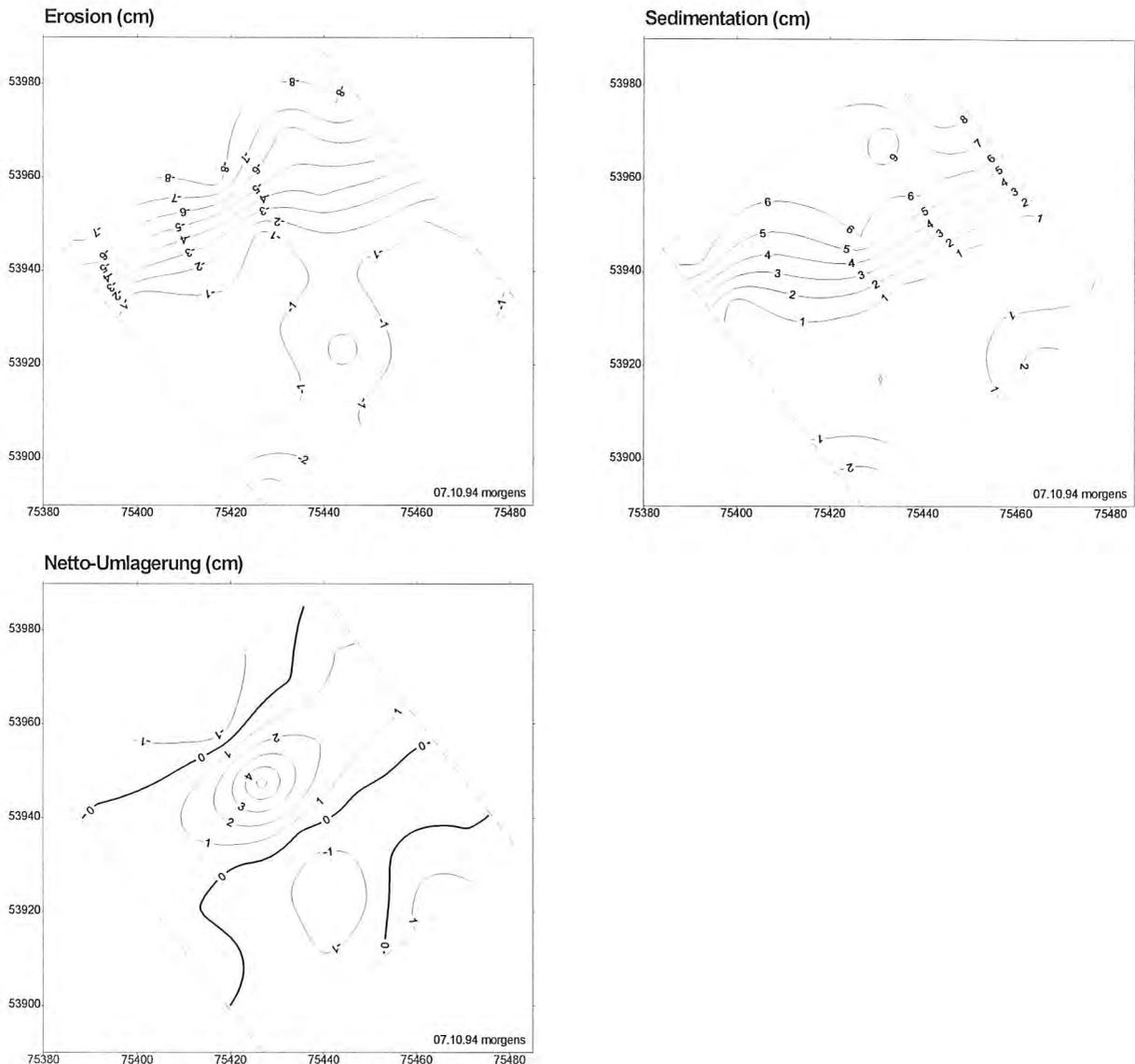


Abb. 22: Umlagerungsintensität vom 06.10. abends zum 07.10.94 morgens

Sedimentologie

In dem untersuchten, ca 60 x 60 m großen Teilgebiet des Bühnenfeldes, auf das sich die nachfolgenden Ausführungen beziehen (Abb. 3, 23 bis 34), reichte der prozentuale Gewichtsanteil der Korngrößenfraktion < 0,25 mm (im folgenden als Feinsand bezeichnet) von etwa 10 % bis über 70 % und demonstriert die Variabilität der Korngrößenverteilung während dieser Untersuchungen. Die geringsten Anteile an Feinsand traten an der Seeseite des untersuchten Gebietes auf, deutlich wird dies besonders am 07.10. (Abb. 33). Die Verteilung der Mittelsandfraktion (0,25 - 0,5 mm) zeigte im allgemeinen einen zunehmenden Anteil von 20 % bis über 50 % in seewärtiger Richtung. Die Fraktion > 0,5 mm (im folgenden als Grobsand bezeichnet) zeigte eine weniger klare räumliche Gliederung, da sie stark durch einzelne Proben mit hohem Schillanteil beeinflusst wurde; in einer Probe vom 26.09. abends betrug der Anteil z.B. über 60 %. Nach den ersten drei untersuchten Tiden lag der Grobsandanteil im Mittel

unter 20 %, während nach den beiden Tiden vom 06./07.10. der mittlere Anteil ca. 30 % bzw. 24 % betrug. Diese beiden Probenserien wiesen auch deutlich größere d_{50} -Werte auf. Die mittlere Korngröße lag zwischen 0,16 und 0,74 mm und zeigte nach den einzelnen Tiden jeweils andere räumlichen Verteilungen ohne eindeutige Tendenzen. Dies beruht auf der unregelmäßigen Verteilung der Grobsandanteile bzw. Schillanteile, die durch punktuelle Anreicherungen die räumliche Verteilungsstruktur der anderen Kornfraktionen überdecken.

Die Sortierung der Sande reichte von mäßig gut sortiert bis sehr schlecht sortiert. Am 23.09.94, nach einer Tide mit überwiegend negativer Netto-Umlagerung, waren die Proben mäßig gut bis mäßig sortiert (Abb. 24); am Abend des 06.10., nach einer Tide mit einer überwiegenden Sedimentakkumulation, zeigten die Proben hingegen eine mäßige bis sehr schlechte Sortierung (Abb. 32).

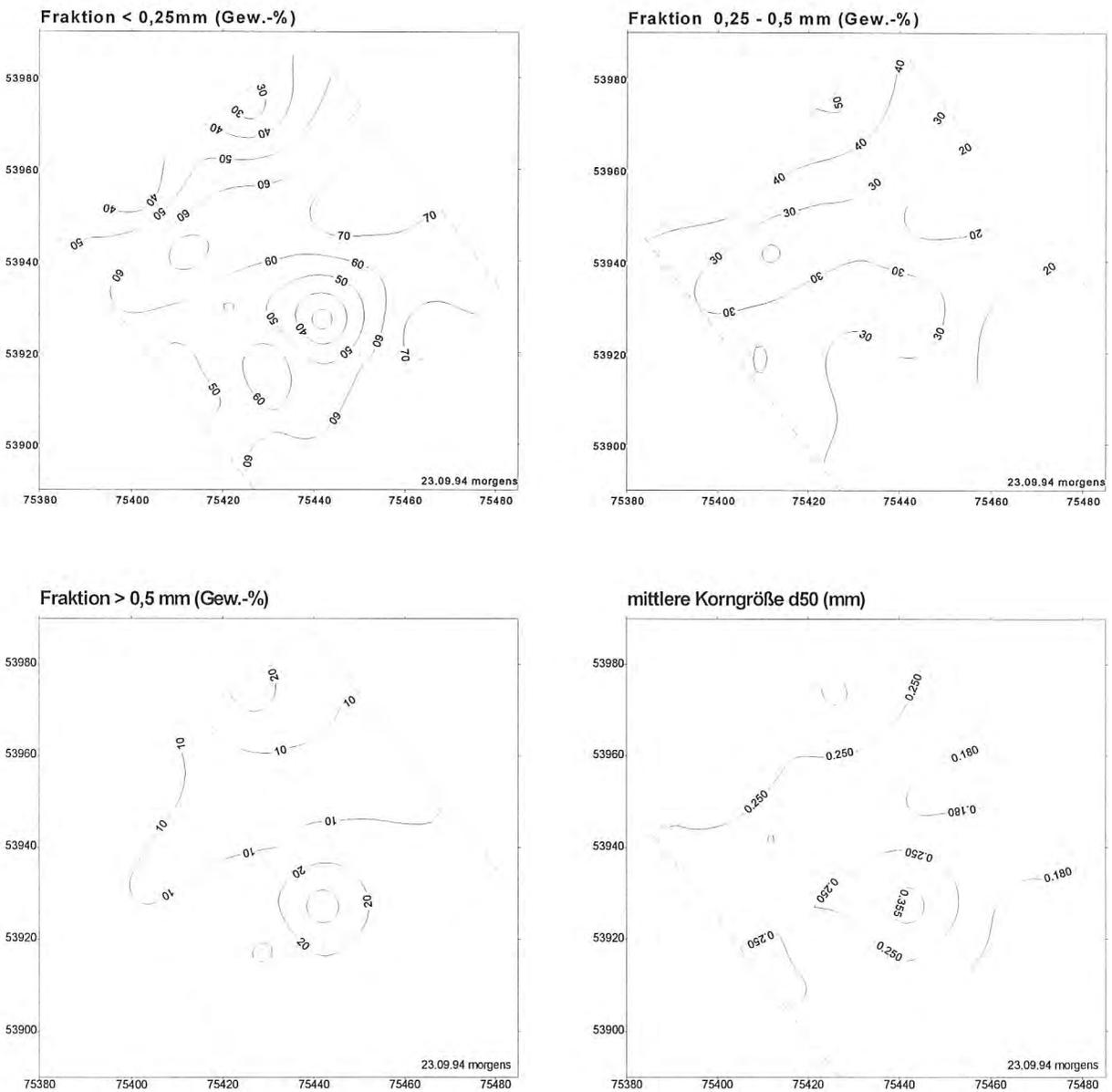
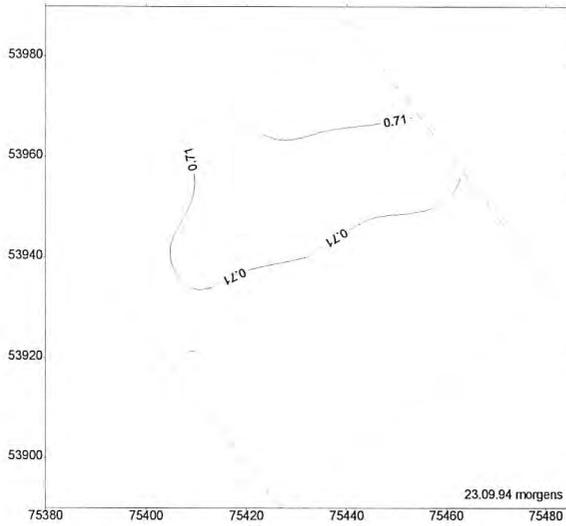
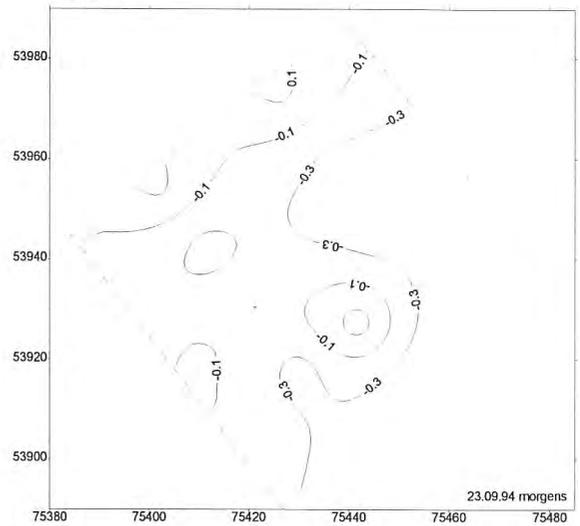


Abb. 23: Korngrößenverteilung und mittlere Korngröße d_{50} am 23.09.94 morgens

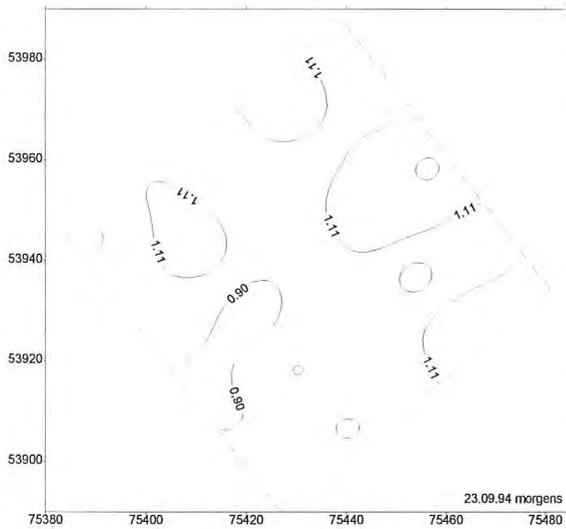
Sortierung (phi)



Schiefe

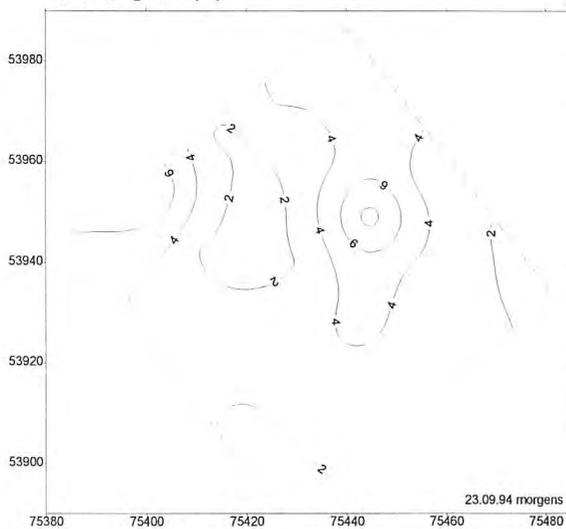


Kurtosis



(Einteilung der Sortierung, Schiefe und Kurtosis siehe Seite 3)

Karbonatgehalt (%)



Schwermineralanteil (%) (in der Fraktion 0.106-0.125 mm)

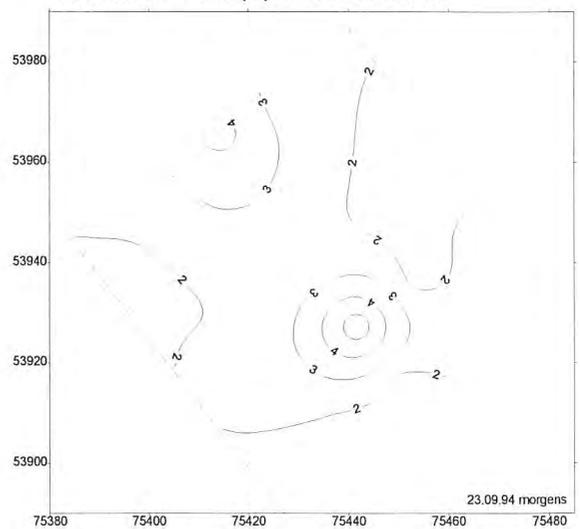


Abb. 24: Sortierung, Schiefe, Kurtosis, Karbonatgehalt und Schwermineralanteil am 23.09.94 morgens

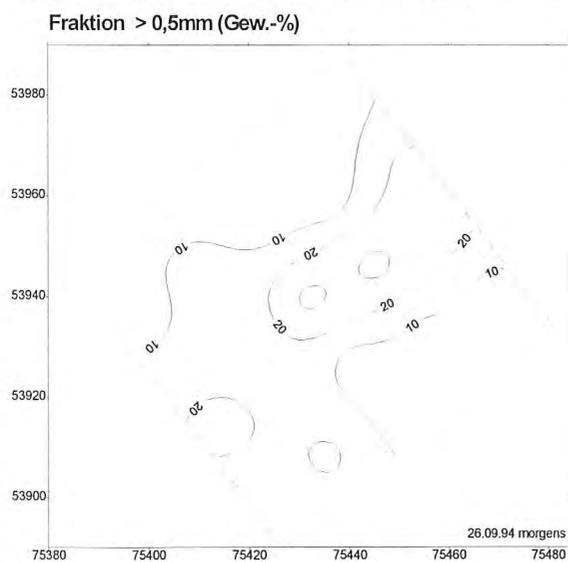
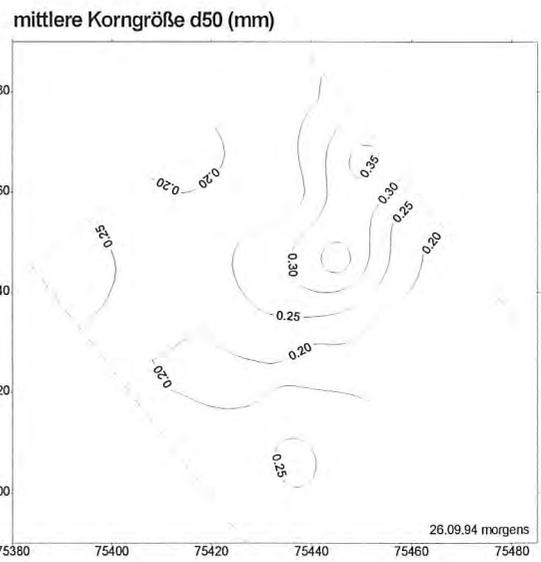
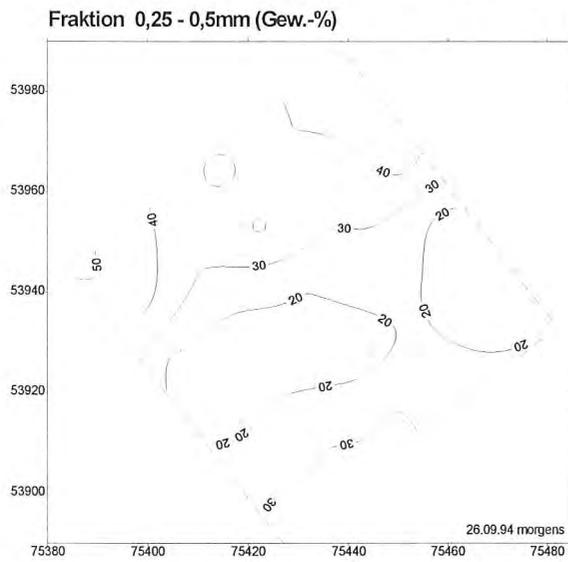
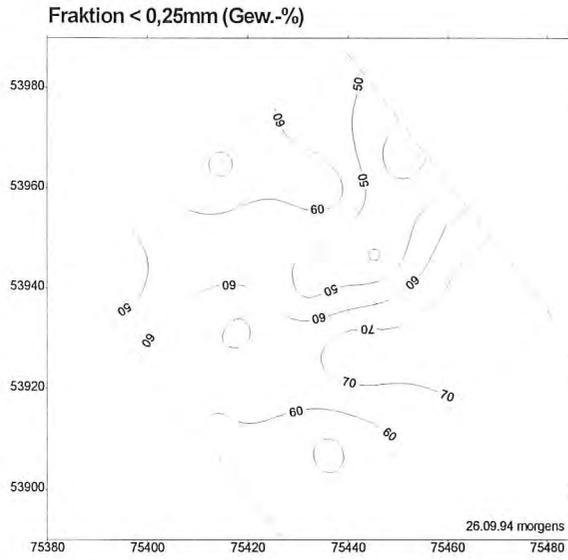
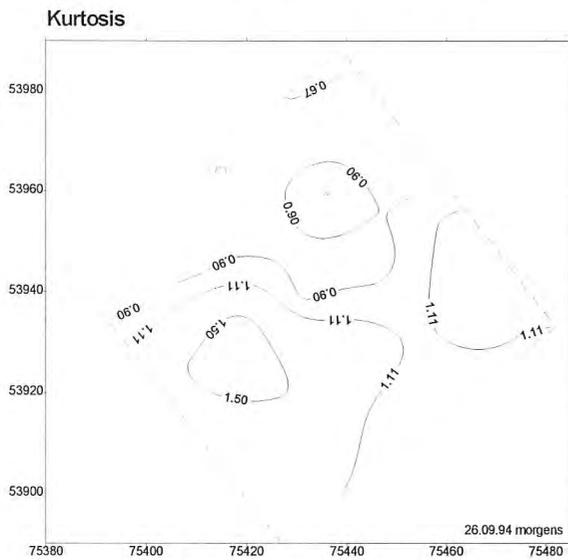
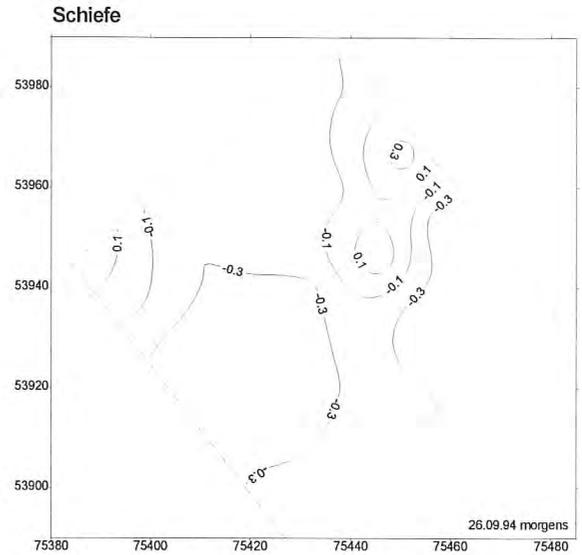
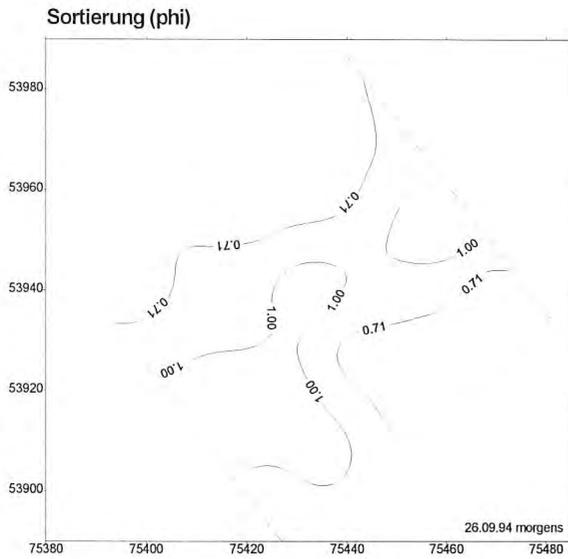


Abb. 25: Korngrößenverteilung und mittlere Korngröße d_{50} am 26.09.94 morgens



(Einteilung der Sortierung, Schiefe und Kurtosis siehe Seite 3)

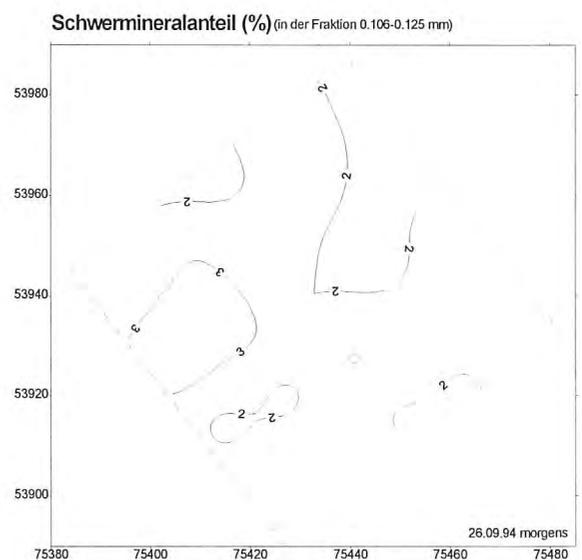
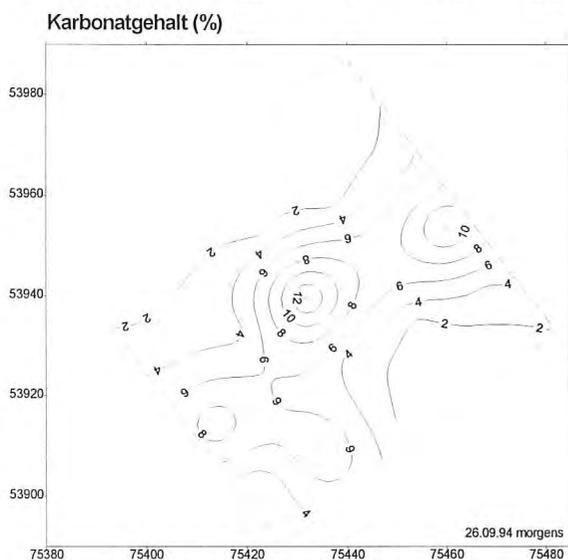


Abb. 26: Sortierung, Schiefe, Kurtosis, Karbonatgehalt und Schwermineralanteil am 26.09.94 morgens

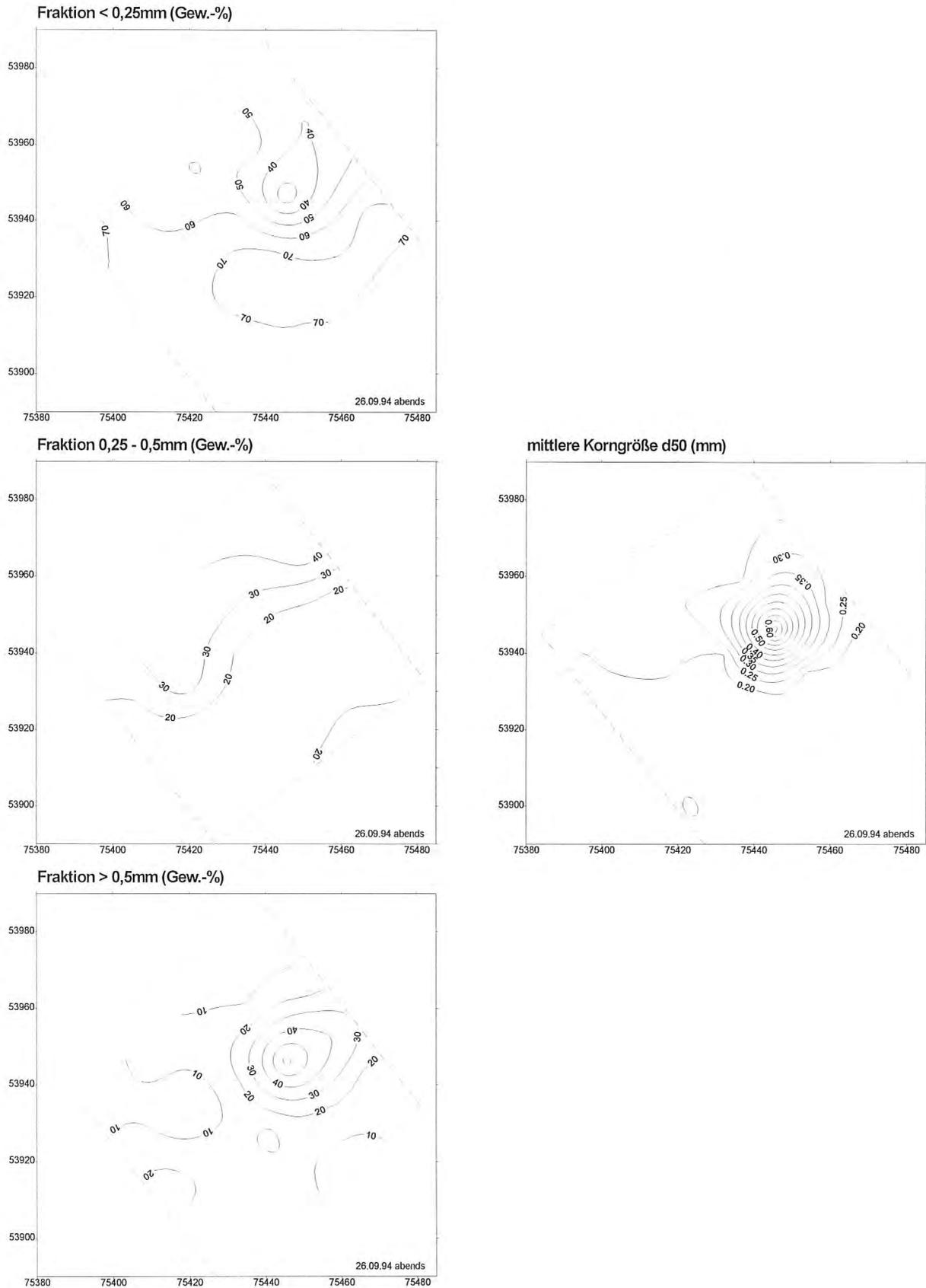
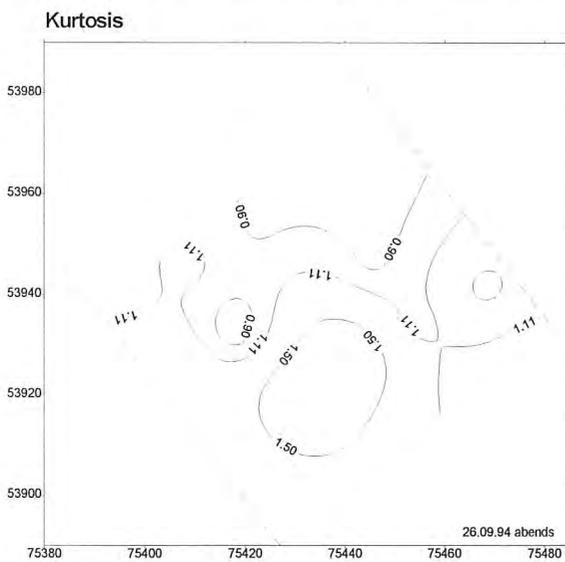
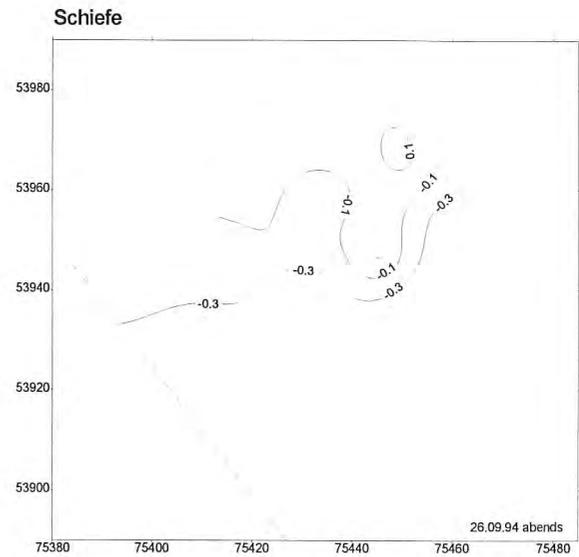
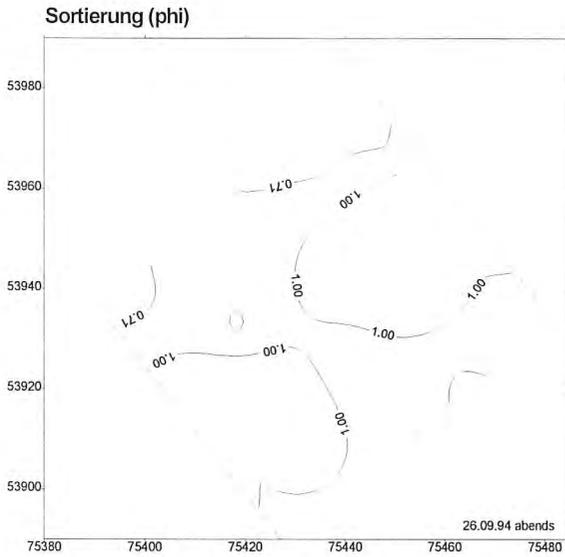


Abb. 27: Korngrößenverteilung und mittlere Korngröße d_{50} am 26.09.94 abends



(Einteilung der Sortierung, Schiefe und Kurtosis siehe Seite 3)

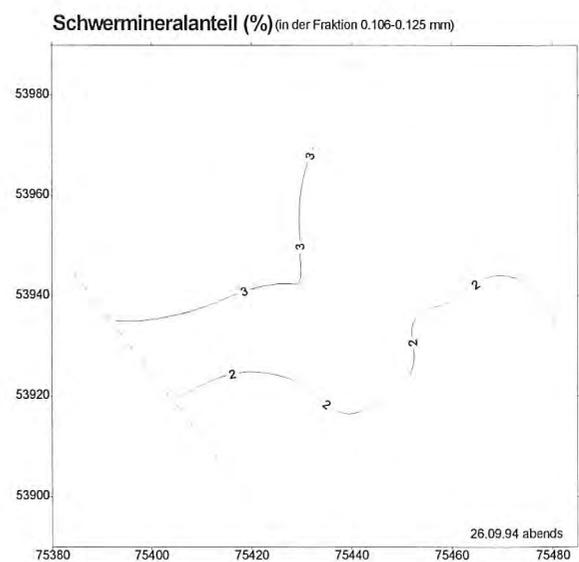
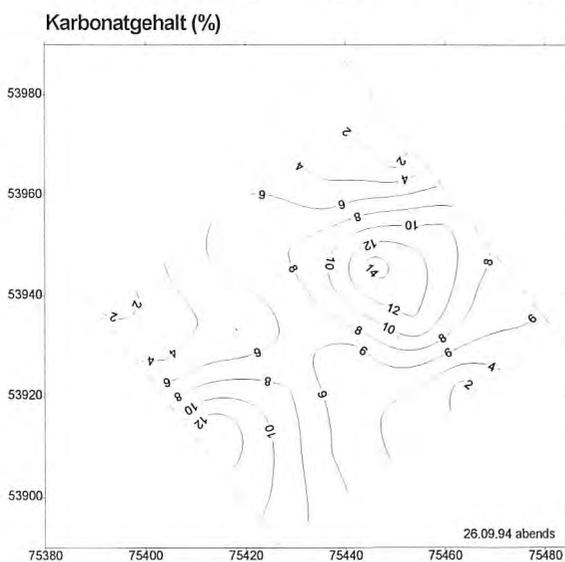


Abb. 28: Sortierung, Schiefe, Kurtosis, Karbonatgehalt und Schwermineralanteil am 26.09.94 abends

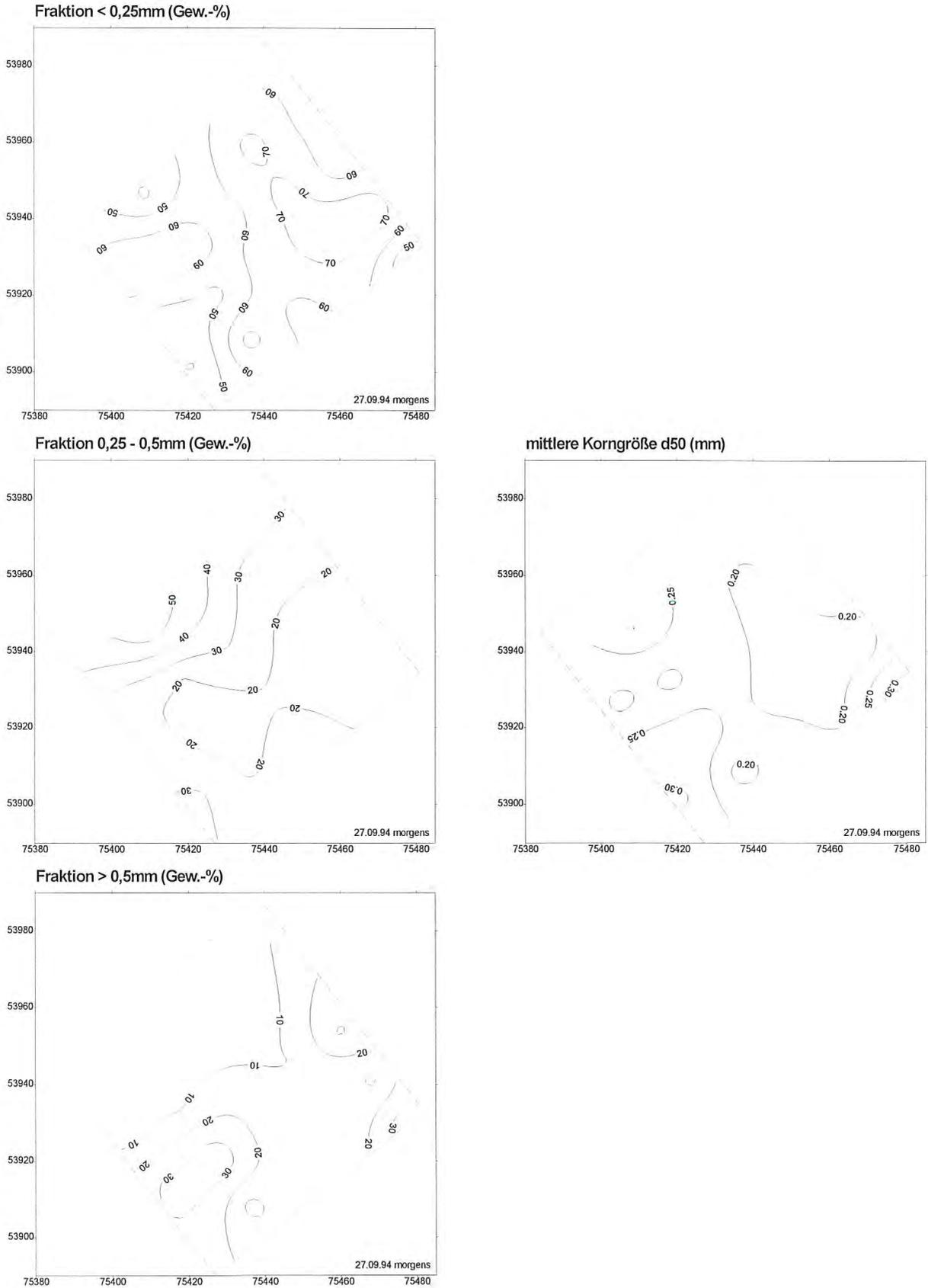
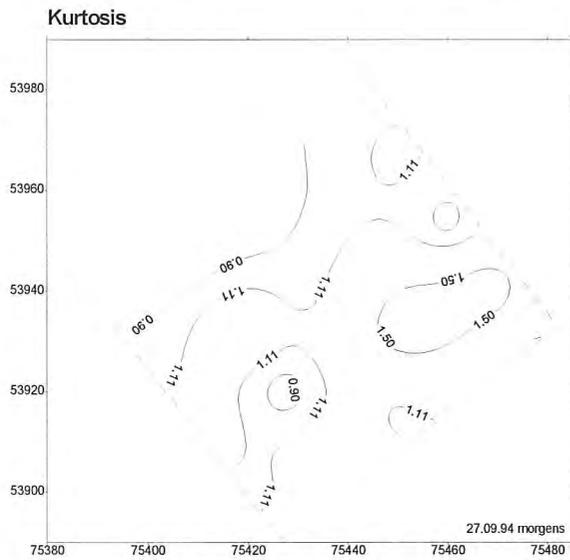
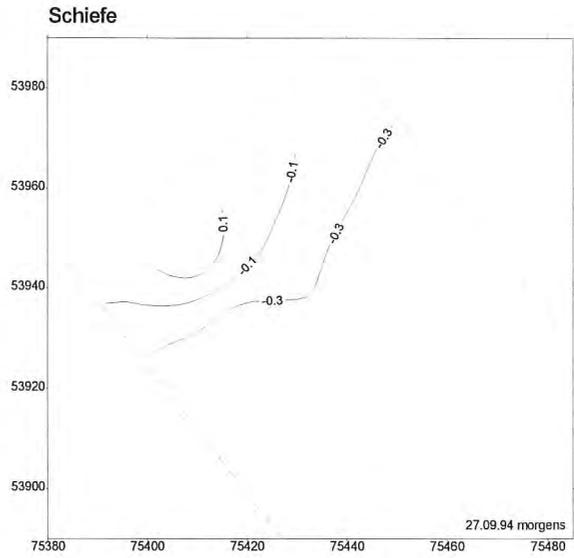
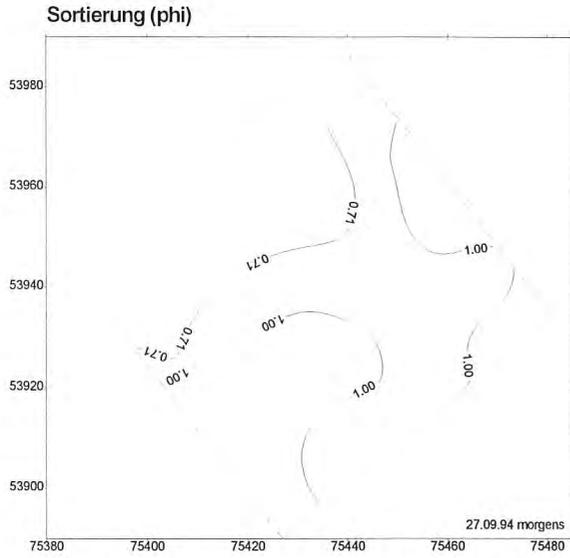


Abb. 29: Korngrößenverteilung und mittlere Korngröße d_{50} am 27.09.94 morgens



(Einteilung der Sortierung, Schiefe und Kurtosis siehe Seite 3)

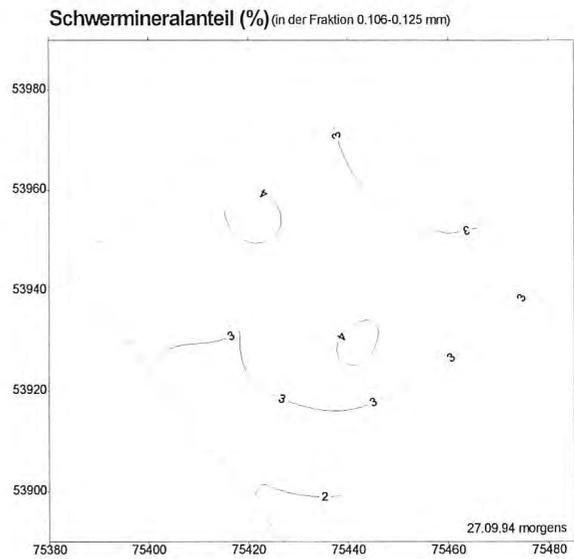
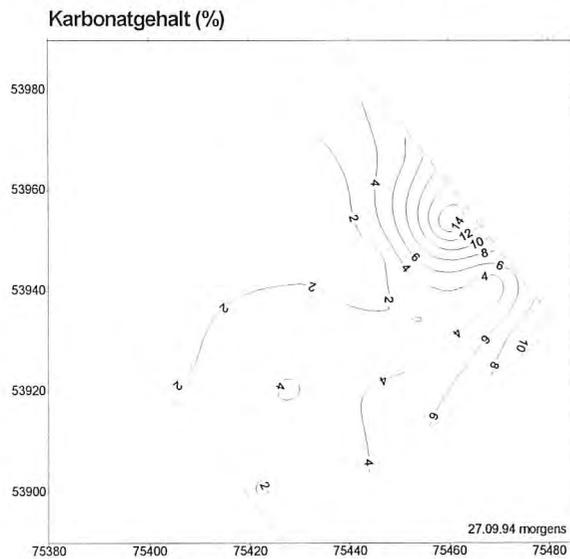


Abb. 30: Sortierung, Schiefe, Kurtosis, Karbonatgehalt und Schwermineralanteil am 27.09.94 morgens

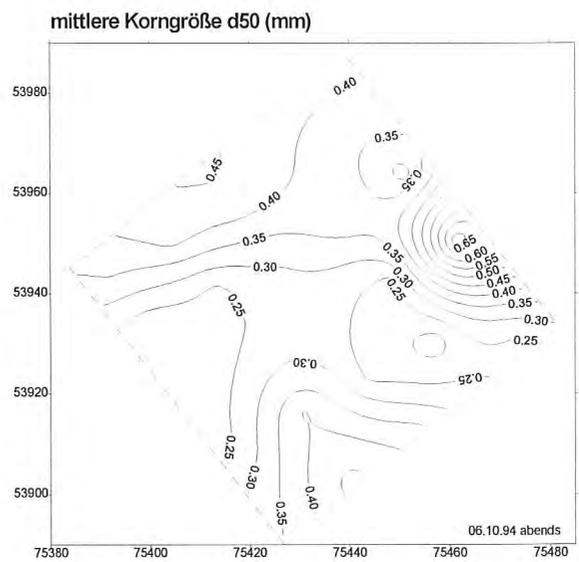
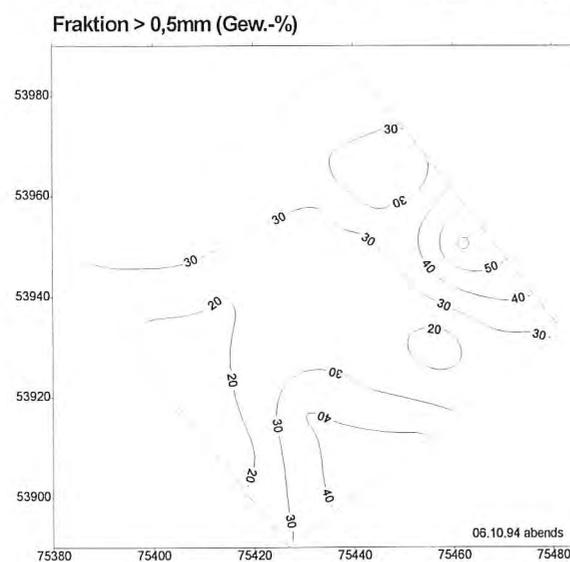
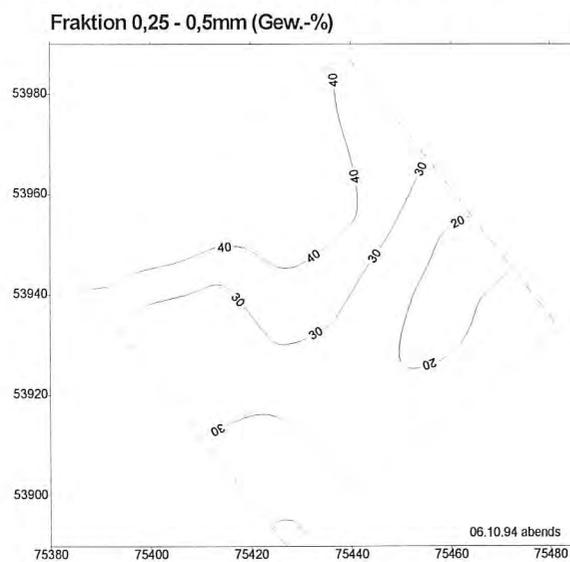
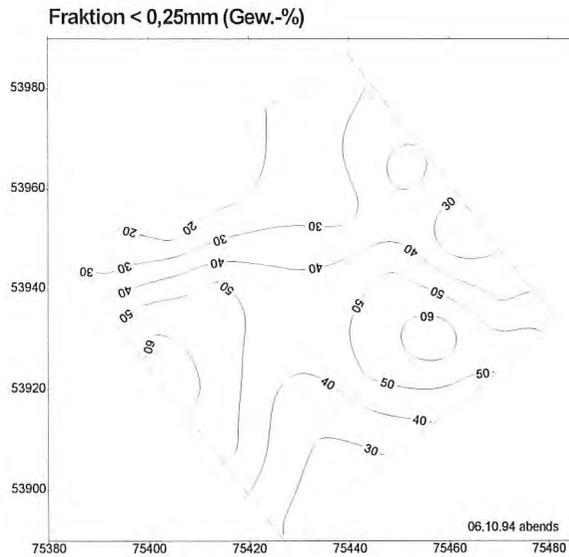
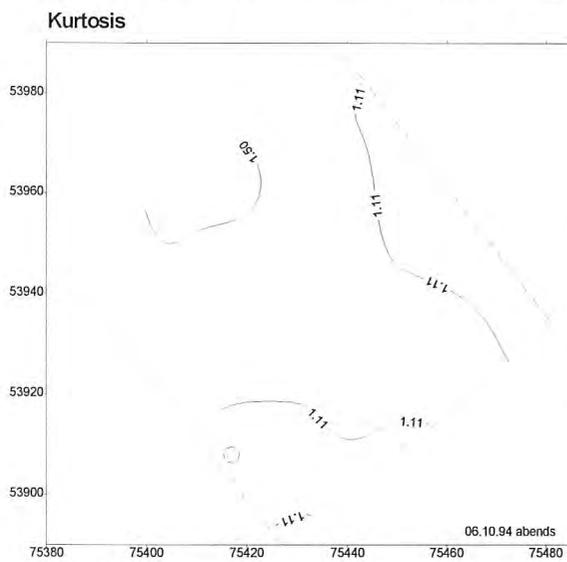
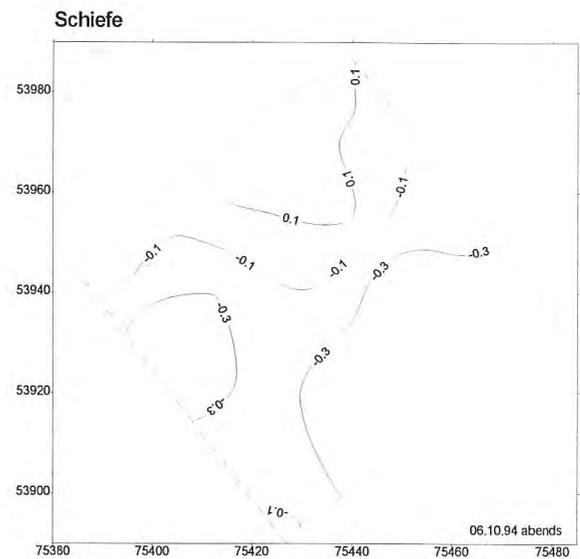
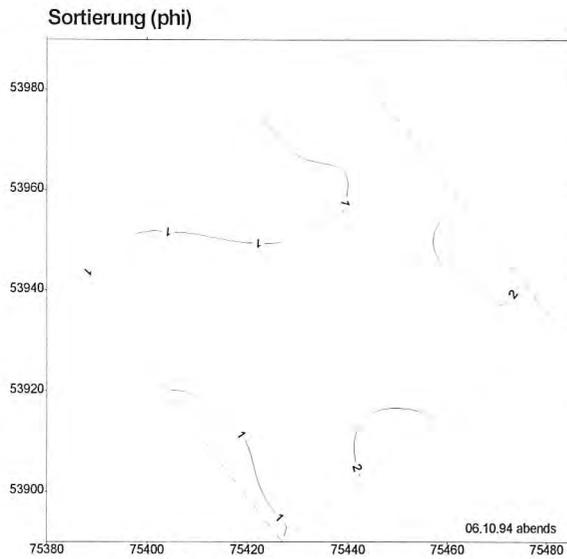


Abb. 31: Korngrößenverteilung und mittlere Korngröße d_{50} am 06.10.94 abends



(Einteilung der Sortierung, Schiefe und Kurtosis siehe Seite 3)

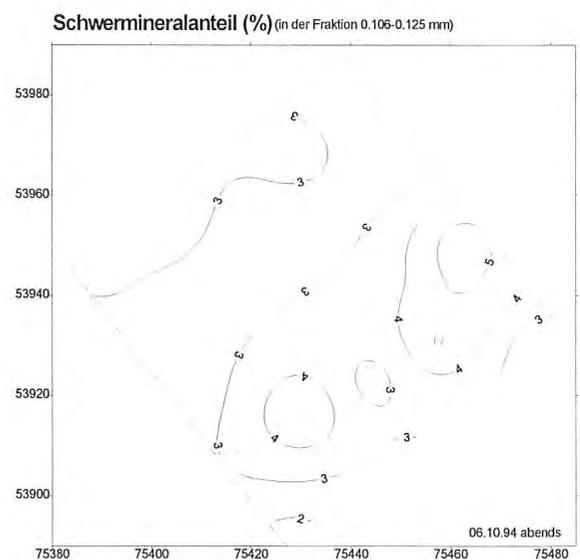
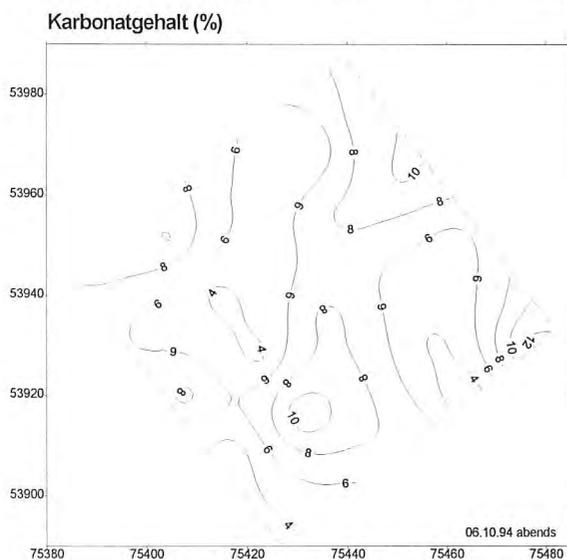


Abb. 32: Sortierung, Schiefe, Kurtosis, Karbonatgehalt und Schwermineralanteil am 06.10.94 abends

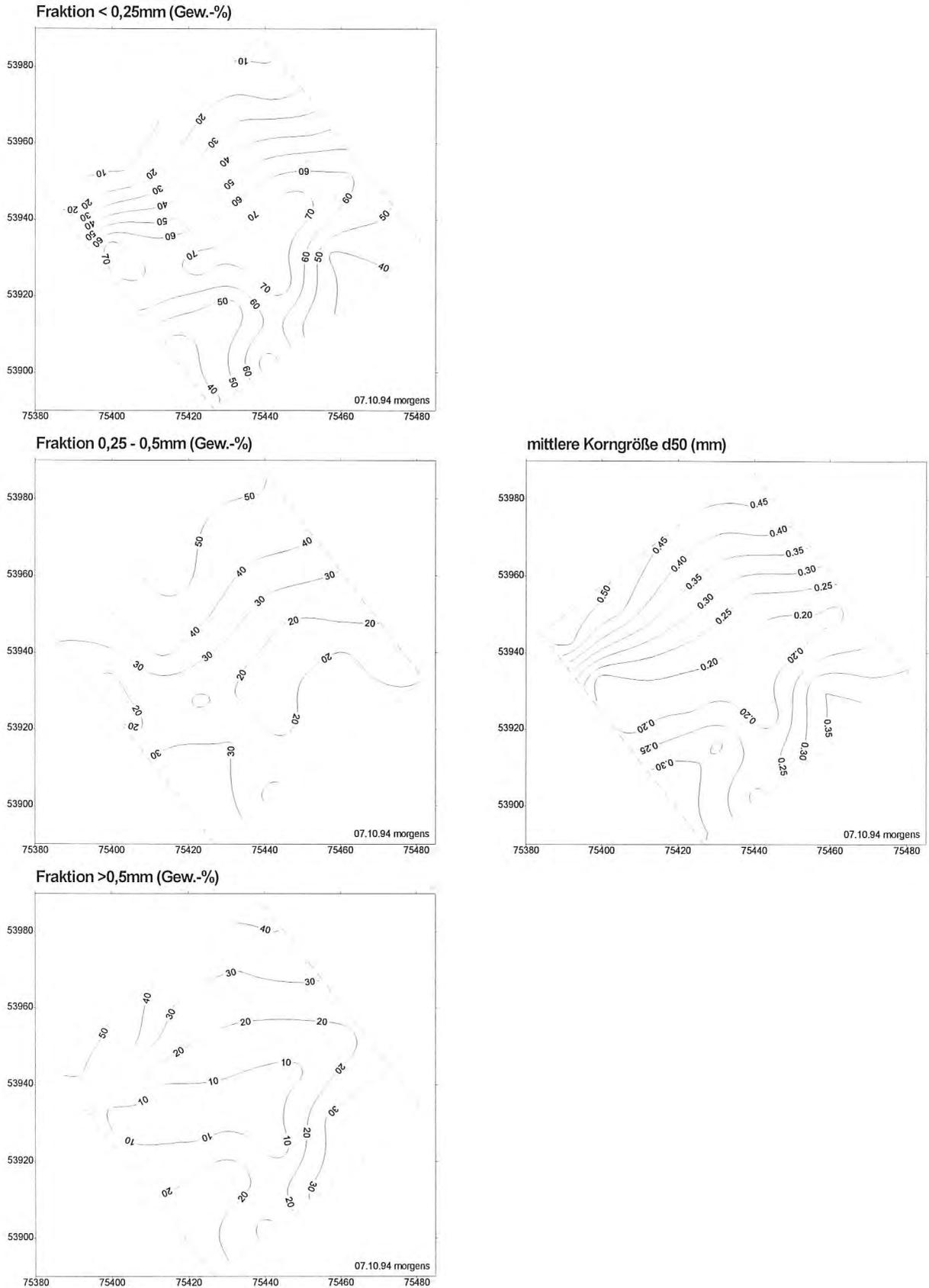
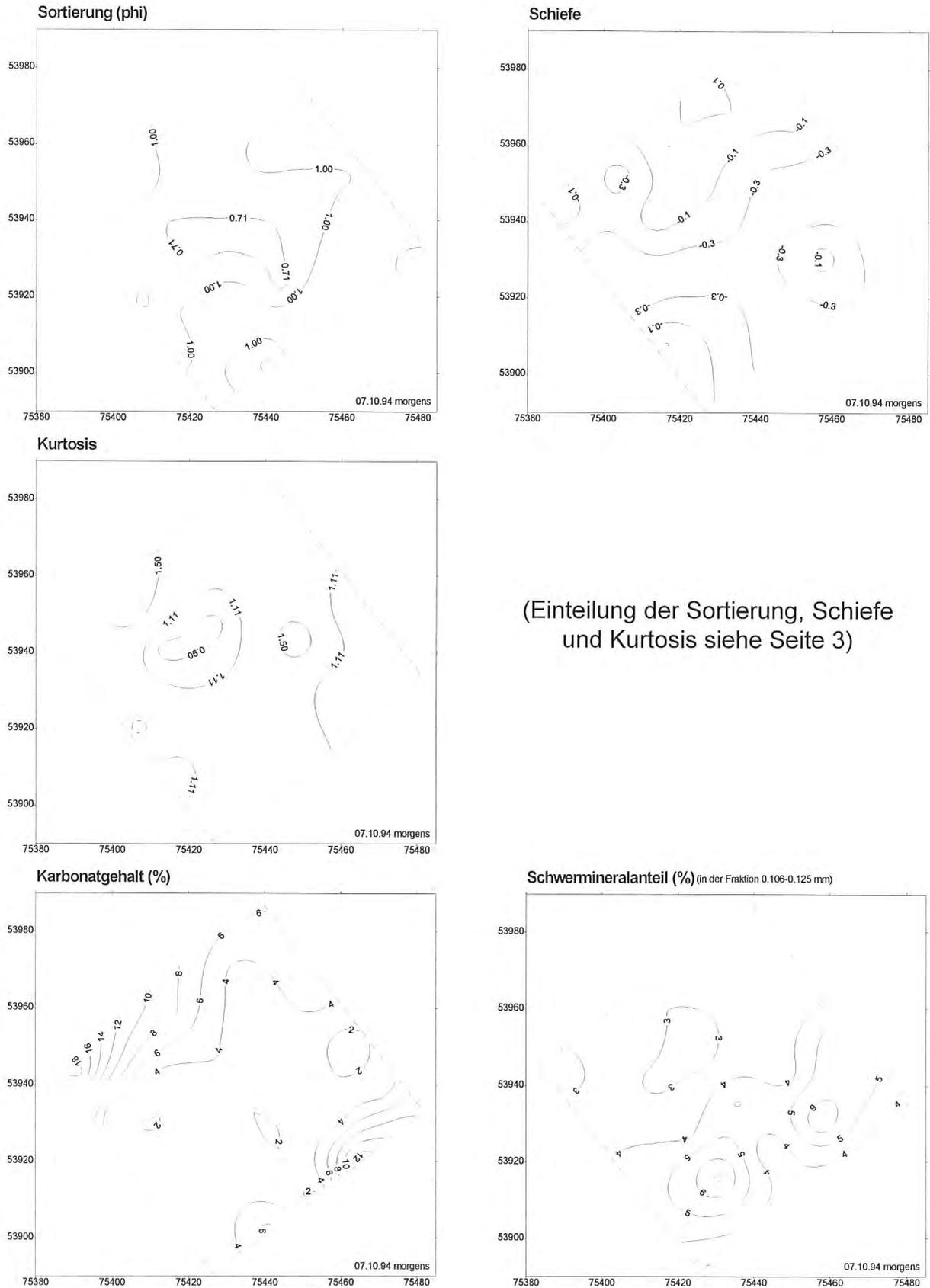


Abb. 33: Korngrößenverteilung und mittlere Korngröße d_{50} am 07.10.94 morgens



(Einteilung der Sortierung, Schiefe und Kurtosis siehe Seite 3)

Abb. 34: Sortierung, Schiefe, Kurtosis, Karbonatgehalt und Schwermineralanteil am 07.10.94 morgens

Die meisten untersuchten Sedimentproben zeigten eine negative Schiefe, d.h. die Korngrößenverteilungen hatten eine Asymmetrie in Richtung der groben Anteile. Nur einzelne Proben, insbesondere vom seewärtigen Rand des untersuchten Gebiets, zeigten eine positive ("feine") Schiefe auf. Generell war eine von der See in Richtung Deckwerk zunehmende negative Schiefe festzustellen. Dieser Trend ging einher mit einer Abnahme des prozentualen Anteils der Mittelsandfraktion, somit wiesen Proben mit größerem Mittelsandanteil eine höhere Symmetrie der Kornverteilungskurven auf. Die Werte der Kurtosis reichten von 0,68 (flachgipfelig) bis 1,96 (sehr steilgipfelig). Eindeutige Tendenzen der räumlichen Verteilung der Werte oder Abhängigkeiten zu anderen Parametern konnten nicht festgestellt werden. Der geringe Nutzen der Kurtosis für die Klärung der Transportvorgänge im Norderneyer Seegebiet, bereits in früheren Arbeiten festgestellt [WESTHOFF 1990], bestätigt sich.

Der Karbonatgehalt der Proben lag zwischen 1 % und fast 19 %. Im allgemeinen waren hohe Karbonatgehalte mit hohen Anteilen an grobem Material ($> 0,5$ mm) verbunden, welches sich im wesentlichen aus Schillbruch zusammensetzt. Ein direkter Zusammenhang mit der mittleren Korngröße d_{50} ist hingegen nicht erkennbar. Die räumliche Verteilung des Karbonatgehalts wird, wie die des groben Materials, von lokalen Schillakkumulationen geprägt.

Der Schwermineralanteil an der Fraktion 0,106-0,125 mm betrug im Mittel ca. 3 %, mit zunehmender Tendenz in der Reihenfolge der untersuchten Tiden. Die Gehalte lagen zwischen 1 und 7 %. Eine eindeutige räumliche Gliederung konnte nicht festgestellt werden.

In den Größenordnungen entsprechen die während der Einzeltiden ermittelten sedimentologischen Werte denen der längerfristigen Probennahmen. Die große Schwankungsbreite der Werte während der Einzeltiden, insbesondere der mittleren Korngröße d_{50} , zeigt aber die Problematik des Wechselspiels zwischen der natürlichen Variabilität der Sedimente und der räumlich-zeitlich begrenzten Probennahme auf (siehe EITNER 1993). Die monatliche Sedimentbeprobung des Strandes zeigte, daß im allgemeinen an der Niedrigwasserlinie die Sortierung schlechter war als an der Hochwasserlinie. Für den kleinen Bereich, der während der Einzeltiden untersucht wurde, war eine solche räumliche Abhängigkeit nicht erkennbar. Ähnliches gilt für eine Zunahme des Schwermineralanteils in Richtung Hochwasserlinie: in den Einzeltidenuntersuchungen konnte keine regelmäßige Verteilung festgestellt werden. Umgekehrt zeigten die Einzeltidenuntersuchungen eine Tendenz zu zunehmend grober Schiefe der Korngrößenverteilungen von der See in Richtung Deckwerk, die in der längerfristigen Untersuchung nicht zu erkennen war.

Die sedimentologischen Untersuchungen über einzelne Tiden im Herbst 1994 zeigten jeweils bestimmte Verteilungsmuster der verschiedenen Parameter bei einer relativ hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität. Es zeigte sich, daß auch bei einer geringen Umlagerungsintensität von wenigen Zentimetern deutliche Veränderungen der Sedimentverteilung während einzelner Tiden eintreten können. Für die Verteilung der Korngrößen und anderer sedimentologischer Werte am Strand sind insbesondere klein- und mittelgroße Strukturen, wie Schillansammlungen und flache Riff-Rinnen-Systeme, von Bedeutung.

Weitreichende Schlußfolgerungen lassen sich aus den Ergebnissen der Einzeltiden-Untersuchungen nicht unmittelbar ziehen. Hierfür wäre der Vergleich einer größeren Anzahl solcher Messungen nötig, die unter verschiedenen hydrodynamischen

Bedingungen erfolgen müßten. Dies ist jedoch nur eingeschränkt möglich, da die Meßmethoden nur bei relativ ruhigem Wetter einsetzbar sind. Insbesondere ist ein vollständiges Trockenfallen des intertidalen Strandes erforderlich; dies ist aber bei rauheren Randbedingungen häufig nicht der Fall.

4 Zusammenfassung

Die monatliche sedimentologische Beprobung mehrerer Bühnenfelder am West- und Nordweststrand der Insel Norderney wurde 1994 fortgesetzt. Im Gegensatz zu den vorhergehenden Aufspülungen 1989 und 1992 konnte nach der Auffüllung im Frühjahr 1994 keine eindeutige Beeinflussung der Zusammensetzung der Sedimente am Weststrand durch die Aufspülung festgestellt werden. Der fehlende Einfluß beruht vermutlich auf der größeren räumlichen Distanz zur Aufspülung und dem geringeren Unterschied in den Korngrößenspektren. Im Aufspülbereich selbst waren deutliche Änderungen der Korngrößenverteilungen des Strandsandes nach allen drei Auffüllungen zu erkennen.

Die Einzeltiden-Untersuchungen im Bühnenfeld D1-E1 im Herbst 1994, wie auch ähnliche Untersuchungen in den vorherigen Jahren, zeigten eine hohe räumliche und zeitliche Variabilität der sedimentologischen Parameter. Für die Verteilung der Korngrößen und anderer sedimentologischer Werte am Strand sind insbesondere auch klein- und mittelgroße Strukturen, wie Schillansammlungen und flache Strandriff-Rinnen-Systeme, von Bedeutung. Hieraus folgt, daß pauschale Aussagen über die Sedimentologie größere Bereiche auf Grund weniger Proben nur unter Berücksichtigung dieser hohen Variabilität möglich sind. Dies betrifft auch die Interpretation der seit 1988 genommenen monatlichen Sedimentproben, dennoch lassen die Ergebnisse der Beprobungen die in diesem Bericht gemachten Aussagen über die Beeinflussung der Strandsedimente durch die Aufspülungen zu. Ferner zeigten die Einzeltidenuntersuchungen, daß bereits bei geringer Umlagerungsintensität deutliche Veränderungen der Oberflächensedimente des intertidalen Strandes stattfinden können. Auch dieses Ergebnis verdeutlicht die Problematik einer räumlich und zeitlich begrenzten Probenahme zur Beschreibung der Sedimentologie eines komplexen Systems wie dem des Strandes. Weitreichende Erkenntnisse bezüglich der Sediment- und Morphodynamik ließen sich aus den Ergebnissen der umfangreichen Einzeltidenuntersuchungen nicht gewinnen, so daß dieser Bericht kaum über eine Beschreibung der Meßresultate hinausgehen kann.

Zur quasi kontinuierlichen Beobachtung von Sohlfluktuationen wurde ein sogenannter Sandstandpegel eingesetzt. Die Messungen mit diesem Gerät bestätigten frühere Untersuchungen, daß mit dem Auflaufen des Wassers Erosionsprozesse verbunden sind, die bei ablaufendem Wasser durch eine entsprechende Sedimentation kompensiert werden. Darüber hinaus konnten über mehrere Tage andauernde Höhenänderungen des Strandniveaus beobachtet werden, die im Zusammenhang mit Änderungen morphologischer Strukturen im Bühnenfeld, z.B. flacher Strandriff-Rinnen-systeme, zu sehen sind. Das Gerät erwies sich, von kleineren technischen Problemen und einer Auskolkung um das Gerät herum abgesehen, als generell geeignet für die Untersuchung von zeitlichen Änderungen der Strandhöhe. Wie alle punktuellen Messungen lassen die Ergebnisse jedoch kaum Aussagen über größere Bereiche zu.

5 Literaturverzeichnis

- BASCOM, W.H. [1954]: Characteristics of natural beaches. Proc. 4th Conf. Coast. Eng., ASCE, 163-180, New York
- BULLER, A.T. & McMANUS, J. [1979]: Sediment sampling and analysis. In: DEYER, K.R., (HRSG.), Estuarine hydrography and sedimentation, Cambridge University Press, 87-130, London
- DAVIS, R.A. [1978]: Beaches and nearshore zone. In: DAVIS, R.A. (HRSG.), Coastal sedimentary environments, 237-286, Springer, New York
- EITNER, V. [1992]: Sedimentologische und morphologische Untersuchungen zu Einzeltidenereignissen im Bühnenfeld D1-E1 sowie zu Auswirkungen der Vorstrand- und Strandauffüllung. 1. Zwischenbericht zum KFKI-FV "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerks-Systemen" Teilprojekt: "Sedimentologie und morphologische Entwicklung", Niedersächsisches Landesamt für Ökologie - Forschungsstelle Küste, Norderney
- EITNER, V. [1993]: Sedimentdynamik im Strandbereich einer brandungsbeeinflussten mesotidalen Barriere-Insel unter Berücksichtigung der Auswirkung künstlicher Strandauffüllungen (Norderney, südliche Nordsee). Dissertation Univ. Münster
- EITNER, V., RAGUTZKI, G. & WESTHOFF, T. [1992]: Sedimentologische Untersuchungen zu den Auswirkungen einer künstlichen Auffüllung des Norderneyer Strandes auf die Transport- und Umlagerungsvorgänge. Die Küste 54, 91-110, Heide
- EITNER, V., RAGUTZKI, G., STEPHAN, H-J. & TADDIGS, R. [1993]: Sedimentologische und morphologische Ergebnisse eines interdisziplinären Meßeinsatzes im Bühnenfeld D1-E1 am 19. Oktober 1993 sowie die zeitliche Entwicklung der Massenbilanzen. 3. Zwischenbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerks-Systemen" Teilprojekt "Sedimentologie und morphologische Entwicklung", Niedersächsisches Landesamt für Ökologie - Forschungsstelle Küste, Norderney
- ERCHINGER, H. F. [1986]: Strandaufspülungen als aktiver Küstenschutz vor Schutzwerken und Dünen auf Norderney und Langeoog. Die Küste 43, 181-204, Heide
- ERCHINGER, H.F. & LAUE, M. [1990]: Durchführung der 6. Strandauffüllung mit besonderer Berücksichtigung der Sandentnahme- und Transporttechniken. 4. Zwischenbericht zum KFKI-FV "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt" Teilprojekt "Versuchsorientierte Strandaufspülung", Staatl. Amt f. Insel- und Küstenschutz, Norden
- ERCHINGER H.F. & TILLMANN, B. [1992]: Die versuchsorientierte Strandaufspülung Norderney 1989. Die Küste 54, 143-168, Heide
- FOLK, R.L. [1964]: Petrology of sedimentary rocks. Hemphill Publ. Co. Austin, Texas
- FOLK, R.L. [1966]: A review of grain-size parameters. Sedimentology 6, 73-93
- FOLK, R.L. & WARD, W.C. [1957]: Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. J. Sed. Petrol. 27, 3-26, Tulsa
- GLASER, D. & MÜNKEWARF, G. [1995]: Vorläufige Dokumentation hydrographisches Meßnetz Norderney 1995. Niedersächsische Landesamt für Ökologie-Forschungsstelle Küste, Norderney
- GRENNWOOD, B., HALE, P.B. & MITTLER, P.R. [1980]: Sediment flux determination in the nearshore zone: prototype measurements. - Workshop on

- instrumentation for currents and sediments in the nearshore zone, Natl. Res. Council of Canada, 99-119, Ottawa
- HOMEIER, H. [1964]: Beiheft zu: Niedersächsische Küste, Historische Karte 1 : 50 000 Nr. 5, Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz, Norderney
- KING, C.A.M. [1972]: Beaches and coasts. 2. Auflage, Arnold, London
- KRAMER, J. [1959]: Die Strandaufspülung Norderney 1951-1952 und ein Plan zu ihrer Fortführung. Die Küste, Jg. 7, 107-139, Heide
- KUNZ, H. & STEPHAN, H.-J. [1992]: Ergebnisse morphologischer Untersuchungen zu den Strandaufspülungen auf Norderney. Die Küste 54, 23-52, Heide
- KURZAK, G., LINKE, O., DECHEND, W., KRAUSE, H. & THILO, R. [1949]: Die Ursachen der Abrucherscheinungen am West- und Nordweststrand der Insel Norderney. Jber. 1949 Forsch.-Stelle f. Insel- u. Küstenschutz Bd.1, Norderney
- INMAN, D.L. [1952]: Measures for describing the size distribution of sediments. J.Sed. Petrol. **22**, 125-145, Tulsa
- MANZENRIEDER, H. & SNIPPE, B. [1991]: Kontinuierliche Beobachtungen der Gewässersohle mit einem Sandstandpegel. Die Küste **52**, 255-263, Heide
- McANDREW, J. [1957]: Calibration of a Frantz Isodynamic Separator and its application to mineral separation. Proc. Aus. I.M.M., no. **181**
- MÜLLER, V. [1993]: Meßbericht zum Feldversuch am 18. - 20.10.93, Norderney - Bühnenfeld D1-E1. Interner Bericht TU-Hamburg-Harburg
- NIEMEYER, H.D. [1986]: Ausbreitung und Dämpfung des Seegangs im See- und Wattgebiet von Norderney. Jber. 1985 Forschungstelle Küste 37, Norderney
- NIEMEYER, H.D., KAISER, R. & EITNER, V. [1994]: Combined shoreface and beach nourishment - island of Norderney, East Frisia. NOURTEC Scientific and Technical Progress Report 6/1993-6/1994. Rep. MAST II, MAS2-CT93-0049
- RAGUTZKI, G. & WESTHOFF, T. [1990]: 4. Zwischenbericht zu den Sedimentologischen Untersuchungen. Zwischenbericht zum KFKI-FV "Wechselwirkungen zwischen Küstenbauwerken und mariner Umwelt" Teilprojekt "Naturuntersuchungen", Niedersächs. Landesamt f. Wasserwirtschaft - Forschungsstelle Küste, Norderney
- SCHULTZE, E. & MUHS, H. [1967]: Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten. 2.Aufl., Springer, Berlin
- STAIK [1994]: Abschlußbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben "Vorstrand- und Strandauffüllungen im Bereich von Bühnen-Deckwerks-Systemen" Teilprojekt "Versuchsaufspülung - Entwicklung und Technik" (MTK 0545). Staatliches Amt für Insel- und Küstenschutz, Norden
- THILO, R. & KURZAK, G. [1952]: Die Ursachen der Abrucherscheinungen am West- und Nordweststrand der Insel Norderney, Die Küste Jg.1, H. 1, 1-20, Heide
- VEENSTRA, H.J. & WINKELMOLEN, A.M. [1976]: Size, shape and density around two barrier islands along the north coast of Holland. Geol. Mijnb. **55**, 87-104, s'Gravenhagen
- WESTHOFF, T. [1990]: Sedimentgeologische Untersuchungen zur Klärung von Transportvorgängen im Bereich sandiger Küsten am Beispiel Norderney. Dissertation Univ. Münster
- WRIGHT, L.D. & SHORT A.D. [1984]: Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. Mar. Geol. **56**, 93-118, Amsterdam
- YU, Z., NIEMEYER, H.D. & BAKKER, W.T. [1991]: Site investigation on sand concentration in the sheetflow layer. Proc. 22nd Int. Conf. o Coast. Eng. Delft, ASCE, 2360-2371, New York