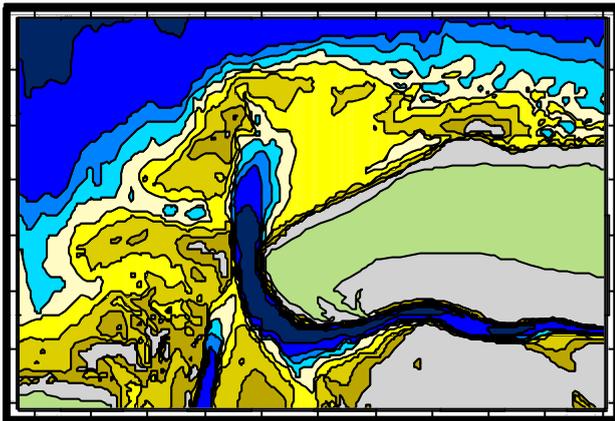
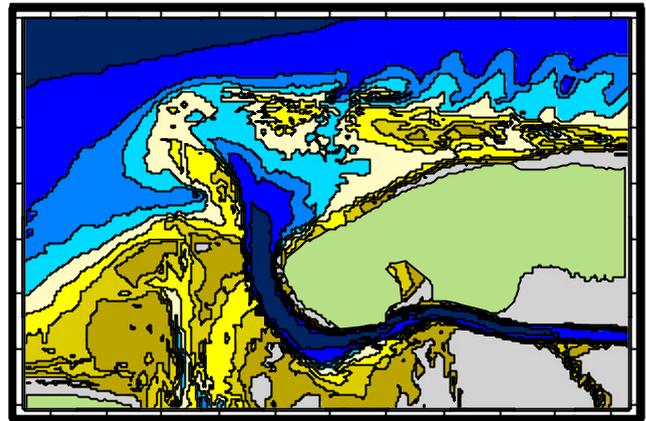




Niedersächsisches
Landesamt für
Ökologie



1929



1995

Cornelius Meyer und Hans-Joachim Stephan

**Sonderuntersuchungen für
Vorarbeiten zum Inselchutz
Ostfriesische Inseln
Morphologische Entwicklung
im Einzugsgebiet
des Norderneyer Seegats**

Herausgeber:

Niedersächsisches Landesamt für Ökologie
- Forschungsstelle Küste-

Bezug:

NLÖ-Forschungsstelle Küste
An der Mühle 5, 26548 Norderney
Tel.: 04932-916-122
Fax: 04932-1394
e-mail: info.crs @ t-online.de

**NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR ÖKOLOGIE
- FORSCHUNGSSTELLE KÜSTE -**

**Sonderuntersuchungen für Vorarbeiten
zum Inselschutz Ostfriesische Inseln
Morphologische Entwicklung
im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats**

Norderney, im Juli 2000

Leiter der
Forschungsstelle Küste

Dezernatsleiter
Geomorphologie
des Küstengebietes

Dezernent
Sedimentologie

Dr.-Ing. habil. H.Kunz
Ltd. Direktor u. Prof.

Dr.-Ing. H.-J. Stephan

Dr. C. Meyer

Sonderuntersuchungen für Vorarbeiten zum Inselschutz Ostfriesische Inseln

Morphologische Entwicklung im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats

Inhaltsverzeichnis

1	Veranlassung und Aufgabenstellung	3
2	Untersuchungsraum	5
3	Methodik	5
3.1	Kartenmaterial	5
3.2	Datenaufbereitung	5
3.3	Fehlerbetrachtung	7
4	Ergebnisse	12
4.1	Entwicklung des Riffbogens	12
4.1.1	Morphologische Ausprägung	12
4.1.2	Volumenänderungen und Massenbilanz	16
4.2	Änderungen im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats	18
4.2.1	Watthöhenveränderungen	19
4.2.2	Volumenbetrachtungen	20
5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	22
6	Literatur	25
7	Anlagen	26

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die vorliegenden Untersuchungen sind Bestandteil des Projektes „Sonderuntersuchungen für Vorarbeiten zum Inselschutz Ostfriesische Inseln“, das vom Niedersächsischen Landesamt für Ökologie – Forschungsstelle Küste (NLÖ-FSK) im Auftrag des Niedersächsischen Landesbetriebes für Wasserwirtschaft und Küstenschutz NLWK-Norden (Schreiben vom 28.04.99) durchgeführt wird.

Im Zusammenhang mit der geplanten Deckwerkssanierung auf Norderney im Bereich des Nordstrandes sind die Kenntnisse der durch das lokale Seegangsklima beeinflussten Bemessungsgrößen entscheidend. Daher sollen die morphologischen Veränderungen im Bereich des Norderneyer Seegats und seines Einzugsgebietes näher untersucht werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen stellen zugleich die Datengrundlage für die Berechnung von HN-Modellen, die vom Dezernat „Hydrographie der Küstengewässer“ des NLÖ-FSK durchgeführt werden und eine Abschätzung der zukünftigen Beanspruchung des Deckwerks erlauben sollen.

Die seewärtigen Riffbögen (ebb tidal delta) zwischen den Ostfriesischen Inseln entstehen durch Wechselwirkungen von Strömung und Brandung. Der dadurch verursachte, von West nach Ost gerichtete resultierende Sandtransport wird im Gebiet des Seegats wegen der hier herrschenden Strömungsverhältnisse unterbrochen. An der Westseite des Seegats staut sich der Sand, schließt sich zu Sandbänken zusammen, umgeht dann das Seegat auf einer bogenförmigen Bahn (= Riffbogen) und versorgt die Strände der ostwärtigen Insel mit Sand (LÜDERS/LUCK 1976).

Die Riffbögen üben eine schützende Wirkung auf die Inseln aus, indem der aus der Nordsee einschwingende, energiereiche Seegang auf den Platen gebrochen wird. Nach NIEMEYER (1992) „beträgt die Energiedissipation infolge Riffbrandung bei auflandigen Starkwind- und Sturmwehtlagen im Mittel vor dem Inselvorstrand 70% und vor dem Seegat 92%. Diese intensive Energieumwandlung führt nicht nur zu einer deutlichen Abnahme der Wellenhöhen und Veränderung der Wellenperioden und –längen, sondern auch zu einer relativen Verlagerung von Energieanteilen in höherfrequente Bereiche und zu einem Zerfall der Energiekonzentration im Peakbereich.“

In den letzten Jahren sind im Bereich des Norderneyer Seegats sowie seines Einzugsgebiets (Abb. 1) auffällige morphologische Veränderungen eingetreten (STEPHAN 1993). Diese drücken sich im Riffbogenbereich insbesondere in einer Höhenabnahme der östlich der Seegatrinne gelegenen Platengruppen aus.

„Exemplarische Modellierungen der Seengangausbreitung vom Küstenvorfeld in den Vorstrand- und Strandbereich der Insel Norderney haben in Übereinstimmung mit Naturmessungen“ gezeigt, „dass morphologische Änderungen im Bereich des Riffbogens nachhaltige Auswirkungen auf das lokale Seegangsklima haben können“ (NIEMEYER & KAISER 1997), die sich nachteilig auf die Inselstrände und –schutzwerke auswirken (Vergrößerung der Belastung, Gefährdung von Deckwerksbereichen, Sandverluste).

Ziel der morphologischen Untersuchung ist es, Aussagen über die langfristige Entwicklung des Norderneyer Riffbogens sowie eine Abschätzung eines ungünstigsten Verlaufes hinsichtlich des Inselschutzes zu treffen. Dabei wird auch der Frage nachgegangen, ob die derzeit bestehende nachteilige Situation vor dem Westkopf/ Deckwerk der Insel Norderney bereits in ähnlicher Form in der Vergangenheit auftrat.

Erste Ergebnisse wurden bereits in einem Zwischenbericht zusammengestellt (JETSES & STEPHAN 1999). Schwerpunktmäßig wurde der unmittelbare Riffbogenbereich betrachtet, wurden grund-

legende Entwicklungstendenzen ermittelt sowie eine vorstellbare „worst-case“-Hypothese erarbeitet.

Der Abschlussbericht befasst sich - in Anlehnung an die Ergebnisse von STEPHAN (1993) - großräumig mit den morphologischen Entwicklungen im gesamten Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats. Für den Bereich des Riffbogens werden die Ergebnisse aus dem Zwischenbericht aufgegriffen und in Teilaspekten ergänzt. Schließlich wird versucht, Ursachen und Wirkungszusammenhänge aufzuzeigen und Konsequenzen für den Küstenschutz abzuleiten.

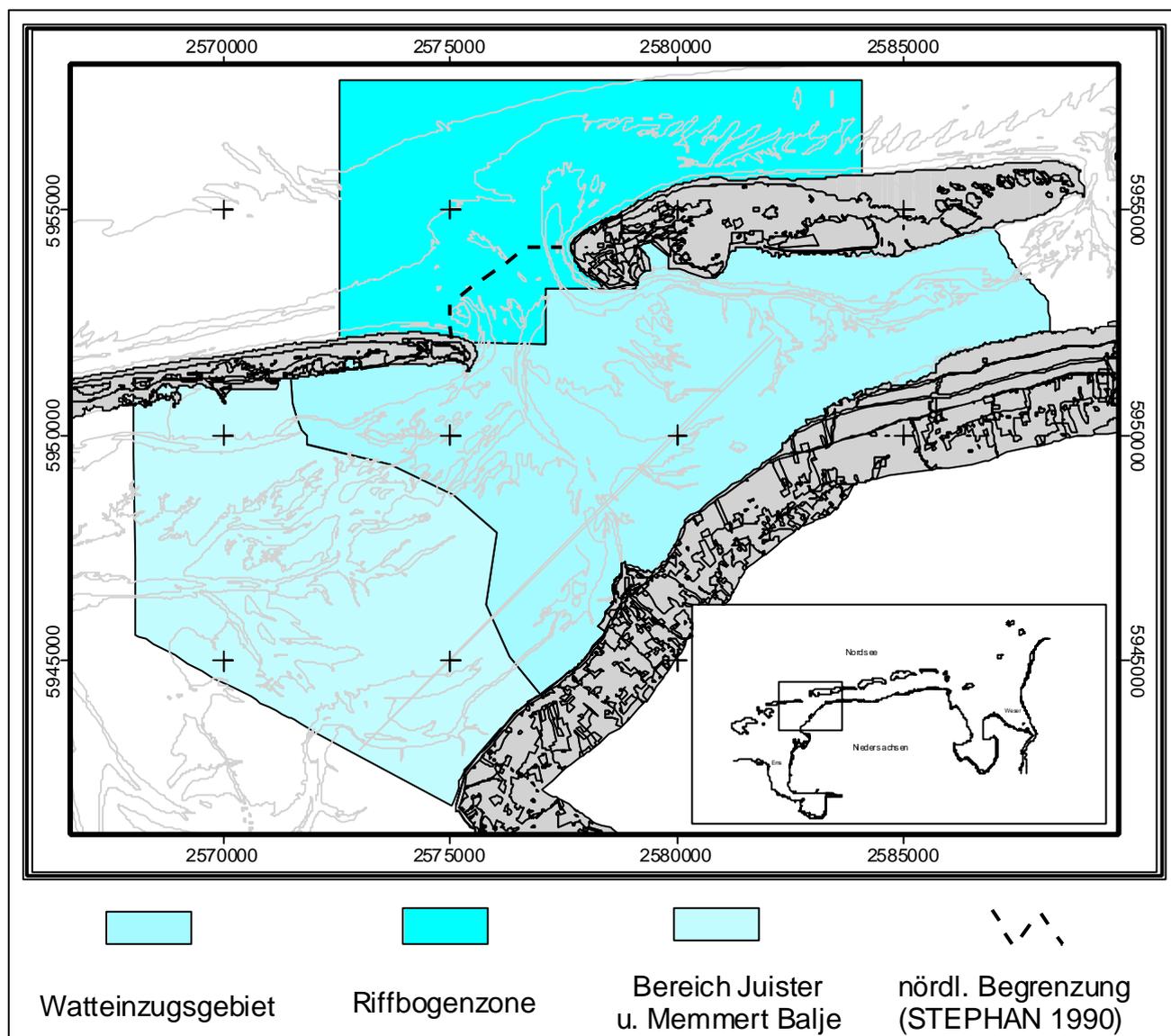


Abb. 1: Lage des Untersuchungsgebietes

2 Untersuchungsraum

Als Teil der niedersächsischen Küste wird das Untersuchungsgebiet durch das Festland im Süden und durch die ostfriesischen Inseln Juist und Norderney bzw. durch eine Linie etwa auf GK 59⁵⁸ im Norden begrenzt (Abb. 1). In Anlehnung an die Untersuchungen von STEPHAN (1993) fällt die östliche Begrenzung mit der Wattwasserscheide zusammen, die als relativ lagestabil angesehen werden kann, während die Grenze im Westen über die Wattwasserscheide hinausläuft und auch den Wurzelbereich der Juister Balje sowie den größten Teil der Memmertbalje mit einschließt (vgl. Kap. 4.2). Der Untersuchungsraum nimmt damit eine Gesamtfläche von gut 240 km² ein. Davon entfallen knapp 58 km² auf den Riffbogen und etwa 184 km² auf das Gebiet zwischen Festland und Inseln. Das eigentliche Einzugsgebiet des Norderneyer Seegat umfasst ein Gebiet von knapp 110 km² (Stand 1998).

3 Methodik

3.1 Kartenmaterial

Grundlage der langfristigen morphologischen Untersuchungen sind überwiegend Seekarten mit Höhenbezug auf SKN (M_{Sp}T_{nw}; Hinweis: Beschickungsproblematik!), die der FSK ab 1866 verfügbar sind. Da die Karten für die Schifffahrt erstellt wurden, sind schwerpunktmäßig die Rinnenläufe erfasst. Die Datendichte, insbesondere in höherliegenden Watt-, Riffbogen- und Vorstrandbereichen, ist hingegen deutlich geringer.

Während neuere Vermessungen digital als Tiefenlinienpläne oder Punktpeilungen verfügbar sind, liegen ältere Aufnahmen nur als verkleinerte Seekarten vor (Tab. 1). Auch ist der von der Vermessung erfasste Bereich in den einzelnen Jahren sehr verschieden und reicht von Teilbereichen des Norderneyer Riffbogens bis hin zu kompletten Vermessungen des gesamten niedersächsischen Küstenraums.

3.2 Datenaufbereitung

Die digitale Umsetzung der Karten sowie Darstellung und Analyse der Daten erfolgte mit dem GIS ArcView. Die Zusatzmodule „Spatial-Analyst“ als rasterorientierte GIS-Erweiterung und „3D-Analyst“ für die dreidimensionale Modellberechnungen mittels Dreiecksvermaschung (TIN – Triangulated Irrregular Network) werden insbesondere für Flächen- und Volumenberechnungen eingesetzt.

Da die Vermessungsunterlagen der verschiedenen Jahrgänge in unterschiedlicher Form vorliegen, ist für die GIS-gestützte Analyse eine Umsetzung in vergleichbare Datenstrukturen erforderlich. Tabelle 1 enthält eine Übersicht über das verwendete Kartenmaterial, die jeweilige digitale Datenstruktur sowie durchgeführte Umwandlungen (siehe auch Anlage 1).

Aus diesen Umwandlungsroutinen ergeben sich insbesondere bezüglich einer quantitativen Analyse Probleme, auf die bereits in Kap. 2.2 des Zwischenberichtes eingegangen wird (JETSES & STEPHAN 1999).

Tab.1: Verwendetes Kartenmaterial – Originalstruktur und Umwandlung
(aus: JETSES & STEPHAN 1999)

Jahr	Höhen Bezug		Art			Gitter- streifen		Umwandlung			
	SKN	NN	Linien	Punkte	orig. Bild	2 (6°)	3 (9°)	(1) Linien zu Polygon	(2) Scanner-Bild zu Polygon	(3) Punkte zu TIN – GRID	(4) Linien (NN) zu TIN – GRID
1866	+		+			+		/			
1889	+		+			+		/			
1895	+		+			+		/			
1900	+		+			+		/			
1904	+		+			+		/			
1910	+		+			+		/			
1922	+		+			+		/			
1926	+		+			+		/			
1929	+		+			+		/			
1932	+				+		+		/		
1936	+	+		+			+			/	
1939	+				+		+		/		
1949	+				+		+		/		
1951	+		+			+		/			
1955	+	+		+			+			/	
1960		+	+			+					/
1964	+	+		+			+			/	
1971	+	+		+			+			/	
1975		+	+			+					/
1979/	+	+		+			+				
1980	+			+		+				/	
1982	+	+		+			+			/	
1985/	+	+		+			+				
1986	+	+		+			+			/	
1990	+	+	+			+					/
1992	+	+		+		+				/	
1995		+	+			+					/
1995	+	+		+			+			/	
1998	+	+		+		+				/	
TIN (Dreiecksvermaschung)						GRID (Rasterdarstellung – hier 10 m)					

3.3 Fehlerbetrachtung

Grundsätzlich kann zwischen Fehlerquellen unterschieden werden, die aus der Originalstruktur der Vermessungsgrundlage (Darstellungsmaßstab, Verzerrungen der Kartengrundlage, Messmethode /-genauigkeit, Datendichte) und deren Übernahme ins GIS resultieren, und solchen, die bei der Umwandlung in ein einheitliches Datenformat auftreten.

So lässt sich der Fehler durch unterschiedliche Abbildungsmaßstäbe, durch Verzerrungen der Kartenvorlagen und beim Arbeiten am Digitalisierbrett nur qualitativ beschreiben. Hinsichtlich mess- und verfahrenstechnischen Fehler bei der Seevermessung wird auf die Untersuchungen von HÜTTEMEYER et al. (1999) verwiesen, die im Rahmen des KFKI-Forschungsvorhabens „Morphologische Gestaltungsvorgänge im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht“ durchgeführt wurden.

Desweiteren ist zu beachten, dass sich die Höhenangaben in den Karten auf SKN beziehen. Dieser Höhenbezug stellt aber eine variable Größe dar, die für die Seekarten des 19. Jh. nicht mehr reproduzierbar ist. Damit sind morphologische Veränderungen quantitativ nur unzulänglich erfassbar, während sie qualitativ durchaus beschrieben und dargestellt werden können.

Bevor Flächen-, Volumen- und Differenzberechnungen durchgeführt werden können, muss das in Form von Linien, Punkten oder als gescanntes Bild vorliegende Kartenmaterial (vgl. Tab. 1) unterschiedlich aufbereitet werden. Aus Isolinien-Darstellungen können nicht unmittelbar GRID's erstellt werden, sondern es muss immer erst ein TIN berechnet, und daraus das GRID abgeleitet werden. Die Berechnung von GRID's direkt aus den Punktpeilungen ist hingegen möglich.

Bei den Umwandlungsroutinen treten allerdings Fehler auf, die allein auf den Rechenalgorithmus zurückzuführen sind und je nach der ursprünglichen Datenstruktur unterschiedlich groß ausfallen. Besonders augenfällig wird die Problematik bei der Berechnung eines TIN's aus Isolinien bzw. Polygonen, wie Abb.2 verdeutlicht: Tritt nur ein geringer Niveauunterschied innerhalb einer größeren Fläche auf oder wechselt das Gefälle auf kurze Distanz bei gleichem Betrag die Richtung, wie z.B. bei einer schmalen, flachen Rinne, interpoliert das Programm daraus eine ebene Fläche.

Um den Fehler bei der Berechnung von TIN's und GRID's auf der Basis von Punkten und auf der Basis von Linien prozentual erfassen zu können, wurden von JETSES & STEPHAN (1999) Vermessungsdaten aus dem Jahre 1995 miteinander verglichen. Diese liegen zum einen als Punktpeilungen vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) und als Topographische Wattkarte der FSK in Linienform vor. Für beide Datensätze wurde ein TIN gerechnet (TIN_Punkt, TIN_Linie) und anschließend ein einheitliches GRID generiert (GRID_Punkt, GRID_Linie; 10m Raster). Schließlich wurde für den Tiefenbereich von NN+0m bis NN-10m das jeweilige Gesamtvolumen bzw. die Gesamtfläche unterhalb definierter Tiefenstufen (1m) ermittelt. Ferner wurden die Tiefenlinien der Topographischen Wattkarte in Polygone umgewandelt und ebenfalls die entsprechenden Flächen ermittelt.

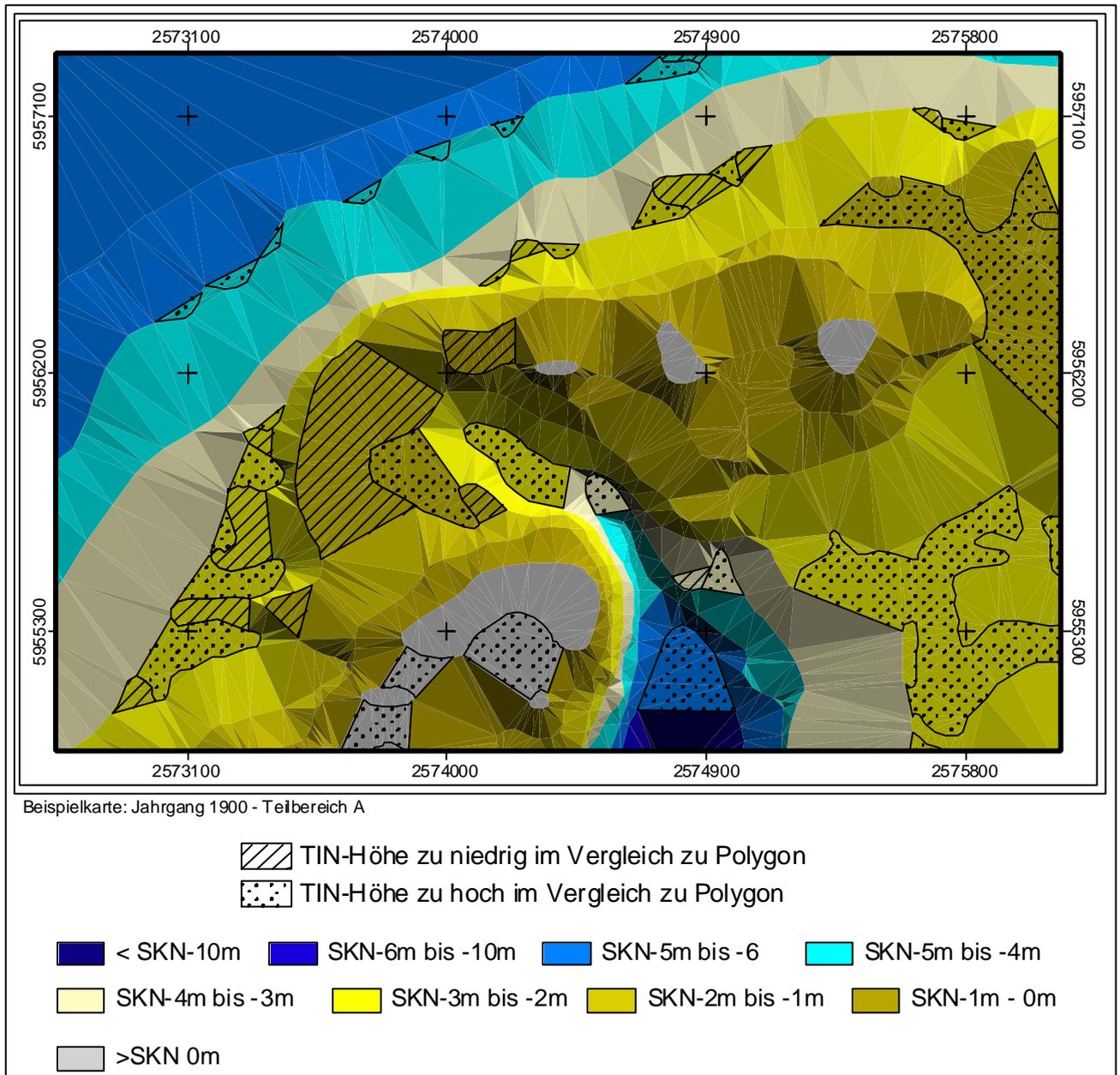
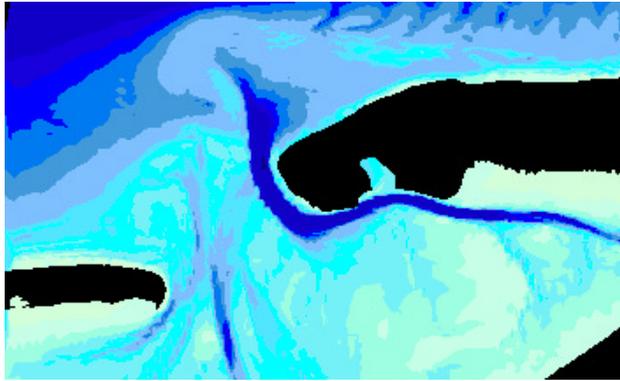
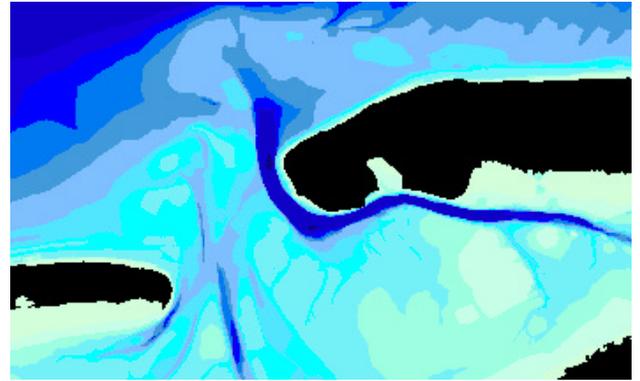


Abb.2: Höhenfehler bei der Berechnung von TIN's

JETSES & STEPHAN (1999) stellen fest, dass sich bereits in den GRID-Darstellungen auffällige Unterschiede ergeben, die insbesondere durch die unterschiedliche Ausprägung des Riffbogens und der Rinnensysteme zum Ausdruck kommen (Abb. 3).



GRID berechnet nach Punkten
(BSH 1995; Bezug NN)



GRID berechnet nach Linien
(FSK 1995; Bezug NN)

Abb.3: Jahrgang 1995: ArcView GRID berechnet nach Punkten und Linien
(aus: JETSES & STEPHAN 1999)

Sie kommen aufgrund vergleichender Volumenberechnungen für TIN_Punkt und TIN_Linie zu folgendem Ergebnis: Wird das Volumen für TIN_Punkt gleich 100% gesetzt, da hier die größte Datendichte vorliegt, ergibt sich zwischen NN?0m bis NN-6 m für das TIN_Linie ein um 1-2 % größeres, für den Bereich darunter ein um knapp 1% (NN-7m) bis 8% (NN-10m) kleineres Volumen. Bei der Flächenberechnung liegt die Abweichung sowohl für das TIN_Linien als auch für die Polygonberechnung gegenüber dem TIN_Punkt bei ?3%, wobei maximal Werte bis absolut 7% auftreten können (Abb. 4).

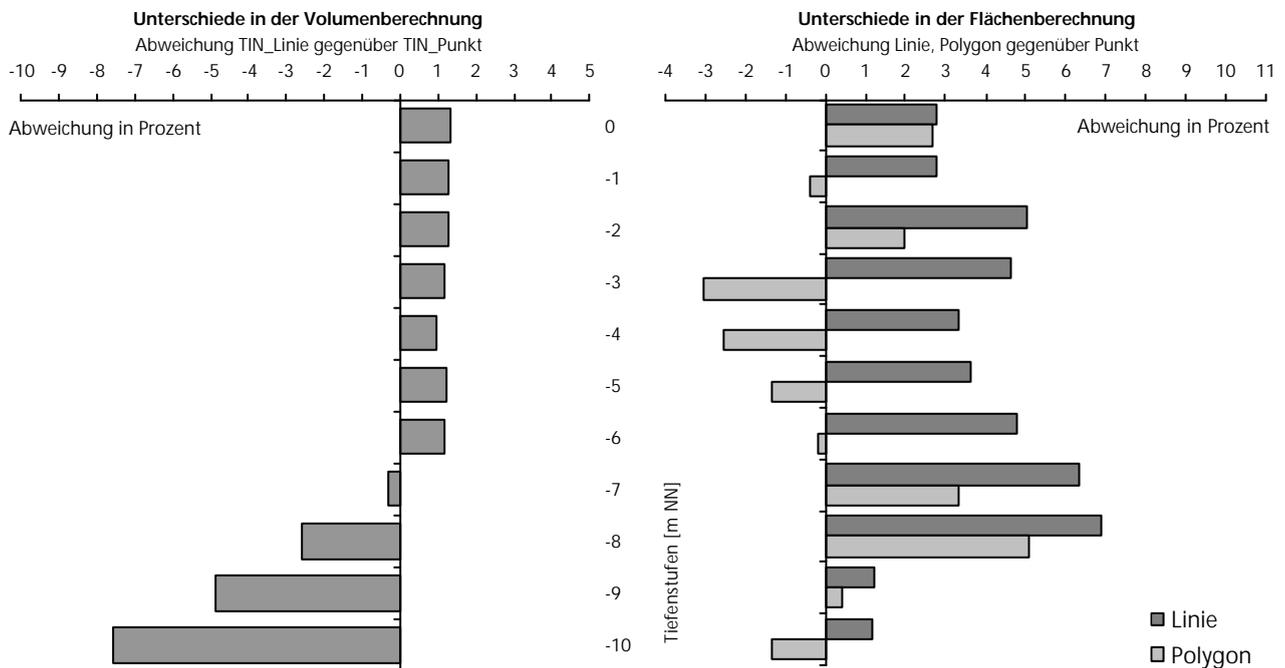


Abb.4: Prozentuale Abweichungen der Volumen- und Flächenberechnung je nach Datenquelle Linie oder Polygon (TIN_Punkt Berechnung = 100 %); Berechnung bezieht sich auf den in Abb.3 erfassten Bereich

Beschränkt sich die Flächenberechnung auf die eigentliche Riffbogenzone, die ja für die vorliegenden Untersuchungen von besonderer Bedeutung ist, ergeben sich zum Teil erheblich größere Fehler. In Abb. 5 sind die Ergebnisse der Fehlerberechnungen für die verschiedenen Tiefenstufen und verfügbaren Jahrgänge einzeln sowie in Form von Fehlerklassen dargestellt. Tolerierbare Fehlerabweichungen von weniger als 5% sind noch nicht einmal bei 60% aller Messungen festzustellen, während die Fehlerklasse 5-10% mit 11.6% und eine Fehlerspanne von 10-20% sogar mit über 15% vertreten ist. Und bei fast 14% der durchgeführten Berechnungen wichen die beiden Vergleichswerte noch erheblich stärker voneinander ab.

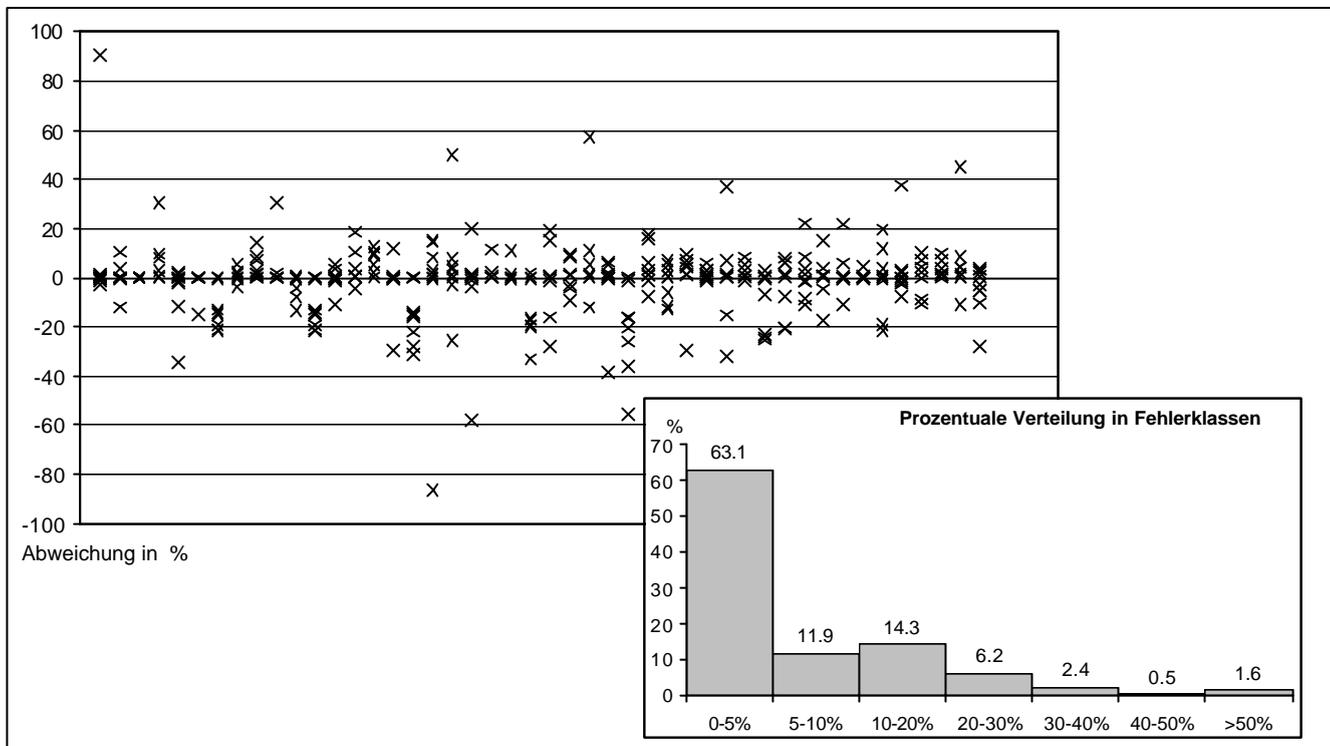


Abb.5: Prozentuale Fehlerabweichung der Flächenberechnung je nach Datenquelle Polygon oder TIN (Polygonberechnung = 100%) für die Riffbogenzone

Ein differenzierteres Bild ergibt sich allerdings, wenn Flächen oberhalb und unterhalb definierter Tiefenstufen betrachtet werden. Dabei wird auch deutlich, dass die Größe des Fehlers entscheidend davon abhängt, ob Flächen oberhalb oder unterhalb einer bestimmten Tiefenstufe ermittelt werden (Abb.6). Ausgehend von der SKN-5m-Linie als allgemein anerkannte Grenze zwischen dem eigentlichen Riffbogen und dem Rinnensystem, liegt die Flächenberechnung für den Riffbogens als der Bereich oberhalb der SKN-5m-Linie auf der Basis der TIN-Linie zumeist nur maximal 5% über dem Ergebnis der Polygonberechnung. Abweichungen nach unten wurden nicht festgestellt. Werden allerdings nur Flächenanteile ober- oder unterhalb bestimmter Tiefenstufen berechnet, so liegt der Fehler im günstigsten Fall bei $\approx 12\%$ (oberhalb von SKN-3m), im ungünstigsten bei weit über 50%. Für die Flächenberechnungen unterhalb einer bestimmten SKN-Linie (Rinnen) ergibt sich mit etwa $\approx 20\%$ ein einheitlich großer Fehler. Ursächlich verantwortlich für diese erheblichen Unterschiede ist der bereits erwähnte Rechenalgorithmus (vgl. Abb.2).

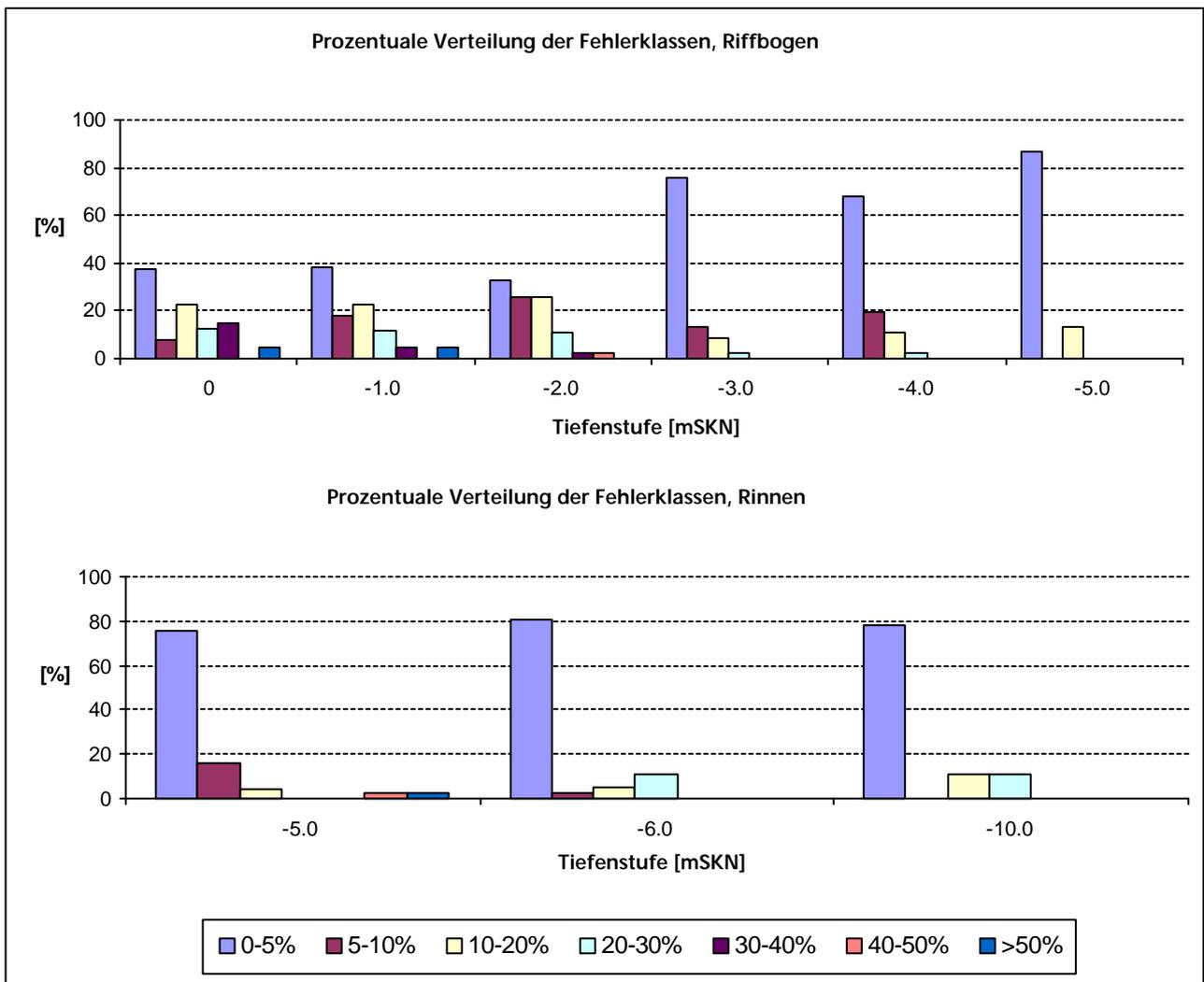


Abb.6: Fehlerabweichung bei der Flächenberechnung oberhalb (Riffbogen) und unterhalb (Rinne) bestimmter Tiefenstufen; Datenquelle: Polygon (100%), TIN

Die vorstehenden Fehlerbetrachtungen führen zu dem Ergebnis, dass der geringste Fehler auftritt, wenn die Originaldaten bereits digital als Punktpeilungen vorliegen. Der Fehler bei der Flächen- und Volumenberechnung wird hier allein durch die Datendichte und –güte bestimmt. Müssen die Vermessungsunterlagen erst digital umgesetzt werden, treten weitere Fehler auf (Digitalisierfehler, Verzerrungen, u.a.). Handelt es sich bei dem Kartenmaterial zudem noch um Isolinien darstellungen, ist außerdem mit relativ großen Fehlern zu rechnen, die ihre Ursache im Rechenalgorithmus haben. Im Gegensatz zu den übrigen Fehlergrößen lassen sich diese aber quantifizieren.

Da die Vermessungsunterlagen nach 1950 größtenteils als Punktpeilungen vorliegen, können sie für quantitative Analysen in der Regel herangezogen werden. Ältere Karten eignen sich hingegen nur für qualitative Aussagen.

4 Ergebnisse

4.1 Entwicklung des Riffbogens

Die älteren Seekarten stellen häufig nur Teilbereiche des Untersuchungsgebietes dar. Qualitative Aussagen sind zwar auch mit lückenhaften Kartenausschnitten möglich, quantitative Berechnungen erfordern hingegen fest abgegrenzte, einheitlich definierte Bereiche. Deshalb wurde die Riffbogenzone weiter in Teilbereiche untergliedert, was somit zumindest abschnittsweise eine Kontinuität in der Analyse erlaubt (Abb. 7)

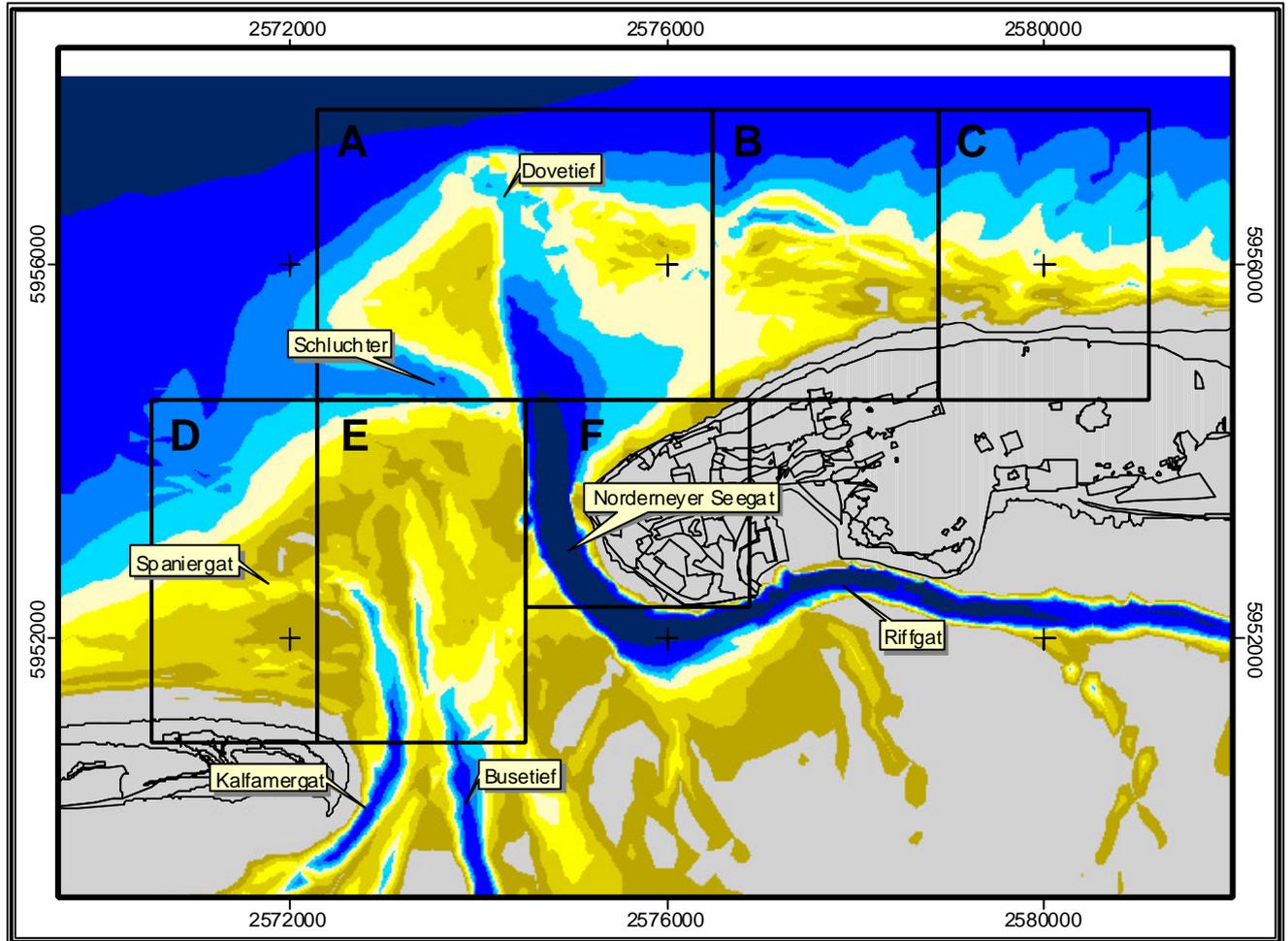


Abb.7: Detailkarte des Riffbogens mit den Teilbereichen A-F

4.1.1 Morphologische Ausprägung

Die Beschreibung der morphologischen Entwicklung des Riffbogens ist weitgehend aus dem Zwischenbericht (JETSES & STEPHAN 1999) übernommen. Allerdings werden einige dort gemachte Aussagen erneut aufgegriffen und diskutiert sowie weiterführende Untersuchungsergebnisse dargestellt.

Der Riffbogen des Norderneyer Seegats weist über nahezu den gesamten Untersuchungszeitraum eine sehr kompakte Form auf und verläuft in einem Bogen vom Ostende Juist zum Westende Norderney. Nur der Schluchter bildet eine ausgeprägte Rinne innerhalb des Riffbogens. Mit der Errichtung von Bühnen und Deckwerken am Westkopf von Norderney ab 1857 und der damit verbundenen Fixierung des Seegats sowie Riffgats ab etwa 1900 ist auch der Riffbogen in seiner Lage relativ stabil.

Deutliche Veränderungen des nordwestlichen Vorstrandbereichs von Norderney sind allerdings seit Anfang der 70iger Jahre festzustellen (Anl. 2 u. 3). Während bis dahin gleichbleibend Tiefen um SKN-2 m bis SKN-3 m nachzuweisen sind, nimmt ab 1971, und zwar fortschreitend von West nach Ost, die Tiefe zunächst auf SKN-3 m bis SKN-4 m zu. Ab Mitte der 80er Jahre weitet sich die Rinne des Riffgats in diesen Bereich aus und ab 1992 treten bereits Tiefen um SKN-5 m bis SKN-6 m auf. Die Zone mit Tiefen um SKN-4 m bis SKN-5 m dehnt sich weit in den Vorstrandbereich nach Osten aus. Im Zustand 1995 wird der Riffbogen in dieser Tiefenlage zweifach durchbrochen. Im Jahr 1998 hat sich jedoch der östliche Durchbruch wieder erhöht.

Prägnant ist in diesem Zusammenhang auch die Entwicklung des Schluchters. Bis 1982 liegen in diesem Bereich Tiefen um SKN-3 m bis SKN-4 m vor. Anschließend vertieft sich diese Rinne auf SKN-5 m bis SKN-6 m und unterteilt den Riffbogen in einen westlichen und einen nordöstlichen Bereich. Die Vorstoßachse des Schluchters ist direkt auf den nordwestlichen Deckwerksbereich Norderneys ausgerichtet und Umfang sowie Höhe der nordöstlichen Platengruppen nehmen deutlich ab. Im Zustand von 1998 sind erneute Sedimentzunahmen in diesem Bereich zu verzeichnen.

Die Tiefendifferenz-Karten (Anl. 4) verdeutlichen die genannten morphologischen Veränderungen. So wird z.B. die Sedimentabnahme im Bereich des Schluchters insbesondere im Vergleich 1975 bis 1979 erkennbar, also deutlich früher als sich eine vertiefte Rinne (ab 1982) in diesem Bereich ausbildet. Die Erosion nördlich des Schluchters hält über die Jahre 1982 bis 1985 und 1985 bis 1990 an. Darauf folgend werden im Jahresvergleich 1990 bis 1992 die erheblichen Erosionen im nordwestlichen Vorstrandbereich sichtbar, mit anhaltender Tendenz im Scheitelbereich der Seegat-Rinne 1992 bis 1995. Ab 1992 läßt sich wieder eine Aufhöhung der Platengruppen westlich sowie nördlich der Seegatrinne feststellen. Diese Tendenz setzt sich im Jahresvergleich 1995 bis 1998 fort und mit diesen Sedimentzunahmen sind leichte Erhöhungen auch im Vorstrandbereich nachzuweisen.

Die Differenzkarten belegen außerdem, dass auch die Seegatrinne trotz Fixierung durch Bühnen gewissen Verlagerungen unterliegt: Zwischen 1955 und 1960 sowie 1975 und 1979 ergibt sich eine deutliche Vertiefung der Rinne Norderneyer Seegat; zwischen 1979 und 1982 wird eine Sedimentation der Rinne sichtbar.

Um diese Veränderungen zu verdeutlichen, wurde von einem festgelegten Bezugspunkt, und zwar in etwa der tiefste und stabilste Punkt in der Seegatrinne, für jeden erfaßten Zustand der nördlichste Punkt der SKN-6 m- und der SKN-10 m-Linie vektoriell erfasst. Anschließend wurde die Lageveränderung des nördlichen Rinnenausläufers sowohl in West-Ost- als auch Nord-Süd-Richtung aufgetragen (Anl. 5). Während bis etwa Ende der 80iger Jahre die Seegatrinne relativ konstant in nördliche Richtung verläuft und sich der nördlichste Ausläufer nach Süden zurückzieht, dehnt sich die Rinne danach um mehrere 100 Meter nach Norden aus und verlagert sich gleichzeitig nach Nordwesten.

Für den Riffbogen selbst ist eine solche Verlagerungstendenz keineswegs so deutlich erkennbar. Die SKN-10 m-Linie wandert zwar ebenfalls nach Süden und folgt damit dem Trend des Norderneyer Seegats, ohne dann aber seit 1990 so auffällig wieder nach Norden vorzustoßen. Für die SKN-6 m- und die SKN-5 m-Linie sind auffällig große Verlagerungsbeträge zu Beginn und gegen Ende des Untersuchungszeitraums charakteristisch. Zwischen 1866 und etwa 1926 wandert der Schnittpunkt dieser SKN-Linien auf R²⁵⁷⁴ erst um ca. 400m nach N, dann bis 1922 um etwa 800m nach S, um sich schließlich wieder ungefähr auf die Lage einzupendeln, die sie bereits 1866 einnahmen. Bis 1995 bleiben beide Linien, von leichten Pendelbewegungen abgesehen, lagekonstant. Dann aber schieben sich die SKN-5 m- und die SKN-6 m-Linie weit nach N vor und drängen auch die SKN-10 m-Linie wieder nach Norden ab (Abb. 8).

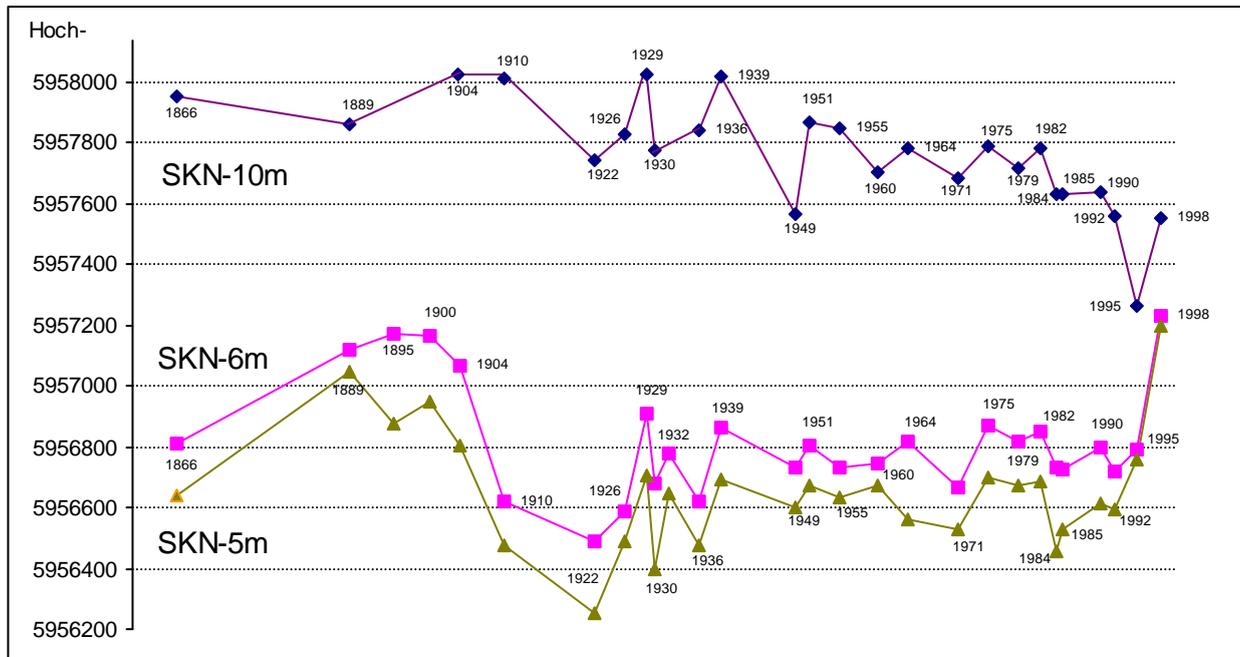


Abb. 8: Nord / Süd-Verlagerung des Riffbogens auf R²⁵⁷⁴

Ferner wurde die Tiefenzunahme und Flächenausdehnung des Norderneyer Seegats nördlich von H ⁵⁹⁵³ durch Berechnung der Niveaulächen für die Tiefenhorizonte SKN-5 m, SKN-6 m und SKN-10 m ermittelt (Abb.9). Die Niveaulächen schwanken bis zu Beginn der 90iger Jahre um einen Mittelwert, der sich aus den Flächenberechnungen von rd. 100 Jahren (1895 bis 1982) ergibt. Die Schwankungen liegen mit maximal 10% zumeist innerhalb der Fehlertoleranz. Erst 1992 ist schlagartig eine Zunahme von 50 % bis 60 % festzustellen. Dagegen sind im letzten Zustand von 1998 wieder leichte Rückgänge zu verzeichnen. Die SKN-10 m Rinne folgt zwar auch dieser Entwicklung, die Schwankungen sind aber deutlich gedämpfter.

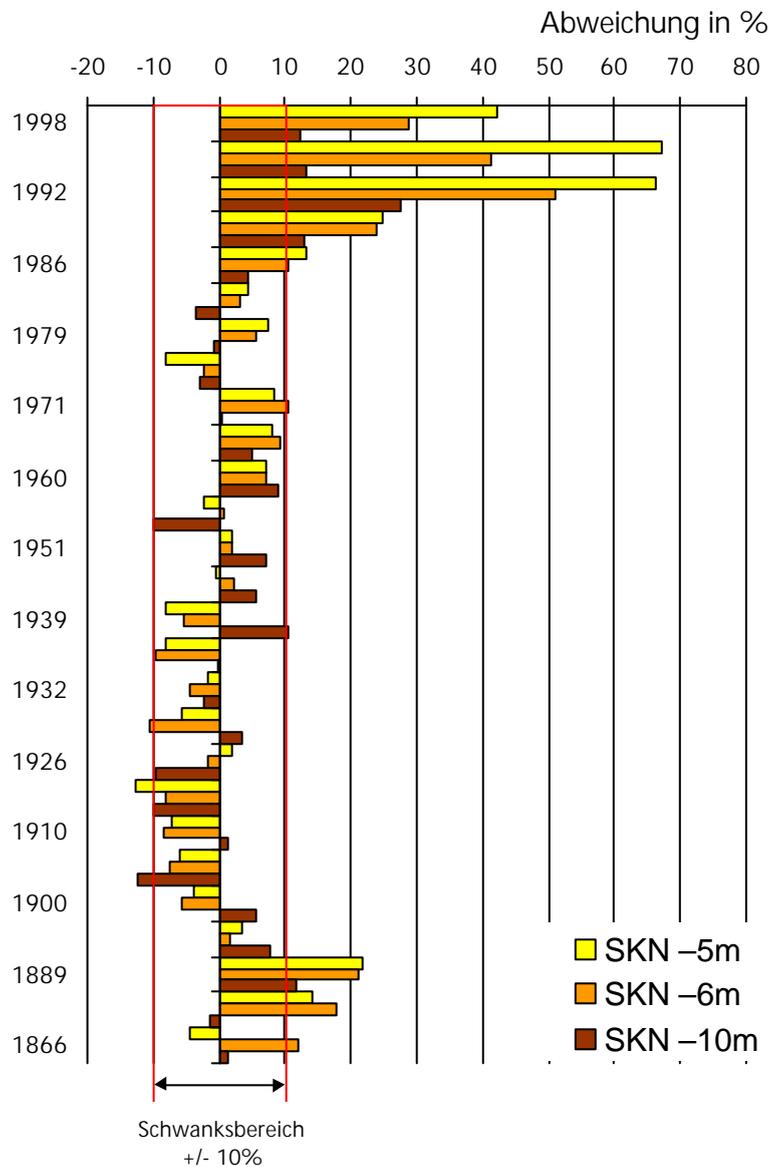


Abb.9: Flächenänderungen des Seegats nördlich H 5953

Die dargestellten Gestaltungsvorgänge im Bereich des Riffbogens, des Norderneyer Seegats und des Schluchters stehen u.a. im Zusammenhang mit Veränderungen im Bereich des Busetiefs und Kalfamergats (Abb.10). Das Busetief verliert ab 1975 nicht nur deutlich an nördlicher Ausdehnung, sondern auch den bogenförmigen, auf die Westspitze von Norderney gerichteten Verlauf und schwenkt zunehmend in das Kalfamergat ein. Das direkt am Ostende von Juist gelegene Kalfamergat prägt sich im gleichen Zeitraum immer stärker aus und stößt zunehmend weiter nach NNW vor (vgl. auch Anlage 6, Profil A). Diese augenfälligen Gestaltungsvorgänge im Bereich des Norderneyer Seegats sowie des zugehörigen Wateinzugsgebietes gaben schon Ende der 80iger Jahre Veranlassung zu eingehenden Untersuchungen (STEPHAN 1993).

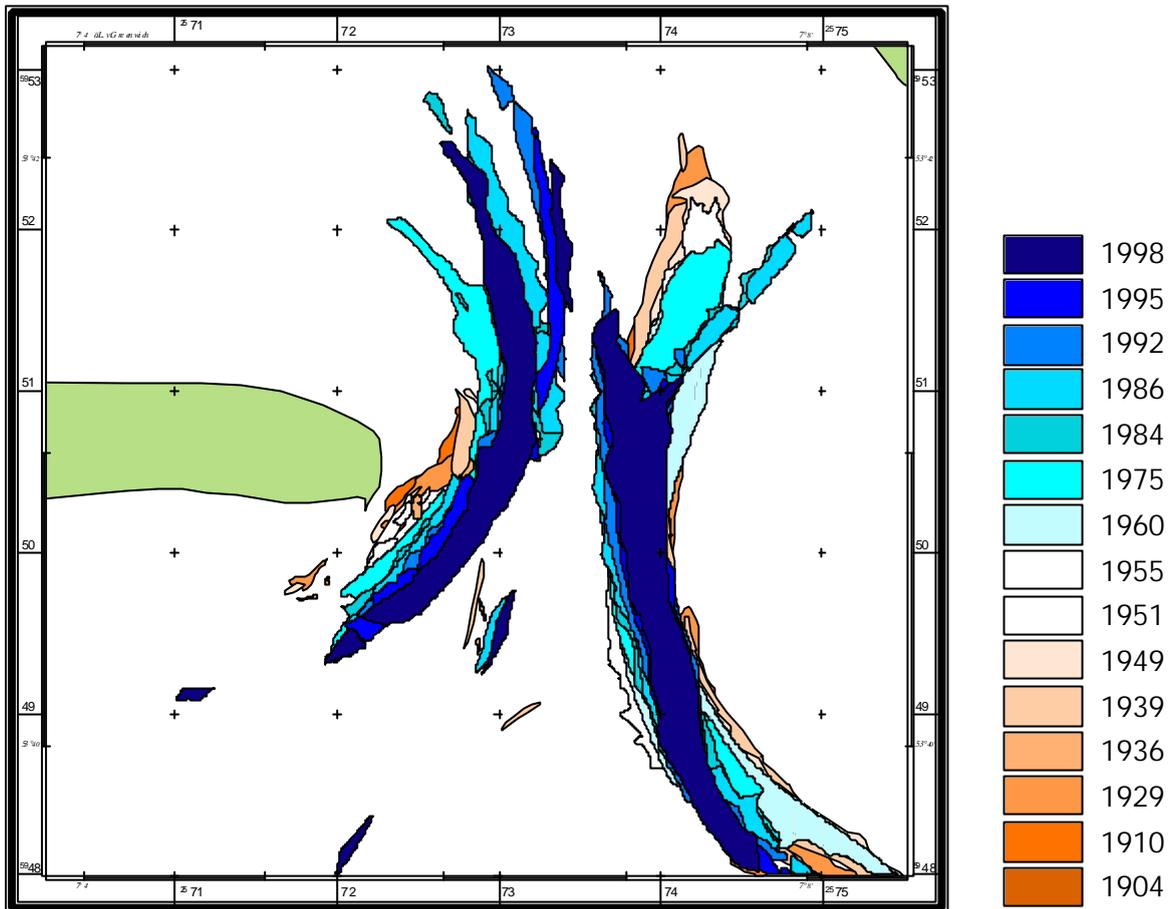


Abb.10: Rinnenentwicklung Kalfamergat / Busetief

Die morphologische Entwicklung entlang der Profile A bis C (Anlage 6) verleiht vor allem der hohen Dynamik des Riffbogens im unmittelbaren Seegatbereich Ausdruck. Noch etwas undeutlich zeichnet sich aber bereits hier die Höhenabnahme im Riffbogen ab, die im Vorstrandbereich von Norderney (Profile D bis G) wesentlich offensichtlicher ist und zu einem Aufsteilen des Vorstrandprofils führt.

Für den Riffbogen, räumlich durch die Teilflächen A-F abgegrenzt, ist zwischen 1868 und 1998 insgesamt ein Flächenrückgang oberhalb von SKN-5 m um rund 12% bei gleichzeitiger Flächenausdehnung der Rinnensysteme um ca. 40% unterhalb SKN-5m festzustellen. Berechnungsgrundlage ist dabei ein gleitendes Mittel über den Betrachtungszeitraum (Anlage 7). Auch hierbei ist wieder zu beobachten, dass sowohl der Riffbogen als auch das Rinnensystem bis 1975 flächenmäßig nur geringfügig variieren. Erst zwischen 1975 und 1998 treten erhebliche Veränderungen auf, die 1995 mit einer Flächenabnahme im Riffbogen bzw. Flächenzunahme im Rinnenbereich von knapp 16% resp. 60% ihr Maximum erreichen. Diese Entwicklung spiegelt sich natürlich auch innerhalb der einzelnen Teilbereiche in unterschiedlicher Intensität wieder (Anlage 8 u. 9).

4.1.2 Volumenänderungen und Massenbilanz

Die Massenermittlung erfolgt auf der Grundlage der TIN-Modelle, die zwar für alle verfügbaren Jahrgänge generiert wurden, die aber aufgrund der Qualitätsunterschiede und Dichte der Daten (vgl. Kap. 3.3) nicht alle für quantitative Analysen herangezogen werden können. Volumenbe-

stimmungen wurden schließlich für acht ausgewählte Jahrgänge zwischen 1936 und 1998 durchgeführt, sowohl getrennt für die einzelnen Teilbereiche A bis F als auch in der Summe.

In der Gesamtbilanz schwankte das Sedimentvolumen im Riffbogen (A-F) in den Jahren 1936, 1955 und 1975 mit gut 92 Mio. m³ nur um wenige Zehntel Prozent. Erst in den darauffolgenden Jahren werden deutliche Massenverluste sichtbar, die 1995 (70.3 Mio. m³) mit über 20 Mio. m³ ihren Höhepunkt erreichen. Das entspricht einer Volumenabnahme von 24.3 %. In den darauffolgenden Jahren bis 1998 nimmt das Gesamtvolumen im Bereich oberhalb von SKN-5 m wieder um 5 % zu und beträgt damit 74.9 Mio. m³ (Anl. 10).

Erwartungsgemäß entwickelt sich das Rinnenvolumen im gleichen Betrachtungszeitraum gegenläufig, wobei die relative Schwankungsbreite z.T. erheblich auffälliger ist. Ausgehend von einem Gesamtvolumen der Rinnen von 18.8 Mio. m³ (1936) nimmt dieses bis 1960 um 15.5 % zu (21.7 Mio. m³), um 1975 dann wieder fast exakt den Wert von 1936 einzunehmen. Zwischen 1975 und 1986 ist dann wieder eine Zunahme des Rinnenvolumens von knapp 20 % zu verzeichnen (22.5 Mio. m³), das sich auch bis 1990 nur unwesentlich verändert. Mit einem Volumenzuwachs von gut 45% gegenüber dem Zustand von 1936 wird schließlich 1995 der bisherige Maximalzustand (27.4 Mio. m³) erreicht. In den nachfolgenden drei Jahren schwindet das Volumen im Bereich unterhalb von SKN-5 m um gut 20 % (Anl. 10).

Deutlich unruhiger präsentieren sich Volumenänderungen, wenn nur einzelne Teilbereiche des Riffbogens betrachtet werden. Ohne an dieser Stelle detailliert auf Einzelheiten einzugehen – diese können der Abbildung in der Anlage 11 und 12 entnommen werden – soll erwähnt werden, dass sich zwischen 1936 und 1998 das Sedimentvolumen in der Regel um mehrere zehn Prozentpunkte reduziert hat. Die Entwicklung des Volumens unterhalb von SKN-5m ist von Teilbereich zu Teilbereich sehr unterschiedlich. Für die Bereiche B und C ist ein Volumenzuwachs bis 1995 um den Faktor 8 bis 12 festzustellen. Teilbereich F zeigt im gleichen Zeitraum einen Volumenzuwachs von 34 %. Für die Entwicklung des Rinnenvolumens innerhalb von Bereich D sind keine verlässlichen Aussagen möglich, da die Datenmenge zu gering ist. Ein sehr uneinheitliches Bild zeigen die Teilbereiche A und E, für die ein wiederholter Wechsel zwischen Volumenzunahme und –rückgang charakteristisch ist und der hohen Dynamik des Norderneyer Seegats (Bereich A) und der Entwicklung von Busetief und Kalfamergat (Bereich E) Ausdruck verleiht.

Sowohl die Profil- als auch die Flächenentwicklung im Riffbogen (vgl. Kap. 4.1.1) deuten bereits an, dass es offensichtlich zu keiner Umverlagerung von Sedimentmassen in der Form gekommen ist, dass Sedimente in höheren Bereichen erodieren und noch innerhalb des Riffbogens in tieferen Regionen wieder zur Ablagerung kommen. Eine solche Entwicklung hätte sich in einer Massen- bzw. Flächenumverteilung innerhalb einzelner Tiefenhorizonte geäußert. Um diese Frage aber im Detail zu klären, wurde das Sediment- bzw. Rinnenvolumen in horizontalen Segmenten von jeweils einem Meter für den Bereich zwischen SKN und SKN-11 m ermittelt. Erodierendes Material wird weder innerhalb des eigentlichen Sedimentkörpers erkennbar umgelagert, noch in die Rinnen transportiert. Vielmehr verläuft die Entwicklung der Sedimentmassen mit abnehmenden Tendenzen und die des Rinnenvolumens mit positiven Beträgen innerhalb der einzelnen Tiefenhorizonte parallel (Anl. 13 u. 14).

4.2 Änderungen im Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats

Das Wateinzugsgebiet des Norderneyer Seegats umfasst eine Fläche von etwa 109 km² und wird im Norden durch die Inseln Juist und Norderney sowie im Süden durch die Küstenlinie begrenzt. Da die östliche Wattwasserscheide, die sich in einem dynamischen Gleichgewicht befindet, als relativ lagestabil betrachtet werden kann, wurde diese Begrenzung durch eine starre Linie festgelegt. Die westliche Begrenzung des Wateinzugsgebietes ist in ihrer Lage hingegen weniger stabil und muss für die verschiedenen Jahre definiert werden. Die Begrenzung des Untersuchungsgebietes liegt allerdings deutlich weiter im Westen. Damit kann eine eventuelle Beeinflussung des Wateinzugsgebietes durch die wesentlichen Rinnensysteme des Juister Watts aufgezeigt werden.

Da den größeren Rinnensystemen Teileinzugsgebiete zugeordnet werden können, wurde das Wattgebiet im rückwärtigen Bereich der Inseln in Teilgebiete (TG) untergliedert. Damit können morphologischen Gestaltungsvorgänge der Teilgebiete isoliert betrachtet werden. Die Zuordnung der Teilgebiete folgt dem Schema von STEPHAN (1993), wobei aber die Teilgebiete 1 bis 3 zusammengefasst wurden (Anl. 15 u. 16):

- TG 1_3 Norderneyer Seegat und Riffgat
- TG 4 Busetief und Osterriede
- TG 5 Westerriede
- TG 6 Kalfamergat
- TG 7 Juister Balje
- TG 8 u. 9 Memmertbalje

Für eine detaillierte Beschreibung der morphologischen Entwicklung innerhalb der verschiedenen Teilgebiete wird auf die Arbeit von STEPHAN (1993) verwiesen. Durch GIS-gestützte Analyse kommt es bei der Flächenberechnung gegenüber den Ergebnissen von STEPHAN zu leichten Abweichungen (±5 %). Die morphologische Entwicklung, die von STEPHAN aufgezeigt und postuliert wird, kann durch die Einbeziehung neuerer Vermessungsdaten bestätigt werden. Im Einzelnen bedeutet dies:

Das Teileinzugsgebiet des Norderneyer Seegats (TG1_3) nimmt zwischen 1935 und 1998 zwar nur geringfügig (-5.5%), aber kontinuierlich an Ausdehnung ab. Das Teilgebiet 4 mit Busetief und Osterriede nimmt in etwa um den gleichen Betrag (+7.5 %) an Fläche zu. Für das Einzugsgebiet der Westerriede ist trotz einer insgesamt recht unruhigen Entwicklung zwischen 1935 und 1998 ein mittlerer Flächenrückgang von etwa 20% festzustellen. Einen erheblichen Flächenzuwachs hingegen erfährt das Einzugsgebiet des Kalfamergats (TG 6), das sich zwischen 1935 und 1998 um über 40 % ausdehnt. Diese Zunahme dürfte teilweise zu Lasten von TG 7 (Juister Balje) gehen, das knapp 33 % der Fläche verliert. Das Teileinzugsgebiet der Memmert Balje entwickelt sich uneinheitlich mit einem Flächenrückgang um ca. 10 % für den nördlichen Hauptarm (TG 8) und einer Flächenzunahme um ca. 16 % für den südlichen (TG 9).

4.2.1 Watthöhenveränderungen

Grundlage für die Berechnung von Watthöhenveränderungen sind Rasterdarstellungen (GRIDs) mit einer gewählten Maschenweite von 25 m, die aus den TINs der einzelnen Jahre generiert wurden. Als Ergebnis ist festzustellen, dass sich das Wattniveau im eigentlichen Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats (TG 1-6) zwischen 1935 und 1998 im Mittel um rd. 21 cm gesenkt hat. Eine Entwicklung, die weder kontinuierlich noch innerhalb der Teileinzugsgebiete einheitlich verlaufen ist:

Durchweg positive Tendenzen sind zwischen 1935 und 1958 in allen Teilgebieten zu verzeichnen, die bei Sedimentationsbeträgen zwischen 15cm (TG 4 u. 6) und 25 cm (TG1_3 u. 5) innerhalb des Watteinzugsgebietes zu einer mittleren Höhenzunahme von gut 19 cm geführt haben (Tab. 2). In der Zeitspanne von 1958 bis 1975 setzt sich diese positive Entwicklung nur in den TG 1-5 fort (6-13 cm); im TG 6 ist ein Wattniveaurückgang von 36 cm festzustellen. Die Gesamtbilanz (TG 1-6) fällt aber mit 1.5cm noch positiv aus. Zwischen 1975 und 1985 kommt es in allen Teilgebieten zu starken Erosionen, die einen mittleren Rückgang des Wattniveaus von 23 cm bedingen. Erst zwischen 1985 und 1995 ist wieder eine im Mittel positive Sedimentbilanz nachweisbar (+1.5cm). Einzig im TG1_3 zeichnet sich weiterhin ein negativer Trend ab, dessen Wert von 2 cm allerdings innerhalb der Messgenauigkeit liegen dürfte. In den letzten vier Jahren des Untersuchungszeitraumes bestimmen wieder einheitlich Erosionsprozesse die Entwicklung des Wattniveaus, das im Mittel um 22 cm zurückgegangen ist. Die geringsten Verluste treten in TG 5 mit 4.5 cm auf, die höchsten in TG 6 mit 35 cm.

Tab. 2: Mittlere Höhenveränderungen im Watteinzugsgebiet

	TG1_3]	TG4	TG5	TG6	TG1-6
	Seegat u. Riffgat	Busetief u. Osterriede	Wester- Riede	Kalfamer- gat	gesamtes Einzugsgebiet
	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]	[cm]
(1935 – 1958)	24	15	25	13	19
1958 – 1975	6	13	6	-36	1.5
1975 – 1985	-34	-24	-15.5	-19	-22.5
1985 – 1995	-2	5	4.5	11.5	1.5
1995 – 1998	-16	-21	-4.5	-35	-22
1935 – 1998	-22	-12	15.5	-65.5	-21.5

Für das Teileinzugsgebiet des Norderneyer Seegats und des Riffgats (TG 1_3) berechnet sich der mittlere Rückgang des Wattniveaus zwischen 1935 und 1998 zu 22 cm. Der Bereich des Busetiefs und der Osterriede (TG 4) weist einen Höhenverlust von 12 cm auf. Die stärksten Sedimentverluste sind im Teileinzugsgebiet des Kalfamergats (TG 6) festzustellen, die zu einem Rückgang des Wattniveaus von 65.5 cm geführt haben. Der einzige Abschnitt mit insgesamt positiver Sedimentbilanz ist das Einzugsgebiet der Westerriede mit einem Höhenzuwachs von 15.5 cm.

Die Abnahme des Wattniveaus bleibt nicht auf die Wattrinnen und angrenzenden, tiefer gelegenen Wattflächen beschränkt, sondern greift auch auf die ursprünglich mit dem Tidegeschehen

periodisch trockenfallenden Bereiche über, so dass sich die Tnw-Linie langsam küstenwärts verschiebt (Anlage 17 u. 18)

Für Vergleichszwecke mit der Arbeit von STEPHAN (1993) sind in die Berechnung für die mittleren Niveauänderungen auch die Teilflächen im Juister Watt einbezogen worden. Die Ergebnisse sind in Anlage 19 dargestellt. Es ist zu beachten, dass den Berechnungen von STEPHAN ein Rastermaß von 1 km zugrunde liegt. Die mittleren Niveauänderungen im Bereich des eigentlichen Wateinzugsgebiet des Norderneyer Seegats (TG 1-&) sind Anlage 20 zu entnehmen.

An dieser Stelle wird auf Untersuchungen hingewiesen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens WADE (KUNZ et al. 1998) im gesamten ostfriesischen Wattenmeer durchgeführt wurden.

4.2.2 Volumenbetrachtungen

Hierzu zählt neben der Berechnung des Fassungsvermögen eines definierten Watt-Priel-Systems in Abhängigkeit vom Wasserstand vor allem die Darstellung und Entwicklung des Tidevolumens. Berechnungsgrundlage für die Volumenermittlungen sind die TIN's der verschiedenen Vermessungsjahre, aus denen sich über eine einfache Abfrageroutine das Volumen unterhalb einer gewählten Höhe ermitteln läßt. Der Berechnung der Tidevolumen liegen folgende Tidekennwerte vom Pegel Norderneyer Riffgat zugrunde:

1935:	NN +1.01 m	NN-1.31m
1958:	NN -1.13 m	NN-1.26m
1975:	MThw: NN +1.21 m	MTnw: NN-1.22m
1985:	NN +1.18 m	NN-1.25m
1995:	NN +1.21 m	NN-1.26m
1998	NN +1.23 m	NN-1.21m

Die Gegenüberstellung der Volumensummenkurven verschiedener Jahre (Anlage 21 u. 22) geben nicht nur Auskunft darüber, wie der Füllraum über die Jahre variiert, sondern verdeutlicht auch, wie sich dieses Volumen im vertikalen Profil verteilt bzw. wie sich diese Verteilung über die Zeit verändert. So wird z.B. in der Memmertbalje (TG8 u. 9) ein Volumen von 10^7 m^3 1935 erst bei einem Wasserstand von ca. NN-2.7 m erreicht, 1985 und 1995 aber bereits schon bei NN-4.7 m. Andererseits sind die Summenkurven für diese drei Jahrgänge ab einem Wasserstand oberhalb von etwa NN-1.5 m völlig deckungsgleich. Daraus ist der Schluss zu ziehen, dass sich das Rinnensystem vertieft bzw. ausgedehnt hat.

Änderungen des Tidevolumens bestimmen aber die Ausprägung der Rinnenstrukturen. Sowohl die Tidevolumen für das TG1_3 (Norderneyer Seegat) als auch für das TG4 (Busetief) weisen nach einem Rückgang um ca. 12 % zwischen 1935 und 1958 eine Volumenzunahme bis 1995 auf, die für TG1_3 17 % beträgt und für TG4 mit 36 % fast doppelt so hoch ausfällt. Daran schließt sich wieder ein leichter Rückgang um etwa 3 % an. Die Entwicklung im Bereich des Kalfamergats (TG6) ist bis 1995 durch eine fast lineare Zunahme des Tidevolumens um über 70 % gekennzeichnet. Zwischen 1995 und 1998 nimmt das Volumen dann allerdings wieder um ca. 15 % ab. Im Teileinzugsgebiet der Westerriede pendelt sich das Tidevolumen - nach einem Rückgang um 15 % zwischen 1935 und 1958 - mit 20 % um einen Wert von $17 \times 10^6 \text{ m}^3$ ein. Für das gesamte Einzugsgebiet des Norderneyer Seegats (TG1-6) ist zwischen 1935 und 1998 eine Zunahme des Tidevolumens um 11 % auf $214 \times 10^6 \text{ m}^3$ festzustellen (Tab. 3).

Tab. 3: Tidevolumen in den Teileinzugsgebieten

	TG1_3	TG4	TG5	TG6	TG1-6
	Seegat u. Riffgat	Busetief u. Osterriede	Westerriede	Kalfamer-gat	gesamtes Einzugsgebiet
	[m ³ x 10 ⁶]				
(1935)	88.2	60	21.8	22.1	192.1
1958	77.7	52.6	18.5	28.6	177.4
1975	81.5	58.8	15.5	31.7	187.5
1985	93.9	70.3	19.1	34.6	217.9
1995	89.8	68.9	15.3	38.6	212.6
1998	91.4	72.0	18.3	32.8	214.5

5 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Bis etwa Mitte der 70iger Jahre befindet sich das Norderneyer Seegat, das zugeordnete Einzugsgebiet sowie der Riffbogenbereich in einem relativ stabilen morphodynamischen Zustand: Der Riffbogen weist über diese Zeit eine gleichmäßige, kompakte Form mit konstanten Höhen auf, das Norderneyer Seegat ist weitgehend lagestabil und im Watteinzugsgebiet dominieren Sedimentationsprozesse.

Dann schließt sich eine Entwicklungsphase an, die durch erhebliche morphologische Umgestaltungen gekennzeichnet ist und die noch nicht abgeschlossen sind. Diese augenfälligen Gestaltungsvorgänge im Bereich des Norderneyer Seegats sowie des zugehörigen Watteinzugsgebietes gaben bereits Ende der 80er Jahre Veranlassung zu eingehenden Untersuchungen (STEPHAN 1993). *„Dabei konnte nachgewiesen werden, dass es sich um ein grundsätzliches strukturelles Geschehen handelt mit großräumigen und langfristigen Auswirkungen:*

- *Mit der Verlagerung des westlich von Juist gelegenen Riffbogens nach Süden und dem damit verbundenen Zurückweichen des Mündungsbereiches der Juister Balje verliert letztere an Stromarbeitsvermögen und verflacht vor allem in ihrem Wurzelbereich. Dort vergrößert sich der Einfluß der Memmertbalje und des Kalfamergats. Damit verstärkt sich der Wasseraustausch vom Juister Watt zum Kalfamergat, begünstigt durch die Verschwenkung der Osterems.*
- *Die Vergrößerung des Einzugsgebietes des Südarms der Memmertbalje führt zu einer Zunahme des Seegangseinflusses im Bereich der Itzendortfplate. Diese erodiert und verstärkt den Sedimenttransport in Richtung Westerriede und Busetief. Erstere verflacht, die Jantjemoepate vergrößert sich, drängt in das Busetief hinein und führt somit zu den Schwierigkeiten an der Hafeneinfahrt Norddeich.*
- *Die Zunahme des Sandtransportes in das Busetief hat dessen Verflachung und Verbreiterung zur Folge. Der nördliche Teil des Busetiefs drückt nach Westen und baut die Hohe Plate und die Branderplate ab. Außerdem drängt die Balje immer mehr zum Kalfamergat und folglich weniger zum Norderneyer Seegat. Damit erklären sich auch die eingangs erwähnten Formänderungen im Riffbogen.*

Das bereits damals für einzelne Teilbereiche erörterte morphologische Geschehen wurde wie folgt zusammengefaßt:

- *Von geringfügigen, im normalen Spiel der Kräfte üblichen Ausnahmen abgesehen, ist das Norderneyer Seegat mit dem Riffgat hinsichtlich Lage und Tiefe als stabil anzusehen.*
- *Sowohl die Juister Balje als auch die Westerriede verlieren deutlich an Einzugsgebiet sowie Tidevolumen.*
- *Das Geschehen innerhalb des Busetiefs ist vor allem durch Lageveränderungen charakterisiert, die in ihrem südlichen Bereich mit Tiefenabnahmen einhergehen.*
- *Das Kalfamergat hat sich in den letzten Jahrzehnten deutlich vertieft, verbunden mit einer Zunahme des Tidevolumens.*

- Auch der Einfluß der Memmertbalje hat sich vergrößert; dies gilt vor allem für seinen südlichen Ausläufer.
- Insgesamt haben sich die Wattflächen vertieft, und zwar zwischen 1958 und 1990 für den gesamten Einzugsbereich um etwa 27 cm bei gleichzeitiger Zunahme des Tidevolumens um 17.6 Mill.m³, entsprechend etwa 10 %.

Die damaligen Ergebnisse können durch die aktuellen GIS-gestützten Analysen bestätigt werden, wobei das Geschehen im Bereich des Riffbogens jetzt großräumiger und genauer untersucht werden kann und somit detailliertere Aussagen möglich sind. Quantitativ ist im Rahmen der Meßgenauigkeiten festzuhalten:

- Im Untersuchungszeitraum 1935 bis 1998 hat sich das gesamte Einzugsgebiet im Mittel um rd. 21 cm vertieft, d.h. das Tidevolumen um rd. $22 \cdot 10^6$ m³ erhöht.
- Diese Erosion ist besonders im Bereich des Kalfamergats bei einer Tiefenabnahme um 66 cm (Tidevolumen $10 \cdot 10^6$ m³) ausgeprägt.

Aufbauend auf den jetzt vorliegenden Untersuchungsergebnissen wird versucht, die bisherigen Prozesse in eine ursächliche Beziehung zueinander zu stellen, und daraus eine Prognose für die weitere großräumige Entwicklung im Bereich des Norderneyer Seegats abzuleiten:

Seit etwa 1975 überwiegen in dem Wateinzugsgebiet des Norderneyer Seegats die Erosionsprozesse. Mit dem Rückgang des Wattniveaus kommt es zu einer deutlichen Zunahme des Tidevolumens. Durch den verstärkten Wasseraustausch vertiefen sich die großen Rinnensysteme und dehnen sich weiter nach Norden aus. Besonders die bis dahin wenig ausgeprägte Flutstromrinne des Kalfamergats vertieft sich infolge einer gegenüber den übrigen Teilgebieten überproportional starken Zunahme des Tidevolumens deutlich und dehnt sich im Zustand 1998 erheblich nach NNW aus. Damit dringt das Kalfamergat an der Ostspitze von Juist in die Bereiche vor, in denen sich Sedimente zu Sandbänken formieren, um dann in Form von Platen den Riffbogen zu „durchwandern“.

Durch diese Entwicklung wird nicht nur die Bildung von Sandbänken, sondern auch deren räumliche Ausdehnung nach Osten behindert. Dadurch nimmt der „Sedimentdruck“ auf das Busetief so weit ab, das es zunehmend nach Westen verschwenkt und nicht mehr ausschließlich in das Norderneyer Seegat entwässert. Auffällig in diesem Bereich ist die starke Zergliederung des Rinnensystems. So stellt der nördlichste Rinnenabschnitt, der der Anlage des Spaniergat folgt, zeitweise die Verlängerung des Kalfamergats dar, oder aber dient dem Busetief als Rinnenfortsetzung. Welcher Zustand dominiert hängt wahrscheinlich davon ab, ob und in welchem Umfang sich Platen abgelöst haben. Je nach Situation entwässert somit das Busetief zwischen 1975 und 1998 verstärkt in das Norderneyer Seegat oder aber mehr oder weniger breitgefächert nach NO über den Riffbogen. Insgesamt läßt aber die Entwicklung erwarten, dass Busetief und Kalfamergat gemeinsam in die nach NNW verlaufenden Strukturen des Spaniergats münden.

Aber auch ohne eine solche Entwicklung ist davon auszugehen, dass sich das Kalfamergat mit zunehmendem Tidevolumen weiter nach NNW ausdehnt und in immer stärkerem Maße die Bildung ausreichend großer und hoher Platen behindert. Folglich werden sich kleinere Sandbänke ablösen, die auf ihrer „Wanderung“ durch den Riffbogen bereits im Bereich des Schluchters erheblichen hydrodynamischen Kräften ausgesetzt sein werden und dabei weiter an Höhe und Ausdehnung verlieren. Bei Fehlen entsprechend großer und hoher Platen im Scheitelbereich des Riffbogens, die sonst bewirkt haben, dass das Norderneyer Seegat nach NO abgedrängt wurde, kann sich das Seegat noch weiter nach NW verlagern und vermehrt über das sich vertiefende

Dovetief entwässern. Schwenkt zudem das Busetief wieder stärker nach Osten und mündet in das Seegat, wäre dieser Prozess sogar noch deutlich ausgeprägter.

Insgesamt verliert der Riffbogen durch diese Entwicklung nicht nur mehr und mehr seine ehemals kompakte Form, sondern Sandbänke und Platen müssen zunehmend größere Wege zurücklegen und sind dabei in immer stärkeren Maße Umlagerungsprozessen unterworfen. Als weitere Folge dürfte sich auch die Anlandungszone der Platen vor Norderney deutlich weiter nach Osten verschieben. Eine Ursachendeutung für die Abschwächung des Riffbogens ist jedoch sehr schwierig: sind es überregionale Einflüsse (Klimaveränderungen, Meeresspiegelanstieg), regionale (Änderungen des Forminventars im Bereich des Einzugsgebietes des Norderneyer Seegats) oder lokale (Häufigkeit der Sandentnahmen für die Norderneyer Strandauffüllungen) ?

Nicht zuletzt als Folge der NW-Verlagerung des Norderneyer Seegats könnte relativ kurzfristig ein Durchbruch des Schluchters zum Seegat mit Tiefen um SKN-5m bis SKN-6m erfolgen. Über diese Auswirkungen auf den Seegang wird auf die Untersuchungen der FSK (Hydrographie des Küstengebietes) verwiesen. Der Abschlußbericht wird im Herbst 2000 vorliegen.

Auf der Grundlage dieser dargestellten Entwicklung wäre als „worst-case“-Szenarium folgende morphologische Situation denkbar:

- o Durchbruch des Schluchters zum Seegat mit maximalen Tiefen um SKN-7 m.
- o Vertiefung des Dovetiefs auf etwa SKN-6 m.
- o Tiefenzunahme im nordwestlichen Vorstrandbereich von Norderney um etwa 1m.
- o Mittlere Höhenabnahme des Riffbogens im Mündungsbereich des Norderneyer Seegats um rd. 1 m bezogen auf den Zustand von 1995.

6 Literatur

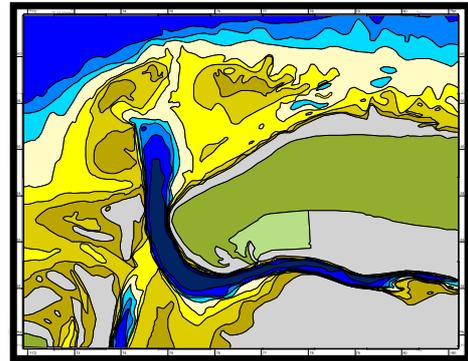
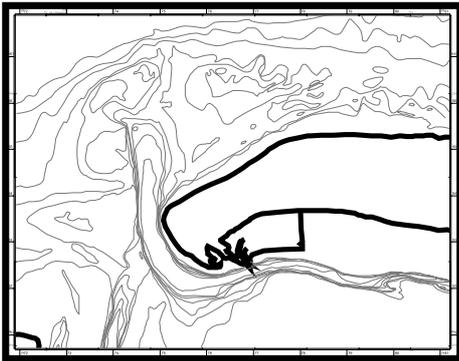
- HÜTTEMEYER, P., A. KOOPMANN, H. KUNZ & M. PUSCHMANN (1999): Schlußbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben „Morphologische Gestaltungsvorgänge im Küstenvorfeld der Deutschen Bucht“, in Bearbeitung.
- JETSES, U. & STEPHAN, H.-J. (1999): Sonderuntersuchungen für Vorarbeiten zum Inselschutz Ostfriesische Inseln – Morphologische Entwicklung des Norderneyer Seegats (Zwischenbericht). Dienstber. Forschungsstelle Küste 15/1999
- KUNZ, H.; NIEMEYER, H.D.; GOLDENBOGEN, R. & SCHROEDER, E. (1998): Forschungsvorhaben WADE, Abschlussbericht. – Forschungsvorhaben MTK 0508
- LÜDERS, K. & G. LUCK (1976): Kleines Küstenlexikon. Lax Verlag, Hildesheim.
- NIEMEYER, H.D. (1992): Die ursächliche Deutung von Transportphänomenen als Gestaltungsgrundlage für Strandauffüllungen. Die Küste, Heft 54, S. 53-92.
- NIEMEYER, H.D. & R. KAISER (1997): Variationen im lokalen Segangsklima infolge morphologischer Änderungen im Riffbogen. Berichte der Forschungsstelle Küste, Bd.41, S. 107-117.
- STEPHAN, H.-J. (1993): Morphologie des Norderneyer Seegats und des zugehörigen Einzugsgebietes seit 1935. Dienstbericht Forschungsstelle Küste, 18 Seiten, 23 Anlagen.

7 Anlagen

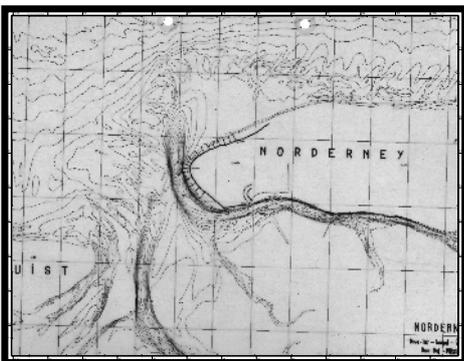
- Anlage 1: ArcView Umwandlung in vergleichbare Datenformate
- Anlage 2: Entwicklung Riffbogen 1932 bis 1971
- Anlage 3: Entwicklung Riffbogen 1975 bis 1998
- Anlage 4: Tiefendifferenz-Karten
- Anlage 5: Rinnenverlagerungen des Norderneyer Seegats
- Anlage 6: Profildarstellungen des Riffbogens
- Anlage 7: Flächenentwicklung des gesamten Riffbogens
- Anlage 8: Flächenentwicklung im Riffbogen für die Teilbereiche A bis C
- Anlage 9: Flächenentwicklung im Riffbogen für die Teilbereiche D bis F
- Anlage 10: Volumenentwicklung des gesamten Riffbogens
- Anlage 11: Volumenentwicklung im Riffbogen für die Teilbereiche A bis C
- Anlage 12: Volumenentwicklung im Riffbogen für die Teilbereiche D bis F
- Anlage 13: Volumenentwicklung für separate Tiefenhorizonte (gesamter Riffbogen)
- Anlage 14: Volumenentwicklung für separate Tiefenhorizonte (Teilbereiche A bis F)
- Anlage 15: Übersicht der Teileinzugsgebiete (TG)
- Anlage 16: Verlagerungen der Teileinzugsgebietsgrenzen zwischen 1930 und 1998
- Anlage 17: Morphologische Veränderungen im Wateinzugsgebiet 1930 bis 1985
- Anlage 18: Morphologische Veränderungen im Wateinzugsgebiet 1995 und 1998
- Anlage 19: Wattniveauänderungen zwischen 1930/34 und 1998 (TG 1-9)
- Anlage 20: Wattniveauänderungen zwischen 1930/34 und 1998 (Wateinzugsgebiet)
- Anlage 21: Volumensummenkurve für das Einzugsgebiet Norderneyer Seegat
- Anlage 22: Volumensummenkurve für die Teilgebiete

ArcView Umwandlung in vergleichbare Datenformate

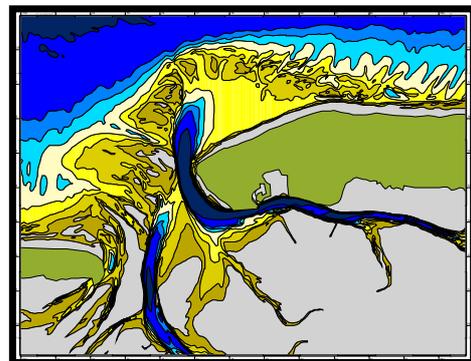
(1) Umwandlung Linien zu Polygon



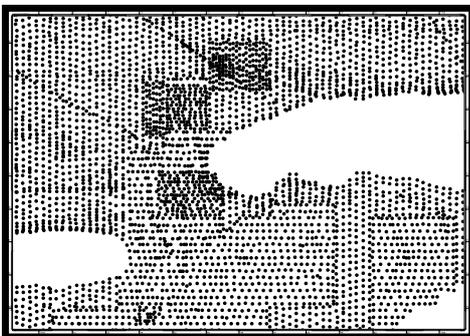
(2) Umwandlung gescanntes Bild zu Polygon



Georeferenzierung
Polygon-Digitalisierung



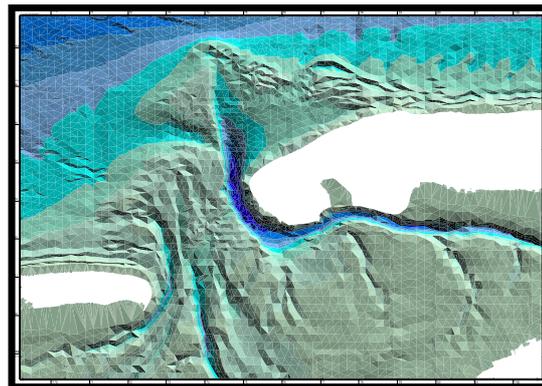
(3) Umwandlung Punkte / Linien (NN) zu TIN und GRID



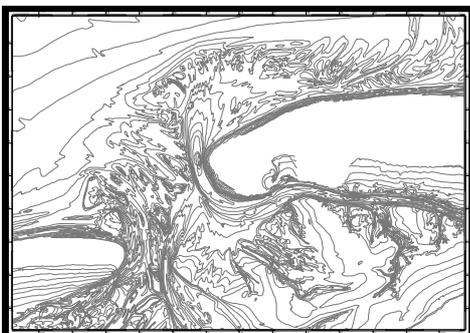
BSH-Daten



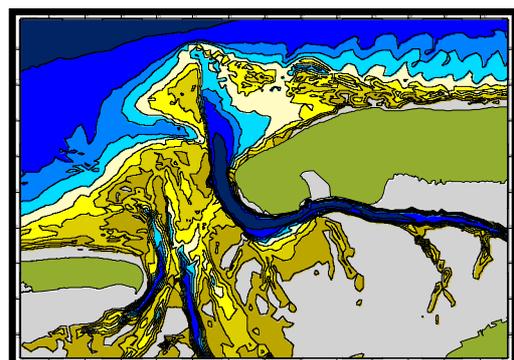
Dreiecksvermaschung (TIN)



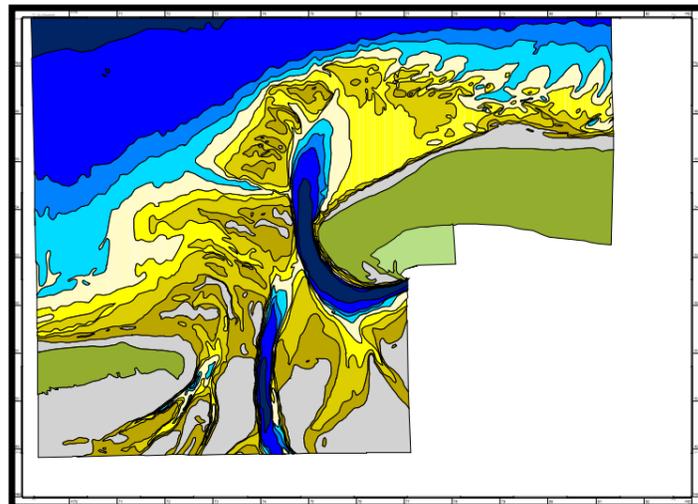
Berechnung eines
einheitlichen GRIDs



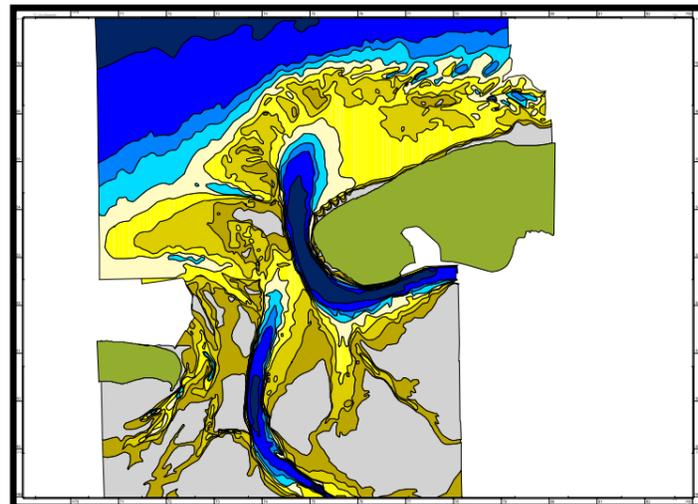
FSK 1960/1995; KFKI 1975; WSD 1990



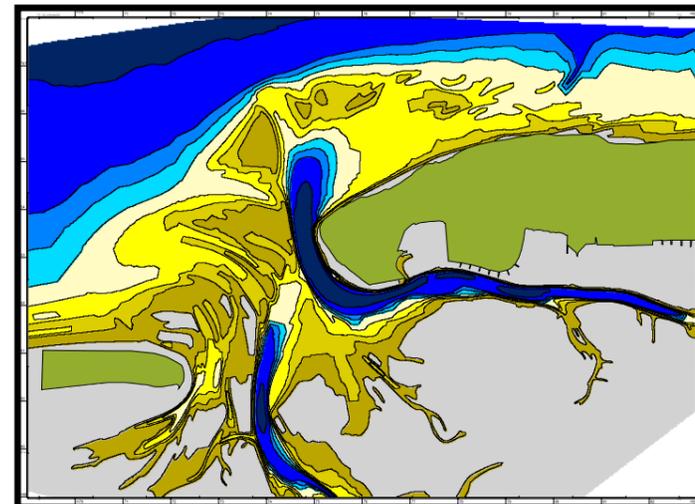
Entwicklung Riffbogen Norderney 1932 bis 1971



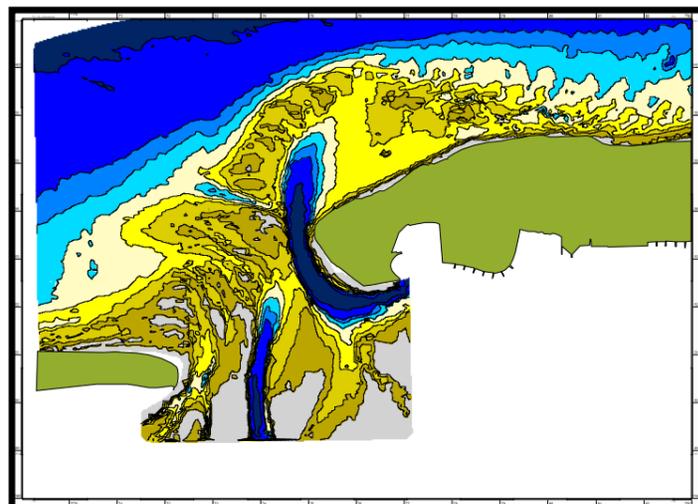
1932



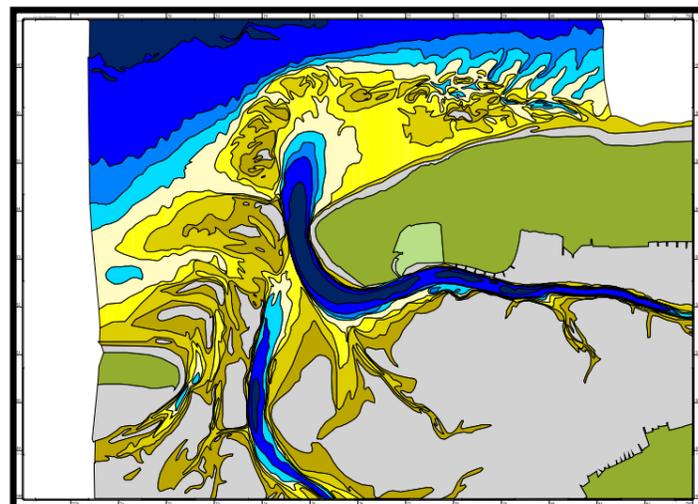
1949



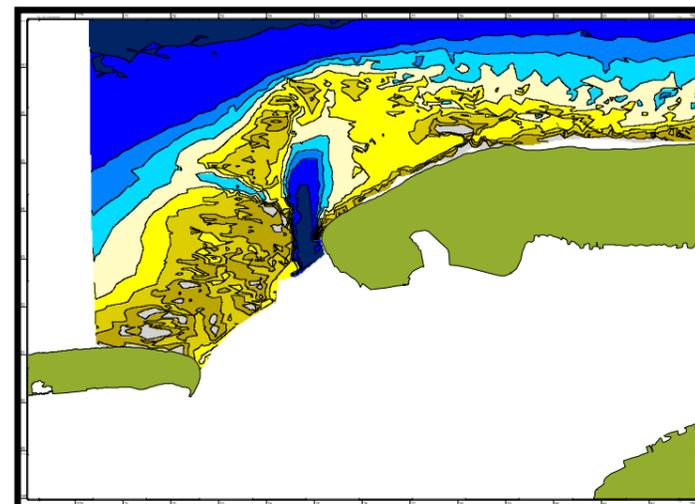
1960



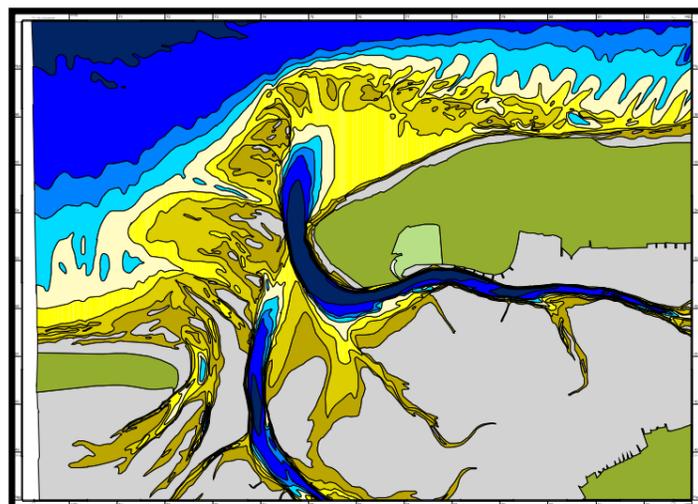
1936



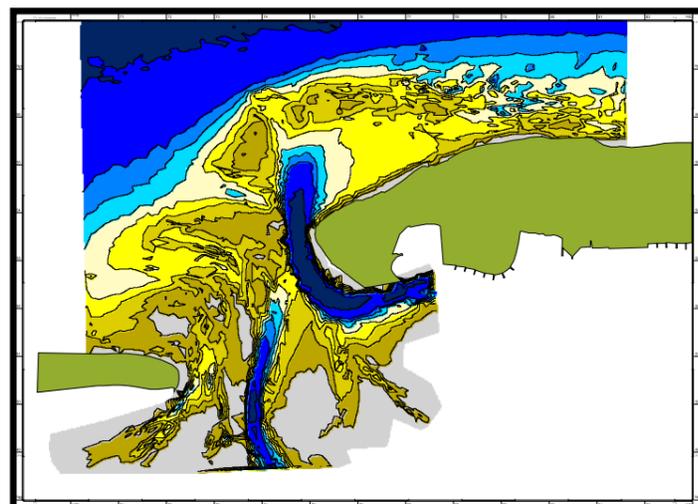
1951



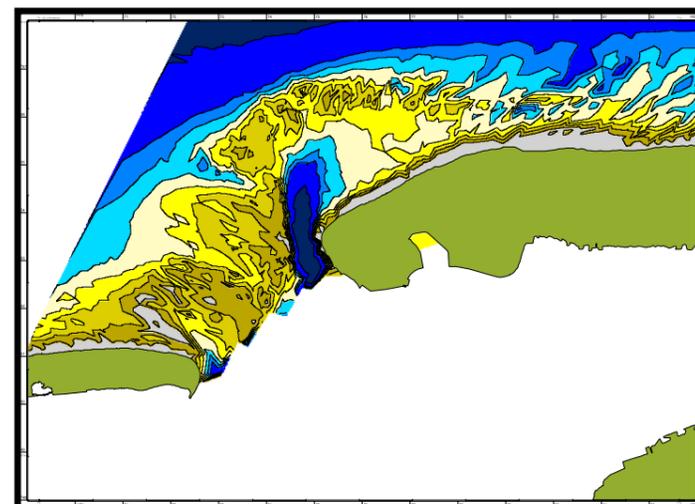
1964



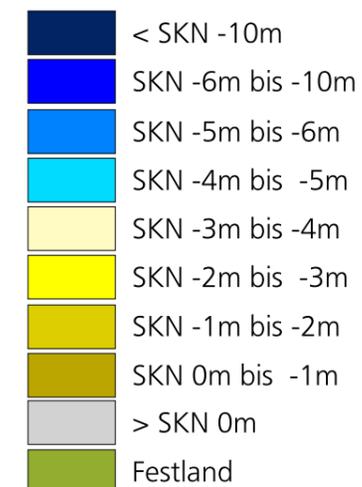
1939



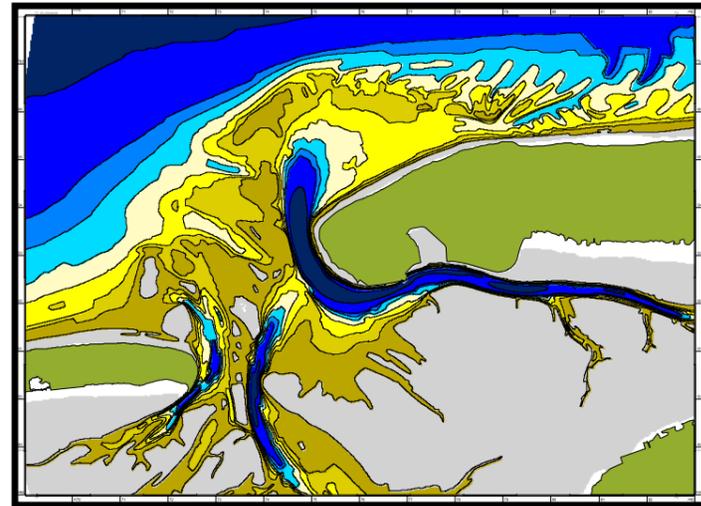
1955



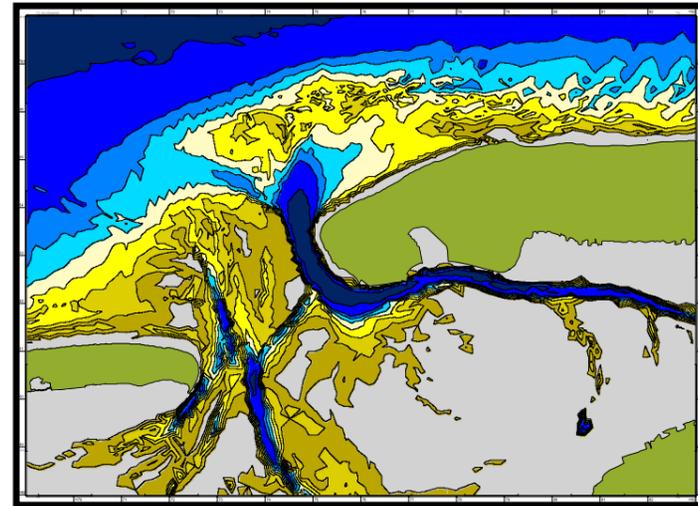
1971



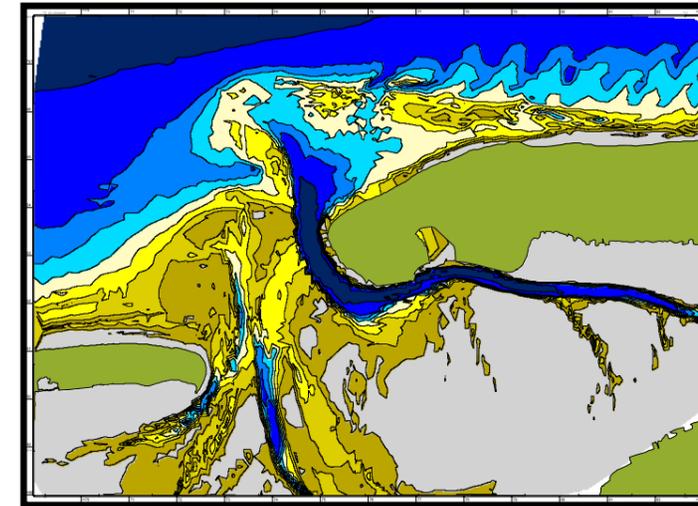
Entwicklung Riffbogen Norderney 1975 bis 1998



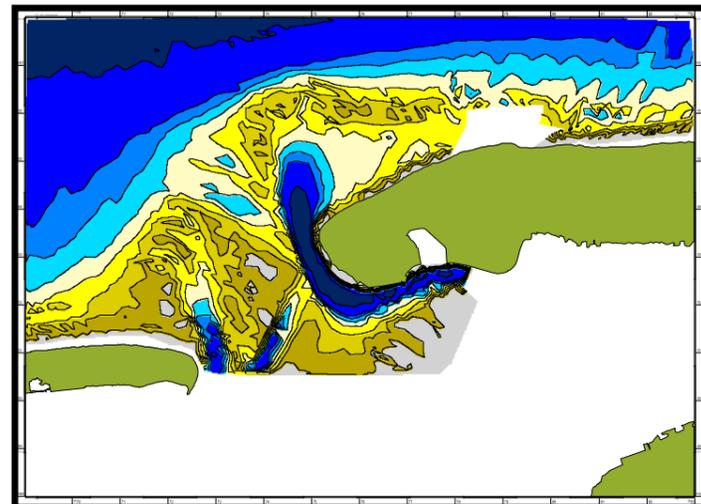
1975



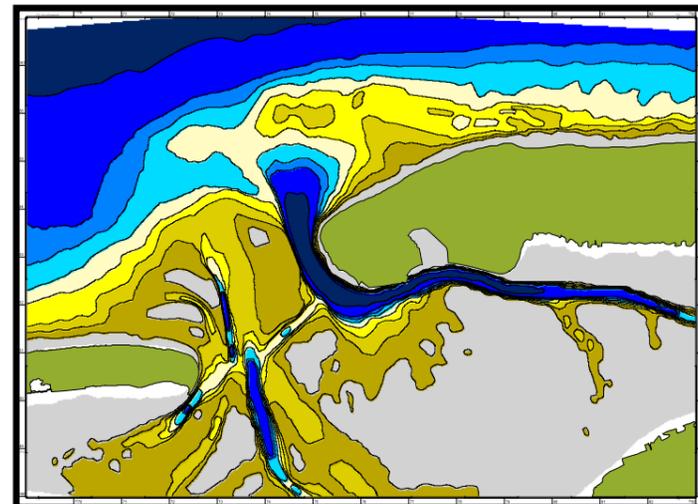
1985/86



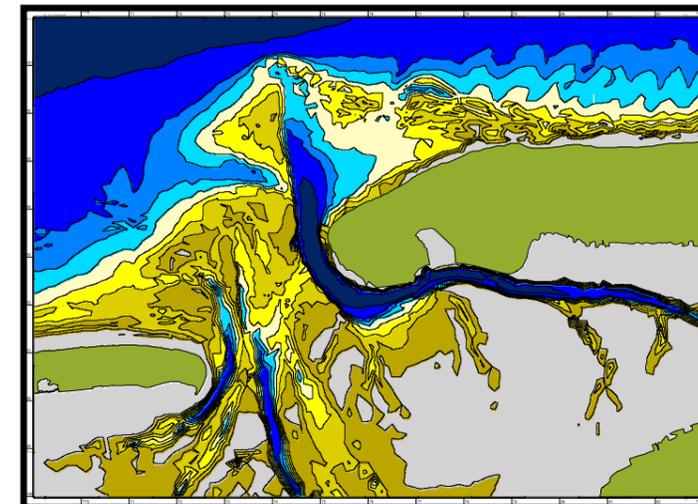
1995



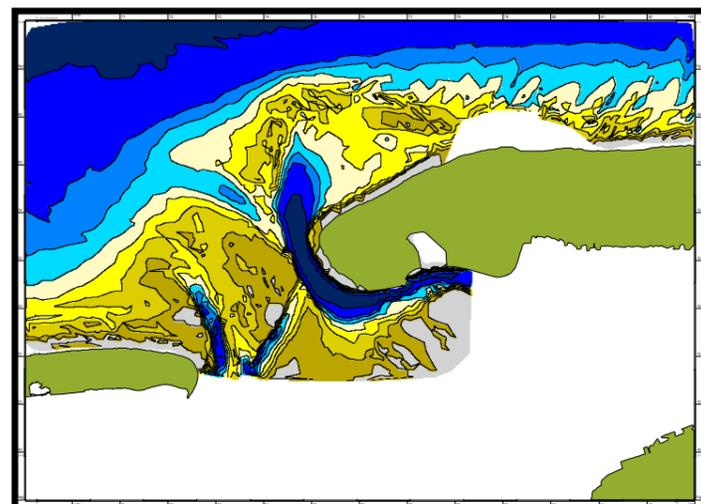
1979/80



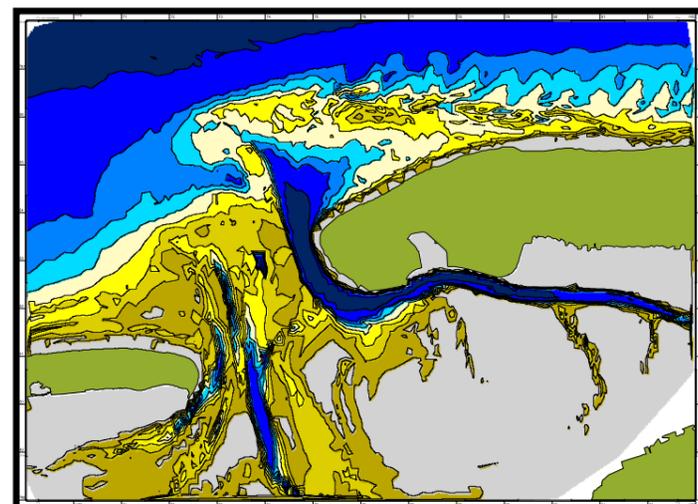
1990



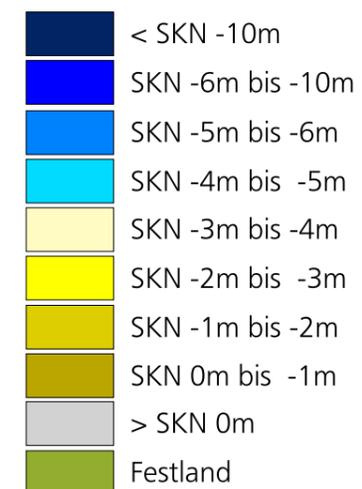
1998



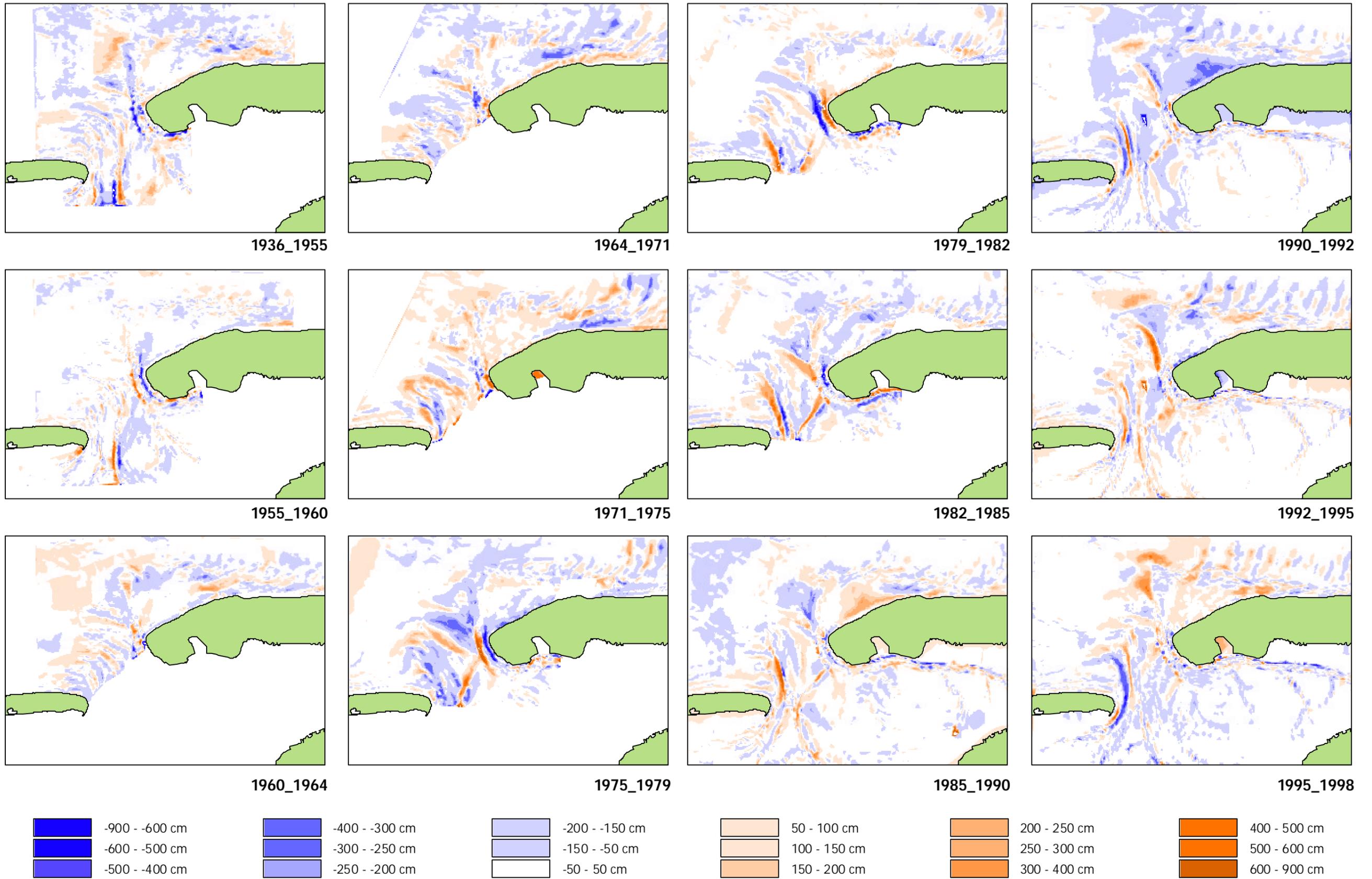
1982



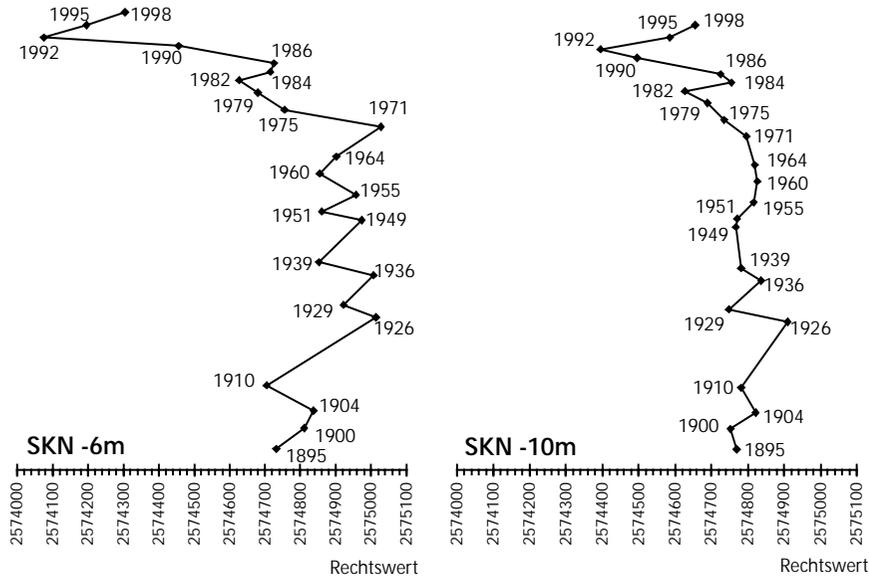
1992



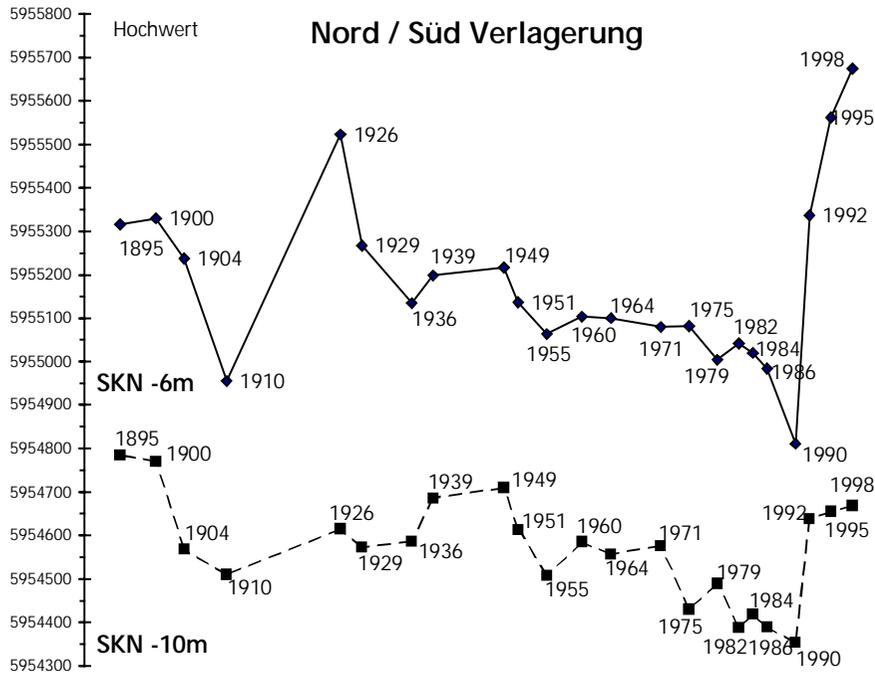
Tiefendifferenz - Karten



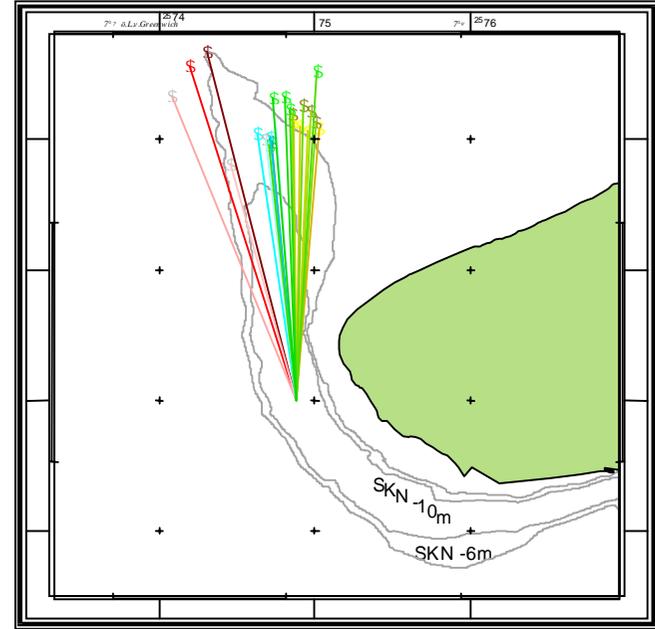
West / Ost Verlagerung



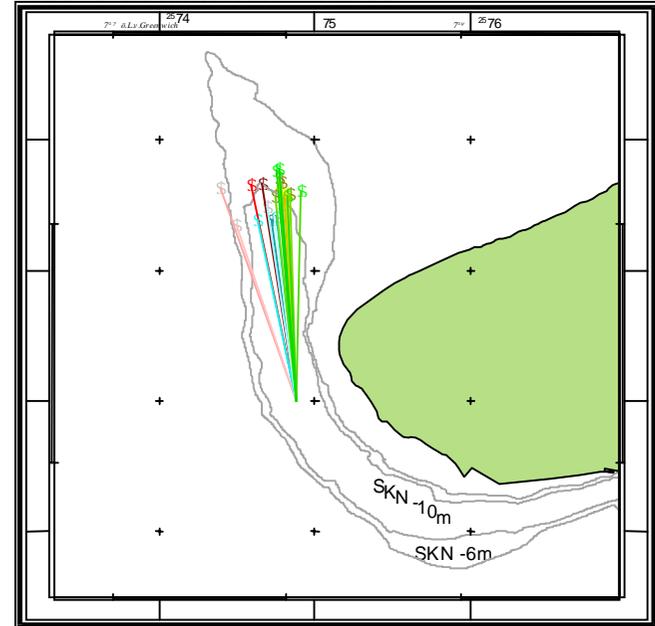
Nord / Süd Verlagerung

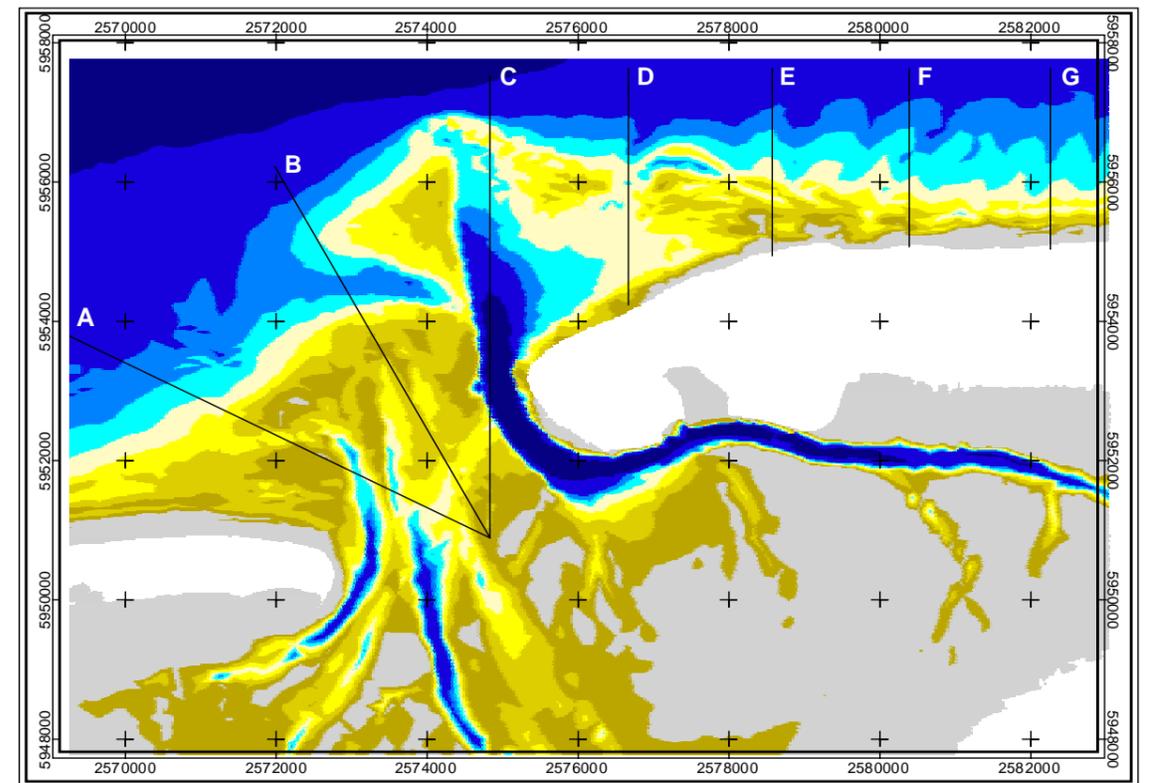
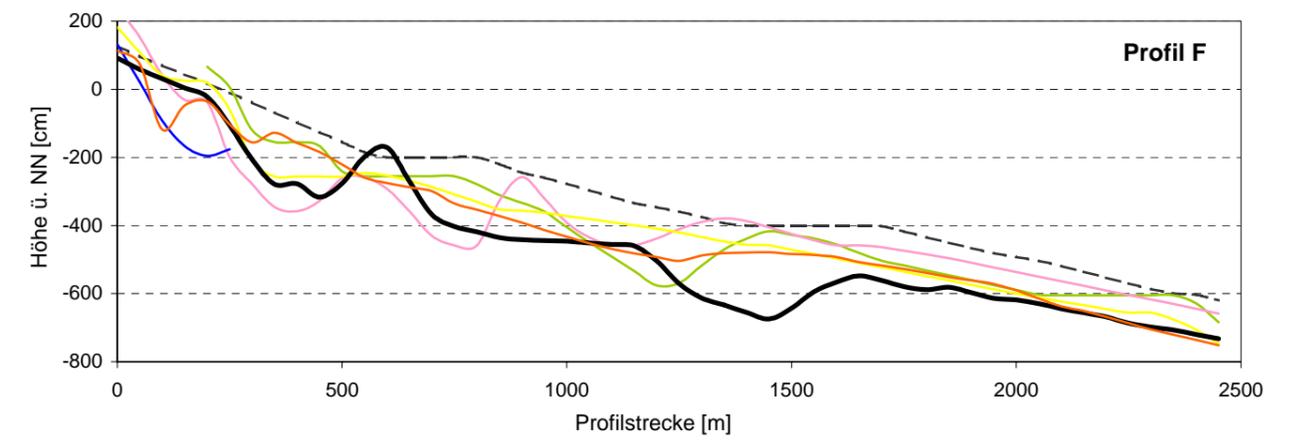
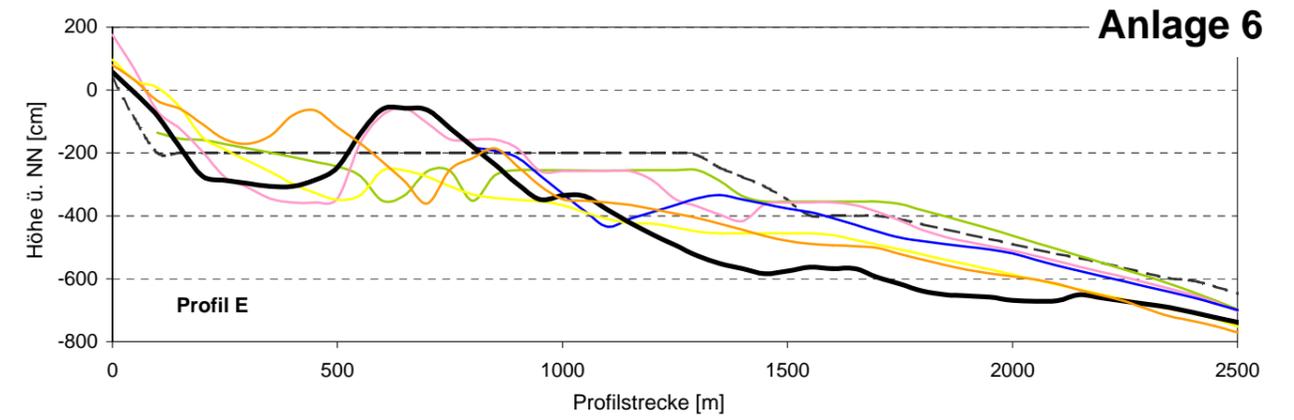
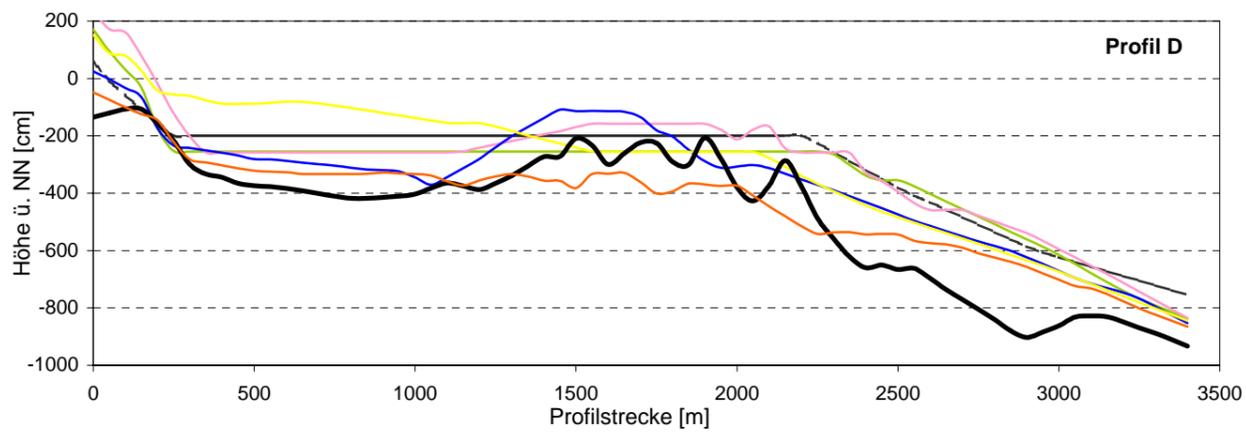
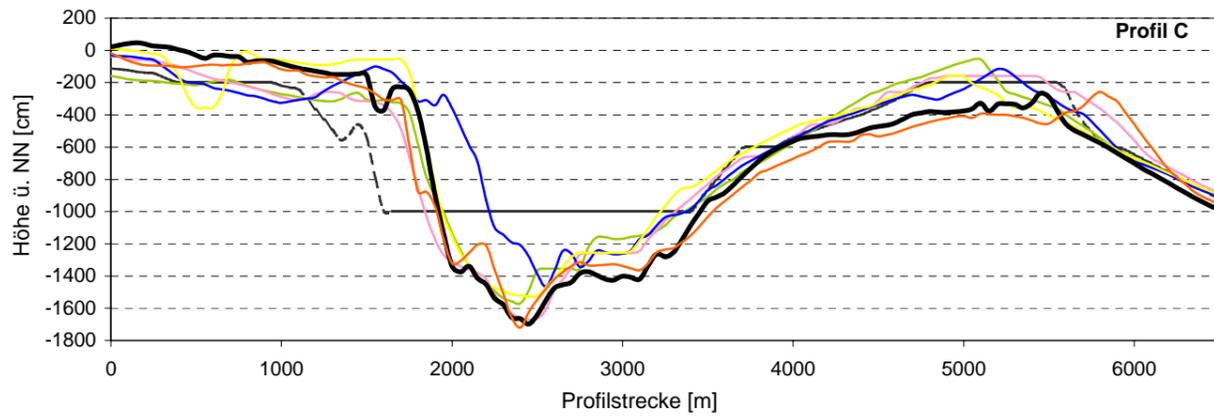
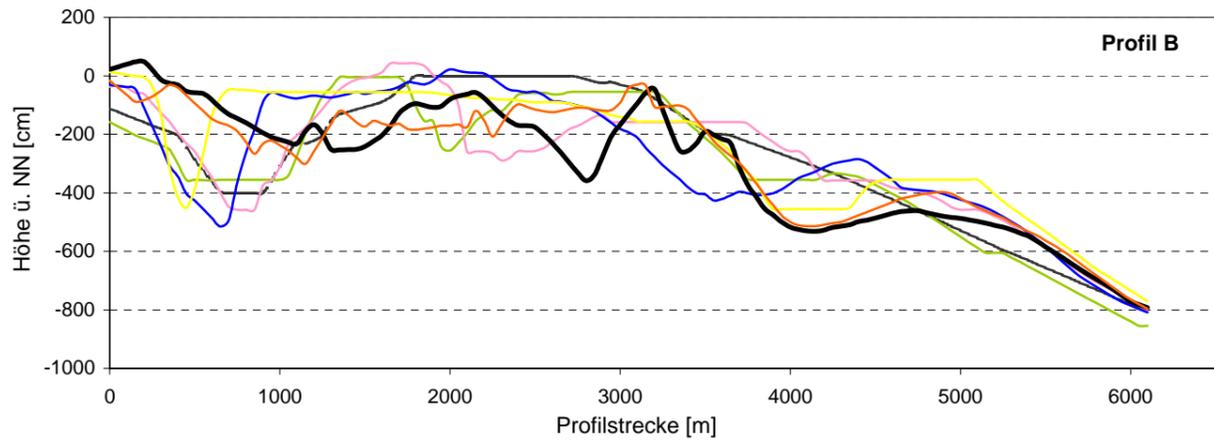
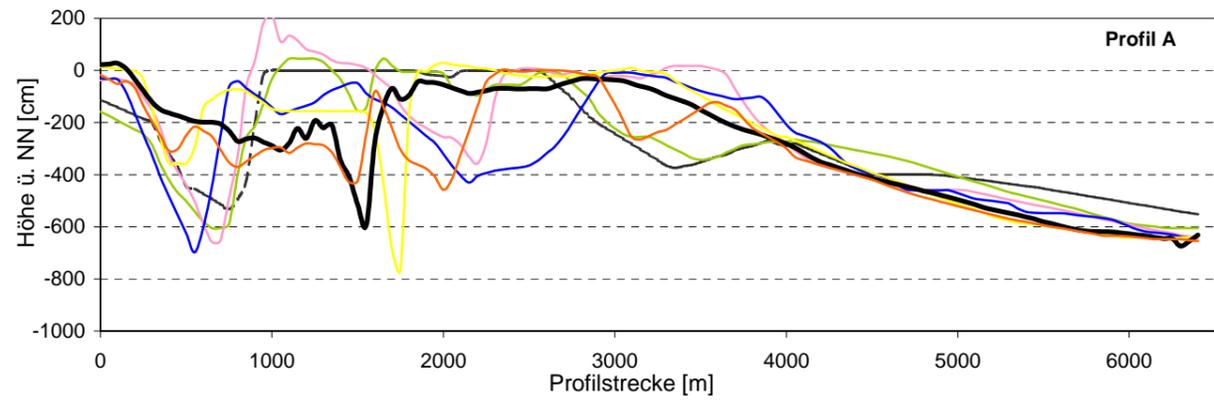


Verlagerung des SKN -6m Rinnenausläufers



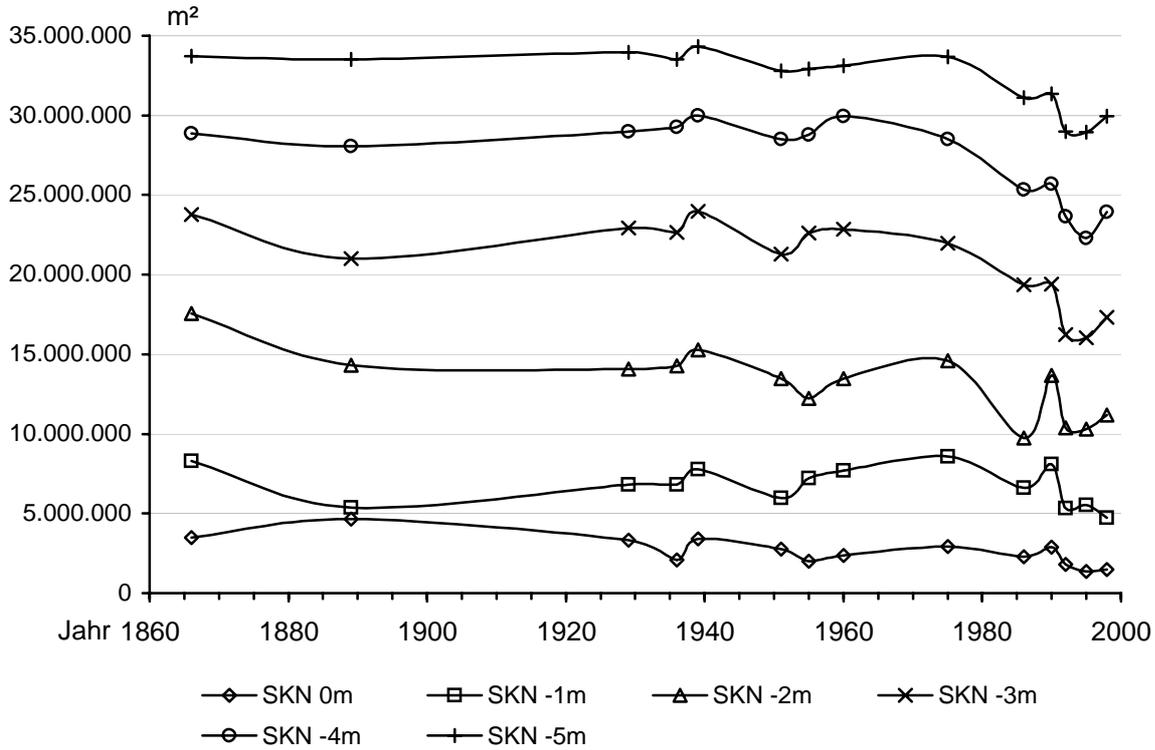
Verlagerung des SKN -10m Rinnenausläufers



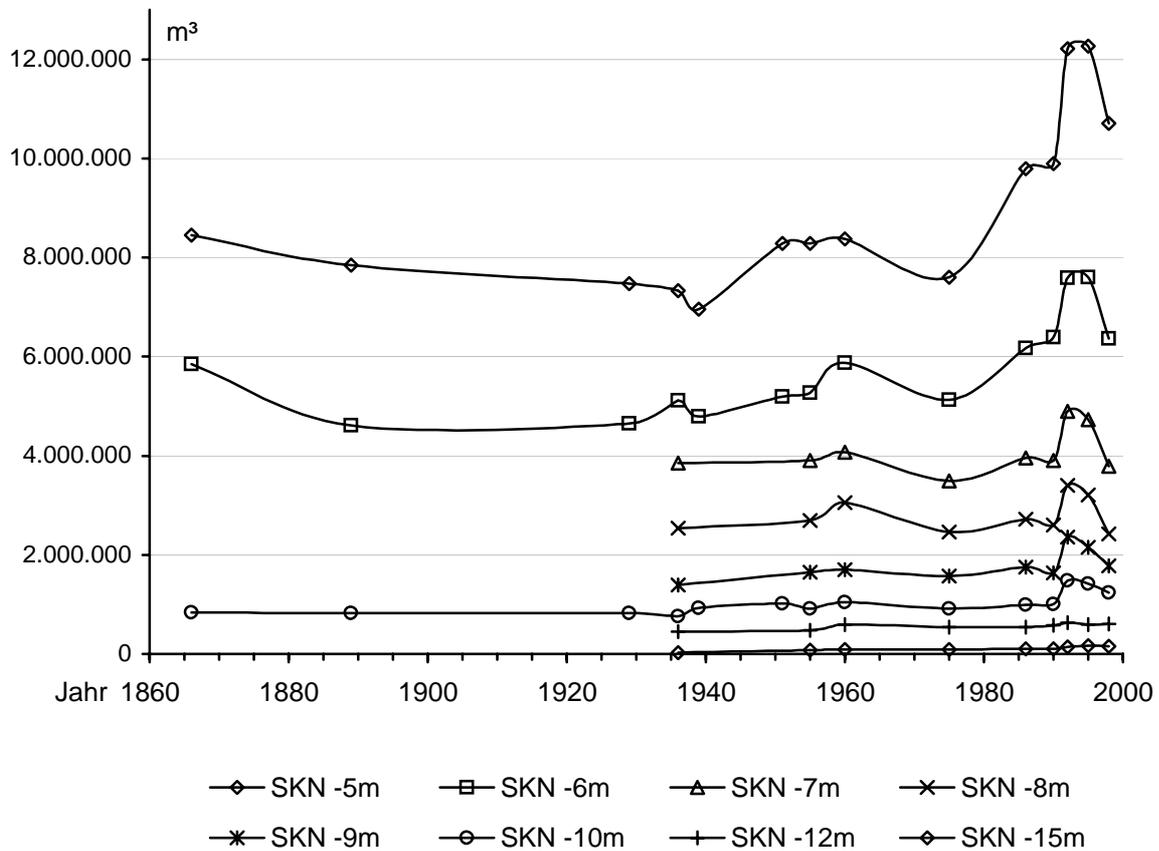


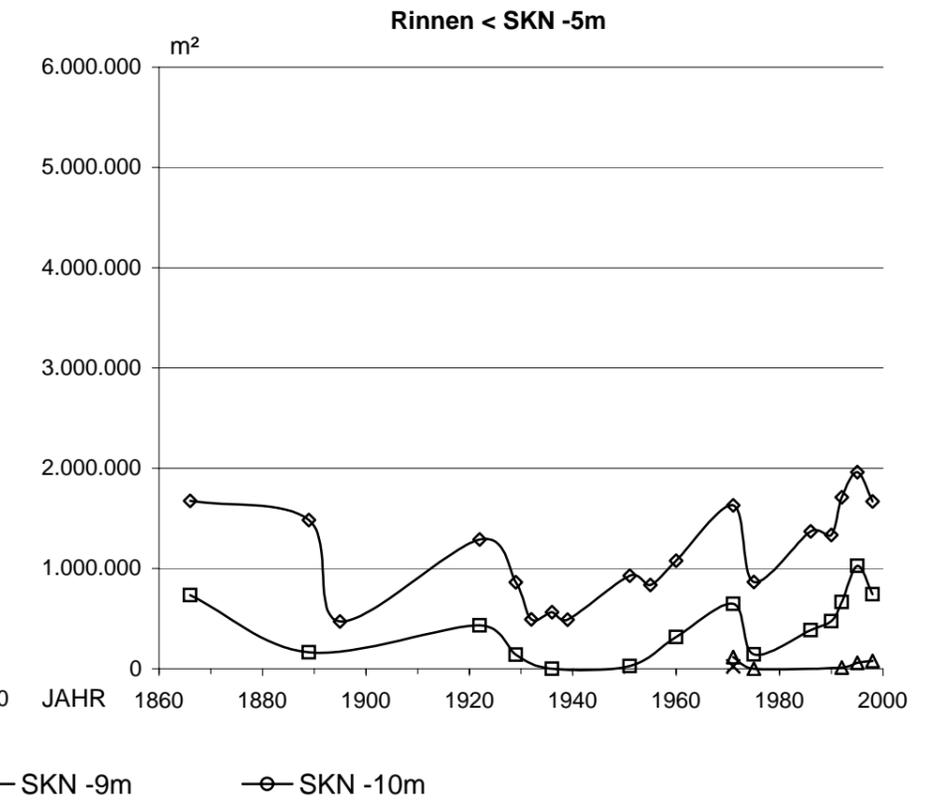
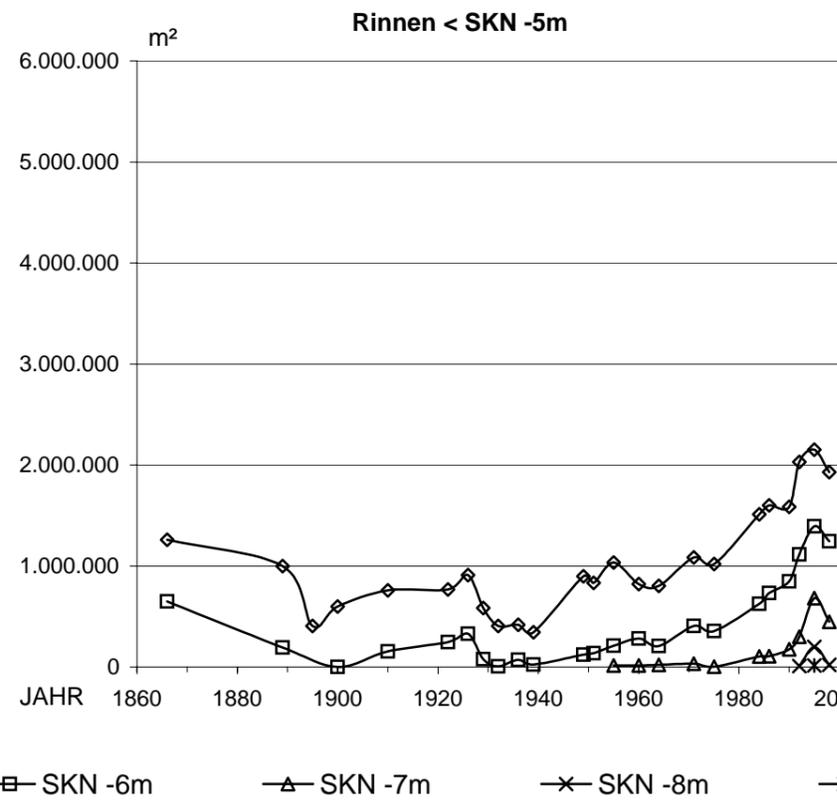
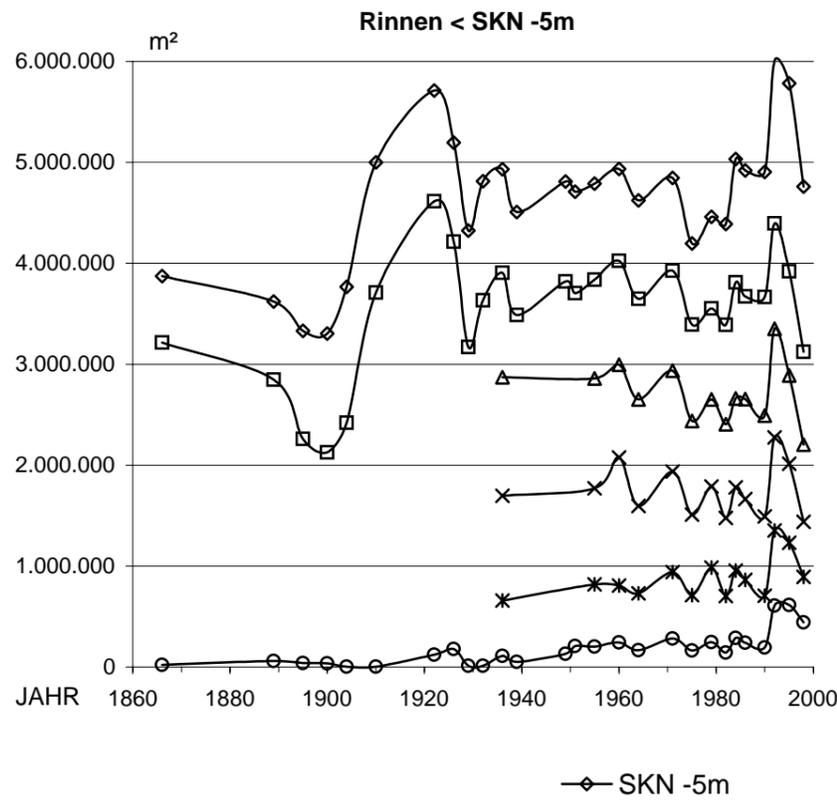
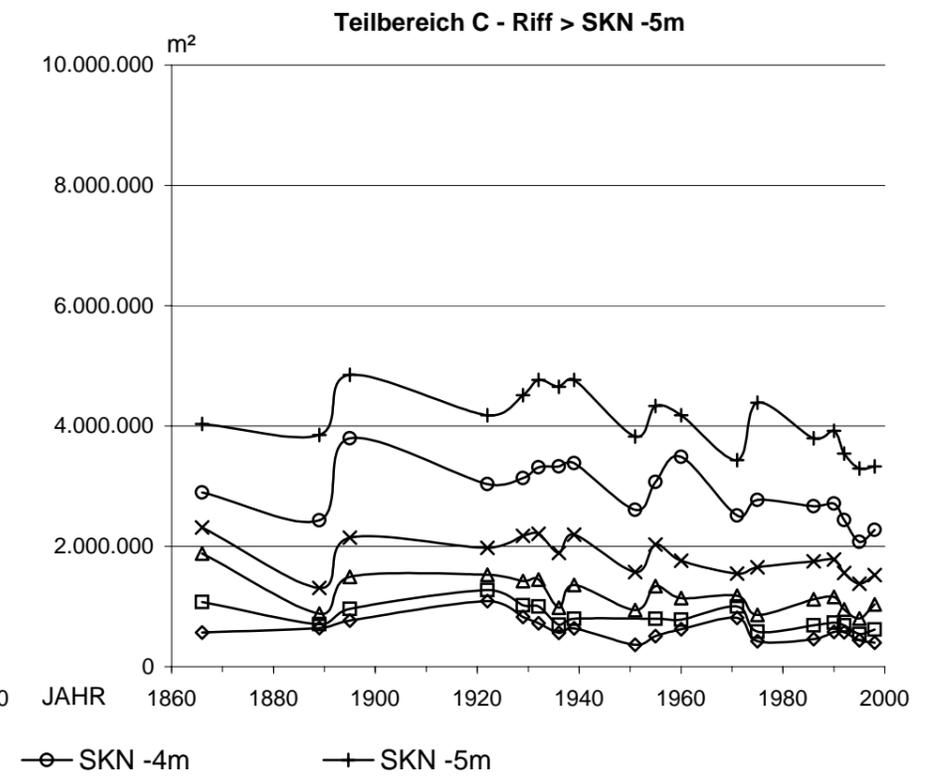
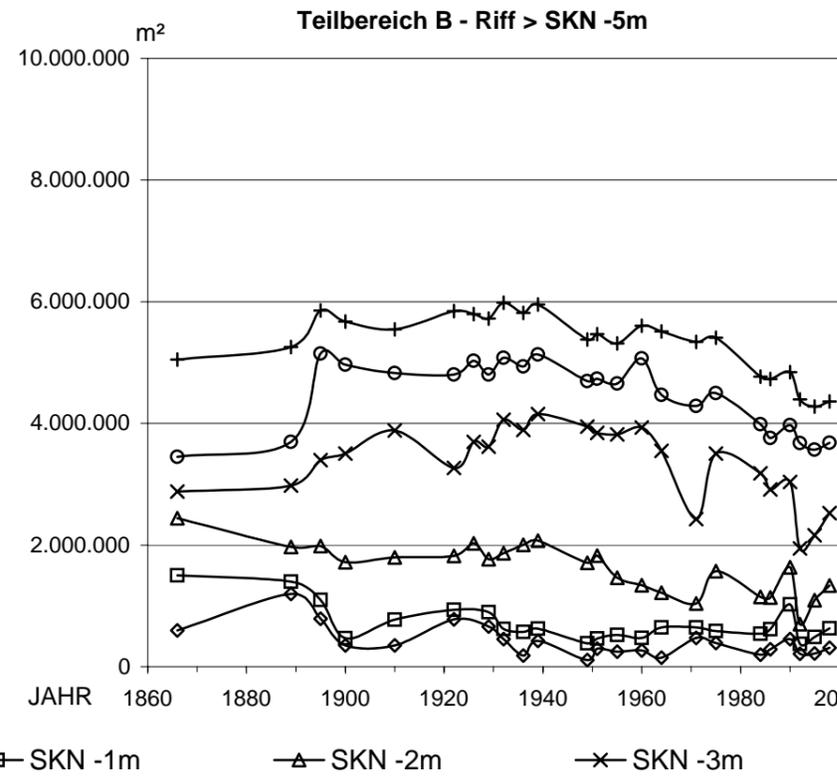
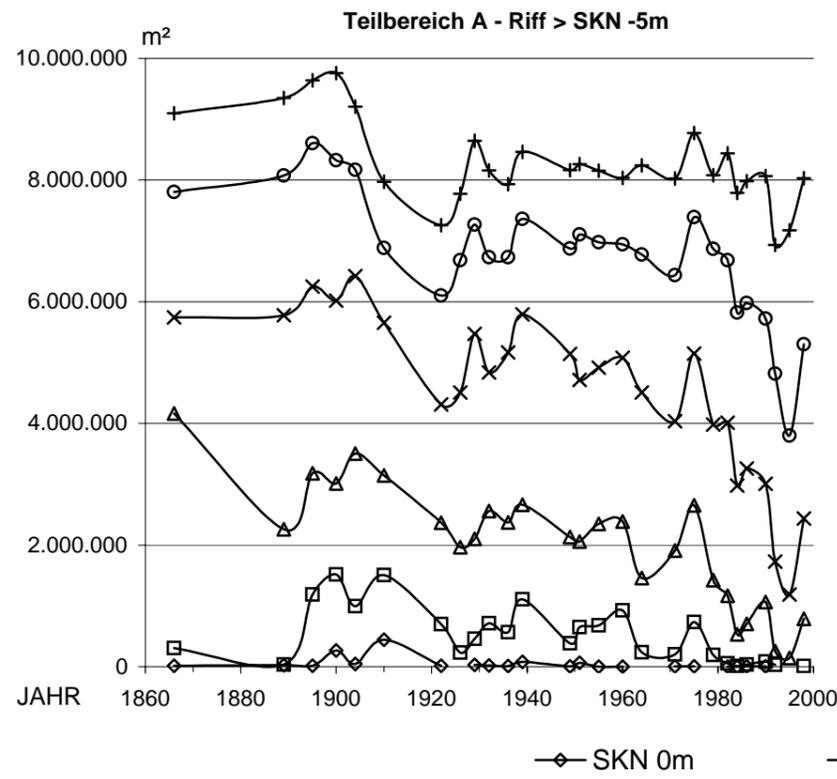
Anlage 7

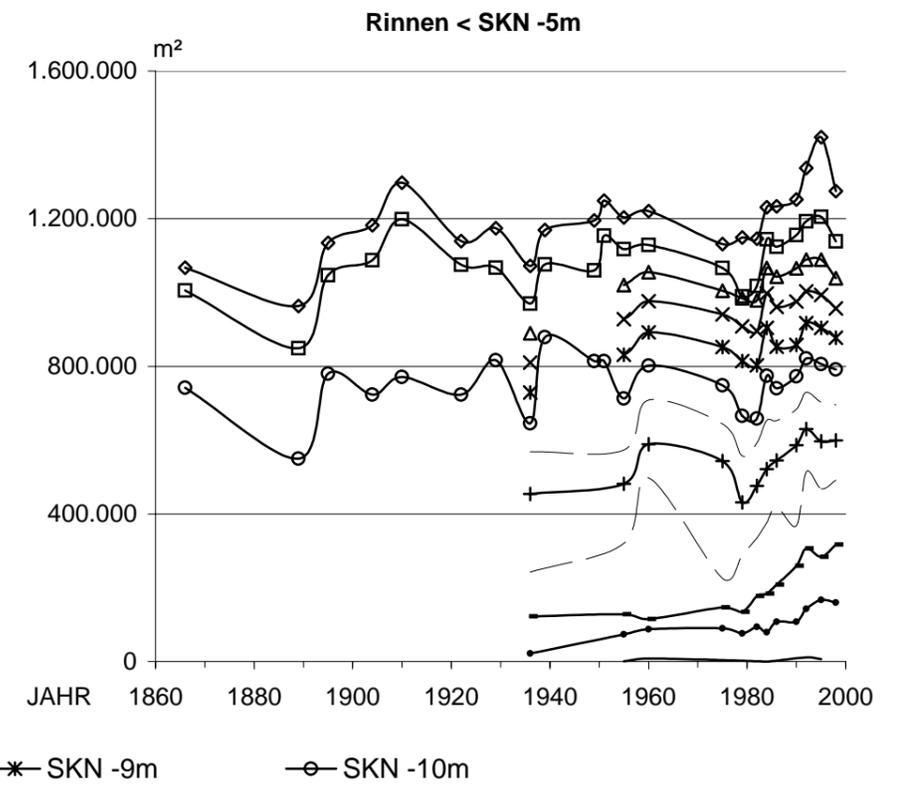
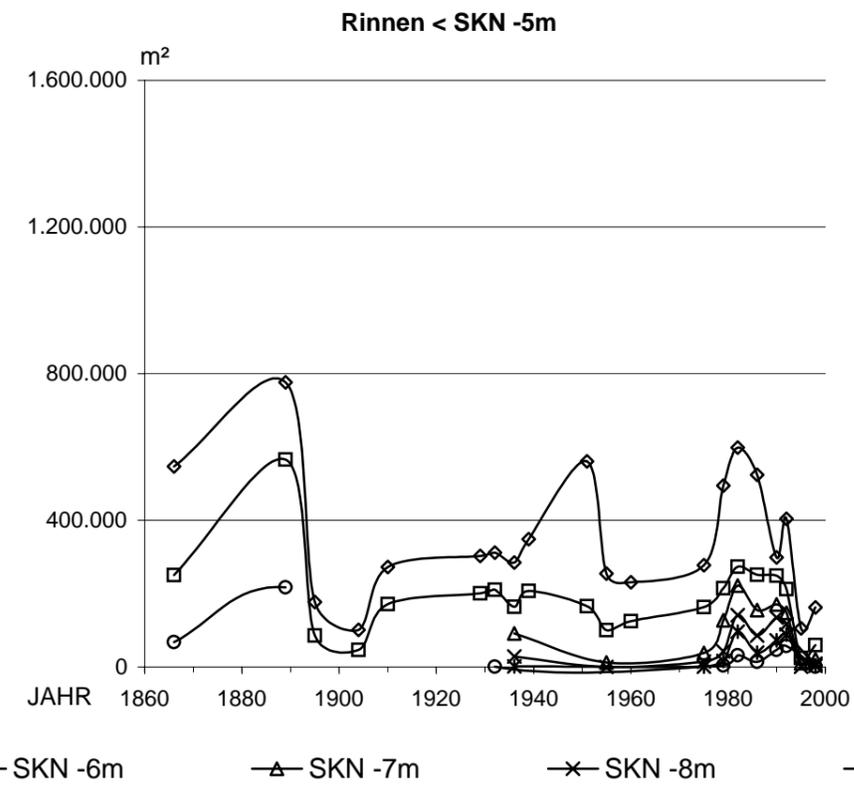
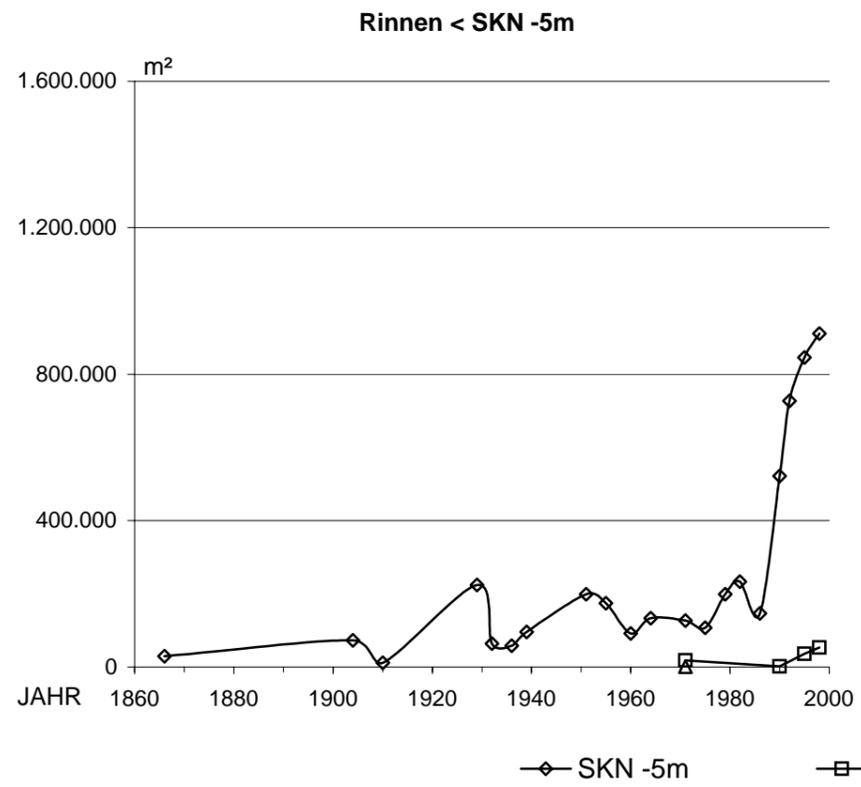
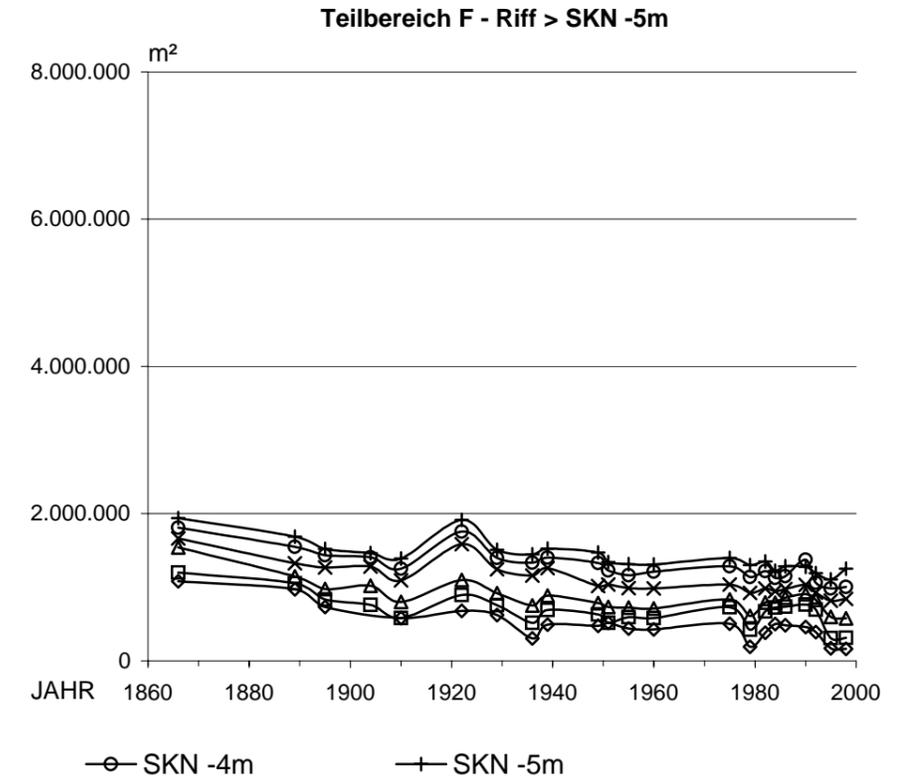
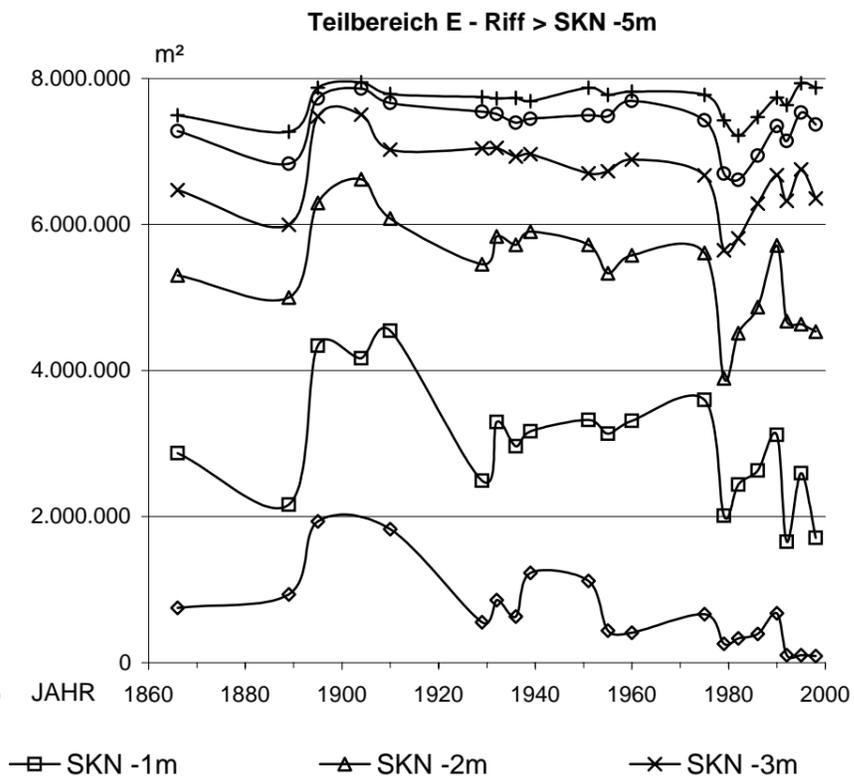
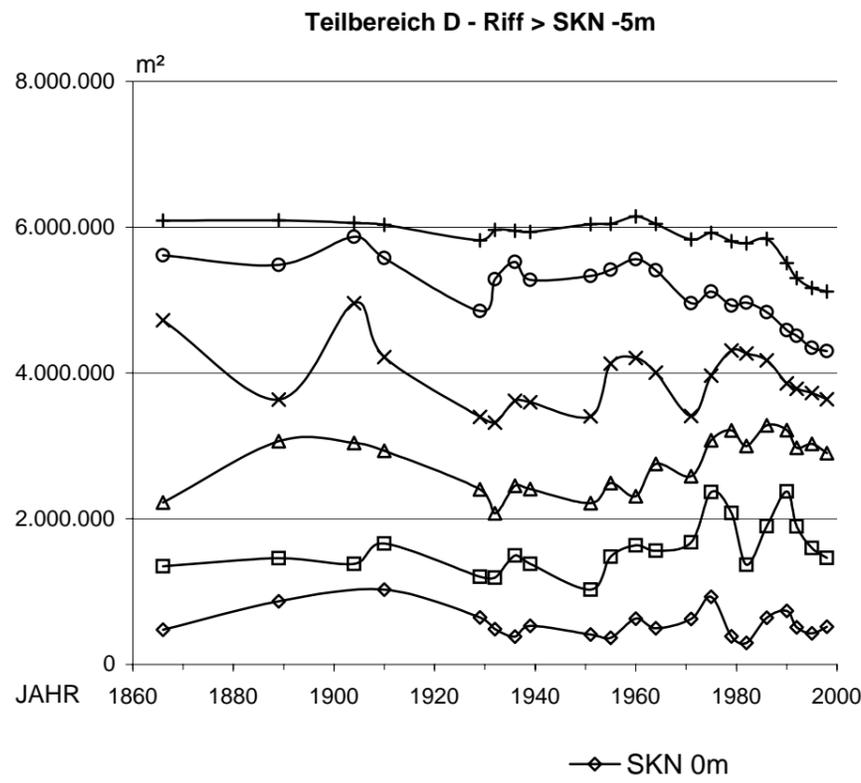
Flächenentwicklung Gesamtbereich [A-F] oberhalb SKN -5m



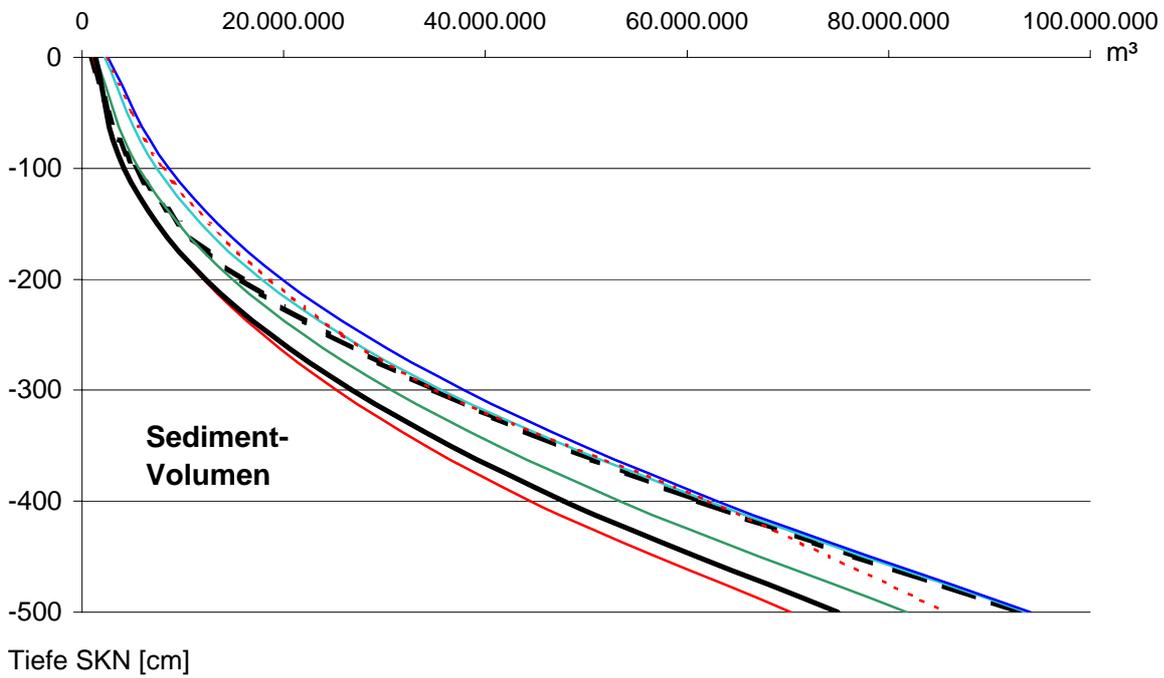
Flächenentwicklung Gesamtbereich [A-F] unterhalb SKN -5m



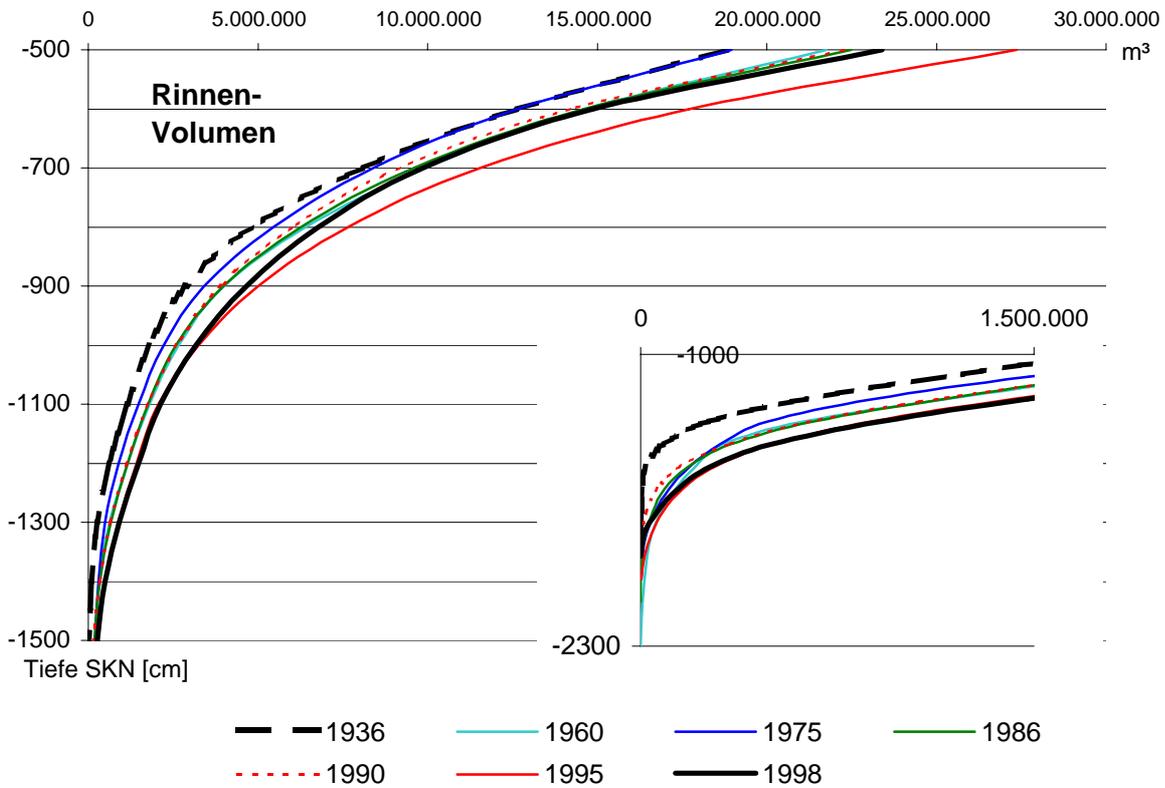


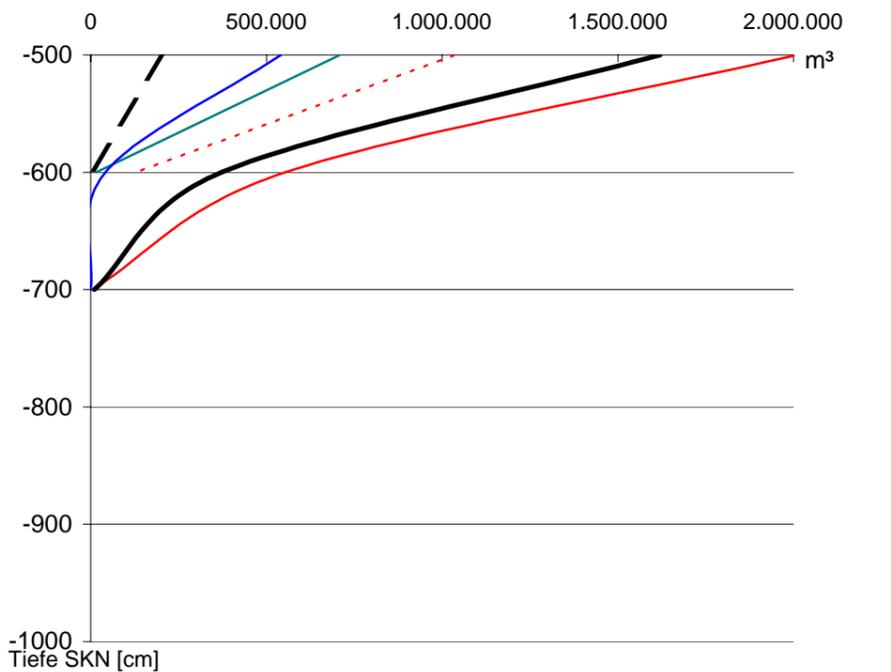
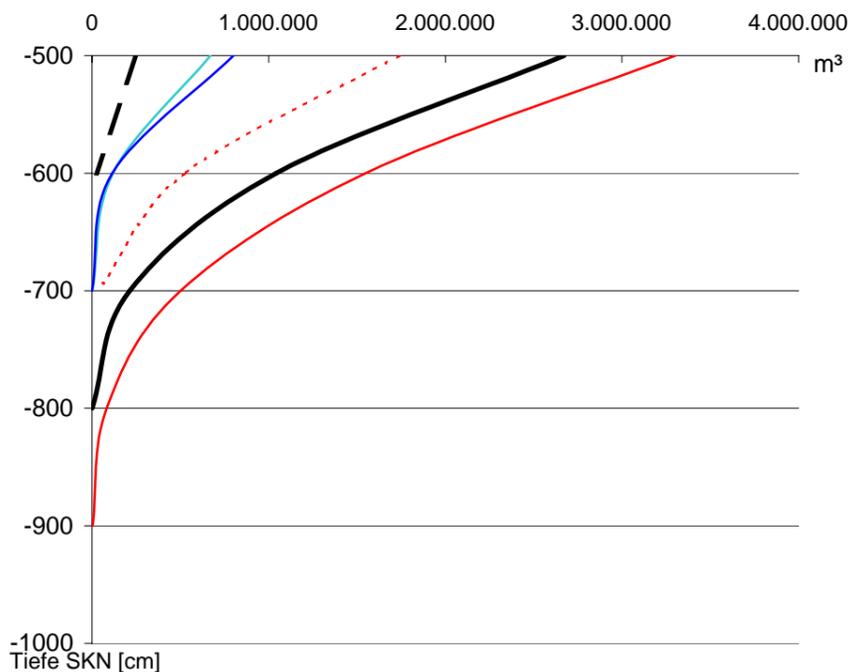
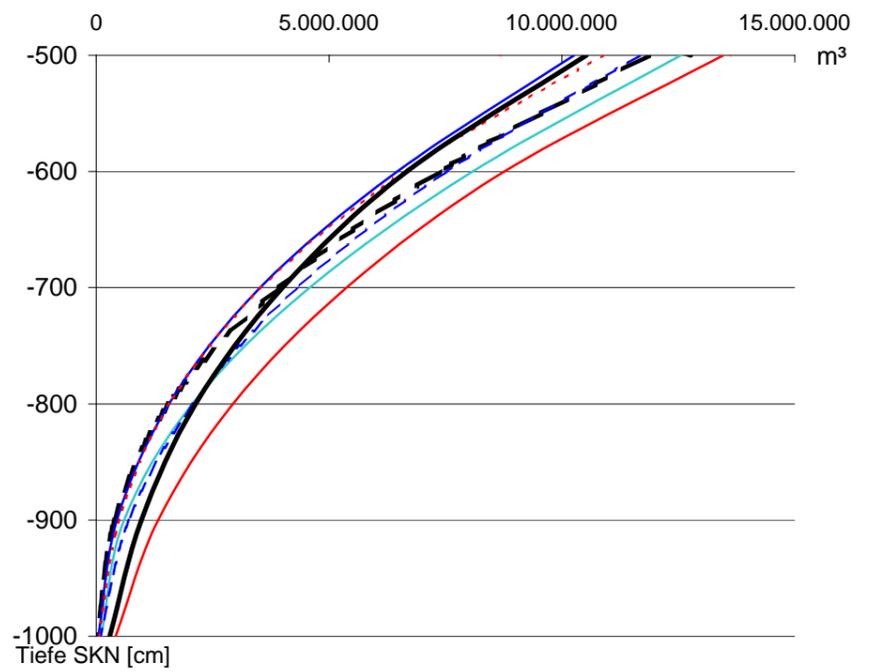
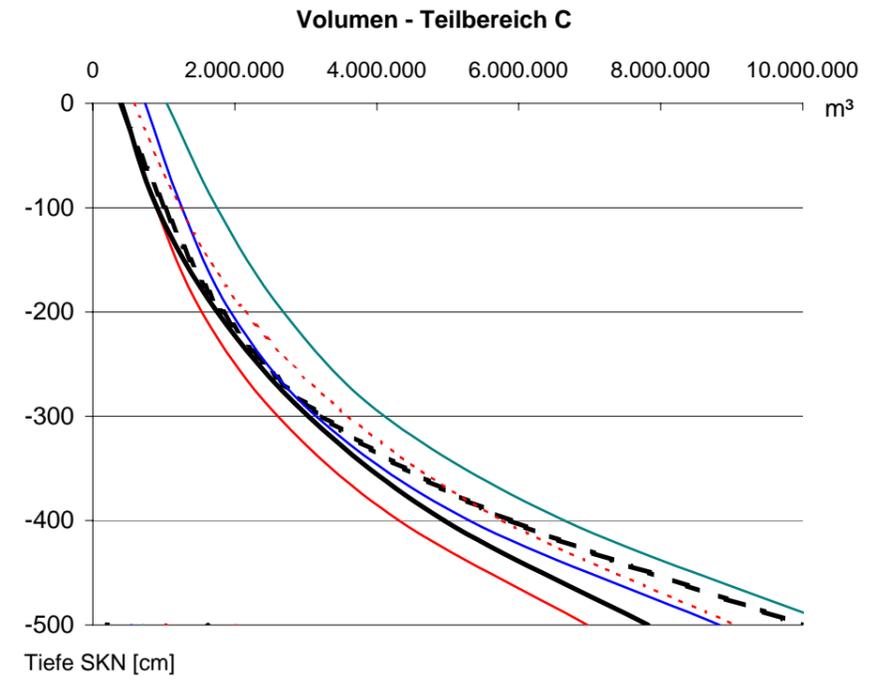
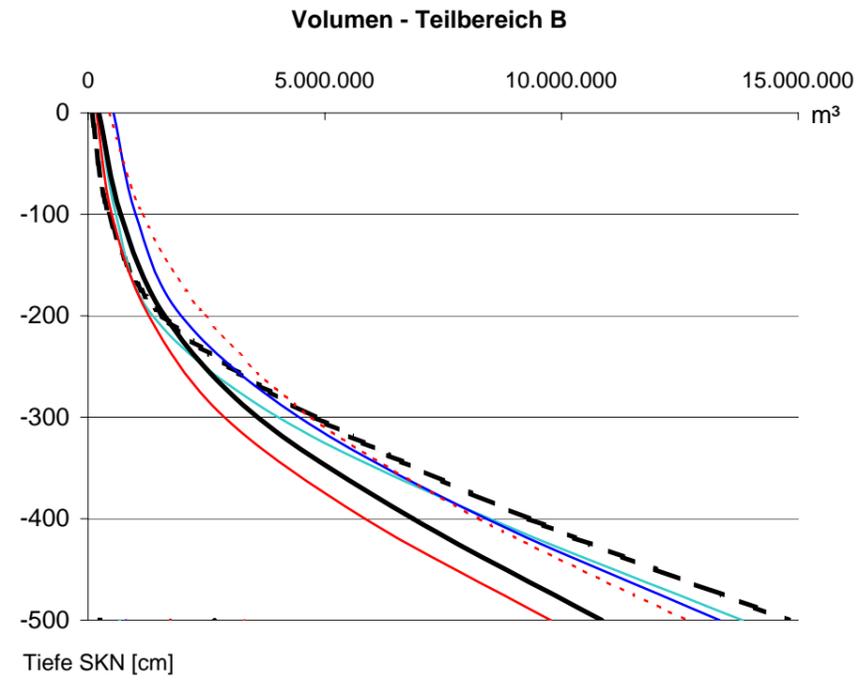
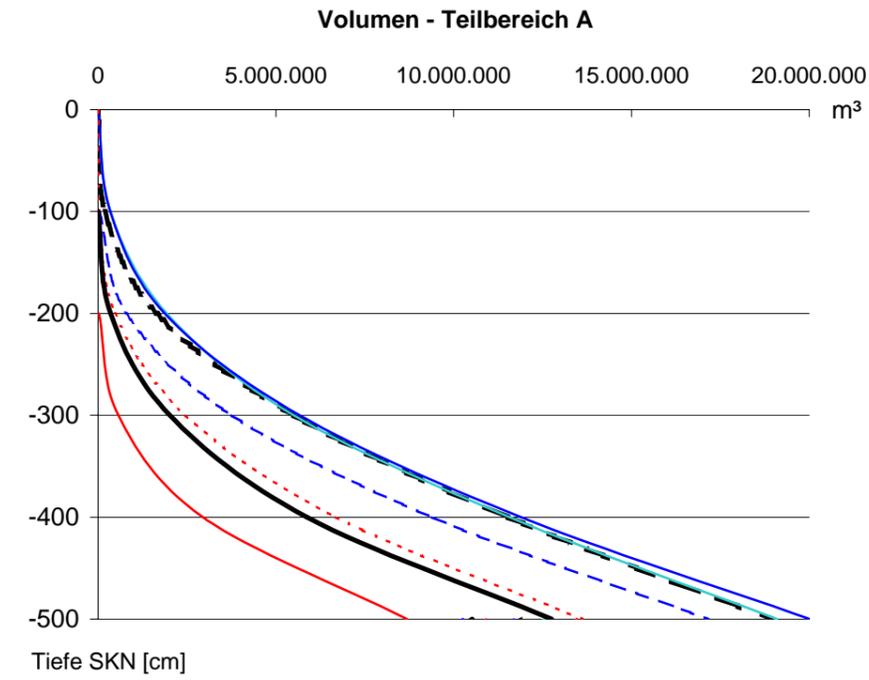


Volumen-Änderung Gesamtbereich [A-F] oberhalb SKN -5m

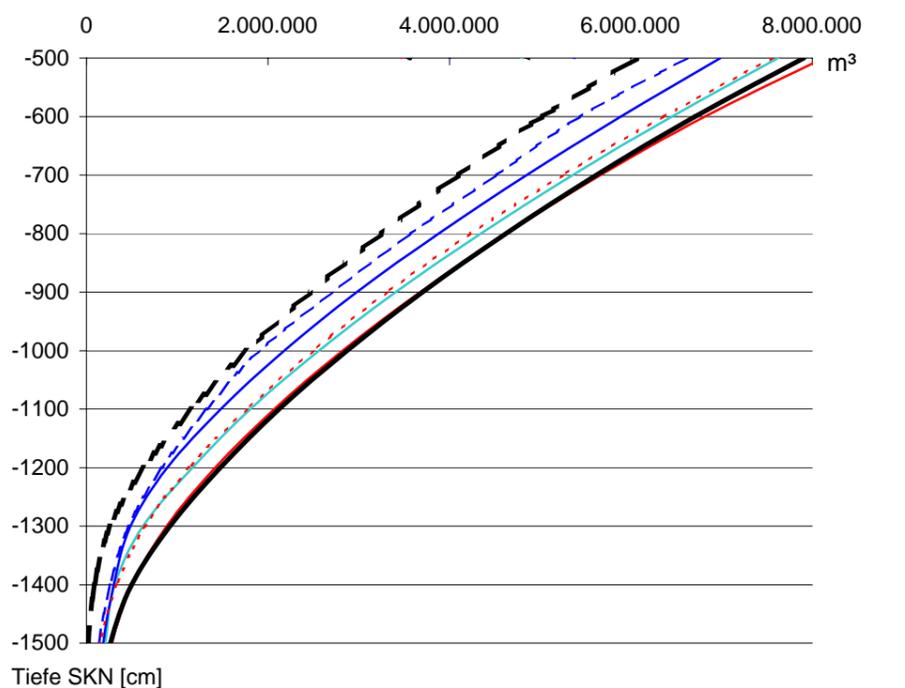
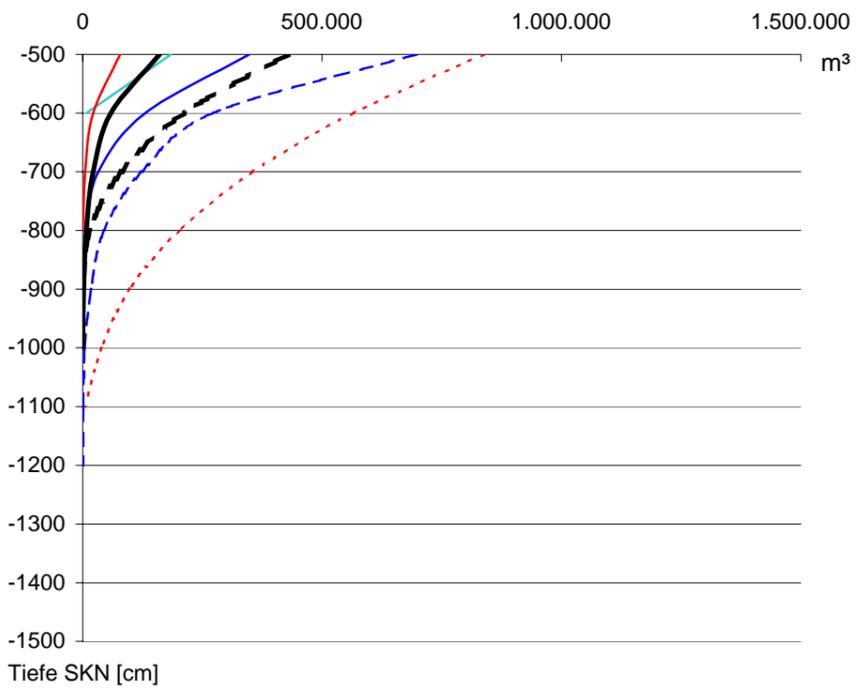
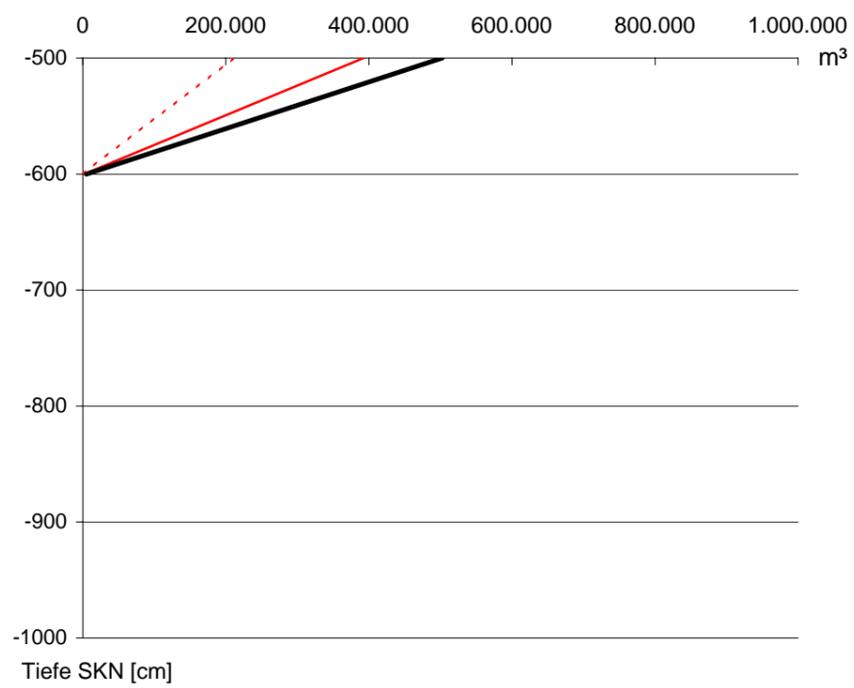
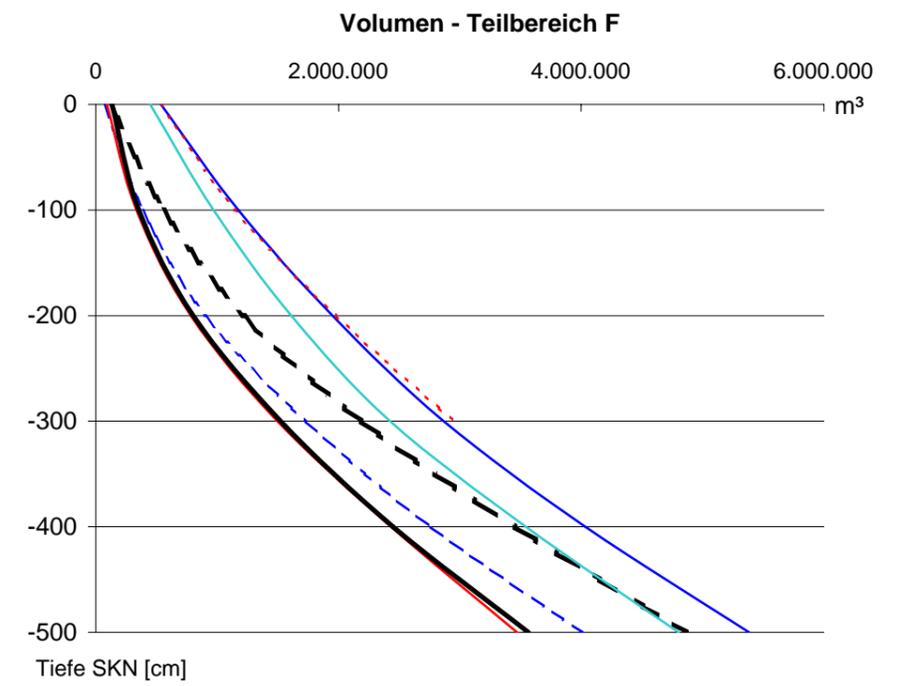
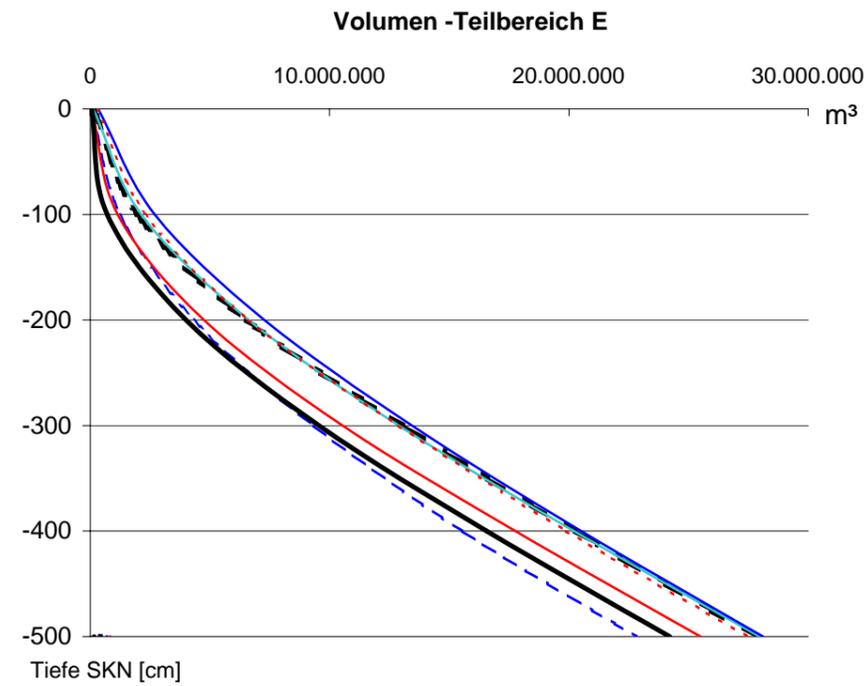
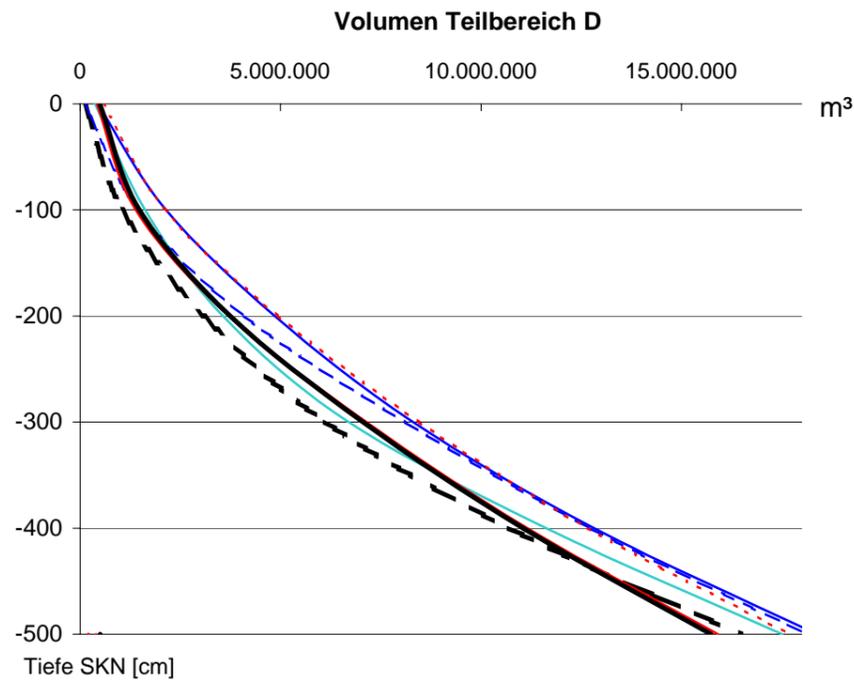


Volumen-Änderung Gesamtbereich [A-F] unterhalb SKN -5m





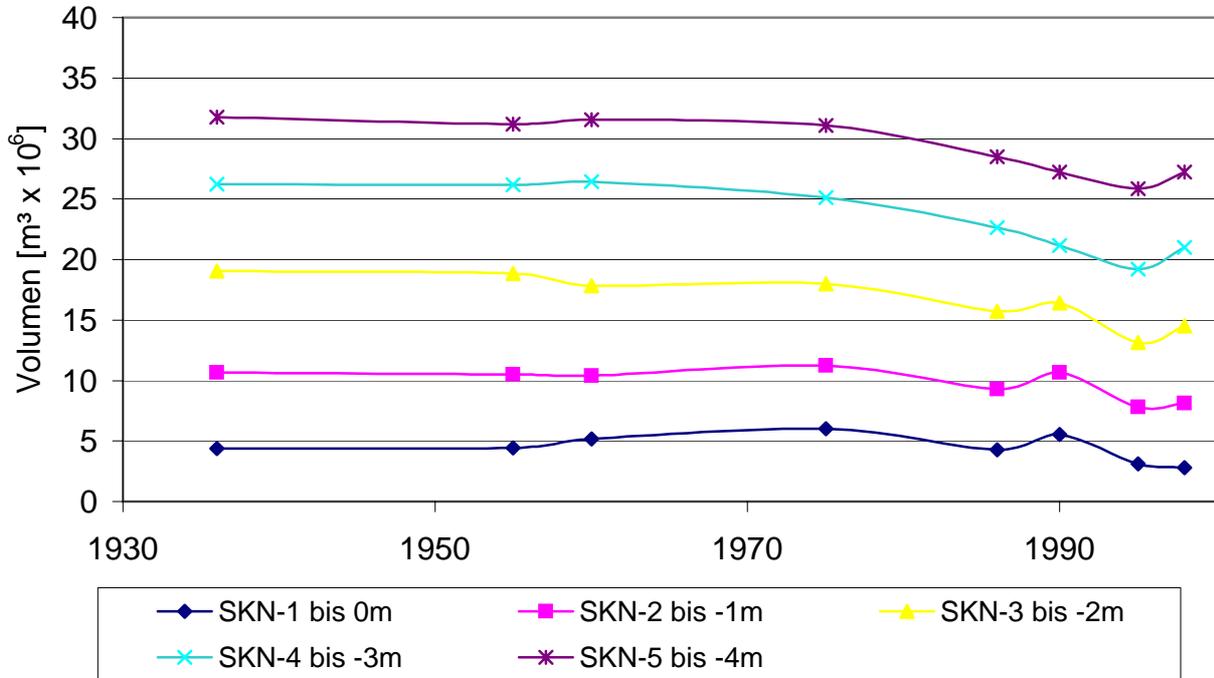
1936
 1955
 1960
 1964
 1971
 1975
 1979
 1982
 1984
 1986
 1990
 1992
 1995
 1998



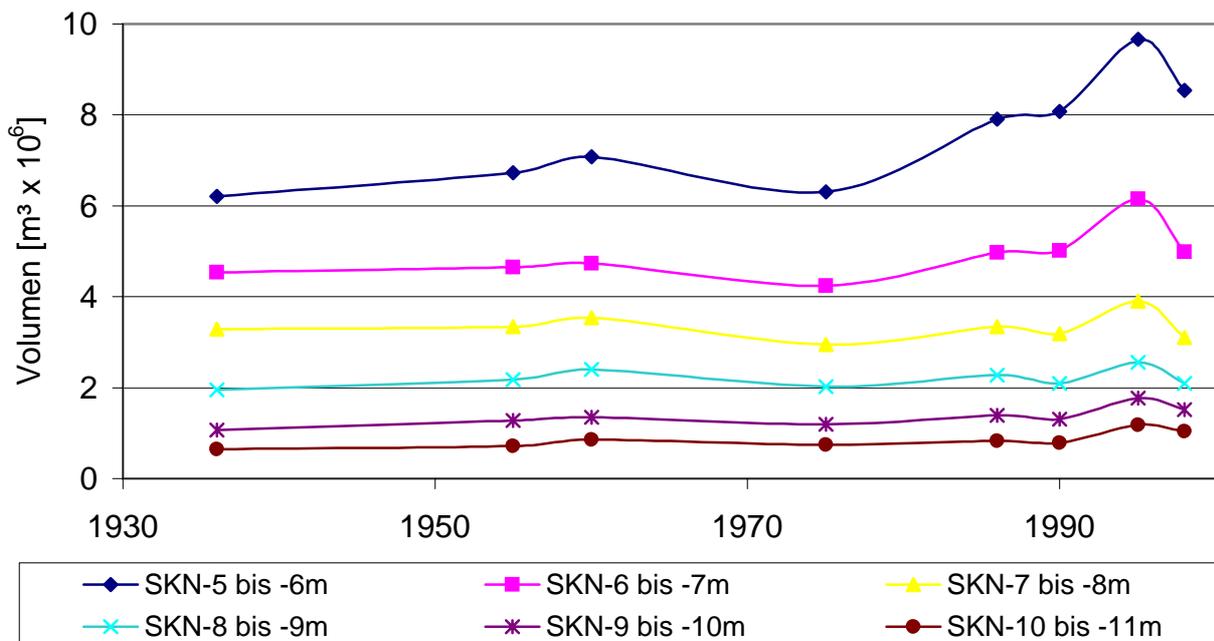
1936
 1955
 1960
 1964
 1971
 1975
 1979
 1982
 1984
 1986
 1990
 1992
 1995
 1998

Volumenentwicklung separater Tiefenhorizonte

Riffvolumen

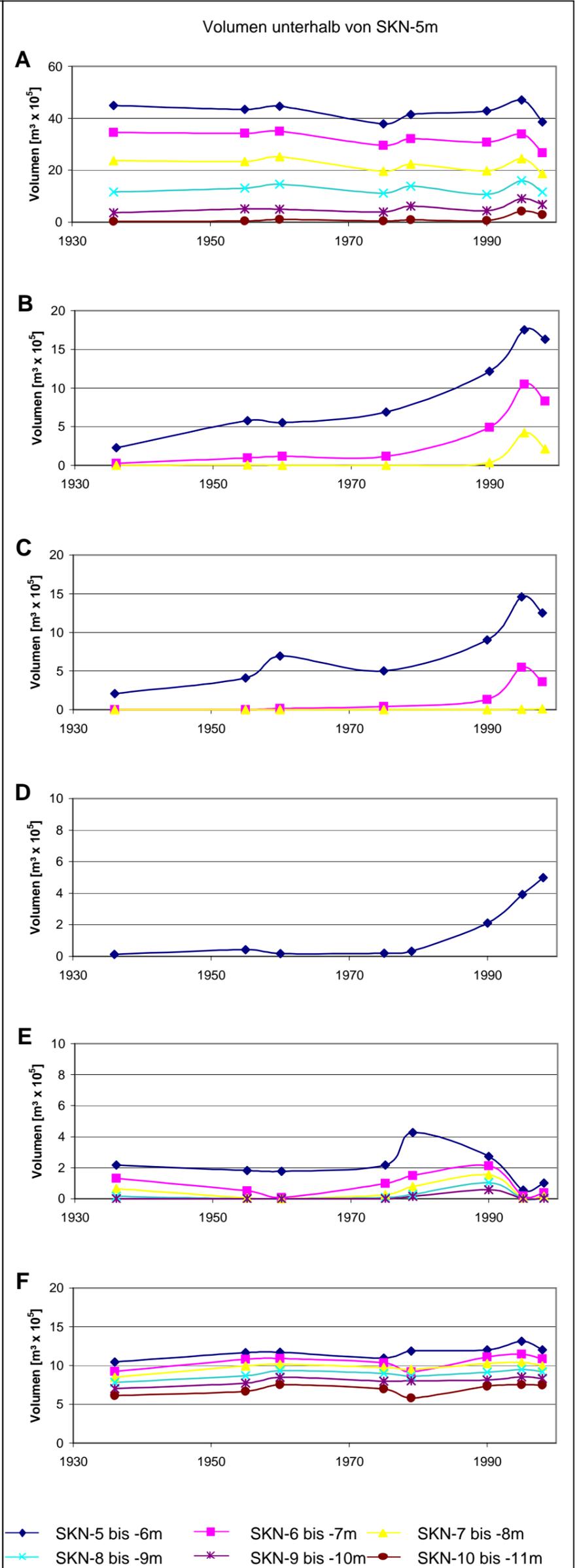
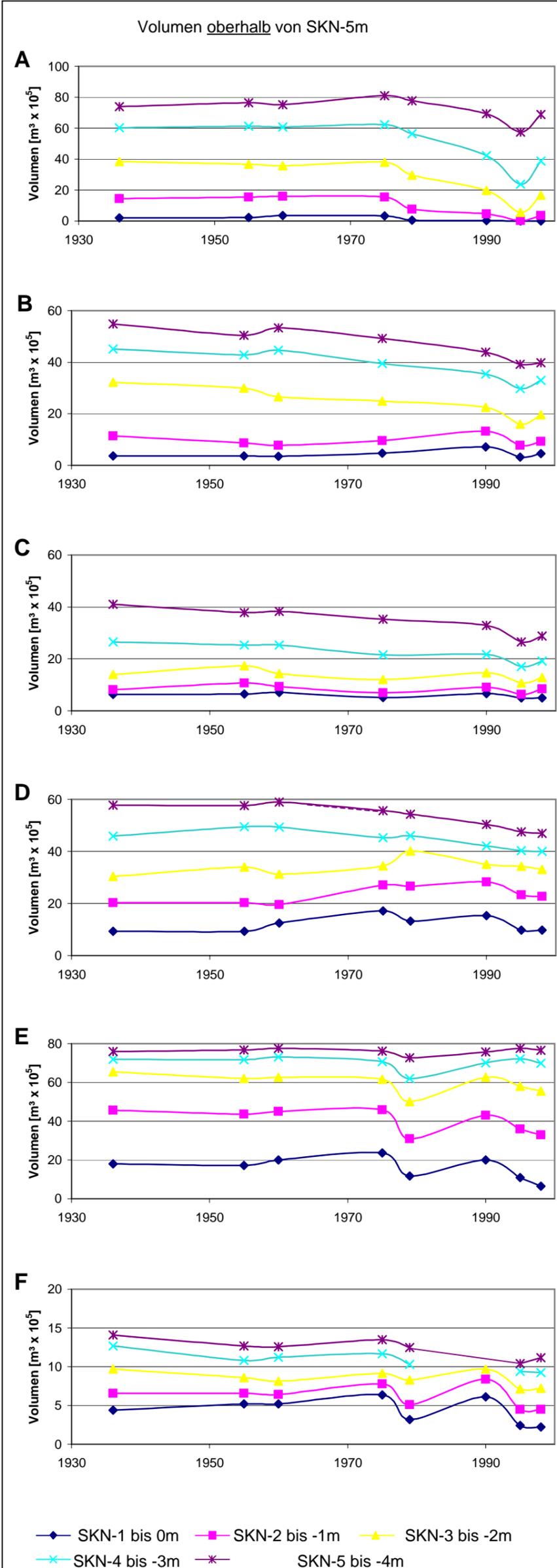


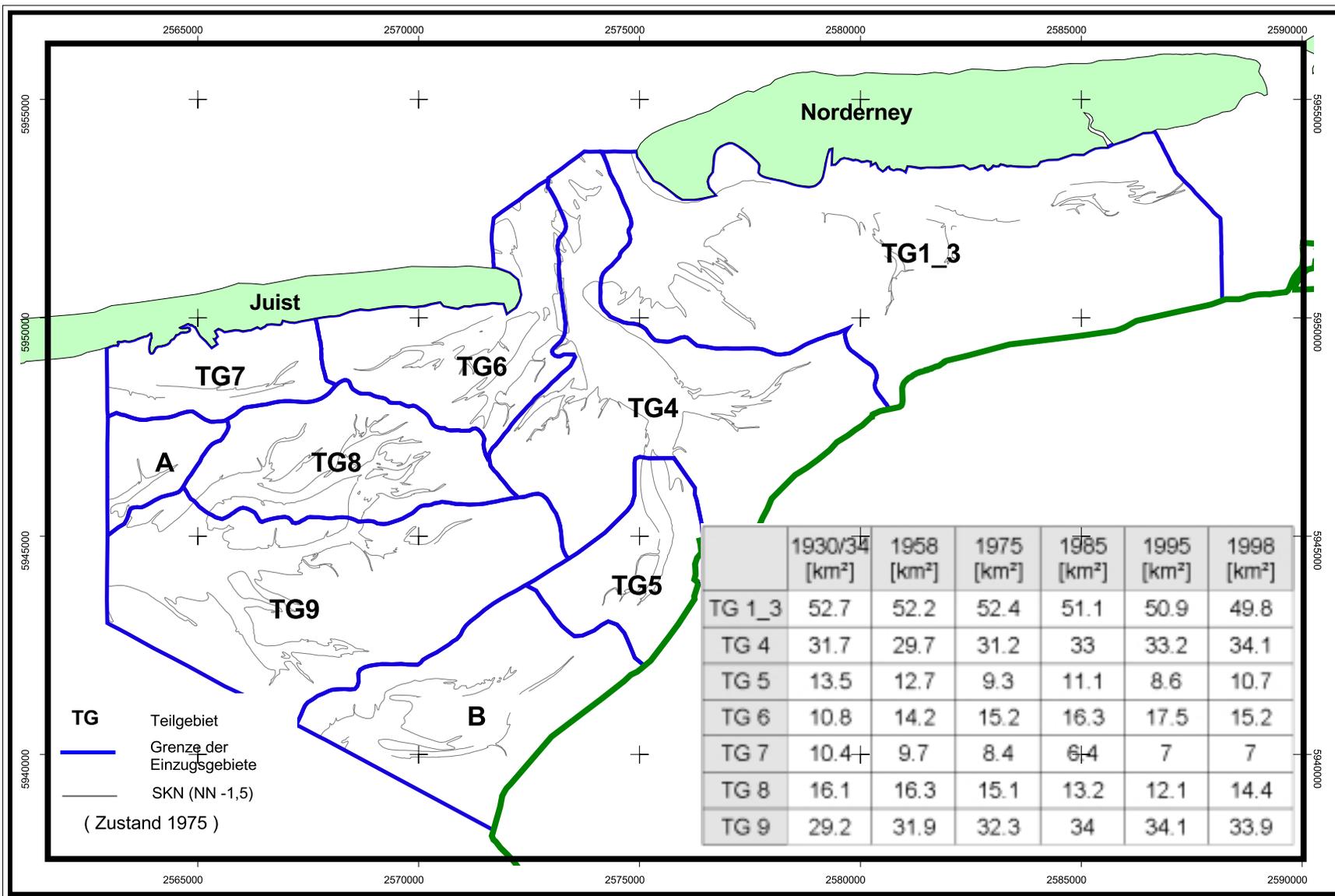
Rinnenvolumen

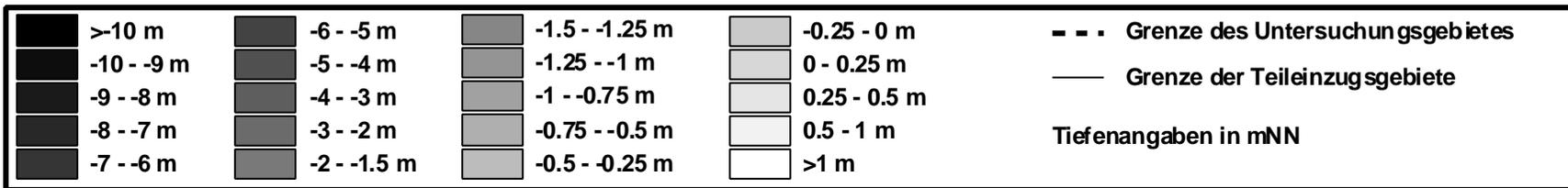
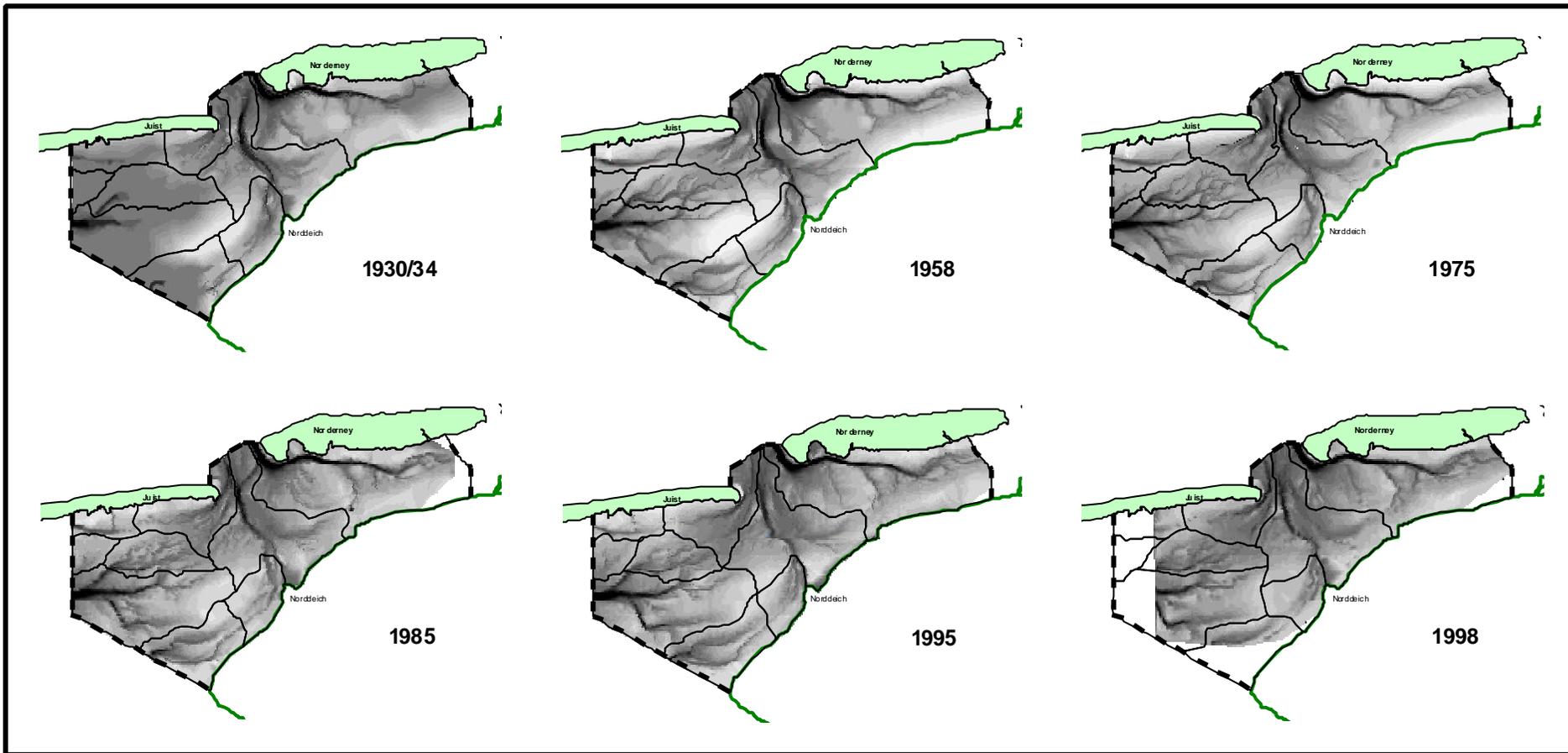


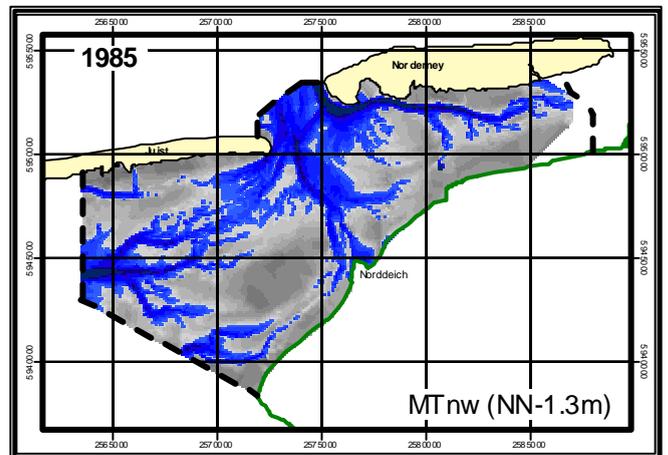
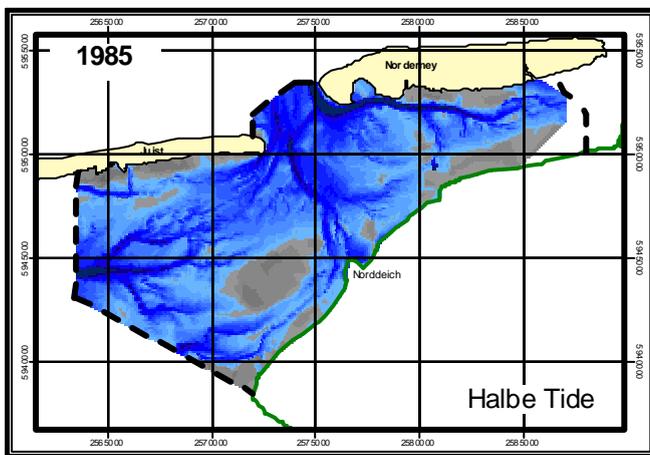
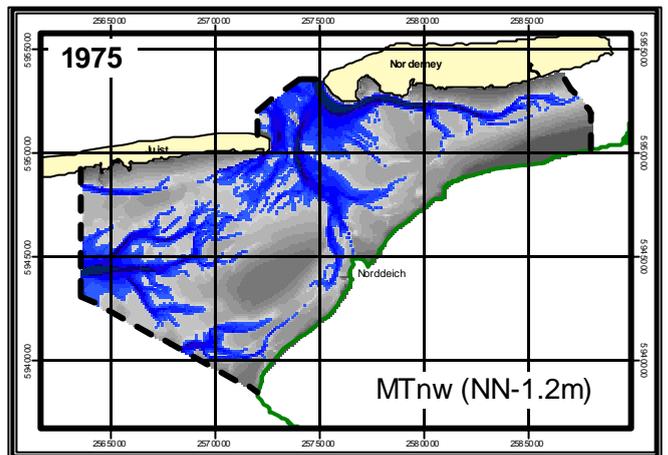
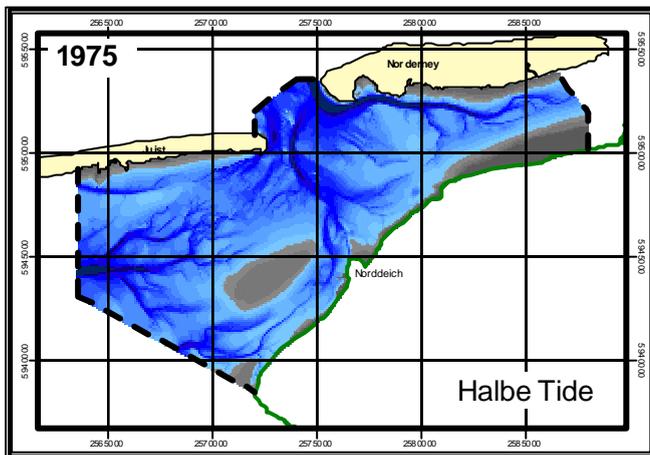
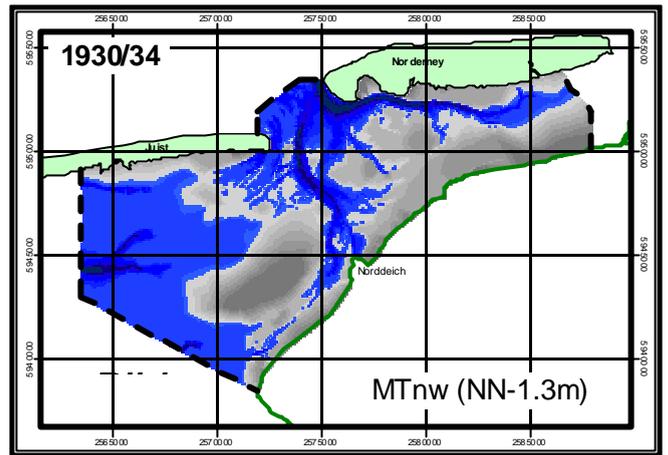
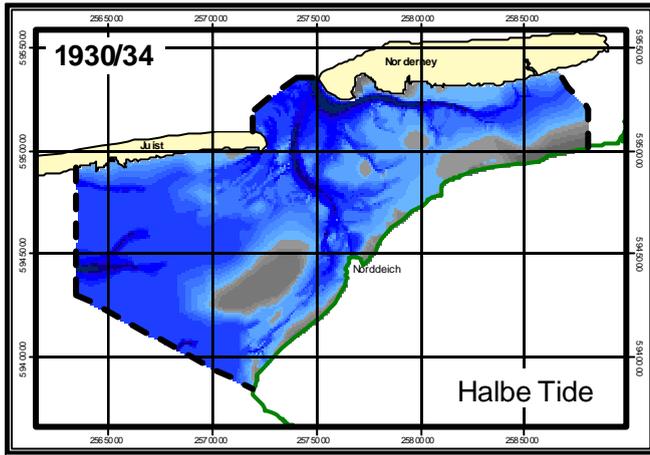
Volumenentwicklung separater Tiefenhorizonte

Dienstber. Forschungsstelle Küste

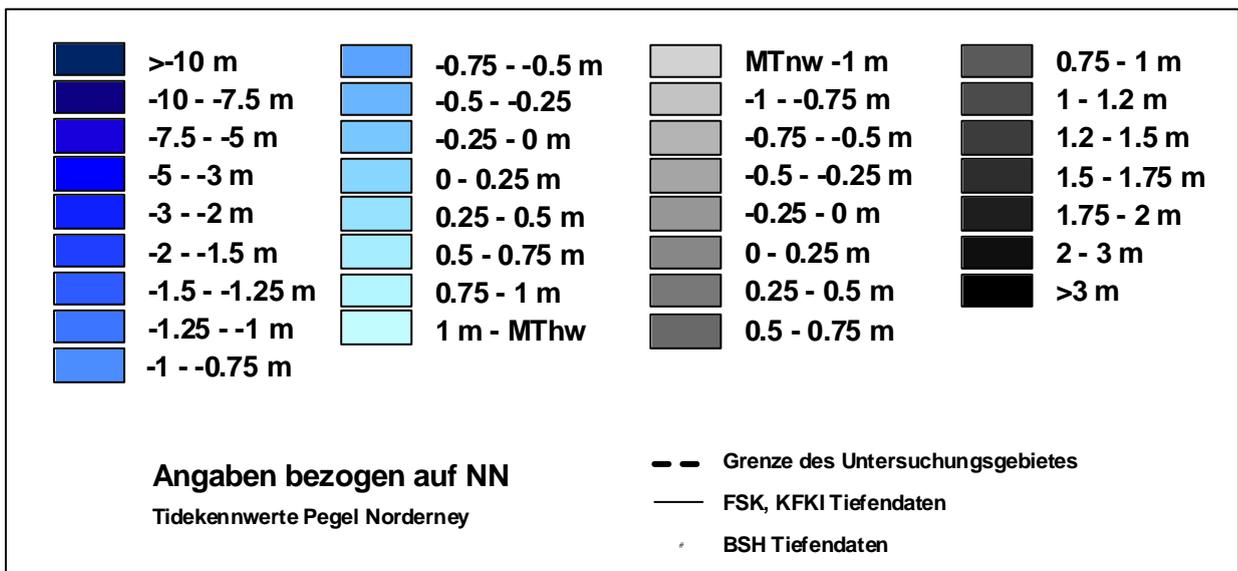
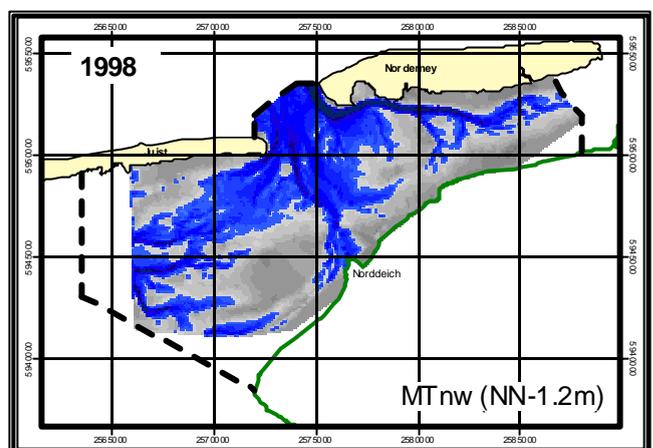
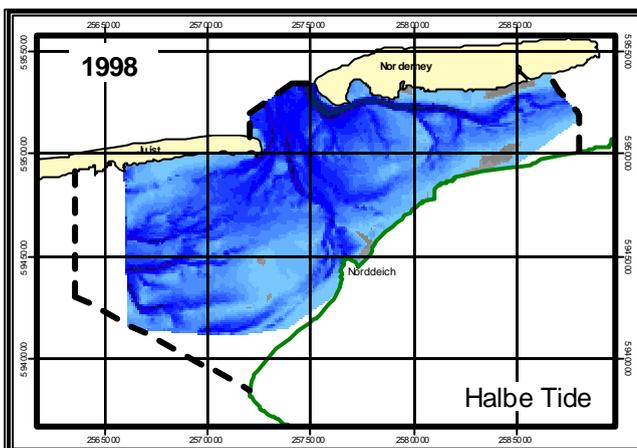
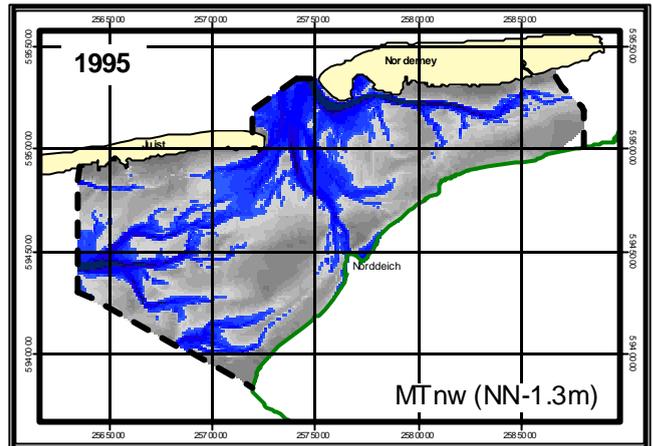
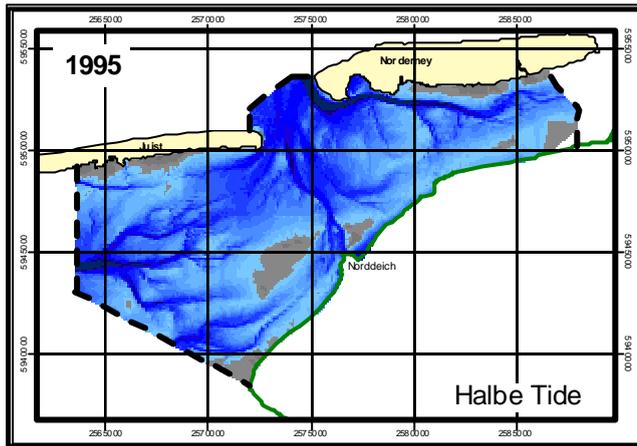




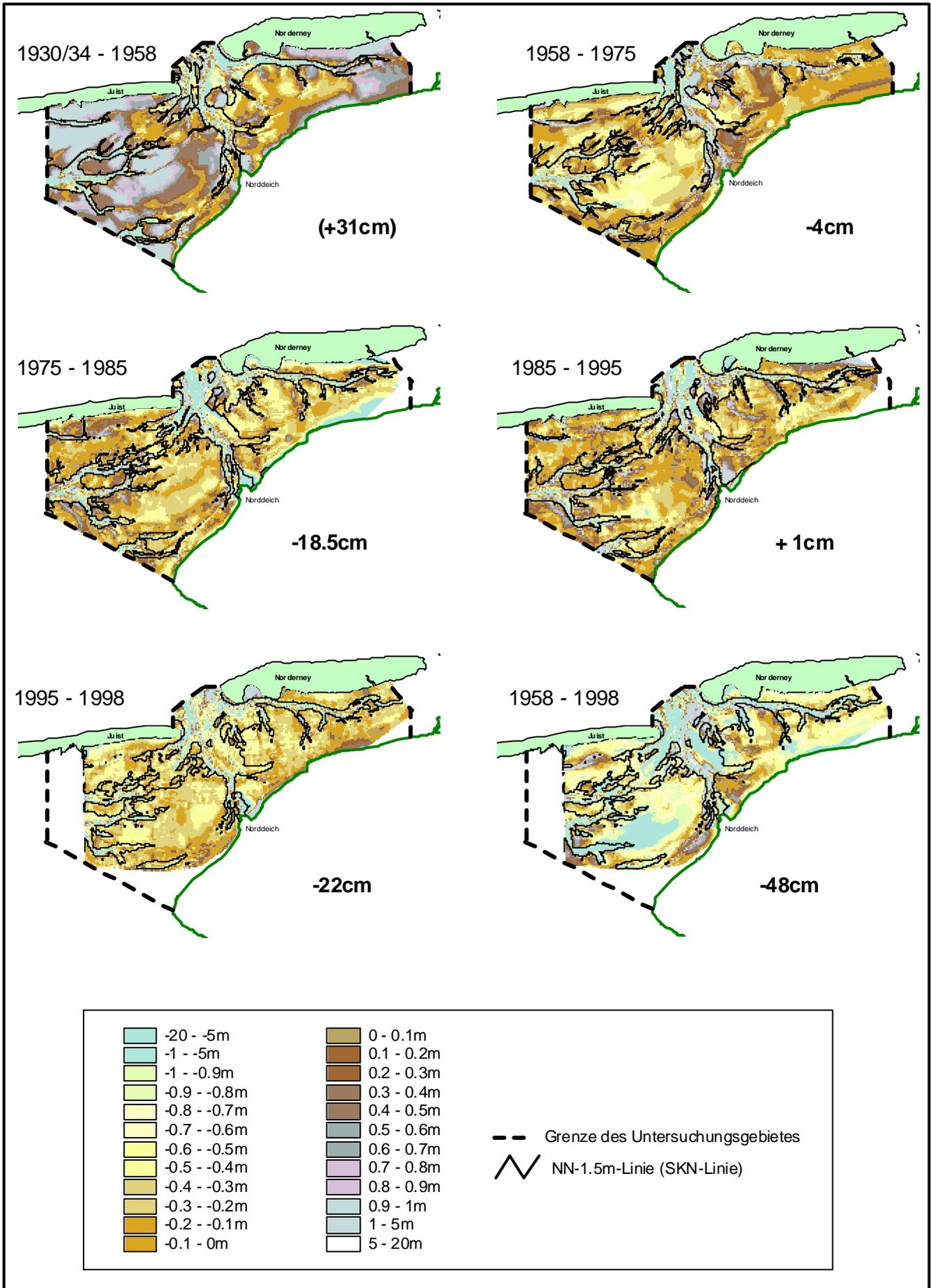




(Legende s. Anlage 18)



Wattnivauänderungen (TG 1 bis 9)



Wattnivauänderungen (Watteinzugsgebiet Norderneyer Seegat)

