



**Untersuchungen zur  
Schwebstoffausbreitung und Sauerstoffzehrung  
während der Baggerung und Verklappung  
im Rahmen der Neubaubaggerungen  
zur Fahrrinnenanpassung der Unter- und Außenelbe an  
die Containerschifffahrt  
Gutachten für das Wasser- und Schifffahrtsamt Hamburg**

**Juni 2000**

Koordinatoren des Gutachtens:

Dr. G. Witte, Dr. J. Kappenberg, Dr. R. Riethmüller , GKSS-Forschungszentrum  
Institut für Gewässerphysik  
GKSS-Auftragsnummer: 1KG01F01

in Zusammenarbeit mit :

Dipl.-Biol. Andreas Hagge  
BIOLOG, integrierte Umweltbeobachtung, Bioindikation, Monitoring

Dipl.-Ing. Jasper Bornhold  
Technische Dienstleistungen

---

<b>1 Einleitung.....</b>	<b>2</b>
<b>2 Fragestellungen .....</b>	<b>2</b>
<b>3 Randbedingungen.....</b>	<b>3</b>
<b>3.1 Umlagerungsgebiet .....</b>	<b>3</b>
<b>3.2 Tidephase, Wetter, Oberwasserabfluß .....</b>	<b>4</b>
<b>3.3 Baggergut.....</b>	<b>5</b>
<b>4 Meßstrategie .....</b>	<b>6</b>
<b>4.1 Probennahmen .....</b>	<b>6</b>
<b>4.2 Schwebstoffverfolgung .....</b>	<b>6</b>
4.2.1 Messungen an der Baggerstelle .....	6
4.2.2 Messungen an der Klappstelle.....	7
<b>5 Methoden .....</b>	<b>8</b>
<b>5.1 Messung der Schwebstoffkonzentration.....</b>	<b>8</b>
<b>5.2 Positions- und Kursbestimmung.....</b>	<b>9</b>
<b>5.3 Analysen des Baggergutes .....</b>	<b>9</b>
<b>5.4 Messungen des Sauerstoffgehaltes und physikalisch-chemischer Begleitparameter.....</b>	<b>10</b>
<b>6 Meß- und Beobachtungsprotokoll der Schwebstoffmessungen.....</b>	<b>11</b>
<b>6.1 Verklappung von Ladung 1643 bei Ebbstrom.....</b>	<b>12</b>
<b>6.2 Messungen des natürlichen Hintergrundes an der Klappstelle bei Ebbstrom.....</b>	<b>15</b>
<b>6.3 Verklappung von Ladung 1644 bei Flutstrom .....</b>	<b>17</b>
<b>6.4 Aufnahmen der Ladung 1649 bei Flutstrom.....</b>	<b>20</b>
<b>6.5 Aufnahme von Ladung 1650 bei beginnendem Ebbstrom.....</b>	<b>22</b>
<b>6.6 Verklappen von Ladung 1650 bei vollem Ebbstrom .....</b>	<b>25</b>
<b>6.7 Aufnahmen von Ladung 1651 bei abnehmendem Ebbstrom.....</b>	<b>28</b>
<b>6.9 Verklappung von Ladung 1651 bei Stauwasser .....</b>	<b>35</b>
<b>6.10 Aufnahmen von Ladung 1656 bei Flutstrom als Überlaufbaggerung .....</b>	<b>38</b>
<b>7 Mess- und Beobachtungsprotokoll der Sauerstoffmessungen.....</b>	<b>41</b>
<b>7.1 Sauerstoffmessungen im Baggerungsgebiet bei Strom-km 699-702...41</b>	<b>41</b>
<b>7.2 Sauerstoffmessungen an der Klappstelle bei Strom-km 712-716 .....</b>	<b>44</b>
<b>8 Beantwortung des Fragenkatalogs .....</b>	<b>48</b>
<b>8.1 Fragen zur Schwebstoff-Problematik .....</b>	<b>48</b>
<b>8.2 Fragen zur Sauerstoff-Problematik .....</b>	<b>49</b>
<b>9. Literatur.....</b>	<b>51</b>

## 1 Einleitung

Die Fahrrinnenanpassung der Unterelbe ist mit einem erhöhtem Eintrag und der Mobilisierung von Schwebstoffen infolge der Baggerung selbst und auch infolge der anschließenden Umlagerung verbunden. Damit kann unter ungünstigen Bedingungen (schlickiges Sediment, hohes Oxidationspotential, hohe Wassertemperatur) eine ökologisch bedenkliche Zehrung des im Wasser gelösten Sauerstoffs einhergehen.

Gegenstand der durchgeführten Untersuchungen ist die messtechnische Verfolgung der Ausbreitung der eingeleiteten Schwebstoffe während der Baggerung und im Anschluss an die Umlagerung bis zu ihrem Verschwinden im natürlichen Schwebstoff-Hintergrund, begleitet von punktuellen Messungen von Sauerstoffgehalt und (experimenteller) Sauerstoffzehrung in der Schwebstoffwolke.

## 2 Fragestellungen

Die Messungen sollten Antworten auf folgende Fragestellungen geben:

1. *Wie groß ist der Einflussradius des arbeitenden Hopperbaggers (Remobilisierung an der Sohle, Laderaumüberlauf) auf das Schwebstoffregime?*
2. *Wie weit lässt sich die Baggergutwolke nach der Umlagerung messtechnisch nachweisen?*
3. *Dringt die Baggergutwolke in Uferzonen, Hafenbecken und Buchten vor?*
4. *Wie hoch ist der Einfluss der Tidephase? Welches sind die Einmischungsmechanismen und Ausbreitungspfade?*
5. *Wie verändert sich der Sauerstoffgehalt in unmittelbarer Nähe des Baggers? Wie hoch ist dort die experimentelle Sauerstoffzehrung über 24 Stunden?*
6. *Wie verändert sich der Sauerstoffgehalt im Umlagerungsgebiet? Wie hoch ist dort die experimentelle Sauerstoffzehrung über 24 Stunden?*
7. *Wie sind aus ökologischer Sicht die Ergebnisse der Sauerstoffmessungen zu beurteilen?*

### 3 Randbedingungen

#### 3.1 Umlagerungsgebiet

Das Umlagerungsgebiet befand sich am südlichen Fahrinnenrand stromab der Südreede Brunsbüttel zwischen Elbe km 699 und 702 (Baggerfelder), sowie zwischen Medemmündung und Glameyer Stack bei Elbe km 712 bis 716 (Klappstelle). Die Abbildungen 1a und 1b zeigen die Bathymetrie in der Umgebung der Baggerfelder und der Klappstelle. Die weißen Rechtecke geben hier die Gebiete der einzelnen Messungen mit der Messnummer an der rechten oberen Ecke.

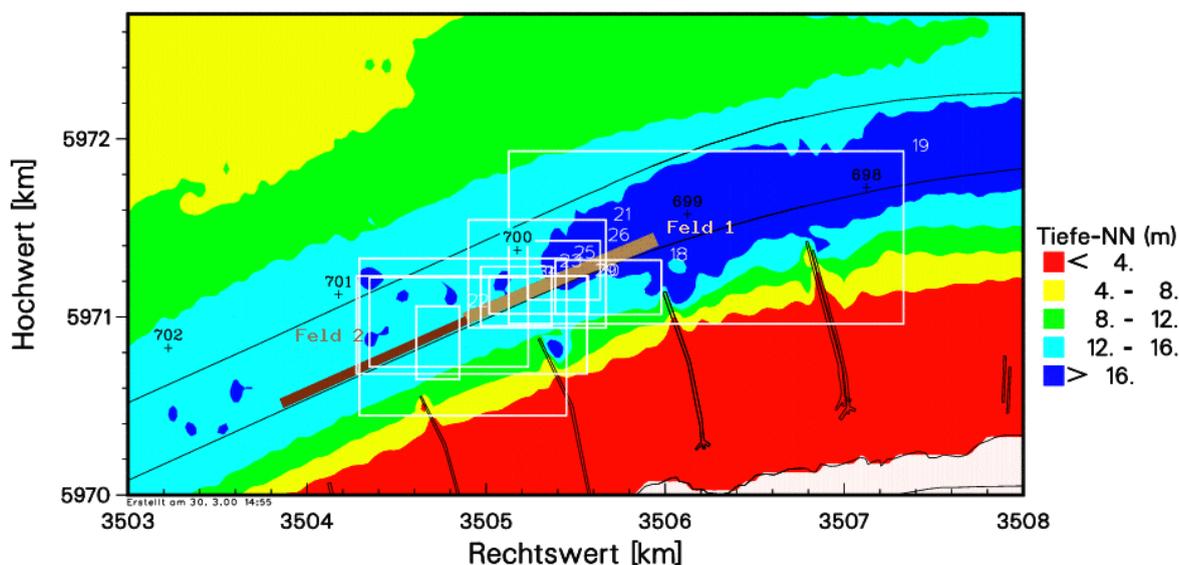


Abb.1a: Umlagerungsgebiet : Baggerfelder 1,2

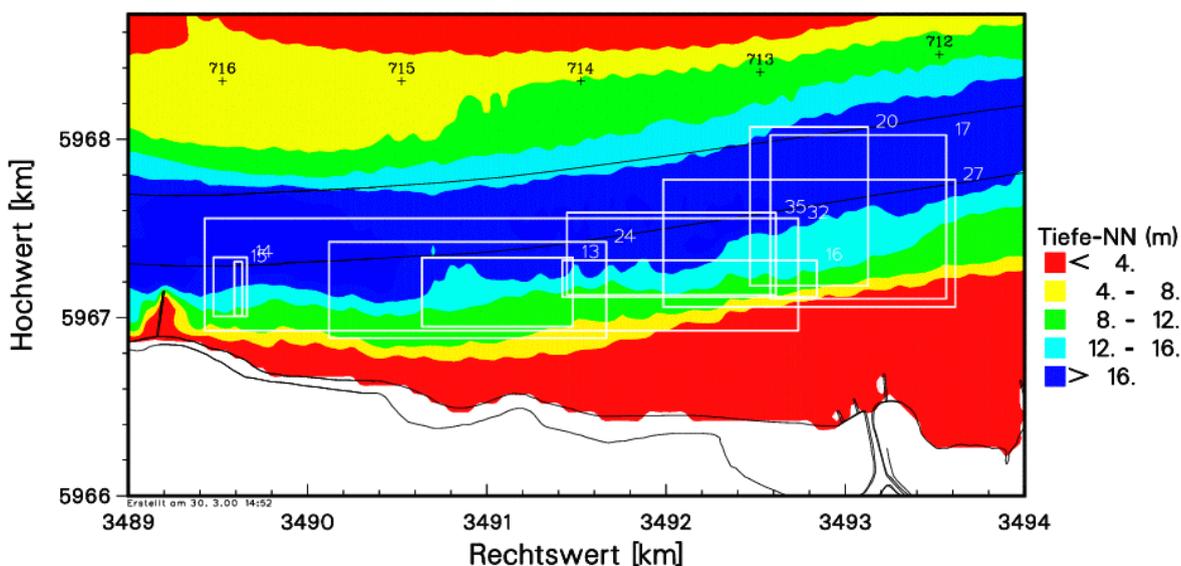


Abb.1b: Umlagerungsgebiet : Klappstelle

### 3.2 Tidephase, Wetter, Oberwasserabfluß

Es wurden Baggerungen und Verklappungen sowohl bei auflaufendem, wie bei ablaufendem Wasser gemessen. Die in Tabelle 1 dargestellten Hoch- und Niedrigwasserzeiten wurden dem Tidenkalender entnommen, wobei für den Pegel Cuxhaven die zeitlichen Verschiebungen für die Region Otterndorf berücksichtigt wurden.

Datum	Hochwasser (MEZ)	Niedrigwasser (MEZ)
02.11.1999:	07:46 / 20:47	02:01 / 14:48
03.11.1999:	09:12 / 22:12	03:25 / 16:18
04.11.1999:	10:34 / 23:23	04:53 / 17:40

Tab. 1: Hoch- und Niedrigwasserzeiten während der Messungen.

Das Wettergeschehen in der Woche 01.-05.11.99 kann allgemein für die Jahreszeit als sehr mild charakterisiert werden. Die Temperaturen lagen tagsüber bei 10-12 °C. Der am Wochenanfang überwiegend bedeckte Himmel mit einem kurzen Regenschauer am Vormittag des 03.11. und Winden aus Süd bis Südwest der Stärke 3-5 (kurzzeitig 6) wechselte im Verlauf der Woche zu trockenem und heiter bis wolkeigem Wetter mit mehrstündigem Sonnenschein und abnehmenden Winden.

Der Oberwasserabfluss (Neu-Darchau) lag zu Beginn der Messung bei 298 m<sup>3</sup>/s und stieg innerhalb der vier Tage dauernden Untersuchung auf 311 m<sup>3</sup>/s an. Die Messungen fanden am Ende einer seit August andauernden Periode fast konstanten niedrigen Oberwassers um 300 m<sup>3</sup>/s (Abb. 2) statt, so dass mit einer deutlich ausgebildeten Trübungszone und damit hohen natürlichen Schwebstoffkonzentrationen im Messgebiet zu rechnen war.

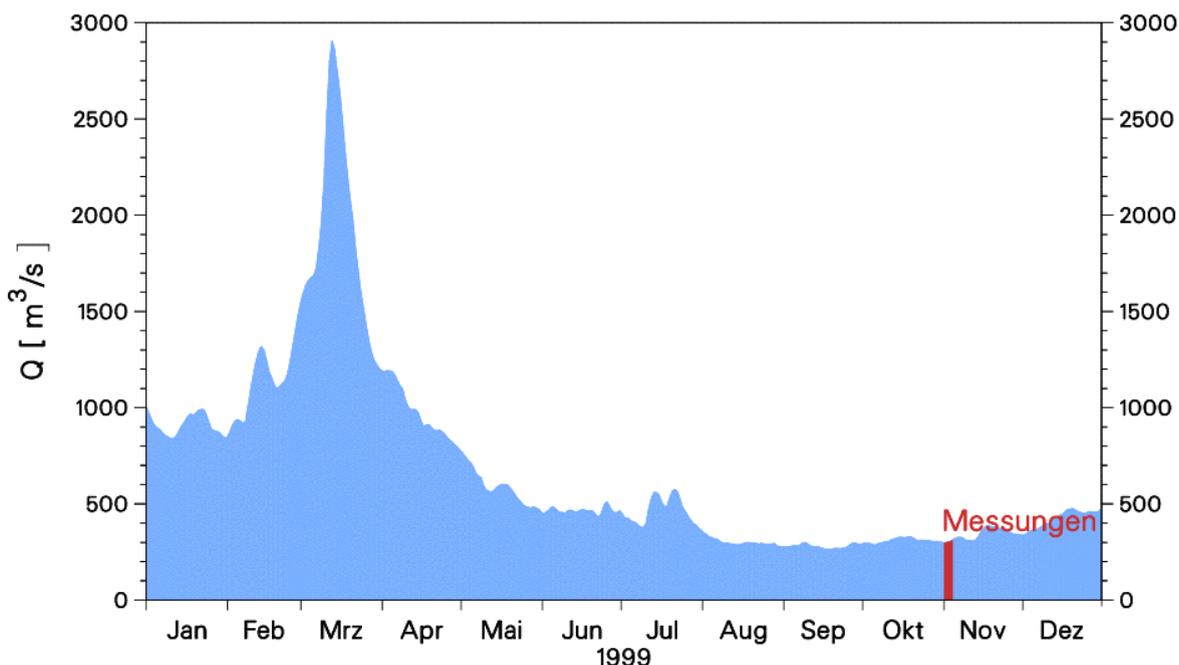


Abb.2: Oberwasserverlauf im Jahr 1999

### 3.3 Baggergut

Bei dem eingeleiteten Baggergut handelte es sich um Material mit einem je nach Herkunft variierendem Schlickanteil (Korngrößen < 63 µm) zwischen 2 und 61 %, wobei der überwiegende Teil der Ladungen sandig mit einem Schlickanteil von unter 10 % war. Nur zwei Ladungen (Nr. 1644 und 1650) haben signifikante Schlickanteile. Tabelle 1 gibt eine Zusammenstellung der Herkunft des Baggergutes der 21 im Messzeitraum erfolgten Umlagerungen sowie der ermittelten Schlickanteile.

Ladung-Nr.	Herkunft Baggergut	Anteil < 63 µm [Gew.-%]
1640	Feld 1	11.6
1641	Feld 1	8.9
1642	Feld 1	2.3
1643	Feld 1	6.1
1644	Feld 1	53.0
1645	Feld 1	8.0
1646	Feld 1	4.7
1647	Feld 1	8.3
1648	Feld 1	6.2
1649	Feld 1	34.6
1650	Feld 1	61.0
1651	Feld 1	11.5
1652	Feld 1	5.8
1653	Feld 1	6.5
1654	Feld 2	3.5
1655	Feld 2	3.4
1656	Feld 2	8.8
1657	Feld 2	2.3
1658	Feld 2	4.3
1659	Feld 2	3.1
1660	Feld 2	6.4

Tab. 2: Feinkornanteil des umgelagerten Baggergutes

## 4 Meßstrategie

Die Messungen wurden vom Katamaran „Baumrönne“ des Wasser- und Schifffahrtsamtes Cuxhaven aus vorgenommen. Die Auswirkungen der Baggerung und Sedimentumlagerung konnten an einem niederländischen Hopperbagger („Amerigo Vespucci“) untersucht werden.

### 4.1 Probennahmen

Alle Probennahmen wurden im Rahmen des normalen Baggereibetriebs durchgeführt. Die Lokalisierung und Detektion von zeitlichen und räumlichen Veränderungen der Schwebstofffahne durch Baggerung bzw. Verklappung erfolgte bei fahrendem Schiff. Diese zeitlich aufwendigen Untersuchungen hatten Vorrang gegenüber der direkten Probennahme in der Wassersäule, da hierzu jeweils ein Zwischenstopp des Messschiffes erforderlich war. Insofern waren die Möglichkeiten für größere Probenserien stark eingeschränkt. Dennoch ergaben die 27 gewonnenen Wasserproben einen repräsentativen Überblick über die Auswirkungen der Baggereiaktivitäten.

### 4.2 Schwebstoffverfolgung

Die eigentliche Schwebstoffmessung erfolgte nahezu kontinuierlich vom fahrenden Messboot durch Registrierung der ADCP-Rückstreuintensität. Die Untersuchungen wurden sowohl während der Flut- als auch während der Ebbphase vorgenommen. Dabei wurde wie folgt vorgegangen :

#### 4.2.1 Messungen an der Baggerstelle

In größerer Entfernung (ca. 1000 m) stromauf vom Hopperbagger wurden zunächst die natürlichen Hintergrundwerte gemessen. Dann sollte beginnend am arbeitenden Hopperbagger selbst ein spiralförmiger Kurs um den Ausgangspunkt gefahren werden; wobei pro Umfahrung der Radius um ca. 25 m zunehmen sollte. Dabei sollte kontinuierlich die vertikale Schwebstoffverteilung gemessen werden. Zu Beginn jeder Umfahrung wurden zur Kalibrierung der Schwebstoffmessungen Wasserproben aus unterschiedlichen Wassertiefen entnommen. Die Umfahrungen sollten beendet werden, wenn der gemessene Schwebstoffgehalt die natürlichen Hintergrundwerte erreicht hatte. Leider konnte durch die andauernde Bewegung des Baggers die geplante spiralförmige Erfassung der räumlichen Schwebstoffverteilung nicht erreicht werden. Als Notprogramm wurden versucht, zumindest die durch die Baggeraktivitäten ausgelöste Schwebstoffwolke zu verfolgen.

Auch waren die Schwebstoffkonzentrationen in der unmittelbaren Umgebung der Baggerung so hoch, dass der Maximalwert der messbaren Rückstreuintensität erreicht wurde. Ein weiterer schwerwiegender Mangel für die abschließende Beurteilung der Auswirkungen der Baggerung war das Fehlen der Aufzeichnung der vom Bagger gefahrenen Kurses, der sich auch aus den wenigen Protokollnotizen kaum rekonstruieren ließ. Das Messschiff befand sich aber (mit Ausnahme der Hintergrundmessungen) stromab des Baggers.

#### 4.2.2 Messungen an der Klappstelle

Hierbei werden feste Flussquerschnitte laufend auf ihre Schwebstoffverteilung und ihren Sauerstoffgehalt während/nach der Baggerguteinbringung untersucht.

Prinzipiell sollte dabei wie folgt vorgegangen werden:

1. Das Messschiff beginnt mit fortlaufenden Querungen des Flusses unterhalb der Einleitungsstelle und erfasst den natürlichen Schwebstoff-Hintergrund.
2. Die Einleitung beginnt .
3. Das Messschiff erfasst die durchlaufende Schwebstoffwolke während seiner Querungen solange, bis sich der natürliche Hintergrundwert wieder eingestellt hat.
4. Das Messschiff verlässt den Querschnitt, überholt die sich stromab bewegende Schwebstoffwolke und beginnt mit erneuten fortlaufenden Querungen solange bis die Schwebstoffwolke den neuen Querschnitt passiert hat.
5. Das Messschiff verlässt den Querschnitt....usw.....

Das Aufsuchen neuer Flussquerschnitte wird solange fortgesetzt, bis die eingeleitete Schwebstoffwolke als solche nicht mehr nachweisbar ist.

Notfalls wird auf die Methode der Zickzack-Verfolgung zurückgegriffen, wenn bereits das Aufsuchen eines zweiten Flussquerschnittes mit messbarer Konzentrationserhöhung nach obigem Verfahren infolge der raschen Einmischung nicht realisierbar ist.

Zur Markierung der Front der Schwebstoffwolke wurde mit dem Beginn der Einleitung am Hopperbagger eine Driftboje ausgebracht. Mit dieser Markierung wurde das Aufsuchen neuer Messquerschnitte (Überholen der Schwebstoffwolke) erheblich vereinfacht. Bei der Zickzack-Verfolgung stellt die Driftboje während jeder Flussquerung den Ansteuerungspunkt auf dem Querungsprofil dar.

Zusätzlich zu den o.g. Profilmfahrten wurden einige Längs- und Querprofile im Umlagerungsgebiet unmittelbar vor und etwa eine Stunde nach der Sedimenteinleitung durchgeführt. Dabei dienten erstere der Erfassung des Ausgangszustandes und letztere der etwaiger Resuspensionsvorgänge nach vorausgegangener Sedimentation des Baggergutes am Umlagerungsort.

## 5 Methoden

### 5.1 Messung der Schwebstoffkonzentration

Für die großräumigen Konzentrationsmessungen im Wasserkörper wurde ein 600 kHz Breitband-ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) von Bord des fahrenden Messschiffs aus eingesetzt. Der Messkopf war am Vorsteven montiert und befand sich etwa 80 cm unterhalb der Wasseroberfläche.

Die akustische Schwebstoffmessung nutzt die der Konzentration proportionale Volumenrückstreuung des Schwebstoffs und erfordert neben einem inversen Berechnungsmodell, das die Schallabschwächung im schwebstoffbeladenen Wasserkörper berücksichtigt, wegen der hohen Variabilität der akustischen Schwebstoffeigenschaften eine permanente Kalibrierung.

Letztere wurde dadurch sichergestellt, dass während der Messungen aus unterschiedlichen Wassertiefen mit einem Ruttner-Schöpfer 80 Wasserproben zur späteren Konzentrationsbestimmung (Filtration und Wägung) entnommen wurden. Zusätzlich wurden zur notwendigen Charakterisierung des Schwebstoffs an 8 Wasserproben Korngrößenanalysen durchgeführt (Laser-Analyzer), da die akustische Rückstreuung neben dem Schwebstoffvolumen (proportional  $d^3$ ) ganz wesentlich auch von der Teilchengröße (proportional  $d^5$ ) abhängt. Tabelle 2 gibt die Korngrößenverteilung (in %) der Schwebstoffproben wieder.

Abbildung 3 zeigt eine Gegenüberstellung der Konzentrationen der 80 Wasserproben und akustisch gemessenen Werten nach erfolgter Kalibrierung. Die Konzentrationen liegen zwischen 24 und 557 mg/l, im Mittel bei 153 mg/l. Hierbei wurden für alle Messungen die gleichen Kalibrierkonstanten für Rückstreuung und Attenuation des beschallten Schwebstoffs angesetzt. Die Überbewertung einiger Konzentrationen durch die Rückstreuung dürfte auf einzelne größere Partikel in der beschallten Wasserschicht zurückzuführen sein. Insgesamt kann man die Übereinstimmung jedoch als sehr gut bezeichnen; auch bei optischen Messungen ist sie erfahrungsgemäß nicht besser.

Die Auswertung erfolgte unter Einsatz einer speziellen Software (SEDIVIEW), die als Input neben den Kalibrierangaben die Rückstreuung relativ zum elektronischen Grundrauschen, das vor der Schwebstoffmessung ermittelt wurde, benötigt.

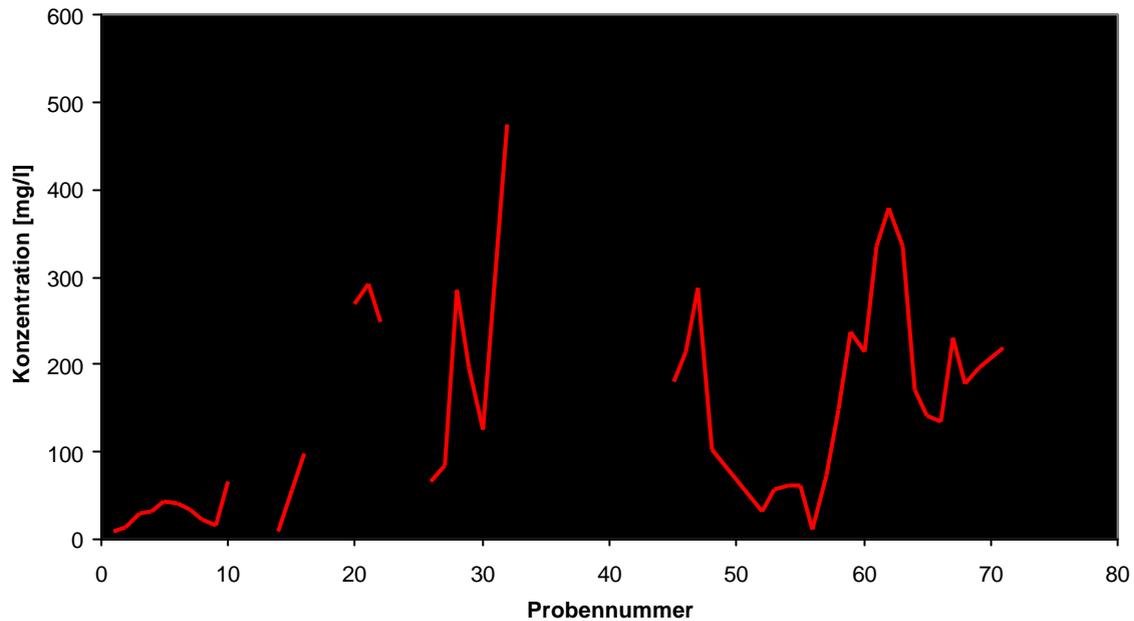


Abb. 3: Schwebstoffkonzentrationen der Wasserproben und mit dem ADCP gemessene Werte

## 5.2 Positions- und Kursbestimmung

Zur Positionsbestimmung und zum Steuern vorgegebener Kurse des Messschiffs wurde ein DGPS (Differential Global Positioning System) mit einer Referenzstation auf dem Leuchtturm des Unterfeuers Wittenbergen (am Nordufer etwa in Höhe der östlichen Grenze des Umlagerungsgebietes) eingesetzt. Mit diesem Gerät sind Positionierungsgenauigkeiten im Dezimeterbereich zu erzielen.

Zur Kursbestimmung diente über ein Interface der Bordkompaß.

Für die Ansteuerung von Festpositionen wurde dem Schiffsführer ein Monitor mit Kursplotter zu Verfügung gestellt.

## 5.3 Analysen des Baggergutes

Vor jeder Umlagerung wurde mit einem Backengreifer eine Sedimentprobe aus dem Laderaum des Hopperbaggers entnommen.

Die Bestimmung des Ton-/Schluffanteils erfolgte nach Homogenisierung durch Nasssiebung bei 63 µm Maschenweite.

#### 5.4 Messungen des Sauerstoffgehaltes und physikalisch-chemischer Begleitparameter

Probennahme: Alle Wasserproben wurden mit dem „GKSS-Elbeschöpfer“ (optimierte MEYERsche Schöpfflasche) gewonnen, der eine auswechselbare Schott-Duran-Glasflasche (1000 ml) in definierten Tiefenstufen mit Probenwasser befüllt. Die Probennahme erfolgte sowohl mit einer Motorwinde als auch von Hand. Alle weiteren Messungen wurden mit Sonden direkt in der Glasflasche durchgeführt.

Salinität/Leitfähigkeit: DEV C8 - DIN EN 27888 bzw. ISO 7888 (Konduktometer WTW LF 191 mit WTW-Sonde LA 1/T)

pH-Wert: DEV C5 - DIN 38404 (pH-Meter WTW pH 91 mit WTW-pH-Elektrode SenTix 61)

Temperatur: DEV C4 - 2 DIN 38404 (elektrische Temperaturmessung mit WTW OXI 196 mit WTW-Sonde EOT 196)

Sauerstoff: Amperometrisch mittels membranbedeckter Sauerstoffsonde nach DEV G22 - DIN EN 25814 bzw. ISO 5814 (Microprocessor Oximeter WTW OXI 196 mit WTW-Sonde EOT 196)

Seston: Unter dem Begriff abfiltrierbare Stoffe (Seston) werden im Wasser befindliche ungelöste Stoffe - es können sowohl Sink-, Schweb- als auch Schwimmstoffe organischer und anorganischer Zusammensetzung sein - verstanden. Die Bestimmung der abfiltrierbaren Stoffe sowie ihres Glührückstandes erfolgte mittels Glasfaserfiltern nach DEV H2-3 DIN 38409. Der sogenannte Glührückstand entspricht dabei annähernd der partikulären organischen Substanz.

Sauerstoffzehrung (experimentell): In Anlehnung an die Bestimmung des biochemischen Sauerstoffbedarfs (BSB) wurde die aktuelle Sauerstoffkonzentration direkt nach der Probennahme gemessen. Hierzu wurde die Glasflasche (1000 ml) auf ein elektrisches Rührgerät (mit Magnetrührer) gestellt, so daß eine gleichmäßige Verteilung der Schwebstoffe im Probengefäß gewährleistet war und die Membran der Sauerstoffsonde zugleich eine konstante Anströmgeschwindigkeit erhielt. Anschließend wurde die Glasflasche mit einem Schraubdeckel verschlossen und 24 Stunden im Dunkeln bei Gewässertemperatur stehend exponiert, um dann in gleicher Weise erneut Temperatur, Sauerstoffkonzentration und -sättigung zu messen. Für eine korrekte Sauerstoff-Bestimmung wurde zuvor der Salzgehalt gemessen und direkt in das Sauerstoff-Meßgerät eingegeben. Die Messung des pH-Wertes vor der ersten und nach der zweiten Sauerstoffmessung diente der Kontrolle zur Beurteilung des Einflusses der Primärproduktion auf den Sauerstoffgehalt in der Probenflasche. Die Differenz beider Sauerstoffmessungen ergab den hier beschriebenen experimentell ermittelten Sauerstoffzehrungswert über 24 Stunden. Diese sehr einfache Messung der Sauerstoffzehrung gibt erste Anhaltspunkte über den Einfluß mikrobieller Aktivitäten beim Abbau der organischen Substanz in einer Wasserprobe mit hohem Schwebstoffanteil. Eine Differenzierung der mikrobiologischen Prozesse (z.B. Nitrifikation) oder eine weitere Bewertung des Sauerstoffverbrauchs über einen längeren Zeitraum (z.B. wie beim BSB<sub>5</sub> oder BSB<sub>20</sub>) erfolgte in der vorliegenden Untersuchung nicht.

## 6 Meß- und Beobachtungsprotokoll der Schwebstoffmessungen

Die Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Messungen. Die GKSS-Messnummer in der ersten Spalte wird auch zur Kennzeichnung der Grafiken bei der Diskussion der einzelnen Umlagerungen und in den Abbildungen in Anhang 1 (Zusammenstellung aller vorgenommenen Schwebstoffverfolgungen) verwendet. Die Ladungsnummer wurde vom Wasser- und Schifffahrtsamt Cuxhaven vergeben.

Messnummer	Ort	Ladung	Tag	Uhrzeit (Beginn)	Tidephase
13	Klappstelle	1643	2.11.	12:55	Ebbe
14	Klappstelle	1643	2.11.	13:25	Ebbe
15	Klappstelle	1643	2.11.	13:50	Ebbe
16	Klappstelle	ungestört	2.11.	14:11	Ebbe
17	Klappstelle	1644	2.11.	16:37	Kenterpunkt Ebbe
18	Baggerfeld 1	1649	3.11.	8:31	Flut
19	Baggerfeld 1	1649	3.11.	8:49	Flut
20	Klappstelle	1649	3.11.	10:22	Kenterpunkt Flut
21	Baggerfeld 1	1650	3.11.	11:59	Ebbe
22	Baggerfeld 1	1650	3.11.	12:40	Ebbe
23	Baggerfeld 1	1650	3.11.	13:04	Ebbe
24	Klappstelle	1650	3.11.	13:55	Ebbe
25	Baggerfeld 1	1651	3.11.	15:37	Ebbe
26	Baggerfeld 1	1651	3.11.	16:48	Ebbe
27	Klappstelle	1651	3.11.	17:51	Kenterpunkt Ebbe
29	Baggerfeld 2	1656	4.11.	9:20	Flut
30	Baggerfeld 2	1656	4.11.	9:49	Flut
32	Klappstelle	1657	4.11.	13:48	Kenterpunkt Flut
34	Baggerfeld 2		5.11.	10:57	Flut
35	Klappstelle		5.11.	13:23	Kenterpunkt Flut

Tab. 3: Zusammenstellung aller ausgewerteten Messungen und der zugehörigen Umlagerungsbedingungen

Im Folgenden werden ausgewählte, typische Verhältnisse charakterisierende Umlagerungen diskutiert. In den zugehörigen Abbildungen werden zunächst flächenhaft anhand einer Flusskarte die gefahrenen Kurse und die vertikal gemittelten Strömungsvektoren dargestellt. Da die bei der Verfolgung des verklappten Materials gefahrenen Kurse oft sehr verwickelt und unübersichtlich waren (siehe die Abbildungen a im Anhang), wurden sie in mit römischen Ziffern gekennzeichnete Teilabschnitte zerlegt, denen im Folgenden jeweils eine Abbildung der Schwebstoffverteilung zugeordnet ist. Bei letzteren ist Abszisse entweder die Zeit, oder es handelt es sich um Projektionen des Kurses entweder auf die Süd-Nord-Richtung oder auch auf die West-Ost-Richtung. Die entsprechenden Koordinatenangaben „northing“ bzw. „easting“ beziehen sich auf das Gauss-Krüger-Koordinatensystem (in [m]).

### **6.1 Verklappung von Ladung 1643 bei Ebbstrom**

Die Verklappung erfolgte am 2. 11. 1999 in der Zeit zwischen 13:00 und 14:00 Uhr bei ablaufendem Wasser und wurde in den Messungen 13 und 14 aufgezeichnet (Abb. 4a,b). Es wurden zunächst in Höhe von Tonne 43 (Messung 13) mehrere Nord-Süd Querungen gefahren, so dass die Wolke des vom stromauf verklappten Materials unter dem Messschiff passierte. Die Breite der Wolke betrug etwa 100 m. Entsprechende Messungen wurde dann bei Tonne 41 vorgenommen (Messung 14) wobei das Material zunehmend in Bodennähe entlang des Gefälles nach Norden in die Fahrinne transportiert wird. Gegen 13:55 Uhr hatte die Wolke den Messquerschnitt passiert.

2. November 1999, Verklappung von Ladung Nr. 1643, (CX99013 und CX99014)

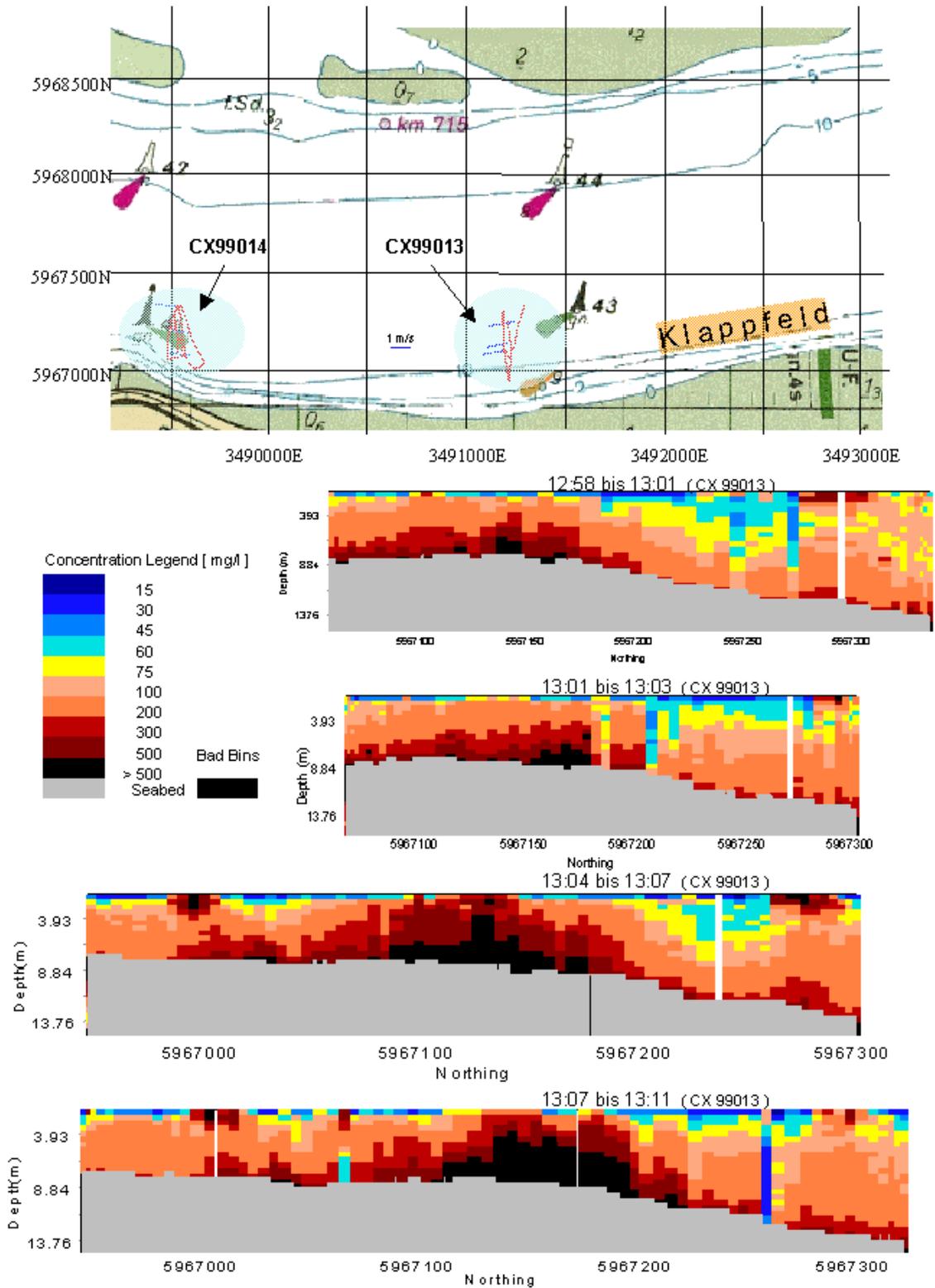


Abb. 4a: Verklappung der Ladung 1643 am 2. 11. 1999 - Messung 13

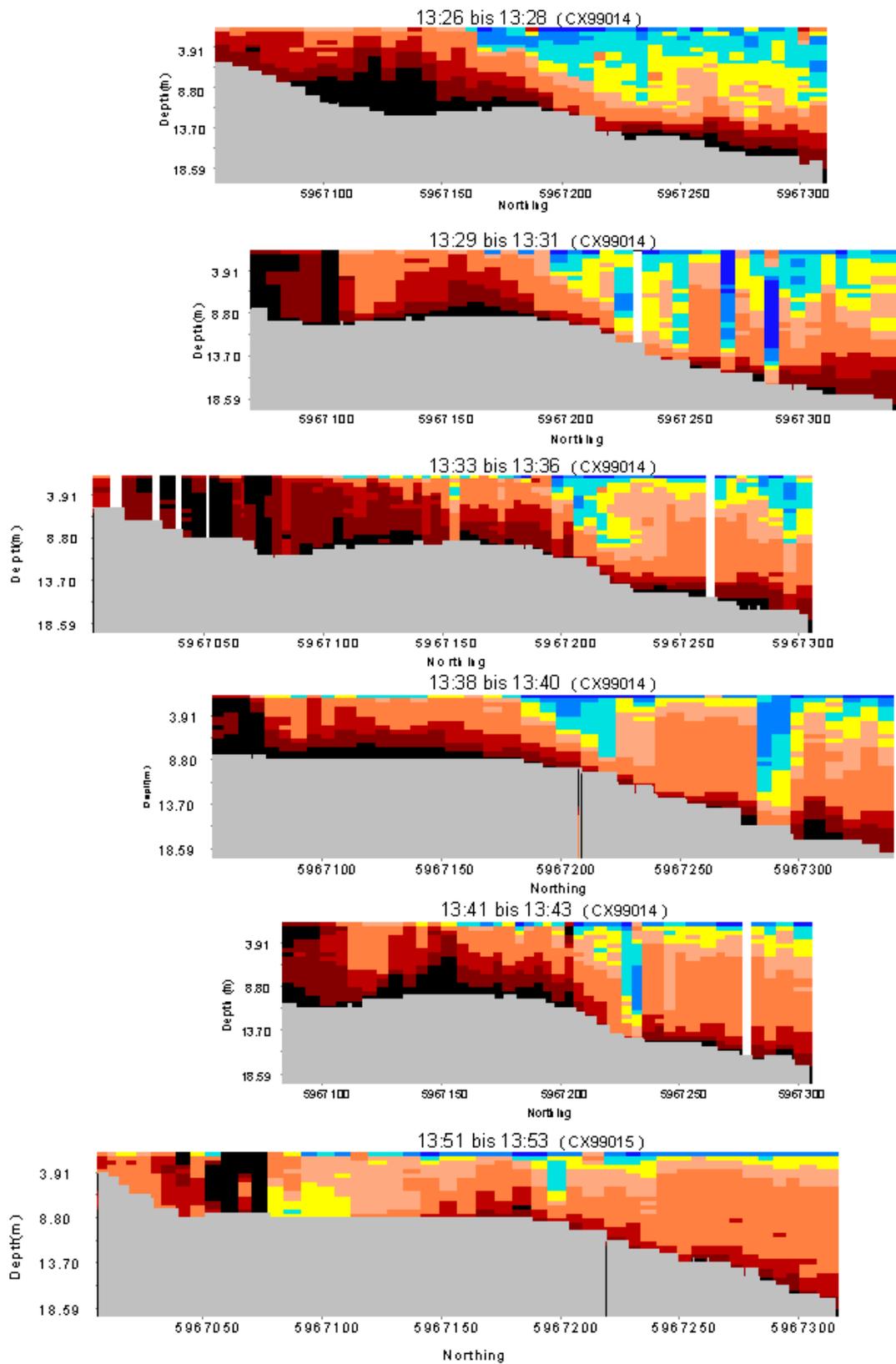


Abb. 4b: Verklappung der Ladung 1643 am 2. 11. 1999 - Messung 14

## **6.2 Messungen des natürlichen Hintergrundes an der Klappstelle bei Ebbstrom**

Im Anschluss an die Verklappung der Ladung 1643 wurde ein Längsprofil der Klappstelle von West nach Ost gemessen (Messung 16, Abb. 5). Dabei zeigt sich eine ausgeprägte vertikale Schichtung. Die Konzentrationen sind etwa halb so groß wie im Zentrum der Schwebstoffwolke aus der Verklappung der Ladung 1643.

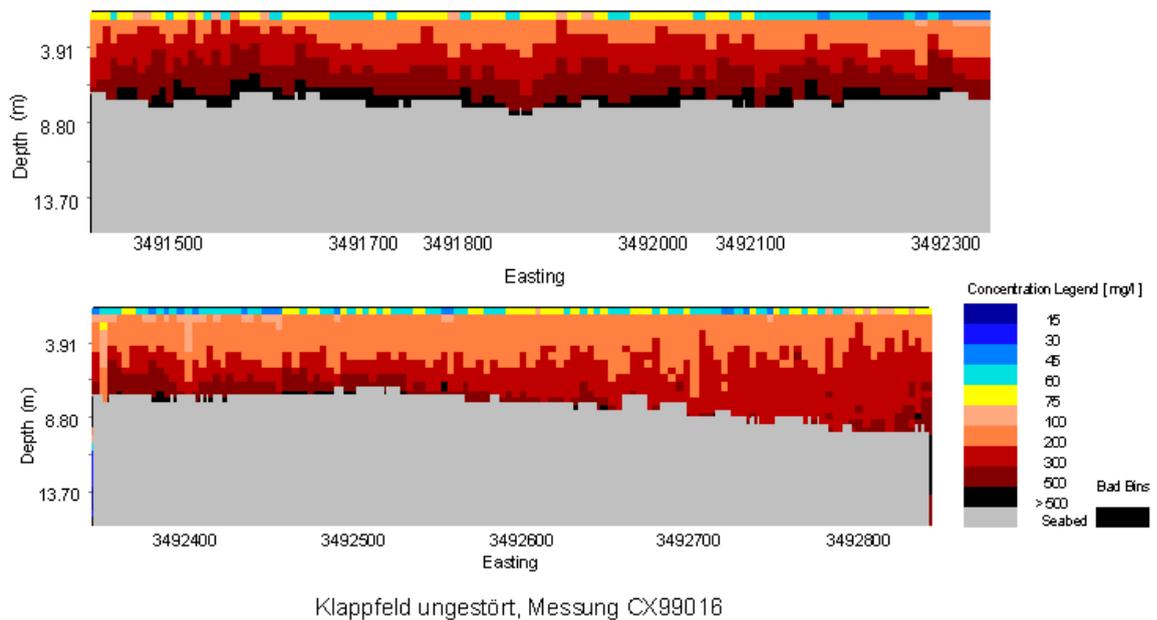
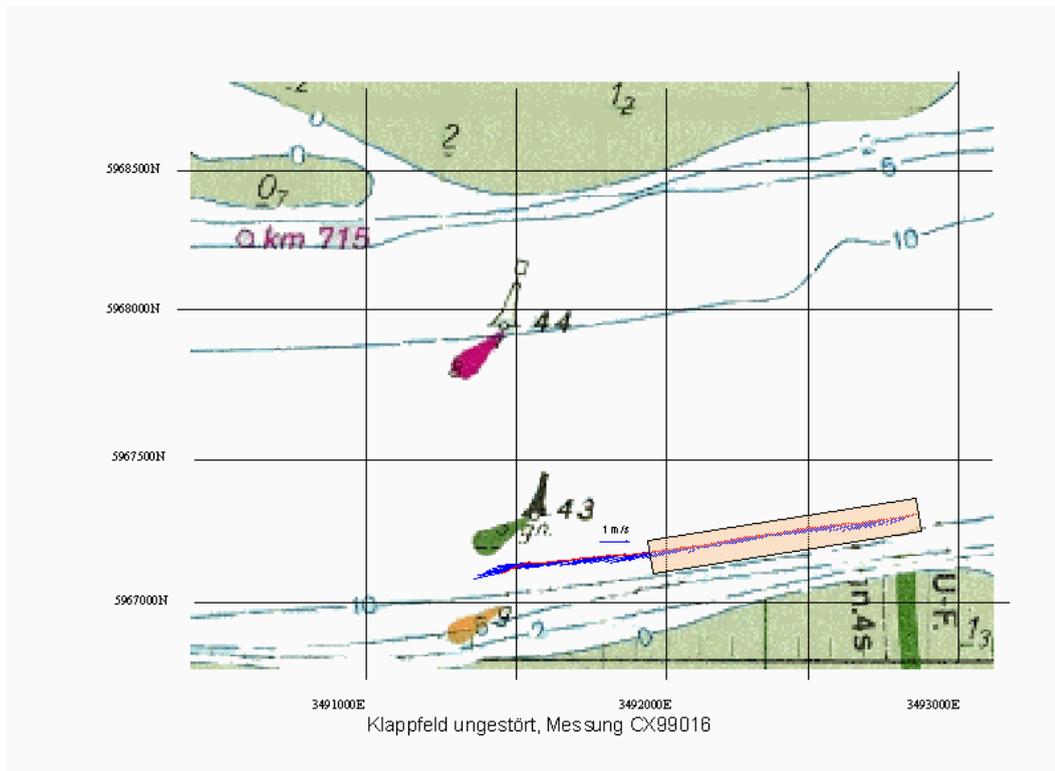


Abb. 5: Klappfeld ungestört bei vollem Ebbstrom - Messung 16

### **6.3 Verklappung von Ladung 1644 bei Flutstrom**

Die Verklappung erfolgte am 2. 11. 1999 in der Zeit zwischen 16:41 und 17:30 Uhr bei auflaufendem Wasser und wurde in der Messung 17 aufgezeichnet (Abb. 6a,b). Der gefahrene Kurs wurde in 9 Abschnitte zerlegt (Abb. 6a). Das Querprofil I zeigt die ungestörten Verhältnisse vor Beginn der Verklappung. Abschnitt II ist ein stromab gefahrenes Längsprofil (auf das Klappschiff zu) und zeigt ebenfalls noch natürliche Verhältnisse. Die Schwebstoffgehalte sind zur Zeit der Kampagne bei Flut deutlich niedriger als bei Ebbe, da sich die Trübungszone stromauf von den Messorten befand.

Die Wolke des verklappten Materials wurde im Querprofil III gefunden und dann stromauf mit der Flutströmung in den folgenden Querprofilen verfolgt. Auch hier zeigt sich neben dem allmählichen Absinken des Materials ein bodengefällebedingter Transport Richtung Fahrwinne.

2. November 1999, Verklappen von Ladung Nr. 1644, (cx99017)

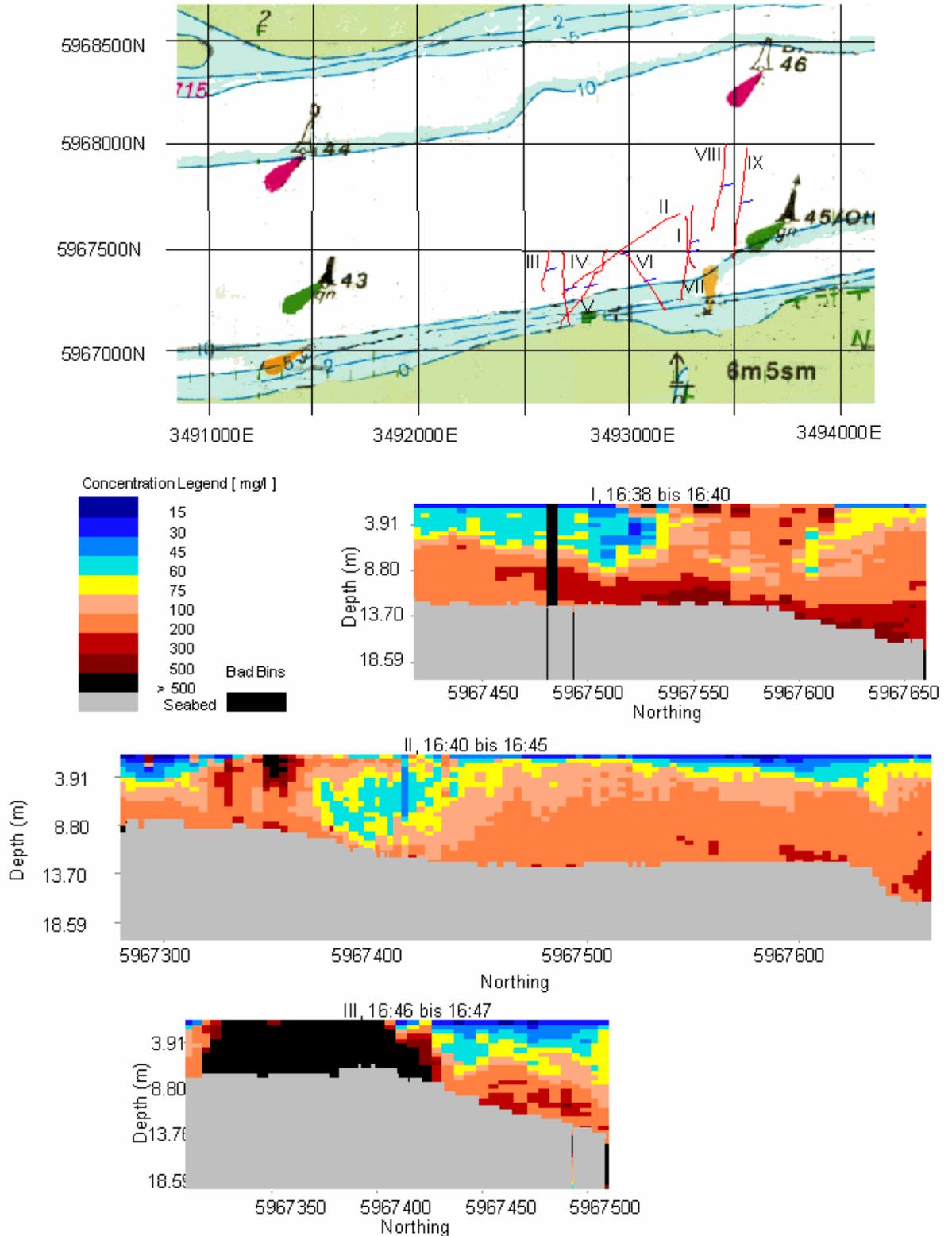


Abb. 6a: Verklappung von Ladung 1644, Kursabschnitte I bis III - Messung 17

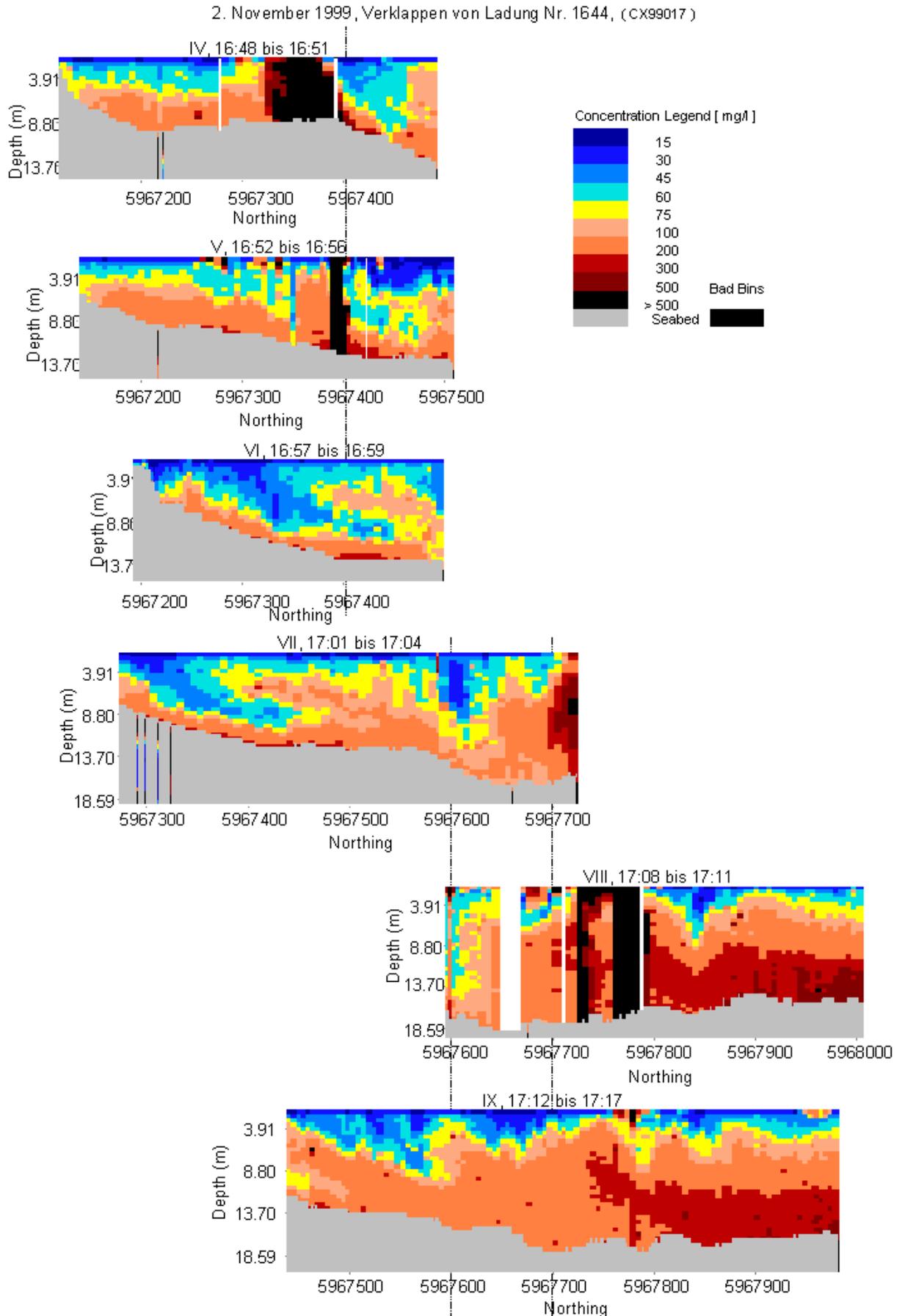


Abb. 6b: Verklappung von Ladung 1644, Kursabschnitte IV bis IX - Messung 17

#### **6.4 Aufnahmen der Ladung 1649 bei Flutstrom**

Die Messung erfolgte bei Flutstrom am 3.11.1999 in der Zeit zwischen 8:49 und 9:30 Uhr (Abb. 7). Zum Zeitpunkt des Baggerbeginns (8:50 Uhr) befand sich das Messschiff ca. 280 m vom Bagger entfernt stromauf. Gegen 8:57 drehte der Bagger in Stromabrichtung, das Messschiff fuhr weiter stromauf und verfolgte das mobilisierte Material. Dabei waren die Konzentrationen zunächst oberhalb des Messbereichs. Mit zunehmender Entfernung vom Bagger nahmen die Konzentrationen in der Wassersäule durch Absinken des Schwebstoffs kontinuierlich ab, bis gegen 9:18 in 1700 m Entfernung vom Bagger die Hintergrundswerte erreicht wurden. Am Ende der Messung wurde eine kurzes Stück in Richtung Fahrrinne gefahren. Dabei stiegen die Konzentrationen wieder an. Es ist daher davon auszugehen, dass auch hier ein Teil des mobilisierten Materials in Richtung der Strommitte transportiert wird.

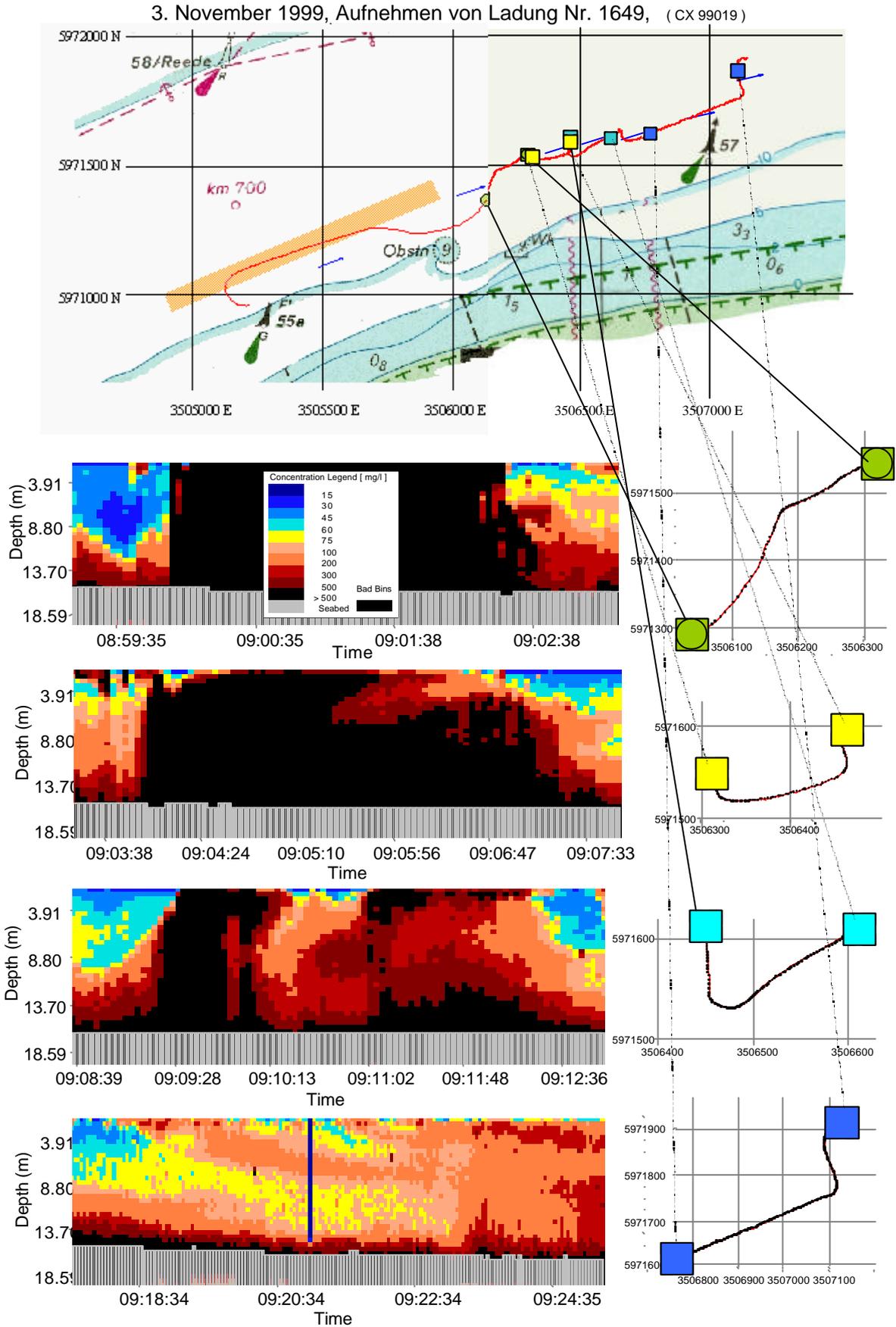


Abb. 7 Aufnahmen der Ladung 1649 am 3. 11. 1999 bei Flutstrom - Messung 19

### **6.5 Aufnahme von Ladung 1650 bei beginnendem Ebbstrom**

Diese Messung (Nr. 21, Abb. 8a,b) ist gekennzeichnet durch stauwasserbedingte sehr geringe Hintergrundkonzentrationen. Das aufgenommene Material war im Gegensatz zur überwiegenden Mehrheit der Ladungen feinkörnig (61 % kleiner als 63  $\mu\text{m}$ ). Zu Beginn der Messung befand sich das Messschiff ca. 100 m hinter dem Bagger. Nur am südlichen Ende des Profil I zeigen sich am nördlichen Rande des Baggerfeldes Ausläufer der Schwebstofffahne. Im Profil II wurde das Baggerfeld dann in Nord-Süd Richtung passiert und dabei auch die Fahne durchquert. Deren Querausdehnung betrug dabei ca. 500 m, wobei der Bagger sich inzwischen 300 m stromauf befand. Die Konzentrationen im Zentrum der Fahne waren dabei oberhalb des Messbereichs. Die Profile III und IV zeigen ein Verdriften der Fahne in Richtung Strommitte (Baggerentfernung 400 m), die mit einer bodennahen Verbreiterung gekoppelt ist. Ein Querprofil unmittelbar hinter dem Bagger zeigt Abbildung V. Die Situation 100 m stromab zeigt Abbildung VI mit einer Querausdehnung der Fahne von über 300 m in mittlerer Tiefe, wobei ufernah ein (wahrscheinlich durch geringere Strömung bedingtes) Absinken des Materials zu beobachten ist. Profil VII ist ein Längsprofil der Schwebstofffahne hinter dem Bagger, die sich über eine Länge von mehr als 500 m erstreckt. Der Kern mit den Konzentrationen über 500 mg/l ist schon nach 300 m verschwunden.

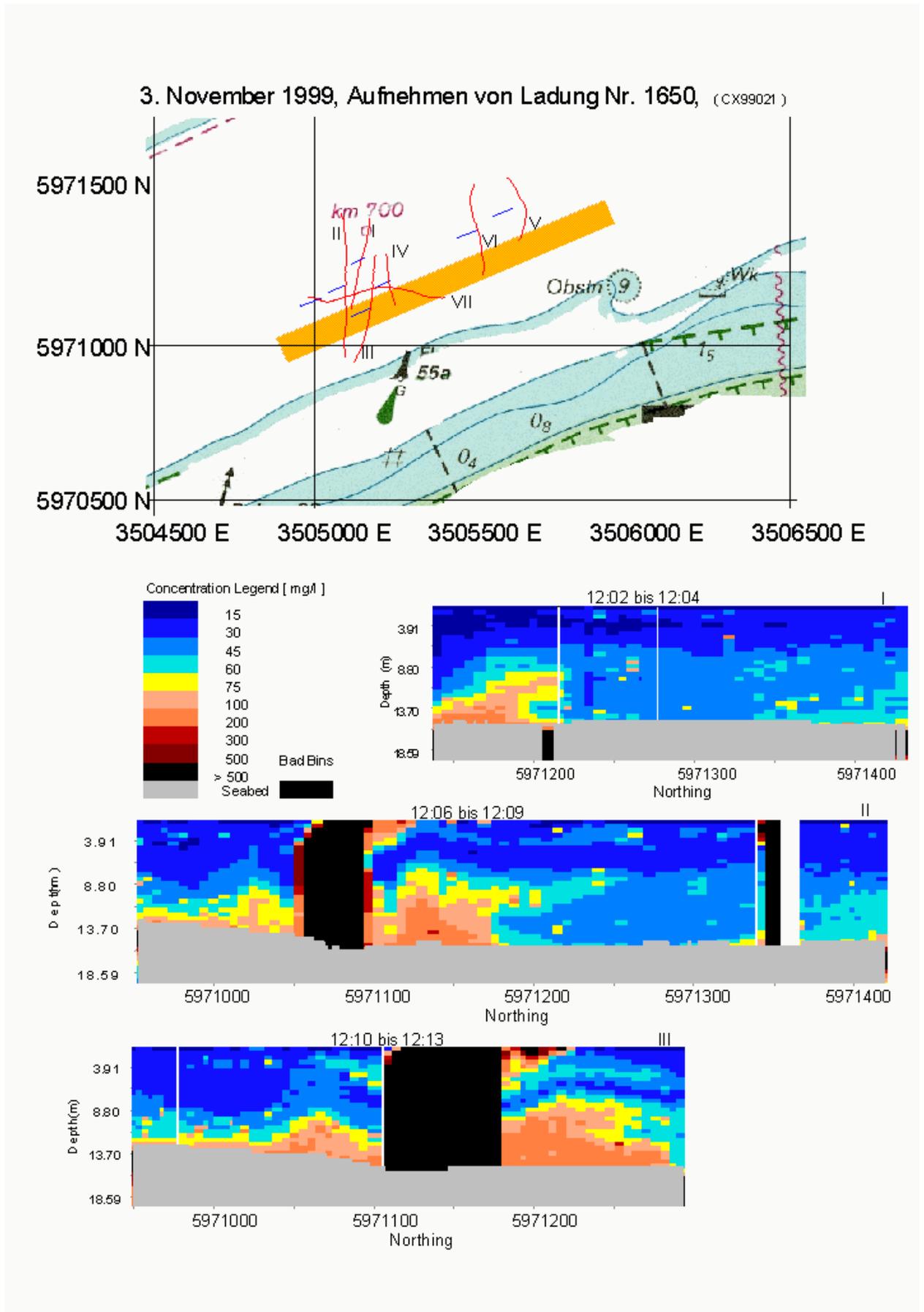


Abb. 8a: Aufnahme von Ladung 1650 (Feinsediment), Profile I bis III - Messung 19

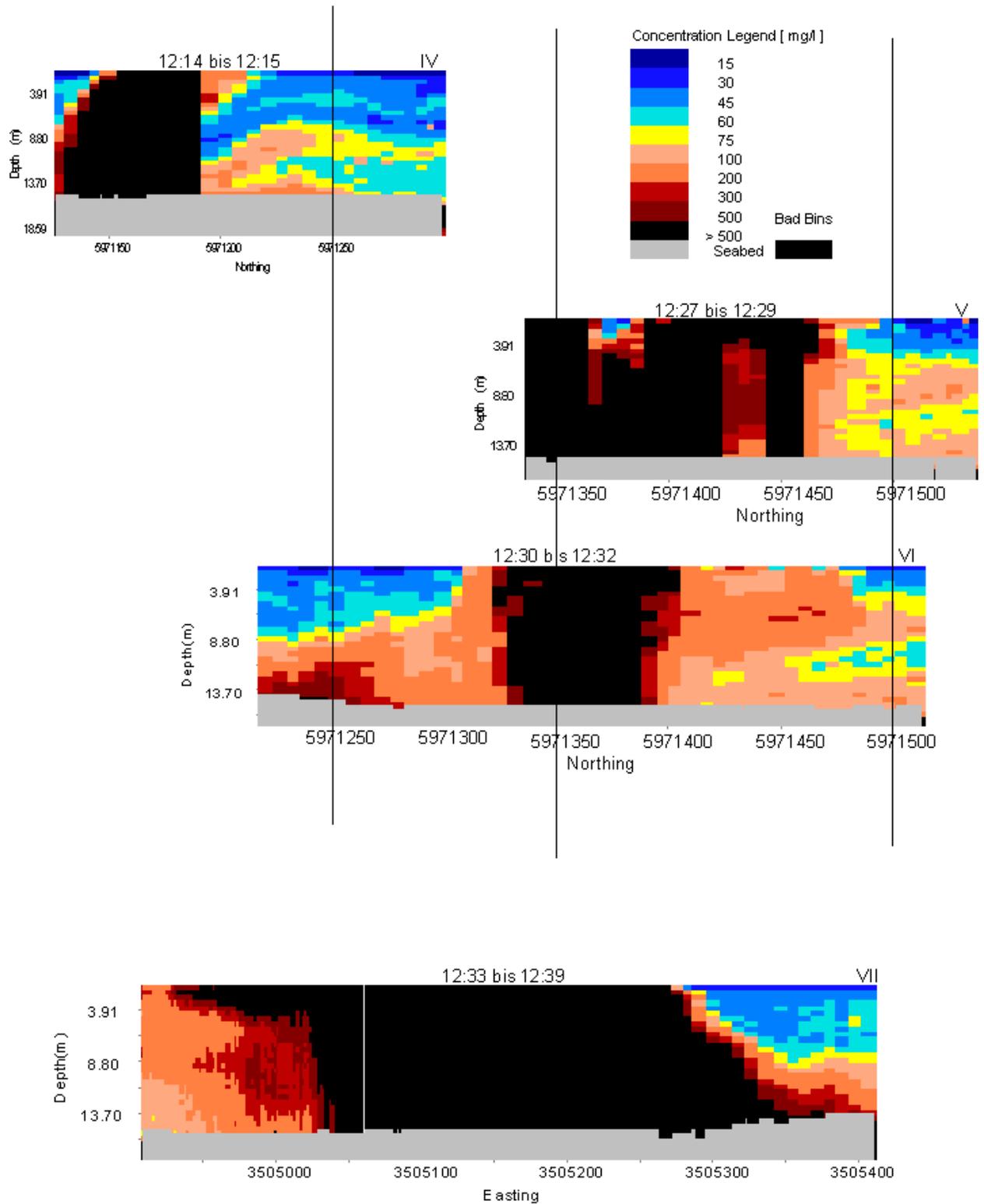


Abb. 8b: Aufnahme von Ladung 1650 (Feinsediment), Profile IV bis VII

## **6.6 Verklappen von Ladung 1650 bei vollem Ebbstrom**

Die Verklappung der feinkörnigen Ladung 1650 erfolgte am 3. 11. 1999 in der Zeit zwischen 13:55 und 14:30 Uhr bei ablaufendem Wasser und wurde in der Messung 24 aufgezeichnet (Abb. 9a,b). Die Profile I bis IV sind Querfahrten hinter dem Klappschiff und zeigen die Querausdehnung der Schwebstofffahne und deren allmähliches Absinken (Profil IV). Auch deutet sich ein Transport in Richtung Strommitte an, der deutlicher in den folgenden Profilen erkennbar wird. Bei der Interpretation dieser Messung ist zu bedenken, dass die Hintergrundswerte bei Ebbe deutlich höher als bei Flut oder gar bei Stauwasser sind. So zeigen die Profile V bis VIII, die sich 700 bis 1200 m stromab befinden ein allmähliches Verschwinden der Fahne im Hintergrund (Profil VIII).

3. November 1999, Verklappen von Ladung Nr. 1650 (CX99024)

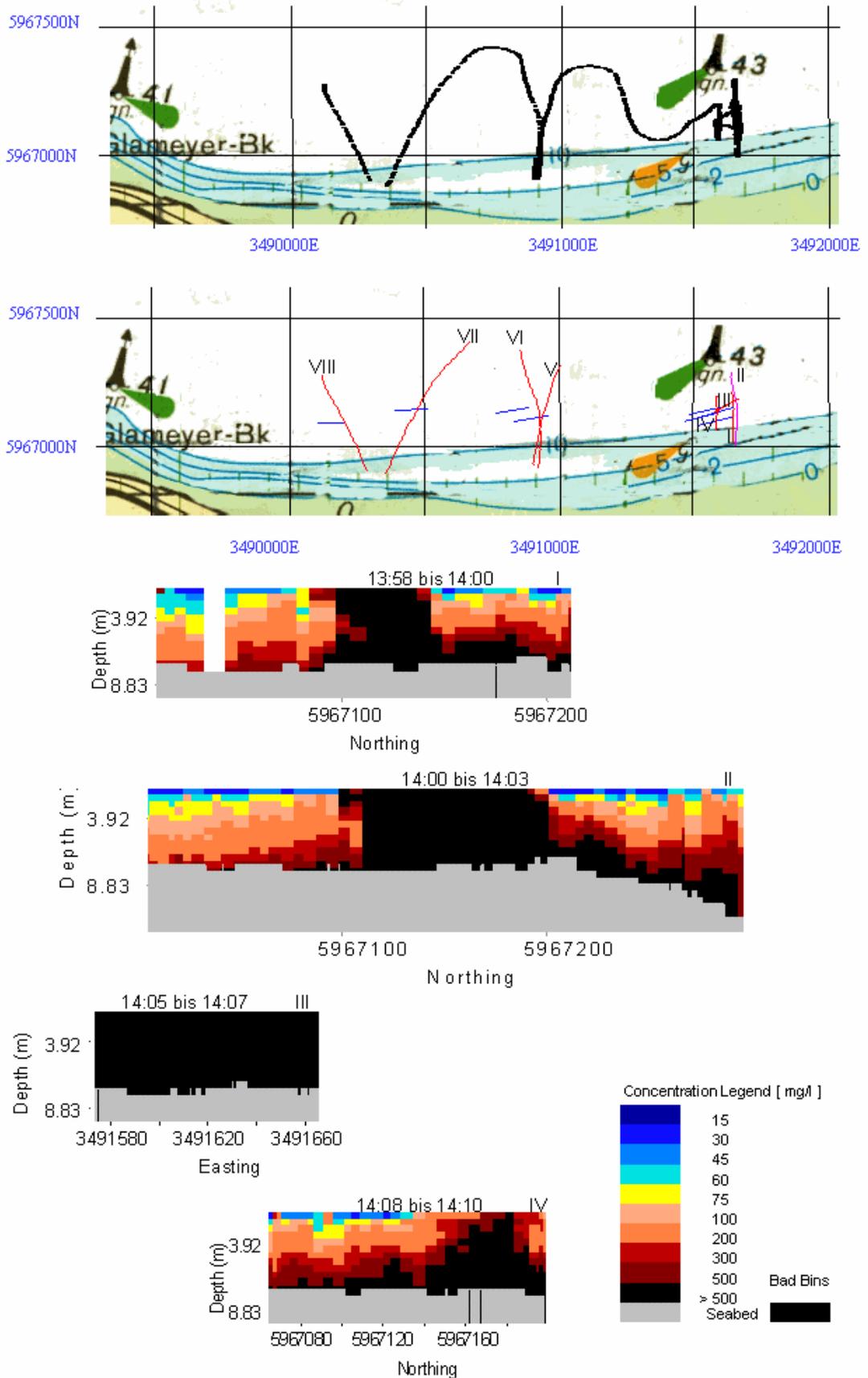


Abb. 9a: Verklappung von Ladung 1650 (Feinsediment), Profile I bis IV, Mess. 24

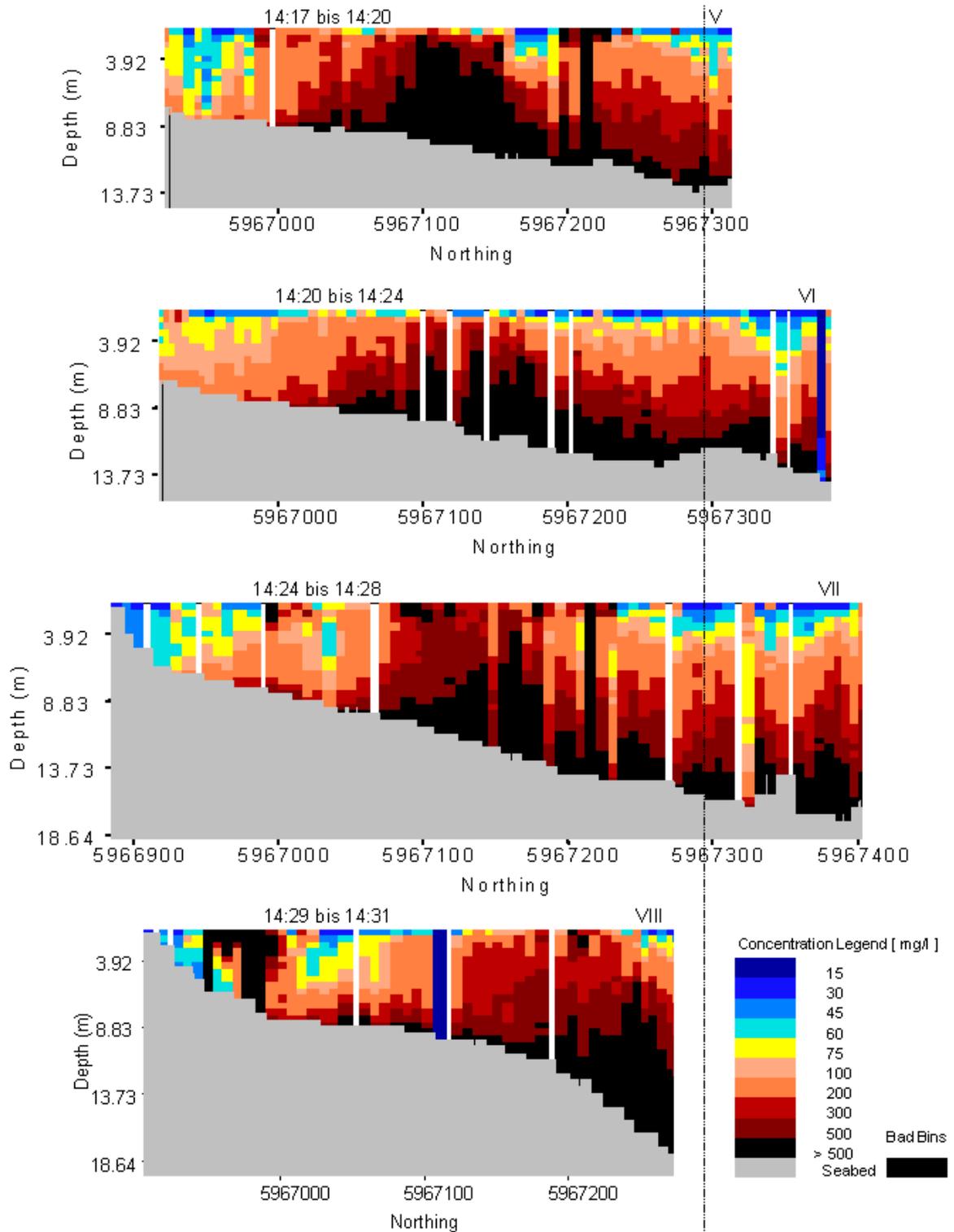


Abb. 9b: Verklappung von Ladung 1650 (Feinsediment), Profile V bis VII Mess. 24

## 6.7 Aufnahmen von Ladung 1651 bei abnehmendem Ebbstrom

Die Baggerung erfolgte am 3.11.1999 in der Zeit zwischen 15:37 und 17:04 Uhr bei ablaufendem Wasser und wurde in den Messungen 25 und 26 aufgezeichnet (Abb. 10a-f). Es ist dies die umfangreichste der vorgenommenen Schwebstoffmessungen bei hohen Hintergrundkonzentrationen von mehr als 200 mg/l. Die Messungen beginnen mit Querprofilen hinter dem stromauf fahrenden Bagger. Die Profile I bis IV die Schwebstofffahne etwa 800 m hinter dem Bagger von ca. 50 m Breite (bodennah: 100 m). Gegen 16:05 Uhr beendet der Bagger vorübergehend die Aufnahme um zu wenden (Profile V und VI) und die Schwebstoffkonzentrationen gehen zurück. Die Profile VII und VIII zeigen die Schwebstofffahne hinter dem stromab (mit dem Ebbstrom) fahrenden Bagger, wobei wahrscheinlich nur das absinkende Material registriert wird, das auf der Hinfahrt mobilisiert wurde. Um 16:23 Uhr fährt der Bagger erneut stromauf. Das Messschiff folgt in Zickzacklinien in ca. 450 m Entfernung (Profile IX und X). Die Profile XII bis XVI zeigen Querschnitte der Fahne ca. 300 m hinter dem Bagger mit konstanter Breite und zur Strommitte gerichtetem Materialtransport. Gegen 16:42 Uhr wird die Baggerung unterbrochen (Profile I bis III in Abb. 10e) und um 16:53 Uhr wieder aufgenommen (Profile IV bis VII, ca. 300 m hinter dem Bagger).

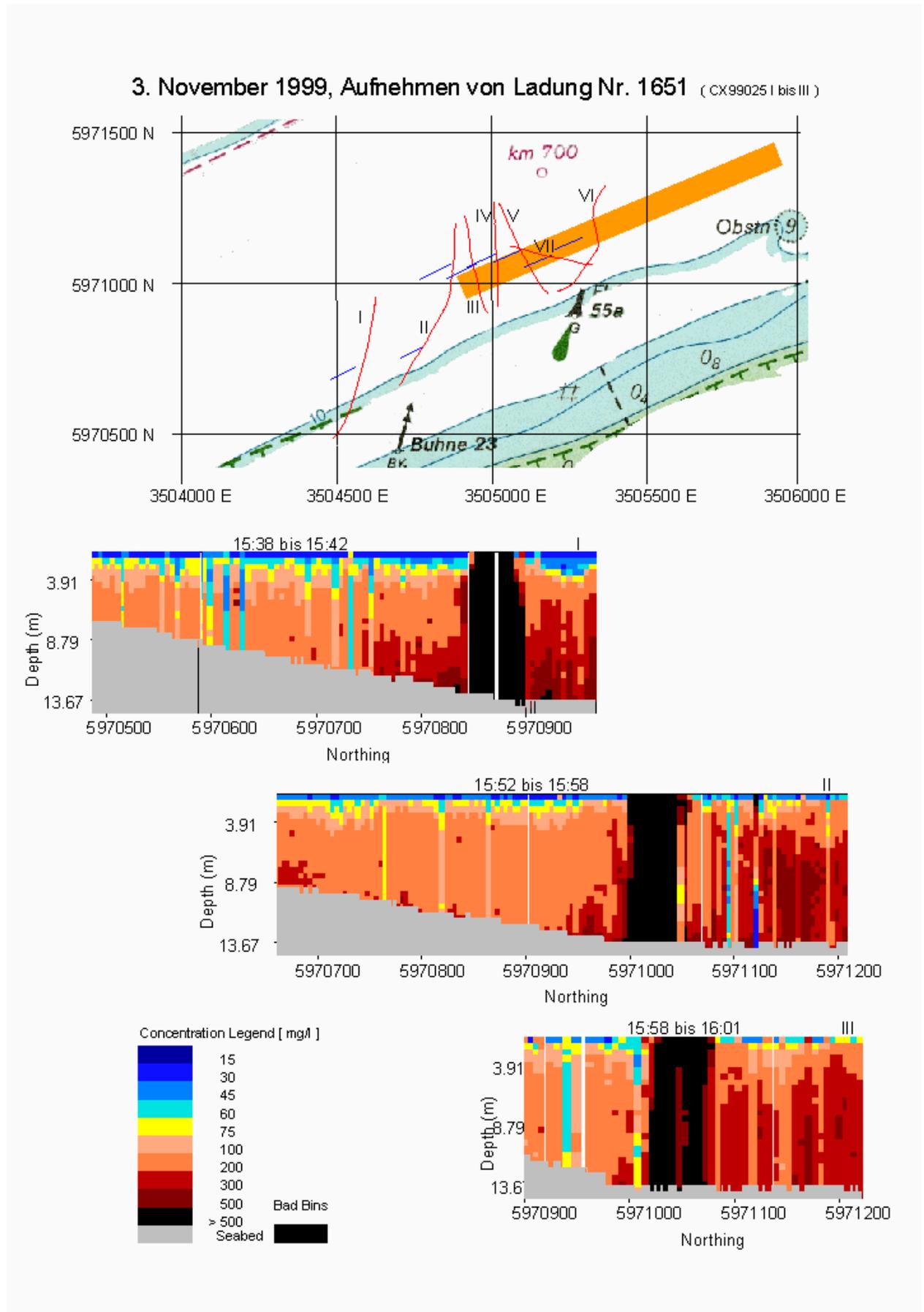


Abb. 10a: Aufnahmen von Ladung 1651, Kursabschnitte I bis III - Messung 25

**3. November 1999, Aufnahmen von Ladung Nr. 1651 (CX99025 IV bis VI)**

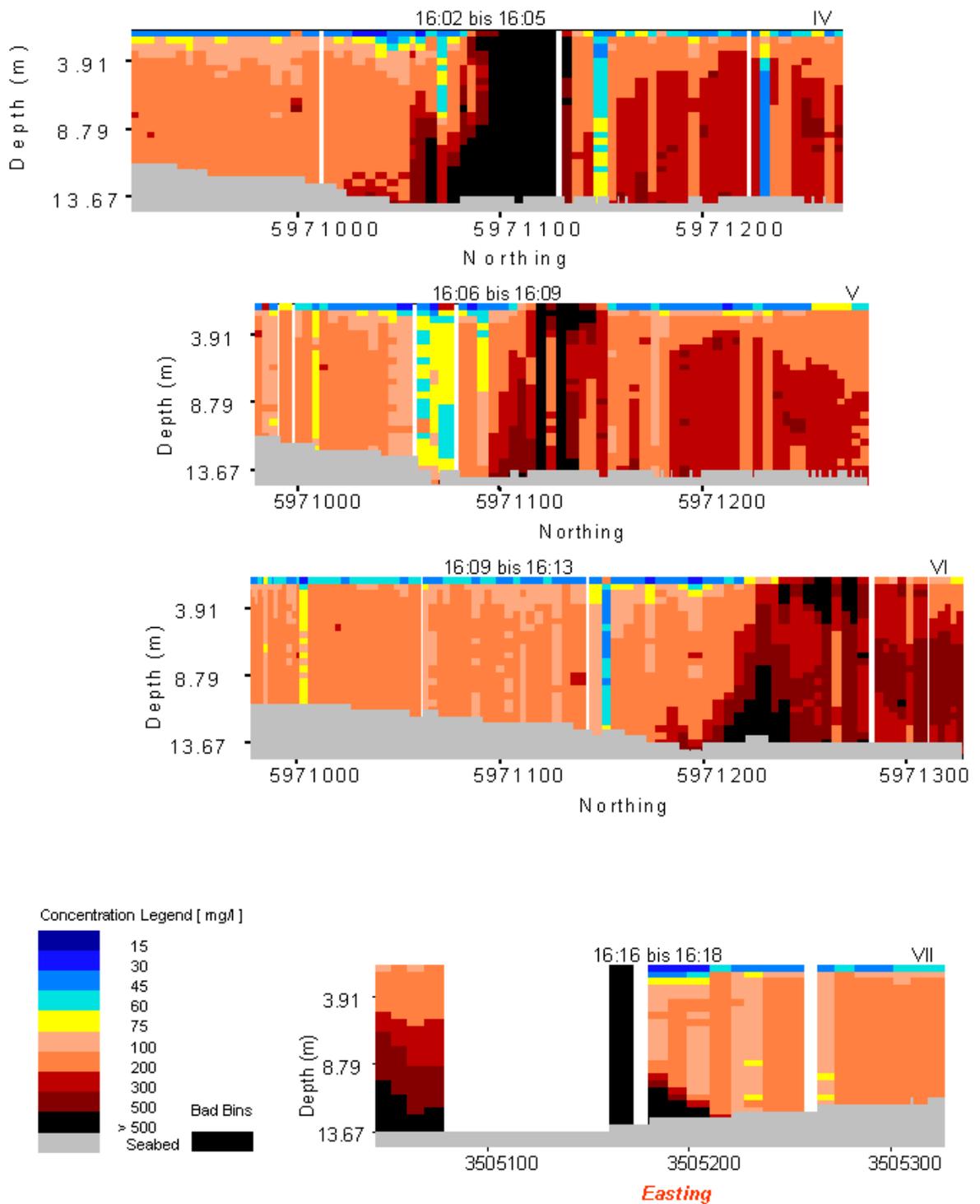


Abb. 10b: Aufnahmen von Ladung 1651, Kursabschnitte IV bis VII - Messung 25

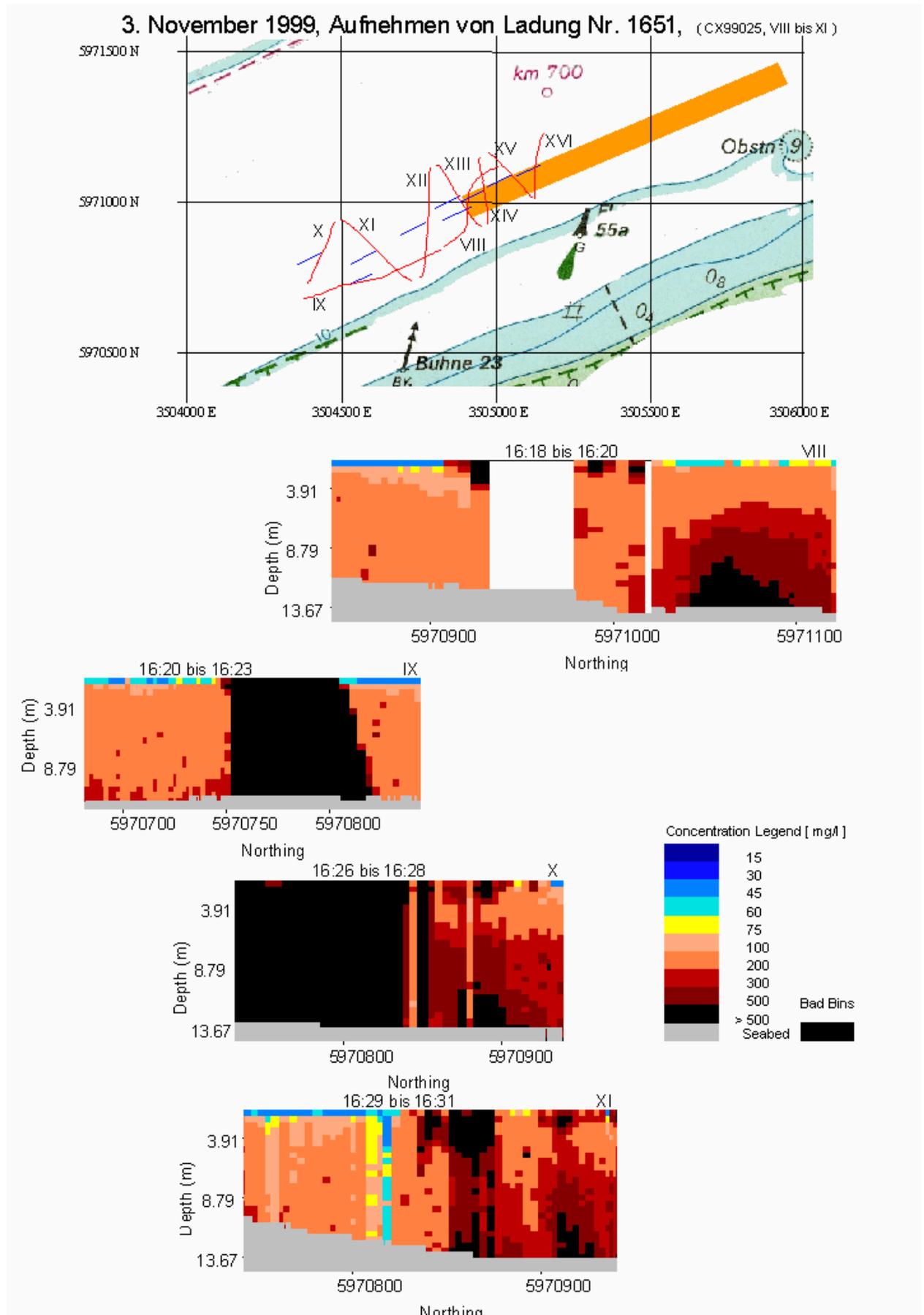


Abb. 10c: Aufnahmen von Ladung 1651, Kursabschnitte VIII bis XI - Messung 25

3. November 1999, Aufnahmen von Ladung Nr. 1651, ( CX99025, XII bis XVI )

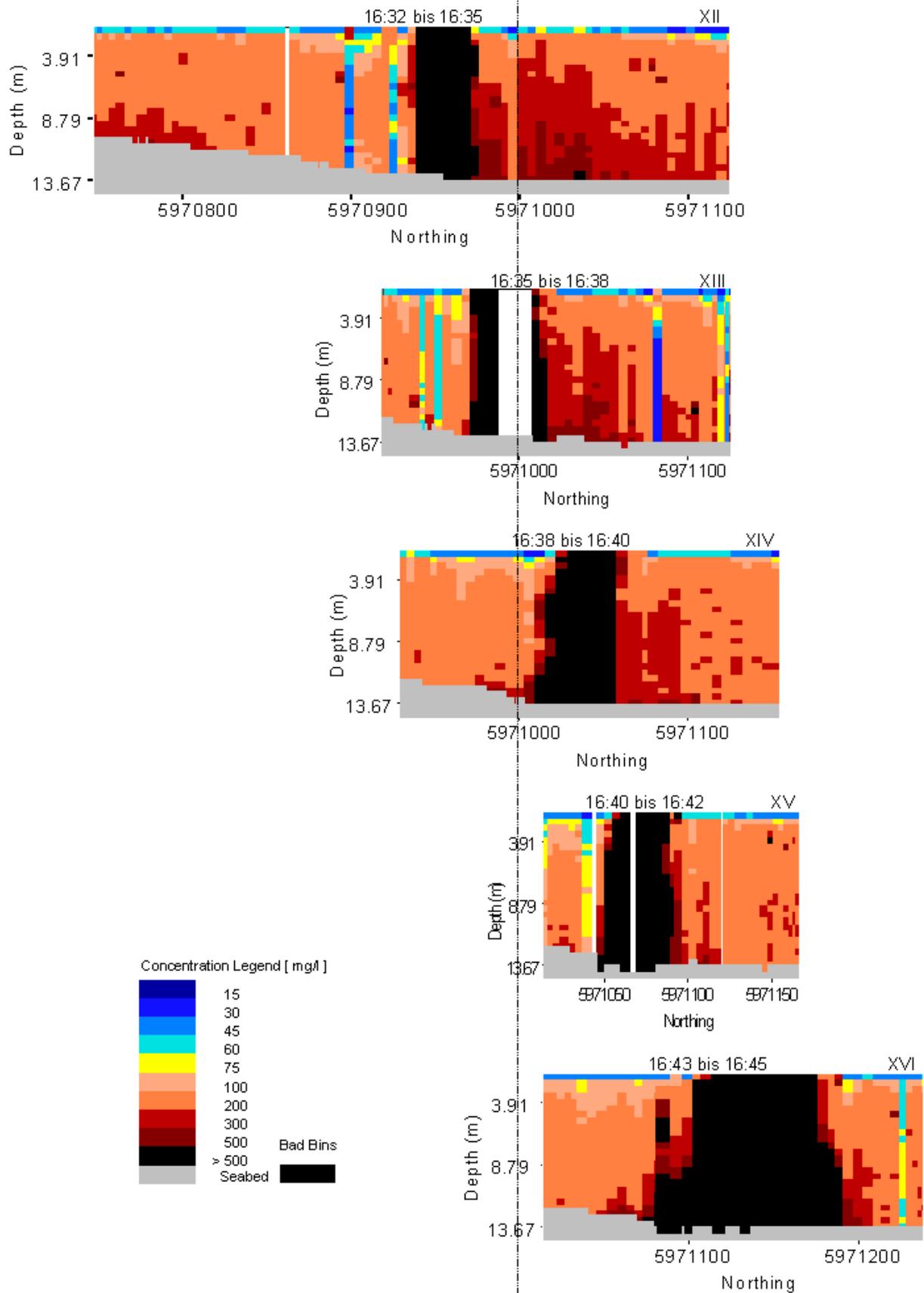


Abb. 10d: Aufnahmen von Ladung 1651, Kursabschnitte XII bis XVI - Messung 25

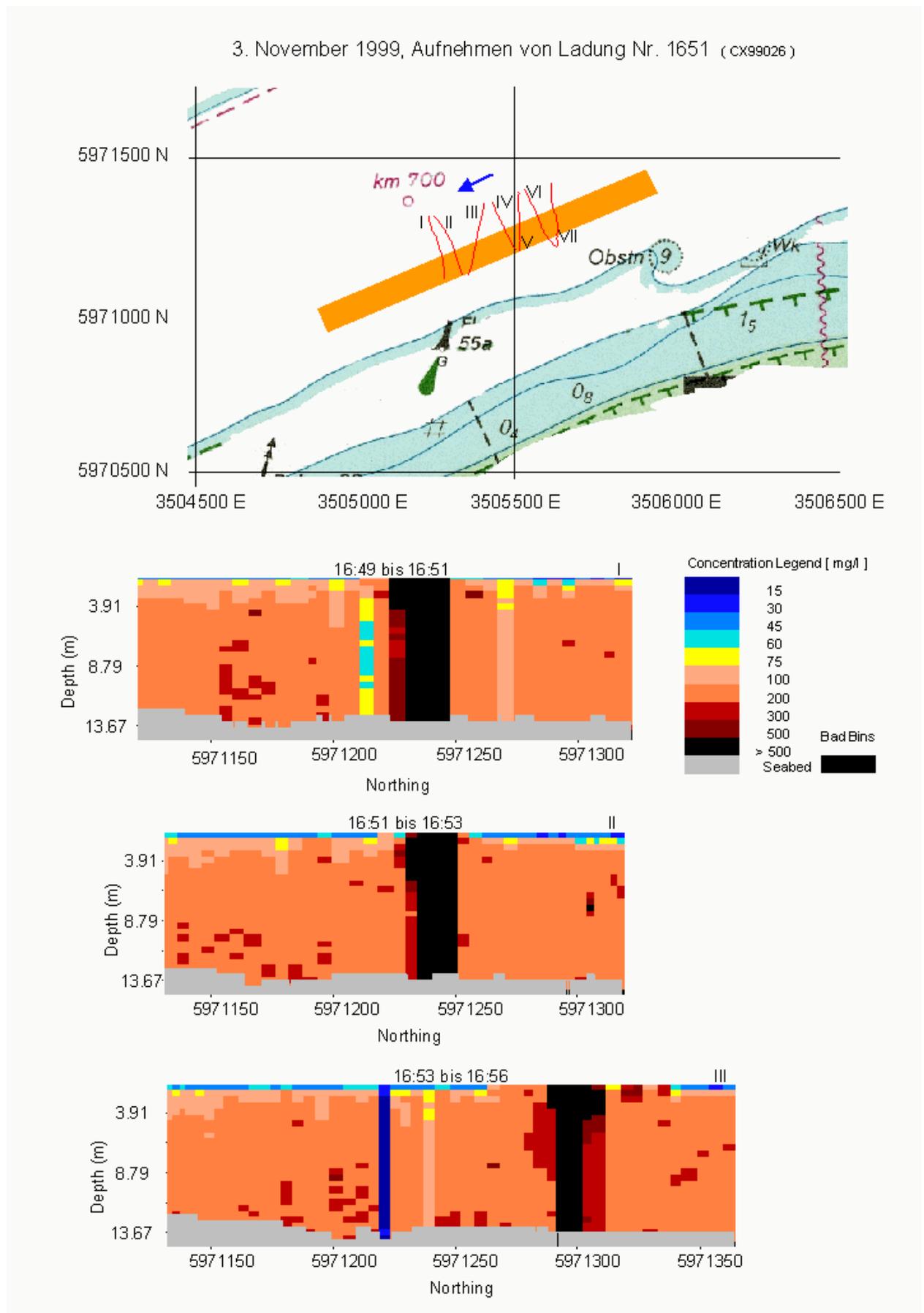


Abb. 10e: Aufnahmen von Ladung 1651, Kursabschnitte I bis III - Messung 26

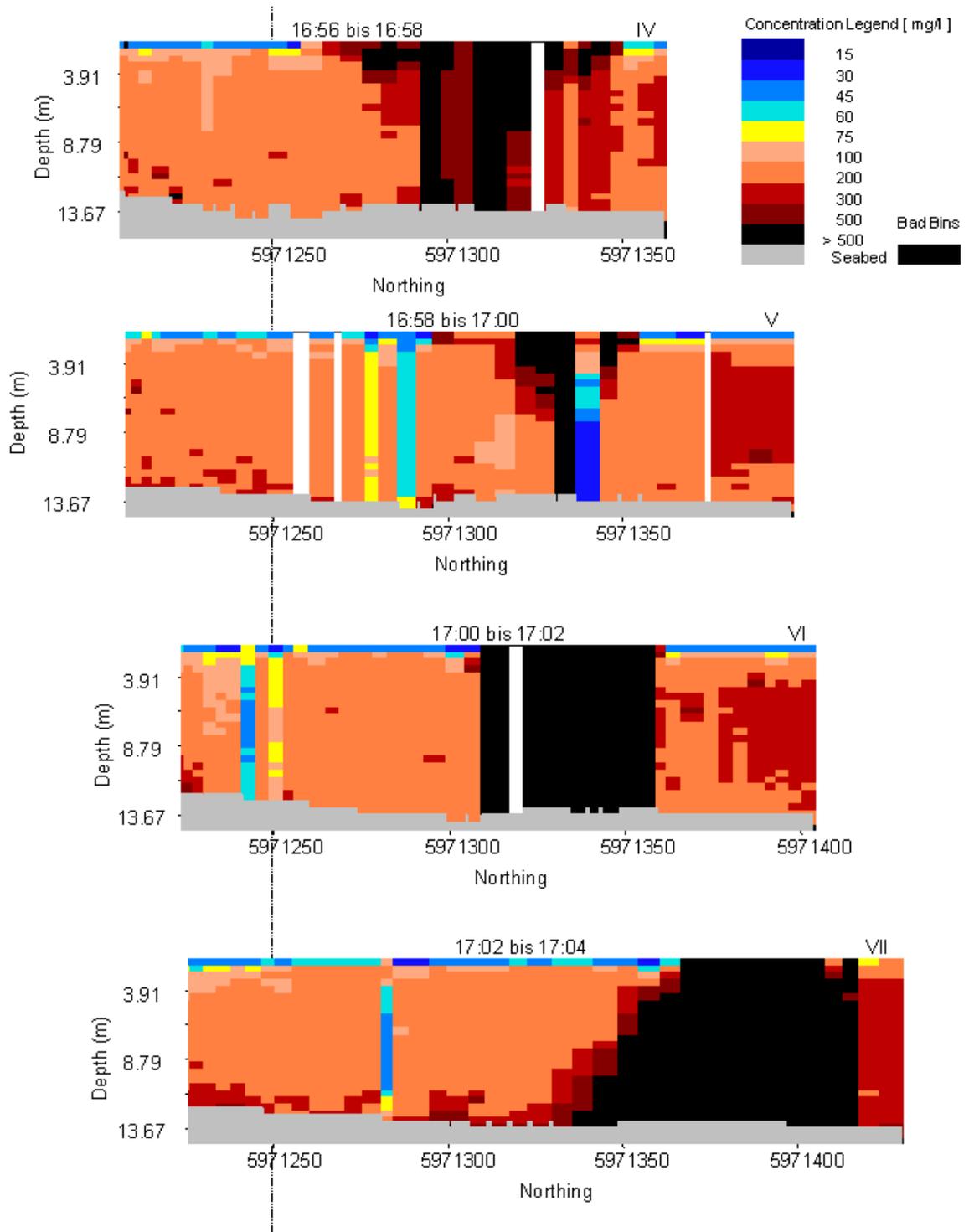


Abb. 10f: Aufnahmen von Ladung 1651, Kursabschnitte VI bis VII - Messung 26

### **6.9 Verklappung von Ladung 1651 bei Stauwasser**

Die Verklappung erfolgte am 3.11.1999 in der Zeit zwischen 17:51 und 18:33 Uhr bei Stauwasser kurz nach dem Kenterpunkt Ebbe und wurde in der Messung 27 aufgezeichnet (Abb. 11a,b). Auf den Querprofilen I und II stromab von der Klappstelle zeigen sich die stauwassertypischen starken Konzentrationsgradienten des natürlichen Hintergrundes. Ein Einfluss der Verklappung ist nicht erkennbar. Das verklappte Material findet sich dagegen im anschließenden Längsprofil III in Bodennähe bei 3493000 m Rechtswert. Das abschließende Längsprofil VII zeigt einen geringen Stromauftransport des Materials mit dem beginnenden Flutstrom. Auf den Querprofilen IV bis VI diesmal stromauf der Klappstelle ist wiederum nur der natürliche Hintergrund beobachtbar. Bei der Verklappung bei Stauwasser bleibt das Material also zunächst in unmittelbarer Nähe der Klappstelle.

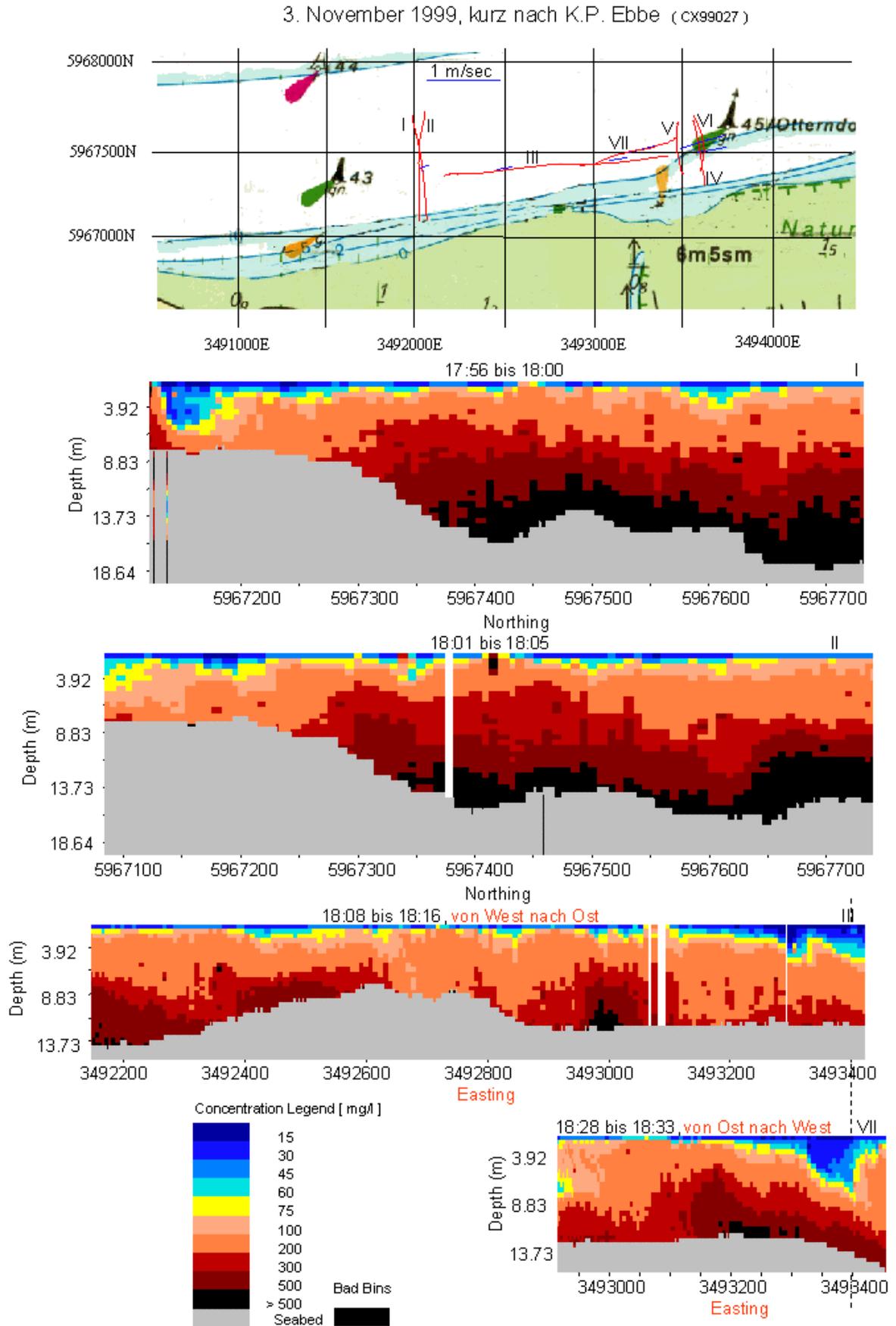


Abb. 11a: Verklappung von Ladung 1651, Kursabschnitte I bis III, VII - Messung 27

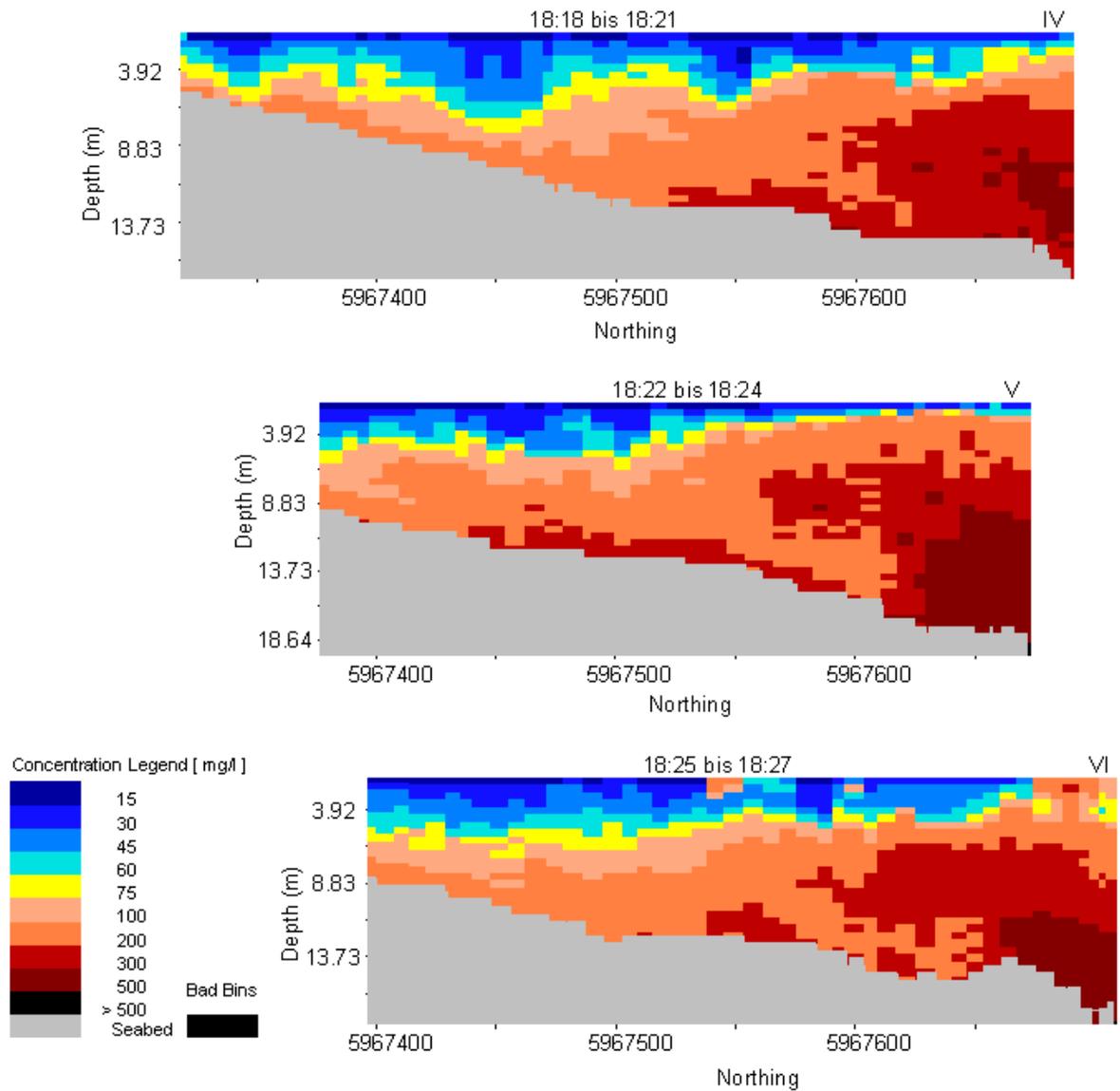


Abb. 11b: Verklappung von Ladung 1651, Kursabschnitte IV bis VI - Messung 27

### **6.10 Aufnahmen von Ladung 1656 bei Flutstrom als Überlaufbaggerung**

Die Baggerung erfolgte im Überlaufverfahren (Overflow). Sie wurde am 4.11.1999 in der Zeit zwischen 9:20 und 9:50 Uhr bei auflaufendem Wasser vorgenommen und in den Messungen 29 und 30 aufgezeichnet (Abb. 12a,b). Die Messung begann 320 m hinter dem Bagger bis zum Erreichen der Schwebstofffahne direkt hinter dem Bagger (Profil I, 300 m) mit anschließendem Queren des Baggerfeldes (300 bis 400 m) und Stromabverfolgung der Fahne. Dabei zeigte sich, dass bei Flutstrom schon wenig stromab vom Bagger keine Auswirkungen der Baggerung feststellbar sind. Das Profil II, das treibend hinter dem Bagger aufgezeichnet wurde, zeigt, dass auch neben dem Baggerfeld natürliche Hintergrundwerte gemessen werden. Erst am Profilende, wo der Kurs das Baggerfeld quert, ist die Fahne wieder messbar. Dagegen ist die Fahne auch noch 500 m stromauf des Baggerfeldes (Profil III) gut erkennbar. Messung 30 (Abb. 12b) zeigt die Verbreiterung der Fahne stromauf der Baggerstelle. Die Fahne wird zweimal durchquert (bei 3505100 m und 3505300 m) und ist fast doppelt so breit geworden.

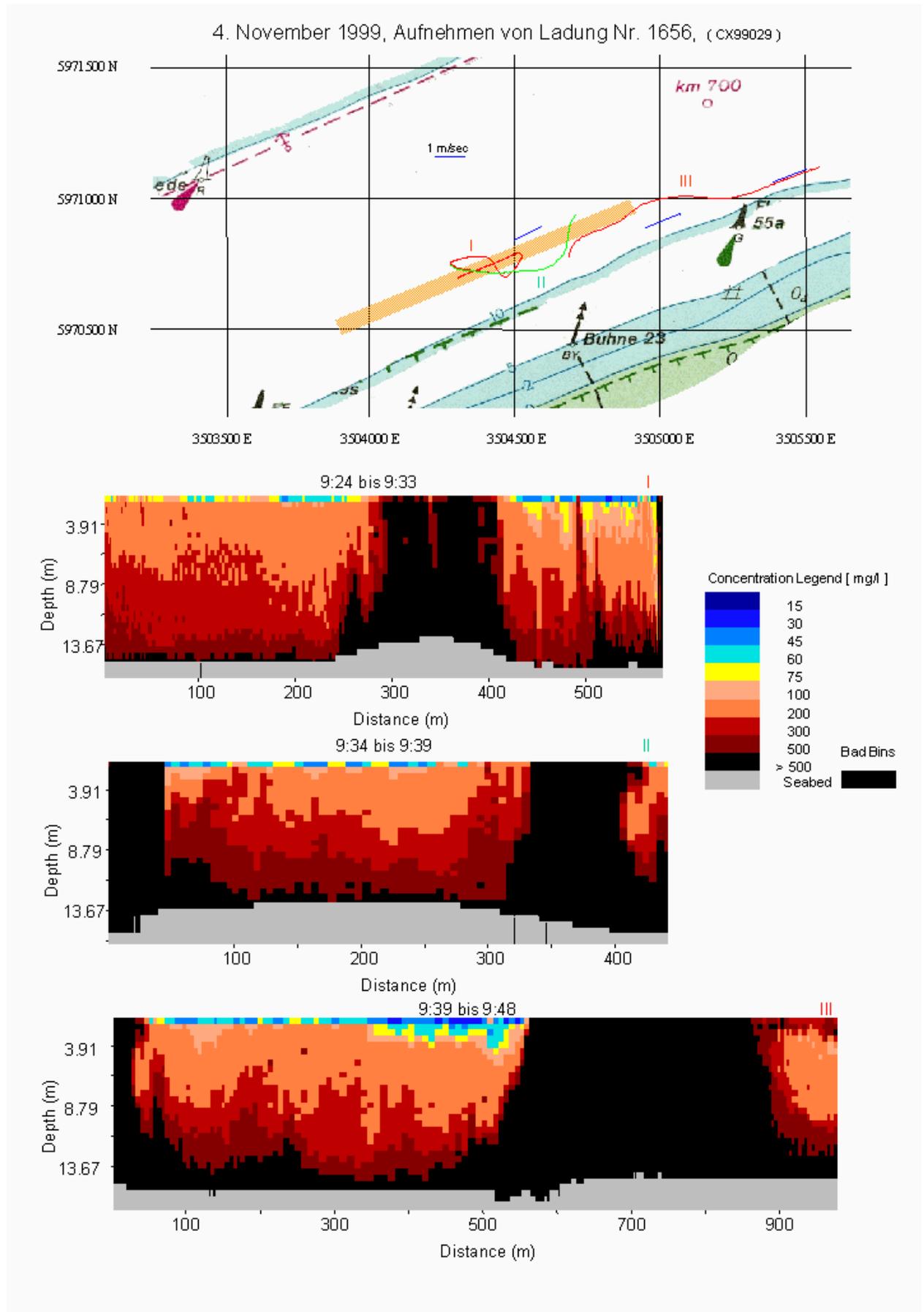


Abb. 12a: Aufnahmen von Ladung 1656, Profile I bis III - Messung 29

4. November 1999, Aufnahmen von Ladung Nr. 1656, (CX99030)

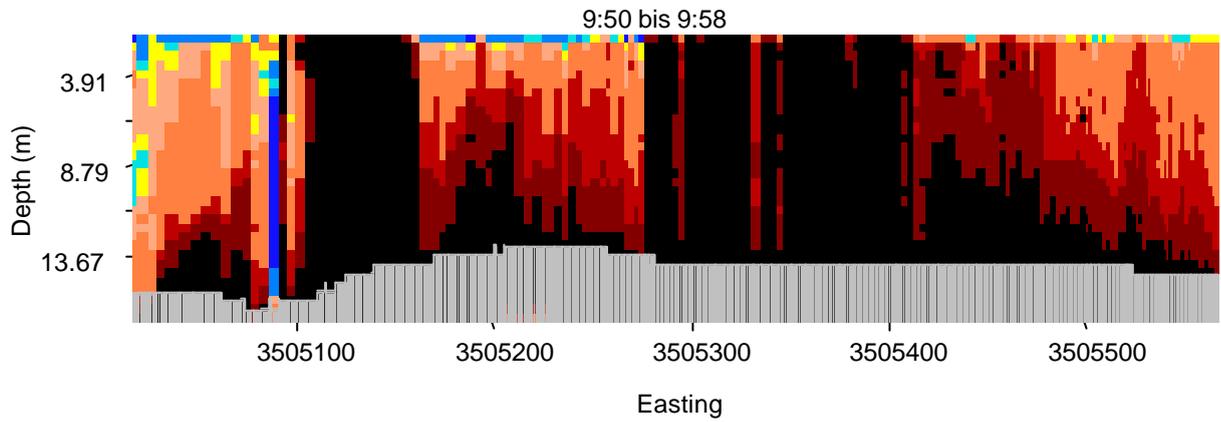
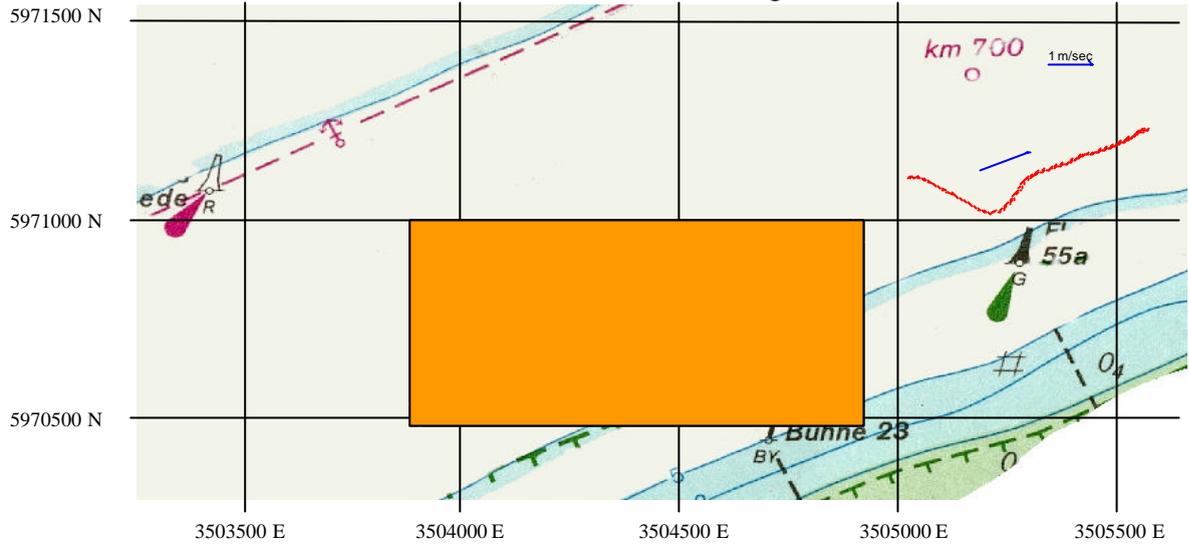


Abb. 12b: Aufnahmen von Ladung 1656 - Messung 30

## 7 Mess- und Beobachtungsprotokoll der Sauerstoffmessungen

### 7.1 Sauerstoffmessungen im Baggerungsgebiet bei Strom-km 699-702

Am 03. und 04.11.1999 konnten jeweils zwei zeitlich getrennte Baggerungsereignisse verfolgt werden (Tab. 4). Bei einer Gesamttiefe von ca. 17 m wurden Proben aus verschiedenen Tiefenstufen bearbeitet. Die Salzgehalte schwankten zwischen 12,9-15,6 ‰ und charakterisieren das Gebiet als Brackwasserzone. Deutliche Tiefengradienten der Salinität wurden nicht festgestellt. Die pH-Werte blieben zu unterschiedlichen Tageszeiten mit Werten von 7,90-7,94 sehr konstant, d.h. messbare Effekte z.B. durch die Primärproduktion im Gewässer konnten nicht nachgewiesen werden. Die Gewässertemperaturen dokumentieren ebenfalls eine vollständige Durchmischung des Wasserkörpers mit Werten von 10,3-10,9 °C.

Die Sauerstoffkonzentrationen lagen bei 8,9-12,9 mg/l und Sättigungswerten zwischen 93-132 % in unkritischen Bereichen, d.h. Sauerstoffdefizite traten zu keinem Zeitpunkt auf. Obwohl fast ausschließlich in der „Bagger-Schwebstoff-Fahne“ gemessen wurde, kann davon ausgegangen werden, dass sogenannte „Null-Proben“ ohne Baggerungsaktivität (siehe Proben-Nr. 19 in Tab. 4) keine gravierenden Unterschiede ergeben hätten.

Effekte der Baggerei auf den Sauerstoffhaushalt können dennoch nicht ausgeschlossen werden. Obwohl die sohnahen Proben (Nr. 9, 23 und 26 in Tab. 4) aus Wassertiefen von 13 bzw. 14 m sehr gut mit Sauerstoff gesättigt waren (113, 125 und 132 %), traten im Zehrungsversuch über 24 Stunden deutliche Abnahmen von 0,4 bzw. 0,7 und 0,8 mg/l auf. Diese Ergebnisse korrelieren mit den nach Versuchsende gemessenen abfiltrierbaren Stoffen, die mit Werten von 218 bzw. 253 und 356 mg/l relativ hoch lagen (Tab. 5). Obwohl die zehrungsfähige Substanz relativ niedrige Glühverluste von 4,6 bzw. 5,0 und 8,1 % aufweist, sind die Absolutwerte im Vergleich zu den anderen Proben mit 13, 17 und 18 mg/l partikulärer organischer Substanz relativ hoch.

Die in Tabellen 4 und 5 mit „plus“ gekennzeichneten Sauerstoffzehrungswerte sind mit Sicherheit nicht auf Sauerstoffproduktion durch Phytoplankton zurückzuführen. Dies belegen auch die gleichbleibenden pH-Werte vor und nach dem Zehrungsversuch. Die Ursache für den sehr geringen Anstieg der Sauerstoffkonzentration um 0,1 mg/l liegt im Rahmen der Fehlerbreite der Sauerstoffmessung.

Tab. 4: Messprotokoll der Salinitäts-, pH-Wert- und Sauerstoff-Bestimmungen im Baggerungsgebiet.

Messschiff: "Baumrönnne" / WSA Cuxhaven										Probenort: Elbe Südseite, Baggerungsgebiet Strom-km 699-702									
										Hopperbagger: "Amerigo Vespucci" / Niederlande									
Datum	Zeit (MEZ)	Proben-Nr.	Wasser-tiefe [m]	Proben-tiefe [m]	Sal. [‰]	pH sofort	O <sub>2</sub> sofort		pH n. 24 h	O <sub>2</sub> nach 24 h		O <sub>2</sub> -Zehr. [mg/l]	Bemerkungen						
							[mg/l]	[%]		[mg/l]	[%]								
03.11.1999	09:05	7 (23*)	17	3	14,1	7,94	9,0	94	10,4	7,96	9,1	94	10,2	plus 0,1	auflaufend, Baggerfahne				
03.11.1999	09:12	8 (24*)	17	5	14,2	7,93	9,8	103	10,4	7,93	9,9	103	10,4	plus 0,1	auflaufend (Stauwasser), Baggerfahne				
03.11.1999	09:17	9 (28*)	17	13	14,7	7,92	12,1	125	10,3	7,92	11,3	119	10,4	0,8	auflaufend (Stauwasser), Baggerfahne				
03.11.1999	09:28	10	17	14	14,4	7,94	9,3	99	10,4	7,92	9,4	98	10,4	plus 0,1	ablaufend, Baggerfahne				
03.11.1999	12:18	13	17	3	14,5	7,93	8,9	95	11,2	7,94	8,8	96	11,8	0,1	ablaufend, Baggerfahne				
03.11.1999	12:36	14	17	7	15,4	7,93	9,9	105	10,9	7,99	9,9	106	11,2	0	ablaufend, Baggerfahne				
03.11.1999	12:55	15	17	7	15,6	7,92	8,9	96	11,4	7,96	8,9	96	11,2	0	ablaufend, Baggerfahne				
03.11.1999	15:45	18 (41*)	12	5	11,6	7,92	9,1	96	11,6	7,92	9,1	96	11,6	0	ablaufend, Baggerfahne				
03.11.1999	15:50	19	12	5	12,5	7,91	9,4	98	11,3	7,94	9,5	101	11,8	plus 0,1	ablaufend, ohne Fahne, Nullprobe				
04.11.1999	09:06	21 (42*)	14	5	11,9	7,92	9,0	93	10,8	7,93	9,0	100	12,8	0	auflaufend, Baggerfahne				
04.11.1999	09:20	22	18	9	12,9	7,90	10,0	105	10,9	7,92	10,0	111	12,8	0	auflaufend, Baggerfahne				
04.11.1999	09:25	23 (47*)	18	13	13,0	7,90	12,6	132	10,8	7,91	11,9	133	12,9	0,7	auflaufend, Baggerfahne				
04.11.1999	09:40	24	17	7	13,1	7,91	10,0	105	10,9	7,93	9,9	110	12,8	0,1	auflaufend, Baggerfahne				
04.11.1999	09:44	25 (48/49*)	17	5	13,0	7,93	9,4	98	10,8	7,93	9,3	104	13,0	0,1	auflaufend, Baggerfahne				
04.11.1999	09:47	26	17	14	12,7	7,92	10,9	113	10,6	7,91	10,5	117	12,9	0,4	auflaufend, Baggerfahne				

\*) GKSS Proben-Nr.

Tab. 5: Messprotokoll der Sauerstoff- und Seston-Bestimmungen im Baggerungsgebiet.

Messschiff: "Baumrönte" / WSA Cuxhaven		Probenort: Elbe Südseite, Baggerungsgebiet Strom-km 699-702									
		Hopperbagger: "Amerigo Vespucci" / Niederlande									
Datum	Zeit (MEZ)	Proben-Nr.	Wasser-tiefe [m]	Proben-tiefe [m]	O <sub>2</sub> -Zehr. [mg/l]	Seston		Glühverlust		Bemerkungen	
						[kg/m <sup>3</sup> ]	[mg/l]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mg/l]		[%]
03.11.1999	09:05	7 (23*)	17	3	plus 0,1	0,1006	100,6	0,0076	7,6	7,6	auflaufend, Baggerfahne
03.11.1999	09:12	8 (24*)	17	5	plus 0,1	0,0610	61,0	0,0067	6,7	11,0	auflaufend (Stauwasser), Baggerfahne
03.11.1999	09:17	9 (28*)	17	13	0,8	0,2529	252,9	0,0126	12,6	5,0	auflaufend (Stauwasser), Baggerfahne
03.11.1999	09:28	10	17	14	plus 0,1	0,1279	127,9	0,0100	10,0	7,8	ablaufend, Baggerfahne
03.11.1999	12:18	13	17	3	0,1	0,0868	86,8	0,0091	9,1	10,5	ablaufend, Baggerfahne
03.11.1999	12:36	14	17	7	0	0,0998	99,8	0,0073	7,3	7,4	ablaufend, Baggerfahne
03.11.1999	12:55	15	17	7	0	0,0624	62,4	0,0063	6,3	10,1	ablaufend, Baggerfahne
03.11.1999	15:45	18 (41*)	12	5	0	0,2771	277,1	0,0154	15,4	5,6	ablaufend, Baggerfahne
03.11.1999	15:50	19	12	5	plus 0,1	0,1541	154,1	0,0182	18,2	11,8	ablaufend, ohne Fahne, Nullprobe
04.11.1999	09:06	21 (42*)	14	5	0	0,1542	154,2	0,0116	11,6	7,5	auflaufend, Baggerfahne
04.11.1999	09:20	22	18	9	0	0,2042	204,2	0,0178	17,8	8,7	auflaufend, Baggerfahne
04.11.1999	09:25	23 (47*)	18	13	0,7	0,2178	217,8	0,0176	17,6	8,1	auflaufend, Baggerfahne
04.11.1999	09:40	24	17	7	0,1	0,1640	164,0	0,0154	15,4	9,4	auflaufend, Baggerfahne
04.11.1999	09:44	25 (48/49*)	17	5	0,1	0,2027	202,7	0,0160	16,0	7,9	auflaufend, Baggerfahne
04.11.1999	09:47	26	17	14	0,4	0,3563	356,3	0,0165	16,5	4,6	auflaufend, Baggerfahne

\*) GKSS Proben-Nr.

## 7.2 Sauerstoffmessungen an der Klappstelle bei Strom-km 712-716

Vom 02.-04.11.1999 konnten drei zeitlich getrennte Umlagerungsereignisse bei ablaufendem Wasser mit deutlich detektierbarer Verklappungsfahne verfolgt werden (Tab. 7). Bei wechselnden Wassertiefen von 8-15 m wurden Proben aus 1, 3, 5 und 7 m Tiefe gezogen. Die Salzgehalte schwankten zwischen 14,6-23,1 ‰. Der Einfluß von marinem Nordseewasser prägt den ästuarinen Charakter des Untersuchungsgebietes. Die Probenserie Nr. 1-6 (Tab. 7) deutet einen leichten Salzgehaltsgradienten in der Wassersäule an. Die pH-Werte schwankten zwischen 7,93-8,06 und lagen damit geringfügig über den Werten im Baggerungsgebiet. Die aktuellen Gewässertemperaturen waren mit 10,7-11,4 °C ebenfalls etwas höher, was wahrscheinlich auf die geringeren Wassertiefen an der Klappstelle zurückzuführen ist.

Die Sauerstoffkonzentrationen waren mit 8,5-9,7 mg/l und Sättigungswerten von 95-109 % deutlich niedriger als im Baggerungsgebiet. Über die Ursachen können z. Zt. keine eindeutigen Aussagen gemacht werden. Die „Null-Proben“ (ohne Verklappungsfahne) und die Proben aus der Verklappungsfahne zeigen beim Vergleich der Mittelwerte eine um 0,3 mg/l geringere Sauerstoffsituation während der Verklappung (Tab. 6).

Tab. 6: Minima, Maxima und Mittelwerte (mit Standardabweichung) der Sauerstoffkonzentration bzw. Sauerstoffsättigung der „Null-Proben“ (ohne Verklappungsfahne) und der Proben aus der Verklappungsfahne.

Sauerstoff	„Null-Proben“	Verklappungsfahne
Minimum:	8,6 mg/l	8,5 mg/l
	95 %	95 %
Maximum:	9,4 mg/l	9,2 mg/l
	109 %	101 %
Mittelwert:	9,13 ± 0,37 mg/l	8,84 ± 0,31 mg/l
	100,86 ± 6,04 %	98,2 ± 3,56 %

Am 02.11.1999 wurde um 15:00 Uhr in der Mitte der Klappstelle bei Strom-km 714 ohne gleichzeitig stattfindendes Verklappungsereignis ein Sauerstoffprofil in ein Meter Abständen gemessen („Null-Profil“). Über 10 m Wassertiefe blieben die Temperaturen (10,0 nach 9,9 °C), die Sauerstoffkonzentrationen (10,9 nach 10,8 mg/l) und die Sauerstoffsättigungen (101 nach 99 %) nahezu konstant, d.h. Schichtungen konnten nicht festgestellt werden.

Effekte der Verklappung auf die Sauerstoffzehrung bei den Inkubationsversuchen über 24 Stunden konnten nicht eindeutig nachgewiesen werden, zumal zwei „Null-Proben“ (Nr. 6 u. 11 in Tab. 7 u. 8) Sauerstoff-Zehrungen von 0,2 mg/l in 24 Stunden aufwiesen. Für die in den Tabellen 7 und 8 mit „plus“ ausgewiesenen Sauerstoff-Zehrungswerte werden die gleichen Ursachen, wie bereits in Abschnitt 7.1 dargestellt, angenommen.

Mit Ausnahme der Proben Nr. 2 und 6 (Tab. 8) waren die Sestonergehalte in den Verklappungsfahnen mit 125,1-214,8 mg/l wesentlich höher als in den „Null-Proben“ (30,5-74,9 mg/l). Der absolute Anteil der partikulären organischen Substanz war in den meisten Proben aus der Verklappungsfahne ebenfalls höher als in den „Null-Proben“. Das Verklappungsereignis der Proben-Serie Nr. 3-5 (Tab. 8) deutet trotz zeitlicher Verschiebungen bei den Probennahmen eine Konzentrationszunahme mit der Wassertiefe an (3 m: 125,1 mg/l; 5 m: 149,4 mg/l; 7 m: 214,8 mg/l), d. h. das Klappgut scheint relativ schnell zu sedimentieren.

Tab. 7: Messprotokoll der Salinitäts-, pH-Wert- und Sauerstoff-Bestimmungen an der Klappstelle.

Messschiff: "Baumrönte" / WSA Cuxhaven										Probenort: Elbe Südseite, Klappstelle Strom-km 712-716									
Datum	Zeit (MEZ)	Proben-Nr.	Wasser-tiefe [m]	Proben-tiefe [m]	Sal. [‰]	pH sofort	O <sub>2</sub> sofort			pH n. 24 h	O <sub>2</sub> nach 24 h			O <sub>2</sub> -Zehr. [mg/l]	Bemerkungen				
							[mg/l]	[%]	[°C]		[mg/l]	[%]	[°C]						
							[mg/l]	[%]	[°C]		[mg/l]	[%]	[°C]						
02.11.1999	10:00	1 (3*)	14	7	23,1	8,03	9,4	109	11,3	8,00	9,5	102	9,4	plus 0,1	Beginn ablaufend, Null-Probe				
02.11.1999	12:45	2	10	7	20,6	8,06	9,7	109	10,9	7,95	9,7	107	11,2	0	ablaufend, Null-Probe				
02.11.1999	13:10	3 (20*)	9	7	19,5	8,06	8,5	96	11,4	7,94	8,6	96	11,3	plus 0,1	ablaufend, Verklappungsfahne				
02.11.1999	13:17	4 (19*)	9	5	20,0	8,05	9,1	103	11,2	7,93	9,1	100	11,2	0	ablaufend, Verklappungsfahne				
02.11.1999	13:20	5 (18*)	9	3	19,2	8,03	8,6	96	11,2	7,94	8,7	95	10,9	plus 0,1	ablaufend, Verklappungsfahne				
02.11.1999	14:35	6	10	5	16,5	8,02	9,0	98	11,1	7,90	8,8	96	11,8	0,2	ablaufend, ohne Fahne, Nullprobe				
03.11.1999	10:25	11	15	5	21,8	7,98	8,6	95	10,7	7,97	8,4	93	10,7	0,2	ablaufend, Null-Probe				
03.11.1999	11:57	12	14	7	16,0	7,93	9,5	102	11,1	7,92	9,5	102	11,5	0	ablaufend, Null-Probe				
03.11.1999	13:55	16	8	1	17,5	7,96	8,8	95	11,1	7,96	8,8	98	12,1	0	ablaufend, Null-Probe				
03.11.1999	14:10	17	8	3	17,9	7,94	8,8	95	11,1	7,97	8,8	96	11,6	0	ablaufend, Verklappungsfahne				
03.11.1999	17:55	20	9	5	14,6	7,95	9,1	98	11,0	7,94	9,3	100	11,4	plus 0,2	auflaufend (Stauwasser), Nullprobe				
04.11.1999	13:55	27	10	5	20,1	8,00	9,2	101	11,2	7,98	9,1	107	13,1	0,1	ablaufend, Verklappungsfahne				

\*) GKSS Proben-Nr.

Tab. 8: Messprotokoll der Sauerstoff- und Sestonbestimmungen an der Klappstelle.

Messschiff: "Baumrönne" / WSA Cuxhaven		Probenort: Elbe Nordseite, Klappstelle Strom-km 712-716		Verklappung: Hopperbagger "Amerigo Vespucci" / Niederlande							
Datum	Zeit (MEZ)	Proben-Nr.	Wasser-tiefe [m]	Proben-tiefe [m]	O <sub>2</sub> Zehr. [mg/l]	Seston		Glühverlust		Bemerkungen	
						[kg/m <sup>3</sup> ]	[mg/l]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[mg/l]		[%]
02.11.1999	10:00	1 (3*)	14	7	plus 0,1	0,0305	30,5	0,0040	4,0	13,1	Beginn ablaufend, Null-Probe
02.11.1999	12:45	2	10	7	0	0,1460	146,0	0,0089	8,9	6,1	ablaufend, Null-Probe
02.11.1999	13:10	3 (20*)	9	7	plus 0,1	0,2148	214,8	0,0095	9,5	4,4	ablaufend, Verklappungsfahne
02.11.1999	13:17	4 (19*)	9	5	0	0,1494	149,4	0,0110	11,0	7,3	ablaufend, Verklappungsfahne
02.11.1999	13:20	5 (18*)	9	3	plus 0,1	0,1251	125,1	0,0083	8,3	6,7	ablaufend, Verklappungsfahne
02.11.1999	14:35	6	10	5	0,2	0,1794	179,4	0,0105	10,5	5,8	ablaufend, ohne Fahne, Nullprobe
03.11.1999	10:25	11	15	5	0,2	0,0333	33,3	0,0039	3,9	11,6	ablaufend, Null-Probe
03.11.1999	11:57	12	14	7	0	0,0377	37,7	0,0042	4,2	11,2	ablaufend, Null-Probe
03.11.1999	13:55	16	8	1	0	0,0358	35,8	0,0043	4,3	12,1	ablaufend, Null-Probe
03.11.1999	14:10	17	8	3	0	0,1429	142,9	0,0079	7,9	5,5	ablaufend, Verklappungsfahne
03.11.1999	17:55	20	9	5	plus 0,2	0,0749	74,9	0,0091	9,1	12,2	auflaufend (Stauwasser), Nullprobe
04.11.1999	13:55	27	10	5	0,1	0,1514	151,4	0,0090	9,0	6,0	ablaufend, Verklappungsfahne

\*) GKSS Proben-Nr.

## 8 Beantwortung des Fragenkatalogs

### 8.1 Fragen zur Schwebstoff-Problematik

1. *Wie groß ist der Einflussradius des arbeitenden Hopperbaggers (Remobilisierung an der Sohle, Laderaumüberlauf) auf das Schwebstoffregime?*

Die Messungen zeigen, dass sich die Grenzen des Einflussbereiches (Schwebstofffahne) gut feststellen lassen. Bei entwickelter Strömung sind nur Auswirkungen auf der strömungsabgewandten Seite des Baggers zu beobachten. Die Fahne lässt sich dort aber noch in mindestens 1 km Entfernung ausmachen. Quer zur Strömungsrichtung beträgt der Einflussbereich 50 bis 100 m, in Bodennähe ungefähr das Doppelte. Genauere Angaben sind möglich, wenn die Position des Baggers kontinuierlich erfasst und aufgezeichnet wird.

2. *Wie weit lässt sich die Baggergutwolke nach der Umlagerung messtechnisch nachweisen?*

Bei feinkörnigem Material konnte die Wolke bei entwickelter Strömung bis 700 m auf der strömungsabgewandten Seite der Klappstelle messtechnisch vom Schwebstoffhintergrund unterschieden werden. Bei der überwiegenden Mehrheit der grobkörnigen Ladungen war der Nachweisbereich geringer. Quer zur Strömung lässt sich die Wolke noch in maximal 100 m Entfernung nachweisen.

3. *Dringt die Baggergutwolke in Uferzonen, Hafenbecken und Buchten vor?*

Die Messungen zeigen neben dem Transport mit der Strömung in Flusslängsrichtung eine Bewegung der bodennahen Schichten der Wolke entlang des Gefälles zur Strommitte. Uferzonen, Hafenbecken und Buchten dürften nur beeinflusst werden, wenn die Wolke mit der Tideströmung direkt in solche Bereiche transportiert wird. In den untersuchten Gebieten ist das nicht der Fall.

4. *Wie hoch ist der Einfluss der Tidephase? Welches sind die Einmischungsmechanismen und Ausbreitungspfade?*

Der geringste Einflussradius besteht bei Baggerung und besonders Verklappung zur Stauwasserzeit, da dann das mobilisierte bzw. verklappte Material vor Ort bleibt. Ob feinkörniges Material dann bei einsetzender Strömung wieder mobilisiert wird, konnte nicht geklärt werden. Es dürfte aber bei den in diesem Flussabschnitt vorherrschenden hohen natürlichen Schwebstoffkonzentrationen messtechnisch nicht möglich sein. Der Unterschied zwischen Ebb- und Flutstrom besteht hauptsächlich in den unterschiedlichen Hintergrundkonzentrationen. Die Einmischung behindernde Dichteunterschiede (Salzgradienten) wurden nicht gemessen. Die Einmischung erfolgt durch Strömungsturbulenz. Die wichtigsten Ausbreitungspfade sind der Transport mit der Strömung (Advektion) in Flusslängsrichtung und der Schwerkraft entlang des Gefälles.

## 8.2 Fragen zur Sauerstoff-Problematik

Für das WSA Hamburg standen im Zusammenhang mit der Sauerstoff-Problematik folgende Fragen im Vordergrund:

5. *Wie verändert sich der Sauerstoffgehalt in unmittelbarer Nähe des Baggers? Wie hoch ist dort die experimentelle Sauerstoffzehrung über 24 Stunden ?*
6. *Wie verändert sich der Sauerstoffgehalt im Umlagerungsgebiet? Wie hoch ist dort die experimentelle Sauerstoffzehrung über 24 Stunden ?*
7. *Wie sind aus ökologischer Sicht die Ergebnisse der Sauerstoffmessungen zu beurteilen?*

Eine abschließende Bewertung der hier dargestellten Ergebnisse kann mit dieser Messkampagne allein nicht vorgenommen werden. Zudem steht eine weitere Messkampagne, geplant für den Sommer 2000, noch aus. Diese ist insofern von großer Bedeutung, da höhere Gewässertemperaturen mikrobiologische Prozesse in der Tideelbe stark beeinflussen (vgl. BERGEMANN et al. 1996).

Die Messkampagne vom 02.-04.11.1999 repräsentierte eine Gewässersituation zu Beginn des Winters mit Wassertemperaturen von 10,3-11,4 °C. So ist nach BERGEMANN et al. (1996) im Herbst ein Nachlaufen der Zehrung zu beobachten, weil die Abbaupotenz noch vorhanden ist, auch wenn die Vermehrungsrate der Bakterien durch sinkende Temperaturen deutlich abnimmt.

Im Baggerungsgebiet bei Strom-km 699-702 wurden im November 1999 keine kritischen Sauerstoffkonzentrationen gemessen. Ob während der Hopperbaggerei mit dem Spülwasser Sauerstoff ins Gewässer eingetragen wird, kann zur Zeit nur vermutet werden, da die Sauerstoffsättigungswerte bei den Tiefenproben mit 113, 125 und 132 % (Tab. 4) relativ hoch lagen. Ein sogenanntes „refreshing by dredging“ wird in Japan und in den USA seit längerer Zeit unter Umweltgesichtspunkten diskutiert (ndl. Mitt. Dipl.-Ing. R. WURPTS, Nds. Hafenamts Emden). Effekte der Baggerei auf den Sauerstoffhaushalt im Baggerungsgebiet konnten jedoch nicht ausgeschlossen werden, da in Zehrungsversuchen über 24 Stunden an drei Proben deutliche Sauerstoffabnahmen von 0,4 bzw. 0,7 und 0,8 mg/l festgestellt wurden (Tab. 4).

Im Umlagerungsgebiet an der Klappstelle bei Strom-km 712-716 traten während der Sauerstoff-Direktmessungen in den Proben der Verklappungsfahne um ca. 0,3 mg/l geringere Sauerstoffkonzentrationen im Vergleich zu Probenwasser ohne Verklappungsereignis („Null-Proben“) auf (Tab. 6). Diese Unterschiede könnten auf die sehr schnell stattfindenden chemischen Sauerstoffzehrungsprozesse des eingebrachten Klappgutes zurückgeführt werden. Die im Experiment durchgeführten Zehrungsversuche zeigten im Klappgebiet keinen deutlichen Einfluss auf die Sauerstoffverhältnisse, das heißt bakterielle Abbauvorgänge scheinen dort zu dieser Jahreszeit keine Rolle zu spielen.

Da während der gesamten Messkampagne im November 1999 vornehmlich sandige Sedimente gebaggert und verklappt wurden, ist es nicht verwunderlich, dass die Effekte der Sauerstoffzehrung im Gewässer insgesamt als sehr gering einzustufen sind. Eine abschließende Beurteilung der Sauerstoffmessungen aus dem vorliegenden relativ geringen Datenmaterial ist für die Beantwortung ökologischer Belange nicht möglich. Hierzu müssen die geplanten Messungen im Sommer 2000 abgewartet werden. Zu diskutieren sind eine veränderte Probennahmestrategie sowie die messtechnischen Rahmenbedingungen. Zur weiteren Verifizierung der Sauerstoffproblematik empfehlen wir Gewässertemperaturen um 20 °C, nach Möglichkeit Untersuchungen im limnischen Bereich der Tideelbe sowie in Baggerungsgebieten mit vornehmlich schlackigen Sedimenten.

## 9. Literatur

BERGEMANN, M., BLÖCKER, G., HARMS, H., KERNER, M., MEYER-NEHLS, R., PETERSEN, W. & SCHROEDER, F. (1996): Der Sauerstoffhaushalt der Tideelbe. - Die Küste 58: 199-261.

DEV (1999): Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlamm-Untersuchung. Physikalische, chemische und bakteriologische Verfahren. Hrsg. Fachgr. Wasserchemie i. d. Gesellsch. Deutsch. Chemiker in Gemeinsch. mit dem Normenausschuß Wasserwesen (NAW) i. DIN Deutsches Inst. f. Normung e.V. - Wiley-VCH/Beuth, ISSN 0932-1004.