Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe

Schwermetalldaten der Elbe

von Schnackenburg bis zur See

1984-1988

ISSN 0935-9818

ARBEITSGEMEINSCHAFT FÜR DIE REINHALTUNG DER ELBE

S C H W E R M E T A L L D A T E N D E R E L B E

1 9 8 4 - 1 9 8 8

ARGE ELBE:

Freie und Hansestadt Hamburg
Umweltbehörde Hamburg
Steindamm 22
2000 H A M B U R G 1

Der Niedersächsische Umweltminister
Archivstr. 2
3000 H A N N 0 V E R 1

Der Minister für Natur, Umwelt und
Landesentwicklung
Niemannsweg 78
2300 K I E L 1

bearbeitet von der

Wassergütestelle Elbe
Focksweg 32a
2103 H A M B U R G 95

Oktober 1988

V O R W O R T

Im Jahre 1980 hat die Arbeitsgemeinschaft für die Reinhaltung der Elbe der Länder Hamburg, Niedersachsen und Schleswig-Holstein (ARGE ELBE) mit dem Sonderbericht „Schwermetalldaten der Elbe 1979/80" einen ersten Überblick über die Schwermetallbelastung des Elbwassers, der Elbsedimente und der Elbfische (Brassen) gegeben.

Inzwischen wurde das ARGE-ELBE-Meßprogramm durch die Aufnahme zusätzlicher Aufgabenstellungen, wie die systematische Ermittlung des Schwermetalleintrages in die Nordsee und die Überwachung des Elbeästuars im Rahmen des internationalen „Joint-Monitoring-Program", fortgeschrieben. Die Meßstrategie und insbesondere die Probenentnahme und Analysentechniken wurden weiterentwickelt. So wurde zur Ermittlung des Schwermetallgehaltes eine getrennte Bestimmung des gelösten und des schwebstoffgebundenen Anteils eingeführt.

Zur Erfassung der zeitlichen Entwicklung der Schwermetallbelastung der feinkörnigen Sedimente werden in ausgewählten Meßstationen spezielle Sedimentationsbecken betrieben und die gewonnenen „frischen, schwebstoffbürtigen Sedimente" als monatliche Mischproben analysiert. Mit der Untersuchung ausgewählter Sediment-Tiefenprofile wurde die historische Entwikklung der Schwermetallbelastung der Elbsedimente ermittelt. Weitere Sedimentuntersuchungen wurden im Bereich des Stromspaltungsgebietes (Hamburger Hafen), in den Elbnebenflüssen und im Elbeästuar (Glückstadt bis Scharhörn) durchgeführt. Die hochgradige Schwermetallbelastung der Elbe wirkt sich bereits auch auf die Organismen im Elbmündungsgebiet aus. Seit 1986 wird deshalb jährlich die Schwermetallbelastung in diesem Gebiet an Bioindikatoren (Flundern und Miesmuscheln) überwacht. Mit dem vorliegenden Bericht werden die Ergebnisse dieser sehr umfangreichen Untersuchungen vorgestellt und bewertet.

Es ist das erklärte Ziel der ARGE ELBE, nicht nur die zuständigen Fachverwaltungen über die Ergebnisse zu unterrichten, sondern gleichzeitig allen an den Umweltproblemen der Elbe interessierten Bürgern die Möglichkeit zu eröffnen, sich umfassend über die Gewässergütesituation der Elbe zu informieren. Die Ergebnis-Berichte werden deshalb regelmäßig veröffentlicht und insbesondere den öffentlichen Bibliotheken zur Verfügung gestellt.

Der Vorsitzende der ARGE ELBE

(D r. H e r r n r i n g)

Der Leiter der Wassergütestelle

(D r. F l ü g g e)

Die Untersuchungen wurden von folgenden Dienststellen und Institutionen ausgeführt:

Wasserprobenentnahme:

Wassergütestelle Elbe in Zusammenarbeit mit
dem Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten, Kiel
den Wasserwirtschaftsämtern Lüneburg und Stade

Vorbehandlung der Wasserproben (Filtration und Bestimmung des Gehaltes an abfiltrierbaren Stoffen):

Wassergütestelle Elbe

Schwermetallanalytik der Wasser- und Schwebstoffproben:

Landesamt für Wasserhaushalt und Küsten des Landes
Schleswig-Holstein, Kiel
Laboratorium für Wasser-, Abwasser- und Ölanalytik
Dr. Harald Schumacher, Heide

Sedimentprobenentnahme und Gewinnung „frischer, sedimentierter Schwebstoffe“:

Wassergütestelle Elbe

Schwermetallanalytik der Sedimentproben:

Laboratorium für Wasser-, Abwasser- und Ölanalytik
Dr. Harald Schumacher, Heide

Entnahme von Fisch und Muschelproben:

Wassergütestelle Elbe in Zusammenarbeit mit Elbfischern aus Hamburg und Cuxhaven

Altersbestimmung der Fische:

Wassergütestelle Elbe

Schwermetallanalytik der Fisch- und Muschelproben:

Staatliches Veterinäruntersuchungsamt für Fische und Fischwaren, Cuxhaven

Die Gewinnung der Sediment-Tiefenprofilproben erfolgte in Zusammenarbeit mit Herrn Dr. B. Hinze vom Ordinariat für Bodenkunde der Universität Hamburg. Die Abflußwerte am Pegel Neu Darchau wurden von der Wasser- und Schiffahrtsdirektion Nord zur Verfügung gestellt.

INHALTSVERZEICHNIS

1.	Allgemeine Grundlagen	1
2.	Untersuchungsprogramm und Analysenmethoden	8
2.1	Schwermetallbestimmuhg im Wasser	15
2.2	Schwermetallbestimmung in sedimentierten Schwebstoffen	16
2.3	Schwermetallbestimmung in abfiltrierten Schwebstoffen	16
2.4	Schwermetallbestimmung in Fischen und Muscheln	17
3.	Hydrologische Verhältnisse	18
4.	Ergebnisse der Wasseruntersuchungen	21
4.1	Vorbelastung bei Schnackenburg (Schwermetallgehalte und -frachten)	21
4.2	Querprofil Schnackenburg	33
4.3	Querprofile Tideelbe (Nienstedten, Twielenfleth, Grauerort und Glückstadt)	37
4.3.1	Quecksilberbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers	38
4.3.2	Cadmiumbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers	40
4.3.3	Bleibelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers	40
4.3.4	Zinkbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers	43
4.3.5	Kupferbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers	45
4.3.6	Chrombelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers	45
4.3.7	Nickelbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers	48
4.3.8	Arsenbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers	48
4.3.9	Eisenbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers	51
4.3.10	Manganbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers	51
4.4	Schwermetallgehalte und -frachten im Querprofil Glückstadt/ Grauerort	51
4.4.1	Grundlagen	51
4.4.2	Erläuterung der Ergebnisse	54
4.4.3	Berechnung der Schwermetallfrachten	65

4.5	Längsprofile - Tideelbe und Elbnebenflüsse	66
	Längsprofil 19. Februar 1987	67
	Längsprofil 1. April 1987	78
	Längsprofil 14. Mai 1987	90
	Längsprofil 13. August 1987	90
	Längsprofil 11. November 1987	111
	Längsprofil 23. Februar 1988	123
	Längsprofil 17. Mai 1988	123
4.6	Zusammenfassende Bewertung	142
4.6.1	Auswertung der Querprofilmischproben Glückstadt/ Grauerort 1986 - 1988	142
4.6.2	Auswertung der Längsprofilergebnisse	147
5.	Ergebnisse der Sedimentuntersuchungen	157
5.1	Schwermetallbelastung der Sedimente in ausgewählten Tiefen-Profilen („Historische” Entwicklung der Belastung)	157
5.2	Schwermetallgehalte der Sedimente im Bereich der Elbmündung	161
5.3	Schwermetallgehalte in sedimentierten Schwebstoffen (Meßstationen: Schnackenburg, Bunthaus, Seemannshöft, Blankenese)	165
5.4	Zusammenfassende Bewertung	180
6.	Ergebnisse der Fisch- und Muscheluntersuchungen (Bereich Elbmündung)	181
6.1	Schwermetallgehalte in Flundern	181
6.1.1	Grunddaten der untersuchten Flundern	181
6.1.2	Schwermetallbelastung der Flundern	184
6.2	Schwermetallgehalte in Miesmuscheln	189
6.2.1	Grunddaten der untersuchten Miesmuscheln	189
6.2.2	Schwermetallbelastung der Miesmuscheln	189
7.	Zusammenfassung	191

1. ALLGEMEINE GRUNDLAGEN

Die Schwermetallbelastung der Gewässer besteht aus der natürlichen Grundbelastung und der zusätzlichen anthropogenen Belastung. Entsprechend der geochemischen Zusammensetzung des Gesteins im gesamten Einzugsgebiet ergibt sich durch die Auswaschungen ein entsprechendes natürliches Grundniveau der Schwermetallkonzentrationen. In Tab. 1 sind in der Literatur aufgeführte Größenordnungen der Schwermetallgehalte in Tongesteinen sowie der Schwermetallgehalte in anthropogen wenig belasteten Gewässern (Flußwasser und Meerwasser) angegeben. Regionale geologische Besonderheiten (z. B. Erzvorkommen) können das natürliche Grundniveau erheblich verschieben.

Tab. 1 Tongesteinstandard und Schwermetallgehalte anthropogen wenig belasteter Gewässer (Quelle: (1))

		Quecksilber	Cadmium	Blei	Zink	Kupfer
Tongesteinstandard	(mg/kg)	0,45	0,13	22	95	45
Gehalt in Flußwasser	(µg/l)	0,07	0,4	0,3	7	2
Gehalt in Meerwasser	(µg/l)	0,02	0,1	0,003	0,6	0.25
		Chrom	Nickel	Arsen	Eisen	Mangan
Tongesteinstandard	(mg/kg)	90	68	10	48000	850
Gehalt in Flußwasser	(µg/l)	1	0,3	1,7	670	4
Gehalt In Meerwasser	(µgll)	0,2	0,6	2,6	1,6	0,03

Die anthropogenen Belastungen der Gewässer resultieren überwiegend aus Abwassereinleitungen, Abschwemmungen von belasteten Flächen (z. B. Straßen), Einträgen aus der Luftverschmutzung, Auswaschungen aus belasteten Böden und Deponien sowie aus der Resuspension älterer, hochbelasteter Sedimente.

Für eine Beurteilung der Schwermetallbelastung des Elbwassers sind verschiedene Kriterien zu beachten. Im Hinblick auf Nutzungen für den menschlichen Gebrauch, z. B. für die Trinkwassergewinnung, können Richtwerte für Trinkwasser (Tab. 2) zugrunde gelegt werden. Dabei ist zu berücksichtigen, daß die

Tab. 2 Trinkwasser-Standards (µg/l) (Schwermetallgrenzkonzentrationen) (Quelle:(1), (6))

	BRD	EG	USA	WHO [1]
Quecksilber	1	1	5	1
Cadmium	5	5	10	10
Blei	40	50	50	50
Zink	-	-	5000	5000
Kupfer	-	-	1000	-
Chrom	50	50	50	50
Nickel	50	50	-	-
Arsen	40	50	10	50
Eisen	200	200	-	-
Mangan	50	50	50	50

[1] europäischer Standard der Weltgesundheitsorganisation

Schwermetallbelastung des Elbwassers in erheblichem Maße durch den an die Schwebstoffe gebundenen Anteil mitbestimmt wird. Bei der Trinkwassergewinnung durch Uferfiltration oder andere Aufbereitungsverfahren wird dieser schwebstoffgebundene Anteil abgeschieden. Über die Trinkwasserrichtwerte wird, bezogen auf den Menschen, die tägliche Zufuhr von Schwermetallen mit dem täglichen Trinkwasserverbrauch (z. B. 2 Liter) berücksichtigt. Da der Mensch als "Allesfresser" eine breite Nahrungsbasis hat (im Vergleich zu Fischen, Seehunden und Seevögeln) und erfahrungsgemäß gegenüber Schadstoffbelastungen im Vergleich zu anderen Organismen recht unempfindlich reagiert, können Trinkwasserrichtwerte nicht für die Bewertung der Belastung eines aquatischen Ökosystems zugrunde gelegt werden. Die Organismen des aquatischen Ökosystems sind der Gewässerbelastung dauernd ausgesetzt und akkumulieren Schwermetalle, wie z. B. Quecksilber, über die Nahrungskette. In der folgenden Abbildung ist schematisch die Bioakkumulation von Schwermetallen über die Nahrungskette aufgezeigt.

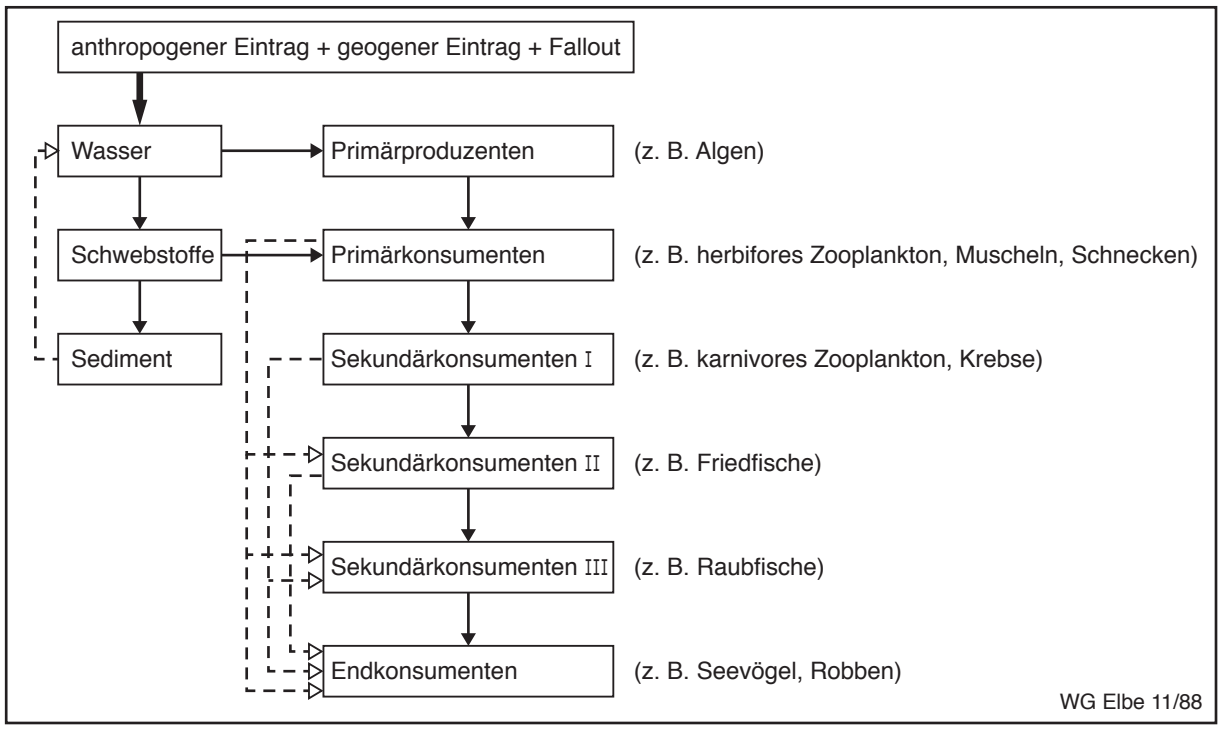


Abb. 1 Beispiel einer Bioakkumulation von Schwermetallen in der aquatischen Nahrungskette

Aus ökologischer Sicht reicht deshalb eine Berücksichtigung der akut-toxischen Wirkungen der verschiedenen Schwermetallverbindungen, z. B. auf Fische, nicht aus.

In Tab. 3 sind für ausgewählte Schwermetallverbindungen Fischtoxizitäten für Goldorfen angegeben. Mit LC0, LC50 und LC100 sind jeweils die Letalkonzentrationen angegeben, d. h. bei der für LC50 angegebenen Schwermetallkonzentration sind im Test 50 % der Goldorfen aufgrund der Schadstoffwirkung verendet. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, daß bei derartigen Tests in der Regel nur die Wirkung

einzelner Schwermetallverbindungen erfaßt wird. In hochbelasteten Gewässern, wie z. B. der Elbe, wirken auf die Organismen jedoch gleichzeitig eine Vielzahl unterschiedlicher Schadstoffe, so daß es zu einer nahezu unübersehbaren Überlagerung mit verstärkender Wirkung (synergistische Effekte), aber auch abschwächender Wirkung (antagonistische Effekte) kommt. Ferner muß bei einer Beurteilung der Schadstoffwirkung der gesamte Lebenszyklus der Organismen von der Eizelle über die Embryonalentwicklung bis zur Reproduktion berücksichtigt werden. Strenggenommen darf sich diese Betrachtung nicht nur auf wenige Leitorganismen beschränken, sondern muß nahezu das gesamte Spektrum der aquatischen Lebensgemeinschaft einschließlich der Langzeitauswirkungen erfassen. Diese Darlegungen verdeutlichen bereits, daß es, bezogen auf die gesamte aquatische Lebensgemeinschaft, eine wissenschaftlich exakt bestimmte, tolerierbare Grenzkonzentration für die einzelnen Schwermetalle, bei der so eben keine Schädigung mehr stattfindet, praktisch nicht geben kann. *

Tab. 3 Fischtoxizitäten einiger Schwermetallverbindungen für Goldorfen (Quelle: (5))

		Fischtoxizitäten (mg/l) LC_0	LC_{50}	LC_{100}
Blei(II)-acetat	[1]	273 - 546	546 - 655	655 - 1080
	[2]	192	371	480
Cadmiumnitrat	[1]	66	70	73
	[2]	5,4	8.8	14
Kupfer(II)-sulfat	[1]	0,4	0,8	1,2
	[2]	0,6	0,8	1,4
Natriumdichromat	[1]	174	224	244
	[2]	168	386	630
Quecksilber(II)-chlorid	[1]	0,07	0,5	0,7
	[2]	0,37	0,5	0,59
Zinkchlorid	[1]	9,6	21	24
	[2]	-	-	-

[1] Landesanstalt für Wasser und Abfall NW

[2] Institut für Wasser-, Boden- und Lufthygiene BGA Berlin

* Von einer Bund/Länder-Arbeitsgruppe (BLAK-QZ) werden gegenwärtig Vorschläge für Qualitätsziele unter dem Aspekt "Schutz der aquatischen Lebensgemeinschaft" auf der Basis einer Auswertung der verfügbaren wissenschaftlichen Literatur und unter Berücksichtigung abgestufter Risikofaktoren erarbeitet. Die Ergebnisse werden in Kürze von der Arbeitsgruppe veröffentlicht werden.

Grundsätzlich ist davon auszugehen, daß eine Erhöhung der Gewässerbelastung über das natürlicherweise vorhandene Konzentrationsniveau, an das die Lebensgemeinschaften durch die Evolution angepaßt sind, mit zunehmender Konzentration zu immer gravierenderen Beeinträchtigungen der Lebensgemeinschaften führt. Ziel des Gewässerschutzes muß es deshalb sein, die Auslenkung der Schwermetallbelastung von dem natürlichen Niveau durch anthropogene Einträge so gering wie möglich zu halten. Aufgrund der Anreicherung der Schwermetalle an den Schwebstoffen, und damit an den feinkörnigen Sedimenten, und der Bioakkumulation in der Nahrungspyramide ist es im Rahmen der Gewässerüberwachung nicht ausreichend, nur die Belastung des Wassers zu bestimmen. Für eine zuverlässige Bewertung muß die Schwermetallbelastung der Schwebstoffe, der Sedimente und ausgewählter Organismenarten mit einbezogen werden. Nachdem bereits in dem Schwermetallbericht aus dem Jahre 1979/80 erstmalig die Belastungssituation des Elbwassers, der Elbsedimente und der Elbfische (Brassen) zusammenfassend dokumentiert wurde, werden im folgenden Bericht die mit zwischenzeitlich verbesserten Probenentnahmestrategien und Untersuchungsmethoden erzielten Ergebnisse dargestellt.

In der folgenden Übersicht sind für die untersuchten Schwermetalle die grundlegenden Eigenschaften zusammengefaßt.

Quecksilber (chemisches Kürzel: Hg)

Quecksilber tritt in drei wichtigen Verbindungsformen auf. Als elementares Quecksilber, in der es als einatomiges Metall vorliegt, besitzt es einen hohen Dampfdruck und hat eine erhebliche toxische Bedeutung. Die zweite Bindungsform sind anorganische Hg(I)- und Hg(II)Verbindungen. Im Wasser liegen meistens Komplexverbindungen von Hg(II)-Ionen vor. Hochgiftig und gut wasserlöslich ist das Hg(II)-Chlorid. Demgegenüber ist HgS kaum wasserlöslich. Die dritte Kategorie besteht aus den Organo-Quecksilber-Verbindungen. In der Hauptsache handelt es sich hier um Methyl-, Ethyl- oder Phenyl-Verbindungen. Durch Methylierung wird Hg in eine gut fettlösliche Form überführt und kann somit leicht biologische Membranen durchdringen und von Zellen besser absorbiert werden. Besondere Mikroorganismen sind in der Lage, anorganische in organische Hg-Verbindungen, insbesondere in das äußerst giftige Methyl-Quecksilber, umzuwandeln. Für Methyl-Quecksilber sind Anreicherungsfaktoren von der Wasserphase in die Fettphase von höheren Organismen von Zehntausend bis zu einer Million ermittelt worden.

Jegliches Wachstum von Süß- und Meerwasserplankton wird bei Organo-Quecksilber-Konzentrationen von über 50 µg/l unterbunden. In Fischen wurden für Quecksilber mittlere Verweilzeiten von ungefähr 400 Tagen festgestellt. Für Quecksilber kann eine Mutagenität beim Menschen angenommen werden. Akute Vergiftungserscheinungen durch quecksilberverseuchte Fische traten in den 50er Jahren in Japan (Minamata) auf. Mehr als 100 Menschen starben nach dem Genuß quecksilberverseuchter Fische aufgrund schwerer Schädigungen des Nervensystems. Eine noch katastrophalere Quecksilbervergiftung ereignete sich Anfang der 70iger Jahre im Irak. Dort starben nach dem Genuß von methylquecksilberbehandeltem Saatgut fast 500 Menschen.

Krabben LC50= 0,006 mg/l (96 h)

Cadmium (chemisches Kürzel: Cd)

Im Gegensatz zum Quecksilber ist beim Cadmium nicht bekannt, daß Mikroorganismen vermehrt Cadmiumalkyle zu bilden vermögen. Cadmium(II) bildet in der wäßrigen Phase hauptsächlich Chlorokomplexe. In Meerestieren ist eine beachtliche Kumulation von Cadmium festgestellt worden. Cd weist eine synergistische Wirkung mit Kupfer auf, d.h. die toxische Wirkung des Kupfers wird erhöht. Antagonistisch hingegen wirken Zink und Magnesium bei der Cd-Toxizität auf Bakterien. pH-Wert-Änderungen in den sauren Bereich haben eine Remobilisierung des Cadmiums aus den Gewässersedimenten zur Folge. Hohe Chlorid-Konzentrationen behindern die Cd-Adsorption an Schwebstoffe. Im Übergangsbereich vom limnischen in das marine Milieu (Brackwasserzone) tritt durch die erhöhte Salzkonzentration eine verstärkte Freisetzung des an Schwebstoffen und Sedimenten angelagerten Cadmiums auf.

Nach Schätzungen besitzt Cadmium im menschlichen Körper eine mittlere Verweilzeit von 1025 Jahren (Methyl-Quecksilber im Vergleich nur 70 Tage). Für fast alle Cd-Verbindungen besteht die Gefahr kumulativer Wirkungen. Die Akkumulation erfolgt vor allem in den Nieren und der Leber mit einer biologischen Halbwertzeit von mehr als zehn Jahren. Bei stark erhöhter, langandauernder Belastung können irreversible renale Stoffwechselstörungen und schwere Knochenschäden auftreten.

Erste toxische Effekte können bei Süßwasserorganismen bereits ab 1 µg/l und bei marinen Organismen ab 7 µg/l auftreten. Die Letalitätsschwelle wird bei Konzentrationen über 2 µg/l in Süß- und 100 µg/l in Meerwasser für bestimmte Organismen erreicht. (Lit. (1))

Blei (chemisches Kürzel: Pb)

Blei(II) liegt hauptsächlich als Carbonatokomplex vor. Organische Pb-Verbindungen leiten sich hauptsächlich vom Pb(IV) ab. Im Wasser liegen über 90 % des Bleis an Schwebstoffe gebunden vor. Blei vermindert die photosynthetische Sauerstoff-Freisetzung merkbar. Im Vergleich zu Cadmium zeigt Pb ein geringeres Bestreben, im sauren Milieu aus Sedimenten zu remobilisieren. Untersuchungen im Nordgrönland-Eis haben gezeigt, daß von 800 v. Chr. bis heute sich die Bleigehalte im Eis dort um den Faktor 200 erhöht haben, seit 1945 allein um das Vierfache. Auch in Sedimenten vor der amerikanischen Küste wurde ein deutlicher Anstieg der Bleigehalte nach 1940 festgestellt. Der Haupteintrag von Blei erfolgt über den Luftpfad. Die Luftbelastung stammt zu einem erheblichen Anteil aus den Abgasen (verbleites Benzin).

Zink (chemisches Kürzel: Zn)

Zn(II) liegt im Wasser meistens als Hydroxokomplex vor. Zink ist essentiell an verschiedenen biochemischen Prozessen des Organismus beteiligt. In bestimmten Muscheln kann Zink bis zur hunderttausendfachen Konzentration gegenüber dem umgebenden Meerwasser akkumulieren. Bei Fischen kann es zu einer Zerstörung des Kiemenapparates und zu Leber- und Nieren-Degeneration kommen. Synergistische Effekte zeigt Zink mit Kupfer und Chromat bei toxischen Wirkungen. Zink weist eine deutlich höhere Remobilisierungsrate im sauren Milieu auf als z. B. Cadmium oder Blei.

Kupfer (chemisches Kürzel: Cu)

Cu(II) liegt in wäßrigen Lösungen meistens als Carbonatokomplex vor. Cu zeigt von allen Metallen die deutlichste signifikante Herabsetzung der Konzentration an freien Cu-Ionen durch organische Komplexbildner. Kupfer als essentielles Element wird in der Leber gespeichert. Wie Zink wird auch Kupfer in bestimmten Muschelarten stark angereichert. So wurden z. B. aus den Niederlanden Vergiftungen durch kupferbelastete Muscheln bekannt. Von Fischen wird Cu stärker akkumuliert als z.B. Hg, Cd oder Pb. Toleranzwerte für Fische und Krebse betragen 0,03 bis 0,8 mg/l, wobei bei Konzentrationen von 0,1 mg/1 erste Vergiftungserscheinungen auftreten. Kupfer wirkt in Konzentrationen von 0,1 bis 0,5 mg/1 bereits algizid.

Fische LC50 = 100 - 280 µg/l (48 h)

Nickel (chemisches Kürzel: Ni)

Nickel kommt in der Wasserphase vornehmlich in Form freier Aquo-Ionen vor. Für Tiere besitzt Ni die Funktion eines essentiellen Spurenelements; dagegen ergeben erhöhte Ni-Konzentrationen für Pflanzen eine toxische Wirkung. Eine Kumulation im Organismus findet nicht statt. Fische vertragen Konzentrationen bis 50 mg/l. Mit einer karzinogenen Wirksamkeit von Ni-Verbindungen beim Menschen muß bei erhöhten Belastungen (z. B. Stäube) gerechnet werden.

Chrom (chemisches Kürzel: Cr)

Chrom ist ein essentielles Spurenelement für Tiere. Eine Anreicherung im Organismus findet nicht statt. Bei erhöhter Belastung mit Cr(VI)Verbindungen muß beim Menschen von einer karzinogenen Wirksamkeit ausgegangen werden. Cr(VI) wird im biologischen Material zu Cr(III) reduziert. Im Gegensatz zu Cr(VI) kann Cr(III) im allgemeinen biologische Membranen nicht durchdringen und besitzt daher eine geringere Toxizität. Allerdings besteht der Verdacht, daß Cr(III) mutagen und damit möglicherweise karzinogen wirkt.

Für Cr(VI):
Fische LC50= 170 - 400 mg/l, Daphnien LC50= 0,05 mg/l, Algen LC50= 0,032 - 6,4 mg/l

Arsen (chemisches Kürzel: As)

Aquatische Pflanzen aus dem marinen als auch aus dem limnischen Bereich sind in der Lage, Arsen zu akkumulieren. In tierischen Organismen akkumuliert As geringer als in Pflanzen, wobei wiederum die marinen Organismen As stärker als die limnischen akkumulieren. Anreicherungsfaktoren von Arsen in Organismen werden mit Zweihundert bis Tausend angegeben. Neben der toxischen Wirkung des As treten sowohl teratogene, mutagene als auch karzinogene Wirkungen auf. Marine Phytoplankter sind in der Lage, Methylarsenverbildungen zu bilden oder Arsenat(V) zu Arsenat(III) zu reduzieren.

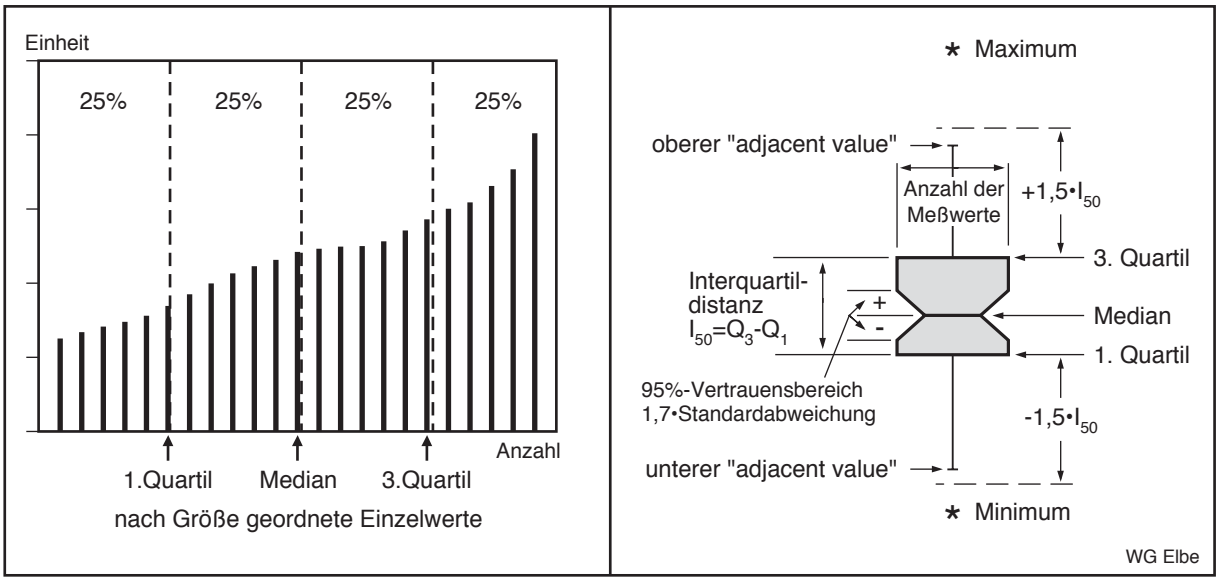
Eisen (chemisches Kürzel: Fe)

Eisen(III) ist im Wasser vor allem als Hydroxokomplex vorhanden. Bei Anwesenheit bestimmter anorganischer oder organischer Liganden bilden sich leichtlösliche Fe(II)- oder Fe(III)-Chelatverbindungen. Eisen gilt sowohl für Tiere als auch für Pflanzen als essentielles Spurenelement und ist nicht toxisch.

Mangan (chemisches Kürzel: Mn)

Mangan gilt sowohl für Tiere als auch für Pflanzen als essentielles Spurenelement. pH-Wert-Änderungen in den sauren Bereich haben eine Remobilisierung des Mangans aus den Gewässersedimenten zur Folge. Toxisch wirkt Mangan auf Fische bei Konzentrationen über 1000 mg/l. In einigen Muschelarten und anderen wirbellosen Meerestieren findet man eine Anreicherung bis um den Faktor Zehntausend.

Für die statistische Auswertung der Meßwerte wurden die Quartile ermittelt und als "BOX AND WHISKER PLOT" (7) aufgetragen, um eine schnelle Übersicht über die mittleren Konzentrationen und die Streubereiche zu ermöglichen. Diese Methode stellt graphisch insgesamt 8 statistische Größen in einer einzigen Figur dar:



Lage der Quartile und des Medians — Box and Whisker Plot (7)

"Box and Whisker Plots" ermöglichen den graphischen Vergleich mehrerer Stichprobengruppen anhand von Quartilen. Die Einzelwerte werden nach Größe sortiert. Das 1. Quartil (Q_1), der Median (= 2. Quartil) und das 3. Quartil (Q_3) sind dann die Werte, unter denen jeweils 25 %, 50 % und 75 % der Beobachtungen liegen. Der Vertrauensbereich ergibt sich aus der Standardabweichung des Medians ($SD=1{,}25*(Q_3-Q_1)/(1{,}35*\sqrt{n})$) und einer Konstanten C, die für eine 95%-Wahrscheinlichkeit mit 1,7 angesetzt wird. Uberlappen sich die Vertrauensbereiche zweier Stichproben nicht, so sind die beiden Mediane signifikant verschieden. Der "adjacent value" ist der größte bzw. kleinste Beobachtungswert, der noch innerhalb der durch die Interquartildistanz vorgegebene Grenze ($I_{50}*1{,}5$) liegt.

Abb. 2 Erläuterung der Box and Whisker Plots

LITERATURANGABEN

(1) MERIAN, E. : Metalle in der Umwelt: Verteilung, Analytik und biologische Relevanz; Verlag Chemie GmbH; Weinheim 1984;ISBN 3-527-25817-5

(2) SALOMONS, W.; FÖRSTNER, U. : Metals in the Hydrocycle; Springer-Verlag; Berlin; 1984; ISBN 3-540-12755-0

(3) FÖRSTNER, U. WITTMANN, G.T.W. : Metal Pollution in the Aquatic Environment; Springer-Verlag; Berlin; 1979; ISBN 3-540-09307-9

(4) FÖRSTNER, U. MÜLLER, G. : Schwermetalle in Flüssen und Seen; Springer-Verlag; Berlin; 1974; ISBN 3-540-06589-X

(5) ROTH, L. : Wassergefährdende Stoffe; Ecomed Verlagsgesellschaft; Landsberg/Lech; 1985; ISBN 3-609-73180-X

(6) DILLY, P. (Bearb.) : Trinkwasserverordnung; Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH Stuttgart; 1986; ISBN 3-8047-0894-3

(7) McGILL R. et al : Variations of Box Plots, The American Statistican Vol. 32, No. 1; 1978

(8) ATRI F. R. : Arsen; G. Fischer Verlag, Stuttgart; 1987; ISBN 3-437-30576-X

2. UNTERSUCHUNGSPROGRAMM UND ANALYSENMETODEN

Das Untersuchungsprogramm umfaßt die Überwachung der Schwermetallbelastung in Wasser, Schwebstoffen, Sedimenten und in ausgewählten Bioindikatoren (Flundern und Miesmuscheln).

Mit der systematischen Überwachung der Vorbelastung durch die Meßstation Schnackenburg wird der Eintrag aus dem oberhalb gelegenen gesamten Einzugsgebiet erfaßt. Da die gravierende Schwermetallbelastung des zur Bundesrepublik gehörenden Elbabschnittes in starkem Maße durch die hochgradige Vorbelastung geprägt wird, erfolgt die Überwachung in der Meßstation Schnackenburg mit besonderer Intensität. Durch ein automatisches Probenentnahmesystem werden aus im 2-Stunden-Takt entnommenen Teilproben 2,5-Liter-Wochenmischproben gesammelt. In den Probengefäßen ist jeweils Säure vorgelegt, so daß eine sofortige Ansäuerung der Proben während der Entnahme der Teilproben sichergestellt ist. Zusätzlich werden die Proben dauernd auf +4°C heruntergekühlt. Die Bestimmung der jeweiligen Schwermetallgehalte erfolgt an den angesäuerten, unfiltrierten Proben im Labor. Eine getrennte Bestimmung des gelösten Anteils und des an Schwebstoffen gebundenen Anteils ist zur Zeit noch nicht kontinuierlich durchführbar, da zuverlässige, voll automatische Filtrationssysteme, die den Anforderungen der Spurenanalytik genügen, bisher nicht verfügbar sind. Mit der quasi-kontinuierlichen automatischen Probenentnahme wird die zeitliche Entwicklung der Schwermetallkonzentrationen und der Schwermetallfrachten erfaßt. Die in den folgenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse verdeutlichen, daß die Schwermetallkonzentrationen an der Meßstation Schnackenburg und damit auch die Schwermetallfrachten, z. B. in Abhängigkeit hydrologischer Bedingungen, eine erhebliche Variabilität aufweisen, so daß eine zuverlässige Überwachung der Vorbelastung in Form einer Eintragsbilanzierung nicht auf der Basis von Einzelmessungen möglich ist.

Die räumliche Verteilung der Schwermetallbelastung in dem hydrologisch sehr komplexen System der Tideelbe erfolgt im Rahmen von Längsprofiluntersuchungen. Hierzu werden in den Monaten Februar, Mai, August und November und zusätzlich bei hydrologisch interessanten Situationen in der Phase des voll entwickelten Ebbstroms vom Hubschrauber aus Wasserproben entnommen. In dieser Phase herrscht jeweils die maximale Strömungsturbulenz, so daß zu diesem Zeitpunkt die Schwebstoffe und damit auch die an den Schwebstoffen angelagerten Schwermetalle am stärksten aufgewirbelt sind und somit bei der Probenentnahme miterfaßt werden. Da die an unfiltrierten Wasserproben gewonnenen Schwermetallkonzentrationen eine erhebliche Variabilität in Abhängigkeit der zufällig miterfaßten unterschiedlichen Schwebstoffgehalte aufweisen, sind diese Daten nur schwer interpretierbar. Mit Beginn des Jahres 1987 wurde deshalb bei den Längsprofiluntersuchungen eine getrennte Bestimmung des "gelösten Anteils" und des "partikulären Anteils" eingeführt.

Im Rahmen der PARISER KONVENTION ist jährlich der Eintrag ausgewählter Schadstoffe in das Konventionsgebiet (Nordsee/Nordatlantik) an der Süßwassergrenze der einmündenden Flüsse zu ermitteln. Im Falle des Elbeästuars liegt die Süßwassergrenze bei mittleren Abflüssen in Höhe Glückstadt. Mit Beginn des Jahres 1988 wurde aus den im Kapitel 4.4 aufgeführten Gründen das Bilanzierungs-Querprofil stromauf nach Grauerort verlegt. Für die Bilanzierung werden wöchentlich in 11 Teilsegmenten des Querprofils Einzelproben entnommen. Die Aufgliederung der Teilquerschnitte im Gesamtquerschnitt erfolgte unter Berücksichtigung der morphologischen Struktur des Querprofils, so daß im Hinblick auf den Durchfluß die Einzelsegmente jeweils gleichgewichtig sind. In Abb. 3 ist die Lage der untersuchten Querprofile und die Aufgliederung der Teilquerschnitte dargestellt.

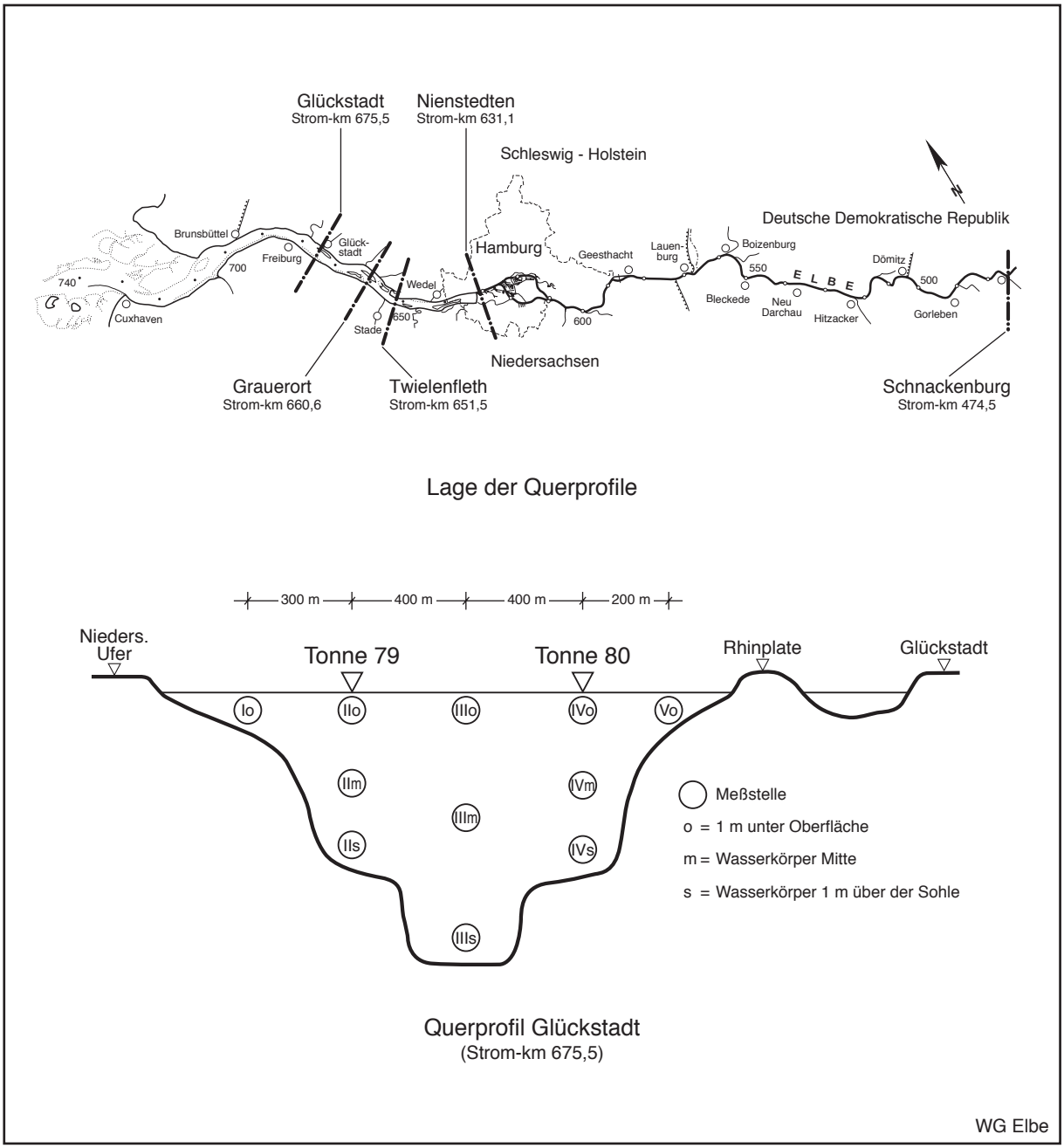


Abb. 3 Untersuchten Querprofile und Aufgliederung der Teilquerschnitte

Auch diese Probenentnahmen erfolgen jeweils bei voll entwickeltem Ebbstrom. Trotz der in dieser Phase stärksten Strömungsturbulenz besteht jedoch zu keiner Zeit eine ideal-homogene Schwebstoffverteilung über den gesamten Querschnitt. Gerade im Bereich der oberen Trübungszone bilden sich entsprechend der Turbulenzwirbel Schwebstoffstrukturen aus, die an einem festen Meßpunkt zu einer erheblichen zeitlichen Variabilität der Schwebstoffkonzentrationen führen. Um dieses turbulenzbedingte "Rauschen" der Schwebstoffgehalte zu dämpfen, wurde für diese Aufgabenstellung ein Wasserprobensammler (Abb. 4) von der Wassergütestelle entwickelt, mit dem eine Probenentnahme integrierend über mehrere Turbulenzwirbel kontinuierlich während eines Zeitraumes von ca. 60 s

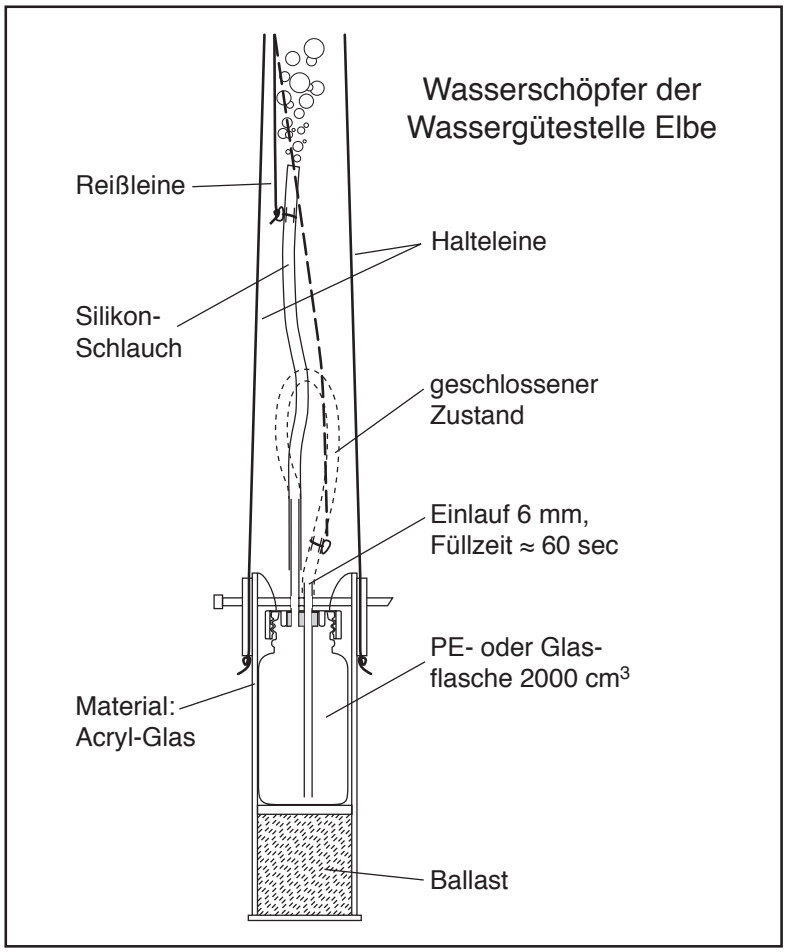


Abb. 4 Wasserprobensammler

erfolgt. Bei einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit zur Zeit der Beprobung von rd. 1 m/s erfolgt eine Entnahme des Probenwassers aus einem rd. 60 m langen Wasserkörper, d. h. integrierend über 10 bis 20 Makro-Turbulenzwirbel. In dem Wasserschöpfer wird jeweils die vorbehandelte Probenflasche direkt eingespannt und gefüllt, so daß Kontaminationen, z. B. beim Umfüllen von dem Schöpfer in die Probenflaschen, entfallen. Durch den Schlauch wird die bei dem Füllvorgang entweichende Luft so weit von der Entnahmeöffnung fortgelenkt, daß eine Beeinflussung der Probe ausgeschlossen ist. Der Wasserschöpfer wird zunächst in geschlossenem Zustand in die gewünschte Entnahmetiefe abgelassen und dann über eine Reißleine durch ein Abziehen des Schlauchendes vom Einlaufstutzen geöffnet. Vergleichsuntersuchungen mit anderen Wasserprobenschöpfern in homogenen Wasserkörpern haben ergeben, daß mit diesem Entnahmeprinzip eine zuverlässige Erfassung der Schwebstoffgehalte erreicht wird.

Bereits zu Beginn der Untersuchungen zeigte sich, daß häufig bei Proben aus 1 m über der Sohle stark erhöhte Schwebstoffgehalte, bedingt durch einen erhöhten Feinsandanteil, infolge der starken Strömungsturbulenz erfaßt wurden. Da der Feinsand überwiegend aus chemisch inertem Quarz besteht, der kein Schwermetallbindungsvermögen aufweist, wirkt ein erhöhter Feinsandanteil auf die Schwermetallkonzentration des Schwebstoffes "verdünnend". Um diese zusätzliche Variabilität zu dämpfen, wurden Überlegungen zur Abtrennung des Feinsandanteiles angestellt. Die einzige Verfahrensweise, bei der jegliche Kontamination ausgeschlossen werden kann, besteht in einer Abtrennung des Feinsandes durch Einhaltung einer Absetzzeit vor der Filtration direkt in dem

Probengefäß. Im Gegensatz zu den schwermetallbeladenen Feinstschwebstoffen sedimentieren die Feinsandanteile aufgrund ihrer höheren Sinkgeschwindigkeit deutlich schneller ab. In Abb. 5 ist beispielhaft die Abnahme des Gehaltes abfiltrierbarer Stoffe in Abhängigkeit der Absetzzeit vor der Filtration dargestellt.

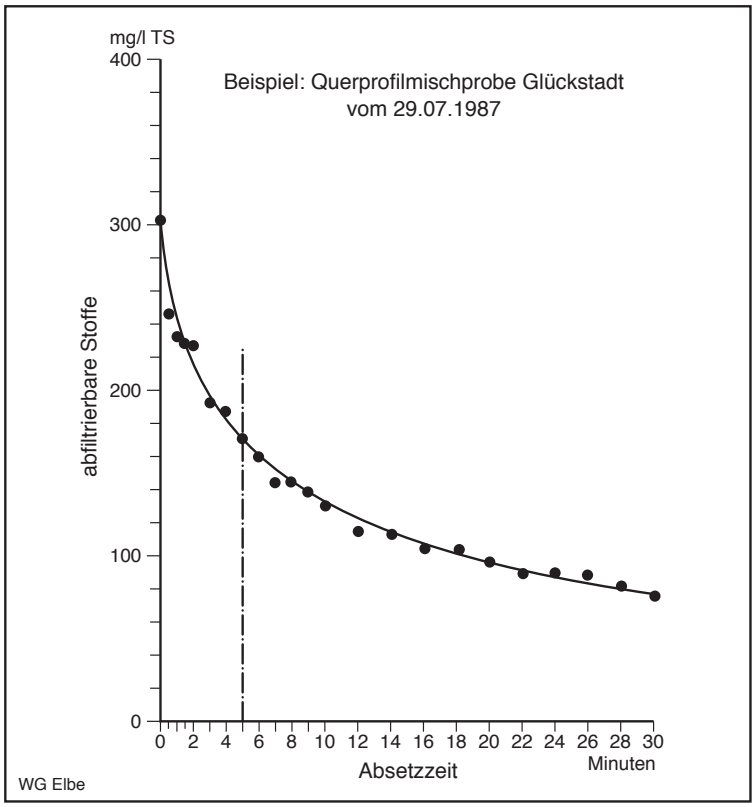


Abb. 5 Gehalt abfiltrierbarer Stoffe in Abhängigkeit der Absetzzeit vor der Filtration

Eine systematische Voruntersuchung hat ergeben, daß durch eine 5minütige Absetzzeit vor der Filtration der Feinsandanteil nahezu vollständig abgeschieden wird und nur ein geringer Anteil der mit Schwermetallen beladenen Schwebstoffe absinkt und dadurch nicht miterfaßt wird.

Die Filtration erfolgte unter Reinstraumbedingungen in einer Clean-bench in der selbst entwickelten, in Abb. 6 dargestellten Apparatur. Alle Teile, die mit dem Probenwasser in Berührung kommen, sind aus Teflon gefertigt bzw. teflonisiert. Das Filterbechervolumen ist mit 0,5 l so ausreichend bemessen, daß bei den für die Elbe typischen Schwebstoffgehalten von rd. 30 mg/l eine ausreichende Schwebstoffmenge gewonnen wird. Bei Proben mit geringeren Schwebstoffgehalten kann die filtrierte Wassermenge einfach durch Nachgießen erhöht werden. Die Filterbecher sind im Verhältnis - Durchmesser zu Höhe - so gewählt, daß sich im Hinblick auf die unvermeidbaren Blindwerte des Filtermaterials ein günstiges Verhältnis zwischen Schwebstoffmenge und Filterleergewicht ergibt. Durch die zylindrische Form der Filterbecher (ohne Verjüngungsflanken) ist gewährleistet, daß sich keine Schwebstoffe an der Wandung absetzen und somit ein Nachspülen mit hochreinem Wasser in der Regel entfallen kann. Durch die Vakuumfiltration im Witt'schen Topf kann das filtrierte Probenwasser direkt in den vorbehandelten Teflongefäßen aufgefangen werden, in denen anschließend der Aufschluß erfolgt. Für die Filtration werden Membranfilter aus reinstem Zelluloseacetat (Fa. Schleicher & Schüll OE 67) mit

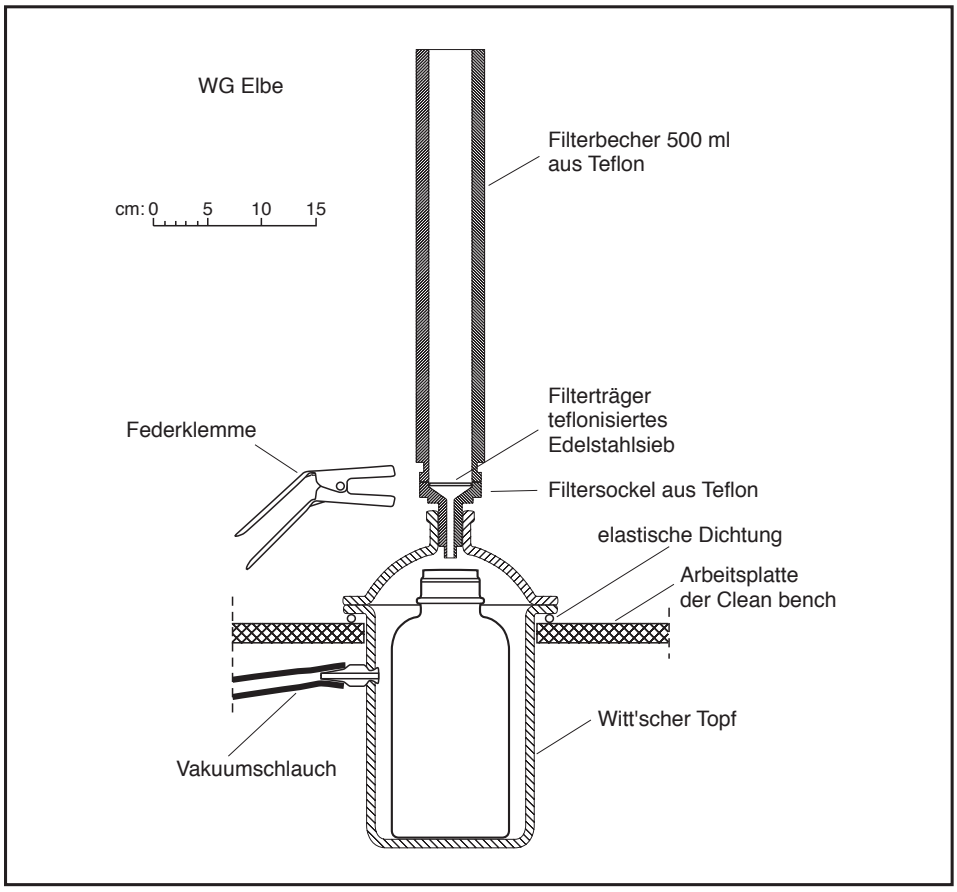


Abb. 6 Teflon-Filtrationsanlage in der Clean bench (Schnitt)

einer Startporenweite von 0,45 µm benutzt. Während der Filtration erfolgt durch den sich aufbauenden Filterkuchen eine nicht genau erfaßbare Abnahme der "wirksamen" Porenweite. Eine mehrstündige Filtrationsdauer ist erforderlich, um Filterkuchengewichte größer 10 mg TS zu erreichen und damit, unter Berücksichtigung der unvermeidbaren Blindwerte, eine zuverlässige Schwermetalluntersuchung zu ermöglichen. Vor der Filtration werden die Filter ebenfalls unter Reinstraumbedingungen in der gleichen Filtrationsapparatur jeweils mit 1 l hochreinem Wasser vorgewaschen, bei 60°C im Trockenschrank getrocknet und anschließend gewogen. Während der Filtration wird die filtrierte Wassermenge durch Differenz-Wägung bestimmt, um die Kontaminationsgefahr beim Überführen in Meßbecher auszuschließen. Im Anschluß an die Filtration wird der Filter, einschließlich Schwebstoffbelag, 2 Stunden bei 105°C im Trockenschrank getrocknet, anschließend 15 Min. abgekühlt und das Filterkuchengewicht bestimmt. Die Analysenmethoden zur Bestimmung der Schwermetalle sind in Kapitel 2.1 für den "gelösten Anteil" und in Kapitel 2.3 für den "partikulären Anteil" aufgeführt.

Entsprechende Untersuchungen wurden in den Querschnitten Schnackenburg, Nienstedten, Twielenfleth und Grauerort bei etwa mittlerem Abfluß durchgeführt.

Zur kontinuierlichen Überwachung der Schwermetallbelastung der Schwebstoffe wurden von der Wassergütestelle Sedimentationsbecken konstruiert, in denen aufgrund der geringen Strömungsgeschwindigkeit von rd. 1 cm/s die Schwebstoffe sedimentieren und somit als Probengut "frische, schwebstoffbürtige Sedimente" gewonnen werden. Die Sedimentationsbecken sind aus Plexiglas her-

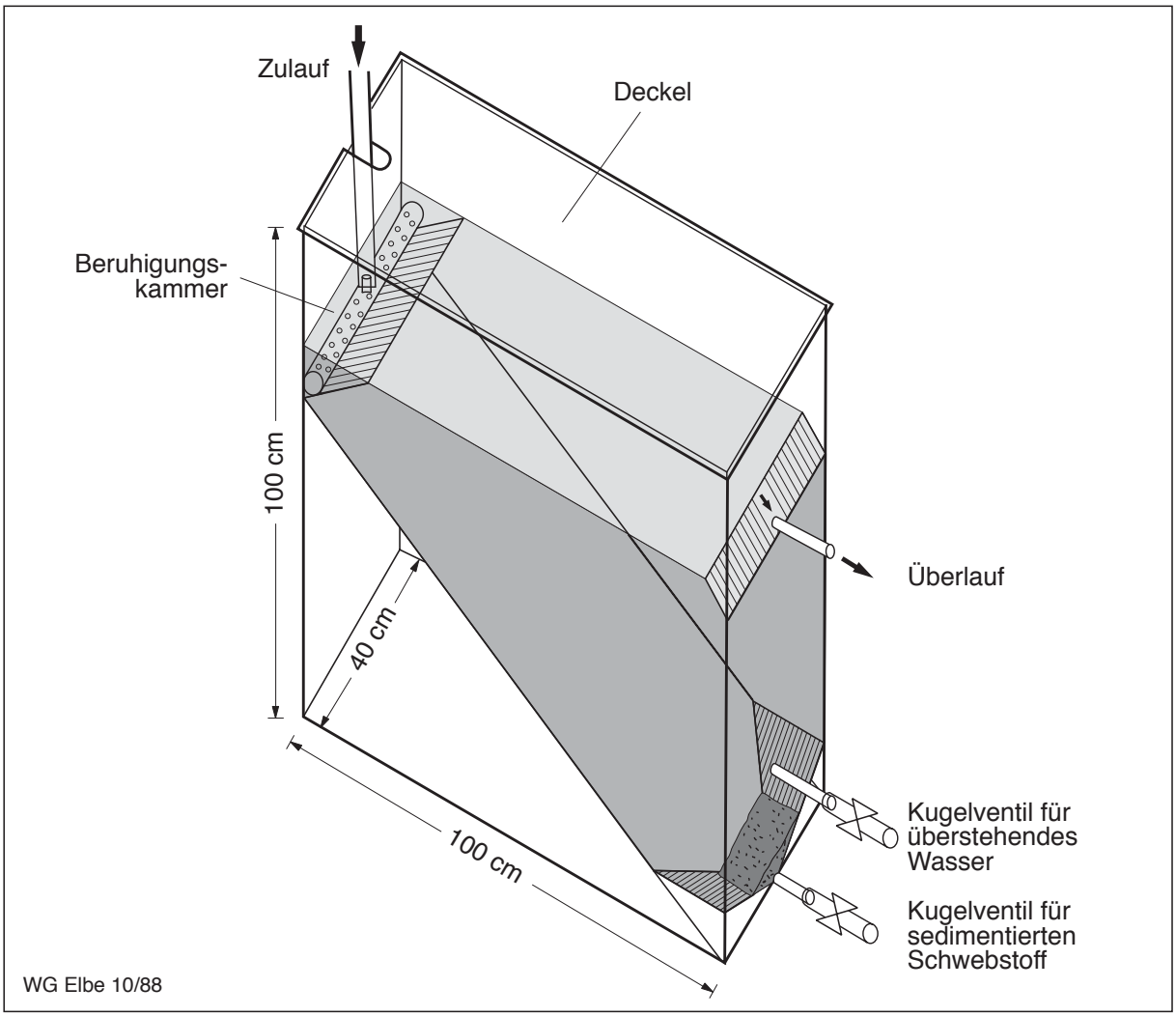


Abb. 7 Sedimentationsbecken zum Sammeln von frischen schwebstoffbürtigen Sedimenten

gestellt, um die Sedimentationsvorgänge und insbesondere das Abziehen des überstehenden Wassers und die Gewinnung des Probengutes beobachten zu können. Nachdem sich in der Meßstation Schnackenburg das erste Sedimentationsbecken (Beginn der Messung: Juli 1984) sehr gut bewährt hat, wurden im Jahre 1985 gleiche Sedimentationsbecken in den Meßstationen Bunthaus, Seemannshöft und Blankenese installiert. Die entsprechenden Untersuchungsergebnisse sind in Kapitel 5.3 erläutert.

Im Elbmündungsgebiet zwischen Glückstadt und Scharhörn wurden im Jahr 1986 Untersuchungen im Rahmen des gemeinsamen Bund/Länder-Meßprogramms für die Sedimente durchgeführt. Die Beprobung erfolgte mit einem Van-Veen-Bodengreifer. Aus der Gesamtprobe wurde lediglich die oberste, deutlich in ihrer Farbe erkennbare frische Sedimentschicht in vorbereitete Probengefäße überführt. Die eingesetzten Analysenmethoden sind in Kapitel 2.2, die Ergebnisse in Kapitel 5.2 aufgeführt.

Für das "Joint Monitoring Program" erfolgten zur Überwachung der Schwermetallbelastung in Biota in den Jahren 1986 und 1987 im Elbeästuar Fisch- und Miesmuschel-Probennnahmen. Die Befischungen fanden jeweils in den Monaten Juni/ Juli statt. Beprobt wurde der innere Teil (von Brunsbüttel bis Cuxhaven) und der äußere Teil des Elbeästuars (s. Kapitel 6).

Die Untersuchung der Fischproben (Flundern) umfaßte in der Muskulatur die Schwermetalle Quecksilber, Kupfer, Zink und Nickel und in der Leber die Schwermetalle Cadmium, Blei, Chrom und Arsen. Die Miesmuscheln (Weichkörper ohne Schale) wurden vor der Analyse zu längenstrukturierten Pool-Proben zusammengefaßt. Diese Pool-Proben wurden dann auf die Schwermetalle Quecksilber, Cadmium, Blei, Kupfer und Zink untersucht. Die Analysenmethoden zur Bestimmung der einzelnen Schwermetalle sind in Kapitel 2.4 zu finden.

Maßgebliche Merkmale der ausgewählten Organismenarten (Flunder und Miesmuschel) sind in der folgenden Ubersicht zusammengestellt:

Flunder (*Platichthys flesus* L.)

Vorkommen: europäische Küstengewässer einschließlich der Ästuare bis in den limnischen Bereich hinein, Mittelmeer

Größe, Gewicht, Alter der laichreifen Tiere:
in den Ästuaren : bis etwa 35 cm lang, ca. 0,5-1 kg, höchstens 5 Jahre
in der See : bis 50 cm lang, bis 3 kg, 15 - 20 Jahre

Nahrung: Würmer, Krebstiere, Schnecken, Muscheln, kleine Fische

Lebensweise: Lebt am Boden auf der Seite liegend, wegen fehlender Schwimmblase nur kurzzeitig im freien Wasser

Die Flunder eignet sich aus zwei Gründen als Bioindikator zur Ermittlung der Schwermetallbelastung:

1. Die Flunder ist weit verbreitet und kommt zahlreich vor.

2. Die am Boden lebende Flunder ernährt sich in der Hauptsache von im und auf dem Grund vorkommenden Tieren. Es ist deshalb zu erwarten, daß die Schwermetallbelastung der Flundern durch die im Sediment angereicherten Schwermetalle geprägt ist.

Das Wanderungsverhalten der Flundern jedoch erschwert die Aussage, welchem Belastungsniveau die jeweilige Flunder ausgesetzt war. Zum einen wandern die jungen, im Süßwasser aufgewachsenen Flundern vor der ersten Laichreife ins Meer, zum anderen ziehen Flundern in der warmen Jahreszeit gerne in die Flußmündungen hinauf und im Winter wieder zurück in salzhaltigeres, tieferes und wärmeres Wasser der Nordsee.

Miesmuschel (*Mytilus edulis* L.)

Vorkommen: vom Nördlichen Eismeer bis Nordafrika, amerikanische Ostküste vom nördlichen Polarkreis bis Kap Hatteras

Größe, Gewicht der laichreifen Tiere: 3 - 8(10) cm lang, etwa 2 - 3 cm dick, 10 - 30 g (abhängig von der Nahrungsmenge, Raummangel, Salzgehalt, Wasserbewegung, sehr variabel)

Nahrung: aus dem Wasser gefiltertes Plankton und Schwebstoffe

Lebensweise: Gesellig, mit Byssusfäden festgeheftet auf festem Untergrund wie Buhnen, Hafenanlagen, Holz, Felsen

Die Miesmuschel ist als Bioindikator aus zwei Gründen gut geeignet:

1. Dank der festsitzenden Lebensweise ist sie absolut ortstreu. Es läßt sich im Gegensatz zu wandernden Fischen der Zusammenhang zwischen der Schadstoffbelastung des umgebenden Wassers und des Organismus klar beschreiben.

2. Die Muscheln filtern für die Nahrungsaufnahme große Wassermengen und kommen so intensiv mit im Wasser gelösten und an Schwebstoffen gebundenen, sowie in Plankton angereicherten Schadstoffen in Berührung.

2.1 Schwermetallbestimmung im Wasser

Parameter	Einheit	BG	Probenvorbereitung	Bestimmung
filtr. Volumen	ml	1		direkt aus der Probenflasche gravimetrische Messung als Differenzwägung
Filterkuchen	mg TS	0,1	sofort nach Probenahme Filtration nach 5-minütiger Absetzzeit, 0,45-µm-Zelluloseacetat-Filter (OE 67 S&S), vorgewaschen mit 1 l hochreinem Wasser, trocknen bei 60°C im Trockenschrank, nach Filtration Trocknung des Filters inklusive Filterkuchen 2 Std. bei 105°C	Differenzwägung aus dem Gewicht des beladenen Filters minus Filterleergewicht

Bestimmung bei Wochen- (in der unfiltrierte Probe) und Querprofilmischproben (im Filtrat)

Parameter	Einheit	BG	Probenvorbereitung	Bestimmung
Quecksilber	µg/l	0,005	bei Wochenmischproben: Polyethylenflasche, unfiltriert, Probenstabilisierung mit 5 ml/l konz. Salpetersäure	2 Std. UV-Aufschluß (Probe gekühlt),die weitere Untersuchung erfolgt an der umgeschüttelten Probe (gelöster und partikulärer Anteil), Reduktion mit $SnCl_2$, die Anreicherung und Reinigung geschieht durch Amalgambildung an fein verteiltem Gold (goldbedampfte reine Quarzglaswolle)(nach SCHMIDT). Die Bestimmung des Quecksilbers erfolgt mit der Kaltdampfmethode (HATCH und OTT).
Blei	µg/l	0,1	bei Querprofilmischproben: Polyethylenflasche, Filtration siehe Filterkuchenbestimmung, Filtrat ansäuern mit 5 ml/1 konz. Salpetersäure	Zu 100 ml werden 5 ml Ammoniumpyrrolidindithiocarbamatlsg. (APDC-Lsg., 2 %ig, gereinigt durch Extraktion m. MIBK) gegeben und 1 Min. geschüttelt. Zur Bestimmung von Chrom wird ein pH-Wert von 4,9 eingestellt und die Probe nach Zugabe von APDC 2 Min. aufgekocht. Nach Zugabe von 10 ml Methylisobutylenketon (MIBK) wird noch weitere 2 Min. geschüttelt. Der Extrakt wird nach der Phasentrennung sofort mit der Atomabsorptionsspektroskopie (flammenlos) auf die angegebenen Schwermetalle untersucht.
Cadmium	pg/l	0,01		
Chrom	µg/l	0,1		
Kupfer	µg/l	0,1		
Nickel	µg/l	0,1		
Mangan	µg/l	1,0		
Arsen	µg/l	0,1		Bestimmung nach der Hydrid-Methode
Zink	µg/l	1,0		direkte Bestimmung
Eisen	µg/l	1,0		

Schwermetall-Analytik des Filterkuchens siehe 2.2 und 2.3

Bestimmung bei Längsprofilproben (im Filtrat)

Parameter	Einheit	BG	Probenvorbereitung	Bestimmung
Quecksilber	µg/l	0,005	Teflonflasche, Filtration siehe Filterkuchenbestimmung, Filtrat ansäuern mit 5 ml/l konz. Salpetersäure	2 Std. UV-Aufschluß (Probe gekühlt), Reduktion mit $SnCl_2$, die Anreicherung und Reinigung geschieht durch Amalgambildung an fein verteiltem Gold (nach SCHMIDT). Die Bestimmung erfolgt mit der Kaltdampfmethode (HATCH und OTT).
Blei	µg/l	0,1		Komplexierung mit Ammoniumpyrrolidindithiocarbamat (APDC), Extraktion mit Methylisobutylenketon (MIBK), Messung: AAS flammenlos
Cadmium	µg/l	0,01		
Kupfer	µg/l	0,1		
Nickel	µg/l	0,1		
Chrom	µg/l	0,1		in Anlehnung an DEV E 10-2 (15. Lieferung 1985),(Standardadditionsverfahren)
Zink	µg/l	0,1		Inversvoltametrie an der HMDE, Standardadditionsverfahren, oder AAS-Graphitrohr oder Flamme je nach Gehalt und Matrix
Arsen	µg/l	0,2		DEV D 18 (15. Lieferung 1985)
Eisen	µg/l	1,0		In Anlehnung an DEV E 1 (12. Lieferung 1983)
Mangan	µg/l	0,05		in Anlehnung an DEV E 2 (12. Lieferung 1983) oder AAS

Schwermetall-Analytik des Filterkuchens siehe 2.2 und 2.3

2.2 Schwermetallbestimmung in sedlmentierten Schwebstoffen

Parameter	Einheit	BG	Probenvorbereitung	Bestimmung
				Druckaufschluß in einem Teflongefäß mit 3 ml HNO_3 und 1 ml HF bei 170°C 4 Stunden, Überführung in Polyethylenmeßkolben und Auffüllung mit Reinstwasser auf genau 100 ml
Quecksilber	mg/kg TS	0,1		direkt mit AAS-Kaltdampfmethode (nach HATCH & OTT)
Cadmium Blei Kupfer Nickel Zink Eisen Mangan	mg/kg TS mg/kg TS mg/kg TS mg/kg TS mg/kg TS mg/kg TS mg/kg TS	0,05 0,5 0,5 0,5 0,5 5 5		Zu 100 ml werden 5 ml Ammoniumpyrrolidindithiocarbamatlsg. (APDC-Lsg., 2 %ig, gereinigt durch Extraktion m. MIBK) gegeben und 1 Min. geschüttelt. Nach Zugabe von 10 ml Methylisobutylenketon (MIBK) wird noch weitere 2 Min. geschüttelt. Der Extrakt wird nach der Phasentrennung sofort mit der Atomabsorptionsspektroskopie (flammenlos) auf die angegebenen Schwermetalle untersucht.
Chrom	mg/kg TS	0,5		In der Teilprobe wird ein pH-Wert von 4,9 eingestellt und die Probe nach Zugabe von APDC 2 Min. aufgekocht. Die weitere Behandlung erfolgt wie bei den vorstehenden Metallen.
Arsen	mg/kg TS	0,5		nach der Hydrid-Methode

TS: Trockensubstanz

2.3 Schwermetallbestimmung in abfiltrierten Schwebstoffen

Parameter	Einheit	BG	Probenvorbereitung	Bestimmung
Filterkuchen	mg TS	0,1	sofort nach Probenahme Filtration nach 5-minütiger Absetzzeit, 0,45-µm-Zelluloseacetat-Filter (OE 67 S&S), vorgewaschen mit 1 l hochreinem Wasser, trocknen bei 60°C im Trockenschrank, nach Filtration Trocknung des Filters inklusive Filterkuchen 2 Std. bei 105°C	Differenzwägung aus dem Gewicht des beladenen Filters minus Filterleergewicht
Quecksilber	mg/kg TS	0,1		Reduktion mit $SNCl_2$ Anreicherung und Reinigung durch Amalgambildung an fein verteiltem Gold (nach SCHMIDT), Bestimmung mit AAS-Kaltdampfmethode (nach HATCH & OTT).
für alle anderen Metalle siehe 2.2				

2.4 Schwermetallbestimmung In Fischen und Muscheln

Parameter	Einheit	BG	Probenvorbereitung	Bestimmung
Gesamtgewicht	g	0,001	bei Muscheln:	Bestimmung an Einzelindividuen
Schalengewicht	g	0,001	nach äußerlicher Reinigung	
Fleischgewicht	g	0,001	Hälterung 24 Std. in gefiltertem Seewasser bei aktueller Wassertemperatur,	
Schalenlänge	mm	1	Entnahme des Weichkörpers, 5 Min. abtropfen auf Filterpapier, längenabhängige Zusammenstellung (Schalenlänge) von Weichkörper-Poolproben	
Fettgehalt	%	0,1		Bestimmung an der Poolprobe (Homogenat)
Wassergehalt	%	0,1		
Länge	cm	0,5	bei Fischen:	
Gewicht	g	0,1	Sortierung nach festgelegten Längengruppen (falls notwendig, Zusammenstellung von Poolproben), bis zur Einzelanalyse tiefgefroren zwischengelagert, Entnahme der Leber	
Geschlecht				
Alter				
an der Muskulatur:				
Wassergehalt	%	0,1		
Fettgehalt	%	0,01		
an der Leber:				
Wassergehalt	%	0,1		
Fettgehalt	%	0,01		

Parameter	Einheit	BG	Probenvorbereitung	Bestimmung
Quecksilber	mg/kg FG	0,01		86/ Homogenat wird mit HNO_3, $HClO_4$ und $HClO_3$ 87: in speziellen Durangefäßen drucklos naß verascht. Die Aufschlußlösung wird mit $SnCl_2$ und $NH_2OH \cdot HCl$ im Ammoniumhydrogencitratpuffer versetzt. AAS-Kaltdampfmethode (nach HATCH & Ott, modifiziert nach Kruse)
Cadmium	mg/kg FG	0,0001		86/ Homogenat wird mit HNO_3 und $HClO_4$ in 87: Teflonbechern drucklos naß verascht. Die
Blei	mg/kg FG	0,001		Aufschlußlösung wird bis zur völligen Trockne abgeraucht. Der Rückstand wird in stark verdünnter HNO_3 aufgenommen. Graphitrohrofen-AAS
Kupfer	mg/kg FG	0,002		86: Aufbereitung der Proben wie bei Pb und Cd Graphitrohrofen-AAS
Zink	mg/kg FG	0,01		87: ohne vorherigen Aufschluß direkte Graphitrohrofen-AAS
Chrom	mg/kg FG	0,02		86/ ohne vorherigen Aufschluß 87: direkte Zeemann-AAS
Nickel	mg/kg FG	0,05		
Arsen	mg/kg FG	0,05		86: Homogenat wird mit HNO_3, $HClO_4$ $HClO_3$ und H_2SO_4 naß verascht und partiell eingeengt. Bei einem pH-Wert von 4,1 wird die Aufschlußlösung mit KI/Ascorbinsäure-Lösung versetzt. Aus einem Teilvolumen wird durch Zugabe von $NaBH_4$-Lösung das Arsen als AsH_3 ausgetrieben. Hydrid-AAS 87: ohne vorherigen Aufschluß direkte Zeemann-AAS

FG: Frischgewicht

3. HYDROLOGISCHE VERHÄLTNISSE

Der zur Bundesrepublik Deutschland gehörende Elbabschnitt besteht aus hydrologisch unterschiedlichen Teilsystemen, die folgendermaßen gegliedert sind:

a. Elbabschnitt Schnackenburg bis Lauenburg

In diesem Abschnitt wird der Wasserstand, die Strömungsgeschwindigkeit und damit die Laufzeit der Wasserkörper jeweils durch die Höhe des Abflusses (wie bei jedem normalen Binnenfluß) bestimmt. Bei Abflüssen unter 800 m^3/s werden die Buhnen nicht überströmt, so daß sich in den Buhnenfeldern infolge der Walzenströmung Schwebstoffe ablagern. Bei erhöhten Oberwasserabflüssen über 1000 m^3/s werden die Buhnen überströmt, so daß in dieser Phase in verstärktem Maße eine Ausräumung frischer feinkörniger Sedimente aus den Buhnenfeldern stattfindet. Da ein erheblicher Anteil der Schwermetalle in an Schwebstoff gebundener Form vorliegt, wird der Schwermetalltransport durch die hydrologischen Bedingungen erheblich beeinflußt.

b. Abschnitt von Lauenburg bis zum Wehr Geesthacht (Staustufe)

Durch das Wehr Geesthacht wird der Wasserstand im Stauraum bei niedrigen bis mittleren Abflüssen durch die Steuerung der Wehrklappen auf + 4,20 m NN konstant gehalten. Zunehmende Abflüsse werden durch ein Absenken der Wehrklappen ausgeglichen. Ab Qo rd. 1100 m^3/s sind die Wehrklappen gelegt (in unterster Stellung), so daß bei Qo über 1100 m^3/s ein "freier" Durchfluß und ein "freier" Wasserspiegel herrscht. Durch die Stauwirkung des Wehres Geesthacht bei niedrigen Oberwasserabflüssen tritt eine deutliche Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten in Verbindung mit einer verstärkten Sedimentation von Schwebstoffen ein. In Phasen mit hohen Oberwasserabflüssen findet durch die dann erhöhten Strömungen eine natürliche Erosion der zuvor sedimentierten Schwebstoffe statt. Durch die Stauhaltung Geesthacht wird somit der von oberstrom resultierende Schwermetalltransport in die Unterelbe zeitweise (bei niedrigen Oberwasserabflüssen) verzögert, aber nicht in seiner absoluten Gesamtmenge verändert.

c. Obere Tideelbe (Wehr Geesthacht bis Hamburger Hafen)

In diesem Abschnitt überwiegt, insbesondere bei höheren Oberwasserabflüssen, der ebbstromorientierte Transport, so daß sich in diesem Elbabschnitt keine langen Verweilzeiten der Wasserkörper und keine bedeutenden Sedimentations- und Erosionsprozesse ergeben.

d. Hamburgisches Stromspaltungsgebiet (einschließlich Hamburger Hafen)

Im hamburgischen Stromspaltungsgebiet erfolgt unterhalb der Elbbrücken in der Norder- und in der Süderelbe durch die Fahrwasservertiefungen eine erhebliche Aufweitung der Querschnitte. Zusätzlich ergeben sich durch die angeschlossenen Hafenbecken, die mit der Flut aufgefüllt und mit der Ebbe entsprechend des Tidefalls entleert werden, erhebliche Verweilzeiten. In Phasen mit anhaltend niedrigen Oberwasserabflüssen pendeln die Wasserkörper mit dem Ebbe- und Flutweg im Bereich des Stromspaltungsgebietes

über mehrere Tiden stromauf und stromab, wobei ein erheblicher Teil des Wassers in die strömungsschwachen und damit turbulenzarmen Hafenbecken während der Flutphase einströmt. Insbesondere in den Hafeneinfahrten und der Elbe nahegelegenen Hafenbereichen kommt es zu verstärkten Sedimentationen, die durch Baggerungen zur Erhaltung der Fahrwassertiefen beseitigt werden müssen. Im Hinblick auf den Schadstofftransport wird in Phasen mit anhaltend niedrigem Oberwasserabfluß ein erheblicher Teil der von oberstrom zugeführten Schwebstofffracht, und damit auch der "gebundenen" Schwermetallfracht, im System Hamburger Hafen durch Sedimentation zurückgehalten. In Phasen bei hohen Oberwasserabflüssen werden die Wasserkörper innerhalb weniger Tiden durch das Stromspaltungsgebiet hindurchtransportiert und gelangen mit der nahezu vollständigen Belastung in die Unterelbe unterhalb Hamburgs.

e. Elbabschnitt Hamburg bis Glückstadt

Während in diesem Abschnitt die Ebb- und Flutströmungsgeschwindigkeit jeweils in erster Linie von der Gezeitendynamik geprägt wird, hängt der resultierende seewärtige Transport von der Höhe des Oberwasserabflusses ab. Aufgrund der großen Querschnitte ergeben sich, insbesondere bei anhaltend niedrigen Oberwasserabflüssen, sehr lange Transportzeiten. Die großen, durch die Tide bewegten Wasserkörper, pendeln mit dem Flut- und Ebbestrom laufend stromauf und stromab und werden nur allmählich durch die Menge des von oberstrom in die Tideelbe einströmenden Oberwassers seewärts verschoben. Beim Abfluß von ausgeprägten Hochwasserwellen wird dieser seewärtige Transport entsprechend verstärkt.

f. Elbabschnitt Glückstadt bis Außenelbe

In diesem Elbabschnitt wird der Schwebstofftransport zusätzlich durch die Einmischung von Nordseewasser mit erhöhtem Salzgehalt (Dichteeffekte) beeinflußt. Bei anhaltend niedrigen Oberwasserabflüssen bildet sich im Bereich der Brackwasserzone eine große Trübungswolke mit erhöhten Schwebstoffgehalten aus. Beim Abfluß von Hochwasserwellen wird diese Trübungswolke innerhalb weniger Tiden seewärts verschoben und teilweise sogar aus der Elbmündung in die Nordseeküstengewässer "ausgespült".

Die vorstehenden kurzen Erläuterungen verdeutlichen, daß in den hydrologisch unterschiedlichen Teilabschnitten der Elbe jeweils der resultierende Transport der Schwebstoffe und damit auch der Schwermetalle in starkem Maße durch die Charakteristik des Oberwasserabflusses (Höhe und Dauer des Abflusses) gesteuert wird. In der folgenden Abbildung ist die Ganglinie des Oberwasserabflusses der Elbe am Pegel Neu Darchau für den Untersuchungszeitraum von Mitte 1984 bis Mitte 1988 dargestellt. Im Vergleich zu dem langjährigen Abflußmittelwert (722 m^3/s) der Beobachtungsreihe 1926 bis 1984 sind die Jahre 1984 mit 582 m^3/s und 1985 mit 558 m^3/s als abflußarm einzustufen. Das Jahr 1986 wies mit 715 m^3/s in etwa mittlere Verhältnisse auf. Das Jahr 1987 war mit 1090 m^3/s abflußreich. Ausgeprägte Hochwasserwellen sind im Frühjahr 1987 und im ersten Halbjahr 1988 abgeflossen. Bei einer Bewertung der im folgenden dargestellten Ergebnisse sind die zum Teil sehr unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen stets mit zu berücksichtigen.

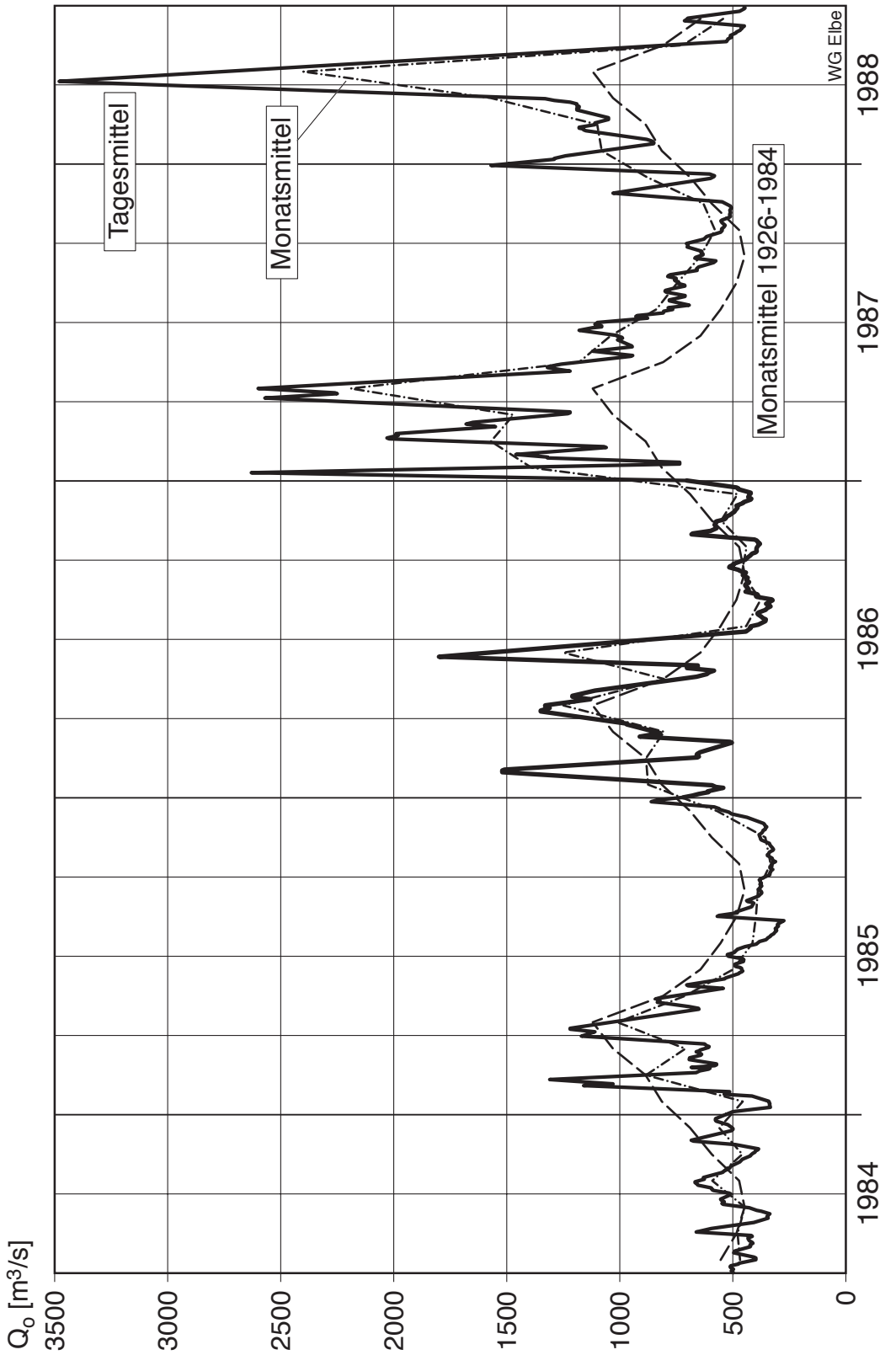


Abb. 8 Oberwasserabfluß am Pegel Neu Darchau (Strom-km 536,4)

4. ERGEBNISSE DER WASSER- UND SCHWEBSTOFFUNTERSUCHUNGEN

4.1 Vorbelastung bei Schnackenburg (Schwermetallgehalte und -frachten)

Zur Überwachung der Vorbelastung der Elbe aus dem oberen Einzugsgebiet erfolgt durch die Meßstation Schnackenburg am Südufer der Elbe aus der Strömung eine kontinierliche Probenwasserentnahme. In einem automatischen Probenentnahmesystem in der Meßstation werden aus diesem kontinuierlichen Probenwasserstrom Wochenmischproben aus den im 2-Stunden-Takt entnommenen Teilproben zusammengestellt. In den Probensammelgefäßen ist Salpetersäure (65 %; Suprapur) zur Probenstabilisierung vorgelegt. In dem abgeschlossenen Probenschrank (zur Vermeidung von Kontaminationen durch Luft und Staub) wird das Probenwasser auf +4°C runtergekühlt und bei dieser Temperatur bis zum Transport ins Labor aufbewahrt.

Mit dem Standardmeßprogramm werden die Schwermetalle Quecksilber, Cadmium, Blei, Zink, Kupfer, Chrom, Nickel, Arsen und das Referenzelement Eisen überwacht. Die Ergebnisse sind in Abb. 9 bis 13 dargestellt. Aufgetragen sind jeweils die Abflußganglinie der Elbe am Pegel Neu Darchau, die an den Wochenmischproben gemessenen Schwermetallkonzentrationen und die berechneten Tagesfrachten.

Zur Frachtenberechnung wurden aus den Wochenmischproben durch lineare Interpolation zwischen den Wochenwerten Tageswerte erzeugt und durch Multiplikation mit dem Tagesabfluß, bezogen auf das Querprofil Schnackenburg, die Tagesfrachten ermittelt.

Die in den Wochenmischproben gemessenen Quecksilberkonzentrationen zeigen, abgesehen von kurzzeitigen Schwankungen, eine generell fallende Tendenz. Um beurteilen zu können, ob es sich hierbei um erste Auswirkungen von Sanierungsmaßnahmen, also einer Verminderung der Einträge, oder nur um eine Verdünnung infolge des erhöhten Oberwasserabflusses handelt, erfolgte eine weitergehende statistische Auswertung der gemessenen Konzentrationen und Frachten in Form von „BOX AND WHISKER PLOTS" (Abb. 14). Die angewendete statistische Methode ist in Kapitel 1 erläutert. Abb. 14 zeigt, daß im Zeitraum 1987 und 1988 gegenüber 1985 und 1986 ein signifikanter, erhöhter Oberwasserabfluß vorlag. Die Medianwerte und die Werte für das 1. und 3. Quartil der gemessenen Quecksilberkonzentrationen haben von 1985 bis 1988 signifikant abgenommen. Die Medianwerte der Tagesfrachten hingegen lagen über den gesamten Beobachtungszeitraum überwiegend in der Größenordnung von 40 bis 60 kg/d Quecksilber. Das heißt, die Abnahme der gemessenen Quecksilberkonzentrationen von 1985 bis 1988 ist in erster Linie auf die Verdünnungswirkung durch die erhöhten Oberwasserabflüsse zurückzuführen.

Die graphischen Darstellungen in Abb. 9 verdeutlichen ferner die erhebliche Schwankungsweite der Tagesfrachten über einen Bereich von 12 bis max. 300 kg/d Hg. Die Quecksilber-Frachtenganglinie zeigt dabei die erwartete systematische Abhängigkeit vom Oberwasserabfluß.

Bei der Bewertung der Befunde ist zu berücksichtigen, daß bei einem Anstieg des Abflusses über Werte von 800 - 1000 m^3/s eine Überströmung der Buhnen einsetzt. Bei niedrigen Abflüssen bildet sich in den Buhnenfeldern eine Walzenströmung aus, in deren Zentrum die Strömungsgeschwindigkeit gering ist. Dadurch findet eine verstärkte Sedimentation von Schwebstoffen statt. Diese sedimentierten Schwebstoffe in den Buhnenfeldern werden insbesondere nach einer Periode mit anhaltend niedrigen Oberwasserabflüssen in der ersten Phase

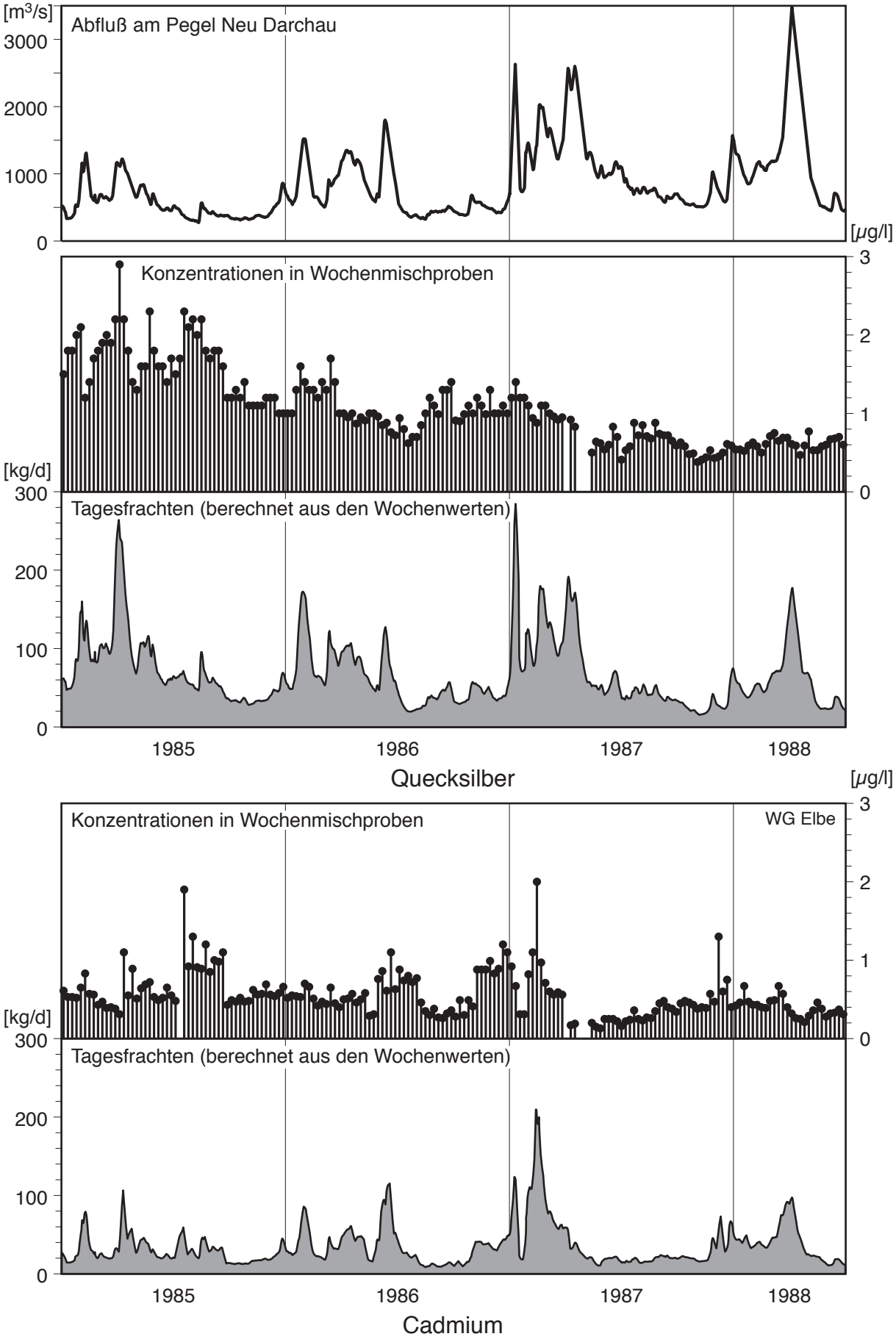


Abb. 9 Quecksilber und Cadmium - Meßstation Schnackenburg, Strom-km 474,5

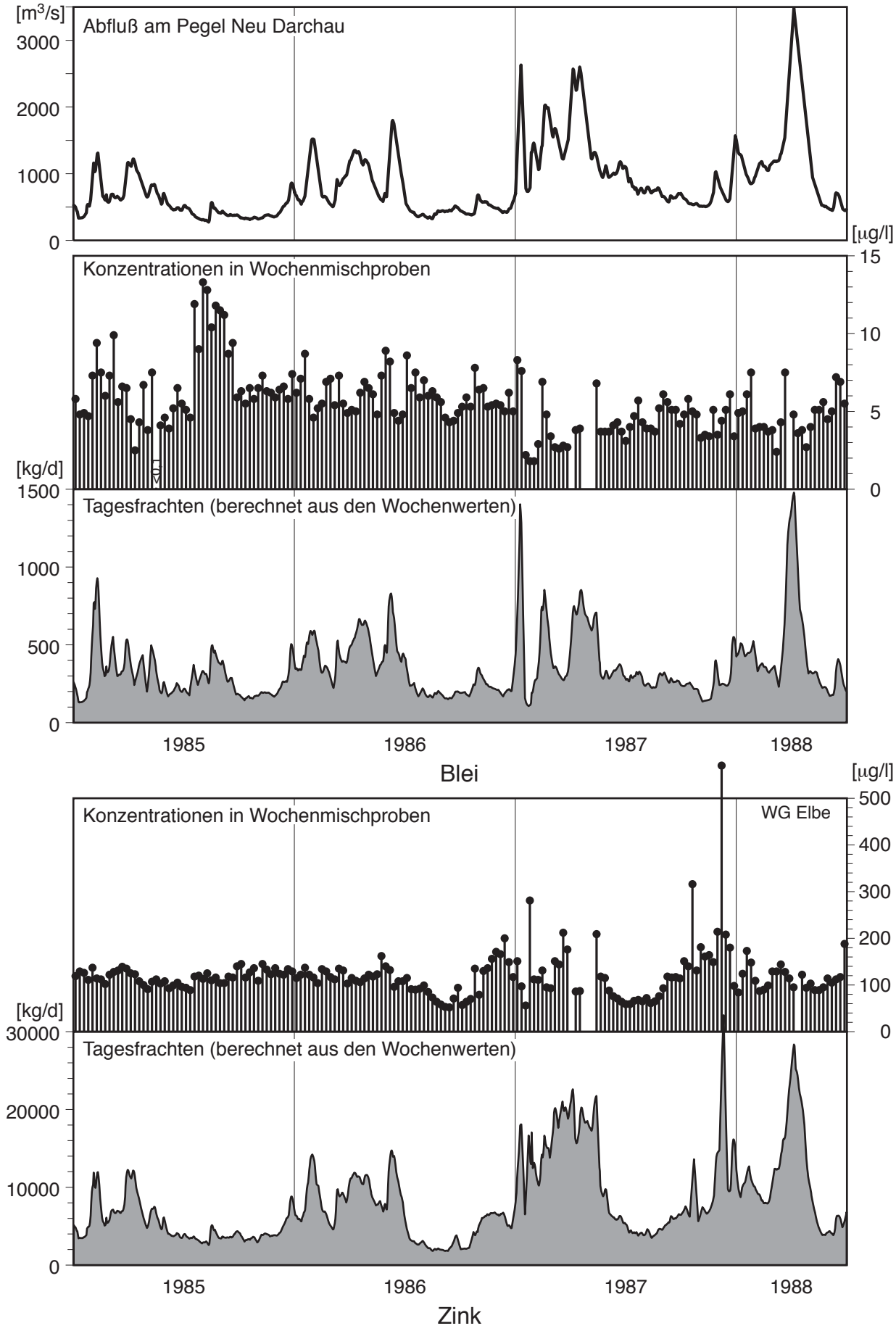


Abb. 10 Blei und Zink - Meßstation Schnackenburg, Strom-km 474,5

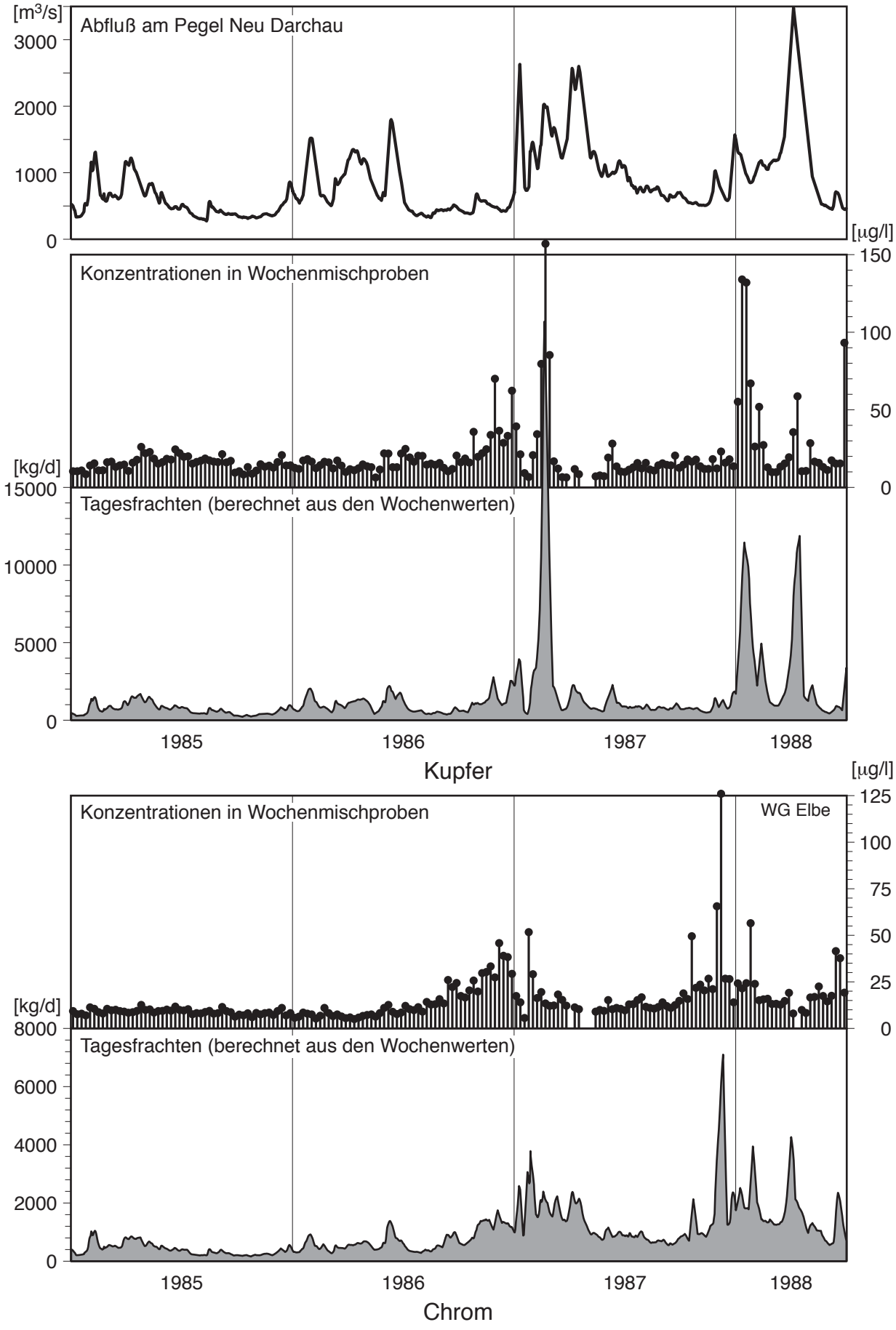


Abb. 11 Kupfer und Chrom - Meßstation Schnackenburg, Strom-km 474,5

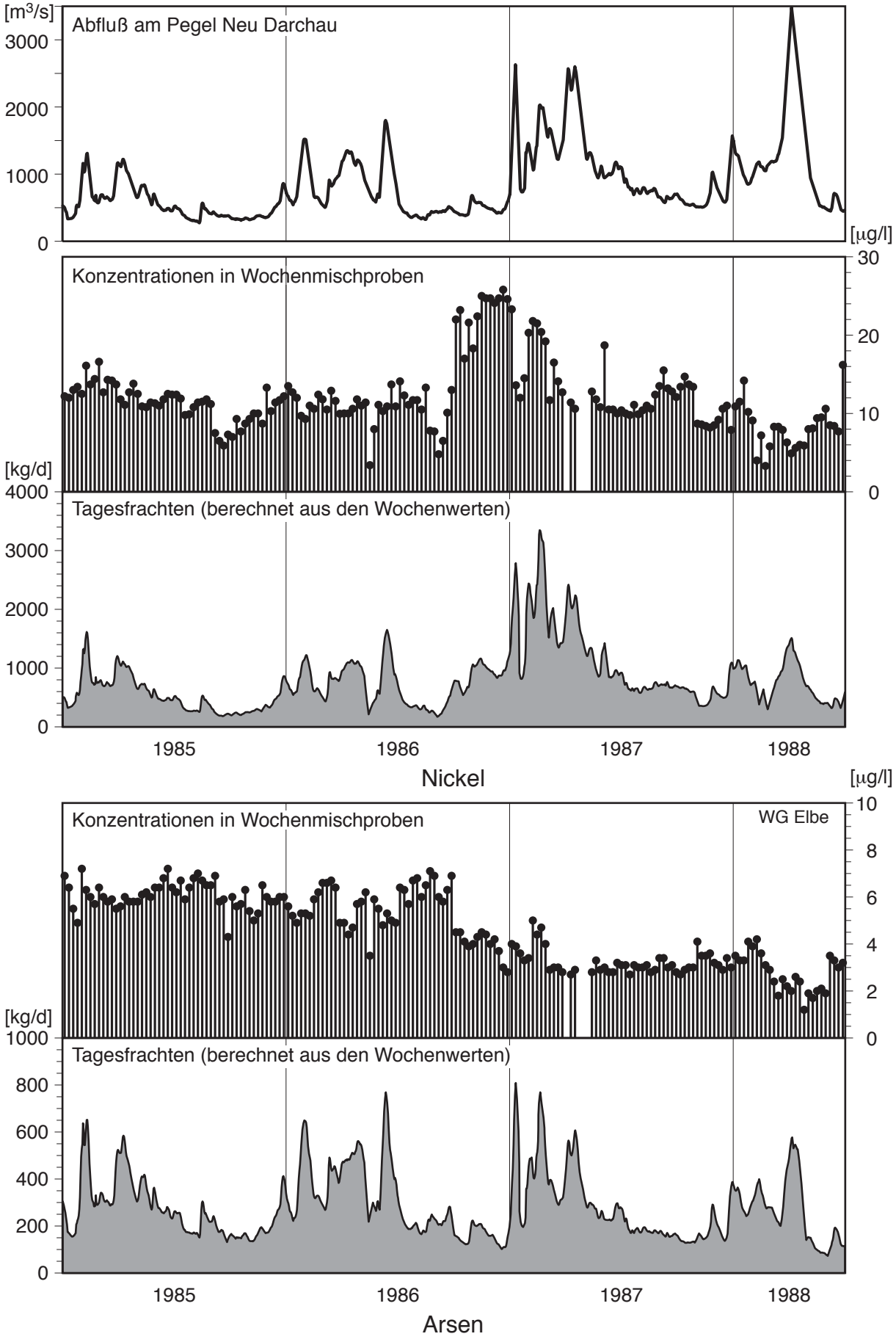


Abb. 12 Nickel und Arsen - Meßstation Schnackenburg, Strom-km 474,5

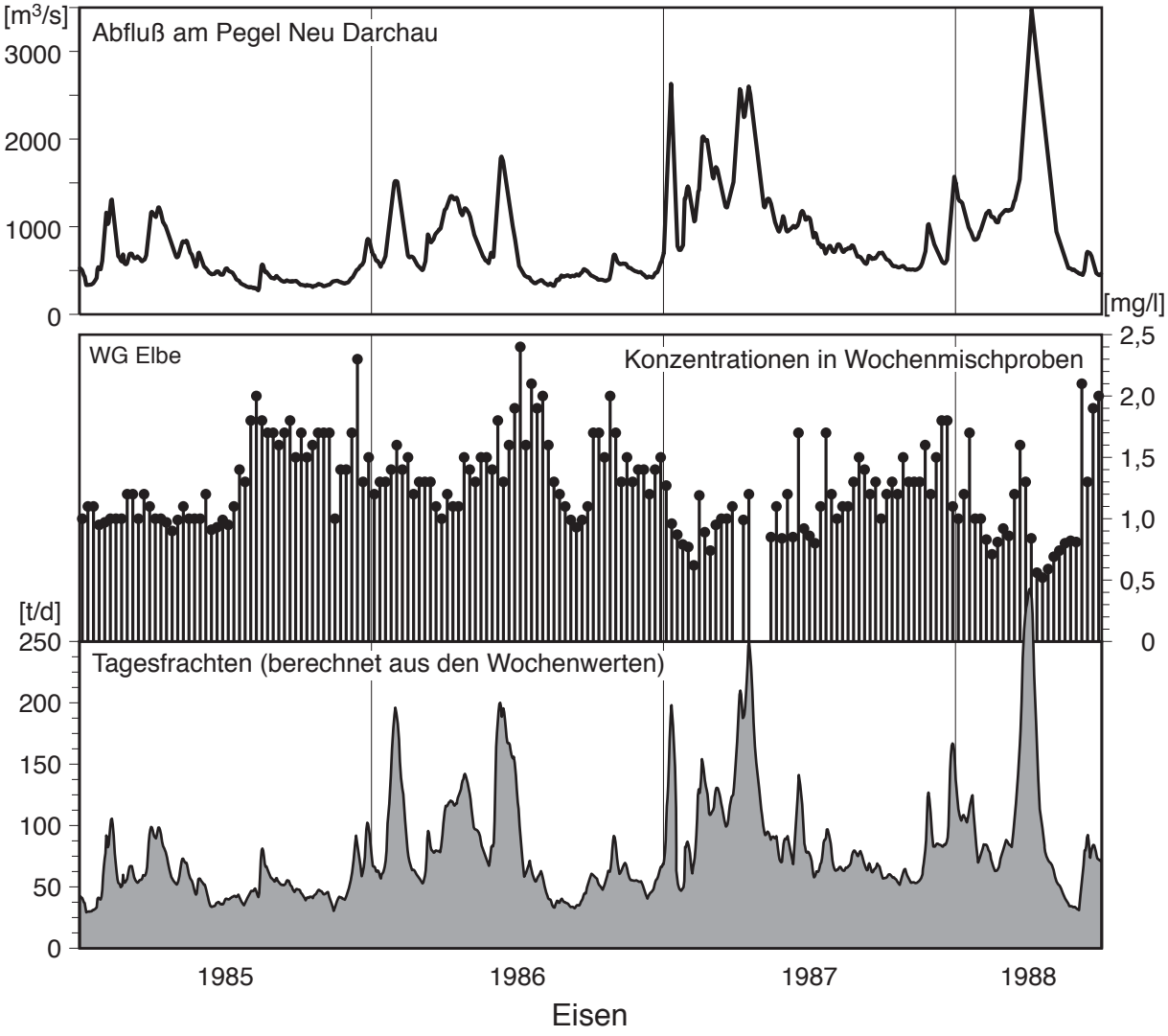


Abb. 13 Eisen - Meßstation Schnackenburg, Strom-km 474,5

einer Hochwasserwelle ausgeräumt und talwärts transportiert. Durch diesen ersten „Spülstoß" ergibt sich, z. B. für Quecksilber, in der Regel ein überproportionaler Anstieg der Frachtenganglinie. Dieser Vorgang wird jedoch zusätzlich durch andere Einflußfaktoren überlagert. Hierzu zählen auch Schwankungen der direkt eingeleiteten Quecksilberfrachten und regionale Belastungsunterschiede im Einzugsgebiet. So werden sich z. B. Frachtenunterschiede ergeben, je nachdem, ob die Oberwasserwellen durch erhöhte Niederschläge und Abflußspenden im Einzugsgebiet der Moldau, der Flußsysteme Saale und Mulde oder aber des Einzugsgebiets von Havel/Spree entstehen. Da über die Belastung dieser unterschiedlichen Regionen keine detaillierten Angaben vorliegen, ist eine weitergehende Interpretation der Befunde bisher nicht möglich.

Für Cadmium deuten die gemessenen Konzentrationen (Abb. 9) und die ermittelten Mediane für die Konzentrationen (Abb. 14) ebenfalls in der Tendenz eine leichte Abnahme an. Diese Abnahme ist jedoch ebenfalls auf die Verdünnungswirkung infolge erhöhter Oberwasserabflüsse zurückzuführen und nicht auf einen verminderten Eintrag von Cadmium.

Ein ähnlicher Verlauf ist für das Schwermetall Blei festzustellen (Abb. 10 und 15). Die Mediane der Bleifrachten zeigen sogar für den Zeitbereich 1985 bis 1988 eine leicht steigende Tendenz.

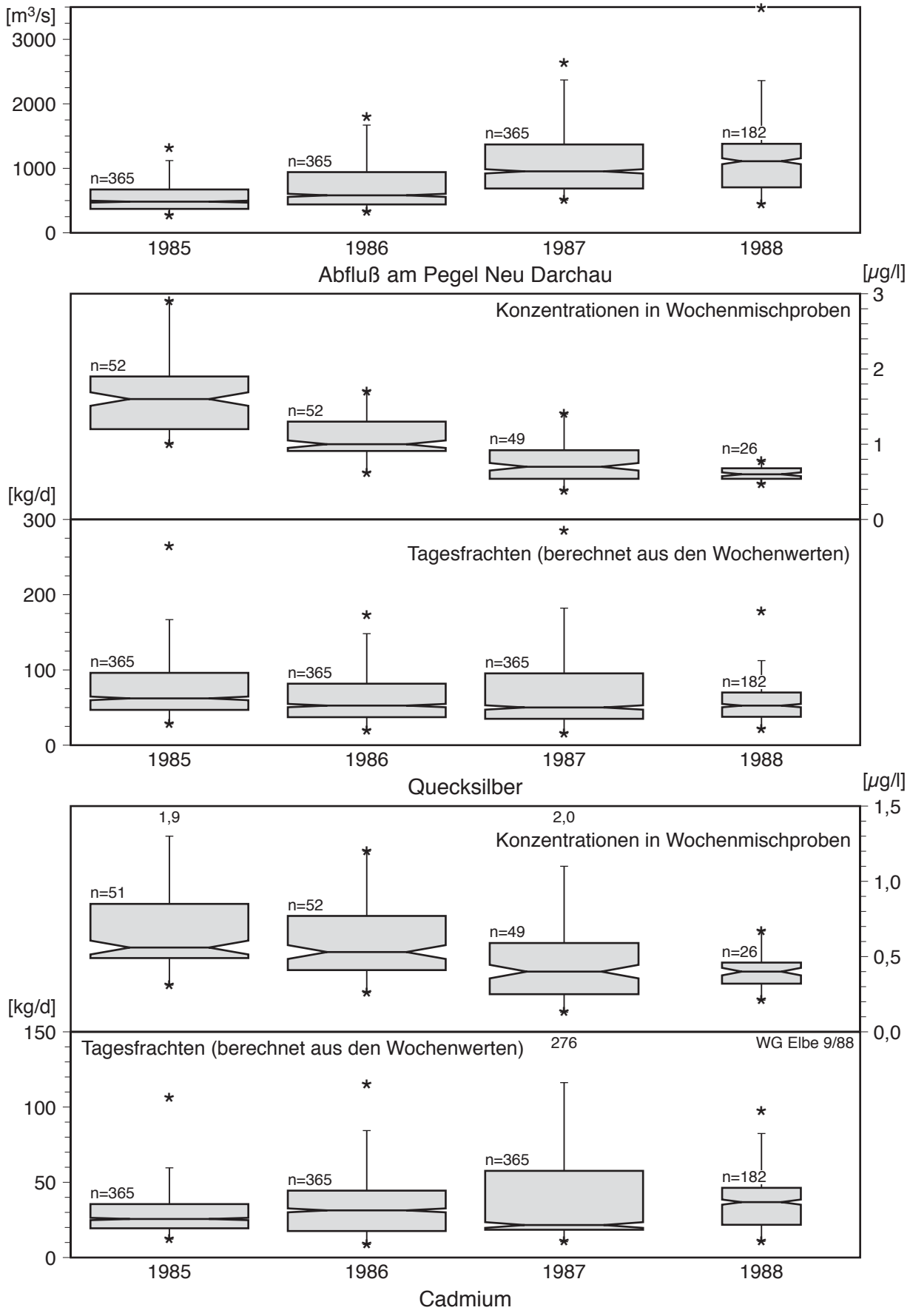


Abb. 14 Medianwerte und Quartile der Quecksilber- und Cadmium-Gehalte und -Frachten der Elbe an der Meßstation Schnackenburg

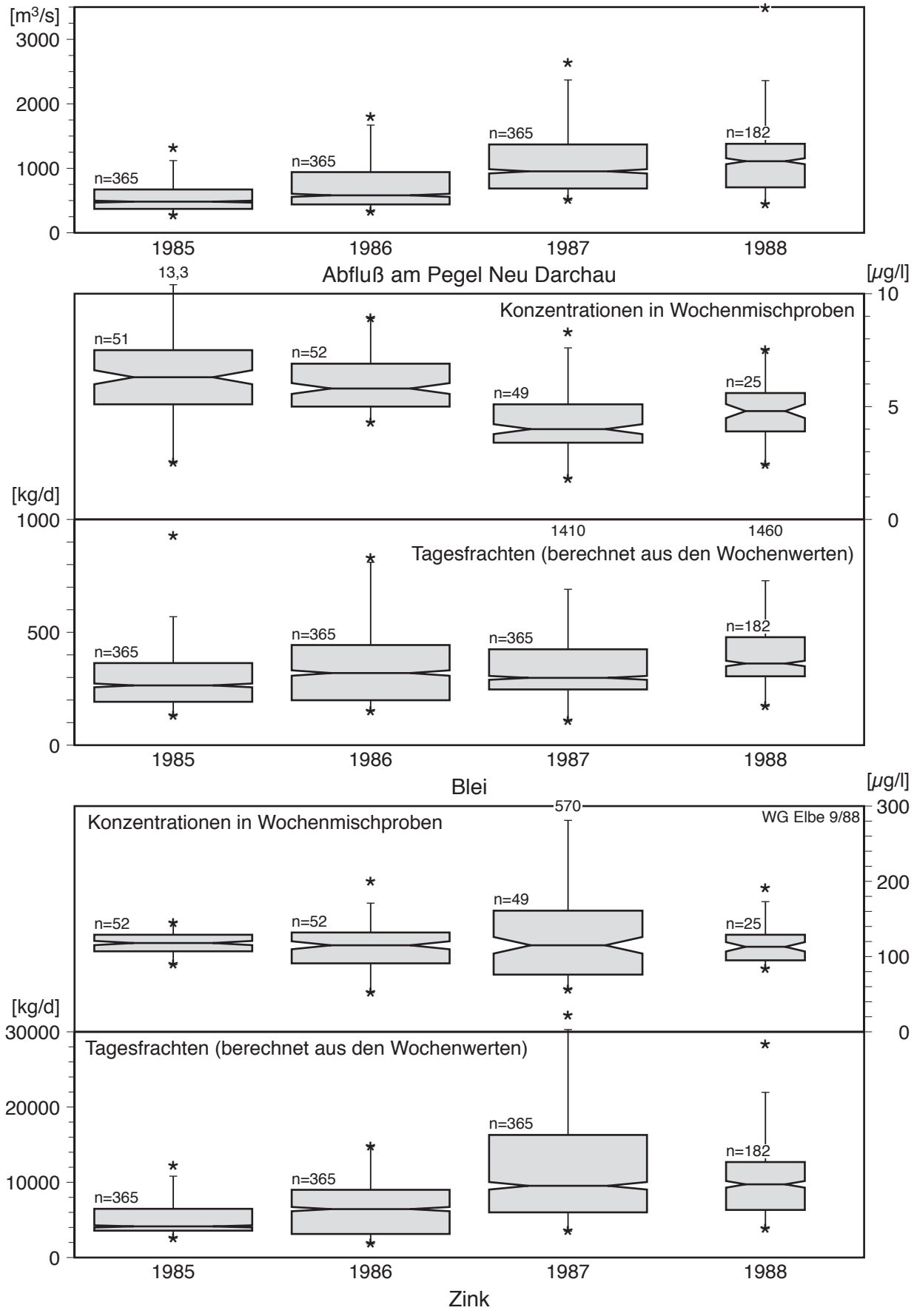


Abb. 15 Medianwerte und Quartile der Blei- und Zink-Gehalte und -Frachten der Elbe an der Meßstation Schnackenburg

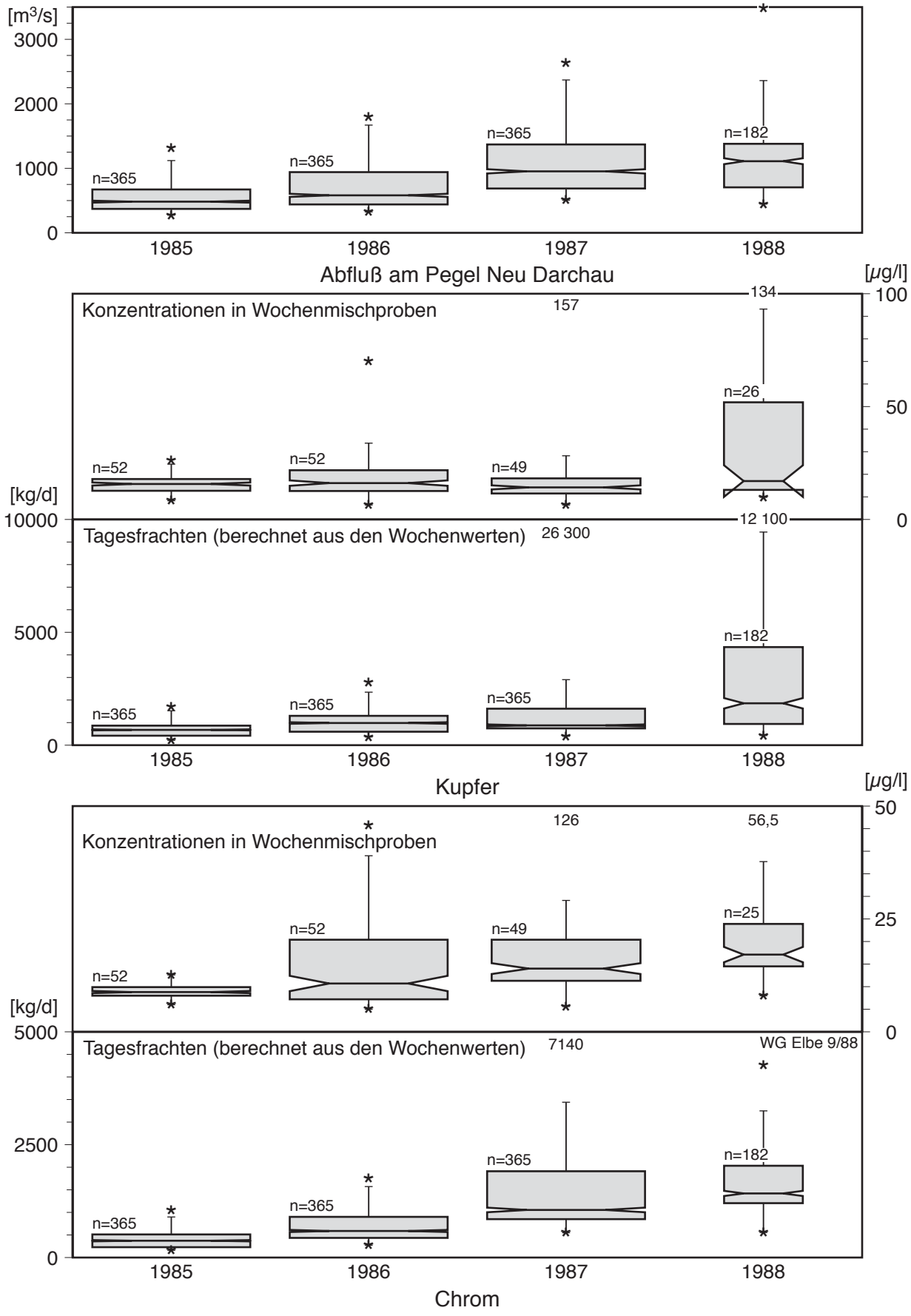


Abb. 16 Medianwerte und Quartile der Kupfer- und Chrom-Gehalte und -Frachten der Elbe an der Meßstation Schnackenburg

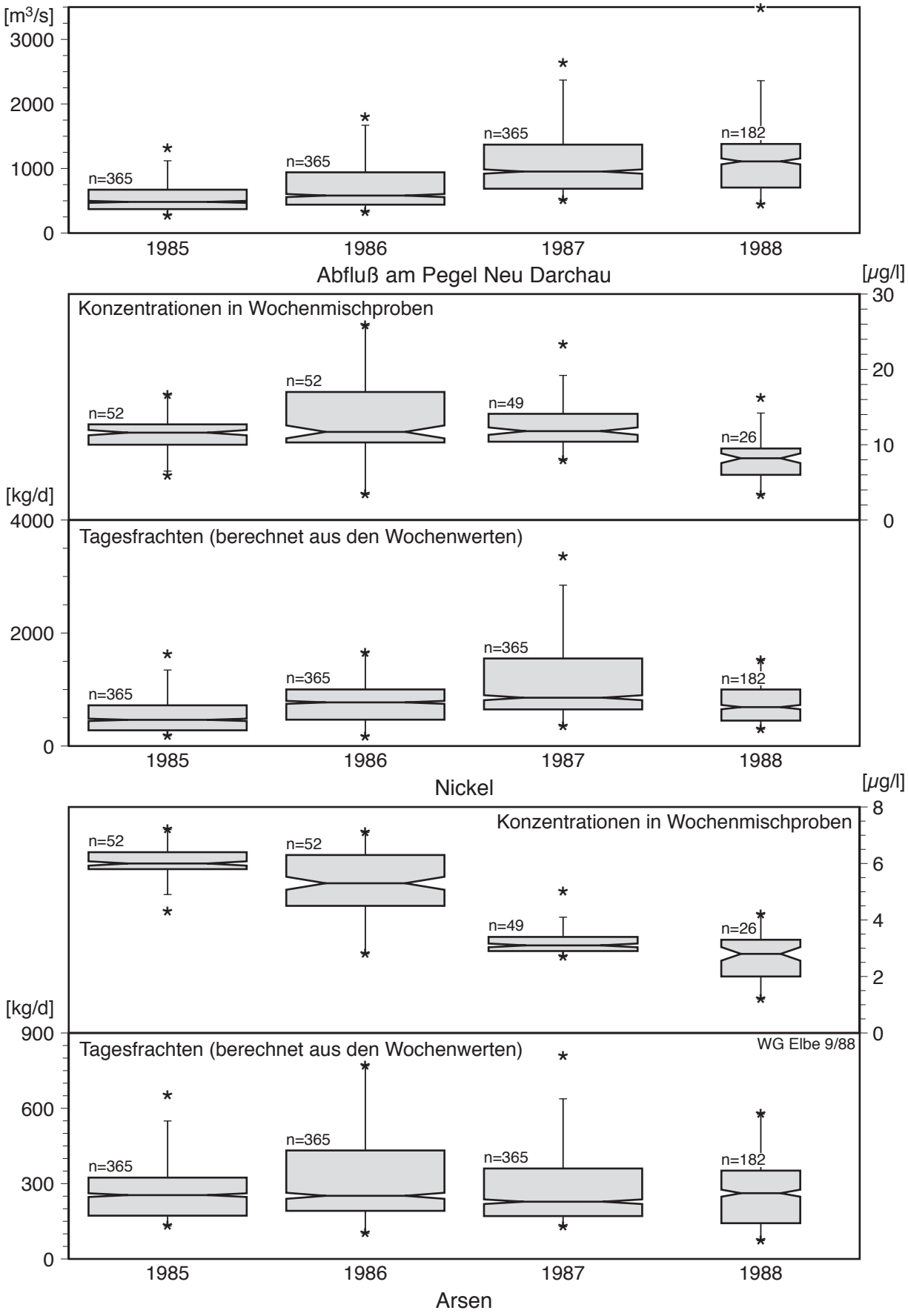


Abb. 17 Medianwerte und Quartile der Nickel- und Arsen-Gehalte und -Frachten der Elbe an der Meßstation Schnackenburg

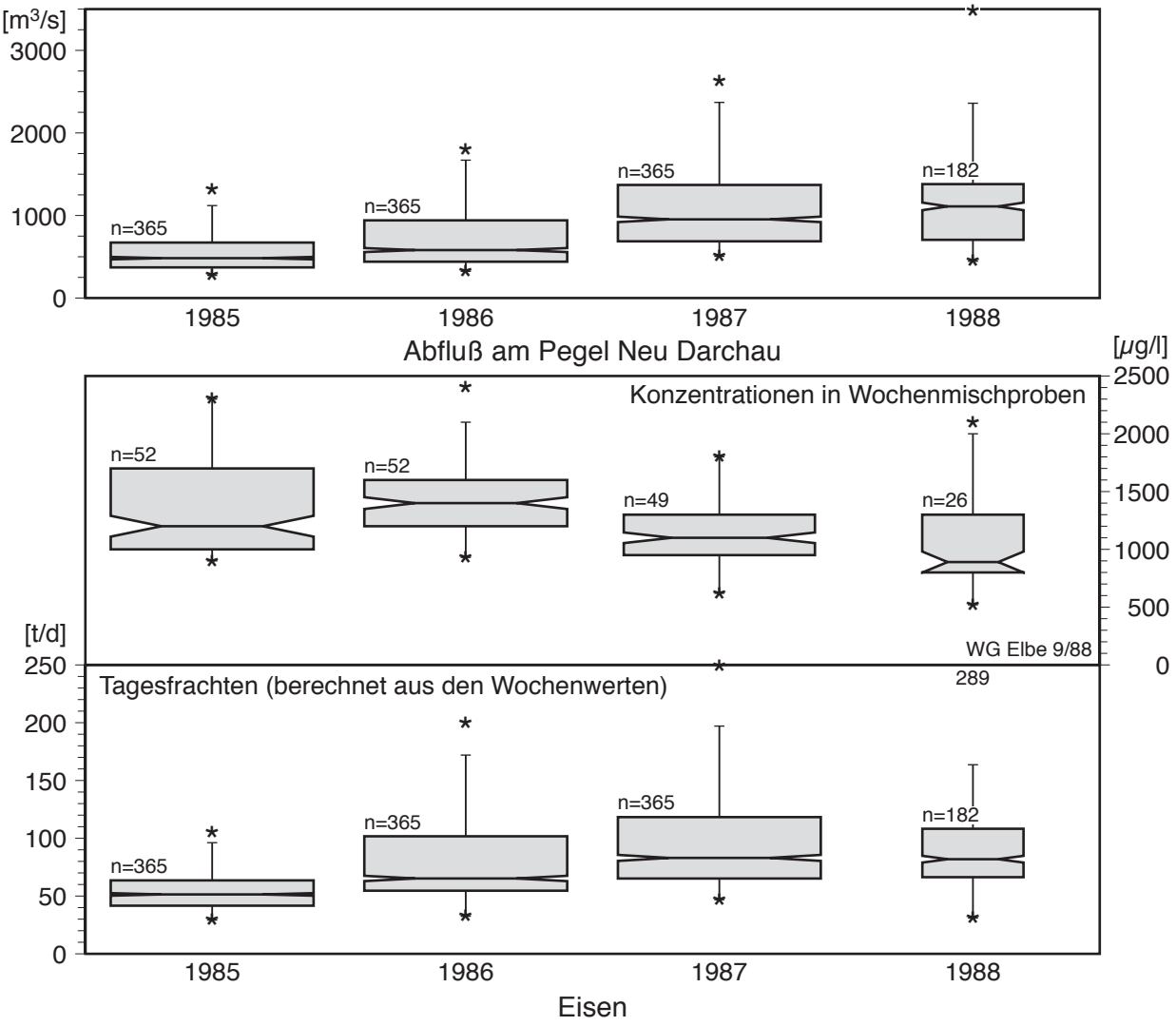


Abb. 18 Medianwerte und Quartile der Eisen-Gehalte und -Frachten der Elbe an der Meßstation Schnackenburg

Für Zink geben die Mediane der Konzentrationen für den Beobachtungszeitraum einen nahezu konstanten Wert von rd. 115 µg/l an (Abb. 15). Für die Zinkfrachten ergibt sich, entsprechend dem Anstieg der Oberwasserabflüsse, eine entsprechende steigende Tendenz (Abb. 10).

Ähnlich ist der Verlauf für die Schwermetalle Kupfer, Chrom und Nickel. Für Kupfer ergaben sich sowohl im Frühjahr 1987 als auch im Frühjahr 1988 extreme Konzentrationsspitzen und damit auch extreme Tagesfrachtwerte (Abb. 11). Für das Metalloid Arsen hingegen ist über den Beobachtungszeitraum mit zunehmendem Oberwasserabfluß eine Konzentrationsverdünnung (Abnahme der Konzentrationsmedianwerte) bei nahezu konstanter Fracht festzustellen (Abb. 12).

Eisen ist kein toxisches Schwermetall, sondern kommt natürlicherweise bereits in sehr hohen Konzentrationen in der Erdkruste vor, so daß der anthropogene Anteil der Eisenbelastung in der Regel nicht ins Gewicht fällt. Eisen kann deshalb überschläglich als Referenzelement für die Bewertung der Befunde

herangezogen werden. Dabei ist jedoch zu beachten, daß die Schwermetalle in sehr unterschiedlichen Bindungsformen in den Gewässern vorliegen; deshalb ist auch kein „einheitliches" Verhalten in bezug zum Referenzelement Eisen zu erwarten. Die gemessenen Eisenkonzentrationen (Abb. 13) und die ermittelten Medianwerte der Konzentrationen (Abb. 18) zeigen mit zunehmendem Oberwasserabfluß nur eine schwach abnehmende Tendenz. Bei den Eisenfrachten hingegen ergibt sich, in Abhängigkeit des Oberwasserabflusses, für den Beobachtungszeitraum 1985 bis 1988 eine deutliche Zunahme. Diese Eisenbefunde weisen darauf hin, daß im niederschlagsreichen Jahr 1987 und im Frühjahr 1988 deutlich erhöhte Frachten an verwittertem Material als Schwebstoff/Sediment talwärts transportiert wurden.

Grundsätzlich deutet ein Anstieg der Schwermetallfrachten in Perioden mit erhöhten Oberwasserabflüssen darauf hin, daß in dieser Phase ein erhöhter Anteil durch geogene Auswaschungen aus der Landschaft, aber auch diffuse Einträge über Luftverschmutzung, Abschwemmungen und Auswaschungen aus belasteten Böden sowie Ausspülungen aus Stauhaltungen und Buhnenfeldern die Belastung prägen. Konstante Schwermetallfrachten hingegen, die über längere Perioden mit steigendem Oberwasserabfluß keinen bedeutenden Anstieg aufweisen, sind ein Hinweis dafür, daß die Einträge aus konstanten Quellen, also typischerweiser über Direkteinleitungen, erfolgen. Dieses scheint sich für das Schwermetall Quecksilber und das Metalloid Arsen anzudeuten.

In der folgenden Tabelle sind Jahresfrachten der Schwermetalle zusammengestellt. Zusätzlich ist die Größenordnung der natürlichen, also durch Auswaschung aus dem natürlichen Gestein sich ergebenden Schwermetallfracht bei MQo mit angegeben. Ein Vergleich der gemessenen Schwermetall-Jahresfrachten mit der „natürlichen" Jahresfracht zeigt deutlich, daß die Elbe besonders hochgradig mit Quecksilber belastet ist. Auch für die übrigen Schwermetalle, wie Cadmium, Blei, Zink, Chrom, Nickel, Kupfer und Arsen, liegen hohe anthropogene Belastungen (teilweise um den Faktor 5 bis 10 über der natürlichen Belastung) vor. Der Frachtenanstieg für das Referenzelement Eisen verläuft nahezu proportional zum Anstieg des Jahresabflusses. Bei einer Bewertung der jeweiligen Jahresfrachten für die einzelnen Schwermetalle ist zu berücksichtigen, daß diese Ergebnisse zum Teil auch dadurch schwanken, daß zufällig eine Hochwasserwelle zu Beginn eines Jahres, z. B. 1987, abgeflossen ist. Die hohe Variabilität der gemessenen Konzentrationen und der berechneten Schwermetallfrachten verdeutlicht, daß mit wenigen Stichprobenmessungen eine zuverlässige Bilanzierung nicht möglich ist.

Tab. 4 Schwermetall-Jahresfrachten bei Schnackenburg

(t/a)	geogen bei MQo	1985	1986	1987
Quecksilber	<0,5	28	23	26
Cadmium	<0,5	13	13	16
Blei	~ 15	110	120	130
Zink	~100	1 900	2 400	3 900
Kupfer	~ 50	260	380	770
Arsen	~ 10	99	110	100
Chrom	~ 50	150	260	570
Nickel	~ 50	190	270	420
Eisen	~25 000	20 000	30 000	36 000

4.2 Querprofil Schnackenburg

Ergänzend zur Überwachung der Vorbelastung durch die automatische Meßstation Schnackenburg werden bei verschiedenen charakteristischen Abflußsituationen Beprobungen über das gesamte Querprofil durchgeführt.

Die einzelnen Probenentnahmestellen in dem Querprofil (11.08.1987) sind zusammen mit dem Gehalt abfiltrierbarer Stoffe bei sofortiger Filtration sowie bei Filtration nach vorheriger 5minütiger Absetzzeit dargestellt. Die Differenz der Gehalte an abfiltrierbaren Stoffen ergibt sich durch die Sedimentation des Feinsandanteiles. Die gemessenen Schwebstoffgehalte zeigen, daß im Querprofil Schnackenburg aufgrund der intensiven Durchmischung eine verhältnismäßig gleichmäßige Schwebstoffverteilung vorliegt.

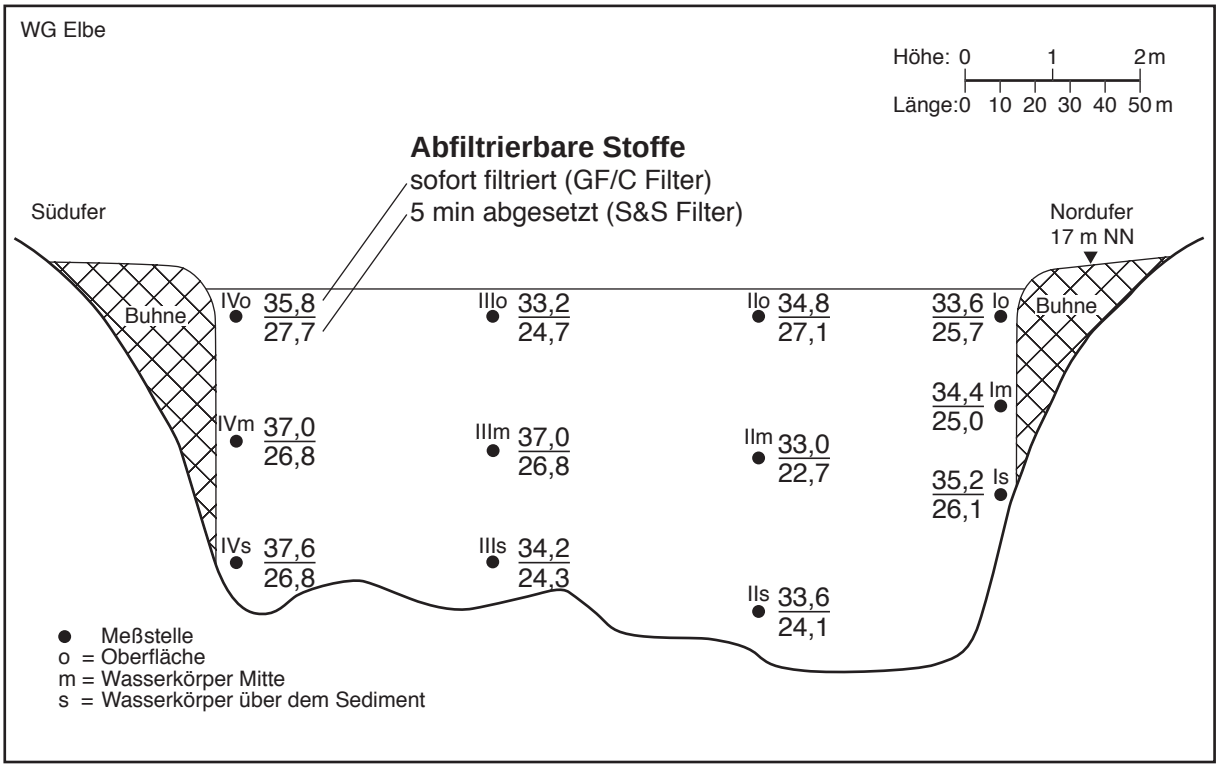


Abb. 19 Querprofilmessung am 11.08.1987 bei Schnackenburg (Strom-km 474,5) (Qo= 742 m^3/s)

In Abb. 20 bis Abb. 22 sind die Ergebnisse einer solchen Querprofiluntersuchung bei mittleren Abflußverhältnissen dargestellt. Die Beprobung erfolgte vom Meßschiff aus im Profil zwischen den Buhnenköpfen. In jeder Meßlotrechten wurde je eine Probe 0,5 m unter der Oberfläche, in mittlerer Wassertiefe und 0,5 m über der Sohle entnommen und einzeln untersucht. Außerdem wurde aus Aliquoten eine Querprofilmischprobe hergestellt und analysiert.

Die Probenentnahme und Probenvorbehandlung (Filtration) wurde nach der in Kapitel 2 beschriebenen Methode durchgeführt. Bei allen 12 Einzelproben aus dem Querprofil erfolgte die Filtration nach einer 5minütigen Absetzzeit, um den chemisch inerten Quarzsand durch Sedimentation von den schwermetall-

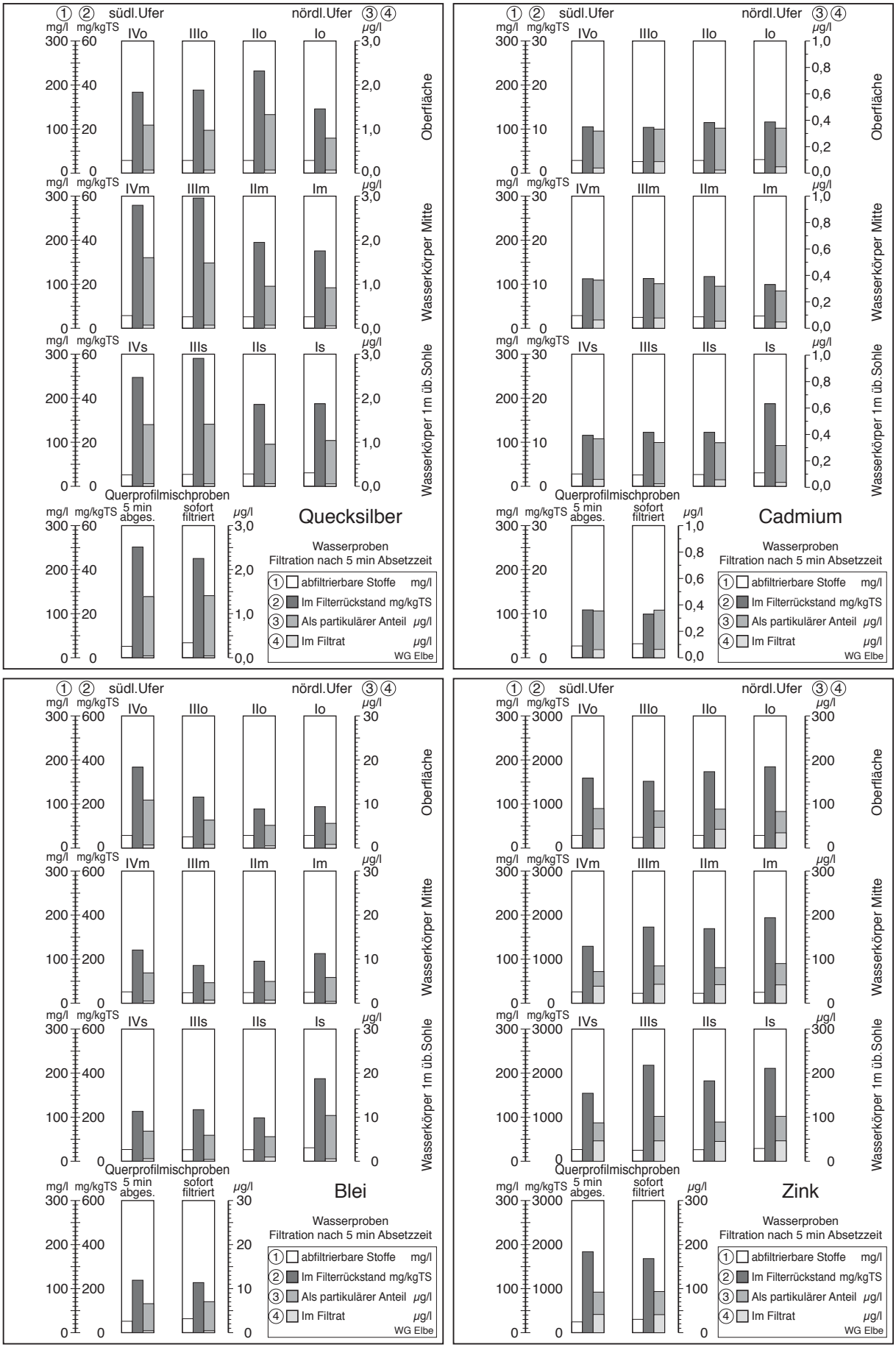


Abb. 20 Querprofilmessung Schnackenburg (Strom-km 474,5) - 11.08.1987 (Qo= 742 m³/s)

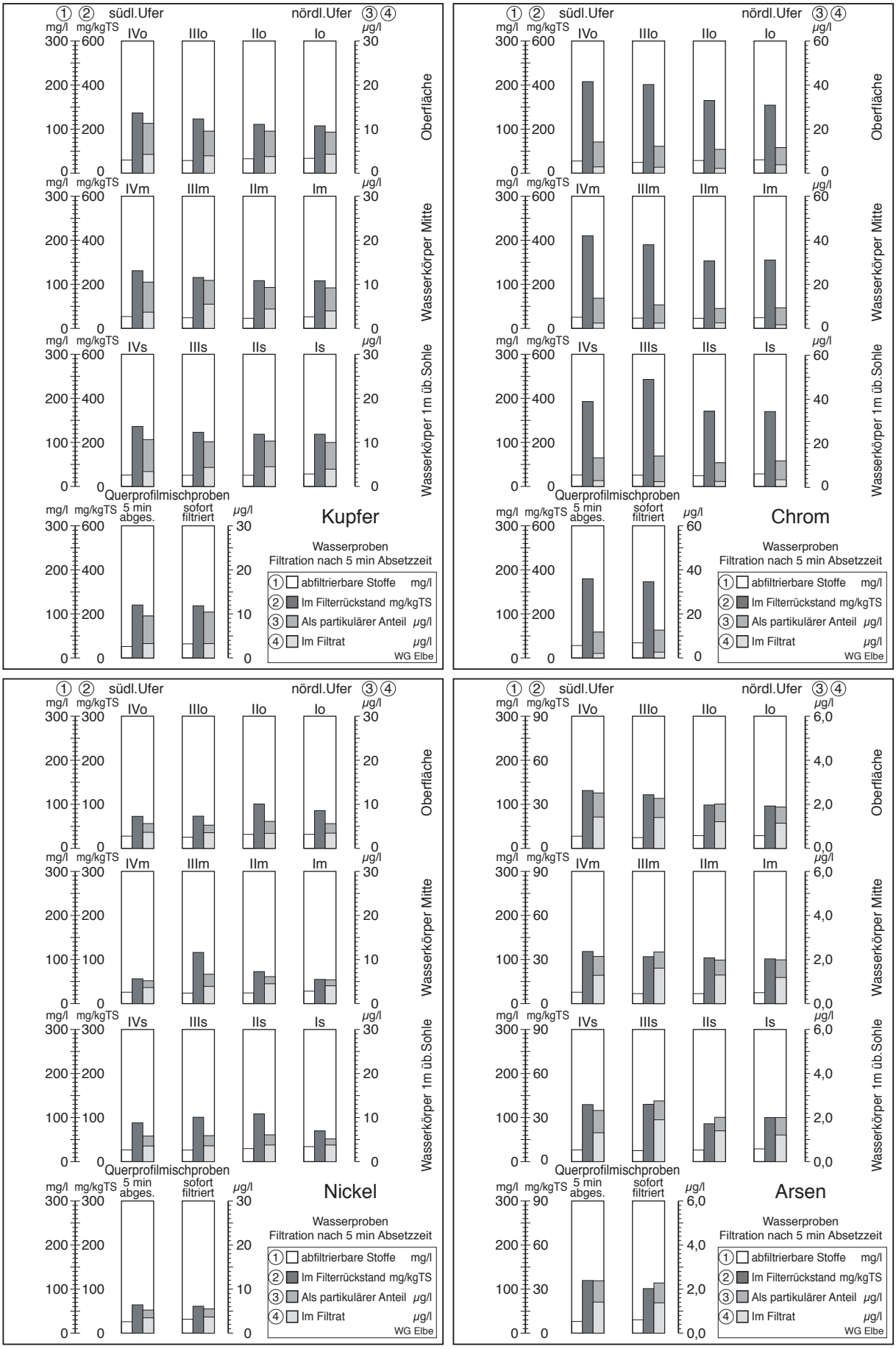


Abb. 21 Querprofilmessung Schnackenburg (Strom-km 474,5) - 11.08.1987 (Qo= 742 m³/s)

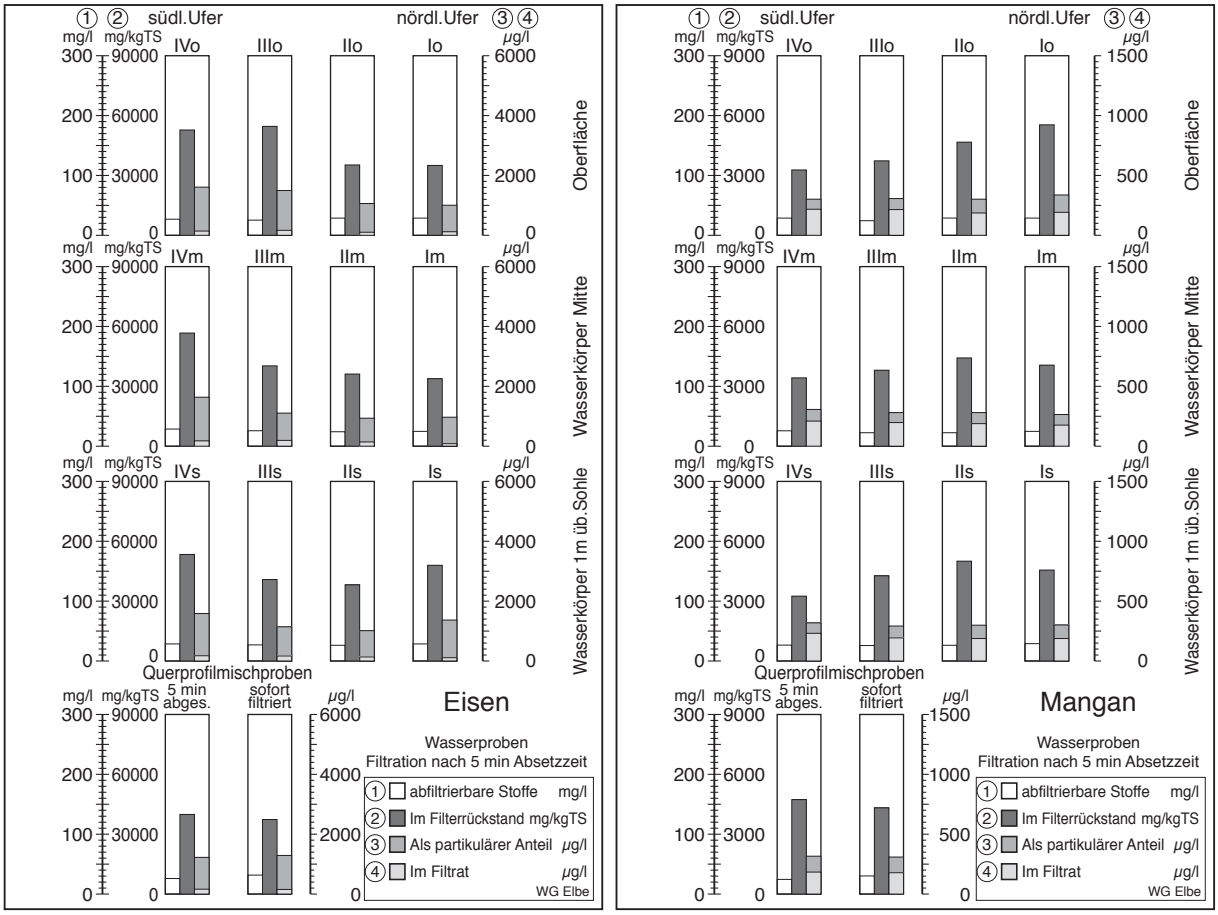


Abb. 22 Querprofilmessung Schnackenburg (Strom-km 474,5) - 11.08.1987 (Qo= 742 m^3/s)

belasteten Schwebstoffen abzutrennen. Bei der Querprofilmischprobe erfolgte einerseits eine Untersuchung nach sofortiger Filtration und parallel dazu eine Untersuchung nach 5minütiger Absetzzeit vor der Filtration.

In den Grafiken ist jeweils der Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen und die spezifische Beladung, d. h. der Schwermetallgehalt des Filterrückstandes, in mg/kg Trockensubstanz (TS) angegeben. Aus dem Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen und der spezifischen Schwermetallbeladung der abfiltrierten Stoffe wurde der an die abfiltrierbaren Stoffe angelagerte Schwermetallanteil (als partikulärer Anteil), bezogen auf 1 Liter Probenwasser, berechnet. Zusammen mit dem im filtrierten Wasser (Filtrat) gemessenen Schwermetallanteil ergibt sich jeweils die Gesamt-Schwermetallkonzentration.

Die an den Einzelproben gemessenen Schwermetallbeladungen der Schwebstoffe zeigen für die Schwermetalle Cadmium, Blei, Kupfer und das Metalloid Arsen eine recht gleichmäßige Verteilung. Für Quecksilber, Zink, Chrom, Eisen und Mangan hingegen ergeben sich Unterschiede in der Schwermetallbeladung der Schwebstoffe. Das Verteilungsmuster innerhalb des Querprofils ist bei den einzelnen Schwermetallen zum Teil recht unterschiedlich ausgeprägt. Die Ursache liegt darin, daß die verschiedenen Schwermetalle in unterschiedlichen Bindungsformen und deshalb an unterschiedlichen Fraktionen des Schwebstoffes gebunden vorliegen. Eine für alle untersuchten Schwermetalle gleichförmige Verteilung der Schwermetallbeladung der Schwebstoffe wäre nur zu erwarten, wenn auch die Schwebstoffe innerhalb des Querprofils von ihren Bindungseigenschaften her gleichförmig wären. Eine homogene Verteilung des Schwebst-

offgehaltes im Querprofil bedeutet jedoch noch nicht, daß auch die Schwebstoffzusammensetzung (z. B. organischer Anteil, Anteil von Karbonaten, Hydroxiden usw.) der einzelnen Teilproben für das gesamte Querprofil gleichförmig ist.

Die Meßwerte für die Querprofilmischproben zeigen jeweils für den nach 5minütiger Absetzzeit abfiltrierten Schwebstoff eine leicht erhöhte spezifische Beladung im Vergleich zu dem durch sofortige Filtration abgetrennten Schwebstoff. Bei der sofortigen Filtration findet durch den mitabfiltrierten Feinsandanteil eine leichte „Verdünnung" statt.

Die Schwermetall-Gesamtgehalte des Elbwassers zeigen für Cadmium, Blei, Zink, Kupfer, Nickel, Arsen und Mangan eine verhältnismäßig gleichförmige Verteilung innerhalb des Querprofiles auf. Eine ideal gleichförmige Verteilung innerhalb des Querprofiles ist in natürlichen Gewässern ohnehin nicht zu erwarten. Die Ungleichförmigkeit der Verteilung innerhalb des Querprofiles ist für Quecksilber und Eisen erkennbar, aber nicht so ausgeprägt wie bei der spezifischen Schwermetallbeladung der Schwebstoffe. Ein Vergleich der Werte der Querprofilmischproben zeigt für die einzelnen Schwermetalle eine sehr gute Übereinstimmung. Diese Ergebnisse bestätigen, daß durch die 5minütige Absetzzeit überwiegend nur „unbelasteter, chemisch inerter Quarzsand" abgeschieden wird.

Die dargestellten Befunde zeigen ferner, daß Quecksilber, Blei und Eisen in erster Linie in einer schwebstoffgebundenen Form vorliegen, während bei den Schwermetallen Zink, Kupfer, Nickel und Arsen ein bedeutender Teil in „gelöster Form" (d. h. im filtrierten Wasser) vorliegt.

4.3 Querprofile Tideelbe (Nienstedten, Twielenfleth, Grauerort und Glückstadt)

Ergänzend zu den bereits seit mehreren Jahren regelmäßig durchgeführten Längsprofilbeprobungen in der Tideelbe (siehe Kapitel 4.5) wurden im November 1987 bei etwa mittleren Abflußverhältnissen Querprofiluntersuchungen durchgeführt. Bezogen auf den Tideverlauf erfolgte die Probenentnahme - wie auch bei den Längsprofilbeprobungen - in der Phase des voll entwickelten Ebbestromes, weil in dieser Phase die maximale Strömungsturbulenz wirksam ist und zu einer intensiven Vertikalvermischung führt. Demgegenüber tritt in Phasen mit Strömungsgeschwindigkeiten, und insbesondere in der Phase der Strömungskenterung, durch die unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten der Schwebstoffe eine „Entmischung" der Schwebstoffe und eine stark inhomogene Vertikalverteilung der Schwebstoffe auf.

Die Probenentnahmetechnik und die Untersuchungsmethoden sind in Kapitel 2 im einzelnen beschrieben. Die oberflächennahen Proben wurden jeweils 1 m unter der Wasseroberfläche entnommen. Die Probenentnahme im Bereich der Sohle erfolgte jeweils 1 m über Grund; als Zwischenstufe wurde jeweils eine Probenentnahme in der jeweiligen mittleren Wassertiefe durchgeführt. Aus den 11 Einzelproben eines jeden Querprofils wurde jeweils aus Aliquoten eine Querprofilmischprobe hergestellt, die sofort bzw. nach 5minütiger Absetzzeit filtriert und untersucht wurde. Bei den Einzelproben erfolgte die Filtration jeweils nach 5minütiger Absetzzeit.

Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 23 bis 32 dargestellt. Für das Querprofil Nienstedten (unterhalb des Hamburger Hafens) ergab sich eine ausgesprochen homogene Schwebstoffverteilung mit einem niedrigen Gehalt an

abfiltrierbaren Stoffen in der Größenordnung von 10 bis 14 mg/l TS. Weiter stromab im Querprofil Twielenfleth ergaben die Messungen bei vergleichbaren hydrologischen Bedingungen bereits deutlich höhere Gehalte an abfiltrierbaren Stoffen und insbesondere deutliche Unterschiede innerhalb des Querprofils, wobei die höchsten Werte in den Proben aus Sohlnähe festgestellt wurden. Auch für das Querprofil Grauerort ergab sich eine inhomogene Schwebstoffverteilung mit den höchsten Werten in Sohlnähe und den niedrigsten Werten in den oberflächennahen Proben. Am ausgeprägtesten waren die Unterschiede im Querprofil Glückstadt. Hier lagen die Gehalte an abfiltrierbaren Stoffen im oberflächennahen Bereich in der Größenordnung von 50 bis 60 mg/l TS und in Sohlnähe bei 430 bis 440 mg/l TS. Das Querprofil Glückstadt lag bei diesen etwa mittleren Oberwasserabflüssen während der Probenentnahme (Phase des voll entwickelten Ebbstroms) zwar oberhalb der Zone mit ansteigenden Salzgehalten (Brackwasserzone), aber bereits im oberen Teil der typischen Haupttrübungszone.

Die Untersuchungsbefunde für den Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen zeigen also, daß selbst bei einer Beprobung in der Phase der maximalen Strömungsturbulenz eine homogene Durchmischung, insbesondere in den Querprofilen Grauerort und Glückstadt, nicht vorliegt. Ein Vergleich der sofort filtrierten mit den nach 5minütiger Absetzzeit filtrierten Querprofilmischproben hat deutliche Unterschiede im Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen bei den Querprofilen Twielenfleth, Grauerort und Glückstadt ergeben. Dieser Befund weist darauf hin, daß aufgrund der intensiven Gezeitenströmung ein erheblicher Feinsandanteil mit aufgewirbelt wird und bei der sofortigen Filtration miterfaßt wird. Dieser sehr inhomogen über das Querprofil verteilte Feinsandanteil (in Sohlnähe können extreme Werte bis zu 1000 mg/l auftreten) würde bei der Untersuchung des Gesamt-Schwebstoffes eine erhebliche Variabilität der Ergebnisse bewirken. Für die Beurteilung der Belastung eines Gewässers ist die Schadstoffbelastung des „bindungsfähigen" Schwebstoffes maßgebend. Aus diesem Grunde ist es zweckmäßig, den Feinsandanteil (z. B. durch Sedimentation) vor der Analyse der Schwebstoffe abzutrennen.

4.3.1 Quecksilberbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers

Wie die Untersuchungsergebnisse belegen, ist die Quecksilberbelastung der Schwebstoffe in allen 4 untersuchten Querprofilen in der Tideelbe nahezu homogen verteilt. Die höchsten Quecksilbergehalte im Elbschwebstoff wurden im Querprofil Nienstedten gemessen. In den stromab gelegenen Querprofilen lagen die spezifischen Beladungen der Schwebstoffe mit Quecksilber deutlich niedriger. Diese Abnahme der Quecksilberbelastung in den Schwebstoffen ist dadurch zu erklären, daß in dem Untersuchungszeitraum nach einer anhaltenden Phase mit mittleren Oberwasserabflüssen sich ein Großteil der sedimentationsfähigen, von oberstrom zugeführten Schwebstoffe im Hamburger Hafen absetzt und nur die Feinststoffe mit einer sehr hohen spezifischen Quecksilberbelastung aus dem oberen Einzugsgebiet durch das System Hamburger Hafen hindurchtransportiert werden. Aus diesem Grunde sind auch im Querprofil Nienstedten die außergewöhnlich niedrigen Schwebstoffgehalte aufgetreten.

In den unterhalb gelegenen Querprofilen Twielenfleth, Grauerort und Glückstadt tritt eine „Verdünnung der spezifischen Beladung" durch eingemischte, aus dem Unterelberaum stammende Elbschwebstoffe (Einträge aus den Elbnebenflüssen, biogen gebildete Schwebstoffe usw.) ein. Ein Vergleich der Querprofilmischproben zeigt jeweils eine höhere Quecksilberbelastung des Schwebstoffes an den Proben mit 5minütiger Absetzzeit vor der Filtration, weil bei diesen Proben der Feinsandanteil abgeschieden ist.

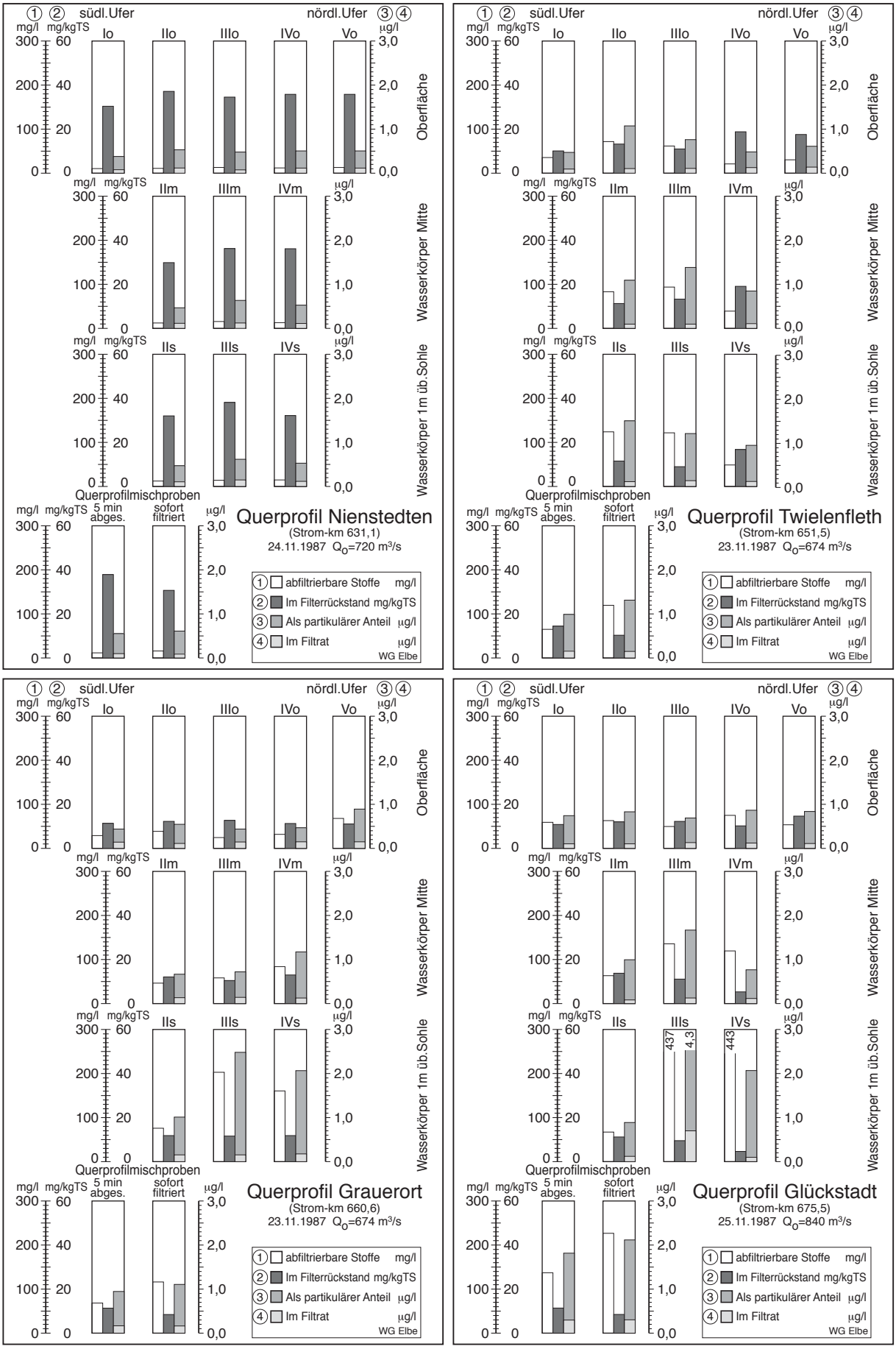


Abb. 23 Querprofilmessungen in der Elbe - **Quecksilber** im Wasser und Schwebstoff
(Filtration nach 5 min Absetzzeit)

Die im filtrierten Wasser (Filtrat) gemessenen Quecksilbergehalte haben überwiegend eine konstante Größenordnung von rd. 0,06 bis 0,1 µg/l.

Der partikuläre Anteil des Quecksilbergehaltes des Elbwassers wies nur im Querprofil Nienstedten aufgrund der dort sehr homogenen Schwebstoffverteilung und spezifischen Beladung eine nahezu konstante Größenordnung auf. Ausgeprägte Unterschiede ergaben sich insbesondere in den Querprofilen Grauerort und Glückstadt. Hier wurden in Sohlnähe aufgrund der deutlich erhöhten Schwebstoffgehalte sehr viel höhere Quecksilbergehalte als partikulärer Anteil gemessen. So ergab sich im Querprofil Glückstadt für die Strommitte in Sohlnähe mit 4,3 µg/l ein nahezu 6mal so hoher Quecksilbergehalt im Vergleich zur oberflächennahen Probe trotz vergleichbarer Größenordnung der spezifischen Beladung. Dieser Befund verdeutlicht, daß eine getrennte Bestimmung des gelösten und partikulären Anteils erforderlich ist, um überhaupt die Untersuchungsbefunde zuverlässig bewerten zu können.

Für die Querprofilmischproben „sofort filtrierte Wasserproben" wurde gegenüber den Proben mit 5minütiger Absetzzeit in der Tendenz ein leicht erhöhter Konzentrationswert festgestellt. Der Unterschied liegt jedoch nur bei etwa 10 %. Diese systematische Abweichung deutet jedoch darauf hin, daß, zusammen mit der Sedimentation des Feinsandanteiles, auch in geringem Maße schwermetallhaltiges Material (z. B. an Coatings gebundene Schwermetalle) mit absedimentiert sind.

Die Quecksilbergehalte der Schwebstoffe im Querprofil Nienstedten mit Werten von 30 bis 38 mg/kg TS zeigen eine außerordentlich hochgradige Quecksilberbelastung an. Die natürlichen Quecksilberkonzentrationen der Schwebstoffe würden nur rd. von 0,3 bis 0,5 mg/kg TS betragen. Auch in den unterhalb gelegenen Querprofilen zeigen die Schwebstoffe mit Quecksilberkonzentrationen in der Größenordnung von rd. 10 mg/kg TS bereits eine mehr als 20fache Erhöhung über die natürliche Grundbelastung an.

4.3.2 Cadmiumbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers

Für die Cadmiumbelastung zeigt sich insgesamt ein ähnliches Verteilungsmuster wie für die Quecksilberbelastung. Auch beim Cadmium wurden die höchsten spezifischen Beladungen der Schwebstoffe im Querprofil Nienstedten festgestellt. Die Abnahme der Cadmiumbelastung der Schwebstoffe in den Querprofilen stromab ist wiederum auf die Verdünnung mit geringer belasteten Schwebstoffen aus der Unterelbe zurückzuführen. Auch für Cadmium zeigt die Gesamtkonzentration (partikulärer Anteil und Gehalt im Filtrat) innerhalb der Querprofile eine Verteilungsstruktur in Analogie zur Verteilung der abfiltrierbaren Stoffe. Die Cadmiumbeladung der Schwebstoffe im Querprofil Nienstedten mit 18 bis 20 mg/kg TS ist Ausdruck einer extrem hohen Cadmiumbelastung. Die natürliche Cadmiumkonzentration der Elbschwebstoffe würde demgegenüber nur 0,2 bis 0,5 mg/kg TS betragen.

Ein Vergleich mit dieser natürlichen Belastung zeigt, daß auch die Schwebstoffe in der Unterelbe bei Twielenfleth, Grauerort und Glückstadt mit Werten zwischen 2,5 bis 5 mg/kg TS eine deutliche anthropogene Belastung aufzeigen.

4.3.3 Bleibelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers

Mit Ausnahme der Einzelprobe IIo des Querprofils Nienstedten und der Einzelprobe IVo des Querprofils Twielenfleth zeigen die Ergebnisse auch für Blei eine recht homogene Verteilung der Belastung der Schwebstoffe. Eine abschlie-

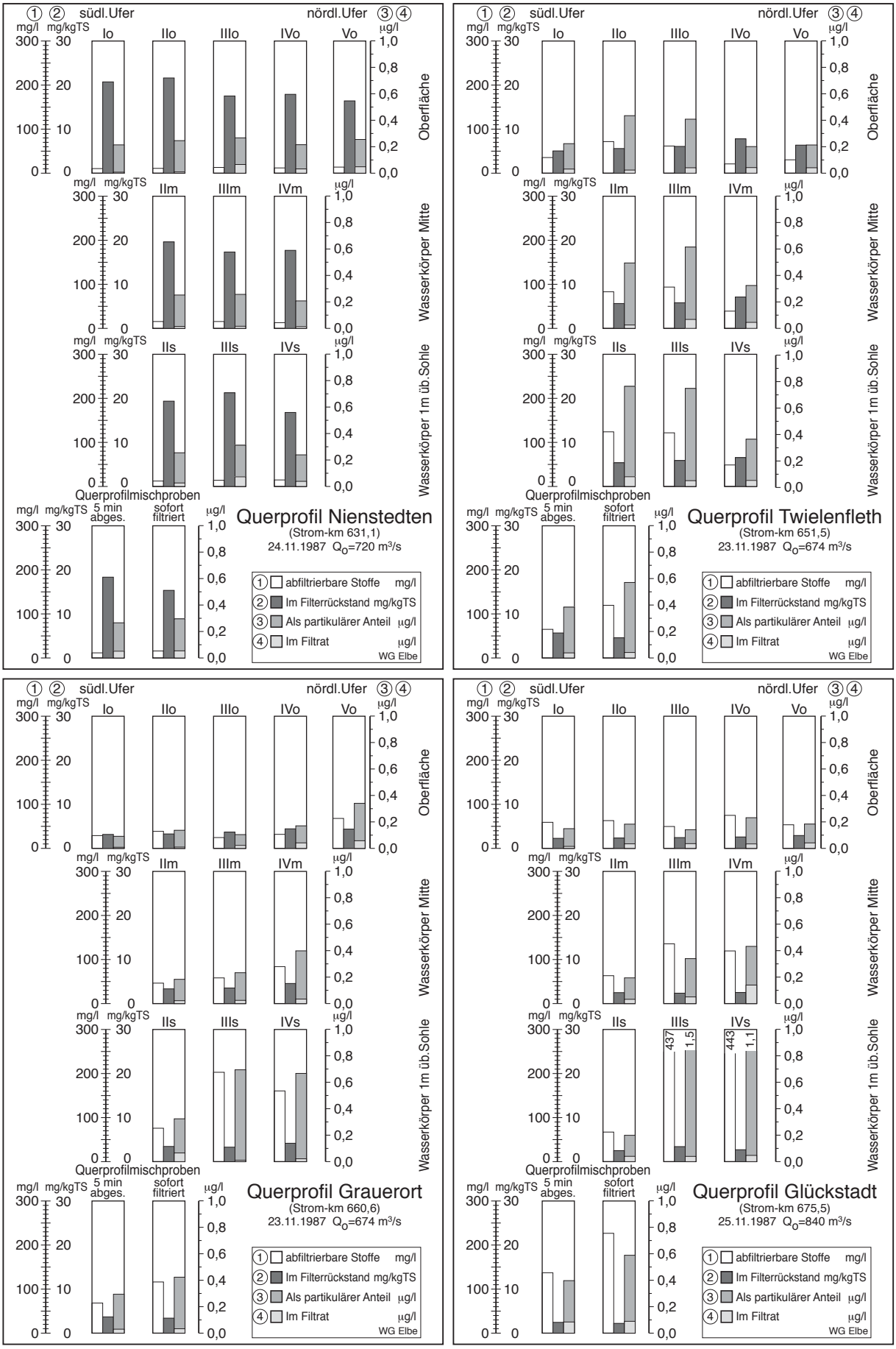


Abb. 24 Querprofilmessungen in der Elbe - **Cadmium** im Wasser und Schwebstoff
(Filtration nach 5 min Absetzzeit)

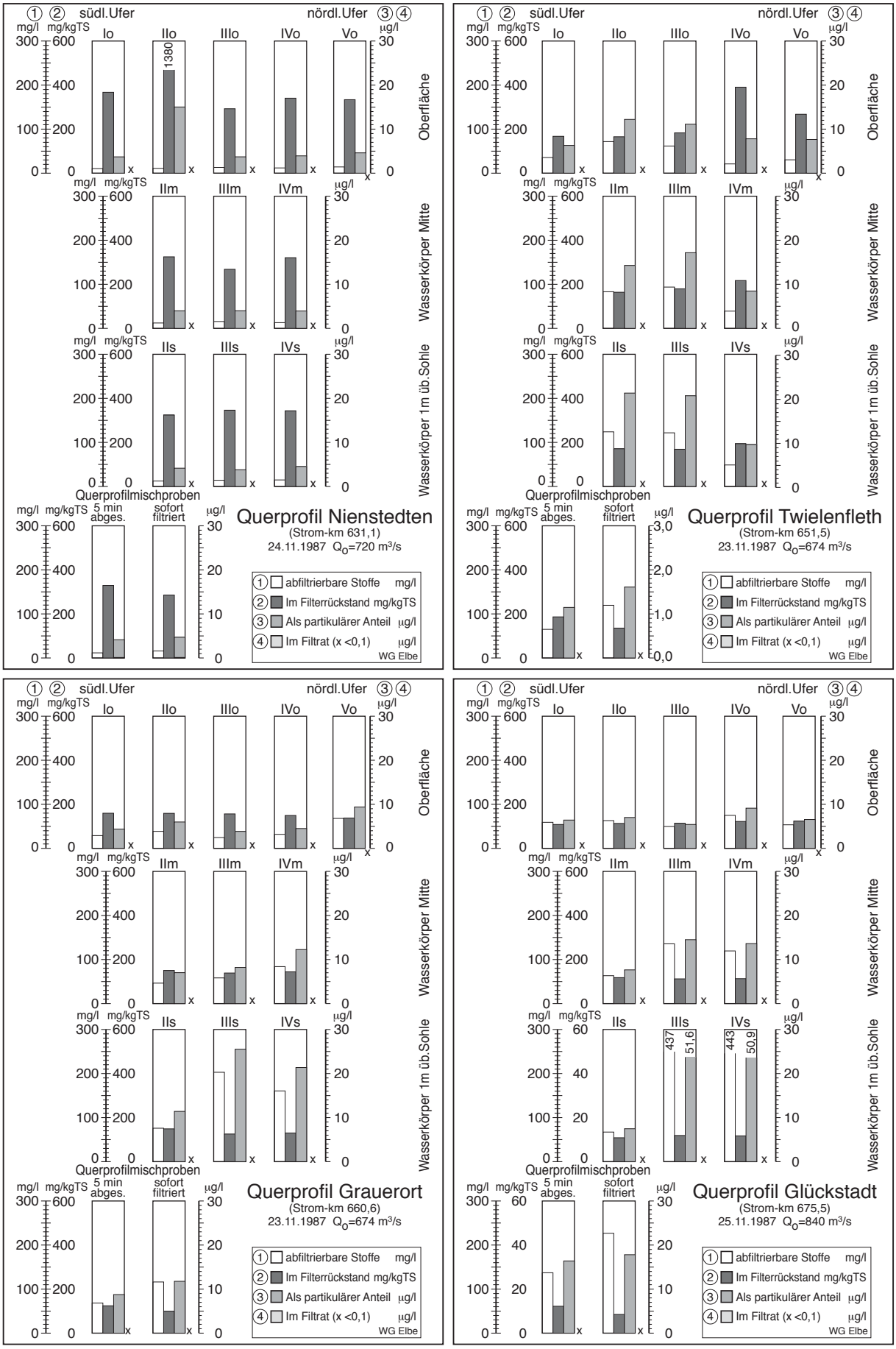


Abb. 25 Querprofilmessungen in der Elbe - **Blei** im Wasser und Schwebstoff
(Filtration nach 5 min Absetzzeit)

ßende Begründung für die beiden herausfallenden Ergebnisse kann nicht gegeben werden. Bleiverbindungen finden eine weitverbreitete Anwendung und sind häufig z. B. auch in Schiffsfarben enthalten (Bleimennige), so daß eine denkbare Ursache für die erhöhten Befunde darin liegen kann, daß bei diesen Proben, zusammen mit dem Schwebstoff, Spuren von abgeplatzten Schiffsfarben miterfaßt wurden. Die geringeren Bleikonzentrationen im Schwebstoff in den stromab gelegenen Querprofilen Twielenfleth, und insbesondere Grauerort und Glückstadt, sind wiederum auf die Verdünnung mit geringer belasteten Schwebstoffen aus dem Unterelbegebiet zurückzuführen.

Die natürliche Grundbelastung der Elbschwebstoffe mit Blei würde in der Größenordnung von rd. 25 mg/kg TS liegen. Demgebenüber sind die hohen Bleikonzentrationen mit 350 bis 400 mg/kg TS im Querprofil Nienstedten Ausdruck einer sehr hohen Belastung. Auch in den unterhalb gelegenen Querprofilen liegen die Bleikonzentrationen der Schwebstoffe mit Werten zwischen 130 bis 180 mg/kg TS um das 6- bis 7fache über dem natürlichen Belastungsniveau.

Für die Wasserproben (Gesamtgehalte) ergaben sich wiederum in den Querprofilen erhebliche Konzentrationsunterschiede, die in erster Linie auf einen unterschiedlichen Gehalt an schwermetallbelasteten Schwebstoffen zurückzuführen sind.

4.3.4 Zinkbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers

Auch für Zink zeigen die Ergebnisse für die einzelnen untersuchten Querprofile eine recht homogene Verteilung der spezifischen Beladung der Schwebstoffe. Nur im Querprofil Nienstedten ist wiederum in der Probe IIo ein deutlich erhöhter Gehalt gemessen worden. Da auch für die Schwermetalle Blei, Kupfer und Chrom in dieser Probe ein deutlich erhöhter Gehalt festgestellt wurde, ist davon auszugehen, daß mit dem Schwebstoff zufällig eine Kontamination, z. B. durch abgeplatzte Farbpartikel von Schiffen, miterfaßt wurde. Die geringere Schwebstoffbeladung mit Zink in den unterhalb gelegenen Querprofilen Twielenfleth, Grauerort und Glückstadt ist, wie bereits vorstehend erläutert, auf die Verdünnung von eingemischten, geringer belasteten Schwebstoffen aus dem Unterelberaum zurückzuführen.

Die Querprofilmischproben zeigen wiederum für die spezifische Beladung der Schwebstoffe geringfügig höhere Werte für die Proben mit 5minütiger Absetzzeit vor der Filtration.

Die natürliche Zink-Konzentration in den Elbschwebstoffen würde in der Größenordnung von rd. 100 mg/kg TS liegen. Die im Querprofil Nienstedten gemessenen Werte von 2.000 bis 2.700 mg/kg TS sind somit Ausdruck einer hohen Zinkbelastung. Auch in den unterhalb gelegenen Profilen - Twielenfleth, Grauerort und Glückstadt - sind die Zinkwerte im Schwebstoff mit 700 bis 1.000 mg/kg TS gegenüber dem natürlichen Konzentrationsniveau deutlich erhöht.

Die Befunde für die Wasserproben (Gesamtkonzentration) zeigen, daß ein erheblicher Anteil von 30 bis 70 µg/l der Zinkverbindungen in gelöster Form vorliegt. Der partikuläre Anteil überwiegt jeweils insbesondere in Proben mit erhöhten Schwebstoffgehalten.

Für die Querprofilmischproben ergeben sich wiederum leicht erhöhte Werte für die Proben nach sofortiger Filtration. Die systematische Differenz deutet darauf hin, daß ein geringer Anteil der Zinkbelastung während der 5minütigen Sedimentation mit abgeschieden wurde.

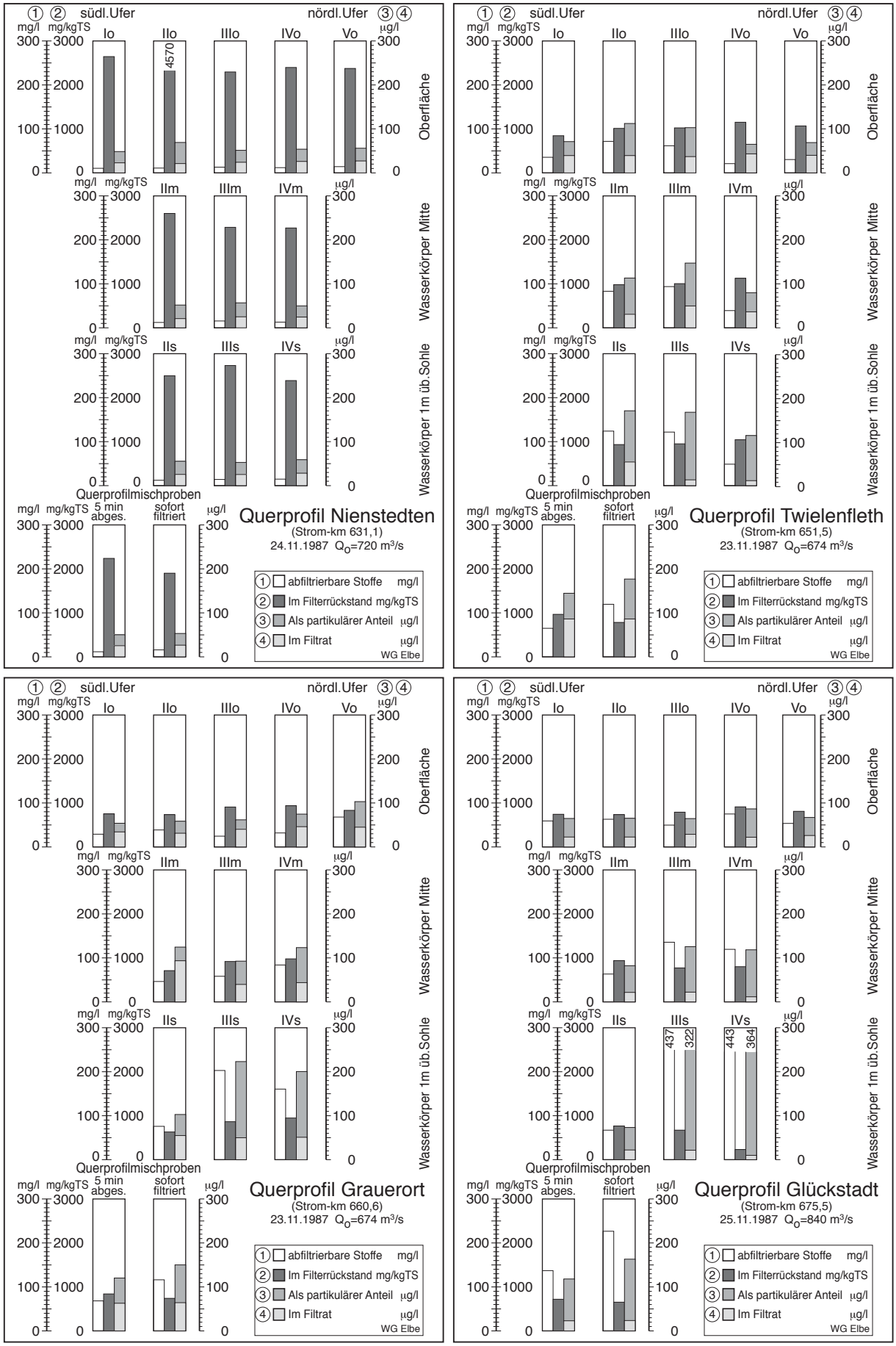


Abb. 26 Querprofilmessungen in der Elbe - **Zink** im Wasser und Schwebstoff
(Filtration nach 5 min Absetzzeit)

4.3.5 Kupferbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers

Beim Querprofil Nienstedten zeigt sich ein erhöhter Kupfergehalt in den Schwebstoffen der ufernahen Oberflächenproben. Da an beiden Ufern Deckwerke aus Kupferschlackensteinen bestehen, kann eine denkbare Ursache darin liegen, daß insbesondere durch die auf die Steinschüttung brandenden Schiffswellen ein Abrieb von den Metallhütten-Schlackensteinen erfolgt und dieser Abrieb in ufernahem Bereich zu leicht erhöhten Kupferkonzentrationen führt. Eine zuverlässige Beurteilung dieses Effektes ist jedoch erst auf der Basis grundlegender weiterer Untersuchungen möglich. Der herausfallende Wert an der Probe IIo im Querprofil Nienstedten ist bereits in Kapitel 4.3.4 erklärt. Die weiteren Befunde zeigen für die Querprofile eine recht homogene Verteilung der Kupferbelastung der Schwebstoffe an.

Auch bei den Querprofil-Mischproben sind nur sehr geringe Unterschiede aufgetreten. Die natürliche Kupferkonzentration der Schwebstoffe würde in der Größenordnung von 20 mg/kg TS liegen. Werte von 300 bis 500 mg/kg TS, wie sie im Querprofil Nienstedten gemessen wurden, sind somit Ausdruck einer starken anthropogenen Belastung. Auch in den Querprofilen Twielenfleth, Grauerort und Glückstadt sind die Kupfergehalte der Elbschwebstoffe mit Werten von 80 bis 130 mg/kg TS deutlich über das natürliche Belastungsniveau erhöht.

An den filtrierten Proben wurden Kupferkonzentrationen in der Größenordnung von rd. 50 µg/l als „gelöster" Anteil bestimmt. Die Kupfergesamtgehalte des Elbwassers zeigen, in Abhängigkeit des miterfaßten Schwebstoffanteiles, eine große Schwankungsweite von 10 bis über 300 µg/l.

4.3.6 Chrombelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers

Die Chromgehalte der untersuchten Schwebstoffe ergaben für alle 4 Querprofile eine recht homogene Verteilung. Lediglich für die Probe IIo des Querprofils Nienstedten wurde ein stark erhöhter Wert festgestellt (vermutliche Ursache: mit dem Schwebstoff wurden abgesplitterte Farbreste, z. B. von Schiffsfarben, erfaßt).

Die natürliche Grundbelastung der Elbschwebstoffe mit Chrom würde in der Größenordnung von 80 mg/kg TS liegen. Die Werte von 400 bis 600 mg/kg TS, wie sie im Querprofil Nienstedten gemessen wurden, sind somit Ausdruck einer sehr ausgeprägten Chrombelastung. Auch die Werte der Querprofile Twielenfleth, Grauerort und Glückstadt zeigen im Vergleich zur natürlichen Grundbelastung erhöhte Werte an. Ein Vergleich der Querprofilmischproben ergibt eine gute Übereinstimmung in der spezifischen Beladung der Schwebstoffe. (Die Werte der 5minütigen Absetzprobe liegen im Vergleich zur sofort filtrierten Probe nur geringfügig höher).

Die Gesamtkonzentrationen des Elbwassers mit Chrom weisen aufgrund der unterschiedlichen Schwebstoffgehalte, insbesondere in den Querprofilen Grauerort und Glückstadt, eine erhebliche Schwankungsweite innerhab des Querprofils auf. Chrom ist nur zu einem geringen Anteil (in der Größenordnung von 1,5 bis 3 µg/l) in „gelöster" Form (bestimmt im Filtrat) vorhanden. Der überwiegende Anteil des Chroms liegt in schwebstoffgebundener Form vor.

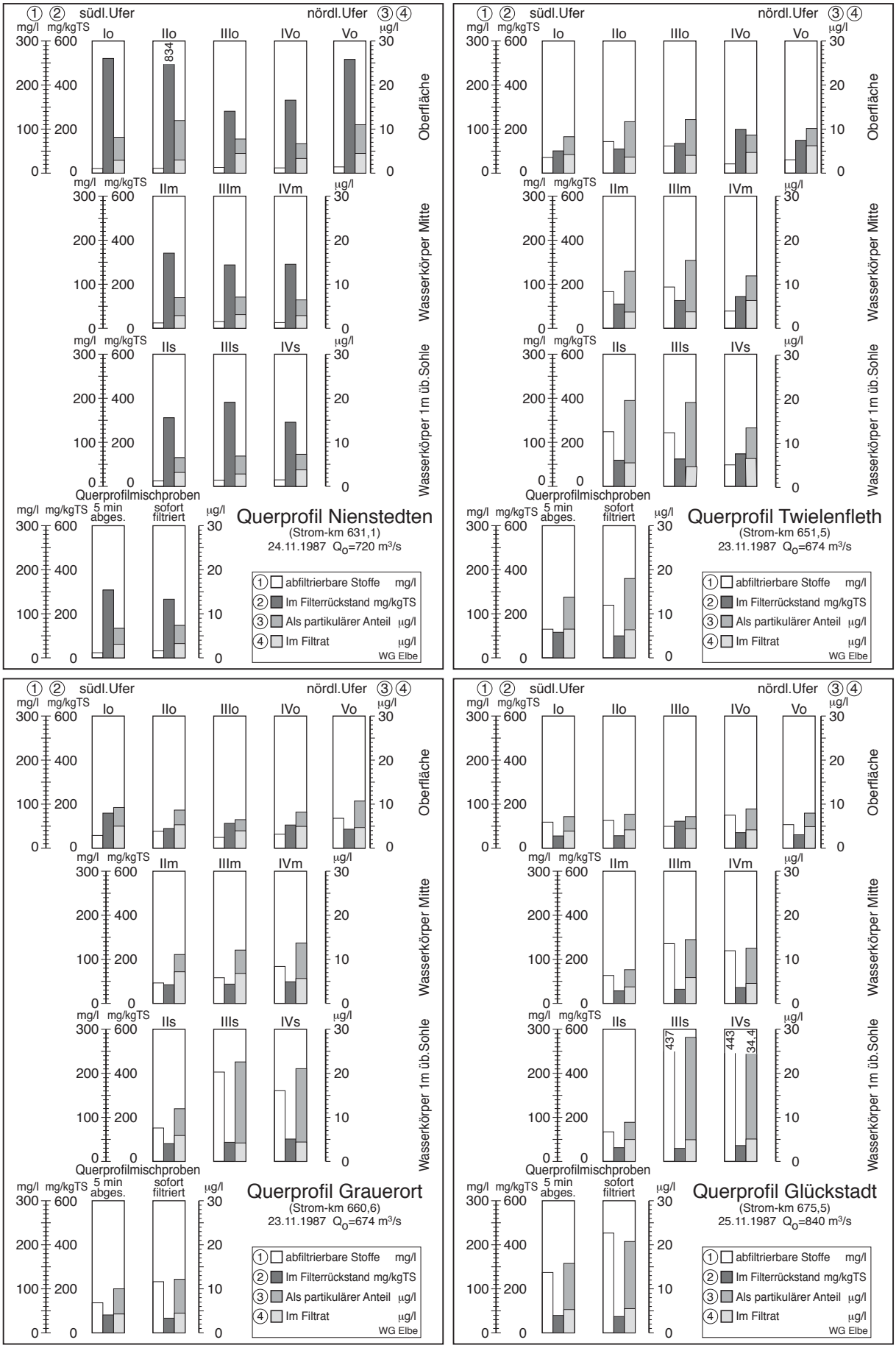


Abb. 27 Querprofilmessungen in der Elbe - **Kupfer** im Wasser und Schwebstoff
(Filtration nach 5 min Absetzzeit)

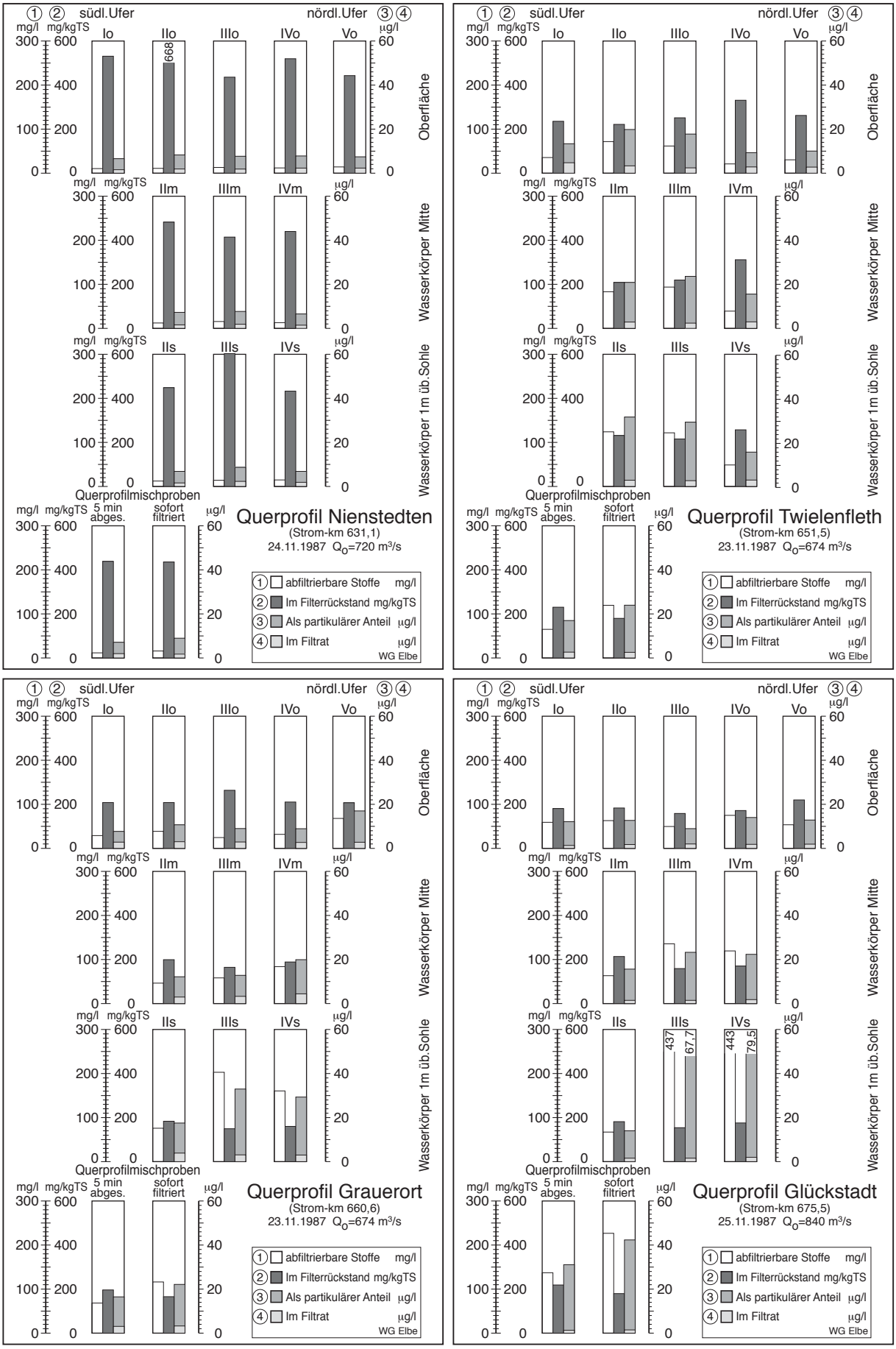


Abb. 28 Querprofilmessungen in der Elbe - **Chrom** im Wasser und Schwebstoff
(Filtration nach 5 min Absetzzeit)

4.3.7 Nickelbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers

Für Nickel haben sich bei der Untersuchung der Schwebstoffe im Querprofil Nienstedten erhebliche Belastungsunterschiede ergeben. Demgegenüber wurde in den übrigen Querprofilen Twielenfleth, Grauerort und Glückstadt eine nahezu homogene Verteilung der Nickelbelastung der Schwebstoffe festgestellt. Dieser für das Querprofil Nienstedten aus dem Rahmen fallende Befund ist nicht eindeutig zu erklären. Ein Blick auf die Verteilung der Schwermetalle Chrom und Kupfer zeigt zwar andeutungsweise eine gewisse Ähnlichkeit mit den Nickelbefunden; die Konzentrationsunterschiede sind jedoch bei weitem nicht so ausgeprägt. So wurde auch bei Chrom und Kupfer bei der Probe aus Strommitte in Sohlnähe (IIIs) ein leicht erhöhter Konzentrationswert festgestellt. Die großen Belastungsunterschiede sind jedoch, insbesondere im Vergleich zu den übrigen Querprofilen, nicht zu erklären.

Bei den Querprofilmischproben haben sich jeweils gute Übereinstimmungen für die spezifische Beladung der Schwebstoffe mit Nickel ergeben. Die natürliche Grundbelastung der Elbschwebstoffe mit Nickel würde in der Größenordnung von 40 mg/kg TS liegen. Die höchsten Nickelkonzentrationen in Schwebstoffen im Querprofil Nienstedten mit 200 mg/kg TS zeigen eine deutliche anthropogene Belastung an. Die Nickelkonzentrationen im Schwebstoff der Querprofile Grauerort und Glückstadt mit Werten in der Größenordnung von 60 mg/kg TS sind gegenüber der natürlichen Grundbelastung nur geringfügig erhöht.

Die Befunde für die Wasserproben zeigen, daß Nickel zum überwiegenden Teil in der gelösten Phase (im filtrierten Wasser bestimmt) vorliegt. Nur in Proben mit erhöhten Schwebstoffgehalten überwiegt der partikuläre Anteil bei der Nickelbelastung.

4.3.8 Arsenbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers

Die Arsenbelastung der Schwebstoffe weist innerhalb der einzelnen Querprofile keine gravierenden Unterschiede auf. Nur in der Probe IIo im Querprofil Nienstedten wurde eine außergewöhnlich erhöhte Konzentration (ebenso für Blei, Kupfer, Chrom und Zink) festgestellt. Die Arsenkonzentrationen der Elbschwebstoffe lagen in den Querprofilen Grauerort und Glückstadt im Vergleich zum Querprofil Nienstedten etwa um den Faktor 3 niedriger. Die natürliche Grundbelastung für das Metalloid Arsen würde in der Größenordnung von rd. 10 mg/kg TS liegen. Werte in der Größenordnung von 60 mg/kg TS, wie sie in dem Querprofil Nienstedten festgestellt wurden, sind somit Ausdruck einer deutlichen anthropogenen Belastung. Auch in den Querprofilen Grauerort und Glückstadt sind die Arsenkonzentrationen des Schwebstoffes noch etwa um den Faktor 2 bis 3 über die natürliche Grundbelastung erhöht.

Arsen liegt zu einem erheblichen Anteil (in Konzentrationen von rd. 1 bis 1,5 µg/l) in gelöster Form vor. Der partikuläre Anteil hängt von dem jeweiligen Schwebstoffgehalt ab. In Proben mit sehr hohen Schwebstoffgehalten im Querprofil Glückstadt wurden Spitzenwerte bis in die Größenordnung von 10 µg/l festgestellt.

Ein Vergleich der Querprofilmischproben zeigt, daß die Arsenbelastung der Schwebstoffe gut übereinstimmt. Die Gesamtgehalte der Wasserproben ergeben jedoch deutlich höhere Werte für die sofort filtrierten Proben. Dieser Befund deutet darauf hin, daß Arsen während der 5minütigen Absetzzeit zum Teil mit abgeschieden wurde.

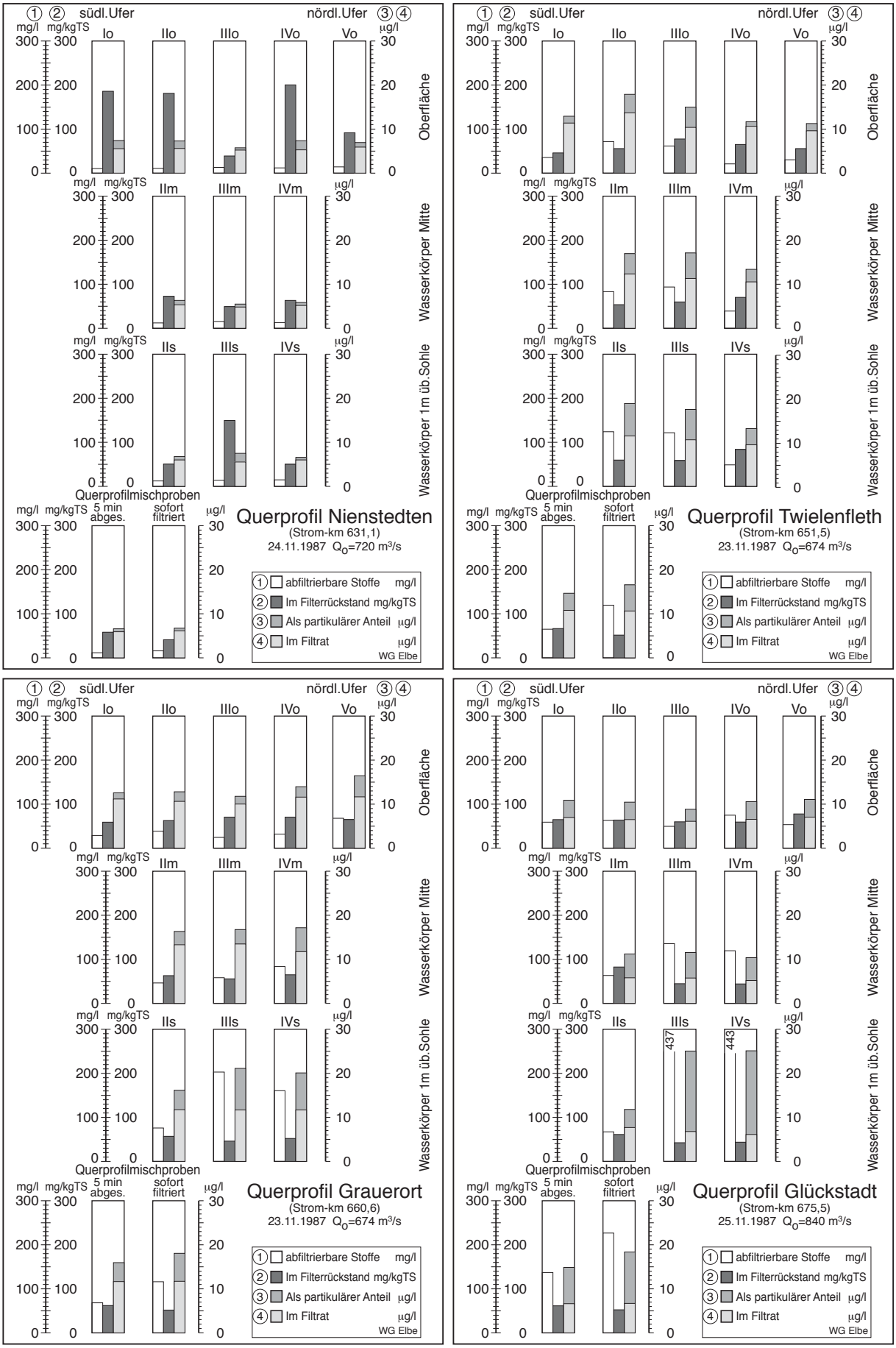


Abb. 29 Querprofilmessungen in der Elbe - **Nickel** im Wasser und Schwebstoff
(Filtration nach 5 min Absetzzeit)

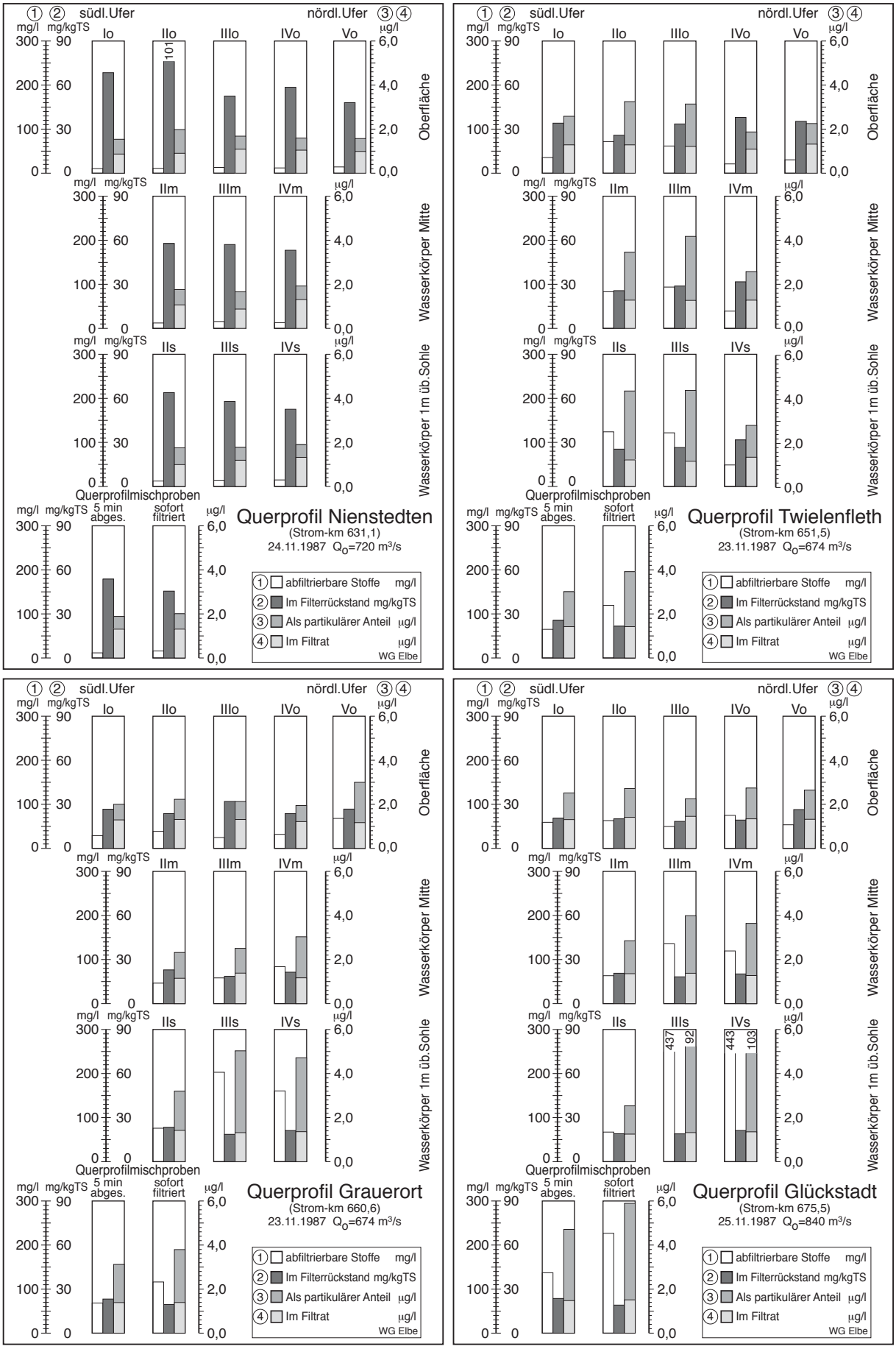


Abb. 30 Querprofilmessungen in der Elbe - **Arsen** im Wasser und Schwebstoff
(Filtration nach 5 min Absetzzeit)

4.3.9 Eisenbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers

Der Eisengehalt der Schwebstoffe wurde mitbestimmt, um Hinweise auf unterschiedliche Eigenschaften der Schwebstoffe zu erhalten. Die Untersuchungsergebnisse zeigen für alle 4 Querprofile eine recht homogene Verteilung der Eisenkonzentrationen in den Schwebstoffen. Im Querprofil Nienstedten wurden im Schwebstoff der zuvor abgesetzten Proben mittlere Eisengehalte in der Größenordnung von 60 g/kg TS gemessen. In den drei anderen Querprofilen lag die Eisenkonzentration der Schwebstoffe im Mittel bei etwa 45 g/kg TS und entsprach somit der Größenordnung der natürlichen Grundbelastung, die mit rd. 35 bis 50 g/kg TS anzusetzen ist.

Ein Blick auf die Befunde der Wasserproben zeigt, daß Eisen fast ausschließlich in der partikulären Phase vorliegt. Der gelöste Anteil lag in der Größenordnug von rd. 100 µg/l. Der Eisengesamtgehalt der Wasserproben weist, entsprechend der inhomogenen Schwebstoffverteilung, zum Teil erhebliche Unterschiede innerhalb der Querprofile auf.

Ein Vergleich der Querprofilmischproben ergibt, daß systematisch in den sofort abfiltrierten Schwebstoffen eine etwas geringere Eisenkonzentration vorliegt. Als Gesamteisengehalt der Wasserproben wurde in den sofort filtrierten Proben ein deutlich erhöhter Eisengesamtgehalt gemessen wird. Dieser Befund zeigt, daß ein Teil des Eisens während der 5minütigen Absetzzeit vor der Filtration, z. B. durch eine Mitfällung, abgeschieden wird.

4.3.10 Manganbelastung der Elbschwebstoffe und des Elbwassers

Mangan wurde als weiteres Referenzelement mitbestimmt. Im Vergleich zum Eisen ist das Mangan durch eine Änderung der Milieubedingungen (z. B. Redoxverhältnisse) sehr viel mobiler. Die Befunde zeigen für die Querprofile Nienstedten und Twielenfleth aus dem limnischen Bereich der Elbe eine relativ gleichmäßige Verteilung der in den Schwebstoffen gemessenen Konzentrationen. In diesen beiden Querprofilen lag Mangan zu einem erheblichen Anteil in der gelösten Phase vor. Etwas größere Unterschiede innerhalb der Querprofile ergaben sich bei Grauerort und Glückstadt. Für Proben mit stark erhöhten Schwebstoffgehalten, wie z. B. im Querprofil Glückstadt, wurden entsprechend erhöhte Gesamtkonzentrationen der Wasserproben festgestellt.

4.4 Schwermetallgehalte und -frachten im Querprofil Glückstadt/Grauerort

4.4.1 Grundlagen

In der Pariser Konvention haben sich die Vertragsstaaten verpflichtet, jährlich den Eintrag ausgewählter Schadstoffe in das Konventionsgebiet (Nordsee/ Nordatlantik) dem Internationalen Sekretariat in London zu melden. Als landseitige Grenze des Konventionsgebietes ist die jeweilige Süßwassergrenze in den Tideästuarien definiert. Im Falle der Elbe ist dies das Querprofil in Höhe Glückstadt (Strom-km 675,5). Der Bilanzierungsquerschnitt hat eine Querschnittsfläche bei mittlerem Tideniedrigwasser von rd. 17.800 m^2 und bei mittlerem Tidehochwasser von rd. 27.500 m^2. In diesem großen Querschnitt ist zu keiner Tidezeit eine homogene Schwebstoff- und damit Schwermetallverteilung vorhanden. Neben der räumlichen Variabilität der Schwebstoffgehalte tritt in den Tideästuarien zusätzlich eine zeitliche Variabilität der Schwebstoff-

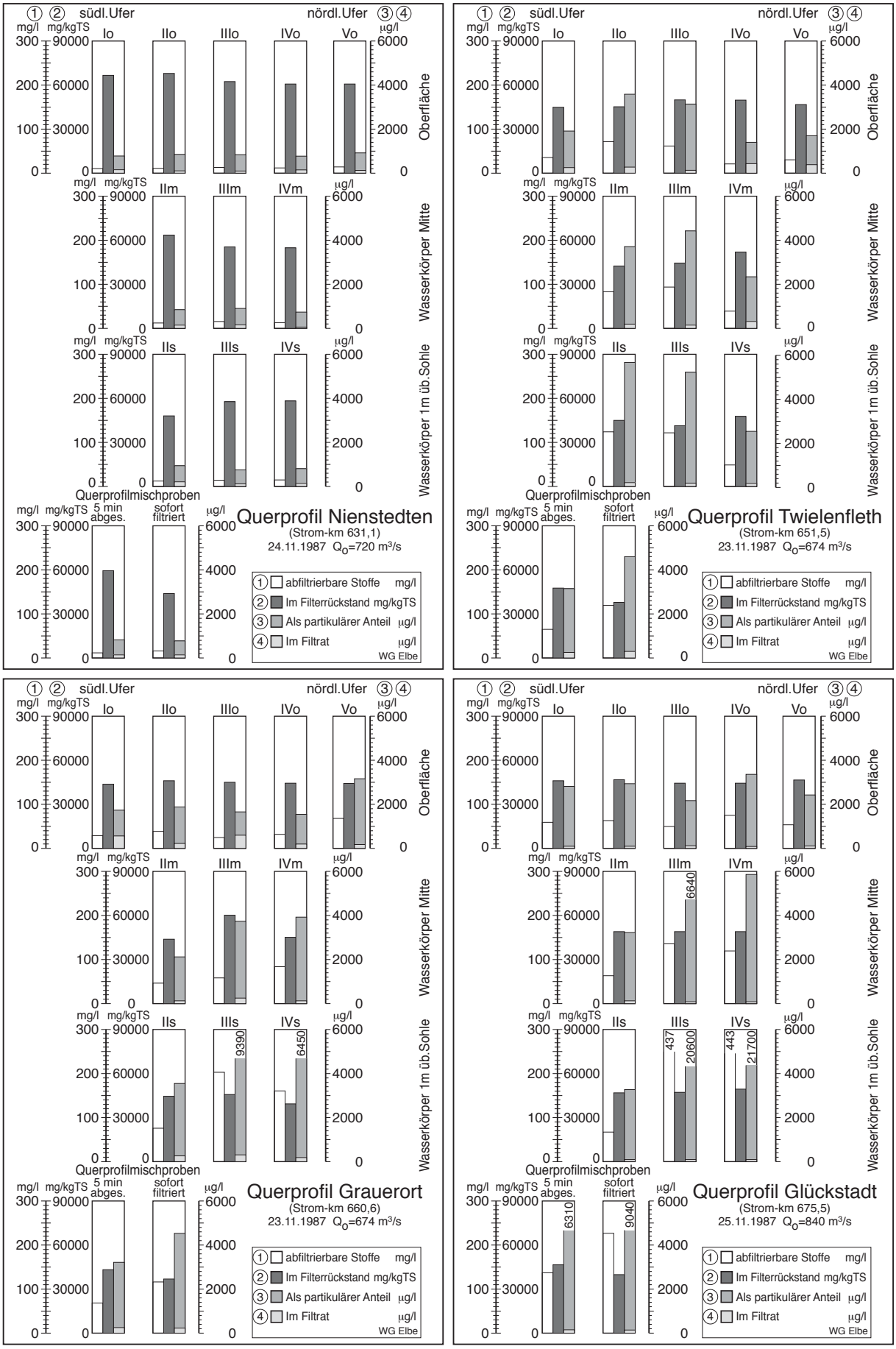


Abb. 31 Querprofilmessungen in der Elbe - **Eisen** im Wasser und Schwebstoff
(Filtration nach 5 min Absetzzeit)

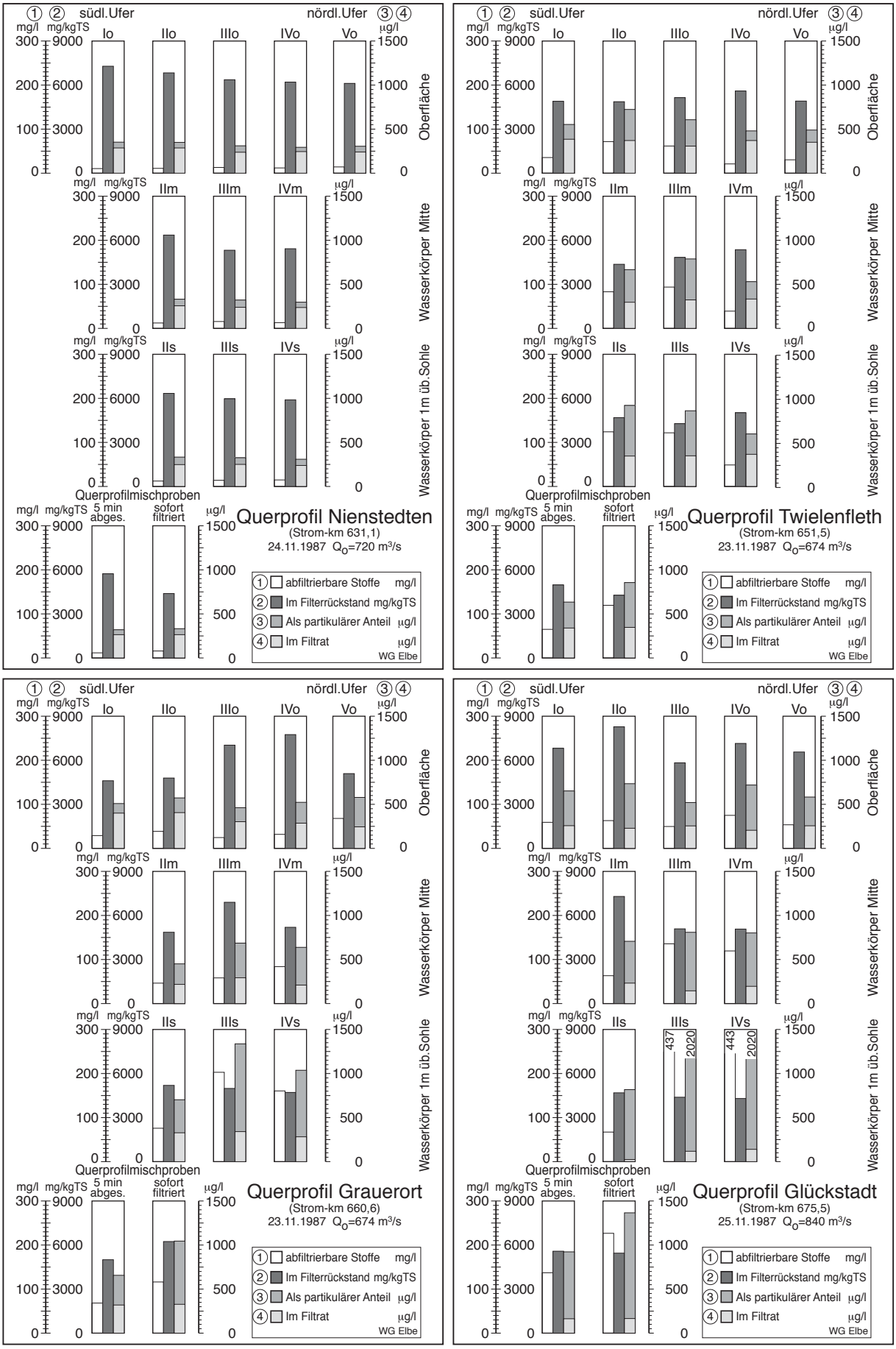


Abb. 32 Querprofilmessungen in der Elbe - **Mangan** im Wasser und Schwebstoff
(Filtration nach 5 min Absetzzeit)

konzentrationen mit unterschiedlichen Zeitskalen auf. So ergeben sich sowohl kurzzeitige Konzentrationsschwankungen, bedingt durch die Strömungsturbulenz, als auch tidezeitabhängige Schwankungen, hervorgerufen durch die instationären Strömungsvorgänge und die tidebedingte Verschiebung der Gradienten in der Brackwasserzone (Ebbe- und Flutweg). Darüber hinaus treten langperiodische Schwankungen auf infolge der Verschiebung der Brackwasser- und Trübungszone aufgrund wechselnder Oberwasserabflüsse. Da ein erheblicher Anteil der Schwermetalle in an Schwebstoffen angelagerter Form transportiert wird, ergibt sich auch für den Schwermetalltransport durch die Überlagerung der verschiedenen Einflußgrößen ein sehr komplexes System, das bei einer Bilanzierung des Schwermetalleintrages in die Nordsee berücksichtigt werden muß.

Im Rahmen eines vom Bundesumweltamt geförderten Forschungsvorhabens* wurden für die Eintragsbilanzierung gezielte Meßstrategien, Probenentnahmetechniken, Untersuchungsverfahren und Methoden der Eintragsermittlung entwickelt, erprobt und bewertet. Die Methoden und Ergebnisse sind in dem Forschungsbericht ausführlich erläutert, so daß auf eine detaillierte Darstellung im Rahmen dieses Schwermetallberichtes verzichtet werden kann. Die durchgeführten Untersuchungen hatten zusammenfassend ergeben, daß die Haupttrübungswolke des Elbeästuars bereits oberhalb der Brackwasserzone im Süßwasserbereich beginnt und dadurch eine Bilanzierung im Querprofil Glückstadt erschwert wird. Aus diesem Grunde wurde mit Beginn des Meßprogramms 1988 das Bilanzierungsprofil von Glückstadt nach Grauerort (Strom-km 660,6) stromauf verlegt.

Während bei den in Kapitel 4.3 beschriebenen Querprofiluntersuchungen jeweils der Schwermetallgehalt der Einzelproben und der Querprofilmischproben ermittelt wurde, erfolgt im Querprofil Glückstadt/Grauerort in wöchentlichem Abstand regelmäßig nur eine Untersuchung der Querprofilmischproben. Eine wöchentliche Untersuchung aller Einzelproben würde mehr als den 10fachen Aufwand ergeben. Die Probenentnahme wird jeweils in der Phase des voll entwickelten Ebbstroms bei maximaler Strömungsturbulenz vom Schiff aus durchgeführt.

4.4.2 Erläuterung der Ergebnisse

Die ausgewerteten Untersuchungsergebnisse sind in Abb. 33 bis 41 dargestellt. Im oberen Teil der Diagramme ist jeweils die Abflußganglinie und die in der Einzelprobe gemessene elektrische Leitfähigkeit angegeben, um den Einfluß der hydrographischen Faktoren auf die zeitliche Entwicklung der Schwermetallbelastung zu verdeutlichen. Durch die Filtration nach vorheriger 5minütiger Absetzzeit werden nur die schwermetallbeladenen Feinschwebstoffe erfaßt, während grobe Partikel, insbesondere der chemisch inerte Sand, durch Sedimentation vorher abgeschieden werden.

Die an den Mischproben bestimmten Gehalte an abfiltrierbaren Stoffen lassen eine gewisse Abhängigkeit zu den hydrographischen Randbedingungen erkennen. So sind in der zweiten Jahreshälfte 1986 während einer Periode mit anhaltend niedrigen Oberwasserabflüssen, zusammen mit erhöhten Leitfähigkeiten, deutlich erhöhte Schwebstoffgehalte gemessen worden. In dieser Phase war eindeutig die Brackwasserzone und die Haupttrübungszone mit ihren oberen Ausläufern bis in das Bilanzierungsprofil Glückstadt stromauf vorgedrungen.

* Pilotstudie zur Überwachung anorganischer und organischer Schadstoffe an ausgewählten Organismen und an Schwebstoffen im Bereich des Elbeästuars; Forschungsbericht 102 04 104; veröffentlicht in der Reihe UBA-Texte Nr. 2/89

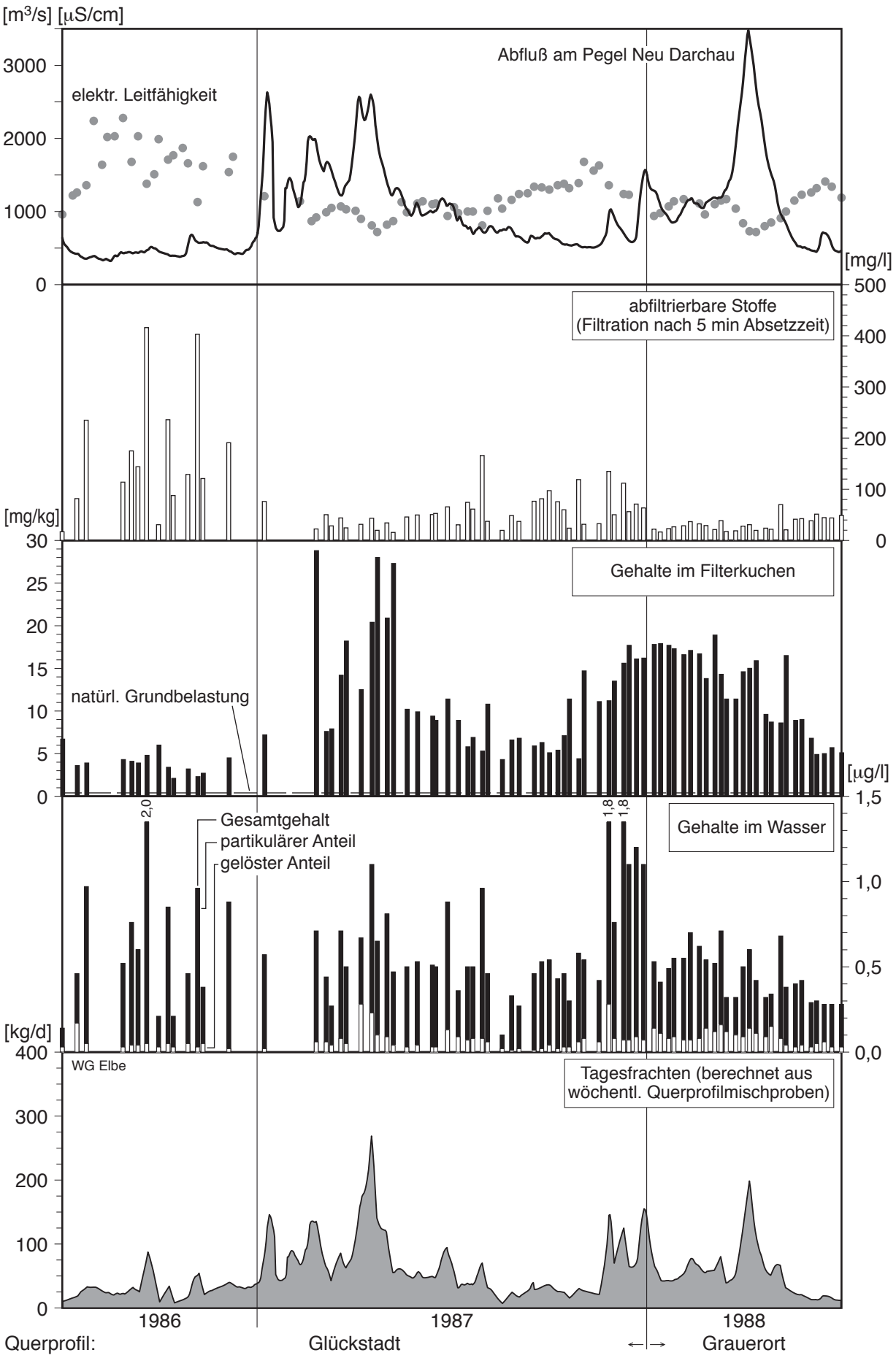


Abb. 33 Quecksilbergehalte und Frachten der Elbe bei Glückstadt/Grauerort

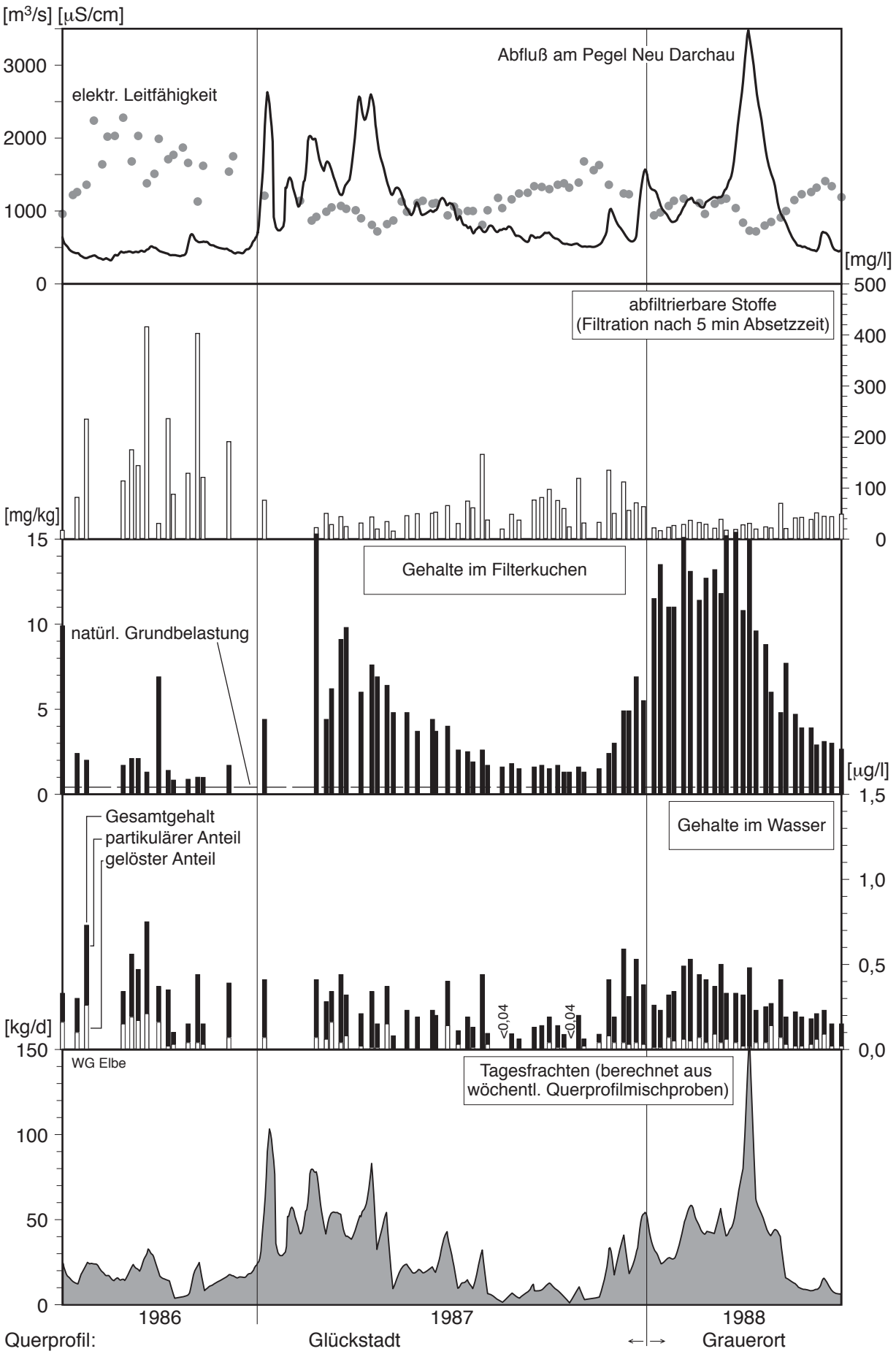


Abb. 34 Cadmiumgehalte und Frachten der Elbe bei Glückstadt/Grauerort

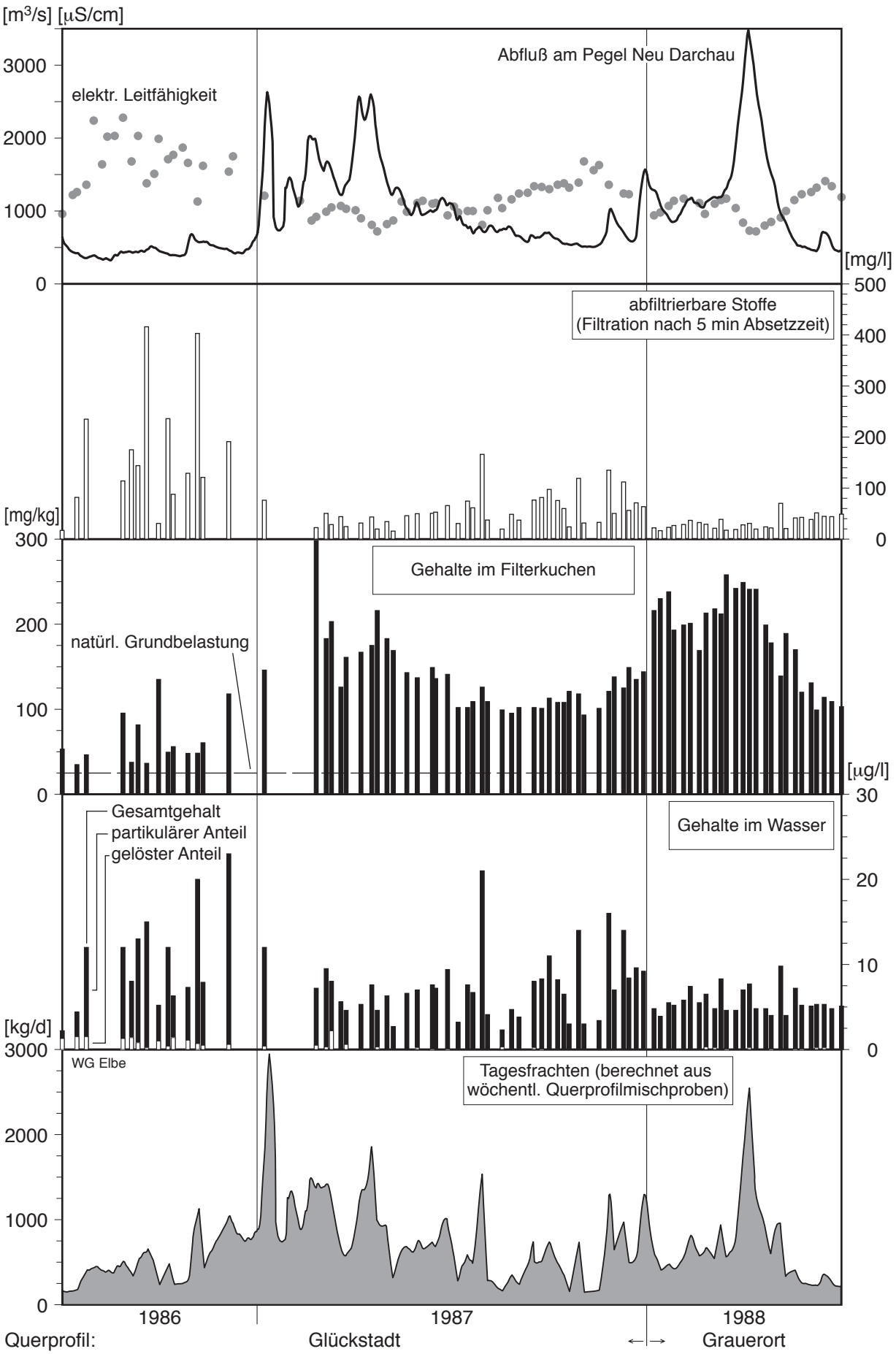


Abb. 35 Bleigehalte und Frachten der Elbe bei Glückstadt/Grauerort

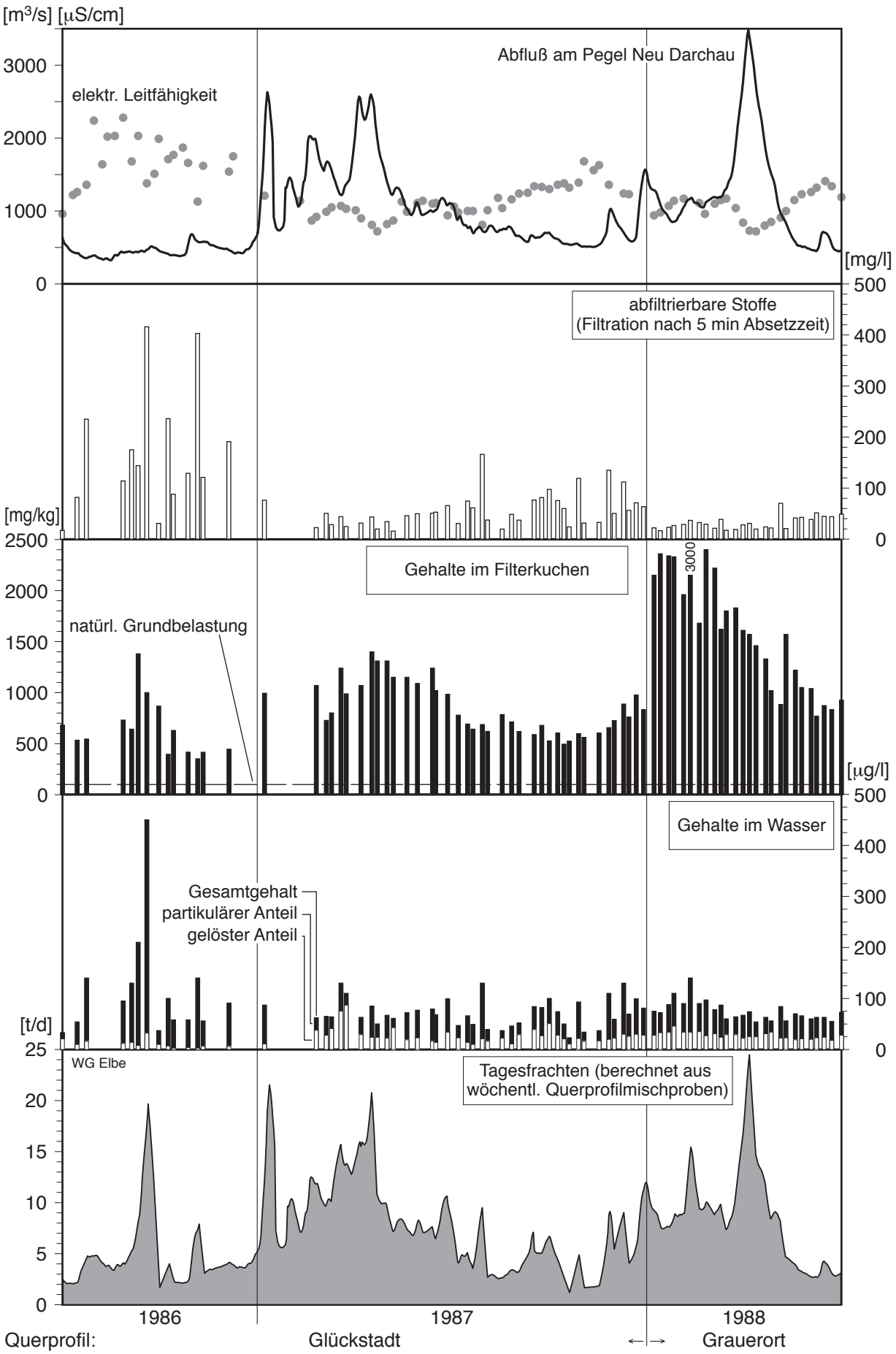


Abb. 36 Zinkgehalte und Frachten der Elbe bei Glückstadt/Grauerort

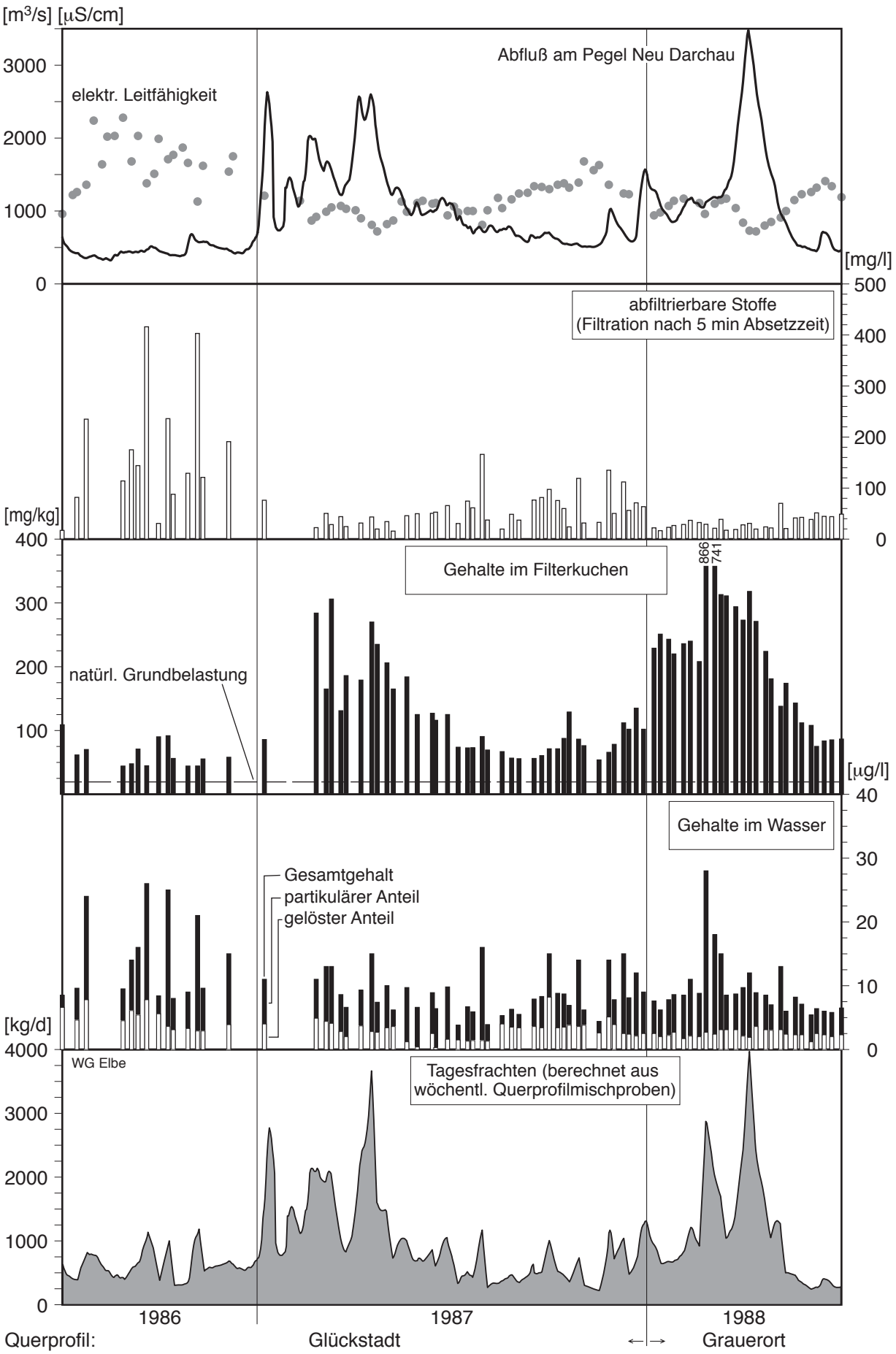


Abb. 37 Kupfergehalte und Frachten der Elbe bei Glückstadt/Grauerort

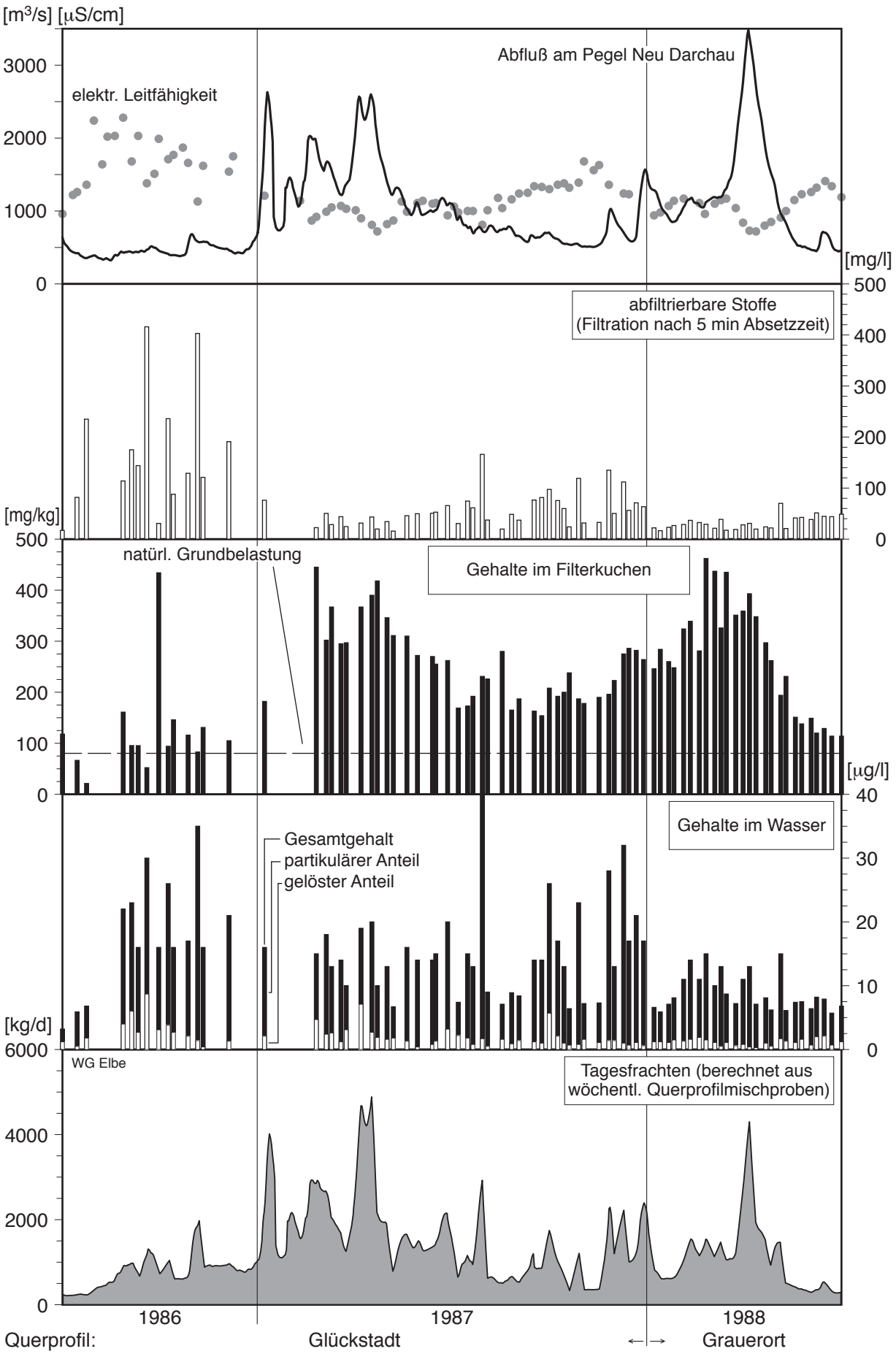


Abb. 38 Chromgehalte und Frachten der Elbe bei Glückstadt/Grauerort

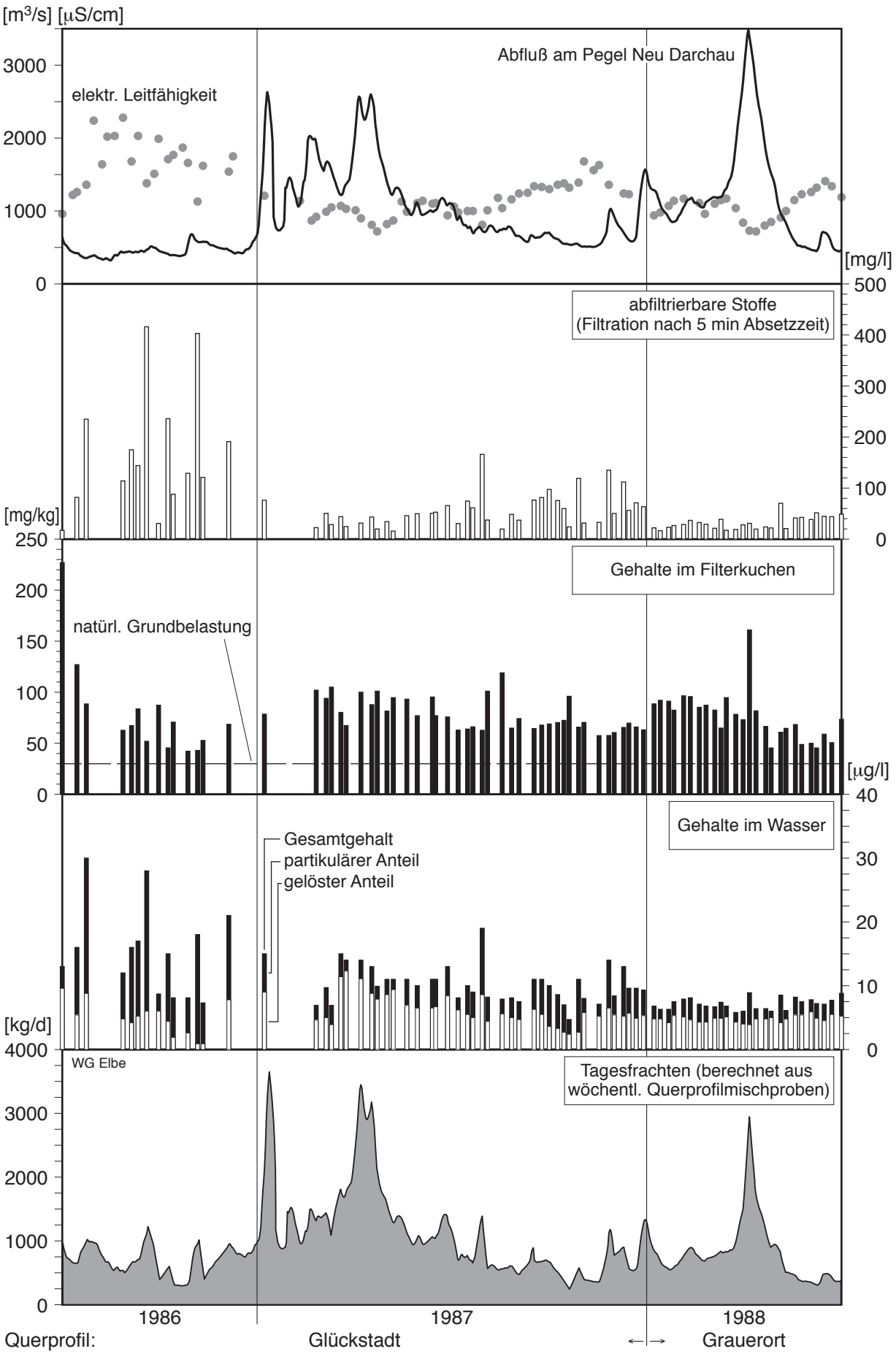


Abb. 39 Nickelgehalte und Frachten der Elbe bei Glückstadt/Grauerort

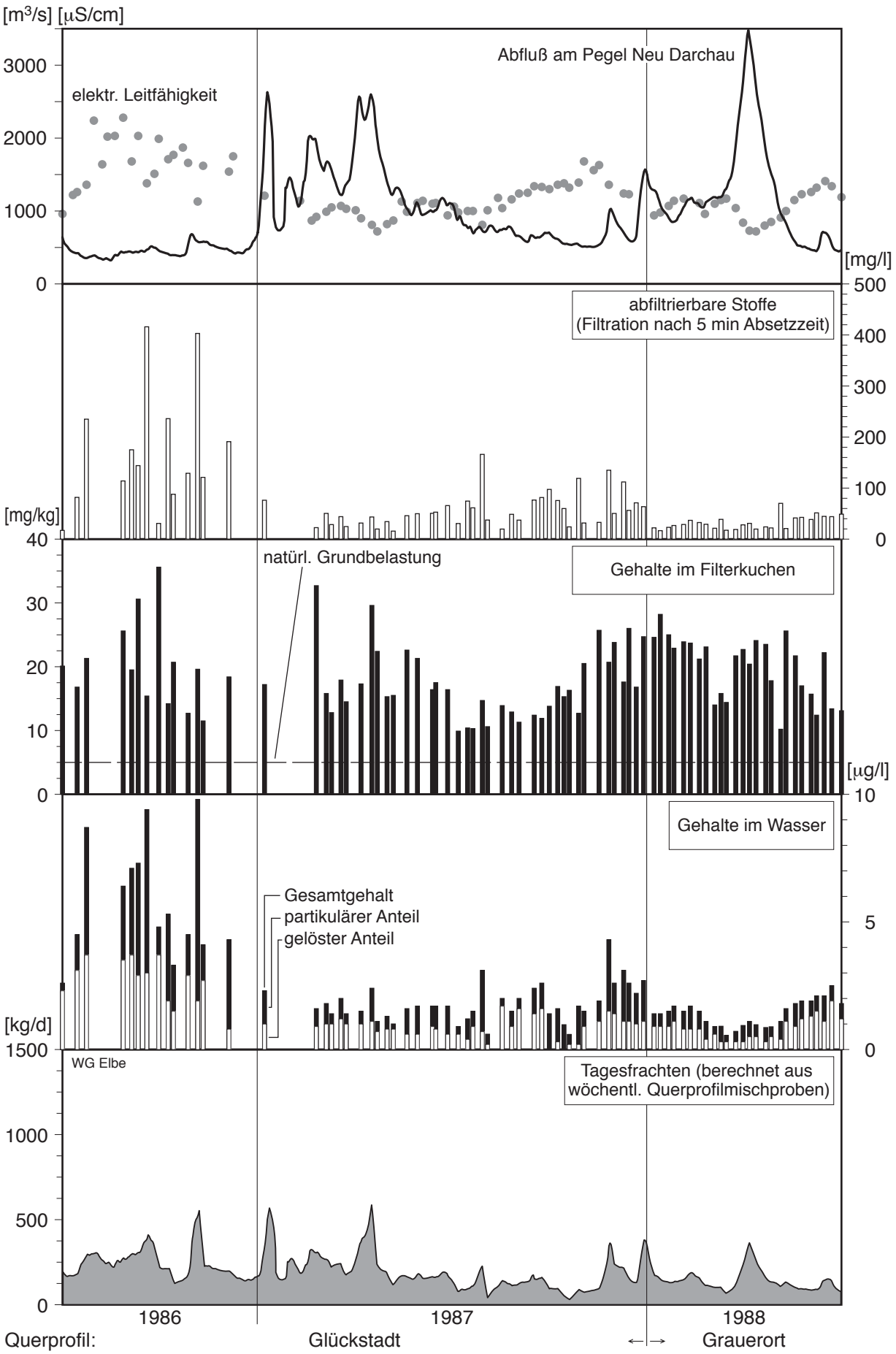


Abb. 40 Arsengehalte und Frachten der Elbe bei Glückstadt/Grauerort

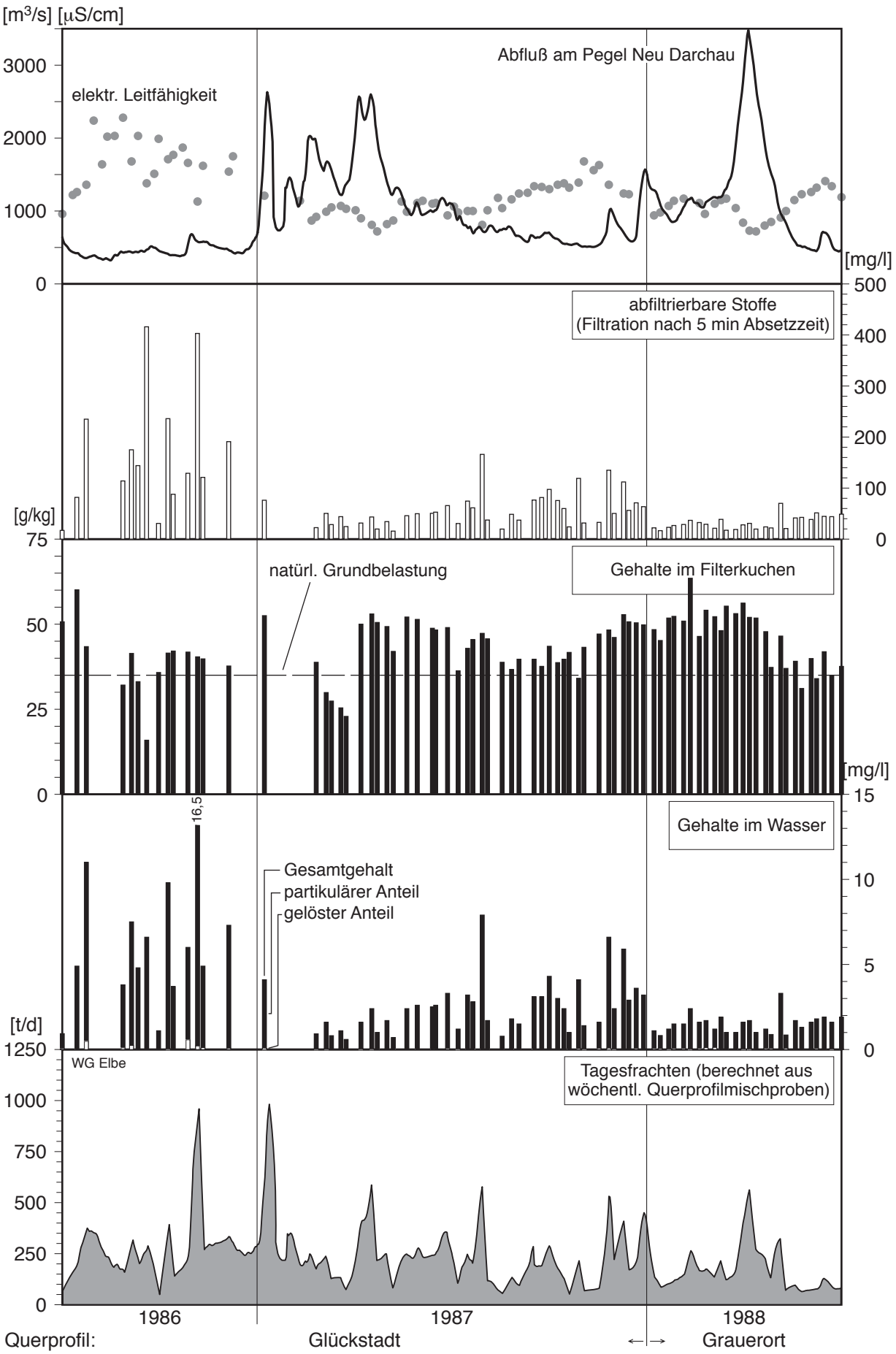


Abb. 41 Eisengehalte und Frachten der Elbe bei Glückstadt/Grauerort

Auch bei den niedrigen Oberwasserabflüssen im Herbst 1987 ist in schwacher Form der Einfluß der Brackwasser-/Trübungszone durch erhöhte Schwebstoffgehalte erkennbar. Durch die Verlegung des Bilanzierungsquerprofils stromauf nach Grauerort wird angestrebt, auch in Phasen mit niedrigen Oberwasserabflüssen den besonders komplexen Verhältnissen in der Trübungszone auszuweichen. Die bisherigen Ergebnisse für das erste Halbjahr 1988 lassen für das Querprofil Grauerort keinen Einfluß der Trübungswolke erkennen.

Die an den abfiltrierten Schwebstoffen gemessenen Schwermetallkonzentrationen zeigen für alle untersuchten Elemente eine über den gesamten Untersuchungszeitraum ähnliche Verteilungsstruktur, die eindeutig durch die jeweilige Entwicklung des Oberwasserabflusses beeinflußt wird. Die niedrigsten Schwermetallkonzentrationen in den abfiltrierbaren Stoffen wurden jeweils in Phasen mit niedrigen Oberwasserabflüssen festgestellt. Bei hohen Oberwasserabflüssen, die in der Regel im Frühjahr auftreten, ergeben sich jeweils deutlich erhöhte Schwermetallkonzentrationen im Schwebstoff. Der Konzentrationsunterschied zwischen den geringen Schwermetallkonzentrationen im Schwebstoff bei niedrigem Oberwasserabfluß und den hohen Schwermetallkonzentrationen im Schwebstoff bei hohem Oberwasserabfluß ist offenbar proportional zu der Höhe der anthropogenen Belastung gegenüber der natürlichen Grundbelastung. So ergeben sich für die Schwermetalle Quecksilber, Cadmium, Zink und Kupfer sehr große Belastungsunterschiede und für Nickel und Eisen nur schwach ausgeprägte Unterschiede in der Schwermetallkonzentration der Schwebstoffe. Die Schwermetallbelastung der Schwebstoffe ist beispielsweise beim Cadmium bis zum 50fachen gegenüber der natürlichen Grundbelastung erhöht, während für Nickel und Eisen nur eine geringfügige Erhöhung vorliegt. Zur Erleichterung der Interpretation der Befunde ist für die Schwermetallbeladung der Schwebstoffe jeweils die Größenordnung der natürlichen Grundbelastung mit angegeben. Die Auslenkung von dieser natürlichen Grundbelastung ist als Maß für die anthropogene Belastung anzusehen.

Der starke Anstieg der Schwermetallkonzentration in den Schwebstoffen beim Abfluß von Hochwasserwellen ist darauf zurückzuführen, daß in dieser Phase hochbelastete Schwebstoffe aus dem oberen Einzugsgebiet innerhalb weniger Tage bis in diesen Bereich des Elbeästuars transportiert werden. Die hohen Oberwasserabflüsse sind jeweils auf starke Niederschläge im oberen Einzugsgebiet zurückzuführen, die einerseits zu erhöhten Abschwemmungen und andererseits zu verstärkten Wiederaufwirbelungen von zwischenzeitlich sedimentiertem Material aus Stauhaltungen, Buhnenfeldern usw. führen. Die erhöhten Oberwasserabflüsse verstärken jeweils den ebbstrom-orientierten Schwebstofftransport, so daß bei diesen hydrologischen Bedingungen nur ein geringer Anteil im Bereich des Hamburger Stromspaltungsgebietes (Hamburger Hafen) sedimentiert. In Perioden mit niedrigen Oberwasserabflüssen hingegen wird die von oberstrom in das Tideästuar eingetragene Schwebstofffracht geringer. Gleichzeitig wird aufgrund der längeren Verweilzeiten im System des Hamburger Hafens ein erheblicher Anteil durch Sedimentation zurückgehalten. In dieser Phase tritt durch die Vermischung der von oberstrom zugeführten geringen Schwebstoffmengen mit den Schwebstoffmengen aus dem Unterelberaum, z. B. durch den Eintrag aus den Nebenflüssen, aber auch durch Vermischung mit biogen (während der Vegetationsperiode) im Unterelberaum gebildeten Schwebstoffen eine Verdünnungswirkung und damit eine Abnahme der Schwermetallkonzentrationen in den Schwebstoffen in verstärktem Maße auf.

Diese Ergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit der Untersuchung von IRMER, KNAUTH und WEILER (1985)* für eine Meßstelle im Bereich des Mühlenberger Lochs unterhalb des Hamburger Hafens.

* IRMER, U.; KNAUTH, H. D.; WEILER, K. (1985) Einfluß der Schwebstoffbildung auf Bindung und Verteilung ökotoxischer Schwermetalle in der Tideelbe - Vom Wasser, Bd. 65 -

Eine ausführliche Erläuterung des Schwebstoff- und Schwermetalltransportes in der Tideelbe erfolgt in Kapitel 4.6.

In den Abbildungen ist für die Wasserproben jeweils der gelöste Anteil (bestimmt im filtrierten Wasser) und der partikuläre Anteil (berechnet aus der gemessenen Schwermetallbelastung der Schwebstoffe und dem Schwebstoffgehalt) sowie als Summe der Gesamtgehalt angegeben. Die Darstellung zeigt, daß die Schwermetalle Quecksilber, Cadmium, Blei, Chrom und insbesondere Eisen zum überwiegenden Teil partikulär, d. h. an Schwebstoffen gebunden, vorliegen. Nur für Nickel und Arsen liegen die gelösten Anteile im Mittel über 50 % des Gesamtgehaltes.

Die bei einigen Elementen sehr ausgeprägte Variabilität der Gesamtgehalte ergibt sich in erster Linie aus dem partikulären Anteil. Da der partikuläre Anteil sich jeweils aus der Verknüpfung des abfiltrierten Schwebstoffgehaltes mit der spezifischen Beladung der Schwebstoffe ergibt, kommt es zu einer Verstärkung der Variabilität. Verhältnismäßig gleichbleibende Gesamtkonzentrationen ergeben sich nur für das Schwermetall Nickel. Bei Nickel liegt ein erheblicher Anteil in gelöster Form vor. Außerdem weist die spezifische Beladung der Schwebstoffe aufgrund der nur geringen anthropogenen Erhöhung der Belastung einen nahezu gleichförmigen Verlauf auf.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die Schwermetallkonzentrationen des Elbwassers (Gesamtgehalte) auch kurzzeitig eine so hohe Schwankungsweite aufweisen, daß eine zuverlässige Erfassung des Konzentrationsniveaus nur durch eine entsprechend häufige Beprobung erreicht werden kann.

4.4.3 Berechnung der Schwermetallfrachten

Im unteren Teil der Abbildungen ist jeweils die aus wöchentlichen Querprofilmischproben berechnete Frachtenganglinie dargestellt. Aufgrund der täglichen Verschiebung der Eintrittszeiten der Tide und der Bedingung, daß die Beprobungen jeweils in der normalen Arbeitszeit liegen müssen, ist eine Beprobung in äquidistanten Zeitschritten, also immer an einem bestimmten Tag in der Woche, nicht möglich. Für die Frachtenermittlung wurde zunächst aus den wöchentlichen Konzentrationswerten der Querprofilmischproben durch Interpolation eine vollständige Ganglinie, d. h. Tageswerte, auf der Rechenanlage erzeugt. In einem zweiten Schritt wurden aus den so ermittelten Konzentrations-Tageswerten und den täglichen Abflußwerten (umgerechnet auf das Untersuchungsprofil Glückstadt bzw. Grauerort) die Tagesfracht berechnet. Gegenüber anderen möglichen Berechnungsmethoden wurde dieser Weg gewählt, weil hierbei die in großer zeitlicher Dichte vorliegende Information „Abfluß” als Tageswert im Sinne der Bilanzierungsgenauigkeit voll genutzt wird. Die so ermittelten Frachtenganglinien zeigen für die verschiedenen Schwermetalle den erwarteten, sehr unregelmäßigen Verlauf. Die Frachtenganglinien veranschaulichen, daß insbesondere beim Abfluß von Hochwasserwellen erhöhte Schwermetallfrachten in die Nordseeküstengewässer (d. h. zunächst in die Brackwasserzone) eingetragen werden.

Untersuchungen anderer Autoren im Elbeästuar hatten eine Abhängigkeit des Schwermetallgehaltes der Schwebstoffe vom jeweiligen Schwebstoffgehalt ergeben. Um diese Frage auch für die Meßdaten aus dem Querprofil Glückstadt zu prüfen, erfolgte eine entsprechende weitergehende Auswertung in Kapitel 4.6.

4.5 LÄNGSPROFILE - TIDEELBE UND ELBNEBENFLÜSSE

Während im Querprofil Glückstadt/Grauerort, ebenso wie in Schnackenburg, an einem festen Ort die zeitliche Entwicklung der Schwermetallbelastung in Abhängigkeit der wechselnden hydrologischen Bedingungen erfaßt wird, erfolgt durch die Längsprofilbeprobungen eine Aufnahme der räumlichen Verteilung der Schwermetallbelastung. Die Probennahme erfolgt jeweils in der Phase des voll entwickelten Ebbstroms, weil zu dieser Zeit durch die hohe Strömungsturbulenz die stärkste Vertikalvermischung der Schwebstoffe erreicht ist. Die Probennahme muß deshalb entsprechend der Fortschrittsgeschwindigkeit der Tide im Längsprofil innerhalb einer Zeitspanne von etwa 4 Stunden über das gesamte, rd. 150 km lange Längsprofil der Tideelbe erfolgen. Die Probennahme ist nur von einem Hubschrauber innerhalb dieser kurzen Zeitspanne durchführbar. Gleichzeitig werden bei den Längsprofiluntersuchungen auch Proben vom Hubschrauber aus den Unterläufen der tidebeeinflußten Elbnebenflüsse entnommen. Durch den Einsatz des Hubschraubers wird ferner erreicht, daß die Proben innerhalb verhältnismäßig kurzer Zeit (rd. 2 Stunden) in der Wassergütestelle eintreffen und sofort die weitere Probenbehandlung, insbesondere die Filtration, vorgenommen werden kann. Die Untersuchungsmethoden sind in Kapitel 2 beschrieben.

Mit Beginn des Meßprogramms für das Jahr 1987 wurde grundsätzlich eine getrennte Bestimmung des gelösten und des partikulären Schwermetallanteils bei der Untersuchung der Wasserproben eingeführt. Die Filtration erfolgte wiederum nach vorheriger 5minütiger Absetzzeit, um eine Verdünnung der spezifischen Schwermetallbeladung der Schwebstoffe durch miterfaßte Sandpartikel auszuschließen. Mit Beginn des Meßprogramms 1988 konnte die Kapazität für die Filtration und die Filtrationstechnik weiter verbessert werden, so daß durch größere Schwebstoffmengen (größere Filterkuchengewichte) die bei den verschiedenen Arbeitsschritten unvermeidlichen Fehlereinflüsse (z. B. Blindwerte) weiter vermindert werden konnten.

In den folgenden Abbildungen 42 bis 109 sind jeweils die abfiltrierten Schwebstoffmengen, die im Filterrückstand gemessenen Schwermetallkonzentrationen (spezifische Beladung), die im filtrierten Wasser gemessenen Schwermetallkonzentrationen und die aus der abfiltrierten Schwebstoffmenge und der spezifischen Beladung berechneten partikulären Anteile der Schwermetallkonzentrationen angegeben. Um die jeweilige Lage der Brackwasserzone in der Elbmündung aufzuzeigen, sind die an Parallelproben bestimmten Chloridgehalte (logarithmischer Maßstab) zusätzlich mit aufgetragen. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß die Lage der Brackwasserzone im wesentlichen durch die Höhe des Oberwasserabflusses bestimmt wird. Im Meßzeitraum 1987 und im 1. Halbjahr 1988 herrschten überwiegend erhöhte Abflüsse vor, so daß bei den Längsprofiluntersuchungen bisher noch keine Situationen mit anhaltenden, niedrigen Oberwasserabflüssen erfaßt werden konnten. In der folgenden Übersicht sind die jeweiligen Oberwasserabflüsse während der Längsprofilbeprobungen zusammengestellt.

Längsprofil Nr.	Datum	Oberwasserabfluß (m^3/s) am Pegel Neu Darchau
1	19.02.1987	2030
2	01.04.1987	1870
3	14.05.1987	1290
4	13.08.1987	712
5	11.11.1987	506
6	23.02.1988	1050
7	17.05.1988	618

Längsprofil 19. Februar 1987

Die Längsprofilbeprobung fand während des Scheitels einer ausgeprägten Hochwasserwelle statt. Durch die erhöhten Oberwasserabflüsse war in dieser Phase die Brackwasserzone weit stromab bis unterhalb Ostemündung verschoben. Die Schwebstoffgehalte zeigen vom Wehr Geesthacht bis zur Ostemündung eine sehr gleichmäßige Verteilung mit stromab leicht ansteigenden Gehalten. Im oberen Brackwasserbereich (Anstieg der Chloridwerte) ist deutlich die für das Ästuar typische Trübungswolke durch die erhöhten Schwebstoffgehalte zu erkennen.

Für Quecksilber zeigen die spezifischen Beladungen extrem hohe Belastungen von rd. 25 bis 40 mg/kg TS im Streckenabschnitt Geesthacht bis Wedel. Im mittleren Abschnitt der Tideelbe von Wedel bis Glückstadt sind die Belastungen mit 20 bis 25 mg/kg TS noch sehr hoch. Die natürliche Grundbelastung der limnischen Schwebstoffe der Elbe würde demgegenüber in der Größenordung von 0,2 bis 0,5 mg/kg TS liegen. Unterhalb Glückstadt ist eine signifikante Abnahme der spezifischen Beladung in Richtung seewärts zu erkennen, die auf eine Verdünnung durch eingemischte Schwebstoffe aus dem Unterelberaum und aus dem Elbmündungsgebiet zurückzuführen ist.

Eine grundsätzlich ähnliche Verteilungsstruktur ergibt sich auch für die übrigen Schwermetalle, wie Cadmium, Blei, Zink, Kupfer, Chrom, Nickel und Arsen. Auch für die Eisenverteilung ergibt sich ein ähnlicher Befund. Demgegenüber wurde für Mangan eine sehr gleichmäßige Längsverteilung der spezifischen Beladung festgestellt.

Eine systematische Analyse der Schwebstoffherkunft, Beschaffenheit und Verteilung im Elbeästuar ist von SCHWEDHELM, SALOMONS, SCHOER und KNAUTH* durchgeführt worden.

Da die Verteilungsstruktur für die 5 Probenentnahmestellen von Geesthacht bis Wedel für die Schwermetalle Quecksilber, Cadmium, Blei, Chrom, Arsen und insbesondere Eisen eine systematische Ähnlichkeit aufweist, sind die Unterschiede zwischen diesen einzelnen Proben nicht auf unterschiedliche regionale Belastungsschwerpunkte, sondern auf eine unterschiedliche Schwebstoffbeschaffenheit zurückzuführen.

In den Unterläufen der Elbnebenflüsse, insbesondere in der Ilmenau und der Seeve, wurden bei dieser Beprobung im Schwebstoff extrem hohe Schwermetallgehalte festgestellt. Dieser Befund ist darauf zurückzuführen, daß durch die Mitte Februar erfolgte kräftige Zunahme des Oberwasserabflusses die Wasserstände, insbesondere im oberen Bereich der Tideelbe, stark angestiegen waren und in dieser Phase vermehrt Elbwasser in die Unterläufe der Elbnebenflüsse eingestaut wurde. Durch die Abnahme der Strömungsgeschwindigkeiten sind dabei in der Ilmenau und Seeve nur extrem niedrige Schwebstoffgehalte von unter 5 mg/l gemessen worden. Diese aus der Elbe stammenden Feinstschwebstoffe haben eine außergewöhnlich hohe spezifische Beladung mit Schwermetallen ergeben. In der Unterelbe unterhalb Hamburgs wirken sich erhöhte Oberwasserabflüsse aufgrund der sehr großen Flußbreite nur noch geringfügig erhöhend auf den Wasserstand aus. Deshalb zeigen die Befunde für die Unterelbenebenflüsse nicht einen vergleichbar hohen Anstieg in der spezifischen Beladung. Aus Sedimentuntersuchungen in den Elbnebenflüssen ist jedoch bekannt, daß in den

* SCHWEDHELM E., SALOMONS W., SCHOER J., KNAUTH H.-D., (1988) Provenance of the sediments and the suspended matter of the Elbe estuary, Forschungbericht der GKSS, GKSS 88/E/20

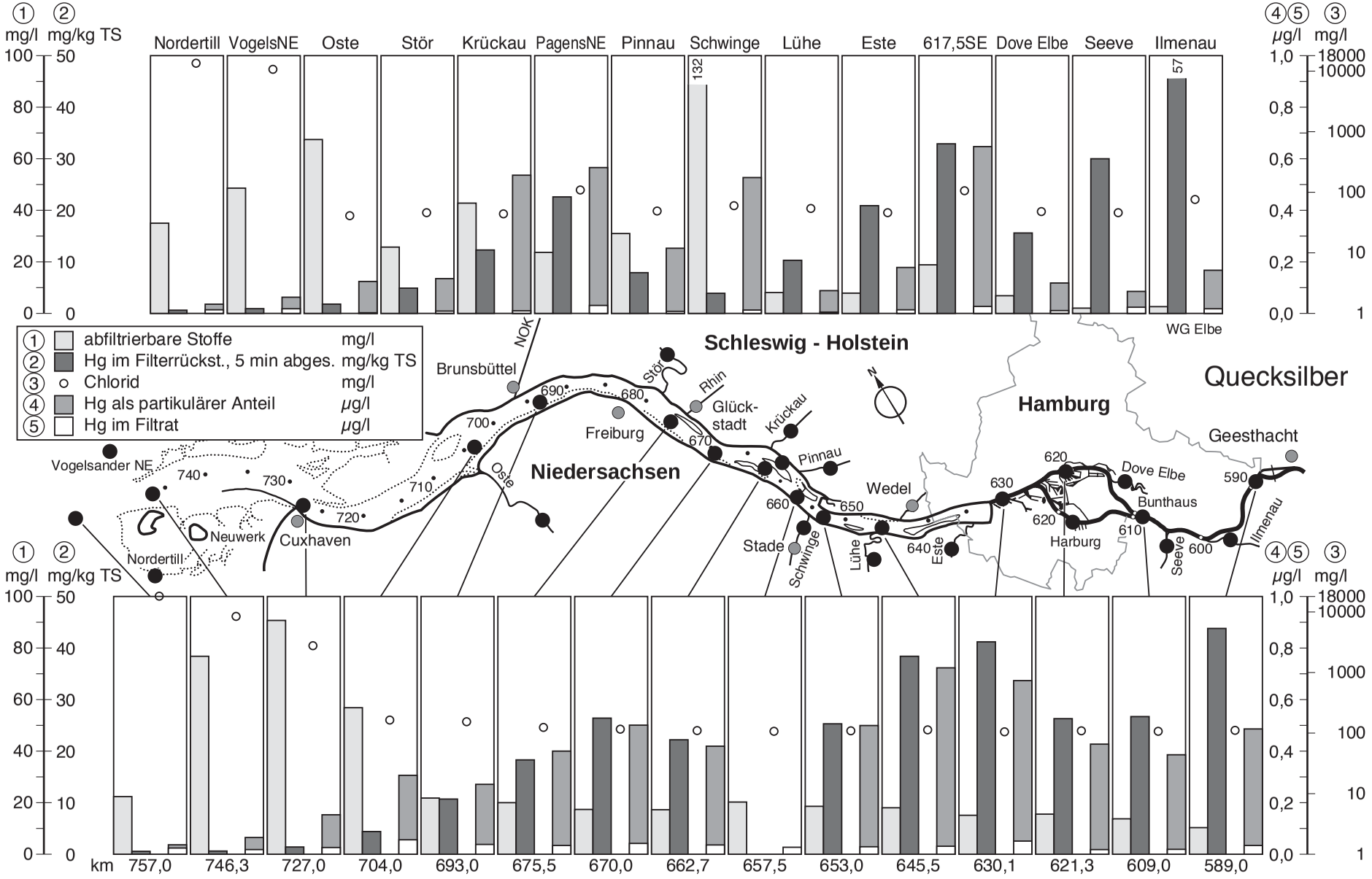


Abb. 42 Quecksilber-Längsprofil der Elbe am 19.02.1987 (Qo=2030 m³/s)

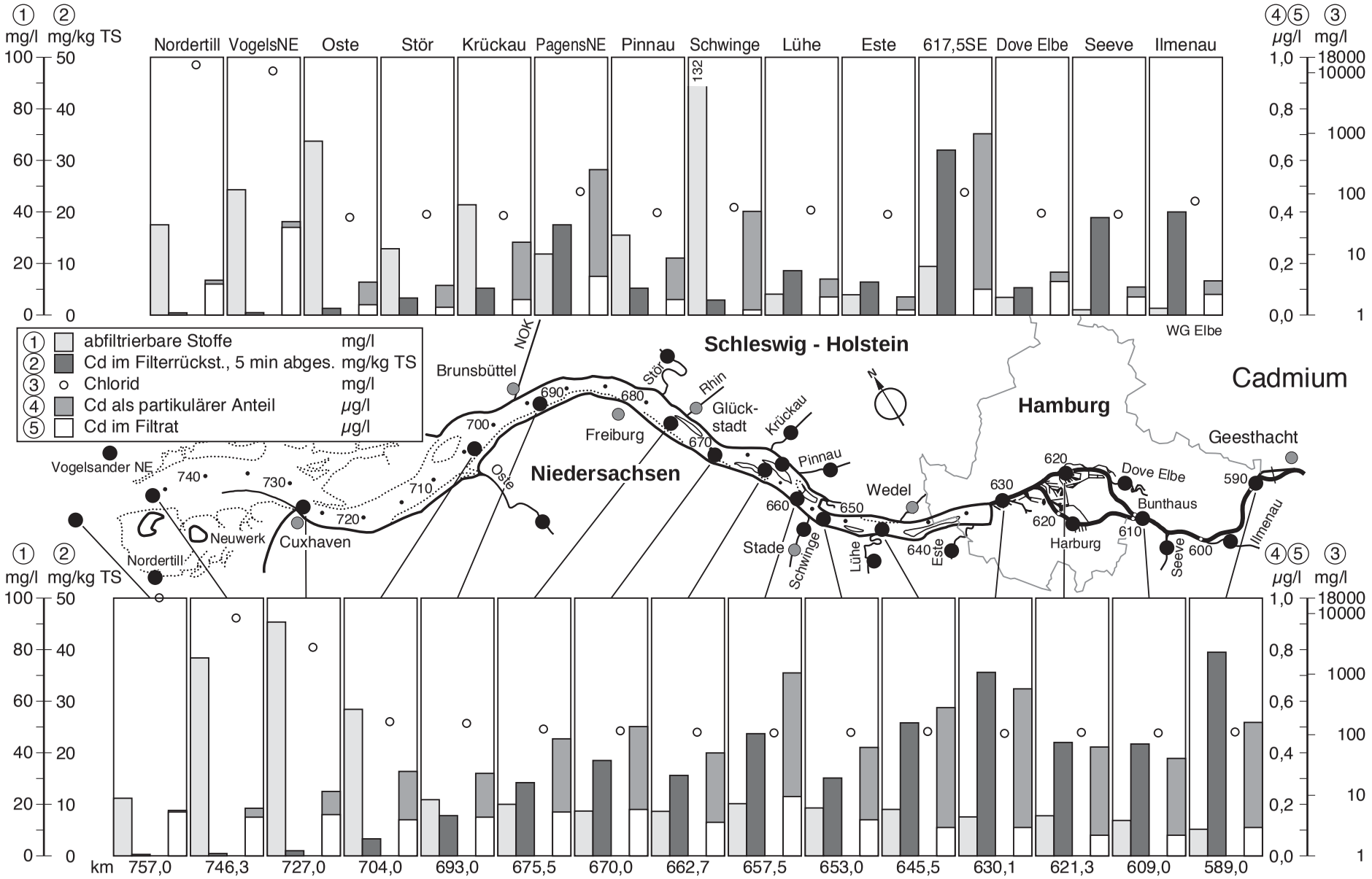


Abb. 43 Cadmium-Längsprofil der Elbe am 19.02.1987 (Qo=2030 m³/s)

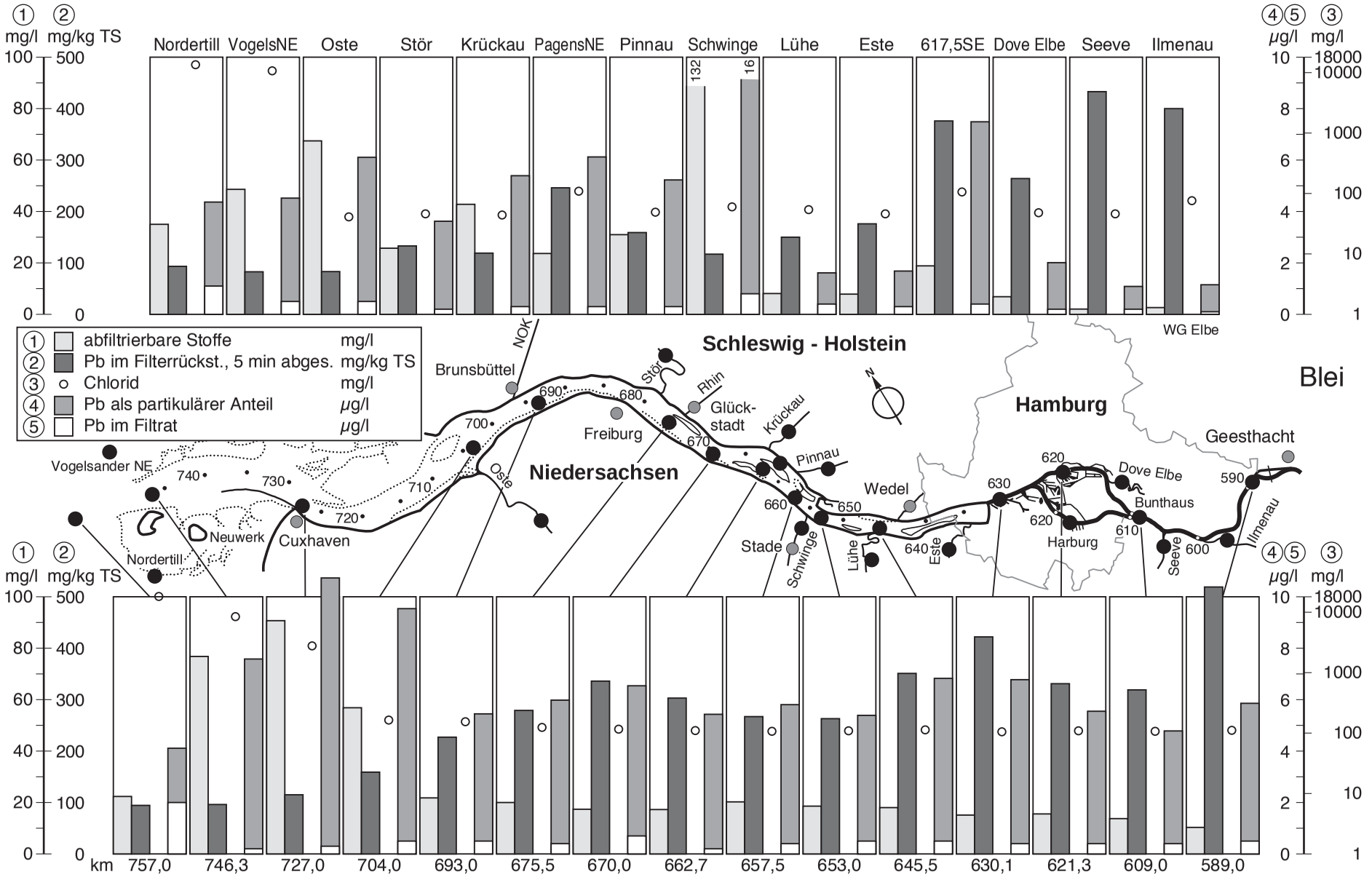


Abb. 44 Blei-Längsprofil der Elbe am 19.02.1987 (Qo=2030 m³/s)

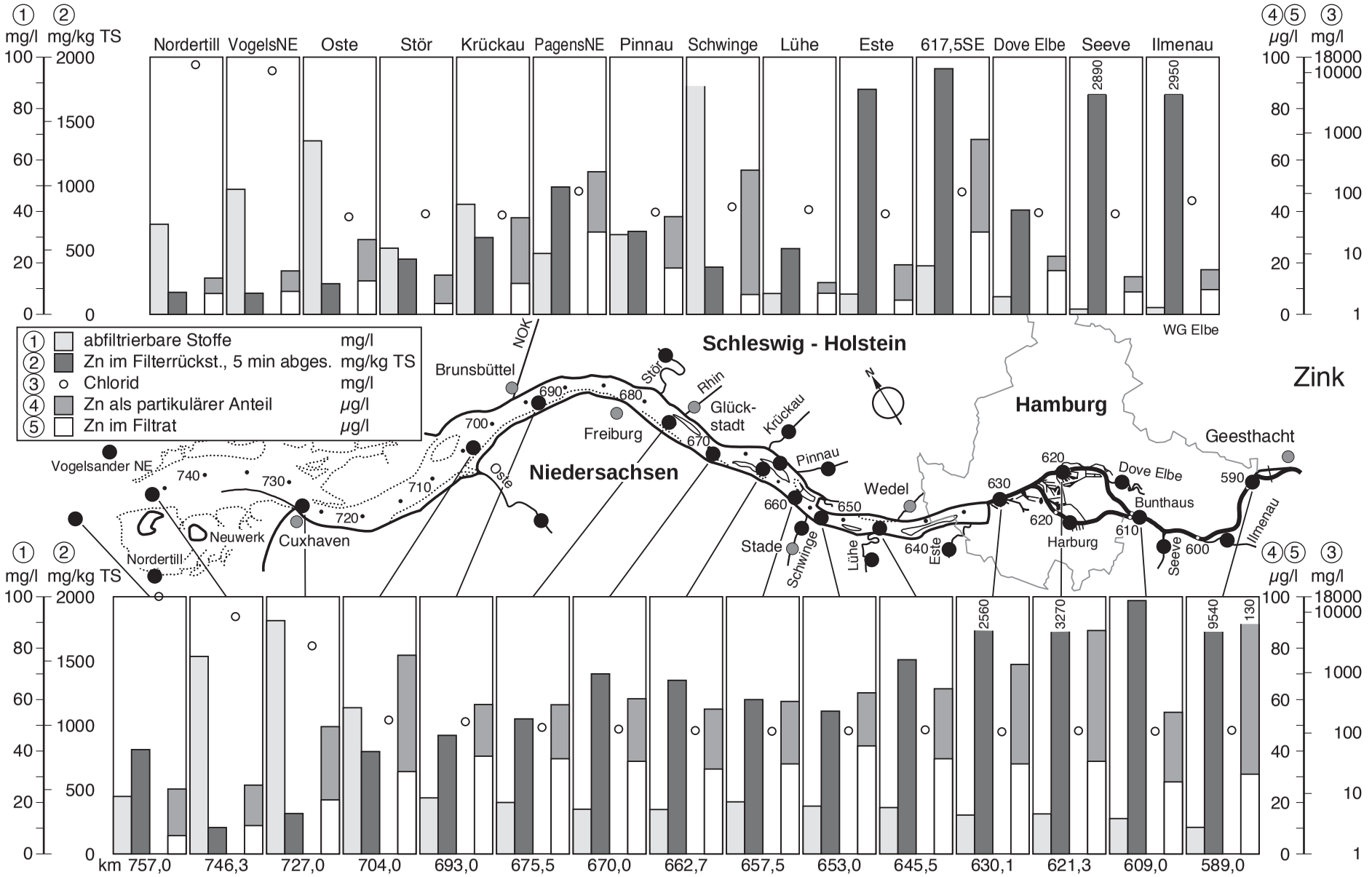


Abb. 45 Zink-Längsprofil der Elbe am 19.02.1987 (Qo=2030 m³/s)

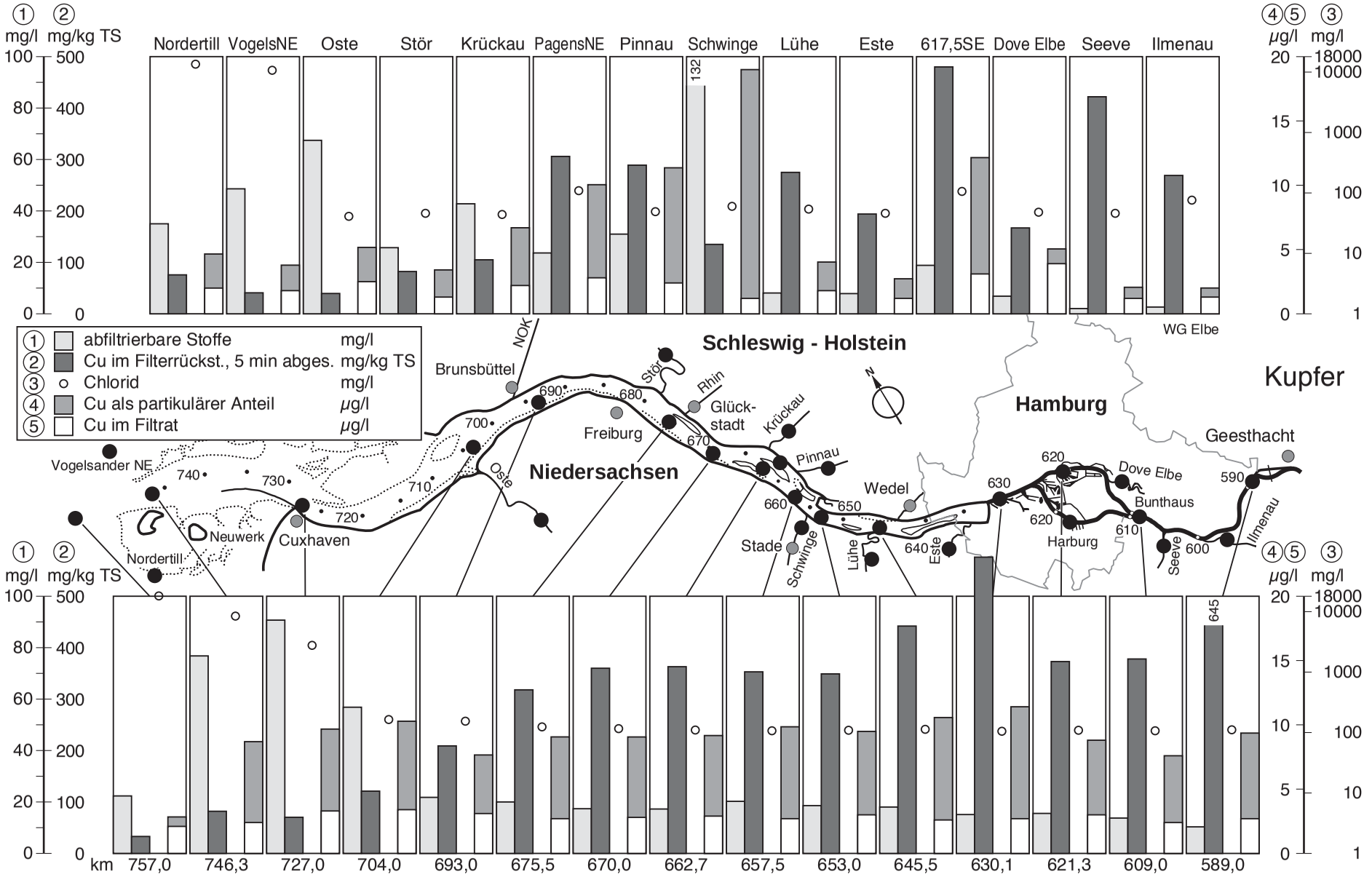


Abb. 46 Kupfer-Längsprofil der Elbe am 19.02.1987 (Qo=2030 m³/s)

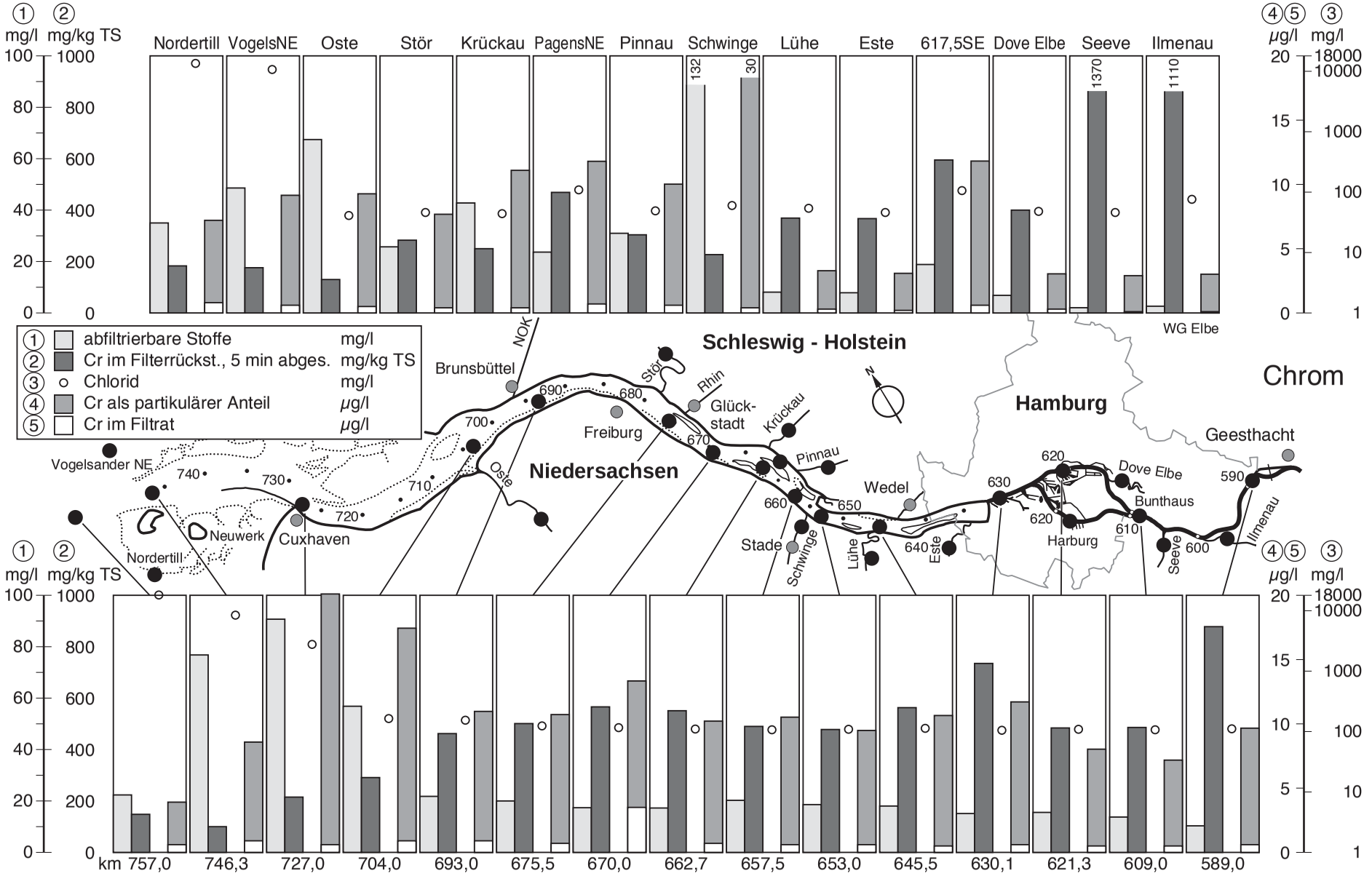


Abb. 47 Chrom-Längsprofil der Elbe am 19.02.1987 (Qo=2030 m³/s)

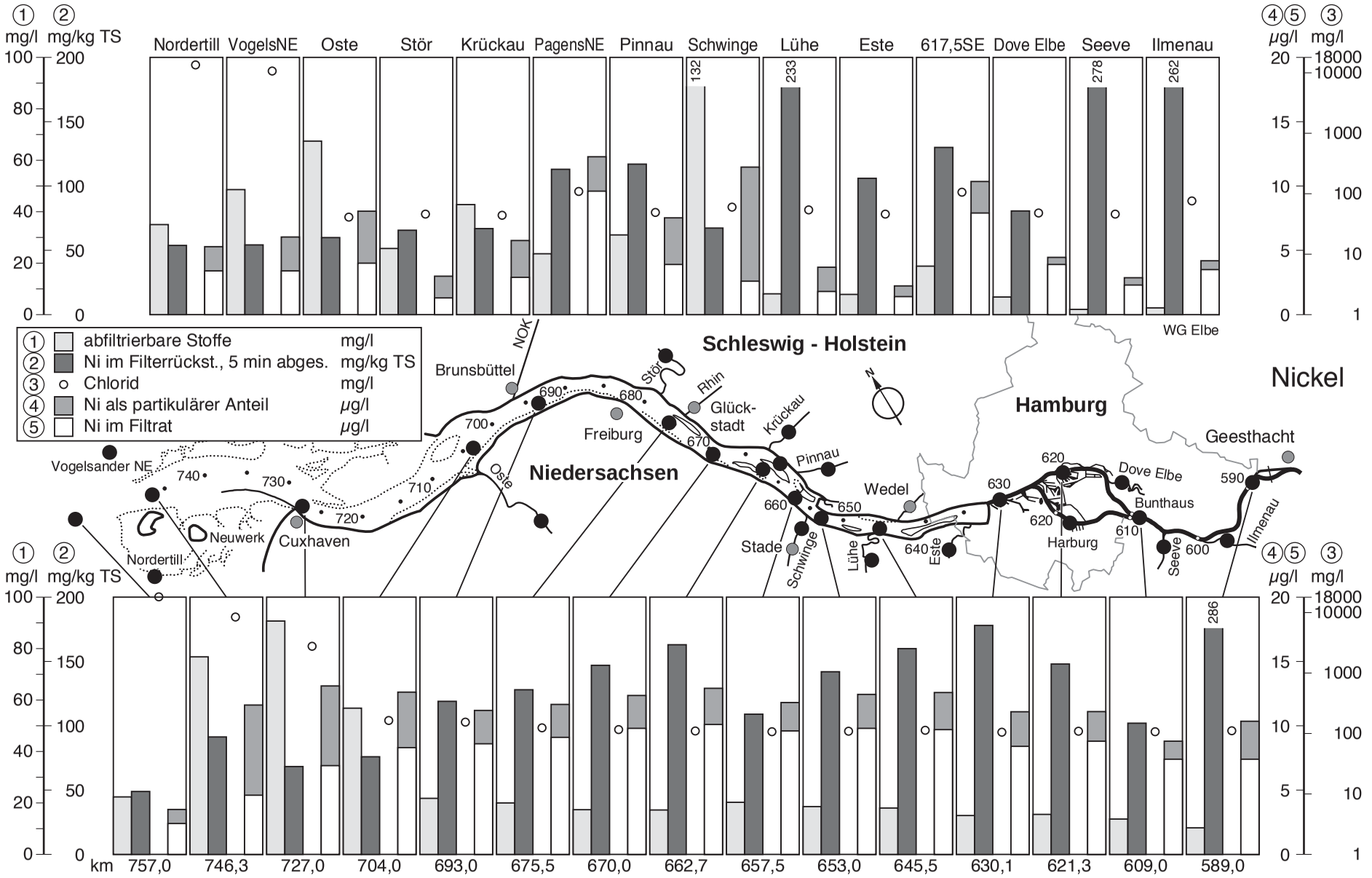


Abb. 48 Nickel-Längsprofil der Elbe am 19.02.1987 (Qo=2030 m³/s)

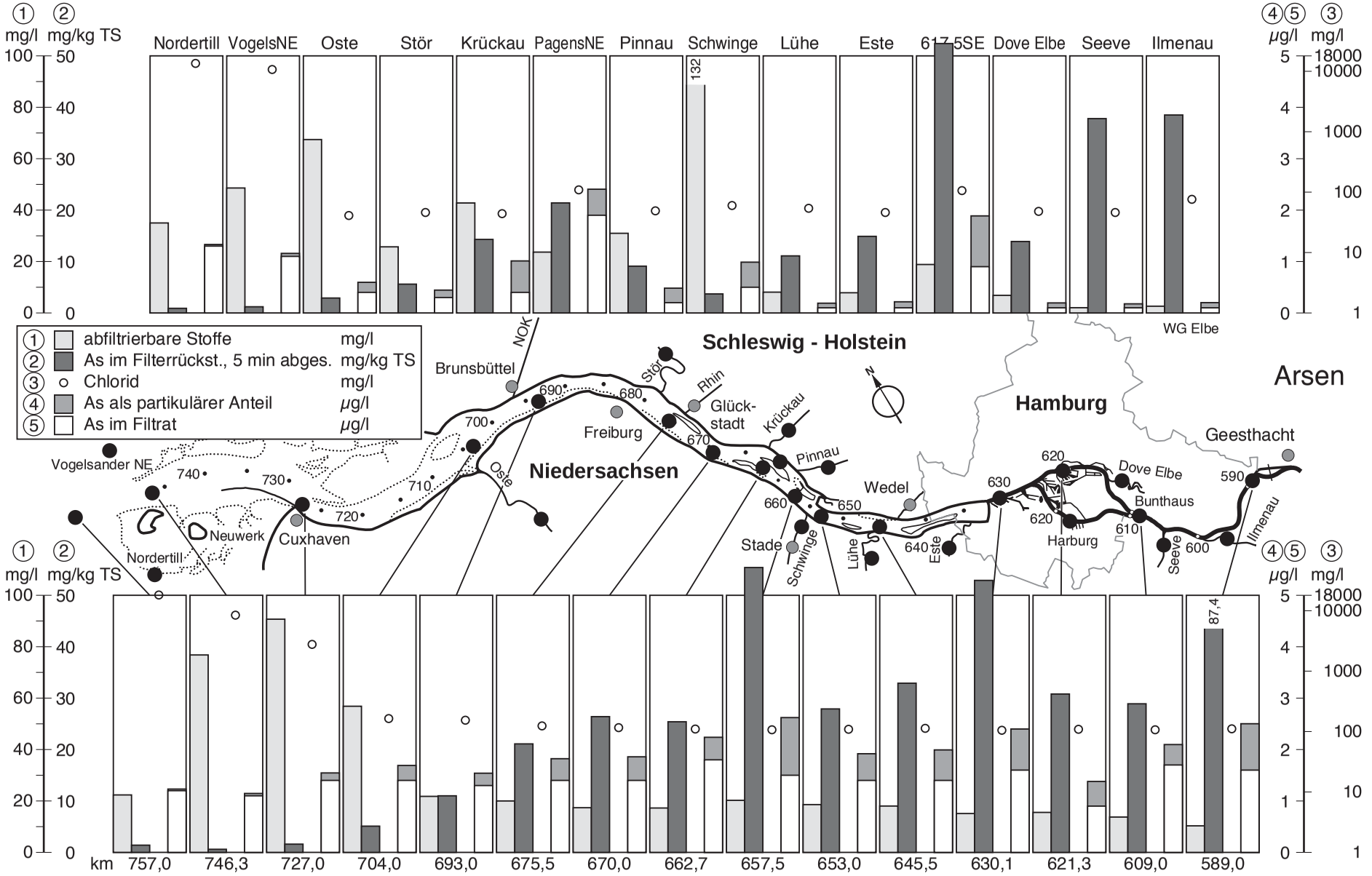


Abb. 49 Arsen-Längsprofil der Elbe am 19.02.1987 (Qo=2030 m³/s)

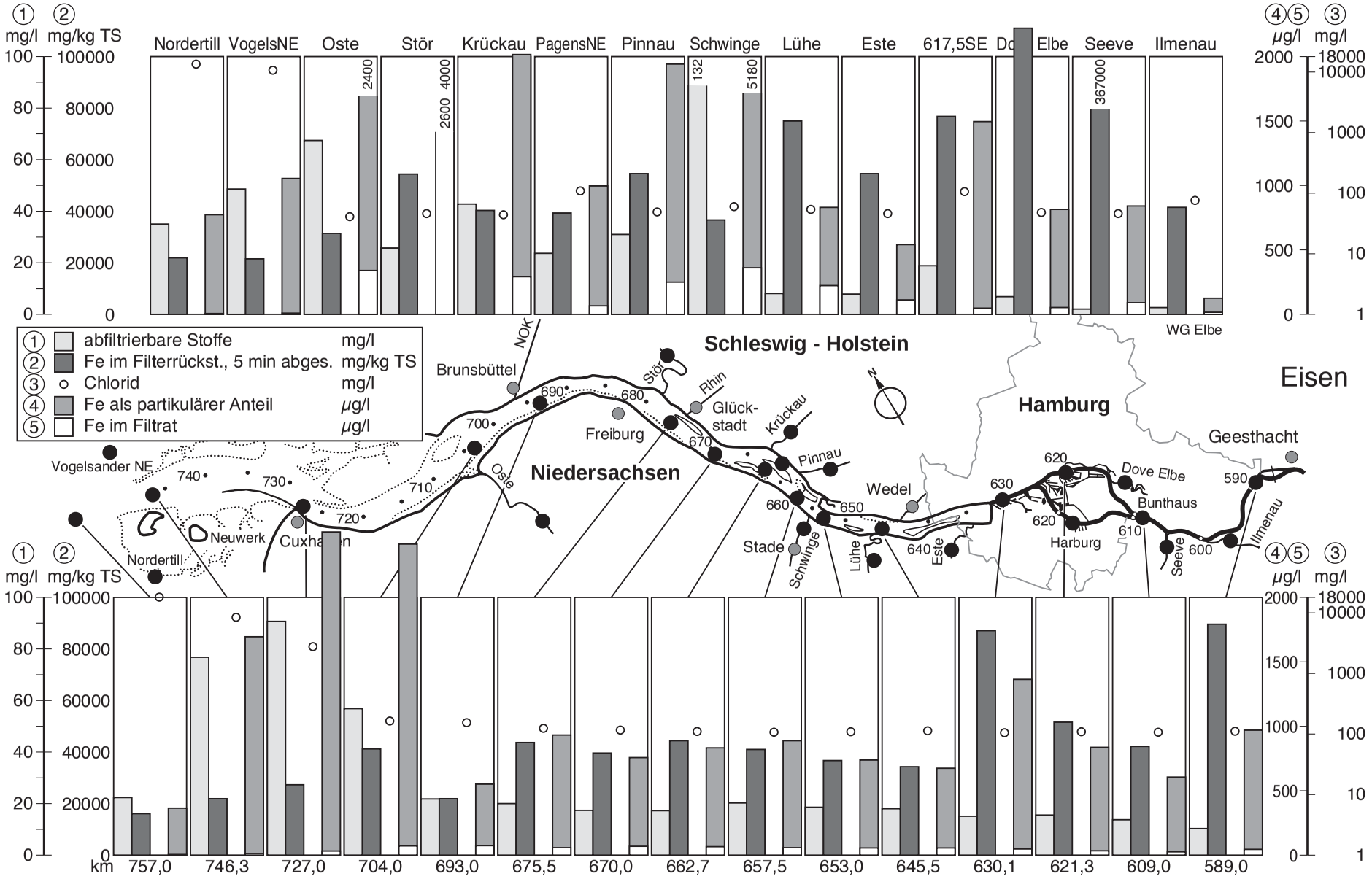


Abb. 50 Eisen-Längsprofil der Elbe am 19.02.1987 (Qo=2030 m³/s)

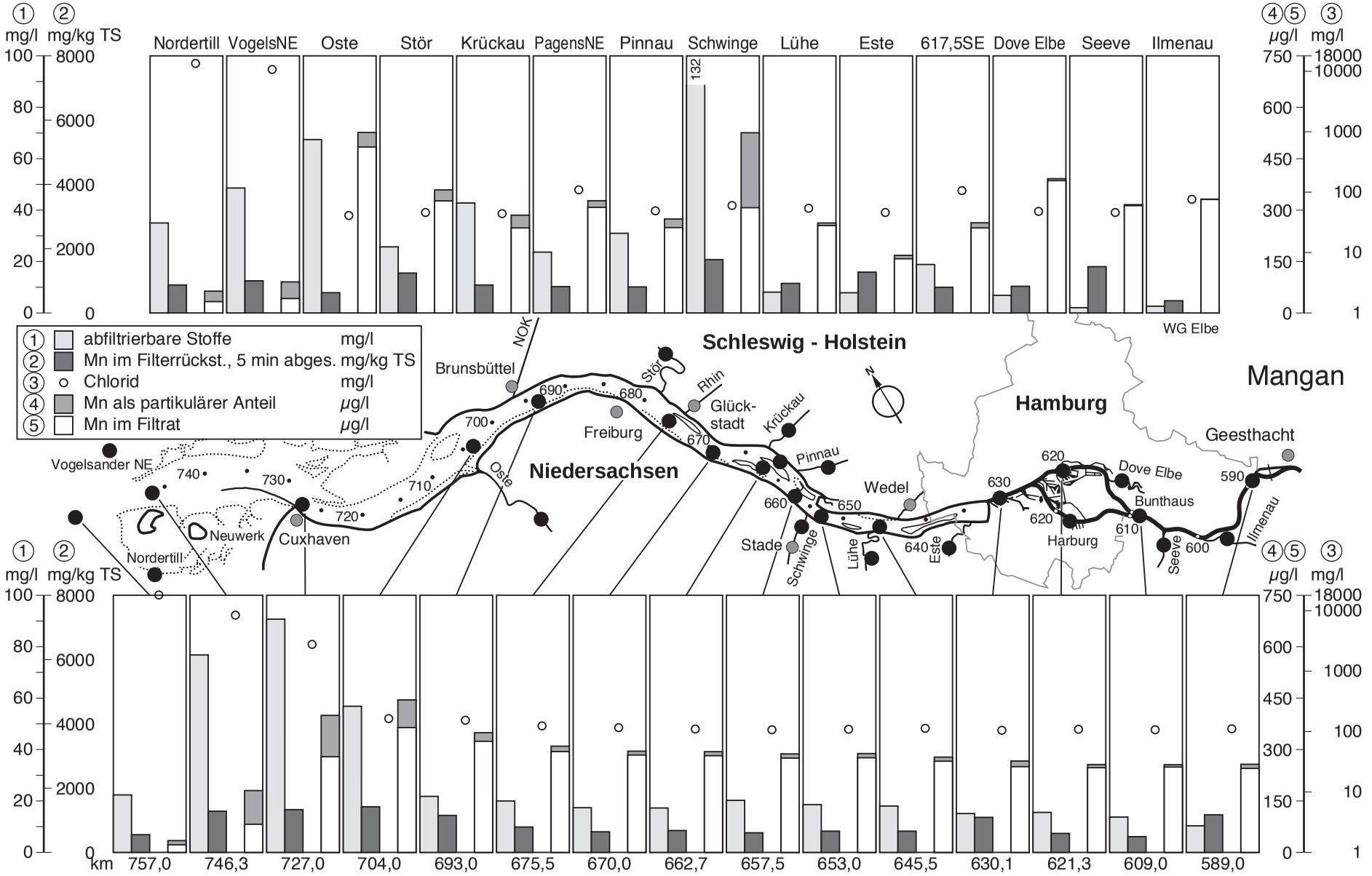


Abb. 51 Mangan-Längsprofil der Elbe am 19.02.1987 (Qo=2030 m³/s)

Unterläufen dieser Elbnebenflüsse durch den Eintrag aus der Elbe erhöhte Sedimentbelastungen vorliegen, die jeweils in der Phase des voll entwickelten Ebbstroms aufgrund der Strömungsturbulenz und der zu dieser Zeit aufgewirbelten Schwebstoffe auch in Wasserproben zum Teil deutlich erhöhte Befunde zeigen. Besonders deutlich wird dieses bei den Nebenflüssen Pinnau und Krückau im Vergleich zur Pagensander Nebenelbe. Die Schwermetallkonzentrationen in den Schwebstoffen der Pagensander Nebenelbe sind in der Regel deutlich höher als die Schwermetallkonzentrationen in den Schwebstoffen der in die Pagensander Nebenelbe einmündenden Flüsse Pinnau und Krückau. Dieser Befund deutet darauf hin, daß die verhältnismäßig hohen Schwebstoff- und auch Sedimentbelastungen in den Unterläufen von Pinnau und Krückau ganz wesentlich durch die mit dem Flutstrom von der Elbe her eingetragenen Belastungen herrühren. Für die Elbnebenflüsse Stör und Oste ergeben sich jeweils deutlich geringere Schwermetallbelastungen der Schwebstoffe, die ebenfalls niedriger liegen als die Schwermetallbelastungen der Schwebstoffe in der Elbe selbst in Höhe der jeweiligen Nebenflußmündungen. Die niedrigen Schwermetallkonzentrationen in den Seitenräumen der Außenelbe (Nordertill und Vogelsander Nebenelbe) sind durch den verdünnenden Einfluß aus dem marinen Milieu zu erklären.

Längsprofil 1. April 1987

Die Probenentnahme fand in der ansteigenden Phase einer ausgeprägten Hochwasserwelle statt. Bereits in den Vormonaten Januar, Februar und März waren Oberwasserwellen mit Werten von 1.200 bis 2.800 m^3/s abgeflossen. Aufgrund dieser erhöhten Oberwasserabflüsse war die Brackwasserzone im Vergleich zu mittleren Verhältnissen wiederum stromab in den Bereich unterhalb der Ostemündung verschoben. Auch die Haupttrübungswolke, gekennzeichnet durch erhöhte Schwebstoffgehalte, war bis in den Bereich Brunsbüttel/Cuxhaven seewärts verschoben. Im limnischen Bereich der Tideelbe lagen die Schwebstoffgehalte in der mittleren Größenordnung von 15 bis 30 mg/l. Bei einzelnen Proben wurden bedeutende Abweichungen festgestellt.

Die spezifische Beladung der Schwebstoffe zeigt für die untersuchten Schwermetalle bis auf Mangan und Arsen eine ähnliche Verteilungsstruktur. Insgesamt lag das Konzentrationsniveau niedriger im Vergleich zur Längsprofiluntersuchung im Februar. Offenbar haben die vorangegangenen, stark erhöhten Oberwasserabflüsse zu einer Ausspülung höher belasteter Schwebstoffe geführt und damit die festgestellte Konzentrationsabnahme bewirkt.

Für die Schwermetalle, für die das Belastungsniveau in erster Linie durch die hochgradige Vorbelastung geprägt wird (z. B. Quecksilber, Cadmium und Blei) zeigt die spezifische Beladung für das gesamte Längsprofil einen sehr gleichförmigen Verlauf. Durch die erhöhten Oberwasserabflüsse erfolgt ein rascher Transport der Schwebstoffe durch das Gebiet des Hamburger Hafens und auch im limnischen Bereich der Unterelbe, so daß sich daraus eine vergleichmäßigte Verteilungsstruktur ergibt. Im Bereich der Brackwasser-/Trübungszone ist wieder die signifikant ausgeprägte Abnahme der Schwermetallkonzentrationen in den Schwebstoffen zu erkennen. Dies ist eindeutig auf die Verdünnungswirkung eingemischter, geringer belasteter Schwebstoffe aus dem Elbmündungsbereich zurückzuführen.

Die für die Wasserproben bestimmten Schwermetallgesamtgehalte zeigen insbesondere für die Schwermetalle Quecksilber, Blei, Chrom und Eisen, die zum weitaus überwiegenden Teil an Schwebstoffe gebunden vorliegen, eine deutliche Abhängigkeit von dem jeweiligen Schwebstoffgehalt und der spezifischen Bela-

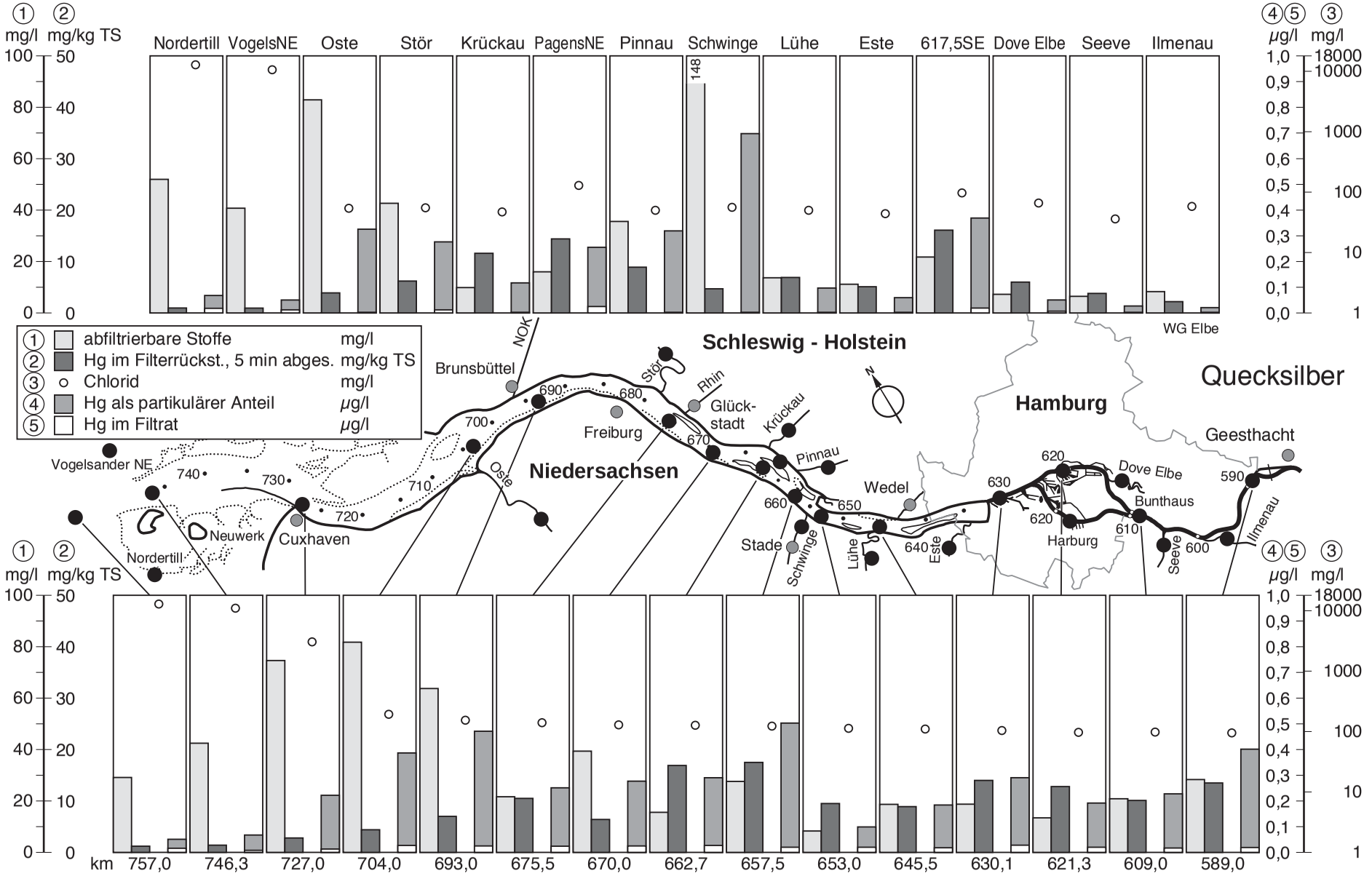


Abb. 52 Quecksilber-Längsprofil der Elbe am 01.04.1987 (Qo=1870 m³/s)

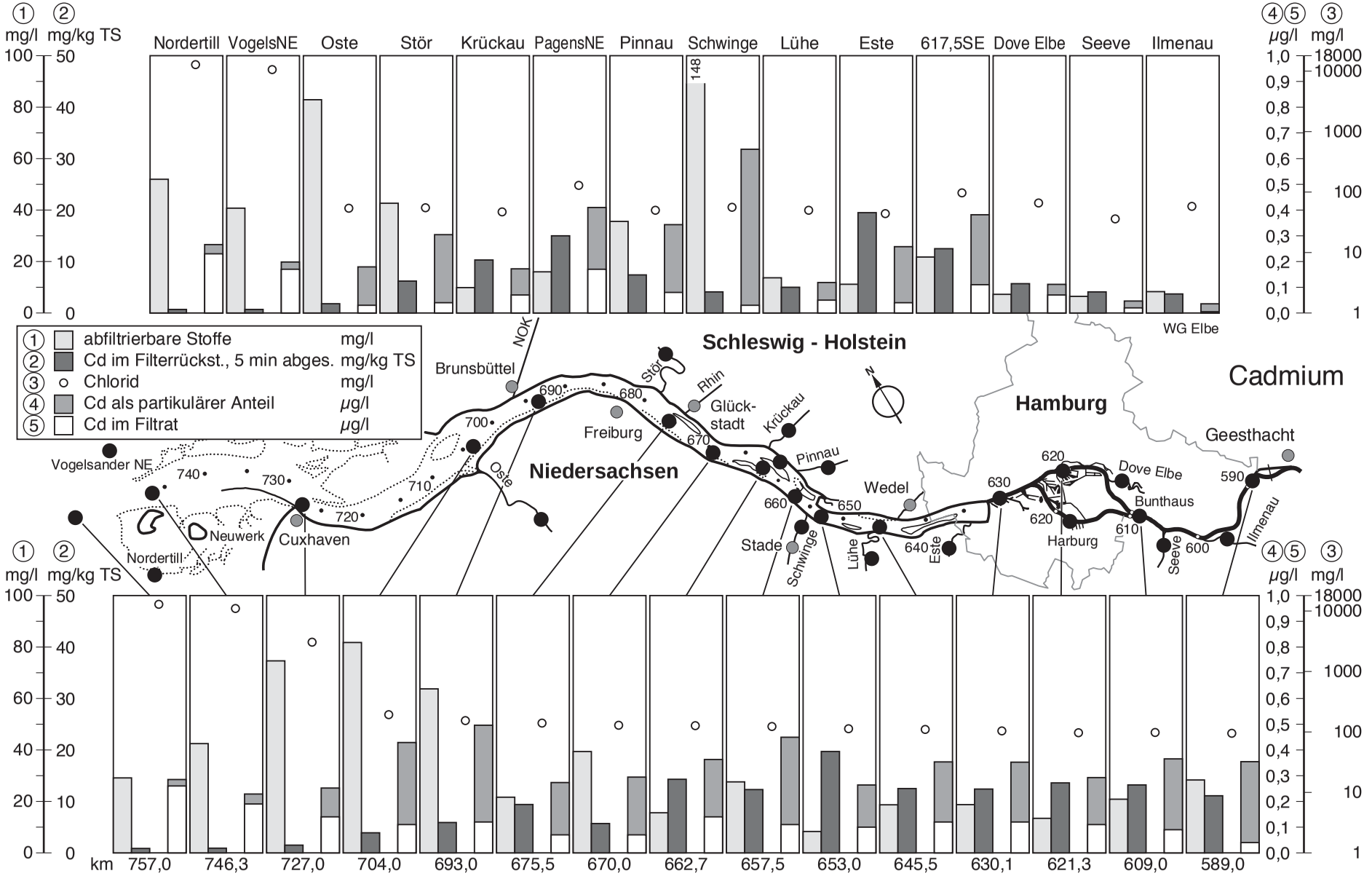


Abb. 53 Cadmium-Längsprofil der Elbe am 01.04.1987 (Qo=1870 m³/s)

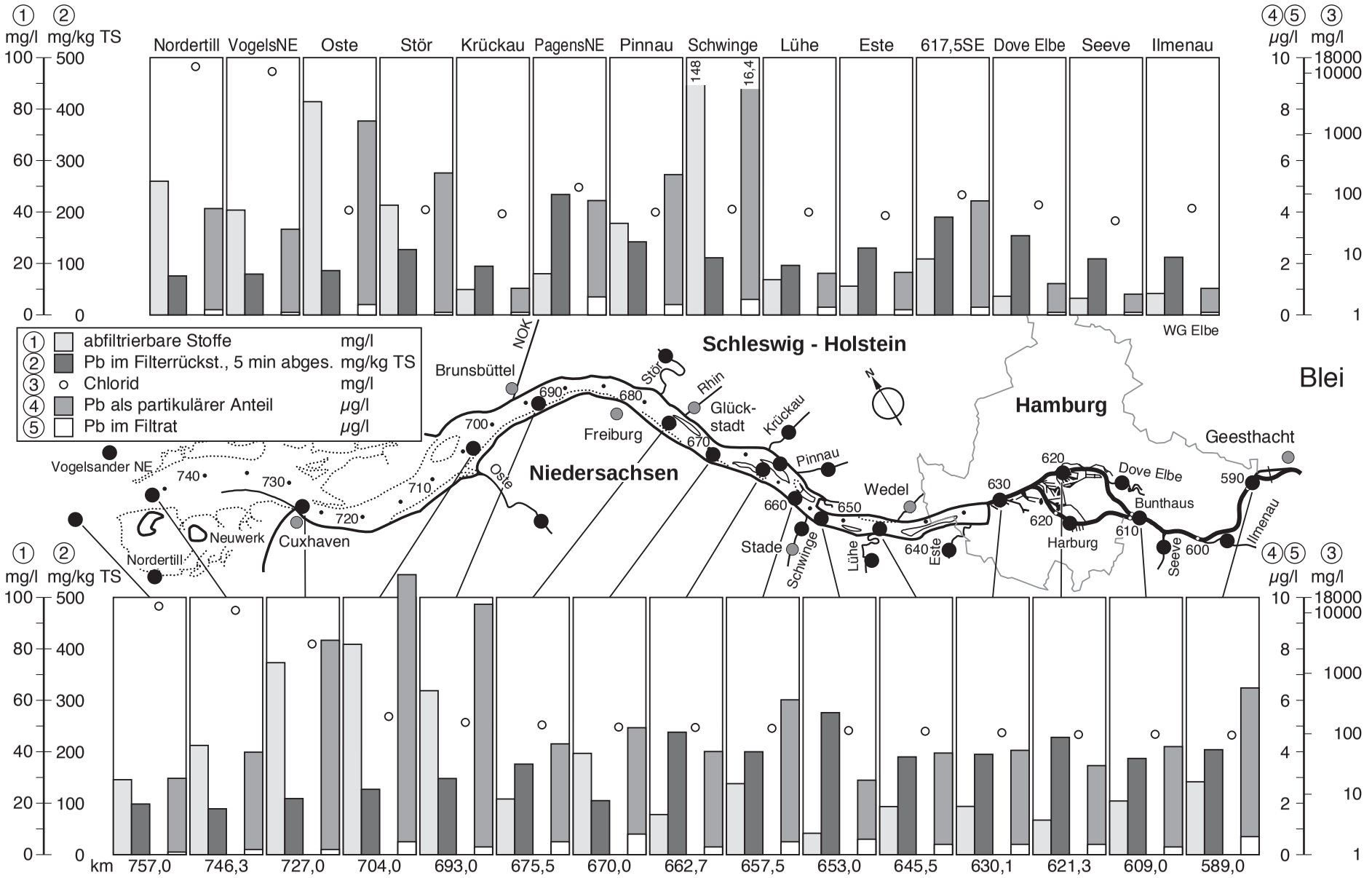


Abb. 54 Blei-Längsprofil der Elbe am 01.04.1987 (Qo=1870 m³/s)

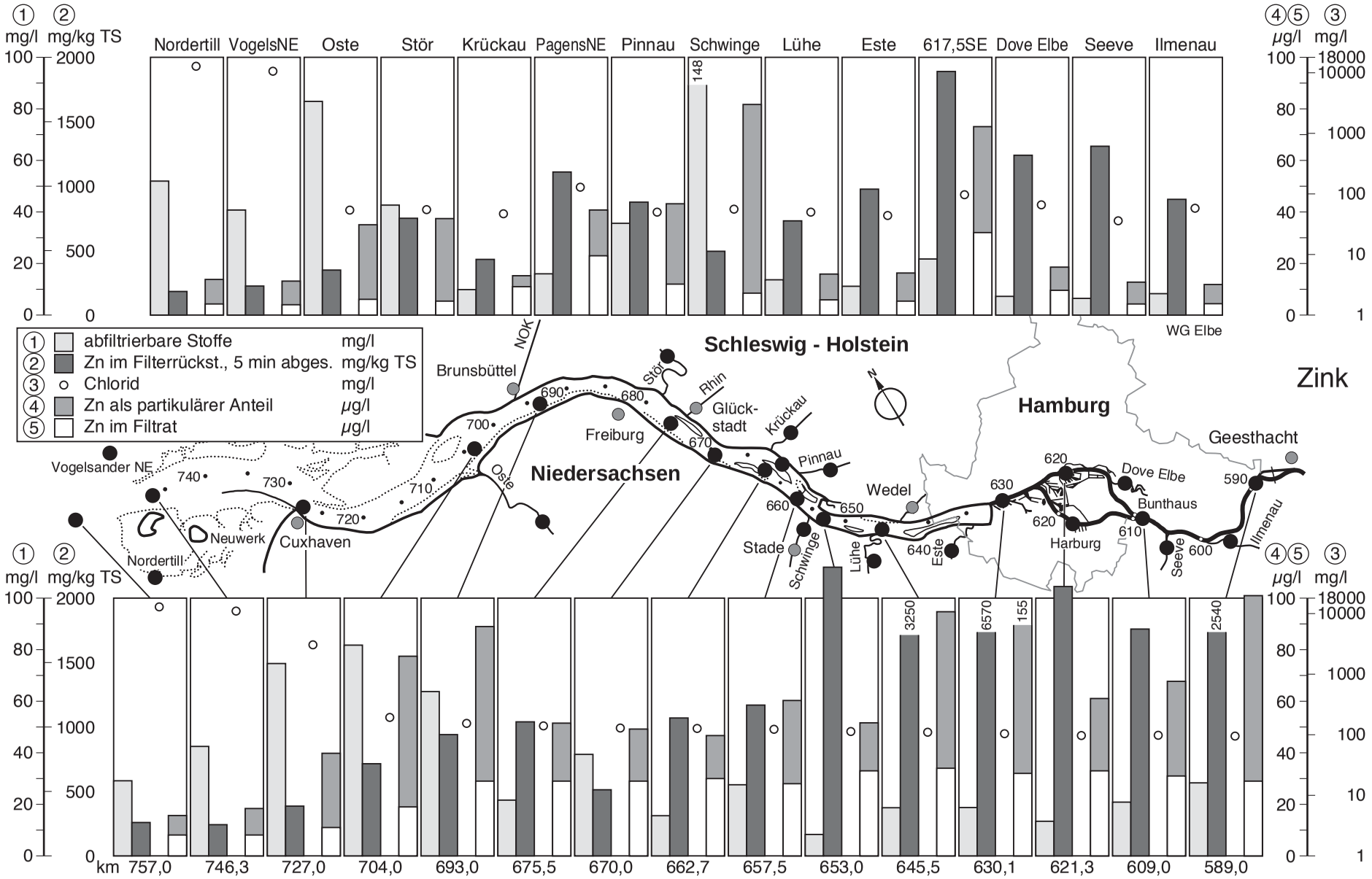


Abb. 55 Zink-Längsprofil der Elbe am 01.04.1987 (Qo=1870 m³/s)

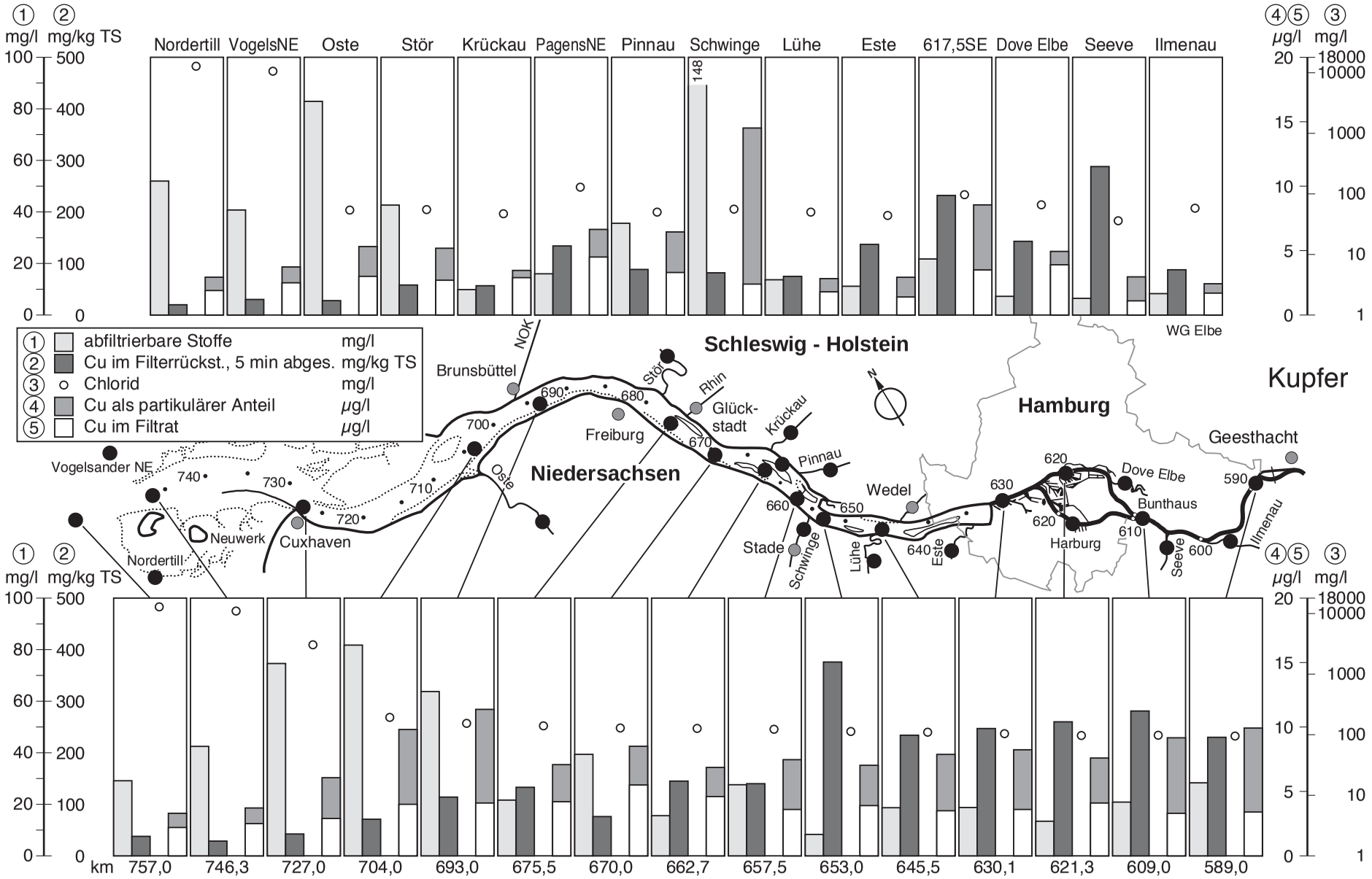


Abb. 56 Kupfer-Längsprofil der Elbe am 01.04.1987 (Qo=1870 m³/s)

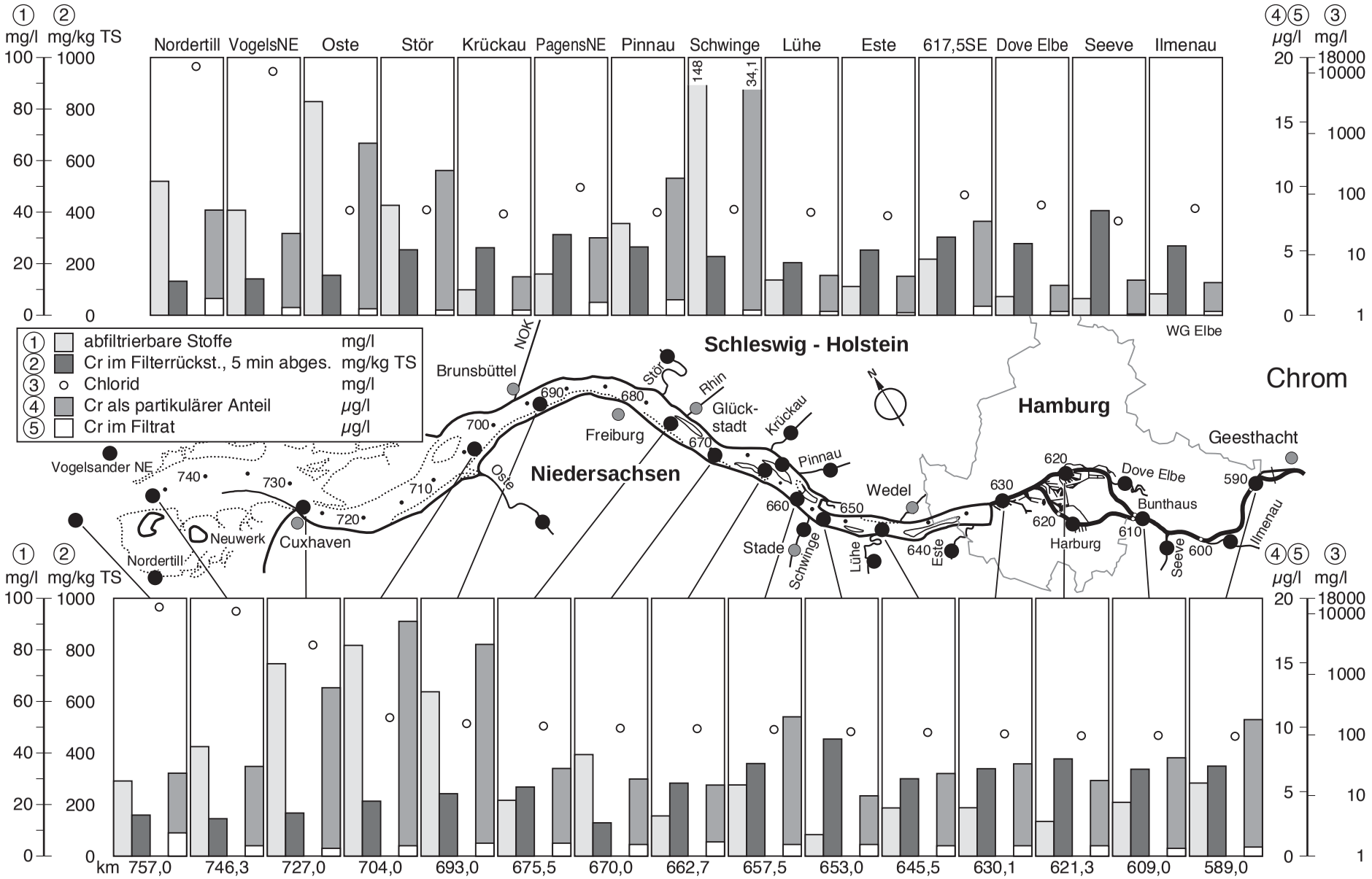


Abb. 57 Chrom-Längsprofil der Elbe am 01.04.1987 (Qo=1870 m³/s)

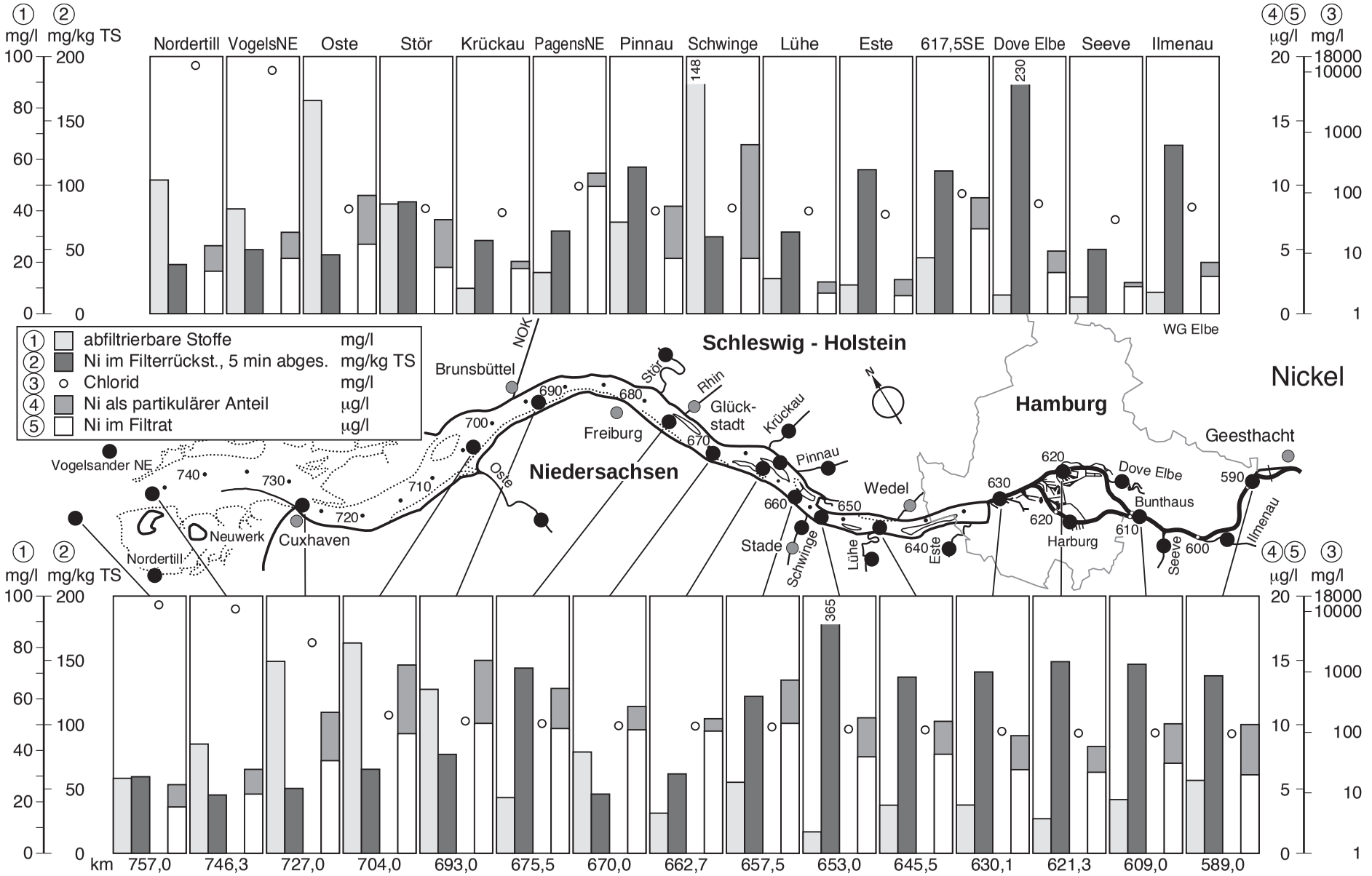


Abb. 58 Nickel-Längsprofil der Elbe am 01.04.1987 (Qo=1870 m³/s)

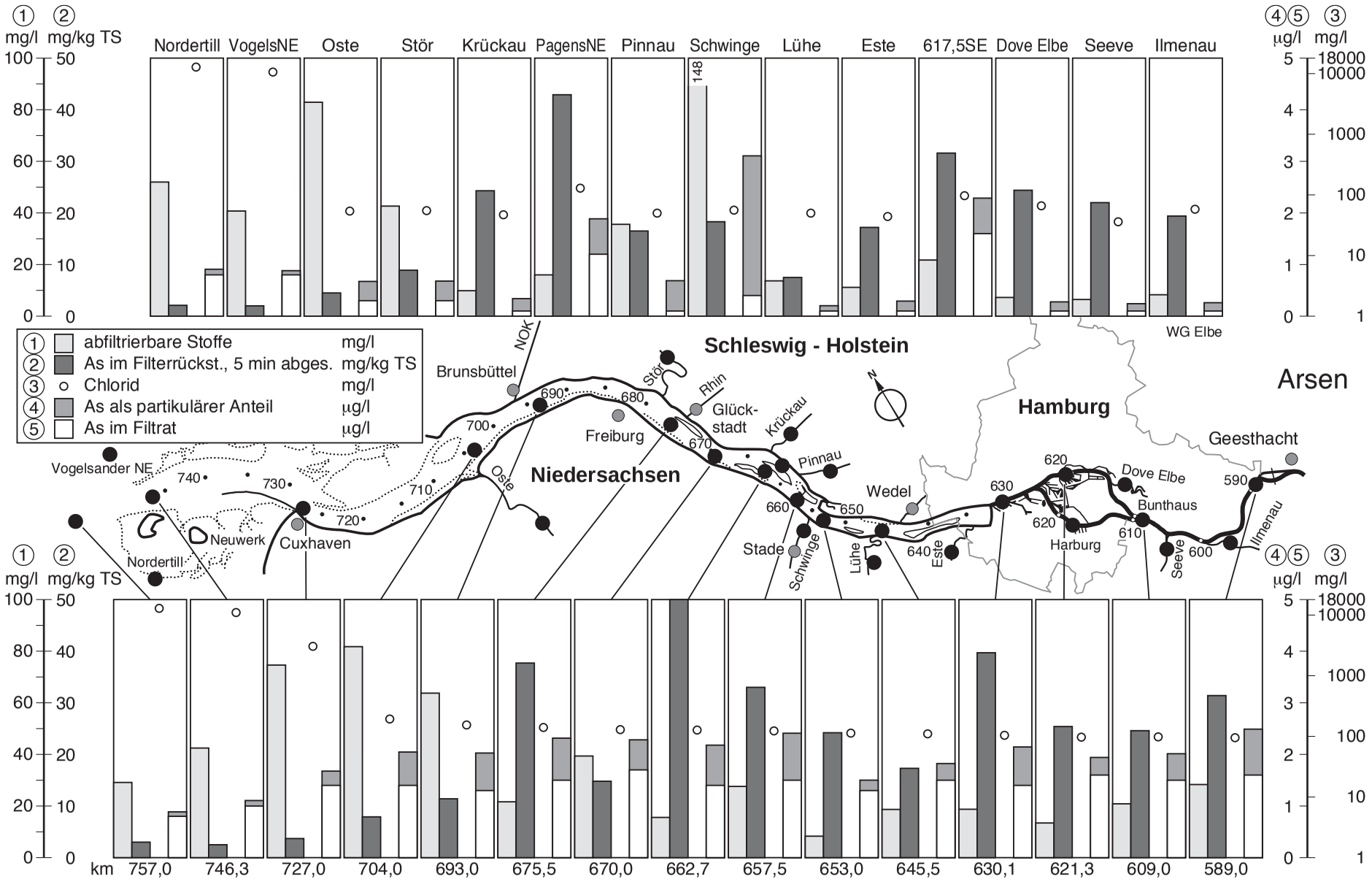


Abb. 59 Arsen-Längsprofil der Elbe am 01.04.1987 (Qo=1870 m³/s)

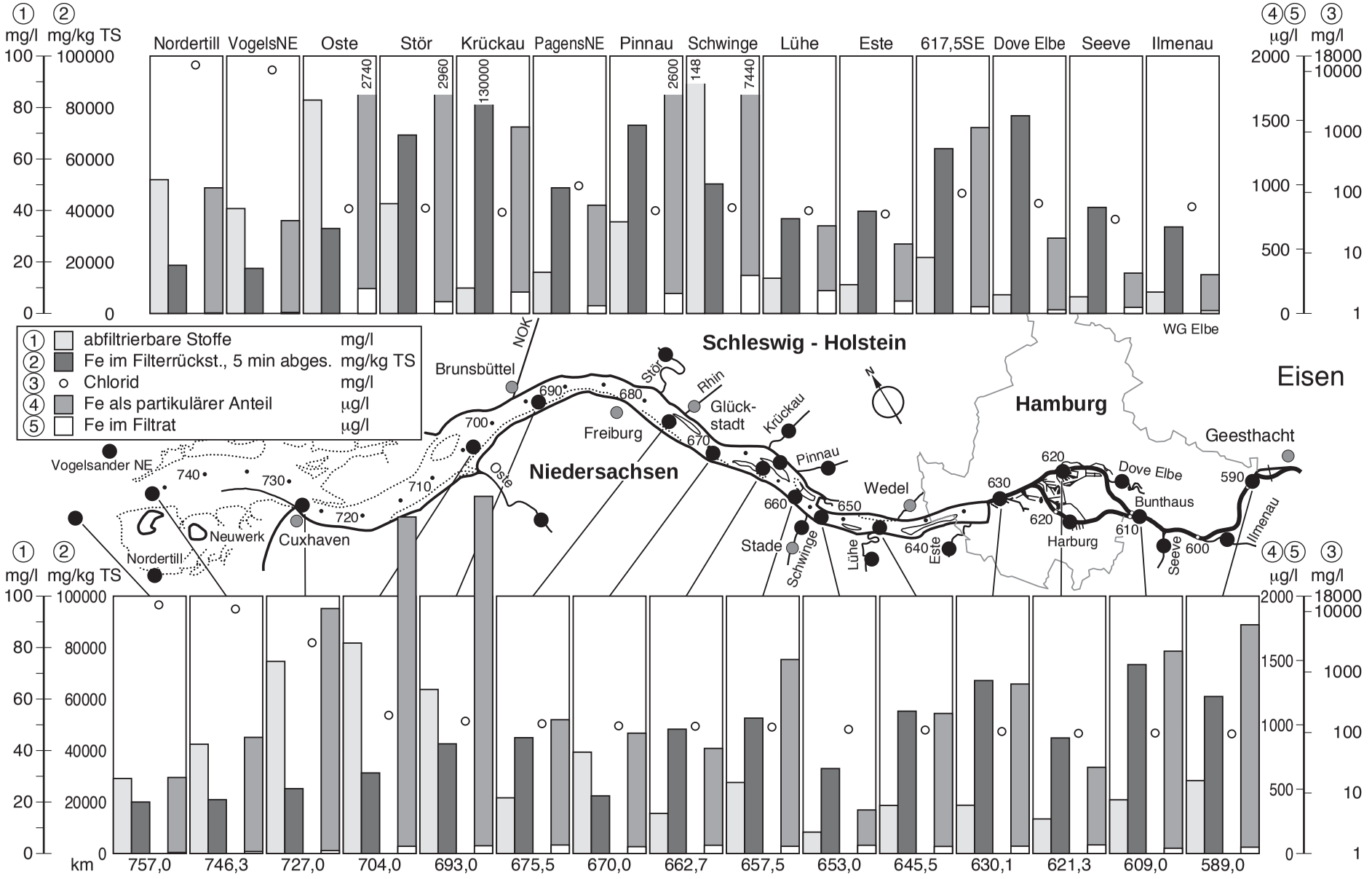


Abb. 60 Eisen-Längsprofil der Elbe am 01.04.1987 (Qo=1870 m³/s)

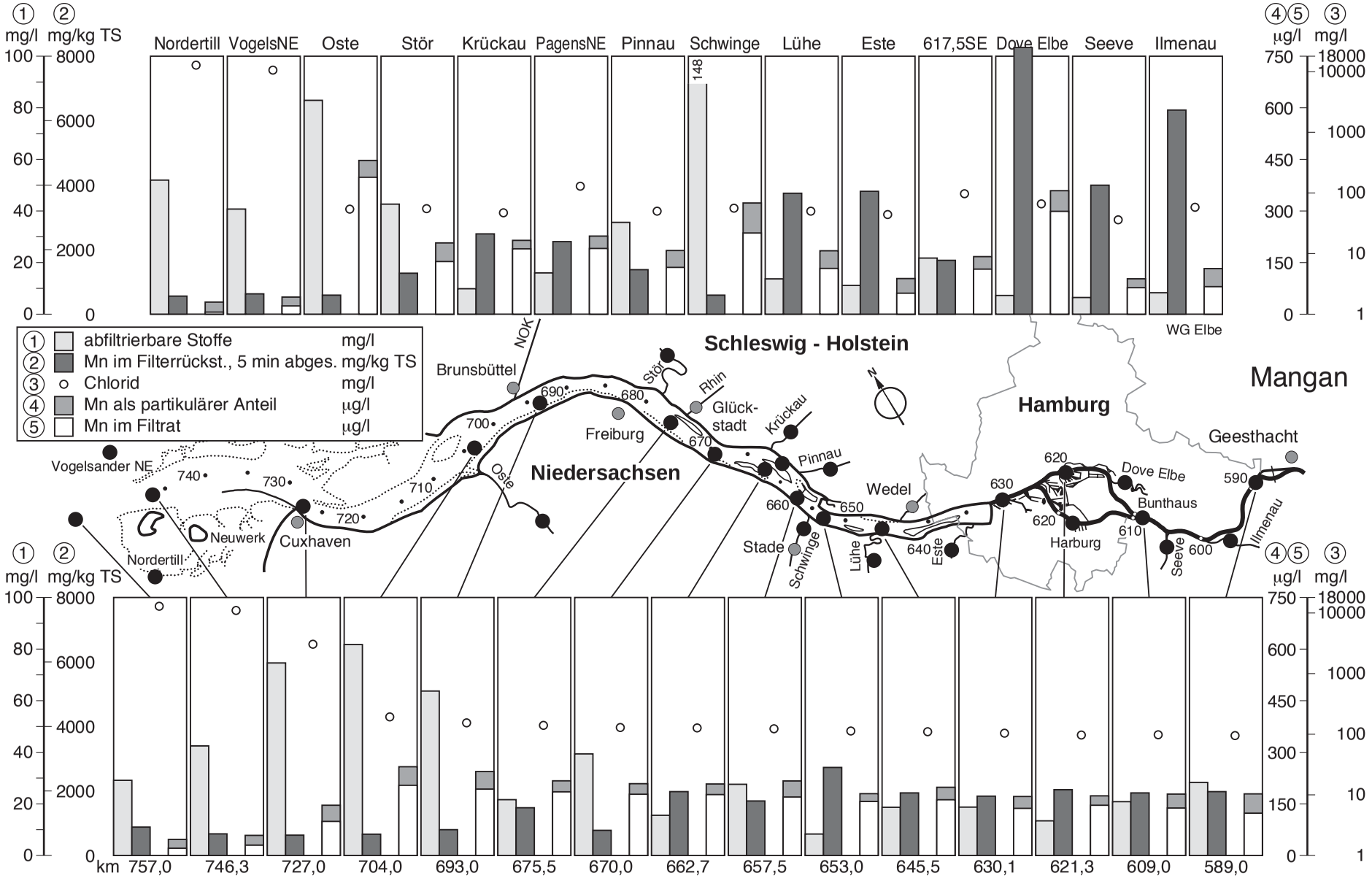


Abb. 61 Mangan-Längsprofil der Elbe am 01.04.1987 (Qo=1870 m³/s)

dung, wie bereits in Untersuchungen von IRMER, WEILER und WOLTER* aufgezeigt wurde. Die räumlichen Konzentrationsunterschiede innerhalb der Tideelbe sind im wesentlichen auf die unterschiedlichen, miterfaßten Schwebstoffgehalte zurückzuführen. Insbesondere ist der Anstieg der Schwermetallkonzentrationen als Gesamtgehalt im oberen Bereich der Trübungszone eindeutig nicht auf örtliche Belastungen aus dem Raum Brunsbüttel, sondern auf die dort natürlicherweise durch die hydrographischen Verhältnisse erhöhten Schwebstoffgehalte zurückzuführen. Bedeutende Einträge in dieser Region hätten sich durch erhöhte spezifische Beladungen an den Schwebstoffen zeigen müssen. Der im filtrierten Wasser gemessene gelöste Anteil zeigt für Cadmium einen deutlichen Anstieg im Elbmündungsbereich mit zunehmenden Salzgehalten. Dieser Anstieg ist auf eine verstärkte Remobilisierung von Cadmium (Überführung in Chlorokomplexe) zurückzuführen, wie es in der wissenschaftlichen Fachliteratur bereits durch zahlreiche Untersuchungen belegt ist.

In den Elbnebenflüssen Ilmenau und Seeve lagen die Schwebstoffgehalte und die Schwermetallkonzentrationen (z. B. Quecksilber, Cadmium und Blei) sowohl im Schwebstoff als auch in den Gesamtwasserproben in der für diese Flüsse typischen Größenordnung. In der Dove-Elbe wird häufig eine erhöhte spezifische Beladung im Schwebstoff festgestellt. Bei einer Bewertung dieser Befunde ist zu berücksichtigen, daß die Probenentnahme oberhalb der Tatenberger Schleuse in einem gestauten Bereich mit nahezu stehendem Wasser erfolgt. Hier werden also bei der Probenentnahme nur Feinstschwebstoffe und im Sommer bei Algenblüten überwiegend organische Masse (Biomasse) mit einem hohen Schwermetallbindungsvermögen erfaßt. Die Schwermetallbelastung, insbesondere der Sedimente in der Dove-Elbe, resultiert zu einem erheblichen Anteil aus eingeleitetem Rücklaufwasser von den nahegelegenen Spülfeldern.

Im Unterlauf der Schwinge wurden außergewöhnlich hohe Schwebstoffgehalte erfaßt. Die Schwinge führt nur einen sehr geringen Oberwasserabfluß, so daß der schiffbare Unterlauf bis Stade durch die mit der Flut einschwingenden Elbwasseranteile in erster Linie geprägt wird. Aufgrund der bei Ebbe nur sehr geringen Wassertiefen können bei der Probenentnahme leicht Schwebstoffe aufgewirbelt werden und zu derartig außergewöhnlichen Befunden führen. Die spezifische Beladung mit Schwermetallen zeigt jedoch in der Regel eine gegenüber dem Elbniveau geringere Belastung.

Für das System Pinnau, Krückau, Pagensander Nebenelbe ist wiederum die im vorangegangenen Abschnitt (Längsprofil 19. Februar 1987) erläuterte Abhängigkeit zu erkennen. Auch hier sind in erster Linie die spezifischen Beladungen und nicht die durch den zufällig miterfaßten Schwebstoffgehalt stark beeinflußten Gesamtkonzentrationen in der Wasserprobe für die Beurteilung heranzuziehen. Dies gilt auch für die Elbnebenflüsse Oste und Stör. In der Stör wurden zwar im Vergleich zur Oste nahezu gleich hohe Schwermetallkonzentrationen in der Wasserprobe bestimmt; ein Blick auf die spezifische Beladung zeigt jedoch, daß die Oste eine geringere Schwermetallbelastung aufweist als die Stör.

* IRMER U., WEILER K., WOLTER K., (1986) Untersuchungen zur Schwermetall- und Schwebstoffdynamik im Elbeästuar - Mögliche Folgerungen für die Überwachungspraxis, VOM WASSER, 67. Band S. 111-123.

Längsprofil 14. Mai 1987

Die bei dieser Längsprofiluntersuchung erfaßte Schwebstoffverteilung über das Elbeästuar zeigt noch deutlich die Auswirkungen der vorangegangenen Hochwasserabflüsse. So hat insbesondere durch das langanhaltende, sehr hohe Oberwasser im April eine weitestgehende Ausspülung der Trübungszone aus der Elbmündung in die Nordsee stattgefunden. In dieser Phase ist nur noch eine schwach ausgeprägte Trübungswolke mit außerordentlich niedrigen Spitzenwerten in der Größenordnung von 45 mg/l Schwebstoff zu erkennen.

Die Chloridwerte zeigen, daß die Brackwasserzone bis in den Bereich Cuxhaven stromab verschoben ist. Bei mittleren Oberwasserbedingungen liegt die obere Grenze der Brackwasserzone in Höhe Glückstadt.

Die spezifische Beladung der abfiltrierten Schwebstoffe zeigt im Unterelbe-Längsprofil den bereits in den vorigen Abschnitten erläuterten Verlauf. Die höchsten Belastungen wurden im limnischen Elbabschnitt Geesthacht bis Glückstadt festgestellt. Auffallend ist, daß die Abnahme der spezifischen Beladung seewärts durch einen flacheren Gradienten gekennzeichnet ist und daß gegenüber den Vormonaten im Elbmündungsbereich Cuxhaven und seewärts vergleichsweise höhere spezifische Beladungen gemessen wurden. Dieser Befund ist auf die Auswirkungen der erhöhten Abflüsse zurückzuführen. Durch die erhöhten Abflüsse erfolgt ein schnellerer resultierender, seewärtiger Transport, so daß höher belastete Schwebstoffe aus dem oberen Einzugsgebiet in dieser Phase bis in die Elbmündung durchtransportiert werden und gleichzeitig aufgrund des verstärkten ebbstrom-orientierten Transportes die Einmischung von geringer belasteten Schwebstoffen aus dem marinen Milieu in verringertem Ausmaß stattfindet. Die innerhalb des Längsprofils festgestellten Unterschiede in der Schwermetall-Gesamtkonzentration des Elbwassers sind in erster Linie auf die unterschiedlichen Schwebstoffgehalte und unterschiedlichen Beladungen zurückzuführen. Dies gilt insbesondere für die Schwermetalle, die zu einem hohen Prozentsatz in schwebstoffgebundener Form vorliegen, wie z. B. Quecksilber, Blei und Eisen. Das Schwermetall Nickel liegt wiederum überwiegend in gelöster Form vor. Die Befunde zeigen eine recht gleichmäßige Verteilung über das Längsprofil, wobei die Konzentrationsabnahme im Elbmündungsbereich in Abhängigkeit des steigenden Salzgehaltes auf die Verdünnung durch das eingemischte Nordseewasser zurückzuführen ist.

Die Befunde für die Elbnebenflüsse zeigen eine ähnliche Verteilungsstruktur wie bei den vorangegangenen Untersuchungen. Auffallend sind die erhöhten Quecksilberwerte in der Dove-Elbe und Este. Für das System Pinnau, Krückau und Pagensander Nebenelbe besteht wiederum die bereits erläuterte Abhängigkeit. Die hohen Schwermetallkonzentrationen im Wasser von Schwinge, Krückau und zum Teil der Oste sind jeweils auf die in diesen Proben erhöhten Schwebstoffgehalte zurückzuführen. Die spezifische Beladung der Schwebstoffe zeigt für die für diese Flüsse typische Größenordnung.

Längsprofil 13. August 1987

Die sehr hohen Oberwasserabflüsse während des gesamten Frühjahrs 1987 waren bis zum August erst auf 712 m^3/s abgesunken. Dieser Oberwasserabfluß lag damit noch um rd. 200 m^3/s über dem langjährigen Mittelwert für den Monat August. Die obere Brackwassergrenze hatte sich in dieser Phase erst stromauf bis in den Bereich Brunsbüttel vorgeschoben. Die Trübungswolke lag mit ihrem Schwerpunkt im Bereich Brunsbüttel-Ostemündung und wies mit ihren maximalen Schwebstoffkonzentrationen noch nicht die für die Spätsommer-/ Herbstsituation typische Konzentration auf.

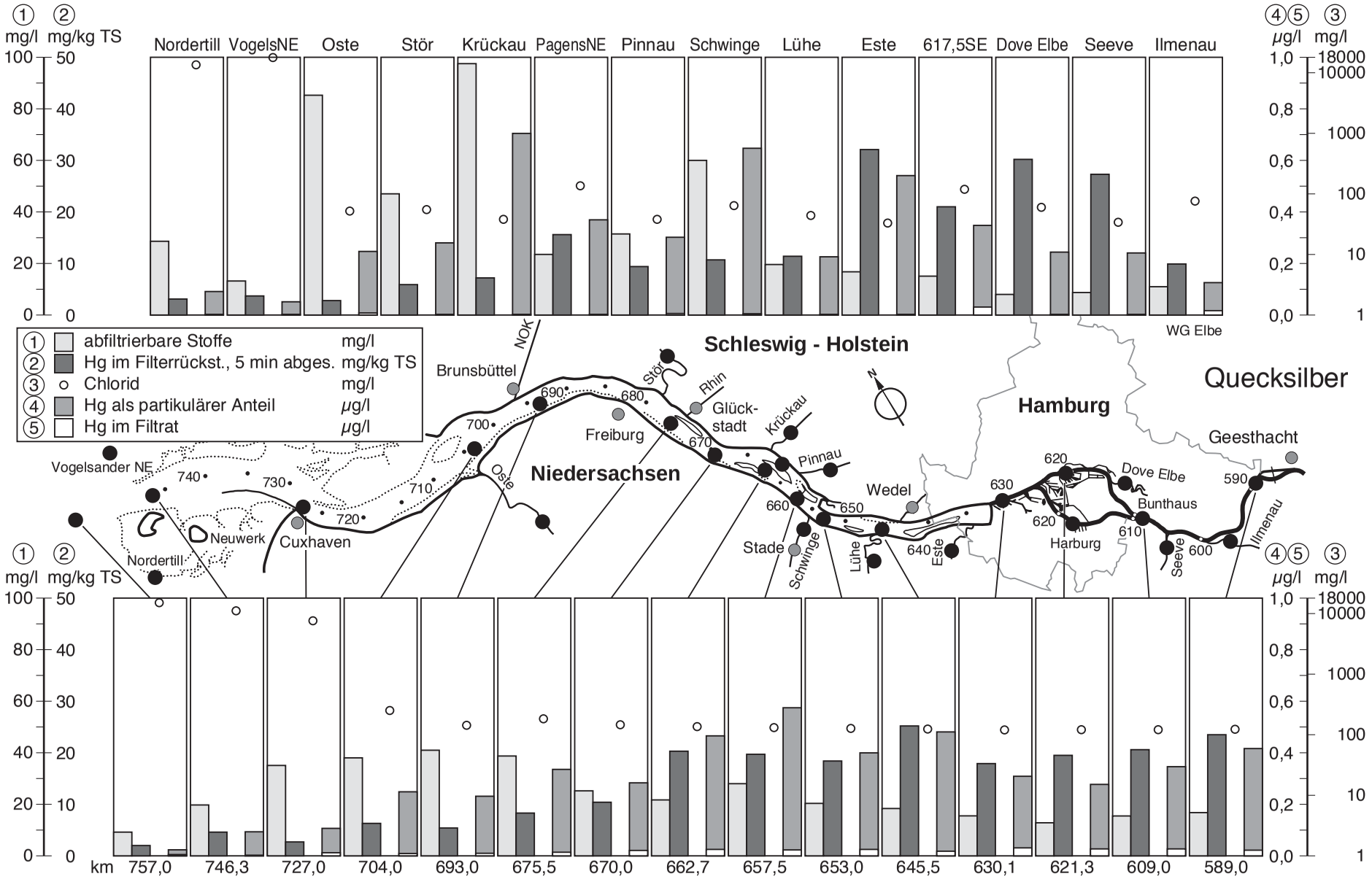


Abb. 62 Quecksilber-Längsprofil der Elbe am 14.05.1987 (Qo=1290 m³/s)

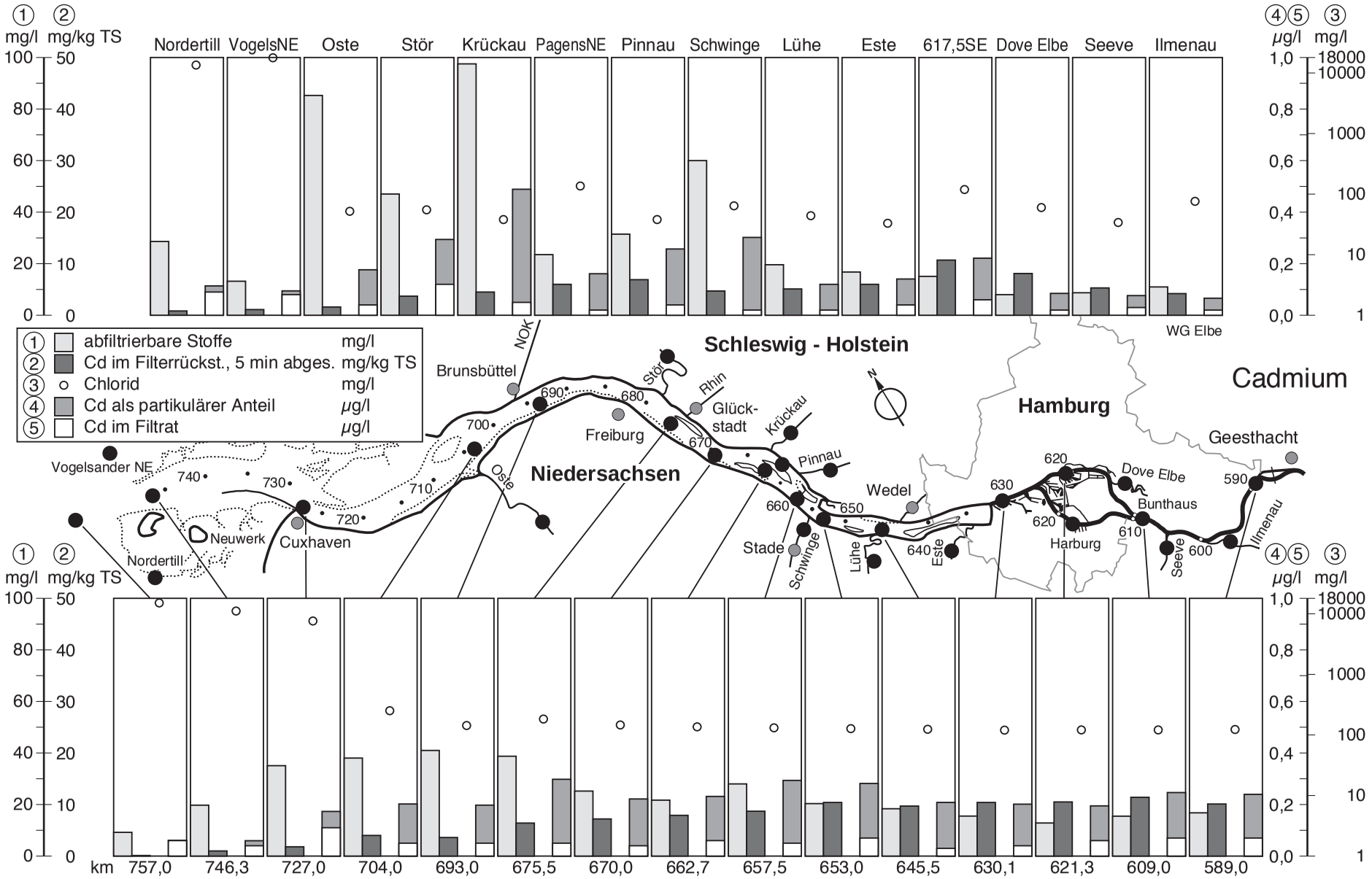


Abb. 63 Cadmium-Längsprofil der Elbe am 14.05.1987 (Qo=1290 m³/s)

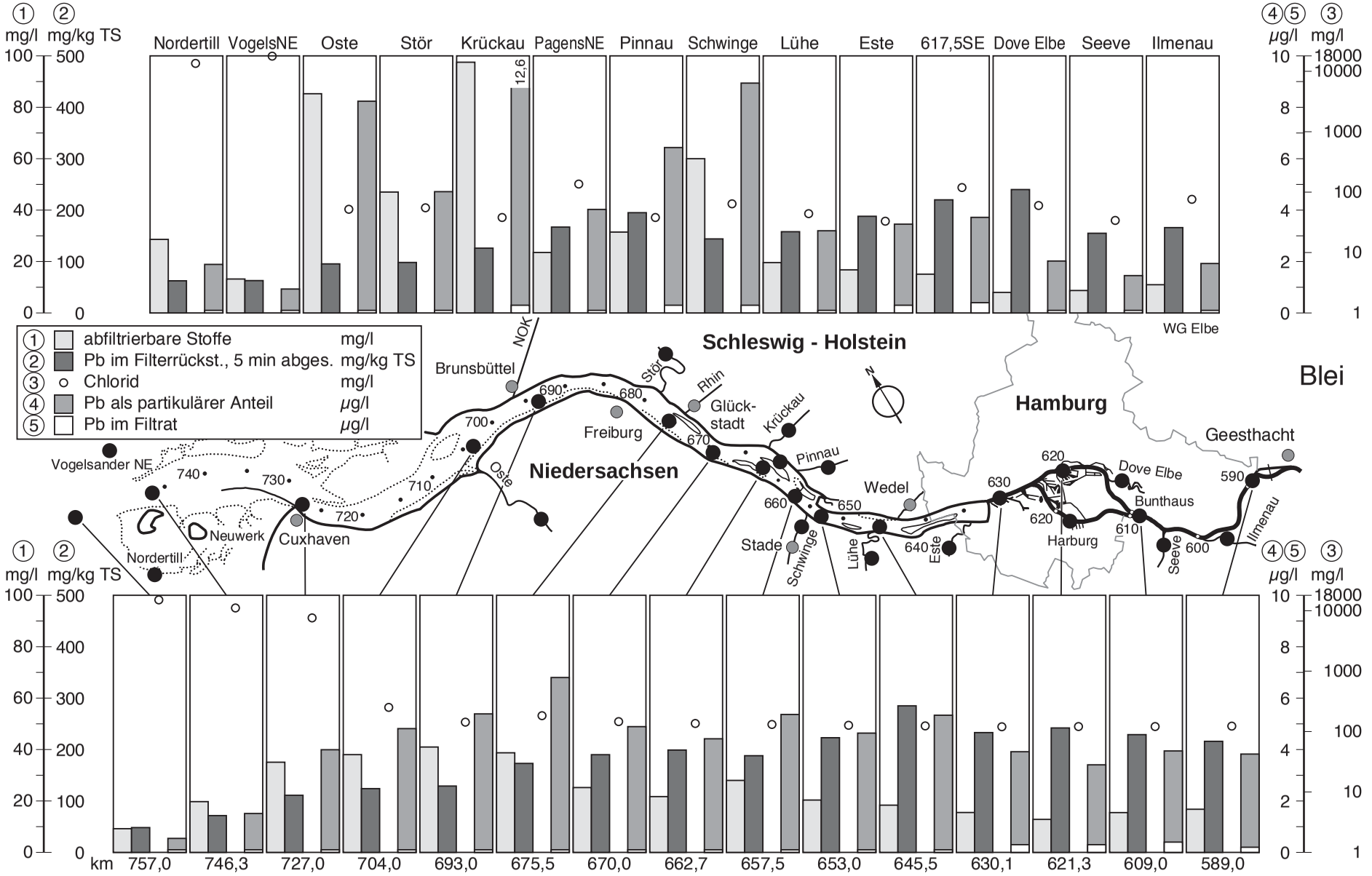


Abb. 64 Blei-Längsprofil der Elbe am 14.05.1987 (Qo=1290 m³/s)

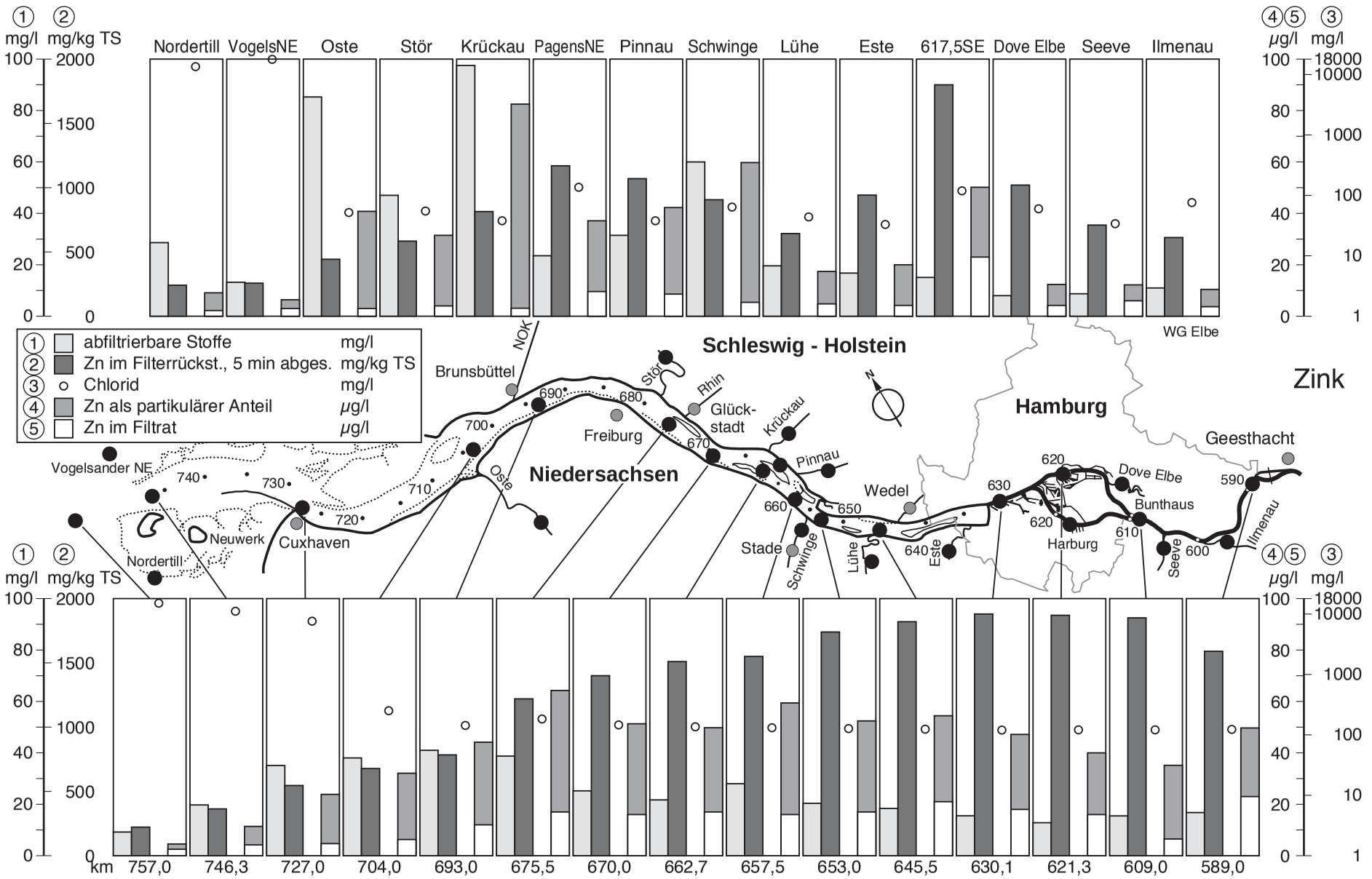


Abb. 65 Zink-Längsprofil der Elbe am 14.05.1987 (Qo=1290 m³/s)

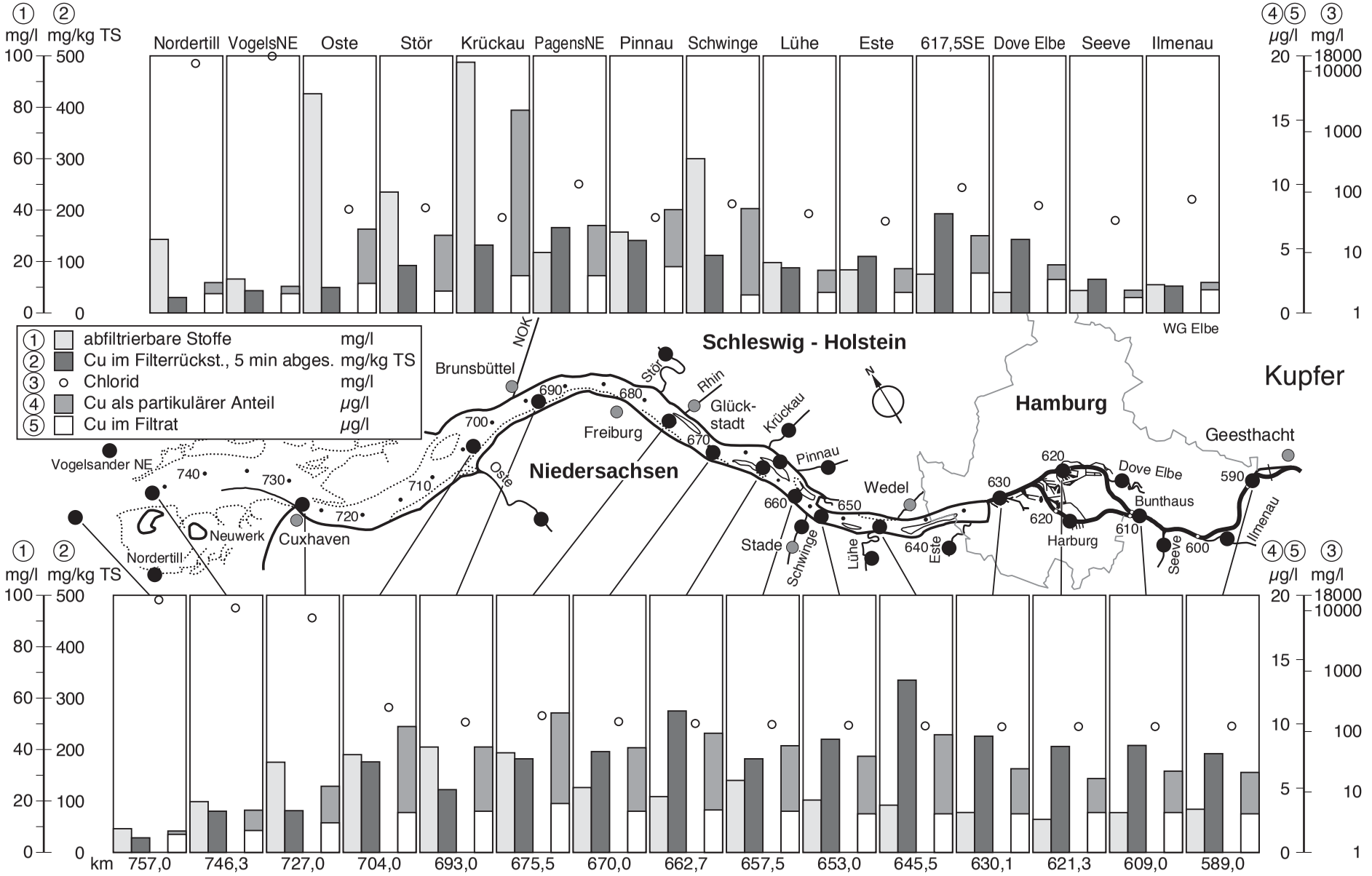


Abb. 66 Kupfer-Längsprofil der Elbe am 14.05.1987 (Qo=1290 m³/s)

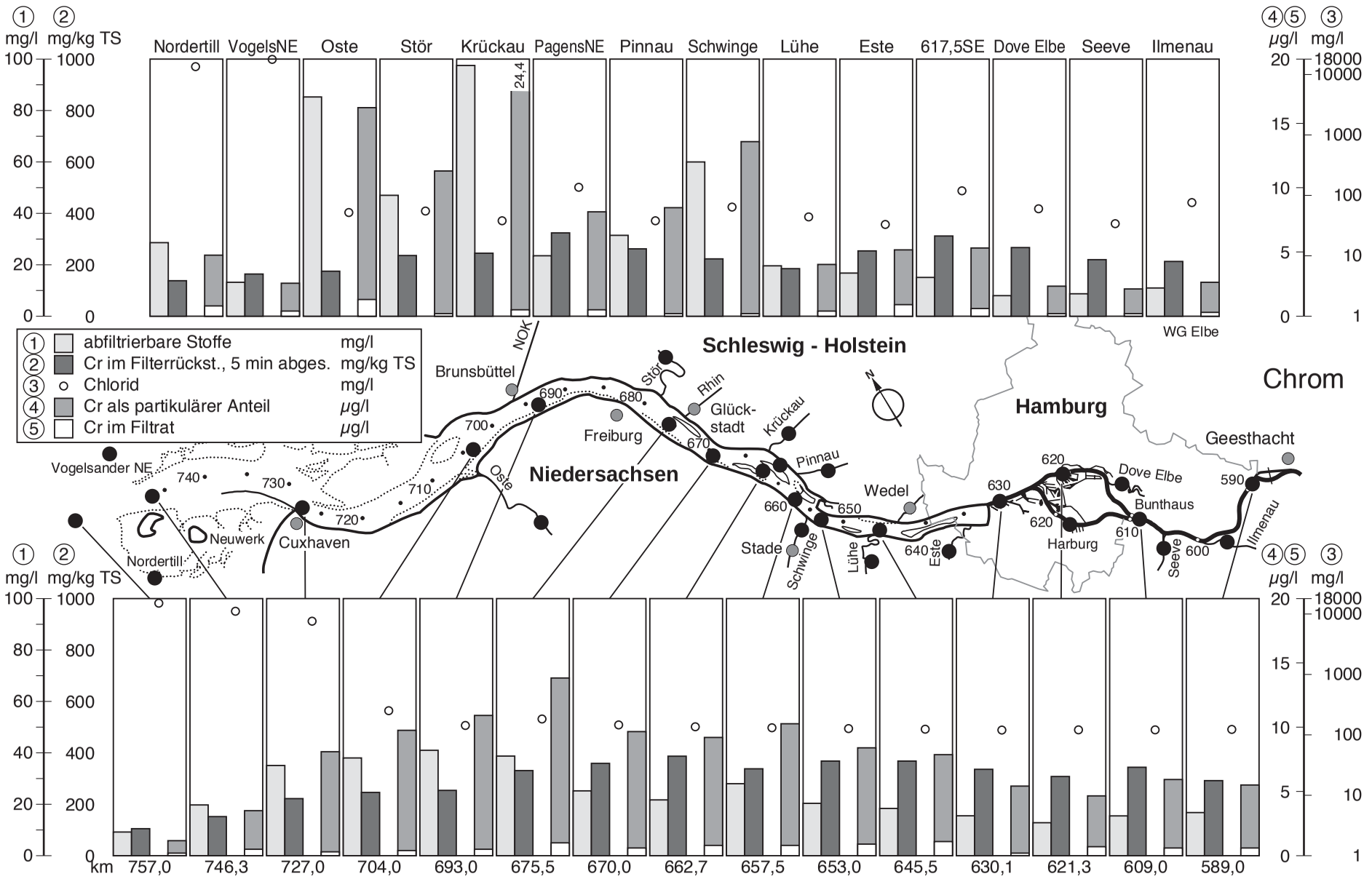


Abb. 67 Chrom-Längsprofil der Elbe am 14.05.1987 (Qo=1290 m³/s)

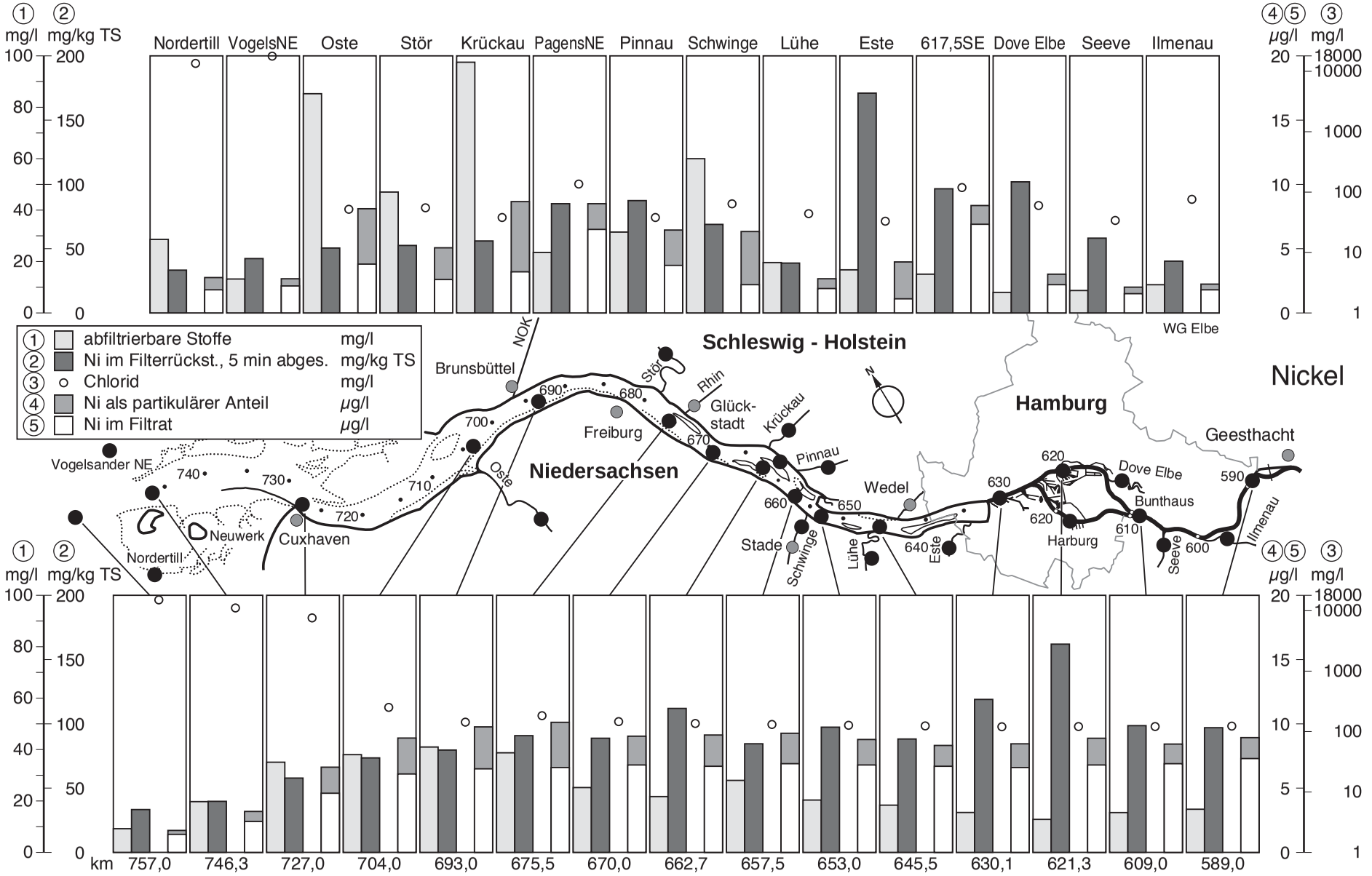


Abb. 64 Nickel-Längsprofil der Elbe am 14.05.1987 (Qo=1290 m³/s)

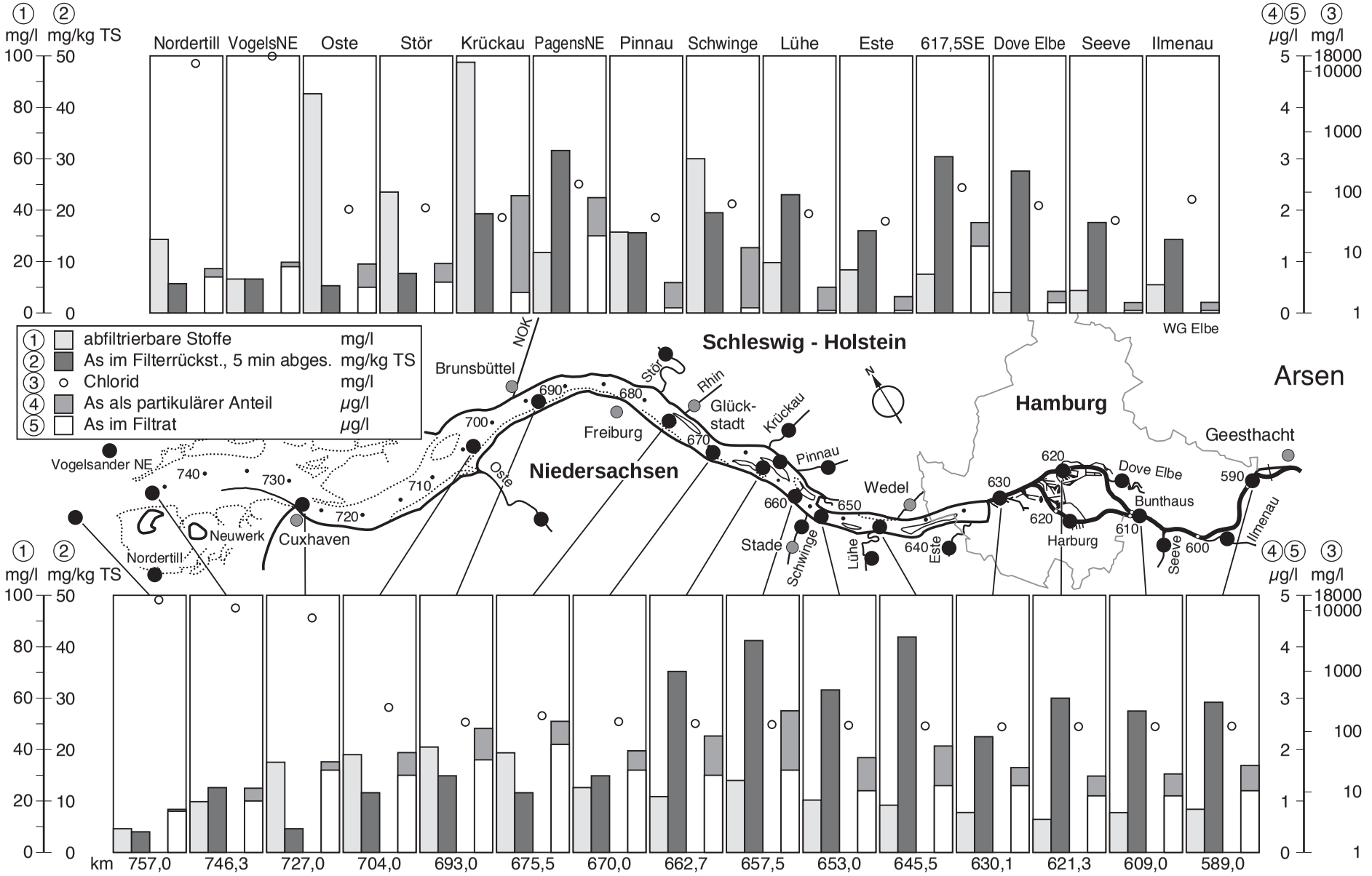


Abb. 69 Arsen-Längsprofil der Elbe am 14.05.1987 (Qo=1290 m³/s)

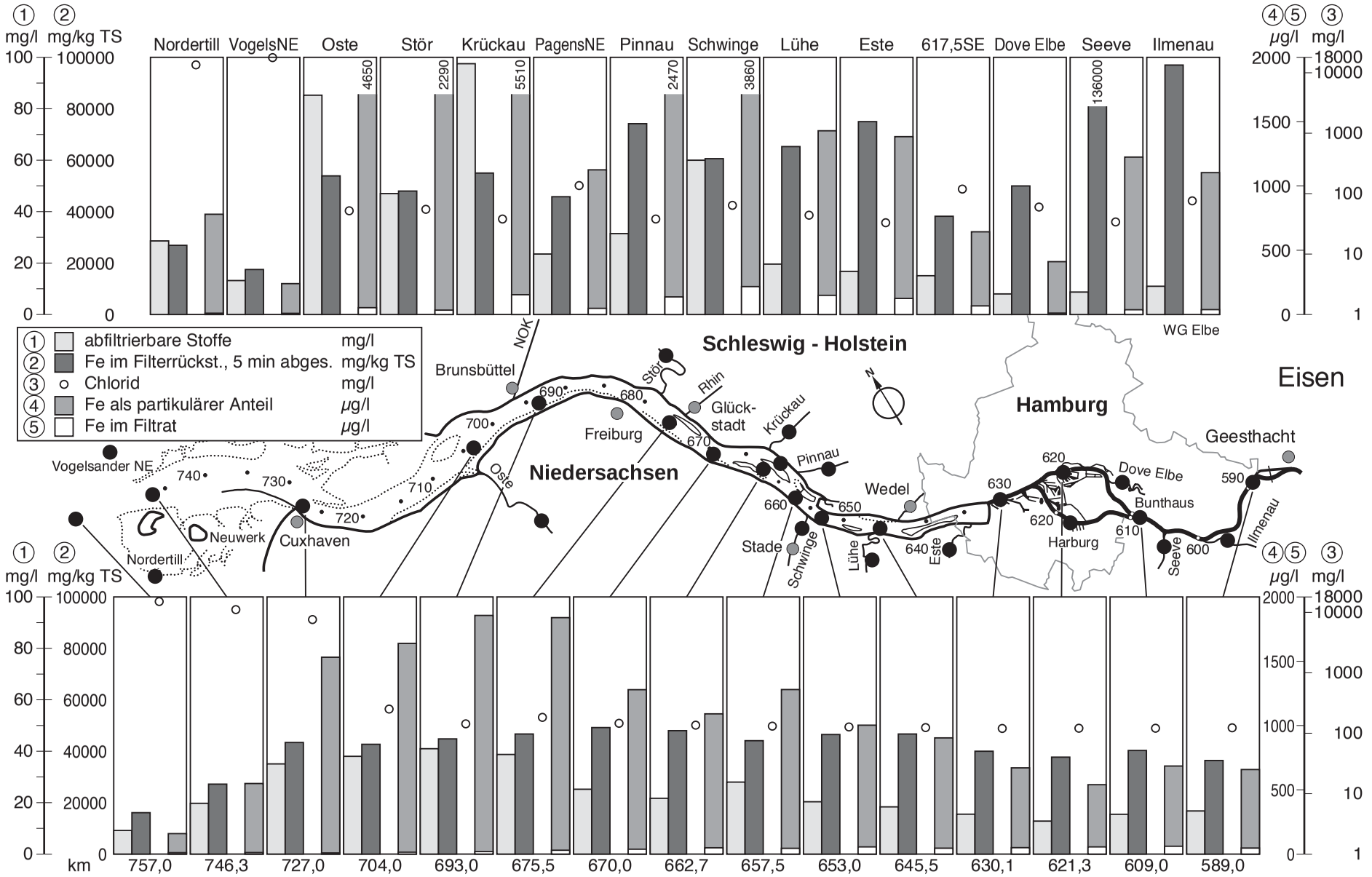


Abb. 70 Eisen-Längsprofil der Elbe am 14.05.1987 (Qo=1290 m³/s)

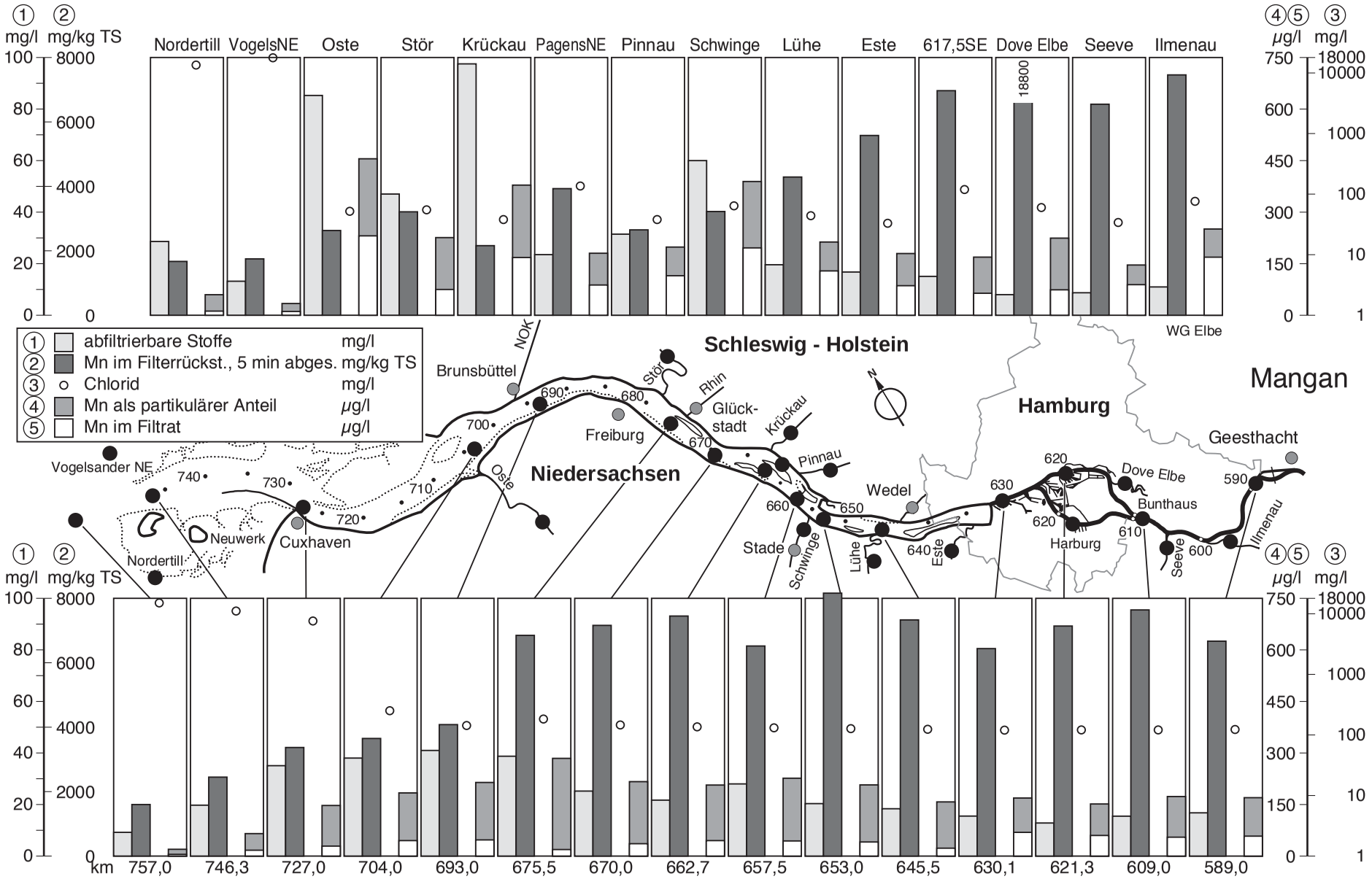


Abb. 71 Mangan-Längsprofil der Elbe am 14.05.1987 (Qo=1290 m³/s)

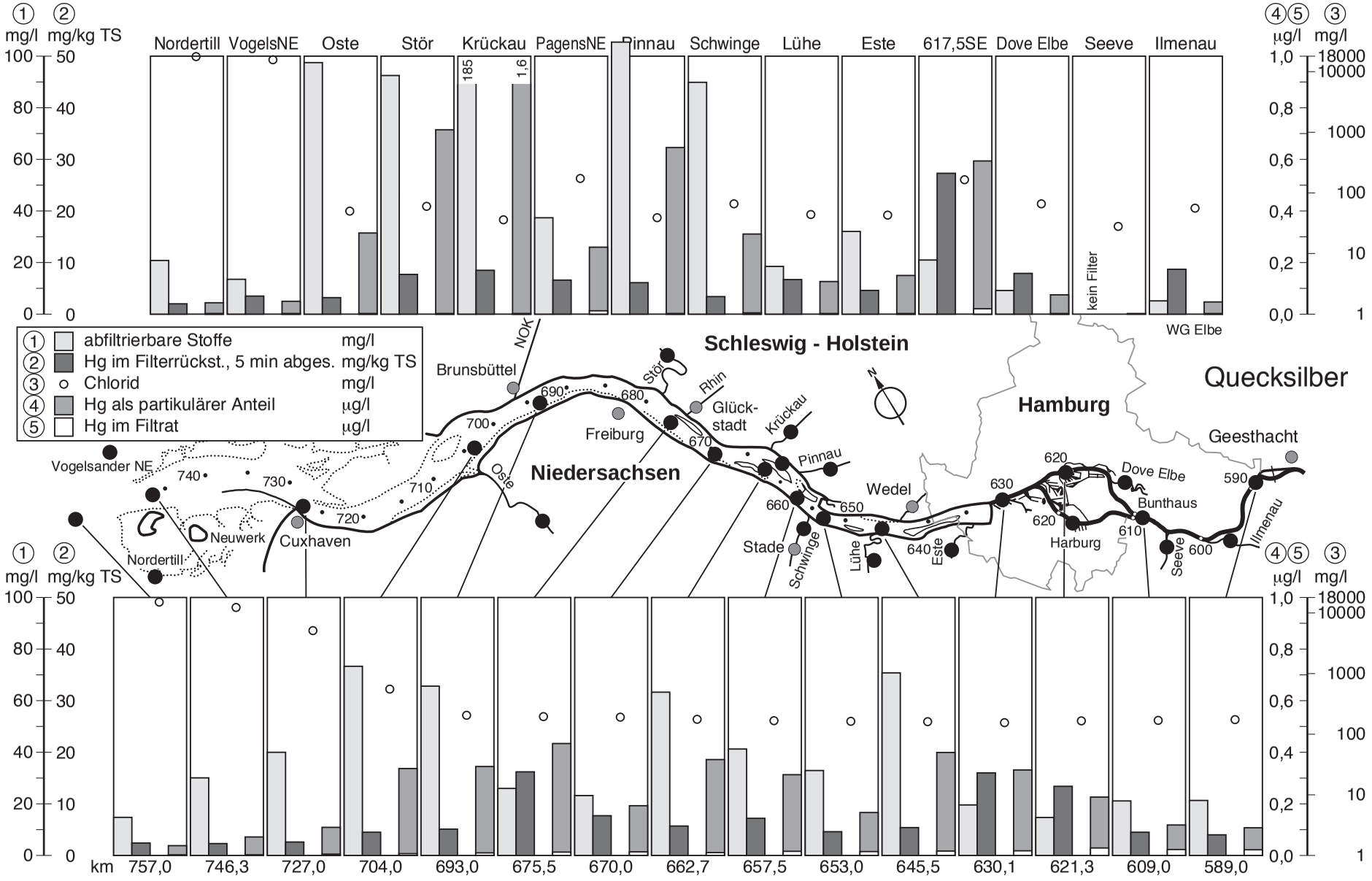


Abb. 72 Quecksilber-Längsprofil der Elbe am 13.08.1987 (Qo=712 m³/s)

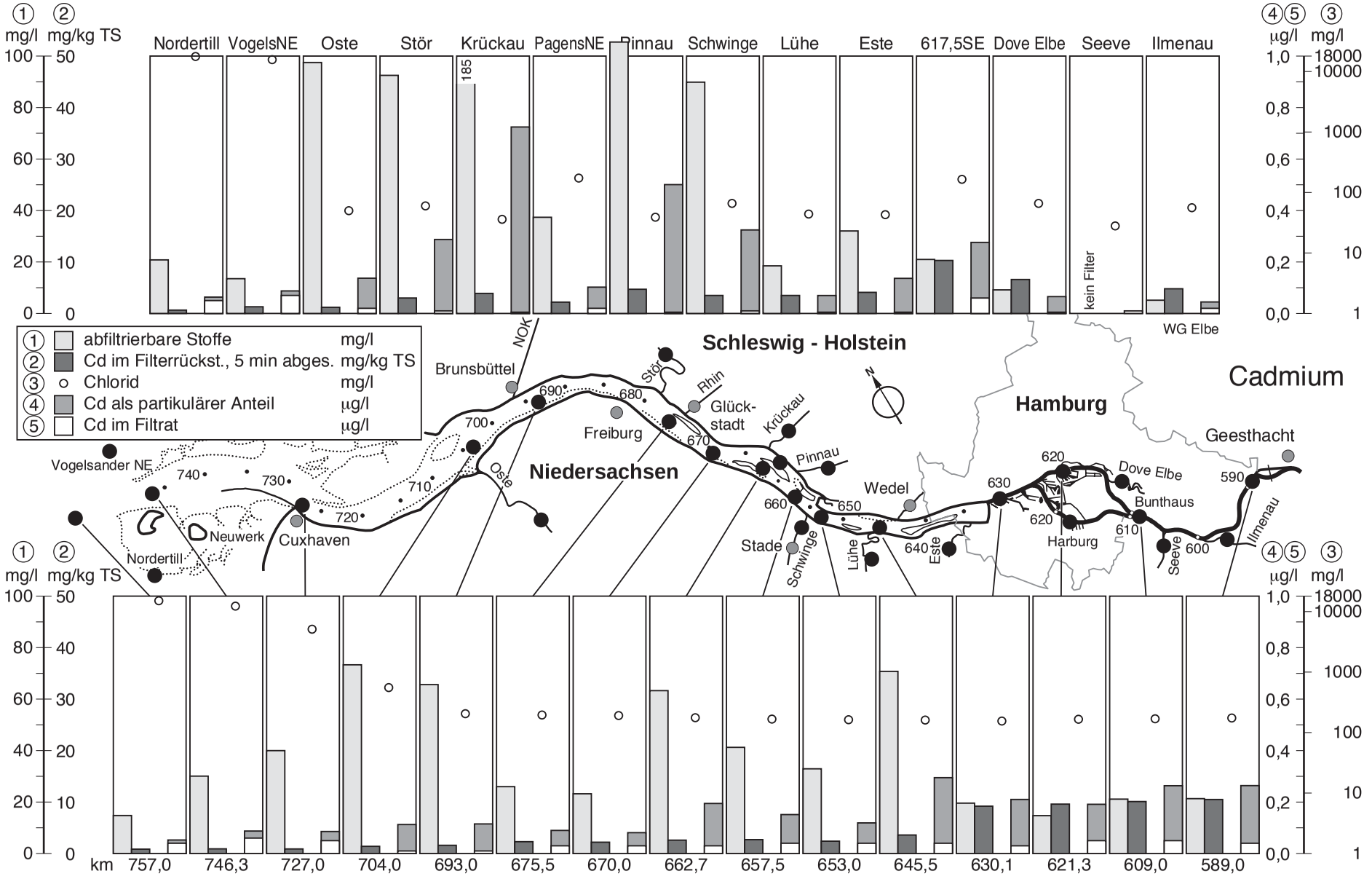


Abb. 73 Cadmium-Längsprofil der Elbe am 13.08.1987 (Qo=712 m³/s)

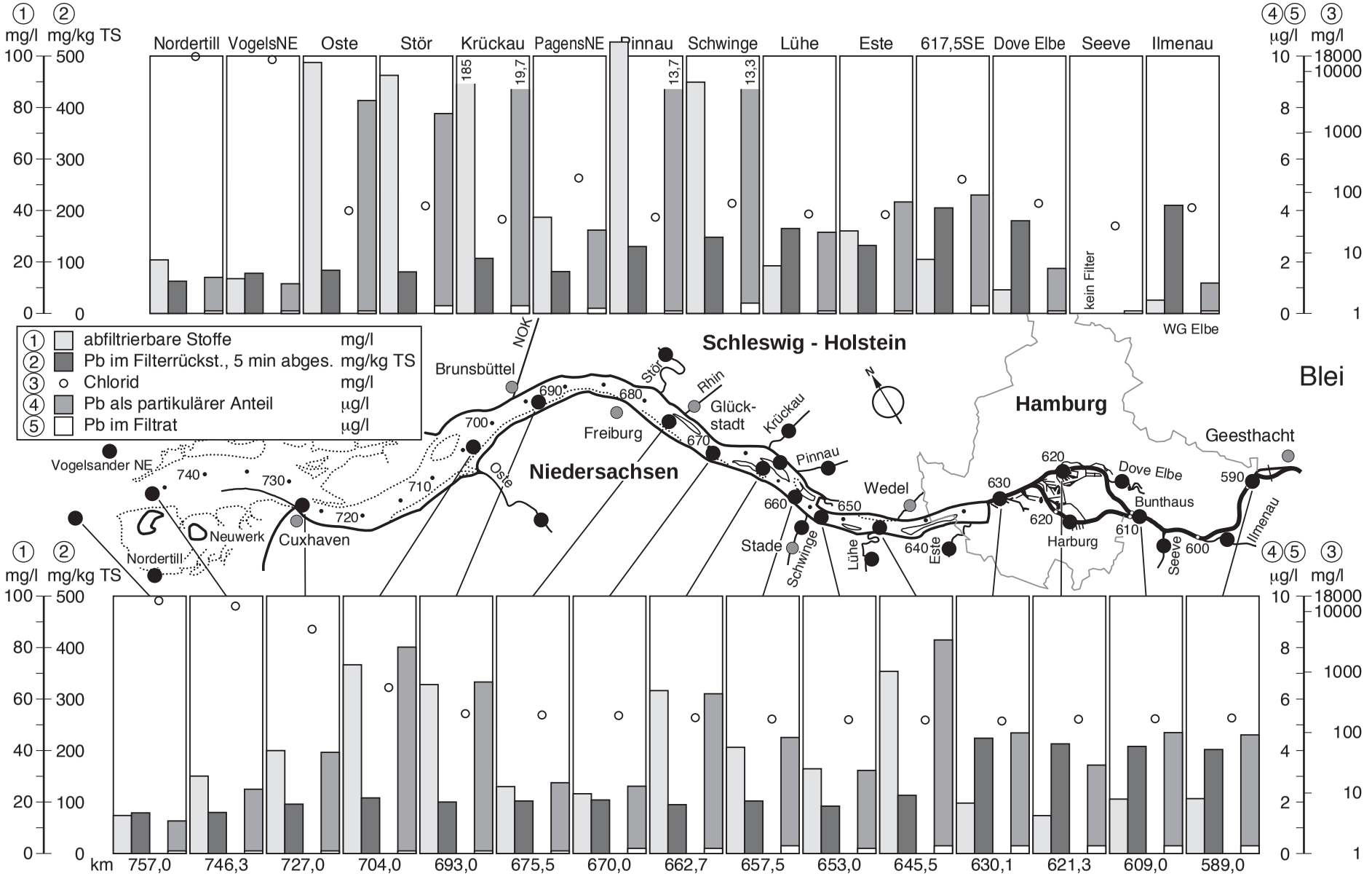


Abb. 74 Blei-Längsprofil der Elbe am 13.08.1987 (Qo=712 m³/s)

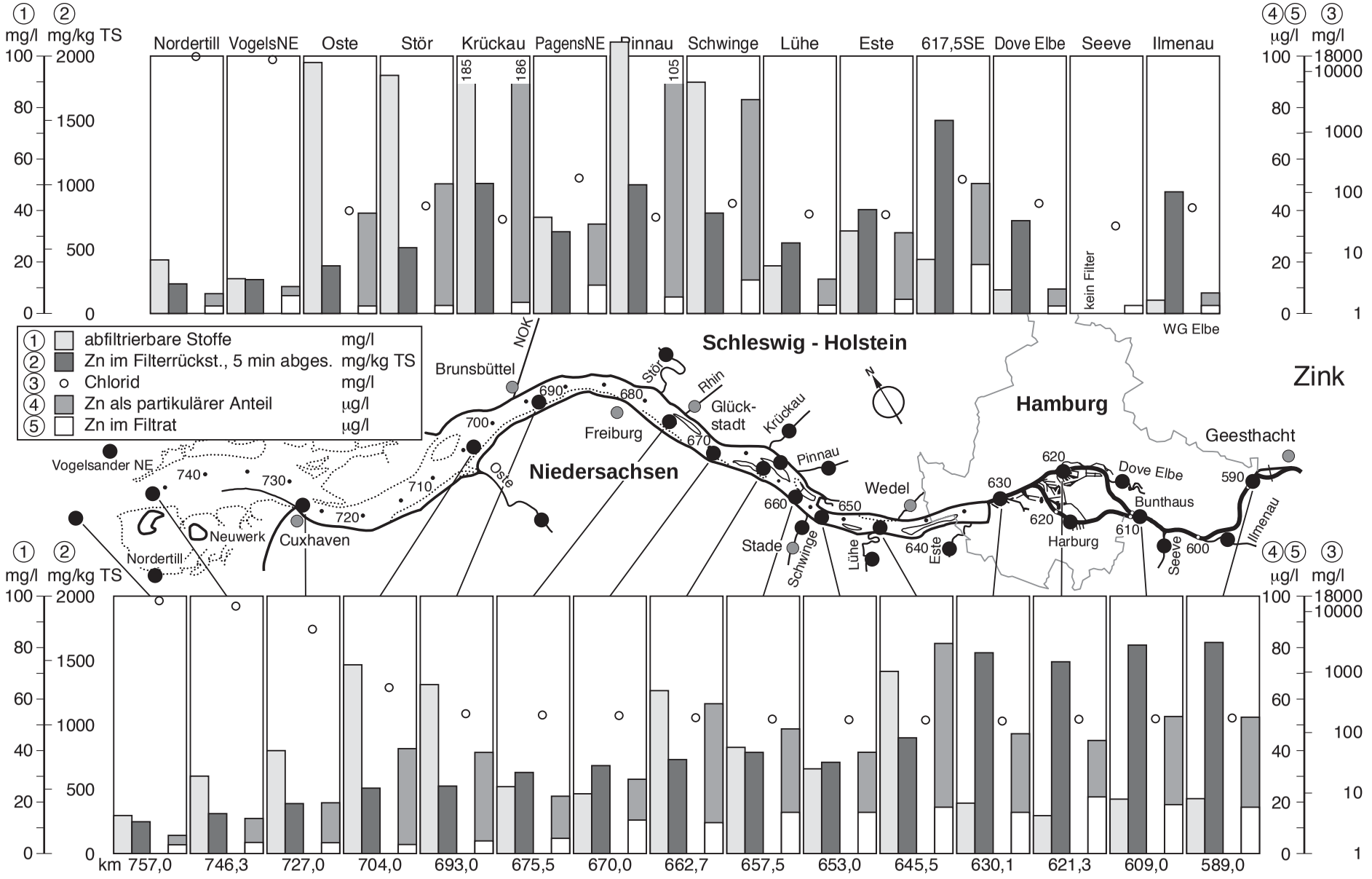


Abb. 75 Zink-Längsprofil der Elbe am 13.08.1987 (Qo=712 m³/s)

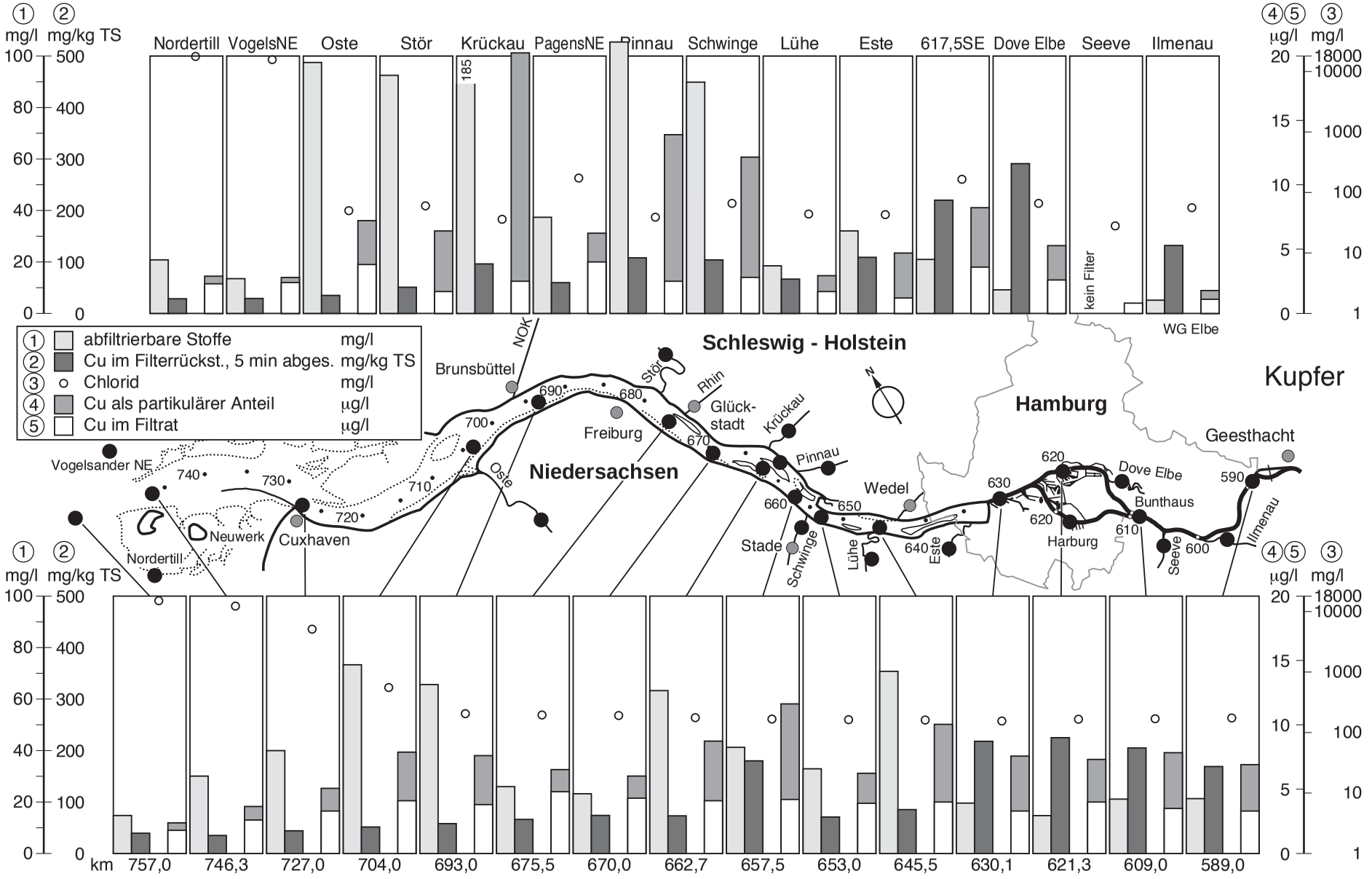


Abb. 76 Kupfer-Längsprofil der Elbe am 13.08.1987 (Qo=712 m³/s)

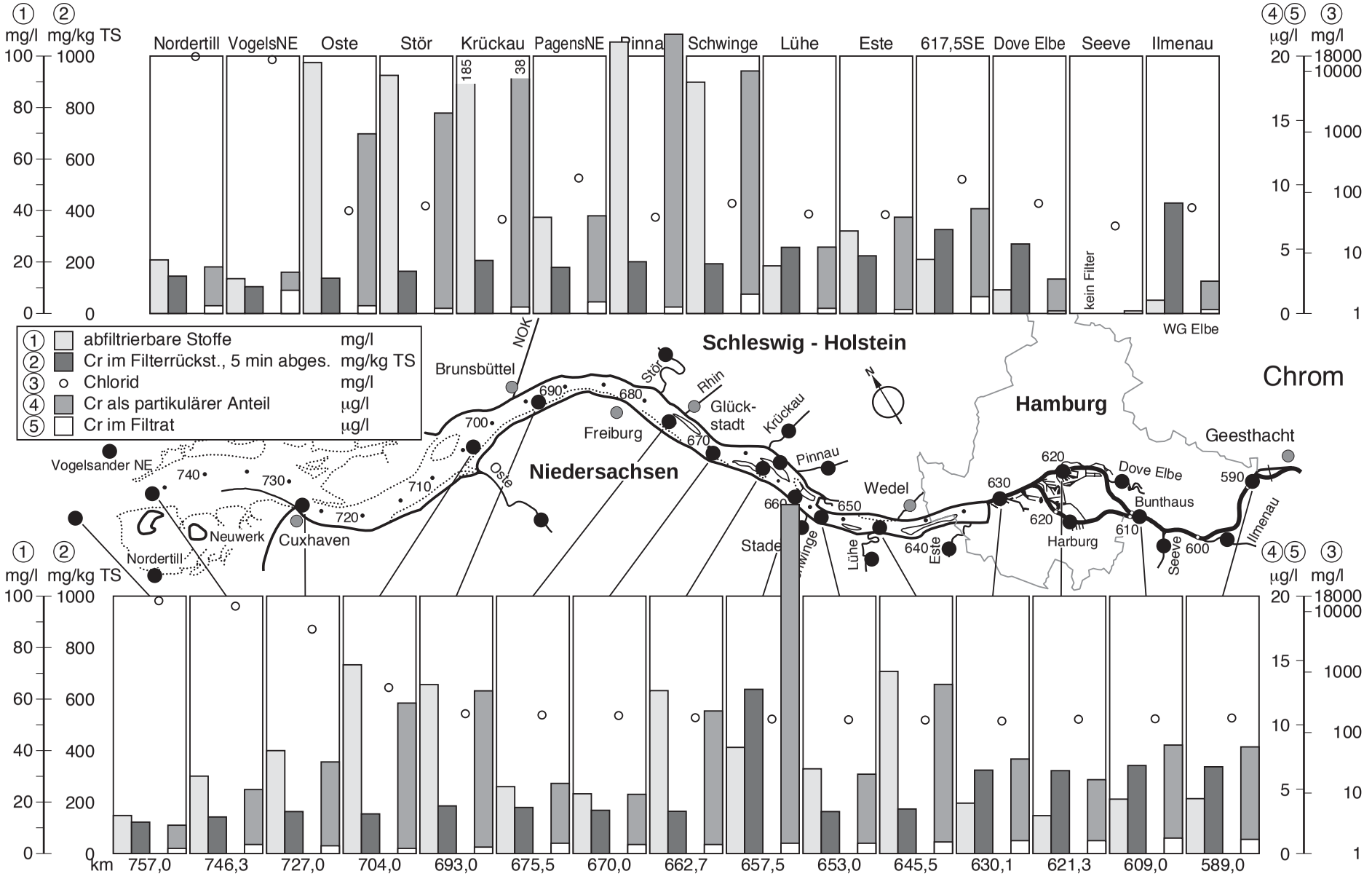


Abb. 77 Chrom-Längsprofil der Elbe am 13.08.1987 (Qo=712 m³/s)

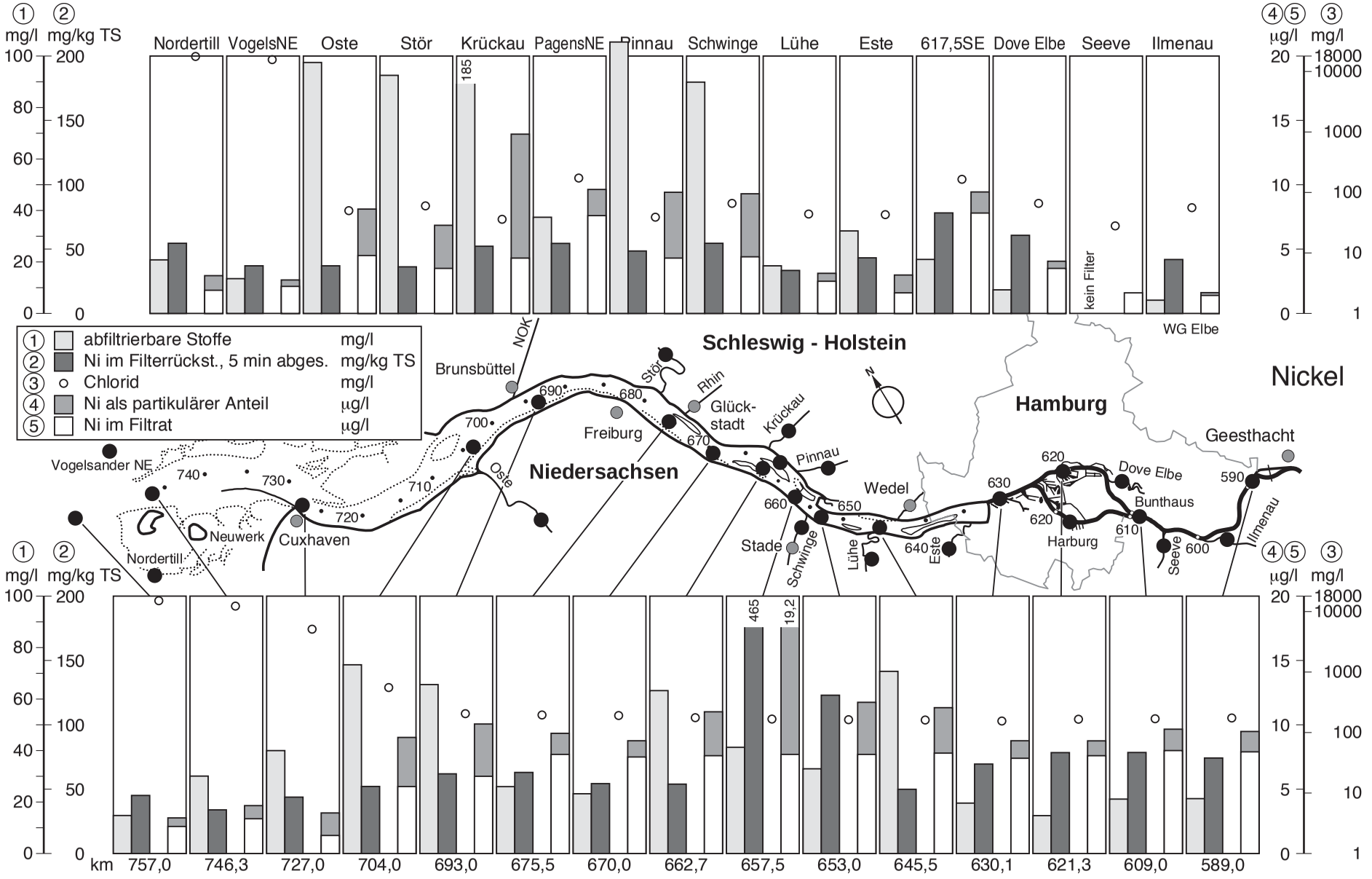


Abb. 78 Nickel-Längsprofil der Elbe am 13.08.1987 (Qo=712 m³/s)

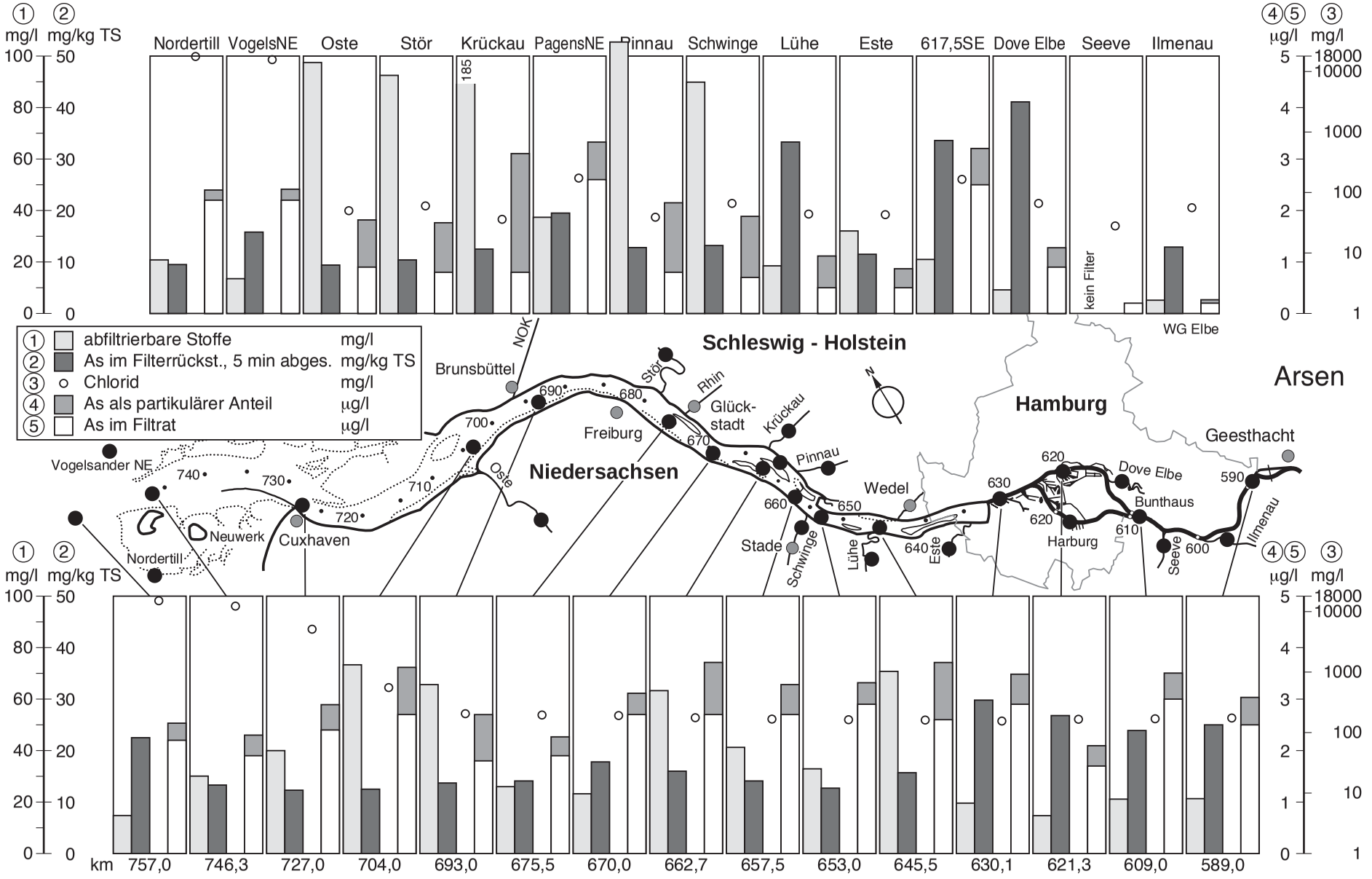


Abb. 79 Arsen-Längsprofil der Elbe am 13.08.1987 (Qo=712 m³/s)

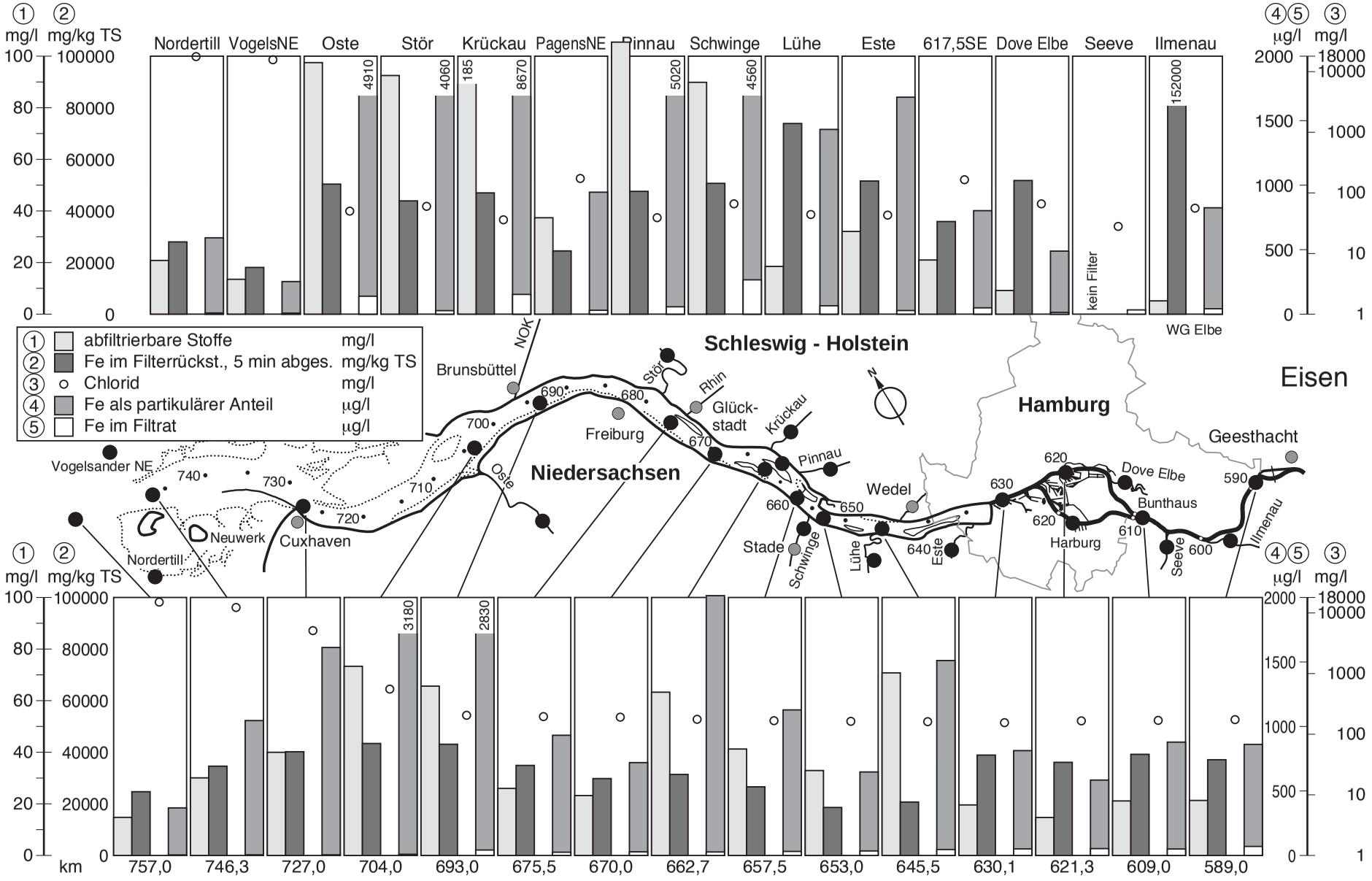


Abb. 80 Eisen-Längsprofil der Elbe am 13.08.1987 (Qo=712 m³/s)

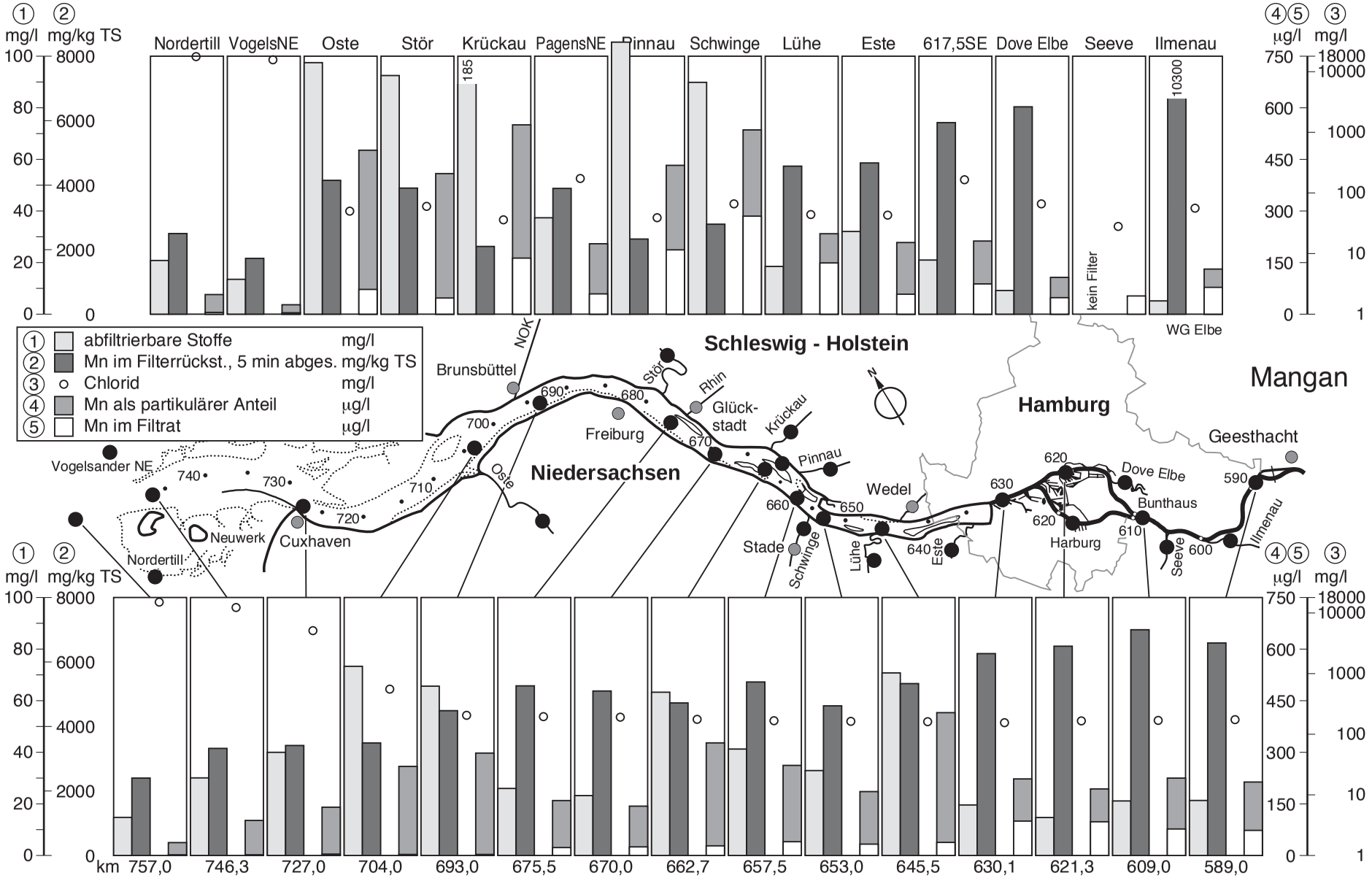


Abb. 81 Mangan-Längsprofil der Elbe am 13.08.1987 (Qo=712 m³/s)

Im limnischen Teil der Tideelbe vom Wehr Geesthacht bis Glückstadt wurden zum Teil sehr unterschiedliche Schwebstoffkonzentrationen erfaßt. Diese örtlichen Inhomogenitäten können z. B. durch Baggermaßnahmen verursacht worden sein. Im Vergleich zum Mai-Längsprofil waren die Schwebstoffgehalte im Mittel etwas erhöht, während die spezifischen Schwermetallbeladungen im Mittel deutlich niedrigere Konzentrationen aufwiesen. Ein Blick auf die Konzentrations- und Frachtenganglinie der Schwermetalle an der Meßstation Schnackenburg zeigt, daß "nach der Ausspülung des Flußsystems" durch die Hochwasserwellen, in Verbindung mit sehr hohen Schwermetallfrachten im Frühjahr 1987, in der zweiten Jahreshälfte 1987 nur sehr viel geringere Schwermetallfrachten von oberstrom in die Tideelbe eingetragen wurden. Die geringeren Schwermetallfrachten aus der Vorbelastung, in Verbindung mit der in der Vegetationsperiode verstärkten Bildung biogener Schwebstoffe in der Tideelbe, haben offenbar diese für die Elbe außergewöhnlich niedrige spezifische Beladung der Schwebstoffe mit Schwermetallen erzeugt.

Während bei Quecksilber und Nickel regional erhöhte spezifische Beladungen der Schwebstoffe festgestellt wurden, zeigen sich für andere Schwermetalle, wie z. B. Cadmium, Blei und Zink sehr gleichmäßige, für die Tideelbe typische Konzentrationsgradienten. Die Gründe für diese Abweichungen bei Quecksilber und Nickel sind im einzelnen im nachhinein nicht mehr aufzuklären. Eine Aufwirbelung älterer, höher belasteter Sedimente hätte bei den jeweiligen Proben zu einer Erhöhung der Konzentration aller Schwermetalle führen müssen.

Die in einzelnen Proben, aber insbesondere im oberen Bereich der Trübungszone deutlich erhöhten Bleikonzentrationen im Elbwasser sind eindeutig nicht auf regionale Belastungsschwerpunkte, sondern auf die erhöhten, jeweiligen Schwebstoffgehalte zurückzuführen.

In den Elbnebenflüssen ergaben sich Befunde in der "normalen Größenordnung". Die deutlich erhöhten Konzentrationswerte in den Wasserproben von Schwinge, Pinnau, Krückau, Stör und Oste sind nicht auf erhöhte Belastungen in diesen Flüssen, sondern auf die mit der Probennahme erfaßten, erhöhten Schwebstoffgehalte zurückzuführen, wie ein Blick auf die spezifischen Beladungen der Schwebstoffe zeigt.

Längsprofil 11. November 1987

Der Oberwasserabfluß war, gegenüber der Messung im August, weiter bis auf 506 m^3/s abgesunken mit der Folge, daß das obere Ende der Brackwasserzone und auch der Trübungszone stromauf bis nahe Glückstadt vorgedrungen war. Eine ausgeprägte Trübungswolke ist an den deutlich erhöhten Schwebstoffgehalten im Raum Brunsbüttel zu erkennen. Aber auch im Elbabschnitt zwischen Wedel und Glückstadt sind in dieser Phase erhöhte Schwebstoffgehalte aufgetreten.

Im oberen Bereich der Tideelbe zwischen Wehr Geesthacht und Blankenese lagen die Schwebstoffgehalte mit 10 bis 15 mg/l auf einem niedrigen Niveau. Bei niedrigen Oberwasserabflüssen von rd. 500 m^3/s tritt in der Staustufe Geesthacht eine deutliche Verminderung der Strömungsgeschwindigkeit bei gleichzeitig verstärkter Sedimentation der Schwebstoffe ein. Dadurch sind die geringen Schwebstoffgehalte unterhalb des Wehres Geesthacht zu erklären.

Die Frachtenganglinie der Vorbelastung bei Schnackenburg zeigt für den Zeitraum November 1987 einen verhältnismäßig niedrigen Schwermetalleintrag in die Tideelbe an. Die Verteilung der spezifischen Beladung der Schwebstoffe mit den

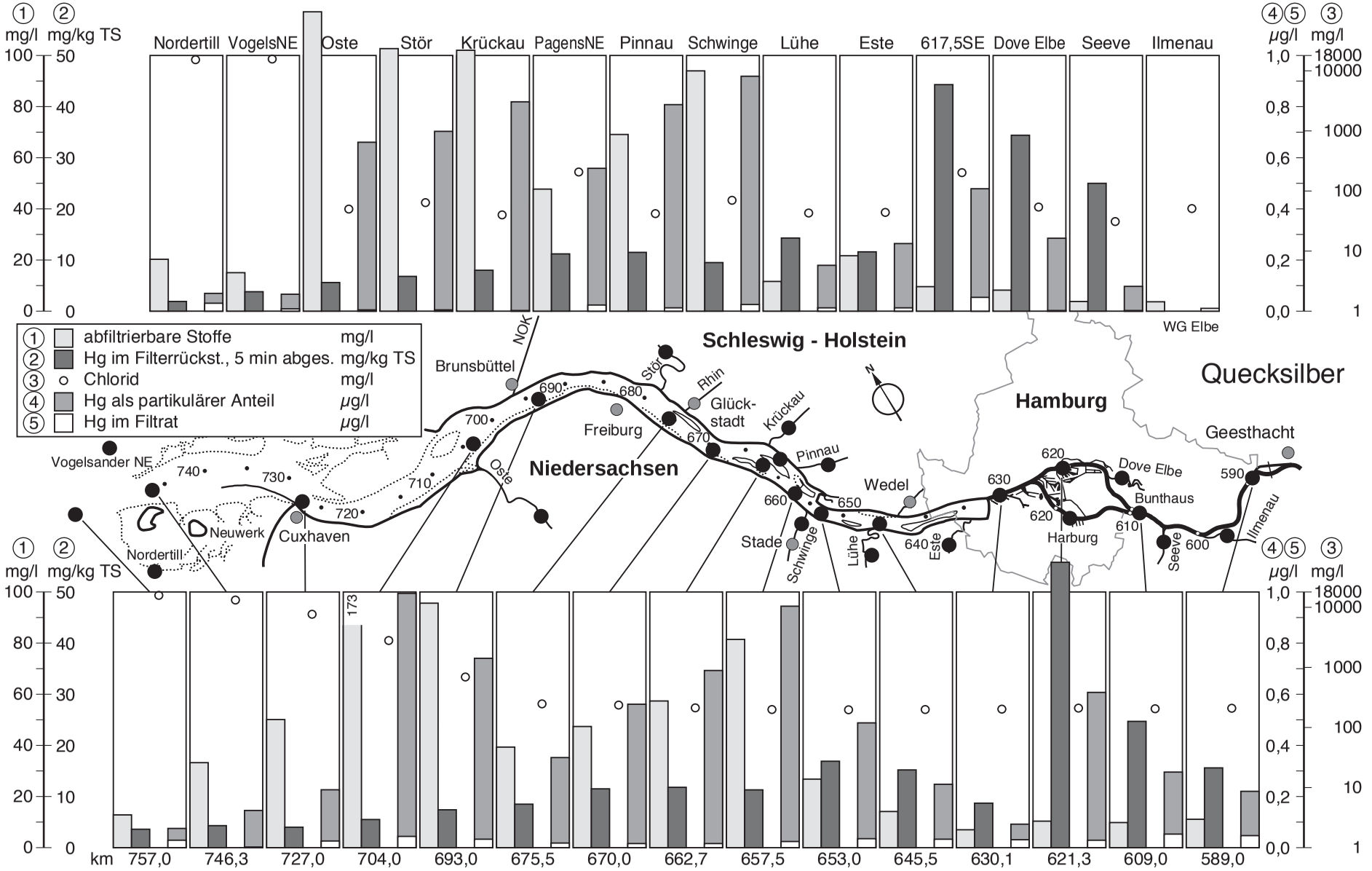


Abb. 82 Quecksilber-Längsprofil der Elbe am 11.11.1987 (Qo=506 m³/s)

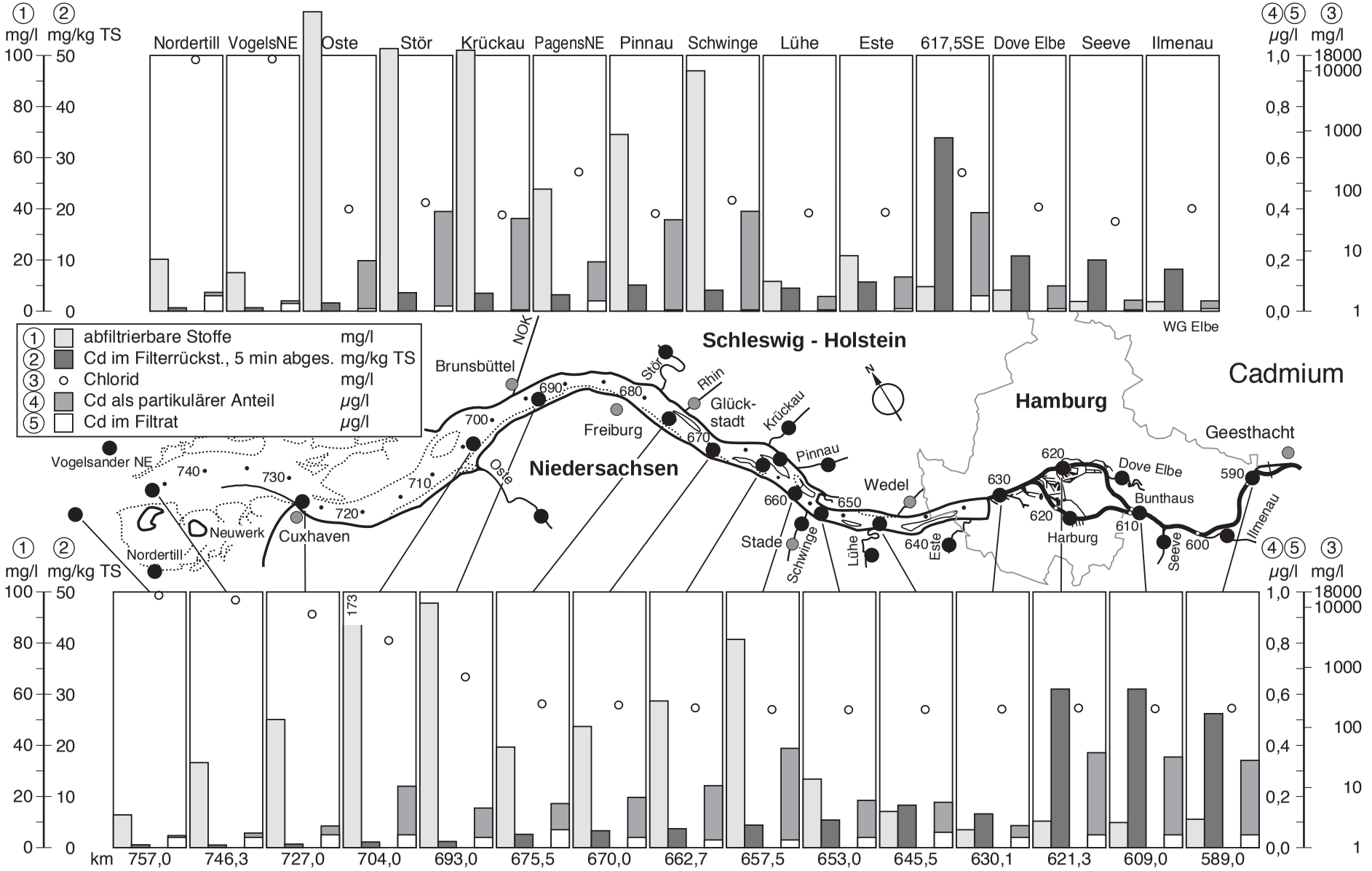


Abb. 83 Cadmium-Längsprofil der Elbe am 11.11.1987 (Qo=506 m³/s)

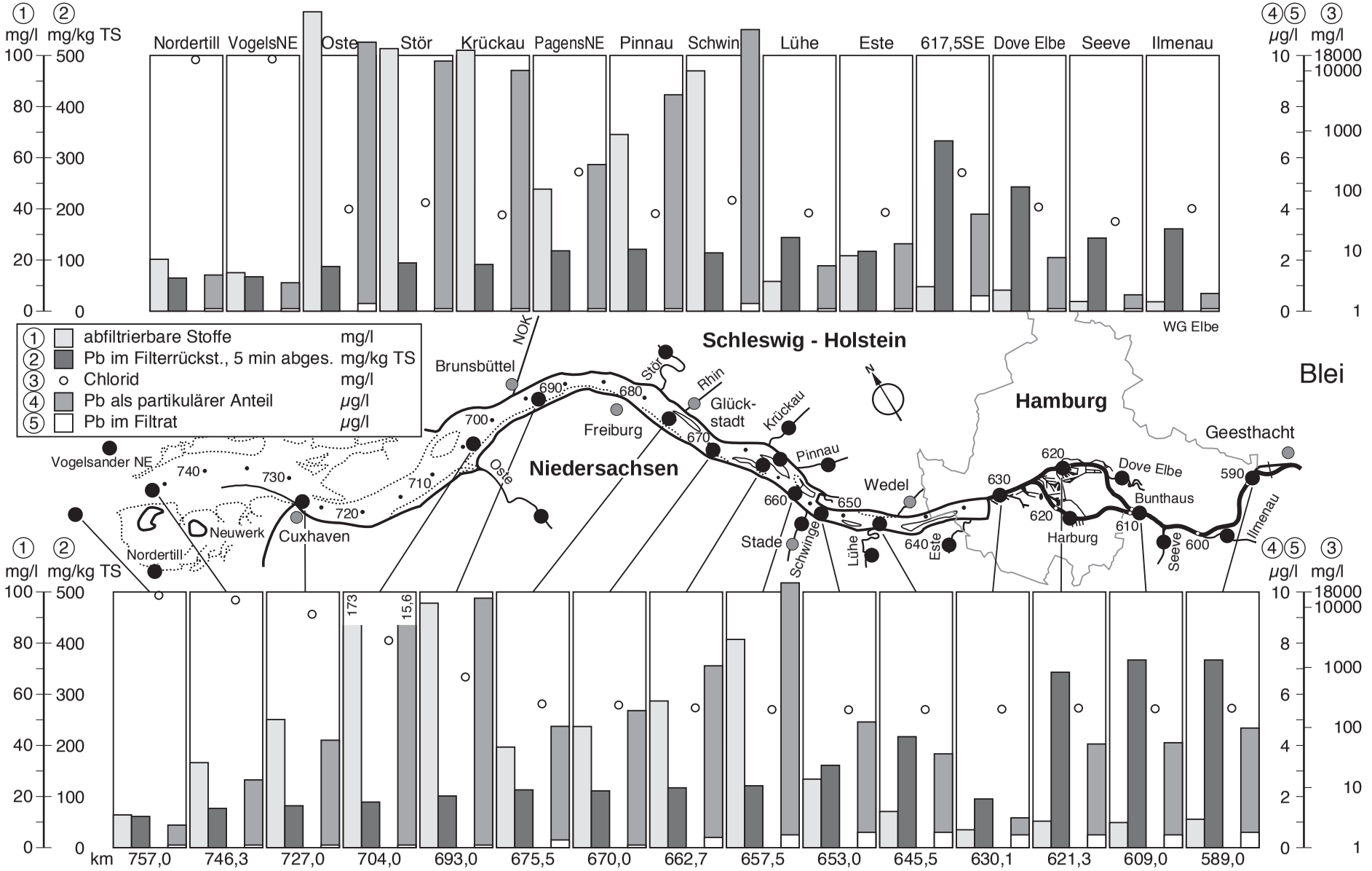


Abb. 84 Blei-Längsprofil der Elbe am 11.11.1987 (Qo=506 m³/s)

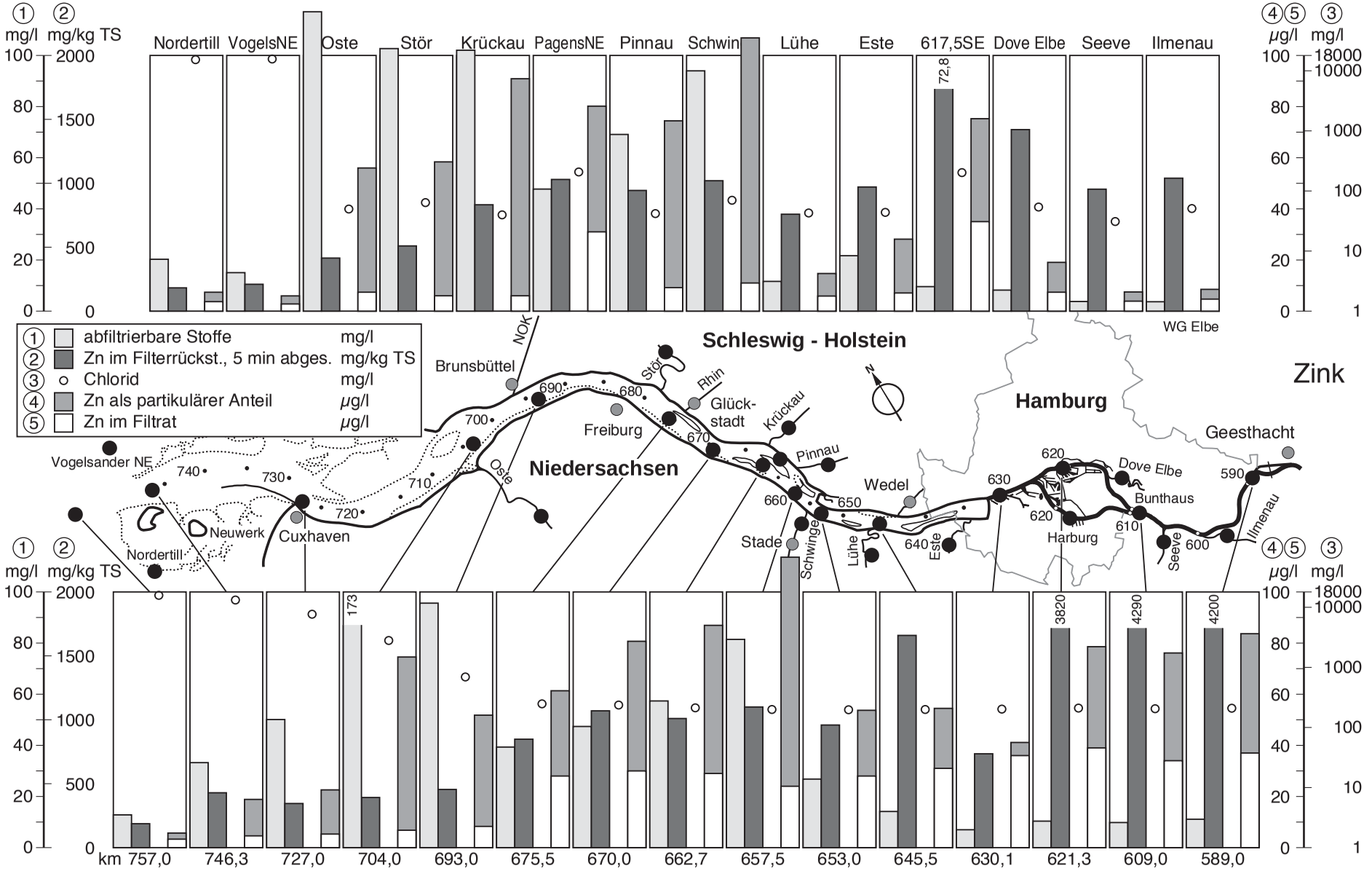


Abb. 85 Zink-Längsprofil der Elbe am 11.11.1987 (Qo=506 m³/s)

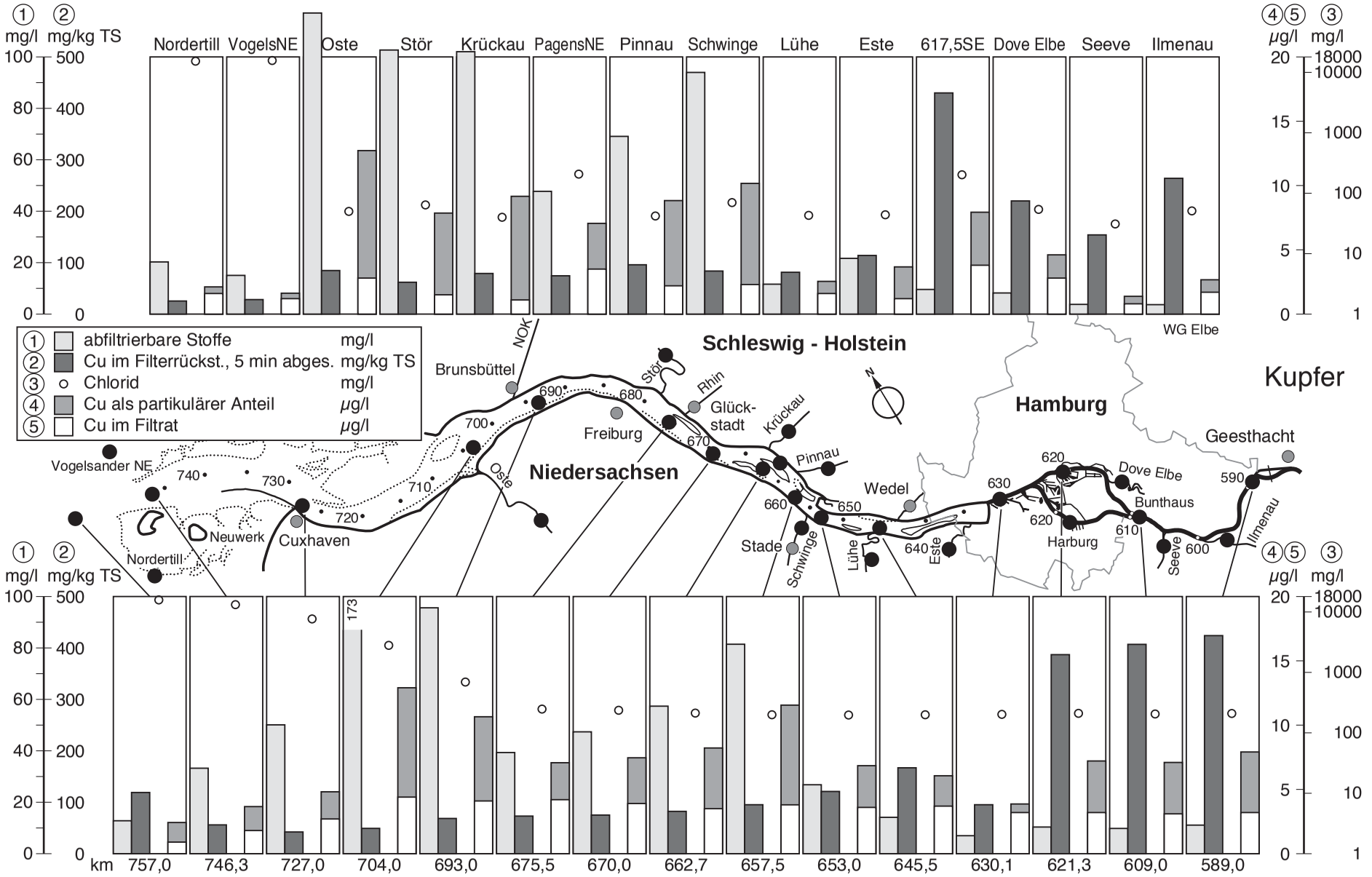


Abb. 86 Kupfer-Längsprofil der Elbe am 11.11.1987 (Qo=506 m³/s)

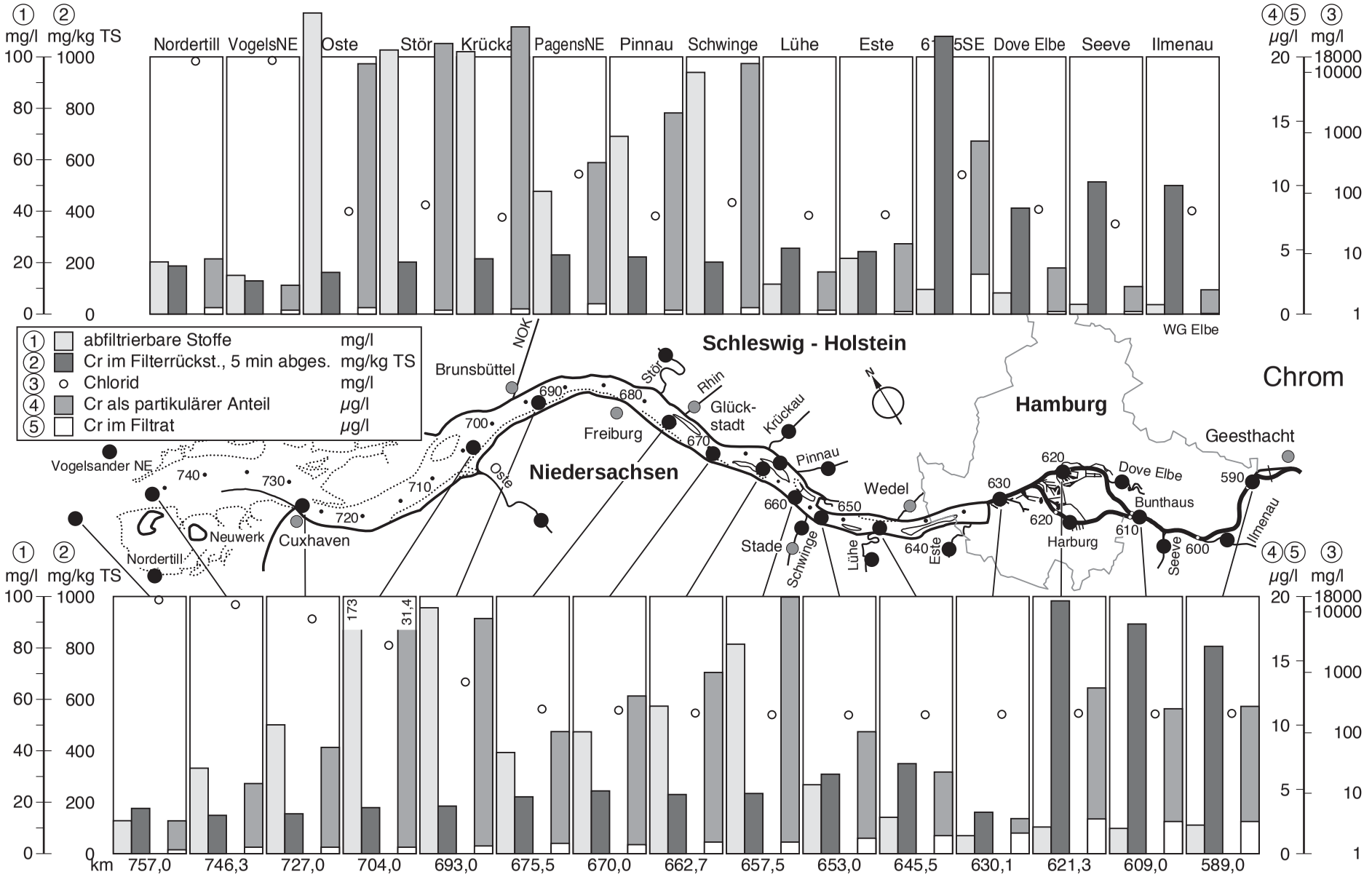


Abb. 87 Chrom-Längsprofil der Elbe am 11.11.1987 (Qo=506 m³/s)

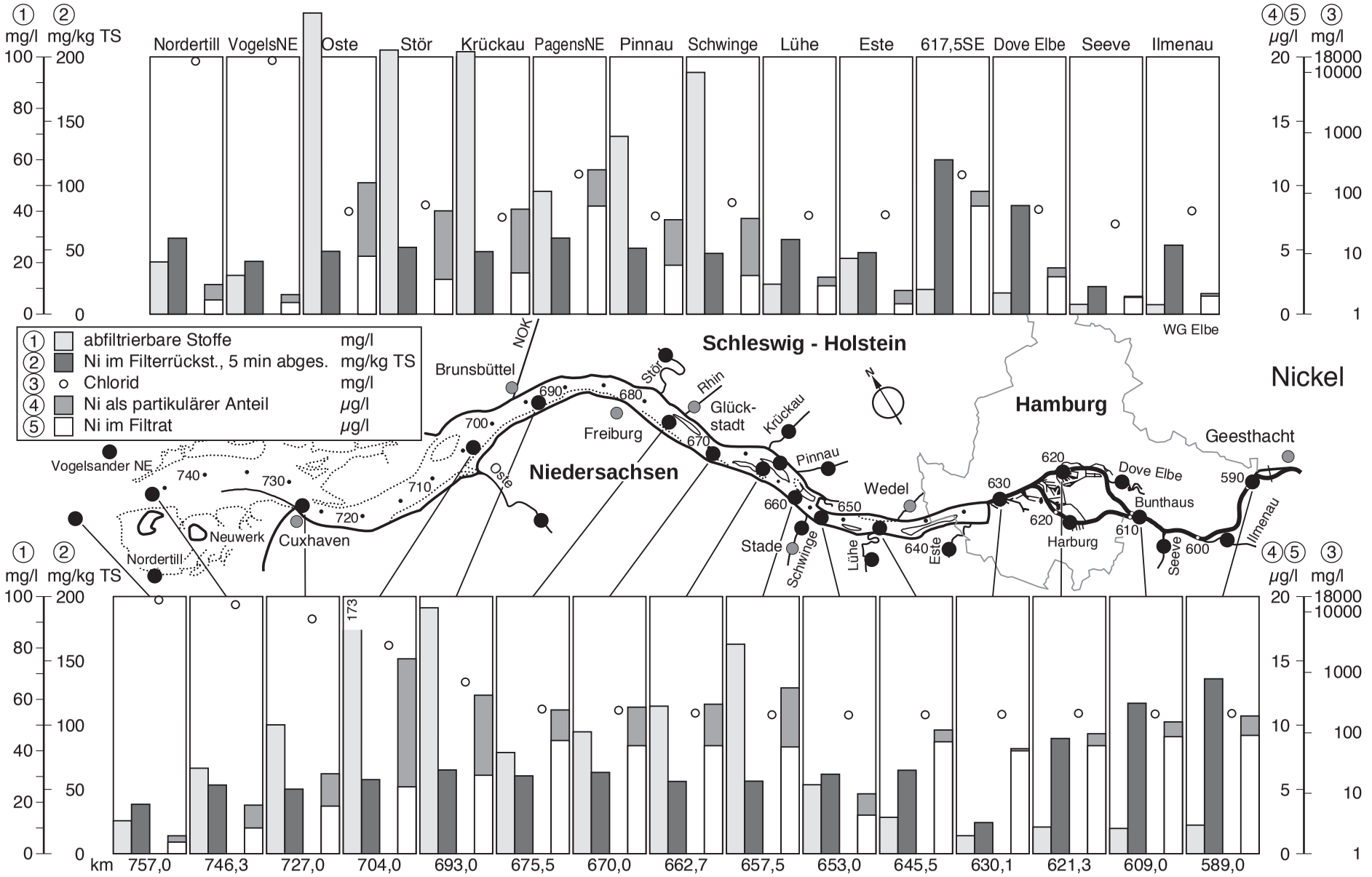


Abb. 88 Nickel-Längsprofil der Elbe am 11.11.1987 (Qo=506 m³/s)

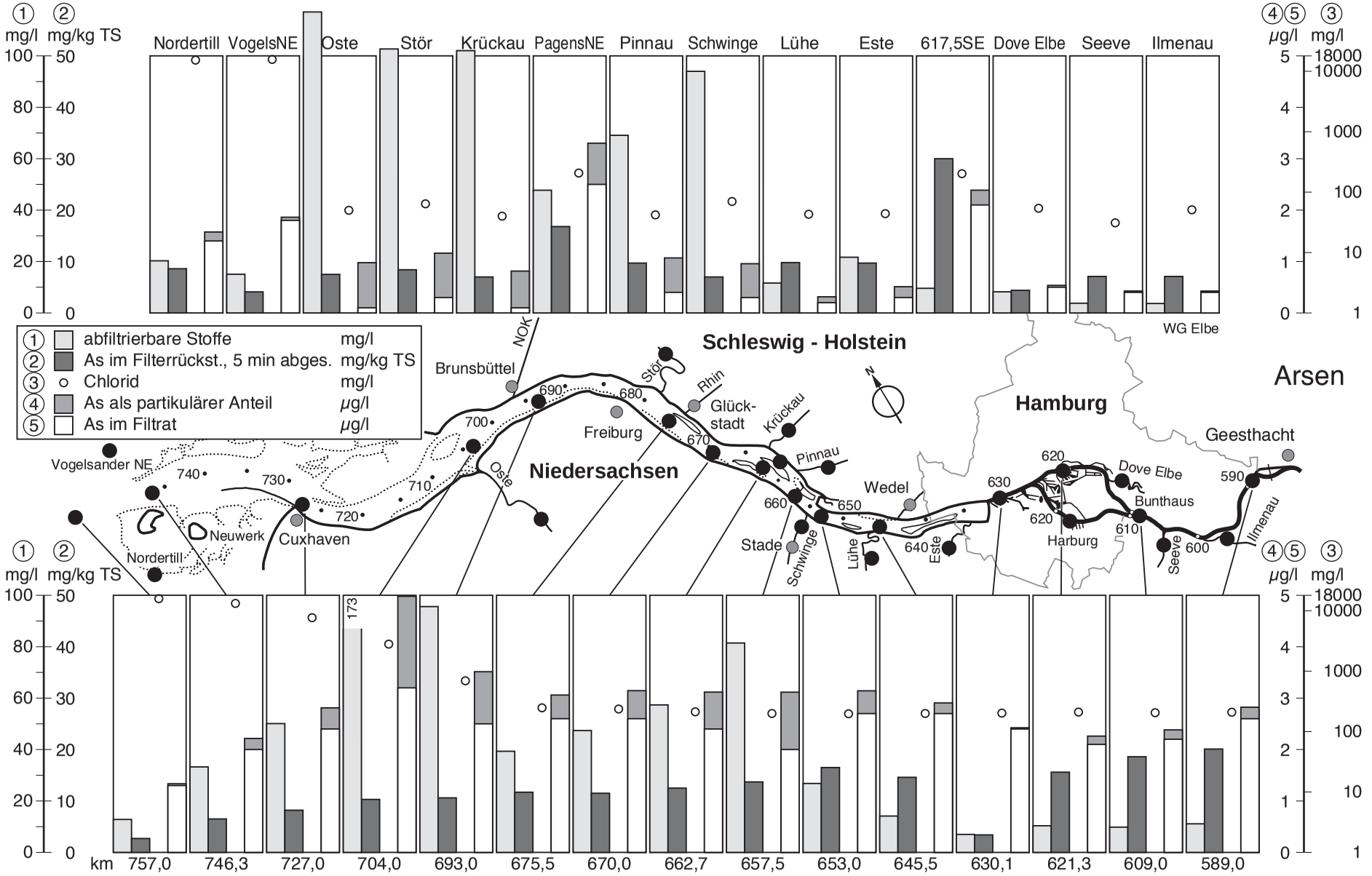


Abb. 89 Arsen-Längsprofil der Elbe am 11.11.1987 (Qo=506 m³/s)

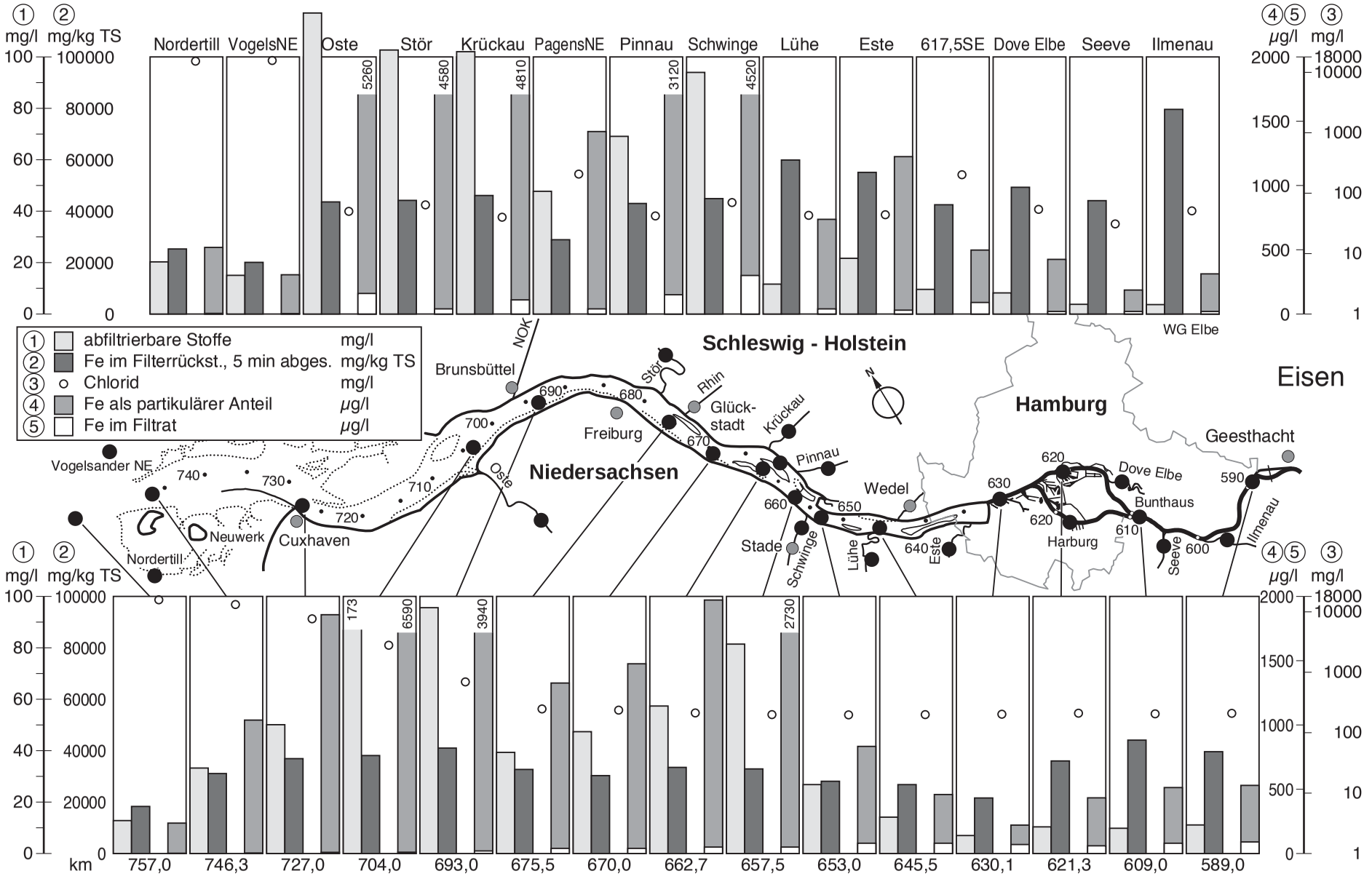


Abb. 90 Eisen-Längsprofil der Elbe am 11.11.1987 (Qo=506 m³/s)

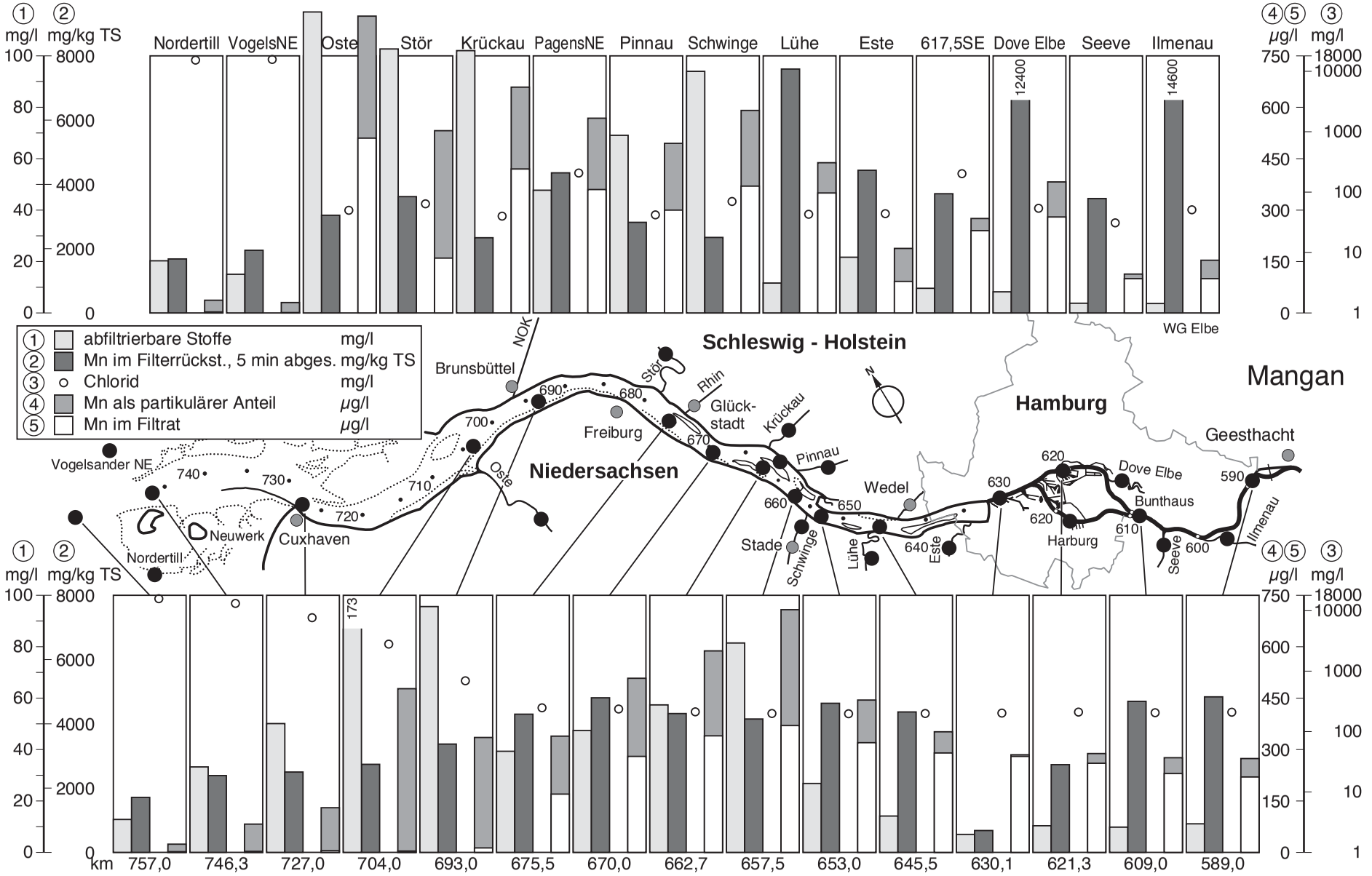


Abb. 91 Mangan-Längsprofil der Elbe am 11.11.1987 (Qo=506 m³/s)

Schwermetallen ergibt über das Längsprofil betrachtet eine typische Struktur. Nur für Quecksilber wurde in der Probe in Höhe St.-Pauli-Landungsbrücken ein außergewöhnlich hoher Spitzenwert festgestellt. Da bei den anderen Elementen, wie Cadmium, Kupfer, Zink und Eisen, keine entsprechende Erhöhung gefunden wurde, kann dieser erhöhte Quecksilberwert nicht auf eine Aufwirbelung von hochbelasteten Sedimenten, z. B. aus dem Hafenbereich, herrühren. Da es sich um einen Einzelwert handelt, der bei keiner anderen Längsprofiluntersuchung vergleichbar auftrat, kann eine örtliche Belastung durch eine regelmäßige Einleitung ausgeschlossen werden. Die tatsächliche Ursache ist im nachhinein nicht mehr ermittelbar.

Die Abnahme der spezifischen Schwermetallbelastung der Schwebstoffe unmittelbar unterhalb des Hamburger Hafens, die bei Cadmium, Blei, Zink, Kupfer und Chrom in ausgeprägter Weise erkennbar ist, ergibt sich aus der hydrographischen Struktur des Stromspaltungsgebietes und des Hamburger Hafens. Bei niedrigen Oberwasserabflüssen pendeln die von oberstrom eingetragenen Wasserkörper, einschließlich der darin enthaltenen Schwebstoffe, über mehrere Tiden im Hafenbereich unter dem Einfluß von Ebbe und Flut hin und her. Dabei wird ein erheblicher Teil des Elbwassers zeitweise in Hafenbecken, also in Stillwasserzonen, gedrückt mit der Folge, daß in diesen Bereichen insbesondere die Schwebstoffe mit einer bedeutenden Sinkgeschwindigkeit sedimentieren. Damit gelangen auch die an die Schwebstoffe angelagerten Schwermetalle in das Sediment bzw. Baggergut.

In die Unterelbe unterhalb Hamburgs wird bei diesen hydrologischen Bedingungen nur noch ein Teil der schwebstoffgebundenen Schadstofffracht eingetragen. Aufgrund des sehr starken Flutstromes bei niedrigen Oberwasserabflüssen werden gleichzeitig Schwebstoffe aus dem Unterelberaum und aus den Elbnebenflüssen, die in der Regel eine geringere Belastung aufweisen, eingemischt, wodurch eine Verdünnung entsteht. Die spezifische Beladung der Schwebstoffe unterhalb des Hamburger Hafens ist deshalb in Phasen mit anhaltend niedrigen Oberwasserabfluß, insbesondere bei den Schwermetallen, bei denen eine deutlich erhöhte anthropogene Belastung vorliegt, deutlich erniedrigt. Für die Schwermetalle Eisen und Mangan hingegen, die überwiegend aus natürlichen Quellen stammen, ergeben sich nicht derartige Konzentrationsunterschiede, da auch die aus dem Unterelberaum stammenden Schwebstoffe das natürlicherweise vorhandene Konzentrationsniveau aufweisen.

Die stark erhöhten Schwermetallkonzentrationen des Elbwassers, z. B. von Quecksilber im Raum Bützfleth, aber auch im Bereich der oberen Brackwasserzone, sind nicht auf Quecksilbereinträge von der dort ansässigen Industrie zurückzuführen, sondern ergeben sich eindeutig aus den in diesen Proben erhöhten Schwebstoffgehalten in Verbindung mit der spezifischen Schwermetallbeladung der Schwebstoffe. Die Abnahme der spezifischen Beladungen in der Brackwasserzone ist wiederum auf die Verdünnung mit schwächer belasteten Schwebstoffen aus dem Elbmündungsbereich zurückzuführen.

Für die Elbnebenflüsse ergeben die Befunde das bereits in den vorangegangenen Abschnitten erläuterte Bild. Die zum Teil sehr hohen Schwermetallkonzentrationen in den Wasserproben, z. B. in der Schwinge, Pinnau, Krückau, Stör und Oste, sind eindeutig auf die erhöhten Schwebstoffgehalte zurückzuführen. Aufgrund der geringen Wassertiefe in den Elbnebenflüssen in der Ebbephase findet durch die Strömungsturbulenz eine erhebliche Resuspension feinkörniger Sedimente statt, so daß die tatsächliche anthropogene Belastung in diesen Nebenflüssen am sichersten an der spezifischen Beladung der Schwebstoffe mit Schwermetallen beurteilt werden kann.

Längsprofil 23. Februar 1988

Das Längsprofil der Schwebstoffgehalte zeigt eine ähnliche Verteilungsstruktur wie im November 1987. Die abgeflossenen Oberwasserwellen Ende November/Anfang Dezember mit rd. 1.200 m^3/s und Anfang Januar mit 1.500 m^3/s haben offensichtlich keine tiefgreifende Verschiebung der Brackwasserzone und der Haupttrübungswolke bewirkt. Während in dem Streckenabschnitt bis in den Bereich Stadersand nahezu gleiche Schwebstoffkonzentrationen mit fast gleich hohen spezifischen Beladungen festgestellt wurden, zeigen die Befunde oberhalb der Haupttrübungszone zwischen Stadersand und der Störmündung einen Anstieg der Schwebstoffgehalte bei gleichzeitiger Abnahme der Schwermetallkonzentrationen in den Schwebstoffen. Dieser Befund deutet eindeutig darauf hin, daß die Abnahme durch eine Verdünnung infolge eingemischter, geringer belasteter Schwebstoffe aus dem Unterelberaum bewirkt wurde.

In der Haupttrübungszone zeigt sich wiederum der typische, seewärts abnehmende Konzentrationsgradient, der von der Einmischung von Schwebstoffen aus dem geringer belasteten marinen Milieu der Außenelbe herrührt.

Die Unterschiede im Schwermetallgehalt der Wasserproben sind in der Regel eindeutig auf die jeweils unterschiedlichen Schwebstoffgehalte der Proben zurückzuführen. Dies gilt insbesondere für die Proben aus dem Unterelberaum zwischen Stadersand und der Ostemündung. Die Befunde für die Elbnebenflüsse zeigen verhältnismäßig hohe Schwebstoffgehalte in Verbindung mit einer niedrigen Schwermetallbeladung der Schwebstoffe, z. B. für die Seeve, Dove-Elbe, Este und Lühe an. Im Februar 1988 führten die Elbnebenflüsse jeweils einen erhöhten Abfluß, so daß in dieser Phase in nur geringem Maße Elbwasser mit hochbelasteten Elbschwebstoffen in die Unterläufe der Nebenflüsse vordringen konnte. Auch die Verteilung der spezifischen Beladung für Pinnau, Krückau und Pagensander Nebenelbe zeigt das bereits erklärte Muster.

Längsprofil 17. Mai 1988

Obwohl bis zum Meßtag der Oberwasserabfluß bereits auf 618 m^3/s abgefallen war, sind die Befunde noch deutlich durch die Ende März/April abgeflossene extreme Hochwasserwelle geprägt. Die extrem hohen Abflüsse Anfang April hatten mit 3.480 m^3/s nahezu den höchsten, jemals beobachteten Wert von 3.620 m^3/s erreicht. Durch diese extremen Abflüsse hat offenbar in erheblichem Maße eine Ausspülung des Flußsystems Elbe (Ausräumung von Stauhaltungen, Buhnenfeldern usw.) stattgefunden. Die Brackwasserzone und auch die Haupttrübungszone waren während der Probennahme noch weit stromab bis in den Bereich Otterndorf/Cuxhaven verschoben. Die maximalen Schwebstoffgehalte in der schwach ausgeprägten Trübungswolke waren außergewöhnlich gering. Durch die zuvor sehr hohen Oberwasserabflüsse hat auch eine Ausspülung eines großen Teils der in der Trübungswolke enthaltenen Schwebstoffmengen stattgefunden.

Die spezifischen Schwermetallbeladungen der Schwebstoffe zeigen über das gesamte Längsprofil der Elbe einen sehr gleichmäßigen Verlauf. Dieser Befund deutet darauf hin, daß durch die sehr hohen Oberwasserabflüsse in den Vormonaten und den dadurch bedingten schnellen, überwiegend ebbstrom-orientierten Schwebstofftransport im gesamten Elbeästuar eine großräumige Verteilung von einheitlich belasteten Schwebstoffen aus dem oberen Einzugsgebiet erfolgt ist. Die sehr schwach ausgeprägte Abnahme der Schwermetallkonzentrationen in den Schwebstoffen seewärts belegt, daß der Anteil von eingemischten, geringer

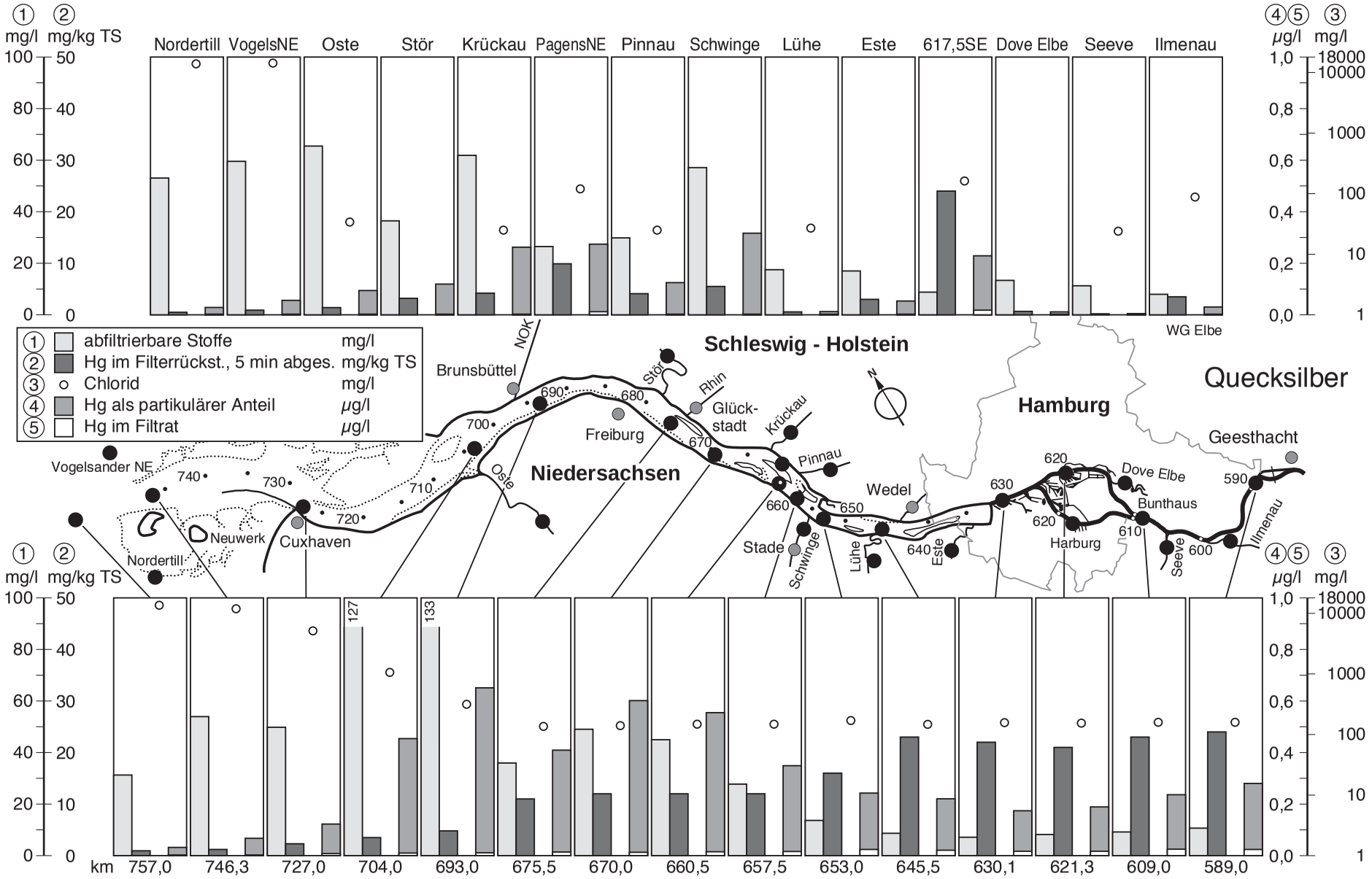


Abb. 92 Quecksilber-Längsprofil der Elbe am 23.02.1988 (Qo=1050 m³/s)

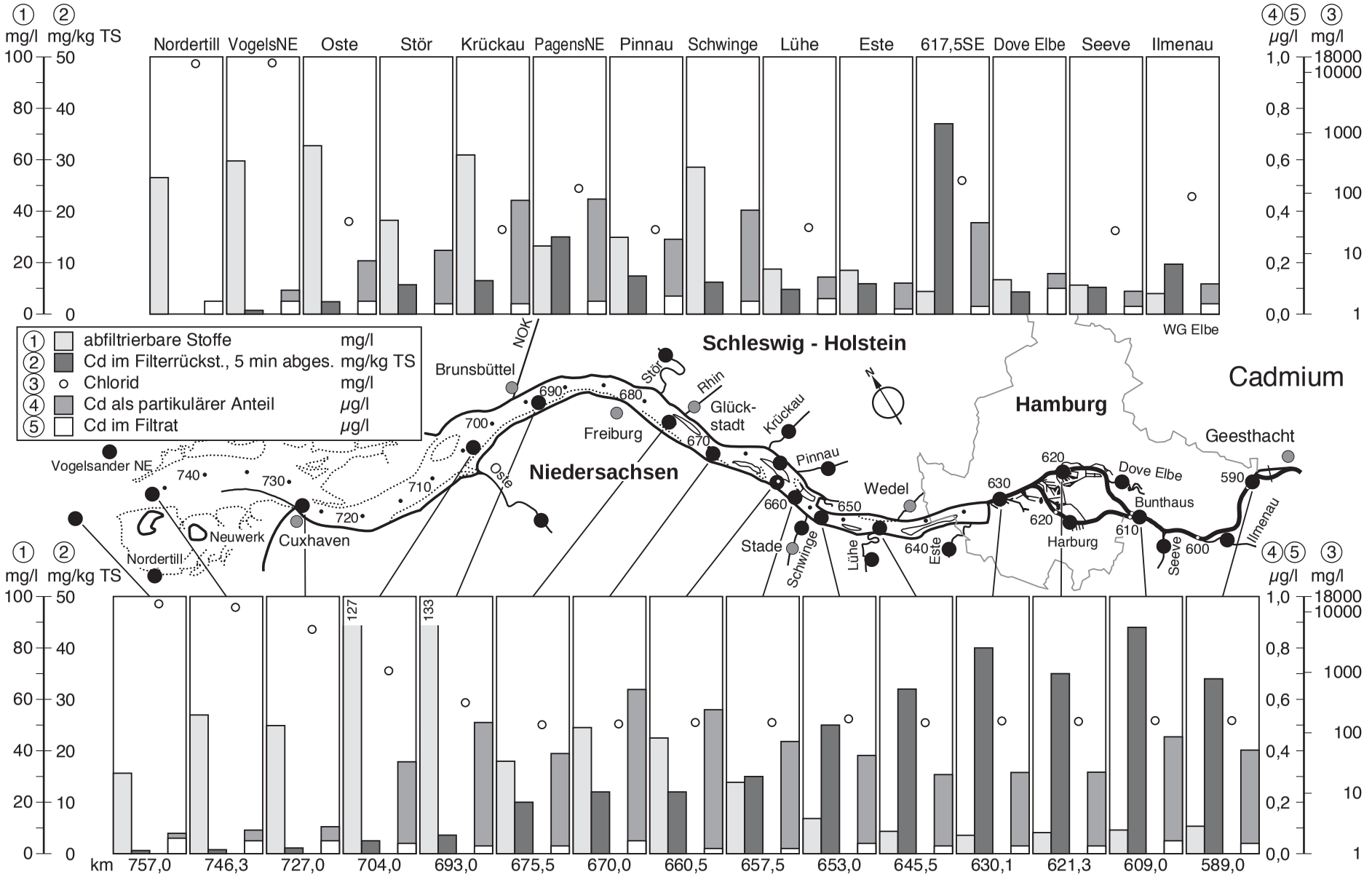


Abb. 93 Cadmium-Längsprofil der Elbe am 23.02.1988 (Qo=1050 m³/s)

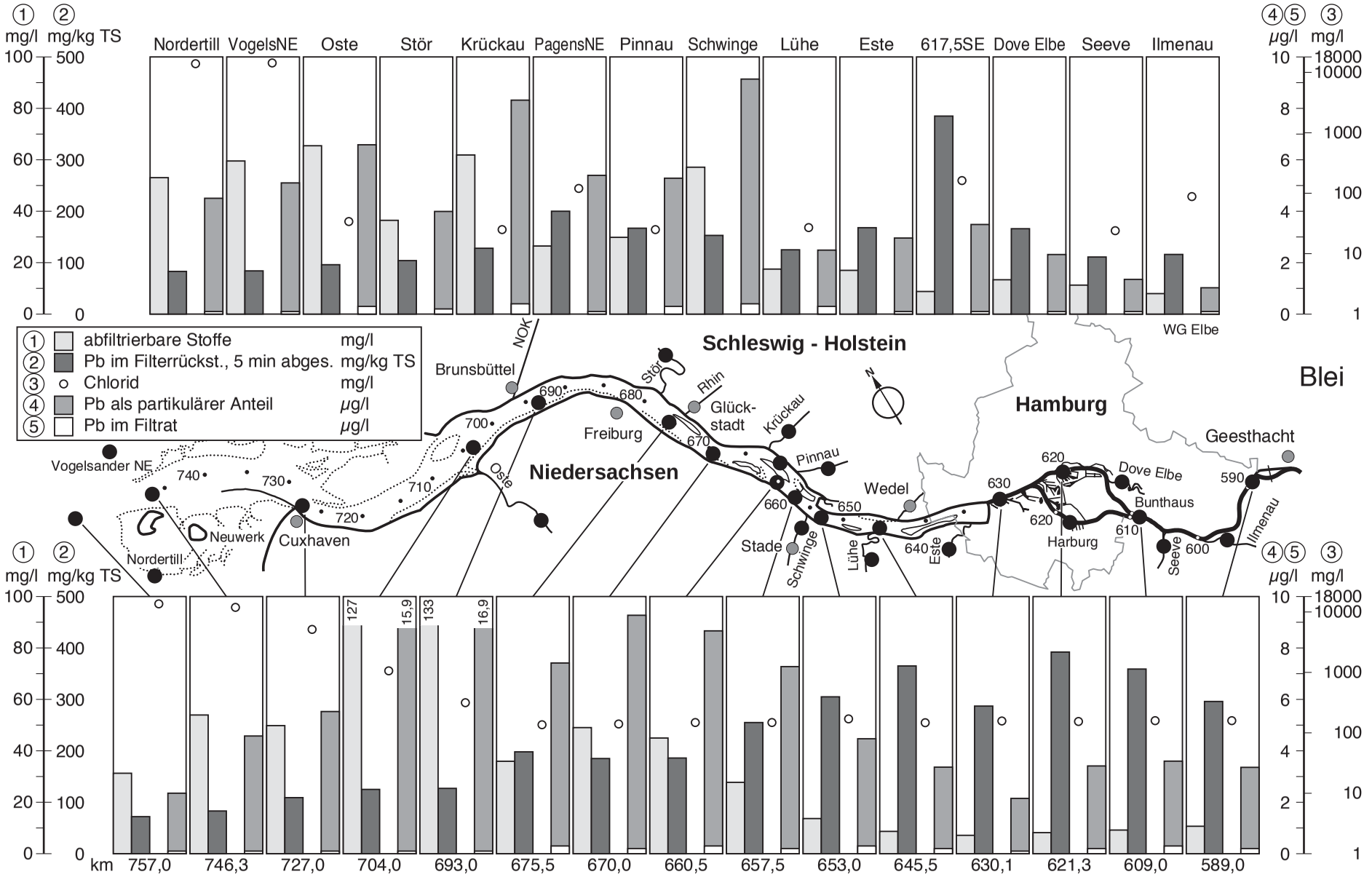


Abb. 94 Blei-Längsprofil der Elbe am 23.02.1988 (Qo=1050 m³/s)

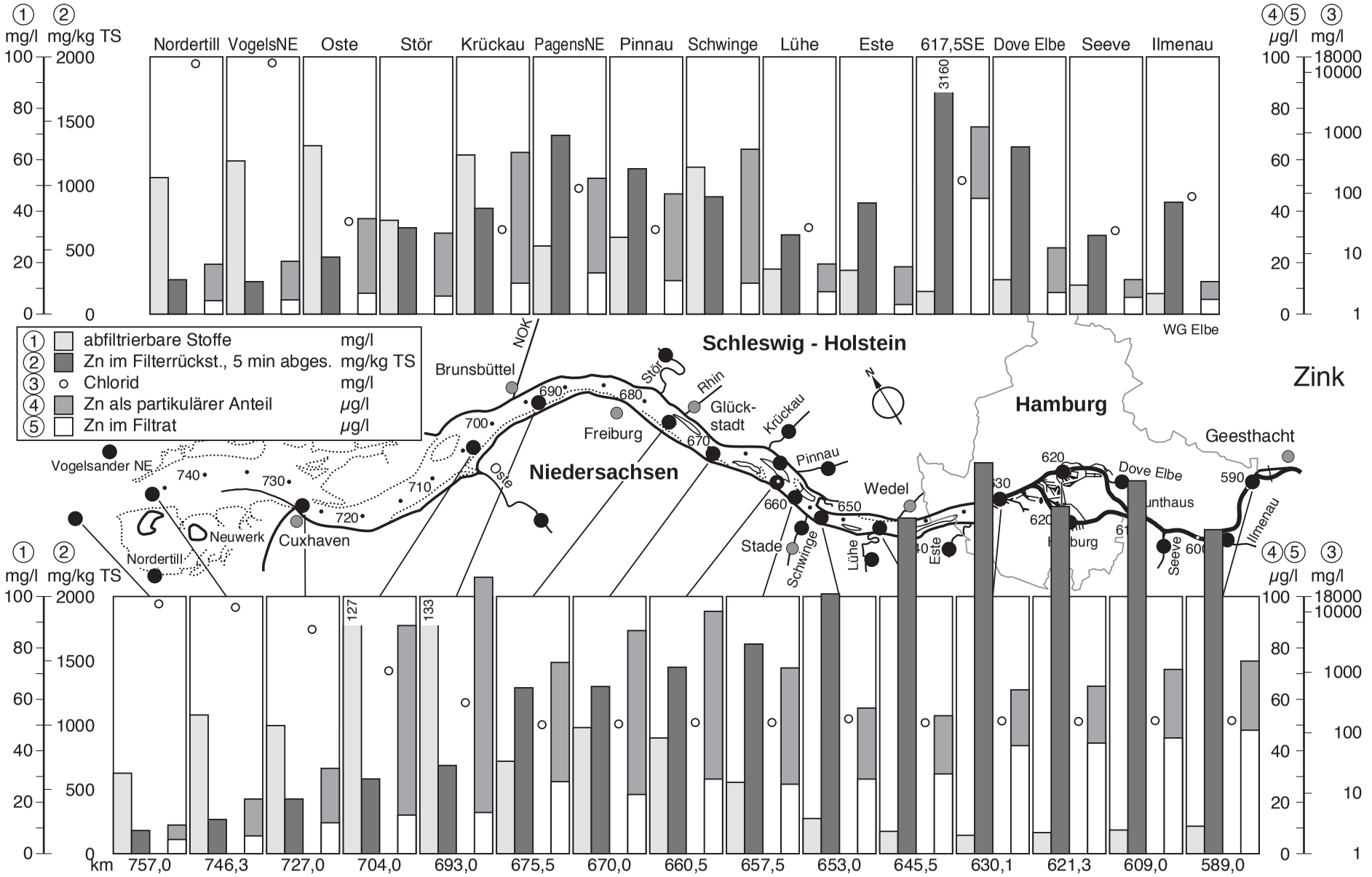


Abb. 95 Zink-Längsprofil der Elbe am 23.02.1988 (Qo=1050 m³/s)

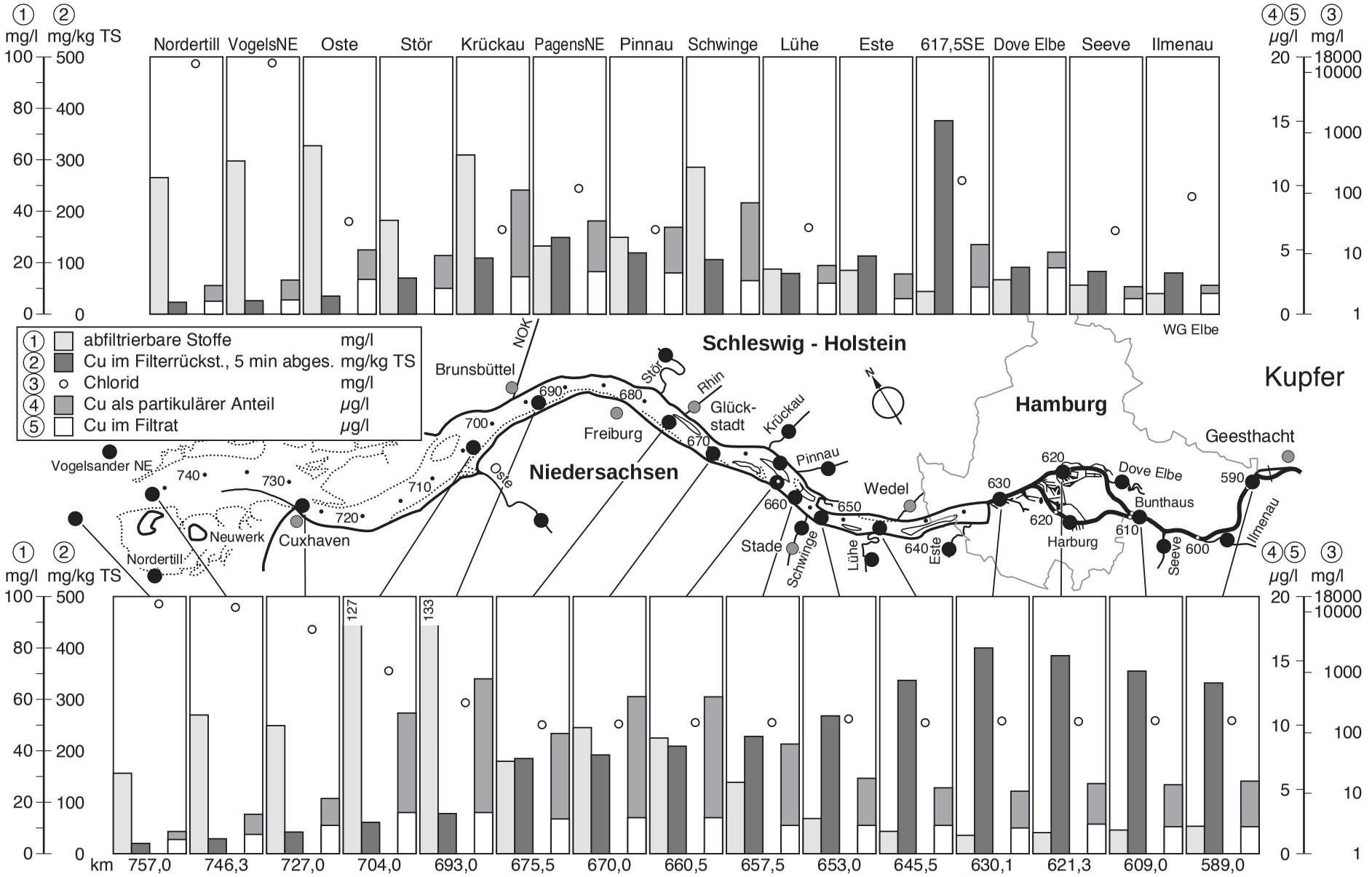


Abb. 96 Kupfer-Längsprofil der Elbe am 23.02.1988 (Qo=1050 m³/s)

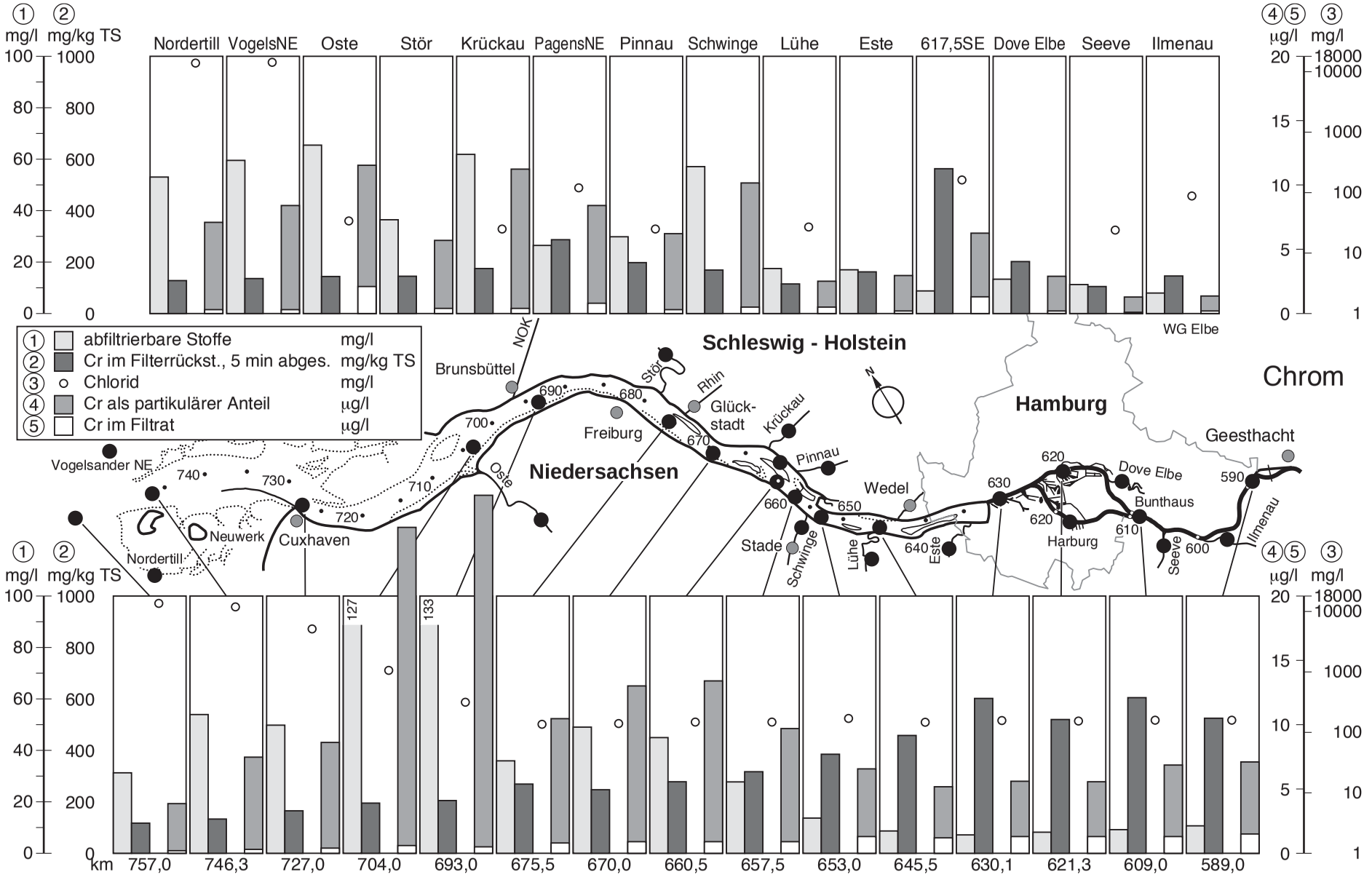


Abb. 97 Chrom-Längsprofil der Elbe am 23.02.1988 (Qo=1050 m³/s)

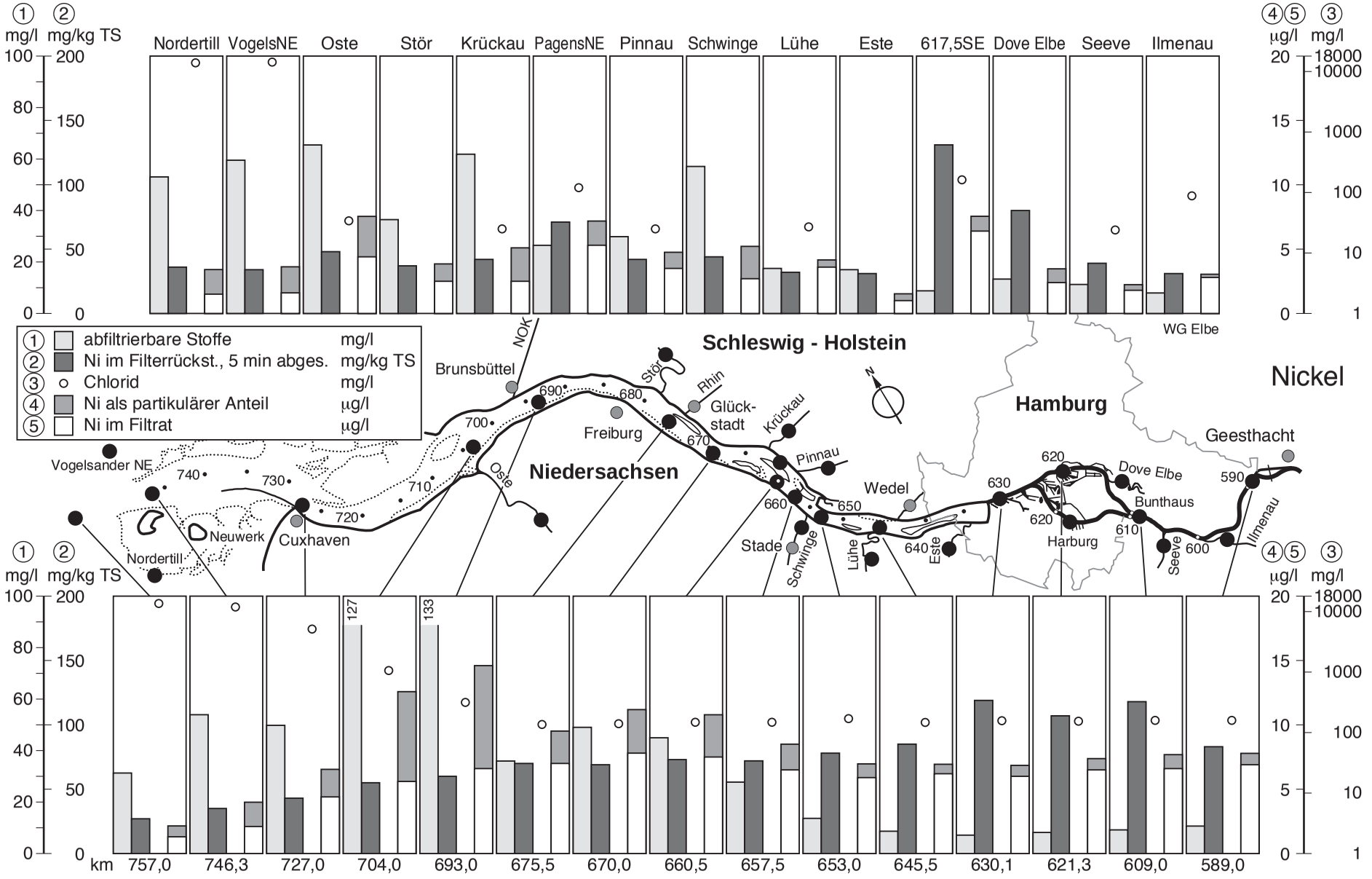


Abb. 98 Nickel-Längsprofil der Elbe am 23.02.1988 (Qo=1050 m³/s)

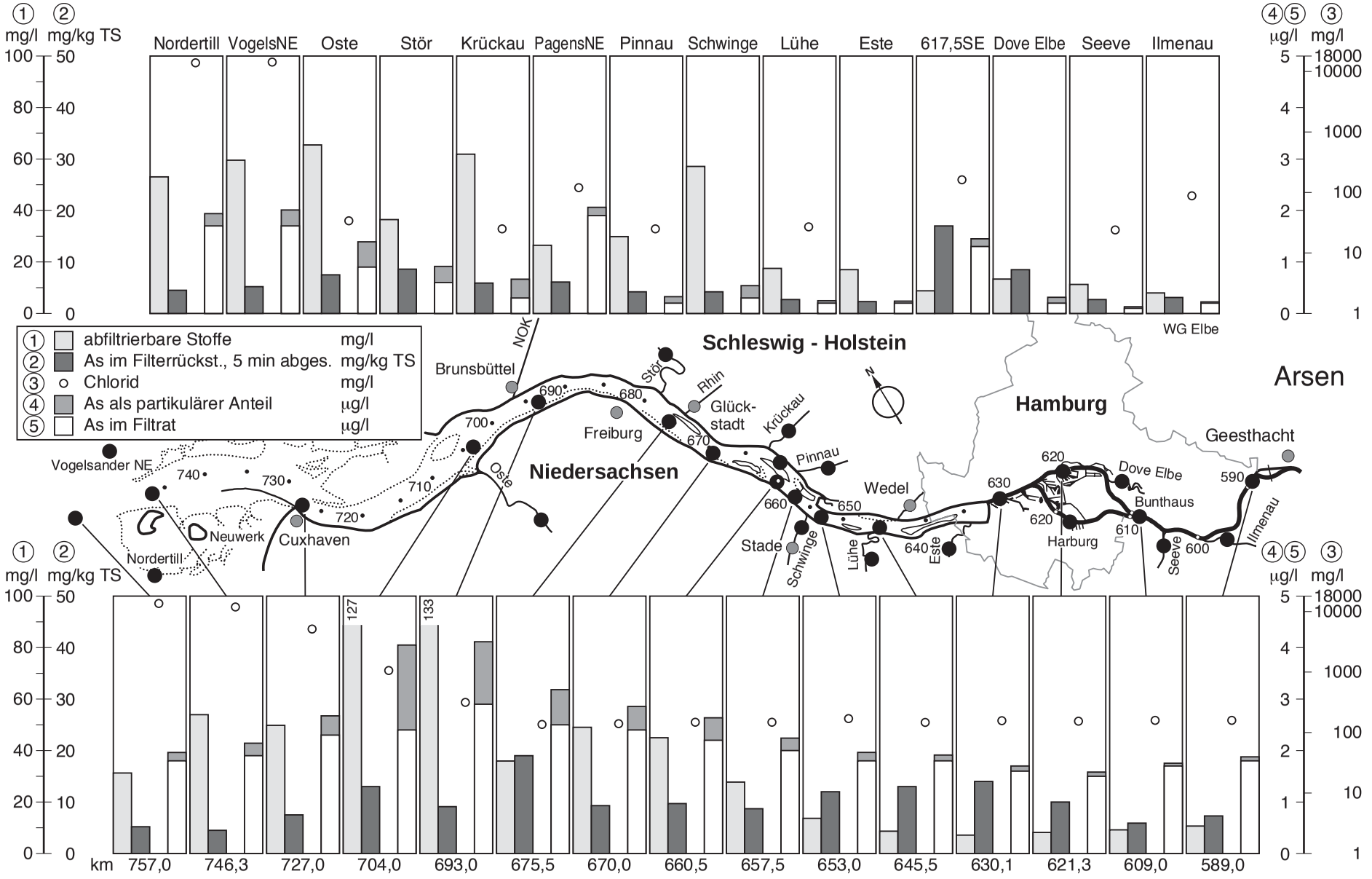


Abb. 99 Arsen-Längsprofil der Elbe am 23.02.1988 (Qo=1050 m³/s)

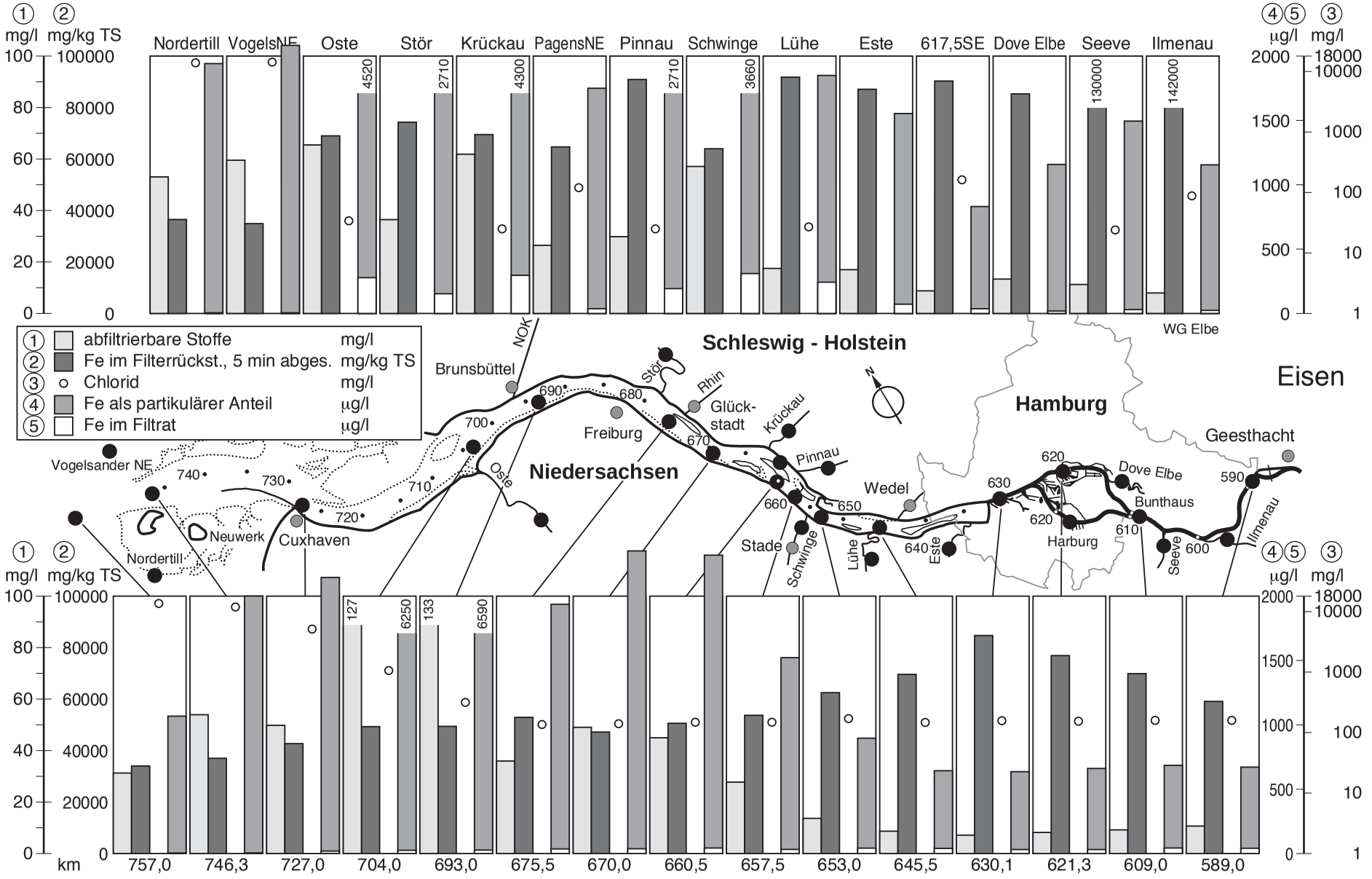


Abb.100 Eisen-Längsprofil der Elbe am 23.02.1988 (Qo=1050 m³/s)

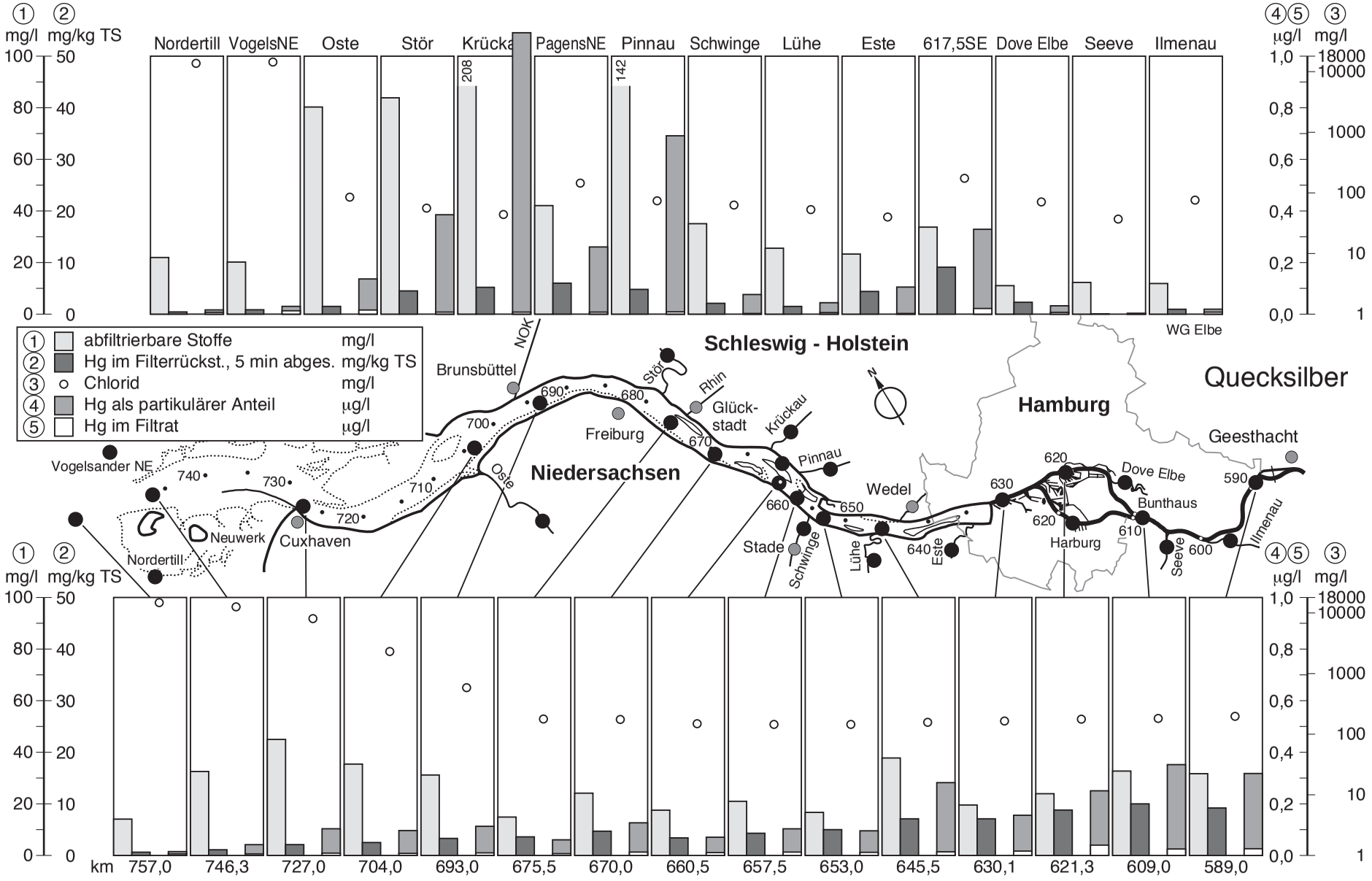


Abb.101 Quecksilber-Längsprofil der Elbe am 17.05.1988 (Qo=618 m³/s)

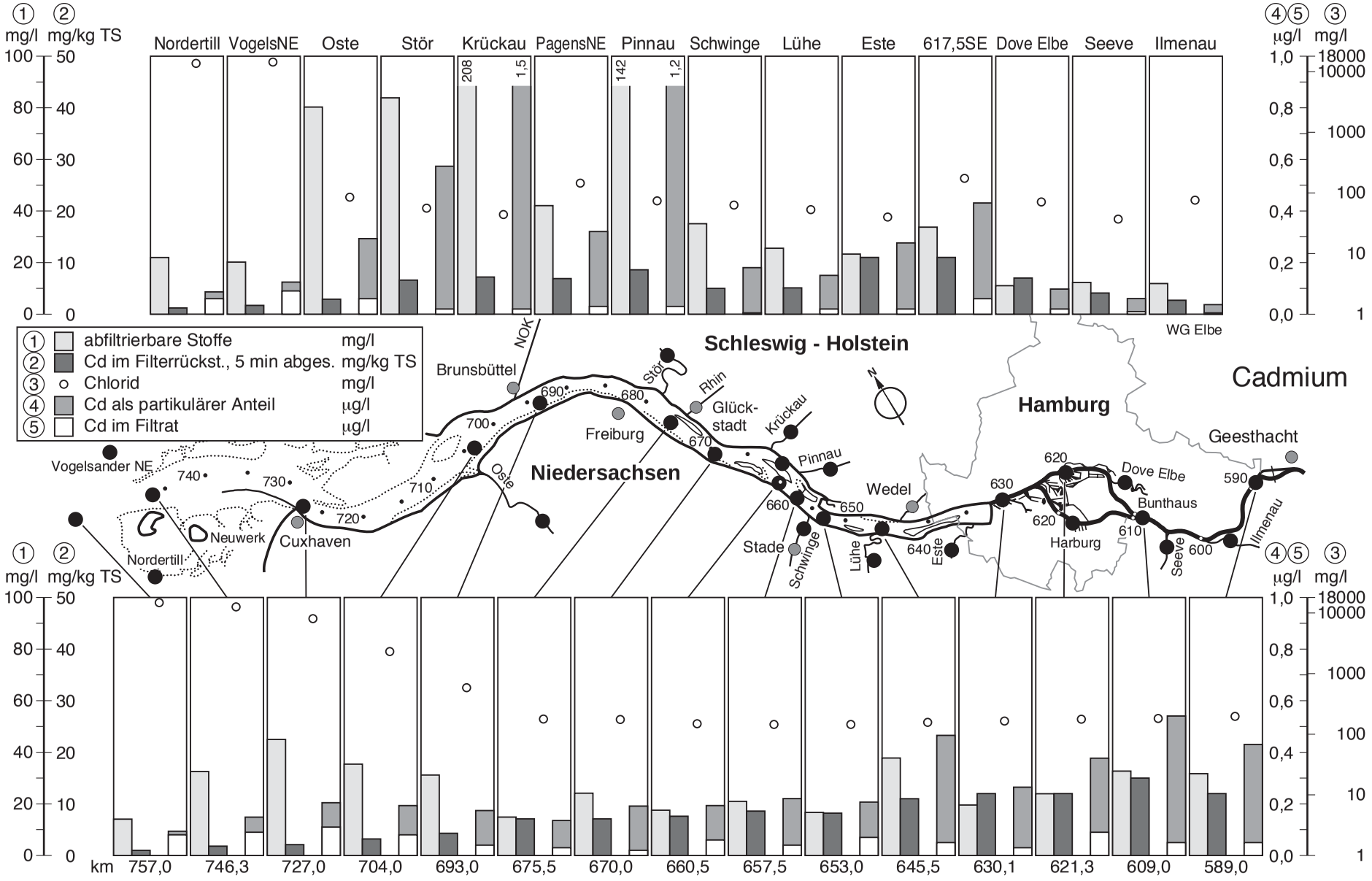


Abb.102 Cadmium-Längsprofil der Elbe am 17.05.1988 (Qo=618 m³/s)

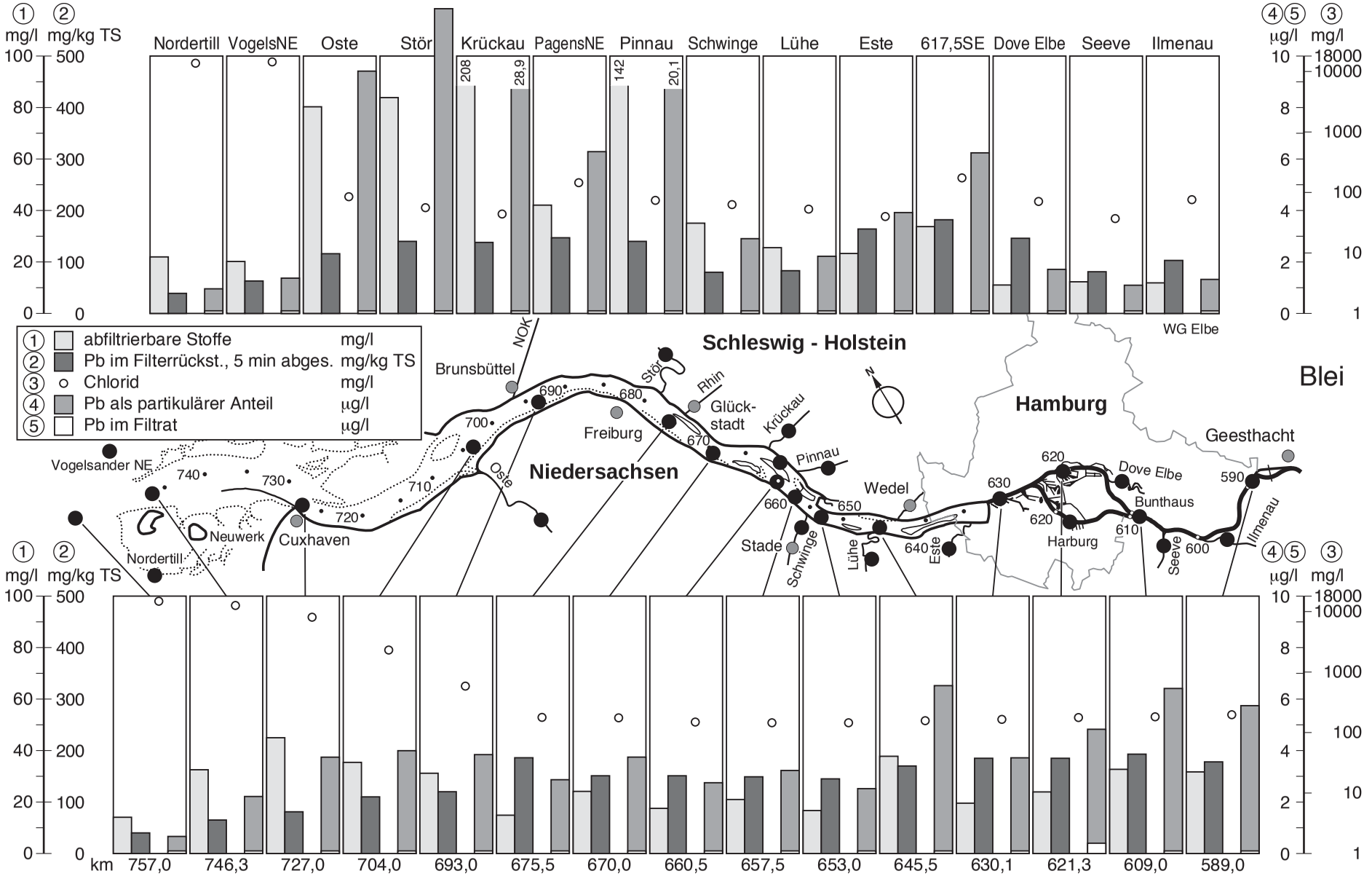


Abb.103 Blei-Längsprofil der Elbe am 17.05.1988 (Qo=618 m³/s)

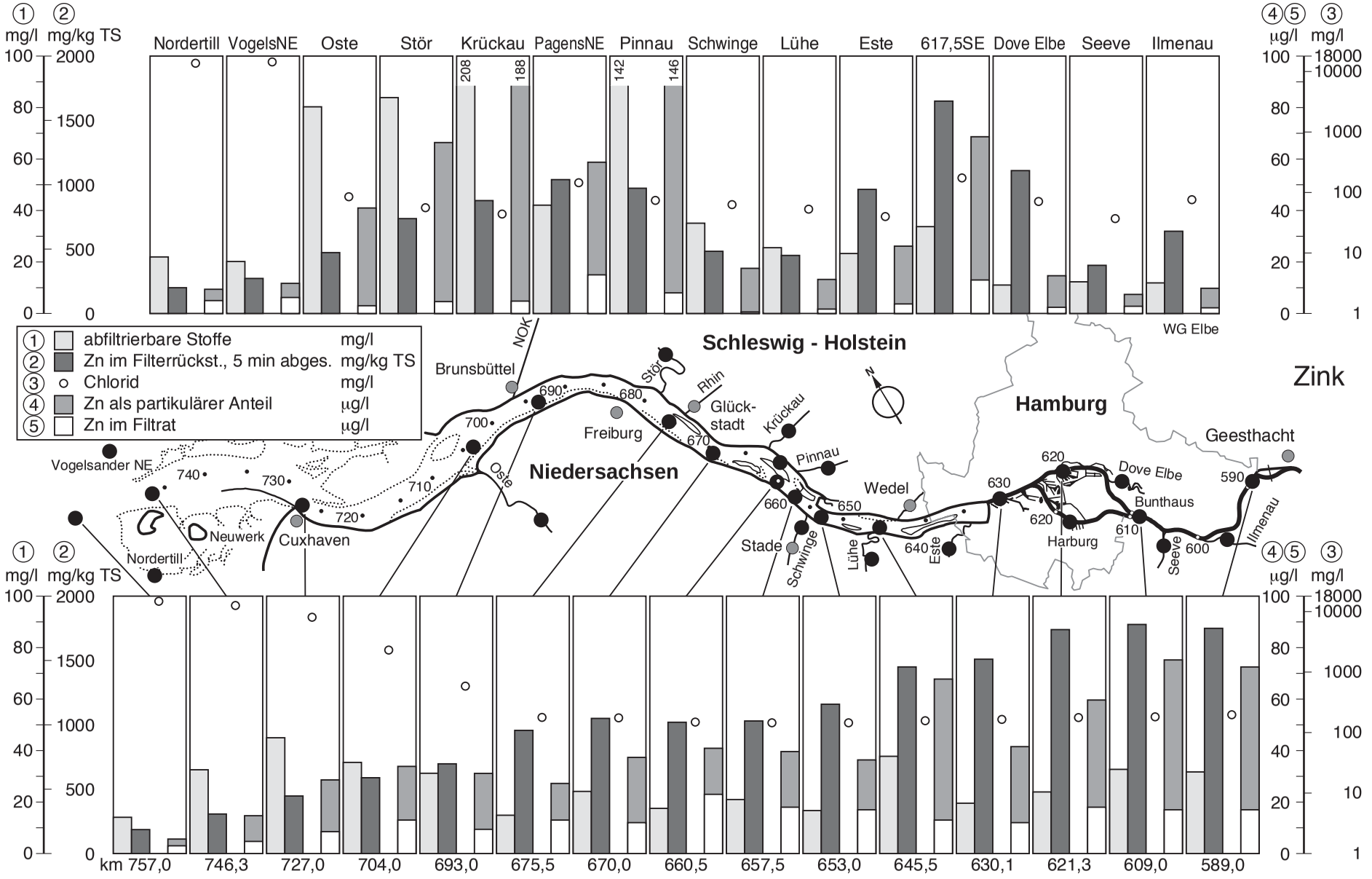


Abb.104 Zink-Längsprofil der Elbe am 17.05.1988 (Qo=618 m³/s)

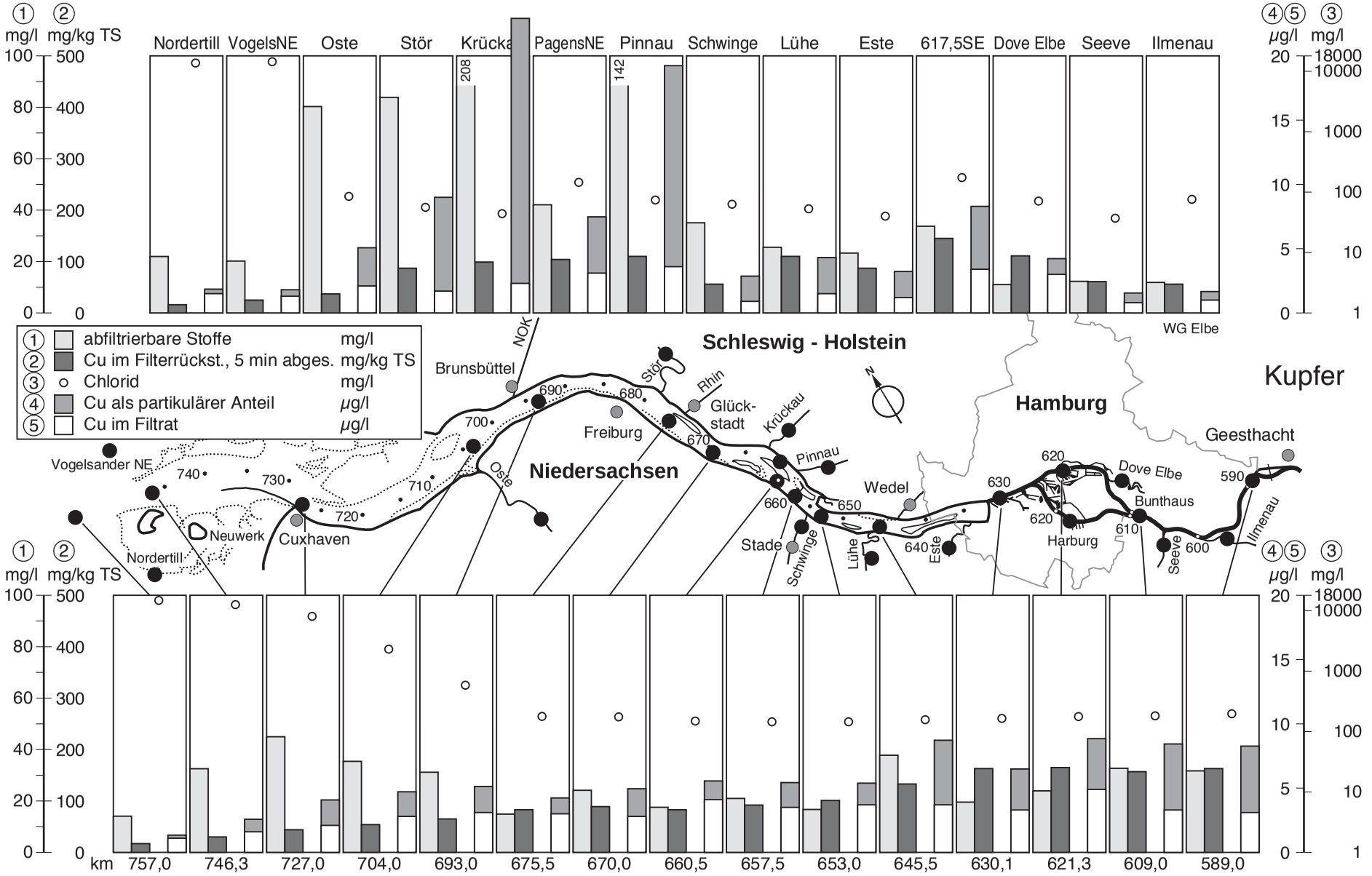


Abb.105 Kupfer-Längsprofil der Elbe am 17.05.1988 (Qo=618 m³/s)

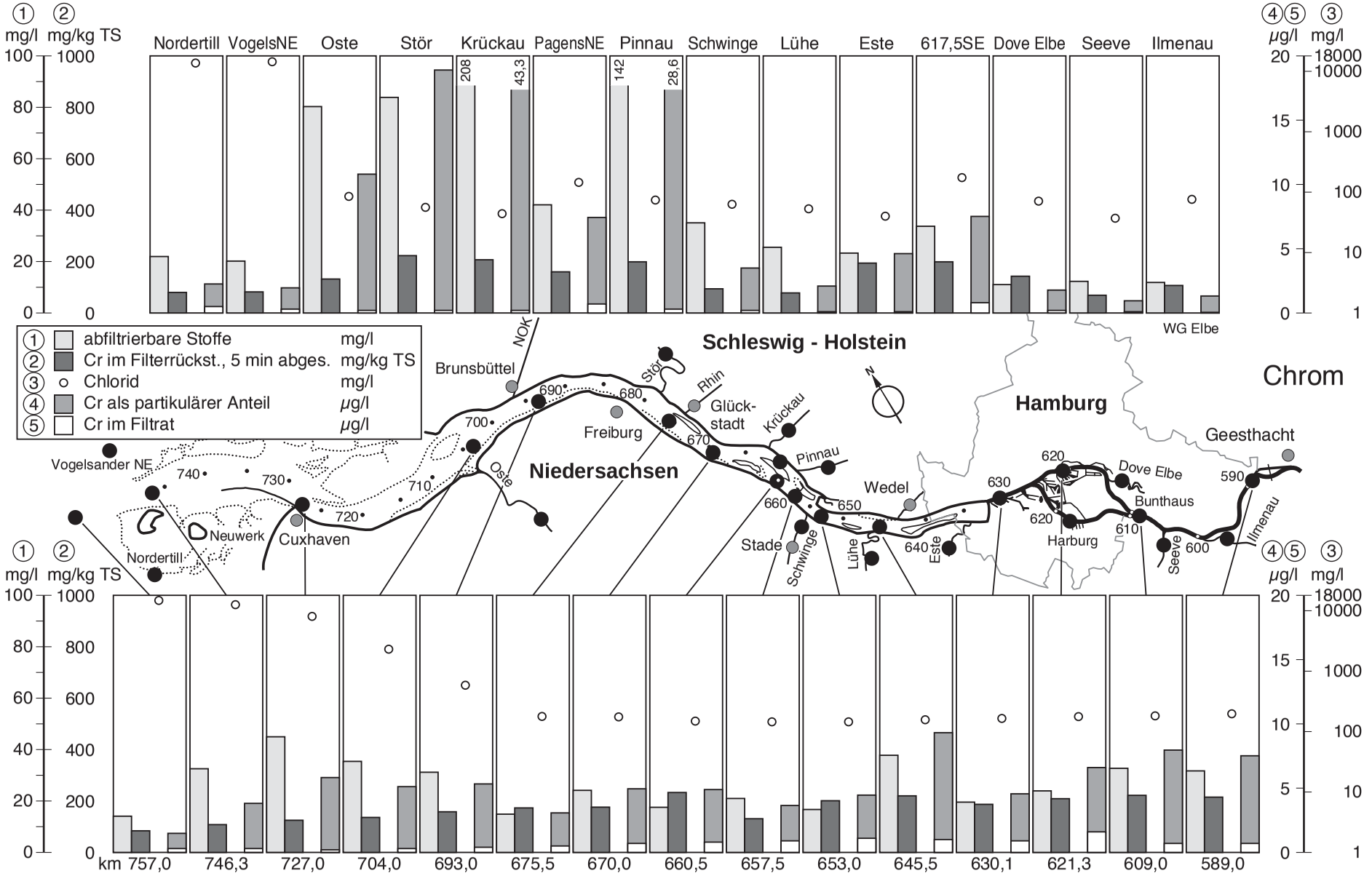


Abb.106 Chrom-Längsprofil der Elbe am 17.05.1988 (Qo=618 m³/s)

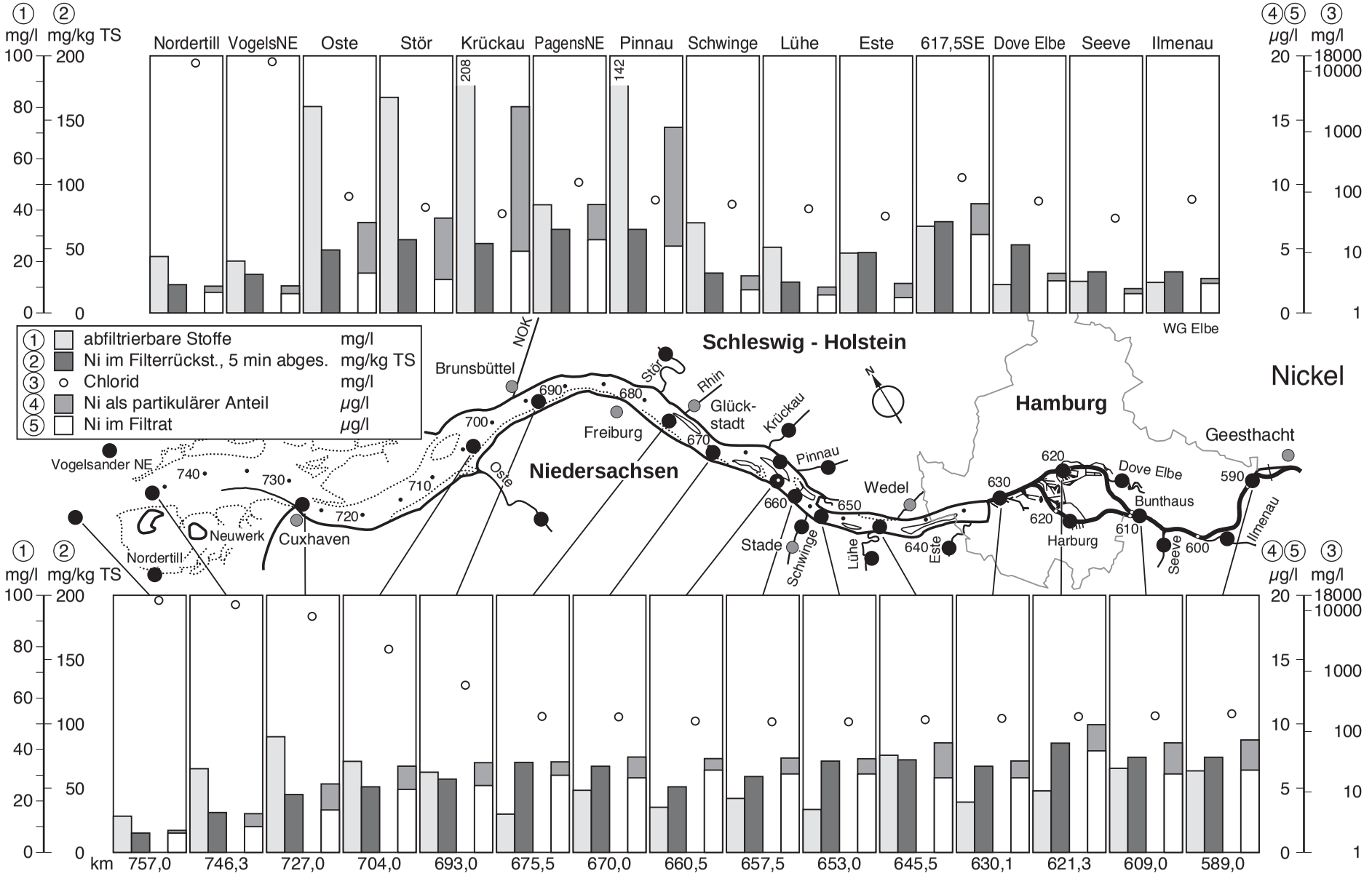


Abb.107 Nickel-Längsprofil der Elbe am 17.05.1988 (Qo=618 m³/s)

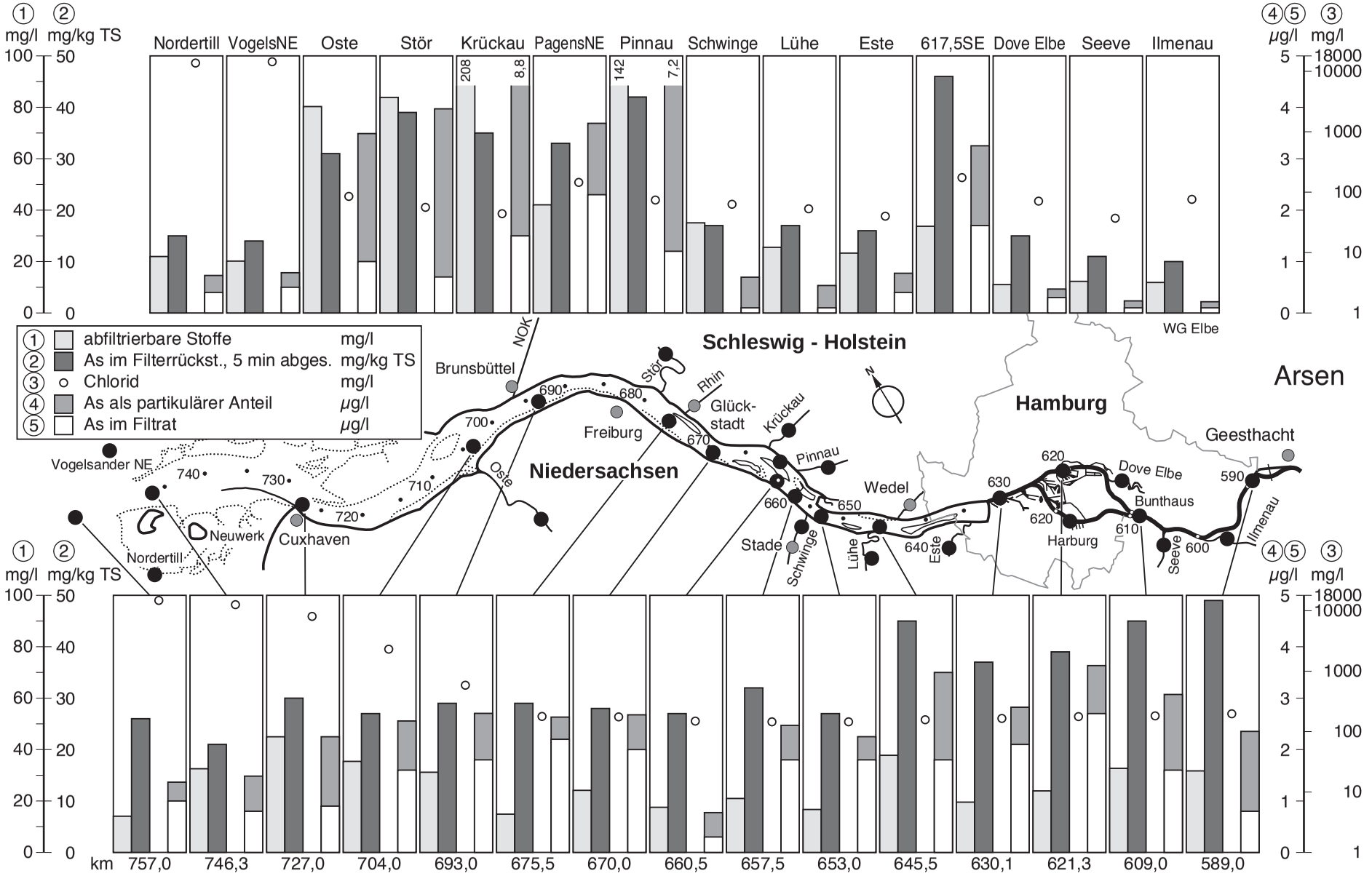


Abb.108 Arsen-Längsprofil der Elbe am 17.05.1988 (Qo=618 m³/s)

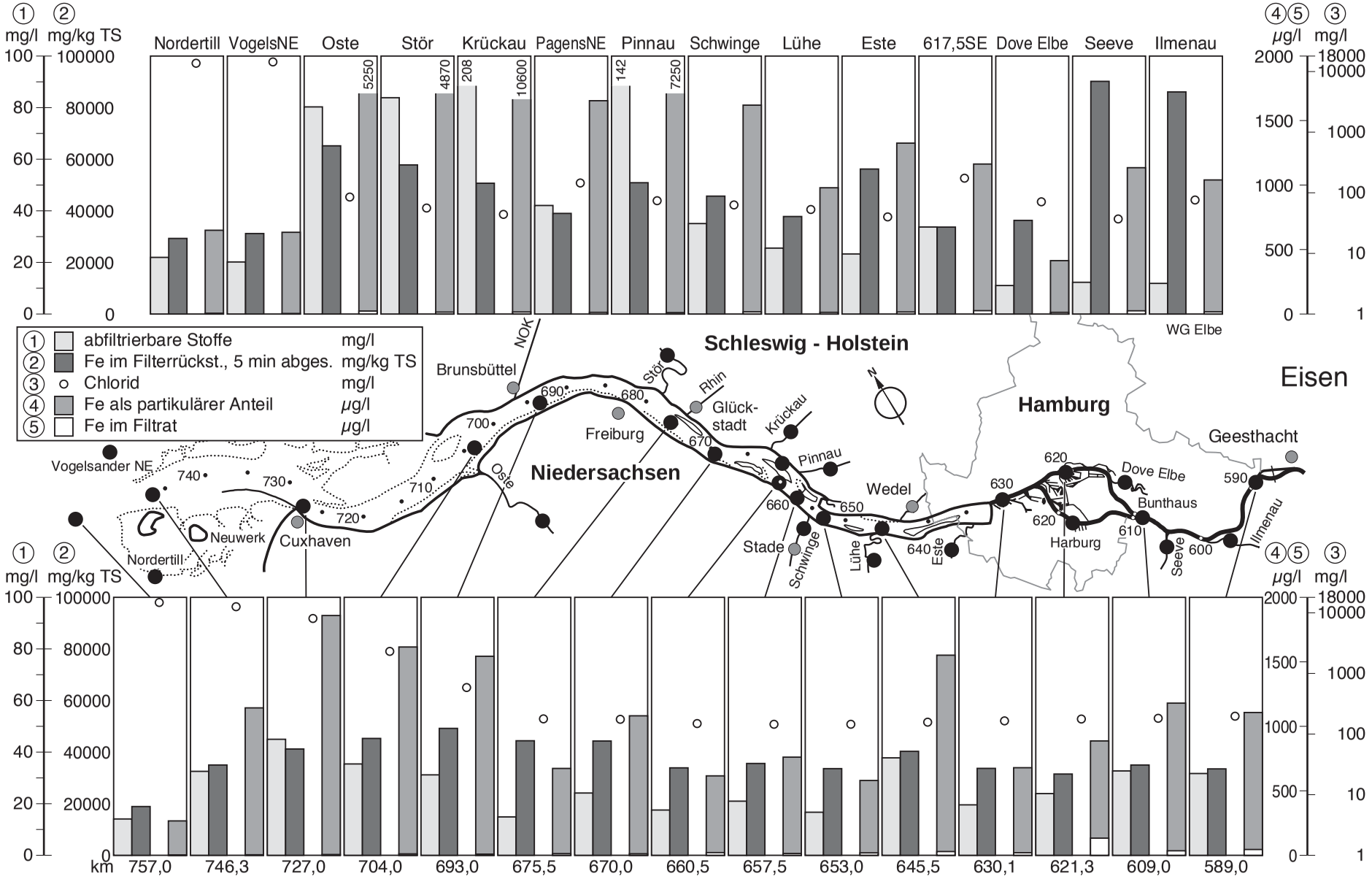


Abb.109 Eisen-Längsprofil der Elbe am 17.05.1988 (Qo=618 m³/s)

belasteten Schwebstoffen aus dem Elbmündungsgebiet bei dieser hydrologischen Situation vergleichsweise gering war.

Die an den Wasserproben gemessenen Gesamt-Schwermetallgehalte zeigen bei diesem Längsprofil wiederum die Abhängigkeit zu dem jeweils miterfaßten Schwebstoffgehalt auf. So sind die erhöhten Schwermetallkonzentrationen in der Elbwasserprobe in Höhe Lühemündung eindeutig auf den in dieser Probe erhöhten Schwebstoffgehalt zurückzuführen, wie ein Blick auf die spezifische Beladung zeigt. Da Eisen zu fast 100 % in einer schwebstoffgebundenen Form vorliegt, zeigt das Längsprofil der Eisengehalte des Elbwassers einen nahezu proportionalen Verlauf zum Schwebstoffgehalt. Die sehr hohen Eisenkonzentrationen im Streckenabschnitt Brunsbüttel und Cuxhaven mit Spitzenwerten von 1.500 bis 1.800 µg/l sind eindeutig auf die Schwebstoffgehalte in der natürlichen Trübungszone zurückzuführen. Die spezifischen Beladungen mit Werten von 40 bis 50 g/kg TS der Schwebstoffe liegen in der natürlichen Größenordnung.

Aufgrund der ergiebigen Niederschläge im Frühjahr 1988 führten auch im Mai die Elbnebenflüsse noch erhöhte Abflüsse. Dadurch wurde das Vordringen von Schwebstoffen aus der Elbe, insbesondere in die Unterläufe von Ilmenau und Seeve, weitgehend unterbunden. Die niedrigen spezifischen Beladungen der Schwebstoffe zeigen in dieser Phase, daß die Schwermetallbelastung in der Regel nicht von den Elbnebenflüssen ausgeht. Die erhöhten Konzentrationen im Wasser der Nebenflüsse Pinnau, Krückau und Stör sind eindeutig auf die stark erhöhten Schwebstoffgehalte zurückzuführen. Die Schwermetallbeladung der Schwebstoffe wiederum zeigt ein für diese Flußunterläufe normales Belastungsniveau.

4.6 Zusammenfassende Bewertung

4.6.1 Auswertung der Querprofilmischproben Glückstadt/Grauerort 1986 - 1988

Durch die Einführung der getrennten Bestimmung der Schwermetallkonzentrationen in der gelösten Phase (filtriertes Wasser) und der partikulären Phase (Schwebstoff) konnte gegenüber den bisher üblichen Gesamtbestimmungen eine erhebliche Verbesserung der Interpretierbarkeit der Daten erreicht werden. Hierdurch wurden überhaupt erst die vorstehenden Erläuterungen der Befunde ermöglicht. Gleichzeitig bieten diese systematisch erhobenen Datensätze eine geeignete Grundlage für eine weiterführende Auswertung, z. B. nach Vorstellungen von DUINKER, HILLEBRAND, NOLTING und WELLERSHAUS*. Ihre Untersuchungen an Proben aus unterschiedlicher Wassertiefe, die bei Strom-km 658,5 und 673,5 am 31. August 1976 entnommen worden waren, hatten ergeben, daß für die Schwermetalle Cadmium, Zink, Kupfer und Blei eine deutliche Abhängigkeit zum jeweiligen Schwebstoffgehalt besteht, während sich für Eisen eine derartige Abhängigkeit nicht ergab. Die Autoren erklärten diesen Befund mit der Einmischung unterschiedlicher Anteile größerer und schwererer Partikel, da insbesondere in den bodennahen Proben ein höherer Schwebstoffgehalt und ein niedrigerer Schwermetallgehalt, z. B. Cadmium, festgestellt worden war.

* DUINKER, HILLEBRAND, NOLTING, WELLERSHAUS (1982): The River Elbe - Processes affecting the Behavior of Metals and Organochlorines during Estuarine Mixing. Netherlands Journal of Sea Research 15(2): 141-169.

Eine entsprechende Auswertung der ARGE-ELBE-Meßdaten des Querprofils Glückstadt/Grauerort ist in Abb. 110 und 111 dargestellt. Das Datenkollektiv umfaßt den gesamten Untersuchungszeitraum von 1986 bis 1988 und damit zum Teil sehr unterschiedliche hydrologische Bedingungen. Die Schwebstoffgehalte und die Schwermetallbeladungen wurden jeweils an Querprofilmischproben nach 5minütiger Absetzzeit bestimmt, so daß das "Rauschen" durch unterschiedliche Feinsandanteile unterdrückt wurde. Die Ergebnisse zeigen keinen straffen, eindeutigen Zusammenhang zwischen der Schwermetallbeladung und dem jeweiligen Schwebstoffgehalt.

Für die Schwermetalle, für die eine deutliche, über das natürliche Niveau erhöhte Belastung vorliegt, wie z. B. Quecksilber, Cadmium, Blei, Zink, Kupfer und Chrom, können bei niedrigen Schwebstoffgehalten sowohl hohe als auch niedrige, spezifische Schwermetallbeladungen der Schwebstoffe vorliegen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß niedrige bis mittlere Schwebstoffgehalte im Querprofil Glückstadt/Grauerort bei unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen, z. B. bei mittleren Oberwasserabflüssen, in der Anstiegsphase einer Oberwasserwelle, während des Abflußscheitels und auch nach dem Abfluß von Hochwasserwellen, auftreten können. In der Regel wird nach einer Periode mit niedrigen Oberwasserabflüssen in der ersten Phase einer Oberwasserwelle in verstärktem Maße hochbelasteter Schwebstoff aus dem oberen Elbabschnitt in die Unterelbe bis in den Bereich Glückstadt transportiert, so daß in dieser Situation die höchsten Schwermetallbelastungen der Schwebstoffe auftreten. Nach dem Abfluß von ausgeprägten Hochwasserwellen ist der überwiegende Anteil der hochbelasteten Schwebstoffe aus dem Flußbett ausgespült, so daß in dieser Phase "frische" Schwebstoffe mit einer niedrigeren Schwermetallbelastung überwiegen.

Erhöhte Schwebstoffgehalte über 100 mg/l treten im Querprofil Glückstadt/Grauerort jedoch nur in Phasen anhaltend niedriger Oberwasserabflüsse, wenn die oberen Ausläufer der Trübungswolke und der Brackwasserzone das Meßprofil erreichen, auf.

In der Trübungswolke besteht in der Regel ein ausgeprägter Konzentrationsgradient für die Schwermetallbelastung der Schwebstoffe, seewärts abnehmend (vergleiche Kapitel 4.5 - Längsprofile), hervorgerufen durch die Einmischung geringer belasteter Schwebstoffe aus dem marinen Milieu der Elbmündung. Sehr hohe Schwebstoffgehalte sind deshalb im Querprofil in der Regel mit einem erhöhten Anteil eingemischter, geringer belasteter Schwebstoffe verknüpft. Abweichungen von dieser Systematik können, insbesondere durch künstliche Eingriffe, wie Baggerungen bzw. Verklappungen, regional hervorgerufen werden.

Für Eisen, aber auch für Nickel, ist diese Systematik nicht gegeben, da für diese Elemente keine ausgeprägte anthropogene Belastungserhöhung vorliegt und deshalb der Eisen- und Nickelgehalt auch der aus dem Elbmündungsbereich stammenden Schwebstoffe immer in etwa die gleiche Größenordnung aufweist.

Zur Charakterisierung der Schwebstoffe, und insbesondere der Elemente, wird in der wissenschaftlichen Literatur zum Teil als Referenzelement Eisen zugrunde gelegt. In Abb. 112 ist eine entsprechende Auswertung der Befunde für das Querprofil Grauerort vorgenommen worden. Die große Streuung der Werte verdeutlicht, daß im Falle des Elbschwebstoffes keine funktionale Beziehung zwischen dem Schwermetallgehalt und dem Eisengehalt der Schwebstoffe besteht. Eisen kann deshalb nicht als Leitelement für die Beurteilung der Schwermetallbelastung der Elbschwebstoffe zugrunde gelegt werden.

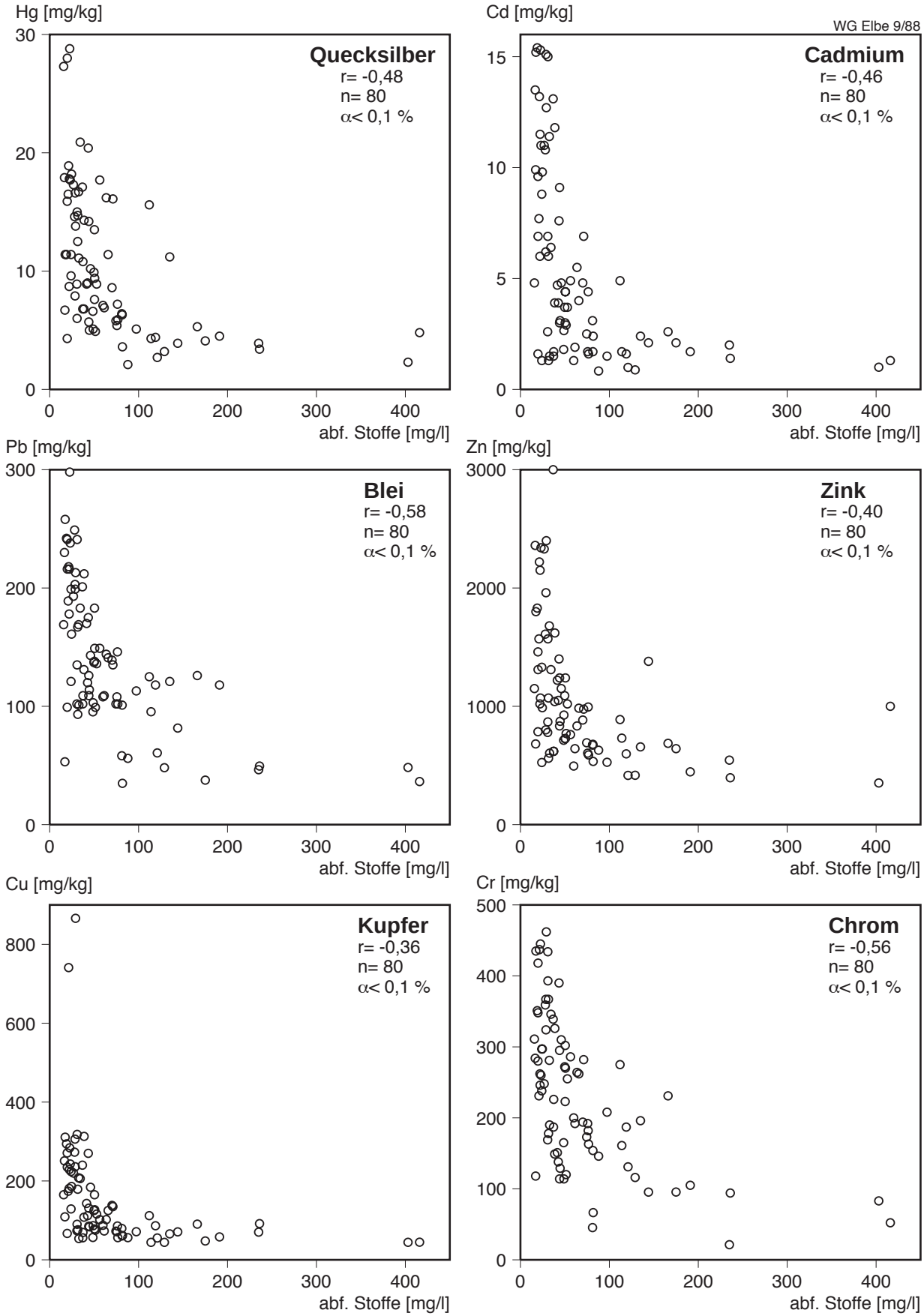


Abb.110 Verhältnis der Schwebstoffbeladung mit Schwermetallen zum Schwebstoffgehalt des Elbwassers - Querprofilmischproben Glückstadt / Grauerort 1986 bis 1988 - Filtration nach 5 Minuten Absetzzeit

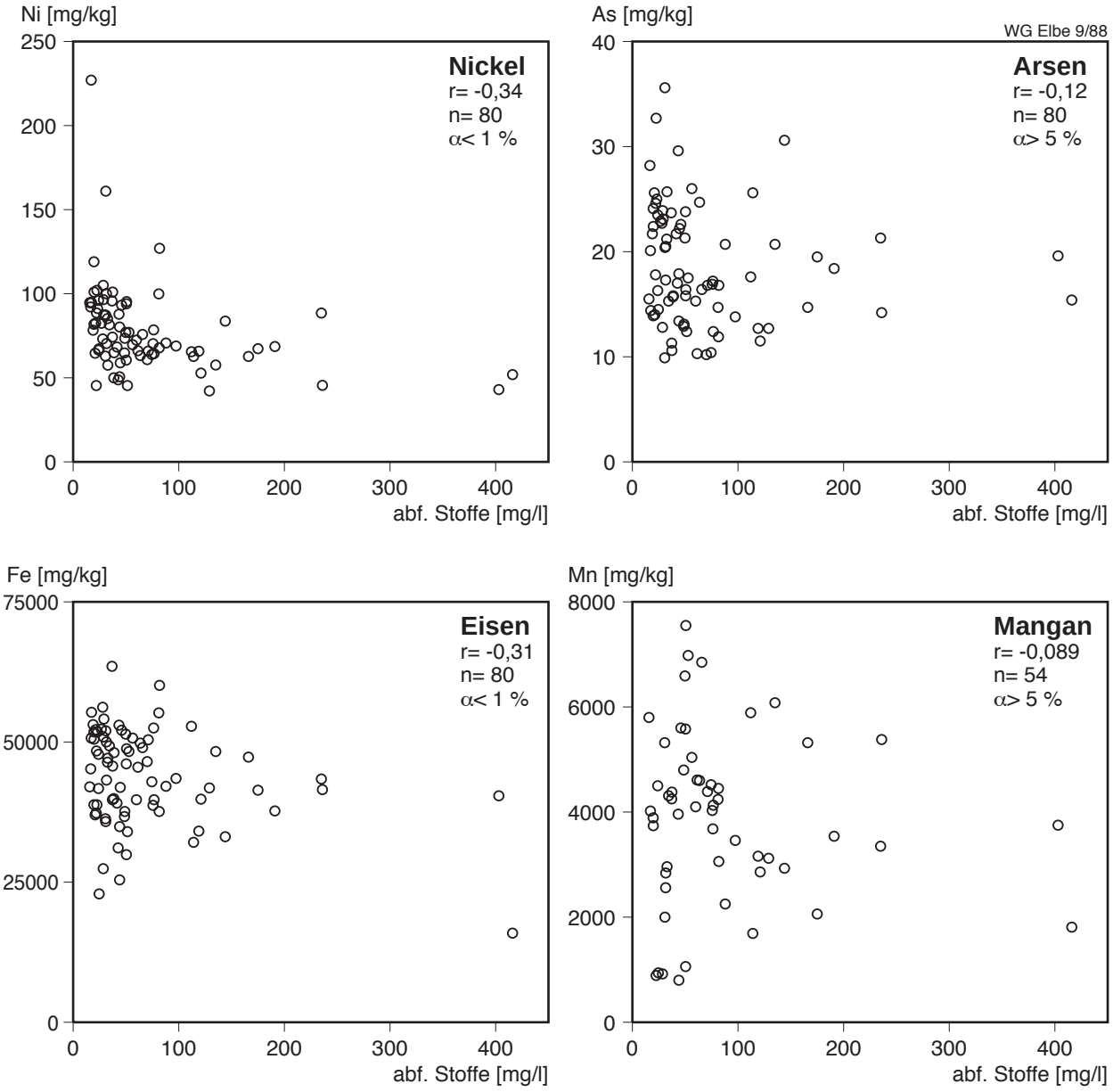


Abb.111 Verhältnis der Schwebstoffbeladung mit Schwermetallen zum Schwebstoffgehalt des Elbwassers - Querprofilmischproben Glückstadt / Grauerort 1986 bis 1988 - Filtration nach 5 Minuten Absetzzeit

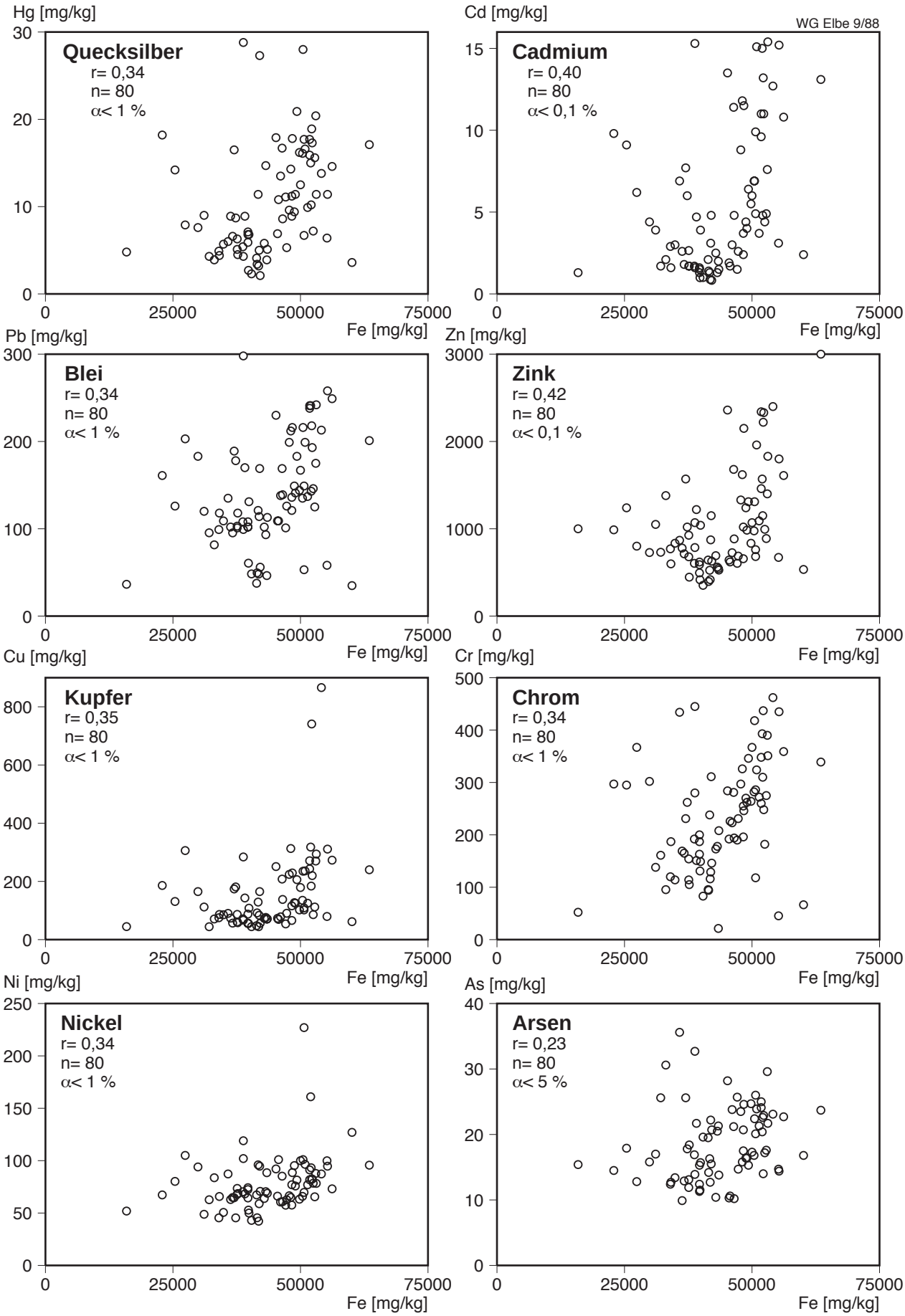


Abb.112 Verhältnis der Schwebstoffbeladung mit Schwermetallen zum Eisengehalt der Schwebstoffe - Querprofilmischproben Glückstadt / Grauerort 1986 bis 1988 - Filtration nach 5 Minuten Absetzzeit

Zwischen der spezifischen Beladung der Schwebstoffe mit Schwermetallen, die deutlich über die natürliche Grundbelastung erhöht vorliegen und dem Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen ergibt sich zwar ein deutlicher Zusammenhang (Abb. 110 und 111); die Streuung einzelner Werte ist jedoch so groß, daß für die Überwachungspraxis das zu untersuchende Schwermetallspektrum nicht auf wenige Leitelemente eingeschränkt werden kann.

Ein Überblick über die mittleren Schwermetallkonzentrationen und die Streuungen gibt Abb. 113. Die "BOX AND WHISKER PLOTS" zeigen die Medianwerte und Quartile der spezifischen Beladung der Schwebstoffe mit Schwermetallen. In Tabelle 5 darunter sind die Ergebnisse einer Korrelationsanalyse zusammengestellt. Die statistische Auswertung zeigt, daß für die Elemente Quecksilber, Cadmium, Blei und Chrom eine ausgeprägte Korrelation besteht. Für die Elemente Nickel, Eisen und Mangan ergeben sich in bezug zu den übrigen Schwermetallen ausgesprochen niedrige Korrelationskoeffizienten. Dieser Befund ergibt sich aus den unterschiedlichen anthropogenen Belastungsniveaus. Die Konzentrationen von Quecksilber, Cadmium, Blei, Zink, Kupfer, Chrom und Arsen weisen aufgrund ihrer überwiegend anthropogenen Herkunft eine andere Variabilität auf, als die Konzentrationen von Nickel, Eisen und Mangan, die überwiegend im natürlichen Konzentrationsniveau schwanken.

4.6.2 Auswertung der Längsprofilergebnisse

Durch die im folgenden vorgenommenen, weiterführenden Auswertung sollen systematische Abhängigkeiten zwischen den Meßdaten und den Begleitparametern, wie Schwebstoffgehalt und Chloridgehalt, überprüft werden. Mit den Längsprofilbeprobungen in der Phase des voll entwickelten Ebbestromes erfolgte jeweils bei einer bestimmten hydrologischen Situation eine Aufnahme der räumlichen Gesamtverteilung über das gesamte Elbeästuar. Die in Kapitel 4.5 erläuterten einzelnen Befunde der Querprofiluntersuchungen zeigen bereits, daß für eine weitergehende Auswertung zwischen dem limnischen Bereich der Elbe, der Brackwasser und Trübungszone und dem mehr marin geprägten Bereich der Außenelbe unterschieden werden muß. Da aufgrund unterschiedlicher Oberwasserabflüsse die Brackwasserzone und die Trübungszone räumlich verlagert werden, muß der Bereich der Brackwasserzone anhand der Salzgehaltsänderungen bzw. des Anstiegs der Leitfähigkeit definiert werden.

Für die folgende Auswertung des partikulären Anteils am Gesamtschwermetallgehalt des Elbwassers (Abb. 114) wurde für die obere Brackwassergrenze ein Anstieg des Chloridgehaltes um 30 mg/l Cl über das limnische Niveau hinaus und für die seewärtige Grenze das Überschreiten einer Chloridkonzentration von 3000 mg/l Cl zugrunde gelegt. Der Elbmündungsbereich wurde verkürzt als mariner Bereich bezeichnet. Für die einzelnen Schwermetalle erfolgte mit der Methode der "BOX AND WHISKER PLOTS" eine einfache, vergleichende statistische Auswertung. Die Ergebnisse zeigen für den limnischen und für den Brackwasserbereich im Mittel (Medianwerte), daß die Schwermetalle Quecksilber, Blei und Eisen zu über 90 % in partikulärer Form vorliegen. Für den marin geprägten Bereich lassen die Auswertungen für diese Schwermetalle ebenfalls einen hohen prozentualen partikulären Anteil erkennen, jedoch bei einer deutlich erhöhten Streuung. Bei einer Beurteilung dieser Befunde muß jedoch berücksichtigt werden, daß durch die geringeren Konzentrationen im marinen Milieu zwangsläufig die Meßfehler (z. B. durch Blindwerte usw.) relativ zunehmen. Auch Chrom liegt im Mittel zu über 85 % in allen drei Elbabschnitten in partikulärer Form vor.

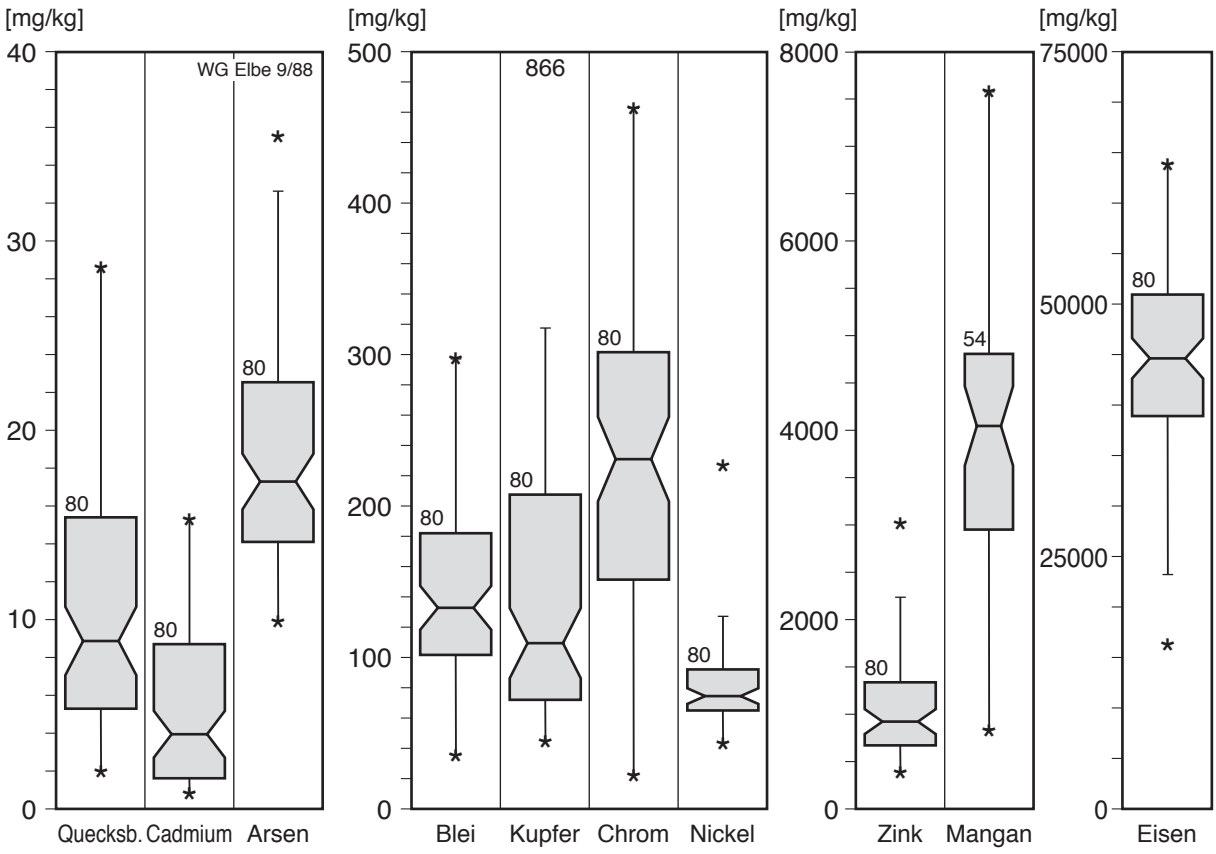


Abb. 113 Medianwerte und Quartile der Schwebstoffbeladung mit Schwermetallen (Querprofilmischproben (5 min abgesetzt), Glückstadt/ Grauerort 1986 - 1988)

Tab. 5 lineare Korrelation zwischen den Schwebstoffbeladungen mit Schwermetallen. (Querprofilmischproben, Filtration nach 5 min Absetzzeit, Glückstadt/ Grauerort 1986 - 1988)

	Hg	Cd	Pb	Zn	Cu	Cr	Ni	As	Fe	Mn
Hg		0,66* (80)	0,73* (80)	0,59* (80)	0,52* (80)	0,71* (80)	0,23 (80)	0,41* (80)	0,34 (80)	0,07 (54)
Cd			0,84* (80)	0,83* (80)	0,73* (80)	0,72* (80)	0,41* (80)	0,43* (80)	0,40* (80)	-0,24 (54)
Pb				0,74* (80)	0,70* (80)	0,84* (80)	0,20 (80)	0,38* (80)	0,34 (80)	-0,02 (54)
Zn					0,71* (80)	0,58* (80)	0,22 (80)	0,42* (80)	0,42* (80)	0,08 (54)
Cu						0,71* (80)	0,24 (80)	0,22 (80)	0,35 (80)	-0,14 (54)
Cr			r (n)				0,29 (80)	0,34 (80)	0,34 (80)	-0,03 (54)
Ni								0,18 (80)	0,34 (80)	-0,06 (54)
As									0,23 (80)	-0,18 (54)
Fe										0,59* (54)
abfilt. Stoffe	-0,48* (80)	-0,46* (80)	-0,58* (80)	-0,40* (80)	-0,36* (80)	-0,56* (80)	-0,34 (80)	-0,12 (80)	-0,31 (80)	-0,09 (54)

* = signifikant für eine Irrtumswahrscheinlichkeit kleiner 0,1 %

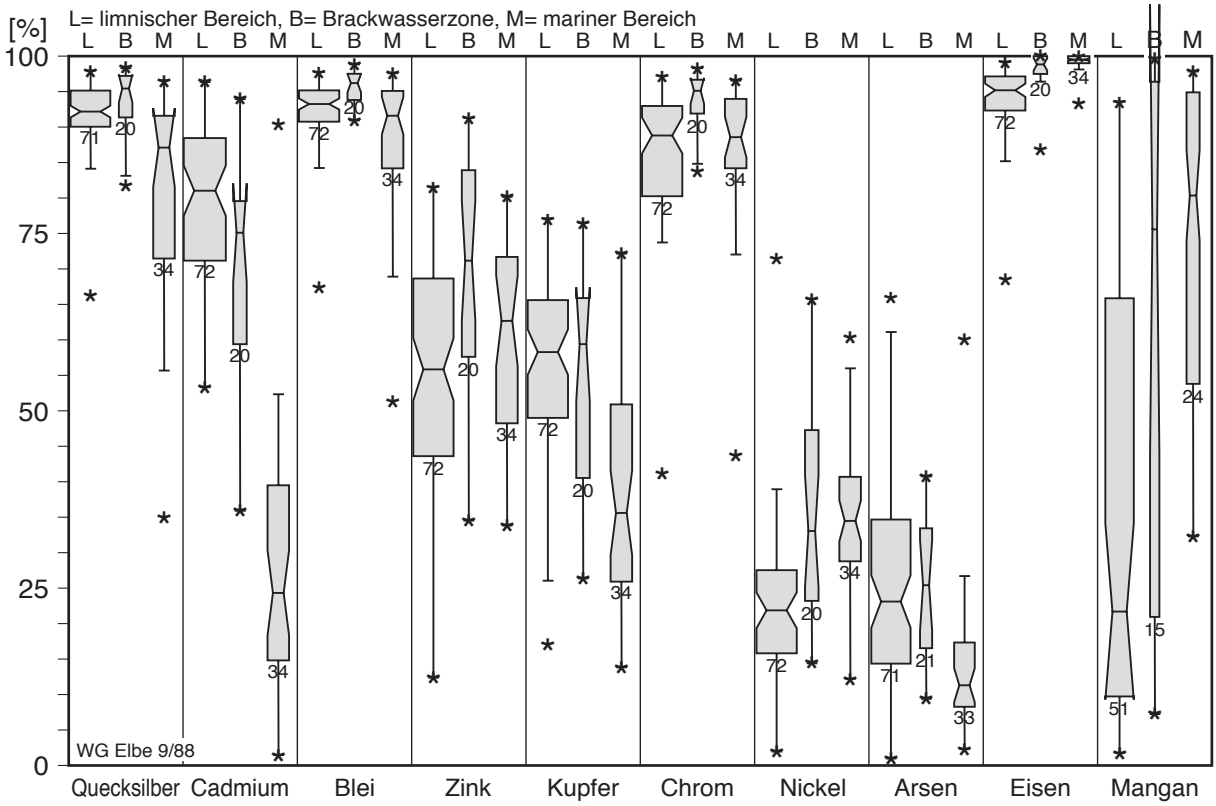


Abb. 114 Medianwerte und Quartile des relativen partikulären Anteils der Schwermetallgehalte im Elbwasser (Längsprofile 1986 - 1988)

Deutliche Unterschiede ergeben sich für das Schwermetall Cadmium zwischen dem limnischen und dem Brackwasserbereich einerseits und den Befunden aus dem marinen Milieu andererseits. Während für den limnischen und den Brackwasserbereich ebenfalls im Mittel über 75 % des Cadmiums in partikulärer Form vorliegt, ergab sich für den marin geprägten Bereich ein Medianwert von nur rd. 26 %. Durch diese Auswertung wird nochmals deutlich aufgezeigt, daß Cadmium auf seinem Transport durch die Brackwasserzone in das marine Milieu in bedeutendem Maße remobilisiert wird, d. h. in erster Linie in Chlorokomplexe, also in die gelöste Form, überführt wird, wie es bereits durch zahlreiche andere wissenschaftliche Untersuchungen nachgewiesen ist.

Zink und Kupfer liegen überwiegend zu 50 bis 75 % in der partikulären Phase vor, wohingegen Nickel und Arsen zum überwiegenden Anteil in der gelösten Phase und nur 20 bis 40 % als partikulärer Anteil auftreten. Die große Streubreite der Mangandaten verdeutlicht das "flexible Verhalten" dieses Elements bei wechselnden Bedingungen.

Als Folgerung für die künftige Überwachungspraxis ergibt sich aus diesen Auswertungen, daß zumindest im limnischen und im Brackwasserbereich für die Schwermetalle Quecksilber, Blei und Eisen, und in eingeschränktem Maße auch Chrom, eine Bestimmung des gelösten Anteils im Rahmen des Standardüberwachungsprogramms entfallen kann.

Abb. 116 zeigt eine Gegenüberstellung der spezifischen Beladung der Schwebstoffe mit Schwermetallen und dem jeweiligen Gehalt an abfiltrierbaren Stoffen. Sowohl für die Schwermetalle Quecksilber, Blei und Eisen, die zu einem

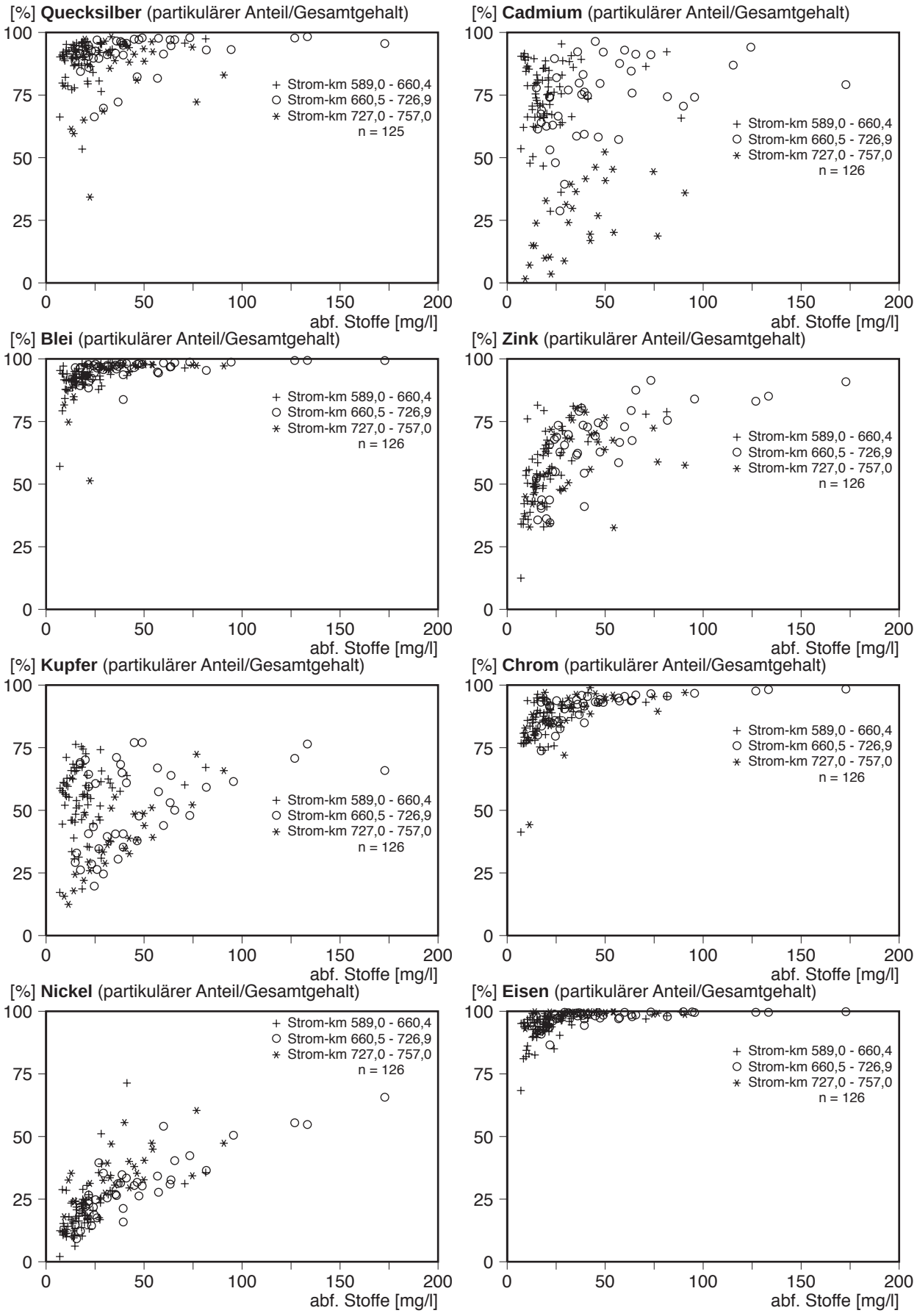


Abb. 115 Verhältnis des relativen partikulären Anteils der Schwermetallgehalte zum Schwebstoffgehalt des Elbwassers (Längsprofile 1987 - 1988)

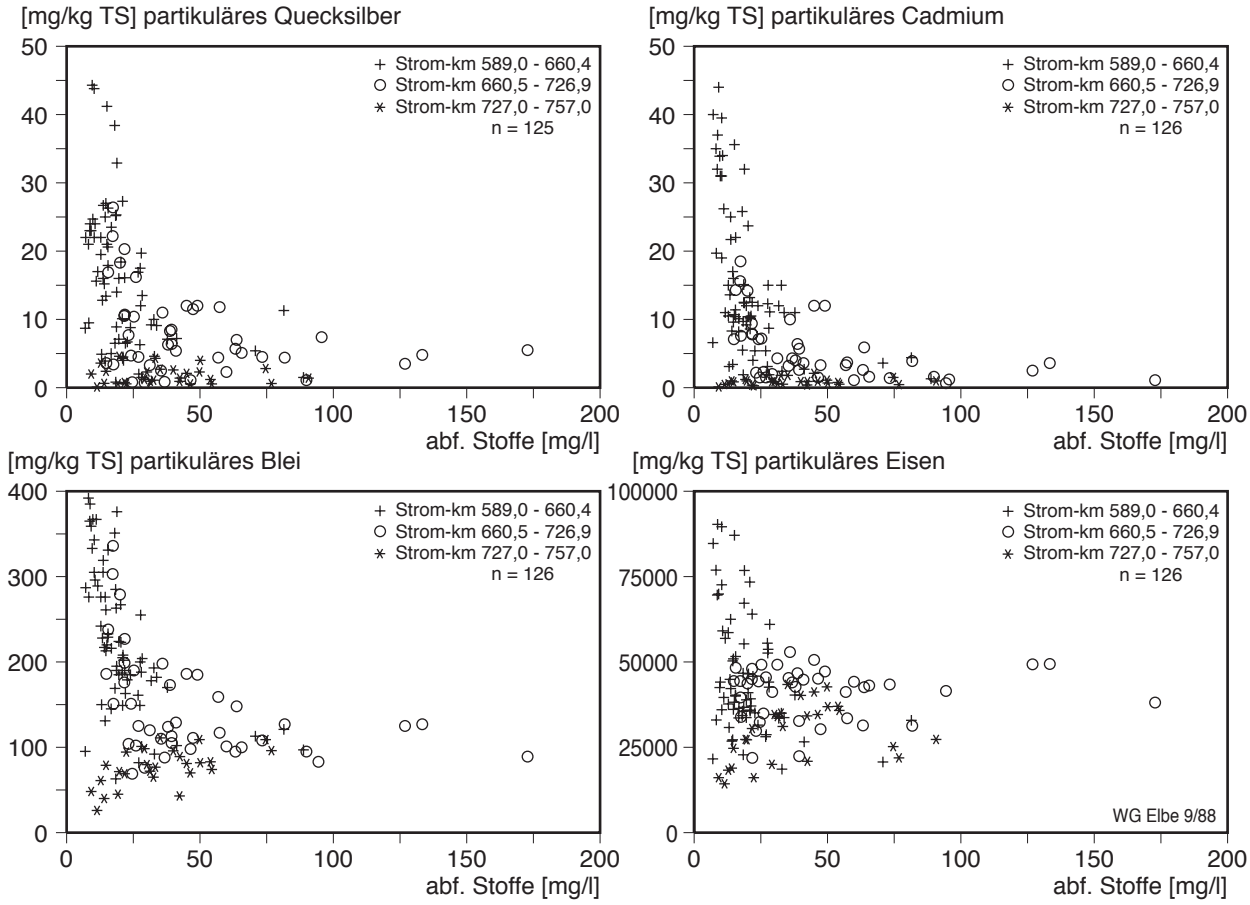


Abb. 116 Verhältnis der Schwebstoffbeladung mit Schwermetallen zum Schwebstoffgehalt des Elbwassers (Längsprofile 1987 - 1988)

hohen prozentualen Anteil in partikulärer Form vorliegen, als auch für das Schwermetall Cadmium, zeigt die graphische Auswertung keinen straffen, funktionalen Zusammenhang. In den Graphiken sind jeweils die Meßdaten der verschiedenen Abschnitte durch unterschiedliche Symbole gekennzeichnet. Die Auswertung ergibt ein ähnliches Bild wie die entsprechende Auswertung (Abb. 110 und 111) der Querprofilmischproben bei Glückstadt/Grauerort. Extrem hohe Schwermetallkonzentrationen für Quecksilber, Blei und Cadmium treten jeweils nur bei für den limnischen Bereich typischen Schwebstoffkonzentrationen von 10 bis 30 mg/l auf. Hohe Schwebstoffkonzentrationen über 100 mg/l ergeben sich jeweils nur in der Trübungszone, wo durch die Verdünnung mit geringer belasteten Schwebstoffen bereits eine deutliche Herabsetzung der Schwermetallkonzentrationen gegeben ist. Die Bleiwerte aus dem Außenelbebereich zeigen mit abnehmenden Schwebstoffgehalten eine gleichmäßig abnehmende Bleikonzentration. An diesen Befunden läßt sich die für das Elbeästuar typische Längsprofil-Verteilungsstruktur wiedererkennen, die in der folgenden Prinzipskizze vereinfacht dargestellt ist.

Die Gesamtstruktur der Abb. 117 läßt sich aufgliedern in die Teilstrukturen "a, b, c". Im limnischen Bereich (a) ergeben sich stark schwankende Schwermetallkonzentrationen bei insgesamt stets verhältnismäßig niedrigen Schwebstoffgehalten zwischen 10 und 30 mg/l TS in Abhängigkeit der durch hydrologische Bedingungen eingeschwemmten, unterschiedlich hoch belasteten Schwebstoffe aus dem oberen Einzugsgebiet. Für den oberen Bereich der Brackwasserzone, in dem im Längsprofil bereits ein abnehmender Gradient der spezifischen Beladung

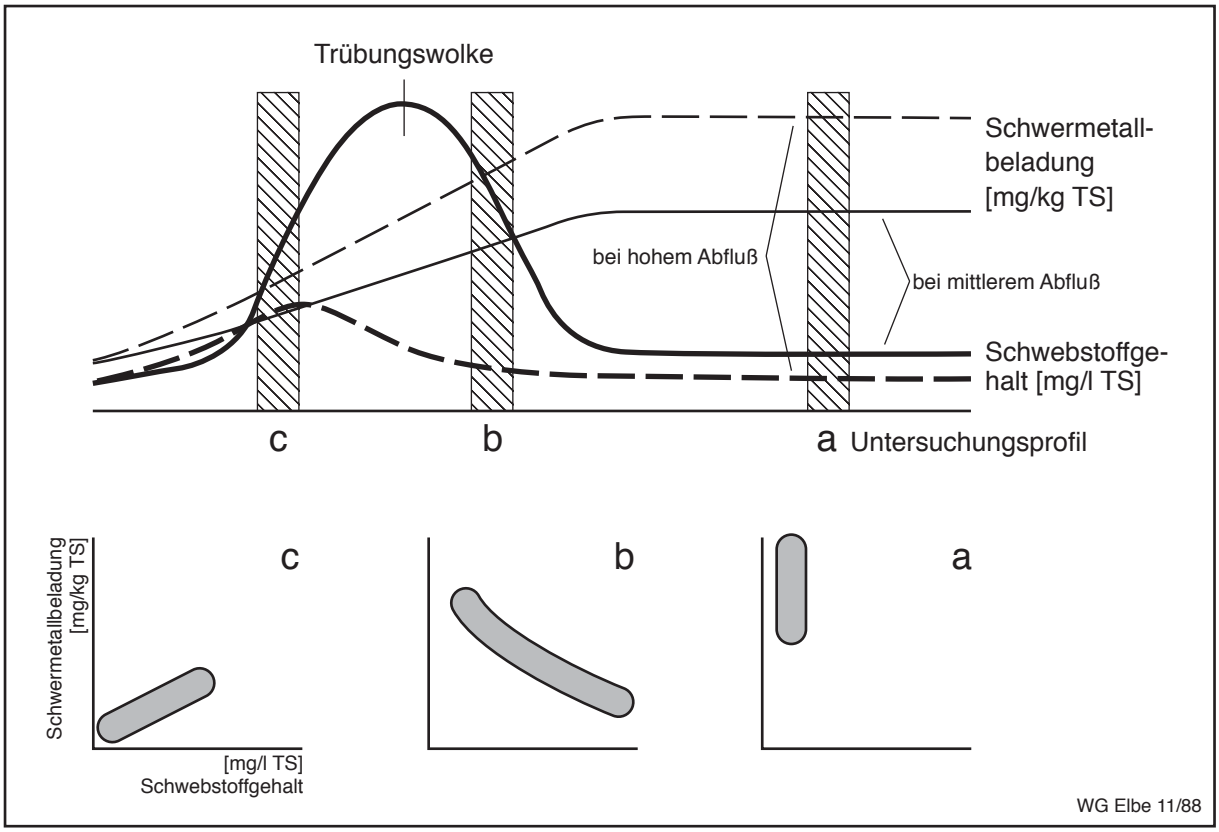


Abb. 117 Verteilungsstruktur der Schwermetallbeladung der Schwebstoffe (Prinzipskizze Längsprofil)

wirksam wird, aber ein Anstieg der Schwebstoffgehalte im oberen Bereich der Trübungszone vorliegt, ergibt sich die Beziehungsstruktur "b". Erhöhte Schwebstoffgehalte in der Trübungszone ergeben sich durch die Einmischung eines erhöhten Anteils geringer belasteter Schwebstoffe aus dem unteren Gebiet mit der Folge, daß mit einem Anstieg der Schwebstoffgehalte von rd. 30 mg/l auf über 100 mg/l in der Regel eine Abnahme der spezifischen Beladung einhergeht. Im unteren Bereich der Trübungszone (c) herrscht ein abnehmender Gradient der Schwebstoffkonzentration und ein abnehmender Konzentrationsgradient für die spezifische Beladung. Die Gleichsinnigkeit beider Gradienten ergibt für diesen Bereich der Brackwasserzone abnehmende Schwermetallkonzentrationen im Zusammenhang mit abnehmenden Schwebstoffgehalten. Ein Zusammenfügen der Befunde aus diesen drei Teilsystemen ergibt dann das Gesamtbild, wie es sich auch bei den Bleidaten (Abb. 116) zeigt. Grundsätzlich gilt diese systematische Beziehung für alle Schwermetalle, die eine deutlich über die natürliche Grundbelastung erhöhte Konzentration im Schwebstoff aufweisen. Für Eisen hingegen zeigen die Längsprofile der spezifischen Beladung nur einen schwachen Gradienten durch die Brackwasserzone, so daß sich auch nur eine entsprechend "undeutlichere" systematische Struktur zeigt.

Probenentnahmen über einen vollen Tidezyklus an einem festen Meßpunkt (z. B. verankertes Meßschiff) ergeben jeweils für die spezifische Beladung der Schwebstoffe die erläuterte Abhängigkeit vom Schwebstoffgehalt, da jeweils durch den Ebbe- bzw. Flutweg eine entsprechende Verschiebung der Gradienten erfolgt. So wird sich für den oberen Bereich der Trübungszone eine Abhängigkeit entsprechend "b" und für den unteren Bereich der Trübungszone mit gleichsinnigen Gradienten eine Abhängigkeit entsprechend "c" einstellen.

Bei der Erläuterung der Längsprofilstrukturen in der Brackwasserzone wurde bereits auf die Abhängigkeit zum Chloridgehalt hingewiesen. Der Chloridgehalt kann als ein Maß für den eingemischten Nordseewasseranteil und damit als Maßstab für eine Verdünnung überschläglich herangezogen werden. Während in den einzelnen Längsprofilen (Kapitel 4.5) bei jeweils unterschiedlichen Oberwasserabflüssen die Konzentrationsgradienten aufgezeigt werden, ist in den folgenden Abbildungen die Abhänigkeit des gesamten Datenkollektivs vom Chloridgehalt dargestellt (Abb. 118 und 119). Für den gelösten Anteil als auch für den partikulären Anteil ergibt sich jeweils für den limnischen Bereich mit Chloridgehalten von rd. 80 bis 250 mg/l Cl die durch wechselnde Oberwassersituationen bereits erläuterte große Schwankungsweite in den Schwermetallkonzentrationen. Für den für die Brackwasserzone typischen Chlorid-Konzentrationsbereich von rd. 300 bis 20.000 mg/l Cl ist eigentlich eine systematische Verdünnungswirkung in Richtung auf das für die Nordsee typische Konzentrationsniveau zu erwarten. Die Befunde zeigen für Nickel und Kupfer einen entsprechenden Verlauf. Für Blei lagen die gelösten Anteile häufig unterhalb der Nachweisgrenze (in der Graphik auf der Null-Linie), so daß die Auswertung nicht das erwartete Bild zeigen konnte. Für Cadmium ergibt sich ein scheinbar widersprüchliches Bild. Eine Konzentrationsabnahme mit zunehmendem Chloridgehalt ist nicht eindeutig zu erkennen, vielmehr sind auch bei hohen Chloridkonzentrationen hohe Konzentrationen an gelöstem Cadmium gemessen worden. Dieser Befund ergibt sich aus der Überlagerung von zwei gegenläufig ablaufenden Prozessen. Mit zunehmendem Meerwasseranteil, ausgedrückt durch den erhöhten Chloridgehalt, findet einerseits eine Verdünnung statt, und andererseits bewirkt der erhöhte Chloridgehalt eine verstärkte Remobilisierung von Cadmium aus den Schwebstoffen (z. B. durch eine Umwandlung in Chlorokomplexe), so daß seewärts bei einem erhöhten Eintrag von partikulärem Material auch erhöhte Cadmiumkonzentrationen in der gelösten Phase auftreten können. Bei den Quecksilberbefunden ist zu berücksichtigen, daß durch die niedrigen Konzentrationen von teilweise unter 0,01 µg/l sich gleichzeitig durch die relative Zunahme der Meßfehler (z. B. Blindwerte usw.) ein größeres Rauschen ergibt.

In einer weiteren Auswertung wurde geprüft, ob zwischen dem "normierten" Gesamtschwermetallgehalt und dem Chloridgehalt eine systematische Beziehung besteht. Da der partikuläre Anteil am Gesamtgehalt jeweils von der zufällig miterfaßten Schwebstoffmenge abhängt, erfolgte zunächst eine Normierung der Meßwerte auf einen einheitlichen Schwebstoffgehalt von 20 mg/l TS. Hierfür wurde der "normierte" partikuläre Anteil aus der gemessenen spezifischen Beladung für einen Schwebstoffgehalt von 20 mg/l berechnet und zusammen mit dem gelösten Anteil als Gesamtgehalt den jeweiligen Chloridgehalten gegenübergestellt. Auch diese Auswertung zeigt ein ähnliches Bild wie Abb. 118. Für den limnischen Bereich mit Chloridgehalten von 80 bis rd. 300 mg/l Cl ergibt sich wiederum die sehr große Schwankungsweite der Belastungen infolge der unterschiedlichen hydrologischen Randbedingungen von oberstrom. Für die ansteigenden Chloridgehalte in der Brackwasserzone von 300 bis zu rd. 20.000 mg/l Cl zeigt sich eine durch die Verdünnung bedingte Konzentrationsabnahme, insbesondere für die Schwermetalle Kupfer, Zink und Nickel. Beim Cadmium sind wiederum erhöhte Konzentrationswerte, auch im Bereich hoher Chloridgehalte von 10.000 bis 20.000 mg/l Cl, zu erkennen, die auf die bereits erwähnte verstärkte Remobilisierung zurückzuführen sind.

Zusammenfassend ist festzustellen, daß aufgrund der wechselnden hydrologischen Randbedingungen ein straffer, funktionaler Zusammenhang nicht gegeben ist.

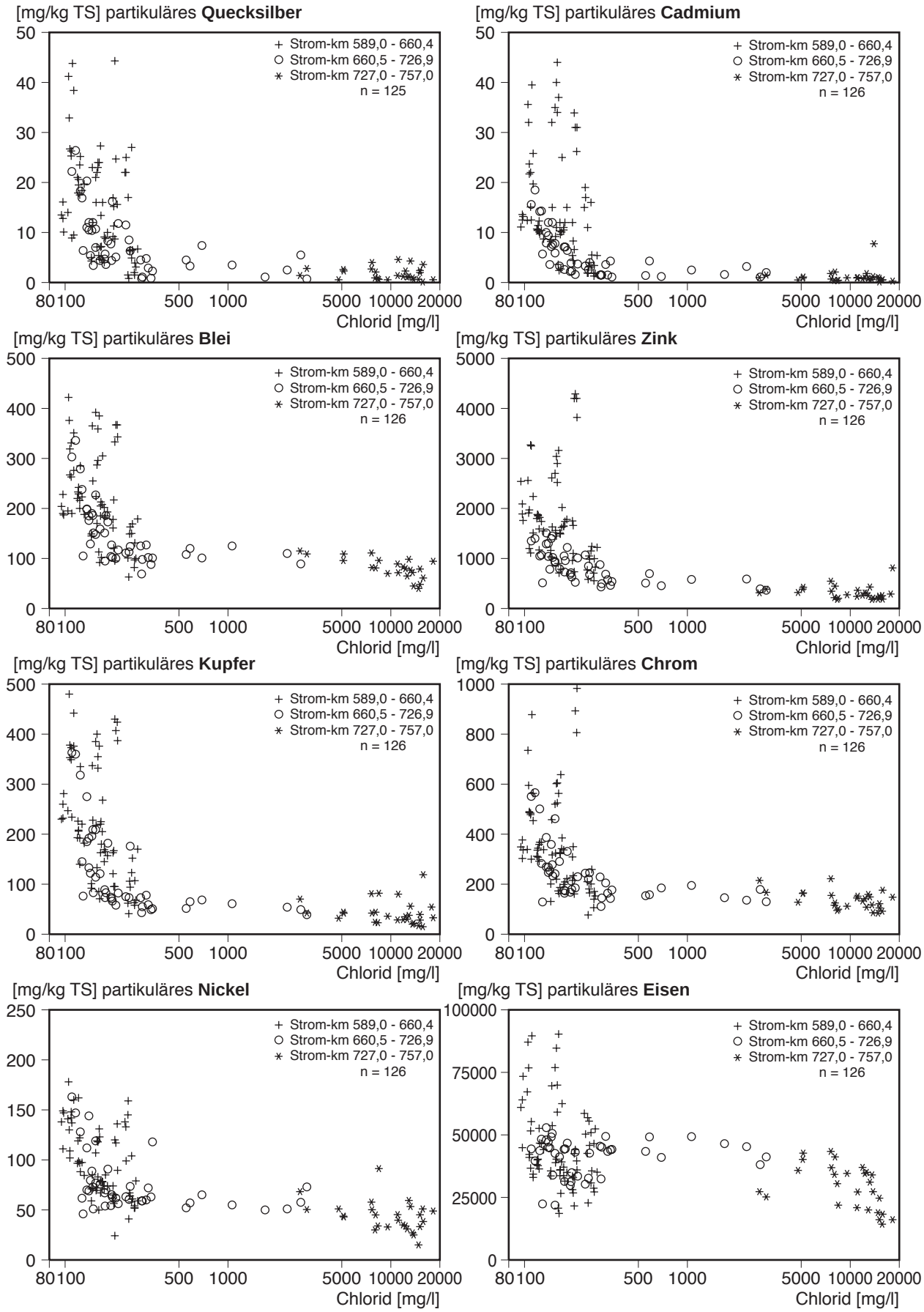


Abb. 118 Verhältnis der Schwebstoffbeladung mit Schwermetallen zum Chloridgehalt des Elbwassers (Längsprofile 1987 - 1988)

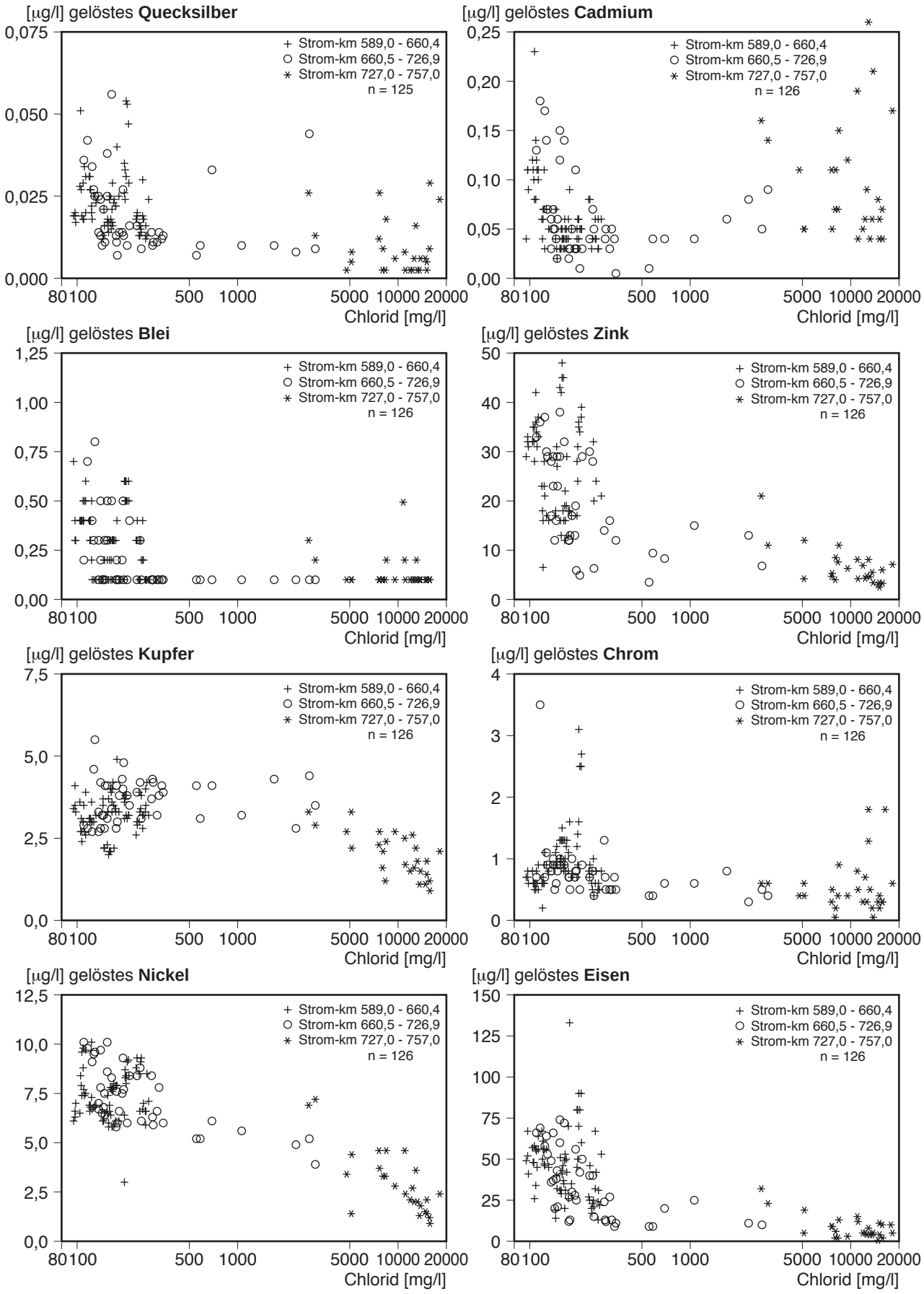


Abb. 119 Verhältnis des gelösten Anteils an Schwermetallen zum Chloridgehalt des Elbwassers (Längsprofile 1987 - 1988)

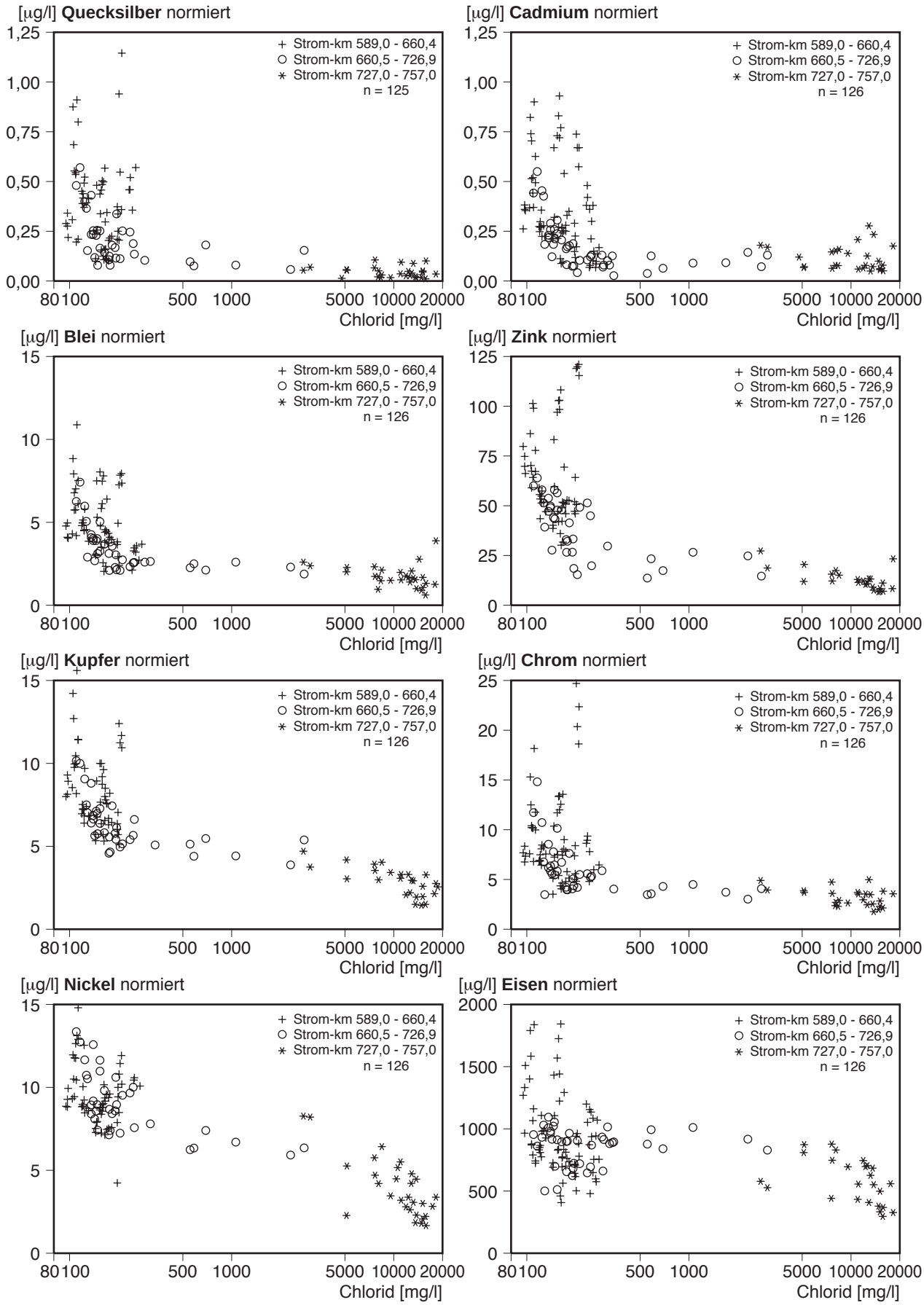


Abb. 120 Verhältnis des normierten Gesamtgehaltes* an Schwermetallen zum Chloridgehalt des Elbwassers (Längsprofile 1987 - 1988)

* berechnet als Summe aus dem gelösten Anteil und dem, auf 20 mg/l normierten, partikulären Anteil

5. ERGEBNISSE DER SEDIMENTUNTERSUCHUNGEN

5.1 Schwermetallbelastung der Sedimente in ausgewählten Tiefenprofilen ("Historische" Entwicklung der Belastung)

Die Untersuchungen wurden durchgeführt, mit dem Ziel, durch die Analyse fossiler, ungestörter Flußsedimente den Grad der natürlichen Grundbelastung mit Schwermetallen zu erfassen, um somit eine sichere Bewertung der Ergebnisse von frischen Oberflächensedimenten vornehmen zu können.

Als Untersuchungsgebiete wurden

1. Pevestorf (Strom-km 485), rd. 10 km unterhalb von Schnackenburg
2. Barförde (Strom-km 565), zwischen Bleckede und Lauenburg
3. Heuckenlock, Moorwerder (Strom-km 612), Süderelbe - oberhalb Harburg
4. Haseldorfer Marsch (Strom-km 650), Hetlinger Schanze

ausgewählt. Die Auswahl der Probenentnahmestellen sowie die Probennahme wurde dabei in Zusammenarbeit mit Herrn Dr. Hintze (Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg) durchgeführt. Bei Pevestorf und Barförde erfolgte die Aufnahme von jeweils 5 Sediment-Tiefenprofilen (4 aus dem Deichvorland und 1 binnendeichs gelegenes Vergleichsprofil). Im Untersuchungsgebiet Heuckenlock wurden insgesamt 4 Profile (3 außendeichs und 1 binnendeichs) und im Bereich der Haseldorfer Marsch 2 Profile (1 außendeichs und 1 binnendeichs) entnommen.

Derartige Untersuchungen können nur an ausgewählten Stellen durchgeführt werden, an denen ungestörte Sedimentschichten anstehen und gleichzeitig das sedimentierte Material feinkörnig genug ist, um eine ausreichende Anlagerungskapazität für die Schwermetalle zu bieten.

Aufgrund des damaligen naturwissenschaftlichen Kenntnisstandes wurde die Bestimmung der Schwermetallgehalte in der Korngrößenfraktion kleiner 63 µm vorgenommen. In der Zwischenzeit werden die Schwermetallkonzentrationen an Schwebstoffen bzw. Sedimenten bundeseinheitlich in der Korngrößenfraktion kleiner 20 µm bestimmt. Bei einem Vergleich der Ergebnisse aus damaligen Untersuchungen mit Konzentrationswerten, die an der Korngrößenfraktion kleiner 20 µm festgestellt wurden, ist diese Änderung mit einzubeziehen.

An ausgewählten Sediment-Tiefenprofilen aus den Bereichen Pevestorf (Abb. 121) und Moorwerder (Abb. 122) soll nachfolgend das Grundmuster der Schwermetallbelastung in den Elbsedimenten prinzipiell erläutert werden.

Das Sediment-Tiefenprofil Pevestorf 3 liegt rd. 180 m von der Elbe entfernt am Ende einer alten Fährdurchfahrt südlich des Pevestorfer Werders. Die Probenentnahmestelle wird regelmäßig bei ausgeprägtem Hochwasser der Elbe überschwemmt, wobei sich mitgeführte Schwebstoffe und daran gebundene Schwermetalle ablagern.

Die Untersuchungsergebnisse für das Profil Pevestorf 3 zeigen für alle untersuchten Elemente (Quecksilber, Cadmium, Blei, Zink, Kupfer, Chrom und das Metalloid Arsen) einen deutlichen Belastungsschwerpunkt in der oberflächennahen Bodenschicht bis zu einer Tiefe von rd. 35 cm auf. In den darunterliegenden, tieferen Bodenschichten wurde demgegenüber für alle untersuchten Elemente eine sehr gleichförmig verlaufende, geringere Belastung festgestellt. Diese über einen größeren Tiefenabschnitt ermittelte gleichförmige Belastung ist Ausdruck des geogenen Backgrounds der Elbsedimente; sie spiegelt größenordnungsmäßig die natürliche Grundbelastung wider. Die erfaßten Tiefen-

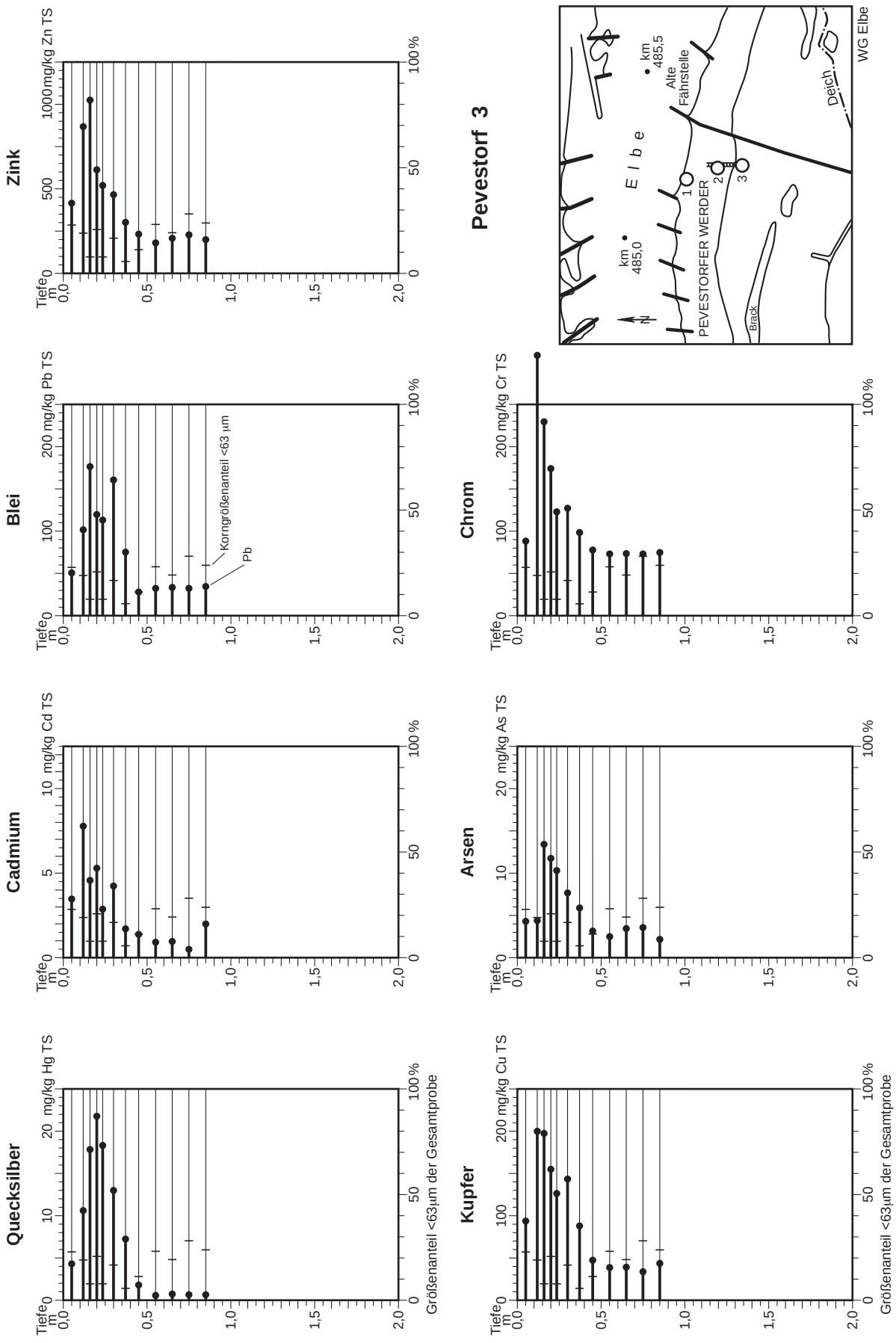


Abb.121 Sediment-Tiefenprofile der Schwermetallgehalte in der <63-µm-Fraktion bei **Pevestorf** 1981

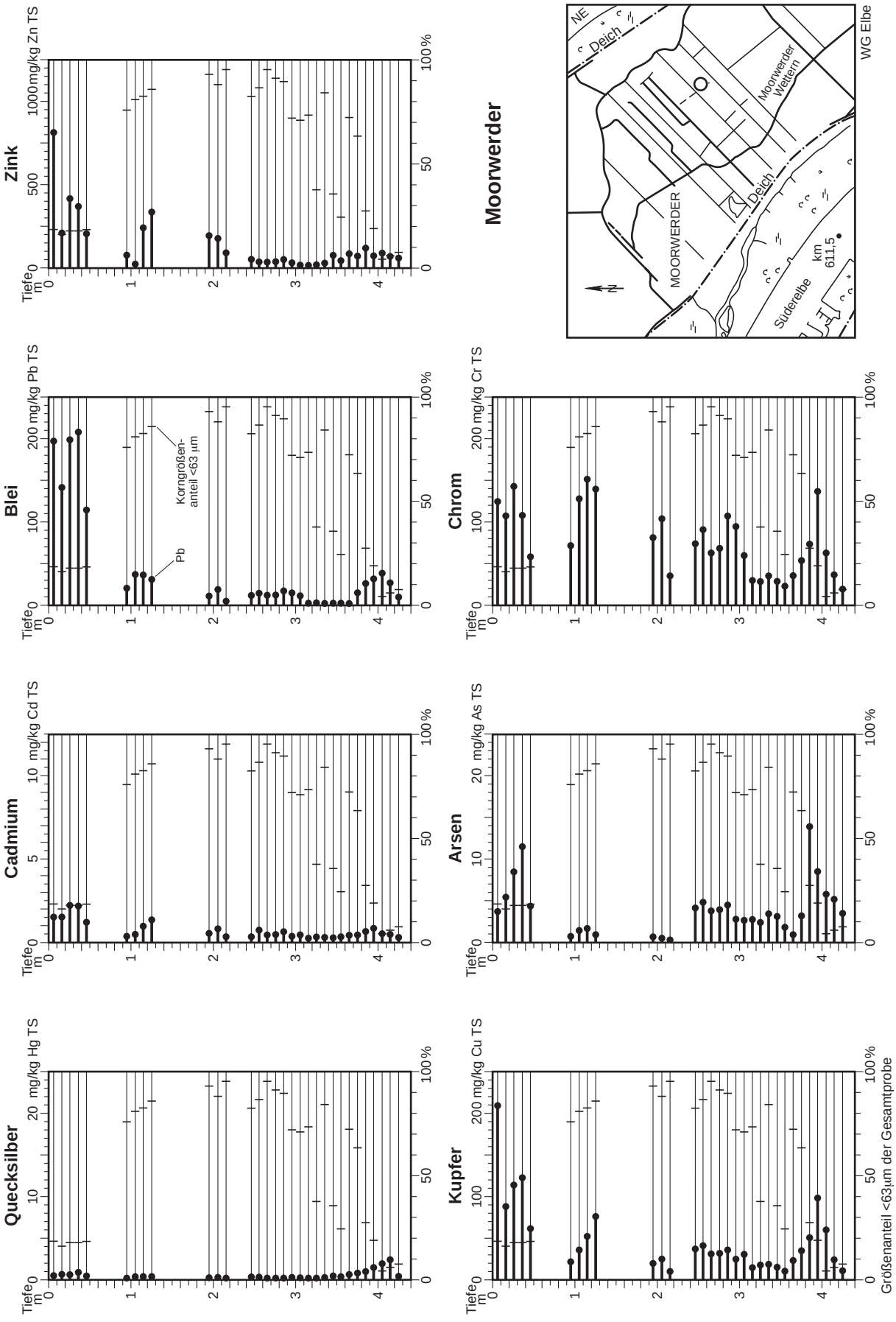


Abb.122 Sediment-Tiefenprofile der Schwermetallgehalte in der <63 µm-Fraktion bei **Moorwerder** 1981

abschnitte können somit als anthropogen weitgehend unbelastet angesehen werden. Demgegenüber sind die Befunde der oberflächennahen, vergleichsweise frischen Sedimentschichten Ausdruck für eine hochgradige, anthropogene Belastung. Vergleichbare Ergebnisse wurden auch für die Tiefenprofile der anderen Untersuchungsbereiche festgestellt.

Allerdings traten auch in den Sediment-Tiefenprofilen, wie z. B. bei Moorwerder, gewisse Unregelmäßigkeiten hinsichtlich der Belastung der einzelnen Bodenhorizonte auf. So wurde beispielsweise neben dem typischen Belastungsschwerpunkt in der oberflächennahen Bodenschicht ein weiterer Belastungsschwerpunkt in einer Tiefe von rd. 4 m festgestellt. Die bodenkundliche Untersuchung dieses Bereiches zeigte, daß der Anteil der Korngrößenfraktion kleiner 63 pm an der Gesamtprobe dort sehr klein war. Die Proben aus diesem Tiefenhorizont bestanden überwiegend aus wasserdurchlässigem Mittelsand; sie wiesen Staunässe auf. In diesen wasserdurchlässigen Sandschichten finden erfahrungsgemäß Sickerströmungen (z. B. Qualmwasser) von der Elbe her statt. Dadurch kann beispielsweise auch mit Quecksilber belastetes Elbwasser in diese abgelagerten Sedimentschichten eindringen und zu einer Konzentrationserhöhung über das natürliche Maß hinaus führen. Die in den darüberliegenden, sehr feinkörnigen und damit nahezu wasserundurchlässigen Sedimentschichten festgestellten Werte weisen demgegenüber keine anthropogene Belastung auf.

Eine genaue Altersbestimmung konnte an den Bodenproben nicht durchgeführt werden, da zu wenig organisches Material für die C-14-Methode zur Verfügung stand. Im Falle von deutlich geschichteten, jungen Hochwassersedimenten konnte allerdings eine Schätzung des Alters durch Auszählen der einzelnen Bodenhorizonte vorgenommen werden. Darüber hinaus untersuchte die GKSS beispielhaft für das Profil Pevestorf an Parallelproben u. a. auch die Cs137-Aktivität*. Da der Cs-137-Gehalt in Sedimenten besonders deutlich ab Mitte der 50er Jahre durch den Fallout der oberirdischen Kernwaffenversuche geprägt wird, kann die sprunghafte Zunahme der Cs-137-Gehalte in einer bestimmten Sedimentschicht mit diesem Zeitpunkt gleichgesetzt werden. Im Falle des Profils Pevestorf 3 lag diese Sprungschicht in etwa in einer Tiefe von rd. 10 bis 15 cm. Schätzungsweise wurden die jüngsten, anthropogen weitgehend unbelasteten Sedimentschichten vor rd. 150 bis 200 Jahren abgelagert.

In der folgenden Aufstellung sind die Ergebnisse der ARGE-ELBE-Untersuchungen (bezogen auf die Fraktion kleiner 63 gm) dem Geochemischen Tongestein-Standard (TUREKIAN & WEDEPOHL) gegenübergestellt. Trotz unterschiedlicher Korngrößenfraktionen besteht in der Größenordnung eine gute Übereinstimmung.

(mg/kg TS) Korngrößenfraktion	natürliche Grundbelastung im limnischen Elbsediment kleiner 63 µm	Geochemischer Tongestein-Standard kleiner 2 µm
Quecksilber	0,2 - 0,4	0,4
Cadmium	0,3 - 0,5	0,3
Blei	25 - 30	20
Zink	90 - 110	95
Kupfer	20 - 30	45
Chrom	60 - 80	90
Arsen	3 - 5	-

* ANDERS, PEPELNIK Sedimentanalysen mit schnellen Neutronen an KORONA, GKSS 85/E/41

5.2 Schwermetallgehalte der Sedimente im Bereich der Elbmündung

Ziel dieser Untersuchungen war es, das Belastungsniveau und den Konzentrationsverlauf der Schwermetallbelastung im Übergangsbereich vom limnischen Elbabschnitt hin bis zum marinen Milieu zu erfassen. Die Probenentnahmestellen sind mit den Meßwerten in Abb. 123 und 124 dargestellt.

Die Probenentnahme erfolgte im September/Oktober 1986, also rd. 2 1/2 bzw. 3 1/2 Monate nach Abfluß der letzten ausgeprägten Hochwasserwelle im Juni, mit einem Spitzenwert von 1.800 m^3/s. Damit war gewährleistet, daß sich im beprobten Elbabschnitt bis zum Zeitpunkt der Probennahme ein relativ gleichförmiges Schwebstoffklima ausgebildet hatte, das nicht durch plötzlich auftretende, besondere hydrologische Randbedingungen "gestört" war.

Die Untersuchungen der Schwermetallgehalte in den einzelnen Proben erfolgten an der durch Ultraschallsiebung abgetrennten Korngrößenfraktion kleiner 20 µm. Da auch der Anteil des organischen Materials in den feinkörnigen Sedimenten das Bindungsvermögen für Schwermetalle mit beeinflußt, wurde auch der Glühverlust der 20 µm-Fraktion bestimmt.

Während die Anteile der 20 µm-Fraktion an den Gesamtproben, bezogen auf alle Meßpunkte, eine relativ große Streubreite von 10 bis 70 % aufweisen, ergab die Glühverlustbestimmung relativ konstante Werte, die sich um 10 bis 20 % bewegten. Das heißt, daß trotz unterschiedlicher Korngrößenzusammensetzung der einzelnen Gesamtproben der organische Anteil in der 20 µm-Fraktion eine vergleichbare Größenordnung aufwies.

Bei einer Interpretation der einzelnen Meßwerte, z. B. im Hinblick auf die am Probenentnahmeort herrschende Belastungssituation muß berücksichtigt werden, daß die Schwermetallgehalte in der Fraktion kleiner 20 µm im Grunde genommen Maximalwerte darstellen. Solche Werte sind in der Regel nur dann für die Meßstelle repräsentativ, wenn die Gesamtprobe aus sehr feinem Schlick, d. h. ohne merklichen Sandanteil, besteht. Dies ist z. B. in Stillwasserbereichen (z. B. Hafenbecken) der Fall. Trotz hoher Belastung in der 20 µm-Fraktion kann demgegenüber die Gesamtbelastung vergleichsweise gering sein, wenn der Probenentnahmeort überwiegend sandige Eigenschaften aufweist, wie z. B. im unmittelbaren Fahrwasserbereich der Elbe.

Die Bewertung der anthropogenen Belastung erfolgt im folgenden durch einen Vergleich der in den Sedimenten gemessenen Schwermetallkonzentrationen mit den für diese Region zugrunde zu legenden natürlichen Konzentrationen der Sedimente. In Kapitel 5.1 ist die Größenordnung der natürlichen Schwermetallbelastung der Elbe für den limnischen Bereich der Elbe angegeben. Für den Brackwasserbereich mit seewärts zunehmenden marinen Einfluß ist eine Abnahme der natürlichen Schwermetallbelastung anzunehmen. Für eine Bewertung der im folgenden erläuterten Befunde im Elbmündungsgebiet sind deshalb nicht die für den limnischen Bereich ermittelten, natürlichen Grundbelastungen, sondern die im Rahmen des "Gemeinsamen Bund/Länder-Meßprogramms NORDSEE" zusammengestellten natürlichen Schwermetallgehalte für die Sedimente im Küstenbereich zugrunde gelegt.

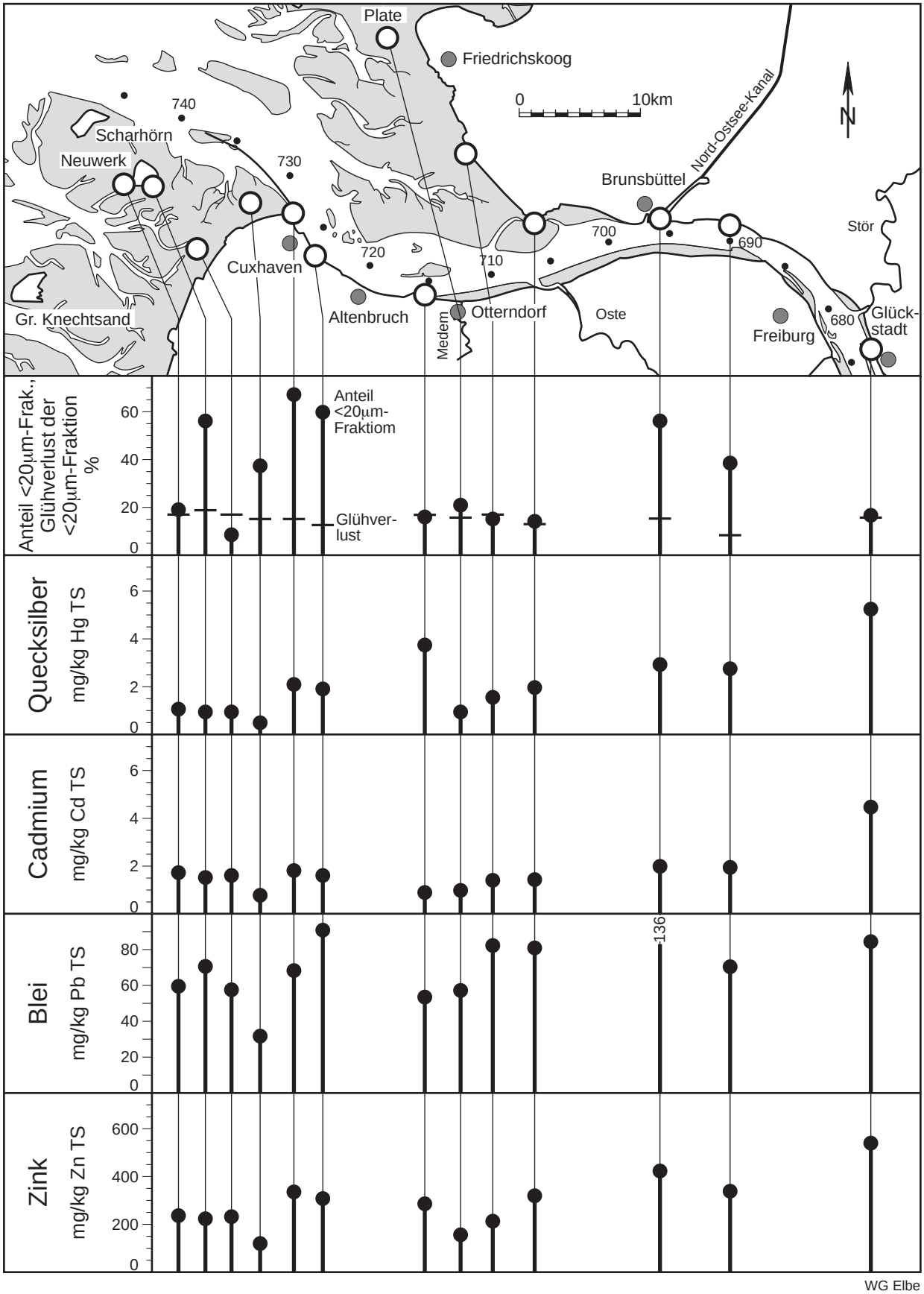


Abb.123 Schwermetallgehalte der Sedimente in der <20µm-Fraktion (BLMP/JMP) - Elbmündung 1986

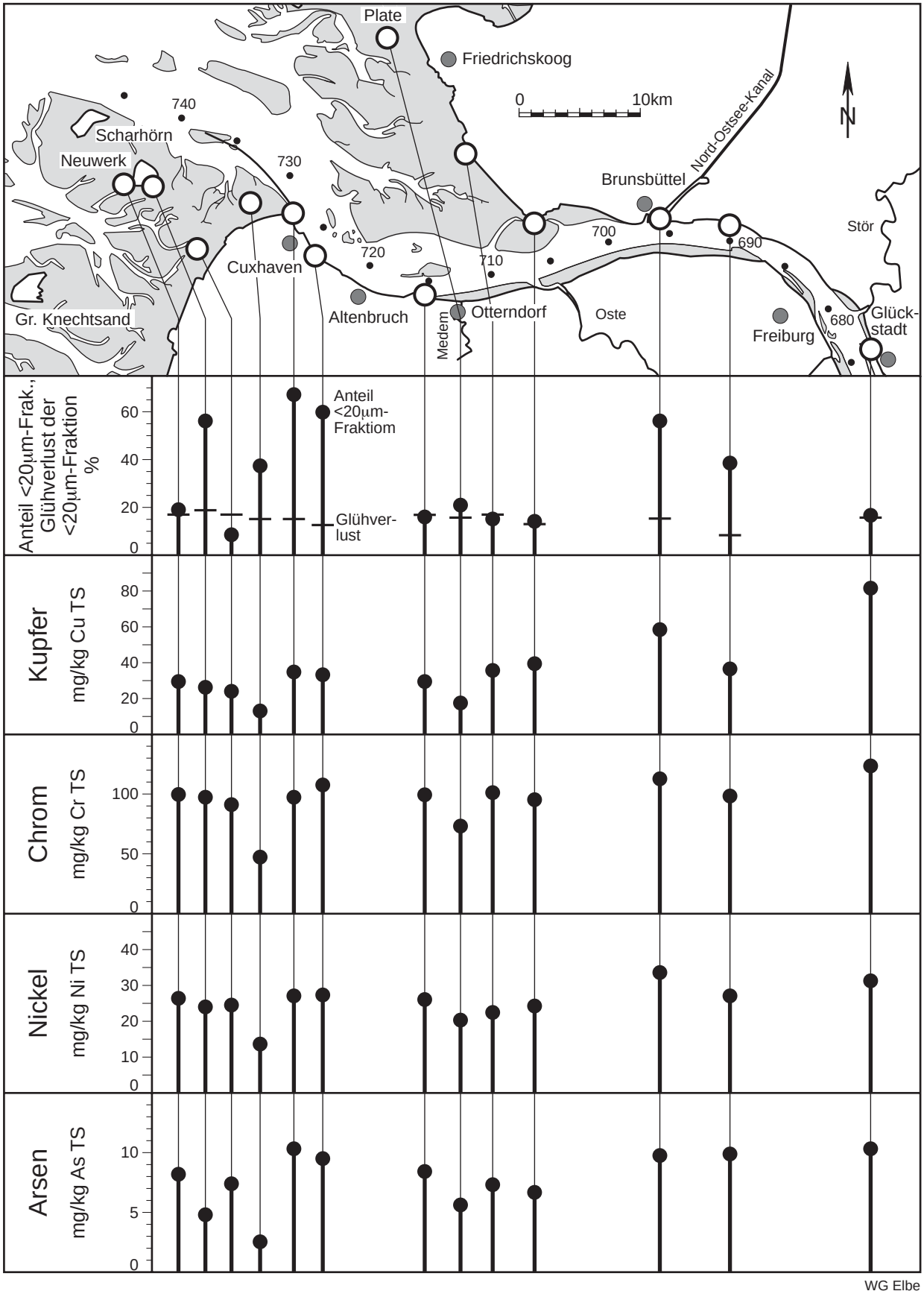


Abb.124 Schwermetallgehalte der Sedimente in der <20µm-Fraktion (BLMP/JMP) - Elbmündung 1986

Natürliche Schwermetallgehalte der Sedimente im Küstenbereich (bezogen auf die Fraktion kleiner 20 µm).

	mg/kg TS
Quecksilber	0,2
Cadmium	0,3
Blei	25
Zink	100
Kupfer	20
Chrom	80
Nickel	30
Arsen	10

Aus dem Bericht: Gewässergütemessungen im Küstenbereich der Bundesrepublik Deutschland 1982/1983; herausgegeben: Hannover 1984, ISSN 0723-1555

Die Ergebnisse der Sedimentuntersuchungen zeigen, daß für die Schwermetalle Quecksilber, Cadmium, Blei, Zink und Kupfer die höchste Belastung im inneren Bereich des Ästuars bei Glückstadt vorliegt. In diesem Bereich werden die Sedimente überwiegend durch hochgradig belastete Schwebstoffe aus dem oberstrom gelegenen limnischen Bereich gebildet. Weiter seewärts wirkt sich in zunehmendem Maße die Einmischung von geringer belastetem Material des marinen Milieus verdünnend auf die Schwermetallgehalte aus.

Die Befunde für Quecksilber zeigen mit Werten von 2 bis 5 mg/kg TS im Bereich Glückstadt bis Cuxhaven eine stark anthropogene Belastung an, die bereits um das 10- bis 25fache über das natürliche Grundniveau erhöht ist. Auch im Außenelbegebiet, seewärts von Cuxhaven, zeigen die Konzentrationen mit rd. 1 mg/kg TS eine rd. 5fach über das natürliche Grundniveau erhöhte anthropogene Belastung an. Die gemessenen Cadmiumkonzentrationen liegen in der gleichen Größenordnung und stellen ebenfalls bereits eine deutliche anthropogene Belastung im Vergleich zur natürlichen Grundbelastung dar.

Die Bleiwerte liegen um das 2- bis 4fache über dem natürlichen Konzentrationsniveau. Die Probe aus dem Schleusenvorhafen Brunsbüttel ergab mit 136 mg/kg TS einen herausfallenden Extremwert. Denkbar ist, daß dieser Wert auf zufällig in der Probe miterfaßte Partikel von abgeblätterter Schiffsfarbe (Bleimennige) zurückzuführen ist. Die Befunde für Zink zeigen eine um das 2- bis 4fache über das natürliche Grundniveau erhöhte anthropogene Belastung an.

Auch für Kupfer wurde eine um das 1- bis 3fache über das natürliche Niveau erhöhte Konzentration gemessen.

Für Chrom zeigen die Befunde nur eine 1- bis 1,5fache anthropogen bedingte Erhöhung.

Die Nickelwerte liegen in der Größenordnung der natürlichen Sedimentkonzentration, so daß für Nickel keine bedeutende anthropogene Belastung besteht. Dieser Befund hatte sich auch bei den in Kapitel 4.4 erläuterten Schwebstoffuntersuchungen im Querprofil Glückstadt gezeigt.

Auch die Arsenwerte zeigen nur eine schwache anthropogene Belastung.

Ein Gesamtüberblick der gemessenen Schwermetallkonzentrationen ergibt jeweils für die Schwermetalle, für die eine deutlich erhöhte anthropogene Belastung vorliegt, wie z. B. für Quecksilber und Cadmium, einen ausgeprägten seewärts abnehmenden Konzentrationsgradienten. Für die drei Schwermetalle Nickel, Chrom und Arsen ist demgegenüber die Abnahme der Belastung vom limnischen zum marinen Bereich nicht so deutlich ausgeprägt. Diese Elemente überschreiten in

den untersuchten Sedimentproben nur geringfügig die natürlichen Schwermetallkonzentrationen, so daß durch den seewärts verstärkten marinen Einfluß keine nennenswerte Konzentrationsabnahme infolge einer Verdünnung wirksam wird.

5.3 Schwermetallgehalte in sedimentierten Schwebstoffen (Meßstationen: Schnackenburg, Bunthaus, Seemannshöft, Blankenese)

Wie bereits in Kapitel 4 erläutert, wird ein erheblicher Anteil der Gesamtschwermetallbelastung in der partikulären Phase, d. h. an Schwebstoffen gebunden, transportiert. In Stillwasserzonen, wie z. B. Hafenbecken, sedimentieren die Schwebstoffe und bilden dort Sedimente. Die Schwermetallkontamination der "frischen" Sedimente ist also jeweils von dem Belastungsniveau der sedimentbildenden Schwebstoffe abhängig. Daraus ergibt sich, daß die Belastung der Sedimente nicht als konstant über die Zeit angenommen werden kann. Sedimentproben aus dem Freiland haben den Nachteil, daß durch wechselnde hydrologische Bedingungen Phasen von Sedimentation und Erosion, aber auch künstliche Eingriffe, wie z. B. Baggerungen und Verklappungen, eine eindeutige Beurteilung der zeitlichen Entwicklung der Gewässerbelastung erschweren. Während Wasserproben und abfiltrierte Schwebstoffproben stets nur den augenblicklichen Belastungszustand widerspiegeln, lassen sich an ungestörten Sedimentproben, die kontinuierlich "gewachsen" sind, die repräsentativen, mittleren Belastungen erfassen. Da jedoch die Gewinnung von ungestörten, kontinuierlich gewachsenen Sedimentproben im Freiland aufgrund wechselnder hydrologischer Bedingungen und anderer Einflußfaktoren, wie z. B. Schiffahrt, Baggerungen und Wehrbetrieb, kaum möglich ist, wurden von der Wassergütestelle spezielle Sedimentationsbecken (s. Kapitel 2) entwickelt und zunächst in der Meßstation Schnackenburg seit Mitte 1984 eingesetzt. Nach der Erprobung wurden ab Dezember 1985 entsprechende Sedimentationsbecken in den Meßstationen Bunthaus, Seemannshöft und Blankenese eingerichtet. Inzwischen sind auch die Meßstationen Grauerort und Cuxhaven mit diesem System ausgerüstet. In den Meßstationen wird jeweils aus dem kontinuierlichen Probenwasserstrom, der aus dem vorbeiströmenden Elbwasser entnommen wird, ein Teilstrom abgezweigt und durch das Sedimentationsbecken geleitet. Die Durchflußmenge ist so geregelt, daß sich in den Sedimentationsbecken eine sehr geringe Durchflußgeschwindigkeit kleiner 1 cm/s einstellt und dadurch ein Absinken der "sedimentationsfähigen" Schwebstoffe eintritt. Feinstschwebstoffe, deren Sinkgeschwindigkeit nahezu 0 ist, wie z. B. Algen, werden in den Sedimentationsbecken kaum abgeschieden. Die so gewonnenen Proben entsprechen ihrem Charakter nach "frischem, schwebstoffbürtigem Sediment", das sich z. B. in Stillwasserzonen, wie Hafeneinfahrten usw., aufbauen würde.

Die sedimentierten Schwebstoffe werden in den Becken jeweils über einen Zeitraum von rd. einem Monat gesammelt und anschließend als Monatsmischproben analysiert. Durch die integrierende Probennahme über einen Monatszeitraum werden kurzzeitige Belastungsschwankungen geglättet und gleichzeitig wird der Untersuchungsaufwand in Grenzen gehalten. Ferner reicht die gesammelte Probenmenge aus, um auch eine Untersuchung auf die Belastung mit Radionukliden und organischen Schadstoffen vornehmen zu können.

Die Bestimmung der Schwermetallkonzentrationen erfolgt an der durch Ultraschallsiebung abgetrennten 20µm-Fraktion. Zur Charakterisierung der Proben wird zusätzlich an der abgetrennten 20µm-Fraktion der Glühverlust als Maß für den organischen Anteil bestimmt. In Abb. 125 sind für die Meßstationen jeweils die Anteile der 20µm-Fraktion an der Gesamtprobe und der zugehörige Glühverlust zusammen mit der Abflußganglinie dargestellt. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, daß, obwohl die Probenentnahmetechniken identisch sind,

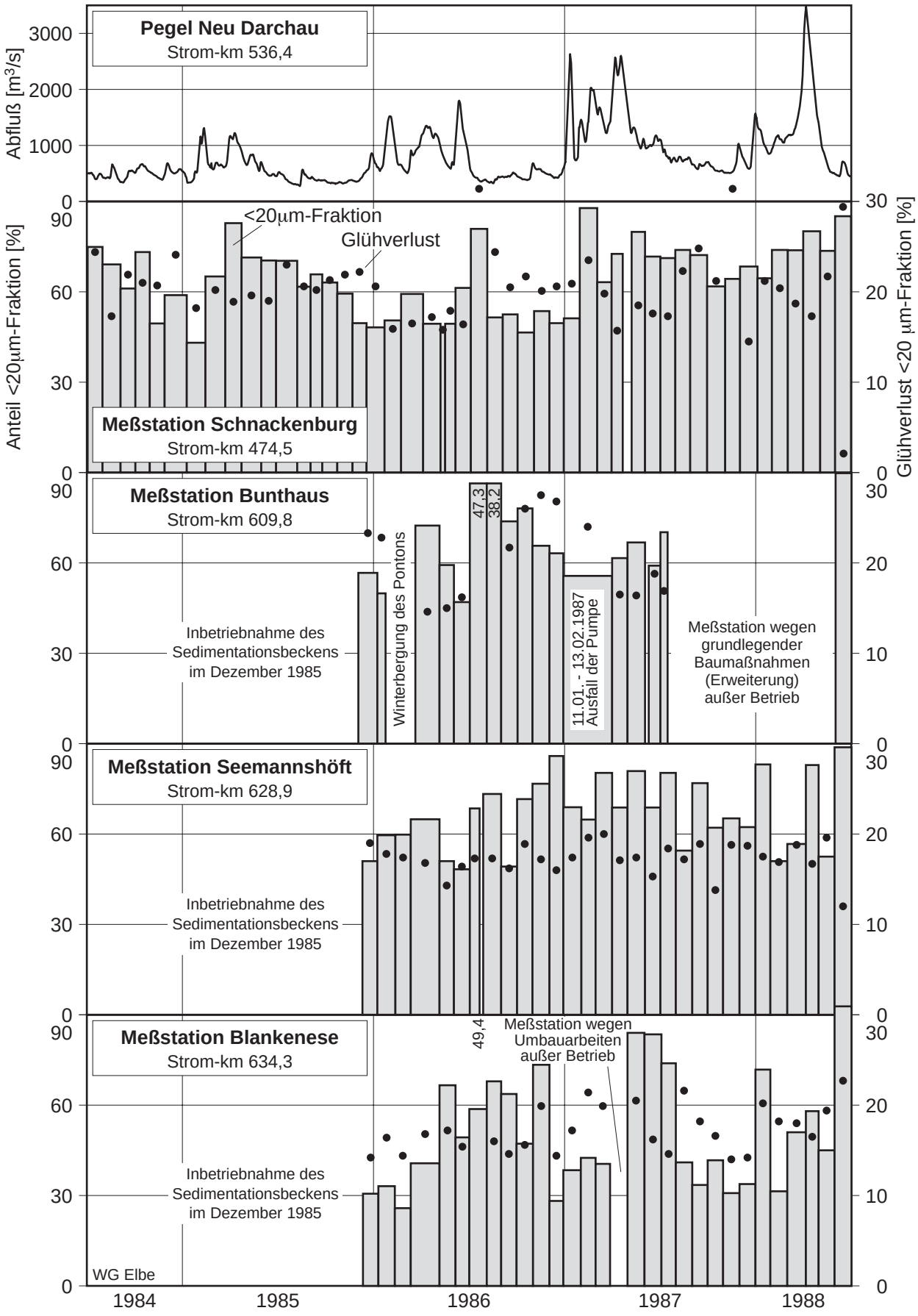


Abb.125 sedimentierte Schwebstoffe - Anteil der <20 µm-Fraktion und dessen Glühverlust

aufgrund der regional unterschiedlichen Strömungsverhältnisse die Gesamtproben eine unterschiedliche Zusammensetzung aufweisen. Dies gilt insbesondere für die Befunde der Meßstationen Seemannshöft und Blankenese. Durch die Zugrundelegung der Feinkornfraktion kleiner 20 µm werden diese Unterschiede der Gesamtproben eliminiert. Dadurch wird auch eine Vergleichbarkeit mit den Sedimenten aus dem Elbstrom sichergestellt.

In Abbildung 126 sind die gemessenen Quecksilberbelastungen der sedimentierten Schwebstoffe dargestellt. Die 4jährige Meßreihe für die Meßstation Schnackenburg zeigt trotz der Dämpfung der zeitlichen Variabilität durch die Monatsmischproben eine erhebliche Schwankungsweite an. Ausgesprochene Belastungsspitzen sind z. B. im Januar und Februar 1987 aufgetreten. Der generelle Trend der Abnahme der Schwermetallkonzentrationen - von den Belastungsschwankungen abgesehen - über den Untersuchungszeitraum darf nicht voreilig als Belastungsabnahme für die Elbe interpretiert werden. Wie in Kapitel 4.1 erläutert, war in diesem durch erhöhte Oberwasserabflüsse geprägten Zeitraum die Gesamtquecksilberfracht bei Schnackenburg nicht signifikant erniedrigt. Die bisher noch lückenhaften Befunde für die Meßstation Bunthaus deuten in der Tendenz gegenüber den Werten von Schnackenburg einen gedämpften, etwas niedrigeren Konzentrationsverlauf an. Für die Meßstationen Seemannshöft und Blankenese, unterhalb des Hamburger Hafens, zeigen die Befunde in der Regel etwas niedrigere Werte als in Schnackenburg an. Die ausgeprägten Belastungsspitzen Januar/Februar 1987 sind an den Meßstationen Seemannshöft und Blankenese kaum zu erkennen. Offensichtlich hat auf dem Transportweg von Schnackenburg bis Hamburg eine Vermischung der Schwebstoffe diese Belastungsspitzen weggedämpft.

Der Einfluß der hydrographischen Struktur des Hamburger Stromspaltungsgebietes spiegelt sich in den Befunden des Jahres 1986 deutlich wider. Während an der Meßstation Bunthaus oberhalb des Hamburger Hafens ein etwa gleichbleibendes Konzentrationsniveau von 25 bis 35 mg/kg TS ergab, zeigen die Meßstationen Seemannshöft und Blankenese im ersten Halbjahr 1986 mit den erhöhten Oberwasserabflüssen nur geringfügig niedrigere Werte als in Bunthaus. In der zweiten Jahreshälfte 1986 mit anhaltend niedrigen Oberwasserabflüssen lagen die Konzentrationswerte bei Seemannshöft und Blankenese jedoch deutlich niedriger als für Bunthaus. Diese Systematik ergibt sich aus dem stark oberwasserabhängigen Transportgeschehen im Stromspaltungsgebiet. In der ersten Jahreshälfte 1986 erfolgte durch die hohen Oberwasserabflüsse ein verhältnismäßig rascher Transport durch das System "Stromspaltungsgebiet/Hamburger Hafen" mit der Folge, daß die hochbelasteten Schwebstoffe aus dem oberen Teil auch unterhalb des Hamburger Hafens ankommen. In der zweiten Jahreshälfte 1986 bei anhaltenden niedrigen Oberwasserabflüssen ist der resultierende, ebbstromorientierende Transport deutlich geschwächt, so daß die von oberstrom herantransportierten Wasserkörper mit ihrem Schwebstoffinventar über zahlreiche Tiden im Bereich des Hamburger Hafens hin- und herschwingen. Mit der flutbedingten Füllung der Hafenbecken gelangt ein erheblicher Anteil der herangeführten Schwebstoffe in turbulenzschwache Zonen der Hafenbecken und sedimentiert dort. Gleichzeitig findet in dieser hydrologischen Phase verstärkten Flutstroms eine Einmischung geringer belasteter Schwebstoffe aus dem Unterelberaum bis in den Bereich Blankenese/Seemannshäft statt. Das Zusammenwirken beider Effekte führt in dieser Phase zu einer deutlich geringeren Schwermetallkonzentration in den Schwebstoffen im Bereich Seemannshöft/Blankenese. Eine vergleichbar systematische Entwicklung im Jahr 1986 ist auch für die Schwermetalle Cadmium, Blei, Zink und Kupfer feststellbar. Für Eisen und Nickel haben sich nicht derartige systematische Konzentrationsunterschiede ergeben. Für diese Elemente liegt keine deutliche anthropogene Belastungserhöhung vor, so daß die Schwebstoffe aus dem oberen Elbeinzugsgebiet und die Schwebstoffe aus dem Unterelberaum nahezu die gleiche Konzentration aufweisen.

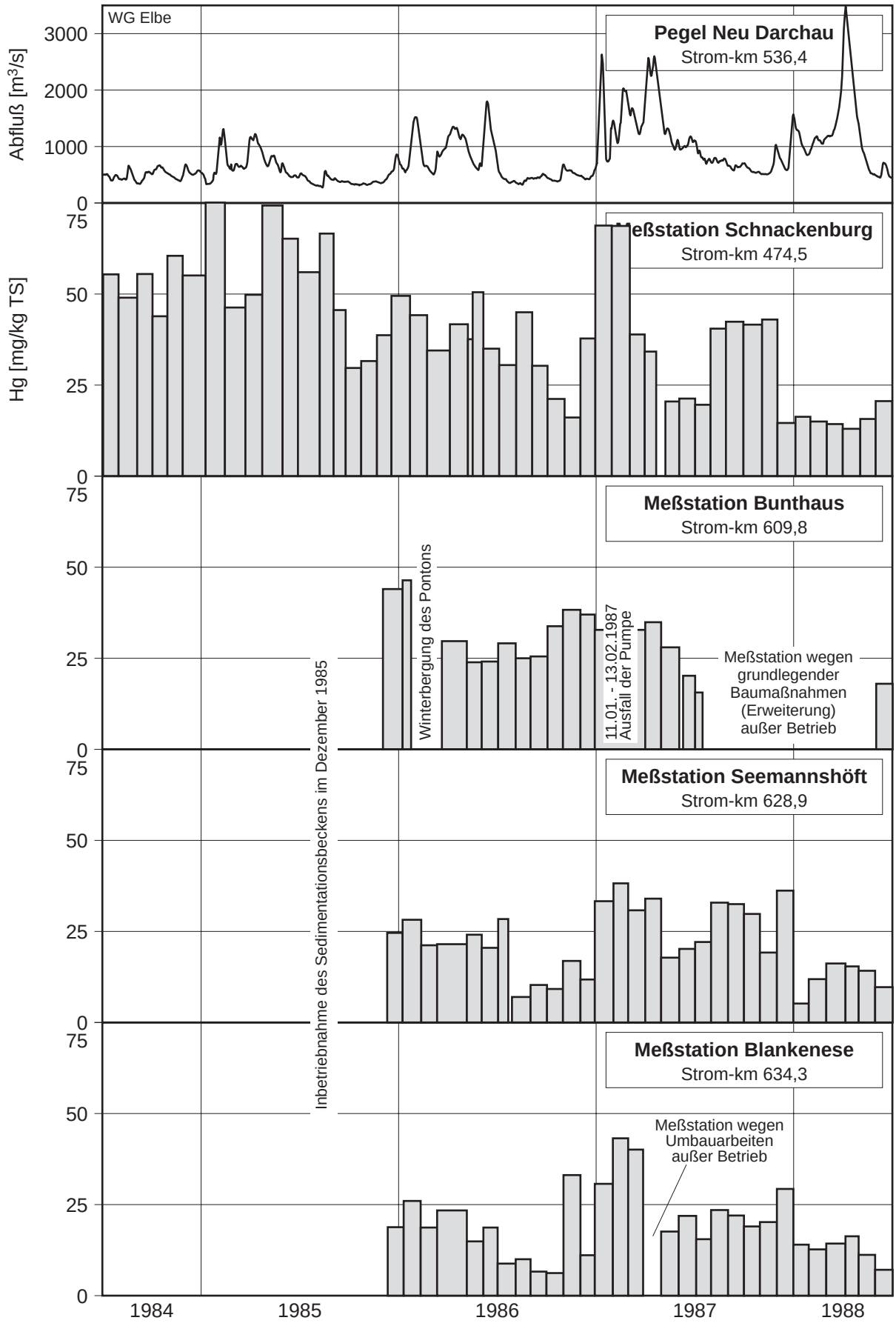


Abb.126 Quecksilberbelastung sedimentierter Schwebstoffe (<20µm-Fraktion)

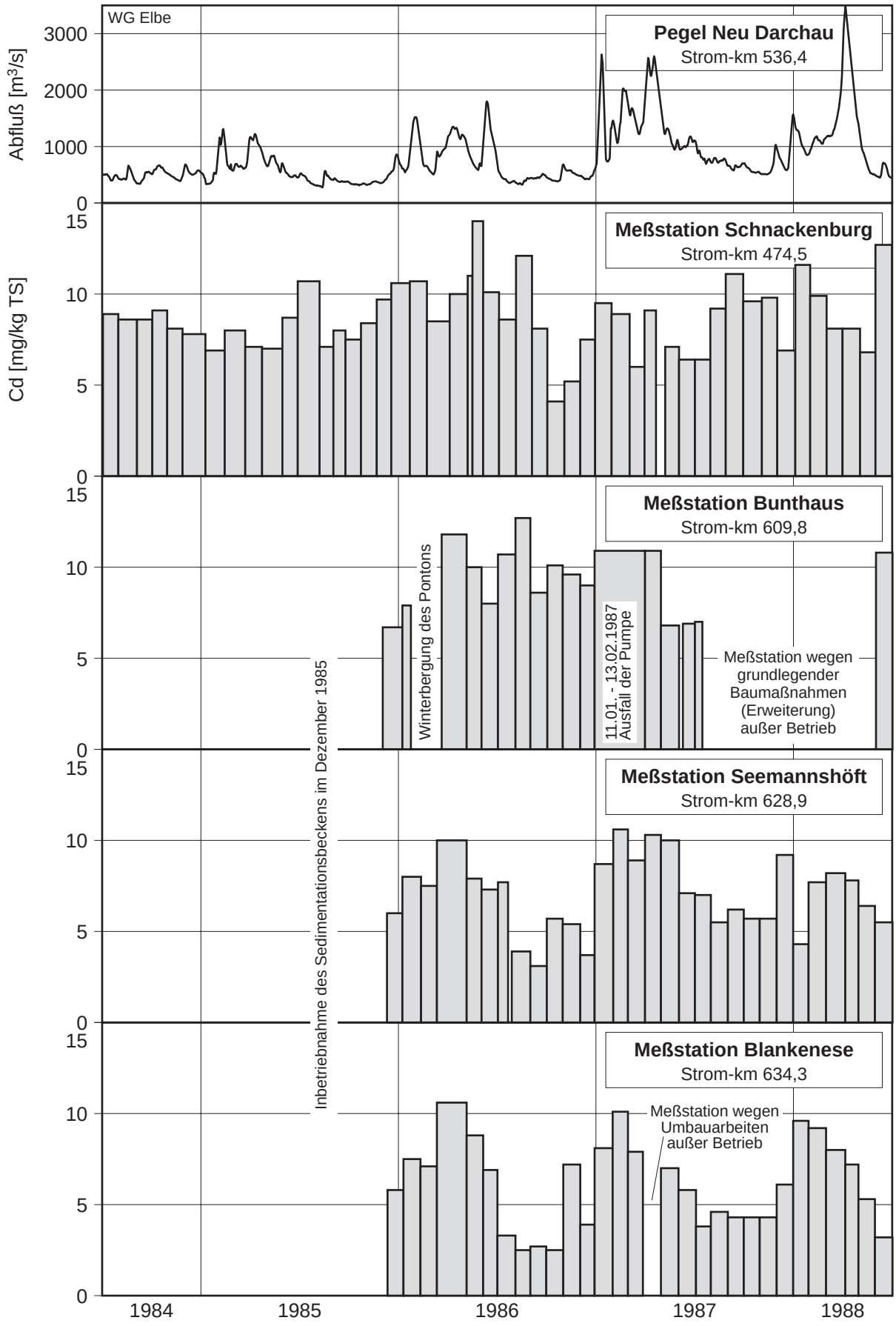


Abb.127 Cadmiumbelastung sedimentierter Schwebstoffe (<20µm-Fraktion)

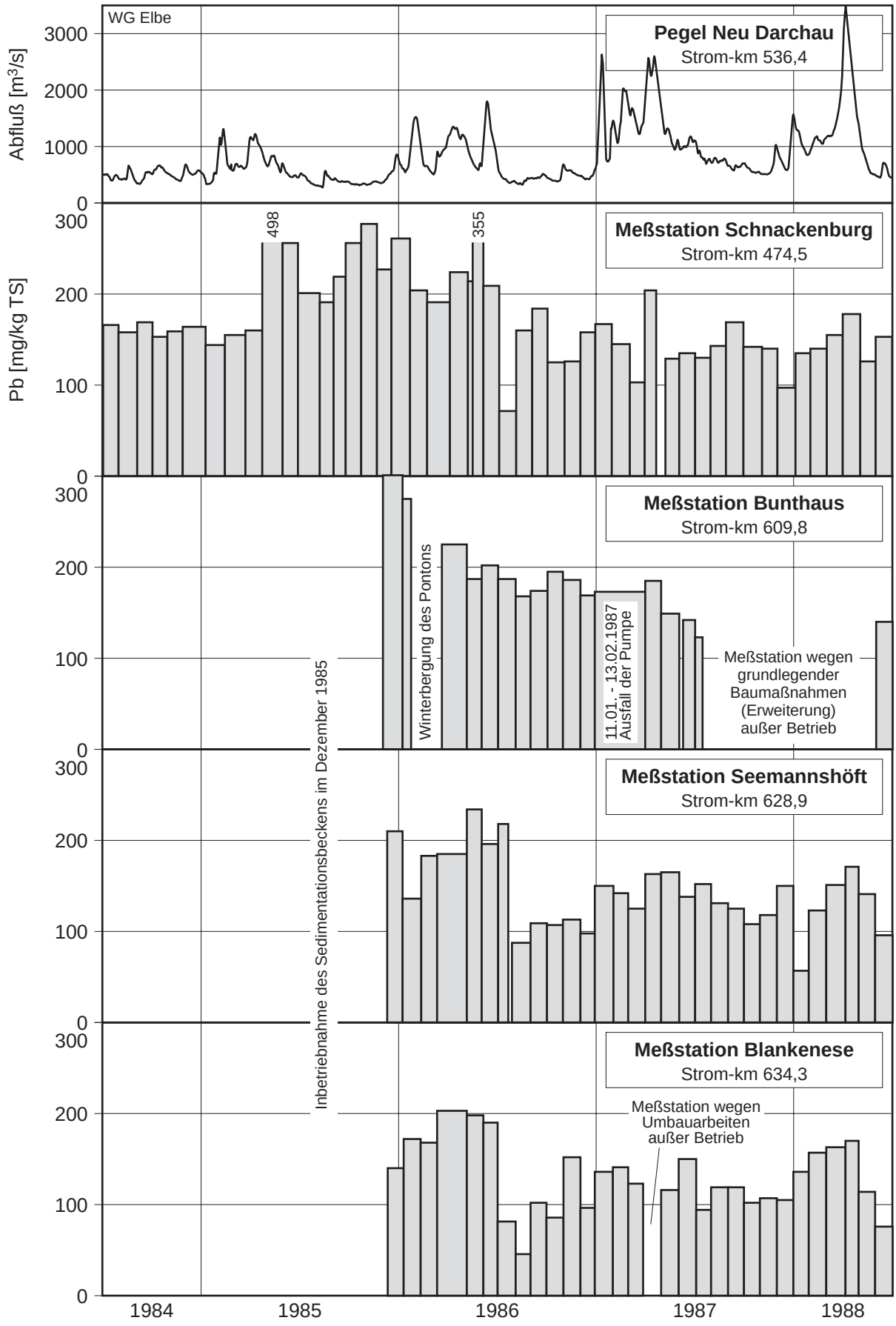


Abb.128 Bleibelastung sedimentierter Schwebstoffe (<20µm-Fraktion)

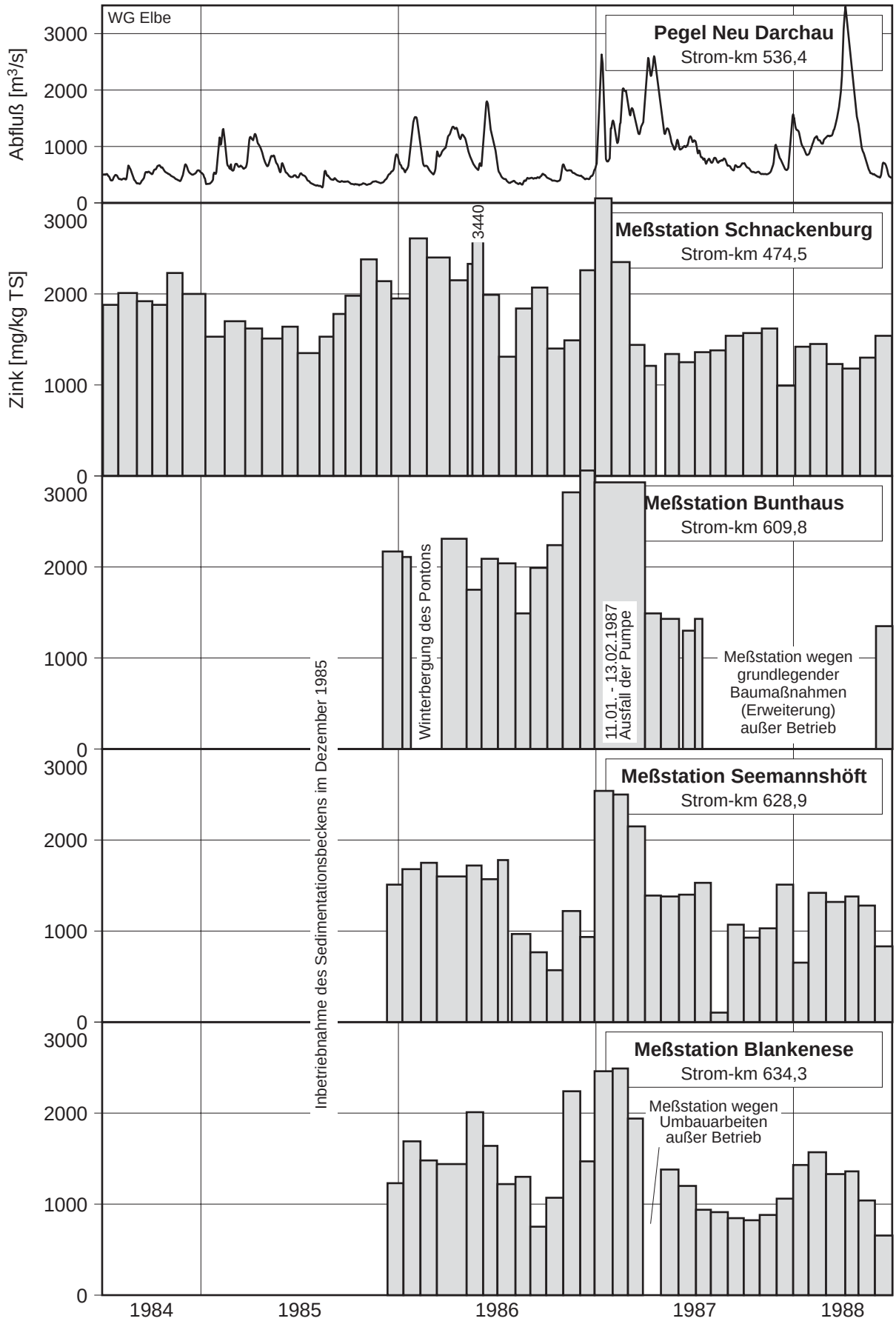


Abb.129 Zinkbelastung sedimentierter Schwebstoffe (<20µm-Fraktion)

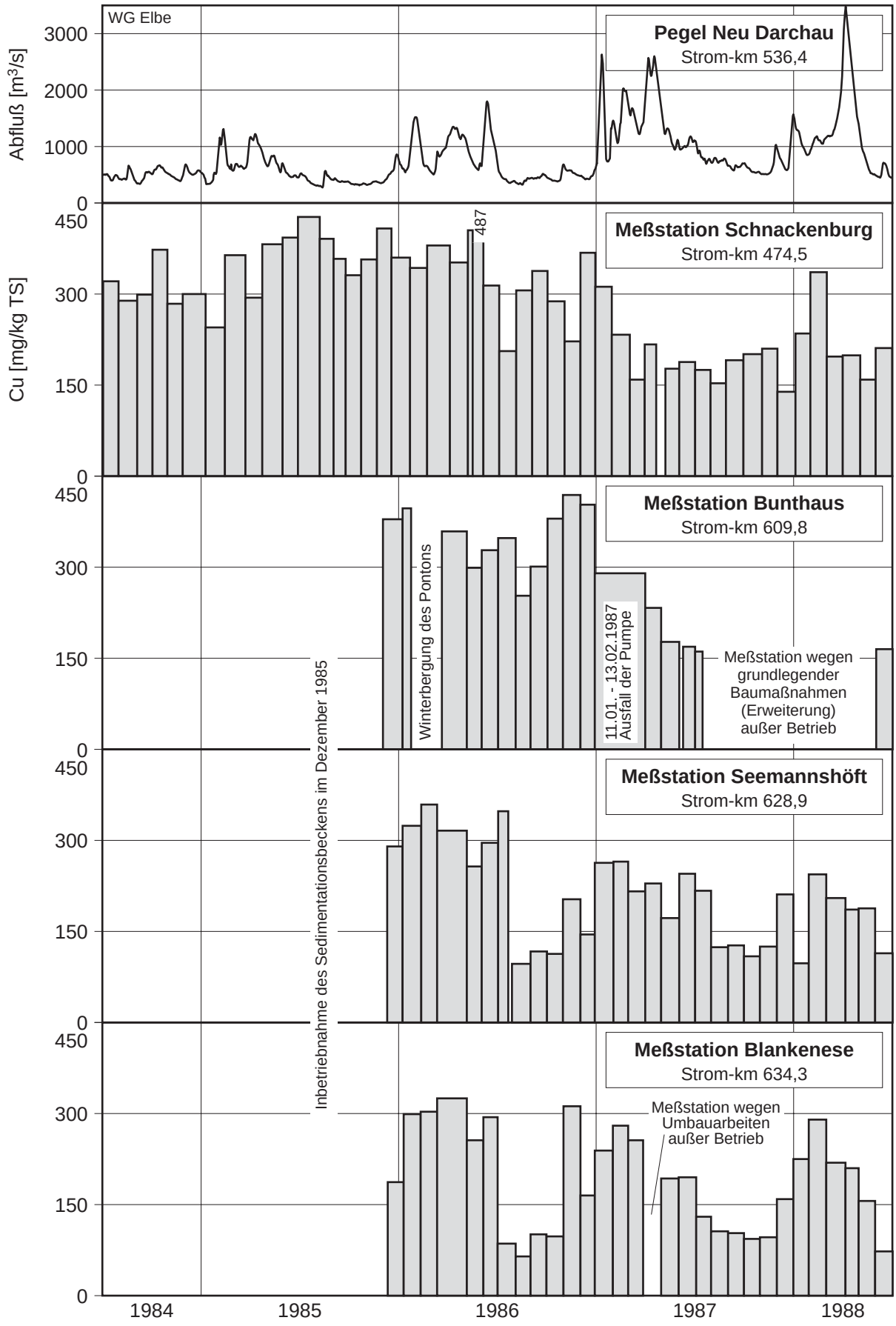


Abb.130 Kupferbelastung sedimentierter Schwebstoffe (<20µm-Fraktion)

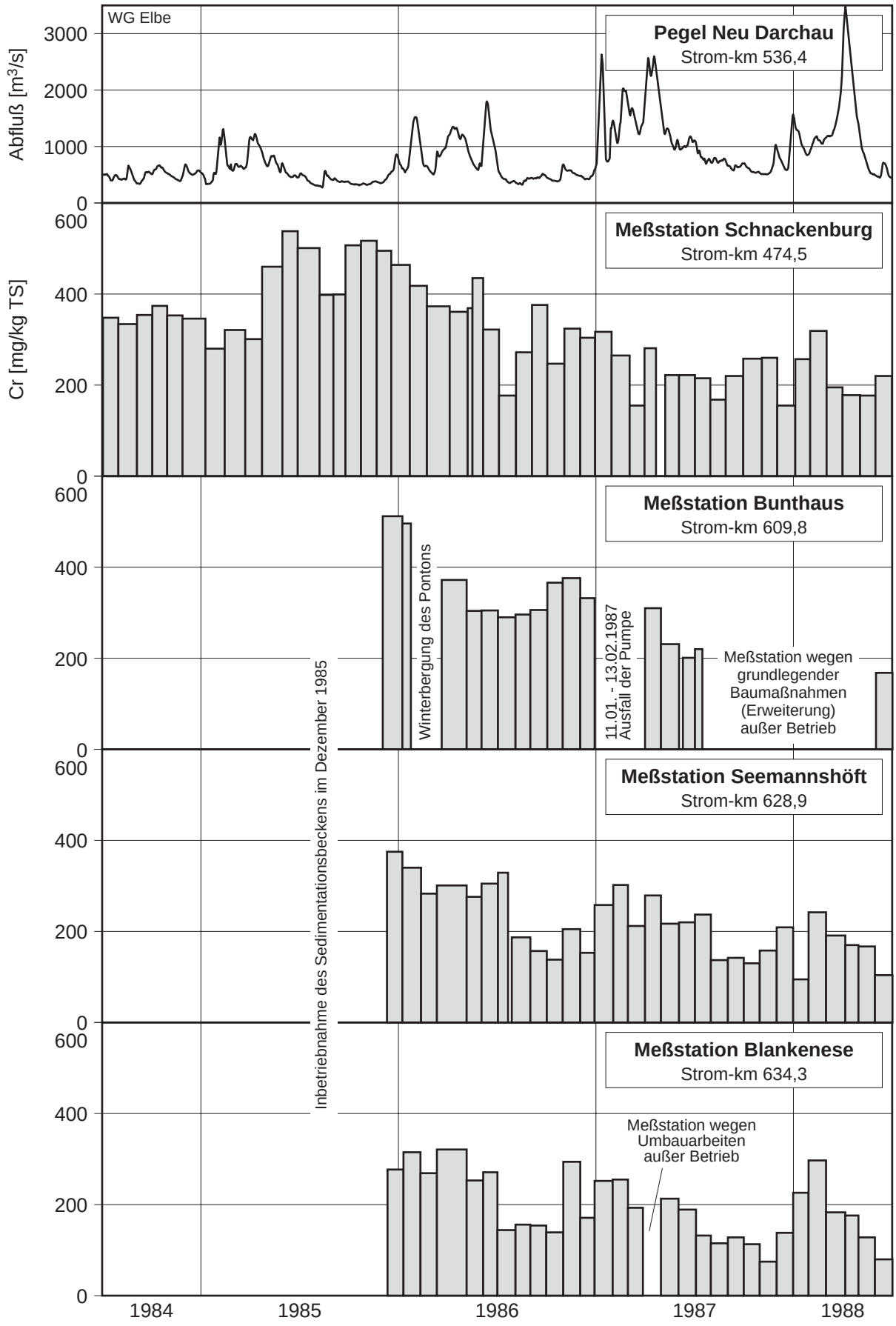


Abb.131 Chrombelastung sedimentierter Schwebstoffe (<20µm-Fraktion)

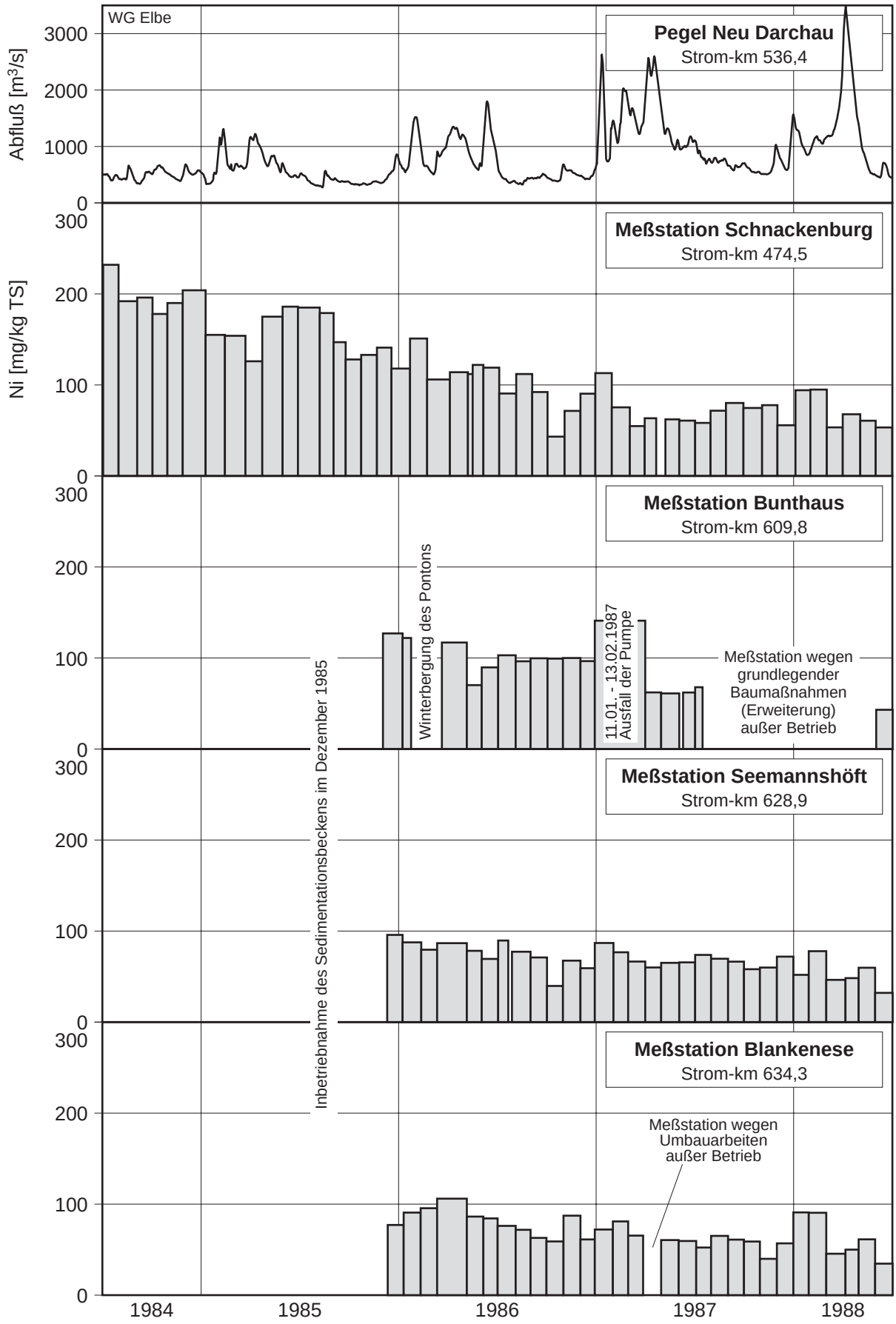


Abb.132 Nickelbelastung sedimentierter Schwebstoffe (<20µm-Fraktion)

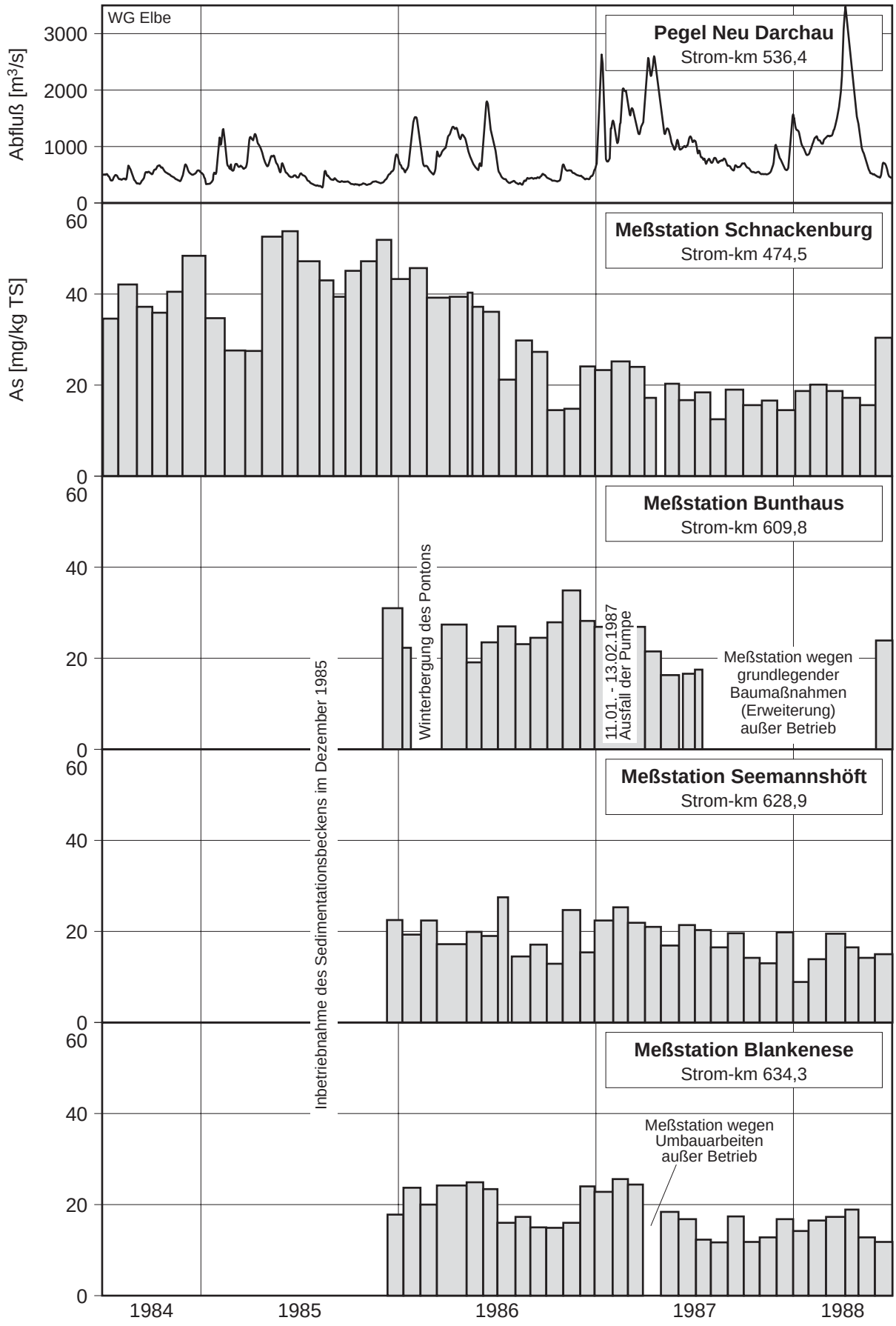


Abb.133 Arsenbelastung sedimentierter Schwebstoffe (<20µm-Fraktion)

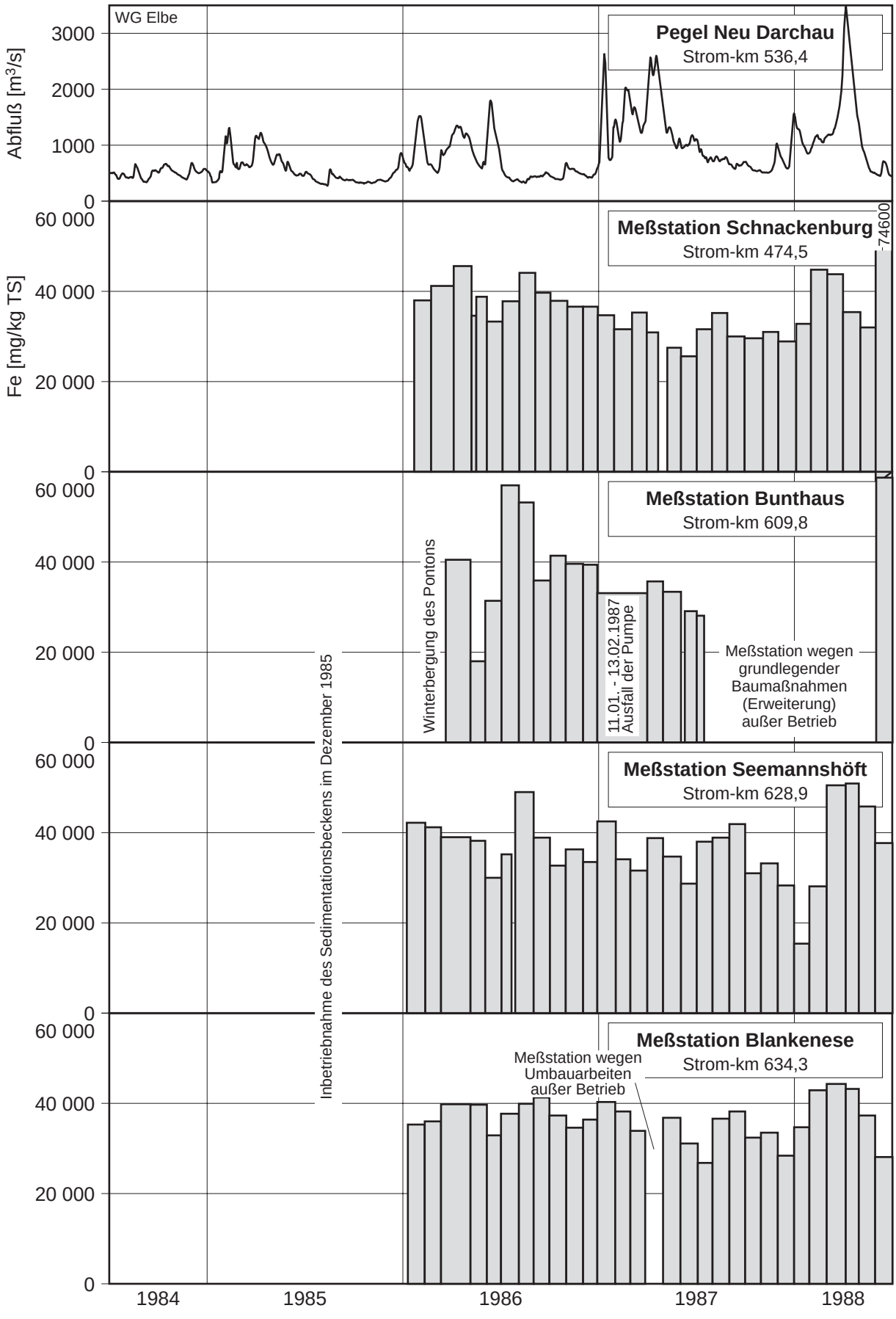


Abb.134 Eisenbelastung sedimentierter Schwebstoffe (<20µm-Fraktion)

Die zeitliche Entwicklung der Schwermetallkonzentrationen der sedimentierten Schwebstoffe zeigt für die Elemente Quecksilber, Cadmium, Blei, Zink, Kupfer, Nickel und Arsen nur zum Teil einen ähnlichen Verlauf. Zwischen einigen Elementen bestehen für die zeitliche Entwicklung grundlegende Unterschiede. Auch die in Kapitel 4.1 erläuterten Konzentrationsgang- und Frachtenganglinien für die Meßstation Schnackenburg haben eine ungleichmäßige zeitliche Entwicklung für die verschiedenen Elemente ergeben. Ursache hierfür ist die Überlagerung vielschichtiger Einflüsse. Die verschiedenen Schwermetalle haben wiederum entsprechend ihrer chemischen Form, in der sie vorliegen, unterschiedliche Anlagerungseigenschaften. Im Zusammenwirken mit den unterschiedlichen Bindungseigenschaften der Schwebstoffe ergibt sich insgesamt eine komplexe Verteilungsstruktur. Für die Belastung sind Emissionsquellen mit verschiedener Charakteristik maßgebend. Zum Beispiel wird sich für Schwermetalle, die überwiegend aus konstanten Emissionsquellen (z. B. Direkteinleitungen) stammen, ein hohes Konzentrationsniveau bei niedrigen Oberwasserabflüssen und eine Verdünnungswirkung bei hohen Oberwasserabflüssen einstellen. Demgegenüber wird sich für Schwermetalle, die zum überwiegenden Anteil aus der Luftverschmutzung stammen und diffus durch Abschwemmungen und Auswaschungen eingetragen werden, jeweils in der ersten Phase einer Hochwasserwelle eine Belastungsspitze ergeben. Auch die regionale Verteilung der für die verschiedenen Schwermetalle maßgeblichen Emissionsquellen in Verbindung mit der hydrographischen Struktur wirkt sich auf den jeweiligen Konzentrationsverlauf bei Schnackenburg aus. So wird beim Abfluß einer Oberwasserwelle die Verteilungsstruktur für die verschiedenen Schwermetalle besonders durch die Belastungssituation des Gebietes, in dem der Oberwasserabfluß durch erhöhte Niederschläge entstanden ist, geprägt. Eine Oberwasserwelle, die durch erhöhte Niederschläge im Bereich Saale/ Mulde entstanden ist, wird eine andere Verteilung der Schwermetallkonzentrationen aufweisen, als eine Oberwasserwelle, die aus der Region Havel/ Spree stammt. Informationen über eine charakteristische Verteilung der verschiedenen Schwermetalle für die verschiedenen Regionen des Elbeinzugsgebietes liegen jedoch leider nicht vor, so daß eine weitergehende Auswertung nicht möglich ist.

Eine zusammenfassende Übersicht der an den sedimentierten Schwebstoffen gemessenen Schwermetallgehalte für die Meßstationen Schnackenburg, Bunthaus und Seemannshöft und Blankenese ist in Form von "BOX AND WHISKER PLOTS" in Abbildung 135 angegeben. Die statistische Methode ist in Kapitel 1 erläutert. Ein Vergleich der Medianwerte zeigt für die meisten Schwermetalle die höchsten Konzentrationen an der Meßstation Schnackenburg an. Dadurch wird wiederum der die Gesamtbelastung prägende Einfluß der hohen Vorbelastung aufgezeigt.

Die für die verschiedenen Schwermetalle ermittelten Medianwerte bieten eine gute Grundlage, um den Grad der anthropogenen Belastung im Verhältnis zur natürlichen Grundbelastung der Elbsedimente zu beurteilen. Für Quecksilber liegt der Medianwert an der Meßstation Schnackenburg mit rd. 40 mg/kg TS um das 100fache über der mit 0,4 mg/kg TS anzusetzenden natürlichen Konzentration. Bei der vergleichenden Bewertung für die Meßstationen Bunthaus, Seemannshöft und Blankenese ist zu berücksichtigen, daß an diesen Stationen die Messung erst seit Dezember 1985 durchgeführt wird. FÜr die Meßstation Bunthaus ergibt sich für Quecksilber ein Medianwert von rd. 30 mg/kg TS, während die Werte bei Seemannshöft und Blankenese mit rd. 20 mg/kg TS deutlich niedriger liegen. Die Belastung der Schwebstoffe mit Quecksilber nimmt also auf dem Fließweg von Bunthaus bis zum unteren Hafenausgang ab. Eine entsprechende Charakteristik ist auch bei den übrigen Schwermetallen, mit Ausnahme von Nickel (keine bedeutende anthropogene Belastung) und den Begleitelementen Mangan und Eisen festzustellen.

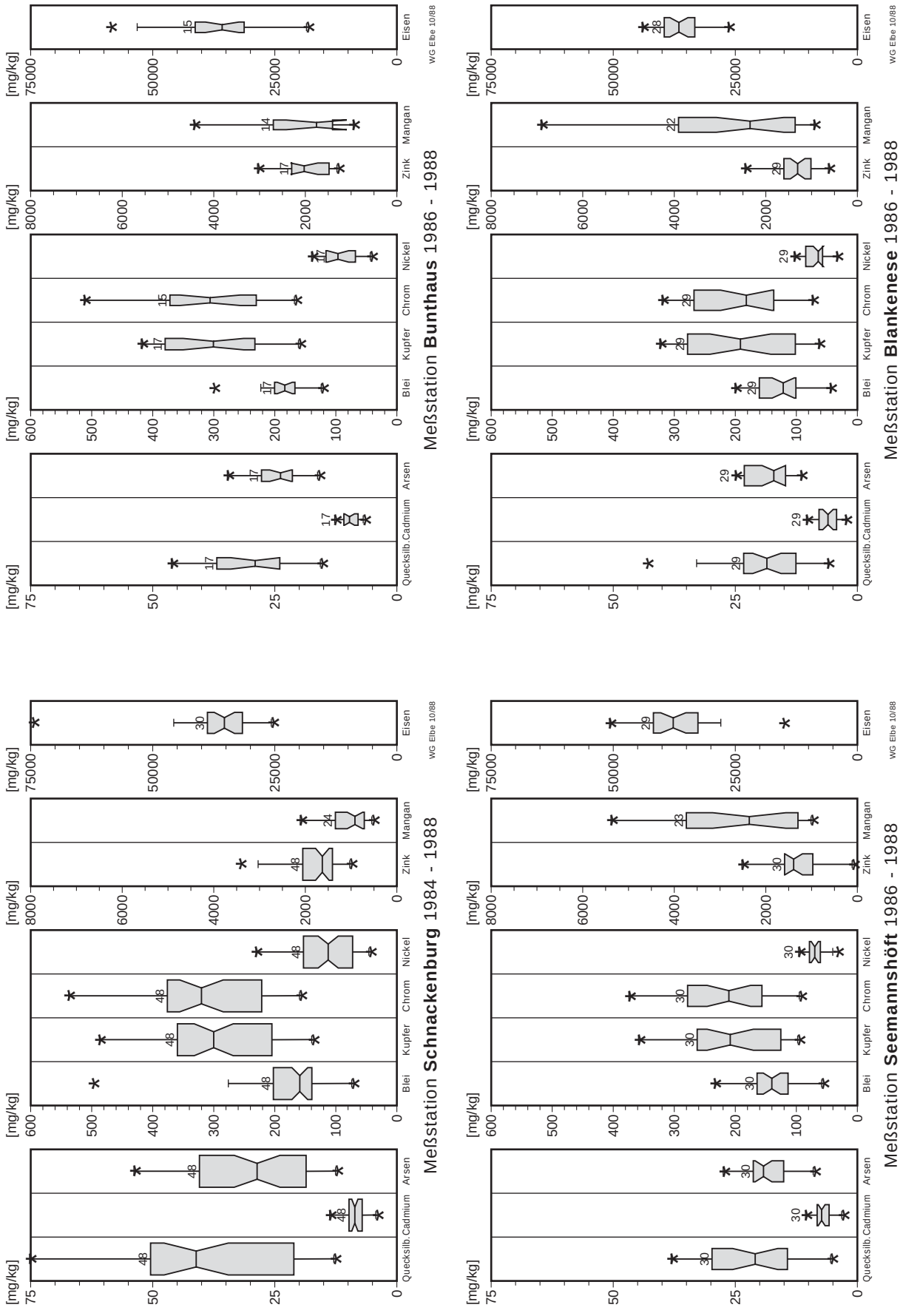


Abb.135 Medianwerte und Quartile der Schwermetallgehalte sedimentierter Schwebstoffe

Tab. 6 Schwermetallgehalte (mg/kg TS) in sedimentierten Schwebstoffen. Mittlere Gehalte im Vergleich zur natürlichen Grundbelastung

	1.Quartil	Median	3.Quartil	natürliche Grundbelast.	anthropogener Belastungs-Faktor (Median/Grdbel)
Schnackenburg (1984 - 1988)		(mg/kg TS)			
Quecksilber	29,7	41,6	55,1	0,2 - 0,4	140
Cadmium	7,5	8,6	9,9	0,3 - 0,5	22
Blei	142	160	204	25 - 30	6
Zink	1420	1640	2070	90 - 110	16
Kupfer	210	300	360	20 - 30	12
Chrom	247	321	376	60 - 80	5
Nickel	71,7	112	155	10 - 30	6
Arsen	18,7	29,8	42,1	3 - 5	7
Eisen	31600	35300	38800	30000-40000	1
Bunthaus (1986 - 1988)		(mg/kg TS)			
Quecksilber	20,8	28,0	34,9	0,2 - 0,4	93
Cadmium	7,9	9,8	10,9	0,3 - 0,5	25
Blei	149	185	198	25 - 30	7
Zink	1490	1990	2240	90 - 110	20
Kupfer	186	299	379	20 - 30	12
Chrom	231	305	366	60 - 80	4
Nickel	62,2	96,4	103	10 - 30	5
Arsen	21,5	23,9	27,4	3 - 5	6
Eisen	31600	35900	49500	30000-40000	1
Seemannshöft (1986 - 1988)		(mg/kg TS)			
Quecksilber	14,2	20,9	29,8	0,2 - 0,4	70
Cadmium	5,7	7,2	8,2	0,3 - 0,5	18
Blei	113	140	165	25 - 30	5
Zink	968	1390	1600	90 - 110	14
Kupfer	125	208	263	20 - 30	8
Chrom	157	211	279	60 - 80	3
Nickel	59,7	68,5	77,9	10 - 30	3
Arsen	15,0	19,2	21,4	3 - 5	5
Eisen	32700	37700	41900	30000-40000	1
Blankenese (1986 - 1988)		(mg/kg TS)			
Quecksilber	12,7	18,7	23,5	0,2 - 0,4	62
Cadmium	4,3	6,1	8,0	0,3 - 0,5	15
Blei	102	123	163	25 - 30	5
Zink	1040	1330	1640	90 - 110	13
Kupfer	103	193	280	20 - 30	8
Chrom	138	183	269	60 - 80	3
Nickel	59,0	65,1	86,3	10 - 30	3
Arsen	14,9	17,3	23,4	3 - 5	4
Eisen	33500	36700	39800	30000-40000	1

5.4 Zusammenfassende Bewertung

Die Untersuchung ausgewählter Tiefenprofile hat ergeben, daß in älteren Sedimentschichten für die untersuchten Schwermetalle keine "elbspezifische" erhöhte natürliche Belastung vorliegt. Die in diesen älteren Sedimenten gemessenen Konzentrationen zeigen eine gute Übereinstimmung mit Literaturdaten für anthropogen unbelastete Sedimente.

Die in den Sedimenten aus dem Elbmündungsgebiet und in den sedimentierten Schwebstoffen der Meßstationen Schnackenburg, Bunthaus, Seemannshöft und Blankenese gemessenen aktuellen hohen Schwermetallkonzentrationen sind Ausdruck einer starken anthropogenen Belastung und nicht auf natürliche Auswaschungen, z. B. aus dem Erzgebirge, zurückzuführen. Die höchsten Belastungen wurden jeweils an der Meßstation Schnackenburg festgestellt. Die hochgradige Vorbelastung prägt die Sedimentbelastung bis in den Unterelberaum und das Elbmündungsgebiet maßgeblich. Als extrem hoch ist die Belastung der sedimentierten Schwebstoffe und der Sedimente mit Quecksilber einzustufen.

6. ERGEBNISSE DER FISCH- UND MUSCHELUNTERSUCHMGEN (Bereich Elbmündung)

6.1 Schwermetallgehalte in Flundern

6.1.1 Grunddaten der untersuchten Flundern

Festlegung der Längengruppen

Die Richtlinien des internationalen "Joint Monitoring Program" geben vor, daß die Fische vor der Untersuchung in 5 (oder mehr) Längengruppen zu sortieren sind, um Pool-Proben für eine spätere Auswertung der möglichen Altersanreicherung der Schadstoffe sinnvoll zusammenstellen zu können. Die Einteilung der Längengruppen richtet sich nach dem im Fanggebiet über mehrere Jahre immer wieder fangbaren Längenspektrum. Mindestens 5 Fische sollten jeweils zur größten Längengruppe gehören. Die Festlegung der Längengruppen erfolgt im logarithmischen Maßstab, wobei jede Längengruppe eine Breite von mindestens 2 cm haben muß. Für das Elbe-Ästuar ergeben sich folgende Längengruppen:

Längenspektrum der vorkommenden Flundern	:	15 - 35 cm
Gruppengröße (logarithmischer Maßstab)	:	0,169 = LOG(35/15)/5
Die Gruppenbereiche (auf 0,5 cm gerundet)	:	15,0 - 17,9 cm 18,0 - 20,9 cm 21,0 - 24,9 cm 25,0 - 29,4 cm 29,5 - 35,0 cm

Diese Längengruppeneinteilung wird auch in den folgenden Jahren beibehalten.

Als Grunddaten zur Charakterisierung der Fischproben wurden folgende Parameter bestimmt:

- Alter
- Länge
- Gewicht
- Lebergewicht
- Fettgehalt der Muskulatur und der Leber
- Wassergehalt der Muskulatur und der Leber

Die wichtigsten Befunde sind in Abb. 136 graphisch für die Jahre 1986 und 1987 dargestellt. In den Graphiken bedeutet das Symbol "+" Daten aus dem inneren Elbeästuarbereich 13.1 (Glückstadt bis Cuxhaven, mit dem Schwerpunkt Medemsand) und das Symbol "o" Daten aus dem äußeren Elbeästuarbereich 13.2 (Cuxhaven bis Außenelbe, mit dem Schwerpunkt Gelbsand). Zusätzlich sind die Befunde durch eine statistische Auswertung (BOX AND WHISKER PLOTS) zusammengefaßt (Abb. 137), um einen räumlichen Vergleich (Gebiet 13.1 und 13.2) und einen zeitlichen Vergleich (1986 gegenüber 1987) der Stichproben zu ermöglichen. Die Auswertungen zeigen, daß trotz der insbesondere im Jahr 1987 durchgeführten intensiven Befischung keine Flundern gefangen werden konnten, die älter als 5 Jahre waren. Die natürliche Lebenserwartung von Flundern liegt durchaus im Bereich von 20 bis 30 Jahren. Das Fehlen der älteren und damit längeren Flundern im Elbeästuar ist einerseits durch die sehr intensive Befischung (z. B. Garnelenfischerei) und die damit verbundene hohe fischereiliche Sterblichkeit zu erklären. Andererseits treten ältere Bestände mit größeren Fischlängen bevorzugt im Bereich größerer Wassertiefen außerhalb der Elbmündung im Gebiet der

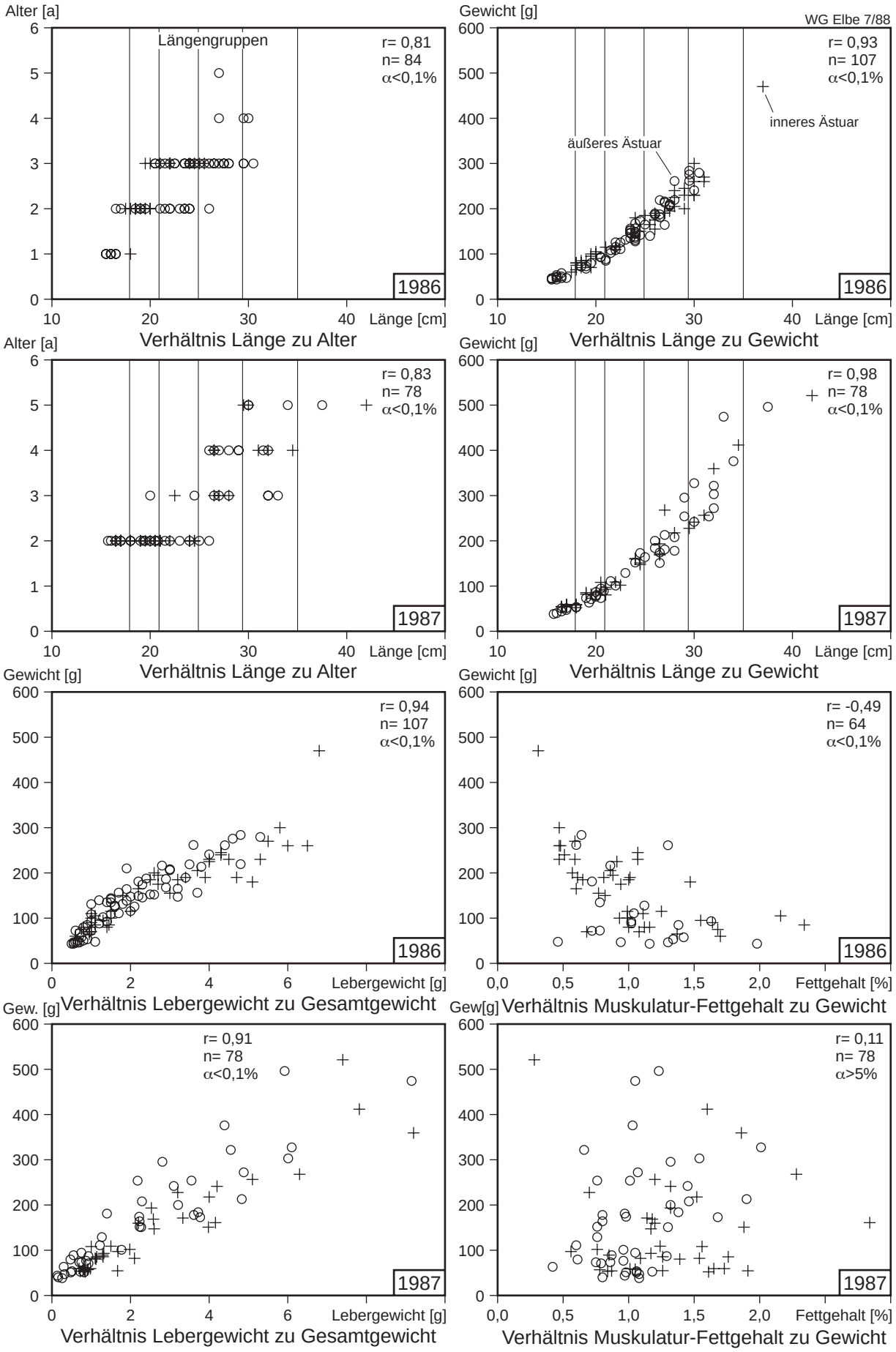


Abb.136 Grunddaten der untersuchten Flundern aus dem Elbeästuar

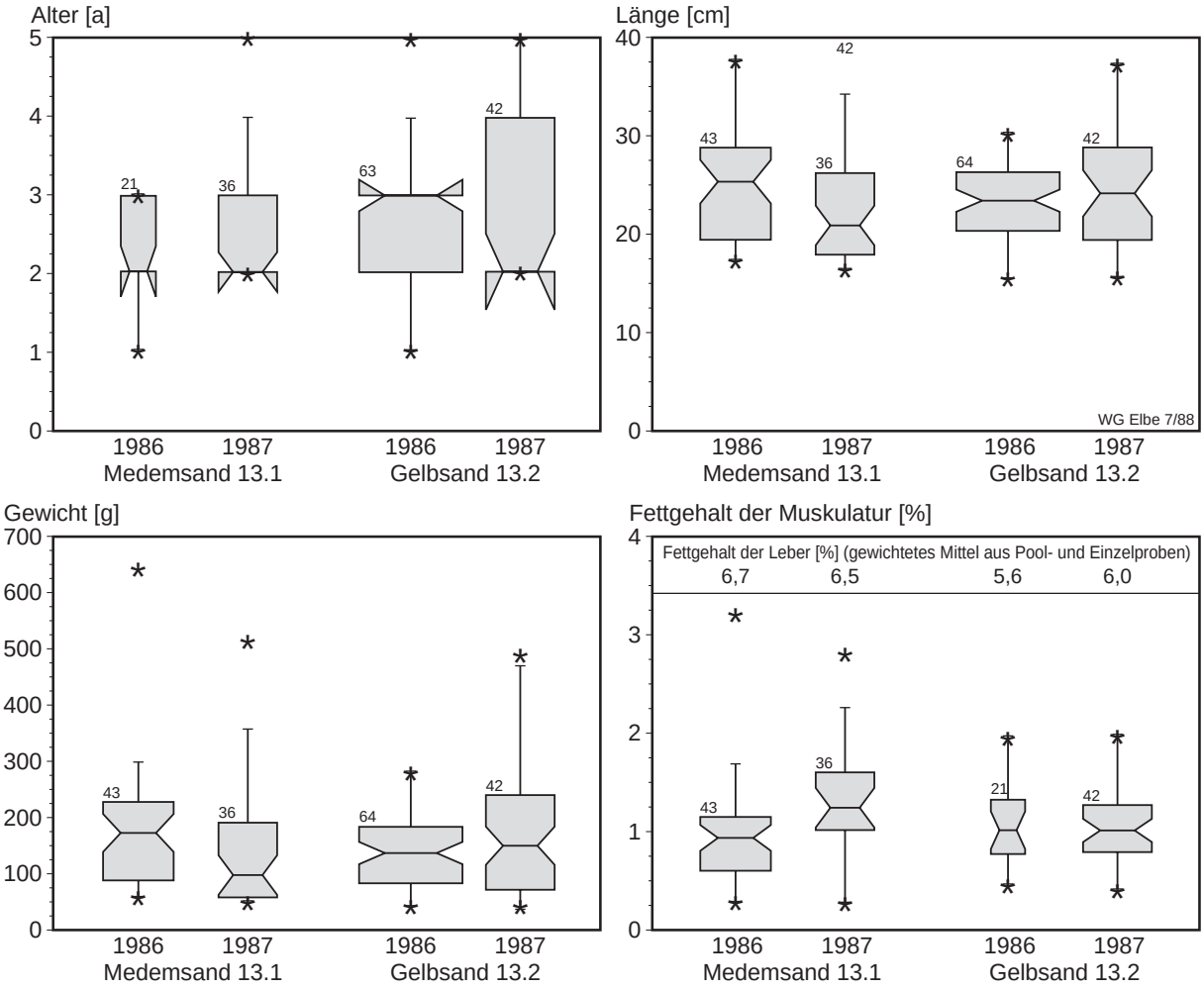


Abb.137 Grunddaten der untersuchten Flundern aus dem Elbeästuar

Deutschen Bucht auf. Vermutlich ist das Fehlen der größeren und damit älteren Flundern im Elbästuar auf ein Zusammenwirken beider Effekte zurückzuführen. Aufgrund des Fehlens der älteren Fische sind Aussagen über die Altersanreicherung der Schadstoffe im Bereich des Elbeästuars kaum möglich.

Die graphischen Auswertungen in Abb. 136 verdeutlichen, daß keine straffe Alters-/Längenbeziehung für die Flundern gegeben ist. So können beispielsweise dreijährige Fische durchaus einen Längenbereich von 19 bis über 30 cm abdecken. Ausdrücklich sei darauf hingewiesen, daß das dargestellte Längenspektrum nicht repräsentativ für die Gesamtpopulation ist. Bei den Fängen wurden jeweils große Mengen kleiner Flundern im Bereich 5 bis 25 cm Länge gefangen. Aus den Fängen wurden die Exemplare mit größeren Fischlängen aussortiert, um für die Schadstoffuntersuchungen einen möglichst weiten Längenbereich zu erfassen. Überschläglich ist davon auszugehen, daß Flundern mit einer Länge über 30 cm von der Gesamtpopulation des Elbeästuars nur weniger als 0,1 % ausmachen.

Zwischen der Fischlänge und dem Fischgewicht besteht naturgemäß eine straffe Korrelation, da das Gewicht proportional zum Volumen eines Fisches ist.

Die Fettreserven von Fischen, die ein Depot für organische Schadstoffverbindungen darstellen, werden durch eine Vielzahl von Einflußgrößen, wie z. B. das Nahrungsangebot, die Laichreife, die gesundheitliche Konstitution und die

Jahreszeit, beeinflußt. Der Fettgehalt in der Muskulatur zeigt deshalb eine erhebliche Streubreite und bedeutende Unterschiede für die Jahre 1986 und 1987.

Der Vergleich der Fänge hinsichtlich der Fischlänge, des Frischgewichtes, des Alters und des Fettgehaltes der Muskulatur (Abb. 137) aus den Jahren 1986 und 1987 zeigte, daß die Stichprobengruppen durchweg ähnlich und damit vergleichbar sind. Die Flundern des Fanges aus dem Gebiet 13.1 im Jahre 1987 waren allerdings im Mittel signifikant etwas kleiner und leichter und hatten gleichzeitig einen höheren Fettanteil in der Muskulatur. Bei der Betrachtung der Altersauswertung der Flundern ist zu beachten, daß alle Altersangaben ganzzahlige Werte sind. Es können so z. B. Minimum, 1. Quartil und Median den gleichen Wert haben. Das erfaßte Altersspektrum ist, wie oben erläutert, recht klein (1 bis 5 Jahre). Bei einem Bestimmungsfehler von 1 Jahr sollten die erkennbaren Altersunterschiede zwischen den Stichproben nicht zu stark bewertet werden. Für den Vergleich der 4 Stichprobengruppen kann auch bei der Alterszusammensetzung von einer ausreichenden Ähnlichkeit ausgegangen werden.

6.1.2 Schwermetallbelastung der Flundern

Die Schwermetallwerte sind alle auf das Frischgewicht der Muskulatur (Quecksilber) bzw. auf das Frischgewicht der Leber (Cadmium und Blei) bezogen. Ab 1987 wurden zusätzlich die Elemente Kupfer, Zink und Nickel in der Muskulatur sowie Arsen und Chrom in der Leber untersucht.

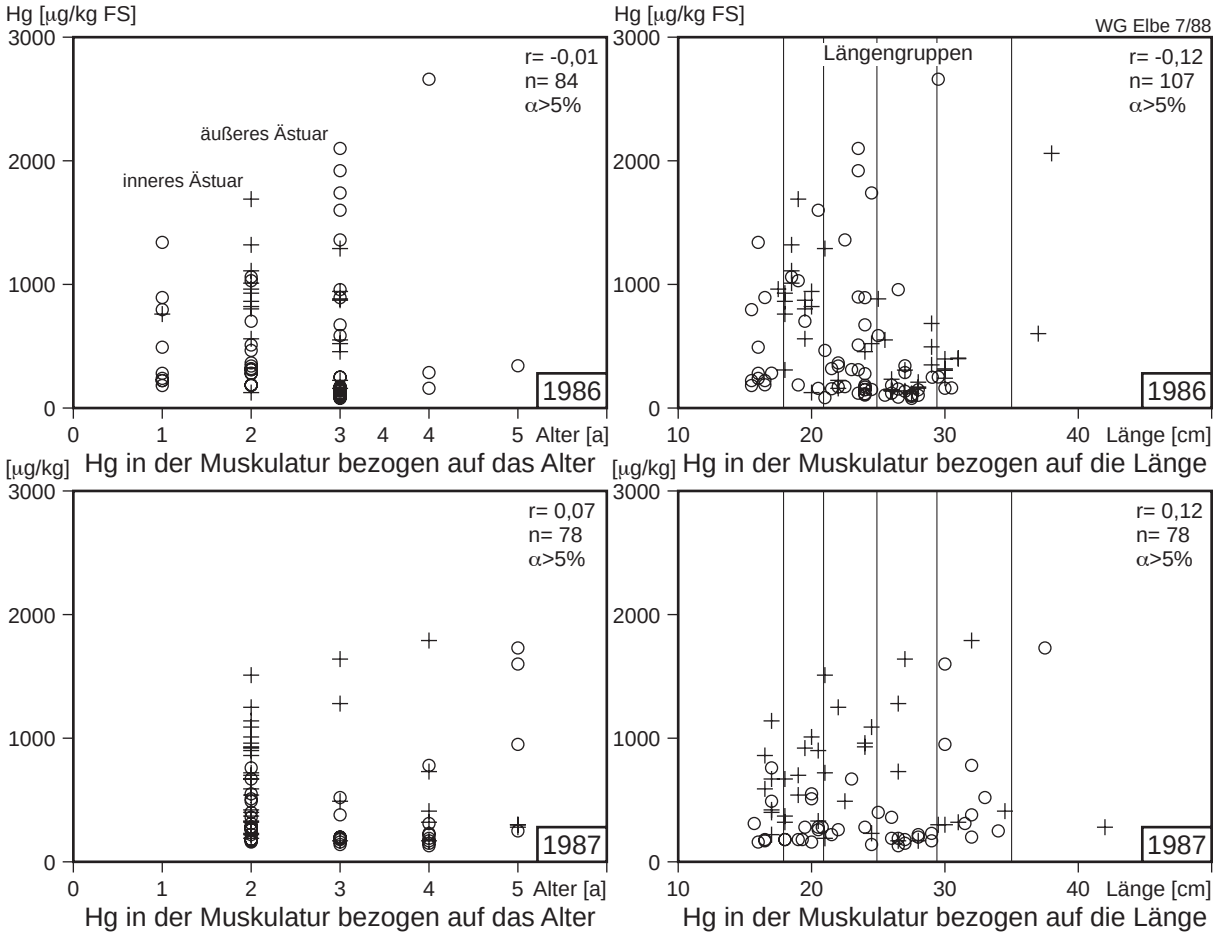


Abb.138 Quecksilbergehalte in der Muskulatur der untersuchten Flundern aus dem Elbeästuar

In Abb. 138 sind die gemessenen Quecksilberkonzentrationen in der Muskulatur, auf das Alter und die Länge der Fische bezogen, aufgetragen. Die Befunde ergeben, daß bei den Populationen in der Elbmündung keine signifikante Alters- bzw. Längenabhängigkeit der Quecksilberkonzentrationen besteht. Der Vergleich der Stichproben (Abb. 139) zeigt, daß es im Gegensatz zu den Werten des Jahres 1986 im Jahre 1987 einen statistisch signifikanten Belastungsunterschied zwischen den Fanggebieten 13.1 und 13.2 gibt. Bei den Befunden aus dem Jahre 1987 liegen die Quecksilberkonzentrationen im Mittel für die Proben aus der Außenelbe etwas niedriger; einzelne Befunde aus der Außenelbe zeigen jedoch ebenfalls erhebliche Quecksilberbelastungen an. Dabei kann es sich um Flundern handeln, die aus dem inneren Bereich des Elbeästuars stammen und nur zufällig im Bereich der Außenelbe bei der Probengewinnung gefangen wurden.

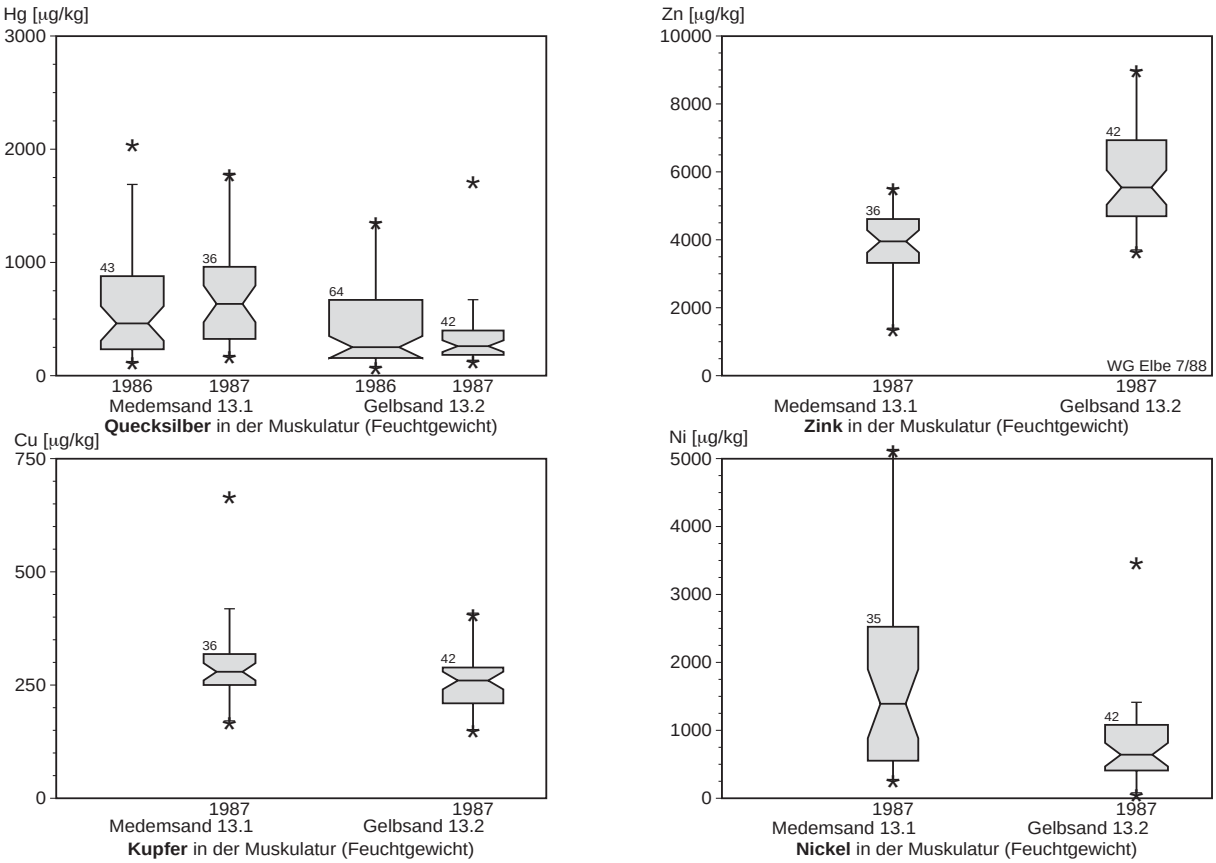


Abb.139 Metallgehalte der untersuchten Flundern aus dem Elbeästuar

Kupfer wird, im Vergleich zu Quecksilber, in der Muskulatur nur in geringem Maße angereichert. Die Befunde in Abb. 140 zeigen, daß auch bei der Kupferbelastung keine signifikante Altersabhängigkeit bzw. Längenabhängigkeit besteht. Ein Belastungsunterschied zwischen dem inneren und äußeren Ästuarbereich ist nicht festzustellen.

In Abb. 140 sind die gemessenen Zinkkonzentrationen der Muskulatur, bezogen auf das Alter bzw. auf die Fischlänge, dargestellt. Die Befunde ergeben ebenfalls keine Abhängigkeit des Konzentrationsniveaus vom Alter bzw. von der Länge. Die Ergebnisse zeigen, daß bei den Fischen in der Außenelbe (Fanggebiet 13.2) im Mittel eine höhere Zinkkonzentration im Muskelgewebe vorlag als bei den Fischen aus dem Gebiet 13.1. Eine mögliche Erklärung kann darin liegen, daß ein erhöhter Zinkanteil in der Außenelbe bioverfügbar ist. Für eine Absicherung dieser Hypothese sind jedoch weitere Untersuchungen in den kommenden Jahren erforderlich.

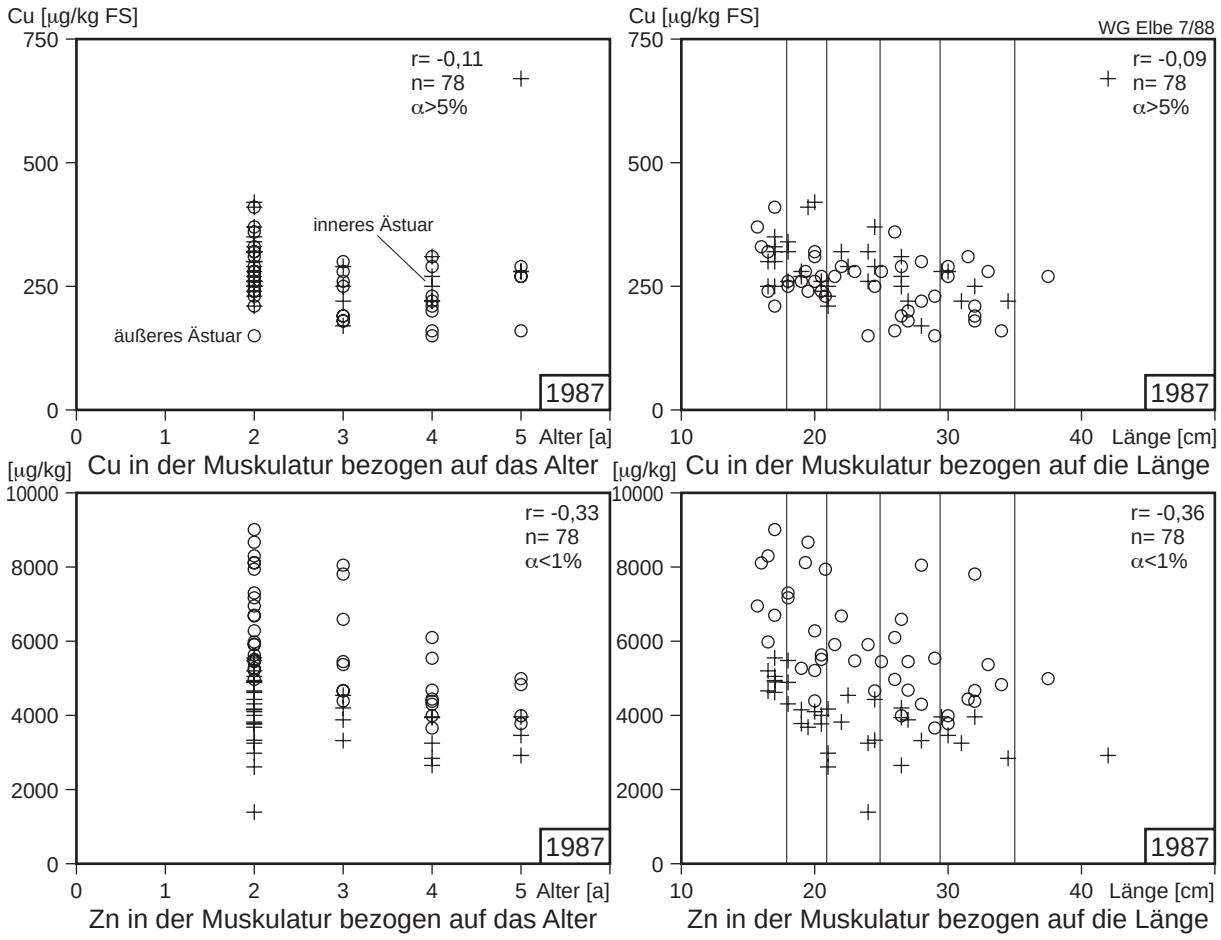


Abb.140 Kupfer- und Zinkgehalte in der Muskulatur der untersuchten Flundern aus dem Elbeästuar

Die in der Muskulatur festgestellten Nickelwerte (Abb. 141) zeigen ebenfalls keine signifikante Abhängigkeit, bezogen auf das Alter oder die Länge. Nickel liegt im limnischen Bereich der Elbe bereits zu einem erheblichen Anteil in gelöster Form vor (Größenordnung rd. 50 %). Insofern ist die sich aus den Daten andeutende Tendenz, daß ein Teil der im Fanggebiet 13.1 (inneres Elbeästuar) gefangenen Fische eine etwas erhöhte Belastung aufwies, erklärbar.

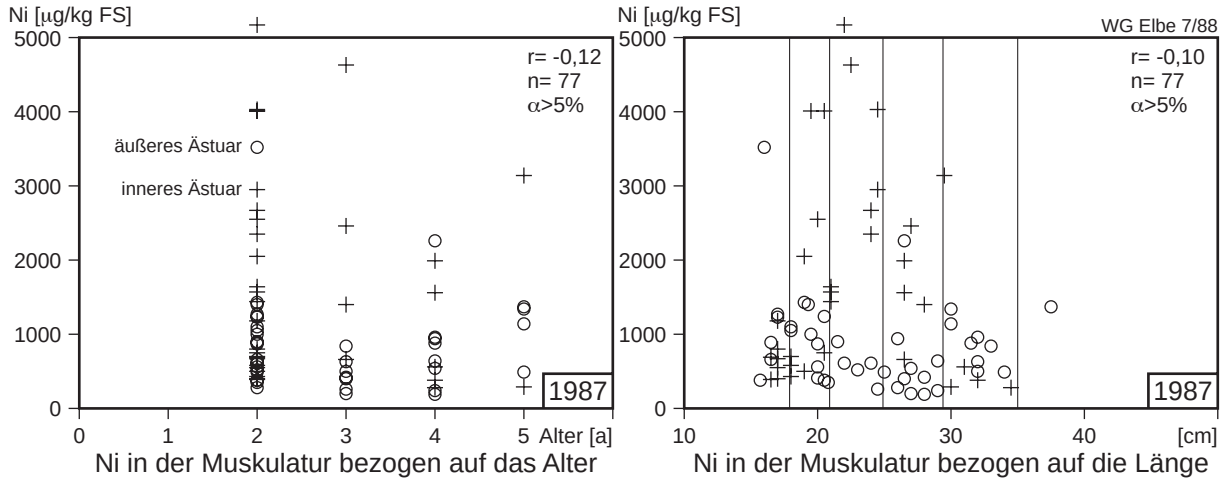


Abb.141 Nickelgehalte in der Muskulatur der untersuchten Flundern aus dem Elbeästuar

Den Richtlinien des "Joint Monitoring Program" entsprechend sind die Schwermetalle Cadmium und Blei (Abb. 142 und 143) und auf freiwilliger Basis ab 1987 Chrom und Arsen (Abb. 143) in der Leber untersucht worden. Um eine ausreichende Probenmenge für die Analyse zu erhalten, wurden insbesondere bei kleineren Fischen die Lebern zu Pool-Proben zusammengefaßt und untersucht. Bei größeren Fischen, bei denen die einzelne Leber für die Analyse ausreichte, erfolgte eine Einzelbestimmung. In den Auftragungen sind also jeweils Pool-Proben und Einzelproben zusammen angegeben. Dadurch ist die größere Streuung bei den älteren bzw. längeren Fischen (Einzelproben) zu erklären. Durch die Bildung von Pool-Proben erfolgt bekanntlich eine bedeutende Glättung der Daten. Die graphischen Darstellungen und insbesondere die angegebenen Korrelationsrechnungen sind in diesem Zusammenhang streng wissenschaftlich unzulässig. Die Graphiken sollen nur einen schnellen Überblick über das Datenkollektiv ermöglichen. Aus den zuvor geschilderten Gründen darf nicht aus den Auftragungen geschlossen werden, daß für die einzelnen Schwermetalle eine altersabhängige oder längenabhängige Konzentrationszunahme besteht. Eine entsprechende Einschränkung gilt auch für die Bewertung der Blei-, Chrom-, Nickel- und Arsenwerte. Die Bleikonzentrationen in den Flunderlebern zeigen keine signifikanten Unterschiede zwischen dem inneren Elbeästuar (13.1) und dem äußeren Elbeästuar (13.2). Blei liegt in Gewässern in überwiegendem Maße in der partikulären Phase vor und wird bei erhöhten Salzgehalten nicht, wie z. B. Cadmium, vermehrt in die wäßrige Phase überführt. Dadurch ergeben sich keine bedeutenden Unterschiede in der Bioverfügbarkeit in Abhängigkeit des Salinitätsgradienten. Blei wird vermutlich zum überwiegenden Teil partikulär zusammen mit der Nahrung aufgenommen.

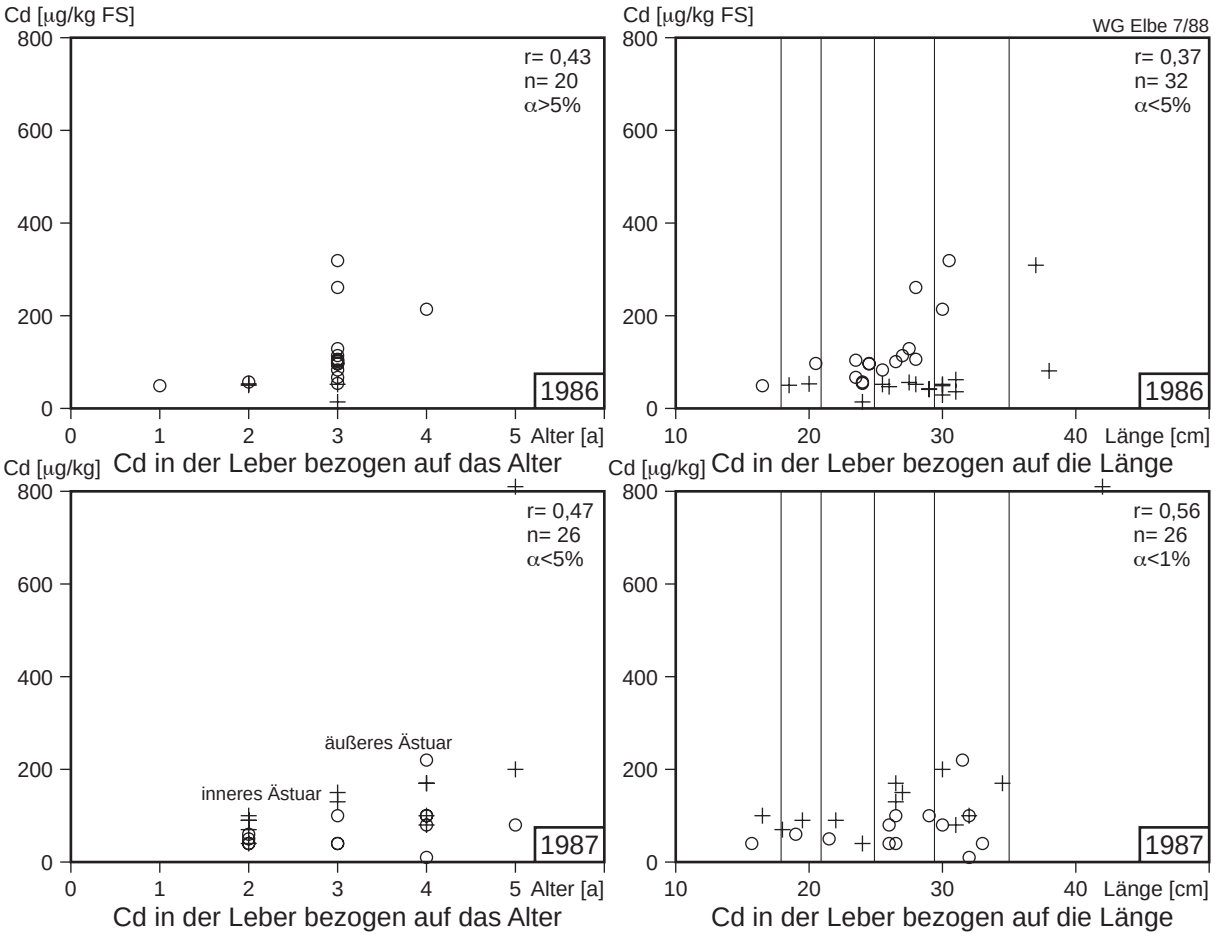


Abb.142 Cadmiumgehalte in der Leber der untersuchten Flundern (Pool-/Einzelproben) aus dem Elbeästuar

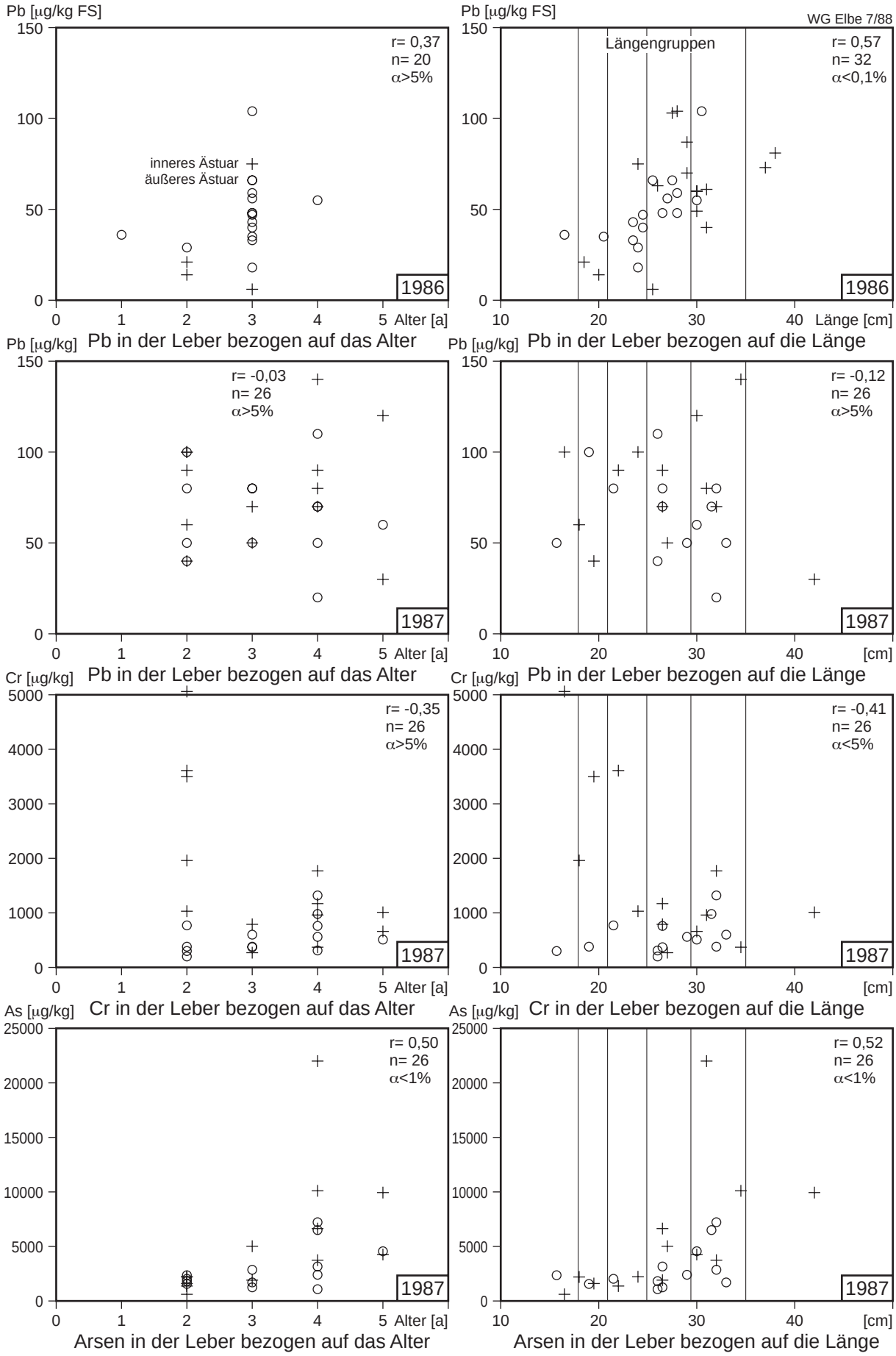


Abb.143 Blei-, Chrom- und Arsengehalte in der Leber der untersuchten Flundern (Pool-/Einzelproben) aus dem Elbeästuar

Die Bestimmung von Chrom und Arsen in der Leber (Abb. 143) und Nickel in der Muskulatur wurde 1987 in das Untersuchungsprogramm mit aufgenommen. Bei der Untersuchung von Chrom und Arsen wurden jeweils wiederum die Lebern kleinerer Fische zu Pool-Proben zusammengefaßt und nur bei ausreichenden Lebergewichten, also bei größeren Fischen, wurden Einzeluntersuchungen vorgenommen. Unter Berücksichtigung dieser Probeneigenschaften ist eine altersabhängige Schadstoffanreicherung für diese Elemente nicht festzustellen. Auch sind bei Chrom und Arsen keine eindeutigen Belastungsunterschiede zwischen dem inneren Elbeästuar (13.1) und dem äußeren Elbeästuar (13.2) zu erkennen. Hervorzuheben ist die erhebliche Anreicherung des Metalloids Arsen im Lebergewebe. So wurden von mehreren Fischen Konzentrationswerte von 5 mg/kg Frischgewicht überschritten.

6.2 Schwermetallgehalte in Miesmuscheln

6.2.1 Grunddaten der untersuchten Miesmuscheln

Miesmuscheln kommen im Bereich des Elbeästuars nur an wenigen Stellen regelmäßig vor. Eine für die regelmäßige Überwachung der Schadstoffbelastung geeignete Population besiedelt den Leitdamm unterhalb der Kugelbake. Nach der Probennahme werden die Muscheln zunächst gehältert, um eine Aussandung und Auskotung zu erreichen. Für die Schadstoffanalysen werden die Muscheln in Längengruppen zu Pool-Proben zusammengefaßt. In Abb. 144 sind die Grunddaten der untersuchten Pool-Proben angegeben. Die Befunde zeigen eine straffe Abhängigkeit zwischen Schalengewicht und Schalenlänge sowie Schalenlänge und Frischgewicht des gesamten Muschelweichkörpers. In den Graphiken bedeutet jeweils die Zahl 6 ein Meßwert des Jahres 1986 und die Zahl 7 ein Meßwert des Jahres 1987.

6.2.2 Schwermetallbelastung der Miesmuscheln

Die Befunde für Quecksilber, Cadmium, Blei, Kupfer und Zink zeigen jeweils keine signifikante Abhängigkeit des Belastungsniveaus von der Muschellänge. Die Quecksilberkonzentrationen lagen 1986 und 1987 im Mittel in der Größenordnung von 130 bis 170 µg/kg Frischgewicht. Die Cadmiumkonzentration betrug im Mittel rd. 240 µg/kg Frischgewicht. FÜr Blei, Kupfer und Zink zeigen die Befunde eine große, unsystematische Streuung, bezogen auf die Muschellänge. Die hohe Variabilität dieser Werte ist auf der Basis dieser erst wenigen Befunde nicht eindeutig zu erklären. Im Jahre 1987 wurden zusätzlich die Elemente Chrom, Nickel und Arsen in das Überwachungsprogramm mit aufgenommen. Auf eine graphische Darstellung dieser wenigen Befunde wurde verzichtet. Die Daten zeigen jedoch ebenfalls keine längenabhängige Konzentrationsänderung. Der festgestellte Konzentrationsbereich lag für Chrom zwischen 1.180 bis 1.960 µg/kg Frischgewicht, für Nickel zwischen 1.320 und 4.950 µg/kg Frischgewicht und für Arsen zwischen 1.820 und 2.440 µg/kg Frischgewicht.

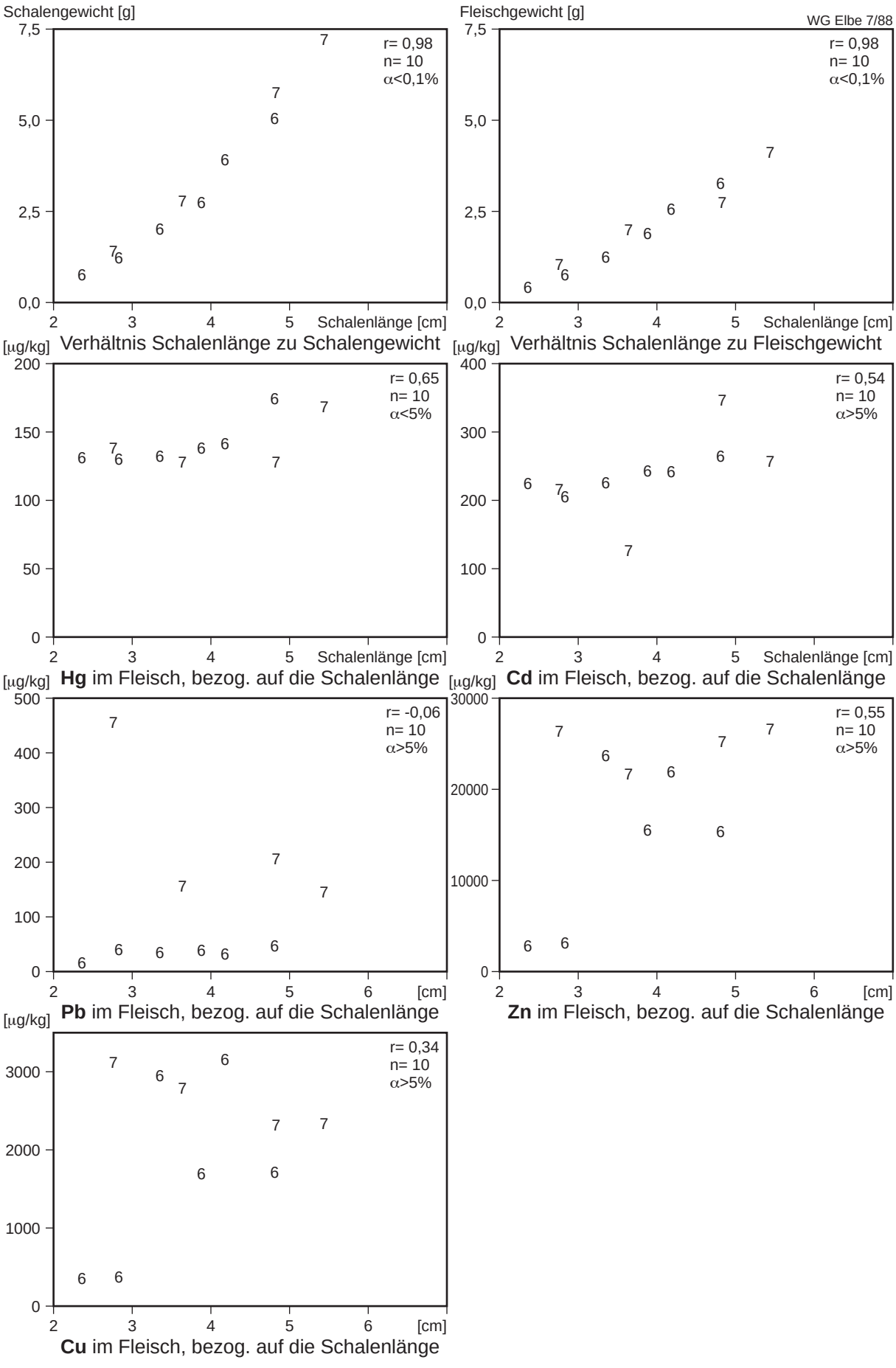


Abb.144 Miesmuscheln (Poolproben) aus dem Elbeästuar 1986/87 - Grunddaten und Metallgehalte im Muschelfleisch (bez. auf das Frischgewicht)

7. ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem Schwermetallbericht 1979/1980 der ARGE ELBE wurde ein erster Überblick über die Schwermetallbelastung des Elbwassers, der Elbsedimente und ausgewählter Bio-Indikatoren (Brassen) gegeben.

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wurden die Meßstrategien, die Probenentnahmetechniken und die eingesetzten Analysenmethoden weiterentwickelt. Im Rahmen eines vom Umweltbundesamt geförderten Forschungsvorhabens wurde eine getrennte Bestimmung des gelösten und partikulären Anteils der Schwermetallbelastung der Wasserproben eingeführt. In Verbindung mit einer besonderen Meßstrategie (Querprofilmischproben) erfolgte eine systematische Ermittlung des Schwermetalleintrags in die Nordsee (entsprechend der Pariser Konvention). Dadurch konnten grundlegende Erkenntnisse über die Entwicklung des Schwebstoffgehaltes und der spezifischen Schwermetallbeladung der Schwebstoffe in Abhängigkeit des Oberwasserabflusses gewonnen werden. Die Erfassung der spezifischen Beladung der Schwebstoffe ermöglichte auch für die Längsprofiluntersuchungen eine weitergehende Interpretation der räumlichen Verteilung über das Längsprofil bei unterschiedlichen hydrologischen Bedingungen.

Mit der Einrichtung von selbst entwickelten Sedimentationsbecken wurde eine systematische Überwachung der zeitlichen Entwicklung der Schwermetallbelastung "frischer, schwebstoffbürtiger Sedimente" an ausgewählten Meßstationen erreicht.

Das Elbeästuar von Glückstadt bis zur seewärtigen Hoheitsgrenze im Elbmündungsgebiet wurde seit 1986 als Beitrag der Bundesrepublik Deutschland in das internationale JOINT MONITORING PROGRAM eingebracht. Für diesen Elbbereich wurde ergänzend zur Untersuchung von Wasserproben auch eine Untersuchung von Sediment- und Organismenproben (Flundern und Miesmuscheln) durchgeführt.

In diesem Bericht sind die Ergebnisse der umfangreichen Meßprogramme ausführlich erläutert und bewertet.

Zusammenfassend ist die Belastungssituation der Elbe folgendermaßen zu bewerten:

- Die Elbe weist beim Eintritt in das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland bei Schnackenburg bereits eine erhebliche anthropogene Vorbelastung auf. Als extrem hoch ist die Quecksilberbelastung einzustufen. Die Quecksilberjahresfrachten in der Größenordnung von 20 - 25 t/a Hg sind um das 50- bis 100fache über das natürliche Grundniveau erhöht. Auch für Cadmium, Blei, Kupfer und Zink besteht eine starke Vorbelastung. Die Höhe der Vorbelastung, als Konzentration und als Fracht betrachtet, ist nicht konstant, sondern weist für die verschiedenen Schwermetalle aufgrund der Überlagerung vielschichtiger Einflußfaktoren eine sehr komplexe zeitliche Struktur auf. Eine Beurteilung der Belastungsentwicklung auf der Basis weniger Stichprobenmessungen ist nicht möglich. Die systematische Überwachung der Vorbelastung muß deshalb fortgeführt werden.

- Die Schwermetallgehalte des Elbwassers, bezogen auf die Gesamtprobe, weisen, sowohl innerhalb eines Querprofiles als auch über das Längsprofil betrachtet, erhebliche Konzentrationsunterschiede auf. Diese Variabilität wird in starkem Maße durch den jeweils zufällig mit erfaßten Schwebstoffgehalt geprägt. Die Bestimmung der Schwermetallbelastung der Schwebstoffe

(spezifische Beladung) ermöglicht eine zuverlässige Beurteilung der Konzentrationsverteilungen. Die gemessene spezifische Beladung der Schwebstoffe zeigt im Verhältnis zur natürlichen Grundbelastung sehr zuverlässig den Grad der anthropogenen Belastung an. Die höchsten Quecksilberkonzentrationen in den Schwebstoffen wurden im Bereich Schnackenburg mit Werten von 40 - 60 mg/kg TS festgestellt. Die Quecksilberbelastung der Elbschwebstoffe ist damit gegenüber der natürlichen Grundbelastung von 0,3 - 0,5 mg/kg TS um mehr als das 100fache erhöht. Auch für die übrigen Schwermetalle wie Cadmium, Kupfer, Zink und Blei ergaben sich die höchsten Belastungen im Bereich Schnackenburg.

- Die spezifische Beladung an der Süßwassergrenze im Bereich Glückstadt/Grauerort zeigt für die Schwermetalle Quecksilber, Cadmium, Blei, Zink, Kupfer und Chrom jeweils eine systematische Abhängigkeit vom Abflußgeschehen. Bei erhöhten Oberwasserabflüssen werden hochbelastete Schwebstoffe aus dem oberen Elbeinzugsgebiet nahezu vollständig durch das Stromspaltungsgebiet/Hamburger Hafen hindurchtransportiert und führen zu sehr hohen Belastungen der Schwebstoffe an der Süßwassergrenze. Besonders ausgeprägt wirkt sich auch in der Unterelbe die hochgradige Quecksilberbelastung aus. Für den Bereich Glückstadt/Grauerort wurden Quecksilberkonzentrationen im Schwebstoff von 5 - 20 mg/kg TS gemessen, die eine 20- bis 50fache Erhöhung gegenüber der natürlichen Grundbelastung anzeigen.

- Die Auswertung der systematischen Längsprofiluntersuchungen verdeutlicht die sehr komplexen Transportmechanismen in der Trübungszone. In Phasen mit anhaltend niedrigen bis mittleren Oberwasserabflüssen bildet sich im Bereich Glückstadt/Otterndorf eine ausgeprägte Trübungswolke mit großen Schwebstoffmengen, die zu einem erheblichen Anteil aus dem oberen Einzugsgebiet stammen und eine entsprechende Schadstoffbelastung aufweisen, aus. In dieser Phase findet in erster Linie nur ein Weitertransport der gelösten Schwermetallanteile in die Nordseeküstengewässer statt. Beim Abfluß von ausgeprägten Hochwasserwellen wird diese Schwebstoff-Trübungswolke mit dem Schadstoffinventar innerhalb kurzer Zeit seewärts verlagert und zu einem erheblichen Anteil aus der Elbmündung in die Nordseeküstengewässer ausgespült. Die aus der hochgradigen Belastung der Elbe resultierende Belastung der Nordsee ist also nicht konstant, sondern erfolgt, insbesondere für die Schwermetalle, die in hohem Maße in an Schwebstoffen angelagerter Form vorliegen (wie Quecksilber, Blei, Chrom, aber auch Cadmium, Zink und Kupfer), in der Phase der Ausspülung der Trübungswolke aus der Elbmündung infolge erhöhter Oberwasserabflüsse. Auch im Gebiet der Außenelbe unterhalb von Cuxhaven zeigen die spezifischen Beladungen der Schwebstoffe eine deutlich erhöhte anthropogene Belastung an. Dies gilt insbesondere für Quecksilber. Die höchsten Belastungen treten in dieser Region bei erhöhten Oberwasserabflüssen auf.

- Die spezifische Beladung der Schwebstoffe aus den Unterläufen der Elbnebenflüsse zeigt ein im Vergleich zur Elbe deutlich niedrigeres Belastungsniveau an. Die von den Elbnebenflüssen eingetragenen Schwebstoffe wirken somit auf die Belastungssituation des Systems Elbe "verdünnend".

- Mit der Untersuchung "frischer, schwebstoffbürtiger Sedimente" an Monatsmischproben wird die zeitliche Entwicklung der Sedimentbelastung überwacht. Ein straffer, funktionaler Zusammenhang mit dem Abflußgeschehen ist bisher nicht erkennbar. Die höchsten Belastungen wurden jeweils an der

Meßstation Schnackenburg gemessen. Ein vergleichbares Konzentrationsniveau mit gedämpfter Variabilität ergibt sich für die Meßstation Bunthaus. Für den Bereich unterhalb des Hamburger Hafens (Meßstation Seemannshöft und Blankenese) zeigen die Schwermetallkonzentrationen bei hohen Oberwasserabflüssen jeweils hohe Belastungen an, die in etwa dem Niveau von Bunthaus entsprechen. Bei anhaltend niedrigen Oberwasserabflüssen liegen die Konzentrationen unterhalb des Hamburger Hafens im Vergleich zur Meßstation Bunthaus deutlich niedriger. Bei anhaltend niedrigen Oberwasserabflüssen wird ein erheblicher Anteil der von oberstrom zugeführten Schwebstoffmengen und der daran angelagerten Schwermetalle im Hamburger Hafen durch Sedimentation zurückgehalten; gleichzeitig findet durch den verstärkten Flutstrom eine verstärkte Einmischung von geringer belasteten Schwebstoffen aus dem Unterelberaum in den Bereich Blankenese/Seemannshöft statt. Im Vergleich zur natürlichen Grundbelastung der Sedimente zeigen die Befunde für Quecksilber eine extrem hohe anthropogene Belastung an. Auch für Cadmium, Blei, Zink und Kupfer liegen deutlich erhöhte, anthropogene Belastungen vor.

- Die hochgradige Schwermetallbelastung der Elbe strahlt bereits bis in das Elbmündungsgebiet von Glückstadt bis seewärts von Scharhörn aus. Die Sedimente aus diesem Bereich weisen insbesondere für Quecksilber, aber auch für Cadmium, Blei, Kupfer und Zink gegenüber der natürlichen Grundbelastung deutlich erhöhte (Faktor 5 bis 10) anthropogene Belastungen auf.

- Auch in den Organismen des Elbmündungsgebietes (Flundern und Miesmuscheln) spiegelt sich die hochgradige Schwermetallbelastung wieder. Die in der Muskulatur der Flundern gemessenen Quecksilberkonzentrationen von rd. 200 bis 1000 µg/kg Frischgewicht sind bereits Ausdruck einer besorgniserregenden anthropogenen Belastung. Auch für die Elemente Cadmium, Blei, Zink, Kupfer und Arsen zeigen die in den Organismenproben gemessenen Konzentrationen eine deutliche anthropogene Belastung an.

Eine zusammenfassende Bewertung der Befunde ergibt, daß die hochgradige Belastung der Elbe mit Schwermetallen seit der ersten systematischen Bestandsaufnahme 1979/1980 nicht abgenommen hat, sondern sich zunehmend auf das Gebiet der Außenelbe und die Nordseeküstengewässer auswirkt. Der weitaus überwiegende Anteil der Schwermetallbelastung stammt aus dem oberhalb von Schnackenburg gelegenen Einzugsgebiet. Eine nachhaltige Verbesserung der Belastungssituation der Elbe und ein wirkungsvoller Schutz der Nordsee kann deshalb nur durch eine drastische Verringerung der Schwermetalleinträge im oberhalb Schnackenburg gelegenen Einzugsgebiet erreicht werden.