

## AP 3.2: Längsprofiluntersuchungen zur Beurteilung von Auswirkungen des Hochwassers vom August 2002 auf die Wasser- und Sedimentqualität der Elbe

R. Pepelnik, R. Niedergesäß, B. Erbslöh, A Aulinger, A. Prange (GKSS)

### 3.2.1 Allgemeines

Bis zum Auftreten des katastrophalen Hochwassers im August 2002 hatte das GKSS-Forschungszentrum die Belastungssituation der Elbe längs ihres gesamten Verlaufs von der Quelle bis zur Mündung bereits in wiederholten Untersuchungen erforscht. Dabei wurden vom Hubschrauber aus im Längsprofil in zwei Frühjahrs- (1994, 1996) und drei Herbstkampagnen (1993, 1995, 1998) jeweils etwa 100 Wasserproben entnommen und die im Elbwasser gelösten und am Schwebstoff gebundenen Elementkonzentrationen getrennt ermittelt. In drei weiteren Herbstkampagnen (1992, 1995, 1998) wurden die Elbsedimente beprobt und analysiert. Dabei wurden in den Filtraten jeweils etwa 30 Elementkonzentrationen und in den Schwebstoffen und Sedimenten die Gehalte von bis zu 60 Elementen bestimmt (Prange A et al 2001).

Auf Grund des extremen Hochwassers war zu befürchten, dass sich die Schadstoffbelastung der Elbe einerseits durch die Überflutung belasteter Flächen und andererseits durch Resuspendierung von älteren, stärker belasteten Flusssedimenten erheblich verschlechtern könnte. Auch musste damit gerechnet werden, dass sich durch den verstärkten Materialtransport das Belastungsprofil verschieben würde.

Ziel dieser Arbeit war es nun, die kurz- und längerfristigen Auswirkungen des Hochwassers auf die Belastung der Elbe zu untersuchen und zu bewerten. Dazu wurden während und nach dem Hochwasserereignis Längsprofiluntersuchungen, die ähnlich wie frühere Kampagnen konzipiert waren, durchgeführt und die Ergebnisse mit den langfristigen Untersuchungen verglichen, um durch das Hochwasser bewirkte Veränderungen der Wasser- und Sedimentqualität zu ermitteln.

Während des Hochwassers wurde in Zusammenarbeit mit der ARGE Elbe (WGE) die fließende Welle in zwei Kampagnen am 16. bzw. am 21. August 2002 jeweils im Bereich des Hochwasserscheitels im Längsprofil beprobt. Zusätzlich wurden vom 20.- 26. August täglich Wasserproben bei Lauenburg vom GKSS-Forschungsschiff "Ludwig Prandtl" aus genommen und die zugehörigen Abflusswerte ermittelt. Die in Filtrat und Schwebstoff aufgeteilten Proben konnten aber nur auf die wichtigsten Elbe-relevanten Schadstoffe untersucht werden.

Etwa ein Monat nach dem Hochwasser und nochmals nach etwa einem Jahr wurden in vier Längsprofilkampagnen nach bewährtem Schema Oberflächensedimente und Wasserproben gezogen und analysiert. Damit sollte die kurzfristige Regenerationsfähigkeit der Elbe unter-

sucht bzw. die längerfristigen Auswirkungen des Hochwassers abgeschätzt werden.

Die Beprobung des Wasserkörpers im Elbelängsprofil erfolgte mit Hilfe eines Hubschraubers und Unterstützung der Wassergütestelle Elbe, des UFZ in Magdeburg und der Povodi Labe. Die Sedimentbeprobungen wurden jeweils von den Elbufern aus mit Unterstützung der Fa. Elana, Falkenberg durchgeführt, 2002 im Auftrag der Wassergütestelle Elbe, 2003 im Auftrag der GKSS.

### 3.2.2 Untersuchungsgebiete und Methodik

#### 3.2.2.1 Untersuchungsgebiete

Im Rahmen dieses Projektes wurden insgesamt sieben neue Kampagnen längs des Elbestroms durchgeführt. Vier Hubschrauberbefliegungen und ein Schiffseinsatz dienten zur Entnahme von Wasserproben, zwei Landkampagnen zur Gewinnung von Oberflächensedimenten.

Direkt während des Hochwassers wurden am 16. August 2002 an 13 Stellen des Elbabschnitt von Neratovice (Elbe-km CZ 120) bis unterhalb der Muldemündung (Elbe-km 262) Proben gezogen. Außerdem wurden den Nebenflüssen Moldau und Mulde in Mündungsnähe je eine Probe entnommen. An diesem Tag lag der Hochwasserscheitel bei Schöna (Elbe-km 2) nahe der tschechischen Grenze.

Ein paar Tage später, am 21. August 2002, wurde dann die Elbe im anschließenden Längsabschnitt an 17 Stellen von Roßlau (Elbe-km 258) bis Zollenspieker (Elbe-km 599) und die Mulde-Mündung beprobt. Das Maximum der Hochwasserwelle hatte sich stark verbreitert und sich bereits nach Schnackenburg (Elbe-km 475) verschoben.

Vom 20. bis 26. August 2002 wurde täglich eine Wasserprobe bei Lauenburg (Elbe-km 567,5) von Bord des Forschungsschiffes Ludwig Prandtl aus genommen. Zusammen mit der von der L. Prandtl ermittelten Abflussmenge sollte die Fracht der betrachteten Schadstoffe, die durch die Hochwasserwelle in Richtung Hamburger Hafen transportiert wurden, abgeschätzt werden.

Kurz nach dem Abklingen der Flut vom 8. bis 16. September 2002 wurden im Längsprofil an den Elbufern von Obristvi (CZ Elbe-km 115) bis zum Trischendamm (Elbe-km 730) 37 Oberflächensedimentproben gewonnen.

Wenig später, vom 7. bis 9. Oktober 2002 wurden dann vom Hubschrauber aus 101 Wasserproben längs der Elbe

von der Quelle (CZ Elbe-km 370) bis Scharhörnriff (Elbe-km 757) im Ästuar gezogen.

Etwas ein Jahr nach dem Hochwasser wurden vom 26. Juli bis 2. August 2003 wieder 76 Oberflächensedimentproben an den Elbufern im Längsprofil von Neratovice (CZ Elbe-km 120) bis Cuxhaven (Elbe-km 727) gewonnen.

Schließlich wurde vom 11. bis 13. August 2003 das Wasser der Elbe im Längsprofil von Horenice (CZ Elbe-km 83,5) bis Scharhörnriff (Elbe-km 757) an 89 Stellen noch einmal beprobt.

### 3.2.2.2 Methodik

Die Elbwasserproben wurden vom Hubschrauber aus mit Hilfe von Acrylglasgestellen in 2-L-Polyethylenflaschen gewonnen. Die Flaschen wurden vor den Kampagnen gereinigt und mit angesäuertem Reinstwasser eine Woche lang konditioniert. Vor den Probennahmen wurden die Flaschen nochmals mit Reinstwasser gespült.

Da sich die Schadstoffe im Flusswasser recht unterschiedlich auf einen gelösten und einen schwebstoffgebundenen Anteil aufteilen und da der aktuelle Schwebstoffgehalt des Wasser von vielen Faktoren beeinflusst wird, ist es für das Verständnis der Zusammenhänge wichtig, die gelöste Phase und die Schwebstoffe getrennt zu untersuchen. Wie schon in früheren Kampagnen geschieht dies im Gegensatz zum behördlichen Vorgehen. Aus den getrennt ermittelten Anteilen lassen sich aber leicht die Gesamtgehalte berechnen.

In allen Wasserproben wurde deshalb die gelöste Phase von den Schwebstoffen innerhalb von wenigen Stunden nach der Probennahme mittels Druckfiltration über 0,4-µm-Nucleopore-Filter getrennt. Um dies zu gewährleisten, wurden an drei Orten Filtrierstationen betrieben: im GKSS-Forschungszentrum Geesthacht, im Institut für Gewässerforschung Magdeburg und bei der Povodi Labe in Hradec Kralove. Die Filtrate wurden mit hochreiner Salpetersäure (HNO<sub>3</sub>) auf pH 2 angesäuert. Die gewonnenen Schwebstofffilter wurden für die verschiedenen Analysenverfahren halbiert, getrocknet und gewogen.

Der im Wasser gelöste Sauerstoff wurde 2002 in der Tideelbe und im tschechischen Teil der Elbe gemäß DIN EN 25813 (iodometrisch) vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft u. Küstenschutz, Stade gemessen. Im mittleren Flussabschnitt wurde der gelöste Sauerstoff nach Winkler bestimmt.

Die Elbsedimente wurden als Oberflächensedimente (0 - 2 cm) mit Hilfe eines Sedimentschabers oder an schwer zugänglichen Ufern von Brücken mit einem Van-Veen-Greifer gewonnen. Die Proben wurden gefriergetrocknet und in Kunststoffsieben der Maschenweite 600 µm und 200 µm trocken gesiebt. Die anschließende Nasssiebung erfolgte mit Reinstwasser im Ultraschallbad mit Poly-

propylengazen der Maschenweite 63 und 20 µm (Ackermann 1983). Die so erhaltenen <20µm-Fractionen wurden zentrifugiert, dekantiert und gefriergetrocknet.

In den Elbwasserfiltraten wurden die Elementgehalte ohne weitere Probenvorbereitung mit Hilfe der Massen- bzw. der optischen Emissions-Spektroskopie mit induktiv gekoppelten Plasma (ICP-MS und ICP-OES) analysiert. Bei den Analysen der Proben aus dem unteren Tidebereich treten aufgrund des hohen Salzgehaltes verstärkt Matrixeffekte auf, die die Bestimmung mehrerer Spurenelemente verfälschen. Eine spezielle Kollisions- und Reaktionszelle im Massenspektrometer, die mit einem Reaktions- oder Kollisionsgas betrieben werden kann, reduziert diese störenden Matrixeffekte.

Die gefriergetrockneten Schwebstoff- und Sedimentproben wurden unter Mikrowelleninduktion mit einer Mischung von Salpeter- und Flusssäure im Verhältnis 2:1 unter Druck aufgeschlossen, anschließend abgeraucht und mit Salzsäure wieder aufgenommen. Direkt in diesen Aufschlusslösungen konnten mit Hilfe der Totalreflexions-Röntgenfluoreszenz-Analyse (TRFA) diverse Elemente bestimmt werden. Für die Massen- und optische Emissions-Spektroskopie mit induktiv gekoppelten Plasma (ICP-MS und ICP-OES) wurden die Aufschlusslösungen vor der Elementanalyse noch mit Reinstwasser verdünnt. In den zweiten schwebstoffbeladenen Filterhälften wurden die Gesamtkonzentrationen der Elemente direkt, d.h. ohne Aufschluss, mit der instrumentellen Neutronen-Aktivierungsanalyse (INAA) ermittelt.

Der beschriebene Vollaufschluss wurde gewählt, weil mit Hilfe des Königswasseraufschlusses erfahrungsgemäß für viele Elemente wie z.B. Natrium (Na), Aluminium (Al), Kalium (K), Calcium (Ca) und Titan (Ti) nur Wiederfindungsraten von unter 75 % erreicht werden (Krause P, et al 1995). Gerade die Gehalte von Ca sind aber in den Proben von 2003 ungewöhnlich stark angestiegen. Andererseits sollten die Elementgehalte mit denen älterer Kampagnen verglichen werden (Prange A, et al 2001). Bei diesen Untersuchungen wurde aber das gleiche Vollaufschlussverfahren angewendet. Nur durch einen Vollaufschluss können Gesamtgehalte bestimmt werden und nur damit ist die Vergleichbarkeit mit den GKSS-Daten vor der Flut gewährleistet.

Die Anwendung der vier Analysenverfahren erweitert die Palette der bestimmbarer Elemente und bietet die Möglichkeit des Methodenabgleichs und der Eliminierung möglicher systematischer Analysenfehler während des Aufschlusses oder durch ungenügend korrigierte Matrixeffekte. Zur weiteren Qualitätskontrolle wurden in jeder Druckaufschluss- bzw. Messserie zertifizierte Referenzmaterialien eingesetzt und vergleichend analysiert.

Bei der Analyse der Nucleopore-Filter wurde eine Kontamination der gelieferten Leerfilter mit Chrom (Cr) festgestellt. Diese Cr-Blindwerte waren teilweise höher

als die Cr-Beladung des Schwebstoffs. Aus diesem Grund ist die Cr-Analytik der Schwebstoffe mit großen Unsicherheiten behaftet. Für viele Proben von 2003 konnte daher kein Cr-Wert angegeben werden.

### Ringanalyse

Als Qualitätskontrolle wurden zwei Elbe-Sedimentproben im Rahmen einer Ringanalyse untersucht. Diese Proben wurden sowohl als Königwasserextrakte als auch nach Vollaufschluss analysiert. Dabei wurde auch die Neutronenaktivierungsanalyse eingesetzt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden allerdings nur die Elemente Cr, Mangan (Mn), Eisen (Fe), Nickel (Ni), Kupfer (Cu), Zink (Zn), Arsen (As), Cadmium (Cd), Quecksilber (Hg) und Blei (Pb) analysiert.

Bei diesem Ringversuch wurden nur die Analysen der Königwasserextrakte ausgewertet. Die in unseren Laboren bestimmten Spurenelementkonzentrationen wichen um maximal 7 % von den durch die Ringanalyse ermittelten Mittelwerten ab.

## 3.2.3 Ergebnisse

### 3.2.3.1 Allgemeine Parameter

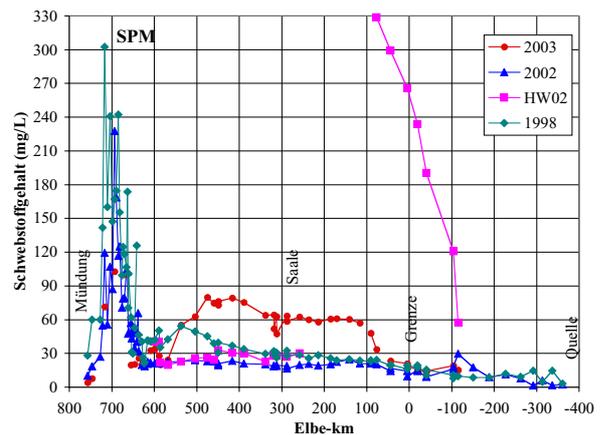
Die Kampagnen wurden zur besseren Vergleichbarkeit jeweils im Herbst durchgeführt. Die Wasserabflusswerte waren während dieser Probenahmen trotzdem recht unterschiedlich. Während der Kampagne im August 2003 herrschten ungewöhnliche Verhältnisse, sodass diese Ergebnisse nur bedingt zum Vergleich herangezogen werden können.

Neben der Bestimmung der Elementkonzentrationen wurden allgemeine Parameter wie Schwebstoffgehalt, Temperatur, pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit, Sauerstoff-, Gesamt-Stickstoff- und Gesamt-Phosphor-Konzentrationen und der Gehalt an adsorbierbaren organischen Halogenkohlenwasserstoffe (AOX) erfasst.

Zur besseren Einschätzung der Schwebstoffgehalte sind in der Tab. 3-10 die Abflusswerte bei Neu Darchau für die letzten Probenahmekampagnen aufgeführt. Der außergewöhnlich hohen Flut im August 2002 folgte im August 2003 ein extrem trockener und heißer Sommer mit extrem geringer Wasserführung.

**Tab. 3-10** Oberwasserabflusswerte bei Neu Darchau (km 536)

Datum	Abfluss, m³/s
11.09.1995	987
07.09.1998	322
21.08.2002	3170
07.10.2002	683
11.08.2003	199



**Abb. 3-3** Vergleich der Schwebstoffgehalte in der Elbe von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003)

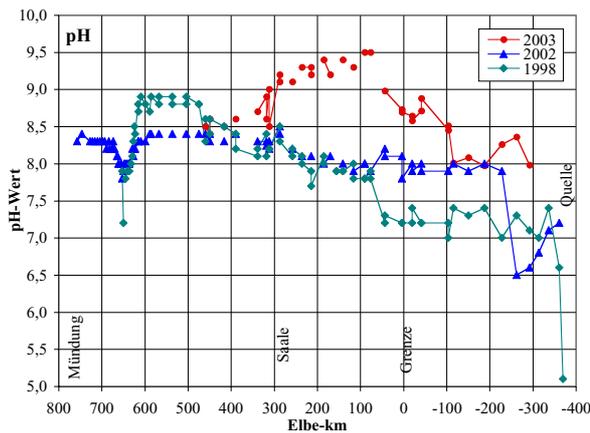
Bei normalen Abflussbedingungen liegen die Schwebstoffgehalte im Elbwasser unter 60 mg/L. Nur in der Trübungszone im Ästuar, wo Salz- und Süßwasser auf einander stoßen, steigen die Schwebstoffgehalte auf 100 bis 300 mg/L an.

Die Hochwasserwelle im August 2002 schob eine sehr große Schwebstoffmenge vor sich her. So wurde am 16.8. eine Schwebstoff-Konzentration von 330 mg/L bei Scharfenberg (Elbe-km 76) unterhalb des Hochwasserscheitels, der damals bei Schöna (Elbe-km 2) lag, beobachtet (s. Abb. 3-3). Auch der Schwebstoffgehalt in der Mulde stieg über das Vierfache des zu dieser Jahreszeit üblichen Wertes an (61 mg/L). Dementsprechend konnten im Wasser auch sehr hohe Gesamtgehalte an Schwermetallen festgestellt werden.

Aufgrund der Witterung stiegen im August 2003 die Wassertemperaturen der Elbe ungewöhnlich hoch an (Mittelwerte: 24°C). Zwischen Geesthacht (Elbe-km 586) und Zollenspieker (Elbe-km 599) wurden Höchstwerte von 26,4°C gemessen. Im September 1998 und Oktober 2002 lagen die Wassertemperaturen dagegen bei 17 bzw. 12°C.

Im August 2003 trat durch das lang andauernde schöne Wetter und durch die hohe Wassertemperatur ein starkes Algenwachstum auf. Durch die verstärkte Photosynthese wurde dem Wasser viel Kohlensäure entzogen. Dies führte durch eine Umwandlung des im Wasser gelösten  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  zur Ausfällung des schwerlöslichen  $\text{CaCO}_3$ . Die Algenblüte, "biogene Entkalkung" und das extreme Niedrigwasser der Elbe führten zu ungewöhnlich hohen Schwebstoffgehalten von bis über 70 mg/L. Während die Medianwerte der Schwebstoffgehalte im September 1998 in der mittleren Elbe noch unter 40 mg/L lagen und im Oktober 2002 sogar nur 20 mg/L betragen, stiegen sie 2003 auf 60 mg/L an.

Für die These der biogene Entkalkung sprechen auch die ungewöhnlich hohen pH-Werte, die im August 2003 auf-



**Abb. 3-4** Vergleich der pH-Werte in der Elbe von der Mündung bis zur Quelle (September 1998, Oktober 2002, August 2003)

traten. Während die Maximalwerte der pH-Werte im September 1998 bei 8,9 und im Oktober 2002 bei 8,5 lagen, wurden im August 2003 unterhalb von Dresden (ca. Elbe-km 50) pH-Maxima von 9,5 gemessen, die erst unterhalb von Magdeburg (Elbe-km 318) wieder unter den pH-Wert von 9,0 sanken (s. Abb. 3-4). Diese hohen pH-Werte sind auf starkes Algenwachstum und dadurch erhöhten CO<sub>2</sub>-Verbrauch zurückzuführen.

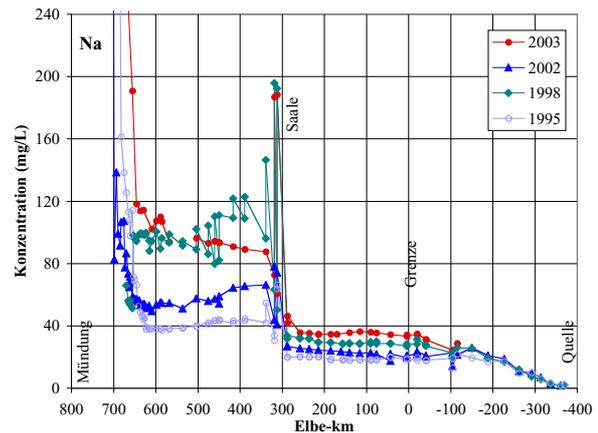
Der Verlauf der elektrische Leitfähigkeit längs der Elbe wird wesentlich durch die Salzfracht der Saale und das Nordseewasser in der Tideelbe beeinflusst. Die elektrische Leitfähigkeit hat sich von September 1998 bis August 2003 oberhalb der Saalemündung nur unwesentlich geändert. Unterhalb der Saalemündung war sie im August 2003 über 170 km lang höher als während der vorangegangenen Kampagnen.

Die Belastung der Elbe mit Gesamt-Phosphor ist im August 2003 gesunken. Während im September 1998 noch über weite Strecken Gesamt-Phosphorgehalte über 0,30 mg/L festgestellt wurden, lagen diese im deutschen Elbeabschnitt im August 2003 unter 0,25 mg/L.

### 3.2.3.2 Elbwasserfiltrate

Im Elbwasser liegen die Elemente Lithium (Li), Bor (B), Na, Magnesium (Mg), Schwefel (S), K, Ca, Strontium (Sr), Molybdän (Mo) und Uran (U) in der Regel zu über 90 % gelöst vor (s. Abschnitt 3.2.3.4 u. Abb. 3-16).

Für eine größere Gruppe von Elementen wird der Längsprofilverlauf der Konzentrationen in den Filtraten wesentlich durch den Zufluss der Saale (in der mittleren Elbe) und durch die Beimischung von Nordseewasser (im Ästuar) geprägt. Zu diesen Elementen gehören die salzbildenden Alkali- und Erdalkalielemente Na, Mg, K, Ca, Rubidium (Rb), Sr und Cäsium (Cs), aber auch B, S und U.



**Abb. 3-5** Vergleich der Natrium-Konzentrationen in den Filtraten der Elbe von der Quelle bis zur Mündung (September 1995, September 1998, Oktober 2002, August 2003)

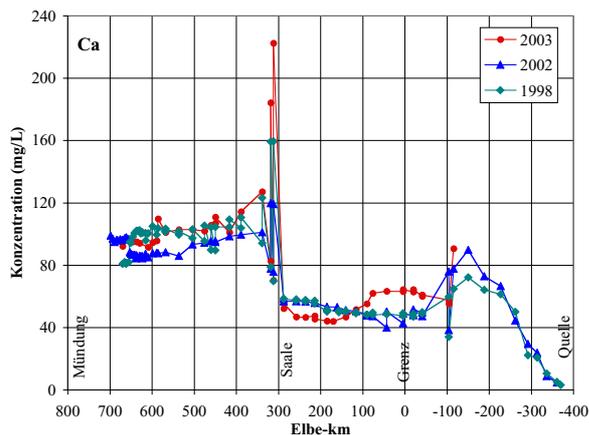
Ein typisches Element dieser Gruppe stellt Natrium dar (Abb. 3-5). Das Längsprofil von Na zeigt einen sprunghaften Anstieg unterhalb der Saalemündung. Im Vergleich der Kampagnen von 1995 bis 2003 wurden im August 2003 oberhalb des Saalezuflusses die höchsten gelösten Na-Konzentrationen festgestellt, unterhalb der Saalemündung dagegen im September 1998. Na als Salzbildner ist zusätzlich ein Indikator für den Tidebereich. Aufgrund des extremen Niedrigwassers im August 2003 machte sich der Einfluss der Tidezone schon ab Elbe-km 655 bemerkbar.

Die Konzentrationen der Elemente Mg, K und Sr zeigen für die Elbfiltrate sehr ähnliche Längsprofilverläufe wie Na. Aber im Vergleich der Kampagnen von 1995 bis 2003 wurden bei diesen Elementen im August 2003 sowohl oberhalb als auch unterhalb der Saale-Mündung die höchsten Elementkonzentrationen festgestellt. Dieser Effekt war bei Ca nicht so deutlich. Während sich die Ca-Konzentrationen in den Filtraten im August 2003 wenig geändert haben (s. Abb. 3-6), sind sie in den Schwebstoffen und Sedimenten (s.u.) ungewöhnlich stark angestiegen.

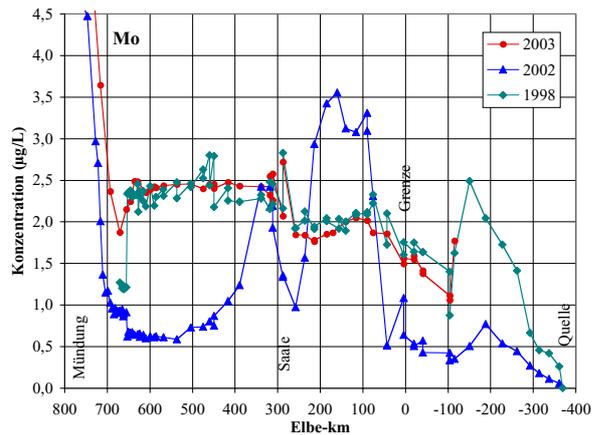
Für den gelösten Schwefel wurden 1995 bis 2002 ähnliche Längsprofile bestimmt wie für Na. Dagegen zeigen die Messungen vom August 2003 eine deutliche Absenkung der Schwefelkonzentration durch den Zufluss der Saale (s. Abb. 3-7).

Die Uran-Konzentrationen in den Elbwasserfiltraten im Längsprofil werden in der Regel nicht nur durch den Zufluss der Saale sondern auch von der Mulde deutlich angehoben. Im August 2003 wurden unterhalb und oberhalb der beiden Nebenflüsse höhere Werte bestimmt als 1998 und 2002. Während der Flut im August 2002 wurden die niedrigsten U-Konzentrationen gemessen (Abb. 3-8). Ein besonderer Anstieg durch Mulde und Saale war hier nicht zu beobachten.

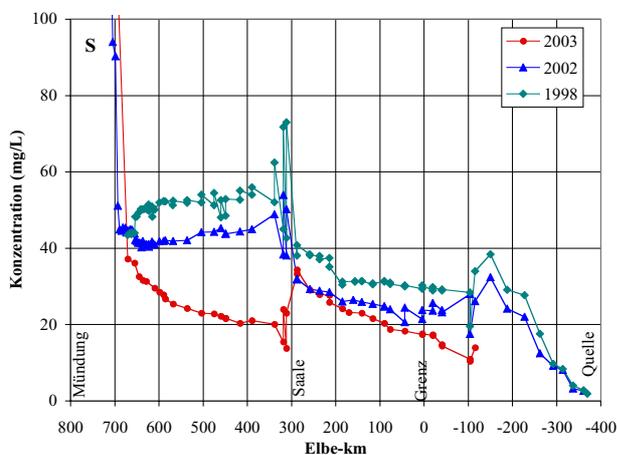
Einen besonders interessanten Verlauf zeigt das Längsprofil des gelösten Molybdän für die Kampagne vom



**Abb. 3-6** Vergleich der Calcium-Konzentrationen in den Filtraten der Elbe von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Oktober 2002, August 2003)

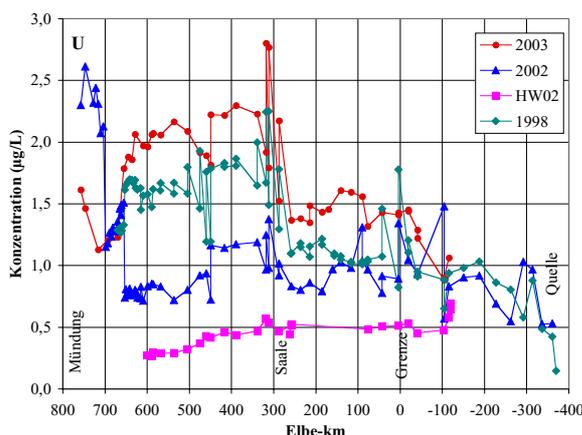


**Abb. 3-9** Vergleich der Molybdän-Konzentrationen in den Filtraten der Elbe von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Oktober 2002, August 2003)



**Abb. 3-7** Vergleich der Schwefel-Konzentrationen in den Filtraten der Elbe von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Oktober 2002, August 2003)

(d:\HW\End\Bilder\AP32\05SFiltr980203.pdf)



**Abb. 3-8** Vergleich der Uran-Konzentrationen in den Filtraten der Elbe von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003)

verlaufen und im deutschen Elbabschnitt nur relativ wenig variieren, liegen die Gehalte vom Oktober 2002 meist deutlich darunter, zeigen aber zwei sehr auffällige Maxima. Das Maximum zwischen Dresden (Elbe-km 75) und etwa Roßlau (Elbe-km 258) wird von Mo-Konzentrationen geformt, die deutlich über denen von 1998 und 2003 liegen. Interessanterweise findet man in diesem Elbabschnitt auch bei den Schwebstoffen dieser Kampagne u. a. extrem hohe Mo-, Wolfram (W)- und Bismut (Bi)-Gehalte.

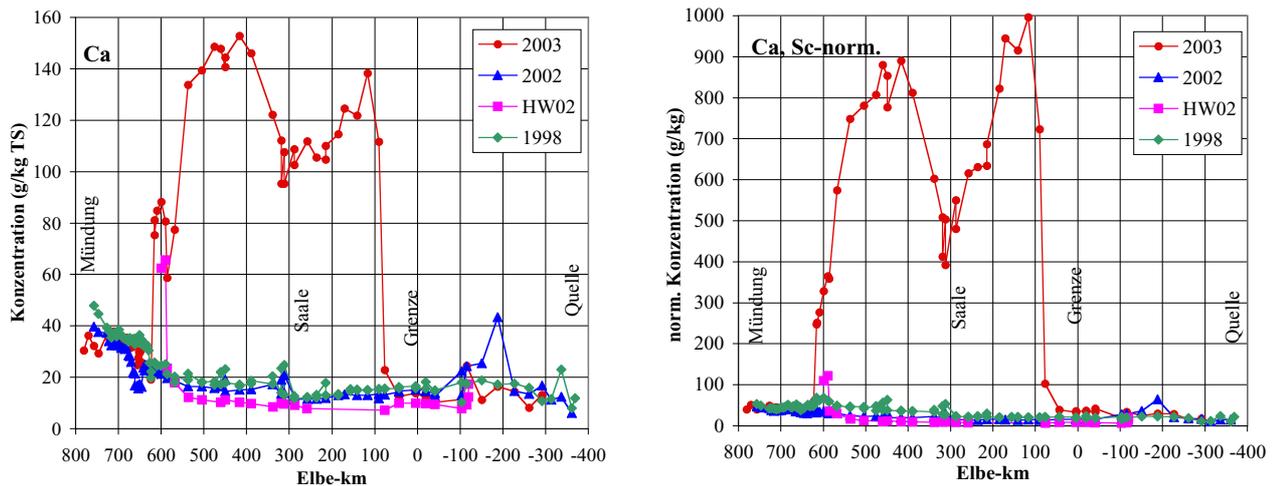
Die Konzentrationen von gelöstem Ni, As und Pb waren während des Hochwassers am 16. 8.2002 zwei bis viermal höher als 1998. Da Pb zu über 90 % am Schwebstoff gebunden vorliegt, wird es im Abschnitt 3.2.3.3 behandelt. As und Ni sind meist nur zu etwa 25 - 35 % am Schwebstoff gebunden. Diese Elemente werden daher im Abschnitt 3.2.3.4 unter den Gesamtgehalten diskutiert.

### 3.2.3.3 Schwebstoffe

Die Elemente Al, Scandium (Sc), Ti, Cr, Mn, Fe, Zn, Yttrium (Y), Zirkonium, Niob, Silber (Ag), Cd, Zinn (Sn), Lanthan (La), Cer (Ce), weitere Lanthanoide, Hafnium, Tantal (Ta), Pb und Thorium (Th) sind meist zu über 75 % am Schwebstoff gebunden (s. Abschnitt 3.2.3.4 u. Abb. 3-16). Bei einem großen Teil dieser Elemente verlaufen die Konzentrationen im Längsprofil der Elbe sehr ähnlich. Bis zur Flut 2002 (wie z.B. 1998) trifft dies für die folgenden, vor allem geogen beeinflussten Elemente zu: Li, Mg, Al, Sc, Ti, V, Fe, Gallium, Rb, Sr, Y, Cs, La, Ce, Ytterbium (Yb), Lutetium, Ta und Th. Dies zeigt sich auch an den hohen Korrelationskoeffizienten zwischen den Elementgehalten dieser Elemente.

Im Oktober 2002, kurz nach dem großen Flutereignis, waren die Ähnlichkeiten zwischen den Längsprofilverläufen der Elementgehalte häufig geringer. Auch fielen

Oktober 2002, anderthalb Monate nach der Flut (Abb. 3-9). Während die Kurven der Mo-Konzentrationen der Kampagnen von 1998 und 2003 nahezu deckungsgleich



**Abb. 3-10** Vergleich der Calcium-Konzentrationen in den Schwebstoffen der Elbe von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Oktober 2002, August 2003) a: links unnormiert, b: rechts Sc-normiert:  $c_{Ca}^{norm} = c_{Ca} / c_{Sc} * c_{Sc}^0$  mit  $c_{Sc}^0 = 13,5 \text{ mg/kg}$

bei vielen Elementen die relativ hohen Gehalte in den Schwebstoffen aus dem Bereich um Belgern (Elbe-km 140) auf. Zu diesen Elementen gehörten neben As, Mo, Sn, W, Bi u. a. auch geogene Elemente wie Li, Rb, Yb, Ta und Th.

Für die Kampagne vom August 2003 wurden besonders extreme Befunde ermittelt. Einerseits zeigten die Calcium- und Strontiumgehalte der getrockneten Elbeschwebstoffe aus einem Bereich von Dresden (Elbe-km 75) bis Hamburg (Elbe-km 615) gegenüber den normalen Gehalten sehr starke Zunahmen. Andererseits wurden bei den übrigen Elementen meist sehr deutliche Abnahmen der Konzentrationen in den Schwebstoffen des gleichen Elbabschnitts festgestellt.

Die Ca-Konzentrationen im Schwebstoff stiegen im Bereich von Dresden bis Hamburg von etwa 12 g/kg bis auf 150 g/kg an und sanken erst im Hamburger Hafen auf sonst normale 20 g/kg ab (s. Abb. 3-10a). Die erhöhten Ca-Konzentrationen sind auf die biogene Entkalkung des Elbwassers zurückzuführen. Trotz der hohen Ca-Gehalte im Schwebstoff (bis zu 15 % der Trockenmasse) sind aber immer noch zu über 90 % des Gesamtcalciums im Wasser gelöst.

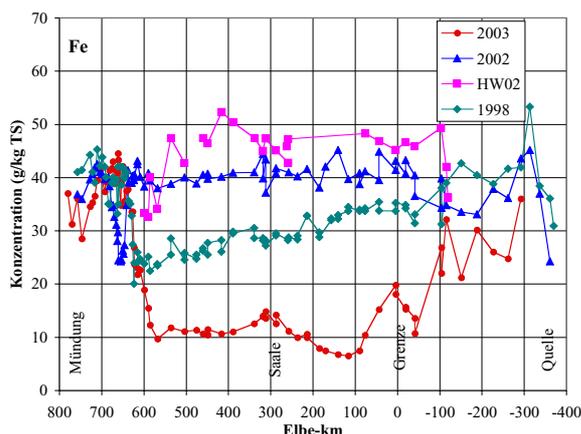
Die ungewöhnlich starke Zunahme von Ca (bzw.  $\text{CaCO}_3$ ) in den Schwebstoffen reicht allein nicht aus, die niedrigen Konzentrationen der meisten übrigen Elemente zu erklären. Es muss noch von weiteren Beimengungen von vermutlich organischem Material (Algen) ausgegangen werden. Durch diese starke Verdünnung der meisten Elemente in den Schwebstoffen kommt es zu einer scheinbaren Verbesserung der Schwebstoffqualität. Um diesen Verdünnungseffekt zu relativieren, wurden wie schon in früheren Arbeiten (Prange A et al 1997) die Konzentrationen in den Schwebstoffen normiert. Zur Normierung auf den Tonmineralgehalt eignet sich gut der Gehalt des geogenen Elements Sc. Neben Sc sind noch andere geogene Elemente für eine Normierung

geeignet und meist auch Fe, da die Konzentrationen von Sc und Fe für die Elbe-Schwebstoffe in der Regel sehr stark korreliert sind. Die Normierung der Konzentration  $c_{El}$  des betrachteten Elements wurde mit folgender Formel durchgeführt:  $c_{El}^{norm} = c_{El} / c_{Sc} * c_{Sc}^0$  mit  $c_{Sc}^0 = 13,5 \text{ mg/kg}$  (Sc-Konzentration des Tongesteinstandards von Turekian & Wedepohl). In den Grafiken werden nun jeweils die absoluten und normierten Konzentrationen gegenübergestellt. Die biogene Entkalkung wird im Sc-normierten Längsprofil noch deutlicher (s. Abb. 3-10b).

Auch die Sr-Gehalte in den Schwebstoffen vom August 2003 sind im gleichen Elbabschnitt durch die biogene Entkalkung angehoben, allerdings nicht so kräftig wie beim Ca, nur um einen Faktor von maximal 3,5.

Beim Magnesium, einem weiteren Erdalkalielement, und bei den meisten anderen Elementen dagegen zeigten sich in der mittleren Elbe bei den Schwebstoffen vom August 2003 keine Konzentrationserhöhungen, sondern große Konzentrationsabnahmen, die durch die starke Verdünnung mit Kalk und organischem Material verursacht wurden. Ein typisches Beispiel dafür zeigt die Abb. 3-11 für das Element Fe. In der mittleren Elbe lagen die Fe-Konzentrationen im Schwebstoff im August 2003 nur bei etwa 10 g/kg, im Oktober 2002 dagegen bei 40 g/kg und beim Hochwasser im August 2002 sogar teilweise über 50 g/kg.

Ähnlich verhielten sich auch die Blei-Gehalte im Schwebstoff. Im August 2003 wurden im Elbeabschnitt von Pillnitz (Elbe-km 43) bis Geesthacht (Elbe-km 586) Pb-Konzentrationen unter 50 mg/kg bestimmt (s. Abb. 3-12a) - mit Ausnahme der Proben linkselbisch unterhalb der Saale-Mündung. Die höchsten Pb-Konzentrationen wurden während der Flut 2002 gefunden. Sie lagen in diesem Abschnitt zwischen 110 und 213 mg/kg. Die Normierung der Pb-Konzentrationen mit den Fe-Gehalten zeigt, dass die Pb-Werte im August 2003 nur durch die beschriebene Verdünnung reduziert wurden.



**Abb. 3-11** Vergleich der Eisen-Konzentrationen in den Schwebstoffen der Elbe von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003)

Nach der Korrektur rückt das Pb-Längsprofil von 2003 unterhalb der Saale nahe an das vom September 1998 (Abb. 3-12b).

Ein anders Bild bieten die Elbelängsprofile der Mangan-Gehalte. Sowohl unnormiert als auch normiert wurden während der Flut im August 2002 die niedrigsten Mn-Konzentrationen in den Schwebstoffen gefunden (um 2 g/kg). In den Schwebstoffen vom Oktober 2002 lagen die Gehalte etwa doppelt so hoch bei 4 g/kg und in denen vom September 1998 bei etwa 5 - 7 g/kg. Für den August 2003 ergeben sich nach der Normierung etwa doppelt so große Konzentration wie 1998. Außerdem fallen in Tschechien zwischen Klavary (CZ Elbe-km 188) und Lysa (CZ Elbe-km 151) ungewöhnlich hohe Mn-Werte von über 9 g/kg (unnormiert) auf, die bei früheren Kampagnen nicht gefunden wurden.

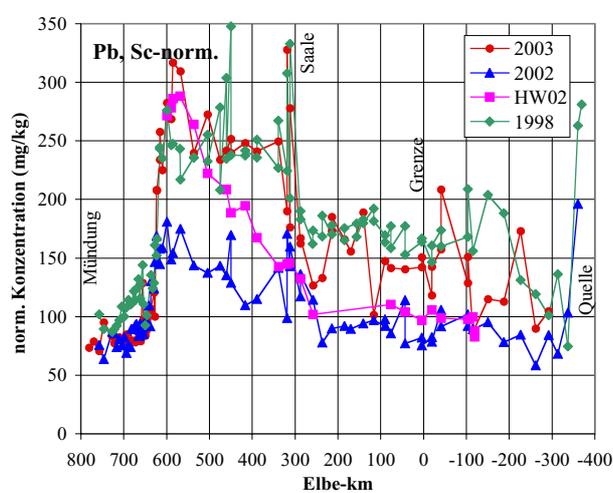
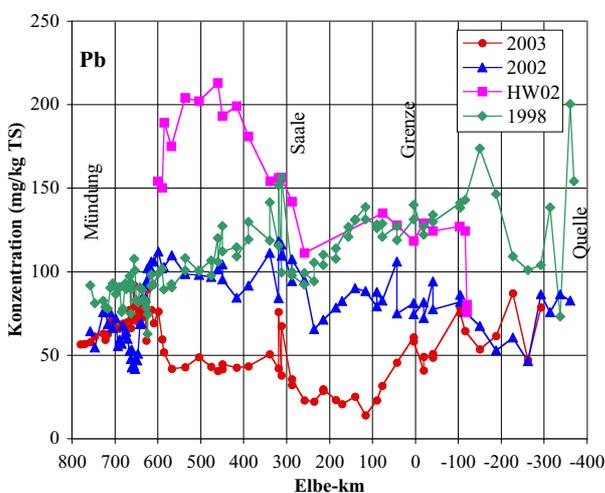
Die Chrom-Konzentrationen der Schwebstoffe, die wegen der hohen Filter-Blindwerte mit großen Unsicher-

heiten behaftet sind, variieren im Untersuchungszeitraum stark. Im oberen Elbelauf wurden im Oktober 2002 die höchsten Cr-Konzentrationen (meist über 160 mg/kg) bestimmt. Im mittleren Flussabschnitt lagen die Cr-Konzentrationen im August 2003 unter denen früherer Kampagnen, nämlich unter 50 mg/kg.

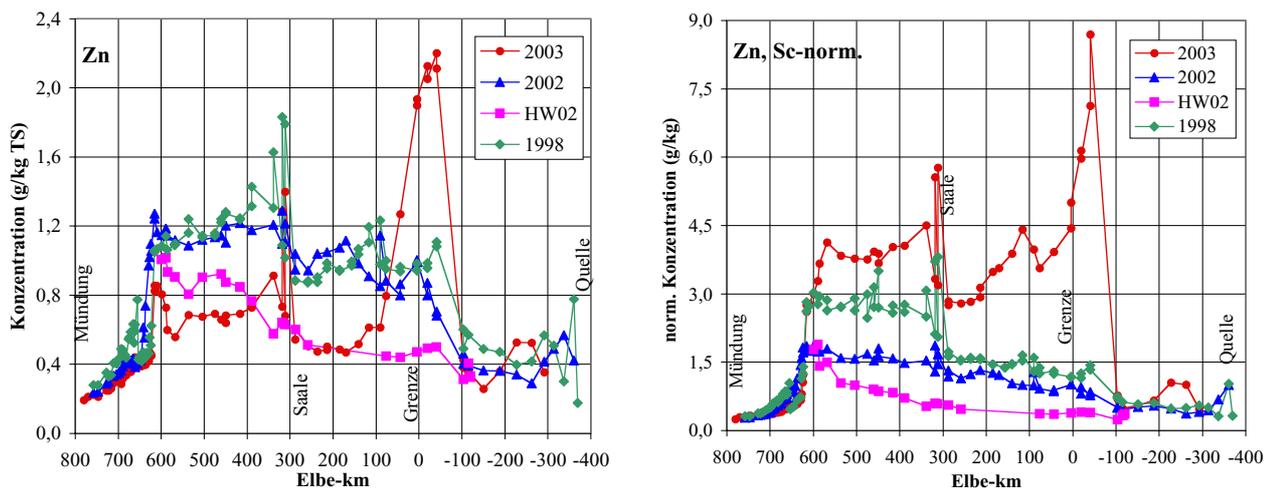
Die Längsprofile der Zink-Konzentrationen im Schwebstoff von 1998 und 2002 verlaufen ähnlich. Während der Flut 2002 und im August 2003 waren die Gehalte im mittleren Elbeabschnitt deutlich niedriger. Allerdings fällt 2003 ein breites Maximum von über 2 g/kg zwischen Vanov (CZ Elbe-km 41) und Pillnitz (Elbe-km 43) auf, das bei früheren Kampagnen nicht gefunden wurde (s. Abb. 3-13a). Eine Normierung mit den Sc-Gehalten korrigiert die unterschiedlichen Verdünnungen der Zn-Konzentrationen im Schwebstoff. Die Sc-normierten Zn-Werte vom August 2003 liegen nun deutlich über denen von 1998 und 2002 (s. Abb. 3-13b). In beiden Bildern sind besonders für 1998 und 2003 deutliche Erhöhungen der Zn-Konzentrationen der Elbe durch den Saalezufluss zu erkennen.

Die Konzentrationen von Cd lagen in den Schwebstoffen der mittleren Elbe im Oktober 2002 über denen der anderen Kampagnen (s. Abb. 3-14a). 1998 wurden zwei Ausreißer bei Opatovice (38 mg/kg) und bei Vanov (21 mg/kg) festgestellt. Die sehr niedrigen Cd-Konzentrationen in den Schwebstoffen vom August 2003 werden durch die Normierung mit den Sc-Gehalten so stark angehoben, dass sie nun in der mittleren Elbe am höchsten sind. Dagegen sind die normierten Konzentrationen der Schwebstoffe vom Hochwasser 2002 am niedrigsten (Abb. 3-14b).

Die Längsprofile der Konzentrationen von Quecksilber im Elbeschwebstoff von 1998 bis 2003 variieren sehr stark (Abb. 3-15). Oberhalb der Saalemündung wurden 1998 die höchsten Werte bestimmt, unterhalb des Saalezuflusses waren dagegen die Hg-Konzentrationen der



**Abb. 3-12** Vergleich der Blei-Konzentrationen in den Schwebstoffen der Elbe von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003) a: links unnormiert, b: rechts Sc-normiert:  $c_{Pb}^{norm} = c_{Pb} / c_{Sc} * c_{Sc}^0$  mit  $c_{Sc}^0 = 13,5 \text{ mg/kg}$



**Abb. 3-13** Vergleich der Zink-Konzentrationen in den Schwebstoffen der Elbe von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003) a: links unnormiert, b: rechts Sc-normiert:  $c_{Zn}^{norm} = c_{Zn} / c_{Sc} * c_{Sc}^0$  mit  $c_{Sc}^0 = 13,5 \text{ mg/kg}$

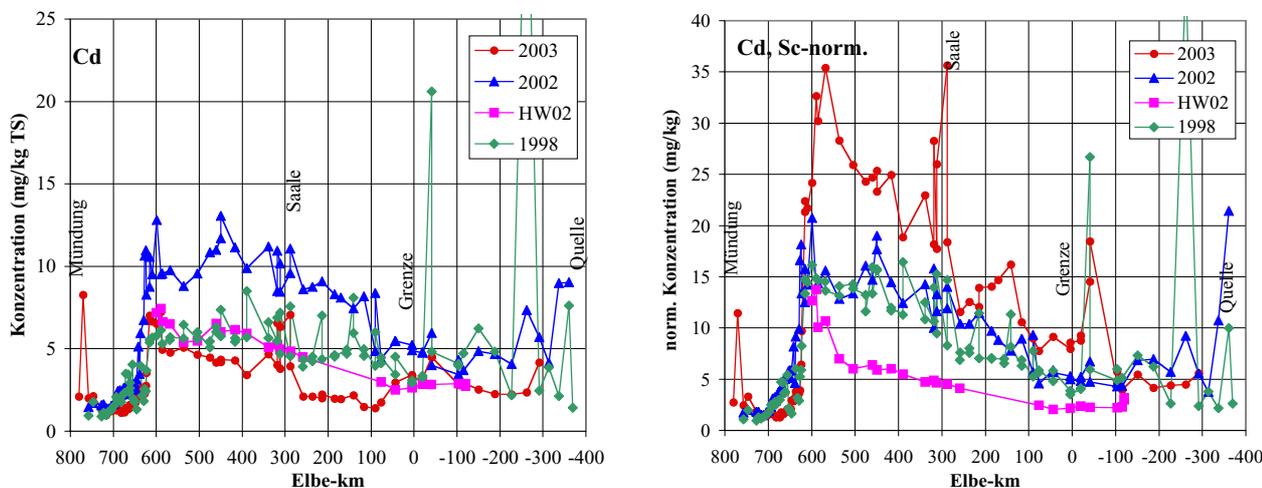
Flutproben die größten. Im August 2003 wurden auf Grund der beschriebenen Verdünnung durch Kalk und organisches Material in der mittleren Elbe die niedrigsten Werte gemessen. Die Normierung mit Sc korrigiert den Verdünnungseffekt und zeigt eine relative Zunahme der Hg-Belastung im Abschnitt unterhalb der Saalemündung bis Hamburg (Abb. 3-15b).

Damit lassen sich Unterschiede und Ähnlichkeiten der an den Schwebstoffen gebundenen Elemente deutlicher erkennen. Um den Anteil zu erfassen, der mit dem Schwebstoff in der Elbe transportiert wird, müssen die spezifischen Beladungen mit dem Schwebstoffgehalt multipliziert werden. Diese Umrechnung ermöglicht eine direkte Gegenüberstellung der Elementkonzentrationen in der gelösten und partikulären Phase und die Ermittlung der Gesamtgehalte der Elemente im Wasserkörper.

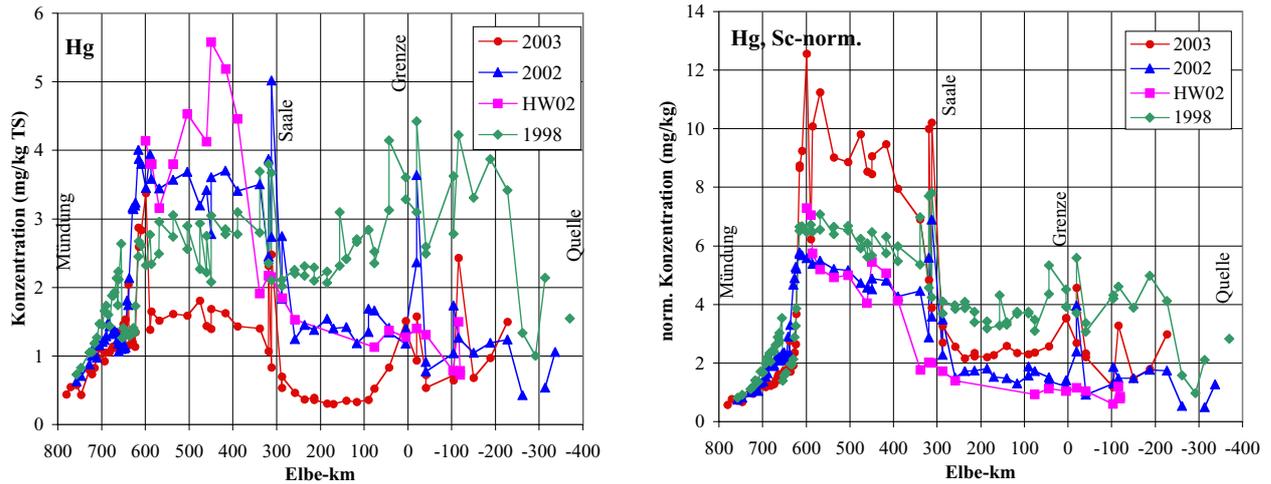
### 3.2.3.4 Gesamtgehalte der Elemente

In Abschnitt 3.2.3.2 und Abschnitt 3.2.3.3 wurden Längsprofilgehalte einiger Elemente in den Filtraten bzw. Schwebstoffen der Elbe beschrieben. Die Elementkonzentrationen der Filtrate sind auf den Liter Wasser bezogen und können bei bekanntem Abfluss direkt in Frachten umgerechnet werden. Bei den Schwebstoffen dagegen sind die spezifischen, auf den trockenen Schwebstoff bezogenen Konzentrationen angegeben.

Unter normalen Abflussbedingungen liegen, wie erwähnt, die Alkali- und Erdalkali-Elemente, aber auch S, Mo und U zu über 90 % im Elbwasser gelöst vor. Die Elemente Cr, Mn, Fe, Zn, Ag, Cd, Sn, Pb, Th u. a. sind dagegen zu über 75 % am Schwebstoff gebunden. Eine Übersicht, in welchem Maße die einzelnen Elemente partikulär im Elbwasser gebunden sind, ist für die Kampagnen 1998, August und Oktober 2002 und 2003 in der



**Abb. 3-14** Vergleich der Cadmium-Konzentrationen in den Schwebstoffen der Elbe von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003); a: links unnormiert, b: rechts Sc-normiert:  $c_{Cd}^{norm} = c_{Cd} / c_{Sc} * c_{Sc}^0$  mit  $c_{Sc}^0 = 13,5 \text{ mg/kg}$



**Abb. 3-15** Vergleich der Quecksilber-Konzentrationen in den Schwebstoffen der Elbe von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003) a: links unnormiert, b: rechts Sc-normiert:  $c_{Hg}^{norm} = c_{Hg} / c_{Sc} * c_{Sc}^0$  mit  $c_{Sc}^0 = 13,5 \text{ mg/kg}$

Abb. 3-16 dargestellt. Die über das Längsprofil gemittelten prozentualen partikulären Anteile (Medianwerte) sind aufsteigend sortiert wiedergegeben.

Die Elemente mittlerer Löslichkeit schienen sich im Herbst 2002 und 2003 genau entgegengesetzt zueinander zu verhalten. Die prozentualen partikulären Anteile von Wolfram im Elbwasser schwankten für die drei Kampagnen von 23 bis 71 %. Bei den Hochwasserproben vom August 2002 wurden vor allem für Uran und Mangan deutlich veränderte prozentuale partikuläre Anteile ermittelt. So wurde U während der Flut stärker am Schwebstoff gebunden vorgefunden (zu 44 %), Mn dagegen war mit 25 % stärker im Elbwasser gelöst (s. Abb. 3-16).

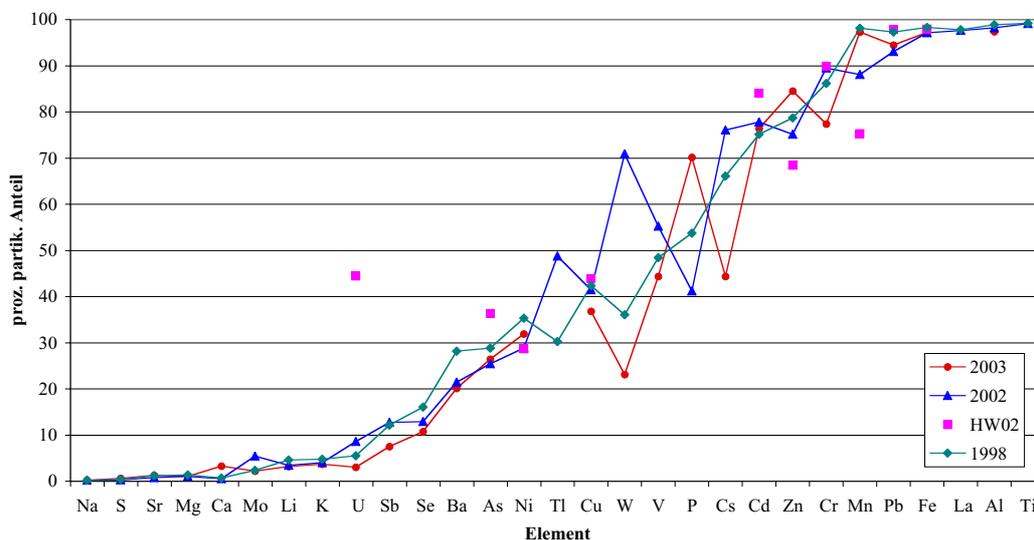
Für Quecksilber kann keine Eingruppierung vorgenommen werden, auch da der Filtrationsvorgang die Aufteilung auf die beiden Phasen verändern kann.

Aufgrund der stark gestiegenen Schwebstoffgehalte während des Hochwassers 2002 sind die Gesamtgehalte

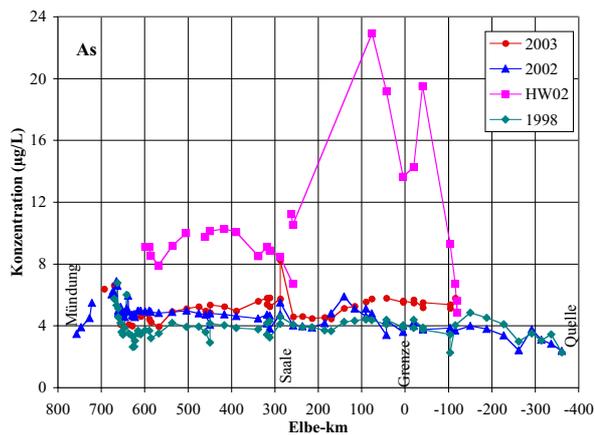
für fast alle Schwermetalle und Arsen im Bereich der Flutwelle stark angestiegen. Im Bereich der Hochwasserwelle stiegen die Fe-Werte bis zum 20-Fachen an. Bereits im Oktober 2002 lagen sie wieder nahe denen von 1998.

As ist im Elbwasser unter normalen Abflussbedingungen zu 71 - 75 % gelöst. Während des Hochwassers 2002 war As dagegen zu 36 % am Schwebstoff gebunden. Im August 2002 stiegen die Gesamtgehalte von As im Bereich der Hochwasserwelle sehr stark an (s. Abb. 3-17). Sie sind bereits im Oktober 2002 wieder abgesunken, haben sich aber in der mittleren Elbe seit 1998 leicht erhöht. Die Gesamtgehalte von As steigen im Längsprofil unter normalen Abflussbedingungen unterhalb der Quelle leicht an, bleiben dann auf etwa gleich bleibendem Niveau und erreichen in der Trübungszone ihr Maximum.

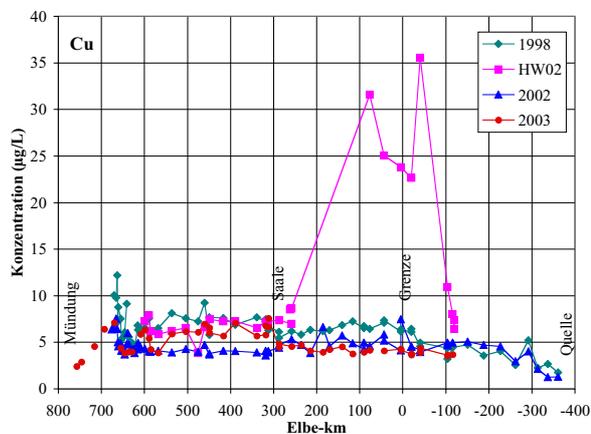
Die Längsprofile der Gesamtgehalte von Ni und Cu in der Elbe sind denen von Arsen ähnlich. Auch die Belas-



**Abb. 3-16** Vergleich der prozentualen partikulären Anteile der Elemente in der Elbe (September 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003)



**Abb. 3-17** Vergleich der Gesamtgehalte von Arsen im Elbwasser von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003)  
<d:\HW\End\Bilder\AP32\06UFilt98HW0203.pdf>



**Abb. 3-18** Vergleich der Gesamtgehalte von Kupfer im Elbwasser von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003)  
<d:\HW\End\Bilder\AP32\06UFilt98HW0203.pdf>

tung der Elbe mit den Gesamtgehalten von Ni stieg während des Hochwassers 2002 stark an. Die Längsprofile der drei anderen Kampagnen unterscheiden sich dagegen nur geringfügig. Die Werte nehmen ab der Elbequelle zu und erreichen Höchstwerte in der Trübungszone. Sie liegen in der mittleren Elbe unterhalb von Dobkovice (CZ Elbe-km 20) bis zum Hamburger Hafen (Elbe-km 636) zwischen 3,2 und 5,8 µg/L, unter Ausnahme von je einem Extremwert 2002 bei Breitenhagen und 2003 bei Wahrenberg.

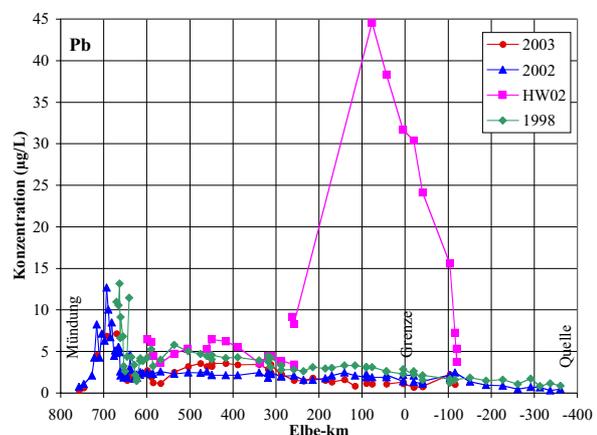
Während des Hochwassers 2002 stiegen auch die Gesamtgehalte von Cu in der mittleren Elbe stark an (s. Abb. 3-18). Sie sind aber bereits im Oktober 2002 wieder unter die Werte von 1998 abgesunken. Auch die Cu-Gesamtgehalte von August 2003 liegen in der mittleren Elbe meist unter denen von 1998. Abgesehen von den Extremwerten während der Flut schwanken die Cu-Werte in der mittleren Elbe unterhalb von Dobkovice (CZ Elbe-km 20) bis zum Hamburger Hafen (Elbe-km 661) zwischen 3,7 und 9,2 µg/L.

Ähnlich stark wie bei Fe stiegen auch Gesamtgehalte von Blei im Bereich der Hochwasserwelle an (Abb. 3-19). Die Pb-Belastung ging aber bereits im Oktober 2002 wieder zurück und lag auch 2003 meist unter den Werten von 1998.

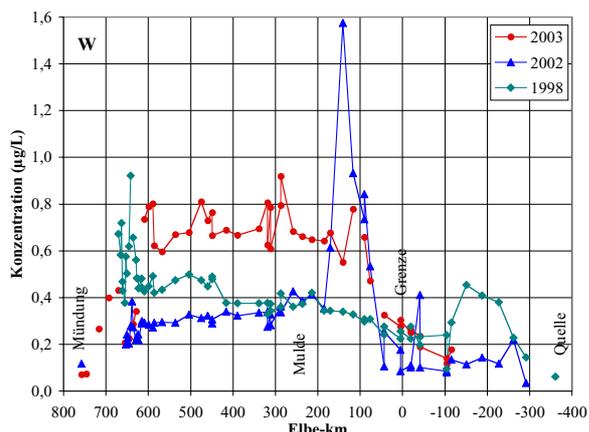
Wolfram lag im September 1998 zu 64 % und im August 2003 zu 77 % im Elbwasser gelöst vor, im Oktober 2002 war es dagegen zu 71 % an den Schwebstoffen gebunden (Abb. 3-16). Für die gesamten Wolfram-Konzentrationen wurden im August 2003 in der mittleren Elbe die höchsten Werte ermittelt (s. Abb. 3-20). Im Oktober 2002 fällt ein sehr hohes Maximum im Elbabschnitt um Belgern (Elbe-km 140) auf. Dies stammt von partikulär gebundenem Wolfram. Wie erwähnt findet man in den Schwebstoffen aus diesen Gebiet 2002 auch für viele andere Elemente hohe Anreicherungen, z.B. für As, Rb, Mo, Ag, Sn, Ta und Bi. Dagegen begründen sich die 2003 in der mittleren Elbe und 1998 im tschechischen Elbabschnitt zwischen Valy (CZ Elbe-km 228) und Lysá (CZ Elbe-km 151) gefundenen höheren Gehalte durch höhere gelöste Anteile der W-Konzentrationen in diesen Bereichen.

### 3.2.3.5 Frachten

Neben den Konzentrationen der Schadstoffe, die in den Wasserproben entlang der Elbe gemessen worden waren, war vor allem die gesamte Schadstoffmenge, die während des Hochwassers in Richtung Nordsee transportiert wurde, von Interesse. Zu diesem Zweck wurden vom 20. bis 26.8.2002, während das Maximum der Hochwasserwelle das Wehr Geesthacht passierte, einmal täglich Elbewasserproben bei Lauenburg ca. 10 km oberhalb des Wehres genommen und die Gesamtgehalte einiger Elemente bestimmt. Aus den Analysenergebnissen konnte zusammen mit den genau vermessenen Abflusswerten die Menge der Stoffe geschätzt werden, die im Laufe dieser Hochwasserwelle in Richtung Hamburger Hafen gespült worden war. Eine ungewöhnlich hohe



**Abb. 3-19** Vergleich der Gesamtgehalte von Blei im Elbwasser von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003)



**Abb. 3-20** Vergleich der Gesamtgehalte von Wolfram im Elbwasser von der Quelle bis zur Mündung (September 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003) ([d:\HW\End\Bilder\AP32\06U\Filt98HW0203.pdf](#))

Fracht für diese 7 Tage wurde für Arsen ermittelt. Sie entsprach mit 13 Tonnen etwa 27 % der für das Jahr 1999 ermittelten Jahresfracht für dieses Element. Das ist umso höher zu bewerten, weil der August normalerweise ein Monat mit relativ geringem Wasserabfluss ist und daher die Monatsfracht an Schwebstoffen und Elementen im Vergleich vor allem mit den Frühjahrsmonaten normalerweise relativ gering ist. Auch an Chrom wurden mit 18 % der Jahresfracht von 1999 sehr große Mengen transportiert. Die übrigen Elemente lagen mit 4 bis 14 % der 99er Jahresfracht ebenfalls deutlich über den für diesen Zeitraum von nicht einmal 2 % entsprechenden Werten (s. Tab. 3-11).

### 3.2.3.6 Elbsedimente

Bei den Probennahmen der Oberflächensedimente wurde darauf geachtet, möglichst junges frisches Sediment zu gewinnen. Während bei früheren Sedimentkampagnen die ermittelten Längsprofile der Elementkonzentrationen in der Regel glatte Verläufe aufwiesen, traten 2003 längs der Elbe starke Schwankungen der Gehalte auf. Vermutlich kam es wohl aufgrund der heftigen Algenblüte im Sommer 2003 und einer damit verbundenen biogenen Entkalkung zu unterschiedlich starken Ablagerungen von organischem Material und Ausfällungen von Calciumkarbonat.

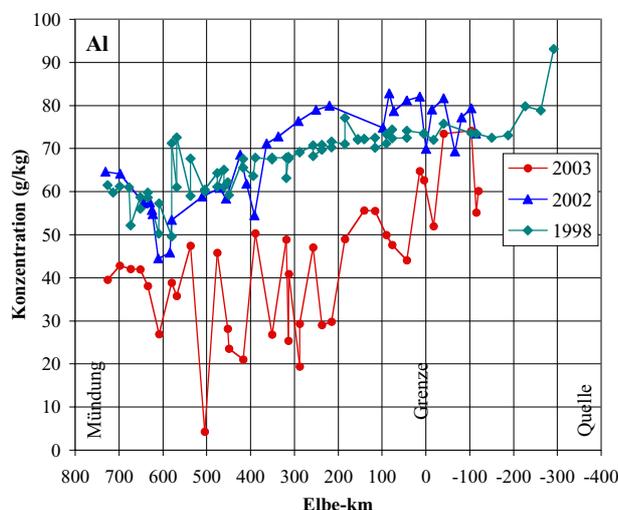
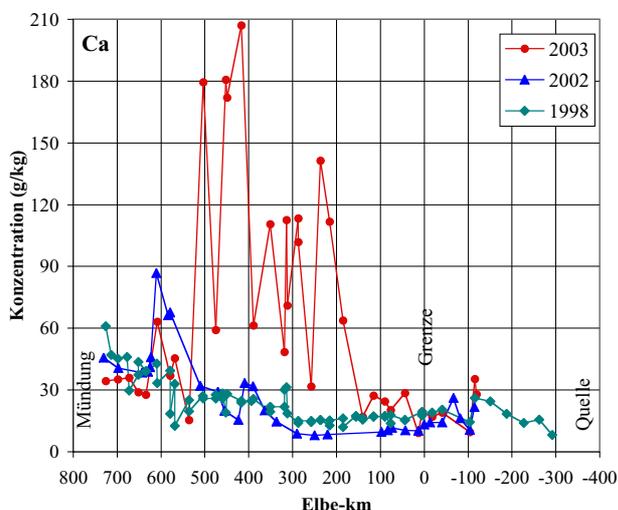
**Tab. 3-11** Vergleich der Gesamtfrachten einer Woche während des Hochwassers mit den Jahresfrachten von 1999

Gesamtfrachten in kg vom 20.8. bis 26.8.02		Jahresfracht in kg von 1999 bei Schnackenburg (IKSE)		Prozentuale Anteile Zeitraum: 1,9 %
Abfluss: 2630 m³/s		Abfluss: 640 m³/s		
Cr	4400	Cr	24000	18,3
Ni	10000	Ni	74000	13,5
Cu	10000	Cu	85000	11,8
Zn	53000	Zn	890000	6,0
As	13000	As	49000	26,5
Cd	280	Cd	6500	4,3
Hg	120	Hg	1400	8,6
Pb	7600	Pb	57000	13,3

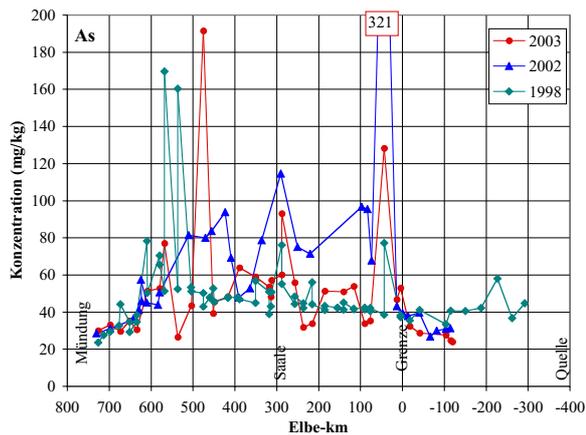
Wie bei den Schwebstoffen, wurden auch bei den Sedimenten vom Sommer 2003 zum Teil sehr deutliche Erhöhungen der Elementgehalte von Ca und Sr gefunden (Abb. 3-21a). Dagegen zeigten sich bei den meisten der übrigen Elemente zum Teil erhebliche Konzentrationsabnahmen, wie z.B. beim Aluminium (Abb. 3-21b).

Die As-Konzentrationen in den Elbsedimenten vom September 1998 und August 2003 haben sich über weite Elbabschnitte nur wenig verändert (s. Abb. 3-22). Im September 2002 wurden vor allem in der mittleren Elbe höhere Gehalte bestimmt. Besonders auffallend sind die hohen Konzentrationen bei Pillnitz (Elbe-km 43) mit 321 mg/kg für 2002 und 128 mg/kg für 2003. Weitere Maxima wurden 2003 bei Schnackenburg (Elbe-km 475) gefunden.

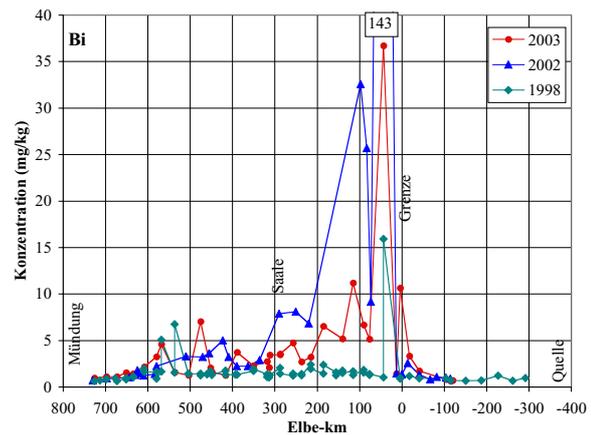
Die As-Konzentrationen in den Elbsedimenten vom September 1998 und August 2003 haben sich über weite Elbabschnitte nur wenig verändert (s. Abb. 3-22). Im September 2002 wurden vor allem in der mittleren Elbe höhere Gehalte bestimmt. Besonders auffallend sind die hohen Konzentrationen bei Pillnitz (Elbe-km 43) mit 321 mg/kg für 2002 und 128 mg/kg für 2003. Weitere Maxima wurden 2003 bei Schnackenburg (Elbe-km 475) gefunden.



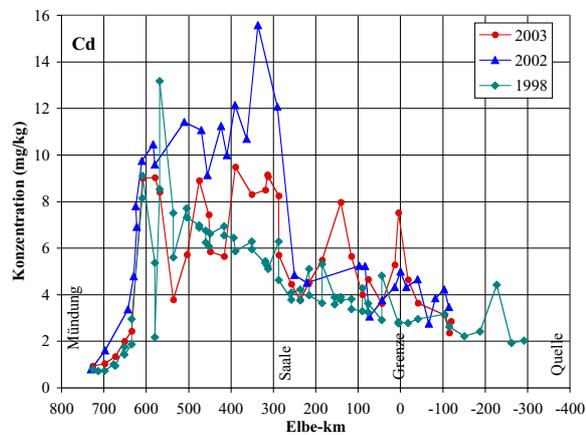
**Abb. 3-21** Vergleich der Konzentrationen in den Elbsedimenten von der Quelle bis zur Mündung (Oktober 1998, September 2002, August 2003) a: links Calcium, b: rechts Aluminium



**Abb. 3-22** Vergleich der Arsen-Konzentrationen in den Elb-sedimenten von der Quelle bis zur Mündung (Oktober 1998, September 2002, August 2003)



**Abb. 3-24** Vergleich der Bismut-Konzentrationen in den Elb-sedimenten von der Quelle bis zur Mündung (Oktober 1998, September 2002, August 2003)



**Abb. 3-23** Vergleich der Cadmium-Konzentrationen in den Elbsedimenten von der Quelle bis zur Mündung (Oktober 1998, September 2002, August 2003)

mit 192 mg/kg und 1998 bei Neu Darchau und Lauenburg (Elbe-km 536 und 568) jeweils links mit 160 und 169 mg/kg gefunden.

Die Cd-Konzentrationen in den Elbsedimenten stiegen 1998 von der Quelle bis Hamburg langsam an. 2002 wurden unterhalb der Muldemündung deutlich höhere Gehalte ermittelt (s. Abb. 3-23). 2003 schwankten die Cd-Gehalte. An einigen Stellen liegen sie auf dem Niveau von 1998, an anderen sind sie deutlich höher.

Bei den Längsprofilen von Bismut fallen ungewöhnlich hohe Maxima auf: 2002 bei Pillnitz (Elbe-km 43) mit 143 mg/kg und bei Meißen und Althirschstein (Elbe-km 83 und 97) mit 26 und 33 mg/kg, (s. Abb. 3-24). 2003 betrug das Maximum bei Pillnitz 37 mg/kg, 1998 "nur" 16 mg/kg.

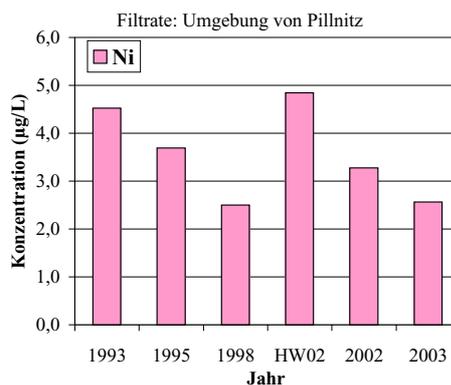
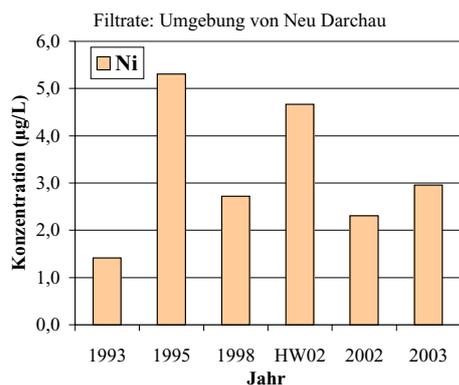
Auch für sehr viele andere Elemente (wie z.B. Li, As, Rb, Mo, Sn, Yb, Ta, W, Th und U) wurden in den bei Pillnitz im September 2002 genommenen Sedimentproben sehr viel höhere Elementgehalte gefunden als sonst in der Elbe.

### 3.2.4 Diskussion

In dem Forschungsbericht "Die Elbe und ihre Nebenflüsse" des ATV-DVWK (Prange A et al 2000) wurden die auf Basis jahrelanger Untersuchungen ermittelten Schadstoffbelastungen der Elbe zusammengefasst und bewertet. Daneben wurden alle GKSS-Messungen der Kampagnen von 1992 bis 1998 in dem Bericht "Erfassung und Beurteilung der Belastung der Elbe mit Schadstoffen" (Prange A et al 2001) als Längsprofilverläufe der Elementkonzentrationen in den Filtraten, Schwebstoffen und Sedimenten vergleichend dargestellt und für Schwebstoffe und Sedimente mit früher ermittelten Elbe-Hintergrundwerten verglichen. Es zeigte sich, dass die Elementkonzentrationen der sieben als prioritär eingestuften Schwermetalle Hg, Cd, Pb, Zn, Cr, Cu, Ni im Zeitraum von 1992 bis 1998 in der Elbe deutlich abgenommen haben, dass aber beispielsweise für die Sedimente 1998 nur Chrom und Nickel die Zielvorgaben der LAWA (Güteklasse II) in etwa erfüllten. Besonders Hg, Cd und Zn sorgten weiter für hohe Belastung der Sedimente (Klasse III-IV).

Zur Bewertung der gelösten Stoffe in natürlichen Gewässern können für einige Elemente die schärfsten Zielvorgaben der LAWA bzw. ARGE für das Schutzgut aquatische Lebensgemeinschaften im Wasser oder die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (TVO) herangezogen werden (s. Tab. 3-12). Eine Klassifizierung existiert nicht. Obwohl die Zielvorgaben für aquatische Lebensgemeinschaften einen Anteil vom Schwebstoff (pauschal 25 mg/L) enthalten, liegen sie deutlich unter den Grenzwerten der TVO, bei Cu um einen Faktor 500. Ein Grenzwert für Zn fehlt in der neuen TVO.

Im Wasser der Elbe wurden die hier aufgeführten Trinkwassergrenzwerte bei den neueren Kampagnen nur 1998 und 2002 von den Konzentrationen des Elements Mangan überschritten und da auch nur bei einigen Proben im tschechischen Teil der Elbe. In den Mündungen der Ein-



**Abb. 3-25** Vergleich der Mittelwerte der Nickel-Konzentrationen in den Filtraten (Okt. 1993, Sep. 1995, Sep. 1998, HW 2002, Okt. 2002, Aug. 2003)

**Tab. 3-12** Zielvorgaben für aquatische Lebensgemeinschaften (LAWA/ARGE) und Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (TVO) in µg/L

Element	Zielvorgaben f. aquat.	
	Lebensgem.	Grenzwerte der TVO
Cr	10	50
Mn		50
Fe		200
Ni	4,5	20
Cu	4	2000
Zn	14	
As	1	10
Cd	0,07	5
Hg	0,04	1
Pb	3,5	10

leiter und Nebenflüsse dagegen lagen die Konzentrationen mehrerer Elemente über den Trinkwassergrenzwerten. Neben Mangan, dessen Konzentrationswerte im September 1998 und im Oktober 2002 bei fast allen untersuchten Einleitern und Nebenflüssen deutlich über dem Grenzwert von 50 µg/L lagen, wurden auch von Fe, Ni, As, Cd und Pb die Grenzwerte in einigen Fällen, besonders im Oktober 2002, überschritten. Im Jahr 2003 gab es signifikante Überschreitungen der Grenzwerte nur beim Mn in der Havelmündung und beim As in der Muldemündung.

Die zeitliche Entwicklung der Elementkonzentrationen in den Filtraten nach 1998 ist ziemlich uneinheitlich. Schon bei der Flut vom August 2002 ergeben sich für die gemessenen Elementgehalte unterschiedliche Befunde. So stiegen in weiten Bereichen der Elbe die Konzentrationen von Ni, Cu, As und Pb im Vergleich zum September 1998 an, dagegen sanken die Konzentrationen von U; die von Mn und Zn nahmen unterhalb von Saale und Mulde zu und fielen oberhalb ab. Schon im Oktober 2002 näherten sich die Elementgehalte in den Filtraten meist wieder den Werten vor dem Flutereignis. Ein Jahr nach dem Hochwasser, im August 2003, wurden für die Elemente S, Mn und Zn relativ niedrige Gehalte in der Elbe gefunden, für Na, Mg, K, Ca, Sr, W und U dagegen die höchsten seit 1995 bzw. sogar seit 1993. Einige andere Elementkonzentrationen, wie die von Fe, As, Mo und Cs haben sich in verschiedenen Elbabschnitten sehr unterschiedlich verändert. Tab. 3-13 zeigt die Mediane einiger Elementkonzentrationen in den Filtraten von Oktober 1993 bis August 2003.

onen von Ni, Cu, As und Pb im Vergleich zum September 1998 an, dagegen sanken die Konzentrationen von U; die von Mn und Zn nahmen unterhalb von Saale und Mulde zu und fielen oberhalb ab. Schon im Oktober 2002 näherten sich die Elementgehalte in den Filtraten meist wieder den Werten vor dem Flutereignis. Ein Jahr nach dem Hochwasser, im August 2003, wurden für die Elemente S, Mn und Zn relativ niedrige Gehalte in der Elbe gefunden, für Na, Mg, K, Ca, Sr, W und U dagegen die höchsten seit 1995 bzw. sogar seit 1993. Einige andere Elementkonzentrationen, wie die von Fe, As, Mo und Cs haben sich in verschiedenen Elbabschnitten sehr unterschiedlich verändert. Tab. 3-13 zeigt die Mediane einiger Elementkonzentrationen in den Filtraten von Oktober 1993 bis August 2003.

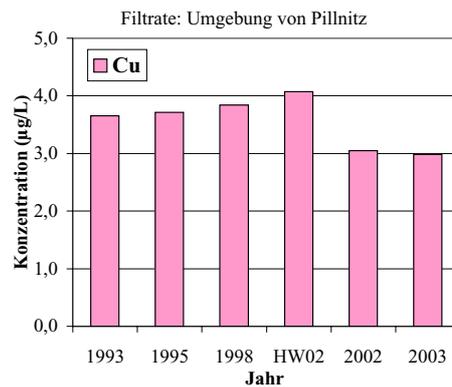
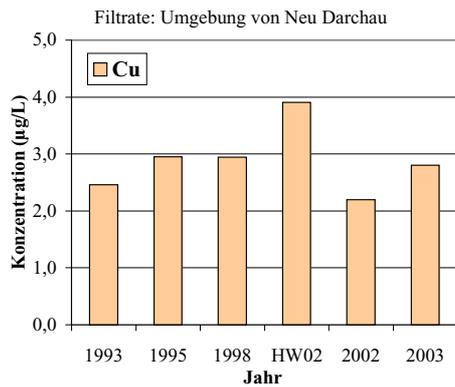
Ergänzend zu den Längsprofilardarstellungen im Abschnitt 3.2.3.2 über die Filtrate geben die Abb. 3-25, 3-26 und 3-27 weitere Belege für die uneinheitliche Entwicklung. Es werden jeweils Flussabschnitte um Pillnitz (von Vanov: CZ Elbe-km 41 bis Torgau: Elbe-km 156) und Neu Darchau (von Dömitz: Elbe-km 504 bis Geesthacht: Elbe-km 586) oberhalb und unterhalb der Zuflüsse von Mulde und Saale verglichen.

Die Belastung der Schwebstoffe während des Hochwassers war ebenfalls uneinheitlich. Viele Elementkonzentrationen wie die von Fe, As, Pb und U sind während des Hochwassers angestiegen, andere wie die von Mn und Zn haben abgenommen. Tab. 3-14 zeigt die Mediane einiger Elementkonzentrationen in den Schwebstoffen von Oktober 1993 bis August 2003.

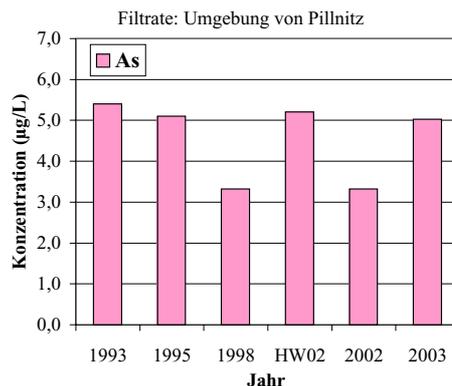
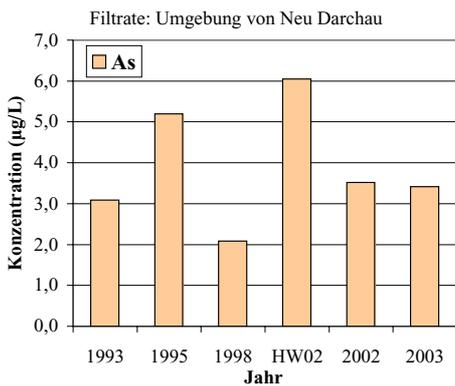
Auch im Oktober 2002 ist noch für viele Elemente wie Li, Mg, Al, Cr, Fe, As, Rb, Mo, Cd, Sn, Ba, La, Ce Ta,

**Tab. 3-13** Mediane der Elementkonzentrationen in den Elbwasserfiltraten von Oktober 1993, September 1995, September 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002 und August 2003

Jahr	Na	Mg	K	Ca	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	W	Pb	U
	mg/L	mg/L	mg/L	mg/L	µg/L									
1993	37,5	11,8	7,30	63,5	11,0	2,75	3,20	16,0	4,25	2,20	0,15	0,31	0,17	1,40
1995	20,1	10,9	6,35	50,4	32,6	4,96	3,12	13,6	4,96	1,38	0,04	0,14	0,17	1,18
1998	31,9	11,1	6,90	58,5	2,0	2,59	3,42	6,4	2,79	2,16	0,04	0,23	0,10	1,21
HW02					25,4	4,84	4,02	9,2	5,79		0,04		0,14	0,47
2002	25,4	12,1	6,63	58,7	18,5	3,07	2,68	14,3	3,33	0,87	0,05	0,09	0,21	0,94
2003	36,3	13,5	8,02	64,3	4,44	2,81	2,78	5,10	3,68	2,06	0,04	0,52	0,11	1,60



**Abb. 3-26** Vergleich der Mittelwerte der Kupferkonzentrationen in den Filtraten (Oktober 1993, Sept. 1995, Sept. 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003)



**Abb. 3-27** Vergleich der Mittelwerte der Arsenkonzentrationen in den Filtraten (Oktober 1993, Sept. 1995, Sept. 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003)

W, Bi, Th und U ein Anstieg festgestellt worden. Die Konzentrationen der Elemente S, Mn, Sr und Pb sind dagegen zurückgegangen.

Im August 2003 haben die Konzentrationen der meisten Elemente im Schwebstoff im Vergleich zu früheren Kampagnen abgenommen. Allerdings wurde durch die Algenblüte und die dadurch hervorgerufene biogene Entkalkung die Belastung durch hohe Beimengungen von Kalk und Algen im Schwebstoff reduziert. Eine Korrektur dieser Verdünnung durch eine Normierung mit den Sc-Gehalten und dadurch auf den Tonmineralgehalt zeigt, dass die Gehalte an Schwermetallen und As sogar angestiegen sind (s. Abb. 3-13b, 3-14b und 3-15b).

Die Abb. 3-28 bis 3-30 zeigen beispielhaft die unterschiedliche Belastungsentwicklung der Elemente Mn, As und U in den Schwebstoffen von 1993 bis 2003. Es werden die mit Sc normierten Medianwerte in charakteristischen Elbabschnitten oberhalb der Mündungen von Mulde und Saale in der Umgebung von Torgau (von

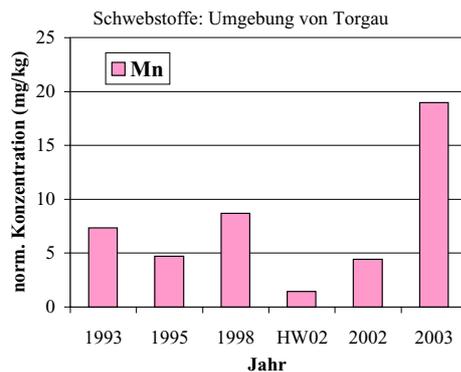
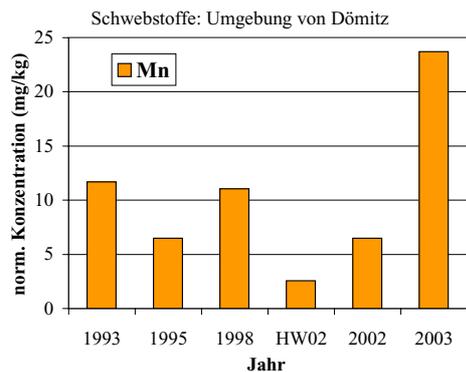
Scharfenberg Elbe-km 76 bis Rosslau Elbe-km 259) und unterhalb in der Umgebung von Dömitz (von Tangermünde Elbe-km 389 bis Bunthauspitze Elbe-km 609) dargestellt.

Die Sc-normierten Medianwerte von Mn erreichten während des Hochwassers ein Minimum und sind später wieder angestiegen, besonders stark im August 2003 (Abb. 3-28). Auch die Sc-normierten Medianwerte von As sind verglichen mit 1995 weiter angestiegen (Abb. 3-29). Die Sc-normierten Medianwerte von Uran sind dagegen 2003 oberhalb der Muldemündung zurückgegangen (Abb. 3-30).

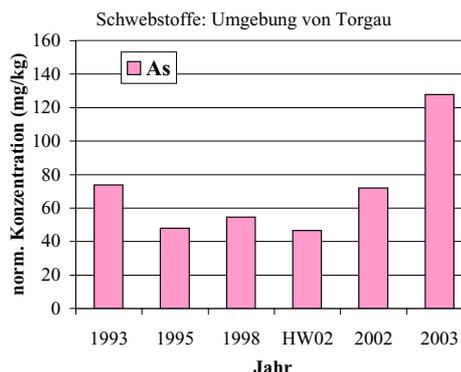
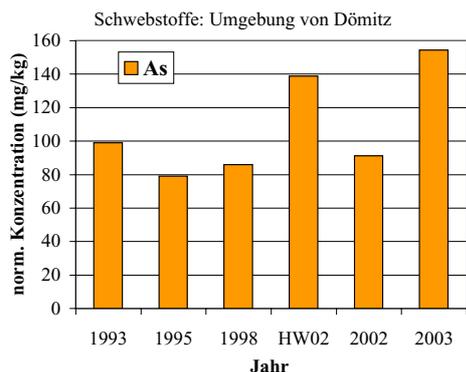
Die Schwermetall-Konzentrationen von Cr, Ni, Cu, Zn, Cd, Hg und Pb in den Schwebstoffen und Sedimenten können nach dem Schema der LAWA (1997), Arsen nach dem der ARGE (1993) klassifiziert werden. Die Veränderungen der Schadstoffbelastung der Elbe sind in Tab. D-1 und Tab. D-2 (Anhang) dargestellt, wo die nach diesem System eingefärbten Konzentrationen dieser Ele-

**Tab. 3-14** Mediane der Elementkonzentrationen in den Schwebstoffen von Oktober 1993, September 1995, September 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002 und August 2003

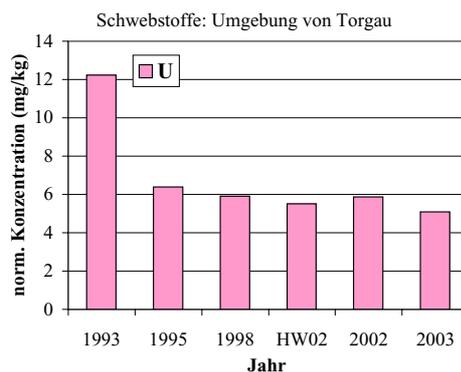
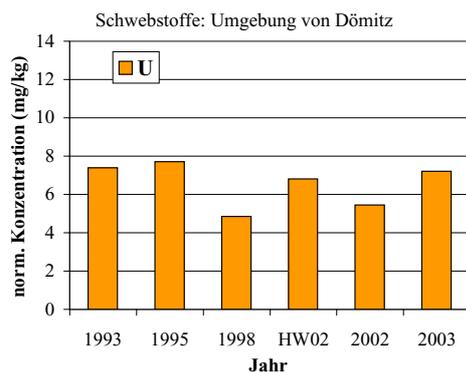
Jahr	Mg	K	Ca	Mn	Ni	Cu	Zn	As	Mo	Cd	W	Hg	Pb	U
	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	µg/g	µg/g	mg/g	µg/g						
1993	6,50	13,0	14,5	4,57	63,0	160	1,54	46,9	2,40	8,40	10,3	9,71	168	5,09
1995	7,71	16,6	13,2	4,19	59,9	114	0,97	50,4	1,82	7,13	5,6	3,66	150	5,49
1998	5,69	13,4	16,4	5,79	50,8	105	1,07	37,9	1,73	5,41	4,5	2,70	118	3,16
HW02		17,3	9,9	1,92	56,7	88	0,59	90,6		5,02	8,6	1,81	154	5,98
2002	6,78	15,7	14,5	4,18	49,2	87	1,07	61,6	2,34	8,58	10,3	2,36	91	4,33
2003	3,78	7,33	105	3,96	29,1	51	0,68	24,6	0,97	3,85	2,5	1,21	43	1,18



**Abb. 3-28** Vergleich der Sc-normierten Medianwerte der Mangan-Konzentrationen in den Schwebstoffen (Oktober 1993, Sept. 1995, Sept. 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003)



**Abb. 3-29** Vergleich der Sc-normierten Medianwerte der Arsen-Konzentrationen in den Schwebstoffen (Oktober 1993, Sept. 1995, Sept. 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003)



**Abb. 3-30** Vergleich der Sc-normierten Medianwerte der Uran-Konzentrationen in den Schwebstoffen (Oktober 1993, Sept. 1995, Sept. 1998, Hochwasser 2002, Oktober 2002, August 2003)

mente in den Schwebstoffen von September 1998, August und Oktober 2002 und August 2003 gegenübergestellt werden.

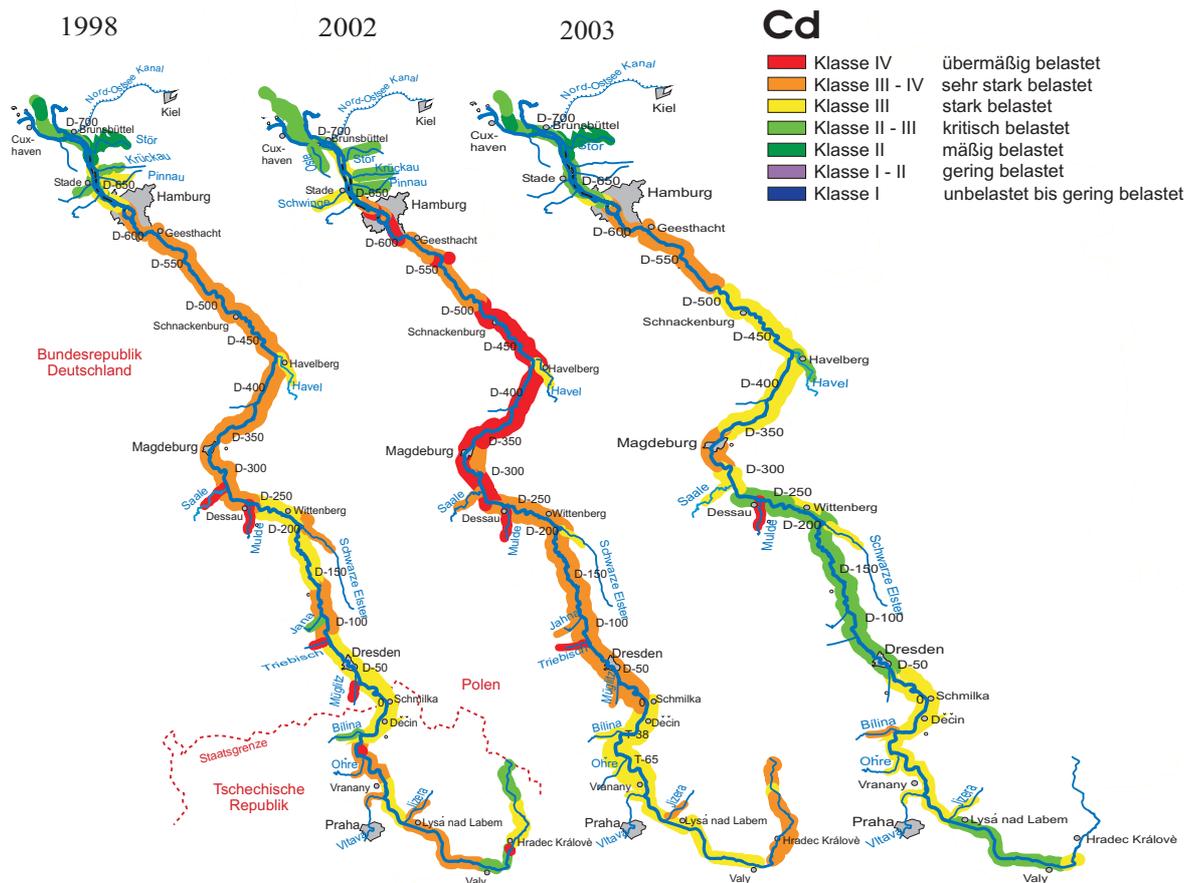
Einige Belastungsschwerpunkte wurden nach wie vor an den Direkteinleitern von Synthesia und dem Stollen unterhalb von Königstein oder an den Mündungen einiger Nebenflüsse festgestellt. So wurden für Zn und Cd hohe Konzentrationen bei Königstein und in der Triebisch, Mulde und Saale gefunden, für As in der Müglitz, Triebisch und Mulde und für Hg bei Synthesia, in der Bilina und Saale (Tab. D-1 und Tab. D-2).

Die Abb. 3-31 und 3-32 zeigen die Veränderungen der Belastung der Schwebstoffe von Cd und Hg von 1998 bis 2003 anhand von nach dem LAWA-Schema eingefärbten Flussverläufen. Während sich im Oktober 2002 die Situation verschlechtert hat, scheint sie sich im August 2003 verbessert zu haben. Dies ist aber, wie erwähnt, auf die Verdünnung durch die biogene Entkalkung zurückzuführen.

Das extreme Hochwasser hat viel Sediment resuspendiert und verlagert. Im September 2002 hat die Belastung der Sedimente geringfügig abgenommen, unter Ausnahme von As, Mo, Sn, W und Bi. Die Veränderung ist 2003 schwieriger zu beurteilen, da der Effekt der biogenen Entkalkung im August 2003 den sonst stetigen Verlauf der Konzentrationen gestört hat. Die stark schwankenden Konzentrationsprofile erschweren eine abschließende Beurteilung. Die Mediane der Konzentrationen von Cr, Ni, Cu, Hg und Pb sind im Vergleich zu 1998 leicht zurückgegangen. Die Belastungen mit Zn, As, und Cd sind leicht angestiegen. Die Konzentrationen von W und Bi im Sediment sind 2003 im Mittel angestiegen, die von Mo und U dagegen gesunken (s. Tab. 3-15).

Im Anhang (Tab. D-3 und Tab. D-4) werden die nach der LAWA/ARGE-Klassifizierung eingefärbten Konzentrationen von Cr, Ni, Cu, Zn, As, Cd, Hg und Pb in den Sedimenten von 1998, 2002 und 2003 gegenübergestellt. Man erkennt deutlich die nach wie vor hohe Belastung durch Zn, Cd und Hg.

## Schwebstoffe



**Abb. 3-31** Belastung der Elbschwebstoffe mit Cadmium (September 1998, Oktober 2002 und August 2003) nach dem Klassifizierungssystem der LAWA

In Abb. 3-33 bis 3-35 sind beispielhaft die unterschiedlichen Belastungsentwicklungen von Cr, Zn und W im Elbsediment von 1992 bis 2003 dargestellt, anhand der Sc-normierten Medianwerte in charakteristischen Abschnitten (in der Umgebung von Torgau und Dömitz) oberhalb und unterhalb der Zuflüsse von Mulde und Saale.

Während sich die Sc-normierten Medianwerte von Cr (Abb. 3-33) wenig verändert haben, sind die von Zn vor allem oberhalb der Muldemündung wieder angestiegen (Abb. 3-34). Besonders auffallend ist die Zunahme der Sc-normierten Medianwerte von W seit 1998 (Abb. 3-35).

Abb. 3-36 zeigt die Entwicklung der Cd-Belastung der Elbsedimente von 1998 bis 2003. Der positive Trend von 1992 bis 1998 hat sich in den letzten Jahren nicht fortgesetzt. Die Sedimente bleiben weiterhin hoch bis sehr hoch belastet.

Auch in den Mündungen der Nebenflüsse Mulde und Saale wurden hohe Sedimentbelastungen durch Zn, Cd und Hg gefunden, in der Mulde zusätzlich auch durch As und in der Bilina durch Hg (s. Anhang Tab. D-3 und Tab. D-4).

**Tab. 3-15** Mediane der Elementkonzentrationen in den Sedimenten von Oktober 1992, Oktober 1995, Oktober 1998, September 2002 und August 2003

Jahr	Mg mg/g	K mg/g	Ca mg/g	Mn mg/g	Ni µg/g	Cu µg/g	Zn mg/g	As µg/g	Mo µg/g	Cd µg/g	W µg/g	Hg µg/g	Pb µg/g	U µg/g
1992	8,39	15,9	15,7	1,98	85,8	238	1,86	72,9	3,10	11,0	11,4	10,6	204	6,84
1995	9,00	18,2	16,2	2,39	74,2	147	1,40	56,0	1,95	7,89	7,9	5,0	167	6,00
1998	9,35	18,1	18,7	3,17	66,3	138	1,03	45,1	2,01	5,10	6,2	2,9	154	5,16
2002	9,36	18,1	14,9	1,85	59,1	134	0,82	60,2	2,96	5,22	8,7	1,7	163	5,70
2003	7,66	14,4	46,8	2,74	55,4	101	1,16	49,5	0,97	5,67	9,2	2,3	126	3,64

## Schwebstoffe

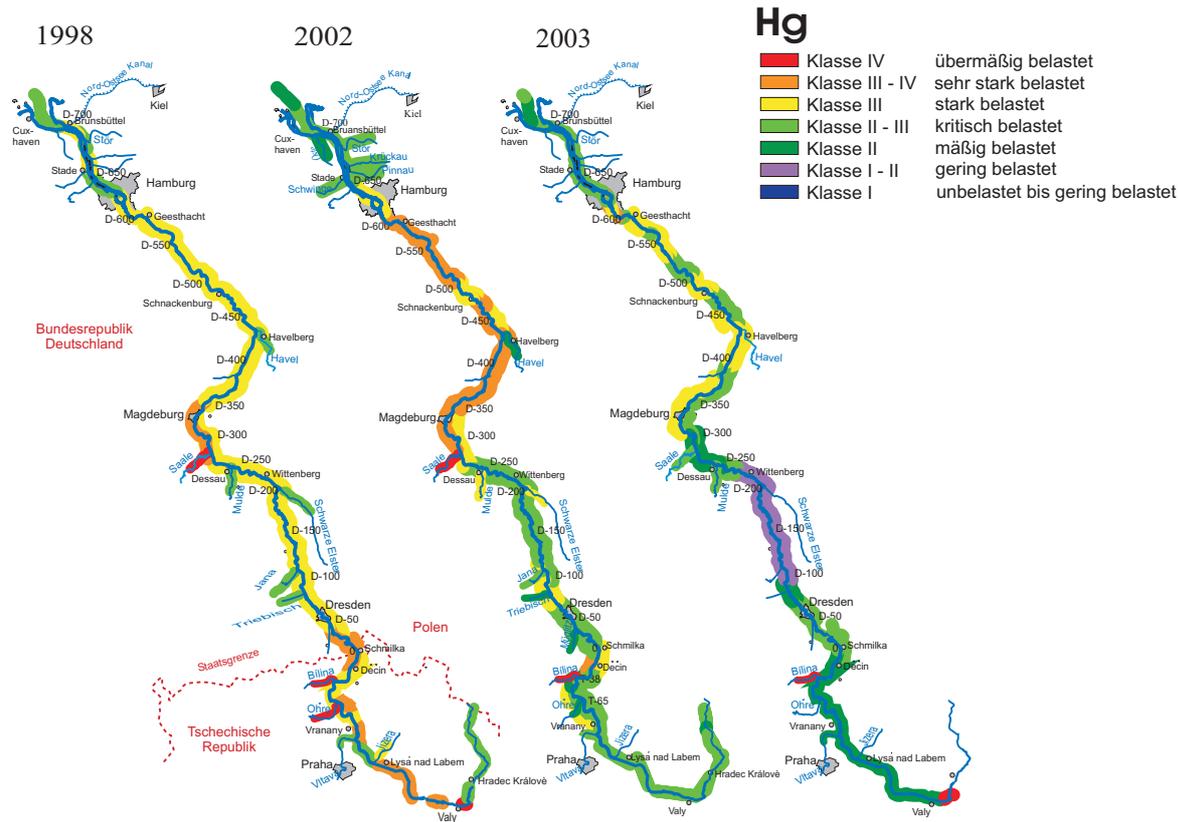


Abb. 3-32 Vergleich der Quecksilber-Belastung der Elbschwebstoffe (September 1998, Oktober 2002 und August 2003) nach dem Klassifizierungssystem der LAWA

### 3.2.5 Zusammenfassung

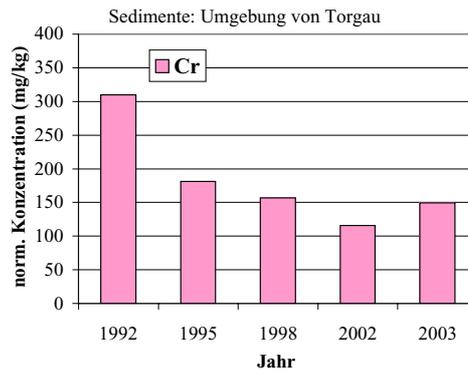
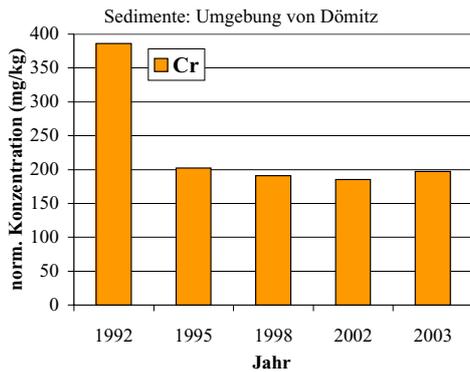
Das extreme Hochwasser im August 2002 hat viel Sediment aufgewirbelt und dadurch hohe Frachten verursacht. In einigen Elbabschnitten sind größere Mengen hoch belasteter Stoffe in Lösung bzw. Schwebstoffe gebracht worden, was zu etwa zwei- bis dreifachen Erhöhungen der Elementkonzentrationen in Filtraten und Schwebstoffen geführt hat. Bei den untersuchten Elementen trat dies in den Filtraten vor allem für Cu, As und Ni im ganzen Längsverlauf der Elbe und für Mn und Zn unterhalb des Saale-Zuflusses auf. In geringerem Maße wurden bei den Schwebstoffen Konzentrationsanstiege für die Elemente As, Pb und U im gesamten Verlauf der Elbe und für die Elemente Ag und Sn unterhalb der Saale gefunden. Es waren jedoch auch einige Konzentrationsabnahmen zu beobachten, vermutlich durch Verdünnung mit geringer kontaminiertem Material. Dies zeigte sich vor allem oberhalb der Saalemündung bei den Filtraten für die Elemente Mn, Zn, Cd und U und bei den Schwebstoffen für die Elemente Mn, Cu, Zn, Ag, Cd, Hg.

Kurz nach dem Hochwasser im Oktober 2002 haben sich die Schwermetallbelastungen der Filtrate zum größten Teil wieder den früheren Werten angenähert; nur die Pb und Zn-Konzentrationen oberhalb des Saale-Zuflusses waren deutlich höher als früher. Ähnlich verhält es sich auch bei den Schwebstoffen; nur sind hier die Cd-Werte

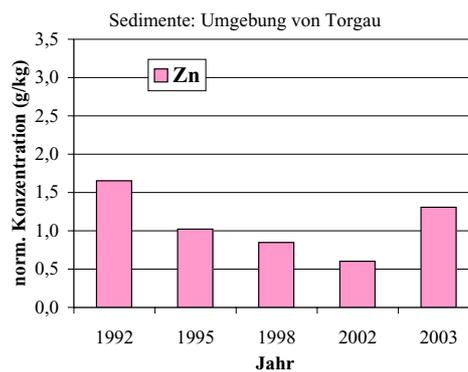
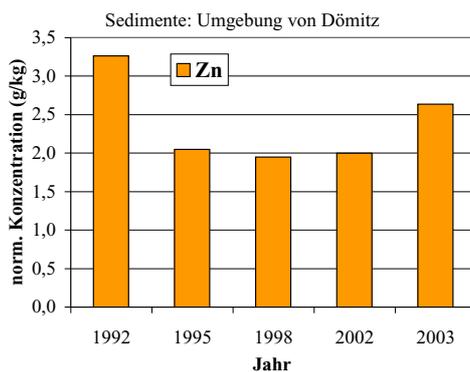
wieder angestiegen. In den fraktionierten Sedimenten wurden im September 2002 für die Elemente As, Mo, Sn, W, Bi und U deutlich höhere Gehalte gefunden als bei den älteren Probenahmen, vor allem oberhalb der Saalemündung.

Neue Belastungen scheinen vom Staubecken oberhalb des Wehrs bei Strekov (z. B. Zn, Cd) und von einer Deponie bei Dresden (z. B. von W, Bi und As) auszugehen.

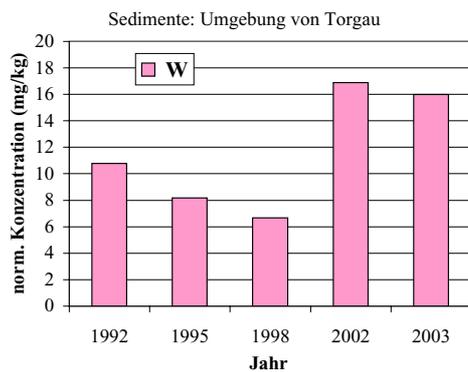
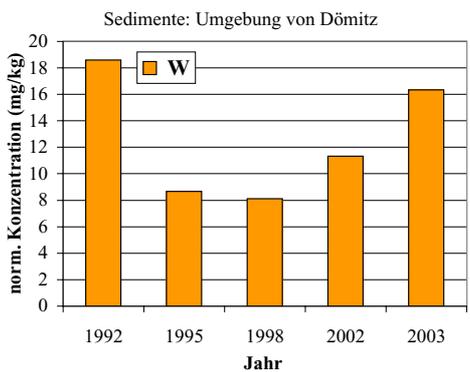
Etwa ein Jahr nach dem Hochwasserereignis herrschten wieder extreme Verhältnisse. Durch lange andauerndes schönes Wetter war es zu besonders niedrigen Abflussraten und zu einer starken Algenblüte gekommen. Wie bereits mehrfach erwähnt, kam es dadurch zu einer starken biogenen Entkalkung und zu einer starken Erniedrigung der Konzentrationen der meisten Elemente in den Schwebstoffen und Sedimenten. Dadurch ist eine vergleichende Beurteilung der Belastungen der Schwebstoffe und Sedimente sehr erschwert. Sie ist nur dann möglich, wenn die Elementgehalte auf ein geogenes Referenzelement wie z.B. Sc normiert werden. Dann zeigt sich allerdings, dass die Elementgehalte nicht absondern vielmehr zunehmen. Bei den Filtratproben vom August 2003 fallen vor allem die hohen W- und U-Konzentrationen auf.



**Abb. 3-33** Vergleich der Sc-normierten Medianwerte der Chrom-Konzentrationen in den Sedimenten (Oktober 1992, Oktober 1995, Oktober 1998, September 2002, August 2003)



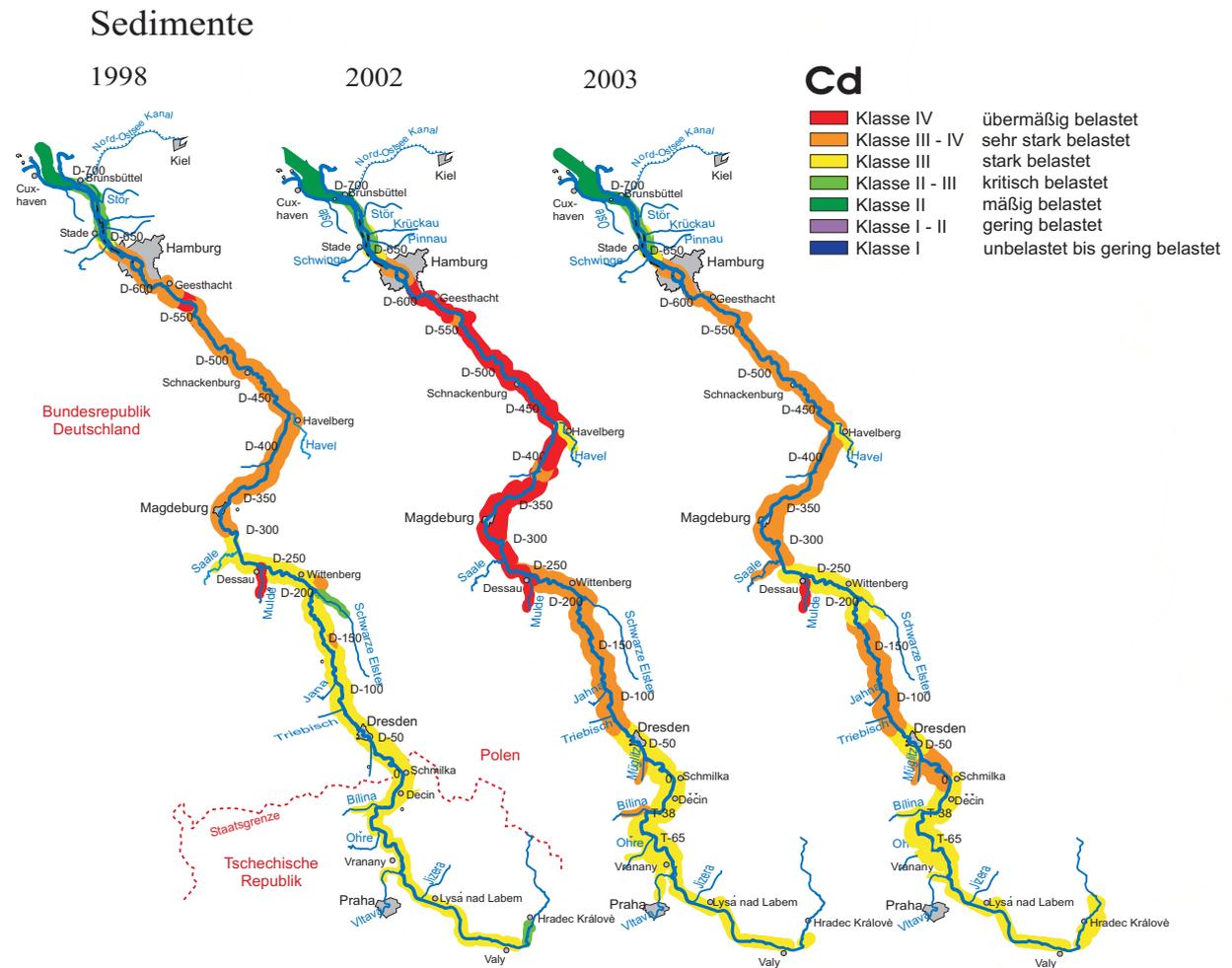
**Abb. 3-34** Vergleich der Sc-normierten Medianwerte der Zink-Konzentrationen in den Sedimenten (Oktober 1992, Oktober 1995, Oktober 1998, September 2002, August 2003)



**Abb. 3-35** Vergleich der Sc-normierten Medianwerte der Wolfram-Konzentrationen in den Sedimenten (Oktober 1992, Oktober 1995, Oktober 1998, September 2002, August 2003)

Betrachtet man die Entwicklung der Elementgehalte in der Elbe zusammenfassend und vergleicht sie mit den Konzentrationen der früheren Untersuchungen, scheint der abnehmende Trend entweder abzuflachen oder gestoppt zu sein. Das könnte zwar daran liegen, dass die Konzentrationen im neuen Jahrtausend schon ein sehr niedriges Niveau erreicht hatten. Jedoch liegen die Konzentrationen zumindest einiger am Feststoff gebundenen Elemente im August 2003 wieder höher als 2002. Z. B. waren die Median-Werte der Konzentrationen von Zn, Cd, W und Bi (s.a. Tab. 3-15) in den Oberflächensedimenten im August 2003 höher als 2002 und 1998. Da diese Befunde jedoch aus einer Kampagne mit ungewöhnlichen hydro- und biologischen Verhältnissen und zum Teil mit Hilfe einer Normierung der Elementgehalte zustande kamen, ist es sinnvoll die Entwicklung der Gehalte relevanter Elemente auch in Zukunft zu beob-

achten. Ein weiterer Grund, die Entwicklung der Qualität des Elbewassers weiterhin zu untersuchen, ist, dass die meisten beprobten Nebenflüsse und Einleiter immer noch hoch belastet sind.



**Abb. 3-36** Belastung der Elbesedimente mit Cadmium (Oktober 1998, September 2002 und August 2003) nach dem Klassifizierungssystem der LAWA