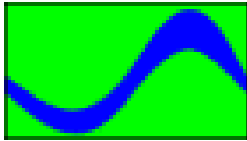


**Quantifizierung sohlhöhenrelevanter
Feststofftransportprozesse
in der Elbe**

Bundesanstalt für Gewässerkunde



Quantifizierung sohlhöhenrelevanter Feststofftransportprozesse in der Elbe

Abschlussbericht der Teilprojekte
II.3 „Suspendierte Feststofffracht“ und
I.6: „Hydrologisches-Feststoff-Bilanz-Modell (HFBM)“
des Verbundvorhabens „*Morphodynamik der Elbe*“

Dieses Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums
für Bildung und Forschung (BMBF) unter dem
Förderkennzeichen 0339566 gefördert.

Projektpartner:

Dr. E. Gölz
Dr.-Ing. A. Schmidt (bis 09/99)
Bundesanstalt für Gewässerkunde
Kaiserin-Augusta-Anlagen 15-17
56068 Koblenz
Außenstelle Berlin
Schnellerstraße 140
12439 Berlin

Bearbeitung:

Dipl.-Phys. W. Sauer

Koblenz/Berlin, September 2000

BfG-1307

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1 Veranlassung und Zielsetzung	1
2 Untersuchungsprogramm	2
2.1 Konzeptionelle Überlegungen	2
2.2 Parameter	3
2.3 Datenbasis	3
2.4 Untersuchungsraum	4
3 Untersuchungsmethoden für die Naturmessungen	5
3.1 Feststoffkonzentration	5
3.2 Kornverteilung des suspendierten Sandes	5
3.3 Strömungsgeschwindigkeit	5
3.4 Trübung	6
3.5 Sohlschubspannung	7
3.6 Fehlerabschätzung für suspendierte Sandproben	9
4 Ergebnisse	10
4.1 Hydraulische Parameter	10
4.1.1 Querschnittsgemittelte Fließgeschwindigkeiten	10
4.1.2 Vertikalprofile der Strömungsgeschwindigkeit	12
4.1.3 Sohlschubspannung / Sohlschubspannungsgeschwindigkeit	14
4.2 Schwebstoffverteilung	16
4.2.1 Feinschwebstoff ($d < 63 \mu\text{m}$)	16
4.2.2 Suspendierter Sand ($d > 63 \mu\text{m}$)	18
4.2.3 Kornverteilung des suspendierten Sandes	19
4.2.4 Schwebstoffzahl z	22
4.2.5 Suspensionsbeginn und kritische Sohlschubspannung	25
4.3 Quantifizierung des Bett bildenden Anteils des suspendierten Sandes	26
4.4 Transport-Abfluss-Beziehungen für Geschiebe und suspendierten Sandes	29
4.5 Das Hydrologische-Feststoff-Bilanz-Modell (HF ₂ BM) - Aufbau und Nutzungsmöglichkeiten	32
4.6 Anwendung des HF ₂ BM auf den Feststoffhaushalt der Elbe	34
4.6.1 Geschiebe	34
4.6.2 Suspendierter Sand	36
4.6.3 Bett bildende Feststofffrachten	37
5 Zusammenfassung	39
6 Verzeichnis der Symbole und Einheiten	40
7 Literatur	41

Verzeichnis der Abbildungen

Abb. 1:	Einsatz der Kleinflügelmesseinrichtung an der Messstelle Mühlberg	6
Abb. 2:	Einsatz der Trübungsmesseinrichtung bei Belgern	7
Abb. 3:	Einsatz der Schubspannungsmesseinrichtung bei Wittenberg	8
Abb. 4:	Mittlere Geschwindigkeit über dem Abfluss für die Messstellen Dresden (km 57,8), Mühlberg (km 126,6) und Belgern (km 141,0)	10
Abb. 5:	Mittlere Geschwindigkeit an den Elbe-Messstellen für ausgewählte Abflüsse	11
Abb. 6:	Ermittlung des Chézy-Koeffizienten für drei Messquerschnitte der Erosionstrecke	12
Abb. 7:	Ausgewählte Vertikalprofile der Strömungsgeschwindigkeit in der Elbe	13
Abb. 8:	Sohlschubspannungen für die Messstellen Schmilka (km 2,58), Mühlberg (km 126,6) und Wittenberg (km 214,8)	15
Abb. 9:	Längsschnitt der Sohlschubspannung im Flussmittbereich zwischen Schmilka und Magdeburg für ausgewählte Abflüsse	16
Abb. 10:	Vertikalverteilung der Konzentration von Feinschwebstoff bei Torgau für mehrere Messlotrechten	17
Abb. 11:	Vertikalverteilung der Trübung an den Messstellen Mühlberg, Belgern und Wittenberg für jeweils mehrere Messlotrechten	17
Abb. 12:	Vertikalprofile der Konzentration des suspendierten Sandes für die Elbe-Messstellen Dresden, Aken und Neu Darchau	18
Abb. 13:	Korngrößen-Summenkurven des suspendierten Sand an der Messstelle Wittenberg	20
Abb. 14:	Vertikalprofile der Sandfraktionen an der Messstelle Wittenberg	20
Abb. 15:	Konzentration von Sandfraktionen an der Messstelle km 321,0 (Magdeburg) a) $Q= 333 \text{ m}^3/\text{s}$ (linkes Bild)	21
	b) $Q= 1219 \text{ m}^3/\text{s}$ (rechtes Bild)	21
Abb. 16:	Vertikalprofile des suspendierten Sandes bei Mühlberg für 3 Messlotrechten	22
Abb. 17:	Vertikalprofile für Fraktionen des suspendierten Sandes an der Messstelle km 321,0 (Magdeburg)	23
Abb. 18a (links):	Differenz der sohl nahen und oberflächennahen Sandkonzentration am Querschnitt Mühlberg in Abhängigkeit von der Sohlschubspannungsgeschwindigkeit	25
Abb. 18b (rechts):	Berechnete Sohlschubspannungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abfluss für den Querschnitt Mühlberg und kritische Sohlschubspannungsgeschwindigkeit nach Abb. 18a	25
Abb. 19:	Querprofil der berechneten Sohlschubspannungsgeschwindigkeiten, Elbe-km 126,6 (Mühlberg)	26
Abb. 20:	Transport der Anteile des suspendierten Sandes an der Messstelle Schöna/Schmilka	27
Abb. 21:	Prozentualer Anteil des suspendierten Sohlmaterials am gesamten suspendierten Sand für die Messstellen Belgern, Wilkenstorf und Neu Darchau	28
Abb. 22:	Anteil des suspendierten Bettmaterials am Gesamttransport des suspendierten Sandes in der Elbe zwischen Schöna (km 2,6) und Neu Darchau (km 536,2) für verschiedene Abflüsse	29

Abb. 23: Ablaufschema zum HFBM	32
Abb. 24: Beispiel zur Oberfläche der Software des HFBM	33
Abb. 25: Mittlere jährliche Geschiebefrachten, Frachtdifferenzen und Sohlhöhenänderungen für den Elbeabschnitt Pirna-Magdeburg auf der Basis der Abflussjahre 1987-98	35
Abb. 26: Berechnete Jahresfrachten des suspendierten Sandes der Elbe in den Abflussjahren 1987 und 1991	37
Abb. 27: Mittlere jährliche Bett bildende Feststofffracht	38

Verzeichnis der Anlagen

- Anlage 3.1: Schubspannungsmesssystem
- Anlage 3.2: Vertikalverteilung des Glühverlustes von Sandproben
- Anlage 3.3: Konzentration des suspendierten Sandes in Abhängigkeit von der Pumpen-Förderleistung
- Anlage 4.1: Querschnittsgemittelte Geschwindigkeiten als Funktion des Abflusses, Elbe-km 2,6-155,0
- Anlage 4.2: Querschnittsgemittelte Geschwindigkeiten als Funktion des Abflusses, Elbe-km 185,0-329,8
- Anlage 4.3: Querschnittsgemittelte Geschwindigkeiten als Funktion des Abflusses, Elbe-km 345,4-569,1
- Anlage 4.4: Tabelle der Funktionen für die querschnittsgemittelten Geschwindigkeiten
- Anlage 4.5: Vertikalprofil der Strömungsgeschwindigkeit (Standard-Messflügel)
- Anlage 4.6: Vertikalprofil der Strömungsgeschwindigkeit (Mehrflügelanordnung)
- Anlage 4.7: Berechnete Sohlschubspannungen als Funktion des Abflusses, Elbe-km 2,6-155,0
- Anlage 4.8: Berechnete Sohlschubspannungen als Funktion des Abflusses, Elbe-km 167,8-329,8
- Anlage 4.9: Berechnete Sohlschubspannungen als Funktion des Abflusses, Elbe-km 345,4-536,2
- Anlage 4.10: Tabelle der Funktionen für die Sohlschubspannung
- Anlage 4.11: Längsschnitt der Sohlschubspannung im Flussmittenbereich
- Anlage 4.12: Oberflächennahe Konzentration des suspendierten Sandes im Elbe-Längsverlauf
- Anlage 4.13: Sohlennahe Konzentration des suspendierten Sandes im Elbe-Längsverlauf
- Anlage 4.14: Verteilung des suspendierten Sandes im Messquerschnitt
- Anlage 4.15: Korngrößen-Summenkurve, suspendierter Sand, Wilkenstorf, $Q = 1305 \text{ m}^3/\text{s}$
- Anlage 4.16: Korngrößen-Summenkurven, suspendierter Sand, Aken, $Q = 1720 \text{ m}^3/\text{s}$
- Anlage 4.17: Korngrößen-Summenkurven, suspendierter Sand, Torgau, $Q = 492 \text{ m}^3/\text{s}$
- Anlage 4.18: Vertikalverteilung von Fraktionen des suspendierten Sandes, Magdeburg, $Q = 331 \text{ m}^3/\text{s}$
- Anlage 4.19: Vertikalverteilung von Fraktionen des suspendierten Sandes, Wilkenstorf, $Q = 571 \text{ m}^3/\text{s}$
- Anlage 4.20: Vertikalverteilung von Fraktionen des susp. Sandes, Wilkenstorf, $Q = 1305 \text{ m}^3/\text{s}$
- Anlage 4.21: Vertikalverteilung von Fraktionen des susp. Sandes, Schnackenburg, $Q = 1370 \text{ m}^3/\text{s}$
- Anlage 4.22: Koeffizienten der Transport-Abfluss-Beziehungen des Bett bildenden Anteils des suspendierten Sandes für die Elbe
- Anlage 4.23: Funktionen für den prozentualen Anteil des suspendierten Sohlmaterials am Gesamttransport des suspendierten Sandes
- Anlage 4.24: Koeffizienten und Parameter der Transport-Abfluss-Beziehungen des Geschiebes für die Elbe
- Anlage 4.25: Koeffizienten und Parameter der Transport-Abfluss-Beziehungen des Gesamt-schwebstoffes für die Elbe
- Anlage 4.26: Koeffizienten und Parameter der Transport-Abfluss-Beziehungen des suspendierten Sandes für die Elbe

- Anlage 4.27: Transport-Abfluss-Beziehungen für den suspendierten Sand,
Elbe-km 2,6-155,0
- Anlage 4.28: Transport-Abfluss-Beziehungen für den suspendierten Sand,
Elbe-km 167,85-327,0
- Anlage 4.29: Transport-Abfluss-Beziehungen für den suspendierten Sand,
Elbe-km 332,2-536,2

1 Veranlassung und Zielsetzung

Vertrauenswürdige Aussagen hinsichtlich der Beurteilung des aktuellen morphologischen Zustandes Elbe wie auch der Prognose zukünftiger Erosions- bzw. Anlandungstendenzen setzen die zuverlässige Quantifizierung nicht nur des Geschiebetransports, sondern auch des Feststoffanteils voraus, der nur zeitweise mit der Sohle im Austausch steht, jedoch zu einem erheblichen Maße zur Sohlbildung beiträgt. Der Ermittlung dieses Anteils kommt gerade an der Elbe besondere Bedeutung zu, da im gesamten Verlauf der deutschen Elbe Sandfraktionen einerseits in erheblichem Umfang Bestandteil des Sohlenmaterials sind, andererseits die Frachten des suspendierten Sandes diejenigen des Geschiebes teilweise deutlich übersteigen (BAW & BFG 1996, SCHMIDT 1996).

Bisher konnte dieser Anteil jedoch allenfalls grob abgeschätzt werden, da über die komplexen Zusammenhänge noch zu wenig bekannt ist. Ziel des Teilprojektes „Suspendierte Feststofffracht“ war es, auf der Grundlage umfangreicher Naturuntersuchungen Aufschluss über Bedingungen und Wirkungsweisen der in diesem Übergangsbereich sich abspielenden Prozesse zu erlangen und Ansätze zu entwickeln, die es erlauben, sämtliche sohlhöhenrelevanten Feststoffkomponenten zuverlässig quantifizieren zu können.

Im Rahmen des Teilprojektes „Hydrologisches-Feststoff-Bilanz-Modell (HFBM)“ sollten für das in der BfG vorbereitete Bilanzmodell aus den Ergebnissen der an der Elbe durchgeführten Geschiebe- und Schwebstoffmessungen Transport-Abfluss-Beziehungen ermittelt werden und diese zusammen mit anderen Elbe-Parametern in das Modell implementiert werden. Die abschnittsweise Berechnung der Frachten des Geschiebes sowie des für die Bettbildung bedeutsamen Anteils der suspendiert transportierten Sandfracht und die daraus resultierenden Bilanzen (Überschüsse, Defizite) ermöglichen die Abgrenzung von Erosions- und Akkumulationsstrecken, Aussagen zur Sohlentwicklung sowie die Volumenvorgabe für eine Geschiebebewirtschaftung.

Innerhalb des gesamten Verbundprojekts ordnen sich diese Teilprojekte zur Analyse morphodynamischer Prozesse als Grundlagenuntersuchungen für die Prognose zukünftiger Entwicklungen ein. Enge Verbindungen bestehen zu den Teilprojekten TPI.3 (Wasserspiegellagen und Feststofftransport), TPII.1 (Physikalische Modelle), TPII.2 (Hydrologisch-morphologische Prognose), die neben orts- und abflussbezogenen Werten zu Geschiebe- und Schwebstofftransportraten auch Angaben zur Sohlbildungsrelevanz der suspendierten Fraktionen für die unterschiedlichen Randbedingungen (Sohlzusammensetzung, Abflusssituation) benötigen. Für die Beantwortung ökomorphologischer Fragestellungen kommt dem Teilprojekt besondere Bedeutung zu, da die Besiedlung des Lebensraumes ‘Flusssohle’ unmittelbar von den dort anzutreffenden Bedingungen (Korngrößenverteilung von Sohle und Geschiebe, sohlnaher Schwebstoffanteil, Dynamik des Geschiebetransports und der sohlnah transportierten Sandfraktionen, Lichtklima, Transportkörper) und deren Stabilität (zeitliche und räumliche Varianz) abhängt.

2 Untersuchungsprogramm

2.1 Konzeptionelle Überlegungen

Aus dem Ansatz zur Ermittlung des auf eine Breitereinheit bezogenen Transports m_s des suspendierten Feststoffes

$$m_s = \int_0^h c(y) v(y) dy \quad (1)$$

ist sofort ersichtlich, dass die Kenntnis der Konzentrations- und Geschwindigkeits-vertikalverteilungen $c(y)$ und $v(y)$ mitsamt ihrer Beziehungen und Korrelationen zu anderen hydraulischen und sedimentologischen Parametern von zentraler Bedeutung für die Aufgabenstellung und die Auswahl der Messparameter ist (s. Kap. 2.2).

Die Frage nach dem Anteil des in Suspension befindlichen Bettmaterials des Flusses erweist sich als Frage der Separierung der Konzentrationsverteilung $c(y)$ dieses Anteils von dem Dauerschwebstoff der wash load. Nach den unten aufgeführten Ergebnissen kann die Abgrenzung zum Dauerschwebstoff nicht einfach über einen Korndurchmesser (z.B. $d > 63 \mu\text{m}$) erfolgen, sondern muss durch die in der Sohle vorkommende kleinste Kornfraktion und durch das (zumindest zeitweise) Überschreiten kritischer hydraulischer Bedingungen für den Übergang dieser Kornfraktion in Suspension beschrieben werden.

Entscheidende Größen für den Übergang eines Kornes in Suspension sind die aufwärts gerichtete Komponente des turbulenten Strömungsfeldes und die ihr entgegengesetzte Sinkgeschwindigkeit v_s . Da die vertikale Turbulenzintensität nach van Rijn (1993) die gleiche Größenordnung wie die Sohlschubspannungsgeschwindigkeit v_0^* annimmt, kann der für den Suspensionsbeginn kritische hydraulische Zustand durch den Quotienten v_0^*/v_s definiert werden. Dieser Quotient wird von mehreren Autoren (BAGNOLD 1966, ENGELUND 1965, van RIJN 1993, ZANKE 1982) mit $v_0^*/v_s = 0,25 \dots 1$ quantifiziert.

Ein anderer – in dieser Arbeit für die Ermittlung des suspendierten Bettmaterials gewählter – Weg zur Beschreibung des Suspensionsbeginns führt über das sich ausbildende vertikale Konzentrationsprofil des suspendierten Sandes. Unter der Annahme einer Vertikalverteilung nach Rouse (ROUSE 1937) für eine Referenzkonzentration c_a am Punkt a

$$\frac{c(y)}{c_a} = \left(\frac{h-y}{y} \frac{a}{h-a} \right)^z \quad \text{mit } z = v_s / \beta \kappa v_0^* \quad (2)$$

kann man die Schwebstoffzahl z zur Unterscheidung zwischen dem Transport von Geschiebe, suspendiertem Bettmaterial und Spülfracht benutzen. Je kleiner z ist, desto gleichmäßiger ist der Schwebstoff über die Vertikale verteilt und umgekehrt wird der Transport in unmittelbarer Sohlnähe durch einen großen z -Wert beschrieben. Wang und Dittrich erhalten aus ihren Untersuchungen (WANG UND DITTRICH 1992) $z < 0,06$ als Kriterium für den Transport von Spülfracht, $0,1 < z < 3$ für den Transport von suspendiertem Bettmaterial und $z > 5$ als Kriterium für den Geschiebetransport.

Daher sind für eine mathematische Beschreibung der Prozesse neben den zentralen Parametern Fließgeschwindigkeit und Konzentration weitere Parameter wie Sohlschubspannungsgeschwindigkeit, Sinkgeschwindigkeit und Schwebstoffzahl zu ermitteln.

2.2 Parameter

Den Überlegungen aus Pkt. 2.1 folgend wurden für die Beschreibung der Resuspensions-, Sedimentations- und Transportvorgänge folgende Parameter für die Untersuchungen ausgewählt:

sedimentologische Parameter:

- Korngrößenverteilung des suspendierten Sandes (vertikal differenziert)
- Korngrößenverteilung des Sohlenmaterials
- Korngrößenverteilung des Geschiebes

hydraulische Parameter:

- Strömungsgeschwindigkeit (Vertikalverteilung und querschnittsgemittelt)
- Sohlschubspannung bzw. Sohlschubspannungsgeschwindigkeit

Die Verteilung und Bewegung des Sediments charakterisierende Parameter:

- Konzentration des suspendierten Sandes bzw. der suspendierten Schwebstoffe (Vertikalverteilung)
- Feststofftransport des suspendierten Sandes bzw. der suspendierten Schwebstoffe
- Feststofftransport des Geschiebes (für Teilprojekt HFBM).

Die für Suspensions- bzw. Sedimentationsprozesse wichtige Größe der Sinkgeschwindigkeit der Sandpartikel wird mit Hilfe der Sanddichte berechnet. Aus den Messungen zur Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit können zusätzlich zu den oben genannten Parametern die äquivalenten Sand- oder die Gesamtrauheiten berechnet bzw. abgeschätzt werden. Die nicht sohlrelevanten feineren Schwebstofffraktionen werden nur hinsichtlich ihrer Konzentrationsverteilung erfasst, Messungen ihrer Dichte sowie der Partikelgrößen- und Sinkgeschwindigkeitsverteilungen wurden – da im Rahmen des Untersuchungsziels nicht relevant – nicht durchgeführt.

2.3 Datenbasis

Zur Auswertung standen folgende unabhängig vom Teilprojekt erhobenen Daten zur Verfügung:

- die ab 1995 von der BfG durchgeführten Schwebstoff- und Geschwindigkeitsmessungen (3 bis 6 Messlotrechten mit jeweils 4 Messtiefen pro Querschnitt) für insgesamt ca. 20 Messquerschnitte der Elbe,
- von der BfG durchgeführten Untersuchungen zur Kornverteilung der Elbesohle (BFG 1994, SCHMIDT 1996),
- die von der BfG durchgeführten Messungen zum Transport und zur Kornverteilung des Geschiebes an der Elbesohle,
- die von den Wasser- und Schifffahrtsämtern durchgeführten Geschwindigkeits- und Abflussmessungen,
- von der BAW bereitgestellte Daten zum Wasserspiegelgefälle.

Zur Ergänzung und Erweiterung dieser Datenbasis wurden im Rahmen dieses Teilprojektes eine große Zahl zusätzlicher Messungen (ausgewählte Schwebstoff- und Geschwindigkeitsvertikalprofile, Schubspannungsmessungen, Siebanalysen von Sohlproben und von suspendiertem Sand) durchgeführt.

2.4 Untersuchungsraum

Die Festlegung des Untersuchungsraumes erfolgte nach folgenden Gesichtspunkten:

- In den Vertikalprofilen der Konzentration des suspendierten Sandes soll im sohlnahen Bereich - zumindest bei höheren Abflüssen - auch eine sohlnah erhöhte Sandkonzentration als Hinweis für einen Resuspensions- bzw. Sedimentationsprozess zu finden sein.
- Für die Interpretation der Messergebnisse und eine spätere mathematische Modellierung ist ein regelmäßiges Profil mit guten Korrelationen zwischen Abfluss und anderen hydraulischen Größen vorteilhaft.
- Für die Ermittlung von Bilanzen der suspendierten Sandfraktion und für die Zuordnung von hydraulischen Parametern sollten im untersuchten Elbabschnitt mindestens zwei geeignete Messstellen existieren, zwischen denen keine größeren Zuflüsse oder Einleiter existieren.

Entsprechend diesen Forderungen und nach Auswertung eines Teils der verfügbaren Daten erwies sich die so genannte Erosionsstrecke zwischen Mühlberg (km 126,6) und Wittenberg (km 214,8) insbesondere hinsichtlich einer hohen Konzentration sohlnah suspendierten Sandes als Untersuchungsgebiet gut geeignet.

Darüber hinaus bietet der Querschnitt Mühlberg auf Grund seiner geometrischen Regelmäßigkeit gute Korrelationen zwischen den hydraulischen Größen (s. Kap. 4.1.1) und somit gute Voraussetzungen für mathematische Ansätze und Simulationen.

Für einen Teil der Parameter wurden insbesondere im Zeitraum 1/00 bis 9/00 im Rahmen einer Verlängerung (Aufstockung) der beiden BfG-Teilprojekte die Untersuchungen und Auswertungen auch auf die BfG-Messstellen außerhalb des o.g. Untersuchungsgebietes ausgedehnt.

3 Untersuchungsverfahren für die Naturmessungen

3.1 Feststoffkonzentration

Zur Bestimmung von Vertikalverteilungen der Konzentration des suspendierten Sandes wird an einer oder mehreren Lotrechten im Profil jeweils in 5 bis 7 verschiedenen Tiefenstufen (BfG-Standard-Vielpunktmessung: 4-6 Messlotrechte mit je 4 Tiefenstufen) durch Pumpen eine definierte Wasserprobe (50 l) entnommen, aus der mittels eines 63 µm- Siebes die Sandfraktion separiert und anschließend in ein Papierfilter mit bekannter Leermasse gespült wird. Das mit der Sandprobe beladene Papierfilter wird im Trockenschrank mindestens 12 Stunden bei 90 °C getrocknet und danach unter definierten Umgebungsbedingungen gewogen.

Die Konzentration des Feinschwebstoffes (< 63 µm) wird über die Filtration von 4 l einer durch das 63 µm- Sieb geleiteten Wasserprobe mit anschließender Trocknung und Wägung des Filters ermittelt (DVWK 1986).

3.2 Kornverteilung des suspendierten Sandes

Zur Bestimmung der Kornverteilung des suspendierten Sandes wird aus entsprechend großen Wasserproben (je nach aktueller Konzentration einige Hundert Liter bis einige Kubikmeter) wie in 3.1 mittels eines 63 µm-Siebes der Sand gewonnen und nach Trocknung (105 °C, 24 h) und Glühen (550 °C, 60 min) - ebenso wie die Sohl- und Geschiebeprouben - einer Siebanalyse unterzogen. Zur Erreichung einer hinreichenden Genauigkeit bei der Siebanalyse wurden Sandmengen von mindestens 5 Gramm angestrebt, was mit den vorhandenen Pumpen zu Messzeiten von ca. 8 Stunden oder mehr für eine einzelne Vertikalverteilung führen kann. Zur Reduzierung dieser Zeit wurde für die Messungen ab 4/98 eine leistungsfähige Jabsco-Impellerpumpe eingesetzt, die gegenüber den bisher verwendeten Pumpen zusätzlich den Vorteil der Betriebsmöglichkeit ohne Vorfilter hatte.

3.3 Strömungsgeschwindigkeit

Bei den Messungen zur Vertikalverteilung der Strömungsgeschwindigkeit wurden analog zu den Konzentrationsmessungen an einer oder mehreren Lotrechten im Profil jeweils in 5 bis 7 verschiedenen Tiefenstufen die Geschwindigkeiten mit Messflügeln und bei einigen Messungen zusätzlich auch mit einer magnetisch-induktiven Sonde ermittelt.

Zur genaueren Bestimmung des sohnahen Profils wurde bei einer Messkampagne eine bereits im Rhein erprobte Mehrfach-Kleinflügelanordnung der BfG (5 hydrometrische Kleinflügel mit je 10 cm Abstand übereinander angeordnet) eingesetzt, die einen Minimalabstand von ca. 5 cm zur Sohle erlaubt (Abb. 1). Eine analog aufgebaute Mehrfachanordnung von magnetisch-induktiven Geschwindigkeitssonden (Nautilus, Fa. Ott) wurde bei diesen Messungen erprobt.

Zur besseren Charakterisierung des sohnahen Strömungsfeldes und wegen des Gültigkeitsbereichs der Auswerteformeln wurde für die Mehrzahl der Messpunkte der normierte Sohlabstand im Bereich $y/h < 0,6$ gewählt.

Zur Auswertung standen auch die Strömungsgeschwindigkeitswerte der BfG-Vielpunktmessungen zum Feststofftransport (4-6 Messlotrechte mit je 4 Tiefenstufen pro Messquerschnitt) zur Verfügung.



Abb. 1: Einsatz der Kleinflügelmesseinrichtung an der Messstelle Mühlberg

3.4 Trübung

Für die Trübungsmessung wurden die nach dem 90°-Streulichtverfahren arbeitenden Tauchsonden 7530 SSN der Fa. Staiger-Mohilo und WP-302 von BTG zusammen mit den zugehörigen Auswerteeinheiten sowie entsprechender Datenaufzeichnungstechnik (Datenlogger, Laptop) eingesetzt. Wie aus Abb. 2 ersichtlich ist, wurden beide Messsonden an einem schweren Tauchkörper fixiert (BTG-Wischersonde links) und mit Hilfe eines Kranauslegers in verschiedene Messtiefen in die Elbe hinabgelassen. Zur Stabilisierung und Ausrichtung wurde der Tauchkörper zusätzlich mit einer Flosse versehen. Unmittelbar über der Staiger-Mohilo-Trübungssonde (rechts) befand sich ein Saugrohr, über welches zeitgleich zur Trübungsmessung Wasserproben für eine Schwebstoffmessung entnommen wurden. Pro Tiefenmesspunkt wurde das Trübungssignal alle 1-2 Sekunden über zumeist 2 Minuten aufgezeichnet und bei der späteren Auswertung gemittelt. Dadurch war es auch möglich, kurzzeitige starke Abweichungen (z.B. durch Blatteile o.ä.) zu eliminieren.



Abb.2: Einsatz der Trübungsmess-einrichtung bei Belgern

3.5 Sohlschubspannung

Neben der in 4.1.3 beschriebenen indirekten rechnerischen Ermittlung der Sohlschubspannung wurde eine in der ehemaligen Versuchsanstalt für Wasser- und Schiffsbau (jetzt TU Berlin) entwickelte Anordnung zur direkten Messung der an der Sohle angreifenden Kraft in der Elbe im Rahmen von zwei Messkampagnen (9/97 und 10/98) eingesetzt.



Abb. 3: Einsatz der Schubspannungsmesseinrichtung bei Wittenberg

Das Schubspannungsmesssystem (s. Abb. 3) besteht aus einem als stabiles Rohrgestell ausgebildeten Geräteträger mit Sensoren für Messtiefe, Strömungsgeschwindigkeit und Neigung und dem eigentlichen Schubspannungsmessgerät (s. Anl. 3.1). Dieses besteht aus einer frei beweglichen Messplatte, die die angreifenden horizontalen und vertikalen Kräfte auf Biegestäbe mit Dehnungsmessstreifen überträgt. Über eine Wheatstonesche Brückenschaltung werden die Kräfte in analoge Spannungswerte umgewandelt, die nach Umwandlung in Digitalwerte von einem Computer aufgezeichnet werden.

Zur Durchführung der Messungen wurden das auf dem Messschiff montierte System an einem Kran zur Sohle der Elbe abgesenkt und die Signale der Messwertgeber über ca. 15 Minuten aufgezeichnet. Die halbautomatische Entfernung einer Schutzabdeckung der Messplatte zu Messbeginn und eventuell über die Messplatte laufendes Geschiebe konnten mit einer Videokamera online beobachtet werden. Bezüglich einer detaillierten Beschreibung des Verfahrens sei auf den ausführlichen Bericht verwiesen (HOHNBERG 1997).

3.6 Fehlerabschätzung für suspendierte Sandproben

Allgemeine Fehlerquellen

Neben subjektiven Fehlern bei der unter 3.1 beschriebenen Gewinnung von Proben des suspendierten Sandes (Volumenbestimmung, Überlaufen des Siebes, Verluste beim Überführen des Sandes in das Papierfilter, Handhabung der Filter u.ä.) können insbesondere bei dem Prozess der Vorbehandlung, Trocknung und Wägung der Papierfilter stärkere Schwankungen auftreten (siehe SCHMIDT 1997).

Im Vergleich zum Feinschwebstoff, dessen Masse meist im Bereich von 5 % der Filtermasse liegt und bei dem diese Probleme häufig auch zu relativ starken Streuungen bei den Konzentrationswerten führen, sind die Konzentrationswerte für den suspendierten Sand auf Grund der größeren Masse des Sandes (≥ 10 % der Filtermasse bei 50 Liter- Proben) von diesen Schwankungen in geringerem Maße betroffen. Wenn die o.g. subjektiven Fehler und äußere Störungen (z.B. Schifffahrt) vermieden werden können, erhält man für die Vertikalprofile des Sandes in der Regel reproduzierbare und eindeutige Verteilungen mit geringer Streuung (ca. ± 10 %).

Organische Bestandteile

Im Regelfall wird der mittels 63 μm - Sieb separierte Sand keiner zusätzlichen Behandlung unterzogen. Für die in den vorliegenden Untersuchungen durchgeführten Siebanalysen wurden die aus mehreren hl Elbwasser gewonnenen Sandproben nach dem Trocknen gewogen, dann einem Glühprozess (s. oben) unterzogen und anschließend wieder gewogen. Der aus der Massendifferenz berechnete Glühverlust betrug im Mittel ca. 27 % der Ausgangsmasse für oberflächennahe Proben und verringerte sich nur für sohlnahe Proben deutlich (siehe Anlage 3.2). Das heißt aber, dass – in Abhängigkeit von Jahreszeit, Abfluss und Probenahmeparametern – durch organische Bestandteile eine zu hohe Sandkonzentration vorgetäuscht wird. Bei Pumpen mit Vorfiltern wird ein Teil dieser organischen Bestandteile zurückgehalten, allerdings fehlen diese Bestandteile dann aber in einer Feststoffbilanz.

Einflüsse durch die Probenahmetechnik

Die Komponenten der Probenahmetechnik können zu systematischen Fehlern führen. Beispielsweise setzt sich das 63 μm - Sieb bei der Probenahme mit zunehmender Zeit zu und hält auch Schluffpartikel zurück, die eine höhere Sandkonzentration vortäuschen.

Umgekehrt kann eine zu geringe Sandkonzentration vorgetäuscht werden, wenn im Schutzfilter der Pumpe infolge Zusetzens Sand zurückgehalten wird oder bei anderen Bauarten im Schutzfiltergehäuse sich Sand ablagert.

Weiterhin muss nach den inzwischen vorliegenden Erfahrungen eine Anpassung des Durchmessers von Ansaugrohr und Saugschlauch an die Förderleistung der Pumpe vorgenommen werden. Neben eventuellen Fehlern (insbesondere im Sohlbereich) bei einer nicht isokinetischen Probenahme am Ansaugrohr spielt das Aussinken bereits angesaugter größerer Sandpartikel im Förderschlauch eine größere Rolle als bisher angenommen. Als Beispiel seien hier vergleichende Vertikalprofilmessungen der Sandkonzentration mit der leistungsstarken Jabsco-Impellerpumpe in Verbindung mit einem ca. 9 m langen 1-Zoll-Saugschlauch für die maximale Förderleistung von ca. 30 l/min und für eine gedrosselte Förderleistung von ca. 8 l/min angeführt (Anlage 3.3). Für den bei den Messungen üblicherweise verwendeten 1/2-Zoll-Saugschlauch wurde dieser Effekt nicht nachgewiesen.

4 Ergebnisse

4.1 Hydraulische Parameter

4.1.1 Querschnittsgemittelte Fließgeschwindigkeiten

Die querschnittsgemittelte Fließgeschwindigkeit $v_{mm} = Q/A$ ist ein wichtiger integraler Parameter zur Charakterisierung der an einer Messstelle vorliegenden hydraulischen Bedingungen und damit auch des Suspensionspotenzials.

Zur Ermittlung von funktionalen Abhängigkeiten zwischen v_{mm} und Q für die Vielpunkt-Schwebstoff- bzw. Abfluss-Messstellen an der Elbe wurden die über einen längeren Zeitraum (1994-1999) vom Messschiff "Elbegrund" (WSA Magdeburg) regelmäßig durchgeführten Abflussmessungen herangezogen. Für jeden Messquerschnitt wurden die mit Hilfe der "Software Q" berechneten v_{mm} -Werte über dem Abfluss dargestellt und mit Hilfe von Regressionen die $v_{mm} = f(Q)$ - Beziehungen in der Form von Potenzfunktionen berechnet.

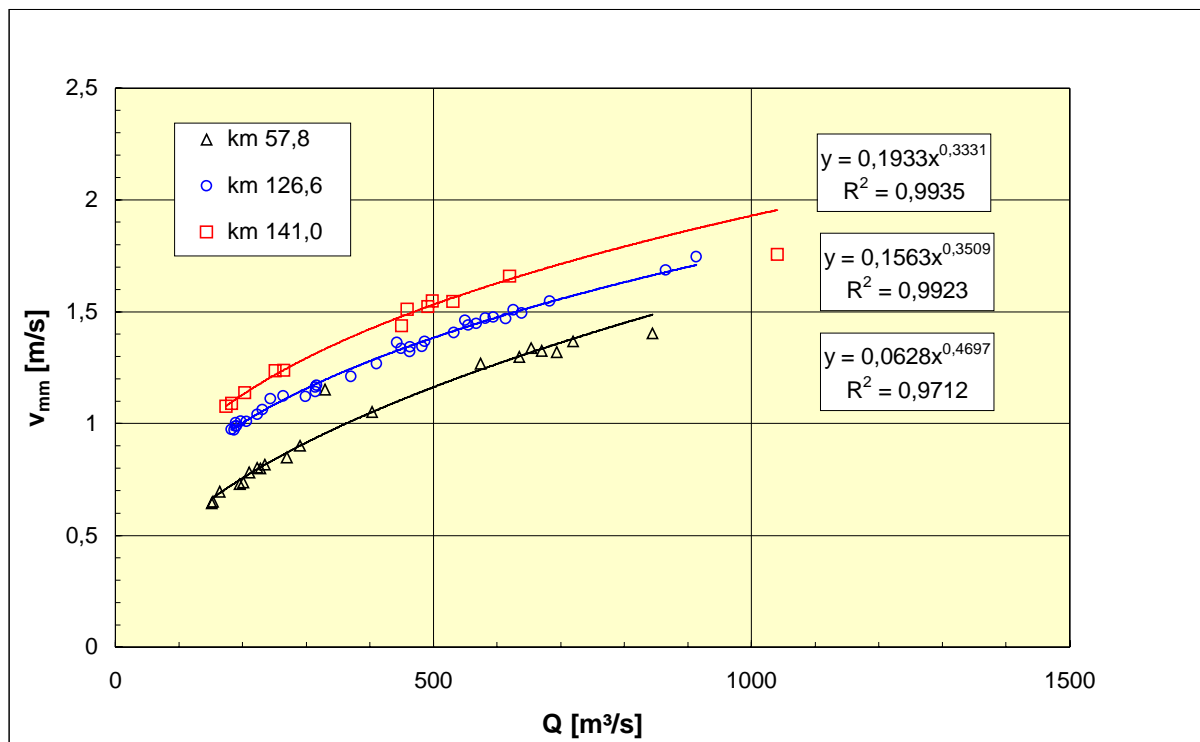


Abb. 4: Mittlere Geschwindigkeit über dem Abfluss für die Messstellen Dresden (km 57,8), Mühlberg (km 126,6) und Belgern (km141,0)

Abbildung 4 zeigt beispielhaft die für die Messstellen Dresden, Mühlberg und Belgern ermittelten Funktionen. Mit Ausnahme weniger Messstellen ergeben sich für den Korrelationskoeffizienten R Werte $> 0,9$, was auf eine allgemein gut gesicherte funktionale Beziehung zwischen den beiden Parametern hinweist. Die Gültigkeit dieser Beziehungen ist naturgemäß nur bis zu bordvollen Abflüssen begrenzt. Messungen bei hohen Abflüssen um MHQ liegen bisher nur an den Messstellen Belgern und Torgau vor, hier sind auch relative Abnahmen von v_{mm} infolge Ausuferungen zu beobachten. Diese Messpunkte wurden nicht in die Regressionsrechnung einbezogen.

Die Anlagen 4.1-4.3 geben einen Überblick über alle für Elbe-Messstellen ermittelten Regressionskurven. Die Koeffizienten der Potenzfunktionen $v_{mm} = AQ^B$ sind in Anlage 4.4 tabellarisch aufgeführt.

Abbildung 5 zeigt den Längsschnitt der mittleren Geschwindigkeit von km 2,5 bis km 569 für 20 Elbe-Messstellen und für drei charakteristische Abflüsse (MNQ, MQ, 2MQ).

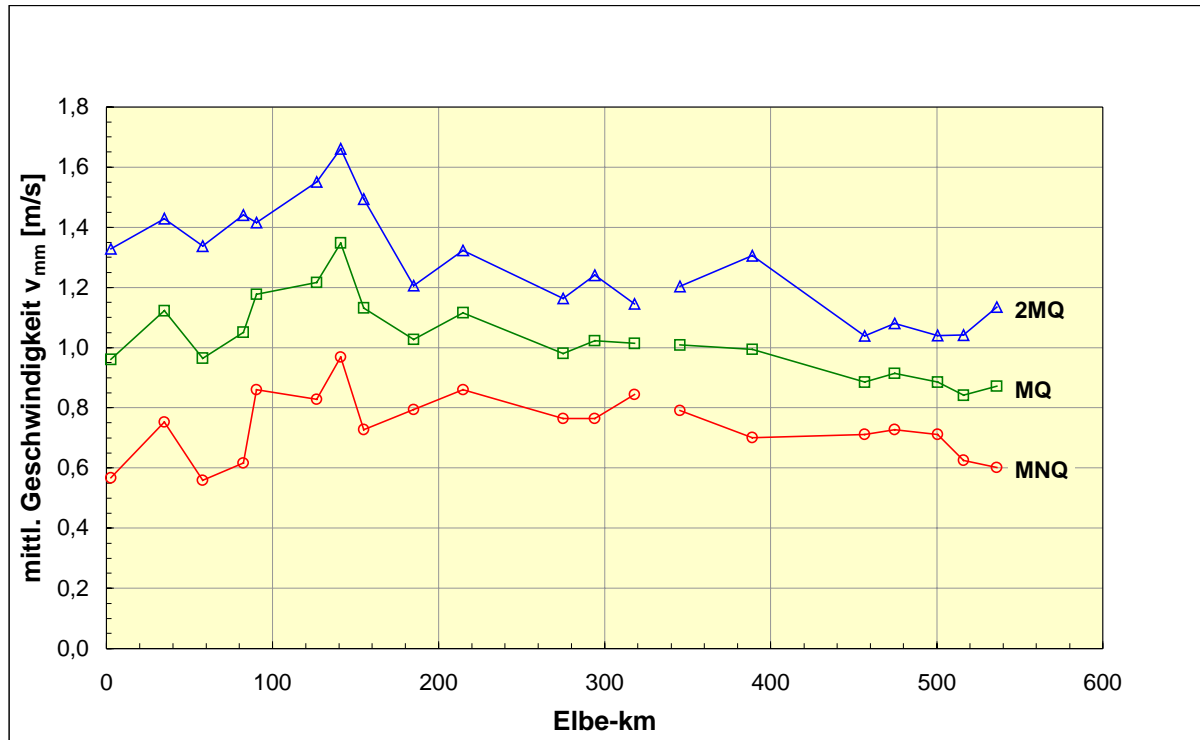


Abb. 5: Mittlere Geschwindigkeit an den Elbe-Messstellen für ausgewählte Abflüsse

Die Stadtstrecke Magdeburg wurde hier ausgeklammert, da sich durch die Stromspaltung und den Domfelsen in diesem Bereich starke Abweichungen gegenüber den anderen Messstellen ergeben. Insgesamt sind bei Mittelwasser an den Messstellen der oberen und mittleren Elbe relativ gleich bleibende mittlere Geschwindigkeiten um 1 m/s zu beobachten - unterbrochen durch einen geringen Anstiegs bei Pirna (km 34,8) und einen Anstieg am Eingang der Erosionsstrecke mit dem Maximum bei Belgern (km 141,0). Im Bereich der unteren Mittelbe (etwa ab km 400) treten - hauptsächlich auf Grund des geringeren Sohlgefälles - etwa um 10-20 % geringere v_{mm} -Werte auf. Mit Hilfe der querschnittsgemittelten Fließgeschwindigkeit und der Fließformel von Chézy wurden für einige Messstellen Abschätzungen der Sohlrauigkeit vorgenommen. Wenn man v_{mm} gegen $(RI)^{1/2}$ aufträgt, so ergibt sich der im Wesentlichen die Gerinnerauigkeit beschreibende Chézy-Koeffizient dann als Anstieg der durch den Nullpunkt führenden linearen Regressionsgleichungen. Abbildung 6 zeigt den für drei Messquerschnitte der Erosionsstrecke auf diese Weise ermittelte Chézy-Koeffizienten, wobei am Querschnitt Mühlberg die für die theoretische Beziehung mit Abstand beste Korrelation gefunden wird.

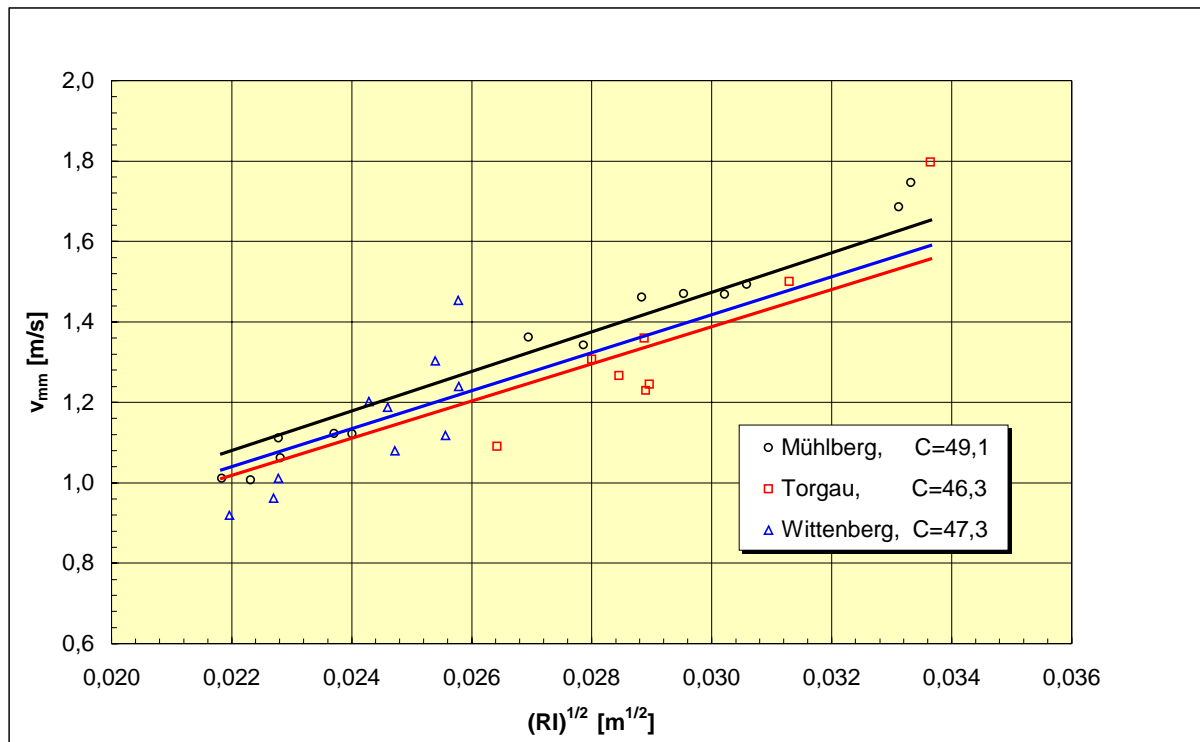


Abb. 6: Ermittlung des Chézy-Koeffizienten C in $m^{1/2}/s$ für drei Messquerschnitte der Erosionstrecke

4.1.2 Vertikalprofile der Strömungsgeschwindigkeit

Zur Charakterisierung des sohnahen Strömungsfeldes und des Kräfteangriffs auf die Sohlpartikel wurden mit verschiedenen Methoden Vertikalprofile der Strömungsgeschwindigkeit ermittelt, und aus diesen die Sohl Schubspannungsgeschwindigkeit berechnet (siehe Kap. 4.1.3).

Im Regelfall ergaben die Messungen die nach dem logarithmischen Wandgesetz für den hydraulisch rauhen Bereich erwarteten logarithmischen Geschwindigkeitsverteilungen mit einem Bestimmtheitsmaß $R^2 > 0,9$ (s. Anlage 4.5), wobei bei der überwiegenden Mehrzahl der Verteilungen auch die oberflächennahen Messpunkte auf der Regressionskurve lagen, die sich aus den Messpunkten mit $y/h < 0,6$ ergab.

Abbildung 7 zeigt Beispiele für mit verschiedenen Messanordnungen an den Messstellen Mühlberg und Wittenberg gemessene Vertikalprofile der Strömungsgeschwindigkeit in halblogarithmischer Darstellung, wobei die drei bei km 126,6 gezeigten Messungen eine Abschätzung der Abweichungen zwischen den Messmethoden zulassen.

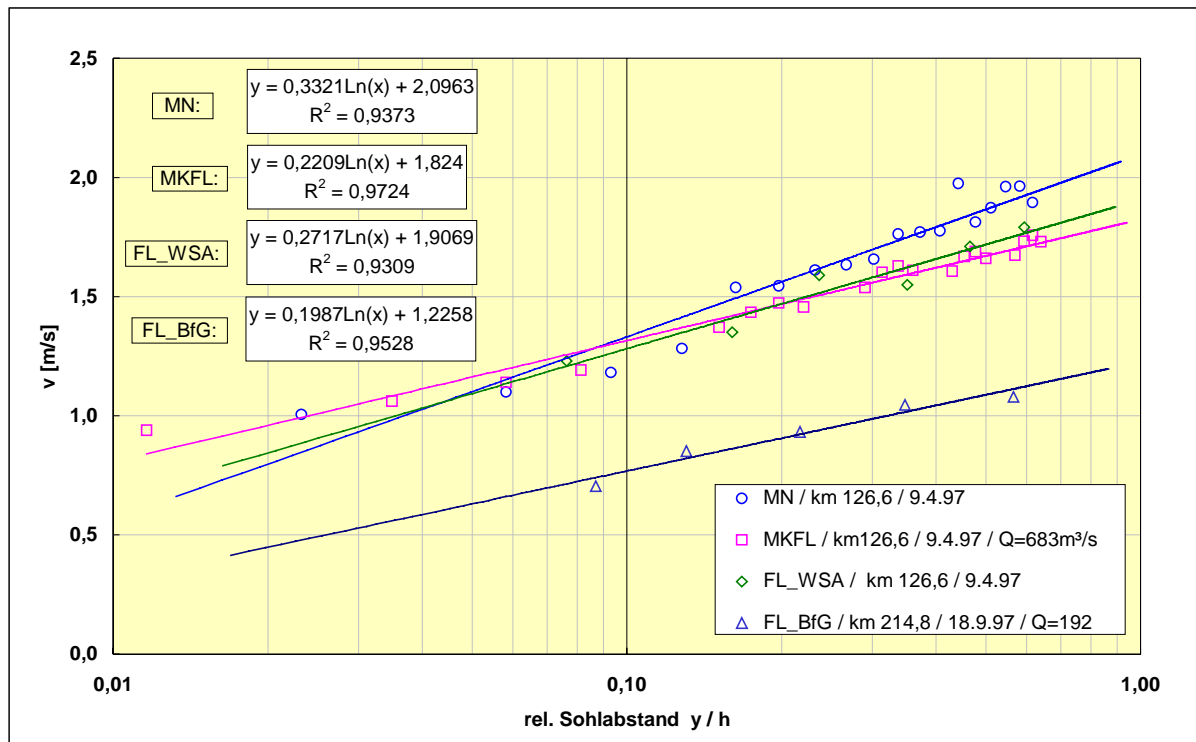


Abb. 7: Ausgewählte Vertikalprofile der Strömungsgeschwindigkeit in der Elbe über dem normierten Sohlabstand in halblogarithmischer Darstellung (FL = Standard- Messflügel, MKFL = Mehrfach- Kleinflügel, MN = Mehrfach- Nautilussonde)

Zur genaueren Bestimmung des sohnnahe Profils wurde bei einigen Messungen die in Kap. 3.3 beschriebene Mehrfach-Kleinflügelanordnung der BfG eingesetzt, die einen Minimalabstand von ca. 5 cm zur Sohle erlaubt und deren Ergebnisse ebenfalls eine logarithmische Geschwindigkeitsverteilung zeigen (Anlage 4.6). Hierbei ergab ein Teil der Messungen leicht unterschiedliche Regressionen, in Abhängigkeit davon, ob nur die untersten (gleichzeitig aufgenommenen) Messpunkte oder alle Messpunkte herangezogen werden. Die Ursache hierfür war messtechnischer Natur, da für die unteren Punkte die Messapparatur mit den Kleinflügeln annähernd senkrecht auf der Sohle stand, während sie bei den weiteren Messpunkten in der Strömung hing und bei dem verwendeten 25 kg-Gewichtskörper eine leichte Schrägstellung wahrscheinlich ist.

Die Erprobung einer Mehrfachanordnung von magnetisch-induktiven Geschwindigkeitssonden (Nautilus, Fa. Ott) zeigte Probleme bei zu starker Annäherung (< 10 cm) der Messsonden untereinander bzw. der untersten Messsonde an die Sohle. Trotz Berücksichtigung dieser Mindestabstände schwankten die Messwerte deutlich stärker als die der hydrometrischen Messflügel, sodass diese Methode bei weiteren Messungen nicht mehr eingesetzt wurde.

Mit dem im Standardfall eingesetzten Messflügel der BfG bzw. des WSV-Messschiffes kann man sich der Sohle bis maximal 20 cm nähern, eine Interpolation bis zur ersten Rauheitsunterschicht bzw. bis zum Abstand k_s (äquivalente Sandrauigkeit) über der Sohle erscheint im vorliegenden Fall einer großen relativen Überdeckung ($h/k_s \gg 5$) aber möglich (s. DITTRICH 1997).

Messungen der Strömungsgeschwindigkeit im aus biologischer Sicht interessanten Bereich < 5cm über der Elbsohle waren mit der verfügbaren Messtechnik nicht realisierbar und hätten darüber hinaus den Umfang der in diesem Projekt geplanten Arbeiten überstiegen. Ein Problem besteht darin, dass die für kleinere Fließgewässer bekannten Messmethoden für sohnnahe Strömungsver-

hältnisse, wie z.B. Mikroflügel (HEILMAIR 1997) oder die FST-Halbkugelmethode (STATZNER UND MÜLLER 1989) nicht problemlos auf große Ströme wie die Elbe übertragen werden können (siehe auch ZWISCHENBERICHT 1998).

4.1.3 Sohlschubspannung/Sohlschubspannungsgeschwindigkeit

Wegen der zentralen Bedeutung der Sohlschubspannungsgeschwindigkeit $v_0^* = (\tau/\rho)^{0,5}$ für den abflussabhängigen Suspensionsbeginn an der Flusssohle wurde dieser Parameter nach verschiedenen Methoden ermittelt.

Die unter 3.6 beschriebene direkte Messung der an der Sohle wirkenden Kraftkomponente in Fließrichtung erfordert in der Praxis einen hohen logistischen, personellen und materiellen Aufwand, sodass sie sich nicht als Routinemessung für mehrere Messquerschnitte und Abflusssituationen eignet.

Deshalb wurden mit Hilfe eigener Auswertprogramme aus den Messdateien der vom WSA Magdeburg seit 1994 durchgeführten ca. 500 Abflussmessungen in der Elbe insgesamt etwa 6000 vertikale Geschwindigkeitsprofile (ca. 12 Messlotrechten pro Abflussmessung) rechenstechnisch ermittelt und aus diesen anschließend die Sohlschubspannungsgeschwindigkeiten berechnet.

Unter der Annahme der Gültigkeit des logarithmischen Wandgesetzes der Geschwindigkeitsverteilung für den hydraulisch rauen Bereich in der Schreibweise (z.B. van RIJN 1990)

$$\frac{v(y)}{v_0^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{y}{y_0} \right) \quad (3)$$

erhält man v_0^* aus dem Anstieg der Regressionsgeraden der halblogarithmischen Darstellung $v = f(y)$ bzw. $f(y/h)$ mit $\kappa = 0,4$. Dabei muss berücksichtigt werden, dass der Gültigkeitsbereich des logarithmischen Wandgesetzes bei naturnahen Fließgewässern nur bis zu normierten Sohlabständen von $y/h = 0,6$ ($h =$ Wassertiefe) angesetzt werden kann (NEZU UND NAKAGAWA 1993).

Aus v_0^* , h und $v_1 = v(y/h = 1)$ lässt sich darüber hinaus auch die äquivalente Sandrauigkeit k_s berechnen.

In einigen Fällen, in denen die vertikal gemittelte Geschwindigkeit v_m bekannt ist, kann v_0^* über die Beziehung

$$\frac{v_m}{v_0^*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(11 \frac{h}{k_s} \right) \quad (4)$$

ermittelt werden (k_s aus der Sohlrauigkeit abgeschätzt und $h \gg k_s$).

Abbildung 8 zeigt für 3 Messquerschnitte beispielhaft die nach Gleichung (3) mit den o.g. vertikalen Geschwindigkeitsprofilen ermittelten Potenzfunktionen für die Abhängigkeit der Sohlschubspannung vom Abfluss im Bereich der Flussmitte.

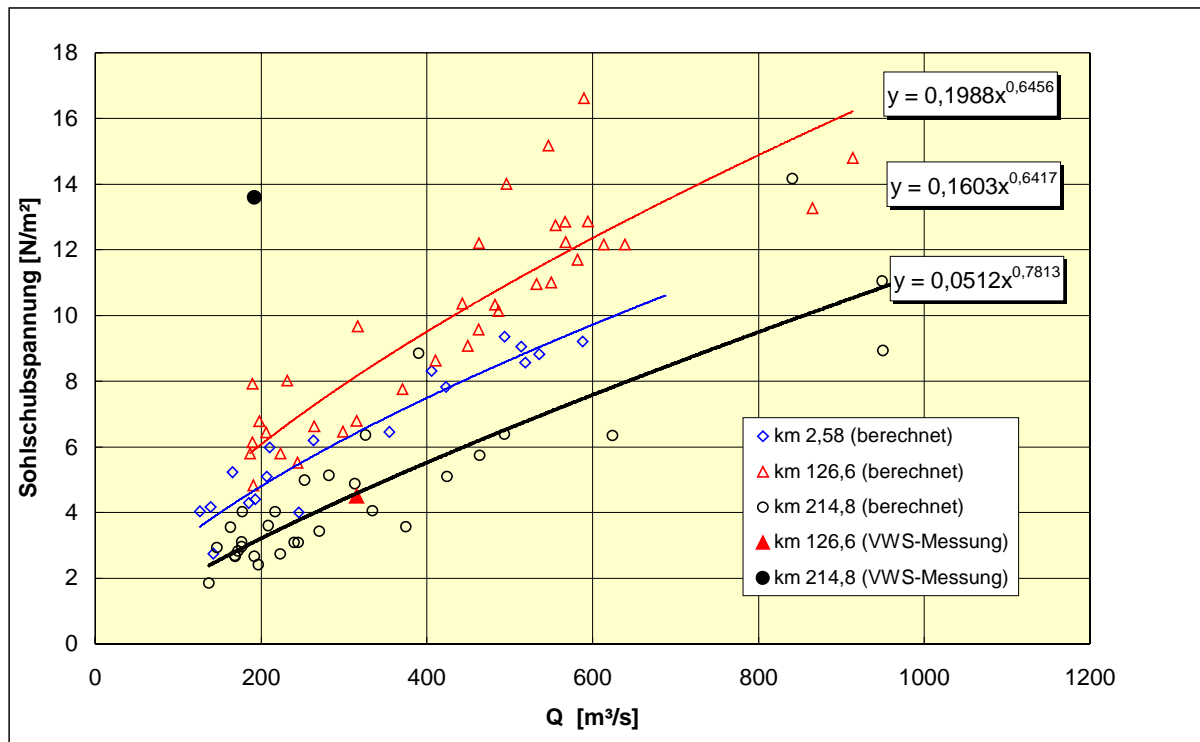


Abb. 8: Sohlschubspannungen für die Messstellen Schmilka (km 2,58), Mühlberg (km 126,6) und Wittenberg (km 214,8) im Flussmittbereich als Funktion des Abflusses

Die in die Darstellung eingetragenen querschnittsgemittelten Messwerte der direkten Schubspannungsmessungen an den Messstellen Wittenberg und Mühlberg zeigen erhebliche Abweichungen von den berechneten Werten, die nicht abschließend geklärt werden konnten. Die starken Schwankungen zwischen Einzelmessungen bei der direkten Schubspannungsmessung (siehe ZWISCHENBERICHT 1998) weisen auf Probleme hin, die möglicherweise durch Transportkörper verursacht werden (z.B. Messung vor, auf, hinter einer Düne)

Die Anlagen 4.7-4.9 geben einen Überblick über alle für Elbe-Messstellen ermittelten funktionalen Zusammenhänge zwischen Sohlschubspannung und Abfluss. Die Koeffizienten der Potenzfunktionen $\tau_0^* = AQ^B$ sind in Anlage 4.10 zusammen mit berechneten Werten der Sohlschubspannung für die Abflüsse MNQ, MQ und 2MQ tabellarisch aufgeführt.

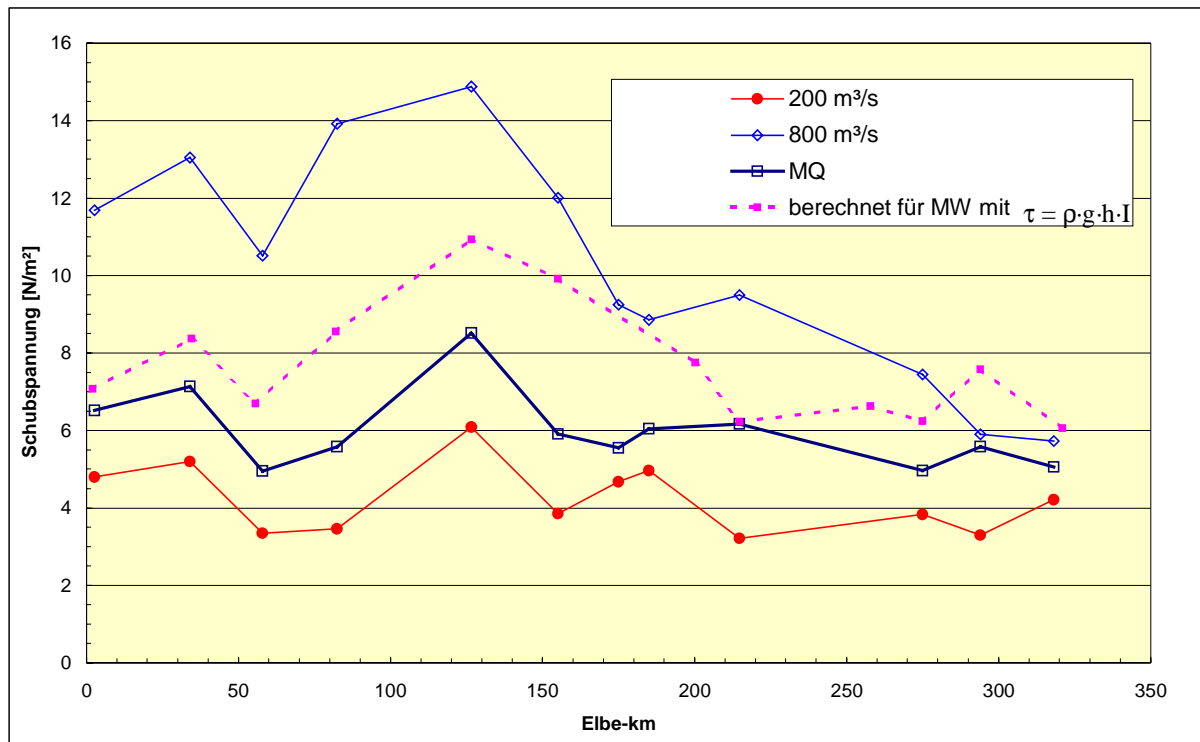


Abb. 9: Längsschnitt der Sohlschubspannung im Flussmittbereich zwischen Schmilka und Magdeburg für ausgewählte Abflüsse

Die Abbildung 9 zeigt einen mit Hilfe dieser Funktionen für 3 Abflüsse erstellten Längsschnitt der Sohlschubspannung für den Abschnitt Schmilka bis Magdeburg. Zum Vergleich sind in der Abbildung die aus morphologischen Daten (Gefälle, Wassertiefe im Talweg) mit $\tau = \rho \cdot g \cdot h \cdot I$ berechneten Schubspannungen für Mittelwasser (gestrichelte Linie) eingetragen. Diese zeigen eine gute Übereinstimmung im qualitativen Verlauf; die etwa 10-20 % höheren Werte gegenüber den für MQ aus Geschwindigkeitsvertikalprofilen ermittelten Schubspannungen sind durch die Verwendung der Wassertiefen im Talweg erklärbar.

Ein mit Hilfe der Funktionen erstellter Längsschnitt der Sohlschubspannung für alle Elbe-Messstellen ist in der Anlage 4.11 dargestellt.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass - im Unterschied zu den querschnittsgemittelten Geschwindigkeiten - die in Abbildung 8 beispielhaft gezeigte Funktionsermittlung noch nicht für alle Messstellen als ausreichend gesichert angesehen werden kann. Bei einigen Messstellen fehlen noch Messungen im oberen Abflussbereich, andere sind auf Grund zu geringer Anzahl von Messungen noch nicht ausreichend gut korreliert (z.B. Messstelle km 167,8).

4.2 Schwebstoffverteilung

4.2.1 Feinschwebstoff ($d < 63 \mu\text{m}$)

Abbildung 10 zeigt ein Beispiel einer Vertikalverteilung der Konzentration der Feinschwebstoffe mit einem Korndurchmesser $< 63 \mu\text{m}$, d.h. unterhalb der Korngröße von Feinsand.

Das Bild zeigt die für wash load charakteristische gleichmäßige Verteilung für die über den gesamten Querschnitt verteilten Messlotrechten. Diese Verteilungen stellen sich sowohl bei

unterschiedlich hohen Abflüssen als auch bei den jahreszeitlich, hydrologisch oder anthropogen bedingten unterschiedlichen Konzentrationen ein.

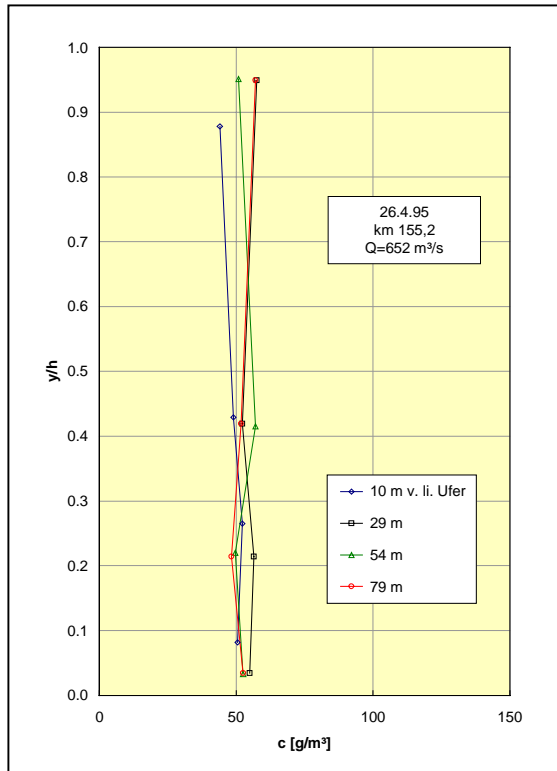


Abb. 10: Vertikalverteilung der Konzentration von Feinschwefstoff bei Torgau für mehrere Messlotrechten

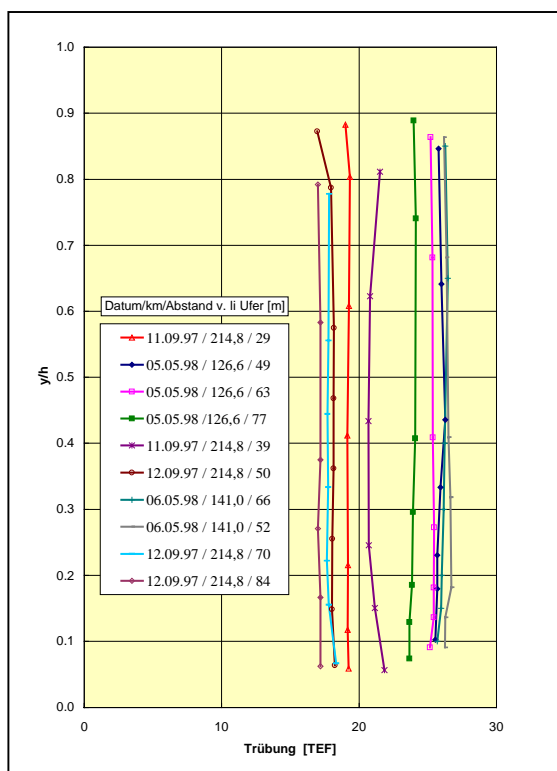


Abb. 11: Vertikalverteilung der Trübung an den Messstellen Mühlberg, Belgern und Wittenberg für jeweils mehrere Messlotrechten

Die zur Charakterisierung der Schwebstoffverteilung durchgeführten Trübungsmessungen zeigten ebenfalls sehr gleichmäßige Verteilungen in den Vertikalen (Abb. 11) und über den Messquerschnitt. Aus diesen und weiteren Trübungs- und Schwebstoffmessungen in der Elbe wurden Korrelationen zwischen der Schwebstoffkonzentration und der Trübung abgeleitet (BUSSE 1998). Diese Korrelationen sind jedoch nicht allgemein gültig, sondern – wie nach den Streutheorien von Mie bzw. Rayleigh (siehe z.B. JAWORSKI UND DETLAF 1972) zu erwarten - nur für die ihnen zu Grunde liegenden Kornverteilungen und Materialparameter (z.B. Brechungsindex, organischer Anteil) des Schwebstoffs anwendbar. Insbesondere ist schon für das „grobkörnigere“ Material der Feinsandfraktion ein deutlich schwindender Beitrag zum Messsignal der Trübung zu erwarten, weshalb die Trübungsmessung für die Charakterisierung von suspendiertem Sand nicht eingesetzt wurde.

Da im untersuchten Elbeabschnitt in der Fahrrinne keine (auch keine temporäre) Sedimentation und Resuspension von Feinschwebstoff nachgewiesen werden konnten, wurden im Rahmen des Projektes die Untersuchungen zur Feinschwebstofffraktion nicht weiter ausgedehnt.

4.2.2 Suspendierter Sand ($d > 63 \mu\text{m}$)

Charakteristische Vertikalverteilungen der Konzentration des suspendierten Sandes sind in Abbildung 12 für drei Messstellen aus unterschiedlichen Elbeabschnitten (Oberlauf, obere und untere Mittelelbe) dargestellt.

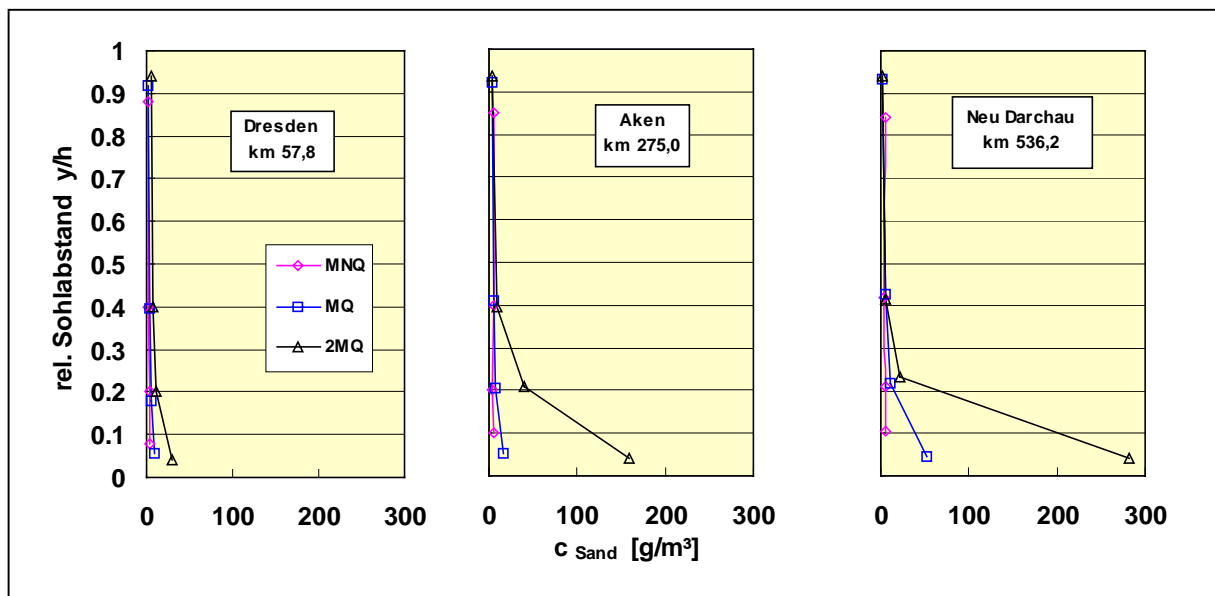


Abb. 12 : Vertikalprofile der Konzentration des suspendierten Sandes für die Elbe-Messstellen Dresden, Aken und Neu Darchau bei unterschiedlichen Abflüssen (MNQ, MQ, 2MQ)

Bei geringen Abflüssen weist die überwiegende Mehrzahl der Profile eine in der Vertikalen (und auch über die Gewässerbreite) fast gleichmäßig verteilte Sandkonzentration von ca. 2...7 g/m^3 auf. Die Anlage 4.12 zeigt, dass im Gesamten von uns untersuchten Elbelauf zwischen Schmilka und Neu Darchau in der Nähe der Wasseroberfläche eine nahezu orts- und abflussunabhängige Sandkonzentration von im Mittel 3,6 g/m^3 auftritt (3,1 g/m^3 bei Nichtberücksichtigung höherer Abflüsse). Mit zunehmendem Abfluss findet ein Anstieg der Konzentration statt. Dieser Anstieg ist

in Sohlnähe am stärksten, nimmt - von der Sohle aus - etwa bis zur halben Gewässertiefe stark ab, führt jedoch bis auf wenige Ausnahmen nicht zur Erhöhung der Konzentration in Oberflächennähe. Wie Abbildung 12 zeigt, ist im Längsverlauf der Elbe bei vergleichbar hohen Abflussverhältnissen (2MQ) eine deutliche Zunahme dieses sohlnahen Anstiegs der Sandkonzentration zu beobachten. Dies wird auch durch Anlage 4.13, in der alle gemessenen sohlnahen Sandkonzentrationen im Längsverlauf der Elbe aufgetragen sind, bestätigt. Während für Messungen bei geringen Abflüssen ($< 300 \text{ m}^3/\text{s}$) sich über alle Messstellen gemittelt sohlnahe Sandkonzentrationen von $6,7 \text{ g/m}^3$ ergeben, zeigt sich bei Berücksichtigung aller Messungen (Mittelwert $19,0 \text{ g/m}^3$) schon ein deutlicher Trend im Längsverlauf.

Die Verteilung dieses sohlnahen Anstiegs im Querprofil einer Messstelle folgt in der Regel der Verteilung der Fließ- bzw. Schubspannungsgeschwindigkeiten (vgl. Abb. 19), d.h. wir finden bei höheren Abflüssen etwa in Strommitte ein Maximum an suspendiertem Sand und eine deutliche Abnahme zum Ufer hin (Anlage 4.14).

Messungen zur Vertikalverteilung der verschiedenen Sandfraktionen (s. Kap. 4.2.3) bestätigen die Annahme, dass neben einer durch die turbulente Strömung gleichmäßig verteilten, nicht sohlrelevanten Feinsandfraktion mit zunehmenden Abfluss Mittel- und Grobsandfraktionen des Sohlmaterials in Suspension übergehen. Diese gelangen wegen ihrer größeren Sinkgeschwindigkeit nur in geringem Maße bis in die Nähe der Oberfläche.

4.2.3 Kornverteilung des suspendierten Sandes

Aus sedimentologischen Untersuchungen der Elbesohle (BFG 1994) ist bekannt, dass Feinsandanteile ($< 0,2 \text{ mm}$) so gut wie gar nicht ($< 1 \%$) am Sohlaufbau beteiligt sind, während Grob- und Mittelsande zusammen mit einem Anteil von ca. 15 % an der tschechischen Grenze bis zu ca. 90 % bei km 575 in der Sohle vorkommen. Vertikal aufgelöste Messungen der Kornverteilung des suspendierten Sandes können deshalb Hinweise zur Herkunft des suspendierten Sandes (Sohle, Einträge) und damit zu seinem Bett bildenden Anteil geben.

Als Beispiel für derartige an verschiedenen Elbe-Messstellen und bei unterschiedlichen Abflüssen durchgeführte Messungen zeigt Abbildung 13 die Kornsummenkurven für einen relativ hohen Abfluss von $841 \text{ m}^3/\text{s}$ (MQ1951/1993 = $349 \text{ m}^3/\text{s}$) an der Messstelle Wittenberg (km 214,8). Mit wachsender Entnahmetiefe weisen die Kornverteilungen für den suspendierten Sand bei dieser Messung, wie auch bei allen anderen Messungen, gegenüber der oberflächennahen Kurve eine Verschiebung zu größeren Korndurchmessern auf.

Der mittlere Korndurchmesser d_m nach Meyer-Peter, Müller liegt bei der in Abbildung 13 dargestellten Messung in der Nähe der Wasseroberfläche bei $0,25 \text{ mm}$ und im sohlnahen Bereich bei $0,53 \text{ mm}$.

Mit abnehmenden Abflüssen rücken die Kornsummenkurven der unteren Tiefenstufen näher an die oberflächennahe Kurve heran, und gleichzeitig nähern sich – infolge abnehmender Resuspension von Sohlmaterial – die d_m -Werte aller Tiefenstufen dem Oberflächenwert an (vgl. Anlagen 4.15-4.17).

Bei den bisher durchgeführten Messungen des suspendierten Sandes im Elbeabschnitt zwischen Mühlberg und Wittenberg lag der mittlere Durchmesser d_m für die oberflächennahen Messpunkte zwischen $0,08$ und $0,25 \text{ mm}$, und für die sohlnahen Punkte zwischen $0,09$ und $0,54 \text{ mm}$.

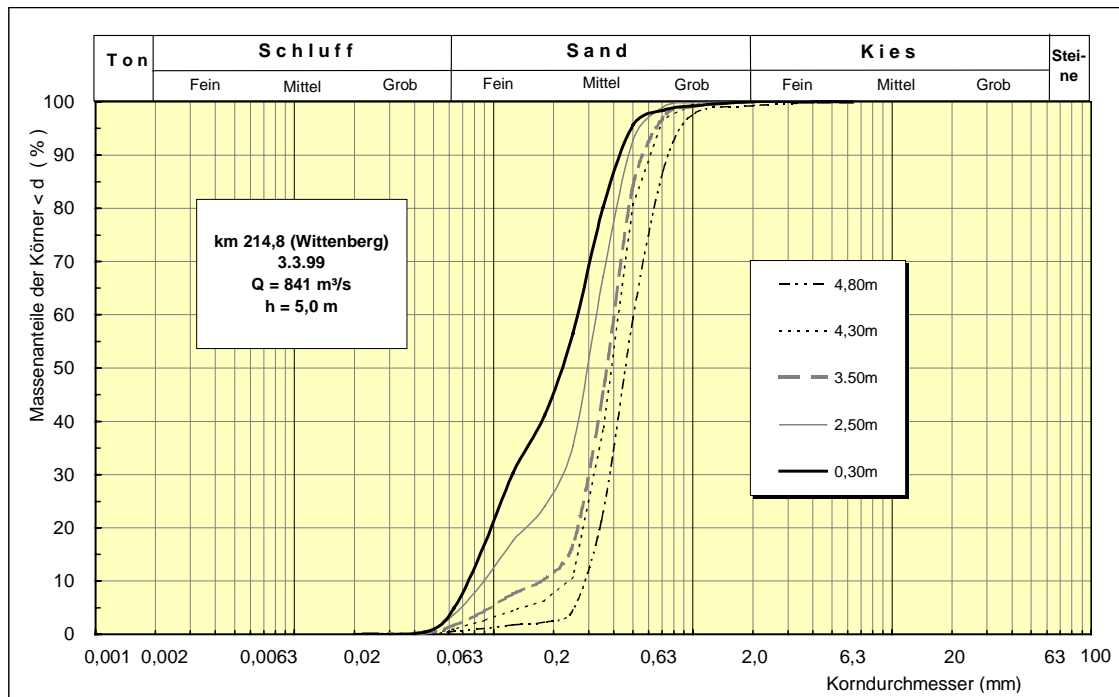
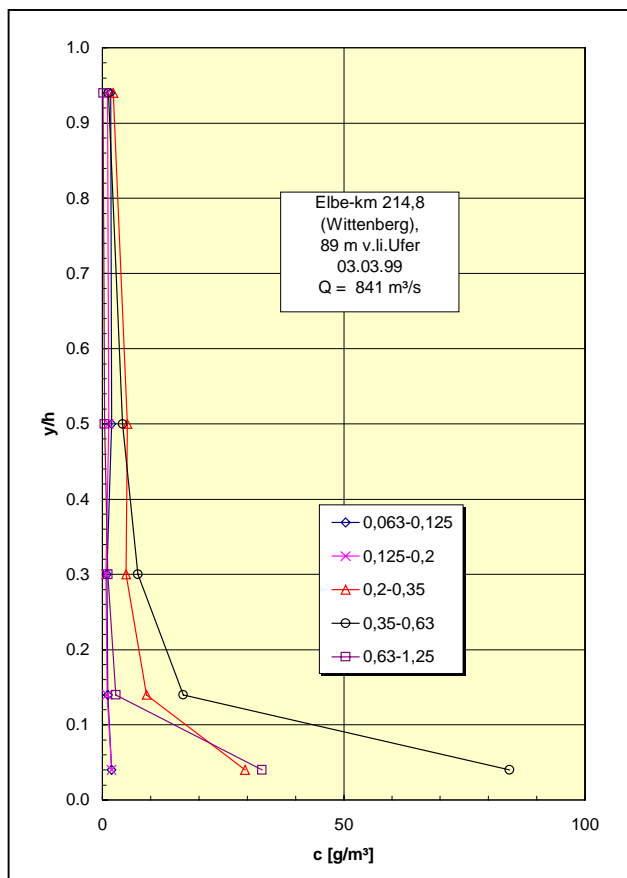


Abb. 13: Korngrößen-Summenkurven des suspendierten Sand für 5 verschiedene Abstände von der Wasseroberfläche an der Messstelle Wittenberg



Aus den Kornverteilungen der einzelnen Tiefenpunkte und den dazu gehörenden Konzentrationsprofilen lassen sich auch Vertikalprofile einzelner Fraktionen des suspendierten Sandes errechnen. Abbildung 14 zeigt eine solche Verteilung für die Vertikale an der Messstelle Wittenberg aus Abbildung 13.

Abb. 14: Vertikalprofile der Sandfraktionen (Korngrößen in mm) an der Messstelle Wittenberg

Für eine detailliertere Betrachtung sind in dieser Abbildung die Fraktionen Fein-, Mittel- und Grobsand jeweils noch einmal unterteilt. Die Teilfraktion des Grobsands mit Korngrößen $> 1,25$ mm war in den Proben nicht enthalten. Während sich die (hier nahezu identischen) Konzentrationen der beiden Feinsandfraktionen im Tiefenverlauf kaum verändern, führt aus der Sohle resuspendierter Mittelsand im unteren Viertel zu einem hohen Konzentrationsanstieg der Mittelsandfraktionen. Auch bei dem in Oberflächennähe nicht vorhandenen Grobsand ist im sohnahen Bereich ein deutlicher Konzentrationsanstieg zu verzeichnen.

Messungen bei niedrigen Abflüssen (unterhalb MQ) zeigen in diesem Elbeabschnitt für den Feinsand eine mit der aus Abbildung 14 vergleichbare Konzentration und Vertikalverteilung, für den Mittelsand Konzentrationen etwas unterhalb der des Feinsandes bei nahezu gleichmäßiger Vertikalverteilung und nur partiell vorhandenen Grobsand mit Konzentrationen < 1 g/m³.

Die geschilderten Verhältnisse werden in der Abbildung 15 für zwei Abflusssituationen an der Messstelle km 321,0 besonders deutlich. Hier sind die Konzentrations-Vertikalverteilungen für die Fraktionen Fein-, Mittel- und Grobsand in getrennten Balkendiagrammen für 5 verschiedene (normierte) Abstände von der Flusssohle dargestellt. Abbildung 15a zeigt bei einem geringen Abfluss von 333 m³/s (MQ_{1931/1993} = 557 m³/s) gleichmäßige Vertikalverteilungen für Fein- und Mittelsand. Bei dem hohen Abfluss von 1219 m³/s (Abb. 15b) bleibt die Konzentration und Verteilung des (nicht in der Sohle enthaltenen) Feinsandes praktisch unverändert, während die Konzentration des Mittel- und Grobsandes den oben beschriebenen Konzentrationsanstieg durch resuspendiertes Sohlmaterial zeigt.

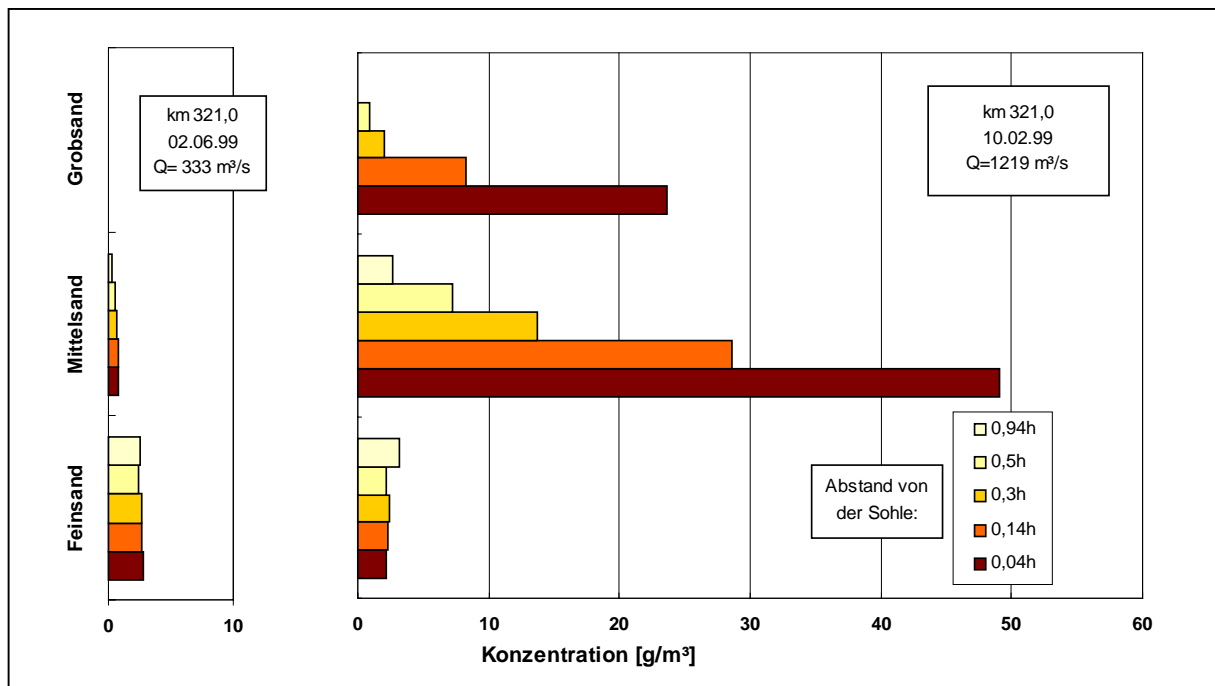


Abb. 15: Konzentration von Sandfraktionen an der Messstelle km 321,0 (Magdeburg) für 5 Tiefenstufen
 a) Q= 333 m³/s (linkes Bild) b) Q= 1219 m³/s (rechtes Bild)

Weitere an verschiedenen Elbe-Messstellen und bei unterschiedlichen Abflusssituationen ermittelte Konzentrations-Vertikalverteilungen für die Fraktionen Fein-, Mittel- und Grobsand sind in den Anlagen 4.18-4.21 dargestellt.

4.2.4 Schwebstoffzahl z

Die durch Gleichung (2) definierte, die Vertikalverteilung der Schwebstoffkonzentration und den Suspensionsgrad beschreibende Schwebstoffzahl z lässt sich aus der Gleichung nur bei Kenntnis der in der Regel unbekannt Referenzkonzentration c_a am Punkt a berechnen. Dieses Problem kann man umgehen, indem man beide Seiten der Gleichung logarithmiert. Der Anstieg der Ausgleichsgeraden der doppelt-logarithmischen Darstellung $c = f((h-y)/y)$ ergibt dann unmittelbar die Schwebstoffzahl z (s. z.B. VANONI 1977).

Abbildung 16 zeigt Vertikalprofile des suspendierten Sandes in doppelt-logarithmischer Darstellung für drei Vertikalen in der Nähe der Flussmitte (45-65 m Abstand vom linken Ufer) für den Messquerschnitt Mühlberg.

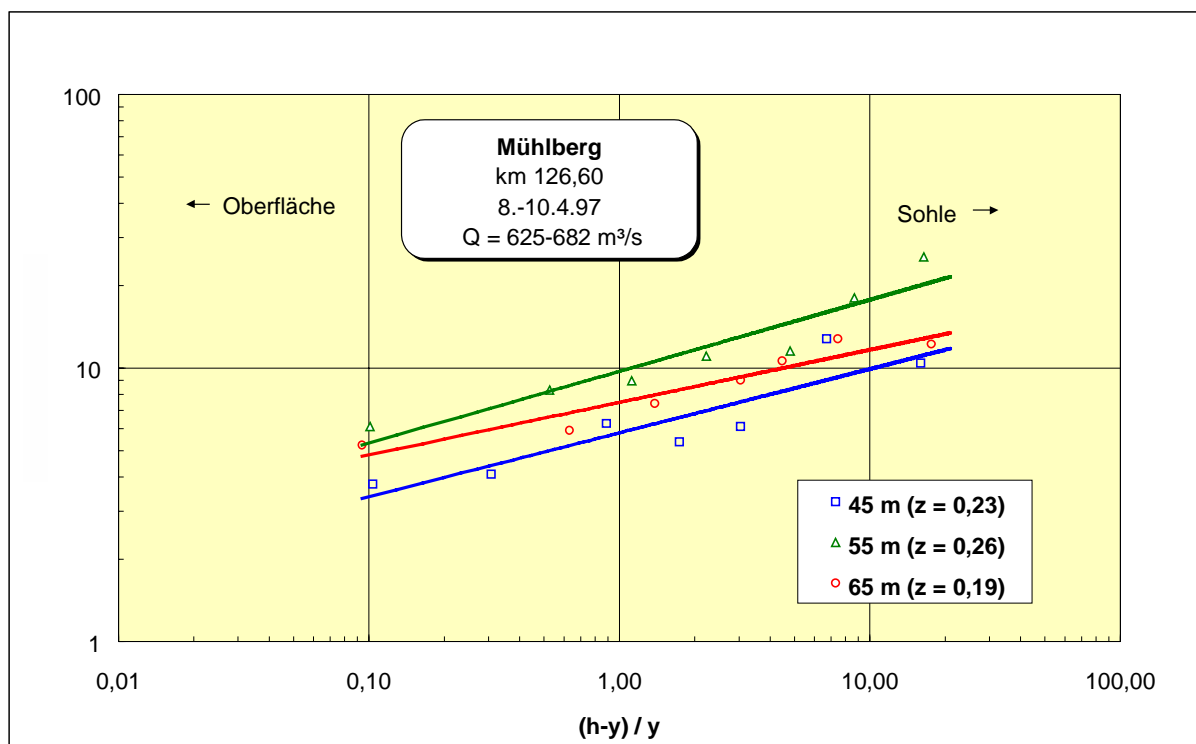


Abb. 16: Vertikalprofile des suspendierten Sandes bei Mühlberg für 3 Messlotrechten in der Nähe der Flussmitte

Die Messpunkte lassen sich mit hinreichend guter Genauigkeit durch eine Gerade ausgleichen, aus den Anstiegen ergeben sich z -Werte zwischen 0,19 und 0,26, die nach Wang und Dittrich (vgl. Kap. 2.1) auf den Transport suspendierten Sohlmaterials hinweisen.

Die so ermittelten z -Werte beschreiben allerdings nur das für den gesamten suspendierten Sand gemittelte Teilchenkollektiv, charakterisiert durch seinen mittleren Korndurchmesser d_m . Aus diesem Grunde wurden aus den Vertikalprofilen der Teilfraktionen des suspendierten Sandes (vgl. Abb.14) zusätzlich die Schwebstoffzahlen für diese Teilfraktionen ermittelt. Abbildung 17 zeigt die Vertikalprofile von 6 solchen Teilfraktionen des suspendierten Sandes in doppelt-logarithmischer Darstellung für die in Abbildung 15b dargestellte Messung am km 321,0 bei einem Abfluss deutlich oberhalb 2MQ. Es ergeben sich für die beiden Feinsandteilfraktionen Schwebstoffzahlen $< 0,1$, während die größeren Sandfraktionen Werte zwischen 0,30 und 0,84 aufweisen.

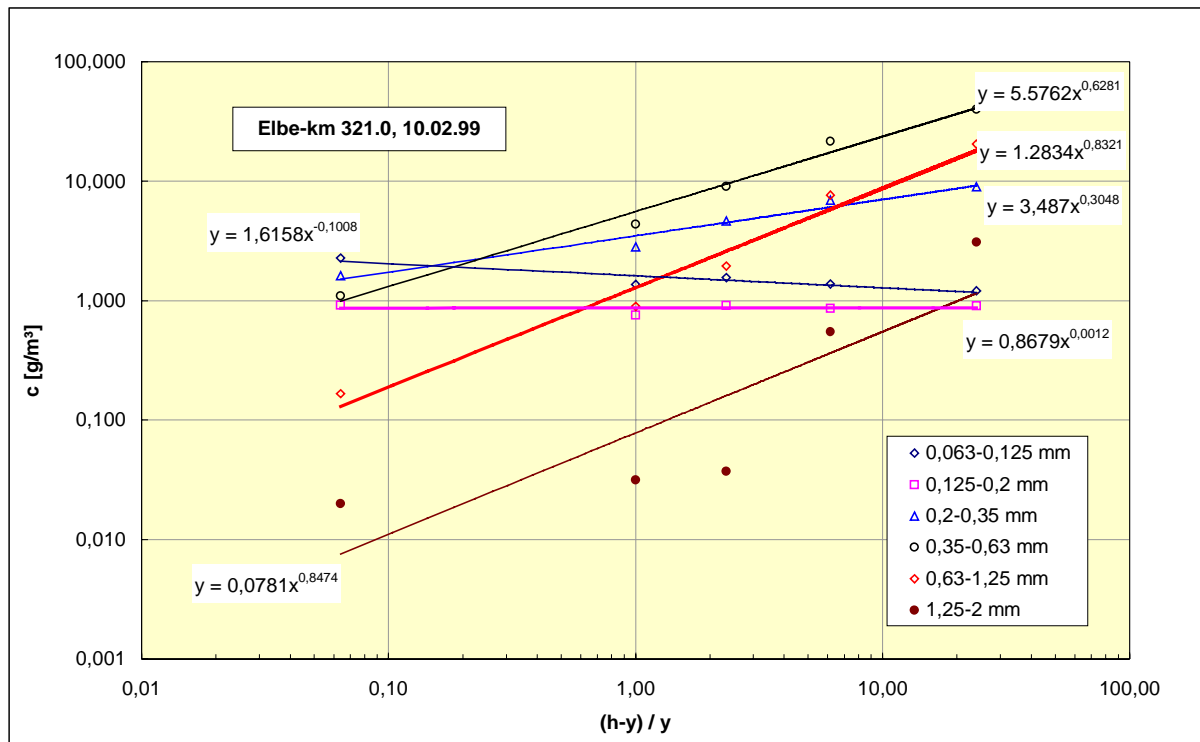


Abb. 17: Vertikalprofile für Fraktionen des suspendierten Sandes an der Messstelle km 321,0 (Magdeburg)

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der aus den Vertikalprofilen der einzelnen Sandfraktionen ermittelten Schwebstoffzahlen für alle hierzu durchgeführten Messungen. Trotz der bei einzelnen Messungen auftretenden stärkeren Abweichungen, die mit den für die Auswertung teilweise zu geringen Sandmassen zusammenhängen können, zeigen die Mittelwerte aus mehreren Messungen relativ eindeutige Ergebnisse.

Tabelle 1: Schwebstoffzahlen für Teilfraktionen des suspendierten Sandes

Datum	Elbe-km	Q _{tabelle} [m ³ /s]	Schwebstoffzahl z				
			Feinsand		Mittelsand		Grobsand
			0,063-0,125	0,125-0,2	0,2-0,35	0,35-0,63	0,63-1,25
09.02.99	324,5	1169	0,08	0,16	0,32	0,45	0,51
10.02.99	321,0	1219	-0,10	0,00	0,30	0,63	0,83
11.02.99	318,1	1160	0,16	0,35	0,67	0,77	0,66
03.03.99	214,8	841	-0,03	0,06	0,40	0,69	0,88
08.04.99	154,0	492	0,06	0,07	0,06	0,01	
27.04.99	324,5	595	-0,06	0,06	0,51	0,99	1,11
29.04.99	338,0	580	0,01	-0,05	0,16		
10.05.99	474,5	525	-0,40	-0,10	0,56	0,69	
11.05.99	509,0	571	-0,08	-0,12	0,19	0,31	0,49
17.05.99	512,0	602	-0,30	-0,01	0,88	1,09	1,00
18.05.99	500,6	599	0,12	0,15	0,43	0,47	
01.06.99	327,0	331	0,04	0,03	0,12		
02.06.99	321,0	333	0,01	0,06	0,39		
06.07.99	141,0	147	-0,02	0,06	0,21	0,87	1,07
13.07.99	216,0	236	0,35	0,42	0,55	0,83	0,77
20.07.99	318,1	478	-0,03	-0,03	0,11		
22.07.99	338,0	397	-0,07	-0,12	0,07	0,64	1,03
04.08.99	505,6	327	0,05	0,05	0,13		
09.09.99	185,0	131	-0,02	0,40	0,40		
15.09.99	153,6	138	0,11	0,30			
16.09.99	141,0	138	0,06	0,16	0,33		
21.09.99	141,0	110	0,02	0,25	0,54		
22.09.99	126,6	126	-0,02	0,22	0,64		
23.09.99	126,6	133	0,09	0,33	0,66		
14.10.99	185,0	161	0,15	0,50	0,73		
10.02.00	474,5	1370	0,13	0,32	0,56	0,72	0,68
16.02.00	516,2	1305	-0,07	0,21	0,48	0,63	0,59
17.02.00	536,2	1319	-0,10	0,09	0,42	0,63	0,72
14.03.00	282,2	1720	0,17	0,25	0,41	0,69	0,95
11.04.00	126,6	760	0,14	0,24	0,24	0,26	0,25
13.04.00	141	716	0,12	0,15	0,14	0,01	

So betragen die Mittelwerte aus allen Messungen für die Feinsandteilfraktion (0,063-0,125 mm) $z = 0,02$ und steigen kontinuierlich auf $z = 0,77$ für die Grobsandteilfraktion (0,63-1,25 mm) an. Werden die Kriterien von Wang und Dittrich angelegt, so bestätigt die Analyse der z -Werte, dass Feinsand bei allen Abflusssituationen nur als wash load auftritt ($z < 0,06$). Die mittleren Schwebstoffzahlen für Mittelsand ($z = 0,39$ bzw. $0,60$) erweisen sich ebenfalls als nahezu abflussunabhängig und weisen ebenso wie die mittlere Schwebstoffzahl der Grobsandfraktionen auf eine Zusammensetzung dieser Fraktionen aus suspendierten Bettmaterial ($z > 0,1$) hin.

4.2.5 Suspensionsbeginn und kritische Sohlschubspannung

Nach in den Kapiteln 4.1.3 und 4.2.2-4.2.4 dargestellten Ergebnissen wäre es nahe liegend, aus den Messungen Zusammenhänge zwischen den z -Werten für die Sandfraktionen und der Sohlschubspannung abzuleiten und aus diesen die für den Suspensionsbeginn kritische Sohlschubspannung zu ermitteln.

Da der Datenbestand insbesondere bei den (aufwändigen) Kornverteilungsmessungen für diese Auswertung noch nicht ausreicht, wurde über eine vereinfachende Betrachtung die kritische Sohlschubspannungsgeschwindigkeit ermittelt. Da in der Elbe Sand aus der Gewässersohle den Beobachtungen nach in der Regel nur im sohnnahen Bereich transportiert wird, andererseits ein (Fein-) Sandanteil gleichmäßig verteilt auftritt (vgl. Abb. 12 und 14), kann man in erster Näherung als ein Maß für das suspendierte Sohlenmaterial die Differenz zwischen der sohnnahen und der oberflächennahen Sandkonzentration nehmen. Beispielsweise ergibt für den Messquerschnitt Mühlberg (Elbe-km 126,6) das Auftragen dieser Differenz gegen den gleichzeitig vorhandenen lokalen Wert der Sohlschubspannungsgeschwindigkeit (berechnet aus der zeitgleich gemessenen vertikalen Strömungsgeschwindigkeitsverteilung), dass Sand aus der Sohle bei einer (kritischen) Sohlschubspannungsgeschwindigkeit von ca. 0,09 m/s in Suspension geht (Abb. 18a).

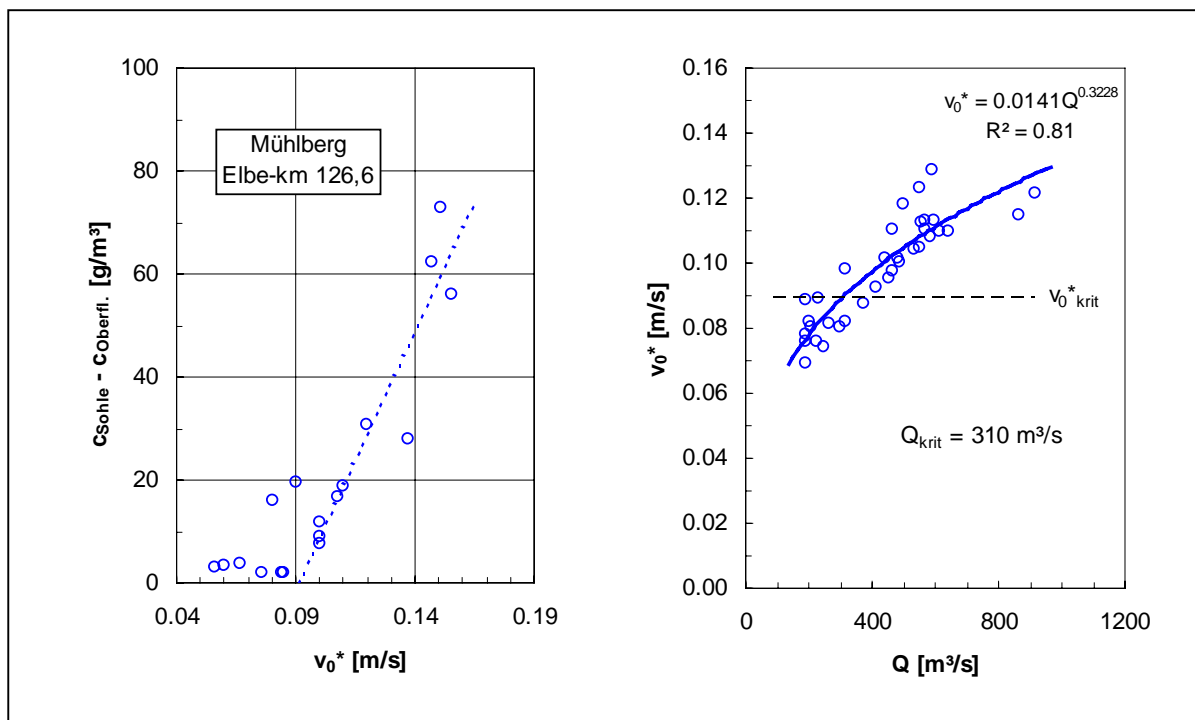


Abb. 18a (links): Differenz der sohnnahen und oberflächennahen Sandkonzentration am Querschnitt Mühlberg in Abhängigkeit von der Sohlschubspannungsgeschwindigkeit

Abb. 18b (rechts): Berechnete Sohlschubspannungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Abfluss für den Querschnitt Mühlberg und kritische Sohlschubspannungsgeschwindigkeit nach Abb. 18a

Zur Ermittlung des zum Suspensionsbeginn zugehörigen Abflusses ist in Abbildung 18b die aus mehreren Messungen der Geschwindigkeitsvertikalprofile ermittelte Funktion (s. 4.1.3) $v_0^* = f(Q)$ zusammen mit der aus Abbildung 18a abgeleiteten kritischen Sohlschubspannung aufgetragen.

Der Schnittpunkt der $v_0^* = f(Q)$ -Kurve mit der Geraden $v_0^* = 0,09$ m/s bei einem Abfluss von ca. 310 m³/s markiert den Suspensionsbeginn für das Bettmaterial.

Die an allen Messstellen beobachtete und am Querschnitt Mühlberg besonders ausgeprägte Querverteilung des Auftretens von suspendiertem Sand (Maximum etwa in Flussmitte, starke Abnahme zu den Ufern hin) hängt unmittelbar mit der zu den Ufern abnehmenden Schubspannungsgeschwindigkeit zusammen und kann anhand Abbildung 19 erklärt werden.

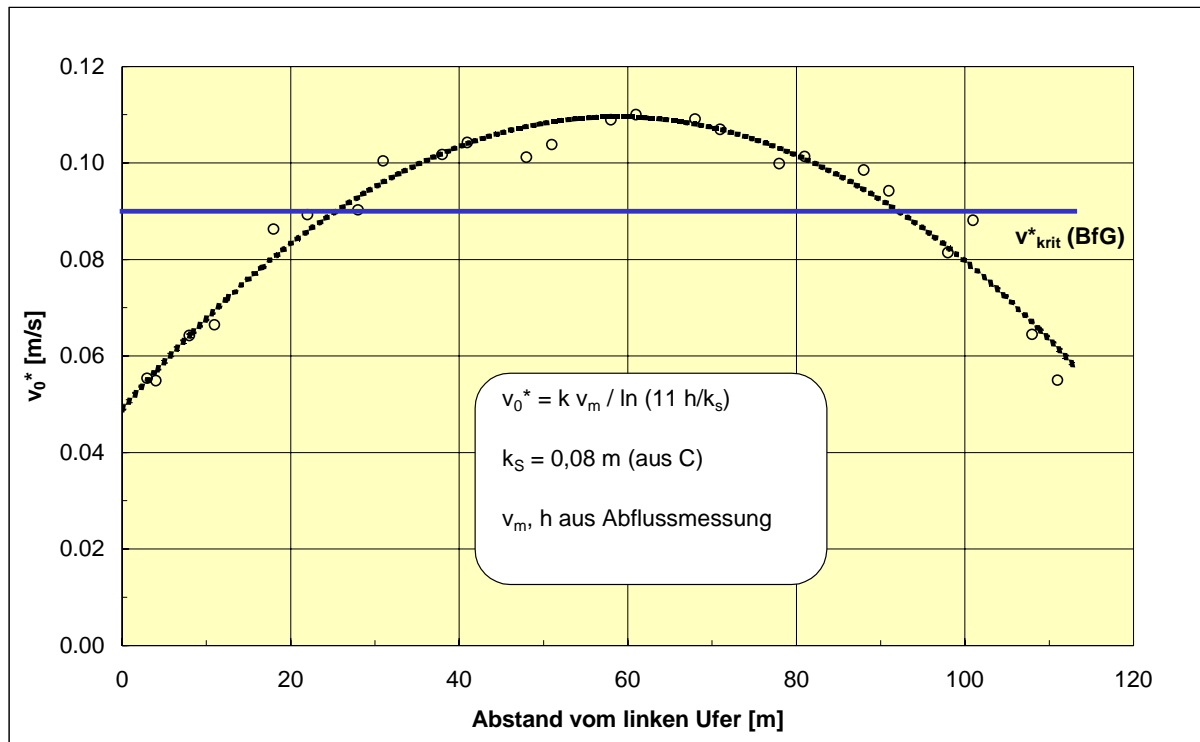


Abb. 19: Querprofil der berechneten Sohlschubspannungsgeschwindigkeiten, Elbe-km 126,6 (Mühlberg), 8./9.4.1997, $Q = 625\text{-}682 \text{ m}^3/\text{s}$

Die gestrichelte Kurve zeigt ein aus den vertikal gemittelten Geschwindigkeiten berechnetes Querprofil von v_0^* , wobei $k_s = 0,08$ m mit Hilfe der White-Colebrook-Formel (van RIJN 1990) aus dem Chézy-Koeffizienten (vgl. Kap. 4.1.1) berechnet wurde. Die waagerechte Linie stellt den oben ermittelten Suspensionsgrenzwert dar. Aus den Schnittpunkten beider Kurven ist ersichtlich, dass im mittleren Bereich mit Suspension zu rechnen ist, in den Randbereichen dagegen nicht. Ein Beispiel für eine solche Querverteilung ist in der Anlage 4.14 (sohlnahe Sandkonzentrationsverteilung für $y/h = 0,05$) dargestellt.

4.3 Quantifizierung des Bett bildenden Anteils des suspendierten Sandes

Die vorliegenden Messergebnisse aus Kap. 4.2.2 und 4.2.3 bestätigen die Annahme, dass der suspendierte Sand zum einen aus überwiegend Feinsand besteht, der z. B. aus Einleitungen, Oberflächeneinträgen, Einträgen über Nebenflüsse u.ä. stammt, und der von der turbulenten Strömung zumindest über längere Elbeabschnitte in nahezu gleichmäßiger Verteilung gehalten wird und somit der Spülfracht zugeordnet werden kann („Sand-Spülfracht“). Zum anderen enthält er einen Anteil, der aus der Sohle oder dem Geschiebe stammt, und der nur zeitweilig bei Vorliegen

ausreichend hoher Schubspannungen in Suspension überführt wird und bei geringeren Schubspannungen wieder sedimentiert (suspendiertes Bettmaterial).

Die Frage nach dem Anteil des in Suspension befindlichen Bettmaterials des Flusses erweist sich als Frage der Separierung der Konzentrationsverteilung $c(y)$ dieses Anteils von dem der Spülfracht. Unter der Annahme einer Vertikalverteilung nach Rouse (vgl. Kap. 2.1 Gl. (2)) wird nach Wang und Dittrich (1992) $z = 0,06$ als Kriterium für die Trennung der Sand-Spülfracht vom suspendiertem Bettmaterial angesetzt.

Zur Berechnung der Konzentrationsverteilung der Sand-Spülfracht einer Vielpunktmessung wird unter Berücksichtigung dieses Ansatzes zunächst nach Gleichung (2) aus der Konzentration des oberflächennahen Punktes mit $z = 0,06$ für jede Messlotrechte die Referenzkonzentration c_a für $a = 0,05 h$ berechnet. Mit Hilfe dieser c_a -Werte werden dann - ausgehend von den jeweiligen oberflächennahen Sandkonzentrationen - die auf den Rouse-Kurven mit $z = 0,06$ liegenden Konzentrationen der drei tiefer liegenden Messpunkte für alle Messlotrechte berechnet. Aus diesen Werten wird anschließend der Transport der Sand-Spülfracht für die jeweilige Messung berechnet.

Im nächsten Schritt werden für die mehrjährigen Vielpunktmessungen an den einzelnen Messstellen analog dem in Kapitel 4.4 beschriebenen Vorgehen Transport-Abfluss-Beziehungen für die Sand-Spülfracht abgeleitet. Abbildung 20 zeigt als Beispiel die für die Messstelle Schöna/Schmilka so gewonnene Beziehung für die Spülfracht zusammen mit der Transport-Abfluss-Beziehung für den gesamten suspendierten Sand aus Kapitel 4.4.

Die Transport-Abfluss-Beziehung des suspendierten Bettmaterials ergibt sich dann aus der Differenz des Transportes der Sand-Spülfracht zum Gesamttransport des suspendierten Sandes. In der Anlage 4.22 sind die so ermittelten Funktionen für die Elbemesststellen tabellarisch dargestellt. Ein Vergleich der ermittelten Funktionen zeigt, dass im Elbeabschnitt oberhalb km 200 der Transport des suspendierten Bettmaterials immer unter dem der Sand-Spülfracht bleibt. Unterhalb von km 200 übersteigt bei hohen Abflüssen der Transport des suspendierten Bettmaterials häufig den der Sand-Spülfracht.

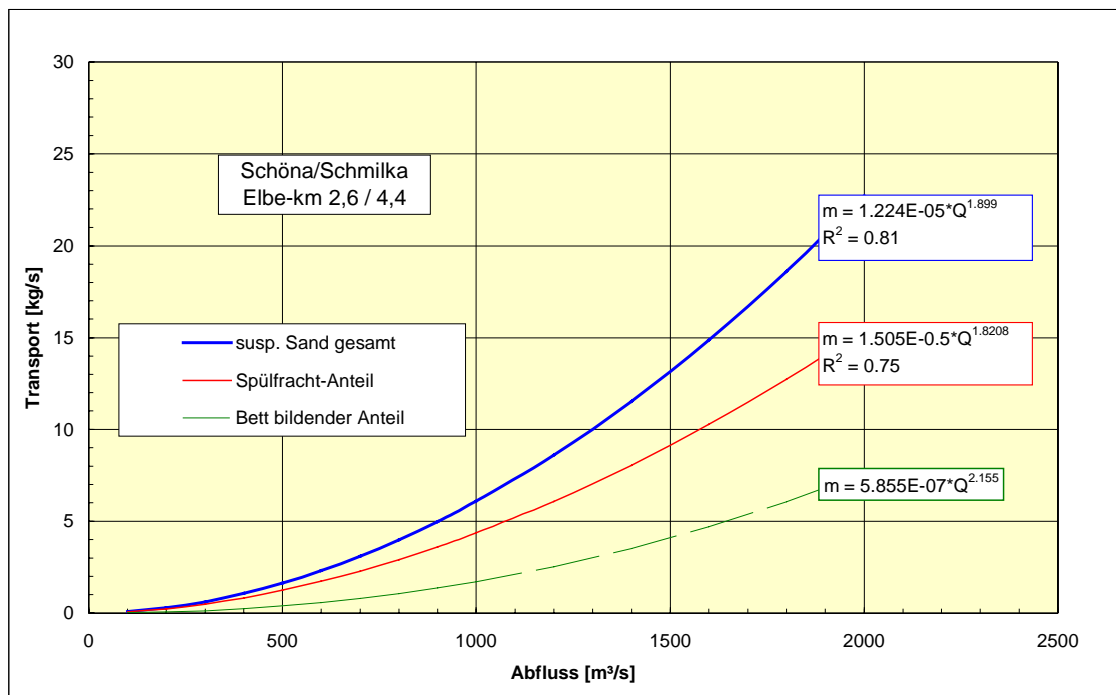


Abb. 20: Transport der Anteile des suspendierten Sandes an der Messstelle Schöna/Schmilka

Aus diesen funktionalen Zusammenhängen kann nun der Anteil des suspendierten Bettmaterials am Gesamttransport in Abhängigkeit vom Abfluss berechnet werden. Abbildung 21 zeigt die auf diese Weise gewonnenen funktionalen Abhängigkeiten des Bett bildenden Anteils des suspendierten Sandes in Prozent vom Gesamttransport für drei verschiedene Messstellen.

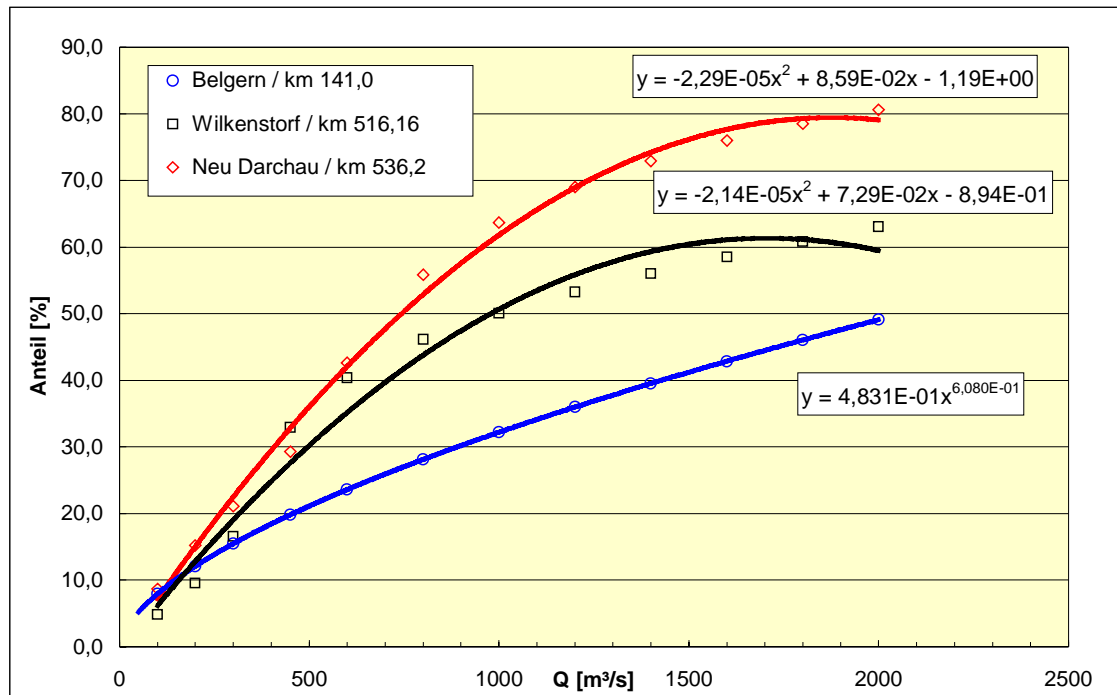


Abb. 21: Prozentualer Anteil des suspendierten Sohlmaterials am gesamten suspendierten Sand für die Messstellen Belgern, Wilkenstorf und Neu Darchau

In der Anlage 4.23 sind diese funktionalen Abhängigkeiten für alle Messstellen in Tabellenform dargestellt. Abgesehen von wenigen Ausnahmen ergeben sich für den Anteil des suspendierten Bettmaterials im Bereich der oberen Elbe Verläufe mit eher geringer Abflussabhängigkeit und geringen Anteilen (< 30 %), während im Bereich der unteren Mittel- und Unterelbe der Anteil mit wachsendem Abfluss auch stark zunimmt und bei Abflüssen um MHQ Werte deutlich über 50 % erreicht.

In Abbildung 22 sind die aus diesen Funktionen für die drei ausgewählten Abflüsse MNQ, MQ und 2MQ berechneten Anteile im Längsverlauf der Elbe dargestellt. Die für MQ gestrichelt eingetragene Trendlinie weist eine Zunahme des Bett bildenden Anteils des suspendierten Sandes zwischen Schmilka und Neu Darchau von ca. 10 % bis auf ca. 50 % auf.

Mit Hilfe dieser funktionalen Zusammenhänge lässt sich der Bett bildende Anteil des suspendierten Sandes für verschiedene Abflusszeiträume oder Abflussszenarien leicht berechnen (s. Kapitel 4.6).

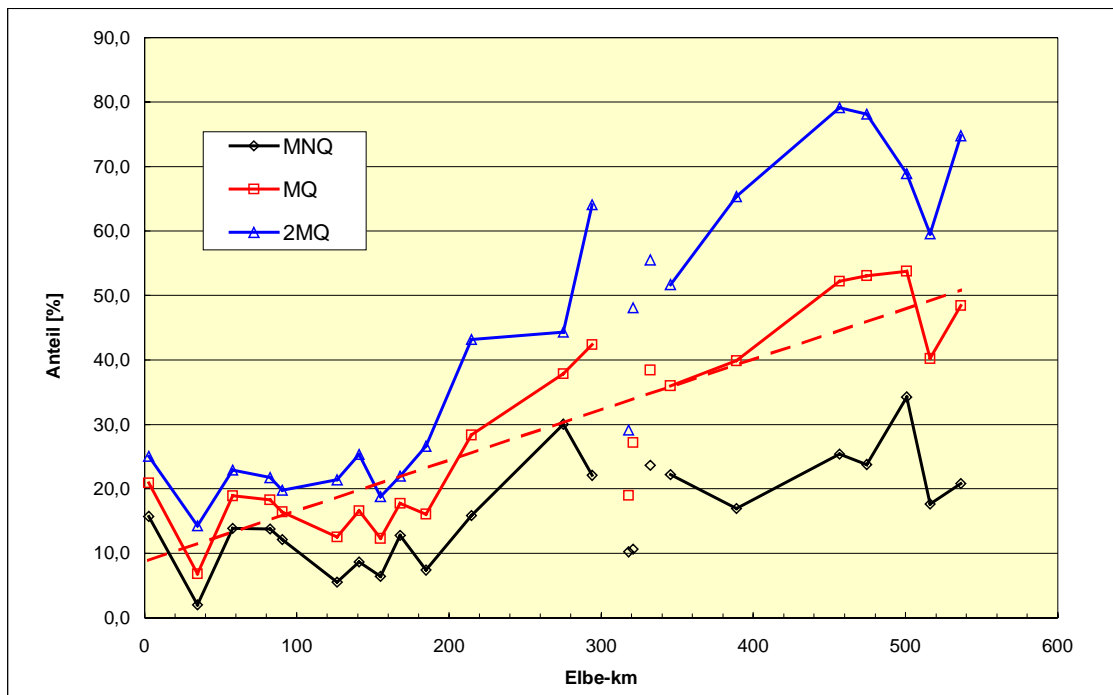


Abb. 22: Anteil des suspendierten Bettmaterials am Gesamttransport des suspendierten Sandes in der Elbe zwischen Schöna (km 2,6) und Neu Darchau (km 536,2) für verschiedene Abflüsse

4.4 Transport-Abfluss-Beziehungen für Geschiebe und suspendierten Sand

Den meisten der allgemein akzeptierten Transportformeln liegt eine Beziehung der Form

$$\text{Feststofftrieb} = C \cdot (\text{Wert}_{\text{aktuell}} - \text{Wert}_{\text{kritisch}})^m \quad (5)$$

zu Grunde (vgl. BfG 1995). Der Feststofftrieb (Transport durch einen Querschnittstreifen von 1m Breite) wird abgeleitet aus dem Überschuss der gewählten hydraulischen Größe ($\text{Wert}_{\text{aktuell}} - \text{Wert}_{\text{kritisch}}$) und dem Wert eines charakteristischen Sediment-Koeffizienten C. Die hydraulischen Größe $\text{Wert}_{\text{kritisch}}$ ist im Falle des Geschiebetransportes mit der kritischen Kraft für das Einleiten der Sedimentbewegung an der Sohle und im Falle des Transportes in Suspension mit der für den Suspensionsbeginn erforderlichen kritischen Kraft verknüpft. Die Einflussstärke der Hydraulik m lässt sich in Abhängigkeit von der gewählten hydraulischen Variablen (z.B. Schubspannung, Abfluss) unterschiedlich bewerten.

Zur Ermittlung der empirischen Transport-Abfluss-Beziehungen dienten die von der BfG durchgeführten Naturmessungen für Geschiebe und Schwebstoff. Diese Messungen werden in Zusammenarbeit mit der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) in unregelmäßiger Abfolge (Hydrologie, Verfügbarkeit des Messschiffes) über die gesamte Lauflänge der deutschen Elbe durchgeführt, wobei bisher verstärkt in den Schwerpunktbereichen Erosionsstrecke, Stadtstrecke Magdeburg und Reststrecke gemessen wurde. Zur Aufstellung funktionaler Zusammenhänge wurden die mit dem BfG-Auswerteprogrammen GAUS (Geschiebe) und SAUS (Schwebstoff/suspendierter Sand) für den Gesamtquerschnitt ermittelten Mittelwerte (Interpolation der an mehreren Messlotrechten des

Gewässerquerschnitts durchgeführten Messungen) des Geschiebe- und Schwebstofftransports herangezogen.

Die Regressionsanalyse wurde zunächst mit dem in der BfG zu diesem Zweck entwickelten Programm FUNCTION (NICODEMUS, 1996) durchgeführt, welches aus den in definierten dBase-Tabellen abgelegten Messergebnissen in Interaktion mit dem Programmbenutzer eine dBase-Tabelle mit den Parametern der Transportfunktionen erzeugt. In Anlehnung an den oben genannten Ansatz bietet dieses Programm eine lineare und zwei Potenz-Funktionen in den Formen

$$m_F = a \cdot (Q - Q_0) \quad (6a)$$

$$m_F = a \cdot (Q - Q_0)^b \quad (6b)$$

$$m_F = a \cdot Q^b \quad (6c)$$

zur Auswahl an. Q_0 ist dabei der Abschnitt auf der x-Achse, der als (kritischer) Abflusswert für den Bewegungsbeginn/ Suspensionsbeginn interpretiert werden kann.

Bei der Anwendung zeigt sich jedoch, dass für die an vielen Messstellen der Elbe noch relativ geringe Zahl von Messungen bei der häufig sehr starken Streuung der Messwerte (s.u.) die angegebenen Funktionen nicht in jedem Fall den Transport zufrieden stellend beschreiben. Trotz sorgfältiger Überprüfung der Messergebnisse und der Eliminierung einzelner stark aus dem Trend der übrigen Messungen abweichender Werte treten bei der Regression mit den Funktionen (6a) bzw. (6b) folgende Probleme auf:

- Q_0 nimmt einen negativen Wert an, d.h. der Schnittpunkt der Kurve liegt auf der negativen x-Achse, mithin zeigt die Funktion bei $Q = 0$ Transportwerte > 0 .
- Durch die Verteilung der (meist zahlreicheren) Messpunkte im unteren Abflussbereich wird die Potenzfunktion vom Typ (6b) häufig zu einem sehr steilen Anstieg im oberen Abflussbereich gezwungen, der weder durch die dort (meist in sehr geringer Zahl) vorhandenen Messpunkte noch durch die allgemeine Erfahrung an benachbarten Messstellen bestätigt wird.
- Umgekehrt gibt es auch Verteilungen, bei denen die Funktionen vom Typ (6a) bzw. (6b) die wenigen stark streuenden Messungen im oberen Abflussbereich besser berücksichtigen, dafür aber die größere Zahl der Messungen im unteren und mittleren Abflussbereich deutlich über- oder unterschätzen.

Wegen dieser Probleme wurde zusätzlich auch die durch den Ursprung verlaufende Gerade

$$m_F = a \cdot Q \quad (6d)$$

mit einbezogen und die Auswahl der Funktion nicht allein anhand des Bestimmtheitsmaßes R^2 , sondern auch anhand der besseren Anpassung an Messungen im unteren und mittleren Abflussbereich sowie anhand physikalisch sinnvoller Randbedingungen (z.B. kein Transport bei $Q = 0$) getroffen. In Zweifelsfällen wurden Plausibilitäts- und Stabilitätsbetrachtungen (z.B. Verhalten der Funktion bei Wegnahme bzw. Hinzufügen einzelner Messwerte) hinzugezogen.

Für einzelne Messstellen musste auf Grund einer noch unzureichenden Datenlage auf die Erstellung einer Transportfunktion verzichtet werden, bei einigen weiteren Messstellen weisen die Messergebnisse (insbesondere beim Geschiebe) eine sehr starke Streuung auf, so dass die ermittelten Funktionen (niedrige Korrelationskoeffizienten) nur unter Vorbehalt verwendet werden sollten. Letzteres gilt auch für die Anwendung von Funktionen auf höhere Abflüsse, wenn sie nur aus

Messungen um und unterhalb MQ erstellt wurden. Zur Extrapolation in einen nicht durch ausreichend Messungen gesicherten Bereich höherer Abflüsse wurden - bei annähernd gleichem Korrelationskoeffizienten - in der Regel Funktionen mit geringerem Zuwachs favorisiert und damit eine mögliche Unterschätzung bei der Frachtberechnung in Kauf genommen.

Eine Aufteilung auf zwei oder mehr Funktionen für unterschiedliche Abflussbereiche erwies sich als problematisch, da die geringe Zahl der ohnehin meist stärker streuenden Werte im oberen Abflussbereich für diese Teilfunktion eher zu schlechteren oder weniger begründeten Anpassungen führt. Im Falle von Unstetigkeiten beim Übergang von einer Teilfunktion zur anderen können bei einigen Auswertungen (z.B. der Ermittlung Bett bildender Sandanteile aus Differenzfunktionen) zwischen benachbarten Messstellen unplausibel veränderte Charakteristiken auftreten.

Ursachen für die teilweise starke Streuung der Messwerte liegen neben den an anderer Stelle zu diskutierenden messtechnischen Problemen auch im Abflussregime. Naturmessungen im Verlaufe auflaufenden und ablaufenden Hochwassers zeigen z.T. erhebliche Transportunterschiede. waserbauliche Versuchsreihen, bei denen eine Laborrinne (Länge 60 m, bewegliches Sohlmaterial) mit Abflusszeitreihen der Elbe beschickt wurde, bestätigen, in welchem erheblichem Maß das Transportgeschehen durch die natürliche Abfluss-Instationarität, d.h. die Abfolge wechselnder Wasserführungen, bestimmt wird (BÜCHELE UND SAUER 2000). Wie diese Labormessungen zeigen, liefern Transportfunktionen der o.g. Typen streng genommen nur für stationäre Zustände zufrieden stellende Aussagen. Dagegen treten bei instationären Verhältnissen und insbesondere hohen Abflussereignissen Transportwerte auf, die um ein mehrfaches oberhalb oder unterhalb der Transportfunktion liegen können.

Für eine getrennte Erstellung von Funktionen für stationäre und instationäre Abflusssituationen fehlt aber zurzeit noch die Datenbasis. Bei der Regressionsanalyse werden durch die ermittelten Funktionen in der Regel einzelne Maximal- und Minimalwerte nur in geringem Maße berücksichtigt bzw. es wird zwischen ihnen vermittelt, sodass diese Funktionen für die Berechnung mittlerer Frachten für ausreichend große Zeiträume (in Abhängigkeit von der hydrologischen Situation etwa ein bis mehrere Monate) durchaus als geeignet angesehen werden können.

Sämtliche ermittelten Transport-Abfluss-Funktionen für Geschiebe, suspendierten Sand und Gesamtschwebstoff sind tabellarisch in den Anlagen 4.24 bis 4.26 aufgeführt. Für die Bewertung dieser Funktionen sollten die ebenfalls aufgeführten Parameter (Bestimmtheitsmaß R^2 , Anzahl der Messungen, Abflussintervall) herangezogen werden. Für den suspendierten Sand wurden zusätzlich in den Anlagen 4.27 bis 4.29 alle Transport-Abfluss-Beziehungen in Form von Diagrammen dargestellt.

4.5 Das Hydrologische-Feststoff-Bilanz-Modell (HFBM) - Aufbau und Nutzungsmöglichkeiten

Das HFBM ist ein empirisches eindimensionales hydrologisches Modell bei dem Massen- und Volumenänderungen für Abschnitte, die durch jeweils zwei Messstellen begrenzt sind, berechnet werden (Abb.23).

Die Datengrundlage dieses empirischen Modells bilden neben täglichen mittleren Abflüssen (hydrologische Datenbank HYDABA) und Querprofildaten im Wesentlichen die Ergebnisse der Geschiebe- und Schwebstoffmessungen. Deren Auswertung und datentechnische Weiterbehandlung bis zur Archivierung in der morphologischen Datenbank für Geschiebe und Schwebstoff (DaGS) wird mit Hilfe mehrerer in der BfG selbst entwickelter Programme realisiert.

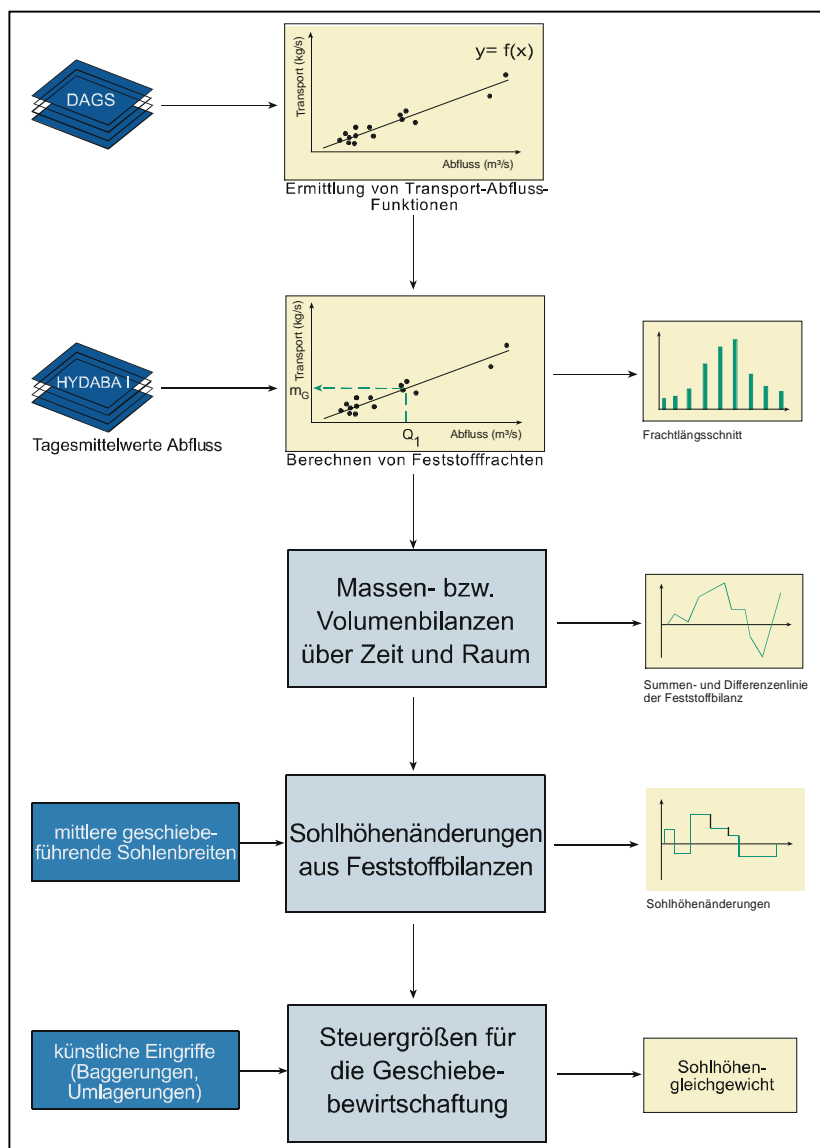


Abb. 23: Ablaufschema zum HFBM

Insgesamt wurden die aus den Messungen gewonnenen Daten von 25 Elbe-Messstellen in die morphologische Datenbank DaGS implementiert.

In den aus diesen Daten empirisch ermittelten Transport-Abfluss-Beziehungen für Geschiebe und suspendierten Sand (siehe auch Kap. 4.4) sind Geometrie, Energieliniengefälle, Gesamtrauheiten, Korngrößen sowie Verfügbarkeiten des Geschiebematerials in der jeweiligen Teilstrecke implizit enthalten (black box).

Diese Beziehungen müssen in angemessenen Intervallen durch neu hinzukommende Messungen aktualisiert bzw. neu ermittelt werden.

Für die in Abbildung 23 angegebenen Berechnungen der Feststofffrachten und der daraus abgeleiteten Bilanzen und Parameter wurde mit Hilfe von Visual Basic ein unter Windows 95/NT lauffähiges Programm geschaffen (Abb. 24).

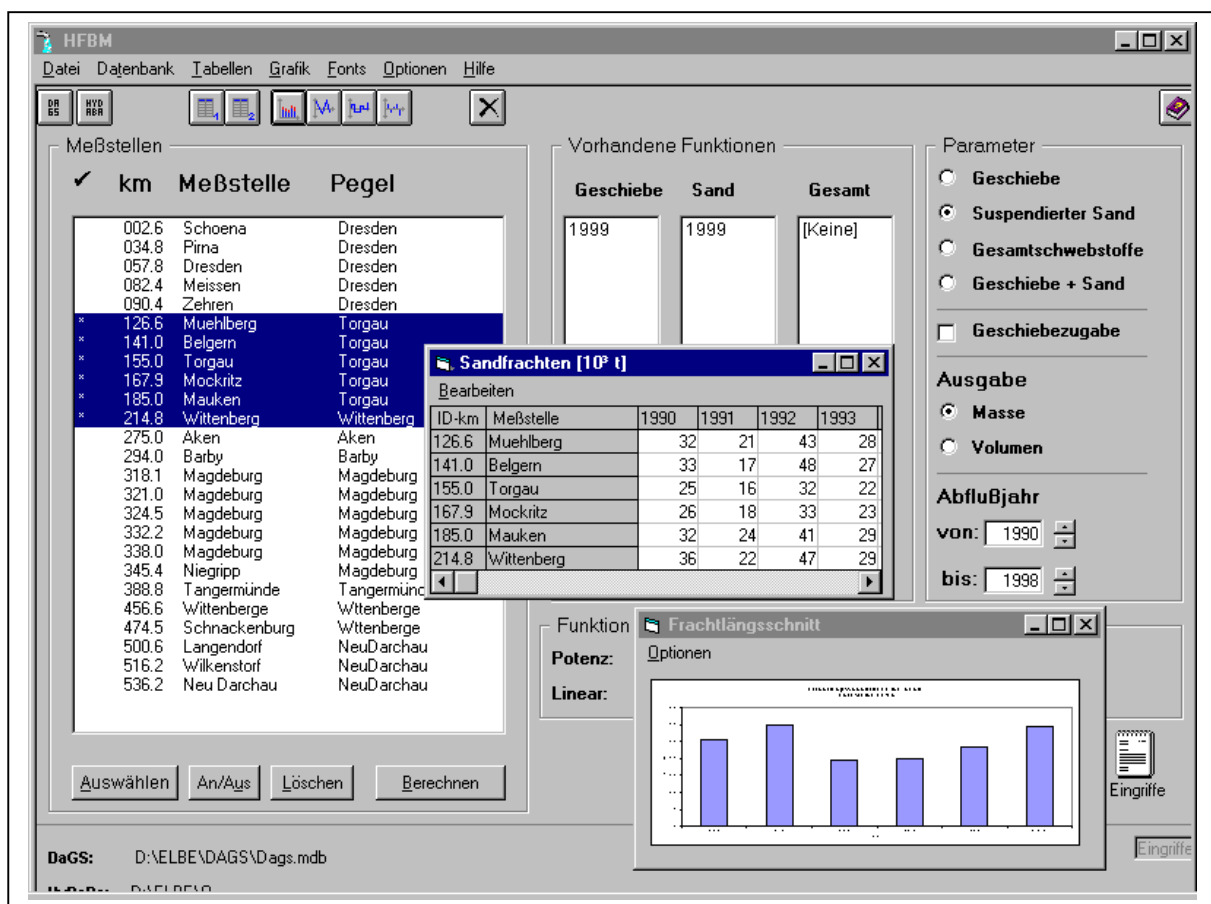


Abb. 24: Beispiel zur Oberfläche der Software des HFBM

Zur Programmumgebung dieser Software gehören neben den schon erwähnten BfG eigenen Auswerteprogrammen und Fachdatenbanken auch MS ACCESS zur Pflege und Verwaltung der Datenbanken und MS EXCEL zur Erstellung der Diagramme. Nach Auswahl der Messstellen (vgl. Abb. 24), des Zeitraums und der Feststofffraktion (Geschiebe, suspendierter Sand, Gesamtschwebstoff) selektiert HFBM die erforderlichen in einer Datenbank gespeicherten Transportfunktionen und berechnet nach Einlesen der zugehörigen Abflussdaten tägliche Frachten, die zu Monats- oder Jahresfrachten aufsummiert werden können. In einem weiteren Modus werden bei der Frachtberechnung der an der Sohle bewegten Geschiebefracht die Bett bildenden suspendierten

Sandanteile zugeordnet. Die Berechnung dieser Bett bildenden Sandanteile wird anhand der Funktionen aus Kapitel 4.3 und 4.4 (s. Anlagen 4.23 und 4.26) vorgenommen und muss individuell für jede Messstelle bzw. jeden Streckenabschnitt erfolgen.

Die Feststofffrachten sind Grundlage für Bilanzierungen zwischen den Messstellen (Menüpunkt „Frachtdifferenzen“) als auch im großräumigen Maßstab (Menüpunkt „Geschiebedefizit“).

Zur Berechnung der Änderungen mittlerer Sohlenlagen sind geometrische Größen aus den Querprofilen, wie z.B. mittlere Sohlenbreiten (als die maximal möglichen geschiebeführenden Breiten), erforderlich. Diese wurden mit Hilfe des Programms „PROFIL“ der Bundesanstalt für Wasserbau aus den Koordinaten für die Begrenzung der Flusssohle zwischen den Böschungsfüßen bzw. Buhnenschatten ermittelt und in die Stammdaten- Datei der DaGS implementiert.

4.6 Anwendung des HFBM auf den Feststoffhaushalt der Elbe

4.6.1 Geschiebe

Abbildung 25 zeigt nach Implementierung aller Daten und Funktionen in das Datenbanksystem DaGS mit dem HFBM-Programm erzeugte Diagramme zum Geschiebetransport in der Elbe.

Wie der Frachtlängsschnitt (Abb. 25a) zeigt, findet im sächsischen Elbeabschnitt bis etwa Mühlberg (km 126,6) kein nennenswerter Geschiebetransport statt. Dies liegt einerseits an der groben Sohlstruktur dieses Abschnitts ($d_m > 20$ mm), andererseits ist der Geschiebeeintrag durch Staustufen im tschechischen Teil der Elbe und Querbauwerke in den Einzugsgebieten der Nebenflüsse nahezu vollständig unterbunden. Die Geschiebetransportmessungen bei Mühlberg bestätigen die Annahme, dass dieser Bereich als Beginn der Erosionsstrecke anzusehen ist. Dementsprechend nimmt der Geschiebetransport auf der Strecke Mühlberg-Torgau-Wittenberg-Barby (km 120-294) erheblich zu. Die Zusammensetzung der Flusssohle weist diesen Abschnitt als Übergangsbereich vom stark grobkiesigem zu feinkiesigem und sandigem Material aus. Im Gegensatz zu den Verhältnissen bei Mühlberg werden in der Erosionsstrecke erhebliche Feststoffmengen an der Sohle transportiert, wobei die Sohle im Bereich Torgau bis weit über Mittelwasser recht stabil ist. Bei Wittenberg findet erheblicher Transport bereits deutlich unter Mittelwasser statt: einerseits wird in diesem Bereich Material von oberhalb eingetragen, andererseits reagiert die Sohle entsprechend ihrem vergleichsweise feinkörnigen Aufbau sehr empfindlich auf Abfluss- und entsprechende Schleppkraftzunahme.

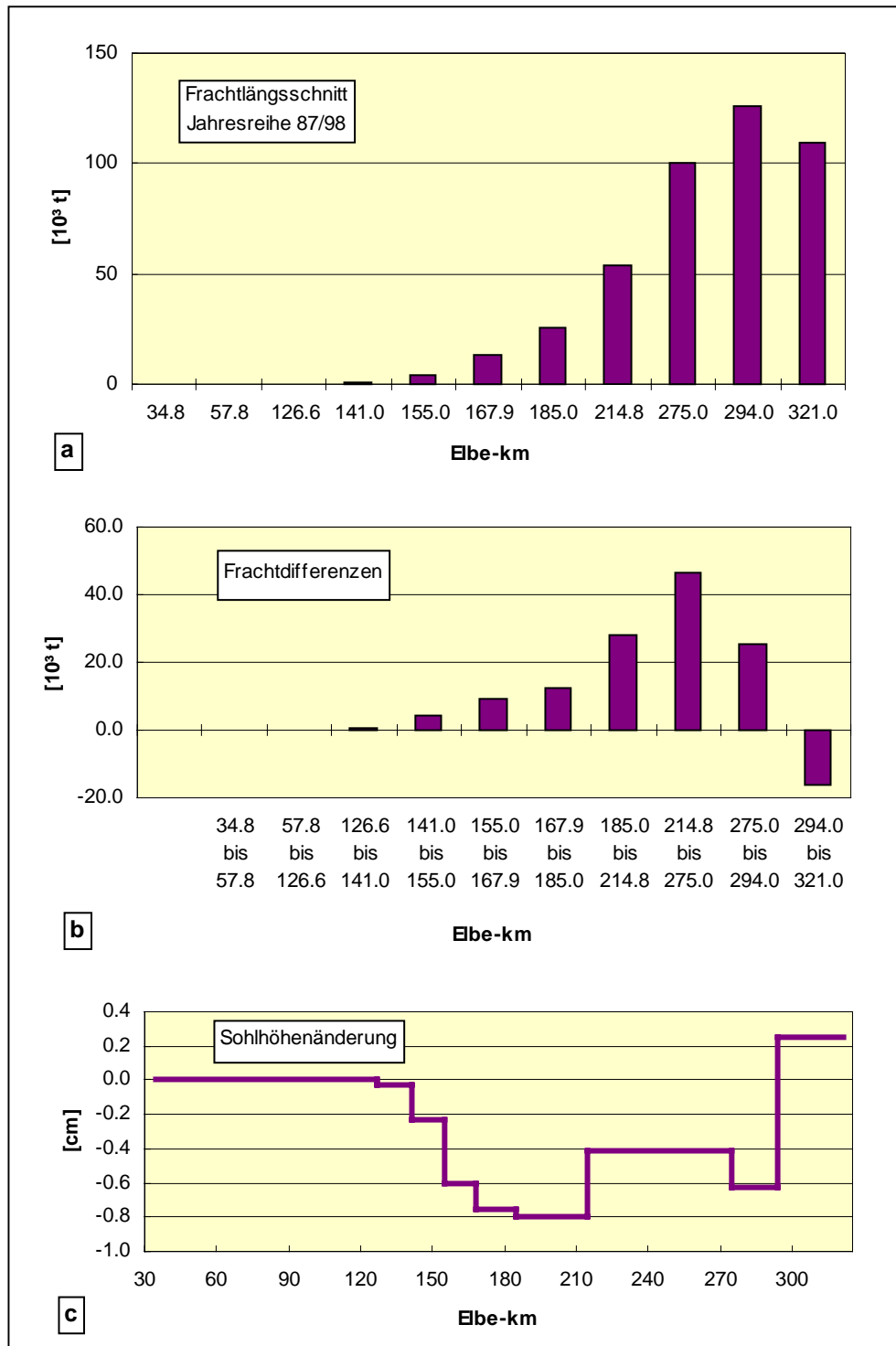


Abb. 25: Mittlere jährliche Geschiebefrachten, Frachtdifferenzen und Sohlhöhenänderungen für den Elbeabschnitt Pirna – Magdeburg auf der Basis der Abflussjahre 1987 - 98

Der Abschnitt Wittenberg bis Aken wird hier, im Gegensatz zu früheren Auswertungen, in die Erosionsstrecke einbezogen. Erst im Raum Magdeburg nimmt der Geschiebetransport wieder ab, d.h. die Sohlerosion geht in Sedimentation über. Diese Vorgänge werden mit Abbildung 4b besonders deutlich beschrieben, eine positive Frachtdifferenz entspricht hier einer Erosion im betrachteten Elbeintervall.

In Abbildung 25c sind die sich rechnerisch aus den Frachtdifferenzen ergebenden mittleren jährlichen Sohlhöhenänderungen dargestellt. Der Vergleich mit aus Querprofilpeilungen ermittelten Werten für die jährliche Eintiefung der Elbesohle im Elbeabschnitt km 140-185 (BAW & BFG 1996) bestätigt die Größenordnung der berechneten Werte. Die Implementierung einer Plausibilitätskontrolle in das HFBM durch Vergleich der abschnittsweise ermittelten Sohlhöhenänderungen mit Differenzen aus Querprofilpeilungen und mit Wasserspiegellagenänderungen ist perspektivisch geplant und kann umgekehrt für eine bessere Anpassung der Modellparameter genutzt werden.

In dem nicht dargestellten Elbeabschnitt unterhalb Magdeburg sind die Zusammenhänge noch nicht genügend genau erfasst, um eine verlässliche Quantifizierung vornehmen zu können. Zwischen km 390 und km 460 kann nach dem derzeitigen Stand der Transport-Funktionen von einer leichten Anlandungstendenz ausgegangen werden, unterhalb km 460 von einer leichten Erosionstendenz. Dieser Elbeabschnitt, insbesondere die so genannte Reststrecke (km 508-521), ist hinsichtlich seiner Feststofftransportsituation durch intensive Transportkörperbewegungen gekennzeichnet, die eine Erfassung der Geschiebetransportraten naturgemäß schwierig gestalten.

4.6.2 Suspendierter Sand

Wegen ihrer potenziellen Bedeutung für die Sohlentwicklung wird die Schwebstoffteilmenge des suspendierten Sandes im HFBM gesondert ausgewiesen. Die Abbildung 26 zeigt einen mit Hilfe der in Kapitel 4.4 ermittelten Transport-Abfluss-Beziehungen berechneten Frachtlängsschnitt des suspendierten Sandes für zwei extreme Abflussjahre (1987, 1991) innerhalb der letzten 13 Jahre. Diese beiden Abflussjahre sollen beispielhaft je ein abflussarmes und ein abflussreiches Jahr simulieren, da die Extrapolation der aus dem Messzeitraum 1995-2000 gewonnenen Funktionen auf zurückliegende Jahre nicht ausreichend gesichert ist. Der suspendierte Sand, dessen Anteil am Gesamtschwebstoff in Abhängigkeit von der Messstelle und vom Abfluss bei ca. 10 bis 30 % liegt, weist ebenfalls eine hohe Varianz der jährlichen Frachten entsprechend den in den beiden betrachteten Jahren stark unterschiedlichen Abflussverhältnissen auf. Die Zuordnung der Frachtdifferenzen zwischen benachbarten Messstellen zu Erosions- bzw. Sedimentationsvorgängen kann beim suspendierten Sand nicht so eindeutig vorgenommen werden wie beim Geschiebe, da nur eine Teilmenge des suspendierten Sandes als Bett bildend angesehen werden kann (s. Kap. 4.3).

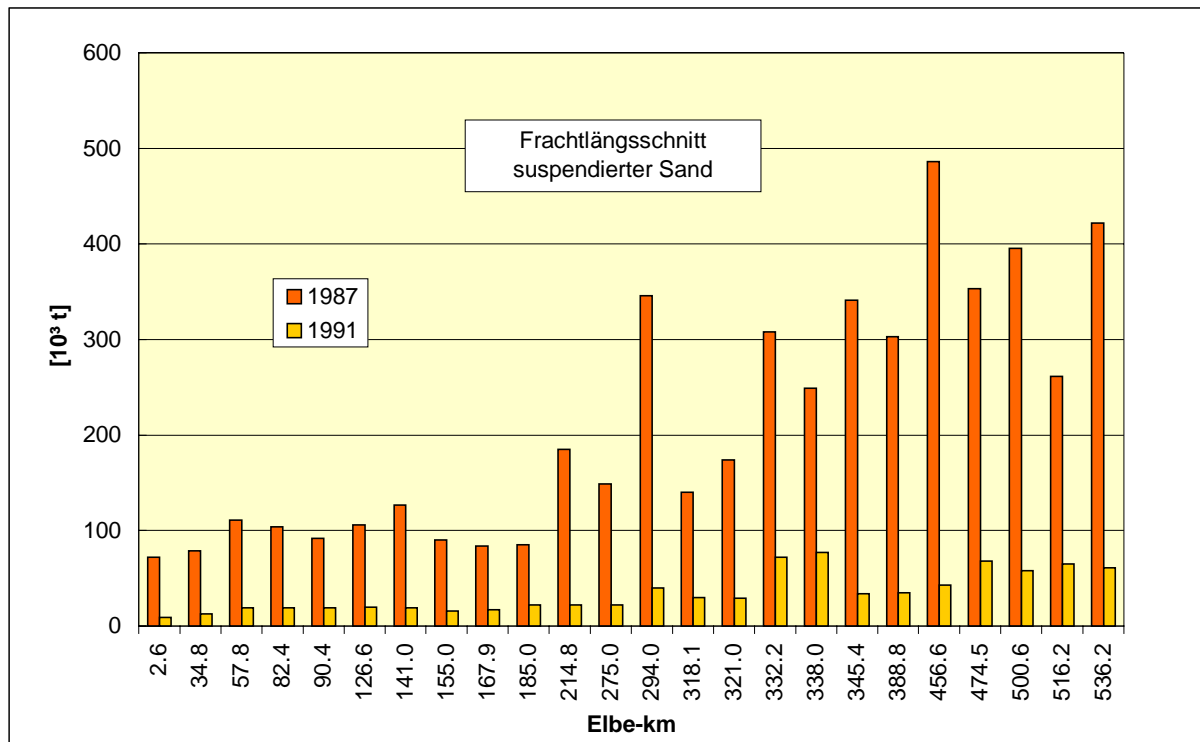


Abb. 26: Berechnete Jahresfrachten des suspendierten Sandes der Elbe in den Abflussjahren 1987 und 1991

Nach den vorliegenden Erkenntnissen kann man davon ausgehen, dass beispielsweise die im abflussarmen Jahr 1991 relativ gleich bleibende Sandfracht zwischen Dresden (km 57,8) und Aken (km 275,0) überwiegend aus durchtransportierten, nicht sohlrelevanten Sand (z.B. Feinsand aus Einträgen und Einleitungen) besteht, während im abflussreichen Jahr 1987 sich diesem Sand erhebliche Anteile von aus der Sohle stammenden Sand überlagern.

4.6.3 Bett bildende Feststofffrachten

Zur Quantifizierung der für die Sohlentwicklung relevanten Feststofffrachten und für die Prognose zukünftiger Erosions- bzw. Anlandungstendenzen in der Elbe muss neben dem Geschiebetransport auch der Anteil des suspendierten Sandes berücksichtigt werden, der nur zeitweise mit der Sohle im Austausch steht, jedoch zu einem erheblichen Maße zur Sohlbildung beiträgt.

Die Ergebnisse von Kapitel 4.3 zeigen, dass dieser Bett bildende Anteil des suspendierten Sandes für jede Messstelle durch eine abflussabhängige Funktion (Anlage 4.23) beschrieben werden kann und für mittlere Abflüsse (MQ) von ca. 10 % des gesamten suspendierten Sandes an der Messstelle Schöna bis zu ca. 50 % im Elbeabschnitt unterhalb Magdeburg reicht. Diese Funktionen wurden zusätzlich zu den Transport-Abfluss-Beziehungen in das HFBM implementiert. Abbildung 27 zeigt einen auf der Basis dieser Funktionen ermittelten Frachtlängsschnitt der Elbe für die Bett bildenden Feststofffrachten (Geschiebe + Bett bildender Sandanteil) im Jahresmittel. Die Abbildung zeigt, dass bei der Bett bildenden Fracht vor dem Beginn der Erosionsstrecke erwartungsgemäß der Sand gegenüber dem Geschiebe dominiert, aber dass auch in Elbeabschnitten mit hoher Geschiebefracht der Bett bildende Sandanteil im Mittel noch ca. 30 bis 50 % der gesamten Bett bildenden Feststofffracht beträgt.

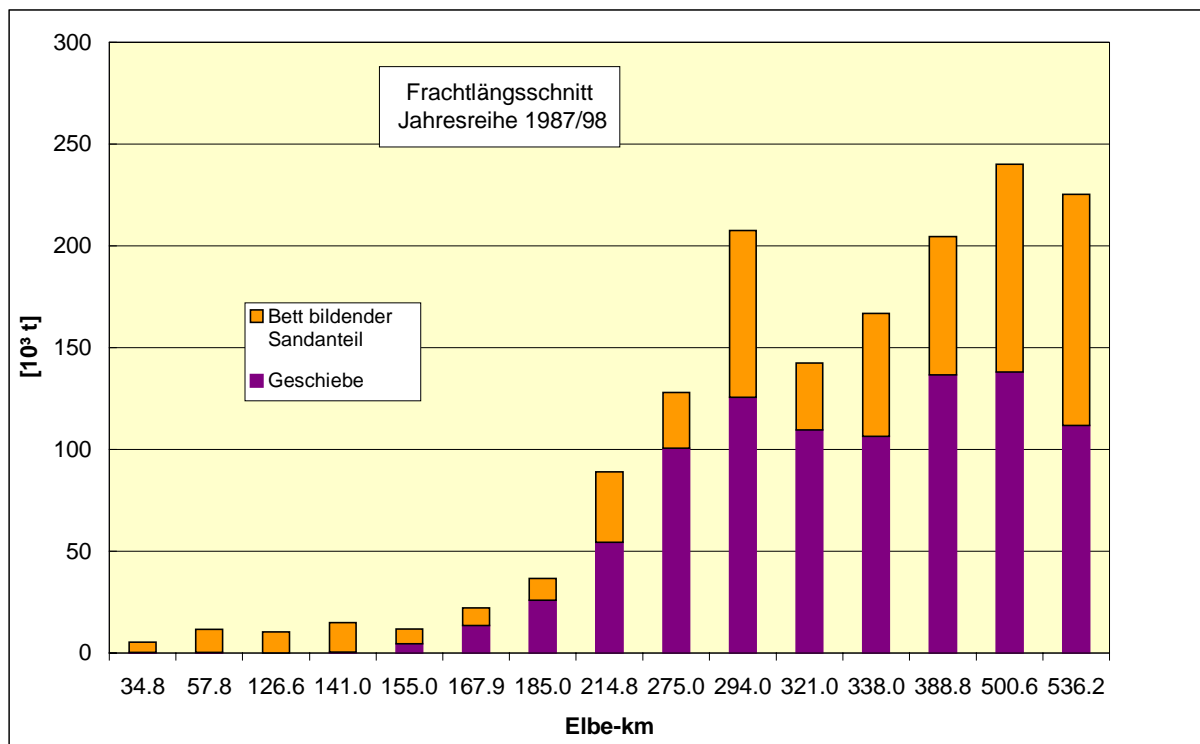


Abb. 27: Mittlere jährliche Bett bildende Feststofffracht

5 Zusammenfassung

Zur Quantifizierung sohlhöhenrelevanter Feststofftransportprozesse in der Elbe muss neben dem Geschiebetransport auch der Anteil des suspendierten Sandes, der mit der Sohle im Austausch steht, betrachtet werden.

In der vorliegenden Arbeit wurden auf der Grundlage umfangreicher Naturuntersuchungen den Transport von suspendiertem Sand beschreibende sedimentologische und hydraulische Parameter bestimmt.

Für die von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) regelmäßig beprobten ca. 25 Elbe-Messstellen konnten zahlreiche funktionale Abhängigkeiten dieser Parameter und insbesondere auch solche, die den Bett bildenden Anteil des suspendierten Sandes beschreiben, aufgestellt werden.

Zur operationellen Unterstützung dieser Aufgabe wurden in das von der BfG entwickelte Hydrologische-Feststoff-Bilanz-Modell (HFBM) die für die Elbe aus den Messungen abgeleiteten Transport-Abfluss-Beziehungen implementiert und durch Simulation der zeitlichen und räumlichen Entwicklung des Geschiebetransports sowie des für die Bettbildung bedeutsamen Anteils der suspendiert transportierten Sandfracht entsprechende Frachtlängsschnitte und daraus ableitbare morphologische Größen berechnet.

Die in dieser Arbeit gefundenen Abhängigkeiten und Funktionen sollen für alle im BMBF-Verbundforschungsvorhaben „Ökologische Forschung in der Stromlandschaft Elbe“ tätigen Wissenschaftler als Informationsquelle und Entscheidungshilfe zu den Fragen des Sedimenttransportes dienen. Die abschnittsweise Berechnung der Frachten und die daraus resultierenden Bilanzen (Überschüsse, Defizite) ermöglichen die Abgrenzung von Erosions- und Akkumulationsstrecken und damit eine realistische Einschätzung der aktuellen morphologischen Verhältnisse der Elbe.

Dies ist eine Voraussetzung für die Planung und Entwicklung von Unterhaltungs- und Ausbaukonzepten der WSV insbesondere für eine Geschiebemanagement im Bereich der Erosionsstrecke.

Da das HFBM auf der Basis vertrauenswürdiger Naturdaten (empirisch-statistisch) operiert, eignet es sich auch hervorragend als Initial- und Eichmodell für ein physikalisch begründetes numerisches Feststofftransportmodell bzw. zu dessen Validierung.

6 Verzeichnis der Symbole und Einheiten

A	m ²	Fläche des Gewässerquerschnitts
a	m	Sohlabstand der Referenzebene für die Schwebstoffkonzentrationsverteilung
c	mg/l	Schwebstoffkonzentration
c _a	mg/l	Schwebstoffreferenzkonzentration
C	m ^{1/2} /s	Chézy- Koeffizient
d	m	Korndurchmesser
d _m	m	mittlerer Korndurchmesser nach MEYER-PETER, MÜLLER (1949)
g	m/s ²	Erdbeschleunigung
h	m	Wassertiefe
I	‰	Sohlgefälle, Wasserspiegelgefälle
k _S	m	äquivalente Sandrauigkeit, NIKURADSE-Rauigkeit
k _{St}	m ^{1/3} /s	Manning- Strickler- Beiwert
m _G	kg/ms	Geschiebetrieb
m _S	kg/ms	Schwebstofftrieb
Q	m ³ /s	Abfluss
R	m	Hydraulischer Radius
v	m/s	Fließgeschwindigkeit
v ₀ *	m/s	Sohlschubspannungsgeschwindigkeit
v _m	m/s	vertikal gemittelte Fließgeschwindigkeit
v _{mm}	m/s	querschnittsgemittelte Fließgeschwindigkeit
v _s	m/s	Sinkgeschwindigkeit
y	m	Sohlabstand
y ₀	m/s	Null-Geschwindigkeits-Niveau
z	-	Schwebstoffzahl, ROUSE-Zahl
β	-	Verhältnis zweier Austauschkoefizienten
κ	-	KARMAN- Konstante (= 0,4)
ρ	g/cm ³	Dichte (des Wassers)
τ	N/m ²	Schubspannung
τ _c	N/m ²	kritische Schubspannung
τ ₀	N/m ²	Sohlschubspannung

7 Literatur

BAGNOLD, R.A. (1966): An approach to the sediment transport problem from general physics, U.S. Geological Survey Professional Paper 422-I, Washington

BAW & BFG (1996): Erosionsstrecke der Elbe - Bericht zur wissenschaftlichen Vorbereitung und Begleitung des Naturversuchs Geschiebezugabe, Berlin, Mai

BFG (1994): Kornzusammensetzung der Elbesohle von der deutsch- tschechischen Grenze bis zur Staustufe Geesthacht, BfG- Bericht 0834, Berlin

BFG (1995): Simulation und Prognose von Geschiebetransportprozessen mit GEM 1, BfG-Nr.0896, Koblenz, Juni

BÜCHELE, B. UND SAUER, W. (2000): Morphologie: Erste Ergebnisse zum Feststofftransport der Elbe, in: ATV-DVWK Forschungsberichte - Die Elbe und ihre Nebenflüsse, Hennef

BUSSE, T. (1998): Eignung der Trübung als Steuergröße zur Entnahme von Schwebstoffproben, Diplomarbeit, Technische Fachhochschule Berlin/ Bundesanstalt für Gewässerkunde

DITTRICH, A. (1997): Strömungsfeld über rauen Sohlen mit geringen relativen Überdeckungen, Wasserwirtschaft 87, S.7-8

DVWK (1986): Schwebstoffmessungen, Regeln zur Wasserwirtschaft Heft 125, DVWK, Verlag Paul Parey, Hamburg

ENGELUND, F. (1965): A criterion for the occurrence of suspended load, Notules Hydrauliques, La Houille Blanche, Nr. 6

HEILMAIR, T. (1997): Hydraulische und morphologische Kriterien bei der Beurteilung von Mindestabflüssen unter besonderer Berücksichtigung der sohnahen Strömungsverhältnisse, Berichte der Versuchsanstalt Oberrach und des Lehrstuhls für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München, Nr. 79

HOHNBERG, H.-J. (1997): Schubspannungsmessungen in der Elbe, Abschlussbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Außenstelle Berlin

JAWORSKI, B.M. UND DETLAF, A.A.(1972): Physik griffbereit, Definitionen-Gesetze-Theorien, Vieweg + Sohn, Braunschweig

NEZU, I. UND NAKAGAWA, H. (1993): Turbulence in open-channel flows, A.A. Balkema / Rotterdam / Brookfield

NICODEMUS, U. (1996): Function - A Program To Set Up Functions For Sediment Transport, BfG, Koblenz, Juni

ROUSE, H. (1937): Modern concepts of the mechanics of fluid turbulence, ASCE-Transactions, Paper 1965

SCHMIDT, A. (1996): Ergebnisse neuerer Untersuchungen zu Gewässersohle und Feststofftransport in der Erosionsstrecke. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 74, S. 51-62

SCHMIDT, R. (1997): Filtriermethode zur Bestimmung des Schwebstoffgehalts, Diplomarbeit, Technische Fachhochschule Berlin / Bundesanstalt für Gewässerkunde

STATZNER, B. UND MÜLLER, R. (1989): Standard hemispheres as indication of flow characteristics in lotic benthos research, Freshwater Biology 26, 227-231

Van RIJN, L.C. (1990): Principles of fluid flow and surface waves in rivers, estuaries, seas and oceans, Aqua Publications, Amsterdam

Van RIJN, L.C. (1993): Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas, Aqua Publications, Amsterdam

VANONI, V.A. (ED.)(1977): Sedimentation engineering, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 54, New York

WANG, Z., DITTRICH, A.(1992): A study on problems in suspended sediment transportation, in: Hydraulic and Environmental Modelling: Estuarine and River Waters, edited by R.A.Falconer et.al., Ashgate, University Press Cambridge

ZANKE, U. (1982): Grundlagen der Sedimentbewegung, Springer, Berlin Heidelberg New York

ZWISCHENBERICHT (1997): BMBF-Verbundvorhaben (FKZ 0339566) „Morphodynamik der Elbe“, Zwischenbericht August

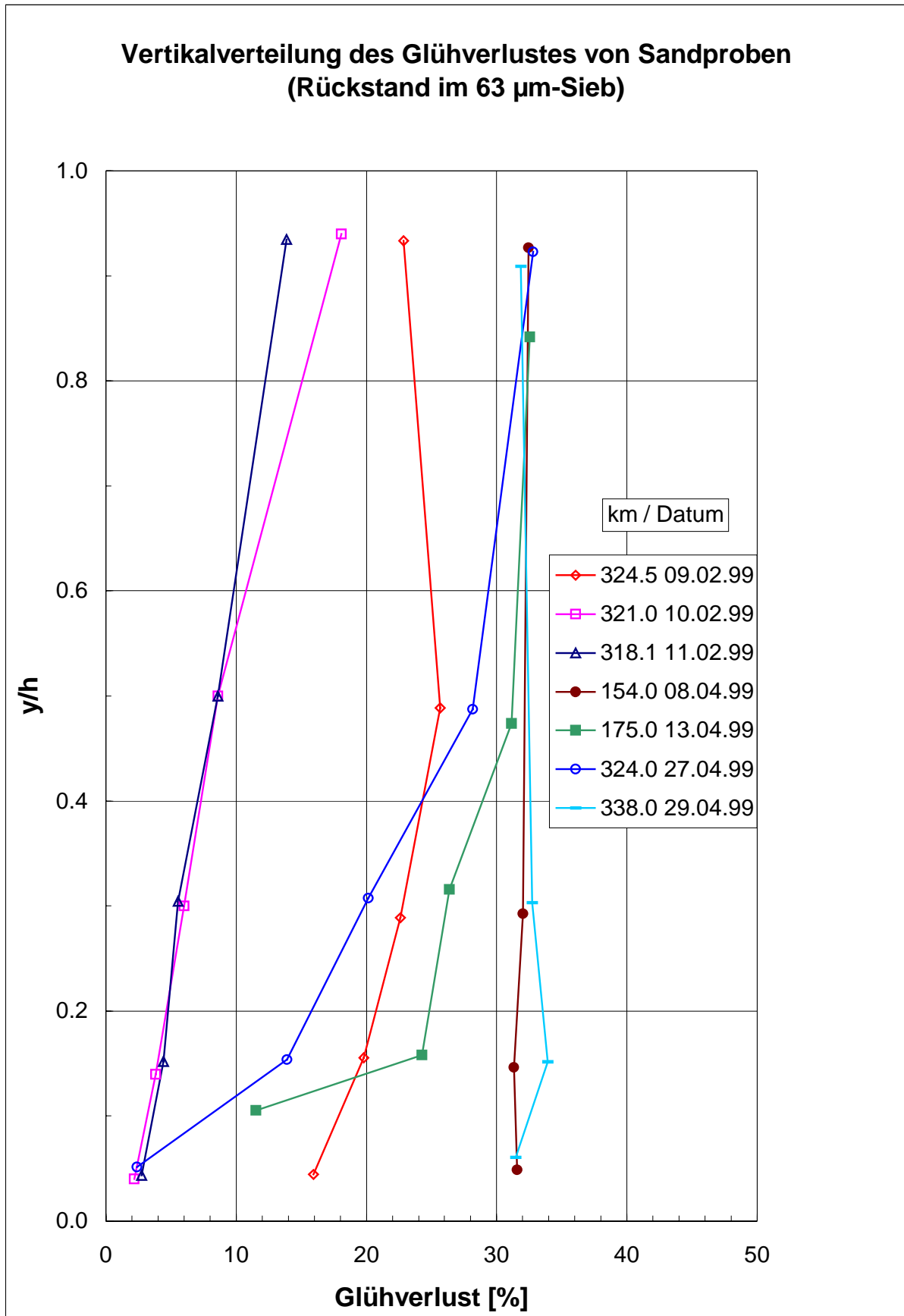
ZWISCHENBERICHT (1998): BMBF-Verbundvorhaben (FKZ 0339566) „Morphodynamik der Elbe“, Sachstandsbericht 1.1. bis 31.12.1997, April

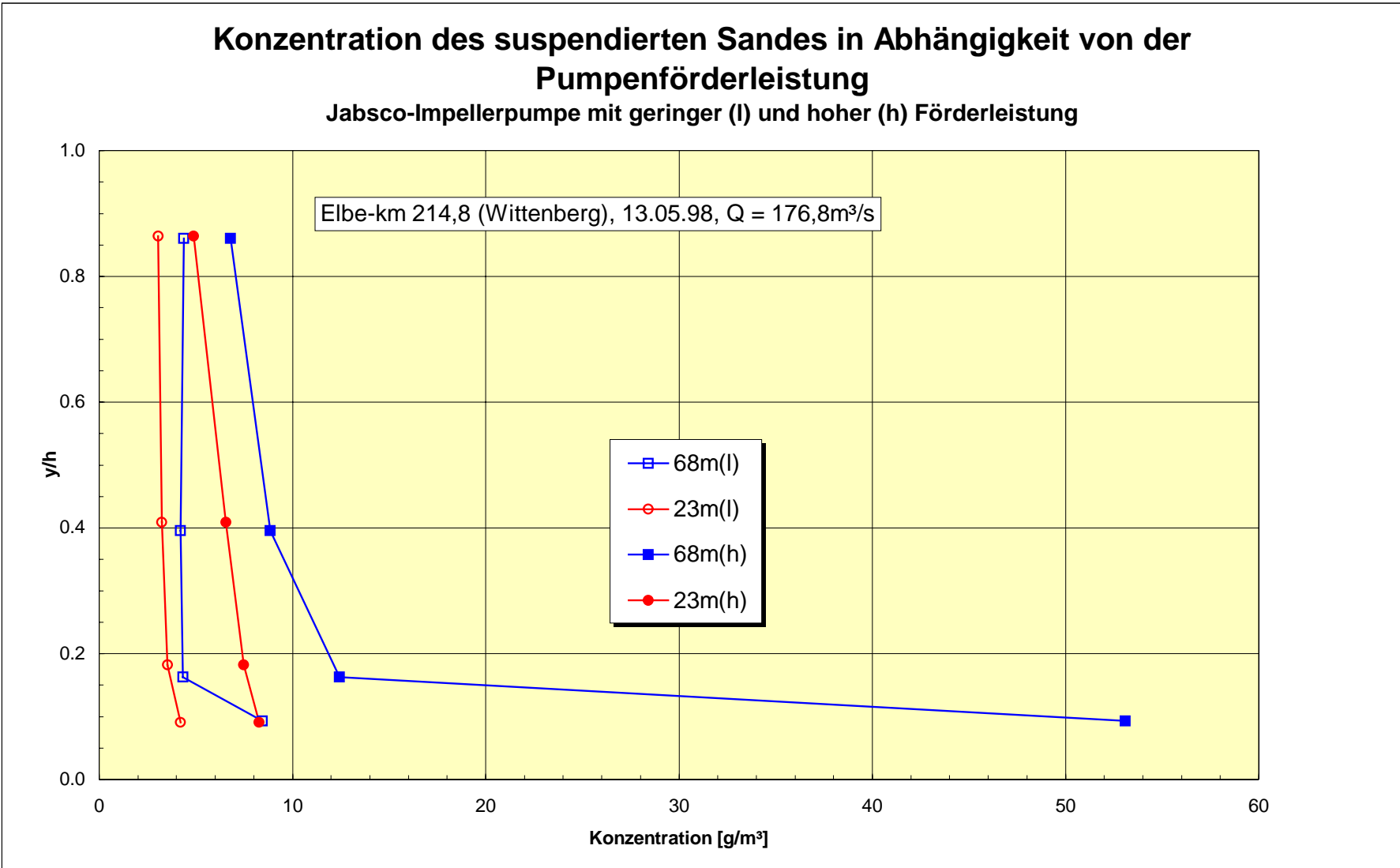
ANLAGEN

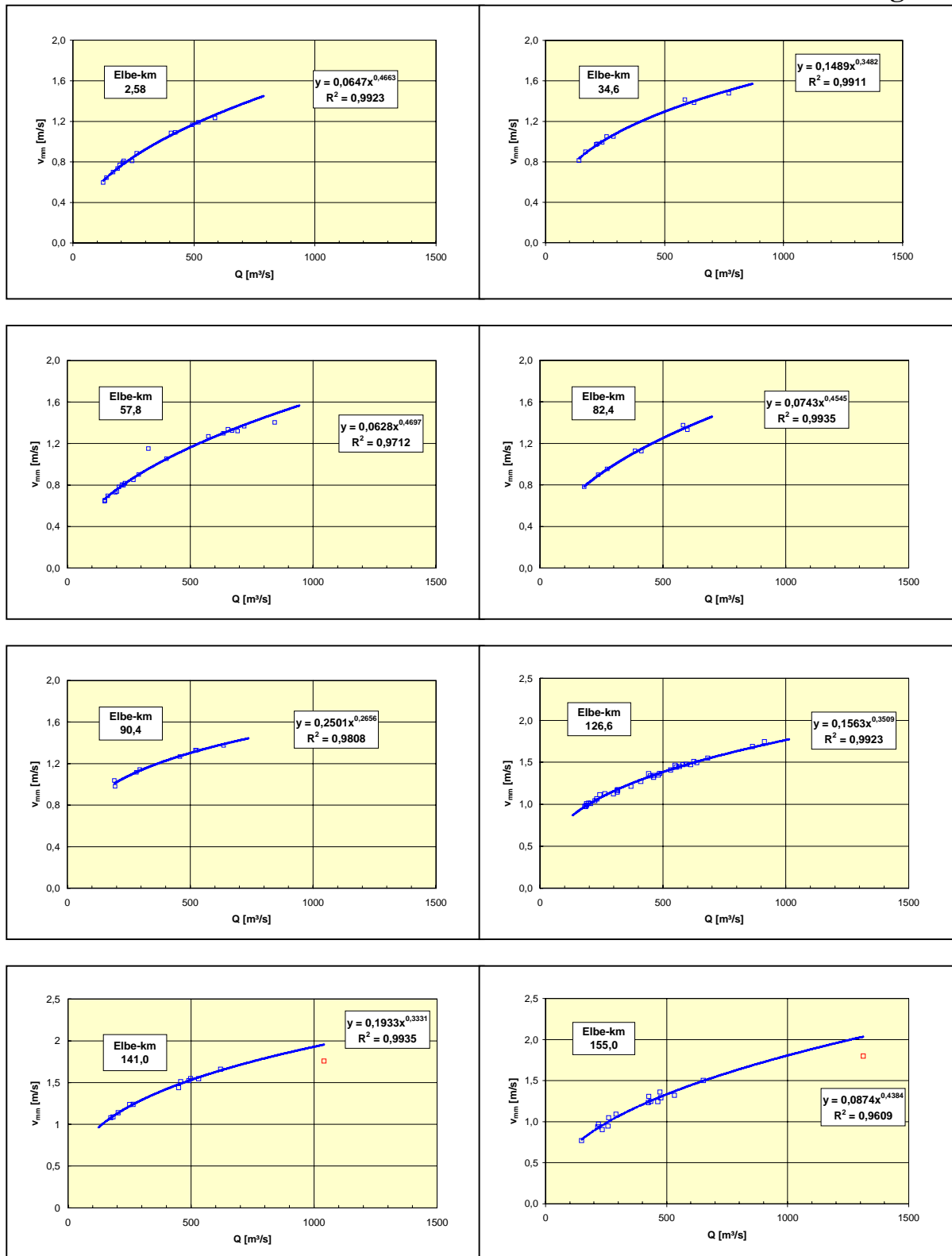
Anlage 3.1



Schubspannungsmesssystem: Linsenförmige Geräteeinfassung (teilweise demontiert) und die im Edelstahlgehäuse bewegliche Messplatte (unteres Bild, Bildmitte) mit definierter Rauigkeit an der Oberfläche

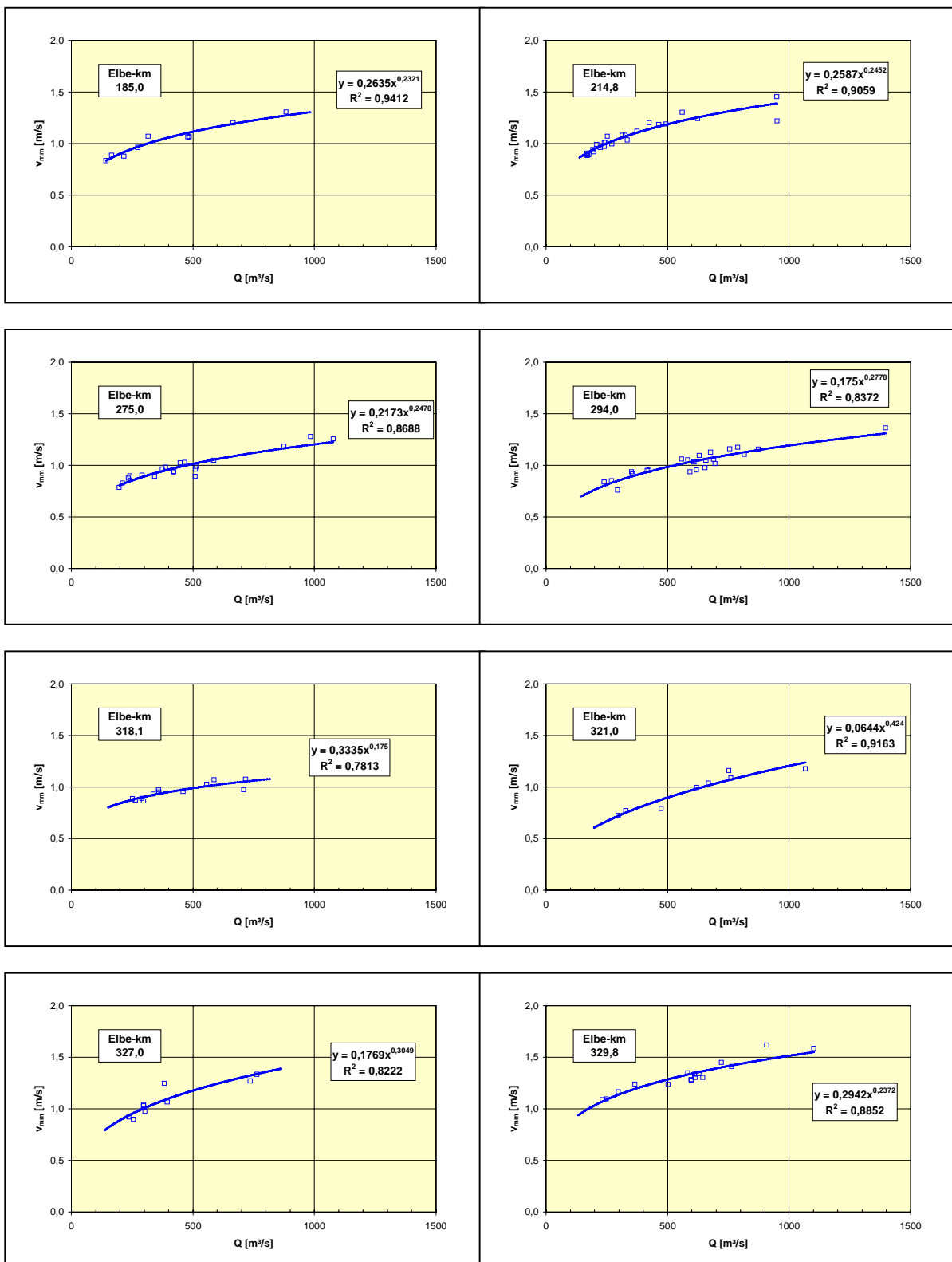






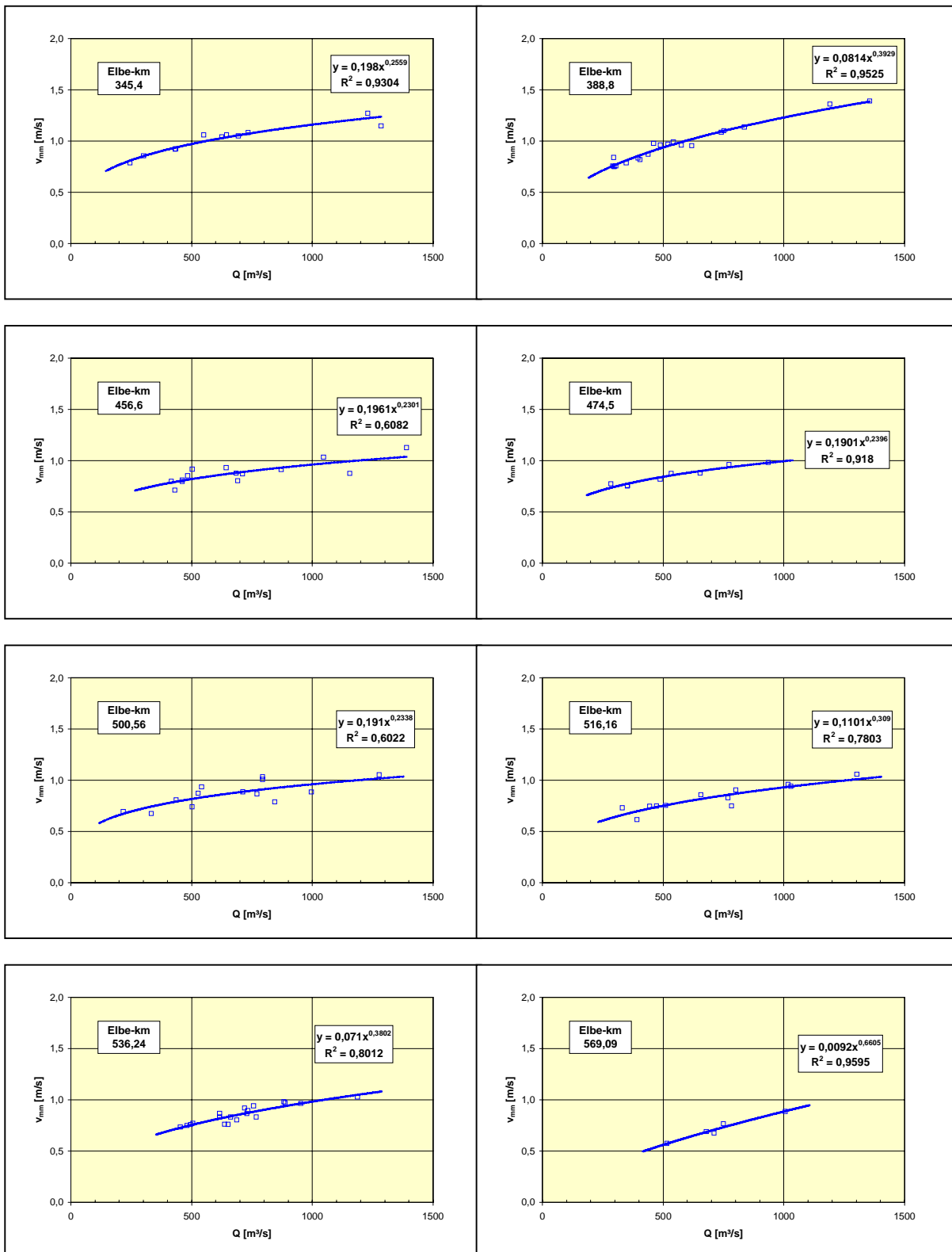
**Querschnittsgemittelte Geschwindigkeit als Funktion des Abflusses,
 Elbe-km 2,6-155,0**

(Stand 8/2000)



**Querschnittgemittelte Geschwindigkeit als Funktion des Abflusses,
 Elbe-km 185,0-329,8**

(Stand 8/2000)



**Querschnittgemittelte Geschwindigkeit als Funktion des Abflusses,
 Elbe-km 345,4-569,1**

(Stand 8/2000)

Anlage 4.4

ID_KM	MESSTELLE	PEGEL	A	B	R ²	N	Q_MIN	Q_MAX
2.600	Schoena	Dresden	0.0647	0.4663	0.9923	14	126	588
34.800	Pirna	Dresden	0.1489	0.3482	0.9911	10	141	770
57.800	Dresden	Dresden	0.0628	0.4697	0.9712	20	152	844
82.400	Meissen	Dresden	0.0743	0.4545	0.9935	6	180	582
90.400	Zehren	Dresden	0.2501	0.2656	0.9808	8	192	637
126.600	Muehlberg	Torgau	0.1563	0.3509	0.9923	35	182	914
141.000	Belgern	Torgau	0.2320	0.3008	0.9727	12	174	1040
155.000	Torgau	Torgau	0.1081	0.4011	0.9602	16	149	1313
185.000	Mauken	Torgau	0.2635	0.2321	0.9412	9	142	883
214.800	Wittenberg	Wittenberg	0.2587	0.2452	0.9059	24	168	951
275.000	Aken	Aken	0.2173	0.2478	0.8688	19	197	1077
294.000	Barby	Barby	0.1750	0.2778	0.8372	24	239	1397
318.100	Magdeburg	Barby	0.3335	0.1750	0.7813	12	251	717
321.000	Magdeburg	Barby	0.0644	0.4240	0.9163	8	297	1067
324.500	Magdeburg	Magdeburg	0.0715	0.4402	0.9976	4	236	748
327.000	Magdeburg	Magdeburg	0.1769	0.3049	0.8222	9	237	764
329.800	Magdeburg	Magdeburg	0.2942	0.2372	0.8852	16	232	1102
332.200	Magdeburg	Magdeburg						
338.000	Magdeburg	Magdeburg				7	245	589
345.400	Niegripp	Magdeburg	0.1980	0.2559	0.9304	11	245	1285
388.800	Tangermünde	Tangermünde	0.0814	0.3929	0.9525	19	291	1356
456.600	Wittenberge	Wittenberge	0.1961	0.2301	0.6082	14	416	1390
474.500	Schnackenburg	Wittenberge	0.1901	0.2396	0.9180	11	284	936
500.560	Langendorf	NeuDarchau	0.1910	0.2338	0.6022	13	217	1277
516.160	Wilkenstorf	NeuDarchau	0.1101	0.3090	0.7803	12	331	1303
536.200	Neu Darchau	NeuDarchau	0.0710	0.3802	0.8012	19	453	1187
569.090	Hohnstorf	NeuDarchau	0.0092	0.6605	0.9595	5	516	1006

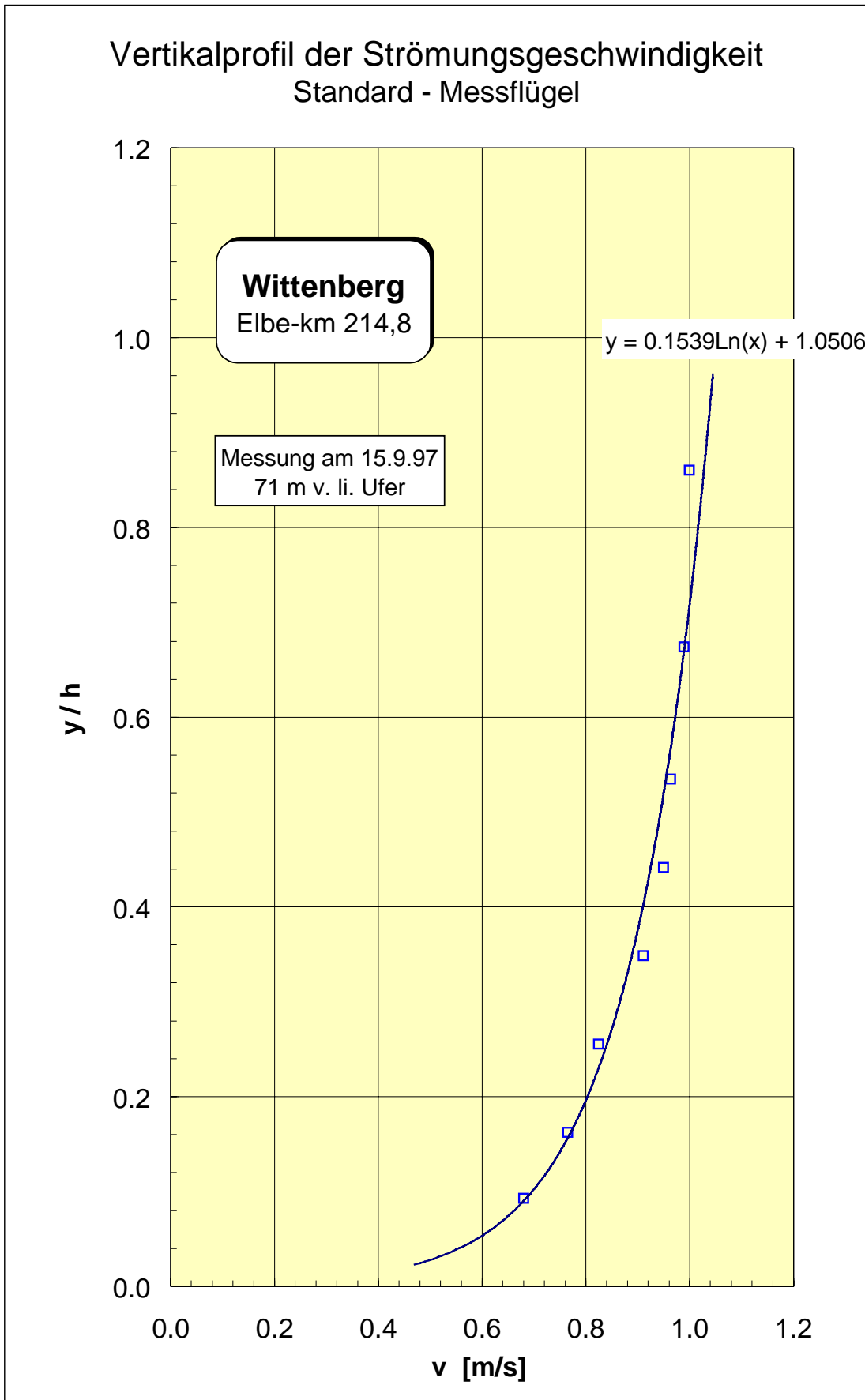
Tabelle der Funktionen für die querschnittsgemittelten Geschwindigkeiten

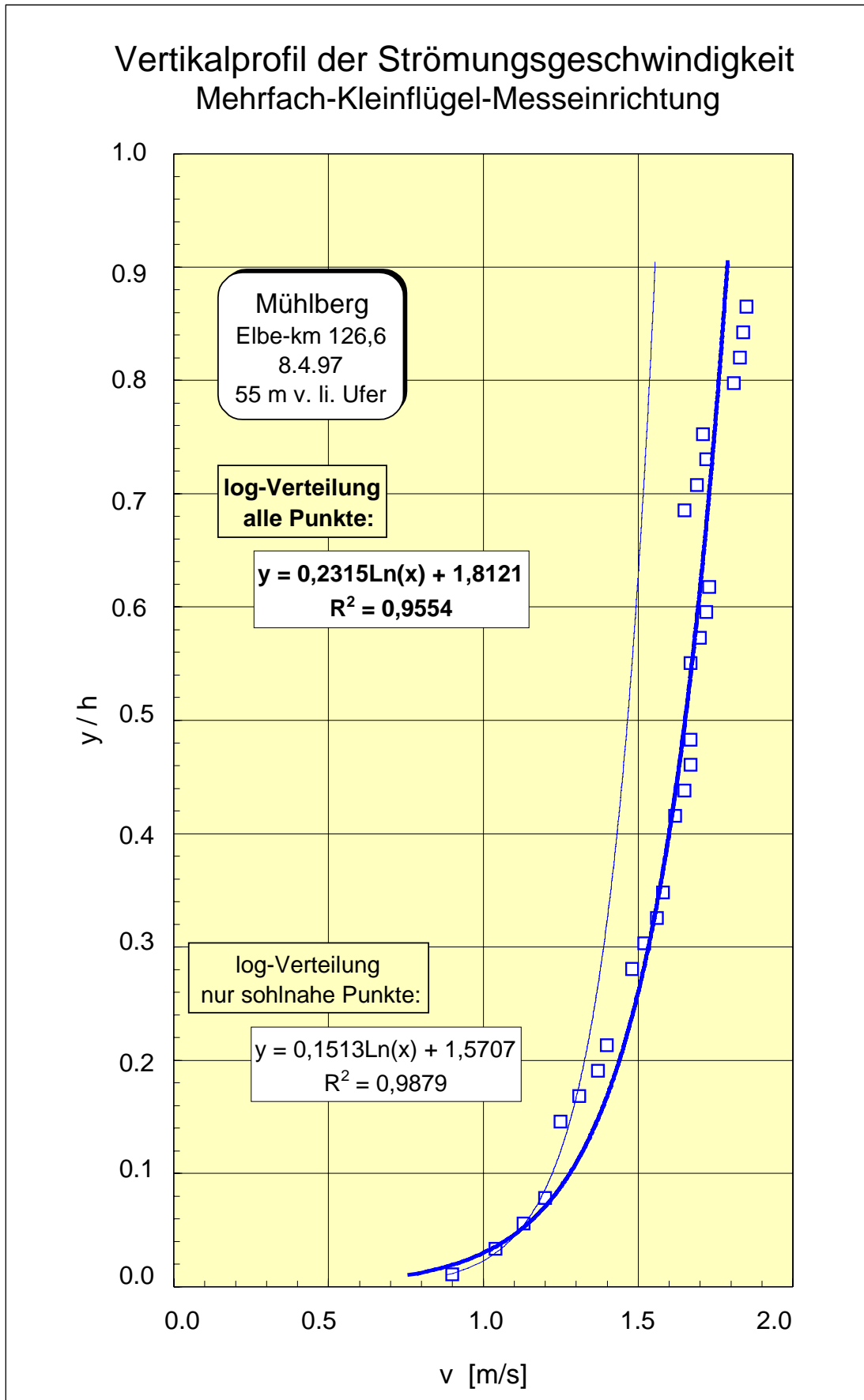
Datenquelle: Abflussmessdateien des Messschiffes "Elbegrund" (WSA Magdeburg) 1994 - 1999, Auswertung mit Software Q

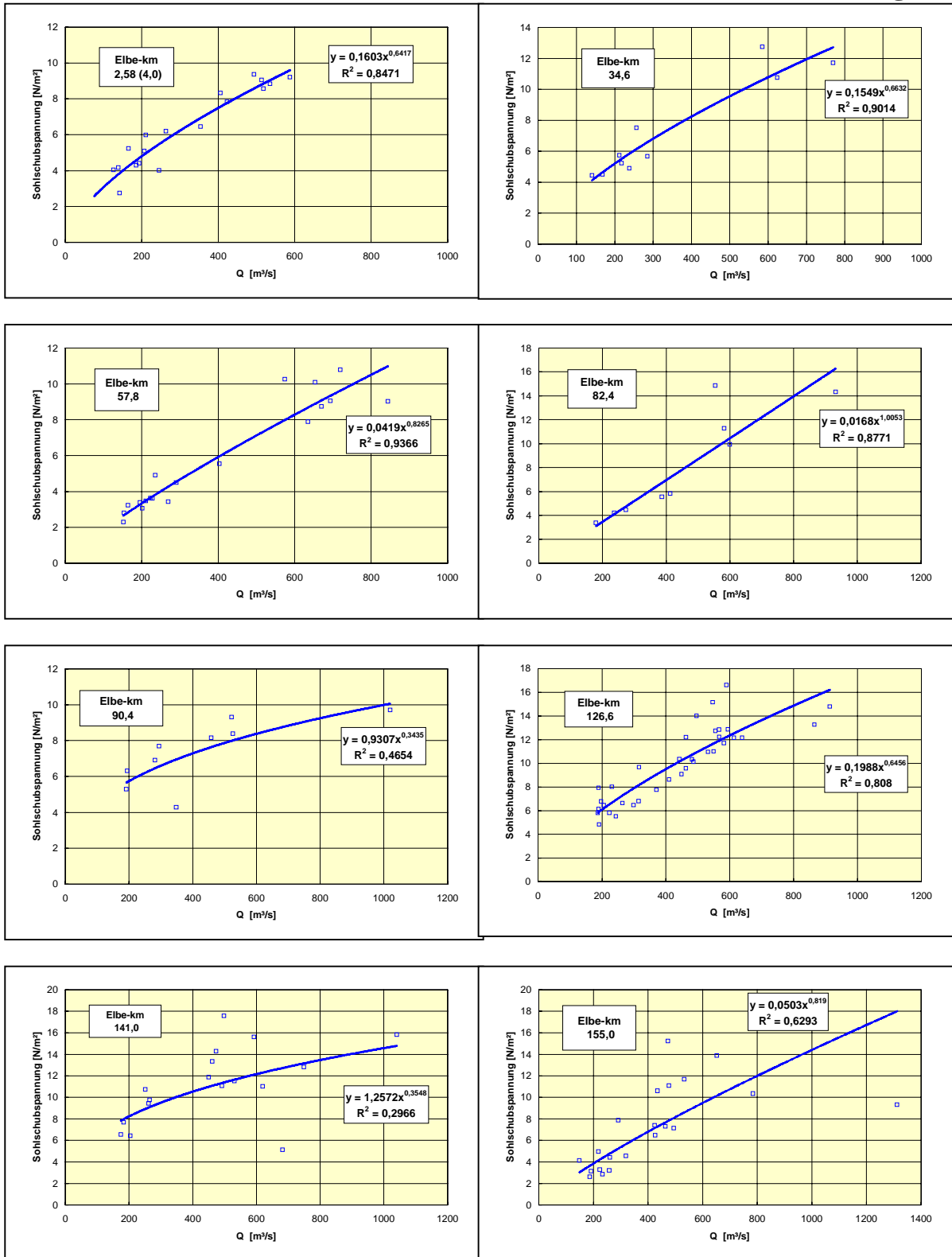
Art der Regressionsfunktion: $v_{mm} = A \cdot Q^B$

Anzahl der Messungen: N, Bestimmtheitsmaß: R²

Q_MIN, Q_MAX: untere/obere Grenze des Messwerteintervalls

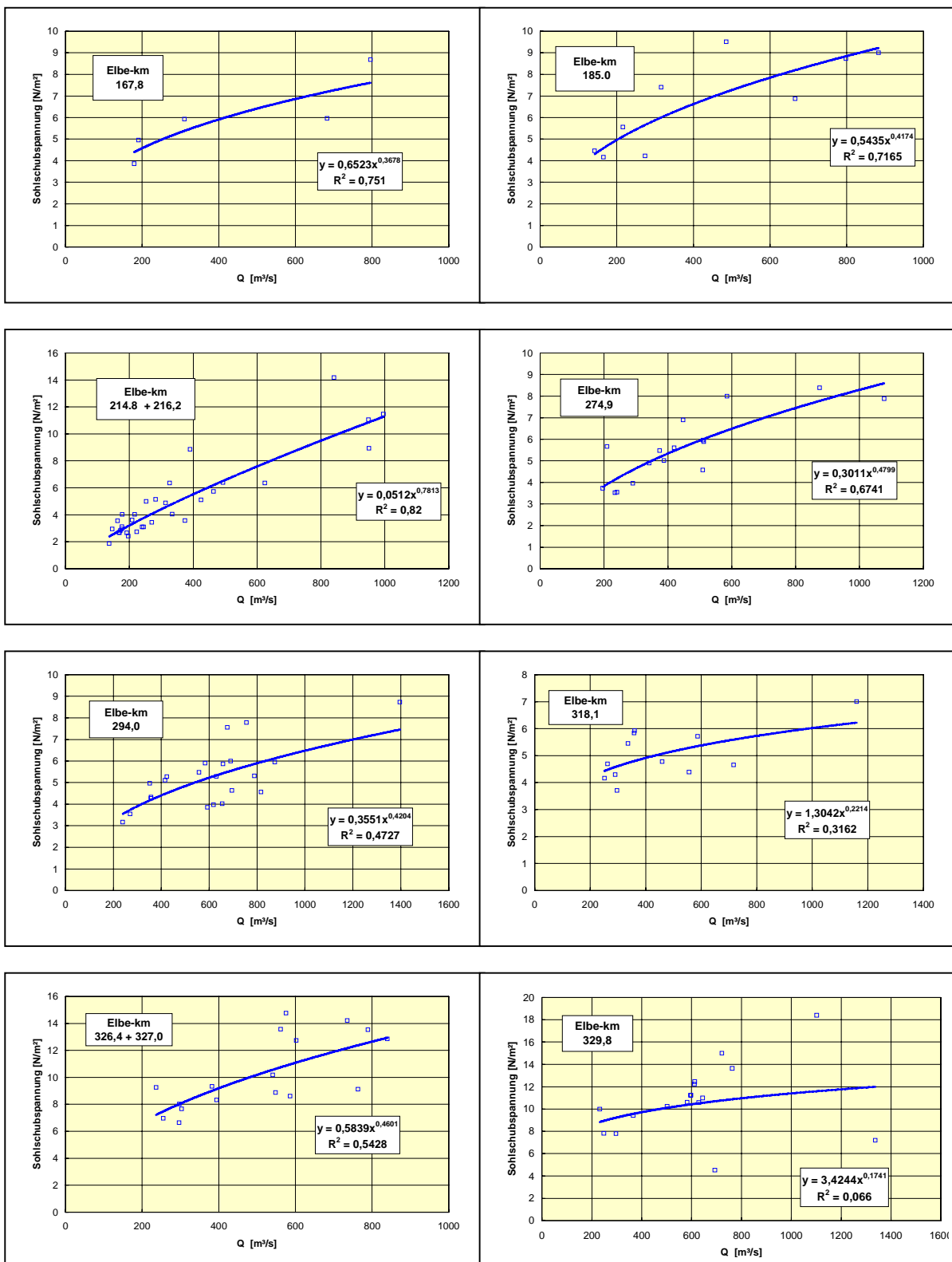






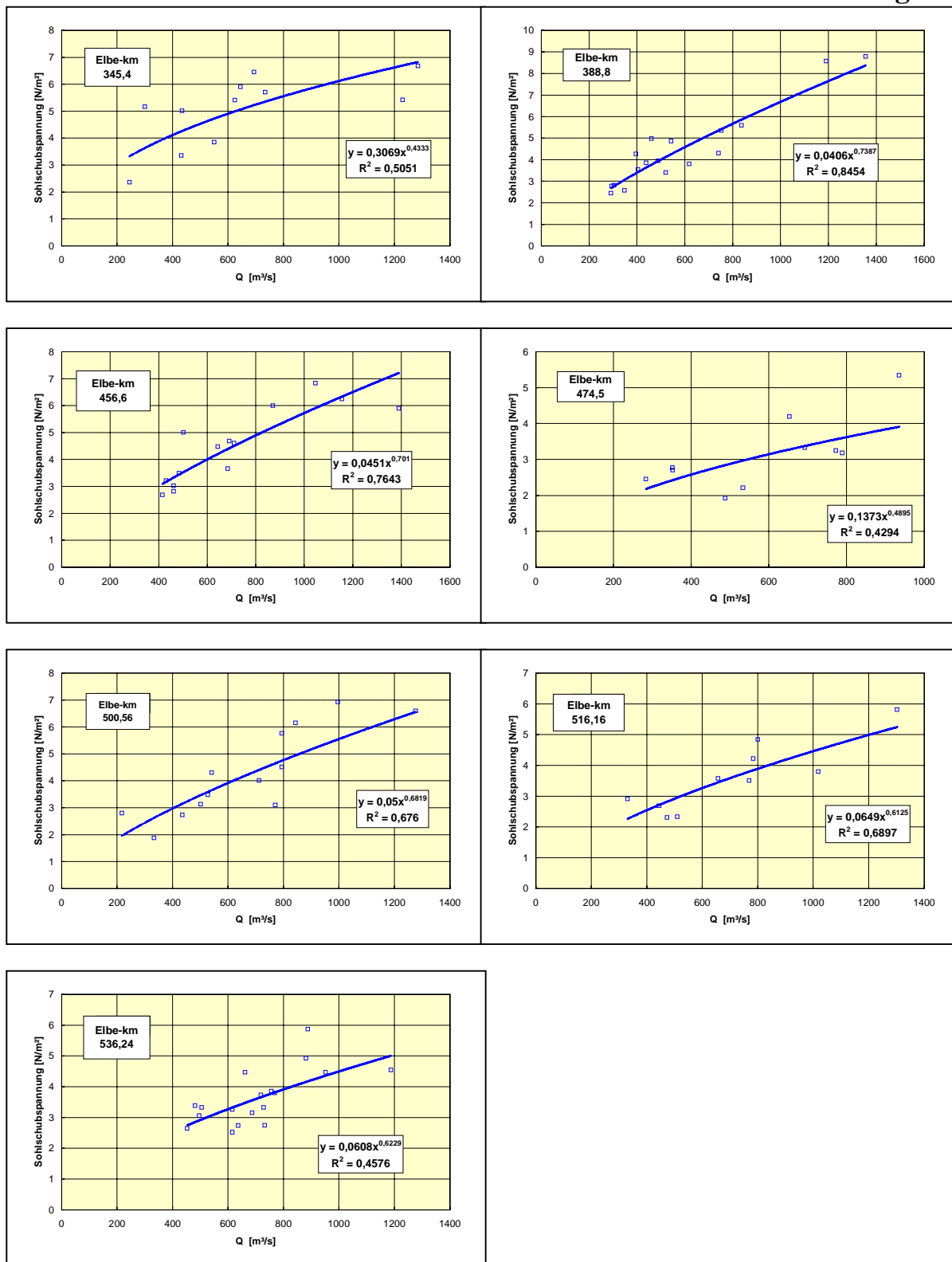
**Berechnete Sohlschubspannungen als Funktion des Abflusses,
 Elbe-km 2,6 – 155,0**

(Stand 8/2000)



**Berechnete Sohlschubspannungen als Funktion des Abflusses,
 Elbe-km 167,8 – 329,8**

(Stand 8/2000)



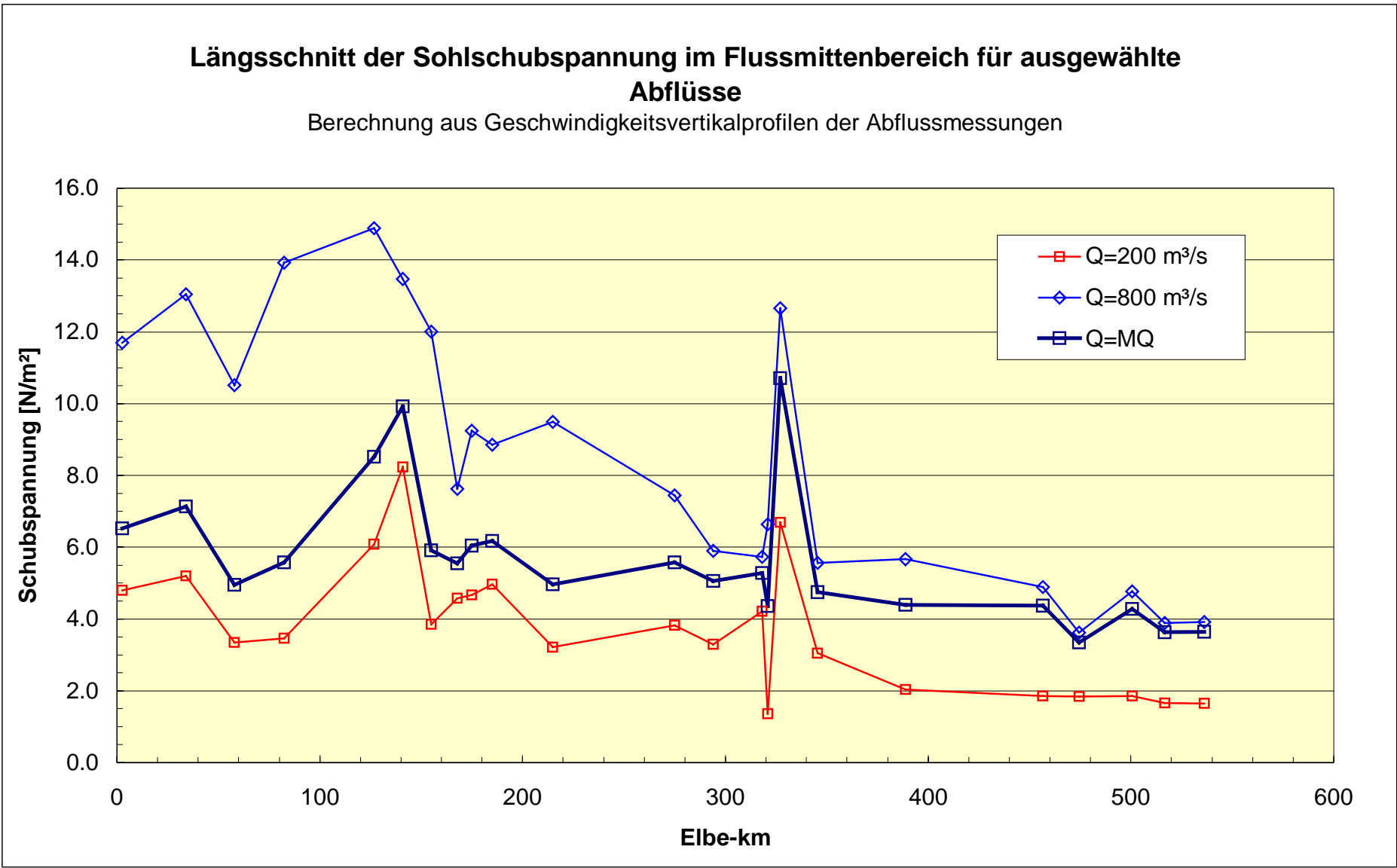
**Berechnete Sohlschubspannungen als Funktion des Abflusses,
 Elbe-km 345,4 – 536,2**

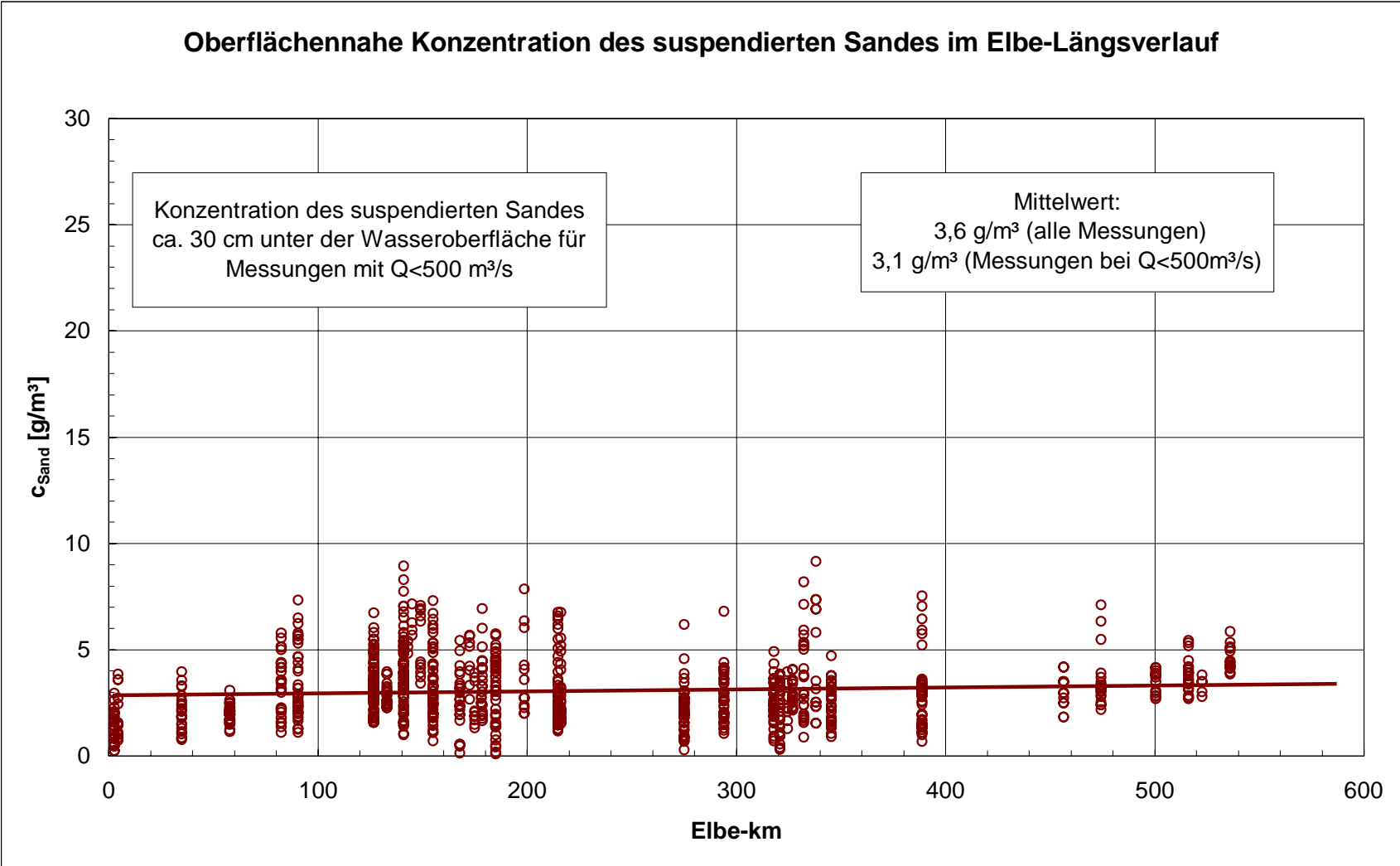
(Stand 8/2000)

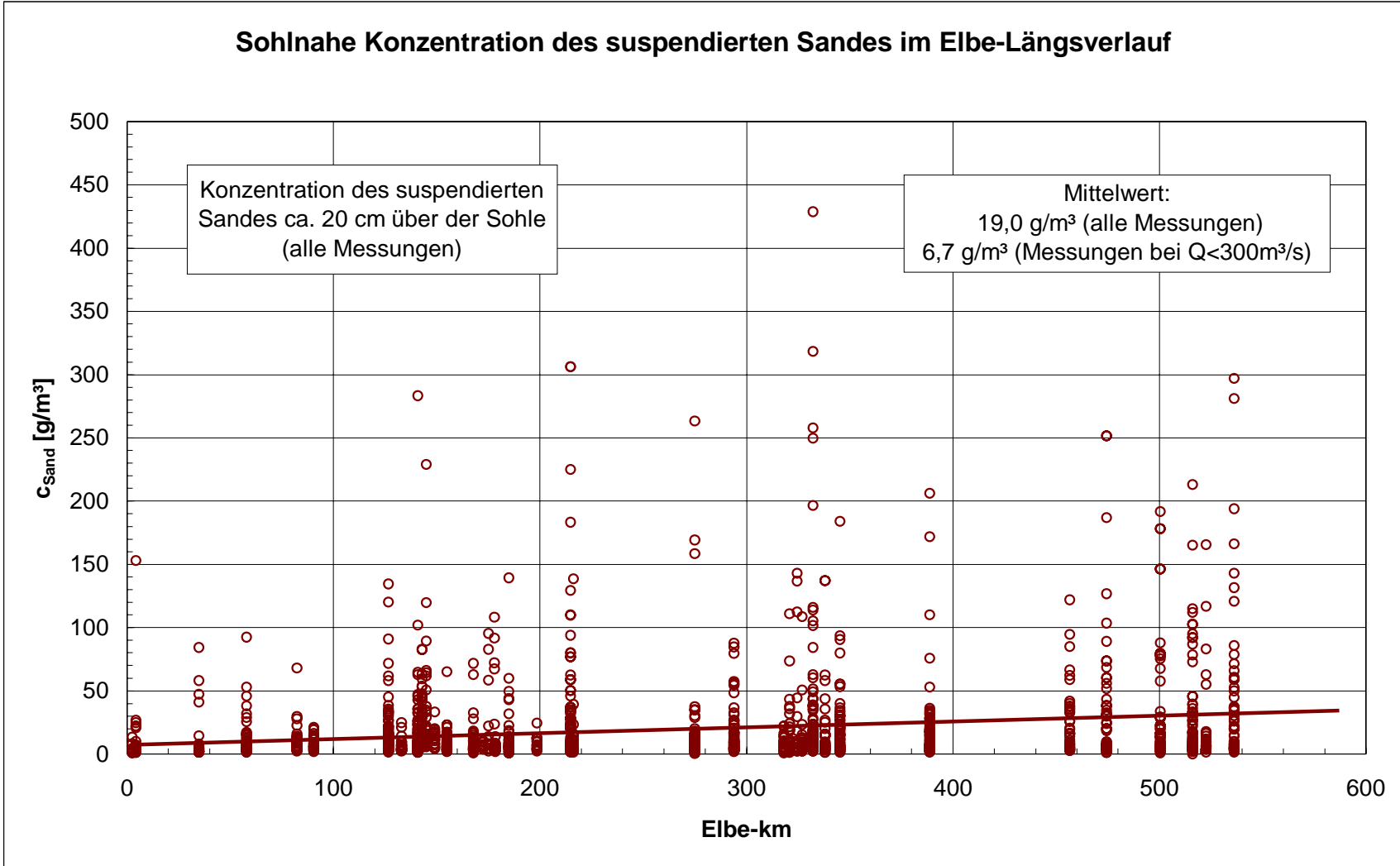
ID_KM	MESSTELLE	A	B	R ²	MNQ	MQ	2MQ	TAU(MNQ)	TAU(MQ)	TAU(2MQ)
2.60	Schoena	0.1603	0.6417	0.85	105	322	644	3.2	6.5	10.2
34.80	Pirna	0.1549	0.6632	0.90	105	322	644	3.4	7.1	11.3
57.80	Dresden	0.0419	0.8265	0.94	105	322	644	2.0	5.0	8.8
82.40	Meissen	0.0168	1.0053	0.88	105	322	644	1.8	5.6	11.2
90.40	Zehren	0.9307	0.3435	0.47	105	322	644	4.6	6.8	8.6
126.60	Muehlberg	0.1988	0.6456	0.81	116	337	674	4.3	8.5	13.3
141.00	Belgern	1.2572	0.3548	0.30	116	337	674	6.8	9.9	12.7
155.00	Torgau	0.0503	0.8190	0.63	116	337	674	2.5	5.9	10.4
167.85	Mockritz	0.6523	0.3678	0.75	116	337	674	3.7	5.5	7.2
185.00	Mauken	0.5435	0.4174	0.72	116	337	674	4.0	6.2	8.2
214.80	Wittenberg	0.0512	0.7813	0.82	134	349	698	2.4	5.0	8.5
275.00	Aken	0.3011	0.4799	0.67	161	438	876	3.4	5.6	7.8
294.00	Barby	0.3551	0.4204	0.47	202	553	1106	3.3	5.1	6.8
318.10	Magdeburg	1.3042	0.2214	0.32	202	553	1106	4.2	5.3	6.2
321.00	Magdeburg	0.0032	1.1425	0.90	202	553	1106	1.4	4.4	9.6
327.00	Magdeburg	0.5839	0.4601	0.54	224	557	1114	7.0	10.7	14.7
345.40	Niegripp	0.3069	0.4333	0.51	224	557	1114	3.2	4.8	6.4
388.80	Tangermünde	0.0406	0.7387	0.85	240	567	1134	2.3	4.4	7.3
456.60	Wittenberge	0.0451	0.7010	0.76	272	681	1362	2.3	4.4	7.1
474.50	Schnackenburg	0.1373	0.4895	0.43	272	681	1362	2.1	3.3	4.7
500.56	Langendorf	0.0500	0.6819	0.68	277	714	1428	2.3	4.4	7.1
516.16	Wilkenstorf	0.0649	0.6125	0.69	277	714	1428	2.0	3.6	5.6
536.20	Neu Darchau	0.0608	0.6229	0.46	277	714	1428	2.0	3.6	5.6

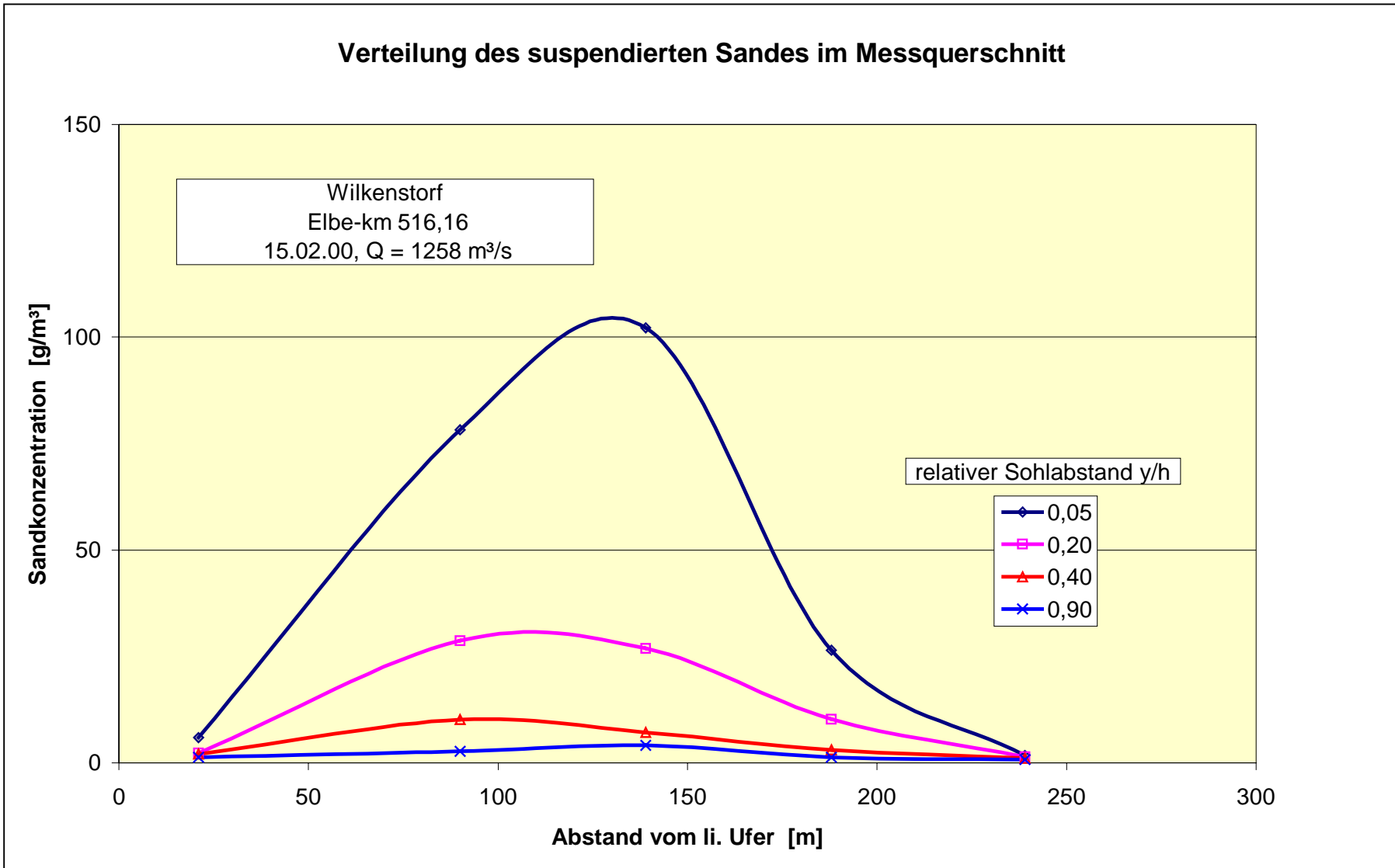
Art der Regressionsfunktion: $\tau = A \cdot Q^B$, Bestimmtheitsmaß: R²
 MNQ, MQ, MHQ in m³/s: Mittelwerte von charakteristischen Abflüssen aus langjährigen Reihen, DGJ 1993
 TAU in N/m²: Sohlschubspannung (berechnet aus vertikalen Geschwindigkeitsverteilungen der Abflussmessdateien des Messschiffes "Elbegrund")

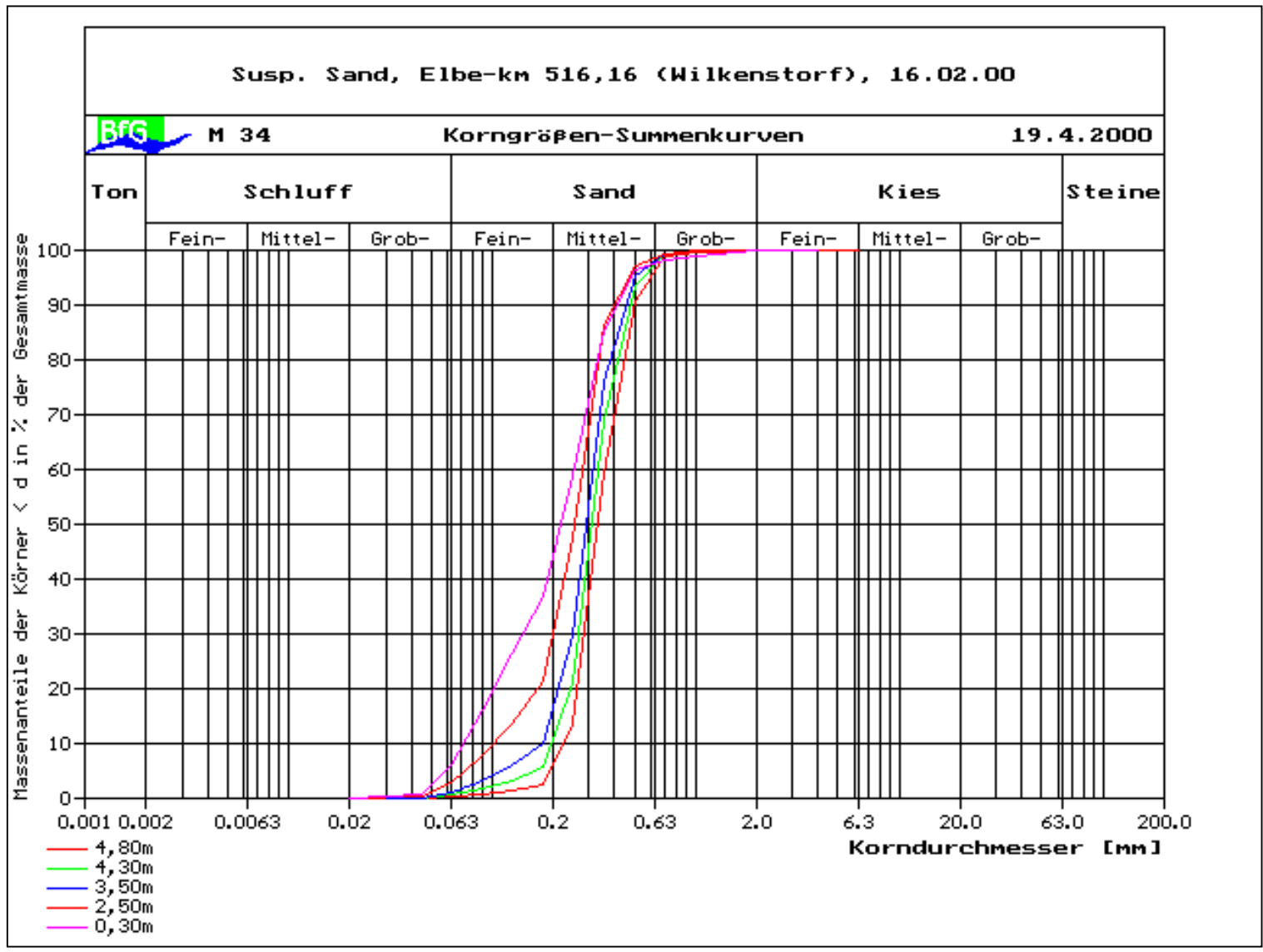
Tabelle der Funktionen für die Sohlschubspannung





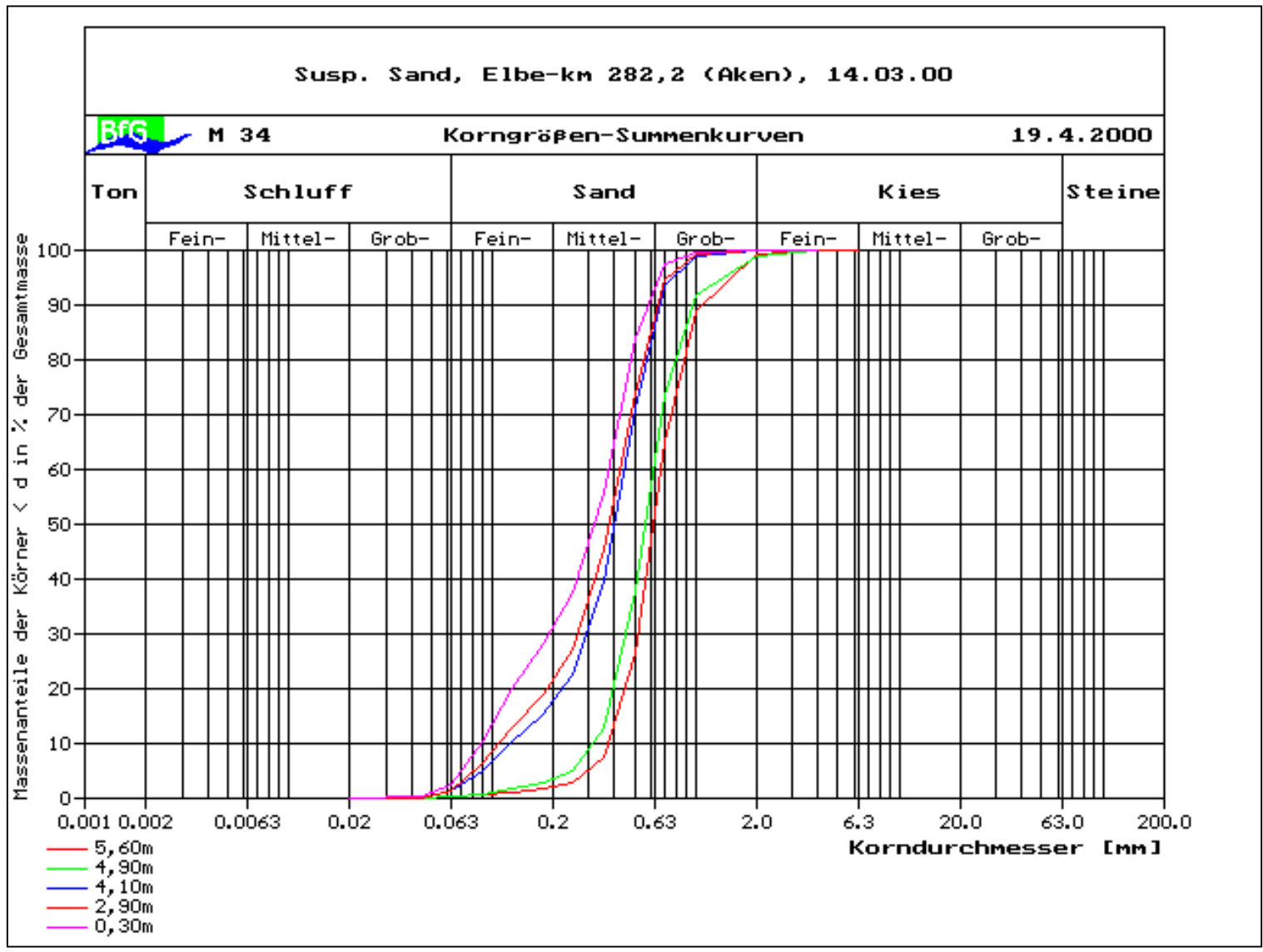




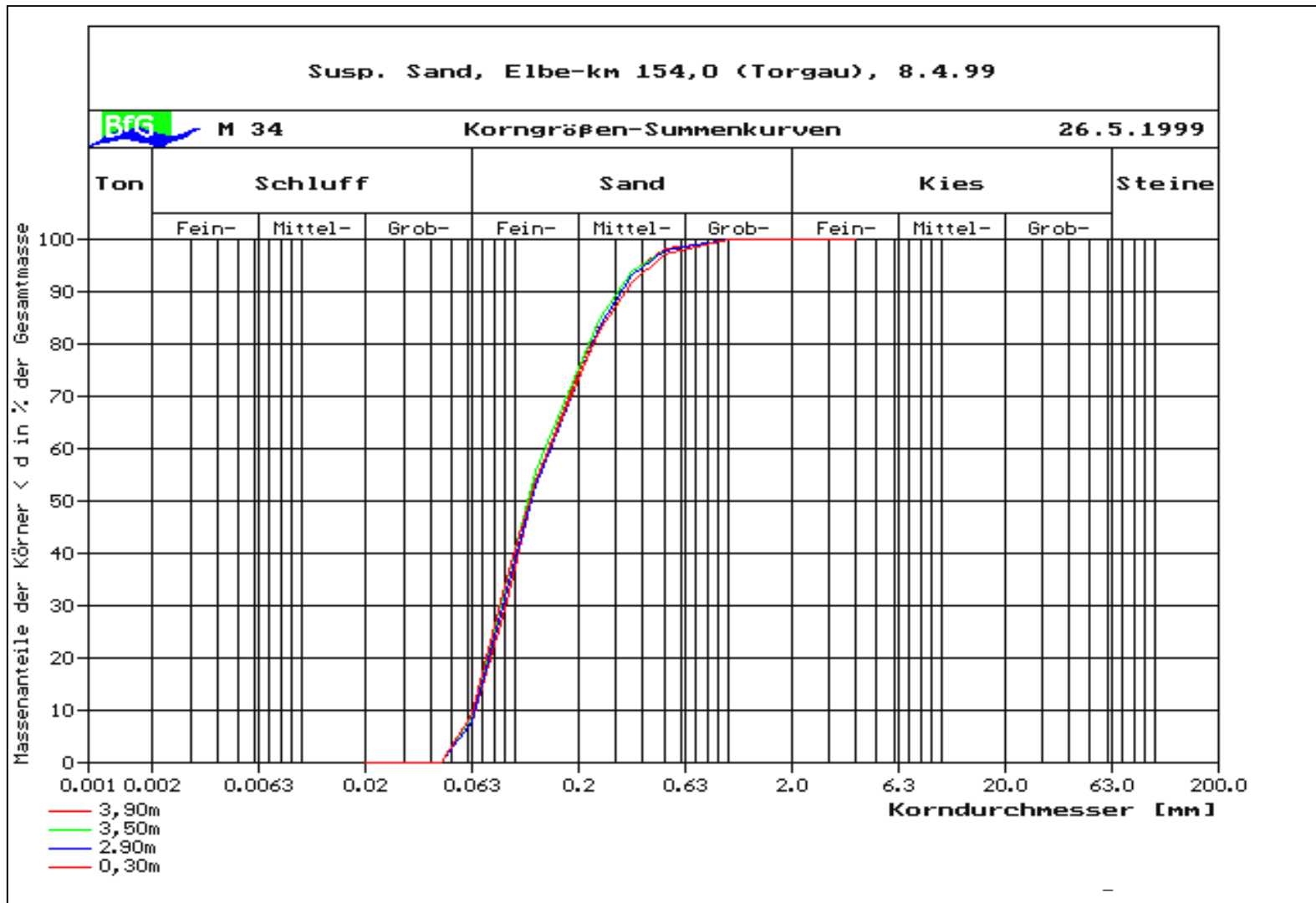


Anlage 4.15

Korngrößen-Summenkurve, suspendierter Sand, Wilkenstorf, Q = 1305 m³/s

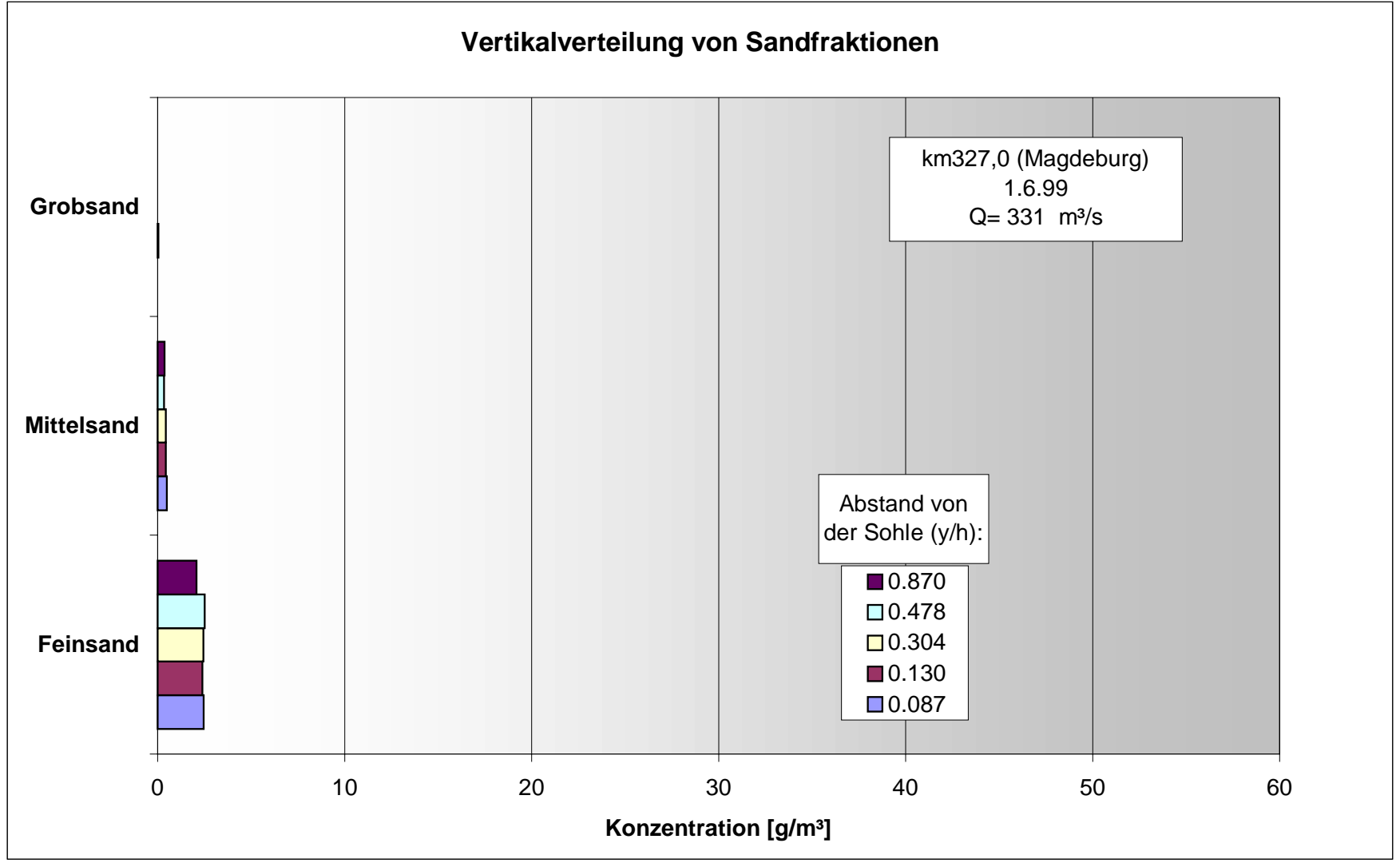


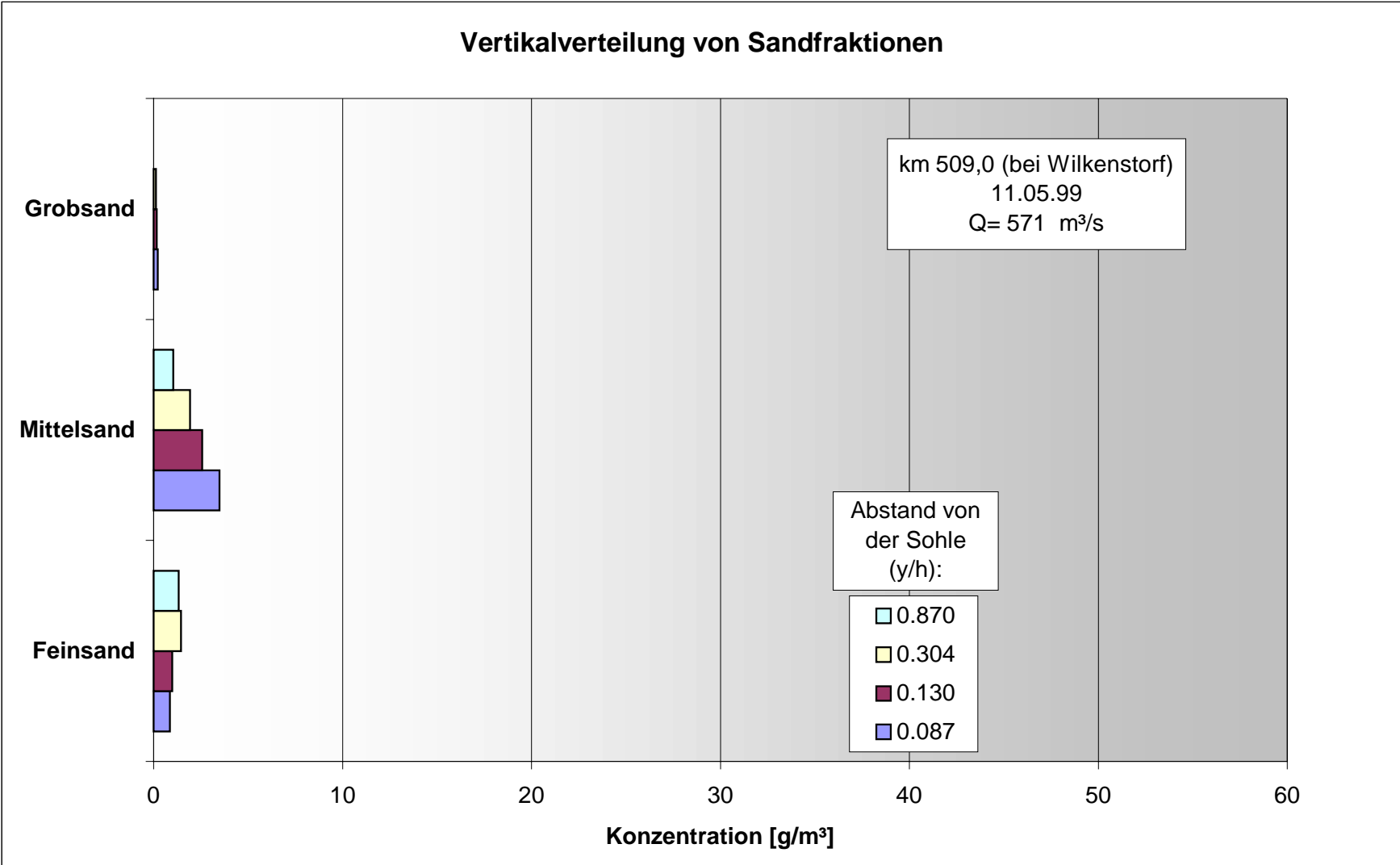
Korngrößen-Summenkurve, suspendierter Sand, Aken, Q = 1720 m³/s

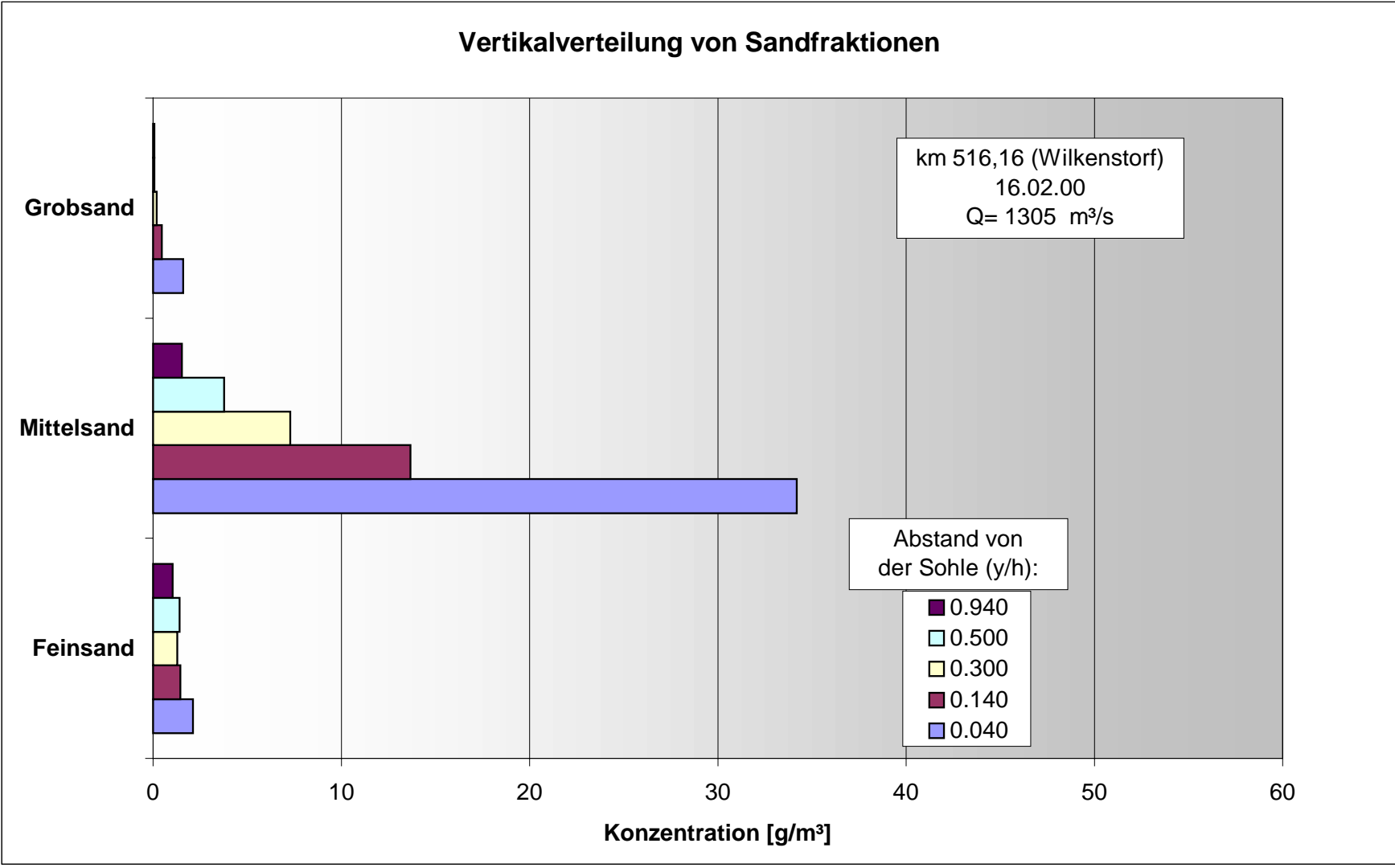


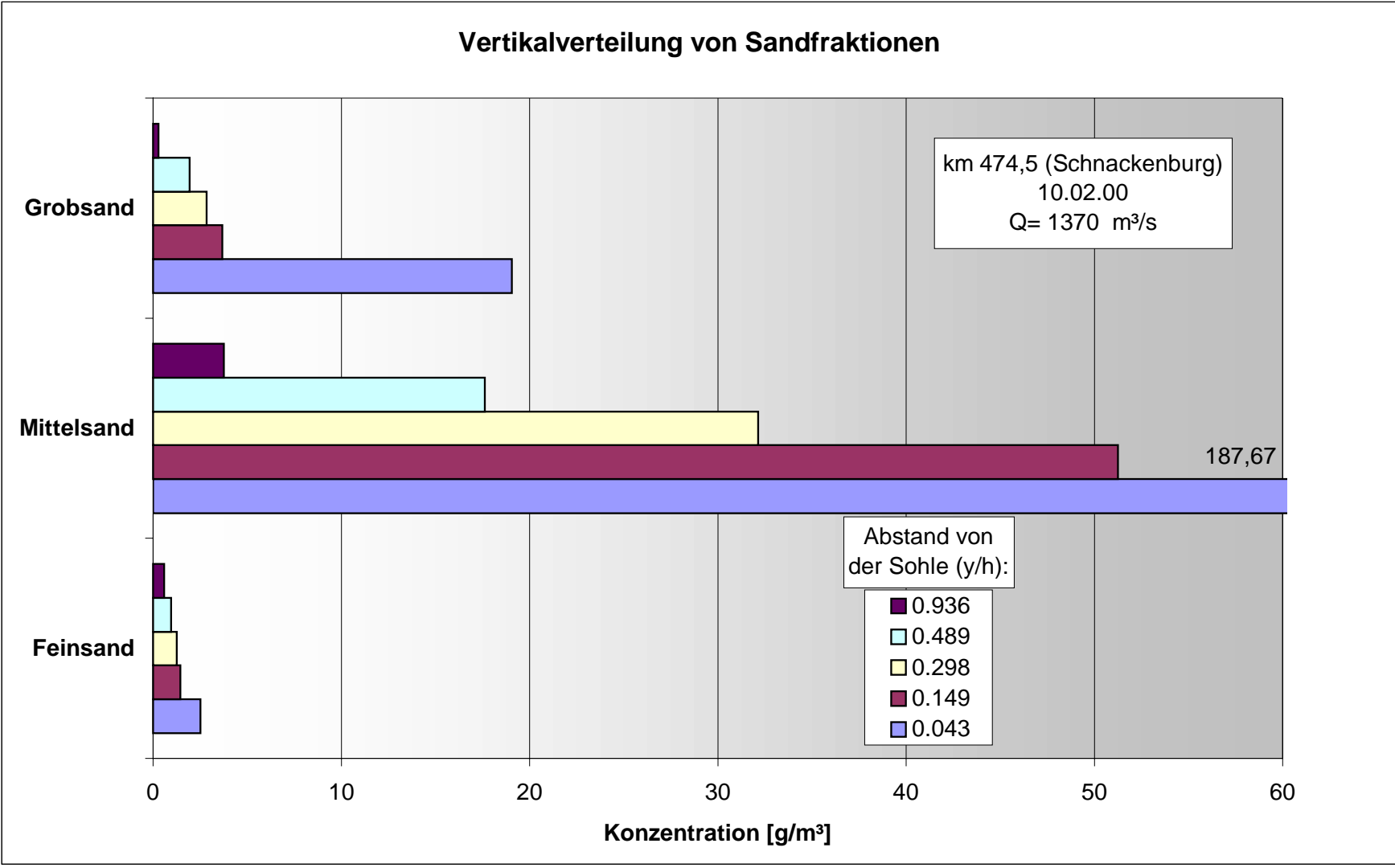
Anlage 4.17

Korngrößen-Summenkurve, suspendierter Sand, Torgau, Q = 492 m³/s









Anlage 4.22

MESSTELLE	ID_KM	a_B1	b_B1	Q_GR	a_B2	b_B2	c_B	d_B
Schoena/Schm.	2.60				5.855E-07	2.155		
Pirna	34.80				6.495E-09	2.785		
Dresden	57.80				2.706E-06	1.980		
Meißen	82.40				4.260E-06	1.893		
Zehren	90.40				5.278E-06	1.829		
Mühlberg	126.60				3.449E-07	2.269		
Belgern	141.00				4.942E-07	2.262		
Torgau	155.00				5.489E-07	2.151		
Mockritz	167.85				1.012E-05	1.720		
Mauken	185.00				2.815E-06	1.950		
Wittenberg	214.80				1.807E-07	2.538		
Aken	275.00				4.721E-06	1.952		
Barby	294.00	9.372E-08	2.61	375	1.012E-05	2.000	-0.004	0.472
Magdeburg/W	318.10				9.114E-07	2.056		
Magdeburg	321.00	9.079E-09	2.80	500	2.974E-06	2.000	0.001	-0.648
Magdeburg	324.50							
Magdeburg	327.00							
Magdeburg	332.20				1.001E-05	1.919		
Magdeburg	338.00							
Niegripp	345.40	9.955E-08	2.56	400	7.718E-06	2.000	-0.003	0.523
Tangermünde	388.80	4.914E-10	3.34	200	8.003E-06	2.000	-0.003	0.226
Wittenberge	456.60	4.800E-09	3.03	525	1.458E-05	2.000	-0.011	2.395
Schnackenburg	474.50	4.406E-08	2.70	275	5.090E-06	2.000	0.002	-0.645
Langendorf	500.56	2.801E-07	2.43	200	6.402E-06	2.000	-0.001	0.024
Wilkenstorf	516.16	2.322E-07	2.38	280	2.139E-06	2.000	0.002	-0.589
Hitzacker	522.60							
Neu Darchau	536.20	4.115E-08	2.71	500	8.347E-06	2.000	-0.002	-0.433

Koeffizienten der Transport-Abfluss-Beziehungen des Bett bildenden Anteils des susp. Sandes für die Elbe (Stand 08/2000)

Legende siehe Anlage 4.22a

Anlage 4.22a

Feldbezeichnung	Erläuterung
ID_KM	Flusskilometer, identifiziert/legt die Messstelle fest
a_i, b_i, c_i, d_i	<p>Koeffizienten bzw. Exponent der Feststoff-Transport-Funktionen in der Form</p> $m_i = a_i Q^{b_i} + c_i Q + d_i$ <p>m = Transport der entsprechenden Feststofffraktion in kg/s Q = Abfluss in m³/s Bedeutung der Indices i : G - Geschiebe A - Gesamtschwebstoff (Feinschwebstoff + suspendierter Sand) S - suspendierter Sand B - Bett bildender Anteil des suspendierten Sandes</p>
Q_GR	<p>Abflussgrenzwert Q_{GR} bei der Beschreibung durch zwei Funktionen:</p> <p>Funktion 1 gilt für Q < Q_{GR} Funktion 2 gilt für Q ≥ Q_{GR}</p>
R2	Bestimmtheitsmaß R ²
N_MESS	Anzahl der Naturmessungen
Q_MAX	Höchster Abfluss der an der Messstelle vorliegenden Messungen
JAHR_MIN	Beginn des Messzeitraumes
JAHR_MAX	Ende des Messzeitraumes

Legende zu den ermittelten Transport-Abfluss-Beziehungen

Anlage 4.23

Messstelle	Elbe-km	a	p	b	c
Schoena/Schm.	2.60	4.784E+00	0.2560		
Pirna	34.80	1.410E-02	1.0700		
Dresden	57.80	3.850E+00	0.2760		
Meißen	82.40	4.239E+00	0.2530		
Zehren	90.40	3.500E+00	0.2680		
Mühlberg	126.60	1.432E-01	0.7690		
Belgern	141.00	4.831E-01	0.6080		
Torgau	155.00	3.494E-01	0.6120		
Mockritz	167.85	2.962E+00	0.3080		
Mauken	185.00	2.321E-01	0.7280		
Wittenberg	214.80	8.107E-01	0.6070		
Aken	275.00	9.337E+00	0.2300		
Barby	294.00	-2.050E-05	2.0000	0.0732	8.1826
Magdeburg	318.10	3.934E-01	0.6140		
Magdeburg	321.00	-1.030E-05	2.0000	0.0549	
Magdeburg	327.00				
Magdeburg	332.20	1.338E+00	0.5310		
Magdeburg	338.00				
Niegripp	345.40	-1.480E-05	2.0000	0.0529	11.1130
Tangermünde	388.80	-2.810E-05	2.0000	0.0927	-3.6500
Wittenberge	456.60	-2.385E-05	2.0000	0.0882	3.2074
Schnackenburg	474.50	-3.190E-05	2.0000	0.1020	-1.6100
Langendorf	500.56	-2.030E-05	2.0000	0.0647	17.9000
Wilkenstorf	516.16	-2.140E-05	2.0000	0.0729	-0.8940
Neu Darchau	536.20	-2.290E-05	2.0000	0.0859	-1.1900

Funktionen für den prozentualen Anteil des suspendierten Sohlmaterials am Gesamttransport des suspendierten Sandes

$$\text{Anteil in \%} = a \cdot Q^p + b \cdot Q + c$$

(Stand 09/2000)

MESSSTELLE	ID_KM	a_G	b_G	c_G	d_G	R2_G	N_MESS	Q_MAX	JAHR_MIN	JAHR_MAX	Bemerkungen
Schoena/Schm	2.60	1.475E-09	2.6840			0.4442	9	1065	1995	2000	bis 536 m³/s kein Geschiebetransport, oberhalb 536 m³/s nur eine Messung
Pirna	34.80	3.503E-07	1.8370			0.8689	5	1116	1996	2000	bis 285 m³/s nahezu kein Geschiebetransport, oberhalb 285 m³/s nur eine Messung
Dresden	57.80			7.808E-05		-0.4586	16	1129	1995	2000	sehr starke Streuung, im unteren Abflussbereich 3 unplausible Messungen nicht berücksichtigt
Meißen	82.40						4	554	1997	1999	zu wenig Messungen für Regression
Zehren	90.40						6	1173	1996	2000	plausible Q-Abhängigkeit bei den vorliegenden 6 Messwerten nicht erkennbar
Mühlberg	126.60			4.069E-05		-0.2193	24	1260	1995	2000	im unteren Abflussbereich 3 unplausible Messungen nicht berücksichtigt
Belgern	141.00	8.701E-07	1.7370			0.2086	24	1040	1995	2000	oberhalb 781 m³/s nur eine Messung, die durch die Regressionskurve unterschätzt wird
Torgau	155.00	6.128E-09	2.7550			0.4904	23	1313	1993	2000	Messungen oberhalb 700 m³/s werden durch die Regressionskurve unterschätzt
Mockritz	167.85	1.326E-05	1.7440			0.2297	8	683	1995	2000	starke Streuung der Messwerte
Mauken	185.00	2.538E-04	1.3770			0.2670	15	883	1995	1998	starke Streuung der Messwerte, Messung vom 11.4.96 nicht berücksichtigt
Wittenberg	214.80	1.732E-03	1.1770			0.6621	20	1296	1994	2000	
Aken	275.00	3.780E-02	0.7469			0.1815	19	1323	1994	1999	Messungen (2) oberhalb 900 m³/s werden durch die Regressionskurve unterschätzt
Barby	294.00	8.220E-02	0.6256			0.0863	14	696	1994	1999	oberhalb 696 m³/s keine Messungen
Magdeburg/W	318.10						5	587	1996	1998	plausible Q-Abhängigkeit bei den vorliegenden 5 Messwerten nicht erkennbar
Magdeburg	321.00	5.961E-04	1.3660			0.4422	22	1936	1993	1998	starke Streuung der Messwerte
Magdeburg	324.50	2.199E-02	0.8095			0.3899	11	1984	1993	1998	
Magdeburg	327.00										
Magdeburg	332.20			6.896E-03		-0.3979	21	1500	1993	1999	
Magdeburg	338.00	6.561E-02	0.6348			0.3981	13	1900	1993	1998	
Niegripp	345.40	3.742E-03	0.9740			0.4110	12	1312	1994	1999	
Tangemünde	388.80	5.123E-04	1.4200			0.2439	14	1017	1994	1999	Messung vom 3.11.98 nicht berücksichtigt
Wittenberge	456.60	1.033E-02	0.8509			0.1187	14	1095	1994	2000	
Schnackenburg	474.50						5	936	1996	1999	plausible Q-Abhängigkeit bei den vorliegenden 5 Messwerten nicht erkennbar
Langendorf	500.56	6.221E-03	1.0100			0.4410	27	2210	1990	2000	
Wilkenstorf	516.16	4.616E-01	0.3993			0.1319	24	2177	1990	2000	
Hitzacker	522.60	1.136E-03	1.2600			0.6589	4	853	1997	2000	Regression wegen der geringen Anzahl von Messungen noch unsicher
Neu Darchau	536.20	1.604E-03	1.1810			0.3315	17	1490	1994	1999	

Koeffizienten und Parameter der Transport-Abfluss-Beziehungen des Geschiebes für

die Elbe (Stand 08/2000)

Legende siehe Anlage 4.22a

MESSSTELLE	ID_KM	a_A	b_A	c_A	d_A	R2_A	N_MESS	Q_MAX	JAHR_MIN	JAHR_MAX	Bemerkungen
Schoena/Schm.	2.60	5.18E-04	1.554			0.66	14	1065	1995	2000	oberhalb 536 m³/s nur eine Messung, die durch die Regressionskurve unterschätzt wird
Pirna	34.80	2.44E-03	1.318			0.79	8	1116	1996	2000	oberhalb 585 m³/s nur eine Messung, die durch die Regressionskurve unterschätzt wird
Dresden	57.80	8.44E-04	1.564			0.87	14	1129	1994	2000	starke Streuung der Messwerte im oberen Abflussbereich
Meißen	82.40	9.14E-04	1.521			0.85	8	600	1997	1999	oberhalb 600 m³/s keine Messung
Zehren	90.40	1.42E-03	1.451			0.76	11	1173	1996	2000	oberhalb 526 m³/s nur eine Messung
Mühlberg	126.60	3.46E-03	1.375			0.68	23	914	1994	2000	starke Streuung der Messwerte, oberhalb 800 m³/s zwei (unterschätzte) Messungen
Belgem	141.00	3.13E-03	1.368			0.55	23	749	1995	2000	starke Streuung der Messwerte, oberhalb 749 m³/s keine Messung
Torgau	155.00	1.96E-04	1.831			0.67	15	1235	1993	2000	oberhalb 652 m³/s nur eine Messung
Mockritz	167.85	4.00E-04	1.706			0.51	8	796	1995	2000	
Mauken	185.00	6.60E-03	1.273			0.63	13	883	1995	1998	
Wittenberg	214.80	3.39E-03	1.403			0.86	21	1296	1995	2000	starke Streuung der Messwerte im oberen Abflussbereich
Aken	275.00	2.92E-04	1.727			0.60	18	1323	1994	2000	
Barby	294.00	2.19E-02	1.017			0.45	14	874	1994	1999	
Magdeburg/W	318.10	3.15E-03	1.380			0.65	13	1165	1996	1998	
Magdeburg	321.00										
Magdeburg	324.50	6.32E-03	1.300			0.73	4	748	1995	1998	Regression wegen geringer Anzahl der Messungen noch unsicher
Magdeburg	327.00	1.09E-02	1.201			0.86	7	1184	1997	1999	
Magdeburg	332.20	2.80E-02	1.071			0.60	16	1377	1994	1999	oberhalb 800 m³/s zwei Messungen, die durch die Regressionskurve unterschätzt werden
Magdeburg	338.00						5	582	1996	1998	Q-Abhängigkeit bei den vorliegenden 5 Messwerten nicht eindeutig erkennbar
Niegripp	345.40	1.42E-03	1.508			0.69	13	1230	1994	1999	Messung bei 1230 m³/s wird durch die Regressionskurve unterschätzt
Tangermünde	388.80	6.17E-03	1.229			0.45	14	1191	1994	1999	Messung bei 1191 m³/s wird durch die Regressionskurve unterschätzt
Wittenberge	456.60						7	1095	1995	2000	plausible Q-Abhängigkeit bei den vorliegenden Messwerten nicht erkennbar
Schnackenburg	474.50			2.796E-02		0.18	11	1445	1996	2000	starke Streuung der Messwerte, Beschreibung mit einer Geraden durch den Nullpunkt
Langendorf	500.56	1.69E-02	1.119			0.45	14	2210	1990	2000	Messung bei 2210 m³/s wird durch die Regressionskurve unterschätzt
Wilkenstorf	516.16			3.495E-02		0.49	15	2177	1990	2000	starke Streuung der Messwerte, Beschreibung mit einer Geraden durch den Nullpunkt
Hitzacker	522.60						7	1162	1997	2000	plausible Q-Abhängigkeit bei den vorliegenden 7 Messwerten nicht erkennbar
Neu Darchau	536.20			3.082E-02		-0.11	13	1318	1995	2000	starke Streuung der Messwerte, Beschreibung mit einer Geraden durch den Nullpunkt

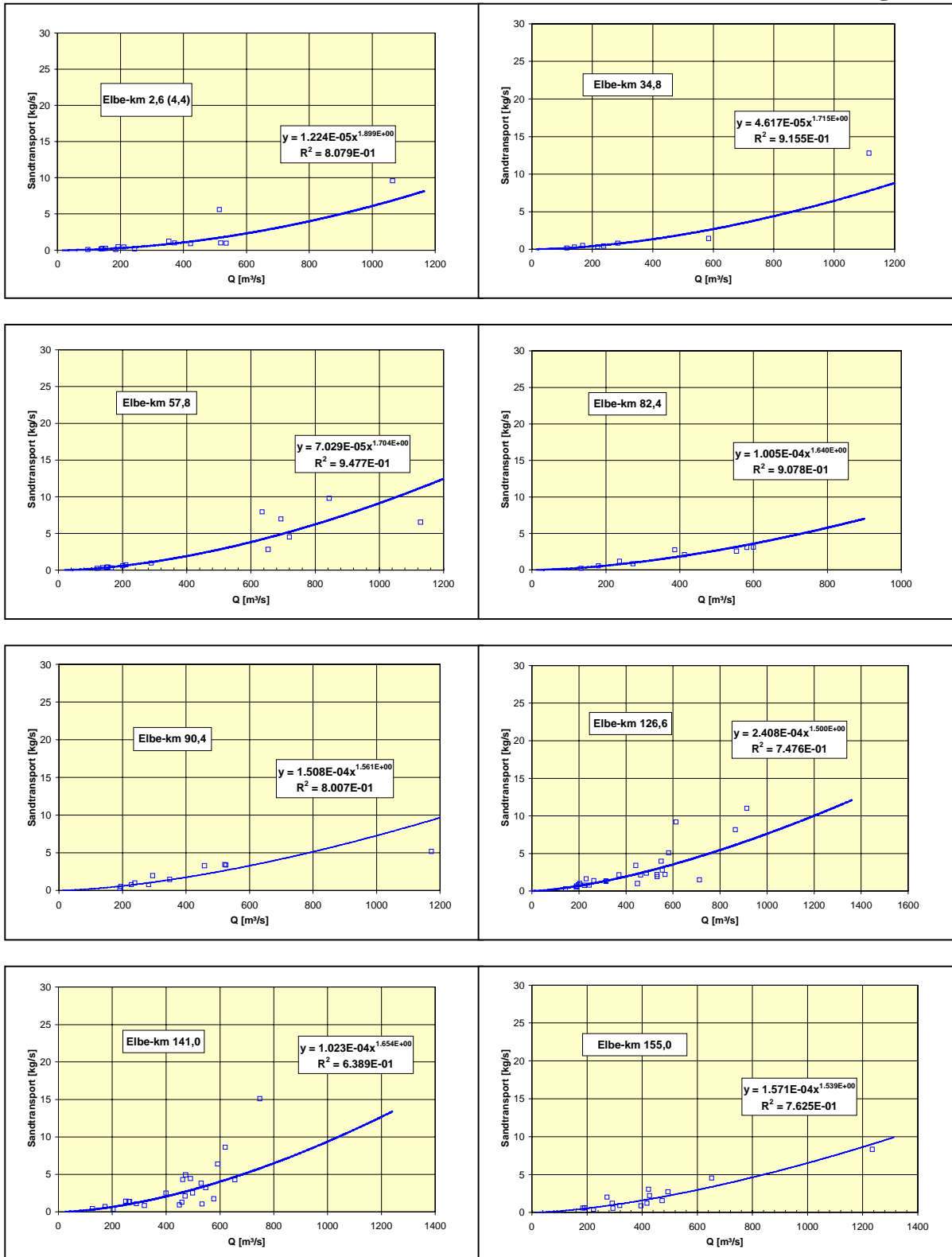
Koeffizienten und Parameter der Transport-Abfluss-Beziehungen des Gesamtschwebstoffes für die Elbe (Stand 08/2000)

Legende siehe Anlage 4.22a

MESSSTELLE	ID_KM	a_S	b_S	c_S	d_S	R2_S	N_MESS	Q_MAX	JAHR_MIN	JAHR_MAX	Bemerkungen
Schoena/Schm.	2.60	1.224E-05	1.899			0.81	15	1065	1995	2000	oberhalb 536 m³/s nur eine Messung, die durch die Regressionskurve unterschätzt wird
Pirna	34.80	4.617E-05	1.715			0.92	8	1116	1996	2000	oberhalb 585 m³/s nur eine Messung, die durch die Regressionskurve unterschätzt wird
Dresden	57.80	7.029E-05	1.704			0.95	13	1129	1994	2000	starke Streuung der Messwerte im oberen Abflussbereich
Meißen	82.40	1.005E-04	1.640			0.91	9	600	1997	1999	oberhalb 600 m³/s keine Messung
Zehren	90.40	1.508E-04	1.561			0.80	11	1173	1996	2000	oberhalb 526 m³/s nur eine Messung, die durch die Regressionskurve überschätzt wird
Mühlberg	126.60	2.408E-04	1.500			0.75	26	914	1994	2000	starke Streuung der Messwerte im oberen Abflussbereich
Belgern	141.00	1.023E-04	1.654			0.64	24	749	1995	2000	starke Streuung der Messwerte, oberhalb 749 m³/s keine Messung
Torgau	155.00	1.571E-04	1.539			0.76	16	1235	1993	2000	oberhalb 652 m³/s nur eine Messung
Mockritz	167.85	3.417E-04	1.412			0.43	9	796	1995	2000	
Mauken	185.00	1.213E-03	1.222			0.59	14	883	1995	1998	oberhalb 750 m³/s zwei Messungen, die durch die Regressionskurve unterschätzt werden
Wittenberg	214.80	2.229E-05	1.931			0.93	23	1296	1995	2000	starke Streuung der Messwerte im oberen Abflussbereich
Aken	275.00	5.056E-05	1.722			0.86	18	1323	1994	2000	Messung bei 1323 m³/s wird durch die Regressionskurve unterschätzt
Barby	294.00	1.030E-05	2.011			0.79	14	874	1994	1999	
Magdeburg/W	318.10	2.317E-04	1.442			0.93	13	1165	1996	1998	
Magdeburg	321.00	6.898E-05	1.643			0.75	9	748	1995	1998	oberhalb 752 m³/s nur eine Messung, die durch die Regressionskurve unterschätzt wird
Magdeburg	324.50										
Magdeburg	327.00	6.919E-05	1.658			0.89	7	1184	1997	1999	
Magdeburg	332.20	7.481E-04	1.388			0.56	16	1377	1994	1999	starke Streuung der Messwerte
Magdeburg	338.00	3.261E-03	1.148			0.54	5	582	1996	1998	oberhalb 582 m³/s keine Messung
Niegripp	345.40	6.729E-06	2.059			0.92	13	1230	1994	1999	
Tangermünde	388.80	1.129E-05	1.974			0.80	14	1191	1994	1999	Messung bei 1191 m³/s wird durch die Regressionskurve unterschätzt
Wittenberge	456.60	9.194E-07	2.334			0.81	7	1095	1995	2000	Messung bei 1095 m³/s wird durch die Regressionskurve unterschätzt
Schnackenburg	474.50	8.384E-05	1.676			0.89	11	1445	1996	2000	
Langendorf	500.56	1.872E-05	1.898			0.76	14	2210	1990	2000	Messung bei 1272 m³/s wird durch die Regressionskurve unterschätzt
Wilkenstorf	516.16	4.142E-04	1.413			0.84	15	2177	1990	2000	
Hitzacker	522.60	3.655E-03	1.094			0.48	7	1162	1997	2000	Messung bei 1162 m³/s wird durch die Regressionskurve unterschätzt
Neu Darchau	536.20	1.955E-05	1.901			0.80	13	1318	1995	2000	

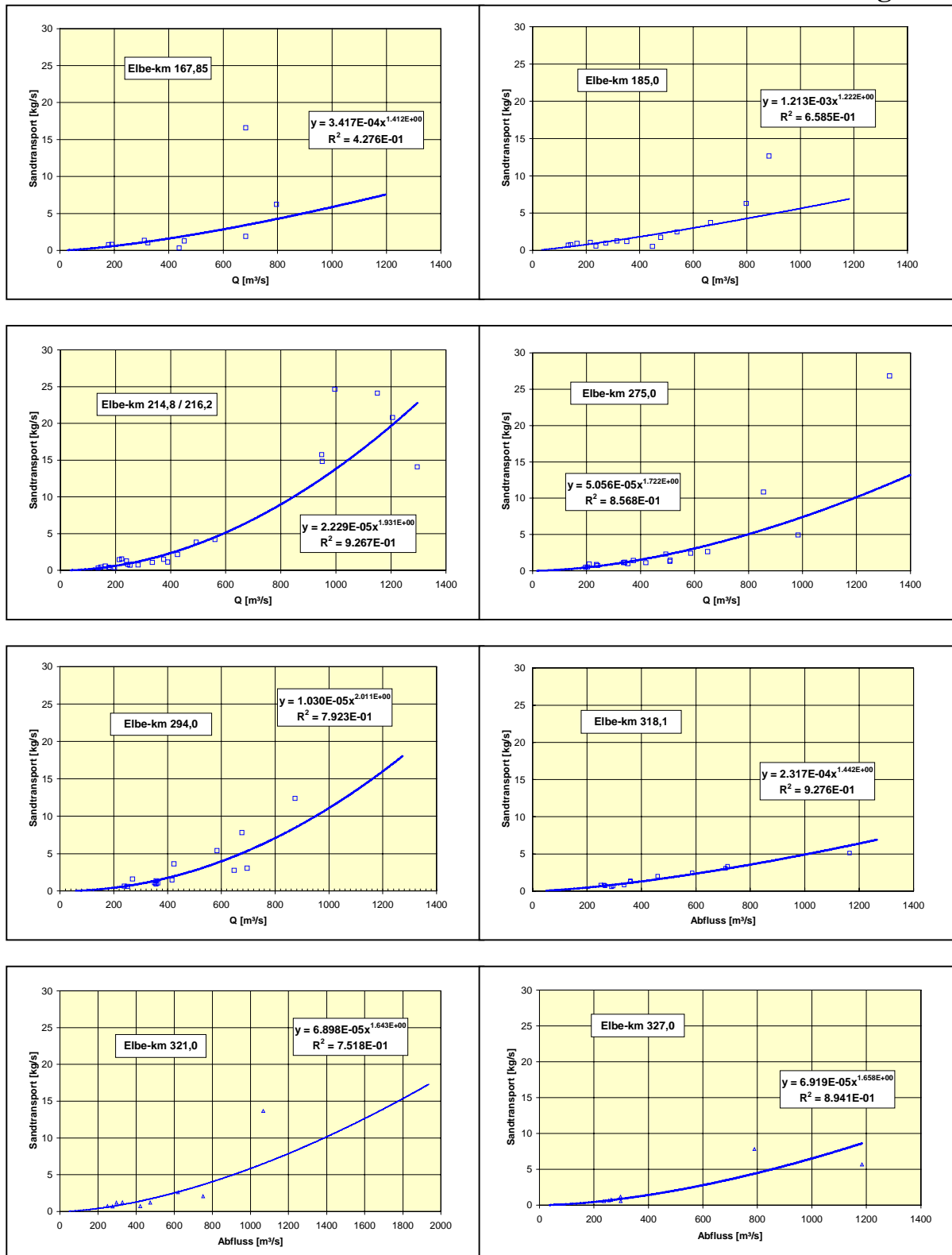
Koeffizienten und Parameter der Transport-Abfluss-Beziehungen des susp. Sandes für die Elbe (Stand 08/2000)

Legende siehe Anlage 4.22a



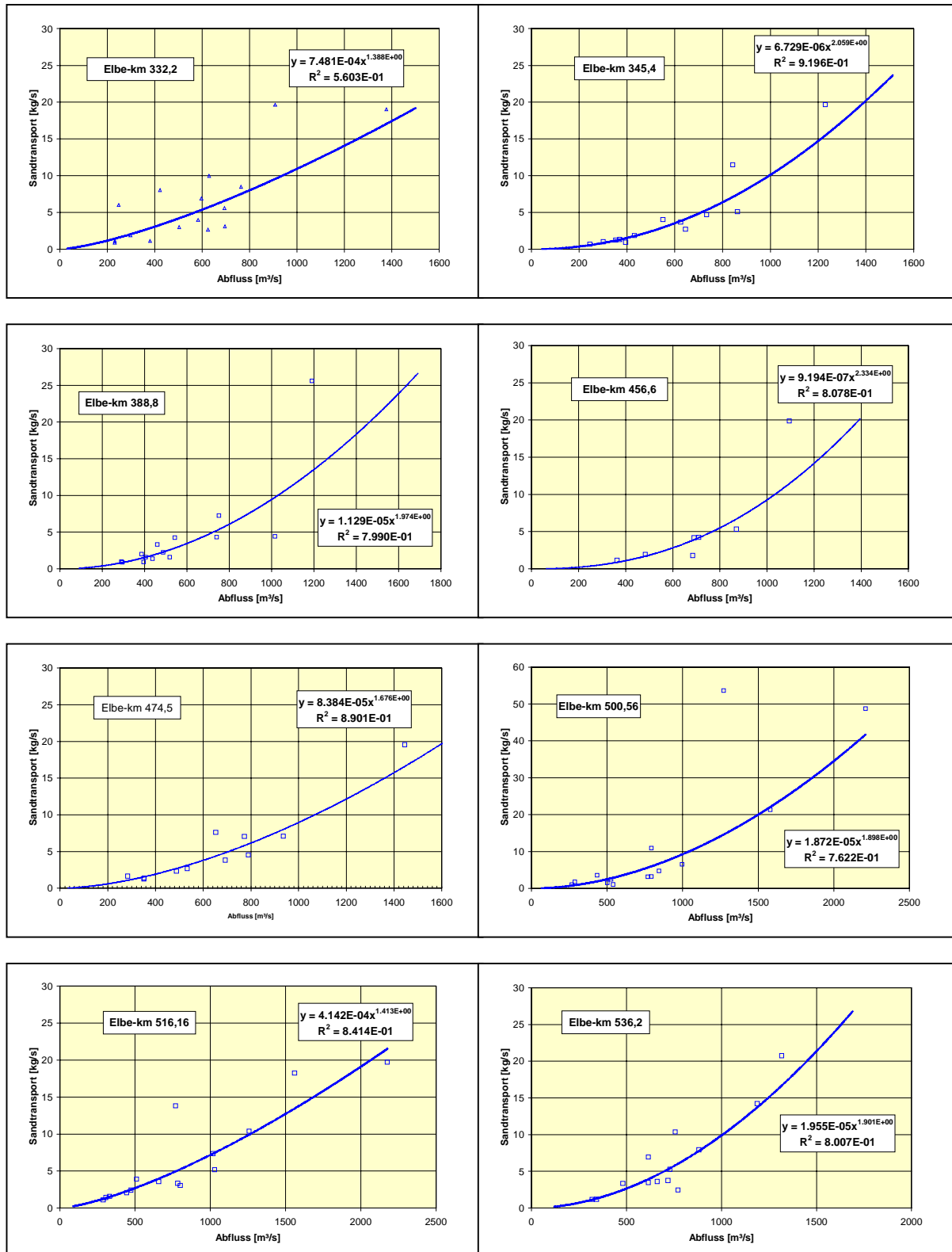
**Transport-Abfluss-Beziehungen für den suspendierten Sand,
 Elbe-km 2,6 - 155,0**

(Stand 8/2000)



Transport-Abfluss-Beziehungen für den suspendierten Sand, Elbe-km 167,85 - 327,0

(Stand 8/2000)



**Transport-Abfluss-Beziehungen für den suspendierten Sand,
 Elbe-km 332,2 - 536,2**

(Stand 8/2000)