

BFG-1702

Bericht

Analyse und Bewertung der hydraulisch-morphologischen Situation zwischen Iffezheim und Mainz

Dr.-Ing. M. Promny
Dr. R. M. Frings
Dipl.-Geol. N. Gehres
Dipl.-Met. N. Busch
Dr.-Ing. S. Vollmer
Prof. Dr. E. Gölz

Auftraggeber: Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest
BfG-SAP-Nr.: M39610304015
Anzahl der Seiten: 117

Koblenz, den 14.12.2010

DOI: 10.5675/BfG-1702

URL: <http://doi.bafg.de/BfG/2016/BfG-1702.pdf>

Zitiervorschlag:

Promny, M., Frings, R. M., Gehres, N., Busch, N., Vollmer, S. & Gölz, E. (2010): Analyse und Bewertung der hydraulisch-morphologischen Situation zwischen Iffezheim und Mainz. Bericht der Bundesanstalt für Gewässerkunde im Auftrag der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest (BfG-Bericht 1702), Koblenz. URL: <http://doi.bafg.de/BfG/2016/BfG-1702.pdf>

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis.....	5
Abbildungsverzeichnis.....	5
Zusammenfassung.....	8
1. Einführung.....	11
2. Datenanalyse Hydrologie/Hydraulik.....	13
2.1 Gleichwertige Wasserstände.....	13
2.1.1 Methodik	13
2.1.2 Datenlage.....	13
2.1.3 Ergebnisse	14
2.2 Wasserspiegelfixierungen.....	15
2.2.1 Methodik	15
2.2.2 Datenlage.....	23
2.2.3 Ergebnisse	25
3. Datenanalyse Sedimentologie	27
3.1 Korngrößen der Sohle.....	27
3.1.1 Methodik	27
3.1.2 Datenlage.....	27
3.1.3 Ergebnisse	28
3.2 Korngrößen des Geschiebes.....	31
3.2.1 Methodik	31
3.2.2 Datenlage.....	31
3.2.3 Ergebnisse	31
3.3 Transportgeschwindigkeiten und Transportweiten.....	32
3.3.1 Methodik und Datenlage	32
3.3.2 Ergebnisse	32
3.4 Transportkörper	33
3.4.1 Methodik	33
3.4.2 Datenlage.....	35
3.4.3 Ergebnisse	37
4. Datenanalyse Morphologie	42
4.1 Mittlere Sohlhöhen	42
4.1.1 Methodik	42
4.1.2 Datenlage.....	43
4.1.3 Ergebnisse	43
4.2 Lokale Entwicklungen	46
4.3 Frachtermittlung aus Transport-Abfluss-Beziehungen.....	50
4.3.1 Methodik	50
4.3.2 Datenlage.....	51
4.3.3 Ergebnisse	51
4.4 Baggerungen und Verklappungen	53

4.4.1	Methodik und Datenlage	53
4.4.2	Ergebnisse	53
5.	Feststoffbilanzen	56
5.1	Methodik.....	56
5.1.1	Bilanzierung anhand der Feststofftransportmessungen.....	56
5.1.2	Bilanzierung anhand der Sohlhöhenentwicklung.....	57
5.2	Datenlage	58
5.3	Ergebnisse.....	59
5.3.1	Bilanzierung anhand der Feststofftransportmessungen.....	59
5.3.2	Bilanzierung anhand der Sohlhöhenentwicklung.....	62
5.3.3	Vergleich der Bilanzierungen.....	64
5.4	Vergleich der mittleren Sohlhöhen mit Wasserspiegellagen	66
6.	Diskussion der Unsicherheiten.....	69
6.1	Unsicherheiten der topografischen Daten.....	69
6.2	Unsicherheiten der Daten zu Zugaben, Baggerungen und Verklappungen	71
6.3	Unsicherheiten des Sedimenteintrags aus Nebengewässern.....	71
6.4	Unsicherheiten der Sedimentsenken	71
6.5	Unsicherheiten des Geschiebetransports.....	72
6.6	Unsicherheiten des suspendierten Sandtransports	75
7.	Bewertung der Sohlstabilität mittels numerischem Modell	77
7.1	Ziele	77
7.2	Modelllayout und Berechnungsgrundlagen	77
7.3	Kalibrierung.....	80
7.4	Validierung	82
7.4.1	Validierung anhand der Sohlhöhenentwicklung 1996-2006	82
7.4.2	Validierung anhand der Transport-Abfluss-Beziehungen an den Messstellen..	83
7.4.3	Validierung anhand der Transportgeschwindigkeit von Tracern	87
7.4.4	Fazit.....	89
7.5	Prognose der Entwicklung des status quo.....	89
8.	Schlussfolgerungen	95
8.1	Zuverlässigkeit der Datengrundlage	95
8.2	Gewässermorphologische Entwicklung.....	97
9.	Literatur.....	102
Anhang		105
	Transport-Abfluss-Beziehungen für den Zeitraum 1985-2006.....	105
	Transport-Abfluss-Beziehungen für den Zeitraum 1996-2006.....	113

Inhaltsverzeichnis

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Gültigkeitsbereiche der Pegelabflüsse.....	19
Tab. 2:	Verzeichnis der zur Verfügung stehenden Wasserspiegelfixierungen von 1978 bis 2008...	24
Tab. 3:	MNQ für Rheinpegel im Zeitraum 1931-2002.....	24
Tab. 4:	Gemessene Transportgeschwindigkeiten [km/a] der fünf Korngrößenfraktionen im Naturversuch zwischen 1996 und 2001 unterhalb Iffezheim.	33
Tab. 5:	Überblick über die verwendeten Peilaufnahmen und die durchführenden Instanzen.....	43
Tab. 7:	Zusammensetzung des Zugabematerials. Seit 1991 wird nur noch das Gemisch 8 verklappt (BfG & WSA-Freiburg, 2006).	54
Tab. 8:	Übersicht über die Baumaßnahmen am frei fließenden Rhein von Iffezheim bis Mainz seit der Fertigstellung der Staustufe Iffezheim 1977 bis 2008.	54
Tab. 9:	Jahresfrachten für Geschiebe, suspendierten Sand und Spülfracht für den Bilanzierungszeitraum 1996 bis 2006..	59
Tab. 10:	Jahresfrachten für Geschiebe, suspendierten Sand und Spülfracht für den Bilanzierungszeitraum 1986 bis 2006..	60

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Karte des Oberrheins zwischen Iffezheim und Mainz (Quelle: DGJ, 2003).....	12
Abb. 2:	Änderungen der gleichwertigen Wasserstände. In A) werden die Wasserstandsänderungen in Meter und in Bezug auf den GIW 1982 angegeben, während in B) die Wasserstandsänderungen in cm pro Jahr der einzelnen Zeitintervalle aufgezeigt sind.....	15
Abb. 3:	Verwendete Wasserspiegelfixierungen zwischen Iffezheim und Mainz seit 1978.....	16
Abb. 4:	Wasserstands- und Abflusslängsschnitte der Wasserspiegelfixierungen von November 1978 und Oktober 2008 am Oberrhein bis Mainz	19
Abb. 5:	Fixierungen für Rhein-km 365; Bezugszeitraum 2005 – 2008 und berechnete Abflusskurve	21
Abb. 6:	Abweichungen der Wasserspiegelfixierungen zwischen 1978 und 2004 von der Abflusskurve des Bezugszeitraums 2005-2008, Rhein-km 365.....	21
Abb. 7:	Abweichungen der Wasserspiegelfixierungen zwischen 1978 und 2003 von der Abflusskurve des Bezugszeitraums 2005-2008, Rhein-km 460.....	22
Abb. 8:	Auswertung der Wasserstandsabweichungen im niedrigen Abflussbereich für die Epochen 1978-1983 und 2002-2003; Beispiel Rhein-km 365.....	23
Abb. 9:	Ermittelte Wasserstandsänderungen für einen Niedrigwasserabfluss im Rhein zwischen Iffezheim und Mainz.	25
Abb. 10:	Entwicklung der Korngrößenzusammensetzung mit Hilfe exponentieller Trendlinien für A) Oberschicht und B) Unterschicht.....	28
Abb. 11:	Mittlere Korngröße (D_m) der Deck-, Ober- und Unterschicht der Rheinsohle aus 2008.....	29
Abb. 12:	Entwicklung der Sandgehalte der Sohlproben mit Hilfe exponentieller Trendlinien in A) Oberschicht und B) Unterschicht.	29
Abb. 13:	Fotografische Aufnahmen der Rheinsohle von Rhein-km 340 bis 480 (August 2008).....	30
Abb. 14:	A) Geschiebefänger während des Ablassens in den Fluss (WSA-Dresden, 2008). B) Skizze des Geschiebefängers der Bundesanstalt für Gewässerkunde mit den wichtigsten Bauteilen (DVWK, 1992).	31
Abb. 15:	A) Entwicklung der mittleren Korngröße des Geschiebes. B) Sandgehalte der Geschiebeproben in Prozent.	32
Abb. 16:	Vertikale Sortierungsprozesse in einer Düne bei maximalem Abfluss (oben) und die Reliktstrukturen der Sortierung bei abnehmenden Abflüssen (unten).....	34
Abb. 17:	Geschiebetransport in einer Düne. t_1 : Sohle zum Zeitpunkt t_1 , t_2 : Sohle zum Zeitpunkt t_2 , x Dünenlänge, Δ Dünenhöhe (verändert nach Van Rijn, 1993).	35

Abb. 18:	A) Kiesdüne am Oberrhein bei Rhein-km 374 mit einer Höhe von etwa 30 cm. B) Kleinere, feinkiesige Düne mit einer Grobkornanreicherung im Dünentrog bei Rhein-km 480 (August 2008).....	36
Abb. 19:	Zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen Dünenlängen und des Abflusses im Messzeitraum 2001.	37
Abb. 20:	Zeitliche Entwicklung der maximalen und mittleren Dünenhöhen sowie des Abflusses im Messzeitraum 2001.	38
Abb. 21:	Mittlere (1-km-Mittelwerte) und maximale Dünenlängen zwischen Iffezheim und Maxau (Längspeilung 2007).	39
Abb. 22:	Mittlere (1-km-Mittelwerte) und maximale Dünenhöhen zwischen Iffezheim und Maxau (Längspeilung 2007).	39
Abb. 23:	Höhen-Längen-Beziehung der Kiesdünen am Oberrhein vom 2001 und 2007 sowie maximal erreichbare Höhe von subaquatischen Sanddünen nach Van Rijn (1993).....	40
Abb. 24:	Dünenhöhen in Abhängigkeit des Abflusses.....	41
Abb. 25:	Sohlhöhenänderungen zwischen 1985 und 1996.....	44
Abb. 26:	Sohlhöhenänderungen zwischen 1996 und 2006.....	44
Abb. 27:	Kumulative Sohlhöhenänderungen der Teilzeiträume zwischen 1985 und 2006.....	45
Abb. 28:	Kumulative Sohlhöhenänderungen zwischen 1985 und 2006.....	46
Abb. 29:	Sohlhöhenänderungsrate und durchgeführte Baumaßnahmen zwischen Iffezheim und Philippsburg.	48
Abb. 30:	Sohlhöhenänderungsrate und durchgeführte Baumaßnahmen für die Flussstrecke von Philippsburg bis Worms.	49
Abb. 31:	Sohlhöhenänderungsrate und durchgeführte Baumaßnahmen von Worms bis Mainz.	50
Abb. 32:	Jährliche Zugabemengen bei Rhein-km 336 und Rhein-km 337 von 1978 bis 2006.....	53
Abb. 33:	Gesamtmenngen der Geschiebemanagement im Untersuchungsgebiet zwischen 1975 und 2006.....	55
Abb. 34:	Anteil der Sandfraktionen kleiner 0,125 mm und 0,25 mm (in Prozent) in den obersten 50 cm der Rheinsohle.	57
Abb. 35:	Längsschnitt der Frachtbilanzierung anhand der Feststofftransportmessungen für den Bilanzierungszeitraum 1996 bis 2006.	60
Abb. 36:	Längsschnitt der Frachtbilanzierung anhand der Feststofftransportmessungen für den Bilanzierungszeitraum 1986 bis 2006.	61
Abb. 37:	Längsschnitt der fraktionierten Frachtbilanzierung anhand der Feststofftransportmessungen für den Bilanzierungszeitraum 1996 bis 2006.	62
Abb. 38:	Längsschnitt der Frachtbilanzierung anhand der Sohlhöhenentwicklung für den Bilanzierungszeitraum 1996 bis 2006.	63
Abb. 39:	Längsschnitt der Frachtbilanzierung anhand der Sohlhöhenentwicklung für den Bilanzierungszeitraum 1986 bis 2006.	64
Abb. 40:	Vergleich der Bilanzierung aus Sohlhöhenentwicklung und Feststofftransportmessungen für den Bilanzierungszeitraum 1996 bis 2006.	65
Abb. 41:	Vergleich der Bilanzierung aus Sohlhöhenentwicklung und Feststofftransportmessungen für den Bilanzierungszeitraum 1986 bis 2006.	65
Abb. 42:	Vergleich der Sohl- und Wasserspiegelentwicklung im langen Vergleichszeitraum (Epoche Anfang der 90er Jahre im Vergleich mit der Epoche 2005 bis 2008).	67
Abb. 43:	Vergleich der Sohl- und Wasserspiegelentwicklung im kürzeren Vergleichszeitraum (Epoche Anfang der 90er Jahre im Vergleich mit der Epoche 2005 bis 2008).....	68
Abb. 44:	Analyse der Residuen (Abweichung der Messwerte von der Transport-Abfluss-Beziehung des Zeitraums) der Suspensionsmessungen im Zeitraum 1996-2006.....	76
Abb. 45:	Beispiel für ein Querprofil des 1D-Modells (durchgezogene Linien) sowie die zugrunde liegende Geometrie (gestrichelt).....	79
Abb. 46:	Breite des morphologisch aktiven Bereichs und des Hauptabflussquerschnitts im Modellgebiet.....	81

Inhaltsverzeichnis

Abb. 47:	Sohlentwicklung im Kalibrierungszeitraum in Natur (orange) und Modell (grau).	82
Abb. 48:	Sohlentwicklung im Validierungszeitraum in Natur (grün) und Modell (grau).	83
Abb. 49:	Vergleich der berechneten Transportraten (Geschiebe plus suspendierter Sand) aus dem numerischen Modell sowie aus den Transport-Abfluss-Beziehungen mit den gemessenen Transportraten an der Messstelle Plittersdorf.	84
Abb. 50:	Vergleich der berechneten Transportraten (Geschiebe plus suspendierter Sand) aus dem numerischen Modell sowie aus den Transport-Abfluss-Beziehungen mit den gemessenen Transportraten an der Messstelle Maxau.	84
Abb. 51:	Vergleich der berechneten Transportraten (Geschiebe plus suspendierter Sand) aus dem numerischen Modell sowie aus den Transport-Abfluss-Beziehungen mit den gemessenen Transportraten an der Messstelle Nierstein.	85
Abb. 52:	Vergleich der berechneten Transportraten (Geschiebe plus suspendierter Sand) aus dem numerischen Modell sowie aus den Transport-Abfluss-Beziehungen mit den gemessenen Transportraten an der Messstelle Speyer.	85
Abb. 53:	Vergleich der berechneten Transportraten (Geschiebe plus suspendierter Sand) aus dem numerischen Modell sowie aus den Transport-Abfluss-Beziehungen mit den gemessenen Transportraten an der Messstelle Mannheim.	86
Abb. 54:	Vergleich der berechneten Transportraten (Geschiebe plus suspendierter Sand) aus dem numerischen Modell sowie aus den Transport-Abfluss-Beziehungen mit den gemessenen Transportraten an der Messstelle Mainz.	86
Abb. 55:	Sohlhöhendifferenz der Simulationen mit und ohne Tracerzugabe zu unterschiedlichen Simulationszeitpunkten.	87
Abb. 56:	Aus den Transportweiten der Tracer in Natur (drei Fraktionen sowie deren gewichtetes Mittel) und Modell (Mittel aller Fraktionen) abgeleitete Transportgeschwindigkeiten sowie die Abflussganglinie am Pegel Maxau.	88
Abb. 57:	Massenbilanz des Tracers im numerischen Modell.	89
Abb. 58:	Änderung des MQ am Pegel Maxau für den Bezugszeitraum <i>near future</i> (2021-2050).	90
Abb. 59:	Änderung des HM7Q am Pegel Maxau für den Bezugszeitraum <i>near future</i> (2021-2050).	91
Abb. 60:	Sohlhöhenentwicklung bis 2050 in Bezug zu 2007 für den Referenzlauf.	91
Abb. 61:	Sohlhöhenentwicklung bis 2050 in Bezug zu 2007 für die Projektion <i>HBV134-KLIWAS_EPW_C20_A2_EH5r1_REMO_10_ls</i>	92
Abb. 62:	Sohlhöhenentwicklung bis 2050 in Bezug zu 2007 für die Projektion <i>HBV134-KLIWAS_EPW_C20_A1B_BCM_RCA_25_ls</i>	92
Abb. 63:	Sohlhöhenentwicklung bis 2050 in Bezug zu 2007 für die Projektion <i>HBV134-KLIWAS_EPW_C20_A1B_EH5r2_CCLM_20_ls</i>	93
Abb. 64:	Vergleich der Sohlhöhenentwicklung bis 2050 in Bezug zu 2007 für die drei Projektionen.	94
Abb. 65:	Klimasignal der Sohlhöhenentwicklung bis 2050 (Differenzen der Projektionen und des Referenzlaufs).	94
Abb. 65:	Längsschnitte: D _m -Werte der Oberschicht (rot), der Unterschicht (dunkelrot) und des Geschiebes (gestrichelt), Sohl Schubspannung (grün) und Sohlhöhe sowie der gleichwertige Wasserstand (GIW 2002) in schwarz.	98

Zusammenfassung

Mit Schreiben vom 20.12.2007 wurden die Bundesanstalten für Gewässerkunde (BfG) und Wasserbau (BAW) durch die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest (WSD-SW) beauftragt, eine Untersuchung zur Optimierung der hydraulischen Situation zwischen Iffezheim und Mainz durchzuführen. Der vorliegende Bericht fasst die durch die BfG durchgeführten Teile des Untersuchungsprogramms zur Analyse und Bewertung der hydraulisch-morphologischen Situation der Oberrheinstrecke zusammen.

Die Untersuchung umfasst die räumliche und zeitliche Entwicklung von: gleichwertigen Wasserständen, Wasserspiegelfixierungen, Korngrößen der Sohle und des Geschiebes, Transportgeschwindigkeiten, Transportkörpern, mittleren Sohlhöhen, Transport-Abfluss-Beziehungen, Baggerungen und Verklappungen sowie Feststoffbilanzen. Die räumliche Ausdehnung der Untersuchung umfasst die Strecke von Rhein-km 334 bis 498. Es wird der Zeitraum zwischen Einstau der Staustufe Iffezheim 1978 und 2008 betrachtet, wobei Daten einiger Parameter nur über Teilbereiche des Untersuchungszeitraums vorliegen.

Die Analyse der gleichwertigen Wasserstände ergibt, dass im Abschnitt von Rhein-km 336 bis 387 der Wasserstand, nach einer lokalen Absenkung zwischen 1982 und 1992 bei Rhein-km 340, von 1992 bis 2002 ansteigt. Im Abschnitt von Rhein-km 387 bis 444 ist der gleichwertige Wasserstand über den gesamten Beobachtungszeitraum mehr oder weniger stabil. Im Abschnitt von Rhein-km 444 bis 500 sind von 1982 bis 1992 Wasserspiegelabsenkungen zu erkennen, die sich im Zeitraum von 1992 bis 2002 ab Rhein-km 470 verstärken.

Aus der Analyse der Wasserspiegelfixierungen ergibt sich, dass die Wasserstände bis kurz oberhalb der Neckarmündung seit 1978 zum Teil deutlich (bis über 30 cm) angestiegen sind. In den letzten Jahren scheint sich dieser Trend abgeschwächt zu haben. Für den Bereich unterhalb der Neckarmündung bis Mainz sind hingegen für den gesamten Zeitraum eher gleichbleibend geringere Wasserstandsabsenkungen festzustellen.

Die Korngrößen der Sohle zeigen eine Abnahme der mittleren Korngröße D_m von oberstrom nach unterstrom, wobei dieser Trend sowohl für die Oberschicht als auch für die Unterschicht erkennbar ist. Die zeitliche Entwicklung zeigt eine Zunahme der gemessenen Korngrößen zwischen 1988 und 2008, jeweils in der Ober- und Unterschicht.

Die mittleren Korngrößen des Geschiebes nehmen von oberstrom nach unterstrom um rund eine 10er-Potenz ab. Die zeitliche Entwicklung zeigt eine Reduktion der mittleren Korngrößen des Zeitraums 1996 bis 2006 im Vergleich zum Zeitraum 1988 bis 1995.

Die mittleren Transportgeschwindigkeiten des Geschiebes, welche nur am oberen Rand des Untersuchungsgebietes gemessen wurden, betragen je nach Korngröße zwischen 5,4 km/a (Fraktion 4/8 mm) und 2,2 km/a (Fraktion 45/63 mm). Die maximalen Transportgeschwin-

digkeiten (99 %-Unterschreitungswahrscheinlichkeit) liegen um etwa den Faktor zwei über den mittleren Transportgeschwindigkeiten.

Im Untersuchungsgebiet treten bei hinreichend hohen Abflüssen Transportkörper in Form von Dünen aus Kies oder aus einem Sand-Kies-Gemisch auf. Die Analyse von Transportkörperabmessungen während zweier Hochwässer bis ca. 3800 m³/s in den Jahren 2001 und 2007 ergab mittlere Dünenlängen von 15 m, mittlere Dünenhöhen von 0,3 m bis 0,4 m und maximale Dünenhöhen von 1,3 m. Die Transportkörperabmessungen steigen mit dem Abfluss und können daher noch höhere Maximalwerte erreichen.

Im betrachteten Zeitraum 1985 bis 2006 zeigen die mittleren Sohlhöhen eine nahezu ausgeglichene Bilanz aus aufeinanderfolgenden Erosions- und Auflandungsbereichen im Abschnitt Rhein-km 336 bis 375. Es schließt sich ein Bereich mit überwiegender Auflandung bis etwa zur Neckarmündung (Rhein-km 428) an. Beginnend dort überwiegt Erosion bis zum Ende des Untersuchungsgebietes. Für die Teilzeiträume zwischen jeweils aufeinander folgenden Peilungen zeigen sich jedoch teilweise von diesem langfristigen Trend abweichende Entwicklungen. Die stärkste Erosion fand zwischen den Peilungen 1998 und 2004 statt. Sie umfasste das gesamte Untersuchungsgebiet mit Ausnahme der Strecken Rhein-km 336 bis 360 und 394 bis 415.

Aus dem Messdatenbestand der BfG werden nach einem einheitlichen Verfahren Transport-Abfluss-Beziehungen für alle Messstellen im Untersuchungsgebiet für zwei Zeiträume aufgestellt: 1986 bis 2006 und 1996 bis 2006. Es werden einheitliche Kriterien für die Elimination von stark abweichenden Einzelmessungen angewendet. Die Transport-Abfluss-Beziehungen werden für den Geschiebetransport, den suspendierter Sandtransport und die Spülfracht (suspendierter Transport ohne den Sandanteil) getrennt aufgestellt. Alle Funktionen sind im Anhang aufgeführt.

Mit zwei voneinander unabhängigen Methoden werden Feststoffbilanzen für das Untersuchungsgebiet aufgestellt. Zum einen erfolgt die Bilanzierung der sohlhöhenrelevanten Fracht aus Jahresfrachten, die aus den Transport-Abfluss-Beziehungen ermittelt werden. Zum anderen wird aus der beobachteten Sohlhöhenentwicklung eine rechnerische Feststoffbilanz erstellt, für die eine zusätzliche Berücksichtigung von Feststoffeinträgen, Geschiebezugaben, Baggerungen und Verklappungen sowie Vorlandsedimentation und Abrieb erfolgt. Für den Bilanzierungszeitraum 1986 bis 2006 ergibt sich eine hohe Übereinstimmung beider Methoden (Abb. 41), die für den Zeitraum 1996 bis 2006 jedoch geringer wird.

Die Betrachtung der Unsicherheiten der dieser Analyse zugrunde liegenden Verfahren zeigt, dass aus Messdatenerfassung und Auswertemethodik teilweise nicht unerhebliche Fehlereinflüsse auf die Ergebnisse resultieren. Durch den Vergleich zweier unabhängiger Methoden der Feststoffbilanzierung sowie den Vergleich von Wasserspiegel- und Sohlentwicklung kann jedoch gezeigt werden, dass der Feststoffhaushalt des Untersuchungsgebietes mit der vorliegenden Methodik mit bisher nicht erreichter Sicherheit beschrieben wird.

Abschließend erfolgt die Bewertung der Entwicklung des status quo unter Anwendung ein-dimensionaler numerischer Modellierung. Die Güte des Modells wird anhand der Validierung der Sohlhöhenentwicklung, der Feststofftransportmengen sowie der Transportgeschwindigkeit von Tracern nachgewiesen.

Durch Vergleich dreier Projektionen der Klimaentwicklung wird der Einfluss des Klimawandels auf die Sohlhöhenentwicklung abgeschätzt. Es zeigt sich, dass der Einfluss der Klimaszenarien einen geringen Einfluss auf die Entwicklung der Sohlage im Untersuchungsgebiet hat. Überwiegend betragen die möglichen Sohlhöhendifferenzen in Abhängigkeit der Klimaprojektion 0 bis 0,2 m. Lokal werden auch 0,5 m erreicht und direkt unterhalb Iffezheim im Maximum 1,0 m. Eine Betrachtung unterschiedlicher Unterhaltungsszenarien erfolgt in diesem Bericht nicht. Die Berechnung wird unter Vernachlässigung von Unterhaltungsmaßnahmen im Prognosezeitraum durchgeführt.

1. Einführung

Der Rhein zählt zu den größten Flüssen Europas mit einer Länge von 1320 km und einem Mittelwasserabfluss von 2300 m³/s an der Deutsch-Niederländischen Grenze. Seine Bedeutung als internationale Wasserstrasse wird durch die Beförderung von 207,5 Millionen Tonnen Gütern im Jahre 2008 verdeutlicht.

Durch die ingenieurtechnischen Eingriffe der letzten beiden Jahrhunderte ergibt sich heute ein weit vom natürlichen Zustand entferntes Gewässer. Insbesondere die Errichtung von insgesamt 10 Staustufen zwischen Basel und Iffezheim hat eine maßgebliche Veränderung des Oberrheins mit Auswirkungen auf die hydraulisch-morphologische Situation in der anschließenden freifließenden Strecke bewirkt. Durch die seit 1978 eingerichtete Geschiebezugabe unterhalb der letzten Staustufe wird angestrebt, die Auswirkungen der morphologischen Veränderungen, insbesondere die durch den Sedimentrückhalt bedingte Erosion, zu begrenzen.

Abb. 1 zeigt den ca. 150 km langen Lauf des frei fließenden Oberrheins bis Mainz mit den wichtigsten Pegeln, der Mündung des Neckars und Mündungen weiterer Rhein Nebenflüsse.

Der Oberrhein zwischen Iffezheim (Rhein-km 334) und Mainz (Rhein-km 498) bildet unter den gegebenen hydrologischen und morphologischen Rahmenbedingungen ein komplexes Gesamtsystem. Im Zusammenspiel der natürlichen morphodynamischen Prozesse mit der von der WSV eingerichteten dynamischen Geschiebezugabe stellt die Zielvorgabe, im Rahmen der Unterhaltung dieses Gewässers stabile Sohl- und Wasserstandsverhältnisse vorzuhalten, eine schwierige Aufgabe dar.

Der vorliegende Bericht ist Teil der durch die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest (WSD-SW) beauftragten Untersuchung zur Optimierung der hydraulischen Situation zwischen Iffezheim und Mainz. Die von der BfG durchgeführten Teile des Untersuchungsprogramms zur Analyse und Bewertung des Istzustandes der Strecke werden im Folgenden zusammengefasst. Zunächst erfolgt die Analyse der Hydrologie und Hydraulik im Kapitel 2. Anschließend folgen Auswertungen zur Sedimentologie (Kapitel 3) und Morphologie (Kapitel 4). In Kapitel 5 werden Feststoffbilanzen aufgestellt, welche auf den vorausgegangenen Auswertungen aufbauen. Eine Unsicherheitsanalyse bezüglich aller untersuchten Parameter folgt in Kapitel 6. Die Bewertung der Sohlstabilität in Kapitel 7 ist in der derzeit vorliegenden Entwurfsfassung noch ausgeklammert. Sie kann erst erfolgen, wenn das numerische Modell eine hinreichende Aussagequalität erreicht. Abschließend werden in Kapitel 8 Schlussfolgerungen aus der bisherigen Analyse gezogen.

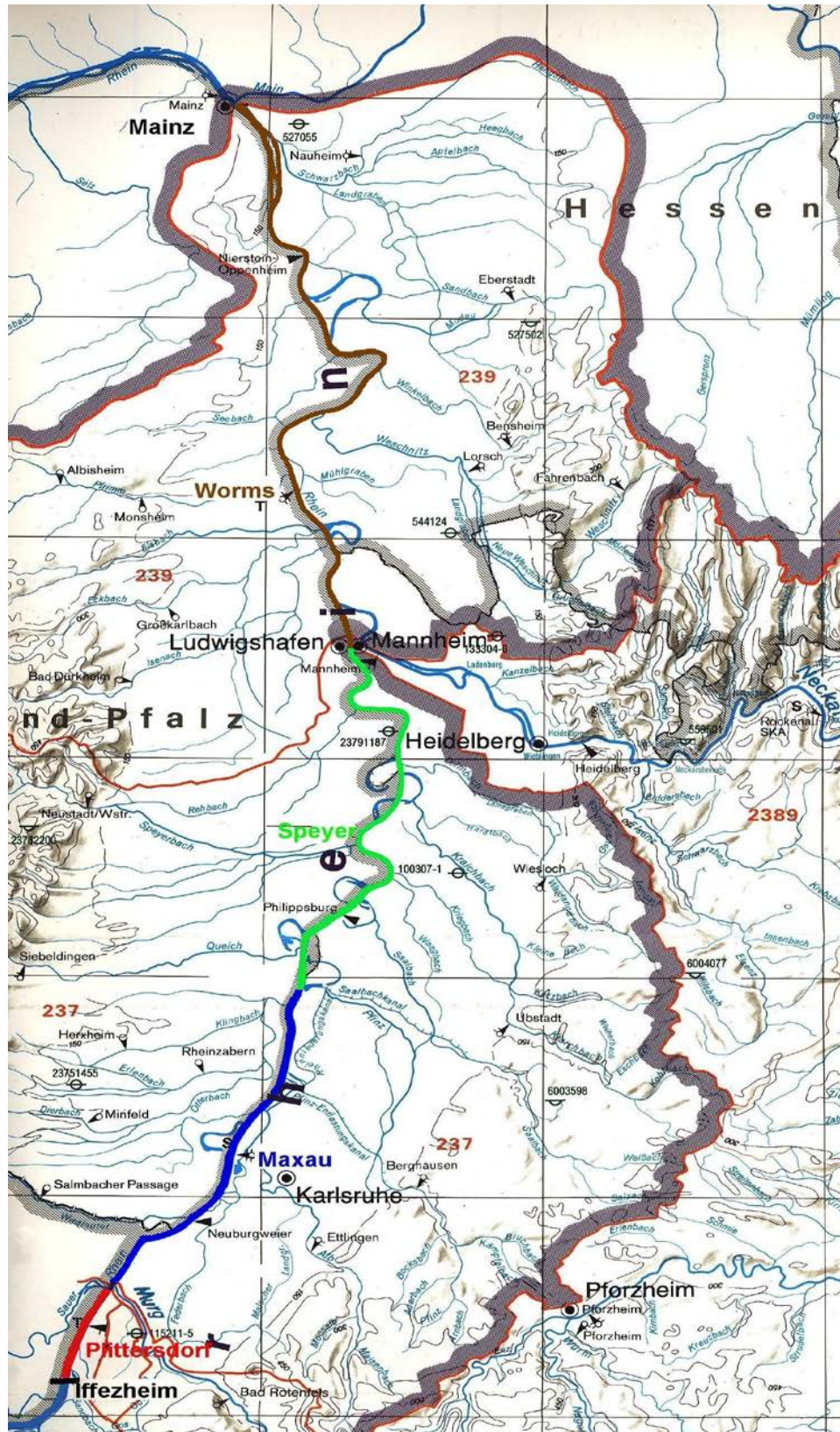


Abb. 1: Karte des Oberrheins zwischen Iffezheim und Mainz (Quelle: DGJ, 2003)

2. Datenanalyse Hydrologie/Hydraulik

2.1 Gleichwertige Wasserstände

2.1.1 Methodik

Der Wasserspiegel frei fließender Flussabschnitte zeichnet bei niedriger bis mittlerer Wasserführung ungefähr das Längsprofil der mittleren Flusssohle nach. Die Untersuchung der Entwicklung des Wasserspiegels über mehrere Jahre liefert somit wertvolle Informationen über die morphologische Veränderung der Flusssohle, sofern diese mit der gleichzeitigen Absenkung oder Anhebung des Wasserspiegels einhergehen.

In Hinblick auf die Zielsetzung dieser zeitlich und räumlich großskaligen Analyse eignet sich zur Erkennung von Erosions- oder Sedimentationsstrecken der gleichwertige Wasserstand GIW (BMV, 2002). Der gleichwertige Abfluss ist als derjenige Abfluss festgelegt, der im langjährigen Mittel je nach Pegel an 10 bis 20 Tagen unterschritten wird. Er wird entlang des Rheins alle 10 Jahre aus den Abflussdaten einer längeren Jahresreihe für ausgewählte Pegel bestimmt. Am frei fließenden Oberrhein sind dies die Pegel Plittersdorf, Maxau, Speyer, Worms und Mainz.

Aus den aktuellen Abflusskurven werden zunächst die zugehörigen gleichwertigen Wasserstände abgelesen. Um den Wasserspiegelverlauf zwischen den Pegeln zu erhalten, wird auf eine möglichst aktuelle Wasserspiegelfixierung im Niedrigwasserbereich zurückgegriffen. Mit Hilfe des so erhaltenen Wasserspiegellängsschnitts wird der gleichwertige Wasserstand über die gesamte Strecke zwischen den Pegeln interpoliert. Das Ergebnis dieses Prozesses ist ein Datensatz, der den gleichwertigen Wasserstand in Meter über Normalnull entlang des frei fließenden Oberrheins angibt.

2.1.2 Datenlage

Daten über gleichwertige Wasserstände für den Oberrhein liegen für die Jahre 1982, 1992 und 2002 vor. Diese bestehen aus Höheninformationen des gleichwertigen Wasserstandes im Abstand von 100 m und wurden von der WSD Südwest zur Verfügung gestellt. Die drei Datensätze sind untereinander vergleichbar, da ihnen jeweils der aus der Jahresreihe von 1966 bis 2000 ermittelte gleichwertige Abfluss zugrunde liegt. Dieser nimmt von Plittersdorf (Rhein-km 340) nach Mainz (Rhein-km 498) von 570 m³/s auf 730 m³/s zu (BMV, 2002).

Zur Berechnung der Wasserspiegeländerungen werden zum einen die Wasserspiegelhöhen der GIW 1992 und 2002 vom Bezugsjahr GIW 1982 subtrahiert und zum anderen die Was-

serspiegeldifferenzen der drei Epochen untereinander berechnet. Aus den Wasserspiegeldifferenzen werden anschließend die Änderungsraten in Zentimeter ermittelt.

2.1.3 Ergebnisse

Zur Beschreibung der Entwicklung der Wasserstände am Oberrhein sind in Abb. 2 die Differenzen der gleichwertigen Wasserstände von 1982, 1992 und 2002 aufgetragen. Beide Diagramme zeigen dieselben Ergebnisse, wobei die Veränderungen des Wasserstandes einmal in Bezug auf das Jahr 1982 (Abb. 2, A) und im anderen Diagramm in Form von Änderungsraten zwischen 1982 und 1992 sowie zwischen 1992 und 2002 (Abb. 2, B) angegeben sind. Zur einfacheren Beschreibung der Ergebnisse werden die Diagramme in drei Abschnitte unterteilt. Abschnitt 1 reicht von Rhein-km 334 bis 387, Abschnitt 2 von Rhein-km 387 bis 444 und Abschnitt 3 von Rhein-km 444 bis 500.

Gleichwertiger Wasserstand von 1982 bis 1992:

Im oberen Teil des ersten Abschnitts (Rhein-km 340) ist der gleichwertige Wasserstand von 1992 gegenüber dem von 1982 um 0,3 m niedriger. Im weiteren Verlauf dieses ersten Abschnitts und im zweiten Abschnitt sind zwischen 1982 und 1992 nur kleinere Ausschläge nach oben und unten zu beobachten. Im dritten Abschnitt senkt sich der gleichwertige Wasserstand von 1982 bis 1992 mit einer Rate von ein bis zwei Zentimetern pro Jahr ab. (Abb. 2)

Gleichwertiger Wasserstand von 1992 bis 2002:

Im ersten Abschnitt von Rhein-km 336 bis 387 hebt sich der gleichwertige Wasserstand gegenüber 1992 deutlich. Die vorhergegangene Absenkung bei Rhein-km 340 wird dadurch kompensiert. Der Bereich um Leimersheim (Rhein-km 371,8) zeichnet sich durch eine jährliche Wasserstandsanhhebung von ein bis zwei Zentimetern aus. Im zweiten Abschnitt schwankt der gleichwertige Wasserstand um die Wasserstandslage aus 1992, wobei die Änderungsbeiträge minimal sind. Im dritten Abschnitt senkt sich der gleichwertige Wasserstand unterstrom von Rhein-km 470 ab. Die maximale Absenkung erreicht bei Rhein-km 485 einen Wert von rund 0,25 m. (Abb. 2)

Zusammenfassend ist festzustellen, dass im ersten Abschnitt von Rhein-km 336 bis 387 der Wasserstand, nach einer lokalen Absenkung zwischen 1982 und 1992 bei Rhein-km 340, von 1992 bis 2002 ansteigt. Im Abschnitt von Rhein-km 387 bis 444 ist der gleichwertige Wasserstand über den gesamten Beobachtungszeitraum mehr oder weniger stabil. Im dritten Abschnitt sind von 1982 bis 1992 Wasserspiegelabsenkungen zu erkennen, die sich von 1992 bis 2002 ab Rhein-km 470 verstärken.

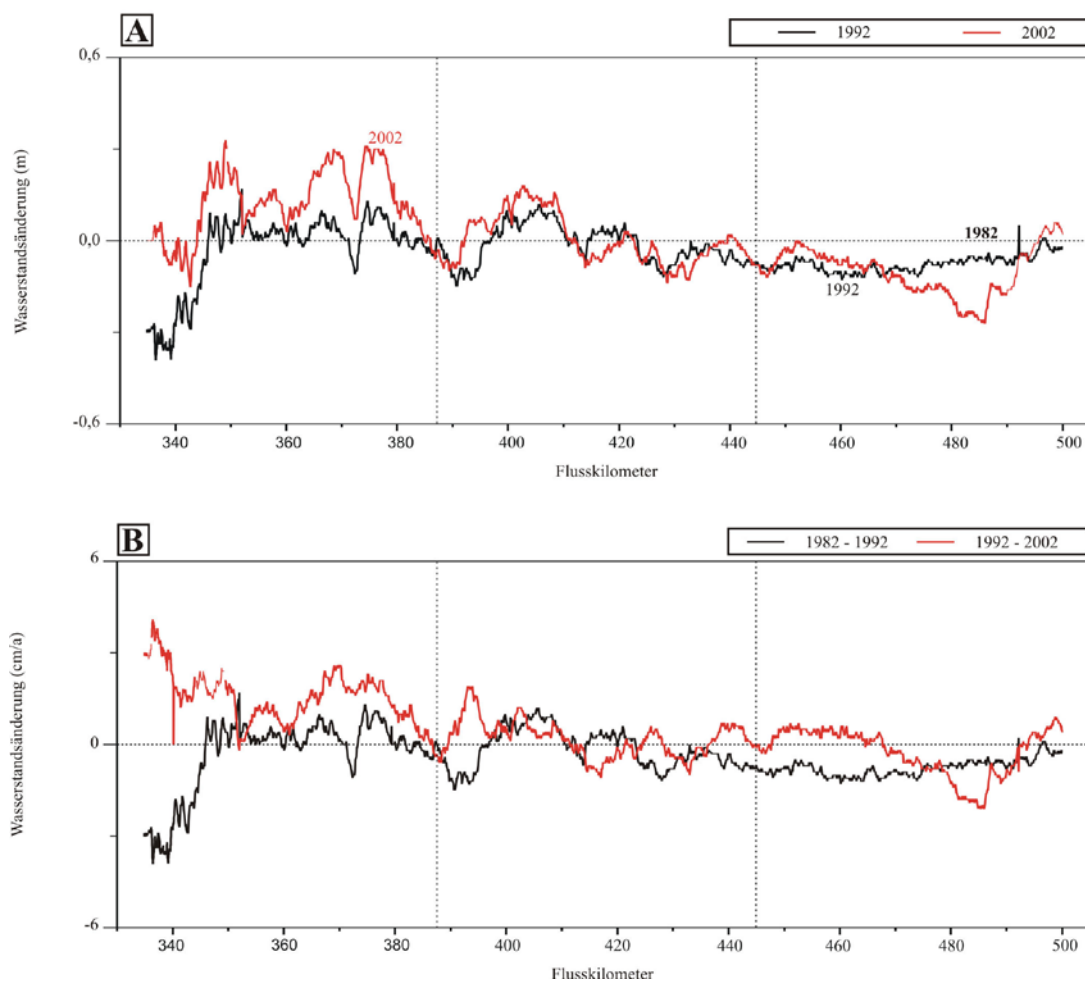


Abb. 2: Änderungen der gleichwertigen Wasserstände. In A) werden die Wasserstandsänderungen in Meter und in Bezug auf den GLW 1982 angegeben, während in B) die Wasserstandsänderungen in cm pro Jahr der einzelnen Zeitintervalle aufgezeigt sind.

2.2 Wasserspiegelfixierungen

2.2.1 Methodik

Der Vergleich von überregionalen Wasserspiegelfixierungen zwischen Iffezheim und Mainz über einen vieljährigen Zeitraum ermöglicht Rückschlüsse auf das morphologische Gesamtsystem des Oberrheins bzw. auf lokale Erosions- und Anlandungstendenzen. Für die Untersuchung hat die BfG ihre Software FLYS mit einer neuartigen Auswertemethodik eingesetzt, um zeitliche Änderungen von Wasserständen zwischen Iffezheim und Mainz auf der Basis von Wasserspiegelfixierungen des Zeitraums 1978 bis 2008 nachzuweisen (BfG, 2008). Nachfolgend werden die verwendeten Daten und die Vorgehensweise der Auswertungen mit FLYS beschrieben sowie Ergebnisse zu den festgestellten Wasserstandsänderungen bei einem mittlerem Niedrigwasserabfluss für diese Oberrheinstrecke präsentiert.

Gemessene Wasserstände aus Wasserspiegelfixierungen werden üblicherweise im Längsschnitt einer Gewässerstrecke dargestellt. Fehlerhafte Messungen lassen sich hierdurch im Vergleich mit vorangegangenen Fixierungen gegebenenfalls feststellen, unterschiedliche lokale Gefälleverhältnisse werden deutlich (siehe Abb. 3).

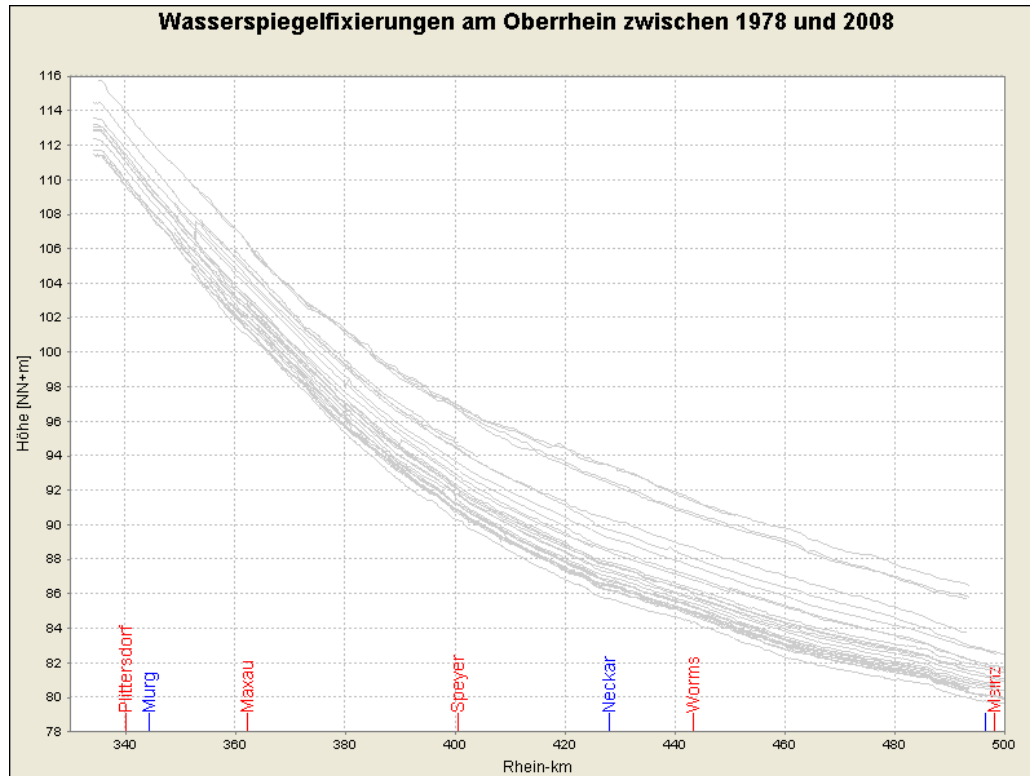


Abb. 3: Verwendete Wasserspiegelfixierungen zwischen Iffezheim und Mainz seit 1978

Abb. 3 veranschaulicht im Längsschnitt der Rheinstrecke von Iffezheim bis Mainz die Wasserstandssituation am frei fließenden südlichen Oberrhein auf der Grundlage von Fixierungen, die hier seit 1978 durchgeführt und für die Untersuchungen herangezogen wurden. Alleine diese Darstellung gibt wenig Informationen über Veränderungen der Wasserspiegellagen, die möglicherweise vorhanden sind, aber nicht erkannt werden, da die Wasserspiegelfixierungen bei unterschiedlichen Abflussbedingungen durchgeführt wurden. Folglich müssen die vorherrschenden Abflüsse auf deren Grundlagen sich die gemessenen Fixierungswasserstände einstellen, als weitere Größe in die Untersuchungen mit einbezogen werden. Für frei fließende Gewässer beschreiben Abflusskurven die Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss. Diese lassen sich in W-Q-Diagrammen darstellen.

Die Auswirkungen von Anlandungen und Eintiefungen auf Wasserstände, die sich an Pegeln durch die zeitliche Auswertung aller gültigen Abflusskurven beschreiben lassen, müssten sich in gleicher Weise im Vergleich vieler Wasserspiegelfixierungen wiederfinden, wenn die gemessenen Wasserstände aller Wasserspiegelfixierungen zusammen mit ihren entsprechenden Abflüssen wie Ergebnisse von Abflussmessungen weiterverwendet und Änderungen zeitlich analysiert würden. Dieser Ansatz, Wasserspiegelfixierungen und Abflussmessungen in glei-

cher Weise auszuwerten, ist neu, aber doch naheliegend. Während bei Abflussmessungen der gemessene Abfluss einem Bezugswasserstand am Bezugspegel zugeordnet wird, werden analog hierzu an allen Orten der Fixierungen den gemessenen Wasserständen jetzt auch ihre Abflüsse zugeordnet. Messungen aus Fixierungen werden folglich (wie Ergebnisse aus Abflussmessungen) in W-Q-Diagrammen dargestellt und ausgewertet. Dies ist der Kern des Auswerteverfahrens, das die BfG im Rahmen dieser Untersuchung erstmals angewendet hat.

Die wesentlichen Merkmale des Auswerteverfahrens sind:

- Die Anwendung des Verfahrens ist lokal, d.h. stationsweise vorzunehmen.
- Es kann nur für frei fließende Gewässer angewendet werden, da nur hier im unteren Abflussbereich eindeutige Beziehungen zwischen allen Abflüssen und sich einstellenden Wasserständen existieren.
- Um zeitliche Änderungen nachweisen zu können, werden gemessene Wasserstände aus Wasserspiegelfixierungen und ihre Abflüsse in W-Q-Diagrammen aufgetragen.
- Für einen festzulegenden Zeitraum auf den die Änderungen bezogen werden sollen, wird auf Grundlage der in diesem Zeitraum erfolgten Fixierungen stationsweise eine Abflusskurve berechnet werden. Der Bezugszeitraum gilt identisch für alle Orte innerhalb der Untersuchungsstrecke.
- Die Wasserstände aller verbleibenden Fixierungen werden jetzt auf die berechnete Abflusskurve des Bezugszeitraums (=Nulllinie) bezogen und sich ergebende Wasserstandsänderungen (ΔW) chronologisch in einem ΔW -Zeit-Diagramm dargestellt.
- Die Auswertung der ΔW erfolgt stationsweise durch Ermittlung von Änderungsraten für den gesamten Untersuchungszeitraum oder von mittleren Abweichungen für Epochen.
- Zusammenführung der stationsweise ermittelten Ergebnisse für die gesamte Untersuchungsstrecke

Um mit Hilfe dieses Verfahrens zeitliche Wasserstandsänderungen in einem Zeitraum nachweisen zu können, müssen mehrere Anforderungen an die zugrundeliegenden Daten hinreichend erfüllt sein. Des weiteren müssen im Vorfeld der Auswertungen einige Rahmenbedingungen festgelegt werden.

Folgende Anforderungen an die zu verwendenden Daten sind zu beachten:

- Es müssen hinreichend viele Wasserspiegelfixierungen in unterschiedlichen Wasserstandsbereichen vorliegen, die möglichst kontinuierlich den Untersuchungszeitraum abdecken. Die im hier vorgestellten Anwendungsbeispiel Oberrhein zur Verfügung stehenden 11 Fixierungen haben sich als hinreichend erwiesen.
- Den gemessenen Wasserständen an allen Messorten der Fixierungen müssen bestmöglich die zum Messzeitpunkt vorhandenen Abflüsse zugeordnet werden.
- Zumindest müssen für den festzulegenden Bezugszeitraum hinreichend viele Fixierungen zur Verfügung stehen, damit auf deren Grundlage eine gesicherte Abflusskurve erstellt werden kann. (Diese wird im weiteren zeitlichen Auswerteverfahren dann als Bezugslinie für die Messungen aus dem verbliebenen Messzeitraum herangezogen.)

Für den Oberrhein zwischen Iffezheim und Mainz können diese Bedingungen als erfüllt angesehen werden.

Im Vorfeld der Auswertungen sind nachfolgende Festlegungen zu treffen:

- Wie die Ergebnisse von Abflussmessungen werden in dem gewählten Auswerteverfahren die gemessenen Wasserstände aus allen vorliegenden Fixierungen mit den ihnen zugeordneten Abflüssen in W-Q-Diagrammen aufgetragen. Zunächst muss die Schrittweite der diskreten, lokalen Auswertungen (z.B. für jeden Hektometer, jeden Halb-Kilometer, jeden Voll-Kilometer) festgelegt werden. Es ist abzuwägen und über die Auswertedichte zu entscheiden, wobei der zeitliche Aufwand für die einzelnen Auswertungen und Analysebedarf in Betracht zu ziehen sind.
- Festlegung eines Bezugszeitraums durch Auswahl von Fixierungen. Dieser Zeitraum gilt gleichermaßen für alle Orte/Hektometer der Untersuchungsstrecke.
- Optional: Festlegung eines Bezugsabflusszustandes auf den die Wasserstandsänderungen ausgewertet werden sollen (in der Regel ein Niedrigwasserzustand)
- Festlegung der abschließenden, chronologischen Auswertung der Wasserstandsänderungen in Form von Änderungsraten für den gesamten Zeitraum (in cm/Jahr) oder für Epochen (in cm)

Mit der Software FLYS können gegenwärtig die beiden letzten Auswerteschritte “Die Auswertung der ΔW erfolgt stationsweise.....“ und “Zusammenführung der stationsweise ermittelten Ergebnisse...” nicht unmittelbar vorgenommen werden. Ein Export der ermittelten ΔW -Werte für die verwendeten Fixierungen nach EXCEL ist deshalb erforderlich.

Beendet ist diese Untersuchung auf zeitliche Änderungen von Wasserständen aus Wasserspiegelfixierungen, wenn die lokalen-zeitlichen Wasserstandsänderungen an den einzelnen Untersuchungsstationen hinsichtlich ihrer Änderungsraten (in cm/Jahr) oder epochenweise (in cm) ausgewertet vorliegen. Hieraus hervorgegangenen Ergebnisse lassen sich dann im Überblick in einem Streckendiagramm graphisch darstellen und weiter analysieren.

Abflusszuweisung

In der Oberrheinstrecke zwischen Iffezheim und Mainz liegen fünf Pegel mit Abflussermittlung. Da in den Analysen für jeden Messort dem gemessenen Wasserstand ein Abfluss zugeordnet sein muss, wurde vereinfachend den einzelnen Pegelabflüssen Streckengültigkeitsbereiche zugewiesen. Diese können der Tab. 1 entnommen werden. Zu beachten ist, dass der Pegel Plittersdorf wegen seiner Lage im direkten Einflussbereich der Geschiebemanagementumgebung vermutlich weniger geeignet als die weiteren Pegel ist.

Tab. 1: Gültigkeitsbereiche der Pegelabflüsse

Pegel	von	bis
Plittersdorf	Iffezheim	Mündung Murg
Maxau	Mündung Murg	Rhein-km 382
Speyer	Rhein-km 382	Mündung Neckar
Worms	Mündung Neckar	Mündung Main
Mainz	Mündung Main	Mündung Nahe

Bis einschließlich 1996 wurden die Wasserspiegelfixierungen mittels der Pflockmethode durchgeführt. In diesen Fällen wurden die Wasserstände an beiden Ufern mit mehreren Messtrupps gemessen. Angaben zu den Abflüssen (Tab. 1) an den jeweiligen Pegeln wurden den Originallisten entnommen und beziehen sich auf die jeweils gültigen Abflusskurven.

Ab dem Jahr 2002 werden die Wasserspiegelfixierungen mittels moderner Technik mit DGPS-Sensor durchgeführt. Die Fixierungen erfolgten über einen mehrere Tage andauernden Zeitraum. In diesem Fall tritt ein Problem bei der Zuweisung der Abflüsse ein. Oft wurden die Fixierungen mitten im festgelegten Gültigkeitsbereich eines Abflusspegels beendet und am nächsten Tag am gleichen Standort wieder aufgenommen. Dies führt dazu, dass sich die Abflussverhältnisse am nächsten Tag möglicherweise verändert haben. Um Plausibilität zu erzielen, basieren die verwendeten Abflüsse auf den parallel durchgeführten ADCP Messungen. Der zugewiesene Abfluss am folgenden Tag bezieht sich in diesem Fall auf den am nächsten zur Grenze des Abflussbereiches liegenden Pegel (siehe Abb. 4). Gemessene Abflüsse mit ADCP weisen im Vergleich zu den aus den gültigen Abflusstafel ermittelten Abflüssen gewisse Diskrepanzen auf, die aber üblicherweise im Bereich von unter 3 % liegen.

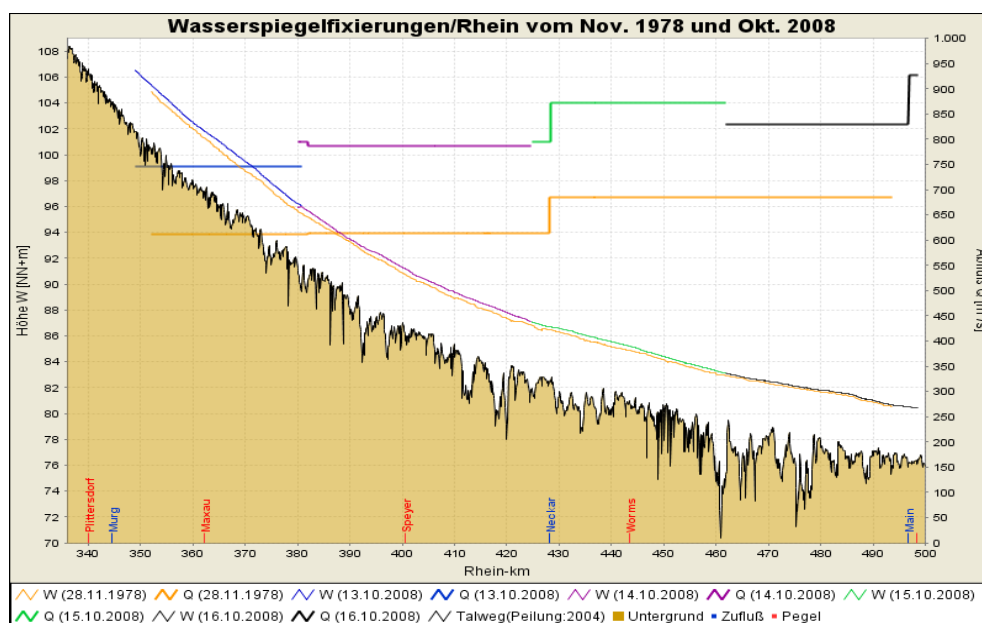


Abb. 4: Wasserstands- und Abflusslängsschnitte der Wasserspiegelfixierungen von November 1978 und Oktober 2008 am Oberrhein bis Mainz

In der Abb. 4 sind am Beispiel der ausgewählten Wasserspiegelfixierungen von November 1978 und Oktober 2008 die gemessenen Wasserstände und die verwendeten, streckenweise gültigen Abflüsse im Längsschnitt der Messstrecken dargestellt. Die veränderten Abflüsse bei Unterbrechung der Fixierung im Oktober 2008 sind deutlich zu erkennen.

Methodik der zeitlichen Analyse

Die Analyse der 30 vorhandenen Wasserspiegelfixierungen auf in ihnen enthaltenen zeitlichen Wasserstandsänderungen wurde mit dem in der Software FLYS enthaltenen Modul "Fixierungsanalyse" für jeden vollen Rheinkilometer zwischen Rhein-km 336 und 498 vorgenommen.

Für diese festgelegten Orte am Rhein gründet sich die zeitliche Analyse der Wasserspiegelfixierungen in FLYS auf das Auswerteschema von Abflussmessungen an Pegeln. Zunächst wurde der Zeitraum von 2005 bis 2008 als Bezugszeitraum festgelegt. D.h., die mit dem Auswerteverfahren festgestellten Wasserstandsänderungen werden auf die heutigen Wasserstands-Abflussverhältnisse bezogen.

Es sind mit der jetzigen Softwareversion jeweils drei Auswerteschritte für jede Station zu durchlaufen:

1. Ermittlung einer Abflusskurve auf Basis aller Fixierungen für den festgelegten Bezugszeitraum 2005-2008 durch Anpassung einer logarithmisch-linearen Funktion ($W(Q) = a \ln(m Q + b)$). Ausschlaggebend für die Wahl dieses Bezugszeitraums war die Verfügbarkeit von 11 Fixierungen, die die Berechnung einer gesicherten Abflusskurve erwarten ließ.
2. Epochenweise Hinzunahme der Fixierungen aus dem vorangegangenen Zeitraum zwischen 1978 und 2004 in das W-Q-Diagramm 2005-2008. Dann Ermittlung der Wasserstandsabweichungen ΔW der Fixierungsepochen 1978-1983, 1994-1996 und 2002-2003 von der Abflusskurve (aus 1.)
3. Darstellung der ermittelten ΔW (in cm) in einem ΔW -t-Diagramm für den untersuchten Zeitraum 1978-2008.

Nachfolgend wird das Vorgehen beispielhaft für die ausgewählten Stationen Rhein-km 365, ca. 3 km unterhalb des Pegels Maxau gelegen und für Rhein-km 460, ca. 16 km unterhalb des Pegels Worms, vorgestellt. Abb. 5 zeigt für Rhein-km 365 gemäß Auswerteschritt 1 die gemessenen Wasserstände aller Fixierungen des Bezugszeitraums 2005-2008 in einem W-Q-Diagramm und die resultierende Abflusskurve, die im weiteren als Bezugskurve für die zeitliche Auswertung herangezogen wird. Die geringe Streuung der Einzelwerte um die Ausgleichskurve überrascht und zeugt von der hohen Qualität der Wasserstands- und Abflussmessungen in diesen Fixierungen.

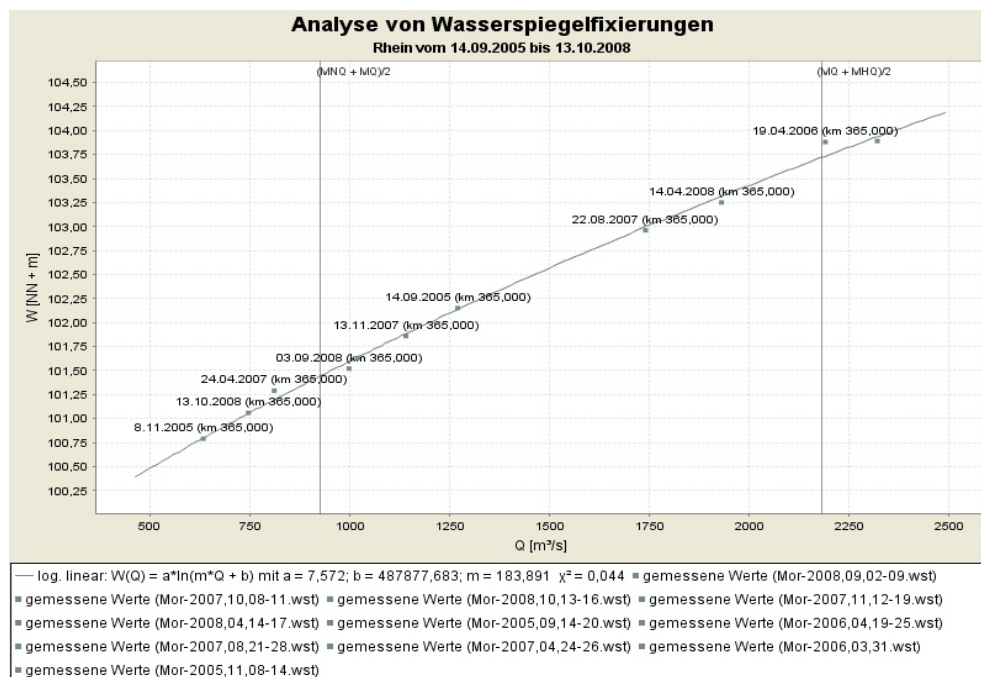


Abb. 5: Fixierungen für Rhein-km 365; Bezugszeitraum 2005 – 2008 und berechnete Abflusskurve

In der Abb. 6 sind als Ergebnis des dritten Auswerteschrittes die ermittelten Abweichungen ΔW (in cm) in einem Zeitdiagramm für den Zeitraum 1978 bis 2008 dargestellt. Hierin beschreibt die Nulllinie die heutigen Wasserstandsverhältnisse für Rhein-km 365.

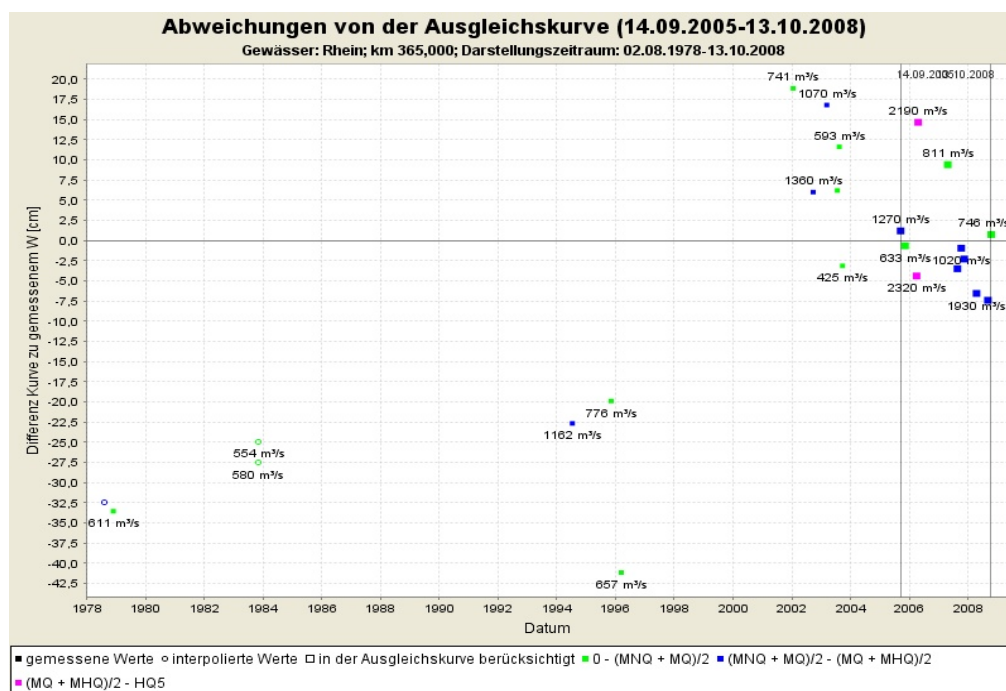


Abb. 6: Abweichungen der Wasserspiegelfixierungen zwischen 1978 und 2004 von der Abflusskurve des Bezugszeitraums 2005-2008, Rhein-km 365

Wertet man in Abb. 6 nur die Abweichungen der Wasserstände für Niedrig- und Mittelwasserabflüsse (grüne Punkte) von den Bezugswasserständen aus, erkennt man einen deutlichen Anstieg der Wasserstände von 1978 bis 1996 und höhere Wasserstände für den Zeitraum von 2002 bis 2004 gegenüber den heutigen Werten (= Bezugszeitraum). Die berechnete Wasserstandstendenz für Rhein-km 365 zwischen 1978 und 1996 korrespondieren mit den hier festgestellten Anlandungen an der Sohle. Zudem deckt sich dieses Ergebnis mit den bekannten Wasserstandserhöhungen am benachbarten Pegel Maxau in diesem Abflussspektrum. Einzig die Messung bei 657 m³/s im Jahr 1996 weicht deutlich vom genannten zeitlichen Trend ab. Ursache hierfür kann eine lokale, zeitliche begrenzte Eintiefung oder auch ein nicht näher zu bestimmender Messfehler sein.

In Abb. 7 sind beispielhaft die Ergebnisse der örtlichen und zeitlichen Analyse für die Station Rhein-km 460 zu sehen. Heutige Verhältnisse werden wiederum durch die Nulllinie beschrieben. Seit 1978 sind hier Wasserstandsabsenkungen im Niedrigwasserbereich (grüne Punkte) in der Größenordnung von 10 bis 20 cm festzustellen. Dieses Ergebnis deckt sich mit den bekannten Wasserstandsabsenkungen am benachbarten Pegel Worms in diesem Abflussspektrum.

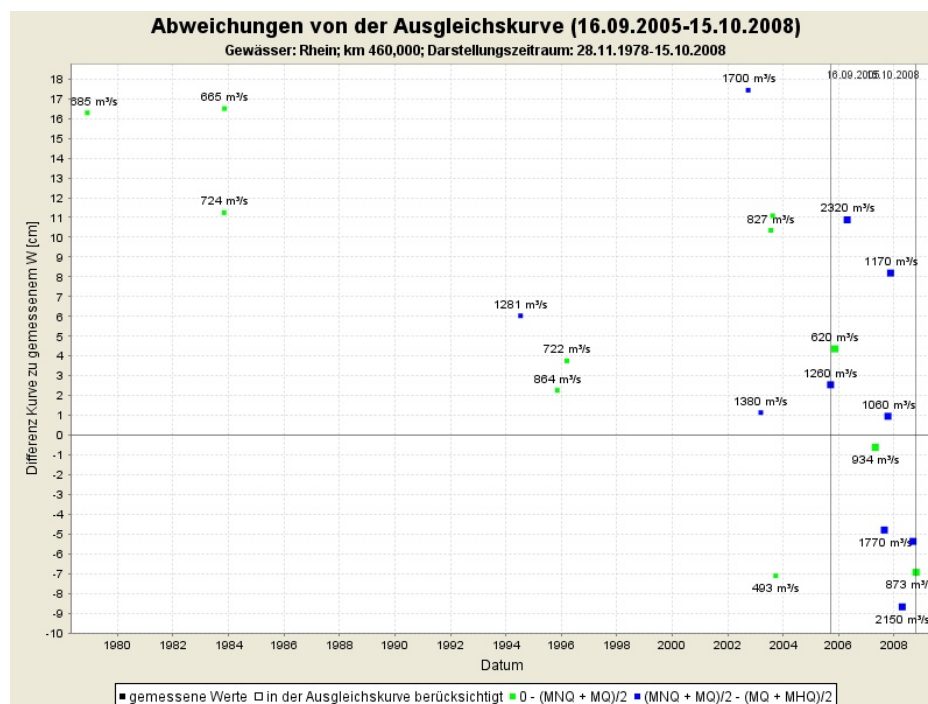


Abb. 7: Abweichungen der Wasserspiegelfixierungen zwischen 1978 und 2003 von der Abflusskurve des Bezugszeitraums 2005-2008, Rhein-km 460

Abb. 8 zeigt am Beispiel für Rhein-km 365, wie für Epochen die Mittelung der Wasserstandsänderungen vorgenommen wurde. Wegen der nicht kontinuierlich über den Gesamtzeitraum verteilten Fixierungen, erfolgte die Auswertung epochenweise durch Mittelbildung der Abweichungen ΔW für die Zeiträume 1978 bis 1983 und 2002 bis 2003. Demzufolge liegen bei Rhein-km 365 (ca. 3 km unterhalb des Pegels Maxau) bei Rheinabflüssen um MNQ im Mittel

die Wasserstände zwischen 1978 und 1983 um 29 cm tiefer als heute. Für den Zeitraum 2002 bis 2003 hingegen ergibt sich eine mittlere Erhöhung um 10,2 cm gegenüber dem heutigen Wasserstand bei MNQ.

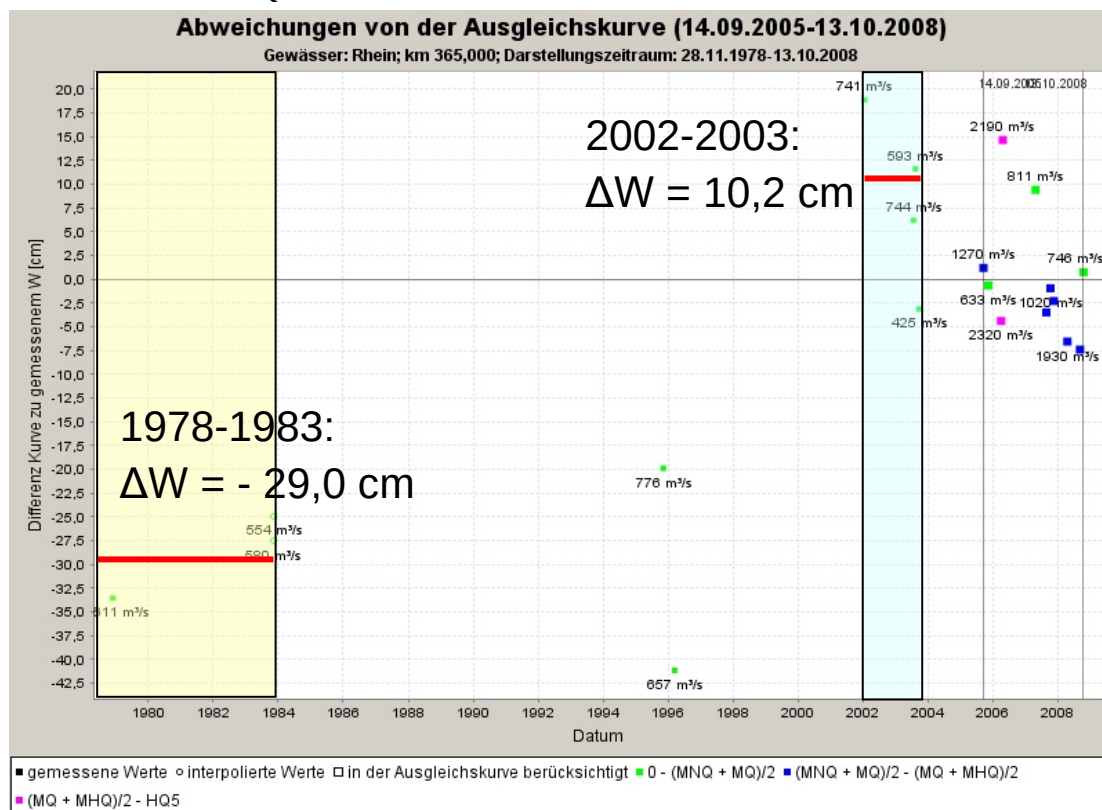


Abb. 8: Auswertung der Wasserstandsabweichungen im niedrigen Abflussbereich für die Epochen 1978-1983 und 2002-2003; Beispiel Rhein-km 365

2.2.2 Datenlage

Die in die Untersuchungen einbezogenen Wasserspiegelfixierungen erfassen den Zeitraum von 1978 bis 2008. Insgesamt stehen Daten aus 30 Messkampagnen zur Verfügung. Erst ab dem Jahr 2002 lagen die von der WSD Südwest bereitgestellten Daten in digitaler Form vor. Für den Zeitraum vor 2002 mussten die Messwerte aus den Originalaufzeichnungen zeitaufwändig digitalisiert werden. Anfallende Digitalisierungsarbeiten wurden von der BfG übernommen. Die Beschaffung der Originalunterlagen wurde mit Hilfe der Fachstelle für Gewässerkunde bei der WSD Südwest sowie den Wasser- und Schifffahrtsämtern Freiburg, Mannheim und Bingen erreicht.

Um eine konsistente Datengrundlage zu erhalten, wurde angestrebt, im Zeitraum 1978 bis 2002 die Lücken zwischen einzelnen Wasserspiegelfixierungen möglichst klein zu halten. Größere zeitliche Lücken waren jedoch mangels Messungen unvermeidbar. Für die Untersuchung wurden Wasserspiegelfixierungen ab einer Länge von 20 km verwendet. Eine Übersicht der Wasserspiegelfixierungen mit Angaben zu den Messmethoden gibt Tab. 2.

Tab. 2: Verzeichnis der zur Verfügung stehenden Wasserspiegelfixierungen von 1978 bis 2008

Jahr	Datum	Rheinstrecke	Pegel Maxau		Pegel Worms		Q- Bereich			Uhrzeit ?		Messmethode	
			W [cm]	Q [m³/s]	W [cm]	Q [m³/s]	MNQ	MQ	HQ	Ja	Nein	Pflockmethode	GPS
1978	1.03.	354 - 493	654	2400	449	2800		x		x		x	
	24.-26.05.	335 - 451	847	4180	717	5270			x		x	x	
	02.08.	334 - 425	531	1520				x			x	x	
	28.11.	352 - 493	351	611	70	685	x			x		x	
1980	07.-08.02.	352,05-451	841	4160	647	4520			x		x	x	
1983	03.11.	352,1 - 493,4	351	580	81	724	x				x	x	
	10.11.	334 - 494	344	554	68	665	x				x	x	
1988	28.03.	362-493,6	844	4070	728	5260			x		x	x	
1994	13.07.	360-493,5	482	1162	193	1280		x			x	x	
1995	27.01.	362-493	845	4080	639	4290			x		x	x	
	07.11.	360-493,5	399	776	109	864	x				x	x	
1996	13.03.	352-493	369	657	78	722	x			x		x	
2002	17.-19.01.	337,2-425,6	421	750			x				x		x
	23.-29.09.	334-866,5	542	1360	265	1700		x			x		x
	08.11.	359-400	738	2620					x		x		x
2003	11.-13.03.	349,03-498,3	487	1090	214	1380		x			x		x
	21.-25.07.	336,2-655	404	744	113	827	x			x			x
	12.-16.08.	336,2-655	375	593	66	606	x			x			x
	22.-27.09.	336,2-654,85	318	425	20	483	x			x			x
2005	14.-20.09.	334-654	516	1270	191	1260		x		x			x
	08.-14.11.	334-654,9	376	633	54	620	x			x			x
2006	31.03.	353,7-404	701	2320				x		x			x
	19.-25.04.	334-654,9	691	2230	390	2320		x		x			x
2007	24.-26.04.	349-498	434	811	130	958	x			x			x
	21.-28.08.	334-655	605	1690	284	1770		x		x			x
	08.-11.10.	349-498	467	1020	151	1060	x			x			x
	12.-19.11.	334-665	512	1230	177	1170		x		x			x
2008	14.-17.04	349-498	631	1930	343	2150		x		x			x
	02.-09.09.	334-654,9	460	998	161	1150	x			x			x
	13.-16.10.	349-498,5	403	746	108	873	x			x			x

Leider verfügen nicht alle Wasserspiegelfixierungen über Informationen zu Datum und Uhrzeit der Messung. Auch die für die Umrechnung auf stationäre Verhältnisse benötigten 15 Minuten- bzw. Stundenwerte für die Pegel liegen erst ab 1982 digital vor. Aus diesem Grund wurde beschlossen, die Untersuchungen anhand der Rohdaten durchzuführen und auf weitergehende Plausibilisierungen zu verzichten. Zur weiteren Nutzung wurden alle verfügbaren Daten zu Wasserspiegelfixierungen ins FLYS-Archiv übernommen.

In Tab. 3 sind die der Ermittlung der normierten Wasserspiegellage zugrundeliegenden MNQ Kenngrößen für die vier Rheinpegel aufgeführt.

Tab. 3: MNQ für Rheinpegel im Zeitraum 1931-2002

Pegel	MNQ [m³/s]
Plittersdorf	588
Maxau	593
Speyer	601
Worms	675

2.2.3 Ergebnisse

In der Abb. 9 sind die Ergebnisse der zeitlichen Wasserstandsänderungen bei niedrigen Abflüssen für die Rheinstrecke von Iffezheim bis Mainz graphisch dargestellt. Die „Null-Linie“ stellt die Bezugslinie für den Zeitraum 2005-2008 (heute) dar. Die rote Linie zeigt im Längsschnitt den Mittelwert ΔW der Wasserstandsabweichungen von Fixierungen der Jahre 1978-1983 zu heute, die grüne den Mittelwert der Abweichungen aus den Jahren 1994-1996 gegenüber heute und die blaue Linie den Mittelwert der Abweichungen aus den Jahren 2002-2003 gegenüber heute.

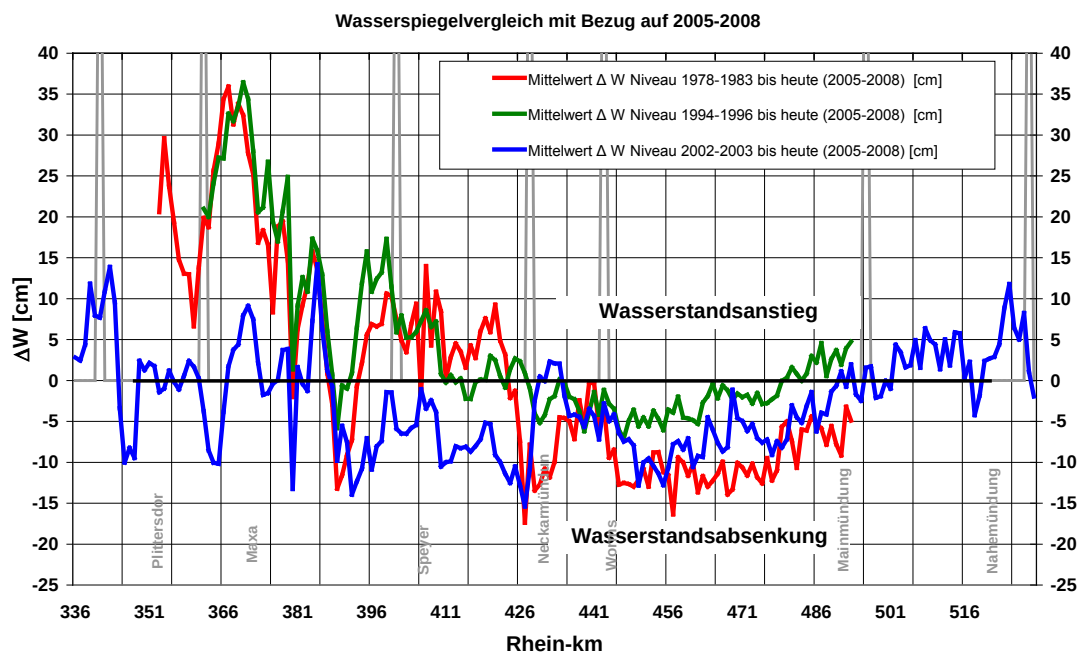


Abb. 9: Ermittelte Wasserstandsänderungen für einen Niedrigwasserabfluss im Rhein zwischen Iffezheim und Mainz.

Als Ergebnis der Analysen ist festzustellen, dass die ermittelten Wasserstandsabweichungen für die einzelnen Epochen bis Rhein-km 423 deutlich voneinander abweichen. Bis Mitte der 90er Jahre überwiegen jedoch die Wasserstandsanstiege. Auffällig ist, dass auf der Strecke unterhalb der Neckarmündung (Rhein-km 428 bis 489) eine einheitliche Wasserstandsabsenkung für die ermittelten ΔW -Kurven ausgewiesen wird. Die Wasserstandsabsenkung beträgt hier im Durchschnitt 6 cm mit einem Maximum von 14 cm im Gesamtzeitraum zwischen den Jahren 1978 bis 1983 und heute (2005 - 2008).

Man erkennt auf der Strecke zwischen Iffezheim und oberhalb der Neckarmündung für die Zeiträume 1978/1983 bis heute und 1994/1996 bis heute durchweg Wasserstandsanstiege im Rhein, die maximale Werte bis zu 36 cm bei Rhein-km 367 bis 370 annehmen. Der Wasserstandsanstieg wird im weiteren Verlauf immer geringer und geht ab Rhein-km 423 in eine Absenkung über. Die einzige lokale Ausnahme gibt es bei Rhein-km 389 bis 393, wo es zur Absenkung in der Größenordnung eines Dezimeters kam.

Im Zeitraum 2002/2003 bis heute zeigt sich eine schwankende Tendenz der ΔW -Kurven um die „Null-Linie“, wobei ab dem Rhein-km 389 eine deutlich überwiegende Absenkung zu verzeichnen ist.

Die festgestellten Wasserstandsänderungen stimmen mit der morphologischen Entwicklung zwischen Iffezheim und Mainz überwiegend gut überein. Die vergleichende Darstellung erfolgt in Kapitel 5.4.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass die Wasserstände bis kurz oberhalb der Neckarmündung seit 1978 zum Teil deutlich (bis über 30 cm) angestiegen sind. In den letzten Jahren scheint sich dieser Trend abgeschwächt zu haben. Für den Bereich unterhalb der Neckarmündung bis Mainz sind hingegen für den gesamten Zeitraum eher gleichbleibend geringere Wasserstandsabsenkungen festzustellen.

Das in BfG-1634 (2009) beschriebene und für diese Auswertung verwendete Verfahren der Fixierungsanalyse wurde als indirekte Methode für Rückschlüsse auf die großskalige Sohlhöhenentwicklung herangezogen. Diese Methode sieht die Auswertung von überregional durchgeführten Wasserspiegelfixierungen vor. Diese neue Auswertemethodik wurde eingesetzt, um zeitliche Änderungen von Wasserständen zwischen Iffezheim und Mainz auf der Basis von Wasserspiegelfixierungen des Zeitraums 1978 – 2008 nachzuweisen. Von besonderem Interesse waren Ergebnisse im niedrigen Abflussbereich des Oberrheins, da sie besondere Aussagekraft hinsichtlich von Sohlhöhenänderungen haben.

Ein erster Vergleich der Wasserspiegellagenanalyse mit Auswertungen zur Sohlhöhenentwicklung deutet darauf hin, dass Zusammenhänge zwischen großräumigen Sohlveränderungen und Tendenzen für die Wasserspiegellagen anhand der entwickelten Methodik besser nachvollzogen werden können als bisher auf Grundlage von GIW-Berechnungen. Durch eine optimierte Abstimmung ihrer zeitlichen und räumlichen Messdaten-Auflösung kann die vergleichende Auswertung von Wasserspiegelfixierungen und Sohlpeilungen weiter optimiert werden. Die Gegenüberstellung der drei Parameter Wasserstandsänderung, Sohlhöhenänderung und Sedimentfracht unter Berücksichtigung der Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen verbessert die Kenntnis des hydraulisch-morphologischen Systems Oberrhein (s. Kap. 5).

3. Datenanalyse Sedimentologie

3.1 Korngrößen der Sohle

3.1.1 Methodik

Der Vergleich von Korngrößenlängsschnitten unterschiedlicher Jahre liefert Hinweise auf die Entwicklung der Korngrößenzusammensetzung der Sohle. Die Entwicklung der Korngrößenzusammensetzung wiederum lässt Rückschlüsse auf das Ausmaß von Erosionserscheinungen und auf Lagerungseffekte an der Flusssohle zu. Dabei ist die Methodik der Sohluntersuchungen zu beachten, so dass keine direkten Vergleiche von Entnahmen mittels Taucherschacht und Greiferprobenahmen gestellt werden, da bei letzteren wegen der Auswaschung von Feinanteilen eine systematische Anreicherung der gröberen Fraktionen auftritt.

3.1.2 Datenlage

Die Ergebnisse der in den letzten Jahrzehnten durchgeführten sedimentologischen Untersuchungen der Rheinsohle sind in der sedimentologischen Datenbank (SedDB) der Bundesanstalt für Gewässerkunde archiviert. Je nach ursprünglicher Fragestellung unterscheiden sich die Daten in Art und Qualität der Probennahme und auch hinsichtlich der Auswertung. Für die vorliegende Untersuchung wurden Sohlaufnahmen der Jahre 1968/69, 1988 und 2008 ausgewählt.

Um verschiedene Tiefenbereiche vergleichen zu können, wurden zwei repräsentative Schichten bestimmt: Eine Oberschicht von 0,0 bis 0,2 m und eine Unterschicht von 0,2 bis 0,5 m. 2008 wurden neben der Beprobung von Ober- und Unterschicht auch Proben aus der so genannten Deckschicht entnommen, wobei diese Deckschicht der „Ein-Korn“-starken obersten Sohlschicht entspricht.

Während der Messkampagne von 1968/69 wurden Sohlproben von einem Arbeitsschiff aus mit Hilfe eines Einseilbohrgreifers mit zwei schließenden Greifschaufeln entnommen (BAW, 1970). Die Probennahme fand auf der Flusstrecke von Rhein-km 299 bis 504 statt, wobei die einzelnen Querprofile in unregelmäßigen Abständen zueinander liegen. Die Greiferproben wurden für die drei Tiefenbereiche von 0,0 bis 0,2 m, von 0,2 bis 0,35 m und von 0,35 bis 0,5 m getrennt analysiert.

Die Proben von 1988 wurden mit dem Taucherschacht „Kaiman“ zwischen Rhein-km 337 und 483 aus vier verschiedenen Sohl-tiefen von 0,0 bis 0,05 m, von 0,05 bis 0,1 m, von 0,1 bis 0,3 m und von 0,3 bis 0,5 m entnommen. Insgesamt wurden zur weiteren Auswertung 179 Sohlproben aus 1968/69 und 449 Sohlproben aus 1988 herangezogen.

Die Sohlproben aus 2008 sind die Ergebnisse einer Beprobungskampagne mit dem Taucherglockenschiff „Carl Straat“ von Iffezheim bis Nierstein (Rhein-km 340 bis 480) vom 11. bis zum 27. August 2008. Von oberstrom nach unterstrom wurden alle 5 km Querschnitte mit jeweils fünf Sohlpunkten angefahren und insgesamt 432 Proben entnommen. Es wurde vermieden, die Proben direkt an Mündungen von Nebenflüssen oder Hafeneinfahrten zu entnehmen. Die Sohle wurde schichtweise sedimentologisch und geologisch untersucht. Zunächst wurde hierzu eine Oberschichtprobe mit Decksicht aus einer Tiefe von 0,0 bis 0,2 m entnommen. In der Tiefe von 0,2 m wurde eine Fläche freigelegt, um eine Unterschichtprobe von 0,2 bis 0,5 m Tiefe zu beproben, ohne dass Sediment von der Seite nachrutschte. Zusätzlich wurde an einer anderen Stelle in der Glocke eine Deckschichtprobe entnommen.

3.1.3 Ergebnisse

Anhand der ausgewerteten Sohlproben der Jahre 1968/69, 1988 und 2008 lässt sich die Entwicklung der Korngröße über einen Zeitraum von 40 Jahren getrennt für Ober- und Unterschicht verfolgen (Abb. 10, A und B). Für alle drei Probenahmekampagnen ist eine Abnahme der mittleren Korngröße D_m von oberstrom nach unterstrom zu beobachten, wobei dieser Trend sowohl für die Oberschicht als auch für die Unterschicht erkennbar ist. Die zeitliche Entwicklung zeigt eine Abnahme der gemessenen Korngrößen zwischen 1968/69 und 1988 und eine darauf folgende Zunahme bis 2008, jeweils in der Ober- und Unterschicht. Die jüngsten Messwerte aus 2008 zeigen jedoch noch immer feinere mittlere Sohlkorndurchmesser als in der Kampagne 1968/69. Dies ist jedoch methodikbedingt dem Verlust von Sandanteilen bei der früheren Greiferentnahme zuzuschreiben.

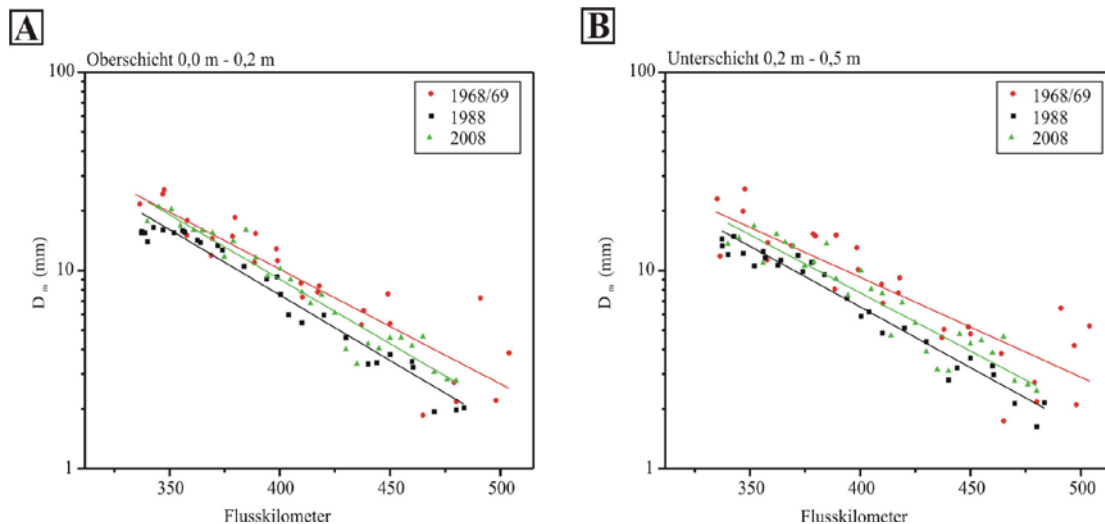


Abb. 10: Entwicklung der Korngrößenzusammensetzung mit Hilfe exponentieller Trendlinien für A) Oberschicht und B) Unterschicht.

In Abb. 11 sind die mittleren Korngrößen der Deckschicht, der Oberschicht und der Unterschicht der Sohlproben aus 2008 dargestellt. Die mittlere Korngröße nimmt von der Deckschicht zur Unterschicht ab, was auf eine Anreicherung von Grobkorn an der Sohloberfläche schließen lässt. Der Korngrößenunterschied der einzelnen Schichten ist dabei im oberen Teil des Untersuchungsgebietes deutlicher ausgeprägt als im unteren Teil.

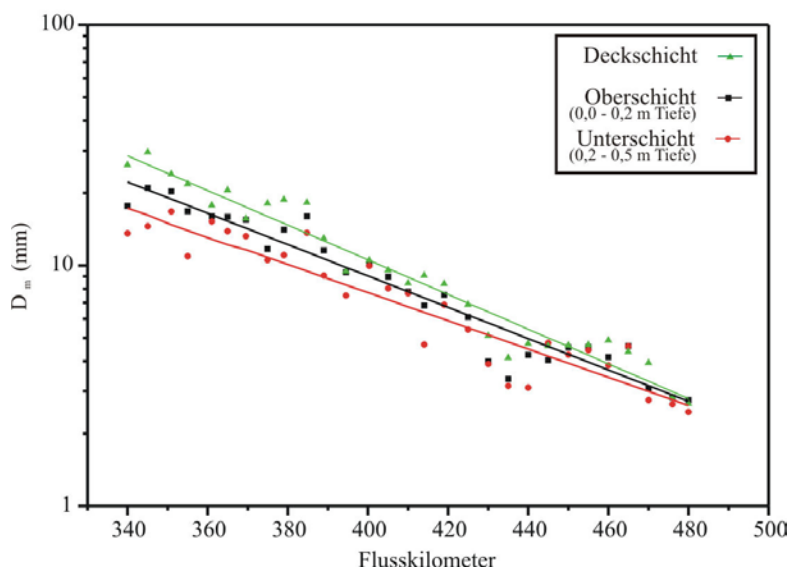


Abb. 11: Mittlere Korngröße (D_m) der Deck-, Ober- und Unterschicht der Rheinsohle aus 2008.

Der Sandgehalt der Oberschicht (Korngröße 0,2 bis 2,0 mm) nimmt mit zunehmender Laufstrecke von Rhein-km 336 bis 500 zu (Abb. 12, A). Auffällig ist, dass der Sandgehalt der Sohlproben aus 1988 und 2008 deutlich höher ist als der aus 1968/69, welches dem Verlust von Sandanteilen durch die Greiferentnahme geschuldet ist (s.o.). Die Sohlproben der Oberschicht von 1988 enthalten geringfügig mehr Sand als die Oberschicht aus 2008. Die Sandgehalte der Unterschicht in 1988 und 2008 entsprechen sich ungefähr (Abb. 12, B).

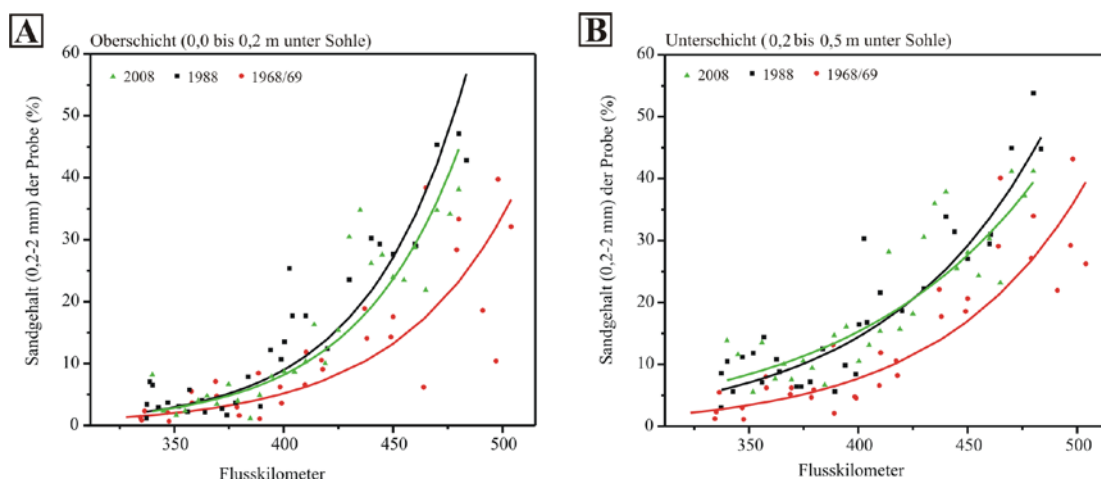


Abb. 12: Entwicklung der Sandgehalte der Sohlproben mit Hilfe exponentieller Trendlinien in A) Oberschicht und B) Unterschicht.

In Abb. 13 sind fotografische Aufnahmen der Rheinsohle aus dem August 2008 abgebildet. Deutlich erkennbar ist die Zunahme des Sandanteils von oberstrom (Abb. 13, A) nach unterstrom (Abb. 13, H).

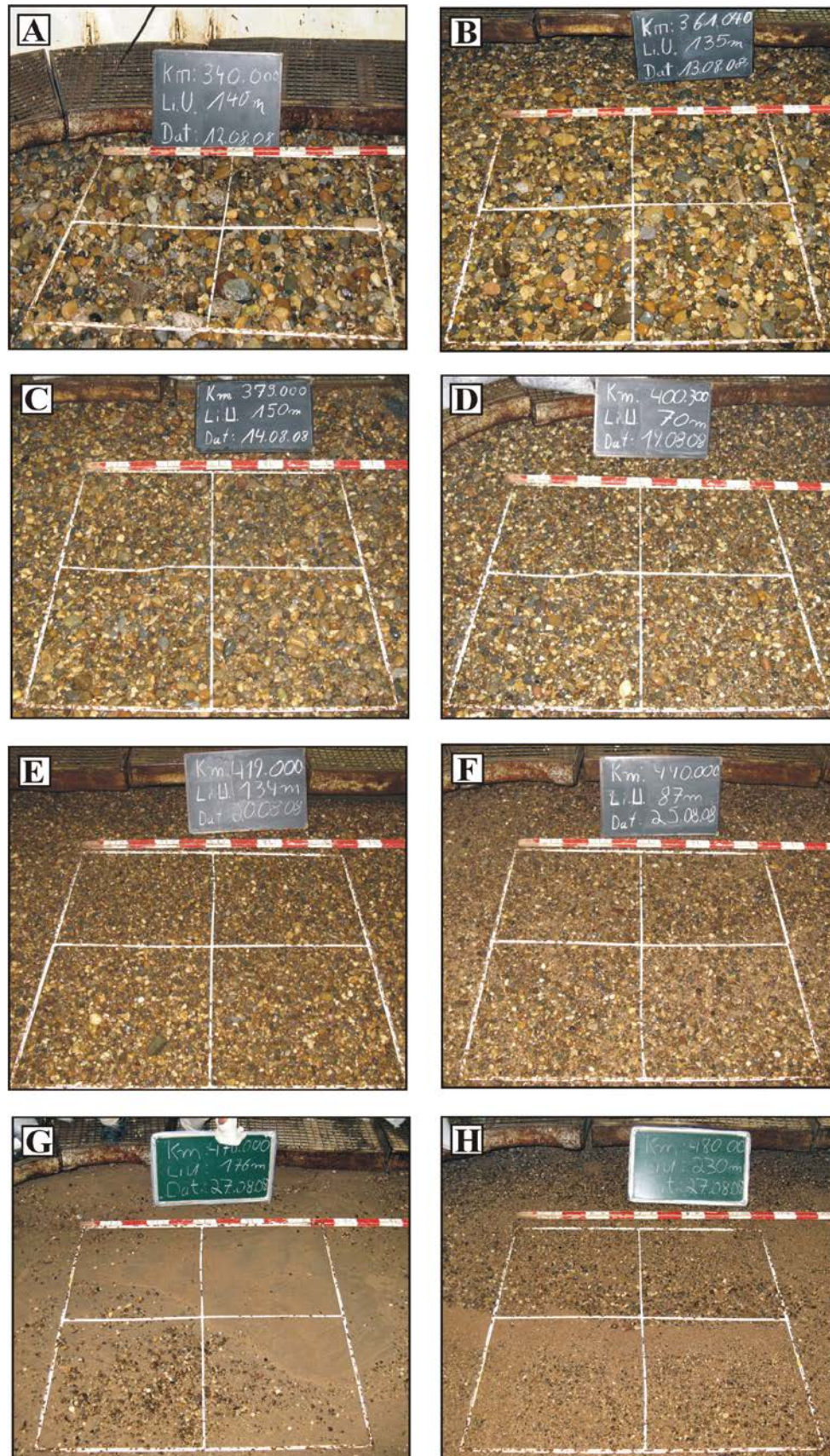


Abb. 13: Fotografische Aufnahmen der Rheinsohle von Rhein-km 340 bis 480 (August 2008).

3.2 Korngrößen des Geschiebes

3.2.1 Methodik

Am Rhein werden regelmäßige Geschiebemessungen mit Geschiebefängern durchgeführt. Der verwendete Geschiebefänger der Bundesanstalt für Gewässerkunde (Abb. 14, A und B) ist eine Apparatur aus Geschiebefangkorb, Leitwerk, Zugvorrichtung, Fängermaul, Scheinwerfern und einer UV-Kamera (Schmegg, 2005).

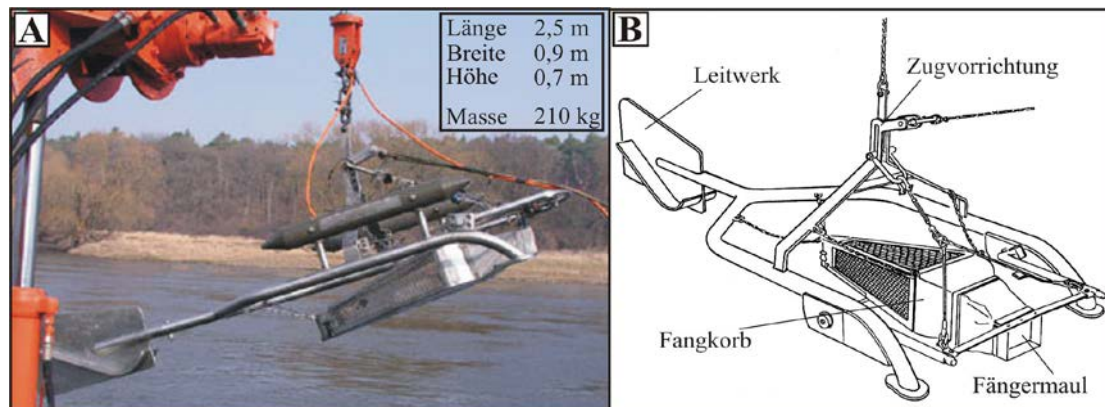


Abb. 14: A) Geschiebefänger während des Ablassens in den Fluss (WSA-Dresden, 2008). B) Skizze des Geschiebefängers der Bundesanstalt für Gewässerkunde mit den wichtigsten Bauteilen (DVWK, 1992).

Bei der Geschiebemessung wird der Geschiebefänger an mehreren Messpunkten im Flussquerschnitt an die Gewässersohle abgelassen, wobei an jedem Messpunkt mehrere Einzelmessungen durchgeführt werden. Die Verweildauer des Geschiebefangkorb an der Sohle je Einzelmessung beträgt dabei jeweils fünf Minuten, wobei die Einlauföffnung des Geschiebefangkorb auf der Sohle aufliegen und die Messung mit einer Unterwasservideokamera überwacht werden muss. Nach Ablauf der Messzeit wird das im Fangkorb gesammelte Geschiebe entnommen und die Probenmasse sowie die Kornverteilung im Labor bestimmt.

3.2.2 Datenlage

Die zur Verfügung stehenden Messdaten der Geschiebemessungen sind der Datenbank SedDB der BfG entnommen und wurden für die Zeiträume 1988 bis 1995 und 1996 bis 2006 getrennt ausgewertet.

3.2.3 Ergebnisse

Die mittlere Korngröße (D_m) des Geschiebes nimmt von oberstrom nach unterstrom um rund eine 10er-Potenz ab. Von 1996 bis 2006 ist die mittlere Korngröße mit Ausnahme der Messstelle Worms (Rhein-km 444) stets etwas kleiner als von 1988 bis 1995 (Abb. 15, A). Der Sandgehalt (Abb. 15, B) nimmt hingegen von nahezu null auf 60 bis 75 % bei Mainz zu. Bei Rhein-km 480 überschreitet der Sandgehalt des Geschiebes die 50 %-Marke.

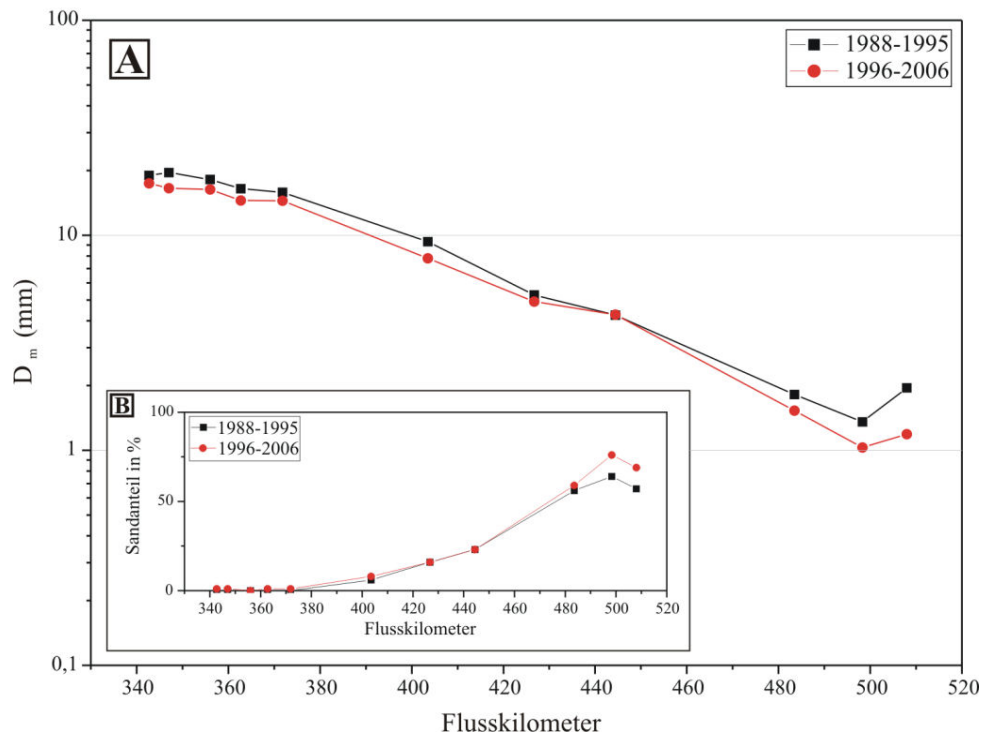


Abb. 15: A) Entwicklung der mittleren Korngröße des Geschiebes. B) Sandgehalte der Geschiebeprobe in Prozent.

3.3 Transportgeschwindigkeiten und Transportweiten

3.3.1 Methodik und Datenlage

Die Ermittlung von Transportgeschwindigkeiten in der Natur erfolgt mit Hilfe von Tracerversuchen. Im Untersuchungsgebiet wurde zwischen 1996 und 2001 in einem großangelegten Naturversuch mit einem gebrochenen Granitracer die Transportgeschwindigkeit mehrerer Korngrößenfraktionen bestimmt. Verfolgt wurde der Transport von 28 000 t Tracer, welche im Bereich von Rhein-km 336,2 bis 337,2 eingebaut wurden. Die Methodik ist in BfG und WSA Freiburg (2006) dargelegt.

3.3.2 Ergebnisse

Die gemessenen Transportgeschwindigkeiten des Tracermaterials im Naturversuch Iffezheim sind in Tab. 4 zusammengefasst.

Tab. 4: Gemessene Transportgeschwindigkeiten [km/a] der fünf Korngrößenfraktionen im Naturversuch zwischen 1996 und 2001 unterhalb Iffezheim.

	Fraktion				
	4/8 mm	8/16 mm	16/31,5 mm	31,5/45 mm	45/63 mm
Mittlere Geschwindigkeit [km/a]	5,4	5,4	4,2	3,2	2,2
Frontgeschwindigkeit (99%) [km/a]	11,5	11,5	8,9	7,6	4,4

Im Rahmen der Traceruntersuchungen bei Iffezheim wurde weiterhin dokumentiert, dass die Einmischung von eingebrachtem markiertem Geschiebeersatzmaterial insbesondere während der Zeiträume mit erhöhter Abflussführung bis in Metertiefe und darüber hinaus stattfindet. Diese tiefen Einmischungsvorgänge stehen im Zusammenhang mit der Bildung von Transportkörpern, welche hier bei steigenden Abflüssen bis 1,5 Meter hoch aufwachsen können.

Es ist zu beachten, dass die Transportgeschwindigkeiten des Tracerversuchs nur für die Strecke der Untersuchung gelten, in welcher Tracer der jeweiligen Fraktionen aufgefunden wurden. Diese ist je nach Korngröße unterschiedlich und umfasst für die Fraktionen 4/8 mm und 8/16 mm die Strecke von Rhein-km 336 bis 402 und für die Fraktion 45/63 mm die Strecke von Rhein-km 336 bis 358.

Die Übertragung der Transportgeschwindigkeiten auf die unterstrom anschließende Rhein-strecke ist nur unter Berücksichtigung der sich zeitlich und räumlich ändernden Strömungsverhältnisse, insbesondere im Hinblick auf Schubspannung und Gefälle, möglich. Aussagen über längerfristige Transportweiten von Zugabematerial setzen zudem die Berücksichtigung der realen hydrologischen Verhältnisse voraus. Beides kann sinnvoll nur mit Hilfe numerischer Modelle geleistet werden. Eine erste Betrachtung hierzu wird in Kapitel 7 durch Nachvollzug und Extrapolation der Tracerversuche mit Hilfe eines eindimensionalen numerischen Modells durchgeführt.

3.4 Transportkörper

3.4.1 Methodik

Im Rahmen dieses Kapitels werden Art, Ausmaß und Veränderung von Dünen im Oberrhein untersucht. Dünen sind einerseits Rauheitselemente, die das Fließverhalten wesentlich mitbestimmen, andererseits erfolgt über ihre Verlagerung talabwärts der überwiegende Teil des Geschiebetransportes. Sie können aufgrund ihrer Dimensionen Hindernisse für die Schifffahrt darstellen. Weiterhin ergibt sich aus der maximalen Dünenhöhe die Grenztiefe, bis zu der Umlagerungsprozesse an der Sohle stattfinden.

Die Bewegung von Dünen in Strömungsrichtung basiert auf Erosion am flachen Luvhang und Sedimentation am steileren Leehang (Abb. 16). Das am Leehang abgelagerte Geschiebe wird solange dem Transportprozess entzogen, bis es durch die Wanderung der Düne am Luvhang wieder freigelegt wird. Die feineren Körner werden im oberen Teil des Leehangs in der Nähe

des Dünenkamms abgelagert, während die größeren Körner am Leehang aufgrund ihrer höheren Rollfähigkeit weiter nach unten verfrachtet werden. Die Folge dieser Umlagerung ist eine vertikal sortierte Schrägschichtung innerhalb der Dünen (Kleinhans, 2001). Eine weitere vertikale Sortierung entsteht im Dünentrog. Während hoher Abflüsse sind alle Korngrößen in Bewegung; nimmt der Abfluss hingegen ab, so sedimentieren zuerst die groben Komponenten und danach die feineren. Relikte dieser vertikalen Sedimentstrukturen sind in der Sohle in Form von Grobkornanreicherungen überliefert und markieren Ereignisse höherer Abflüsse (Abb. 16).

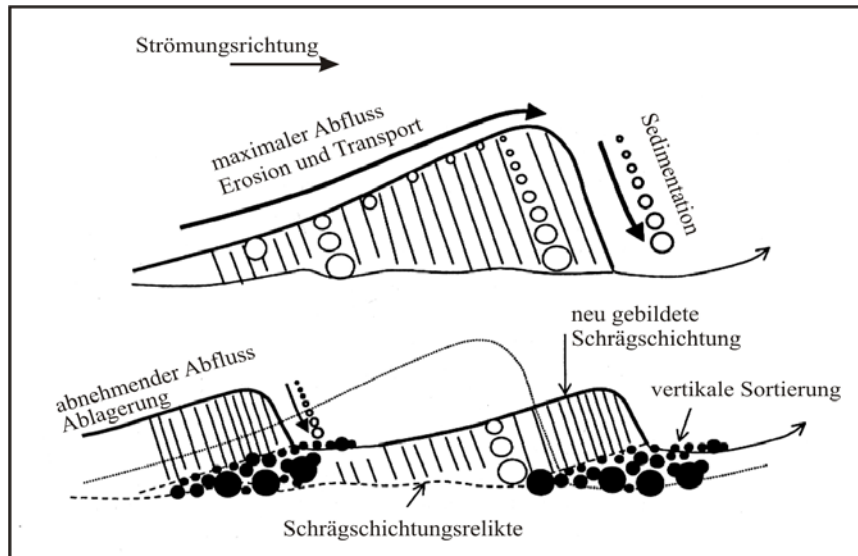


Abb. 16: Vertikale Sortierungsprozesse in einer Düne bei maximalem Abfluss (oben) und die Reliktstrukturen der Sortierung bei abnehmenden Abflüssen (unten) (verändert nach Kleinhans, 2002).

Die Dünenhöhe ist von der Wassertiefe, den Fließbedingungen und anderen Randwerten, wie zum Beispiel der Kornverteilung abhängig. Yalin (1964) definierte die theoretische Beziehung zwischen Wassertiefe (h) und Dünenhöhe (Δ) jeweils in Meter als

$$\frac{\Delta}{h} = 0,167 \quad (1)$$

Aus den Höhen-Längen-Beziehungen einer Düne lässt sich eine Grenzlinie formulieren, bis zu der Dünenwachstum möglich ist. Van Rijn (1993) gibt die Formel mit

$$\Delta = 0,16x^{0,84} \quad (2)$$

an, wobei Δ die Dünenhöhe (m) und x die Dünenlänge (m) ist. Die maximalen Dünenhöhen werden meist nicht erreicht, da Dünen eine lange Anpassungszeit an veränderte Fließbedin-

gungen haben und die Zustände hoher Abflüsse dafür nicht lange genug andauern (Carling et al., 1993). Einen weiteren limitierenden Faktor für die Dünenhöhe stellt die Verfügbarkeit von Sediment dar. Dünen können ihre maximale Größe bei entsprechenden Abflüssen nur erreichen, wenn genügend Sediment zum Aufbau des Dünenkörpers an der Flusssohle bereitgestellt wird.

Dünen geben einen Hinweis auf die maximale Umwälzung der Flusssohle bei bestimmten Abflüssen. Dabei liegen der Dünenkamm und der tiefste Punkt der Dünen im Mittel jeweils eine halbe Dünenhöhe über bzw. unter der durchschnittlichen Sohlhöhe (Kleinhans, 2001). Dies bedeutet, dass in Dünen Sedimente der Flusssohle bis zu einer halben Dünenhöhe unter die mittlere Sohlhöhe umgelagert werden können (Abb. 17). Die Umlagerungstiefe ist somit von der Dünenhöhe abhängig, wobei die größten Dünenhöhen und Umlagerungstiefen bei den höchsten Abflüssen erreicht werden. Bei abnehmenden Abflüssen nehmen die Dünenhöhen leicht verzögert ab.

Ziel der Auswertung von Längspeilungen ist der Nachweis von Transportkörpern im Oberrhein und die Bestimmung ihrer Geometrie (Länge und Höhe). Dazu sind Peilungen notwendig, bei denen aufgrund genügender zeitlicher und räumlicher Auflösung die Entwicklung der Dünenhöhen und Dünenlängen in Abhängigkeit des Abflusses verfolgt werden kann. Für die Auswertung der Längspeilungen wird die Software Dune Tracking 2D (DT2D) von Wilbers (1999) in der Version 3.0 verwendet. Mit dieser können zu jeder erfassten Düne die Parameter Länge, Höhe und Flächeninhalt ermittelt werden.

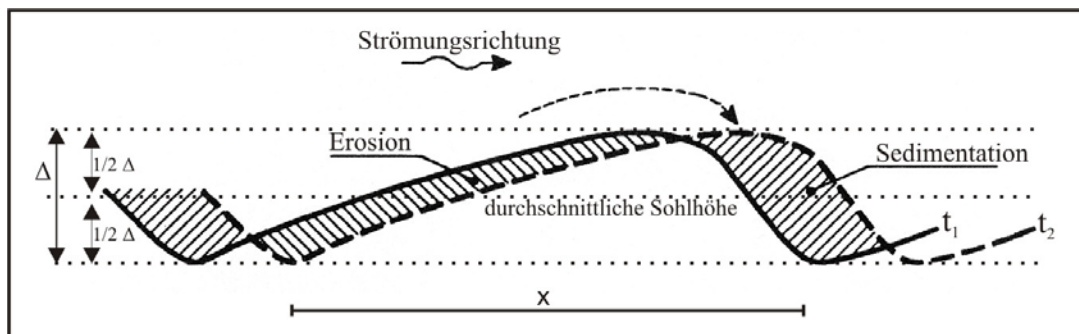


Abb. 17: Gesteins- und Sedimenttransport in einer Düne. t_1 : Sohle zum Zeitpunkt t_1 , t_2 : Sohle zum Zeitpunkt t_2 , x Dünenlänge, Δ Dünenhöhe (verändert nach Van Rijn, 1993).

3.4.2 Datenlage

Vorherrschende Transportkörper im Untersuchungsgebiet

Im frei fließenden Oberrhein zwischen Iffezheim und Mainz bestehen die Dünen aus Kies oder aus einem Sand-Kies-Gemisch (Abb. 18). Über diese Kiesdünen und ihre Wechselwirkungen mit der Flusssohle ist relativ wenig bekannt, da sich die meisten Arbeiten mit den weitaus häufigeren Sanddünen beschäftigen.

In der anschließenden Rheingau-Strecke zwischen Mainz und Bingen bewegt sich das Geschiebe in Form von Sanddünen mit Feinkiesanteilen über eine stabile grobkörnige, teilweise abgeplasterte Deckschicht. Aus petrographischen Untersuchungen geht hervor, dass das dortige Dünensediment nicht im Austausch mit der Flusssohle steht, sondern aus dem nördlichen Oberrhein (Raum Speyer/Worms) stammt (Carling et al., 1993).

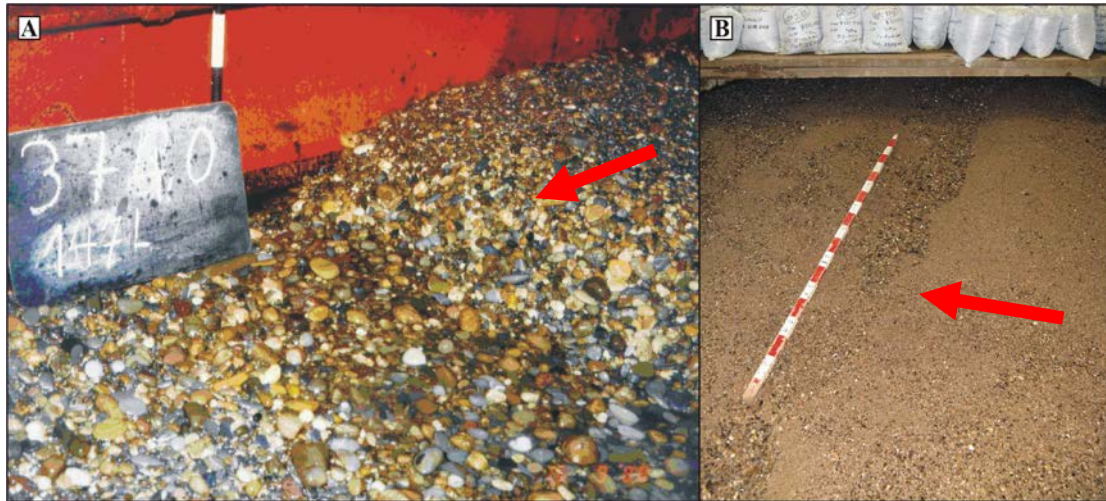


Abb. 18: A) Kiesdüne am Oberrhein bei Rhein-km 374 mit einer Höhe von etwa 30 cm (BfG & WSA-Freiburg, 2006). B) Kleinere, feinkiesige Düne mit einer Grobkornanreicherung im Dünentrog bei Rhein-km 480 (August 2008). Die Pfeile kennzeichnen die Strömungsrichtung.

Dünenpeilungen

Im März und April 2001 wurden während eines Hochwassers über eine Strecke von rund fünf Kilometern von Rhein-km 344 bis 349 fünf Längspeilungen in der Fahrrinne aufgenommen. Die Peilfahrten wurden während Anstieg und Ablauf einer Hochwasserwelle an folgenden fünf Tagen 22.03, 23.03, 27.03 29.03. und 04.04.2001 durchgeführt.

Im August 2007 wurde eine Längspeilung bei Abflüssen von 3800 m³/s in der Fahrrinne über rund 28 km von Rhein-km 334 bis 362 vorgenommen. Die Auflösung der Peilungen von 2001 umfasst vier Datenpunkte pro Meter, während die Auflösung der Längspeilung von 2007 weitaus geringer ist und bei nur einem Datenpunkt pro Meter liegt.

Die Auflösung der Peildaten in Längsrichtung (1-4 Punkte pro Meter) begrenzt die minimalen Dünengrößen, die mit DT2D bestimmt werden können. Die Grenze der Auflösung der Dünenlänge für die Daten von 2001 liegt bei einem Meter, für die Daten von 2007 bei drei Metern. Um die Vergleichbarkeit der beiden Datensätze untereinander zu gewährleisten, werden alle Dünen mit einer Länge $x < 3$ m aus der Auswertung herausgenommen. Um zu verhindern, dass verschiedene Dünengenerationen gleichzeitig bestimmt werden, werden

außerdem Dünen mit einer Höhe $\Delta < 0,05$ m sowie die längsten fünf Prozent der Dünen von der Auswertung ausgeschlossen.

3.4.3 Ergebnisse

Die zeitliche Entwicklung der Höhen und Längen der ausgewerteten Kiesdünen sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. In Abb. 19 sind die Längen der Dünen aus 2001 sowie der mittlere Tagesabfluss gegen das Datum ihrer jeweiligen Aufnahme aufgetragen. Es lässt sich beobachten, dass die Längen der Kiesdünen mit steigendem Abfluss rasch zunehmen, während bei abnehmenden Abflüssen die Dünen etwas verzögert an Größe verlieren. Im Durchschnitt erreichten die 2001 gemessenen Dünen eine Länge von 15 m.

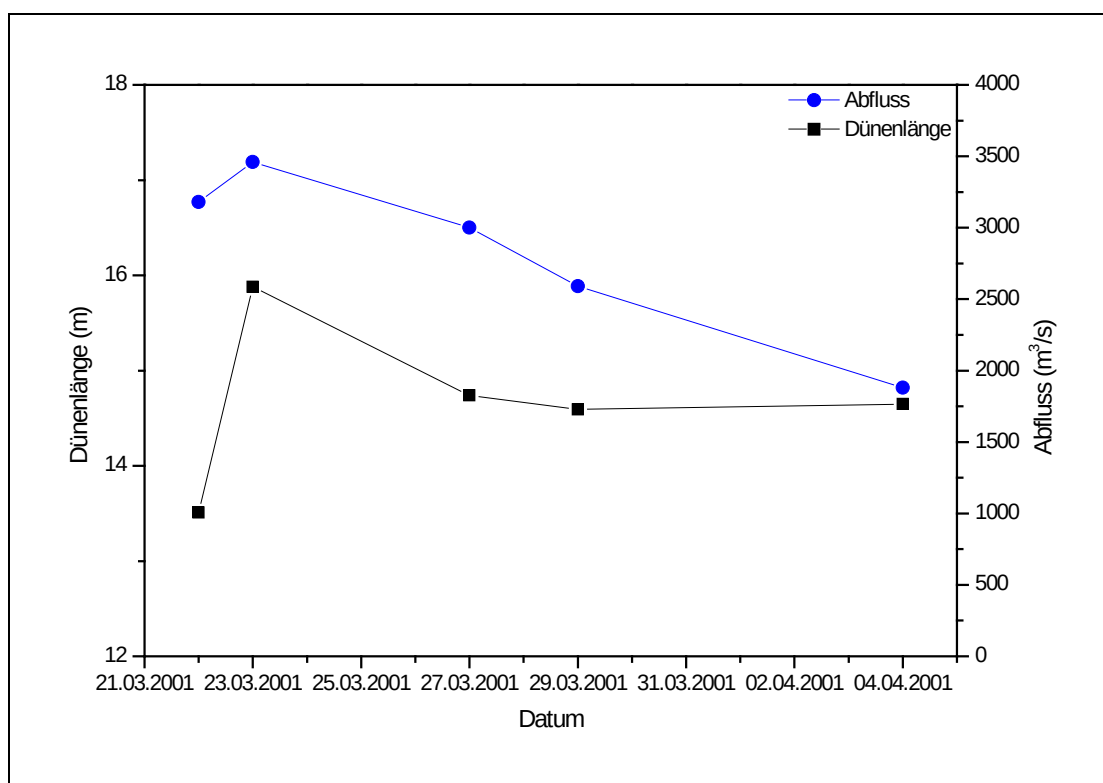


Abb. 19: Zeitliche Entwicklung der durchschnittlichen Dünenlängen und des Abflusses im Messzeitraum 2001.

Die zeitliche Entwicklung der Dünenhöhen ist der Längenentwicklung sehr ähnlich. Mit steigendem Abfluss nehmen die mittleren Höhen der Dünen rasch zu, um bei fallendem Abfluss verzögert wieder an Höhe zu verlieren (Abb. 20). Im Mittel erreichten die 2001 gemessenen Dünen eine Höhe von 0,3 m. Die zeitliche Entwicklung der maximalen Dünenhöhen folgt dem Muster der mittleren Längen und Höhen nicht exakt, da die komplexen Abläufe an der Sohle auch ermöglichen, dass trotz fallendem Abfluss die lokal maximal gemessene Dünenhöhe wieder ansteigen kann. Im Messzeitraum 2001 ist dies am Ende der Messperiode der Fall. Die maximalen Dünenhöhen im gesamten Messzeitraum 2001 wurden jedoch bei

Durchgang der Hochwasserspitze und der ersten Peilung danach mit jeweils 1,3 m gemessen (Abb. 20).

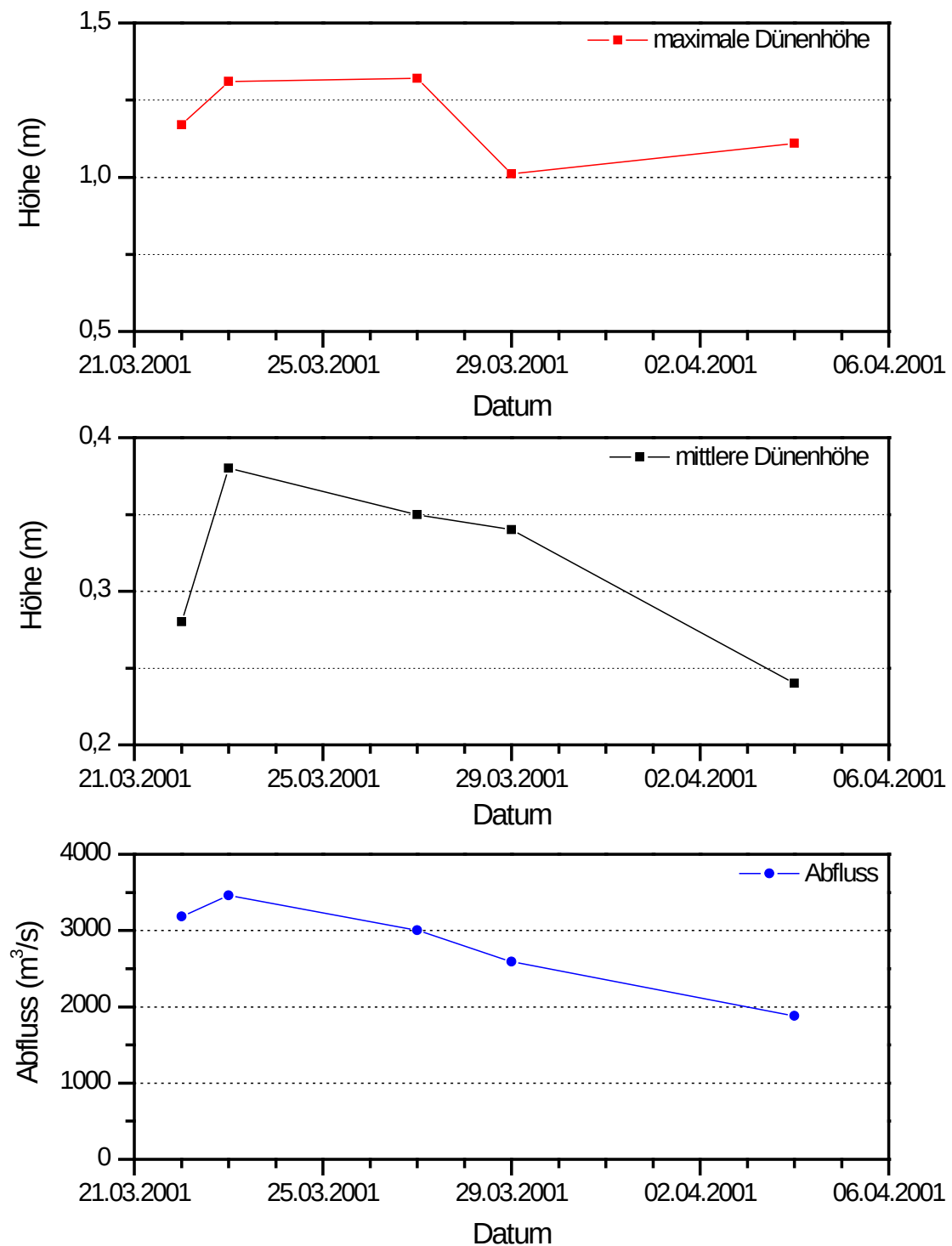


Abb. 20: Zeitliche Entwicklung der maximalen und mittleren Dünenhöhen sowie des Abflusses im Messzeitraum 2001.

In Abb. 21 sind die mittleren und maximalen Längen der Kiesdünen aus der Peilung 2007 als Längsschnitt aufgetragen. Der Abfluss betrug dabei etwa 3800 m³/s (Pegel Maxau, 13. August 2007). Die maximalen Dünenlängen schwanken dabei örtlich stark, was auf die hohe räumliche Variabilität der Dünensohle hinweist. Die über 1 km gemittelte durchschnittliche Dünenlänge bleibt hingegen entlang der Messstrecke vergleichsweise konstant.

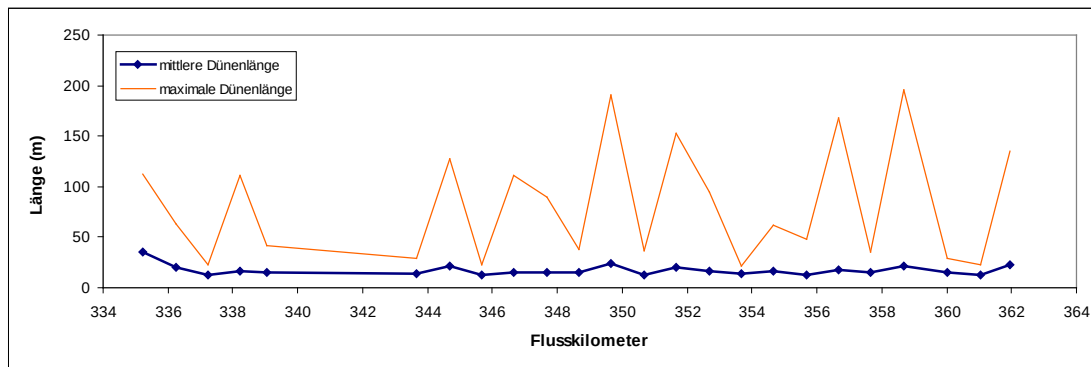


Abb. 21: Mittlere (1-km-Mittelwerte) und maximale Dünenlängen zwischen Iffezheim und Maxau (Längspeilung 2007).

In Abb. 22 sind die Dünenhöhen der in Abb. 21 dargestellten Peilung als Längsschnitt dargestellt. Die über 1 km gemittelte Dünenhöhen bleiben mit Werten um 0,4 m in der Messstrecke relativ konstant. Die lokalen Maximalwerte erreichen jedoch Werte von bis zu 1,35 m und zeigen eine hohe räumliche Variabilität.

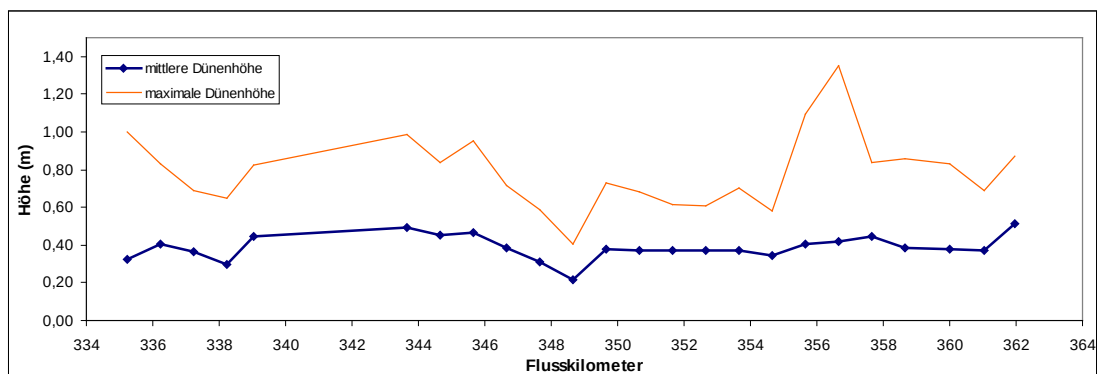


Abb. 22: Mittlere (1-km-Mittelwerte) und maximale Dünenhöhen zwischen Iffezheim und Maxau (Längspeilung 2007).

Aus der Höhen-Längen-Beziehung aller ausgewerteten Dünen aus 2001 und 2007 geht hervor, dass nur wenige Dünen die Höhe von einem Meter überschreiten (Abb. 23). Die Höhen-Längen-Verhältnisse der Dünen aus 2001 und 2007 streuen sehr stark. Die von Van Rijn (1993) definierte Steilheit der Dünen (Gl. (3)) wird von den großen Kiesdünen ab einer Höhe von rund 0,6 m nicht erreicht (grüne Linie in Abb. 23).

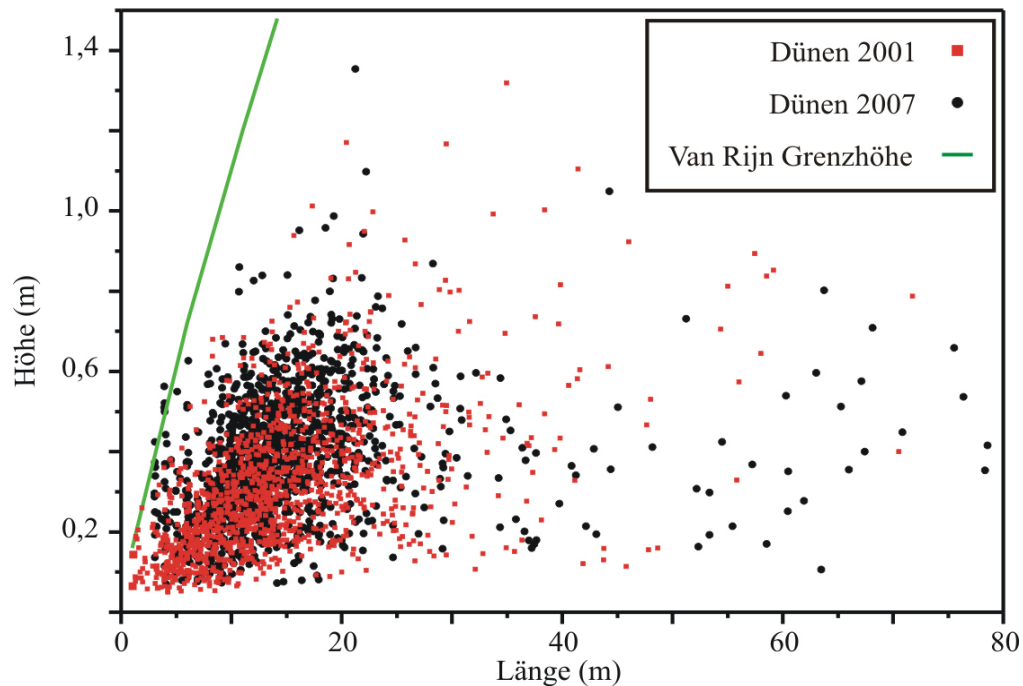


Abb. 23: Höhen-Längen-Beziehung der Kiesdünen am Oberrhein vom 2001 und 2007, die grüne Gerade ($\Delta = 0,16 \times L^{0,84}$) stellt die maximal erreichbare Höhe von sub-aquatischen Sanddünen nach Van Rijn (1993) dar.

Die Abhängigkeit der mittleren und maximalen Dünenhöhen vom Abfluss wird in Abb. 24 illustriert. Datengrundlage sind die oben beschriebenen Dünenpeilungen aus 2001 und 2007. Da für Abflüsse über ca. 3700 m³/s keine Messwerte vorliegen, werden die Daten um eine maximale Einmischtiefe ergänzt, die 1999 aus einem Geschiebetracerversuch (BfG und WSA Freiburg, 2006) ermittelt wurde. Dieser Wert kann als theoretische Dünenhöhe während eines HQ₁₀₀ interpretiert werden. Wie erwartet steigt die Dünenhöhe mit dem Abfluss.

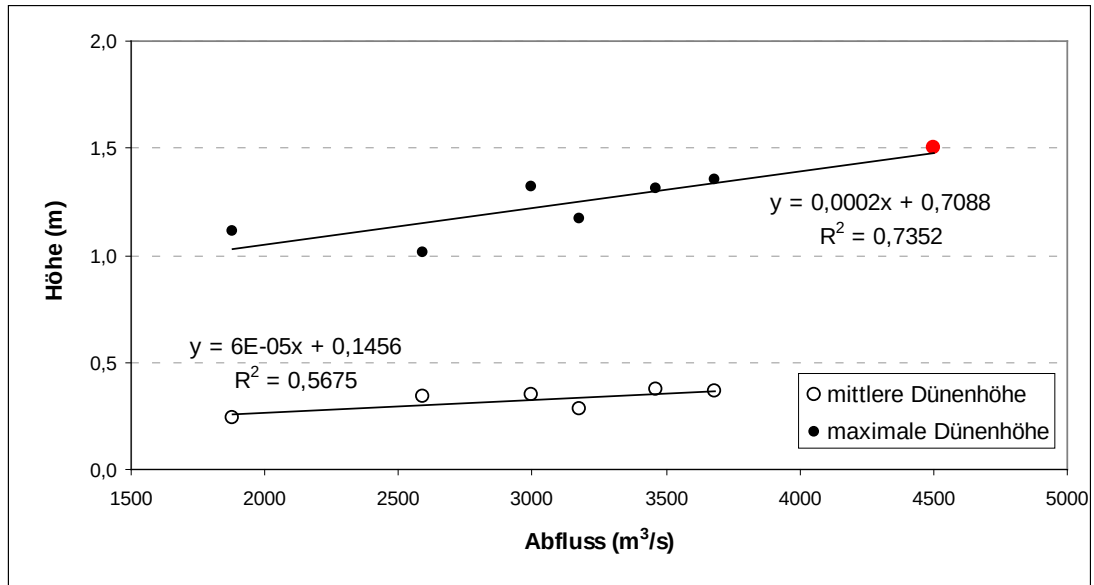


Abb. 24: Dünenhöhen in Abhängigkeit des Abflusses. Die offenen Symbole geben jeweils den Mittelwert der gemessenen Dünenhöhen, die gefüllten Symbole die maximale Dünenhöhe an. Der rote Punkt kennzeichnet eine indirekt aus Traceruntersuchungen abgeleitete Dünenhöhe.

4. Datenanalyse Morphologie

4.1 Mittlere Sohlhöhen

4.1.1 Methodik

Erosion und Anlandung können natürlichen Ursprungs oder die Folge von Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen sein und lassen sich u.a. an der Veränderung der mittleren Sohlhöhen ablesen. Zur Bestimmung der mittleren Sohlhöhen wurden die Peilungen der Wasser- und Schifffahrtsämter Freiburg und Mannheim herangezogen (Tab. 5). Die Flussstrecke von Rhein-km 334 bis 352 gehört dabei zum Zuständigkeitsbereich des Wasser- und Schifffahrtsamtes Freiburg, während die Flussstrecke von Rhein-km 352,1 bis 493,5 dem Wasser- und Schifffahrtsamt Mannheim zugeordnet ist. Die für diese Arbeit verwendeten Peilungen sind Linienpeilungen und wurden mit Vertikalecholoten im Hektometerabstand innerhalb der Fahrrinne aufgenommen. Peilungen einzelner Jahre umfassen auch über die Fahrrinne hinaus gehende Bereiche. Wegen der Vergleichbarkeit untereinander sind jedoch nur die Schnittmengen aller ausgewerteten Peilungen zu verwenden. Nach der Echolotaufnahme erfolgte eine Plausibilitätsprüfung durch die Wasser- und Schifffahrtsämter, bevor die digitalisierten Daten in Querprofildatenbanken gespeichert wurden (BfG, 1993).

Die weitere Auswertung der Peilaufnahmen fand mit Hilfe der von der BfG entwickelten Software „Hydrographische Datenauswertung und Präsentation“ (HyDAP) statt. Die korrigierten Peildaten wurden für 10 km lange Flussabschnitte in das Programm eingelesen und nochmals plausibilisiert. Anschließend wurden die bereinigten Daten verdichtet und Lücken interpoliert, um daraus ein digitales Geländemodell (DGM) zu erzeugen. Bei der Auswertung von Linienpeilungen entsteht kein gebietsabdeckendes digitales Geländemodell, sondern lediglich ein Modell mit Linien oder Streifen im Abstand von 100 m. Eine durch Stromachsen orientierte Modellierung und Verdichtung kann aber auch für Linienpeilungen eine befriedigende Qualität des digitalen Geländemodells erreichen (BfG, 2007). In einem letzten Arbeitsschritt generiert das Programm die mittleren Sohlhöhen im Abstand von 100 m. Infolge des Wechsels der Höhenreferenzsysteme enthielten die Daten Höhenfehler (BfG, 2009b). Diese systematischen Fehler wurden in der Datengrundlage rechnerisch korrigiert.

Die mittleren Sohlhöhen wurden in Rahmen dieser Analyse aus den Peilungen 1985, 1992, 1996, 1998, 2004 und 2006 erstmals alle auf die gleiche oben beschriebene Art ausgewertet. Um die Sohlhöhenänderungen zwischen aufeinanderfolgenden Peilungen zu berechnen, wurden die mittleren Sohlhöhen dieser Jahre voneinander subtrahiert und die Sohlhöhendifferenzen als gleitende Durchschnitte über einen Kilometer dargestellt. Eine weitere Darstellung

erfolgt in Form der kumulativen Höhenänderungen, für die mittleren Sohlhöhenänderungen über jeweils einen Kilometer entlang der Untersuchungsstrecke aufsummiert werden.

4.1.2 Datenlage

Die für die vorliegende Analyse verwendeten Sohlpeilungen sind in Tab. 5 aufgeführt.

Tab. 5: Überblick über die verwendeten Peilaufnahmen und die durchführenden Instanzen.

Messung	Flussstrecke (km)		Instanz
	von	bis	
1985	334,20	352,00	WSA Freiburg
	352,10	492,70	WSA Mannheim
1992	334,10	352,00	WSA Freiburg
	352,10	493,50	WSA Mannheim
1996	335,70	352,00	WSA Freiburg
	352,10	493,50	WSA Mannheim
1998	334,10	352,00	WSA Freiburg
	352,10	493,50	WSA Mannheim
2004	334,10	352,00	WSA Freiburg
	352,10	493,50	WSA Mannheim
2006	335,80	352,00	WSA Freiburg
	352,10	493,50	WSA Mannheim

4.1.3 Ergebnisse

Die Ergebnisdarstellung erfolgt als absolute Höhenänderungen in den Zeiträumen 1985 bis 1996 und 1996 bis 2006, welche auch für die Feststoffbilanzierung (Kapitel 5) verwendet werden. Die absoluten Höhenänderungen im Zeitraum 1985 bis 1996 sind als 1-km-Mittelwerte in Abb. 25 dargestellt. Deutlich erkennbar sind die Auswirkungen der Baumaßnahmen in den Bereichen um Rhein-km 360 und 438 (vgl. Kapitel 4.4). Ebenfalls deutlich sichtbar ist die Baumaßnahme Sedimentfang Weisenau bei Rhein-km 494.

Eine detaillierte und umfassende Analyse zur Wirksamkeit des Regulationssystems im Projektgebiet wird parallel durch die BAW erstellt. Erste Resultate sind in BAW (2008) aufgeführt.

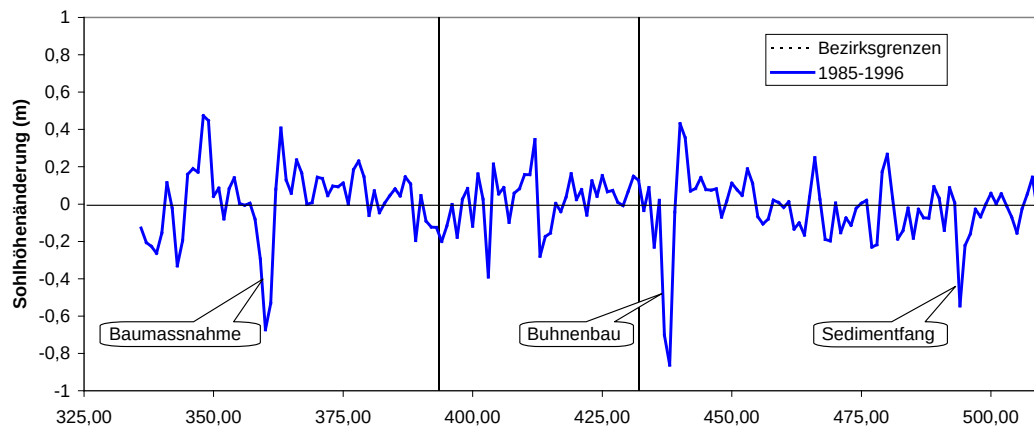


Abb. 25: Sohlhöhenänderungen zwischen 1985 und 1996.

Die absoluten Höhenänderungen im Zeitraum 1996 bis 2006 sind als 1-km-Mittelwerte in Abb. 26 dargestellt. Auch hier fallen die Auswirkungen der Baumaßnahmen unterhalb Rhein-km 360 besonders auf. Die großräumige Eintiefungstendenz unterstrom der Neckarmündung hat gegenüber dem vorigen 10-Jahreszeitraum zugenommen.

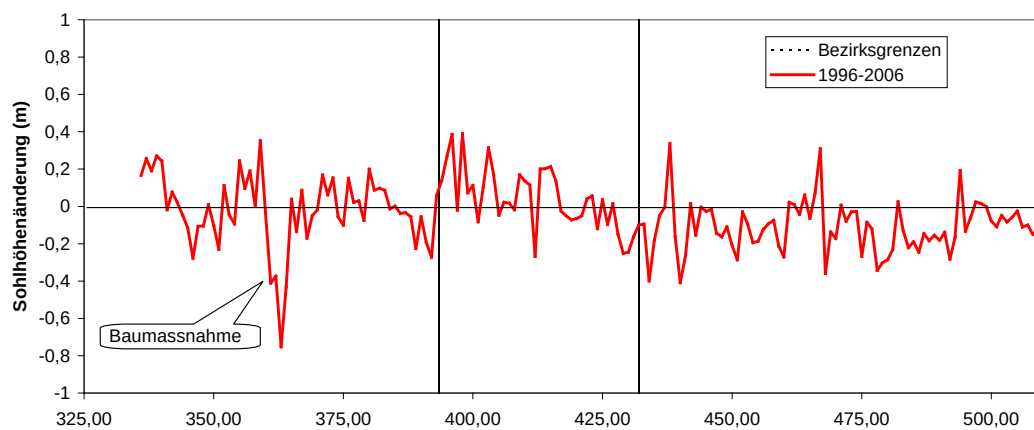


Abb. 26: Sohlhöhenänderungen zwischen 1996 und 2006.

Die lokalen und großräumigen Tendenzen der Sohlentwicklung lassen sich in kumulativer Darstellung z.T. deutlicher erkennen. In Abb. 27 sind die Höhenänderungen zwischen jeweils aufeinander folgenden Peilungen kumulativ dargestellt. Ein positiver Gradient bedeutet in dieser Darstellung eine Strecke mit Anlandung im jeweiligen Zeitraum, ein negativer Gradient entspricht Erosion.

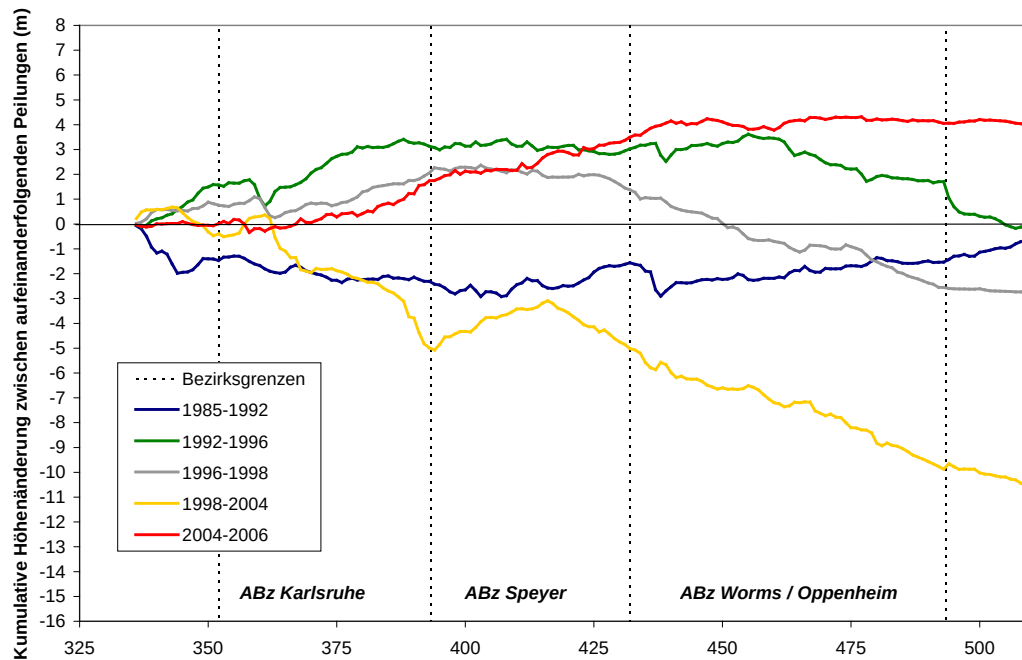


Abb. 27: Kumulative Sohlhöhenänderungen der Teilzeiträume zwischen 1985 und 2006.

Zwischen 1985 und 1992 überwiegt im Untersuchungsgebiet moderate Erosion, welche überwiegend im obersten Streckenabschnitt anschließend an die Geschiebezugabestrecke stattfindet. Unterhalb von Rhein-km 350 halten sich Anlandung und Erosion in etwa die Waage.

Im Zeitraum 1992 bis 1996 treten in der Strecke zwischen Iffezheim und Mainz etwa gleich viele 1-km-Abschnitte mit negativer wie positiver Sohlhöhendifferenz auf und die Linie der kumulativen Höhenänderung erreicht im Raum Mainz wieder nahezu die Nulllinie. Im oberen Bereich bis etwa Rhein-km 385 überwiegt dabei Anlandung. Es folgt ein Abschnitt ohne Tendenz bis Rhein-km 455, ab wo sich ein Bereich mit moderater Erosion anschließt.

Zwischen 1996 und 1998 ist eine moderate Anlandung bis etwa Rhein-km 400 zu verzeichnen, an die sich eine Flussstrecke mit negativer Sohlhöhenentwicklung bis zum unteren Ende des Untersuchungsgebietes anschließt.

Im Zeitraum 1998 bis 2004 ist eine deutliche Erosion auf nahezu der gesamten Strecke zu verzeichnen. Lediglich im oberen Abschnitt bis Rhein-km 360 halten sich Erosion und Anlandung in etwa die Waage. Im Bereich unterstrom der Geschiebezugabe Iffezheim wurde im Zeitraum 1992 bis 2004 die vorhergehende Eintiefung ausgeglichen. Zwischen Rhein-km 394 und 415 kommt es entgegen dem Trend der übrigen Untersuchungsstrecke zu Anlandungen. Der netto Massenauswurf dieser Periode ist der höchste im Untersuchungszeitraum.

Im letzten dargestellten Zeitraum 2004 bis 2006 findet möglicherweise eine Auflandung entlang der Strecke von Rhein-km 370 bis 430 statt, welche etwa der Hälfte des im Zeitraum 1998 bis 2004 ausgetragenen Volumens entspricht. Im übrigen Bereich der Untersuchungs-

strecke ist die Bilanz nahezu ausgeglichen. Die Unsicherheiten der Bilanzierung über den kurzen 2-Jahreszeitraum sind jedoch relativ groß.

Über den gesamten betrachteten Zeitraum 1985 bis 2006 hinweg ergibt sich eine nahe ausgeglichene Bilanz aus aufeinanderfolgender Erosion und Auflandung im Abschnitt bis Rhein-km 375. Es schließt sich ein Bereich mit überwiegender Auflandung bis etwa zur Neckarmündung (Rhein-km 428) an. Unterstrom der Neckarmündung überwiegt deutliche Erosion bis zum Ende des Untersuchungsgebietes (Abb. 28).

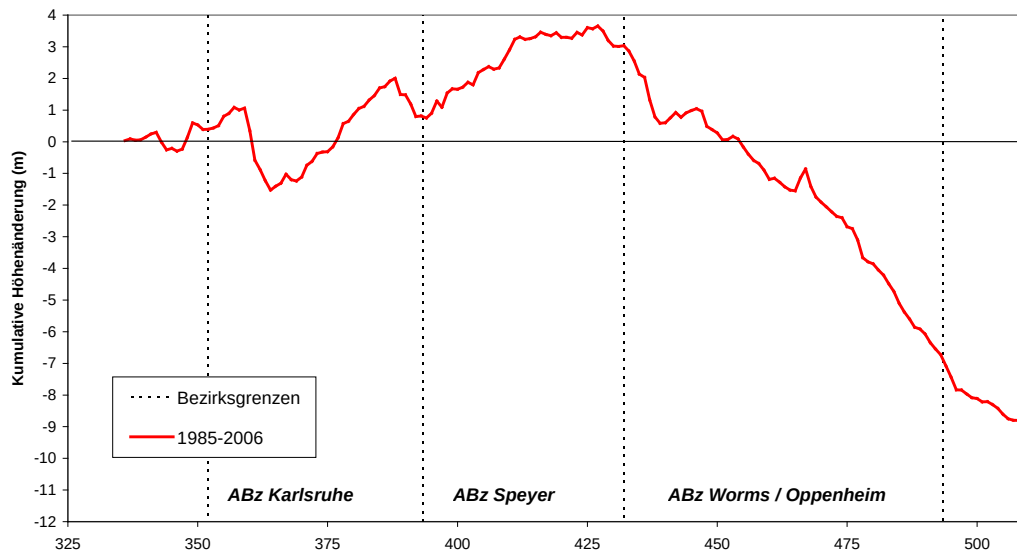


Abb. 28: Kumulative Sohlhöhenänderungen zwischen 1985 und 2006.

4.2 Lokale Entwicklungen

Den Zusammenhang zwischen hydraulisch-morphologischer Entwicklung und sedimentologischer Veränderung des Oberrheingebietes hat Gehres (2009) für die zurückliegenden Jahrzehnte betrachtet. Hierin sind die anthropogenen Einwirkungen auf das System soweit bekannt im Hinblick auf ihre lokalen Auswirkungen berücksichtigt.

Die großskalige morphologische Entwicklung ist wesentlich beeinflusst durch die vorhandenen Systeme der Regelungsbauwerke und der Geschiebemanagement. Gleichzeitig wird die lokale Sohlenlagenentwicklung sowohl durch die großräumigen Prozesse wie auch durch die lokalen Verhältnisse (Bauwerke, Flussgeometrie, Sedimentologie, etc.) beeinflusst.

Aus der Veränderung der mittleren Sohlhöhen kann die lokale morphologische Entwicklung der Rheinsohle abgeleitet werden. Im Vergleich zur Feststofffracht ist die mittlere Sohlhöhe nicht nur für einzelne Messstellen, sondern für die gesamte Flussstrecke berechnet worden. Deshalb sollte es möglich sein, aus der Veränderung der mittleren Sohlhöhe auch auf die Auswirkung von Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen zu schließen. Nicht zuletzt auch, weil sich flussbauliche Maßnahmen vor allem durch Höhenänderungen der Flusssohle bemerkbar

machen, da eine laterale Anpassung des Flusses aufgrund seitlicher Begrenzungen des Flussschlauchs kaum mehr möglich ist. Es muss beachtet werden, dass die mittlere Sohlhöhe nur für die Fahrrinne bestimmt wurde und keine Informationen zu Veränderungen der Sohle außerhalb der Fahrrinne vorliegen. Der mögliche Einfluss flussbaulicher Eingriffe wird im Folgenden getrennt für die drei Flussabschnitte Rhein-km 334 bis Rhein-km 387, Rhein-km 387 bis Rhein-km 444 und Rhein-km 444 bis Rhein-km 500 erörtert.

Eine detaillierte Analyse des Einflusses des Regelungssystems wird innerhalb der durch die Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest beauftragten Arbeitsgruppe durch die BAW erstellt.

Iffezheim bis Philippsburg: Rhein-km 334 bis Rhein-km 387

Die Geschiebezugabe im Unterwasser der Staustufe Iffezheim hat maßgeblichen Einfluss auf den Sedimenthaushalt und die Flussbettentwicklung des Oberrheins. Wie groß und wie weit reichend dieser Einfluss ist, kann jedoch nur schwer abgeschätzt werden, da das zu Tal beförderte Zugabematerial je nach Kornfraktion im Durchschnitt zwischen 2,2 und 5,4 Kilometer pro Jahr zurücklegt und Sortierungs- und Vermischungsprozessen unterliegt (Kapitel 3.3, BfG & WSA-Freiburg, 2006). Dabei wird das Zugabematerial über die gesamte Transportstrecke verteilt. Aussagen über die Auswirkungen bestimmter Zugabemengen auf die Sohlhöhen weiter unterstrom liegender Flussabschnitte sind nur durch den Einsatz geeigneter Feststofftransportmodelle zu treffen, da mit zunehmender Entfernung von der Zugabestelle erst Jahre später eine Reaktion der Sohle zu erwarten ist. Eine erste solche Untersuchung zum Transportverhalten des Zugabematerials unterhalb Iffezheims wird in Kapitel 7 vorgestellt.

Die beobachtete Wasserspiegelsenkung zwischen 1982 und 1992 und Sohleintiefung von 1980 bis 1996 im Unterwasser der Staustufe Iffezheim stehen möglicherweise zum Teil in Zusammenhang mit dem Modus der Geschiebezugabe. In den 80er Jahren wurden Kiesgemische ohne Feinfraktionen zugegeben und die Zugabemengen lagen teilweise deutlich unter der heute zugegebenen Menge (Tab. 7, Abb. 32). Das Zugabematerial reichte vermutlich nicht aus um die Sohlerosion im Unterwasser der Staustufe Iffezheim vollständig zu unterbinden. Von 1996 bis 2006 sind Sohlaufhöhungen im Nahbereich der Staustufe zu beobachten die mit Wasserspiegelanhebungen übereinstimmen. Diese Entwicklung belegt, dass durch höhere Zugabemengen und sohlstabilisierende Maßnahmen die Sohlhöhe seit Mitte der 90er Jahre gehalten werden kann.

Die Strecke zwischen Iffezheim und Philippsburg wird des Weiteren durch Bühnenneubau und -ausbau beziehungsweise durch Nachregelungsmaßnahmen geprägt. Die zwischen Rhein-km 337 und Rhein-km 352,1 bestehenden Bühnen wurden von 1983 bis 1989 von unterstrom nach oberstrom ausgebaut. Zwischen 1985 und 1996 treten in diesem Abschnitt um Rhein-km 350 positive Sohlhöhenänderungen in Erscheinung. Die Ursache hierfür könnte zum einen im Kolkverbau bei Rhein-km 349 im Jahr 1994 liegen, durch den die Sohle künstlich auf 3,50 m unter GIW aufgehöhht wurde (Tab. 8, Abb. 29). Zum anderen könnte die Ursache aber auch darin liegen, dass durch die Nachregelungsmaßnahmen zwischen 1990 und 1995 weiter oberstrom Geschiebe in Bewegung gesetzt wurde, das bis 1996 noch nicht den Bereich um Rhein-km 350 passiert hatte. Die im Streckenabschnitt von Rhein-km 336 bis

Rhein-km 345 zu beobachtende Sohleintiefung wäre dann als lokale Reaktion auf die Nachregulierung und als Quelle der sich unterstrom abzeichnenden Geschiebeablagerung zu interpretieren.

Bei Rhein-km 359 lässt sich aus der Veränderung der mittleren Sohlhöhen schon zwischen 1985 und 1996 eine deutliche Eintiefung der Sohle ablesen, die sich von 1996 bis 2006 verstärkt und nach unterstrom verlagert (Abb. 29). Im Bereich von Karlsruhe und Maxau (um Rhein-km 360) wurde das Niedrigwasserbett zwischen 1995 und 1996 durch Verlängerung der Buhnen weiter eingeschnürt. Diese Arbeiten wurden ab 2002 nach unterstrom fortgesetzt. Die Verschärfung der Regelung von Rhein-km 360 bis Rhein-km 387 ist bis heute noch nicht abgeschlossen. Zurzeit konzentrieren sich die Arbeiten auf den Bereich Leimersheim (ab Rhein-km 371). Die Anlandungen in diesem Flussabschnitt bildeten den Anlass für die Nachregulierung dieser Buhnen (Abb. 29). Eine Reaktion der Flusssohle wird sich erst aus zukünftigen Peilungen ablesen lassen.

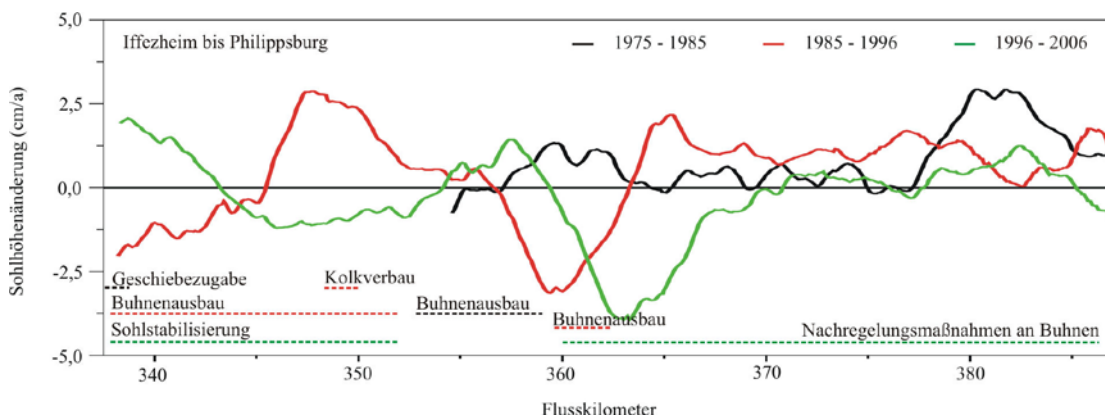


Abb. 29: Sohlhöhenänderungsrate und durchgeführte Baumaßnahmen zwischen Iffezheim und Philippsburg.

Philippsburg bis Worms: Rhein-km 387 bis Rhein-km 444

Die erosive Tendenz auf der Strecke von Philippsburg bis Worms von 1975 bis 1985 war nur durch eine positive Sohlhöhenänderung zwischen Rhein-km 434 und Rhein-km 437 unterbrochen. Sie ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass dort bis 1977 unsortiertes Felsmaterial aus der Neckarvertiefung im Rhein verbaut wurde (Tab. 8, Abb. 30). Aus der bettbildenden Fracht lässt sich die Sohleintiefung auf der Strecke Philippsburg bis Worms nicht ableiten, da diese zwischen Speyer und Worms konstant bleibt. Die Eintiefung der Sohle in diesem Zeitraum könnte aber mit dem Neubau von Buhnengruppen zwischen Rhein-km 392 und Rhein-km 423 in Zusammenhang stehen.

Zwischen 1985 und 1996 weisen die Sohlhöhenänderungen und die Abnahme der bettbildenden Fracht auf Sedimentation hin. Lokal wurde 1984/85 am Stefanienufer bei Rhein-km 424 ein Kolk verbaut. Der Bereich zwischen Rhein-km 423 und Rhein-km 432 wird von den Stromhäfen Ludwigshafen und Mannheim geprägt. Der Rhein ist in diesem Bereich sehr breit, beide Ufer sind durch Kaimauern begrenzt und die Sohlschubspannungen nehmen mi-

nimale Werte an. Das von oberstrom kommende Geschiebe kann nicht vollständig durchtransportiert werden und sedimentiert bereichsweise, während der suspendierte Sand den Bereich der Stromhäfen problemlos passiert. Dies hat zur Folge, dass die Geschiebefracht abnimmt und die Fracht des suspendierten Sandes zunimmt. Um die unerwünschten kiesigen Geschiebeablagerungen zu entfernen, müssen bis heute an lokalen Fehlstellen Baggerungen durchgeführt werden (Abb. 33). Das gebaggerte Material wird unterhalb der Neckarmündung hauptsächlich zwischen Rhein-km 434 und Rhein-km 435 dem Rhein wieder zugegeben. Im Bereich zwischen Rhein-km 434 und Rhein-km 437 scheint das verklappte Material bis 1996 erodiert und stromab verlagert worden zu sein. Lokal wurde bei Rhein-km 438 von 1991 bis 1992 zusätzlich eine neue Buhnengruppe gebaut. Diese Maßnahme könnte den Abtransport des verklappten Sediments nach Unterstrom verstärkt haben (Abb. 30).

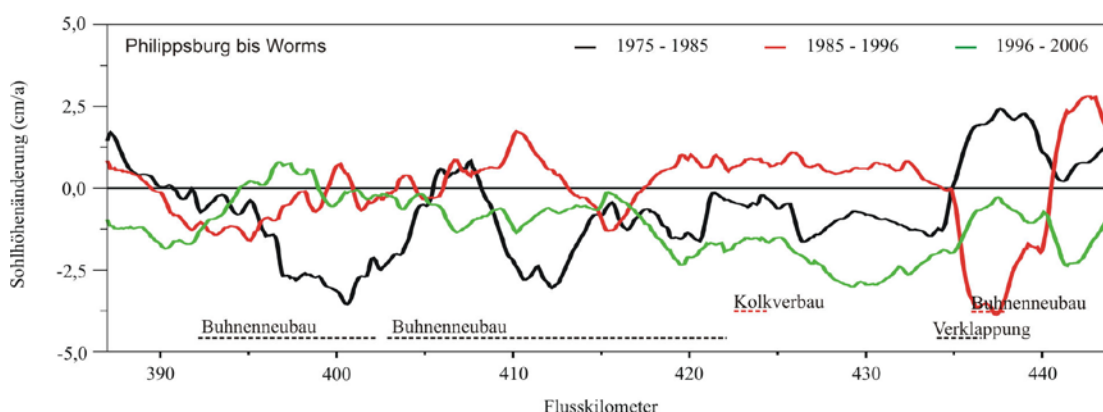


Abb. 30: Sohlhöhenänderungsrate und durchgeführte Baumaßnahmen für die Flussstrecke von Philippsburg bis Worms.

Worms bis Mainz: Rhein-km 444 bis Rhein-km 490

Die Sohlhöhenänderungen verschieben sich zwischen Worms und Mainz von 1975 bis 2006 zusehends vom positiven in den negativen Bereich (Abb. 31). Auch der Anstieg der bettbildenden Fracht zwischen Worms und Nierstein belegt diese Tendenz zur Erosion (Kapitel 5). Die Ursache kann nicht aus Baumaßnahmen abgeleitet werden. Die Regelung der Nackenheimer Schwelle zum Beispiel wurde von 1972 bis 1974 durchgeführt und liegt somit nicht im Beobachtungszeitraum (BAW, 2008). Nur kleine lokale Eingriffe wurden vorgenommen, so wurde in den Jahren 1975 und 1976 bei Rhein-km 453 eine Buhnengruppe nachgeregelt, die eventuell mit der dort zu beobachtenden schwachen Sohleintiefung zwischen 1975 und 1985 in Verbindung gebracht werden kann. Des Weiteren wurde 1995/1996 bei Rhein-km 448 ein Längswerk gebaut. Bei Rhein-km 465 erscheint auffällig, dass die Sohlage über 30 Jahre hinweg stabil bleibt, obwohl ober- und unterstrom Erosion zu beobachten ist. Aus der geologischen Karte geht hervor, dass sich dort keine Felsschwelle im Untergrund befindet. Auch die Beprobung der Sohle bei Rhein-km 465 zeigte keine Besonderheiten.

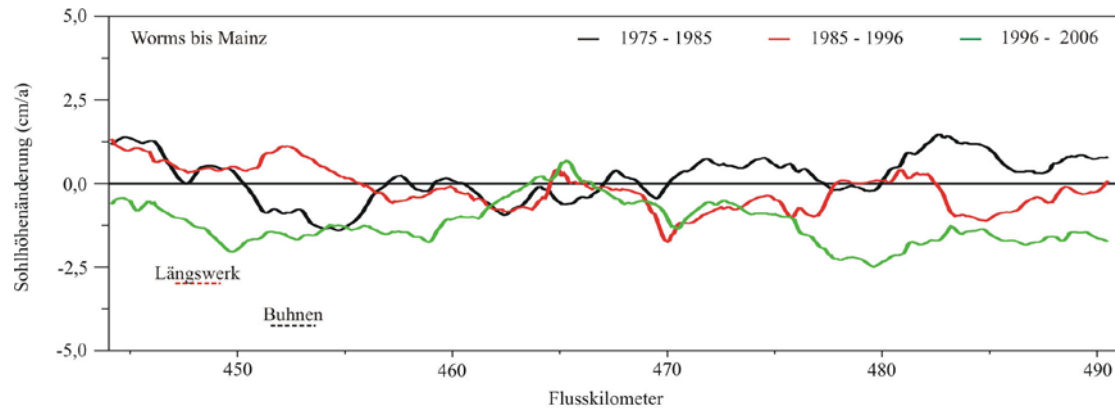


Abb. 31: Sohlhöhenänderungsrate und durchgeführte Baumaßnahmen von Worms bis Mainz.

4.3 Frachtermittlung aus Transport-Abfluss-Beziehungen

4.3.1 Methodik

Grundlage für die Ermittlung von Feststoffbilanzen (Kapitel 5) bilden die Geschiebe- und Schwebstoffmessungen der WSV. Mit Hilfe von Transport-Abfluss-Beziehungen werden durch die BfG Jahresfrachten berechnet. Die mit dem Geschiebefänger ermittelten Frachten umfassen Korngrößen zwischen 0,063 und 125 mm und werden im Folgenden als Geschiebefracht bezeichnet. Der Anteil der Suspensionsfrachten mit Korngrößen größer 0,063 mm wird im Folgenden als suspendierte Sandfracht, der Anteil kleiner 0,063 mm als Spülfracht bezeichnet. Letztere wird für die Bilanzierung nicht berücksichtigt, da diese Korngrößen an der Sohlkornzusammensetzung einen vernachlässigbaren Anteil und entsprechend geringe Relevanz für die Sohlhöhenentwicklung aufweisen (siehe auch Kapitel 5.1.1).

Um aus den ermittelten Feststofftransportdaten gesicherte Transport-Abfluss-Funktionen berechnen zu können, werden aus den Messstellen zwischen Iffezheim und Mainz nur diejenigen ausgewählt, die mehr als 10 Messungen für den jeweiligen Zeitraum aufweisen und für die Messungen bei Abflüssen vorhanden sind, die während 5 % eines Jahres überschritten werden (95 %-Fraktile der Abflussdauerlinie). Die Frachten dieser Messstellen werden im Folgenden als gesichert bezeichnet.

Der Geschiebetransport und der Transport des suspendierten Sandes werden getrennt ausgewertet, da sie unterschiedlich auf steigende Abflüsse reagieren. Der Zusammenhang zwischen Feststofftransport und Abfluss lässt sich am besten in logarithmischer Darstellung durch Potenzfunktionen der Form

$$Q_s = a(Q - Q_{krit})^b \quad (4)$$

beschreiben (BfG, 2009a). Q_s ist der Feststofftransport in kg/s, Q ist der Abfluss in m^3/s und a (kg/m^3) und b (-) sind Konstanten, die für jede Kurve berechnet werden. Q_{krit} als kritischer Abflusswert für den Bewegungsbeginn wurde in Anlehnung an Sauer (2000) zu Null angenommen. Diese Festlegung vereinfacht die Regressionsanalyse, da bei freier Anpassung aller Parameter an die Messwerte auch unrealistische, negative Werte für Q_{krit} resultieren können. Die physikalisch unzutreffende Annahme des Bewegungsbeginns bei $Q = 0$ stellt hingegen für die praktische Anwendung der Regression kein Problem dar, da im natürlich auftretenden Abflussspektrum keine Abflüsse nahe bei Null auftreten. Sie gibt hingegen auch die Beobachtung wieder, dass bei praktisch allen gemessenen Abflüssen ein wie auch immer geringer Feststofftransport messbar ist, und ein Grenzwert für den Bewegungsbeginn für reale Fließgewässerbedingungen als unrealistisch angesehen werden muss.

Bei der Aufstellung der Transport-Abfluss-Funktionen müssen stark abweichende Messwerte, welche die Steigung der Kurve zu stark beeinflussen würden, eliminiert werden. Es wurden alle Messwerte, die mehr als die dreifache Standardabweichung von der Transport-Abfluss-Beziehung entfernt liegen, nicht berücksichtigt (Ausreißer).

4.3.2 Datenlage

Alle Daten der Geschiebemessungen und Messungen des suspendierten Sandes am Oberrhein sind in der sedimentologischen Datenbank (SedDB) der BfG gespeichert. Transport-Abfluss-Beziehungen sind nur für gewisse Zeiträume gültig, in denen die maßgeblichen Einflussgrößen Sohlgefälle, Profilform sowie Sedimentzusammensetzung und -eintrag als annähernd konstant angesehen werden können. Im Hinblick auf die nachfolgend zu ermittelnden Feststoffbilanzen (Kapitel 5) werden Transport-Abfluss-Beziehungen für die Zeiträume 1986 bis 2006 und 1996 bis 2006 aufgestellt.

4.3.3 Ergebnisse

Die Transport-Abfluss-Beziehungen aller Messstellen im Untersuchungsgebiet sind im Anhang abgebildet. Die Parameter a und b der Transport-Abfluss-Beziehungen (Gleichung 4) sind zusammenfassend in Tab. 6 aufgeführt. Weiterhin sind die Anzahl der zugrunde liegenden Messungen, das jeweilige Bestimmtheitsmaß R^2 sowie der maximale Abfluss Q_{max} für den Messungen vorliegen, verzeichnet.

Tab. 6: Übersicht der Transport-Abfluss-Beziehungen

Zeitraum	Messstelle	Transportart	Messungen	a (kg/m ³)	b (-)	R ² (-)	Qmax (m ³ /s)
1986-2006	Iffezheim	Geschiebe	16	8,463E-04	1,248	0,54	2245
		Susp. Sand	8	4,223E-08	2,498	0,72	1761
		Spülfracht	8	5,934E-04	1,431	0,28	1761
	Plittersdorf (alt)	Geschiebe	30	1,291E-05	1,821	0,59	3330
		Susp. Sand	15	7,005E-08	2,438	0,88	2740
		Spülfracht	15	1,770E-05	1,962	0,87	2740
	Plittersdorf (akt.)	Geschiebe	45	5,571E-06	1,933	0,42	3117
		Susp. Sand	21	2,386E-08	2,610	0,80	2898
		Spülfracht	21	6,161E-05	1,808	0,60	2898
	Illingen	Geschiebe	52	7,248E-08	2,509	0,50	3350
		Susp. Sand	32	4,535E-07	2,192	0,66	2963
		Spülfracht	32	3,605E-04	1,551	0,57	2963
	Neuburgweiler	Geschiebe	53	2,969E-07	2,358	0,54	2824
		Susp. Sand	36	4,223E-08	2,517	0,73	2824
		Spülfracht	36	5,887E-05	1,770	0,54	2824
	Maxau	Geschiebe	50	3,290E-06	2,038	0,54	2718
		Susp. Sand	32	1,958E-09	2,904	0,78	2718
		Spülfracht	32	1,058E-06	2,323	0,74	2718
	Leimersheim	Geschiebe	33	2,024E-08	2,747	0,67	2381
		Susp. Sand	29	1,526E-08	2,621	0,74	2381
		Spülfracht	30	3,374E-06	2,173	0,63	2381
	Philippsburg	Geschiebe	10	1,712E-12	4,000	0,68	1972
		Susp. Sand	9	2,285E-07	2,321	0,54	1972
		Spülfracht	9	1,643E-02	1,046	0,18	1972
	Speyer	Geschiebe	34	1,504E-06	2,073	0,57	2402
		Susp. Sand	26	2,118E-09	2,961	0,94	2402
		Spülfracht	26	1,300E-05	1,996	0,81	2402
	Mannheim	Geschiebe	32	3,973E-08	2,478	0,64	3090
		Susp. Sand	23	5,987E-09	2,808	0,90	3090
		Spülfracht	23	6,698E-06	2,088	0,85	3090
	Worms	Geschiebe	35	2,097E-07	2,279	0,70	3789
		Susp. Sand	25	7,663E-08	2,460	0,92	3492
		Spülfracht	25	4,374E-05	1,835	0,77	3492
	Gernsheim	Geschiebe	11	9,128E-07	2,089	0,53	2312
		Susp. Sand	8	1,937E-06	2,056	0,76	2312
		Spülfracht	8	3,074E-04	1,587	0,49	2312
	Nierstein	Geschiebe	40	3,015E-05	1,658	0,78	3717
		Susp. Sand	29	4,461E-10	3,170	0,91	3717
		Spülfracht	30	1,495E-05	1,975	0,74	3717
	Mainz	Geschiebe	36	3,833E-07	2,164	0,68	4529
		Susp. Sand	24	3,640E-10	3,134	0,92	4529
		Spülfracht	24	6,311E-06	2,077	0,73	4529
1996-2006	Plittersdorf (akt.)	Geschiebe	23	8,145E-13	4,088	0,81	2910
		Susp. Sand	15	4,105E-09	2,845	0,91	2910
		Spülfracht	15	1,847E-05	1,957	0,79	2910
	Illingen	Geschiebe	26	7,425E-12	3,734	0,73	2963
		Susp. Sand	14	2,712E-07	2,257	0,84	2963
		Spülfracht	14	1,929E-03	1,332	0,69	2963
	Neuburgweiler	Geschiebe	25	2,676E-11	3,607	0,81	2824
		Susp. Sand	15	9,875E-10	3,003	0,81	2824
		Spülfracht	15	2,689E-06	2,179	0,70	2824
	Maxau	Geschiebe	25	8,904E-09	2,817	0,75	2718
		Susp. Sand	16	4,340E-10	3,086	0,80	2718
		Spülfracht	16	1,896E-06	2,214	0,67	2718
	Leimersheim	Geschiebe	22	6,467E-11	3,525	0,88	2381
		Susp. Sand	20	4,897E-09	2,777	0,72	2381
		Spülfracht	20	2,157E-06	2,218	0,67	2381
	Speyer	Geschiebe	20	7,108E-08	2,472	0,68	2402
		Susp. Sand	15	2,877E-09	2,914	0,92	2402
		Spülfracht	15	8,846E-05	1,725	0,83	2402
	Mannheim	Geschiebe	20	8,123E-10	3,016	0,78	3090
		Susp. Sand	15	3,763E-09	2,869	0,91	3090
		Spülfracht	15	4,420E-06	2,125	0,93	3090
	Worms	Geschiebe	20	2,967E-10	3,152	0,90	3492
		Susp. Sand	15	2,501E-08	2,604	0,96	3492
		Spülfracht	15	3,823E-05	1,826	0,93	3492
	Nierstein	Geschiebe	25	7,207E-06	1,866	0,87	3717
		Susp. Sand	19	9,184E-10	3,063	0,94	3717
		Spülfracht	19	4,216E-06	2,112	0,91	3717
	Mainz	Geschiebe	23	2,743E-07	2,209	0,74	4529
		Susp. Sand	12	1,098E-09	2,977	0,93	4529
		Spülfracht	13	7,156E-06	2,052	0,74	4529

4.4 Baggerungen und Verklappungen

4.4.1 Methodik und Datenlage

Trotz Regulierung des Rheins und überwiegender Erosionsneigung im Untersuchungsgebiet besteht lokal Bedarf an Baggerung. Das dabei entnommene Material wird dem Strom an geeigneten Stellen wieder zugeführt. Die Hauptentnahmestelle ist der Geschiebefang bei Mainz-Weisenau (Rhein-km 494,3), der 1989 im Betrieb ging. Die Geschiebezugabe bei Iffezheim stellt die größte Quelle transportierten Geschiebes im Untersuchungsgebiet dar. Die Daten über Zugaben, Baggerungen und Verklappungen, welche im Kapitel 5 für die Feststoffbilanzierung benötigt werden, wurden aus der Untersuchung der BAW (2008) übernommen und sind im folgenden Abschnitt zusammengefasst. Eine nachfolgend durchgeführte Aktualisierung der Datenlage zu den Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen, welche seitens der BAW durchgeführt wurde, ist in der vorliegenden Auswertung nicht berücksichtigt worden.

4.4.2 Ergebnisse

Seit 1978 werden zwischen Rhein-km 336 und Rhein-km 337 durchschnittlich 180 000 m³ Geschiebe pro Jahr zugegeben (Abb. 32). Die verschiedenen Sieblinien, die dafür verwendet werden, sind in Tab. 7 aufgeführt. Das Gemisch 8, welches seit 1991 zugegeben wird, entspricht weitestgehend dem natürlichen Rheingeschiebe der oberen Untersuchungsstrecke.

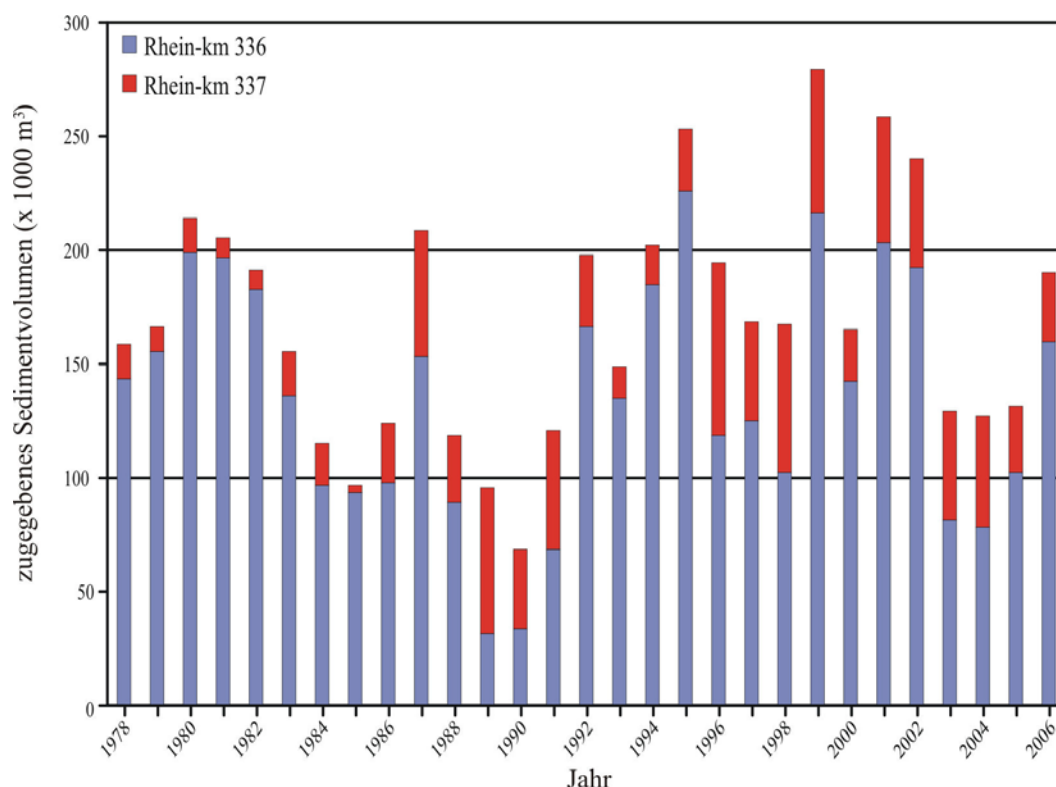


Abb. 32: Jährliche Zugabemengen bei Rhein-km 336 und Rhein-km 337 von 1978 bis 2006.

Tab. 7: Zusammensetzung des Zugabematerials. Seit 1991 wird nur noch das Gemisch 8 verklappt (BfG & WSA-Freiburg, 2006).

Gemisch 1	bis 1981	Gemisch 2	bis 1981	Gemisch 3	1981-1991	Gemisch 4	1981-1991
33%	2/16 mm	40%	2/16 mm	19%	8/16 mm	33%	8/16 mm
33%	16/32 mm	30%	16/32 mm	19%	16/32 mm	33%	16/32 mm
33%	32/63 mm	30%	32/63 mm	62%	32/63 mm	33%	32/63 mm
Gemisch 5	1981-1991	Gemisch 6	1981-1991	Gemisch 7	1981-1991	Gemisch 8	seit 1991
30%	8/16 mm	40%	8/16 mm	42%	8/16 mm	12%	0/2 mm
30%	16/32 mm	40%	16/32 mm	28%	16/32 mm	12%	2/8 mm
40%	32/63 mm	30%	32/63 mm	30%	32/63 mm	26%	8/16 mm
						25%	16/32 mm
						25%	32/63 mm

Eine Übersicht über die durchgeführten Baumaßnahmen (ohne Baggerungen und Verklappungen) entlang der Untersuchungsstrecke seit 1978 (BAW, 2008) ist in Tab. 8 gegeben, aufsteigend nach Flusskilometern sortiert.

Tab. 8: Übersicht über die Baumaßnahmen am frei fließenden Rhein von Iffezheim bis Mainz seit der Fertigstellung der Staustufe Iffezheim 1977 bis 2008.

Flusskilometer	Jahr	Baumaßnahme
336-337	1978-2008	Geschiebezugabe
336-351	1998-2008	sohlstabilisierende Maßnahmen
335-336	1995	Reduzierung der Regelung
335,6-352,1	1990-1995	Nachregelungsmaßnahmen an Buhnen und Uferabflachungen
337-352,1	1983-1989	Buhnenausbau auf AGIW 82
349	1995	Kolkverbau, Sohlanhebung auf 3,50 unter GIW
352,1-402,6	1967-1984	Erhöhung und Verlängerung der NW-Buhnen
360-362,7	1995-1996	weitere Einengung des Niedrigwasserbettes
360	seit 1984	Baggerungen (25 000 m ³ /a) aufgrund von Fehltiefen und Fehlbreiten
360-387	2000-2008	Nachregelungsmaßnahmen an Buhnen
377,5	1998	Geschiebezugabe
392,2-402,6	1976-1980	Bau von NW-Buhnen
402,6-419	1976-1980	Bau von NW-Buhnen
424	1984/85	Kolkverbau und Sohlenaufhöhung am Stefanieufer bei Mannheim (Baggermengen von 50 000 m ³ /a auf 30 000 m ³ /a reduziert)
434-437	1972-1977	Einbau unsortierten Felsmaterials aus dem Neckar
438	1991/92	Neubau einer NW-Buhnengruppe, Uferbegradigung und Uferrückverlegung
448	1995/96	Bau eines offenen Längswerks und Ufervorverlegung
453	1975/76	Verlängerung der Buhnen
477	1968/69	Bau von Buhnen und Längswerk
486	1972/74	Regelung der Nackenheimer Schwelle, Felsbeseitigung und Buhnenbau
494,3	1989	Bau des Geschiebefangs bei Mainz-Weisenau

Trotz Nachregelungen bleiben lokale Fehlstellen, an denen gebaggert werden muss. Das gebaggerte Sediment wird dem Fluss an anderer Stelle wieder zugegeben. In Abb. 33 sind die Gesamtmengen der Geschiebewartung im Untersuchungsgebiet zwischen 1975 und 2006 aufgetragen. Es ist zu erkennen, dass Baggerungen vor allem im Bereich der Stromhäfen Ludwigshafen und Mannheim zwischen Rhein-km 420 und 430 stattfinden.

Das gebaggerte Sediment wird 10 bis 15 km weiter unterstrom wieder zugegeben. Im Rheingau traten Schifffahrtshindernisse in Form von großen Sanddünen auf. Diesen wurde durch den Bau eines Geschiebefangs bei Mainz-Weisenau (1989) bei Rhein-km 494,3 begegnet. Der Geschiebefang wurde in der Strommitte mit einer Länge von 160 m, einer Breite von 250 m und einer Tiefe von 1,5 m angelegt. Er hat die Funktion, dem Fluss einen Teil des Geschiebes zu entziehen, um auf diese Weise die Dünenbildung zu unterbinden. Der Geschiebefang wurde zwischen 1989 und 2007 insgesamt 22-mal geleert, wobei ihm insgesamt 1,6 Mio m³ Sediment entnommen wurden (WSD-SW, 2007). Nur ein Teil dieser Sedimentmenge wurde dem Rhein unterstrom von Bingen wieder zugegeben.

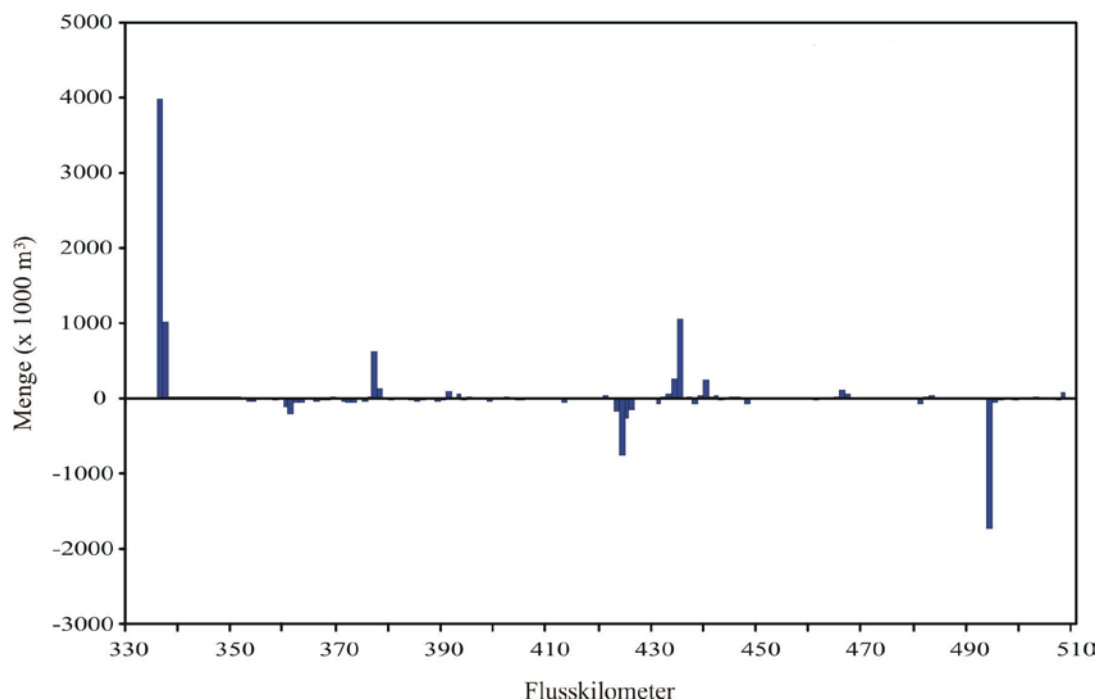


Abb. 33: Gesamtmengen der Geschiebebewirtschaftung im Untersuchungsgebiet zwischen 1975 und 2006. Zugaben und Verklappungen sind positiv, Entnahmen negativ aufgetragen.

5. Feststoffbilanzen

5.1 Methodik

Die Aufstellung von Feststoffbilanzen erfolgt mit zwei unabhängigen Methoden. Erstens werden die aus den Feststofftransportmessungen abgeleiteten Transport-Abfluss-Beziehungen genutzt, um an allen Messstellen mit gesicherter Frachtbestimmung (vgl. Kapitel 4.3.1) Feststoffjahresfrachten zu ermitteln, welche innerhalb des Untersuchungsgebietes bilanziert werden. Zweitens wird aus der Sohlhöhenentwicklung zwischen aufeinanderfolgenden Sohlpeilungen unter Berücksichtigung der Massen der Geschiebezugaben, Baggerungen und Verklappungen sowie Sedimenteinträgen, Abrieb und Vorlanddeposition eine Massenbilanz aufgestellt.

Beide Methoden sind aufgrund von notwendigen Annahmen und Messungenauigkeiten fehlerbehaftet. Hierauf wird in Kapitel 6 eingegangen. Durch die unabhängige, vergleichende Bilanzierung der Feststoffe mit Hilfe der Feststofftransportmessungen und der Sohlhöhenentwicklung ist es jedoch möglich, eine Beurteilung des Feststofftransports und des Feststoffhaushalts im Untersuchungsgebiet inklusive einer Abschätzung der erreichten Genauigkeit durchzuführen (Kapitel 8).

Die Bilanzierung soll die Beurteilung des aktuellen Feststoffhaushalts und der Sohlentwicklung ermöglichen. Eine hinreichende Sicherheit wird nur erreicht, wenn der Bilanzierungszeitraum eine genügend hohe Zahl von Messungen umfasst. Bei Wahl zu langer Bilanzierungszeiträume besteht hingegen die Gefahr, dass sich wesentliche Randbedingungen innerhalb des Zeitraums geändert haben und nicht mehr von einem durchgehend konsistenten Systemverhalten ausgegangen werden kann. Zur Lösung dieser gegenläufigen Anforderungen erfolgt die Bilanzierung für die jüngsten zur Verfügung stehenden Zeiträume mit vollständiger Datenauswertung und 10 bzw. 20 Jahren Beobachtungsdauer. Dadurch ergeben sich die Bilanzierungszeiträume 1986 bis 2006 sowie 1996 bis 2006.

5.1.1 Bilanzierung anhand der Feststofftransportmessungen

Aus den Transport-Abfluss-Beziehungen (Kapitel 4.3) an den jeweiligen Messstellen und den Abflussganglinien der dazugehörigen Bezugspegel werden zunächst Tagesfrachten berechnet.

Ferguson (1986) zeigte, dass es bei der Frachtberechnung mit Hilfe von Potenzfunktionen mit zunehmender Standardabweichung zu einer systematischen Unterschätzung der Frachten kommt. Um die Frachten zu korrigieren führt er einen Korrekturfaktor C ein, der mit Hilfe der Varianz s^2 berechnet werden kann.

$$C = \exp(2,65s^2) \quad (5)$$

Die Frachten werden daher zunächst in Tonnen pro Tag ermittelt und mit dem Ferguson-Faktor multipliziert. Aus den so ermittelten täglichen Frachten wird durch Summierung die Jahresfracht bestimmt. Abschließend erfolgt die Mittelung der Jahresfrachten über die Bilanzierungszeiträume 1986 bis 2006 bzw. 1996 bis 2006. Aus den Frachten an den einzelnen Messstellen wurden Frachtlängsschnitte für das Untersuchungsgebiet aufgestellt.

Für die Sedimentbilanzierung muss festgelegt werden, welcher Anteil der Fracht mit der Flusssohle im Austausch steht. In früheren Arbeiten wurde beispielsweise durch Dröge (BfG, 1993) angenommen, dass 1/3 des suspendierten Sandes am Sohlaufbau teilnehmen und 2/3 zur Spülfracht zu rechnen sind. Die Aufteilung erfolgte nach der Beobachtung, dass die Kornfraktionen kleiner 0,25 mm nur in vernachlässigbarer Menge in der Rheinsohle vorhanden sind und 2/3 des suspendierten Sandes kleiner als 0,25 mm sind. Dieser Beobachtung lagen jedoch nur wenige Messwerte zu Grunde. Neuere Analysen der BfG zeigen, dass Korngrößen kleiner 0,25 und darunter entgegen früherer Annahmen in nennenswerten Anteilen vorhanden sind (Abb. 34). Eine genaue Abgrenzung der Spülfracht von den Fraktionen, die am Sohlaufbau beteiligt sind, ist jedoch schwierig. Aufgrund fehlender Informationen über die Korngrößenverteilung des suspendierten Sandes (nur der Anteil größer 0,063 mm wird bestimmt), wird die Grenze in der vorliegenden Analyse bei 0,063 mm gezogen. Die gesamte suspendierte Sandfracht größer 0,063 mm wird zusammen mit der Geschiebefracht zur Bettbildenden Fracht gerechnet. Die Spülfracht hingegen entspricht dem Teil des suspendierten Transports mit Korngrößen kleiner 0,063 mm.

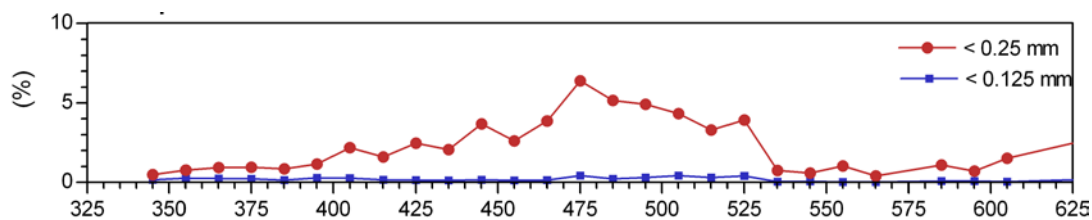


Abb. 34: Anteil der Sandfraktionen kleiner 0,125 mm und 0,25 mm (in Prozent) in den obersten 50 cm der Rheinsohle.

5.1.2 Bilanzierung anhand der Sohlhöhenentwicklung

Die Feststoffbilanzierung anhand der Sohlhöhenentwicklung erfolgt analog zur oben beschriebenen Feststofftransportbilanzierung für die Zeiträume 1986 bis 2006 bzw. 1996 bis 2006. Grundlage sind die Peilungen der Jahre 1985, 1996 und 2006 (Kapitel 4.1).

Die Höhenänderung zwischen den Peilungen wird für 100 m-Abschnitte ermittelt. Bei Kenntnis des Sedimenteintrags am oberstromigen Rand des Abschnittes lässt sich daraus die Fracht am unterstromigen Rand des Abschnittes bilanzieren als

$$V_{aus} = V_{ein} + \Delta z \cdot b \cdot l + V_{Zugabe} - V_{Baggerung} + V_{Verklappung} + V_{Neben} - V_{Vorland} - V_{Abrieb} \quad (6)$$

mit V_{aus} als der Fracht am unterstromigen Rand des Abschnittes, V_{ein} als den Frachteintrag am oberstromigen Rand, Δz der mittleren Sohlhöhenänderung im Abschnitt, b der Breite, über welche die Sohlhöhenänderung stattfand, l der Länge des Abschnittes, V_{Zugabe} als das Volumen, welches im Bilanzierungszeitraum im Abschnitt zugegeben wurde, $V_{Baggerung}$ als das Volumen, welches im Bilanzierungszeitraum im Abschnitt gebaggert wurde und $V_{Verklappung}$ als das Volumen, welches im Bilanzierungszeitraum im Abschnitt verklappt wurde. Die Terme V_{Neben} , $V_{Vorland}$ und V_{Abrieb} bezeichnen die Volumina der Nebengewässereinträge, Vorlanddeposition und des Abriebverlustes, welche ebenfalls auf den Bilanzierungsabschnitt bezogen werden.

Bei bekannten Einträgen am oberen Rand des Untersuchungsgebietes kann somit sukzessive die Gesamtfeststoffbilanz für das Untersuchungsgebiet aufgestellt werden.

5.2 Datenlage

Die Frachtbilanzierung erfolgt anhand der Transport-Abfluss-Beziehungen (Kapitel 4.3) und der mittleren Sohlhöhenentwicklung aus den Peilungen (Kapitel 4.1). Neben den bekannten Größen betreffend die Geschiebezugaben, Baggerungen und Verklappungen (Kapitel 4.4) werden Ansätze für die Einträge aus den Nebenflüssen, den Abriebverlust, die Vorlanddeposition sowie für die Porosität benötigt.

Am oberen Rand der Untersuchungsstrecke kann aufgrund des Stauhaltung Iffezheim die Geschiebefracht zu Null angesetzt werden. Als suspendierte Sandfracht wird die Differenz zwischen der Sandzugabemenge bei Iffezheim und der an der Messstelle Plittersdorf gemessenen Sandfracht als Eintrag am oberen Rand angenommen. Dieser Eintrag beträgt 0,1 Mio. t/a.

Geschiebeeinträge aus Nebenflüssen sind aufgrund der Staustufen an Neckar, Main und Mosel zu vernachlässigen. Die Daten der Schwebstoffmessungen an diesen drei Flüssen zeigen zwar nicht unerhebliche Mengen an Schwebstoffen (0,39 Mio. t/a), deren Kornverteilung ist jedoch unbekannt. Da der Anteil der suspendierten Sandfracht mit Korngrößen größer 0,063 mm (vgl. Kapitel 5.1.1) nicht näher bestimmt werden kann und zudem wahrscheinlich nur einen geringfügigen Teil der Gesamteinträge in Höhe von 0,39 Mio. t/a ausmacht, werden diese Einträge für die Feststoffbilanzierung vernachlässigt.

Ansätze für den Abriebverlust müssen anhand von mittleren Geschiebefrachten und geschätzten Abriebraten überschlägig ermittelt werden. Es ergeben sich für:

- Oberrhein: 250 t/km/a (mittlere Geschiebefracht von 0,25 Mio. t/a bei einer Abriebrate von 0,001 1/km)
- Rheingau: 70 t/km/a (mittlere Geschiebefracht von 0,07 Mio. t/a bei einer Abriebrate von 0,001 1/km)
- Mittelrhein: 110 t/km/a (mittlere Geschiebefracht von 0,06 Mio. t/a bei einer Abriebrate von 0,002 1/km)

Für die Vorlanddeposition entlang des Oberrheins wird ein Betrag von 350 t Sand/km/a angesetzt. Dieser Wert beruht auf Messungen der Universität Karlsruhe (Mohrlok et al, 2009), welche für diese Analyse im Hinblick auf den Sandanteil der Deposition neu ausgewertet wurden.

Die Porosität n , welche zur Umrechnung zwischen Massen und Volumina benötigt wird, wird berechnet zu

$$n = 0,353 - 0,068\sigma + 0,146p \quad (7)$$

mit σ als der Standardabweichung der Korngrößenverteilung und p dem Anteil der Fraktion kleiner 0,5 mm. Dieser Ansatz ist ein bisher unveröffentlichtes Nebenprodukt der aktuellen BfG-Analysen am Rhein (Frings, Vollmer et al.). Als mittlere Porosität im Untersuchungsgebiet ergibt sich $n = 0,25$.

5.3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Bilanzierungen anhand der Feststofftransportmessungen sowie der Sohlhöhenentwicklung dargestellt. Diese wurden über das Untersuchungsgebiet hinaus bis in den Bereich Königswinter (Rhein-km 646) durchgeführt. Die Darstellung erfolgt für den gesamten ausgewerteten Bereich, wobei in der Diskussion dem Projektauftrag folgend nur auf die Strecke Iffezheim bis Mainz eingegangen wird.

5.3.1 Bilanzierung anhand der Feststofftransportmessungen

Die anhand der Feststofftransportmessungen ermittelten Frachten für den Bilanzierungszeitraum 1996 bis 2006 sind in Tab. 9 zusammengefasst. Die grafische Darstellung der Frachtentwicklung im Längsschnitt folgt in Abb. 35.

Tab. 9: Jahresfrachten für Geschiebe, suspendierten Sand und Spülfracht für den Bilanzierungszeitraum 1996 bis 2006. Die sohlhöhenrelevante Fracht ist die Summe der Geschiebe und suspendierten Sandfracht, wobei nur deren gesicherten Werte angegeben werden (vgl. Kapitel 4.3.1).

		Jahresfrachten (1996-2006) x1000 t/a																
Messstelle		Plittersdorf (akt.)	Illingen	Neuburgweiler	Maxau	Leimersheim	Speyer	Mannheim	Worms	Nierstein	Mainz	Niedervalluf	Oestrich	Bingen	Braubach	Neuwied	Brohl	Koenigswinter
km		343	347	356	363	372	403	427	444	484	498	508	518	527	581	609	620	646
Geschiebe	0.063-125 mm	411	265	335	277	388	184	123	158	209	165	155	84	180	149	140	88	107
susp. Sand	0.063-2 mm	138	114	124	104	122	167	161	186	231	237	492		290	314			381
Spülfracht	6,1 µm - 0.063 mm	850	896	715	671	792	735	693	803	762	1276	1966		1282	1157			2087
gesicherte Sohlhöhen-relevante Fracht	0.063-125 mm	549	379	459	382	511	351	284	344	441	402			470	463			488

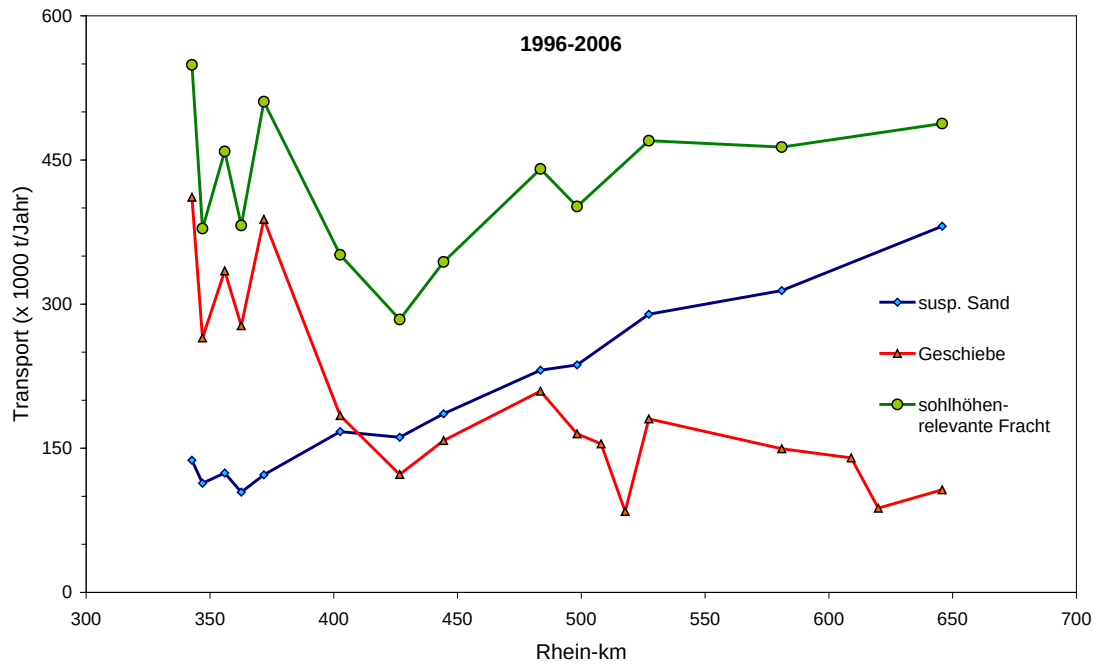


Abb. 35: Längsschnitt der Frachtbilanzierung anhand der Feststofftransportmessungen für den Bilanzierungszeitraum 1996 bis 2006. Dargestellt sind die Frachten von Geschiebe und suspendiertem Sand sowie deren Summe, die sohlhöhenrelevante Fracht.

Die Frachten für den Bilanzierungszeitraum 1986 bis 2006 sind in Tab. 10 zusammengefasst. Die grafische Darstellung der Frachtentwicklung im Längsschnitt folgt in Abb. 36.

Tab. 10: Jahresfrachten für Geschiebe, suspendierten Sand und Spülfracht für den Bilanzierungszeitraum 1986 bis 2006. Die sohlhöhenrelevante Fracht ist die Summe der Geschiebe und suspendierten Sandfracht, wobei nur deren gesicherte Werte angegeben werden (vgl. Kapitel 4.3.1).

		Jahresfrachten (1986-2006) x1000 t/a															
Messstelle		Pittersdorf (alt)	Pittersdorf (akt.)	Illingen	Neuburgweiler	Maxau	Leimersheim	Speyer	Mannheim	Worms	Nierstein	Mainz	Niederrhein	Oestrich	Bingen	Braubach	Neuwied
km		340	343	347	356	363	372	403	427	444	484	498	508	518	528	581	609
Geschiebe	0.063-125 mm	246	281	288	341	329	439	204	114	174	197	172	172	117	161	174	138
susp. Sand	0.063-2 mm	116	151	131	141	119	110	178	165	206	281	290	496	260	308	353	505
Spülfracht	6,1 µm - 0.063 mm	841	1042	893	792	798	889	834	843	1098	1087	1365	1826	1388	1324	1255	1691
gesicherte Sohlhöhen-relevante Fracht	0,063-125 mm	362	432	420	482	449	549	383	278	380	478	462		377	469	527	557

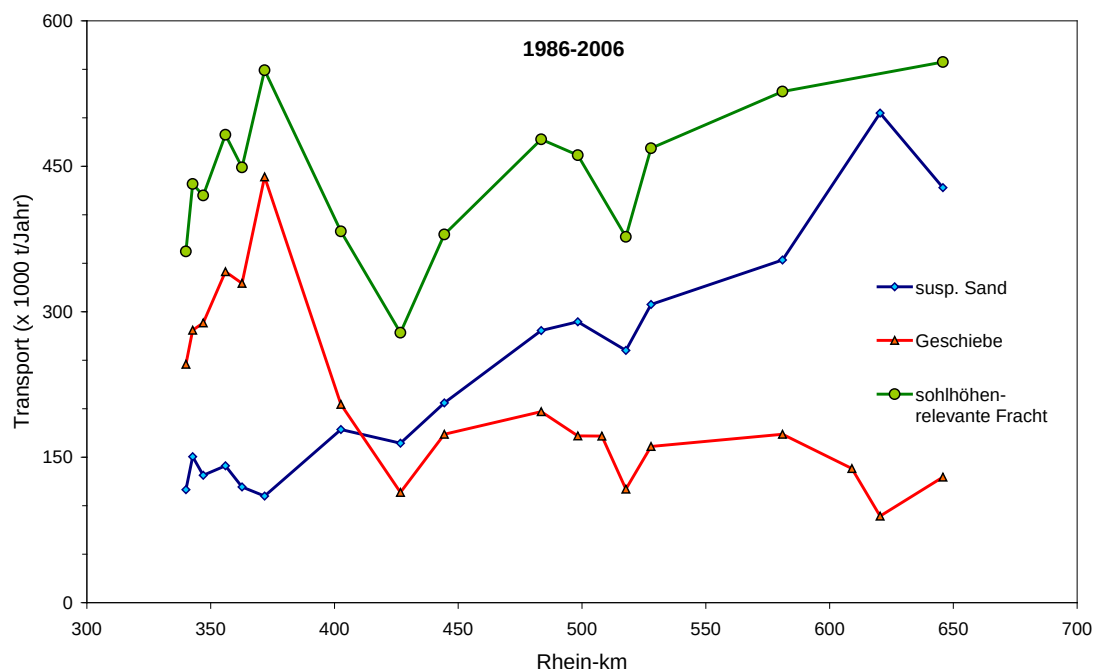


Abb. 36: Längsschnitt der Frachtbilanzierung anhand der Feststofftransportmessungen für den Bilanzierungszeitraum 1986 bis 2006. Dargestellt sind die Frachten von Geschiebe und suspendiertem Sand sowie deren Summe, die sohlhöhenrelevante Fracht.

Für beide Zeiträume ist festzustellen, dass der Anteil des Geschiebetransports in Längsrichtung, von lokalen Schwankungen abgesehen, abnimmt, der Anteil des suspendierten Sandtransports hingegen stark zunimmt.

Die sohlhöhenrelevante Fracht wurde für den Bilanzierungszeitraum 1996 bis 2006 auch fraktionsweise für die Komponenten Sand (suspendiert und als Geschiebe), Feinkies und Grobkies ausgewertet. Dazu wurden für die Fraktionen jeweils eigene Transport-Abfluss-Beziehungen aufgestellt. Der sich ergebende Längsschnitt ist in Abb. 37 dargestellt. Da nur die Frachten der Messstellen, an denen für alle vier Komponenten jeweils gesicherte Frachten ermittelt werden konnten (vgl. Kapitel 4.3.1), dargestellt sind, ergibt sich stellenweise ein geringfügig von der nicht-fraktionierten Bilanzierung abweichender Kurvenverlauf (vgl. Abb. 35).

In der fraktionierten Frachtbilanzierung ist zu erkennen, dass die Grobkiesfraktion, die am oberen Rand der Untersuchungsstrecke (Messstelle Plittersdorf, Rhein-km 343) noch ca. 50 % der Geschiebefracht ausmacht, entlang der Transportstrecke deutlich abnimmt und im Bereich der Neckarmündung (Rhein-km 428) bereits nicht mehr im Geschiebe anzutreffen ist. Die Feinkiesanteile schwanken entlang der Untersuchungsstrecke und erreichen an den Messstellen Plittersdorf und Leimersheim (Rhein-km 343 und 372) lokale Maxima. Erst unterhalb der Untersuchungsstrecke nehmen die Feinkiesanteile kontinuierlich ab. Der Sandtransport nimmt entlang der Bilanzierungsstrecke kontinuierlich zu. Dabei fällt auf, dass die Sandfraktion zunächst nahezu vollständig in Suspension transportiert wird. Erst ab

Worms (Rhein-km 444) werden auch nennenswerte Sandanteile im Geschiebetransport gemessen. Unterhalb des Rheingaus nehmen die Sandanteile im Geschiebe wieder zugunsten des suspendierten Sandtransports ab.

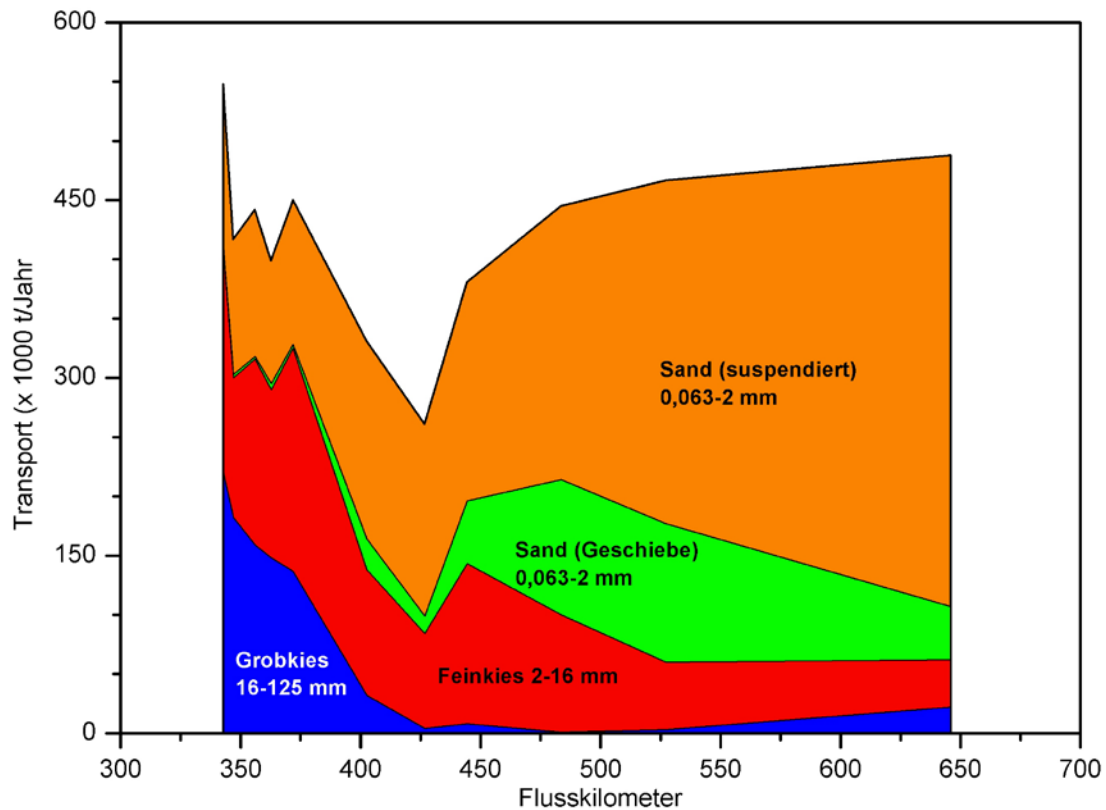


Abb. 37: Längsschnitt der fraktionierten Frachtbilanzierung anhand der Feststofftransportmessungen für den Bilanzierungszeitraum 1996 bis 2006.

5.3.2 Bilanzierung anhand der Sohlhöhenentwicklung

In Abb. 38 ist das Ergebnis der Frachtbilanzierung anhand der Sohlhöhenentwicklung für den Bilanzierungszeitraum 1996 bis 2006 dargestellt. Darin sind die Einzelbeiträge (vgl. Kapitel 5.2)

- Sohlentwicklung ($\Delta z \cdot b \cdot l \cdot \rho$),
- Geschiebezugabe, Baggerungen und Verklappungen,
- Eintrag von oberstrom und aus Nebengewässern,
- Vorlandsedimentation,
- Abrieb

sowie die sich daraus ergebende Summe der Transportbilanzierung dargestellt. Zur Interpretation: Aus der Differenz der Sohlhöhen der Jahre 1996 und 2006 ergibt sich die violette Linie. Steigende Abschnitte zeigen dabei Bereiche mit Erosion (Zunahme des Transports in Fließrichtung), fallende Abschnitte entsprechen einer Abnahme des Transport und somit Deposition. Für die Bilanzierung des Transports müssen noch die bekannten Mengen der Geschiebezugabe (positiv), Baggerungen (negativ) und Verklappungen (positiv) berücksichtigt werden. Weiterhin sind die Einträge von oberstrom und aus Nebengewässern (vernachlässigt,

siehe Kapitel 5.2) hinzuzuaddieren. Die Ansätze für Vorlandsedimentation und Abrieb verringern hingegen den Transport. Die Summe aller Terme ergibt die blaue Linie in Abb. 38.

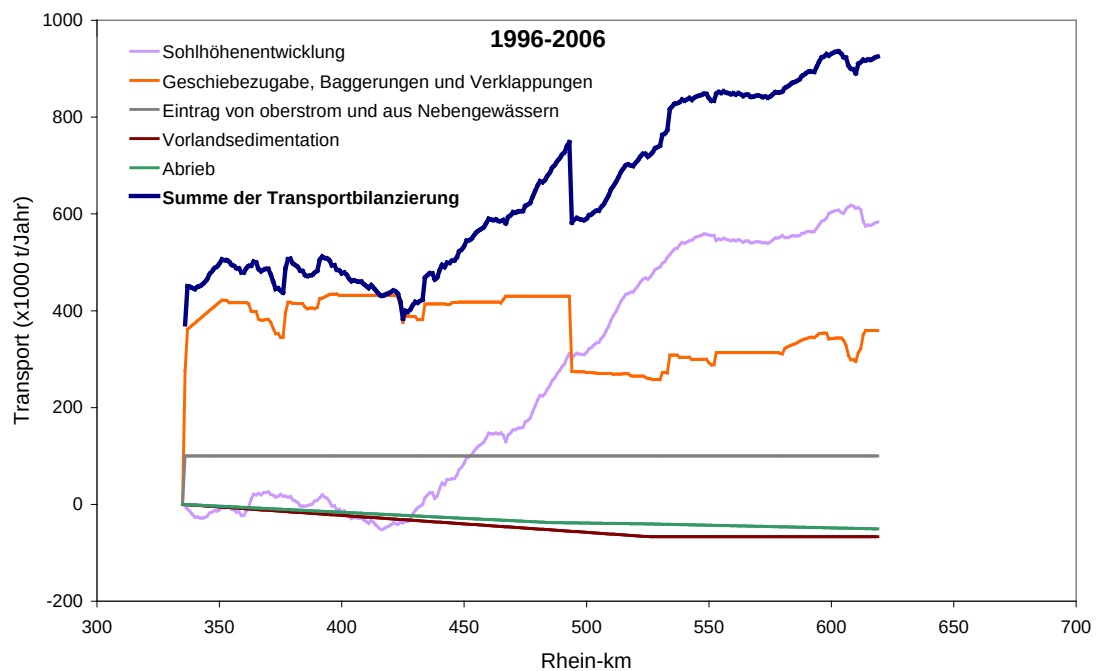


Abb. 38: Längsschnitt der Frachtbilanzierung anhand der Sohlhöhenentwicklung für den Bilanzierungszeitraum 1996 bis 2006. Dargestellt sind die Einzelbeiträge und die Summe der Bilanzierung.

Analog erfolgt in Abb. 39 die Darstellung für den Bilanzierungszeitraum 1986 bis 2006. Die Summe der Feststofftransportbilanzierung unterscheidet sich im Untersuchungsgebiet bis Mainz vom vorhergehenden 10-Jahres-Zeitraum infolge der geringeren mittleren jährlichen Sohlhöhendifferenzen sowie der etwas geringeren Mengen aus Geschiebezugabe, Baggerungen und Verklappungen.

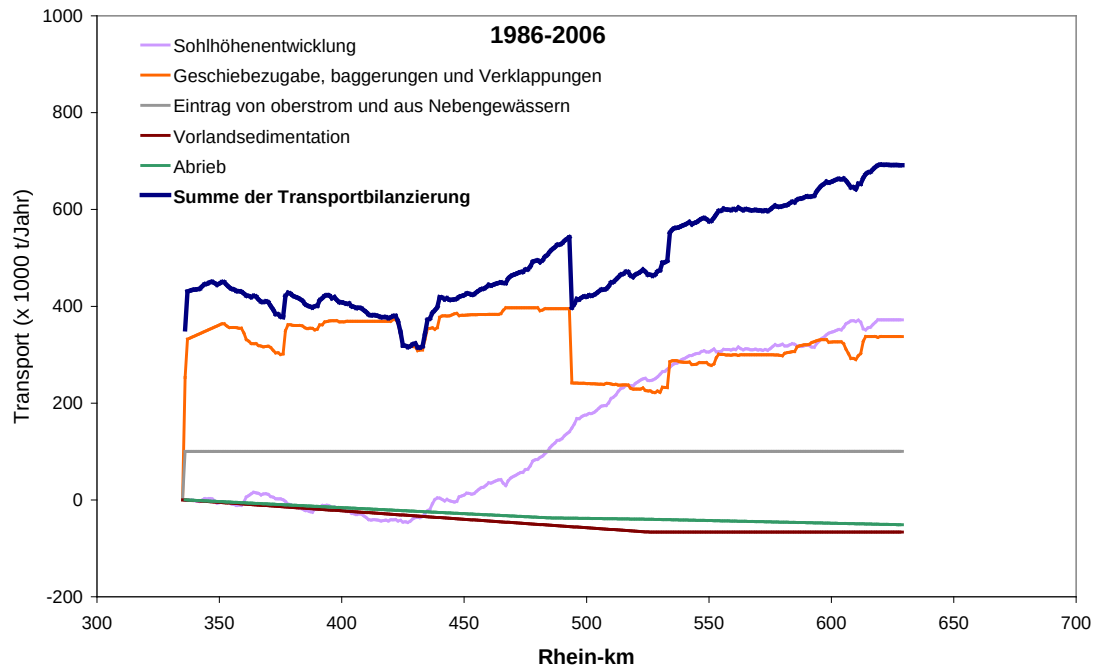


Abb. 39: Längsschnitt der Frachtbilanzierung anhand der Sohlhöhenentwicklung für den Bilanzierungszeitraum 1986 bis 2006. Dargestellt sind die Einzelbeiträge und die Summe der Bilanzierung.

5.3.3 Vergleich der Bilanzierungen

Beide Methoden der Feststofftransportbilanzierung – anhand der Feststofftransportmessungen und der Sohlhöhenentwicklung – sind voneinander unabhängig. Die zugrunde liegenden Daten weisen gewisse Unsicherheiten auf, die in Kapitel 6 diskutiert werden. Der Vergleich der Resultate kann Hinweise über die Vertrauenswürdigkeit der jeweiligen Ergebnisse liefern.

In Abb. 40 sind die Resultate der Transportbilanzierung für den Zeitraum 1996 bis 2006 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich ab etwa Rhein-km 375 eine zunehmende Differenz zwischen den Bilanzierungen beider Methoden ergibt. Bei Mainz (Rhein-km 494) erreicht die Differenz ca. 1/3 der Bilanzmenge aus der Sohlhöhenentwicklung. Für den Zeitraum 1986 bis 2006 ergibt sich eine deutlich höhere Übereinstimmung (Abb. 41). Während die Bilanzmengen bei Mainz annähernd übereinstimmen, liegen die Feststofftransportmessungen am Ende der Bilanzierungsstrecke im Bereich Königswinter (Rhein-km 646) um ca. 20 % unter der Bilanzmenge aus der Sohlhöhenentwicklung.

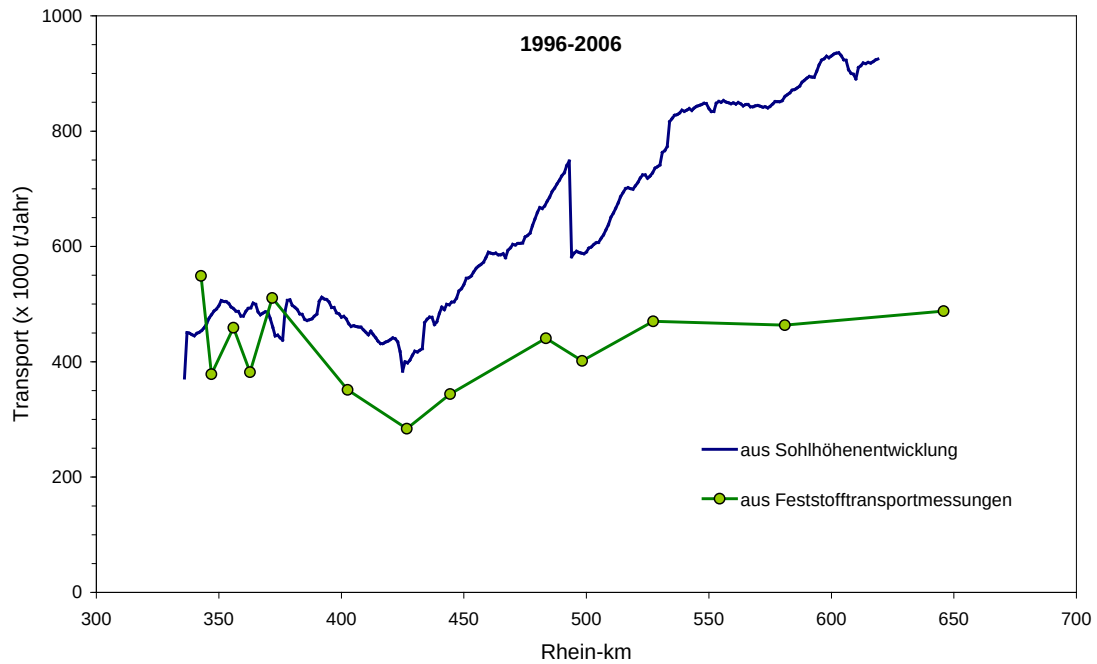


Abb. 40: Vergleich der Bilanzierung aus Sohlhöhenentwicklung und Feststofftransportmessungen für den Bilanzierungszeitraum 1996 bis 2006.

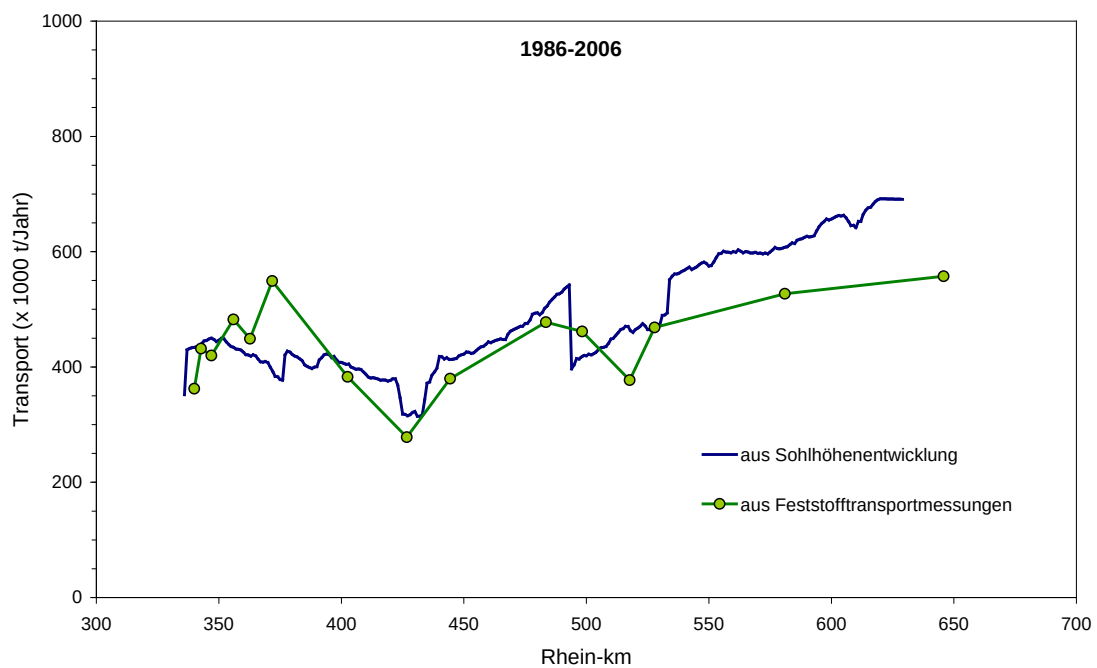


Abb. 41: Vergleich der Bilanzierung aus Sohlhöhenentwicklung und Feststofftransportmessungen für den Bilanzierungszeitraum 1986 bis 2006.

Die erreichte Übereinstimmung der Bilanzierung für den längeren Zeitraum (1986 bis 2006) ist somit höher als für den Zeitraum 1996 bis 2006. Die grundsätzlichen Fehlereinflüsse auf die Resultate der verwendeten Methoden werden in Kapitel 6 diskutiert. Eine Beurteilung der Ergebnisse findet im abschließenden Kapitel 8 statt.

5.4 Vergleich der mittleren Sohlhöhen mit Wasserspiegellagen

Im folgenden Abschnitt wird die beobachtete Entwicklung der Wasserspiegellagen (Kapitel 2.2) der Entwicklung der Sohlagen (Kapitel 4.1) gegenübergestellt. Theoretisch folgt, insbesondere für niedrige Abflüsse, die zeitliche Entwicklung von Wasserspiegellagen bei gleichem Abfluss der Sohlentwicklung. In natürlichen Fließgewässern verhindern jedoch mehrere Effekte einen völligen Gleichlauf. So kann bei lokalen Kolken der Wasserspiegel dennoch stabil sein, oder aufgrund gestiegener Gerinnerauheit sogar ansteigen. Außerdem können die Auswirkungen von Baumaßnahmen lokal gegenläufige Auswirkungen auf die Sohlage und den Wasserspiegel zeigen. Über eine größere Flussstrecke kann die vergleichende Betrachtung der Sohl- und Wasserspiegelentwicklung jedoch zur gegenseitigen Prüfung der Auswertungen herangezogen werden.

Zwischen Iffezheim und Mainz zeigt die vergleichende Darstellung von Sohlhöhenänderungen und der Entwicklung der Wasserspiegelfixierungen weite Bereiche mit qualitativer Übereinstimmung. Da die Wasserspiegelfixierungen nicht zu den gleichen Zeitpunkten vorliegen wie die Sohlaufnahmen und außerdem eine zeitliche Mittelung erfordern (vgl. Kapitel 2.2), stimmen die Vergleichszeiträume nicht völlig überein. Es wurde jedoch angestrebt, möglichst ähnliche zeitliche Epochen zu vergleichen. Der maximal zur Verfügung stehende Vergleichszeitraum ist in Abb. 42 abgebildet. Hier wird die Entwicklung der Wasserspiegel- und Sohlagen seit etwa Anfang der 90er Jahre (Wasserspiegelfixierungen aus 1978 bis 1996 und Sohlhöhen aus der Peilung 1992) im Vergleich mit dem Zustand um 2006 (Wasserspiegelfixierungen aus 2005 bis 2008, Sohlhöhen aus 2006) dargestellt.

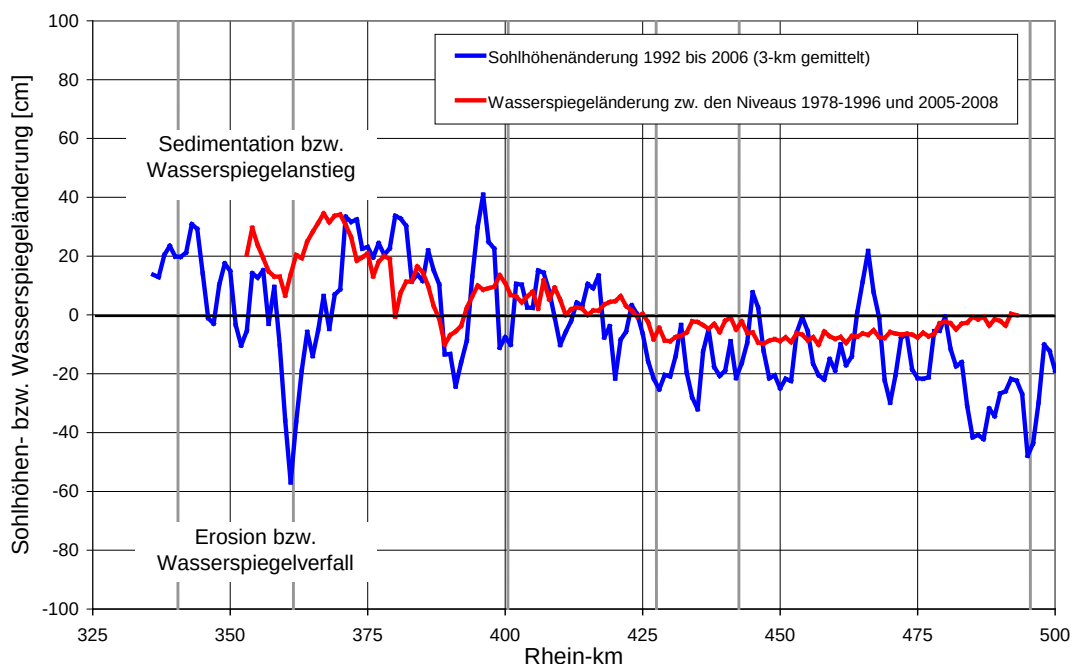


Abb. 42: Vergleich der Sohl- und Wasserspiegelentwicklung im langen Vergleichszeitraum (Epoche Anfang der 90er Jahre im Vergleich mit der Epoche 2005 bis 2008).

Tendenziell ist aus Abb. 42 abzulesen, dass der Bereich zwischen Neckarmündung (Rhein-km 428) und Mainz durch Erosion bzw. Wasserspiegelverfall gekennzeichnet ist, während im oberstrom liegenden Bereich die Sohlhöhenänderungen stark um die Nulllinie schwanken. Während sich die markante Sohleneintiefung bei Rhein-km 389 auch im Wasserspiegelverlauf wiederfindet, trifft dies auf den Bereich Maxau (Rhein-km 362) nicht zu. Hier ist an den Einfluss von lokalen Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen zu denken. So war beispielsweise der Bereich Maxau bis in die 90er Jahre durch Sohlenaufhöhungen gekennzeichnet, die mit entsprechenden Wasserspiegelanhebungen einhergingen. Erst durch die Nachregelungen Mitte der 90er Jahre und den damit verbundenen Baggerungen dürfte sich dort die tiefere Sohlenlage und die Absenkung bzw. Stabilisierung des Wasserspiegels eingestellt haben.

Für einen kürzeren Zeitraum wird die Übereinstimmung der Sohl- und Wasserspiegellagenentwicklung geringer. Abb. 43 ist als ergänzende Darstellung für einen kürzeren Vergleichszeitraum (Epoche Mitte der 90er Jahre im Vergleich mit der Epoche 2006 bzw. 2005-2008) gegeben.

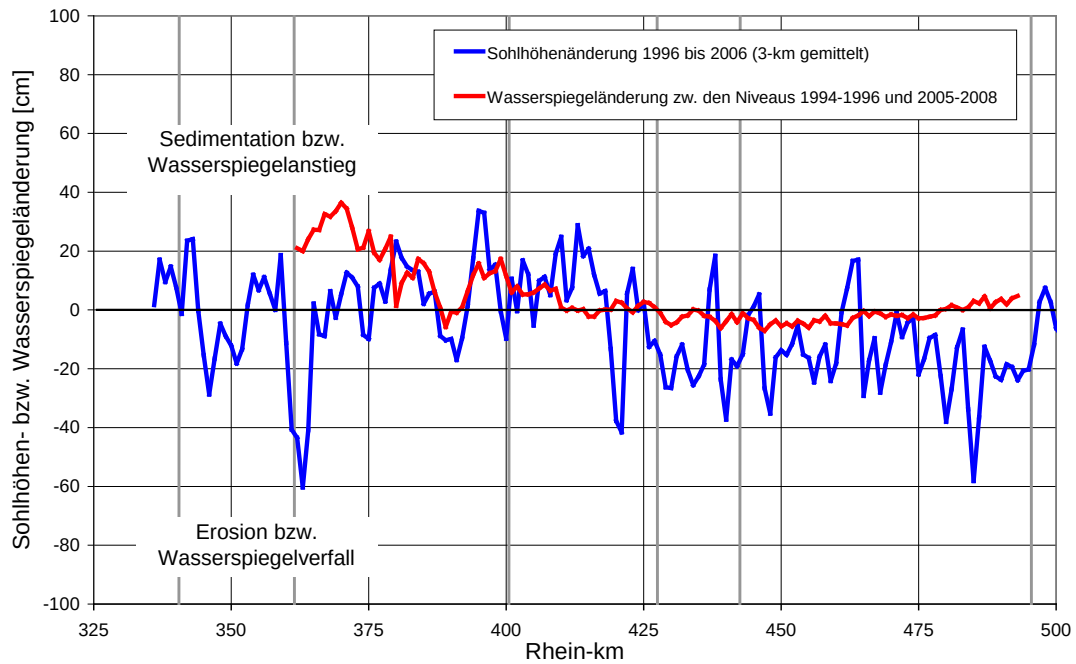


Abb. 43: Vergleich der Sohl- und Wasserspiegelentwicklung im kürzeren Vergleichszeitraum (Epoche Anfang der 90er Jahre im Vergleich mit der Epoche 2005 bis 2008)

Zusammenfassend deutet der Vergleich der Wasserspiegellagenentwicklung mit Auswertungen zur Sohlhöhenentwicklung darauf hin, dass Zusammenhänge zwischen großräumigen Sohlveränderungen und Tendenzen für die Wasserspiegellagen anhand der entwickelten Methodik besser nachvollzogen werden können als bisher auf Grundlage von GlW-Berechnungen. Durch die mögliche Abstimmung ihrer zeitlichen und räumlichen (hohen) Messdaten-Auflösung kann die vergleichende Auswertung von Wasserspiegelfixierungen und Sohlpeilungen zukünftig weiter optimiert werden.

6. Diskussion der Unsicherheiten

Die Erfassung hydrologischer, sedimentologischer und morphologischer Daten ist aufgrund der hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität eine komplexe Aufgabe. Dadurch, dass ein Großteil der Prozesse nicht direkt sichtbar unter Wasser stattfindet, wird die Schwierigkeit nochmals erhöht. Unstimmigkeiten der Messwerte können im allgemeinen erst nach intensiver Auswertung und dem Vergleich mit dem Datenbestand identifiziert werden. Eine Wiederholung der Messungen ist wegen der zeitlichen Veränderlichkeit des Fließgewässers ausgeschlossen. Durch jahrzehntelange methodische Erfahrungen und die Hinzunahme neuer Technologien wie z. B. GPS, ADCP etc. gelingt es an den Bundeswasserstrassen, so auch am Rhein, eine vergleichsweise hohe Datenqualität zu erreichen. Dennoch weisen alle erfassten und in diesem Bericht dargestellten Parameter Messfehler und methodische Unsicherheiten auf. Diese sollen im Folgenden diskutiert werden.

Insbesondere die hier aufgestellten Sedimentbilanzen auf Grundlage von Transportmessungen zeigen teilweise eine Restunsicherheit, die nicht vollständig eliminiert werden kann. Durch die vergleichende Darstellung der Resultate zweier unabhängiger Methoden wird jedoch eine Aussage zur Zuverlässigkeit der Sedimentbilanzen möglich. Durch den Vergleich der Sohlhöhenentwicklung mit der Wasserspiegellagenentwicklung können die Auswertungen zusätzlich abgesichert werden.

Die Ergebnisse der numerischen Simulationen weichen teilweise deutlich von den beobachteten Naturmesswerten ab. Auch nach sorgfältiger Kalibrierung innerhalb des physikalisch begründeten Parameterfeldes bleiben Streckenabschnitte mit geringer Übereinstimmung bestehen. Diese sind prinzipiell auf Modellvereinfachungen und Unsicherheiten der Naturdaten (inklusive anthropogener Beeinflussungen) zurückzuführen.

6.1 Unsicherheiten der topografischen Daten

Die der Auswertung der Sohlagenentwicklung zugrunde liegenden mittleren Sohlhöhen sind durch Linienpeilungen gewonnen worden. Dazu wird die Flusssohle während Querfahrten in regelmäßigen Distanzen per Echolot vermessen. Die Einzelmesswerte weisen dabei einen nicht unerheblichen stochastischen Messfehler auf. Dieser kann jedoch als Gauß-verteilt betrachtet werden, wodurch die positiven und negativen Fehler in der Vielzahl der Messwerte zu Null werden.

Systematische Fehler hingegen weisen bei jeder Messkampagne ein jeweils positives oder negatives Vorzeichen auf. Sie mitteln sich daher nicht aus, sondern verfälschen die Ergebnisse einzelner Messfahrten, Messkampagnen oder gar Messsysteme. Trotz sorgfältiger Durch-

führung sind solche Fehler aufgrund der Komplexität der Mess- und Auswertesysteme und die dadurch große Anzahl möglicher Fehlerquellen nicht völlig ausgeschlossen.

Systematische Fehlerquellen bei der Erfassung der Topografie sind im Einzelnen:

Wechsel der Höhenreferenzsysteme

Infolge des Wechsels der Höhenreferenzsysteme sind in den Daten lokale Höhenfehler bis zu ca. 2,5 cm identifiziert worden (BfG, 2009b). Diese systematischen Fehler wurden in der Datengrundlage rechnerisch korrigiert und können somit als behoben angesehen werden.

Einführung satellitenbasierter Messungen (GPS)

Die vor Einführung der GPS-Messungen erhobenen Topografiedaten können möglicherweise durch ungenügende Korrektur der Schiffsdynamik (Squat) fehlerbehaftet sein. Eine Rekonstruktion des Fehlers ist nicht möglich. Vergleichende Messungen in den Niederlanden haben jedoch ein hohes mögliches Fehlerpotenzial erkennen lassen (Storm et al., 1993). Es gibt keinen Anhaltspunkt dafür, dass ein solcher Fehler auch im Untersuchungsgebiet und – zeitraum vorliegt. Jedoch stimmt die Periode der größten Sohlhöhenänderungen streckenweise mit dem Zeitpunkt der Einführung der GPS-Messungen überein.

Fehlerhafte Kalibrierung der Echolotsysteme

Die Analyse der Peildaten in den Teilstrecken der einzelnen Außenbezirke (ABZ) lieferte Hinweise auf existierende systematische Fehler von Messkampagnen. Infolgedessen wurden die im Jahr 2006 erfassten Daten im ABZ Speyer und die Daten aus 2004 im ABZ Karlsruhe um 15 cm entsprechend der in der „Arbeitsgruppe Optimierung Oberrhein“ getroffenen Festlegungen korrigiert. Es wird vermutet, dass die Abweichungen durch eine fehlerhafte Kalibrierung begründet sind. Die Existenz weiterer systematischer Fehler dieser Art, insbesondere falls diese betragsmäßig kleiner wären, kann trotz sorgfältiger Prüfung der Daten nicht ausgeschlossen werden.

Fehlerhafte Extrapolation aus der Fahrrinne in Randbereiche

Für die Sedimentbilanz wurden die in der Fahrrinne gemessenen Sohlhöhenänderungen linear bis zum Ufer extrapoliert, wo sie zu Null angenommen wurden. Diese Annahme muss aufgrund fehlender Peilungen außerhalb der Fahrrinne als bestmögliche Schätzung akzeptiert werden. Es wird empfohlen, diese mögliche Fehlerquelle zukünftig durch zusätzliche Peilungen in Seitenbereichen zu eliminieren.

Fehlerhafte Umrechnung von Volumen in Massen

Die Umrechnung von gemessenen Volumenänderung in Massen erfolgt unter Annahme einer Korndichte von 2,65 g/cm³. Detaillierte Porositätsmessungen lieferten die Datenbasis für eine streckenweise variierende Porositätsberechnung, die im Mittel $n = 0,25$ ergibt. Die Parameter werden als zuverlässig eingeschätzt und beinhalten ein vernachlässigbares Fehlerpotenzial.

Fehlerhafte Zeitzuweisung der Peilungen

Teilweise wurden die genauen Messzeitpunkte der Peilungen nicht festgehalten. Für diese Peilungen wurde der Zeitpunkt bestmöglich geschätzt. Der mögliche Fehlereinfluss infolgedessen wird als gering eingeschätzt.

Datenlücken

In der Peilung von 1996 sind teilweise Lücken enthalten, die durch Interpolation der umliegenden Daten geschlossen wurden. Diese beliefen sich auf insgesamt 8 % der Strecke. Durch Vergleich mit Datenauswertungen der BAW, die keine Lücken enthalten, wurde festgestellt, dass durch die Interpolation ein vernachlässigbar geringer Fehler entsteht.

Die vorgenannte Analyse möglicher Fehlerquellen der Topografie erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass weitere mögliche systematische Fehler in der Datenbasis enthalten sind.

6.2 Unsicherheiten der Daten zu Zugaben, Baggerungen und Verklappungen

Die vorliegenden Daten zu Zugaben, Baggerungen und Verklappungen könnten ebenfalls Fehler enthalten. Insbesondere ist nicht ausgeschlossen, dass Baggerungen teilweise undokumentiert durchgeführt wurden. Der Vergleich der Sohlentwicklung zwischen numerischem Modell und Naturdaten lässt vermuten, dass insbesondere im Bereich von Rhein-km 425-428 noch undokumentierte Entnahmen oder Baumaßnahmen stattgefunden haben könnten.

6.3 Unsicherheiten des Sedimenteintrags aus Nebengewässern

Wegen der teilweise großen Entfernung der Messstellen an Nebengewässern von deren Mündung in den Rhein sowie der weniger umfangreichen Messprogramme in Nebengewässern sind die Einträge als unsicher zu bezeichnen. Der Einfluss des Messfehlers auf die Gesamtsedimentbilanz des Rheins wird dennoch als von untergeordneter Bedeutung angenommen, insbesondere, da die wesentlichen Zuflüsse sämtlich durch Stauregulierung und entsprechenden Sedimentrückhalt geprägt sind.

6.4 Unsicherheiten der Sedimentsenken

Die Sedimentbilanzierung legt nahe, dass Sedimentsenken bisher nicht oder nur ungenügend in der Bilanzierung berücksichtigt werden.

Vorlandsedimentation

Der in der Bilanzierung berücksichtigte Wert für die Vorlandsedimentation von 350 t Sand je Kilometer wird als sehr unsicher angesehen, da er auf nur zwei Messwerten beruht. Der Vergleich mit Messwerten am Niederrhein lässt jedoch vermuten, dass die Größenordnung der Annahme realistisch ist. Der Anteil der angenommenen Vorlandsedimentation an der Ge-

samtsedimentbilanz beträgt je nach Analysezeitraum nur 7 bis 10 %. Wegen dieses vergleichsweise geringen Beitrags ist der mögliche Fehlereinfluss zu vernachlässigen.

Buhnenfelder

Buhnenfelder werden in der Sedimentbilanz nicht explizit berücksichtigt. Es wird angenommen, dass sich die Sohlhöhenänderungen der Fahrrinne analog zu den Bereichen außerhalb der Buhnenfelder linear zum Ufer extrapolieren lassen, wo die Änderung zu Null angenommen werden. Denkbar ist, dass Buhnenfelder als Zwischenspeicher von Sediment dienen, in welche insbesondere durch Hochwässer ein Eintrag stattfindet, der erst allmählich und eventuell unvollständig wieder in den Hauptstrom ausgetragen wird. Solche Beobachtungen liegen an anderen Flüssen, z. B. dem Niederrhein bzw. in den Niederlanden, vor. Da die Buhnen im Untersuchungsgebiet überwiegend jedoch schon sehr lange existieren ist anzunehmen, dass sich ein Gleichgewicht zwischen Ein- und Austrag bereits eingestellt hat. Da weiterhin nur etwa 30 % der Fließstrecke ein- oder beidseitige Buhnen aufweisen, wird der mögliche Fehlereinfluss für die Sedimentbilanz als gering angesehen.

Nebenarme

Daten über die Sohlhöhenänderungen in Seiten- und Nebenarmen liegen überwiegend nicht vor. Es ist zu vermuten, dass es teilweise zu Sedimentation in diesen Bereichen kommt, die in der bisherigen Sedimentbilanz nicht enthalten ist. Da die Anzahl von Nebenarmen jedoch gering ist, wird der mögliche Fehlereinfluss als gering angesehen.

Abrieb

Die Geschiebefracht verliert durch Abrieb ständig an Masse. Die Abriebrate wird aus Laborversuchen abgeleitet und kann als relativ sicher angesehen werden. Die durch Abrieb entstehenden Partikel werden entweder als Sandfracht weitertransportiert oder gehen in Suspension über, wenn die Partikelgrößen entsprechend klein sind. Mit den hier angesetzten Abriebraten ergeben sich lediglich Beiträge des Abriebs zur Sedimentbilanz. Lediglich eine um Größenordnungen falsche Abriebrate würde einen merklichen Effekt auf die Bilanz haben. Der mögliche Fehlereinfluss kann daher als gering angesehen werden.

6.5 Unsicherheiten des Geschiebetransports

Die Messung des Geschiebetransport ist eine anspruchsvolle technische Aufgabe. Mögliche Unsicherheiten ergeben sich durch stochastische und systematische Fehlerquellen.

Der Geschiebetransport ist ein räumlich und zeitlich variabler, stochastischer Prozess. Einzelmessungen können daher nicht als repräsentativ für die Transportrate unter den jeweils aktuellen Bedingungen angesehen werden. Auch durch die mehrmalige Wiederholung der Punktmessungen und die Integration des Transports aus mehreren Punktmessungen innerhalb eines Messprofils werden gewisse hydraulische und sedimentologische Effekte (z. B. Hystereseeffekte) nicht vollständig eliminiert. Dies zeigt sich letztlich in der Streuung der einzelnen Messwerte um die abgeleiteten Transport-Abfluss-Beziehungen. Aufgrund der vielfachen Wiederholung der Messungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten kann jedoch davon ausge-

gangen werden, dass stochastische Effekte einen vernachlässigbaren Einfluss auf die abgeleiteten Transportraten haben.

Jedoch sind systematische Fehlerquellen der Transportmessungen möglich:

Fehlerhafte Positionierung des Geschiebefängers

Trotz der Ausrüstung des BfG-Geschiebefängers mit einer Kamera zur Kontrolle kann nicht ausgeschlossen werden, dass der Fänger aufgrund fehlerhafter Positionierung den tatsächlichen Transport unterschätzt. Dies ist jedoch nur wahrscheinlich, wenn hoher Transport mit ungenügender Sicht herrscht und weiterhin die Sohle durch Unebenheiten gekennzeichnet ist. Eine systematische Unterschätzung der Transportraten bei hohen Abflüssen kann daher nicht ausgeschlossen werden.

Ungenügende hydraulische Effektivität des Geschiebefängers

Da der Fänger aufgrund des eigenen Strömungswiderstandes im Einlaufbereich eine geringere Fließgeschwindigkeit als die umgebende Strömung aufweist, wird der gemessene Transport systematisch unterschätzt. Dieser Effekt wird jedoch durch einen in Laborversuchen ermittelten Korrekturfaktor berücksichtigt. Ein systematischer Restfehler kann nicht ausgeschlossen werden, der mögliche Einfluss wird jedoch als gering angesehen.

Ungenügende sedimentologische Effektivität des Geschiebefängers

Die sedimentologische Effektivität gibt an, wie viel des in den Geschiebefängers eingetragenen Materials tatsächlich gefangen wird. Maßgeblichen Einfluss darauf hat die Maschenweite des Fangkorbs. Eine kleine Maschenweite verringert die hydraulische Effektivität, Geschiebe wird durch den Stau um den Fänger herum transportiert. Größere Maschenweiten beinhalten die Wahrscheinlichkeit, dass Feinkorn durch die Maschen hindurchtransportiert wird, mit zunehmender Füllung des Korbes nimmt dieser Effekt jedoch ab. Aufgrund der positiven Erfahrungen wird seit einigen Jahren im Untersuchungsgebiet ein Geschiebefangkorb mit 1,4 mm Maschenweite eingesetzt. Messungen vor 1996 wurden mit einer Maschenweite von 1,0 mm durchgeführt. Um 2002 wurden auch einzelne Messungen mit 0,5 mm Maschenweite durchgeführt. Vergleichsmessungen mit anderen, für feinere Korngrößen entwickelten, Geschiebefängern zeigen, dass der im Untersuchungsgebiet eingesetzte Geschiebefänger bei geringem Abfluss den Transport unterschätzt. Auch der Vergleich der Transportmessungen bei Nierstein mit der Menge des aus dem Geschiebefang Weisenau gebaggerten Material lässt vermuten, dass der Sandtransport unterschätzt wird (in diesem Fall um ca. 47 %). Es ist weiterhin zu vermuten, dass ein Teil der Feinfraktionen beim Bergen des Fängers verloren geht. Der Einfluss der sedimentologischen Effektivität wird daher als nicht unerheblich für die Sedimentbilanzierung eingeschätzt. Eine Quantifizierung des möglichen Fehlers sowie mögliche Kalibrierungswerte sollten in weiteren Natur- und Laborversuchen angestrebt werden.

Fehlerhafte Integration des Transports über die Breite

Die Integration der Transportmenge aus den Einzelmessungen über die Gewässerbreite erfolgt in der Datenbank SedDB. Es ist möglich, dass zwischen den Einzelmessungen noch höhere, nicht gemessene Transportraten auftraten, wodurch die Integration eine systematische

Unterschätzung ergäbe. Aufgrund der Vielzahl der Messpunkte (überwiegend 5 bis 10) und des meist visuell plausiblen Verlaufs der Transportrate über die Breite wird der mögliche Fehlereinfluss als gering eingeschätzt.

Fehlerhafte Transport-Abfluss-Beziehungen

Die Korrelation des Geschiebetransport mit dem Abfluss ist theoretisch nicht zwingend eindeutig. Besser begründet wäre eine Korrelation mit der Schubspannung, welche jedoch nicht direkt gemessen werden kann. Unter den möglichen Korrelationen wurde die Potenzfunktion ausgewählt, da sich damit im Vergleich zu anderen Funktionen die höchsten Korrelationskoeffizienten ergeben. Die Regressionsanalyse reagiert jedoch besonders stark auf einzelne Werte im hohen Abflussbereich, in dem die Datendichte naturgemäß am geringsten ist. Eine weitere Verbesserung der Korrelation ließe sich durch die Verwendung von abflussbereichsweise gültigen Transportfunktionen erreichen. Hierfür liegen noch keine Erfahrungen im Untersuchungsgebiet vor, weswegen hier weiterer Forschungsbedarf gesehen wird. Der mögliche Fehlereinfluss auf die Sedimentbilanzierung aufgrund der Unsicherheiten in den Transport-Abfluss-Beziehungen wird als nicht unerheblich eingeschätzt.

Ferguson-Korrektur

Ferguson (1986) zeigt, dass auf Potenzfunktionen beruhende Transport-Abfluss-Beziehungen zu einer systematischen Unterschätzung von Jahresfrachten führen. Der dafür vorgeschlagene Korrekturfaktor ist eine Funktion der Standardabweichung der Messwerte von der Transport-Abfluss-Funktion. Es kann davon ausgegangen werden, dass mit dieser Korrektur die genannte systematische Unterschätzung behoben wird und somit ein unerheblicher möglicher Fehlereinfluss verbleibt.

Repräsentativität der Transport-Abfluss-Beziehungen

Transport-Abfluss-Beziehungen sind nur für gewisse Zeiträume gültig, in denen die maßgeblichen Einflussgrößen Sohlgefälle, Profilform sowie Sedimentzusammensetzung und -eintrag als annähernd konstant angesehen werden können. Die ermittelten Transport-Abfluss-Beziehungen für die beiden Untersuchungszeiträume weisen teilweise deutliche Unterschiede voneinander auf, was auf Änderungen der genannten Einflussgrößen rückschließen lässt. Es ist fraglich, ob die Parameter innerhalb der Untersuchungszeiträume hinreichend konstant waren. Insbesondere für den Zeitraum 1996 bis 2006 kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine Unterteilung in Teilzeiträume zu einer Verbesserung der Bilanzierung führen würde. Die zur Verfügung stehenden Transportmessungen fallen jedoch überwiegend in den Zeitraum 2000 bis 2006, wohingegen die deutlichsten Sohlhöhenänderungen zwischen 1996 und 2002 stattgefunden haben. Die Bilanzierung der Teilzeiträume wäre aufgrund der geringen Datendichte in der ersten Hälfte des Zeitraums eher unsicher. Der mögliche Fehlereinfluss aufgrund der eventuell nicht gegebenen Repräsentativität der Transport-Abfluss-Beziehung, insbesondere für das relativ nasse Jahr 1999, wird daher als eher hoch eingeschätzt. Eine möglicherweise steilere Transport-Abfluss-Abziehung in diesem Zeitraum, die jedoch aufgrund nicht vorhandener Messungen nicht aufgestellt werden kann, würde die Transportbilanzen deutlich beeinflussen.

6.6 Unsicherheiten des suspendierten Sandtransports

Systematische Unsicherheiten

Die Suspensionsfracht lässt sich prinzipiell einfacher und genauer als die Geschiebefracht bestimmen. Der mögliche Fehlereinfluss auf die Transportbilanzen ist dennoch von Bedeutung.

Fehlerhafte Integration des Transports über die Breite und Tiefe

Die Integration der Suspensionsfracht aus Punkt- und Vollprofilmessungen erfolgt in der Datenbank SedDB. Manuelle Überprüfung zeigte keinen systematischen Fehler. Ein Vergleich der Frachten aus Vollprofilmessungen mit den in Punktmessungen ermittelten Frachten deutet auf eine mögliche systematische Unterschätzung der Frachten hin. Dies sollte Gegenstand vertiefter Untersuchungen werden.

Fehlerhafte Transport-Abfluss-Beziehungen

Suspensionsfrachten sind ebenso wie Geschiebefrachten nicht direkt mit dem Abfluss korreliert. Dennoch ist es Stand der wissenschaftlichen Praxis, solche Korrelationen, z. B. mit Potenzfunktionen, aufzustellen. Für den Rhein ergeben Potenzfunktionen im Vergleich zu anderen möglichen Funktionstypen die höchsten Korrelationskoeffizienten. Eine Überprüfung der Berechnung von Frachten aus den abgeleiteten Transport-Abfluss-Beziehungen mit den gemessenen Frachten ergab jedoch, dass sich für hohe Abflüsse eine Unterschätzung der Suspensionsfracht ergibt. Die Größe der Unterschätzung kann derzeit nicht quantifiziert werden, da die Anzahl der Messungen bei hohen Abflüssen dafür zu gering ist. Der mögliche Fehlereinfluss auf die Sedimentbilanzierung aufgrund der Unsicherheiten in den Transport-Abfluss-Beziehungen für den Suspensionstransport wird als nicht unerheblich eingeschätzt.

Fehlerhafte Ferguson-Korrektur

Analog der Betrachtung zu den Unsicherheit bezüglich des Geschiebetransports (Kapitel 6.5) wird der durchgeführten Ferguson-Korrektur ein unerheblicher möglicher Fehlereinfluss beigemessen.

Repräsentativität der Transport-Abfluss-Beziehungen

Ebenso wie für den Geschiebetransport sind Transport-Abfluss-Beziehungen der Suspensionsfracht nur für einen begrenzten Zeitraum gültig, in welchem die wesentlichen Randbedingungen vergleichbar sind. Insbesondere die Verfügbarkeit von Sand hat einen hohen Einfluss auf den Betrag der Suspensionsfracht. Für den Rhein ist dies besonders gültig, da der Suspensionstransport hier von der Verfügbarkeit und nicht von der Transportkapazität limitiert wird. Wird die verfügbare Sandmenge erhöht (beispielsweise durch Erosion sandhaltiger Schichten), so kann die Suspensionsfracht unabhängig vom Abfluss ansteigen. Die hier aufgestellten Transport-Abfluss-Beziehungen für die beiden betrachteten Zeiträume zeigen teilweise deutliche zeitliche Variationen. Analog zur Betrachtung des Geschiebetransports kann nicht ausgeschlossen werden, dass eine Aufteilung in Teilzeiträume eine Verbesserung der Transportbilanzierung ergeben würde. Die wenigen vorhandenen Transportmessungen rechtfertigen eine solche getrennte Betrachtung nicht. Die Auswertung der Residuen der Transportmessungen im Zeitraum 1996 bis 2006 zeigt jedoch im Teilzeitraum 1996 bis 1999 überwiegend

positive Werte von im Mittel +0,15 (Abb. 44). Dies bedeutet, dass der Transport in diesen Jahren bei Verwendung der Transportfunktion um $10^{0,15} = 41\%$ unterschätzt wird. Da die Sedimentbilanz 1996 bis 2006 durch diese Korrektur jedoch nur um ca. 5 % besser geschlossen würde und die Werte zudem wegen der geringen Anzahl von Messungen unsicher sind, wird auf die getrennte Betrachtung von Teilzeiträumen verzichtet.

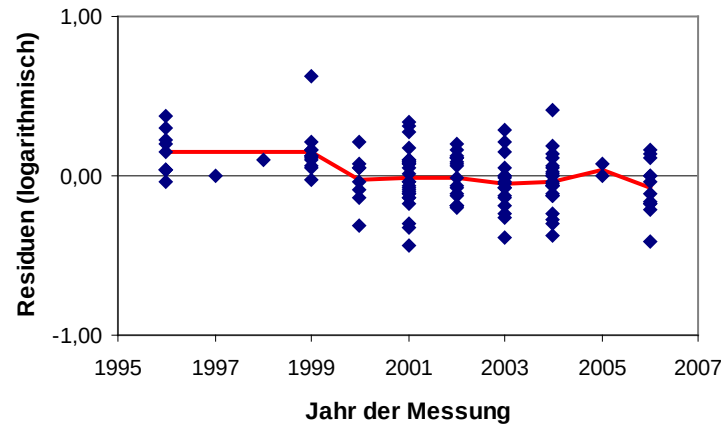


Abb. 44: Analyse der Residuen (Abweichung der Messwerte von der Transport-Abfluss-Beziehung des Zeitraums) der Suspensionsmessungen im Zeitraum 1996-2006

Die Bilanzierungsmethode, welche sich auf die Auswertung der Sohlhöhenentwicklung stützt, benötigt eine Reihe zusätzlicher Annahmen, wodurch sich die Anzahl möglicher Fehlereinflüsse erhöht. Im Resultat der Unsicherheitsanalyse kann dieser Methode dennoch die höhere Zuverlässigkeit zugesprochen werden, da in der Methodik der Feststofftransportmessungen eine größere Anzahl möglicher nicht unerheblicher Fehlerquellen identifiziert werden konnte.

Die tatsächlichen Frachten liegen wahrscheinlich zwischen den Bilanzierungen beider Methoden, da die Sohlhöhenentwicklung die Frachten tendenziell eher überschätzt, wohingegen die Feststofftransportbilanzierung insbesondere die Sandfracht tendenziell unterschätzt.

7. Bewertung der Sohlstabilität mittels numerischem Modell

7.1 Ziele

Numerische Modelle werden zur Unterstützung der Analyse komplexer Wirkzusammenhänge herangezogen. Im Falle der Gewässermorphologie ergeben sich drei primäre Ziele:

- Messdaten sind zwangsläufig räumlich und zeitlich lückenhaft. Bei Kalibrierung an hinreichend bekannten Zwischenzuständen sowie geeigneter Abbildung der physikalischen Prozesse ist es möglich, mit numerischen Modellen eine kontinuierliche Datenreihe zu erzeugen, die sich auf die Messdaten stützt. Damit lassen sich beispielsweise die Wirkungen messtechnisch undokumentierter Ereignisse untersuchen.
- Von besonderem Interesse ist die zukünftige Entwicklung des Gewässers. Mit numerischen Modellen ist die Extrapolation des beobachteten Verhaltens unter Annahme von Szenarien für die hydrologischen Randbedingungen möglich. Dies kann helfen, mögliche Problemstellen im Voraus zu erkennen.
- Mögliche Maßnahmenvarianten können am Modell durchgeprüft werden, bevor sie in der Natur umgesetzt werden. Ziel ist eine Optimierung der Gewässerunterhaltung im Hinblick auf Nutzen und Kosten.

7.2 Modelllayout und Berechnungsgrundlagen

Das Projektgebiet zwischen Iffezheim und Mainz ist in einem 1D-morphodynamischen Modell im System SOBEK-RE, Version 2.52.007 (Deltares, 2010) abgebildet, welches in der BfG zur Simulation der morphologisch-sedimentologischen Entwicklung des Rheins eingesetzt wird. Das Modellgebiet umfasst die freifließende Rheinstrecke unterhalb der Staustufe Iffezheim bis zur Verzweigung Pannerdensch Kop in den Niederlanden. Nebenflüsse werden im morphologischen Modell als punktuelle Zugaben an den Einmündungen berücksichtigt. Die folgenden Auswertungen beschränken sich auf das Projektgebiet Iffezheim bis Mainz.

Der Rhein wird im numerischen Modell durch diskrete Querprofile (sogenannte *cross-sections*) repräsentiert. Diese haben einen Abstand von ca. 550 m untereinander und repräsentieren jeweils die Geometrie eines Gewässerabschnittes. Die Profile sind aus dem Geodatenbestand der BfG mit Hilfe des Verfahrens GIS2PROF abgeleitet und im Format Baseline 4.0 gespeichert. Die Geometriedaten liegen für zwei Zustände vor und entsprechen den Situationen der Jahre 1993 und 2004.

Die Profile sind symmetrisch und die y-z-Koordinaten aufsteigend sortiert, sodass ein regelmäßig vom tiefsten Punkt zum Ufer ansteigendes Profil entsteht. Der Querschnitt ist weitestgehend flächengleich zum zugrunde liegenden realen Profil.

Das Modellgebiet ist an markanten Punkten in Abschnitte (sogenannte *branches*) unterteilt. Diese sind notwendig an Verzweigungen und Einmündungen sowie an Stellen, an denen sich grundlegende Parameter, welche jeweils für einen *branch* definiert werden können, ändern. Diese werden im Kapitel 7.3 beschrieben.

Der Fließquerschnitt jedes Querprofils gliedert sich in die Abschnitte Hauptabflussquerschnitt (*main channel*), Bühnenfelder (*flood plain 1*) und Vorland (*flood plain 2*). Aus technischen Gründen ist der Bereich *flood plain 1* (Bühnenfelder) im gesamten Modell vorhanden. Wo in Natur keine Bühnen existieren, wird dem Bereich *flood plain 1* im Modell eine Breite von 0,1 m zugewiesen. Ansonsten sind die tatsächlich vorhandenen Breiten der Bühnenfelder sowie des Vorlandes maßgebend.

Die Rauheit im Hauptabflussquerschnitt wird jeweils als Funktion des Abflusses für Abschnitte von mehreren Kilometern Länge definiert. Diese Rauheiten stammen aus einer hydraulischen Kalibrierung welche im Vorfeld der Erstellung des morphologischen Modells durchgeführt wurde. Im Bereich der Bühnenfelder wird die gleiche Rauheit wie im Hauptabflussquerschnitt angenommen. Der Bereich des Vorlandes wird durch eine weitere profilbezogene Rauheitsgröße beschrieben, welche zwar aus der hydraulischen Kalibrierung übernommen, jedoch im Rahmen der morphologischen Kalibrierung stellenweise angepasst wurde. Ein Beispiel für ein Querprofil des Rheinmodells ist in Abb. 45 gegeben.

Der Untergrund des Modells wird durch eine Kornverteilung beschrieben, welche aus 11 Fraktionen aufgebaut wird. Die Zusammensetzung der Kornfraktionen wird im Modell in neun vertikalen Schichten gespeichert. Somit ist die Abbildung vertikaler Sortierprozesse möglich. Die oberste Schicht hat eine Mächtigkeit von 0,1 m, alle weiteren Schichten eine Mächtigkeit von 0,25 m, wodurch sich eine 2,1 m mächtige Gesamtsohle ergibt. Jede dieser Schichten kann an jedem Profil als unerodierbar definiert werden, womit die Abbildung von Felshorizonten ermöglicht wird. Die Zusammensetzung des Untergrundes ist aus den in Kapitel 3.1 dargestellten Daten abgeleitet.

Der Transport findet in einer sogenannten Transportschicht (*transport layer* oder *active layer*) statt, welche die Dicke D_{AL} besitzt. Diese kann querprofilweise definiert werden.

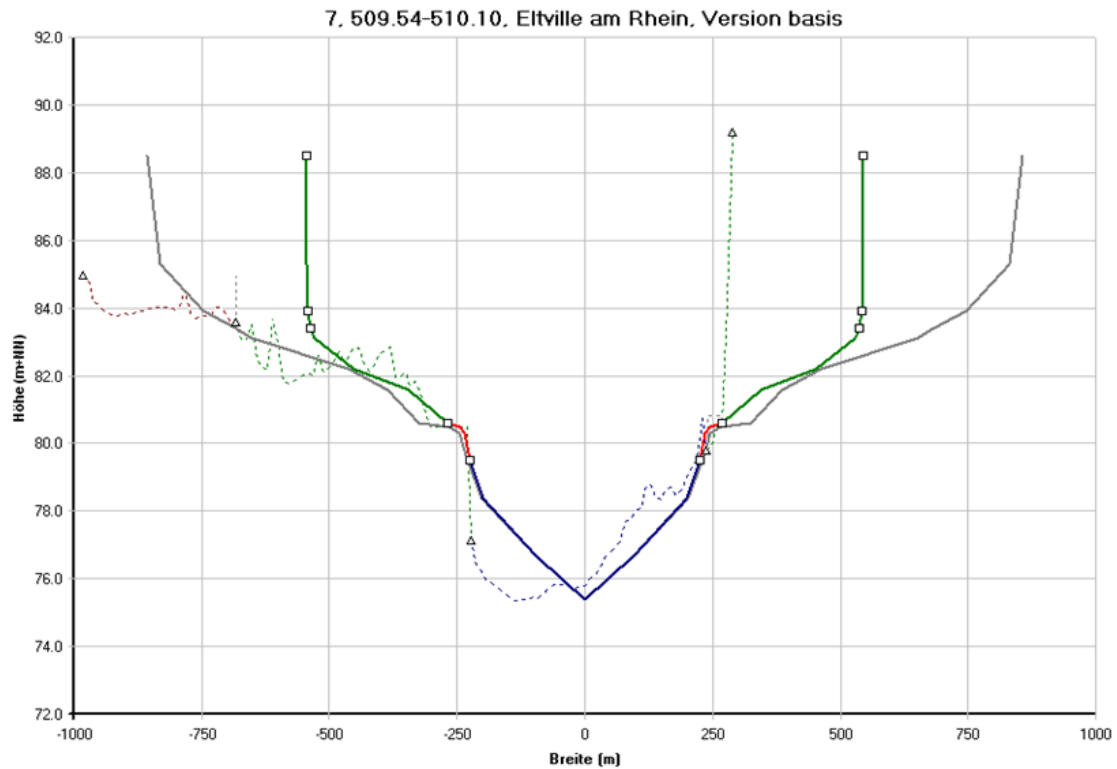


Abb. 45: Beispiel für ein Querprofil des 1D-Modells (durchgezogene Linien) sowie die zugrunde liegende Geometrie (gestrichelt). Die Fließzonen sind: main channel (blau), flood plain 1 (rot) sowie flood plain 2 mit durchflossenen Querschnitt (grün) und Stillwasserbereich (grau).

Weiterhin sind die Geschiebezugaben, Baggerungen und Verklappungen der Jahre 1993 bis einschließlich 2006 abgebildet. Diese werden als Mittelwerte über jeweils einen Monat zugegeben. Aus Stabilitätsgründen werden die Geschiebezugaben bei Iffezheim über jeweils fünf Profile verteilt zugegeben. Dies entspricht einer etwas höheren räumlichen Streckung der Geschiebezugaben in Fließrichtung im Vergleich zur Natur. Da Aussagen jedoch nicht querprofilscharf und auch nicht direkt für den Zugabebereich getroffen werden, ist diese Abweichung hinnehmbar. Wenige Kilometer unterhalb der Zugabestelle ist wegen der Volumentreue der Zugaben keine Auswirkung infolge der vorgenommenen Streckung zu erwarten.

Der Transport je Breitenmeter der i -ten Fraktion $m_{g,i}$ wird mit der Transportformel von Meyer-Peter und Müller berechnet zu

$$m_{g,i} = \gamma_s \frac{8 \sqrt{g \frac{\rho_g - \rho}{\rho}} d_i^3}{(1 - n)} \left(\frac{v_m^2}{C^2 \frac{\rho_g - \rho}{\rho} d_i} - \tau_c \right)^{1,5} \quad [\text{m}^2 / \text{s}] \quad (8)$$

mit γ_s = Vorfaktor zur Kalibrierung, $g = 9,81 \text{ m/s}^2$, $\rho_g = 2650 \text{ kg/m}^3$, $\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$, d_i = Korndurchmesser der i -ten Fraktion, n = Porosität, v_m = mittlere Fließgeschwindigkeit im Hauptabflussquerschnitt, C = Chézy-Koeffizient, τ_c = kritische Schubspannung für den Be-

wegungsbeginn (SOBEK-RE Help Desk, 2005). Die Porosität wurde zu $n = 0,26$ festgelegt, welches sich am gemessenen Mittelwert im Untersuchungsgebiet orientiert (vgl. Kapitel 5.2).

Berechnet wird der Sedimenttransport mit den Größen des Hauptabflussquerschnitts, die Verteilung der resultierenden Sohlhöhenänderungen im Querschnitt kann jedoch festgelegt werden. Für das hier beschriebene Modell wurde die Methode der Änderung der y-z-Profilkoordinaten proportional zur Wassertiefe an den jeweiligen Koordinaten gewählt. Die Breite, welche von den Änderungen betroffen ist (entspricht dem morphologisch aktiven Teil des Querschnitts) ist ein Kalibrierungsparameter und wird im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

7.3 Kalibrierung

Die Kalibrierung des Modells erfolgte anhand der beobachteten Sohlhöhenentwicklung zwischen 1993 und 2004. Folgende Modellparameter wurden während der Kalibrierungsphase variiert, um die bestmögliche Übereinstimmung von Natur- und Modellverhalten zu erreichen:

- der Vorfaktor der Transportformel γ_s ,
- die kritische Schubspannung für den Bewegungsbeginn τ_c ,
- die Dicke der Transportschicht D_{AL} ,
- die Breite, über welche die Sohlhöhenänderungen verteilt werden.

Ziel war es, die Sohlhöhenentwicklung zwischen 1993 und 2004 hinreichend genau wiederzugeben, um großräumige und langfristige Trends abbilden zu können. Lokale Abweichungen wurden mit dem Ziel, die Modellsteuerung und Handhabung möglichst zu vereinfachen, akzeptiert. Baumaßnahmen, die während des Kalibrierzeitraums durchgeführt wurden, sind bereits ab Beginn des Kalibrierungszeitraums im Modell abgebildet. Hierdurch kommt es teilweise zu einer Überschätzung deren Wirkung, der durch geeignete Wahl der Kalibrierungsparameter teilweise entgegengewirkt werden kann. Die Modellparameter γ_s , τ_c und D_{AL} wurden an möglichst wenigen Punkten im Modellgebiet variiert.

Im Folgenden werden die während der Kalibrierung ermittelten Größen der Modellparameter, für deren Kombination sich die bestmögliche Anpassung der Sohlhöhenentwicklung unter den vorgenannten Randbedingungen ergeben hat, aufgeführt.

Der Vorfaktor der Transportformel γ_s beträgt für das Untersuchungsgebiet konstant 0,7. Die kritische Schubspannung für den Bewegungsbeginn τ_c beträgt für die Strecke Iffezheim bis Maxau (Rhein-km 362,3) 0,031 und ab Maxau stromab 0,030. Weiterhin beträgt der Hiding-Exposure-Korrekturfaktor nach Ashida und Michiue (1972) $\gamma = 2,05$ für den Bereich Iffezheim bis Maxau und unterhalb Maxau $\gamma = 2,0$. Dies entspricht der Berücksichtigung einer leicht erhöhten Exposition im Bereich Iffezheim bis Maxau, welche in der Natur durch die Zugabe von Geschiebematerial auf die Sohle verursacht wird.

Die Dicke der Transportschicht D_{AL} ist im Bereich Iffezheim bis Plittersdorf (Rhein-km 340,5) auf 0,80 m festgelegt. Im Bereich Plittersdorf bis Speyer (Rhein-km 400,6) beträgt sie 0,20 m und unterstrom davon 0,50 m. Die Breite, über welche die Sohlhöhenänderungen verteilt werden (morphologisch aktiver Bereich) sowie die Breite des Hauptabflussquerschnittes sind in Abb. 46 angegeben.

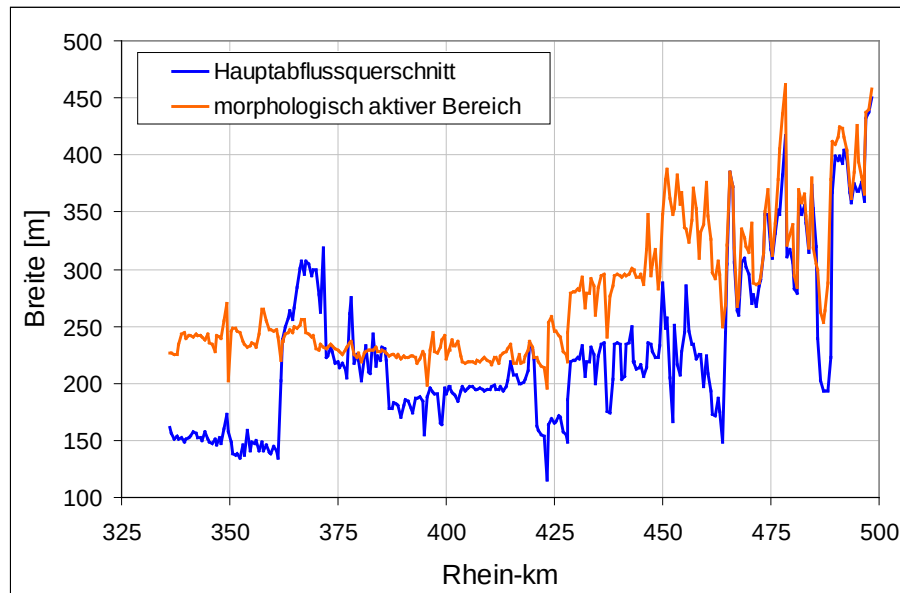


Abb. 46: Breite des morphologisch aktiven Bereichs und des Hauptabflussquerschnitts im Modellgebiet.

Die sich für den Kalibrierungszeitraum ergebende Sohlentwicklung im Modell im Vergleich zur Natur ist in Abb. 47 dargestellt.

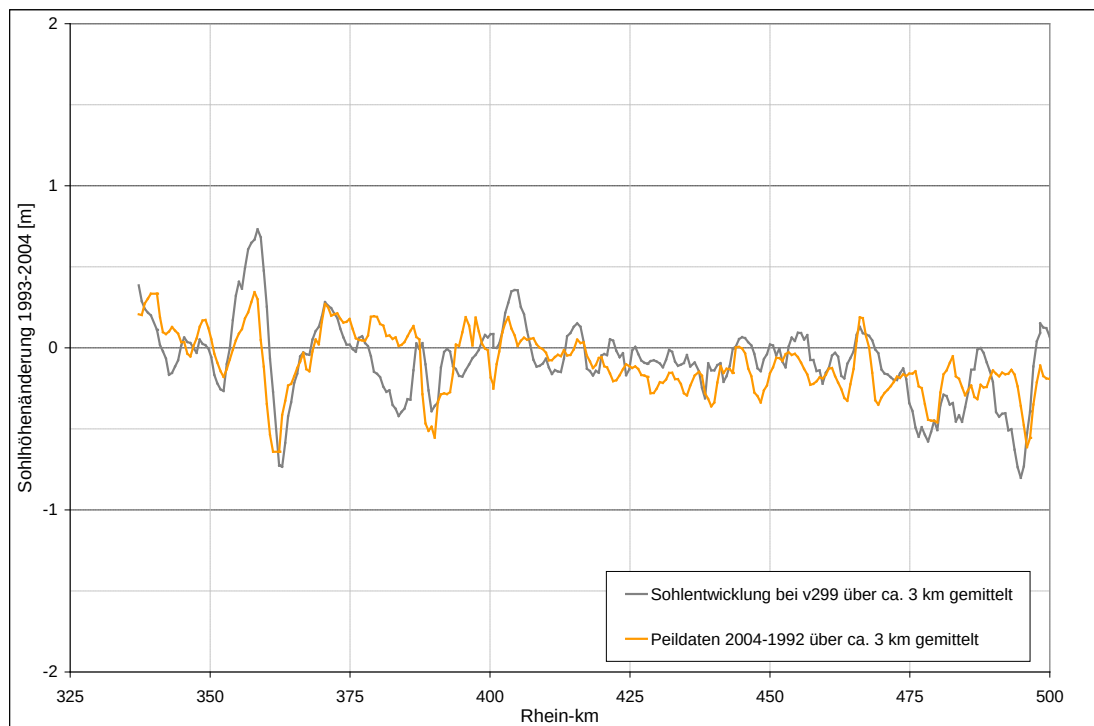


Abb. 47: Sohlentwicklung im Kalibrierungszeitraum in Natur (orange) und Modell (grau).

Die Sohlentwicklung in der Natur, die sich aus dem Vergleich der Peilungen 1992 und 2004 ergibt, wird durch das Modell insgesamt gut wiedergegeben. Lokale Abweichungen sind im Sinne der Modellziele akzeptabel. Die zu starke Eintiefung des Modells im Bereich Rhein-km 378-387 ist vermutlich auf die dort durchgeführten Baumaßnahmen zurückzuführen, welche im Modell zu früh wirksam werden.

7.4 Validierung

Die Validierung des Modells erfolgt anhand:

- der Sohlhöhenentwicklung zwischen 1996 und 2006,
- der Transport-Abfluss-Beziehungen an den Messstellen und
- der Transportgeschwindigkeit der Tracer im Naturversuch von 1996 (vgl. Kapitel 3.3)

7.4.1 Validierung anhand der Sohlhöhenentwicklung 1996-2006

Die Sohlentwicklungen für den Validierungszeitraum 1996 bis 2006 in Natur und Modell sind in Abb. 48 dargestellt.

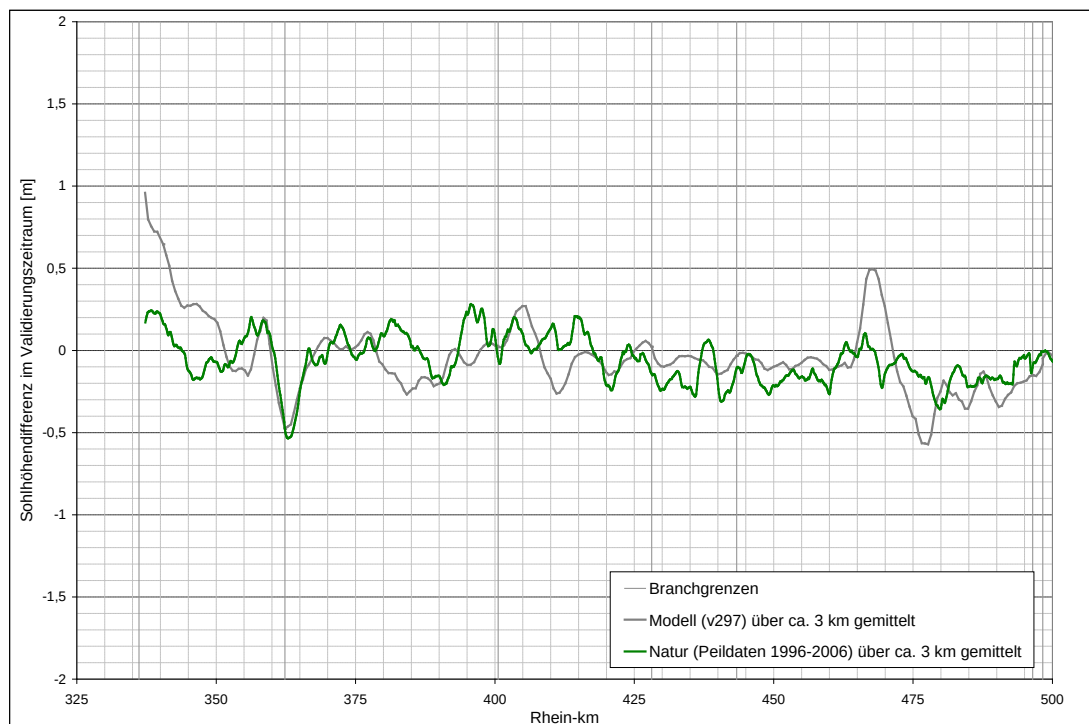


Abb. 48: Sohlentwicklung im Validierungszeitraum in Natur (grün) und Modell (grau).

7.4.2 Validierung anhand der Transport-Abfluss-Beziehungen an den Messstellen

Die Sedimentbilanzierung anhand der Feststofftransportmessungen des Zeitraums 1996-2006 unterschätzt die Frachten leicht gegenüber der Bilanzierung anhand der Sohlhöhenentwicklung (vgl. Kapitel 5.3.3). Das numerische Modell hingegen wurde dahingehend kalibriert, die beobachteten Sohlhöhenentwicklung möglichst genau wieder zu geben. Die dazu berechneten Feststofffrachten werden folglich tendenziell über den in der Natur gemessenen Werten liegen. Die vom Modell berechneten Feststofffrachten sind in Abb. 49 bis Abb. 54 den in der Natur gemessenen Frachten sowie den daraus abgeleiteten Transport-Abfluss-Beziehungen gegenübergestellt. Darin sind die berechneten Frachten des numerischen Modells anhand des jeweils vorhandenen mittleren Korndurchmessers der Transportschicht in vier Klassen farblich kodiert.

Es ist festzustellen, dass an einigen Messstellen, insbesondere im unteren Teil des Modellgebietes, wie erwartet die berechneten Frachten tendenziell höher sind als die gemessenen Frachten in der Natur (vgl. Messstelle Speyer, Abb. 52 und Mainz, Abb. 54). Die Variabilität der berechneten Frachten ist deutlich höher als durch Messung in der Natur belegt. Hierfür dürfte vor allem die im Modell starke Abhängigkeit des berechneten Transports von der modellierten Korngrößenverteilung in der Transportschicht ursächlich sein. Im Modell ist außerdem eine starke Hysterese der Transporte innerhalb einzelner Abflussereignisse festzustellen (z. B. Messstelle Nierstein, Abb. 51 und Speyer, Abb. 52). Diese ist in dieser Ausprägung in der Natur bisher nicht festgestellt worden. Es ist jedoch möglich, dass eine hinreichend lange Messung während eines Hochwasserereignisses ein entsprechendes Bild liefern würde.

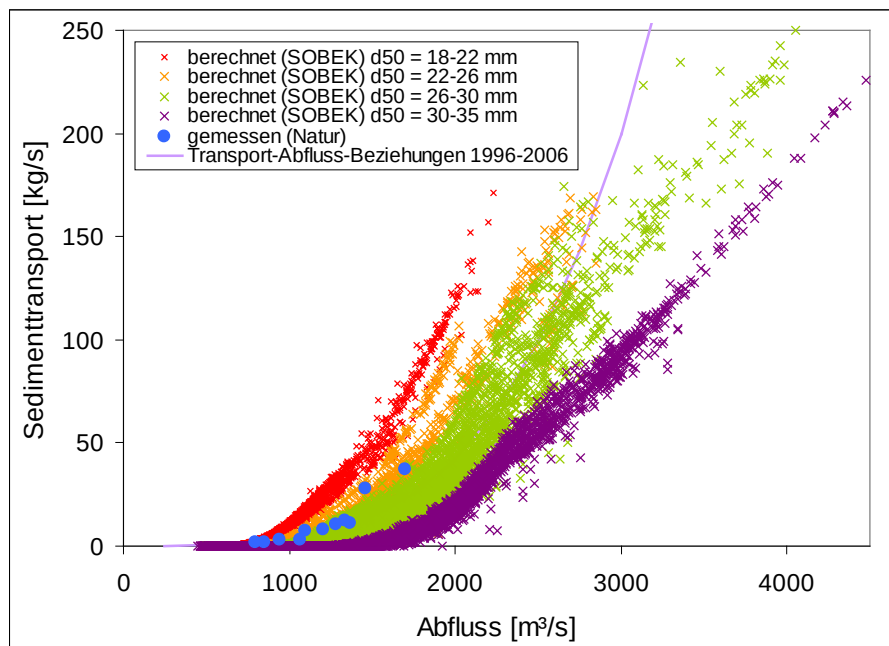


Abb. 49: Vergleich der berechneten Transportraten (Geschiebe plus suspendierter Sand) aus dem numerischen Modell sowie aus den Transport-Abfluss-Beziehungen mit den gemessenen Transportraten an der Messstelle Plittersdorf.

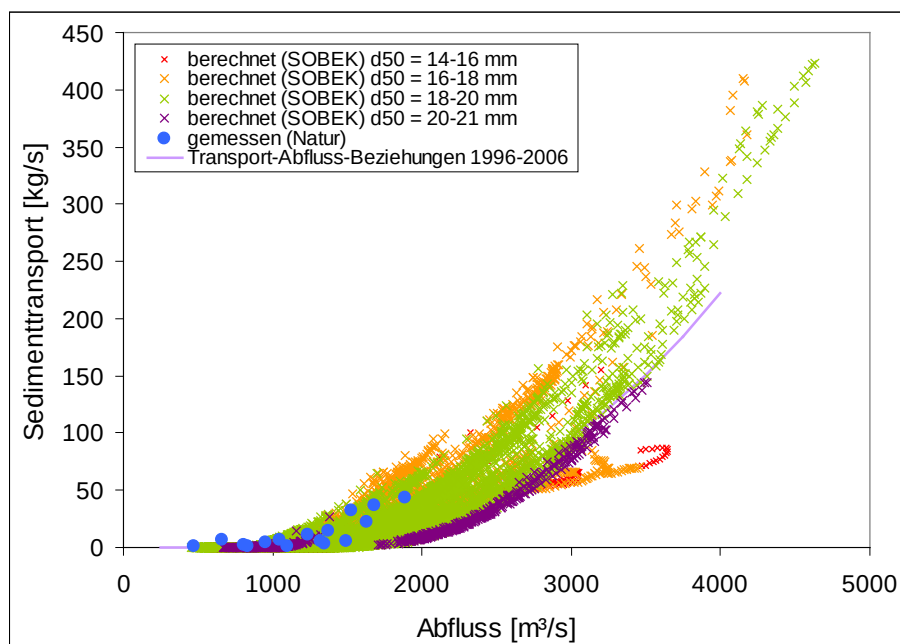


Abb. 50: Vergleich der berechneten Transportraten (Geschiebe plus suspendierter Sand) aus dem numerischen Modell sowie aus den Transport-Abfluss-Beziehungen mit den gemessenen Transportraten an der Messstelle Maxau.

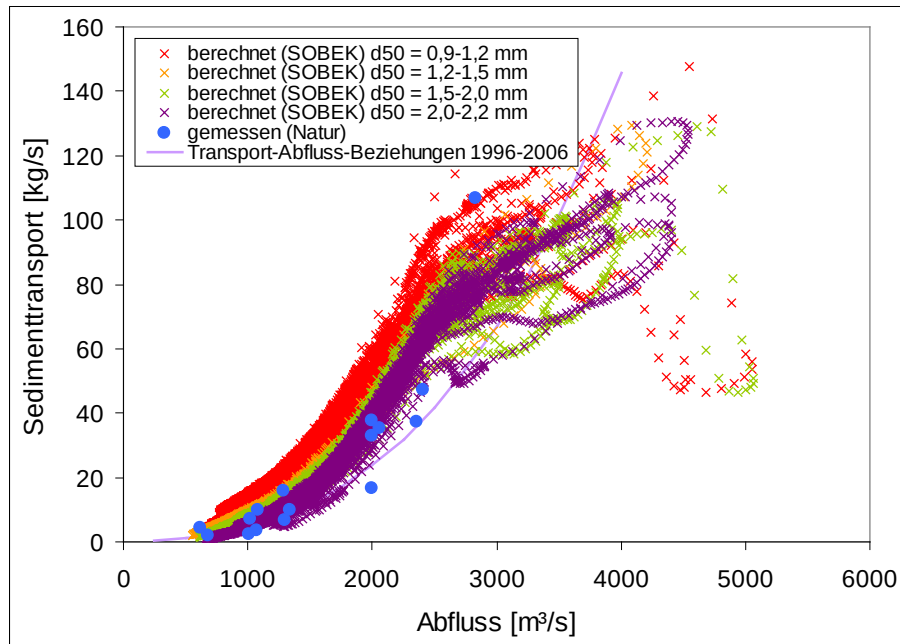


Abb. 51: Vergleich der berechneten Transportraten (Geschiebe plus suspensierter Sand) aus dem numerischen Modell sowie aus den Transport-Abfluss-Beziehungen mit den gemessenen Transportraten an der Messstelle Nierstein.

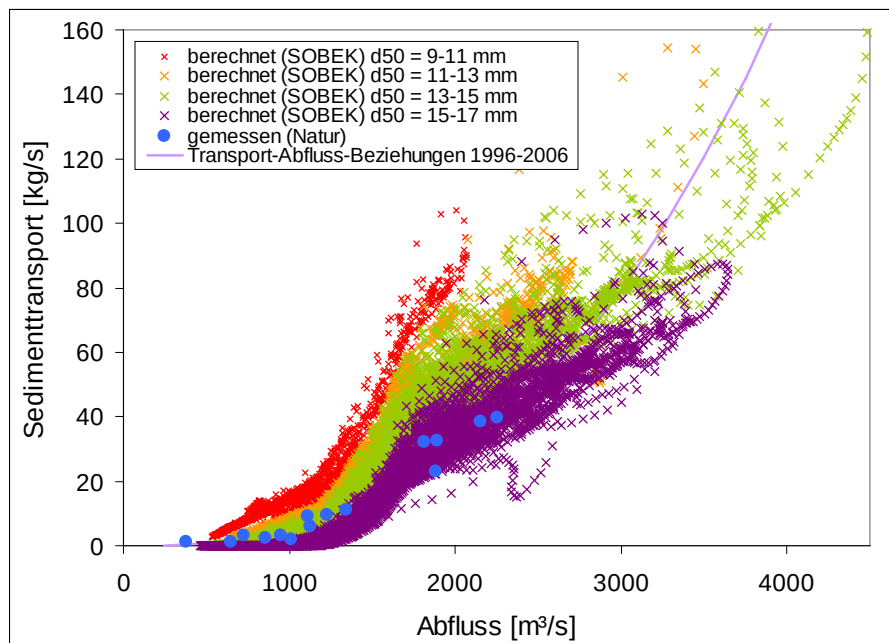


Abb. 52: Vergleich der berechneten Transportraten (Geschiebe plus suspensierter Sand) aus dem numerischen Modell sowie aus den Transport-Abfluss-Beziehungen mit den gemessenen Transportraten an der Messstelle Speyer.

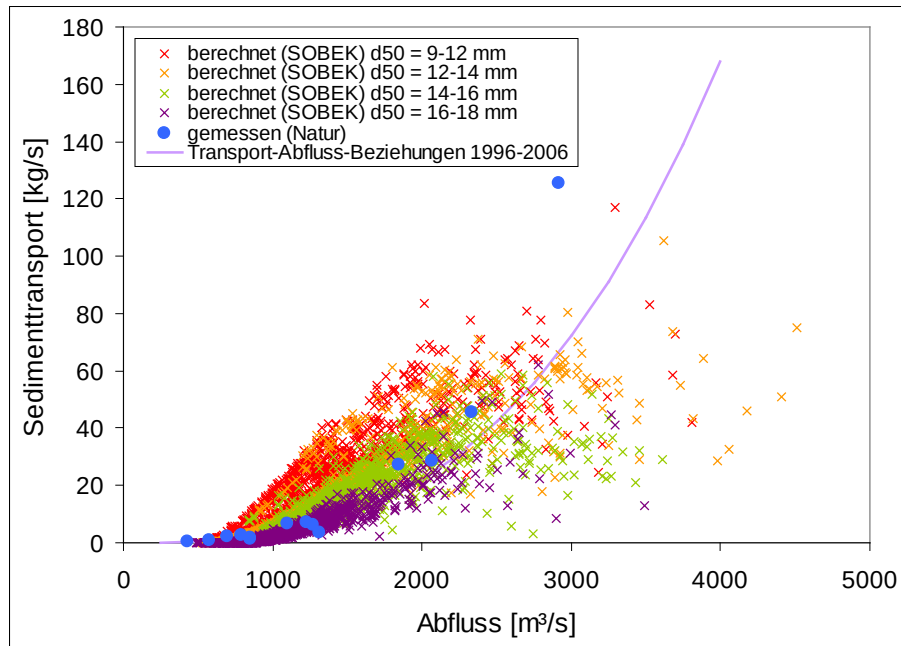


Abb. 53: Vergleich der berechneten Transportraten (Geschiebe plus suspendierter Sand) aus dem numerischen Modell sowie aus den Transport-Abfluss-Beziehungen mit den gemessenen Transportraten an der Messstelle Mannheim.

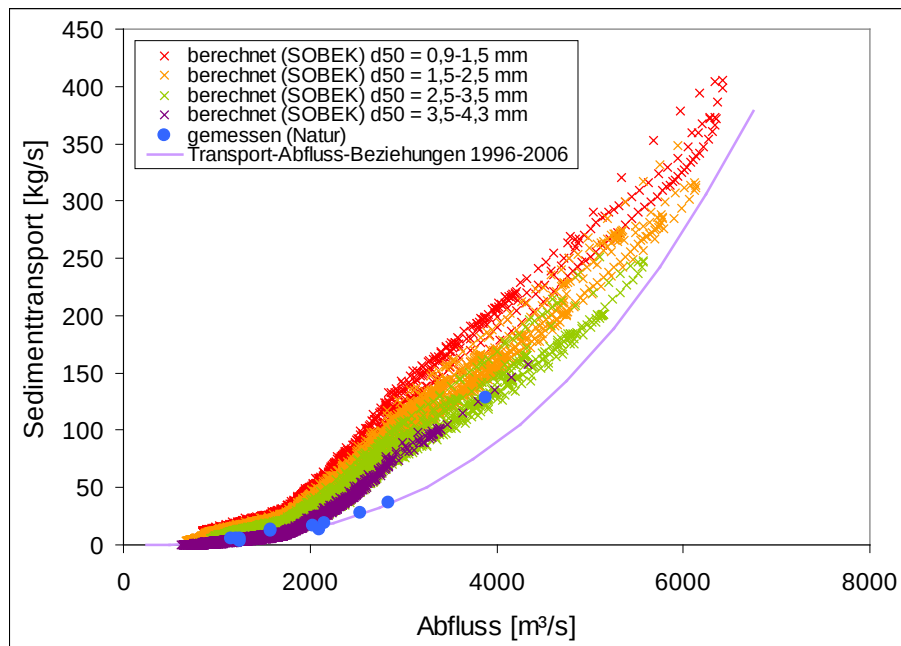


Abb. 54: Vergleich der berechneten Transportraten (Geschiebe plus suspendierter Sand) aus dem numerischen Modell sowie aus den Transport-Abfluss-Beziehungen mit den gemessenen Transportraten an der Messstelle Mainz.

7.4.3 Validierung anhand der Transportgeschwindigkeit von Tracern

Die im Naturversuch Iffezheim gemessenen Transportgeschwindigkeiten des Tracermaterials (vgl. Kapitel 3.3) dienen zu einer weiteren Validierung des numerischen Modells. Darüber hinaus sollen die gemessenen Transportgeschwindigkeiten und –weiten über das Ende des Naturversuchs hinaus extrapoliert werden.

Im numerischen Modell sind die Zugabemengen des Naturversuchs wie alle übrigen Zugaben als sogenannte laterale Sedimenteinträge berücksichtigt. Die Modellierung diskreter Tracer ist mit dem Modellsystem SOBEK nicht ohne weiteres möglich. Eine Simulation des Tracerversuchs ist dennoch durch Vergleich der Sohlhöhenentwicklung zweier Rechenläufe, einmal mit und einmal ohne Zugabe einer Tracermenge, möglich. Die Menge der hier verwendeten Zugabedifferenz im numerischen Modell beträgt abweichend vom Naturversuch 6.000 m^3 . Die sich ergebende Sohlhöhendifferenz aus den Simulation mit und ohne Tracer ist in Abb. 55 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Ausbreitung des Materials mit fortschreitender Versuchsdauer verlangsamt. So hat eine klar erkennbare Front nach etwas mehr als vier Jahren Transportdauer Anfang 2001 den Rhein-km 402 erreicht (66 km unterhalb des Zugabebereichs), während nach weiteren fünf Jahren Transport diese Front am Rhein-km 422 zu finden ist und somit nur 20 km weiter transportiert wurde.

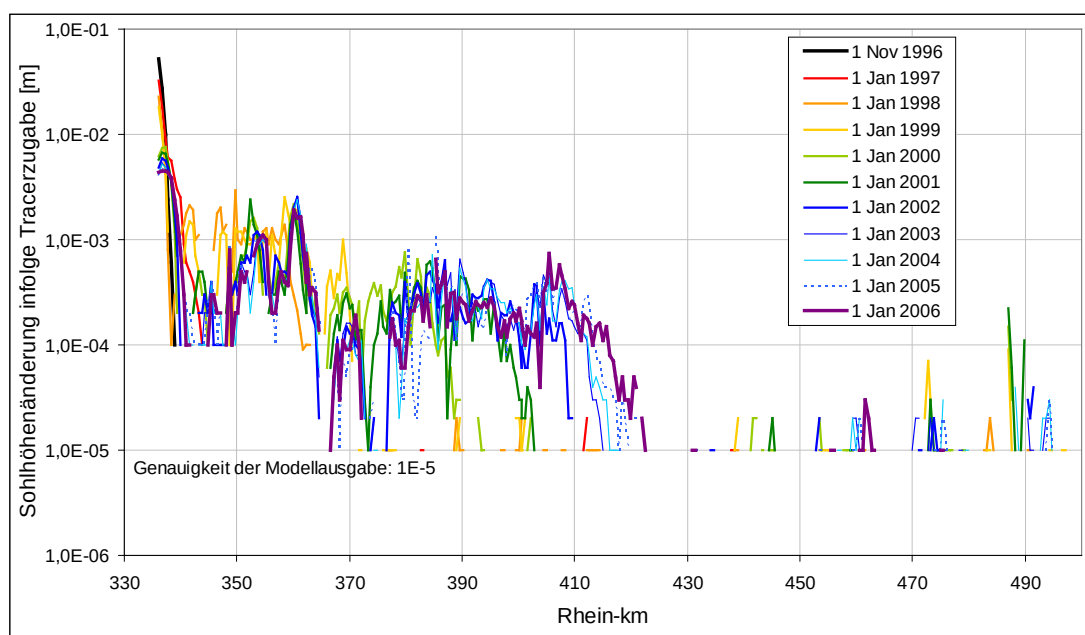


Abb. 55: Sohlhöhendifferenz der Simulationen mit und ohne Tracerzugabe zu unterschiedlichen Simulationszeitpunkten.

Noch deutlicher wird das Verhalten des Tracermaterials in Abb. 56, in der die Transportgeschwindigkeiten des Naturversuchs den aus dem Modell abgeleiteten Transportgeschwindigkeiten gegenübergestellt sind. Die in der Natur festgestellten Transportgeschwindigkeiten der Tracer sind dabei zu einem gewichteten Mittel zusammengefasst. Die Geschwindigkeit im Modell ist integral für alle transportierten Fraktionen angegeben. Bis zum Ende des Naturversuchs ist eine sehr hohe Übereinstimmung der Geschwindigkeiten festzustellen. Sowohl in

der Natur als auch im Modell kommt es zu einer markanten Abnahme des Geschwindigkeiten nach Einbau der Tracer. Erst nach Durchgang eines Hochwassers im Sommer 1997 sind die festgestellten Geschwindigkeiten wieder deutlich erhöht und nehmen im weiteren Verlauf wieder ab.

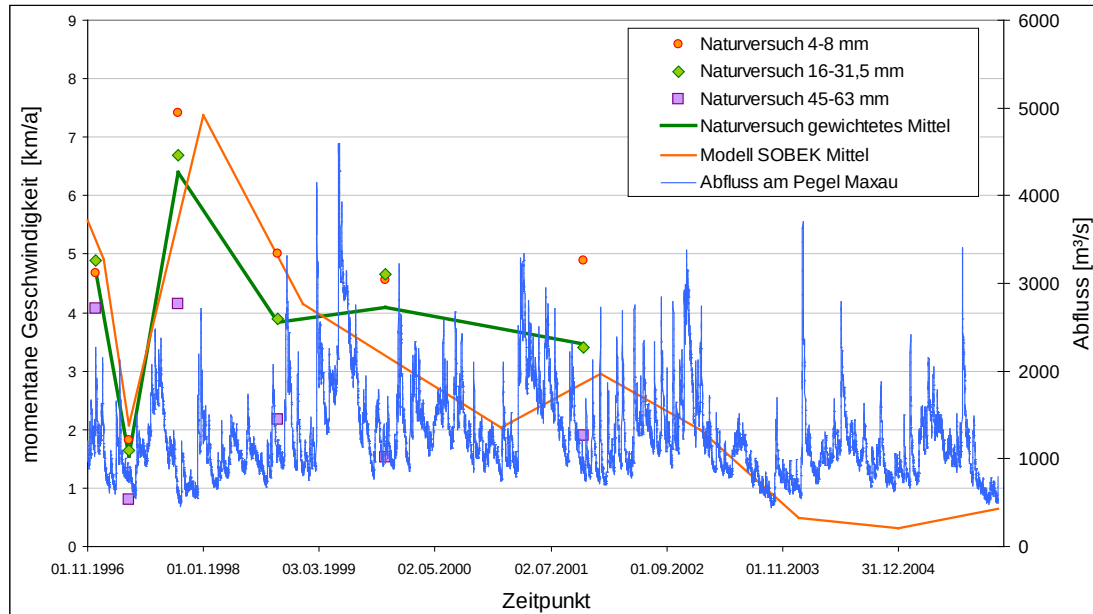


Abb. 56: Aus den Transportweiten der Tracer in Natur (drei Fraktionen sowie deren gewichtetes Mittel) und Modell (Mittel aller Fraktionen) abgeleitete Transportgeschwindigkeiten sowie die Abflussganglinie am Pegel Maxau.

Die Extrapolation der Transportgeschwindigkeiten im numerischen Modell zeigt, dass im weiteren Verlauf des Versuches die Transportgeschwindigkeiten stark abnehmen. Der Mündungsbereich des Mains um Rhein-km 428 mit dem dort vorhandenen geringen Gefälle stellt eine Barriere dar, die von einem Großteil des Tracermaterials nicht oder nur sehr allmählich durchwandert werden kann. Dies deckt sich mit der Erkenntnis aus der Bilanzierung anhand der Feststofftransportmessungen (Kapitel 5.3.1), wonach die Grobkiesfraktion nicht über diesen Bereich hinaus transportiert wird.

Eine Überprüfung des Tracerversuchs kann anhand der Bilanzierung der Tracermasse, welche in der Auswertung erfasst wurde, erfolgen. Dies ist in Abb. 57 dargestellt. Insgesamt wurden von den verfolgten 6.000 m³ Tracermaterial zwischen 5.500 und 4.200 m³ mit leicht abnehmender Tendenz in der Auswertung erfasst. Die übrige Menge kann teilweise aus der Untersuchungsstrecke nach unterstrom ausgetragen worden sein. Andererseits ist aufgrund der Modellgenauigkeitsgrenze von 10^{-5} m eine Abweichung zu erwarten. Die Bilanzierung und die erreichte Übereinstimmung von Natur und Modellergebnissen sind als sehr zufriedenstellend zu bezeichnen.

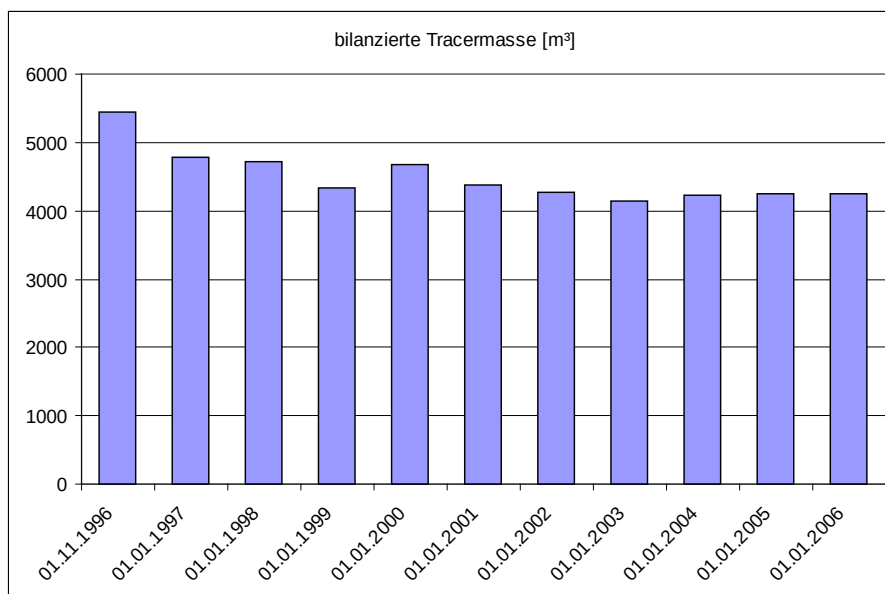


Abb. 57: Massenbilanz des Tracers im numerischen Modell.

7.4.4 Fazit

Das langfristige und großräumige Systemverhalten im Ist-Zustand kann vom Modell wiedergegeben werden. Lokale und temporäre Abweichungen werden im Sinne des Modellierungsziels toleriert.

7.5 Prognose der Entwicklung des status quo

Die Prognose der Entwicklung des status quo erfolgt unter Berücksichtigung möglicher Klimaänderungen durch eine Betrachtung von Szenarien, welche im Folgenden als Projektionen bezeichnet werden. Diese werden vom Referat M2 - Wasserhaushalt, Vorhersagen und Prognosen der BfG im Rahmen des KLIWAS-Forschungsprogramms erstellt. Hierzu werden die Prognosen globaler Klimamodelle regionalisiert. Dadurch wird die räumlich-zeitliche Verteilung von Niederschlag und Temperatur ermittelt, welche auf diskrete Teileinzugsgebiete projiziert wird. Mit Hilfe von Niederschlags-Abfluss-Modellierung werden Ganglinien der Pegel im Einzugsgebiet berechnet. Diese sind die Eingangsgrößen für hydraulisch-morphologische Modellierungen. Durch Vergleich der Szenarien untereinander kann eine Abschätzung der möglichen Auswirkungen der Klimaänderung auf die Morphologie erfolgen.

Aus den zur Verfügung stehenden 23 Abflussprojektionen muss aus Kapazitätsgründen eine Auswahl getroffen werden. Im folgenden werden drei Projektionen weiterverfolgt, welche anhand ihrer hydrologischen Kennwerte dahingehend ausgewählt wurden, ein möglichst breites Spektrum an Abflussszenarien zu umfassen. Gleichzeitig sollen jedoch als extrem zu bezeichnende Szenarien unberücksichtigt bleiben. Die Auswahl erfolgte anhand der Kennwerte MQ (mittlerer Abfluss eines Bezugszeitraums) und HM7Q (höchstes 7-Tagesmittel eines Bezugszeitraums). Die berücksichtigten Bezugszeiträume sind *control period* (1961-1990) sowie *near future* (2021-2050). Die Änderung des MQ am Pegel Maxau für den Bezugszeit-

raum *near future* bezogen auf den MQ der *control period* ist in Abb. 58 dargestellt. Die darin hervorgehobenen Projektionen

- HBV134-KLIWAS_EPW_C20_A2_EH5r1_REMO_10_ls,
- HBV134-KLIWAS_EPW_C20_A1B_BCM_RCA_25_ls und
- HBV134-KLIWAS_EPW_C20_A1B_EH5r2_CCLM_20_ls

werden für die nachfolgende Betrachtung ausgewählt. Sie unterscheiden sich durch die zugrunde liegenden globale Emissionsszenarien (A2 bzw. A1B), durch das verwendete Regionalisierungsmodell sowie die räumliche Auflösung. Die Spannweite des MQ in der *near future* beträgt 98%-108% des MQ der *control period*.

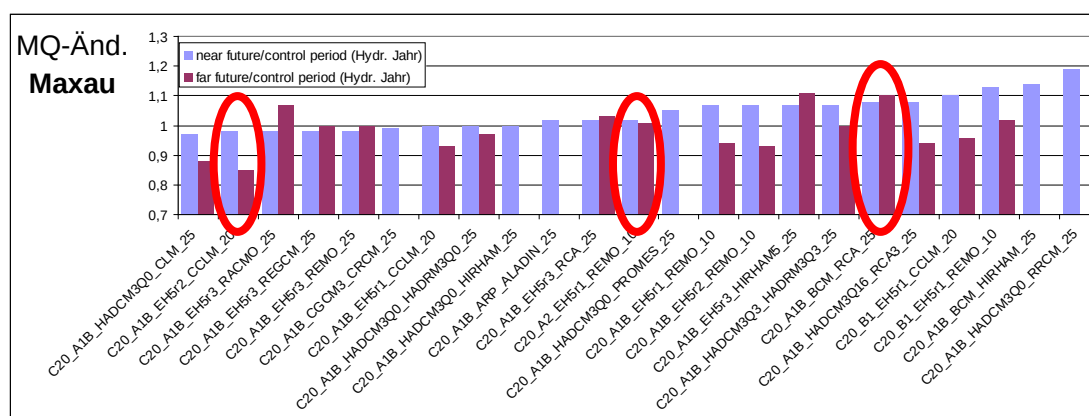


Abb. 58: Änderung des MQ am Pegel Maxau für den Bezugszeitraum *near future* (2021-2050).

Eine Kontrolle der Eignung der Projektionen erfolgt anhand des Kennwertes HM7Q. Der Wert für die höchsten 7-Tagesmittel eines Bezugszeitraums sollte von den beobachteten Daten der *control period* nicht zu stark abweichen, da die bisherigen Projektionen für den Pegel Maxau im Bereich von Extremereignissen noch mit Unsicherheiten behaftet sind (Görgen et al., 2010). Die Änderung des HM7Q am Pegel Maxau für den Bezugszeitraum *near future* bezogen auf den HM7Q der *control period* ist in Abb. 59 dargestellt. Markiert sind die drei oben anhand der MQ-Änderungen ausgewählten Projektionen. Die Spannweite des HM7Q der drei Szenarien beträgt für den Zeitraum 2021-2050 99%-105% des HM7Q₁₉₆₁₋₁₉₉₀. Damit werden die drei Projektionen als für die weitere Untersuchung geeignet angesehen.

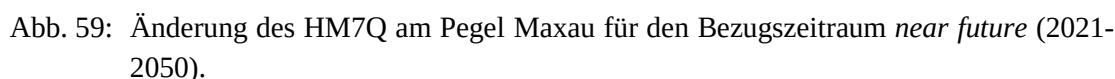


Abb. 60: Sohlhöhenentwicklung bis 2050 in Bezug zu 2007 für den Referenzlauf.

In Abb. 61 bis Abb. 63 sind die Entwicklung der Sohlhöhen für die drei Projektionen angegeben.

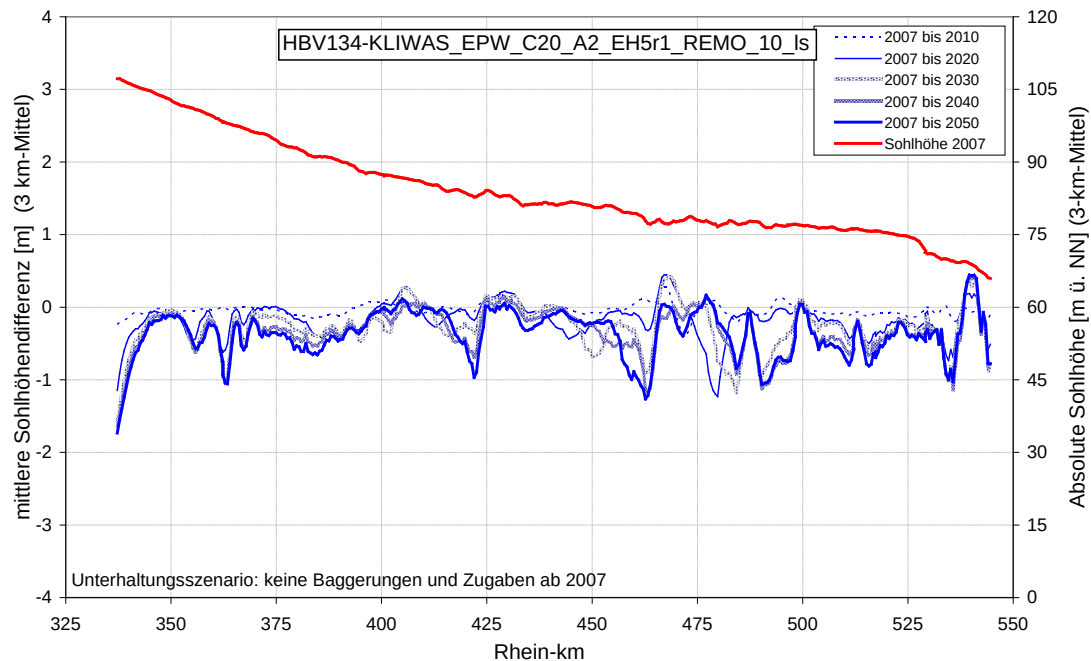


Abb. 61: Sohlhöhenentwicklung bis 2050 in Bezug zu 2007 für die Projektion *HBV134-KLIWAS_EPW_C20_A2_EH5r1_REMO_10_Is*.

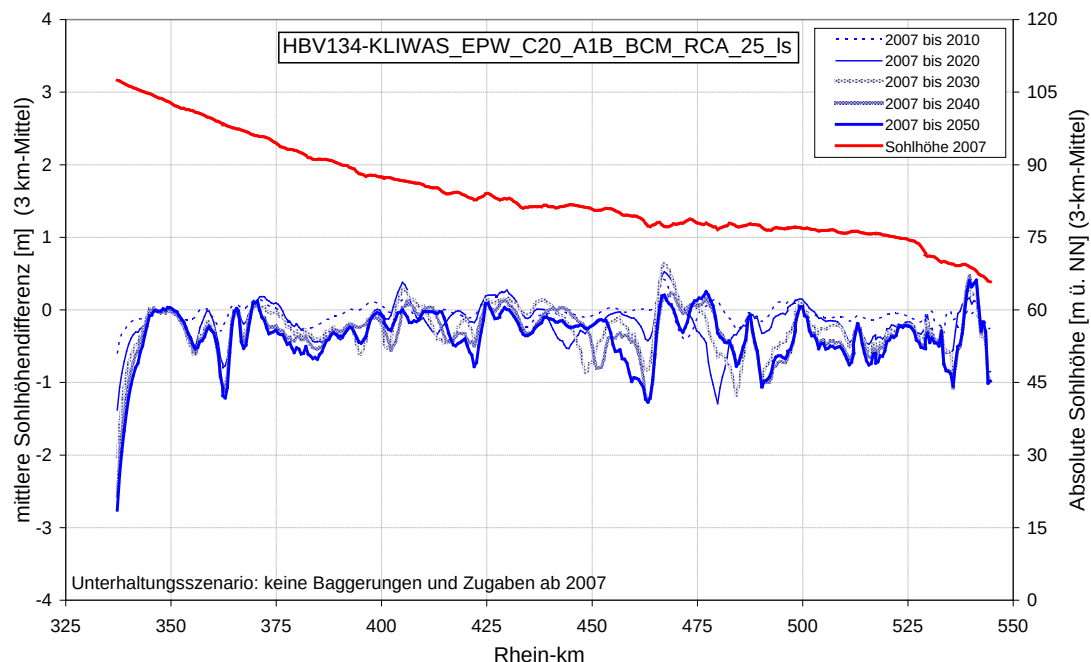


Abb. 62: Sohlhöhenentwicklung bis 2050 in Bezug zu 2007 für die Projektion *HBV134-KLIWAS_EPW_C20_A1B_BCM_RCA_25_Is*.

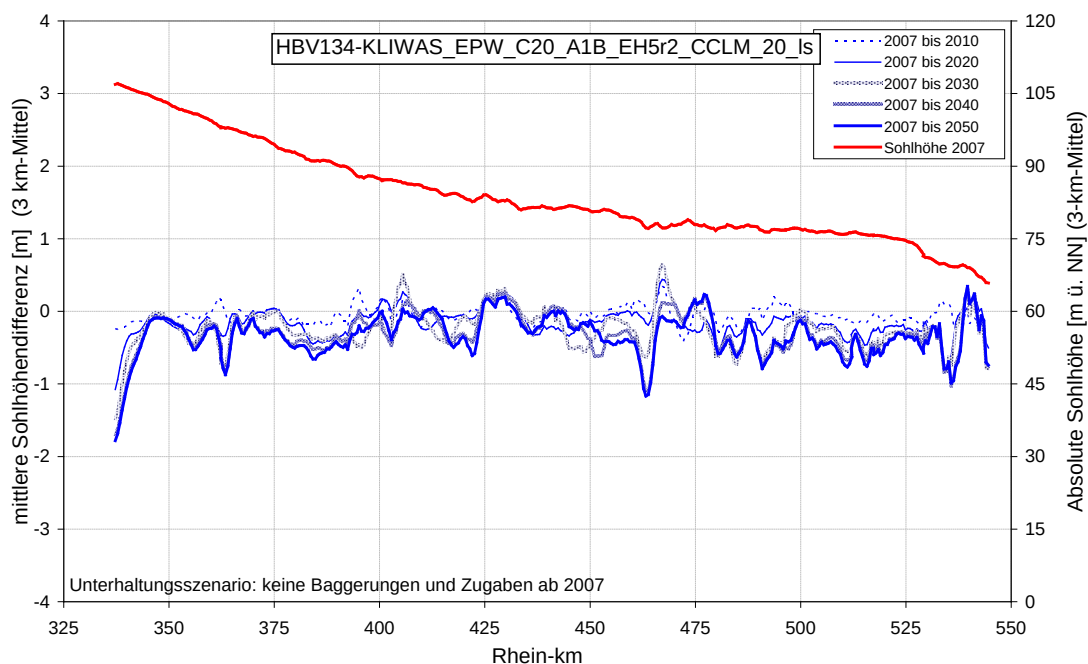


Abb. 63: Sohlhöhenentwicklung bis 2050 in Bezug zu 2007 für die Projektion *HBV134-KLIWAS_EPW_C20_A1B_EH5r2_CCLM_20_Is*.

Ein Vergleich der Projektionen untereinander ist in Abb. 64 gegeben. In der Projektion mit dem höchsten MQ im Vergleich zur *control period* (*HBV134-KLIWAS_EPW_C20_A1B_BCM_RCA_25_Is*, vgl. Abb. 58), welches dem nassesten Szenario entspricht, gibt es im Zugabebereich die höchste Sohleintiefung. In den übrigen Bereichen des Untersuchungsgebietes sind die Unterschiede zwischen den drei Projektionen wenig ausgeprägt. Insgesamt überwiegt Erosion, welche sich im Laufe des Prognosezeitraums bis 2050 entwickelt (vgl. Abb. 61 bis Abb. 63). Dies ist größtenteils auf die Nichtberücksichtigung der Geschiebezugaben zurückzuführen.

Durch Subtraktion der Sohlhöhenänderung im Referenzlauf von den drei Projektionen ergibt sich das Klimaänderungssignal der Sohlhöhenentwicklung (Abb. 65). In Abhängigkeit der Projektion erhält man für die Sohlhöhenentwicklung im Zugabebereich unterhalb Iffezheim Werte zwischen nahezu keinem Einfluss der Klimaentwicklung und einer erhöhten Eintiefung um ca. 1 m (*HBV134-KLIWAS_EPW_C20_A1B_EH5r2_CCLM_20_Is*). Überwiegend betragen die Änderungen infolge des Klimawandeleinflusses im Vergleich zum Referenzlauf zwischen 0 und 0,2 m, stellenweise werden 0,5 m erreicht.

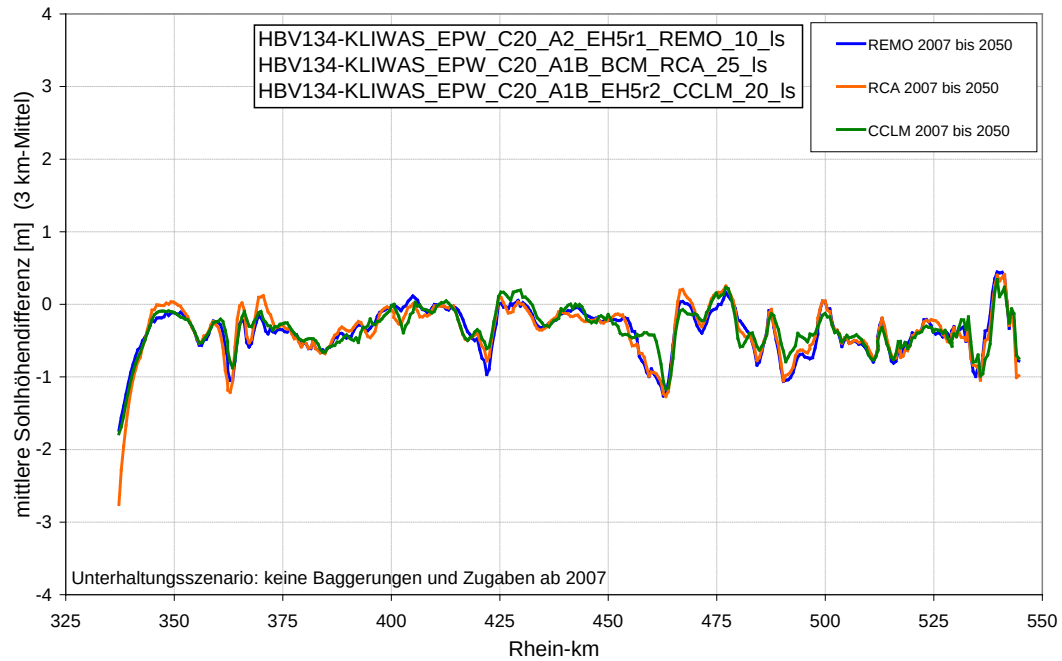


Abb. 64: Vergleich der Sohlhöhenentwicklung bis 2050 in Bezug zu 2007 für die drei Projektionen.

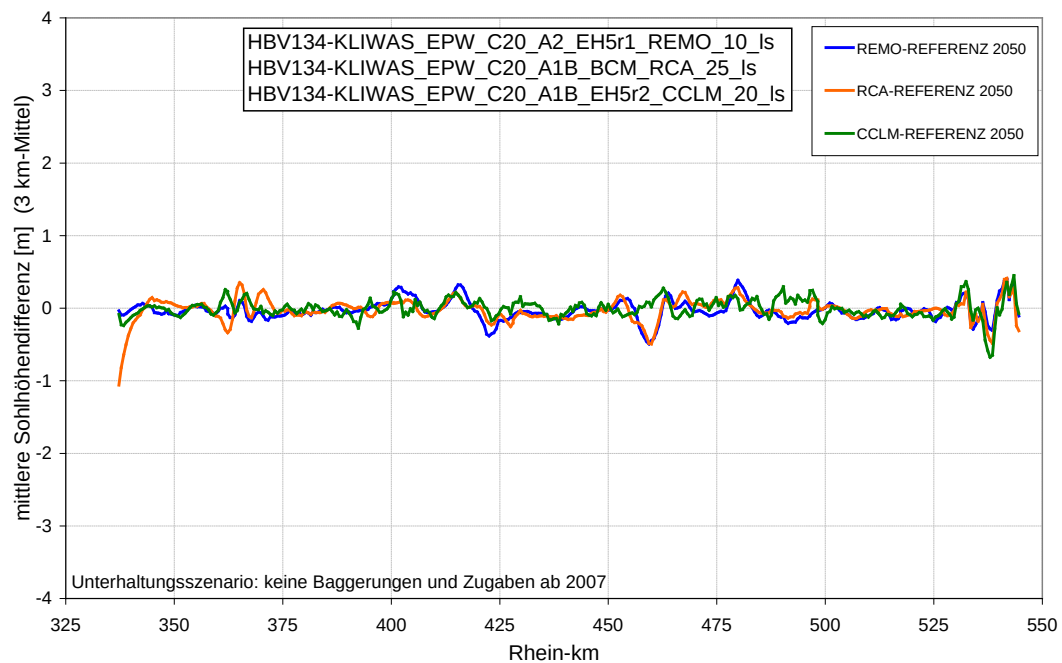


Abb. 65: Klimasignal der Sohlhöhenentwicklung bis 2050 (Differenzen der Projektionen und des Referenzlaufs).

8. Schlussfolgerungen

Um die morphologische Entwicklung des Oberrheins zu analysieren, wurden zwei Methoden angewandt. Die erste Methode basiert auf Echolotmessungen der Sohlhöhe, die zweite auf Transportmessungen. Die auf Grundlage dieser Methoden ermittelten Sohlhöhenänderungen sind grundsätzlich in guter Übereinstimmung und sichern die längerfristigen und großräumigen Trends in der Sohlhöhenentwicklung gegeneinander ab. Unterschiede in den beiden voneinander unabhängigen Analysen können teilweise auf die unterschiedliche räumliche Auflösung der beiden Methoden (Echolotaufnahmen liegen für alle Zeitpunkte der Erhebungen nur für die Fahrrinnenbreite vor, während Transportmengen annähernd über die gesamte Flussbreite erhoben werden) zurückgeführt werden, und darauf, dass beide Methoden nicht genau die gleiche Zeitspanne abdecken. Hinzu kommen bekannte Unsicherheiten der aufwändigen Sedimenttransportmessungen. Hilfreich ist daher die vergleichende Betrachtung der Sohlentwicklung mit den zeitlich und räumlich großskaligen Trends der Wasserspiegellagenentwicklung. Dabei muss beachtet werden, dass die Analyse der gleichwertigen Wasserstände vorwiegend die großräumige Entwicklung in festgelegten 10-Jahresschritten aufzeigt und lokale morphologische Veränderungen eher ausgleicht. Aufgrund der flexibleren Anpassungsoptionen an die Peilepochen bietet die Analyse der Wasserspiegelfixierungen gegenüber der Analyse der gleichwertigen Wasserstände Vorteile für die vergleichende Betrachtung von Wasserspiegellagen- und Sohlhöhenentwicklungen. In der Theorie sollte eine sich aus Peildaten ergebende negative Sohlhöhenänderung mit einer Zunahme der bettbildenden Fracht und einer Wasserspiegelsenkung einhergehen.

Aus der Auswertung der Wasserstände, der mittleren Sohlhöhen, der Feststofffrachten und der Veränderung des mittleren Sohlkorndurchmessers lassen sich Rückschlüsse auf die Flussbettentwicklung und Sohldynamik des frei fließenden Oberrheins ziehen. Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungen miteinander verglichen und synoptisch interpretiert.

Bei der Interpretation der Flussbettentwicklung anhand der einzelnen Parameter, muss berücksichtigt werden, dass eine ganze Reihe von Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen sowohl die Strömung als auch den Sedimenttransport beeinflusst haben. Nach einer Diskussion der Zuverlässigkeit der Datengrundlage erfolgt eine Analyse der großräumigen Entwicklungen welche die bislang dokumentierten Einwirkungen auf das Regime der Oberrheinstrecke (BAW, 2008) berücksichtigt.

8.1 Zuverlässigkeit der Datengrundlage

Die in Kap. 6 durchgeführte Unsicherheitsanalyse kann wie folgt zusammengefasst werden: Die Datengrundlage weist grundsätzlich Unsicherheiten auf. Dies zeigt sich besonders in den vorhandenen Diskrepanzen der aufgestellten Frachtbilanzen. Der Vergleich der beiden unabhängigen Bilanzierungsmethoden beruhend auf der Sohlhöhenentwicklung und den Fest-

stofftransportmessungen sowie der zusätzlich durchgeführte Vergleich der Wasserspiegel- und Sohlhöhenentwicklung ermöglichen es jedoch die erreichte Genauigkeit einzuschätzen.

Die Abweichungen zwischen den beiden Methoden der Sedimentbilanzierung in der Untersuchungsstrecke sind mit maximal ca. 33 % (am unteren Ende der Untersuchungsstrecke für den Bilanzierungszeitraum 1996 bis 2006, Abb. 40 und Abb. 41) als vergleichsweise gering zu bezeichnen. Die Verläufe der Wasserspiegel- und Sohlagenentwicklung stimmen großräumig, mit Ausnahme begründbarer lokaler Effekte, gut überein (Abb. 42 und Abb. 43).

Die Bilanzierungsmethode, welche auf der Sohlhöhenentwicklung basiert, benötigt eine Reihe zusätzlicher Annahmen, wodurch sich die Anzahl möglicher Fehlereinflüsse erhöht. Die Fehlerquellen dieser Analysemethode, welchen ein nicht unerhebliches mögliches Fehlerpotenzial zugesprochen werden muss, sind:

- möglicherweise ungenügende Squatkorrektur vor Einführung der GPS-Messungen,
- möglicherweise teilweise fehlerhafte Kalibrierung der Echolotsysteme und
- Unsicherheiten der Datengrundlage zu Baggerungen.

Im Resultat der Unsicherheitsanalyse kann dieser Methode dennoch die höhere Zuverlässigkeit zugesprochen werden, da in der Methodik der Feststofftransportmessungen eine größere Anzahl möglicher nicht unerheblicher Fehlerquellen identifiziert werden konnte. Diese sind:

- mögliche systematische Unterschätzung der Geschiebemessungen bei hohen Abflüssen durch fehlerhafte Positionierung des Geschiebefängers,
- mögliche systematische Unterschätzung des Sandtransports infolge ungenügender sedimentologischer Effektivität des Geschiebefängers,
- möglicherweise fehlerhafte (wegen geringer Messwertanzahl im hohen Abflussbereich) bzw. nicht repräsentative Transport-Abfluss-Beziehungen (wegen zeitlicher Veränderlichkeit des Transportverhaltens) sowie
- mögliche systematische Unterschätzung der Suspensionsfracht bei hohen Abflüssen.

Die tatsächlichen Frachten, liegen wahrscheinlich zwischen den Bilanzierungen beider Methoden, da die Sohlhöhenentwicklung die Frachten tendenziell eher überschätzt (dies betrifft die möglichen Fehlerquellen Squatkorrektur und Baggerungen, für die Kalibrierung kann keine Richtungsangabe der Fehlerwirkung gemacht werden), wohingegen die Feststofftransportbilanzierung die Frachten tendenziell unterschätzt. Drei der vier oben möglichen nicht unerheblichen Fehlerquellen der Feststofftransportmessungen wirken unterschätzend.

Die genannten möglichen nicht unerheblichen Fehlerquellen können weder nachgewiesen noch untereinander ihrer Wahrscheinlichkeit nach gewichtet werden. Als eine mögliche plausible Erklärung der Frachtdifferenz soll folgende These aufgestellt werden: Während der Hochwasserereignisse des Jahres 1999 trat in weiten Bereichen des Untersuchungsgebietes, insbesondere jedoch zwischen Rhein-km 360 und 394 sowie unterstrom von Rhein-km 415 erhebliche Erosion auf. Die dabei erodierten Mengen, welche auch einen erheblichen Sandanteil enthielten, wurden überwiegend in Suspension aus dem Untersuchungsgebiet ausgetra-

gen. Da im betreffenden Zeitraum nur eine ungenügende Zahl von Frachtmessungen, insbesondere bei hohen Abflüssen, vorliegen, wird dieses wahrscheinlich außergewöhnliche Transportereignis in der Bilanzierung der Feststofftransportmessungen ungenügend berücksichtigt. Grund ist die nicht gegebene Repräsentativität der Transportmessungen bzw. der Transport-Abfluss-Beziehungen (Kapitel 6.6). Diese mögliche Erklärung sollte für eine zukünftige Überprüfung der Datengrundlage als Arbeitshypothese aufgenommen werden.

8.2 Gewässermorphologische Entwicklung

Für die großräumige Entwicklung wird der gesamte frei fließende Oberrhein zwischen Iffezheim und der Nackenheimer Schwelle betrachtet. Letztere bildet die Erosionsbasis des Oberrheins, bis zu der Gefälle und Sohlschubspannung abnehmen und sich der Flussquerschnitt verbreitert. Entsprechend nimmt der Korndurchmesser von Sohl sediment und Geschiebe bis zur Nackenheimer Schwelle ab. Sie ist die wesentliche Randbedingung am unteren Ende des Oberrheins, die das hydraulisch-sedimentologische Regime von Unterstrom her kontrolliert, während am oberen Ende die Geschiebezugabe bei Iffezheim seit 1978 den Sedimenthaushalt und die morphologische Entwicklung des Oberrheins maßgeblich mitbestimmt.

Die aktuellen hydraulischen und sedimentologischen Verhältnisse dieser rund 150 km langen Strecke sind Abb. 66 zu entnehmen. Um die morphologischen Veränderungen seit Errichtung der Staustufe Iffezheim aufzuzeigen, werden nachfolgend die für verschiedene Jahre bzw. Zeiträume erstellten Längsschnitte des gleichwertigen Wasserstandes, der mittleren Sohlhöhe, der Feststofffracht und der mittleren Korngröße der Sohle im einzelnen diskutiert und miteinander verglichen.

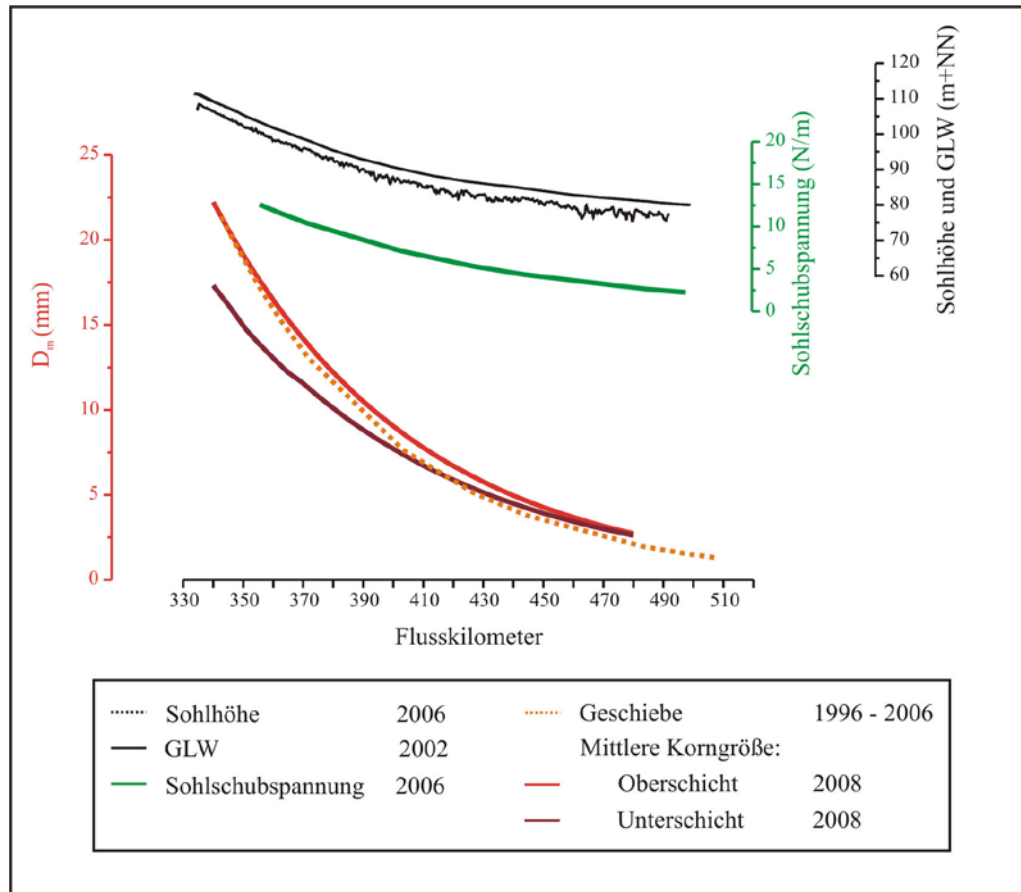


Abb. 66: Längsschnitte: D_m -Werte der Oberschicht (rot), der Unterschicht (dunkelrot) und des Geschiebes (gestrichelt), Sohlschubspannung (grün) und Sohlhöhe sowie der gleichwertige Wasserstand (GLW 2002) in schwarz

Wird von der Entwicklung des gleichwertigen Wasserstands im Nahbereich der Staustufe Iffezheim einmal abgesehen, so zeichnet sich der Zeitraum von 1982 bis 2002 im oberen Drittel (bis Rhein-km 387) durch eine Anhebung des Wasserspiegels um durchschnittlich 15 cm, im mittleren Drittel (Rhein-km 387 bis Rhein-km 444) durch Schwankungen um die Nulllage und im unteren Drittel (Rhein-km 444 bis Rhein-km 500) durch eine Wasserspiegel-senkung in der Größenordnung von 15 cm aus (Abb. 2).

Die Sohlhöhenentwicklung zwischen 1985 und 2006 zeigt nur geringfügige Änderungen oberstrom von Rhein-km 360, lokale Erosion in den Abschnitten Rhein-km 360 bis 364 und 388 bis 395. Dazwischen, sowie im weiteren Verlauf bis zur Neckarmündung, kommt es zu Auflandungen. Unterhalb von Rhein-km 428 bis zum Ende der Untersuchungsstrecke kommt es zu Erosion (Abb. 28).

Die Frachtbilanzen im Zeitraum 1986 bis 2006 bestätigen das großräumige Bild der ausgeglichenen Bilanz und nachfolgender Auflandung bis etwa zur Neckarmündung (Minimum der sohlhöhenrelevanten Fracht an der Messstelle Mannheim, Rhein-km 427). Die unterstrom anschließende Erosionsstrecke wird durch die entsprechend steigenden Frachten bestätigt (Abb. 35, Abb. 36). Die Abnahme der Fracht bis zur Neckarmündung ist dabei ganz überwiegend durch die Ablagerung der Grobkiesfraktion begründet. Diese nimmt im Bilanzierungs-

zeitraum 1996 bis 2006 zwischen den Messstellen Plittersdorf und Mannheim von 220 000 t/a (entspricht ca. 50 % der Geschiebefracht) auf nahezu Null ab (Abb. 37). Die Ablagerung geschieht dabei kontinuierlich, und entsprechend der Frachtbilanzierung ohne erkennbaren Schwerpunkt. Auf den als Abriebverlust angesetzten Betrag von 250 t/(km · a) (Kapitel 5.2) entfallen mit 23 000 t/a bis Rhein-km 427 ca. 10 % der Frachtabnahme.

Der Sandgehalt von Sohle und Geschiebe liegt ab Worms (Rhein-km 444) über 20 % und steigt bis Nierstein (Rhein-km 484) auf über 50 % an (Abb. 15 und Abb. 37). Dieser Flussabschnitt bildet eine Übergangszone zwischen einer kiesigen, komponentengestützten Sohle und einer sandigen, matrixgestützten Sohle. Laut Wilcock (1998) beginnt die Umwandlung der Sohle bei Sandgehalten von 25 %. Da Sand geringere kritische Sohlschubspannungen benötigt um transportiert zu werden als Kies, kann der Anstieg der bettbildenden Fracht möglicherweise auf die verstärkte Aufnahme von Sand zurückgeführt werden. Zum einem steht mehr Sand in der Sohle zum Transport zur Verfügung und zum anderen kann bei geringeren Sohlschubspannungen auch eher Sand als Kies transportiert werden.

Infolge der abnehmenden Schubspannungen sedimentiert der grobe Anteil der Kiesfraktion und wird nicht weiter transportiert. Dafür steigt die suspendierte Sandfracht signifikant an. Im Zuge des Tracerversuchs bestätigten Tracerfunde in den Bühnenfeldern, dass ungefähr 10 % des Tracers in Bühnenfelder eingetragen wurden (BfG & WSA-Freiburg, 2006). In welcher Größenordnung ein Austrag aus den Bühnenfeldern stattfindet, ist jedoch nicht bekannt. Aus Arbeiten von Ten Brinke *et al.* (2004) am niederländischen Rhein geht hervor, dass während Hochwasser Sand in die Bühnenfelder eingetragen und abgelagert wird, während er bei niedrigen Wasserständen auch bedingt durch schiffsinduzierten Schwall und Sunk wieder erodiert wird. Demnach sollten sich die dort abgelagerten und erodierten Sedimentmengen ausgleichen und die Fracht kaum beeinflussen.

Die Summe aus Geschiebefracht und der gesamten Sandfracht zeigt, dass die Fracht von Iffezheim nach Nierstein zunimmt. Da an der Messstelle Worms aber relativ niedrige Gesamtfrachten registriert werden, ist diese Zunahme nicht auf eine Sandzufuhr aus dem Neckar, sondern auf Sohlerosion im Abschnitt Worms bis Nierstein, zurückzuführen. Nach Gölz & Tippner (1985) findet auf der Oberrheinstrecke ein Austausch von Kies gegen Sand statt. Auf dieser Strecke nimmt der Strom verstärkt Sand aus der Sohle auf und transportiert ihn teils als Geschiebe teils als Schwebstoff nach unterstrom. Dies deckt sich mit der aus der Wasserspiegelentwicklung und der Sohlhöhenentwicklung abgeleiteten Tendenz.

Der mittlere Korndurchmesser des Geschiebes ist bis Rhein-km 420 weitgehend identisch mit dem der Oberschicht der Sohle, wird unterstrom aber merklich kleiner (Abb. 42). Letzteres ist ein zusätzliches Indiz für die bevorzugte Aufnahme feiner Fraktionen im unteren Streckenabschnitt. Auch die im zeitlichen Verlauf dokumentierte Abnahme des Geschiebekorndurchmessers im Untersuchungsgebiet spricht für eine verstärkte Aufnahme feinerer Fraktionen während des letzten Jahrzehnts (s. Abb. 15).

Wie der Vergleich von Deckschicht, Oberschicht und Unterschicht zeigt, nimmt der mittlere Korndurchmesser von der Sohloberfläche bis zur Unterschicht generell ab, wobei der Korn-

größenunterschied oberstrom von Worms deutlicher ausgeprägt ist als unterstrom. An der Sohloberfläche werden die feinen Fraktionen bevorzugt abtransportiert. Dies führt insbesondere bei fallenden Wasserständen zu einer gewissen Grobkornanreicherung, aber nicht zu einer dauerhaft erosionsstabilen Deckschicht. Schon bei niedriger bis mittlerer Wasserführung sind flache Transportkörper („gravel sheets“) zu beobachten (BfG & WSA-Freiburg, 2006). Aus diesen entwickeln sich bei höheren Abflüssen Kies- und Sand/Kiesdünen. Die Dünen werden bei weiter zunehmenden Abflüssen sowohl länger als auch höher und können bei Extremereignissen einen Meter Höhe überschreiten. Bei abnehmenden Abflüssen bilden sich die Transportkörper mit einer gewissen Verzögerung zurück.

Dünen sind ein Indiz für die hohe Mobilität der Sohlsedimente des Oberrheins. Sie sind im Wesentlichen verantwortlich für die Umwälzung der Sohle, dass heißt für das Ausspülen feiner Fraktionen aus dem Untergrund und der Verlagerung gröberer Fraktionen in tiefere Bereiche durch vertikale Sortierungsprozesse. Aus den maximal erreichten Dünenhöhen (2001, 2007) konnte für fünfjährige Hochwasser eine Umlagerungstiefe von 0,5 m bestimmt werden. Daraus folgt, dass alle untersuchten Sohlsedimente (Deck-, Ober- und Unterschicht) umgewälzt werden, wobei die Oberschicht häufiger von Umwälzung betroffen ist als die Unterschicht.

Der frei fließende Oberrhein zeichnet sich durch eine intensive durch Dünenbildung charakterisierte Sohldynamik und durch hohe Mobilität der Sohlsedimente aus. Die Bildung stabiler Deckschichten ist bei den gegebenen sedimentologischen Verhältnissen ohne künstliche Grobkornzugabe auf der gesamten Strecke nicht zu erwarten. Die aus der Entwicklung der Kriterien gleichwertiger Wasserstand, mittlere Sohlhöhe und Feststofffracht abgeleitete Erosionstendenz steht jedoch in Zusammenhang mit der deutlich messbaren Vergrößerung der Sohlsedimente zwischen 1988 und 2008.

Durch die Zugabe von Geschiebeersatzmaterial, die nach dem Bau der letzten Staustufe eingerichtet wurde, kann in deren Unterwasser eine Sohleintiefung vermieden werden. Der Strom nimmt das bei Iffezheim zugegebene Kies-Sandgemisch auf und transportiert es talabwärts. Zum Teil lädt er die gröberen Fraktionen des Geschiebes oberhalb der Neckarmündung ab und nimmt dafür zunehmend feineres Material aus der Sohle auf. Infolgedessen tieft sich die Sohle unterstrom der Neckarmündung tendenziell ein, während oberstrom Ablagerungstendenzen festzustellen sind. Sohleintiefungen überwiegen großräumig im Bereich von km 425 bis km 520 und lokal um km 350, km 365 und im Germersheimer Bereich um km 385-390, welcher während der abflussstarken Jahre um den Jahrtausendwechsel einen erheblichen Austrag von Kies und Sandmaterial aus der Sohle erfahren hat. Die anderen Bereiche des Flussbettes sind stabil oder landen in Teilstrecken sogar auf. Dennoch weist der größte Teil des Untersuchungsgebietes im zurückliegenden Zeitraum 1996 bis 2006 eine Tendenz zur Sohleintiefung auf. Die durchschnittliche Eintiefungsrate liegt für das gesamte Untersuchungsgebiet bei etwa 0,5 cm pro Jahr.

In defizitären Flussabschnitten sollte der Sedimenttransport nach unterstrom zunehmen. Die Transportmessungen spiegeln dies zum großen Teil wider und geben weiterhin einen wichtigen Anhaltspunkt für die Art bzw. den Charakter der großräumigen Sohleintiefung: Im Untersuchungsgebiet nimmt der Geschiebetransport flussabwärts ab, während der Suspensions-

transport zunimmt; beide Trends sind statistisch signifikant. Die Geschiebefracht besteht hauptsächlich aus Kies und der Teil der hier betrachteten Suspensionsfracht aus Sand.

Im Untersuchungsgebiet tritt eine Abnahme an Kies möglicherweise in Kombination mit einer Aufnahme an Sand auf. Die Zunahme der Suspensionsfracht kann auch auf eine relevante Sandzufuhr aus Nebenflüssen hinweisen. Die auf Basis von Echolotaufnahmen beobachtete Sohleintiefung jedoch deutet darauf hin, dass diese Zunahme hauptsächlich auf die Erosion aus der Sohle zurückzuführen ist. Die Sohloberfläche besteht aus einer kiesigen Deckschicht, die keinen Sand enthält; die Sandquelle muss sich tiefer unter der Sohloberfläche befinden. Die tiefere Sohlschicht enthält ein Sand-Kies-Gemisch. Wird der Sand erodiert, bleibt der Kies zurück und bildet eine überwiegend kiesige Schicht. Zusammen mit dem Kies der vom Fluss abgelagert wurde, müsste sich die Mächtigkeit dieser Schicht vergrößern. Während des Betrachtungs-Zeitraumes (1988-2008) nahm die Sohlvergrößerung tatsächlich zu, ein Vorgang der längerfristig wiederum den Geschiebetransport und die weitere Sohleintiefung hemmt.

Der großräumige Trend der Vergrößerung der oberen Schicht der Gewässersohle ist prinzipiell im Einklang mit der im zurückliegenden Zeitraum beobachteten defizitären morphologischen Entwicklung. Die Analysen von Sedimentzusammensetzung, Sedimenttransport und Sohlenentwicklung werden zusätzlich durch die Analyse der Wasserspiegellage bestätigt. Die Ergebnisse aus dieser Betrachtung zeigen, dass die Wasserstände bis kurz oberhalb der Neckarmündung seit dem Bau der Staustufe Iffezheim zum Teil deutlich angestiegen sind. In den letzten Jahren scheint sich dieser Trend abgeschwächt zu haben. Für den Bereich unterhalb der Neckarmündung bis Mainz sind hingegen für den gesamten Zeitraum eher gleichbleibend geringere Wasserstandsabsenkungen festzustellen. Diese Beobachtungen sind in guter Übereinstimmung mit den Auswertungen der Entwicklung der mittleren Sohlenhöhe aus Echolotaufnahmen und Frachtberechnungen. Insgesamt ist im Untersuchungsgebiet ein deutlicher Trend der Absenkung und ein überwiegend defizitäres System insbesondere unterstrom der Neckarmündung zu erkennen.

9. Literatur

BAW (1970): Untersuchungen der Veränderungen der Höhenlage der Rheinsohle. Das Sohlenkorn des Rheins zwischen Straßburg und Bingen. Teilbericht I. Karlsruhe, Bundesanstalt für Wasserbau, 1-15.

BAW (2008): Optimierung der hydraulisch-morphologischen Situation zwischen Iffezheim und Mainz. Historische Entwicklung des Regelungssystems zwischen Iffezheim und Mainz. Karlsruhe, Bundesanstalt für Wasserbau, 1-11.

BFG & WSA-FREIBURG (2006): Tracerversuch Iffezheim. Koblenz/Freiburg, Bundesanstalt für Gewässerkunde/Wasser-und Schifffahrtsamt Freiburg (Bfg-1530), 1-65.

BFG (1993): Entwicklung und Beobachtung der Sohlenerosion im Längsverlauf des Rheins. Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG-0762), 1-22.

BFG (2007): Volumen und Sohlhöhtrendberechnung mit der Prismenmethode. Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde, 1-51.

BfG (2008): Analyse von Wasserspiegelfixierungen am Rhein zwischen Iffezheim und Mainz zur Ermittlung zeitlicher Wasserstandsänderungen zwischen 1978 und 2008. Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG-1634).

BfG (2009a): Morphological development of the Rhine between 1996 und 2006. A comparison of two approaches: sediment transport measurements and echosounding surveys. Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG-1640), 1-45.

BfG (2009b): Stromachs-orientierte Darstellung potenzieller Versatzhöhen durch die Änderungen im Höhensystem. Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG-1663), 1-19.

BMV (2002): Neufestsetzung der gleichwertigen Wasserstände (GLW) des Rheins 2002. Bundesministerium für Verkehr. Zentralkommission für die Rheinschifffahrt, Protokoll 26

CARLING: P.A, GLAISTER, M., GÖLZ, E., REDECKI, A. & ROSENZWEIG, S. (1993): Untersuchung und numerische Modellierung von subaquatischen Dünen im Rhein bei Niederwalluf (Rheingau). Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG-0774), 1-31.

DELTARES (2010): SOBEK-RE One-dimensional Hydraulic Modelling System, Software Version 2.52.007, Deltares, Delft, The Netherlands.

DGJ (2003): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch: Rheingebiet, Teil I: Hoch- und Oberrhein, Herausgeber: Landesamt für Umweltschutz Baden Württemberg, Karlsruhe, 2003.

DVWK (1992): Regeln zur Wasserwirtschaft. Geschiebemessungen. Hamburg/Berlin, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (127/1992), 1-53.

FERGUSON, R. I. (1986): River loads underestimated by rating curves. Water Resources Research 22, 74-76.

FRINGS, R.M., KLEINHANS, M.G. & VOLLMER, S. (2008): Discriminating between pore-filling load and bed-structure load: a new porosity-based method, exemplified for the River Rhine. Sedimentology 55, 1571-1593.

GEHRES, N. (2009): Flussbettentwicklung und Sohldynamik des frei fließenden Oberrheins von Iffezheim bis Mainz von 1975 bis heute. Diplomarbeit Universität Stuttgart angefertigt in der BfG, Koblenz, 1-85.

GÖLZ, E. & TIPPNER, M. (1985): Korngrößen, Abrieb und Erosion am Oberrhein. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 29, 115-122.

GÖRGEN, K., BEERSMA, J., BRAHMER, G., BUIITEVELD, H., CARAMBIA, M., DE KEIZER, O., KRAHE, P., NILSON, E., LAMMERSEN, R., PERRIN, C., VOLKEN, D. (2010): Assessment of Climate Change Impacts on Discharges in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. CHR-Report No. 1.23.

KLEINHANS, M.G. (2001): The key role of fluvial dunes in transport and deposition of sand-gravel mixtures, a preliminary note. Sedimentary Geology 143, 7-13.

KLEINHANS, M.G. (2002): Sorting out sand and gravel: Sediment transport and deposition in sand-gravel bed rivers. Utrecht, Netherlands Geographical Studies, 1-317.

MOHRLOK, U., BETHGE, E., LEHMANN, B., HILLEBRAND, G., MAIER, D. (2009): Spannungsfeld Hochwasserrückhaltung und Trinkwassergewinnung – Vermeidung von Nutzungskonflikten, Teilprojekt C: Bewertung des Sickerwassertransports von Schadstoffen aus Überflutungsflächen ins Grundwasser bei extremen Hochwässern. Endbericht des BMBF-Vorhabens im RIMAX-Schwerpunkt. IWG-Bericht Nr. A-1038. Universität Karlsruhe (TH).

SAUER, W. (2000): Quantifizierung sohlhöhenrelevanter Feststofftransportprozesse in der Elbe. Koblenz, Berlin, Bundesanstalt für Gewässerkunde, 1-42.

SCHMEGG, J. (2005): Feststoffmessungen - Die quantitative Grundlage der Feststoffbewirtschaftung. BfG-Veranstaltung: 7. Gewässermorphologisches Kolloquium, Koblenz, Bundesanstalt für Gewässerkunde, 18-24.

SOBEK-RE Help Desk (2005): Technical Reference Manual Morphology & Sediment Transport.

STORM, C., BOLLEBAKKER, P., DE JONG, J., MOL, G. (1993): Nauwkeurigheid zandbalans Westerschelde 1965-1990 en aanbevelingen ter optimalisatie. Rijkswaterstaat, Rapport RIKZ-94.008.

TEN BRINKE, W.B.M., SCHULZE, F.H. & VAN DER VEER, P. (2004): Sand exchange between groyne field beaches and the navigation channel of the Dutch Rhine: the impact of navigation versus river flow. River Research and Applications 20 (8), 899-928.

VAN RIJN, L.C. (1993): Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas. Part I. Amsterdam, Aqua Publications, 1-715.

WILCOCK, P.R. (1998): Two-fraction model of initial sediment motion in gravel bed rivers. Science 280, 410-412.

WSA-DRESDEN (2008): Morphologie. Wasser- und Schifffahrtsamt Dresden. 25.11.2008, from <http://www.wsa-dresden.wsv.de/fachinformation/gew/gew-mor.html>.

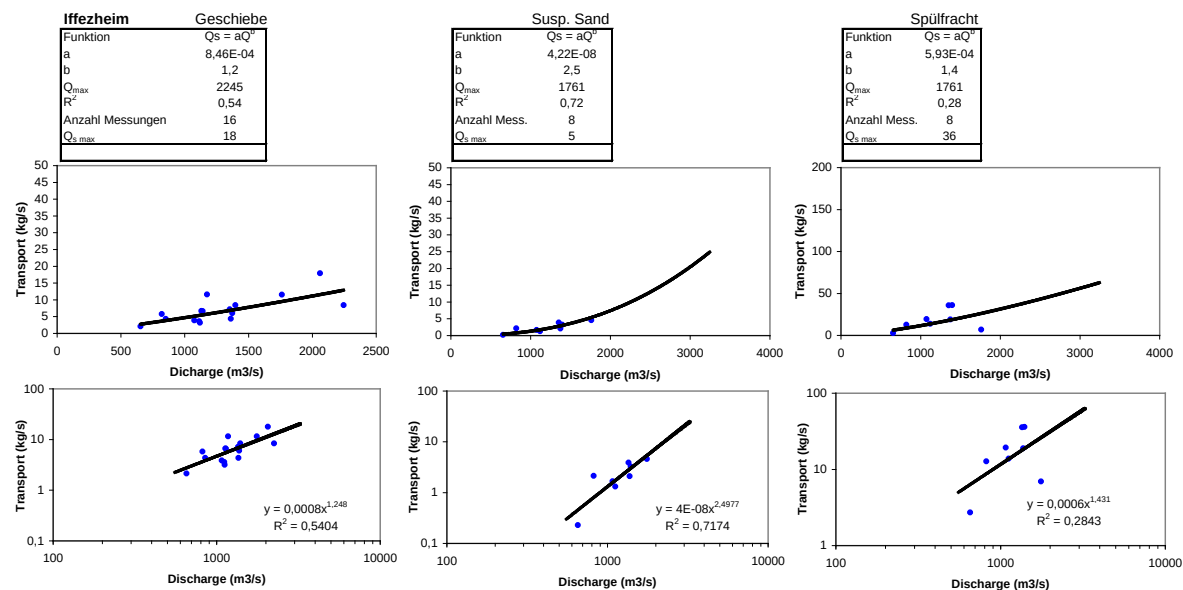
WSD-SW (2007): Kompendium der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest. Organisatorische und technische Daten, Binnenschifffahrt, Aufgaben, Wasserstraßen. Rostock, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), 1-287.

YALIN, M.S. (1964): Geometrical perspectives of sand waves. Journal of the Hydraulic division, ASCE 90 (HY5), 105-119.

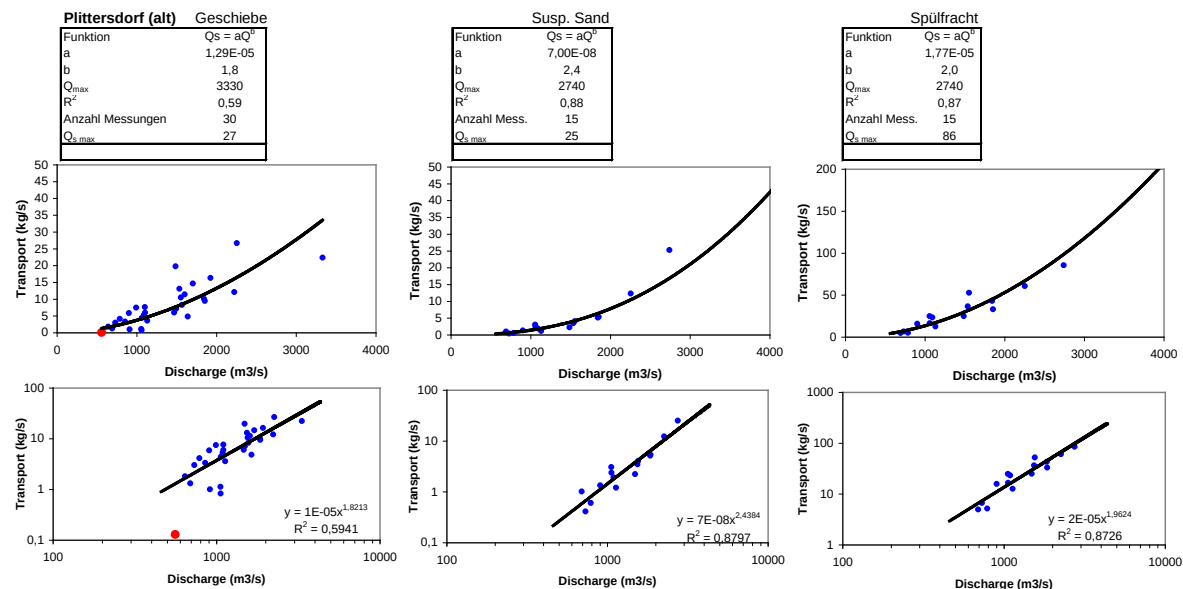
Anhang

Transport-Abfluss-Beziehungen für den Zeitraum 1985-2006

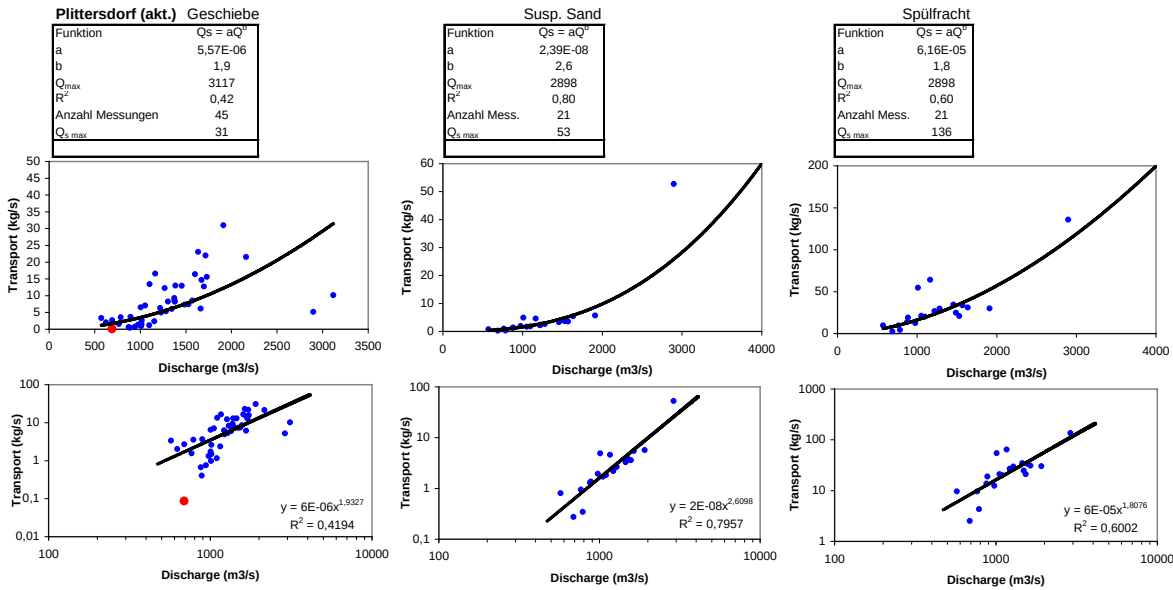
Transport-Abfluss-Beziehungen für Iffezheim 1985-2006



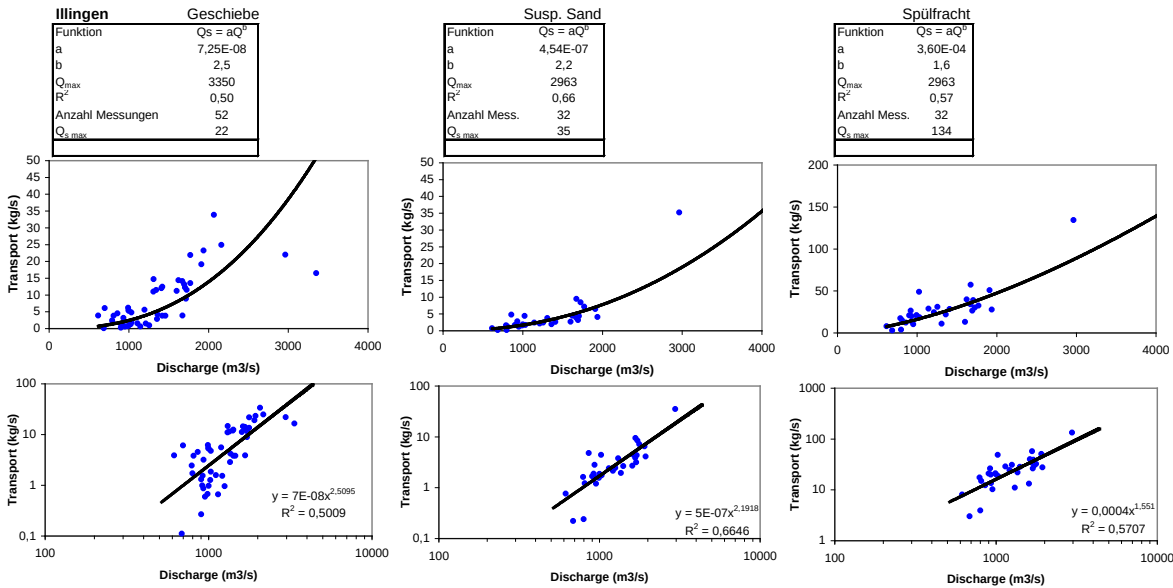
Transport-Abfluss-Beziehungen für Plittersdorf (alt) 1985-2006



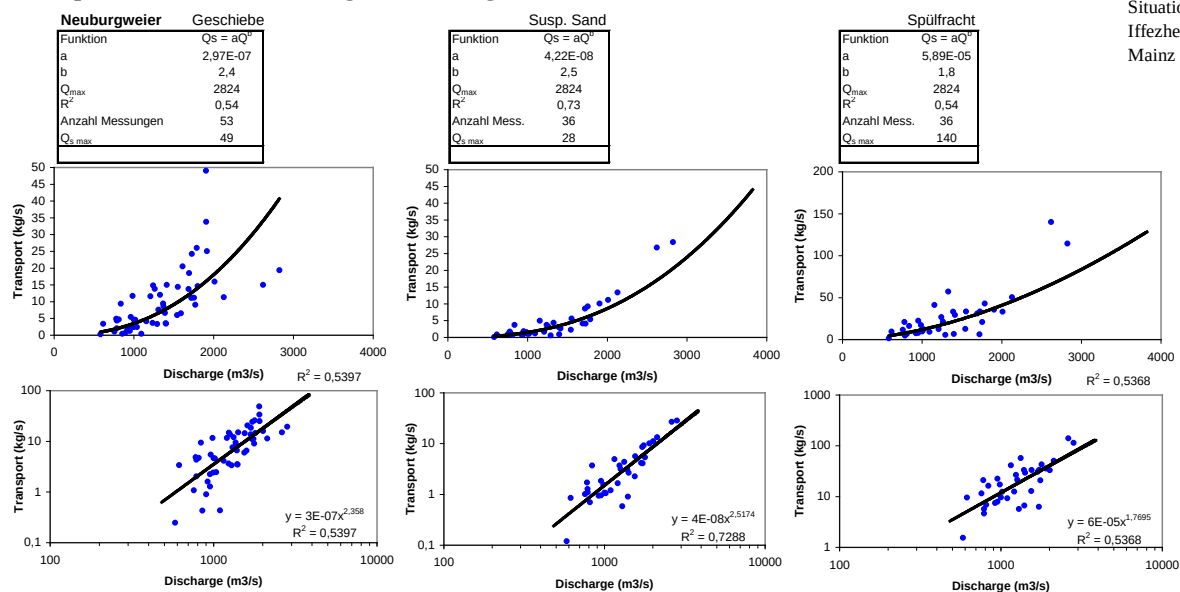
Transport-Abfluss-Beziehungen für Plittersdorf (aktuell) 1985-2006



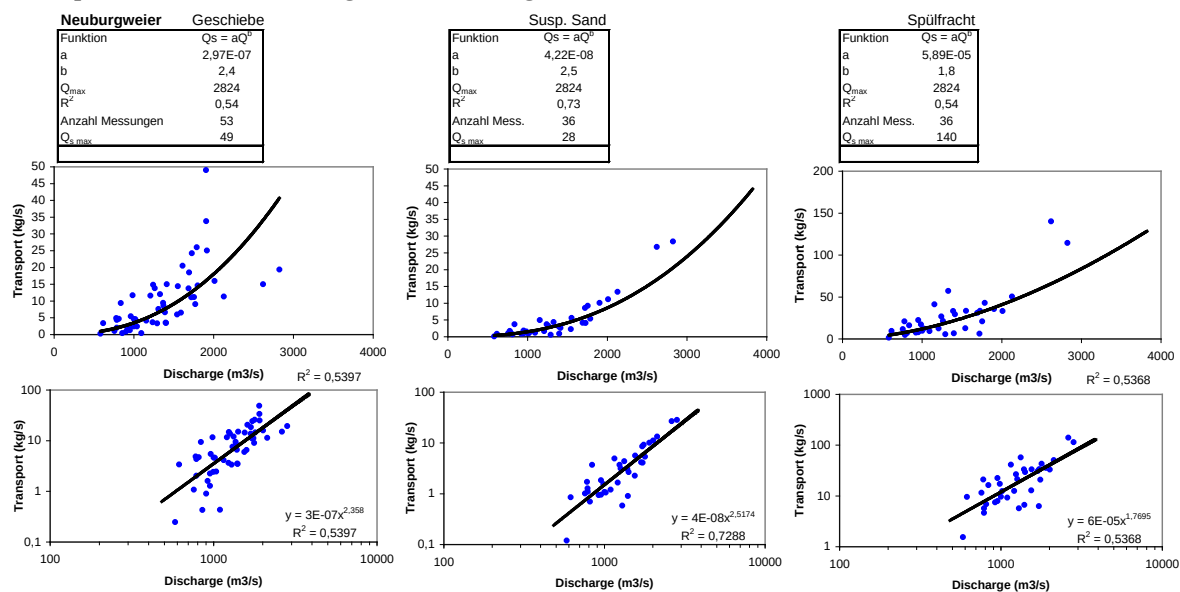
Transport-Abfluss-Beziehungen für Illingen 1985-2006



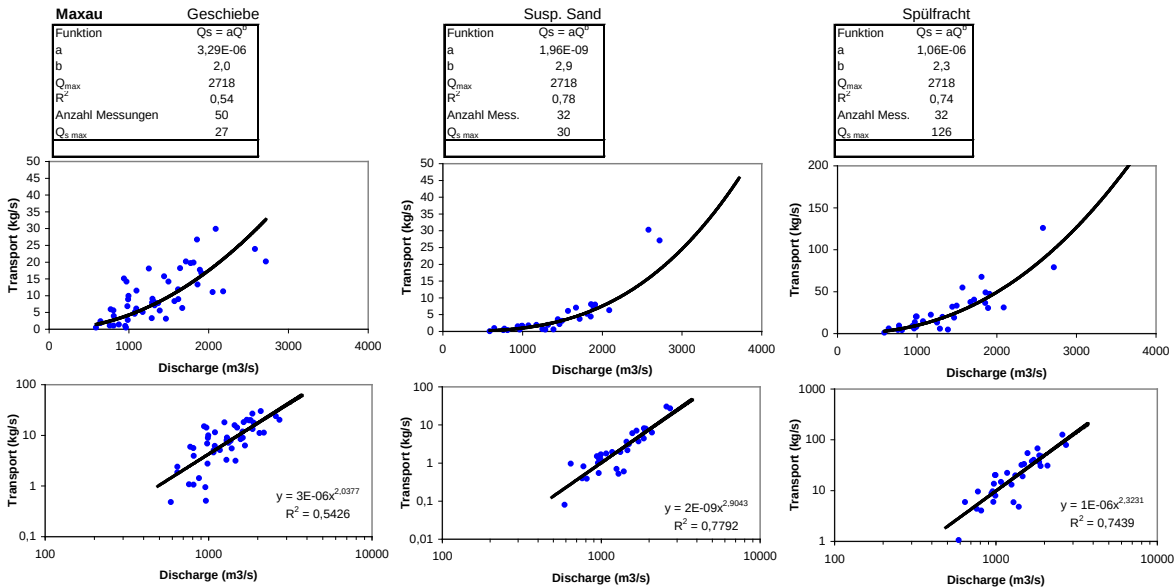
Transport-Abfluss-Beziehungen für Illingen 1985-2006



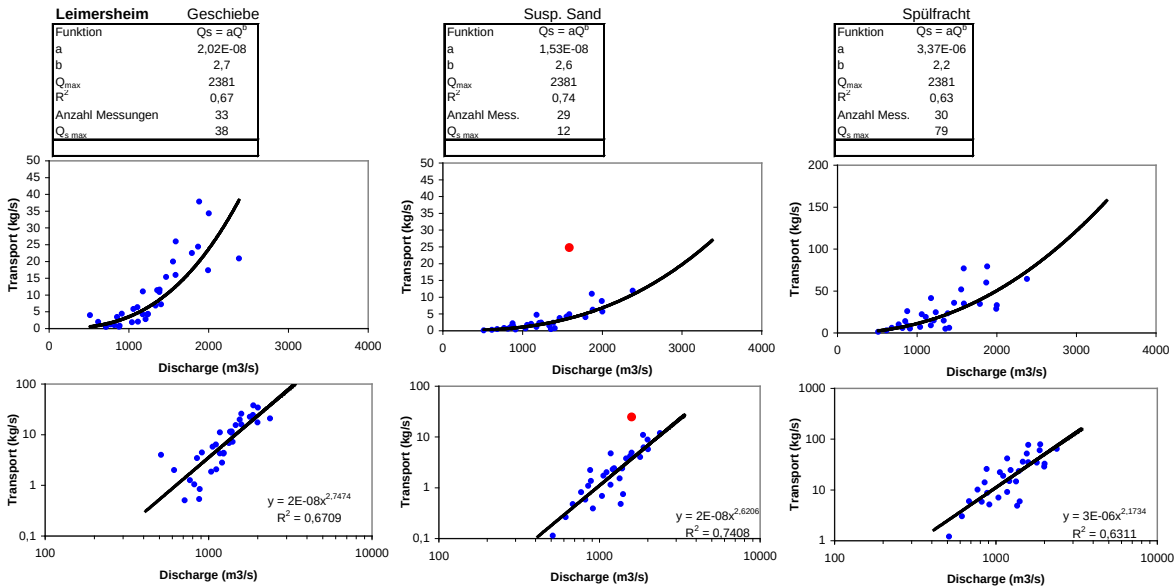
Transport-Abfluss-Beziehungen für Neuburgweier 1985-2006



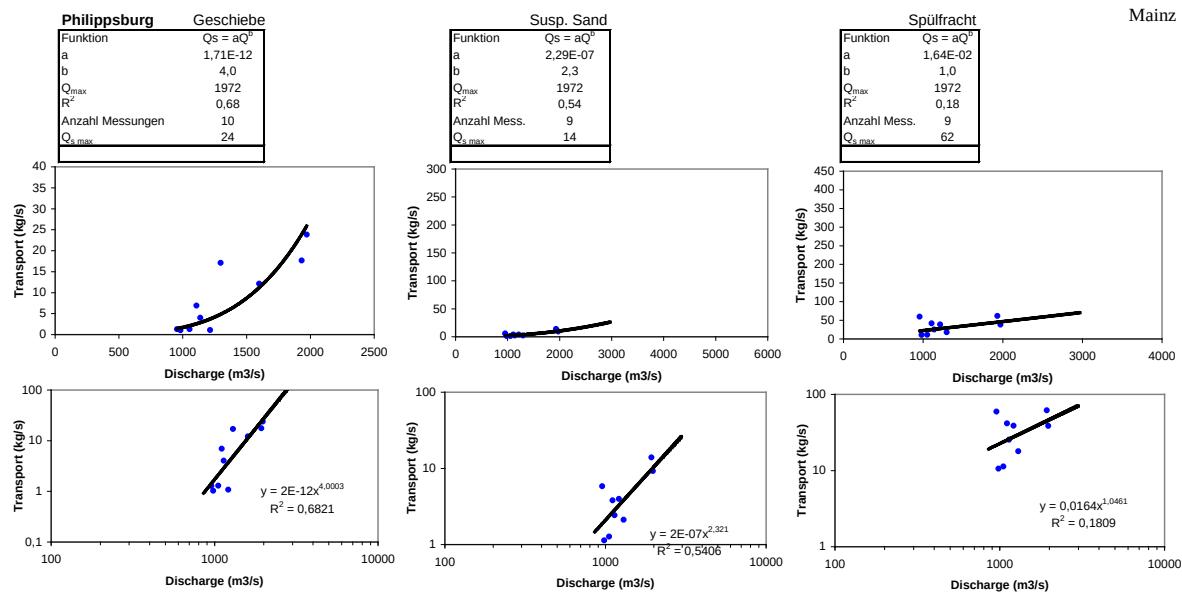
Transport-Abfluss-Beziehungen für Maxau 1985-2006



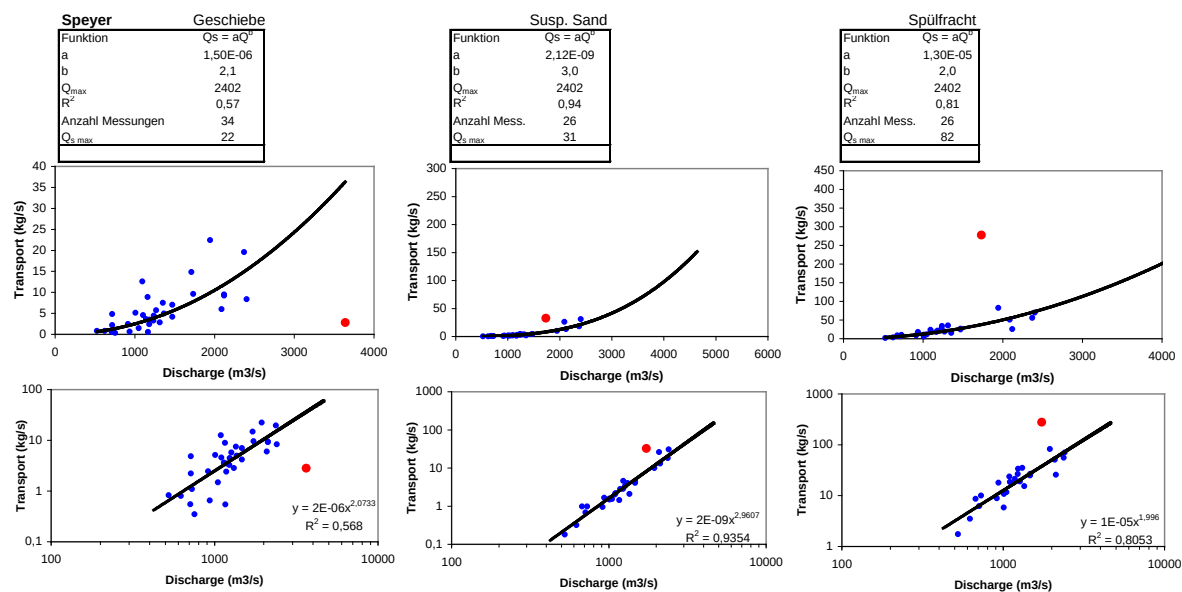
Transport-Abfluss-Beziehungen für Leimersheim 1985-2006



Transport-Abfluss-Beziehungen für Phillipsburg 1985-2006

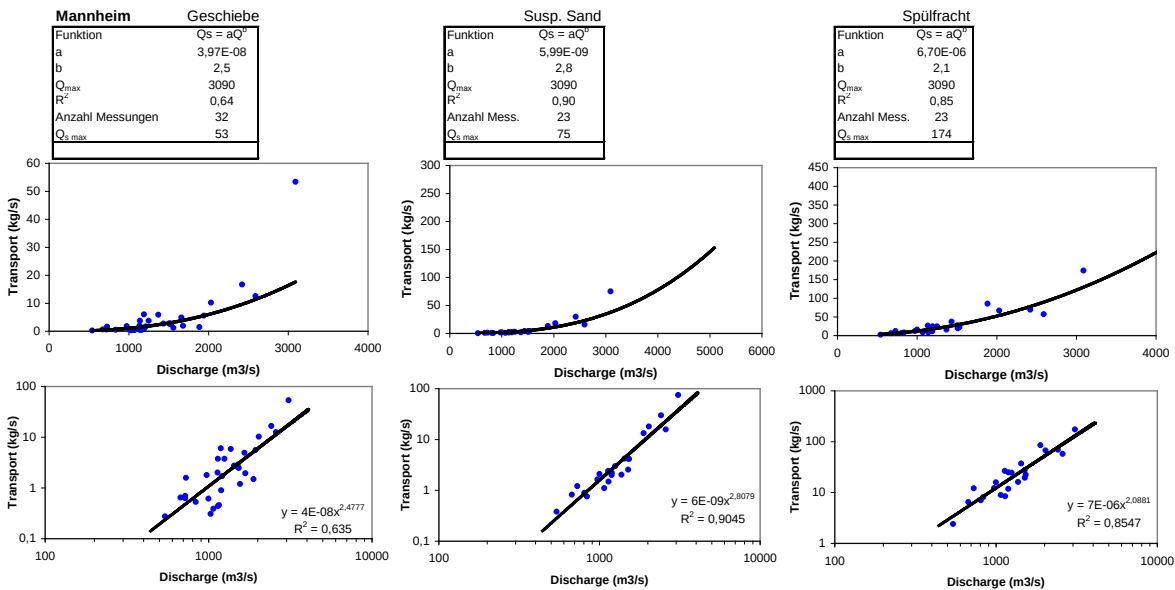


Transport-Abfluss-Beziehungen für Speyer 1985-2006

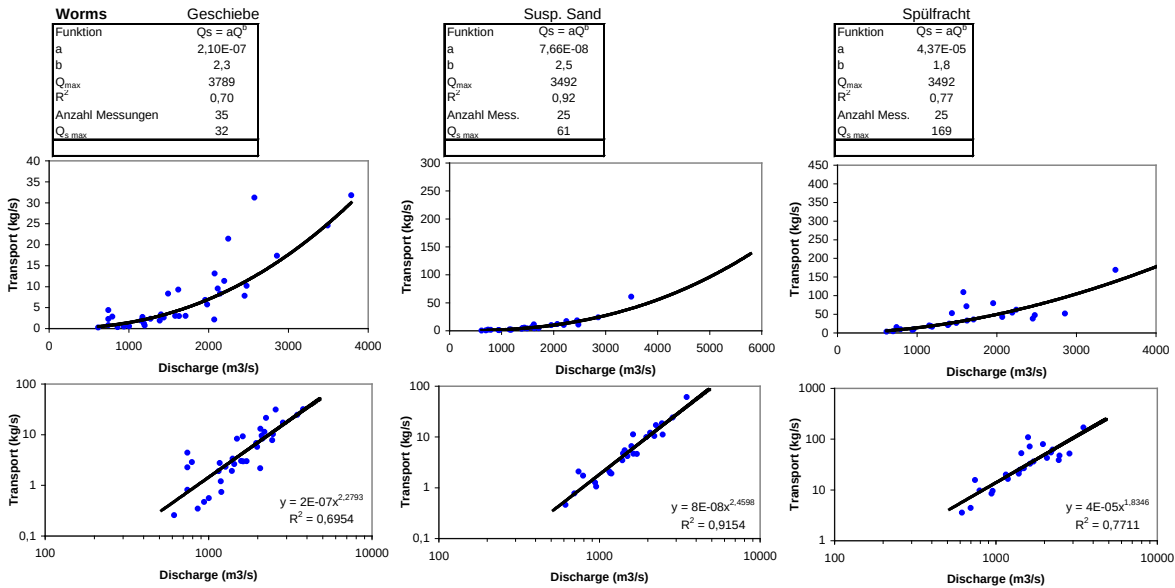


Analyse und
Bewertung der
hydraulisch-
morphologischen
Situation zwischen
Iffezheim und
Mainz

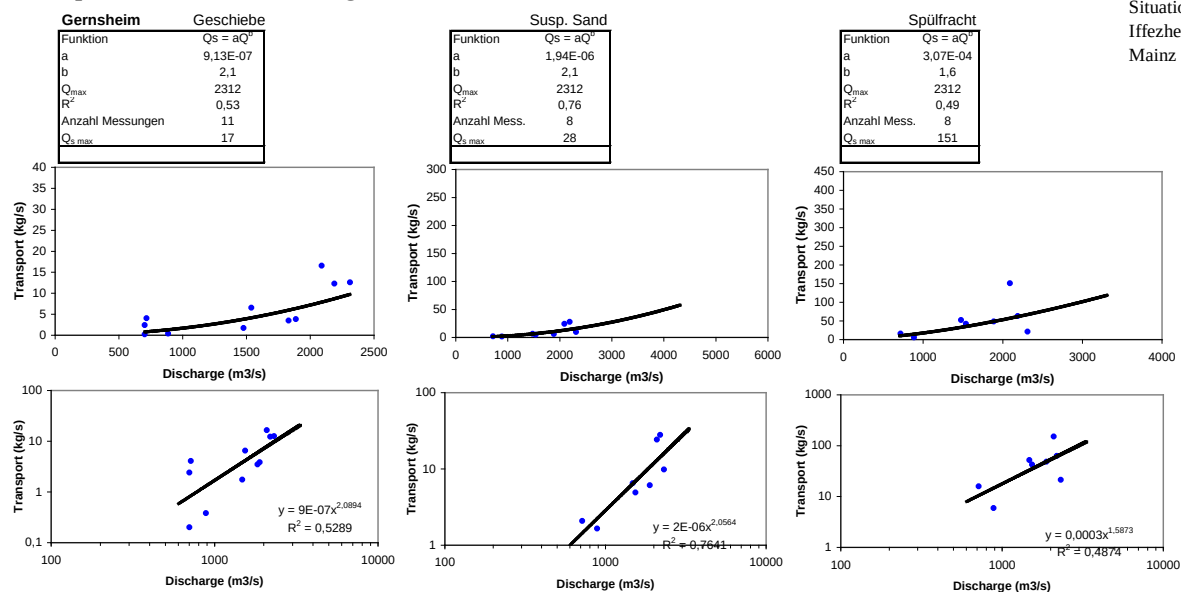
Transport-Abfluss-Beziehungen für Mannheim 1985-2006



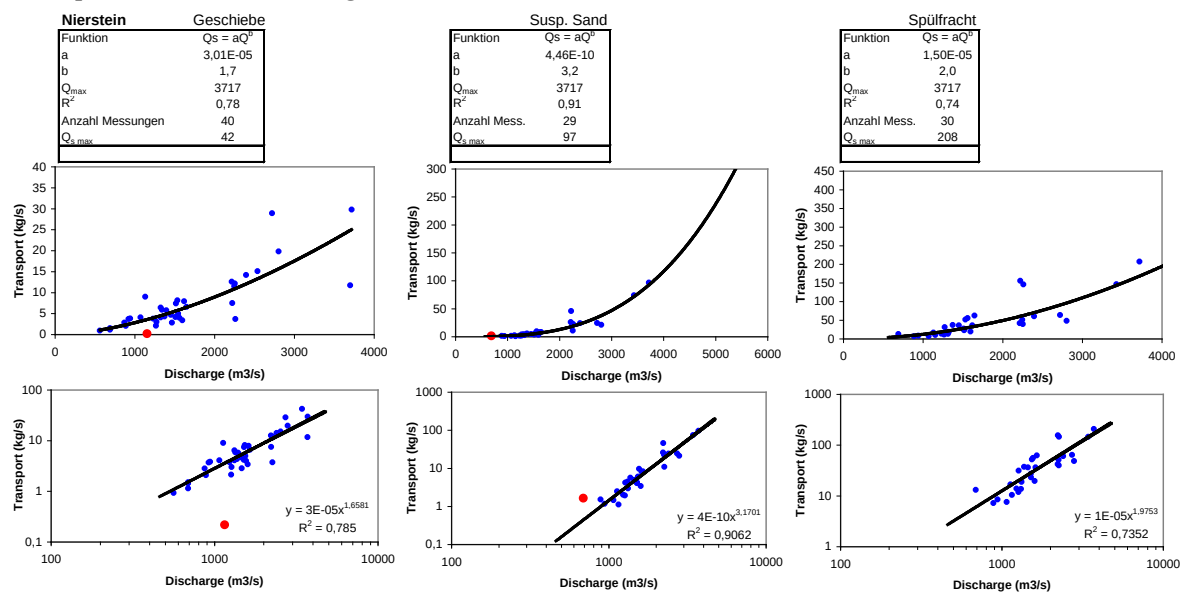
Transport-Abfluss-Beziehungen für Worms 1985-2006



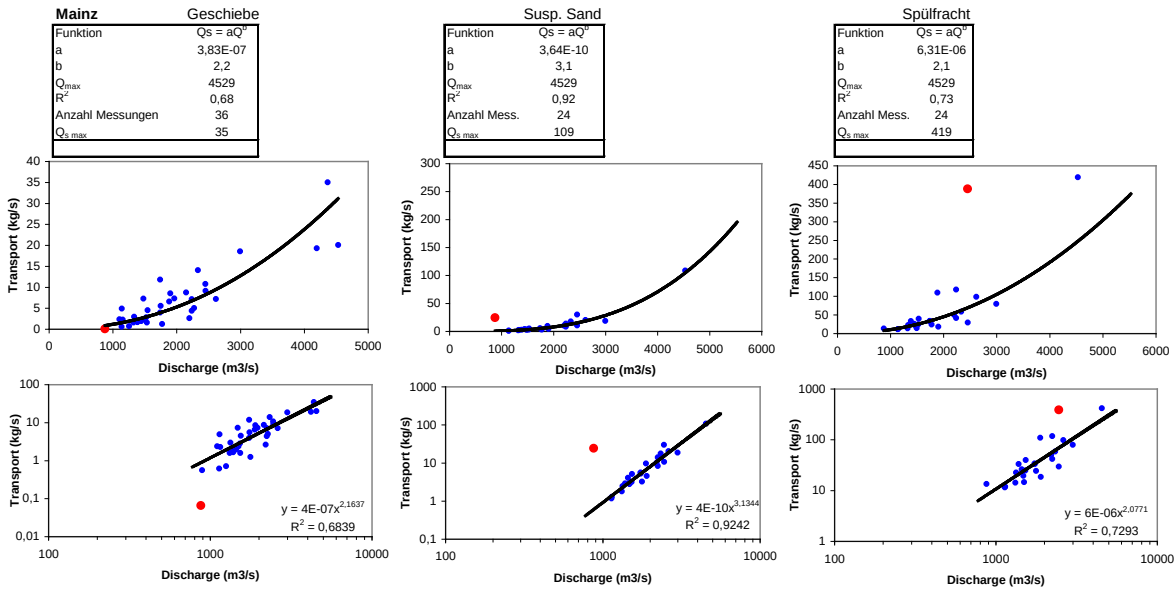
Transport-Abfluss-Beziehungen für Gernsheim 1985-2006



Transport-Abfluss-Beziehungen für Nierstein 1985-2006

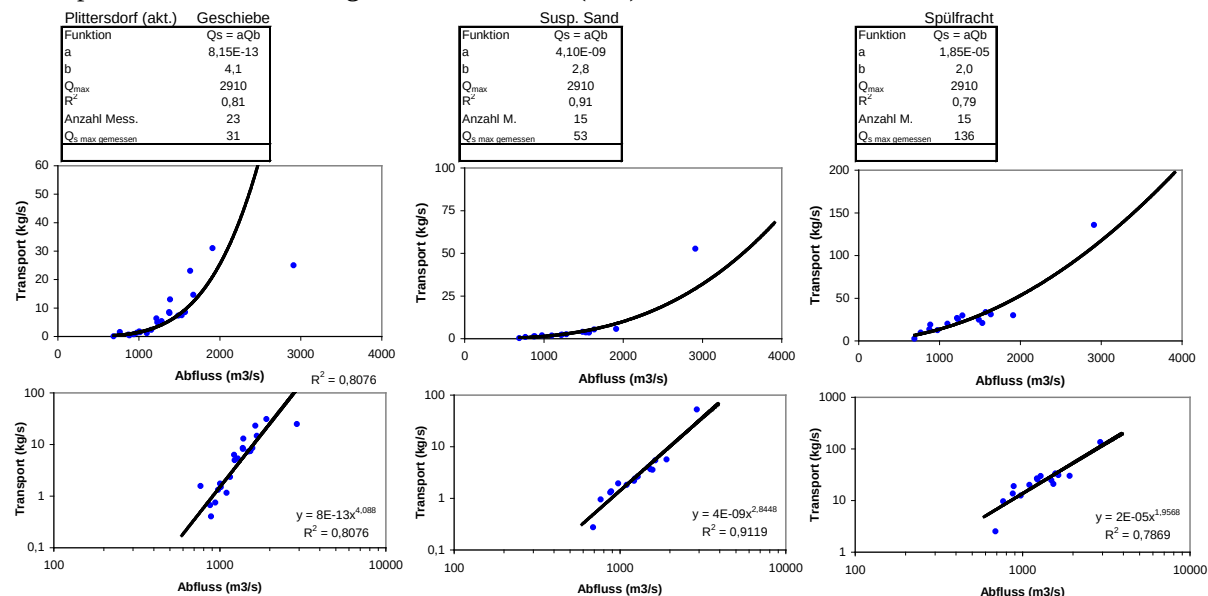


Transport-Abfluss-Beziehungen für Mainz 1985-2006

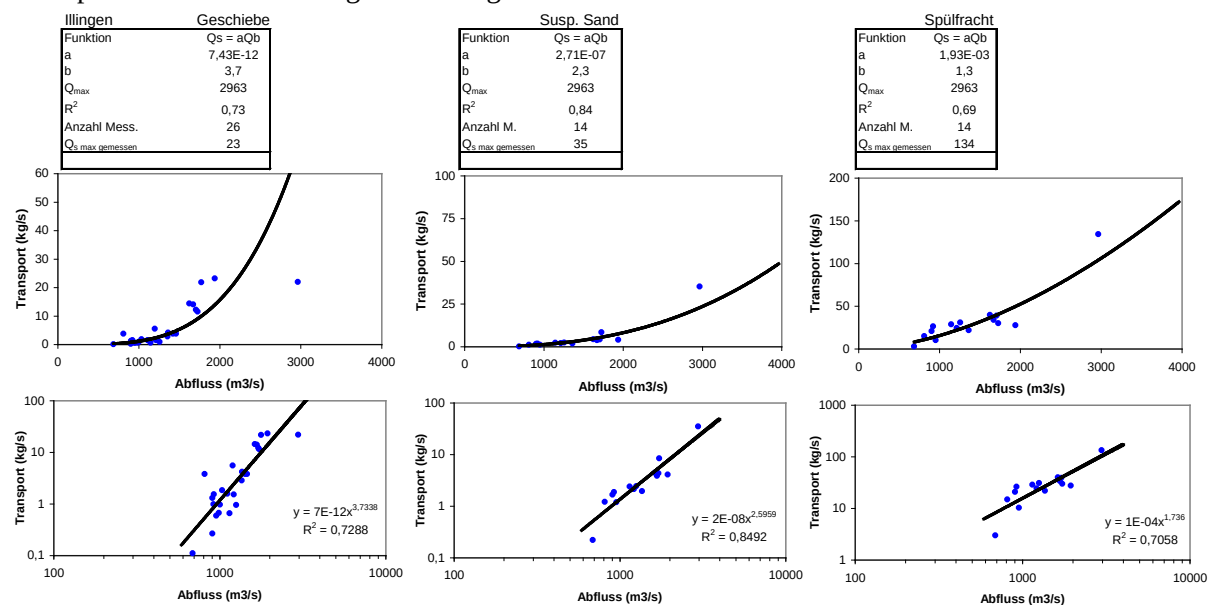


Transport-Abfluss-Beziehungen für den Zeitraum 1996-2006

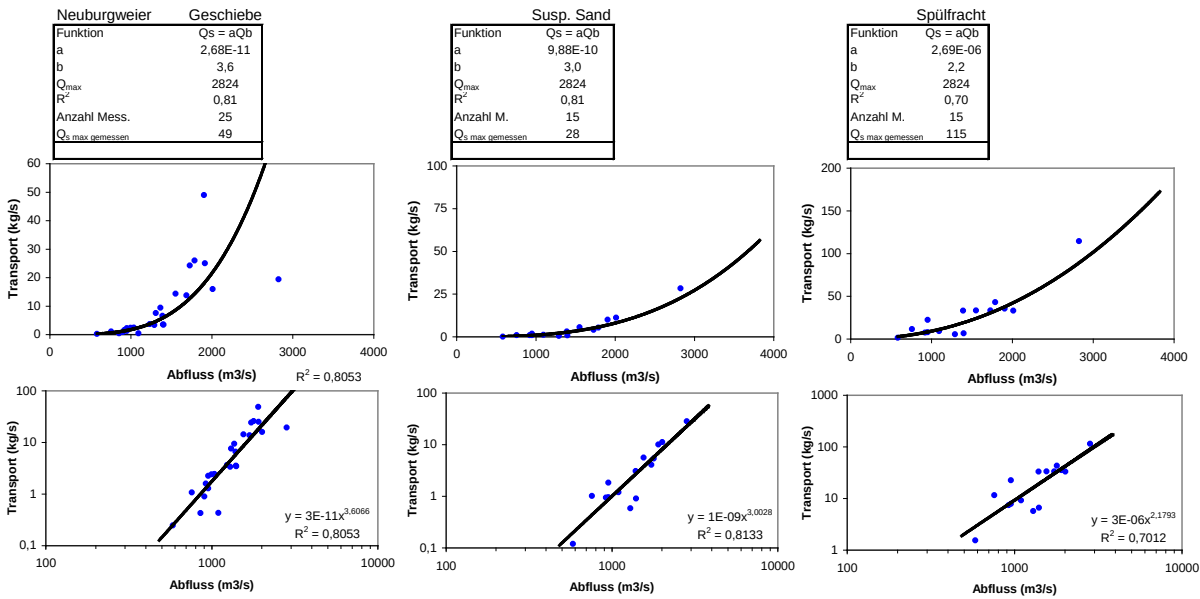
Transport-Abfluss-Beziehungen für Plittersdorf (akt.) 1996-2006



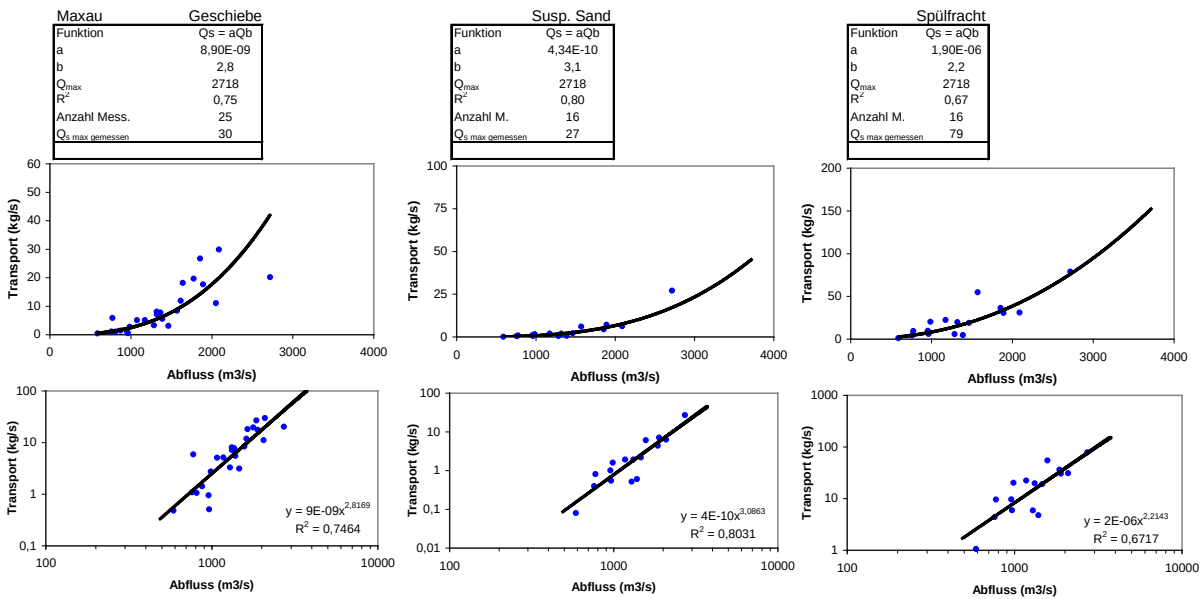
Transport-Abfluss-Beziehungen für Illingen 1996-2006



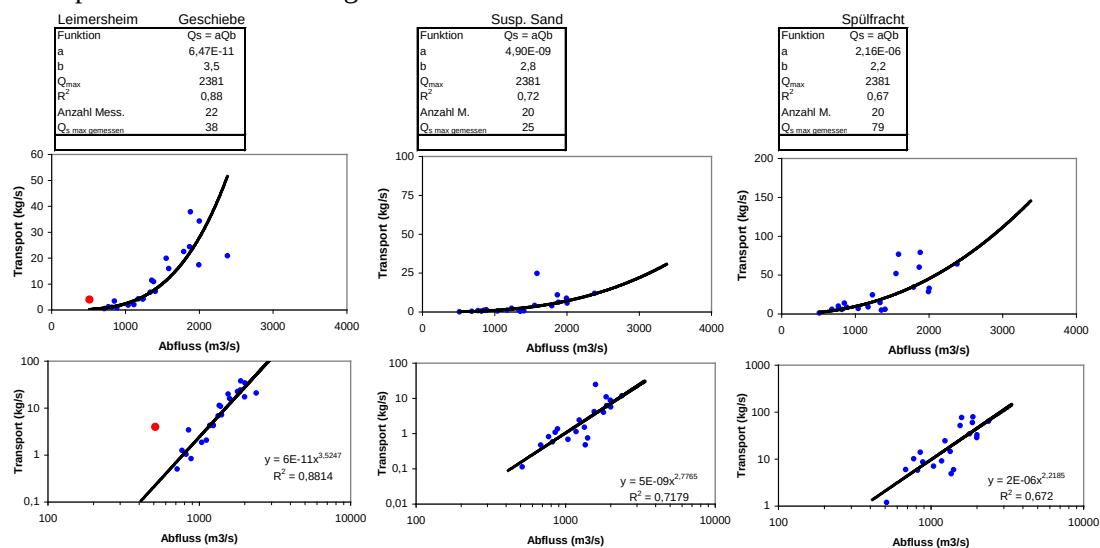
Transport-Abfluss-Beziehungen für Neuburgweier 1996-2006



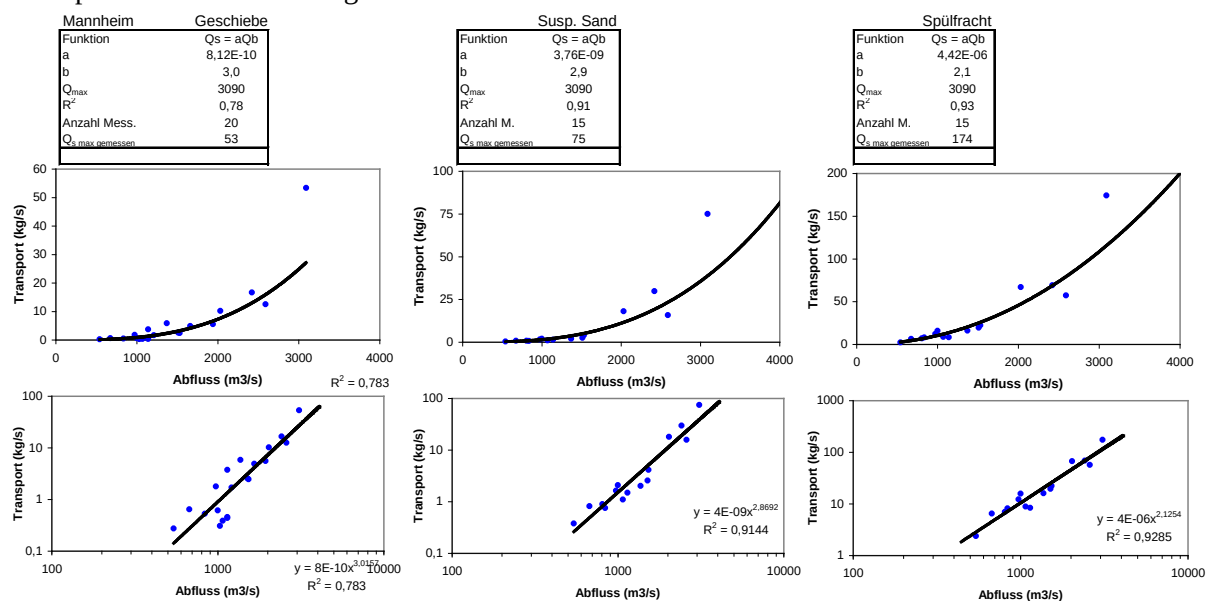
Transport-Abfluss-Beziehungen für Maxau 1996-2006



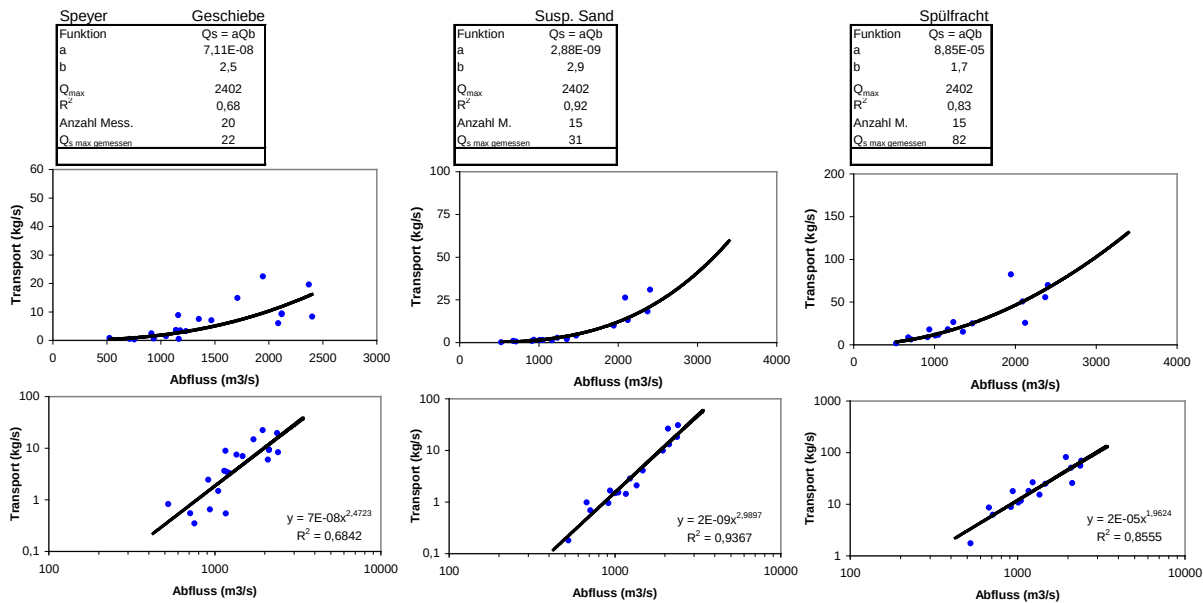
Transport-Abfluss-Beziehungen für Leimersheim 1996-2006



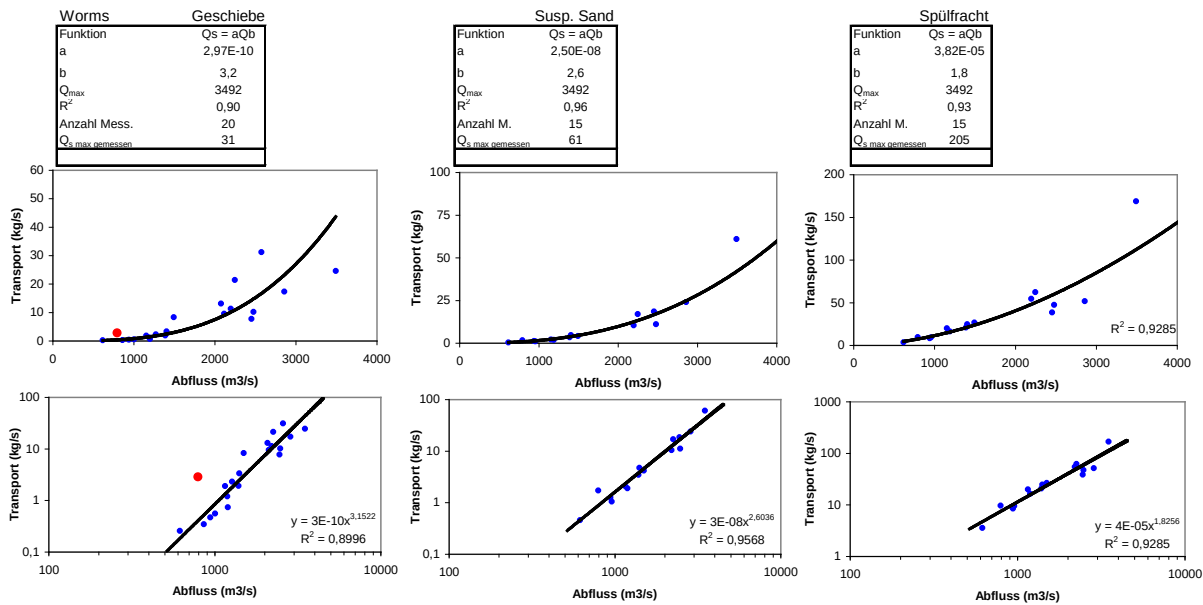
Transport-Abfluss-Beziehungen für Mannheim 1996-2006



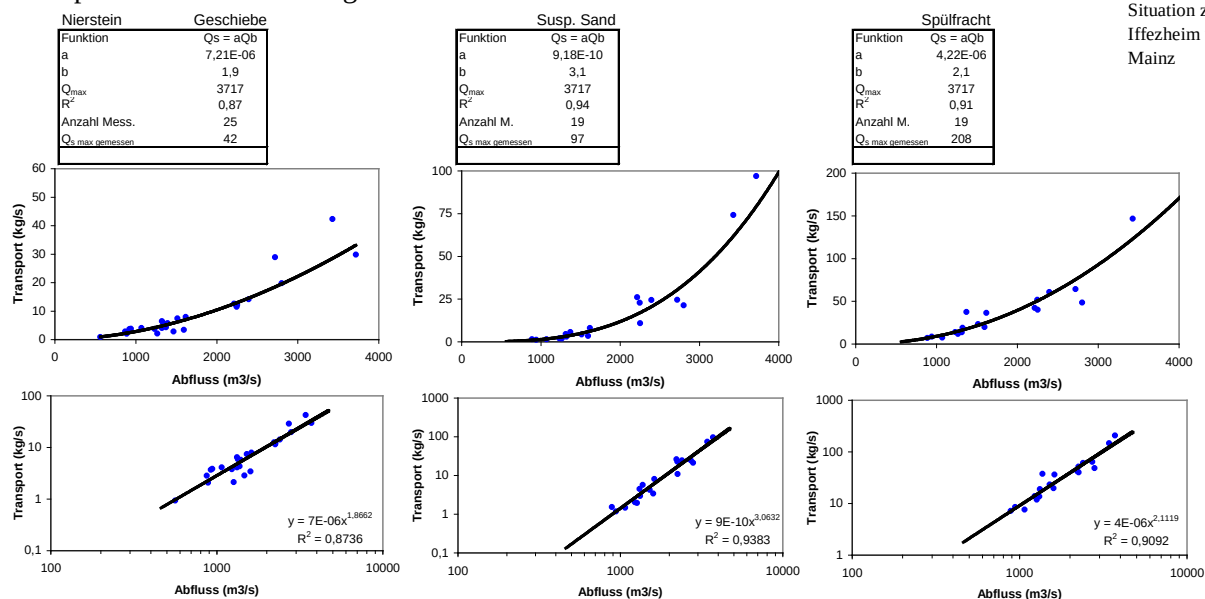
Transport-Abfluss-Beziehungen für Speyer 1996-2006



Transport-Abfluss-Beziehungen für Worms 1996-2006



Transport-Abfluss-Beziehungen für Nierstein 1996-2006



Transport-Abfluss-Beziehungen für Nierstein 1996-2006

