

Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes

International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin

**Von der Quelle zur Mündung:
Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 - 2010**

**Gudrun Hillebrand
Roy M. Frings**





Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes

International Commission for the Hydrology of the Rhine Basin

Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 - 2010

Autoren:	Gudrun Hillebrand	Bundesanstalt für Gewässerkunde (D)	2011-2017
	Roy M. Frings	RWTH Aachen University (D)	2012-2017
Fachliche Mitwirkung:	Stefan Vollmer	Bundesanstalt für Gewässerkunde (D)	2011-2017
	Birgit Astor	Bundesanstalt für Gewässerkunde (D)	bis 04/2014
	Karin Banhold	RWTH Aachen University (D)	bis 05/2016
	Nicole Gehres	Bundesanstalt für Gewässerkunde (D)	bis 11/2014
	Holger Schüttrumpf	RWTH Aachen University (D)	bis 06/2015
	Thomas Hoffmann	Bundesanstalt für Gewässerkunde (D)	ab 04/2014
	Sönke Schriever	Bundesanstalt für Gewässerkunde (D)	ab 01/2015
Projektbeirat:	Dietmar Abel	WSA Duisburg-Rhein (D)	
	Philippe Belleudy	Université de Grenoble (F)	
	Jürg Bloesch	EAWAG (D)	
	Astrid Blom	Technische Universiteit Delft (NL)	
	Emil Gölz	Bundesanstalt für Gewässerkunde (D)	
	Helmut Habersack	Universität BOKU Wien (A)	
	Hendrik Havinga	Rijkswaterstaat (NL)	
	Hans Middelkoop	Universiteit Utrecht (NL)	
	Wilfried ten Brinke	Bureau Blueland (NL)	
	Marcel van der Perk	Universiteit Utrecht (NL)	
	Benno Zarn	Hunziker, Zarn & Partner AG (CH)	

Bericht Nr. II-22 der KHR
Report No II-22 of the CHR
© 2017, KHR/CHR
ISBN: 978-90-70980-39-9
doi: 10.5675/KHR_22.2017



Vorwort

Die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR/CHR) wurde 1978 durch die Rheinanliegerstaaten gegründet. Die Gründung folgte einer Empfehlung zur Förderung der Zusammenarbeit in internationalen Flussgebieten, welche im Rahmen der Internationalen Hydrologischen Dekade (IHD) der UNESCO formuliert wurde. Die Mitgliedstaaten der KHR sind: Schweiz, Österreich, Deutschland, Frankreich, Luxemburg und Niederlande.

Zu den Tätigkeitsfeldern der KHR/CHR zählt auch die Erarbeitung Gewässermorphologischer Grundlagen für die nachhaltige Entwicklung im Rheingebiet. Für ein korrektes Verständnis der aktuellen und zukünftigen morphologischen Entwicklung des Rheins und ihrer Auswirkungen auf die Gesellschaft ist es notwendig, die Gewässermorphologie auf Flussgebietsebene zu betrachten.

Die vorliegende Studie integriert die Ergebnisse zahlreicher morphologischer Studien, die in den vergangenen 25 Jahren in den verschiedenen Teilen des Rheineinzugsgebiets durchgeführt worden sind. Das Ergebnis ist eine einzigartige, detaillierte, flussgebietsweite, fraktionierte morphologische Analyse des Rheins. Neben einer Darstellung der Ton-, Schluff-, Sand- und Kiesfrachten zwischen der Quelle des Rheins in der Schweiz und der Mündung des Rheins in den Niederlanden werden auch die Quellen und Senken der Sedimente in Form einer Sedimentbilanz quantitativ dargestellt.

Diese Studie schafft eine exzellente Grundlage für die morphologische Bewirtschaftung des Rheins in den nächsten Jahren. Sie erzeugt ein besseres integratives Verständnis der morphologischen Prozesse im Rhein, zeigt die Konsequenzen von anthropogenen Eingriffen, und bietet Handreichungen zur Verbesserung von Bagger-, Zugabe- und Monitoringstrategien. Außerdem bilden die vielfältigen und sorgfältig erarbeiteten morphologischen Daten aus dieser Studie wertvolle Eingangsdaten für die numerische Sedimenttransportmodellierung.

Eine detaillierte morphologische Analyse, wie in diesem Bericht dargestellt, ist nur bei einer guten Datengrundlage möglich. Um eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung im Rheineinzugsgebiet zu ermöglichen, müssen wir dauerhaft in die Erhebung und Registrierung von morphologischen und sedimentologischen Daten investieren.

Ich bedanke mich im Namen der KHR bei allen Beteiligten für die exzellenten Arbeiten. Besonderer Dank gebührt den Initiatoren des Projekts Herrn Dr. Stefan Vollmer und Herrn Dr. Roy Frings, der Projektleiterin Frau Dr.-Ing. Gudrun Hillebrand und dem Sekretariat der KHR/CHR unter der Leitung von Eric Sprokkereef.

Zum Schluss möchte ich Sie darauf aufmerksam machen, dass eine Synthese dieser Studie in englischer Sprache erscheint, sowohl in Berichtsform (KHR/CHR) als in einer wissenschaftlichen Fachzeitschrift, möglicherweise Earth Science Reviews.

Der Präsident der KHR

Prof. Dr. Moser

Danksagung

Die Erstellung der Sedimentbilanz des Rheins ist die Krone von 25 Jahren morphologischer Untersuchungen in allen Anrainerstaaten des Rheins. Diese Studie wurde unter dem Banner der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR) durchgeführt und gemeinsam von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) und dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University (IWW) finanziert, mit Beiträgen von Rijkswaterstaat, des WSA Duisburg-Rhein und der KHR/CHR. Ein besonderer Dank geht an die Mitglieder des Projektbeirat und Mitwirkenden an unserem Symposium in Lyon: Emil Gözl (BfG), Hans Middelkoop, Marcel van der Perk (beide Universität Utrecht), Hendrik Havinga (Rijkswaterstaat), Wilfried ten Brinke (Bureau Blueland), Dietmar Abel (WSA Duisburg-Rhein), Helmut Habersack (BOKU Wien), Jürg Bloesch (EAWAG), Astrid Blom (Technische Universität Delft), Benno Zarn (Hunziker, Zarn & Partner AG) und Philippe Belleudy (Université de Grenoble). Ihr bemerkenswertes Wissen über die Morphodynamik, die Ingenieurarbeiten und die Instandhaltungsarbeiten am Rhein waren für diese Studie von unschätzbarem Wert. Wir bedanken uns für die ergiebigen Diskussionen mit Gilles Erkens, Maarten Kleinhans (Universität Utrecht) sowie Kees Sloff (Technische Universität Delft) und danken unseren Kollegen Doreen Grätz, Klaudia Krötz, Wilfried Otto, Markus Promny, Jürgen Schmegg, Harry Wirth (alle BfG), Ricarda Döring, Manfred Kriegel, Irene Ohligschläger, Norbert Quast, Mario Czogallik und Franziska Ribbe (alle IWW) für die Mitarbeit. Ein weiterer Dank gilt Sönke Schriever (BfG) für die Erstellung der Abbildungen und Marlene Sikora und Lisa Walter (beide IWW) für die Redaktionsarbeit. Die Arbeit am Projekt hat uns viel Freude bereitet und wir bedanken uns für die hervorragende Zusammenarbeit herzlich bei allen Mitgliedern des Projektteams und Ko-Autoren dieses Berichts: Birgit Astor, Nicole Gehres, Thomas Hoffmann, Sönke Schriever, Stefan Vollmer (alle BfG), sowie Karin Banhold und Holger Schüttrumpf (beide IWW). Nicht zuletzt sind wissenschaftliche Analysen wie die hier vorgestellten ohne eine gute Datenbasis unmöglich. Daher soll die Anstrengung der Messbesetzungen der Feldkampagnen, die zwischen 1991 und 2010 stattgefunden haben, gewürdigt werden.

Dr.-Ing. Gudrun Hillebrand und Dr. Roy Frings

Februar 2017

Zusammenfassung

Um die aktuelle und zukünftige morphologische Entwicklung großer Flüsse und ihre gesellschaftlichen Auswirkungen richtig zu verstehen, ist es wesentlich, die Flussmorphologie und -dynamik im gesamten Einzugsgebiet korngößenspezifisch zu untersuchen. In diesem Bericht präsentieren wir eine detaillierte Sedimentbilanz des Rheines von der Quelle bis zur Mündung. Die Ziele waren: (a) die Stromabwärts-Flüsse von Ton, Schluff, Sand, Kies und Steinen zu quantifizieren und (b) die Quellen und Senken dieser Sedimente in den verschiedenen Flussabschnitten des Rheines zu identifizieren. Zur Quantifizierung der einzelnen Bilanzterme wurde eine Vielzahl von Daten aus dem Zeitraum von 1991 bis 2010 homogenisiert und analysiert. Diese umfassen u.a. Echolotungen, Sedimenttransportmessungen, Korngrößenanalysen, Sedimentationsraten und Angaben zu Verklappungen und Baggerungen. Es konnten die folgenden Schlüsse gezogen werden: (1) Die Sedimentflüsse im Rhein variieren entlang des Längsprofils aufgrund von regionalen Senken und Quellen. (2) Von seiner Quelle zur Mündung durchquert der Rhein vier Abschnitte mit fundamental unterschiedlichem morphodynamischem Verhalten: den alpinen Abschnitt, den staugeregelten Abschnitt, den frei fließenden Abschnitt und den Delta-Abschnitt. (3) Die maximalen Sedimentfrachten werden im Alpenrhein, oberhalb des Bodensees, erreicht. Die Tonfraktion weist hier und im gesamten Längsschnitt die höchsten Frachtraten auf. (4) Im gesamten Einzugsgebiet ist der anthropogene Eintrag die größte Quelle für Kies und Steine, die Nebenflüsse des Rheins sind die größte fluviale Sedimentquelle für Ton, Schluff und Sand. Zusätzlich führt das Meer dem unteren Rheindelta große Mengen an Ton, Schluff und Sand zu. (5) Baggerungen stellen eine Hauptsedimentsenke für alle Kornfraktionen dar. Bei Schluff und Ton stellen Ablagerungen in Überschwemmungsebenen und in Häfen große Sedimentsenken dar. Der Sedimentaustrag in die Nordsee ist begrenzt. (6) Der Rhein weist Nettoablagerung in den oberen Flussabschnitten und Nettoerosion in den Abschnitten stromabwärts auf, wobei lokal eine hohe Variabilität besteht. (7) Es werden mehr Sedimente von der Nordsee in das Rheindelta transportiert als umgekehrt. (8) Sedimentverluste durch Ablagerungen in Überflutungsgebieten sind mengenmäßig oberstrom im Rhein größer als im Rheindelta. (9) Die heutigen Sedimentflüsse im Rhein werden stark von Flussregulierungsarbeiten der Vergangenheit sowie von Baggerungen und Zugaben beeinflusst. (10) Dessen ungeachtet bestimmen natürliche Faktoren die Position der wichtigsten Sedimentationsgebiete. (11) In vielen Flussabschnitten wird Kies abgelagert, während gleichzeitig Sand erodiert wird. (12) Die Bilanzanalyse zeigt, dass die Dynamik von Sedimenten in Flüssen viel größer ist, als Echolotungen oder Transportmessungen nahelegen, und sie zeigt ebenfalls, dass (13) Sand eine dominante Rolle in der Morphodynamik des Rheins spielt, nicht nur in den Sandbett-Abschnitten, sondern auch in den Kiesbett-Abschnitten des Flusses. (14) Die in dieser Studie abgeleitete Sedimentbilanz bietet eine gute Datenbasis für die Verbesserung numerischer Prognosemodelle, die Optimierung von Verklapp-, Bagger- und Überwachungsstrategien sowie um Wissenslücken zu identifizieren und Forschungsagenden festzulegen.

Summary

The actual and future morphological development of large rivers has major effects on society. A sound understanding of the morphological development requires a basin-scale sediment budget analysis that considers the grain size specific morphodynamics along the river channel. In this report we present a unique, detailed, basin-wide, and fraction-wise, morphological analysis of the Rhine, one of the world's larger rivers. The objectives were: (a) to quantify the downstream fluxes of clay, silt, sand, gravel and cobbles and (b) to identify the sources and sinks of these sediments. We reviewed a large number of morphological studies about the Rhine and re-analysed existing data, such as echo soundings and sediment transport data from the period 1991 to 2010. The following conclusions were drawn: (1) Sediment fluxes in the Rhine are discontinuous due to regional sinks and sources, leading to a large variability of the sediment fluxes along the river channel. (2) From source to mouth, the Rhine traverses four sections with fundamentally different morphodynamic behaviour: the Alpine, impounded, free-flowing and delta section. (3) The largest sediment fluxes, which are dominated by the clay fraction, are observed in the Alpine section. (4) On a basin-scale, nourishment represents the biggest source of gravel and cobbles, and tributaries the biggest fluvial source of clay, silt and sand. In addition large amounts of clay, silt and sand are supplied to the lower Rhine delta by the sea. (5) Dredging represents a main sediment sink for all size fractions. For silt and clay, deposition in floodplains and ports represent an additional major sediment sink. Sediment output to the North Sea is limited. (6) In contrast to the typical prototype example of a river with erosion in the upper reaches and sedimentation in the lower reaches, the Rhine has net deposition in the upper reaches and net erosion in the downstream reaches. Local variations are high though. (7) More sediment is transported upstream from the North Sea into the lower Rhine delta than vice versa. (8) Floodplain deposition causes a higher loss of sediment in the upstream parts of the river than in the delta. (9) Today's sediment fluxes in the Rhine are strongly influenced by river training works from the past, as well as by dredging and nourishment operations. (10) This notwithstanding, natural factors determine the location of the main sedimentation areas. (11) In many reaches gravel is deposited, whereas sand is being eroded simultaneously. (12) The budget analysis shows that sediment dynamics in rivers are much higher than is suggested by echosoundings or transport measurements, and it also shows that (13) sand plays a dominant role in the morphodynamics of the Rhine, not only in the sand-bed reaches, but also in the gravel-bed reaches of the river. (14) The sediment budget derived in this study provides a good data basis for improving numerical prediction models, optimizing nourishment, dredging and monitoring strategies, and for discovering knowledge gaps and setting research agendas.

Two extended syntheses of this study in English language are scheduled to be published this or next year: one in the CHR/KHR report series, the other in a scientific journal, possibly Earth Science Reviews.

Inhalt

Vorwort	I
Danksagung	II
Zusammenfassung	III
Summary	IV
Zitiervorschläge	XII
1. Einleitung	1
2. Die Grundlagen der Sedimentbilanz	2
2.1 Sedimentbilanzierung.....	2
2.2 Die Sedimentbilanzgleichung.....	3
2.3 Datengrundlage.....	4
2.4 Erstellung der Sedimentbilanz.....	4
2.5 Literatur.....	5
3. Prozessuntersuchungen	6
3.1 Sandverlust bei Geschiebemessungen.....	6
3.1.1 Einleitung.....	6
3.1.2 Vorgehensweise.....	6
3.1.3 Sohlversuche.....	7
3.1.4 Lift-Up-Versuche.....	7
3.1.5 Ergebnisse und Diskussion.....	8
3.1.6 Korrektur vorhandener Daten.....	9
3.1.7 Fazit.....	9
3.2 Korngrößen der Schwebstofffracht.....	10
3.2.1 Einleitung.....	10
3.2.2 Methodik.....	10
3.2.3 Ergebnisse und Fazit.....	10
3.3 Sedimenteintrag aus den Nebenflüssen.....	11
3.3.1 Einleitung.....	11
3.3.2 Grundlagen.....	11
3.3.3 Geschiebetransport.....	11
3.3.4 Schwebstofftransport.....	12
3.3.5 Fazit.....	12
3.4 Vorlandsedimentation entlang des frei fließenden deutschen Rheins.....	13
3.4.1 Einleitung.....	13
3.4.2 Grundlagen.....	13
3.4.3 Vorgehensweise.....	14
3.4.4 Ergebnisse und Diskussion.....	15
3.4.5 Fazit.....	16
3.5 Literatur.....	17
4. Sedimentbilanz des Alpenrheins	18
4.1 Einleitung.....	18
4.2 Gebietsbeschreibung.....	19
4.2.1 Lage.....	19

4.2.2	Geologie und Sedimentologie	22
4.2.3	Hydrologie.....	22
4.2.4	Anthropogene Eingriffe.....	24
4.3	Bestimmung der Sedimentquellen und -senken.....	25
4.3.1	Die Sedimentbilanzgleichung	25
4.3.2	Sedimentaustrag durch Baggerungen.....	27
4.3.3	Sedimente- und -austrag durch Abrieb.....	29
4.3.4	Sedimenteinträge aus Nebenflüssen und von oberstrom	30
4.3.5	Sedimentaustrag nach unterstrom	33
4.3.6	Sohlhöhenänderung	33
4.3.7	Sedimenteintrag aus diffusen Quellen	34
4.3.8	Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen	34
4.4	Ergebnisse	35
4.5	Diskussion.....	38
4.5.1	Unsicherheiten.....	38
4.5.2	Validierung.....	38
4.5.3	Interpretation.....	39
4.5.4	Empfehlungen.....	39
4.6	Schlussfolgerungen	40
4.6.1	Sedimentquellen und -senken	40
4.6.2	Sedimentfrachten	40
4.6.3	Unsicherheiten und Empfehlungen	41
4.7	Literatur	41
5.	Sedimentbilanz des Hochrheins und des staugeregelten Oberrheins.....	43
5.1	Einleitung	43
5.2	Betrachtungsgebiet	44
5.2.1	Lage.....	44
5.2.2	Geologie und Sedimentologie	45
5.2.3	Hydrologie.....	48
5.2.4	Anthropogene Eingriffe.....	49
5.3	Bestimmung der Sedimentquellen und -senken.....	54
5.3.1	Die Sedimentbilanzgleichung	54
5.3.2	Sedimentaustrag nach unterstrom	55
5.3.3	Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe.....	55
5.3.4	Sedimentaustrag in Nebenarme.....	56
5.3.5	Sedimenteintrag aus Nebenarmen.....	57
5.3.6	Sedimenteintrag aus Nebenflüssen	57
5.3.7	Sedimentaustrag durch Baggerungen.....	58
5.3.8	Sedimenteintrag und -austrag durch Abrieb.....	61
5.3.9	Sedimenteintrag aus diffusen Quellen	61
5.3.10	Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen	61
5.3.11	Sohlhöhenänderung	61
5.4	Ergebnisse	62
5.5	Diskussion.....	64
5.5.1	Unsicherheiten.....	64
5.5.2	Validierung.....	65

5.6	Schlussfolgerungen	67
5.6.1	Sedimentquellen und -senken	67
5.6.2	Sedimentfrachten	67
5.6.3	Unsicherheiten und Empfehlungen	68
5.7	Literatur	68
6.	Sedimentbilanz des Restrheins	70
6.1	Einleitung	70
6.2	Gebietsbeschreibung	71
6.2.1	Lage	71
6.2.2	Geologie und Sedimentologie	72
6.2.3	Hydrologie	74
6.2.4	Anthropogene Eingriffe	75
6.3	Bestimmung der Sedimentquellen und -senken	77
6.3.1	Die Sedimentbilanzgleichung	77
6.3.2	Sohlhöhenänderung	78
6.3.3	Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen und in Bühnenfelder	79
6.3.4	Sedimenteintrag von oberstrom	80
6.3.5	Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe	81
6.3.6	Sedimentaustrag durch Baggerungen	81
6.3.7	Sedimentaus- und -eintrag durch Abrieb	82
6.3.8	Sedimentaustrag nach unterstrom	82
6.4	Ergebnisse	82
6.5	Diskussion	84
6.5.1	Unsicherheiten	84
6.5.2	Vergleich mit bereits durchgeführten Studien	85
6.5.3	Empfehlungen	86
6.6	Schlussfolgerungen	86
6.7	Literatur	86
7.	Sedimentbilanz des frei fließenden Ober- und Mittelrheins	89
7.1	Einleitung	89
7.2	Gebietsbeschreibung	90
7.2.1	Lage	90
7.2.2	Geologie und Sedimentologie	90
7.2.3	Hydrologie	93
7.2.4	Anthropogene Einflüsse	95
7.3	Methoden	97
7.3.1	Die Sedimentbilanzgleichung	97
7.3.2	Sedimenteintrag von oberstrom	98
7.3.3	Sedimenteintrag aus Nebenflüssen	98
7.3.4	Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe	99
7.3.5	Sedimenteintrag/-austrag durch Abrieb	100
7.3.6	Sedimentaustrag nach unterstrom	100
7.3.7	Sedimentaustrag durch Baggerungen	101
7.3.8	Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen	101
7.3.9	Sohlhöhenänderung	102
7.3.10	Sedimentaustrag in Bühnenfelder und Häfen	102

7.3.11	Sedimenteintrag aus diffusen Quellen	103
7.4	Ergebnisse	104
7.5	Diskussion.....	106
7.5.1	Betrachtung der Unsicherheiten	106
7.5.2	Validierung.....	111
7.5.3	Vergleich mit bereits durchgeführten Studien	113
7.5.4	Empfehlungen.....	113
7.6	Schlussfolgerungen	114
7.6.1	Sedimentquellen und -senken	114
7.6.2	Sedimentfrachten	114
7.6.3	Unsicherheiten und Empfehlungen	114
7.7	Literatur	115
8.	Sedimentbilanz des Niederrheins	118
8.1	Einleitung	118
8.2	Gebietsbeschreibung	120
8.2.1	Lage	120
8.2.2	Geologie und Sedimentologie	121
8.2.3	Hydrologie.....	122
8.2.4	Anthropogene Eingriffe.....	123
8.3	Bestimmung der Sedimentquellen und -senken	123
8.3.1	Die Sedimentbilanzgleichung	123
8.3.2	Sedimenteintrag von oberstrom	124
8.3.3	Sedimenteintrag aus Nebenflüssen	125
8.3.4	Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe.....	125
8.3.5	Sedimenteintrag/-austrag durch Abrieb.....	126
8.3.6	Sedimentaustrag nach unterstrom	126
8.3.7	Sedimentaustrag durch Baggerungen.....	127
8.3.8	Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen	127
8.3.9	Sohlhöhenänderung	128
8.3.10	Sedimentaustrag in Bühnenfelder und Häfen	128
8.3.11	Sedimenteintrag aus diffusen Quellen	129
8.4	Ergebnisse	129
8.5	Diskussion.....	133
8.5.1	Unsicherheiten.....	133
8.5.2	Validierung.....	137
8.5.3	Vergleich mit bereits durchgeführten Studien	140
8.5.4	Empfehlungen.....	140
8.6	Schlussfolgerungen	141
8.6.1	Sedimentquellen und -senken	141
8.6.2	Sedimentfrachten.....	141
8.6.3	Unsicherheiten und Empfehlungen.....	142
8.7	Literatur	142
9.	Sedimentbilanz des Oberen Rheindeltas	145
9.1	Einleitung	145
9.2	Gebietsbeschreibung	146

9.2.1	Lage.....	146
9.2.2	Geologie und Sedimentologie	146
9.2.3	Hydrologie	148
9.2.4	Anthropogene Eingriffe.....	149
9.3	Bestimmung der Sedimentquellen und -senken.....	150
9.3.1	Die Sedimentbilanzgleichung	150
9.3.2	Sedimenteintrag von oberstrom	151
9.3.3	Sedimentverteilung an den Flussverzweigungen.....	151
9.3.4	Sedimentaustrag durch Baggerungen	152
9.3.5	Sedimentaustrag in Bühnenfelder	153
9.3.6	Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen	154
9.3.7	Sohlhöhenänderung	155
9.3.8	Sedimentaustrag nach unterstrom	156
9.4	Ergebnisse	157
9.4.1	Das Obere Rheindelta: eine Gesamtbetrachtung	157
9.4.2	Bovenrijn und Waal.....	159
9.4.3	Pannerdensch Kanaal	159
9.4.4	Nederrijn-Lek	160
9.4.5	IJssel.....	160
9.5	Diskussion.....	164
9.5.1	Betrachtung der Unsicherheiten	164
9.5.2	Validierung	165
9.5.3	Vergleich mit bereits durchgeführten Studien.....	167
9.5.4	Empfehlungen.....	168
9.6	Schlussfolgerungen	169
9.6.1	Sedimentquellen und -senken	169
9.6.2	Sedimentfrachten.....	169
9.6.3	Unsicherheiten und Empfehlungen	169
9.7	Literatur	170
10.	Sedimentbilanz des Unteren Rheindeltas	173
10.1	Einleitung	173
10.2	Gebietsbeschreibung	174
10.2.1	Lage.....	174
10.2.2	Hydrologie	174
10.2.3	Geologie und Sedimentologie	175
10.2.4	Anthropogene Einflüsse	175
10.3	Bestimmung der Sedimentquellen und -senken.....	179
10.3.1	Die Sedimentbilanzgleichung	179
10.3.2	Sedimenteintrag von oberstrom	179
10.3.3	Sedimenteintrag aus Nebenflüssen	180
10.3.4	Sedimenteintrag von unterstrom	180
10.3.5	Sedimentaustrag durch Baggerungen	181
10.3.6	Sedimentaustrag in Häfen	181
10.3.7	Sedimentaustrag nach unterstrom	181
10.3.8	Sohlhöhenänderung	181
10.4	Ergebnisse	183

10.5	Diskussion.....	185
10.5.1	Unsicherheiten.....	185
10.5.2	Validierung.....	186
10.5.3	Interpretation.....	186
10.5.4	Vergleich mit bereits durchgeführten Studien	189
10.5.5	Empfehlungen.....	189
10.6	Schlussfolgerungen	190
10.6.1	Sedimentquellen und -senken	190
10.6.2	Sedimentfrachten.....	191
10.6.3	Unsicherheiten und Empfehlungen.....	191
10.7	Literatur.....	191
11.	Synthese	193
11.1	Einführung.....	193
11.2	Morphologische Eigenschaften des Rheins.....	195
11.2.1	Der alpine Bereich	195
11.2.2	Der staugeregelte Bereich.....	196
11.2.3	Der frei fließende Bereich	197
11.2.4	Der Delta-Bereich	198
11.3	Methoden: Sedimentbilanzierung	200
11.4	Sedimentfrachten: von der Quelle bis zur Mündung	202
11.4.1	Kies und Steine	204
11.4.2	Sand	205
11.4.3	Ton und Schluff	207
11.5	Die Sedimentbilanz des gesamten Einzugsgebiets.....	208
11.6	Sedimentquellen und -senken	209
11.6.1	Sedimenteintrag von oberstrom	209
11.6.2	Sedimenteintrag aus Nebenflüssen	211
11.6.3	Sedimenteintrag und -austrag durch Nebenarme	211
11.6.4	Sedimenteintrag und -austrag durch Abrieb.....	211
11.6.5	Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe.....	211
11.6.6	Sedimenteintrag aus diffusen Quellen	212
11.6.7	Sedimenteintrag aus dem Meer	212
11.6.8	Sedimentaustrag nach unterstrom	213
11.6.9	Sedimentaustrag durch Baggerungen.....	213
11.6.10	Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen	215
11.6.11	Sedimentaustrag in Bühnenfelder	216
11.6.12	Sedimentaustrag in Häfen	217
11.7	Veränderung des Sedimentspeichers.....	217
11.8	Diskussion.....	218
11.8.1	Unsicherheiten	218
11.8.2	Verifizierung	219
11.9	Schlussfolgerungen	222
11.10	Literatur	224
12.	Beitrag für das Gewässermanagement	229
	Literatur	233

Anhang A	Alpenrhein	235
Anhang B	Hochrhein und staugeregelter Oberrhein	237
	B.1 Durchgängigkeit der Stauhaltungen im Hochrhein	237
	B.2 Sohlhöhenänderung in den Stauhaltungen im Hochrhein	238
	B.3 Messprotokolle Korngrößenverteilung Birs und Glatt	239
Anhang C	Oberes Rheindelta	241
	C.1 Abflussverteilung im Oberen Rheindelta	241
	C.2 Umwandlung von Volumina in Massen	241
	C.3 Berechnung der Sohlkornverteilung des Oberen Rheindeltas	242
	C.4 Sedimentverteilung am IJsselkop	243
Anhang D	Synthese:	246
	D.1 Quantifizierung der Quellen und Senken	246
	KHR-Veröffentlichungen	261
	KOLOPHON	264

Zitiervorschläge

Gesamtbericht

Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017.

Kapitel 1 - Einleitung

Frings, R.M., G. Hillebrand (2017). Einleitung. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 1.

Kapitel 2 - Die Grundlagen der Sedimentbilanz

Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Die Grundlagen der Sedimentbilanz. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 2-5.

Kap. 3.1 - Sandverlust bei Geschiebemessungen

Banhold, K., R.M. Frings, H. Schüttrumpf (2017). Sandverlust bei Geschiebemessungen. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 6-9.

Kap. 3.2 - Korngrößen der Schwebstofffracht

Astor, B., N. Gehres, G. Hillebrand (2017). Korngrößen der Schwebstofffracht. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 10-11.

Kap. 3.3 - Sedimenteintrag aus den Nebenflüssen

Gehres, N., B. Astor, G. Hillebrand (2017). Sedimenteintrag aus den Nebenflüssen. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 11-12.

Kap. 3.4 - Vorlandsedimentation entlang des Ober- und Mittelrheins

Banhold, K., R.M. Frings, H. Schüttrumpf (2017). Vorlandsedimentation entlang des Ober- und Mittelrheins. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 12-16.

Kapitel 4 - Sedimentbilanz des Alpenrheins

Banhold, K., R.M. Frings, H. Schüttrumpf (2017). Sedimentbilanz des Alpenrheins. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 17-41.

Kapitel 5 - Sedimentbilanz des Hochrheins und des staugeregelten Oberrheins

Banhold, K., R.M. Frings, H. Schüttrumpf (2017). Sedimentbilanz des Hochrheins und des staugeregelten Oberrheins. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 42-67.

Kapitel 6 - Sedimentbilanz des Restrheins

Banhold, K., R.M. Frings, H. Schüttrumpf (2017). Sedimentbilanz des Restrheins. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 68-86.

Kapitel 7 - Sedimentbilanz des frei fließenden Ober- und Mittelrheins

Hoffmann, T., S. Vollmer, N. Gehres, R.M. Frings, G. Hillebrand (2017). Sedimentbilanz des frei fließenden Ober- und Mittelrheins. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im

Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 87-115.

Kapitel 8 - Sedimentbilanz des Niederrheins

Hillebrand, G., T. Hoffmann, R.M. Frings, N. Gehres, S. Vollmer (2017). Sedimentbilanz des Niederrheins. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 116-141.

Kapitel 9 - Sedimentbilanz des Oberen Rheindeltas

Frings, R.M., K. Banhold, I. Evers (2017). Sedimentbilanz des Oberen Rheindeltas. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 142-169.

Kapitel 10 - Sedimentbilanz des Unteren Rheindeltas

Frings, R.M., K. Banhold, I. Evers (2017). Sedimentbilanz des Unteren Rheindeltas. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 170-189.

Kapitel 11 - Synthese

Frings, R.M., T. Hoffmann, G. Hillebrand, N. Gehres, S. Schriever, K. Banhold (2017). Synthese. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 190-225.

Kapitel 12 - Beitrag für das Gewässermanagement

Frings, R.M., T. Hoffmann, G. Hillebrand, S. Vollmer (2017). Beitrag für das Gewässermanagement. In: Hillebrand, G., R.M. Frings (2017). Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. Bericht KHR/CHR II-22. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017, S. 226-230.



1. Einleitung

R.M. Frings & G. Hillebrand

Der Sedimenthaushalt von Flüssen ist sowohl für ökologische als auch ökonomische Fragestellungen am Gewässer relevant. Sedimentablagerungen können zu verringerten Fahrrinntiefen und damit während Niedrigwasserperioden zu Problemen für die Schifffahrt führen. Ablagerungen in Stauräumen verringern das zur Verfügung stehende Wasserrückhaltevolumen, was im Hinblick auf die Energiegewinnung, vor allem aber auch aus Hochwasserschutzgründen unerwünscht ist. Erosion im Flussbett hingegen kann die Standsicherheit von Bauwerken gefährden. Neben der reinen Menge ist auch die Zusammensetzung der Sohl-sedimente von Bedeutung. Die Habitateignung eines Sohlsubstrats hängt wesentlich von der Korngrößenzusammensetzung ab. Die Kolmation der Sohle führt zur Degradation des Interstitials und dem Verlust von Lebensraum für Makrozoobenthos. Zudem sind Feinsedimente aufgrund ihrer großen spezifischen Oberfläche häufig Träger von Nähr- und Schadstoffen und spielen dadurch eine Sonderrolle für das Sedimentmanagement. Mit der EG-WRRL gewinnen die ökologischen Aspekte des Sedimenthaushalts an Bedeutung.

Zur Bestimmung des Sedimenthaushalts werden meist Sohlpeilungen, manchmal in Kombination mit Geschiebemessungen und Schwebstoffmessungen, betrachtet. Diese Messungen geben jedoch keine Antwort auf wesentliche Fragestellungen wie: „Woher stammen die Sedimentfrachten?“, „Was passiert mit den erodierten Sedimenten?“, und „Wie sind die morphologischen Prozesse in den Bereichen unterstrom und oberstrom miteinander verknüpft?“. Die Beantwortung dieser Fragen ist unabdingbar für das Verständnis der Flussmorphologie, für die Prognose zukünftiger Erosions- und Sedimentationsprozesse und um die Auswirkungen menschlicher Einflüsse zu verstehen. Sie ist außerdem relevant für die Optimierung von Geschiebezugabe- und Baggerstrategien. Sediment- oder Feststoffbilanzen beschreiben das Gleichgewicht zwischen den Sedimentmengen, die in das Untersuchungsgebiet eingetragen werden (die sogenannten Quellen), den Sedimentmengen, die aus dem Untersuchungsgebiet ausgetragen werden (die sogenannten Senken), und der Veränderung der Sedimentmengen, die im Untersuchungsgebiet gespeichert sind. Sedimentbilanzen sind somit geeignet, die oben aufgeworfenen Fragen nach den Quellen und Senken des Sedimentes zu beantworten und geeignete Managementmaßnahmen zu entwickeln. Eine Sedimentbilanzierung liefert darüber hinaus Informationen über morphologische Zusammenhänge verschiedener Flussabschnitte. Für Abschnitte, in denen keine Frachtmessungen vorliegen, bietet eine Bilanzierung außerdem die Möglichkeit, Frachten abzuschätzen.

In diesem Bericht werden die Ergebnisse eines Ressortforschungsprojekts der Bundesanstalt für Gewässerkunde in Kooperation mit dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University vorgestellt. Das Ziel der Studie war die Erstellung einer Sedimentbilanz für den Rhein von der Quelle bis zur Mündung für den Zeitraum 1991 bis 2010. Die Sedimentfraktionen feiner als 0,063 mm (Schluff, Ton), 0,063 bis 2 mm (Sand), 2 bis 16 mm (Feinkies), größer 16 mm (Grobkies/Steine) wurden getrennt voneinander bilanziert. In einigen Teilabschnitten wurden darüber hinaus die Fraktionen 16 mm bis 63 mm (Grobkies) und 63 bis 125 mm (Steine) getrennt betrachtet.

Im vorliegenden Bericht werden zunächst die Grundlagen der Sedimentbilanzierung dargestellt (Kapitel 2). Zur Schließung von Kenntnislücken zur Sedimentbilanzierung des Rheins wurden spezielle Untersuchungen zu bestimmten Methoden oder Prozessen durchgeführt. Diese Untersuchungen sind in getrennten Berichten dokumentiert und im Kapitel 3 dieses Berichtes kurz zusammengefasst. Für die Bilanzierung wurde der gesamte Rhein von der Quelle bis zu Mündung in Teilabschnitte aufgeteilt. Diese Teilbilanzen finden sich in den Kapiteln 4 bis 10. Eine Gesamtsicht ist in Kapitel 11 beschrieben. Kapitel 12 beschäftigt sich speziell mit den Erkenntnissen, die sich aus der Sedimentbilanzierung für das Management der Wasserstraßen ergeben.

2. Die Grundlagen der Sedimentbilanz

G. Hillebrand, R.M. Frings

2.1 Sedimentbilanzierung

Im Rahmen einer Sedimentbilanz werden Ein- und Austragspfade von Sedimenten erfasst und gegenübergestellt (Reid & Dunne, 1996; Slaymaker, 2003). Aus der Differenz zwischen Einträgen und Austrägen ergibt sich eine Änderung im Sedimentspeicher des betrachteten Systems. Für die Bilanzierung müssen ein Kontrollvolumen und ein Kontrollzeitraum definiert werden, über dessen Grenzen hinweg die Sedimentflüsse innerhalb des gegebenen Zeitraumes bestimmt werden.

In der Literatur finden sich viele Beispiele für Sedimentbilanzen auf der Einzugsgebietsskala eines Fließgewässers, bei denen Bodenerosion, der Transport von Sedimenten hangabwärts, Zwischenspeicherungen am Hang und der Eintrag ins Gewässer bilanziert werden (Reid & Dunne 1996; Hinderer, 2012; Hoffmann, 2015). Der Transport im Gewässer wird häufig vernachlässigt oder unzureichend betrachtet.

Im Gegensatz dazu liegt der Fokus der vorliegenden Studie auf den Prozessen im Gewässer. Entsprechend ist das Kontrollvolumen durch das Hauptgerinne des Rheins definiert. Nebenarme, Häfen oder Buhnenfelder sind nicht mehr im Kontrollvolumen enthalten. Vertikal nach unten umfasst das Kontrollvolumen das komplette Flussbett, so dass Sohländerungen als Änderungen im Sedimentspeicher in der Bilanz erfasst werden. Abb. 2.1 illustriert schematisch das verwendete Kontrollvolumen an einem beispielhaften Flussabschnitt.

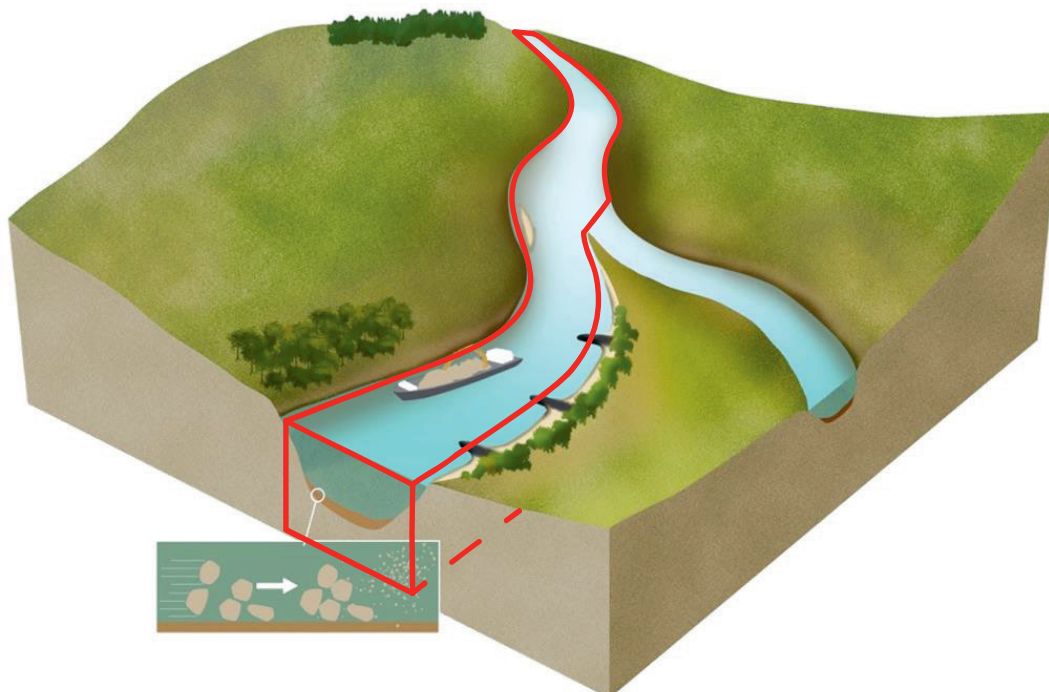


Abb. 2.1: Schematische Darstellung eines Kontrollvolumens für die Sedimentbilanz, verändert nach Frings et al., 2014.

Für die Bilanzierung wird ein Zeitraum von 20 Jahren (1991-2010) zugrunde gelegt, um aktuelle, mittlere Verhältnisse abzubilden. Einerseits fallen über einen solchen Zeitraum Effekte einzelner Extremereignisse und stochastische Unsicherheiten weniger ins Gewicht. Andererseits sind Einflüsse langfristiger Trends in einzelnen Bilanztermen (z. B. Rückgang von Schwebstofffrachten aufgrund von Bodenerosionsschutzmaßnahmen) noch vernachlässigbar.

2.2 Die Sedimentbilanzgleichung

Die in dieser Studie verwendete allgemeine Sedimentbilanzgleichung für den Flussabschnitt des Rheins lautet:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{se} + I_{di} + I_{ar} + I_{ab} + I_{do}) - (O_{do} + O_{se} + O_{dr} + O_{gr} + O_{fl} + O_{po} + O_{ab}) = \Delta S \quad (2.1)$$

mit I_{up} , dem Sedimenteintrag von oberstrom, I_{tr} , dem Sedimenteintrag aus den Nebenflüssen, I_{se} , dem Sedimenteintrag aus Nebenarmen, I_{di} , dem Sedimenteintrag aus diffusen Quellen (zum Beispiel Ufererosion), I_{ar} , dem Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe, I_{ab} , dem Sedimenteintrag durch Abrieb von anderen Kornfraktionen, I_{do} , dem Sedimenteintrag von unterstrom, O_{do} , dem Sedimentaustrag nach unterstrom, O_{se} , dem Sedimentaustrag in Nebenarme, O_{dr} , dem Sedimentaustrag durch Baggerungen, O_{gr} , dem Sedimentaustrag in Bühnenfelder, O_{fl} , dem Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen, O_{po} , dem Sedimentaustrag in Häfen, O_{ab} , dem Sedimentaustrag durch Abrieb, und ΔS , der Sohlhöhenänderung, die sich aus der Erosion bzw. der Akkumulation von Sediment ergibt. Für den Kontrollzeitraum 1991-2010 wird angenommen, dass tektonische Sohlhöhenänderungen eine untergeordnete Rolle spielen. Alle Bilanzterme werden in der Einheit Mt/a ausgedrückt. Die einzelnen Terme sind in Abbildung 2.2 an einem exemplarischen Flussabschnitt dargestellt.

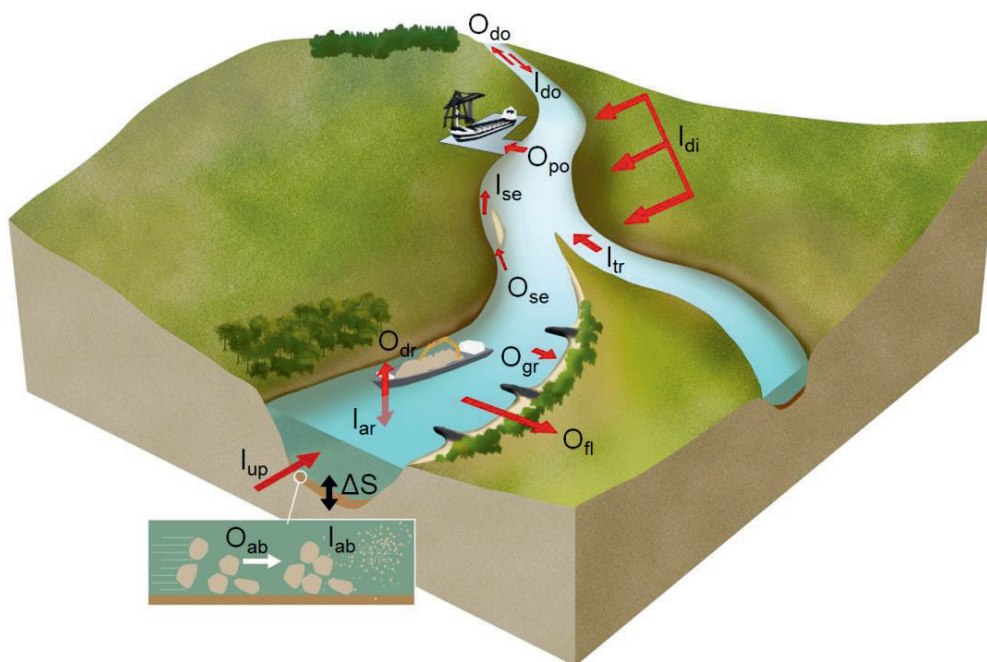


Abb. 2.2: Schematische Darstellung der Sedimentbilanzterme.

Je nach betrachtetem Flussabschnitt und betrachteter Kornfraktion verändert sich die Sedimentbilanzgleichung bzw. werden einzelne Terme vernachlässigbar. Der Sedimenteintrag von unterstrom ist beispielsweise nur im tidebeeinflussten Bereich relevant. Der Abrieb während des Transportes stellt für gröbere Fraktionen einen Austragspfad und für die Feinfraktionen einen Eintragspfad dar. In den Kapiteln der Teilbilanzen wird die jeweils verwendete Bilanzgleichung zu Beginn erläutert.

2.3 Datengrundlage

Die der Sedimentbilanz der Rheins zugrundeliegenden Daten und Untersuchungen sind aufgrund der grenzüberschreitenden Betrachtung sehr heterogen. Im Bereich der deutschen Bundeswasserstraße Rhein wurden vor allem Messdaten der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) verwendet, ergänzt durch Daten der Bundesländer, anderer Dritter und eigene Untersuchungen. Für die übrigen Abschnitte wurde im Wesentlichen auf bereits durchgeführte Studien zu Feststofftransportverhältnissen und zum Sedimenthaushalt zurückgegriffen.

Insgesamt wurden Messdaten bzw. Literaturwerte zu Geschiebetransportraten (ca. 1400 Messungen), Schwebstofffrachten (etwa 500 Querprofilmessungen und 50000 Punktmessungen), Dokumentationen von ca. 3000 Maßnahmen der Geschiebepflichtbewirtschaftung (Baggerungen, Zugaben), Peildaten, Messungen der Kornzusammensetzung der Sohle (ca. 10000 Sieblinien), Abrasionsraten und 53 Sedimentationsraten auf Überflutungsflächen verwendet.

In geringem Umfang wurden im Projekt außerdem eigene Untersuchungen durchgeführt, um spezifische Kenntnislücken zu schließen (Kapitel 3). Vor der Erstellung der Sedimentbilanz wurden alle Daten auf Plausibilität geprüft und, wenn notwendig und möglich, korrigiert.

2.4 Erstellung der Sedimentbilanz

Für den Rhein wurden verschiedene Teilabschnitte definiert, die sich einerseits an den großräumigen naturräumlichen Einheiten des Rheins orientieren, andererseits bauliche Maßnahmen (hier Staustufen) berücksichtigen, die maßgeblichen Einfluss auf den Sedimenttransport haben. Als Abschnitte wurden gewählt:

- Alpenrhein und Bodensee
- Hochrhein und staugeregelter Oberrhein (Konstanz bis Iffezheim)
- Restrhein
- Frei fließender Ober- und Mittelrhein (Iffezheim bis Königswinter)
- Niederrhein (Königswinter bis zur dt.-nl. Grenze)
- Oberes Rheindelta
- Unteres Rheindelta (tidebeeinflusster Bereich)

Für diese Teilabschnitte wurden jeweils Teilbilanzen erstellt, die in den Kapiteln 4 bis 10 beschrieben werden.

Zur Erstellung der Sedimentbilanzen wurden alle vorhandenen Daten aggregiert und in mittlere Jahresfrachten über 20 Jahre konvertiert. Mit diesen Eingangsdaten in die Bilanzgleichung wurde für die gewählten Teilabschnitte jeweils eine Bilanz für die Fraktionen feiner als 0,063 mm (Schluff, Ton), 0,063 bis 2 mm (Sand), 2 bis 16 mm (Feinkies) und größer 16 mm (Grobkies/Steine) aufgestellt. In

einigen Teilabschnitten wurden darüber hinaus die Fraktionen 16 mm bis 63 mm (Grobkies) und 63 bis 125 mm (Steine) getrennt betrachtet.

Mithilfe der räumlichen Verteilung der Ein- und Austräge können aus der Bilanzierung Sedimentfrachten entlang der Strecke ermittelt werden. Die Frachten wurden für jeden Kilometer im Längsschnitt des Rheins berechnet und soweit möglich mit unabhängigen, d. h. nicht in die Erstellung der Bilanz eingegangenen, Frachtmessungen validiert. Zur Validierung wurden zudem weitere vorliegende, unabhängige Studien verwendet. Eine Diskussion der Ergebnisse und der Unsicherheiten der Bilanzterme rundet die Teilbilanzen ab. Schließlich wurden alle Teilbilanzen zu einer Gesamtbilanz zusammengeführt (Kapitel 11).

2.5 Literatur

- Frings, R.M., Gehres, N., Promny, M., Middelkoop, H., Schüttrumpf, H. & Vollmer, S. (2014): Today's sediment budget of the Rhine River channel, focusing on the Upper Rhine Graben and Rhenish Massif. *Geomorphology*, 204, 573-587.
- Hinderer, M. (2012): From gullies to mountain belts: A review of sediment budgets at various scales. *Sedimentary Geology*, 280, 21-59.
- Hoffmann, T. (2015): Sediment residence time and connectivity in non-equilibrium and transient geomorphic systems. *Earth-Science Reviews*, 150, 609-627.
- Reid, L.M. & Dunne, T. (1996): Rapid Evaluation of Sediment Budgets: Catena: Reiskirchen.
- Slaymaker, O. (2003): The sediment budget as conceptual framework and management tool. *Hydrobiologia*, 494(1-3), 71-82.

3. Prozessuntersuchungen

Kapitel 3 fasst die ergänzenden Prozessuntersuchungen zur Sedimentbilanz des Rheines zusammen, die im Rahmen des Projektes durchgeführt wurden. Ziel der ergänzenden Prozessstudien war es, für die Bilanzierung relevante Kenntnis- und Datenlücken zu schließen. Die Untersuchungen umfassen den Sandverlust bei Geschiebemessungen, die Korngrößenverteilung der Schwebstoffe sowie den Sedimentrückhalt auf Überflutungsflächen. Ausführlichere Informationen finden sich in den bereits publizierten Berichten (Banhold et al., 2014a; Astor et al., 2014; Banhold et al., 2014b; Gehres et al., 2014).

3.1 Sandverlust bei Geschiebemessungen

K. Banhold, R.M. Frings, H. Schüttrumpf

3.1.1 Einleitung

Um genauere Erkenntnisse über die Herkunft, den Transport und den Verbleib von Sedimenten in einem Fließgewässer zu erlangen, werden regelmäßige Geschiebemessungen durchgeführt. Besonders im Rhein, der aufgrund der Anbindung wichtiger deutscher Industriestandorte an die Nordsee eine große Bedeutung für die Schifffahrt hat, ist die Kenntnis über morphologische Prozesse von Nöten. In Deutschland kommt ein Geschiebefänger der Bundesanstalt für Gewässerkunde (im Folgenden BfG) zum Einsatz, welcher mit einer Maschenweite von 1,4 mm beziehungsweise 0,5 mm (unterstrom von circa Rhein-km 800) für 300 s auf die Flusssohle aufgesetzt wird. Material, das kleiner als die verwendete Maschenweite ist, kann den Fänger passieren und verbleibt eventuell nicht im Fangkorb. Dadurch entsteht eine Verfälschung der tatsächlichen Geschiebemenge. Ziel dieser Studie war, die Sandmenge, welche während der Messung durch das Maschennetz verloren geht, zu quantifizieren. Neben dem eigentlichen Sandverlust wurde auch die Fragestellung nach dem Einfluss der Maschenweite, dem Sand- oder Grobkiesanteil sowie des Füllgrads des Fängers in der Studie berücksichtigt (Banhold et al., 2014a).

3.1.2 Vorgehensweise

In der Versuchshalle des Instituts für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University wurden im ersten Quartal 2013 und im ersten Quartal 2014 zur Untersuchung dieser Fragestellungen 146 Laborversuche durchgeführt. Es wurden zwei Phasen unterschieden: Zum einen wurde der Messvorgang selbst untersucht, bei dem sich der Geschiebefänger auf der Sohle befindet (Sohlversuche), zum anderen wurde der Heraufholvorgang simuliert, bei dem der Geschiebefänger sich auf dem Weg zur Wasseroberfläche im Wasserkörper befindet (lift-up-Versuche). Um den Einfluss des Sandgehaltes auf den Sandverlust zu untersuchen, wurde der Sandanteil im zugegebenen Sediment mit 20 %, 40 %, 60 % und 80 % variiert. Ebenso wurden Grobkiesanteile (16-32 mm) von 10 % und 40 % sowie Füllgrade des Fangkorbes von 12,5 %, 37,5 % und 62,5 % verwendet. Die Sedimentmischungen wurden so erstellt, dass sie repräsentativ für die Sohle des deutschen Rheins sind und wurden vor dem Versuch zusammengestellt. Bei allen Versuchen kam die institutseigene Kipprinne zum Einsatz. Diese besteht aus einem 30 m langen, 1 m breiten und 1 m hohen Strömungskanal. Die Wände sind mit Glas ausgekleidet, der Boden besteht aus PVC. Das Wasser wird aus dem eigenen Tiefbehälter konstant in die Versuchsrinne geleitet. Die

Fließgeschwindigkeit und der Wasserstand können über die Neigung des Wehres am Ende der Rinne und die Sohlneigung mithilfe einer Spindel gesteuert werden.

3.1.3 Sohlversuche

Für die Versuche zum Sandverlust während des Messvorganges auf der Sohle („Sohlversuche“) wurde der Geschiebefänger für 300 s (beziehungsweise 420 s bei einem Füllgrad von 62,5 %) auf die Sohle der Kipprinne in eine Arretierung gesetzt, die den Fänger während des Versuchs in Position hielt und garantierte, dass er sich bei jeder Messung in derselben Position befand. Der Wasserstand betrug bei der Versuchsdurchführung 30 cm, die Fließgeschwindigkeit 0,7 m/s, die Sohlschubspannung berechnete sich zu 1,5 N/m². Die Sedimentmischung wurde dem Fänger trocken über einen Trichter und ein Kunststoffrohr manuell zugegeben (siehe Abb. 3.1). Das Ende des Rohres wurde bei der Versuchsdurchführung mittig, unmittelbar vor der Fängeröffnung platziert, so dass das Material verlustfrei direkt in den Fänger eingetragen werden konnte. Zudem wurde am Fangkorb ein Übernetz installiert, um austretende Sandmengen daran zu hindern, in das zirkulierende Betriebswasser zu gelangen und so die Messergebnisse zu verfälschen. Der Einfluss des Übernetzes ist als gering einzustufen. Nach dem Einfüllen der Sedimentmischung wurden Trichter und Rohr mit Wasser ausgespült, um sicherzustellen, dass Rückstände vollständig in den Fänger eingebracht wurden. Um realitätsnahe Verhältnisse zu schaffen, wurde über den Versuchszeitraum mit konstanter Rate Sediment zugegeben. Das Sediment wurde bei 105° C bis zur Massenkonstanz getrocknet und gewogen.

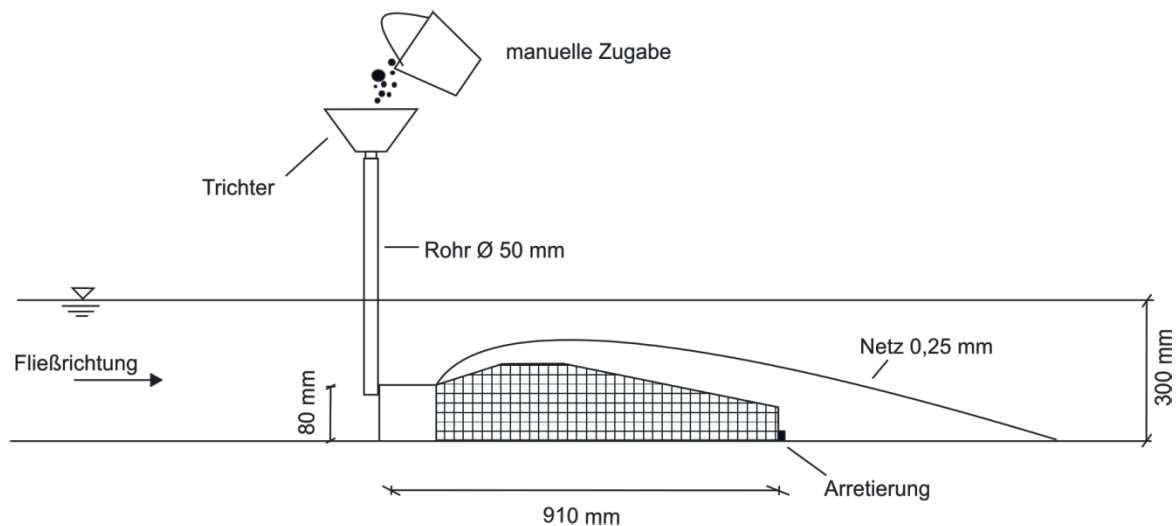


Abb. 3.1: Versuchsaufbau zum Sandverlust während der Geschiebemessung auf der Sohle mit dem Geschiebefänger der BfG (Banhold et al., 2014a).

3.1.4 Lift-Up-Versuche

Bei den lift-up-Versuchen wurde der Vorgang des Heraufholens simuliert, also der Weg, den der Geschiebefänger nach Beendigung der eigentlichen Messung auf der Sohle bis zum Messschiff zurücklegt. Der Versuchsaufbau sah wie folgt aus: Der bereits zuvor mit Sediment beladene Geschiebefänger wurde auf ein Podest in die Strömung gesetzt, der den Fänger 10 cm über der Sohle fixierte (siehe Abb. 3.2). Der Vorgang des Heraufholens dauert bei den Feldmessungen der BfG durchschnittlich 30 s (Gehres BfG, 2013, mdl. Mitt.). Diese Zeit wurde als Messdauer für die lift-up-Versuche festgelegt. Auch hier wurde das Sediment getrocknet und gewogen.

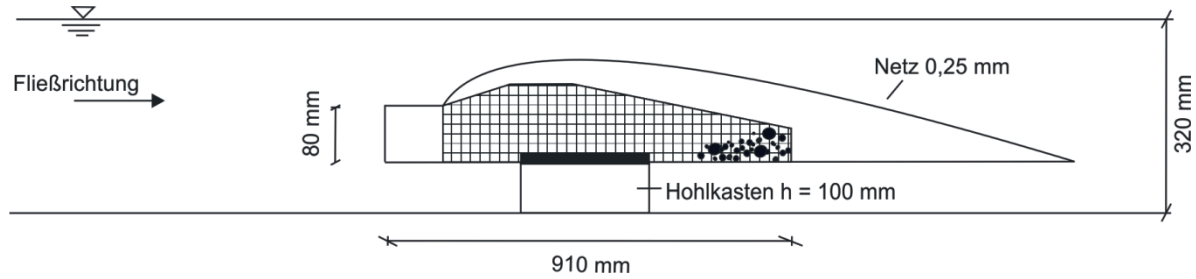


Abb. 3.2: Versuchsaufbau zum Sandverlust bei Geschiebemessungen, Simulation des Heraushelevorgangs von der Sohle zum Messschiff (lift-up-Versuche) (Banhold et al., 2014a).

Zur Analyse wurde bei beiden Versuchsreihen die trockene Masse des Sandverlustes festgestellt und die Ergebnisse einer statistischen Analyse unterzogen. Es wurde der t-Test bei gepaarten Stichproben herangezogen, um signifikante Abhängigkeiten zwischen den Mittelwerten zu erfassen. Des Weiteren wurden uni- und multivariate lineare Regressionen durchgeführt, um die potentiellen Abhängigkeiten des Sandverlustes von den Versuchsparametern Sandgehalt, Grobkiesgehalt und Füllgrad zu prüfen.

3.1.5 Ergebnisse und Diskussion

Die Ergebnisse (siehe Abb. 3.3) zum Sandverlust bei Geschiebemessungen haben gezeigt, dass der Sandverlust während der Zeit, die der Geschiebefänger auf der Sohle verbleibt, beim Einsatz eines Fangkorbs mit der Maschenweite 0,5 mm im Durchschnitt 23 % (Bandbreite 10-40 %) beträgt und beim Einsatz eines Fangkorbs mit der Maschenweite 1,4 mm im Durchschnitt 50 % (Bandbreite 36-67 %) beträgt. Beim Heraushelevorgang gehen zusätzlich 3 % (Bandbreite 1-8 %), bzw. 16 % (Bandbreite 8-30 %) des gefangenen Sandes verloren.

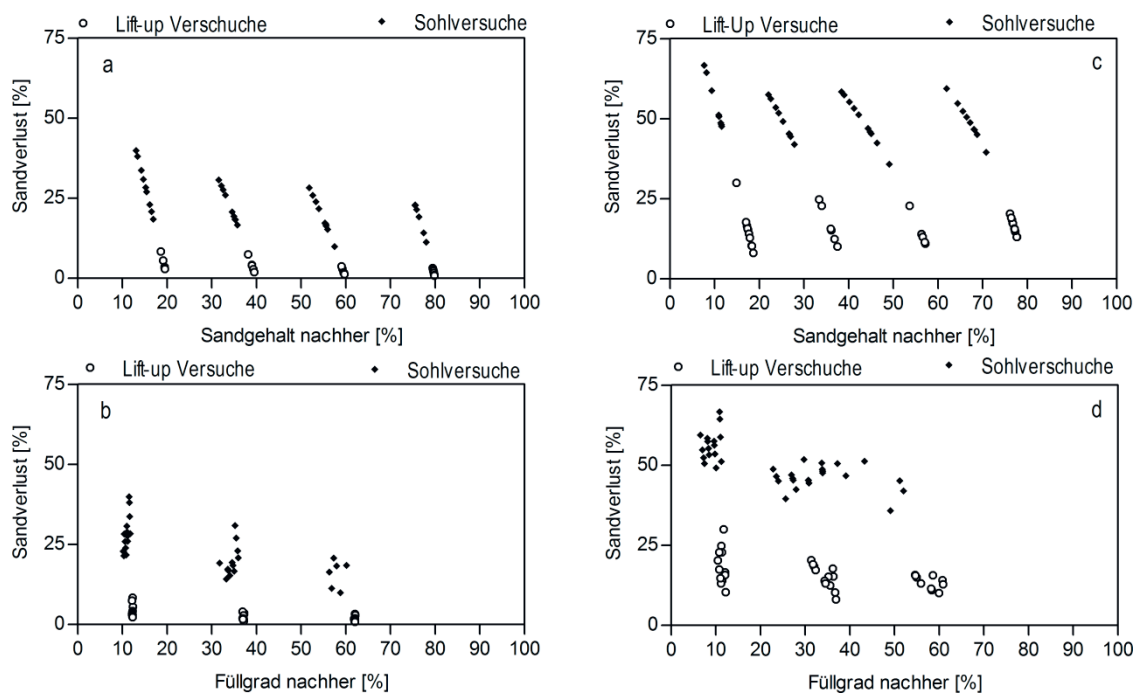


Abb. 3.3: Grafische Darstellung der Ergebnisse der Versuche mit den Geschiebefängern der BfG mit der Maschenweite 0,5 mm (a und b) und 1,4 mm (c und d).

Der Sandverlust ist dabei abhängig vom Sandgehalt des im Fänger vorhandenen Sediments und des Füllgrades des Fängers. Je mehr Sediment im Fänger vorhanden ist, desto geringer der Sandverlust, da der Sand sich offenbar in die Zwischenräume des restlichen Sediments setzt. Ebenfalls gilt: Je mehr Sand im Fänger vorhanden ist, desto geringer ist der Sandverlust, da die Maschen des Fangkorbs teilweise zugesetzt werden, wenn der Sandgehalt zunimmt. Die Sandverluste waren bei 0,5 mm Maschenweite deutlich geringer als bei 1,4 mm Maschenweite.

3.1.6 Korrektur vorhandener Daten

Um künftig die Ergebnisse von Geschiebemessungen besser deuten zu können, wurde ein Faktor entwickelt, der mit den vorhandenen Daten verrechnet werden kann, um aus den gemessenen Sandmassen die realen Sandmassen des Geschiebes auf der Sohle des Rheins zu errechnen. Der Korrekturfaktor ist wie folgt definiert:

$$k = \frac{m_{s1}}{m_{s3}} = \frac{1}{(1-0,01SV_{Sohle})(1-0,01SV_{liftup})} \quad (3.1)$$

mit:

$$SV_{Sohle} = a - bSG - cFG$$
$$SV_{liftup} = d - eSG - fFG$$

mit:

k = Korrekturfaktor [-]
 m_{s1} = trockene Sandmasse, die von dem Fluss in den Fänger transportiert wird [g]
 m_{s3} = trockene Sandmasse nach dem Heraufholvorgang [g]
 SG = Sandgehalt des Fängerinhalts nach der Messung [%]
 FG = Füllgrad des Fängers nach der Messung [%]
 SV_{Sohle} = Sandverlust während des Heraufholvorgangs [%]
 SV_{liftup} = Sandverlust während der Messung [%]

Die Werte Koeffizienten a bis f sind abhängig von der benutzten Maschenweite und Banhold et al. (2014a) zu entnehmen. Dieser Korrekturfaktor beinhaltet den Einfluss des Sandgehaltes des gefangenen Materials und des Füllgrades des Fangkorbes sowie den Verlust, der bei der eigentlichen Messung auf der Sohle stattfindet, und des Heraufholvorganges zum Messschiff. Eine vorläufige Schätzung zeigte, dass der Korrekturfaktor für den Rheinabschnitt km 330-800, bei dem ein Fänger mit einer Maschenweite von 1,4 mm zum Einsatz kommt, und im Durchschnitt bei 2,8 – 3,1 liegt. Für den Rheinabschnitt, der mit einer Maschenweite von 0,5 mm gemessen wird (Rhein-km 800-870), liegt der Korrekturfaktor bei etwa 1,5. Das bedeutet, dass in diesen Abschnitten 2,8- beziehungsweise 1,5-mal so viel Sand in Form von Geschiebe transportiert wird, als bisher angenommen wurde. Es ist zu beachten, dass aufgrund der natürlichen Variabilität in Füllgrad (FG) und Sandgehalt (SG) die Korrekturfaktoren räumlich und zeitlich sehr streuen.

3.1.7 Fazit

Die Ergebnisse dieser Untersuchung haben gezeigt, dass Geschiebemessungen im deutschen Rhein den Sandtransport unterschätzen. Wie zu erwarten war, ist der Sandverlust beim Einsatz eines Fängers mit der Maschenweite 0,5 mm geringer als bei 1,4 mm. Die Ergebnisse zeigen, dass der Sandverlust während der Messung vom Sandgehalt des Geschiebes und vom Füllgrad des Fängers abhängig ist: je höher der Sandgehalt oder Füllgrad, desto geringer der Sandverlust. Mit dem entwickelten Korrekturfaktor können die bisher angenommenen Sandfrachten nach oben korrigiert werden. Weitere Informationen zu den Vorgehensweisen und den Ergebnissen dieser Untersuchung sind Banhold et al. (2014a) zu entnehmen.

3.2 Korngrößen der Schwebstofffracht

B. Astor, N. Gehres, G. Hillebrand

3.2.1 Einleitung

Für eine fraktionierte Sedimentbilanz sind Kenntnisse der Korngrößenzusammensetzung der transportierten Sedimente notwendig. Bei Messungen der Geschiebefracht erfolgt standardmäßig eine Auswertung der Kornverteilung des Geschiebes. Für die Schwebstoffe liegen zur Ermittlung der Gesamtfrachten Daten unterschiedlicher Messnetze vor. An etwa 70 Messstellen an den Bundeswasserstraßen (BWaStr) werden zweimal jährlich Schwebstoffkonzentrationen und Fließgeschwindigkeiten im Fließquerschnitt erfasst (Schwebstoffvielpunktmessungen). Dabei werden die Fracht des suspendierten Sandes und die Gesamtschwebstofffracht getrennt erfasst. Diese Messungen erfolgen allerdings nur entlang der frei fließenden Abschnitte der BWaStr.

Im Schwebstoffdauermessnetz der WSV werden entlang der gesamten staugeregelten und frei fließenden BWaStr an 67 Messstellen werktäglich Wasserproben entnommen, um die Schwebstoffkonzentration zu bestimmen. Eine Bestimmung der Zusammensetzung der Schwebstoffe, beispielsweise der Sandanteile im Schwebstoff, erfolgt dabei nicht.

3.2.2 Methodik

Um entlang des gesamten Rheins eine fraktionierte Betrachtung der Schwebstofffrachten zu ermöglichen, wurden Wasserproben verschiedener Sondermesskampagnen mit Zelluloseacetatfiltern gefiltert und im Anschluss im Labor auf ihr Korngrößenspektrum untersucht. Die Probennahme hierzu erfolgte von 2010 bis 2013. Verwendet wurden Wasserproben aus der Kalibrierung von ADCP-Vollprofilmessungen und Wasserproben, die zur Kalibrierung von Trübungssonden in Ufernähe entnommen waren.

Korngrößenanalysen im Nachgang zur Messung der Schwebstoffkonzentration waren möglich, wenn die Probenmenge ausreichend groß war. Bei den üblichen Volumina der Kalibrierproben zur Konzentrationsbestimmung von 1 oder 2 Litern war dies nur bei erhöhter Schwebstoffführung möglich. Bei niedrigeren Schwebstoffkonzentrationen wurden ähnliche Proben (selbe Messstelle, ähnlicher Abfluss, ähnliche Konzentration) für die Analyse zusammengefasst, um ausreichend Probenmaterial zu erhalten.

3.2.3 Ergebnisse und Fazit

Korngrößenanalysen aus Proben der ADCP-Vollprofilmessungen wurden mit den Ergebnissen der parallel durchgeführten Schwebstoffvielpunktmessungen verglichen. Dabei zeigt sich, dass die Konzentrationen der Feinanteile (Ton und Schluff) gut übereinstimmt. Die Proben der ADCP-Vollprofilmessungen unterschätzen die Konzentration des suspendierten Sandes systematisch, möglicherweise bedingt durch ein zu geringes Probenvolumen. Für die Kalibrierproben der Trübungssonden war ein analoger Vergleich mit einer unabhängigen Methodik nicht möglich. Die Sandgehalte der Kalibrierproben der Trübungssonden waren tendenziell höher als die der Proben der ADCP-Vollprofilmessungen.

Insgesamt wurden 536 einzelne Kalibrierproben analysiert. Es wurden keine signifikanten räumlichen Gradienten in der Korngrößenverteilung festgestellt. Auch eine Abhängigkeit der Korngrößenverteilung vom Abfluss war nicht eindeutig nachzuweisen. Deshalb wurden alle erhobenen Werte gemittelt und daraus für den Rhein eine mittlere Korngrößenverteilung der Schwebstoffe

berechnet. Aus allen Proben ergibt sich im Mittel ein Tongehalt von 12,2 %, ein Schluffgehalt von 78,6 % und ein Sandgehalt von 9,2 %. Diese Werte werden der Fraktionierung der gemessenen Schwebstofffrachten aus dem Schwebstoffdaueressnetz der WSV in diesem Bericht zugrunde gelegt. Diese Werte weichen leicht von den durch Frings et al. (2014) analysierten Schwebstoffvielpunktmessungen ab, die einen durchschnittlichen Sandgehalt von 16,6 % im Bereich Iffezheim-Königswinter ableiteten.

Details zur Methodik der Korngrößenbestimmung, zu den Ergebnissen und eine Diskussion der Unsicherheiten finden sich im ausführlichen Bericht (Astor et al., 2014).

3.3 Sedimenteintrag aus den Nebenflüssen

N. Gehres, B. Astor, G. Hillebrand

3.3.1 Einleitung

Bei der Aufstellung einer Sedimentbilanz müssen die Nebenflüsse als Sedimentlieferanten (Sedimentquellen) berücksichtigt werden. Die großen Nebenflüsse des Rheins, Aare, Neckar, Main, Mosel und Maas sind staugeregelte Flüsse mit Querbauwerken, aber auch die kleineren Nebenflüsse sind flussbaulich verändert. Es stellt sich die Frage, wie hoch die Schwebstoff- und Geschiebeeinträge aus den Nebenflüssen in den Rhein sind bzw. wie groß der Einfluss der Stauregelung der Nebenflüsse auf die transportierten Sedimentfrachten im Rhein ist.

3.3.2 Grundlagen

Schwebstofffrachten werden zu einem großen Teil über die Querbauwerke der Nebenflüsse hinweg transportiert. Dies bestätigen Schwebstoffmessungen im Längsverlauf des Rheins, die einen sprunghaften Anstieg der Frachten im Bereich der Mündungen von Nebenflüssen zeigen. Geschiebefrachten in staugeregelten BWaStr werden nicht messtechnisch erfasst. Kolkbildung oder notwendige Baggerungen von Grobsedimenten (Kies, Sand) im Unterwasser von Wehranlagen nach Hochwasserereignissen deuten jedoch auf zumindest zeitweisen Geschiebetransport auch in staugeregelten Flussstrecken hin.

In dieser Studie wurden zur Abschätzung der eingetragenen Sedimentmengen entlang des Rheins vor allem die großen Zuflüsse Neckar, Main und Mosel und ergänzend eine Auswahl kleinerer Nebenflüsse des Rheins betrachtet. Eine ausführliche Darstellung der Datengrundlage und der Methodik zur Abschätzung der Sedimenteinträge aus den Rheinnebenflüssen ist im Bericht von Gehres et al. (2014) enthalten.

3.3.3 Geschiebetransport

Ein Großteil der Wehre an den Stauanlagen der Rheinnebenflüsse ist aufgrund der Bauart zumindest bei bestimmten Abflusssituationen durchgängig für Sedimente. Allerdings tritt dieser Fall im Schnitt nur an wenigen Tagen pro Jahr ein. Untersuchungen zur petrografischen Zusammensetzung des Rheingeschiebes und theoretische Überlegungen legen nahe, dass zumindest bei Hochwasserereignissen geringe Mengen an Sedimenten aus den Nebenflüssen als Geschiebematerial in den Rhein eingetragen werden. Anhand der aktuellen Datenlage sind diese Mengen nicht quantifizierbar. Für den Bilanzzeitraum 1991 bis 2010 werden sie als vernachlässigbar erachtet.

3.3.4 Schwebstofftransport

Der Schwebstofftransport an Neckar, Main, Mosel und Lahn wird langjährig an Dauermessstationen erfasst. An den Stationen werden werktäglich durch die örtlichen Stellen der WSV Proben entnommen und vor Ort gefiltert. Anschließend wird im Sedimentlabor der BfG gravimetrisch die Schwebstoffkonzentration der Proben bestimmt. Die Berechnung des Schwebstofftransportes der Rhein Nebenflüsse basiert hauptsächlich auf dieser Datengrundlage.

An den kleineren direkten Rhein Nebenflüssen werden die Schwebstoffkonzentrationen teilweise durch die Bundesländer erhoben. Die Messungen erfolgen als Stichprobe meist ein- bis zweimal pro Monat. An acht Messstellen lag eine ausreichende Anzahl an Messwerten vor, um Konzentrations-Abfluss-Beziehungen aufstellen zu können. Aus diesen Beziehungen wurden anhand von durchgehenden Abflussganglinien mittlere Jahresfrachten für den Bilanzzeitraum ermittelt. Die Einträge über weitere kleine Nebenflüsse wurden wegen der geringen Datendichte aus mittleren Schwebstoffkonzentrationen und der Abflussganglinie abgeschätzt. Weitere Nebenflüsse, für die keine Messdaten zu Schwebstoffkonzentrationen vorliegen, wurden nach Einzugsgebietsgrößen klassifiziert. Ihre Schwebstofffrachten wurden vereinfacht über Analogieschluss zu Nebenflüssen, an denen Daten vorlagen, abgeschätzt.

Für die Fraktionierung aller Schwebstofffrachten wurde die entsprechend Kapitel 3.2 ermittelte mittlere Korngrößenzusammensetzung verwendet.

3.3.5 Fazit

Die ermittelten Sedimentfrachten der Einträge aus den Nebenflüssen sind in Tab. 3.1 zusammengefasst.

Tab. 3.1: *Ergebnisse der Sedimentfrachten aus den untersuchten Rhein Nebenflüssen im Bereich Rhein-km 334-857 (Gehres et al., 2014).*

	Einheit	Neckar	Main	Mosel	Lahn	kl. Nebenflüsse
Einzugsgebiet	km ²	14.000	27.300	28.146	5.925	< 100 - 5.000
Länge	km	367	527	544	246	
MQ	m ³ /s	137	224	315	47	
Staufstufen	Anzahl	27	34	28	24	
Fracht_{Feinschweb}	Mt/a	0,237	0,233	0,556	0,053	0,067
Fracht_{susp.Sand}	Mt/a	0,024	0,024	0,056	0,005	0,007
Fracht_{Geschiebe}	Mt/a	-	-	-	-	-

3.4 Vorlandsedimentation entlang des frei fließenden deutschen Rheins

K. Banhold, R.M. Frings, H. Schüttrumpf

3.4.1 Einleitung

Die Sedimentquellen und -senken innerhalb des Rheingebiets sind teilweise unbekannt. Um die Prozesse in Fließgewässern nachvollziehen zu können, ist die Kenntnis der Quellen und Senken wichtig. Eine bedeutende Sedimentsenke ist die Ablagerung auf den Vorländern, welche im Rahmen dieser Studie für den frei fließenden Ober-, Mittel-, und Niederrhein getrennt untersucht wurde. Das Ziel war die Berechnung der massenmäßigen jährlichen Ablagerungsraten auf den Vorländern von Ober-, Mittel- und Niederrhein sowie die Aufteilung in Ton/Schluff und Sand. Die kompletten Ergebnisse sind in einem eigenen Bericht zusammengestellt (Banhold et al., 2014b).

3.4.2 Grundlagen

Die Ermittlung der Sedimentationsraten in den Vorländern erfolgte durch die Messung des Verlaufs der Cäsium-137-Konzentrationen mit der Tiefe in Bohrkernen. Cäsium-137 ist ein radioaktives Isotop, das bei einer Kernspaltung entsteht und bei Kernwaffenexplosionen oder Unfällen in Atomkraftwerken in die Atmosphäre gelangt. Durch Niederschlag gelangt es zurück auf die Erdoberfläche und kontaminiert so unter anderem das anstehende Sediment. In Nordeuropa gelangte Cäsium-137 aufgrund weltweiter Bombentests zwischen 1952 und 1963 sowie des Unfalls im Kernkraftwerk Tschernobyl am 26.04.1986 verstärkt in die Atmosphäre. Kietzer (2007) zeigte, dass der Unfall in Tschernobyl einen weitaus größeren Einfluss auf die Cäsium-137-Konzentration in Deutschland hatte als die Bombentests. Aufgrund seiner Halbwertszeit von 30,17 Jahren ist es auch heute noch im Boden und im Sediment nachweisbar und kann zur Datierung der Sedimente genutzt werden (Bahadir et al. 2013).

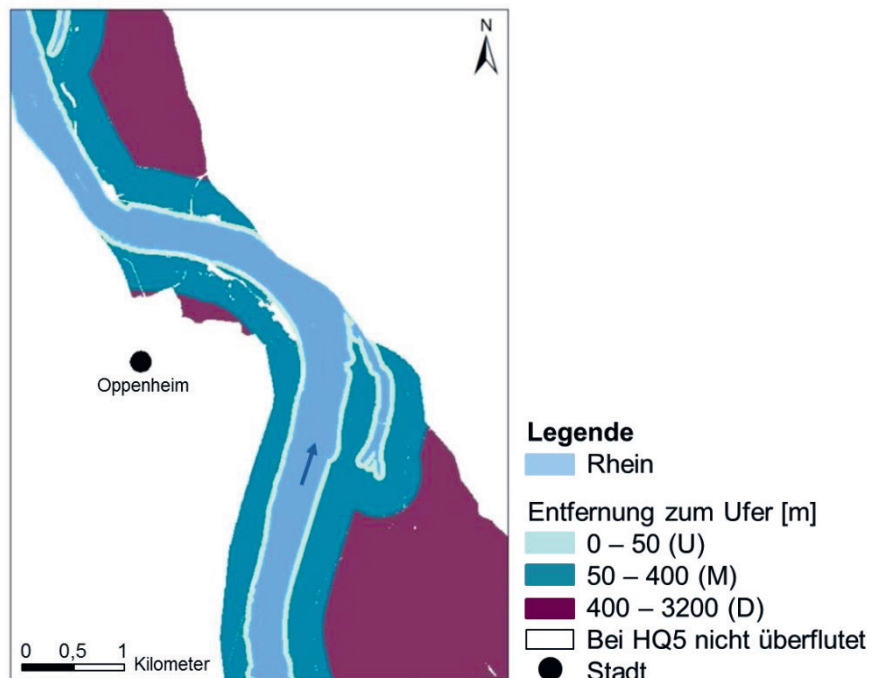


Abb. 3.4: Entfernung zum Ufer des Rheins, drei Entfernungsklassen. Dargestellt ist nur der Bereich, der während eines HQ₅ überflutet wird. Beispielhafte Lage am Oberrhein (Banhold et al, 2014b).

3.4.3 Vorgehensweise

In den Jahren 2013/14 wurden 23 Rammkerne aus dem Untersuchungsgebiet zwischen Iffezheim (Rhein-km 334) und der deutsch-niederländischen Grenze (Rhein-km 857) entnommen und schichtweise auf den Cäsium-137-Gehalt untersucht, um so die mittlere jährliche Ablagerungsrate bestimmen zu können (vgl. Ritchie und McHenry, 1990). Um eine Vergleichbarkeit und Repräsentativität der entnommenen Rammkerne zu erreichen, wurden die Entnahmestandorte im Vorland eingeteilt in eine Ufer-, Mittel- und Deichzone (Abb. 3.4). Außerdem bildete die Entfernung in Fließrichtung, also der steigende Rhein-km, eine weitere Kategorie.

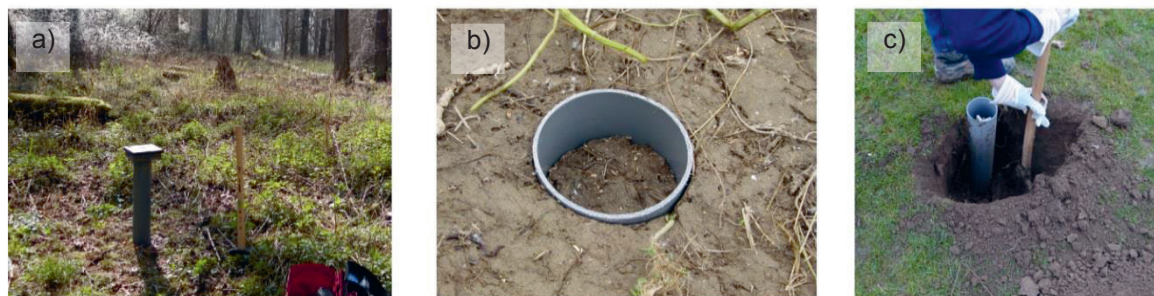


Abb. 3.5: Entnahme der Rammkerne: a) aufgestelltes Polypropylen-Rohr mit aufgesetzter Schlagplatte, b) eingeschlagenes Rohr mit komprimiertem Bohrkern, c) Bergung des Rammkerns (Banhold et al, 2014b).

Die Proben wurden ausschließlich aus Flächen entnommen, die nicht anthropogen beeinflusst wurden. Am Oberrhein 4 im Uferbereich, jeweils 4 weitere im Mittelbereich und jeweils 2 im Deichbereich. Am Mittlerrhein wurden je 2 Rammkerne im Ufer- und Mittelbereich entnommen. Am Niederrhein 3 im Uferbereich, jeweils 4 weitere im Mittelbereich und jeweils 2 im Deichbereich.

Bei der Entnahme der Rammkerne im Feld wurde ein Polypropylen-Rohr mit einem Innendurchmesser von 10,5 cm und einer Länge von 65 cm manuell in den Boden getrieben. Die durch das sich verdichtende Sediment entstandene Komprimierung wurde dokumentiert und das Rohr aus dem Erdreich geborgen und verschlossen (siehe Abb. 3.5). Im Bodenphysikalischen Labor des IWW wurde der Bohrkern in 1 cm mächtige Schichtproben unterteilt und bis zur Massenkonstanz getrocknet. Von jeder zweiten Schichtprobe wurde das Gewicht notiert und die Probe in einer verschließbaren Runddose zur weiteren Untersuchung in das Forschungszentrum Jülich gesandt. Um auf das Alter der Schichtproben zu schließen, wurde mittels Gammastrahlenspektrometrie der Cäsium-137-Gehalt gemessen. Aufgrund der Kenntnis der Masse der Schichtproben konnte somit der Gehalt je Masse (Bq/kg) bestimmt werden. Weiterhin wurde die Kornverteilung der Rammkerne durch eine Nasssiebung bestimmt. Außerdem wurde der Glühverlust sowohl des gesamten Materials als auch des bereits nassgesiebten Materials bestimmt, um den organischen Anteil zu erhalten.

Das Tiefenprofil der Cäsium-Belastung zeigte typischerweise 1 oder 2 klar erkennbare Peaks (s. Banhold et al, 2014b). Unter der Annahme, dass der oberste Peak im Tiefenprofil durch den Unfall in Tschernobyl entstanden ist und alles darüber befindliche Sediment sich seither abgelagert hat, wurde die durchschnittliche jährliche Ablagerung für jeden Entnahmestandort berechnet. Durch Multiplikation mit der überfluteten Fläche wurde für die durchschnittliche jährliche Ablagerung der Vorlandzonen des Ober-, Mittel- und Niederrheins die Gesamtakkumulation berechnet. Bei der statistischen Analyse wurde die Methodik der linearen univariaten und multivariaten Regressionsanalyse und Kurvenanpassung angewandt, mit der die Daten hinsichtlich eines statistischen Zusammenhangs untersucht wurden. Es wurde untersucht, ob sich Sandgehalt und/oder Ablagerungsrate zwischen Iffezheim und der deutsch-niederländischen Grenze mit der Fließrichtung statistisch signifikant verändern.

3.4.4 Ergebnisse und Diskussion

Bei der statistischen Analyse stellte sich heraus, dass einzig bei der Betrachtung aller abgelagerten Fraktionen und aller Entfernungen zum Ufer ein statistisch signifikanter Zusammenhang besteht (Abb. 3.6). Die ermittelten Ablagerungsmengen sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Die Mittelwerte der untersuchten Zusammenhänge unterscheiden sich nicht signifikant (Abb. 3.7). Die Mobilität von Cäsium-137 insbesondere in sandigen Böden und biologische Prozesse wie Wurzeinschlag oder tierische Aktivitäten sind Umstände, welche die Lage eines Peaks im Cäsium-137-Profil beeinflussen können und in dieser Studie unberücksichtigt blieben. Außerdem wurde davon ausgegangen, dass auf Vorländern Sedimentation vorherrscht und keine signifikante Erosion auftritt.

Tab. 3.2: Berechnete Ablagerungsraten in [Mt/a] und [1.000 t/a/km] auf Vorländern des frei fließenden Rheins in Deutschland. Gesamte Masse beinhaltet organische Bestandteile, die weiteren nur anorganische (Banhold et al, 2014b).

	Gesamt		Sand		Ton/Schluff	
	Mt/a	1.000 t/a/km	Mt/a	1.000 t/a/km	Mt/a	1.000 t/a/km
Oberrhein	0,743	3,8	0,129	0,7	0,539	2,8
Mittelrhein	0,054	0,5	0,020	0,2	0,030	0,3
Niederrhein	0,993	4,6	0,220	1,0	0,679	3,1

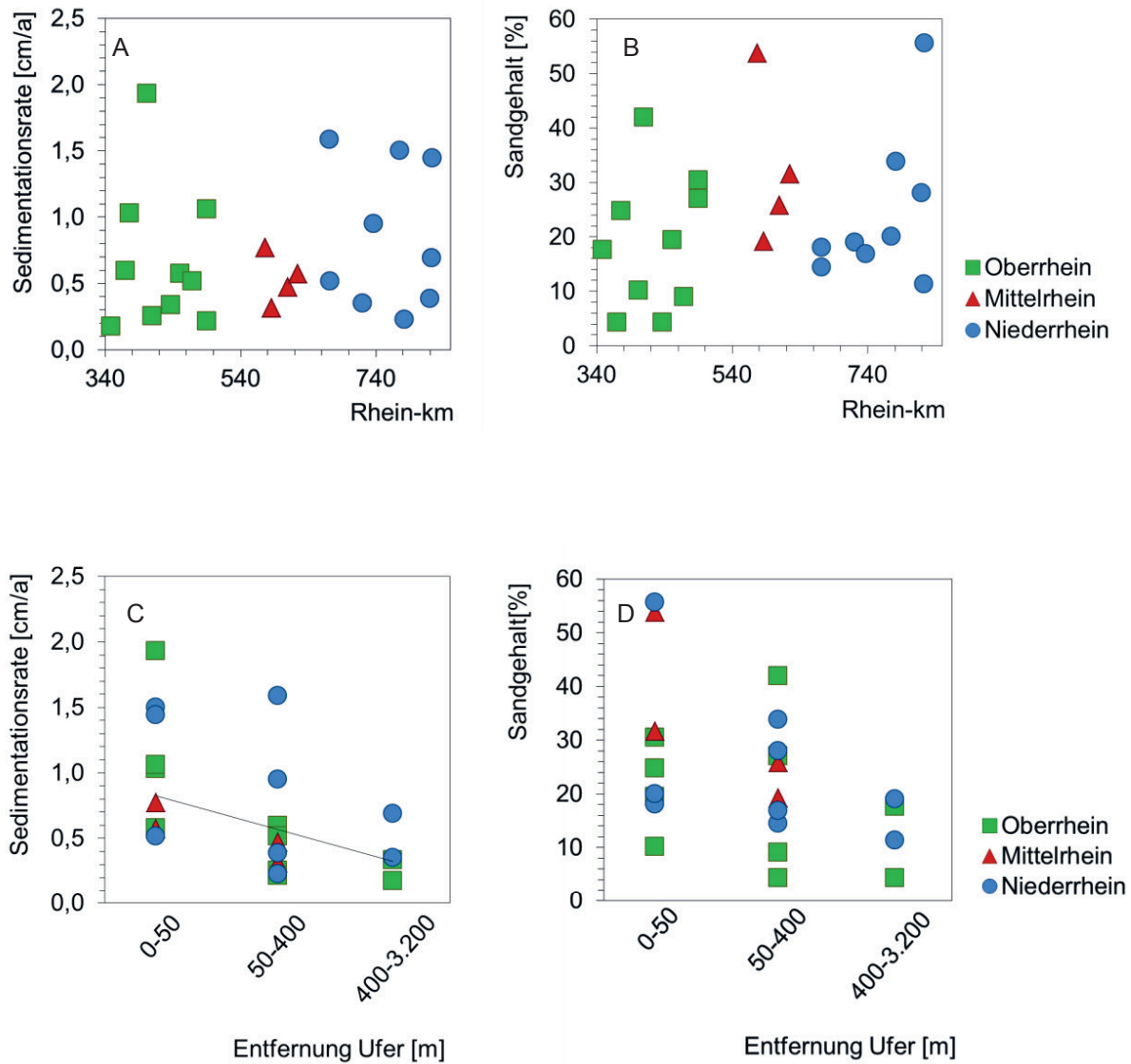


Abb. 3.6: (A): Veränderung der durchschnittlichen jährlichen Ablagerungsrate aller Fraktionen auf den Vorländern des frei fließenden Rheins bis zur deutsch-niederländischen Grenze im Zeitraum 1986 – 2013/14 in Fließrichtung und (B): dessen Sandgehalt. (C): Veränderung der durchschnittlichen jährlichen Ablagerungsrate aller Fraktionen auf den Vorländern des frei fließenden Rheins in Deutschland Grenze im Zeitraum 1986 – 2013/14 mit steigender Entfernung zum Ufer und (D): dessen Sandgehalt (Banhold et al, 2014b).

3.4.5 Fazit

Wie erwartet, wird im Bereich der Vorländer von Oberrhein und Niederrhein aufgrund der Breite der Vorländer wesentlich mehr Sediment abgelagert als im Bereich des Mittelrheins. Ebenso konnte gezeigt werden, dass die Ablagerungen zum großen Teil aus Ton/Schluff bestehen. Die Betrachtung ergab, dass 0,129 Mt/a Sand und 0,539 Mt/a Ton/Schluff im Bereich des Oberrheins abgelagert wurden. Am Mittelrhein waren es 0,020 Mt/a Sand und 0,030 Mt/a Ton/Schluff. Im Bereich des Niederrheins wurden 0,220 Mt/a Sand und 0,679 Mt/a Ton/Schluff auf den Vorländern abgelagert. Die angegebenen Werte entsprechen der mittleren jährlichen Ablagerung zwischen 1986 und 2013/2014.

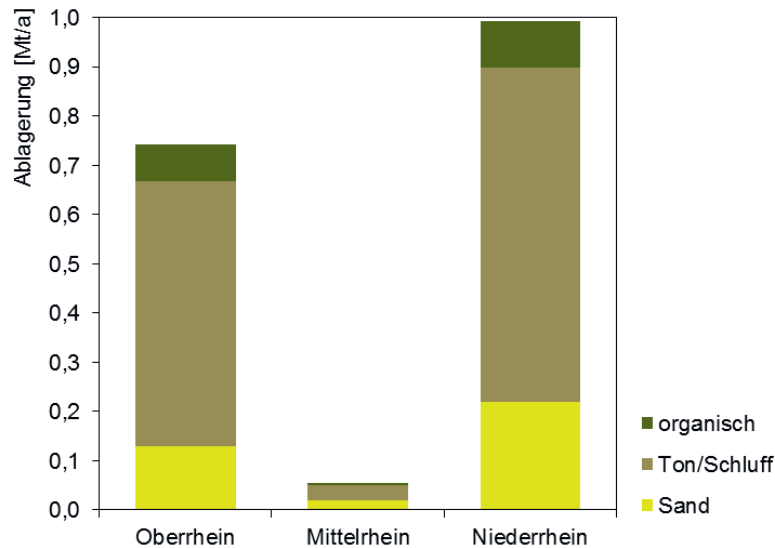


Abb. 3.7: Mittlere Ablagerung auf den Vorländern des frei fließenden Rheins zwischen 1986 – 2013/14 an Ober-, Mittel- und Niederrhein in [Mt/a] (Banhold et al, 2014b).

3.5 Literatur

- Astor, B., Gehres, N., & Hillebrand, G. (2014): *Von der Quelle zur Mündung, eine Sedimentbilanz des Rheins: Korngrößenanalyse von Schwebstoffproben am Rhein und seinen Nebenflüssen*. BfG-Bericht 1798. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Bahadir, M., Parlar, H. & Spiteller, M. (Hg.) (2013): Springer Umweltlexikon. 2., Aufl. 2000. Springer Berlin.
- Banhold, K., Frings, R.M., & Schüttrumpf, H. (2014a): *Teil 1: Sandverlust bei Geschiebemessungen im Rhein*. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University, Aachen.
- Banhold, K., Frings, R.M., & Schüttrumpf, H. (2014b): *Vorlandsedimentation am deutschen Rhein* (Bericht). Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University, Aachen.
- Gehres, N., Astor, B., & Hillebrand, G. (2014): *Von der Quelle zur Mündung, eine Sedimentbilanz des Rheins: Rheinnebenflüsse als Sedimentlieferanten*. BfG-Bericht 1812. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Kietzer, B. (2007): Aufklärung der Bodenverlagerung durch Bearbeitungserosion in Jungmoränenlandschaften. Dissertation. Berlin.
- Ritchie, J.C. & McHenry, J.R. (1990): Application of Radioactive Fallout Cesium-137 for Measuring Soil Erosion and Sediment Accumulation Rates and Patterns: A Review. In: *Journal of Environment Quality* 19 (2), S. 215–233. DOI: 10.2134/jeq1990.00472425001900020006x.

4. Sedimentbilanz des Alpenrheins

K. Banhold, R.M. Frings, H. Schüttrumpf

4.1 Einleitung

Alpenrhein und Bodensee werden regelmäßig mittels Sohlaufnahmen beziehungsweise Seegrundaufnahmen auf höhenmäßige Veränderungen untersucht. Diese Messungen geben jedoch keine Antwort auf wesentliche Fragestellungen, wie: "Wie viele Sedimente werden flussabwärts transportiert", "Welche Kornfraktionen sind in Bewegung?", "Woher kommen die im Fluss transportierten Sedimente?", "Wohin gelangen die erodierten Sedimente?", und „Wie sind die morphologischen Prozesse im Alpenrhein und Bodensee von den Prozessen weiter oberstrom abhängig?“. Die Beantwortung dieser Fragen ist nicht nur unabdingbar für das Verständnis der Flussmorphologie, sondern auch relevant, um eine Prognose zukünftiger Erosionsprozesse und Sedimentationsraten zu erhalten und die Auswirkungen menschlicher Einflüsse zu verstehen. Weiterhin ermöglichen Antworten auf diese Fragen eine Optimierung des Flussmanagements, unter anderem in Bezug auf Baggerstrategien. Die Fragestellungen können nur mit der Aufstellung einer Sediment- oder Feststoffbilanz beantwortet werden.



Abb. 4.1: a) Die offizielle Quelle des Rheins: der Ausfluss des Tomasees, b) der Zusammenfluss von Vorder- und Hinterrhein zum Alpenrhein, c) der Alpenrhein bei Vaduz (LIE), d) die Vorstreckung im Bodensee (Fotos: Frings, 08/13).



Abb. 4.2: Bodensee, Blick auf die Insel Mainau (Foto: Rizzo, 2008).

Eine solche Bilanz beschreibt den Massenerhalt zwischen den Sedimentmengen, die in das Untersuchungsgebiet eingetragen werden (die sogenannten Quellen), den Sedimentmengen, die aus dem Untersuchungsgebiet ausgetragen werden (die sogenannten Senken) und der Veränderung der Sedimentmengen, die im Untersuchungsgebiet gespeichert sind und sich in der Änderung der Sohlhöhen widerspiegeln.

Das Ziel dieser Teilstudie war die Erstellung einer Sedimentbilanz für den Flussschlauch des Alpenrheins (Abb. 4.1) und des Bodensees (Abb. 4.2) für den Zeitraum 1991-2010. Dabei wurden die Sedimentfraktionen feiner als 0,063 mm (Schluff, Ton), 0,063 bis 2 mm (Sand), 2 bis 16 mm (Feinkies), 16 mm bis 63 mm (Grobkies) und 63 bis 125 mm (Steine) getrennt voneinander bilanziert.

Die offizielle Quelle des Rheins ist historisch bedingt der Ausfluss des Tomasees in den Schweizer Alpen (Abb. 4.1a). Die hier vorgestellte Bilanzierung beginnt beim Zusammenfluss der Quellflüsse Vorder- und Hinterrhein (Abb. 4.1b), da für die oberstromigen Bereiche kaum Daten vorhanden waren.

Die hier vorgestellte Bilanz des Alpenrheins hat zwei Berichte zur Grundlage, die von Zarn (2010a und 2010b) erstellt wurden. Zarn (2010a) hat den Alpenrhein vom Beginn (Tamins) bis zur Mündung der Ill auf sein Feststoffaufkommen mithilfe eines numerischen Modells (MORMO) untersucht, das mit vorhandenen Daten kalibriert wurde. Der zweite Bericht (Zarn, 2010b) fokussiert auf den Bereich unterstrom der Illmündung, die internationale Strecke, auf der der Alpenrhein die Schweiz, Liechtenstein und Österreich passiert.

4.2 Gebietsbeschreibung

4.2.1 Lage

Das betrachtete Gebiet beginnt am Zusammenfluss des Vorder- und Hinterrheins, der den Anfang des Alpenrheins beim Ort Reichenau in der Gemeinde Tamins (Kanton Graubünden, CH) (Alpenrhein-km, kurz AP-km 0,00) markiert (Abb. 4.3). Der Vorderrhein beginnt beim Ausfluss des Tomasees, der gleichzeitig als offizielle Quelle des Rheins angesehen wird. Bis zum Zusammenfluss mit dem 64 km langen Hinterrhein legt der Vorderrhein eine Strecke von 76 km zurück. Der Alpenrhein entwässert bis zu seiner Mündung in den Bodensee ein Gebiet von 6.123 km² bei einer mittleren Höhe von

1.800 m üNN; 1,4 % dieses Gebiets sind vergletschert. Auf einer Länge von 90 km fließt der Alpenrhein in nördliche Richtung durch die schweizerischen Kantone Graubünden und St. Gallen, das Fürstentum Liechtenstein und das österreichische Bundesland Vorarlberg, in dem auch die Mündung des Alpenrheins in den Bodensee liegt. Die Breite des Flussbettes variiert in Form eines Einfachtrapezquerschnittes über die Länge des Alpenrheins. Zu Beginn schwankt die Breite zwischen 55 und 110 m bis zur Mündung des Nebenflusses Maschänser Rüfi bei AP-km 14,0. Hier hat sich durch den Eintrag groben Materials eine natürliche Blockrampe gebildet. Die Flussbettbreite steigt in den Mastrilser Rheinauen (AP-km 20-23,2) bis auf 300 m an. In diesem Bereich haben sich natürliche Verzweigungen gebildet.

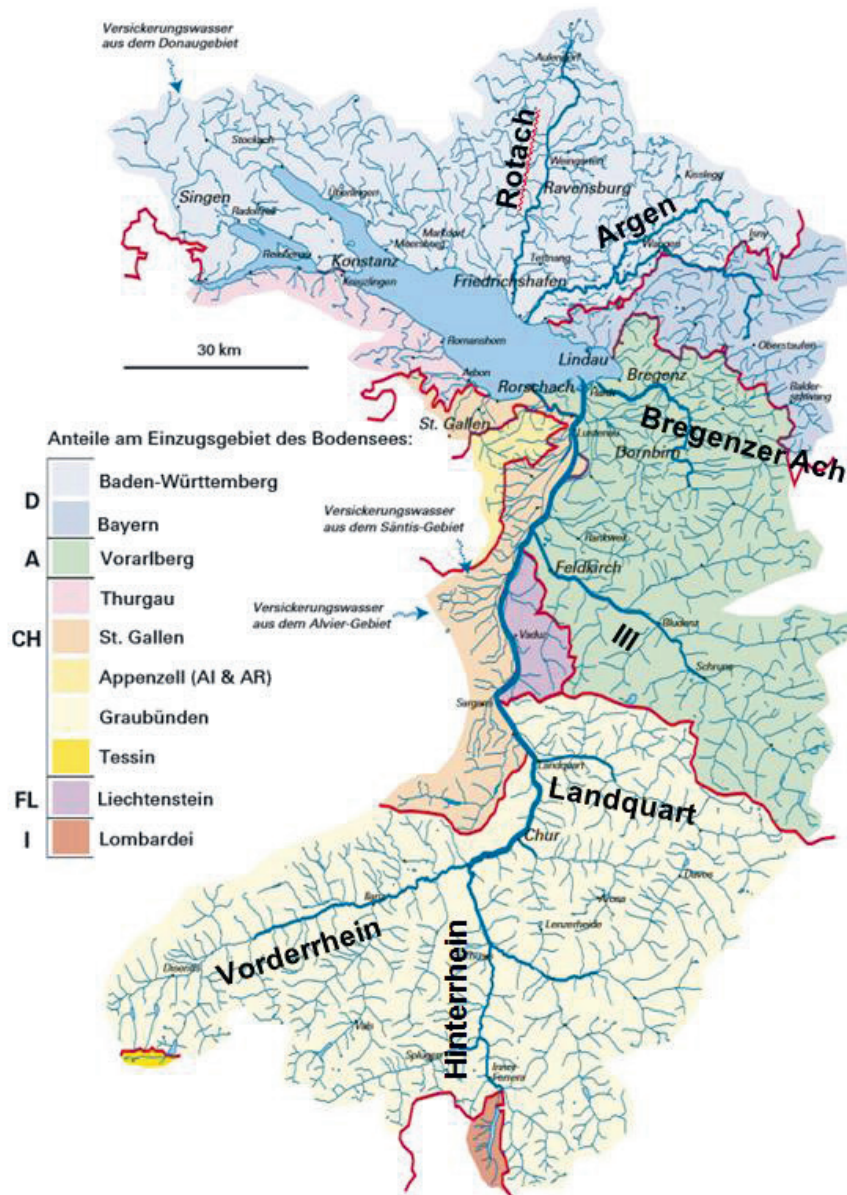


Abb. 4.3: Das Einzugsgebiet des Bodensees (bearbeitet nach IGKB, 2004).

Zwischen den Mündungen der Nebenflüsse Landquart und Ill ist der Alpenrhein mit Hochwasserschutzdämmen eingedeicht und hat eine Sohlbreite von etwa 100 m. In diesem Bereich sind bis zur Ill-Mündung alternierende Bänke vorzufinden. Im Bereich des Kieswerks in der

Landquartmündung (AP-km 23,5) sind Blöcke im Flussbett eingebracht. Ab der Ill-Mündung (AP-km 65,4) liegt ein Doppeltrapezquerschnitt mit Mittelwuhren mit einer Breite des Hauptgerinnes von 80 m vor. Bis zur Mündung in den Bodensee verjüngt sich das Bett auf 40 m. Die Hochwasserschutzdämme haben hier einen Abstand zwischen 200 und 400 m. Aufgrund der zunehmenden Verlandung durch Schwebstoffe und damit verbundenen Verschiebung der Alpenrheinmündung in den Bodensee ist diese mit einer Vorstreckung in den Bodensee verlängert. Die Mündung ist stark ausgebaut und ist 4,8 km in Form einer Vorstreckung in den Bodensee verlängert (Zarn et al. 1995). In den Bodensee münden neben dem Hauptzufluss aus dem Alpenrhein nur kleinere Flüsse und Bäche. Der Bodensee wird in Richtung NWW durchflossen. Sein einziger Ausfluss bei Konstanz markiert das untere Ende des hier betrachteten Gebietes. Der unterstrom liegende Untersee ist hier aus der Betrachtung ausgeschlossen. Die Entfernung zwischen dem Ende der Vorstreckung, also dem Ende des Alpenrheins, und Konstanz, dem Ende des Bodensees, beträgt 39 km.

Das Gefälle des Alpenrheins nimmt in Fließrichtung ab, allerdings nicht gleichmäßig: Bis zur Illmündung liegt das Gefälle bei fast 0,3 %, im weiteren Verlauf nur noch bei 0,1 % (Zarn, 2010a). Das Gefälle in der Vorstreckung liegt bei 0,027 % (IRR, 2014).

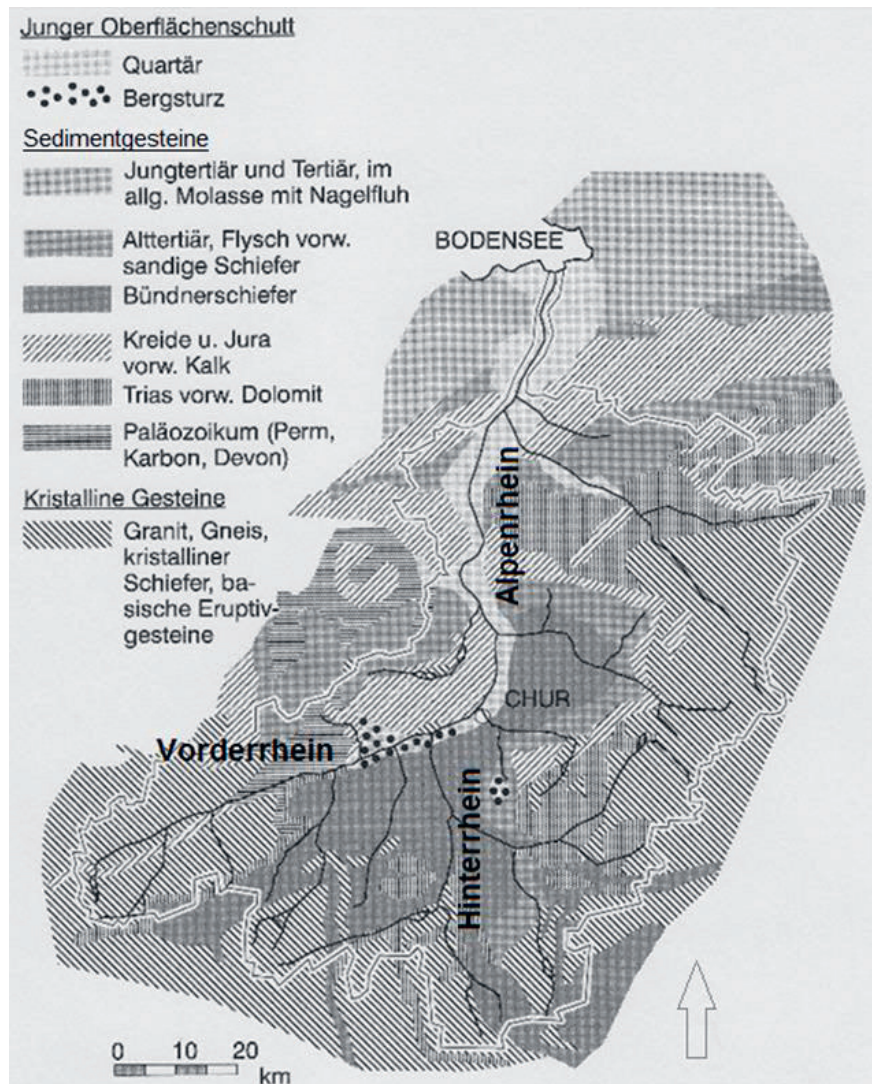


Abb. 4.4: Geologische Übersicht über das Einzugsgebiet des Alpenrheins (bearbeitet nach Zarn et al., 1995).

4.2.2 Geologie und Sedimentologie

Das Einzugsgebiet des Alpenrheins ist im Westen vom Aaremassiv und Gotthardmassiv sowie dem Tavetscher Zwischenmassiv begrenzt. Nördlich und westlich des Alpenrheins sind hauptsächlich die Helvetischen Decken anzutreffen, bei der Mündung in den Bodensee vorwiegend Molasse. Im Süden und Osten befinden sich die Penninischen Decken. Aufgrund der verschiedenen tektonischen Einheiten mit den zugehörigen Gesteinsarten sind in diesem Einzugsgebiet unterschiedliche Festigkeiten, Verwitterungs- und Erosionsresistenzen vorzufinden (Zarn et al., 1995). Abbildung 4.4 zeigt die heute im Einzugsgebiet des Alpenrheins anstehenden Gesteine.

Die Sohle des Alpenrheins ist aufgrund von Sohlproben, die in den Jahren 1989/90 und 2009/10 entnommen wurden, bekannt: Der Anteil des Sandes liegt bei etwa 20 %, 25 % Feinkies, 35 % Grobkies und 20 % Steinen. Insgesamt wird die Kornverteilung nach unterstrom immer feiner.

Im Gegensatz zu der sandig-kiesigen Sohle des Rheines handelt es sich bei den Ablagerungen im Bodensee hauptsächlich um Sande, Schluffe und Tone aus dem Holozän und dem letzten Glazial (Würm). Die jüngeren Sedimente weisen eine deutliche Korngrößendifferenzierung mit zunehmender Distanz zum Delta auf. Im Delta dominieren gröbere fluviatile Ablagerungen (Sand), während in der Seemitte v.a. holozäne Tone vorhanden sind. In größeren Tiefen sind ältere pleistozäne Moränen und tertiäre Molassesedimente zu finden.

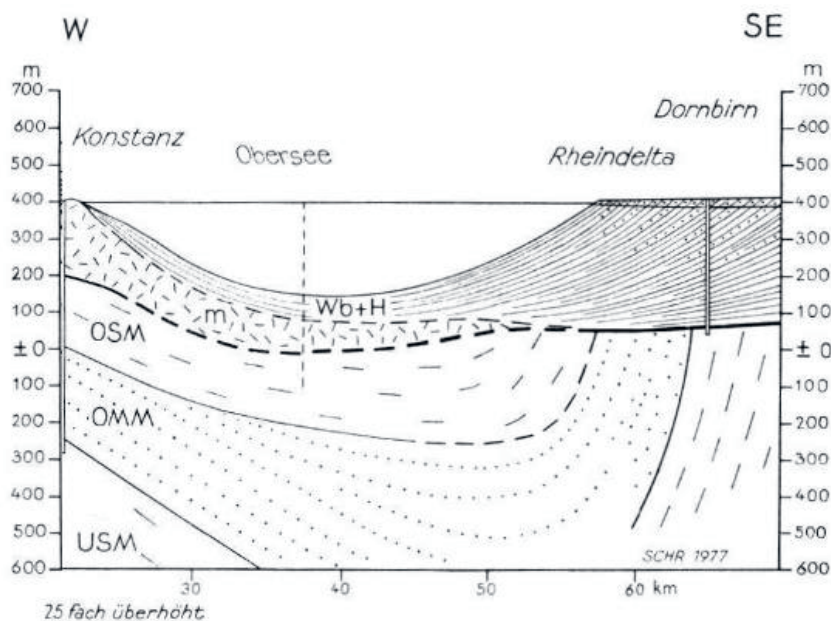


Abb. 4.5: Längsschnitt längs der Mittellinie durch das Bodenseebecken von Konstanz bis in das Alpenrheindelta. H: holozäne Sedimente (Seetone, Sande, Kiese), Wb: würmeiszeitliche Seesedimente (Beckentone und -sande), OSM: Obere Süßwassermolasse, OMM: Obere Meeresmolasse, USM: Untere Süßwassermolasse, m: Moränen und Kiese - würmeiszeitlich und vielleicht älter (bearbeitet nach Schreiner, 1979).

4.2.3 Hydrologie

Der Alpenrhein besitzt kein eindeutiges Abflussregime, sondern entspricht einer Kombination aus glazialem, nivalem und pluvialen Abflussregime (Naef, 1989). Die Folge ist ein ausgeprägtes Abflussmaximum im Juni. Aufgrund der zahlreichen Talsperren, die im Bereich von Vorder- und Hinterrhein liegen, können die Abflüsse reguliert werden. Der Alpenrhein als Hauptzufluss des Bodensees wies bei Diepoldsau (Schwebstoffmessstelle bei AP-km 77,03; Beprobung in der Regel zwei Mal pro Woche) zwischen 1984 und 2009 einen mittleren Abfluss von 231 m³/s auf (BAFU, 2009).

Tab. 4.1: Quellflüsse und Nebenflüsse des Alpenrheins.

Quell-/Nebenfluss	Ort/Rhein	Mündung AP-km	Rhein-km	EZG [km ²]	mittlerer Abfluss [m ³ /s]
Vorderrhein	Reichenau	0,0 (li)	-134,6	1.514	53,8 [•]
Hinterrhein	Reichenau	0,0 (re)	-134,6	1.693	59,6 [•]
Plessur	Chur	9,6 (re)	-125,0	263	6,0 [^]
Landquart	Landquart	23,3 (re)	-111,3	618	24,5
Ill	Feldkirch	65,0 (re)	69,6	1.000	65,6

* HADES (1992), [^]BAFU (2010), alle anderen aus Zarn et al. (1995)

Tab. 4.2: Abflüsse der wichtigsten Zuflüsse des Bodensees (gemittelte Jahresabflüsse Periode 1887-1987) (Daten aus IGKB, 2004).

	Einzugsgebiet		Abfluss	
	km ²	%	m ³ /s	%
Alpenrhein	6.119	56,1	230	61,8
Bregenzerach	832	7,6	46,8	12,6
Argen	656	6,0	19,2	5,2
Rheintal-Binnenkanal	360	3,3	14,9	4,0
Schussen	822	7,5	10,7	2,9
Dornbirnerach	196	1,8	4,9	1,3
Seefelder Aach	280	2,6	3,1	0,8
Rotach	130	1,2	1,8	0,5

Die wichtigsten Zuflüsse des Alpenrheins sind die Plessur (CH, re), die Landquart (CH, re) und die Ill (AT, re). Zusätzlich entwässern verschiedene Wildbäche in den Alpenrhein wie die Maschäner Rüfi (CH, re), die Tamina (CH, li) oder die Frutz (AT, re) (Zarn et al., 1995). Die Lage der Mündung und die jeweiligen Abflüsse der wichtigsten Nebenflüsse des Alpenrheins sind Tabelle 4.1 und Abbildung 4.3 zu entnehmen.

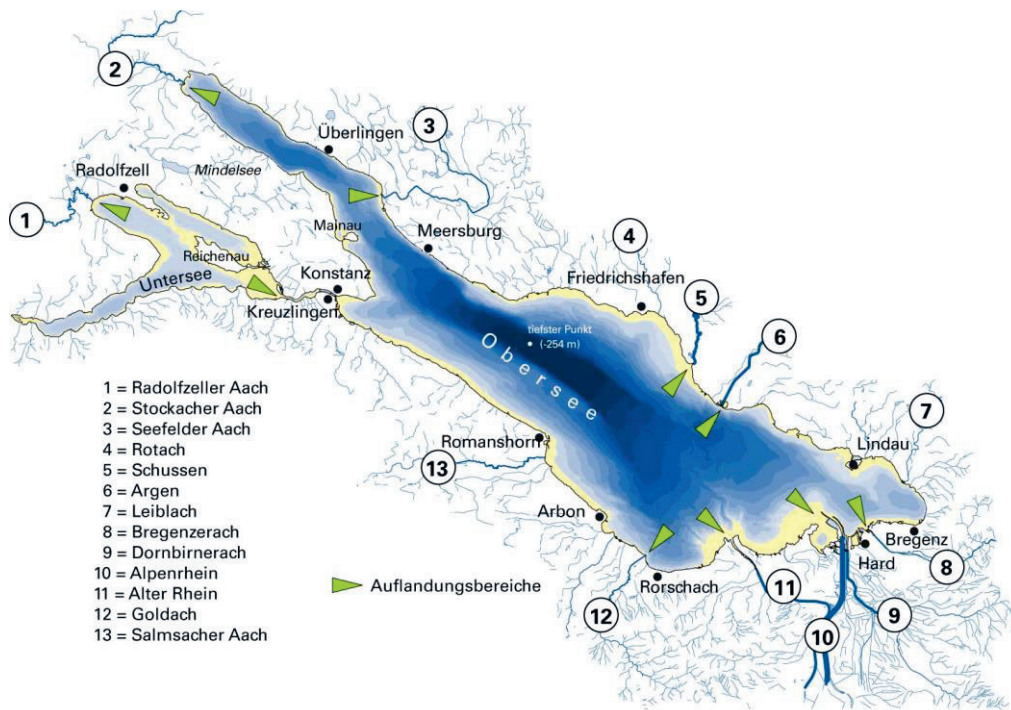


Abb. 4.6: Unter- und Obersee des Bodensees mit den größten Zuflüssen, gelb: Flachwasserbereich bis 10 m Wassertiefe (Mürle et al., 2004).

Der Bodensee hat eine Gesamtfläche von 472 km² und ein Volumen von 48 km³ und ist bis zu 253 m tief (IGKB, 2004). Neben dem Alpenrhein münden nur kleinere Flüsse und Bäche in den Bodensee, die zusammen etwa 100 m³/s einspeisen. Der Bodensee dient als Trinkwasserspeicher für weite Teile des Gebiets. Der mittlere Abfluss bei Konstanz, dem Ausfluss des Bodensees, beträgt 346 m³/s. Der Pegel unterliegt jahreszeitlichen Schwankungen von ca. 1,7 m (KHR, 2012; 1864-2011). Im Frühjahr verursacht Schmelzwasser ein Maximum des Pegels. Größtenteils fließt das Schmelzwasser über den Alpenrhein sowie die Bregenzer Ach ein. Oberstrom liegende Speicher haben kaum einen dämpfenden Einfluss (LUBW, 2011). Laut Schmieder & Pier (1999) hat sich der Wasserstand seit der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts um circa 10 cm gesenkt. Extreme Niederschläge und Hochwasser zeichnen das Jahr 1999 aus. Am 24. Mai 1999 übertraf der Hochwasserstand des Bodensees bei Konstanz mit 5,65 m alle gemessenen Pegelstände im 20. und 21. Jahrhundert.

In Tabelle 4.2 und Abbildung 4.6 sind die wichtigsten Zuflüsse des Bodensees und die dazugehörigen Daten für Einzugsgebiet und Abfluss dargestellt. Der Alpenrhein wird im Gegensatz zu den anderen Zuflüssen aufgrund der hier vorgenommenen Definition nicht als Nebenfluss bezeichnet, sondern als Quellfluss. Die in den Bodensee mündenden Flüsse werden in der vorliegenden Betrachtung als Nebenflüsse bezeichnet, um die Vergleichbarkeit zu den anderen Teilbilanzen zu wahren.

4.2.4 Anthropogene Eingriffe

Alpenrhein

Zarn et al. (1995) beschreiben die anthropogenen Eingriffe in den Alpenrhein, die hier zusammengefasst wurden. Erste anthropogene Eingriffe sind auf die Jungsteinzeit datierte Brandrodungen, die im Alpenrheintal vorgenommen wurden (Broggi, 2009). Laut Zarn et al. (1995) gab es bereits im 11. Jahrhundert erste Versuche, den Alpenrhein in ein Bett zu drängen, jedoch gibt es hierzu keine weiteren Informationen. Erste dokumentierte Baumaßnahmen sind auf 1765 zu datieren, als Leitwerke den Alpenrhein regulierten (keine nähere Information). Mitte des 19. Jahrhunderts wurde mit dem Ausbau des gesamten Alpenrheins begonnen: Die Begradigung sollte das Gefälle und somit den Transport des Sediments bis zum Bodensee erhöhen, Ablagerungen im Alpenrhein verhindern und somit die Hochwassergefahr für Anlieger verringern. Zwischen Reichenau und Landquart wurde eine Flussbreite von 90 m, zwischen Landquart und Illmündung von 120 m angestrebt. Zwischen den Mündungen von Maschänsler Rüfi und Landquart befindet sich der Damm nur auf einer Seite, alle weiteren Bereiche sind beidseitig ausgebaut (Zarn et al., 1995; IRR, 2014). Zwei Durchstiche, die eine Verkürzung der Fließstrecke von 10 km zur Folge hatten, wurden aufgrund eines Staatsvertrages zwischen der Schweiz und Österreich ausgeführt: Der erste Durchstich bei Fußach (Bau bis 1900, circa AP-km 85), der die Mündung in den Bodensee verlagerte und ein weiterer bei Diepoldsau (circa AP-km 75, beendet 1923). Die Verlegung der Mündung in den Bodensee durch den Fußacher Durchstich verhinderte nicht die Sedimentation der Schwebstoffe in diesem Bereich. Das Delta wuchs weiterhin, weshalb die Dämme, die zur Mündung führten, in den Bodensee verlängert wurden (Abb. 4.7, 1961).

Seit 1940 wird dem Alpenrhein, vor allem zwischen den Einmündungen der Landquart und der Ill sowie oberhalb des Deltas, Kies als Baumaterial entnommen. Die Kiesentnahme im Delta wirkt der Sedimentation entgegen und reduziert dort das Hochwasserrisiko maßgeblich. Die gesteigerte Kiesentnahme im Bereich Landquart bis Ill, v.a. in den 1960er und 70er Jahren, führte zur Sohlerosion um mehrere Meter, die im Einsturz der Brücke bei Buchs kulminierte. Trotz einer stark reduzierten Kiesentnahme nach 1970 hält die Sohleintiefung an. Um die Fortschreitung der Sohleintiefung zu verhindern, wurden Blockrampen errichtet zunächst lokal (AP-km 6,52, 7,22 und 8,92, Bau ab 1962) und später (ab 1970) im gesamten Verlauf des Alpenrheins. Mittlerweile wird nur noch bei Tamins, dem Zusammenfluss von Vorder- und Hinterrhein, sowie an den Mündungen von Landquart und Plessur und in der Vorstreckung Sediment entnommen. Die gesamte Sedimentfracht aus dem Alpenrhein größer 2 mm wird in der Vorstreckung vor der Bodenseemündung (circa AP-km 90) durch

Baggerungen entnommen, weshalb nur Ton/Schluff und Sand in den Bodensee eingetragen werden. Die Baggerungen in der Vorstreckung werden unterschieden in Sand- und Kiesentnahmen. Der Bau, der die Vorstreckung bis AP-km 94,55 führt, wurde in den 1980er Jahren begonnen (IRR, 2014). Der 1954 geschlossene, dritte Staatsvertrag regelte auch die Einengung des Hauptgerinnes bei der Illmündung auf 90 m und bei der Mündung in den Bodensee auf 70 m (beendet 1972).

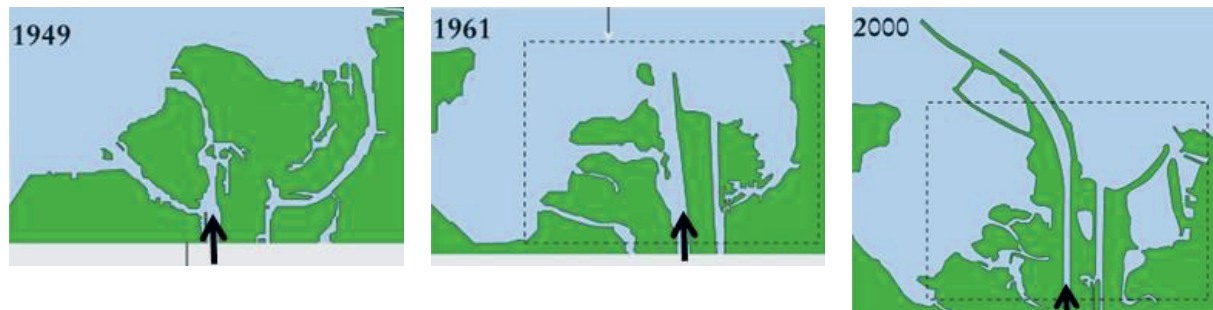


Abb. 4.7: Entwicklung des Alpenrheindeltas, schwarze Pfeile markieren jeweils den Alpenrhein (bearbeitet nach IGKB, 2004).

Bodensee

Erste menschliche Besiedelung gab es am Bodensee bereits im 18. Jahrhundert vor Christus. Der Bodensee gewann bis ~0 AD auch als Verkehrsweg an Bedeutung, wobei heute nur noch Schiffe für Sport und Tourismus eingesetzt werden. Rodungen, Landwirtschaft und Besiedlung haben das Bild des Bodensees und seines Umlands stark verändert. Der Rückgang des ufernahen Schilfbestandes sowie der durch touristischen Bootsverkehr gesteigerte Wellengang verursachen eine erhöhte Ufererosion (Ostendorp & Dienst, 2010), weshalb die Ufer nach und nach verbaut wurden (Intensivierung im 19. Jahrhundert). Der Bodensee ist stark verändert, wobei die einflussreichsten Veränderungen in den letzten 150 Jahren durchgeführt wurden (Schnitter 1992; Vischer 1986).

Durch vergrößerte Fließgeschwindigkeiten und Sohlschubspannungen erfolgte in den letzten 75 Jahren eine Bewegung des Alpenrheindeltas um 1,5 km in den Bodensee hinein (Boes, 2011). Die Begradigung des Alpenrheins verstärkt diese Verlagerung der Rheinmündung in den Bodensee.

Laut IGKB (2009) werden Baggerungen im Bodensee nur im kleinen Stil durchgeführt wie beispielsweise bei Verlandung von kleinen Hafenanlagen. Für den Bodensee sind keine Sedimentzugaben bekannt oder notwendig.

4.3 Bestimmung der Sedimentquellen und -senken

4.3.1 Die Sedimentbilanzgleichung

Für den Fall, dass tektonische Sohlhöhenänderungen eine untergeordnete Rolle spielen, lautet die allgemeine Sedimentbilanzgleichung für den Flusschlauch des Rheins:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{se} + I_{di} + I_{ar} + I_{ab} + I_{do}) - (O_{do} + O_{se} + O_{dr} + O_{gr} + O_{fl} + O_{po} + O_{ab}) = \Delta S \quad (4.1)$$

mit I_{up} , dem Sedimenteintrag von oberstrom, I_{tr} , dem Sedimenteintrag aus Nebenflüssen, I_{se} , dem Sedimenteintrag aus Nebenarmen, I_{di} , dem Sedimenteintrag aus diffusen Quellen (zum Beispiel Ufererosion), I_{ar} , dem Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe, I_{ab} , dem Sedimenteintrag durch Abrieb von anderen Kornfraktionen (nur für die Fraktion Ton/Schluff), I_{do} , dem

Sedimenteintrag von unterstrom, O_{do} , dem Sedimentaustrag nach unterstrom, O_{se} , dem Sedimentaustrag in Nebenarme, O_{dr} , dem Sedimentaustrag durch Baggerungen, O_{gr} , dem Sedimentaustrag in Bühnenfelder, O_{fl} , dem Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen, O_{po} , dem Sedimentaustrag in Häfen, O_{ab} , dem Sedimentaustrag durch Abrieb, und ΔS , der Sohlhöhenänderung, wobei alle Bilanzterme in der Einheit Mt/a ausgedrückt werden. Es wurden für den Alpenrhein von Tamins bis zum Ende der Vorstreckung und den Bodensee vom Ende der Vorstreckung bis zum Ausfluss bei Konstanz getrennte Bilanzgleichungen aufgestellt.

Die Umrechnung von Volumina in Massen wurde stets mit einer Sedimentdichte ρ_S von 2,65 t/m³ berechnet. Die Lagerungsdichte wurde in Abhängigkeit der nach Frings et al. (2011) bestimmten Porosität n , die von der Kornverteilung abhängig ist, nach Gleichung 4.2 berechnet:

$$\rho = \rho_S \cdot (1 - n) \quad (4.2)$$

Alpenrhein

Der Alpenrhein beginnt bei Tamins mit dem Zusammenfluss von Vorder- und Hinterrhein, die hier als oberstromige Zuflüsse des Alpenrheins betrachtet werden. Im Alpenrhein gibt es keinerlei Nebenarme, die zu betrachten wären. Daher wurden die Größen I_{se} und O_{se} hier vernachlässigt. Es gab innerhalb des Betrachtungszeitraums keine anthropogenen Sedimentzugaben (I_{ar}). Da es keinerlei Meereseinfluss gibt, existiert kein Eintrag von unterstrom (I_{do}). Im betrachteten Gebiet sind Bühnen nicht und Hafenanlagen nur in geringer Fläche vorhanden, so dass der Austrag von Sediment dorthin (O_{gr} und O_{po}) vernachlässigt wird. Überflutungsflächen können aufgrund der geringen Größe vernachlässigt werden (O_{fl}). Außerdem wurde aufgrund von fehlenden Informationen angenommen, dass der Eintrag aus diffusen Quellen ebenfalls vernachlässigbar klein ist (I_{di}). Aus diesen Gründen kann die Sedimentbilanzgleichung für den Alpenrhein wie folgt reduziert werden:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{ab}) - (O_{do} + O_{dr} + O_{ab}) = \Delta S \quad (4.3)$$

Bodensee

Im Fall des Bodensees sind ebenfalls einige Terme der Bilanz vernachlässigbar. Es gibt keine Nebenarme (I_{se} und O_{se}) und keinen Meereseinfluss (I_{do}), weshalb diese Terme nicht berücksichtigt werden. Anthropogene Zugaben werden im Bodensee nicht vorgenommen (I_{ar}). Es gibt keine Bühnen im Bodensee, demnach auch keinen Austrag in Bühnenfelder (O_{gr}). Die wenigen Häfen, in die Sedimentaustrag stattfinden kann, sind klein und der Sedimenttausch folglich vernachlässigbar (O_{po}). Baggerungen finden nur im vernachlässigbaren Maßstab statt (O_{dr}). Im Bodensee gibt es aufgrund des Fehlens von Sedimenten größer 2 mm und der geringen Fließgeschwindigkeit keinen Abrieb (I_{ab} und O_{ab}). Die Sedimentbilanzgleichung für den Bodensee lautet somit:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{di}) - (O_{do} + O_{fl}) = \Delta S \quad (4.4)$$

Die Bestimmung der einzelnen Terme der reduzierten Bilanzgleichungen für Alpenrhein und Bodensee wird in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Die beiden Teilabschnitte des Rheins bilden hier ein System, das zusammen behandelt wird. Um das System aber besser verständlich zu erläutern, werden die Abschnitte Alpenrhein und Bodensee getrennt bilanziert. Die Sedimentfraktionen feiner 0,063 mm (Schluff, Ton), 0,063 bis 2 mm (Sand), 2 bis 16 mm (Feinkies), 16 mm bis 63 mm (Grobkies) und 63 bis 125 mm (Steine) wurden getrennt voneinander bilanziert. Zur besseren Vergleichbarkeit zu anderen Studien des Rheins, die denselben Zeitraum betrachten, werden die Fraktionen Grobkies und Steine auch zusammengefasst dargestellt.

4.3.2 Sedimentausttrag durch Baggerungen

Baggerungen im Betrachtungsgebiet erfolgen insbesondere an den Mündungen von Vorder- und Hinterrhein, Plessur und Landquart und in der Vorstreckung des Rheindeltas (Zarn et al., 1995). Die Baggervolumina wurden von Zarn (2010a und b) übernommen und in Massen umgerechnet. In der Vorstreckung finden die Baggerungen laut Zarn (2010a) immer nahezu an derselben Stelle statt, weshalb hier für die Berechnungen immer der gleiche Standort von AP-km 91,5 (Rhein-km -43,1) angesetzt wird. Das Baggergut wird in der Vorstreckung grundsätzlich in Kies und Sand unterschieden (siehe Kapitel 4.2.4). Die Baggerdaten (siehe Abb. 4.8 bis Abb. 4.13) decken den Zeitraum 1991 bis 2008 ab (Sandbaggerungen in der Vorstreckung bis 2009). Für die vorliegende Betrachtung wurde davon ausgegangen, dass die Entnahme im letzten Zeitraum von 2008/2009 bis 2010 unverändert war. Es wurde jeweils für den Zeitraum, in dem die Baggervolumina nur geringfügig variierten, der Mittelwert berechnet und auf die fehlenden Jahre übertragen.

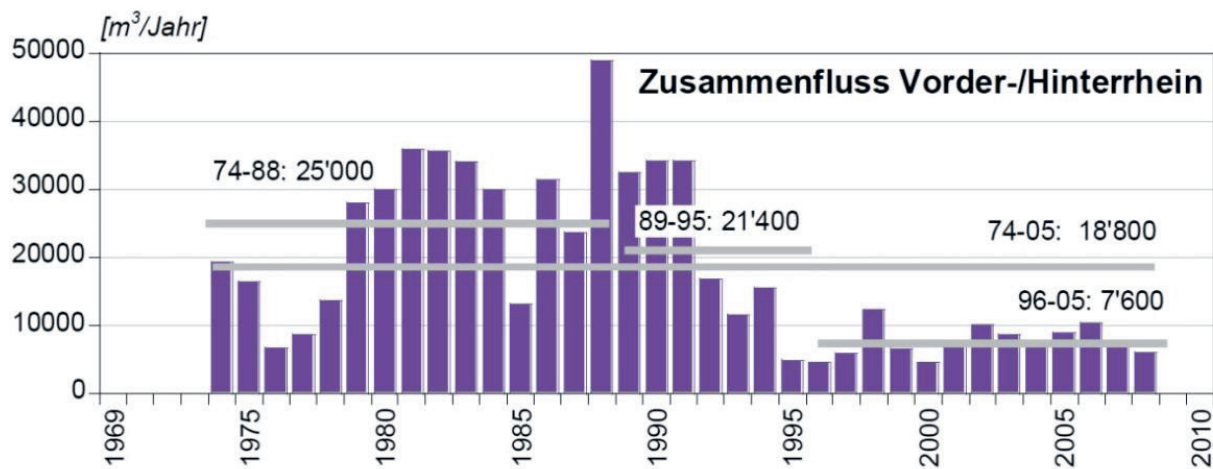


Abb. 4.8: Kiesentnahmen aus dem Alpenrhein beim Zufluss von Vorder- mit dem Hinterrhein zwischen 1974 und 2008 (Angaben Tiefbauamt Kanton Graubünden) (Zarn, 2010a). Die horizontalen Striche markieren über den angegebenen Zeitraum gemittelte Entnahmemengen.

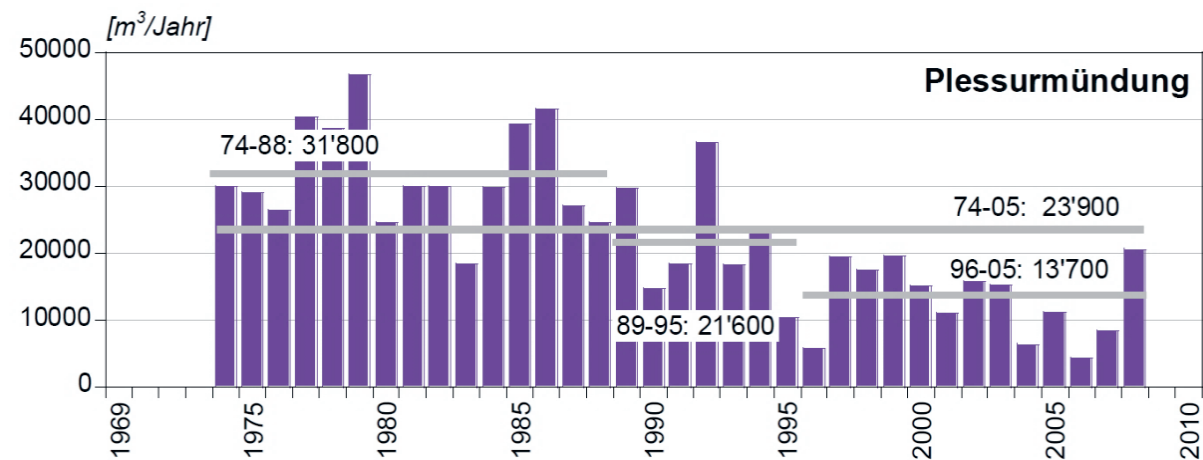


Abb. 4.9: Kiesentnahmen aus dem Alpenrhein bei der Plessurmündung zwischen 1974 und 2008 (Angaben Tiefbauamt Kanton Graubünden) (Zarn, 2010a).

Die Umrechnung der Baggervolumina in Massen erfolgte für die Baggerstellen in den Mündungsbereichen der Quell- und Nebenflüsse mit einer Dichte von 2,27 t/m³ (mit: 20 % Sand, 23 % Feinkies, 37 % Grobkies und 20 % Steinen, abgeschätzt nach Zarn, 2010a, Abb. 7). In der Vorstreckung wurde für die Kiesbaggerung eine Lagerungsdichte von 2,23 t/m³ (mit 22 % Sand, 33 % Feinkies, 35 % Grobkies und 10 % Steinen, nach Zarn, 2010b, S. 17) angesetzt und für sandige Bereiche mit einer Dichte von 1,64 t/m³ (mit einer Porosität von Sand $p = 0,38$). Die Aufteilung des Baggergutes aus der Vorstreckung in Fraktionen erfolgte aufgrund von Kornverteilungen für die Kiesbaggerungen (2009, n=44) und für die Sandbaggerungen (2007, n=1) (Zarn, 2010b, S. 17). Daraus ergaben sich die in Tabelle 4.3 angegebenen Baggermassen für den Betrachtungszeitraum im Alpenrhein.

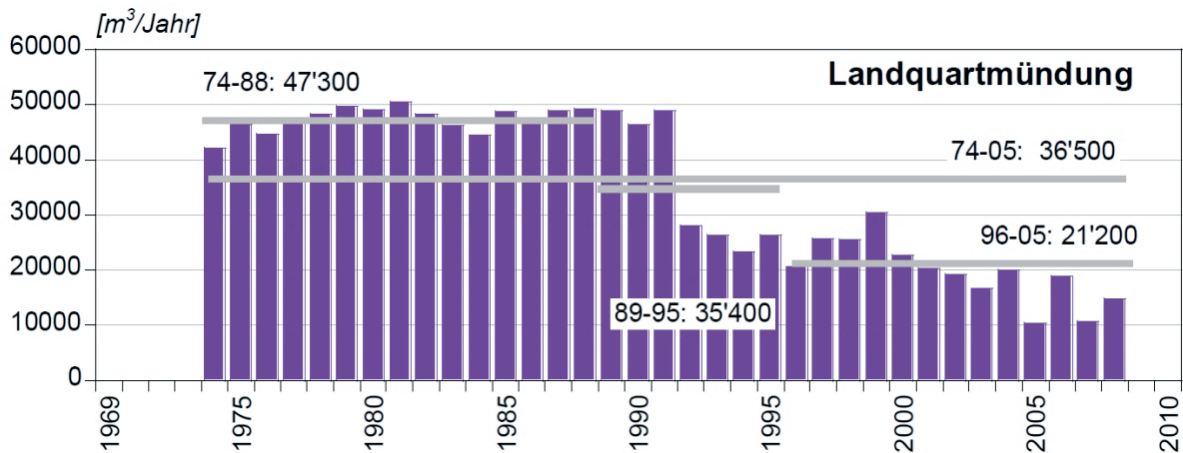


Abb. 4.10: Kiesentnahmen aus dem Alpenrhein bei der Landquartmündung zwischen 1974 und 2008 (Angaben Tiefbauamt Kanton Graubünden) (Zarn, 2010a).

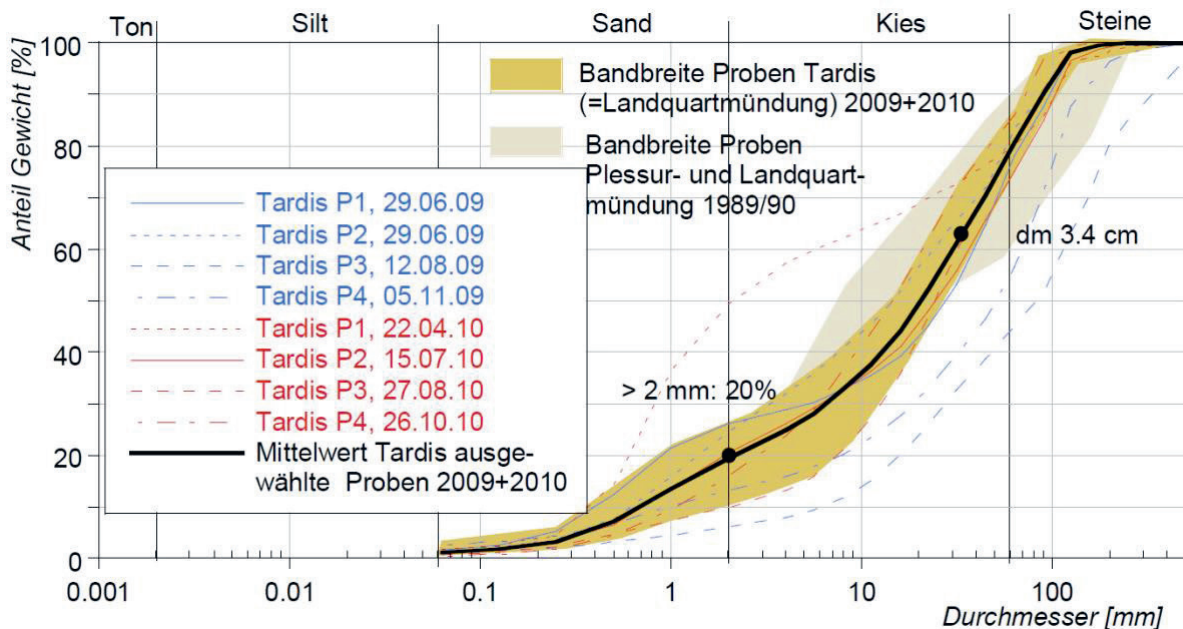


Abb. 4.11: Kornverteilung der Kiesentnahmen aus dem Alpenrhein bei Landquart (Tardis ist ein Flurname bei der Landquartmündung, z. B. Tardisbrücke; Brücke über den Alpenrhein bei Landquart) (Zarn, 2010a).

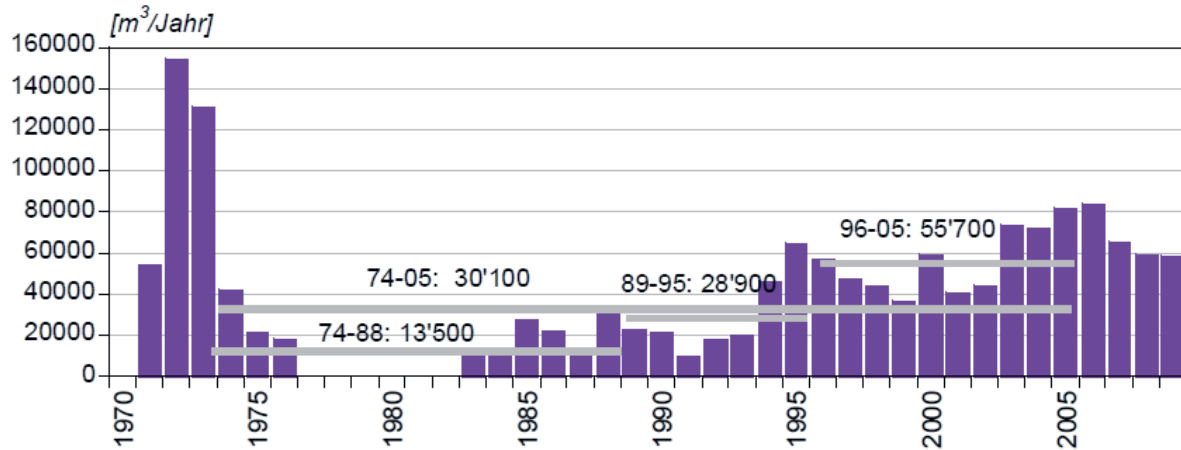


Abb. 4.12: Sandentnahmen aus der Vorstreckung (Angaben Internationale Rheinregulierung) (Zarn, 2010b).

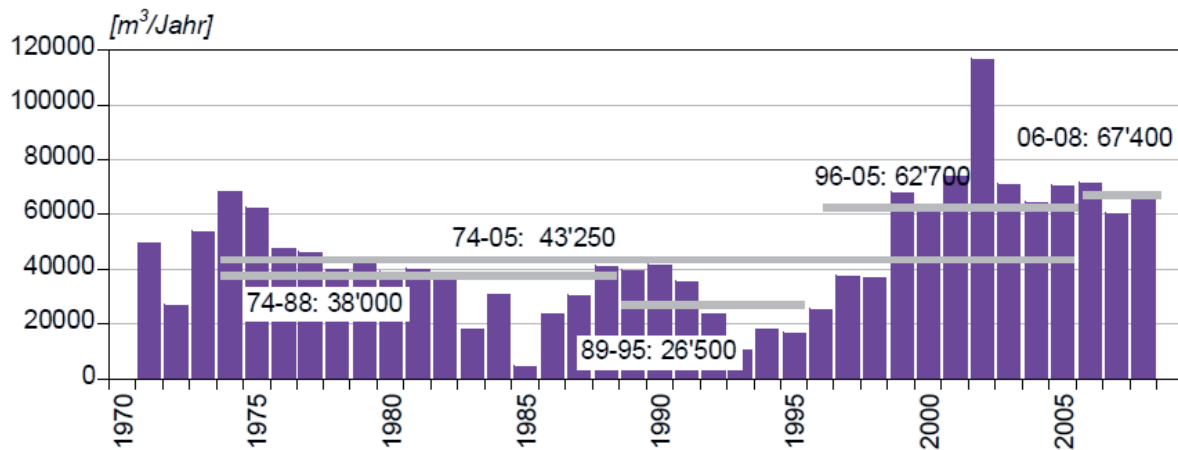


Abb. 4.13: Kiesentnahmen aus der Vorstreckung (Angaben Internationale Rheinregulierung) (Zarn, 2010b).

Tab. 4.3: Fraktionierte Baggermassen in Mt/a je Entnahmestelle für 1991-2010 im Alpenrhein.

AR-km (Rhein-km)	Ton/Schluff	Sand	Feinkies	Grobkies	Steine	Grobkies +Steine
0,0 (-134,6)	0,000	0,005	0,005	0,008	0,005	0,013
9,6 (-125,0)	0,000	0,007	0,008	0,013	0,007	0,020
23,3 (-111,3)	0,000	0,011	0,012	0,020	0,011	0,031
91,5 (-43,1)	0,004	0,108	0,039	0,042	0,012	0,054
gesamt	0,004	0,130	0,065	0,083	0,034	0,117

4.3.3 Sedimente in- und -austrag durch Abrieb

Durch die Bewegung im Wasser verkleinern sich die Sedimentkörner in Fließrichtung. Dieser Vorgang wird als Abrieb oder Abrasion bezeichnet und wird hier für die Fraktionen Fein- und Grobkies sowie Steine betrachtet. In dieser Studie wurde angenommen, dass die durch Abrieb verloren gegangene und damit ausgetragene Masse der Kiesfraktionen direkt der Ton/Schluff-Fraktion eingetragen wird.

Der Abrieb liegt im Alpenrhein durchschnittlich bei 0,8 % pro km Massenverlust (gemittelt nach Zarn, 2010a, Abb. 4.14). Für die vorliegende Betrachtung wurde berechnet, wieviel Sediment

Abrieb c [-/km]

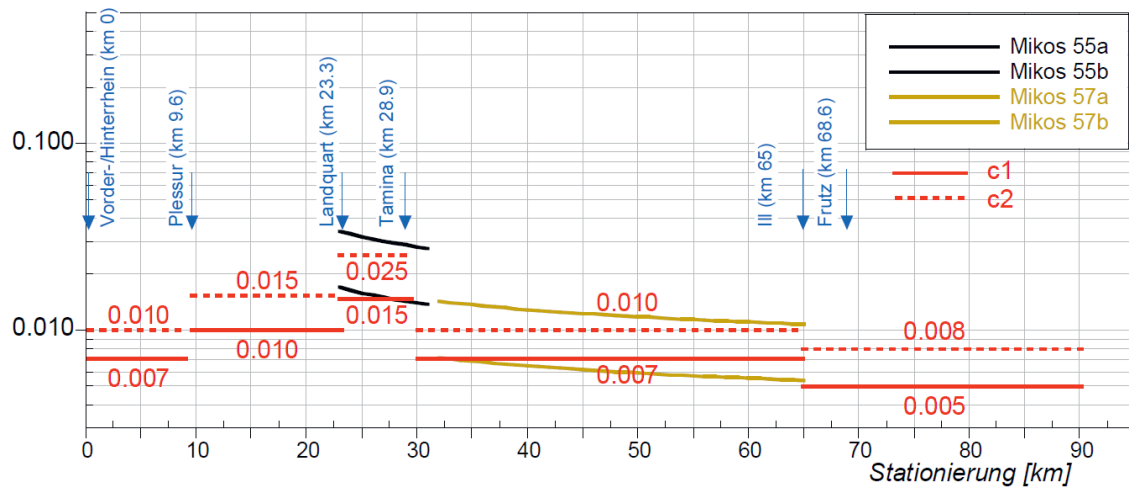


Abb. 4.14: Bandbreite Abriebsbeiwert c für den Alpenrhein nach Mikos (1993) und Werte für die Untersuchung von Zarn, 2010a in Rot (Zarn, 2010a).

durch die Quell- und Nebenflüsse in den Alpenrhein eingetragen wird. Multipliziert mit der jeweiligen Entfernung zur Baggerstelle in der Vorstreckung, also der vollständigen Entnahme des Sediments größer 2 mm, und multipliziert mit dem durchschnittlichen Abriebsbeiwert konnte der Abrieb je Fraktion berechnet werden. Tabelle 4.4 enthält den Abrieb je Fraktion für den Betrachtungszeitraum 1991 - 2010. Es kann davon ausgegangen werden, dass im Bodensee kein Abrieb existiert, da hier nur Fraktionen kleiner 2 mm anzutreffen sind.

Tab. 4.4: Fraktionierter Abrieb in Mt/a für 1991-2010 im Alpenrhein, positive Werte sind Einträge, negative Werte Austräge durch Abrieb.

Ton/Schluff	Sand	Feinkies	Grobkies	Steine	Grobkies +Steine
0,120	0,000	-0,035	-0,056	-0,030	-0,086

4.3.4 Sedimenteinträge aus Nebenflüssen und von oberstrom

a) Sand, Feinkies, Grobkies und Steine im Alpenrhein als Geschiebe

Die beiden Quellflüsse Vorder- und Hinterrhein sind hier als oberstromiger Zufluss definiert und werden in dieser Bilanz mit den Nebenflüssen gemeinsam betrachtet. Die Berechnung der Sedimente, die von oberstrom (siehe Tab. 4.5) und aus Nebenflüssen (siehe Tab. 4.6) in den Alpenrhein eingetragen werden, beruht auf der von Zarn (2010a und b) getroffenen Annahme, dass der Alpenrhein kein Sediment größer 2 mm in den Bodensee einträgt, sondern dass es zuvor in der Vorstreckung gänzlich gebaggert und damit dem System entzogen wird. Die hier verwendeten Kornverteilungen und Dichten entsprechen den für die Baggermassen verwendeten (vgl. Kapitel 4.3.3). Die von Zarn (2010a) berechneten Einträge (siehe Anhang A, Tab. A.1) wurden auf den hier betrachteten Zeitraum umgerechnet, in der Annahme, dass die Einträge sich nach 2005 bis 2010 nicht verändert haben.

b) Suspendierter Sand und Ton/Schluff im Alpenrhein

Der Eintrag aus den Quell- und Nebenflüssen erfolgt auch in Form von suspendiertem Sediment. Dies betrifft vor allem die Fraktion Ton/Schluff, die im Schwebstoff des Alpenrheins zu 82 % vertreten ist (nach Zarn, 2010b, Abb. 20). Die restlichen 18 % der Schwebfracht werden durch die Sandfraktion gebildet. Die Berechnung des durch Nebenflüsse eingetragenen suspendierten Sediments basiert

ebenfalls auf einer Rückrechnung. Bei Diepoldsau besteht eine Messstelle des Bundesamtes für Umwelt der Schweiz (BAFU). Zarn (2010a) hat für die in den Alpenrhein mündenden Nebenflüsse auf Grundlage dieser Messstelle und des Abriebverhaltens der anstehenden Gesteinsarten im jeweiligen Einzugsgebiet berechnet, wie hoch der Schwebstoffeintrag ist (Abb. 4.16). Hierbei wurden die Perioden 1989-1998 und 1999-2008 betrachtet, die auf den Zeitraum von 1991-2010 bezogen wurden. Vorausgesetzt wurde hier, dass die Schwebstofffracht 1989-2008 der für den Zeitraum 1991-2010 entsprach. Daraus ergaben sich die in Tabelle 4.7 angegebenen Einträge von oberstrom und die in Tabelle 4.8 angegebenen Einträge aus Nebenflüssen in den Alpenrhein.

Tab. 4.5: *Fraktionierte Einträge von oberstrom in den Alpenrhein in Form von Geschiebe in Mt/a für 1991-2010, Daten basieren auf Zarn (2010a).*

Quellfluss	AR-km (Rhein-km)	Sand	Feinkies	Grobkies	Steine	Grobkies +Steine
Vorderrhein	0,0 (-134,6)	0,008	0,024	0,039	0,021	0,060
Hinterrhein	0,0 (-134,6)	0,004	0,010	0,016	0,009	0,025
gesamt		0,012	0,035	0,056	0,030	0,086

Tab. 4.6: *Fraktionierte Einträge durch Nebenflüsse in Form von Geschiebe in den Alpenrhein in Mt/a und Lage der Mündung für 1991-2010, Daten basieren auf Zarn (2010a).*

Nebenfluss	AR-km (Rhein-km)	Sand	Feinkies	Grobkies	Steine	Grobkies +Steine
Plessur	9,6 (-125,0)	0,005	0,009	0,014	0,008	0,022
Masch. Rüfi	14,0 (-120,6)	0,004	0,004	0,007	0,004	0,011
Landquart	23,3 (-111,3)	0,022	0,028	0,045	0,025	0,070
Tamina	28,9 (-105,7)	0,001	0,002	0,003	0,002	0,005
Ill	65,0 (-69,6)	0,008	0,013	0,020	0,011	0,031
Frutz	68,6 (-66,0)	0,001	0,004	0,006	0,003	0,009
gesamt		0,041	0,060	0,096	0,052	0,148

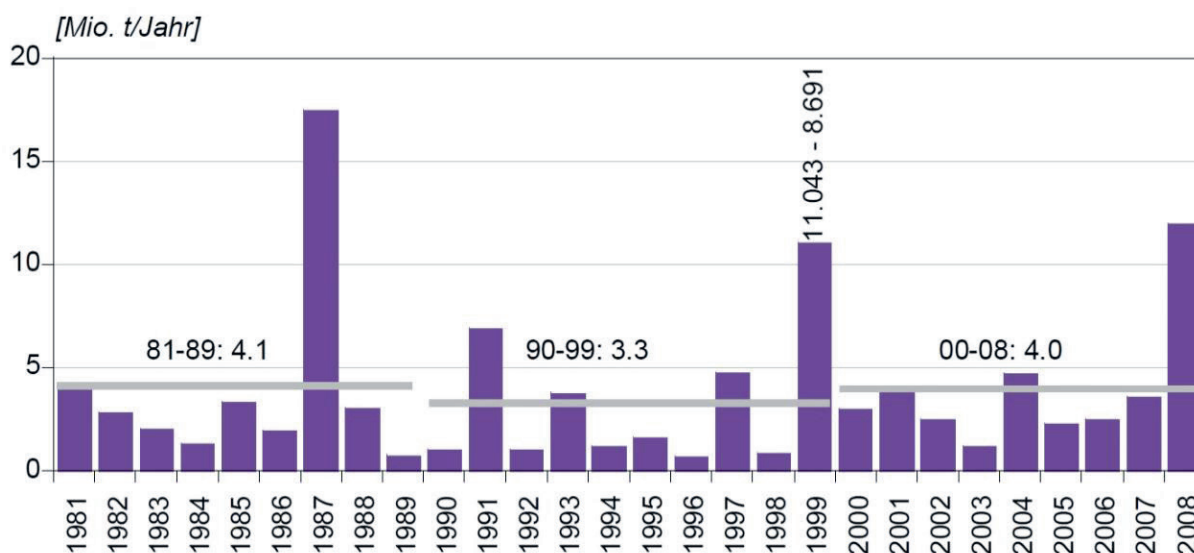


Abb. 4.15: *Jährliche Schwebstoffmengen in der Internationalen Rheinstrecke gemäß Landeshydrologie (Zarn, 2010b).*

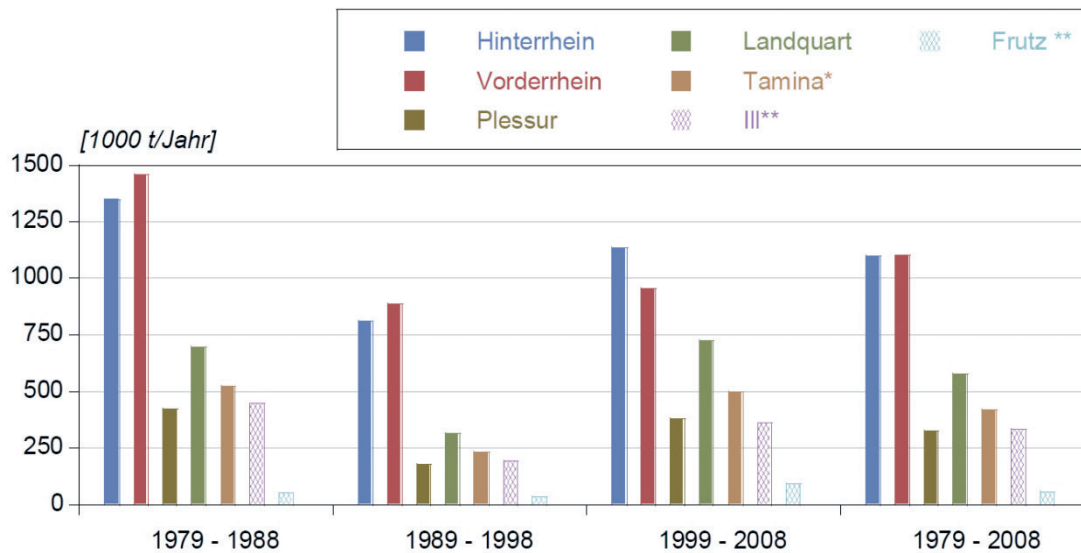


Abb. 4.16: Schwebstofffrachten der wichtigsten Rheinzuflüsse (inklusive Anteil Zwischeneinzugsgebiet und Zuschlag wegen Änderung Betrieb Stausee Mapragg und Solis) für verschiedene Perioden (*Hochrechnung von der Periode von 2000-2008 auf die übrigen Perioden (Zarn, 2010a).

Tab. 4.7: Fraktionierte Einträge von oberstrom in Mt/a für 1991-2010, Daten basieren auf Zarn (2010a).

Quellfluss	AR-km (Rhein-km)	Ton/Schluff	Susp. Sand
Vorderrhein	0,0 (-134,6)	0,763	0,167
Hinterrhein	0,0 (-134,6)	0,853	0,187
gesamt		1,615	0,355

Tab. 4.8: Fraktionierte Einträge durch Nebenflüsse in den Alpenrhein in Mt/a für 1991-2010 und Lage der Mündung, Daten basieren auf Zarn (2010a).

Nebenfluss	AR-km (Rhein-km)	Ton/Schluff	Susp. Sand
Plessur	9,6 (-125,0)	0,212	0,046
Landquart	23,3 (-111,3)	0,458	0,100
Tamina	28,9 (-105,7)	0,321	0,071
III	65,0 (-69,6)	0,221	0,049
Frutz	68,6 (-66,0)	0,071	0,015
gesamt		1,282	0,282

c) Sand und Ton/Schluff im Bodensee

Da der Alpenrhein über die Vorstreckung in den Bodensee mündet und diese gemeinsam das hier betrachtete System bilden, wird der Austrag nach unterstrom aus dem Alpenrhein dem Eintrag von oberstrom des Bodensees gleich gesetzt. Der Eintrag von oberstrom in den Bodensee ist äquivalent zum Austrag nach unterstrom des Alpenrheins, der in Kapitel 4.3.5 beschrieben wird.

75 % des in den Bodensee eingetragenen Sediments stammen aus dem Alpenrhein (IGKB, 2004). Daten zur Fracht oder zur Kornverteilung der übrigen Zuflüsse des Bodensees waren nicht verfügbar. Da der Eintrag von Sedimenten größer 0,063 mm insgesamt sehr gering ist (Müller & Quakernaat, 1969), wurde hier davon ausgegangen, dass die Kornverteilung des Eintrags der Nebenflüsse dem Austrag des Alpenrheins in den Bodensee entspricht: 16 % Sand und 84 % Ton/Schluff (siehe Kapitel 4.3.2). Die Einträge aus den Nebenflüssen sind Tabelle 4.9 zu entnehmen.

Tab. 4.9: *Fraktionierte Einträge durch Nebenflüsse in den Bodensee für 1991-2010 in Mt/a.*

Ton/Schluff	Sand
0,991	0,189

4.3.5 Sedimentausttrag nach unterstrom

a) Alpenrhein

Es wird davon ausgegangen, dass das gesamte Sediment größer 2 mm in der Vorstreckung durch Baggerungen entnommen wird (vgl. Zarn 2010a und b).

Es wird also davon ausgegangen, dass der Alpenrhein ausschließlich Sedimente kleiner 2 mm nach unterstrom in den Bodensee transportiert. Der in der Vorstreckung gebaggerte Sand wird nicht unbedingt durch die Schwebstoffmessstelle bei Diepoldsau (AP-km 77,03) erfasst, da er sich auch auf der Sohle bewegt und an der Messstelle suspendiertes Sediment gemessen wird. Das bedeutet, dass der durch Nebenflüsse eingetragene und von oberstrom stammende Sand (Kapitel 4.3.4) abzüglich des gebaggerten Sandes (alle Baggerstellen, vgl. Kapitel 4.3.2) dem Austrag aus dem Alpenrhein in den Bodensee entspricht und demnach als Schließungsterm der Sandbilanz verwendet wird: $I_{up} + I_{tr} - O_{dr} = O_{do} = 0,559$ Mt/a. Dieser Wert weicht von der bei Diepoldsau gemessenen Sandfracht ab: Hier wurden 0,654 Mt/a ermittelt (entspricht 18 % des Schwebstoffes, Zarn, 2010b, Abb. 20). Damit ist der Sandgehalt im Schwebstoff von 18 % bei Diepoldsau auf 16 % beim Eintritt in den Bodensee gesunken. Insgesamt wurden 0,559 Mt/a Sand innerhalb des Betrachtungszeitraums 1991-2010 nach unterstrom in den Bodensee eingetragen.

Die Berechnung der nach unterstrom transportierten, also in den Bodensee eingetragenen Fracht der Fraktion Ton/Schluff beruht auf dem Prinzip der Massenerhaltung und wurde hier als Schließungsterm berechnet. Die hierzu verwendeten Terme ($I_{up} + I_{tr} + I_{ab} - O_{dr} = O_{do}$) sind den vorangegangenen Kapiteln zu entnehmen. Es berechnet sich ein Austrag aus dem Alpenrhein und damit ein Eintrag nach unterstrom in den Bodensee von 3,014 Mt/a.

b) Bodensee

Der Bodensee wird gemeinhin als typische Sedimentfalle beschrieben. Der Austrag nach unterstrom liegt bei allen Fraktionen bei null. Der einzige Ausfluss des Bodensees befindet sich bei Konstanz, wo der Bodensee in den Seerhein, den Untersee und später in den Hochrhein übergeht. Hier finden sich keine Anhaltspunkte, dass Sedimente den Bodensee verlassen, was auch das Kraftwerk Schaffhausen im Hochrhein, sowie der Rheinaubund bestätigten (mündl. Mittl. Bernhard van Felten, Geschäftsbereichsleiter Kraftwerkenanlagen Schaffhausen und Jürg Bloesch, Em. Rheinaubund, am 05.08.2013). Für die vorliegende Betrachtung wurde also für alle Fraktionen ein Austrag aus dem Bodensee nach unterstrom (O_{do}) von null angesetzt.

4.3.6 Sohlhöhenänderung

a) Alpenrhein

Die Berechnung der Einträge aus den Quell- und Nebenflüssen geht davon aus, dass es innerhalb des Betrachtungszeitraum 1991-2010 keine Sohlhöhenänderung von Ton/Schluff und Sand gab. Die Sohlhöhenänderung ΔS diente für die Fraktionen größer 2 mm als Schließungsterm, wurde also aufgrund der Massenerhaltung mithilfe der Gleichung 4.3 berechnet. Insgesamt ergeben sich die in Tabelle 4.10 angegebenen Werte für die Sohlhöhenänderung im Zeitraum 1991-2010. Ein positives Vorzeichen sagt aus, dass Sohlerrhöhung stattgefunden hat, ein negatives hingegen, dass Sedimentation stattfand. Die Werte sind als Nettowerte über die gesamte Strecke zu betrachten. Das

heißt, dass ein negativer Gesamtbetrag auch bedeuten kann, dass innerhalb der Betrachtungsstrecke auch Sedimentation herrschen kann.

Tab. 4.10: Fraktionierte Sohlhöhenänderung im Alpenrhein in Mt/a für 1991-2010.

Ton/Schluff	Sand	Feinkies	Grobkies	Steine	Grobkies +Steine
0,000	0,000	0,001	0,024	0,024	0,024

b) Bodensee

Die Temperatur- und damit auch Dichteunterschiede zwischen Alpenrhein sowie den anderen Zuflüssen und dem Bodensee bedingen ein sehr schnelles Absinken des eingetragenen Sedimentes. Es gelangen ausschließlich Sedimente kleiner 2 mm in den Bodensee, die dort sofort oder wenig später sedimentieren (in Abb. 4.17 ist die Entwicklung des Bodenseeufers bei der Vorstreckung zu sehen). Der durch Alpenrhein und Nebenflüsse eingetragene Betrag entspricht also dem der Sohlerrhöhung ΔS im Betrachtungszeitraum 1991-2010 und ist somit der Schließungsterm. Die berechneten, fraktionierten Sohlhöhenänderungen sind Tabelle 4.11 zu entnehmen.

Tab. 4.11: Fraktionierte Sohlhöhenänderung im Bodensee in Mt/a für 1991-2010.

Ton/Schluff	Sand	Feinkies	Grobkies	Steine	Grobkies +Steine
3,966	0,755	0,000	0,000	0,000	0,000

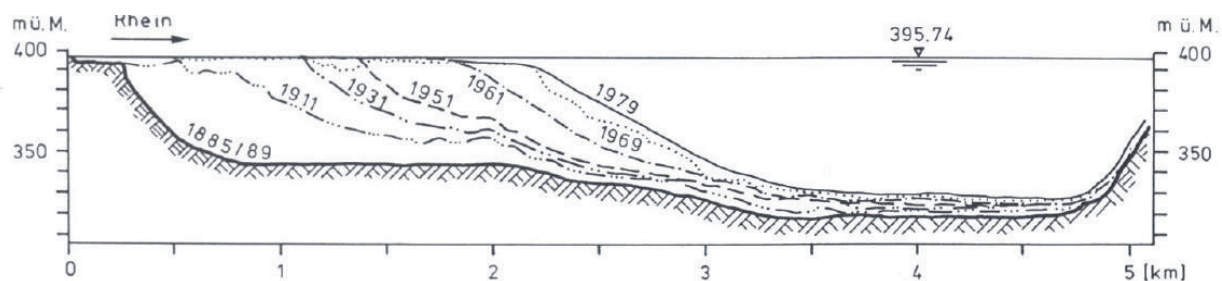


Abb. 4.17: Entwicklung Delta im Bodensee, Mündung Alpenrhein (Lambert, 1989).

4.3.7 Sedimenteintrag aus diffusen Quellen

Die Ufer des Bodensees werden zunehmend erodiert. Insbesondere der Einfluss der Schifffahrt auf dem See bedingt einen Wellengang, der die für die Uferstabilisierung wertvollen Flachufer abträgt (Schulz, 2004). Das so in den Bodensee eingetragene Sediment sedimentiert wahrscheinlich in einiger Entfernung wieder. Dass es im Bodensee verbleibt, scheint plausibel. Es handelt sich also bei der Erosion der Flachufer im Bodensee um einen Sedimenteintrag aus diffusen Quellen I_{di} . Quantitative Daten lagen bei der Bearbeitung nicht vor, weshalb die Größe des Eintrags aus diffusen Quellen im Bodensee unbekannt bleibt. Einfluss auf die Ufererosion und Vorlandsedimentation haben der Wasserpegel und der Wellengang, der windinduziert oder schiffsinduziert sein kann (Schmiedler & Pier, 1999). Der Abfluss des Bodensees bei Konstanz ist ohne Sedimentfracht, sodass die in den Bodensee eingetragenen Sedimente dort verlanden (mündlich, Jürg Bloesch, Em. Rheinaubund, 05.08.2013).

4.3.8 Sedimentausttrag auf Überflutungsflächen

Die Größe der Vorländer im Bereich des Alpenrheins ist derart gering, dass die dort sedimentierten Sedimentmassen vernachlässigt werden können.

Bei großen Hochwassern wird die maximale Abflusskapazität des Seerheins und damit die des Bodensees überschritten und es kommt zur Überflutung der Vorländer am Bodensee. Die Fläche des Bodensees vergrößert sich bei Hochwasser laut IGKB (2004) um 7,5 km² (unklar ist, ob diese Zahl die Überflutungsflächen des Untersees einschließt). Es lagen zum Bearbeitungszeitpunkt keinerlei Informationen über durch Hochwasser abgelagertes Sediment vor. Es kann allerdings davon ausgegangen werden, dass die Ablagerungsrate geringer ist als beispielsweise im unterstrom liegenden Bereich des Oberrheins (siehe Kapitel 7), da die Frachten im Bodensee wesentlich geringer sind. Hier wurde davon ausgegangen, dass der Sedimenteintrag durch diffuse Quellen, also der Ufererosion des Bodensees den Austrag auf Überflutungsflächen bei weitem übersteigt. Die Dimension bleibt hier allerdings unbekannt.

4.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Bilanzierung für die Sedimente im Alpenrhein und Bodensee für den Betrachtungszeitraum 1991-2010 sind in Abbildung 4.18 dargestellt. Die Betrachtung erfolgt für Alpenrhein und Bodensee getrennt in einer gemeinsamen Darstellung: links jeweils die Einträge in den Alpenrhein, der Austrag aus dem Alpenrhein ist gleichzeitig der Eintrag in den Bodensee, rechts die Austräge aus dem Bodensee. Die fraktionierten Frachten sind für denselben Betrachtungszeitraum und dasselbe Gebiet in Abbildung 4.19 dargestellt.

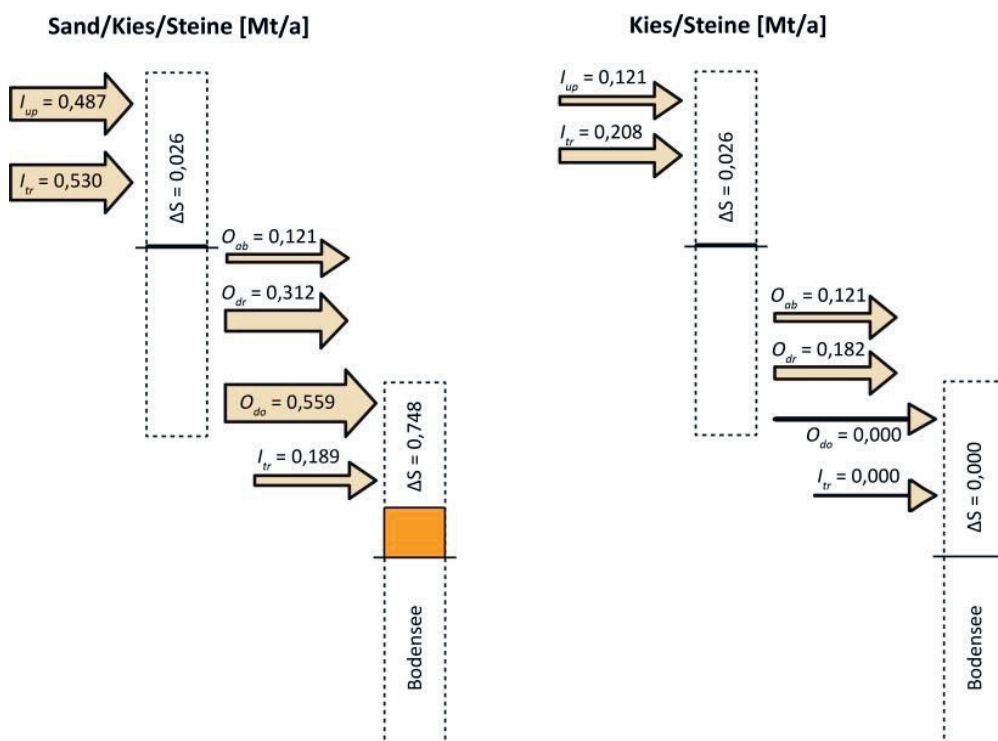


Abb. 4.18: Sedimentbilanz des Alpenrheins und Bodensees, für den Zeitraum 1991-2010 für die Fraktionen Ton/Schluff (< 0,063 mm), Sand (0,063 bis 2 mm), Feinkies (2 bis 16 mm), Grobkies (16 bis 63 mm), Steine (63 bis 125 mm) und alle Fraktionen > 0,063 mm. Zu beachten ist, dass bei $\Delta S \sim 0$ Anlandungen und Sedimenteinträge einerseits sowie Eintiefungen und Sedimentaustträge andererseits sich in der Flussstrecke kompensieren; $\Delta S \sim 0$ ist somit kein Zeichen einer stabilen, undynamischen Sohle. Nomenklatur nach Kapitel 4.3.1.

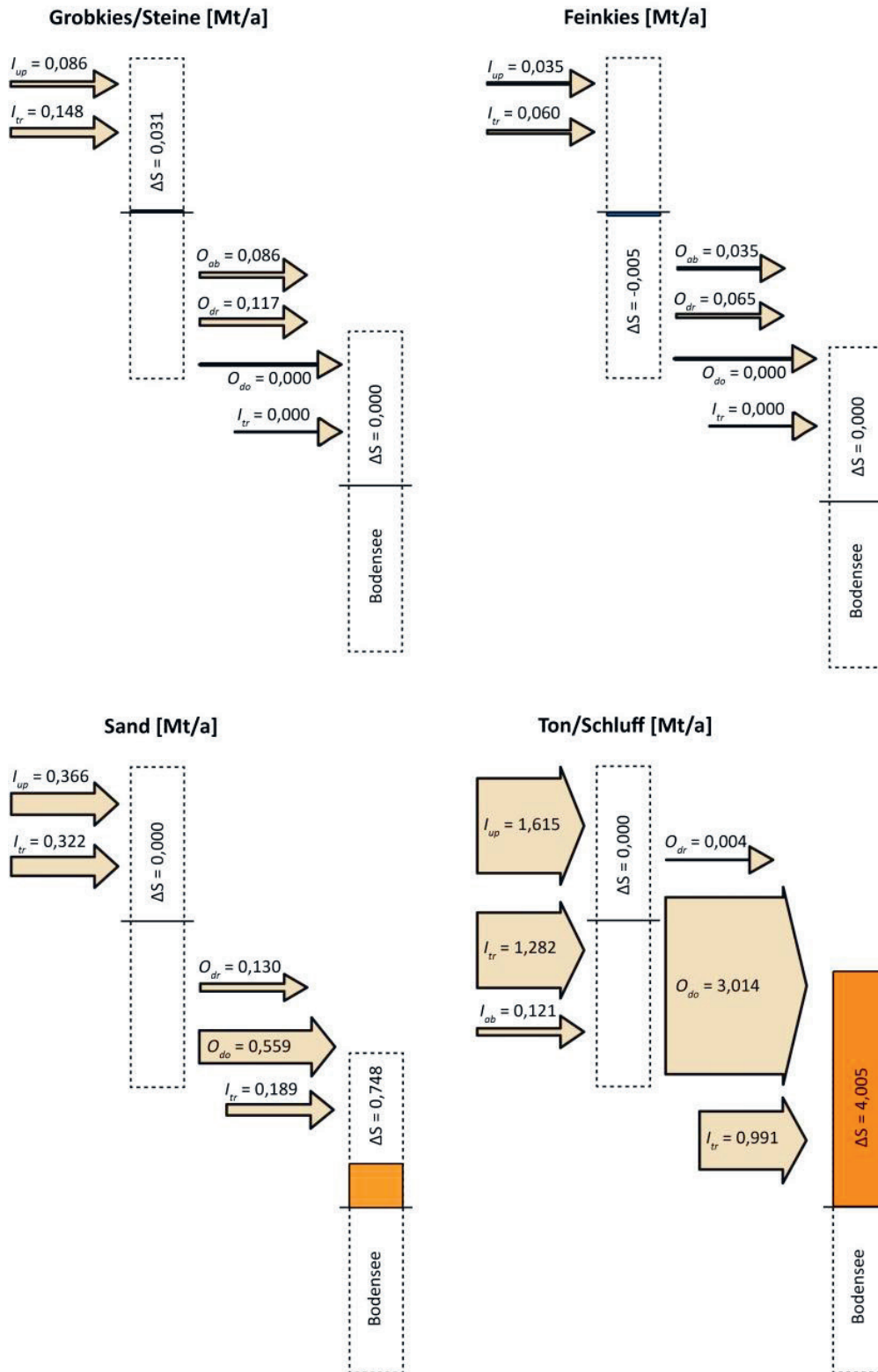


Abb. 4.18: Fortsetzung.

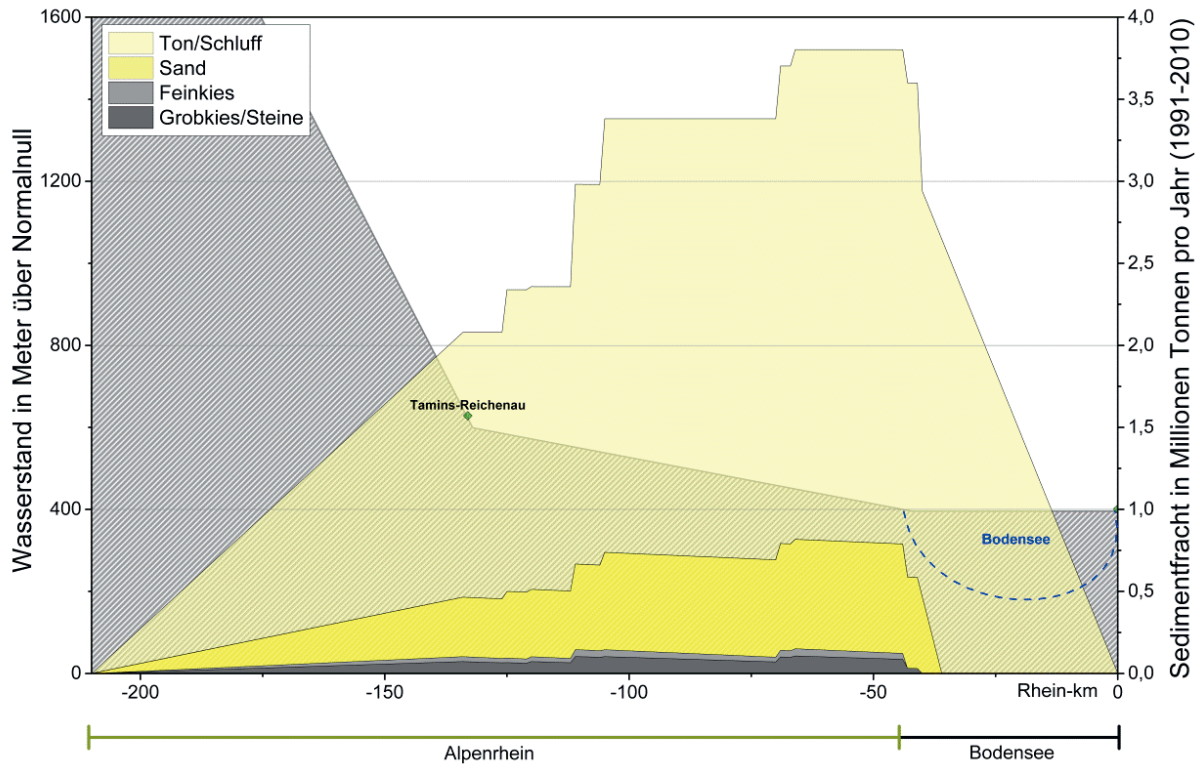


Abb. 4.19: Kumulierte fraktionierte Frachten für den Alpenrhein und Bodensee zwischen 1991 und 2010 in Mt/a.

Tab. 4.12: Ergebnisse und Unsicherheiten für den Alpenrhein in der hier betrachteten Bilanz, 1991-2010.

	Ton/Schluff < 0,063 mm	Sand 0,063-2 mm	Feinkies 2-16 mm	Grobkies und Steine > 16 mm
I_{up}	1,615 ±30%	0,366 ±30%	0,035 ±30%	0,086 ±30%
I_{tr}	1,282 ±30%	0,322 ±30%	0,060 ±30%	0,148 ±30%
I_{ab}	0,121 ±25%			
O_{ab}			0,035 ±20%	0,086 ±20%
O_{do}	3,014 ±20%	0,559 ±25%	0,000 ±0,001	0,000 ±0,002
O_{dr}	0,004 ±30%	0,130 ±30%	0,065 ±30%	0,117 ±30%
ΔS	0,000 ±0,001	0,000 ±0,001	-0,005 ±50%	0,031 ±50%

Tab. 4.13: Ergebnisse und Unsicherheiten für den Bodensee in der hier betrachteten Bilanz, 1991-2010.

	Ton/Schluff < 0,063 mm	Sand 0,063-2 mm	Feinkies 2-16 mm	Grobkies und Steine > 16 mm
I_{up}	3,014 ±20%	0,559 ±25%	0,000 ±0,001	0,000 ±0,002
I_{tr}	0,991 ±50%	0,189 ±50%	0,000 ±0,001	0,000 ±0,001
O_{do}	0,000 ±0,002	0,000 ±0,001	0,000 ±0,000	0,000 ±0,000
ΔS	4,005 ±20%	0,748 ±25%	0,000 ±0,001	0,000 ±0,002

4.5 Diskussion

4.5.1 Unsicherheiten

Die Unsicherheit einer Sedimentbilanzstudie wird sowohl von der Richtigkeit der zuvor getroffenen Annahmen, als auch von den Unsicherheiten der einzelnen Bilanzterme bestimmt. Die angegebene Unsicherheit in Prozent kann entweder addiert oder subtrahiert werden, das heißt, der in der Bilanz verwendete Wert kann entweder zu hoch oder zu niedrig eingeschätzt worden sein. Beträgt ein Wert in der Bilanz null, so wurde hier eine pauschale Unsicherheit angegeben. Die Unsicherheiten überschneiden sich in der vorliegenden Teilbilanz, da der Austrag aus dem Alpenrhein (O_{do}) dem Eintrag in den Bodensee entspricht (I_{up}).

Die meisten der hier verwendeten Werte sind Ergebnisse von Berechnungen, die mittels eines numerischen Modells von Zarn (2010a und b) ermittelt wurden. Diese Berechnung wird hier als zuverlässig angesehen. Weitere Daten, wie Baggervolumina, wurden aus Berichten entnommen. Es musste jeweils eine Umrechnung auf den hier betrachteten Zeitraum erfolgen. Die Baggervolumina werden jeweils von der ausführenden Firma übermittelt. Die Daten sind laut der Internationalen Rheinregulierung plausibel (mündlich, M. Weiß, Bauleiter IRR Lustenau, 01.08.2013). Die berechneten Bilanzterme in Mt/a und die angenommenen Unsicherheiten für den Alpenrhein sind Tabelle 4.12 zu entnehmen, die für den Bodensee Tabelle 4.13. Die Unsicherheiten für mittels Schließungsterm berechneter Bilanzterme wurden mithilfe einer einfachen Fehlerfortpflanzungsanalyse berechnet.

4.5.2 Validierung

Lambert (1989) gibt einen mittleren Sedimenteintrag des Alpenrheins in den Bodensee von $3,0 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ pro Jahr an. Diese Zahl basiert auf den Vermessungen des Bodenseegrundes (Seegrundaufnahmen) zwischen 1911 und 1979, die im Abstand von circa 10 Jahren durchgeführt wurden. Im Abstand von 25 bis 100 m wurde das Untersuchungsgebiet in parallel verlaufenden Linien zunächst mittels Single-beam-Sounding abgetastet, um im Anschluss ein multi-beam-Echosounding anzuschließen. 2008 war das Untersuchungsgebiet 92 km^2 groß und es wurden etwa 1.000 km Profil gemessen. Die neuesten Vergleiche der Seegrundaufnahmen zeigen, dass zwischen 1989 und 1999 insgesamt $2,39 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ abgelagert wurden (Zarn, 2010b, Datengrundlage: Heine et al., 2008), zwischen 1999 und 2008 waren es durchschnittlich $1,69 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ (Heine, 2011). Im Zeitraum 1989-2008, der vergleichbar mit 1991-2010 wäre, sind also $2,06 \cdot 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ im Bereich des aufgenommenen Bereichs (siehe Abb. 4.20) sedimentiert. Zu beachten ist hier, dass nicht nur der Bereich untersucht wurde, in dem der Alpenrhein mündet, das Gebiet umfasst ebenso die Mündungsbereiche von Bregenzer Ach und Dornbirner Ach (Abb. 4.21). Die in den Bodensee eingetragene Sedimentmasse muss mit dem dort abgelagerten Sediment übereinstimmen. Die Schwierigkeit liegt vor allem in der Umrechnung von Volumen in Masse, da die Konsolidierung eine nicht bekannte Größe darstellt. Zarn (2010b) beschreibt die Berechnung, die von den Autoren der Messkampagne durchgeführt wurden, welche eine konsolidierte Sedimentdichte von $1,3 \text{ t/m}^3$ (vor 1999) beziehungsweise $1,7 \text{ t/m}^3$ (ab 1999) angeben (Anhang A Tab. A.2). Umgerechnet wären also innerhalb des Betrachtungszeitraums $2,996 \text{ Mt/a}$ eingetragen und sedimentiert.

Oben wurde ein Eintrag aus dem Alpenrhein in den Bodensee von $3,573 \text{ Mt/a}$ (Sedimente $< 2 \text{ mm}$) berechnet. Zu beachten ist hier, dass auch der Mündungsbereich von Dornbirner Ach und Bregenzer Ach in der Seegrundaufnahme enthalten sind. Der Vergleich der Werte zeigt jedoch, dass die Berechnung realistisch ist.

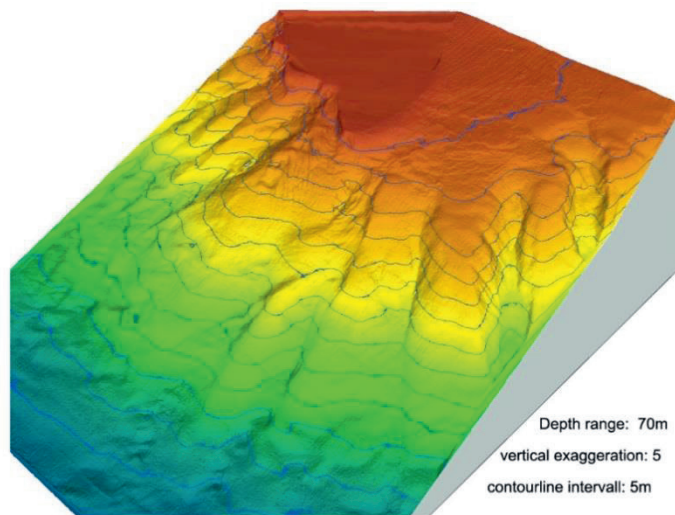


Abb. 4.20: *Digitales Geländemodell der Unterwasserdeltaebene des Rheins (Heine, 2011).*

4.5.3 Interpretation

Der hier betrachtete Teilabschnitt des Rheins trägt für seine Abflusskapazität eine immens große Menge Sediment mit sich. Vornehmlich handelt es sich um die Fraktion Ton/Schluff, die aufgrund des hohen Abriebs des anstehenden Gebirgsmaterials im Einzugsgebiet durch Nebenflüsse eingetragen wird. Vor dem hier betrachteten Zeitraum hat sich die Sohle des Alpenrheins eingetieft. Dies hing vornehmlich mit der hohen Kiesentnahme zusammen, die aber, wie bereits erwähnt vermindert und teils eingestellt wurde. Seither findet vor allem im unterstromigen Teil des Alpenrheins Sedimentation und damit eine Aufhöhung der Sohle statt. Die zunehmende Sedimentation in diesem Bereich hängt wohl vor allem mit der Verlängerung der Vorstreckung zusammen, die das Gefälle herabgesetzt hat, wodurch Sediment schneller sedimentiert.

Der Bodensee wird gemeinhin als Sedimentfalle bezeichnet, was durch die hier angestellte Betrachtung bestätigt wurde: Alle eingetragenen Sedimente verbleiben im Bodensee und es findet kein Austrag nach unterstrom in den Hochrhein statt.

4.5.4 Empfehlungen

Um die Entwicklung der Morphodynamik in Alpenrhein und Bodensee besser verstehen zu können, sollten die Vermessungen von Alpenrheinsohle und Seegrund des Bodensees weitergeführt werden. Es sollten aktuelle Daten zu Baggerungen und Schwebstoffgehalt beschafft und in die vorliegende Bilanz eingepflegt werden, um diese zu aktualisieren. Schwebstoffmessungen sollten in Alpenrhein, Bodensee und wichtigen Nebenflüssen beziehungsweise Quellflüssen unternommen werden. Ebenfalls ist die Quantifizierung des Geschiebeeintrags der Quell- und Nebenflüsse für das Verständnis elementar. Hier sollten Untersuchungen stattfinden, welche die Berechnungen unterstützen und zur Kalibrierung der Modelle weiter beitragen würden. Informationen zu Ablagerungen auf Vorländern, sowie Daten zu den Erosionen des Uferbereichs, insbesondere im Bereich des Bodensees waren nicht verfügbar. Die Frage, welche Sedimente in welchem Umfang erodieren oder sedimentieren, wäre hier noch zu untersuchen. Die Unsicherheiten für die Bilanzierung der Sedimente würden sich dadurch stark verringern und die Qualität der Bilanz erhöhen.

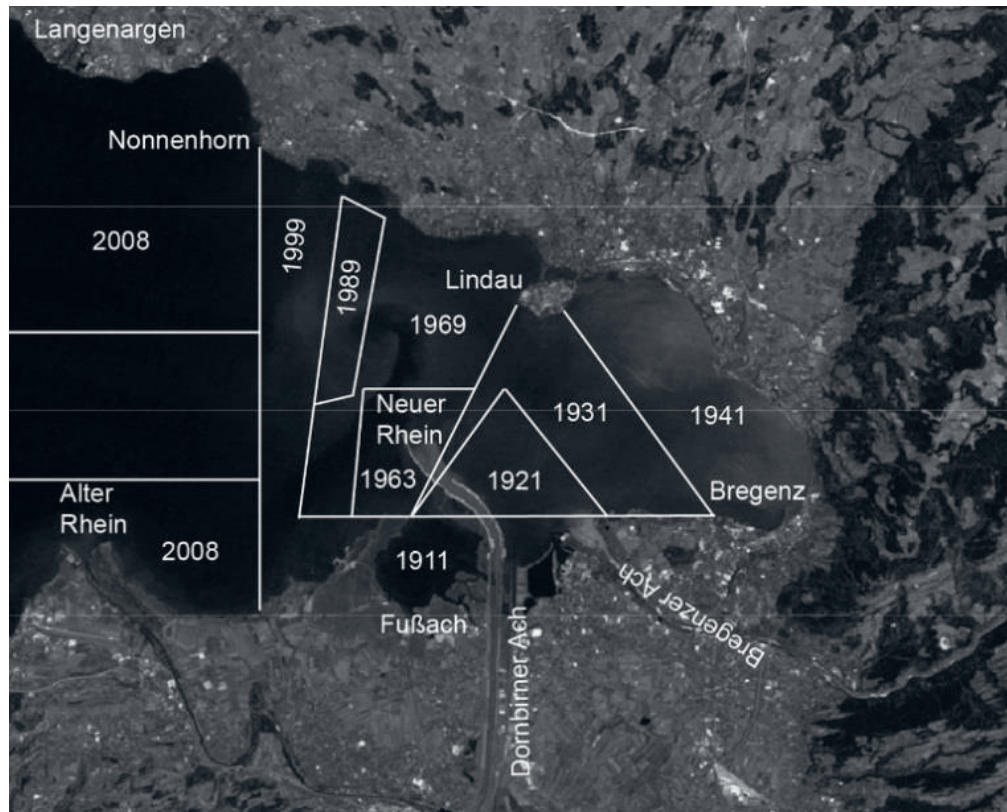


Abb.4.21: Kontinuierliche Erweiterung der Seegrundaufnahmen seit 1991 (Heine, 2011).

4.6 Schlussfolgerungen

4.6.1 Sedimentquellen und -senken

Die Fraktion mit dem höchsten Transportaufkommen im Untersuchungsgebiet ist mit Abstand Ton/Schluff. Die Fraktionen Ton/Schluff und Sand haben ihre größten Quellen im Eintrag von oberstrom (Vorder- und Hinterrhein) und die größten Senken im Austrag nach unterstrom, also in den Bodensee. Die Fraktion Sand wird im Alpenrhein auch durch Baggerungen entnommen. Für die Fraktionen größer 2 mm war die einzige Quelle im Alpenrhein der Eintrag durch die Quell- und Nebenflüsse. Neben einem geringen Austrag durch Abrieb ist der Austrag des Sediments aus dem Alpenrhein durch Baggerungen die größte Senke. Die Fraktionen Feinkies, Grobkies und Steine tragen alle zur Sohlerrhöhung bei. Einen Austrag nach unterstrom gibt es nicht.

In den Bodensee gelangen von oberstrom, dem Alpenrhein, ausschließlich die Fraktionen Ton/Schluff und Sand. Gleiches gilt für den Eintrag aus Nebenflüssen in den Bodensee: Es findet kein Eintrag von Sediment größer 2 mm statt. Das gesamte, in den Bodensee eingetragene Sediment trägt zur Sohlerrhöhung bei und verbleibt im Bodensee, es gibt keinen Austrag nach unterstrom oder eine sonstige Senke.

4.6.2 Sedimentfrachten

Innerhalb des Untersuchungsgebiets stiegen alle Fraktionen aufgrund des Eintrages von oberstrom und der Nebenflüsse bis zur Vorstreckung, die den Alpenrhein in den Bodensee leitet, immer weiter

an. In den Bodensee gelangten nur die Fraktionen kleiner 2 mm. Die Sedimente lagern sich im Bodensee ab, weshalb der Bodensee keinen Austrag nach unterstrom hat.

4.6.3 Unsicherheiten und Empfehlungen

Um die Unsicherheiten zu mindern und damit die Qualität der vorliegenden Bilanz zu verbessern, sollten aktuelle Daten zu Baggerungen und Schwebstoffen eingefügt werden. Auch sollten Messkampagnen zum Geschiebetransport, sowie Schwebstofffrachten an weiteren Stellen durchgeführt werden. Vorlandsedimentation und Ufererosion am Bodensee sollten untersucht werden, um eine Wissenslücke schließen zu können.

4.7 Literatur

- BAFU (2009): Schweizer Bundesamt für Umwelt; Veröffentlichung der hydrologischen Jahrbücher der Schweiz. Bern.
- Boes, R. (2011): Nachhaltigkeit von Talsperren angesichts der Stauraumverlandung. In: 41. IWASA, Kleine und Große Steine; Internationales Wasser-Symposium Aachen 2011, Aachen.
- Broggi, M. (2009): Das Alpenrheintal im Zeitraffer seiner Landschaftsgeschichte. In: Liechtenstein Politische Schriften, 45, 53-82.
- Frings, R.M., Schüttrumpf, H. & Vollmer, S. (2011): Verification of porosity predictors for fluvial sand-gravel deposits. *Water Resources Research*, Vol. 47, W07525.
- HADES: Hydrologischer Atlas der Schweiz (1997), Universität Bern.
- Heine, E. (2011): Hydrographical Surveying of the Subaqueous Delta Plain of the River Rhine at Lake Constance. In: FIG (Ed.), FIG Working Week 2011 – Bridging the Gap Between Cultures, Hydrographical Surveying of the Subaqueous Delta Plain of the River Rhine at Lake Constance.
- Heine, E., Mayr, P. & Bolter, N. (2008): Bodensee Seegrundvermessung 2008. Im Auftrag der Internationale Rheinregulierung. Im Rahmen des INTERREG IV Projekts Alpenrhein-Bodensee-Hochrhein: "Nachhaltiger Hochwasserschutz".
- IGKB (2004): Internationale Gewässerschutzkommission für den Bodensee; Der Bodensee. Zustand, Fakten, Perspektiven (1. Auflage).
- IRR: Internationale Rheinregulierung (2014): Homepage <http://www.rheinregulierung.org/>, letzter Aufruf: 27.11.2014.
- Kanton Aargau (2014): Homepage <https://www.ag.ch/de>, letzter Aufruf: 16.12.2014.
- KHR (2012): Jahresberichte der Internationalen Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes. Lelystad.
- Lambert, A. (1989): Das Rheindelta im See. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik. Vol. 87, Iss. 1.
- LUBW – Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (Hrsg.) (2011): DGJ - Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch 2009. Karlsruhe.
- Mikos, M. (1993): Fluvial Abrasion of Gravel Sediments, Mitteilung Nr. 123 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich, Zürich.

- Müller, G. & Quakernaat, J. (1969): Diffractometric Clay Mineral Analysis of Recent Sediments of Lake Constance (Central Europe); Contributions to Mineralogy and Petrology, Vol. 22, S. 268-275.
- Mürle, U. , Becker, A. & Rey, P. (2004): *Dikerogammarus villosus* (Amphipoda) im Bodensee; Lauterbornia, Dinkelscherben.
- Naef, F. (1989): Hydrologie des Bodensees und seiner Zuflüsse; Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik, Vol. 1, S. 15-17.
- Ostendorp, W. & Dienst, M. (2010): Seerhein: schaden zu schnelle Schiffe dem Ufer? Limnologisches Institut der Universität Konstanz. Konstanz.
- Schmieder, K. & Pier, A. (1999): Lakeside reed border characteristics at Lake Constance (Untersee): A comparison between 1981–1983 and 1994; Wetlands Ecology and Management 8.
- Schnitter, N. (1992): Die Geschichte des Wasserbaus in der Schweiz. 2. Auflage. Oberbözberg.
- Schreiner, A. (1979): Zur Entstehung des Bodenseebeckens. Eiszeit und Gegenwart Vol. 29, S. 71-76, Hannover.
- Schulz, M. (2004): Morphodynamik am Mehrerauer Seeufer (Bodensee). Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters. Vol. 34, Iss. 1–2, S. 75–82.
- Vischer, D. (1986): Schweizerische Flusskorrekturen im 18. und 19. Jahrhundert. Mitteilung Nr. 84 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie der ETH Zürich. Zürich.
- Zarn, B. (2010a): Alpenrhein Reichenau – Illmündung, Ermittlung des Feststoffaufkommens. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag der Internationalen Rheinregulierung. Domat/Ems.
- Zarn, B. (2010b): Internationale Strecke des Alpenrheins, Ermittlung des Feststoffaufkommens. Unveröffentlichter Bericht im Auftrag der Internationalen Rheinregulierung. Domat/Ems.
- Zarn, B. , Oplatka, M. , Pellandini, S. , Mikos, M. , Hunziker, R. , Jäggi , M. (1995): Geschiebehaushalt Alpenrhein. Neue Erkenntnisse und Prognosen über die Sohlenveränderungen und Geschiebetransport, Zürich.

5. Sedimentbilanz des Hochrheins und des staugeregelten Oberrheins

K. Banhold, R.M. Frings, H. Schüttrumpf

5.1 Einleitung

Seit Jahren wird die Erosions- und Sedimentationsproblematik im Rhein auf der Basis von Sohlpeilungen und Feststofffrachtmessungen untersucht. Diese Messungen geben jedoch keine Antwort auf wesentliche Fragestellungen wie: „Wo kommen die Sedimentfrachten im Rhein her?“, „Was passiert mit den erodierten Sedimenten?“, und „Wie sind die morphologischen Prozesse in den Bereichen unterstrom und oberstrom miteinander verknüpft?“. Diese Fragestellungen sind besonders für die Optimierung von Geschiebezugabe- und Baggerstrategien wichtig, können aber nur mit der Aufstellung einer Sediment- oder Feststoffbilanz beantwortet werden. Eine solche Bilanz beschreibt das Gleichgewicht zwischen den Sedimentmengen, die in das Untersuchungsgebiet eingetragen werden (die sogenannten Quellen), den Sedimentmengen die aus dem Untersuchungsgebiet ausgetragen werden (die sogenannten Senken) und der Veränderung der Sedimentmengen, die im Untersuchungsgebiet gespeichert sind, der Sohlhöhenänderung.

Das Ziel dieser Teilstudie war die Erstellung einer Sedimentbilanz für den Flussschlauch des Hochrheins (Abb. 5.1a) ab Konstanz und des staugeregelten Oberrheins (Abb. 5.1b) bis Iffezheim für den Zeitraum 1991-2010. Dabei wurden die Sedimentfraktionen kleiner 0,063 mm (Ton/Schluff), 0,063 bis 2 mm (Sand), 2 bis 16 mm (Feinkies), 16 bis 63 mm (Grobkies) und 63 bis 125 mm (Steine) getrennt voneinander bilanziert.

Ausführliche Untersuchungen zum aktuellen morphologischen Zustand haben für den Hochrhein bereits Schälchli et al. (2000) und Abegg et al. (2013) unternommen. Diese Berichte enthalten Informationen wie Baggervolumina und Geschiebeeinträge aus Nebenflüssen, die in den vorliegenden Bericht eingeflossen sind. Für den staugeregelten Oberrhein wurde bislang keine vergleichbare Studie durchgeführt. Grundlage bilden für diesen Abschnitt Baggerdaten und Schwebstoffmessungen.

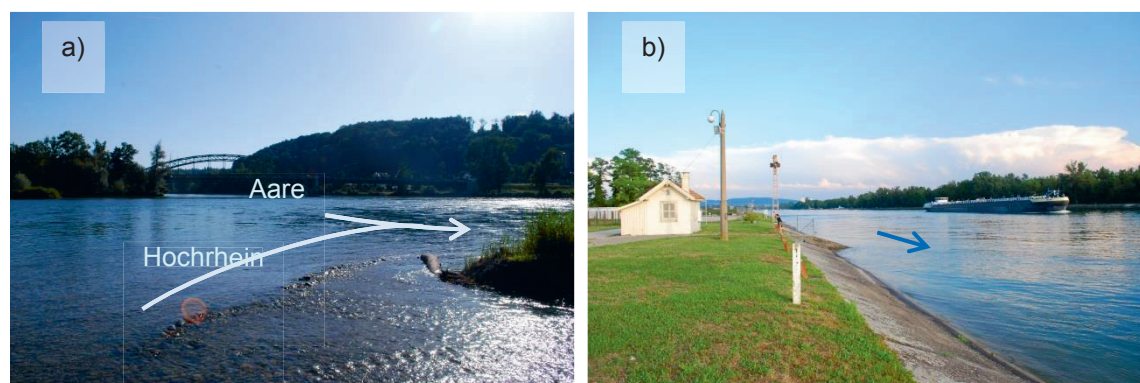


Abb. 5.1: Mündung der Aare in den Hochrhein (a) und Grand Canal d'Alsace, ein Teil des staugeregelten Oberrheins (b) (Fotos: Frings, August 2013).

5.2 Betrachtungsgebiet

5.2.1 Lage

Das hier betrachtete Gebiet (siehe Abb. 5.2) beginnt beim Ausfluss des Bodensees bei Konstanz, wo auch die Rhein-Kilometrierung offiziell beginnt. Der Rhein bildet hier die meiste Zeit die Grenze zwischen Deutschland und der Schweiz. Der Auslass aus dem Bodensee wird Seerhein genannt und fließt direkt in den Untersee, der ebenfalls nur einen Auslass hat, der bei Stein am Rhein liegt. Ab hier wird der Rhein Hochrhein genannt und bildet meist die Grenze zwischen der Schweiz und Deutschland. Aufgestaut durch elf Kraftwerke fließt der Hochrhein in westliche Richtung bis Basel. Ab dort ist der Rhein für die Großschifffahrt schiffbar. Hier erfolgt ein Richtungswechsel nach Norden, auch *Rheinknie* genannt. Ab hier gilt die Bezeichnung Oberrhein. Der Oberrhein wird durch zehn weitere Kraftwerke mit Schleusen aufgestaut. Zwischen Kembs und Breisach fließt das Wasser des Rheins zu großen Teil durch den Rheinseitenkanal auf französischem Gebiet. In diesem Bereich befinden sich vier Wasserkraftwerke. Weiter unterstrom wurden vier Stauhaltungen in der sogenannten Schlingelösung gebaut (vgl. Kapitel 2.4). Die letzten beiden Kraftwerke am Rhein liegen in einem Querbauwerk auf der ursprünglichen Flussachse. Das letzte Kraftwerk befindet sich bei Iffezheim, ab hier ist der Rhein frei fließend. Das Betrachtungsgebiet endet hier.



Abb. 5.2: Übersicht und Staustufenlage am staugeregelten Oberrhein.

5.2.2 Geologie und Sedimentologie

Im Mittel-Pliozän, vor der Jura-Faltung, flossen Aare und Alpenrhein in Richtung Norden, um dort in die heutige Donau zu münden. Der Alpenrhein durchfloss auch zu dieser Zeit schon das Becken des Bodensees. Die Jura-Faltung und die Schwarzwaldhebung lenkten die Aare nach Westen um. Der von Süden kommende Alpenrhein mündet nach wie vor in den Bodensee, welcher im Altpleistozän seinen Auslauf im Westen bekam. Von hier aus floss er als heutiger Hochrhein weiter nach Westen, wo die Aare, von Süden kommend, mündet. Beim heutigen Basel besteht ein Richtungswechsel nach Norden. Von hier an wird der Rhein Oberrhein genannt (IGKB, 2004).

Der Hochrhein fließt durch drei geologische Abschnitte (Abb. 5.4). Zwischen Stein am Rhein (Rhein-km 25) und Schaffhausen (Rhein-km 45) verläuft der Hochrhein über das Molassegebiet, in dem auch der Bodensee liegt. Die quartären Ablagerungen bestehen aus Sandstein, Mergel und Nagelfluh. Zwischen Konstanz und Schaffhausen ist der Molassefels zu einem Großteil durch Gletscher erodiert worden. In den Talebenen findet sich eine aus Moränenmaterial bestehende Lockergesteinsschicht. Die Oberfläche des Tals besteht aus Moränenmaterial (lehmiger Kies und kiesiger Lehm) und ist praktisch wasserundurchlässig. Hier reicht die Eintiefung des Hochrheins nicht bis auf den Molassefels. Der folgende Abschnitt bis zur Stadt Kaiserstuhl am Hochrhein (Rhein-km 85) ist unregelmäßig von Gletschern erodiert worden. Der Hochrhein hat sich fast bis zum Molassefels eingetieft (Abegg et al., 2013). Hier fließt der Hochrhein in ausgeprägten Mäandern durch abwechselnde Abschnitte aus Fest- und Lockergestein. Der feste Molassefels reicht an einigen Orten (Rheinfall, Abb. 5.3, Koblenzer Laufen und Überreste im Unterwasser des Kraftwerks Rheinhausen), bis an die Erdoberfläche. Dies hat den Effekt einer höheren Sohlstabilität. Im weiteren Verlauf bis Basel (Rhein-km 169) sind Gesteine und Ablagerungen aus dem Jura und Trias vorzufinden. Sie reichen von locker gelagerter Struktur bis annähernd erosionsresistenten Kristallinen. Die Zuflüsse Alb, Murg, Wehra und Wiese sind weitestgehend durch eine bezüglich der Grobsedimente erosionsresistente Sohlstruktur geprägt (Schälchli et al., 2000 und Abegg et al., 2013, Anhang B.1).



Abb. 5.3: Der Rheinfall bei Schaffhausen, Blick in Richtung oberstrom (R. Weiss, BfG, 2014).

Geologische Übersichtskarte des Oberrheingrabens

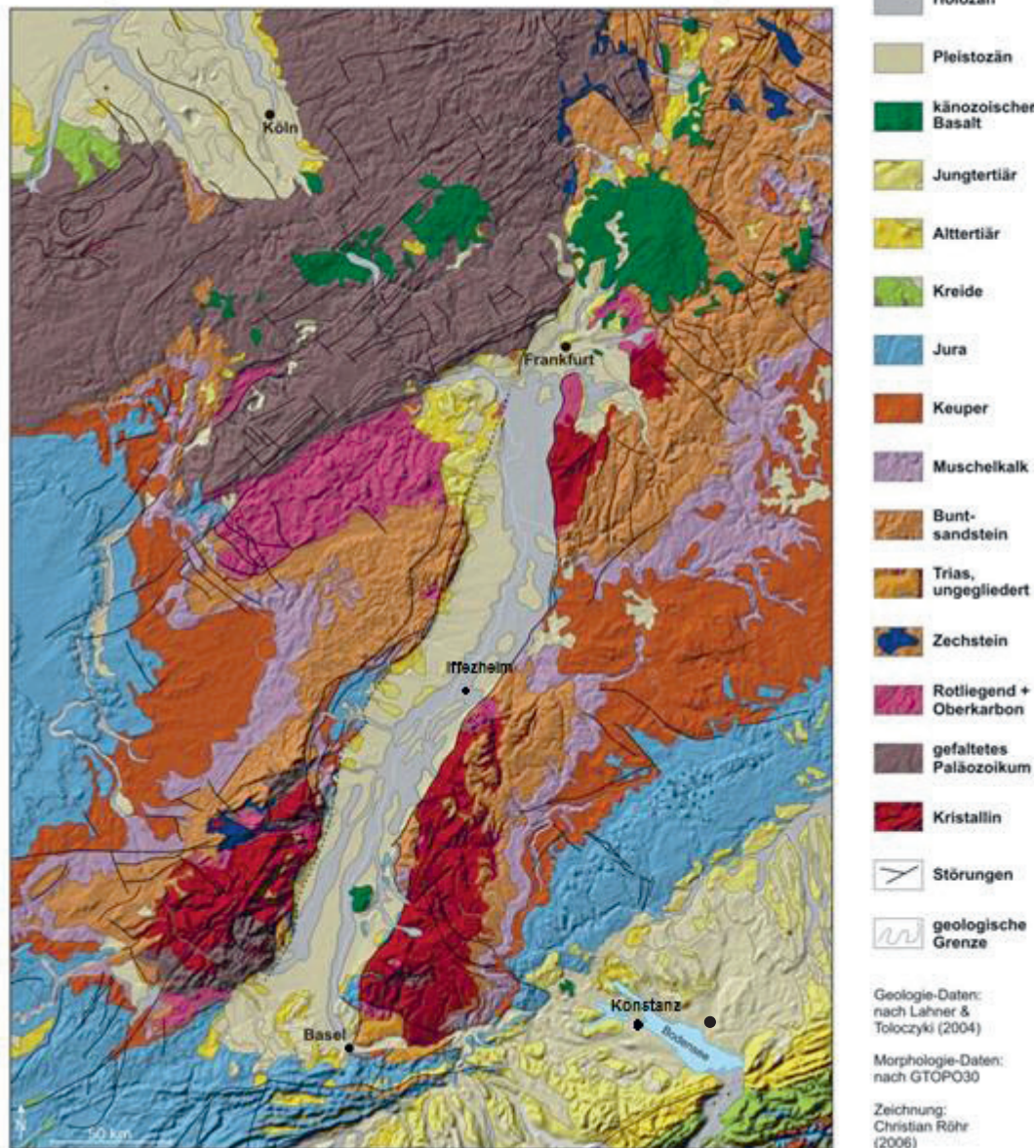


Abb. 5.4: Geologische Übersichtskarte des Oberrheingrabens (bearbeitet nach Röhr, 2006).

Schälchli et al. (2000) und Abegg et al. (2013) berichten von einer grobkörnigen, abgeplasterten Sohle in den Stauhaltungen des Hochrheins. Innerhalb der Stauhaltungen nimmt die mittlere Korngröße ab, das Sediment verkleinert sich. Grund hierfür ist die abnehmende Sohlschubspannung, wodurch gröberes Material nicht mehr transportiert werden kann.

Das Gefälle im Hochrhein ist hoch, vor der Errichtung der Kraftwerke gab es zahlreiche Wasserfälle und Stromschnellen. Auf 150 km Länge verliert der Hochrhein 160 m an Höhe. Abbildung 5.5 zeigt den Höhenverlauf (Talweg) der Hochrheinsohle, die Lage der heutigen Kraftwerke und die frei fließenden Strecken, das heißt, Bereiche, die nicht innerhalb einer Stauhaltung liegen. Die dargestellten Restwasserstrecken (braun) sind kleinere Umleitungen, die bei Niedrigwasser keinen Abfluss haben. Beispielhaft ist in Abbildung 5.6 die Lage der Restwasserstecke des Kraftwerkes Rheinau dargestellt.

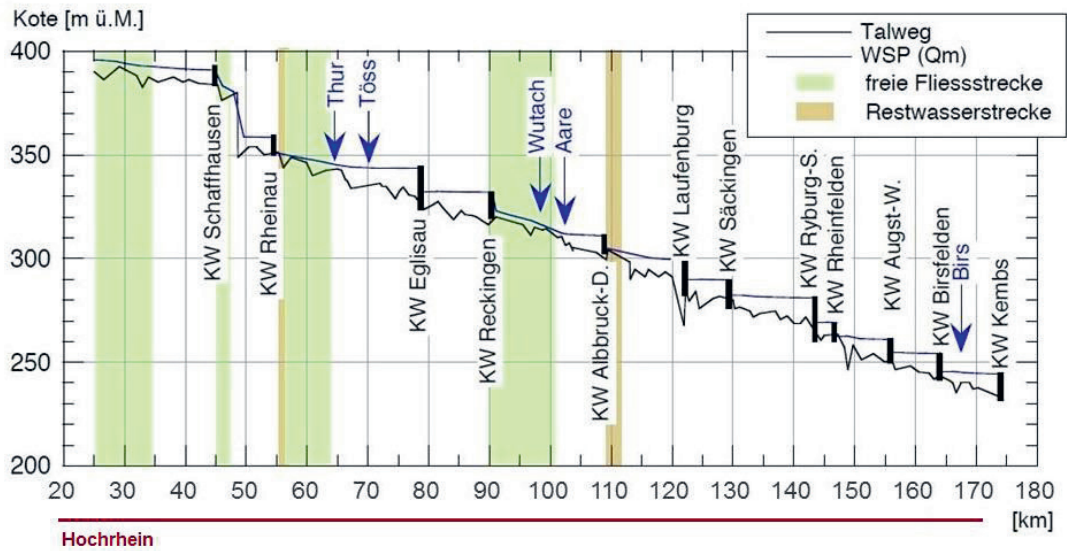


Abb. 5.5: Längensprofil der Sohle im Hochrhein (Talweg) (bearbeitet nach Abegg et al., 2013).

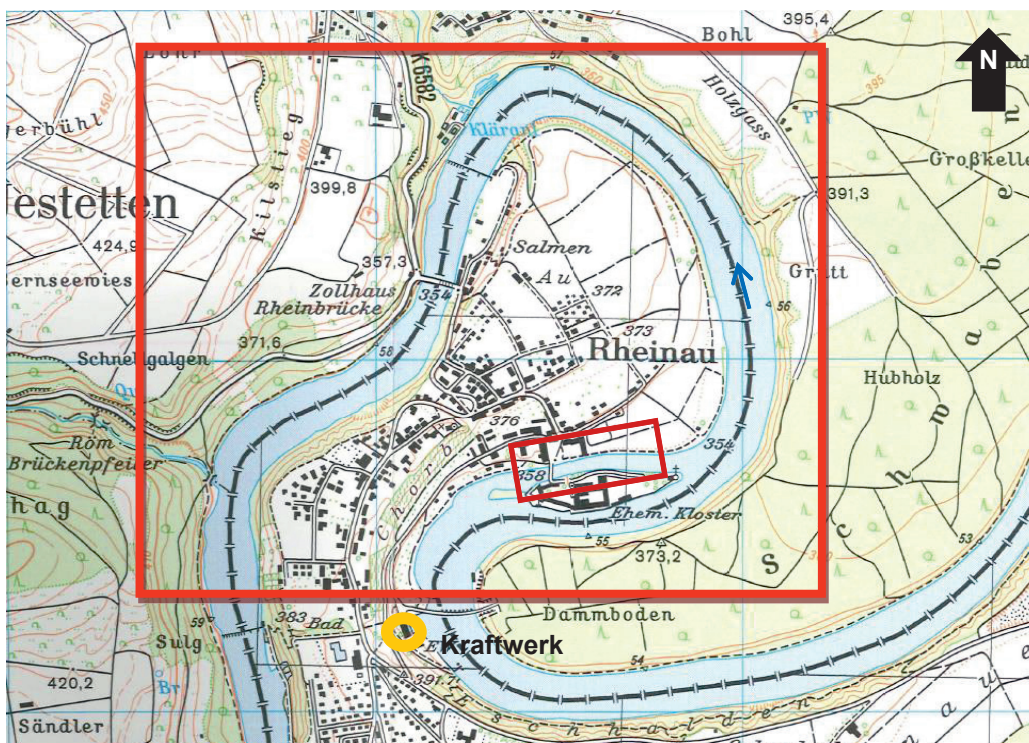


Abb. 5.6: Lage des Ausleitungskraftwerks Rheinau, gelb markiert; Lage der Restwasserstrecke, rot markiert (Ausschnitt: LVA, 2008).

Die einzigen Flächen des Hochrheins, die bei Hochwasser überflutet werden, liegen bei den Mündungen von Thur und Aare (UVM, 2005) und sind dementsprechend im Vergleich zum Einzugsgebiet sehr gering. Dies bestätigen auch die Überschwemmungskarten der IKS (2001).

Bei Basel tritt der Rhein in den Oberrheingraben ein. Hier war im Verlauf des Tertiärs ein bis zu 40 km breiter Streifen der Erdkruste um einige tausend Meter abgesunken. Der entstehende Graben füllte sich mit marinen und terrestrisch-limnischen Sedimenten vorwiegend klastischer Natur. Der Rhein und seine Nebenflüsse lagerten im Lauf des Pleistozäns zunächst mehr feinkörnige, später vorwiegend

sandig-kiesige Sedimente ab, die sich infolge überwiegender Senkungstendenz örtlich bis über 300 m anhäufen konnten. Dies hat zur Folge, dass der Rhein heute zwischen Istein (Rhein-km 178) im Süden und Nierstein (Rhein-km 482) im Norden auf einer Strecke von ca. 300 km in seinen eigenen, im Pleistozän aufgeschütteten Ablagerungen fließt. Nach dem Rückzug der würmeiszeitlichen Alpengletscher wurde der Oberrhein durch die Bildung der alpinen Randseen von seiner wichtigsten Geschiebequelle, den Alpen, abgeschnitten, da sich in den Zungenbecken der Gletscher die gesamte Feststofffracht der alpinen Zuflüsse sammelte. Im Holozän nahm der Rhein deshalb Geschiebe aus dem von ihm aufgeschotterten Untergrund auf und schuf sich dadurch ein breites Hochflutbett, die holozäne Rheinniederung. Der Oberrhein tiefte sich im Süden um bis zu 14 m in die würmeiszeitliche Niederterrasse (Hochgestade) ein, im Norden des Oberrheingrabens nur 0,5 m und weniger. Bedingt durch menschliche Eingriffe – vor allem die Rheinkorrektion – hat sich der Oberrhein in den letzten 2 Jahrhunderten bis zum Bau der Staustufen noch weiter eingetieft (Gölz, 1980; Gölz, 1984).

Durch Deich- und Strombauten wurde der Rhein immer weiter eingeeengt. Die mit wenigen Ausnahmen würmeiszeitliche Unterlage der Rheinsohle wurde im Bereich des Hochflutbetts umgelagert, zum Teil ausgeräumt und durch neu antransportiertes Geschiebe ersetzt. Seit dem Ausbau des Rheins im 19. und 20. Jahrhundert sind diese Vorgänge im Wesentlichen auf das nun festgelegte Gewässerbett beschränkt (Gölz, 1980).

Im Bereich des staugeregelten Oberrheins liegen kaum Informationen zur Zusammensetzung des Sohlmaterials vor. Direkt oberstrom der Querbauwerke befinden sich Anlandungsbereiche, in denen sich Feinsedimente ablagern. Für diese Feinsedimentablagerungen beträgt der Anteil der Fraktion $< 20 \mu\text{m}$ im Schnitt ca. 70 %. Der Sandanteil beträgt in der Regel unter 10 %. Systematische Sohlbehebungen der übrigen Bereiche aus neuerer Zeit liegen nicht vor. Stichproben deuten darauf hin, dass die ursprüngliche abgeplattete Rheinsohle aus der Zeit vor dem Staustufenbau vorzufinden ist, teilweise bzw. zeitweise überlagert oder kolmatiert durch Feinsedimente (Abb. 5.7).



Abb. 5.7: Greiferproben der Rheinsohle aus der Stauhaltung Iffezheim (links: km 315,8, rechts: km 317,7 jeweils ca. 40 m vom linken Ufer) (Foto: Hillebrand, 2014).

5.2.3 Hydrologie

Der mittlere Tagesabfluss bei Konstanz (D) lag zwischen 1991 und 2010 bei $MQ = 346 \text{ m}^3/\text{s}$. Die etwa 4 km lange Verbindung zwischen Bodensee und Untersee, die bei Konstanz beginnt, wird auch Seerhein genannt. Der Untersee hat, wie der Bodensee, nur einen Ausfluss, dieser liegt bei Stein am Rhein (CH) bei Rhein-km 25. Häufig wird in der Literatur erst hier vom Hochrhein gesprochen (unter anderem UVM, 2005). Weiter im Süden liegt linksrheinisch bei Rhein-km 65 die Mündung des zweitgrößten Nebenflusses des Hochrheins – der Thur. Es folgen linksrheinisch die Mündung der Töss bei Rhein-km 71,2 und ein Richtungswechsel nach Westen, sowie ein weiterer Aufstau durch das Kraftwerk Eglisau. Bei Glattfelden mündet ebenfalls linksrheinisch bei Rhein-km 79,1 die Glatt. Die Messstation beim Kraftwerk Rekingen verzeichnete innerhalb des Betrachtungszeitraums einen gemittelten Tagesabfluss von $MQ = 441 \text{ m}^3/\text{s}$. Bei Rhein-km 100,2 mündet die Wutach als erster

größerer rechtsrheinischer Nebenfluss in den Hochrhein. Der größte Nebenfluss des Hochrheins mündet von links bei Waldshut-Tiengen (D, Rhein-km 103): Die Aare führt mit einem mittleren Abfluss $MQ = 559 \text{ m}^3/\text{s}$ mehr Wasser als der Hochrhein selbst. Der Hochrhein wird bei Rhein-km 109 durch das Kraftwerk Albruck-Dogern aufgestaut. Es folgen weitere Kraftwerke und kleinere Nebenflüsse bis Basel. Die Birs (Rhein-km 164) und der Birsig münden nach dem Kraftwerk Birsfelden, dem letzten im Hochrhein.

Im letzten Abschnitt des Hochrheins bei Basel (Rheinhalle, Rhein-km 165,1) liegt ein mittlerer Abfluss von $MQ = 1.060 \text{ m}^3/\text{s}$ vor (Tagesmittelwerte im Betrachtungszeitraum 1991-2010, Daten aus WISKI¹). Im weiteren Verlauf mündet die Wiese ($MQ = 11,7 \text{ m}^3/\text{s}$, Rhein-km 169,2; rechts; HVZ, 2013) und der Canal de Huningue beginnt bei Rhein-km 169,7 (links). In Basel bei Rhein-km 170 beginnt der Oberrhein, für diesen wird der im Hochrhein gemessene Abfluss angenommen, in der Annahme, dass der Abfluss von Wiese und Canal de Huningue sich netto ausgleichen. Bei Markt (Rhein-km 174) teilt sich der Oberrhein in den Grand Canal d'Alsace (deutsch auch *Rheinseitenkanal*) auf der linken, französischen Seite, und den Restrhein auf der rechten Seite. Der Restrhein bildet die Grenze von Deutschland und Frankreich und ist ein Nebenarm des Oberrheins, der gesondert in einer eigenen Studie betrachtet wird (Kapitel 6). Im Mittel fließen 9 % des Abflusses in den Restrhein, der Hauptteil in den Grand Canal d'Alsace. Im Betrachtungszeitraum erreichte der Abfluss im Restrhein einen maximalen Anteil von 75 % aufgrund von Hochwasser (Näheres in Kapitel 6). Im Grand Canal d'Alsace befinden sich vier Wasserkraftwerke, die eine maximale Abflusskapazität von $1.400 \text{ m}^3/\text{s}$ (EDF, 2011) besitzen. Bei Breisach (D, Rhein-km 224) vereinen beide Teile sich wieder. Es folgen sechs weitere Kraftwerke im Rhein, diese sind in Tabelle 5.2 aufgelistet. Tabelle 5.1 beinhaltet hydrologische Messstationen am Hoch- und Oberrhein, deren Lage und hydrologische Kenndaten.

Im Mai 1999 gab es im Bereich des Hoch- und Oberrheins ein außergewöhnliches Hochwasser (häufig als *Pfingsthochwasser* bezeichnet). Der Abfluss in Basel erreichte am 12. Mai 1999 einen historischen Höchstwert von $5.090 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tagesspitze), dieser Abfluss liegt über dem eines 100-jährlichen Hochwassers (BAFU, 2000, S. 152). Ein weiteres Hochwasser im Betrachtungszeitraum 1991 bis 2010 gab es im August 2007. Hier lag der höchste Abfluss in Basel bei $4.810 \text{ m}^3/\text{s}$ (BAFU, 2013, S. 236). Die Abflüsse der Jahre 1991 bis 2010 für den Hochrhein und Oberrhein für verschiedene Stationen sind in Tabelle 5.1 aufgetragen.

Tab. 5.1: Hydrologische Kenndaten für den Zeitraum 1991-2010, Abflüsse in $[\text{m}^3/\text{s}]$ für die Messstationen Konstanz, Rheinfelden, Basel Rheinhalle und Plittersdorf. Daten basieren auf gemittelten Tageswerten (Daten aus WISKI).

	Konstanz km 0,0	Rheinfelden km 148,3	Basel km 164,3	Plittersdorf km 342,7
NQ ₁₉₉₁₋₂₀₁₀	142	345	367	444
MQ ₁₉₉₁₋₂₀₁₀	346	1.041	1.061	1.228
HQ ₁₉₉₁₋₂₀₁₀	1.080	4.220	4.580	4.510

5.2.4 Anthropogene Eingriffe

Ausbau des Hochrheins

Industrialisierung und Schifffahrt machten sich zu Anfang des 19. Jahrhunderts am Hochrhein bemerkbar. Bei Schaffhausen wurde der Hochrhein bereits 1860 teilweise aufgestaut (Tittizer & Krebs, 1996), um Energie für die ansässigen Produktionsstätten zu erzeugen. Der Hochrhein wird seit 1898 zur Energieerzeugung genutzt. Die erste Staustufe war das Kraftwerk Rheinfelden, heute sind

¹ Datenhaltung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes, Daten bereitgestellt durch die BfG.

es insgesamt elf Laufwasserkraftwerke. Die einzelnen Kraftwerke sind Tabelle 5.2 zu entnehmen. Ein geografischer Überblick ist in Abbildung 5.8 dargestellt.

Tab. 5.2: Lage, Baujahr und Verschlussstypen der Kraftwerke am Hochrhein.

Kraftwerk	Rhein-km	Baujahr	Verschlussstyp
Schaffhausen	45,0	1963	Segmentschütz mit Klappe
Rheinau	54,5	1956	Sektorschütz
Eglisau	78,5	1920	Hubschütz
Reckingen	90,5	1941	Doppelhakenschütz
Albruck-Dogern	109,0	1933	Doppelhakenschütz
Laufenburg	122,0	1914	Tafelschütz
Säckingen	129,5	1966	Segmentschütz
Ryburg-Schwörstadt	143,0	1927	Doppelhakenschütz
Rheinfelden	147,0	1898	Roll- und Tafelschütz
Augst-Wyhlen	156,0	1912	Rollschütz
Birsfelden	164,0	1954	Hakenschütz

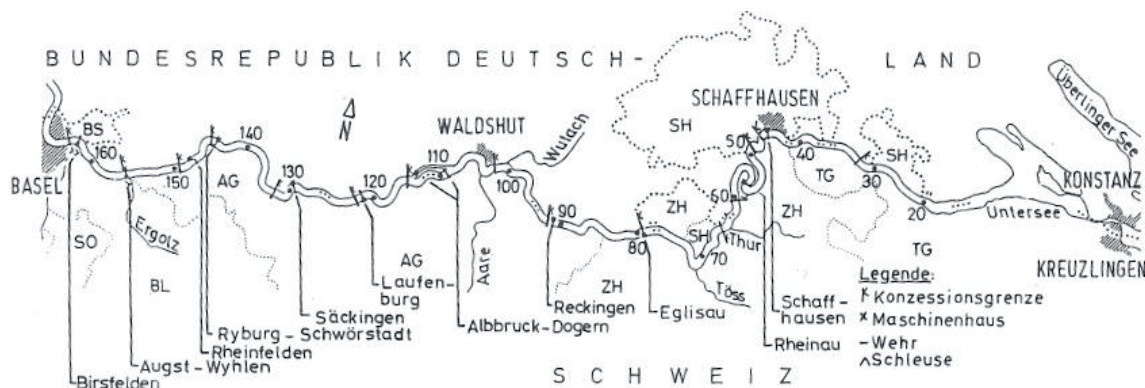


Abb. 5.8: Übersicht und Staustufenlage am Hochrhein, Fließrichtung von Ost nach West (Ausschnitt aus: BFVNL, 1975).

Die Oberrheinkorrektion im 19. Jahrhundert

Vor der Durchführung umfangreicher wasserbaulicher Maßnahmen, mit denen im 19. Jahrhundert begonnen wurde, floss der Oberrhein bis zur Illmündung (heute Rhein-km 311,3) als stark verzweigter Fluss und unterstrom stark mäandrierend. Häufige Hochwasserereignisse und eine Vernässung weiter Vorlandbereiche waren die Folge. Bereits im 14. Jahrhundert bemühten sich deshalb einzelne Anliegergemeinden durch Deiche oder Durchstiche von Flussschlingen um einen Schutz gegen Hochwasser (KHR, 1993).

Die größten anthropogenen Eingriffe im Bereich des Oberrheins wurden im Auftrag der badischen Regierung zwischen 1817 und 1876 nach den Plänen von Johann Gottfried Tulla durchgeführt (Löbert, 1996), sie werden heute allgemein als Oberrheinkorrektion bezeichnet. Für den Umbau des Gewässerverlaufs des Oberrheins gab es mehrere Gründe. Hauptgrund war die Trockenlegung der umliegenden Sumpf- und Auengebiete. Durch die Absenkung des Grundwasserspiegels konnte das Umland trocken gelegt werden, Kanalsysteme und Pumpwerke unterstützten die Landgewinnung. Die Trockenlegung ermöglichte das Zurückdrängen von Fieberkrankheiten wie Malaria, Ruhr und Typhus. Durch die Einschnürung des Rheins wurde die Schifffahrt erleichtert und der Bau von Häfen brachte Anrainern einen wirtschaftlichen Vorteil. Eine negative Auswirkung war die Austrocknung der Wälder, was durch eine Aufforstung der Altarme nur teilweise ausgeglichen werden konnte (Löbert, 1996). Die Pläne von Tulla sahen die Unterbindung der Furkationen sowie den Durchstich der Mäander vor. Es sollte insgesamt nur ein einheitliches Flussbett ohne Verzweigungen oder Nebenarme geben, insgesamt also eine Laufverkürzung (siehe Abb. 5.9). Der Flussverlauf der im Süden des Hochrheins liegenden Furkationszone wurde um 13 % verkürzt, der Flussverlauf der nördlicheren Mäanderzone

sogar um 37 % (Buck et al., 1993). Das neu gestaltete Flussbett, welches Abflüsse bis zu 2.000 m³/s abführen konnte, hatte eine Breite von 200 bis 240 m (Buck et al., 1993). Links- und rechtsseitig war jeweils ein Treidelpfad eingerichtet. Die auftretenden Hochwasser während der Baumaßnahmen waren eingeplant und für den Bau dienlich: Die durch die Einschnürung erhöhte Sohlschubspannung rief eine Tiefenerosion hervor, wodurch sich das Bett eintiefte. Die zuvor vorherrschende Seitenerosion wurde unterbunden. Die Tieferlegung der Flusssohle zog eine gewollte Senkung des Grundwasserspiegels mit sich, was zusätzlich vor Überschwemmungen schützte. Um das umliegende Land vor späteren Hochwassern zu schützen und landwirtschaftlich dauerhaft nutzbar zu machen, wurde zusätzlich ein Damm auf dem Vorland aufgeschüttet.

Die Erosion tiefte im weiteren Verlauf das Bett weiter ein als zuvor geplant. Weitere Umbaumaßnahmen waren nötig, um weiterhin die Schifffahrt bis Basel gewährleisten zu können. Daher wurden in den Oberrhein zwischen 1906 und 1956 Buhnen und Leitwerke gebaut, welche eine Wassertiefe von mindestens 2 m in der Schifffahrtsrinne ermöglichten (Buck et al., 1993).



Abb. 5.9: Rheinlauf von Weisweil bis Marlen (Fließrichtung von links nach rechts). a) zeigt den Verlauf des Rheins vor der Rheinkorrektur, b) den nach Tullas Plänen ausgebauten Verlauf. Aus: Karte des Rheinlaufes von Basel bis zur Grossh. Hessischen Grenze. Blatt 2 in: Honsell, Max: Die Korrektur des Oberrheines von der Schweizer bis zur Gr. Hessischen Grenze.-Karlsruhe. 1885, Karlsruhe (Universitätsbibliothek Freiburg i. Br., 2006).

Der Oberrheinausbau im 20. Jahrhundert

Durch den Versailler Vertrag von 1919 erhielt Frankreich das alleinige Nutzungsrecht der Wasserkraft entlang der deutsch-französischen Grenzstrecke des Rheins (Versailler Vertrag, Teil. XII., Abschnitt I, Artikel 358 b) woraufhin auf französischer Seite, linksrheinisch, der Grand Canal d'Alsace (deutsch auch *Rheinseitenkanal*) mit vier Wasserkraftwerken (Tab. 5.3) errichtet wurde. Das erste Wasserkraftwerk im Oberrhein wurde in Kembs in Betrieb genommen. Der Aufstau wurde bereits durch das Wehr Markt (D) aufgebaut. Ab dem Wehr Markt sind der schiffbare Grand Canal d'Alsace

und der nicht schiffbare Restrhein baulich durch die *Rheininsel* voneinander getrennt. Der Bau der Staustufen Ottmarsheim und Fessenheim erweiterte den Grand Canal d'Alsace, der Bau des Kraftwerks Vogelgrün (französisch: Vogelgrun) schloss den Grand Canal d'Alsace ab. Das Kulturwehr Breisach (D) wurde am Ende des Restrheins errichtet, um den durch den verringerten Abfluss hervorgerufenen abgesenkten Grundwasserspiegel wieder anzuheben (Buck et al., 1993). Anschließend folgte der Bau der unterstrom liegenden Stauhaltungen mit Schlingenlösung bis Straßburg, wobei der schiffbare Kanal stets linksrheinisch auf französischer Seite liegt. Die vier Schlingen beinhalten jeweils eine Staustufe, dazwischen verläuft die Fahrrinne im Rhein (Klose, 2003). Es folgen zwei weitere Staustufen, die im Rhein selbst liegen, die sogenannte Flusslösung. Hier erfolgt keine Trennung von Kanal und Rhein. Unterhalb der letzten Staustufe Iffezheim ist die Sohlerosion derart hoch, dass hier seit 1978 durchschnittlich 166.000 m³/a (Zahlen basieren auf dem Zeitraum 1985-2006) Geschiebe künstlich hinzugegeben werden müssen (Frings et al., 2014).

Tab. 5.3: Wehre im Oberrhein, deren Lage, Baujahr und Fallhöhe.

	Wehr	Rhein-km	Baujahr ⁱ	Fallhöhe [m] ⁱⁱ
Kanallösung	Kembs	179,10	1932	13,3
	Ottmarsheim	193,64	1952	14,7
	Fessenheim	210,51	1956	15,2
	Vogelgrün	224,54	1959	11,6
Schlingenlösung	Marckolsheim	234,80	1961	12,5
	Rheinau	256,15	1963	12,3
	Gerstheim	268,60	1967	10,6
	Strasbourg	287,36	1970	10,9
Flusslösung	Gambsheim	308,83	1974	10,3
	Iffezheim	334,00	1977	10,3

ⁱ Klose, 2003, ⁱⁱ Buck et al., 1993

Baggerungen

In den Mündungsbereichen der größeren Nebenflüsse des Hochrheins fanden innerhalb des Betrachtungszeitraums regelmäßig Baggerungen statt. Abegg et al. (2013, S. 65) gibt für diese die in Tabelle 5.4 aufgeführten Volumina an. Es konnte nicht genau festgestellt werden, ob die Baggerungen noch in den Nebenflüssen stattfinden oder bereits im Mündungsbereich, also dem Hochrhein selbst. Für die vorliegende Betrachtung wurde davon ausgegangen, dass das Sediment den Hochrhein erreicht und erst dann durch Baggerung entnommen wird. Innerhalb der Stauhaltungen fanden zwischen 1991 und 2010 periodisch wiederkehrende Baggerungen nur in der Stauhaltung des Kraftwerks Schaffhausen statt. Hier wurden im Mittel jährlich 350 m³ Kies gebaggert (Schälchli et al., 2000). Durch die Ökozertifizierung des Kraftwerkes im Jahre 2003 ist der Betreiber verpflichtet, das „Geschiebe ins Unterwasser weiterzugeben“, was bedeutet, dass es sich seither um eine Umlagerung des Sediments, nicht aber um eine Entnahme handelt. Im Wehrbereich des Kraftwerks Augst-Wyhlen wurden jährlich 4.000 m³ „Schlamm“ abgebagert und entsorgt (Kleikämper & Gälli, 2007).

Eine größere Baggerung innerhalb der Stauhaltungen wurde nach dem Hochwasser 1999 oberstrom des Kraftwerks Schaffhausen durchgeführt. Der hier gelöste Kies wurde aber unterstrom wieder dem Hochrhein zugegeben, um die ökologisch wertvollen Kiesinseln entstehen zu lassen (mündlich, Bernhard von Felten, KW Schaffhausen 05.08.2013). Hier hat also eine Umlagerung, keine Entnahme stattgefunden.

Im Oberrhein gab es innerhalb des Betrachtungsraums drei Baggerungsschwerpunkte: an der Staustufe Strasbourg (zwischen Rhein-km 283 und 290), der Staustufe Gambsheim (Rhein-km 308) und in der Staustufe Iffezheim (Rhein-km 334). Alle weiteren Baggermengen wurden dem Rhein wieder zugegeben und wurden hier somit nicht als Baggerung, sondern als Umlagerung betrachtet und flossen nicht mit in die Berechnung ein. Unterstrom des Kulturwehres Breisach und somit unterstrom des Restrheins finden nach Hochwässern Baggerungen statt, bei denen Kies gebaggert wird, um die Schifffahrt weiter ermöglichen zu können (mündl. Hahnel, WSA Freiburg, 06.08.2013). Die

Baggerungen zur Freihaltung der Schifffahrtsrinne unterstrom des Kulturwehres Breisach haben innerhalb des Betrachtungszeitraums 1991-2010 nur einmal stattgefunden: Im Jahre 2006 wurden 1.000 t Sediment entnommen, dessen Kornverteilung nicht genau bekannt ist. Die Daten wurden für die Jahre 1990-2005 von Polschinski et al. (2008) in einem Bericht dokumentiert.

Tab. 5.4. *Baggermengen in den Mündungsbereichen der Nebenflüsse des Hochrheins (Abegg et al., 2013, S. 65). (re=rechtsrheinisch, li=linksrheinisch)*

Nebenfluss	Mündung Rhein-km		Baggerung [m³/a]
Biber	30,0	re	0
Durach	46,0	re	0
Thur	65,0	li	8.000-12.000
Töss	71,2	li	3.000-4.000
Glatt	79,1	li	500-1.000
Wutach	100,2	re	0
Aare	103,0	li	0
Alb	113,6	re	0
Murg	124,0	re	0-100
Sissle	127,5	li	500-780
Wehra	137,6	re	0
Ergolz	155,4	li	1.500-2.000
Birs	164,2	li	2.500-3.000
Birsig	167,0	li	0

Künstliche Sedimentzugaben

Da der Hochrhein einen wichtigen Lebensraum für kieslaichende Fische und andere Lebewesen darstellt, liegt es im Interesse der Behörden, den Geschiebehalt zu reaktivieren. Zu diesem Zwecke wurden Kiesbänke im Hochrhein eingebaut, die sich durch Hochwasser umlagern und so Lebensraum und Laichplatz für aquatische Lebewesen bilden sollten. Innerhalb des Betrachtungszeitraums war dies bei Ellikon am Rhein (unmittelbar oberstrom der Thurmündung, Rhein-km 63) im Jahre 2006 der Fall. Hier wurden 6.500 m³ Kies aus der Thurmündung entnommen und in Form von Kiesbänken in den Hochrhein eingebracht. Eine weitere Kiesschüttung gab es bei Zurzach (Rhein-km 94), bei der 1.100 m³ Kies eingebracht wurden. Das zugegebene Sediment wurde so zusammengestellt, dass es dem Geschiebe der Thur entspricht. Im staugeregelten Oberrhein gibt es keine künstlichen Sedimentzugaben.

5.3 Bestimmung der Sedimentquellen und -senken

5.3.1 Die Sedimentbilanzgleichung

Für den Fall, dass tektonische Sohlhöhenänderungen eine untergeordnete Rolle spielen, lautet die allgemeine Sedimentbilanzgleichung für den Fluss-schlauch des Rheins:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{se} + I_{di} + I_{ar} + I_{ab} + I_{do}) - (O_{do} + O_{se} + O_{dr} + O_{gr} + O_{fl} + O_{po} + O_{ab}) = \Delta S \quad (5.1)$$

mit I_{up} , dem Sedimenteintrag von oberstrom, I_{tr} , dem Sedimenteintrag aus Nebenflüssen, I_{se} , dem Sedimenteintrag aus Nebenarmen, I_{di} , dem Sedimenteintrag aus diffusen Quellen (zum Beispiel Ufererosion), I_{ar} , dem Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe, I_{ab} , dem Sedimenteintrag durch Abrieb von anderen Kornfraktionen (nur für die Fraktion Ton/Schluff), I_{do} , dem Sedimenteintrag von unterstrom, O_{do} , dem Sedimentausttrag nach unterstrom, O_{se} , dem Sedimentausttrag in Nebenarme, O_{dr} , dem Sedimentausttrag durch Baggerungen, O_{gr} , dem

Sedimentaustrag in Bühnenfelder, O_{fl} , dem Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen, O_{po} , dem Sedimentaustrag in Häfen, O_{ab} , dem Sedimentaustrag durch Abrieb, und ΔS , der Sohlhöhenänderung, wobei alle Bilanzterme in der Einheit Mt/a ausgedrückt werden.

Der Austrag aus dem Bodensee ist als „geschiebe- und schwebstofflos“ anzusehen (Abegg, 2013). Laut Bloesch (mündlich, Jürg Bloesch, Em. Rheinaubund, 05.08.2013) gibt es nicht einmal Schwebstoffe, die den Bodensee verlassen, da das Temperaturgefälle der Zuflüsse und des Bodensees zu hoch ist, sodass alle Schwebstoffe absinken (siehe auch Kapitel 4). Ein weiteres Indiz ist, dass es am ersten Wehr (Staustufe Schaffhausen) keinerlei Abrasionsspuren gibt (mündlich, Bernhard von Felten, KW Schaffhausen 05.08.2013). Für alle betrachteten Fraktionen sind die Einträge von oberstrom (I_{up}), in diesem Fall aus dem Bodensee, daher vernachlässigbar. Für den hier betrachteten staugeregelten Bereich ist die Nettoablagerung in Bühnenfeldern (O_{gr}) gleich null, da keine aktiven Bühnen vorhanden sind. Da keinerlei Meereseinfluss im Betrachtungsgebiet existiert, gibt es keinen Eintrag von unterstrom (I_{do}). Im betrachteten Gebiet sind Hafenanlagen vernachlässigbar, es findet also kein Austrag von Sediment dorthin (O_{po}) statt. Aus diesen Gründen kann die Sedimentbilanzgleichung für den vorliegenden Fall wie folgt reduziert werden:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{se} + I_{di} + I_{ar} + I_{ab}) - (O_{do} + O_{se} + O_{dr} + O_{ft} + O_{ab}) = \Delta S \quad (5.2)$$

Die Bestimmung der einzelnen Terme der reduzierten Bilanzgleichung für den Hochrhein und staugeregelten Oberrhein wird in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben. Die angenommene Sedimentdichte beträgt im gesamten hier betrachteten Bereich $2,65 \text{ t/m}^3$. Die Sedimentfraktionen feiner 0,063 mm (Schluff, Ton), 0,063 bis 2 mm (Sand), 2 bis 16 mm (Feinkies), 16 mm bis 63 mm (Grobkies) und 63 bis 125 mm (Steine) wurden getrennt voneinander bilanziert. Zur besseren Vergleichbarkeit zu anderen Studien des Rheins, die denselben Zeitraum betrachten, werden die Fraktionen Grobkies und Steine auch zusammengefasst dargestellt.

5.3.2 Sedimentaustrag nach unterstrom

Die Sohle der Stauhaltung bei Iffezheim wird aus wirtschaftlichen Gründen sehr gut beobachtet, woher bekannt ist, dass dort ausschließlich feines Material wie Ton/Schluff und Sand in Bewegung ist (vgl. Kapitel 5.2.2). Dies ist ein Hinweis darauf, dass gröbere Sedimente wie Fein- und Grobkies oder Steine nicht bis dorthin transportiert werden. Daher kann davon ausgegangen werden, dass ausschließlich Sand und Ton/Schluff nach unterstrom ausgetragen werden.

Der Sandgehalt bei der Messstelle Plittersdorf unmittelbar unterstrom von Iffezheim ist aufgrund von Schwebstoffvielpunktmessungen bekannt. Die Messstelle wird von der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (D) betrieben und 2- bis 4-mal pro Jahr beprobt (Astor, 2014). Zwischen 1991 und 2010 wurden so $0,077 \text{ Mt/a}$ Sand bei Plittersdorf berechnet (siehe Kapitel 7).

Der Eintrag der Fraktion Ton/Schluff in den frei fließenden Oberrhein, also der Austrag nach unterstrom aus dem hier betrachteten Gebiet, ist ebenfalls aufgrund von Messungen bekannt. Die Messstelle Plittersdorf (Rhein-km 340,2) des Schwebstoffdauermessnetzes der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) lieferte zwischen 1991 und 2010 eine durchschnittliche Ton/Schlufffracht von $0,845 \text{ Mt/a}$ (siehe Kapitel 7).

5.3.3 Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe

Aus ökologischen Gründen wurden im Betrachtungszeitraum 1991-2010 zwei größere Kiesschüttungen im Hochrhein vorgenommen (siehe Kapitel 5.2.4): Insgesamt wurden 7.600 m^3 Kies in den Hochrhein eingebracht. Das zugegebene Material bestand aus 40 % Feinkies (2-16 mm) und 60 % Grobkies (16-63 mm) (Abegg et al., 2013). Für die künstliche Zugabe ergeben sich nach

Umrechnung mit einer Lagerungsdichte von $1,98 \text{ t/m}^3$ für den Betrachtungszeitraum 300 t/a Feinkies und 450 t/a Grobkies, also jeweils unter $0,001 \text{ Mt/a}$.

5.3.4 Sedimentausttrag in Nebenarme

Sand

Der Oberrhein teilt sich nördlich von Basel (Rhein-km 174) in den Grand Canal d'Alsace (F) und den Restrhein (vgl. Kapitel 5.2.3). Der Eintrag von Sand in den Restrhein wurde berechnet, indem angenommen wurde, dass innerhalb des Grand Canal d'Alsace und des weiteren Verlaufs des staugeregelten Oberrheins keinerlei Sohlhöhenänderungen stattfinden und kein weiterer Eintrag aus Nebenflüssen stattfindet. Die Baggermassen in den Stauhaltungen sind bekannt. Der Austrag nach unterstrom ist ebenfalls bekannt (siehe oben). Aus dem Restrhein findet kein Austrag von Sand statt. Letzteres ist eine Annahme, die für die Bilanzierung der Sedimente im Restrhein getroffen wurde (siehe Kapitel 6). Abzüglich der gebaggerten Massen innerhalb des staugeregelten Oberrheins und aufgrund der Kenntnis der im Restrhein vorherrschenden Prozesse (Sedimentation in Bühnenfeldern, auf Vorländern und im Sohlbereich) konnte der daraus resultierende prozentuale Eintrag in diesen Nebenarm berechnet werden: 41 % des Sandes gelangen in den Restrhein, 59 % werden weiter im Grand Canal d'Alsace transportiert. Die Aufteilung ist in Abbildung 5.10 schematisch dargestellt. Der Eintrag in den Restrhein, also der Austrag aus dem Oberrhein O_{se} , betrug demnach im Betrachtungszeitraum $0,086 \text{ Mt/a}$.

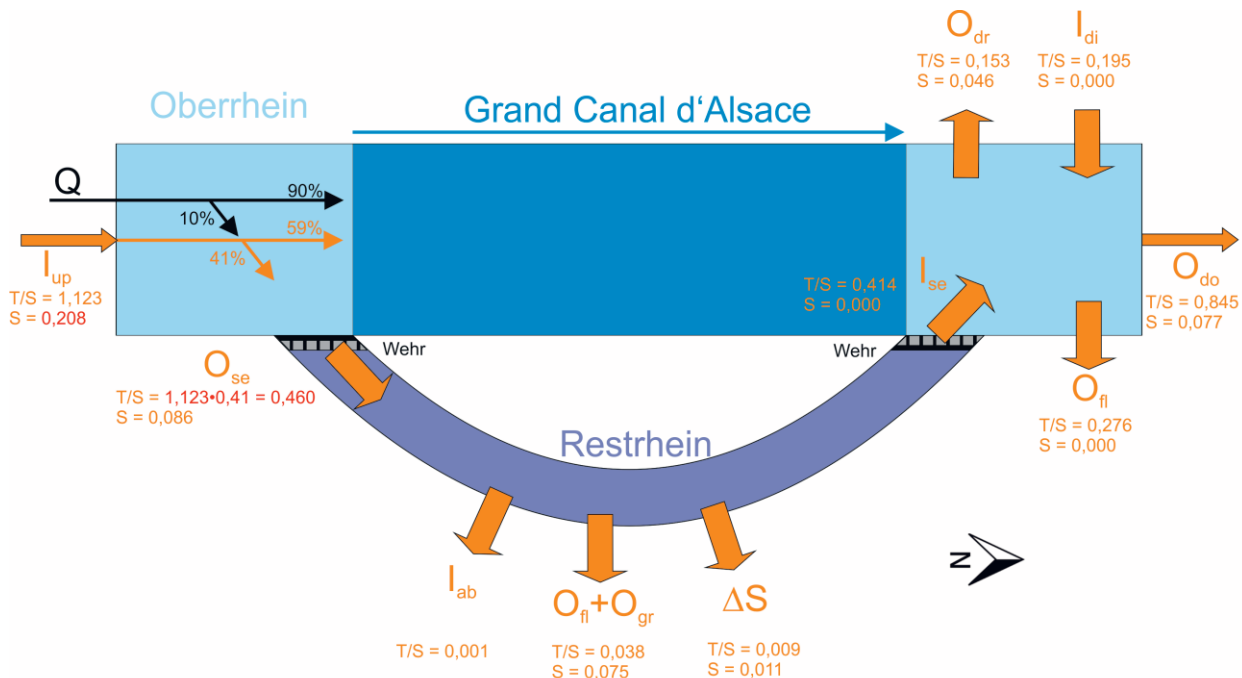


Abb. 5.10: Aufteilung der Fraktionen Ton/Schluff (T/S) und Sand (S) in Restrhein und Oberrhein.

Ton/Schluff

Für die Berechnung des in den Restrhein eingetragenen Ton/Schluffes wurde die Messstelle Weil am Rhein (Rhein-km 171,4) herangezogen. Die tägliche Messung der Schwebstoffe erfolgte in g/m^3 (Schwebstoffkonzentration c). Die Messstelle des Schwebstoffdaueressnetzes im Oberrhein wurde innerhalb des Betrachtungszeitraums mehrfach umgebaut: bis 19.05.1994 oberflächennahe Entnahme mittels Pumpe, bis 10.01.2006 sohlennahe Entnahme mittels Pumpe und ab 27.02.2008 oberflächennahe Entnahme durch Schöpfproben. Die Daten aus dem Zeitraum 1991-2010 wurden der SchwebDB der Bundesanstalt für Gewässerkunde entnommen (Datenexport Februar 2011). Der

Mittelwert der Schwebstoffkonzentration liegt nach Ausschluss der Fehlwerte (keine Aufzeichnung am Messtag) bei $33,2 \text{ g/m}^3$. Die tägliche Schwebstofffracht wurde durch die Multiplikation der gemessenen Schwebstoffkonzentration mit dem mittleren Abfluss des jeweiligen Tages multipliziert errechnet. Diese wurden für jedes Kalenderjahr im Betrachtungszeitraum summiert und der Mittelwert dieser Werte für den Zeitraum 1991-2010 bestimmt: Die mittlere Jahresschwebstofffracht bei Weil am Rhein lag bei $1,237 \text{ Mt/a}$. Nach Subtraktion des Sandgehaltes von $9,2 \%$ (Astor, 2014; Kapitel 3.2) folgt für Ton/Schluff eine Fracht von $1,123 \text{ Mt/a}$ bei der Messstelle Weil am Rhein. Die Fraktion Sand im Oberrhein teilt sich in 59% Grand Canal d'Alsace und 41% Restrhein auf (siehe oben). Es wurde angenommen, dass diese Aufteilung auch für die Fraktion Ton/Schluff gültig ist, somit wurden zwischen 1991 und 2010 insgesamt $0,460 \text{ Mt/a}$ in den Restrhein eingetragen (O_{se}).

Feinkies, Grobkies und Steine

Unter anderem Abegg et al. (2013) beschreibt die Strecke bei Basel als „geschiebelos“, auch Arnaud (2012) geht davon aus, dass ausschließlich „Feinmaterial“ (frz.: sédiments fins) über das Wehr Markt in den Restrhein gelangt. Der Austrag aus dem Oberrhein in den Restrhein der Fraktionen größer 2 mm beträgt demnach $0,000 \text{ Mt/a}$.

5.3.5 Sedimenteintrag aus Nebenarmen

Die aus Nebenarmen eingetragenen Sedimente entsprechen dem Austrag aus dem Restrhein, der in einer eigenen Sedimentbilanz berechnet wurde und in Kapitel 6 nachzuvollziehen ist. Es ergibt sich für 1991-2010 ein Eintrag in den Oberrhein aus Nebenarmen I_{se} von $0,000 \text{ Mt/a}$ Sand, $0,414 \text{ Mt/a}$ Ton/Schluff, $0,000 \text{ Mt/a}$ Feinkies, $0,002 \text{ Mt/a}$ Grobkies sowie $0,000 \text{ Mt/a}$ Steinen.

5.3.6 Sedimenteintrag aus Nebenflüssen

Sand

Der Sedimenteintrag von oberstrom, hier aus dem Bodensee, ist gleich null (siehe Kapitel 5.3.1). Ebenfalls bekannt waren die Sandfracht bei Plittersdorf am Ende des betrachteten Gebiets (siehe Kapitel 7), sowie die berechnete Stützstelle bei der Aufteilung des Oberrheins in Grand Canal d'Alsace und Restrhein (siehe Kapitel 5.3.4). Innerhalb des Hochrheins steigt die Sandfracht also bis hierher auf $0,208 \text{ Mt/a}$ an. Es wird davon ausgegangen, dass der Eintrag der Fraktion Sand in den Hochrhein ausschließlich über die Nebenflüsse erfolgt. Für die Bilanzierung bedeutet dies also, dass $0,208 \text{ Mt/a}$ Sand aus den Nebenflüssen stammen.

Im Oberrhein liegt eine andere Situation vor: Aufgrund der Grabenstruktur (vgl. Kapitel 5.2.2) liefern die Nebenflüsse des Oberrheins vernachlässigbare Mengen Sand, sie sedimentieren, bevor sie in den Oberrhein gelangen. Daher wird hier davon ausgegangen, dass der Eintrag von Sand durch Nebenflüsse im Oberrhein bis Iffezheim vernachlässigbar klein ist und damit zu null gesetzt werden kann.

Ton/Schluff

Der Austrag aus dem Bodensee im Betrachtungszeitraum beträgt $0,000 \text{ Mt/a}$ (siehe Kapitel 5.3.1). Aufgrund des Schwebstoffdauermessnetzes der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (D) sind die Schwebstoffkonzentrationen für mehrere Stationen bekannt. Die Messstellen im Hochrhein liegen bei Rekingen (Rhein-km 90) und beim Kraftwerk Albbruck-Dogern (Rhein-km 109) und liegen somit oberstrom und unterstrom der Mündungen von Wutach und Aare. Eine weitere Messstelle befindet sich bereits im Oberrhein bei Weil am Rhein (Rhein-km 171,4). Täglich werden hier Proben des oberflächennahen Wassers entnommen, aus denen die Schwebstoffkonzentration in g/m^3 ermittelt wird. Die Multiplikation mit dem mittleren Abfluss am entsprechenden Tag erlaubt die Berechnung der täglichen Fracht. Für die folgende Betrachtung wird, wie bereits in Kapitel 5.3.4, ein

Ton/Schluff-Anteil von 90,8 % zugrunde gelegt. Vor der Mündung von Wutach und Aare bei Rekingen (Rhein-km 90) beträgt die gemittelte Fracht Ton/Schluff im Betrachtungszeitraum 0,251 Mt/a, am Kraftwerk Albbruck-Dogern (Rhein-km 109) beträgt sie 0,768 Mt/a (Berechnung analog zu Kapitel 3.3). Bei Weil am Rhein (Rhein-km 171,4) liegt die mittlere Ton/Schlufffracht bei 1,123 Mt/a. Es wurde angenommen, dass die gesamte mitgeführte Fracht aus den Nebenflüssen stammt. Die bei Augst-Wyhlen gebaggerte Masse von durchschnittlich 0,002 Mt/a (siehe Kapitel 5.3.7) stammt ebenfalls aus Nebenflüssen, wurde also addiert. Für die Nebenflüsse, die zwischen Weil am Rhein und Iffezheim münden, wird vereinfachend angenommen, dass der Eintrag bei 0,000 Mt/a liegt. Die Nebenflüsse hatten somit von 1991 bis 2010 einen Eintrag von durchschnittlich 1,124 Mt/a Ton/Schluff in den Hochrhein und staugeregelten Oberrhein.

Feinkies, Grobkies und Steine

Schälchli et al. (2000) und Abegg et al. (2013) geben für die wichtigsten Nebenflüsse des Hochrheins einen potentiellen jährlichen Geschiebeeintrag an. Dieser beruht auf Angaben über Baggerungen, überschlagsmäßigen Geschiebefrachtberechnungen und Abschätzungen, die sich an anderen, bereits untersuchten Gewässern orientieren. Bezüglich der Kornverteilungen der Nebenflüsse lagen für die vorliegende Betrachtung keine genauen Informationen vor, weshalb sie aus Abbildung 5.11 und Abbildung 5.12 abgeschätzt wurden: Das in den Hochrhein eingetragene Geschiebe der Thur besteht zu 40 % aus Feinkies und zu 60 % aus Grobkies, was nach der nach Frings et al. (2011) berechneten Porosität einer Lagerungsdichte von 1,98 t/m³ entspricht (Abb. 5.12). Es wurde angenommen, dass der charakteristische Korndurchmesser d_m hier einem d_{50} entspricht. Außerdem wurde berücksichtigt, dass Geschiebematerial immer feiner als das Sohlmaterial selbst ist, wie andere Bilanzierungen bereits gezeigt haben. Alle weiteren Nebenflüsse wurden wie folgt abgeschätzt: 50 % Feinkies, 40 % Grobkies und 10 % Steine, mit der nach Frings et al. (2011) berechneten Porosität ergibt sich hier eine Lagerungsdichte von 2,02 t/m³. Das aus der Birs stammende Sediment ähnelt dem aus der Thur, weshalb die gleiche Kornverteilung angenommen wurde. Das aus der Aare kommende Sediment größer 2 mm wird spätestens durch das Kraftwerk Klingnau zurückgehalten und gelangt nicht in den Hochrhein (Schälchli et al., 2005). Es wird angenommen, dass in den Oberrhein mündende Nebenflüsse vernachlässigbare Mengen Fein- und Grobkies oder Steine liefern, da das Sediment aufgrund der vorhandenen Grabenstruktur nicht in den Oberrhein gelangt. Tabelle 5.5 enthält die so bestimmten Einträge der jeweiligen Nebenflüsse.

5.3.7 Sedimentaustrag durch Baggerungen

Feinkies und Grobkies

Im Bereich der Mündungen der größeren Nebenflüsse im Hochrhein wird, wie bereits erwähnt, regelmäßig gebaggert, die Massen sind Tabelle 5.6 zu entnehmen. Die Umrechnung von Volumen in Massen erfolgte analog zu Kapitel 5.3.6. Die Kornverteilung des gebaggerten Materials entspricht der des durch Nebenflüsse eingetragenen. Es wurde davon ausgegangen, dass die Baggerungen erst im Hochrhein selbst stattfinden, zu den meisten Baggerstellen konnten keine genauen Lageinformationen gefunden werden.

Neben den Baggerungen in den Mündungsbereichen der Nebenflüsse gab es Baggerungen in der Stauhaltung des Kraftwerks Schaffhausen im Rhein (Rhein-km 45), unmittelbar oberstrom des Wehres. Laut Kraftwerksbetreiber handelte es sich dabei immer um Kies (mündlich, Bernhard von Felten, KW Schaffhausen 05.08.2013). Da keinerlei Informationen über die Kornverteilung des Sediments existieren, wurde davon ausgegangen, dass sie mit dem der Thur vergleichbar ist (siehe oben). Daraus folgt, dass insgesamt 644 t/a Sediment im Betrachtungszeitraum in Wehrnähe entnommen wurden. Insgesamt wurden zwischen 1991 und 2010 0,000 Mt/a Feinkies (40 %, 390 t/a) und 0,001 Mt/a Grobkies (60 %, 590 t/a) entnommen.

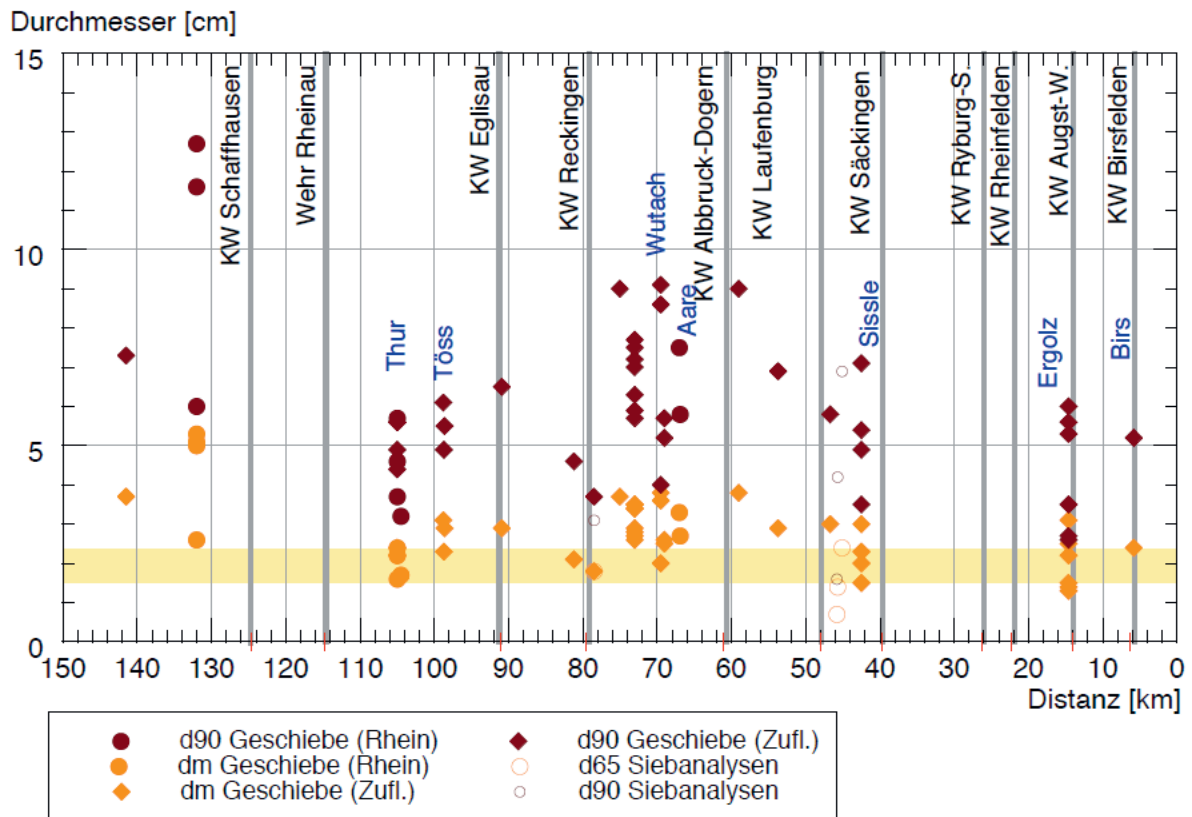


Abb. 5.11: Charakteristische Korndurchmesser von Sohlproben des Hochrheins und seiner Zuflüsse (Abegg et al., 2013, S. 36).

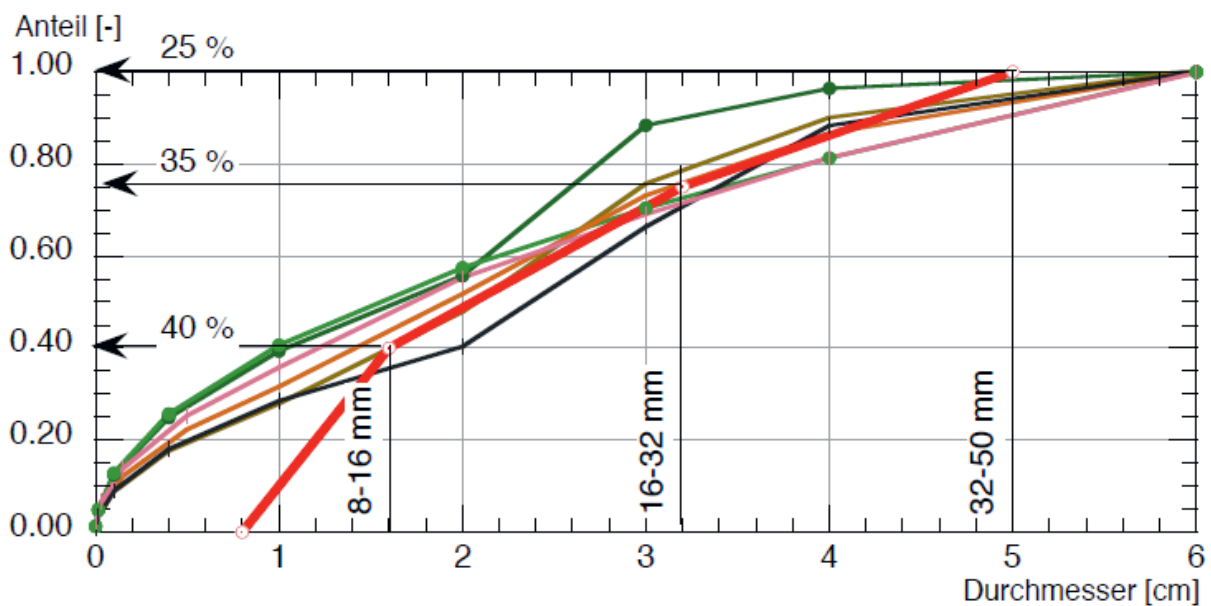


Abb. 5.12: Kornverteilungskurve von verschiedenen Proben des Geschiebes aus der Thur und für die Kiesschüttung bei Zurzach (rot) verwendeten Materials (Abegg, 2013, S. 69)

Tab. 5.5 Sedimenteintrag der geschiebeführenden Nebenflüsse des Hochrheins.

Nebenfluss	Mündung Rhein-km	Gesamteintrag [Mt/a]	2-16 mm [Mt/a]	16-63 mm [Mt/a]	> 63 mm [Mt/a]
Thur	65,0	0,01980	0,00792	0,01188	0,00000
Töss	71,2	0,00505	0,00253	0,00202	0,00051
Glatt	79,2	0,00202	0,00101	0,00081	0,00020
Wutach	100,2	0,00303	0,00091	0,00152	0,00030
Alb	113,6	0,00101	0,00030	0,00051	0,00010
Sissle	127,5	0,00162	0,00081	0,00065	0,00016
Ergolz	155,4	0,00404	0,00202	0,00162	0,00040
Birs	164,2	0,00606	0,00242	0,00364	0,00000
Wiese	169,2	0,00404	0,00202	0,00162	0,00040
Kleine Nebenflüsse	-	0,00222	0,00111	0,00089	0,00022

Sand und Ton/Schluff

Beim Kraftwerk Augst-Wyhlen (Rhein-km 156) wurde jährlich 4.000 m³ Sediment gebaggert. Es handelte sich hier um ein Gemisch aus Ton/Schluff und Sand. Die Kornverteilung ist für Ablagerungen im staugeregelten Oberrhein aufgrund einer Beprobung mit 30 Bohrkernen aus dem Jahre 2009 bekannt (die Daten wurden im Jahre 2013 durch eine weitere Untersuchung bestätigt) und wird hier vereinfachend angesetzt: 23 % Sand und 77 % Ton/Schluff mit einer Lagerungsdichte von 0,725 t/m³. Aufgrund dieser Verteilung und Dichte ergibt dies 0,002 Mt/a der Fraktion Ton/Schluff und unter 0,001 Mt/a Sand.

Im staugeregelten Oberrhein wurden innerhalb der Stauhaltungen Sand und Ton/Schluff gebaggert. Zwischen Kembs (Rhein-km 179,1) und Iffezheim (Rhein-km 334,0) wurden im Betrachtungszeitraum durchschnittlich 198.380 t/a gebaggert, was mit der oben angegebenen Kornverteilung 0,045 Mt/a Sand, sowie 0,153 Mt/a Ton/Schluff entspricht. Diese Daten basieren alle auf der von Polschinski et al. (2008) geschaffenen Grundlage und wurden auf den Betrachtungszeitraum hochgerechnet, unter der Annahme, dass sich die Baggermassen nach 2005 nicht mehr verändert haben. Aktuellere Daten lagen nicht vor. Im Grand Canal d'Alsace gebaggerte Massen wurden dem Rhein wieder zugegeben und stellen demnach keine Entnahmen dar.

Die in Kapitel 5.2.4 beschriebenen Baggerungen unterstrom des Kulturwehres Breisach hatten einen Umfang von einmalig 1.000 t (Daten zur Verfügung gestellt vom WSA Freiburg, B. Stinner, September 2013). Da es sich um eine derart geringe Masse im gesamten Zeitraum handelt, wird diese vernachlässigt.

Tab. 5.6: Sedimentbaggerungen in den Mündungsbereichen der Nebenflüsse in [Mt/a].

Nebenfluss	Mündung Rhein-km	Gesamtent- nahme [Mt/a]	2-16 mm [Mt/a]	16-63 mm [Mt/a]	> 63 mm [Mt/a]
Thur	65,0	0,01980	0,00792	0,01188	0,00000
Töss	41,2	0,00505	0,00253	0,00202	0,00051
Glatt	79,2	0,00101	0,00030	0,00051	0,00010
Sissle	127,5	0,00162	0,00081	0,00065	0,00016
Ergolz	155,4	0,00404	0,00202	0,00162	0,00040
Birs	164,2	0,00606	0,00242	0,00364	0,00000

5.3.8 Sedimenteintrag und -austrag durch Abrieb

Durch die Bewegung im Wasser verkleinern sich die Sedimentkörner in Fließrichtung immer weiter. Dieser Vorgang wird als Abrieb bezeichnet und wird hier für die Fraktionen Fein- und Grobkies sowie Steine betrachtet. Die durch Abrieb verloren gegangene und damit ausgetragene Masse dieser Fraktionen geht direkt über in die Fraktion Ton/Schluff, bildet hier also einen Eintrag.

Abegg et al. (2013) gibt für das Geschiebe der Thur einen Abrieffkoeffizienten $c = 0,012$ an und überträgt diesen Wert auf das Sediment des gesamten Hochrheins. Bei der geringen Eintragsmenge und den geringen Transportwegen berechnet sich der Abrieb für alle Fraktionen jeweils zu kleiner 0,000 Mt/a.

Im staugeregelten Oberrhein gibt es keinen Abrieb, da hier nur die Fraktionen Sand und Ton/Schluff in Bewegung sind.

5.3.9 Sedimenteintrag aus diffusen Quellen

Es stehen einige wenige Daten zu Schwebstoffeinträgen aus einem Kali-Bergwerk bei Fessenheim in den Oberrhein (genauer: Grand Canal d'Alsace) zur Verfügung. Im Mittel lagen die Einträge zwischen 1997 bis 2005 bei 0,195 Mt/a, mit stark abnehmender Tendenz (UAG SuBedO, 2008). Hier wird davon ausgegangen, dass dieser Wert für den gesamten Betrachtungszeitraum von 1991 bis 2010 übertragen werden kann und dass die gesamte eingetragene Fracht aus der Fraktion Ton/Schluff besteht.

5.3.10 Sedimentausttrag auf Überflutungsflächen

Die Ablagerung von Sediment auf Überflutungsflächen kann im Bereich des Hochrheins vernachlässigt werden, da die im Hochwasserfall überflutete Fläche sehr gering ist (siehe Kapitel 5.2.2). Es kann davon ausgegangen werden, dass die auf den Vorländern abgelagerten Massen innerhalb des Betrachtungszeitraums für jede Kornfraktion vernachlässigbar klein sind.

Es liegen keinerlei Informationen zur Sedimentation auf Vorländern beziehungsweise Überflutungsflächen vor, weshalb dieser Bilanzterm für die Fraktion Ton/Schluff als Schließungsterm für den staugeregelten Oberrhein dient. Es wurde vereinfachend angenommen, dass nur Ton/Schluff auf den Vorländern sedimentiert. Laut Gleichung 5.2 lagern sich 0,313 Mt/a Ton/Schluff auf den Überflutungsflächen des staugeregelten Oberrheins von Markt bis Iffezheim (Rhein-km 174,4 bis 334,0) zwischen 1991 und 2010 ab. Davon verbleiben 0,037 Mt/a bereits auf den Überflutungsflächen, die sich im Bereich des Restrheins befinden (nachzuvollziehen im Kapitel 6). Demnach beträgt der Sedimentausttrag auf Überflutungsflächen im hier betrachteten Gebiet für die Fraktion Ton/Schluff 0,276 Mt/a. Für alle weiteren Fraktionen beträgt dieser Bilanzterm 0,000 Mt/a.

5.3.11 Sohlhöhenänderung

Die Sohlhöhenänderung ΔS wurde, wie alle anderen Bilanzterme, für jede Fraktion betrachtet. Es existieren Anhaltspunkte, dass im Hochrhein in den Stauhaltungen Sedimentation vorherrscht, wie Differenzen in Talweglagen aus unterschiedlichen Jahren belegen (vgl. Anhang B.2). Im staugeregelten Oberrhein wird, wie bereits erwähnt, angenommen, dass keine Sohlhöhenänderung im Betrachtungszeitraum stattgefunden hat. Ausnahme bildet hier das aus dem Restrhein eingetragene Sediment, das unterstrom des Kulturwehres Breisach sedimentiert. Das bedeutet, dass ΔS für Fein- und Grobkies sowie für Steine als Schließungsterm funktionierte und aufgrund der Massenerhaltung berechnet wurde. Es wurde berechnet, dass zwischen 1991 und 2010 im gesamten Betrachtungsgebiet durchschnittlich je 0,005 Mt/a Feinkies, 0,007 Mt/a Grobkies, sowie 0,001 Mt/a

Steine zur Sohlhöhenänderung, also zur Erhöhung beigetragen haben. Für Sedimente kleiner 2 mm wird die Sohlhöhenänderung innerhalb des langen Betrachtungszeitraums zu null angenommen, da abgelagertes Sediment innerhalb der Staustufen durch Hochwasser wieder erodiert und weiter transportiert wird (Abegg et al., 2013). Für den staugeregelten Oberrhein wird die Annahme getroffen, dass die Sohlhöhenänderung aufgrund der regelmäßigen Baggerungen null ist.

5.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der fraktionierten Bilanzierung der Sedimente im Hochrhein ab Konstanz bis zum Ende des staugeregelten Oberrheins bei Iffezheim für den Zeitraum 1991-2010 sind in Abbildung 5.13 grafisch dargestellt. Die Nomenklatur entspricht der in Kapitel 5.3 eingeführten. Für jede Fraktion wurde eine eigene Bilanz erstellt, sowie zusätzlich die Bilanz für Sedimente größer 0,063 mm. Links ist jeweils der Eintrag der Sedimente, rechts der Austrag und in der Mitte die Sohlhöhenänderung dargestellt.

Tab. 5.7: Auflistung aller Ergebnisse für jede Quelle und Senke sowie für die einzelnen Kornfraktionen innerhalb des Betrachtungsgebietes von Konstanz bis Iffezheim in Mt/a, inklusive Abschätzung der Unsicherheiten.

Quelle/ Senke	Ton/ Schluff		Sand		Feinkies		Grobkies+Steine	
<i>I_{up}</i>	0,000	±0,002	0,000	±0,000	0,000	±0,000	0,000	±0,000
<i>I_{tr}</i>	1,125	±20%	0,208	±50%	0,021	±100%	0,027	±100%
<i>I_{ar}</i>	0,000	±0,000	0,000	±0,001	0,000	±0,001	0,000	±0,002
<i>I_{se*}</i>	0,414	±20%	0,000	±0,050	0,000	±0,002	0,002	±30%
<i>I_{di}</i>	0,195	±50%	0,000	±0,001	0,000	±0,001	0,000	±0,001
<i>I_{ab}</i>	0,000	±0,004	0,000	±0,000	0,000	±0,000	0,000	±0,000
<i>O_{ab}</i>	0,000	±0,000	0,000	±0,000	0,000	±0,002	0,000	±0,002
<i>O_{se*}</i>	0,460	±40%	0,086	±40%	0,000	±0,002	0,000	±0,003
<i>O_{do}</i>	0,845	±20%	0,077	±20%	0,000	±0,001	0,000	±0,001
<i>O_{dr}</i>	0,153	±20%	0,045	±20%	0,016	±100%	0,021	±100%
<i>O_{fi}</i>	0,276	±50%	0,000	±0,050	0,000	±0,000	0,000	±0,000
ΔS	0,000	±0,001	0,000	±0,002	0,005	±150%	0,008	±150%

* Übernahme aus Sedimentbilanz des Restrheins (siehe Kapitel 6)

Der Eintrag aller Fraktionen in das Betrachtungsgebiet ist gleich null. Der Sedimentaustrag nach unterstrom ist nur bei Sedimenten kleiner 2 mm größer null. Größte Quelle für alle Fraktionen sind die Nebenflüsse, größte Senke sind die Baggerungen, die insbesondere in den Mündungsbereichen im Hochrhein und in der Stauhaltung des Oberrheins stattgefunden haben.

Für die Darstellung der fraktionierten, kumulierten Frachten (Abb. 5.14) wurden einige Stützpunkte ausgewählt: Konstanz (Rhein-km 0,0), Messstelle Rekingen (Rhein-km 91,0), Messstelle Albruck-Dogern (Rhein-km 109), Basel (Rhein-km 169), Beginn und Ende des Restrheins (Rhein-km 174 und 224) sowie Iffezheim (Rhein-km 334). Die Fraktionen größer 2 mm sind aufgrund der Darstellungsart nicht sichtbar.

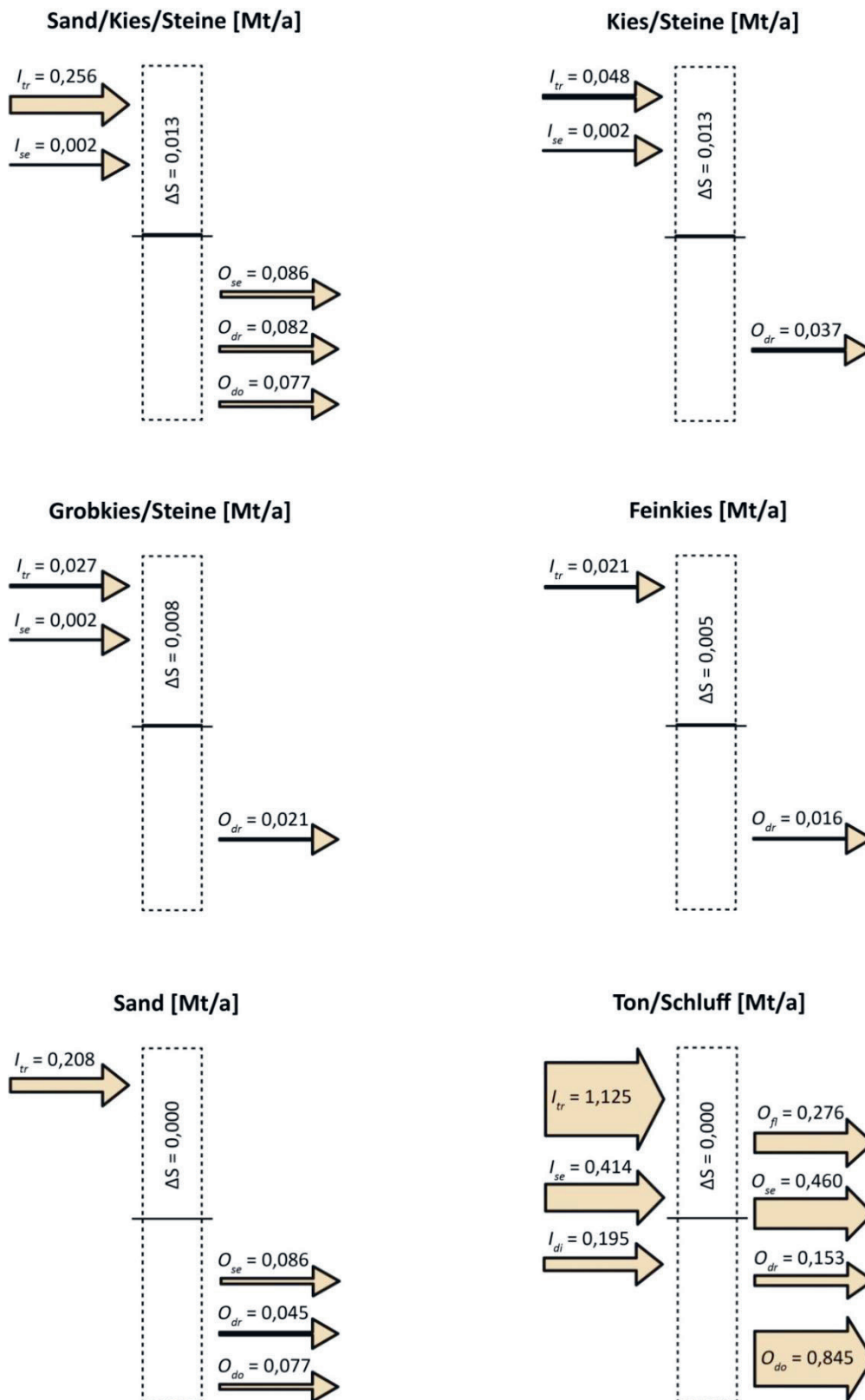


Abb. 5.13: Sedimentbilanz des Hochrheins ab Konstanz und des staugeregelten Oberrheins bis Ipfzheim für den Zeitraum 1991-2010 für die Fraktionen Ton/Schluff (< 0,063 mm), Sand (0,063 bis 2 mm), Feinkies (2 bis 16 mm), Grobkies (16 bis 63 mm), Steine (63 bis 125 mm) und alle Fraktionen > 0,063 mm. Zu beachten ist, dass sich bei $\Delta S \sim 0$ Anlandungen und Sedimenteinträge einerseits sowie Eintiefungen und Sedimentausträge andererseits in der Flussstrecke kompensieren; $\Delta S \sim 0$ ist somit kein Zeichen einer stabilen, undynamischen Sohle. Nomenklatur nach Kapitel 5.3.1.

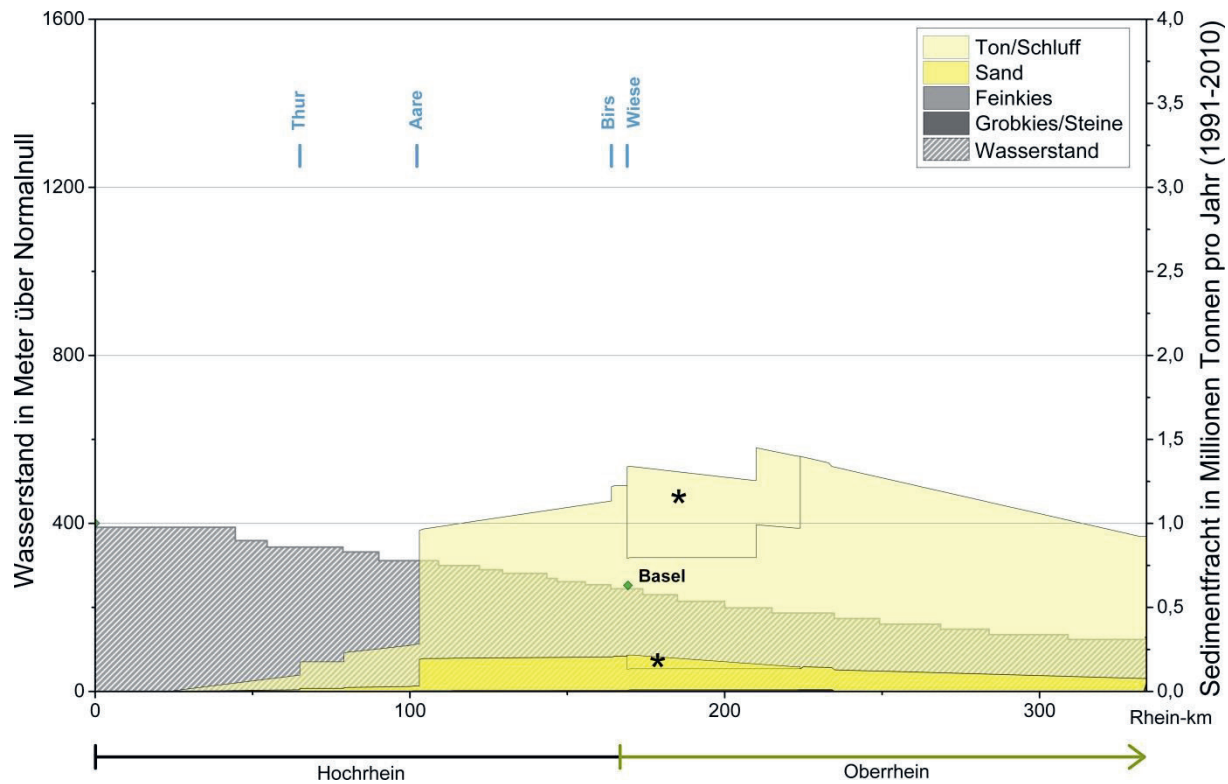


Abb. 5.14: Frachtlängsschnitt für den Hochrhein und staugeregelten Oberrhein.* = Beitrag Restrhein.

5.5 Diskussion

5.5.1 Unsicherheiten

Bei jeder Bilanz müssen Unsicherheiten angenommen werden, die je nach Herkunft der Daten unterschiedlich ausfallen; sie sind für das betrachtete Gebiet und den betrachteten Zeitraum in Tabelle 5.7 aufgelistet. Für Bilanzterme gleich null kann kein prozentualer Wert angegeben werden, daher wird eine pauschale Abschätzung angegeben. Die Unsicherheiten sind in dieser Betrachtung besonders hoch. Da die meisten hier angestellten Berechnungen nicht auf Messungen basieren, sondern teils Abschätzungen anderer Autoren sind, war es kaum möglich, genaue Aussagen zu treffen. Insbesondere die Aufteilung in Fraktionen beruht auf Abschätzungen und ist somit mit einer hohen Unsicherheit behaftet. Ausnahme in der Genauigkeit bilden die Fraktionen kleiner 0,063 mm. Diese basieren auf gut dokumentierten Messungen und weisen eine wesentlich geringere Unsicherheit auf. Im Folgenden wird auf die angenommenen Unsicherheiten der vorliegenden Betrachtung eingegangen.

Es scheint plausibel, dass aus dem Bodensee kein Sediment größer 0,063 mm in den Hochrhein gelangt. Vorstellbar ist aber, dass insbesondere im Hochwasserfall Ton/Schluff eingetragen (I_{up}) wird, weshalb hier pauschal ein Eintrag als Unsicherheit angesetzt wurde. Denkbar ist, dass der Großteil des eingetragenen Sediments innerhalb des Seerheins und Untersees bereits sedimentiert. Die unterschiedlichen Berechnungsweisen für den Eintrag aus den Nebenflüssen (I_{tr}) erfordern auch unterschiedliche Unsicherheiten: Für die Fraktion Sand ist die Unsicherheit etwas höher als bei Ton/Schluff, da die zugrunde gelegte Messstelle unterstrom und damit außerhalb des Betrachtungsgebietes liegt. Für die Fraktionen größer 2 mm ist die Unsicherheit sehr viel größer, da

die Berechnung auf Abschätzungen und Berechnungen anderer Autoren beruht, in denen Ereignisse wie Hochwasser eventuell nicht betrachtet wurden. Die Unsicherheiten bei den anthropogenen Zugaben (I_{ar}) liegen pauschal bei einem geringen Wert, da hier die zugrunde gelegte Kornverteilung leicht abweichend von der Realität sein kann. Der Eintrag aus dem Restrhein (I_{se}) ist bereits in einer anderen Bilanzierung berechnet worden, aus der die Unsicherheiten übernommen wurden (siehe Kapitel 6). Es ist wahrscheinlich, dass ein Eintrag von Sand aus dem Nebenarm Restrhein stattfindet, insbesondere da auch gröbere Sedimente den Restrhein über das Kulturwehr verlassen. Da diese Größe jedoch nicht bekannt ist, musste diese Annahme getroffen werden. Für Sand wurde daher ein pauschaler Wert für die Unsicherheit angegeben, der im Rahmen der möglichen Unterschätzung liegt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Unsicherheit bei der Fraktion Ton/Schluff recht gering ist. Für Fraktionen größer 2 mm liegt die Unsicherheit höher. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Austrag der Fraktionen größer 2 mm in den Nebenarm Restrhein (O_{se}) massenmäßig äußerst gering ist. Da es aber doch möglich erscheint, dass im Hochwasserfall Sediment größer 2 mm in den Restrhein eingetragen wird, wird eine geringe Pauschale angesetzt (siehe auch Kapitel 6). Es wird als plausibel erachtet, dass kein Austrag nach unterstrom (O_{do}) von Sediment größer 2 mm stattfindet; die Unsicherheit für kleinere Fraktionen ist recht gering, da die Berechnung auf guten Messdaten basiert. Die gebaggerten Massen (O_{dr}) wurden ebenso wie die Einträge aus den Nebenflüssen aufgrund von Berechnungen und Abschätzungen anderer Autoren errechnet, deren Datenherkunft und Güte unklar ist. Der Austrag auf Überflutungsflächen (O_{fl}) für Ton/Schluff beruht auf der Annahme, dass innerhalb des staugeregelten Oberrheins keine weiteren Ein- und Austräge stattfinden. Da dies eine Vereinfachung ist, musste hier eine recht hohe Unsicherheit angenommen werden. Für Sand wird eine pauschale Unsicherheit angegeben, da vorstellbar ist, dass auch eine geringe Masse Sand auf den Vorländern sedimentiert. Die Abwesenheit des Abriebs (I_{dr}/O_{dr}) wird als plausibel erachtet. Die Unsicherheiten für die aufgrund des Schließungsterms berechneten Werte sind mittels Fortpflanzungsanalyse ermittelt worden.

Die von Schälchli et al. (2000) und Abegg et al. (2013) durchgeführten numerischen Modellberechnungen zum Transport innerhalb der Stauhaltungen wurden mit einem Einkornmodell von 2 cm durchgeführt. In der Gesamtbetrachtung kann davon ausgegangen werden, dass grundsätzlich das Material größer 2 cm innerhalb der Stauhaltungen verbleibt und vernachlässigbare Massen bis nach unterstrom transportiert werden, da Schälchli et al. (2000) zum Beispiel erwähnen, dass die Sohle in der Stauhaltung Birsfelden feiner ist als die oberstrom liegende. Dies wird als Hinweis darauf gesehen, dass das Sediment nicht herausgetragen wird. Einzige Ausnahme bilden natürlich die Nebenflüsse Birs und Birsig, die erst nach der letzten Staustufe münden. Das von der Birs eingetragene Sediment wird gebaggert, um die Schifffahrtsrinne freizuhalten, der Birsig liefert laut Schälchli et al. (2000) nur wenig Geschiebe, das vor der Teilung in Restrhein und Grand Canal d'Alsace im Sohlbereich sedimentieren könnte.

Die Stauhaltung Rheinau wird von Schälchli et al. (2000) als nicht durchgängig beschrieben, trotzdem findet in der oberstrom liegenden Stauhaltung Erosion statt. Diese Tatsachen passen nicht zusammen, da unklar ist, wohin das erodierte Sediment geht. In der vorliegenden Bearbeitung wurde davon ausgegangen, dass das Wehr im Hochwasserfall durchgängig ist und innerhalb der Stauhaltung Sediment erodiert und weitertransportiert wird.

5.5.2 Validierung

Die Ton/Schlufffracht steigt innerhalb des Hochrheins aufgrund des Eintrages durch die Nebenflüsse an. Auffällig ist, dass dies nicht proportional zum steigenden Abfluss geschieht. In Abbildung 5.14 ist die Fracht der Fraktion Ton/Schluff aufgetragen. Die Fracht bei der Aaremündung verläuft nicht proportional zum Abfluss. Die Aare trägt im Verhältnis zum Abfluss wenig Schwebstoff in den Hochrhein ein. Die Aare als abflussreichster Nebenfluss des Hochrheins ($MQ = 559 \text{ m}^3/\text{s}$) ist in ihrer

unmittelbaren Nähe zur Mündung (Rhein-km 1,2) durch das Kraftwerk Klingnau aufgestaut (Schälchli et al., 2000). Der hinter dem Kraftwerk liegende Stausee verlandet seit seiner Einrichtung immer mehr durch „riesige Mengen Sand und Feinmaterial“ (OAKS, 2014). Dies erklärt, warum der Schwebstoffeintrag der Aare in den Hochrhein für die Größe derart gering ist. Unterstrom des Kraftwerks Albruck-Dogern münden nur noch kleinere Nebenflüsse in den Hochrhein. Diese liefern allerdings verhältnismäßig große Mengen Schwebstoff: Der Abfluss steigert sich um 51 m³/s (5 %), die Schwebstofffracht erhöht sich jedoch um 0,4 Mt/a (40 %) (Abb. 5.15). Es wird also angenommen, dass die Nebenflüsse im unteren Bereich des Hochrheins mehr Schwebstoff eintragen, als die oberstrom liegenden. Dies bestätigen auch die Schwebstoff-Abfluss-Beziehungen, die aufgrund einer einmaligen Untersuchung für das Jahr 1993 für Glatt und Birs erstellt werden konnten: Der Schwebstoffgehalt der Birs ist im gleichen Messjahr höher als der in der Glatt (siehe Abb. 5.15, Daten wurden zur Verfügung gestellt von A. Grasso, BAFU Schweiz, E-Mail vom 15.05.2014).

Im September 1993 wurden in der Birs und Glatt bezüglich der Kornzusammensetzung zwei Einzelmessungen bei mittlerem Abfluss jeweils in Mündungsnähe durchgeführt (BAFU, Messprotokolle, siehe Anhang B.3). Der Sandgehalt des Schwebstoffs in der Birs lag bei 5,3 %, in der Glatt bei 5,8 %. Diese beiden Nebenflüsse unterscheiden sich nicht nur in ihren hydrologischen Eigenschaften (siehe Kapitel 5.2.3), sondern vor allem in ihrer Lage. Die Mündungen liegen 85 km voneinander entfernt und entwässern sehr unterschiedliche Einzugsgebiete. Da sich die Sandgehalte aber trotzdem derart ähneln, kann angenommen werden, dass die Sandgehalte der Schwebstofffrachten aller Nebenflüsse bei mindestens 5 % liegen. Da keine weiteren Informationen zur Kornverteilung des Schwebstoffes im Hochrhein und seinen Nebenflüssen vorliegen, wurde die Annahme getroffen, dass der Sandgehalt des Schwebstoffes im deutschen Rheingebiet bei 9,2 % liegt (Astor et al., 2014). Für die Berechnung wurde davon ausgegangen, dass, je höher der Abfluss des Nebenflusses ist, desto höher ist die eingetragene Schwebstoffmenge. Der Schwebstoffeintrag wurde anteilig nach Abflusshöhe berechnet, um den bekannten Schwebstoffgehalt an den Messstationen zu erreichen. Die oberstrom von Rekingen mündenden Nebenflüsse liefern demnach zusammen 0,251 Mt/a Ton/Schluff und 0,025 Mt/a Sand in Form von Schwebstoff. Wutach und Aare liefern gemeinsam 0,517 Mt/a Ton/Schluff und 0,052 Mt/a Sand, die nachfolgenden Nebenflüsse unterstrom von Albruck-Dogern liefern zusätzliche 0,355 Mt/a Ton/Schluff und weitere 0,036 Mt/a Sand als Schwebstoff in den Hochrhein. Bei Basel beträgt die Fracht Ton/Schluff 1,123 Mt/a, Sand in Form von Schwebstoff 0,114 Mt/a.

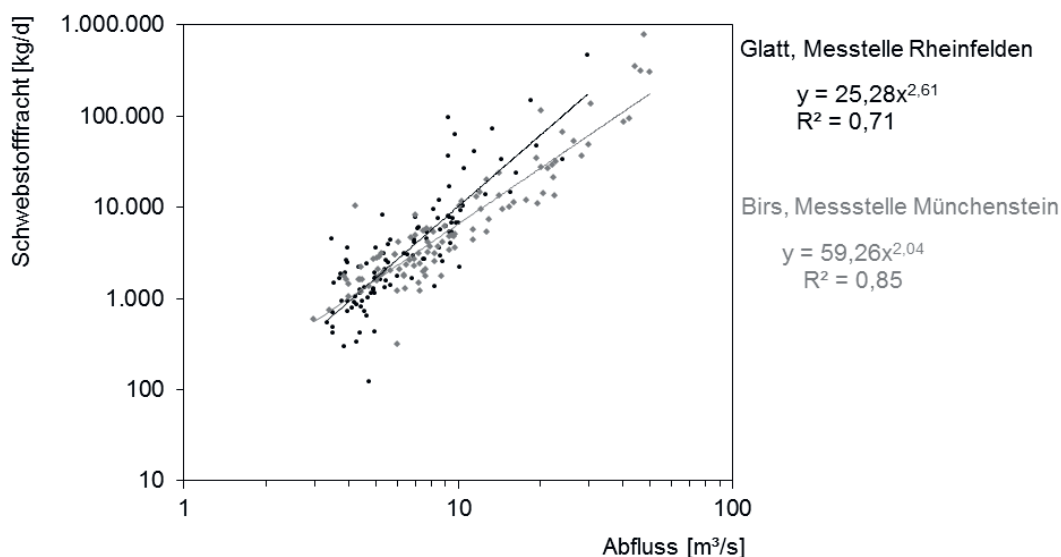


Abb. 5.15: Schwebstoff-Abfluss-Beziehung der Hochrhein-Nebenflüsse Glatt (Messstation Rheinfelden) und Birs (Messstation Münchenstein) im Jahre 1993, n = 104, Datengrundlage: BAFU, 1993.

Zur Validierung der Sandfracht konnte die Messstelle Weil am Rhein herangezogen werden: Die dort gemessene Schwebstofffracht wurde ausschließlich für die Berechnung der Ton/Schlufffracht genutzt. Grund dafür ist, dass davon ausgegangen wird, dass derartige Messstellen den Sandgehalt häufig unterschätzen, weshalb hier für die Berechnung der Sandfracht auf eine andere Methode zurückgegriffen wurde (siehe Kapitel 5.3.4). Berechnet man die Sandfracht für die Messstelle Weil am Rhein aber zum Vergleich über die Differenz des Ton/Schluffgehaltes zum gesamten Schwebstoffgehalt, so ergibt sich eine Sandfracht von 0,114 Mt/a. Die berechnete Fracht von 0,208 Mt/a Sand oberstrom der Teilung des Oberrheins in Grand Canal d'Alsace und Restrhein ist also plausibel und liegt im möglichen Bereich.

Empfehlungen

Eine höhere Datendichte verbessert die Güte einer Sedimentbilanz. Im vorliegenden Fall konnten gute Aussagen über die feinen Sedimente wie Ton/Schluff und Sand gemacht werden, da hier aufgrund von guten Messdaten im Hoch- und Oberrhein eine geringe Unsicherheit besteht. Für Sedimente größer 2 mm gibt es kaum Informationen. Daher sind Untersuchungen bezüglich des Transportes dieser Sedimente dringend erforderlich. Die Sediment-Durchgängigkeit der Staustufen, insbesondere im Hochrhein, aber auch die des Wehres Märkt, sollte untersucht werden, da nicht eindeutig geklärt werden konnte, ob Sediment größer 2 mm die Wehre passieren kann. Die Aufteilung des Sediments in Grand Canal d'Alsace und Restrhein ist nicht bekannt. Messungen bei verschiedenen Abflusszuständen in beiden Bereichen sind notwendig, um das System besser verstehen zu können. Durch derartige Untersuchungen kann die Qualität der vorliegenden Sedimentbilanz noch verbessert werden; sie sind daher unabdingbar.

5.6 Schlussfolgerungen

5.6.1 Sedimentquellen und -senken

Die wichtigste Quelle aller Fraktionen stellen im betrachteten Gebiet, das sich von Konstanz bis Iffezheim erstreckt, die Nebenflüsse dar. Da der Großteil des Sediments größer 2 mm direkt in den Mündungsbereichen der Nebenflüsse gebaggert wird, stellen Baggerungen die größte Senke im Gebiet dar. Einen Eintrag von oberstrom gibt es nicht. Ein Austrag nach unterstrom besteht einzig bei den Fraktionen kleiner 2 mm.

5.6.2 Sedimentfrachten

Innerhalb des Betrachtungsgebietes steigt die Fracht von Ton/Schluff von zuvor null aufgrund des Eintrags durch Nebenflüsse von 1,124 Mt/a bis Basel zunächst an. Im folgenden Abschnitt des staugeregelten Oberrheins sinkt die mittlere Jahresfracht zunächst ab, da der Rhein insbesondere bei Hochwasser einen großen Teil der Fracht in den Restrhein leitet, wo ein Teil verbleibt. Durch Vorlandsedimentation und Baggerungen sinkt die Fraktion weiter ab, bis schließlich 0,845 Mt/a nach unterstrom transportiert werden. Der Verlauf der Sandfracht zeigt ein ähnliches Bild: Auch die Sandfracht beginnt bei null und steigt aufgrund von Einträgen durch Nebenflüsse bis Basel an. Ein großer Teil des Sandes wird in den Restrhein eingetragen und verbleibt dort. Bis zum Ende des Betrachtungsgebietes sinkt die Fracht aufgrund von Baggerungen weiter. Die Fraktionen größer 2 mm, also Feinkies, Grobkies und Steine, haben keinen Eintrag von oberstrom. Da Einträge durch Nebenflüsse im Mündungsbereich gebaggert werden, verbleiben die Frachten bis zum Ende des Restrheins auf null. Der Nebenarm Restrhein trägt insgesamt 0,085 Mt/a Sediment in den Rhein ein.

Bis zum Ende des Betrachtungsgebietes sinken die Frachten wieder auf null zurück. Das Sediment trägt zur Sohlerrhöhung bei.

5.6.3 Unsicherheiten und Empfehlungen

Um die Unsicherheiten der vorliegenden Bilanz für eine Aktualisierung zu reduzieren, wird empfohlen, neue Daten zu erheben. Bisher ist nicht bekannt, inwieweit die Wehre im Hochrhein und Oberrhein für Sediment durchgängig sind. Dies sollte untersucht werden. Außerdem ist die Kenntnis der Aufteilung des suspendierten Sediments bei der Teilung des Rheins in Grand Canal d'Alsace und Restrhein von Nöten.

5.7 Literatur

- Abegg, J. (2001): Massnahmen zur Verbesserung des Geschiebehaushalts. Natur + Mensch Vol.1/2001.
- Abegg, J. Kirchhofer, A. & Rutschmann, P. (2013): Masterplan – Massnahmen zur Geschiebereaktivierung im Hochrhein. Zürich und Gümmenen. online unter www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/29940.pdf, letzter Aufruf: 12.11.2014.
- Arnaud, F. (2012): Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé: le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne). Doktorarbeit Université de Lyon, Lyon.
- Astor, B. Gehres, N. & Hillebrand, G. (2014): Von der Quelle zur Mündung, eine Sedimentbilanz des Rheins: Korngrößenanalyse von Schwebstoffproben am Rhein und seinen Nebenflüssen, BfG-1798. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Buck, W., Felkel, K., Gerhard, H., Kalweit, H., Malde, J. van, Nippes, K.-R., Ploeger, B. & Schmitz, W. (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen – Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft. Bericht I-11, Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), Lelystad, Niederlande.
- BAFU (2000), Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 1999. Bundesamt für Umwelt, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Schweiz.
- BAFU (2013): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2009. Bundesamt für Umwelt, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Schweiz.
- EDF (2011): Wasserkraftanlage Kembs - Maßnahmen und Bauarbeiten im Rahmen der Erneuerung der Betriebskonzession (Pressemappe), Électricité de France, Paris.
- Frings, R.M., Schüttrumpf, H. & Vollmer, S. (2011): Verification of porosity predictors for fluvial sand-gravel deposits. Water Resources Research, Vol. 47, W07525.
- Frings, R.M., Gehres, N., Promny, M., Middelkoop, H., Schüttrumpf, H. & Vollmer, S. (2014). Today's sediment budget of the Rhine River channel, focusing on the Upper Rhine Graben and Rhenish Massif. Geomorphology, 204:573-587.
- Gölz, E. (1980): Die Herkunft des Rheingeschiebes – ein geologisch-petrografischer Beitrag zum Geschiebeprobem (Bericht). Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz
- Gölz, E. (1984): Der Einfluss des Geschiebeabtriebs auf die Sohlenerosion des Oberrheins (BfG-0234). Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

- IKSR (2001): Atlas der Überschwemmungsgefährdung und möglichen Schäden bei Extremhochwasser am Rhein. Internationale Kommission zum Schutz des Rheins IKSR, Koblenz.
- KHR (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen – Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft. Bericht Nr. I-11 der KHR. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes KHR/CHR, Lelystad.
- Kleikämper, J. & Gälli, R. (2007): Sedimente am Hochrhein, Kurzbericht. BMG Engineering, Zürich.
- Klose, H. (2003): Grundwasserprobleme beim Ausbau von Wasserstraßen am Beispiel des Oberrheinausbau. Wasser- und Schifffahrtsamt Freiburg, Freiburg.
- LVA (2008): Topografische Karte 1:25 000. Nr. 8317/417 Jestetten, 6. Auflage, Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, Stuttgart.
- Löbert, T. (1996): Die Oberrheinkorrektion in Baden – Zur Umweltgeschichte des 19. Jahrhunderts. Mitteilungen des Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 193, Karlsruhe.
- UVM (2005): Internationales Bearbeitungsgebiet Hochrhein, Bericht zur Bestandsaufnahme. Ministerium für Umwelt und Verkehr, Baden-Württemberg. online: http://www.iksr.org/fileadmin/user_upload/Dokumente_en/Inventory_Parts/High_Rhine/hr_gesamtbericht.pdf, letzter Aufruf: 12.11.2014.
- OAKS (2014): Der Stausee – Verlandung. Ornithologische Arbeitsgruppe Klingnauer Stausee. <http://www.klingnauerstausee.ch/stausee/verlandung.php>, letzter Aufruf: 12.11.2014.
- Polschinski, M., Vollmer, S., Kempmann, K., Schittly, J.U. & Steimer, V. (2008): Sediment- und Baggertgutmanagement entlang des Oberrheins. In: Straßburg, S.K.Ü.D.A.D.O.Z.B.U. (ed.): WSD Südwest, BFG, WSA Freiburg, Electricité de France, Service de la Navigation de Strasbourg.
- Röhr, C. (2006): Geologische Übersichtskarte des Oberrheingrabens. www.oberrheingraben.de. Letzter Aufruf: 13.12.2014.
- Schälchli U., Abegg, J. & Hunzinger, L. (2000): Geschiebehaushalt Hochrhein. Nicht veröffentlichte Studie im Auftrag von Bundesamt für Wasser und Geologie und Regierungspräsidium Freiburg. Universität Karlsruhe, Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Zürich und Karlsruhe.
- Schälchli, U., Abegg, J. & Hunzinger, L. (2005): Geschiebe- und Schwebstoffproblematik in Schweizer Fließgewässern, Zürich
- Tittizer, T. & Krebs, F. (1996): Ökosystemforschung: Der Rhein und seine Auen – eine Bilanz, Springer-Verlag, ISBN: 3540589465.
- UAG SuBedO (2008): Sedimenttransport entlang des Hoch- und Oberrheins. Quantitative Untersuchungen. Unterarbeitsgruppe Sediment- und Baggertgutmanagement entlang des Oberrheins UAG SuBedO.

6. Sedimentbilanz des Restrheins

K.Banhold, R.M. Frings, H. Schüttrumpf

6.1 Einleitung

Der Rhein stellt Wasser für Landwirtschaft, Industrie und private Haushalte bereit, führt Abwasser ab, beherbergt zahlreiche Naturschutzgebiete und besitzt einen großen Freizeitwert. Aufgrund seiner vorteilhaften Abflusseigenschaften ist der Rhein zu einer der wichtigsten binnenländischen Wasserstraßen Europas geworden. Er verbindet den Hafen von Rotterdam mit dem Hinterland. Zur Verbesserung der Schiffbarkeit entschieden Flussbauingenieure im 19. Jahrhundert, den Rhein zu verengen und zu begradigen. Der Restrhein bildet einen Nebenarm des Oberrheins, weshalb er hier gesondert betrachtet wird. Er ist nicht schiffbar, weshalb Erosions- und Sedimentationsprozesse hier diesbezüglich keinen Schaden anrichten. Eine hohe Dynamik ist aus ökologischen Gesichtspunkten im Restrhein sogar erwünscht: Die Bildung von Kiesinseln ist beispielsweise bedeutend für kieslaichende Fische. Zum Verständnis von Erosions- bzw. Sedimentationsprozessen sind Antworten auf Fragen wie „Wie viel Sediment wird flussabwärts transportiert?“, „Welche Korngrößenfraktion ist primär in Bewegung?“, „Welcher Transportprozess ist vorherrschend (Schwebstoff- oder Geschiebetransport)?“, „Woher stammt das transportierte Material?“ und „Wohin geht das erodierte Material?“ elementar. Diese Fragen lassen sich mithilfe der Erstellung einer Sedimentbilanz beantworten.

Das Ziel dieser Teilstudie war die Erstellung einer Sedimentbilanz für den Restrhein (Abb. 6.1) für den Zeitraum 1991-2010. Dabei wurden die Sedimentfraktionen feiner 0,063 mm (Ton/Schluff), 0,063 bis 2 mm (Sand), 2 bis 16 mm (Feinkies), 16 mm bis 63 mm (Grobkies) und 63 bis 125 mm (Steine) getrennt voneinander bilanziert. Es wurde eine Recherche basierend auf bereits vorhandener Literatur durchgeführt. Hier waren insbesondere die Dissertation von Arnaud in französischer Sprache aus dem Jahre 2012 und eine Veröffentlichung der Universität Braunschweig, die auf zwei nicht veröffentlichten Berichten basiert (Dittrich, 2013), von Bedeutung. Auch wurde der Artikel von Arnaud aus dem Jahr 2015 herangezogen. Die Literatur wurde auf Plausibilität geprüft, miteinander verglichen und daraus entnommene Daten wurden für diesen Bericht weiterverarbeitet und interpretiert. Des Weiteren wurden Abflussdaten der Messstationen Rheinweiler im Restrhein zur Berechnung herangezogen.



Abb. 6.1: Restrhein bei Markt, Rhein-km 174. Rechts: deutsches Ufer, links: Rheininsel, Blick vom Wehr Markt in Fließrichtung (Foto: Frings, 08/2013).

6.2 Gebietsbeschreibung

6.2.1 Lage

Das Untersuchungsgebiet liegt im südlichen Oberrhein und wird im Folgenden Restrhein, in der Literatur auch Altrhein, genannt. Es handelt sich bei dem betrachteten Teilabschnitt um einen Nebenarm, der parallel zum schiffbaren Grand Canal d'Alsace (links, auf französischer Seite) verläuft. Bei Markt (Rhein-km 174) teilt sich der Oberrhein in den Grand Canal d'Alsace (deutsch auch Rheinseitenkanal) auf der linken, französischen Seite, und den Restrhein auf der rechten Seite. Der Restrhein bildet die Grenze von Deutschland und Frankreich. Bei Breisach (D, Rhein-km 224) vereinen beide Teile sich wieder. Im Grand Canal d'Alsace befinden sich vier Wasserkraftwerke. In den Restrhein wird eine gewisse Mindestwassermenge eingeleitet und im Hochwasserfall ein höherer Abfluss, um den Kanal zu entlasten. Der Restrhein überwindet einen Höhenunterschied von 44,53 m auf 46,4 km, was einem Gefälle von etwa 1,0 ‰ entspricht (Dittrich et al., 2012). Die Breite des Niedrigwasserbettes schwankt zwischen 100 und 125 m.

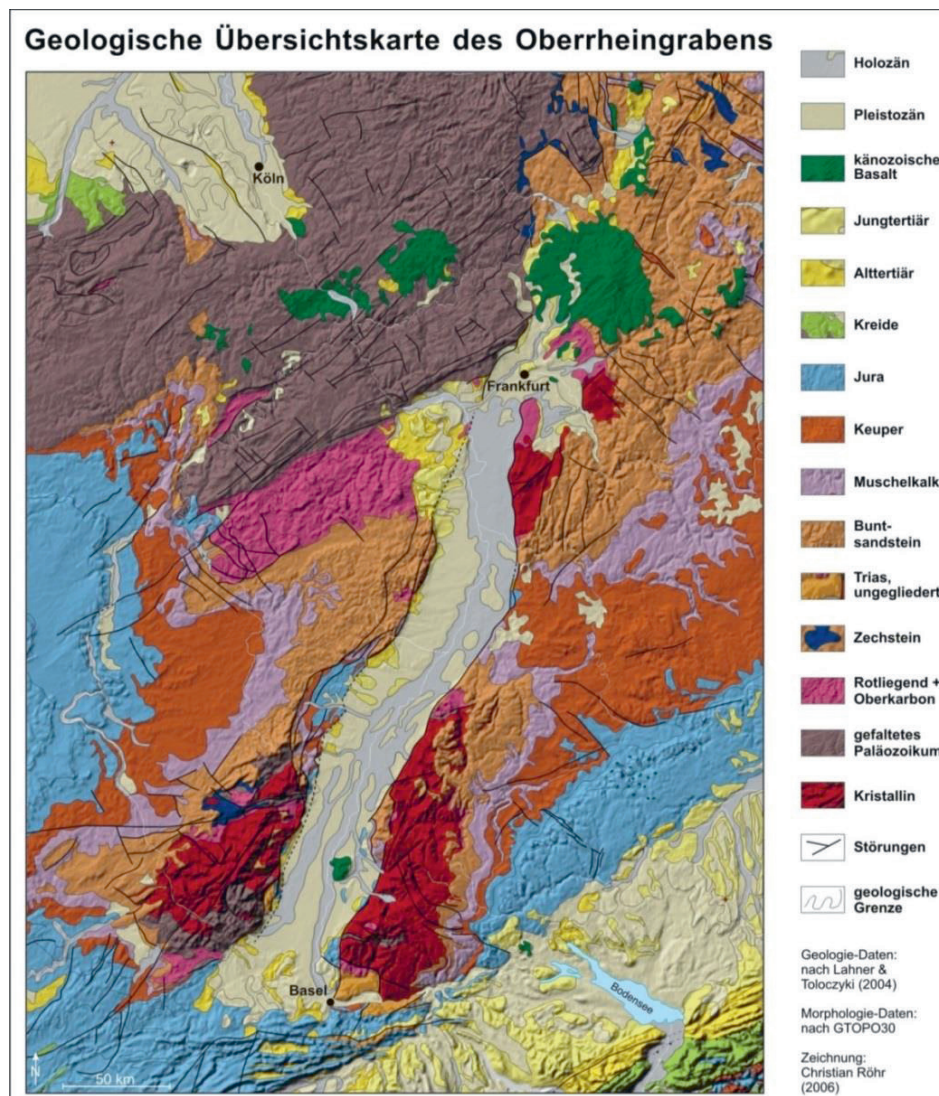


Abb. 6.2: Geologische Übersichtskarte des Oberrheingrabens (Röhr, 2006).



Abb. 6.3: Zwei Ansichten der Isteiner Bucht (circa km 180) vor der Oberrheinkorrektion von Peter Birmann (1758-1844): links) Blickrichtung nach unterstrom (oben) (Witschel and Kerkhof, 2002.), rechts) Blickrichtung nach oberstrom (geschätzt 1819) (UM BW, 2013).

6.2.2 Geologie und Sedimentologie

Geologische Entwicklung

Der Restrhein befindet sich im Oberrheingraben (siehe Abb. 6.2). Der Oberrheingraben ist ein klassisches Beispiel für eine Grabenstruktur. Die Breite des Grabens beträgt 30-40 km und seine Flanken erheben sich ungefähr 450-500 m über das Gelände. Infolge von Absenkungen im Quartär kam es zu einer Ansammlung von Rheinsediment (Sand und Kies), lokal mit einer Mächtigkeit von bis zu 300 m. Aus diesem Grund ist das Flussbett innerhalb dieses Bereichs größtenteils alluvial.

Der südliche Teil des Oberrheins war etwa bis zum heutigen Rhein-km 310 vor den anthropogenen Eingriffen durch Furkation geprägt (Abb. 6.3) und aufgrund der weit in das Land hineinreichenden Überschwemmungsflächen nicht so stark besiedelt wie der mit Mäandern durchzogene nördliche Teil.

Flusssohle

Im Restrhein ist die Sohle durch eine natürliche Deckschicht, häufig auch *Abpflasterung* genannt, vor Erosion geschützt. Patt und Gonsowski (2011) bezeichnen eine Deckschicht als die oberste Schicht der Sohle, wenn sie sich ausschließlich aus groben, in Fließrichtung schuppenartig gelagerten Komponenten zusammensetzt (Abb. 6.4). Diese Schicht entsteht durch selektive Erosion: Das feinere Material wird bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten erodiert, das grobe Material kann nicht transportiert werden und bildet so die Sohloberfläche. Das darunterliegende Material ist wesentlich feiner und durch die Deckschicht vor Erosion geschützt, solange die kritische Strömungsgeschwindigkeit nicht überschritten und die Deckschicht aufgerissen und erodiert wird.

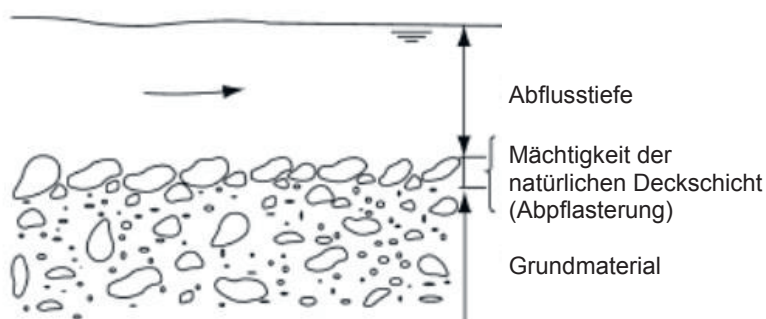


Abb. 6.4: Schnitt durch eine Gewässersohle mit Deckschicht (Patt and Gonsowski, 2011).

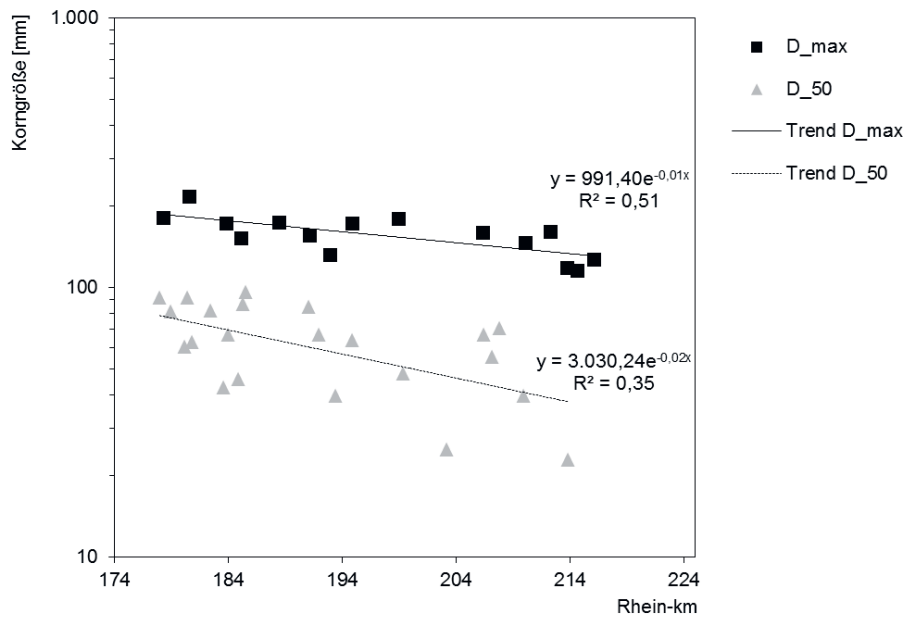


Abb. 6.5: D_{max} und D_{50} für den Restrhein (nach Dittrich, 2012).

Im Bereich des Restrheins hat sich eine äußerst erosionsstabile Deckschicht ausgebildet mit einem medianen Korndurchmesser D_{50} zwischen 23 mm und 92 mm und maximalen Korndurchmessern D_{max} von 100 mm bis 220 mm. Die Werte des D_{50} variieren stark innerhalb des Restrheins. In Abbildung 6.5 sind die charakteristischen Korndurchmesser D_{50} und D_{max} der Deckschicht dargestellt: Sie nehmen im Laufe des Fließweges ab. Dittrich (2012) beschreibt markant hohe Anstiege der Korndurchmesser im Bereich der Rückführungen der Staustufen (vgl. Abb. 6.9).

Während eines Hochwassers im Mai 1999 war die Sohlschubspannung im Restrhein so hoch, dass die Deckschicht lokal aufgerissen wurde und das Material an anderer Stelle wieder abgelagert wurde. Dadurch entstanden Kiesbänke beziehungsweise bereits bestehende Kiesbänke konnten so erweitert werden. Diese sind vor Ort gut von den älteren Kiesbänken zu unterscheiden, da sie einen jüngeren Baumbestand haben (mündl. Hahnel, WSA Freiburg, 06.08.2013). In Abbildung 6.1 kann man diesen jungen Baumbestand auf einer in das Rheinbett hineinragenden Kiesinsel gut erkennen (Bildmitte).

Buhnenfelder und Vorländer

Durch den Bau des Grand Canal d'Alsace (siehe Kapitel 5.2.4) liegen im Restrhein zwei verschiedene Ausprägungen der Vorländer vor: Rechts des Rheins, auf deutscher Seite liegend, stehen Wälder mit etwa 50 Jahre altem Kiefernbestand, Gebüsch und Trockenrasen. Außerdem gibt es zahlreiche Baggerseen und aktive Kiesgruben. Die Waldbereiche wurden in vergangener Zeit häufig ausgelichtet oder kahl geschlagen. Das linke Ufer liegt auf französischer Seite und bildet die 65 m bis 1.055 m breite Begrenzung (auch *Rheininseln*) des Grand Canal d'Alsace und des Restrheins. Der hier anstehende Wald ist dichter, da er als Naturschutzgebiet nicht bewirtschaftet wird. Die Buhnenfelder sind bis zu zwei Meter aufsedimentiert und zum Teil stark bewachsen.

In Flussnähe haben sich sandige Ablagerungen gebildet, in weiterer Entfernung vorwiegend schluffige. Abbildung 6.6a lässt erkennen, dass sich der Sand in Form von Uferwällen (auch *Rehnen* genannt) absetzt. In Ufernähe (Abb. 6.6b) hat sich sehr grober Kies abgelagert, aber auch (eckigere) Wasserbausteine, die wahrscheinlich an anderer Stelle abgebrochen sind (zum Beispiel aus der Uferbefestigung beim Wehr Märkt, vgl. Abb. 6.1).

Bei Untersuchungen der Ablagerungen in den Buhnenfeldern hat Dittrich (2012) eine relativ homogene Struktur mit überwiegend feinsandigen Anteilen festgestellt. Im Mittel haben sich in den

vergangenen 40 Jahren ein bis zwei Meter mächtige Sandablagerungen gebildet, was einer Ablagerungsrate von 2,5 cm/Jahr entspricht.

Dittrich (2012) hat aufgrund von Messungen festgestellt, dass sich das Sediment in den tiefen Schichten der Vorländer, also nicht im innerhalb des Betrachtungszeitraum abgelagerten Material (Probenahmestellen: Baggerseen Grißheim bei km 207,5 und Hartheim bei km 216), nur wenig vom Sediment im Restrhein (Probenahmestelle: km 210,5) unterscheidet, die Sieblinien haben in etwa den gleichen Verlauf: Feine Sande und große Steine dominieren, die mittleren Kornfraktionen sind stark reduziert.



Abb. 6.6: a) Sandablagerungen (hinter dem Bewuchs in Blickrichtung befindet sich der Rhein) und b) Kies im Uferbereich im Restrhein. Bei Bad Bellingen, ca. Rhein-km 190,5, rechtsrheinisch (Fotos: Frings, 08.2013).

6.2.3 Hydrologie

Der Mindestabfluss im Restrhein, der über das Wehr Markt gesteuert wird, betrug bis Ende 2010 für die Wintermonate Dezember bis Februar 20 m³/s und für die Sommermonate 30 m³/s. Mittlerweile wurde eine „Erhöhung der für die Wassertiere und -pflanzen erforderlichen Mindestwassermenge“ (EDF, 2011) beschlossen und ist seit dem 15. Dezember 2010 in Kraft: Seither beträgt der Mindestabfluss von November bis März 52 m³/s, im April, Mai, September und Oktober 54-80 m³/s und im restlichen Jahr 95-150 m³/s. Für den Betrachtungszeitraum 1991-2010 ergeben sich die in Tabelle 6.1 gelisteten Abflüsse.

Tab. 6.1: Hydrologische Kenndaten für die Messstation Rheinweiler, Rhein-km 186,18 (Restrhein). Daten basieren auf gemittelten Tageswerten (WISKI, Stand: 08.07.2013).

Abfluss Restrhein	
	[m ³ /s]
NNQ ₁₉₉₁₋₂₀₁₀	8
MQ ₁₉₉₁₋₂₀₁₀	91
HHQ ₁₉₉₁₋₂₀₁₀	3.430

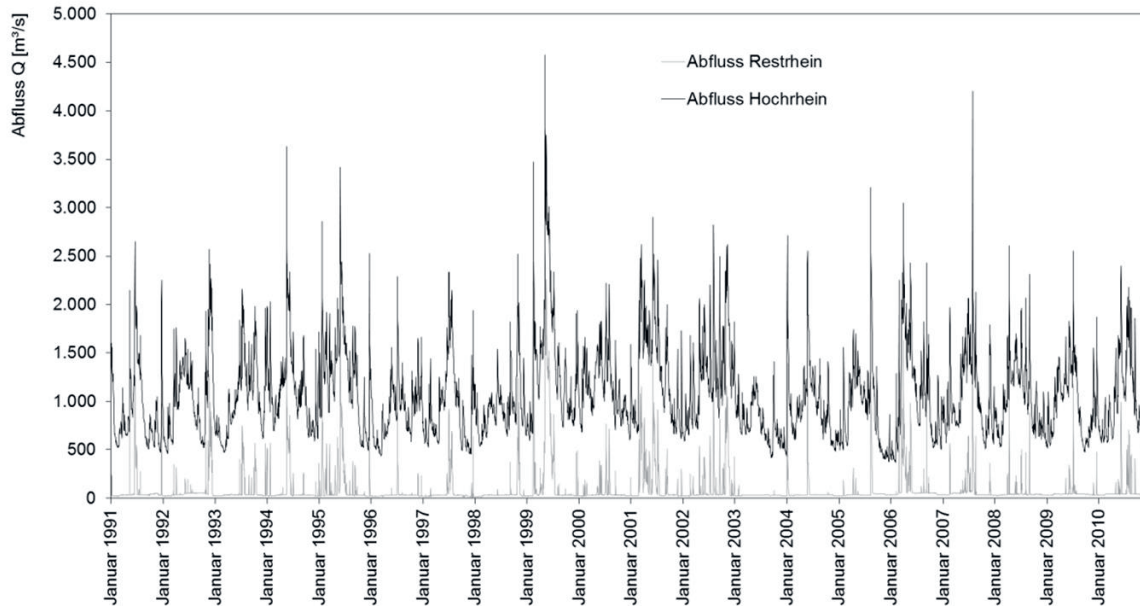


Abb. 6.7: Abfluss Hochrhein (Basel) und Restrhein (Rheinweiler) für die Jahre 1991 bis 2010.

In den Restrhein münden zwei Nebenflüsse: die Kander bei km 175,3 ($1,17 \text{ m}^3/\text{s}$; HVZ, 2013) und der Hodbach (inklusive Feuerbach; Abfluss unbekannt) bei km 181,3. Neben diesen Nebenflüssen existieren noch kleinere Hochwasserentlastungsanlagen, die in den Restrhein münden, deren Abfluss nicht bekannt war. Der Abfluss im Restrhein wird an der Messstation Rheinweiler aufgezeichnet (km 186,18, im folgenden Messstation Restrhein genannt) und betrug im Jahresmittel $91 \text{ m}^3/\text{s}$ (Mittel der Tagesmittelwerte 1991-2010).

Im Mai 1999 gab es im Bereich des Hoch- und Oberrheins ein außergewöhnliches Hochwasser (häufig als *Pfingsthochwasser* bezeichnet). Der Abfluss im Hochrhein erreichte am 12. Mai 1999 einen historischen Höchstwert von $5.090 \text{ m}^3/\text{s}$ (Tagesspitze), im Restrhein lag der höchste Abfluss in dieser Zeit dabei bei $3.650 \text{ m}^3/\text{s}$ (höchster Tageswert, WISKI, Stand: 08.07.2013). Ein weiteres Hochwasser im Betrachtungszeitraum 1991 bis 2010 gab es im August 2007. Hier lag der höchste Abfluss im Hochrhein bei $4.810 \text{ m}^3/\text{s}$ (BAFU, 2013, S. 236), im Restrhein lag er bei $3.390 \text{ m}^3/\text{s}$ (WISKI, Stand: 08.07.2013). Die Abflüsse der Jahre 1991 bis 2010 für den Restrhein und den Hochrhein sind in Abbildung 6.7 aufgetragen.

6.2.4 Anthropogene Eingriffe

vor 1900

Durch gezielte Verlandung in den Überschwemmungsgebieten hat man bereits im 18. Jahrhundert versucht, im Bereich des Oberrheins Land zu gewinnen. Die größten anthropogenen Eingriffe im Bereich des Oberrheins wurden im Auftrag der badischen Regierung zwischen 1817 und 1876 nach den Plänen von Johann Gottfried Tulla durchgeführt (Löbert, 1996); sie werden heute allgemein als Oberrheinkorrektur bezeichnet. Die Pläne von Tulla sahen die Unterbindung der Furkationen sowie den Durchstich der Mäander vor. Es sollte insgesamt nur ein einheitliches Flussbett ohne Verzweigungen oder Nebenarme geben, insgesamt also eine Laufverkürzung. Das neu gestaltete Flussbett, welches Abflüsse bis zu $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ abführen konnte, hatte eine Breite von 200 bis 240 m (Buck et al., 1993). Die auftretenden Hochwasser während der Baumaßnahmen waren eingeplant und für den Bau dienlich: Die durch die Einschnürung erhöhte Sohlschubspannung rief eine Tiefenerosion hervor, wodurch sich das Bett eintiefte. Die zuvor vorherrschende Seitenerosion wurde unterbunden. Die Tieferlegung der Flusssohle zog eine gewollte Senkung des Grundwasserspiegels mit sich, was

zusätzlich vor Überschwemmungen schützte. Die Erosion tiefte das Bett allerdings weiter ein, als zuvor geplant. Weitere Umbaumaßnahmen waren nötig, um weiterhin die Schifffahrt bis Basel gewährleisten zu können. Daher wurden in den Oberrhein zwischen 1906 und 1956 Buhnen und Leitwerke gebaut, welche eine Wassertiefe von mindestens 2 m in der Schifffahrtsrinne ermöglichten (Buck et al., 1993). Bei Istein haben sich aufgrund der erhöhten Sohlschubspannungen und der damit verbundenen Tiefenerosion nach der Oberrheinkorrektur die *Isteiner Schwellen* (km 178) gebildet. Der Fels trat Anfang des 20. Jahrhunderts hervor, nachdem das darüberliegende Sohlmaterial erodiert war. Im Restrhein ist der Fels heute sichtbar und liegt aufgrund des geringen Wasserspiegels bei Normalabfluss frei (Abb. 6.8).



Abb. 6.8: Die Isteiner Schwellen, ca. Rheinkilometer 178 (Kühn, 2014).

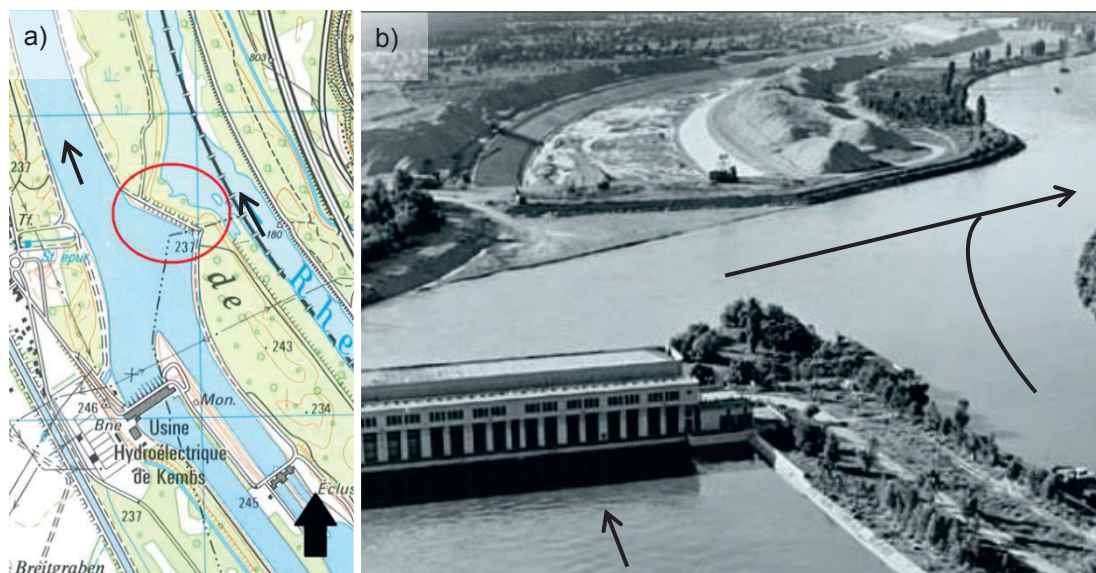


Abb. 6.9: Rückführung an der Staustufe Kembs: a) heutiger Zustand, ehemalige Rückführung rot markiert (bearbeitet nach Landesvermessungsamt Baden-Württemberg, 2008) b) Aufnahme in Fließrichtung aus dem Jahre 1952 (bearbeitet nach EDF, 2007).

nach 1900

Durch den Versailler Vertrag von 1919 erhielt Frankreich das alleinige Nutzungsrecht der Wasserkraft entlang der deutsch-französischen Grenzstrecke des Rheins (Versailler Vertrag, Teil. XII., Abschnitt I, Artikel 358 b) woraufhin auf französischer Seite, links, der Grand Canal d'Alsace mit vier Wasserkraftwerken errichtet wurde. Der Aufstau wurde bereits durch das Wehr Märkt (Bau 1932, D, km 174,0) aufgebaut, gleichzeitig beginnt hier der Restrhein. Das Kulturwehr Breisach (Bau 1965, D, km 224,8) wurde am unterstromigen Ende des Restrheins errichtet, um den durch den verringerten Abfluss hervorgerufenen, abgesenkten Grundwasserspiegel wieder anzuheben (Buck et al., 1993). Beim Bau des Grand Canal d'Alsace wurden Rückführungen erstellt, die es ermöglichten, den jeweils nächsten Kanalabschnitt im Trockenem zu bauen, während der Rhein selbst Wasser führte. Abbildung 6.9b zeigt am Beispiel des Kraftwerks Kembs eine noch nicht geschlossene Rückführung, der Grand Canal d'Alsace befand sich im Bau. Nach der Fertigstellung eines jeden Abschnittes des Kanals wurde das Teilstück angeschlossen und das Wasser am Ende der Teilstrecke in den (Rest-)Rhein geleitet, um die nächste Stufe im Kanal bauen zu können. Im Bereich dieser Rückführungen, die heute verschlossen sind (Abb. 6.9a), ist der Querschnitt im Restrhein verbreitert.

1991 bis 2010

Der Restrhein ist keine Schifffahrtsstraße; für die Schifffahrt wurde der Grand Canal d'Alsace errichtet. Allerdings liegt bei km 219 ein Sportboothafen, den das Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Freiburg durch Baggerungen zwischen dem Kulturwehr Breisach (Rhein-km 224) und dem Hafen schiffbar hält. Die Baggermengen werden noch innerhalb der Stauhaltung dem Restrhein wieder zugegeben.

Die einzige Entnahme von Sediment stellt eine Baggerung dar, bei der 2006 circa 500 m³ Sediment, das sich aus Ton/Schluff und Sand zusammensetzte, unmittelbar oberhalb des Kulturwehres Breisach entnommen wurde (mündl. Hahnel, Wasserstraßen- und Schifffahrtsamt Freiburg, 10.09.2013).

Unterstrom des Kulturwehres Breisach wird nach Hochwasserereignissen (> 3.000 m³/s) Sediment, das die Schifffahrt behindert, gebaggert und dem Rhein entzogen. Innerhalb des Betrachtungszeitraums war dies nur einmal der Fall: am 13.05.1999 bei einem Abfluss von 3.430 m³/s, dies ist ein Hinweis darauf, dass sich Geschiebematerial über das Wehr hinwegbewegt. Auch die Beobachtungen des Außenbezirks Breisach des Wasserstraßen- und Schifffahrtsamtes Freiburg belegen einen Transport: Die Sektorwehre des Kulturwehres Breisach sind stark beansprucht (mündl. Hahnel, WSA Freiburg, 06.08.2013).

Die einzige anthropogene Zugabe von Sediment im Restrhein innerhalb des Betrachtungszeitraums war Oktober 2010: Das *Interreg-Programm IV Oberrhein – Redynamisierung des Restrheins* startete bei km 183,0 einen Geschiebezugaberversuch, bei dem 22.000 m³ Sediment in Form einer künstlichen Kiesbank in den Restrhein gegeben wurden. Die teils mit Transpondern versehenen Sedimente haben sich mit dem ersten Hochwasser bereits verlagert (Région Alsace, 2012).

6.3 Bestimmung der Sedimentquellen und -senken

6.3.1 Die Sedimentbilanzgleichung

Eine Feststoff- oder Sedimentbilanz beschreibt das Gleichgewicht zwischen den Sedimentmassen, die in eine Flussstrecke eingetragen werden (die sogenannten Quellen), den Sedimentmassen, die aus der Flussstrecke ausgetragen werden, (die sogenannten Senken) und der Veränderung der Sedimentmassen, die in der Flussstrecke gespeichert sind. Eine Sedimentbilanz kann für alle in einer Flussstrecke vorhandenen Sedimente aufgestellt werden aber auch für jede Kornfraktion einzeln. In dieser Studie wurden die Sedimentfraktionen feiner 0,063 mm (Ton/Schluff), 0,063 bis 2 mm (Sand), 2

bis 16 mm (Feinkies), 16 mm bis 63 mm (Grobkies) und 63 bis 125 mm (Steine) getrennt voneinander bilanziert.

Für den Fall, dass tektonische Sohlhöhenänderungen eine untergeordnete Rolle spielen, lautet die allgemeine Sedimentbilanzgleichung für den Flussschlauch des Rheins:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{se} + I_{di} + I_{ar} + I_{ab} + I_{do}) - (O_{do} + O_{se} + O_{dr} + O_{gr} + O_{fl} + O_{po} + O_{ab}) = \Delta S \quad (6.1)$$

mit I_{up} , dem Sedimenteintrag von oberstrom, I_{tr} , dem Sedimenteintrag aus Nebenflüssen, I_{se} , dem Sedimenteintrag aus Nebenarmen, I_{di} , dem Sedimenteintrag aus diffusen Quellen (zum Beispiel Ufererosion), I_{ar} , dem Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe, I_{ab} , dem Sedimenteintrag durch Abrieb von anderen Kornfraktionen (nur für die Fraktion Ton/Schluff), I_{do} , dem Sedimenteintrag von unterstrom, O_{do} , dem Sedimentaustag nach unterstrom, O_{se} , dem Sedimentaustag in Nebenarme, O_{dr} , dem Sedimentaustag durch Baggerungen, O_{gr} , dem Sedimentaustag in Bühnenfelder, O_{fl} , dem Sedimentaustag auf Überflutungsflächen, O_{po} , dem Sedimentaustag in Häfen, O_{ab} , dem Sedimentaustag durch Abrieb, und ΔS , der Sohlhöhenänderung, wobei alle Bilanzterme in der Einheit Mt/a ausgedrückt werden.

Für den Bilanzierungszeitraum 1991-2010 galt folgendes: Im Restrhein gibt es keine Nebenarme, weshalb sowohl Ein- und Austrag aus diesen (I_{se} und O_{se}) gleich null sind. Diffuse Quellen spielen ebenfalls keine Rolle (I_{di}). Es erfolgt kein Eintrag von unterstrom (I_{do}), die mündenden Nebenflüsse sind vernachlässigbar klein (I_{tr}). Der Sedimentaustag in Häfen (O_{po}) kann ebenfalls als null angesetzt werden. Die Gleichung kann demnach reduziert werden und sieht für den Restrhein wie folgt aus, in den folgenden Kapiteln werden die einzelnen Bilanzterme erläutert.

$$(I_{up} + I_{ar} + I_{ab}) - (O_{do} + O_{dr} + O_{gr} + O_{fl} + O_{ab}) = \Delta S \quad (6.2)$$

Die Umrechnung von Volumina in Massen wurde stets mit einer Sedimentdichte ρ_S von 2,65 t/m³ berechnet. Die Lagerungsdichte wurde in Abhängigkeit der nach Frings et al. (2011) bestimmten Porosität n , die von der Kornverteilung abhängig ist, nach Gleichung 6.3 berechnet:

$$\rho = \rho_S \cdot (1 - n) \quad (6.3)$$

Die Sedimentfraktionen feiner 0,063 mm (Schluff, Ton), 0,063 bis 2 mm (Sand), 2 bis 16 mm (Feinkies), 16 mm bis 63 mm (Grobkies) und 63 bis 125 mm (Steine) wurden getrennt voneinander bilanziert. Zur besseren Vergleichbarkeit zu anderen Studien des Rheins, die denselben Zeitraum betrachten, werden die Fraktionen Grobkies und Steine auch zusammengefasst dargestellt.

6.3.2 Sohlhöhenänderung

Die hier angestellte Betrachtung hat zum Ziel, die Erhöhung und Eintiefung im Flussschlauch in Masseneinheiten zu quantifizieren. Der Vergleich von Querprofilpeilungen erlaubt eine flächenmäßige Berechnung der Sohlhöhenänderung über die Zeit. Durch Multiplikation mit der Länge der Strecke zwischen den Peilungen erhält man die volumetrische Veränderung (Tab. 6.2). Die Umrechnung in Massen erfolgt durch die Multiplikation mit der Lagerungsdichte der anstehenden Sedimente, außerdem wurde mittels Kornverteilung die Aufteilung in Kornfraktionen vorgenommen.

Die hier übernommene Sohlhöhenänderung wurde von Dittrich (2013) aufgestellt: Eingangsdaten sind Sohlpeilungen aus den Jahren 1985/93, in denen die Sohle des Restrheins im Abstand von 200 m vermessen wurden. Im Jahre 1993 wurden die Profile der Rhein-km 180,04 bis km 209 aufgenommen, die restlichen Peilungen stammen aus dem Jahre 1985. Als Vergleich dienten ihm Aufnahmen aus den Jahren 2009/10. Dittrich (2013) hat das Niedrigwasserbett in vier Bereiche eingeteilt, die den

morphologischen Zustand beschreiben; diese sind Tabelle 6.2 zu entnehmen. Bereich 1 ist durch eine stetige Eintiefung des Niedrigwasserbettes gekennzeichnet, Bereich 2 befand sich nahezu im Gleichgewicht, Bereich 3 hat innerhalb des Zeitraums eine Eintiefung erfahren, Bereich 4 eine Erhöhung.

Tab. 6.2. Einteilung des Restrheins in vier morphologische Bereiche und Nettoänderung des Niedrigwasserbettes in m^3 zwischen 1985/93 und 2009/10, nach Dittrich (2013).

Bereich	vorherrschender Prozess	Änderung im Niedrigwasserbett [m^3]	von km	bis km	Länge [km]
1	Eintiefung	-357.378	174,4	193,8	19,4
2	Gleichgewicht	44.506	193,8	204,0	10,2
3	Eintiefung	-145.402	204,0	211,2	7,2
4	Erhöhung	441.280	211,2	224,7	13,5

Um Bilanz und Frachten fraktioniert darstellen zu können, ist die Kenntnis der Kornverteilung notwendig. Da im Restrhein keine Geschiebemessungen durchgeführt werden, muss die Kornverteilung des bewegten Sediments auf andere Weise berechnet werden. Es liegen Kornverteilungen für die Sohle vor, die Dittrich (2013) für verschiedene Stellen des Restrheins ermittelt hat. Die Kornverteilung variiert im Laufe des Restrheins erheblich: Die Sohle der Bereiche 1 bis 3 besteht hauptsächlich aus Sedimenten größer 16 mm, wohingegen Bereich 4 zur Hälfte aus Sedimenten kleiner 2 mm besteht. Es wird hier davon ausgegangen, dass das Sediment, welches in den ersten Bereichen erodiert wird, in gleicher Kornverteilung im Bereich 4 sedimentiert. Aus diesem Grund wurde für die Fraktionen größer 2 mm für den gesamten Restrhein die Kornverteilung des Bereichs 4 angesetzt (Tab. 6.3). Außerdem wird angenommen, dass die Fraktionen Ton/Schluff und Sand, die am Ende des Restrheins sedimentieren und sich dort auf der Sohle befinden, von oberstrom (I_{up} aus Hochrhein/Oberrhein) eingetragen werden. Diese Annahme kann getroffen werden, da insbesondere die Fraktion Ton/Schluff in Suspension transportiert wird. Die Sohle des Bereichs 4 besteht zu 46 % aus Ton/Schluff und Sand, sowie zu 54 % aus Sedimenten größer 2 mm (Tabelle 6.3). Aus den Bereichen 1 bis 3 erodiertes Material sedimentiert zum Großteil in Bereich 4 oder verlässt den Restrhein nach unterstrom. Für die Umrechnung der Volumen in Massen wurde für den Sedimentationsbereich (Bereich 4) eine Porosität von $n = 0,2$ berechnet (Gleichung 6.3).

Tab. 6.3: Anteile Kornfraktionen [-] der Niedrigwassersohle im letzten Bereich des Restrheins nach Proben von Dittrich (2012).

Niedrigwassersohle	Bereich 4 211,2 - 224,7
Anzahl Proben	2
< 0,063 mm	0,20
0,063-2 mm	0,26
2-16 mm	0,02
16-63 mm	0,16
> 63 mm	0,36

6.3.3 Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen und in Bühnenfelder

Vorländer und Bühnenfelder wurden in dieser Betrachtung zu einem Uferbereich zusammengefasst. Der Restrhein bildet hier eine Besonderheit, da die Bühnenfelder stark verlandet sind. Die Bühnenfelder und Vorländer haben über den gesamten Verlauf des Restrheins eine volumenmäßige Zunahme erfahren. Sedimente < 2 mm findet man im Uferbereich des Restrheins vorherrschend in Form von Uferwällen vor. Dittrich (2012) hat im Bühnenfeld bei Rhein-km 191,3 Auflandungen in Form eines Uferwalls von bis zu 2 m Höhe ausgemacht und zwei Bohrstocksondierungen bis auf 1,4 m Tiefe durchgeführt, die in 20 cm-Schichten untersucht wurden. Insgesamt war die Kornverteilung bei

allen sieben Schichten sehr ähnlich, mit einem D_{50} von 0,14 mm und einem D_{max} von 2 mm. Aufgrund dieser Untersuchungen wurde hier für alle Uferwälle von einem Anteil der Kornfraktion 0,063-2 mm (Sand) von 100 % ausgegangen. Die in Tabelle 6.4 gelisteten volumetrischen Änderungen des Uferbereichs basieren, wie im Falle der Niedrigwassersohle, auf den Berechnungen von Dittrich (2013).

Für die Porosität wurde im Bereich der Sandablagerungen $p = 0,38$ (locker gelagerter Sand) angenommen. Die Uferwälle, die sich auf den Bühnenfeldern gebildet haben, machen laut Arnaud (2012) einen Volumenanteil des im Uferbereich abgelagerten Sediments von 84 % aus. Für den restlichen Teil der Bühnenfelder (von Arnaud (2012) als Grobanteil bezeichnet) wurden die Kornverteilungen jeweils für die Bereiche 1 & 2 und Bereiche 3 & 4 ermittelt, diese sind in Abbildung 6.10 dargestellt. Datengrundlage sind von Dittrich (2012) durchgeführte Korngrößenanalysen von Bühnenfeldern und Vorländern, die für die vorliegende Betrachtung gemittelt wurden. Hier ist zu erkennen, dass der Anteil der Sedimente 16-63 mm im Verlauf des Restrheins abnimmt, während alle anderen Fraktionen zunehmen.

Zur Ablagerung von Ton/Schluff auf den Vorländern gibt es keinerlei Daten, weshalb hier eine vereinfachende Annahme getroffen wurde: Im Bereich des staugeregelten Oberrheins verlanden insgesamt 0,118 Mt/a Ton/Schluff auf Vorländern. Dies wurde in einer eigenen Sedimentbilanz bereits gezeigt (siehe Kapitel 5). Der Restrhein macht mit einer Fließlänge von 50 km 32 % des staugeregelten Oberrheins (Märkt bis Iffezheim) aus. Es wird vereinfachend angenommen, dass ebendieser Anteil auch auf die Vorländer des Restrheins anwendbar ist. Demnach wurden 0,038 Mt/a Ton/Schluff im Bereich des Restrheins auf Vorländern abgelagert.

Tab. 6.4: Nettoänderung des in den Bühnenfeldern und auf Vorländern abgelagerten Sediments in m^3 zwischen 1985/93 und 2009/10, nach Dittrich (2013).

Bereich	Nettoänderung [m^3]	von km	bis km	Länge [km]
1	417.409	174,4	193,8	19,4
2	283.080	193,8	204,0	10,2
3	203.107	204,0	211,2	7,2
4	200.023	211,2	224,7	13,5

6.3.4 Sedimenteintrag von oberstrom

Sand

Der Eintrag des Sandes beruht auf der in der Sedimentbilanz von Konstanz bis Iffezheim (siehe Kapitel 5) bereits berechneten Fracht im Oberrhein. Diese beruht auf der Sand-Fracht bei der Schwebstoffvielpunkt-Messstelle Plittersdorf (Rhein-km 342,7) und der Aufteilung der Fracht bei der Teilung des Oberrheins in Grand Canal d'Alsace (59 %) und Restrhein (41 %). Insgesamt beträgt der Eintrag der Fraktion Sand in den Restrhein 0,086 Mt/a.

Ton/Schluff

Der Eintrag von Ton/Schluff von oberstrom wurde aufgrund der Aufteilung des Oberrheins in Grand Canal d'Alsace und Restrhein bestimmt. Diese wurde ebenfalls in der Sedimentbilanz von Konstanz bis Iffezheim (siehe Kapitel 5) untersucht und wird hier angesetzt. Die Berechnung der in den Restrhein eingetragenen Fracht beruht auf der gemessenen Fracht bei der Messstelle Weil am Rhein (Rhein-km 171,4) des Schwebstoffdaueressnetzes der WSV. Der Anteil von Ton/Schluff des dort gemessenen Schwebstoffs beträgt 90,8 % (Astor et al., 2014). Es wurde angenommen, dass die Aufteilung der Fraktion Ton/Schluff in Grand Canal d'Alsace und Restrhein der Aufteilung der Fraktion Sand an dieser Stelle entspricht (siehe oben). Insgesamt beträgt der Eintrag der Fraktion Ton/Schluff in den Restrhein 0,460 Mt/a.

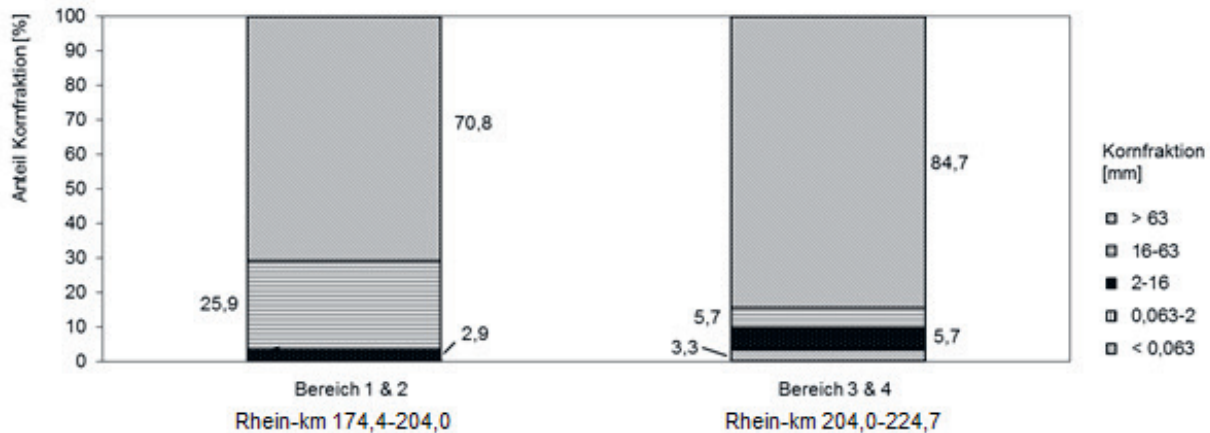


Abb. 6.10: Verteilung der Kornfraktionen der Bühnenfelder („Grobanteil“) je Bereich im Restrhein, Daten nach Dittrich (2012).

Feinkies, Grobkies und Steine

In der Literatur wird davon ausgegangen, dass kein Sediment größer 2 mm in den Restrhein eingetragen wird. Arnaud (2012) beschreibt ausschließlich suspendiertes Sediment, das in den Restrhein eingetragen wird und sagt aus, dass Kies und Steine das Wehr nicht passieren können. Auch Abegg (2001) nennt den Bereich des Hochrheins bis Basel (Beginn Oberrhein) geschiebelos, was ebenfalls bedeutet, dass es keinen Eintrag in den Restrhein gibt. Hier wird also davon ausgegangen, dass der Eintrag von Feinkies, Grobkies und Steinen bei 0,000 Mt/a liegt.

6.3.5 Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe

Im Restrhein gibt es keine regelmäßigen anthropogenen Sedimentzugaben. Innerhalb des Betrachtungszeitraums gab es aber einen Geschiebezugabeversuch, bei dem 22.000 m³ Sediment aus dem Vorland in Form einer Kiesbank in den Restrhein eingebaut wurden (Région Alsace, 2013). Das verbaute Sediment stammte aus einem Vorland, für das Dittrich (2012) Kornverteilungen erstellt hat. Insgesamt wurden zehn Proben aus allen Tiefen, die dort verbaut wurden, entnommen und analysiert. Im Mittel lag folgende Kornverteilung vor:

- Ton/Schluff (< 0,063 mm): 2 %
- Sand (0,063-2 mm): 14 %
- Feinkies (2-16 mm): 25 %
- Grobkies (16-63 mm): 40 %
- Steine (> 63 mm): 18 %

Für die Umrechnung in Massen wurde eine Porosität von $p = 0,35$ angesetzt, woraus sich nach Gleichung 6.3 eine Lagerungsdichte von $\rho = 1,72 \text{ t/m}^3$ ergibt. Um die Massen der einzelnen Fraktionen zu berechnen, wurden diese Anteile mit dem gebaggerten Volumen multipliziert. Auf den Betrachtungszeitraum 1991 bis 2010 bezogen bedeutet das, dass die so eingetragene Masse insgesamt 0,002 Mt/a, die jeder einzelnen Fraktion kleiner 0,001 Mt/a war.

6.3.6 Sedimentaustrag durch Baggerungen

Das Material der Baggerung oberstrom des Kulturwehres aus dem Jahre 2006 (siehe Kapitel 6.2.4) bestand zu 98 % Ton/Schluff und zu 2 % aus Sand (Breitung, 2006). Die 500 m³ wurden mit einer

Porosität $p = 0,725$ zu 48 t/a im Betrachtungszeitraum umgerechnet, dies entspricht weniger als 0,001 Mt/a.

6.3.7 Sedimentaustausch- und -eintrag durch Abrieb

Im Verlauf eines Fließgewässers verkleinern sich die Körner in Fließrichtung, dies wird als Abrieb bezeichnet. Für den Rhein in Deutschland geht man von einem durchschnittlichen Abrieb von etwa 0,16 %/km aus (Gölz et al., 1995). Das bedeutet, dass sich die Sedimentkörner massenmäßig verringern, was einem Sedimentaustausch entspräche. Für die vorliegende Berechnung wurde der durch den Abrieb hervorgerufene Verlust der Fraktionen Fein-, Grobkies und Steine der Fraktion Ton/Schluff hinzugerechnet, also als Sedimenteintrag für Ton/Schluff angesetzt. Dies wurde für jeden Bereich (siehe Kapitel 6.3.2) berechnet. Der Abrieb liegt für die Fraktion Steine bei 0,001 Mt/a. Für alle weiteren Fraktionen im gesamten Restrhein ergibt sich ein Abrieb von 0,000 Mt/a. Dies bedeutet einen Eintrag aufgrund von Abrieb der Fraktion Ton/Schluff von 0,001 Mt/a.

6.3.8 Sedimentaustausch nach unterstrom

Die Fraktion Ton/Schluff kann in Suspension den Restrhein über das Kulturwehr ungehindert verlassen. In der vorliegenden Bilanz wird der Austrag nach unterstrom der Fraktion Ton/Schluff aufgrund der Massenerhaltung berechnet und dient als Schließungsterm. Er berechnet sich zu 0,414 Mt/a. Für die Sandfraktion wurde vereinfachend angenommen, dass kein Austrag aus dem Restrhein erfolgt. Oben wird beschrieben, welche Massen Feinkies, Grobkies und Steine im Restrhein im Betrachtungszeitraum zurückblieben. Der Austrag nach unterstrom dient hier als Schließungsterm, wurde also unter Berücksichtigung der Massenerhaltung berechnet. Insgesamt ergibt sich ein Austrag nach unterstrom von je 0,000 Mt/a Feinkies und Steine, sowie 0,002 Mt/a Grobkies.

6.4 Ergebnisse

In Abbildung 6.11 sind die Sedimentbilanzen der einzelnen Fraktionen mit allen Quellen und Senken im Restrhein für den Betrachtungszeitraum 1991-2010 in Mt/a dargestellt. Abbildung 6.12 zeigt die Frachten der einzelnen Fraktionen in den vier Bereichen des Restrheins, ebenfalls für 1991-2010 in Mt/a. Auffällig ist, dass die Fraktion $< 0,063$ mm (Abb. 6.11) massenmäßig den größten Eintrag in den Restrhein darstellt, diese Fraktion aber den Restrhein fast vollständig durch den Austrag nach unterstrom wieder verlässt.

Neben dem Eintrag von oberstrom stellt der Abrieb anderer Fraktionen eine Quelle dar. Die Fraktion 0,063-2 mm (Abb. 6.11), die sowohl als Geschiebe als auch in Suspension transportiert werden kann, verbleibt gänzlich im Restrhein, wobei sie zumeist im Uferbereich abgelagert wird. Die Hauptquelle dieser Fraktion stellt der Eintrag von oberstrom dar. Am geringsten im Transport vertreten ist die Fraktion 2-16 mm (Abb. 6.11), es gibt keinen zusätzlichen Eintrag. Feinkies wird aus der Sohle erodiert und innerhalb des Restrheins im Uferbereich abgelagert. Die Fracht der Fraktion 16-63 mm (Abb. 6.11) hat einen ähnlichen Verlauf, allerdings erodiert hier wesentlich mehr Sediment aus der Sohle, welches im Uferbereich wieder sedimentiert. Eine weitere Senke des Grobkieses stellt der Austrag nach unterstrom dar. Die Quelle der Fraktion > 63 mm (Abb. 6.11) ist vor allem die Sohlerosion, Senken sind Abrieb und Austrag in den Uferbereich.

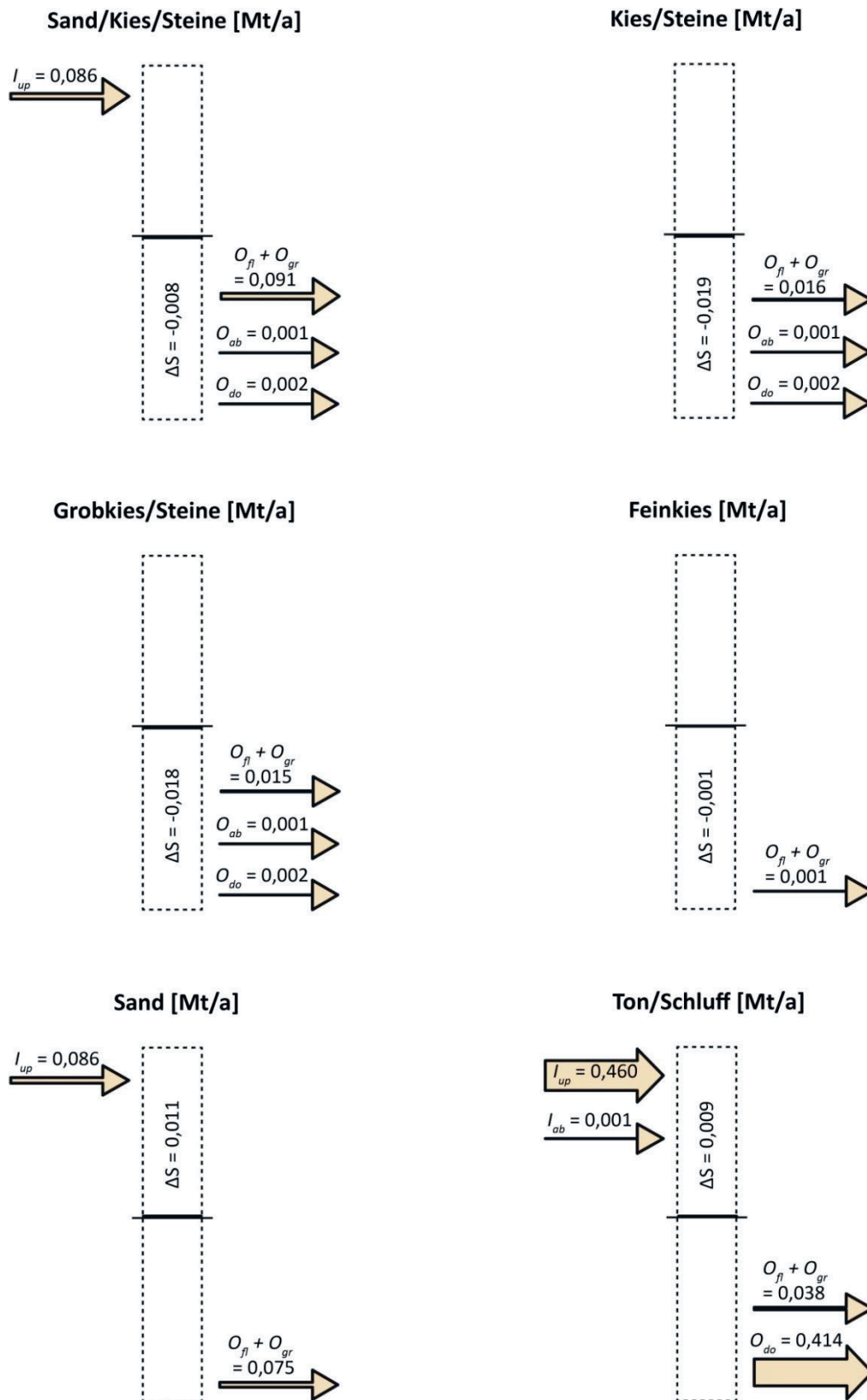


Abb. 6.11: Sedimentbilanz des Restrheins für den Zeitraum 1991-2010, für die Fraktionen Ton/Schluff (< 0,063 mm), Sand (0,063 bis 2 mm), Feinkies (2 bis 16 mm), Grobkies (16 bis 63 mm), Steine (63 bis 125 mm) und alle Fraktionen > 0,063 mm. Zu beachten ist, dass sich bei $\Delta S \sim 0$ Anlandungen und Sedimenteinträge einerseits sowie Eintiefungen und Sedimentausträge andererseits in der Flussstrecke kompensieren; $\Delta S \sim 0$ ist somit kein Zeichen einer stabilen, undynamischen Sohle. Nomenklatur nach Kapitel 6.3.1.

Tab. 6.5: Auflistung aller Ergebnisse für jede Quelle und Senke für den Restrhein sowie für die einzelnen Kornfraktionen in Mt/a, inklusive Abschätzung der Unsicherheiten.

Quelle/ Senke	Ton/Schluff < 0,063 mm	Sand 0,063-2 mm	Feinkies 2-16 mm	Grobkies 16-63 mm	Steine > 63 mm	Grobkies+Steine >16 mm
I_{up}	0,460 ±40%	0,086 ±40%	0,000 ±0,002	0,000 ±0,002	0,000 ±0,001	0,000 ±0,003
I_{ar}	0,000 ±0,001	0,000 ±0,001	0,000 ±0,001	0,000 ±0,001	0,000 ±0,001	0,000 ±0,002
I_{ab}	0,001 ±0,003	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
O_{ab}			0,000 ±0,001	0,000 ±0,001	0,001 ±0,001	0,001 ±0,002
O_{fl+gr}	0,038 ±50%	0,075 ±50%	0,001 ±50%	0,003 ±50%	0,012 ±50%	0,015 ±50%
O_{do}	0,414 ±40%	0,000 ±0,050	0,000 ±0,002	0,002 ±30%	0,000 ±0,002	0,002 ±0,002
ΔS	0,009 ±20%	0,011 ±20%	-0,001 ±20%	-0,005 ±20%	-0,013 ±20%	-0,018 ±20%

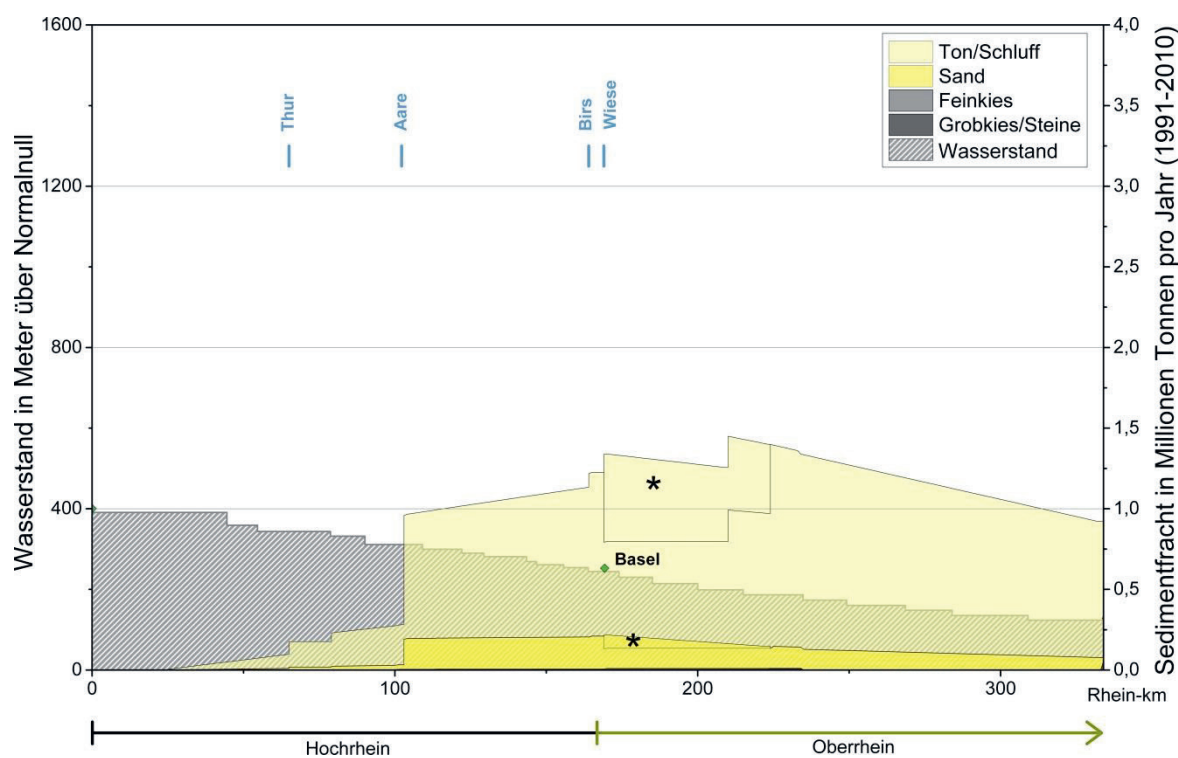


Abb. 6.12.: Frachtlängsschnitt für den Restrhein, Hochrhein und staugeregelten Oberrhein. * = Beitrag Restrhein

6.5 Diskussion

6.5.1 Unsicherheiten

Bei jeder Bilanz müssen Unsicherheiten angenommen werden, die je nach Herkunft der Daten unterschiedlich ausfallen, sie sind in Tabelle 6.5 aufgelistet. Für Bilanzterme gleich null kann kein prozentualer Wert angegeben werden, daher wird eine pauschale Abschätzung angegeben. In der Literatur (z. B. Dittrich, 2012) wird davon ausgegangen, dass Geschiebe das Wehr Märkt außer im Hochwasserfall bei gezogenem Schütz nicht passieren kann. Eine Vor-Ort-Besichtigung zeigte aber, dass die Schütze auch bei normalem Abfluss gezogen sein können, der Eintrag von Sedimenten also grundsätzlich möglich ist. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass der Eintrag massenmäßig äußerst gering ist. Die Unsicherheit beim Eintrag von oberstrom liegt bei allen Fraktionen über 0 Mt/a.

Die bereits beschriebene Wahrscheinlichkeit des Eintrages besteht, allerdings nur im geringen Umfang. Die Unsicherheit bei der anthropogenen Zugabe ist gering, da eine gute Dokumentation vorliegt, es werden 10 % Unsicherheit, beziehungsweise eine Unterschätzung des zugegebenen Materials von 0,001 t/a angenommen, da die Kornverteilung aus einer anderen Quelle stammt. Die Unsicherheit bei der Sedimentation auf Vorländern und in Bühnenfeldern ist verhältnismäßig hoch, da zum Beispiel die Kornverteilungen und auch die Sedimentationshöhe auf Stichproben beruhen, sie liegt für alle Fraktionen bei 50 %. Der Austrag aus dem Restrhein nach unterstrom ist bei allen Fraktionen außer der des Sandes aus dem Schließungsterm hervorgegangen. Bei der Berechnung des Eintrages der Fraktion Sand von oberstrom wurde davon ausgegangen, dass der Austrag nach unterstrom null beträgt. Es ist möglich, dass ein Austrag von Sand stattfindet, insbesondere da auch gröbere Sedimente den Restrhein über das Kulturwehr nach unterstrom verlassen. Die Unsicherheiten für das nach unterstrom ausgetragene Sediment wurden aufgrund einer einfachen Fehlerfortpflanzungsanalyse berechnet. Die Unsicherheiten für die Sohlhöhenänderung wird für alle Kornfraktionen zu 20 % angegeben, hier stammen die Daten alle aus einer Quelle, die auf einer guten Berechnung basiert, für die Aufteilung der Kornfraktionen musste jedoch eine weitere Berechnung erfolgen, die aufgrund der Verwendung von Stichproben als 20 % unsicher eingeschätzt wird.

6.5.2 Vergleich mit bereits durchgeführten Studien

Arnaud (2012) hat eine Feststoffbilanz für den Restrhein aufgestellt, in der sie Fein- (< 1,6 mm) und Grobsedimente (>1,6 mm) betrachtet. Aufgeteilt in Bühnenbereich und Fließbett betrachtet sie den Abschnitt Rhein-km 174,0 bis km 212 (ungefähr bei Fessenheim; hier Ende Bereich 3) innerhalb der Jahre 1990 bis 2010. Die angewandte Methode unterscheidet sich insbesondere in der Ergebnisdarstellung: Die Frachten werden volumetrisch angegeben, wohingegen der vorliegende Bericht immer die Masseneinheit betrachtet. Der Unterschied liegt in der Umrechnung mittels Lagerungsdichte, diese kann einen erheblichen Unterschied ausmachen, da sich beispielsweise feine Sedimente in den Zwischenräumen größerer befinden können. Eine Abweichung in den Eingangsdaten stellt die Sedimentzufuhr von oberstrom dar: Diese wird bei Arnaud (2012) auf 0,04 Mt/a Feinsediment geschätzt, hier kann davon ausgegangen werden, dass die hier vorgenommene Berechnung aufgrund der Schwebstoffdaten im Oberrhein bei Basel einen genaueren Wert erzielt, auch wenn der Wert 10-mal so hoch ist.

In der Veröffentlichung von Arnaud et al. (2015) wird die Studie von 2012 fortgeführt. Demnach hat der anthropogene Einfluss zu geringem Sedimenttransport und einem Sedimentdefizit unterstrom von ca. 16.000 m³/a geführt. Dies beeinflusst fluviale Erosions- und Akkumulationsprozesse. Die Sedimentbilanzierung von Arnaud et al. (2015) in Tabelle 6.6 ist mit der Vorliegenden vergleichbar, da Arnaud et al.'s (2015) Feinsediment mit den Fraktionen Ton/Schluff und Sand sowie ihr Grobsediment mit den Fraktionen feiner, grober Kies und Steine übereinstimmen. Der von Arnaud et al. (2015) berechnete Sedimenteintrag durch Flussbetterosion und Sedimentablagerung im aktiven Flussbett entspricht der Sohlhöhenänderung ΔS der vorliegenden Studie. Auch entspricht der Sedimentaustrag in Bühnenfelder O_{gr} und auf Überflutungsflächen O_{fl} dem Sedimenteintrag und -austrag durch Ufer- und Bühnenfeldsedimente in der Bilanzierung von Arnaud et al. (2015). In der Rechnung nehmen Arnaud et al. (2015) den Grobsedimenteintrag aus oberstrom I_{up} ebenfalls mit null an. Dies wird aus der nicht gegebenen Durchgängigkeit der mitgeführten Grobsedimente durch die Schweizer Wasserkraftwerke sowie aufgrund der vorwiegend aus Feinsedimentanteilen bestehenden Sohle oberhalb des Kraftwerks Kembs mit Berufung auf mehrere Autoren gefolgert. Anthropogene Sedimentzugaben I_{ar} , Baggerungen O_{dr} sowie Austrag in Häfen O_{po} werden bei Arnaud et al. (2015) nicht berücksichtigt, da diese außerhalb des zeitlichen Rahmens und nicht im von Arnaud et al. (2015) betrachteten Flussabschnitt stattfinden. Ferner wird der Sedimenteintrag und -austrag aus Nebenflüssen und der Eintrag aus Nebenarmen (I_{tr} ; I_{se} ; O_{se}) als vernachlässigbar klein angenommen. Abrieb (I_{ab} ;

O_{ab}) betrachten Arnaud et al. (2015) nicht. Auch Arnaud et al. (2015) berechneten ebenfalls in den Bereichen 1-3 eine Abnahme der Fein- und Grobsedimentanteile in der Sohle.

Tab. 6.6: Auflistung der Ergebnisse von Arnaud et al. (2015) für den Restrhein Bereich 1 - 3 unterteilt in Fein- und Grobsediment in m^3/a . Unbekannte Größen werden mit X gekennzeichnet.

Quelle/ Senke	Feinsediment [m^3/a]	Grobsediment [m^3/a]
I_{up}	$16.500 \pm X$	0
O_{fl+gr}	$-5.500 + 44.900 = 39.400$	$-5.500 + 7.900 = 2.400$
O_{se}	$\pm X$	16.300
ΔS	$-2.300 + 400 = -1.900$	$-22.200 + 3.500 = -18.700$

6.5.3 Empfehlungen

Der Restrhein wird seit einiger Zeit bereits stark umgebaut und renaturiert. Einen Teil dieser Maßnahmen stellte auch schon die Zugabe der Kiesinsel im Jahre 2010 (siehe Kapitel 6.2.4) dar. Auch der Abfluss wird mittlerweile aus ökologischen Gründen insgesamt höher gehalten. Die Dynamik und Natürlichkeit soll durch diese Maßnahmen wieder hergestellt werden. Es sollte angestrebt werden, die Morphodynamik innerhalb des Restrheins besser zu verstehen, um die Ökologie gezielter verbessern zu können. Die Aufteilung des Schwebstoffes auf Restrhein und Grand Canal d'Alsace sollte einer der zu untersuchenden Punkte darstellen. Insbesondere die Veränderung der Fracht bei höheren Abflüssen ist nicht bekannt. Des Weiteren sollte man die Kornverteilung des Baggergutes unterhalb des Kulturwehres Breisach aufnehmen, um bessere Aussagen über den Austrag aus dem Restrhein treffen zu können. Sohlpeilungen und Abflussmessungen sollten weiterhin unternommen werden.

6.6 Schlussfolgerungen

Es wird deutlich, dass der Restrhein einen Speicher für aus dem Oberrhein kommenden Sand darstellt. Es werden insgesamt fast 0,010 Mt/a Sand abgelagert, wohingegen der von oberstrom eingetragene Ton/Schluff (circa 0,4 Mt/a) fast gänzlich wieder nach unterstrom ausgetragen wird. Da im Hochrhein und im Übergang zum Oberrhein kein Transport auf der Sohle stattfindet, erfolgt kein Eintrag von Sedimenten größer 2 mm in den Restrhein. Die überwiegende Erosion der Sohle im Restrhein selbst bedingt aber einen Austrag nach unterstrom der Fraktionen Grobkies und Steine (insgesamt 0,01 Mt/a).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Bühnenfelder und Vorländer im Restrhein von starker Verlandung geprägt sind. Im Verlauf des Fließweges verfeinert sich die Sohle, aber auch im Laufe der Zeit. Das heißt, feinere Fraktionen wurden vermehrt aus der Sohle erodiert. Die Sohle der letzten Kilometer des Restrheins enthalten zusätzlich Ton/Schluff und Sand; dieses Sediment stammt von oberstrom.

Bessere Informationen zur Aufteilung des Schwebstoffes in Grand Canal d'Alsace und Restrhein würde die Unsicherheiten bezüglich des Eintrags von oberstrom stark reduzieren. Ebenso sollten unterstrom Untersuchungen angestellt werden, um die Unsicherheiten in der Bilanz weiter reduzieren zu können und die Bilanz somit außerordentlich verbessern zu können.

6.7 Literatur

- Abegg, J. (2001): Massnahmen zur Verbesserung des Geschiebehaushalts. natur+mensch 1/200. Schaffhausen, Schweiz.
- Arnaud, F. (2012): Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé: le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne). Doktorarbeit Université de Lyon, Lyon, Frankreich.
- Arnaud, F., Piégay, H., Schmitt, L., Rollet, A.J., Ferrier, V. & Béal, D. (2015): Historical geomorphic analysis (1932–2011) of a by-passed river reach in process-based restoration perspectives: The Old Rhine downstream of the Kembs diversion dam (France, Germany). *Geomorphology*, Volume 226, S. 163–177.
- Astor, B., Gehres, N. & Hillebrand, G. (2014): Von der Quelle zur Mündung, eine Sedimentbilanz des Rheins: Korngrößenanalyse von Schwebstoffproben am Rhein und seinen Nebenflüssen. BfG-1798. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Buck, W., Felkel, K., Gerhard, H., Kalweit, H., Malde, J. van, Nippes, K.-R., Ploeger, B. & Schmitz, W. (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen – Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft. Bericht I-11, Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), Lelystad, Niederlande.
- Breitung, V. (2006): Nassbaggerarbeiten – Am Schleusenvorhafen Breisach – Rhein-km 224,500 bis 224,600. Unveröffentlichter Bericht, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- BAFU (2000): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 1999. Bundesamt für Umwelt, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation.
- BAFU (2013): Hydrologisches Jahrbuch der Schweiz 2009. Bundesamt für Umwelt, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation.
- Dittrich, A. (2012): Hydraulisch/morphologische Charakterisierung des Rheins zwischen Märkt und Breisach für den Ist- und Planungszustand. Nicht veröffentlichter Bericht des Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig.
- Dittrich, A. (2013): Morphodynamics of the Rhine river between the weir „Märkt“ and „Breisach“. *Mitteilungen Heft 159/2013*. Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig.
- Dittrich, A., Koll, K. & Kunz, C. (2012): Historische Entwicklung des südlichen Oberrheins unter morphologischen Gesichtspunkten. Nicht veröffentlichter Bericht des Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig.
- EDF (2007): Kembs: concilier, énergie renouvelable, navigation et ecosystems. Broschüre, Électricité de France, Mulhouse.
- EDF (2011): Wasserkraftanlage Kembs - Maßnahmen und Bauarbeiten. Électricité de France, Mulhouse.
- Gölz, E., Schröter, M. & Mikos, M. (1995): Fluvial abrasion of broken quartzite used as a substitute for natural bedload, in: C.V.J. Varma, A.R.G. Rao (Eds.), *Management of sediment: Philosophy, Aims and Techniques*, Sixth International Symposium on River Sedimentation, New Delhi, India, S. 387–395.
- Kühn, A. (2014): Isteiner Schwellen. angewandte geografie und landschaftsplanung Rastatt. Link: <http://www.angewandte-geografie-rastatt.de/pages/projektbeispiele/uvs-weil-breisach.php>, letzter Aufruf: 30.09.2013.

- LUWG (2008): Bericht der Expertengruppe 1, Qualitative Untersuchungen. Ständige Kommission, Ausschuss A. Unveröffentlichter Bericht. Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht Rheinland-Pfalz.
- Löbert, T. (1996): Die Oberrheinkorrektion in Baden – Zur Umweltgeschichte des 19. Jahrhunderts. Mitteilungen des Institut für Wasserbau und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe, Heft 193, Karlsruhe.
- Patt, H. & Gonsowski, P. (2011): Wasserbau – Grundlagen, Gestaltung von wasserbaulichen Bauwerken und Anlagen. 7. Auflage, Springer, Berlin.
- UM BW (2013): Der Landschaftswandel bei Istein. Ministerium für Umwelt Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. Link: <http://www.themenpark-umwelt.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/16765/?path=4422;6350;16667;&part=16609&partId=0>, letzter Aufruf: 30.09.2013.
- Région Alsace (2013): Redynamisierung des Restrheins, Programm Interreg IV Oberrhein, Machbarkeitsuntersuchung, Abschlussbericht. Cedex, Frankreich.
- Röhr, C. (2006): Der Oberrheingraben - Geologische Karte des Oberrheingrabens. Link: <http://www.oberrheingraben.de>, letzter Aufruf: 30.09.2013.
- Universitätsbibliothek Freiburg i. Br. (2006): Karte des Rheinlaufes von Basel bis zur Grossh. Hessischen Grenze. Blatt 2 in: Honsell, Max: Die Korrektion des Oberrheines von der Schweizer- bis zur Gr. Hessischen Grenze.-Karlsruhe. Braun 1885. Atlas. Link: http://www.ub.uni-freiburg.de/eucorkarten/eucor_main.php?ctrl=showCard&la=d&t_idn=1466, letzter Aufruf: 30.09.2013.
- WISKI: Datenhaltung der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV), Daten bereitgestellt durch die Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG): Wasserwirtschaftliches Informationssystem Kisters (WISKI).
- Witschel, M. & Kerkhof, U. (2002): Naturschutzgebiet Isteiner Klotz. Link: http://www.bergwacht-schwarzwald.de/bergwacht-schwarzwald/de/Ortsgruppen/OG-Istein/Naturschutzgebiete/Isteiner_Klotz.html, letzter Aufruf: 30.09.2013.

7. Sedimentbilanz des frei fließenden Ober- und Mittelrheins

T. Hoffmann, S. Vollmer, N. Gehres, R.M. Frings, G. Hillebrand

7.1 Einleitung

Seit Jahren wird die Erosions- und Sedimentationsproblematik im Rhein auf der Basis von Sohlpeilungen und Feststofffrachtmessungen untersucht. Diese Messungen geben jedoch keine Auskunft über die Quellen der Sedimente im Rhein, den Verbleib erodierter Sedimente und die Auswirkungen der morphologischen Prozesse auf die Verknüpfung von ober- und unterstrom. Die Kenntnis dieser Zusammenhänge ist besonders für die Optimierung von Geschiebeabgabe- und Baggerstrategien wichtig, kann aber nur mit der Aufstellung einer Sediment- oder Feststoffbilanz beantwortet werden. Eine solche Bilanz beschreibt den Massenerhalt zwischen den Sedimentmengen, die in das Untersuchungsgebiet eingetragen werden (die sogenannten Quellen), den Sedimentmengen, die aus dem Untersuchungsgebiet ausgetragen werden (die sogenannten Senken) und der Veränderung der Sedimentmengen, die im Untersuchungsgebiet gespeichert sind. Im Bereich des Gerinnes macht sich eine Änderung der gespeicherten Sedimente in der Höhenänderung der Sohle bemerkbar. Ein umfassendes Verständnis der morphologischen Prozesse, insbesondere der Erosion und Sedimentation, und deren Auswirkung auf die Sedimentbilanz des Rheines sind aus ökonomischen, ökologischen und gesellschaftlichen Gründen von besonderer Bedeutung.

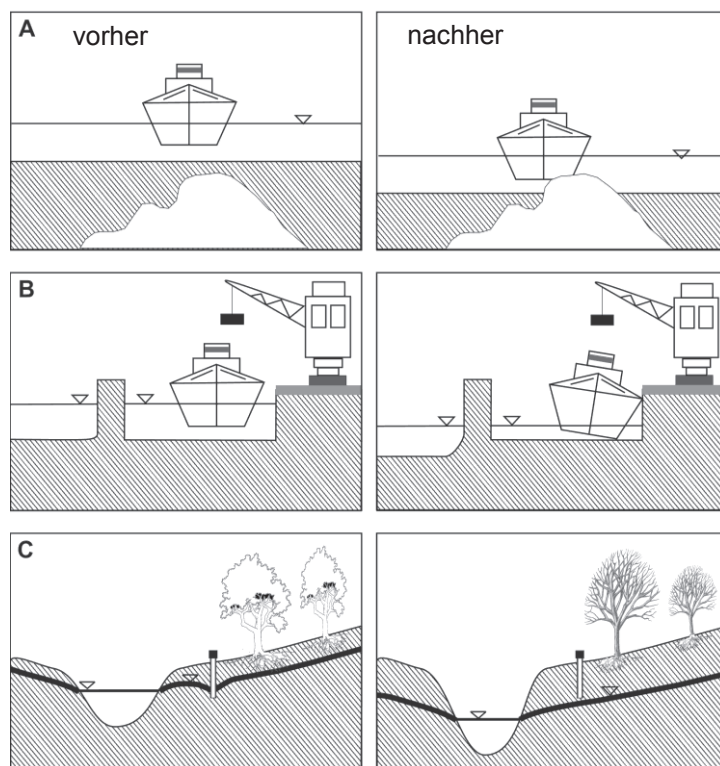


Abb. 7.1: Erosion und geringe Wasserstände (aus Frings et al., 2014a, nach Götz, 1992). A: Behinderung des Schiffverkehrs durch Härtlinge in der Flusssohle, B: Infrastrukturelle Probleme, C: ökologische Schäden durch reduzierten Grundwasserspiegel.

Der Rhein stellt Wasser für Landwirtschaft, Industrie und private Haushalte bereit, führt Abwasser ab, fließt durch zahlreiche Naturschutzgebiete und besitzt einen großen Freizeitwert. Aufgrund seiner vorteilhaften Abflusscharakteristik ist der Rhein zu einer der wichtigsten Binnenwasserstraßen Europas geworden. Er verbindet den Hafen von Rotterdam mit dem Hinterland, welches die Alpen einschließt. Zur Verbesserung der Schiffbarkeit wurde der Rhein seit dem 19. Jahrhundert verengt und begradigt. Dadurch erhöhten sich Wassertiefe, Energiegefälle und Sohl Schubspannung und damit einhergehend auch die Transportkapazität im Flussschlauch. Im 20. Jahrhundert wurde die Sedimentzufuhr aus dem Hinterland durch die Errichtung von Dämmen im Rhein und seinen Zuflüssen stark reduziert. Der frei fließende Rhein reagiert heute noch auf diese Einwirkungen, indem er Sedimente vom Flussbett aufnimmt (Buck, 1993). Diese andauernde Sohlenerosion erschwert die Schifffahrt an Stellen, die nicht erodierbar sind (z. B. aus der Sohle herauswachsenden Felsen), verursacht Probleme an der Infrastruktur der Wasserstraße (Brückenpfeiler, Häfen) und bedingt fallende Grundwasserspiegel (welche zu ökologischem Schaden und zu niedrigeren Raten von Trinkwasserbrunnen führen) (Gölz, 1994) (Abb. 7.1). Trotz der generellen Sohlenerosion herrscht in einigen Strecken des Rheins Sedimentation vor. Dies verursacht Probleme für die Schifffahrt während Niedrigwasser-Perioden und gesteigerte Überschwemmungsgefahren während Hochwasser.

In dieser Teilstudie wird die Sedimentbilanzierung für den frei fließenden Teil des Oberrheines und des Mittelrheines dargestellt. Die Ergebnisse der Bilanz helfen zur Beantwortung für die mit dem Sedimenthaushalt und der Morphodynamik verbundenen Fragestellungen aus der Perspektive einer vielbefahrenen Wasserstraße und deren sozio-ökonomischer Nutzung. Im Folgenden wird die Sedimentbilanzierung beginnend an der Staustufe Iffezheim bis zum Übergang vom Mittelrhein in den Niederrhein bei Königswinter für den Zeitraum 1991-2010 erstellt. Ziel war die Quantifizierung der Sedimentfrachten aller Kornfraktionen von Ton/Schluff über Sand und Kies bis hin zu Steinen und die Bestimmung aller Quellen und Senken für Sedimente.

Die morphologische Entwicklung des frei fließenden Rheines wurde auf Grundlage von Peilaufnahmen der Sohle ermittelt, für die Identifikation der zugrundeliegenden Prozesse erweisen sich die Kenntnisse der Sedimentflüsse jedoch als unverzichtbar. Daher wurde ein einzigartiger Datensatz mit tausenden von Geschiebetransportmessungen, Schwebstofftransportmessungen und Messungen der Sohlkornzusammensetzung ausgewertet. Nachdem die Sedimentströme quantifiziert wurden, wurde die Sedimentbilanz des Untersuchungsraumes errechnet. Im Gegensatz zu früheren Untersuchungen (Frings et al., 2014a) wurde hier der Zeitraum an die Gesamtbilanz des Rheines angepasst (1991-2010) und die Bilanz nach den Korngrößen feiner als 0,063 mm (Schluff/Ton), 0,063 bis 2 mm (Sand), 2 bis 16 mm (Feinkies), und > 16 mm (Grobkies/Steine) fraktioniert berechnet. Die in diesem Bericht betrachtete Strecke liegt zwischen Rhein-km 334 und 646.

7.2 Gebietsbeschreibung

7.2.1 Lage

Das hier betrachtete Gebiet (Abb. 7.2) umfasst den frei fließenden Rhein unterhalb der Staustufe Iffezheim (Rhein-km 334) und oberstrom der Stadt Königswinter (Rhein-km 646). Das Gebiet schließt somit den nördlichen Oberrhein (zwischen Iffezheim und Bingen) und den flussabwärts anschließenden Mittelrhein ein (Abb. 7.3).

7.2.2 Geologie und Sedimentologie

Das Gebiet gliedert sich geologisch in den nördlichen Oberrheingraben, das Mainzer Becken und das Rheinische Mittelgebirge. Der Oberrheingraben ist ein 30 bis 40 km breiter tektonischer Graben, der

sich mit ca. 0,2 mm im Jahr senkt (Zippelt, 1988). Durch die bis heute anhaltende Senkungstendenz hat der Rhein im Quartär den Oberrheingraben mit Sedimenten verfüllt, die bei Heidelberg („Heidelberger Loch“) eine maximale Mächtigkeit von 300 m erreichen. Die Grabenschultern überragen den Talboden um 450 bis 500 m. Im Norden begrenzt die Nackenheimer Schwelle den Oberrheingraben. Sie ist ein Ausläufer des Nierstein-Alzeyer Horstes und besteht aus erosionsbeständigen permischen Festgesteinen. Durch ihre Lage zwischen dem sich einsenkenden Oberrheingraben einerseits und dem Mainzer Becken andererseits entwickelte sich die Nackenheimer Schwelle zur Erosionsbasis des Oberrheins. Im Bereich des nördlichen Oberrheingrabens fließt der Rhein in einer alluvialen Ebene und ist durch eine ausgedehnte Auenlandschaft mit ausgeprägten Mäandern gekennzeichnet. Die natürliche Hochwasserfläche erreichte hier vor der Eindeichung und Kultivierung eine maximale Breite von 15 km.

Am Übergang des Oberrheins zum Mittelrhein fließt der Rhein in westlicher Richtung durch das Mainzer Becken. Die Mächtigkeit der quartären Sedimente, die hier von tertiären Tonsteinen unterlagert werden, sinkt hier auf wenige Meter.

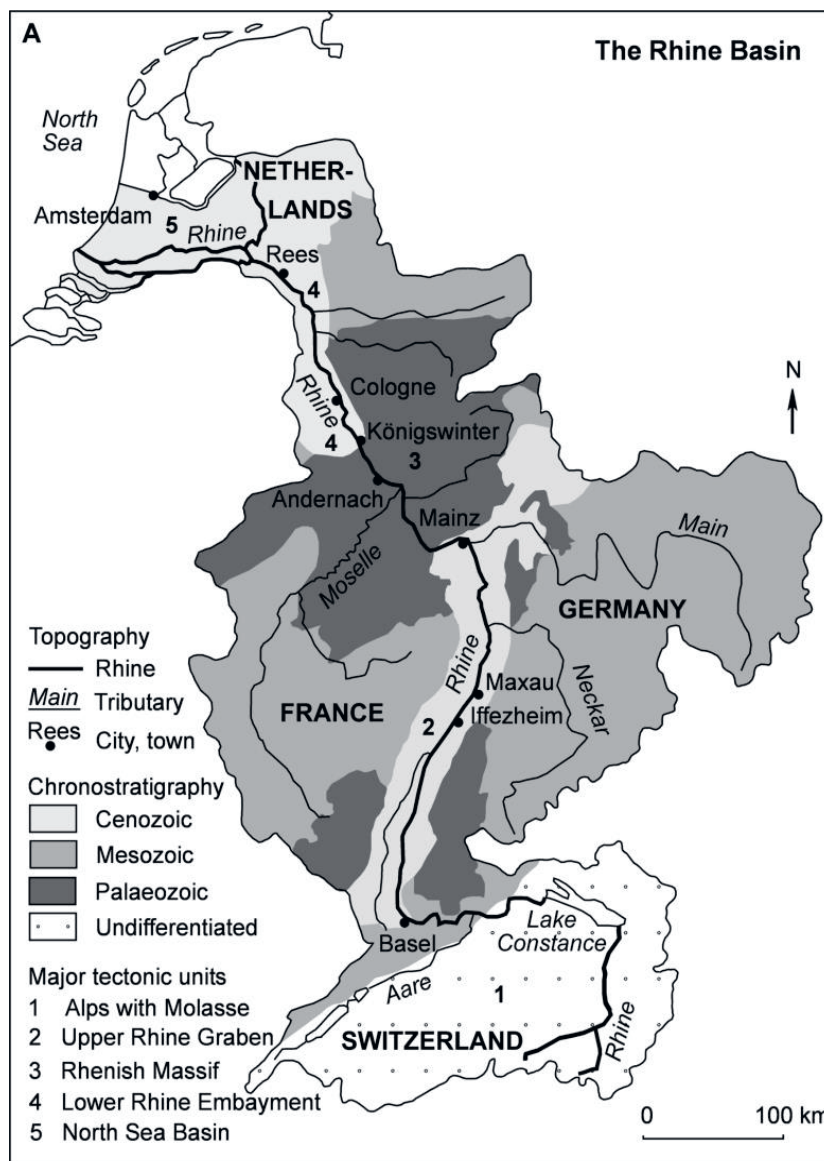


Abb. 7.2: Übersicht über das Rhein-Einzugsgebiet (nach Frings et al., 2014b).



Abb. 7.3: Luftbilder des Oberrheins im nördlichen Oberrheingraben bei km 334 (oben) und des Rheins im Mittelrheintal bei km 570 (Frings et al., 2014a).

Bei Bingen biegt der Rhein von Westen nach Norden ab und tritt in das Rheinische Schiefergebirge ein. Hier folgt der Fluss dem tief eingeschnittenen Engtal des Mittelrheins, welches sich als antezedentes Durchbruchstal im Zuge der tektonischen Hebung des Schiefergebirges im Tertiär und Quartär gebildet hat. Der Rhein fließt im Mittelrheintal überwiegend auf Festgestein, welches sich aus devonischen Schiefen, geschiefertem Ton- und Sandsteinen, Grauwacken und Quarziten zusammensetzt. Das enge Tal wird von charakteristischen Krümmungen, felsigen Quer- und Längsrippen (Bingener Loch/ Quarzitbänke) und steinigem Mittelgründen geprägt (Gölz, 1996).

Außerhalb des Gerinnes wird das devonische Grundgebirge des Mittelrheins in weiten Teilen von Terrassensedimenten überlagert, die sich unter kaltzeitlichen Klimabedingungen im Quartär gebildet haben. Die dominante Hauptterrasse liegt heute ca. 200 m über dem heutigen Flussbett und zeugt von der tektonischen Hebung seit deren Ablagerung vor ca. 700.000 Jahren. Rezente Hebungsraten des Rheinischen Massivs betragen nach Zippelt (1988) 0,2 mm im Jahr.

Im Rheinischen Schiefergebirge kam es lokal auch zu Senkungsvorgängen an Schwächezonen und jungen Verwerfungen, wie zum Beispiel im Neuwieder Becken bei Koblenz. Bei Bonn tritt der Rhein in das Senkungsgebiet der Niederrheinischen Bucht ein. Hier und auf seinem weiteren Weg zur Nordsee fließt er überwiegend auf seinen eigenen Ablagerungen (WSD-SW, 2007); nur lokal treten tertiäre Sedimente an der Rheinsohle zu Tage (Gölz, 1987).

Die tektonische Entwicklung steuert den großskaligen Verlauf des Flussprofils (Abb. 7.4) und der Zusammensetzung der Sohle (Abb. 7.5). Das Sohlgefälle fällt von 0,04 % bei Iffezheim auf 0,009 % im Mainzer Becken, und steigt sprunghaft im flussabwärtigen Mittelrheintal auf 0,026 % an. Mit der

Abnahme des Sohlgefälles weist der nördliche Oberrheingraben eine klare Tendenz zum „downstream fining“ der Sohlsedimente auf (Abb. 7.5), wobei die geometrisch gemittelte Korngröße des Deckschichtmaterials von 17 mm bei Iffezheim auf etwa 2 mm bei Bingen abnimmt. Im Mittelrhein steigt die Korngröße wieder auf 20 mm.

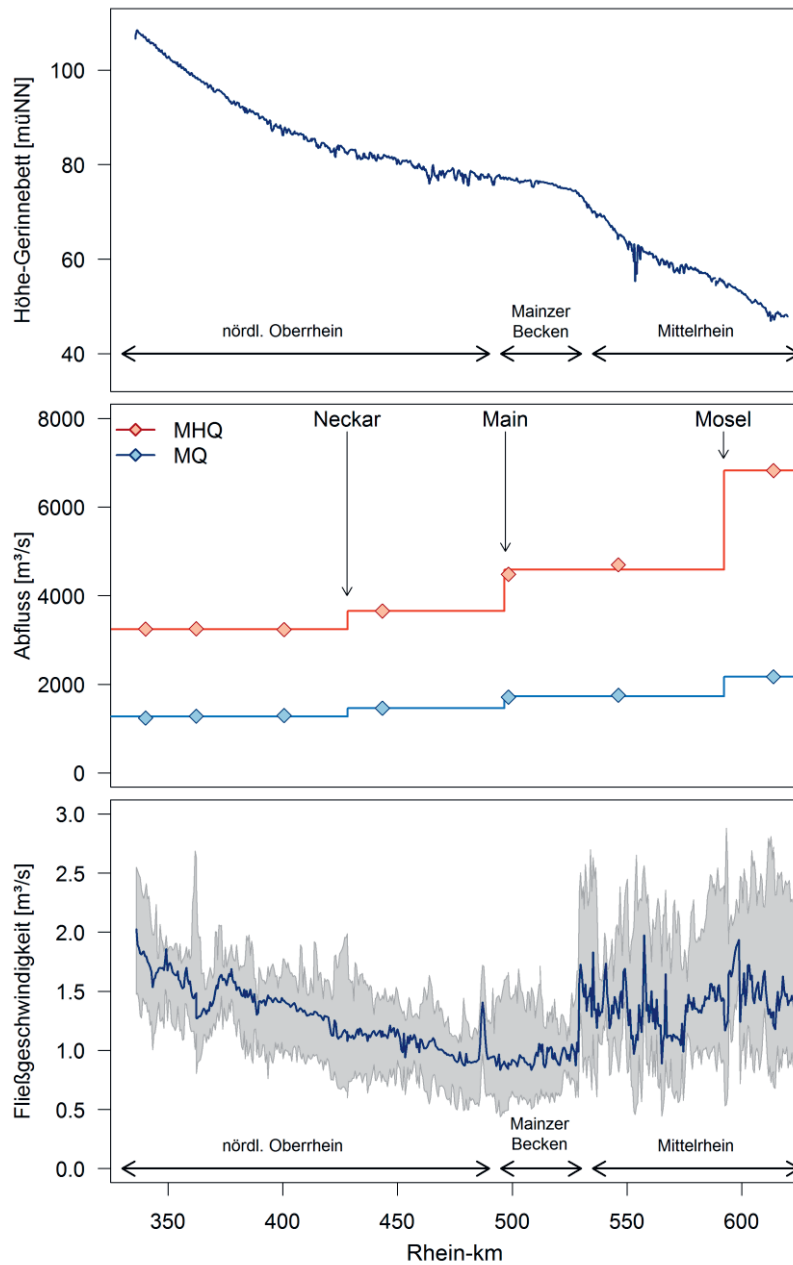


Abb. 7.4 Flusslängsprofil des nördlichen Oberrheins und Mittelrheins (A), sowie Abfluss (B) und Fließgeschwindigkeiten (C) im Längsschnitt (nach Frings et al., 2014a).

7.2.3 Hydrologie

Der Rhein gehört mit einem mittleren jährlichen Abfluss von 2390 m³/s an der deutsch-niederländischen Grenze zu den wasserreichsten Flüssen Europas. Sein Einzugsgebiet umfasst von den Alpen bis zur Nordsee rund 185.000 km². Die günstigen klimatischen und hydrologischen Verhältnisse bescheren dem Rhein über das gesamte Jahr hinweg eine ausgeglichene

Wasserrführung und machen ihn zur wichtigsten europäischen Binnenwasserstraße, die auf insgesamt 884 km von Rheinfeldern bis in die Nordsee schiffbar ist (WSD-SW, 2007).

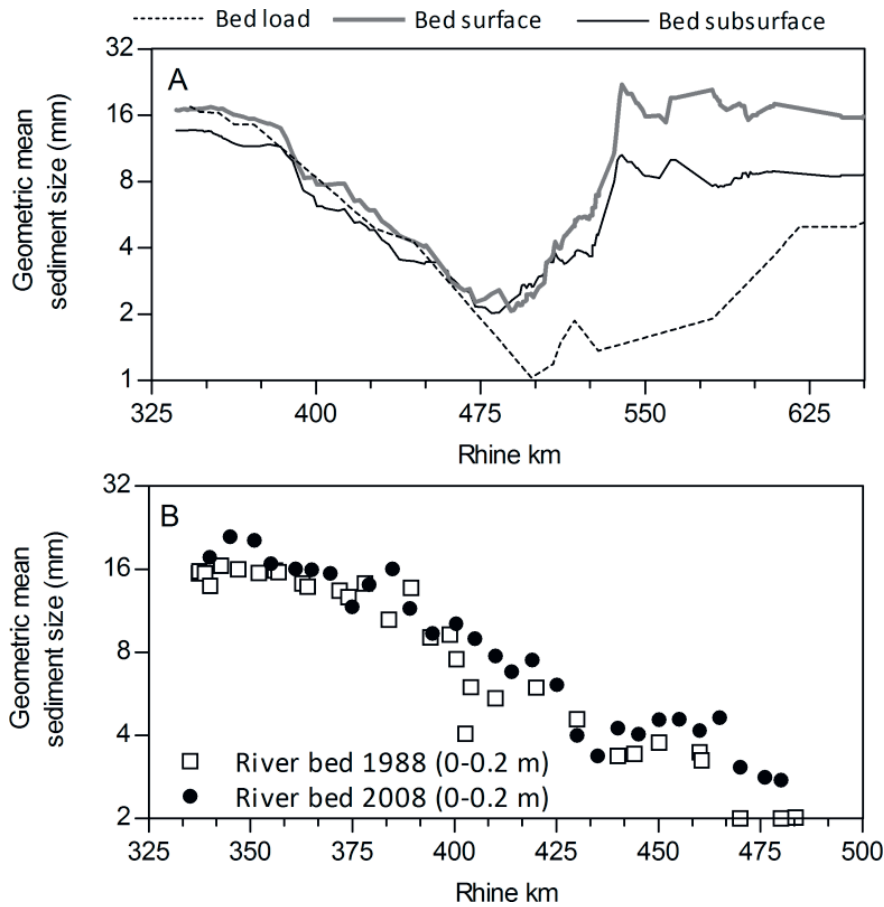


Abb. 7.5: Korngrößenverteilung: (A) Vergleich der Korngrößen der Geschiebefracht (1996-2006), der Sohlenoberfläche (1985-2006, 0-10 cm Tiefe) und des Sohlenuntergrundes (1985-2006, 10-50 cm Tiefe), (B) zeitliche Veränderung der Sohle in den Jahren 1988 und 2008 (nach Frings et al., 2014a).

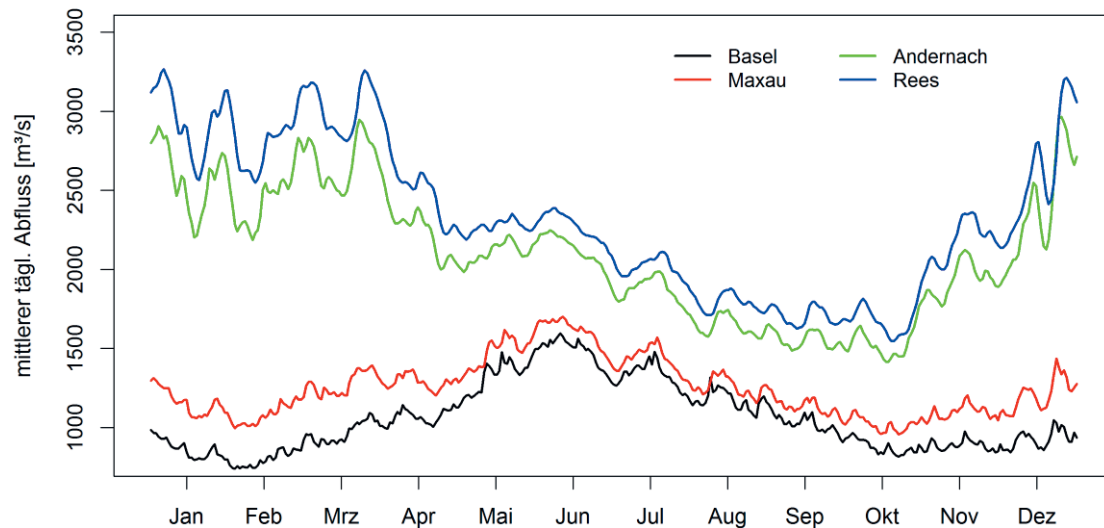


Abb. 7.6: Mittlere Abflussganglinie des Rheins in Basel, Maxau, Andernach und Rees (nach Frings et al., 2014a).

Der mittlere Abfluss (MQ) des Rheins im Untersuchungsgebiet steigt von $1250 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ am Pegel Maxau auf $2050 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ in Königswinter (Abb. 7.4). Der Abfluss steigt vor allem stufenweise durch die Zuflüsse des Neckars (Rhein-km 428,2; $\text{MQ} = 136 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), des Mains (Rhein-km 496,6; $\text{MQ} = 193 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), der Lahn (Rhein-km 585,7; $\text{MQ} = 47 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) und der Mosel (Rhein-km 592,3; $\text{MQ} = 315 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Das Abflussregime im nördlichen Oberrhein weist ein ausgeprägtes fröhsommerliches Maximum als Folge der kombinierten Schnee- und Gletscherschmelze in den Alpen auf (Abb. 7.6). Durch die pluvial geprägten Nebenflüsse dominieren die winterlichen Niederschläge und die Schneeschmelze im Frühling den Abfluss des Mittelrheins unterhalb des Zuflusses der Mosel. Die mittlere Wassertiefe variiert zwischen 2 und 10 m während des Niedrig- und Hochwassers. Die Fließgeschwindigkeit wird in erster Linie durch das Sohlengefälle bestimmt und fällt bei MQ im nördlichen Oberrhein von ca. 2 m s^{-1} auf 1 m s^{-1} im Mainzer Becken. Im Mittelrheintal ist die Fließgeschwindigkeit erheblichen longitudinalen Veränderungen unterworfen und liegt im Mittel zwischen 1 und 2 m s^{-1} (Abb. 7.4).

7.2.4 Anthropogene Einflüsse

Umfangreiche anthropogene Beeinflussungen im Rheineinzugsgebiet begannen mit der Landnahme der Lössböden im Neolithikum vor ca. 7000 Jahren (Kalis et al., 2003). Die agrare Landnutzung führte in den lössbedeckten Gebieten zur kontinuierlichen Bodenerosion. Während die erodierten Böden in den Frühphasen der Landnutzung überwiegend auf den Hängen abgelagert wurden, führte die Intensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung ab der Bronzezeit zum erhöhten Sedimenteintrag in die Flüsse und zur Ablagerung von Hochflutlehm und -sanden in den Auen (Hoffmann et al., 2009). Obwohl für kleinere Flussläufe im Rheineinzugsgebiet diskutiert wird, ob die Gerinnemorphologie durch den Eintrag kohäsiver Sedimente von einem verzweigten zu einem mäandrierenden bzw. anastomisierenden Flusslauf verändert wurde, blieb die Morphologie des Rheines und der größeren Nebenflüsse vermutlich bis ins Mittelalter weitgehend unbeeinflusst.

Erste menschliche Beeinflussungen des Gerinnes begannen im Mittelalter durch den Bau von Deichen zum Hochwasserschutz und von Bewässerungsanlagen. Von einem einheitlichen Wasserbau und einer Wasserbewirtschaftung im heutigen Sinne kann jedoch nicht die Rede sein (Kalweit et al., 1993). Bis ins 19. Jahrhundert war der Oberrhein von Basel bis Rastatt ein verflochtener Flusslauf mit einer Vielzahl verzweigter Rinnen. Die einzelnen Rinnen waren durch Strombänke voneinander getrennt und verlagerten sich regelmäßig über eine Breite von mehreren Kilometern (Wittmann, 1955). Die Rheinaue war von hohen Grundwasserständen und regelmäßigen Überschwemmungen geprägt, die zur Vernässung der landwirtschaftlichen Nutzflächen führten. Zusätzlich stellten Sumpfgebiete Brutstätten für Stechmücken und die von ihnen verbreiteten Krankheitserreger dar. Von Rastatt bis Mainz bildete der Rhein ein mäandrierendes System, dessen Schlingen sich ständig verlagerten.

Die größten anthropogenen Eingriffe, die den Rhein nachhaltig veränderten, begannen im 19. Jahrhundert unter der Aufsicht von Johann Gottfried Tulla (Spiess, 1951). Mithilfe von Parallelwerken, Querbauwerken (Buhnen) und Uferdämmen fasste Tulla den verflochtenen Flusslauf zu einem einheitlichen begradigten Flussbett zusammen. Die Begradigung erfolgte vor allem durch den Durchstich großer Mäander. Ziele der Regulierung durch Tulla waren die Schiffbarmachung des Rheins, die Reduzierung des Hochwasserrisikos und die Eliminierung der Malaria. Neben den positiven Entwicklungen, die aus der Rheinregulierung resultierten, führten die wasserbaulichen Maßnahmen zur Erhöhung der Fließgeschwindigkeit und damit zu einer erheblichen und lang anhaltenden Einschneidung/Erosion der Gerinnesohle (vgl. Kap. 7.1).

Zur Verbesserung der Navigation im Rhein und seinen Nebenflüssen und u. a. zur Energieerzeugung wurden im 20. Jahrhundert entlang großer Teile des Gerinnes Buhnen und Staustufen gebaut. Der hier betrachtete Abschnitt des Rheins ist zwar frei von Staustufen, wird jedoch von den Staustufen oberstrom und in den Nebenflüssen beeinflusst. Der Bau von 10 Staustufen am südlichen Oberrhein erfolgte im Zuge des Versailler Vertrages ab dem Ende des ersten Weltkrieges. Die Staustufe

Iffezheim bildet heute das untere Ende der Staustufenkette am Oberrhein und markiert den Anfang des frei fließenden Rheins. Sie wurde 1977 in Betrieb genommen. Unterhalb der letzten Staustufe kam es aufgrund des Geschieberückhaltes in den Stauhaltungen jeweils zu starker Sohlenerosion, da der frei fließende Strom das fehlende Geschiebe gemäß seiner Transportkapazität aus seiner kiesigen Sohle aufnimmt. Zur Vermeidung der flussabwärts einsetzenden Erosion wird unterhalb der Staustufe in Iffezheim (Rhein-km 336-338) und in geringerem Umfang im Mittelrhein (Rhein-km 534 und 582-603) künstlich Geschiebe zugeführt (Abb. 7.7).

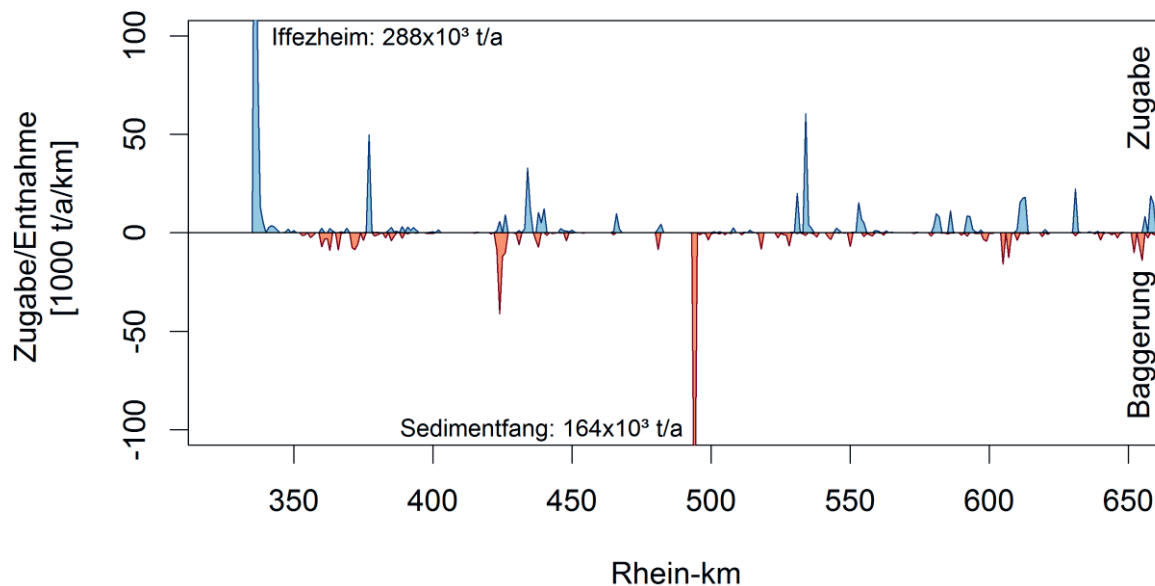


Abb. 7.7: Sedimententnahme und -zugabe entlang des Rheingerinnes.

Durch die Tiefenerosion im nördlichen Oberrhein und das abnehmende Sohlgefälle kam es im Mainzer Becken zur Sedimentation, die den Schiffsverkehr erheblich behinderte. Zur Verhinderung der Sedimentation im Mainzer Becken wurde 1989 ein Sedimentationsbecken im Gerinnebett des Rheins am oberen Ende des Mainzer Beckens (Rhein-km 494,3) erstellt, welches die Geschiebefracht auffängt und regelmäßig geleert wird. Am Übergang vom Mainzer Becken zum Rheinischen Schiefergebirge wurde zusätzlich der Quarzithärtling im Rheingerinne (das Binger Riff) entfernt, der erhebliche Probleme für die Navigation darstellte.

Neben den flussbaulichen Maßnahmen (Tab. 7.1) erfolgen umfangreiche Unterhaltungstätigkeiten, wobei insb. Sedimente umgelagert werden, um die schiffahrtlichen Bedingungen zu verbessern. Das gebaggerte Sediment wird dem Fluss an anderer Stelle wieder zugegeben. Wie Abb. 7.7 zeigt, finden regelmäßige Baggerungen zum Beispiel im Bereich der Stromhäfen Ludwigshafen und Mannheim zwischen Rhein-km 420 und 430 statt. Das gebaggerte Sediment wird 10 bis 15 km weiter unterstrom wieder zugegeben. Eine weitere Problemstrecke war der Rheingau. Dort bewegte sich das Geschiebe in Form von großen Sanddünen und behinderte so die Schifffahrt. Seit dem Bau des Geschiebefangs bei Mainz-Weisenau wird dem Fluss Geschiebe entzogen und auf diese Weise die Dünenbildung unterbunden. Nur ein Teil der mit dem Geschiebefang entnommenen Sedimentmenge wird dem Rhein wieder zugegeben.

Tab. 7.1: Zusammenfassung der Baumaßnahmen am Rhein seit 1978 (BAW, 2008).

Fluss-kilometer	Jahr	Baumaßnahme
336-337	1978-2014	Geschiebezugabe
336-351	1998-2014	sohlstabilisierende Maßnahmen
335,6-352,1	1990-1995	Nachregelungsmaßnahmen an Bühnen und Uferabflachungen
337-352,1	1983-1989	Buhnausbau auf AGIW 82
349	1994	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 m³/a) aufgrund von Fehltiefen und Fehlbreiten
360-387	2000-2014	Nachregelungsmaßnahmen an Bühnen
379-382	1967-1984	Neubau von NW-Buhnen
392,2-402,6	1967-1984	Bau von NW-Buhnen
402,6-423	1976-1980	Bau von NW-Buhnen
424	1984/85	Kolkverbau und Sohlanaufhöhung am Stefanienufer bei Mannheim (Baggermengen von 50 000 m³/a auf 30 000 m³/a)
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 Bühnen
477	1968/69	Bau von Bühnen und Längswerk
486	1972/74	Regelung der Nackenheimer Schwelle, Felsbeseitigung und Bühnenbau
494,3	1989	Bau des Geschiebefangs bei Mainz-Weisenau
528-531	1994-1995	Bau der Bühnenfelder
559-562	1980-1982	Sprengung von Härtlingen im Gerinnebett, Modifikation der Abflussverhältnisse um Inseln

7.3 Methoden

7.3.1 Die Sedimentbilanzgleichung

Für den Fall, dass tektonische Sohlhöhenänderungen eine untergeordnete Rolle spielen, lautet die allgemeine Sedimentbilanzgleichung für den Flussschlauch des Rheins:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{se} + I_{di} + I_{ar} + I_{ab} + I_{do}) - (O_{do} + O_{se} + O_{dr} + O_{gr} + O_{fl} + O_{po} + O_{ab}) = \Delta S \quad (7.1)$$

mit I_{up} , dem Sedimenteintrag von oberstrom, I_{tr} , dem Sedimenteintrag aus Nebenflüssen, I_{se} , dem Sedimenteintrag aus Nebenarmen, I_{di} , dem Sedimenteintrag aus diffusen Quellen (zum Beispiel Ufererosion), I_{ar} , dem Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe, I_{ab} , dem Sedimenteintrag durch Abrieb von anderen Kornfraktionen (nur für die Fraktion Ton/Schluff), I_{do} , dem Sedimenteintrag von unterstrom, O_{do} , dem Sedimentaustrag nach unterstrom, O_{se} , dem Sedimentaustrag in Nebenarme, O_{dr} , dem Sedimentaustrag durch Baggerungen, O_{gr} , dem Sedimentaustrag in Bühnenfelder, O_{fl} , dem Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen, O_{po} , dem

Sedimentaustrag in Häfen, O_{ab} , dem Sedimentaustrag durch Abrieb, und ΔS , der Sohlhöhenänderung, wobei alle Bilanzterme in der Einheit Mt/a ausgedrückt werden.

Für den Ober- und Mittelrhein wird der Sedimenteintrag und -austrag in Nebenarme I_{se}/O_{se} vernachlässigt. Es findet kein Sedimenteintrag von unterstrom statt, weshalb der Term $I_{do} = 0$ ist. Im Untersuchungsgebiet befinden sich einige Binnenhäfen. Über die Sedimentausträge in die Häfen liegen keine gesicherten Daten vor. Baggermengen können als Abschätzung herangezogen werden. Für die Bilanzierung wird der Sedimentaustrag in Häfen O_{po} aufgrund der vorliegenden Daten nicht getrennt betrachtet, sondern unter den Sedimentaustrag in Bühnenfelder O_{gr} subsumiert. Die Sedimentbilanzgleichung für den Ober- und Mittelrhein reduziert sich damit zu:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{di} + I_{ar} + I_{ab}) - (O_{do} + O_{dr} + O_{gr,po} + O_{ft} + O_{ab}) = \Delta S \quad (7.2)$$

Die Methoden zur Bestimmung der einzelnen Terme der reduzierten Bilanzgleichung werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

7.3.2 Sedimenteintrag von oberstrom

Kies/Steine

Die Sohle der Stauhaltung bei Iffezheim wird aus wirtschaftlichen Gründen sehr gut beobachtet, woher bekannt ist, dass dort ausschließlich feines Material wie Ton/Schluff und Sand in Bewegung ist und gröbere Sedimente wie Fein- und Grobkies/Steine nicht die Staustufe passieren. Daher kann davon ausgegangen werden, dass ausschließlich Sand und Ton/Schluff von oberstrom in den betrachteten Rheinabschnitt gelangen.

Sand

Der Sandeintrag von oberstrom wurde durch regelmäßige Vielpunktmessungen und Geschiebemessungen in Plittersdorf (Rhein-km 342,7) abgeschätzt. Der Sandanteil der gemessenen Schweb- und Geschiebefracht betrug 0,118 Mt/a und 0,001 Mt/a. Zur Korrektur des Sandverlustes bei der Geschiebemessung (vgl. Kap. 3.1) wurde die Geschiebefracht des Sandes in Plittersdorf mit 3,1 multipliziert, womit sich ein Gesamtsandtransport von 0,122 Mt/a ergibt. Da sich die Messstation unterhalb der Geschiebezugabe bei Iffezheim (Rhein-km 336-338) befindet, deren Sandanteil 0,045 Mt/a beträgt, berechnet sich der Sandeintrag von oberstrom zu 0,077 Mt/a.

Ton/Schluff

Zur Bestimmung der Ton- und Schluffeinträge von oberstrom wurden die Messwerte der Schwebstoffdauermessstation Plittersdorf (Rhein-km 340,2) verwendet. Die mittlere Jahresfracht des gesamten Schwebstoffs im Zeitraum 1991-2010 betrug 0,985 Mt/a. Diese Fracht umfasst sowohl mineralische Komponenten der Ton-, Schluff- und Sandfraktionen als auch organische Anteile. Der Anteil des Phytoplanktons wurde über Chlorophyll-a-Gehalte (Daten der FGG Rhein) für den Zeitraum 1991-2010 zu 0,028 Mt/a abgeschätzt. Weiterhin ist aufgrund der Untersuchungen von Astor et al. (2014) (Kapitel 7.3.2) bekannt, dass die mineralischen Komponenten der mit der im Schwebstoffdauermessnetz verwendeten Messmethodik erfassten Schwebstoffe im Rhein im Durchschnitt 9,2 % Sand beinhalten. Damit errechnet sich ein Ton- und Schluffeintrag in den frei fließenden Oberrhein von 0,845 Mt/a.

7.3.3 Sedimenteintrag aus Nebenflüssen

Kies/Steine

Obwohl in den Ober- und Mittelrhein die drei größten Nebenflüsse des Rheins münden (Neckar, Main und Mosel) (vgl. Kapitel 2.3), gelangt nur sehr wenig Geschiebe der Nebenflüsse in den Rhein, da

diese überwiegend staugeregelt sind, so dass die Geschiebedurchgängigkeit stark eingeschränkt ist (Kapitel 3.3). Für diese Studie werden die Sedimenteinträge der groben Fraktionen (Kies/Steine) deshalb zu null gesetzt.

Sand

Die Einträge von Sand als Geschiebe wurden für diese Studie zu null gesetzt. Für den Schwebstoff wurden Messdaten aus dem Schwebstoffdauermessnetz (tägliche Einzelmessung) von Neckar, Main und Mosel zugrunde gelegt. Der Schwebstoffeintrag von Sand aus kleineren Rhein Nebenflüssen wurde aus Daten verschiedener Landesämter ermittelt. Sandeinträge aus kleineren Nebenflüssen ohne vorliegende Messdaten wurden durch einen einfachen Klassifikationsansatz auf Grundlage der Einzugsgebietsgröße abgeschätzt (Kapitel 3.3) (Gehres et al., 2014). Für die Aufteilung auf die Kornfraktionen Sand bzw. Ton/Schluff wurde der für den Rhein ermittelte durchschnittliche Sandgehalt von 9,2 % angesetzt (Kapitel 3.2). Für den Sand wurde damit ein durchschnittlicher Eintrag aus den Nebenflüssen von 0,112 Mt/a berechnet.

Ton/Schluff

Die Einträge der Ton/Schluff-Fraktion aus den Nebenflüssen Neckar, Main, Lahn und Mosel wurden analog zu den Sandeinträgen aus den werktäglichen Einzelmessungen des Schwebstoffdauermessnetzes der WSV bestimmt (Tab. 7.2). Aufgrund fehlender Daten wurde keine Korrektur aufgrund von organischen Anteilen durchgeführt. Der Sandgehalt von 9,2% wurde von der Gesamtschwebfracht abgezogen, um den Anteil der Ton/Schluff-Fraktion zu ermitteln. Die Einträge kleinerer Nebenflüsse wurden stichpunktartig aus Daten verschiedener Landesämter ermittelt und durch eine Klassifikation der Einzugsgebiete nach ihrer Größe auf den Eintrag in den Ober- und Mittelrhein zu 0,031 Mt/a hochgerechnet (Kapitel 3.3) (Gehres et al. 2014). Es ergibt sich ein durchschnittlicher Eintrag aller Nebenflüsse von 1,109 Mt/a (vgl. Tab. 7.2).

Tab. 7.2: Sedimenteintrag der Nebenflüsse des Ober- und Mittelrheins. Der Eintrag kleiner Nebenflüsse unterscheidet sich von den Werten in Tab. 3.1, da hier nur die Nebenflüsse des Ober- und Mittelrheins erfasst wurden.

	Fluss- km	Anzahl der Messwerte	Mittl. Schwebstoff- konzentration (g/m ³)	Schwebstoff Mt/a	Susp. Sand Mt/a	Feinschwebstoffe Mt/a
Neckar (Rockenau)	61,3	7159	28	0,261	0,024	0,237
Main (Eddersheim)	15,6	7221	27	0,257	0,024	0,233
Lahn (Kalkofen)	31,6	6296	21	0,058	0,005	0,053
Mosel (Brodembach)	27,2	5970	29	0,612	0,056	0,556
Kleine Nebenflüsse				0,034	0,003	0,031
Gesamt				1,221	0,112	1,109

Zeitraum: 1991-2010

7.3.4 Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe

Die Hauptzugabe (ca. 50 %) anthropogener Sedimente im betrachteten Rheinabschnitt erfolgt unterhalb der Staustufe Iffezheim (Rhein-km 336-338) zur Stabilisierung der Sohle. Das Volumen und die Korngrößenverteilung der zugegebenen Sedimente stammen aus der Datenhaltung BauMags und wurden soweit möglich mit den Angaben der WSÄ Freiburg und Bingen geprüft. Der anthropogene Sedimenteintrag wurde durch die Multiplikation des Gesamtvolumens des Baggerguts mit dem Faktor $\rho_s (1-p)$ ermittelt, wobei $\rho_s = 2650 \text{ kg/m}^3$ die Dichte des Materials und p die Porosität des Baggerguts ist. $p [-]$ wurde auf Grundlage von Frings et al. (2011) berechnet: $p = 0,362 - 0,088\sigma_\phi + 0,219f_{<0,5}$, wobei σ_ϕ die Standardabweichung der Korngrößenverteilung des Baggergutes und $f_{<0,5}$ der Anteil des Sedimentes kleiner als 0,5 mm ist.

Die anthropogene Sedimentzugabe enthält einerseits extern zugegebenes Material, andererseits Material, welches im Rahmen von Unterhaltungsbaggerungen entnommen wurde (interne Zugabe). Die Zugaben bei Iffezheim (0,407 Mt/a) und Koblenz-Wallersheim (Rhein-km 592-594, 0,016 Mt/a) sowie die Zugaben zur Sohlstabilisierung (0,034 Mt/a) stammen ausschließlich aus externen Zugaben. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Gesamtzugabe in Höhe von 0,865 Mt/a zu 53 % (0,457 Mt/a) aus externen Zugaben stammt, während der Rest (47 % bzw. 0,408 Mt/a) der internen Umlagerung durch die Unterhaltung zuzurechnen ist.

7.3.5 Sedimenteintrag/-austrag durch Abrieb

Durch die Bewegung des Geschiebes am Gerinnebett verkleinern sich die Sedimentkörner in Fließrichtung. Der als Abrieb bezeichnete Prozess wird für die Fraktionen des Fein- und Grobkieses betrachtet. In der Sand- und Stein-Fraktion wird der Abrieb vernachlässigt. Der Abrieb stellt für die Kiesfraktionen eine Senke und für die Ton/Schluff-Fraktion eine Quelle dar. Es wird angenommen, dass sich der Abrieb prozentual entsprechend der Frachtanteile auf Fein- und Grobkiesgeschiebe verteilt. In der Realität wird der Abrieb der größeren Fraktionen deutlich größer sein als der Abrieb der feineren Fraktionen.

Gölz et al. (1995) beziffert die Abriebrate an natürlichen Rheinsedimenten mit maximal 11 % pro 50 km, was einer Rate von 0,22 % pro km entspricht. Der Abrieb in Masseinheiten ergibt sich aus der Multiplikation der Abriebrate mit der mittleren Transportdistanz des Geschiebes. Der Abrieb wurde abschnittsweise für Oberrhein, Rheingau und Rheinisches Schiefergebirge berechnet (Tab. 7.3).

Tab. 7.3: Berechnung des Abriebs getrennt nach Oberrhein, Rheingau und Mittelrhein.

Abschnitt	Länge	mittlere Feinkiesfracht	mittlere Grobkiesfracht	mittlere Gesamtkiesfracht	Gesamt-abrieb	Abrieb Feinkies	Abrieb Grobkies
	km	Mt/a	Mt/a	Mt/a	Mt/a	Mt/a	Mt/a
Oberrhein	153	0,122	0,103	0,225	0,076	0,041	0,035
Rheingau	42	0,047	0,002	0,049	0,005	0,004	0,000
Rh. Schiefergebirge	111	0,051	0,009	0,060	0,015	0,012	0,002
Summe	306				0,095	0,058	0,037

7.3.6 Sedimentausttrag nach unterstrom

Kies/Steine

Die langjährigen Mittelwerte der Geschiebefrachten – und damit des Sedimentausttrag am Pegel Königswinter (Rhein-km 645,8) – wurde auf Grundlage der gemessenen Geschiebefrachten (ca. 4 Messungen pro Jahr pro Messstelle) und einer statistisch signifikanten Transport-Abfluss-Beziehung berechnet (vgl. Frings et al., 2014a). Die Frachtanalyse hat gezeigt, dass die mittleren Jahresfrachten im Untersuchungszeitraum 1991-2010 für Grobkies 0,015 Mt/a und für Feinkies 0,044 Mt/a betragen. Die obere Korngrenze der gemessenen Frachten beträgt aufgrund der Trichterweite des Geschiebefängers 100 mm.

Sand

Der Sandausttrag wurde auf Basis von Frings et al. (2014a) bestimmt. Für den suspendierten Sand beträgt die mittlere Jahresfracht bei Königswinter (Rhein-km 645,8) im Untersuchungszeitraum 0,322 Mt/a. Für die als Geschiebe transportierte Sandfracht wurde ein Wert von 0,035 Mt/a bestimmt. Es ist jedoch bekannt, dass aufgrund des benutzten Geschiebefängers mit Maschenweite 1,4 mm die Sandfrachten in vorgenannter Studie unterschätzt wurden. Eine aktuelle Laboruntersuchung (Kapitel

3.1, Banhold et al., 2014) zeigte, dass bei diesem Geschiebefänger ein relevanter Sandverlust auftritt. Entsprechend dieser Laboruntersuchung wurde in der vorliegenden Studie die Sandgeschiebefracht aus Frings et al. (2014a) mit 2,8 multipliziert. Damit ergibt sich ein Gesamtaustrag an Sand als Schwebstoff und Geschiebe von 0,420 Mt/a.

Ton/Schluff

Die Austräge der Ton- und Schlufffraktion in den Niederrhein wurden auf Grundlage der Schwebstoffdauermessstation Weißenthurm (Rhein-km 608,2) berechnet. Die mittlere Jahresfracht des gesamten Schwebstoffs im Zeitraum 1991-2010 bei Weißenthurm betrug 2,644 Mt/a. Diese Fracht umfasst sowohl mineralische Komponenten der Ton-, Schluff- und Sandfraktionen als auch organische Anteile. Der Anteil an Phytoplankton wurde über Daten von Chlorophyll-a-Gehalten an der Messstelle Koblenz/Rhein (Daten der FGG Rhein) für den Zeitraum 1991-2010 zu 0,046 Mt/a abgeschätzt. Weiterhin ist aufgrund der Untersuchungen von Astor et al. (2014) (Kapitel 3.2) bekannt, dass die mineralischen Anteile der Schwebstoffe im Rhein im Durchschnitt 9,2 % Sand beinhalten (0,239 Mt/a). Damit errechnet sich ein Ton- und Schluffeintrag in den Niederrhein von 2,359 Mt/a.

7.3.7 Sedimentausttrag durch Baggerungen

Die Hauptentnahmestelle stellt der Sedimentfang in Mainz-Weisenau (Rhein-km 494) am oberen Ende des Mainzer Beckens dar. Insgesamt wurde im Zeitraum von 1991 bis 2010 ein Volumen von 1.673.444 m³ aus dem Sedimentfang entnommen. Die Korngrößenverteilungen der Baggerungen entsprechen der Kornverteilung der Sohle zwischen 0,1 und 0,5 m Tiefe. Die Umrechnung des Volumens in Masse erfolgt analog zu Kapitel 7.3.4 unter Berücksichtigung der Dichte von 2650 kg/m³ und der ermittelten Porosität der Flusssohle zwischen 0,16 und 0,25. Demnach entspricht das entnommene Volumen einer Masse von 0,165 Mt/a. Davon wurden ca. 68 % dem System entnommen (externer Austrag) und ca. 32 % stromabwärts wieder in den Rhein verklappt. Da bei allen weiteren Baggerentnahmen (0,301 Mt/a) das Material ebenfalls verklappt wird, beträgt der berechnete externe Austrag durch Baggerungen insgesamt 0,112 Mt/a. Dies entspricht einem Anteil von 24 % an den gesamten anthropogenen Austrägen.

7.3.8 Sedimentausttrag auf Überflutungsflächen

Die Sedimentation auf den Vorländern des Rheins wurde in dieser Studie mittels der Tiefenverteilung des Cäsiums 137 untersucht (Banhold et al., 2014, Kapitel 3.4). Die Datierung der akkumulierten Sedimente beruht auf der Identifikation des ¹³⁷Cs-Peaks, welcher der Reaktorkatastrophe in Tschernobyl im Jahre 1986 zugeordnet werden kann, und liefert damit mittlere Erosionsraten seit 1986.

Kies/Steine

Es wird angenommen, dass nur Sand-, Schluff- und Tonpartikel aus dem Hauptgerinne auf die Vorländer transportiert werden. Die Sedimentausträge von Kies/Steinen auf die Überflutungsflächen werden entsprechend in der Bilanz zu null gesetzt.

Sand

Die Austräge von Sand auf die Überflutungsflächen im Ober-/Mittelrhein im Bilanzzeitraum wurden aufgrund der Messungen von Banhold et al. (2014) zu durchschnittlich 0,149 Mt/a abgeschätzt.

Ton/Schluff

Die Austräge von Ton und Schluff auf die Überflutungsflächen im Niederrhein im Bilanzzeitraum 1991 bis 2010 wurden aufgrund der Messungen von Banhold et al. (2014) zu durchschnittlich 0,569 Mt/a abgeschätzt.

Tab. 7.4: Berechnete Sedimentationsraten auf Vorländern des Ober- und Mittelrheins in Deutschland. Die Gesamtmasse beinhaltet organische Bestandteile, die der Sand und Ton/Schluff-Fractionen nur anorganische (Banhold et al., 2014).

Zone	Gesamt		Sand		Ton/Schluff	
	[Mt a ⁻¹]	[1000 t km ⁻¹ a ⁻¹]	[Mt a ⁻¹]	[10 ³ t km ⁻¹ a ⁻¹]	[Mt a ⁻¹]	[10 ³ t km ⁻¹ a ⁻¹]
Oberrhein	0,743	3,8	0,129	0,7	0,539	2,8
Mittelrhein	0,054	0,5	0,020	0,2	0,030	0,3

7.3.9 Sohlhöhenänderung

Die Sohlhöhenänderungen ΔS im Betrachtungszeitraum am frei fließenden Ober- und Mittelrhein wurden aus Peildaten der Jahre 1985 und 2010 nach Frings et al. (2014a) berechnet. Da die Peilung mit Ausnahme der Messkampagnen in den Jahren 1993 und 2004 auf die Fahrrinne beschränkt ist, wurde ein Korrekturfaktor berücksichtigt, der sich unter anderem aus dem Verhältnis der Breite der Fahrrinne zur Breite des morphologisch aktiven Gerinnes und dem Verhältnis der Sedimentation in beiden Bereichen zusammensetzt. Da sich der Zeitraum der Peildaten (1985-2010) nicht mit dem Zeitraum der Bilanzierung deckt, wurden die mittleren jährlichen Raten auf die Jahre 1991-2010 (unter der Annahme konstanter Raten) umgerechnet.

Im Bereich des Ober- und Mittelrheins treten lokal differenziert sowohl Erosion als auch Sedimentation auf. Im südlichen Teil des betrachteten Gebietes (Rhein-km 336-425) dominiert die Zunahme der Sohlhöhe, während im zentralen Bereich (Rhein-km 425-531) die Abnahme überwiegt. Sohlhöhenänderungen stellen also sowohl Sedimentquellen als auch Senken in der Bilanz dar. Insgesamt ergibt sich im Zeitraum 1991 bis 2010 eine Netto-Erniedrigung über den gesamten Bilanzraum von durchschnittlich 0,323 Mt/a.

Welche Korngrößen im Einzelnen erodiert werden, ist nicht bekannt. Bei bekannter Gesamtänderung der Sohle lassen sich die fraktionierten Ein- und Austräge aus der Sohländerung rechnerisch aus der fraktionierten Bilanzierung auf die einzelnen Kornfraktionen aufteilen.

Kies/Steine

Für die Feinkies- und Grobkies/Stein-Fractionen stellt die Flusssohle eine Senke am Ober- und Mittelrhein dar. Über den gesamten Bilanzraum betrachtet ergibt sich im Betrachtungszeitraum 1991 bis 2010 für diese Fractionen eine positive Sohlhöhenänderung, d. h. eine Sedimentation, von durchschnittlich 0,005 Mt/a und 0,191 Mt/a.

Sand

Für den Sand stellen die Sohländerungen am Ober- und Mittelrhein ein Quelle dar. Über den gesamten Bilanzraum betrachtet ergibt sich im Betrachtungszeitraum 1991 bis 2010 für die Sandfraction eine negative Sohlhöhenänderung, d. h. eine Erosion, von durchschnittlich 0,519 Mt/a.

Ton/Schluff

Ton- und Schlufffractionen liegen in der Sohle des Ober- und Mittelrheins nicht oder nur in sehr geringen Mengen vor. Der Anteil der Sedimentation oder Erosion der Ton- und Schlufffractionen an den beobachteten Sohländerungen im Ober- und Mittelrhein wird entsprechend als vernachlässigbar gering eingeschätzt und in der Bilanz zu null gesetzt.

7.3.10 Sedimentausttrag in Bühnenfelder und Häfen

Bühnenfelder können als Zwischenspeicher von Sedimenten auftreten und entsprechend Quellen oder Senken für Sedimente darstellen. Da in vielen Bühnenfeldern eine Tendenz zur Verlandung beobachtet wird, liegt die Vermutung nahe, dass Bühnenfelder auf lange Sicht tendenziell eine Senke

darstellen. Dies steht im Kontrast zu den Bühnenfeldern entlang des niederländischen Teils des Rheins, die ein Gleichgewicht verzeichnen (Ten Brinke et al., 2004). Zum Sedimentaustrag in die Bühnenfelder des Ober- und Mittelrheins im Zeitraum 1991 bis 2010 liegen keine Daten vor. Der Sedimentaustrag in Bühnenfelder O_{gr} wird für die Korngrößen $> 63 \mu\text{m}$ deshalb als Term zur Schließung der Bilanz verwendet und aus den übrigen auf der Grundlage von Messungen bestimmten Termen rückgerechnet. Für die Korngrößen $< 63 \mu\text{m}$ wird der Nettoaustrag aus Bühnenfeldern auf null gesetzt (siehe unten). Der Netto-Sedimentaustrag in die Bühnenfelder ergibt sich aus der Bilanz über alle Kornfraktionen für den Zeitraum 1991 bis 2010 am Ober- und Mittelrhein zu durchschnittlich $0,188 \text{ Mt/a}$ insgesamt. Dieser Sedimentaustrag beinhaltet neben der Sedimentablagerung in den eigentlichen Bühnenfeldern auch weitere Sedimentation in der Nähe der Uferkante, beispielsweise die Bildung von Uferrehnen.

Sand/Kies/Steine

Für die Aufteilung der Sedimentausträge in Bühnenfelder auf einzelne Kornfraktionen wird die Annahme zugrunde gelegt, dass sich das Sedimentmaterial der Bühnenfelder aus dem gesamten transportierten, für die Bettbildung relevanten Material zusammensetzt. Deshalb wurde über den Ober- und Mittelrhein die Korngrößenverteilung der gemessenen Sand- und Kiesfrachten (Geschiebe und suspendierter Sand) der Messstellen Plittersdorf und Königswinter gemittelt und die sich daraus ergebende Kornverteilung als Verteilung des sich in den Bühnenfeldern ablagernden Materials angesetzt. Im Durchschnitt setzten sich die Frachten aus $56,3 \%$ Sand (in Suspension und als Geschiebe), aus $16,2 \%$ Feinkies (Geschiebe) und $27,6 \%$ Grobkies (Geschiebe) zusammen. Ein Transport von Korngrößen $> 100 \text{ mm}$ wurde aufgrund der begrenzten Öffnung des Geschiebetrichters nicht gemessen.

Damit ergeben sich durchschnittliche Sedimentausträge in die Bühnenfelder im Bilanzraum für den Zeitraum 1991 bis 2010 von $0,106 \text{ Mt/a}$ an Sand, $0,030 \text{ Mt/a}$ an Feinkies und $0,052 \text{ Mt/a}$ an Grobkies/Steinen.

Ton/Schluff

Es ist bekannt, dass Bühnenfelder grundsätzlich auch Senken und Quellen für Feinsedimente darstellen (Wirtz, 2004; Schwartz, 2006; Hillebrand et al., 2014). Für den Ober- und Mittelrhein liegen keine Daten zu Feinsedimentablagerungen in Bühnenfeldern vor. Es wird deshalb aufgrund der mangelnden Datenlage vereinfachend angenommen, dass sich Feinsedimentablagerungen in den Bühnenfeldern des Ober- und Mittelrheins im Gleichgewicht befinden, d. h. dass sich Sedimentation und Remobilisierung von Feinsedimenten in den Bühnenfeldern über den Betrachtungszeitraum die Waage halten. Der entsprechende Bilanzterm O_{gr} wird deshalb in der Bilanz für die Ton- und Schlufffraktion zu null gesetzt.

7.3.11 Sedimenteintrag aus diffusen Quellen

Neben den Punktquellen für Sedimente, wie den Einträgen von oberstrom und aus Nebenflüssen oder durch anthropogene Sedimentzugabe, und den Einträgen aus der Sohle bzw. aus dem Abrieb können weitere Quellen entlang der Fließstrecke eines Bilanzraums auftreten. Dazu gehören beispielsweise Einträge aus Kläranlagen, aus Uferabbrüchen oder aus Bodenerosion in Flussnähe. Diese potenziellen Quellen werden als Sedimenteinträge aus diffusen Quellen I_{di} zusammengefasst.

Sand/Kies/Steine

Für die gröberen Sedimentfraktionen mit Korngrößen $> 63 \mu\text{m}$ wird davon ausgegangen, dass keine relevanten diffusen Quellen am Ober- und Mittelrhein im Zeitraum 1991 bis 2010 vorhanden sind. I_{di} wird für diese Korngrößen daher auf null gesetzt.

Ton/Schluff

Der Sedimenteintrag aus diffusen Quellen wird für die Ton- und Schlufffraktionen in der Bilanz als Schließungsterm verwendet. Aus der Bilanz ergeben sich durchschnittlich 0,879 Mt/a an zusätzlichen Einträgen aus diffusen Quellen für den frei fließenden Ober- und Mittelrhein im Zeitraum 1991 bis 2010.

7.4 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Sedimentbilanzierung für die betrachteten Korngrößenfraktionen des frei fließenden Ober- und Mittelrheins sind in der Tabelle 7.5 und den Abbildungen 7.8 und 7.9 zusammengefasst.

Für die summierte Bilanz der Sande, Kiese/Steine ist die anthropogene Zugabe von Material die größte Bilanzkomponente am Ober- und Mittelrhein. Der Sedimenteintrag aus dem staugeregelten Oberrhein liegt in einer ähnlichen Größenordnung wie der Eintrag aus den Nebenflüssen und ist mit knapp 18 % der externen Gesamteinträge von untergeordneter Bedeutung. Der Eintrag entspricht in der Summe dem Austrag nach unterstrom plus dem Austrag durch Baggerungen, die die größten Posten des Austrags sind. Als Schließungsterm der Sedimentbilanz nimmt die Sedimentation in den Bühnenfeldern mit 13 % nur einen geringen Teil der gesamten Austräge ein. Die Sohle stellt eine relevante Sedimentquelle dar, die sich v. a. aus der Erosion des Sandes ergibt und die durch die Sedimentation der Kies/Stein-Fraktion in der Summe um die Hälfte reduziert wird.

In der summierten Kies/Stein-Bilanz stellen die anthropogenen Sedimentzugaben den größten Term dar. Während die Grobkiese/Steine zum überwiegenden Teil in der Sohle gespeichert werden und nur ein sehr kleiner Teil das Mittelrheintal nach unterstrom verlässt, wird die Hälfte der eingetragenen Feinkiese durch Baggerungen wieder entfernt und nur ein kleiner Teil in der Sohle gespeichert bzw. nach unterstrom ausgetragen. Ca. 9 % der zugegebenen Grobkiese bzw. 17 % der zugegebenen Feinkiese, wird durch Abrasion in die Ton/Schluff-Fraktion überführt.

Die Bilanz der Sandfraktion wird durch die Erosion der Flusssohle dominiert. Sie stellt, gefolgt von den anthropogenen Zugaben und dem Eintrag durch die Nebenflüsse, mit Abstand die größte Sandquelle im Ober- und Mittelrhein dar. Die größte Senke des Sandes ist der Austrag nach unterstrom, der in etwa 50 % der Gesamtausträge repräsentiert und in der Größenordnung der Sohlerosion entspricht. Der Austrag durch Baggerung und die Sedimentation in den Flussauen sind ebenfalls relevant und entsprechen 21 % bzw. 17 % des Gesamtaustrages.

Die Bilanz der Ton/Schluff-Fraktion zeigt ein gänzlich anderes Bild im Vergleich zu den groben Kornfraktionen und belegt die Dominanz der Suspensionsfracht im nördlichen Oberrhein und Mittelrhein. Die größte Quelle ist der Eintrag aus den Nebenflüssen, gefolgt von den diffusen Einträgen und dem Eintrag aus dem staugeregelten Rhein. Mit 81 % dominiert der Sedimentaustrag in den Niederrhein die Sedimentsenken, gefolgt von der Akkumulation in den Flussauen, die ca. 19 % der eingetragenen Sedimente entspricht. Als Schließungsterm der Sedimentbilanz zeigt der große Anteil der diffusen Einträge (30 % bezogen auf die Gesamteinträge) die großen Unsicherheiten der Ton/Schluff-Bilanz.

Die Veränderung der Sand, Kies- und Ton/Schluff-Fracht entlang des frei fließenden Ober- und Mittelrheins ist in Abb. 7.9 dargestellt. Die Grafik verdeutlicht die Größenordnungen der Frachten der einzelnen Fraktionen. Die Aufteilung der gesamten Sand/Kies-Fracht in die Fraktionen Sand, Feinkies und Grobkies erfolgte durch die gemessenen Korngrößenverteilungen der Frachten an den Stationen der regelmäßigen Frachtmessungen.

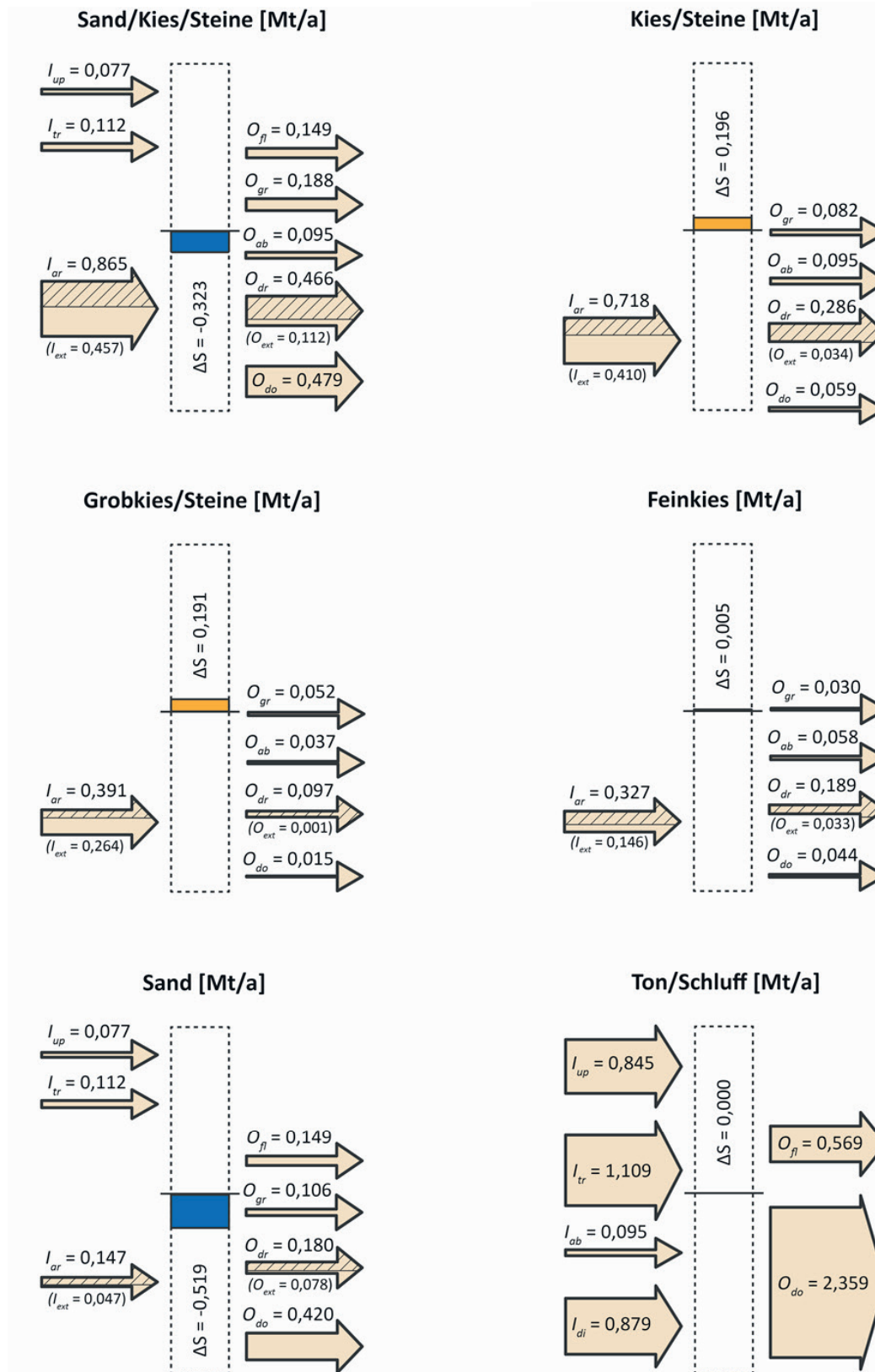


Abb. 7.8: Sedimentbilanz des frei fließenden Ober- und Mittelrheins für den Zeitraum 1991-2010 für die Fraktionen Ton/Schluff (< 0,063 mm), Sand (0,063 bis 2 mm), Feinkies (2 bis 16 mm), Steine/Grobkies (16 bis 125 mm), und alle Fraktionen > 0,063 mm. Zu beachten ist, dass sich bei $\Delta S \sim 0$ Anlandungen und Sedimenteinträge einerseits sowie Eintiefungen und Sedimentausträge andererseits in der Flussstrecke kompensieren; $\Delta S \sim 0$ ist somit kein Zeichen einer stabilen, undynamischen Sohle. Nomenklatur nach Kapitel 7.3.1.

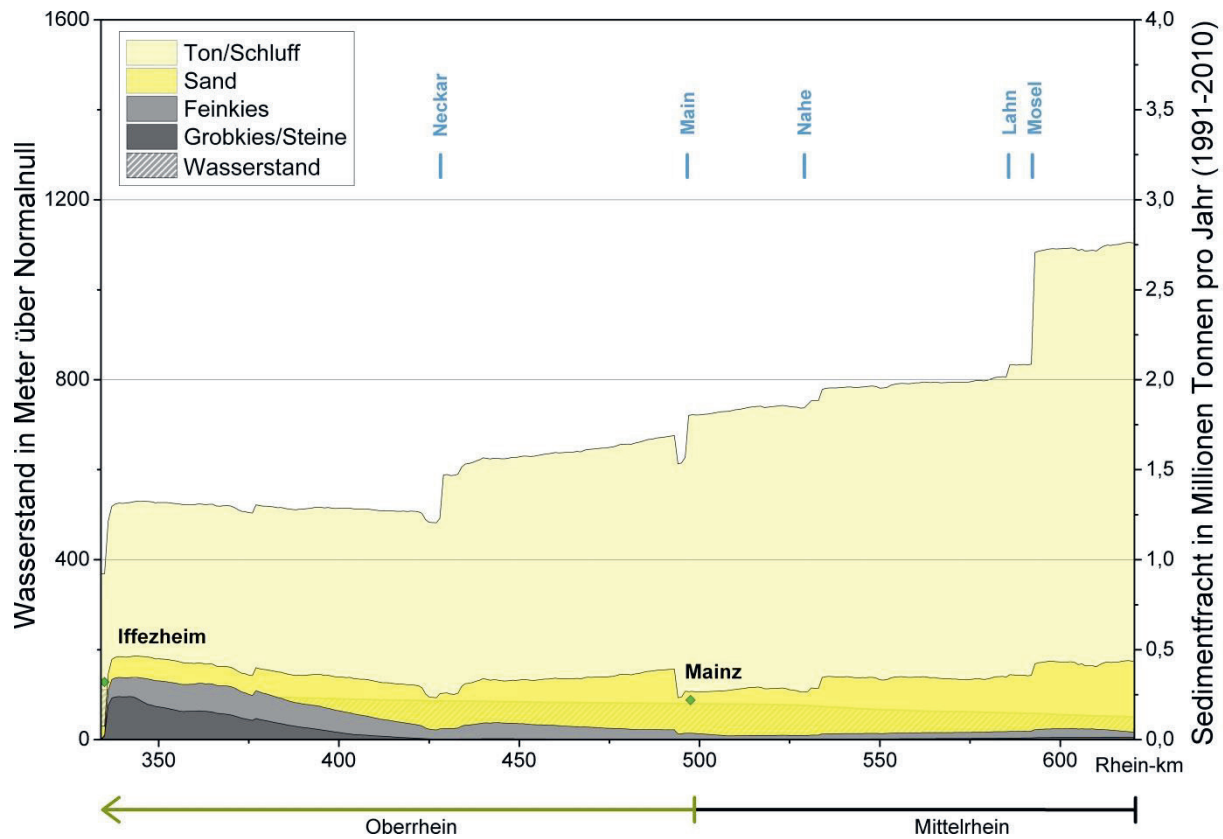


Abb. 7.9: Frachtlängsschnitt für den frei fließenden Ober- und Mittelrhein in Mt/a für Grobkies, Feinkies, Sand und Ton/Schluff, berechnet aus der Bilanz.

Die Fracht der Ton/Schluff-Fraktion dominiert entlang des gesamten Längsprofils und nimmt v. a. im Bereich der drei großen Nebenflüsse Neckar, Main und Mosel sprunghaft von am Streckenbeginn 0,845 Mt/a auf 2,350 Mt/a zu. Die Sandfrachten (in Suspension und als Geschiebe) nehmen im nördlichen Oberrheingraben stromabwärts von etwa 0,1 Mt/a bei Iffezheim bis ca. Rhein-km 480 auf rund 0,3 Mt/a zu. Der signifikante Anstieg ist v. a. eine Folge der Sohländerung, die eine Quelle für den Sand in diesem Bereich darstellt. Im Mainzer Becken und im Mittelrheintal schwankt die Sandfracht zwischen ca. 0,25 und 0,35 Mt/a und zeigt keinen klaren Trend. Der Transport von Grobkies beträgt kurz unterhalb der Stauhaltung in Iffezheim ca. 0,2 Mt/a (als Folge der Geschiebezugabe), nimmt jedoch schnell ab und ist ab Rhein-km 426 kleiner als 0,01 Mt/a. Im Bereich des Mittelrheines ist ein leichter Anstieg der Grobkiesfracht zu verzeichnen. Die Fracht des Feinkieses nimmt hingegen nur langsam und nahezu linear von Rhein-km 334 bis 650 ab.

7.5 Diskussion

7.5.1 Betrachtung der Unsicherheiten

Die Unsicherheiten der Bilanz ergeben sich zum einen aus den Annahmen, die der Gesamtbilanz zugrunde liegen, zum anderen aus den Unsicherheiten bei der Bestimmung der einzelnen Bilanzterme. Diese werden im Folgenden einzeln diskutiert.

Tektonik

Bei der Aufstellung der Bilanzgleichung (Kapitel 7.3.1) wurde die Annahme getroffen, dass tektonische Sohlhöhenänderungen eine untergeordnete Rolle spielen. Rezente tektonische Aktivität im nördlichen Oberrhein ist auf den Niersteiner Horst limitiert, dessen Hebungsraten jedoch um einige Größenordnungen kleiner als die gemessenen Sohländerungen und damit vernachlässigbar sind (Peters and van Balen, 2007).

Sohländerungen

Die Ableitung der Sohlhöhenänderung erfolgte auf Basis von Peildaten, die sich (mit Ausnahme der Jahre 1993 und 2004) auf die Fahrinne beschränken. Die Extrapolation auf die gesamte morphologisch aktive Breite zwischen den Bühnenköpfen führt damit zu zusätzlichen Unsicherheiten im Bereich des Ober- und Mittelrheins. Zur Umwandlung der Volumina in Massen wird eine Information über die Porosität der Sohle benötigt. Zur Abschätzung der Porosität wurde ein semiempirischer Ansatz von Frings et al. (2011) verwendet. Ein systematischer Fehler in den Peilungen kann lokal bis zu 5 cm betragen (Frings et al., 2014a). Die Sohländerungen im Betrachtungszeitraum 1991 bis 2010 waren jedoch überwiegend größer als 5 cm (bzw. 0,25 cm/a), was bedeutet, dass die beobachteten Sohländerungen signifikant sind. Insgesamt wird von einer Unsicherheit bei der Bestimmung der Änderungen der in der Sohle zwischengespeicherten Sedimentmengen von 20 % (Kies) und 40 % (Sand) ausgegangen (Frings et al., 2014a).

Sedimentfrachten

Die Unsicherheiten bei der Bestimmung mittlerer Sedimentfrachten liegen in der Größenordnung von 40 %. Die Annahme, dass durch die Staustufe Iffezheim kein Kiese/Steine gelangen, kann als gesichert angesehen werden. Größere Unsicherheiten bestehen bei der Bestimmung des oberstromigen Sedimenteintrags von Sand und Ton/Schluff und des Sedimentaustrags am Pegel Weißenthurm (Rhein-km 608,2). Die Bestimmung der langjährigen Mittelwerte der Geschiebefrachten setzt eine statistisch signifikante Transport-Abfluss-Beziehung aus den Messungen voraus, die nicht für alle Messstellen gegeben ist. Messstellen mit nicht signifikanten Transport-Abfluss-Beziehungen wurden in dieser Studie nicht berücksichtigt. Um die inhärente systematische Unterschätzung der Sedimentfrachten bei der Verwendung einer Potenzfunktion als Transport-Abfluss-Beziehung zu berücksichtigen, wurde zur Bestimmung der mittleren Jahresfrachten eine Bias-Korrektur nach Duan (1983) durchgeführt. Insgesamt wurden die Unsicherheiten der langjährigen Mittelwerte der Frachten aller Korngrößenfraktionen mit 40 % beziffert.

Tab. 7.5: Sedimentbilanz des frei fließenden Ober- und Mittelrheins für verschiedene Fraktionen für den Zeitraum 1991 bis 2010.

	I_{up}	I_{tr}	I_{ar}	I_{ab}	I_{di}	O_{fl}	O_{gr}	O_{ab}	O_{dr}	O_{do}	ΔS
	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)
Sand, Kies, Steine (> 0,063 mm)	0,077	0,112	0,865*	0,000	0,000	0,149	0,188	0,095	0,466	0,479	-0,323
Grobkies/Steine (> 16 mm)	0,000	<u>0,000</u>	0,391*	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,052	0,037	0,097	0,015	0,191
	±0,001	±0,001	±20%	±0%	±0,001	±0,001	±75%	±50%	±20%	±40%	±20%
Feinkies (2 – 16 mm)	0,000	<u>0,000</u>	0,327*	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,030	0,058	0,189	0,044	0,005
	±0,001	±0,001	±20%	±0%	±0,001	±0,001	±75%	±50%	±20%	±40%	±20%
Sand (0,063 – 2 mm)	0,077	0,112	0,147*	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,149	0,106	<u>0,000</u>	0,180	0,420	-0,519
	±40%	±100%	±20%	±0%	±0,100	±100%	±75%	±0,001	±20%	±40%	±40%
Ton/Schluff (< 0,063 mm)	0,845	1,109	<u>0,000</u>	0,095	0,879*	0,569	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	2,359	<u>0,000</u>
	±40%	±100%	±0,050	±50%	±100%	±50%	0,100	±0%	±0,050	±40%	±0,050

Fett gedruckte Werte sind aus Messwerten abgeleitet.

Unterstrichene Werte beruhen auf Annahmen.

Mit * gekennzeichnete Werte sind Schließgrößen der Sedimentbilanz.

Alle übrigen Werte sind aus der Bilanzierung abgeleitet.

Bei der Messung der Geschiebefrachten wurde eine systematische Unterschätzung der Sandfrachten vermutet, die sich durch die Laborversuche von Banhold et al. (2014) bestätigte. Im Bilanzzeitraum waren unterschiedliche Fängertypen im Einsatz (mit 0,5 mm, 1,0 mm und 1,4 mm Maschenweite), von denen nur die derzeit noch im Einsatz befindlichen Fänger (mit 0,5 mm und 1,4 mm Maschenweite) im Labor untersucht wurden. Auf Grundlage der Laborversuche wurden für die beiden Bilanzmessstellen Plittersdorf und Königswinter für den Ein- und Austrag Korrekturfaktoren von 3,1 und 2,8 für die Sand-Geschiebefrachten abgeleitet und angewendet. Für die Kies- und Sandfrachten werden die Unsicherheiten insgesamt zu etwa 40 % abgeschätzt.

Für die Feinanteile der Schwebstofffracht (Ton/Schluff) stehen zwei unabhängige Datensätze zur Verfügung. Auf der einen Seite werden im Schnitt drei- bis viermal jährlich an 17 Messstellen am frei fließenden Ober- und Mittelrhein Querprofilmessungen der Schwebstofffracht durchgeführt (Schwebstoffvielpunktmessungen). Zum anderen bestehen entlang des Rheins 11 Dauermessstellen, an denen arbeitstäglich Einpunkt-Messungen der Schwebstoffkonzentration durchgeführt werden. Für die Bestimmung der Einträge von oberstrom bzw. der Austräge nach unterstrom der Feinschwebstoffe wurden die Messwerte der Dauermessstellen zugrunde gelegt, da hier pro Messstelle wesentlich mehr Messwerte und auch deutlich mehr Messwerte bei Hochwasser vorliegen. Zudem konnte dadurch in der Gesamtbilanz für den deutschen Rhein für die Feinschwebstoffe auf eine einheitliche Datengrundlage zurückgegriffen werden. Die Abweichungen zwischen den beiden Messnetzen betragen im Ober- und Mittelrhein etwa $\pm 40\%$: dieser Wert wurde als Unsicherheit für die Ton/Schluff-Fracht angenommen.

Im Jahr 2009 startete im Rheineinzugsgebiet eine Pilotphase zur kontinuierlichen Erfassung der Schwebstoffkonzentration mittels kalibrierter Trübungssonden (Hillebrand et al., 2015). Im Rahmen der Pilotphase wurde an den betreffenden Messstellen über mindestens 14 Monate ein Parallelbetrieb des herkömmlichen Verfahrens einer vor Ort gefilterten Tagesstichprobe mit der an im Labor gefilterten Proben kalibrierten Trübungssonde durchgeführt, die Messwerte im 15-min-Intervall liefert. Beim Parallelbetrieb wurde festgestellt, dass die aus der kalibrierten Trübungsmessung ermittelten Jahresfrachten signifikant über den nach herkömmlicher Methodik ermittelten Jahresfrachten lagen. Die Unterschätzung des herkömmlichen Verfahrens lag im Schnitt im Bereich von 20 bis 30 %, im Maximum bei nahezu 50 %. Als Ursache kommt vor allem die niedrigere Datendichte der herkömmlichen Messung bei Hochwasserereignissen in Frage. Es ist davon auszugehen, dass die Jahresfrachten auf Basis der kalibrierten Trübungssonden verlässlicher sind und dass deshalb die in dieser Bilanz verwendeten Messwerte des Schwebstoffdauermessnetzes der WSV die wahren Frachten eher unterschätzen.

Die gemessenen Schwebstoffkonzentrationen des Dauermessnetzes wurden zum einen um den Gehalt an Biomasse des Phytoplanktons, zum anderen um den abgeschätzten Anteil an Sand korrigiert, um die mineralischen Ton/Schluff-Frachten zu erhalten. Zur Bestimmung der organischen Gehalte wurden von der FGG Rhein veröffentlichte Chlorophyll-a-Messwerte an verschiedenen Messstellen entlang des Rheins verwendet. Zur Umrechnung der Chlorophyll-a-Gehalte in Algenbiomasse wurde ein mittleres Verhältnis von Kohlenstoff zu Chlorophyll-a (C:Chl) von 45 angesetzt (Cloern et al., 1995). Außerdem wurde angenommen, dass die Algenbiomasse zu 42 % aus Kohlenstoff besteht (Fischer et al., 2002). Darüber hinaus wurde die Annahme getroffen, dass im Mittel rund 80 % des Phytoplanktons aus Kieselalgen besteht, deren Zellhülle wiederum aus anorganischem Material besteht und etwa 20 % der gesamten Biomasse ausmacht. Aus diesen Annahmen wurde eine Gesamtmenge an „Algenschwebstoff“ berechnet, die von den gemessenen Schwebstoffkonzentrationen des Dauermessnetzes abgezogen wurde. Die angesetzten Konversionsfaktoren können je nach Flussabschnitt und Jahreszeit schwanken. Da die ermittelten Algenschwebstofffrachten im Ober- und Mittelrhein jedoch im Bereich bis max. etwa 5 % der Gesamtfracht betragen, sind die Unsicherheiten in der Bestimmung der Algenschwebstofffracht für die Gesamtaussage von untergeordneter Bedeutung. Neben der Biomasse des Phytoplanktons enthalten Schwebstoffe auch abgestorbenes organisches Material. Es ist davon auszugehen, dass die Masse

an abgestorbenem organischem Material in einer vergleichbaren Größenordnung liegt wie die des lebenden organischen Materials. Für die vorliegende Bilanz wurde dieser Anteil nicht weiter berücksichtigt.

Zur Abschätzung der Sandanteile der Frachten des Schwebstoffdaueressnetzes wurden Wasserproben verschiedener Sondermesskampagnen mit Zelluloseacetatfiltern gefiltert und im Anschluss im Labor auf ihr Korngrößenspektrum untersucht. Im Mittel aus allen Proben ergab sich ein Sandgehalt von 9,2 % (Kapitel 3.2), der für die Bestimmung der Feinanteile von den Messwerten abgezogen wurde. Bei den Schwebstoffvielpunktmessungen lag der Sandanteil der Schwebstoffe etwas höher bei im Mittel 16 %.

Insgesamt wird die Unsicherheit der mittleren Jahresfracht der Feinfraktionen Ton und Schluff zu 40 % abgeschätzt.

Eintrag aus Nebenflüssen

Der Ober- und Mittelrhein umfasst mit Neckar, Main und Mosel die drei größten Nebenflüsse des Rheins. Die Annahme des vernachlässigbaren Eintrags von Steinen und Kiesen aufgrund der Stauhaltungen nahe der Mündung dieser Nebenflüsse in den Rhein kann als gesichert angenommen werden. Schwieriger ist die Abschätzung des Geschiebeeintrags durch kleinere Nebenflüsse. Insgesamt wird die Unsicherheit des Eintrags generell hoch, aber betragsmäßig recht gering zu 0,001 Mt/a eingeschätzt. Aufgrund der sehr eingeschränkten Datenlage des Schwebstofftransports in den Nebenflüssen wird der Fehler für Einträge der Ton/Schluff-Fraktion auf 100 % (also auf 1,109 Mt/a) abgeschätzt. Neben den Unsicherheiten des Ein- und Austrags von oberstrom bzw. nach unterstrom, stellt damit der Eintrag der Schwebfracht aus den Nebenflüssen eine erhebliche Unsicherheit für die Bilanz des Ober- und Mittelrheins dar.

Zugaben/Baggermengen

Anthropogene Sedimenteinträge im Rahmen von Geschiebezugaben oder Sohlstabilisierungsmaßnahmen sind wegen ihrer ökonomischen Bedeutung ebenso wie Baggermengen gut dokumentiert. Deshalb werden die Unsicherheiten in der Bestimmung dieser Terme als eher gering eingeschätzt. Dennoch bestehen Unsicherheiten vor allem hinsichtlich der genauen Kornzusammensetzungen. Der maximale Fehler der anthropogenen Sedimenteinträge bzw. -entnahmen wird zu 20 % angenommen (Frings et al., 2014a).

Abrieb

Der maximale Fehler beim Sedimentaustrag (Kies) bzw. -eintrag (Ton/Schluff) aufgrund von Abrieb wird auf 50 % abgeschätzt (Frings et al., 2014a).

Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen

Zur Abschätzung der Sedimentation auf den Überflutungsflächen wurden 23 Kernproben zwischen Rhein-km 349 und 823,8 zur Datierung mittels ¹³⁷Cs entnommen. Die Unsicherheiten bei der Bestimmung des Sedimentaustrags resultieren aus der Unsicherheit der Datierung (hier die Korrelation der ¹³⁷Cs-Maxima mit der Tschernobyl-Katastrophe) und aus der großen räumlichen Variabilität der ermittelten Sedimentationsraten und dem damit einhergehenden Fehler bei der Extrapolation auf die Überflutungsflächen des Ober- und Mittelrheins. Insgesamt sind die Unsicherheiten deshalb relativ hoch und werden zu 50 % für die Schluff/Ton-Fraktion und zu 100 % für die Sand-Fraktion abgeschätzt. Hinsichtlich der mangelnden Kenntnis der großräumigen Vorlandsedimentation im Vergleich zu den anderen Bilanztermen stellen die hier vorgestellten Zahlen dennoch einen wichtigen Erkenntnisgewinn da.

Sedimentaustrag in Bühnenfelder

Der Sedimentaustrag in Bühnenfelder wurde für die Kies- und Sandfraktionen als Schließungsterm in der Bilanz verwendet. Neben dem Sedimentaustrag in Bühnenfelder sind in diesem Term auch die

Sedimentation in Hafenbecken, Altwässern etc. enthalten. Diese Sedimentausträge wurden bisher nicht quantifiziert. Ihre Unsicherheit ist deshalb entsprechend hoch. Es wird angenommen, dass der maximale Fehler bei 75 % liegt, basierend auf der Betrachtung, dass die Abschätzung einerseits sehr unsicher ist, andererseits aber in der richtigen Größenordnung liegen muss (vgl. Kapitel 7.5.2). Durch die geringe Größe des Sedimentaustrags in die Bühnenfelder (13 % bezogen auf die Gesamtausträge) ist der Einfluss auf die Unsicherheit der Gesamtbilanz jedoch eher gering.

Eintrag aus diffusen Quellen

Der Sedimenteintrag aus diffusen Quellen wurde als Schließungsterm für die Bilanz der Ton- und Schlufffraktion verwendet. Der diffuse Eintrag gleicht damit das Ungleichgewicht der Einträge gegenüber dem großen Sedimentaustrag in den Niederrhein und in die Flussauen aus. Die berechneten diffusen Einträge sind kleiner als die Einträge durch die Nebenflüsse, aber größer als der Sedimenteintrag von oberstrom und stellen somit eine bedeutende Komponente der Bilanz dar (ein Drittel der Gesamteinträge). Ansatzpunkte zur Erklärung des sehr großen diffusen Eintrages umfassen: a) Unsicherheiten der übrigen Bilanzterme, b) Einträge aus der Bodenerosion, c) Uferabbrüche des Rheins, und d) diffuse Einträge aus Kläranlagen.

Uferabbrüche entlang des Ober- und Mittelrheins sind wegen der durchgehenden Uferbefestigung vernachlässigbar. Ebenso wird der Umfang der Feinsedimenteinträge aus den zahlreichen Kläranlagen entlang des Rheins als eher gering eingeschätzt (vgl. Moshenberg, 2013).

Die Bodenerosion der ausgedehnten Flächen des Weinbaus entlang des nördlichen Oberrheins und des Mittelrheins kann als eine Hauptquelle der diffusen Einträge angesehen werden. Die mittlere Bodenerosionsrate von Weinbauflächen in Deutschland wird bei Auerwald et al. (2009) mit 5,2 t/ha/a angegeben. Bei einer zusammengefassten Fläche der Weinbaugebiete Rheinhessens, des Rheingaus und des Mittelrheins von ca. 30.000 ha, entspricht dies einer jährlichen Bodenerosion von 0,156 Mt/a. Trotz der großen räumlichen Variabilität der Erosionsraten unter Wein (0,2 – 151 t/ha/a) ist die mittlere jährliche Erosionsrate als Maximum der Einträge in den Rhein anzusehen, da der überwiegende Teil des erodierten Sedimentes an den Hängen zwischengespeichert wird und nicht die Vorfluter erreicht (Hoffmann et al., 2013). Damit kann ausgeschlossen werden, dass die Bodenerosion der Weingebiete die diffusen Einträge allein erklärt. Die Weingebiete tragen maximal 25 % zu den diffusen Einträgen bei.

Neben den diffusen Einträgen sind der Sedimenteintrag des oberstromigen Rheins und der Nebenflüsse sowie der Austrag nach unterstrom die dominanten Terme der Ton/Schluff-Bilanz. Die Magnitude des diffusen Eintrags kann daher allein durch die erheblichen Unsicherheiten dieser Terme (40 % für den Eintrag von oberstrom und Austrag nach unterstrom und 100 % für die Nebenflüsse) erklärt werden. Da der Eintrag von oberstrom und Austrag nach unterstrom auf der gleichen Datengrundlage und Berechnungsmethode beruhen, ist eine gleichzeitige Überschätzung des Austrags und Unterschätzung des Eintrags unwahrscheinlich. Vielmehr ist die Ursache der großen diffusen Einträge vor allem bei der Unterschätzung der Einträge durch die Nebenflüsse zu suchen, die sich zum einen aus der Lage der Messpegel weit oberhalb der Zuflüsse und zum anderen aus der fehlenden Datengrundlage für die zahlreichen kleineren Zuflüsse ergibt. Zum Beispiel liegt der mündungsnächste Schwebstoffpegel des Neckars bei Rockenau 60 km oberhalb des Zusammenflusses von Neckar und Rhein und schließt damit den Zufluss der Elsenz, eines bedeutenden Tributärs des Neckars, aus. Da die Elsenz zum großen Teil leicht erosive Lössböden im Einzugsgebiet aufweist, ist zu vermuten, dass sie eine wichtige Schluff-Quelle des Neckars und damit des Rheins darstellt. Zudem werden einige kleinere Nebenflüsse nicht berücksichtigt, die aufgrund ihrer Lage in den Lössgebieten hohe spezifische Austräge vermuten lassen.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Sedimentbilanz der Schluff/Ton-Fraktion aufgrund der Größe der diffusen Sedimenteinträge die größten Unsicherheiten aufweist. Für ein

effektives Management der Feinsedimente des Ober- und Mittelrheines ist eine Reduzierung der Unsicherheiten von großer Bedeutung.

7.5.2 Validierung

Sand/Kies

Entlang des frei fließenden Ober- und Mittelrheins liegen an 17 Messstellen Daten zu Kies- und Sandfrachten vor. Die Berechnung der Sand/Kies-Frachten zur Erstellung der Sedimentbilanz erfolgte auf Grundlage der Stationen Plitterdorf und Königswinter. Die übrigen Stationen wurden zur Validierung hinzugezogen: ein Vergleich dieser Daten im Längsschnitt ist in Abb. 7.10 dargestellt. In der Bilanzrechnung wurden Sand- und Kies/Stein-Frachten zusammengefasst, da Sohländerungen zwar räumlich differenziert vorliegen, aber zunächst nur in Summe für alle Sedimentfraktionen.

Am Ende der Strecke ist eine gute Übereinstimmung der Frachten erzwungen, da die gemessenen Frachten den Austrag der Bilanz aus dem Längsschnitt darstellen. Alle Messwerte, mit Ausnahme der Stationen Mainz (Rhein-km 498,3) und Niederwalluf (Rhein-km 508) unterhalb des Geschiebefangs bei Weisenau (Rhein-km 494) sowie Bingen (Rhein-km 528,8), liegen innerhalb der angenommenen Unsicherheit von $\pm 40\%$ (grau-schattierter Bereich in Abb. 7.10). Die Abweichungen resultieren vor allem aus der erwarteten und starken Abnahme der modellierten Frachten unterstrom des Sedimentfanges. Diese Abnahme spiegelt sich jedoch nicht in den gemessenen Frachten an den Stationen Mainz und Niederwalluf wider. Für den übrigen Verlauf des Längsprofils sind die gemessenen und modellierten Frachten sehr ähnlich und belegen damit die Güte der Sand/Kies-Bilanz für den frei fließenden Ober- und Mittelrhein.

Ton/Schluff

Zur Validierung der Ton/Schluff-Bilanz wurden die aus der Bilanz ermittelten Frachten für Schluff und Ton mit denen an den 5 Dauermessstellen und den 17 SVP-Messstellen entlang der Strecke verglichen (Abb. 7.11). Die Dauermessstellen beruhen wie bereits erwähnt auf werktäglichen Messungen, während die Frachten der SVP-Messstellen im Schnitt auf zwei- bis dreimal jährlich durchgeführten Querprofilmessungen beruhen. Die Dauermessstellen Plittersdorf (Rhein-km 340,2) und Weißenthurm (Rhein-km 608,2) dienen als Stützstellen der Bilanzierung und sind somit nicht als unabhängige Größen zu betrachten.

Generell zeigen alle drei Kurven eine Zunahme der Suspensionsfrachten entlang des Ober- und Mittelrheins. Während die modellierten Frachten durch geringe Anstiege zwischen den Nebenflüssen und deutliche Sprünge an den Zuläufen des Neckars, des Main, der Lahn und v.a. an der Mosel gekennzeichnet sind, zeigen die SVP-Messungen einen deutlich variableren Verlauf. Insbesondere unterhalb von Rhein-km 480 weisen die SVP-Messungen einen Sägezahn-Verlauf auf, der nicht den Ergebnissen der Bilanz und der Stationen des Schwebstoffdauermessnetzes entspricht.

Der Verlauf der Frachten des Dauermessnetzes stimmt im Wesentlichen mit dem der Modellierung gut überein. Abweichungen bestehen vor allem an den Zuläufen von Neckar und Mosel: der Sedimenteintrag durch den Neckar ist bei den gemessenen Frachten kaum ausgeprägt, wohingegen der gemessene Sedimenteintrag der Mosel den modellierten Anstieg übersteigt und damit das Defizit der gemessenen Frachten ausgleicht. Der Vergleich der Dauermessstellen mit den aus der Bilanz berechneten Frachten erweckt demnach den Eindruck, dass die modellierten Frachten im Bereich zwischen Rhein-km 434 und 608 überschätzt werden. Im Hinblick auf die großen Unsicherheiten der Schwebstofffrachten (hier 40 %) sind die Unterschiede jedoch nicht signifikant. Eine Erklärung für die Unterschiede können die diffusen Einträge liefern, die in der Modellierung gleichmäßig über das gesamte Längsprofil verteilt wurden und im Wesentlichen für den Anstieg der Frachten zwischen den Nebenflüssen verantwortlich sind. Geht man davon aus, dass die diffusen Einträge vor allem im Mittelrheintal, welches durch intensiven Weinanbau mit hohen Erosionsraten und gute Kopplung der Hänge zum Rhein charakterisiert ist, erhöht und im Bereich des Oberrhein reduziert sind, werden die

bilanzierten Frachten im mittleren Teil des betrachteten Gebiets (wie in Abb. 7.11 gezeigt) überschätzt. Wie in Kap. 7.5.1 gezeigt, kann jedoch die Erosion durch Weinanbau nicht allein für die Höhe der Einträge aufkommen.

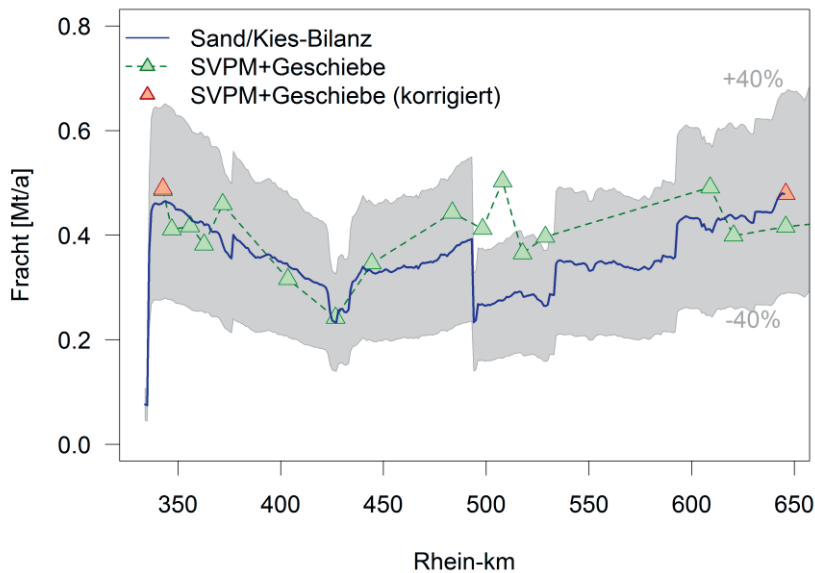


Abb. 7.10: Variation der mittleren Jahresfracht für Kies und Sand (0,063 - 63 mm) entlang des frei fließenden Ober- und Mittelrheins, berechnet aus der Bilanz mit einer Stützstelle am Beginn und Ende des Bilanzabschnittes, im Vergleich zu Frachtmessungen entlang der Strecke (grüne Dreiecke). SVPM = Schwebstoff-Vielpunkt-Messnetz. Der grau schattierte Bereich markiert die Unsicherheiten der modellierten Frachten ($\pm 40\%$).

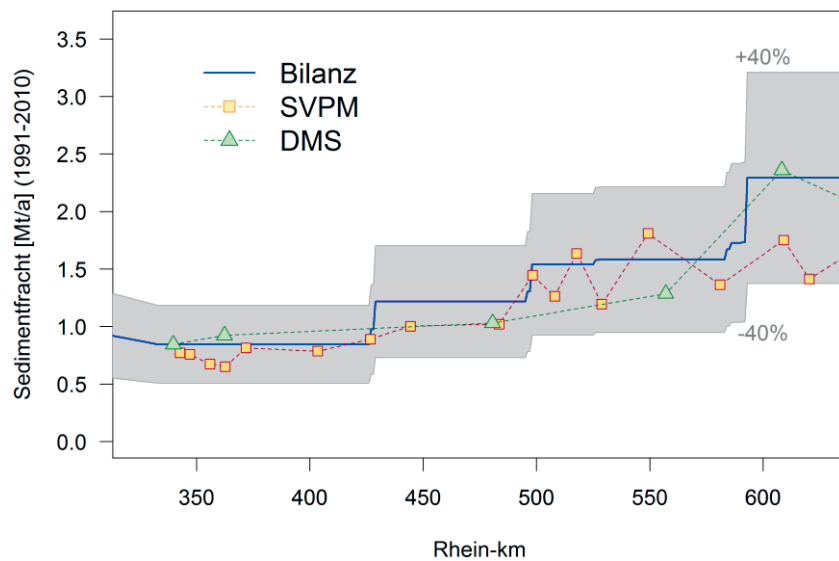


Abb. 7.11: Frachtlängsschnitt für den frei fließenden Ober- und Mittelrhein für Ton und Schluff (< 0,063 mm), berechnet aus der Bilanz mit je einer Stützstelle am Beginn und Ende des Bilanzabschnittes, im Vergleich zu Messungen aus zwei verschiedenen Messnetzen (SVPM = Schwebstoff-Vielpunkt-Messnetz, DMS = Dauermessnetz). Der grau schattierte Bereich markiert die Unsicherheiten ($\pm 40\%$) der bilanzierten Frachten. Die angegebenen Jahresfrachten sind gemittelte Werte aus dem Zeitraum 1991 – 2010.

7.5.3 Vergleich mit bereits durchgeführten Studien

Die Unterschiede der bestehenden Sedimentbilanz für den frei fließenden Ober- und Mittelrhein liegen zum einen in der Bestimmung einzelner Bilanzterme. Außerdem wurden neben der früheren Betrachtung der Kies- und Sandbilanz in Summe nun für einzelne Fraktionen getrennte Bilanzen bestimmt. Neu hinzugekommen ist ferner die Bilanz der Feinsedimente (Ton/Schluff) mit der Berücksichtigung von diffusen Quellen im Einzugsgebiet. Zudem unterscheiden sich die Zeiträume der Bilanzierung.

Mit Ausnahme des Sedimenteintrags von oberstrom, des Sedimentaustrags in Flussauen und Buhnen und der Sohländerung übersteigen in der hier gezeigten Sand/Kies-Bilanz alle Terme die der Bilanz von Frings et al. (2014a). Dies betrifft vor allem die anthropogene Sedimentzugabe und den Sedimentausttrag nach unterstrom, die mit einem Faktor von 1,9 und 4,2 signifikant höher ausfallen (Tab. 7.6). Die liegt vor allem in der unterschiedlichen Betrachtung der Zugaben und Entnahmen. In der hier aufgestellten Bilanz sind sowohl die internen als auch externen Zugaben/Entnahmen berücksichtigt, während Frings et al. (2014a) nur die externen Zugaben/Entnahmen bilanziert hat. Die Faktoren betragen 0,9 und 1,0, wenn nur die externen Zugaben/Entnahmen berücksichtigt werden. Die übrigen Terme unterscheiden sich bezogen auf die angegebenen Unsicherheiten nicht signifikant voneinander. Die Unterschiede beider Studien sind somit zum einen durch die Unsicherheiten und durch die unterschiedlichen Bilanzierungszeiträume zu erklären. Während in dieser Studie der Zeitraum 1991-2010 gewählt wurde, umfasst der Bilanzierungszeitraum in Frings et al (2014a) die Jahre 1985-2006.

Tab. 7.6: Vergleich der Sand/Kies-Bilanz dieser Studie mit der Bilanzierung von Frings et al. (2014a).

Bilanzterm	Diese Studie	Frings et al. (2014a)	Verhältnis
I_{up}	0,077	0,10	0,8
I_{tr}	0,112	0,09	1,2
I_{ar}	0,865	0,46	1,9
$\sum I$	1,054	0,65	1,6
O_{fl+gr}	0,337	0,26	1,3
O_{ab}	0,095	0,08	1,2
O_{dr}	0,466	0,11	4,2
O_{do}	0,479	0,59	0,8
$\sum O$	1,377	1,04	1,3
ΔS	-0,323	-0,38	0,9

7.5.4 Empfehlungen

Verschiedene Empfehlungen ergeben sich direkt aus der Sicht auf die Datenlage, die der vorliegenden Bilanz zugrunde liegt. Die Ergebnisse zeigen den großen Anteil, den der Sand an der Sohlentwicklung der Bilanzstrecke hat. Entsprechend hoch ist die Bedeutung des Sandhaushalts für die Wassertiefenentwicklung und damit für die Schifffahrt einzustufen. Bei Frachtmessungen im Querprofil sollte deshalb immer eine Bestimmung des Sandgehaltes erfolgen. Zur besseren Einordnung der Altdaten sollten außerdem Laborversuche mit dem Geschiebefänger der Maschenweite 1,0 mm, analog zu den im Rahmen dieser Studie durchgeführten Untersuchungen mit den Fängern der Maschenweiten 0,5 mm und 1,4 mm, durchgeführt werden.

Hohe Unsicherheiten bei gleichzeitig betragsmäßig großen Werten finden sich vor allem in den Bilanzparametern der diffusen Einträge und der Sedimentausträge in Buhnenfelder und auf Überflutungsflächen. Derzeit werden die diffusen Sedimenteinträge der Schluff/Ton-Bilanz nicht direkt gemessen oder modelliert, sondern als Schließungsterme indirekt ermittelt. Die ersten Abschätzungen zu den diffusen Einträgen (Kap. 7.5.1) sind ebenfalls mit hohen Unsicherheiten verbunden. Zur

Reduktion der Unsicherheiten der Ton/Schluff-Bilanz wird daher empfohlen, die diffusen Einträge durch eine Bodenerosions- und Sedimenteintragsmodellierung direkt zu bestimmen.

Für den Sedimentrückhalt auf Überflutungsflächen gibt es recht grobe Anhaltswerte aus Messungen, für die Bühnenfeldsedimentation musste auf Annahmen zurückgegriffen werden. Für beide Terme sollten aufgrund ihrer (rechnerischen) Relevanz weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um die Unsicherheiten zu verringern.

Aufgrund der großen Bedeutung der Nebenflüsse im untersuchten Abschnitt ist eine verbesserte Abschätzung der Einträge aus den Nebenflüssen notwendig.

Insgesamt wurden die Unsicherheiten der einzelnen Bilanzterme (Kap. 7.5.1) grob geschätzt und nicht auf Grundlage der Daten ermittelt. Hier empfiehlt sich eine detaillierte Fehleranalyse, die die räumliche Variabilität der Sedimentfrachten innerhalb eines Querschnittes und die zeitliche Variabilität berücksichtigt. Die systematische Analyse von hochfrequenten Trübungsmesswerten, die in einem Abstand von derzeit 15 Minuten gemessen werden, lassen hier erfolgversprechende Ergebnisse erwarten.

7.6 Schlussfolgerungen

7.6.1 Sedimentquellen und -senken

Die wichtigste Quelle für Sand, Kies und Steine am Ober- und Mittelrhein ist der anthropogene Eintrag in Form von Zugaben von Geschiebeersatzmaterial oder Sohlstabilisierungsmaßnahmen. Für Ton/Schluff dominiert der Eintrag durch die Nebenflüsse, die diffusen Quellen und der Eintrag von oberstrom.

Relevante Senken der Kies-Bilanz sind die Sedimententnahme durch Baggerung und im geringeren Umfang die Akkumulation in Bühnenfeldern sowie die Abrasion. Für die Sand- und Ton/Schluff-Fraktion sind die Sedimentausträge nach unterstrom und die Ablagerung in der Flussaue von Bedeutung.

An der Sohle tritt, bilanziert über den Gesamtabschnitt, eine Sedimentation von Grob- und Feinkies und eine Erosion von Sand auf, was zu einer Anreicherung von grobem Material auf der Flusssohle führt. Insgesamt ist das Ober- und Mittelrheinrheingebiet ein Erosionsgebiet.

7.6.2 Sedimentfrachten

Der hier betrachtete Abschnitt des Rheines ist durch deutliche Veränderung der Gerinneneigung und damit der Fließgeschwindigkeit (Abb. 7.4) gekennzeichnet, die durch die großskaligen tektonischen Einheiten gesteuert wird (Kap. 7.2.2). Die Veränderung der Gerinneneigung bewirkt erhebliche Änderungen der Sedimentfrachten im Längsverlauf entlang des Ober- und Mittelrheins. Die Grobkiesfracht nimmt unterhalb der Sedimentzugabestellen bei Iffezheim auf einer Strecke von 50 km erheblich ab. Im Gegenzug verdreifachen sich die Sandfrachten von Rhein-km 350 bis Rhein-km 500. Die Veränderung der Ton/Schluff-Fracht ist durch den sprunghaften Anstieg an den Nebenflüssen gekennzeichnet. Die diffusen Einträge, die per Annahme gleichmäßig über das Längsprofil verteilt werden, bewirken einen langsamen Anstieg zwischen Nebenflüssen.

7.6.3 Unsicherheiten und Empfehlungen

In der Bilanzierung der Sedimentfrachten entlang der Fließstrecke bestehen große Unsicherheiten in den Bilanztermen, die aufgrund fehlender Informationen gleichmäßig auf die Fließstrecke umgelegt wurden. Dazu gehören vor allem der Sedimentrückhalt auf Überflutungsflächen und die Sedimentation in Bühnenfeldern bzw. in Form von Uferreihen. Für diese Parameter sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um die Unsicherheiten zu verringern.

Die größte Unsicherheit für die fraktionierte Bilanzierung besteht darin, die aus Peildaten ermittelten lokalen Sohländerungen auf die Kornfraktionen umzulegen. Trifft man die Annahme, dass die Sohländerung mit einer bestimmten Kornverteilung erfolgt, beispielsweise die der Sohle oder des transportierten Materials, müssen sich Sohländerungen qualitativ für alle Kornfraktionen gleich auswirken (Erosion aller Fraktionen bzw. analog Sedimentation aller Fraktionen, ggf. in unterschiedlichem Umfang). In diesem Fall wäre es nicht möglich, dass Grobkies sedimentiert und gleichzeitig Sand erodiert. Erlaubt man andererseits unterschiedliche Vorzeichen der Sohländerungen verschiedener Fraktionen, ergeben sich entgegengesetzte Verläufe (Schmetterlingsmuster) der Frachtlängsschnitte der Fraktionen, in denen zwangsläufig eine Akkumulation der positiv gewerteten Fraktion mit einer Erosion der negativ gewerteten Fraktion einhergeht. Dies führt zu den physikalisch unplausiblen Fällen, dass die Erosion von Grobkies mit der Akkumulation von Sand zusammenfällt. Die hier verwendete Einführung von Stützstellen führt nur teilweise zur Lösung dieses Problems. Vielmehr ist eine von der Fließgeschwindigkeit abhängige, räumlich variable Zusammensetzung der erodierten/akkumulierten Korngrößenverteilung notwendig. Numerische Modelle haben das Potenzial, hier die fraktionierte Bilanzierung zu verbessern.

7.7 Literatur

- Astor, B., Gehres, N. & Hillebrand, G. (2014). Von der Quelle zur Mündung, eine Sedimentbilanz des Rheins: Korngrößenanalyse von Schwebstoffproben am Rhein und seinen Nebenflüssen. BfG-Bericht Nr. 1798. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Auerswald, K., Fiener, P. & Dikau, R. (2009). Rates of sheet and rill erosion in Germany – a meta-analysis. *Geomorphology*, 111, 182-193.
- Banhold, K., Frings, R.M. & Schüttrumpf, H. (2014a). Vorlandsedimentation am deutschen Rhein. RWTH Aachen University, Aachen.
- Banhold, K., Frings, R.M. & Schüttrumpf, H. (2014b). Teil 1: Sandverlust bei Geschiebemessungen im Rhein (No. B2014003). Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University, Aachen.
- BAW (2008). Optimierung der hydraulisch-morphologischen Situation zwischen Iffezheim und Mainz. Historische Entwicklung des Regelungssystems zwischen Iffezheim und Mainz. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- Buck, W., Felkel, K., Gerhard, H., Kalweit, H., Malde, J. van, Nippes, K.-R., Ploeger, B. & Schmitz, W. (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen – Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft. Bericht I-11, Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), Lelystad, Niederlande.
- Cloern, J. E., Grenz, C. & Videgar-Lucas, L. (1995). An empirical model of the phytoplankton chlorophyll : carbon ratio-the conversion factor between productivity and growth rate. *Limnology and Oceanography*, 40(7), 1313-1321.
- Duan, N. (1983). Smearing Estimate: A Nonparametric Retransformation Method. *Journal of the American Statistical Association*, 78(383), 605-610.

- Fischer, H., Wanner, S. C. & Pusch, M. (2002). Bacterial abundance and production in river sediments as related to the biochemical composition of particulate organic matter (POM). *Biogeochemistry*, 61(1), 37-55.
- Frings, R.M., Gehres, N., Promny, M., Middelkoop, H., Schüttrumpf, H. & Vollmer, S. (2014a). Today's sediment budget of the Rhine River channel, focusing on the Upper Rhine Graben and Rhenish Massif. *Geomorphology*, 204, 573-587.
- Frings, R.M., Döring, R., Beckhausen, C., Schüttrumpf, H. & Vollmer, S. (2014b): Fluvial sediment budget of a modern, restrained river: The lower reach of the Rhine in Germany. *Catena*, 122, 91-102.
- Frings, R.M., Schüttrumpf, H. & Vollmer, S. (2011). Verification of porosity predictors for fluvial sand-gravel deposits. *Water Resources Research*, 47(7), W07525.
- Gehres, N., Astor, B. & Hillebrand, G. (2014). Von der Quelle zur Mündung, eine Sedimentbilanz des Rheins: Rhein Nebenflüsse als Sedimentlieferanten. BfG-Bericht 1812. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Gölz, E. (1987). Zur Sohlenerosion des Niederrheins. *Wasserwirtschaft*, 77, 432-436.
- Gölz, E. (1994). Bed Degradation – Nature, Causes, Countermeasures. *Water Science and Technology*, 29(3), 325-333.
- Gölz, E. (1996). Der Rhein als Wasserstraße - Verkehr, Ausbau, Geologie. Deutsche Geologische Gesellschaft, Bonn.
- Gölz, E., Schröter, M. & Mikoš, M. (1995). Fluvial abrasion of broken quartzite used as a substitute for natural bed load. Paper presented at the Sixth International Symposium on River Sedimentation, New Delhi, India.
- Hillebrand, G., Claus, E., Schwandt, D., Becker, B., Möhlenkamp, C. & Heininger, P. (2014). Die Bühnenfelder der Elbe Fachbeiträge zum Sedimentmanagementkonzept Elbe. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz. DOI: 10.5675/BfG_Mitteilungen_30.2014.
- Hillebrand, G., Otto, W., Schmegg, J., Vollmer, S. & Gehres, N. (2015). Neuausrichtung des WSV-Messstellennetzes Schwebstoffmonitoring. BfG-1799. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Hoffmann, T., Erkens, G., Gerlach, R., Klostermann, J. & Lang, A. (2009). Trends and controls of Holocene floodplain sedimentation in the Rhine catchment. *Catena*, 77(2), 96-106.
- Hoffmann, T., Schlummer, M., Notebaert, B., Verstraeten, G. & Korup, O. (2013). Carbon burial in soil sediments from Holocene agricultural erosion, Central Europe. *Global Biogeochemical Cycles*, 27.
- Kalis, A.J., Merkt, J. & Wunderlich, J. (2003). Environmental changes during the Holocene climatic optimum in central Europe - human impact and natural causes. *Quaternary Science Reviews*, 22(1), 33-79.
- Kalweit, K., Buck, W., Felkel, K., Gerhard, H., Ploeger, B., & Schmitz, W. (1993). Menschliche Einwirkungen vor dem 19. Jahrhundert. In: Buck, W., Felkel, K., Gerhard, H., Kalweit, H., Malde, J. van, Nippes, K.-R., Ploeger, B. & Schmitz, W. (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen – Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft. Bericht I-11, Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), Lelystad, Niederlande, pp. 37-54.
- Moshenberg, K., (2013). Fate and Transport Modeling of Cohesive Sediment and Sediment-bound HCB in the Middle Elbe River Basin - Modellierung des Transports kohäsiver Sedimente und des Verbleibs sedimentgebundenen Hexachlorbenzols (HCB) im Einzugsgebiet der mittleren Elbe. (PhD-thesis). TU Hamburg-Harburg.

- Peters, G. & van Balen, R.T. (2007). Tectonic geomorphology of the northern Upper Rhine Graben, Germany. *Global and Planetary Change*, 58(1-4), 310-334.
- Schwartz, R. (2006). Geochemical characterisation and erosion stability of fine-grained groyne field sediments of the Middle Elbe River. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*, 34(3), 223-233.
- Spiess, K. (1951). Ausbau des Rheins vom Bodensee bis zum Main. In W.-u. S. Duisburg (Ed.), *Der Rhein. Ausbau, Verkehr, Verwaltung*. (pp. 86-146). Rhein Verlagsgesellschaft mbH, Duisburg.
- Wirtz, C. (2004). Hydromorphologische und morphodynamische Analyse von Bühnenfeldern der unteren Mittelelbe im Hinblick auf eine ökologische Gewässerunterhaltung. Dissertation. Freie Universität Berlin.
- Wittmann, H. (1955). Zur Morphogenese des Oberrheins. *Wasserwirtschaft*, 5, 121-131.
- WSD-SW (2007). Kompendium der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest. Organisatorische und technische Daten, Binnenschifffahrt, Aufgaben, Wasserstraßen. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Rostock.
- Zippelt, K. (1988). Modellbildung, Berechnungsstrategie und Beurteilung von Vertikalbewegungen unter Verwendung von Präzisionsnivelements. Dissertation Universität Fridericiana zu Karlsruhe. Beck'schen Verlagsbuchhandlung, München.

8. Sedimentbilanz des Niederrheins

G. Hillebrand, T. Hoffmann, R.M. Frings, N. Gehres, S. Vollmer

8.1 Einleitung

Seit Jahren wird die Erosions- und Sedimentationsproblematik im Rhein auf der Basis von Sohlpeilungen, Geschiebemessungen und Schwebstoffmessungen untersucht. Diese Messungen geben jedoch keine Antwort auf wesentliche Fragestellungen wie: „Woher stammen die Sedimentfrachten im Rhein?“, „Was passiert mit den erodierten Sedimenten?“, und „Wie sind die morphologischen Prozesse in den Bereichen unterstrom und oberstrom miteinander verknüpft?“. Die Beantwortung dieser Fragen ist unabdingbar für das Verständnis der Flussmorphologie und um eine gute Prognose zukünftiger Erosionsprozesse und Sedimentationsraten zu erhalten und die Auswirkungen menschlicher Einflüsse zu verstehen. Sie ist außerdem relevant für die Optimierung von Geschiebeabgabe- und Baggerstrategien. Diese Fragen können aber nur mit der Aufstellung einer Sediment- oder Feststoffbilanz beantwortet werden. Eine solche Bilanz beschreibt das Gleichgewicht zwischen den Sedimentmengen, die in das Untersuchungsgebiet eingetragen werden (die sogenannten Quellen), den Sedimentmengen, die aus dem Untersuchungsgebiet ausgetragen werden (die sogenannten Senken), und der Veränderung der Sedimentmengen, die im Untersuchungsgebiet gespeichert sind.

Das Ziel dieser Teilstudie war die Erstellung einer Sedimentbilanz für den Flussschlauch des Niederrheins (Abb. 8.1) für den Zeitraum von 1991 bis 2010. Die betrachtete Strecke liegt zwischen Rhein-km 646 und 858 und damit etwa zwischen Bonn (oder Königswinter) und der deutsch-niederländischen Grenze. In der Bilanz wurden die Sedimentfraktionen feiner als 0,063 mm (Schluff, Ton), 0,063 bis 2 mm (Sand), 2 bis 16 mm (Feinkies²), gröber als 16 mm (Grobkies und Steine) getrennt voneinander bilanziert.

² Die Wahl für die Fraktionierung 2 – 16 mm und 16 – 125 mm wurde bereits in einer früheren Studie getroffen (Frings et al., 2012). Sie ist der Tatsache geschuldet, dass zum einen beide Fraktionen in der untersuchten Strecke ein bedeutendes Vorkommen haben und sie sich zum anderen unterschiedlich verhalten.



Abb. 8.1: Niederrhein bei Bislich.

Für die Fraktionen Sand, Kies und Steine (Korngrößen $> 0,063$ mm) lag bereits eine gemeinsame, nicht nach Fraktionen aufgeschlüsselte Sedimentbilanz für den Zeitraum 1991-2010 vor (Frings et al., 2012, Frings et al., 2014b). Diese Bilanz ist Grundlage für die vorliegende Auswertung, hier ergänzt durch eine Betrachtung der einzelnen Kornfraktionen sowie ergänzt durch die Fraktionen Ton und Schluff als gemeinsame Feinsedimentfraktion $< 0,063$ mm. Zusätzlich wurde eine Abschätzung der Vorlandsedimentation vorgenommen, so dass der Schließungsterm der Bilanz auf bestimmte Prozesse (diffuse Sedimenteinträge, Verlandung von Bühnenfeldern etc.) weiter eingegrenzt werden konnte.



Abb. 8.2: Verlauf des Rheines und der Nebenflüsse im Niederrheingebiet. Teile des Rheineinzugsgebietes sind grün schattiert. Gebiete außerhalb des Einzugsgebietes sind weiß dargestellt.

8.2 Gebietsbeschreibung

8.2.1 Lage

Das in dieser Studie betrachtete Gebiet umfasst den deutschen Niederrhein ab Rhein-km 646 bis zur deutsch-niederländischen Grenze. Die gesamte Niederrheinstrecke und nahezu das gesamte Teileinzugsgebiet gehören politisch zum Bundesland Nordrhein-Westfalen. Das Gebiet des Niederrheins ist geprägt durch eine hohe industrielle Konzentration und eine dichte Besiedelung. Der Niederrhein durchfließt etwa zwischen Duisburg und Wesel das Ruhrgebiet, das über einem der bedeutendsten Steinkohlevorkommen der Erde liegt (Tümmers, 1994).

8.2.2 Geologie und Sedimentologie

Der Niederrhein durchfließt ab Königswinter die Niederrheinische Bucht. Diese gehört, genau wie der Oberrheingraben, zum Mitteleuropäischen Riftsystem, welches sich vom Mittelmeer bis zur Nordsee verfolgen lässt. Der Haupteinbruch erfolgte im Tertiär, die Senkung ist heute abgeschlossen (Henningsen and Katzung, 2006).

Zu Beginn des Tertiärs im Paläozän drang das Meer nach Südosten und es wurden Sande und Mergelkalke abgelagert (Lotze, 1971), anschließend zog sich das Meer zurück und es folgte eine Phase mit festländischer Verwitterung. Im Oligozän erfolgte ein erneuter Meeresvorstoß bedingt durch einen steigenden Meeresspiegel einerseits und eine fortschreitende Subsidenz andererseits. Es wurde eine Abfolge mariner Sande und terrestrischer Silte sowie Tone abgelagert (Lotze, 1971). Im Miozän bildeten sich in ausgedehnten Küstensäumpfen die späteren Braunkohlen. Im Pliozän dominierten terrestrische Bedingungen: es kam zur Ablagerung von hellen Sanden, Kiesen und Tonen. Im Pliozän traten am Niederrhein erstmals Ablagerungen des Ur-Rheins auf (Kieseloolith-Schotter) (Lotze, 1971). Das Tertiär erreicht in der Niederrheinischen Bucht Mächtigkeiten von rund 1000 m, steht heute aber nur im nördlichen Teil des Niederrheins sowie am östlichen Rand der Niederrheinischen Bucht im Übergang zum Rheinischen Schiefergebirge an (Frings et al., 2012).

Überdeckt werden diese Ablagerungen von pleistozänen Terrassenablagerungen (Kies- und Sandschüttungen) sowie von Löss und Flugsand (Henningsen and Katzung, 2006). Die Ablagerungen des Quartärs können am südlichen Niederrhein Mächtigkeiten von bis zu 100 m erreichen (Frings et al., 2012). Im mittleren und nördlichen Abschnitt des Niederrheins lagern die feinkörnigen Ablagerungen des Tertiärs lokal oberflächennah oder werden von der Rheinsohle bereits angeschnitten (vgl. Abb. 8.3) (Frings et al., 2014b).

Das Flussbett des Niederrheins besteht im Wesentlichen aus einer Mischung aus Sand und Kies. Im Schnitt enthält die Sohle außerdem ca. 9 % Steine (Sedimente gröber als 63 mm). Im Zeitraum 1992-2010 liegt die geometrisch gemittelte Korngröße der Oberschicht bei 9,6 mm. Die Korngrößenverteilung der Ober- und Unterschicht der Flusssohle des Niederrheins ist in Abb. 8.4 dargestellt. Man erkennt im Bereich etwa ab Rhein-km 820 eine deutliche Zunahme des Sandgehaltes in der Sohle verbunden mit einem Rückgang vor allem des Anteils der Grobkiesfraktion. Im Vergleich des Oberschichtmaterials (0 – 10 cm Tiefe) mit dem Unterschichtmaterial (10 – 50 mm Tiefe) zeigt sich, dass das Unterschichtmaterial tendenziell etwas feiner ist, was auf die Ausbildung einer Deckschicht hinweist. Besonders deutlich ist dies im oberen Bereich des Niederrheins.

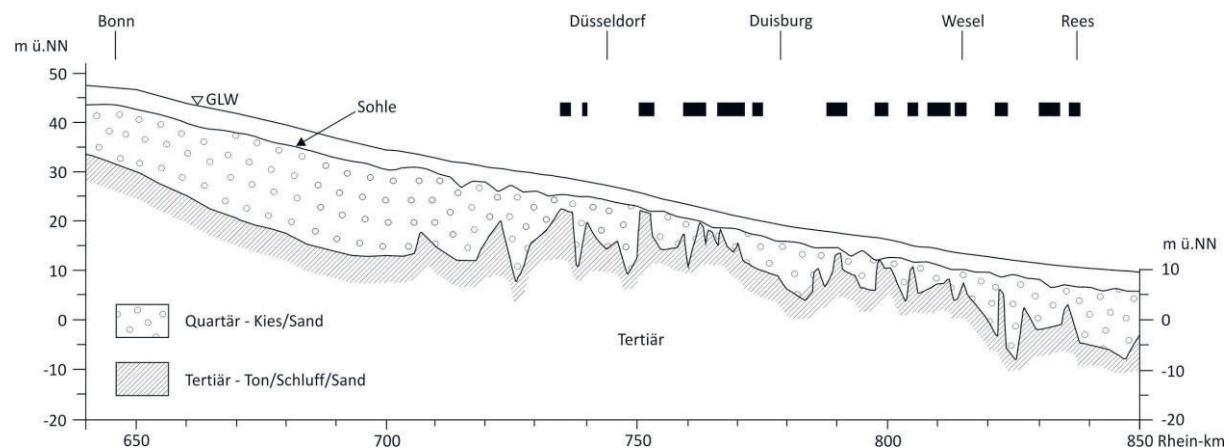


Abb. 8.3: Geologisches Längsprofil durch den Niederrhein; schwarze Balken markieren Bereiche mit hohen Tertiärlagen (aus Frings et al. 2014b, nach Gölz, 1992). Die Datengrundlage der Abbildung stammt aus den 1980er Jahren; im Detail können die heutigen Verhältnisse abweichen.

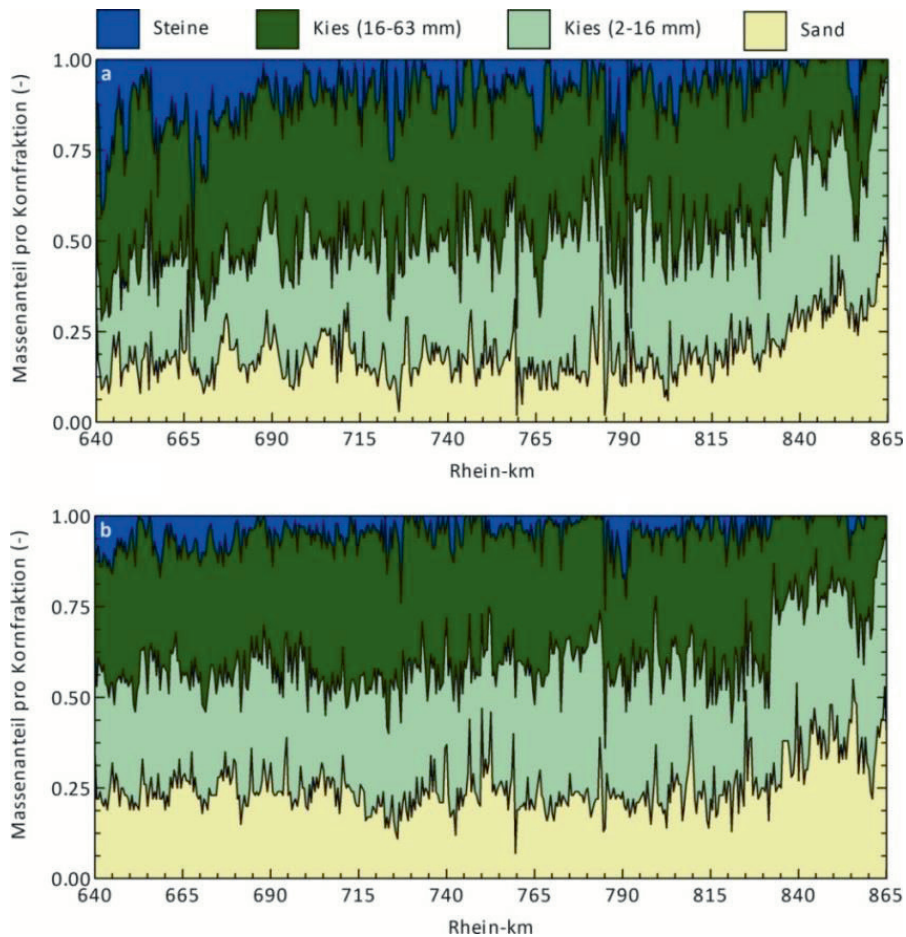


Abb. 8.4: Kornverteilung des Sohlmaterials des Niederrheins (Proben 1992-2010): (a) Oberschicht (0 – 10 cm Tiefe), (b) Unterschicht (10 – 50 cm Tiefe) (Frings et al., 2012). Die Steinfraktion umfasst alle Körner größer als 63 mm.

8.2.3 Hydrologie

Das Abflussregime des Niederrheins ist gekennzeichnet durch die Überlagerung des von der sommerlichen Schneeschmelze geprägten alpinen Einzugsgebiets und der hohen winterlichen und kleinen sommerlichen Abflüsse der Nebenflüsse. Es lässt sich klassifizieren als zusammengesetztes „Pluvial-Nival-Regime“. Die zeitliche Abfolge von Niederschlägen, der Wasserspeicherung als Schnee oder der Schneeschmelze in den Alpen, der Verdunstung und der Grundwasserströmung einzelner Teileinzugsgebiete kann jedoch starke Abweichung von dieser mittleren Charakteristik verursachen (Görgen et al., 2010). Das Maximum des Abflusses am Pegel Rees am Niederrhein liegt im langjährigen Mittel im Februar, das Minimum im September (Belz et al., 2007).

Entlang der Fließstrecke des Niederrheins ändert sich der innerjährliche Abflussgang des Rheins kaum. Zum einen weisen die weiteren Zuflüsse im Vergleich zum Rhein meist nur geringe Unterschiede in ihrer jahreszeitlichen Abflusscharakteristik auf, zum anderen sind die Abflüsse im Niederrhein so hoch, dass die durchweg abflussschwachen Nebenflüsse entlang des Niederrhein nur einen geringen Einfluss auf das Abflussregime des Rheins ausüben (Belz et al., 2007). Der mittlere Abfluss am Pegel Rees im Zeitraum 1991-2010 lag bei 2311 m³/s. Hauptzuflüsse im Bereich des Niederrheins sind Ruhr und Lippe, die jedoch im Schnitt deutlich geringere Wassermengen liefern, als die großen Nebenflüsse weiter oberstrom (Aare, Neckar, Main, Mosel). Weitere kleinere Zuflüsse des Niederrheins mit Fließlängen über 80 km sind Sieg, Wupper und Erft und Emscher.

8.2.4 Anthropogene Eingriffe

Menschliche Einwirkungen auf die Flussmorphologie des Rheins begannen im Neolithikum vor ca. 7500 Jahren mit dem Beginn der landwirtschaftlichen Nutzung und damit verbundenen verstärkten Sedimenteinträgen in den Fluss (Hoffmann et al., 2009). Bereits vor über 1000 Jahren wurden Sommerdeiche gebaut, um die landwirtschaftlich genutzten Flächen wenigstens teilweise vor Hochwasser zu schützen (Buck et al., 1993). Im 18. Jahrhundert begannen systematische Ausbaurbeiten, beispielsweise dauerhaft befestigte Durchstiche und der Verbau von Rheinarmen zur Landgewinnung und zur Verbesserung der Schifffahrtsverhältnisse (Buck et al., 1993; Tümmer, 1994). Aufgrund der zunehmenden Bedeutung des Rheins wurden im 19. Jahrhundert weitere Regulierungsarbeiten mit Buhnen, Leitwerken, Deckwerken und dem Verbau von Nebenarmen durchgeführt (Buck et al., 1993). Im 20. Jahrhundert wurden eine Vielzahl kleinerer wasserbaulicher Maßnahmen und Hochwasserschutzmaßnahmen (z. B. Deicherhöhungen) durchgeführt. In vielen Nebenflüssen des Niederrheins wurden im späten 19. und im 20. Jahrhundert Talsperren zur Trinkwasserversorgung, zum Hochwasserschutz und zur Niedrigwasseraufhöhung gebaut (Buck et al., 1993).

Seit den 1920er Jahren wurde Steinkohle unter dem Niederrhein abgebaut, was zu einer starken lokalen Absenkung des Geländes führte. Im Zeitraum 1991-2010 beschränkten sich die bergbaubedingten Setzungen auf den Abschnitt zwischen Rhein-km 791,5 und km 809 (Frings et al., 2014b). Dabei waren die Bergsenkungsraten bei Rhein-km 794-799, mit Gesamtsenkungen von bis zu 9 m, am höchsten (Frings et al., 2012). Aus dem Abraum der Steinkohlenzeche Walsum wurden im Bergsenkungsgebiet seit 1976 etwa 13,6 Mio. Tonnen Waschbergematerial zur Auffüllung der Senkungsmulden im Rhein eingebaut (Buck et al., 1993, Frings et al., 2014b).

Um ganzjährige Schifffbarkeit zu ermöglichen, sind kontinuierliche Unterhaltungsmaßnahmen im Niederrhein erforderlich. Neu entstandene Sedimentablagerungen, die die Schifffahrt behindern, werden ausgebaggert, und seit dem Jahr 2000 wird Flussstrecken mit einem Sedimentdefizit zusätzliches Geschiebematerial zugegeben. Weiterhin werden Sohlstabilisierungsmaßnahmen wie die Verfüllung und Umgestaltung von Grundschwelen, die Stabilisierung und Sicherung der Flusssohle, der Verbau von Kolken und die Sicherung von Buhnenfüßen durchgeführt (Frings et al., 2012).

8.3 Bestimmung der Sedimentquellen und -senken

8.3.1 Die Sedimentbilanzgleichung

Für den Fall, dass tektonische Sohlhöhenänderungen eine untergeordnete Rolle spielen, lautet die allgemeine Sedimentbilanzgleichung für den Flusslauf des Rheins:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{se} + I_{di} + I_{ar} + I_{ab} + I_{do}) - (O_{do} + O_{se} + O_{dr} + O_{gr} + O_{fl} + O_{po} + O_{ab}) = \Delta S \quad (8.1)$$

mit I_{up} , dem Sedimenteintrag von oberstrom, I_{tr} , dem Sedimenteintrag aus Nebenflüssen, I_{se} , dem Sedimenteintrag aus Nebenarmen, I_{di} , dem Sedimenteintrag aus diffusen Quellen (zum Beispiel Ufererosion), I_{ar} , dem Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe, I_{ab} , dem Sedimenteintrag durch Abrieb von anderen Kornfraktionen (nur für die Fraktion Ton/Schluff), I_{do} , dem Sedimenteintrag von unterstrom, O_{do} , dem Sedimentaustrag nach unterstrom, O_{se} , dem Sedimentaustrag in Nebenarme, O_{dr} , dem Sedimentaustrag durch Baggerungen, O_{gr} , dem Sedimentaustrag in Buhnenfelder, O_{fl} , dem Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen, O_{po} , dem Sedimentaustrag in Häfen, O_{ab} , dem Sedimentaustrag durch Abrieb, und ΔS , der Sohlhöhenänderung, wobei alle Bilanzterme in der Einheit Mt/a ausgedrückt werden.

Für den Niederrhein wird der Sedimenteintrag aus oder der Sedimentrückhalt in Nebenarmen I_{se}/O_{se} vernachlässigt. Es findet kein Sedimenteintrag von unterstrom statt, weshalb der Term I_{do} zu null gesetzt werden kann. Im Untersuchungsgebiet befinden sich einige der bedeutendsten Binnenhäfen Deutschlands. Über die Sedimentausträge in die Häfen liegen keine gesicherten Daten vor. Für eine Abschätzung können die Baggermengen herangezogen werden. Für die Bilanzierung wird der Sedimentaustrag in Häfen O_{po} aufgrund der vorliegenden Datenlage nicht getrennt betrachtet, sondern zu null gesetzt bzw. unter den Sedimentaustrag in Bühnenfelder subsumiert. Die Sedimentbilanzgleichung für den Niederrhein reduziert sich damit zu:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{di} + I_{ar} + I_{ab}) - (O_{do} + O_{dr} + O_{gr} + O_{fl} + O_{ab}) = \Delta S \quad (8.2)$$

Die Bestimmung der einzelnen Terme der reduzierten Bilanzgleichung für den Niederrhein wird in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

8.3.2 Sedimenteintrag von oberstrom

Feinkies/ Grobkies/Steine

Der Sedimenteintrag von oberstrom I_{up} wurde aus einer existierenden Frachtanalyse (Frings et al., 2014b) übernommen, für die Frachten aufgrund von Querprofilmessungen ermittelt wurden. Die Frachtanalyse hat gezeigt, dass die mittleren Jahresfrachten bei Königswinter (Rhein-km 645,8) im Untersuchungszeitraum 1991-2010 für Grobkies 0,015 Mt/a und für Feinkies 0,044 Mt/a betragen. Die obere Korngrenze der gemessenen Frachten beträgt aufgrund der Trichterweite des Geschiebefängers 100 mm. Daher wurde der Eintrag von Steinen von oberstrom nicht gemessen.

Sand

Der Sandeintrag ins Untersuchungsgebiet wurde ebenfalls bereits in der Frachtanalyse von Frings et al. (2014b) bestimmt. Für den suspendierten Sand beträgt die mittlere Jahresfracht bei Königswinter (Rhein-km 645,8) im Untersuchungszeitraum 0,322 Mt/a. Für die als Geschiebe transportierte Sandfracht wurde in dieser Frachtanalyse ein Wert von 0,035 Mt/a bestimmt. Es ist jedoch bekannt, dass aufgrund des am Niederrhein eingesetzten Geschiebefängers mit einer Maschenweite von 1,4 mm die Sandfrachten in vorgenannter Studie unterschätzt wurden. Eine aktuelle Laboruntersuchung (Banhold et al., 2014, Kapitel 3.4) zeigte, dass bei diesem Geschiebefänger ein relevanter Sandverlust auftritt. Entsprechend dieser Laboruntersuchung wurde in der vorliegenden Studie die Sandgeschiebefracht aus Frings et al. (2014b) mit 2,8 multipliziert. Damit ergibt sich ein Gesamteintrag an Sand als Schwebstoff und Geschiebe von 0,420 Mt/a.

Ton/Schluff

Zur Bestimmung der Sedimenteinträge von oberstrom der Fraktionen Ton und Schluff in den Niederrhein wurden die Messwerte der Schwebstoffdauermessstation Weißenthurm (Rhein-km 608,2) verwendet. Die mittlere Jahresfracht des gesamten Schwebstoffs bei Weißenthurm im Zeitraum 1991-2010 betrug 2,644 Mt/a. Diese Fracht umfasst sowohl mineralische Komponenten der Ton-, Schluff- und Sandfraktionen als auch organische Anteile. Der Anteil des Phytoplanktons wurde über Chlorophyll-a-Gehalte, die an der Messstelle Koblenz/Rhein gemessen wurden (Daten der FGG Rhein), für den Zeitraum 1991-2010 zu 0,046 Mt/a abgeschätzt. Weiterhin ist aufgrund der Untersuchungen von Astor et al. (2014) bekannt, dass die mineralischen Komponenten der mit der im Schwebstoffdauermessnetz verwendeten Messmethodik erfassten Schwebstoffe im Rhein im Durchschnitt 9,2 % Sand beinhalten (0,239 Mt/a). Damit errechnet sich ein Ton- und Schluffeintrag in den Niederrhein von 2,359 Mt/a.

8.3.3 Sedimenteintrag aus Nebenflüssen

Kies/Steine

Wie bereits in Kapitel 8.2.3 beschrieben, fließen dem Niederrhein nur vergleichsweise abflussschwache Nebenflüsse zu. Viele dieser Nebenflüsse sind darüber hinaus staugeregelt, so dass die Geschiebedurchgängigkeit stark eingeschränkt ist. Für diese Studie werden die Sedimenteinträge der Kies- und Steinfractionen deshalb zu null gesetzt (vgl. Gehres et al., 2014, vgl. Kapitel 3.3).

Sand

Es ist bekannt, dass einige Nebenflüsse des Rheins, wie beispielsweise die Lippe, sandgeprägte Bereiche mit Sanddünen aufweisen und deshalb dem Rhein Sand in Form von Geschiebe zuführen. Aufgrund der geringen Größe der Nebenflüsse und der Abwesenheit von Messdaten, wurden die Einträge von Sand als Geschiebe für diese Studie jedoch zu null gesetzt. Für suspendierte Sandeinträge wurden Messdaten abfiltrierbarer Stoffe aus Ländermessstellen zugrunde gelegt und auf kleinere Rheinnebenflüsse ohne vorliegende Messdaten extrapoliert (vgl. Kapitel 3.3). Für die Aufteilung auf die Kornfraktionen Sand bzw. Ton/Schluff wurde der für den Rhein ermittelte durchschnittliche Sandgehalt von 9,2 % angesetzt, Kapitel 3.2). Für den Sand wurde damit ein durchschnittlicher Eintrag aus den Nebenflüssen entlang des Niederrheins von 0,006 Mt/a berechnet.

Ton/Schluff

Die Einträge der Ton/Schluff-Fraktion aus Nebenflüssen wurden analog zu den Sandeinträgen bestimmt. Aufgrund fehlender Daten wurde keine Korrektur für organische Anteile durchgeführt. Es ergibt sich ein durchschnittlicher Eintrag von 0,061 Mt/a.

8.3.4 Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe

Der Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe I_{ar} wurde aus der existierenden Frachtanalyse von Frings et al. (2014b) übernommen.

Grobkies/Steine

Der anthropogene Eintrag von Steinen findet vor allem im Rahmen von Sohlstabilisierungsmaßnahmen statt. Durchschnittlich wurden im Betrachtungszeitraum 0,361 Mt/a Grobkies und Steine von außen ins System zugegeben. Davon entfielen 0,321 Mt/a auf Sohlstabilisierungsmaßnahmen. Die übrigen 0,040 Mt/a wurden zur Reduzierung des Geschiebedefizits von außen ins System zugegeben. Im Rahmen der Unterhaltung angefallenes Baggergut wurde im Umfang von 0,159 Mt/a (Grobkies und Steine) im Niederrhein wieder zugegeben. Insgesamt wurden somit durchschnittlich 0,520 Mt/a Grobkies und Steine eingebracht.

Feinkies

Der durchschnittliche Eintrag an Feinkies im Betrachtungszeitraum im Niederrhein von außen ins System lag bei 0,059 Mt/a. Die externe Zugabe erfolgte als Geschiebeersatzmaterial. Zusätzlich wurden 0,122 Mt/a an Baggergut aus der Gewässerunterhaltung im Niederrhein zugegeben. Insgesamt wurden somit durchschnittlich 0,180 Mt/a Feinkies eingebracht.

Sand

Im Niederrhein werden nur geringe Mengen an Sand im Rahmen von Geschiebezugaben eingebracht. Im Betrachtungszeitraum lag die externe Zugabe von Sand bei durchschnittlich 0,002 Mt/a. Sand wurde vor allem im Zuge von Bagger- und Verbringmaßnahmen im Umfang von 0,114 Mt/a im Niederrhein umgelagert bzw. zugegeben. Insgesamt lagen die durchschnittlichen anthropogenen Einträge von Sand im Betrachtungszeitraum bei 0,116 Mt/a.

Ton/Schluff

Sedimente feiner als 63 µm werden nicht gezielt zugegeben. Zugaben gröberer Sedimente können aber geringe Anteile dieser Feinfraktionen aufweisen. Diese Anteile werden als so gering angegeben, dass sie für die Bilanzierung nicht von Relevanz sind und deshalb in dieser Studie zu null gesetzt werden.

8.3.5 Sedimenteintrag/-austrag durch Abrieb

Der Abrieb stellt für die groben Kornfraktionen einen Austrag O_{ab} , für die Feinanteile hingegen einen Eintrag I_{ab} dar. Nach Götz (1995) beträgt der maximale Massenverlust natürlichen Rheinkieses 11 % pro 50 km Fließstrecke, bzw. 0,22 % pro km. Für die Berechnung des Abriebs wurde angenommen, dass nur ein Abrieb der Kiesfraktionen erfolgt. Die Gesamtkiesfracht wurde mit diesem Faktor multipliziert. Der Abrieb wurde dann entsprechend der Zusammensetzung der Kiesfrachten auf die Fraktionen Grobkies und Feinkies aufgeteilt.

Steine/Grobkies/Feinkies

Für Steine wird angenommen, dass der Abrieb im Niederrhein wegen der geringen Transportraten vernachlässigbar gering ist. Der durchschnittliche Rückgang der im Bilanzabschnitt vorhandenen Menge an Grobkies liegt im Betrachtungszeitraum bei 0,014 Mt/a. Für Feinkies liegt die Menge bei 0,035 Mt/a.

Sand

Es wird angenommen, dass ein Abrieb des Sandes entlang des Niederrheins aufgrund der bereits abgerundeten Körner nur eine untergeordnete Bedeutung als Austragspfad besitzt (Frings, 2008). Weiterhin wird angenommen, dass der Abrieb der Kiesfraktionen keinen relevanten Eintrag in die Sandfraktionen erzeugt, bzw. dass sich Eintrag und Austrag infolge des Abriebs die Waage halten. Der Abrieb wird für die Sandfraktion entsprechend in der Bilanz zu null gesetzt.

Ton/Schluff

Für die Sedimente < 63 µm stellt der Abrieb einen Eintragspfad dar. Im Bilanzabschnitt nimmt die Feinsedimentmenge durch den Abrieb der Kiesfraktionen im Betrachtungszeitraum im Durchschnitt um 0,049 Mt/a zu. Der Abrieb von Waschbergematerial (Abschnitt 8.2) wurde in dieser Studie nicht berücksichtigt (s. auch Kap. 8.5).

8.3.6 Sedimentaustrag nach unterstrom

Feinkies/Grobkies/Steine

Der Sedimentaustrag nach unterstrom O_{do} wurde aus der existierenden Frachtanalyse von Frings et al. (2014b) übernommen. Die Frachtanalyse hat gezeigt, dass die mittleren Jahresfrachten bei Griethausen (Rhein-km 857,8) im Untersuchungszeitraum 1991-2010 für Grobkies 0,016 Mt/a und für Feinkies 0,090 Mt/a betragen. Ein Austrag von Steinen nach unterstrom wurde nicht gemessen.

Sand

Der Austrag von Sand aus dem Untersuchungsgebiet nach unterstrom wurde ebenfalls bereits in der Frachtanalyse von Frings et al. (2014b) bestimmt. Für den suspendierten Sand beträgt die gemessene mittlere Jahresfracht bei Griethausen (Rhein-km 857,5) im Untersuchungszeitraum 0,477 Mt/a. Für die als Geschiebe transportierte Sandfracht wurde in dieser Frachtanalyse ein Wert von 0,078 Mt/a bestimmt. Es ist jedoch bekannt, dass aufgrund des am unteren Niederrhein eingesetzten Geschiebefängers mit einer Maschenweite von 0,5 mm die Sandfrachten in vorgenannter Studie unterschätzt wurden. Eine aktuelle Laboruntersuchung (Banhold et al. 2014, Kapitel 3.4) zeigte, dass bei diesem Geschiebefänger ein relevanter Sandverlust auftritt. Entsprechend dieser

Laboruntersuchung wurde in der vorliegenden Studie die Sandgeschiebefracht aus Frings et al. (2014b) mit 1,5 multipliziert. Damit ergibt sich ein Gesamtaufrag von Sand als Schwebstoff und Geschiebe nach unterstrom von 0,594 Mt/a.

Ton/Schluff

Zur Bestimmung der Sedimentausträge nach unterstrom der Fraktionen Ton und Schluff in die Niederlande wurden die Messwerte der Schwebstoffdauermessstation Emmerich (Rhein-km 851,9) verwendet. Die mittlere Jahresfracht des gesamten Schwebstoffs im Zeitraum 1991-2010 bei Emmerich betrug 2,440 Mt/a. Diese Fracht umfasst sowohl mineralische Komponenten der Ton-, Schluff- und Sandfraktionen als auch organische Anteile. Der Anteil an Phytoplankton wurde über Daten von Chlorophyll-a-Gehalten an der Messstelle Kleve-Bimmen (Daten der FGG Rhein) für den Zeitraum 1991-2010 zu 0,119 Mt/a abgeschätzt. Weiterhin ist aufgrund der Untersuchungen von Astor et al. (2014) (Kapitel 3.2) bekannt, dass die mineralischen Anteile der mit dem Schwebstoffdauermessnetz gemessenen Schwebstoffe im Rhein im Durchschnitt 9,2 % Sand beinhalten (0,214 Mt/a). Damit errechnet sich ein Ton- und Schluffaufrag aus dem Bilanzabschnitt nach unterstrom von 2,107 Mt/a.

8.3.7 Sedimentaufrag durch Baggerungen

Die Baggermengen O_{dr} im Niederrhein für den Bilanzzeitraum 1991 bis 2010 wurden aus der bereits existierenden Frachtanalyse (Frings et al., 2014b) übernommen. Für die Korngrößenverteilung der bekannten Baggermengen wurde die mittlere Kornverteilung der Sohle zwischen 0,1 und 0,5 m Tiefe am jeweiligen Baggerort verwendet (d. h. die Deckschicht wurde nicht berücksichtigt).

Steine/Grobkies/Feinkies/Sand

Die durchschnittlichen Baggermengen im Bilanzraum lagen im Zeitraum 1991 bis 2010 für Grobkies und Steine bei 0,160 Mt/a, für Feinkies bei 0,128 Mt/a sowie für Sand bei 0,127 Mt/a. Die gebaggerten Sedimente wurden dem System im Rahmen der Unterhaltung nahezu vollständig wieder zugegeben (vgl. Kapitel 8.3.4).

Ton/Schluff

Baggerungen größerer Sedimente können geringe Anteile der Feinfraktionen mit Korngrößen $< 63 \mu\text{m}$ aufweisen. Diese Anteile werden als so gering angesehen, dass sie für die Bilanzierung nicht von Relevanz sind und deshalb in dieser Studie zu null gesetzt werden.

8.3.8 Sedimentaufrag auf Überflutungsflächen

In der existierenden Frachtanalyse von Frings et al. (2014b) wurden Sedimentausträge auf Überflutungsflächen, in Bühnenfelder und Häfen zusammengefasst und als Term zur Schließung der Bilanz verwendet. Zur besseren quantitativen Abschätzung wurden gezielte Untersuchungen zu Sedimentationsraten auf den Überflutungsflächen entlang der deutschen frei fließenden Rheinstrecke durchgeführt (Banhold et al., 2014, Kapitel 3.4). Die Ergebnisse dieser Studie zu Sedimentausträgen auf Überflutungsflächen O_{fl} wurden zur Verbesserung der Bilanz verwendet.

Steine/Kies

Es wird angenommen, dass nur Sand-, Schluff- und Tonpartikel aus dem Hauptgerinne auf die Vorländer transportiert werden. Die Sedimentausträge von Steinen und Kies auf die Überflutungsflächen werden entsprechend in der Bilanz zu null gesetzt.

Sand

Die Austräge von Sand auf die Überflutungsflächen wurden aufgrund der Untersuchung von Banhold et al. (2014) zu durchschnittlich 0,220 Mt/a abgeschätzt.

Ton/Schluff

Die Austräge von Ton und Schluff auf die Überflutungsflächen im Niederrhein im Bilanzzeitraum 1991 bis 2010 wurden zu durchschnittlich 0,679 Mt/a berechnet.

8.3.9 Sohlhöhenänderung

Die Sohlhöhenänderungen ΔS im Betrachtungszeitraum im Niederrhein wurden aus Peildaten entsprechend der in Frings et al. (2014b) beschriebenen Vorgehensweise berechnet. Im Bereich des Niederrheins treten lokal differenziert sowohl Erosion als auch Sedimentation auf. Sohlhöhenänderungen stellen also sowohl Sedimentquellen als auch Senken in der Bilanz dar. Insgesamt ergibt sich im Zeitraum 1991 bis 2010 eine Netto-Erosion über den gesamten Bilanzraum von durchschnittlich 0,343 Mt/a.

Wie sich die lokale Sohländerung aus den betrachteten Kornfraktionen im Einzelnen zusammensetzt, ist nicht bekannt. Die Korngrößenverteilung der Sohländerungen ist nicht gleichbedeutend mit der Korngrößenverteilung der Sohle. Ebenso liegen keine Daten vor, welche Korngrößenverteilung im Durchschnitt in den Bühnenfeldern vorzufinden ist (vgl. Kapitel 8.3.10). Für die Bühnenfelder wurde die Annahme getroffen, dass sich dort ablagerndes Material im Schnitt die Korngrößenverteilung des gesamten in Schwebelage und als Geschiebe transportierten Sand- und Kiesmaterials aufweist (s. Abschnitt 8.3.10). Aus der bekannten Gesamtänderung der Sohle und der Annahme über die Korngrößenverteilung von in Bühnenfelder ausgetragenen Material lassen sich die Ein- und Austräge aus der Sohländerung rechnerisch aus der Bilanzierung auf die einzelnen Kornfraktionen aufteilen.

Grobkies/Steine

Für Grobkies und Steine stellt die Flusssohle am Niederrhein eine Senke dar. Über den gesamten Bilanzraum betrachtet ergibt sich im Betrachtungszeitraum für die Grobkies/Stein-Fraktion eine positive Sohlhöhenänderung, d. h. eine Sedimentation, von durchschnittlich 0,337 Mt/a.

Feinkies

Für den Feinkies stellen die Sohländerungen am Niederrhein eine Quelle dar. Über den gesamten Bilanzraum betrachtet ergibt sich im Betrachtungszeitraum 1991 bis 2010 für die Feinkiesfraktion eine negative Sohlhöhenänderung, d. h. eine Erosion, von durchschnittlich 0,058 Mt/a.

Sand

Für den Sand stellen die Sohländerungen am Niederrhein eine Quelle dar. Über den gesamten Bilanzraum betrachtet ergibt sich im Betrachtungszeitraum 1991 bis 2010 für die Sandfraktion eine negative Sohlhöhenänderung, d. h. eine Erosion, von durchschnittlich 0,623 Mt/a.

Ton/Schluff

Ton- und Schlufffraktionen liegen in der Sohle des Niederrheins nur in sehr geringen Mengen vor. Der Anteil der Sedimentation oder Erosion dieser Fraktionen an den beobachteten Sohländerungen wird entsprechend als vernachlässigbar gering eingeschätzt und in der Bilanz zu null gesetzt.

8.3.10 Sedimentaustag in Bühnenfelder und Häfen

Bühnenfelder können als Zwischenspeicher von Sedimenten wirken und entsprechend Quellen oder Senken für Sedimente darstellen. Zu den in die Bühnenfelder des Niederrheins im Zeitraum 1991 bis 2010 insgesamt ausgetragenen Sedimentmengen liegen keine Daten vor. Der Sedimentaustag in Bühnenfelder O_{gr} wird deshalb als Term zur Schließung der Bilanz verwendet und aus den übrigen, auf der Grundlage von Messungen bestimmten Termen rückgerechnet. Der Netto-Sedimentaustag in die Bühnenfelder ergibt sich aus der Bilanz für den Zeitraum 1991 bis 2010 im Niederrhein zu durchschnittlich 0,260 Mt/a insgesamt über alle Kornfraktionen.

Steine/Grobkies/Feinkies/Sand

Für die Aufteilung der Sedimentausträge in Bühnenfelder auf einzelne Kornfraktionen wird die Annahme getroffen, dass sich das Sedimentmaterial der Bühnenfelder aus dem gesamten transportierten, für die Bettbildung relevanten Sediment zusammensetzt. Die Korngrößenverteilungen der Sand- und Kiesfrachten (Geschiebe und suspendierter Sand) der Querprofilmessungen am Anfang (Messstelle Königswinter) und Ende (Messstelle Griethausen) des Niederrheins wurden gemittelt und die sich daraus ergebende Kornverteilung als Verteilung der sich in den Bühnenfeldern ablagernden Sedimente angesetzt. Im Durchschnitt setzten sich die Frachten aus 86,3 % Sand (in Suspension und als Geschiebe), aus 11,0 % Feinkies (Geschiebe) und 2,7 % Grobkies (Geschiebe) zusammen. Ein Transport von Steinen wurde nicht gemessen.

Damit ergeben sich durchschnittliche Sedimentausträge in die Bühnenfelder im Bilanzraum für den Zeitraum 1991 bis 2010 von 0,224 Mt/a an Sand, 0,029 Mt/a an Feinkies und 0,007 Mt/a an Grobkies. Austräge von Steinen in Bühnenfelder werden in der Bilanz zu null gesetzt.

Ton/Schluff

Es ist bekannt, dass Bühnenfelder grundsätzlich auch Senken und Quellen für Feinsedimente darstellen (Wirtz, 2004; Schwartz, 2006; Hillebrand et al., 2014). Für den Niederrhein liegen keine Daten zu Feinsedimentablagerungen in Bühnenfeldern vor. Es wird deshalb aufgrund der mangelnden Datenlage vereinfachend angenommen, dass sich Feinsedimentablagerungen in den Bühnenfeldern des Niederrheins in einem dynamischen Gleichgewicht befinden, d. h. dass sich Sedimentation und Remobilisierung von Feinsedimenten in den Bühnenfeldern des Niederrheins über den Betrachtungszeitraum die Waage halten. Der entsprechende Bilanzterm O_{gr} wird deshalb in der Bilanz für die Ton- und Schlufffraktion zu null gesetzt.

8.3.11 Sedimenteintrag aus diffusen Quellen

Neben den Punktquellen für Sedimente, wie den Einträgen von oberstrom und aus Nebenflüssen oder durch anthropogene Sedimentzugabe, und den Einträgen aus der Sohle bzw. aus dem Abrieb können weitere Quellen entlang der Fließstrecke eines Bilanzraums auftreten. Dazu gehören beispielsweise Einträge aus Kläranlagen, aus Uferabbrüchen oder aus Bodenerosion in Flussnähe. Diese potenziellen Quellen werden als Sedimenteinträge aus diffusen Quellen I_{di} zusammengefasst.

Steine/Grobkies/Feinkies/Sand

Für die gröberen Sedimentfraktionen mit Korngrößen $> 63 \mu\text{m}$ wird davon ausgegangen, dass keine relevanten diffusen Quellen im Niederrhein im Zeitraum 1991 bis 2010 vorhanden sind.

Ton/Schluff

Der Sedimenteintrag aus diffusen Quellen wird für die Ton- und Schlufffraktionen in der Bilanz als Schließungsterm verwendet. Aus der Bilanz ergeben sich durchschnittlich 0,317 Mt/a an zusätzlichen Einträgen aus diffusen Quellen für den Niederrhein im Zeitraum 1991 bis 2010.

8.4 Ergebnisse

Die Bilanz des Niederrheins ist in Abbildung 8.5 sowie in den Tabellen 8.1 und 8.2 dargestellt. Für die Kies- und Sandfraktionen in Summe stellen der Eintrag von oberstrom und die anthropogene Zugabe von Material die größten Eintragspfade dar. Der Eintrag von oberstrom besteht zu rund 88 % aus Sand. In den Zugaben hingegen überwiegt der Kies (im Schnitt ca. 85 % Kies/Steine, 15 % Sand). Daneben stellt die Gewässersohle eine relevante Quelle vor allem für den Sand, aber auch für

Feinkiesfraktionen dar. Für die Fraktion Grobkies und Steine hingegen wirkt die Flusssohle in Summe über den gesamten Niederrhein betrachtet als Senke. In Summe über alle Fraktionen stellt die Gewässersohle des Niederrheins eine Sedimentquelle dar, ist also insgesamt von Erosion geprägt.

Die Bilanz der einzelnen Fraktionen zeigt, dass für Steine, Grobkies und Feinkies anthropogene Sedimentzugaben am Niederrhein die wesentlichen Quellen darstellen. Sand und Feinfraktionen werden hingegen überwiegend von oberstrom in den Bilanzabschnitt eingetragen. Die vorwiegend im Rahmen von Sohlstabilisierungsmaßnahmen eingebrachten Steine verbleiben wie geplant weitgehend im Fluss. In der Grobkiesfraktion entspricht der Eintrag von oberstrom in etwa dem Austrag nach unterstrom. Der Verlust an Grobkies aufgrund von Abrieb und der Austrag in Bühnenfelder liegen ebenfalls in derselben Größenordnung. Die Menge an anthropogen eingetragenen Sedimenten der Grobkies-/Steinfraktion liegt etwa um den Faktor 30 höher. In diesen Einträgen enthalten sind innerhalb des Bilanzabschnitts umgelagerte Sedimente, die sich entsprechend auch auf der Austragsseite der Bilanz in den Baggermengen wiederfinden. Der Nettoeintrag aus anthropogener Zugabe und anthropogenem Austrag liegt immer noch etwa um den Faktor 20 über den transportierten Grobkiesfrachten. Daran lässt sich erkennen, dass die Grobkies-/Steinzugaben vor allem der Sohlstabilisierung dienen. Grobkies und Steine kommen in Summe über den gesamten Bilanzabschnitt betrachtet im Niederrhein zur Ablagerung (positives Vorzeichen von ΔS).

Tab. 8.1: Sedimentbilanz des Niederrheins für verschiedene Fraktionen für den Zeitraum 1991 bis 2010.

	I_{up}	I_{tr}	I_{ar}^3	I_{ab}	I_{di}	O_{fi}	O_{gr}	O_{ab}	O_{dr}	O_{do}	ΔS
	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)	(Mt/a)
Sand, Kies, Steine (> 0,063 mm)	0,479	0,006	0,816	0,000	0,000	0,220	0,260*	0,049	0,415	0,700	-0,343
Grobkies/Steine (> 16 mm)	0,015	<u>0,000</u>	0,520	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,007	0,014	0,161	0,016	0,337
Feinkies (2 – 16 mm)	0,044	<u>0,000</u>	0,180	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,029	0,035	0,128	0,090	-0,058
Sand (0,063 – 2 mm)	0,420	0,006	0,116	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	0,220	0,224	<u>0,000</u>	0,127	0,594	-0,623
Ton/Schluff (< 0,063 mm)	2,359	0,061	<u>0,000</u>	0,049	0,317*	0,679	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	<u>0,000</u>	2,107	<u>0,000</u>

Fett gedruckte Werte sind aus Messwerten abgeleitet.

Unterstrichene Werte beruhen auf Annahmen.

Mit * gekennzeichnete Werte sind Schließgrößen der Sedimentbilanz.

Alle übrigen Werte sind aus der Bilanzierung abgeleitet.

Tab. 8.2: Sedimentbilanz des Niederrheins für verschiedene Fraktionen für den Zeitraum 1991 bis 2010 inkl. Abschätzung der Unsicherheiten.

		Steine/Grobkies (> 16 mm)	Feinkies (2 – 16 mm)	Sand (0,063 – 2 mm)	Ton/Schluff (< 0,063 mm)
I_{up}	(Mt/a)	0,015 ± 40 %	0,044 ± 40 %	0,420 ± 40 %	2,359 ± 40 %
I_{tr}	(Mt/a)	0,000 ± 0,001 Mt/a	0,000 ± 0,001 Mt/a	0,006 ± 0,001 Mt/a	0,061 ± 100 %
I_{ar}	(Mt/a)	0,520 ± 20 %	0,180 ± 20 %	0,116 ± 20 %	0,000 ± 0,050 Mt/a
I_{ab}	(Mt/a)	0,000 ± 0 %	0,000 ± 0 %	0,000 ± 0 %	0,049 ± 50 %
I_{di}	(Mt/a)	0,000 ± 0,001 Mt/a	0,000 ± 0,001 Mt/a	0,000 ± 0,100 Mt/a	0,317 ± 100 %
O_{fi}	(Mt/a)	0,000 ± 0,001 Mt/a	0,000 ± 0,001 Mt/a	0,220 ± 100 %	0,679 ± 50 %
$O_{gr,po}$	(Mt/a)	0,007 ± 75 %	0,029 ± 75 %	0,224 ± 75 %	0,000 ± 0,100 Mt/a
O_{ab}	(Mt/a)	0,014 ± 50 %	0,035 ± 50 %	0,000 ± 0,001 Mt/a	0,000 ± 0 %
O_{dr}	(Mt/a)	0,160 ± 20 %	0,128 ± 20 %	0,127 ± 20 %	0,000 ± 0,050 Mt/a
O_{do}	(Mt/a)	0,016 ± 40 %	0,090 ± 40 %	0,594 ± 40 %	2,107 ± 40 %
ΔS	(Mt/a)	0,337 ± 20 %	-0,058 ± 20 %	-0,623 ± 20 %	0,000 ± 0,050 Mt/a

³ In den Zahlen der anthropogenen Zugaben und Entnahmen I_{ar} und O_{dr} sind im Rahmen der Unterhaltung innerhalb des Systems umgelagerte Sedimentmengen enthalten (siehe auch Kap. 8.3.7).

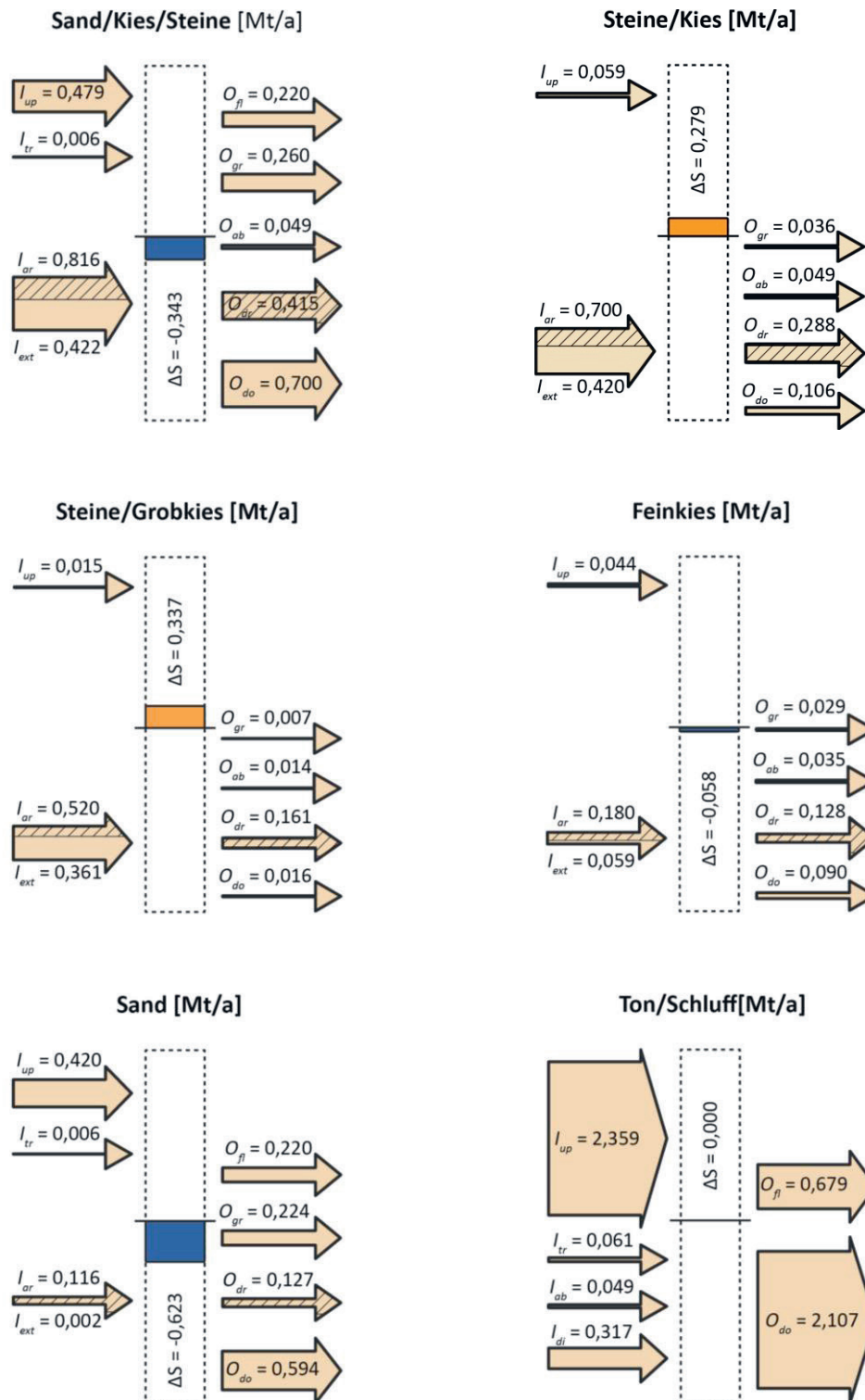


Abb. 8.5: Sedimentbilanz des frei fließenden Niederrheins für den Zeitraum 1991-2010 für die Fraktionen Ton/Schluff (< 0,063 mm), Sand (0,063 bis 2 mm), Feinkies (2 bis 16 mm), Steine/Grobkies (16 bis 125 mm), Kies/Steine (16 bis 125 mm) und alle Fraktionen > 0,063 mm. Zu beachten ist, dass sich bei $\Delta S \sim 0$ Anlandungen und Sedimenteinträge einerseits sowie Eintiefungen und Sedimentausträge andererseits in der Flussstrecke kompensieren; $\Delta S \sim 0$ ist somit kein Zeichen einer stabilen, undynamischen Sohle. Nomenklatur nach Kapitel 8.3.1.

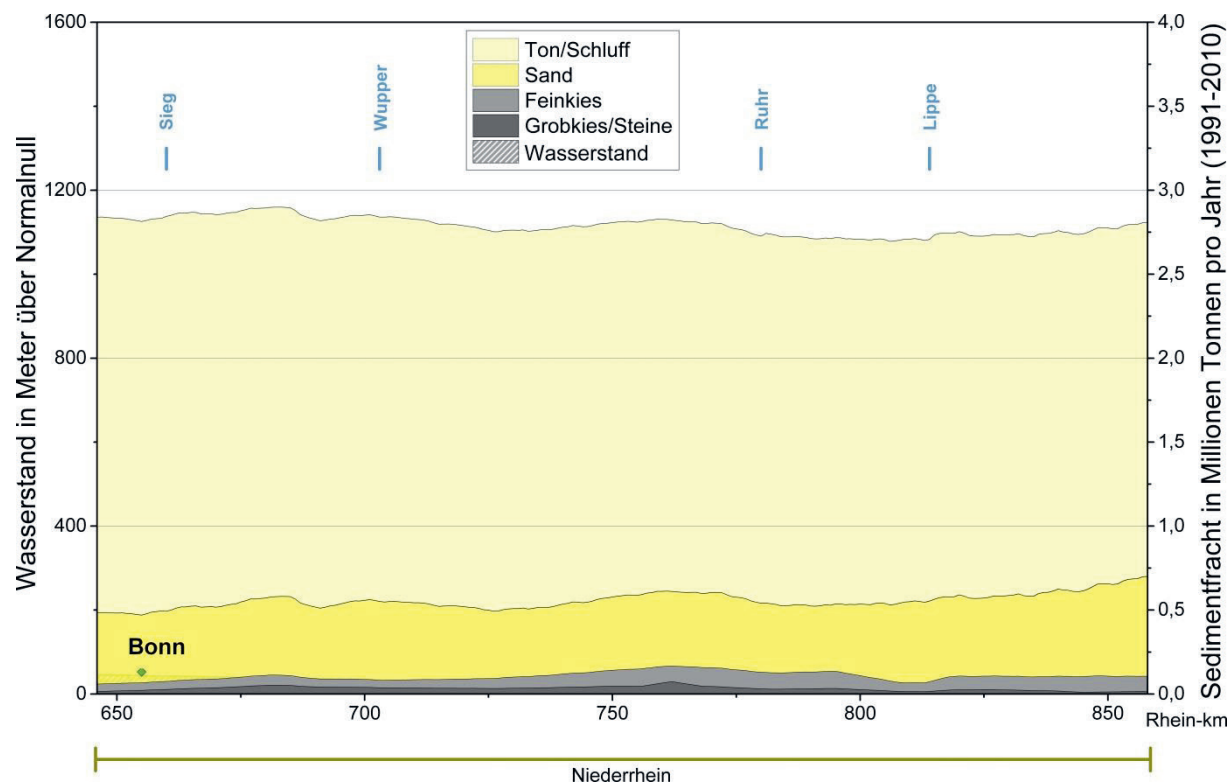


Abb. 8.6: Frachtlängsschnitt für den Niederrhein in Mt/a für Grobkies, Feinkies, Sand und Ton/Schluff berechnet aus der Bilanz.

Auch für den Feinkies stellen die anthropogenen Zugaben den größten Eintragspfad dar. Es findet außerdem ein relevanter Verlust durch Abrieb statt. Der berechnete Austrag von Feinkies in Buhnenfelder liegt in derselben Größenordnung wie die transportierten Frachten. Im Gegensatz zur Grobkies-/Steinfraktion wird entlang des Niederrheins in Summe Feinkies aus der Gewässersohle ausgetragen. Diese Nettoausträge an Feinkies liegen ebenfalls in der Größenordnung der transportierten Frachten. Es ist zu beachten, dass sich die Nettobeträge der Sohländerung über den gesamten Bilanzabschnitt aus positiven und negativen Sohländerungen entlang der Strecke zusammensetzen.

Auf der Eintragsseite der Sandbilanz nimmt der Eintrag von oberstrom den größten Wert an. Betrachtet man die fraktionierte Sohländerung im Falle einer negativen Sohländerung jedoch ebenfalls als Eintragspfad, so stellt genau genommen die Flusssohle für den Niederrhein die größte Quelle für den Sand dar. Daneben werden auch relevante Mengen an Sand anthropogen zugegeben. Diese anthropogenen Zugaben bestehen jedoch weitgehend aus vorher gebaggertem Material, führen also in Summe für den gesamten Bilanzabschnitt betrachtet nicht zu einer Erhöhung der Sandmenge im System. Die Einträge aus Nebenflüssen sind eher gering. Ein großer Teil des Sandes wird aus dem Niederrhein nach unterstrom ausgetragen. Daneben stellen der Rückhalt bzw. die Ablagerung auf Überflutungsflächen und in Buhnenfeldern relevante Austragspfade dar.

Für die Ton- und Schlufffraktionen erfolgen die weitaus größten Einträge über den Zustrom von oberstrom. Einträge aus Nebenflüssen und durch den Abrieb der Kiesfraktionen liegen beide etwa um den Faktor 40 unter den Sedimenteinträgen von oberstrom. Der größte Teil der Feinsedimente wird als Spülfracht durch das System hindurch und nach unterstrom weiter transportiert. Etwa 25 Prozent der gesamten Einträge werden auf Überflutungsflächen zurückgehalten. Zur Schließung der Ton/Schluff-Bilanz wurde ein zusätzlicher Eintragsterm eingeführt, der Einträge aus diffusen Quellen

(beispielsweise aus Kläranlagen, aus dem Abrieb von Waschbergematerial oder aus Bodenerosion in Ufernähe des Hauptflusses) umfasst. Diese diffusen Einträge betragen rechnerisch etwa 11 Prozent der Gesamteinträge.

Abbildung 8.6 zeigt die durchschnittlichen Jahresfrachten der einzelnen Fraktionen im Niederrhein, berechnet aus der Bilanzierung. Die Aufteilung der gesamten Sand/Kies-Fracht in die Fraktionen Sand, Feinkies und Grobkies erfolgte anhand der gemessenen Korngrößenverteilungen der Frachten entlang des Niederrheins. Die Grafik verdeutlicht die Größenordnungen der Frachten der einzelnen Fraktionen. Die Frachten der Feinsedimente (Ton/Schluff) liegen bei über 2 Mt/a und damit deutlich über allen anderen Frachten. Ihre Fracht nimmt im langjährigen Mittel im Verlauf des Niederrheins vor allem aufgrund des Rückhalts auf den Vorländern bei Hochwasser ab. Sand wird ebenfalls in großen Mengen transportiert, wobei hier keine Unterscheidung in suspendierten Sand bzw. als Geschiebe transportierten Sand erfolgt. Die Fracht des Sandes nimmt insgesamt entlang des Niederrheins zu. Ähnlich verhält es sich mit der Feinkiesfracht, die ebenfalls im Mittel im Niederrhein mit der Fließstrecke ansteigt. Die Kiesfrachten liegen deutlich unter den Sandfrachten, da der Transport des Kieses überwiegend als Geschiebe erfolgt. Die Frachten der Grobkiesfraktion sind im Vergleich so gering, dass sie in der Grafik kaum noch erkennbar sind.

8.5 Diskussion

8.5.1 Unsicherheiten

Die Unsicherheiten der Bilanz ergeben sich zum einen aus den Annahmen der Gesamtbilanz, zum anderen aus den Unsicherheiten bei der Bestimmung der einzelnen Bilanzterme.

Tektonik

Bei der Aufstellung der Bilanzgleichung (Kapitel 8.3.1) wurde die Annahme getroffen, dass tektonische Vertikalbewegungen für die Bestimmung der Sohlhöhenänderungen eine untergeordnete Rolle spielen. Für den bergsenkungsbehafteten Abschnitt des Niederrheins zwischen Rhein-km 791,5 und km 809 (vgl. Kapitel 8.2.4) gilt dies offensichtlich nicht. Weil die Bergsenkungen im Rhein aber eher lokal auftreten und die Senkungen im Flussbett außerdem kontinuierlich mit Waschbergen aus der Steinkohlenzeche Walsum aufgefüllt wurden, wurden sowohl die Bergsenkung als auch die Zugabe des Waschbergematerials nicht betrachtet.

Sohländerungen

Die Ableitung der Sohlhöhenänderung erfolgte aus Peildaten, die für die gesamte morphologisch aktive Breite zwischen den Bühnenköpfen erhoben wurden. Dies erhöht die Aussagekraft der Daten für die Volumenbilanz im Gegensatz zum Ober- und Mittelrhein, in denen nur der Bereich der Fahrrinne gepeilt wird. Zur Umwandlung der Volumina in Massen wird die Porosität der Sohle benötigt. Zur Abschätzung der Porosität wurde ein semiempirischer Ansatz von Frings et al. (2011) verwendet. Ein systematischer Fehler in den Peilungen kann lokal bis zu 5 cm betragen (Frings et al., 2014b). Die Sohländerungen im Betrachtungszeitraum 1991 bis 2010 waren jedoch überwiegend größer als 5 cm (bzw. 0,25 cm/a), was bedeutet, dass die beobachteten Sohländerungen signifikant sind. Insgesamt wird von einer Unsicherheit bei der Bestimmung der Änderungen in den in der Sohle zwischengespeicherten Sedimentmengen von 20 % ausgegangen (Frings et al., 2014b).

Sedimentfrachten

Die Unsicherheiten bei der Bestimmung mittlerer Sedimentfrachten sind recht hoch. Bei Königswinter (Rhein-km 645,8) als Bilanzmessstelle für den Eintrag von Kies und Sand in den Niederrhein von oberstrom konnte eine statistisch signifikante Transport-Abfluss-Beziehung aus den Messungen

abgeleitet werden. Um die inhärente systematische Unterschätzung der Sedimentfrachten bei der Verwendung einer Potenzfunktion als Transport-Abfluss-Beziehung zu berücksichtigen, wurde zur Bestimmung der mittleren Jahresfrachten eine Bias-Korrektur nach Duan (1983) durchgeführt.

Für Griethausen als untere Bilanzmessstelle (Rhein-km 857,5) war die Datengrundlage für die Ableitung einer statistisch signifikanten Transport-Abfluss-Beziehung nicht ausreichend. Hier wurde die mittlere Jahresfracht für Kies und Sand nach einem anderen Verfahren über eine Abflussklassifizierung ermittelt (Frings et al., 2014b). Außerdem wurde angenommen, dass der suspendierte Sand bei Hochwasser als Spülfracht durch das System transportiert wird, was nicht der Realität entspricht (vgl. Bilanz, Sandrückhalt auf Überflutungsflächen).

Bei der Messung der Geschiebefrachten wurde eine systematische Unterschätzung der Sandfrachten vermutet, die sich durch die Laborversuche von Banhold et al. (2014) (Kapitel 3.1) bestätigte. Auf Grundlage der Laborversuche wurden für die beiden Bilanzmessstellen für den Eintrag in bzw. den Austrag aus dem Niederrhein Korrekturfaktoren für die Sand-Geschiebefrachten abgeleitet und angewendet. Im Bereich des Niederrheins waren im Bilanzzeitraum jedoch unterschiedliche Fängertypen im Einsatz (mit 0,5 mm, 1,0 mm und 1,4 mm Maschenweite), von denen nur die derzeit noch im Einsatz befindlichen Fänger (mit 0,5 mm und 1,4 mm Maschenweite) im Labor untersucht wurden. Es ist also davon auszugehen, dass die Sand-Geschiebefrachten in der Bilanz weiterhin etwas unterschätzt werden. Für die Kies- und Sandfrachten werden die Unsicherheiten insgesamt zu etwa 40 % abgeschätzt (Frings et al., 2014b).

Für die Feinanteile der Schwebstofffracht (Ton/Schluff) stehen für den Niederrhein zwei unabhängige Datenreihen zur Verfügung. Auf der einen Seite werden im Schnitt zwei- bis dreimal jährlich an 19 Messstellen im Niederrhein Querprofilmessungen der Schwebstofffracht durchgeführt (Schwebstoffvielpunktmessungen). Zum anderen bestehen entlang der Strecke drei Dauermessstellen, an denen arbeitstäglich Einpunkt-Messungen der Schwebstoffkonzentration durchgeführt werden. Für die Bestimmung der Einträge von oberstrom bzw. der Austräge nach unterstrom der Feinschwebstoffe wurden die Messwerte der Dauermessstellen zugrunde gelegt, da hier pro Messstelle wesentlich mehr Messwerte vorliegen und damit auch eine deutlich bessere Berücksichtigung des Sedimenttransports bei Hochwasser möglich ist. Zudem konnte dadurch in der Gesamtbilanz für den deutschen Rhein für die Feinschwebstoffe auf eine einheitliche Datengrundlage zurückgegriffen werden. Die Abweichungen zwischen den beiden Messnetzen betragen im Niederrhein etwa $\pm 30\%$ (vgl. Kapitel 8.5.2).

Im Jahr 2009 startete im Rheineinzugsgebiet eine Pilotphase zur kontinuierlichen Erfassung der Schwebstoffkonzentration mittels kalibrierter Trübungssonden (Hillebrand et al., 2015). Im Rahmen der Pilotphase wurde an den betreffenden Messstellen (davon keine im Bereich des Niederrheins) über mindestens 14 Monate ein Parallelbetrieb des herkömmlichen Verfahrens einer Tagesstichprobe mit der kalibrierten Trübungssonde durchgeführt, die Messwerte in 15-Minuten-Abständen liefert. Beim Parallelbetrieb wurde festgestellt, dass die aus der kalibrierten Trübungsmessung ermittelten Jahresfrachten signifikant über den nach herkömmlicher Methodik ermittelten Jahresfrachten lagen. Die Unterschätzung des herkömmlichen Verfahrens lag im Schnitt im Bereich von 20 bis 30 %, im Maximum bei nahezu 50 %. Als Ursache kommt vor allem die höhere Datendichte bei Hochwasserereignissen in Frage. Gerade bei Feinsedimenten spielen Hochwasserereignisse eine wichtige Rolle für den Gesamttransport, so kann innerhalb von wenigen Tagen bis Wochen über die Hälfte einer Jahresfracht transportiert werden (Belz et al., 2014; Hillebrand et al., 2015). Daneben können systematische Unterschiede auch in der Art der Probenfiltration begründet sein. Im herkömmlichen Schwebstoffmessnetz werden zur Filtration Papierfilter verwendet, die keine definierte Porengröße aufweisen. Im Mittel liegen die Porengrößen im Bereich von 6 μm (Naumann et al., 2003). In Vergleichsuntersuchungen wurde eine gegenüber anderen Filtern (z. B. Zelluloseacetatfiltern) signifikant geringere Effizienz beobachtet. Für die Kalibrierung der Trübungsmessungen werden die Proben mit Zelluloseacetatfiltern mit einer definierten Porengröße von 0,45 μm gefiltert. Im direkten

Vergleich zeigte sich bei hohen Konzentrationen eine signifikante Unterschätzung der Schwebstoffkonzentration bei den Papierfiltern. Im Bereich niedriger Konzentrationen wurden jedoch mit den Papierfiltern höhere Konzentrationen ermittelt als mit den Zelluloseacetatfiltern. Es ist davon auszugehen, dass die Jahresfrachten auf Basis der kalibrierten Trübungssonden verlässlicher sind und dass deshalb die in dieser Bilanz verwendeten Messwerte des Schwebstoffdaueressnetzes der WSV die wahren Frachten ebenfalls eher unterschätzen.

Die gemessenen Schwebstoffkonzentrationen des Daueressnetzes wurden zum einen um den Gehalt an Biomasse des Phytoplanktons, zum anderen um den abgeschätzten Anteil an Sand korrigiert, um die mineralischen Ton/Schluff-Frachten zu erhalten. Zur Bestimmung der organischen Gehalte wurden von der FGG Rhein veröffentlichte Chlorophyll-a-Messwerte an verschiedenen Messstellen entlang des Rheins verwendet. Zur Umrechnung der Chlorophyll-a-Gehalte in Algenbiomasse wurde ein mittleres Verhältnis von Kohlenstoff zu Chlorophyll-a (C:Chl) von 45 angesetzt (Cloern et al., 1995). Außerdem wurde angenommen, dass die Algenbiomasse zu 42 % aus Kohlenstoff besteht (Fischer et al., 2002). Darüber hinaus wurde die Annahme getroffen, dass im Mittel rund 80 % des Phytoplanktons aus Kieselalgen besteht, deren Zellhülle wiederum aus anorganischem Material besteht und etwa 20 % der gesamten Biomasse ausmacht. Aus diesen Annahmen wurde eine Gesamtmenge an „Algenschwebstoff“ berechnet, die von den gemessenen Schwebstoffkonzentrationen des Daueressnetzes abgezogen wurde. Die angesetzten Konversionsfaktoren können je nach Flussabschnitt und Jahreszeit schwanken. Da die ermittelten Algenschwebstofffrachten im Niederrhein jedoch im Bereich bis max. etwa 5 % der Gesamtfracht betragen, sind die Unsicherheiten in der Bestimmung der Algenschwebstofffracht für die Gesamtaussage von untergeordneter Bedeutung. Neben der Biomasse des Phytoplanktons enthalten Schwebstoffe auch abgestorbenes organisches Material. Es ist davon auszugehen, dass die Masse an abgestorbenem organischem Material in einer vergleichbaren Größenordnung liegt wie die des lebenden organischen Materials. Für die vorliegende Bilanz wurde dieser Anteil nicht weiter berücksichtigt.

Zur Abschätzung der Sandanteile der Frachten des Schwebstoffdaueressnetzes wurden Wasserproben verschiedener Sondermesskampagnen mit Zelluloseacetatfiltern gefiltert und im Anschluss im Labor auf ihr Korngrößenspektrum untersucht. Im Mittel aus allen Proben ergab sich ein Sandgehalt von 9,2 % (Astor et al., 2014, siehe auch Kapitel 3.2), der für die Bestimmung der Feinanteile von den Messwerten abgezogen wurde. Bei den Schwebstoffvielpunktmessungen lag der Sandanteil der Schwebstoffe etwas höher bei im Mittel 16 %. Insgesamt wird die Unsicherheit der mittleren Jahresfracht der Feinfraktionen Ton und Schluff zu 40 % abgeschätzt.

Zugaben/Baggermengen

Anthropogene Sedimenteinträge im Rahmen von Geschiebezugaben oder Sohlstabilisierungsmaßnahmen sind wegen ihrer ökonomischen Bedeutung ebenso wie Baggermengen gut dokumentiert. Deshalb werden die Unsicherheiten in der Bestimmung dieser Terme als eher gering eingeschätzt. Dennoch bestehen Unsicherheiten vor allem hinsichtlich der genauen Kornzusammensetzungen und der Porosität. Der maximale Fehler der anthropogenen Sedimenteinträge bzw. -entnahmen wird zu 20 % angenommen (Frings et al., 2014b).

Abrieb

Der maximale Fehler beim Sedimentaustrag (Kies) bzw. -eintrag (Ton/Schluff) aufgrund von Abrieb wird auf 50 % abgeschätzt (Frings et al., 2014b).

Eintrag aus Nebenflüssen

Wie in Kapitel 8.2.3 beschrieben fließen dem Niederrhein nur vergleichsweise abflussschwache Nebenflüsse zu, die darüber hinaus zum Teil staugeregelt sind. Insofern wird die Unsicherheit für Sand- und Kieseinträge zwar als generell hoch, aber betragsmäßig recht gering zu 0,001 Mt/a

eingeschätzt. Aufgrund der sehr eingeschränkten Datenlage wird der Fehler für Einträge der Ton/Schluff-Fraktion auf 100 % abgeschätzt.

Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen

Für den Bereich des Niederrheins wurden im Rahmen des Projektes analog zum Ober- und Mittelrhein Kernproben von Überflutungsflächen zur Datierung mittels ^{137}Cs entnommen. Die Unsicherheiten bei der Bestimmung des Sedimentaustrags resultieren aus der Unsicherheit der Datierung (hier die Korrelation der ^{137}Cs -Maxima mit der Tschernobyl-Katastrophe) und aus der großen räumlichen Variabilität der ermittelten Sedimentationsraten und dem damit einhergehenden Fehler bei der Extrapolation auf die Überflutungsflächen des Niederrheins. Insgesamt sind die Unsicherheiten deshalb relativ hoch und werden zu 50 % für die Schluff/Ton-Fraktion und zu 100 % für die Sand-Fraktion abgeschätzt. Hinsichtlich der mangelnden Kenntnis der großräumigen Vorlandsedimentation im Vergleich zu den anderen Bilanztermen stellen die hier vorgestellten Zahlen dennoch einen wichtigen Erkenntnisgewinn da.



Abb. 8.7: Beispiel einer verlandeten Bühnenfeldgruppe bei Uedesheim (zwischen Rhein-km 728 und 729), Aufnahme während einer Niedrigwasserbefliegung am 19.09.2009.

Sedimentaustrag in Bühnenfelder

Während im Rheindelta seit den 1980er Jahren keine Netto-Auflandung oder -Erosion der Bühnenfelder mehr beobachtet wird (vgl. Kapitel 9), wurde für den deutschen frei fließenden Bereich des Niederrheins die Annahme getroffen, dass die Bühnenfelder über lange Zeiträume betrachtet tendenziell eine Sedimentsenke darstellen. Gestützt wird diese Annahme durch die Beobachtung verlandeter Bühnenfelder bei Niedrigwasser. Abb. 8.7 zeigt beispielhaft eine Aufnahme verlandeter Bühnenfelder bei Uedesheim. Der Sedimentaustrag in Bühnenfelder wurde für die Kies- und Sandfraktionen als Schließungsterm in der Bilanz verwendet. Neben dem Sedimentaustrag in Bühnenfelder sind in diesem Term auch die Sedimentation in Hafenbecken, Altwassern etc. enthalten. Diese Sedimentausträge wurden bisher nicht quantifiziert. Ihre Unsicherheit ist deshalb entsprechend hoch. Es wird angenommen, dass der maximale Fehler bei 75 % liegt, basierend auf der Betrachtung, dass die Abschätzung einerseits sehr unsicher ist, andererseits aber in der richtigen Größenordnung liegen muss (vgl. Kapitel 8.5.3).

Für die Bilanzierung wurde außerdem die Annahme getroffen, dass auf lange Zeiträume ein Rückhalt von Feinsedimenten der Ton- und Schlufffraktionen in den Buhnenfeldern vernachlässigbar gering sei. Für den deutschen Rhein sind keine Untersuchungen zum Feinsedimentrückhalt in Buhnenfeldern bekannt. An der Binnenelbe haben aktuelle Untersuchungen abgeschätzt, dass in etwa 10 bis 15 % aller Buhnenfelder nennenswerte Feinsedimentablagerungen vorhanden sind (Heininger et al., 2014). Zwar lässt sich diese Untersuchung nicht direkt auf den Rhein übertragen. Jedoch birgt die Annahme, dass der Feinsedimentrückhalt in Buhnenfelder am deutschen Rhein vernachlässigbar gering ist, eine gewisse Unsicherheit. Insgesamt wird die Unsicherheit des Bilanzterms „Sedimentaustrag in Buhnenfelder“ für Ton/Schluff mit 0,1 Mt/a abgeschätzt.

Eintrag aus diffusen Quellen

Der Sedimenteintrag aus diffusen Quellen wurde als Schließungsterm für die Bilanz der Ton- und Schlufffraktion verwendet. Die berechneten diffusen Einträge liegen innerhalb der Fehlerspanne der ermittelten Schwebstofffrachten im Niederrhein und sind damit nicht signifikant größer null. Dennoch gibt es einige Ansatzpunkte, die zusätzliche Einträge in den Niederrhein erklären könnten. Für den Niederrhein erscheint die Annahme gerechtfertigt, dass Uferabbrüche wegen der Uferbefestigungen am Rhein für den Sedimenteintrag keine Rolle spielen. Einträge durch Bodenerosion in der Nähe des Rhein-Hauptgerinnes sind zwar denkbar, werden aber aufgrund des flachen Reliefs für den Niederrhein ebenfalls eher als von untergeordneter Bedeutung eingeschätzt. Diffuse Einträge aus Kläranlagen existieren grundsätzlich entlang der gesamten Niederrheinstrecke. Der Umfang der Feinsedimenteinträge aus Kläranlagen wird jedoch ebenfalls als eher gering eingeschätzt. Relevanter könnten Feinsedimenteinträge aus dem Anschneiden tertiärer Ablagerungen im Bereich der Niederrheinsohle sein (vgl. Kapitel 8.2.2). Daneben ist bekannt, dass das im Bergsenkungsgebiet des Niederrheins verklappte Waschbergematerial auch ohne mechanische Einwirkung leicht verwittert und dabei zu feinen Körnern zerfällt (Wenka & Pribil, 2009). Wenka & Pribil (2009) schätzen einen Austrag von etwa 30 bis 35 % des seit 1976 verklappten Waschbergematerials ab. Insgesamt wurden seit 1976 etwa 13,6 Mt Waschbergematerial eingebracht. Nimmt man überschlägig an, dass der abgeschätzte Austrag von Waschbergematerial gleichmäßig über 30 Jahre erfolgte, ergibt sich ein Austrag aus der Sohle von ca. 0,14 Mt/a, was berechnete diffuse Einträge im Niederrhein von 0,145 Mt/a von der Größenordnung her realistisch erscheinen lässt.

Als Schließungsterm der Ton/Schluff-Bilanz sind die Unsicherheiten für den Term Sedimenteinträge aus diffusen Quellen hoch. Es wird angenommen, dass der maximale Fehler bei 100 % liegt, basierend auf der Betrachtung, dass die Abschätzung sehr unsicher ist und innerhalb der Fehlerspanne der Feinsedimentfrachten liegt.

Neben Ton und Schluff sind auch diffuse Quellen für die Sandfraktion vorstellbar. Im Osten, aber auch am Westrand der Niederterrasse des Rheins liegen beispielsweise verbreitet Flugsande vor (Breddin, 1927), so dass Tiefenerosion in Nebenflüssen und in geringem Umfang Bodenerosion durch Niederschlag oder Wind zu Sandeinträgen führen kann.

8.5.2 Validierung

Sand/Kies

Entlang des Niederrheins liegen an 19 Messstellen Daten zu Kies- und Sandfrachten vor. Ein Vergleich dieser Daten im Längsschnitt mit den anhand der Bilanz ermittelten räumlich differenzierten Kies- und Sandfrachten ist in Abb. 8.8 dargestellt. In der vorliegenden Bilanzrechnung wurden Sand, Kies und Steine zusammengefasst, da Sohländerungen zwar räumlich differenziert vorliegen, aber zunächst nur in Summe für alle Sedimentfraktionen. Zur Aufteilung der Sohländerungen auf die Fraktionen wurde in der Bilanz eine Kornverteilung verwendet, die auf Basis von gemessenen Sedimentfrachten erstellt wurde und damit im Bereich der Kies- und Sandfraktionen liegt. Damit ist nicht berücksichtigt, dass ein Teil der Sohländerungen aus der Zugabe von Steinen im Rahmen von

Sohlstabilisierungsmaßnahmen resultiert. Für den Vergleich der Frachten ist die Berechnung aus der Bilanz von Sand, Kies und Steinen mit den gemessenen Kies- und Sandfrachten dennoch gerechtfertigt, da davon ausgegangen wird, dass kein relevanter Transport von Steinen stattfindet.

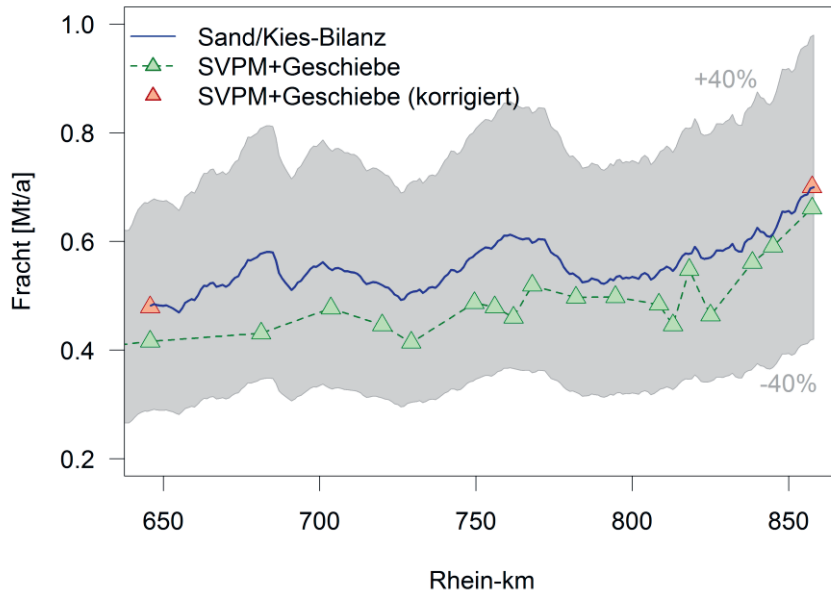


Abb. 8.8: Frachtlängsschnitt für den Niederrhein in Mt/a für Kies und Sand (0,063 - 63 mm), berechnet aus der Bilanz mit je einer Stützstelle am Beginn und Ende des Bilanzabschnittes (rote Dreiecke) im Vergleich zu den Messungen entlang der Strecke. Der grau schattierte Bereich markiert den Unsicherheitsbereich der Bilanz ($\pm 40\%$). Die angegebenen Jahresfrachten sind gemittelte Werte aus dem Zeitraum 1991 – 2010.

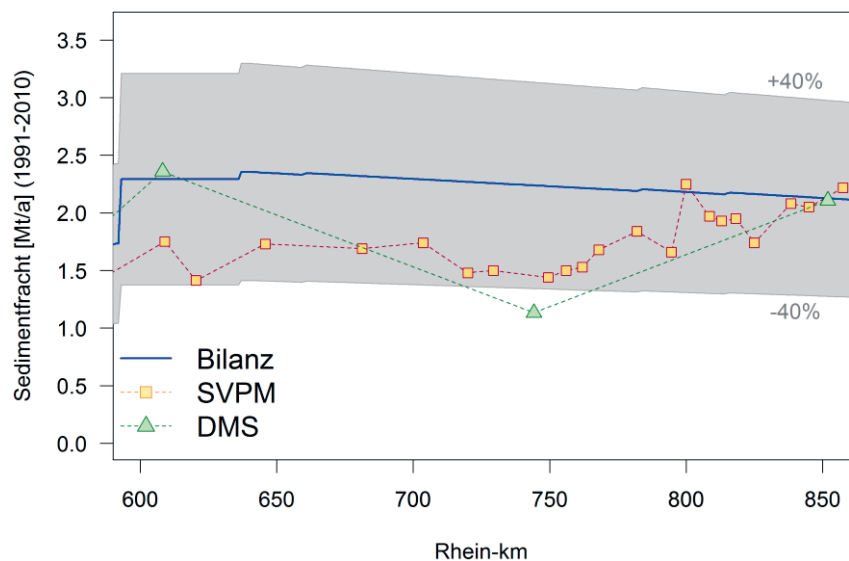


Abb. 8.9: Frachtlängsschnitt für den Niederrhein in Mt/a für Ton und Schluff (< 0,063 mm), berechnet aus der Bilanz mit je einer Stützstelle am Beginn und Ende des Bilanzabschnittes im Vergleich zu Messungen entlang der Strecke aus zwei verschiedenen Messnetzen (SVPM = Schwebstoffvielpunktmessnetz, DMS = Schwebstoffdauermessnetz). Die angegebenen Jahresfrachten sind gemittelte Werte aus dem Zeitraum 1991 – 2010.

Der Verlauf der berechneten Frachten zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung mit den gemessenen Frachten. Die berechneten Frachten liegen jedoch durchweg über den gemessenen Frachten. Als Hauptursache für die niedrigeren gemessenen Frachten kommt die fehlende Korrektur der Geschiebefrachten um den Sandverlust in Frage. Diese Korrektur wurde nur für die Stützstellen durchgeführt (rote Markierung). Die Korrekturfaktoren für den Anteil der Sandfracht als Geschiebe lagen bei 2,8 für Königswinter (km 645,8) bzw. 1,5 für Griethausen (km 857,5) (vgl. Kapitel 8.3.2). An den Stützstellen zu Beginn und Ende der Strecke ist eine Übereinstimmung der berechneten Frachten mit den korrigierten Werten erzwungen, da die gemessenen Frachten Eingangsparameter für die Bilanz darstellen. Die unkorrigierten Werte an den Stützstellen sind zum Vergleich im Diagramm mit dargestellt. Die Korrekturfaktoren für die übrigen Messstellen müssen im Nachgang des Projektes noch ermittelt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass sie in derselben Größenordnung liegen werden. Damit würden alle gemessenen Frachten zwischen den Stützstellen etwas nach oben korrigiert. Alle Abweichungen liegen innerhalb der Unsicherheitsspanne der berechneten Frachten.

In der Bilanz für Kies und Sand wurde die Verlandung von Bühnenfeldern als Schließungsterm verwendet. Aus dem deutschen Rhein existieren keine Messungen zum Austrag von Sedimenten in Bühnenfelder. An der Elbe wurden von der Bundesanstalt für Wasserbau Untersuchungen zur Verlandung von acht ausgewählten Bühnenfeldern über einen Zeitraum von 10 Jahren durchgeführt (Henning & Hentschel, 2013). Dabei wurde eine mittlere Verlandungsrate von 150 m³/a pro Bühnenfeld beobachtet, jedoch nicht nach Korngrößen differenziert. In der Mittelelbe befinden sich im Schnitt etwa 14 Bühnenfelder auf einem Kilometer Fließstrecke (linke und rechte Flussseite zusammengefasst) (Claus et al., 2014). Hochrechnet auf eine Strecke von 226 Fließkilometern, analog zur Länge des Niederrheins, ergäbe sich ein in Bühnenfeldern zurückgehaltenes Sedimentvolumen von ca. 0,475 Mio. m³ Sediment pro Jahr. Umgerechnet mit einer angenommenen Porosität von 0,4 und einer Kornrohdichte von 2600 kg/m³ ergäbe dies rechnerisch eine zurückgehaltene Sedimentmenge von 0,741 Mt/a. Der für den Niederrhein aus der Bilanz bestimmte Austrag in Bühnenfelder liegt mit 0,260 Mt/a deutlich niedriger. Dies könnte einerseits darauf hinweisen, dass die Bühnenfelder im Niederrhein im Vergleich zur Mittelelbe näher an einem langfristigen Gleichgewichtszustand sind. Andererseits deutet es darauf hin, dass der Schließungsterm für die Kies/Sand-Bilanz des Niederrheins in einer plausiblen Größenordnung liegt.

Ton/Schluff

Wie in Kapitel 8.3.2 bereits erläutert, liegen für die Feinsedimentfracht im Niederrhein zwei unabhängige Datenreihen vor, die Unterschiede in der Messmethodik und in der Messfrequenz aufweisen. Der Bilanz wurden die Daten des Schwebstoffdaueressnetzes der WSV zugrunde gelegt, weil damit für die gesamte deutsche Rheinstrecke eine einheitliche Datenbasis vorlag. In diesem Daueressnetz werden arbeitstäglich Stichproben der Schwebstoffkonzentration an einem vordefinierten Punkt im Fließquerschnitt erhoben. Daneben werden an 19 Messstellen im Niederrhein im Schnitt zwei- bis dreimal jährlich Querprofilmessungen der Schwebstofffracht durchgeführt (Schwebstoffvielpunktmessungen, SVPM). In Abb. 8.9 sind die aus den beiden Messnetzen abgeleiteten mittleren Jahresfrachten für den Zeitraum 1991 bis 2010 für die Ton/Schluff-Frachten zusammen mit den aus der Bilanz berechneten Frachten dargestellt. Der Vergleich zeigt deutliche Abweichungen zwischen den beiden Messnetzen sowie zwischen Messdaten und berechneten Frachten. Eine Betrachtung der zeitlichen Entwicklung der Feinsedimentfrachten (nicht dargestellt) zeigt einen deutlichen Rückgang der Frachten über die Zeit innerhalb des Zeitraums 1991 bis 2010, der an der Messstelle Düsseldorf (Rhein-km 744,2) außerdem sehr viel stärker ausgeprägt ist, als an den Messstellen Weißenthurm (Rhein-km 608,2) und Emmerich (Rhein-km 851,9). Ein genereller Rückgang der Frachten über die Zeit wurde auch an vielen anderen Flüssen bzw. Streckenabschnitten beobachtet (Walling, 2009; Hillebrand et al., 2014). Eine Erklärung für den stärkeren Rückgang der Frachten bei Düsseldorf im Vergleich zu Weißenthurm und Emmerich auf Basis von Veränderungen im Flusseinzugsgebiet konnte nicht gefunden werden. Eventuell ist der

Rückgang teilweise auch durch nicht dokumentierte Änderungen bei der Probenahme (Verlegung des Probenahmepunktes etc.) zu erklären.

Sowohl in den Frachten des Dauermessnetzes als auch in den Schwebstoffvielpunktmessungen zeigt sich ein Rückgang der Ton/Schluff-Frachten etwa bis km 750 und danach ein erneuter Anstieg der Frachten. In den aus der Bilanz rückgerechneten Frachten wird dieser Verlauf nicht abgebildet. Die berechneten Frachten nehmen gleichmäßig ab, unterbrochen durch kleine lokale Anstiege im Bereich der Mündungen von Nebenflüssen. Eine Erklärung für den qualitativen Verlauf der Messdaten könnte darin liegen, dass die diffusen Einträge nicht – wie in der Bilanz angenommen – gleichmäßig entlang der Strecke auftreten, sondern sich auf den Bereich ab km 750 konzentrieren. Für den Niederrhein wurden als wichtigste diffuse Quelle der Zerfall des verklappten Waschbergematerials im Bergsenkungsgebiet sowie der Anschnitt tertiärer Ablagerungen vermutet (vgl. Kapitel 8.2.2). Diese Prozesse sind vor allem im betreffenden Bereich ab km 750 relevant, was die Zunahme der Feinschwebstofffrachten in diesem Gebiet erklären könnte und die Hypothese stützen würde, dass diese Prozesse in der Tat die wesentlichen diffusen Quellen in der Bilanz darstellen.

Zur Kontrolle der Feinsedimentausträge aus dem Niederrhein wurden außerdem Schwebstoffmessungen an der niederländischen Messstelle Lobith Ponton (Rhein-km 857,5) aus dem Zeitraum 1991 bis 2010 herangezogen (vgl. Kapitel 9). Die aus diesen Daten abgeleitete mittlere Jahresfracht bei Lobith liegt bei 2,050 Mt/a und damit um etwa 3 % niedriger als die deutsche Vergleichsmessung bei Emmerich (Rhein-km 851,9). Die Abweichung liegt innerhalb der Unsicherheitsbandbreite und ist in Anbetracht der Unterschiede in der Messtechnik sehr gering.

8.5.3 Vergleich mit bereits durchgeführten Studien

Die Unterschiede der bestehenden Sedimentbilanz für den Niederrhein (Frings et al., 2014b) zu der hier vorgestellten Sedimentbilanz liegen zum einen in der Bestimmung einzelner Bilanzterme:

- Sedimenteintrag von oberstrom $I_{up,Sand}$ und Sedimentaustrag $O_{do,Sand}$ nach unterstrom: Korrektur der Geschiebefrachten des Sandes, um den Sandverlust bei den Geschiebemessungen auszugleichen
- Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen und in Bühnenfelder und Häfen O_{fl} und $O_{gr,po}$: Erfassung als getrennte Terme, wobei der Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen auf Basis von Messdaten abgeschätzt wurde

Außerdem wurden neben der früheren Betrachtung der Kies- und Sandbilanz in Summe nun für einzelne Fraktionen getrennte Bilanzen bestimmt. Neu hinzugekommen ist ferner die Bilanz der Feinsedimente (Ton/Schluff) mit der Berücksichtigung von diffusen Quellen im Einzugsgebiet.

In der bestehenden Sedimentbilanz des Niederrheins (Frings et al., 2014b) wurde die Sedimentation auf Vorländern, in Bühnenfeldern und Häfen als Ganzes abgeschätzt zu 0,540 Mt/a. Aufgrund der Änderungen in den Sedimentfrachten an den Stützstellen und damit in den Bilanztermen $I_{up,Sand}$ und $O_{do,Sand}$ ergibt sich nun ein Rückhalt auf Überflutungsflächen und in Bühnenfeldern von insgesamt $O_{fl} + O_{gr} = 0,480$ Mt/a für Kies und Sand. In Summe über die Kies- und Sandfraktionen teilt sich der Rückhalt jeweils etwa zur Hälfte auf den Rückhalt auf Überflutungsflächen und den Rückhalt in Bühnenfeldern auf. Zu bedenken ist dabei, dass davon ausgegangen wird, dass kein Kies auf die Vorländer ausgetragen wird.

8.5.4 Empfehlungen

Verschiedene Empfehlungen ergeben sich direkt aus der Sicht auf die Datenlage, die der vorliegenden Bilanz zugrunde liegt. Die Ergebnisse zeigten den großen Anteil, den der Sand an der Sohlentwicklung der Bilanzstrecke hat. Entsprechend hoch ist die Bedeutung des Sandhaushalts für

die Wassertiefenentwicklung und damit für die Schifffahrt einzustufen. Bei Frachtmessungen im Querprofil sollte deshalb immer eine Bestimmung des Sandgehaltes erfolgen. Zur besseren Einordnung der Altdaten sollten außerdem Laborversuche mit dem Geschiebefänger der Maschenweite 1,0 mm, analog zu den im Rahmen dieser Studie durchgeführten Untersuchungen mit den Fängern der Maschenweiten 0,5 mm und 1,4 mm, durchgeführt werden.

Hohe Unsicherheiten bei gleichzeitig betragsmäßig großen Werten finden sich vor allem in den Bilanzparametern der Sedimentausträge in Bühnenfelder und auf Überflutungsflächen. Für den Sedimentrückhalt auf Überflutungsflächen gibt es recht grobe Anhaltswerte aus Messungen, für die Bühnenfeldsedimentation musste auf Annahmen zurückgegriffen werden. Für beide Terme sollten aufgrund ihrer (rechnerischen) Relevanz weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um die Unsicherheiten zu verringern.

8.6 Schlussfolgerungen

8.6.1 Sedimentquellen und -senken

Eine wichtige Quelle für Sedimente am Niederrhein ist der Eintrag von oberstrom aus dem Mittelrhein. Für Kies und Steine ist die bedeutendste Quelle jedoch der anthropogene Eintrag in Form von Zugaben von Geschiebersatzmaterial oder Sohlstabilisierungsmaßnahmen. Weitere Sedimentquellen wie Einträge aus Nebenflüssen spielen im Niederrhein eine untergeordnete Rolle. Für die Ton/Schluff-Fraktion wurden im Niederrhein über die Schließung der Bilanz diffuse Quellen in der Größenordnung von etwa 15 % der Fracht ermittelt.

Relevante Senken sind die Sedimentausträge in Bühnenfelder und auf Überflutungsflächen. Andere Senken wie Nettoentnahmen im Rahmen von Baggermaßnahmen oder der Abrieb sind von geringerer Bedeutung. Es finden zwar in signifikantem Umfang Baggerungen statt. Das gebaggerte Material wird jedoch in der Regel in der Nähe der Entnahmestelle dem Rhein wieder zugegeben.

An der Sohle tritt, bilanziert über den Gesamtabschnitt, eine Sedimentation von Grobkies und eine Erosion von Sand und in deutlich geringerem Umfang von Feinkies auf, was zu einer Anreicherung von grobem Material auf der Flusssohle führt. Insgesamt ist das Niederrheingebiet ein Erosionsgebiet.

8.6.2 Sedimentfrachten

Insgesamt treten entlang des Niederrheins im Vergleich zu anderen Rheinabschnitten (vgl. Kapitel 11) eher geringe Änderungen der Sedimentfrachten im Längsverlauf auf. Die Frachten von Ton/Schluff nehmen vor allem aufgrund der Sedimentation auf Überflutungsflächen bei Hochwasser und nur geringer Einträge aufgrund von Nebenflüssen im Längsverlauf ab. Sand- und Kiesfrachten bewegen sich auf einem recht stabilen Niveau, bis etwa im Bereich um km 830 die Sandfrachten deutlich ansteigen. Dieser Anstieg in den Sandfrachten geht mit dem Kies-Sand-Übergang einher, der sich in diesem Bereich befindet (vgl. auch Kap. 8.2.2). Am Beginn dieses Bereiches ist die Sohle größtenteils durch ein Gerüst von Kieskörnern gestützt. Am Ende dieses Übergangsbereiches, etwa im Bereich der deutsch-niederländischen Grenze, bilden die Sandkörner das tragende Korngerüst. Diese Änderung der Sohlstruktur sorgt dafür, dass die Mobilität des Sandes zunimmt (Frings et al., 2012).

8.6.3 Unsicherheiten und Empfehlungen

In der Berechnung von Sedimentfrachten entlang der Fließstrecke aus den Bilanztermen bestehen große Unsicherheiten in den Bilanztermen, die aufgrund fehlender Informationen gleichmäßig auf die Fließstrecke umgelegt wurden. Dazu gehören vor allem der Sedimentrückhalt auf Überflutungsflächen und die Sedimentation in Bühnenfeldern bzw. in Form von Uferreehen. Für diese Parameter sollten weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um die Unsicherheiten zu verringern.

Die Schließungsterme der Bilanzen sollten in künftigen Untersuchungen unabhängig bestimmt werden. Dies betrifft vor allem die Einträge aus diffusen Quellen für die Ton/Schluff-Bilanz und der Rückhalt in Bühnenfeldern für die Sand/Kies-Bilanz.

Die größte Unsicherheit für die fraktionierte Bilanzierung besteht darin, die aus Peildaten ermittelten lokalen Sohländerungen auf die Kornfraktionen umzulegen. Trifft man die Annahme, dass die Sohländerung eines Bilanzabschnittes jeweils mit einer bestimmten Kornverteilung erfolgt, beispielsweise mit der der Sohle oder des transportierten Materials, müssen sich Sohländerungen qualitativ für alle Kornfraktionen gleich auswirken (Erosion aller Fraktionen bzw. analog Sedimentation aller Fraktionen, ggf. in unterschiedlichem Umfang). In diesem Fall wäre es nicht möglich, dass Grobkies sedimentiert und gleichzeitig Sand erodiert. Erlaubt man andererseits unterschiedliche Vorzeichen der Sohländerungen verschiedener Fraktionen, benötigt man entweder viele Stützstellen fraktionierter Frachten oder weitere Zusatzinformationen, die Hinweise auf die fraktionierte Sohländerung geben. In größeren Bilanzabschnitten können sich ansonsten lokal physikalisch unplausible Effekte einstellen (beispielsweise gleichzeitig signifikante Sedimentation von Sand im Hauptgerinne und Erosion von Kies). Solche Effekte wirken sich besonders stark aus, wenn – wie im Niederrhein – die Gesamtfrachten relativ gleichbleibend sind, aber signifikante Sohländerungen beobachtet werden. Die Aufteilung der gesamten Sand/Kies-Fracht in die Fraktionen Sand, Feinkies und Grobkies erfolgte in der vorliegenden Studie anhand von gemessenen Korngrößenverteilungen der Frachten. Dies war nur durch Hinzuziehung zusätzlicher Messdaten möglich und schränkt die Möglichkeiten der Validierung ein. Numerische Modelle haben das Potenzial, hier die fraktionierte Bilanzierung zu verbessern.

8.7 Literatur

- Astor, B., Gehres, N. & Hillebrand., G. (2014). Von der Quelle zur Mündung, eine Sedimentbilanz des Rheins: Korngrößenanalyse von Schwebstoffproben am Rhein und seinen Nebenflüssen. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Banhold, K., Frings, R.M. & Schüttrumpf, H. (2014a). Von der Quelle zur Mündung, eine Sedimentbilanz des Rheins: Sandverlust bei Geschiebemessungen im Rhein. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University, Aachen.
- Banhold, K., Frings, R.M. & Schüttrumpf, H. (2014b). Vorlandsedimentation am deutschen Rhein. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen University, Aachen.
- Belz, J.U., Adler, M., Baschek, B., Bergfeld-Wiedemann, T., Brockmann, H., Claes, J., Daedlow, K., Hammer, M., Hatz, M., Hillebrand, G., Hübner, G., Klein, B., Kleisinger, C., Krahe, P., Larina-Pooth, M., Meißner, D., Mothes, D., Mürlebach, M., Nilson, E., Otto, W., Promny, M., Rademacher, S., Schöl, A., Schriever, S., Schubert, B., Schwandt, D. & Viergutz, C. (2014). Das Hochwasser-Extrem des Jahres 2013 in Deutschland: Dokumentation und Analyse. Vol. 31. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

- Belz, J.U., Brahmer, G., Buiteveld, H., Engel, H., Grabher, R., Hodel, H., Krahe, P., Lammersen, R., Larina, M., Mendel, H.-G., Meuser, A., Müller, G., Plonka, B., Pfister, L. & Van Vuuren, W. (2007). Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert: Analyse, Veränderungen, Trends. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad.
- Bredden, H. (1927). Löß, Flugsand und Niederterrasse im Niederrheingebiet, ein Beitrag zur Frage der Entstehung des Löß. *Geol. Rundsch.* 18:72-78.
- Buck, W., Felkel, K., Gerhard, H., Kalweit, H., Malde, J. van, Nippes, K.-R., Ploeger, B. & Schmitz, W. (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen – Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft. Bericht I-11, Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR), Lelystad, Niederlande.
- Claus, E., Hillebrand, G., Schwandt, D., Becker, B., Möhlenkamp, C. & Heininger, P. (2014). Bühnenfeldkataster der Bundesanstalt für Gewässerkunde. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Cloern, J.E., Grenz, C. & Videgar-Lucas, L. (1995). An empirical model of the phytoplankton chlorophyll: carbon ratio-the conversion factor between productivity & growth rate. *Limnology and Oceanography.* 40:1313-1321.
- Duan, N. (1983). Smearing Estimate: A Nonparametric Retransformation Method. *Journal of the American Statistical Association.* 78:605-610.
- Fischer, H., Wanner, S.C. & Pusch, M. (2002). Bacterial abundance and production in river sediments as related to the biochemical composition of particulate organic matter (POM). *Biogeochemistry.* 61:37-55.
- Frings, R.M. (2008): Downstream fining in large sand-bed rivers. *Earth-Science Reviews,* 87(1), 39-60.
- Frings, R.M., Döring, R., Beckhausen, C. & Schüttrumpf, H. (2012a). Sedimentologisch-morphologischer Atlas des Niederrheins. Lehrstuhl und Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen, Aachen.
- Frings, R.M., Gehres, N., Promny, M., Middelkoop, H., Schüttrumpf, H. & Vollmer, S. (2014a). Today's sediment budget of the Rhine River channel, focusing on the Upper Rhine Graben and Rhenish Massif. *Geomorphology.* 204:573-587.
- Frings, R.M., Döring, R., Beckhausen, C., Schüttrumpf, H. & Vollmer, S. (2014b). Fluvial sediment budget of a modern, restrained river: The lower reach of the Rhine in Germany. *Catena,* 122:91-102.
- Frings, R.M., K. Krötz, W. Otto, M. Noack, B. Brandstetter, N. Gehres & Vollmer, S. (2012). Sedimentologisch-Morphologische Untersuchung des Niederrheins. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Frings, R.M., H. Schüttrumpf & Vollmer, S. (2011). Verification of porosity predictors for fluvial sand-gravel deposits. *Water Resources Research.* 47:W07525.
- Gehres, N., Astor, B. & Hillebrand, G. (2014). Von der Quelle zur Mündung, eine Sedimentbilanz des Rheins: Rhein Nebenflüsse als Sedimentlieferanten. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Gölz, E. 1992. Recent Morphologic Development of the Rhine River. In: 5th Int. Symposium on River Sedimentation, Karlsruhe.
- Gölz, E., Schröter, M. & Mikoš, M. (1995). Fluvial abrasion of broken quartzite used as a substitute for natural bed load. In: Sixth International Symposium on River Sedimentation, New Delhi, India, 387-395.

- Görge, K., Beersma, J., Brahmmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., De Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C. & Volken, D. (2010). Assessment of Climate Change Impacts on Discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad.
- Heininger, P., Anlanger, C., Becker, B., Claus, E., Fricke, D., Hillebrand, G., Hübner, G., Jährling, K.-H., Möhlenkamp, C., Quick, I., Schwandt, D. & Vollmer, S. (2014). Fachbeiträge zum Sedimentmanagementkonzept Elbe. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Henning, M. & Hentschel, B. (2013). Sedimentation and flow patterns induced by regular and modified groyne fields on the River Elbe, Germany. *Ecohydrology*, 6:598-610.
- Henningsen, D. & Katzung, G. (2006). Einführung in die Geologie Deutschlands. Springer Spektrum.
- Hillebrand, G., Claus, E., Schwandt, D., Becker, B., Möhlenkamp, C. & P. Heininger (2014a). Die Bühnenfelder der Elbe. In: Fachbeiträge zum Sedimentmanagementkonzept Elbe. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Hillebrand, G., Otto, W., Schmegg, J., Vollmer, S., & Gehres, N. (2015). Neuausrichtung des WSV-Messstellennetzes Schwebstoffmonitoring. BfG-1799. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Hillebrand, G., Pohlert, T. & Breitung, V. (2014b). Klimaprojektionen für den Sedimenthaushalt und Risiken durch kohäsive Sedimente. Schlussbericht KLIWAS-Projekt 5.01. KLIWAS-48/2014., Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, DOI: 10.5675/Kliwas_48/2014_5.01.
- Hoffmann, T., Erkens, G., Gerlach, R., Klostermann, J. & Lang, A. (2009). Trends and controls of Holocene floodplain sedimentation in the Rhine catchment. *Catena*, 77(2), 96-106.
- Lotze, F. (1971). Geologie Mitteleuropas. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- Naumann, S., Bögehold, M. & Wieprecht, S. (2003). Wirkungsgrad gravimetrischer Labormethoden zur Schwebstoffbestimmung. In: Gewässermorphologisches Kolloquium. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Schwartz, R. (2006). Geochemical characterisation and erosion stability of fine-grained groyne field sediments of the Middle Elbe River. *Acta hydrochimica et hydrobiologica*, 34:223-233.
- Tümmers, H.J. (1994). Der Rhein: Ein europäischer Fluss und seine Geschichte. C.H. Beck, München.
- Walling, D.E. (2009). The Impact of Global Change on Erosion and Sediment Transport by Rivers: Current Progress and Future Challenges. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, Paris.
- Wenka, T. & Pribil, D. (2009). Untersuchungen zur Lagestabilität des bergsenkungsbedingt eingebrachten Waschbergmaterials am Niederrhein In BAW-Kolloquium: Verkehrswasserbauliche Untersuchungen am Rhein. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- Wirtz, C. (2004). Hydromorphologische und morphodynamische Analyse von Bühnenfeldern der unteren Mittel-Elbe im Hinblick auf eine ökologische Gewässerunterhaltung. In Fachbereich Geowissenschaften. Freie Universität Berlin, Berlin.

9. Sedimentbilanz des Oberen Rheindeltas

R.M. Frings, K. Banhold, I. Evers

9.1 Einleitung

Seit Jahren wird die Erosions- und Sedimentationsproblematik im niederländischen Rhein auf der Basis von Sohlpeilungen untersucht. Vereinzelt werden auch Geschiebemessungen und Schwebstoffmessungen durchgeführt. Diese Messungen geben jedoch keine Antwort auf wesentliche Fragestellungen wie: „Woher kommen die Sedimentfrachten im Rhein?“, „Was passiert mit den erodierten Sedimenten?“, und „Wie sind die morphologischen Prozesse in den Bereichen unterstrom und oberstrom miteinander verknüpft?“. Diese Fragestellungen sind besonders für die Optimierung von Sedimentzugabe- und Baggerstrategien wichtig, können aber nur mit der Aufstellung einer Sediment- oder Feststoffbilanz beantwortet werden. Eine solche Bilanz beschreibt das Gleichgewicht zwischen den Sedimentmengen, die in das Untersuchungsgebiet eingetragen werden (die sogenannten Quellen), den Sedimentmengen, die aus dem Untersuchungsgebiet ausgetragen werden (die sogenannten Senken), und der Veränderung der Sedimentmengen, die im Untersuchungsgebiet gespeichert sind.

Das Ziel dieser Teilstudie war die Erstellung einer Sedimentbilanz für den Fluss schlauch des Oberen Rheindeltas (Abb. 9.1) für den Zeitraum 1991-2010. Dabei wurden die Sedimentfraktionen kleiner 0,063 mm (Ton/Schluff), 0,063 bis 2 mm (Sand), 2 bis 16 mm (Feinkies) und 16 mm bis 63 mm (Grobkies) getrennt voneinander bilanziert. Im untersuchten Gebiet kommen, im Gegensatz zum oberstromigen Rheingebiet, Sedimente größer 63 mm nicht vor.

Eine sehr umfassende Sedimentbilanz für das Obere Rheindelta wurde schon 2001 veröffentlicht (Ten Brinke et al., 2001). Diese Bilanz bezieht sich auf die Zeiträume 1970-1989 und



Abb. 9.1: Der Mündungsarm Waal im Oberen Rheindelta (Foto Rijkswaterstaat / Joop van Houdt).

1990-1999 und ist mittlerweile nicht mehr aktuell. In der vorliegenden Studie wurde eine komplette Aktualisierung der Sedimentbilanz von Ten Brinke et al. (2001) vorgenommen. Aufgrund der bereits existierenden Bilanz des Niederrheins (Frings et al., 2014) konnten die Sedimentfrachten am oberen Rand des Rheindeltas besser abgeschätzt werden. Mithilfe von aktuellen Untersuchungen von Middelkoop et al. (2010) konnte dasselbe für die Vorlandsedimentation erreicht werden. Auch wurden aktuelle Zahlen zu Sohlhöhenänderungen von Rijkswaterstaat eingearbeitet. Im Gegensatz zu der Bilanz von Ten Brinke et al. (2001) wird in der vorliegenden Studie zwischen Sand und zwei Kiesfraktionen unterschieden. Des Weiteren wurden in dieser Studie neue Daten über die Sedimentverteilung am IJsselkop im Zeitraum 1991 bis 2010 (Frings & Kleinans, 2008) verwendet, so dass die von Ten Brinke et al. (2001) bemängelte Erkenntnislücke über die Sedimentverteilung an dieser Stelle geschlossen werden konnte.

9.2 Gebietsbeschreibung

9.2.1 Lage

Das in dieser Studie betrachtete Gebiet umfasst das Obere Rheindelta von der deutsch-niederländischen Grenze bei Lobith (Rhein-km 857,5) bis zum tidebeeinflussten Bereich des in den Niederlanden gelegenen Unteren Rheindeltas (Abb. 9.1, 9.2). Es beinhaltet die Gewässerläufe Bovenrijn (Rhein-km 857,5 bis 867,5), Waal (Rhein-km 867,5-951), Pannerdensch Kanaal (Rhein-km 867,5 bis 878,5), Nederrijn-Lek (Rhein-km 878,5 bis 969) und IJssel (Rhein-km 878,5 bis 1.005).

9.2.2 Geologie und Sedimentologie

Geologisch betrachtet liegt das Obere Rheindelta am Ostrand des Nordseebeckens, einem aus dem Tertiär stammenden Senkungsgebiet. Während des Pleistozäns und Holozäns haben der Rhein



Abb. 9.2: Oberes Rheindelta (1: Pannerdensch Kop, 2: IJsselkop).

und die Maas in diesem Gebiet auf großer Skala fluviale Sedimente abgelagert. In der Nähe der deutschen Grenze beträgt die Mächtigkeit der holozänen Sedimente etwa 1,5 m und es befinden sich pleistozäne Flussablagerungen nahe der Erdoberfläche. In westlicher Richtung steigt die Mächtigkeit der holozänen Flusssedimente bis auf über 20 m in der Nähe der heutigen Nordseeküste an. Eine paläogeographische Rekonstruktion des Holozäns (Berendsen & Stouthamer, 2001; Cohen et al., 2012) zeigt, dass die Gewässerläufe des Rheins und der Maas sich ständig verlagert haben (Abb. 9.3), wobei Sandkörper (mit geringen Kiesanteilen) von ehemaligen Gewässerläufen zeugen, hingegen Schluffe, Tone und Torfpakete auf ehemalige Auengebiete hinweisen. Vereinzelt finden sich im Oberen Rheindelta äolische Sande und eiszeitliche Moränen nahe der Geländeoberfläche (Berendsen & Stouthamer, 2000).

Die Sohle der heutigen Gewässerläufe im Oberen Rheindelta besteht hauptsächlich aus Sand. Im östlichen Teil des Oberen Rheindeltas (Bovenrijn, Pannerdensch Kanaal) und den Oberläufen von Waal, Nederrijn und IJssel finden sich zusätzlich erhebliche Mengen Kies in der Flusssohle. Der Kiesanteil sowie die mediane Korngröße nehmen nach unterstrom aufgrund des abnehmenden Gefälles stark ab (Abb. 9.4). Im heutigen Zustand weisen die Gewässerläufe unterschiedliche Flussbreiten auf: kurz nach der deutsch-niederländischen Grenze misst der Rhein in der Breite 340 m, die Waal verbreitert sich im Verlauf von 270 auf 350 m, der Pannerdensch Kanaal von 125 auf 140 m, der Nederrijn-Lek von circa 100 auf 190 m und die IJssel von circa 75 auf 170 m.

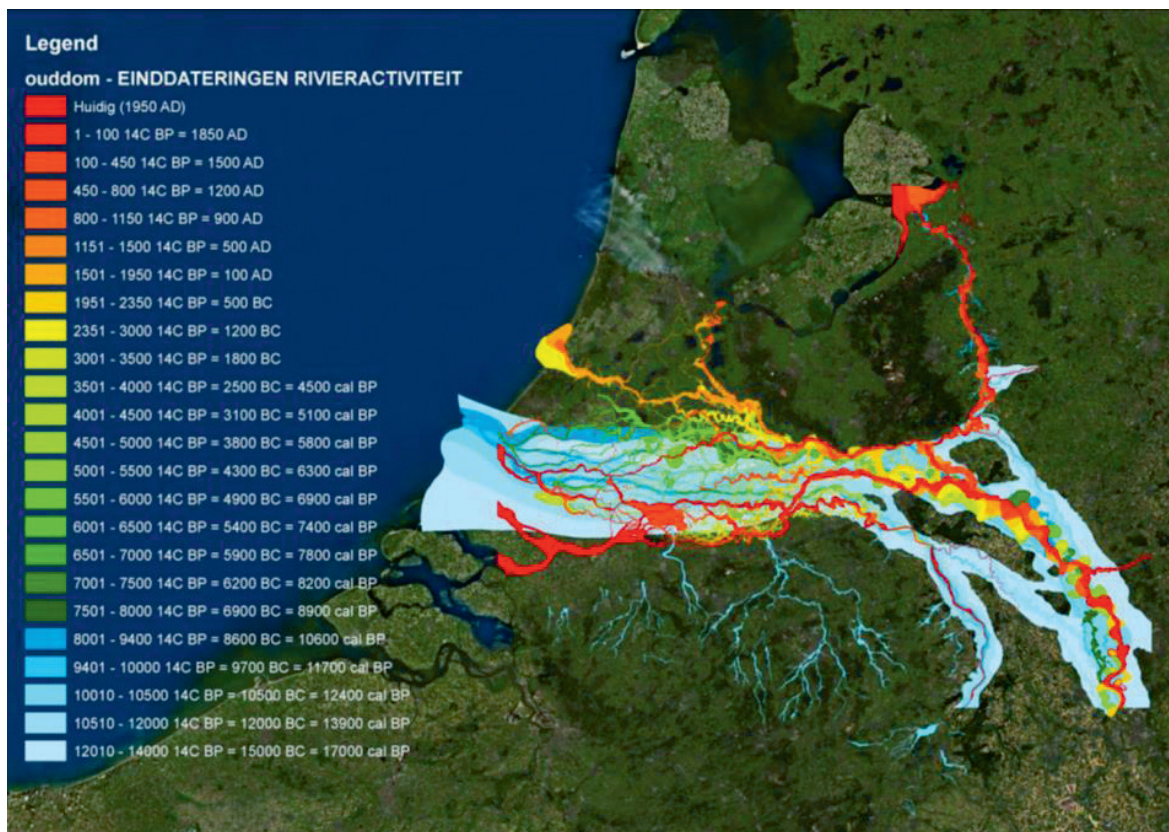


Abb. 9.3: Aktuelle und ehemalige Flussläufe im Rheindelta (Huismans et al., 2013, auf Basis von Daten von Cohen et al., 2012).

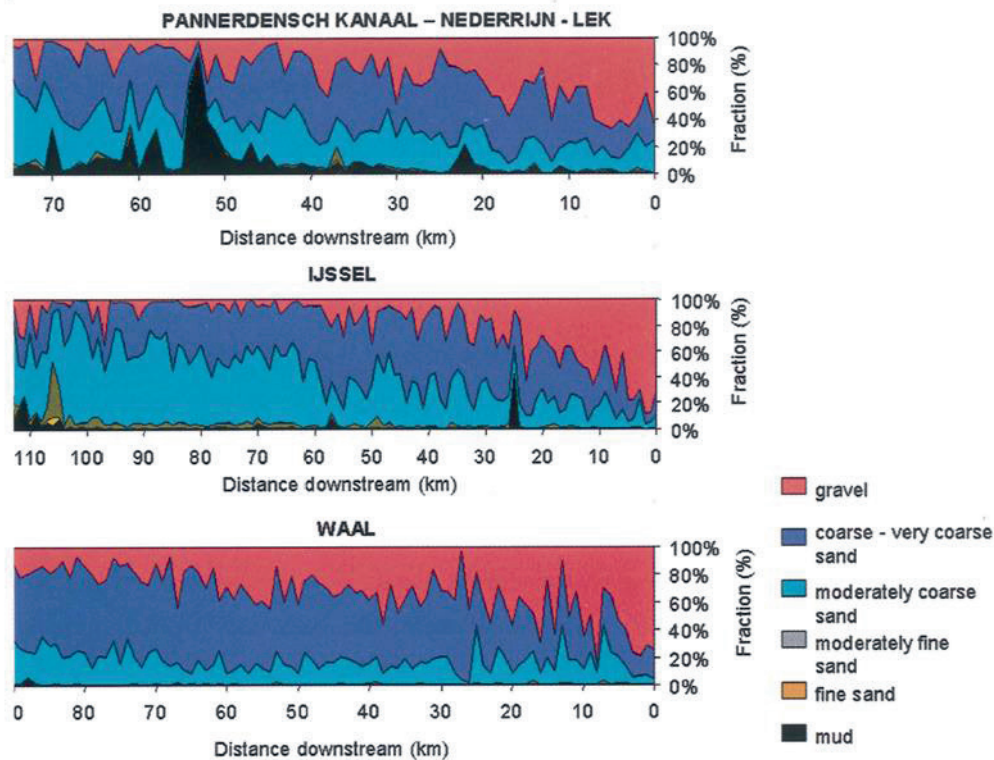


Abb. 9.4: Die Kornverteilung der oberen 10 cm des Flussbettes im Oberen Rheindelta (Ten Brinke, 2005).

9.2.3 Hydrologie

Innerhalb des Oberen Rheindeltas teilt sich der Rhein in vier Gewässerläufe auf. Zunächst wird der aus Deutschland kommende Niederrhein nach dem Überfließen der niederländischen Grenze (Rhein-km 857,5) in Bovenrijn umbenannt. Anschließend erfolgt am Pannerdensche Kop (Rhein-km 867,5) die erste Teilung in die Gewässerläufe Waal, die in westliche Richtung weiterfließt, und Pannerdensch Kanaal, der nach Norden fließt. Die Waal führt laut einer Analyse im Rahmen dieser Studie circa 71 % des Rheinabflusses ab und ist somit der größte Gewässerlauf des Rheins. In dieser Teilstudie wird die Waal vom Pannerdensche Kop (Rhein-km 867,5) bis Vuren (Rhein-km 951) betrachtet. Im weiteren Verlauf der Waal kommt es zu einem Zusammenfluss mit der Maas, woraufhin beide Gewässerläufe gemeinsam südlich von Rotterdam in die Nordsee münden. Dieser Abschnitt ist jedoch nicht mehr Teil des Untersuchungsgebiets. Der Pannerdensch Kanaal ist ein im 18. Jahrhundert angelegter künstlicher Gewässerlauf. Er zweigt am Pannerdensche Kop in nord-westliche Richtung ab und endet am IJsselkop (Rhein-km 878,5) bei Arnhem.

Am IJsselkop teilt sich der Gewässerlauf erneut: in Nederrijn und IJssel. Der Nederrijn führt im Durchschnitt ca. 47 % des Abflusses ab (Anhang C.1) und sollte nicht mit dem deutschen Niederrhein verwechselt werden. Er fließt vom IJsselkop aus nach Westen und wird ab dem Ort Wijk bij Duurstede in Lek umbenannt. In dieser Teilstudie wird der Nederrijn-Lek bis Nieuwpoort aan de Lek (Rhein-km 969) betrachtet. In diesem Bereich wird der Fluss durch drei Staustufen geregelt. Die Staustufen befinden sich bei Driel, Amerongen und Hagestein. Der zweite am IJsselkop abzweigende Gewässerlauf ist die IJssel. Sie fließt zunächst scharf nach Nord-Osten, bevor sie sich wieder nach Westen wendet und bei Kampen (Rhein-km 1.005) ins Ketelmeer und IJsselmeer mündet. Die IJssel hat somit keine direkte Verbindung zur Nordsee. Seit 1971 wird der Abfluss der IJssel im Wesentlichen über die Staustufe Driel im Nederrijn geregelt. Im Betrachtungsgebiet dieser Teilstudie ist die gesamte IJssel vom IJsselkop bis zur Mündung bei Kampen enthalten.

Für die in dieser Studie aufgestellte Sedimentbilanz wurden die Gewässerläufe des Rheins in fünf Abschnitte aufgeteilt. Der erste Teilabschnitt umfasst den Bovenrijn (Rhein-km 857,5 bis 867,5), zweiter Teilabschnitt ist die Waal (Rhein-km 867,5-951), dritter Abschnitt der Pannerdensch Kanaal (Rhein-km 867,5 bis 878,5), vierter Abschnitt der Nederrijn-Lek (Rhein-km 878,5 bis 969) und der fünfte Abschnitt beinhaltet die IJssel vom IJsselkop bis zur Mündung (Rhein-Km 878,5 bis 1.005).

9.2.4 Anthropogene Eingriffe

Im Rheineinzugsgebiet gibt es bereits seit 4.350 v. Chr. weitreichende anthropogene Einflüsse (Kalis et al., 2003). Um Talhänge als Ackerflächen nutzen zu können, wurden Wälder abgeholzt, was den Transport von suspendiertem Ton/Schluff und somit auch die Sedimentation auf Vorländern erhöhte. Der Geschiebetransport der gröberen Fraktionen blieb hiervon unbeeinflusst (Erkens et al., 2006). Soweit bekannt, hatte die Abholzung keinen Einfluss auf die Morphologie und die Sohleigenschaften des Hauptgerinnes des Deltas und die Gewässerläufe im Delta blieben im Wesentlichen natürlich. Seit etwa 1.100 n. Chr. wurden zum Hochwasserschutz und zur Landgewinnung Eindeichungen vorgenommen (Van de Ven, 1993): so war der Gewässerlauf der Waal bereits 1.300 n. Chr. komplett eingedeicht (Berendsen & Stouthamer, 2000). In den folgenden Jahrhunderten wurden zum Schutz dieser Deichanlagen vor Erosion zahlreiche große Mäander durchschnitten (Berendsen & Stouthamer, 2001).

Um 1600 wurde in Bereichen mit divergierenden Deichen mit dem Bau von Buhnen begonnen, um mittels Sedimentation Land zu gewinnen (Middelkoop, 1997). Der so abgelagerte Ton/Schluff wurde häufig in Ziegeleien genutzt. Am heutigen Pannerdensch Kop, wo sich der Rhein in den Pannerdensch Kanaal und Waal aufteilt, wurden im 17. Jahrhundert Pläne zur Verbesserung der Verteilung des Abflusses umgesetzt. Diese haben sich jedoch aus militärischer und wirtschaftlicher Sicht als nachteilig herausgestellt (Van de Ven, 1976). Die Arbeiten erzielten nicht den gewünschten Erfolg, weshalb die Verzweigung um 1707 einige Kilometer nach unterstrom verlegt wurde. Dies bewirkte eine Verminderung des Abflusses der Waal um etwa 25 %, von zuvor über 90 % des Abflusses auf später etwa 67 % (Hesselink et al., 2006), die bis heute besteht. Im 19. Jahrhundert stieg die Bedeutung der Waal als internationaler Verkehrsweg. Für die Verbesserung der Schiffbarkeit und die Erhöhung der Abflusskapazität wurde die Waal zwischen 1870 und 1916 mithilfe von Buhnen eingeschnürt und eingetieft (zum Beispiel Topographische Inrigting, 1873–1884). Da die Erosion der Sohle nicht sofort erfolgte, mussten im großen Umfang auf gesamter Strecke Baggerungen durchgeführt werden, welche die Tiefe der Schifffahrtsrinne erhöhten (Van Heiningen, 1991).

Die Umgestaltung seit dem 19. Jahrhundert schließt den Bau der Verzweigung im Unterlauf der Waal ein (1860-1890), sowie den Verschluss der Verbindung von Waal und Maas (1904) und die Deicherhöhung für ein höheres Sicherheitsniveau (seit 1956) (Van de Ven, 1993). 1932 wurde der 29 km lange Afsluitdijk als Teil der Zuiderzeewerke errichtet, der das heutige IJsselmeer entstehen ließ und die ehemalige Zuiderzee von der Nordsee trennte. Der Deich sollte vor allem die Überschwemmungsgefahr des Hinterlandes begrenzen und Landgewinnung ermöglichen. Mehrere weitere Projekte wurden im IJsselmeer im Zuge der Zuiderzeewerke realisiert. Die letzte Baumaßnahme war 1976 die Errichtung des Houtribdijk, der mitten im IJsselmeer verläuft und das Markermeer vom IJsselmeer trennt (MWH, 2010).

Der Nederrijn-Lek wurde zur Sicherung und Verbesserung der Schifffahrt und des Wassermanagements durch drei Wehre aufgestaut: 1960 wurde der Bau des Wehres Hagestein (ca. Rhein-km 945) abgeschlossen, 1965 das Wehr bei Amerongen (ca. Rhein-km 921) und 1970 das Wehr bei Driel (ca. Rhein-km 891). Die Tore der Wehranlagen sind bei Hochwasser geöffnet.

Unter der Bezeichnung Ruimte voor de Rivier (dt.: Raum für den Fluss), sind aktuell zahlreiche Deichrückverlegungen, Deichumgestaltungen, Retentionsräume, Nebenarme, Bühnenabsenkungen

und Vorlandtieferlegungen in Planung und Bau. Da sie aber erst nach dem hier betrachteten Zeitraum beschlossen und umgesetzt wurden, wird hier nicht explizit darauf eingegangen.

Zur Instandhaltung und zum Ausbau der im 20. Jahrhundert immer höher frequentierten Waal werden kontinuierlich Baggerungen durchgeführt. Mit den Baggerungen stellt Rijkswaterstaat eine Mindestbreite von 150 m und eine Mindesttiefe von -2,50 m bei OLR für die Schifffahrtsrinne sicher. Ab 2006 wurde die Mindesttiefe um 30 cm auf -2,80 m bei OLR erhöht (Van Vessem, 2015). OLR bedeutet dabei „Overeengekomen Lage Rivierafvoer“, oder auf Deutsch „Vereinbarter Niedrigwasserabfluss“.

Die Baggermengen wurden im Zeitraum 1991 bis 2010 immer stärker reduziert, um die fortschreitende Sohlerosion zu bekämpfen. 1992 durfte maximal 220.000 m³ Sediment aus der Waal gebaggert werden. Ab 1993 wurde die Nettoentnahme von Sohlmaterial in der Waal oberhalb von Zaltbommel ganz untersagt und unterhalb von Zaltbommel auf 180.000 m³ pro Jahr beschränkt (Van Vessem, 2015). Ab 2002 ist die Nettoentnahme unterhalb von Zaltbommel noch weiter beschränkt worden auf 90.000 m³ pro Jahr. Nettoentnahmen in der IJssel sind nur noch gestattet unterstrom von Harculo (km 975) (maximal 10.000 m³ pro Jahr). Nettoentnahmen im Nederrijn-Lek sind nur noch gestattet unterstrom von Hagestein (km 947), mit ebenfalls maximal 10.000 m³ pro Jahr (Tönis, 2010). Fraglich ist, wann und ob die festgelegten Quoten verwendet werden.

9.3 Bestimmung der Sedimentquellen und -senken

9.3.1 Die Sedimentbilanzgleichung

Für den Fall, dass tektonische Sohlhöhenänderungen eine untergeordnete Rolle spielen, lautet die allgemeine Sedimentbilanzgleichung für den Flussschlauch des Rheins:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{se} + I_{di} + I_{ar} + I_{ab} + I_{do}) - (O_{do} + O_{se} + O_{dr} + O_{gr} + O_{fl} + O_{po} + O_{ab}) = \Delta S \quad (9.1)$$

mit I_{up} , dem Sedimenteintrag von oberstrom, I_{tr} , dem Sedimenteintrag aus Nebenflüssen, I_{se} , dem Sedimenteintrag aus Nebenarmen, I_{di} , dem Sedimenteintrag aus diffusen Quellen (zum Beispiel Ufererosion), I_{ar} , dem Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe, I_{ab} , dem Sedimenteintrag durch Abrieb von anderen Kornfraktionen (nur für die Fraktion Ton/Schluff), I_{do} , dem Sedimenteintrag von unterstrom, O_{do} , dem Sedimentaustag nach unterstrom, O_{se} , dem Sedimentaustag in Nebenarme, O_{dr} , dem Sedimentaustag durch Baggerungen, O_{gr} , dem Sedimentaustag in Bühnenfelder, O_{fl} , dem Sedimentaustag auf Überflutungsflächen, O_{po} , dem Sedimentaustag in Häfen, O_{ab} , dem Sedimentaustag durch Abrieb, und ΔS , der Sohlhöhenänderung, wobei alle Bilanzterme in der Einheit Mt/a ausgedrückt werden.

Im Oberen Rheindelta findet kein Sedimenteintrag durch Nebenflüsse (I_{tr}), durch Meereseinfluss (I_{do}) oder anthropogene Sedimentzugaben (I_{ar}) statt. Auch Ufererosion als diffuse Sedimentquelle (I_{di}) spielt aufgrund der Uferbefestigungen eine untergeordnete Rolle. Somit können die entsprechenden Quellterme in der Bilanz zu null gesetzt werden. Des Weiteren finden sich im betrachteten Gebiet nur wenige kleine Häfen, so dass der Sedimentaustag in Häfen (O_{po}) als vernachlässigbar gering angesehen werden kann und daher ebenfalls zu null gesetzt wurde. Sedimenteintrag oder -austrag durch Abrieb (I_{ab} , O_{ab}) findet vornehmlich in Kiesflüssen statt und wurde, da das hier betrachtete Gebiet ein sandiger Flussabschnitt ist, auch zu null gesetzt. Wenn weiterhin jeder Gewässerlauf separat betrachtet wird (I_{se} und O_{se} gleich null), kann die allgemeine Bilanzgleichung wie folgt reduziert werden:

$$I_{up} - O_{do} - O_{dr} - O_{gr} - O_{fl} = \Delta S \quad (9.2)$$

9.3.2 Sedimenteintrag von oberstrom

Feinkies und Grobkies

Der Sedimenteintrag von oberstrom (I_{up}), das heißt der Sedimenteintrag aus dem deutschen Niederrhein in das niederländische Rheindelta wurde aus einer bereits existierenden Frachtanalyse für den deutschen Niederrhein (Frings et al., 2014, Tabelle 2) übernommen. Diese Frachtanalyse hat gezeigt, dass die mittleren Jahresfrachten bei Lobith (Rhein-km 857,5) in dem Untersuchungszeitraum (1991-2010) folgende Werte annehmen: 0,016 Mt/a (Grobkies) und 0,090 Mt/a (Feinkies).

Sand

Auch für Sand wurde der Sedimenteintrag von oberstrom (I_{up}) aus einer bereits existierenden Frachtanalyse für den deutschen Niederrhein (Frings et al., 2014, Tabelle 2) übernommen. Es ist jedoch bekannt, dass aufgrund des benutzten Geschiebefängers mit Maschenweite 0,5 mm die Sandfrachten in vorgenannter Studie unterschätzt wurden. Eine aktuelle Laboruntersuchung (Banhold et al., 2014) zeigte, dass die realen Frachten etwa 50 % höher lagen. Daher wurden in der vorliegenden Studie die Sandgeschiebefrachten aus Frings et al. (2014) (0,078 Mt/a) mit 1,5 multipliziert. Die suspendierten Sandfrachten aus dem Niederrhein (0,477 Mt/a) wurden unverändert als Input für die Teilstrecke Bovenrijn (Rhein-km 857,5 bis 867,5) herangezogen.

Ton / Schluff

Zur Bestimmung des Sedimenteintrags von Schluff und Ton in das Obere Rheindelta (I_{up}) wurden die Schwebstoffmessungen der Dauermessstelle Emmerich (Rhein-km 851,9) aus dem Schwebstoffdaueressnetz der Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung herangezogen. Es betrifft Tageswerte der Gesamtschwebstofffracht im Niederrhein. Die mittlere Fracht im Zeitraum 1991-2010 betrug 77,3 kg/s, oder 2,440 Mt/a. Diese Fracht beinhaltet sowohl organische als auch anorganische Bestandteile. Der Anteil des Phytoplanktons wurde über Chlorophyll-a-Gehalte, die an der Messstelle Bimmen-Lobith gemessen wurden (Daten der FGG Rhein), für den Zeitraum 1991-2010 zu 0,119 Mt/a berechnet (Gehres, mündl. Mittl.). Weiterhin ist aufgrund von Untersuchungen von Astor et al. (2014) bekannt, dass die anorganischen Schwebstoffwerte in der SchwebDB-Datenbank im Durchschnitt 9,2% Sand beinhalten (0,214 Mt/a). Damit errechnet sich ein Ton- und Schluffeintrag von 2,107 Mt/a.

9.3.3 Sedimentverteilung an den Flussverzweigungen

Die größte Herausforderung bei der Erstellung einer Sedimentbilanz eines Flussdeltas ist die Bestimmung der Sedimentverteilung über die verschiedenen Gewässerläufe.

Sand, Feinkies und Grobkies

Ten Brinke et al. (2001) haben in ihrer Bilanz bereits festgestellt, dass fehlende Informationen über die Sedimentverteilung die Erstellung einer zuverlässigen Bilanz fast unmöglich machen. Daher hat Rijkswaterstaat in Zusammenarbeit mit der Universität Utrecht in den Jahren 2002 und 2004 Sedimenttransportmessungen an der Flussverzweigung IJsselkop durchgeführt. Die Daten dieser Messkampagne (Frings & Kleinhans, 2008) wurden hier herangezogen, um die Sedimentverteilung am IJsselkop (Rhein-km 878,5) zu bestimmen. Eine genaue Beschreibung des Vorgehens findet sich in Anhang C (Tab. C.2). Somit konnte der Sedimenteintrag von oberstrom (I_{up}) für die Teilstrecken Nederrijn-Lek und IJssel ermittelt werden. Gleichzeitig war somit auch der Sedimentaustag (O_{do}) für die Teilstrecke Pannerdensch Kanaal bekannt. Die Sedimentverteilung an der Pannerdensch Kop-Verzweigung wurde aus anderen Bilanztermen zurückgerechnet. Erstens wurde der Gesamtsedimentaustag aus dem Bovenrijn (O_{do}) über die Bilanzgleichung des Bovenrijns bestimmt. Zweitens wurde der Sedimenteintrag von oberstrom (I_{up}) in den Gewässerlauf Pannerdensch Kanaal über die Bilanzgleichung des Pannerdensch Kanaals berechnet. Aus beiden Werten folgte dann automatisch der Sedimenteintrag in die Waal.

Ton / Schluff

Neben der Messstelle bei Lobith am oberen Ende des Rheindeltas (Kapitel 9.5), gibt es keine Schwebstoffmessstellen im Oberen Rheindelta, an denen im Zeitraum 1991-2010 kontinuierlich Schwebstoffmessungen durchgeführt wurden. Die meisten Messstellen wurden 1992 eingestellt. Um trotzdem die Verteilung der Schluff- und Ton-Frachten an den Flussverzweigungen berechnen zu können, wurde angenommen, dass die Aufteilung der Schwebstoffmengen am Pannerdensche Kop und IJsselkop der Aufteilung der Abflüsse auf die einzelnen Gewässerläufe entspricht. Zuerst wurden zwei Abflussklassen gebildet: 0 – 2.000 m³/s und 2.000 – 12.000 m³/s, wobei die erste die Niedrigwassersituation mit Wehreffekten darstellt (Anhang C.1) und die zweite die Mittel- und Hochwassersituation mit geringen oder keinen Wehreffekten. Zuerst wurde aufgrund der Schwebstoffmessungen bei Emmerich für beide Abflussklassen bestimmt, wie groß der Anteil der Jahresfracht in der jeweiligen Abflussklasse ist. Dann wurde aufgrund der Abflussmessungen in den verschiedenen Gewässerläufen (Anhang C.1) für jede Abflussklasse die Abflussverteilung über die Gewässerläufe bestimmt. Aus der Multiplikation des Anteils der Jahresfracht mit der Abflussverteilung ergab sich dann die Verteilung von Schluff und Ton über die Gewässerläufe. Daraus folgte, dass am Pannerdensche Kop 30 % der Ton- und Schlufffracht in den Pannerdensch Kanaal fließen und 70 % in die Waal (Tab. 9.1). Am IJsselkop fließen 51 % der Ton- und Schlufffracht in die IJssel und 49 % in den Nederrijn. Eine ausführlichere Analyse mit 12 statt 2 Abflussklassen hat diese Ergebnisse nicht nennenswert geändert.

Tab. 9.1: Berechnung der Aufteilung der Ton- und Schlufffrachten über die Gewässerläufe.

Abflussklasse (m ³ /s)	0-2.000	2.000-12.000	Jahressumme
Abflussfrequenz (-)	0,54	0,46	1
Jahresschwebstofffracht (ohne Sand) (Mt/a)	0,51	1,60	2,11
Anteil der Jahresfracht pro Abflussklasse (-)	0,24	0,76	1,00
Anteil des Abflusses im Bovenrijn zum Pan. Kanaal (-)	0,25	0,32	-
Anteil des Abflusses im Pannerdensch Kanaal zur IJssel (-)	0,72	0,44	-
Anteil der Jahresfracht in Pannerdensch Kanaal zur IJssel (-)	0,17	0,34	0,51
Anteil der Jahresfracht in Pannerdensch Kanaal /Nederrijn (-)	0,07	0,42	0,49
Anteil der Jahresfracht im Bovenrijn zum Pan. Kanaal (-)	0,06	0,24	0,30
Anteil der Jahresfracht im Bovenrijn zur Waal (-)	0,18	0,52	0,70

9.3.4 Sedimentaustrag durch Baggerungen

Sand, Feinkies und Grobkies

Der Sedimentaustrag durch Unterhaltungsbaggerungen (O_{dr}) wurde der Sedimentbilanz von 1990 bis 1999 (Ten Brinke et al., 2001, S. 32, 35) entnommen (Tab. 9.2). Die Baggermengen für diesen Zeitraum wurden mithilfe einer Baggerstatistik der Directie Oost-Nederland errechnet, die alle potentiellen Baggerungen im Oberen Rheindelta im Zeitraum 1900 bis 1999 aufführt. Potentiell bedeutet, dass die Baggerungen behördlich genehmigt wurden, die tatsächliche Ausführung der Arbeiten jedoch nicht gesichert ist. Dies führt zu einer gewissen Unsicherheit der angegebenen Baggermengen. In diesem Zeitraum wurden sowohl im Pannerdensch Kanaal, als auch auf den Teilstrecken Nederrijn-Lek und IJssel keine Baggerungen mehr durchgeführt.

Zur Zeit der Erstellung dieses Berichts wurden die Baggerdaten aus dem Zeitraum 1997-2014 von Rijkswaterstaat (Van Vessem, 2015) neu zusammengestellt und interpretiert. Eine definitive Übersicht lag nicht rechtzeitig vor. Jedoch hat Rijkswaterstaat festgestellt, dass es im Moment keinen Anlass gibt, eine signifikante Änderung der Baggermengen gegenüber den von Ten Brinke et al. (2001) angegebenen Mengen anzunehmen (Van Vessem, 2015). Diese Annahme wurde hier übernommen.

Die von Ten Brinke et al. (2001) aufgeführten Netto-Baggervolumina im Bovenrijn wurden in der vorliegenden Studie mit einer Dichte von 1.820 kg/m^3 (Anhang C.2) in Masseneinheiten umgerechnet. Für die Baggervolumina in der Waal wurde eine Dichte von 1.690 kg/m^3 (Anhang C.2) verwendet. Zur Aufteilung der Baggermengen auf die Sedimentfraktionen Sand, Feinkies und Grobkies wurde die Annahme getroffen, dass die Verteilung der Baggermengen der Sohlkornverteilung in den einzelnen Gewässerläufen entspricht (siehe Anhang C.3).

Ton / Schluff

Anlehnend an Ten Brinke et al. (2001) wird hier die Annahme getroffen, dass der Sedimentaustrag durch Baggerungen (O_{dr}) für die Sedimentfraktionen Schluff und Ton vernachlässigbar ist.

Tab. 9.2: Netto-Baggermengen im Zeitraum 1990-1999 aus der Bilanz von Ten Brinke et al. (2001).

Flussstrecke	Fluss-km	Volumen (m^3/a)
Bovenrijn	857,5-867,5	4.000
Waal-bochten	867,5-885,5	9.000
Midden - Waal	885,5-914,5	14.000
Omgeving St. Andries	914,5-933,5	30.000
Benedenwaal	934,5-951,0	87.000

9.3.5 Sedimentaustrag in Bühnenfelder

Feinkies und Grobkies

Im Oberen Rheindelta finden sich die Sedimentfraktionen Feinkies und Grobkies ausschließlich im Flussschlauch. Visuelle Beobachtungen der Bühnenfelder sowie sedimentologische Messungen (zum Beispiel Berendsen & Stouthamer, 2001) belegen dies. Für Grobkies und Feinkies wird der Sedimentaustrag durch Sedimentation in Bühnenfeldern (O_{gr}) deshalb gleich null gesetzt.



Abb. 9.5: Bühnenfeld entlang der Waal am Pannerdenschep Kop (Frings, 2013).

Ton/Schluff und Sand

In den Bühnenfeldern entlang des Oberen Rheindeltas befinden sich hauptsächlich sandige Sedimente (Abb. 9.5). Bohrungen in den Bühnenfeldern (zum Beispiel im Rahmen der Studie von

Frings et al., 2009) zeigten, dass lokal schichtweise auch Schluff- und Ton-Ablagerungen in den Bühnenfeldern vorhanden sind. Messungen entlang der Waal (Ten Brinke et al., 2004) zeigten, dass die Bühnenfelder sehr dynamische Bereiche des Flusses sind. Bei Hochwasser werden erhebliche Mengen Sediment in den Bühnenfeldern des Oberen Rheindeltas abgelagert, während bei Niedrigwasser schiffsinduzierte Strömungen dafür sorgen, dass diese Ablagerungen wieder erodiert werden. Laut Ten Brinke et al. (2004) ist über einen mehrjährigen Betrachtungszeitraum ein Gleichgewicht zwischen Sedimentation und Erosion in den Bühnenfeldern vorhanden. Somit kann der Sedimentaustrag von Sand und Schluff durch Netto-Sedimentation in Bühnenfeldern (O_{gr}) für die vorliegende Bilanz gleich null gesetzt werden.

9.3.6 Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen

Feinkies und Grobkies

Wie bereits erläutert, befinden sich die Sedimentfraktionen Feinkies und Grobkies im Oberen Rheindelta ausschließlich im Flussschlauch. Für Feinkies und Grobkies wurde daher der Sedimentaustrag durch Sedimentation auf Überflutungsflächen (O_{fl}) gleich null gesetzt.

Sand

Das Rheindelta hat große Vorländer, in denen sowohl Sand, Schluff als auch Ton abgelagert werden (zum Beispiel Middelkoop, 1997). Sand wird hauptsächlich in direkter Nähe zum Flussschlauch in Form von Uferwällen abgelagert. Die Gewässerläufe im Rheindelta haben ausgeprägte Uferwälle. Der Sedimentaustrag auf Uferwällen wurde in mehreren Messkampagnen nach Hochwasserereignissen entlang der Waal und der IJssel bestimmt (Ten Brinke et al., 1998). Es wurde festgestellt, dass vor allem sandiges Material während eines Hochwassers auf den Uferwällen sedimentiert. Daher wird in dieser Studie die Annahme getroffen, dass auf den Uferwällen entlang des Flussschlauchs keine kiesigen Sedimente (>2 mm) und auch keine schluffigen oder tonigen Sedimente abgelagert werden. Die mittleren Sandablagerungsraten auf Uferwällen (O_{fl}) wurden der Sedimentbilanz von 1990 bis 1999 (Ten Brinke et al., 2001) entnommen (Tab. 9.3). Dabei wurde die Annahme getroffen, dass diese auch für den Zeitraum 1991 bis 2010 repräsentativ sind. Die von Ten Brinke et al. (2001, S. 32) aufgeführten Sandvolumina wurden in dieser Studie mit einer Dichte von 1.690 kg/m^3 (Anhang C.2) in Masseneinheiten umgerechnet.

Tab. 9.3: Sandablagerungen auf Uferwällen (aus Ten Brinke et al., 2001).

Flussstrecke	Fluss-km	Volumen (m^3/a)
Bovenrijn	857,5 - 867,5	1.000
Waal	867,5 - 951,0	53.000
Pannerdensch Kanaal	867,5 - 878,5	2.400
Nederrijn-Lek	878,5 - 969,0	8.000
IJssel	878,5 - 1.005	10.000

Ton/Schluff

Auf dem Großteil der Vorländer wird hauptsächlich Schluff und Ton abgelagert, obwohl gewisse Sandanteile in den Vorlandsedimenten vorhanden sind. Zur Bestimmung der Ablagerungsraten von Schluff und Ton auf den Vorländern des Oberen Rheindeltas (O_{fl}) wurde eine Studie von Middelkoop et al. (2010) herangezogen. In dieser Studie wurde das gesamte Obere Rheindelta abgebildet und die gegenwärtigen hydrodynamischen und morphologischen Prozesse auf Vorländern mittels einer zweidimensionalen Simulation mit den Modellen WAQUA und SEDIFLUX simuliert. Die gesamte eingedeichete Fläche im Oberen Rheindelta beträgt 399 km^2 . In Teilen dieser Fläche findet keine Sedimentation statt (Flussbett) oder es werden bereits abgelagerte Sedimente im gleichen Jahr

wieder erodiert. Die Netto-Sedimentationsfläche beträgt laut Van der Perk (mündl. Mitt., 2014) 267 km². Die vom Modell berechneten Sedimentationsraten variierten zwischen 0,1 und 9,0 mm pro Jahr, wobei die höchsten Sedimentationsraten entlang der Flussstrecken Bovenrijn und Waal ausgemacht wurden (siehe Tab. 9.4). Daraus folgte eine Vorlandsedimentation von Schluff und Ton von 0,390 Mt/a im gesamten Gebiet (Middelkoop et al., 2010). Die Sedimentationsraten in den einzelnen Teilstrecken sind in Tabelle 9.4 aufgeführt.

Tab. 9.4: Vorlanddeposition (Middelkoop et al., 2010).

Flussstrecke	Fluss-km	Ablagerung (mm/a)	Volumen (m ³ /a)
Bovenrijn - Waal	857,5-951,0	1,5	0,190
Pan.Kanaal, Nederrijn-Lek	867,5-969,0	1,0	0,115
IJssel	878,5-1.005	0,7	0,085

9.3.7 Sohlhöhenänderung

Sand, Feinkies und Grobkies

Jährliche Sohlpeilungen werden im Bovenrijn und in der Waal seit 1926 ausgeführt. Erst ab 1928 werden ähnliche Messungen im Nederrijn-Lek und ab 1941 in der IJssel ausgeführt. Über viele Jahre wurde zur Durchführung dieser Messungen ein singlebeam Echolot verwendet. Seit 1999 (Bovenrijn, Waal) bzw. 2002 (Pannerdensch Kanaal, Nederrijn, Lek, IJssel) wird für diese Messungen ein multibeam Echolot benutzt.

Die Datengrundlage dieser Studie ist von Rijkswaterstaat bereitgestellt worden. Diese umfasst Daten der über die Breite gemittelten, jährlich durchschnittlichen Sohlhöhen, entweder pro Flussabschnitt (siehe Tab. 9.5) oder pro Hektometer. Für diese Studie wurden die Daten pro Flussabschnitt gewählt (Tab. 9.5) und die Differenz zwischen den Sohlhöhen von 1991 und 2010 berechnet. Das Ergebnis wurde mit der Flussbreite und Länge des Flussabschnitts multipliziert, um die Volumina der Sohlhöhenänderung zu erhalten. Diese Volumina (Tab. 9.5) wurden in dieser Studie mit einer Dichte von 1.820 kg/m³ (Bovenrijn, Pannerdensch Kanaal) beziehungsweise einer Dichte von 1.690 kg/m³ (Waal, IJssel, Nederrijn, Lek) (Anhang C.2) in Masseneinheiten umgerechnet.

Vorausgehend zu der Berechnung der Sohländerungen wurde eine Bias-Korrektur an den Singlebeam Daten von 1991 durchgeführt. Bei den singlebeam und den multibeam Messmethoden wird die höchste Erhebung eines Strahls (beam) durch die Instrumente aufgezeichnet. Da jedoch die singlebeam Echolotsysteme eine größere Messfläche als multibeam Echolotsysteme besitzen, sind die aufgezeichneten Sohlhöhen einer singlebeam Messung leicht größer als bei einer multibeam Messung, wenn das Flussbett uneben ist. Um den Bias quantifizieren zu können, wurden die durchschnittlichen Sohlhöhen der singlebeam Messung mit den durchschnittlichen Sohlhöhen der multibeam Messung für die Jahre verglichen, wo beide Techniken simultan angewandt worden sind.

Die Aufteilung der Sohlhöhenänderung auf die einzelnen Sedimentfraktionen (Sand, Feinkies und Grobkies) stellte ein besonderes Problem dar. Obwohl bei Baggerungen davon ausgegangen werden kann, dass Sand, Feinkies und Grobkies proportional zu ihrem Vorkommen in der Gewässersohle gebaggert werden (Kapitel 9.3.4), kann eine solche Annahme bei Sohlhöhenänderungen nicht gemacht werden. Es wurde bereits mehrfach nachgewiesen, dass im Oberen Rheindelta gleichzeitig Sand erodiert wird und Kies abgelagert wird (z. B. Frings et al., 2009; Frings, 2011). Wenn externe Informationen über die Kornverteilung des erodierten oder sedimentierten Materials nicht vorliegen, ist es unmöglich eine fraktionierte Sedimentbilanz zu erstellen. Um dieses Problem zu lösen, wurde die Annahme getroffen, dass im Bovenrijn und Pannerdensch Kanaal kein Kies erodiert oder abgelagert, sondern der Kies durchtransportiert wird, während Waal, IJssel und Nederrijn Ablagerungsstrecken für Kies sind (das heißt in diesen Strecken werden alle angeführten Kiespartikel komplett abgelagert und es findet kein Austrag von Feinkies oder Grobkies ins untere Rheindelta statt). Vor allem diese letzte

Annahme ist durchaus realistisch, da Messungen der Sohlbeschaffenheit (zum Beispiel Ten Brinke et al., 2004, S. 35) zeigen, dass die Sohle am Ende der IJssel und des Nederrijns kaum Kies enthält. Die Flusssohle am Ende der Waal enthält zwar noch einige Prozent Feinkies (zum Beispiel Ten Brinke et al., 2004), aber Geschiebemessungen kurz unterhalb der Waal während des Hochwassers von 2004 haben gezeigt, dass die Kiesanteile des Geschiebes selbst bei Hochwasser unter 1% liegen (Quelle: Datenbank von Frings & Kleinhans, 2008). Teile der Kiesbestandteile der Sohle haben auch ohne Zweifel einen anthropogenen Ursprung (zum Beispiel von Schiffen gefallene Steinkohlepartikel).

Ton/Schluff

Des Weiteren ist davon auszugehen, dass im betrachteten Gebiet im Flussschlauch kaum Sediment kleiner 0,063 mm abgelagert oder erodiert wird, da es sich (mit Ausnahme der Stauräume im Nederrijn/Lek) um eine vornehmlich sandige Flusssohle handelt (Abb. 9.4). Somit können auch die Änderungen der in der Flusssohle vorhandenen Sedimentmenge (ΔS) von Ton/Schluff zu null gesetzt werden.

Tab. 9.5: Veränderung des Sedimentspeichers im Zeitraum 1991-2010, basierend auf single-beam Sohlpeilungen aus dem Jahr 1990/1991 und (mit der „pmap“-Methode aufbereitete) multibeam Sohlpeilungen aus dem Jahr 2010/2011 (Rijkswaterstaat, unveröffentlichte Daten).

Flussstrecke	Fluss-km	Höhe 1991	Korrektur 1991	Höhe 2010	Länge (m)	Breite (m)	Höhenänderung	
		(m + NN)	(m)	(m+ MN)			(cm/a)	(m ³ /a)
Boven-Rijn	858 - 867	3,91	-0,26	3,53*	9900	342	-0,61	-20500
Waal	868 - 885	3,03	-0,16	2,55*	17800	265	-1,59	-75100
Waal	886 - 914	0,56	-0,25	0,19*	28900	262	-0,64	-48400
Waal	915 - 933	-2,28	-0,3	-2,49*	18700	246	0,48	22300
Waal	934 - 951	-3,96	-0,26	-4,22*	17500	313	0	-100
Pan. Kanaal	868 - 878	3,76	-0,17	3,24*	11000	138	-1,78	-27000
Nederrijn-Lek	879 - 891	3,62	-0,13	3,52*	13000	107	0,18	2600
Nederrijn-Lek	892 - 922	1,02	-0,13	0,86*	30800	124	-0,15	-5700
Nederrijn-Lek	923 - 946	-2,08**	-0,16	-2,12*	22500	145	0,65	20100
Nederrijn-Lek	947 - 968	-4,47**	-0,15	-4,65*	21500	171	-0,18	-6500
IJssel	879 - 910	2,75	0,09	2,75	23300	79	-0,49	-9000
IJssel	911 - 942	-0,24	-0,05	-0,34	31800	86	-0,26	-7000
IJssel	943 - 963	-2,46	-0,14	-2,55	20900	99	0,28	5900
IJssel	964 - 978	-3,29	-0,13	-3,47	15000	113	-0,3	-5200
IJssel	979 -1005	-4,05	-0,26	-4,28	27000	146	0,17	6900

* Keine Daten aus 2010 vorhanden, es wurden Daten aus 2011 verwendet

** Keine Daten aus 1991 vorhanden, es wurden Daten aus 1990 verwendet

9.3.8 Sedimentaustrag nach unterstrom

Sand, Feinkies und Grobkies

Im Prinzip ist der Sedimentaustrag nach unterstrom (O_{so}) in allen Gewässerläufen der Schließungsterm der Bilanz. Dabei gelten folgende Ausnahmen: (1) der Sedimentaustrag aus dem Pannerdensch Kanaal wurde auf Grundlage von Messungen berechnet (siehe Anhang C.4) und (2) der Kiesaustrag aus der Waal, IJssel und aus dem Nederrijn ist gleich null (siehe Kapitel 9.3.7).

Ton/Schluff

Für Schluff und Ton ist der Sedimentaustrag nach unterstrom (O_{so}) in allen Gewässerläufen der Schließungsterm der Bilanz.

9.4 Ergebnisse

Die Bilanz des Oberen Rheindeltas ist in den Abbildungen 9.6-9.10 grafisch und in den Tabellen 9.6a-9.6e tabellarisch dargestellt. Unsicherheiten sind ebenfalls der Tabelle zu entnehmen.

9.4.1 Das Obere Rheindelta: eine Gesamtbetrachtung

Die einzige Sedimentquelle im Oberen Rheindelta ist die Zufuhr von oberstrom (Abb. 9.6). Die Bilanzrechnung zeigt, dass die Zufuhr von Sand und Kies aus dem Niederrhein 0,700 Mt/a beträgt. Der Großteil der eingetragenen Sedimente ist Sand (0,594 Mt/a). Außerdem werden dem Untersuchungsgebiet 2,107 Mt/a Schluff und Ton von oberstrom zugeführt. Damit ist die Menge an Schluff und Ton fast viermal so groß wie die Menge an Sand und Kies, die aus dem deutschen Rhein eingetragen wird (Abb. 9.7). Sedimentsenken (Abb. 9.6) im Oberen Rheindelta sind (1) die Baggerungen von Sand und Kies aus der Flusssohle (0,244 Mt/a), (2) die Deposition von Sand auf den Uferwällen während Hochwasser (0,126 Mt/a), (3) die Deposition von Schluff und Ton auf den Vorländern (0,390 Mt/a) und (4) der Sedimentaustrag ins untere Rheindelta (0,584 Mt/a Sand und 1,717 Mt/a Ton und Schluff). Der Sandgehalt im Sedimentaustrag nach unterstrom (25 %) ist damit etwas größer als der Sandgehalt im Sedimenteintrag von oberstrom (21 %). Die Veränderung des Sedimentspeichers in der Flusssohle beträgt -0,254 Mt/a, was durch eine Netto-Sohlerosion der Fraktion Sand verursacht wird (Abb. 9.6).

Das Obere Rheindelta stellt eine nahezu komplette Senke für Kies dar. Besteht die bettbildende Fracht (Sand und Kies) am oberen Ende des Deltas noch zu 15 % aus Kies, besteht sie am unteren Ende des Deltas ausschließlich aus Sand. Die 0,106 Mt/a Kies, die aus Deutschland in das Obere Rheindelta eingetragen werden, werden teilweise bei Baggermaßnahmen entnommen und teilweise auf der Gewässersohle abgelagert. Es werden nur vernachlässigbar geringe Massen Sedimente größer als 2 mm nach unterstrom ausgetragen (Abb. 9.7, 9.9). Gleichzeitig stellt das Obere Rheindelta eine Quelle für Sand dar. In der Waal werden erhebliche Mengen Sand aus der Sohle erodiert (Abb. 9.7). Die Kombination von einer Sedimentation von Kies und einer Erosion von Sand sorgt dafür, dass eine Anreicherung von grobem Material auf der Flusssohle stattfindet.

Von den vier Gewässerläufen ist die Waal der dynamischste. Hier finden nicht nur die größten Sohländerungen statt, hier werden auch die größten Mengen Sand, Schluff und Ton auf Uferwällen und Vorländern abgelagert und es wird am meisten gebaggert. Die Waal ist auch der wichtigste Lieferant von Sediment in das untere Rheindelta. Die Waal führt 80 % des Sandes ab (Abb. 9.8) und 75 % des schluffigen und tonigen Sediments.

Die Sedimentverteilung über das Obere Rheindelta wird hauptsächlich an den beiden Verzweigungen Pannerdensche Kop und IJsselkop bestimmt. Am Pannerdensche Kop werden 86 % der Sand-Kies-Fracht und 70 % der Ton-Schlufffracht in den größten Gewässerlauf, die Waal, transportiert. Am IJsselkop werden nur 64 % der Sand-Kies-Fracht und 49 % der Ton-Schlufffracht in den größten Gewässerlauf, den Nederrijn, transportiert. Damit ist die Sedimentverteilung keinesfalls ähnlich. Dass am Pannerdensche Kop die von oben eingetragenen Sedimente hauptsächlich in den größten Gewässerlauf geleitet werden, während die Sedimente am IJsselkop etwa gleichmäßig über beide Gewässerläufe verteilt werden, hängt mit dem Stauereffekt der Wehre im Nederrijn zusammen, der den Sedimenteintrag in den größten Gewässerlauf, den Nederrijn, bei Niedrig- und Mittelwasser reduziert.

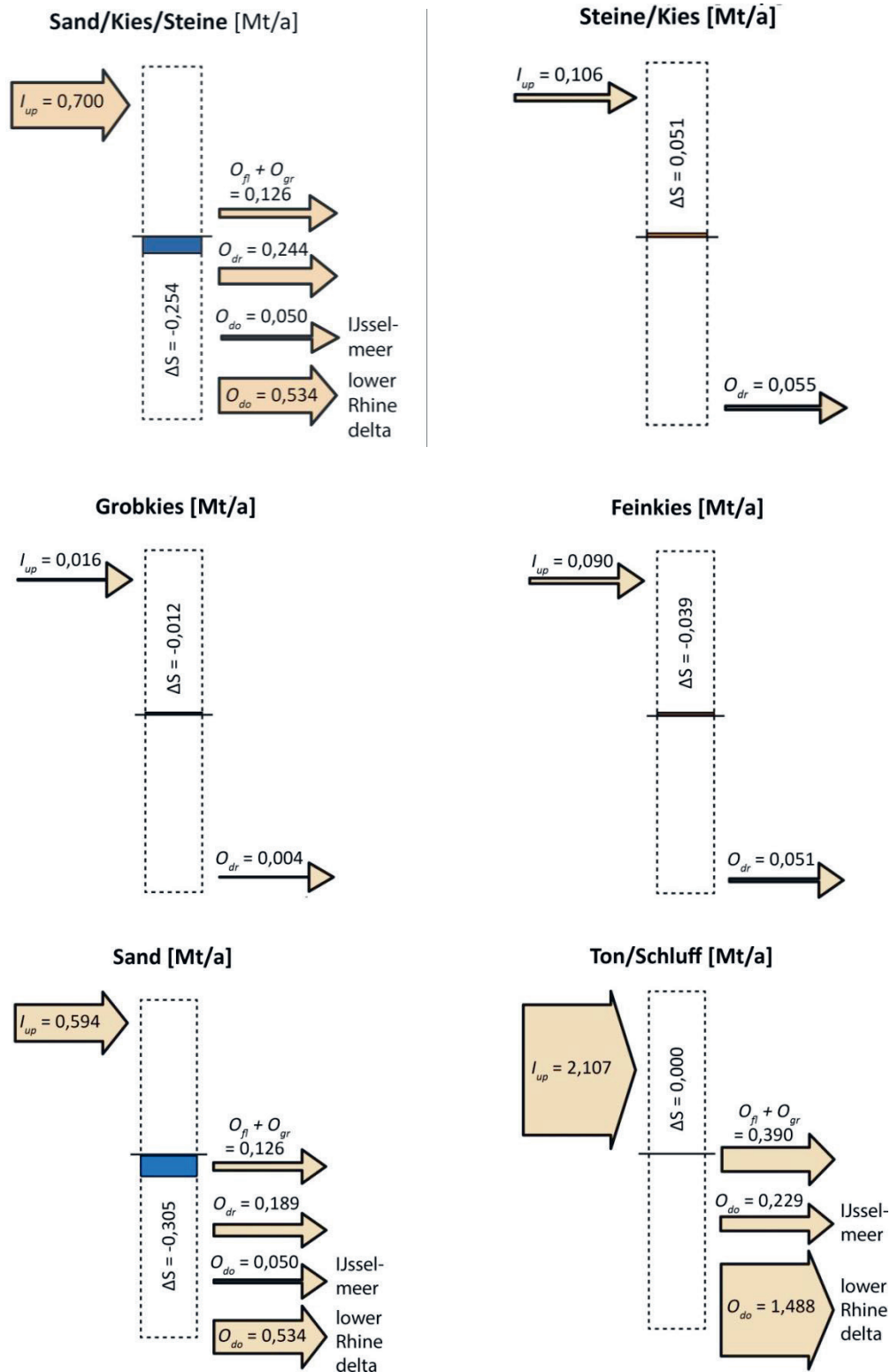


Abb. 9.6.: Sedimentbilanz des Oberen Rheindeltas für den Zeitraum 1991-2010 für die Fraktionen Ton/Schluff (< 0,063 mm), Sand (0,063 bis 2 mm), Feinkies (2 bis 16 mm), Grobkies (16 bis 63 mm), Kies/Steine (16 bis 63 mm) und alle Fraktionen > 0,063 mm. Zu beachten ist, dass sich bei $\Delta S \sim 0$ Anlandungen und Sedimenteinträge einerseits sowie Eintiefungen und Sedimentausräge andererseits in der Flussstrecke kompensieren; $\Delta S \sim 0$ ist somit kein Zeichen einer stabilen, undynamischen Sohle. Nomenklatur nach Kapitel 9.3.1.

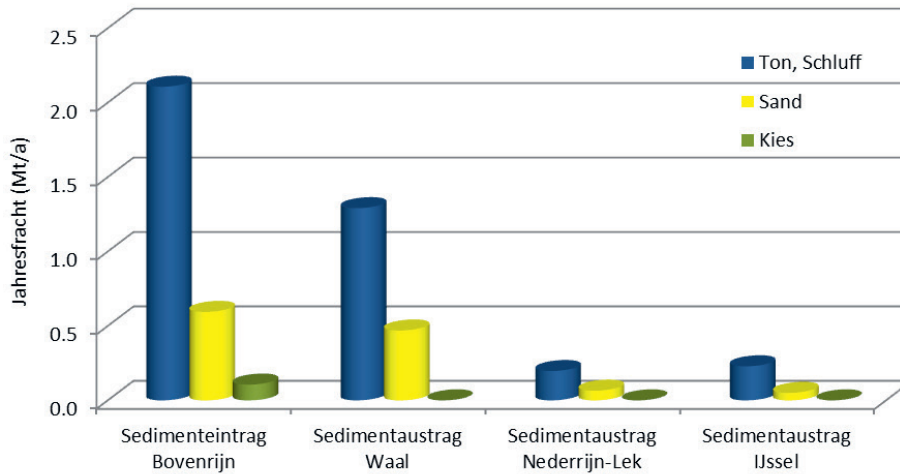


Abb. 9.7: Vergleich der Sedimentfrachten am oberen und unteren Ende des Oberen Rheindeltas.

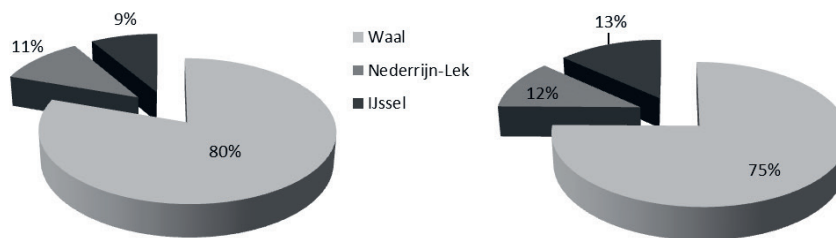


Abb. 9.8: Sedimentaustrag von Sand (a) und Ton/Schluff (b) aus den Gewässerläufen Waal, Nederrijn-Lek und IJssel nach unterstrom.

9.4.2 Bovenrijn und Waal

Die Zufuhr von Sand und Kies aus dem Niederrhein beträgt 0,700 Mt/a. Außerdem werden dem Untersuchungsgebiet 2,107 Mt/a Schluff und Ton von oberstrom zugeführt. In den Flussstrecken Bovenrijn und Waal werden jährlich 0,244 Mt/a Sand und Kies aus der Flusssohle gebaggert. Entlang dieser Flussabschnitte findet ebenfalls eine bedeutende Sedimentation von Sand auf den Uferwällen statt (0,092 Mt/a). Die Sedimentation von Schluff und Ton auf den Vorländern beträgt 0,190 Mt/a. Insgesamt kommt es entlang des Bovenrijns/Waal zu einer Sohleintiefung (0,208 Mt/a), da große Mengen Sand (0,225 Mt/a) erodiert werden. Gleichzeitig sedimentierten in diesem Streckenabschnitt geringe Mengen Feinkies (0,009 Mt/a) und Grobkies (0,008 Mt/a), wodurch die Sohleintiefung etwas aufgefangen wird. Der Sedimentaustrag nach unterstrom aus der Waal beträgt 0,469 Mt/a Sand und 1,291 Mt/a Schluff und Ton (Abb. 9.9). Es werden kaum Sedimente größer 2 mm nach unterstrom ausgetragen.

9.4.3 Pannerdensch Kanaal

Der Sedimenteintrag in den Pannerdensch Kanaal beträgt 0,104 Mt/a Sand und Kies sowie 0,626 Mt/a Schluff und Ton. Entlang der Teilstrecke werden 0,004 Mt/a Sand auf den Uferwällen und 0,010 Schluff und Ton auf den Vorländern deponiert. Am IJsselkop werden im Pannerdensch Kanaal noch 0,616 Mt/a an schluffigem und tonigem Material transportiert, sowie 0,149 Mt/a Material größer

0,063 mm. Das meiste Sediment hiervon ist Sand (0,115 Mt/a) und ein geringer Anteil ist Feinkies (0,030 Mt/a) und Grobkies (0,004 Mt/a). Es fand eine geringe Sohleintiefung von 0.049 Mt/a statt.

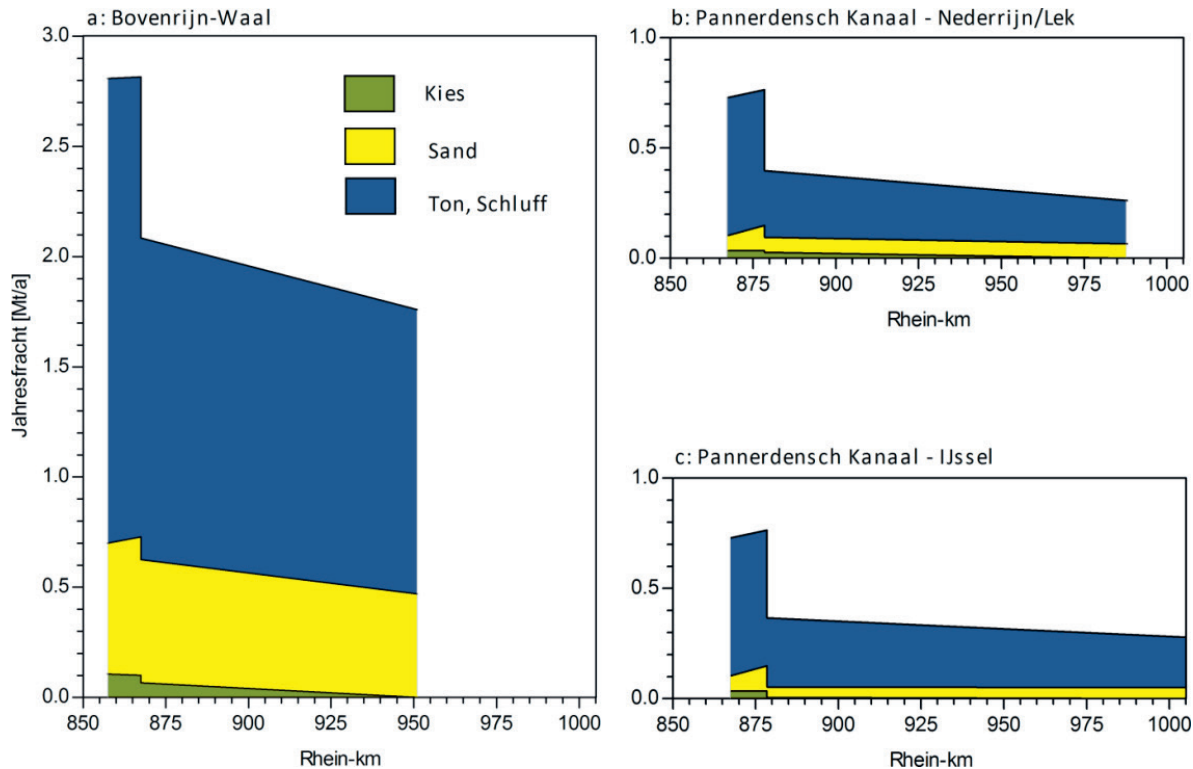


Abb. 9.9: Frachtlängsschnitt für die Flussstrecken: a) Bovenrijn-Waal, b) Pannerdensch Kanaal – Nederrijn/Lek und c) Pannerdensch Kanaal – IJssel.

9.4.4 Nederrijn-Lek

Der Sedimenteintrag in die Teilstrecke Nederrijn-Lek beträgt 0,096 Mt/a Sand und Kies und 0,302 Mt/a Schluff und Ton. Baggermengen in diesem Flussabschnitt waren im Betrachtungszeitraum gering. Die Uferwallsedimentation von Sand beträgt insgesamt 0,014 Mt/a und zusätzlich werden 0,105 Mt/a schluffiges und toniges Material auf den Vorländern abgelagert. Insgesamt ist auf dieser Strecke eine kleine Sohlhöhenänderung zu vermerken: es wird Sand (0,009 Mt/a) erodiert und eine kleine Menge Feinkies (0,024 Mt/a) und Grobkies (0,003 Mt/a) sedimentiert, so dass die Sohle in diesem Abschnitt vergrößert wird. Der Sedimentaustrag nach unterstrom über den Nederrijn-Lek beträgt 0,065 Mt/a Sand und 0,197 Mt/a Schluff und Ton. Es werden keine Sedimente größer 2 mm nach unterstrom ausgetragen.

9.4.5 IJssel

Aus dem Pannerdensch Kanaal werden 0,053 Mt/a Sand und Kies sowie 0,314 Mt/a Schluff und Ton in die IJssel eingetragen. Entlang des Gewässerlaufes sedimentieren davon 0,017 Mt/a Sand auf den Uferwällen und 0,085 Mt/a Schluff und Ton auf den Vorländern. Entlang der IJssel gibt es sowohl Abschnitte mit Sohlaufrhöhungen, als auch Abschnitte mit Sohleintiefungen. Insgesamt findet entlang des Flussabschnitts eine Sohleintiefung von 0,014 Mt/a statt. Es werden 0,021 Mt/a Sand erodiert und 0,006 Mt/a Feinkies und 0,001 Mt/a Grobkies abgelagert. Auf der gesamten Teilstrecke wird kaum baggert. Der Sedimentaustrag nach unterstrom ins Ketelmeer/IJsselmeer beträgt 0,050 Mt/a Sand und 0,229 Mt/a Schluff und Ton. Es werden keine Sedimente größer 2 mm nach unterstrom ausgetragen.

Tab. 9.6a: Sedimentbilanz für Sand und Kies (0,063 - 63 mm)

Flusstrecke	Flusstrecke [Rhein-km]	I_{up} [Mt/a]	O_{dr} [Mt/a]	O_{gr}, O_{fl} [Mt/a]	O_{do} [Mt/a]	ΔS [Mt/a]
Σ Bovenrijn	857,5-867,5	0,700 ±40%	0,007 ±50%	0,002 ±30%	0,728 ±40%	-0,037 ±40%
Σ Waal	867,5-951,0	0,624 ±50%	0,237 ±50%	0,090 ±30%	0,469 ±70%	-0,171 ±40%
Σ P. Kanaal	867,5-878,5	0,104 ±100%	0,000 ±0,05 Mt/a	0,004 ±30%	0,149 ±75%	-0,049 ±40%
Σ Nederr.-Lek	878,5-969,0	0,096 ±100%	0,000 ±0,05 Mt/a	0,014 ±30%	0,065 ±150%	0,018 ±40%
Σ IJssel	878,5-1005	0,053 ±100%	0,000 ±0,05 Mt/a	0,017 ±30%	0,050 ±220%	-0,014 ±40%
Σ Oberes Rheindelta		0,700 ±40%	0,244 ±50%	0,126 ±30%	0,584 ±60%	-0,254 ±40%

Tab. 9.6b: Sedimentbilanz für Sand (0,063 - 2 mm)

Flusstrecke	Flusstrecke [Rhein-km]	I_{up} [Mt/a]	O_{dr} [Mt/a]	O_{gr}, O_{fl} [Mt/a]	O_{do} [Mt/a]	ΔS [Mt/a]
Σ Bovenrijn	857,5-867,5	0,594 ± 40%	0,003 ± 50%	0,002 ± 30%	0,627 ± 40%	-0,037 ±100%
Σ Waal	867,5-951,0	0,557 ± 50%	0,186 ± 50%	0,090 ± 30%	0,469 ± 60%	-0,188 ±100%
Σ P. Kanaal	867,5-878,5	0,070 ±160%	0,000 ±0,05 Mt/a	0,004 ± 30%	0,115 ± 75%	-0,049 ±100%
Σ Nederr.-Lek	878,5-969,0	0,069 ±100%	0,000 ±0,05 Mt/a	0,014 ± 30%	0,065 ±130%	-0,009 ±100%
Σ IJssel	878,5-1005	0,046 ±100%	0,000 ±0,05 Mt/a	0,017 ± 30%	0,050 ±130%	-0,021 ±100%
Σ Oberes Rheindelta		0,594 ± 40%	0,189 ± 50%	0,126 ± 30%	0,584 ± 50%	-0,305 ±100%

Tab. 9.6c: Sedimentbilanz für Kies (2 - 16 mm)

Flusstrecke	Flusstrecke [Rhein-km]	I_{up} [Mt/a]	O_{dr} [Mt/a]	O_{gr}, O_{fl} [Mt/a]	O_{do} [Mt/a]	ΔS [Mt/a]
Σ Bovenrijn	857,5-867,5	0,090 ± 40%	0,004 ± 50%	0,000 ± 0%	0,086 ± 40%	<u>0,000</u> ±0,01 Mt/a
Σ Waal	867,5-951,0	0,056 ± 80%	0,046 ± 50%	0,000 ± 0%	<u>0,000</u> ± 0,01 Mt/a	0,009 ±100%
Σ P. Kanaal	867,5-878,5	0,030 ± 90%	0,000 ±0,01 Mt/a	0,000 ± 0%	0,030 ± 75%	<u>0,000</u> ±0,01 Mt/a
Σ Nederr.-Lek	878,5-969,0	0,024 ±100%	0,000 ±0,01 Mt/a	0,000 ± 0%	<u>0,000</u> ±0,01 Mt/a	0,024 ±100%
Σ IJssel	878,5-1005	0,006 ±100%	0,000 ±0,01 Mt/a	0,000 ± 0%	<u>0,000</u> ±0,01 Mt/a	0,006 ±100%
Σ Oberes Rheindelta		0,090 ± 40%	0,051 ± 50%	0,000 ± 0%	0,000 ±0,03 Mt/a	0,039 ±100%

Tab. 9.6d: Sedimentbilanz für Kies (16 - 63 mm)

Flusstrecke	Flusstrecke [Rhein-km]	I_{up} [Mt/a]	O_{dr} [Mt/a]	O_{gr}, O_{fl} [Mt/a]	O_{do} [Mt/a]	ΔS [Mt/a]
Σ Bovenrijn	857,5-867,5	0,016 ± 40%	0,000 ± 50%	0,000 ± 0%	0,016 ± 40%	<u>0,000</u> ±0,01 Mt/a
Σ Waal	867,5-951,0	0,012 ±140%	0,004 ± 50%	0,000 ± 0%	<u>0,000</u> ±0,01 Mt/a	0,008 ± 100%
Σ P. Kanaal	867,5-878,5	0,004 ±360%	0,000 ±0,01 Mt/a	0,000 ± 0%	0,004 ± 75%	<u>0,000</u> ±0,01 Mt/a
Σ Nederr.-Lek	878,5-969,0	0,003 ±100%	0,000 ±0,01 Mt/a	0,000 ± 0%	<u>0,000</u> ±0,01 Mt/a	0,003 ±100%
Σ IJssel	878,5-1005	0,001 ±100%	0,000 ±0,01 Mt/a	0,000 ± 0%	<u>0,000</u> ±0,01 Mt/a	0,001 ±100%
Σ Oberes Rheindelta		0,016 ± 40%	0,004 ± 50%	0,000 ± 0%	0,000 ±0,03 Mt/a	0,012 ±100%

Tab. 9.6e: Sedimentbilanz für Schluff, Ton (<0,063 mm)

Flusstrecke	Flusstrecke [Rhein-km]	I_{up} [Mt/a]	O_{dr} [Mt/a]	O_{gr}, O_{fl} [Mt/a]	O_{do} [Mt/a]	ΔS [Mt/a]
Σ Bovenrijn	857,5-867,5	2,107 ± 40%	0,000 ± 0%	0,020 ± 50%	2,087 ± 40%	0,000 ± 0%
Σ Waal	867,5-951,0	1,461 ± 60%	0,000 ± 0%	0,170 ± 50%	1,291 ± 70%	0,000 ± 0%
Σ P. Kanaal	867,5-878,5	0,626 ± 60%	0,000 ± 0%	0,010 ± 50%	0,616 ± 60%	0,000 ± 0%
Σ Nederr.-Lek	878,5-969,0	0,302 ± 90%	0,000 ± 0%	0,105 ± 50%	0,197 ±140%	0,000 ± 0%
Σ IJssel	878,5-1005	0,314 ± 90%	0,000 ± 0%	0,085 ± 50%	0,229 ±125%	0,000 ± 0%
Σ Oberes Rheindelta		2,107 ± 40%	0,000 ± 0%	0,390 ± 50%	1,717 ± 50%	0,000 ± 0%

Fett gedruckte Werte beruhen auf externen, unabhängig bestimmten, Eingangsdaten. Unterstrichene Werte beruhen auf Annahmen
Alle sonstigen Werte sind aufgrund der Bilanzgleichung berechnet worden.

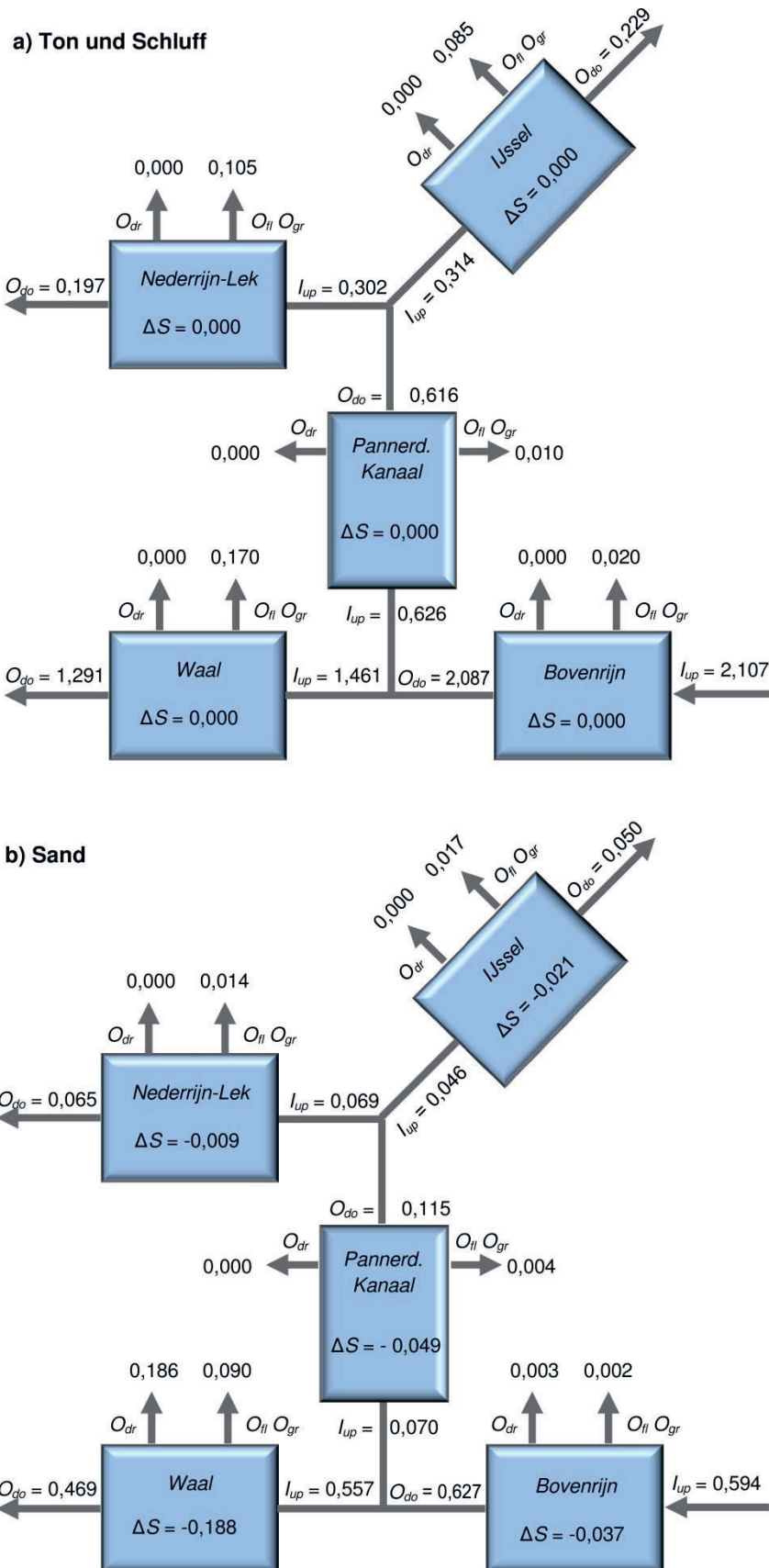


Abb. 9.10: Sedimentbilanz des Oberen Rheindeltas für (a) Ton und Schluff (< 0,063 mm); (b) Sand (0,063-2 mm), (c) Feinkies (2-16 mm), (d) Grobkies (16-63 mm) und (e) Sand und Kies zusammen (0,063-63 mm); weicht die Bilanzsumme um 0,001 [Mt/a] von 0 ab, so ist dies auf Rundungseffekte zurückzuführen.

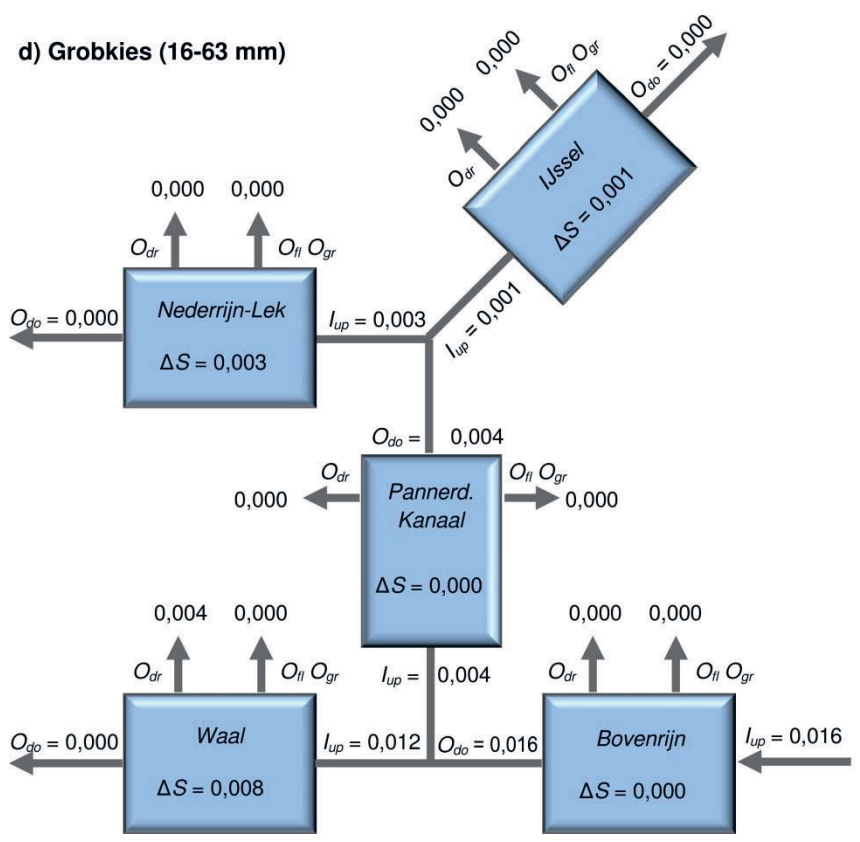
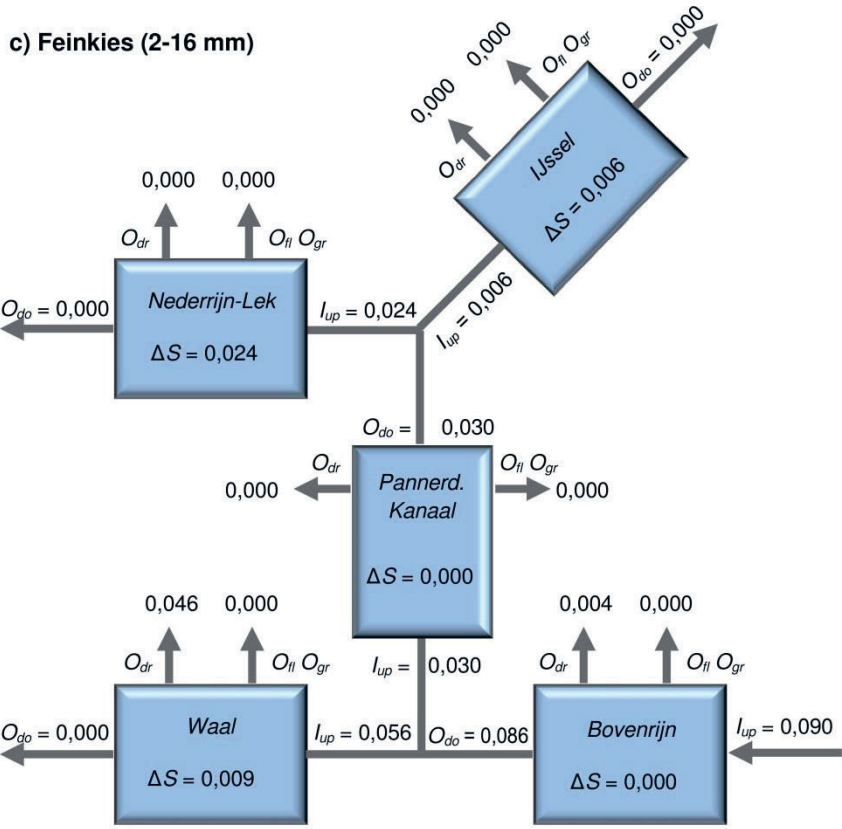


Abb. 9.10: Fortsetzung

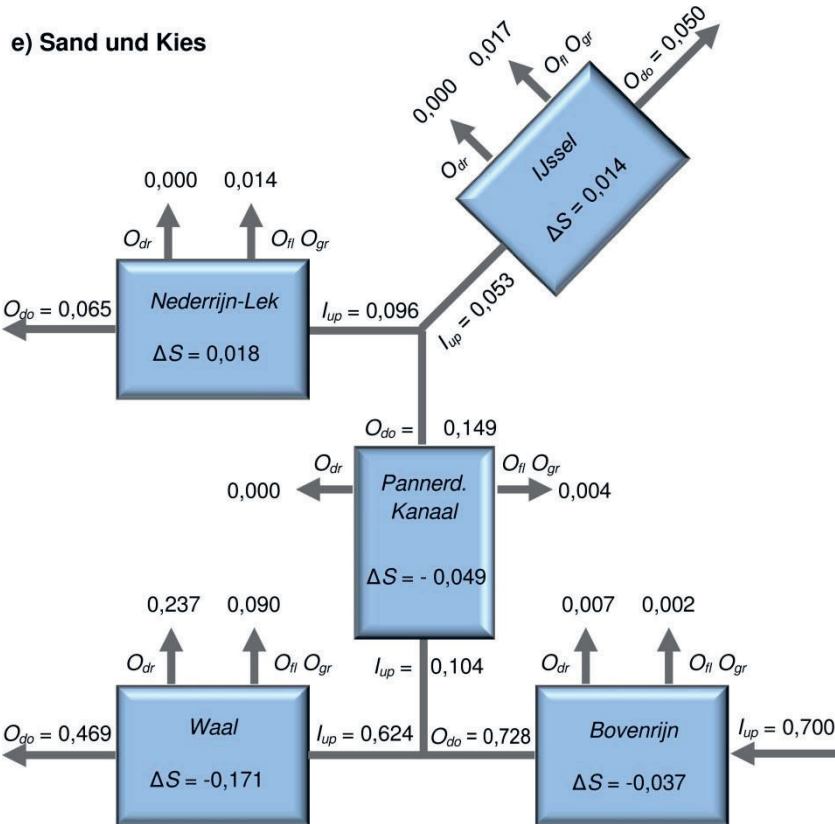


Abb. 9.10: Fortsetzung

9.5 Diskussion

9.5.1 Betrachtung der Unsicherheiten

Zur Erstellung jeder Sedimentbilanz ist eine große Menge an unterschiedlichen Daten über einen längeren Betrachtungszeitraum notwendig. Es ist nicht zu vermeiden, dass für die meisten Daten auf Literaturquellen zurückgegriffen werden muss. Selbst wenn in diesen Quellen Angaben zu den Unsicherheiten der Daten aufgeführt sind, bleibt es schwierig, Unsicherheiten aus verschiedenen Quellen zu kombinieren, da bei der Berechnung der Unsicherheiten unterschiedliche Definitionen benutzt wurden und da die Unsicherheiten in den verschiedenen Termen der Bilanz nicht unabhängig voneinander sind, wie in den gängigen Fehlerfortpflanzungsregeln vorausgesetzt wird. Im Rahmen dieser Studie war es nicht möglich, eine ausführliche Unsicherheitsanalyse durchzuführen. Nichtsdestotrotz dürfen Bilanzstudien nie ohne Unsicherheitsangabe präsentiert werden, da sonst eine Güte der Bilanz suggeriert würde, die nicht erfüllt werden kann. Deshalb wird hier eine Abschätzung der Unsicherheiten durchgeführt (Tab. 9.6).

Die Unsicherheit der Kies- und Sandzufuhr von oberstrom (I_{up}) gleicht der Unsicherheit der deutschen Transportmessungen bei Rhein-km 857,5: Sie entspricht etwa 40 % des Bilanzterms (vgl. Frings et al., 2014) und ist als maximaler Fehler anzusehen. Das heißt die tatsächlichen Frachten betragen höchstens 140 % und mindestens 60 % der berechneten Zufuhr. Die Ton-/Schluffzufuhr von oberstrom (I_{up}) basiert auf Tagesmessungen, die allerdings nur in einer bestimmten Tiefe und an einer Position im Querschnitt durchgeführt wurden. Die daraus resultierende Unsicherheit ist unbekannt und wird hier auch auf etwa 40 % geschätzt. Der Austrag von Sand und Kies aus dem Pannerdensch Kanaal und dessen Eintrag in IJssel und Nederrijn-Waal beruhen auf einer geringeren Anzahl von

Messungen, daher wird die Unsicherheit mit 75 % (Austrag) bis 100 % (Eintrag) etwas höher eingeschätzt als bei der Sedimentzufuhr in den Bovenrijn.

Die Standardabweichung der Sanddeposition auf Uferwällen ($O_{\#}$) beträgt laut Ten Brinke et al. (2001) 15 %, was bedeutet, dass der maximale stochastische Fehler (auf dem 95 % Konfidenzniveau) etwa 30 % entspricht. Die Deposition von Schluff und Ton wurde aufgrund von Modellberechnungen bestimmt. Modelleigene Annahmen (beispielsweise bezüglich der kritischen Schubspannung für Erosion und Sedimentation, sowie der Randbedingungen) erzeugen Unsicherheiten, die hier auf etwa 50 % geschätzt werden.

Unsicherheitsangaben von gebaggerten Mengen Sand und Kies (O_{gr}) sind schwer zu treffen, da eine verlässliche Baggerbuchhaltung nicht geführt wird (Ten Brinke et al., 2001; Van Vessem, 2015). Daher wird hier für jede Flussstrecke mit einer Unsicherheit von 50 % gerechnet. In Flussstrecken, wo laut Eingangsdaten nicht gebaggert wurde, macht eine prozentuale Unsicherheitsangabe keinen Sinn und es wird eine absolute Unsicherheit von 0,050 Mt/a für Sand und von 0,010 Mt/a jeweils für Fein- und Grobkies angesetzt.

Für die Veränderung des in der Flusssohle gespeicherten Sandes und Kieses wird für jede Flussstrecke mit einer Unsicherheit von 40 % oder 100 % gerechnet, wobei der letzte Wert die Unsicherheit infolge der Aufteilung auf die verschiedenen Kornfraktionen beinhaltet. Für die Fälle, dass die Veränderung des Sedimentspeichers auf Annahmen beruht, wurde mit einer absoluten Unsicherheit von 0,010 Mt/a (je für Fein- und Grobkies) gerechnet.

Die übrigen Bilanzterme wurden aufgrund der Bilanzgleichung berechnet und deren Unsicherheiten sind damit von den oben genannten Unsicherheiten abhängig. Eine vereinfachte Fehlerfortpflanzungsanalyse zeigte, dass die Unsicherheit des Sand- und Kieseintrags in Waal bei 50 % und Pannerdensch Kanaal bei etwa 100 % liegt, und die Unsicherheit des Sand- und Kiesaustrags aus dem Bovenrijn bei etwa 40 %, aus der Waal bei etwa 70 %, aus dem Nederrijn-Lek bei etwa 150 % und aus der IJssel bei etwa 220 %. Auch hier gilt, dass für Bilanzterme mit einer Größe von null eine absolute Unsicherheit von 0,010 Mt/a (Fein- und Grobkies) angesetzt wird. Für Ton und Schluff wird angenommen, dass die Unsicherheiten des Sedimenteintrags und -austrags in und aus der Waal, dem Pannerdensch Kanaal, dem Nederrijn und der IJssel bei 60 – 140 % liegen (Tab. 9.6e).

9.5.2 Validierung

Zur Kontrolle des ermittelten Sand- und Kieseintrags in die Waal wurden Messungen des suspendierten Sandtransports sowie Messungen des Geschiebetransports während des Hochwassers von 1998 herangezogen. Die Messungen des suspendierten Sandtransports wurden mittels eines akustischen Sand-Transport-Meters (ASTM) (Kleinans, 2002; Frings & Kleinans, 2008) kurz unterhalb des Pannerdensch Kops durchgeführt (km 868,5). Der suspendierte Sandtransport wurde an 7 Lotrechten in mehreren Messtiefen (0,2, 0,5, 1, 2, 3 m über der Sohle usw. bis zur Wasseroberfläche) volumetrisch bestimmt und dann über die Flussbreite integriert. Die Daten wurden hier aufgrund einer Kornrohddichte von 2.603 kg/m³ in Massen umgerechnet. Danach wurde eine Transport-Abfluss-Beziehung erstellt und mit den Tagesabflusswerten kombiniert, um die mittlere Jahresfracht an suspendiertem Sand am oberen Ende der Waal zu bestimmen. Diese beträgt 0,176 Mt/a. Die Geschiebetransportmessungen wurden mittels des Dunetrackingverfahrens aus Peildaten am oberen Ende der Waal (km 868,0-868,5) bestimmt (Wilbers, 2004; Frings & Kleinans, 2008). Es wurde eine morphologisch aktive Breite von 247 m angenommen und die Daten aufgrund einer Kornrohddichte von 2.603 kg/m³ und Porosität von 0,30 in Massen umgerechnet. Auch hier wurde eine Transport-Abfluss-Beziehung erstellt und mit den Tagesabflusswerten kombiniert, um die mittlere Jahresfracht zu berechnen. Dabei wurde eine Geschiebefracht von 0,497 Mt/a berechnet. Die

Gesamtfracht an Kies und Sand beträgt damit 0,673 Mt/a. Dieser Wert weicht etwa 8 % von dem in der vorliegenden Bilanz berechneten Wert (0,624 Mt/a, Abb. 9.10) ab, wobei die Abweichung innerhalb der Unsicherheit (50 %, siehe oben) bleibt. Zu bemerken sei auch, dass die Messungen in der Waal ausschließlich bei sehr hohen Abflüssen gemacht wurden ($> 4500 \text{ m}^3/\text{s}$), obwohl der größte Teil der Jahresfracht bei Abflüssen leicht über MQ stattfindet (2000 – 5000 m^3/s). Auffallend ist jedoch vor allem, dass die Sand-Kiesfracht hier anscheinend hauptsächlich als Geschiebe transportiert wird. Die deutschen Messungen bei Rhein-km 857,5 (nur 10 – 11 km oberstrom), die zur Berechnung des Sedimenteintrags in das Obere Rheindelta herangezogen wurden, zeigten, dass die bettbildende Fracht hauptsächlich in Schwebelast transportiert wurde (Kapitel 9.3.2). Es ist möglich, dass auf dieser kurzen Strecke die Schubspannungen derart weit abnehmen, dass suspendierter Sand absinkt und als Geschiebe weiter transportiert wird. Das würde auch erklären, warum der Sandgehalt der Flusssohle auf dieser kurzen Strecke von 35% auf 52% ansteigt (Frings, 2011) und damit den Kies-Sandübergang des Rheins bewerkstelligt. Allerdings ist auch nicht auszuschließen, dass Unterschiede in Geschiebe- und Schwebstofffrachten auf die unterschiedlichen Messverfahren zurückzuführen sind, was bedeuten würde, dass die gute Übereinstimmung der Bilanz mit den Transportmessungen auf reinem Zufall beruht.

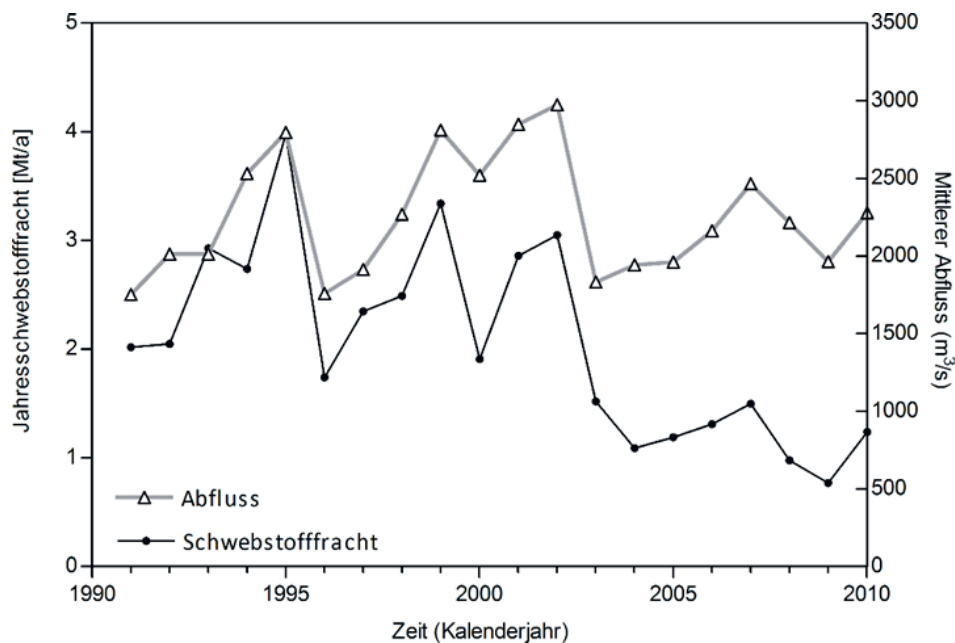


Abb. 9.11: Abflüsse und Schwebstofffrachten am oberen Ende des Oberen Rheindeltas (Messstation Lobith Ponton).

Tab. 9.7: Vergleich der Sand- und Kiesfrachten im Oberen Rheindelta (Mt/a) zwischen der Bilanz von 1990 – 1999 (Ten Brinke, 2005) und der vorliegenden Bilanz von 1991 – 2010.

Bilanz	I_{up} Lobith	O_{do} Waal	O_{do} Nederrijn-Lek	O_{do} IJssel
1990 - 1999	0,850	0,870	0,170	0,000
1991 - 2010	0,700	0,469	0,065	0,050

Tab. 9.8: Vergleich der Ton- und Schlufffrachten im Oberen Rheindelta (Mt/a) zwischen der Bilanz von 1990 – 1999 (Ten Brinke et al., 2001) und der vorliegenden Bilanz von 1991-2010.

Bilanz	I_{up} Lobith	O_n	O_{do} Waal	O_{do} Nederrijn-Lek	O_{do} IJssel
1990 - 1999	2,580	0,190	1,660	0,410	0,320
1991 - 2010	2,107	0,390	1,291	0,197	0,229

Wilbers (2004) hat die oben erwähnte Dunetrackinganalyse nicht nur für die Waal, sondern auch für den Pannerdensch Kanaal und den Bovenrijn durchgeführt. Dabei wurde festgestellt, dass bei Hochwasser 58 bis 84 % des vom Bovenrijn zugeführten Geschiebes in die Waal geleitet wird. Am Ende der Hochwasserwelle von 1998 hatte der Prozentsatz sich auf 88 % erhöht. Diese Werte stimmen mit der Bilanzrechnung überein (Abb. 9.9), wobei errechnet wurde, dass 86 % der Sand- und Kiesfracht in die Waal transportiert wird. Die Unsicherheiten der Sedimentverteilung aufgrund der Dunetrackinganalyse sind jedoch zu groß, um aussagekräftige Vergleiche machen zu können.

Die Vorlandsedimentation von Schluff und Ton (O_{fl}) wurde mit Sedimentationsmessungen von Middelkoop & Asselman (1998), Thonon (2006) und Thonon et al. (2007) verglichen. Die dort durchgeführten Messungen mit Sedimentationsmatten zeigten, dass die gegenwärtigen Depositionsraten zwischen 0,5 und 7,5 mm pro Jahr lagen (Middelkoop et al., 2010). Diese Werte liegen sehr nah an den Werten von Asselman & Van Wijngaarden (2002), welche die Vorlandsedimentation mit einem 1D hydrodynamischen Modell und einem Depositionsmodell für die Vorländer bestimmten. Die daraus folgende durchschnittliche Depositionsrate von 1,3 mm pro Jahr korrespondiert mit einer mittleren Ablagerungsrate von 0,48 Mt/a (Middelkoop et al., 2010). Wenn berücksichtigt wird, dass Vorlandsedimente etwa 10 % Sand beinhalten (z. B. Thonon, 2006), dann folgt hieraus eine mittlere Ablagerungsrate von Schluff und Ton von etwa 0,43 Mt/a, was sehr nah an dem in der Bilanz benutzten Wert von 0,39 Mt/a liegt.

Zur Validierung des Sedimenteintrags von oberstrom (I_{up}) am oberen Ende des Rheindeltas wurden Schwebstoffmessungen von der Messstelle Lobith Ponton (Rhein-km 857,5) aus dem Zeitraum 1991-2010 herangezogen. An jedem Tag dieses Zeitraums wurde dem Rhein eine Wasserprobe 100 cm unterhalb der Wasseroberfläche entnommen. Aus diesen Proben wurde dann (nach Glühverlustanalyse) die Tagesschwebstoffkonzentration berechnet. Die Ergebnisse dieser Messungen wurden am 14.3.2014 aus einer Online-Datenbank (Rijkswaterstaat, 2014) entnommen und mit Tagesabflusswerten (aus derselben Datenbank) multipliziert, um Tagesschwebstofffrachten zu erhalten. So entstand ein Datensatz mit nur 87 Fehlwerten (etwa 1 %) auf einer Gesamtprobenanzahl von 7.305. Für jeden Tag mit einem Fehlwert wurde die Konzentration mit dem arithmetischen Mittelwert der gemessenen Konzentrationen am Vortag und Folgetag gleichgestellt. So wurde als mittlere Jahresschwebstofffracht 2,050 Mt/a berechnet. Aufgrund der Nähe zur Wasseroberfläche der Entnahmestelle wird davon ausgegangen, dass diese Fracht komplett aus Ton und Schluff besteht und kaum Sand enthält (Abb. 9.11). Diese Zahl ist etwa 3 % niedriger als die in der Bilanz benutzte und aufgrund der deutschen Messungen bei Emmerich bestimmte Fracht (2,107 Mt/a, s. Abb. 9.10). Die Abweichung liegt innerhalb der Unsicherheitsbandbreite und ist in Anbetracht der Unterschiede in der Messtechnik sehr gering.

9.5.3 Vergleich mit bereits durchgeführten Studien

Obwohl in den vergangenen Jahrzehnten regelmäßig Abschätzungen der Sedimentfrachten im Oberen Rheindelta gemacht worden sind, existierte bis dato nur eine detaillierte Bilanzstudie: die Studie von Ten Brinke et al. (2001). Dort wurden die Zeiträume 1.1.1970 – 31.12.1989 und 1.1.1990 - 31.12.1999 betrachtet. Zu Beginn wurden nur volumetrische Angaben der Frachten, Quellen und Senken gemacht. Eine Umrechnung in Masseneinheiten folgte einige Jahre später (Ten Brinke, 2005).

Ein Vergleich der neu aufgestellten Bilanz für Sand und Kies für das Obere Rheindelta mit der Bilanz von Ten Brinke et al. (2001) für den Zeitraum 1990-1999 zeigt deutliche Unterschiede. Vor allem fällt auf, dass die dort berechneten Sedimentfrachten deutlich höher sind als die Sedimentfrachten in der vorliegenden Bilanz (Tab. 9.7). Wenn berücksichtigt wird, dass Ten Brinke et al. (2001) aufgrund des damaligen Kenntnisstands die Dichte des Sediments zu niedrig einschätzten (1.500 kg/m^3 statt $1.690\text{-}1.820 \text{ kg/m}^3$, siehe Anhang C.2), wird klar, dass die Unterschiede zwischen beiden Bilanzen noch größer sind, als es auf den ersten Blick scheint. Die Unterschiede zwischen beiden Bilanzen können

auf die Tatsache zurückzuführen sein, dass sie nicht exakt den gleichen Zeitraum abdecken. Zwar überschneiden sie sich um neun Jahre, doch in der aktuellen Bilanz (1991-2010) ist der Betrachtungszeitraum doppelt so lang wie in der Bilanz von Ten Brinke et al. (2001). Es ist nicht auszuschließen, dass aufgrund der niedrigeren Hochwasserabflüsse im Zeitraum 2000-2010 im Vergleich zum Zeitraum 1990-1999 die mittleren Jahresfrachten abgenommen haben. Viel wichtiger allerdings scheint, dass zur Berechnung des Sedimenteintrags von oberstrom in der aktuellen Bilanz mehr Daten (Transportmessungen aus den Jahren 2000-2010) und vor allem eine verbesserte Auswertemethodik (Frings et al., 2014) zur Verfügung standen. Außerdem stimmt der Sedimenteintrag von oberstrom in der vorliegenden Bilanz mit ausführlichen Analysen des Sedimentaustrags aus dem deutschen Niederrhein (Frings et al., 2014) überein.

Die größte Unsicherheit in der Bilanz von Ten Brinke et al. (2001) war die Sedimentverteilung am IJsselkop. In der vorliegenden Bilanz konnte aufgrund neuer Messungen (Frings & Kleinhans, 2008) die Sedimentverteilung am IJsselkop neu berechnet werden. Die Daten standen für die Bilanz von Ten Brinke et al. (2001) noch nicht zur Verfügung, so dass auf Schätzungen zurückgegriffen werden musste. Die Schätzung von Ten Brinke et al. (2001, S. 32), dass 62 % des eingetragenen Kieses und Sandes in den Nederrijn-Lek geleitet werden, weicht nur geringfügig von der Berechnung in der vorliegenden Bilanz ab (64 %, Abb. 9.10). Beim Vergleich der Schluff- und Tonbilanzen für das Obere Rheindelta (Tab. 9.8) fallen Unterschiede auf. Auch für Schluff und Ton lagen zusätzliche Daten zum Sedimenteintrag von oberstrom vor. Dabei kam ein niedriger Wert heraus. Das ist eindeutig auf die Abnahme der Sedimentfrachten seit dem Jahr 2002 (Abb. 9.11) zurückzuführen. Ein weiterer Unterschied zwischen beiden Bilanzen ist die Vorlanddeposition, die in der alten Bilanz abgeschätzt wurde und in der aktuellen Bilanz auf Daten beruht und höher ausfällt. Beide Faktoren zusammen sorgen dafür, dass der Sedimentausttrag nach unterstrom in der vorliegenden Bilanz deutlich geringer ist als in der Bilanz von 1990-1999. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass zum Aufstellen der vorliegenden Bilanz ein anderes Verfahren verwendet wurde, als es in der Bilanz von 1991-1999 der Fall war. Während in der aktuellen Bilanz die Annahme getroffen wurde, dass sich die in Schwebefähigkeit befindlichen Sedimente im gleichen Verhältnis wie der Abfluss über die einzelnen Gewässerläufe verteilen, wurden in der Bilanz von 1990-1999 Schwebstoffmessungen an den Gewässerläufen ausgewertet. Dabei ist zu beachten, dass nach 1992 die Schwebstoffmessungen an den meisten Messstellen eingestellt wurden und die Ergebnisse in der Bilanz von 1990-1999 daher große Unsicherheiten aufweisen.

Zum Schluss ist zu bemerken, dass die verbesserte Datenlage dazu geführt hat, dass die Kies-, Sand-, Schluff- und Tonfrachten genauer bestimmt werden konnten. Die Unsicherheiten der Frachten (hier definiert als die doppelte Standardabweichung) liegen in der vorliegenden Bilanz etwa 50 % niedriger als die Unsicherheiten in der Bilanz von Ten Brinke et al. (2001, S. 40).

9.5.4 Empfehlungen

Zur Verbesserung der vorliegenden Bilanz sind weitere Informationen über die Sedimentverteilung am Pannerdensche Kop erforderlich, da die bisherigen Daten keine schlüssigen Informationen liefern. Weiterhin werden die Empfehlungen von Ten Brinke et al. (2001, S. 53), dass (1) Messungen des Sandaustrags aus der IJssel, (2) kontinuierliches Monitoring der Bühnenfelder und (3) kontinuierliche Schwebstoffmessungen in den verschiedenen Gewässerläufen für eine gute Bilanzstudie dringend notwendig sind, unterstrichen. Die Tatsache, dass außer den Schwebstoffdauermessungen bei Lobith in den letzten 10 Jahren im Oberen Rheindelta keine hochaufgelösten, systematischen Schwebstoff- und Geschiebemessungen durchgeführt worden sind, ist als eine verpasste Chance anzusehen. Für ein gutes Verständnis der Morphodynamik eines Gewässerlaufs, insbesondere in Zeiten großer Umbaumaßnahmen (z. B. Ruimte voor de Rivier) sind fraktionierte Sedimenttransportmessungen zwingend erforderlich. Sohlpeilungen und numerische Modellberechnungen reichen eher nicht aus.

9.6 Schlussfolgerungen

9.6.1 Sedimentquellen und -senken

Die wichtigste Sedimentquelle für das Obere Rheindelta ist die Zufuhr von Schluff/Ton, Sand und Kies aus dem deutschen Niederrhein. Ein Eintrag von Steinen aus dem Niederrhein findet nicht statt. Weitere Sedimentquellen, wie Sedimenteintrag durch Nebenflüsse, Ufererosion und anthropogene Sedimentzugabe spielen im Oberen Rheindelta eine untergeordnete Rolle. Die wichtigsten Sedimentsenken sind (1) die Baggerungen von Sand und Kies aus der Flusssohle, (2) die Deposition von Sand auf den Uferwällen, und (3) die Deposition von Schluff und Ton auf den Vorländern. Weitere Sedimentsenken, wie Sedimentaustrag in Häfen, in Nebenarme, in Bühnenfelder oder durch Abrieb, sind weniger relevant. Auf der Sohle tritt gleichzeitig Erosion von Sand und Sedimentation von Kies auf, was zu einer Kiesanreicherung führt. Insgesamt ist das Obere Rheindelta ein Erosionsgebiet.

9.6.2 Sedimentfrachten

Die Ton/Schlufffrachten im Oberen Rheindelta nehmen aufgrund der zurückgehenden Sedimentzufuhr aus dem deutschen Niederrhein schon seit einigen Jahrzehnten ab. Auch die in dieser Studie berechneten Sand- und Kiesfrachten liegen deutlich unter bisherigen Abschätzungen. Im Gegensatz zu den sinkenden Ton/Schlufffrachten hat dies wahrscheinlich jedoch keinen physikalischen Grund, sondern ist auf eine verbesserte Datengrundlage und Analysemethodik zurückzuführen. Räumlich ist eine Abnahme der Ton/Schlufffrachten nach unterstrom zu verzeichnen: Aufgrund der Vorlanddeposition nehmen die Frachten gleichmäßig nach unterstrom ab, von etwa 2,1 Mt/a bis 1,7 Mt/a. Auch die Kiesfrachten nehmen gleichmäßig nach unterstrom ab, von etwa 0,1 Mt/a am oberen Ende des Deltas bis etwa 0,0 Mt/a am unteren Ende des Deltas. Die Abnahme ist teilweise auf Baggermaßnahmen und teilweise auf Sohl sedimentation zurückzuführen. Im Gegensatz zu den Kiesfrachten bleiben die Sandfrachten nach unterstrom gleich bei etwa 0,6 Mt/a. Bei den Sandfrachten wirken Baggermaßnahmen und Deposition von Sand auf den Uferwällen dem Effekt von Sohlerosion entgegen. Die Sedimentverteilung innerhalb des Oberen Rheindeltas wird hauptsächlich an den beiden Verzweigungen Pannerdenschekop und IJsselkop bestimmt, wobei der Stauereffekt der Wehre im Nederrijn einen erheblichen Einfluss auf die Sedimentverteilung hat.

9.6.3 Unsicherheiten und Empfehlungen

Eine verbesserte Datenlage, vor allem in Bezug auf die Sedimentzufuhr von oberstrom, die Sedimentverteilung an Flussverzweigungen, die Porosität der Sohl sedimente und die Sedimentation auf Überflutungsflächen, hat dazu geführt, dass die Unsicherheiten der Sedimentflüsse in der vorliegenden Bilanz gegenüber existierenden Bilanzen deutlich geringer geworden sind. Die in dieser Studie berechneten Sedimenteinträge haben eine maximale Unsicherheit von etwa 40 %, während die berechneten Sedimentausträge maximale Unsicherheiten von 40 bis 220 % haben. Eine weitere Reduzierung der Unsicherheiten erfordert (1) bessere Kenntnisse über die Sedimentverteilung am Pannerdenschekop, (2) langjährige Informationen über den Sediment austausch zwischen Bühnenfeldern und Hauptgerinnen, und (3) langjährige Informationen zum Sediment austrag aus der Waal, dem Nederrijn/Lek und der IJssel in das untere Rheindelta und in das Ketelmeer/IJsselmeer. Für ein gutes Verständnis der Morphodynamik eines Gewässerlaufs, vor allem in Zeiten großer Umbaumaßnahmen (z. B. Ruimte voor de Rivier) sind Sedimenttransportmessungen erforderlich. Dabei sind Informationen über das Verhalten der einzelnen Kornfraktionen essentiell.

9.7 Literatur

- Asselman, N.E.M & Van Wijngaarden, M. (2002): Development and application of a 1D floodplain sedimentation model for the River Rhine in The Netherlands. *Journal of Hydrology*, Vol. 268, Iss. 1–4, S. 127–142.
- Astor, B., Gehres, N. & Hillebrand, G. (2014): Von der Quelle zur Mündung, eine Sedimentbilanz des Rheins: Korngrößenanalyse von Schwebstoffproben am Rhein und seinen Nebenflüssen, BfG-1798, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Banhold, K., Frings, R.M. & Schüttrumpf, H. (2014): Sandverlust bei Geschiebemessungen im Rhein. Bericht B2014003, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, RWTH Aachen University, Aachen.
- Berendsen, H.J.A. & Stouthamer, E. (2000): Late Weichselian and Holocene palaeogeography of the Rhine–Meuse delta, The Netherlands. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, Vol. 161, S. 311–335.
- Berendsen, H.J.A. & Stouthamer E. (2001): Palaeogeographic Development of the Rhine–Meuse Delta, The Netherlands. Koninklijke Van Gorcum, Assen.
- Cohen, K.M., Stouthamer, E., Pierik, H.J. & Geurts, A.H. (2012): Digitaal Basisbestand Paleogeografie van de Rijn-Maas Delta / Rhine-Meuse Delta Studies' Digital Basemap for Delta Evolution and Palaeogeography. Release 2012 - Dept. Physical Geography. Utrecht University, Utrecht.
- MWH (2010): Atlas van het IJsselmeergebied. Deltaprogramma IJsselmeergebied, Lelystad, Nederlande.
- Erkens, G., Cohen, K.M., Gouw, M.J.P., Middelkoop, H. & Hoek, W.Z. (2006): Holocene sediment budgets of the Rhine Delta (The Netherlands): a record of changing sediment delivery. In *Sediment Dynamics and the Hydromorphology of Fluvial Systems*, Rowan JS, Duck RW, Werritty A (eds). IAHS Publication 306, International Association of Hydrological Sciences: Wallingford; S. 406–415.
- Frings, R.M. (2011): Sedimentary Characteristics of the Gravel-Sand Transition in the River Rhine, *Journal of Sedimentary Research* Vol. 8, Iss. 1, S. 52–63.
- Frings, R.M., Döring, R., Beckhausen, C., Schüttrumpf, H. & Vollmer, S. (2014): Fluvial sediment budget of a modern, restrained river: The lower reach of the Rhine in Germany. *Catena*, Vol. 122, S. 91–102.
- Frings, R.M & Kleinhans, M.G (2008): Complex variations in sediment transport at three large river bifurcations during discharge waves in the river Rhine. *Sedimentology*, Vol. 55, S. 1145–1171.
- Frings, R.M., Berbee, B.M., Erkens, G., Kleinhans, M.G. & Gouw, M.J.P. (2009): Human-induced changes in bed shear stress and bed grain size in the River Waal (The Netherlands) during the past 900 years. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 34, Iss. 4, S. 503–514.
- Grujters, S.H.L.L., Veldkamp, J.G., Gunnink, J. & Bosch, J.H.A. (2001): De lithologische en sedimentologische opbouw van de ondergrond van de Pannerdensche Kop, eindrapport. TNO rapport NITG01-166-B. Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Zwolle.
- Grujters, S.H.L.L., Maljers, D. & Veldkamp, J.G. (2005): 3D interpolation of grain size distributions in the upper 5 m of the channel bed of three lower Rhine distributaries. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 30 Vol. 4-5, S. 303–316.
- Hesselink, A.W., Kleinhans, M.G. & Boreel, G.L. (2006): Historical discharge measurements in three Rhine branches. *Journal of Hydraulic Engineering* Vol. 132, Iss. 2, S. 140–145.

- Huisman, Y., Wiersma, A., Blinde, J., van Kesteren, W. & Mosselman, E. (2013): Erosie door het verwijderen van boomstammen uit de Merwedede. Deltares, Delft.
- Kalis, A.J., Merkt, J. & Wunderlich, J. (2003): Environmental changes during the Holocene climatic optimum in central Europe – human impact and natural causes. *Quaternary Science Reviews*, Vol. 22, S. 33–79.
- Kleinmans, M.G. (2002): Sorting out sand and gravel: sediment transport and deposition in sand-gravel bed rivers. Ph.D. thesis, Utrecht University. Also published as: *Netherlands Geographical Studies* 293. Royal Dutch Geographical Society, Utrecht.
- Middelkoop, H. (1997): Embanked floodplains in the Netherlands. Doktorarbeit, Utrecht University. Also published as: *Netherlands Geographical Studies* 224. Royal Dutch Geographical Society, Utrecht.
- Middelkoop, H., Erkens, G. & Van der Perk, M. (2010): The Rhine delta—a record of sediment trapping over time scales from millennia to decades, *J Soils Sediments*, Vol. 10, S. 628–639.
- Middelkoop, H. & Asselman, N.E.M. (1998): Spatial variability of floodplain sedimentation at the event scale in the Rhine–Meuse delta, The Netherlands. *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 23, Iss. 6, S. 561–573.
- Rijkswaterstaat (2014): live.waterbase.nl (letzter Abruf: 4 April 2014).
- Ten Brinke, W. (1997): De bodemsamenstelling van de Waal en IJssel in de jaren 1966, 1976, 1984 en 1995. RIZA, Arnhem.
- Ten Brinke, W. (2005): *The Dutch Rhine – A restrained River*. Veen Magazines, Diemen.
- Ten Brinke, W., 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*, Vol. 20, Iss. 8, S. 899–928.
- Ten Brinke, W.B.M., Bolwidt, L.J., Snippen, E. & Hal, L.W.J van (2001): Sedimentbalans Rijntakken 2000. Een actualisatie van de sedimentbalans voor slib, zand en grind van de Rijntakken in het beheersgebied van de Directie Oost-Nederland. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), Arnhem.
- Ten Brinke, W., Schuur, M.M., Sorber, A.M., Berendsen, H.J.A. (1998): Overbank Sand Deposition in Relation to Transport Volumes during Large-Magnitude Floods in the Dutch Sand-Bed River, *Earth Surface Processes and Landforms*, Vol. 23, S. 809–824.
- Thonon, I. (2006): Deposition of sediment and associated heavy metals on floodplains. Dissertation, Utrecht University, Utrecht.
- Thonon I., de Jong, K., Van der Perk, M., Middelkoop, H. (2007): Modelling floodplain sedimentation using particle tracking. *Hydrological Processes*, Vol. 21, Iss. 11, S. 1402–1412.
- Tönis, R. (2010): Sedimentbeheer Rijntakken 2010-2015. Rijkswaterstaat Oost-Nederland: Arnhem.
- Topographische Inrigting. (1873–1884): Herziene kaart van de rivieren Boven Rijn, Waal, Merwede, Noord, Dordsche Kil, Oude Maas, Spui en Nieuwe Maas (river map of the Netherlands, 1st revision), scale 1:10,000. Topographische Inrigting, 's-Gravenhage.
- Van de Ven, G.P. (1976): *Aan de wieg van Rijkswaterstaat: wordingsgeschiedenis van het Pannerdens Kanaal*. De Walburg Pers: Zutphen. Van de Ven G.P. (1993). *Man-made Lowlands – History of Water Management and Land Reclamation in The Netherlands*. Matrijs, Utrecht.
- Van de Ven, G.P., (1993): *Man-made Lowlands – History of Water Management and Land Reclamation in The Netherlands*. Matrijs, Utrecht.

- Van Heiningen, H. (1991): Diepers and Delters – Geschiedenis van de Zand- en Grindbaggers. Walburg Pers, Zutphen.
- Van Vessem, P. (2015): Memo zandwinning Rijntakken 1991-2010. 4 juni 2015. Rijkswaterstaat Oost-Nederland, Arnhem.
- Wilbers, A.W.E. (2004): The development and hydraulic roughness of subaqueous dunes. Ph.D. thesis, Utrecht University. Also published as: Netherlands Geographical Studies 323. Royal Dutch Geographical Society, Utrecht.

10. Sedimentbilanz des Unteren Rheindeltas

R.M. Frings, K. Banhold, I. Evers

10.1 Einleitung

Die Erosions- und Sedimentationsproblematik im Unteren Rheindelta (Abb. 10.1) wird hauptsächlich auf der Basis von Sohlpeilungen untersucht. Diese Messungen geben jedoch keine Antwort auf wesentliche Fragestellungen, wie: „Wie viele Sedimente werden flussabwärts transportiert?“, „Welche Kornfraktionen sind in Bewegung?“, „Woher kommen die im Fluss transportierten Sedimente?“, „Wohin gelangen die erodierten Sedimente?“, und „Wie sind die morphologischen Prozesse im Unteren Rheindelta von den Prozessen weiter oberstrom abhängig?“. Die Beantwortung dieser Fragen ist nicht nur unabdingbar für das richtige Verständnis der Flussmorphologie, sondern auch relevant, um eine gute Prognose zukünftiger Erosionsprozesse und Sedimentationsraten zu erhalten und die Auswirkungen menschlicher Einflüsse zu verstehen. Weiterhin ermöglichen Antworten auf diese Fragen eine Optimierung des Flussmanagements, unter anderem in Bezug auf Baggerstrategien und die Verbreitung von schadstoffbelasteten Sedimenten. Die Fragestellungen können nur mit der Aufstellung einer Sediment- oder Feststoffbilanz beantwortet werden. Eine solche Bilanz beschreibt das Gleichgewicht zwischen den Sedimentmengen, die in das Untersuchungsgebiet eingetragen werden (die sogenannten Quellen), den Sedimentmengen, die aus dem Untersuchungsgebiet ausgetragen werden (die sogenannten Senken) und der Veränderung der Sedimentmengen, die im Untersuchungsgebiet gespeichert sind.

Das Ziel dieser Teilstudie war die Erstellung einer Sedimentbilanz für das Untere Rheindelta (Abb. 10.1, 10.2) für den Zeitraum 1991-2010 mit separater Betrachtung der Sedimentfraktionen < 0,063 mm (Ton/Schluff) und 0,063 – 2 mm (Sand). Sedimentfraktionen > 2 mm kommen in diesem Flussabschnitt nur in geringen Mengen vor und werden in dieser Studie nicht betrachtet.

Die erste Sedimentbilanz des Unteren Rheindeltas stammt aus dem Jahr 1977 und beschreibt die Situation kurz nach der Schließung des Haringvliets (Terwindt, 1977). Aktualisierungen der



Abb. 10.1: Der Gewässerlauf Nieuwe Waterweg kurz vor der Mündung in die Nordsee (Foto: M. Minderhoud, 2005).

Sedimentbilanz wurden von Van Dreumel (1995) vorgenommen, der den Zeitraum 1982-1992 betrachtete, und von Snippen et al. (2005), die den Zeitraum 1990-1999 betrachteten. Da all diese Bilanzen überholt sind, ist eine komplette Aktualisierung zwingend notwendig. In Vorbereitung auf eine solche Bilanzaktualisierung wurde in dieser Studie bereits eine grundlegende Anpassung der existierenden Bilanzen durchgeführt, um diese mit der neu aufgestellten Sedimentbilanz des Oberen Rheindeltas (Kapitel 9) zu verknüpfen. Schlüsselemente waren (1) eine Kontinuität der ständigen Sedimentbewegungen zu gewährleisten (die Sedimentflüsse, welche das Obere Rheindelta verlassen, müssen genau mit den im Unteren Rheindelta ankommenden übereinstimmen) und (2) alle Sedimentquellen und -senken in die Fraktionen < 0,063 mm (Ton/Schluff) und 0,063-2 mm (Sand) aufzuteilen. Eine komplette Aktualisierung der Sedimentbilanz war im Rahmen dieser Studie nicht möglich, da keine aktuellen Zahlen zur Sohlhöhenänderungen, zum Sedimenteintrag aus der Nordsee und zur Sedimentation in Häfen vorlagen.

10.2 Gebietsbeschreibung

10.2.1 Lage

Das in dieser Studie betrachtete Gebiet umfasst das Mündungsgebiet des Rheins, das Untere Rheindelta (Abb. 10.2). Dieses Gebiet wird im Niederländischen auch als Benedenrivierengebied, Noordelijk Deltabekken oder Rijn-Maas-Monding bezeichnet. Das Untere Rheindelta wird durch den Zusammenfluss der Gewässerläufe Lek und Waal, sowie der Maas und der Hollandse IJssel gebildet. Kennzeichnend für das Untere Rheindelta sind die vielen Verzweigungen und Zusammenflüsse (Abb. 10.2, Tab. 10.1), die teilweise auf natürliche Weise und teilweise anthropogen entstanden sind. Drei Gewässerläufe stehen in direkter Verbindung mit der Nordsee: der Nieuwe Waterweg, der Hartelkanaal und das Haringvliet (Abb. 10.2).

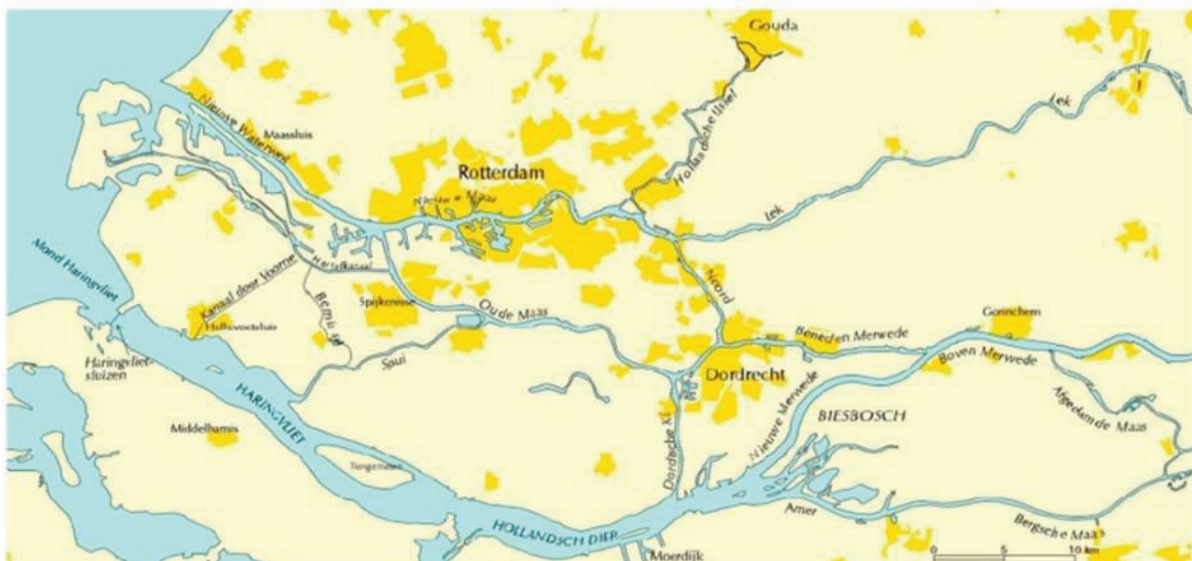


Abb. 10.2: Das Untere Rheindelta (Snippen et al., 2005).

10.2.2 Hydrologie

Laut Snippen et al. (2005, S. 20) verlassen etwa 70 % des Wassers das Untere Rheindelta durch den Nieuwe Waterweg/Hartelkanaal ($MQ = 1.481 \text{ m}^3/\text{s}$) und etwa 30 % durch das Haringvliet ($MQ = 668 \text{ m}^3/\text{s}$).

Aufgrund des Gezeiteneinflusses erfolgt in einem großen Teil des Unteren Rheindeltas viermal pro Tag eine Umkehrung der Strömungsrichtung. Aufgrund des Dichteunterschieds zwischen dem Süßwasser aus dem Rhein und dem salzigen Meerwasser kommt es im Brackwasserbereich zu einer unteren Schicht aus salzigem und einer oberen Schicht aus Süßwasser mit entgegengesetzten Strömungsrichtungen. Die Wasserbewegung im Unteren Rheindelta wird jedoch nicht nur von fluvialen (Lek, Maas und Waal) und marinen Prozessen (Gezeitungwirkung der Nordsee) bestimmt, sondern auch vom Wehrsteuerungsprogramm der Haringvlietschleusen sowie vom Wind.

In dieser Studie wird das untere Rheindelta als Gesamteinheit betrachtet. Die östliche Grenze des in dieser Studie betrachteten Gebiets liegt bei Nieuwpoort aan de Lek (Rhein-km 969), Woudrichem an der Waal (Rhein-km 951), sowie Hedikhuizen an der Bergsche Maas (km 226). Im Norden wird das Betrachtungsgebiet von der Hollandse IJssel bei Gouda und im Süden vom Gewässerlauf Hollandsch Diep begrenzt. Im Westen endet das Gebiet am Austritt der zwei Gewässerläufe Haringvliet und Nieuwe Waterweg in die Nordsee.

10.2.3 Geologie und Sedimentologie

Geologisch betrachtet liegt das Untere Rheindelta im Osten des Nordseebeckens, einem aus dem Tertiär stammenden Senkungsgebiet, in dem im Pleistozän und Holozän bis zu 1.000 m Sediment abgelagert wurden. Im Gebiet des Unteren Rheindeltas beträgt die Mächtigkeit der pleistozänen Ablagerungen bis zu 500 m und die der holozänen Sedimente bis zu 20 m. Letztere Ablagerungen bestehen aus einem Wechsel von marinen Sanden und Tonen, fluvialen Sanden, Schluffen und Tonen, äolischen Sanden sowie organischen Torfpaketen. Eine paläogeografische Rekonstruktion des Holozäns (Berendsen & Stouthamer, 2001; Cohen et al., 2012; Huismans et al., 2013) zeigt, dass die Gewässerläufe von Rhein und Maas sich ständig verlagert haben (Kapitel 9, Abb. 9.3, Kapitel 9.2.2), wobei Sandkörper von ehemaligen Gewässerläufen, Schluffe, Tone und Torfpakete von ehemaligen Auengebieten zeugen. Diese alluvialen Ablagerungen sind gekennzeichnet durch große Unterschiede in ihrer Erodierbarkeit und bilden den Untergrund für die heutigen Gewässerläufe im Unteren Rheindelta. Vereinzelt finden sich äolische Sande nahe der Geländeoberkante im Unteren Rheindelta.

Die Flusssohle im Unteren Rheindelta besteht hauptsächlich aus Sand und Schluff. Lokal werden Torfablagerungen angeschnitten (zum Beispiel Huismans et al., 2013) und vereinzelt gibt es Kiesvorkommen, wobei es sich hier teilweise um Steinkohlpartikel handelt, die von Schiffen heruntergefallen sind, sowie teilweise um Sohlsicherungen. Eine ausführliche Messkampagne im Jahr 2002, in der aus allen Gewässerläufen Sohlproben entnommen wurden (Fugro, 2002), hat gezeigt, dass die östlichen Gewässerläufe (Bovenmerwede, Benedenmerwede, Nieuwe Merwede, Bergsche Maas, Dordsche Kil, Noord und Lek) eine sandige Sohle mit einer medianen Korngröße von etwa 0,25 bis 4 mm haben (Abb. 10.3). Auch der Nieuwe Waterweg hat eine sandige Sohle (mediane Korngröße etwa 0,125 bis 1 mm), wobei es sich hier im Gegensatz zu den östlichen Sandvorkommen hauptsächlich um marine Sande aus der Nordsee handelt. Die Flussarme im zentralen Teil des Unteren Rheindeltas (Nieuwe Maas, Oude Maas und Spui) haben eine feinkörnigere Sohle mit gewissem Anteil an Schluff (und Ton), da aber die mediane Korngröße auch hier über 0,063 mm liegt (Abb. 10.3), muss davon ausgegangen werden, dass die Sohle auch hier mindestens 50 % Sand enthält. Eine schluffige Sohle wird sowohl in den südlichen Teilen des Unteren Rheindeltas (Amer, Hollands Diep und Haringvliet), als auch in den Hafengebieten angetroffen. Letztere sind in Abbildung 10.3 nicht angegeben.

10.2.4 Anthropogene Einflüsse

Das Untere Rheindelta ist wirtschaftlich von großer Bedeutung. Der Hafen Rotterdams entwickelte sich im 20. Jahrhundert zum größten der Welt und ist derzeit noch unter den fünf größten Häfen

weltweit. Aus nautischen Gründen ist eine stabile Sohlage der Gewässerläufe essentiell. Der Großteil der dem Unteren Rheindelta zugeführten Sedimente sedimentiert im Bereich des Rotterdamer Hafens und stellt ein Hindernis für die Schifffahrt dar. Daher finden große Unterhaltungsbaggerungen in Fahrrinnen, Gewässerläufen und Häfen statt. Darüber hinaus wird im Rahmen des Flussausbaus sowie für industrielle Zwecke Sediment gebaggert (Snippen et al., 2005). Gebaggerter Sand wird verkauft und so dem System entzogen. Gebaggerter Schluff wird entweder auf Deponien gelagert (im Falle einer Schadstoffbelastung) oder wird (meist im Meer) wieder verklappt. Auch hierbei wird der größte Teil des Baggerguts dem System entzogen. Die Baggervolumina sind seit 1980 deutlich reduziert worden (Abb. 10.4), was unter anderem auf eine Optimierung der Bagger- und Verklappungsstrategie zurückzuführen ist.

Im Zeitraum 1991- 2010 wurden insgesamt rund 9,0 Mio m³/a Sediment aus den Gewässerläufen des Unteren Rheindeltas gebaggert (Tab. 10.1; Anonymus, 2014). Dies entspricht etwa 5,2 Mt/a. Etwa 74 Massenprozent davon wurden im nördlichen Mündungsbereich des Rheins (Nieuwe Waterweg, Maasmond, Mündung des Caland- und Beerkanaals) gebaggert (Abb. 10.5). Dieses Material besteht hauptsächlich aus vom Meer eingetragenen Sanden, Schluffen und Tonen, wobei anzumerken ist, dass Teile dieser Meeressedimente ursprünglich vom Rhein ins Meer ausgetragen wurden. Etwa 10 Massenprozent des Gesamtbaggervolumens (0,55 Mt/a) wurden im oberstromigen Teil des Unteren Rheindeltas (Bovenmerwede, Benedenmerwede, Nieuwe Merwede) gebaggert. Hierbei handelte es sich hauptsächlich um Sand. Etwa 2 Massenprozent (0,12 Mt/a) wurden im südlichen Teil des Deltas (Haringvliet, Hollands Diep) gebaggert, wobei es sich hauptsächlich um Ton/Schluff handelte. Die restlichen 14 Massenprozent (0,72 Mt/a) wurden in den anderen Gewässerläufen des Deltas gebaggert, wobei der Sandgehalt zwischen etwa 0,2 und 0,8 variierte. Zusätzlich zu den 9,0 Mio m³/a, die aus den Gewässerläufen gebaggert wurden, wurden auch aus den Häfen (Abb. 10.5) erhebliche Mengen Sediment gebaggert. Im Zeitraum 1982-1991 handelte es sich um 4,7 Mio m³/a (Tab. 10.1, Van Dreumel, 1995); Werte für den Zeitraum 1991-2010 lagen nicht vor.

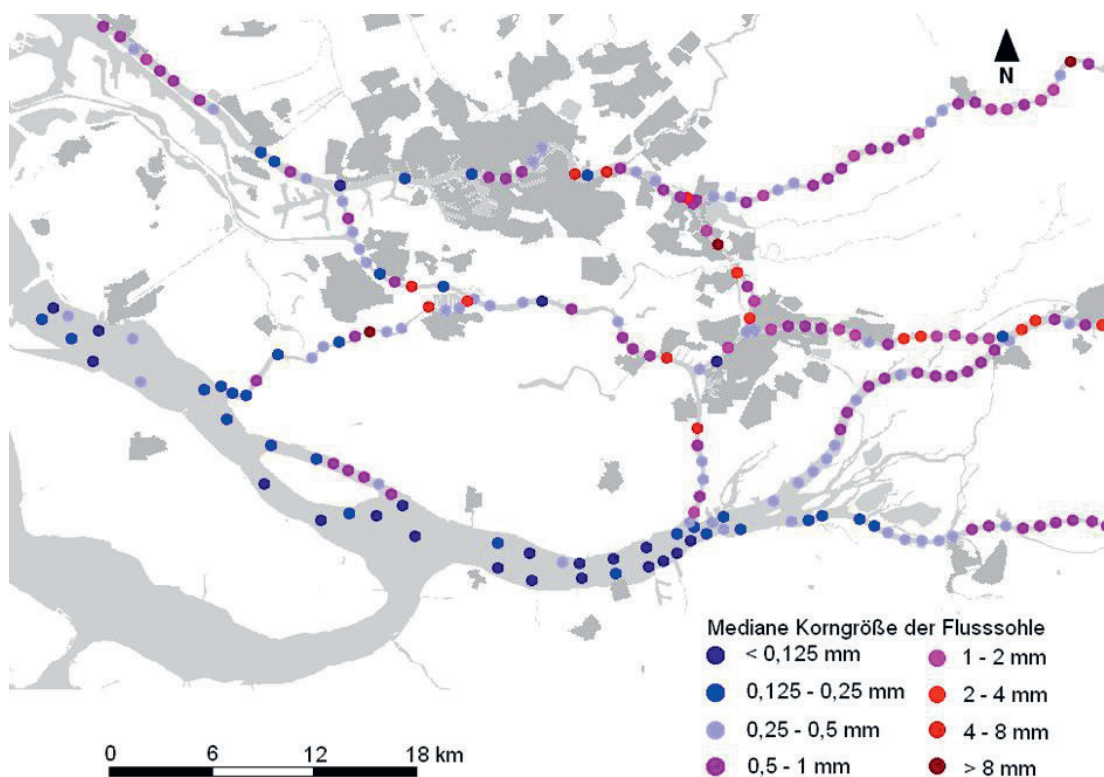


Abb. 10.3: Mediane Korngröße der Flusssohle im Unteren Rheindelta (verändert nach Snippen et al., 2005, Datengrundlage: Fugro, 2002; Topographischer Hintergrund: Topografische Dienst Emmen).

Flussbauliche Maßnahmen im Bilanzzeitraum 1991-2010 waren (1) die Öffnung des Beerdams (1997), um eine offene Verbindung des Hartelkanaals zum Beerkanaal und somit zur Nordsee zu erstellen, (2) die Erweiterung des Rotterdamer Hafen (2. Maasvlakte) in der Nordsee, südlich des größten Gewässerlaufs Nieuwe Waterweg, (3) die Fertigstellung der Maeslandtkering im Nieuwe Waterweg und der Hartelkering im Hartelkanal (1997), die nur bei Sturmflut geschlossen werden, sowie (4) das Verbot zur Sedimententnahme bei Unterhaltungsbaggerungen weiter oberstrom in der Waal zur Reduzierung der Sohlerosion (1990er Jahre). Weiterhin wurde 2004 beschlossen, die Haringvlietschleusen bei Flut teilweise zu öffnen, um so den ökologisch wertvollen Gezeiteinfluss im Haringvliet zurückzubringen. Diese Maßnahme war zu Beginn des Betrachtungszeitraums noch nicht umgesetzt.

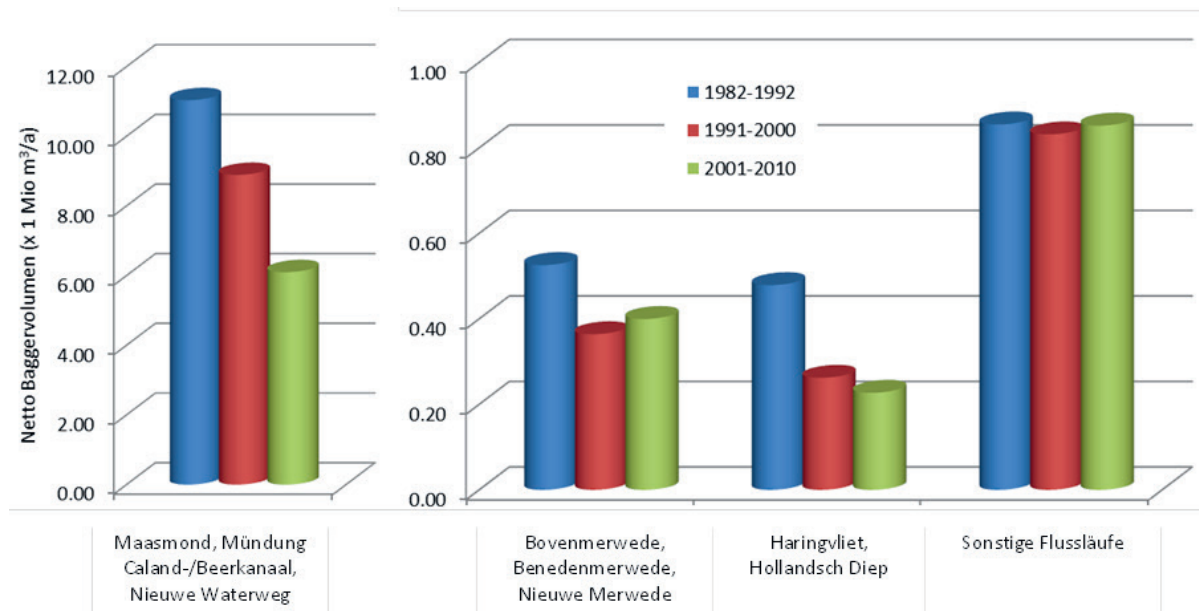


Abb. 10.4: Netto-Baggervolumina in den Flussläufen des unteren Rheindeltas (Datenquelle: 1982-1992: Van Dreumel, 1995; 1991-2000 und 2001-2010: Anonymus, 2014).

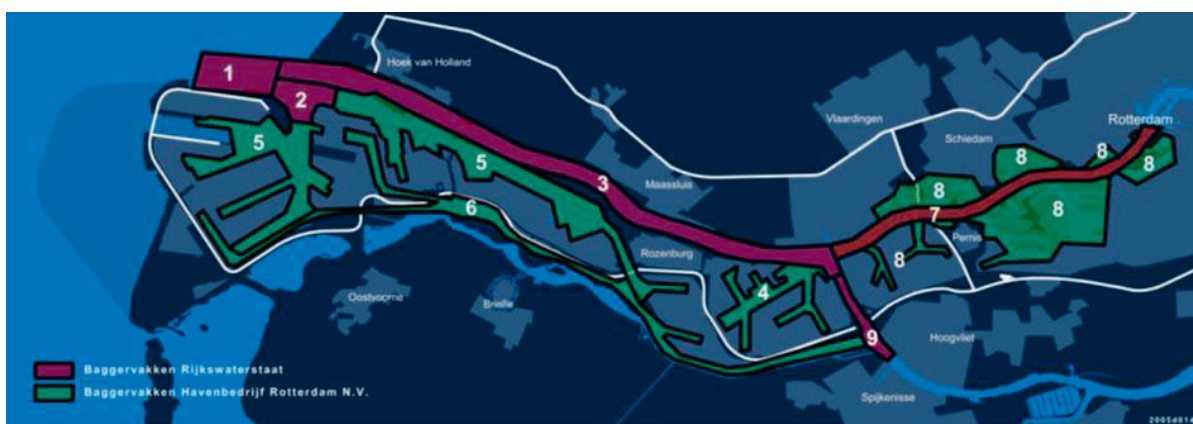


Abb. 10.5: Baggerstellen im nördlichen Rheinmündungsbereich (Langeveld, 2005): 1. Maasmond, 2. Mündung des Caland- und des Beerkanaals, 3. Nieuwe Waterweg, 4. Botlek, 5. Europoort und Maasvlakte, 6. Hartelkanaal, 7. Nieuwe Maas, 8. Stadshavens Rotterdam, 9. Oude Maas.

Tab. 10.1: Baggermengen im Unteren Rheindelta.

Gebiet	Sand- gehalt	Trockene Schüttdichte	Baggervolumen		Baggermengen		
			1982-1992 ^b	1991-2010 ^c	Sand	Schluff/Ton	Gesamt
	(-) ^a	(kg/m ³) ^a	(m ³ /a)	(m ³ /a)	(Mt/a) ^d	(Mt/a) ^d	(Mt/a) ^d
Flussläufe							
Beneden Merwede	0,68	1.160	99.275	36.161	0,028	0,014	0,042
Boven Merwede	0,95	1.620	268.305	220.824	0,340	0,018	0,358
Nieuwe Merwede	0,83	1.203	158.243	124.920	0,124	0,026	0,150
Maasmond	0,50	565	6.010.737	3334.254 ^e	0,942	0,942	1,884
mond							
Caland/Beerkanaal	0,15	395	4.314.858	3703.584 ^e	0,219	1,243	1,463
Nieuwe Waterweg	0,75	1.103	713.105	458.235	0,379	0,126	0,506
Afgedamde Maas	0,28	640	63.763	7.822	0,001	0,004	0,005
Amer	0,50	768	63.933	9.373	0,004	0,004	0,007
Bergsche Maas	0,80	1.335	29.434	28.028	0,030	0,007	0,037
Dordtsche Kil	0,70	1.125	48.847	36.123	0,028	0,012	0,041
Hollandsche IJssel	0,35	655	18.610	46.101	0,011	0,020	0,030
Lek	0,65	1.085	88.766	126.179	0,089	0,048	0,137
Nieuwe Maas	0,60	765	426.477	547.379	0,251	0,167	0,419
Noord	0,58	875	31.198	5.723	0,003	0,002	0,005
Oude Maas	0,63	1.013	83.685	34.876	0,022	0,013	0,035
Spui	0,50	745	0	138	0,000	0,000	0,000
Haringvliet	0,23	427	-7.291	-6.777	-0,001	-0,002	-0,003
Hollandsch Diep	0,22	478	486.107	251.406	0,026	0,094	0,120
Häfen							
Havens zuidrand	0,30	545	55.000		0,009	0,021	0,030
Havens midden-oost	0,20	510	30.000		0,003	0,012	0,015
Hartelkanaal vak 1+2	0,65	855	32.000		0,018	0,010	0,027
Hartelkanaal rest	0,75	945	91.000		0,064	0,021	0,086
Havens midden-west	0,30	590	50.000		0,009	0,021	0,030
Waalhaven	0,35	470	234.104		0,039	0,072	0,110
1e & 2e Petroleum haven	0,15	370	481.000		0,027	0,151	0,178
Overige havens (NM & rest)	0,25	420	372.000		0,039	0,117	0,156
Botlek-vak 1 mond	0,70	935	150.000		0,098	0,042	0,140
Botlek-vak 1 zwaai kom	0,40	530	450.000		0,095	0,143	0,239
Botlek-vak 2+3	0,15	370	1.459.000		0,081	0,459	0,540
Botlek-vak 4	0,25	420	136.000		0,014	0,043	0,057
Europoort-vakken 1 t/m 6	0,30	395	1.162.212		0,138	0,321	0,459
Summe Flussläufe			12.898.052	8.964.348	2,497	2,739	5,236
Summe Häfen			4.702.316		0,634	1,433	2,067

^a Mittelwert der Angaben von Van Dreumel (1995, Tabelle 2) pro Flussstrecke

^b Van Dreumel (1995, Tabelle 1)

^c Baggerstatistik Rijkswaterstaat (Anonymus, 2014)

^d Basiert auf den jüngsten Baggerangaben

^e Keine Angaben für die Jahre 1991-1992, Annahme, dass die Werte dem Mittelwert 1993-2000 entsprechen

10.3 Bestimmung der Sedimentquellen und -senken

10.3.1 Die Sedimentbilanzgleichung

Für den Fall, dass tektonische Sohlhöhenänderungen eine untergeordnete Rolle spielen, lautet die allgemeine Sedimentbilanzgleichung für den Flussschlauch des Rheins:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{se} + I_{di} + I_{ar} + I_{ab} + I_{do}) - (O_{do} + O_{se} + O_{dr} + O_{gr} + O_{fl} + O_{po} + O_{ab}) = \Delta S \quad (10.1)$$

mit I_{up} , dem Sedimenteintrag von oberstrom, I_{tr} , dem Sedimenteintrag aus Nebenflüssen, I_{se} , dem Sedimenteintrag aus Nebenarmen, I_{di} , dem Sedimenteintrag aus diffusen Quellen (zum Beispiel Ufererosion), I_{ar} , dem Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe, I_{ab} , dem Sedimenteintrag durch Abrieb von anderen Kornfraktionen (nur für die Fraktion Ton/Schluff), I_{do} , dem Sedimenteintrag von unterstrom, O_{do} , dem Sedimentaustrag nach unterstrom, O_{se} , dem Sedimentaustrag in Nebenarme, O_{dr} , dem Sedimentaustrag durch Baggerungen, O_{gr} , dem Sedimentaustrag in Bühnenfelder, O_{fl} , dem Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen, O_{po} , dem Sedimentaustrag in Häfen, O_{ab} , dem Sedimentaustrag durch Abrieb, und ΔS , der Sohlhöhenänderung, wobei alle Bilanzterme in der Einheit Mt/a ausgedrückt werden.

Anthropogene Zugaben von allochthonen Sedimenten (I_{ar}), wie in den deutschen Rheinabschnitten (zum Beispiel Frings et al., 2014ab), kommen im Unteren Rheindelta nicht vor. Ufererosion als diffuse Sedimentquelle (I_{di}) spielt aufgrund der Uferbefestigungen ebenfalls eine untergeordnete Rolle. Weiterhin wird angenommen, dass Sedimenteintrag oder -austrag durch Abrieb (I_{ab} , O_{ab}) aufgrund der feinen Körnung und des geringen Anteils des Geschiebetransports im Vergleich zum schwebenden Transport vernachlässigbar sind. Des Weiteren wird die Annahme von Ten Brinke et al. (2004) übernommen, dass sich die Bühnenfelder morphodynamisch im Gleichgewicht befinden, was bedeutet, dass keine Sedimentation (O_{gr}) oder Erosion stattfindet. Messungen zum Sedimentaustrag durch Sedimentation auf Überflutungsflächen (O_{fl}) wurden im Unteren Rheindelta nie durchgeführt. Die von Van Dreumel (1995) und Snippen et al. (2005) getroffene Annahme, dass aufgrund der sehr geringen Fläche oder Abwesenheit der Vorländer im Betrachtungsgebiet die Sedimentation auf den Vorländern vernachlässigt werden kann, wurde hier übernommen. Somit können die entsprechenden Bilanzterme zu null gesetzt werden. Da die vorliegende Studie Teil der Gesamt-Sedimentbilanz des Rheins ist, in der die großskaligen Sedimentflüsse im gesamten Rhein untersucht werden, erfolgte in dieser Studie (im Gegensatz zu den Studien von Van Dreumel (1995) und Snippen et al. (2005)) keine Aufteilung von Sedimentflüssen auf die einzelnen Flussabschnitte innerhalb des Rheindeltas (I_{se} und O_{se} gleich null). Damit kann die allgemeine Bilanzgleichung wie folgt reduziert werden:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{do}) - (O_{do} + O_{dr} + O_{po}) = \Delta S \quad (10.2)$$

Die Bestimmung der einzelnen Terme der reduzierten Bilanzgleichung für das untere Rheindelta wird in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

10.3.2 Sedimenteintrag von oberstrom

Am oberen Rand des Unteren Rheindeltas wird Sediment von den Gewässerläufen Lek und Waal zugeführt. Durch die Waal wird die größte Menge zugeführt, da die Zufuhr von Sediment aus Nederrijn-Lek durch die Stauhaltungen bei Driel, Amerongen und Hagestein reduziert wird. Die Sedimentströme aus Waal und Nederrijn-Lek bilden den Sedimentausgang aus dem Oberen Rheindelta und den Sedimenteintrag in das Untere Rheindelta. Basierend auf einer Sedimentbilanzanalyse des Oberen Rheindeltas für die Zeit zwischen 1991 und 2010 berechneten Frings et al. (2015) (Kapitel 9) das Sedimentangebot der Gewässerläufe Nederrijn-Lek und Waal (I_{up}). Dabei kam heraus, dass der Nederrijn-Lek 0,065 Mt/a Sand und 0,197 Mt/a Ton/Schluff lieferte,

während die Waal eine erheblich größere Menge Sediment lieferte: 0,469 Mt/a Sand und 1,291 Mt/a Ton/Schluff.

10.3.3 Sedimenteintrag aus Nebenflüssen

Ton/Schluff

Die beiden Nebenflüsse des Unteren Rheindeltas sind die Hollandse IJssel und die Maas. Da die Hollandse IJssel ein Moorgebiet entwässert und einen geringen Abfluss hat (im Durchschnitt $2 \text{ m}^3/\text{s}$, Snippen et al. (2005), S. 20), kann angenommen werden, dass die Sedimentzufuhr aus diesem Nebenfluss (I_{tr}) vernachlässigbar gering ist ($< 0,001 \text{ Mt/a}$). Dies gilt jedoch nicht für die Maas. Diese hatte im Zeitraum von 1991-2010 einen durchschnittlichen Abfluss von $246 \text{ m}^3/\text{s}$ an der Messstelle Eijsden (Rijkswaterstaat, 2014) und führt eine große Menge Sediment mit sich. Zwischen 1970 und 1992 wurden Schwebstoffmessungen in der Maas bei Lith, 50 km oberstrom des Unteren Rheindeltas, durchgeführt. Auf Grundlage einer gut dokumentierten Extrapolation dieser Daten haben Snippen et al. (2005, Abb. 7.2) die Ton/Schluff-Zufuhr für den Zeitraum 1990-1999 ermittelt. Diese ist weitgehend im Einklang mit den durch Van Dreumel (1995) abgeleiteten Werten. In der vorliegenden Studie wird angenommen, dass der Wert von Snippen et al. (2005, Abb. 5.2) ($I_{tr} = 0,387 \text{ Mt/a}$) für den gesamten Zeitraum von 1991 bis 2010 gültig ist.

Sand

Obwohl bekannt ist, dass im Hochwasserfall Geschiebe in Form von Sanddünen über die Sohle der Maas transportiert wird (zum Beispiel: Julien & Klaassen, 1995; Frings & Kleinhaus, 2002), lagen quantitative Daten dieses Geschiebeeintrags in das Untere Rheindelta nicht vor. Auch Daten zum Transport suspendierten Sandes lagen nicht vor. Snippen et al. (2005) haben angenommen, dass das Verhältnis von Sandtransport zu Ton/Schluff-Transport in der Maas und der Waal identisch ist und haben so den Sandeintrag aus der Maas (I_{tr}) zum Unteren Rheindelta abgeschätzt. Die Werte von Snippen et al. (2005, Abb. 6.3) wurden hier übernommen. Insgesamt bedeutet dies, dass die Maas in den Jahren 1991-2010 $0,199 \text{ Mt/a}$ Sand in den Rhein eingetragen hat.

10.3.4 Sedimenteintrag von unterstrom

Das Untere Rheindelta steht über die Mündungsarme Nieuwe Waterweg, Hartelkanaal und Haringvliet (Abb. 10.2) in direkter Verbindung zur Nordsee. Da das Haringvliet 1970 mit einem Damm und einer Schleuse abgesperrt wurde und da bei Flut keine Schlesungen stattfinden, kann über diese Strecke kein Eintrag von Meeressediment in das Untere Rheindelta erfolgen. Über den Nieuwe Waterweg werden jedoch erhebliche Sedimentmengen (I_{do}) aus der Nordsee in das Untere Rheindelta eingetragen (Van Dreumel, 1995). Aufgrund des Dichteunterschieds von Salz- und Süßwasser kommt es zu einer Schichtung von Meeres- und Flusswasser. Auch über den Hartelkanaal kann ein Sedimenteintrag in das Untere Rheindelta erfolgen. Informationen dazu waren nicht vorhanden. In seiner Bilanzierung hat Van Dreumel (1995) den Sedimenteintrag aus der Nordsee im Bereich des Nieuwe Waterwegs abgeschätzt. Da aktuellere Werte nicht vorlagen, wurden die Werte aus der Bilanz von Van Dreumel (1995, Abb. 11) in der vorliegenden Studie unverändert übernommen. Der Eintrag von Ton/Schluff aus der Nordsee in das Untere Rheindelta (I_{do}) wurde somit auf $3,500 \text{ Mt/a}$ festgelegt, der von Sand auf $2,300 \text{ Mt/a}$. Diese Sedimentmengen sind als Nettosedimenteinträge zu sehen; sie werden im Unteren Rheindelta abgelagert und verlassen es nicht auf natürlicher Weise. Die tatsächlichen Mengen Sediment, die bei Flut durch den Nieuwe Waterweg aus dem Meer eingetragen werden, sind viel größer. Die Mehrheit dieser Sedimente wird jedoch bei der nächsten Ebbe wieder zurück ins Meer gespült und ist damit nicht bilanzwirksam.

10.3.5 Sedimentaustrag durch Baggerungen

Der Sedimentaustrag durch Baggerungen O_{dr} wurde einer Baggerstatistik von Rijkswaterstaat Zuid-Nederland in MS Excel Format (Anonymus, 2014) entnommen. Diese Baggerstatistik enthält für alle Gewässerläufe im Unteren Rheindelta volumetrische Angaben zu den jährlichen Baggermengen aus dem Zeitraum 1970-2012. Hier wurden nur die Daten aus dem Zeitraum 1991-2010 betrachtet. Zur Umrechnung von Baggervolumina in Masseneinheiten wurden die aufgeführten Volumina mit der Dichte des Baggerguts multipliziert; Dichteangaben für jeden Gewässerlauf wurden aus Tabelle 2 von Van Dreumel (1995) entnommen. Zur Aufteilung des Baggerguts in die Fraktionen Ton/Schluff (< 0,063 mm) und Sand (0,063 – 2 mm) wurden die Baggermassen pro Gewässerlauf mit dem Ton/Schluffgehalt beziehungsweise Sandgehalt (auch aus Van Dreumel, 1995, Tabelle 2) multipliziert. Da in der Baggerstatistik keine Angaben über die Gewässerläufe Maasmond sowie die Mündung des Caland- und Beerkanaals für die Jahre 1991 und 1992 vorlagen, wurde angenommen, dass die Baggermengen in diesen Flussabschnitten den mittleren Baggermengen aus den Folgejahren (1993-2000) entsprachen (Tabelle 1). Die Baggermassen für das gesamte Betrachtungsgebiet lagen somit für Ton/Schluff bei 2,739 Mt/a und für Sand bei 2,497 Mt/a.

10.3.6 Sedimentaustrag in Häfen

Das betrachtete Gebiet beinhaltet den viertgrößten Hafen der Welt (Rotterdammer Hafen), so dass der Sedimentaustrag in Häfen (O_{po}) ein sehr wesentlicher Bestandteil der Bilanz sein kann. Unter der Annahme, dass die Sohlage in den Häfen sich nicht wesentlich ändert, lässt sich der Sedimentaustrag in Häfen aus den Hafenbaggervolumina abschätzen. Eine ausführliche Auflistung der Baggerungen in den einzelnen Häfen des Unteren Rheindeltas wurde von Van Dreumel (1995, Tabelle 1) für den Zeitraum 1982-1992 vorgenommen. Durch Multiplikation der Baggervolumina mit der Sedimentdichte und mit dem Ton/Schluffgehalt beziehungsweise dem Sandgehalt für jeden Hafen (Van Dreumel, 1995, Tabelle 2) wurden folgende Werte für den Sedimentaustrag in Häfen berechnet: 0,634 Mt/a Sand und 1,433 Mt/a Ton/Schluff. Obwohl zu erwarten ist, dass der Sedimentaustrag in Häfen sich aufgrund der Bauarbeiten und Veränderungen in der Baggerstrategie geändert haben, wurden diese Werte hier integral für den Zeitraum 1991-2010 übernommen, da keine aktuelleren Daten vorlagen.

10.3.7 Sedimentaustrag nach unterstrom

Der fluviale Anteil im Sediment des Nieuwe Waterwegs beträgt im Durchschnitt etwa 20 % (Verlaan, 1993). Wenn man diese Zahl mit der jährlichen Sedimentationsrate im Nieuwe Waterweg kombiniert, wird klar, dass die jährliche Sedimentation von fluvialen Sedimenten geringer ist als die von oberstrom eingetragene fluviale Sedimentfracht. Das bedeutet, dass nicht die gesamte vom Rhein eingetragene Fracht im Unteren Rheindelta sedimentiert; ein Teil wird in die Nordsee abgeführt. Hierbei handelt es sich überwiegend um tonige und schluffige Sedimente. Auch durch das Haringvliet werden bei Ebbe Flusssedimente ins Meer ausgetragen. Van Dreumel (1995, Abb. 11) quantifizierte den Sedimentaustrag (O_{do}) basierend auf Schwebstoffmessungen. Für die vorliegende Bilanz wurden die Daten von Van Dreumel (1995, Abb. 11) herangezogen. Das bedeutet, dass davon ausgegangen wird, dass aus dem Nieuwe Waterweg zwischen 1991 und 2010 jährlich 0,700 Mt Ton/Schluff und 0,300 Mt Sand in die Nordsee gelangten. Aus dem Haringvliet gelangten zusätzlich 0,200 Mt/a Ton/Schluff und 0,050 Mt/a Sand in die Nordsee.

10.3.8 Sohlhöhenänderung

Van Dreumel (1995) und Snippen et al. (2005) haben die Sohlhöhenänderung ΔS für alle Gewässerläufe mittels Echolotpeilungen mit dem Single-beam Verfahren ermittelt. Für den

betrachteten Zeitraum in den von ihnen aufgestellten Bilanzen lagen regelmäßige Peilungen für alle Gewässerläufe im Gebiet vor. Diese Peilungen wurden über die Fläche interpoliert, so dass eine gebietsabdeckende Sohlhöhenänderung verfügbar war. Im Betrachtungszeitraum 1991-2010 sind ebenfalls Messungen durchgeführt worden. Die Ergebnisse dieser Messungen lagen zum Zeitpunkt der Berichterstellung nur grafisch vor (unter anderem Abb. 10.6), wobei eine zuverlässige Umrechnung in Volumen- und Masseneinheiten nicht möglich war. Aus diesem Grund wurde ΔS sowohl für Sand als auch für Ton/Schluff als Schließungsterm der Bilanz berechnet.

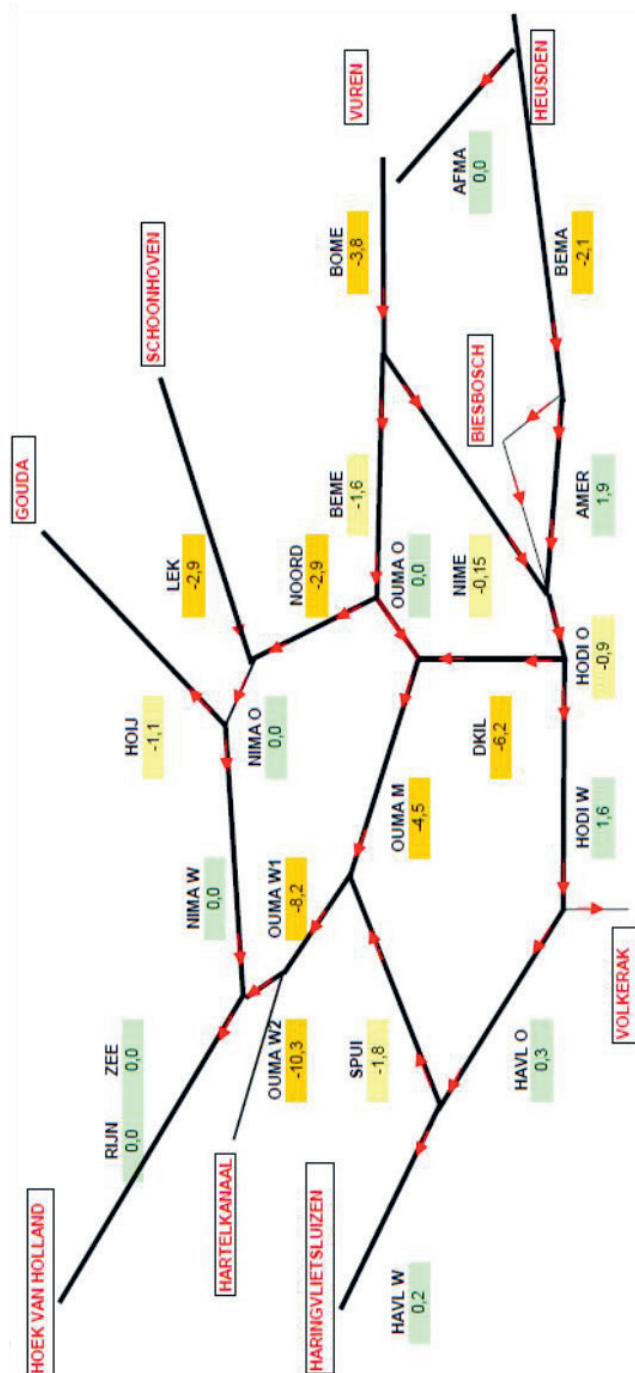


Abb. 10.6: Sohlhöhenänderung im Unteren Rheindelta (in cm/Jahr) im Zeitraum 1990-2000 (Snippen et al. 2005). Gewässerläufe mit einer Sohlvertiefung sind in gelb/orange angegeben, Gewässerläufe mit einer Sohlauflhöhung in grün.

10.4 Ergebnisse

Die Bilanzberechnung (Abb. 10.7, Tab. 10.2) zeigt, dass die Sedimentzufuhr aus dem Oberen Rheindelta insgesamt 2,022 Mt/a beträgt. Etwa 87 % davon werden von der Waal eingetragen, nur 13 % stammen aus Nederrijn-Lek. Der Eintrag über die Nebenflüsse erfolgt ausschließlich durch die Maas. Sie trägt zusätzliche 0,586 Mt Sediment pro Jahr in das System ein. Die größte Sedimentquelle für das untere Rheindelta ist jedoch der Eintrag von Meeressediment (5,800 Mt/a). Allgemein sind die ins System eingetragenen Ton/Schluff-Mengen fast doppelt so groß wie die eingetragenen Sandmengen.

Bei einem großen Teil der dem Unteren Rheindelta zugeführten marinen und fluvialen Sedimente kommt es zu Sedimentation und nachfolgend zu Baggerungen. Dabei finden Sedimentation und Baggerung sowohl auf der Flusssohle als auch in den angrenzenden Hafengebieten statt. Kleine Anteile der zugeführten Sedimente verlassen das Betrachtungsgebiet über das Haringvliet und den Nieuwe Waterweg in die Nordsee. Damit sind die Sedimentsenken des Unteren Rheindeltas in abnehmender Reihenfolge: (1) Baggerungen 5,236 Mt/a, (2) Sedimentaustrag in Häfen 2,067 Mt/a und (3) Sedimentaustrag nach unterstrom 1,250 Mt/a.

Ein Vergleich der Sedimentmassen, die das Untere Rheindelta erreichen oder verlassen, suggeriert, dass Ton und Schluff im Delta akkumulieren ($\Delta S > 0$), während der Sandvorrat im Delta zurückgeht ($\Delta S < 0$) (Abb. 10.7, Tab. 10.2): Es tritt eine Verfeinerung der Sohle im Delta auf. In Anbetracht der großen Unsicherheiten in Bezug auf ΔS (Tab. 10.2) sollte man zurückhaltend bei der Interpretation von ΔS sein. Die Sedimentfrachten im Unteren Rheindelta nehmen nach unterstrom deutlich ab, es werden erhebliche Mengen Sediment in die Nordsee transportiert (Abb. 10.8).

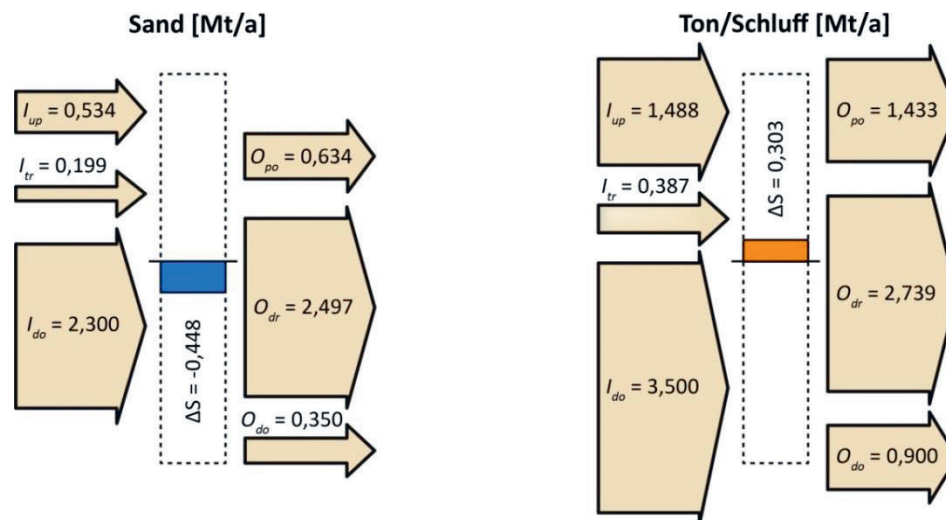


Abb. 10.7: Sedimentbilanz des Unteren Rheindeltas für den Zeitraum 1991-2010 für die Fraktionen Sand (0,063-2 mm) und Ton/Schluff (<0,063 mm). Größere Sedimentfraktionen sind in dem unteren Rheindelta nicht vorhanden.

Tab. 10.2: Sedimentbilanz inklusive Unsicherheiten für das untere Rheindelta.

Mündungs- arm	I_{up} [Mt/a]	I_{tr} [Mt/a]	I_{do} [Mt/a]	O_{dr} [Mt/a]	O_{po} [Mt/a]	O_{do} [Mt/a]	ΔS [Mt/a]
Sand	0,534 ±55%	0,199 ±50%	2,300 ±50%	2,497 ±25%	0,634 ±50%	0,350 ±50%	-0,448 ±300%
Ton, Schluff	1,488 ±65%	0,387 ±50%	3,500 ±50%	2,739 ±25%	1,433 ±50%	0,900 ±50%	0,303 ±750%

Fett gedruckte Werte beruhen auf externen, unabhängig bestimmten Eingangsdaten. Unterstrichene Werte beruhen auf Annahmen. Alle sonstigen Werte sind aufgrund der Bilanzgleichung berechnet worden.

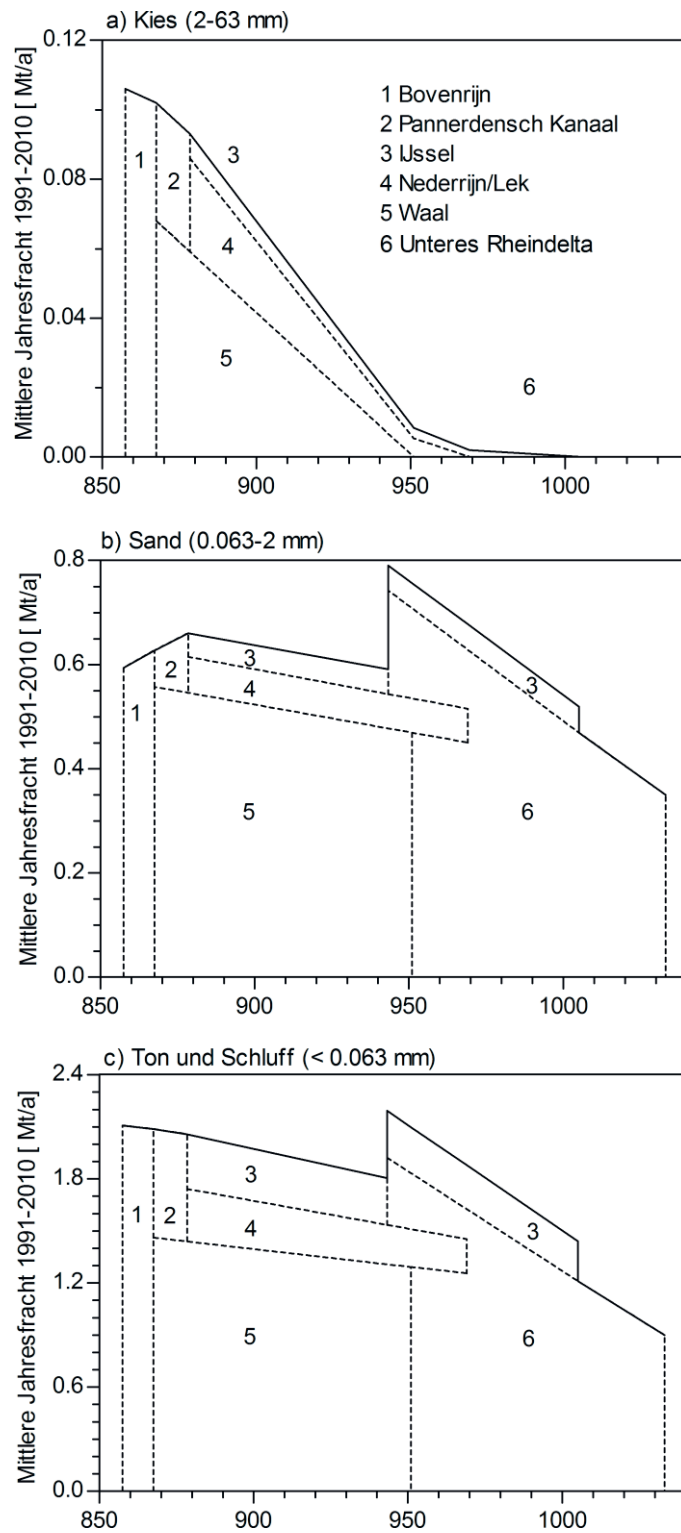


Abb. 10.8. Schematische Darstellung der seewärtsgerichteten Sedimentfrachten im Rheindelta: a) Kies und Steine, b) Sand, c) Ton und Schluff, inklusive deren Aufteilung über die verschiedenen Fluss-Arme im Delta. Daten des Oberen Rheindeltas stammen aus Kapitel 9. Zu bemerken ist, dass die Nettojahresfracht im unteren Teil des Deltas landwärts (stromauf) gerichtet ist. Hier ist nur die stromabwärts gerichtete fluviale Komponente dargestellt.

10.5 Diskussion

10.5.1 Unsicherheiten

Die Unsicherheit einer Sedimentbilanzstudie wird sowohl von der Richtigkeit der vorher getroffenen Annahmen (Abschnitt 10.3.1), als auch von der Unsicherheit der einzelnen Bilanzterme (I_{up} , I_{tr} , I_{do} , O_{dr} , O_{po} , O_{do} , ΔS) bestimmt (Tab. 10.2). Die Unsicherheit des Sedimenteintrags von oberstrom (I_{up}) entspricht der Unsicherheit der Frachten am unteren Ende von Waal und Nederrijn-Lek. Diese Unsicherheit wurde im Rahmen der Bilanzanalyse für das Obere Rheindelta ermittelt und entspricht 140 % des Ton/Schluffeintrags aus Nederrijn-Lek, 70 % des Ton/Schluffeintrags aus der Waal, 60 % des Sandeintrags aus der Waal und 130 % des Sandeintrags aus Nederrijn-Lek. Zusammengerechnet bedeutet das, dass die Unsicherheit des Ton/Schluffeintrags in das Untere Rheindelta bei etwa 65 % liegt und die Unsicherheit des Sandeintrags bei etwa 55 %. Hierbei handelt es sich um Abschätzungen der maximalen Unsicherheit bei 95 % Wahrscheinlichkeit der in der Bilanz aufgeführten Werte. Die Unsicherheit des Sedimenteintrags aus Nebenflüssen (I_{tr}) basiert auf einer Extrapolation von Messungen in der Maas aus dem Zeitraum 1970 bis 1992 (Snippen et al., 2005). Da keine aktuelleren Daten vorliegen und es gut möglich ist, dass die Sedimentfrachten in der Maas sich über die Zeit geändert haben, wird hier eine Unsicherheit von 50 % angesetzt. Der Sedimenteintrag aus der Nordsee (I_{do}) wurde unverändert aus der Bilanz von Van Dreumel (1995) übernommen, implizit annehmend, dass sich der Sedimenteintrag seit der Studie von Van Dreumel (1995) nicht geändert hat. Es ist zu erwarten, dass die Baumaßnahmen (Kapitel 10.2.3) und die geänderte Baggerstrategie einen Einfluss auf den Sedimenteintrag aus der Nordsee hatten. Aufgrund der Abnahme der Baggervolumina in Meeresnähe (Abb. 10.4) ist zu erwarten, dass auch der Sedimenteintrag aus der Nordsee geringer geworden ist. Daher wird hier eine Unsicherheit des Sedimenteintrags von 50 % angesetzt.

Der Sedimentaustag durch Baggerungen (O_{dr}) wurde aufgrund einer detaillierten und aktuellen Baggerstatistik berechnet. Es ist davon auszugehen, dass die Baggervolumina relativ genau sind. Unsicherheiten werden jedoch bei der Umrechnung von Volumina in Massen und die Aufteilung in Sand und Ton/Schluff angenommen. Van Dreumel (1995) geht von einer Unsicherheit von 8 – 10 % aus. Hier wird die Unsicherheit mit 25 % höher eingeschätzt. Aktuelle Daten zum Sedimentaustag in Häfen (O_{po}) lagen in dieser Studie nicht vor: Die Daten von Van Dreumel (1995) wurden unverändert übernommen, implizit annehmend, dass der Austrag sich seit der Studie von Van Dreumel (1995) nicht geändert hat. Aufgrund der Abnahme der Baggervolumina in den an Häfen angrenzenden Gewässerläufen ist es jedoch wahrscheinlich, dass der Sedimenteintrag in Häfen ebenfalls kleiner geworden ist. Hier wird eine Unsicherheit von 50 % angesetzt. Der fluviale Sedimentaustag in die Nordsee (O_{do}) hängt sowohl von der Zulieferung von fluvialen Sedimenten, als auch von Sedimentationsprozessen im Unteren Rheindelta ab. Da keine aktuellen Daten vorlagen, wurde mit einer Unsicherheit von 50 % gerechnet. Der letzte Bilanzterm (ΔS) wurde aufgrund der Bilanzgleichung berechnet und dessen Unsicherheit ist damit von den oben genannten Unsicherheiten abhängig. Eine Fehlerfortpflanzungsanalyse zeigte, dass die Unsicherheit für Sand bei etwa 300 % und für Ton/Schluff bei etwa 750 % liegt (Tab. 10.2).

Die oben aufgestellte Sedimentbilanz ist in sich schlüssig und bezieht sich auf unabhängig ermittelte Eingangsdaten. Die Unsicherheiten sind jedoch relativ groß, da für einige Bilanzterme keine aktuellen Daten vorlagen und auf die Bilanzdaten von Van Dreumel (1995) zurückgegriffen werden musste. Natürlich führt eine partikuläre Aktualisierung einer Bilanz, indem neue Daten (Periode 1991-2010) mit alten (Periode 1982-1992) kombiniert werden, zu einer Bilanzunsicherheit, welche die Benutzung und Interpretation der Bilanz stark einschränkt. Dies ist ein triftiger Grund, eine komplette Aktualisierung der Bilanz anzustreben.

10.5.2 Validierung

Zur Validierung des Sedimenteintrags von oberstrom (I_{up}) am oberen Ende des Unteren Rheindeltas wurden Messungen des suspendierten Sandtransports sowie Messungen des Geschiebetransports während des Hochwassers von Januar 2004 herangezogen. Die Messungen des suspendierten Sandtransports wurden mittels eines akustischen Sand-Transport-Meters (ASTM) (Frings & Kleinans, 2008) in der Bovenmerwede (Rhein-km 960,5) durchgeführt. Der suspendierte Sandtransport wurde an sieben Lotrechten in mehreren Messtiefen (0,2, 0,5, 1, 2, 3 m usw. über der Sohle bis zur Wasseroberfläche) volumetrisch bestimmt und dann über die Flussbreite integriert. Die Daten wurden aufgrund einer Trockenrohddichte von 2.603 kg/m^3 in Massen umgerechnet. Danach wurde eine Transport-Abflussbeziehung (Abb. 10.9) erstellt und mit den Tagesabflusswerten der Messstelle Tiel Waal (Rijkswaterstaat, 2014) kombiniert, um die mittlere Jahresfracht an suspendiertem Sand in der Bovenmerwede zu bestimmen. Diese beträgt $0,358 \text{ Mt/a}$. Die Geschiebetransportmessungen wurden sowohl mittels Dunetrackingverfahren (Rhein-km 960,15 – 960,85) als auch mittels Fängermessungen mit dem Delft Nile Sampler (Rhein-km 960,5) bestimmt (Frings & Kleinans, 2008). Es wurde eine morphologisch aktive Breite von 440 m angenommen und die Daten wurden aufgrund einer Trockenrohddichte von 2.603 kg/m^3 und Porosität von 0,35 in Massen umgerechnet. Auch hier wurde eine Transport-Abflussbeziehung (Abb. 10.9) erstellt und mit den Tagesabflusswerten kombiniert, um die mittlere Jahresfracht zu berechnen. Dabei wurde eine Geschiebefracht von $0,129 \text{ Mt/a}$ berechnet. Die Gesamtsandfracht beträgt damit $0,487 \text{ Mt/a}$. Dieser Wert ist nur 4 % höher als der in der aktuellen Bilanz benutzte Wert ($0,469 \text{ Mt/a}$, Abschnitt 10.3.2), was – in Anbetracht der Tatsache, dass nur an sieben Tagen innerhalb des 20-jährigen Betrachtungszeitraums gemessen wurde – als eine sehr gute Übereinstimmung anzusehen ist. Es ist jedoch zu beachten, dass die Messungen nicht exakt an der oberen Grenze des Unteren Rheindeltas durchgeführt wurden, sondern etwa 10 km weiter unterstrom, und zwar unterhalb der Baggerstelle in der Bovenmerwede (siehe Tab. 10.1).

10.5.3 Interpretation

Als Folge der Gefälleabnahme im Rückstau der Nordsee nehmen die mittleren Strömungsgeschwindigkeiten im Unteren Rheindelta stromabwärts ab. Große Teile des durch die Waal eingetragenen Sandes sedimentieren direkt bei Erreichen des Unteren Rheindeltas auf der Flusssohle, insbesondere in der Boven-, Beneden- und Nieuwe Merwede. Dort wird es dann ausgebagert, um die Schifffahrtsroute zwischen Rotterdam und dem deutschen Hinterland offen zu halten (Tab. 10.2). In den Merweden wurde zwischen 1991 und 2010 etwa $0,5 \text{ Mt}$ Sand gebaggert pro Jahr. Damit haben die Baggermengen die gleiche Größenordnung wie der durch die Waal eingetragene Sand ($0,5 \text{ Mt/a}$). Da in den Merweden netto Sohleintiefung auftritt (Abb. 10.6.), ist davon auszugehen, dass der Waalsand nur teilweise in den Merweden sedimentiert, und teilweise weitertransportiert wird. Baggerungen und Sohlerosion verursachen dann die netto Sohleintiefung in den Merweden. Ähnliche Effekte treten beim Sand auf, der durch den Nederrijn-Lek in die Maas eingetragen wird. Auch in einigen anderen Flussabschnitten des Deltas findet Erosion von Sand aus der Flusssohle statt (Van Dreumel, 1995; Snippen et al., 2005). Schließlich erreicht ein kleiner Teil des durch den Rhein eingetragenen, zusammen mit einem Teil durch die Maas eingetragenen Sediments sowie durch Sohlerosion gelösten Sandes die Nordsee.

Auch für Ton/Schluff gilt, dass die abnehmende Steigung und ein Rückstau aus dem Meer unterstrom eine Sedimentationstendenz und Frachtenabnahme schaffen, wodurch das System selbst von Ost nach West gefüllt wird. Große Teile des durch Waal und Maas eingetragenen Materials landen im südlichen Teil des Unteren Rheindeltas (Haringvliet, Hollands Diep), wo sie die

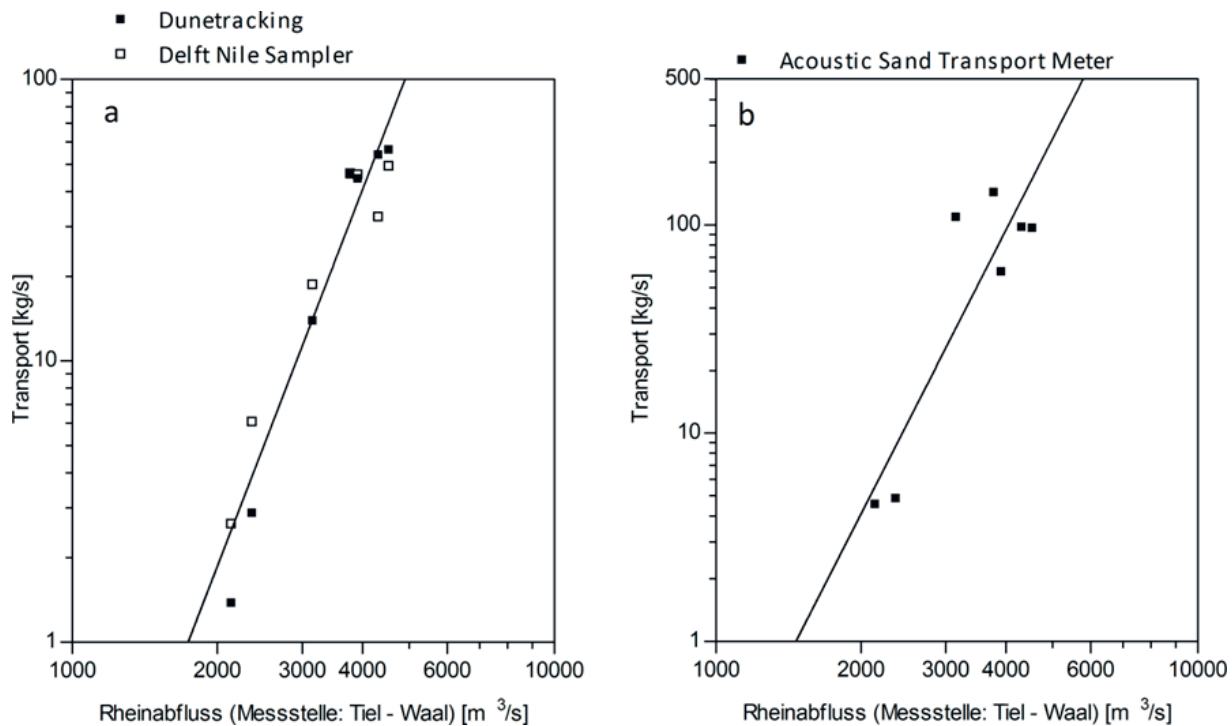


Abb. 10.9: Transport-Abflussbeziehungen für die Bovenmerwede (km 960,5): a) Geschiebe, b) suspensierter Sand (Daten: Frings & Kleinhaus, 2008).

Sandablagerungen aus der Zeit vor den Deltawerken bedecken und eine schluffige Sohle bilden (Snippen et al., 2005). Weil die Schifffahrtsbelange in diesem Gebiet gering sind, bleibt ein großer Teil des sedimentierten Materials liegen. Suspensierter Ton/Schluff, welcher in Richtung der nördlichen Gewässerläufe transportiert wird, sedimentiert teils unterwegs und teils kurz vor der Mündung in die Nordsee. Im Nieuwe Waterweg (inkl. Maasmond), im Rotterdamer Hafen und in deren Zugangskanälen (unter anderem an der Mündung von Caland- und Beerkanal) wird weitgehend gebaggert, um die Flusssedimente, die oft verunreinigt sind, zu entfernen und einen Durchgang für die Schifffahrt zu ermöglichen. Das verunreinigte Sediment wird auf Deponien verbracht. Trotz dieser starken Sedimentation erreicht ein bedeutender Teil des eingetragenen Flusssediments die Nordsee.

Fluviale Sande, Schluffe und Tone, die in die Nordsee eingetragen werden, werden bei Flut oft zurück in das Untere Rheindelta zurückgespült. Mit dem Flutstrom und der salzigen Unterströmung werden auch enorme Mengen Meeressediment in das Delta eingeführt. Ein Teil dieses Sediments verlässt das Delta wieder bei der nächsten Ebephase, ein Teil erreicht teilweise auch die Bereiche Maasmond, Nieuwe Waterweg (hauptsächlich Sand), den Rotterdamer Hafen und die dazugehörigen Zugangskanäle (hauptsächlich Ton/Schluff). Auch dieses Material wird zur Gewährleistung der Schifffahrt gebaggert. Es wird angenommen, dass der Großteil des durch das Meer eingetragenen Sediments im Nieuwe Waterweg (inkl. Maasmond) und dem angrenzenden Rotterdamer Hafengebiet (inkl. Mündung Caland/Beerkanal) sedimentiert (Abb. 10.5).

Das Baggervolumen im Unteren Rheindelta ist weitaus höher als das Baggervolumen in den weiter oberstrom liegenden Teilen des Rheins. Tatsächlich wird die großräumige Sedimentbilanz des Gebiets vollständig durch die Baggerungen bestimmt, wodurch nur begrenzt von einem natürlichen morphologischen System die Rede sein kann. Um die Zieltiefe von Kanälen, Gewässerläufen und Häfen zu erhalten, bleiben Baggerarbeiten notwendig. Durch Ausführung von Baggerungen wird ein vergleichsweise zu breites Fluss- und Hafengebiet instandgehalten, was zur Fortsetzung der Sedimentation und daraus resultierenden zusätzlichen Baggerarbeiten führt (Van Dreumel, 1995).

Die Baggerungen am unteren Rand des Deltas (Umgebung des Nieuwe Waterwegs) zeigen im Betrachtungszeitraum 1991-2010 eine partielle Abnahme über die Zeit (Abb. 10.4), was wahrscheinlich auf eine veränderte Bagger- und Abraumstrategie sowie entsprechend eine Abnahme des Inputs maritimen Sediments zurückzuführen ist. Die Baggerungen am oberen Rand des Deltas (Umgebung Bovenmerwede) sind während des Zeitraums 1991-2010 weder signifikant größer noch kleiner geworden (Abb. 10.4). Es ist zu erwarten, dass die Baggerungen an dieser Stelle stark mit der Sandzufuhr aus der Waal zusammenhängen, wodurch besonders in Jahren mit hoher Sedimentzufuhr viel gebaggert werden musste. Anzumerken ist, dass die Baggerungen in der Bovenmerwede zeitlich mit den suspendierten Sandfrachten des Oberrheins bei Bingen (cf. Frings et al., 2014a) korrelieren. Vor allem im Zeitraum 1993-2006 besteht ein starker Zusammenhang, wobei Jahre mit hoher Sandfracht bei Bingen mit Jahren mit hohen Baggerungen in der Bovenmerwede korrespondieren (Abb. 10.10). Dies könnte bedeuten, dass sich Sand, welcher im Oberrhein in das System gelangt und in Schwebelag nach unterstrom transportiert wird, relativ kurz danach in der Umgebung der Bovenmerwede absetzt. Es besteht jedoch nicht unbedingt ein kausaler Zusammenhang. Dennoch verdient dieser mögliche Zusammenhang weitere Untersuchungen.

Van Dreumel (1995) gibt an, dass sich die Sohle der Gewässerläufe im Zeitraum 1982-1992 weiterhin an die geänderten hydrodynamischen Bedingungen infolge der Schließung von Haringvliet und Volkerak (Abschnitt 10.2.3) angepasst hat. Nach Snippen et al. (2005) setzte sich diese Anpassung auch nach 1991 (folglich im Betrachtungszeitraum dieser Studie) fort. Darüber hinaus findet man in den südlichen Teilen des Deltas (Haringvliet, Hollands Diep) Stellen, die sich durch Sedimentation von Ton/Schluff erhöhen, während in den mittleren und östlichen Teilen des Deltas eine Vertiefung stattfindet (teils natürlich, teils durch Ausbaggerungen). In den nördlichen Teilen des Deltas wird das Flussbett wegen der Schifffahrt eben gehalten. Es ist zu erwarten, dass die Veränderungen in der Tiefe der Gräben einen Einfluss auf die Wasser- und Sedimentverteilung in den Gewässerläufen hat und damit auch auf die Verbreitung von Schadstoffen und Versalzungseffekten. Normalerweise würde das Untere Rheindelta ohne menschliches Eingreifen durch Sedimentations- und Erosionsprozesse auf längere Zeit wieder in ein dynamisch-morphologisches Gleichgewicht kommen. Der Mensch nimmt jedoch durch Baggerungen Einfluss auf das System. In der Tat verhindert der Mensch durch sein Eingreifen, dass das Flussbett in ein dynamisches Gleichgewicht mit den gegenwärtigen Tidevolumina kommen kann (Van Dreumel, 1995).

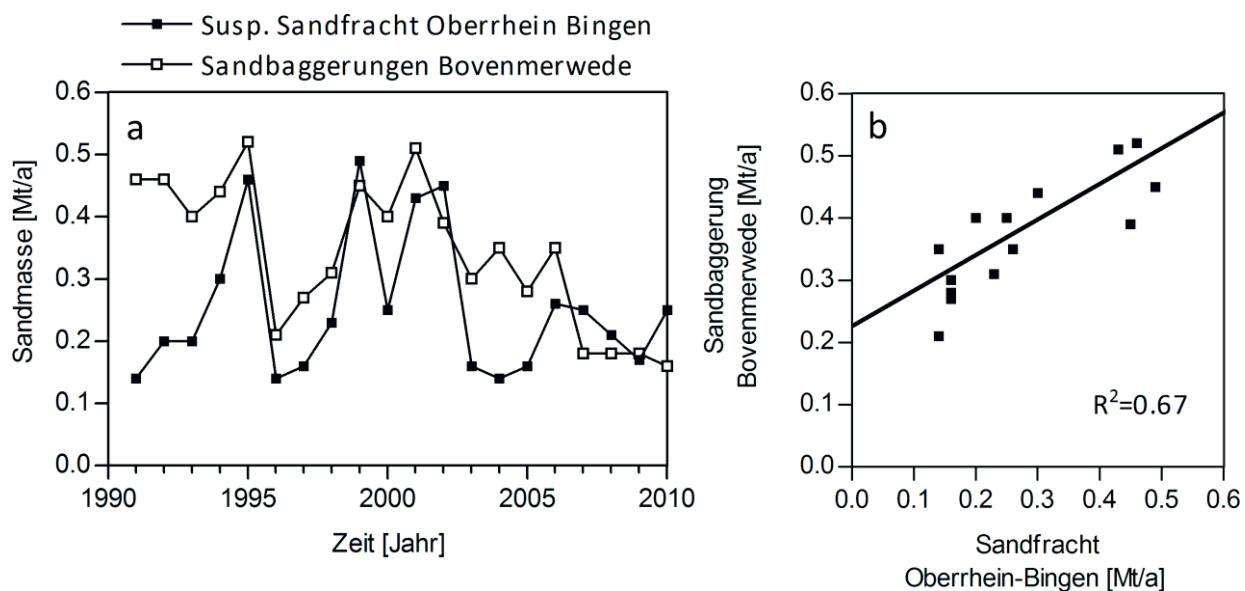


Abb. 10.10: Zusammenhang zwischen suspendierten Sandfrachten im Oberrhein (Messstelle Bingen) und Baggerungen in der Bovenmerwede: a) Zeitliche Tendenz von 1991-2010, b) Korrelation im Zeitraum 1993-2006.

10.5.4 Vergleich mit bereits durchgeführten Studien

Zusätzlich zu der vorliegenden Bilanz sind bis dato drei Bilanzstudien des Unteren Rheindeltas veröffentlicht (Terwindt, 1977; Van Dreumel, 1995; Snippen et al., 2005). Van Dreumel (1995) und Snippen et al. (2005) fokussierten stark auf die räumliche Verteilung der Sedimentfrachten und Ablagerungsraten in den verschiedenen Gewässerläufen des Unteren Rheindeltas. Im Rahmen der vorliegenden Studie des gesamten Rheins war dieses Detailniveau nicht erforderlich. Ein Vergleich der aktuellen Bilanz mit den bisherigen Sedimentbilanzen ist vor allem in Bezug auf den fluvialen Sedimenteintrag (Tab. 10.3) sinnvoll.

Zu erkennen ist, dass die Werte des fluvialen Sedimenteintrags seit dem Zeitraum 1982-1992 deutlich geringer geworden sind. Das gilt sowohl für Schluff und Ton (45 % Abnahme) als auch für Sand (52 % Abnahme). Die Abnahme des Ton/Schluffeintrags ist auf die Abnahme des Schwebstoffgehalts im Rhein bei Lobith zurückzuführen. Im Zeitraum 1980-2010 reduzierte sich der Schwebstoffgehalt von durchschnittlich 35 mg/l im Jahr 1980 (siehe Snippen et al., 2005) auf 14 mg/l im Jahr 2010 (Rijkswaterstaat, 2014) (s. auch: Abb. 9.11, Kapitel 9). Die Verminderung des Ton/Schluffeintrags aus der Maas ist laut Van Dreumel (1995) teilweise auf die erhöhte Kiesgewinnung in den Maasauen zurückzuführen, da die entstandenen Kiesgruben als Sedimentfang fungieren. Die Abnahme des Sandeintrags aus Nederrijn-Lek und Waal kann möglicherweise einer Abnahme der Sohlerosion im Rhein zugeschrieben werden.

Die Abnahme des fluvialen Sedimenteintrags in das untere Rheindelta wird in der zeitlichen Tendenz der Baggermengen widergespiegelt (Abb. 10.4). Dabei ist jedoch anzumerken, dass auch der Sedimenteintrag aus der Nordsee wahrscheinlich abgenommen hat und zu reduzierten Baggermengen geführt hat.

Tab. 10.3: Vergleich des fluvialen Sedimenteintrags in das Untere Rheindelta (in Mt/a) für die Zeiträume: vor 1980 (Terwindt, 1977; Salomons & Eysink, 1981), 1982-1992 (Van Dreumel, 1995), 1990-1999 (Snippen et al., 2005) und 1991-2010 (vorliegende Studie).

Bilanz		I_{up} Waal	I_{up} Lek	I_r Maas	Summe
< 1980	(Schluff+Ton/Sand)	2,50/ -	0,60/ -	0,70/ -	3,80/1,50
1982 – 1992	(Schluff+Ton/Sand)	2,40/1,05	0,55/0,30	0,45/0,20	3,40/1,55
1990 – 2000	(Schluff+Ton/Sand)	1,46/0,75	0,34/0,17	0,39/0,20	2,19/1,12
1991- 2010	(Schluff+Ton/Sand)	1,29/0,47	0,20/0,08	0,39/0,20	1,88/0,74

10.5.5 Empfehlungen

Um eine komplett aktualisierte und vollständige Bilanz erstellen zu können, müssen aktuelle Sohlpeilungen in die Berechnung einfließen. Dieser Vorgang wäre ohne großen Aufwand durchzuführen und würde die Unsicherheiten deutlich verringern und die Bilanz somit verbessern. Darüber hinaus sind aktuelle Daten zum Sedimentausttrag in die Häfen erforderlich. Da die Sedimentmengen, die in die Häfen ausgetragen werden, von der gleichen Größenordnung sind wie die Sedimentmengen, die in das untere Rheindelta eingetragen werden, kann auf Hafengebaggerstatistiken mit Informationen zum Sedimentausttrag in die Häfen nicht verzichtet werden. Es wird auch nochmal darauf hingewiesen, dass für die Umrechnung von Massen in Volumen im Unteren Rheindelta eine räumlich variable Sedimentdichte anzusetzen ist. Gleiches gilt für die Aufteilung in Fraktionen, wo ein räumlich variabler Sandgehalt von Sohl- und Baggermaterial zu verwenden wäre. Dieses Vorgehen, auf dem auch die vorliegende Bilanz basiert, ist an das von Van Dreumel (1995) gelehnt. Das Vorgehen von Snippen et al. (2005) ist ggf. weniger geeignet: Erstens erlaubt die Methode keine Unterscheidung zwischen den Kornfraktionen Sand und Ton/Schluff, zweitens wurde für das gesamte Betrachtungsgebiet dieselbe Sedimentdichte benutzt, obwohl es

große räumliche Unterschiede zwischen der Sedimentdichte des im östlichen, sandhaltigen Bereichs und des im Süden liegenden, schlammigen Bereichs gibt; und drittens wird der Eindruck erweckt, dass die nasse Schüttdichte statt der trockenen Dichte benutzt wurde, um die Baggervolumina in Massen umzurechnen, was in Bilanzstudien unüblich ist und zu Massenfehlern führen kann.

Zur Validierung der Bilanz ist eine bessere Kenntnis des Sedimentaustausches mit der Nordsee, also dem Sedimentein- und austrag von und nach unterstrom, zwingend vonnöten. Im Vergleich zu anderen Bilanztermen sind diese sehr hoch und müssen daher genau betrachtet werden. Bereits Snippen et al. (2005) bemängelten die Datenlage, die mittels Monitoring der Sedimentfrachten am unteren Ende des Unteren Rheindelta (Haringvliet, Nieuwe Waterweg) verbessert werden könnte. Die vorliegenden Messwerte sind nicht ausreichend für eine ausführliche Betrachtung. In den bisher durchgeführten Sedimentbilanzen konnte der Sedimentaustausch mit der Nordsee nur grob abgeschätzt werden. Meist musste die vereinfachende Aussage getroffen werden, dass seit den 1980er Jahren keine Veränderung diesbezüglich stattgefunden hat (Snippen et al., 2005; vorliegende Bilanz). Da aber große bauliche Veränderungen stattgefunden haben, ist diese Annahme wahrscheinlich nicht korrekt. Die Kenntnis des Sedimentaustausches mit der Nordsee ist nicht nur zur Validierung der Bilanz notwendig, sondern würde auch die Interpretation der zeitlichen Änderung der Baggermengen (Abb. 10.4) vereinfachen und das Verständnis des Einflusses durchgeführter und geplanter Baumaßnahmen (Kapitel 10.2) auf das Untere Rheindelta erhöhen.

Ein dreidimensionales Bild der suspendierten Feststofffracht im Delta kann mithilfe numerischer Modelle erzeugt werden. Die Kalibrierung und Validierung muss aufgrund gemessener Konzentrationen vorgenommen werden. In der Vergangenheit konnte dies anhand von in den Jahren 1970 und '80 durchgeführten Sedimenttransportmessungen vorgenommen werden. Die dabei entstandenen Daten sollten nicht mehr für die Kalibrierung von aktuellen numerischen Modellen herangezogen werden. Ideal wäre eine neue Messkampagne wie in den 1970er Jahren, wo an 97 Messstellen innerhalb des unteren Rheindeltas Konzentrationsmessungen bei verschiedenen hydrodynamischen Bedingungen gemacht wurden (Van Dreumel, 1995). Die Empfehlung von Van Dreumel (1995), diese Messkampagne zu wiederholen, wird hier unterstützt. Für die Validierung der Sedimentverteilung an der Merwedekopverzweigung können auch die Messungen von Frings & Kleinhans (2008) herangezogen werden.

Wie bereits gezeigt wurde (beispielsweise Abb. 10.10), korrelieren die Prozesse im oberstromigen Bereich (zum Beispiel im Oberrhein) viel stärker mit dem unterstromigen als bisher gedacht. Hier sollte unbedingt eine Untersuchung erfolgen, die diese Zusammenhänge prüft. Ereignisse, die lokal auftreten, wie zum Beispiel einmalige Zugaben von Sediment, müssen nach unterstrom verfolgt werden, um das System als Einheit verstehen zu können.

10.6 Schlussfolgerungen

10.6.1 Sedimentquellen und -senken

Im Unteren Rheindelta sind ausschließlich die Fraktionen Ton/Schluff und Sand anzutreffen. Diese werden teils aus dem Oberen Rheindelta eingetragen, der Meereseinfluss ist allerdings dafür verantwortlich, dass der Großteil des eingetragenen Sediments von unterstrom stammt. Ein sehr großer Teil des eingetragenen Sediments sedimentiert sowohl auf der Sohle der Gewässerläufe als auch in den Häfen. Aufgrund der hohen Bedeutung der Schifffahrt in diesem Bereich muss dieses Sediment durch Baggerungen entfernt werden, um die Fahrwassertiefe aufrechterhalten zu können. Insgesamt kann man beim Unteren Delta von einem Sedimentationsgebiet sprechen, das allerdings stark dem anthropogenen Einfluss unterliegt.

10.6.2 Sedimentfrachten

Betrachtet man nur die fluviale Sedimentfracht, so nimmt sie in Fließrichtung ab. Grund sind Sedimentation in Häfen und insbesondere die Baggerungen in diesen und in den Gewässrläufen. Dies gilt sowohl für Ton/Schluff als auch für Sand. Allerdings erhöht sich der Anteil von Ton/Schluff innerhalb des Fließweges, was auf eine Verfeinerung der Sohle deutet. Der Eintrag aus dem Meer übertrifft im hier betrachteten Gebiet alle weiteren Sedimenteinträge. Das so entgegen der Fließrichtung des Flusses eingetragene Sediment gelangt weit in die Gewässrläufe hinein, muss aber zur Freihaltung der Schifffahrtsrinne gebaggert werden. Der Eintrag in die Nordsee, also der Austrag nach unterstrom ist betragsmäßig wesentlich geringer als der Eintrag von unterstrom.

10.6.3 Unsicherheiten und Empfehlungen

Das Fehlen aktueller Daten an vielen Stellen dieser Bilanz erforderte die Übernahme älterer Daten, die bereits in vorausgegangenen Studien anderer Autoren entstanden. Dieser Umstand erhöht die Unsicherheiten in der erstellten Bilanz. Es wird daher empfohlen, fehlende Daten zu beschaffen, sofern sie existieren und in die Bilanz mit einfließen zu lassen. Nicht vorhandene Daten müssten durch Messungen erst erhoben werden, was dringend notwendig ist. Messungen, die beispielsweise den Schwebstoffgehalt untersuchen, sollten wiederholt werden, da die Daten bereits sehr alt und eventuell nicht mehr repräsentativ sind. Die Unsicherheiten könnten mit diesen Maßnahmen enorm reduziert und die Bilanz damit wesentlich verbessert werden.

10.7 Literatur

- Anonymus (2014): Baggerwerk RijnMaasmonding per jaar tm 2012.xls (Excel-Tabelle), Rijkswaterstaat, Rotterdam.
- Berendsen, H.J.A., Stouthamer, E. (2001): Palaeogeographic Development of the Rhine–Meuse Delta, The Netherlands. Koninklijke Van Gorcum, Assen.
- Cohen, K.M., Stouthamer, E., Pierik, H.J., Geurts, A.H. (2012): Digitaal Basisbestand Paleogeografie an de Rijn–Maas Delta / Rhine–Meuse Delta Studies' Digital Basemap for Delta Evolution and Palaeogeography. Release 2012 - Dept. Physical Geography, Utrecht University, Utrecht.
- Fugro (2002). Laboratoriumresultaten betreffende morfologisch modelleren (datarapport). Opdrachtnummer H-4086. Fugro Ingenieursbureau.
- Frings, R.M., Kleinhans, M.G. (2002): Sedimentsortering en transportlaagdynamiek: geologisch, antropogene en alluviale invloeden op de beddingsamenstelling van de Rijn rond de Pannerdensch Kop. ICG 02/7. Utrecht: Centre for Geo-ecological Research, Universiteit Utrecht, Utrecht.
- Frings, R.M., Kleinhans, M.G. (2008): Complex variations in sediment transport at three large river bifurcations during discharge waves in the river Rhine. *Sedimentology*, Vol. 55, Iss. 5, S. 1145–1171.
- Frings, R.M., Gehres, N., Promny, M., Middelkoop, H., Schüttrumpf, H., Vollmer, S. (2014a). Today's sediment budget of the Rhine River channel, focusing on the Upper Rhine Graben and Rhenish Massif. *Geomorphology* 204, pp 573-587.

- Frings, R.M., Döring, R., Beckhausen, C., Schüttrumpf, H., Vollmer, S. (2014b): Fluvial sediment budget of a modern, restrained river: The lower reach of the Rhine in Germany. *Catena*, Vol. 122 S. 91-102.
- Frings, R.M., Banhold, K., Evers, I. (2015): Sedimentbilanz des Oberen Rheindeltas für den Zeitraum 1991-2012, S. 4. Bericht 2015.019. Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft. RWTH Aachen University, Aachen.
- Huisman, Y., Wiersma, A., Blinde, J., van Kesteren, W., Mosselman, E. (2013): Erosie door het verwijderen van boomstammen uit de Merwedde. Deltares, Delft.
- Julien, P.Y., Klaassen, G.J. (1995). Sand-dune geometry of large rivers during floods. *J. Hydraul. Eng.*, Vol. 121, Iss. 9, S. 657–663.
- Langeveld, C.R. (2005) Verdiepte Loswal. Fysisch onderzoek naar het gedrag van baggerspecie. Master Thesis, TU Delft, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Hydraulic Engineering.
- Rijkswaterstaat (2014): Waterbase Rijkswaterstaat: http://www.rijkswaterstaat.nl/water/waterdata_waterberichtgeving/watergegevens, letzter Aufruf 18.10.2014.
- Salomons, W., Eysink, W.D. (1981): Pathways of mud and particulate trace metals from rivers to the southern North Sea. W. Salomons and W.D. Eysink. *Spec. Publs int. Ass. Sediment.* Vol. 5, S. 429-450.
- Snippen, E., Fiiole, A., Geelen, H., Kamsteeg, A., Van Spijk, A., Visser, T. (2005): Sediment in (be)weging – Sedimentbalans Rijn-Maasmonding periode 1990-2000. Rijkswaterstaat RIZA.
- Ten Brinke, W., 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*, Vol. 20, Issue 8, S. 899–928.
- Terwindt, H.J. (1977): Mud in de Dutch Delta area. *Geologie en Mijnbouw*, Vol. 56, S. 203- 210.
- Van Dreumel, P.F. (1995): Slib- en zandbeweging in het noordelijk Deltabekken in de periode 1982-1992. Rijkswaterstaat, Directie Zuid-Holland, Rotterdam.
- Verlaan, P.A.J., Spanhoff, R., (1993). Aanslibbing van de Maasmond: inventarisatie en heranalyse. Rijkswaterstaat Dienst Getijdewateren; RIZA, Den Haag.

11. Synthese⁴

R.M. Frings, T. Hoffmann, G. Hillebrand, N. Gehres, S. Schriever, K. Banhold

11.1 Einführung

Große Flüsse weisen einen hohen Grad an Komplexität auf. Sie durchfließen verschiedene lithologische, tektonische, klimatische, biotische und morphologische Zonen, verändern flussabwärts ihr hydrologisches Regime und sind verschiedensten Eingriffen durch den Menschen unterworfen. Um unter diesen vorherrschenden externen Einflüssen ein morphodynamisches Gleichgewicht zu erreichen, erodieren, transportieren und deponieren Flüsse Sedimente entlang ihrer Fließwege (Nanson und Huang, 2008). Im Gegensatz zu kleinen Flüssen erreichen große Flüsse selten ein solches Gleichgewicht, da die Reaktionszeiten großer Flusssysteme viel länger als die Zeitskalen der Veränderungen der externen Einflüsse (z. B. Klimaveränderungen, Tektonik und menschliche Eingriffe) sind (vgl. De Vries, 1975; Hoffmann, 2015). Viele große Flüsse passen sich noch immer an die klimatischen Veränderungen des Pleistozäns (z. B. Blum & Törnqvist, 2000) sowie an menschliche Eingriffe, die vor hunderten oder tausenden Jahren stattfanden, an (Walling, 1999, 2006). Zudem müssen sie sich an die heutige Tektonik, die heutige Klimaänderung und die intensiven heutigen menschlichen Eingriffe anpassen. Das grundlegende Ungleichgewicht großer Flüsse führt zu einem komplexen Wechsel zwischen Erosion und Sedimentation entlang ihrer Fließwege. Sowohl Sedimentation als auch Erosion sind aus menschlicher Sicht oft unerwünscht, da sie die menschliche Nutzung von Flüssen für Trinkwasser, Nahrung, Transport, Verteidigung, Energieerzeugung, Sand- und Kiesabbau, Bewässerung, Fischerei und Erholung limitieren.

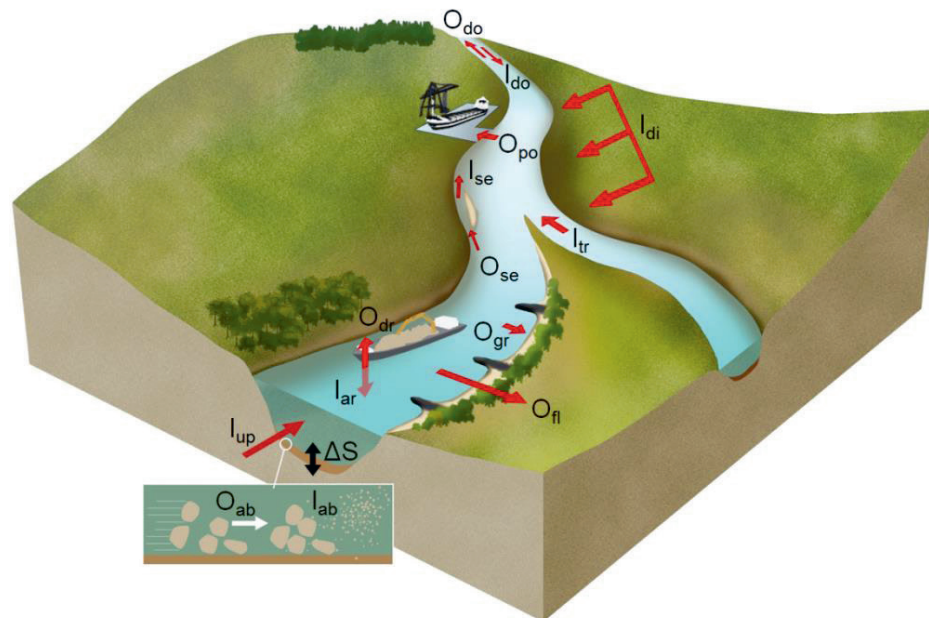


Abb. 11.1: Schematische Darstellung der Sedimentbilanz eines Flussabschnittes (Frings et al., 2017). Die Symbole werden in Kapitel 11.3 erläutert.

⁴ Dieses Kapitel wurde in englischer Sprache bei der wissenschaftlichen Zeitschrift Earth Science Reviews zur Veröffentlichung eingereicht.

Darüber hinaus ist es unerlässlich, die Korngrößen-spezifische Dynamik in den Blick zu nehmen, da sich das Verhalten der Fraktionen Ton, Schluff, Sand, Kies und Steine stark voneinander unterscheidet. In diesem Kapitel präsentieren wir die erste, detaillierte, systematische, morphologische Analyse des Flussschlauches des Rheins von der Quelle bis zur Mündung.

Das übergeordnete Ziel dieser Studie war es, die Morphodynamik des Rheins im Zeitraum 1991 bis 2010 für das gesamte Einzugsgebiet zu charakterisieren und dabei zwischen dem Verhalten der Sedimentfraktionen Ton, Schluff, Sand, Kies und Steine zu unterscheiden. Untergeordnete Ziele waren: (1) die Quantifikation der Sedimentflüsse von Ton, Schluff, Sand, Kies und Steine entlang des Rheins und (2) die Identifikation der Quellen und Senken dieser Sedimente. Dabei wurde die gesamte Länge des Rheins von 1.232,7 km (KHR, 2015) von seiner Quelle in den Schweizer Alpen bis zu seiner Mündung in die Nordsee berücksichtigt. Das Rheineinzugsgebiet oberhalb des Rhein-Maas-Deltas erstreckt sich über etwa 185.000 km² (Görgen et al., 2010) und wird von 58 Millionen Menschen bewohnt (IKSR, 2005).

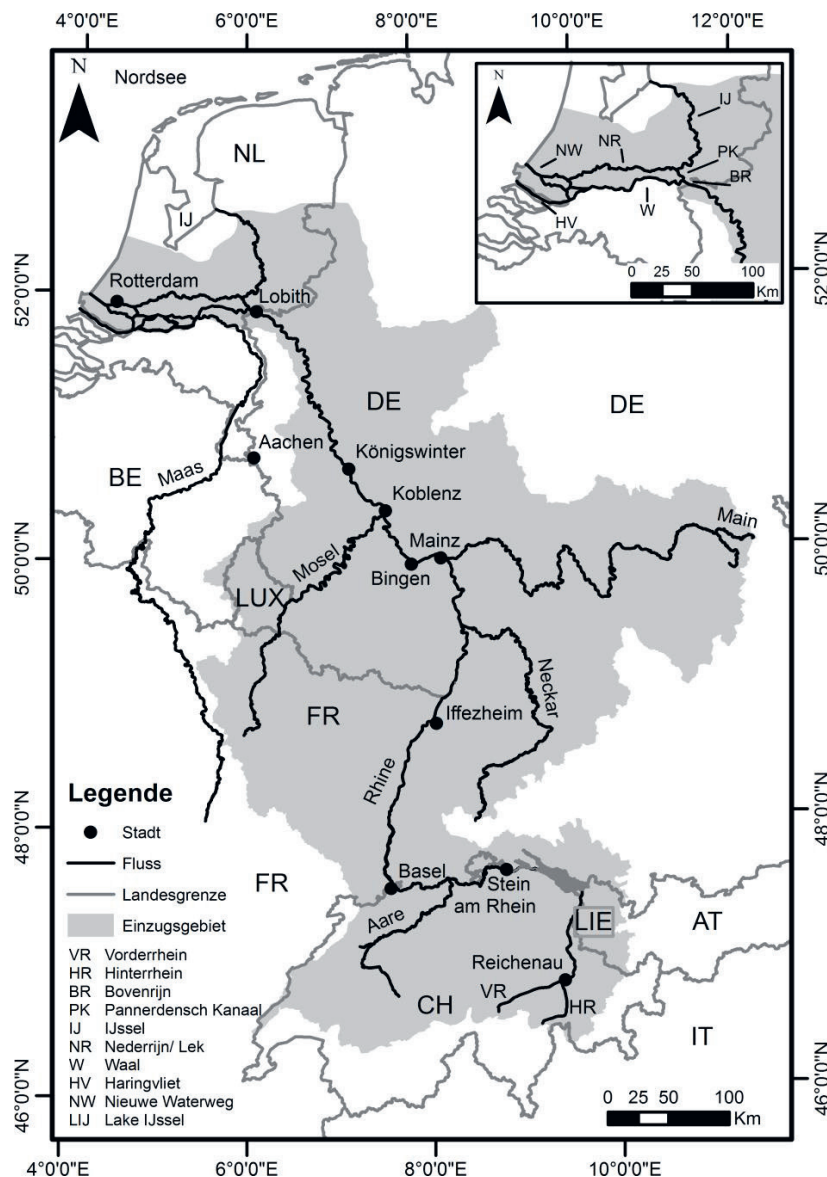


Abb. 11.2 Das Einzugsgebiet des Rheins mit seinen wichtigsten Nebenflüssen und Delta-Seitenarmen.

Um die genannten Ziele zu erreichen, wurde eine große Anzahl an morphologischen Studien über den Rhein zusammengeführt. Sohlhöhenvermessungen sowie tausende Sedimenttransportmessungen aus den Anrainerstaaten Schweiz, Österreich, Frankreich, Deutschland und den Niederlanden aus dem Zeitraum 1991 bis 2010 wurden herangezogen und neu analysiert, wobei besonders auf die Genauigkeit und Kompatibilität der Daten geachtet wurde. Um die Quellen und Senken des Sediments zu quantifizieren, wurde eine Reihe von Sedimentbilanzen erstellt. Dabei wurden die folgenden Bilanzterme berücksichtigt: Sedimenteintrag von oberstrom, Sedimenteintrag aus Nebenflüssen, Sedimenteintrag aus Nebenarmen, Sedimenteintrag aus diffusen Quellen, Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe, Sedimenteintrag durch Abrieb von gröberen Kornfraktionen, Sedimenteintrag von unterstrom (Meereseintrag), Sedimentaustag nach unterstrom, Sedimentaustag in Nebenarme, Sedimentaustag durch Baggerungen, Sedimentaustag in Bühnenfelder, Sedimentaustag auf Überflutungsflächen, Sedimentaustag in Häfen, Sedimentaustag durch Abrieb, und die Veränderung des Sedimentspeichers durch Sohlhöhenänderung (Abb. 11.1). Während Sohlhöhenvermessungen die beste Methode darstellen, um Veränderungen der Sohlhöhe zu quantifizieren, sind Transportmessungen und Bilanzanalysen unverzichtbar, um Ursache und Art dieser Veränderungen zu verstehen (Frings, 2015). Die Ergebnisse dieser Studie stellen einerseits eine Datenbasis für Flussmanager und politische Entscheidungsträger dar, helfen andererseits aber auch Wissenschaftlern, die Reaktionen großer Flüsse auf menschliche Einflüsse zu untersuchen.

In den folgenden Abschnitten beschreiben wir erst die wesentlichen morphologischen Eigenschaften des Rheines, die für ein gutes Verständnis der Ergebnisse dieser Studie unentbehrlich sind. Nach einer Beschreibung der Methodik präsentieren wir dann die Sedimentflüsse im gesamten Einzugsgebiet, ihre Quellen und Senken, differenziert für die Korngrößenfraktionen Ton, Schluff, Sand, Kies und Steine.

11.2 Morphologische Eigenschaften des Rheins

11.2.1 Der alpine Bereich

Der Rhein (Abb. 11.2 bis 11.4) entspringt in den Schweizer Alpen in einer Höhe von 2.500 – 2.900 m ü. N. N. Er hat zwei Hauptquellen (*Vorderrhein* und *Hinterrhein*), die im Ort Reichenau zusammenfließen (vgl. Abb. 11.2, 11.3). Von hier aus fließt der Fluss (unter dem Namen *Alpenrhein*) durch ein breites Alpental in Richtung *Bodensee*, etwa 395 m über dem Meeresspiegel. Dieser Teil des Flusses ist großteils kanalisiert und mit Deichen für Hochwasserschutz versehen. Der Bodensee besteht aus zwei separaten Seen mit einer maximalen Tiefe von 253 m und stellt die Erosionsbasis für den alpinen Bereich des Rheins dar (vgl. Abb. 11.4). Entlang des alpinen Bereichs des Rheins verringert sich das Sohlgefälle von über 100 m/km bei den Quellen des Flusses auf 3 m/km bei Reichenau und 1 m/km flussabwärts der Ill-Mündung (Zarn, 2010a). Die Mündung des *Alpenrheins* in den *Bodensee* wird durch einen Kanal verlängert, der 4,8 km in den See hineinreicht (Zarn et al., 1995). Dieser Kanal (*Vorstreckung* genannt) wurde errichtet, um die Überschwemmungsgefahr durch Sedimentation in der gefällearmen Gegend nahe dem See zu verringern, und hat selbst ein Sohlgefälle von 0,3 m/km (IRR, 2014). Insgesamt beträgt die Länge des alpinen Bereichs, einschließlich der Seen, 230 km (nach KHR, 2015). Das Abflussregime des alpinen Bereichs wird von der Schneeschmelze dominiert, wodurch die maximalen Abflüsse im Frühling auftreten (Belz et al., 2007). Der *Alpenrhein*, *Vorderrhein*, *Hinterrhein* sowie viele in diese mündende Nebenflüsse sind seit den 1960er-Jahren durch Dämme reguliert. Der mittlere Abfluss am Ausfluss des *Bodensees* betrug zwischen 1991 und 2010 350 m³/s (Kapitel 4). Die Flussbreite schwankt zwischen 0 m (an der Quelle) und 300 m (in verzweigten Abschnitten); bei seinem Eintritt in den *Bodensee* beträgt sie etwa 40 m. Geologisch gesehen liegt der alpine Bereich des Rheins in den europäischen Alpen (vgl. Abb. 11.3),

einer Bergkette, die während der alpinen Gebirgsbildung (Kreidezeit-Eozän) aufgrund des Aufeinandertreffens der adriatischen Mikroplatte und der europäischen Platte entstand. Die dominanten Lithologien im alpinen Teil des Rheineinzugsgebiets sind kristallines Gestein, Kalkstein/Dolomitgestein sowie leicht erodierbare Schiefer (sogenannte Bündnerschiefer) (Zarn et al., 1995). Tektonisch gesehen ist das alpine Einzugsgebiet von einer anhaltenden Hebung geprägt, wobei die Hebungsraten von Süden nach Norden hin abnehmen und im Bereich des *Bodensees* null erreichen. Die Hebung führt in den oberen Bereichen des *Alpen-, Vorder- und Hinterrheins* zur fluvialen Einschneidung und lokal zur Ausbildung einer Felssohle. Weiter flussabwärts (*Alpenrhein*) hat der Fluss eine alluviale Sohle, die aus quartären Sedimenten besteht, welche sich flussabwärts verfeinern und deren mittlere Korngröße von 10/20 mm auf 2 mm sinkt (Zarn, 2001). Das Bett des *Bodensees* besteht aus Ton, Schluff und Sand aus dem Pleistozän und dem Holozän (Schreiner, 1979).

11.2.2 Der staugeregelte Bereich

Am Ausfluss des *Bodensees* bei Stein am Rhein (Rhein-km 24, 395 m ü. N. N.) beginnt der staugeregelte Bereich des Rheins (vgl. Abb. 11.2 – 11.4), der bis Basel *Hochrhein* und weiter stromab *Oberrhein* heißt. Einundzwanzig Staustufen, die zwischen 1860 und 1977 gebaut wurden (vgl. Tittizer & Krebs, 1996; Klose, 2003), dienen der Abflussregulierung und der Stromerzeugung aus Wasserkraft in diesem 310 km langen Bereich, der an der Staustufe Iffezheim endet (Rhein-km 334, 107 m ü. N. N.). Ab Basel (Rhein-km 169) ist der Rhein für die kommerzielle Schifffahrt nutzbar. In dieser Strecke stabilisieren Buhnen und Steinpackungen die Flussufer, während Deiche Hochwasserschutz bieten. Zwischen Rhein-km 174 und 224 verläuft der *Rheinseitenkanal (Grand Canal d'Alsace)* parallel zum ursprünglichen Rhein (der hier *Restrhein* heißt). Der *Rheinseitenkanal* führt bei Niedrig- und Mittelwasser den Großteil des Rheinwassers ab. Das mittlere Sohlgefälle des staugeregelten Bereichs und des frei fließenden *Restrheins* beträgt 1 m/km. Der hydraulische Gradient der Staustufen ist deutlich geringer. Entlang des staugeregelten Bereichs steigt der mittlere Abfluss des Rheins von etwa 350 m³/s (Pegel Konstanz, Rhein-km 0,0) auf 1.230 m³/s (Pegel Plittersdorf, Rhein-km 342,7, Zeitraum 1991–2010). Der Anstieg des Abflusses geht hauptsächlich auf den Zusammenfluss mit der Aare (Rhein-km 103) zurück, einem Nebenfluss, der, ebenso wie der Rhein selbst, ein von der Schneeschmelze dominiertes Abflussregime hat. Der höchste je verzeichnete Abfluss des *Hochrheins* betrug 5.090 m³/s am Pegel Basel im Jahr 1999. Die Flussbreite schwankt zwischen 85 m und 650 m (im *Restrhein*: 100 – 125 m). Geologisch gesehen durchquert der staugeregelte Bereich zuerst das Alpenvorland (vgl. Abb. 11.3). Durch die tektonische Hebung und die daraus folgende Einschneidung des Flusses sind entlang des *Hochrheins* lokal Sandstein, Mergel und Konglomerate (Molasse) aufgeschlossen. Diese Gesteine bilden an vielen Stellen die Sohle des Rheines. An Stellen, wo diese Gesteine von pleistozänen Gletschern erodiert wurden, besteht der Untergrund des Rheins aus undurchlässigen Moränensedimenten (Kies/Lehm) (Abegg et al., 2013). Kurz vor Basel fließt der Rhein durch Ablagerungen aus dem Jura und der Trias. In Basel tritt der Rhein in den südlichen Oberrheingraben ein, der zum europäischen Riftsystem gehört. Eine Senkung des Oberrheingraben im Quartär führte zu einer Akkumulation von Rheinsedimenten (hauptsächlich Sand und Kies), die stellenweise eine Dicke von über 300 m erreichen (Bartz, 1974). Im Bereich des Oberrheingraben hat der Rhein eine überwiegend alluviale Flusssohle mit ausgeprägter Deckschichtbildung. Detaillierte Informationen zu dieser Deckschicht sind vom *Restrhein* bekannt: Sie ist außergewöhnlich grob mit einer mittleren Korngröße von 23–92 mm und Steinen mit einer Größe von bis zu 220 mm (Dittrich, 2012). Im *Restrhein* nimmt die mittlere Korngröße auf einer Strecke von 50 km von 80 auf 40 mm ab (Dittrich, 2012). Ein ähnlicher Trend der Korngrößenabnahme wurde auch in anderen Teilen des staugeregelten Bereichs, beispielsweise im *Hochrhein*, beobachtet (Schälchli et al., 2000; Abegg et al., 2013). In den Staustufen des *Oberrheins* kommt es vor allem oberstrom der Wehre zu erheblichen Ablagerungen von Ton und Schluff (überwiegend mit Sandgehalten < 20 %), welche die ursprüngliche Sohloberfläche bedecken.

11.2.3 Der frei fließende Bereich

Zwischen dem Staudamm bei Iffezheim (Rhein-km 334, 107 m ü. N. N.) und dem Ort Lobith (Rhein-km 857,5, 3 m ü. N. N.) an der deutsch-niederländischen Grenze ist der Rhein ein frei fließender, kanalisierter und eingedeichter Fluss (Abb. 11.2 – 11.4). Der frei fließende Bereich durchquert drei geologische Einheiten: (1) den nördlichen Oberrheingraben, (2) das Rheinische Schiefergebirge, ein Gebirge des variskischen oder herzynischen Zeitalters, das sich während der Gebirgsbildung der Alpen erneut erhob, und (3) die Niederrheinische Bucht, die Teil des europäischen Riftsystems ist. Am Übergang zwischen diesen geologischen Einheiten wechselt der Rhein seine Bezeichnung von *Oberrhein* zu *Mittelrhein* und dann zu *Niederrhein*. Der nördliche Oberrheingraben ist von einer Senkung (ca. 0,2 mm/a) geprägt und hat eine alluviale Flusssohle. Charakteristisch sind das flussabwärts abnehmende Gefälle (von ca. 0,40 auf 0,10 m/km) und die zunehmende Breite (von ca. 150 auf 300 m), als Folge der tektonischen Hebung des Rheinischen Schiefergebirges und dessen Einfluss auf die Erosionsbasis der oberstromigen Rheinstrecken (Frings et al., 2014b). Die geometrische gemittelte Korngröße der Sedimente der Sohlfläche sinkt flussabwärts von 17 auf ca. 2 mm (Frings et al., 2014a, 2014b). Im Mainzer Becken (Rhein-km 486–531), dem Übergang zwischen Oberrheingraben und Rheinischem Schiefergebirge, fließt der Rhein parallel zum Rheinischen Schiefergebirge, bis er bei Bingen in das Gebirge eintritt. Im Mainzer Becken besteht die Sohle des Rheins aus einer dünnen Schicht quartärer alluvialer Ablagerungen (< 4 m) über tertiären Sedimenten (hauptsächlich Ton) (Dröge et al., 1985). Charakteristisch sind der geringe hydraulische Gradient (~ 0,09 m/km), die große Breite des Flussbetts (~ 450 m) und das Vorliegen mehrerer, durch Inseln getrennter Flussarme. Das Rheinische Schiefergebirge ist ein tektonisch gehobenes Gebiet (Zippel, 1988), in das der Rhein eine enge (550 – 1.650 m breite) Schlucht in den devonischen Schiefer geschnitten hat, wodurch eine terrassenförmige Landschaft entstand (Schirmer, 1990; Semmel, 1996; Meyer & Stets, 2002). Die höchste Terrasse liegt ca. 300 m über dem heutigen Fluss. Die Flusssohle besteht hier überwiegend aus Schiefer und Quarzit des Unterdevons, teilweise bedeckt von dünnen Schichten quartärer alluvialer Ablagerungen (Sand und Kies) mit einer mittleren Größe von ca. 17 mm (Frings et al., 2014b). Charakteristisch sind das steile Gefälle (0,26 m/km), die geringen Breiten (~ 300 m) und scharfe Mäander im Festgestein (Frings et al., 2014b). Die Niederrheinische Bucht (vgl. Abb. 11.3), welche sich nördlich des rheinischen Schiefergebirges anschließt, senkte sich im Tertiär und im Großteil des Quartärs stark ab. Heute dominiert eine geringfügige Hebung. Die Flussstrecke um Duisburg (Rhein-km 791,5 – 809) war in dem hier betrachteten Zeitraum (1991 bis 2010) jedoch durch eine durch den Bergbau verursachte Senkung gekennzeichnet (Rommel, 2005; Wenka, 2009). Die Flusssohle in der Niederrheinischen Bucht besteht aus einer quartären Sand-Kies-Mischung, die lokal eine Dicke von über 100 m erreicht (Rothe, 2006). Im mittleren und nördlichen Teil der Niederrheinischen Bucht fehlt die Quartär-Decke lokal, wodurch tertiäre Ablagerungen darunter freigelegt werden (z. B. Gölz, 1992). Diese bestehen aus feinem Meeressand mit unterschiedlichem Ton- und Schluffgehalt. Lokal treten Schichten aus Sandstein, Ton und Torf auf. In der Niederrheinischen Bucht ist der Rhein von einem abnehmenden Sohlgefälle von ca. 0,20 auf 0,11 m/km (vgl. Abb. 11.4) zum Rheindelta hin geprägt (Frings et al., 2014a). Der geometrische Mittelwert der Sohlkorngröße nimmt ebenfalls ab, von ca. 16 mm bei Rhein-km 640 auf ca. 10 mm bei Rhein-km 820 und auf 2 – 3 mm bei Rhein-km 857,5 (Frings et al., 2014a). Die starke Verfeinerung des Sohlmaterials zwischen Rhein-km 820 und 857,5 repräsentiert den Beginn der Kies-Sand-Übergangszone des Rheins an der Grenze des Deltas (Frings, 2011). In dieser Zone nimmt der Kiesgehalt nach unterstrom rapide ab, während der Sandgehalt von weniger als 25 % auf über 50 % steigt (Frings, 2011; Frings et al., 2014a). Der mittlere Abfluss am Ende des frei fließenden Bereichs nahe der deutsch-niederländischen Grenze am Pegel von Rees (Rhein-km 837) betrug zwischen 1991 und 2010 2.310 m³/s, während der höchste je gemessene Abfluss 12.200 m³/s beträgt und im Jahr 1926 gemessen wurde (DGJ, 1926). Die wichtigsten Nebenflüsse entlang des frei fließenden *Oberrheins* und *Mittelheins*, die jeweils mehr als 100 m³/s zum Anstieg des Rhein-

Abflusses im frei fließenden Bereich beitragen, sind die staugeregelten Flüsse Neckar, Main und Mosel. Aufgrund der Zuflüsse der Nebenflüsse verwandelt sich das ursprünglich von der Schneeschmelze dominierte Abflussregime des *Oberrhein* in ein gemischtes, von Regen und Schneeschmelze dominiertes Regime im *Niederrhein* (Görgen et al., 2010). Hierdurch kommt es zu einer Verschiebung des maximalen Abflusses vom Frühling in den Winter (Belz et al., 2007).

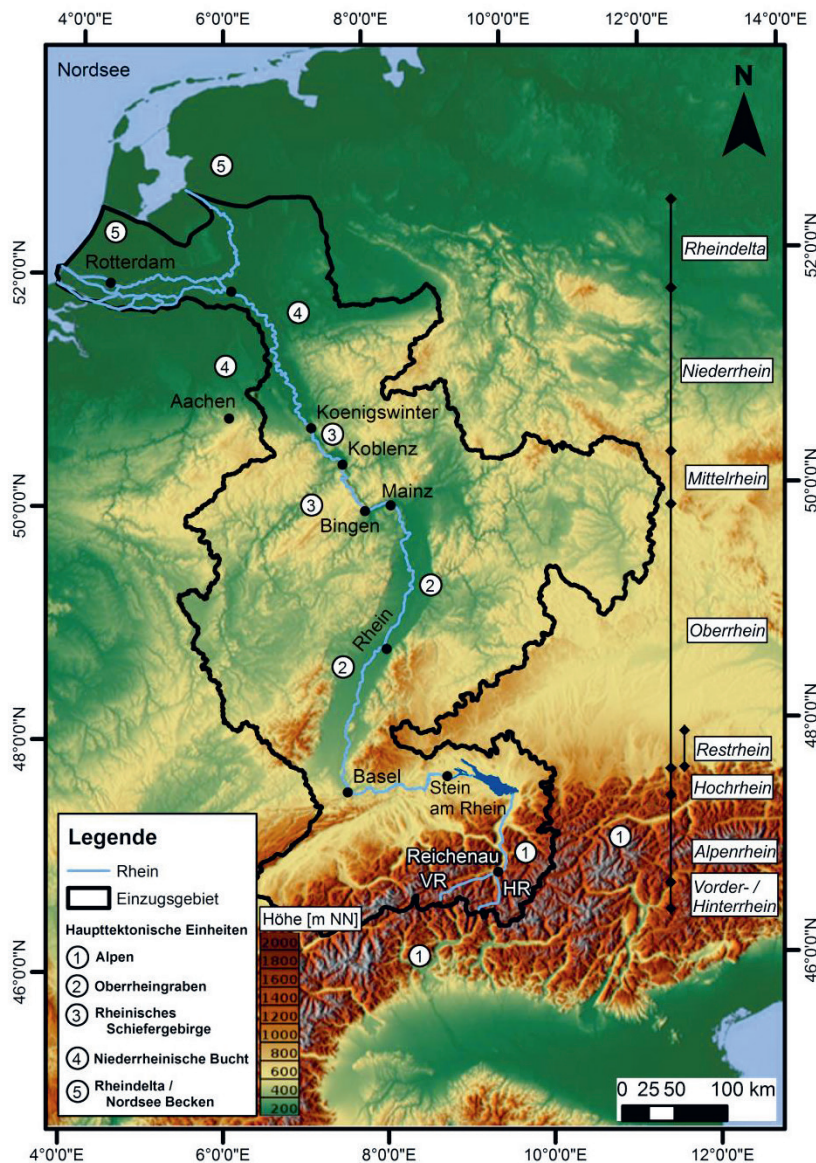


Abb. 11.3: Relief und tektonische Einheiten des Rheineinzugsgebiets.

11.2.4 Der Delta-Bereich

Bei den Dörfern Lobith und Spijk an der deutsch-niederländischen Grenze (Rhein-km 857,5, 3 m ü. N. N.) beginnt der Delta-Bereich (vgl. Abb. 11.2 – 11.4). Der Delta-Bereich ist aufgrund der Nähe zur Erosionsbasis *Nordsee* von einem flussabwärts abnehmenden Gefälle (von ca. 0,11 auf 0,0 m/km) geprägt (Frings, 2011). An der Verzweigung Pannerdense Kop (Rhein-km 867,5) spaltet sich der Rhein (der dort *Bovenrijn* genannt wird) in die nach Westen fließende *Waal* und den nach Norden fließenden *Pannerdensch Kanaal* (vgl. Abb. 11.2). Wenige Kilometer flussabwärts, an der Verzweigung IJsselkop (Rhein-km 878,5) teilt sich der *Pannerdensch Kanaal* in den nach Westen fließenden *Nederrijn/Lek*, der von drei Wehranlagen reguliert wird, und die nach Norden fließende

IJssel. Die *Waal* ist der größte Mündungsarm und führte zwischen 1991 und 2010 71 % des gesamten Rhein-Abflusses. Der *Nederrijn/Lek* und die *IJssel* führten 14 % bzw. 15 % des Abflusses (Kapitel 9, Anlage C). Die *IJssel* führt ihren Teil des Rheinwassers bei der Stadt Kampen (Rhein-km 1.005, ~ 0 m ü. N. N.) ins *IJsselmeer* ab, das früher ein Meer war und 1932 in einen großen Süßwassersee umgewandelt wurde. Die *Waal* und der *Nederrijn/Lek* befördern ihre Teile des Rheinwassers in das untere Rheindelta, einen Mündungsbereich mit vielen verbundenen Mündungsarmen, die teilweise natürlichen und teilweise anthropogenen Ursprungs sind. Hier fließen zwei Nebenflüsse (*Maas*, ca. 300 m³/s und *Hollandse IJssel*) in den Rhein. Drei Mündungsarme sind direkt mit der *Nordsee* verbunden: der *Nieuwe Waterweg* (bei Rhein-km 1.033), der *Hartelkanaal* und der *Haringvliet* (bei Rhein-km 1.029). *Nieuwe Waterweg* und *Hartelkanaal* befinden sich im Hafen Rotterdam. Während die Mündungsarme *Nieuwe Waterweg* und *Hartelkanaal* eine offene Verbindung zur *Nordsee* haben und 70 % des gesamten Abflusses befördern, wird der *Haringvliet* von Schleusen reguliert und befördert 30 % des gesamten Abflusses in die *Nordsee*. Durch Gezeitenwirkung ändert sich viermal täglich die Fließrichtung. Auch der Wind beeinflusst die Hydrodynamik in diesem Teil des Rheins maßgeblich. Das Rheindelta befindet sich im östlichen Teil des *Nordseebeckens*, eines Senkungsgebietes tertiären Ursprungs, in dem während des Quartärs über 1.000 m Sediment abgelagert wurden. Die Mächtigkeit der holozänen Ablagerungen steigt vom östlichen zum westlichsten Teil des Deltas von 1,5 auf über 20 m (Berendsen & Stouthamer, 2000). Die Mündungsarme sind fast ausschließlich alluvial und fließen durch Flussbettablagerungen (Sand, Schluff) sowie Auenablagerungen (Ton, Torf) des Rheins und der *Maas* unterschiedlicher Erodibilität (z. B. Huismans et al., 2013). Lokal durchschneiden die Mündungsarme äolischen Sand, Meeressand, Meereston und Gletschermoränen (Berendsen & Stouthamer, 2000). Aufschlüsse von Grundgestein treten nicht auf.

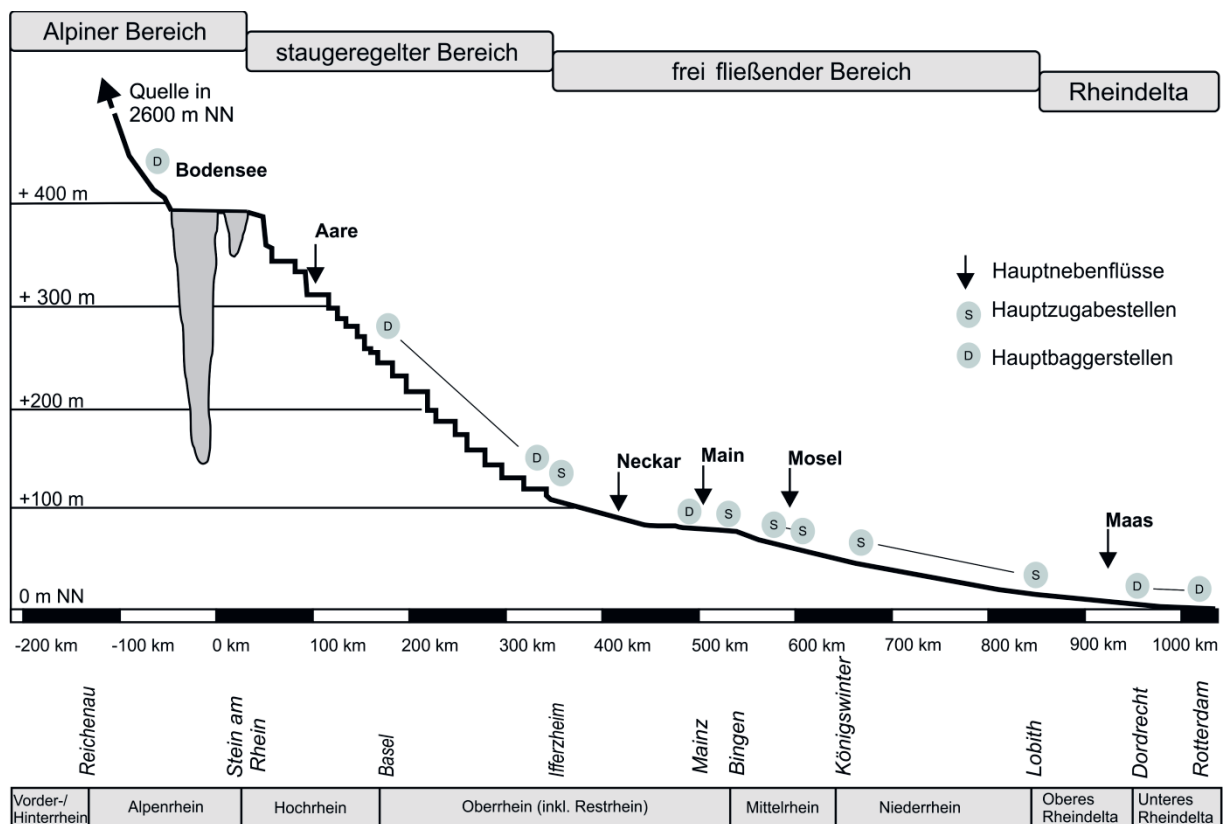


Abb. 11.4 Längsprofil des Rheins.

Die Mündungsarme im oberen Teil des Deltas (*Bovenrijn*, *Pannerdensch Kanaal*, *Waal*, *Nederrijn/Lek* und *IJssel*) weisen Sohlsedimente aus Sand und Kies auf, die einen eindeutigen Trend zur Verfeinerung nach unterstrom aufweisen. Beispielsweise entlang der *Waal* sinkt die mediane Korngröße der Sohle von 1,6 auf 0,8 mm (vgl. Frings, 2011), während der Kiesgehalt von 48 % (Gruijters et al., 2001, 2005) auf 4 % (Datensatz Frings & Kleinhaus, 2008) abnimmt. Die Sohle des Ketelmeers (der Bereich des *IJsselmeers*, in das sich die *IJssel* ergießt) besteht aus Schluff und Ton. Die Mündungsarme im unteren Teil des Deltas haben Sohlsedimente bestehend aus Sand, Schluff und Ton, wobei der Sandgehalt im Allgemeinen über 50 % liegt. Schluff- und Tongehalte dominieren dagegen im durch geringe Fließgeschwindigkeiten gekennzeichneten südlichen Teil des Deltas (*Haringvliet*, *Hollands Diep*, *Amer*) sowie in den vielen Häfen des unteren Deltas (Fugro, 2002). Die Flussbreite beträgt am Beginn des Deltas (*Bovenrijn*) durchschnittlich 340 m und erhöht sich flussabwärts von 270 auf 350 m in der *Waal*, von 125 auf 140 m im *Pannerdens Kanaal*, von 100 auf 190 m im *Nederrijn/Lek* und von 75 auf 170 m in der *IJssel*. Der *Nieuwe Waterweg* und der *Haringvliet* weisen Breiten von 350 – 1.350 bzw. 2.000 – 4.500 m auf.

Tab. 11.1: Die analysierten Sedimentflüsse

ID	Transportmodus	Sedimenttyp	Korngröße D [mm]
1	Suspensionsfracht	Ton/ Schluff	0,006 – 0,063
2	Suspensionsfracht/ Geschiebefracht	Sand	0,063 – 2
3	Geschiebefracht	Feinkies	2 – 16
4	Geschiebefracht	Grobkies, Steine	16 – ca. 125

Tab. 11.2: Regionale Unterteilung des Rheins für die Bilanzierung

ID	Bilanzregion	Flussabschnitt	Rhein-km
1	Alpiner Bereich	<i>Alpenrhein</i>	-206 bis -39
2	Alpiner Bereich	<i>Bodensee</i>	-39 bis 24
3	Staugeregelter Bereich	<i>Hochrhein-Oberrhein</i>	24 bis 334
4	Staugeregelter Bereich	<i>Restrhein</i>	174 bis 224
5	Frei fließender Bereich	<i>Oberrhein, Mittelrhein</i>	334 bis 640
6	Frei fließender Bereich	<i>Niederrhein</i>	640 bis 858
7	Delta-Bereich	<i>Oberes Delta</i>	858 bis 951*
8	Delta-Bereich	<i>Unteres Delta</i>	951* bis 1033

* Das Untere Rheindelta endet bei km 951, 969 oder 1005 für die Mündungsarme *Waal*, *Nederrijn/Lek* und *IJssel*

11.3 Methoden: Sedimentbilanzierung

Eine Sedimentbilanz beschreibt die Massenbilanz ($I - O = \Delta S$) zwischen Sedimenteintrag (I), Sedimentaustrag (O) und Sedimentspeicherung (ΔS) eines bestimmten Gebiets innerhalb eines definierten Zeitraums. Sedimentbilanzen erlauben, die Sedimentflüsse sowie die Quellen und Senken der betreffenden Sedimente zu identifizieren und quantifizieren (z. B. Reid & Dunne, 1996). Zur Erstellung der Sedimentbilanz des Rheines wurden Daten aus bereits bestehenden Studien verwendet, um eine zusammenhängende morphologische Sicht auf das Rheineinzugsgebiet zu erhalten. In dieser Studie ist der Flusslauf des Hauptgerinnes des Rheins das zu bilanzierende Gebiet. Die Sedimentbilanzgleichung ist in Abb. 11.1 graphisch dargestellt und lautet:

$$(I_{up} + I_{tr} + I_{se} + I_{di} + I_{ar} + I_{ab} + I_{do}) - (O_{do} + O_{se} + O_{dr} + O_{gr} + O_{fl} + O_{po} + O_{ab}) = \Delta S \quad (11.1)$$

mit I_{up} , dem Sedimenteintrag von oberstrom, I_{tr} , dem Sedimenteintrag aus Nebenflüssen, I_{se} , dem Sedimenteintrag aus Nebenarmen, I_{di} , dem Sedimenteintrag aus diffusen Quellen (zum Beispiel Ufererosion), I_{ar} , dem Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe, I_{ab} , dem Sedimenteintrag durch Abrieb von größeren Kornfraktionen (nur für die Fraktion Ton/Schluff), I_{do} , dem Sedimenteintrag von unterstrom, O_{do} , dem Sedimentausttrag nach unterstrom, O_{se} , dem Sedimentausttrag in Nebenarme, O_{dr} , dem Sedimentausttrag durch Baggerungen, O_{gr} , dem Sedimentausttrag in Bühnenfelder, O_{fl} , dem Sedimentausttrag auf Überflutungsflächen, O_{po} , dem Sedimentausttrag in Häfen, O_{ab} , dem Sedimentausttrag durch Abrieb (nur für die Fraktionen Kies und Steine), und ΔS , die Veränderung des Sedimentspeichers durch Sohlhöhenänderung, wobei alle Bilanzterme in der Einheit Mt/a (1 Mt/a = 31,69 kg/s) ausgedrückt werden. Implizit wird in Gleichung 11.1 angenommen, dass tektonische Sohlhöhenänderungen vernachlässigbar sind. Diese Annahme wird im Bergsenkungsgebiet bei Duisburg verletzt (siehe Kapitel 11.3). Da die Senkungseffekte jedoch lokal begrenzt sind und die Senkungstrichter ständig mit Waschbergematerial gefüllt werden, wurde entschieden, sowohl die Senkung als auch die Füllung außer Acht zu lassen.

In dieser Studie präsentieren wir die 15 Bilanzterme der Gleichung 11.1 für vier verschiedene Korngrößenfraktionen (Tab. 11.1) und acht Teilgebiete des Rheineinzugsgebiets (Tab. 11.2). Insgesamt wurden also 480 verschiedene Bilanzterme bestimmt. Unter Verwendung der von Parsons et al. (2011) aufgestellten Empfehlungen wurden für alle Bilanzterme durchschnittliche Jahreswerte (einschließlich Unsicherheiten) für den Zeitraum zwischen 1991 und 2010 berechnet. Die Wahl eines 20-jährigen Bilanzierungszeitraumes erleichtert die Datenintegration des Rheineinzugsgebietes und ermöglicht die Ermittlung der durchschnittlichen morphodynamischen Trends. Es ist jedoch zu beachten, dass die Sedimentflüsse periodisches Verhalten auf allen Zeitskalen zeigen (Frostick & Jones, 2015). Unser Ansatz erlaubt weder die Identifikation von kurzfristigen morphologischen Prozessen (z. B. während Hochwasserereignissen), noch von langfristigen morphologischen Prozessen (z. B. Klimawandel). Zur Identifikation dieser Prozesse sollten Sedimentbilanzen mit entsprechend kürzeren oder längeren Bilanzperioden gewählt werden (z. B. Frings & Kleinhaus, 2008).

Um jede der 480 Bilanzgrößen zu quantifizieren, wurden zunächst die dominanten morphologischen Prozesse in jedem Flussabschnitt identifiziert (Anhang D.1). Bei vielen Flussabschnitten können mehrere Bilanzgrößen aus Gleichung 11.1 vernachlässigt werden. Ein Beispiel hierfür ist I_{do} , der Sedimenteintrag von unterstrom, der in allen Flussabschnitten außer dem unteren Delta, wo Tideeinfluss herrscht, gleich null ist. Eine detaillierte Spezifikation der Bilanzgrößen, die vernachlässigt wurden, findet sich in Anhang D.1. Auf diese Weise wurde die Anzahl der Bilanzterme um 50 % auf 227 reduziert. Optimal wäre es, wenn unabhängige Daten für die Quantifizierung aller verbleibenden Terme zur Verfügung stünden. Dadurch wäre das Gleichungssystem überbestimmt, was eine Kreuzvalidierung der Ergebnisse ermöglichen würde. Obwohl der Rhein ein intensiv gemonitortes Flusssystem ist, waren dennoch nicht genügend Informationen verfügbar, um jeden der verbleibenden Terme zu quantifizieren. Um dieses Problem zu lösen, wurden ergänzende Teilstudien durchgeführt, die auf die Genauigkeit von Geschiebemessungen (Banhold et al., 2014a), die Sedimentation in Überflutungsbereichen (Banhold et al., 2014b), den Sedimenteintrag der Nebenflüsse und die Korngrößenverteilung der Schwebfracht (Astor et al., 2014) fokussierten (s. Kapitel 3 für Zusammenfassungen dieser Studien). Hierdurch wurde die Anzahl der Unbekannten pro Flussabschnitt auf einen Schließungsterm pro Gleichung reduziert. Eine Liste der Schließungsterme sowie Details zu den Methoden für die Quantifizierung der verbleibenden Größen sind in Anhang D.1 zu finden. Unsere Methode stimmt größtenteils mit der Bilanzierungsmethode von Frings et al. (2014a, 2014b) überein.

11.4 Sedimentfrachten: von der Quelle bis zur Mündung

In den folgenden Abschnitten (11.4, 11.5 und 11.6) präsentieren wir aggregierte Ergebnisse für drei Korngrößenfraktionen: (A) Kies und Steine, (B) Sand, (C) Schluff und Ton, für vier Flussabschnitte: (I) den alpinen Bereich, (II) den staugeregelten Bereich, (III) den frei fließenden Bereich und (IV) den Delta-Bereich.

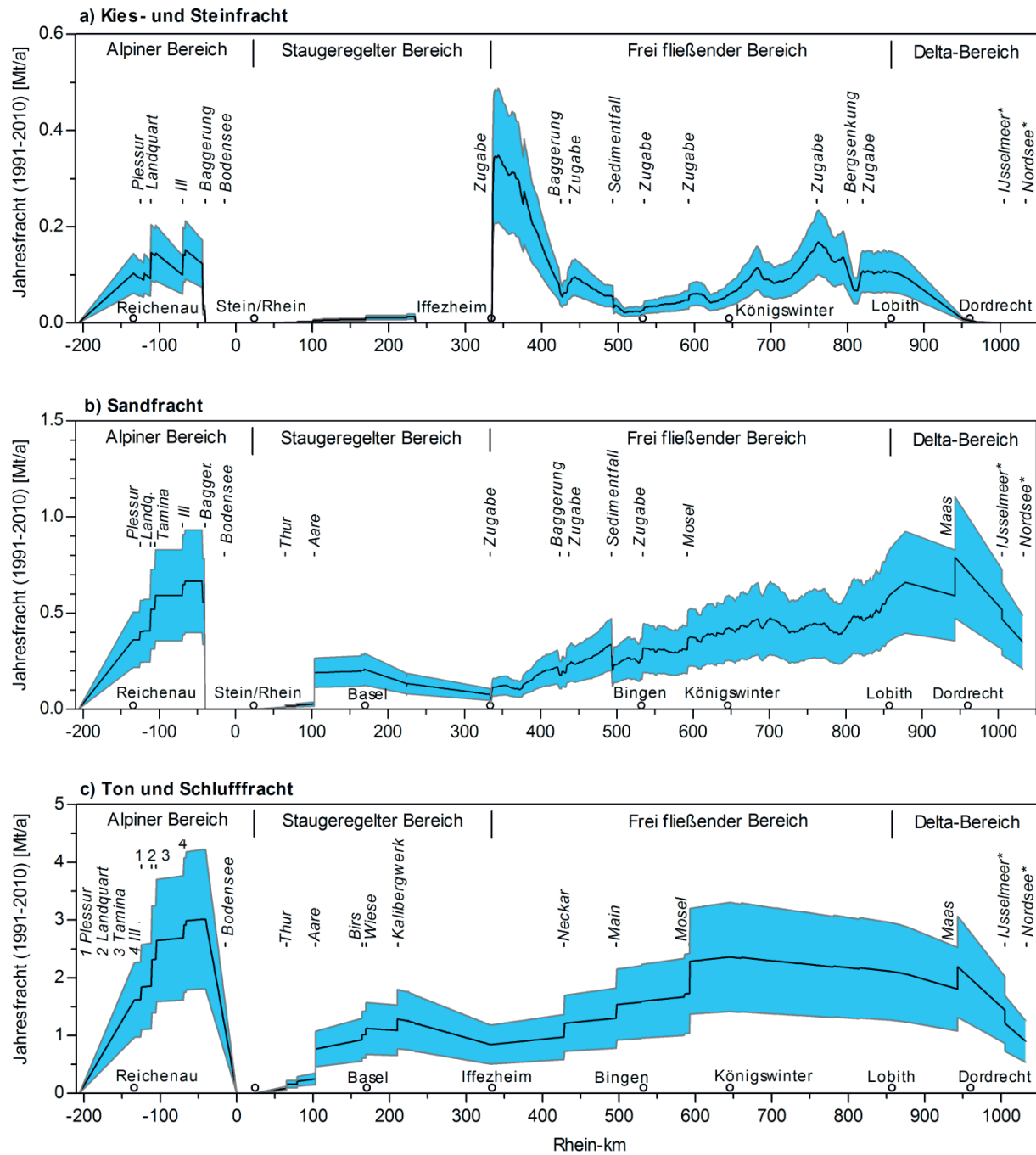


Abb. 11.5 Sedimentfrachten des Rheins von der Quelle bis zur Mündung. Dargestellt sind mittlere Jahresfrachten mit 40 % Unsicherheitsband aus dem Zeitraum 1991 – 2010. a) Kies- und Steinfrachten (2 – 125 mm), b) Sand-Frachten (0,063 – 2 mm), c) Ton- und Schlufffrachten (< 0,063 mm), d) Gesamtfrachten. * (Abb. a – c) Ein Teil der Sedimentfracht fließt in das Jusselmeer, der Rest in die Nordsee. * (Abb. d): Beitrag des Rest Rheins.

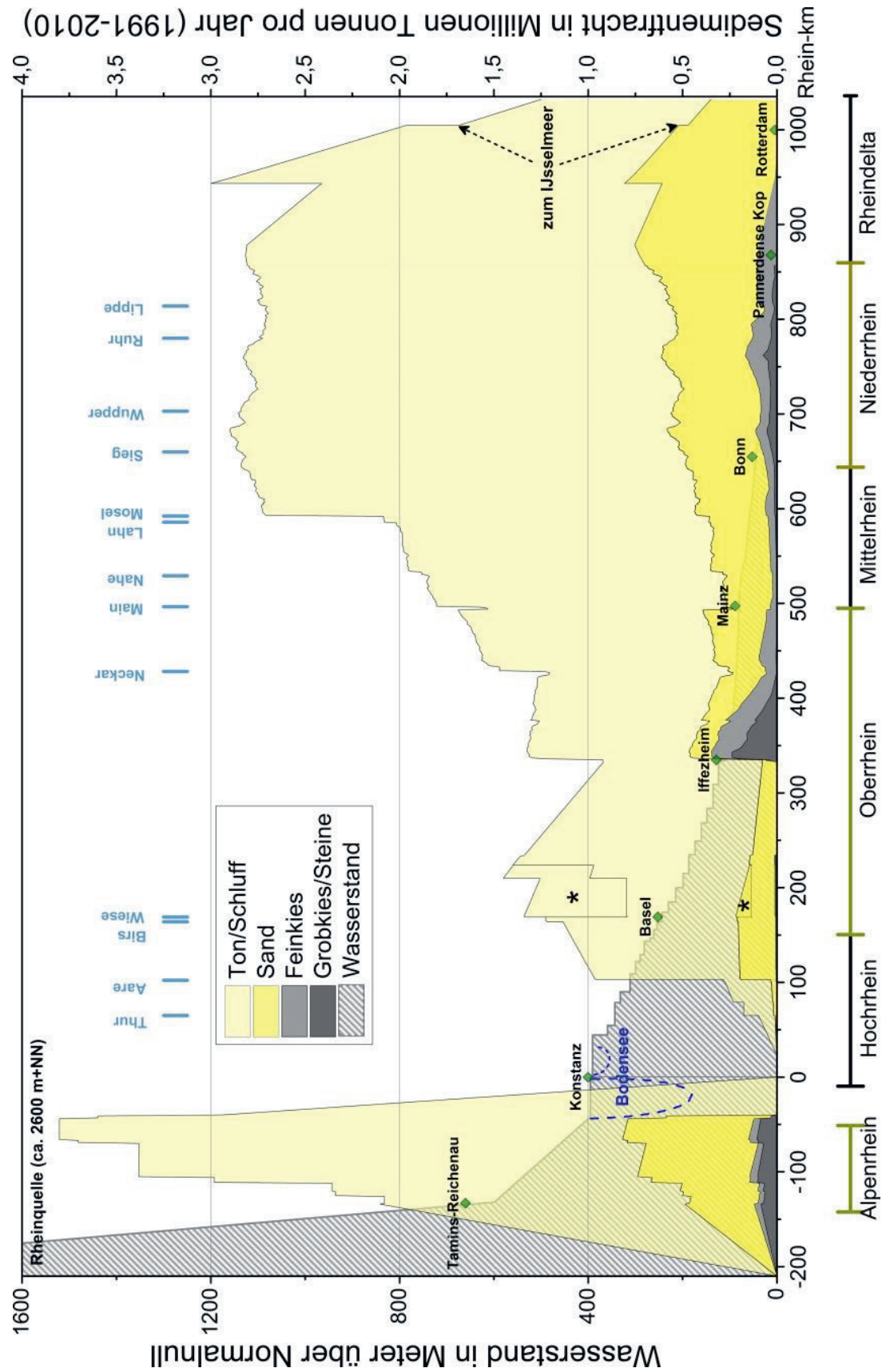


Abb. 11.5d Fortsetzung

Unsere Ergebnisse bestehen aus drei Schlüsselementen: Frachtlängsschnitte, welche die Veränderungen der Sedimentflüsse flussabwärts von der Quelle zur Mündung zeigen (Abb. 11.5 und 11.6), Sedimentbilanzen, welche die Quellen und Senken von Sedimenten sowie die Veränderungen im Sedimentspeicher für jeden Flussabschnitt zeigen (Abb. 11.7 und 11.8) und einem Überblick über alle Bilanzterme, einschließlich deren Unsicherheiten (Tab. 11.3). Detaillierte Sedimentbilanzen für alle vier Sedimentfraktionen (Tabelle 11.1) und alle acht Flussabschnitte (Tabelle 11.2) sind in den Kapiteln 4 bis 10 zu finden.

11.4.1 Kies und Steine

Durch Massenbewegungen, Gletscher und Hangerosion gelangen riesige Mengen an Kies und Steinen in die Quellbäche des Rheins. Teile dieser Sedimente werden durch Erosionsschutzstrukturen zurückgehalten oder dem Flusssystem durch Baggerungen entnommen. Der Rest, ca. 0,121 Mt/a Kies und Steine, wird vom *Vorder-* und *Hinterrhein* dem *Alpenrhein* zugeführt. Entlang des *Alpenrheins* geht ein Teil des Kieses und der Steine durch Abrieb und Baggerungen verloren, jedoch wird der Kies/Stein-Verlust durch die Zufuhr aus den Nebenflüssen Plessur, Landquart und Ill mehr als ausgeglichen. Dadurch steigt die Kies/Stein-Fracht entlang des *Alpenrheins* und erreicht an der Ill-Mündung (Rhein-km 66) ein Maximum von 0,152 Mt/a. Nahe dem *Bodensee*, wo sich der Fluss seiner Erosionsbasis nähert, werden Kies/Steine immobil und folglich sinken ihre Frachten abrupt auf null. Kies/Stein-Ablagerungen werden hier durch Baggerungen entfernt, um die Sohlhöhe nahezu konstant zu halten. Die Kies/Stein-Zufuhr in den *Bodensee* ist fast null. Am Ende des *Bodensees*, wo der alpine Bereich des Rheins endet und der staugeregelte Bereich beginnt, beträgt die Kies/Stein-Zufuhr von oberstrom null. Entlang des staugeregelten Bereichs führen Nebenflüsse lediglich geringe Mengen an Kies und Steinen zu, die teilweise durch Baggerungen entfernt werden und teilweise von Staustufen zurückgehalten werden. Kies/Stein-Frachten entlang des staugeregelten Bereichs sind diskontinuierlich und, verglichen mit den Kies/Stein-Frachten im alpinen Bereich, vernachlässigbar gering. Von besonderem Interesse ist der *Restrhein*, der längste frei fließende Bereich innerhalb des staugeregelten Bereichs. Der *Restrhein* erhält keine merklichen Mengen an Kies/Steinen von flussaufwärts und während des Untersuchungszeitraums wurde lediglich eine geringe Menge Sediment für ein ökologisches Experiment zugegeben. Extreme Hochwässer mobilisieren die Deckschicht der Sohle des *Restrheins* und führen so zur Erosion von Kies und Steinen im oberen Teil des *Restrheins*. Die meisten dieser Sedimente werden im unteren Teil des *Restrheins* wieder abgelagert. Einige werden über das Kulturwehr bei Breisach zurück in den *Oberrhein* transportiert, was auch Beobachtungen von geringeren Kiesablagerungen flussabwärts des Wehrs bekräftigen (pers. Komm. Hahnel, WSA Freiburg). Die Stauhaltungen von Gamsheim und Iffezheim verhindern den Durchtransport von Kies und Steinen aus dem staugeregelten Bereich in den frei fließenden Bereich des Rheins. Stattdessen werden flussabwärts der Staustufe Iffezheim 0,407 Mt/a Steine, Kies und Sand verklappt, um eine Sohlerosion zu verhindern. Dadurch steigen die Kies- und Steinfrachten abrupt an und erreichen mit 0,355 Mt/a ihr höchstes Niveau entlang des gesamten Rheins. Über die nächsten 80 km ist ein langsamer Rückgang der Kies/Stein-Frachten zu beobachten. Ein kleiner Teil des Rückgangs wird durch Abrieb und wahrscheinlich durch die Speicherung von Kies und Steinen in Bühnenfeldern verursacht. Der Hauptgrund für den Rückgang ist aber das geringer werdende Gefälle des nördlichen *Oberrheins*, was die Transportkapazität reduziert und die Sedimentation der Kies/Stein-Fraktion auf der Flusssohle zur Folge hat. Teile der Kies/Stein-Ablagerungen werden durch Baggerungen entfernt, ein großer Teil bleibt jedoch zurück, wodurch die Flusssohle sich mit der Zeit vergrößert. Auf ihrem Weg durch das Rheinische Schiefergebirge und die Niederrheinische Bucht nehmen die Kies-/Stein-Frachten erst bis auf 0,168 Mt/a bei Rhein-km 760 zu, zeigen dann ein Minimum im Bergsenkungsgebiet (siehe Frings et al., 2014a für weitere Details), und nehmen dann stetig ab bis im Rheindelta keine Kies/Stein-Fraktion mehr transportiert wird. Der Kies/Stein-Eintrag durch Sedimentzugaben wird durch Abrieb, Ablagerungen in Bühnenfeldern und besonders durch die Sedimentation von grobem Kies und Steinen auf der Flusssohle ausgeglichen. Diese Sedimentation

findet hauptsächlich im unterstromigen Teil des frei fließenden Bereichs statt, wo das Sohlgefälle geringer wird, je näher der Fluss zur Erosionsbasis *Nordsee* kommt. Diese Zone ist als Kies-Sand-Übergangszone bekannt und markiert den Übergang von einer von Kies zu Sand dominierten Flusssohle (z. B. Frings, 2011). Es gibt keinerlei Anzeichen dafür, dass Nebenflüsse oder Netto-Sedimententnahmen (d. h. Baggerungen ohne nachträgliche Verklappung von ausgebaggertem Material) hier eine signifikante Rolle spielen. Nur 0,106 Mt/a an Kies verlassen den frei fließenden Bereich des Rheins und treten in den Delta-Bereich ein. Im oberen Delta sinken die Kiesflüsse aufgrund des Erosionsbasis-Einflusses der *Nordsee* langsam auf null. Teile der Ablagerungen werden durch Baggerungen entfernt, andere Teile bleiben zurück, wodurch die Flusssohle sich mit der Zeit vergrößert. Kein Kies tritt in die *Nordsee* ein.

11.4.2 Sand

Entlang des alpinen Bereichs des Rheins zeigen die Sand-Frachten ähnliche Trends wie die Kies/Stein-Frachten. Im ersten Teil des alpinen Bereichs findet ein schneller Anstieg von Sand-Frachten nach unterstrom statt, verursacht durch Sedimenteinträge aus dem *Vorder- und Hinterrhein*, Plessur, Landquart, Tamina, Ill und kleineren Nebenflüssen. Die höchste Fracht tritt nach Zusammenfluss mit der Ill auf und beträgt durchschnittlich 0,666 Mt/a. Dieser Wert ist vier mal so hoch wie die Kies/Stein-Fracht an gleicher Stelle und etwa genauso hoch wie die Sand-Fracht im Rheindelta, obwohl der mittlere jährliche Wasserabfluss des alpinen Bereichs des Rheins nur 15 % von jenem im Rheindelta beträgt. Unterhalb des Ill-Zuflusses nehmen die Sand-Frachten bis zum *Bodensee* hin ab, da das Sohlgefälle geringer wird, je weiter sich der Fluss der Erosionsbasis *Bodensee* nähert. Verglichen mit der Kies/Stein-Fracht wird vor dem *Bodensee* nur ein geringer Teil der Sand-Fracht auf der Rheinsohle abgelagert (und anschließend durch Baggerungen entfernt). Der Großteil des Sandes wird schwebend in den *Bodensee* befördert, wo er abgelagert wird. Von allen Flüssen, die in den *Bodensee* münden, befördert der Rhein die höchste Sand-Fracht. Der *Bodensee* stellt eine vollständige Falle für Sedimente dar, die vom Rhein und von anderen Flüssen zugeführt werden. Daher unterliegt der Seegrund einer ständigen Sedimentation. Wie bei der Kies/Stein-Fraktion tritt auch Sand nicht von oberstrom in den staugeregelten Rhein ein. Die Nebenflüsse sind ebenfalls durch Staudämme reguliert und führen daher nur eine begrenzte Menge an Sand zu. Teile dieses Sandes lagern sich auf der Rheinsohle nahe den Zusammenflüssen ab, wo sie durch Baggerungen entfernt werden. Der größte Anteil des von den Nebenflüssen zugeführten Sandes bewegt sich aber in Suspension fort und kann auf diese Weise die Wehre passieren. Im Gegensatz zur Kies/Stein-Fraktion wird Sand zumindest zeitweise entlang des gesamten staugeregelten Bereichs transportiert. Nichtsdestotrotz geht ein Großteil der Sand-Fracht auf ihrem Weg durch den staugeregelten Bereich verloren. Etwa 0,086 Mt/a gehen an Bühnenfelder, Überflutungsbereiche und die Flusssohle des Restrheins verloren, der eine Falle für Sand darstellt, der von flussaufwärts zugeführt wird. Weitere 0,045 Mt/a werden durch Baggerungen aus dem staugeregelten Oberrhein-System entfernt. Aus den Stauhaltungen können 0,077 Mt/a Sand entweichen, die bei Iffezheim in den frei fließenden Bereich des Rheins eintreten. Der Sand, der von oberstrom in den frei fließenden Bereich des Rheins eintritt, vermischt sich mit dem Sand, der bei Iffezheim im Rahmen der Sedimentzugabe zugeführt wird. Da der Anteil an Sand bei der Gesamtzugabe relativ gering ist (12 %), ist die Zunahme der Sand-Frachten verglichen mit der Zunahme der Kies/Stein-Frachten gering. Das unterschiedliche Verhalten der Sand- und Kies/Stein-Fractionen wird im verbleibenden Teil des frei fließenden Bereichs sogar noch ausgeprägter. Im Gegensatz zu den Kies/Stein-Frachten, die entweder stabil bleiben oder zu den Erosionsbasen des Rheinischen Schiefergebirges und der Nordsee hin abnehmen, nehmen die Sand-Frachten weiterhin gleichmäßig zu. Der Eintrag durch die Nebenflüsse (z. B. Neckar und Mosel) ist nur für einen kleinen Teil dieser Zunahme verantwortlich. Der meiste Sand stammt aus der Erosion der Flusssohle, was bemerkenswert ist, da dieselben Flussabschnitte Sedimentation von Kies und Steinen ausgesetzt sind. Tatsächlich findet entlang dieses Flussabschnitts ein Austausch zwischen Sand und Kies/Steinen statt, wodurch sich die Sohle mit der

Zeit vergrößert. Der Anstieg der Sand-Fracht nach unterstrom wird teilweise durch die Ablagerung in Überflutungsbereichen kompensiert. Wahrscheinlich wird auch ein signifikanter Teil in Bühnenfeldern gelagert. Ein kleinerer Teil wird durch Baggerungen entfernt, insbesondere in dem Gebiet, dass sich direkt flussaufwärts an das Rheinische Schiefergebirge anschließt. Hier führt der hohe Sandgehalt auf der Flusssohle zur Entwicklung von Transportkörpern (Dünen). Ein 250 m langer und 160 m breiter Geschiebefang ermöglicht die gezielte Entfernung dieser Sedimente, bevor sie zu Hindernissen für die Schifffahrt werden.

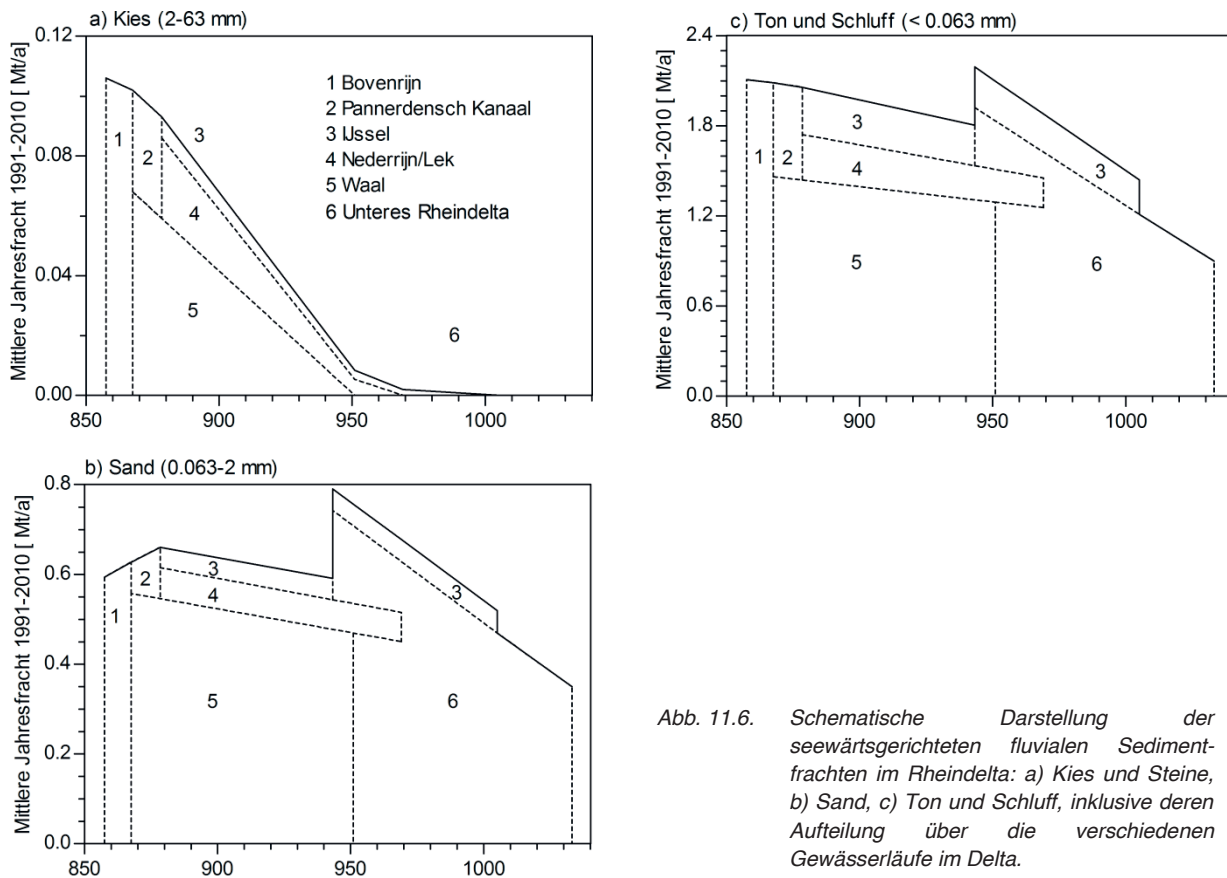


Abb. 11.6. Schematische Darstellung der seewärtsgerichteten fluvialen Sedimentfrachten im Rheindelta: a) Kies und Steine, b) Sand, c) Ton und Schluff, inklusive deren Aufteilung über die verschiedenen Gewässerläufe im Delta.

Am Beginn des Rheindeltas besteht die Sand/Kies/Stein-Fracht zu ca. 85 % aus Sand, der hier ebenfalls hauptsächlich schwebend transportiert wird, und zu 15 % aus Kies. Steine sind nicht enthalten. Innerhalb des Delta-Bereichs schreitet der Prozess der Sanderosion von der Flusssohle weiter fort, wodurch die Sand-Fracht weiter steigt. Ein geringer Anteil der Sand-Fracht wird auf den Uferwällen und in der Aue abgelagert oder von der IJssel ins IJsselmeer/Ketelmeer befördert (Abb. 11.6). Der Rest tritt über die Waal und Nederrijn/Lek in das untere Rheindelta ein. Die Waal weist die größte Sand-Fracht (88 %) auf. Am Übergang zum unteren, von den Gezeiten beeinflussten Teil des Deltas sinkt der hydraulische Gradient und Teile des Sandes werden auf der Flusssohle abgelagert (besonders in den Deltaarmen Benedenwaal, Boven-Merwede und Nieuwe Merwede). Die abgelagerten Sande stellen oft ein Hindernis für die Schifffahrt dar und werden durch Baggerungen entfernt. Die Maas führt erhebliche Mengen Sand zu. Nach der Maasmündung entspricht die Sand-Fracht im Rheindelta nahezu dem Ausmaß der Sand-Fracht im alpinen Bereich des Rheins. Wider Erwarten sind viele Mündungsarme des Flusses im unteren Delta der Erosion ausgesetzt. Erosion in Kombination mit Baggerungen führt zu einem Nettoverlust an Sand in der Flusssohle, ähnlich wie weiter stromaufwärts im Delta-Bereich und im frei fließenden Rhein. Im unteren Delta wird der Flusssand des Rheins durch den Eintrag von Meeressand durch den Nieuwe Waterweg überlagert.

Die Flussarme und Häfen im Bereich von Rotterdam fangen den Großteil dieses Sandes ein. Ablagerungen werden für gewöhnlich durch Baggerungen entfernt, um die Fahrrinntiefe stabil zu halten. Ein kleiner Teil der fluvialen Sandfraktion erreicht die Nordsee über den *Nieuwe Waterweg* oder den *Haringvliet*.

11.4.3 Ton und Schluff

Leicht erodierbare Gesteine (Bündnerschiefer) und die hohen Hangneigungen im alpinen Einzugsgebiet führen zu einer massiven Zufuhr an feinem Sediment in den *Alpenrhein*. Am Zusammenfluss von *Vorderrhein* und *Hinterrhein* befördert der Rhein 1,615 Mt/a an Schluff und Ton. Flussabwärts steigt die Ton/Schluff-Fracht aufgrund der Zufuhr durch Nebenflüsse (Plessur, Landquart, Tamina, Ill) weiter auf 3,014 Mt/a an. Kleinere Mengen an Ton und Schluff werden durch Baggerungen entfernt und durch Ton und Schluff ersetzt, die beim Abrieb der Kies/Stein-Fraktion entstanden sind. Die durchschnittlichen Ton/Schluff-Konzentrationen im alpinen Bereich betragen kurz vor dem *Bodensee* rund 413 mg/l und sind damit etwa 14-mal so hoch wie die mittlere Ton/Schluff-Konzentration am Beginn des Delta-Bereichs des Rheins (29 mg/l). Während große Anteile der Sand- und Kies/Stein-Fraktion im untersten Teil des *Alpenrheins* sedimentieren, werden die Ton/Schluff-Fraktionen als Spülfracht in den *Bodensee* transportiert. Innerhalb des Sees werden durch temperaturbedingte Dichteströmungen die Sedimente zum Seegrund befördert, wo sie gemeinsam mit Ton und Schluff aus anderen in den See mündenden Wasserläufen (Bregenzer Ach, Argen) abgelagert werden.

Am Beginn des staugeregelten Rheins beträgt die Zufuhr von Ton und Schluff von oberstrom null, ebenso wie die Zufuhr von Sand, Kies und Steinen. Über die ersten 186 km des staugeregelten Bereichs (*Hochrhein*) steigt die Ton/Schluff-Fracht aufgrund des Eintrags der Nebenflüsse sehr stark an. Die wichtigste Sedimentquelle ist die Aare, die mehr Wasser und Sediment befördert als der Rhein selbst. Ungeachtet dessen bleibt die Ton/Schluff-Fracht weit unter jener im alpinen Bereich des Rheins. Flussabwärts von Basel (*Oberrhein*) gehen geringe Mengen von Ton und Schluff durch Baggerungen und durch Sedimentation in den Überflutungsbereichen verloren, der Verlust wird im Betrachtungszeitraum teilweise ausgeglichen durch das Abwasser eines Kalibergwerks, das in dieser Studie als diffuser Eintrag eingestuft wurde. Der *Restrhein* stellt keine signifikante Senke für Sedimente der Größenordnung von Ton und Schluff dar: Ein Großteil des Eintrags in den *Restrhein* fließt als Spülfracht flussabwärts wieder in den *Oberrhein*. Dieses Verhalten unterscheidet sich also deutlich vom oben beschriebenen Verhalten der Sandfraktion.

Am Beginn des frei fließenden Rheins werden ca. 0,845 Mt/a an Ton und Schluff von oberstrom zugeführt. Die Nebenflüsse Neckar, Main und Mosel sowie einige kleinere Nebenflüsse und unbekannte diffuse Sedimentquellen, führen weitere 2,366 Mt/a zu, wodurch sich die Sedimentfracht verdoppelt bis verdreifacht. Sedimentation in Überflutungsbereichen stellt einen moderaten Verlust an Ton/Schluff entlang des frei fließenden Rheins dar. Nur 2,107 Mt/a werden schließlich zum Delta-Bereich weitergeleitet. Etwa ein Drittel der Fracht im Rheindelta geht durch Sedimentation in Überschwemmungsgebieten verloren oder wird von der *IJssel* ins *IJsselmeer/Ketelmeer* befördert. Der Rest tritt über die Gewässerläufe *Waal* und *Nederrijn/Lek* in den unteren Delta-Bereich ein (vgl. Abb. 11.6). Der Beitrag der *Waal* (87 %) ist viel größer als der Beitrag des *Nederrijn/Lek* (13 %), da Letzterer kleiner und gestaut ist. Ein Teil des Tons und Schluffs, der vom Rhein befördert wird, vermischt sich mit Ton und Schluff aus der Maas und wird in den südlichen Teil des unteren Deltas transportiert, wo der Großteil abgelagert wird (*Amer*, *Hollands Diep*, *Haringvliet*) und ein kleiner Teil über den *Haringvliet* in die *Nordsee* eintritt. Der andere Teil des vom Rhein transportierten Tons und Schluffs wird in den Bereich des Hafens von Rotterdam befördert, wo er sich mit dem Ton/Schluff-Eintrag aus dem Meer vermischt. Hier wird der Großteil des Tons und Schluffs in den Kanälen oder in den benachbarten Häfen abgelagert. Diese frisch abgelagerten Sedimente behindern die Schifffahrt und werden durch Baggerungen entfernt. Ein kleiner Teil der fluvialen Sedimente fließt über den

Nieuwe Waterweg in die *Nordsee* ab. Insgesamt steigt im unteren Delta die Nettomenge von in der Flusssohle gespeichertem Ton/Schluff mit der Zeit. In dieser Hinsicht verhält sich die Ton/Schluff-Fraktion konträr zur Sandfraktion, bei der der Sedimentspeicher in der Flusssohle im unteren Delta mit der Zeit abnahm.

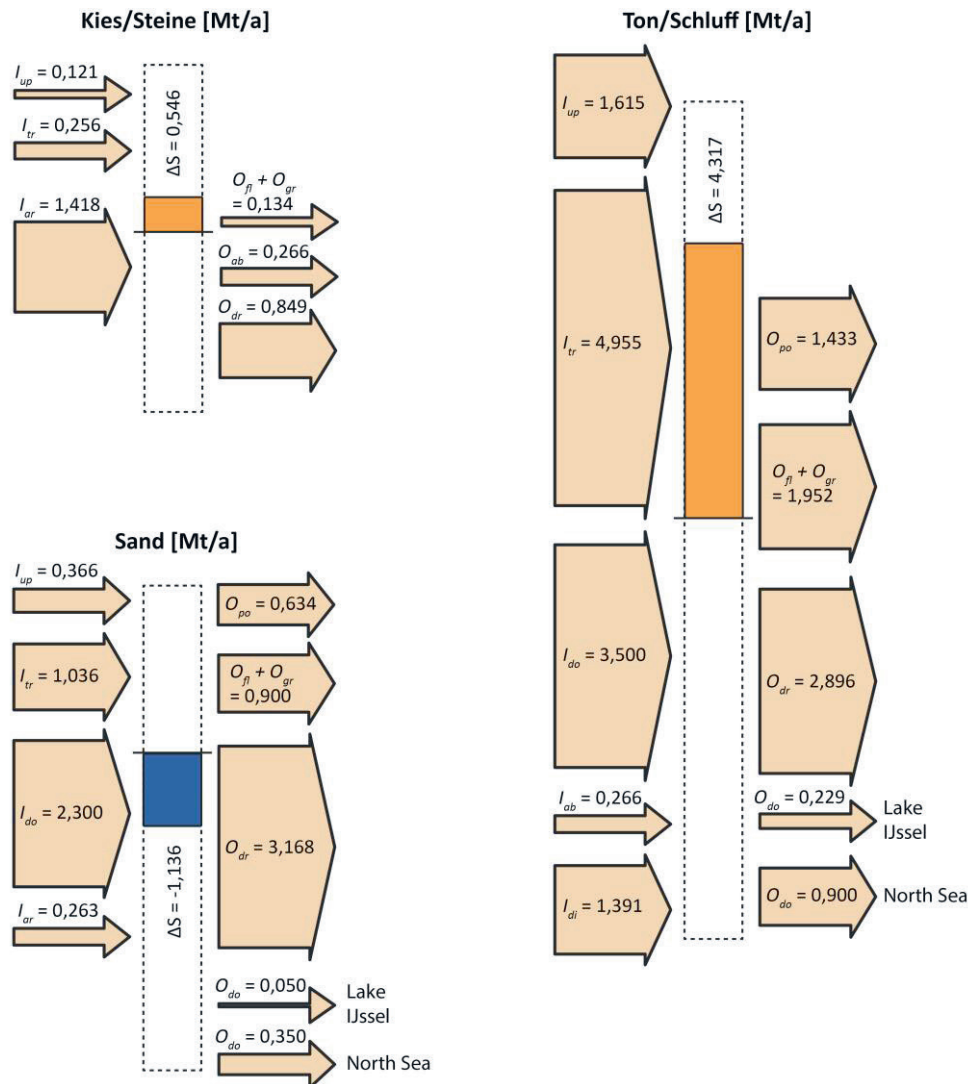


Abb. 11.7: Die Sedimentbilanz des gesamten Rheineinzugsgebiets für Kies/Steine (2–125 mm), Sand (0,063–2 mm) und Ton/Schluff (< 0,063 mm). ΔS stellt die Veränderung des Sedimentspeichers im Fluss Schlauch des gesamten Rheins dar und setzt sich aus positiven wie negativen Sohländerungen entlang der Strecke zusammen. Zu beachten ist, dass I_{ar} und O_{dr} Sedimente ($0,560 \pm 0,070$ Mt/a Kies/Steine; $0,220 \pm 0,020$ Mt/a Sand) beinhalten, die im frei fließenden Bereich (Ober-, Mittel-, Niederrhein) umgelagert wurden (gebaggert und darauffolgend wieder verklappt). Umlagerungsbaggerungen aus anderen Teilen des Rheineinzugsgebietes konnten aufgrund von Datenmangel nicht in den Graphiken aufgenommen werden.

11.5 Die Sedimentbilanz des gesamten Einzugsgebiets

Im gesamten Einzugsgebiet (vgl. Abb. 11.7) ist der anthropogene Eintrag die größte externe Stein/Kies-Quelle im Rhein. Nebenflüsse liefern lokal zwar etwas Kies und Steine, jedoch sind die Massen deutlich geringer. Die größte Sedimentsenke für Kies und Steine sind Baggerungen, obwohl

auch Abrieb und Sedimentaustrag in Bühnenfelder zum Verlust beitragen. Der Speicher von Kies und Steine in der Flusssohle wächst mit der Zeit. Diese Zunahme des Speichers kann als interne Senke von Kies und Steinen betrachtet werden (im Gegensatz zu den oben beschriebenen externen Senken): Jährlich werden ca. 0,546 Mt/a an durch anthropogenen Eintrag und durch Nebenflüsse zugeführtem Kies auf der Flusssohle abgelagert.

Die größte fluviatile Sandquelle für den Rhein ist die Zufuhr aus dem Quellbereich und den Nebenflüssen. Von deutlich größerem Ausmaß ist die Zufuhr von marinem Sediment in das untere Rheindelta. Der anthropogene Eintrag stellt nur eine geringe Quelle für Sand dar. Die Menge an Sand, die in der Rheinsohle gespeichert ist, verringert sich im Laufe der Zeit um 1,136 Mt/a. Im Gegensatz zu den oben beschriebenen externen Sandquellen stellt somit die Sohle eine interne Sandquelle dar. Die räumlichen Variationen hinsichtlich der Veränderungen des Sandspeichers sind groß: Während der *Bodensee* eine Nettosenke für Sand ist (0,748 Mt/a), stellt die Sohlerosion von Sand im frei fließenden Rhein und im Rheindelta eine Sandquelle dar (1,895 Mt/a). Dieser Trend der Sedimentation in den oberstrom gelegenen Flussabschnitten und der Erosion in den unterstrom gelegenen Flussabschnitten steht im Gegensatz zu den Prozessen eines typischen ungestörten Flusses. Die Hauptsenke von Sand stellen Baggerungen dar. Sekundäre Senken sind Ablagerungen in Überflutungsbereichen, Bühnenfeldern, Nebenarmen und Häfen. Ein Teil des Rheinsandes verlässt das Rheinsystem und tritt in die *Nordsee* ein.

Auch für Ton und Schluff stellen der Quellbereich des Rheins und die Nebenflüsse die größten Sedimentquellen dar. Große Mengen an marinem Schluff und Ton werden dem unteren Delta zugeführt. Diffuse Einträge spielen eine geringere, aber dennoch signifikante Rolle. Abriebprodukte spielen als Sedimentquelle nur eine geringe Rolle. Die Hauptsenken von Ton und Schluff sind Ablagerungen in Überflutungsbereichen, Baggerungen und Ablagerungen in Häfen. Die beiden letztgenannten Prozesse treten hauptsächlich im unteren Rheindelta auf. Etwa 4,317 Mt/a an Schluff und Ton werden dauerhaft am Bodenseegrund bzw. auf der Flusssohle abgelagert, wodurch der Sedimentspeicher im Laufe der Zeit wächst.

11.6 Sedimentquellen und -senken

11.6.1 Sedimenteintrag von oberstrom

Da Sedimentfrachten typischerweise nach unterstrom zunehmen, spielt die Sedimentzufuhr von oberstrom in der Sedimentbilanz eines Flusses normalerweise im unterstrom gelegenen Teil des Einzugsgebiets eine größere Rolle als in den oberstrom gelegenen Teilen. Diese Situation wird durch die Sedimentspeicherung im *Bodensee* und im Oberwasser der 21 Staustufen am Rhein komplexer. Der *Bodensee*, der ein Produkt der pleistozänen Vergletscherung ist, stellt eine vollständige Sedimentsenke dar und trennt das alpine Rheineinzugsgebiet morphologisch vollständig von den weiter unterstrom gelegenen Teilen des Einzugsgebiets (dem staugeregelten, dem frei fließenden und dem Delta-Bereich) (vgl. Abb. 11.5). Die Sedimentfrachten im Rhein (Abb. 11.5) sind daher diskontinuierlich: der staugeregelte Bereich der Rheins empfängt keine Sedimente von oberstrom. Die 21 Staustufen im staugeregelten Bereich verhindern den durchgehenden Transport von Kies und Steinen, wodurch der Sedimenteintrag von oberstrom von Kies und Steinen am Beginn des frei fließenden Rheines null ist. Die Staustufen können teilweise von den feineren Sedimentfraktionen passiert werden. Daraus resultiert, dass die Zufuhr von Sand, Schluff und Ton von oberstrom für den frei fließenden Bereich größer als null ist.

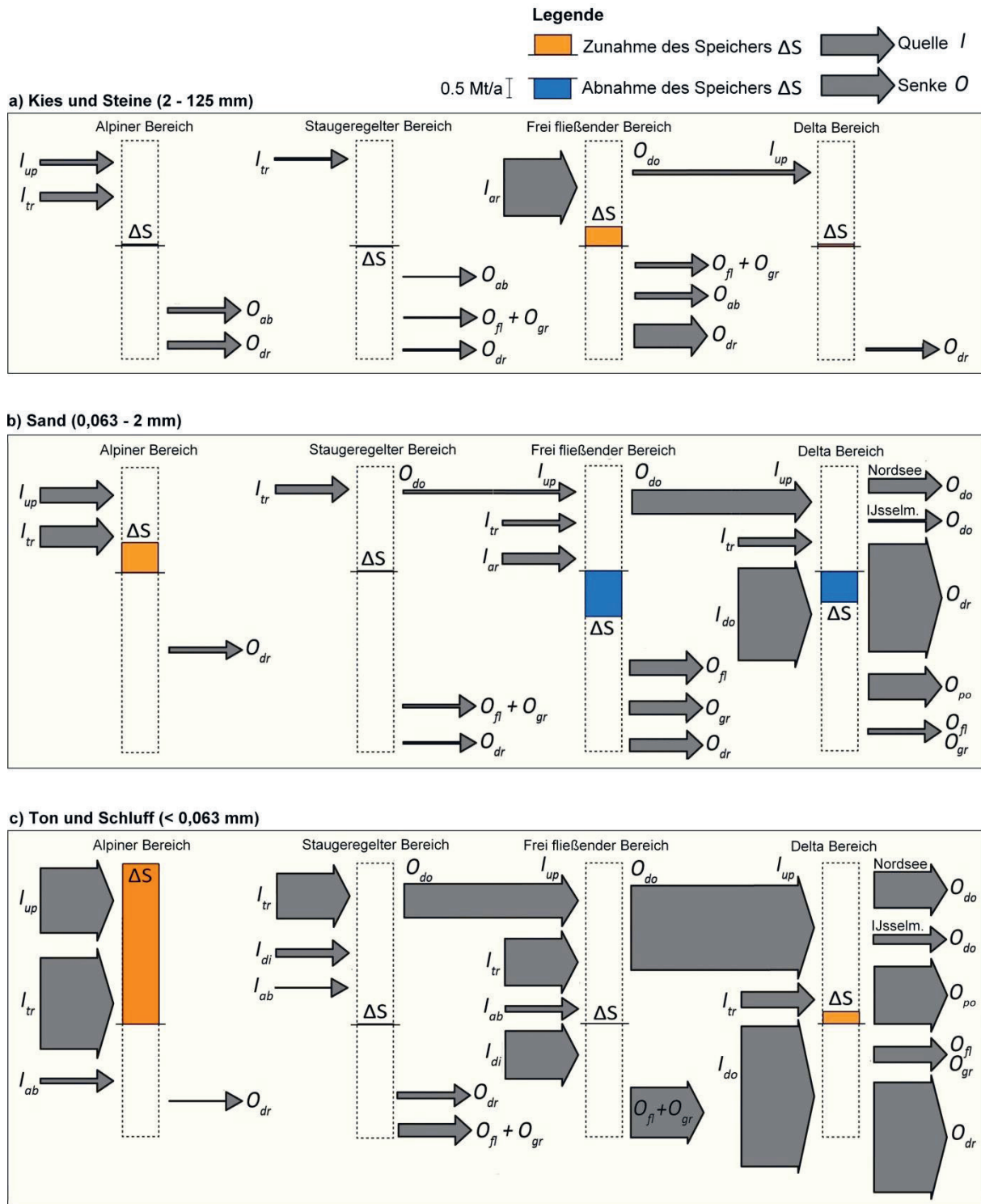


Abb. 11.8 Die Sedimentbilanz des gesamten Rheineinzugsgebietes für Kies/Steine (2–125 mm), Sand (0,063–2 mm) und Ton/Schluff (< 0,063 mm), aufgelöst für den alpinen, staugeregelten, frei fließenden und Delta Bereich. Hervorzuheben ist, dass, auch wenn die Veränderung des Speichers (ΔS) für einen Bereich nahe null ist, es lokal immer noch Erosion und Sedimentation geben kann, die Probleme für Schifffahrt, Ökologie oder Hochwasserschutz verursachen können. Zu beachten ist, dass I_{ar} und O_{dr} im frei fließenden Bereich Sedimente ($0,560 \pm 0,070$ Mt/a Kies/Steine; $0,220 \pm 0,020$ Mt/a Sand) beinhalten, die umgelagert wurden (gebaggert und darauffolgend wieder verklappt). Umlagerungsbaggerungen aus anderen Teilen des Rheineinzugsgebietes konnten aufgrund von Datenmangel nicht in den Graphiken aufgenommen werden. Werte sind in Tabelle 11.3 dargestellt.

11.6.2 Sedimenteintrag aus Nebenflüssen

Alle großen und viele der kleinen Nebenflüsse des Rheins sind durch Staustufen reguliert. Infolgedessen wird die Sedimentzufuhr gröberer Kornfraktionen aus den Nebenflüssen in den Rhein stark unterdrückt. Nebenflüsse stellen eine vernachlässigbare Quelle für Kies und Steine, eine geringe Quelle für Sand, aber eine wichtige Quelle für Ton und Schluff dar. Die wichtigsten sedimentliefernden Nebenflüsse sind: Plessur, Landquart, Tamina und Ill für den *Alpenrhein*; Bregenzer Ach für den *Bodensee*; Thur, Wutach, Aare, Birs und Wiese für den *Hochrhein*; Neckar und Main für den *Oberrhein*; Mosel für den *Mittelrhein* und Maas für das Rheindelta.

11.6.3 Sedimenteintrag und -austrag durch Nebenarme

Der Rhein ist grundsätzlich ein einsträngiger Fluss. Nebenarme treten lokal in verzweigten Abschnitten des Rheins (z. B. Mastrilser Rheinauen, *Alpenrhein*), bei Wasserkraftwerken und entlang von Inseln auf (z. B. im Mainzer Becken, *Mittelrhein*). Im staugeregelten Rhein treten abgeschnittene Mäander auf, die durch Wehre vom Hauptgerinne abgetrennt sind. Die Mündungsarme im Rheindelta wurden in dieser Studie nicht als Nebenarme eingestuft. Keiner der kleineren Nebenarme und abgeschnittenen Mäander scheint eine signifikante Senke oder Quelle für Sedimente darzustellen. Jedoch sind aufgrund der wenigen Daten die Unsicherheiten hoch. Der einzige Nebenarm von beträchtlicher Länge ist der *Restrhein* (km 174–224). Geschätzte 41 % der Sand- und Schluff/Ton-Fracht des staugeregelten Rheins bei Basel tritt in den *Restrhein* ein (die Kies/Stein-Fracht bei Basel ist vernachlässigbar). Während Sand überwiegend innerhalb des *Restrheins* abgelagert wird, wird der meiste Schluff/Ton zurück in den *Oberrhein* transportiert, ohne im *Restrhein* abgelagert zu werden. Der *Restrhein* stellt daher eine erhebliche Senke für Sand und eine geringe Senke für Schluff/Ton dar. Zudem stellt der *Restrhein* eine geringe Quelle für Kies und Steine dar.

11.6.4 Sedimenteintrag und -austrag durch Abrieb

Nur die Kies/Stein-Fractionen unterliegen geringen, aber markanten Massenverlusten durch Abrieb. Diese treten vorwiegend in den alpinen und frei fließenden Bereichen des Rheins auf. In den anderen Bereichen ist die Kies/Stein-Fracht so niedrig, dass Abrieb keine große Auswirkung hat. Die Produktion von Ton und Schluff während des Abriebprozesses stellt eine signifikante Ton/Schluff-Quelle dar (0,266 Mt/a), die jedoch im Vergleich zur Größe der Ton/Schluff-Fracht gering ist.

11.6.5 Sedimenteintrag durch anthropogene Sedimentzugabe

Anthropogene Sedimentzugaben werden sowohl zu ökologischen Zwecken als auch zum Erosionsschutz durchgeführt. Zwischen 1991 und 2010 wurden ökologisch motivierte Zugaben nur im staugeregelten Rhein bei Ellikon (km 63), Zurzach (km 94) und Kleinkems (km 183) durchgeführt (Abegg et al., 2013; Région Alsace, 2012). Diese Zugaben waren ausnahmslos experimentellen Charakters und umfassten nur geringe Mengen an Sediment (hauptsächlich Kies und Steine). Die Zugaben zum Erosionsschutz fanden im frei fließenden Rhein statt und waren weitaus umfangreicher als die ökologischen Zugaben. Man unterscheidet zwischen drei Arten von Sedimentzugaben zum Erosionsschutz. Die erste Art beinhaltet relativ feines Material (0,063–63 mm), die als Ersatz für ein natürliches Geschiebe gedacht ist. Die Hauptzugabestandorte befinden sich direkt flussabwärts der Staustufe Iffezheim (km 336–338) sowie bei km 534, 581–603, 746–768, 813–826 und 835–850 (vgl. Abb. 11.4) (Frings, 2014a, b). Die zweite Art von Zugaben zum Erosionsschutz beinhaltet gröbere allochthone Sedimente (8–150 mm), welche die Sohle in Gebieten, die zu lokalen Unterspülungen neigen, stabilisieren sollen. Diese Zugaben fanden vorwiegend bei Iffezheim (km 338–352) und im Niederrhein (km 665–857) statt. Die dritte Art beinhaltet die Umlagerung von vorher gebaggertem

Sediment. Informationen über diese Art der Erosionsschutzmaßnahme stehen nur für den frei fließenden Bereich zur Verfügung. Der gesamte Sedimenteintrag durch anthropogene Zugaben entspricht 1,681 Mt/a, bestehend aus 84 % Kies/Stein und 16 % Sand. Daher stellen Zugaben im gesamten Einzugsgebiet die wichtigste Quelle für die Kies/Stein-Fraktion dar. Etwa 46 % dieser Zugaben stammen jedoch nicht aus externem Material, sondern wurden vorher in Rhein gebaggert und nachher wieder im Rhein verklappt. Die langfristigen Auswirkungen der Zugaben sind noch unbekannt, jedoch ist es nicht unwahrscheinlich, dass der immense Eintrag von Kies und die anschließende Vergrößerung der Flusssohle größere Auswirkungen als viele bauliche Maßnahmen der Vergangenheit auf die Morphodynamik des Flusses hat.

Zusätzlich zu den bereits genannten Zugaben wurde auch Waschbergematerial aus dem Bergbau dem Rhein zugegeben, um Senkungen der Rheinsohle aufgrund des Steinkohlebergbaus zu kompensieren (Rommel, 2005; Wenka, 2009). Genaue Zahlen sind nicht bekannt, Schätzungen geben aber eine Masse von ca. 13,6 Mt seit 1976 an, was etwa 0,4 Mt/a entspricht. Zwischen 1991 und 2010 war die Senkung (und folglich die Zugabe von Waschbergematerial) auf den Flussabschnitt zwischen km 791,5 und 809 beschränkt. Da die Senkung nicht als eigener Faktor in unserer Bilanzgleichung (vgl. Gleichung 11.1) berücksichtigt wurde, wurde auch die kontinuierliche Zugabe von Waschbergematerial im Bergbaugebiet nicht miteinbezogen. Dennoch hatten sowohl die Senkung als auch der Eintrag von Waschbergematerial einen signifikanten Einfluss auf die Morphologie im Bergbaugebiet (Frings et al., 2014a).

11.6.6 Sedimenteintrag aus diffusen Quellen

Die Auswirkungen diffuser Sedimenteinträge aufgrund von Ufererosion, kleinen Wasserläufen und städtischen Kanalisationsabflüssen wurden für den Rhein generell als gering angenommen. Ufererosion wird flussabwärts von Reichenau (km -134) fast im gesamten Flussverlauf durch Uferschutzmaßnahmen wirksam verhindert, und nur im *Bodensee* tritt eine gewisse, durch Schiffswellen verursachte, Ufererosion auf (Schulz, 2004).

Die Annahme der vernachlässigbaren diffusen Einträge scheint für den frei fließenden Bereich des Rheins jedoch inkorrekt sein. Die Ton/Schluff-Bilanz zeigt, dass der Sedimenteintrag von oberstrom (I_{up}), durch Abrieb (I_{ab}) und durch Nebenflüsse (I_{tr}) in diesem Bereich längst nicht groß genug ist, um den Sedimentaustrag in die Überflutungsbereiche (O_{fl}) und den flussabwärts gelegenen Bereich (O_{do}) zu kompensieren. Wenn die unabhängigen Schätzungen von I_{tr} , I_{up} , I_{ab} , O_{fl} und O_{do} korrekt sind, muss eine weitere, noch unbekannte Ton/Schluff-Quelle von 1,196 Mt/a angenommen werden. Angesichts der Unsicherheiten der Bilanzterme (vgl. Tab. 11.3) lässt sich nicht mit Sicherheit sagen, dass dieser diffuse Eintrag wirklich existiert. Potentiell relevante diffuse Einträge, die in dieser Studie nicht berücksichtigt wurden, sind der Eintrag von erodiertem Boden aus Weinbergen entlang des Flusses, Einträge aus Kläranlagen und der Kanalisation sowie der Abrieb von Waschbergematerial (Schiefer), der für die Zugabe im Bergsenkungsgebiet verwendet wird.

In dieser Studie wurde auch der Eintrag von Abwässern aus dem Kalibergwerk bei km 211 im staugeregelten Rhein als diffuser Eintrag eingestuft. Dieser Sedimentfluss hätte auch als Nebenfluss klassifiziert werden können.

11.6.7 Sedimenteintrag aus dem Meer

Der Meereseintrag von Sedimenten tritt nur im unteren Rheindelta auf, wo er die wichtigste Quelle für Sand, Schluff und Ton darstellt. Obwohl die drei Mündungsarme *Nieuwe Waterweg*, *Hartelkanal* und *Haringvliet* direkt mit der *Nordsee* verbunden sind, erlauben nur die ersten beiden Meereseinträge aufgrund der Gezeitenwirkung. Der *Haringvliet* ist durch ein Wehr verschlossen, das nur bei Ebbe geöffnet ist. Beachtenswert ist die Tatsache, dass der Eintrag aus dem Meer in das Rheindelta um

einen Faktor 1,4 (Ton, Schluff) bzw. 2,6 (Sand) höher ist als der fluviatile Sedimenteintrag von oberstrom. Wohlgermerkt beziehen sich die Werte der marinen Ton/Schluff-Einträge in Abb. 11.8 auf jene Sedimente, die im Delta abgelagert und anschließend ausgebaggert werden. Die Gesamtvolumen sind viel höher, da marine Sedimente, die bei Flut schwebend in das Rheinsystem gelangen und es während der anschließenden Ebbe-Phase wieder verlassen, hier nicht berücksichtigt wurden.

11.6.8 Sedimentaustrag nach unterstrom

Da der *Bodensee* eine vollständige Senke für alle Sedimente darstellt, beträgt der Sedimentaustrag aus dem alpinen Bereich null. Der Sedimentaustrag aus dem staugeregelten Bereich wird durch die 21 Stauufen reduziert. Nur Ton und Schluff (und in geringerem Ausmaß Sand) können den staugeregelten Rhein verlassen und in den frei fließenden Bereich des Rheins eingetragen werden. Weniger als 50 % der Sedimente, die den frei fließenden Rhein verlassen und in das Delta eingetragen werden, erreichen letztendlich die Nordsee über die Mündungsarme *Haringvliet*, *Hartelkanal* und *Hollands Diep*. Ein kleiner Teil des Sediments verlässt den Delta-Bereich in Richtung *IJsselmeer*. Der gesamte Sedimentfluss, der in das Meer eintritt, ist global gesehen sehr gering: Syvitsky (2005) schätzte, dass den Ozeanen global 10.000 bis 20.000 Mt/a an Sediment durch die Flüsse der Welt zugeführt werden. Der Beitrag des Rheins (1,25 Mt/a) beträgt weniger als 0,1 Promille.

11.6.9 Sedimentaustrag durch Baggerungen

Die Hauptstandorte für Baggerungen befinden sich direkt flussaufwärts der drei wichtigsten Erosionsbasen (*Bodensee*, Rheinisches Schiefergebirge und *Nordsee*) sowie in den Stauhaltungen des Oberrheins. In diesen Gebieten nimmt der hydraulische Gradient in Fließrichtung ab, wodurch sich Kies, Sand und Schluff ablagern, wobei klassische Sortierungsmuster mit einer Abnahme der Mittleren Korngröße nach unterstrom entstehen. Da die Ablagerungen das Überflutungspotential vergrößern und/oder die Schifffahrt behindern, werden sie durch Baggerungen entfernt. Der erste dieser vier Baggerstandorte befindet sich in dem (als *Vorstreckung* bekannten) Kanal, der sich 4,8 km aus dem *Alpenrhein* in den *Bodensee* erstreckt (Zarn et al., 1995). Hier werden etwa gleiche Mengen an Sand und Kies/Steinen ausgebaggert. Der zweite Standort befindet sich in den Stauhaltungen des *Oberrheins* (km 179–334), wo Sedimente mit einer Zusammensetzung von ca. 23 % Sand und 77 % Ton/Schluff ausgebaggert werden. Der dritte Baggerstandort befindet sich im Mainzer Becken (km 494), direkt oberstrom des Punktes, an dem der frei fließende Rhein in das Rheinische Schiefergebirge eintritt. Hier wurde 1989 ein Sedimentfang – mit einer Länge von 160 m, einer Breite von 250 m und einer Tiefe von 1,5 m – gebaut, um Transportkörper (Dünen) aufzufangen und auszubaggern, bevor sie der Schifffahrt Probleme bereiten (WSD-SW, 2007). Die hier gebaggerten Sedimente bestehen zu etwa aus 63 % Sand und zu etwa 33 % aus Kies (Frings et al., 2014b). Der vierte Standort ist das untere Rheindelta (km 934–1030, d. h. einschließlich des untersten Teils der *Waal*). Hier werden sowohl fluviatile als auch marine Sedimente ausgebaggert. In Masseneinheiten werden etwa gleich große Mengen an Ton/Schluff (52 %) und Sand (48 %) ausgebaggert, volumetrisch sind die Ton/Schluff-Baggerungen aber aufgrund der niedrigeren Porosität viel größer (siehe Anhang D, Tabelle D3). Unabhängig von ihren Einheiten sind die Baggermengen in diesem Gebiet viel höher als jene in den flussaufwärts gelegenen Teilen des Rheins. Es ist anzumerken, dass Baggerungen im unteren Rheindelta zu einem Querschnitt führen, der so tief und breit ist, dass er zu zusätzlicher Sedimentation und zusätzlichen Baggerungen führt.

Während die flussaufwärts des *Bodensees* und im unteren Rheindelta ausgebaggerten Sedimente vollständig dem Flusssystem entnommen werden (d. h. für Bauzwecke verkauft oder in Deponien für verunreinigte Sedimente abgeladen werden), wurden im Zeitraum 1991 – 2010 ca. 30 % der

Sedimente, die im Mainzer Becken ausgebaggert werden, dem Fluss zurückgegeben, um die Sohlerosion weiter flussabwärts zu reduzieren. In den übrigen Teilen des frei fließenden Bereichs und im oberen Rheindelta werden sogar bis zu 100 % der vorher entnommenen Sedimente dem Fluss wieder zurückgegeben (Umlagerungsbaggerungen). Die Sedimentbilanzen für den alpinen, den staugeregelten und den Delta-Bereich zeigen die Nettomassen, die extrahiert wurden. Die gesamten ausgebaggerten Massen in diesen Flussabschnitten sind größer als angegeben, da Umlagerungsbaggerungen in den Zahlen nicht enthalten sind (z. B. Frings et al., 2014b). Nur für den frei fließenden Rhein sind Daten über die gesamten ausgebaggerten Massen verfügbar. Für diesen Bereich werden die gesamt extrahierten Massen (0,575 Mt/a Kies/Steine und 0,307 Mt/a Sand) gezeigt. 3 % der Kies/Steine und 30 % des Sandes wurden für Bauzwecke verkauft und aus dem System entfernt. Der Rest (ca. 0,560 Mt/a Kies und 0,220 Mt/a Sand) wurde dem Fluss wieder zurückgegeben.

Zusätzlich zu den oben genannten Baggerorten befinden sich noch kleinere Baggerorte am Zusammenfluss des *Vorder-* und *Hinterrheins*, an den Zusammenflüssen von Nebenflüssen (Landquart, Plessur, Thur, Töss, Glatt, Murg, Sissle, Ergolz, Birs) und im Oberwasser der Staustufen von Schaffhausen (km 45), Augst-Wyhlen (km 156), Rhinau (km 256), Gerstheim (km 272), Straßburg (km 283–290), Gamsheim (km 308) und Iffezheim (km 334) (Zarn et al., 1995; Abegg et al., 2013; Schälchli, 2000; Kleikämper & Gälli, 2007; Polschinski et al., 2008), so wie an vielen Stellen im frei fließenden Bereich, z. B. in der Nähe von Karlsruhe (km 360-367), Mannheim (km 423-427), Neuwied (km 605-609), Köln (km 686-692), Duisburg (km 766-785), Xanten (km 819-828) und Emmerich (km 852-858) (siehe Frings et al., 2014a, 2014b).

Tab 11.3a: Kies und Steine (2 – 125 mm): Sedimentquellen, -senken und Änderungen im Speicher [Zeitraum 1991 – 2010]. Angegeben sind: der ermittelte Wert (W) und die maximale Unsicherheit (U).

Bilanzierungs- term		Alpenrhein	Bodensee	Hochrhein	Restrhein	Oberrhein	Niederrhein	Oberes Delta	Unteres Delta
		km -206 bis -39	km -39 bis 24	km 24 bis 334	km 174 bis 224	km 334 bis 646	km 646 bis 858	km 858 bis 951*	km 951* bis 1032
I_{up}	W [Mt/a]	0,121	0,000	0,000	0,000	0,000	0,059	0,106	0,000
	U [Mt/a]	0,036	0,003	0,000	0,005	0,002	0,024	0,042	0,050
I_{tr}	W [Mt/a]	0,208	0,000	0,048		0,000	0,000		0,000
	U [Mt/a]	0,062	0,002	0,048		0,002	0,002		0,020
I_{do}	W [Mt/a]								0,000
	U [Mt/a]								0,050
I_{ar}	W [Mt/a]			0,000	0,000	^0,718	^0,700		
	U [Mt/a]			0,003	0,003	0,144	0,140		
I_{se}	W [Mt/a]			0,002					
	U [Mt/a]			0,003					
I_{di}	W [Mt/a]			0,000		0,000	0,000		
	U [Mt/a]			0,001		0,002	0,002		
I_{ab}	W [Mt/a]								
	U [Mt/a]								
O_{ab}	W [Mt/a]	0,121		0,000	0,001	0,095	0,049		
	U [Mt/a]	0,030		0,004	0,003	0,048	0,025		
O_{se}	W [Mt/a]			0,000					
	U [Mt/a]			0,005					
O_{do}	W [Mt/a]	0,000	0,000	0,000	0,002	0,059	0,106	0,000	0,000
	U [Mt/a]	0,003	0,000	0,002	0,003	0,024	0,042	0,060	0,003
O_{dr}	W [Mt/a]	0,182		0,037		^0,286	^0,289	0,055	0,000
	U [Mt/a]	0,055		0,037		0,057	0,058	0,028	0,050
O_{gr}	W [Mt/a]				*0,016	0,082	0,036	*0,000	
	U [Mt/a]				0,008	0,062	0,027	0,000	
O_{fl}	W [Mt/a]			0,000		0,000	0,000		
	U [Mt/a]			0,000		0,002	0,002		
O_{po}	W [Mt/a]								0,000
	U [Mt/a]								0,010

ΔS	W [Mt/a]	0,026	0,000	0,013	-0,019	0,196	0,279	0,051	0,000
	U [Mt/a]	0,013	0,003	0,020	0,004	0,039	0,056	0,051	0,001

* Einschließlich Ablagerungen in Überflutungsflächen

^ Einschließlich Sediment, welches an einem Standort gebaggert und dem Fluss in der Nähe wieder zugegeben wurde

11.6.10 Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen

Überflutungsbereiche stellen eine Sedimentsenke für die Sand- und Schluff/Ton-Fraktion dar, obwohl lokal auch geringe Mengen Kies in den Überflutungsbereichen abgelagert werden. Wichtige Sedimentsenken sind der staugeregelte Bereich (hauptsächlich unterhalb von Basel) mit 0,389 Mt/a, der frei fließende Bereich (0,718 Mt/a im *Oberrhein* und 0,899 Mt/a im *Niederrhein*) und der obere Teil des Deltas (0,516 Mt/a). Die Fläche der Überflutungsbereiche in den anderen Abschnitten ist für signifikante Hochflutsedimentation zu klein. Der Hauptgrund für die Variabilität des Austrages in die Überflutungsbereiche entlang des Rheins ist die unterschiedliche Breite der Überflutungsbereiche. Anders als man vielleicht erwarten würde, ist der Sedimentaustrag auf Überflutungsflächen oberstrom des Deltas größer als im Delta selbst.

Tab 11.3b: Sand (0,063 – 2 mm): Sedimentquellen, -senken und Änderungen im Speicher [Zeitraum 1991 – 2010]. Angegeben sind: der ermittelte Wert (W) und die maximale Unsicherheit (U).

Bilanzierungs- term		Alpenrhein	Bodensee	Hochrhein	Restrhein	Oberrhein	Niederrhein	Oberes Delta	Unteres Delta
		km -206 bis -39	km -39 bis 24	km 24 bis 334	km 174 bis 224	km 334 bis 646	km 646 bis 858	km 858 bis 951*	km 951* bis 1032
<i>I_{up}</i>	W [Mt/a]	0,366	0,559	0,000	0,086	0,077	0,420	0,594	0,534
	U [Mt/a]	0,110	0,140	0,000	0,034	0,031	0,168	0,238	0,294
<i>I_{tr}</i>	W [Mt/a]	0,322	0,189	0,208		0,112	0,006		0,199
	U [Mt/a]	0,097	0,095	0,104		0,112	0,001		0,100
<i>I_{do}</i>	W [Mt/a]								2,300
	U [Mt/a]								1,150
<i>I_{ar}</i>	W [Mt/a]			0,000	0,000	^0,147	^0,116		
	U [Mt/a]			0,001	0,001	0,029	0,023		
<i>I_{se}</i>	W [Mt/a]			0,000					
	U [Mt/a]			0,050					
<i>I_{di}</i>	W [Mt/a]			0,000		0,000	0,000		
	U [Mt/a]			0,001		0,100	0,100		
<i>I_{ab}</i>	W [Mt/a]								
	U [Mt/a]								
<i>O_{ab}</i>	W [Mt/a]								
	U [Mt/a]								
<i>O_{se}</i>	W [Mt/a]			0,086					
	U [Mt/a]			0,034					
<i>O_{do}</i>	W [Mt/a]	0,559	0,000	0,077	0,000	0,420	0,594	0,584	0,350
	U [Mt/a]	0,140	0,001	0,015	0,050	0,168	0,238	0,292	0,152
<i>O_{dr}</i>	W [Mt/a]	0,130		0,045		^0,180	^0,127	0,189	2,497
	U [Mt/a]	0,039		0,009		0,036	0,025	0,095	0,624
<i>O_{gr}</i>	W [Mt/a]					0,106	0,224		
	U [Mt/a]					0,080	0,168		
<i>O_{fl}</i>	W [Mt/a]			0,000	*0,075	0,149	0,220	*0,126	
	U [Mt/a]			0,050	0,038	0,149	0,220	0,038	
<i>O_{po}</i>	W [Mt/a]								0,634
	U [Mt/a]								0,317
ΔS	W [Mt/a]	0,000	0,748	0,000	0,011	-0,519	-0,623	-0,305	-0,448
	U [Mt/a]	0,001	0,187	0,002	0,002	0,208	0,125	0,305	1,390

* Einschließlich Ablagerungen in Bühnenfeldern

31 % der Sandzugaben im Oberrhein und 2 % der Sandzugaben im Niederrhein hatten eine externe Quelle (wurde nicht vorher im Rhein gebaggert)

^ 43 % des ausgebaggerten Sandes im Oberrhein und 0 % des ausgebaggerten Sandes im Niederrhein wurde komplett entfernt (wurde dem Fluss nicht wieder zugegeben)

11.6.11 Sedimentausttrag in Bühnenfelder

Bühnenfelder gibt es ab Rhein-km 174. Die Bilanzanalyse legt nahe, dass Bühnenfeld-Ablagerungen eine wichtige Senke für Sand im staugeregelten Rhein (*Restrhein*) und im frei fließenden Rhein (*Oberrhein, Mittelrhein, Niederrhein*) darstellen. Im Delta Bereich stellen Bühnenfeld-Ablagerungen jedoch keine Nettosenke für Sand dar. Messungen (Ten Brinke et al., 2004) haben gezeigt, dass Sand, der bei Hochwasser abgelagert wird, in Niedrigwasserperioden durch von Schiffen verursachte Wellen erodiert wird, wodurch die Bühnenfelder sich in einem morphologischen Gleichgewicht befinden. Eine mögliche Erklärung für das unterschiedliche Verhalten der Bühnenfelder im frei fließenden Rhein und (dem oberen) Rheindelta mit ähnlichem Bühnenfeld-Alter und ähnlichen Fließigenschaften könnte das Verhalten der Sandfraktion sein, die im Rheindelta mobiler und dominanter ist. Die Unsicherheiten in Bezug auf Bühnenfeld-Ablagerungen im frei fließenden Bereich sind jedoch groß. Im frei fließenden Bereich des Rheins lagern sich zusätzlich zum Sand geringe Mengen Kies und Steine in den Bühnenfeldern ab.

Tab 11.3c: Ton und Schluff (< 0,063 mm): Sedimentquellen, -senken und Änderungen im Speicher [Zeitraum 1991–2010]. Angegeben sind: der ermittelte Wert (W) und die maximale Unsicherheit (U).

Bilanzierungs- term		Alpenrhein	Bodensee	Hochrhein	Restrhein	Oberrhein	Niederrhein	Oberes Delta	Unteres Delta
		km -206 bis -39	km -39 bis 24	km 24 bis 334	km 174 bis 224	km 334 bis 646	km 646 bis 858	km 858 bis 951*	km 951* bis 1032
<i>I_{up}</i>	W [Mt/a]	1,615	3,014	0,000	0,460	0,845	2,359	2,107	1,488
	U [Mt/a]	0,485	0,603	0,002	0,184	0,338	0,944	0,843	0,945
<i>I_{tr}</i>	W [Mt/a]	1,282	0,991	1,125		1,109	0,061		0,387
	U [Mt/a]	0,385	0,496	0,225		1,109	0,061		0,194
<i>I_{do}</i>	W [Mt/a]								3,500
	U [Mt/a]								1,750
<i>I_{ar}</i>	W [Mt/a]			0,000	0,000	0,000	0,000		
	U [Mt/a]			0,000	0,001	0,050	0,050		
<i>I_{se}</i>	W [Mt/a]			0,414					
	U [Mt/a]			0,083					
<i>I_{di}</i>	W [Mt/a]			0,195		0,879	0,317		
	U [Mt/a]			0,098		0,879	0,032		
<i>I_{ab}</i>	W [Mt/a]	0,121		0,000	0,001	0,095	0,049		
	U [Mt/a]	0,030		0,004	0,001	0,048	0,025		
<i>O_{ab}</i>	W [Mt/a]								
	U [Mt/a]								
<i>O_{se}</i>	W [Mt/a]			0,460					
	U [Mt/a]			0,184					
<i>O_{do}</i>	W [Mt/a]	3,014	0,000	0,845	0,414	2,359	2,107	1,717	0,900
	U [Mt/a]	0,603	0,002	0,169	0,166	0,944	0,843	0,859	0,364
<i>O_{dr}</i>	W [Mt/a]	0,004		0,153		0,000	0,000	0,000	2,739
	U [Mt/a]	0,001		0,031		0,050	0,050	0,000	0,685
<i>O_{gr}</i>	W [Mt/a]				0,000	0,000			
	U [Mt/a]				0,100	0,100			
<i>O_{fl}</i>	W [Mt/a]			0,276	*0,038	0,569	0,679	*0,390	
	U [Mt/a]			0,138	0,019	0,285	0,340	0,195	
<i>O_{po}</i>	W [Mt/a]								1,433
	U [Mt/a]								0,717
ΔS	W [Mt/a]	0,000	4,005	0,000	0,009	0,000	0,000	0,000	0,303
	U [Mt/a]	0,001	0,801	0,001	0,002	0,050	0,050	0,000	2,260

* Einschließlich Ablagerungen in Bühnenfeldern

11.6.12 Sedimentausttrag in Häfen

Nur die feineren Sedimentfraktionen (Ton/Schluff und Sand), die sich vorwiegend schwebend bewegen, treten in Häfen ein und können dort in den Stillwasserbereichen abgelagert werden. Größere Binnenhäfen existieren bei Basel, Straßburg (staugeregelter Bereich), Karlsruhe, Ludwigshafen, Mannheim, Köln, Düsseldorf/Neuss, Duisburg (frei fließender Bereich), Nijmegen und Dordrecht (Rheindelta). Diese Häfen stellen vernachlässigbare Senken für Sand, Kies und Steine und nur geringfügige Senken für Ton und Schluff dar. Daten zur Abschätzung des Austrages in Häfen sind nur lokal vorhanden bei gleichzeitig großen Unsicherheiten. Im Gegensatz zu diesen Binnenhäfen stellen die Häfen im von Gezeiten geprägten unteren Rheindelta (z. B. Rotterdam) bedeutende Senken für Sand und besonders für Ton und Schluff dar. Die meisten der in diesen Häfen abgelagerten Sedimente sind marinen Ursprungs und werden bald nach ihrer Ablagerung durch Baggerungen entfernt, wodurch ein Netto-Stromaufwärtsfluss von Sedimenten aus der Nordsee ins Rheindelta entsteht.

11.7 Veränderung des Sedimentspeichers

Die Gesamtveränderung des in der Rheinsohle gespeicherten Sediments beträgt 3,727 Mt/a. Allerdings ist der *Bodensee* das einzige Gebiet mit beträchtlicher Aggradation: Trotz seiner kurzen Länge (weniger als 5 % der gesamten Flusslänge) werden hier jährlich 4,753 Mt Sediment abgelagert. Der grösste Teil des Flusses wird durch Sohlerosion charakterisiert: Im frei fließenden und Delta-Bereich werden jedes Jahr 1,066 Mt Sediment aus der Gewässersohle ausgetragen. Der Alpenrhein und der staugeregelte Bereich zeigen keine signifikanten Nettoveränderungen des Sedimentspeichers.

Nur zwei Flussabschnitte sind von intensiver Ton/Schluff-Ablagerung betroffen: der *Bodensee* (4,005 Mt/a) und das untere Rheindelta. Die Nettozunahme der gespeicherten Sedimentmengen im unteren Rheindelta ist relativ niedrig (0,303 Mt/a), weil die meisten Ablagerungen hier durch Baggerungen direkt entfernt werden (2,738 Mt/a). In allen anderen Bereichen gibt es nur in geringem Umfang längerfristige Senken von Ton und Schluff im Bereich des Gerinnes. Einträge von Ton und Schluff werden entweder direkt zum unmittelbar flussabwärts gelegenen Flussabschnitt transportiert, im Mittel etwa im selben Maß im Fluss zwischengespeichert wie remobilisiert oder im Überflutungsbereich abgelagert.

Bei Sand ist die Situation komplizierter. Während im *Bodensee* und *Restrhein* die Sandmengen auf der Sohle über die Zeit stark steigen, liegen bei anderen Flussabschnitten keine Veränderungen des Sedimentspeichers vor (z. B. *Alpenrhein*, *Hochrhein*, staugeregelter *Oberrhein*). Der frei fließende Rhein und das Rheindelta zeigen jedoch einen massiven Sandverlust aus der Flusssohle aufgrund von Sohlerosion und Baggerungen.

Beim Kies ist eine gegenteilige Tendenz zu beobachten. Während der alpine Bereich und der staugeregelte Bereich keine zeitlichen Veränderungen des Sedimentspeichers zeigen, zeigen der frei fließende Rhein und der Delta-Bereich eine Zunahme des Sedimentspeichers in der Flusssohle über die Zeit, der mit einer Vergrößerung der Flusssohle einhergeht.

Es soll hier betont werden, dass, selbst bei sehr geringer Veränderung des Speichers in einem Flussabschnitt ($\Delta S \sim 0$), es dennoch Gebiete mit massiver Sedimentation oder Erosion geben kann, die durch Ein- und Austräge kompensiert oder ausgeglichen werden.

11.8 Diskussion

11.8.1 Unsicherheiten

Sedimentbilanzen unterliegen von Natur aus vielen Unsicherheiten (Grams & Schmidt, 2005). Unsicherheiten sind abhängig von den zugrunde liegenden Annahmen und dem Charakter, der Verfügbarkeit, Qualität und Verarbeitung der zugrunde liegenden Daten. Hinsichtlich des Datencharakters dominiert die Heterogenität der Eingangsdaten die Unsicherheiten. Bei Sedimentbilanzstudien, die mehrere Länder und mehrere Jahrzehnte überspannen, wie in der hier vorliegenden Studie, entstehen unvermeidlich Unstimmigkeiten, da Messgeräte und -verfahren von Land zu Land verschieden sind und sich im Laufe der Zeit verändern, wenn neue Techniken entwickelt werden. Hinsichtlich der Datenverfügbarkeit können sowohl die zeitliche als auch die räumliche Ausdehnung und Auflösung von Messungen unzureichend sein und Unsicherheiten einbringen. Hinsichtlich der Datenqualität können zufällige und systematische Messfehler vorliegen (vgl. Frings & Vollmer, 2017). Auch wurden oft nicht alle relevanten Daten aufgezeichnet (z. B. Daten zur Korngröße) bzw. sind Werte in Datenbanken fehlerhaft und unvollständig. Hinsichtlich der Datenverarbeitung sind vor allem die Umwandlung volumetrischer Daten in Masseneinheiten (wofür Informationen zur Porosität erforderlich sind, siehe Anhang D.1) sowie die Unterscheidung zwischen verschiedenen Korngrößenfraktionen für Unsicherheiten bei den Bilanzberechnungen verantwortlich.

Vorzugsweise werden alle Größen einer Sedimentbilanz mithilfe von unabhängigen empirischen Daten quantifiziert (Parsons et al., 2011). Wenn dies nicht möglich ist, sind Sedimentbilanzen immer noch wertvoll, aber mit größerer Vorsicht zu interpretieren (Kondolf & Matthews, 1991). Um die Unsicherheit jedes der 227 Bilanzterme zu quantifizieren, wurden Unsicherheitsschätzungen aus früheren Studien oder zusätzliche Unsicherheitsbewertungen durchgeführt (z. B. Frings et al., 2014a, 2014b). Zudem wurde die Plausibilität aller Annahmen, die für die Bilanzanalyse getroffen wurden, kritisch geprüft. Details hierzu finden sich in den Kapiteln 4 bis 10.

Die Unsicherheiten der Sedimentquellen und -senken liegen bei maximal 750 %. In den meisten Fällen liegen die Unsicherheiten aber in einer Größenordnung von 25 – 75 % (vgl. Tab. 11.3). Diese Unsicherheiten weisen dieselbe Größenordnung wie andere Sedimentbilanzen auf (z. B. Ten Brinke et al., 2001). Es wird betont, dass die Unsicherheiten, die in der vorliegenden Studie aufgeführt werden, den maximalen (und nicht den mittleren) Fehler darstellen. Durch die Wahl eines relativ langen Analysezeitraums konnten die Unsicherheiten reduziert werden, da die Anzahl an Transportmessungen innerhalb des Analysezeitraums so relativ groß ist und stochastische Fehler und kurzfristige Auswirkungen herausgemittelt werden. Eine weitere Reduktion der Unsicherheiten wurde erreicht mittels zusätzlicher Feld- und Labor-Messungen, die die Datenbasis hinsichtlich der Porosität (siehe Frings et al., 2011), des Geschiebetransports (Banhold et al., 2014a), des Eintrags der Nebenflüsse (Gehres et al., 2014), der Korngrößenverteilung der Schwebstoffe (Astor et al., 2004) und des Austrags in die Überflutungsbereiche (Banhold et al., 2014b) verbesserten (siehe auch Kapitel 3).

Im Alpenin Bereich des Rheins stellen der Sedimenteintrag durch Nebenflüsse und der Sedimentaustrag aus dem *Alpenrhein* in den *Bodensee* die größten Unsicherheiten dar. Im staugeregelten Bereich sind die Hauptunsicherheiten die Sedimenteinträge durch Nebenflüsse, die Sedimentdurchgängigkeit der Staustufen sowie die Sedimentation in den Überflutungsbereichen entlang des *Oberrhains*. Auch die Sedimentaufteilung zwischen *Restrhein* und *Rheinseitenkanal* bleibt unsicher. Im frei fließenden Bereich sind die Hauptunsicherheiten der Sedimenteintrag durch diffuse Einträge und Nebenflüsse sowie der Sedimentaustrag in Bühnenfelder und Überflutungsbereiche. Zusätzlich stellen die Schätzung der Korngrößenverteilung der erodierten Sedimente sowie der Einfluss von Hochwasser auf die Schwebstofffracht wichtige Unsicherheitsquellen dar. Im Rheindelta sind die größten Unsicherheiten die Sedimentverteilung an den Flussverzweigungen Pannerdensche Kop und IJsselkop, der Sedimenteintrag in das untere Delta und das *IJsselmeer*, die Veränderungen

des Sedimentspeichers im unteren Delta, die Baggerungen in Hafengebieten sowie der Sedimenteintrag und -austrag der *Nordsee*. Tatsächlich stellt der Sedimenteintrag und -austrag der *Nordsee* absolut die größte Unsicherheit der ganzen Bilanzen im Rheineinzugsgebiet dar. Es wird jedoch angemerkt, dass sich die Auswirkungen dieser Unsicherheit auf die anderen Bilanzterme des unteren Deltas beschränken und die Flussabschnitte flussaufwärts nicht beeinträchtigen.

11.8.2 Verifizierung

Zur Validierung der Bilanzergebnisse wurden unabhängige empirische Daten verwendet. Der bilanzierte Sedimentaustag aus dem *Alpenrhein* (O_{do}) in den *Bodensee* (I_{up}) wurde mit der Gesamtablagerung im *Bodensee* verglichen. Echolotmessungen des *Bodensees* zeigten eine durchschnittliche Sedimentation auf dem Seeboden zwischen 1989 und 2008 von $2,05 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ (vgl. Heine et al., 2008; Heine, 2011; Zarn, 2010b), was einem Sedimenteintrag in den See von ca. 2,996 Mt/a entspricht (Kapitel 4). Obwohl dies auch Einträge von kleineren Nebenflüssen (Bregenzer Ach, Dornbirner Ach) einschließt, stimmt die Zahl recht gut mit dem *Alpenrhein*-Austrag überein, der in dieser Studie berechnet wurde ($3,573 \pm 20 \text{ % Mt/a}$, vgl. Tab. 11.3): Die Abweichung beträgt nur 16 %.

Die berechneten Ton/Schluff-Frachten im frei fließenden Bereich (Abb. 11.9a) wurden zur Verifikation für 43 Standorte mit gemessenen Frachten verglichen. Insgesamt liegen die gemessenen Frachten innerhalb der Fehlerbandbreite der bilanzierten Frachten. Abweichungen gibt es vor allem (1) an Mündungen größerer Nebenflüsse (vor allem der Mosel), die laut unserer Studie einen größeren Einfluss auf die Frachten des Rheins haben als die Messungen zeigen, und (2) zwischen Rhein-km 600 und 800. Gründe für die letzt genannten Abweichungen können in der Annahme der gleichverteilten diffusen Einträge liegen (die wahrscheinlich eher einen punktuellen Charakter haben) sowie in der systematischen Unterschätzung der Sedimentfracht bei Hochwasser.

Die bilanzierten Sand- und Kies/Stein-Frachten im frei fließenden Bereich wurden mit den gemessenen Frachten von Frings et al. (2014a) verglichen (Abb. 11.9b). Im Allgemeinen liegt eine gute Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Werten vor, erkennbar an der Position der gemessenen Punkte innerhalb des grauen Bereichs der berechneten Unsicherheiten. Signifikante Unterschiede beschränken sich auf den Bereich zwischen Rhein-km 494 und 535, wo die berechneten Frachten aufgrund der Sedimentfalle im Mainzer Becken stark reduziert sind, was die gemessenen Werte nicht widerspiegeln. Unterhalb von km 600 sind die gemessenen Frachten etwas geringer als die berechneten Frachten, was ein positives Ergebnis ist, da die Geschiebemessungen in diesem Bereich die Sandfrachten deutlich unterschätzen (Banhold et al., 2014, Kapitel 3).

Zur Validierung des Ton/Schluff-Austrags aus dem frei fließenden Bereich in den Delta-Bereich verwendeten wir tägliche Einpunktmessungen der Schwebstofffracht bei Lobith (km 857,5) aus dem Zeitraum 1991–2010 (Daten von Rijkswaterstaat, 2014). Der Austrag an Schluff/Ton aus dem frei fließenden Bereich beträgt, basierend auf den Daten aus Lobith, 2,050 Mt/a, was nur 3 % von dem in dieser Studie berechneten Wert abweicht ($2,107 \text{ Mt/a} \pm 40 \text{ %}$, vgl. Tab. 11.3).

Der Ton/Schluff-Austrag in die Überflutungsbereiche im Rheindelta wurde mit den Feldmessungen von Middelkoop & Asselman (1998), Thonon (2006), Thonon et al. (2007) sowie der numerischen Studie von Asselman & Van Wijngaarden (2002) verglichen. Letztere ergaben eine durchschnittliche Ablagerungsrate von 1,3 mm/a, was ca. 0,48 Mt/a entspricht (vgl. Middelkoop et al., 2010). Unter Annahme eines Sandgehaltes von ca. 10 % (Thonon, 2006) betragen die Ablagerungsraten von Ton und Schluff 0,43 Mt/a, was nur um 10 % von dem in dieser Studie berechneten Wert abweicht ($0,39 \text{ Mt/a} \pm 50 \text{ %}$, vgl. Tab. 11.3).

Zur Verifikation des Sand- und Kies/Stein-Eintrags in die *Waal* wurden detaillierte Querschnittsmessungen von Transportraten verwendet, die während des Hochwassers von 1998 nahe der Verzweigung Pannerdensch Kop (km 868,5) gemessen wurden. Suspenderter Sand wurde mithilfe einer akustischen Messsonde und die Geschiebefracht mithilfe des Dunetracking-Verfahrens

gemessen (vgl. Kleinans, 2002; Wilbers, 2004; Frings & Kleinans, 2008). Auf Grundlage einer Transport-Abflussbeziehung und der Umrechnung von Volumen in Masse – basierend auf einer Porosität von 30 % und einer Mineraleichte von 2.603 m³/s – konnte ein jährlicher Sand- und Kieseintrag in die *Waal* von 0,673 Mt/a berechnet werden. Dieser Wert weicht um 8 % von dem in dieser Studie berechneten Wert ab (0,624 Mt/a ± 50 %).

Der Sand und Kies/Stein-Austrag aus der *Waal* wurde mit detaillierten Querschnittsmessungen der Transportraten während des Hochwassers von 2004 oberstrom der Merwedekop-Verzweigung (km 960,5) verglichen. Der suspendierte Sand wurde mithilfe einer akustischen Sonde und das Geschiebe mithilfe des Dunetracking-Verfahrens sowie des Delft-Nile-Geschiebesammlers gemessen (Frings & Kleinans, 2008). Unter der Annahme einer Porosität von 35 % und einer Mineraleichte von 2.603 m³/s konnte aus den Messungen mithilfe einer Transport-Abflussbeziehung der jährliche Sandaustrag aus der *Waal* zu 0,478 Mt/a berechnet werden, was um nur 4 % von dem in dieser Studie berechneten Wert abweicht (0,469 Mt/a ± 70 %).

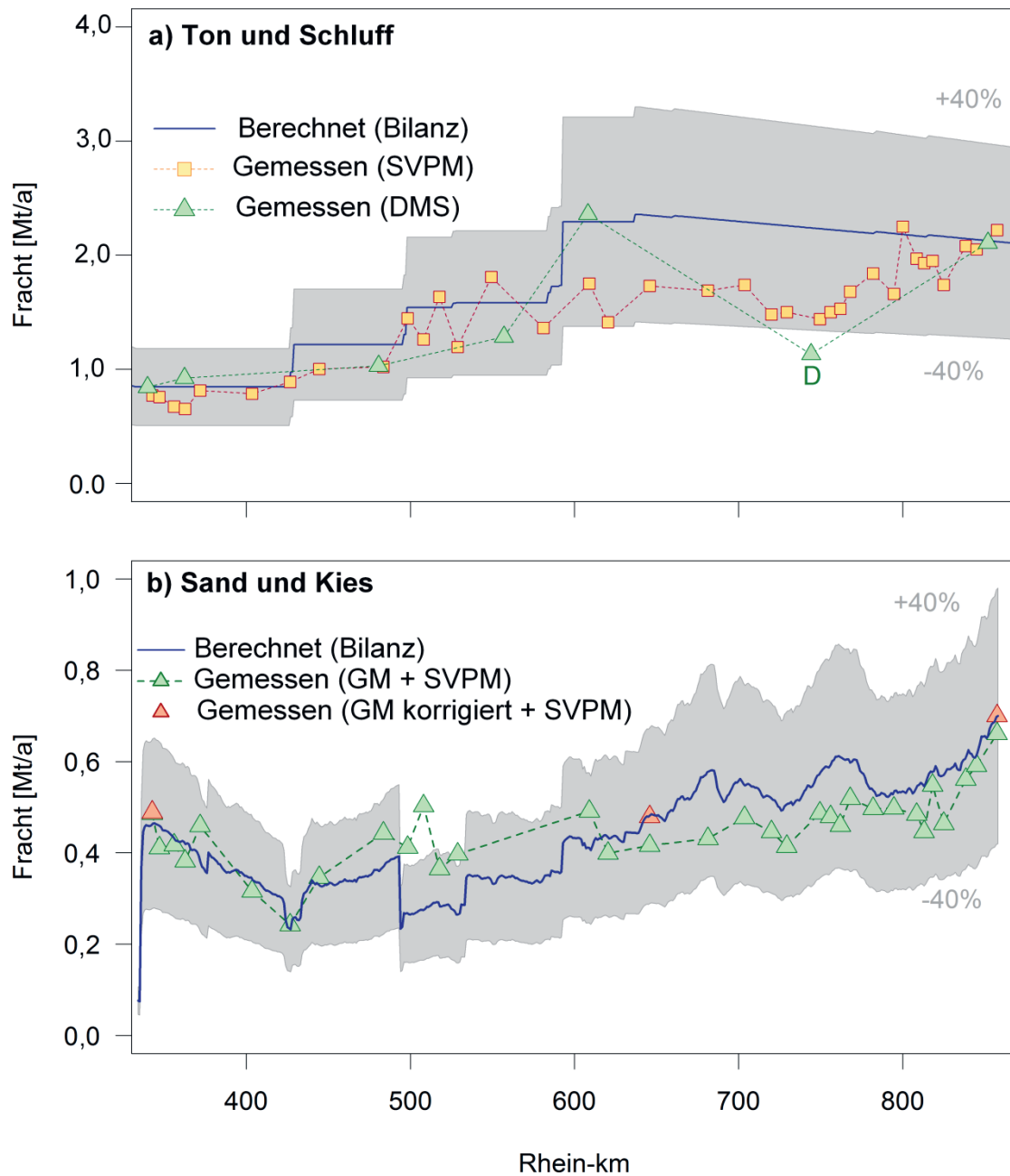


Abb. 11.9 Verifizierung der Sedimentbilanz des frei fließenden Bereichs des Rheins: a) Ton/Schluff-Frachten, b) Sand/Kies-Frachten. SVPM = Schwebstoffvielpunktmessung, DMS = Dauermessnetz Schwebstoff, GM = Geschiebemessnetz. Dargestellt sind mittlere Jahresfrachten im Zeitraum 1991–2010. Zu beachten ist, dass die DMS-Messungen an Rhein-km 340,2, 608,2, und 851,9 sowie die korrigierten GM/SVPM Messungen an Rhein-km 342,7, 645,8 und 857,5 als Eingangsdaten der Bilanzierung dienen und somit nicht als unabhängige Größen zu betrachten sind. GM/SVPM Werte aus dem Bereich Rhein-km 620–865 stammen aus Frings et al. (2014a). Die sonstigen auf Messwerten basierten Jahresfrachten wurden neu berechnet.

11.9 Schlussfolgerungen

Der Rhein ist der weltweit erste große Fluss mit einer detaillierten Sedimentbilanz des Flussschlauchs. Die einzigartigen Eigenschaften der Bilanz sind (a) der grenzüberschreitende Charakter, (b) die Erfassung des gesamten Flusses von der Quelle bis zur Mündung, (c) die Unterscheidung zwischen mehreren Korngrößenfraktionen und (d) die hohe räumliche Auflösung. Die Sedimentbilanz bietet ein kohärentes Bild der Morphodynamik im gesamten Einzugsgebiet des Rheins zwischen 1991 und 2010, das die Ton/Schluff-, Sand- und Kies/Stein-Fracht entlang des Rheins sowie die Quellen und Senken dieser Sedimente beschreibt. Es werden folgende Schlussfolgerungen gezogen.

- (1) Die Sedimentfrachten im Rhein sind nicht durchgängig. Es gibt keinen kontinuierlichen Transport von Sedimenten von der Quelle zur Mündung. Der Hauptgrund für den unterbrochenen Transport ist der natürliche *Bodensee*, der eine vollständige Sedimentfalle darstellt und den Sedimenttransfer vom alpinen Oberlauf zum Fluss stromabwärts unterbricht. Die 21 Staustufen unterbrechen den Sedimenttransport im staugeregelten Bereich. Die Staustufen sind nahezu vollständige Barrieren für die Geschiebefracht und speichern zudem große Mengen der Schwebstofffracht. Zusätzliche Querbauwerke, die die Kontinuität der Sedimente beeinträchtigen, sind im Quellbereich des Rheins, in den Nebenflüssen und den Mündungsarmen im Delta zu finden.
- (2) Von der Quelle zur Mündung durchquert der 1.232,7 km lange (KHR, 2015) Rhein vier morphologisch unterschiedliche Bereiche: den alpinen Bereich, den staugeregelten Bereich, den frei fließenden Bereich und den Rheindelta-Bereich. Im *Alpenrhein* nimmt die Sedimentfracht flussabwärts stark zu. Im *Bodensedelta* setzen sich die Sedimente auf der Sohle ab. Die Sedimentfrachten aller Fraktionen fallen im Bereich des *Bodensees* auf null. Im staugeregelten Bereich nehmen die Ton/Schluff- und Sand-Frachten langsam zu, während die Kies/Stein-Frachten nahezu bei null bleiben. Im frei fließenden Bereich nehmen die Kies/Stein-Frachten aufgrund von anthropogenen Zugaben zuerst abrupt zu, nehmen dann aber entlang der Fließstrecke wieder ab. Die Ton/Schluff- und Sand-Frachten weisen in einem Großteil des frei fließenden Rheins einen in Fließrichtung ansteigenden Trend auf. Bei der Ton/Schluff-Fraktion verwandelt sich im untersten Teil des frei fließenden Rheins aufgrund von Austrägen in die Überflutungsbereiche der steigende Trend in einen rückläufigen Trend. Dieser Trend setzt sich im Rheindelta fort. Bei der Sandfraktion setzt sich der Anstieg der Fracht bis in das Rheindelta fort; die Sand-Frachten gehen nahe der *Nordsee* letztendlich aber ebenfalls zurück. Die Kieseinträge ins Rheindelta sind gering und die Frachten fallen rasch auf null. Im unteren Rheindelta treten große Mengen an marinem Ton/Schluff und Sand in das Rheinsystem ein.
- (3) Auf globaler Ebene sind die Sedimentfrachten im *Alpenrhein* sehr groß, während der Sedimentaustrag vom Rhein in das Meer gering ist. Maximale Frachten reichen von 0,348 Mt/a bei der Kies/Stein-Fraktion, über 0,790 Mt/a bei der Sandfraktion bis hin zu 3,014 Mt/a bei der Ton/Schluff-Fraktion. Die maximalen Ton/Schluff-Frachten treten nicht, wie bei vielen anderen Flüssen, am Scheitelpunkt des Flussdeltas auf, sondern im Oberlauf des Flusses unmittelbar vor dem *Bodensee*. Die maximalen Kies-Frachten treten nahe der Sedimentzugabestelle am Beginn des frei fließenden Rheins auf; die maximalen Sand-Frachten im Rheindelta im Bereich der Maasmündung.
- (4) Im gesamten Einzugsgebiet stellen anthropogene Sedimenteinträge die größte Quelle der Kies/Stein-Fraktion dar. Die Nebenflüsse sind die größte fluviatile Quelle für Ton/Schluff und Sand in den Rhein. Eine Sedimentquelle derselben Größenordnung ist der Beitrag von marinem Ton/Schluff und Sand in das untere Rheindelta. Diffuse Einträge, anthropogene Sedimenteinträge sowie Abriebprodukte spielen eine eher geringe Rolle als Sedimentquelle für die Ton/Schluff- und Sand-Fractionen.

- (5) Die größte Sedimentsenke für Sand und Kies im gesamten Rhein sind Baggerungen. Geringere Senken für Kies sind Abrieb und Bühnenfeld-Ablagerungen. Geringere Senken für Sand sind Ablagerungen in Überflutungsbereichen, Bühnenfeldern und Häfen. Die Hauptsenken für Ton/Schluff sind Ablagerungen in Überflutungsbereichen, Baggerungen und Ablagerungen in Häfen, wobei die zuletzt genannten Prozesse hauptsächlich im unteren Rheindelta konzentriert auftreten. Der Sedimentaustrag in die *Nordsee* beschränkt sich auf die Sand- und Ton/Schluff-Fractionen.
- (6) Im Gegensatz zum idealtypischen Beispiel eines Flusses mit Erosion im Oberlauf und Sedimentation im Unterlauf weist der Rhein in seinem Oberlauf Nettosedimentation auf – hauptsächlich aufgrund massiver Sand-, Ton/Schluff-Ablagerungen im *Bodensee* – und Nettoerosion in den meisten flussabwärts gelegenen Bereichen. Lokal bestehen jedoch hohe Variationen. Veränderungen der Rheinsohle als Sedimentspeicher unterscheiden sich je nach Korngrößenfraktionen. Die Sohle bzw. der Seegrund sind netto interne Senken für die Kies- und Ton/Schlufffraktionen (im Gegensatz zu den oben beschriebenen externen Senken). Die Sandmenge in der Rheinsohle nimmt im Laufe der Zeit jedoch ab, was eine wichtige interne Sandquelle für den Rhein darstellt.
- (7) Der größte Teil des im Rheindelta abgelagerten Sediments ist marinen Ursprungs und wird nach der Ablagerung durch Baggerungen entfernt, wodurch eine stetige Sedimentfracht von der Nordsee ins Rheindelta entsteht. So wird mehr Sediment stromaufwärts von der Nordsee in das untere Delta transportiert als umgekehrt.
- (8) Oberstrom geht mehr Sediment aufgrund von Ablagerungen auf Überflutungsgebieten verloren als im Rheindelta.
- (9) Die heutigen Sedimentflüsse im Rhein sind stark von Flussregulierungsarbeiten der Vergangenheit sowie Sedimentmanagementmaßnahmen (d. h. Baggerungen und Sedimentzugaben) beeinflusst.
- (10) Trotz des starken menschlichen Einflusses bestimmen natürliche Faktoren die Lage der größten Sedimentationsbereiche im Rhein. Aufgrund seiner Tektonik und klimatologischen Geschichte hat der Rhein drei Haupterosionsbasen: den *Bodensee*, das Rheinische Schiefergebirge und die *Nordsee*. Die drei größten Sedimentationsgebiete liegen direkt flussaufwärts dieser drei Erosionsbasen. Hier finden die meisten Baggerarbeiten statt.
- (11) Das Verhalten der Ton/Schluff-, Sand- sowie der Kies/Stein-Fractionen im Rhein unterscheidet sich fundamental voneinander. Die Korngrößenverteilung der Flusssohle, die Korngrößenverteilung der Sedimentfrachten und die Korngrößenverteilungen der verschiedenen Sedimentquellen und -senken unterscheiden sich massiv voneinander. Am offensichtlichsten wird dies an der Tatsache, dass in vielen Flussabschnitten Kies abgelagert wird, während gleichzeitig Sand erodiert wird. Dies zeigt deutlich, dass man das Verhalten verschiedener Korngrößenfraktionen berücksichtigen muss, um die Dynamik des Flusses zu verstehen.
- (12) Die Sedimentdynamik im Rhein ist viel höher als Messungen der Sohländerung durch Echolotungen oder Transportmessungen im Hauptstrom vermuten lassen. Aufgrund der internen Sedimentspeicherung und -remobilisierung ist Sediment, welches einen bestimmten Flussabschnitt verlässt, nicht notwendigerweise dasselbe Material, das in den Flussabschnitt eintritt. Innerhalb des Flussabschnitts treten Quellen und Senken für Sedimente auf, die großräumig einander aufheben können, aber dennoch eine dominante Rolle für die lokale Morphodynamik spielen. Beispiele sind die gleichzeitige Erosion von Sand und Ablagerung von Kies in vielen Teilen des Rheins, der Sediment austausch mit den Überflutungsbereichen, Nebenarmen und Bühnenfeldern sowie die Rolle des Abriebs.

- (13) Der Rhein ist größtenteils ein kiesgeprägter Fluss (Ausnahmen sind der *Bodensee*, die Stauhaltungen im *Hoch-* und *Oberrhein* und das untere Rheindelta). Trotz seines Kiesbettes sind die Transportraten von Sand und Schluff um ein bis zwei Größenordnungen größer als die Transportraten von Kies. Während der Austausch von Ton/Schluff in diesen Kiesabschnitten von untergeordneter Bedeutung ist, stellt der Sand einen Teil des Sohlmaterials dar und tauscht sich mit der Sohle aus. Sand scheint in den Abschnitten mit Kiesbett eine wichtige morphologische Rolle zu spielen, da das erodierte Material hauptsächlich aus Sand besteht, der schnell schwebend flussabwärts transportiert wird.
- (15) Um die Sedimentbilanz des Rheins zu verbessern, wird ein Fokus auf die folgenden Aspekte empfohlen: (a) das Verhalten der Sandfraktion, (b) die Veränderungen der Korngröße in der Flusssohle aufgrund von Erosion und Sedimentation, (c) das Verhalten der Bühnenfelder, (d) die Sedimentation in Überflutungsbereichen, (e) die marinen Sedimenteinträge, (f) die Dynamik des staugeregelten Rheins, (g) die Rolle der Nebenflüsse und der diffusen Sedimenteinträge, (h) die Sedimentverteilung an den Flussverzweigungen und (i) Baggerungen in Häfen. Zusätzlich wird empfohlen weiter in die Datenerhebung und -erfassung zu investieren, um die Unsicherheiten der Bilanz zu verringern. Um den Rhein nachhaltig zu bewirtschaften und so den Bedarf des Menschen an seinen natürlichen Ressourcen zu decken, ist die Fortführung und Weiterentwicklung von Sedimenttransportmessungen und Sedimentbilanzanalysen unerlässlich.

11.10 Literatur

- Abegg, J., Kirchofer, A., Rutschmann, P. (2013): Masterplan – Massnahmen zur Geschieberekativierung im Hochrhein. Zürich und Gümmenen online]. Bundesamt für Energie BFE, Bern / Regierungspräsidium Freiburg. Verfügbar unter: www.news.admin.ch/NSBSubscriber/message/attachments/29940.pdf (letzter Zugriff: 12.11.2014).
- Arnaud, F. (2012): *Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé: le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach* (France, Allemagne). PhD Thesis, Université de Lyon, Lyon.
- Arnaud, F., Piégay, H., Schmitt, L., Rollet, A.J., Ferrier, V., Béal, D. (2015): Historical geomorphic analysis (1932–2011) of a by-passed river reach in process-based restoration perspectives: The Old Rhine downstream of the Kembs diversion dam (France, Germany). *Geomorphology*, 236, 163–177.
- Asselmann, N.E.M., Van Wijngaarden, M. (2002): Development and application of a 1D floodplain sedimentation model for the River Rhine in the Netherlands. *Journal of Hydrology* 268(1), 127–142.
- Astor, B., Gehres, N., Hillebrand, G. (2014): Von der Quelle zur Mündung, eine Sedimentbilanz des Rheins: Korngrößenanalyse von Schwebstoffproben am Rhein und seinen Nebenflüssen, Bericht BfG-1798. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Banhold, K., Frings, R.M., Schüttrumpf, H. (2014a): Von der Quelle bis zur Mündung – eine Sedimentbilanz des Rheins: Sandverlust bei Geschiebemessungen im Rhein, Bericht B2014.003. RWTH Aachen Universität, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Aachen.
- Banhold, K., Frings, R.M., Schüttrumpf, H. (2014b): Vorlandsedimentation am deutschen Rhein. Bericht B2014.004, RWTH Aachen Universität, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Aachen.
- Bartz, J. (1974): Die Mächtigkeit des Quartärs im Oberrheingraben. In: Illies, H.J., Fuchs, K. (Hrsg.): *Approaches to Taphrogenesis*, Schweizerbart, Stuttgart, 78–87.

- Belz, J.U., Brahmer, G., Buiteveld, H., Engel, H., Grabher, R., Hodel, H., Krahe, P., Lammersen, R., Larina, M., Mendel, H.-G., Meuser, A., Müller, G., Plonka, B., Pfister, L., van Vuuren, W. (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert: Analyse, Veränderungen, Trends. Bericht KHR I-22-2007, Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad.
- Berendsen, H.J.A., Stouthamer, E. (2000): Late Weichselian and Holocene palaeogeography of the Rhine–Meuse delta, the Netherlands. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 161(3), 311–335.
- Berendsen, H.J.A., Stouthamer, E. (2001): Palaeogeographic Development of the Rhine–Meuse Delta, the Netherlands. Van Gorcum, Assen.
- Blum, M.D., Törnqvist, T.E. (2000): Fluvial responses to climate and sea-level change: a review and look forward. *Sedimentology* 47(1), 2–48.
- Champagnac, J.D., Molnar, P., Anderson, R.S., Sue, C., Delacou, B. (2007): Quaternary erosion-induced isostatic rebound in the western Alps. *Geology* 35(3), 195–198.
- CHR (2015): Length of the Rhine (Update 2015) (online). Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes, Lelystad. January 9 2005. Verfügbar unter: <http://www.chr-khr.org/en/news/length-rhine-update-2015> (letzter Zugriff: 26.11.2016).
- De Vries, M. (1975): A morphological time-scale for rivers. XVIth IAHR Congress São Paulo. IAHR publications, 147 Seiten.
- DGJ (1926): Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch 1926, Rheingebiet Teil I–III, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Dittrich, A. (2012): Hydraulisch/morphologische Charakterisierung des Rheins zwischen Märkt und Breisach für den Ist- und Planungszustand. Bericht. Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Technischen Universität Braunschweig, Braunschweig.
- Dröge, B., Tippner, M., Gölz, E., Schürg, M., Engel, H., Busch, N., Mürlebach, M. (1985): Untersuchung der Abfluß- und Geschiebeverhältnisse des Rheins. Zusammenfassender Bericht über den Stand der Untersuchungen im November 1985 für die RE B, C und A/Geschiebezugabe. Bericht BfG-0291. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Frings, R., Kleinhans, M. (2008): Complex variations in sediment transport at three large river bifurcations during discharge waves in the river Rhine. *Sedimentology* 55(5), 1145–1171.
- Frings, R.M. (2011): Sedimentary characteristics of the gravel-sand transition in the river Rhine. *Journal of Sedimentary Research* 8(1), 52–63.
- Frings, R.M., Schüttrumpf, H., Vollmer, S. (2011): Verification of porosity predictors for fluvial sand-gravel deposits. *Water Resources Research* 47(7), W07525.
- Frings, R.M., Döring, R., Beckhausen, C., Schüttrumpf, H., Vollmer, S. (2014a): Fluvial sediment budget of a modern, restrained river: The lower reach of the Rhine in Germany. *Catena* 122, 91–102.
- Frings, R.M., Gehres, N., Promny, M., Middelkoop, H., Schüttrumpf, H., Vollmer, S. (2014b): Today's sediment budget of the Rhine River channel, focusing on the Upper Rhine Graben and Rhenish Massif. *Geomorphology* 204, 573–587.
- Frings, R.M., Vollmer, S. (2017): Guidelines for sampling bed-load transport with minimum uncertainty. *Sedimentology* (in press).
- Frostick, L.E., Jones, S.J. (2002): Impact of periodicity on sediment flux in alluvial systems: grain to basin scale. Geological Society, London, Special Publications 191(1), 81–95.

- Fryirs, K.A., Brierley, G.J., Preston, N.J., Kasai, M. (2007): Buffers, barriers and blankets: the (dis)connectivity of catchment-scale sediment cascades. *Catena* 70(1), 49–67.
- Fugro (2002): Laboratoriumresultaten betreffende morfologisch modelleren (datarapport, Nr. 610106004). Opdracht-nummer H-4086. Fugro Ingenieursbureau.
- Gehres, N., Astor, B., Hillebrand G. (2014): Von der Quelle zur Mündung, eine Sedimentbilanz des Rheins: Rhein Nebenflüsse als Sedimentlieferanten. Bericht BfG-1812, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.
- Gölz, E. (1992): Recent morphologic development of the Rhine River. In: 5th International Symposium on River Sedimentation, Karlsruhe.
- Görgen, K., Beersma, J., Brahmer, G., Buiteveld, H., Carambia, M., de Keizer, O., Krahe, P., Nilson, E., Lammersen, R., Perrin, C., Volken, D., (2010): Assessment of climate change impacts on discharge in the Rhine River basin: results of the RheinBlick2050 Project. CHR report I-23. ISBN: 978-90-70980-35-1, Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes CHR/KHR, Lelystad.
- Grams, P.E., Schmidt, J.C. (2005): Equilibrium or indeterminate? Where sediment budgets fail: Sediment mass balance and adjustment of channel form, Green River downstream from Flaming Gorge Dam, Utah and Colorado. *Geomorphology* 71(1), 156–181.
- Grujters, S.H.L.L., Veldkamp, J.G., Gunnink, J., Bosch, J.H.A. (2001): De lithologische en sedimentologische opbouw van de ondergrond van de Pannerdensche Kop, eindrapport. TNO rapport NITG01-166-B. Nederlands Instituut voor Toegepaste Geowetenschappen TNO, Zwolle.
- Grujters, S.H.L.L., Maljers, D., Veldkamp, J.G. (2005): 3D interpolation of grain size distributions in the upper 5 m of the channel bed of three lower Rhine distributaries. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 30(4), 303–316.
- Heine, E. (2011): Hydrographical Surveying of the Subaqueous Delta Plain of the River Rhine at Lake Constance. In: FIG (Hrsg.): FIG Working Week 2011 – Bridging the Gap Between Cultures, Hydrographical Surveying of the Subaqueous Delta Plain of the River Rhine at Lake Constance.
- Heine, E., Mayr, P., Bolter, N. (2008): Bodensee Seegrundvermessung 2008. Final report. Internationale Rheinregulierung/ BOKU Universität für Bodenkunde, Wien.
- Hoffmann, T. (2015): Sediment residence time and connectivity in non-equilibrium and transient geomorphic systems. *Earth-Science Reviews* 150, 609–627.
- Huisman, Y., Wiersma, A., Blinde, J., van Kesteren, W., Mosselman, E. (2013): Erosie door het verwijderen van boomstammen uit de Merwedde. Deltares, Delft.
- IKSR (2005): Internationale Flussgebietseinheit Rhein: Merkmale, Überprüfung der Umweltauswirkungen menschlicher Tätigkeiten und wirtschaftliche Analyse der Wassernutzung. Koordinierungskomitee Rhein/Internationale Kommission zum Schutz des Rheins, Koblenz.
- IRR (2014): Die Internationale Rheinregulierung [online]. Internationale Rheinregulierung, Lustenau. Verfügbar unter: <http://www.rheinregulierung.org/> (letzter Zugriff: 27.11.2014).
- Kleikämper, J., Gälli, R. (2007): Sedimente am Hochrhein, Kurzbericht. BMG Engineering AG, Zürich.
- Kleinhans, M.G. (2002): Sorting out sand and gravel: sediment transport and deposition in sand-gravel bed rivers. Ph.D. thesis, Utrecht University. Also published as: *Netherlands Geographical Studies* 293. Royal Dutch Geographical Society, Utrecht.
- Klose, H. (2003): Grundwasserprobleme beim Ausbau von Wasserstraßen am Beispiel des Oberrheinausbaues. Wasser- und Schifffahrtsamt Freiburg, Freiburg.

- Kondolf, G.M., Matthews, W.V.G. (1991): Unmeasured residuals in sediment budgets: A cautionary note. *Water Resources Research*, 27 (9), 2483-2486.
- Meyer, W.T., Stets, J. (2002): Pleistocene to recent tectonics in the Rhenish Massif (Germany). *Netherlands Journal of Geosciences* 81(2), 217–222.
- Middelkoop, H., Erkens, G., van der Perk, M. (2010): The Rhine delta – a record of sediment trapping over time scales from millennia to decades. *Journal of soils and sediments* 10(4), 628–639.
- Middelkoop, H., Asselman, N.E. (1998): Spatial variability of floodplain sedimentation at the event scale in the Rhine–Meuse delta, the Netherlands. *Earth Surface Processes and Landforms* 23(6), 561–573.
- Nanson, G.C., Huang, H.Q. (2008): Least action principle, equilibrium states, iterative adjustment and the stability of alluvial channels. *Earth Surface Processes and Landforms* 33(6), 923–942.
- Parsons, A.J. (2011): How useful are sediment budgets? *Progress in Physical Geography* 36(1), 60–71.
- Polschinski, M., Vollmer, S., Kempmann, K., Schittly, J.U., Steimer, V. (2008): Bericht der Expertengruppe 1 „Quantitative Untersuchungen“ der Unterarbeitsgruppe „Sediment- und Baggergutmanagement entlang des Oberrheins“.
- Port of Amsterdam (März 2010): RePort - Port of Amsterdam. Newsletter (36) https://www.portofamsterdam.nl/docs/uk/RePort/RePort%202010/RePort_36UK_DEF.pdf (letzter Zugriff am 21.12.2016).
- Reid, L.M., Dunne, T. (1996): Rapid evaluation of sediment budgets. *Catena*, Reiskirchen.
- Rijkswaterstaat (2014): Historische waterkwantiteit- en waterkwaliteitsgegevens [online database]. Verfügbar unter: live.waterbase.nl (letzter Zugriff: 04.04.2014).
- Rommel, J. (2005): Historische Entwicklung des Niederrheins und seiner Vorländer als Folge des dort seit 1934 betriebenen Bergbaus – Voruntersuchungsbericht zum Abschnitt Rhein-km 775 bis 814 im Zeitraum bis 1975. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- Rothe, P. (2000): Erdgeschichte – Spurensuche im Gestein. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Schälchli, U., Abegg, J., Hunzinger, L. (2000): Geschiebehaushalt Hochrhein. Universität Karlsruhe, Karlsruhe.
- Schirmer, W. (1990): Der känozoische Werdegang des Exkursionsgebietes. In: Schirmer, S. (Hrsg.): Rheingeschichte zwischen Mosel und Maas. Deuqua-Führer, 1. Wegener, Dormagen, Germany, 9–33.
- Schreiner, A. (1979): Zur Entstehung des Bodenseebeckens. *Eiszeit und Gegenwart* 29(1), 71–76.
- Schulz, M. (2004): Morphodynamik am Mehrerauer Seeufer (Bodensee). *Limnologica - Ecology and Management of Inland Waters* 34(1), 75–82.
- Schumm, S.A. (2005): *River variability and complexity*. Cambridge University Press.
- Semmel, A. (1996): On the physical geography of the excursion area. In: de Lange, N., Grimm, A., Heineberg, H., Mayr, F.-D. (Hrsg.): *The Rhine Valley. Urban, Harbour and Industrial development and Environmental Problems*. Beiträge zur Regionalen Geographie 41, 27–40.
- Syvitski, J.P., Vörösmarty, C.J., Kettner, A.J., Green, P. (2005): Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science* 308(5720), 376–380.
- Ten Brinke, W.B.M., Bolwidt, L.J., Snippen, E., van Hal, L.W.J (2001): Sedimentbalans Rijntakken 2000. Een actualisatie van de sedimentbalans voor slib, zand en grind van de Rijntakken in het

- beheersgebied van de Directie Oost-Nederland. Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA), Arnhem.
- Ten Brinke, W., 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.
- Tittizer, T., Krebs, F. (1996): *Ökosystemforschung: Der Rhein und seine Auen – eine Bilanz*. Springer-Verlag, 468 Seiten.
- Thonon, I. (2006): Deposition of sediment and associated heavy metals on floodplains. Ph.D. thesis, Utrecht University, Utrecht.
- Thonon I., de Jong, K., Van der Perk, M., Middelkoop, H. (2007): Modelling floodplain sedimentation using particle tracking. *Hydrological Processes* 21(11), 1402–1412.
- Walling, D. E. (1999): Linking land use, erosion and sediment yields in river basins. In: J. Garnier & J.M. Mouchel (Hrsg.): *Man and River Systems*, Springer Netherlands, 223–240.
- Walling, D. E. (2006): Human impact on land–ocean sediment transfer by the world's rivers. *Geomorphology* 79(3), 192–216.
- Wenka, T. (2009): Untersuchungen zur langfristigen Lagestabilität der zum bergsenkungsbedingten Sohlausgleich eingebrachten Waschberge im Rheinstrom. Abschlussbericht. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- Wilbers, A.W.E. (2004): The development and hydraulic roughness of subaqueous dunes. Ph.D. thesis, Utrecht University. Also published as: *Netherlands Geographical Studies* 323. Royal Dutch Geographical Society, Utrecht.
- WSD-SW (2007). *Kompendium der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Südwest. Organisatorische und technische Daten, Binnenschifffahrt, Aufgaben, Wasserstraßen*. Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH), Rostock.
- Zarn, B. (2001): Morphologie und Geschiebehalt Alpenrhein. Zusammenfassender Bericht über die Untersuchungen zwischen 1985 und 2000. Hunziker, Zarn & Partner, Domat/Ems.
- Zarn, B. (2010a): Alpenrhein Reichenau – Illmündung, Ermittlung des Feststoffaufkommens. Bericht Nr. A-504.1. Hunziker, Zarn & Partner AG, Domat/Ems.
- Zarn, B. (2010b): Internationale Strecke des Alpenrheins, Ermittlung des Feststoffaufkommens. Hunziker, Zarn & Partner AG, Domat/Ems.
- Zarn, B., Oplatka, M., Pellandini, S., Mikos, M., Hunziker, R., Jäggi, M. (1995): Geschiebehalt Alpenrhein. Mitteilung Nr. 139 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, Zürich.
- Zippelt, K. (1988): Modellbildung, Berechnungsstrategie und Beurteilung von Vertikalbewegungen unter Verwendung von Präzisionsnivelements. Dissertation Universität Fridericiana zu Karlsruhe. Beck'schen Verlagsbuchhandlung, München.

12. Beitrag für das Gewässermanagement

R.M. Frings, T. Hoffmann, G. Hillebrand, S. Vollmer

Die vorliegende Sedimentbilanz zeigt, dass der Sedimenttransport im Rhein sehr dynamisch und durch abwechselnde Sedimentations- und Erosionsmuster auf unterschiedlichen Raumskalen gekennzeichnet ist. Sowohl Sedimentations- als auch Erosionsprozesse können aus der Sicht der Flussbewirtschaftung negative Auswirkungen haben (Gölz, 1994; Ten Brinke, 2005). Eine Sedimentbilanz kann die Sedimentdynamik effektiv erfassen, sodass die Bilanzanalyse ein nützliches Werkzeug bei der Identifikation von Ursachen von Erosions- und Sedimentationsprozessen mit negativen Auswirkungen und für die Ausarbeitung von Maßnahmen im Flussmanagement darstellt. Zwar ist die Erstellung der Sedimentbilanz zeitaufwendig und kostenintensiv, jedoch erweist sie sich langfristig als gewinnbringend, da sie unser Verständnis des funktionalen Zusammenhangs des Sedimenttransports im Rhein und der damit verbundenen anthropogenen Auswirkungen verbessert. Das Hauptziel dieses Kapitels ist es, den Mehrwert der Sedimentbilanzanalyse für das Management des Rheines zu zeigen. In Anlehnung an Frings & Ten Brinke (eingereicht) und Ten Brinke (2016) werden die Vorteile einer Sedimentbilanz für die Flussbewirtschaftung aufgelistet und konkrete Anwendungsmöglichkeiten für den Rhein dargestellt.

Anwendung I: Erzeugung von Ordnung in den Daten

Die Sedimentdynamik eines Flusses ist nicht immer leicht zu bestimmen. Dies liegt zum einen an der Komplexität der Prozesse, zum anderen an Messunsicherheiten und den variablen Raum- und Zeitskalen der Erfassung der berücksichtigten Prozesse. Während zum Beispiel die Erfassung der Schwebfracht im deutschen Teil des Rheines durch werktägliche Daten an elf Stationen erfolgt, liegen die Messungen der Sohlveränderungen im frei fließenden Rhein alle 100 m im Ein- bis Zweijahresrhythmus vor. Die Berechnung der Vorlandsedimentation im *Ober-, Mittel- und Niederrhein* erfolgte hingegen als Mittelwert der Jahre 1986 bis 2013. Aufgabe einer jeden Sedimentbilanz ist es, die verwendeten Daten zu vereinheitlichen und auf einen gemeinsamen Zeitraum und ein einheitliches Untersuchungsgebiet zu inter- bzw. extrapolieren. Mithilfe einer homogenisierten Sedimentbilanz erhalten Flussmanager einen Ansatz zur schlüssigen und einheitlichen Bewertung der verfügbaren Daten des Flusssystemes.

Anwendung II. Identifizierung morphologischer Probleme

Sedimentbilanzen erfassen nicht nur die Veränderung des Sedimentflusses entlang des Gerinnes, sondern geben Aufschluss über die Quellen und Senken des Transportes und damit über die Ursachen der Veränderungen. Zur Veranschaulichung soll hierbei eine Erosionstendenz im *Oberrhein* (hier zwischen Worms und Eltville im Rheingau) dienen. Dort wurden in den 2000er Jahren mithilfe von Sohlpeilungen Eintiefungen der Sohle über große Bereiche dieser Rheinstrecke festgestellt. Gleichzeitig haben Sedimentmessungen eine Verringerung des Geschiebetransports (Kies) stromabwärts nachgewiesen, was für ein Sedimentationsverhalten spricht. Dieser Widerspruch konnte erst mithilfe einer Sedimentbilanz für alle Korngrößen geklärt werden (Frings et al., 2014a). Der Fluss befindet sich tatsächlich in einem Erosionsregime. Dagegen erwies sich die Annahme, dass überwiegend Kies erodiert wurde, als falsch. Stattdessen hat sich gezeigt, dass ein signifikanter Anteil des erodierten Materials aus Sand besteht, der in Suspension abtransportiert wird. Die Bilanzanalyse hat somit gezeigt, dass auf der Raumskala der betrachteten Abschnitte des Rheins nicht der Austrag von Kies, sondern von Sand das Hauptproblem der langfristigen Sohlerosion darstellt.

Ein weiteres Beispiel betrifft die Bühnenfelder entlang des Rheins, zwischen denen sich in regelmäßigen Abständen Sand- oder Kiesstrände befinden. In den 1980er Jahren bestand in den Niederlanden die Befürchtung, dass die fortschreitende Zunahme der Größe von Binnenschiffen zu

einer kontinuierlichen Erosion der Sandstrände führen werde. Auf Grundlage einer Sedimentbilanz der Bühnenfelder konnten Ten Brinke et al. (2004) zeigen, dass bei geringen Abflüssen die induzierten Strömungen der Schiffe in der Tat zu Erosionen an den Stränden beitragen, diese jedoch bei großen Abflüssen durch die Anlandung von Sedimenten wieder kompensiert werden. Ein aktives Eingreifen von Flussmanagern war demzufolge nicht erforderlich. Da die Bühnenfelder im deutschen Teil des Rheins teilweise das gleiche Alter wie die Bühnenfelder im niederländischen vorweisen, liegt die Vermutung nahe, dass auch die deutschen Bühnenfelder sich langjährig im morphologischen Gleichgewicht befinden. Die neue Bilanzstudie suggeriert jedoch, dass die Bühnenfelder im frei fließenden Rhein sich in einem Sedimentationsregime befinden. Eine zunehmende Bühnenfeldverlandung kann zu veränderten Strömungsverhältnissen im Hauptgerinne führen und damit zukünftig Probleme verursachen.

Anwendung III. Ermittlung von Lösungen für morphologische Probleme

Sedimentbilanzen können helfen komplexe Probleme zu verstehen und diese mit zielführenden Lösungen zu beheben. Um die Ziele der europäischen Wasserpolitik adressieren und wirksam verfolgen zu können, müssen z. B. die dominierenden Wirkmechanismen der jeweiligen komplexen Systeme auf Flussgebietskala verstanden werden. Viele Prozesse stehen in lokaler, aber auch überregionaler Wechselwirkung miteinander. Die Einflüsse einzelner Eingriffe müssen auf das Gesamtsystem bezogen bewertet werden und dürfen nicht als unabhängige aneinandergereihte Einzelmaßnahmen behandelt werden, sondern erfordern Konzepte auf Flussgebietskala. Zentrale Bedeutung für das Verständnis der Wirkmechanismen dieser komplexen Systeme Flussgebiete, haben Hydro- und vor allem die Sediment- und Morphodynamik der Gewässer. Ein wichtiger Schlüssel für das Systemverständnis ist daher die Ermittlung einer flussgebietsweiten Sedimentbilanz, wie sie am Rhein von der Quelle bis zur Mündung, und nach Fraktionen aufgeschlüsselt, unternommen wurde. Auf einer solchen Grundlage können Sedimentmanagementkonzepte fußen, die wiederum ein Rückgrat der Flussgebietsbewirtschaftung bilden können. Anhand einer beispielhaften Fragestellung kann diese Schlüsselfunktion eingeschätzt werden: Die Situation überwiegender Sedimentdefizites in frei fließenden Strecken besteht weit verbreitet in Europa (u.a. in den großen Flussgebieten von Rhein, Donau, Elbe, aber auch in vielen kleineren frei fließenden Flussstrecken) und hat über den Wirkmechanismus der damit einhergehenden Eintiefung der Flusssohle und Entkopplung zwischen Fluss und Aue prägenden Einfluss auf den Zustand der europäischen Ströme. Ursache von Sohlenerosion kann in einem Streckenbereich z. B. der Geschieberückhalt in Staustufen oder Speichern der Zuflüsse sein. Überwiegend ursächlich kann aber auch eine flussbauliche Verschärfung des Sohlenangriffes oder eine Sedimentsenke in der Strecke (z. B. ein Nebenarm mit Sedimentationstendenz) sein. Eine detaillierte fraktionierte Sedimentbilanzierung kann Hinweise darauf geben, was die Ursachen für Defizite sind und den Weg auf die sachgemäße Strategie für Gegenmaßnahmen führen, wie z. B. die Reduzierung des Sohlenangriffes oder die Zugabe von fehlenden Fraktionen (detektiert über die Sedimentbilanz).

Anwendung IV: Verbesserung von Monitoring-Strategien

Mithilfe der Sedimentbilanz können mögliche Fehler und Unsicherheiten der zugrunde liegenden Daten identifiziert werden. Das Konzept der Sedimentbilanz basiert auf dem Gesetz der Massenerhaltung, sodass sich Sedimentquellen und -senken sowie die Änderungen im Sedimentspeicher ausgleichen. Ist dies nicht der Fall, deutet dies auf die Vernachlässigung wesentlicher Bilanzterme bzw. auf Fehler oder Unsicherheiten in den Eingangsdaten hin. Die Größe der Schließungsterme gibt hierbei Aufschluss über die Unsicherheiten der verwendeten Daten und die Vollständigkeit der erfassten Prozesse. Zur Abschätzung der Auswirkungen von Maßnahmen zum Sedimentmanagement gilt es diese Unsicherheiten zu reduzieren. Auf Grundlage der Sedimentbilanz des Rheines ergeben sich folgende Implikationen für das zukünftige Gewässermonitoring:

- Für den *Alpenrhein* stellen die Sedimenteinträge durch Nebenflüsse die größte Unsicherheit dar. Für den *Bodensee* ist die größte Unsicherheit der Sedimenteintrag aus dem *Alpenrhein*. Diese Prozesse sollen zukünftig intensiver untersucht werden. Falls die Sedimenteinträge in den *Bodensee* aufgrund von Seegrundvermessungen quantifiziert werden, ist es essentiell, auch die Kornverteilung und Dichte der Sedimentablagerungen zu quantifizieren.
- Für den staugeregelten *Hochrhein* und *Oberrhein* liegen nur sehr beschränkt Daten vor. So bleibt unklar, welche Sedimente hier auf der Flusssohle zu finden sind, inwiefern es in dieser Strecke Geschiebetransport gibt, und in welchem Maß die Sedimentdurchgängigkeit durch die 21 vorhandenen Staustufen beeinträchtigt wird. Auch der Sedimenteintrag in dieser Strecke durch Nebenflüsse und diffuse Quellen, sowie die Sedimentverteilung zwischen *Restrhein* und *Grand Canal d'Alsace* bleiben unsicher. Im gesamten Rheineinzugsgebiet ist zur Sedimentdynamik der staugeregelten Strecke am wenigsten bekannt. Feldmessungen in dieser Strecke sind zu empfehlen.
- Der Sediment austausch zwischen dem Gerinne und den Bühnenfeldern bzw. den Überflutungsflächen im deutschen Rhein ist mit hohen Unsicherheiten verbunden. Dies betrifft vor allem die Fraktionierung der Akkumulation in den Auen und Bühnenfeldern. Eine verbesserte Erfassung der morphologischen Veränderung der Bühnenfelder (z. B. durch die Anwendung des Fächerlotes während eines Hochwassers, oder mittels terrestrischer Methoden während Niedrigwasser) und eine detailliertere Erfassung der Akkumulation in den Überflutungsflächen in Abhängigkeit der Eigenschaften der Hochwasser ist daher empfehlenswert.
- Mit Blick auf die Ton/Schluff-Fraktion sind die Unsicherheiten, die mit den diffusen Sedimenteinträgen (hier Schließungsterm) und mit den Einträgen aus Nebenflüssen verbunden sind, signifikant. Dies betrifft vor allem den Eintrag am frei fließenden *Ober-* und *Mittelrhein*. In der hier vorgestellten Sedimentbilanz wird der Sedimenteintrag in die Fließgewässer durch den Eintrag der Nebenflüsse berücksichtigt. Eine prozessbasierte Analyse der Sedimenteinträge in die Gewässer bzw. eine Prognose veränderter Einträge infolge des Klima- bzw. Landnutzungswandels unter Einbezug der Dynamik im Einzugsgebiet des Rheines sind hierzu unerlässlich.
- Für das obere Rheindelta hat sich herausgestellt, dass die Sedimentverteilung an den Flussverzweigungen Pannerdensche Kop und IJsselkop eine der größten Unsicherheiten bleibt. Auch der Sedimentaustrag aus *Waal*, *Lek* und *IJssel* ist sehr unsicher. Mit Blick auf die aktuelle Situation (d. h. hinsichtlich des Bilanzierungszeitraums 1991 – 2010) stellt sich vor allem die Frage, inwiefern die zahlreichen „Ruimte voor de Rivier“-Maßnahmen den Sedimenthaushalt verändert haben. Eine Aktualisierung der Bilanz für den Zeitraum 2011 – 2020 sollte jetzt schon eingeplant werden. Dafür sind großskalige Feldmessungen in den nächsten Jahren unentbehrlich.
- Für das untere Rheindelta sind viele Bilanzterme mit großen Unsicherheiten behaftet: zum Beispiel der Sedimenteintrag von oberstrom und aus der *Nordsee*, die Sedimentausträge in die Häfen und *Nordsee* und die korngrößen-spezifischen Anlandungs- und Erosionsmengen an der Flusssohle. Auch hier sind Messkampagnen zur Aktualisierung der Bilanz und zur Verbesserung des Verständnisses der aktuellen morphologischen Prozesse erforderlich.

Anwendung V: Verbesserung von Baggerstrategien

Um die Schiffbarkeit zu gewährleisten, erfolgen regelmäßig Baggerungen entlang des Rheins. Baggermaßnahmen profitieren deutlich von einem verbesserten Verständnis der Quellen und Senken der bettbildenden Korngrößen. Zum Beispiel wurde der ausgebagerte Sand in den Niederlanden bis zum Ende des 20. Jahrhunderts als Baumaterial verkauft. Sedimentbilanzen in den 1990er Jahren zeigten jedoch, dass das ausgebagerte Material der Größenordnung der jährlichen Sohleintiefung

entspricht, wodurch Baggerungen als eine der Hauptursachen für die fortwährende Sohleintiefung identifiziert werden konnten. Daraufhin erfolgte ein Verbot der Nettosedimententnahme im Oberlauf des Rheindeltas. Das entnommene Material muss nun in der gleichen Strecke wieder hinzugegeben werden. Ein Vergleich der Sedimentbilanz für den Zeitraum 1980–1990 mit der des Zeitraums 1990 – 2010 hat gezeigt, dass diese optimierte Baggerstrategie erfolgreich war (Ten Brinke et al., 2001): Die Sohleintiefung wurde zwar nicht vollständig behoben, konnte aber deutlich reduziert werden.

Anwendung VI: Beurteilung der Konsequenzen von anthropogenen Eingriffen

Sedimentbilanzen stellen für die Beurteilung von anthropogenen Eingriffen ein hervorragendes Hilfsmittel dar. Um Sohleintiefungen zu verhindern, werden im deutschen Teil des Rheins große Mengen Kies zugegeben (vgl. u. a. Abb. 7.7). Durch die Sedimentbilanz wird deutlich, dass diese Zugaben einen großen Effekt auf die Morphodynamik haben. Die Zugaben reduzieren nicht nur die Eintiefungserscheinungen, sie führen auch zu einer Vergröberung der Gewässersohle. Bei Fortsetzung dieser Managementstrategie kann effektiv die Sohlerosion (von hauptsächlich Sand) im deutschen Teil des Rheins reduziert werden. Es sollte jedoch auch in den Blick genommen werden, ob hiermit die Sand-Frachten abnehmen könnten und dadurch im unterstromigen Teil des Rheins langfristig ein Defizit von Sand-Frachten entstehen kann. Mithilfe einer Sedimentbilanz können sowohl die positiven als auch negative Konsequenzen von anthropogenen Eingriffen aufgezeigt werden.

Renaturierungsmaßnahmen von Flussauen stellen einen wichtigen Baustein bei der Erreichung eines guten ökologischen Zustandes von Flüssen und Bundeswasserstraßen im Rahmen der EG-Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) dar. Die Bilanzen des frei fließenden Rheins belegen, dass die Flussauen große Teile des von oberstrom eingetragenen Sedimentes speichern und damit eine langfristige Senke der Feinfracht und assoziierter Nähr- und Schadstoffe darstellen. Ferner zeigen die Teilbilanzen die hohe Bedeutung der Nebenflüsse, welche die primäre Quelle der Ton/Schluff-Frachten im Rhein sind. Langfristige Bilanzstudien (vgl. u. a. Hoffmann et al., 2009; Hoffmann, 2015) zeigen einen erheblichen Anstieg der Feinfracht und der Auensedimentation als Folge der gesteigerten Landnutzung in Mitteleuropa in den letzten 2000 Jahren. Die anthropogen induzierten Sedimenteinträge in die Flussauen sind somit eine wesentliche Restriktion bei der Planung und Umsetzung von Maßnahmen zur Verbesserung der Auenentwicklung im Rahmen der EG-WRRL. Zur Bewertung der Maßnahmen ist eine integrative Betrachtung des Flussgebietsmanagements, inklusive der Sedimenteinträge aus dem Einzugsgebiet, notwendig.

Anwendung VII. Verbesserung von numerischen Modellen

Mithilfe von Sedimentbilanzen können numerische Modelle optimiert werden, indem sie (1) bessere Eingangs-, Kalibrierungs- und Validierungsdaten bieten, (2) die relevanten Prozesse für die Simulation festlegen. Die Ergebnisse der Sedimentbilanz des Rheins belegen, dass diffuse Einträge sowie die Akkumulation in den Bühnenfeldern und den Überflutungsbereichen relevante Prozesse sind, die häufig in hydromorphodynamischen Simulationen zum Sedimenttransport von Flusssystemen nicht berücksichtigt werden. Optimierte Simulationen des Sedimenttransportes im Rhein (insbesondere der Schwebfracht) sollten diese Prozesse mit einbeziehen.

Anwendung VIII. Veranschaulichung des Flussmanagements für die Gesellschaft

Sedimentbilanzen ermöglichen eine klare und übersichtliche Visualisierung von morphodynamischen Prozessen im Fluss. Diese Darstellungen der Sedimentbilanzierungen (Frachtlängsschnitte auch in Fraktionen unterteilt sowie Fließschemata) eignen sich gut, um die komplexen Prozesse Menschen ohne wasserbaulichen oder geomorphologischen Hintergrund zu vermitteln und zusätzlich die Unterstützung der Gesellschaft sowie der Politik für Vorhaben im Flussmanagement zu erhalten.

Anwendung IX. Schulung zukünftiger Generationen von Flussmanagern

Eine Sedimentbilanz aufzustellen ist wie das Arbeiten an einem Puzzle, welches sich nach und nach zusammensetzt und letztlich sein Bild offenbart. Somit wird Ordnung im scheinbaren Chaos erzielt,

was sich zum einen positiv auf das Flussmanagement auswirkt und gleichzeitig das Fachwissen sowie die Erfahrung von Flussmanagern schult. Junge Akademiker, die am Anfang ihrer Karriere stehen, sollten also die Möglichkeit erhalten bei feldorientierter Forschung und beim Zusammensetzen des Puzzles mitzuwirken, um somit das Flusssystem richtig kennenzulernen.

Im Rahmen des Anthropozän-Konzeptes, an dem weltweit führende Wissenschaftler aus den Natur- und Sozialwissenschaften, Künstler, Politologen und Vertreter der Gesellschaft beteiligt sind, wird zu einem Paradigmenwechsel aufgerufen, der den Menschen als formende Kraft der Natur in den Mittelpunkt stellt (siehe u. a. Schwägerl, 2010). Die Arbeitsgruppe „Anthropozän“ der Internationalen Geologischen Vereinigung IUGS (International Union of Geological Science) erarbeitet in diesem Zusammenhang einen Vorschlag zur Benennung einer neuen geochronologischen Epoche, die den Anforderungen einer globalen Stratigraphie gerecht wird. Die vorgestellte Sedimentbilanz belegt die außerordentlich hohe Bedeutung der wirtschaftlichen Tätigkeit des Menschen für den Sedimenttransport und die Morphodynamik des Rheins. Der Rhein stellt somit eine Typlokalität eines anthropozänen Fließgewässers dar (Syvitski & Kettner, 2011). An keinem anderen Fluss der Welt ist in solch hohem Maß die Auswirkung des Menschen von der Quelle bis zur Mündung wie am Rhein belegt. Die Sedimentbilanz des Rheins stellt somit ein weltweit einmaliges Schulungsmaterial dar, die anthropogenen Auswirkungen und Maßnahmen zum Management eines anthropozänen Flusses zu veranschaulichen.

Literatur

- Frings, R.M., Ten Brinke, W.B.M.: Ten reasons for drawing-up channel sediment budgets for river management. *International Journal of River Basin Management* (eingereicht).
- Frings, R.M., Gehres, N., Promny, M., Middelkoop, H., Schüttrumpf, H., Vollmer, S. (2014a): Today's sediment budget of the Rhine River channel, focusing on the Upper Rhine Graben and Rhenish Massif. *Geomorphology* 204, 573–587.
- Frings, R.M., Döring, R., Beckhausen, C., Schüttrumpf, H., Vollmer, S. (2014b): Fluvial sediment budget of a modern, restrained river: The lower reach of the Rhine in Germany. *Catena* 122, 91–102.
- Schwägerl, C. (2010): Menschenzeit: Zerstören oder gestalten? Die entscheidende Epoche unseres Planeten. Riemann.
- Syvitski, J.P., Kettner, A. (2011): Sediment flux and the Anthropocene. *Philosophical Transactions of the Royal Society, A Math Phys Eng Sci*, 369, 957–975.
- Ten Brinke, W.B.M., Bolwidt, L.J., Snippen, E., Van Hal, L.W.J (2001): Sedimentbalans Rijntakken 2000. Een actualisatie van de sedimentbalans voor slib, zand en grind van de Rijntakken in het beheersgebied van de Directie Oost-Nederland. Arnhem: Rijksinstituut voor Integraal Zoetwaterbeheer en Afvalwaterbehandeling (RIZA).
- Ten Brinke, W.B.M., Schulze, F.H., Van der Veer, P. (2004): Sand exchange between groyne field beaches along the Rhine and the main channel: the impact of navigation traffic versus river flow. *River Research and Applications* 20, 899–928.
- Ten Brinke, W.B.M. (2016): Relevance of the sediment budget for navigation and river management. Sedimentbilanzen in Flussgebieten – von der Quelle bis zur Mündung. 17. Gewässermorphologisches Kolloquium am 3./4. November 2015 in Koblenz. Veranstaltungen 1/2016. Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 10–17.

Anhang A Alpenrhein

Tab. A.1: Angenommener Geschiebeeintrag aus Quell- und Nebenflüssen in den Alpenrhein über alle Fraktionen und für die Fraktionen über 2 mm für verschiedene Perioden zwischen 1974 und 2005 (gerundet auf 1000 m³) (Zarn, 2010a).

Periode	1974 – 2005	1974 – 1988	1989 – 1995	1996 – 2005
	[m ³ /Jahr]	[m ³ /Jahr]	[m ³ /Jahr]	[m ³ /Jahr]
alle Fraktionen				
Vorderrhein	36'000	23'000	35'000	45'000
Hinterrhein	13'000	8'000	11'000	20'000
Plessur	13'000	9'000	5'000	20'000
Maschänser Rüfi	6'000	4'000	3'000	11'000
Landquart	36'000	22'000	16'000	70'000
Tamina	3'000	2'000	1'000	5'000
Ill	18'000	14'000	8'000	30'000
Frutz	3'000	2'000	1'000	8'000
Summe	128'000	84'000	80'000	209'000
Fraktionen > 2 mm				
Vorderrhein	29'000	17'000	24'000	42'000
Hinterrhein	11'000	6'000	8'000	18'000
Plessur	11'000	7'000	6'000	16'000
Maschänser Rüfi	5'000	3'000	2'000	8'000
Landquart	29'000	17'000	17'000	52'000
Tamina	2'000	1'000	1'000	4'000
Ill	14'000	11'000	6'000	24'000
Frutz	3'000	1'000	1'000	7'000
Summe	104'000	63'000	65'000	171'000

Tab. A.2: Übersicht über die Bilanzierungen der Veränderungen des Rheindeltas aus Seegrundaufnahmen bis zum Jahr 2008. Ab 1989 wurde versucht, die Ablagerungen dem Rhein, der Bregenzer- und der Dornbirnerach zuzuordnen (Zarn, 2010b).

Periode	1911 -		1921 -		1931 -		1941 -		1951 -		1961 -		1969 -		1979 -		1989 -		1999 -		2008 -		1931 -			
	1921	10	1931	10	1941	10	1951	10	1961	10	1969	8	1979	10	1989	10	1999	10	2008	9	29	77	1931 -	2008		
Jahre																										
Bemerkungen																						1)				
Deltaablagerungen aus Seegrundvermessungen																										
Alpenrhein [Mio. m3]																										
B. und D. Ach [Mio. m3]																	21.1									
Total [Mio. m3]						35.1	15.8	36.8	27.6	36.3	22.3	22.3	23.9	14.998	61.196	212.798										
Total [Mio. m3/Jahr]						3.51	1.59	3.68	3.45	3.63	2.23	2.23	2.39	1.67	2.11	2.76										
Baggerungen [Mio. m3]						1.974	1.158	1.100	0.343	0.805	1.545	0.750	1.123	3.418	8.798											
Schwebstoffaufkommen aus Messdaten Die poldsau																										
Alpenrhein, B. und D. Ach [Mio. m3/Jahr] 2)	2.572	3.566	3.428	1.883	3.787	3.113	2.861	2.389	2.050	1.781	2.083	2.661	7.203													
mittlere Jahreswasserfrachten [Mio. m3/Jahr]						7320	6520	7250	7260	7090	7870	7200	7406	7.203												
1): Umrechnung von den Schwebstoffmessungen auf Volumen mit 1.7 t/m3 und erhöht um 20% Geschiebeanteil, Seite 27 in /11/																										
2): Gemäss /17/ dürfte das Schwebstoffaufkommen mit Hilfe der Abflussmessungen am Rhein sowie von Schwebstoffmessungen der Jahre 1936 bis 1939 bei Brugg bestimmt worden sein mit der Annahme, dass das Schwebstoffaufkommen der Bregenzer- und Dornbirnerach pro Quadratkilometer Einzugsgebiet gleich ist wie im Einzugsgebiet des Alpenrheins; Raumgewicht vermutlich 1.3 t/m3																										

Anhang B Hochrhein und staugeregelter Oberrhein

B.1 Durchgängigkeit der Stauhaltungen im Hochrhein

In der Literatur wird der Bereich des Hochrheins bei Basel als geschiebelos beschrieben (Abegg, 2001), da die Staufstufen nicht für Geschiebe durchgängig seien. Der Geschiebetransport ist im Hochrhein durch die elf Kraftwerke stark eingeschränkt. Innerhalb der Stauhaltungen kommt es zu keinem oder nur geringem Transport. Schälchli et al. (2000) haben mittels numerischer Berechnungen und Vergleich von Sohlhöhen aus verschiedenen Zeiträumen untersucht, inwieweit sich Sediment durch die Stauhaltungen bewegen kann. In der numerischen Betrachtung wurde vor allem untersucht, welche Sohlschubspannungen sich bei den Abflüssen Q_m (mittlerer Abfluss, auch MQ genannt), Q_9 (Abfluss, der im Mittel neun Mal pro Jahr erreicht oder überschritten wird) und HQ_{10} (Hochwasser, das statistisch gesehen einmal in 10 Jahren auftritt) einstellt. Diese Werte sind beispielhaft für die Stauhaltungen Laufen und Birsfelden in Abbildung B1 dargestellt. Schälchli et al. (2000) gehen davon aus, dass unterhalb der kritischen Sohlschubspannung kein Transport stattfinden kann. Die dimensionslose kritische Schubspannung ist für Sediment mit der Korngröße 2 cm (d_m des Thur-Geschiebes) berechnet worden und beträgt $\Theta = 0,05$. Für die Stauhaltung Laufenburg bedeutet dies, dass bei mittlerem Abfluss (Q_m) kein Transport stattfindet, bei einem Q_9 in der Umgebung der Murg-Mündung allerdings Sediment in Bewegung kommt. Bei einem HQ_{10} wird laut Berechnung in der ganzen Stauhaltung Sediment transportiert. Die Stauhaltung Laufenburg wird somit von Schälchli (2000) als durchgängig eingestuft. In der Stauhaltung Birsfelden sieht die Situation ähnlich aus: kein Transport bei mittlerem Abfluss, bei einem Q_9 ausschließlich Transport an der Stauwurzel, bei HQ_{10} Transport bis kurz vor das Kraftwerk. Dies würde bedeuten, dass kein Sediment bis zur Bauwerksebene gelangen oder gar hindurchtransportiert werden könnte. Die Stauhaltung Birsfelden wird daher von Schälchli (2000) als nicht durchgängig eingestuft.

Für die vorliegende Betrachtung wurden die Ansätze von Schälchli (2000) insofern erweitert, als eine fraktionierte Betrachtung durchgeführt wurde, da im Hochrhein und seinen Nebenflüssen auch Sedimente kleiner als 2 cm vorliegen, mit denen das numerische Modell ausgeführt wurde. In der vorliegenden Betrachtung wird angenommen, dass sich Sand durch alle Stauhaltungen hindurchbewegt und die Wehre passiert.

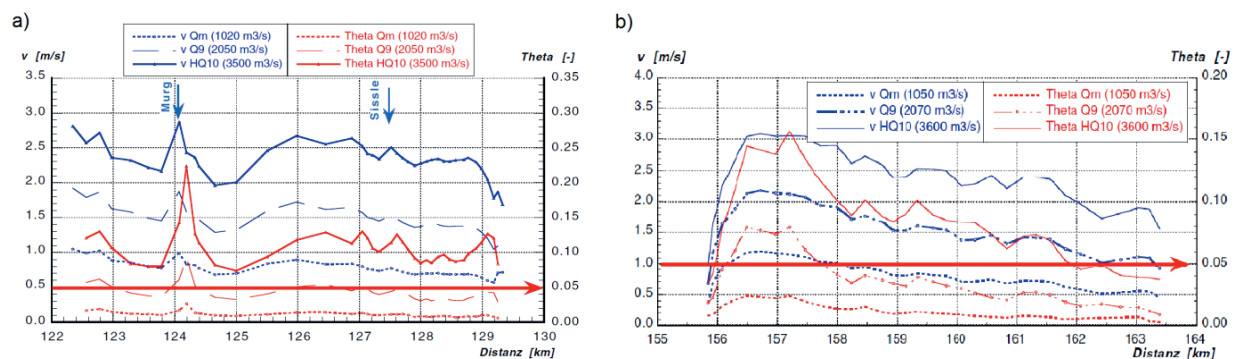


Abb. B.1: Mittlere Fließgeschwindigkeiten (blau) und dimensionslose Schubspannung Θ (rot) für Q_m , Q_9 und HQ_{10} in den Stauhaltungen a) Laufenburg und b) Birsfelden im Längsprofil (Schälchli, 2000).

B.2 Sohlhöhenänderung in den Stauhaltungen im Hochrhein

Die Sohlhöhenänderungen innerhalb der Stauhaltungen im Hochrhein unterscheiden sich untereinander. Selbst innerhalb einiger Stauhaltungen wechseln sich Erosions- und Sedimentationsbereiche ab. Das abgelagerte Volumen wurde über von Schälchli (2000) angegebene Talweg-Veränderungen innerhalb der Stauhaltungen abgeschätzt. Jede Stauhaltung wurde auf Erosion oder Sedimentation untersucht. Abbildung B.2 zeigt beispielhaft die Stauhaltung Augst-Wyhlen, in der durchgehende Sedimentation zu erkennen ist. Hier wurden die Talwege von 1980 und 1991 verglichen. Die weiteren Stauhaltungen wurden identisch behandelt. Die einzige Stauhaltung, in der Netto-Erosion auftrat, ist die des Kraftwerks Rheinau, Sedimentation findet in den Stauhaltungen Eglisau, Reckingen, Albrück-Dogern, Säckingen und Augst-Wyhlen statt. Die weiteren Stauhaltungen zeigen keinerlei Tendenz bezüglich Erosion oder Sedimentation und werden als stabil betrachtet. Laut Aussage von Schälchli et al. (2000) sind innerhalb der Stauhaltungen im Hochrhein Auflandungen aus Feinmaterial vorzufinden, die bei höheren Abflüssen erodiert und als Schwebstoff weiter transportiert werden.

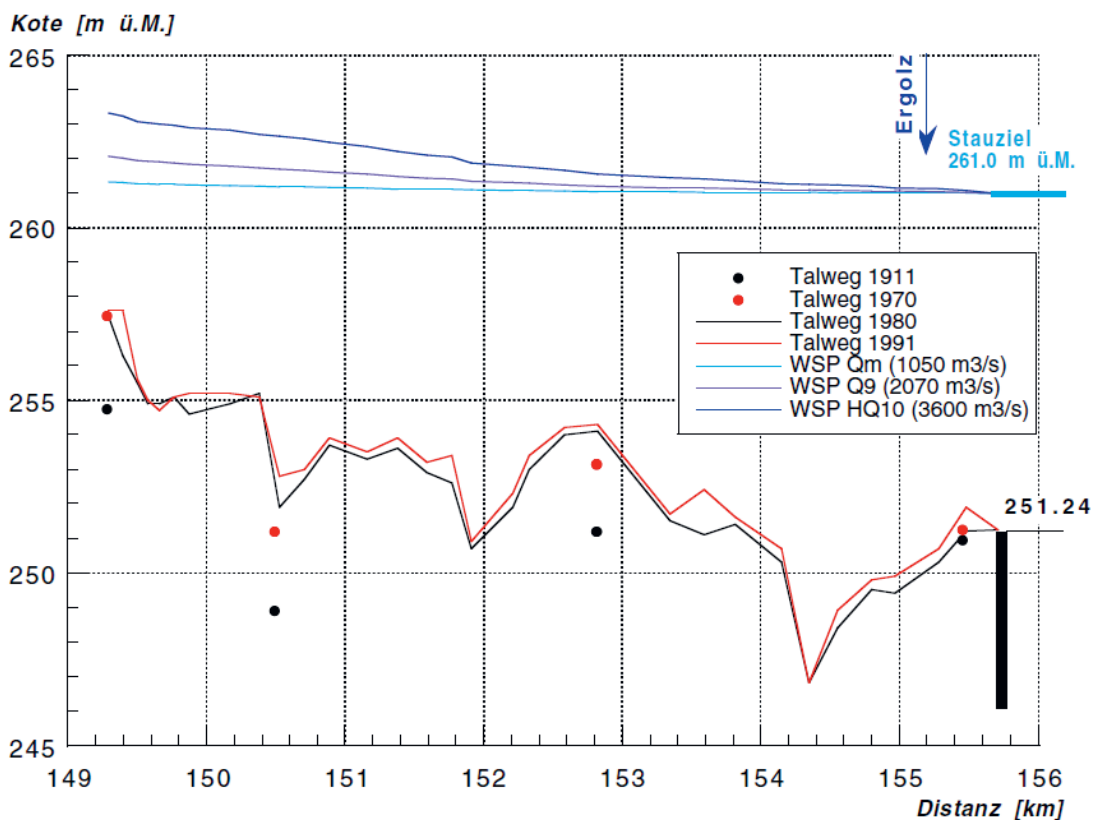


Abb. B.2: Talweg von verschiedenen Vermessungen sowie die berechneten Wasserspiegellagen (WSP) in der Stauhaltung Augst-Wyhlen (Schälchli et. al. 2000).

In der Restwasserstrecke des Kraftwerks Augst-Wyhlen wurde um 1985, vor dem hier betrachteten Zeitraum, eine große Menge Sediment gebaggert. Diese Maßnahme wirkt sich bis heute aus: Das gesamte Sediment, welches hierher gelangt, sedimentiert in dieser Geschiebefalle, die sich selbst innerhalb des Betrachtungszeitraums nicht gefüllt hat (Abegg et al., 2013).

B.3 Messprotokolle Korngrößenverteilung Birs und Glatt

**FRITSCH PARTICLE SIZER
ANALYSETTE 22**

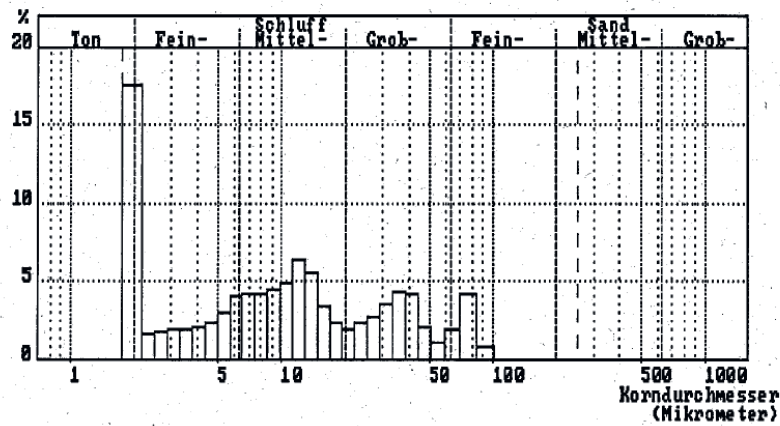
CH-0106- Birs-Mnchenstein 13.7.93

Date : 15-09-93
Time : 09:21
Meas.Nr. : 159

Fixed particle sizes (undersize) :

17.32 %	<	2.00 microns
72.57 %	<	20.00 microns
82.45 %	<	32.00 microns
94.71 %	<	63.00 microns
100.00 %	<	100.00 microns

Frequency Distribution



Integ.Freq.Distrib.

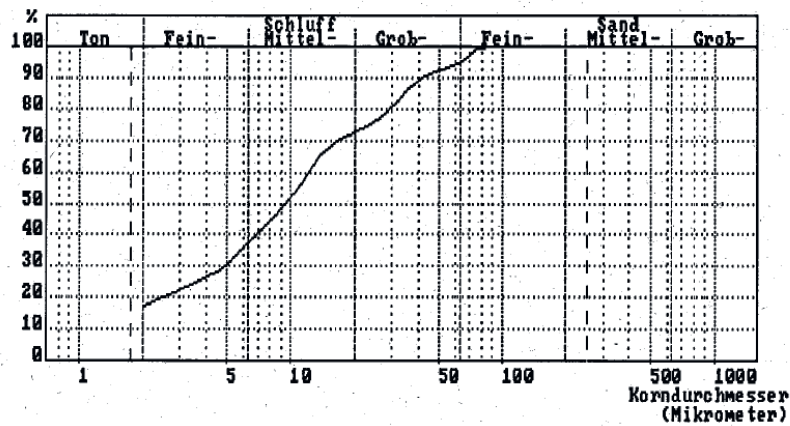


Abb. B.3: Korngrößenverteilung Birs (Quelle: BAFU Schweiz, zur Verfügung gestellt von A. Grasso).

FRITSCH PARTICLE SIZER
ANALYSETTE 22

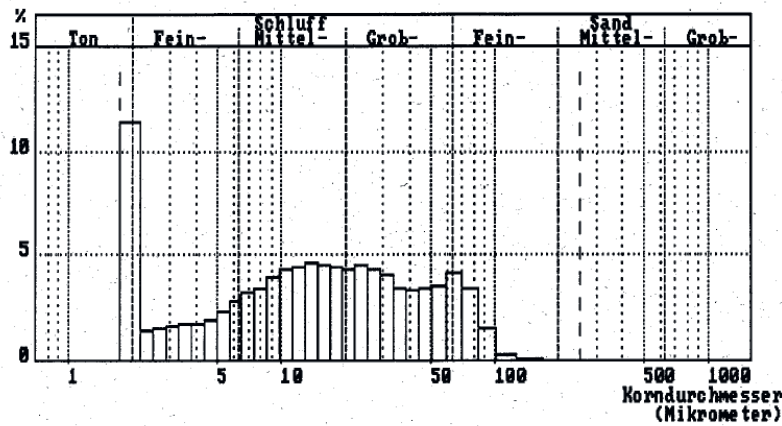
CH-0415 / Glatt-Rheinsfelden 22.7.93

Date : 16-09-93
Time : 14:47
Meas.Nr. : 184

Fixed particle sizes (undersize) :

11.18 % < 2.00 microns
62.64 % < 20.00 microns
77.45 % < 32.00 microns
94.20 % < 63.00 microns
99.74 % < 100.00 microns

Frequency Distribution



Integ.Freq.Distrib.

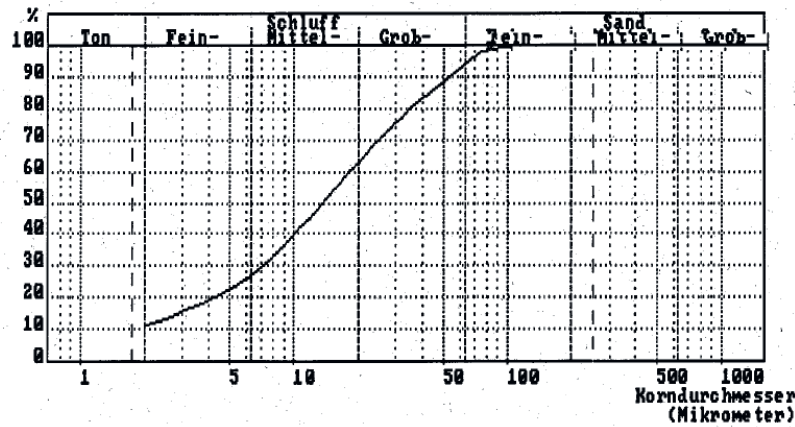


Abb. B.4: Korngrößenverteilung Glatt (Quelle: BAFU Schweiz, zur Verfügung gestellt von A. Grasso).

Anhang C Oberes Rheindelta

C.1 Abflussverteilung im Oberen Rheindelta

Der mittlere Abfluss des Rheins am oberen Ende des Rheindeltas betrug im Zeitraum 1991-2010 $2.251 \text{ m}^3/\text{s}$. Der maximale Abfluss des Zeitraums ($11.185 \text{ m}^3/\text{s}$) wurde am 31.1.1995 erreicht, während der minimale Abfluss ($794 \text{ m}^3/\text{s}$) am 24.9.1991 erreicht wurde (Datenquelle: Rijkswaterstaat, 2014).

Die Abflüsse der Gewässerläufe Waal, Pannerdensch Kanaal, Nederrijn und IJssel werden nicht nur vom Rheinabfluss am oberen Ende des Rheindeltas (Lobith), sondern auch von der Abflussverteilung an den Verzweigungen Pannerdensche Kop und IJsselkop (Abb. C.1) bestimmt. Dabei wird die Abflussverteilung an den beiden Verzweigungen bei Niedrigwasser erheblich von den Wehren im Nederrijn (Kapitel 9.2) beeinflusst. Das Wehrsteuerungsprogramm (Stuwprogramma s-285) des Nederrijns sieht folgendes vor: Bei Abflüssen kleiner $1.420 \text{ m}^3/\text{s}$ sind die Wehre ganz geschlossen, bei Abflüssen zwischen 1.420 und $3.400 \text{ m}^3/\text{s}$ sind die Wehre teilweise geschlossen und erst bei Abflüssen über $3.400 \text{ m}^3/\text{s}$ sind die Wehre ganz geöffnet. Bei den höchsten Abflüssen ($Q > 3.400 \text{ m}^3/\text{s}$) fließen etwa 33 % des Rheinwassers in den Pannerdensch Kanaal, von denen wiederum 43 % in die IJssel und 57 % in den Nederrijn fließen (Abb. C.1). Bei niedrigen Abflüssen ($Q < 1.420 \text{ m}^3/\text{s}$) werden Pannerdensch Kanaal und Nederrijn aufgestaut und es fließen nur noch 22 % des Rheinwassers in den Pannerdensch Kanaal, von denen dann 87 % in die IJssel und nur 13 % in den Nederrijn fließen. In der Praxis ist der Einfluss der Wehre nur bis zu Abflüssen von etwa $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ bemerkbar. Ist der Rheinabfluss höher, fließen im Durchschnitt 32 % des Rheinwassers in den Pannerdensch Kanaal und davon 45 % in die IJssel beziehungsweise 55 % in den Nederrijn (Abb. C.1). Ist der Rheinabfluss kleiner $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$, fließen im Durchschnitt 24 % des Rheinwassers in den Pannerdensch Kanaal, aber davon 76 % in die IJssel und nur 24 % in den Nederrijn.

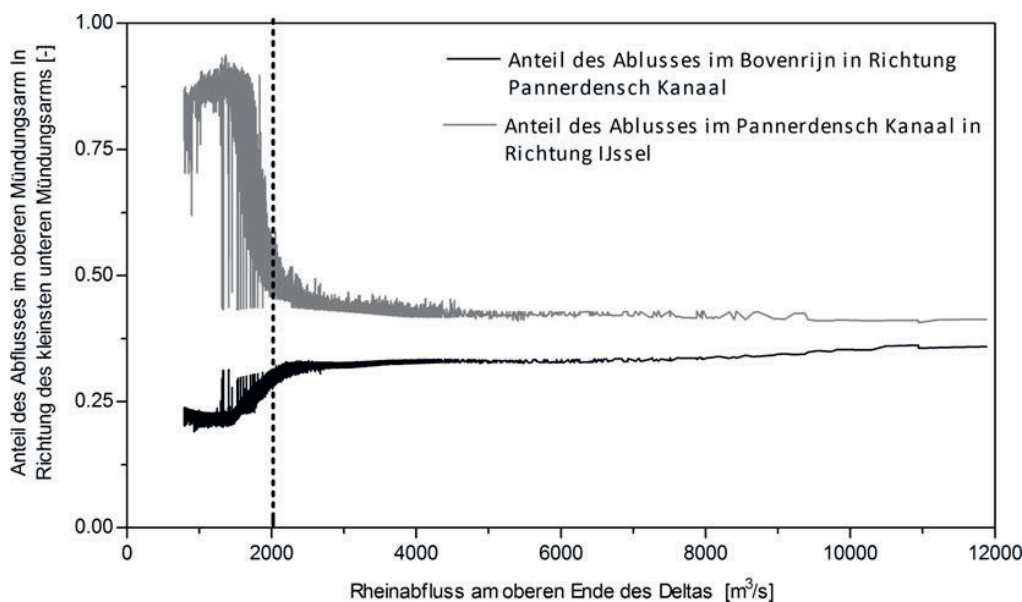


Abb. C.1: Abflussverteilung an den Verzweigungen Pannerdensche Kop und IJsselkop im Zeitraum 1991-2010 (berechnet aus Abflussdaten (Rijkswaterstaat 2014) der Messstellen „Lobith“, „Driel Boven“, „IJsselkop“, „Pannerden“ und „Pannerdensche Kop“).

C.2 Umwandlung von Volumina in Massen

Eines der Standardprobleme in der Flussmorphologie ist die Umwandlung von Sedimentvolumina in Sedimentmassen und umgekehrt. So ist zum Beispiel die Erstellung von Sedimentbilanzen nur möglich, wenn alle Eingangsdaten die gleichen Einheiten besitzen. Meistens ist das nicht der Fall und

werden Sedimentationsmengen volumetrisch anhand von Peildaten bestimmt, während Sedimenttransportraten in Masseneinheiten anhand von Transportmessungen bestimmt werden.

Die Umrechnung von Volumina in Massen setzt die Kenntnis der Lagerungsdichte der Sedimente voraus (ρ_L , kg/m³). Die Lagerungsdichte ist die Dichte einer porösen Sedimentmischung einschließlich der Porenräume. Sie ist das Verhältnis der Masse der Sedimentpartikel zum eingenommenen Lagerungsvolumen. ρ_L ist abhängig von der Trockenrohddichte der konstituierenden Mineralien (ρ_S , kg/m³) und der Porosität der Mischung (n , -), wobei letzteres das Verhältnis des Porenvolumens zum Gesamtvolumen darstellt. Obwohl es möglich ist, ρ_L direkt zu messen oder vorherzusagen (zum Beispiel Verstraeten & Poesen, 2001), ist es besser, die Lagerungsdichte aus ihren grundlegenden Bestandteilen zu rekonstruieren:

$$\rho_L = (1-n) \rho_S$$

Die räumliche Variation in ρ_S innerhalb eines Flusssystemes ist oft gering. Ausführliche Messungen im deutsch-niederländischen Grenzbereich (Frings et al., 2012) haben gezeigt, dass ρ_S für Sohlsedimente im Durchschnitt 2.603 kg/m³ beträgt (Frings et al., 2012, Kapitel 5.3). Dieser Wert wird hier übernommen. Die Bestimmung der Porosität n ist viel schwieriger, da sie in der Natur sehr variabel ist (Bereich 0,0 – 1,0). Frings (2011) hat mithilfe des Porositätsprädiktors von Yu & Standish (1991, 1993) die Porosität für jeden Kilometer des Flussabschnitts Bovenrijn-Waal berechnet (Frings, 2011, Abb. 6). Als Eingang für die Berechnungen dienten Sohlkornverteilungen aus einer Zusammenstellung von Ten Brinke (1997). Die berechneten Porositätswerte lagen zwischen 0,15 und 0,35, wobei ein leichter Anstieg der mittleren Porosität von 0,23 auf 0,33 in Fließrichtung zu beobachten war. Dieser Anstieg hängt mit der Abnahme des Kiesgehalts in Fließrichtung zusammen. Porositätsmessungen im deutschen Rhein (Frings et al., 2011) haben später gezeigt, dass die Standardeinstellungen für den Yu-Standish-Prädiktor für Flusssedimente nicht gültig sind, und dass die von Frings (2011) berechneten Porositätswerte leicht unterschätzt wurden. Weitere Messungen im deutsch-niederländischen Grenzbereich (Frings et al., 2012) unterstützen diese Einschätzung.

Aufgrund dieser Überlegungen kann mit großer Sicherheit festgehalten werden, dass die Porosität der Sohlsedimente im Oberen Rheindelta bei etwa 0,30 bis 0,35 liegt, wobei der erste Wert eher für die kiesigen Bereiche zutrifft und der zweite Wert für die sandigen Bereiche. Für die Berechnungen in diesem Bericht wurde als repräsentativer, durchschnittlicher Porositätswert für Bovenrijn und Pannerdensch Kanaal 0,30 gewählt, für Waal, Nederrijn und IJssel 0,35. Die Porosität der Sandablagerungen auf Uferwällen wurde ebenfalls auf 0,35 geschätzt. Mit $\rho_S = 2.603$ kg/m³ folgt $\rho_L = 1.820$ kg/m³ beziehungsweise 1.690 kg/m³.

C.3 Berechnung der Sohlkornverteilung des Oberen Rheindeltas

Grundlage der Sohlkornverteilung für die Flussstrecke Bovenrijn (km 857,5 – 867,5) waren geologische Bohrungen aus dem Jahr 2000 (Grujters et al., 2001, 2005). In sechs Querprofilen (km 865,3, 865,7, 866,1, 866,5, 866,9, 867,3) wurden insgesamt 43 Bohrungen mittels Vicracore-Verfahren durchgeführt. Aus verschiedenen Tiefen wurden Sedimentproben entnommen, getrocknet und anschließend gesiebt. Aufgrund dieser Daten wurden in der vorliegenden Studie die mittleren Gehalte von Sand (0,063 – 2 mm), Feinkies (2 – 16 mm) und Grobkies (16 – 63 mm) der oberen 20 cm der Flusssohle bestimmt (Tab. C.1).

Grundlage der Sohlkornverteilung für die Flussstrecke Waal (km 867,5-951,0) waren Greiferproben aus dem Jahr 1995 (Ten Brinke, 1997). In 85 Querprofilen (alle 1.000 m) wurden jeweils 3 Proben mittels Van Veen Greifer genommen. Die oberflächennahen Proben wurden getrocknet und anschließend gesiebt. Bei der Siebung wurde als Größtsieb das 2-mm- oder 8-mm-Sieb verwendet, was bedeutet, dass aufgrund dieser Daten der Sandgehalt der Waalsohle gut bestimmt werden kann (Tab. C.1). Aussagen über die Gehalte von Feinkies und Grobkies sind aufgrund dieser Daten jedoch nicht möglich. Glücklicherweise gibt es zwei andere Messkampagnen, die aussagekräftige

Informationen über den Gehalt von Grobkies enthalten. Geologische Bohrungen aus 2000 (Gruijters et al., 2001, 2005) am Anfang der Waal (km 867,7, 868,1, 868,5, 868,9, 869,3) zeigten einen mittleren Grobkiesgehalt (16 – 63 mm) von 5,3 % (n = 41), während Greiferproben am Ende der Waal (km 960,5) aus dem Jahr 2004 (Frings & Kleinhans, 2008) einen mittleren Grobkiesgehalt (16 – 63 mm) von 0,7 % (n = 72) zeigten. Mit der Annahme, dass die Grobkiesgehalte linear nach unterstrom abnehmen, konnte so für die verschiedenen Teile der Waal (Tab. C.1) der Grobkiesgehalt bestimmt werden. Der Feinkiesgehalt (Tab. C.1) wurde zum Schluss aus dem Sandgehalt und dem Grobkiesgehalt berechnet, da sowohl feinere (Ton, Schluff) als auch gröbere (Steine) Sedimentfraktionen auf der Flusssohle der Waal nicht vorkommen. Für die Flussstrecken Pannerdensch Kanaal, IJssel und Nederrijn wurde keine Rekonstruktion der Sohlkornverteilung vorgenommen.

Tab. C.1: Kornverteilung der Gewässerläufe Bovenrijn und Waal (Anteile in [-]).

Flussstrecke	Fluss-km	0,063 – 2 mm	2 – 16 mm	16 – 63 mm	
Bovenrijn	857,5 - 867,5	0,37	0,57	0,06	(n=43)
Waal-bochten	867,5 - 885,5	0,57	0,39	0,04	(n=47)
Midden - Waal	885,5 - 914,5	0,66	0,31	0,03	(n=87)
Omgeving St. Andries	914,5 - 933,5	0,76	0,22	0,02	(n=57)
Benedenwaal	934,5 - 951,0	0,84	0,15	0,01	(n=57)

C.4 Sedimentverteilung am IJsselkop

Geschiebefrachten

Im Pannerdensch Kanaal, einige hundert Meter oberhalb der IJsselkopverzweigung (Rhein-km 878,5), wurden während Hochwasser- und Niedrigwasserperioden in 2002 und 2004 Geschiebemessungen durchgeführt. Teilweise wurden diese Messungen mit Geschiebefänger (Typ: Delft Nile Sampler) durchgeführt, teilweise kam auch das Dunetracking-Verfahren zum Einsatz. Analysiert wurden die Daten von Frings & Kleinhans (2008) in den Einheiten m³/Tag pro Meter Flussbreite (Frings & Kleinhans, 2008, Tab. 3). Hier wurden diese Daten mit einer Porosität von 0,30 und einer Sedimentdichte von 2.603 kg/m³ (Anhang C.2) in kg/s umgewandelt.

Aufgrund dieser Daten und der Methodik, die in Frings et al. (2014) beschrieben wurde, wurde eine Transport-Abfluss-Beziehung aufgestellt (Abb. C.2). Angenommen wurde, dass die Transport-Abfluss-Beziehung für Abflüsse größer 2.000 m³/s gültig ist. Bei geringeren Abflüssen wird der Abfluss des Pannerdensch Kanaals durch die Wehrsteuerung im Nederrijn stark reduziert (Abb. C.1) und die Geschiebefrachten sind entsprechend geringer (Abb. C.2). Hier wird als repräsentativer Geschiebewert für Abflüsse kleiner 2.000 m³/s der kleinste gemessene Wert aus Abb. C.2 eingesetzt: 0,03 kg/s.

Mit der Transport-Abfluss-Beziehung für Abflüsse größer 2.000 m³/s und dem angenommenen Geschiebewert von 0,03 kg/s für Abflüsse kleiner 2.000 m³/s konnte für jeden Tag des Zeitraums 1991-2010 die Geschiebefracht berechnet werden. Daraus folgte eine mittlere Jahresfracht am Ende des Pannerdensch Kanaal von 0,065 Mt/a.

An vier Tagen während des Hochwassers 2004 und an einem Tag während des Niedrigwassers 2004 wurde die Korngrößenverteilung des Geschiebes bestimmt (Frings & Kleinhans, 2008). Da die gemessenen Korngrößenverteilung nur geringfügig mit dem Abfluss variierte, wurde hier auf die mittlere Korngrößenverteilung zurückgegriffen. Diese wurde mit der Jahresgeschiebefracht multipliziert, um so die Jahresgeschiebefrachten von Grobkies (0,004 Mt/a), Feinkies (0,030 Mt/a) und Sand (0,031 Mt/a) zu bestimmen.

Die Unsicherheit der einzelnen Geschiebemessungen ist aufgrund der gewählten Messmethode gering: Fehler liegen bei etwa 1 bis 14 % (Frings & Kleinhans, 2008). Die berechneten Jahresfrachten

sind jedoch ungenauer, da nur eine begrenzte Anzahl Transportmessungen zur Bildung der Transport-Abfluss-Beziehung zur Verfügung stand.

Verteilung des Geschiebes

Aufgrund von Sohlpeilungen während des Hochwassers vom Januar 2004 ($Q = 2.838 - 6.726 \text{ m}^3/\text{s}$) und einer Dunetrackinganalyse haben Frings & Kleinhans (2008) die Geschiebeverteilung am IJsselkop bestimmt. Festgestellt wurde, dass 9 bzw. 18 % des Geschiebes im Pannerdensch Kanaal die IJssel erreichte (Frings und Kleinhans, 2008: Tab. 3, S. 1160, Abb. 7f). Hier wird angenommen, dass die zweite Schätzung die realistischere ist, was bedeutet, dass von den 0,065 Mt/a Geschiebe im Pannerdensch Kanaal 0,012 Mt/a die IJssel erreichen und 0,053 Mt/a den Nederrijn.

In Anbetracht der Tatsachen, dass (1) nur das Sediment in der rechten Hälfte des Pannerdensch Kanaal die IJssel erreichen kann, und (2) das Geschiebe in dem Bereich aus 9 % Grobkies (> 16 mm), 52 % Feinkies (2 – 16 mm) und 39 % Sand besteht (Frings & Kleinhans, 2008), wird angenommen, dass sich die Geschiebefracht am Anfang der IJssel (insgesamt 0,012 Mt/a) aus 0,001 Mt/a Grobkies, 0,006 Mt/a Feinkies und 0,005 Mt/a Sand zusammensetzt. Das bedeutet automatisch, dass sich die Geschiebefracht am Anfang des Nederrijns (insgesamt 0,053 Mt/a) aus 0,003 Mt/a Grobkies, 0,024 Mt/a Feinkies und 0,026 Mt/a Sand zusammensetzt. Aus dieser Berechnung folgt, dass das Geschiebe am Anfang der Nederrijns folgende Kornverteilung hat: 4 % Grobkies (> 16 mm), 46 % Feinkies (2 – 16 mm) und 50 % Sand. Dies entspricht etwa der von Frings & Kleinhans (2008) gemessenen Kornverteilung (3 % – 47 % – 50 %).

Zum Schluss sollte noch einmal betont werden, dass die oben dargestellte Berechnung der Sedimentverteilung am IJsselkop für Abflüsse über $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ gilt. Bei geringeren Abflüssen bewegt sich das Geschiebe des Pannerdensch Kanaals zu 98 % in die IJssel (Frings & Kleinhans, 2008, S. 1169). Da der Geschiebetrieb bei Abflüssen kleiner $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ sehr klein ist (Abb. C.2) kann diese Situation für die Jahresfrachtbestimmung außer Betracht gelassen werden.

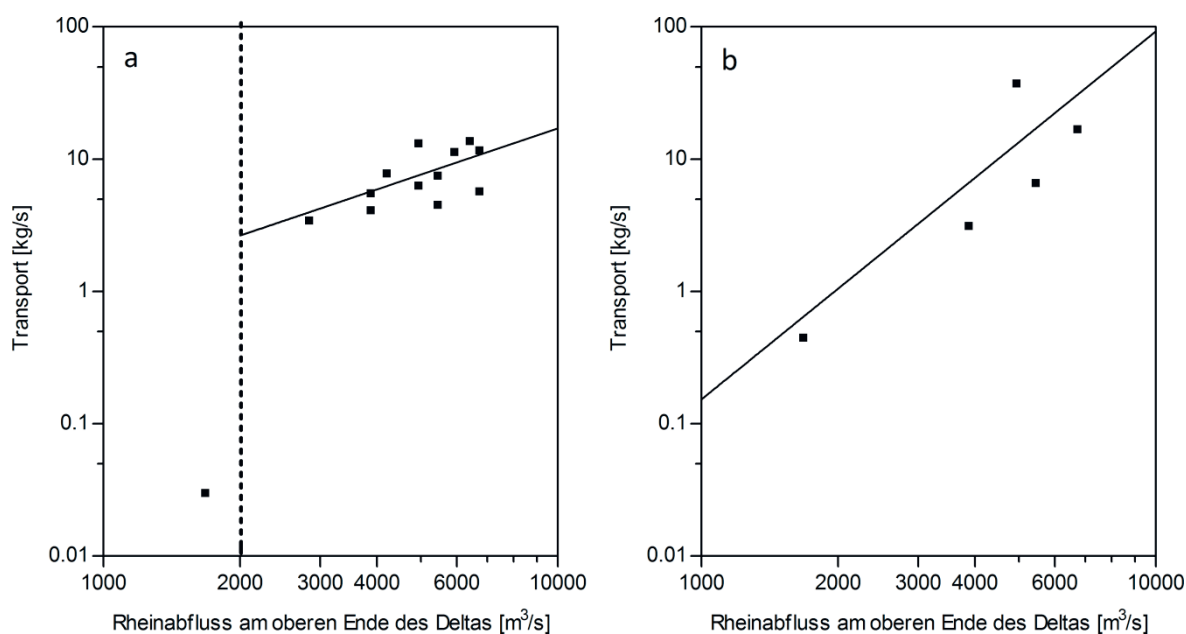


Abb. C.2: Gemessene Transportraten und Transport-Abfluss-Beziehungen für Geschiebe (a) und suspendierten Sand (b) am Ende des Pannerdensch Kanaal (Daten: Frings & Kleinhans, 2008).

Suspendierte Sand-Frachten

Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass Sand in einem Fluss nicht nur als Geschiebe, sondern auch schwebend transportiert wird. Um die Menge des in Suspension befindlichen Sandes im

Pannerdensch Kanaal auf Höhe des IJsselkop zu ermitteln, wurden an vier Tagen während des Hochwassers im Januar 2004 und an einem Tag im September 2004 Messungen mithilfe eines Akustischen Sand Transport Meters (ASTM) durchgeführt. Die Messungen wurden an mehreren Stellen und in unterschiedlichen Tiefen durchgeführt. Durch Integration über den Querschnitt wurde die gesamte Rate des suspendierten Sandes ermittelt (Frings & Kleinhaus, 2008, Tab. 3). Die ursprünglich in m³/Tag pro Meter Flussbreite dargestellten Daten wurden hier mithilfe der Sedimentdichte von 2.603 kg/m³ (Anhang C.2) in kg/s konvertiert.

Die fünf Werte wurden in einem Diagramm dargestellt (Abb. C.2). Des Weiteren wurde, wie beim Geschiebe, eine Transport-Abfluss-Beziehung aufgestellt und benutzt, um die Jahresfracht an suspendiertem Sand zu bestimmen (0,084 Mt/a).

Verteilung des suspendierten Sandes

Zur Aufteilung des suspendierten Sandes auf die Gewässerläufe Nederrijn-Lek und IJssel wurde angenommen, dass die Verteilung analog zur Aufteilung der Abflussmengen am IJsselkop ist. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Abflussverteilung deutlich unterschiedlich ist für Abflüsse größer und kleiner 2.000 m³/s (Abb. C.1).

Aus der Transport-Abfluss-Beziehung für suspendierten Sand (Abb. C.2) folgt, dass bei Abflüssen kleiner 2.000 m³/s in einem durchschnittlichen Jahr insgesamt 0,009 Mt/a Sand transportiert wird. Aus den Abflussdaten (Abb. C.1) folgt zusätzlich, dass bei diesen Abflüssen im Durchschnitt 72 % des Abflusses in die IJssel fließen. Daraus folgen ein Sandeintrag in die IJssel von 0,007 Mt/a und ein Sandeintrag in den Nederrijn von 0,002 Mt/a.

Bei Abflüssen größer 2.000 m³/s wird in einem durchschnittlichen Jahr insgesamt 0,075 Mt/a Sand transportiert. Aus den Abflussdaten (Abb. C.1) folgt zusätzlich, dass bei diesen Abflüssen im Durchschnitt 44 % des Abflusses in die IJssel fließen. Daraus folgen ein Sandeintrag in die IJssel von 0,034 Mt/a und ein Sandeintrag in den Nederrijn von 0,041 Mt/a.

Werden die suspendierten Sand-Frachten für beide Abflusssituationen zusammengerechnet, ergeben sich Gesamtfrachten von 0,084 Mt/a, von denen 0,041 Mt/a in die IJssel gelangen und 0,043 Mt/a in den Nederrijn.

Zusammenfassung

Die Sand- und Kiesfrachten im Pannerdensch Kanaal und deren Verteilung über die IJssel und den Nederrijn sind in Tabelle C.2 zusammengefasst.

Tab. C.2: Mittlere Jahresfrachten Sand und Kies am IJsselkop im Zeitraum 1991-2010 (Mt/a).

Gewässerläufe	IJssel	Nederrijn	Pannerdensch Kanaal
Grobkies (16 – 63 mm)	0,001	0,003	0,004
Feinkies (2 – 16 mm)	0,006	0,024	0,03
Sand (0,063 – 2 mm)	0,046	0,069	0,115
Summe	0,053	0,096	0,149

Anhang D Synthese

D.1 Quantifizierung der Quellen und Senken

Die Bilanzgrößen, die wir als vernachlässigbar betrachtet haben, sind in Tabelle D.1 aufgeführt. Die Bilanzgrößen, die in den Bilanzgleichungen als Schließungsterm behandelt wurden, sind in Tabelle D.2 aufgelistet. Die anderen Bilanzgrößen wurden wie unten beschrieben bestimmt.

Sedimenteintrag von oberstrom (I_{up}) — Direkt bei der Quelle des Rheins ist $I_{up} = 0$. Beim *Alpenrhein* basierte I_{up} auf einer Sedimentbilanzanalyse von Zarn (2010a, 2010b), die teilweise auf Transportmessungen bei Diepoldsau (km -57,6) basiert. Die Massenkonservierung schreibt vor, dass in allen anderen betrachteten Flussabschnitten der Sedimenteintrag von oberstrom (I_{up}) gleich groß sein muss wie der Sedimentaustrag (O_{do}) aus dem Flussabschnitt direkt oberstrom (siehe dort).

Sedimenteintrag aus Nebenflüssen (I_{tr}) — Für die Kies- und Steinfraktionen wurde angenommen, dass I_{tr} nur im *Alpenrhein* und im *Hochrhein* auftritt. Schätzungen wurden aus Sedimentbilanzen von Zarn (2010a, 2010b) bzw. Abegg (2013, siehe auch Schälchli et al., 2000) bezogen. Für Sand, Schluff und Ton wurde I_{tr} folgendermaßen quantifiziert. Die auf Transportmessungen bei Diepoldsau (km -57,6) basierenden Schätzungen von I_{tr} für den *Alpenrhein* wurden von Zarn (2010a, 2010b) bereitgestellt. Für den *Bodensee* wurde I_{tr} auf ein Drittel des Sedimenteintrags durch den Rhein selbst geschätzt (nach IGKB, 2004). Für den *Hochrhein* war I_{tr} der Schließungsterm der Bilanz für Sand, für Schluff und Ton wurde I_{tr} aus Transportmessungen suspendierter Frachten bei Rekingen (km 90), Albruck-Dogern (km 109) und Weil am Rhein (km 171,4) rekonstruiert. Für den gestauten Teil des *Oberrhains* einschließlich des *Restrhains* wurde I_{tr} als null angenommen. Für den frei fließenden Bereich des Rheins (*Oberrhein, Mittelrhein, Niederrhein*) wurde I_{tr} aus Messungen suspendierter Frachten rekonstruiert, die in den Nebenflüssen Neckar (Messstelle Rockenau), Main (Messstelle Eddersheim), Lahn (Messstelle Kalkofen) und Mosel (Messstelle Brodenbach) durchgeführt wurden, oder (für die kleineren Nebenflüsse) basierend auf dem Einzugsgebiet geschätzt (vgl. Gehres et al., 2014). Für den Delta-Bereich des Rheins wurden Schätzungen von I_{tr} , basierend auf veralteten Messungen suspendierter Frachten in der Maas bei Lith von Snippen et al. (2005) bereitgestellt. Generell existierte nur eine begrenzte Anzahl an Korngrößenproben, um zwischen dem Sandanteil und dem Schluff-/Tonanteil der gemessenen Frachten zu differenzieren.

Tab. D.1: Annahmen über vernachlässigbare Terme, die zur Lösung der Sedimentbilanzanalysen verwendet wurden

Flussabschnitt	Annahmen
Alpenrhein	alle Fraktionen: $I_{se} = I_{di} = I_{ar} = I_{do} = O_{se} = O_{gr} = O_{fl} = O_{po} = 0$, Kies/Steine: $I_{ab} = O_{do} = 0$, Sand: $I_{ab} = O_{ab} = \Delta S = 0$, Ton/Schluff: $O_{ab} = \Delta S = 0$
Bodensee	alle Fraktionen: $I_{se} = I_{di} = I_{ar} = I_{ab} = I_{do} = O_{do} = O_{se} = O_{dr} = O_{gr} = O_{fl} = O_{po} = O_{ab} = 0$
Hochrhein-Oberrhein	alle Fraktionen: $I_{do} = O_{gr} = O_{po} = I_{tr}$ (Oberrhein) = 0, Kies/Steine: $I_{di} = I_{ab} = O_{do} = O_{se} = O_{fl}$, Sand: $I_{di} = I_{ab} = O_{ab} = \Delta S = 0$, Ton/Schluff: $O_{ab} = I_{ar} = \Delta S = 0$
Restrhein	alle Fraktionen: $I_{tr} = I_{se} = I_{di} = I_{do} = O_{se} = O_{po} = 0$, Kies/Steine: $I_{ab} = O_{fl} = 0$, Sand: $I_{ab} = O_{do} = O_{ab} = 0$, Ton/Schluff: $O_{ab} = I_{ar} = 0$
Oberrhein-Mittelrhein	alle Fraktionen: $I_{se} = I_{do} = O_{se} = O_{po} = 0$, Kies/Steine: $I_{tr} = I_{di} = I_{ab} = O_{fl} = 0$, Sand: $I_{di} = I_{ab} = O_{ab} = 0$, Ton/Schluff: $O_{ab} = I_{ar} = O_{gr} = 0$
Niederrhein	alle Fraktionen: $I_{se} = I_{do} = O_{se} = O_{po} = 0$, Kies/Steine: $I_{tr} = I_{di} = I_{ab} = O_{fl} = 0$, Sand: $I_{di} = I_{ab} = O_{ab} = 0$, Ton/Schluff: $O_{ab} = I_{ar} = O_{gr} = 0$
Oberes Rheindelta	alle Fraktionen: $I_{tr} = I_{se} = I_{di} = I_{ar} = I_{ab} = I_{do} = O_{se} = O_{gr} = O_{po} = O_{ab} = 0$, Kies/Steine: $O_{do} = O_{fl} = 0$, Ton/Schluff: $\Delta S = 0$, Kies: $\Delta S = 0$, nur für Bovenrijn und Pannerdensch Kanaal
Unteres Rheindelta	alle Fraktionen: $I_{se} = I_{di} = I_{ar} = I_{ab} = O_{se} = O_{gr} = O_{fl} = O_{ab} = 0$, Kies/Steine: $I_{tr} = I_{do} = O_{do} = O_{dr} = O_{po} = 0$

Nebenarme (I_{se} , O_{se}) — Im staugeregelten Bereich ist der *Restrhein* ein Nebenarm, der aus dem *Oberrhein* (km 174) stammt und parallel zum *Rheinseitenkanal* verläuft, bevor er sich wieder mit dem *Oberrhein* vereint (km 224). Die Massenkontinuität definiert den Sedimentverlust aus dem *Oberrhein* (O_{se}) als gleich groß wie der Sedimenteintrag in den *Restrhein* (I_{up}), während der Eintrag des Nebenarms (I_{se}) aus dem *Restrhein* in Richtung *Oberrhein* gleich groß ist wie der Sedimentaustrag aus dem *Restrhein* (O_{do}). Für Kies und Stein wurde O_{se} als null angenommen (nach Arnaud, 2012 und Abegg, 2001), während I_{se} die Schließgröße der *Restrhein*-Bilanz war. Für Sand war O_{se} der Schließungsterm der *Restrhein*-Bilanz, während I_{se} für Sand aufgrund der massiven Sandablagerung im *Restrhein* als null angenommen wurde. Für Ton und Schluff wurde O_{se} aus Messungen suspendierter Frachten bei Weil am Rhein im *Oberrhein* (Rhein-km 171,4, etwas oberstrom des *Restrheins*) rekonstruiert, wobei angenommen wurde, dass die Schluff-/Ton-Verteilung an der Verzweigung *Restrhein-Rheinseitenkanal* gleich groß ist wie die Sandverteilung. I_{se} war der Schließungsterm der *Restrhein*-Bilanz für Ton/Schluff.

Diffuse Quellen (I_{di}) — Mit Ausnahme des Eintrages von Schluff/Ton aus Kalibergwerken (Polschinski et al., 2008) im gestauten Bereich sind für den Rhein keine Informationen zu diffusen Sedimenteinträgen verfügbar. Die Auswirkungen solcher Quellen werden generell als gering eingestuft. Um jedoch die Ton/Schluff-Bilanz für den frei fließenden Bereich zu schließen, musste ein signifikanter diffuser Eintrag angenommen werden.

Anthropogene Einträge (I_{ar}) — Volumetrische Daten zur künstlichen Sedimentzufuhr (anthropogene Einträge) wurden für den *Hochrhein* von Abegg (2013), für den *Restrhein* von Dittrich (2012) und Region d'Alsace (2013) und für den frei fließenden *Oberrhein*, *Mittlerrhein* und *Niederrhein* aus der BauMaGs-Datenbank der deutschen Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung bezogen. Diese Datensätze enthalten auch Informationen zur Korngröße der Zugaben. Nachdem das Gesamtvolumen der zugegebenen Sedimente innerhalb des aktiven Flussbettes (also exklusive Bühnenfeldern etc.) zwischen 1991 und 2010 pro Flussabschnitt bestimmt worden war, wurden die Ergebnisse in Masseneinheiten umgewandelt, indem sie mit $\rho_s(1-n)$ multipliziert wurden, wobei ρ_s für die mineralische Dichte des Feststoffanteils und n für die Porosität der Sedimente (-) steht. Für n wurde ein räumlich variabler Wert verwendet (Tab. D.3), basierend auf dem Porositätsprädiktor für Rheinsedimente von Frings et al. (2011).

Abrieb (I_{ab} , O_{ab}) — Da Sedimente mit der Größe von Ton und Schluff sich vorwiegend in Suspension fortbewegen, während die Abriebraten für Sedimente der Sandgröße Berichten zufolge gering sind (z. B. Kuenen, 1956), berücksichtigten wir nur die Abrasion von Kies und Stein. Abrasionsprozesse bei Kies/Stein fallen in zwei Kategorien: jene, die zur Produktion von feinerem Kies und Sand führen, und jene, die zur Produktion von Schluff und Ton führen. Im Oberlauf des Flusses überwiegen die Sand-/Kies-produzierenden Prozesse, während im Großteil des Flussverlaufs die Schluff-/Ton-produzierenden Prozesse überwiegen (Kuenen, 1956; Abbott & Peterson, 1978). In der vorliegenden Bilanzanalyse wurden nur Letztere berücksichtigt, die einen Sedimentverlust für die Kies- und Steinfraktionen (O_{ab}) und eine Sedimentquelle (I_{ab}) für die Ton/Schluff-Fraktion darstellen. Um I_{ab} und O_{ab} für einen Flussabschnitt zu berechnen, wurden die durchschnittliche Kies- und Stein-Frachten in diesem Bereich mit α , der durchschnittlichen Abrasionsrate pro Transportkilometer, und L , der Länge des Flussabschnitts, multipliziert. Für den alpinen Bereich des Rheins wurde $\alpha = 0,80$ % pro km verwendet (basierend auf numerische Modellstudien von Zarn, 2010a), für den Hochrhein $\alpha = 1,2$ % pro km (nach Abegg et al., 2013), für den Restrhein $\alpha = 0,16$ % pro km und für den frei fließenden Oberrhein, Mittlerrhein und Niederrhein $\alpha = 0,22$ % pro km (die letzten beiden Werte sind die mittleren bzw. maximalen Abrasionsraten, die in Tracer-Experimenten von Götz et al., 1995, festgestellt wurden). Im feinkörnigen Delta-Bereich wurde die Abrasion als vernachlässigbar angenommen.

Tab. D.2: Schließgrößen in den Sedimentbilanzanalysen.

Flussabschnitt	Schließgrößen
Alpenrhein	Kies/Steine: ΔS , Sand: O_{do} , Ton/Schluff: O_{do}
Bodensee	alle Fraktionen: ΔS
Hochrhein-Oberrhein	Kies/Steine: ΔS , Sand: I_{tr} , Ton/Schluff: O_{fl}
Restrhein	Kies/Steine: O_{do} , Sand: I_{up} , Ton/Schluff: O_{do}
Oberrhein-Mittelrhein	Kies/Steine: O_{gr} , Sand: O_{gr} , Ton/Schluff: I_{di}
Niederrhein	Kies/Steine: O_{gr} , Sand: O_{gr} , Ton/Schluff: I_{di}
Oberes Rheindelta	Kies/Steine: ΔS , Sand: O_{do} , Ton/Schluff: O_{do}
Unteres Rheindelta	alle Fraktionen: ΔS

Tab. D.3: In den Sedimentbilanzanalysen verwendete Porositäts- und Dichtewerte.

Flussabschnitt	Quelle/Senke	Porosität	Min. Dichte
Alpenrhein	O_{dr} (Kiesabschnitt)	*15%	2650 kg/m ³
	O_{dr} (Sandabschnitt)	*38%	2650 kg/m ³
Hochrhein-Oberrhein	I_{tr}	*25%	2650 kg/m ³
	O_{dr} (Kiesabschnitt)	*25%	2650 kg/m ³
	O_{dr} (Ton-/Schluffabschnitt)	72%	2650 kg/m ³
Restrhein	I_{ar}	*25%	2650 kg/m ³
	ΔS	*21-28%	2650 kg/m ³
	O_{dr} (Ton-/Schluffabschnitt)	72%	2650 kg/m ³
	O_{gr}	*27-38%	2650 kg/m ³
Oberrhein-Mittelrhein	I_{ar}	35%	2650 kg/m ³
	O_{dr}	*16-28%	2650 kg/m ³
	ΔS	*16-28%	2650 kg/m ³
Niederrhein	O_{dr}	*14-23%	[§] 2603 kg/m ³
	ΔS	*14-23%	[§] 2603 kg/m ³
Oberes Rheindelta	O_{dr} (Bovenrijn)	*30%	[§] 2603 kg/m ³
	O_{dr} (Waal)	*35%	[§] 2603 kg/m ³
	O_{fl} (sandiger Uferwall)	*35%	[§] 2603 kg/m ³
	ΔS (Bovenrijn, P. Kanaal)	*30%	[§] 2603 kg/m ³
	ΔS (andere Deltaarme)	*35%	[§] 2603 kg/m ³
Unteres Rheindelta	O_{dr} (sandig: 60-95 % Sand)	**39-65%	2650 kg/m ³
	O_{dr} (schluffig: 15-60 % Sand)	**65-85%	2650 kg/m ³
	O_{po}	**64-86%	2650 kg/m ³

* Bestimmt aus lokaler Korngrößenverteilung bei Verwendung des Porositätsprädiktors von Frings et al. (2011)

** räumlich variable Werte; bereitgestellt von Van Dreumel (1995)

[§] Mittelwert der gemessenen Daten (Frings et al 2011)

Tab. D.4: Für die Bilanzerstellung verwendete Transportmessungen.

Flussabschnitt	Messstelle (km, Typ ¹)
Alpenrhein	Diepoldsau (km -57,6, dS)
Hochrhein-Oberrhein (staugeregelt)	Rekingen (km 90, dS), Albruck-Dogern (km 109, dS), Weil am Rhein (171,4, dS)
Oberrhein-Mittelrhein (frei fließend)	Plittersdorf (340,2, dS), Plittersdorf (342,7, cT), Weißenthurm (km 608,2, dS), Königswinter (km 645,8, cT)
Niederrhein	Griethausen (857,5, cT), Emmerich (851,9, dS)
Oberes Rheindelta	IJsselkop (878,5, cT)

¹ d = tägliche Punktmessungen, c = Querschnittsmessungen, S = Schwebstofffracht, B = Geschiebefracht, T = S+B

Mariner Eintrag (I_{do}) — I_{do} betrifft nur das untere Rheindelta. Um den marinen Eintrag von unterstrom zu quantifizieren, wurden die Schätzungen von Van Dreumel et al. (1995) übernommen. Ihre Studie, wiewohl ein wenig veraltet (sie umfasst den Zeitraum 1982-1992), ist heute noch immer die realistischste verfügbare Schätzung.

Austrag nach unterstrom (O_{do}) — Für den *Alpenrhein* war O_{do} der Schließungsterm der Bilanz, außer für Kies und Stein, für die O_{do} in Anlehnung an Zarn (2010a, 2010b) als null angenommen wurde. Aufgrund des großen Volumens des *Bodensees* und temperaturbedingter Dichteströmungen werden alle von einfließenden Flüssen transportierten Schwebstoffe zum Grund des Sees befördert. Am Ausfluss des Sees überwiegt klares Wasser, was dadurch bestätigt wird, dass keine Anzeichen von Sedimentation oder Turbinenabration beim nahe gelegenen Kraftwerk Schaffhausen berichtet wurden (pers. Komm. B. van Felten, Kraftwerk Schaffhausen; J. Bloesch, Rheinaubund). Daher wurde O_{do} für den *Bodensee* als null angenommen. Am Ende des staugeregelten Bereichs (Staustufe Iffezheim) werden kein Kies bzw. Steine transportiert, also ist für diese Fraktionen $O_{do} = 0$. Für die Fraktionen anderer Größen wurde O_{do} aus Sediment-Transportmessungen bei Plittersdorf (km 340,2, 342,7) rekonstruiert, die um das zwischen der Staustufe Iffezheim und der Messstelle Plittersdorf zugegebene Sediment korrigiert wurden. Die gemessenen Sedimentfrachten wurden zum einen um den Gehalt an organischen Substanzen und Sand (für die Bestimmung der Ton/Schluff-Anteile) und zum anderen um die Unterschätzung der Sand-Geschiebefracht aufgrund des Verlustes durch die Maschen des Geschiebefängers korrigiert (vgl. Banhold et al., 2014a). Für den frei fließenden *Oberrhein* und *Mittelrhein* wurden die jährlichen Sand-, Kies- und Steinfrachten verwendet, die von Frings et al. (2014b) für die Messstelle Königswinter (km 645,8) für O_{do} berechnet wurden. Diese Sand-Fracht wurde ebenfalls einer Bias-Korrektur nach Banhold et al. (2014a) unterzogen. Für Ton und Schluff wurde O_{do} aus Schwebfrachtmessungen bei Weißenthurm (km 608,2) abgeleitet und um den Gehalt an organischen Substanzen und Sand korrigiert. Für den *Niederrhein* wurde O_{do} aus Sedimenttransportmessungen nahe der deutsch-niederländischen Grenze abgeleitet. Für die Kies- und Steinfraktionen wurden die Daten von Frings et al. (2014b) vom Standort Griethausen (km 857,5) verwendet. Für die Sandfraktion wurden die Daten von Frings et al. (2014b) mit der Methode von Banhold et al. (2014a) einer Bias-Korrektur unterzogen. Für die Schwebfrachtdaten der Ton/Schluff-Fraktion wurden Daten der Station Emmerich (km 851,9) verwendet, korrigiert um den Gehalt an organischen Substanzen und Sand. Für das obere Rheindelta war O_{do} die Schließgröße der Bilanz, außer für Kies, für den O_{do} als null angenommen wurde. Der Austrag an Sediment vom *Rhein* in die *Nordsee* entsprach in etwa den von Van Dreumel (1995) angegebenen Werten.

Baggerungen (O_{dr}) — Baggerdaten wurden von Zarn (2010a, 2010b) für den *Alpenrhein*, von Abegg et al. (2013) für den *Hochrhein*, von Breitung (2006) für den *Restrhein* und aus der BauMaGs-Datenbank der deutschen Wasserstraßen- und Schifffahrtsverwaltung für den *Oberrhein*, *Mittelrhein* und *Niederrhein* bezogen. Für das obere Rheindelta wurden Baggerdaten von Ten Brinke et al. (2001) verwendet, die noch immer gültig sind (Van Vessem, Rijkswaterstaat, pers. Komm.). Für das untere Rheindelta wurden Baggerdaten für den Zeitraum 1991-2010 von Rijkswaterstaat (2014) bereitgestellt. Es wurden nur Baggerungsaktivitäten berücksichtigt, die den Hauptstrom betreffen, Baggeraktivitäten

in Bühnenfeldern und Häfen wurden ausgeklammert. Die meisten verfügbaren Baggerdaten wurden in Volumen bereitgestellt. Diese Volumen wurden durch Multiplikation mit $\rho_s(1-n)$ in Masseneinheiten umgewandelt (vgl. Tab. D.3). Wenn die Korngrößenverteilung des ausgebaggerten Materials nicht dokumentiert war, wurden angenommen, dass sie der lokalen Korngrößenverteilung in der Flusssohle entsprach. Für alle Flussabschnitte, außer für den frei fließenden Teil, wurden nur die Netto-Baggervolumen berücksichtigt, d. h. Sedimente, die ausgebaggert und anschließend im selben Flussabschnitt wieder zugegeben wurden, wurden nicht miteinbezogen. Die Gesamt-Baggervolumen waren daher viel größer.

Bühnenfelder (O_{gr}) — Der erste durch Bühnenfelder regulierte Bereich des Rheins ist der *Restrhein*. Für den Restrhein wurde O_{gr} aus Zeitreihen von Querschnitten abgeleitet, die Arnaud (2012) und Dittrich (2013) entnommen wurden. Die Aufteilung in Korngrößenfraktionen wurde basierend auf den Daten von Dittrich (2012) vorgenommen und die Volumen-Masse-Umwandlung erfolgte mithilfe der Porositätswerte in Tabelle D.3. Für die anderen Teile des Rheins, in denen Bühnen seit oftmals über 100 Jahren existieren, wurde $O_{gr} = 0$ angenommen, in Anlehnung an Ten Brinke et al. (2004), die zeigten, dass die meisten Bühnenfelder sich in einem Zustand dynamischen Gleichgewichts befinden. Diese Annahme hielt für den frei fließenden Teil des Rheins nicht stand, wo erhebliche Bühnenfeld-Ablagerungen angenommen werden mussten, um die Bilanz zu schließen. Die Korngrößenverteilung der abgelagerten Sedimente wurde als gleich groß wie die lokale Zusammensetzung der Sohlenmaterialfracht (Geschiebe plus suspendierte Sand-Fracht) angenommen, die im Rahmen von regelmäßigen Querschnittsmessungen im Zeitraum 1991-2010 an drei verschiedenen Messstellen (km 342,7 und 645,8 für den Oberrhein sowie km 645,8 und 857,5 für den Niederrhein) gemessen wurden (Tab. D.4).

Häfen (O_{po}) — Für den alpinen, den staugeregelten und den frei fließenden Bereich des Rheins sind keine Informationen zu O_{po} verfügbar. Für das von den Gezeiten dominierte untere Rheindelta wurden Schätzungen von O_{po} aus dem Baggerdatensatz von Van Dreumel (1995) bezogen, der eine Unterscheidung zwischen Sand und Ton/Schluff zulässt und detaillierte Informationen zu Sedimentdichten enthält, um Volumen in Massen umzuwandeln.

Überflutungsbereiche (O_{fl}) — Schätzungen zur Ablagerung von Sand in Überflutungsbereichen wurden aus Vor-Ort-Messungen im *Restrhein* von Dittrich (2013) und Arnaud (2012) bezogen, sowie aus Vor-Ort-Messungen entlang des frei fließenden *Oberrheins*, *Mittelrheins* und *Niederrheins* (Banhold et al., 2014b) und aus Vor-Ort-Messungen im oberen Rheindelta, berichtet von Ten Brinke et al. (1998, 2001). Daten zur Ablagerung von Schluff/Ton in Überflutungsbereichen wurden aus den Vor-Ort-Messdaten von Banhold et al. (2014b) für den frei fließenden *Oberrhein*, *Mittelrhein* und *Niederrhein* sowie aus numerischen Modellsimulationen von Middelkoop (2010) für das obere Rheindelta bezogen. Ablagerungen in Überflutungsbereichen entlang des staugeregelten Abschnitts (*Hochrhein/staugeregelter Oberrhein*) wurde als Schließungsterm der Bilanz behandelt. Die Sedimentationsrate in den Überflutungsbereichen (ausgedrückt pro km Flusslänge) entlang des *Restrheins* wurde als gleich groß wie die Ablagerungen in Überflutungsbereichen entlang des staugeregelten *Oberrheins* angenommen. Ablagerungen in Überflutungsbereichen in den restlichen Rheinabschnitten wurden als vernachlässigbar angenommen.

Sohlhöhenänderung (ΔS) — Für die Flussabschnitte *Alpenrhein* (nur Kies), *Bodensee*, *Hochrhein* (nur Kies), *Oberes Rheindelta* (nur Kies) und *Unteres Rheindelta* wurden Veränderungen bei der Sedimentspeicherung ΔS als Schließungsterm behandelt. Um ΔS für die anderen Bereiche zu quantifizieren, wurden Veränderungen der Sohlenhöhe im *Restrhein* (Daten von Dittrich, 2013), im frei fließenden *Oberrhein*, *Mittelrhein* und *Niederrhein* (Daten bereitgestellt vom WSA Mannheim und WSA Duisburg-Rhein) und im Oberen Rheindelta (Daten bereitgestellt von Rijkswaterstaat, 2015) analysiert. Die Verwendung von Informationen zur Sedimentdichte und -porosität (Tab. D.3) ermöglichte die Umwandlung von volumetrischen Veränderungen der Sohlenhöhe in Masseneinheiten. Da in Flusssystemen oft feine Körner bevorzugt erodiert werden und grobe Körner bevorzugt abgelagert werden, konnte die Korngrößenverteilung (KGV) der erodierten/abgelagerten Sedimente nicht mithilfe

der Sohlen-Korngrößenverteilung als Näherung bemessen werden. Es war daher eine Herausforderung, die Beteiligung mehrerer Korngrößenfraktionen an der Gesamtänderung der Sohlenhöhe (ΔS) zu bestimmen. Für den *Oberrhein*, *Mittelrhein* und *Niederrhein* war die Gesamt-Sohlhöhenänderung ΔS aus Messungen bekannt, während der gesamte Austrag aller Fraktionen in Bühnenfelder O_{gr} als Schließungsterm behandelt wurde. Unter der Annahme, dass die Korngrößenverteilung von O_{gr} der Korngrößenverteilung der Sohlenmaterialfracht entspricht, konnte die Korngrößenverteilung von ΔS abgeleitet werden. Für das obere Rheindelta wurde die Beteiligung der verschiedenen Korngrößenfraktionen an der Gesamtänderung der Sohlenhöhe (ΔS) bestimmt, indem angenommen wurde, dass ΔS für mindestens eine Größenfraktion gleich null ist (siehe Tab. D.1). Die Bestimmung von ΔS erforderte eine Korrektur des Bias, der durch die Einführung neuer Peil-Messtechniken um das Jahr 2000 entstand (anfänglich wurden Einstrahl-Echolote verwendet, während später GPS-basierte Mehrstrahl-Echolote verwendet wurden). Der Bias schien in den von Sand dominierten, dünenbedeckten Flusssohlen des Delta-Bereichs am ausgeprägtesten zu sein. Für die weiter flussaufwärts gelegenen Flussabschnitte wurde keine Korrektur angewendet.

Für das obere Rheindelta erschien es möglich, die Sedimentbilanz für jeden der einzelnen Nebenarme *Bovenrijn*, *Waal*, *Pannerdens-Kanal*, *IJssel* und *Nederrijn/Lek* zu lösen. Dies war mithilfe von Transportmessungen zur Sand- und Kiesverteilung an der IJsselkop-Verzweigung (km 878,5; Frings, 2007, Frings & Kleinhaus, 2008) möglich, in Kombination mit der Annahme, dass Ton und Schluff an Flussverzweigungen proportional zur Abflussverteilung verteilt wurden. Das untere Rheindelta ist von einem Netzwerk an Flussarmen mit einigen Dutzend miteinander verbundenen Flussarmen geprägt. Obwohl das Lösen von Sedimentbilanzberechnungen für einzelne Flussarme in diesem Gebiet besonders reizvoll ist, war dies ohne aktuelle Informationen zur Entwicklung der Sohlenhöhe nicht möglich.

Tab. D.5b. Übersicht der Annahmen und Berechnungsmethoden in der Bilanzanalyse des Bodensees. G: Kiesfraktionen, S = Sandfraktion, F = Ton/Schlufffraktion

		Method of quantification	Motivation
Input	Upstream	G Calculated	Equals output from Alpenrhein
		S Calculated	Equals output from Alpenrhein
	Tributaries	F Calculated	Equals output from Alpenrhein
		G Data-based	Equal to 1/3 of output from Alpenrhein (following IGKB 2004)
		S Data-based	Equal to 1/3 of output from Alpenrhein (following IGKB 2004)
	Secondary channels	F Data-based	Equal to 1/3 of output from Alpenrhein (following IGKB 2004)
		G Assumed zero	No secondary channels (except for channels between islands)
		S Assumed zero	No secondary channels (except for channels between islands)
	Diffusive inputs	F Assumed zero	No secondary channels (except for channels between islands)
		G Assumed zero	Bank erosion does occur, but data are non existing
	Artificial supply	S Assumed zero	Bank erosion does occur, but data are non existing
		F Assumed zero	Bank erosion does occur, but data are non existing
	Abrasion	G Assumed zero	No sediment nourishments were carried out between 1991 and 2010
		S Assumed zero	No sediment nourishments were carried out between 1991 and 2010
	Downstream	F Assumed zero	No sediment nourishments were carried out between 1991 and 2010
		G Assumed zero	Lake constance is suspension-dominated, and does not have abrasion
		F Assumed zero	Lake constance is suspension-dominated, and does not have abrasion
		G Assumed zero	Lake constance is suspension-dominated, and does not have abrasion
		S Assumed zero	This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
		F Assumed zero	This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
Output	Downstream	G Assumed zero	Because of the temperature gradient, all suspended sediments are carried to the bottom of the lake. No turbid water at lake outflow. No sedimentation or abrasion of turbines in first hydropower plant
		S Assumed zero	No secondary channels (except for channels between islands)
Secondary channels	F Assumed zero	No secondary channels (except for channels between islands)	
	G Assumed zero	No secondary channels (except for channels between islands)	
Dredging	S Assumed zero	No secondary channels (except for channels between islands)	
	F Assumed zero	Dredging works are only rarely carried out and have small volumes	
Groyne fields	G Assumed zero	Dredging works are only rarely carried out and have small volumes	
	S Assumed zero	Dredging works are only rarely carried out and have small volumes	
Floodplains	F Assumed zero	This part of the Rhine does not have groyne	
	G Assumed zero	This part of the Rhine does not have groyne	
Ports	S Assumed zero	This part of the Rhine does not have groyne	
	F Assumed zero	Surface area of floodplains is small	
Abrasion	G Assumed zero	Surface area of floodplains is small	
	S Assumed zero	Surface area of floodplains is small	
Bed level	F Assumed zero	Only a few small ports exist	
	G Assumed zero	Only a few small ports exist	
Delta S	S Assumed zero	Only a few small ports exist	
	F Assumed zero	Only a few small ports exist	
	G Calculated	Lake constance is suspension-dominated, and does not have abrasion	
	S Calculated	Lake constance is suspension-dominated, and does not have abrasion	
	F Calculated	Lake constance is suspension-dominated, and does not have abrasion	

Tab. D.5c. Übersicht der Annahmen und Berechnungsmethoden in der Bilanzanalyse des staugeregelten Hochrheins/Oberrheins. G: Kiesfraktionen, S = Sandfraktion, F = Ton/Schlufffraktion

		Method of quantification	Motivation
Input	Upstream	G Calculated	Equals output from Lake Constance
		S Calculated	Equals output from Lake Constance
	Tributaries	F Calculated	Equals output from Lake Constance
		G Data-based	Taken from budget calculations of Schälchli (2000) and Abegg et al (2013).
	Secondary channels	S Calculated	Closing term of budget
		F Data-based	Calculated from the increase in measured transport rates along the Hochrhein
		G Calculated	Equals output from Restrhein
		S Calculated	Equals output from Restrhein
		F Calculated	Equals output from Restrhein
	Diffusive inputs	G Assumed zero	No data available, but no significant bank erosion nor rock avalanches
		S Assumed zero	No data available, but no significant bank erosion nor rock avalanches
	Artificial supply	F Data-based	From UAG SuBeO (2008)
		G Data-based	Volumetric data by Abegg et al. (2013), subsequently converted into mass units
		S Data-based	Volumetric data by Abegg et al. (2013), subsequently converted into mass units
	Abrasion	F Data-based	Volumetric data by Abegg et al. (2013), subsequently converted into mass units
		G Assumed zero	The assumption is made that only silt and clay are produced during the abrasion process
	Downstream	S Assumed zero	The assumption is made that only silt and clay are produced during the abrasion process
		F Calculated	Equals sediment loss due to abrasion for the gravel/cobble fraction
		G Assumed zero	This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
		S Assumed zero	This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
Output	Downstream	F Assumed zero	This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
		G Assumed zero	Observations show that no gravel reaches the Ifezheim dam (the bed is sandy/silty)
	Secondary channels	S Data-based	Based on transport measurements Plittersdorf minus sand supply Ifezheim
		F Data-based	Transport measurements Plittersdorf
		G Assumed zero	Absence of bed-load in the Hochrhein (following Arnaud (2012) and Abegg (2001)).
	Dredging	S Calculated	Equals input to Restrhein
		F Data-based	Total flux from data Weil am Rhein, sediment and water distribution at bifurcation proportional
		G Data-based	Volumetric data by Abegg (2013) and others subsequently converted into mass units
		S Data-based	Volumetric data by Abegg (2013) and others, subsequently converted into mass units
	Groyne fields	F Data-based	Volumetric data by Abegg (2013) and others, subsequently converted into mass units
		G Assumed zero	Groyne fields assumed to be in dynamic equilibrium following Ten Brinke et al (2004)
		S Assumed zero	Groyne fields assumed to be in dynamic equilibrium following Ten Brinke et al (2004)
	Floodplains	F Assumed zero	Groyne fields assumed to be in dynamic equilibrium following Ten Brinke et al (2004)
		S Assumed zero	Groyne fields assumed to be in dynamic equilibrium following Ten Brinke et al (2004)
	Ports	F Calculated	Gravel is transported as bed-load and cannot reach floodplains
		G Assumed zero	No data exist
		S Assumed zero	Closing term of budget
	Abrasion	F Assumed zero	Flow conditions do not enable deposition of gravel in ports
		S Assumed zero	No data exist
	Delta S	F Assumed zero	No data exist
G Calculated		Abrasion exp. $\alpha = 1.2\%/km$ (Abegg et al. 2013), assumption no bed-load transport in Oberrhein	
S Assumed zero		According to literature, abrasion rates of sand are very low (e.g. Kuenen, 1956)	
F Assumed zero		These sediments are transported in suspension and therefore not abraded	
Bed level	G Calculated	Closing term of budget in Hochrhein, for Oberrhein assumption that bed-level change is zero.	
	S Assumed zero	Data for Oberrhein are lacking	
	F Assumed zero	Data for Oberrhein are lacking	

Tab. D.5d. Übersicht der Annahmen und Berechnungsmethoden in der Bilanzanalyse des Restrheins. G: Kiesfraktionen, S = Sandfraktion, F = Ton/Schlufffraktion

Table D.5d. Restrhein		Method of Motivation
Input	Upstream	G Calculate Equals secondary channel output from impounded part of Oberrhein
		S Calculate Closing term of sediment budget
	Tributaries	F Calculate Equals secondary channel output from impounded part of Oberrhein
		G Assumed There are only a few minor tributaries
		S Assumed There are only a few minor tributaries
		F Assumed There are only a few minor tributaries
	Secondary channels	G Set to zero No secondary channels
		S Set to zero No secondary channels
	Diffusive inputs	F Set to zero No secondary channels
		G Set to zero No reports of significant bank erosion
		S Set to zero No reports of significant bank erosion
	Artificial supply	F Set to zero No reports of significant bank erosion
		G Data-base Volumetric data from Region d'Alsace (2013), Dittrich (2012), subsequently converted into mass units
		S Data-base Volumetric data from Region d'Alsace (2013), Dittrich (2012), subsequently converted into mass units
	Abrasion	F Data-base Volumetric data from Region d'Alsace (2013), Dittrich (2012), subsequently converted into mass units
		G Assumed The assumption is made that only silt and clay are produced during the abrasion process
	Downstream	S Assumed The assumption is made that only silt and clay are produced during the abrasion process
		F Calculate Equals sediment loss due to abrasion for the gravel/cobble fraction
		G Set to zero This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
		S Set to zero This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
Output	Downstream	F Set to zero This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
		G Calculate Closing term of sediment budget
	Secondary channels	S Assumed Massive deposition of sand along Restrhein
		F Calculate Closing term of sediment budget
		G Set to zero No secondary channels
		S Set to zero No secondary channels
	Dredging	F Set to zero No secondary channels
		G Data-base Volumetric data from Breitung (2006), subsequently converted into mass units
	Groyne fields	S Data-base Volumetric data from Breitung (2006), subsequently converted into mass units
		F Data-base Volumetric data from Breitung (2006), subsequently converted into mass units
	Floodplains	G Data-base Reconstructed from bed-level surveys reported by Amaud (2012) and Dittrich (2013), converted into masses using grain size distributions of Dittrich (2012), a porosity of 27-38% and Data-base sediment density of 2650 kg/m ³
		F Data-base sediment density of 2650 kg/m ³
		G Assumed Grain size distributions of Dittrich (2013) suggest little gravel in floodplains
		S Calculate Reconstructed from cores + grain size distributions (Dittrich 2013) and Amaud (2012)
	Ports	F Calculate Assumed proportional to floodplain deposition along the impounded part of the Oberrhein
		G Assumed Flow conditions do not enable deposition of gravel in ports
	Abrasion	S Assumed Only a few small ports exist
		F Assumed Only a few small ports exist
	Delta S	G Calculate Based on gravel transport rates and abrasion exponent ($\alpha = 0.16\%/km$, cf. Götz et al 1995)
		S Assumed According to literature, abrasion rates of sand are very low (e.g. Kuenen, 1956)
F Assumed These sediments are transported in suspension and therefore not abraded		
G Data-base Bed-level changes (Period 1985/1993 till 2009/2010) based on Dittrich (2013). Grain size Data-base distribution based on the assumption that gravel deposited in the Restrhein stems from erosion in the Restrhein a little upstream.		

Tab. D.5e. Übersicht der Annahmen und Berechnungsmethoden in der Bilanzanalyse des frei fließenden Ober- und Mittelrheins. G: Kiesfraktionen, S = Sandfraktion, F = Ton/Schlufffraktion

	Method of quantification	Motivation	
Input	Upstream	G Calculated S Calculated F Calculated	
	Tributaries	G Assumed zero S Data-based F Data-based	
	Secondary channels	G Assumed zero S Assumed zero F Assumed zero	
	Diffusive inputs	G Assumed zero S Assumed zero	
	Artificial supply	F Calculated G Data-based S Data-based	
	Abrasion	F Data-based G Assumed zero S Assumed zero	
	Downstream	F Calculated G Assumed zero S Assumed zero	
	Output	Downstream	G Data-based S Data-based F Data-based
		Secondary channels	G Assumed zero S Assumed zero F Assumed zero
		Dredging	G Data-based S Data-based F Data-based
		Groyne fields	G Calculated S Calculated F Assumed zero
		Floodplains	G Assumed zero S Data-based F Data-based
		Ports	G Assumed zero S Assumed zero F Assumed zero
		Abrasion	G Calculated S Assumed zero F Assumed zero
		Delta S	G Data-based S Data-based F Data-based
		Bed level	G Data-based S Data-based F Data-based

Tab. D.5f. Übersicht der Annahmen und Berechnungsmethoden in der Bilanzanalyse des Niederrheins. G: Kiesfraktionen, S = Sandfraktion, F = Ton/Schlufffraktion

	Method of quantification	Motivation
Input	Upstream	Equals sediment output from Oberrhein/Mittelrhein
		Equals sediment output from Oberrhein/Mittelrhein
	Tributaries	Equals sediment output from Oberrhein/Mittelrhein There are only a few minor tributaries
		There are only a few minor tributaries
	Secondary channels	There are only a few minor tributaries Only few secondary channels
		Only few secondary channels
	Diffusive inputs	Only few secondary channels Bank erosion effectively prevented by structures
		Bank erosion effectively prevented by structures
	Artificial supply	Closing term of sediment budget? Volumetric data from BauMaGs (WSV)
		Volumetric data from BauMaGs (WSV)
	Abrasion	Volumetric data from BauMaGs (WSV) The assumption is made that only silt and clay are produced during the abrasion process
		The assumption is made that only silt and clay are produced during the abrasion process
	Downstream	Equals sediment loss due to abrasion for the gravel/cobble fraction
		This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
		This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
		This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
		This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
	Output	Equal to annual flux at Griethausen (data from Frings et al 2014)
	Downstream	Equal to annual flux at Griethausen (Frings et al 2014, corrected according to Banhold, subm.)
	Secondary channels	Based on suspended load measurements at Emmeitch (XX) Only few secondary channels
	Only few secondary channels	
Dredging	Only few secondary channels Volumetric data from BauMaGs (WSV), subsequently converted into mass units	
	Volumetric data from BauMaGs (WSV), subsequently converted into mass units	
Groyne fields	Volumetric data from BauMaGs (WSV), subsequently converted into mass units Closing term of sediment budget	
	Closing term of sediment budget	
Floodplains	Little silt/clay is observed in groyne fields only limited gravel or cobble deposits on floodplains	
	Measurements by Banhold et al (2014)	
Ports	Measurements by Banhold et al (2014) Flow conditions do not enable deposition of gravel in ports	
	A few ports exist, but no information about sedimentation is available	
Abrasion	A few ports exist, but no information about sedimentation is available Based on gravel transport rates and abrasion exponent ($\alpha = 0.22\%/km$, cf. Götz et al 1995)	
	According to literature, abrasion rates of sand are very low (e.g. Kuener, 1956)	
Delta S	These sediments are transported in suspension and therefore not abraded	
Bed level	Measurements of bed-level data to determine Delta S for all fractions together. Grain size distribution reconstructed from budget equation.	
	G Data-based	
	S Data-based	
	F Data-based	

Tab. D.5g. Übersicht der Annahmen und Berechnungsmethoden in der Bilanzanalyse des oberen Rheindeltas. G: Kiesfraktionen, S = Sandfraktion, F = Ton/Schlufffraktion

Input	Method of quantification	Motivation
Upstream	G Calculated	Equals sediment output from Niederrhein (*)
	S Calculated	Equals sediment output from Niederrhein (*)
Tributaries	F Calculated	Equals sediment output from Niederrhein (*)
	G Assumed zero	There are only a few minor tributaries
	S Assumed zero	There are only a few minor tributaries
Secondary channels	G Assumed zero	Only few secondary channels
	S Assumed zero	Only few secondary channels
	F Assumed zero	Only few secondary channels
Diffusive inputs	G Assumed zero	Bank erosion effectively prevented by structures
	S Assumed zero	Bank erosion effectively prevented by structures
	F Assumed zero	Bank erosion effectively prevented by structures
Artificial supply	G Assumed zero	No sediment nourishments were carried out between 1991 and 2010
	S Assumed zero	No sediment nourishments were carried out between 1991 and 2010
	F Assumed zero	No sediment nourishments were carried out between 1991 and 2010
Abrasion	G Assumed zero	Abrasion rates in sand-gravel bed rivers are assumed to be low (e.g. Frings 2008)
	S Assumed zero	Abrasion rates in sand-gravel bed rivers are assumed to be low (e.g. Frings 2008)
	F Assumed zero	Abrasion rates in sand-gravel bed rivers are assumed to be low (e.g. Frings 2008)
Downstream	G Assumed zero	This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
	S Assumed zero	This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
	F Assumed zero	This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
Output	G Assumed zero	Observations show negligible quantities of gravel in downstream river bed
Downstream	G Assumed zero	Closing term of sediment budget
	S Calculated	Closing term of sediment budget
Secondary channels	F Calculated	This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
	G Assumed zero	This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
	S Assumed zero	This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
	F Assumed zero	This part of the Rhine is not subjected to tidal influence
Dredging	G Data-based	Data from Ten Brinke et al. (2001), checked by Van Vessem (2015), converted into mass units
	S Data-based	Data from Ten Brinke et al. (2001), checked by Van Vessem (2015), converted into mass units
	F Data-based	Data from Ten Brinke et al. (2001), checked by Van Vessem (2015), converted into mass units
Groyne fields	G Assumed zero	Observations show negligible quantities of gravel in groyne fields
	S Assumed zero	Groyne fields assumed to be in dynamic equilibrium (following Ten Brinke et al (2004)
	F Assumed zero	Groyne fields assumed to be in dynamic equilibrium (following Ten Brinke et al (2004)
Floodplains	G Assumed zero	Grain size observations show negligible quantities of gravel in groyne fields
	S Data-based	Volumetric data from Ten Brinke et al. (2001), subsequently converted into mass units
	F Data-based	Data from Middelkoop et al. (2010)
Ports	G Assumed zero	Flow conditions do not enable deposition of gravel in ports
	S Assumed zero	A few ports exist, but no information about sedimentation is available
	F Assumed zero	A few ports exist, but no information about sedimentation is available
Abrasion	G Assumed zero	Abrasion rates in sand-gravel bed rivers are assumed to be low (e.g. Frings 2008)
	S Assumed zero	Abrasion rates in sand-gravel bed rivers are assumed to be low (e.g. Frings 2008)
	F Assumed zero	Abrasion rates in sand-gravel bed rivers are assumed to be low (e.g. Frings 2008)
Delta S	G Calculated	Closing term of sediment budget (For Bovenrijn, Pan. Kanaal assumption Delta S = 0)
Bed level	S Data-based	Up-to data field data from Rijkswaterstaat (2015), subsequently converted into mass units
	F Assumed zero	Grain size observations show the river bed to be almost void of clay and silt

Table D.5g. Das obere Rheindelta.

Tab. D.5h. Übersicht der Annahmen und Berechnungsmethoden in der Bilanzanalyse des unteren Rheindeltas. G: Kiesfraktionen, S = Sandfraktion, F = Ton/Schlufffraktion

Table D.5h. Das untere Rheindelta		Method of quantification	Motivation
Input	Upstream	G Calculated	Equals sediment output from Upper Rhine Delta
		S Calculated	Equals sediment output from Upper Rhine Delta
	Tributaries	F Calculated	Equals sediment output from Upper Rhine Delta
		G Assumed zero	Because of the low bed-slope, gravel supply is unlikely
	Secondary channels	S Assumption	Assumption that ratio of silt/clay versus sand transport is equal for Maas and Waal
		F Data-based	Use of values from Snippen et al (2005) based on old suspended measurements at Lith
		G Assumed zero	The whole delta was treated as a single unit. Budgets for individual branches could not be resolved.
		S Assumed zero	The whole delta was treated as a single unit. Budgets for individual branches could not be resolved.
		F Assumed zero	The whole delta was treated as a single unit. Budgets for individual branches could not be resolved.
		G Assumed zero	Bank erosion effectively prevented by structures
	Diffusive inputs	S Assumed zero	Bank erosion effectively prevented by structures
		F Assumed zero	Bank erosion effectively prevented by structures
	Artificial supply	G Assumed zero	No sediment nourishments were carried out between 1991 and 2010
		S Assumed zero	No sediment nourishments were carried out between 1991 and 2010
	Abrasion	F Assumed zero	No sediment nourishments were carried out between 1991 and 2010
		G Assumed zero	According to literature, abrasion rates of sand-bed rivers are very low (e.g. Kuenen, 1956)
		S Assumed zero	According to literature, abrasion rates of sand-bed rivers are very low (e.g. Kuenen, 1956)
		F Assumed zero	According to literature, abrasion rates of sand-bed rivers are very low (e.g. Kuenen, 1956)
	Downstream	G Assumed zero	Gravel occurrences are very small in this part of the Rhine
		S Data-based	Use of estimates presented by Van Dreumel (1995)
Output	Downstream	F Data-based	Use of estimates presented by Van Dreumel (1995)
		G Assumed zero	Gravel occurrences are very small in this part of the Rhine
	Secondary channels	S Data-based	Based on data of Van Dreumel (1995)
		F Data-based	Based on data of Van Dreumel (1995)
	Dredging	G Assumed to zero	The whole delta was treated as a single unit. Budgets for individual branches could not be resolved.
		S Assumed to zero	The whole delta was treated as a single unit. Budgets for individual branches could not be resolved.
	Groyne fields	F Assumed to zero	The whole delta was treated as a single unit. Budgets for individual branches could not be resolved.
		G Assumed to zero	Gravel occurrences are very small in this part of the Rhine
	Floodplains	S Data-based	Dedging records from Rijkswaterstaat (2014); densities from Van Dreumel (1995)
		F Data-based	Dedging records from Rijkswaterstaat (2014); densities from Van Dreumel (1995)
	Ports	G Assumed zero	Observations show negligible quantities of gravel in groyne fields
		S Assumed zero	Groyne fields assumed to be in dynamic equilibrium (following Ten Brinke et al (2004)
	Bed level	F Assumed zero	Groyne fields assumed to be in dynamic equilibrium (following Ten Brinke et al (2004)
		G Assumed zero	Floodplain area is extremely limited
		S Assumed zero	Floodplain area is extremely limited
		F Assumed zero	Floodplain area is extremely limited
	Delta S	G Calculated	Gravel occurrences are very small in this part of the Rhine
		S Calculated	Use of old dredging records, sediment densities and grain size info of Van Dreumel (1995)
		F Calculated	Use of old dredging records, sediment densities and grain size info of Van Dreumel (1995)
		G Assumed zero	According to literature, abrasion rates of sand-bed rivers are very low (e.g. Kuenen, 1956)
	S Assumed zero	According to literature, abrasion rates of sand-bed rivers are very low (e.g. Kuenen, 1956)	
	F Assumed zero	According to literature, abrasion rates of sand-bed rivers are very low (e.g. Kuenen, 1956)	
	G Calculated	Closing term of sediment budget	
	S Calculated	Closing term of sediment budget	
	F Calculated	Closing term of sediment budget	

Die Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes (KHR)

Die KHR ist eine Organisation, in der wissenschaftliche Institutionen der Rheinanliegerstaaten gemeinsam hydrologische Grundlagen für die nachhaltige Entwicklung im Rheingebiet erarbeiten.

Mission und Aufgaben der KHR sind:

Erweiterung der Kenntnisse über die Hydrologie des Rheingebietes durch:

- gemeinsame Untersuchungen
- Austausch von Daten, Methoden und Informationen
- Entwicklung standardisierter Verfahren
- Veröffentlichungen in einer eigenen Schriftenreihe

Beiträge zur Lösung von grenzüberschreitenden Problemen durch die Entwicklung, Verwaltung und Bereitstellung von:

- Informationssystemen (KHR-Rhein-GIS)
- Modellen, wie z. B. Wasserhaushaltsmodelle und das Rhein-Alarmmodell

Die Länder, die sich daran beteiligen, sind:

die Schweiz, Österreich, Deutschland, Frankreich, Luxemburg und die Niederlande.

Beziehung zur UNESCO und WMO:

Die KHR wurde 1970 anlässlich der UNESCO-Empfehlung zur Förderung einer engeren Zusammenarbeit in internationalen Flussgebieten gegründet. Seit 1975 erfolgt die Fortsetzung der Arbeiten im Rahmen des Internationalen Hydrologischen Programms (IHP) der UNESCO und des Hydrological Water Resources Program (HWRP) der WMO.

Für weitere Informationen über die KHR, siehe unsere Website: www.chr-khr.org

KHR-Veröffentlichungen

Monographie der KHR

CHR/KHR (1978): Das Rheingebiet, Hydrologische Monographie. Staatsuitgeverij, Den Haag / Le bassin du Rhin. Monographie Hydrologique. Staatsuitgeverij, La Haye. ISBN 90-12017-75-0 (nicht mehr lieferbar)

Berichte der KHR

- I-1 GREBNER, D. (1982): Objektive quantitative Niederschlagsvorhersagen im Rheingebiet. Stand 1982 / Prévisions objectives et quantitatives des précipitations dans le bassin du Rhin. Etat de la question en 1982 (nicht mehr lieferbar)
- I-2 GERHARD, H., J.W. VAN DER MADE, J. REIFF, L.P.M. DE VREES (1983): Die Trocken- und Niedrigwasserperiode 1976. (2. Auflage 1985) / La sécheresse et les basses eaux de 1976 (2ème édition, 1985). ISBN 90-70980-01-0 (nicht mehr lieferbar)
- I-3 HOFIUS, K. (1985): Hydrologische Untersuchungsgebiete im Rheingebiet / Bassins de recherches hydrologiques dans le bassin du Rhin. ISBN 90-70980-02-9 (nicht mehr lieferbar)
- I-4 BUCK, W., R. KIPGEN; J.W. VAN DER MADE, F. DE MONTMOLLIN, H. ZETTL, J.F. ZUMSTEIN (1986): Berechnung von Hoch- und Niedrigwasserwahrscheinlichkeit im Rheingebiet / Estimation des probabilités de crues et d'étiages dans le bassin du Rhin. ISBN 90-70980-03-7 (nicht mehr lieferbar)
- I-5 TEUBER, W., A.J. VERAART (1986): Abflußermittlung am Rhein im deutsch-niederländischen Grenzgebiet / La détermination des débits du Rhin dans la région frontalière germano hollandaise. ISBN 90-70980-04-5 (nicht mehr lieferbar)
- I-6 TEUBER, W. (1987): Einfluß der Kalibrierung hydrometrischer Meßflügel auf die Unsicherheit der Abflußermittlung. Ergebnisse eines Ringversuchs / Influence de l'étalonnage des moulinets hydrométriques sur l'incertitude des déterminations de débits. Résultats d'une étude comparative. ISBN 90-70980-05-3 (nicht mehr lieferbar)
- I-7 MENDEL, H.G. (1988): Beschreibung hydrologischer Vorhersagemodelle im Rheineinzugsgebiet / Description de modèles de prévision hydrologiques dans le bassin du Rhin. ISBN 90-70980-06-1 (nicht mehr lieferbar)
- I-8 ENGEL, H., H. SCHREIBER, M. SPREAFICO, W. TEUBER, J.F. ZUMSTEIN (1990): Abflußermittlung im Rheingebiet im Bereich der Landesgrenzen / Détermination des débits dans les régions frontalières du bassin du Rhin. ISBN 90-70980-10-x (nicht mehr lieferbar)
- I-9 CHR/KHR (1990): Das Hochwasser 1988 im Rheingebiet / La crue de 1988 dans le bassin du Rhin. ISBN 90-70980-11-8 (nicht mehr lieferbar)
- I-10 NIPPES, K.R. (1991): Bibliographie des Rheingebietes / Bibliographie du bassin du Rhin. ISBN 90-70980-13-4 (nicht mehr lieferbar)
- I-11 BUCK, W., K. FELKEL, H. GERHARD, H. KALWEIT, J. VAN MALDE, K.R. NIPPES; B. PLOEGER; W. SCHMITZ (1993): Der Rhein unter der Einwirkung des Menschen. Ausbau, Schifffahrt, Wasserwirtschaft / Le Rhin sous l'influence de l'homme. Aménagement, navigation, gestion des eaux. ISBN 90-70980-17-7 (nicht mehr lieferbar)
- I-12 SPREAFICO, M., A. VAN MAZIJK (Red.) (1993): Alarmmodell Rhein. Ein Modell für die operationelle Vorhersage des Transportes von Schadstoffen im Rhein. ISBN 90-70980-18-5
- I-13 SPREAFICO, M., A. VAN MAZIJK (réd) (1997): Modèle d'alerte pour le Rhin. Un modèle pour la prévision opérationnelle de la propagation de produits nocifs dans le Rhin. ISBN 90-70980-23-1
- I-14 EMMENEGGER, CH. ET AL. (1997): 25 Jahre KHR. Kolloquium aus Anlaß des 25jährigen Bestehens der KHR / 25 ans de la CHR. Colloque à l'occasion du 25e anniversaire de la CHR. ISBN 90-70980-24-x
- I-15 ENGEL, H. (1997): Fortschreibung der Monographie des Rheingebietes für die Zeit 1971- 1990 / Actualisation de la Monographie du Bassin du Rhin pour la période 1971-1990. ISBN 90-70980-25-8

- I-16 GRABS, W. (ed.) (1997): Impact of climate change on hydrological regimes and water resources management in the Rhine basin. ISBN 90-70980-26-6
- I-17 ENGEL, H. (1999): Eine Hochwasserperiode im Rheingebiet. Extremereignisse zwischen Dez.1993 und Febr. 1995. ISBN 90-70980-28-2 (nicht mehr lieferbar)
- I-18 KOS, TH.J.M., H. SCHEMMER, A. JAKOB (2000): Feststoffmessungen zum Vergleich von Messgeräten und Messmethoden im Rhein, 10-12 März 1998. ISBN 90-36953-54-5
- I-19 BARBEN, M. ET AL. (2001): Übersicht über Verfahren zur Abschätzung von Hochwasser- abflüssen – Erfahrungen aus den Rheinanliegerstaaten. ISBN 90-36954-11-8
- I-20 KRAHE, P., D. HERPERTZ (2001): Generation of Hydrometeorological Reference Conditions for the Assessment of Flood Hazard in large River Basins - Papers presented at the International Workshop held on March 6 and 7, 2001 in Koblenz. ISBN 90-36954-18-5
- I-21 KRAHE, P. ET AL. (2004): Entwicklung einer Methodik zur Analyse des Einflusses dezentraler Hochwasserrückhaltmaßnahmen auf den Abfluss des Rheins. ISBN 90-36956-74-9
- I-22 BELZ, J.U. ET AL. (2007): Das Abflussregime des Rheins und seiner Nebenflüsse im 20. Jahrhundert - Analyse, Veränderungen, Trends. ISBN 978-90-70980-33-7
- I-23 GÖRGEN, K. ET AL. (2010): Assessment of climate change impacts on discharge in the River Rhine Basin. Results of the RheinBlick2050 project. ISBN 978-90-70980-35-1
- I-24 STEINRÜCKE, J., B. FRÖHLINGS, R. WEIßHAUPT (2012): HYMOG – Hydrologische Modellierungsgrundlagen im Rheinsgebiet. ISBN 978-90-70980-00-9

Katalog/Catalogue der KHR

- 1 SPROKKEREEF, E. (1989): Verzeichnis der für internationale Organisationen wichtigen Meßstellen im Rheingebiet / Tableau de stations de mesure importantes pour les organismes internationaux dans le bassin du Rhin. ISBN 90 70980 08 8

Berichte unter der Schirmherrschaft der KHR

- II-1 MADE, J.W. VAN DER (1982): Quantitative Analyse der Abflüsse / Analyse quantitative des débits (nicht mehr lieferbar)
- II-2 GRIFFIOEN, P.S. (1989): Alarmmodell für den Rhein / Modèle d'alerte pour le Rhin. ISBN 90-70980-07-x (nicht mehr lieferbar)
- II-3 SCHRÖDER, U. (1990): Die Hochwasser an Rhein und Mosel im April und Mai 1983 / Les crues sur les bassins du Rhin et de la Moselle en avril et mai 1983. ISBN 90-70980-09-6 (nicht mehr lieferbar)
- II-4 MAZIJK A. VAN, P. VERWOERDT, J. VAN MIERLO, M. BREMICKER, H. WIESNER (1991): Rheinalarmmodell Version 2.0. Kalibrierung und Verifikation / Modèle d'alerte pour le Rhin version 2.0. Calibration et vérification. ISBN 90-70980-12-6 (nicht mehr lieferbar)
- II-5 MADE, J.W. VAN DER (1991): Kosten Nutzen Analyse für den Entwurf hydrometrischer Meßnetze / Analyse des coûts et des bénéfices pour le projet d'un réseau hydrométrique. ISBN 90-70980-14-2 (nicht mehr lieferbar)
- II-6 CHR/KHR (1992): Contributions to the European workshop Ecological Rehabilitation of Floodplains, Arnhem, The Netherlands, 22-24 September 1992. ISBN 90-70980-15-0
- II-7 NEMEC, J. (1993): Comparison and selection of existing hydrological models for the simulation of the dynamic water balance processes in basins of different sizes and on different scales. ISBN 90-70980-16-9 (nicht mehr lieferbar)
- II-8 MENDEL, H.G. (1993): Verteilungsfunktionen in der Hydrologie. ISBN 90-70980-19-3
- II-9 WITTE, W., P. KRAHE, H.J. LIEBSCHER (1995): Rekonstruktion der Witterungsverhältnisse im Mittelrheingebiet von 1000 n. Chr. bis heute anhand historischer hydrologischer Ereignisse. ISBN 90-70980-20-7 (nicht mehr lieferbar)
- II-10 WILDENHAHN, E., U. KLAHOLZ (1996): Große Speicherseen im Einzugsgebiet des Rheins. ISBN 90-70980-21-5
- II-11 SPREAFICO, M., C. LEHMANN, H. SCHEMMER, M. BURGDORFFER, TH. L. KOS (1996): Feststoffbeobachtung im Rhein, Beschreibung der Meßgeräte und Meßmethoden. ISBN 90-70980-22-3

- II-12 SCHÄDLER, B. (Red.) (1997): Bestandsaufnahme der Meldesysteme und Vorschläge zur Verbesserung der Hochwasservorhersage im Rheingebiet. Schlußbericht der IKSR-Arbeitseinheit 'Meldesysteme / Hochwasservorhersage 'Projektgruppe 'Aktionsplan Hochwasser' / Annonce et prévision des crues dans le bassin du Rhin. Etat actuel et propositions d'amélioration. Rapport final de l'unité de travail 'Systèmes d'annonce / prévision des crues' Groupe de projet 'Plan d'action contre les inondations'. ISBN 90-70980-27-4
- II-13 DRÖGE, B., H. HENOCH, W. KELBER, U. MAHR, T. SWANENBERG, T. THIELEMANN, U. THURM (1999): Entwicklung eines Längsprofils des Rheins. Bericht für die Musterstrecke von Rhein km 800-845. Arbeitsgruppe 'Sedimenttransport im Rhein' Projekt 3. ISBN 90-70980-29-0
- II-14 MAZIJK, A. VAN, CH. LEIBUNDGUT, H.P. NEFF (1999): Rhein Alarm Modell Version 2. 1. Erweiterung um die Kalibrierung von Aare und Mosel. Kalibrierungsergebnisse von Aare und Mosel aufgrund der Markierungsversuche 05/92, 11/92 und 03/94. ISBN 90-70980-30-4
- II-15 KWADIJK, J., W. VAN DEURSEN (1999): Development and testing of a GIS based water balance model for the Rhine drainage basin. ISBN 90-70980-31-2
- II-16 MAZIJK, A. VAN, J.A.G. VAN GILS, V. WEITBRECHT. S. VOLLSTEDT (2000): ANALYSE und EVALUIERUNG der 2D-MODULE zur Berechnung des Stofftransportes in der Windows-Version des RHEINALARMMODELLS in Theorie und Praxis. ISBN 90-36953-55-3
- II-17 SPREAFICO, M., R. WEINGARTNER ET AL. (2002): Proceedings International Conference on Flood Estimation, March, 6-8, 2002 Berne, Switzerland. ISBN 90-36954-60-6
- II-18 BRONSTERT A. ET AL. (2003): LAHoR – Quantifizierung des Einflusses der Landoberfläche und der Ausbaumassnahmen am Gewässer auf die Hochwasserbedingungen im Rheingebiet. ISBN 90-70980-32-0
- II-19 KROEKENSTOEL, D.F., E.H. VAN VELZEN (2003): Morphologische Berechnungen mit Sedimentmischungen – Zukunftsmusik oder eine realistische Alternative? ISBN 90-36954-98-3
- II-20 SPREAFICO, M., C. LEHMANN (Ed.) (2009): Erosion, Transport and Deposition of Sediment - Case Study Rhine- Contribution to the International Sediment Initiative of UNESCO / IHP. ISBN 90-70980-34-4
- II-21 GERTSCH, E., CH. LEHMANN, M. SPREAFICO (2012): Methods for the Estimation of Erosion, Sediment Transport and Deposition in Steep Mountain Catchments. A contribution to the International Sediment Initiative of UNESCO/International Hydrological Programme. ISBN 978-90-70980-36-8
- II-22 HILLEBRAND, G., R.M. FRINGS (2017): Von der Quelle zur Mündung: Die Sedimentbilanz des Rheins im Zeitraum 1991 – 2010. ISBN: 978-90-70980-39-9, DOI: 10.5675/KHR_22.2017
- II-23 SCHWILLUS, H., H. MOSER (HRSG) (2017): Land unter. Der Mensch vor der Katastrophe. Menschliche Wahrnehmung singulärer hydrologischer Ereignisse. ISBN 90-70980-40-5.

KOLOPHON

Bericht Nr. II-22 der KHR
Report No II-22 of the CHR

Sekretariat
PO Box 2232, NL-3500 GE Utrecht
E-Mail: info@chr-khr.org
Website: www.chr-khr.org

Projektdurchführung

Bundesanstalt für Gewässerkunde
Referat Grundwasser, Geologie, Gewässermorphologie
Am Mainzer Tor 1, D-56068 Koblenz
E-Mail: posteingang@bafg.de
Website: www.bafg.de

RWTH Aachen University
Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Mies-van-der-Rohe-Strasse 17, D-52056 Aachen
E-Mail: sekretariat@iww.rwth-aachen.de
Website: www.iww.rwth-aachen.de

Übersetzung Kapitel 11 und Anhang D

LUND Languages
Übersetzungsbüro für Industrie, Handel, Medien & Wissenschaft
Hohenstaufenring 11, D-50674 Köln / Cologne
E-Mail: info@lund-languages.com
Website: www.lund-languages.com

Drucker / Printers:

Enveloprint BV
PO Box 42, NL 7090 AA Dinxperlo
E-Mail: info@enveloprint.nl
Website: www.enveloprint.nl

ISBN: 978-90-70980-39-9

DOI: 10.5675/KHR_22.2017

