

Die numerische Simulation von Nassbaggerstrategien im Kontext der Optimierung von Unterhaltungsmaßnahmen für die Schifffahrt

Christian Maerker

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Gutachter:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Malcherek
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm

Die Dissertation wurde am 08.05.2013 bei der Universität der Bundeswehr München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 15.05.2013 angenommen. Die mündliche Prüfung fand am 17.10.2013 statt.

Kurzfassung

Jährlich betragen die finanziellen Aufwendungen zur Unterhaltung der Schifffahrtsstraßen in Deutschland mehrere hundert Millionen Euro. Zur Reduktion dieser Kosten und der Verminderung der Eingriffe haben sich verschiedene Sedimentmanagement-Konzepte für die einzelnen Flüsse, Ästuare und Häfen ausgebildet. Allerdings sind auch in diesen Konzepten weiterhin Nassbaggermaßnahmen notwendig.

Auch im Bereich der Nassbaggermaßnahmen gibt es intensive Bestrebungen, durch Optimierungsprozesse den Baggergutanteil zu reduzieren. Eine Möglichkeit, die im Zuge der fortwährenden Entwicklung der Rechnerkapazitäten und leistungsfähiger Software weiter an Bedeutung gewinnt, ist die Verwendung von Hydrodynamisch-Morphodynamisch-Numerischen Modellen zur Simulation von Nassbaggerstrategien. Aus diesem Grund erging der Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau an das Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München zur Entwicklung eines Programmpakets, das in Kombination mit gängigen Strömungs- und Transportmodellen die Modellierung von Nassbaggermaßnahmen ermöglicht.

Ein Teil der vorliegenden Arbeit wird sich mit den Anforderungen und der Umsetzung der Entwicklung des Programmbausteins DredgeSim auseinander setzen. Im Zuge dieser Programmentwicklung zeigte sich immer stärker der Bedarf nach Möglichkeiten, die intellektuell vielfältig interpretierbaren Lösungen eines numerischen Modells zu analysieren. Häufig sind mehrere Kriterien zu beachten, die darüber entscheiden, ob eine Lösung gut oder schlecht ist. Der andere Teil dieser Arbeit wird sich daher damit beschäftigen, wie Nassbaggerstrategien ausgewertet und die Lösungen mit Hilfe von mehrkriteriellen Beurteilungsmodellen bewertet werden.

Zu Beginn wird in Kapitel 1 die Baggergutproblematik thematisiert. Dabei wird darauf eingegangen, welche Verfahrensmöglichkeiten es im Umgang mit Baggergut existieren und wie derart hohe Kosten entstehen können. Es wird deutlich gemacht, wie der Umgang mit Baggergut durch den Verwaltungsapparat mit beeinflusst wird, bevor zum Abschluss auf die unvermeidlichen rechtlichen Grundlagen eingegangen wird. In Kapitel 2 wird aufgezeigt, welche gängigen und auch speziellen Sedimentmanagement-Konzepte mit dem Ziel der Verringerung des Unterhaltungsaufwands entlang der Fließgewässer entwickelt wurden. Man erkennt daran vor allem, dass es keine einheitliche Lösung gibt, die auf verschiedene Gewässerabschnitte einfach übertragen werden kann, sondern sich regional verschiedene Unterhaltungsstrategien herausgebildet haben. Das Kapitel schließt mit einer Hierarchisierung der verschiedenen Sedimentmanagement-Konzepte gemäß PIANC.

Im Anschluss werden in Kapitel 3 Nassbaggermaßnahmen thematisiert, indem die bekanntesten im Einsatz befindlichen Gerätschaften vorgestellt werden. Zudem gilt es, die Vorgänge Baggern und Verbringen im Vorgriff auf die Umsetzung solcher Maßnahmen in einem numerischen Modell phänomenologisch zu beschreiben.

Ein wichtiger Schritt für die Modellierung von Baggermaßnahmen ist die Beschreibung des Entscheidungsprozesses, der einer Maßnahme vorher geht. Dieser muss möglichst logisch strukturiert sein, damit er von einem Computermodell korrekt interpretiert wird. Dementsprechend wird dieses Thema in Kapitel 4 mit Hilfe von einfachen Überlegungen aus der Entscheidungstheorie bearbeitet, um einen einfachen Baggeralgorithmus zu entwickeln. Dieser führte zunächst zu einem Ein-Punkt-Modell, das auf der Interpretation als Steuerungs- und Regelungsproblem basiert und mit dem Baggermaßnahmen für einen charakteristischen Punkt im betrachteten Gebiet untersucht werden können. Da es sich jedoch in der Regel um mehrdimensionale Probleme handelt, ist es notwendig ein entsprechendes mehrdimensionales Programm zu entwickeln, um Baggervorgänge genauer zu modellieren. In dieses Programm sollten die wesentlichen Erkenntnisse aus der Beschreibung von Bagger- und Verbringmaßnahmen als Entscheidungsproblem einfließen.

Die entsprechend den Anforderungen entwickelte Software DredgeSim wird in Kapitel 5 vorgestellt. Bagger- und Verbringvorgänge können auf drei verschiedene Arten mit DredgeSim simuliert werden. Zunächst bieten Baggerkriterien die Möglichkeit einen Baggervorgang einzuleiten, wenn die Schiffbarkeit infolge von Sedimentationsprozessen eingeschränkt ist. Der Entscheidungsprozess, wann eine Baggerung erforderlich ist, wird hierin abgebildet. Als Ergebnis erhält man die Baggermengen, die bei der Wiederherstellung der Schiffbarkeit anfallen. Des Weiteren kann ein Bagger- und Verbringvorgang dadurch modelliert werden, dass ein Start- und Endzeitpunkt für eine Maßnahme vorgegeben wird. In Erweiterung dieser Funktionalität kann eine Geschiebezugabe simuliert werden, wenn zusätzlich zu Start- und Endzeitpunkt auch eine Sedimentverteilung definiert wird, die dem System von außen zugegeben wird. Die Entwicklung des Programmpakets DredgeSim erfolgte in verschiedenen Schritten, die hier beschrieben werden - von der Anforderungsermittlung, der Notwendigkeit weitergehender theoretischer Überlegungen, der Entwicklung von Baggerkriterien, der Umsetzung aller Überlegungen in ein anwendbares Programm und der Kopplung mit bestehenden numerischen Modellen. Abgerundet wird dieser Abschnitt mit der Demonstration der Anwendung eines Baggerkriteriums zur Baggermengenentwicklung an einem einfachen Kurvenmodell.

Kapitel 6 setzt sich mit dem Thema der Optimierung und Bewertung von Nassbaggerstrategien auseinander. Dazu werden eingangs die verschiedenen Möglichkeiten der Beurteilung von mehrkriteriellen Problemen aufgeführt. Es wird deutlich gemacht, dass sich momentan multiattributive Modelle am ehesten dazu eignen, die verschiedenen Aspekte von Nassbaggerstrategien in einem Beurteilungsprozess abzuhandeln. Auf der Grundlage dieser Überlegungen wird ein einfaches allgemeines Beurteilungsmodell für Nassbaggerstrategien diskutiert, welches im Rahmen dieser Arbeit angewendet werden soll.

In Kapitel 7 werden vier praktische Anwendungsfälle gezeigt. Zunächst werden an

einem Donauabschnittsmodell Baggermengen über den Zeitraum von drei Jahren prognostiziert und mit Messdaten verglichen. Die Ergebnisse stimmen sehr gut mit den beobachteten Mengen überein.

Der zweite Anwendungsfall behandelt die Simulation einer Geschiebezugabe an einem Modell für einen Rheinabschnitt über mehrere Jahre. Die Ausbreitung der verbrachten Sedimente wird mit Messdaten aus Tracer-Experimenten verglichen. Auch hier ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen.

An einem kalibrierten Modell der Tideelbe vom Hamburger Hafen bis zur Elbmündung werden in einer dritten Anwendung verschiedene Verbringstrategien simuliert und hinsichtlich des Einflusses des Oberwassers analysiert. Dazu wird die Verdriftung in definierte Kontrollabschnitte bestimmt und miteinander verglichen. Es wird deutlich, dass bei geringem Oberwasserzufluss der Stromauftransport der verbrachten Sedimente signifikant ist, was bereits nach kurzer Zeit zu Akkumulationsprozessen der zuvor verbrachten Sedimente in den kritischen Hafenbereichen führen kann. Dieser Prozess kann die Bagger- und Verbringstrategie maßgeblich beeinflussen, da das Verbringen des Baggerguts bei diesen Oberwasserverhältnissen zu einer Erhöhung der Unterhaltungskosten führen kann. Weiterhin wurde das in Kapitel 6 entworfene Beurteilungsmodell angewendet, um den Einfluss der Verdriftung in ökologisch sensitive und unterhaltungsintensive Abschnitte einander gegenüber zu stellen und auf diese Weise ein mehrkriterielles Unterhaltungsproblem zu analysieren. Die Anwendung zeigt, wie die Interpretation der Ergebnisse mit der Wertung der Kriterien korreliert, indem der Oberwassereinfluss auf die Ergebnisse auch hierin deutlich wird.

In der vierten Anwendung wird noch gezeigt, wie ein solches Programmpaket nicht nur in komplexen Projekten eingesetzt werden kann, sondern auch in einfachen Anwendungen zum operativen Geschäft, indem die Aufnahmekapazität eines Kolks an der Donau bestimmt wurde.

Im abschliessenden Kapitel 8 werden die wesentlichen Erkenntnisse und Schlussfolgerungen der Arbeit dargestellt.

Abstract

Every year high maintenance costs of several million Euro are reported for German waterways. In order to reduce these costs different sediment management concepts have developed for the different rivers, estuaries and harbor sections. Within modern maintenance strategies dredging is still considered as one of the key factors.

Reducing the amount of dredged material is one of the main optimization tasks in dredging. Due to the recent development of computer capacities and powerful application software one possibility is the use of morphodynamic models to simulate dredging strategies. Based on this, the Federal Waterways Engineering and Research Institute entrusted the Universität der Bundeswehr München with the development of a software package enabling the simulation of dredging activities in combination with common morphodynamic modeling systems.

A major part of this thesis describe the requirements and the realization of the software package DredgeSim. During this development the necessity of analyzing the multiple results of a numerical model regarding the effect of dredging became visible. Often, different criteria have to be respected to decide whether a result can be evaluated as favorable or not. Therefore, another major part of this thesis is focussing on the analysis of dredging strategies and how results can be evaluated by use of multi-criteria decision models.

In the beginning the actual processes around dredging activities and dredged material are described in chapter 1. It is shown which methods of dealing with dredged material are existing and why high costs are resulting. It is described furthermore, how dredging is influenced by local authorities and which legal regulations have to be respected when dealing with dredged material.

In chapter 2 common and special sediment management concepts are illustrated, which have developed in order to reduce maintenance efforts. An important conclusion is that there is no general procedure which can be adopted in every region. An important hierarchy of different methods which are available was developed by PIANC and is described in the end of this section.

The most common dredging machinery is introduced in chapter 3. Furthermore, the two processes dredging and replacing of dredged material are described phenomenologically in preparation for simulating both with a computer model.

An important step to set up a model for dredging measures is to define the decision making process that forms the basis for such operations. This decision making process should be built of logical algorithms to be interpreted correctly by a computer mo-

del. Chapter 4 shows how decision theory helps to develop a simple dredging method. The derived algorithm cumulates in a simplified point model to simulate a dredging strategy as a control system for a characteristic spot within the investigated area. However, dredging has to be considered as multidimensional process, which shows the necessity of developing a multidimensional software package in order to model dredging actions accurately. This software should incorporate the main findings of describing dredging and replacing of dredged material as a decision making process. The software package DredgeSim allowing multidimensional modeling of dredging strategies is introduced in chapter 5. DredgeSim offers three options to model dredging and disposal activities. The prediction of dredging needs can be simulated by use of different dredge criteria, where dredging is initiated if sedimentation is reaching a certain threshold within an observed area. The decision making process for dredging is herein applied. Furthermore, DredgeSim offers the possibility to define a dredging and disposing action by setting a start and end time for an operation. In addition to this functionality, artificial bed load supply modeling can be done by use of DredgeSim introducing externally defined sediments to the system. The development of the whole software package consisted of different steps which are portrayed here, like determining the requirements, incorporating additional theoretical aspects, the development of dredge criteria, the implementation in program code and finally coupling it to existing morphodynamic models. The end of this chapter shows a typical use case by applying DredgSim on a simple curve model to predict dredging needs.

Chapter 6 deals with possibilities of the optimization and evaluation of dredging strategies. In the beginning different options to solve multi-criteria optimization problems in general are being introduced. It became apparent that multi-attributive utility theory seems to be the best approach to evaluate dredging strategies regarding different optimization tasks. These optimization tasks are discussed in detail cumulating in a general assessment model which is used in practical applications later.

Four typical applications stemming from actual project works are being portrayed in chapter 7. A dredge criterion is used within a model of a stretch of the River Danube to predict dredging needs over a period of three years in this area. The results are compared to actual dredging needs reported for this section. The predicted amounts of dredged material computed with DredgeSim and the morphodynamic model correspond well with the measured values.

The second application of DredgeSim deals with a model of a River Rhine section. Here, an artificial bed load supply campaign is simulated over several years. The transport of sediments which were disposed during the campaign is compared with tracer experiments, carried out for the same river stretch. Again a good correspondence of the numerical model and the experimental data could be achieved.

A calibrated model of the Elbe Estuary was used in a third application in order to simulate different disposal strategies and analyze the influence of the head water discharge. This is done by determining the masses of sediments which are drifting from the disposal sites into defined control sections drawn around areas of certain interest. In the computation results it became apparent that the flood dominated

sediment transport in upstream direction is getting significantly strong at low head water discharges which can lead to a frequent siltation of critical harbor stages. This is influencing the dredging strategy, as disposal of dredged material at such head water conditions tends to increase the maintenance costs. Furthermore, in order to evaluate drifting into ecological sensitive control sections and frequently dredged control sections the assessment model being introduced in chapter 6 is applied, for this marks a multi-criteria optimization task. The results of this assessment model correspond well with the interpretation of morphodynamic model as the head water influence is resembled herein as well.

The last application shows how DredgeSim can be applied in more simple investigations. For a smaller model of the River Danube the capacity of a scour for disposing dredged sediments is calculated. Such results can assist to develop dredging strategies in the early stages of a project.

This thesis ends with chapter 8, where the main results and conclusions of are being portrayed.

Inhaltsverzeichnis

1	Baggergutproblematik	1
1.1	Die Definition von Baggergut	2
1.2	Qualitative Beschreibung des Baggerguts	4
1.3	Umgang mit Baggergut	5
1.3.1	Umlagern	6
1.3.2	Verwendung	7
1.3.3	Behandlung	7
1.3.4	Verwertung	8
1.3.5	Beseitigung	8
1.4	Rechtlicher Rahmen	9
1.4.1	Internationale Regelungen	9
1.4.2	Nationale Gesetzgebung	11
1.4.3	Handlungsanweisungen für den Umgang mit Baggergut in Deutschland	14
1.5	Zuständigkeiten	21
1.6	Baggergutproblematik	22
1.7	Zielstellung der Arbeit	24
2	Sedimentmanagement und Nassbaggerstrategien	27
2.1	Konstruktive Maßnahmen	27
2.1.1	Buhnen und Leitwerke	28
2.1.2	Konstruktive Maßnahmen in Häfen	30
2.1.3	Weitere konstruktive und technische Maßnahmen	32

2.2	Der Umgang mit Flüssigschlick	33
2.3	Nassbaggerstrategien am Beispiel Hamburgs	34
2.4	Unterhaltungskonzepte an deutschen Flüssen und Häfen	37
2.4.1	Sedimentmanagementkonzept für die Tideelbe	37
2.4.2	Unterhaltungskonzept für das Weserästuar	39
2.4.3	Sedimentmanagement am Rhein	39
2.4.4	Unterhaltungsbaggerungen an der Donau	40
2.5	Systematik für Sedimentmanagement-Systeme	40
2.6	Zusammenfassung	42
3	Nassbaggertypen und Baggergutverbringung	43
3.1	Einzelprozesse des Nassbaggerns	43
3.2	Nassbaggertypen	44
3.2.1	Pontonbagger	45
3.2.2	Hopperbagger	46
3.2.3	Schneidkopfsaugbagger	47
3.2.4	Eimerkettenbagger	48
3.2.5	Wasserinjektionsgerät	49
3.2.6	Dustpanbagger	50
3.2.7	Bed Leveller	51
3.2.8	Pneumatische Bagger	51
3.2.9	Air-Lift-Bagger	52
3.3	Solltiefen beim Baggern	53
3.4	Umlagerung von Baggergut	55
4	Die Modellierung menschlicher Eingriffe in den Sedimenthaushalt	59
4.1	Beispiele der Modellierung menschlicher Handlungen und ihrer Auswirkungen	59
4.2	Die Modellierung von Entscheidungsprozessen	61
4.3	Sedimentmanagement als Steuerungs- und Regelungsproblem	66
4.4	Ein-Punkt-Regelungsmodell zur Analyse von Baggerstrategien	68

4.4.1	Eingangsdaten und Modellaufbau	69
4.4.2	Analyse für unterschiedliche Sedimentationsfunktionen	72
4.5	Die Simulation mit mehrdimensionalen Modellen	77
4.6	Zusammenfassung	79
5	Das Modellpaket DredgeSim	81
5.1	DredgeSim in HMN-Modellen	81
5.2	Use Cases für DredgeSim	82
5.2.1	Use Cases Baggermaßnahmen	82
5.2.2	Use Cases Verbringmaßnahmen	84
5.3	Die Definition von Einsatzflächen	87
5.4	Die Algorithmisierung von Baggeroperationen	89
5.4.1	Baggern auf Knoten und Elementen	89
5.4.2	Entnahme eines Volumens aus dem Simulationsgitter	90
5.4.3	Baggerkriterien zur automatischen Baggerinitiierung	92
5.4.4	Zeitgesteuerte Baggeroperationen	99
5.5	Die numerische Erfassung von Verbringmaßnahmen	100
5.5.1	Kriteriengesteuertes und zeitgesteuertes Verbringen	101
5.5.2	Das gleichmäßige Verbringen von Baggergut in der Fläche	102
5.5.3	Das Verbringen in Kolken	103
5.5.4	Das Einmischen von fraktioniertem Baggergut in die Austausch- schicht	105
5.5.5	Die Simulation von Geschiebezugaben	106
5.5.6	Verbringstrategien	106
5.5.7	Beispiel Kurvenmodell	108
5.6	Softwaretechnische Umsetzung	109
5.6.1	IO-Struktur	110
5.6.2	Module und Pakete	111
5.6.3	Programme in Kopplung	112
5.6.4	Telemac2D	112
5.6.5	UnTRIM	114
5.6.6	SediMorph	116
5.6.7	Sisyphé	117

6	Die Optimierung und Bewertung von Nassbaggerstrategien	119
6.1	Mehrkriterielle Analysen	120
6.2	Mehrkriterielle Optimierung	121
6.2.1	Pareto-Optima	122
6.2.2	Entscheidungsfindung	125
6.3	Multiattributive Modelle	125
6.3.1	Monetäre Verfahren	126
6.3.2	Nicht-monetäre Verfahren	127
6.3.3	Entscheidungsmodell für eine Beispielanwendung	131
6.4	Bewertungskriterien für Nassbaggerstrategien	133
6.4.1	Kosten	135
6.4.2	Umweltauswirkungen	136
6.4.3	Langfristentwicklung	136
6.4.4	Verwendung bei Sicherungsmaßnahmen	137
6.5	Nassbaggerstrategien in Beurteilungsmodellen	138
6.5.1	Wichtung der Kriterien	138
6.5.2	Bestimmung von Nutzwerten	143
6.6	Zusammenfassung	145
7	Anwendungen	147
7.1	Die Prognose von Baggermengen in einem Donauabschnittsmodell . .	147
7.1.1	Modellgebiet und Methodik	148
7.1.2	Simulationsergebnisse	149
7.1.3	Zusammenfassung	151
7.2	Die Ausbreitung einer Geschiebezugabe entlang eines Rheinabschnitts	151
7.2.1	Modellgebiet und Methodik	151
7.2.2	Simulationsergebnisse	152
7.2.3	Zusammenfassung	154
7.3	Die Beurteilung von Umlagerungsstrategien in der Tideelbe	154
7.3.1	Modellgebiet und Methodik	154

7.3.2	Simulationsergebnisse	157
7.3.3	Beurteilung der Ergebnisse durch Multiattributive Modelle . .	161
7.3.4	Zusammenfassung	166
7.4	Die Befüllkapazität eines Donaukolks	167
7.4.1	Modellgebiet und Methodik	167
7.4.2	Simulationsergebnisse	167
7.4.3	Zusammenfassung	169
8	Zusammenfassung und Ausblick	171
	Literaturverzeichnis	176
	Danksagung	186

Abbildungsverzeichnis

1.1	Verteilung der Unterhaltungsbaggermengen in deutschen Gewässern im Jahr 2004	1
1.2	Feinkörniges Baggergut im Bereich eines Sportboothafens in Hamburg	3
1.3	Baggergut aus einer Unterhaltungsbaggerung an der Donau	4
1.4	Verfahrenskette zur Entscheidung über den Umgang mit Baggergut .	5
1.5	Verbringen zuvor gebaggerter Sedimente an der Donau	6
1.6	Nationale Rechtsvorschriften beim Umgang mit Baggergut	14
1.7	Handlungsanweisungen im Umgang mit Baggergut im Binnenbereich nach BfG	16
1.8	Handlungsanweisungen zum Umgang mit Baggergut im Küstenbereich nach GÜBAK	19
1.9	Kosten der Unterhaltungsbaggerei 2000-2003	22
1.10	Kosten der Baggergutbehandlung aus dem Jahr 2002	23
2.1	Buhnenkörper an der Donau	28
2.2	Die Wirkungsweise von Buhnen	29
2.3	Beeinflussung der Zirkulationsströmung an Hafeneinfahrten	31
2.4	Ausbildung eines Sedimentationsschwerpunktes an Hafeneinfahrten und Vermeidung durch eine Strömungsumlenkwand	32
2.5	Verschlickung des Hafens Dorum	33
2.6	Verlauf von Wasserständen und Strömungsgeschwindigkeiten in Ästuaren aufgrund von Dämpfungs- und Reflexionseffekten	35
2.7	Die Tideelbe mit der Umlagerungsstelle Tonne E3	36
2.8	Entwicklung der Baggermengen im Hamburger Hafen 1990-2007 . . .	36
2.9	KSIS-Sedimentmanagementansätze	42

3.1	Darstellung eines hydraulischen Pontongrabbaggers	45
3.2	Darstellung eines Pontonseilbaggers	46
3.3	Darstellung eines Laderaumsaugbaggers	46
3.4	Arbeitsprinzip eines Saugbaggers	47
3.5	Darstellung eines Schneidkopfsaugbaggers	48
3.6	Arbeitsprinzip eines Eimerkettenbaggers	49
3.7	Arbeitsprinzip eines Wasserinjektionsgeräts	50
3.8	Arbeitsprinzip eines Dustpanbaggers	50
3.9	Arbeitsprinzip eines Bed Levellers	51
3.10	Funktionsweise eines pneumatischen Baggerverfahrens	52
3.11	Funktionsweise des Air-Lift-Systems	52
3.12	Normalnull und Seekartennull als Referenzniveaus im Küstenbereich .	53
3.13	Referenzwasserspiegellagen im Binnenbereich	54
3.14	Konzept der nautischen Tiefe für Flüssigschlick	55
3.15	Klapp- und Spaltschuten zur Baggergutumlagerung	56
3.16	Prozess der Baggergutumlagerung aus einer Schute heraus	57
4.1	Beispiel eines Entscheidungsprozesses in der Wirtschaft	63
4.2	Reduziertes Entscheidungsmodell für Nassbaggermaßnahmen	64
4.3	Entscheidungsmodell für Nassbaggerstrategien	65
4.4	Entscheidungsmodell für Sedimentmanagementmaßnahmen	66
4.5	Aufbau eines Steuerungs- und eines Regelungssystems	67
4.6	Entwurf eines Regelungssystems für die Unterhaltungsbaggerei	67
4.7	Grundformen der verwendeten Sedimentationsfunktion	69
4.8	Simulinkmodell zur Analyse von Baggerstrategien	71
4.9	Beispielhafte Ergebnisse des Simulinkmodells für einen linearen Sedi- mentationsverlauf	71
4.10	Simulation mit einem Ein-Punkt-Regelungsmodell für eine lineare Se- dimentationsfunktion	74
4.11	Simulation mit einem Ein-Punkt-Regelungsmodell für eine konvexe Se- dimentationsfunktion	75

4.12	Simulation mit einem Ein-Punkt-Regelungsmodell für eine konkave Sedimentationsfunktion	75
4.13	Sedimentationsfunktionen im Bereich der kritischen Sohlhöhen	77
4.14	Optionen bei der Modellierung von Nassbaggermaßnahmen in mehrdimensionalen numerischen Modellen	79
5.1	Simulationsumgebung für DredgeSim	82
5.2	Use Cases Baggern	84
5.3	Use Cases Baggergutverbringung und Geschiebezugabe	86
5.4	Use Cases Geschiebezugabe	87
5.5	Die Definition von Baggereinsatzflächen und Verbringstellen im IPDS-Paket durch Polygonzüge	88
5.6	Die Zuordnung von Gitterelementen oder Gitterknoten im IPDS-Paket	88
5.7	Vergleich einer Vertiefung aus Baggerungen auf Knoten und Elementen	90
5.8	Vertiefung eines Knotens und daraus folgendes Entnahmevolumen . .	90
5.9	Vertiefung von drei Knoten eines Dreieckelements und daraus folgendes Entnahmevolumen	91
5.10	Vertiefung eines Knotens im Gitterverband und daraus folgendes Entnahmevolumen	92
5.11	Die Prüfung der Sohlhöhe eines Elements im Rahmen eines Baggerkriteriums	93
5.12	Baggerkriterium bezüglich der Wassertiefe	94
5.13	Definition von Profilen zur Interpolation des Referenzwasserspiegels .	95
5.14	Kriterium bezüglich eines Referenzwasserspiegels	95
5.15	Ermittlung aller baggerrelevanten Knoten innerhalb eines definierten Umkreises	96
5.16	Vertiefung eines Baggerpolygons zu jedem Zeitschritt um das Maß Δz bis zum Erreichen des Aushubziels	97
5.17	Sohlhöhenabsenkung infolge Baggerns mit konstantem Δz für alle Elemente eines Baggerpolygons	100
5.18	Vergleich zwischen gleichmäßigem Verbringen und dem Befüllen von Kolken	102
5.19	Das Verbringen mit variabler Differenzhöhe und der sich dabei einstellende Zielhorizont bei der Befüllung von Kolken	103

5.20	Einmischen einer Kornverteilung aus verbrachtem Baggergut in die Austauschschicht	106
5.21	Bestimmung der nächstgelegenen Verbringstelle zur Baggergutumlagerung	107
5.22	Beispielanwendung eines einfachen Kurvenmodells	109
5.23	IO-Struktur für DredgeSim	110
5.24	Simulationsumgebung aus Modulen und Paketen	111
5.25	Unstrukturiertes orthogonales UnTRIM-Gitter [31]	115
5.26	Struktur des dreidimensionalen Bodenmodells in SediMorph (Knoch und Malcherek, 2005 [65])	117
6.1	Beispiel einer mehrkriteriellen Optimierungsaufgabe	121
6.2	Pareto-optimale Lösungen eines gleichgerichteten zweidimensionalen Optimierungsproblems in einer Lösungsmenge	124
6.3	Pareto-optimale Lösungen eines gegenläufigen zweidimensionalen Optimierungsproblems in einer Lösungsmenge	124
6.4	Mögliche Folgeprozesse bei der Baggergutverbringung	134
6.5	Beurteilungsmodell zur Bewertung von Verbringstellen	138
6.6	Beurteilungskriterien und Unterkriterien zur Bewertung von Verbringstellen	139
7.1	Donauabschnitt Straubing bis Vilshofen und Modellabschnitt	148
7.2	Modellierte Sohlevolution nach einem Jahr Simulationszeit vor (links) und nach (rechts) einer eingeleiteten Baggerung [49]	150
7.3	Summenkurven der simulierten und gemessenen Baggermengen im Modellgebiet, nach [49]	150
7.4	Geschiebezugabefelder am Rhein unterhalb von Iffezheim [90]	152
7.5	Ausbreitungsgeschwindigkeiten der vier Sedimentfraktionen nach dem Verbringen unterhalb von Iffezheim [90]	153
7.6	Lage der Baggerstelle Parkhafen und der Verbringstellen Neßsand und 689	155
7.7	Festgelegte Kontrollabschnitte zur Beurteilung der Verbringstrategie [102] 156	
7.8	Verteilung der Sedimentmengen nach Verbringen auf Neßsand und anschließender Verdriftung bei $Q_{OW} = 180 \text{ m}^3/\text{s}$ [102]	157

7.9	Verteilung der Sedimentmengen nach Verbringen auf Neßsand und anschließender Verdriftung bei $Q_{OW} = 720 \text{ m}^3/\text{s}$ [102]	158
7.10	Verteilung der Sedimentmengen nach Verbringen auf 689 und anschließender Verdriftung bei $Q_{OW} = 180 \text{ m}^3/\text{s}$ [102]	160
7.11	Verteilung der Sedimentmengen nach Verbringen auf 689 und anschließender Verdriftung bei $Q_{OW} = 720 \text{ m}^3/\text{s}$ [102]	160
7.12	Ergebnisse einer Kolkverbringung an der Donau	168
7.13	Ergebnisse der Sohlhöhenentwicklung für ein Verbringvolumen von 70000 m^3 über die Simulationszeit [69]	169

Tabellenverzeichnis

6.1	Matrix über die paarweisen Vergleiche von Bewertungskriterien im Rahmen des analytischen Hierarchieprozesses	130
6.2	Bewertung der Standorte bezüglich der gewählten Kriterien	131
6.3	Nutzwerte und Gesamtbewertung der Standorte nach Wichtung der Kriterien	132
6.4	Wichtung der Kriterien für Nassbaggerstrategien	141
6.5	Matrix über die paarweisen Vergleiche von Bewertungskriterien für Nassbaggerstrategien	142
6.6	Wichtung der Kriterien für Nassbaggerstrategien nach AHP	143
6.7	Bewertungsgrößen, Nutzwerte und Wichtungen der einzelnen Beurteilungskriterien	145
7.1	Vergleich der Frontgeschwindigkeiten aus Simulationen und Tracerversuch [90])	154
7.2	Prozentuale Verteilung der Sedimente (Summe aller Fraktionen) in den Kontrollabschnitten nach Umlagerung und Verdriftung von der Verbringstelle Neßsand (nach [102])	159
7.3	Vergleich der Verteilung der Sedimente (Summe aller Fraktionen) in den Kontrollabschnitten nach Umlagerung und Verdriftung von den Verbringstellen 689 und Neßsand (nach [102])	159
7.4	Nutzwerte, Wichtungsfaktoren und Gesamtnutzen beim Vergleich der Simulationsergebnisse zur Verbringstelle Neßsand	163
7.5	Nutzwerte, Wichtungsfaktoren und Gesamtnutzen beim Vergleich der Simulationsergebnisse von Verbringstelle 689 mit Verbringstelle Neßsand	164
7.6	Sensitivitätsanalyse für den Vergleich der Simulationsergebnisse zur Verbringstelle Neßsand	165
7.7	Nutzwerte, Wichtungsfaktoren und Gesamtnutzen beim Vergleich der Simulationsergebnisse von Verbringstelle 689 mit Verbringstelle Neßsand	166

Kapitel 1

Baggergutproblematik

Mit dem Begriff Baggern wird ganz allgemein der Aushub von Boden bezeichnet. Das Aufgabengebiet der Baggerei ist sehr weitläufig. So können beispielsweise der Gewinn granularer Materialien, Aushubarbeiten für den Hoch- und Tiefbau oder auch umwelttechnische Aspekte im Vordergrund stehen. Typische Anwendungen im Bereich des Wasserbaus liegen im Bau und der Unterhaltung der Wasserstraßen als auch dem Aus- oder Neubau von Häfen. Diese Arbeiten fallen in das Gebiet der Nassbaggerei, da das Baggermaterial unter Wasser gefördert wird.

Jährlich werden in Deutschland Baggerarbeiten mit einem Volumen von 45 bis 50 Millionen m^3 allein für die Unterhaltung der Wasserstraßen durchgeführt. Davon fällt mit ca. 41 Mio. m^3 der größte Teil den Seeschiffahrtsstraßen und der Unterhaltung der Seehäfen zu (Abb. 1.1). Mit ca. 5 Mio. m^3 wurden lediglich 10 % der Unterhaltungsbaggerungen in Deutschland im Binnenbereich durchgeführt (Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2004 [17]). Europaweit ist laut einer Erhebung der Central Dredging Association im Jahr 2005 von ca. 200 Mio. m^3 Baggergut aus der Gewässerunterhaltung auszugehen (Netzband, 2006 [82]).

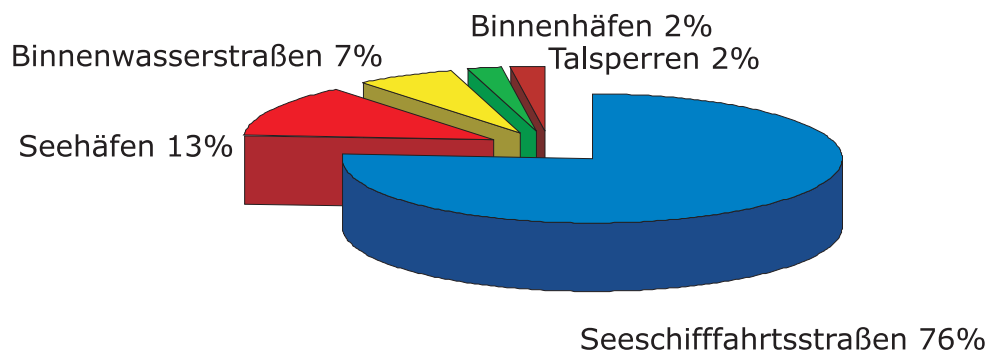


Abbildung 1.1: Verteilung der Unterhaltungsbaggermengen in deutschen Gewässern (BMVBS, 2004 [17])

Das gewonnene Material wird je nach Verwendungszweck und Beschaffenheit weiterverarbeitet, nach vorhergehender Behandlung verwertet und deponiert oder auch dem Gewässer an anderer Stelle wieder zugeführt. Der letzte Fall wird als aquatische Umlagerung oder Verklappen bezeichnet.

Beim Umbau und Neubau von Häfen oder Kanälen ist der Baggereinsatz einmalig („Capital Dredging“), während die Unterhaltungsbaggerei („Maintenance Dredging“) kontinuierlich erfolgt. Durch die zunehmende Anzahl und das regelmäßige, wiederkehrende Auftreten von Baggermaßnahmen zur Gewässerunterhaltung haben sich in diesem Bereich verschiedene Baggerstrategien zur Reduzierung der Baggereinsätze herausgebildet.

In Deutschland gibt es derzeit noch keine einheitliche nationale Vorschrift für den Umgang mit Baggergut (BMVBS, 2004 [17]). Vielmehr werden verschiedene Rechtsvorschriften wie das Wasserhaushaltsgesetz oder das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz berührt. Ferner sind verschiedene rechtliche Regelungen auf EU-Ebene sowie internationale Meeresschutzabkommen zu beachten. Ein Leitfaden, diesen Bestimmungen gerecht zu werden, bieten Handlungsanweisungen und Empfehlungen, die aus jenen Rechtsgrundlagen und beobachteten Bedürfnissen entstanden sind. Die wichtigsten sind in Deutschland die Handlungsanweisung für den Umgang mit Baggergut im Küstenbereich (Bundesanstalt für Gewässerkunde, 1999 [9]) und die Handlungsanweisung für den Umgang mit Baggergut im Binnenbereich (Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2000 [10]).

Einen weiteren Überblick über den Umgang mit Baggergut liefern Dokumente, wie die von der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (DWA, vor 2004 Abwassertechnische Vereinigung ATV) veröffentlichten Merkblätter Nr. 362 Teil 1-3 [38], [37], [36] oder die Ergebnisse von Arbeitsgruppen wie dem HTG-Fachausschuss Baggergut (2002, [50]).

Wie umfassend die Regelungen sind, die sich mit dem Umgang mit Baggergut beschäftigen, zeigt nicht zuletzt die Tatsache, dass der Begriff Baggergut zunächst einer eindeutigen Definition bedarf, um einen Verfahrensablauf, wie mit ihm umgegangen werden sollte, konstruieren zu können.

1.1 Die Definition von Baggergut

Für Baggergut gibt es unterschiedliche Begriffserklärungen, die in der Regel aber nur geringfügig voneinander abweichen. Sie heben je nach Handlungsanweisung und Empfehlung die Zusammensetzung des Baggerguts, den Entnahmeort, das Entnahmeregime und den damit verbundenen Zweck hervor. Allen Definitionen ist gemein, dass sie Baggergut als bei Unterhaltungsbaggerungen oder Ausbaumaßnahmen in den schiffbaren Bereichen der Häfen, Küsten und Bundeswasserstraßen anfallende Mengen betrachten und es in diesem Fall eine Folge der Ablagerung von Sedimenten durch die natürliche Morphodynamik darstellt.

Die Herausforderung besteht unter anderem darin, Baggergut klar zu definieren, aber auch dem heterogenen Charakter der gebaggerten Sedimente gerecht zu werden. So

lagern sich in beruhigten Bereichen wie Häfen oder Hafenbecken sehr feine Sedimente mit einem unter Umständen hohen Anteil an organischem Material ab, die im Rahmen einer Unterhaltungsbaggerung entfernt werden müssen (Abb. 1.2). Im Bereich der Binnenwasserstraßen ist das Baggergut hingegen in der Regel weitaus gröber (Abb. 1.3).



Abbildung 1.2: Feinkörniges Baggergut im Bereich eines Sportboothafens in Hamburg während des Befüllungsvorgangs einer Transportschute, Firma Matthäi 2008

Die Definition des HTG-Fachausschusses Baggergut aus dem Jahr 2002 nutzend [50] soll Baggergut im Rahmen dieser Arbeit wie folgt bezeichnet werden:

„Baggergut ist Boden, Bodenmaterial oder Aushubmaterial mit unterschiedlichem Anteil an mineralischen und organischen Bestandteilen, das im Zuge der Gewässerunterhaltung und bei Gewässerausbaumaßnahmen zur Gewährleistung der Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs und des Wasserabflusses im oder am Gewässer anfällt.“

Diese Begriffserklärung erfolgte in Anlehnung an die Definitionen der DIN 19731 (1998, [35]) und der ATV und wird auch in der Begriffsbeschreibung der aktuellen Fassung des DWA-Merkblatts M 362-1 (2008, [38]) zitiert.

Um eine Abgrenzung zu Bodenmaterial, das im Rahmen von Baggararbeiten an Land entnommen wird, vorzunehmen, sollen diese Mengen fortan als Erdaushub bezeichnet werden, wohingegen Material aus Nassbaggerarbeiten als Baggergut deklariert wird. Diese Aufteilung erfolgt ebenfalls analog zu den Empfehlungen des Positionspapiers des HTG-Fachausschusses Baggergut [50].



Abbildung 1.3: Baggergut aus einer Unterhaltungsbaggerung beim Befüllen einer Klappschute an der Donau 2008

1.2 Qualitative Beschreibung des Baggerguts

Die Zusammensetzung von Baggergut ist sehr heterogen. Es besteht aus natürlichen organischen und anorganischen Anteilen sowie chemischen Verbindungen, die über Immissionswege in das Gewässer gelangen können und an den Feststoffoberflächen adsorbiert werden. Aufgrund der Vielfalt seiner Bestandteile lässt sich das Baggergut laut dem DWA-Merkblatt M 362-1 [38] unter den folgenden Gesichtspunkten betrachten:

- Physikalisch
- Chemisch
- Mineralogisch
- Hydrobiologisch
- Ökotoxikologisch.

Hierin sind die physikalischen Eigenschaften vornehmlich für den Baggervorgang selbst, den Transport sowie etwaige Behandlung und Entsorgung zu beachten. Bei der chemischen Beschaffenheit des Baggerguts eignen sich vor allem Stoffgehalte, pH-Werte und der TOC-Gehalt als Parameter für die Beurteilung der Behandlungsnotwendigkeit. Anhand der mineralogischen Analyse lassen sich Stoffe bezüglich ihrer

zeitlichen und räumlichen Variationen als auch in natürliche, terrigene, biogene und anthropogene Minerale klassifizieren. Die Hydrobiologie von Baggergut beschreibt alle enthaltenen pflanzlichen und tierischen Organismen und wird in Abhängigkeit vom Untersuchungsschwerpunkt als Beurteilungsriterium herangezogen. Ökotoxikologische Untersuchungen ermöglichen Aussagen über das Gefährdungspotential von enthaltenen Stoffen auf die Umwelt.

In der Vielfalt seiner Bestandteile und der Möglichkeit der Adsorption von Schadstoffen durch anthropogene Einflüsse liegt auch die Problematik der Behandlung von Baggergut.

1.3 Umgang mit Baggergut

Die Qualität des Baggerguts bestimmt im Wesentlichen, wie mit ihm verfahren werden kann und welche Rechtsvorschriften dabei eingehalten werden müssen. Je nach Beschaffenheit bleibt mitunter nur eine Entledigungsoption. Bei geringen Belastungen durch Schadstoffe kann Baggergut wieder im Fließgewässer umgelagert werden, sofern die stofflichen Voraussetzungen erfüllt sind. Sollte es für eine direkte Umlagerung nicht geeignet sein, muss es vor der weiteren Verwertung aufbereitet und bei weiterhin schlechter Eignung mitunter auch als Abfall abgelagert werden.

Für den Umgang mit Baggergut sollte die nachfolgende Verfahrenskette, ähnlich der Behandlung von Abfall, hinsichtlich ihrer Anwendungsmöglichkeiten vom Vermeiden bis zum eventuell unumgänglichen Ablagern geprüft werden (Abb. 1.4). Da das Vermeiden und Vermindern von Baggergut keine eigentlichen Verfahren im Umgang mit angefallenem Baggergut darstellen, sind sie in dieser Darstellung der Vollständigkeit halber aufgeführt worden, aber werden in der Folge nicht näher besprochen.

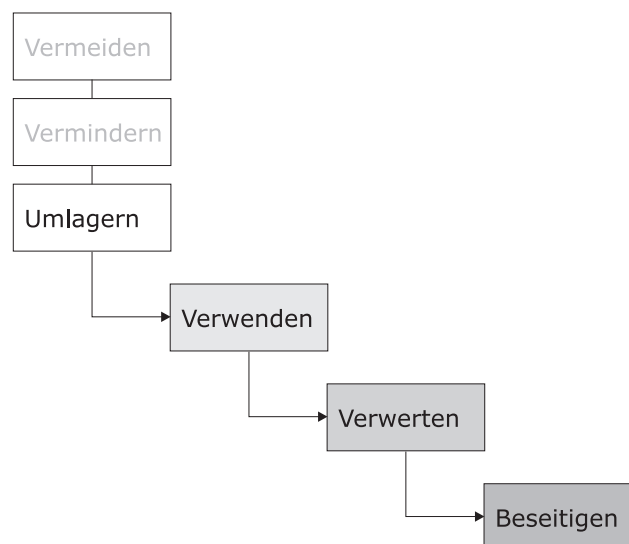


Abbildung 1.4: Verfahrenskette zur Entscheidung über den Umgang mit Baggergut

Probleme im Umgang mit Baggergut resultieren vornehmlich aus der Baggergutzusammensetzung, die durch räumliche und anthropogene Einflüsse bestimmt sind. In schadstoffbelasteten Gewässern lagern sich Problemstoffe beispielsweise vor allem an Schwebstoffe an und gelangen über diesen Emissionsweg in die Sedimente. Wird derart belastetes Material gebaggert, kann es nicht umgelagert werden, sondern bedarf einer wirtschaftlich und technisch anspruchsvollen Behandlung (BMVBS, 2004 [17]).

1.3.1 Umlagern

Das Wort Umlagern hat im aktuellen Sprachduktus aufgrund positiverer Assoziationen den Begriff Verklappen weitestgehend verdrängt. Gemeint ist die Rückführung von gebaggertem Material in das Gewässer, womit der gesamte Prozess der Entnahme und Zufuhr der Aushubmengen durch dieses Verfahren beschrieben werden kann (Abb. 1.5). Des Weiteren lassen sich unter diesem Begriff auch die Baggerverfahren einordnen, durch die eine Förderung von Baggergut an die Wasserspiegeloberfläche vermieden wird, wodurch das Umlagern eine Verallgemeinerung erfährt. Zu diesen Verfahren gehört der Einsatz von Schlickeggen oder Wasserinjektionsgeräten, durch die das zu entfernende Material gelöst und anschließend durch natürlich wirkende oder induzierte Kräfte aus dem Operationsgebiet abtransportiert wird.



Abbildung 1.5: Verbringen zuvor gebaggerter Sedimente an der Donau aus einer Schute heraus im Dezember 2008

Das Umlagern stellt neben der Verwendung von Baggergut als Baumaterial den wirtschaftlichsten Umgang dar und besitzt zudem den ökologischen Vorteil, dass der Sedimentmassenhaushalt großräumig ausgeglichen bleibt. Geeignete Stellen für eine

Umlagerung gebaggerter Sedimente können Gebiete mit erhöhten Erosionstendenzen sein, wie z.B. Kolke entlang einer Fließstrecke oder auch Bereiche mit geringer Relevanz für die Schifffahrt. In jedem Fall ist die Befüllungskapazität der angestrebten Unterbringungsstelle zu überprüfen.

Wie bereits erwähnt, eignen sich nur gering belastete Sedimente für eine Umlagerung. So können momentan alle im Bereich des Donauabschnitts Straubing-Vilshofen anfallenden Baggermengen ohne Behandlung umgelagert werden. Die Donau wird hauptsächlich durch alpine Zuflüsse gespeist, wodurch die Wassertemperatur verhältnismäßig niedrig ist und das Wasser somit einen hohen Anteil an Sauerstoff mit sich führt. Außerdem sind in diesem Bereich keine nennenswerten Schadstoffeinträge durch die Industrie zu verzeichnen. In der Summe dieser Verhältnisse ist das anfallende Baggergut von guter Qualität und kann daher zum Ausgleich des Geschiebegleichgewichts verwendet werden (BMVBS, 2004 [17]).

1.3.2 Verwendung

Sollte eine Umlagerung des Baggerguts im Gewässer nicht möglich sein, kann es auch unmittelbar, das heißt ohne weitere Behandlung, bei wasser- und erdbaulichen Maßnahmen verwendet werden. Dies erfolgt mitunter auch, wenn wirtschaftliche Erwägungen dafür sprechen. Ein typischer Verwendungszweck von Baggergut liegt in der Aufspülung von Flächen zur Aufhöhung und Bodenverbesserung oder als Baumaterial. Zudem kann es auch zur Verfüllung von ungenutzten Hafenbecken dienen.

1.3.3 Behandlung

Treten Schadstoffbelastungen im Baggergut auf, kann es gegebenenfalls behandelt werden. Dadurch werden Gefahrenstoffe entfernt und seine Eigenschaften für eine weitergehende Verwertung verbessert. Behandlungsmaßnahmen können aufgrund der unterschiedlichen Belastungen sehr vielfältig sein und werden auch nach dem anschließenden Verwertungszweck ausgewählt. Der HTG-Fachausschuss Baggergut [50] gibt verschiedene Möglichkeiten der Behandlung an, die einzeln oder im Verbund auf die gebaggerten Sedimente angewendet werden können:

- Korngrößenklassierung: Feine Partikel mit ihrer Eigenschaft, Schadstoffe leicht zu binden, werden von der Grobfraction getrennt.
- Sortierung: Ziel der Sortierung ist es schadstoffbelastete Sedimente von den schadstofffreien zu trennen. Dabei werden unterschiedliche Feststoffdichten und Oberflächeneigenschaften als Sortierkriterium herangezogen, um beispielsweise organische von mineralischen Bestandteilen zu separieren.
- Entwässerung: Hier erfolgt eine Abtrennung des Wassers von den Feststoffen, um diese im Anschluss wieder nutzen zu können und beide Phasen getrennt weiter zu behandeln.

- Biologischer Abbau: Mikroorganismen zersetzen Schadstoffe auf natürlichem Weg, indem sie diese verarbeiten. Dieser Prozess kann durch technische Hilfsmittel unterstützt werden.
- Thermische Verfahren: Die Anwendung thermischer Verfahren erfolgt, um Schadstoffe zu zerstören, auszutreiben oder zu binden.
- Chemische Einbindung: Anorganische Stoffe werden durch Zugabe von Stoffen und die dadurch hervorgerufenen chemischen Reaktionen immobilisiert, um einen Austritt als Schadstoff zu verhindern.

Ein Beispiel für eine anspruchsvolle Behandlung und die darauf folgende Nutzung und Beseitigung ist die „Mechanische Trennung und Entwässerung von Hafensedimenten“ (METHA) mit anschließender Verwertung geeigneter Anteile und der sicheren Deponierung hoch belasteten Baggerguts aus dem Hamburger Hafen.

1.3.4 Verwertung

Der Entledigungspfad Verwertung lässt sich in eine Verwertung im Gewässer und eine Verwertung an Land unterteilen. In beiden Fällen gibt es vielfältige Einsatzmöglichkeiten für Baggergut, wie die nachfolgenden Beispiele zeigen. Zwischen der Baggergutverwertung und -behandlung ist die Grenze fließend, so dass sie mitunter direkt ineinander übergehen (HTG, 2002 [50]).

Küstensedimente wurden bei einer Verwertung im Gewässer bereits erfolgreich für die Verfüllung von Hafenbecken genutzt. Für eine Verwertung an Land gibt es Beispiele über ihren Einsatz zur Bodenverbesserung in der Landwirtschaft, in den Rekultivierungs- und Dichtungsschichten im Deponiebau, ebenso im Deichbau und im Zuge einer Verwertung nach vorheriger thermischer Behandlung in der Ziegelproduktion und Pelletterstellung (HTG-Fachausschuss Baggergut, 2007 [51]).

Baggergut aus dem Binnenbereich kann ebenfalls in der Land- und Forstwirtschaft, als Baustoff oder als Bergversatz eingesetzt werden (BfG, 2000 [10]).

1.3.5 Beseitigung

Sollte selbst nach eingehender Behandlung das Baggergut nicht geeignet sein, um durch eine der vorigen Maßnahmen genutzt zu werden, muss es in Abhängigkeit vom Gefährdungspotential gesichert abgelagert werden. Dies kann als subaquatische Ablagerung im Gewässer erfolgen oder oberirdisch auf Deponien unter Einhaltung der Deponievorschriften. In der Regel muss nur ein geringer Anteil an der Gesamtmenge des Baggerguts beseitigt werden, da sich die übrigen Mengen für einen der vorangegangenen Entledigungspfade eignen.

Typische Fallbeispiele über den Umgang mit Baggergut sind auch in dem ATV-DVWK-Merkblatt 362-2 aufgeführt (2004, [37]). Grundsätzlich sind beim Umgang

mit Baggergut die berührten Rechtsgrundlagen in den Entscheidungsprozess mit einzubeziehen. Diese sind je nach Verfahrensablauf dem Wasserrecht, dem Naturschutzrecht, dem Abfallrecht oder dem Bodenschutzrecht zugehörig. Die wesentlichen durch den Umgang mit Baggergut berührten Rechtsvorschriften werden nachfolgend kurz zusammengefasst.

1.4 Rechtlicher Rahmen

Nassbaggerarbeiten zur Aufrechterhaltung der Fahrwassertiefen fallen weltweit entlang der Zufahrtswege zu Häfen an. Der reine Nassbaggervorgang ist als klassische Baumaßnahme anzusehen, so dass hier vor allem baurechtliche und umweltrechtliche Belange auf nationaler Ebene berücksichtigt werden müssen. Der Umgang mit Baggergut ist jedoch nicht einheitlich geregelt. Er wird im Wesentlichen durch die Zusammensetzung und Belastung des Baggerguts beeinflusst, die die Entledigungsoptionen definieren und damit bestimmend für die anzuwendenden Regelwerke sind. Es handelt sich demzufolge um Einzelfallentscheidungen, bei denen verschiedene Bestimmungen beachtet werden müssen. Bei Umlagerungen ist Wasser- und Wasserstraßenrecht zu berücksichtigen, im Fall der Behandlung und Verwertung sind Abfall-, Boden-, Naturschutz- und Immissionsschutzrecht entscheidend (HTG-Fachausschuss Baggergut, 2007 [51]).

Der überwiegende Teil des Baggerguts wird nach der Entnahme in den Gewässern verbracht. Da dabei häufig gemeinsam genutzte Gewässer betroffen sind, wurden für eine Vereinheitlichung des Vorgehens im Umgang mit Baggergut verschiedene internationale Baggergut-Regelwerke beschlossen (Netzband, 1997 [81]). Die für den deutschen Raum wichtigsten sind die Meeresschutzübereinkommen von London (International Maritime Organization, ab 1972 [60]) und Helsinki (Helsinki Commission, ab 1972 [56]) sowie das Oslo-Paris-Abkommen (OSPAR Convention, ab 1992 [84]). Zudem sind europäische Richtlinien zum Schutz der Natur und der Ressourcen als auch zum Abfallrecht zu berücksichtigen. Die Umsetzung dieser internationalen Richtlinien wurde bei der Ausgestaltung der nationalen Regelungen in Bezug auf den Umgang mit Baggergut beachtet.

1.4.1 Internationale Regelungen

Das London-Abkommen beinhaltet Regelungen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen. Es wurde bereits 1972 beschlossen und gilt weltweit. Derzeit haben 86 Vertragsstaaten die London-Konvention unterzeichnet.¹ In Bezug auf Baggergut enthält das Abkommen seit den neunziger Jahren konkrete Richtlinien zur Beurteilung von gebaggerten Sedimenten und gibt die Bedingungen an, unter welchen diese im Meer umgelagert werden können (Dredged Material Assessment Framework (DMAF), später Specific Guidelines

¹Quelle: <http://www.londonprotocol.imo.org>

for Assessment of Dredged Material, LC 22/5/Add. 1, 2000).

Das OSPAR-Übereinkommen wurde zum Schutz der Meeresumwelt des Nordostatlantiks verabschiedet. Es ist aus der Oslo-Konvention (1972) zum Schutz des Nordatlantiks und der Paris-Konvention (1974) zum Schutz des Ostatlantiks hervorgegangen (1992, ab 1998 in Kraft). In ihm sind Richtlinien für die Handhabung von Baggergut aufgeführt, die von allen Vertragsstaaten beachtet werden müssen. Sie behandeln u.a. die Charakterisierung der gebaggerten Sedimente, ihre Beurteilung hinsichtlich einer Kontaminierung, geben Hinweise über die Wahl einer geeigneten Ablagerungsfläche und ihres Monitorings. Das OSPAR-Abkommen gilt für den Nordostatlantik und umfasst die Hohe See, das Küstenmeer und die inneren Gewässer der Anrainerstaaten bis zur Süßwassergrenze. Dadurch unterliegen auch die Ästuarbereiche eines Vertragsstaates diesen Regelungen. Der Geltungsbereich der London-Konvention umfasst die Meeresgewässer bis zur Basislinie der Mitgliedsstaaten. Es ist somit in dem Schutzbereich des OSPAR-Abkommens enthalten.

Was das OSPAR-Abkommen für den Nordatlantik ist, fasst die Helsinki-Konvention für den Ostseeraum zusammen. In ihr ist dementsprechend der Umgang mit gebaggerten Sedimenten in diesem Gebiet geregelt, um eine Beeinträchtigung der Umwelt zu verhindern. Diese zielt auf die Beurteilung gebaggerter Sedimente und Ablagerungsflächen und enthält darüber hinaus auch Regelungen zur Überwachung von Verbringstellen.

Für die Umlagerung von Baggergut in Natura 2000-Schutzgebieten von Gewässern ist weiterhin die Fauna-Flora-Habitat-(FFH)-Richtlinie (92/43/EWG, [46]) zu berücksichtigen, die ein Verschlechterungsverbot der Schutzgebiete vorschreibt (Art. 6, Abs. 2). Sollten gebaggerte Sedimente nicht für eine aquatische Umlagerung und die direkte Verwendung geeignet sein, sind sie als Abfall einzuordnen. In diesem Fall ist die Abfallrichtlinie (2008/98/EG, [45]) zu beachten. Darin ist erstmalig europaweit aufgeführt, dass Baggergut umgelagert werden darf, sofern es erwiesenermaßen nicht gefährlich ist (Art. 2, Abs. 3). Ferner ist im Fall einer Unterbringung des Baggerguts an Land die Deponierichtlinie (1999/31/EG, [41]) zu berücksichtigen.

Die europäische Wasserrahmenrichtlinie (EG-WRRL) (2000/60/EG, [42]) wird durch den Umgang mit Baggergut tangiert, allerdings ohne konkret zu werden. Sie hat zum Ziel, innerhalb von 15 Jahren einen guten Gewässerzustand zu erreichen. In Artikel 2 wird dazu angegeben, dass die Schadstoffkonzentration in Sedimenten nicht überschritten werden darf. Zudem befindet sich der Begriff „Schwebstoffe“ in einer Auflistung der wichtigsten Schadstoffe im Anhang. Die zur Anwendung der EG-WRRL verfasste Tochterrichtlinie „Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik“ (2008/105/EG, [43]) enthält ebenfalls keine konkreten Qualitätsnormen für Sedimente, allerdings für prioritäre Stoffe, die auch an Sedimente gebunden sein können.

Die europäische Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie (EG-MSRL) (2008/58/EG, [44]) besitzt einen ähnlichen Charakter wie die EG-WRRL (Netzband, 2008 [83]). Sie hat zum Ziel, die Meeresumwelt zu schützen, zu erhalten und wenn möglich wiederherzustellen. Die EG-MSRL schreibt vor, dass für die unterschiedlichen Regionen Meeresstrategien zu entwickeln und umzusetzen sind, um die Verschmutzung zu beseitigen

und schädliche Auswirkungen auf die Meeresökosysteme, die menschliche Gesundheit und Nutzung des Meeres zu verhindern (Art. 1 (2)). Als Verschmutzung in diesem Sinn gelten alle anthropogen bewirkten Zuführungen von Stoffen oder Energie, die die Schutzziele und -güter gefährden (vgl. Art. 3 (8)). In diese Kategorie kann unter gewissen Bedingungen (stoffliche Zusammensetzung, Herkunft, Lage der Ablagerungsstelle, Belastung) auch Baggergut gehören. Laut Artikel 8 führen die Mitgliedsstaaten eine Anfangsbewertung ihrer Gewässer durch, in der u.a. die Belastungen und Auswirkungen durch die Ablagerung von Baggergut in Bezug auf eine vollständige Überdeckung des Meeresbodens und die Veränderung der Verschlickung dokumentiert werden. Diese Anfangsbewertung dient als Grundlage der Beschreibung eines guten Umweltzustands (Art. 9) und der Festlegung von Umweltzielen (Art. 10).

1.4.2 Nationale Gesetzgebung

Die in den aufgeführten internationalen Regelungen genannten Anforderungen müssen jeweils in nationales Recht übertragen werden. Die wesentlichen Unterhaltungs-baggerungen und Baggergut betreffenden Gesetze in Deutschland sind:²

- Wasserhaushaltsgesetz (WHG)
- Wasserstraßengesetz (WStrG)
- Hohe-See-Einbringungsgesetz (HoheSeeEinbrG)
- Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG)
- Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG)
- Bundes-Immissionsschutzgesetz (BImSchG)
- Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG).

Über die Bundesgesetze hinaus gibt es auch Landesgesetze der einzelnen Bundesländer, wie z.B. Landeswassergesetze, die im Umgang mit Baggergut berührt werden und daher insbesondere bei der Einholung von erforderlichen Genehmigungen berücksichtigt werden müssen. Nachfolgend werden sie jedoch vernachlässigt.

Das Wasserhaushaltsgesetz (2010, [28]) beinhaltet die Vorgaben der EG-WRRL. Das wesentliche im WHG verankerte Ziel ist, „durch eine nachhaltige Gewässerbewirtschaftung die Gewässer als Bestandteil des Naturhaushalts, als Lebensgrundlage des Menschen, als Lebensraum für Tiere und Pflanzen sowie als nutzbares Gut zu schützen“ (§ 1). Laut § 31 gehört die Unterhaltung der Gewässer und darin die Erhaltung der Schiffbarkeit von schiffbaren Gewässern zu den Tätigkeiten, zu denen dieses Gesetz verpflichtet. In Bezug auf Baggergut ist ferner das Einbringen von Sedimenten

²vgl. HTG-Fachausschuss Baggergut, Quelle: <http://www.htg-baggergut.de/>

in Oberflächengewässer, wenn sie diesem entnommen wurden, erlaubt (§ 32 (1)). Dies ist natürlich kein rechtlicher Freifahrtschein, jegliches Sediment, das gebaggert wurde, wieder im Gewässer zu verbringen, wenn die Nachhaltigkeit, mit der Gewässer zu bewirtschaften sind, sowie der Schutz vor nachteiligen Veränderungen von Gewässerereigenschaften (§ 6 (1)) dagegen sprechen und somit der Schutzgedanke überwiegt. Das Wasserstraßengesetz (1968, [19]) regelt Belange in Bezug auf die Binnen- und Seewasserstraßen der Bundesrepublik Deutschland. Es hat als einziges der hier aufgeführten Gesetze keinen direkten Bezug zu europäischen Regelungen. Das WStrG schreibt die Unterhaltung der bundeseigenen Wasserstraßen als Hoheitsaufgabe dem Bund zu (§ 7). Die Unterhaltung der Binnenwasserstraßen umfasst u.a. die Aufrechterhaltung der Schiffbarkeit. Dabei sind die Bewirtschaftungsziele des WHG zu beachten und „es ist den Belangen des Naturhaushalts Rechnung zu tragen“ (§ 8 (1)). Im Fall der Seewasserstraßen ist die Unterhaltung der von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung markierten Schifffahrtswege zu gewährleisten, sofern es wirtschaftlich vertretbar ist (§ 8 (5)). Sofern Unterhaltungsmaßnahmen innerhalb der Bundeswasserstraßen erfolgen, sind laut § 7 (3) keine wasserrechtlichen Genehmigungen erforderlich. Das schließt Umlagerungen mit ein. Sobald eine Beseitigung im Gewässer außerhalb der Bundeswasserstraßen erfolgt, handelt es sich um eine genehmigungspflichtige Maßnahme, für die das WHG und Landeswassergesetze gelten.

Laut dem Hohe-See-Einbringungsgesetz (1998, [23]) ist das „Einbringen von Abfällen und sonstigen Stoffen und Gegenständen in die Hohe See [...] verboten“ (§ 4). Jedoch ist Baggergut davon ausgenommen (§ 4, Nr.1).

Baggergut wird als Abfall im Sinne des Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetzes (1994, [21]) betrachtet, wenn weder die Umlagerung noch die direkte Verwendung möglich ist. Hintergrund dieses Gesetzes ist „die Förderung der Kreislaufwirtschaft zur Schonung der natürlichen Ressourcen und die Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen“ (§ 1). Es sollen möglichst große Mengen des darunter fallenden Materials in Form von Kreisläufen der Wirtschaft zurückgeführt werden, bevor der nicht rückführbare Anteil entsorgt werden muss. Abfälle sind demnach bewegliche Sachen, deren sich der Besitzer entledigen will oder muss. Sie lassen sich in Abfälle zur Verwertung und zur Beseitigung einteilen (§ 3). Davon sind nach § 2 (2) Nr.6 „Stoffe, sobald diese in Gewässer oder Abwasseranlagen eingeleitet oder eingebracht werden“ ausgenommen. In diesem Fall ist das Wasserrecht anzuwenden, das auf den Schutz des Mediums Wasser ausgerichtet ist (Schäfer, 2010 [93]). Unter den Entledigungsoptionen ist die Verwertung (stofflich oder energetisch) der Beseitigung vorzuziehen (§ 4 (1)), wobei die umweltverträglichere Verwertungsart Vorrang hat (§ 5 (1)). Für Baggergut kommt jedoch nur die stoffliche Verwertung in Betracht (§ 4 (3)).

Im Rahmen der Anpassung des deutschen Rechts an die europäische Abfallrahmenrichtlinie (2008/98/EG, [45]) liegt ein durch das Bundesumweltministerium erstellter Entwurf zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts (2010, [16]) vor, der sich aktuell in der Ressortabstimmung befindet (s. a. Schäfer, 2010 [93]). Dieses Gesetz soll das bestehende KrW-/AbfG ablösen. Artikel 1 besteht aus dem Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft, während die weiteren Artikel Änderungen in anderen Gesetzen betreffen, die sich aus der Umsetzung der Abfallrahmenrichtlinie

ergeben. In Bezug auf den Umgang mit Baggergut wird im überarbeiteten KrWG die Erlaubnis zur Einleitung von Stoffen (vorher § 2 (2) Nr.6, zukünftig § 2 (2) Nr.9) und damit auch der Abfallbegriff weiter ausdefiniert, indem „Sedimente, die zum Zweck der Bewirtschaftung von Gewässern, insbesondere auch der Unterhaltung oder des Ausbaus von Wasserstraßen [...] umgelagert werden [dürfen], sofern die Sedimente nachweislich nicht gefährlich sind“ (§ 2 (2) Nr. 12). Dies entspricht dem Wortlaut der EU-Rahmenrichtlinie. Ferner wurde unter § 6 des KrWG die Abfallhierarchie auf fünf Stufen erweitert, in denen die Entledigungsoptionen geordnet sind.

Sollte das Baggergut von guter Beschaffenheit sein, so dass es direkt als Bodenmaterial verwendet werden kann, greift das Bundes-Bodenschutzgesetz (1998 [22]). Die Verwertung im Landbau ist ein typisches Beispiel. Bei der Verwendung gebaggerter Sedimente als Bodenmaterial ist zu beachten, dass schädliche Bodenveränderungen verhindert werden, Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden getroffen werden und Beeinträchtigungen seiner natürlichen Funktionen möglichst vermieden werden (§ 1).

Eine weitere Möglichkeit der Verwertung stellt beispielsweise die Verwendung als Deponieersatzbaustoff dar, für die das Baggergut in jedem Fall entwässert werden muss. In diesem Fall müssen andere Regelwerke wie die Deponieverwertungsverordnung (DepVerwV, 2005 [26]) beachtet werden. Sollte eine Verwertung nicht möglich sein, muss es als Abfall zur Beseitigung gemäß Abfallablagerversordnung (AbfAbIV, 2001 [25]) und Deponieverordnung (DepV, 2009 2005 [27]) abgelagert werden. Darüber hinaus existieren je nach Entsorgungs- und Verwertungspfad weitere Verordnungen und Regelungen z.B. die Bundes-Bodenschutzverordnung (BBodSchV, 1999 [24]), die im Rahmen der Behandlung und Sicherung von gebaggerten Sedimenten berücksichtigt werden müssen. Sie sind oben erwähnten Gesetzen untergeordnet und dienen ihrer Ausgestaltung.

In jedem Fall ist beim Umgang mit Baggergut auch das Bundes-Immissionsschutzgesetz (1974, [20]) zu beachten, laut dem „Menschen, Tiere und Pflanzen, den Boden, das Wasser, die Atmosphäre sowie Kultur- und sonstige Sachgüter vor schädlichen Umwelteinwirkungen zu schützen [sind] und dem Entstehen schädlicher Umwelteinwirkungen vorzubeugen“ ist (§ 1 (1)). Ferner dient es der „Vermeidung und Verminderung schädlicher Umwelteinwirkungen durch Emissionen in Luft, Wasser und Boden unter Einbeziehung der Abfallwirtschaft, um ein hohes Schutzniveau für die Umwelt insgesamt zu erreichen“ (§ 1 (2)).

Die Neufassung des Bundesnaturschutzgesetzes (2010, [29]) hat zum Ziel, eine länderübergreifende, einheitliche Regelung zu schaffen und die bis dahin gültige Rahmengesetzgebung des Bundes zu ersetzen. In Bezug auf den Umgang mit Baggergut oder die Unterhaltungsbaggerei sind keine konkreten Vorschriften enthalten. Allerdings sind Regelungen für die Umsetzung der FFH-Richtlinie wie z.B. das Verschlechterungsverbot für die Natura 2000-Gebiete festgeschrieben (§ 33), welches bei der Planung und Durchführung von Baggermaßnahmen beachtet werden muss. Ferner wurde der Anwendungsbereich des BNatSchG auf den Meeresschutz ausgedehnt (§§ 56-58).

Einen abschließenden Überblick, welche Gesetze bei der Durchführung von Unterhaltungsbaggerungen und im Umgang mit Baggergut in Abhängigkeit von dem zulässi-

gen Verfahren zu beachten sind, gibt Abbildung 1.6.

Einen Leitfaden, den Verpflichtungen aus den Meeresschutzübereinkommen und den Forderungen nationaler und europäischer Vorschriften nachzukommen, bieten die nachfolgend vorgestellten Handlungsanweisungen für Baggergut im Binnen- und Küstenbereich [10], [9]. Zudem nehmen sie Bezug auf den aktuellen Stand der Technik und stellen ökonomisch und ökologisch sinnvolle Maßnahmen in den Vordergrund.

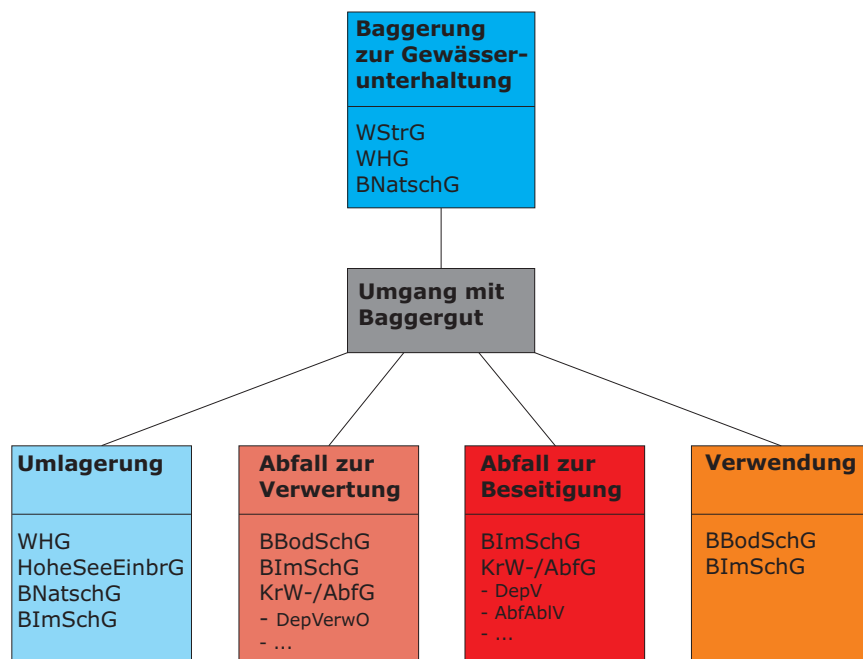


Abbildung 1.6: Nationale Rechtsvorschriften beim Umgang mit Baggergut

1.4.3 Handlungsanweisungen für den Umgang mit Baggergut in Deutschland

Die in Deutschland wichtigsten Bagger-Regelwerke sind die von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) herausgegebenen Handlungsanweisungen für den Umgang mit Baggergut im Binnenbereich (HABAB-WSV) [10] und die Handlungsanweisung für den Umgang mit Baggergut im Küstenbereich (HABAK-WSV) [9]. Sie sind die Planungs- und Entscheidungsgrundlage für von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung durchzuführende Nassbaggermaßnahmen und decken mit ihrem Geltungsbereich das gesamte Areal der deutschen Wasserstraßen ab. Der Ort der Ablagerung des Baggerguts entscheidet darüber, welche Handlungsanweisung anzuwenden ist (Schäfer, 2008 [92]). Bei einer Ablagerung an Land ist der HABAB zu folgen. Beide Handlungsanweisungen geben konkret an, welche Maßnahmen im Rahmen einer Nassbaggermaßnahme ergriffen werden müssen. Dazu gehört die Feststellung der Qualität des Baggerguts, die Aufnahme seiner Schadstoffbelastung und ein Ablaufdiagramm, wie

mit dem Baggergut nach Feststellung seiner Eignung verfahren werden kann.

HABAB-WSV

Die HABAB gilt für alle Bundeswasserstraßen des Binnenbereichs. Die Grenze zum Geltungsbereich der HABAK bzw. der Übergangsbestimmungen ist die Süßwassergrenze der Nord- und Ostseeästuare sowie des Nord-Ostsee-Kanals. In der HABAB werden die rechtlichen Grundlagen, die beim Umgang mit Baggergut berührt werden, ebenfalls berücksichtigt. Dabei wird das Augenmerk auf die erforderlichen Genehmigungen gelegt, die eingeholt werden müssen. Damit stellt die BfG mit der Handlungsanweisung ein praxisnahes Werkzeug als Instrument für die Beurteilung einer Nassbaggermaßnahme bereit.

Die HABAB gibt einen Verfahrensablauf von der Projektplanung bis zur Durchführung der Maßnahme vor, bei der alle Möglichkeiten, wie mit dem Baggergut umgegangen werden soll, überprüft werden (Abb. 1.7). Dieser Ablaufplan ist in Form eines Baggergutmanagements angelegt, das eine wirtschaftliche und umweltverträgliche Baggergutunterbringung sicherstellen soll.

Sollte das **Vermeiden** der Entstehung von Baggergut nicht möglich sein, sind vor der Durchführung der Maßnahme eine **Bestandserhebung der Baggergutmenge und -beschaffenheit** und **Untersuchungen am Unterbringungsort** erforderlich. Dieser Schritt ist der wichtigste in dem gesamten Ablaufschema, da er für die nachfolgenden Verfahrensmöglichkeiten bestimmend ist. Die HABAB gibt dazu eine Reihe von Untersuchungen über die Qualität und Zusammensetzung des Baggerguts an:

- Sedimentologische und physikalische Untersuchungen
- Ermittlung von Schadstoffgehalten
- Biochemische Beurteilung (Sauerstoffzehrung und Nährstoffgehalte)
- Ökotoxikologische Untersuchungen.

Die Palette der Verfahren ist demnach sehr umfangreich. Sie dient einer möglichst genauen Zustandsbeschreibung, um die darauf folgenden Verfahrensschritte mit dem Ziel einer wirtschaftlichen und ökologischen Lösung sicher eruiert zu können. Allerdings werden auch Einschränkungen angegeben, die das Maß an notwendigen Untersuchungen unter bestimmten Voraussetzungen reduzieren. Diese betreffen vor allem grobkörniges Baggergut (worin sich die Eigenschaft von Schadstoffen widerspiegelt, sich vor allem an feine Sedimente anzulagern) und Baggerstellen, die hinsichtlich ihrer Schadstoffemissionen bereits eingehend untersucht wurden und für die demnach Erfahrungswerte vorliegen.

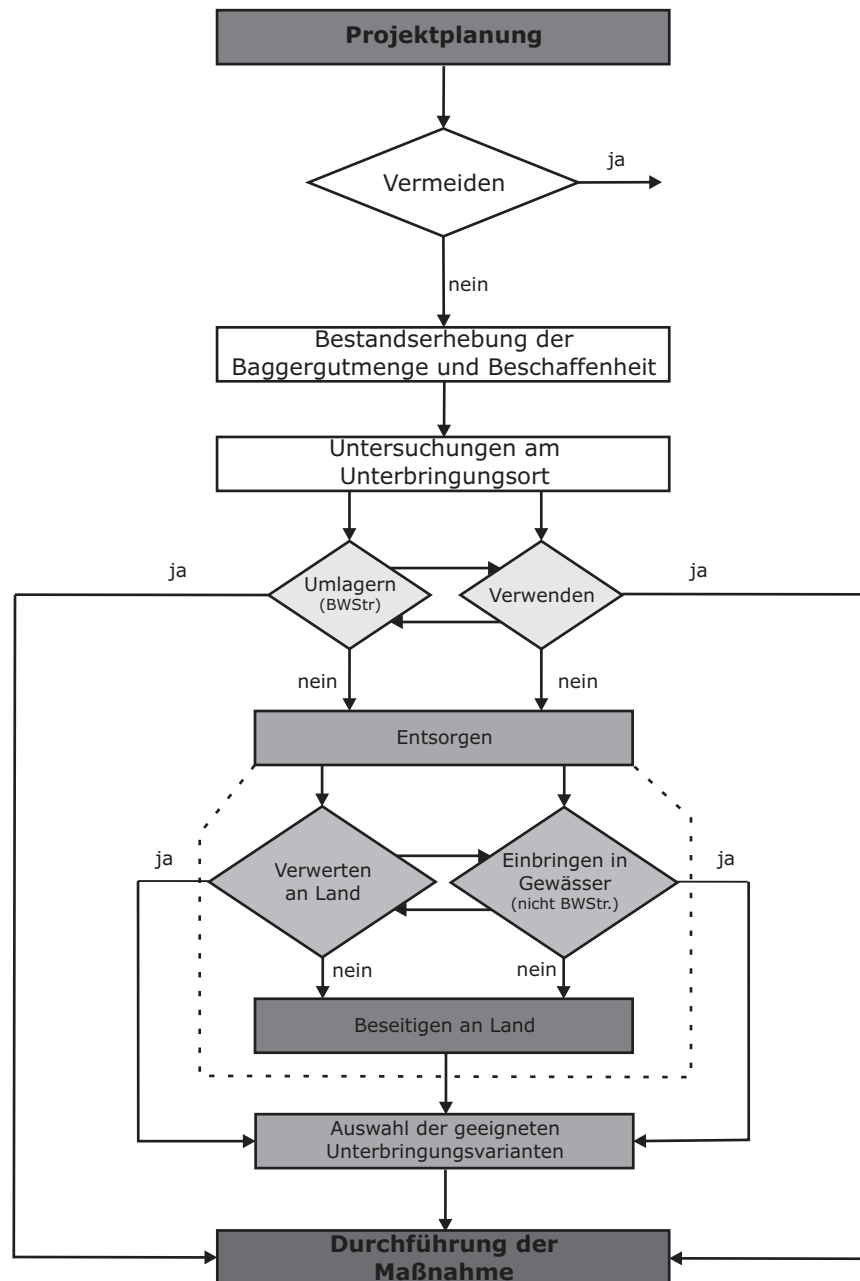


Abbildung 1.7: Handlungsanweisungen im Umgang mit Baggergut im Binnenbereich nach BfG [10]

Die Untersuchungen am Unterbringungsort beziehen sich auf eine Zustandserhebung der sedimentologischen Parameter und des ökologischen Zustands oder auch der dortigen Schadstoffbelastung. Sie werden zusammen mit den Ergebnissen der Baggergutbewertung hinsichtlich der Auswirkungen einer **Baggergutumlagerung** beurteilt. Die Umlagerung von Baggergut im Gewässer ist die wirtschaftlichste Form der Unterbringung und ist daher als Regelfall anzustreben. Zur Entscheidungsfindung, ob das Baggergut umgelagert werden kann, stellt die HABAB Beurteilungskriterien bereit, die in Ermangelung einer festen, gemeinschaftlichen Regelung nach bestimmten Grundsätzen aufgestellt wurden. Demnach sollte beispielsweise die Korngrößenverteilung des Baggerguts mit der des Verbringungsorts aus ökologischen Gründen ähnlich sein³. Ferner soll es zu keiner nachhaltigen Störung des Feststoffhaushalts kommen und es sind Beeinträchtigungen des Wasserabflusses oder der Schifffahrt zu vermeiden. Zur chemischen und ökotoxikologischen Bewertung werden die Ergebnisse der Bestandserhebung herangezogen. In beiden Fällen lassen sich daraus drei Fälle zur Beurteilung, ob das Baggergut zur Umlagerung geeignet ist, erstellen:

- Fall 1:** Das Baggergut ist lediglich gering belastet und kann umgelagert werden.
- Fall 2:** Das Baggergut ist kritisch belastet. Hier ist eine Einzelfallentscheidung notwendig. Alternativen oder weitere Verfahrensschritte sind hinsichtlich ihrer Durchführbarkeit zu überprüfen.
- Fall 3:** Das Baggergut darf nicht umgelagert werden, da es als stark belastet eingestuft wird.

Zur Feststellung, welchem Fall das Baggergut zugeordnet werden kann, wird bei der chemischen Beurteilung die gemessene Schadstoffkonzentration im Baggergut mit der Konzentration des selben Stoffes in den Schwebstoffen an der Ablagerungsstelle verglichen. Ist die Konzentration aller Schadstoffe im Baggergut kleiner als der 1.5-fache Wert ihrer Konzentration in den Schwebstoffen, werden die Sedimente dem ersten Fall zugeordnet. Fall zwei liegt vor, wenn die Konzentration eines Stoffes den 1.5-fachen Wert übersteigt, wohingegen der dritte Fall erreicht wird, sobald die Konzentration an der Ablagerungsstelle um das 3-fache überschritten wird.

Die ökotoxikologische Beurteilung erfolgt anhand von sieben Toxizitätsklassen für den empfindlichsten Organismus im Bereich der Ablagerungsstelle (Klasse 0: nicht belastet, Klasse VI: gefährlich belastet). Zur Ermittlung der Toxizitätsklasse wird das unverdünnte Testgut mit der höchsten Verdünnungsstufe verglichen, ab der keine Toxizität mehr festzustellen ist. Bis zur zweiten Toxizitätsklasse wird Baggergut dem ersten Fall zugeordnet, bei den Klassen III und IV ist Fall zwei anzuwenden und ab der Toxizitätsklasse IV muss Baggergut nach dem dritten Fall behandelt werden.

³Hier gilt: Gleiches Korn zu gleichem Korn, denn beim Verbringvorgang von grobem Material auf Feinsubstraten wird die Fauna der Feinsubstrate überdeckt, wodurch ihre Lebensbedingungen beeinträchtigt werden. Werden feine Sedimente auf Grobsubstraten verbracht, können sie bei bestimmten hydrologischen Gegebenheiten das Lückensystem zwischen den Körnern der Sohle zusetzen und dadurch die Lebensbedingungen der dort befindlichen Fauna einschränken (BfG, 2002 [11]).

Sollte die Gesamtbeurteilung ergeben, dass das Baggergut umgelagert werden kann, ist diese Form der Unterbringung zu wählen. Wenn das Baggergut aufgrund seiner Eigenschaften dazu geeignet ist, kann es als Alternative allerdings auch direkt wieder **verwendet** werden. Das ist der Fall, wenn es ohne weitere Behandlung genutzt werden kann.

Ist eine Umlagerung oder direkte Verwendung nicht möglich, muss das Baggergut **entsorgt** werden (vgl. Abb. 1.7). Hier ist zunächst zu prüfen, ob es **an Land verwertet** werden kann oder **außerhalb der Wasserstraße im Gewässer abgelagert** werden kann. Vor einer Verwertung ist das Baggergut zu behandeln, indem seine schädlichen Komponenten entfernt oder immobilisiert werden. Die Verwertungsmöglichkeiten sind sehr vielfältig, wodurch auch viele unterschiedliche Richtlinien, die auf den jeweiligen Verwertungszweck ausgelegt sind, berührt werden können (s. Kapitel 1.3). Die subaquatische Ablagerung in Gewässern außerhalb von Bundeswasserstraßen muss ortsfest erfolgen, d.h. eine Remobilisierung muss ausgeschlossen sein. Eine Möglichkeit ist die Verfüllung von Hafenbecken.

Sollte sich das Baggergut auch nicht für die letztgenannten Zwecke eignen, ist es **sicher an Land, in einer abfallrechtlich zugelassenen Deponie, unterzubringen**.

HABAK-WSV und GÜBAK

Derzeit ist die HABAK-WSV außer Kraft gesetzt worden, um sie zu überarbeiten und an aktuelle Entwicklungen der internationalen Rechtsprechung anzupassen. Sie wird daher durch Übergangsbestimmungen (GÜBAK) ersetzt, die gemeinsam von den Bundesländern an der deutschen Küste und dem Bundesverkehrsministerium und seinen Unterbehörden erarbeitet wurden (BMVBS et. al, 2009 [18]). Diese werden nachfolgend kurz beschrieben.

Die Übergangsbestimmungen gelten für die Seewasserstraßen der Bundesrepublik. Seewärtig wird der Geltungsbereich durch die Anwendungsgrenzen des OSPAR- und des Helsinki-Abkommens beschlossen. Die Regelungen nehmen einen starken Bezug zu den internationalen Meeresschutzabkommen (s. Kapitel 1.4.1), da die Übereinkommen LONDON und OSPAR als Grundlage für die Anwendung in Deutschland herangezogen werden. Die Anforderungen gemäß HELCOM sind dadurch ebenfalls erfüllt.

Auch die Übergangsbestimmungen bieten dem Anwender ein praxistaugliches Werkzeug zur Beurteilung einer Nassbaggermaßnahme, nach der festgestellt werden kann, ob eine Zulassung für das Vorhaben gewährt werden kann. Wie bei den Handlungsanweisungen für den Umgang mit Baggergut stellt ein Fließschema über die notwendigen Maßnahmen in Bezug auf den Umgang mit Baggergut auch den Kern der Übergangsbestimmungen dar (Abb. 1.8). Sie wurden aus den OSPAR-Richtlinien abgeleitet. Die **Charakterisierung des Baggerguts** nimmt hier ebenfalls den zentralen Punkt ein. Die im Zuge dessen notwendigen Untersuchungen sollen die Beurteilung möglicher ökologischer Folgen aus der Ablagerung des Baggerguts im Übereinkommensgebiet ermöglichen. Zudem ist in dem Ablaufschema die **Überwachung der Ablagerungsstelle** festgehalten. Der Umfang der Überwachung richtet sich nach den Ergebnissen

der **Auswirkungsprognose**. Beide Punkte gehören zu den Grundlagen für die Zulassung einer Maßnahme. Es ist allerdings nicht notwendig, jede Ablagerungsstelle zu überwachen, da die Auswirkungen der Baggergutverbringung häufig ähnlich sind. Vielmehr sind detaillierte Untersuchungen an sorgfältig ausgewählten Ablagerungsflächen durchzuführen.

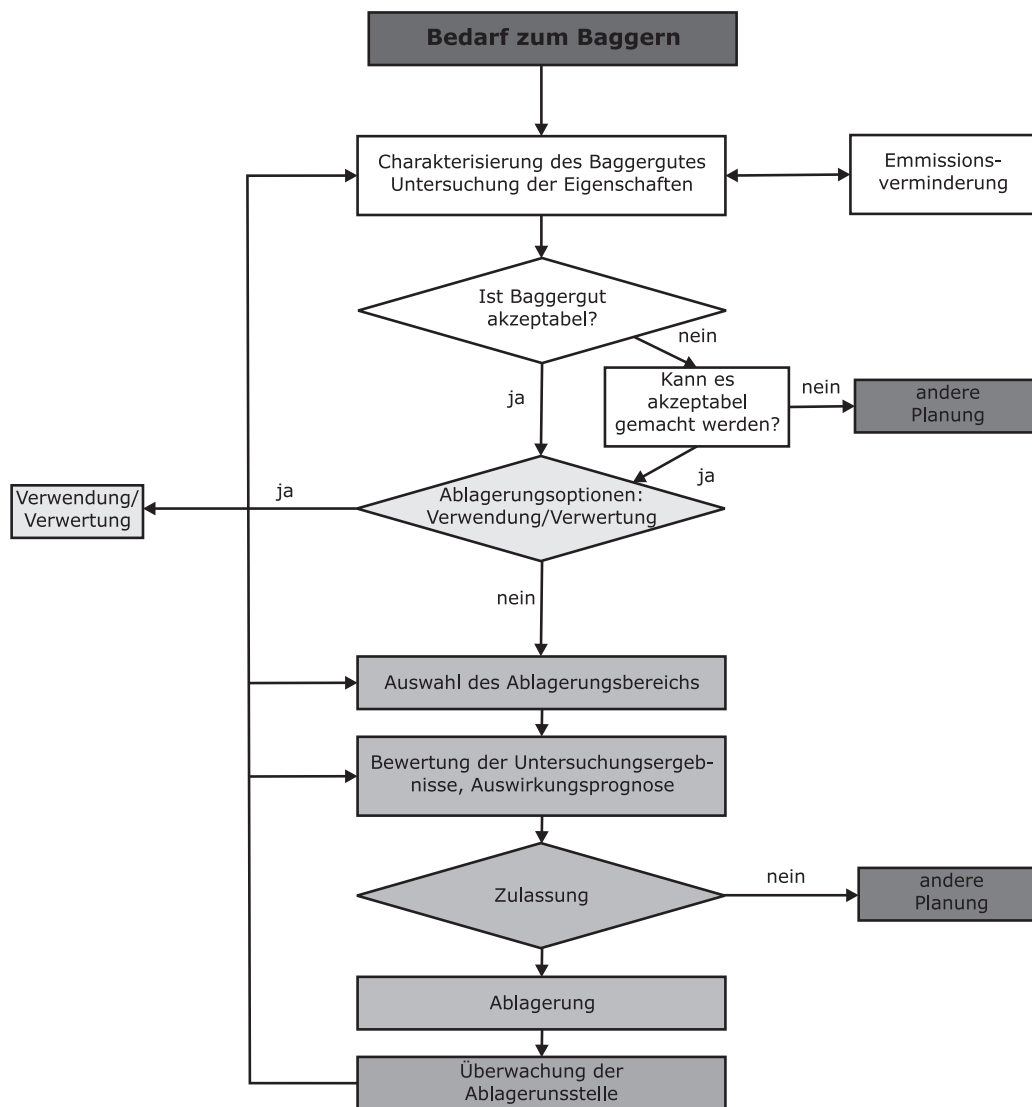


Abbildung 1.8: Handlungsanweisungen zum Umgang mit Baggergut im Küstenbereich nach GÜBAK [18]

Die Charakterisierung des Baggerguts erfolgt ähnlich wie bei der HABAB anhand sedimentologischer, chemischer und biologischer Untersuchungen. Auch hier werden Voraussetzungen angegeben, unter denen das Untersuchungsprogramm verringert werden kann. Sie beziehen sich beispielsweise auf frühere Untersuchungen, die zeigen, dass das Baggergut nur gering belastet ist. Zudem kann bei bestimmten sedimentologischen Eigenschaften wie einer groben Korngrößenverteilung oder wenn es

sich um „gewachsenen Boden“ handelt von weiteren Analysen abgesehen werden. In diesen Sonderfällen sind nur noch benthos- und fischbiologische Untersuchungen am Ablagerungsort notwendig, die den Einfluss der Baggergutverbringung auf Fauna und Flora klären sollen.

Der Umfang der chemischen Untersuchungen ist sehr detailliert beschrieben. Er gipfelt in der Feststellung, ob die Konzentration gewisser Schad- und Nährstoffe im Baggergut kritische Richtwerte überschreitet. Es handelt sich dabei ausdrücklich um Richt- und nicht um Grenzwerte, so dass eine Einhaltung dieser Werte nicht rechtsverbindlich ist, wodurch eine Einleitung zulässig ist. Sie wurden aus den Schadstoffkonzentrationen in Wattenmeer- und küstennahen Sedimenten abgeleitet.

Im Unterschied zur HABAB sind in den Übergangsbestimmungen konkrete Richtwerte für verschiedene Stoffe aufgeführt. Bei der HABAB richtet sich die Zulässigkeit einer Maßnahme nach den vor Ort an der Ablagerungsstelle angetroffenen Konzentrationen. Die in den Übergangsbestimmungen enthaltenen Richtwerte sind für die Nord- und Ostsee angegeben. Es sind jeweils zwei Werte für jeden Stoff aufgeführt. Der Richtwert $R1$ stellt eine untere Bewertungsschwelle dar, der Wert $R2$ ist ein oberes Beurteilungskriterium. Bei der Einordnung des Baggerguts wird wieder zwischen drei Fällen unterschieden:

- Fall 1:** Die Schadstoffkonzentrationen c sind kleiner als die Richtwerte $R1$. In diesem Fall ist der Belastungsgrad des Baggerguts mit den Sedimenten des Küstennahbereichs vergleichbar. Das Baggergut kann verwendet, verwertet oder abgelagert werden. Die **Ablagerungsoptionen** sind in dieser Reihenfolge zu prüfen. Eine Zulassung wird bei positiver Auswirkungsprognose erteilt.
- Fall 2:** Wenn mindestens eine Schadstoffkonzentration c zwischen den beiden Richtwerten $R1$ und $R2$ liegt, gilt das Baggergut als mäßig höher belastet als die Küstensedimente. Zur Entscheidung, was mit dem Baggergut geschehen soll, sind weitere Prüfungen und Maßnahmen erforderlich. Es kann ggf. dennoch verwendet, verwertet oder abgelagert werden. Die **Ablagerungsoptionen** sind zunächst zu prüfen. Wenn die Auswirkungsprognose jedoch eine erhebliche Beeinträchtigung der Ökologie und Nutzungen anzeigt, ist das Baggergut wie unter Fall 3 zu behandeln.
- Fall 3:** Sobald eine Schadstoffkonzentration c den Wert $R2$ übersteigt, ist das Baggergut deutlich höher belastet als die küstennahen Sedimente. In diesem Fall sind die gleichen Maßnahmen wie unter Fall 2 zu ergreifen. Zusätzlich ist zu prüfen, ob Informationen über die Herkunft der Schadstoffe gesammelt werden können und inwieweit eine technische Behandlung und die Abtrennung geringer belasteter Anteile möglich ist. Am Ende ist zwischen einer See- und Landablagerung abzuwägen und der **geeignete Ablagerungsbereich** auszuwählen.

Die biologischen Untersuchungen dienen dazu, innerhalb der Auswirkungsprognose den Einfluss einer Umlagerung auf die Tier- und Pflanzenwelt in der Nähe der Ablagerungsstelle zu erfassen. In den Übergangsbestimmungen werden auch hierzu sehr detailliert Maßnahmen beschrieben. Ergeben die chemischen Untersuchungen eine Einordnung des Baggerguts unter Fall 3, sind ökotoxikologische Untersuchungen unbedingt durchzuführen. Dabei wird das Baggergut wie bei der HABAB in sieben Toxizitätsklassen eingeteilt. Gehören die gebaggerten Sedimente maximal der Klasse II an, gilt es als unbedenklich. Andernfalls ist die erhöhte Toxizität in der Auswirkungsprognose zu berücksichtigen und es muss den möglichen Ursachen für den erhöhten Wert nachgegangen werden.

Weitere „Untersuchungen und die Bewertung von Fauna und Flora sind nach den gängigen wissenschaftlichen Methoden durchzuführen.“ Dabei ist ein Mindestuntersuchungsprogramm zu berücksichtigen und im Fall einer bestehenden Ablagerungsfläche sind die darüber vorhandenen Informationen zu sichten. Insbesondere die Auswirkungen aus der Überdeckung mit Baggergut, Sedimentation und der erhöhten Trübung sind zu untersuchen.

Der Umfang der Überwachung der Ablagerungsstelle hängt von den Ergebnissen der Auswirkungsprognose ab. Die Überwachungsmaßnahmen konzentrieren sich in der Regel auf die Sedimente und Organismen im Bereich der Ablagerungsstelle. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden mit einem Referenzgebiet verglichen, das frei von Einflüssen aus der Baggergutablagerung ist, um die Auswirkungen zu bewerten.

1.5 Zuständigkeiten

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) ist für die Unterhaltung der Bundeswasserstraßen und der Seeschifffahrtstraßen auf deutschem Hoheitsgebiet verantwortlich. Im Bereich der Binnen- und Seehäfen sind die jeweiligen Hafenbetreiber zuständig. Dazu zählen laut WStrG [19] auch die Zufahrten zu den Hafenanlagen. Wird jedoch eine Bundeswasserstraße in einen Hafen einbezogen, bleibt für deren Unterhaltung die WSV zuständig. Ein Beispiel hierfür ist der Köhlbrand im Bereich des Hamburger Hafens. Für die Schifffahrt der Landeswasserstraßen sind die einzelnen Bundesländer verantwortlich.

Die Tideelbe ist ein Beispiel dafür, wie mehrere Parteien eine einvernehmliche Lösung finden müssen. An der Aufgabe, die Zufahrt zum Hamburger Hafen zu gewährleisten, von der die gesamte Region wirtschaftlich profitiert, sind verschiedene Wasser- und Schifffahrtsämter (WSA Hamburg, Brunsbüttel, Cuxhaven), die Hamburg Port Authority (HPA) und drei Bundesländer (Freie und Hansestadt Hamburg, Niedersachsen, Schleswig-Holstein) beteiligt. Einheitlich wird das Ziel der kosteneffizienten und nachhaltigen Unterhaltung für den Schiffsverkehr verfolgt, welches sich in dem gemeinsam entwickelten Sedimentmanagementkonzept niederschlägt (s. Kapitel 2).

1.6 Baggergutproblematik

Verbunden mit den eingangs beschriebenen großen Baggermengen sind auch hohe Kosten für die Unterhaltungsbaggerei zu verzeichnen. Detaillierte Angaben über ihre Größe sind nicht zuletzt aufgrund der unterschiedlichen Zuständigkeitsbereiche nur schwer zugänglich. Daher soll zunächst Bezug auf eine Zusammenfassung des Bundesverkehrsministeriums genommen werden, in der die Kosten aus der Unterhaltungsbaggerei aus den Jahren 1999-2003 an den Seeschiffahrtsstraßen im Zuständigkeitsbereich der WSV aufgeführt sind (Abb. 1.9). Man erkennt deutlich, dass die dargestellten Kosten schwanken, aber kontinuierlich im oberen zweistelligen Millionen-Bereich liegen.

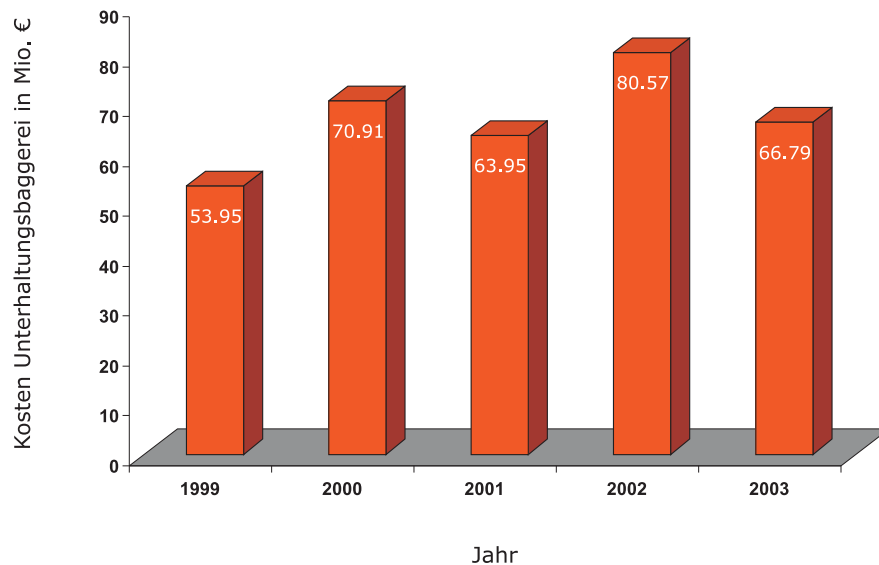


Abbildung 1.9: Kosten der Unterhaltungsbaggerei 2000-2003 (nach BMVBS, 2004 [17])

Die Varianz in den Kosten ist im Wesentlichen auf unterschiedlich große Baggermengen zurückzuführen, die wiederum aus dem angewandten Unterhaltungskonzept und äußeren Einflüssen wie schwankenden Abflüssen resultieren. Es ist trotz der Tatsache, dass keine aktuelleren Daten über die Kosten für Unterhaltungsbaggerungen zur Verfügung stehen nicht davon auszugehen, dass sich die Werte in den letzten sieben Jahren signifikant geändert haben, da auch die Baggermengen einen relativ konstanten Verlauf zeigen.

Weitere Kosten entstehen vor allem durch die erforderlichen Verfahren im Umgang mit Baggergut, die insbesondere bei belasteten Hafensedimenten teuer und aufwendig sind. Zudem sind Kosten aus der Unterhaltungsbaggerei aus dem Binnenbereich in der obigen Aufstellung nicht enthalten.

Ein Blick auf Abbildung 1.10 zeigt, welche Kosten in Abhängigkeit von dem erforder-

lichen Verfahrenspfad anfallen können. Man erkennt vor allem, dass das Umlagern die kostengünstigste Variante ist ($1\text{-}5\text{ €/m}^3$), die jedoch aufgrund der Abhängigkeit von der Entfernung zur Ablagerungsstelle auch gewissen Schwankungen unterliegt. Das WSA Cuxhaven setzt laut einer persönlichen Mitteilung Kosten von $3,50\text{ €/m}^3$ Baggergut/transportierten Kilometer an. Dabei entfällt 1 € auf den reinen Baggervorgang für einen m^3 Baggergut und $2,50\text{ €}$ für den Transport von dieser Menge über einen Kilometer (in Maerker & Malcherek, 2011 [70]). Demgegenüber steht die Behandlung zur Trennung und Entwässerung der Sedimente und die anschließende Deponierung in Schlickhügeln in Hamburg, die hier mit insgesamt 33 €/m^3 angegeben wird.

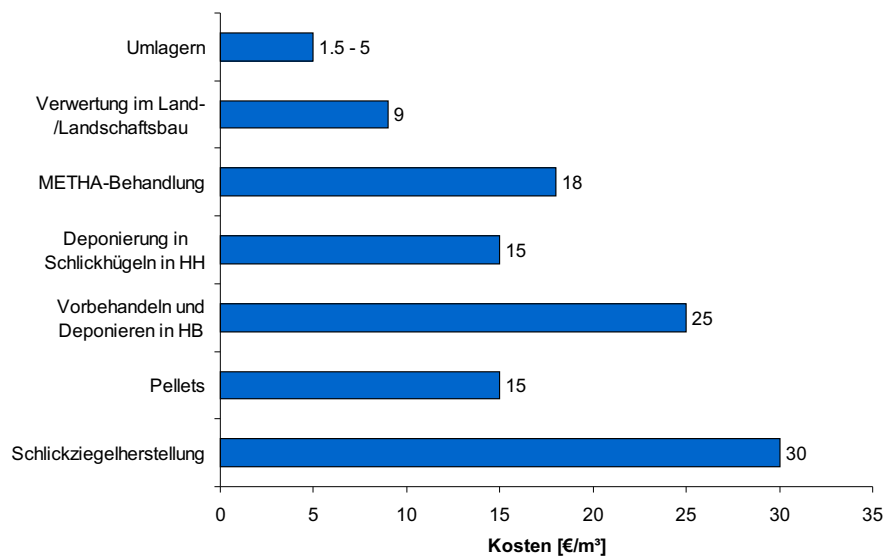


Abbildung 1.10: Kosten der Baggergutbehandlung aus dem Jahr 2002 (nach BMVBS, 2004 [17])

Geht man von jährlich 3 Mio. m^3 Baggergut im Bereich der Binnenwasserstraßen aus und nimmt pauschal an, dass der überwiegende Teil davon umgelagert werden kann, sind demnach zusätzliche Aufwendungen von $3\text{-}15\text{ Mio. €}$ für die Unterhaltung zu erwarten. Laut Einzelplan 12 des Bundeshaushalts 2010 des Bundesfinanzministeriums standen der WSV im Jahr 2010 ca. 58 Mio. € für die Unterhaltung der Bundeswasserstraßen zu (Bundesfinanzministerium, 2010 [15]). Dieser Betrag korrespondiert mit den Größenordnungen aus Abbildung 1.9.

Nicht enthalten sind in den obigen Aufstellungen Kosten aus der Unterhaltungsbaggerei im Zuständigkeitsbereich der Hafentreiber. Hier ist mit weiteren erheblichen Kosten zu rechnen. Aus den Geschäftsberichten der Hamburg Port Authority der Jahre 2007 und 2008 geht beispielsweise hervor, dass 85 Mio. € bzw. 76.6 Mio. € für die Aufrechterhaltung der Fahrwassertiefen und die zum Teil notwendige Deponierung der gebaggerten Sedimente aufgewendet wurden (HPA, 2007 und 2008, [52], [53]). In den weiteren Häfen an der Nord- und Ostseeküste und deren Zufahrten ist aufgrund der geringeren Baggergutmengen sicher mit geringeren aber dennoch nicht

zu vernachlässigenden Kosten zu rechnen.

Auch wenn sich aufgrund der zum Teil unübersichtlichen Informationslage kein lückenloses Bild zeichnen lässt, wird deutlich, dass durch die Unterhaltungsbaggerei jährlich hohe und vor allem regelmäßig wiederkehrende Kosten anfallen. Darüber hinaus muss hoch belastetes Material dauerhaft sicher abgelagert werden. Dadurch entsteht ein mitunter erheblicher Flächenbedarf, um die Sedimente beispielsweise deponieren zu können. Unklar ist derzeit, wie sich die Baggermengen infolge weiterer Fahrrinnenanpassungen im Bereich der Zufahrten zu den großen Seehäfen langfristig entwickeln werden. Bisherige Untersuchungsergebnisse am Beispiel der Auswertung vergangener Fahrrinnenanpassungen in der Tidelbe lassen den Schluss zu, dass unter anderem die Vertiefungen zu einer Anhebung des mittleren Tidehochwassers und einer Absenkung des mittleren Tideniedrigwassers im Bereich des Hamburger Hafens führten (Boehlich, 2003 [3]). Ferner ist mit einer Zunahme des Tidal Pumping-Effekts zu rechnen, bei dem die Flutströmung verstärkt wird und damit ein stromaufgerichteter Transport der Sedimente die Folge ist, der sich in dem Anstieg der Baggermengen im Bereich des Hamburger Hafens nach den erfolgten Vertiefungen niederschlägt (HPA & WSV, 2008 [55]).

1.7 Zielstellung der Arbeit

Aufgrund der durch die Unterhaltung der Fahrwassertiefen an den Schifffahrtsstraßen und in den Häfen anfallenden Kosten haben sich im Laufe der Zeit unterschiedliche Unterhaltungskonzepte entwickelt, die jeweils sehr eng auf die jeweiligen Gegebenheiten abgestimmt sind. Diese Unterhaltungskonzepte setzen sich aus konstruktiven, strombaulichen Maßnahmen, optimierten Nassbaggermaßnahmen und deren Folgeverfahren zusammen.

Mit dem Ziel der Optimierung der Nassbaggerarbeiten werden im Rahmen dieser Unterhaltungskonzepte zudem verschiedene Nassbaggerstrategien verfolgt, durch die möglichst geringe Baggermengen erzeugt werden und kostengünstige, zulässige Ablagerungsoptionen gefunden werden. Die Entwicklung solcher Nassbaggerstrategien ist ein zeitaufwendiger Prozess, bei dem viel Erfahrung im Umgang mit Baggergut und ein breites Wissen über das entsprechende Einsatzgebiet erforderlich ist. Zudem sind sie von aktuellen Entwicklungen der Rechtssprechung abhängig und werden erheblich durch regionale Bedingungen wie Schadstoffbelastungen beeinflusst. Da sich die Randbedingungen ändern können, unterliegen auch die Nassbaggerstrategien häufigen Veränderungen. Es handelt sich insgesamt um einen sehr dynamischen Prozess. In den Bereich Nassbaggerstrategien ist diese Arbeit einzuordnen. Sie hat zum Ziel, numerische Verfahren für den Einsatz der Modellierung von Nassbaggerstrategien und damit auch die Optimierung von Unterhaltungskonzepten einzusetzen. Dies ist bislang in begrenztem Umfang möglich. So gibt es Untersuchungen zu Einzelprozessen, wie zum Beispiel durch A. Wurpts (2006) [103], nach denen der Umlagerungsprozess von Baggergut bereits sehr detailliert modelliert werden kann. Das Particle Tracking Model des US Army Corps of Engineers (2005) [34] ermöglicht die Untersuchung von

Baggergutverdriftungen, indem Sedimente in der Wassersäule definiert werden und diese im Rahmen der Vorgabe eines Strömungsbilds bewegt werden. Das Strömungsbild resultiert dabei aus Simulationsergebnissen der Hydrodynamik. Außerdem kann hiermit auch die Resuspension von Sedimenten beim Baggervorgang von der Sohle aus simuliert werden. Die Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg hat im Rahmen von mehrdimensionalen Feststofftransportsimulationen, bei denen ein hydrodynamisches mit einem morphodynamischen Modell gekoppelt wird, Baggergutverdriftungen modelliert (z.B. Bundesanstalt für Wasserbau, 2006 [14]). Dabei wurde der Verklappvorgang durch eine Schwebstoffquelle in Sohlnähe vorgegeben. Die Simulation der Verdriftung erfolgt dann durch die Modellierung der Strömungs- und Transportprozesse und steht in Wechselwirkung mit der Gewässersohle, indem das Absetzen und die Resuspension berücksichtigt werden.

Allerdings kann durch die bestehenden Ansätze und Modelle der gesamte Vorgang von der Baggerung bis zur Umlagerung nicht vollständig berücksichtigt werden. Dazu sollte der Entscheidungsprozess, wann eine Baggerung erforderlich ist und welchen Umfang diese hat, wie auch die Aufnahmekapazität der Ablagerungsstelle in die Modellierung mit einfließen. Nur auf diese Weise kann eine gesamte Nassbaggerstrategie umfassend bewertet werden. Daher sollte ein Programmbaustein entwickelt werden, mit dem anthropogene Einflüsse in Form von Bagger- und Umlagerungsmaßnahmen in aktuellen numerischen Modellen berücksichtigt und deren Einfluss auf die Morphodynamik untersucht werden kann. Dieses Modell soll die Simulation für Forecast- und Hindcast-Fragestellungen ermöglichen. Forecast-Simulationen sollen den Blick in die Zukunft erlauben, indem die Folgewirkung von Baggermaßnahmen prognostiziert und analysiert wird, während Hindcast-Simulationen darauf hinzielen, den Einfluss von abgeschlossenen Unterhaltungsmaßnahmen auf die Entwicklung eines Fließgewässers zu untersuchen.

Die unter dem Arbeitsnamen DredgeSim entwickelte Software soll die Funktionalitäten zur Modellierung von Nassbaggerstrategien bereitstellen, mit denen das Sedimentmanagement um eine numerische Betrachtungsweise erweitert wird. Der Softwareentwurf erfolgt nach den Vorgaben eines nachhaltigen Software Engineerings und soll zudem eine hohe Flexibilität aufweisen, indem DredgeSim an unterschiedliche morphodynamische Programme gekoppelt werden kann.

Ein weiterer Aspekt, der in dieser Arbeit behandelt werden soll, ist die Beurteilung von Nassbaggerstrategien, die in der Regel von verschiedenen Kriterien wie den Kosten der Maßnahme, Umweltauswirkungen und der alternativen Verwendung des Baggerguts abhängt. Um diese zum Teil gegensätzlichen Interessen in die Bewertung darüber eingehen zu lassen, welche Baggerstrategie zu bevorzugen ist, soll ein Beurteilungsmodell zur Analyse der Lösungen entwickelt werden.

Kapitel 2

Sedimentmanagement und Nassbaggerstrategien

Sedimentmanagement beschreibt alle unmittelbaren Handlungen zur Steuerung des Sedimenthaushalts, die mit dem Ziel der Erreichung eines dynamischen Sohlengleichgewichts unternommen werden (Stamm et. al, 2007 [96]). Es umfasst Bewirtschaftungsmaßnahmen zur Sicherung der verschiedenen Funktionen oder des Schutzes eines Gewässers, die durch Sedimente beeinflusst werden oder sie selbst als Bestandteil eines Gewässers direkt betreffen.

Auf dem Gebiet der Unterhaltung der Fahrwassertiefen werden Sedimentmanagementkonzepte angewendet, um die störenden Ablagerungen in den schiffbaren Bereichen der Oberflächengewässer langfristig zu entfernen und die kostenintensiven Maßnahmen zur Entfernung der Untiefen zu reduzieren. Sie bestehen häufig aus einer Kombination aus konstruktiven Maßnahmen und Nassbaggerarbeiten. Konstruktive Maßnahmen sollen den Anfall von Baggergut per se verringern, während durch Nassbaggerarbeiten die verbliebenen Anlandungen entfernt werden.

Nassbaggerstrategien sind im Kontext des Sedimentmanagements angesiedelt. Sie leisten ihren Beitrag, um einen möglichst nachhaltigen Gewässerzustand zu generieren. Das geschieht beispielsweise durch die Verwendung geeigneter Ablagerungsstellen, wodurch Baggerkreisläufe durchbrochen und die Anzahl der Baggerumläufe reduziert werden. Dadurch können auch die Baggermengen und die damit verbundenen Unterhaltungskosten verringert werden. In diesem Kapitel sollen Aspekte des Sedimentmanagements und verschiedene Nassbaggerstrategien anhand von Beispielen vorgestellt werden.

2.1 Konstruktive Maßnahmen

Konstruktive Maßnahmen zur Behinderung der Sedimentablagerung finden sich im Binnen- und Küstenbereich. Ihre Wirkungsweise besteht in der dauerhaften Beeinflussung der Hauptströmung eines Fließgewässerabschnitts und des damit verbundenen

Sedimenttransports. An Flüssen wie der Binnenelbe werden zu diesem Zweck häufig Buhnen und Leitwerke konstruiert. In dieser Funktion kommen diese auch vereinzelt an der Küste zum Einsatz. Ein Beispiel ist der Leitdamm zur Sicherung der Fahrrinne im Mündungsbereich der Elbe an der Kugelbake in Cuxhaven. Darüber hinaus werden konstruktive Maßnahmen im Bereich von Hafenzufahrten und der Einfahrt in Hafenbecken eingesetzt, um die Anlandung von Sedimenten an diesen Stellen zu verringern. Ein Beispiel hierfür sind Strömungsumlenkwände, wie sie im Hamburger Hafen eingesetzt werden.

Strombauliche Maßnahmen unterscheiden sich hinsichtlich ihres Wirkungsbereichs von Einzelmaßnahmen in Häfen. Sie erstrecken sich häufig über einen längeren Gewässerabschnitt, während letztere hauptsächlich lokal wirken.

2.1.1 Buhnen und Leitwerke

Buhnen und Leitwerke werden als klassische strombauliche Maßnahmen vor allem an Flüssen zur Niedrig- und Mittelwasserregelung eingesetzt. Durch sie sollen Anlandungsprozesse in strömungsgemäßigten Bereichen der Fahrrinnen unterbunden werden, indem die Selbststräumkraft der Fließgewässer an diesen Stellen durch eine Abflusskonzentration erhöht wird. Diese wird durch eine Reduktion des effektiven Querschnitts durch den Einbau von Bauwerken längs (Leitwerke) und quer (Buhnen) zur Hauptströmungsrichtung erreicht (Abb. 2.1).



Abbildung 2.1: Buhnenkörper an der Donau

Wird der wirksame Abflussquerschnitt durch eines der beiden Bauwerke von der Breite B_1 auf die Breite B_2 verringert, muss bei gleichbleibendem Durchfluss aufgrund der Masserhaltung gelten:

$$Q_1 = Q_2$$

$$q_1 B_1 = q_2 B_2.$$

Daraus lässt sich ablesen, dass sich der spezifische Durchfluss q_2 nach dem Einbau des Leitwerks oder der Buhne erhöht, da der Quotient aus der Ausgangsbreite des Fließgewässerabschnitts B_1 und der neuen Breite B_2 in jedem Fall größer als eins ist. Für die Abflusskonzentration ergibt sich:

$$q_2 = \frac{B_1}{B_2} q_1.$$

In der Folge der Querschnittseinengung wachsen die Strömungsgeschwindigkeiten an und es kommt zu einer Anhebung des Wasserspiegels. Dadurch erhöht sich in diesen Bereichen die Wassertiefe. Die Erhöhung der Fließgeschwindigkeit und der Wassertiefe führt auch zu einer Verstärkung von Erosionstendenzen, wodurch sich die Sohle eintieft. Das Gewässer strebt einem aus diesen drei Anteilen bestehenden Gleichgewichtszustand entgegen (Abb. 2.2).

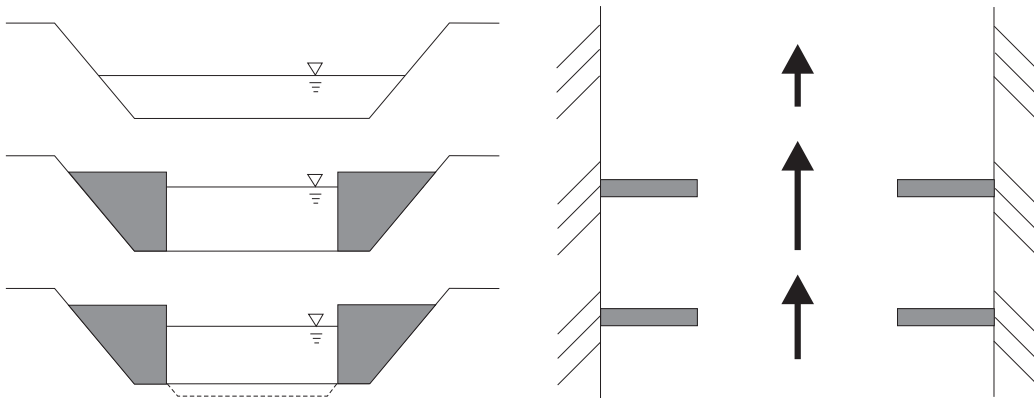


Abbildung 2.2: Die Wirkungsweise von Buhnen als angestrebter Gleichgewichtszustand aus Anhebung des Wasserspiegels, Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit und Eintiefung der Sohle

Da der spezifische Abfluss q das Produkt aus Strömungsgeschwindigkeit u und Wassertiefe h ist, kann selbst für den einfachen Fall eines erosionsstabilen Flussbetts anhand des obigen Zusammenhangs noch keine Aussage darüber getroffen werden, um welches Maß sich diese beiden Einflussgrößen ändern, sobald strombauliche Maßnahmen den Fließquerschnitt einengen. Eine analytische Lösung dieser Fragestellung ist nur mittels Vereinfachungen möglich und kann beispielsweise in Form der sich einstellenden Normalwassertiefe h_N aus dem Gesetz nach Darcy-Weisbach für die Annahme abgeschätzt werden, dass sich die gesamte Flussbreite durch den Einbau strombaulicher Maßnahmen verringert.

$$I_E = \frac{\lambda}{d_{hy}} \frac{u^2}{2g}$$

Hierin sind I_E das Energieliniengefälle, das bei Normalabfluss als parallel zu dem Sohlliniengefälle I_{So} angenommen werden kann, und λ der Reibungsverlustbeiwert, der sich iterativ nach dem Gesetz von Colebrook-White errechnen lässt. d_{hy} ist der hydraulische Durchmesser, für den in breiten, rechteckförmigen Kanälen $d_{hy} = 4h$ angesetzt werden kann (Malcherek, 2011 [76]). Damit ergibt sich für die Normalwassertiefe:

$$h_N^3 = \frac{\lambda}{4I_{So}} \frac{q^2}{2g}.$$

Die Werte für den spezifischen Abfluss q und die Normalwassertiefe h_N müssen diese und die oben aufgeführte Massenerhaltungsgleichung erfüllen.

Im Fall der Berechnung der Buhnenwirkung ist es nur in erster Näherung zulässig, die durch deren Konstruktion entstandene lichte Breite zwischen den Bauwerken als effektive Breite für den Fließquerschnitt anzusetzen. Grundsätzlich sind die Strömungsprozesse, insbesondere im Bereich von Buhnen, zu komplex, als dass sich die assoziierten Größen so einfach berechnen lassen. Zum einen hängen die Strömungsgeschwindigkeit und die Wasserspiegellage voneinander ab. Zum anderen erfolgt durch den Einbau von Buhnen zwar eine Einengung des effektiven Abflussquerschnitts aber keine wirkliche Querschnittänderung des gesamten Fließgewässerkörpers. Es entstehen Sekundärströmungseffekte, die auch in die beruhigten Bereiche wie Buhnenfelder hinein wirken. Dadurch kommt es zum Volumenaustausch mit dem wirksamen Fließquerschnitt, der bei der Ermittlung der Wasserspiegellage und der Strömungsgeschwindigkeiten berücksichtigt werden muss. Eine Möglichkeit der Berechnung stellen mehrdimensionale numerische Modelle dar (z.B. in Spannring, 1999 [95]).

2.1.2 Konstruktive Maßnahmen in Häfen

In Häfen finden sich konstruktive Maßnahmen an Einfahrten zu strömungsberuhigten Bereichen wie Hafenbecken oder im Fall kleinerer Häfen der Hafenzufahrt selbst. Sie sollen auf der einen Seite einer Verschlickung entgegenwirken, die insbesondere in den Ruhewasserbereichen auftreten kann und zum anderen einer Sedimentablagerung direkt im Zufahrtsbereich, die auf die dortige Bildung einer Drehströmung am Übergang zu den gemäßigten Abschnitten von Hafenbecken zurückzuführen ist. Deren Ausbildung ist bereits detailliert in zahlreichen Publikationen beschrieben (z.B. in Vollmers, 1963 [101] und Brinkmann, 1990 [8]). Im Wesentlichen lässt sich die Entstehung auf Trennflächeneffekte beim Aufeinandertreffen von Flüssigkeitsschichten mit unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten zurückführen. Die Trennflächen sind labil und zerfallen insbesondere an Ausbuchtungen rasch in kleinere und größere Wirbel. Die Fortpflanzung dieser Wirbel in parallel zu der Hauptströmungsrichtung

liegenden Hafeneinfahrten führt zur Ausbildung einer Zirkulationsströmung (Abb. 2.3 oben).

Zur Vermeidung des Eintrags von Sedimenten in die Hafengebiete und der negativen Wirkung der Rotationsbewegung am Hafeneingang wird seit geraumer Zeit nach Lösungen bei der Gestaltung der Hafeneinfahrten gesucht (z.B. in [101]). Daraus hervorgegangene erste Lösungsansätze sind die Anordnung von Störelementen oder Walzenräumen, die das Strömungs- und Transportgeschehen dahingehend beeinflussen sollen. Durch Störelemente wie Schwellen oder Öffnungen kann die Ausdehnung der Drehströmung reduziert werden, indem der Reibungswiderstand an geeigneten Stellen lokal erhöht wird (Abb. 2.3 rechts). Walzenräume als künstliche Erweiterungen der Hafeneinfahrt sollen die sich ausbildende Strömungswalze am Hafeneingang einfangen und deren Wirkung kontrollieren. In der Folge bildet sich eine Sekundärwalze in strömungsberuhigten Bereichen heraus, die jedoch deutlich schwächer in ihrer Intensität ist (Abb. 2.3 links). Während Walzenräume bei der konstruktiven Gestaltung der Hafenzufahrt heutzutage keine tragende Rolle spielen, kommen Störelemente weiterhin zum Einsatz.

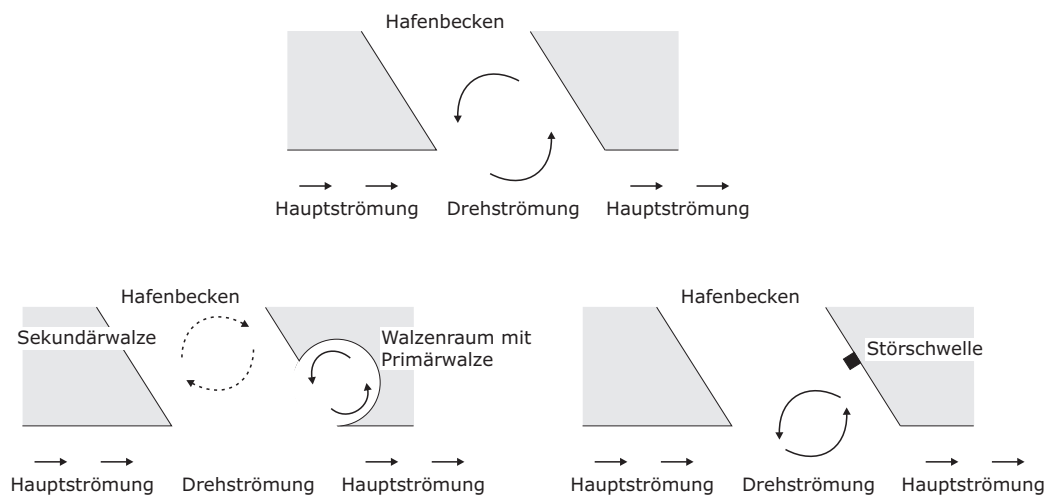


Abbildung 2.3: Beeinflussung der Zirkulationsströmung (oben) durch Walzenraum (links) und Störkörper (rechts) im Bereich von Hafeneinfahrten (nach Vollmers, 1963 [101])

Ein aktuelles Beispiel der Beeinflussung des Strömungsgeschehens im Bereich von Hafeneinfahrten sind Strömungsumlenkwände. Eine sehr vereinfachte Darstellung einer möglichen konstruktiven Gestaltung ist in Abbildung 2.4 zu sehen. Durch die gekrümmte Ausbildung wird ein Teil der Hauptströmung mit höheren Geschwindigkeiten in das Hafenbecken umgelenkt. Die Ausbildung eines Zirkulationsgebiets wird verhindert und die Ablagerung von Sedimenten in diesen Bereichen erschwert.

Die damit verbundenen Prozesse sind mitunter sehr komplex und können durch mehrdimensionale Strömungsmodelle beschrieben werden. Strömungsumlenkwände können durch Bermen, Drempele oder Sohlschwellen ergänzt werden, die den sohnahen Transport von Feststoffen behindern. Das Beispiel einer Strömungsumlenkwand im

Hamburger Hafen zeigte positive Ergebnisse im Hinblick auf die Entwicklung der Sedimentationsmengen. Diese konnten durch eine derartige Konstruktion im Bereich des Köhlfleets um bis zu 40 % verringert werden (Christiansen, 1997 [32]).

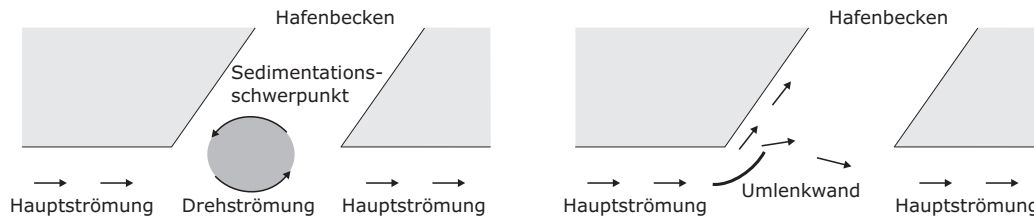


Abbildung 2.4: Typische Ausbildung eines Sedimentationsschwerpunktes infolge einer Drehströmung an Hafeneinfahrten (links) und dessen Vermeidung durch eine gekrümmte Strömungsumlenkwand (rechts)

2.1.3 Weitere konstruktive und technische Maßnahmen

Darüber hinaus ist zu den strombaulichen Maßnahmen auch die Schaffung zusätzlicher Wasserflächen durch die Wiederanbindung von Altarmen zu zählen, durch die die Strömungsenergie gedämpft und damit der Transport von Sedimenten in das System von vornherein unterbunden werden kann. Dies kann sich insbesondere in durch Eindeichung oder Kanalisierung anthropogen stark veränderten Flussläufen positiv auswirken.

Auch Sedimentfallen können hier eingeordnet werden. Sie bestehen aus einer künstlichen Eintiefung, in der sich Sedimente aufgrund des strömungsberuhigten Regimes leicht ablagern können. Sedimentfallen werden geschaffen, um den Transport von bestimmten Sedimenten und eine verstärkte Akkumulation in die dahinter liegende Bereiche zu unterbinden. Sie stellen taktische Sedimentationsschwerpunkte dar, die zudem über eine hohe Aufnahmekapazität verfügen können, für Nassbagger in der Regel leicht anzufahren sind und zudem belastete von unbelasteten Sedimenten trennen (s. a. Sedimentmanagementkonzept der Tideelbe, Kapitel 2.4).

Auto Flushing-Systeme kombinieren die Ausnutzung vorhandener Sedimentbewegungen eines Systems mit technischen Hilfsmitteln. Im Hafen Leer an der Leda wird ein solches System seit 2003 erfolgreich betrieben. Die Hafenbecken hinter der Seeschleuse sind mit einem Gefälle versehen, so dass die Sedimente, die bei jeder Schleusung in den Hafen getragen werden, durch die Schwerkraft angetrieben sohnah zu einem Pumpensumpf abtransportiert werden. Eine Pumpenanlage befördert die Sedimente von dort wieder zurück in die Leda (in PIANC, 2008 [89]).

Des Weiteren kommen vereinzelt auch rein technische Maßnahmen zur Anwendung, um den Eintritt von Schwebstoffen in strömungsberuhigte Hafenbereiche zu verhindern. Als solche sind Systeme bekannt, mit denen Luftblasen im Bereich von Zufahrten zu Hafenbecken horizontal eingetragen werden, um ein turbulentes Regime zu erzeugen, in dem das Absetzen von Schwebstoffen behindert wird. Eine solche Anlage

wurde im Hamburger Hafen getestet (in [89]). Auch Tore zu Hafeneinfahrten und an Schleusen verhindern den Eintrag von Sedimenten in die kritischen Ruhewasserbereiche.

2.2 Der Umgang mit Flüssigschlick

Flüssigschlick („Fluid Mud“) ist ein Gemisch aus Feststoffen und Wasser, das in Sohlhöhe eine fließfähige Schicht bildet. Ohne Resuspension konsolidiert Fluid Mud zu festem Boden. Im unkonsolidierten Zustand besitzt Schlick die Eigenschaften einer Flüssigkeit, die sich von Newtonschen Fluiden unterscheidet, jedoch durch rheologische Ansätze beschrieben werden kann (Malcherek & Cha, 2011 [77]).

Flüssigschlick ist vor allem in strömungsberuhigten Zonen wie Hafenanlagen anzutreffen (Abb. 2.5). Im Fall der Konsolidierung ist das Räumen des betroffenen Gewässerabschnitts, sofern die Fahrwassertiefe eingeschränkt ist, technisch aufwendig und mit hohen Kosten verbunden. Das kann durch anthropogene Eingriffe verhindert werden, indem die Fluid Mud-Schichten regelmäßig durchmischert werden. Dabei werden interpartikuläre Verbindungen zerstört und die Verfestigung des Schlicks unterbunden.



Abbildung 2.5: Verschlickung des Hafens Dorum (aus [77])

Fluid Mud kann demnach durch geeignete Methoden derart konditioniert werden, dass er gefahrlos schiffbar ist. Hier wird das Prinzip der nautischen Tiefe (Herbich, 1992 [57]) angewendet. Diese allein schon korrekt zu ermitteln, ist eine nichttriviale Aufgabe, da viele Einflussfaktoren berücksichtigt werden müssen. Eine Möglichkeit liegt in der Messung der Dichte der Fluid Mud-Suspension, durch die der schiffbare Bereich und damit die nautische Tiefe recht genau bestimmt werden (Kirby & Parker, 1974 [64]). Weitere Ausführungen zur Definition und dem Konzept der nautischen

Tiefe finden sich in Kapitel 3.3.

Eine weitere Möglichkeit, die Schiffbarkeit des Schlicks aufrecht zu erhalten, sind Belüftungsmaßnahmen (Wurpts, R. & Torn, 2005 [104]). Dabei wird der Schlick in eine Schute gefördert, wo er dem Luftsauerstoff ausgesetzt wird. Dadurch werden Oxidationsprozesse angestoßen, durch die die mikrobiologischen Eigenschaften verbessert werden, die wiederum das Fließverhalten maßgeblich beeinflussen. Zudem werden durch den Fördervorgang die Fluid Mud-Schichten gestört und vermischt. Das Verfahren wird seit mehreren Jahren erfolgreich in Emden eingesetzt und ersetzt dort die früher erforderlichen Unterhaltungsbaggerungen.

Darüber hinaus werden konstruktive Maßnahmen wie Sohlschwellen dazu verwendet, den sohnahen Transport von Fluid Mud in die Hafengebiete hinein zu unterbinden. Zudem wird versucht, die vermehrte Schlickbildung zu behindern, indem bei der konstruktiven Gestaltung von Hafeneinfahrten Maßnahmen wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben zum Einsatz kommen, um das Vordringen von feinen Partikeln in die Ruhewassergebiete zu erschweren, wo sie sich absetzen können.

2.3 Nassbaggerstrategien am Beispiel Hamburgs

Nassbaggerarbeiten hängen stark von den örtlichen Gegebenheiten ab. Daher ist es schwierig, konkrete und allgemeingültige Empfehlungen für eine Nassbaggerstrategie zu finden. Sie hängen neben dem Ziel, die nautischen Erfordernisse zu gewährleisten, von der wirtschaftlich sinnvollsten Variante, der rechtlichen Durchführbarkeit, der geografischen Situation und selbstverständlich der Beschaffenheit des Baggerguts ab. In der Summe sind viele Zwangspunkte zu beachten, die die Entwicklung von Baggerstrategien begleiten.

Sinn und Zweck einer Nassbaggerstrategie liegen neben dem Unterhaltungsziel in der Findung einer optimalen Lösung, die vor allem kostengünstig, nachhaltig und in ihrer Gesamtheit ökologisch vertretbar ist. Ein Beispiel für die Entwicklung einer solchen Strategie liefert die Geschichte der Unterhaltungsbaggerungen im Hamburger Hafen (s.a. BMVBS, 2004 [17]). Das hier angefallende Baggergut wurde lange Zeit zur Aufhöhung von Flächen und einen Einsatz in der Landwirtschaft an Land genutzt. Später wurde der Anteil, der für eine Umlagerung geeignet ist, an der Landesgrenze in Wedel verbracht (Abb. 2.7).

Durch unterschiedliche Einflüsse wie zum Beispiel als Folge der Fahrrinnenanpassungen hat die Änderung der Tidedynamik im Elbeästuar zu einer Erweiterung der Dominanz der flutstrominduzierten Transporte in diesem Bereich geführt. Ergebnisse numerischer Modelle der BAW legen diese Schlussfolgerungen nahe (in HPA & WSV, 2008 [55]). Grundsätzlich ist eine Dominanz der stromaufgerichteten Transporte in Ästuaren nichts ungewöhnliches. Es bedeutet, dass mit den Flutströmungen größere Sedimentmengen in dem beobachteten Gebiet transportiert werden als mit den Ebbeströmungen. Dieses Ungleichgewicht wird auch als Tidal Pumping bezeichnet, das sich anhand der Darstellung des qualitativen Verlaufs der mittleren Strömungsgeschwindigkeiten über eine Tide erklären lässt. Das Tidevolumen, das während der

Flut stromauf bewegt wird, muss während der Ebbe wieder stromab transportiert werden. Man erhält es aus der Integration der Wasserstandskurve zwischen den Kenterpunkten. Infolge des Eindringens der Tide in ein Ästuar ist die Tidekurve verformt. Es kommt zu Dämpfungs- und Reflexionseffekten, die dazu führen, dass die Flutdauer gegenüber der Ebbedauer je nach Position im Ästuar deutlich kürzer ist (Malcherek, 2010 [75]). Da jedoch das gleiche Wasservolumen wie mit dem ausströmenden Wasser transportiert werden muss, steigen die Flutgeschwindigkeiten sehr viel schneller an und sind häufig betragsmäßig auch größer als die Ebbestromgeschwindigkeiten (Abb. 2.6).

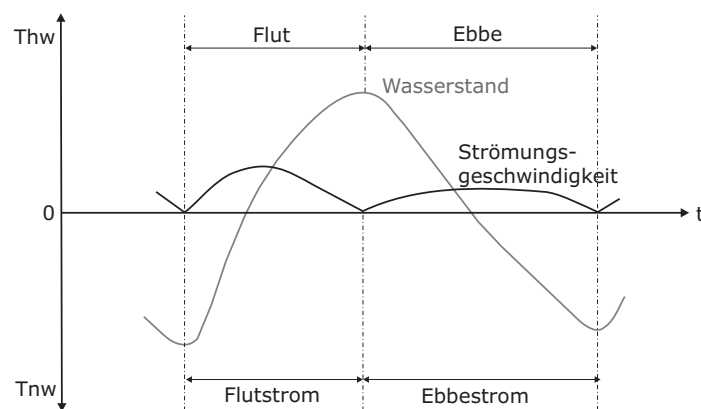


Abbildung 2.6: Typischer, qualitativer Verlauf von Wasserständen und Strömungsgeschwindigkeiten in Ästuaren aufgrund von Dämpfungs- und Reflexionseffekten

Mit dem einlaufenden Wasser der Flut werden daher auch größere Mengen an Sedimenten transportiert. Der Flutstromtransport ist also deutlich ausgeprägter als der Ebbestromtransport. Durch den Ausbau und die anthropogenen Uferbefestigungen kann dieser Effekt je nach Topografie wie zum Beispiel in der Tideelbe noch einmal verstärkt werden. Dadurch wurden die verbrachten Sedimente innerhalb kurzer Zeiträume wieder in den Hafen verfrachtet, wo sie erneut in Sedimentationsschwerpunkten akkumulierten. Ergebnis dieser Entwicklung sind Kreislaufbaggerungen, die sich in dem Anstieg der Baggermengen im Hamburger Hafen in den Jahren 2004 bis 2005 ausdrückt (HPA, 2009 [54]; s. a. Abb. 2.8).

Um diesen Kreislauf zu durchbrechen, wurden neue Ablagerungsflächen evaluiert. Als Ergebnis wird seit 2005 ein Teil des Baggerguts in der Nordsee an der Tonne E3 umgelagert. Hier ist ein ähnliches Sedimentinventar anzutreffen. Zudem legen die Strömungsverhältnisse an dieser Stelle nahe, dass der überwiegende Anteil des verbrachten Baggerguts in einem abgegrenzten Bereich verbleibt [54].

Ein weiterer Grund für die Wahl dieser Verbringstelle liegt darin, dass die Schutzgüter der Nationalparks Niedersächsisches Wattenmeer und Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer durch die Umlagerung nicht beeinträchtigt werden. Monitoringkampagnen im Bereich der Verbringstelle sollen eine ökologische Folgenabschätzung ermöglichen. Die Baggermengen im Hamburger Hafen sind als Ergebnis dieser neuen Baggerstrategie gesunken (Abb. 2.8).

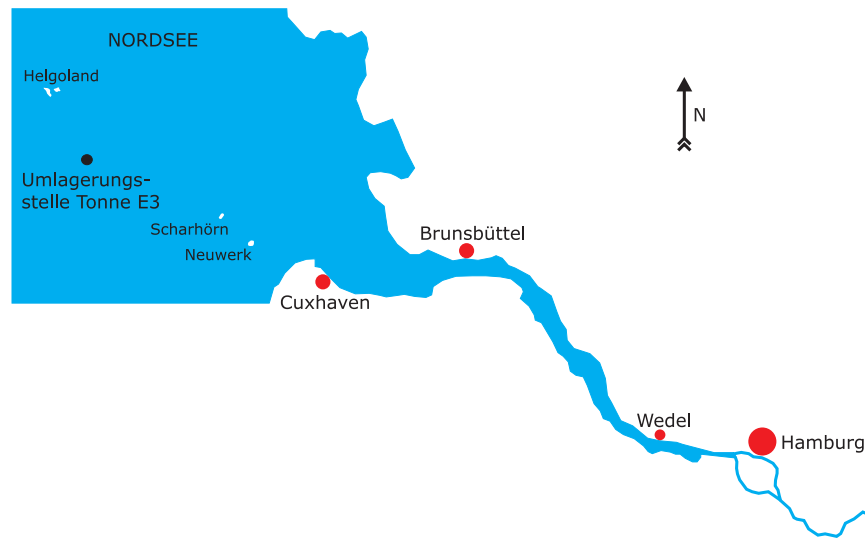


Abbildung 2.7: Die Tideelbe mit der Umlagerungsstelle Tonne E3

Dieses Beispiel zeigt sehr deutlich, wie sich eine Nassbaggerstrategie dem Erkenntnisgewinn und dem damit verbundenen Optimierungsdrang folgend ausbilden kann. Zwar ist der Weg zur Ablagerungsstelle weit, allerdings erscheint diese Lösung für die Baggermengenentwicklung im Hafensbereich zunächst als nachhaltiger. Dennoch steckt auch in diesem Vorgehen noch Optimierungsbedarf, da die Ablagerungsstelle nur für einen festgelegten Zeitraum und in einem bestimmten Umfang für Sedimentumlagerungen zugelassen ist. Zudem verursacht die Distanz zur Verbringstelle nicht unerhebliche Kosten und die Sedimente werden weit entfernt von ihrem Ursprung abgelagert.

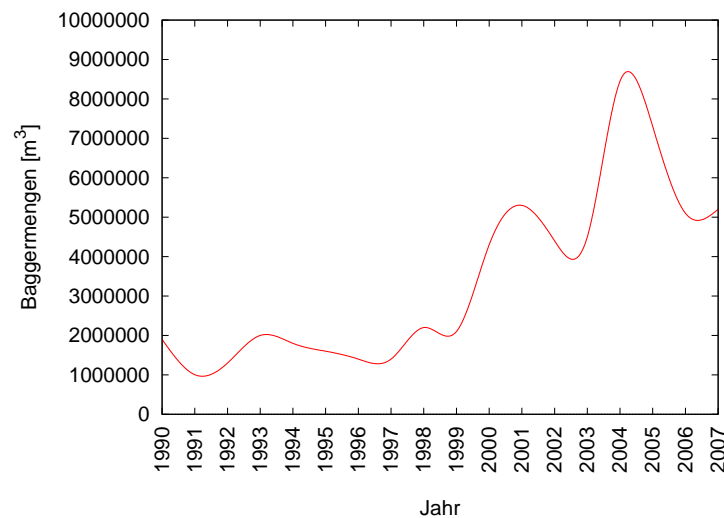


Abbildung 2.8: Entwicklung der Baggermengen im Hamburger Hafen 1990-2007 (nach HPA, URL: <http://www.tideelbe.de>)

Grundsätzlich besteht das Ziel, die Baggermengen in der Tideelbe weiter zu verringern. Daher wurden umfangreiche Studien zur Entwicklung eines neuen Sedimentmanagementkonzepts durchgeführt.

2.4 Unterhaltungskonzepte an deutschen Flüssen und Häfen

An den deutschen Bundeswasserstraßen und Seehäfen wurden verschiedene Unterhaltungskonzepte entwickelt. Dies ist ein sehr dynamischer Prozess, der nie zu einer dauerhaften Lösung führen wird, da das System auf die jeweiligen Gegebenheiten reagiert und eine Optimierungsaufgabe unter solchen Voraussetzungen immer neue Lösungsansätze gebiert. Nachfolgend sollen aktuelle Unterhaltungsstrategien einiger wichtiger Flüsse und Häfen erläutert werden.

2.4.1 Sedimentmanagementkonzept für die Tideelbe

Das aktuell verfolgte Unterhaltungskonzept für die Tideelbe befindet sich im Umbruch. Die Unterhaltung der Tideelbe obliegt der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung mit den Wasser- und Schifffahrtsämtern Cuxhaven und Hamburg sowie der Hamburg Port Authority. Insgesamt fallen jährlich 15-20 Mio. m³ Baggergut in diesem Bereich an (nach WSV und HPA, in Burt, 2006 [30]).

Der Großteil der Mengen wird in der Elbe und in der Nordsee umgelagert. Das gilt beispielsweise für die gesamten Mengen im Verantwortungsbereich der WSÄ Cuxhaven und Hamburg. Die Sedimente aus dem Hamburger Hafen können nur eingeschränkt für die Umlagerung verwendet werden, da hier gebietsweise hohe Schadstoffkonzentrationen, die von oberstrom eingetragen werden, vorliegen. Daher müssen die Hafensedimente teilweise aufbereitet werden. Dies geschieht durch eine Mechanische Trennung und Entwässerung (METHA), bei der die verunreinigten feinen Fraktionen von den unbelasteten groben getrennt werden. Die unbelasteten Schlick- und Sandpartikel können stofflich verwertet werden, während der restliche Schlick deponiert wird. Die jährliche Durchsatzleistung der METHA-Anlage beträgt rund 1 Mio m³ an Sedimenten (HTG-Fachausschuss Baggergut, 2007 [51]).

Aufgrund der hohen Kosten und Mengen an Baggergut sowie neuer rechtlicher Rahmenbedingungen wurde ein neues zuständigkeitsübergreifendes Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Tideelbe von der WSV und HPA erarbeitet (WSV & HPA, 2008 [55]). Es kombiniert Faktoren eines quantitativen und eines qualitativen Sedimentmanagements. Künftig soll dieses Konzept, bestehend aus einer Verbindung von strombaulichen Maßnahmen, Nassbaggerarbeiten und einer zeitlich begrenzten Ablagerung an Land, das aktuell praktizierte Unterhaltungskonzept ablösen. Es besteht aus vier Teilen:

- Reduzierung der Baggermengen

- Optimierung der Umlagerung
- Verringerung der Schadstoffbelastung
- Landbehandlung schadstoffreichen Baggerguts.

Die Reduzierung der Baggermengen soll unter anderem durch strombauliche Maßnahmen erreicht werden, die die Transportcharakteristik im Elbeästuar beeinflussen sollen. Das Ziel besteht darin, den stromaufgerichteten Transport zu verringern. Dazu sind mehrere Einzelmaßnahmen von der Elbmündung bis zum Hafenbereich angedacht, die sich aufgrund ihres Umfangs erst mittel- bis langfristig auf das Sedimentationsverhalten auswirken werden. Beispiele für bereits praktizierte Maßnahmen sind der Sedimentfang im Bereich Wedel zur Trennung von belasteten Hafensedimenten und unbelasteten, in dem sich Sedimente gewollt ablagern und Maßnahmen zur Sedimentationsverminderung wie Strömungsumlenkwände im Hafenbereich oder Aktionen zur partiellen Erhöhung von Strömungsgeschwindigkeiten im Strombereich wie zum Beispiel im Bereich Krautsand.

Die Reduzierung der Baggermengen wird auch durch eine Optimierung der Umlagerung erreicht. Diese sieht vor, feinkörnige Sedimente in den ebbestromdominierten Bereichen umzulagern und gröbere Sedimente strombaulich zu verwenden. Dadurch können Sedimentkreisläufe durchbrochen und eine Verringerung der Baggermengen erreicht werden. Zudem wird das Ziel verfolgt, zukünftig das Verbringen in die Nordsee abzustellen. Dazu werden geeignete Unlagerungsstellen in der Tideelbe untersucht.

Die vorhandene Belastung der Sedimente durch Schadstoffe muss weiter reduziert werden. Da es sich hierbei um ein übergregionales Problem handelt, das sich über weite Strecken des gesamten Einzugsgebiets der Elbe erstreckt, ist für die Sanierung ein Gesamtkonzept erforderlich. Die wesentlichen Einträge entstammen Altlasten aus dem Binnenbereich und den Zuflüssen des Flusses. Für eine nachhaltige Sanierung sind die Einträge zu minimieren, da sie nicht nur lokal an der Eintragstelle verbleiben, sondern größtenteils durch partikelgebundene Verfrachtung stromab transportiert werden können und damit nicht nur die Schutzziele der EG-WRRL, sondern auch der europäischen Meeresschutzstrategierahmenrichtlinie (EG-MSRL) gefährden. Die im Bereich der Tideelbe entnommenen schadstoffbelasteten Sedimente werden behandelt und anschließend gesichert an Land verbracht. Dadurch werden die Schadstoffkonzentrationen vermindert und das Gewässer entlastet, so dass in Kombination mit Maßnahmen im Binnenbereich die Gesamtbelastung reduziert werden kann. Die Landbehandlung kontaminierter Sedimente soll noch bis zum Jahr 2025 in dem aktuellen Umfang fortgeführt werden.

Auch wenn die Einzelmaßnahmen an sich schon positive Auswirkungen haben können, ist das vorgelegte Konzept in seiner Gesamtheit zu betrachten. Erste Schritte, wie die Errichtung eines Sedimentfangs bei Wedel, sind bereits unternommen und werden anhand von Monitoringergebnissen, die in begleitenden Kampagnen erhoben wurden, bewertet.

2.4.2 Unterhaltungskonzept für das Weserästuar

Auch am Weserästuar werden bei der Zufahrt zu den beiden Häfen in Bremerhaven und Bremen verschiedene Maßnahmen im Rahmen einer Unterhaltungsstrategie angewendet. Jährlich fallen im Amtsbereich der beiden zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämter Bremen und Bremerhaven ca. 4-5 Mio. m³ Baggergut aus Sand und Schlick an, das vornehmlich umgelagert wird (Quelle: WSA Bremerhaven¹). Dazu werden überwiegend Hopperbagger und Wasserinjektionsgeräte verwendet. Hinzu kamen lange Zeit ca. 400000 bis 500000 m³ schlickiger Sedimente im Bereich der Häfen, die in den letzten Jahren durch geeignete Maßnahmen auf ca. 200000 m³ gesenkt werden konnten (Quelle: Bremen Ports²).

Aufgrund der Belastung der Hafensedimente muss ein Teil des anfallenden Baggerguts landfest entsorgt werden (BMVBS, 2004 [17]). Dies erfolgt mit Hilfe der Entsorgungsanlage Seehausen, in der das Baggergut entwässert und anschließend deponiert wird. Weiter wird der Schlick im Deponiebau eingesetzt. Durch verschiedene Maßnahmen konnte das Baggeraufkommen in den vergangenen Jahren reduziert werden. Dazu zählt der vermehrte Einsatz von Wasserinjektionsgeräten, durch die die Feinsedimente in Schwebelage gehalten werden, damit sie mit den Tideströmungen weiter transportiert werden. Des Weiteren wird der durch Schleusen abgetrennte Überseehafen über einen Kanal mit schwebstoffarmem Wasser versorgt, wodurch der Gesamtschwebstoffgehalt im Hafen reduziert wird und die Sedimentationsmenge um 50 % verringert wurde (Bremen Ports, 2009 [7] und BMVBS, 2004 [17]).

2.4.3 Sedimentmanagement am Rhein

Der Rhein ist die meistbefahrene Wasserstraße Deutschlands. Aufgrund seiner Länge sind mehrere WSÄ mit seiner Unterhaltung betraut. Das Sedimentmanagement ist von regionalen Defiziten und Bereichen verstärkter Akkumulation der Sedimente geprägt. Anthropogene Maßnahmen sind zur Sicherung der Schifffahrt als auch zum Ausgleich des Geschiebehauhalts erforderlich. Grundsätzlich sind die Abflussverhältnisse im Rhein besonders günstig, da er im Sommer aus Schmelzwasser der Alpen und im Winter aus den Einzugsgebieten der Nebenflüsse gespeist wird (Stenglein, 2002 [98]).

Geschiebezugaben sind entlang der gesamten Strecke des freifließenden Rheins notwendig, um das Geschiebegleichgewicht wieder herzustellen (BMVBS, 2004 [17]). Durch die starke Staustufenregelung am Oberrhein treten hier insbesondere im Bereich der untersten Staustufe Iffezheim Sedimentdefizitbereiche auf, die durch regelmäßige Zugaben ausgeglichen werden. Jährlich werden im Bereich Iffezheim 200000 m³ an Sedimenten verbracht. Im Bereich der Moselmündung am Mittelrhein treten verstärkte Erosionen auf. In der Folge senkt sich auch der Wasserspiegel, so dass die Schifffahrt bei der Zufahrt zur Mosel beeinträchtigt werden kann. Zur Stützung des Wasserspiegels werden hier ebenfalls regelmäßige Geschiebezugaben unternommen. Am

¹URL: <http://www.wsa-bremerhaven.de>

²URL: <http://www.bremenports.de>

Niederrhein kam es insbesondere durch den Bergbau zu tiefen Einsenkungen und der Kolkbildung im Nachlauf, die die Fahrwasserverhältnisse beeinträchtigten und daher verfüllt wurden (allesamt Stenglein, 2002 [98]).

In den flacheren Bereichen des Oberrheins, insbesondere im Rheingau und bei Karlsruhe begegnet man den Anlandungstendenzen durch Nassbaggermaßnahmen und strombauliche Unterhaltung. Das gebaggerte Material kann im Zuge der Verbesserung der Wasserqualität im Rhein vollständig im Gewässer umgelagert werden. Im Rheingau treten vermehrt Unterwasserdünen auf, die die Schifffahrt beeinträchtigen. Zur Vermeidung der Dünenbildung wurde ein Sedimentfang eingerichtet, der das feine Material zurückhält. In Karlsruhe wurden zur Verbesserung der Situation bestehende Buhnen erhöht und verlängert (beide Stenglein, 2002 [98]).

2.4.4 Unterhaltungsbaggerungen an der Donau

Das WSA Regensburg ist für die Unterhaltung von 213 Donaukilometern auf deutschem Staatsgebiet zuständig. Der deutsche Teil der Donau ist nur gering belastet. Die Gründe hierfür liegen in seiner Speisung aus alpinen Flüssen, die gut mit Sauerstoff versorgt werden. Zudem gibt es im Einzugsgebiet nur geringe industrielle Verschmutzungen (BMVBS, 2004 [17]). Jährlich sind Unterhaltungsbaggerungen um die 80000 bis 100000 m³ notwendig.

Aufgrund der guten Sedimentqualität kann das Baggergut direkt zum Erhalt des Geschiebegleichgewichts verwendet werden. Dazu wird es beispielsweise in den oberstromigen Kolken umgelagert. Diese Maßnahme erscheint zunächst widersinnig, da auf diese Weise bereits verbrachtes Baggergut Erosionstendenzen ausgesetzt ist und wieder remobilisiert werden kann, um sich entlang von stromab gelegenen bereits gebaggerten Anlandungsstrecken wieder abzulagern. Allerdings wird durch eine solche Strategie ein Beitrag zur Sicherung erosionsgefährdeter Uferabschnitte geleistet und der Gefahr eines Sedimentdefizits vorbeugt. Dieses Beispiel zeigt, dass eine umfassende Kosten-Nutzen-Analyse zur Wahl der geeigneten Strategie ratsam ist.

2.5 Systematik für Sedimentmanagement-Systeme

Insgesamt ist eine Vielzahl unterschiedlicher anthropogener Maßnahmen im Rahmen des Sedimentmanagements möglich, die stark von den regionalen Gegebenheiten und Problemen abhängen. Eine allgemeine, anschauliche Systematik für Sedimentmanagementkonzepte zur Verringerung der Verschlickung von Häfen wurde von der PIANC Working Group 43 veröffentlicht (PIANC, 2008 [89]). Diese lässt sich auf die Bereiche der Schifffahrtsstraßen übertragen, auch wenn hier im einzelnen andere Methoden zur Anwendung kommen.

Über allem steht der Leitsatz „Keep Sediment In the System“ (KSIS), um Defizite im Sedimenthaushalt zu vermeiden und nachhaltige Maßnahmen zu fördern. Darunter lassen sich die verschiedenen Lösungsansätze in drei Gruppen einteilen:

- Keep sediment moving (KSM)
- Keep sediment out (KSO)
- Keep sediment navigable (KSN).

Diese Systematik wurde später um

- Keep sediment in place (KSP)
- Dredge and place sediment (DSP)
- Dredge and remove sediment (DRS)

erweitert (McAnally, 2011 [78]). DRS erfüllt jedoch nicht mehr das Kriterium KSIS. Es handelt sich dabei um Nassbaggerarbeiten, bei denen das Baggergut nicht in dem Gewässer umgelagert wird, sondern aus dem System entfernt wird. DRS ist eine Maßnahme, die vor allem bei kontaminierten oder für eine Umlagerung unbrauchbaren Sedimenten angewendet wird. Daher ist sie gesondert zu betrachten und wird in der Folge vernachlässigt.

Unter DSP werden Nassbaggermaßnahmen zusammengefasst, bei denen Baggergut entnommen und an anderer Stelle im Gewässer abgelagert wird. Des Weiteren lassen sich Arbeiten mit Wasserinjektionsgeräten oder Schlickeggen in diese Kategorie einordnen, durch die Untiefen entfernt und die davon betroffenen Sedimente an andere Stellen bewegt werden.

Maßnahmen zur Erosionsvermeidung von Sedimenten werden in KSP eingeordnet. Dadurch soll der Sedimenttransport an seinen Ursprüngen beeinflusst werden und der verstärkte Abtrag von Sedimenten in erosionsgefährdeten Bereichen vermieden oder die Remobilisierung von verbrachtem Baggergut verhindert werden.

Die oben beschriebenen Beispiele aus der Praxis lassen sich den übrigen Sedimentmanagementsystemen zuordnen. KSM umfasst aktive und passive Methoden, durch die das Ablagern von Sedimenten in für die Navigation kritischen Bereichen verhindert werden soll, ohne dass den Sedimenten der Eintritt in die betreffenden Bereiche verwehrt wird. Ein Beispiel für eine Verbindung von aktiven und passiven KSM-Methoden im Küstenbereich sind Auto Flushing-Systeme. Die wichtigsten passiven KSM-Maßnahmen im Binnen- und Küstenbereich sind so genannte „Flow Training Structures“ wie Bühnen und Leitwerke.

Im Gegensatz zu KSM wird durch die Strategie KSO verhindert, dass Sedimente überhaupt in die unerwünschten Bereiche gelangen und dort akkumulieren. Typische passive KSO-Methoden sind Maßnahmen zur Beeinflussung der Strömungsverhältnisse an Hafeneinfahrten. Ein Beispiel hierfür sind Strömungsumlenkwände. Auch Sedimentfallen können in diese Kategorie eingeordnet werden, da sie das Sediment vor dem Eintritt in kritische Bereiche aus dem System nehmen. Zu den aktiven KSO-Methoden gehören bewegliche Tore und Düsen- oder Belüftungssysteme zum Aufbau eines Turbulenzschleiers an Hafeneinfahrten.

KSN bezieht sich auf den Umgang mit Flüssigschlick. Dieser kann durch verschiedene Maßnahmen aktiv behandelt werden, wodurch dessen Schiffbarkeit gewährleistet und eine Konsolidierung verhindert werden soll. Zu den passiven KSN-Methoden gehört die möglichst genaue Bestimmung der nautischen Tiefe. Diese hängt sehr stark von den Schlickeigenschaften ab und kann messtechnisch ermittelt werden. Die Systematik der einzelnen KSIS-Maßnahmen ist in Abbildung 2.9 abschließend zusammengefasst.

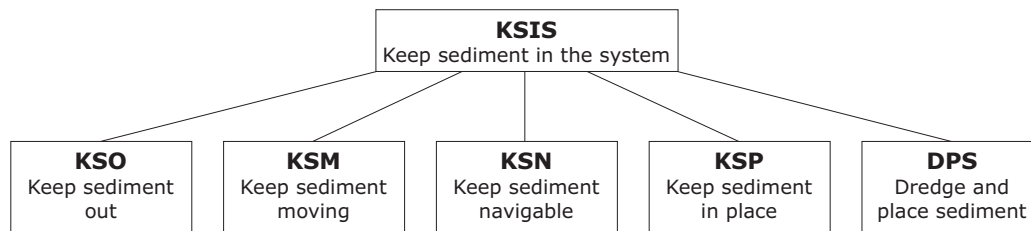


Abbildung 2.9: KSIS-Sedimentmanagementansätze

2.6 Zusammenfassung

Es zeigt sich, dass verstärkt Sedimentmanagementkonzepte aus einer Kombination vieler Maßnahmen Anwendung finden, um die Fahrwassertiefen der schiffbaren Bereiche von Flüssen und Häfen aufrecht zu erhalten. Die verschiedenen aufgezeigten Möglichkeiten zur Gewässerunterhaltung verdeutlichen den Bedarf nach innovativen Konzepten. Diese sind ohne geeignete Nassbaggerstrategien nicht zu erreichen, die ihrerseits wiederum ständig optimiert werden müssen, da sie von aktuellen Änderungen entlang der sehr dynamischen Fließgewässer betroffen sein können.

Numerische Modelle können das Systemverständnis hinsichtlich der zahlreichen Einzelprozesse unterstützen und ermöglichen die Evaluierung geeigneter Ansätze. Sie finden daher Anwendung zur Beurteilung von Sedimentmanagementmaßnahmen. Im Mittelpunkt steht dabei neben der Bewertung strombaulicher Ideen die Suche nach geeigneten Ablagerungsbereichen, um gebaggertes Material möglichst aus den sensiblen Fahrrinnenbereichen zu entfernen, es jedoch nicht dem Sedimenthaushalt vorzuenthalten und im Rahmen der Maßnahme geringe Kosten zu verursachen.

Sedimentmanagement-Systeme sind ein Instrument, die gebotenen Möglichkeiten einzuordnen und die am besten geeignete Lösung für ein Unterhaltungsproblem zu finden.

Kapitel 3

Nassbaggertypen und Baggergutverbringung

Für die Durchführung von Nassbaggerarbeiten steht eine Vielzahl an Geräten zur Verfügung, die sich hinsichtlich ihrer Funktionsweise und technischen Einsatzmöglichkeiten voneinander unterscheiden. Auch hier sind es Optimierungsprozesse, die die Entwicklung der Verfahren beeinflussen. Sie haben sich aufgrund der Erfordernisse in einem der Einzelprozesse des Nassbaggerns kostengünstiger und effizienter zu arbeiten oder aus neuen technischen Möglichkeiten ausgebildet. Die Geräte werden ständig hinsichtlich ihrer Größe und technischen Ausrüstung weiterentwickelt. In diesem Abschnitt sollen die verbreitetsten Verfahren kurz vorgestellt werden.

3.1 Einzelprozesse des Nassbaggerns

Nassbaggerarbeiten lassen sich in die Verfahrensschritte Lösen, Laden, Transportieren und Ablagern aufteilen (Kühn, 1997 [67]). Die einzelnen Verfahrensschritte werden in Abhängigkeit verschiedener Bedingungen, wie den örtlichen Gegebenheiten, des zur Verfügung stehenden finanziellen Rahmens, der erwarteten Mengen und des vorhandenen Geräts mit Hilfe unterschiedlichster Techniken durchgeführt.

Das Lösen des Baggerguts wird durch die Beschaffenheit des Untergrunds beeinflusst. Lösen bedeutet das Entfernen von Sohlmaterial. Das kann durch Schaufeln, spezielle Saugköpfe oder das Einbringen von Wasser oder Luft erfolgen. Maßgebend für die Auswahl eines Geräts ist die Gewinnungsfestigkeit. Diese ist bei verdichteter oder konsolidierter Sohle größer als bei einem lockeren sandigen Untergrund. Daraus lässt sich ableiten, dass das Lösen hauptsächlich von der Korngröße und der Lagerungsdichte abhängig ist.

Das Fördern des Baggerguts an die Wasserspiegeloberfläche, die Zwischenlagerung auf Pontons und die Befüllung der transportfähigen Baggerschiffe oder Schuten soll hier mit Laden bezeichnet werden. Das geschieht in der Regel durch Schaufeln oder Saugrohre. Dieser Teilprozess hängt von der Zusammensetzung des Baggerguts und

der Fördertiefe ab. Kohäsive Partikel können verkleben und die Förderung bei einigen Verfahren erschweren. Bei groben Sedimenten ist dies nicht der Fall. Allerdings eignen sie sich aufgrund ihres Gewichts nicht für die Förderung mittels Saugern aus tiefen Bereichen, da hier ein hoher Unterdruck am Saugstutzen erzeugt werden muss. Bei dem zu fördernden Material handelt es sich um ein Gemisch aus Feststoffen und Wasser. Eine Grundregel besagt, dass die hydraulische Förderung bei 50 % Feststoffgehalt ideal ist. Unwirtschaftlich wird der Betrieb bei Feststoffgehalten unter 10 % [67]. Zur Förderung über längere Strecken müssen Pumpen zwischengeschaltet werden.

Das geförderte Baggergut muss abtransportiert werden. Dabei kommen Spülleitungen, das Baggerschiff selbst oder umlagerungsfähige Schuten sowie Straßen- und Schienenverkehrsmittel zum Einsatz [67]. Die Transportmöglichkeiten werden von dem Verwendungszweck des Baggerguts, der Lage des Bestimmungsorts und der Baggergutbeschaffenheit beeinflusst. Bei einer Verwendung und Zwischenlagerung am nahegelegenen Ufer und der Umlagerung in geringer Entfernung können Spülleitungen genutzt werden. Bei größeren Entfernungen sind Schiffe die sinnvollere Transportvariante. Für eine Unterbringung an Land ist unter Umständen der Transport in LKWs oder Zügen erforderlich. Hinsichtlich des Einflusses der Beschaffenheit des Baggerguts gelten die selben Maßgaben wie beim Fördern der Sedimente.

Neben den Möglichkeiten, das Baggergut zu verwenden und zu verwerten, ist der Hauptentsorgungspfad die Ablagerung an Land oder im Gewässer. Die möglichen und notwendigen Verfahrensschritte hängen außer von der Baggergutqualität auch von wirtschaftlichen und ökologischen Faktoren ab. Im Fall der Umlagerung im Gewässer können Klappschuten und Rohrleitungen, die das Material direkt an der Sohle oder an der Wasseroberfläche einbringen, verwendet werden. Hier ist die Korngröße ein wesentlicher Faktor, der die Wahl des Geräts beeinflusst.

3.2 Nassbaggertypen

Im Laufe der Zeit haben sich verschiedene Methoden auf dem Arbeitsfeld der Nassbaggerei entwickelt. Grundsätzlich kann man zwischen Baggerverfahren unterscheiden, bei denen das Material an die Wasserspiegeloberfläche gefördert wird und Verfahren, durch die Sedimente von der Sohle in die Wassersäule suspendiert werden. Bei ersteren wird das geförderte Baggergut anschließend durch technisches Gerät an Land aufbereitet oder direkt auf einer geeigneten Ablagerungsstelle verbracht. Verfahren zur Resuspendierung von Sedimenten werden unter „Agitation Dredging“ zusammengefasst. Das Sohlmaterial wird dabei durch Wasserdüsen, Pumpen oder Kratzer gelöst, um dann durch die natürliche Strömung abtransportiert zu werden. Das „Agitation Dredging“ stellt das einfachste Baggerverfahren dar, bedarf allerdings detaillierter Untersuchungen, wie sich die Partikel im Strömungsfeld verhalten, um bewerten zu können, ob die Zielvorgaben erreicht werden.

Die häufiger eingesetzten Förderverfahren sind hinsichtlich des Transportes der Materialien unabhängiger, da er durch Pipelines oder Fahrzeuge realisiert wird. Es gibt

verschiedene Baggergeräte, deren Charakteristika im wesentlichen durch die Beschaffenheit der zu entfernenden Sedimente geprägt sind. Nachfolgend werden die bekanntesten Baggertypen vorgestellt.

3.2.1 Pontonbagger

Stationär auf einem Ponton arbeitende Seil- oder Hydraulikbagger werden unter dem Begriff Pontonbagger zusammengefasst. Das geförderte Sohlmaterial wird an Land oder in Schuten abgeladen. Die Einteilung erfolgt nach der Ladekapazität der Schaufel, die zwischen 1 und 20 m³ variiert (Bray et. al (1997) [6]). Die Größe der eingesetzten Schaufel richtet sich wiederum nach der Beschaffenheit des Sohlmaterials. So werden bei festen Materialien eher kleine Schaufeln verwendet.

Pontonbagger können auf engem Raum arbeiten, besitzen gegenüber hydraulischen Förderverfahren den Vorteil einer geringeren Verdünnung des Baggerguts und reagieren relativ unempfindlich auf größere Störkörper wie Steine oder Geröll. Die Arbeitstiefe von hydraulisch betriebenen Pontonbaggern (Abb. 3.1) liegt zwischen 4 und 24 m, während seilbetriebene Bagger (Abb. 3.2) auch in größeren Tiefen eingesetzt werden können. Allerdings ist die Arbeitsgenauigkeit des Hydraulikbaggers größer. Darüber hinaus wird die Technik dieses Baggers auch in großen Stückzahlen an Land eingesetzt, so dass seine Beschaffungskosten geringer sind und die eingesetzten Systemkomponenten einer detaillierten Qualitätsüberprüfung unterliegen. Seilbagger sind in der Regel teurer, da sie Sonderanfertigungen sind (alle [6]).

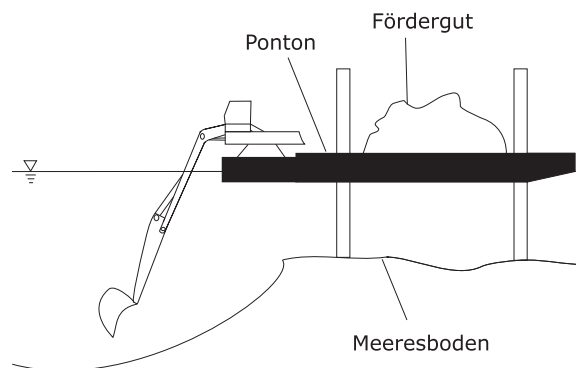


Abbildung 3.1: Darstellung eines hydraulischen Pontongrabbaggers

Nachteile der Pontonbagger sind die geringeren Förderraten als bei kontinuierlichen Verfahren, die kleine Reichweite sowie die damit verbundene Abhängigkeit von Transportsystemen, da dieser Baggertyp über keinen Stauraum verfügt.

Für den Gewinn granularer Materialien mächtiger Schichten und den Einsatz in großen Tiefen werden auch Saugpontonbagger verwendet, bei denen das Fördergut zusammen mit Wasser durch Pumpen angesaugt wird. Die Fluidisierung der Sedimente wird durch den Einsatz von Hochdruckwasserdüsen unterstützt [6].

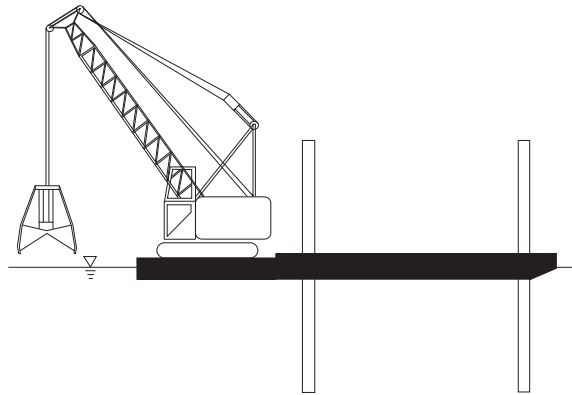


Abbildung 3.2: Darstellung eines Pontonseilbaggers

3.2.2 Hopperbagger

Hopperbagger sind selbstfahrende Laderaumbagger, in denen das durch Schaufel- oder Saugverfahren geförderte Material gelagert und abtransportiert wird (Abb. 3.3). Diese Bagger zeichnen sich aufgrund ihrer Mobilität durch eine hohe Unabhängigkeit aus und können daher auf einem weiträumigen Einsatzgebiet arbeiten.

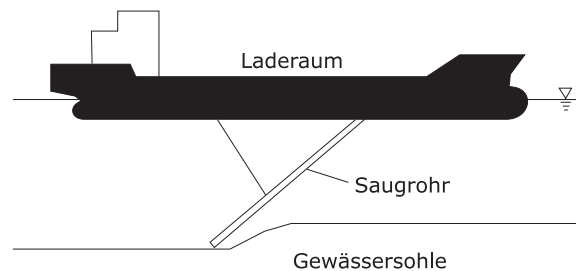


Abbildung 3.3: Darstellung eines Laderaumsaugbaggers

Bei dem Laderaumsaugbagger wird das zu fördernde Material während der Fahrt durch ein Saugrohr aufgenommen und in den Laderaum überführt (Meyer, 2004 [79]) (Abb. 3.4). Während des Pumpvorgangs wird Sohlmaterial durch das angezogene Wasser erodiert und als Sediment-Wasser-Mixtur gefördert. Nach Ende der Operation wird das Baggergut zu den Klappstellen transportiert, um dort abgelagert zu werden oder durch Spülverfahren im Rahmen des Küstenschutzes oder der Landgewinnung verbracht. Die Förderhöhe ist abhängig von der Positionierung der Pumpe. Befindet sich diese im Saugrohr, kann die größte Operationstiefe erreicht werden. Sie variiert normalerweise zwischen 4 und 45 m [6].

Saugbagger eignen sich besonders für die Entfernung loser Materialien. Um die suspendierte Menge dicht gelagerter Sohlmaterialien zu erhöhen, befinden sich am Ansaugstutzen so genannte Dragheads, Aufsätze, die durch ihre Konstruktion und Wirkungsweise zu einer stärkeren Erosion führen. Hier kommen Kratzer oder auch Wasserdüsen zum Einsatz. Die Wahl des Dragheads richtet sich nach der Beschaffenheit

des Sediments. Laderaumsaugbagger können hohe Förderraten erzielen, da der Baggervorgang kontinuierlich ist. Zudem ist die Mobilisierung dieses Baggertyps relativ preiswert. Allerdings ist das Baggern harter Materialien nicht möglich und die Sedimente werden während der Förderung stark verdünnt. Saugverfahren sind außerdem sehr anfällig hinsichtlich größerer Steine, so dass sie auf die Beschaffenheit der Sedimente äußerst sensitiv reagieren. Die Ladekapazität der fahrenden Saugbagger liegt normalerweise zwischen 750 und 10.000 m³ (alle [6]). Der aktuell größte Laderaumsaugbagger ist der *HAM 318* mit einer Kapazität von 37.000 m³ (in Dredging and Port Construction, 2008 [100]).

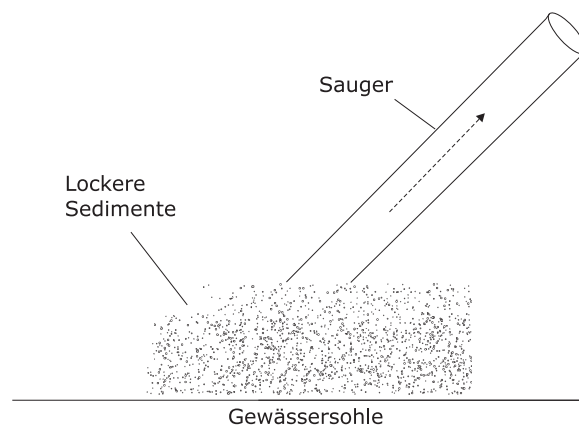


Abbildung 3.4: Arbeitsprinzip eines Saugbaggers

Im Gegensatz zu dem Laderaumsaugbagger kann der Schaufelladeraumbagger nur während der Ankerung arbeiten. Die Förderung der Sedimente erfolgt durch mehrere Kräne oder hydraulisch arbeitende Bagger (Abb. 3.1). Ihr Laderaum besitzt aufgrund des größeren Platzbedarfs der Förderanlagen normalerweise eine Kapazität $< 1.500 \text{ m}^3$ [6]. Dieser Baggertyp verfügt über die gleichen Vorteile wie der Pontonbagger, erweitert um seine Beweglichkeit. Die Operationskosten sind mit denen des Laderaumsaugbaggers vergleichbar. Im Gegensatz zu diesem kann jedoch eine größere Bandbreite verschiedener Sedimente ohne zusätzliches Gerät gefördert werden. Der Baggervorgang erfolgt jedoch nicht kontinuierlich, so dass die Förderraten geringer ausfallen. Die mögliche Baggertiefe richtet sich nach der verwendeten Technik und kann im Fall von Seilbaggern auch $> 45 \text{ m}$ betragen [6].

3.2.3 Schneidkopfsaugbagger

In Erweiterung der Saugbagger verfügen Schneidkopfsaugbagger über aktiv arbeitende Scheidwerkzeuge am Einlauf, durch die die Sedimente gelöst werden (Abb. 3.5). Dadurch können auch harte und dicht gelagerte Materialien mit Hilfe von hydraulischen Verfahren gefördert werden. Dieser Baggertyp arbeitet in der Regel auf einem

Ponton und verfügt daher über keinen Laderaum, weshalb der Abtransport durch Schuten oder Pipelines erfolgt. Aufgrund des Einsatzes der Schneidwerkzeuge können Schneidkopfsaugbagger eine Vielfalt an Materialien fördern. Zudem besitzen sie hohe Förderraten von bis zu $9500 \text{ m}^3/\text{h}$ (Kühn, 1997 [67]) und eine hohe Arbeitsgenauigkeit, so dass beispielsweise beim Kanalbau vordefinierte Profile erzeugt werden können [6].

Der Schneidkopf hat in Abhängigkeit von dem Baggergut unterschiedliche Formen. Der Antrieb des Schneidwerkzeugs kann im Fall großer Baggervorhaben elektrisch und bei kleineren Projekten hydraulisch erfolgen. Hohe Mobilisierungskosten, eine limitierte Arbeitstiefe von 35 m und die der Pumpverfahren eigene relativ hohe Verdünnung der Sedimente stellen Nachteile dieses Verfahrens dar. Schneidkopfsaugbagger werden nach dem Durchmesser des Förderrohrs oder der Leistung der Cutterheads eingeteilt (alle [6]).

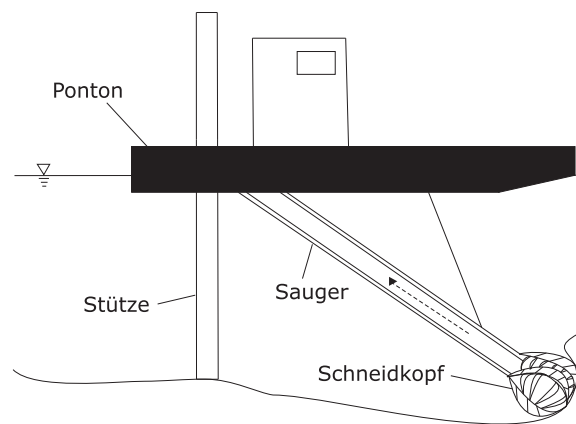


Abbildung 3.5: Darstellung eines Schneidkopfsaugbaggers

3.2.4 Eimerkettenbagger

Eimerkettenbagger bestehen aus einer rotierenden Kette, an der mehrere Eimer befestigt sind, die Material von der Sohle abtragen und dieses nach dem Transport an die Oberfläche auf Schuten entladen (Abb. 3.6). Die Arbeit erfolgt von einem Ponton aus, dessen Position durch Anker und Winden festgelegt wird. Die zur Erosion des Bodens induzierte Brechkraft ist abhängig von der Größe und Masse des Baggers, der Eimerform, -konstruktion und -größe sowie der Baggerleistung. So werden zur Förderung sehr harter Materialien kleine, schwere Eimer bei einer relativ langsamen Geschwindigkeit eingesetzt. Typische Eimergrößen besitzen ein Volumen zwischen 150 und 1.200 l . Allerdings werden selten mehr als zwei unterschiedliche Eimertypen während eines Baggervorgangs eingesetzt. Die Fördergeschwindigkeit reicht bis 30 Eimer/min (alle [6]).

Eimerkettenbagger vereinen verschiedene Vorteile der Saug- und Schaufelbagger in

sich, wie eine kontinuierliche Förderung, die Möglichkeit, Materialien unterschiedlicher Charakteristika zu fördern und hohe Feststoffkonzentrationen des Baggergutes. Nachteilig wirken sich das erforderliche Ankernetz, das den Baggervorgang behindern kann und der Abtransport durch Schuten aus. Probleme können zudem beim Entladen feinkörniger Materialien entstehen, die aufgrund der kohäsiven Eigenschaften in den Eimern verbleiben. Die Beschaffungs- und Einsatzkosten dieses Baggers sind hoch, da es sich um eine schwere Konstruktion handelt und der Bedarf an Arbeitskräften groß ist. Der Eimerkettenbagger ist aufgrund der Gefahr des Überbaggerns nicht für den Einsatz in flachen Gewässern oder für das Entfernen dünner Sedimentschichten geeignet. Die Wassertiefe, in der dieser Bagger operieren kann, liegt zwischen 5 und 35 m (alle [6]).

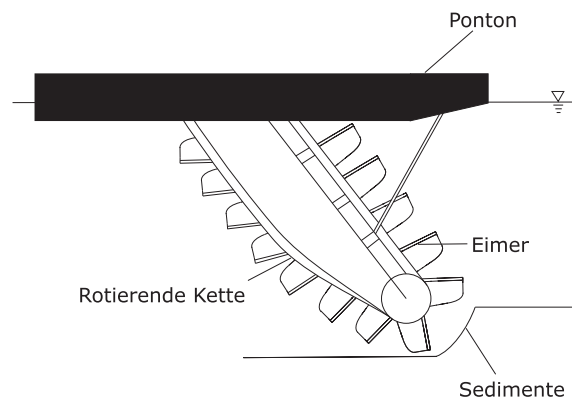


Abbildung 3.6: Arbeitsprinzip eines Eimerkettenbaggers

3.2.5 Wasserinjektionsgerät

Mit Hilfe des Wasserinjektionsgeräts wird die Dichte des Sohlmaterials durch Wasserzugabe verringert, bis es verflüssigt ist und infolge eines Gefälles mobilisiert werden kann. Im Gegensatz zum „Agitation Dredging“ ist hierbei nicht die Absicht, Partikel von der Sohle in die Wassersäule einzutragen, damit diese von der natürlichen Strömung fort transportiert werden. Allerdings tritt diese Form der Sedimentbewegung aufgrund des Einsatzes mehrerer Wasserdüsen zur Verflüssigung des Bodens parallel auf. Da es sich bei dem Wasserinjektionsbagger um ein frei fahrendes Schiff handelt, kann er die Sedimente während des Düsvorgangs auch vor sich her treiben, so dass dieser Baggertyp auch für ebene und gewellte Sohlen geeignet ist und die Sedimentbewegung aktiv beeinflusst werden kann (Abb. 3.7). Der Einsatz dieses Baggers eignet sich im wesentlichen für weiche kohäsive Böden oder locker gelagerte grobkörnige Materialien. Die operative Wassertiefe liegt zwischen 3 und 15 m. Durch die Injektion von Wasser wird die Konsolidierung des Sohlmaterials behindert und damit die natürliche Sedimentbewegung unterstützt (alle [6]).

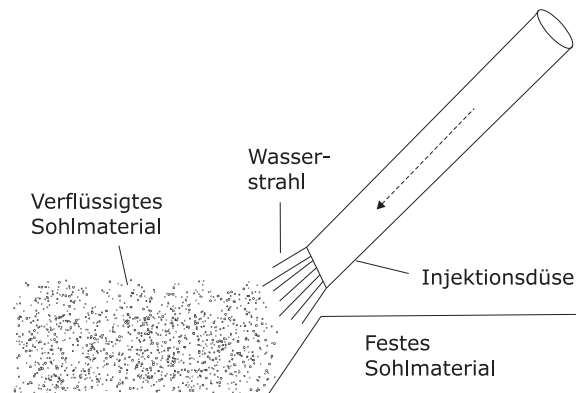


Abbildung 3.7: Arbeitsprinzip eines Wasserinjektionsgeräts

3.2.6 Dustpanbagger

Dustpanbagger sind Saugbagger mit einer speziellen Saugkopfkonstruktion, durch die Sedimente mittels Wasserdüsen gelöst und fluidisiert werden, bevor sie durch Pumpen gefördert werden (Abb. 3.8). Dieser Baggertyp basiert damit auf einem ähnlichen Arbeitsprinzip wie Cutterbagger [6].

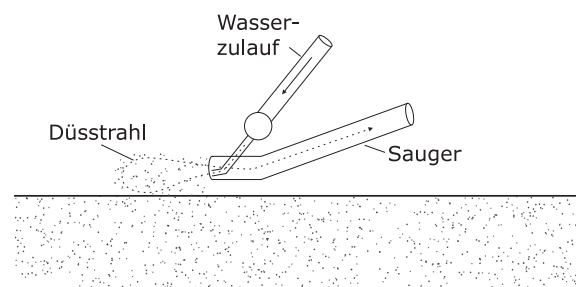


Abbildung 3.8: Arbeitsprinzip eines Dustpanbaggers, nach Bray et. al (1997) [6]

Die auf einem durch Drähte positionierten Ponton stationierten Dustpanbagger eignen sich besonders für die Entfernung dünner großflächiger Sedimentschichten. Er ist jedoch nur für die Förderung frischer unkonsolidierter Sedimente geeignet, da er über kein Schneidwerkzeug verfügt. Dient die Operation nicht dem Gewinn granularer Materialien, wird das Baggeregut meist in naheliegenden tieferen Bereichen oder in Abschnitten mit hohen Fließgeschwindigkeiten, die für einen Abtransport der Sedimente sorgen, abgelagert. Die maximale Entfernung, in der Material ohne Schuten oder Pipelines verbracht werden kann, liegt bei 500 m. Die Arbeitstiefe für den Dustpanbagger befindet sich zwischen 1,5 und 20 m (alle [6]).

3.2.7 Bed Leveller

Der Bed Leveller bewegt abgelagerte Sedimente über kurze Entfernungen aus flacheren Depositionsbereichen in tieferes Wasser. Dabei werden Kratzer oder Schaufeln hinter einem fahrenden Schiff hergezogen, wodurch Material mitgeführt wird (Abb. 3.9). Dieser Bagger kann bei weichen und locker bis mitteldicht gelagerten Böden eingesetzt werden. Wie bei dem Wasserinjektionsgerät verbleiben die bewegten Partikel in der Wassersäule und werden nicht an die Oberfläche gefördert. Die Arbeitstiefe liegt dabei zwischen 3 und 30 m. Bed leveller werden auch zur Unterstützung anderer Baggerverfahren oder, wie der Name schon ausdrückt, zur Einebnung der Gewässersohle verwendet. Zähne und Wasserdüsen an der Schaufel unterstützen das Lösen dicht gelagerter Materialien (alle [6]).

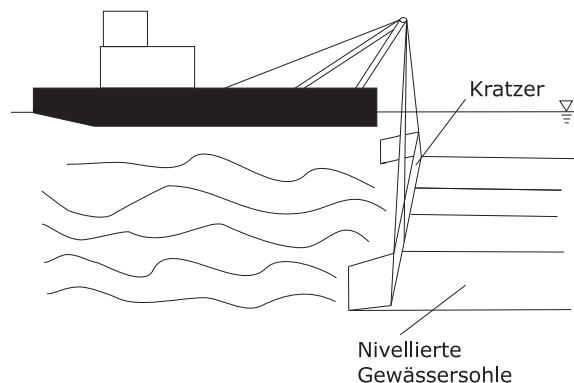


Abbildung 3.9: Arbeitsprinzip eines Bed Levellers

3.2.8 Pneumatische Bagger

Neben den oben dargestellten, häufig eingesetzten Baggersystemen gibt es auch sehr spezielle Alternativen, die nur in besonderen Fällen eingesetzt werden. Pneumatische Bagger bestehen aus mindestens einer Unterwasserkammer, die mit einem Saugrohr, das in die Sedimentschicht einbindet, verbunden ist. Entweicht die Luft aus der Kammer, füllt sie sich infolge des hydrostatischen Drucks mit dem Sohlmaterial. Wenn der Behälter gefüllt ist, wird die Verbindung zur Sedimentschicht geschlossen und wieder Luft in die Kammer gepumpt. Dadurch steigt der Druck in der Kammer und die Sedimentmischung steigt durch ein Abflussrohr an die Wasseroberfläche (Abb. 3.10). Dieses Verfahren kann nur bei weichen kohäsiven Böden angewendet werden, da eine gewisse Fließfähigkeit vorhanden sein muss. Es wird zum Beispiel für die Entfernung kontaminierter Böden und für Baggereinsätze in großen Tiefen eingesetzt (alle [6]).

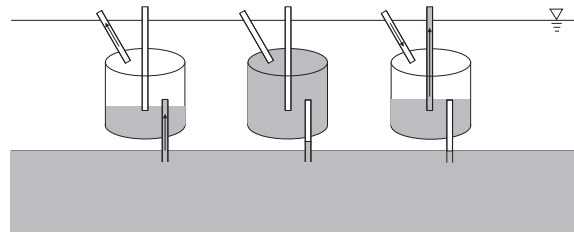


Abbildung 3.10: Funktionsweise eines pneumatischen Baggerverfahrens, nach Bray et. al (1997) [6]

3.2.9 Air-Lift-Bagger

Bei Air-Lift-Baggern wird Luft mittels eines Kompressors in die sohnnahen Bereiche der Wassersäule injiziert. Durch die geringe Dichte des Luft-Wasser-Gemisches entsteht in einem eingestellten Rohr eine Fließbewegung von der Sohle zur Oberfläche. Dabei wird lockeres und feines Material aufgewirbelt und mit der Strömung mitgeführt (Abb. 3.11) [6].

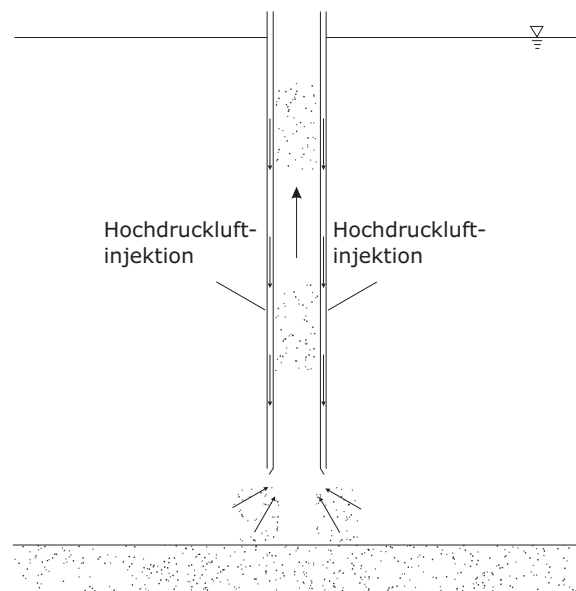


Abbildung 3.11: Funktionsweise des Air-Lift-Systems, nach Bray et. al (1997) [6]

Dieses Baggerverfahren ist sehr einfach und hinsichtlich der Arbeitstiefe nicht beschränkt. Allerdings ist die der Fließbewegung zugrunde liegende Druckhöhe sehr klein, wodurch die Fördergeschwindigkeit ebenfalls klein ist und es zudem leicht zum Verstopfen des Förderrohres kommen kann. Des Weiteren ist das Baggergut sehr stark verdünnt. Für die Förderung härterer oder dichter gelagerter Sedimente ist der Einsatz eines Cutterheads notwendig. Dieses Baggerverfahren wird vor allem als Reinigungsverfahren für Unterwasserbauwerke und Gründungen eingesetzt (alle [6]).

3.3 Solltiefen beim Baggern

Eine wichtige Festlegung für die Planung und Durchführung von Baggermaßnahmen ist die Vorgabe von Solltiefen. Diese ergeben sich aus den Anforderungen der Schifffahrt und beziehen sich auf die Fahrrinnenbereiche eines Gewässers. Maßgebende Größe ist der Tiefgang eines Transportschiffs bei voller Abladetiefe. Darüber hinaus ist die Kielfreiheit („Underkeel Clearance“) zu berücksichtigen, die zusätzliche Vertikalbewegungen des Schiffes und den Absunk während der Fahrt einkalkuliert. Für diesen Wert sind keine einheitlichen Vorgaben definiert. Er hängt im Wesentlichen von den örtlichen Gegebenheiten ab, so dass schifffahrtstechnische Empfehlungen (z.B. PIANC, 1985 [88]) und regional entwickelte Kriterien angewendet werden.

Die Wasserstände in einem frei fließenden Oberflächengewässer unterliegen allein aufgrund der hydrologischen Verhältnisse und der Tidedynamik Schwankungen. An Binnengewässern ist das im Wesentlichen auf variierende Oberwasserzuflüsse zurückzuführen, während im Küstenbereich zusätzlich der Gezeiteneinfluss zu berücksichtigen ist. Daher werden Baumaßnahmen an Oberflächengewässern und in Häfen immer auf ein festes Referenzniveau bezogen, anstatt auf die jeweils aktuellen Wasserstände. Das gilt auch für Bagger- und Verbringmaßnahmen, bei denen überprüft wird, ob eine bestimmte Tiefe, bezogen auf das Referenzniveau, erreicht oder unterschritten wird.

An der Küste ist dieses Referenzniveau das Seekartennull (SKN) oder das Normalnull (NN) (Abb. 3.12). Normalnull markiert den Nullpunkt für die gesamte Landvermessung. An der deutschen Nordseeküste weicht dieser Wert nur geringfügig vom mittleren Wasserstand ab (Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie¹).

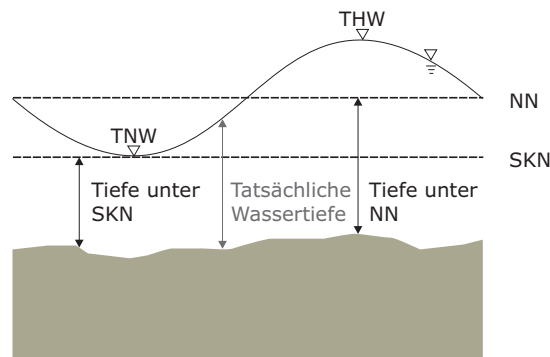


Abbildung 3.12: Normalnull und Seekartennull als Referenzniveaus im Küstenbereich

Das Seekartennull an Gezeitengewässern ist der niedrigste Wasserstand, der bei Ebbe möglich ist (Lowest Astronomical Tide). Da auf Seekarten die Tiefe, bezogen auf SKN, angezeigt wird, ist dadurch eine Mindesttiefe angegeben, wodurch die größtmögliche Sicherheit für die Schifffahrt gewährleistet ist.

Im Binnenbereich wird das Referenzniveau durch eine statistische Größe für die Wasserspiegellage festgelegt, die aus den Wasserständen der Vorjahre ermittelt wird

¹URL: <http://www.bsh.de>

(Abb. 3.13). An der Donau ist dies der „Regulierungsniedrigwasserstand“ (RNW). Dabei handelt es sich um einen Niedrigwasserstand der Donau, der an 89 % der eisfreien Tage im Jahr erreicht oder überschritten wird (Elektronischer Wasserstraßen-Informationsservice²). Am Rhein wird seit 1908 als Referenzwasserspiegellage der „Gleichwertige Wasserstand“ (GIW) verwendet (Wasser- und Schifffahrtsdirektion West³). Dieser ergibt sich aus einem gleichwertigen Abfluss, der in der Vergangenheit an durchschnittlich 20 Tagen im Jahr eisfrei unterschritten wurde. Der gleichwertige Wasserstand wird alle zehn Jahre anhand von Messdaten über diesen Zeitraum neu festgelegt, um auf die morphologische Entwicklung der Rheinsohle Rücksicht zu nehmen. Derzeit gilt der GIW aus dem Jahr 2002.

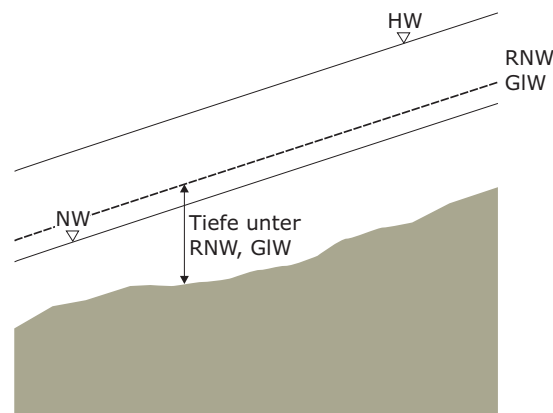


Abbildung 3.13: Referenzwasserspiegellagen im Binnenbereich

Bei Gewässern, in denen die Sedimentationsproblematik durch Schlick und Fluid Mud bestimmt wird, kann die Festlegung der Fahrwassertiefen mit dem Konzept der nautischen Tiefe erfolgen, das in den siebziger Jahren für die Häfen in Rotterdam entwickelt wurde (Herbich, 1992 [57]). Dabei gilt es, die Lage der nautischen Sohle zu bestimmen. Da Fluid Mud ein Gemisch aus Wasser und Feststoffen ist, ist seine Dichte abhängig von der Feststoffkonzentration. Normalerweise markieren die oberen Bereiche einer Fluid Mud-Schicht den Übergang zur Wasserphase und besitzen geringere Feststoffanteile als die tiefer liegenden. Zudem treten im Übergangsbereich vermehrt suspendierte Partikel auf. Die nautische Tiefe in einem Gewässer mit Flüssigschlick ist ausreichend, wenn beim Durchfahren eines Fluid-Feststoffgemisches keine Gefahr für die Schiffshülle ausgeht und die Navigierfähigkeit nicht negativ beeinflusst wird [57] (Abb. 3.14). Der Übergangsbereich ist demnach bei entsprechend geringer Feststoffkonzentration schiffbar, jedoch kam es in der Vergangenheit zu großen Baggeraufkommen, da diese Stellen durch zu grobe Messverfahren zur Gewässersohle deklariert wurden. Mittlerweile ist es durch verbesserte akustische Messungen möglich, die nautische Tiefe und damit die Lage der nicht schiffbaren Schlickschichten genauer zu ermitteln, wodurch die Baggermengen in schlickdomierten Gewässerabschnitten si-

²<http://www.elwis.de>

³<http://www.wsd-west.wsv.de>

gnifikant verringert werden konnten (Kirby & Parker, 1974 [64]). Ein Parameter, der als Kriterium verwendet werden kann, um zu beurteilen wann die nautische Sohle anfängt, ist die Dichte des Schlicks. Hier wird von der PIANC ein kritischer Wert von $\rho = 1.200 \text{ kg/m}^3$ zur Abgrenzung empfohlen. In [57] findet sich ein Wert für die spezifische Dichte von 1,2, was den Vorgaben der PIANC entspricht.

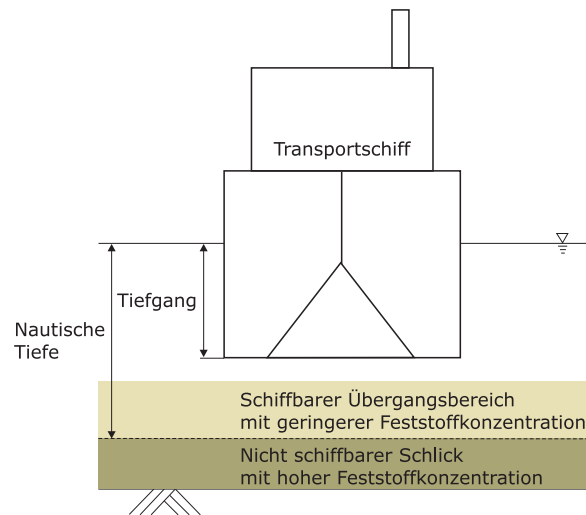


Abbildung 3.14: Konzept der nautischen Tiefe für Flüssigschllick

Darüber hinaus können auch rheologische Größen zur Beurteilung der Schiffbarkeit herangezogen werden (R. Wurpts & Torn, 2005 [104]). Hier eignet sich besonders die Fließgrenze τ_0 des Flüssigschllicks als Beurteilungskriterium. Sie gibt an, ab welcher Anfangsschubspannung ein Schlickgemisch in den fließenden Zustand übergeht. Untersuchungen zeigten, dass bei einer entsprechenden Fließgrenze auch dichtere Fluid Mud-Schichten problemlos schiffbar sind. Für den Emden Hafen wurde beispielsweise ein Wert von $\tau_0 = 100 \text{ Pa}$ festgelegt, was einer Dichte von $\rho = 1,3 \text{ kg/m}^3$ entspricht [104]. Die Verwendung dieses Parameters kann als überarbeitetes Konzept der nautischen Tiefe verstanden werden.

3.4 Umlagerung von Baggergut

Die physikalischen Prozesse beim Verbringen von Baggergut in Oberflächengewässern sind abhängig von dem gewählten Baggerverfahren, der Umlagerungsmethode, den physikalischen Eigenschaften der gebaggerten Sedimente und dem Strömungsgeschehen an der Ablagerungsstelle (Palermo, 1992 [86]). Umlagerungsstellen können akkumulativ oder dispersiv sein. Bei akkumulativen Verbringstellen verbleibt das Baggergut im Bereich der Eintragstelle, während an dispersiven Ablagerungsstellen der größte Teil der verbrachten Sedimente durch die Strömung abtransportiert wird. Auch für das Umlagern der geförderten Sedimente wurden verschiedene Verfahren

entwickelt. So kann das Baggergut durch Luken oder Auslässe im Boden der Transportschiffe und -schuten verbracht werden. Bei den Luken handelt es sich um Fall- oder Schiebetüren (Abb. 3.15). Kohäsives Baggergut oder Störkörper wie größeres Geröll können hier jedoch zu langen Entladezeiten führen. Um das Verbringen schwieriger Materialien zu beschleunigen, ist auch ein Aufklappen des Schiffsrumpfes über seine gesamte Länge möglich. Die zwei Rumpfhälften des Split-Schiffes werden von sehr starken Scharnieren an Deck des Schiffes gehalten und hydraulisch bewegt (Abb. 3.15). Dieses System wird vor allem bei kleinen und mittelgroßen Trailern eingesetzt.

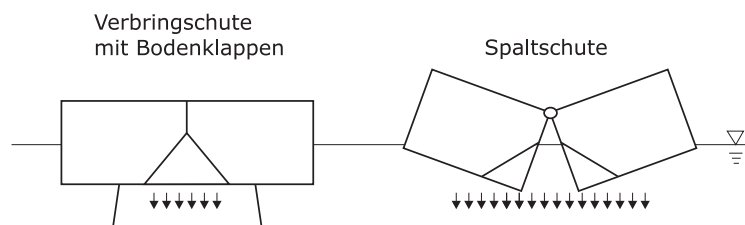


Abbildung 3.15: Klapp- und Spaltschuten zur Baggergutumlagerung

Das Verbringen über Bodenklappen von Schuten oder aus Split oder Spalt-Schiffen heraus ist die häufigste Variante der Baggergutumlagerung. Dabei wird das gesamte Baggergut innerhalb eines kurzen Zeitraums an der Wasseroberfläche eingetragen, wo es infolge des Eigengewichts absinkt. Der Absinkvorgang einer Ladung Baggergut unterscheidet sich vom Absinken von Einzelpartikeln infolge der Gruppenwirkung der Sedimente. Das umzulagernde Baggergut ist ein Gemisch aus Sedimenten und Wasser, das eine höhere Dichte als das umgebende Wasser besitzt, in dem es verbracht wird. Das Absinkverhalten wird im Detail von den Eigenschaften des Baggerguts beeinflusst. Dieses ist im Allgemeinen inhomogen und kann verklumpen, was sich auf der Partikelebene zusammen mit Flokkulationsprozessen und Hindered Settling zu einem Absinken in Korngruppen äußert (A. Wurpts, 2006 [103]). Makroskopisch kann vereinfacht davon ausgegangen werden, dass sich während des Verbringens ein verhältnismäßig stabiler Strom heraus bildet, innerhalb dessen das Baggergut absinkt. An der Grenzfläche zum umgebenden Wasser können jedoch einzelne feine Partikel aus dem Strom herausgelöst werden und sich in der Wassersäule anreichern. Im Gegenzug kommt es auch zum Eintrag von Wasser in den Baggergutstrom, wodurch sich dieser aufweitet und weitere Partikel suspendiert werden [103]. In Folge des Absinkens stellt sich aus Gründen der Massenerhaltung eine Ausgleichsströmung im Bereich der seitlichen Grenzflächen ein, bei der Wasser in die entgegengesetzte Richtung ausweicht (Abb. 3.16). Dadurch werden suspendierte, aus dem Baggergutstrom herausgelöste Sedimente in die oberen Bereiche der Wassersäule transportiert, was sich in einer erhöhten Trübung äußert, die häufig im Einzugsgebiet einer Baggergutumlagerung beobachtet werden kann [103].

Die Gestalt der Sedimentablagerung an der Gewässersohle aus einem Baggerguteintrag kann kraterförmige oder haufenförmige Strukturen besitzen (Li & Ma, 2001 [68])

und in [103]). Auch dieser Vorgang wird maßgeblich durch die Baggerguteigenschaften und die Strömungsverhältnisse beeinflusst. Ringförmige Krater stellen sich ein, wenn nach dem Erreichen der Sohle eine gewisse Menge des verbrachten Baggerguts im Bereich der Eintragstelle verbleibt, während sich ein anderer Teil in horizontaler Richtung ausbreitet. Das geschieht in Folge einer Ausweichströmung, die sich am Boden aufgrund der Abbremsung des vertikalen Baggergutstroms einstellt und durch die Sedimente mitgeführt werden können [86] (Abb. 3.16). Dieser Prozess ist eher für feinere Sedimente zu erwarten, während die Ergebnisse in [68] darauf schließen lassen, dass bei grobkörnigem Baggergut infolge des größeren Gewichts der Partikel haufenförmige Strukturen auftreten.

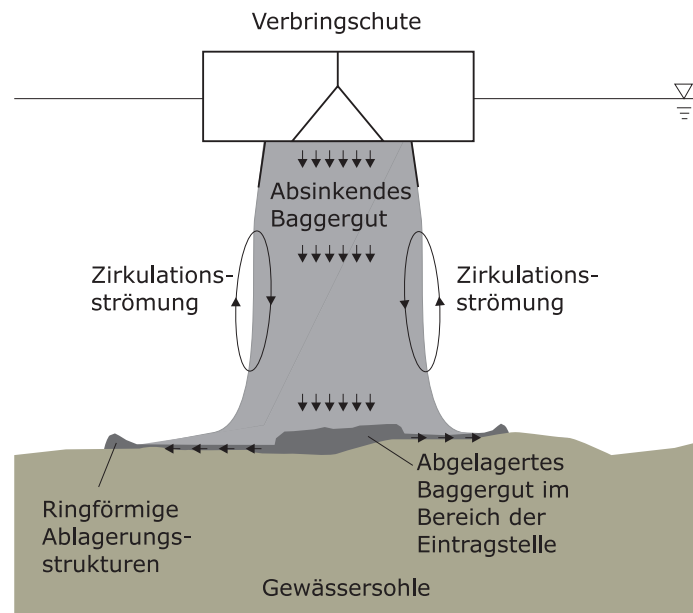


Abbildung 3.16: Prozess der Baggergutumlagerung aus einer Schute heraus

Eine weitere Möglichkeit des Entladens stellen Rohrleitungen dar, über die das Baggergut kontinuierlich aus den Laderäumen gepumpt wird. Sie werden insbesondere für das Aufspülen des Baggerguts in der Landgewinnung und die Ablagerung an Land verwendet. In speziellen Fällen wird für die kleinräumige Verbringung in Häfen auch auf den Einsatz von Schaufeln und Schabern zurückgegriffen.

Das Verbringen erfolgt häufig in Abhängigkeit von den Strömungsverhältnissen, um die daraus resultierende Trübung gering zu halten. Daher wird das Baggergut im Binnenbereich nur bei bestimmten Abflüssen umgelagert. Im Küstenbereich wird Baggergut zudem tidephasenabhängig verbracht, damit der Transportweg der umgelagerten Sedimente in der Anfangsphase gesteuert werden kann. Dadurch soll zum Beispiel das Ausmaß an Kreislaufbaggerungen verringert werden, indem das Baggergut in einem flutstromdominierten Transportregime während der Ebbephase verbracht wird, so dass die Sedimente in der hochmobilen Phase des Absinkens nicht sofort wieder stromauf transportiert werden.

Kapitel 4

Die Modellierung menschlicher Eingriffe in den Sedimenthaushalt

Natürliche Prozesse lassen sich in der Regel durch deterministische Gesetze beschreiben. Die darüber hinaus auftretenden Fluktuationen können ebenfalls durch geeignete (Fuzzy-) Ansätze erfasst werden. Auf dieser Grundlage lassen sich natürlich ablaufende Ereignisse wie zum Beispiel der durch die Strömung induzierte Sedimenttransport in numerische Modelle überführen.

Um die Einflüsse auf den Sedimenthaushalt korrekt zu erfassen, ist es insbesondere für unterhaltungsintensive Gewässerabschnitte erforderlich, auch anthropogene Eingriffe aus Bagger- und Verbringmaßnahmen zu berücksichtigen. Hier ist eine Algorithmisierung menschlicher Handlungen nötig. Dazu zählt auch der Entscheidungsprozess über Unterhaltungsarbeiten, das heißt wann und in welchem Umfang gebaggert werden muss.

Die Modellierung menschlicher Eingriffe in ein System kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Die Wahl des dabei verfolgten Ansatzes wird durch die jeweilige Art des Eingriffs bestimmt. Aufgrund der Vielfalt der Aufgaben, in denen die Modellierung menschlicher Einflüsse erfolgt, ist sie Bestandteil vieler Fachdisziplinen. Die Modelle können Entscheidungsprozesse, Verhaltensweisen, Handlungen und Wirkungen anthropogener Aktivitäten umfassen, um nur einige aufzuführen.

Bevor die Simulation menschlicher Eingriffe in Form von Nassbaggerstrategien mit numerischen Modellen diskutiert wird, soll ein kleiner Einblick über die Möglichkeiten der Modellierung menschlich gesteuerter Prozesse gewagt werden.

4.1 Beispiele der Modellierung menschlicher Handlungen und ihrer Auswirkungen

In der Soziologie werden Fuzzy-Modelle im Rahmen der Situations- und Selektionslogik der akteurtheoretischen Modellierung verwendet (siehe z.B. Kron, 2005 [66]).

Fuzzy-Logik erlaubt ganz allgemein die Berechnung unscharfer, vager Prozesse. Man kann mit ihrer Hilfe ermitteln, inwieweit ein Ereignis, in Bezug auf alle Möglichkeiten, die passieren können, wahrscheinlich ist. Durch sie kann eine Situation, die von verschiedenen Einflussfaktoren abhängt, aus Sicht eines Akteurs bewertet werden. Ein Anwendungsbeispiel ist die Analyse der Gefährdung für eine Person, die vor der Frage steht, ob sie in der Notsituation eines Personenangriffs auf andere helfen soll (aus [66]). Die Situation hängt stark von dem Empfinden des Akteurs ab, ist also in höchstem Maße subjektiv. Es handelt sich um einen unscharfen Prozess. Dieser wird zudem durch Einflussgrößen wie die Kampfkraft des Täters oder die Anzahl weiterer Helfender beeinflusst. Zur Lösung können die Einzelprozesse jeder für sich beurteilt werden, indem Fuzzy-Mengen zu ihnen aufgestellt werden. Die Gefährdung für den Akteur ist natürlich höher, wenn weniger Leute eingreifen und die Kampfkraft des Angreifers als hoch eingeschätzt wird. Andersherum wird die Gefährdung als gering angenommen, wenn das Gegenteil bei beiden Einflussgrößen vorliegt. Durch Fuzzifizierung können die Einflussgrößen und ihre Bedeutung für die Gesamtgefährdung anhand von Zahlenwerten klassifiziert werden. Eine eindeutige Zuweisung von Gefährdungswerten und -risiken ist aufgrund der Subjektivität in dieser Sache nicht möglich. Hier kommen die Fuzzy-Mengen ins Spiel, die besagen, dass Elemente auch nur zu einem gewissen Prozentsatz in ihr enthalten sein können und daneben in weiteren Teilmengen vorkommen. So schätzen ein Teil der Akteure die gleiche Kampfkraft des Täters als hoch ein, während andere sie als weniger stark beurteilen. Aus Befragungen können daher nur Wertebereiche festgelegt werden, die einem allgemeinen Gefährdungsgefühl Ausdruck verleihen. Nach dem Aufstellen der Fuzzy-Mengen aus den einzelnen Teilmengen kann dann abschließend durch Wichtungsalgorithmen das Gesamtgefährdungsgefühl numerisch ausgedrückt werden.

Die Modellierung menschlicher Verhaltensweisen spielt auch in komplexen Anwendungen im Rahmen der Berücksichtigung des „Human Factor“ bei der Erweiterung von Mensch-Maschine-Systemen eine Rolle (siehe z.B. Kindsmüller et al., 2004 [63]). Dabei geht es darum, durch die Verwendung kognitiver Modelle die Mensch-Maschine-Interaktion zu verbessern und die Systementwicklung voranzutreiben. Solche Simulationen können beispielsweise zu Trainings- und Übungszwecken im Bereich der Streckenflugkontrolle oder der Gestaltung von Unterstützungssystemen in der chemischen Prozessführung eingesetzt werden [63].

Weitere Anwendungen der Modellierung menschlichen Verhaltens und die Entwicklung diesbezüglicher Ansätze finden sich im Bereich der militärischen Simulationen, die in der Einsatzplanung und ebenfalls zu Trainingszwecken eingesetzt werden (siehe z.B. Pew & Mavor, 1998 [87]). Hier können die für den Ausgang einer Operation entscheidenden menschlichen Handlungen, Verhaltensweisen und Reaktionen auf eine bestimmte Lage sowohl für Einzelpersonen als auch innerhalb einer Einsatzgruppe nachgestellt werden. Dabei finden die menschlichen Kapazitäten, ihr Zusammenwirken aber auch ihr limitierender Einfluss Eingang in die Simulationen. Ein wichtiger Bestandteil solcher Modelle ist die Abbildung der Kommunikation unter den Mitwirkenden, da auf diese Weise ein Erfahrungs- und Wissenstransfer berücksichtigt werden kann. Letzlich sind auch Entscheidungsprozesse zu beachten, die den Aus-

gang einer Mission ebenfalls beeinflussen und in kritischen Situationen häufig nicht aufgrund einer vollständigen und lückenlosen Analyse der Lage erfolgen können, sondern den momentan zur Verfügung stehenden Informationen und nicht zuletzt auch der Verantwortung des Führungspersonals entspringen.

Die Wirkung anthropogener Aktivitäten findet in verschiedenen Fragestellungen Anwendung und kann durch eine Vielzahl bestehender Modelle für die einzelnen Fachdisziplinen untersucht werden. Hydrodynamisch-Numerische Modelle werden beispielsweise standardmäßig in der wasserbaulichen Planung eingesetzt. Soll die Auswirkung eines Bauvorhabens untersucht werden, wird ein Modell mit einer dementsprechenden Topografie verwendet, um die daraus resultierenden Änderungen auf verschiedene Analysegrößen beurteilen zu können. So können auf diese Weise Hochwasserschutzmaßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkungsweise untersucht und das sich aus ihnen ergebende Gefährdungspotenzial anhand von simulierten Wasserständen und Strömungsgeschwindigkeiten bestimmt werden.

Die Systemtheorie ist eine interdisziplinäre Wissenschaft, bei der im Bereich der Ingenieurwissenschaften das Verhalten verschiedener dynamischer Systeme untersucht wird. Menschliche Eingriffe können bei bestimmten Fragestellungen als Steuerungs- und Regelungssysteme beschrieben werden, deren Grundlage die Systemtheorie ist. Heyer (1987) [59] untersuchte beispielsweise die Möglichkeiten der Beeinflussung der Tidedynamik und den damit verbundenen Sedimenttransport durch die Steuerung von Sperrwerken. Auch das Sedimentmanagement und Nassbaggerstrategien als Bestandteil davon können als Steuerungs- und Regelungssysteme betrachtet werden und sollen daher in diesem Abschnitt als solche formuliert werden.

Für die Simulation von Nassbaggermaßnahmen ist aktuell sicher kein Fuzzy-logisches System erforderlich, da die Eingangsgrößen, die zu einer Baggerung führen, klar definiert sind. Vielmehr handelt es sich um einen reinen Entscheidungsprozess, wann eine Nassbaggerkampagne notwendig ist, der um diese Eingangsgrößen herum modelliert werden muss. Daher wird dieser Entscheidungsprozess näher untersucht. Zunächst wird allgemein auf die entscheidungstheoretischen Grundlagen eingegangen. Daraus ergeben sich im Verbund mit den Erkenntnissen aus der systemtheoretischen Betrachtung die Anforderungen an ein Software-System, mit dem die Modellierung von Unterhaltungsstrategien in mehrdimensionalen numerischen Simulationen ermöglicht werden soll. Diese werden am Ende dieses Kapitels erläutert, um im Anschluss Rückschlüsse auf die programmtechnische Umsetzung zu ziehen.

4.2 Die Modellierung von Entscheidungsprozessen

Modelle für Entscheidungsprozesse werden in vielen Bereichen der Interaktion zwischen Mensch und Technik aber auch der Menschen untereinander verwendet, um ein damit verbundenes Systemverhalten zu simulieren. Die erhaltenen Ergebnisse ermöglichen sodann eine Analyse dieses Verhaltens, welches anhand einer Zielvorstellung beurteilt werden kann. In der Regel besteht der Gesamtvorgang bei der Entscheidungsfindung aus den beiden Teilprozessen „Entscheidung“ und „Beurteilung“. Aus

diesem Grund wird dieser Bereich der Entscheidungstheorie auch als „Judgment and Decision Making“ bezeichnet.

Entscheidungen können im mathematischen Sinn als A priori-Prozess zerlegt werden, wohingegen Beurteilungen A posteriori-Vorgänge sind (Connolly et al., 2000 [33]). Die Unterscheidung zwischen „Entscheidung“ und „Beurteilung“ erfolgt häufig willkürlich, da eine scharfe Trennung der beiden Vorgänge nicht immer möglich ist und sie sich gegenseitig beeinflussen. Vielmehr bildet die Beurteilung einer Entscheidung in vielen Anwendungen das wesentliche Ergebnis eines Entscheidungsmodells (Yates, 1990 [105]). Wichtig ist es jedoch, bei der Analyse des gesamten Entscheidungsprozesses zwischen A priori- und A posteriori-Methoden zu unterscheiden, da ihr Wesen gegensätzlich ist.

Entscheidungsmodelle kommen nur dann zur Anwendung, wenn mehrere Handlungs- oder Auswahlmöglichkeiten bestehen. Gekoppelt an diese Möglichkeiten sind Folgeprozesse, deren Ergebnis die Grundlage für weitere Entscheidungsprozesse ist oder das direkt hinsichtlich der Zielvorstellung beurteilt wird. Mit Hilfe von Entscheidungsdiagrammen können Entscheidungsprozesse modelliert werden. Diese können mittels Kennzahlen ausgewertet werden. Dabei wird einem Entscheidungspfad eine Auftretenswahrscheinlichkeit zugeordnet. Die Auftretenswahrscheinlichkeiten werden bei mehreren Verästelungen entlang eines Entscheidungspfads miteinander multipliziert. Am Ende eines jeden Pfads wird ein Bewertungsmaßstab für das Ergebnis festgelegt. Dieser wird dann mit dem Produkt der Auftretenswahrscheinlichkeiten multipliziert, um einen Wert für die abschließende Beurteilung zu erhalten.

Grundsätzlich sind folgende Informationen wichtig für die Modellierung eines Entscheidungsprozesses [33]:

- Welche Handlungsalternativen bestehen?
- Welche Ereignisse (Prozesse, Handlungen) folgen auf eine Entscheidung?
- Welche Auftretenswahrscheinlichkeit besitzt ein Folgeereignis?
- Welcher Wert wird jedem möglichen Ergebnis zugeordnet?

Die Dichte der Eingangsdaten bestimmt wie bei jedem Modell die Qualität der Ergebnisse. Je präziser also eine Auftretenswahrscheinlichkeit ermittelt und je genauer die Folgewirkung beurteilt werden kann, um so verlässlicher ist solch ein Modell wie ein Entscheidungsdiagramm. Durch Unsicherheitsanalysen und Parametervariationen kann das dem jeweiligen Modell inne wohnende Fehlerpotenzial analysiert und die Festlegung der jeweiligen Kennzahlen unterstützt werden.

Typische Anwendungen dieser Auflösung von Entscheidungsprozessen finden sich im Bereich der Betriebswirtschaft, sofern es sich um Entscheidungssituationen handelt, bei denen die Informationslage vollständig bekannt ist oder diese verlässlich abgeschätzt werden kann. Ein Beispiel hierfür sind Nutzwertanalysen, wie in Abbildung 4.1 dargestellt. Hier soll untersucht werden, wie die langfristige Ausrichtung eines hypothetischen Unternehmens gestaltet werden soll. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage,

ob sich die Investitionskosten einer Kapazitätserweiterung auszahlen. Zur Beantwortung wird ein Entscheidungsdiagramm entworfen. Die Kapazitätserweiterung ist nur lohnenswert, wenn eine große Nachfrage bedient werden soll. Die dazu gehörige Eintretenswahrscheinlichkeit wird zu 70 % angenommen, während die übrigen 30 % auf eine geringe Nachfrage entfallen. Der wesentliche Beurteilungsmaßstab ist der letztendliche Wert eines Prozesses, der in diesem Beispiel dem jeweiligen Gewinn entspricht. Für eine Kapazitätserweiterung bei großer Nachfrage wird dieser zu 10 Geldeinheiten (GE) abgeschätzt. Im Gegenzug kann bei geringer Nachfrage mit keinem Gewinn gerechnet werden. Für die Berechnung ohne Kapazitätserweiterung liegen die Werte bei 6 und 5 GE (alle Zahlen nach Feess, 2004 [47]).

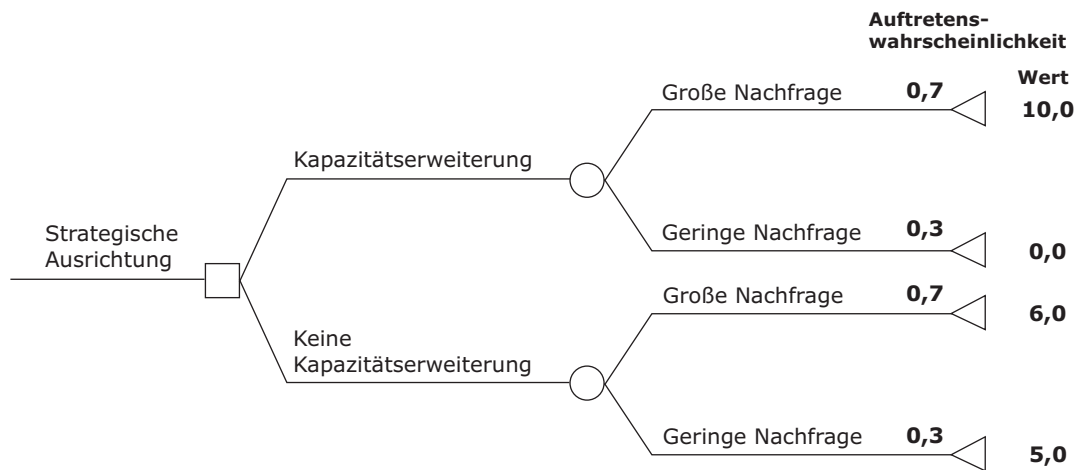


Abbildung 4.1: Beispiel eines Entscheidungsprozesses zur Frage der Kapazitätserweiterung eines Produktionsbetriebs¹

Eine einfache Berechnung liefert die Erwartungswerte EW :

$$EW_1 = 0,7 \cdot 10,0 + 0,3 \cdot 0 = 7,0$$

$$EW_2 = 0,7 \cdot 6,0 + 0,3 \cdot 5,0 = 5,7$$

Laut dieser Berechnung wird sich ein Kapazitätsausbau lohnen, da ein höherer Erwartungswert erzielt wird. Allerdings ist zu beachten, dass bei dieser Maßnahme ein größeres Risiko eingegangen wird, da der Unterschied in den Werten zwischen einer großen und einer geringen Nachfrage deutlich größer ist, als bei der Variante ohne Kapazitätserweiterung. Dem größeren Risiko könnte durch eine Anpassung der Zahlen im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse Rechnung getragen werden.

Entscheidungsmodelle sind beliebig ausbaubar und können durch die Berücksichtigung weiterer entscheidungsbeeinflussender Prozesse noch detaillierter gestaltet werden. Festgelegte Entscheidungskriterien helfen beispielsweise bei der Bewertung der Ergebnisse eines Entscheidungsmodells. Sie liefern einen Beurteilungsmaßstab, indem

¹Symbolik nach [33]: Quadrat für Entscheidungsknoten, Kreis für Wahrscheinlichkeitsknoten

Ziel- und Grenzwerte vorgegeben werden. Ist einer von diesen erreicht, wird ein darauf zurück gehendes Ereignis in der Prozesskette bevorzugt. Die Strenge und berücksichtigten Faktoren bei der Formulierung eines solchen Kriteriums beeinflussen ebenfalls maßgeblich die Akuratesse des Entscheidungsmodells [33].

Während solche Entscheidungssituationen also mit Hilfe der klassischen Entscheidungstheorie untersucht werden können, ist bei strategischen, spieltheoretischen Entscheidungssituationen das Nash-Gleichgewicht das zentrale Lösungskonzept [47]².

Neben den beschriebenen Entscheidungsfindungen gibt es auch intuitive Entscheidungen. Auch sie können durch geeignete Modellansätze prädiziert werden. Sie eignen sich insbesondere, um menschliche Handlungen zu modellieren, spielen jedoch in rein technischen Anwendungen keine Rolle. Aus diesem Grund werden sie in der Folge vernachlässigt.

Nassbaggermaßnahmen sind technische Anwendungen, die einem bestimmten Muster folgen. Zunächst wird durch Peilungen der Wassertiefen die aktuelle Tiefe, bezogen auf ein Referenzniveau, bestimmt (s. Kapitel 3.3). Ist die Tiefe in dem untersuchten Bereich nicht ausreichend, muss eine Baggerung erfolgen, wenn keine Handlungsalternative vorliegt. Diese könnte darin bestehen, dass punktuelle Untiefen umfahren werden, die aktuellen Wasserstände hoch genug sind, um eine sichere Schifffahrt an dieser Stelle auch weiter zu gewährleisten oder dass bei einem später folgenden stärkeren Abfluss die Selbststräumkraft des entsprechenden Gewässerabschnitts ausgenutzt werden kann. Wenn also eine Baggerung notwendig ist, wird ein Entscheidungsmodell wie oben beschrieben nicht benötigt, sondern kann auf den wesentlichen Kern, die Prüfung der Wassertiefe reduziert werden (Abb. 4.2). Die Auftretenswahrscheinlichkeiten der beiden Möglichkeiten „Baggern“ und „Nicht-Baggern“ können daher nur die Werte 1 oder 0 annehmen. In diesem Sinn handelt es sich um eine reine Beurteilung der Sedimentationsverhältnisse.

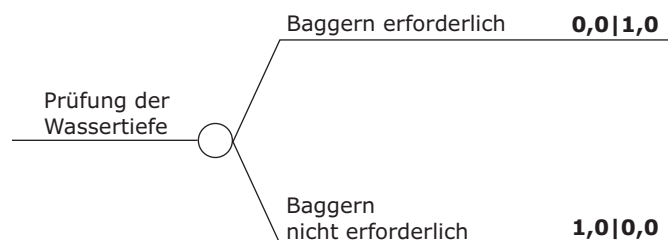


Abbildung 4.2: Reduziertes Entscheidungsmodell für Nassbaggermaßnahmen

Alle dazu notwendigen Informationen sind im Bereich der Wasserstraßen durch Peildaten und Aufzeichnungen der Messpegel in ausreichender Dichte vorhanden. Unsicherheiten sind damit nahezu auszuschließen.

²Im Rahmen der Spieltheorie entwickeltes Konzept der optimalen Strategien. Im einfachsten Fall wird kein Spieler unter Vernachlässigung von dominanten Strategien sein Verhalten ändern, wenn die konkurrierenden Spieler ebenfalls bei ihrem Verhalten bleiben. Sofern nämlich die Spieler ihre Verhaltensweisen korrekt antizipieren, ist der höchste Nutzen nur möglich, wenn jeder bei der ursprünglich gewählten Strategie bleibt.

Will man jedoch analysieren, welche Baggerstrategie am geeignetsten ist, kann der Einsatz von Entscheidungsmodellen sinnvoll sein. So ist es denkbar, den Begriff der kritische Tiefe, ab der die Sedimentation die Schifffahrt beeinflusst, in einer solchen Anwendung zu untersuchen. Ist es aus Kostengründen beispielsweise günstiger, frühzeitig, vor Erreichen des eigentlichen Grenzwerts, die Baggerung durchzuführen, oder lohnt es sich, mit der Baggerung zu warten. In Abbildung 4.3 ist die Struktur eines derartigen Entscheidungsmodells dargestellt. Wenn die Prüfung der kritischen Tiefe ergibt, dass eine Baggerung erforderlich ist, stehen verschiedene Baggerstrategien zur Auswahl. In deren jeweiliger Beurteilung, die Werte zwischen 0 und r annehmen kann, akkumulieren Faktoren wie Nachhaltigkeit, langfristige Kosten und ökologische Auswirkung.

Wenn die zur Beurteilung einer solchen Untersuchung notwendigen Informationen, wie der zeitliche Verlauf der Sedimentation, wie auch die Folgen einer solchen Strategie genau genug abgeschätzt werden können, ist eine Beschreibung mit einem geeigneten Modell möglich. Die Realität zeigt, dass jedoch genau an dieser Stelle die Schwierigkeiten eines solchen Ansatzes liegen.

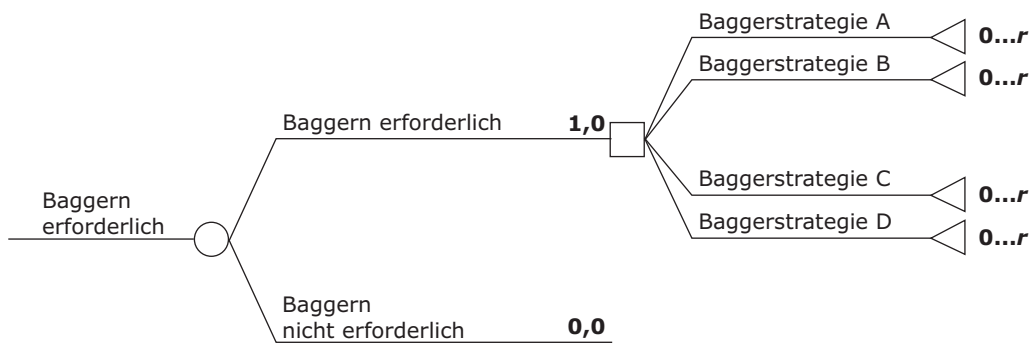


Abbildung 4.3: Entscheidungsmodell für Nassbaggerstrategien

Entscheidungsmodelle können in analoger Weise auch auf Sedimentmanagementkonzepte angewendet werden (Abb. 4.4). Allerdings ist in diesem Fall die Prüfung, ob eine Baggerung erforderlich ist, nicht notwendig. Vielmehr soll zur langfristigen Sicherstellung einer nautisch erforderlichen Wassertiefe ein möglichst optimales Unterhaltungskonzept gefunden werden. Neben der Baggerei stehen insbesondere zur Sedimentationsvermeidung oder deren Reduzierung verschiedene Maßnahmen zur Diskussion. Diese können hinsichtlich ihrer Wirksamkeit untersucht werden. Auch hier ist es von fundamentaler Bedeutung, die Folgen und Kosten der einzelnen Maßnahmen, zum Beispiel mit Hilfe von numerischen Modellen, prognostizieren zu können. Die jeweiligen Maßnahmen können dann hinsichtlich ihrer Wirkung bewertet werden.

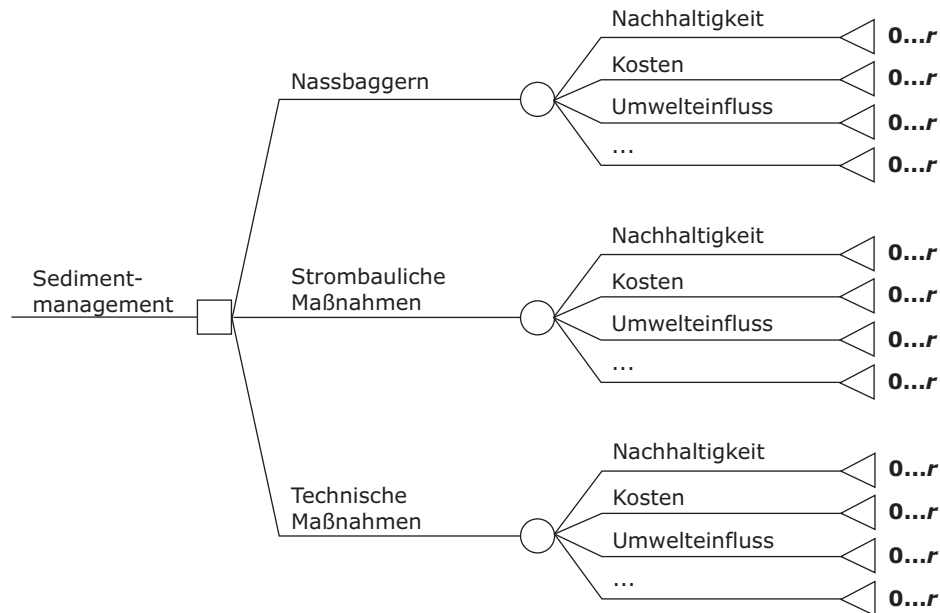


Abbildung 4.4: Entscheidungsmodell für Sedimentmanagementmaßnahmen

4.3 Sedimentmanagement als Steuerungs- und Regelungsproblem

Das Ziel von Steuerungs- und Regelungsaufgaben besteht darin, ein technisches System so zu beeinflussen, dass ein bestimmtes Verhalten oder Ergebnis erreicht wird. In Steuerungssystemen wird durch einen Aktuator der Prozess direkt beeinflusst. Eine Rückkopplung, durch die der erreichte Zielwert mit dem gewünschten verglichen wird und die Steuerung bei Abweichungen angepasst wird, findet nicht statt. In diesem Fall spricht man von Regelungssystemen (Dorf & Bishop, 2006 [40]) (Abb. 4.5). Ein typisches Beispiel für eine Steuerung ist die Verkehrsampel, die unabhängig von dem Verkehrsfluss geschaltet wird. Dem gegenüber entspricht der Autopilot eines Flugzeugs einem typischen Regelungssystem, da hier auf äußere Einflüsse wie Wind mit Kurskorrekturen reagiert wird.

In diesem Sinn kann auch Sedimentmanagement als Steuerungs- und Regelungsproblem angesehen werden. Dieses besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher Maßnahmen, die sich, wie schon in Kapitel 2 gezeigt, grob in Nassbaggerarbeiten und konstruktive, strombauliche Maßnahmen einteilen lassen. Strombauliche Eingriffe wie Buhnen, Leit- oder Parallelwerke werden als Maßnahmen zur Wasserstandsregelung bezeichnet. Durch ihre Position und Ausdehnung beeinflussen sie neben den Sedimenttransportverhältnissen auch die Wasserspiegellage. Sollte das Regelungsziel nicht erreicht werden oder sogar übersteuert werden, können die Bauwerke konstruktiv angepasst werden. Es findet eine Regelung des Prozesses statt. Da ein wesentliches Ziel der technisch geprägten Regelungstechnik darin besteht, ein Regelungsziel möglichst schnell zu erreichen und damit spontan auf etwaige Änderungen zu reagieren, muss für konstruktive Maßnahmen eine andere Zeitskala angewendet werden. Betrachtet

man strombauliche Regelungen innerhalb kurzer Zeitintervalle, können sie daher auch als reine Steuerung aufgefasst werden, die die Abflussverhältnisse moduliert und in dem Betrachtungszeitraum nicht verändert wird.

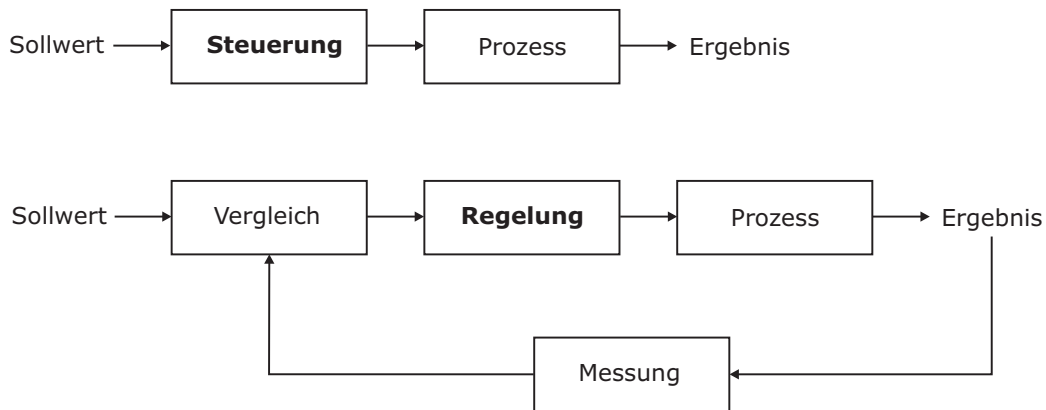


Abbildung 4.5: Aufbau eines Steuerungs- und eines Regelungssystems (nach Dorf & Bishop, 2006 [40])

Eine Unterhaltungsbaggerung ist ein Regelungsprozess. Hier wird regelmäßig oder zu bestimmten Zeitpunkten anhand von Peildaten geprüft, ob die Fahrwassertiefen für die Schifffahrt gemäß fester Vorgaben ausreichend sind (Abb. 4.6). Ist dies nicht der Fall, wird ein Baggereinsatz erforderlich und dieser im Rahmen von vorgegebenen Zielgrößen wie Soll- oder Aushubtiefen durchgeführt. Die Nassbaggerarbeiten selbst werden ebenfalls geregelt, indem hier die Zielvorgaben durch begleitende Messungen überprüft werden und Abweichungen in der Horizontalen oder der Tiefe korrigiert werden.

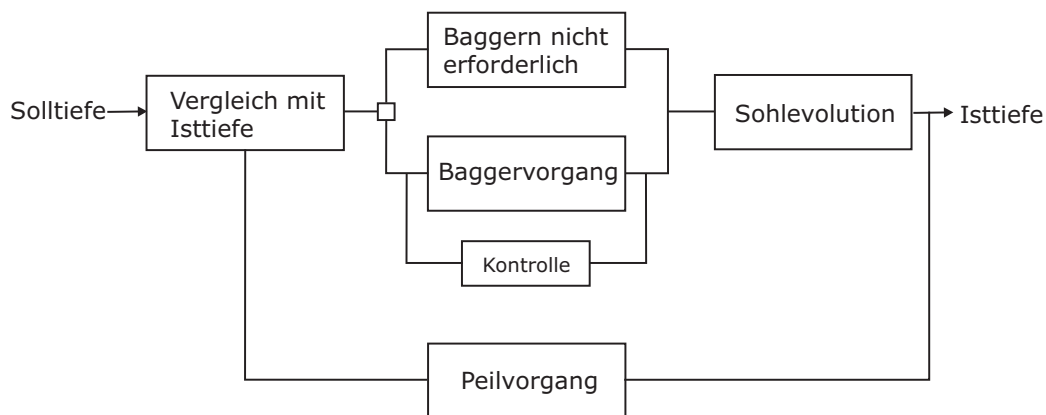


Abbildung 4.6: Entwurf eines Regelungssystems für die Unterhaltungsbaggerung

Durch Geschiebezugaben wird der Sedimenthaushalt geregelt, indem durch gezieltes Zuführen bestimmter Mengen und Korngrößen auf ein Sedimentdefizit reagiert wird.

Dabei wird neben einem Sedimentgleichgewicht das Ziel verfolgt, Erosionstendenzen zu begegnen, die Stabilität von Bauwerken zu sichern und den Wasserspiegel zu stützen. Auch wenn sie dem Wesen nach einem Regelungsprozess entsprechen, sind Geschiebezugaben nicht beliebig regelbar. Einmal hinzugegebenes Material ist nicht mehr kontrollierbar, da es fortan von der Strömung transportiert wird.

Das Verbringen von Baggergut kann ebenfalls als Steuerungs- und Regelungsaufgabe betrachtet werden. Grundsätzlich will man sich zunächst der gebaggerten Sedimente durch das Umlagern kostengünstig entledigen. Dabei wird jedoch auch das Ziel verfolgt, den Sedimenthaushalt positiv oder zumindest nicht zu Lasten der verschiedenen Nutzungsmöglichkeiten zu regeln. Das Verbringen erfolgt daher mitunter in Übertiefen oder Kolken, wodurch unter anderem auf zu starke Erosionen reagiert wird. Zudem wird die Verbringstelle dahingehend ausgewählt, dass von ihr nur eine geringe Remobilisierung und verminderter Transport in sensitive Bereiche wie zum Beispiel die Fahrrinne ausgeht. Bei der Baggergutumlagerung wird demnach versucht, den anthropogen beeinflussten, aber dennoch natürlich ablaufenden Sedimenttransport zu steuern.

Das Regelungsziel bei Unterhaltungsmaßnahmen sind die für die Schifffahrt notwendigen Wasserstände. Als Regelungsgröße kommen die von Sedimentablagerungen betroffenen Sohliefen in Betracht. Sie müssen auf einen bestimmten Wert eingestellt werden, über den sich die gewünschten Wasserstände einstellen. Die Wasserspiegeloberfläche beeinflusst ebenfalls die Wasserstände. Allerdings kann sie nur durch bauliche Maßnahmen wie Stauhaltungen oder Buhnen beeinflusst werden. Daher eignen sie sich nicht als Regelungsgröße, da bei diesen Maßnahmen nicht kurzfristig auf eine lokale Reduktion der Wassertiefen durch Anlandungen reagiert werden kann.

Im Gegensatz zu technischen Regelungssystemen wird beim Sedimentmanagement die Regelungsstätigkeit stets durch den Menschen vollzogen. Eine automatische Regelung wird auch in naher Zukunft nicht möglich sein. Dennoch können Werkzeuge für Regelungssysteme angewendet werden, um die in der Unterhaltungsbaggerei zu bewältigende Regelungsaufgabe zu analysieren. Zunächst geht es darum, das betrachtete System zu verstehen und Strategien zu entwickeln, wie das Regelungsziel möglichst schnell, langfristig oder ökonomisch erreicht wird. Im Rahmen der Beurteilung von Baggerstrategien können bereits einfache Regelsysteme verwendet werden, um die Organisation von Baggereinsätzen zu untersuchen.

4.4 Ein Ein-Punkt-Regelungsmodell zur Analyse von Baggerstrategien

Mit Hilfe des in Abbildung 4.6 beschriebenen sehr einfachen Regelungsmodells können bereits rudimentäre Baggerstrategien untersucht werden. Dazu wird ein entsprechendes Modell für die Software Simulink aufgebaut und mit ihr analysiert. Vereinfacht wird dabei davon ausgegangen, dass das Untersuchungsgebiet, welches beispielsweise ein Hafenabschnitt sein kann, durch einen charakteristischen Punkt repräsentiert wird. Es handelt sich demnach um ein Ein-Punkt-Modell.

4.4.1 Eingangsdaten und Modellaufbau

Bei genauer Betrachtung des in Abbildung 4.6 dargestellten Modells werden Informationen über die Solltiefe und die Isttiefe zur Simulation einer Baggerstrategie benötigt. Die Solltiefe wird explizit angegeben und richtet sich nach den spezifischen Anforderungen an die Fahrwassertiefe und die daraus folgende gewünschte Sohllage. Die aktuelle Isttiefe hängt von der morphodynamischen Entwicklung des Gebiets ab. Die wesentliche Kenngröße, die Auskunft über ihren Verlauf gibt, ist die Sohlevolution. Diese setzt sich wiederum aus den gestaltgebenden Einflüssen des natürlichen Sedimenttransports, der anthropogenen Eingriffe aus Bagger- und Verbringaktivitäten und schiffsbedingter Transportvorgänge zusammen.

Da der Einfluss aus der Unterhaltungsbaggerung in dem Modell als eigenständiger Teilprozess abgebildet wird, gilt es zunächst ein Maß für die natürlich bedingten Sedimentumlagerungen zu finden. Hier wird beispielhaft eine resultierende Sedimentationsfunktion angesetzt, um die Anwendungsmöglichkeiten des Ein-Punkt-Modells für verschiedene Baggerstrategien zu überprüfen. Dabei wird angenommen, dass die Sohlhöhe in einem relevanten Untersuchungsgebiet kontinuierlich anwächst, wenn nicht durch Nassbaggermaßnahmen dagegen gewirkt wird. Zeitlich beschränkte Effekte wie Ablagerungen und Abtransporte über eine Tide werden dabei zusammengefasst. Wenn man von einer kontinuierlichen Sedimentation ausgeht, können drei grundsätzliche Verläufe der Sedimentationsfunktion untersucht werden (Abb. 4.7):

- Linearer Verlauf
- Konvexer Verlauf
- Konkaver Verlauf.

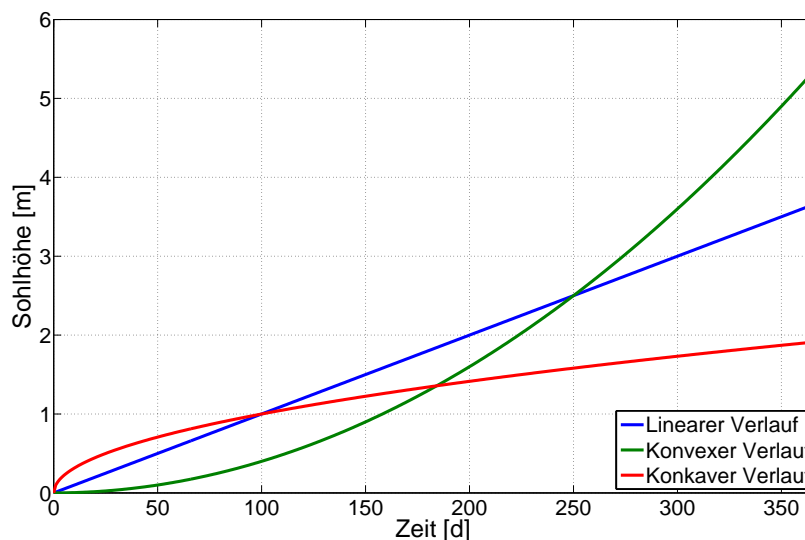


Abbildung 4.7: Grundformen der verwendeten Sedimentationsfunktion

Durch die Wahl dieser drei Verläufe soll exemplarisch ein zeitlich unterschiedlicher Sedimentationsvorgang untersucht werden. Man erkennt, dass die Funktionen verschiedene Steigungen besitzen. Die Steigung ist die Sedimentationsrate, die den Sedimentationsfunktionen zugrunde liegt. Während sie bei dem linearen Funktionsverlauf konstant ist, nimmt sie bei konvexem Verlauf zu und bei konkavem Verlauf ab. Dadurch wächst die Sohlhöhe im Fall des linearen Vorgangs über die Zeit um ein konstantes Maß, wohingegen sie bei der konvexen und konkaven Funktion über die Zeit schneller beziehungsweise langsamer zunimmt. Dadurch kann wiederum die Erfordernis und notwendige Wiederholung eines Baggervorgangs erheblich beeinflusst werden.

Durch den Schiffsverkehr induzierte Sedimentumlagerungen können erhebliche Veränderungen bewirken. Sie sind jedoch sehr komplex und in hohem Maß lokalen Einflüssen ausgesetzt, wie zum Beispiel den durch einen Schraubenstrahl hervorgerufenen Sedimentbewegungen. Solche Effekte sind schwer zu quantifizieren und können auch nicht auf die untersuchte Fläche oder einen diese Fläche charakterisierenden Punkt projiziert werden, so dass sie nicht in dem Ein-Punkt-Modell berücksichtigt werden. Daher werden verschiedene Baggerstrategien nur in Abhängigkeit der einzelnen Sedimentationsfunktionen mit einem Simulink-Modell untersucht. Bei Simulink handelt es sich um eine Blockset-Erweiterung von MATLAB, mit der dynamische Systeme modelliert, simuliert und analysiert werden können (Angermann et al., 2009 [1]). Dabei werden für eine grafische Bedienoberfläche vorgefertigte Funktionsblöcke zur Verfügung gestellt, die in einem Signalfussplan miteinander verbunden werden können, um eine bestimmte Fragestellung modellieren zu können. Die Funktionsblöcke enthalten eine Vielzahl an zu verwendenden Elementen aus unterschiedlichen Fachdisziplinen für die Simulation linearer, nichtlinearer, diskreter und hybrider Systeme. Darüber hinaus können vom Anwender auch eigene anwendungsbezogene Modellkomponenten entworfen und mit den bestehenden Blöcken verknüpft werden, um neue Anwendungspfade zu erschließen.

Ein mögliches Simulinkmodell zur Analyse von Baggerstrategien ist als Signalfussbild in Abbildung 4.8 dargestellt. Dieses verwendet bestehende Blocksets der Simulinkbibliothek und mathematische Funktionen. Als Eingangswerte sind der Zeitschritt, mit dem simuliert wird, und die Sollsohlage vorzugeben. Die Sedimentationsfunktion wird in einem eigenständigen Block definiert. Sie muss bei erfolgter Baggerung auf den Wert der Sollsohlage zurückgesetzt werden, von dem die Sedimentation von neuem beginnen kann, was in einer Rückkopplungsschleife aufgelöst wird. Eine Manipulation der Sedimentationsfunktion über diese Rückkopplung ist erforderlich, um die sich aus einer Baggermaßnahme ergebenden Unstetigkeiten ausdrücken zu können.

Die Auswertung der Sedimentationsfunktion und ein Vergleich mit einem kritischen Grenzwert führt zu der Entscheidung, ob eine Baggerung erfolgen muss oder nicht. Falls ja, wird die Sohlhöhe auf den definierten Sollwert gesetzt. Liegt die Sohlhöhe noch unterhalb des kritischen Werts, läuft die Simulation weiter, ohne dass eingegriffen wird. Die sich aus einer Baggerung ergebenden Baggermengen werden berechnet und ausgegeben. Da es sich um ein Einpunktmodell handelt, erhält man sie aus der Differenz aus der Sohlhöhe vor dem Eingriff und dem Sollwert.

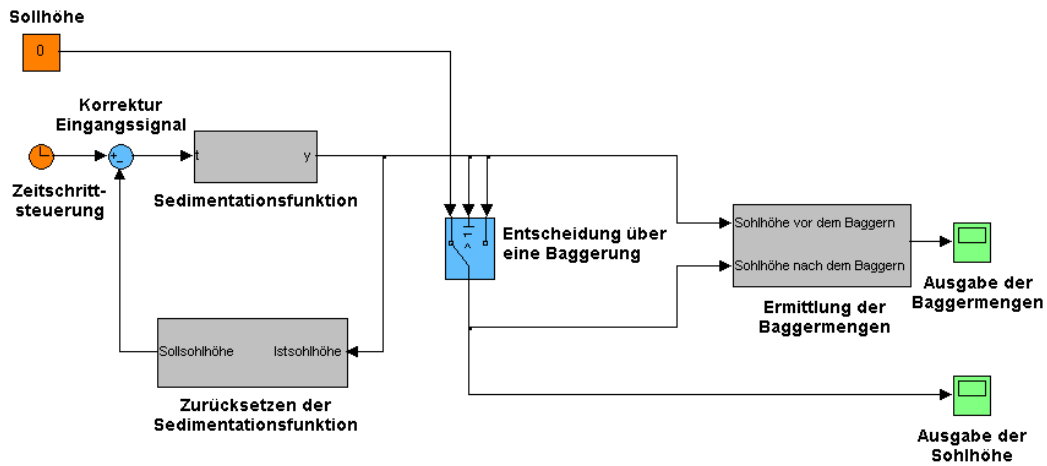


Abbildung 4.8: Simulinkmodell zur Analyse von Baggerstrategien

Für die Bewertung der modellierten Baggerstrategie, wird die Entwicklung der Baggermengen und die zeitliche Änderung der Sohlhöhe abschließend als funktionaler Verlauf dargestellt.

Ein Beispiel für einen linearen Sedimentationsverlauf ist in Abbildung 4.9 aufgeführt. Die kritische Sohlentiefe wurde hierin mit $z_{krit} = 0,5$ m definiert. Wird dieser Wert durch die natürliche Sedimentation erreicht, erfolgt eine Baggerung, um das Ausgangsniveau wieder zu erreichen. Die dabei anfallenden Baggermengen sind in Form einer Summenkurve dargestellt. Ein solches Ergebnis kann als Planungsinstrument für Nassbaggermaßnahmen genutzt werden. Die Anzahl der notwendigen Einsätze wie auch die sich daraus ergebenden Baggermengen können auf diese Weise ermittelt werden.

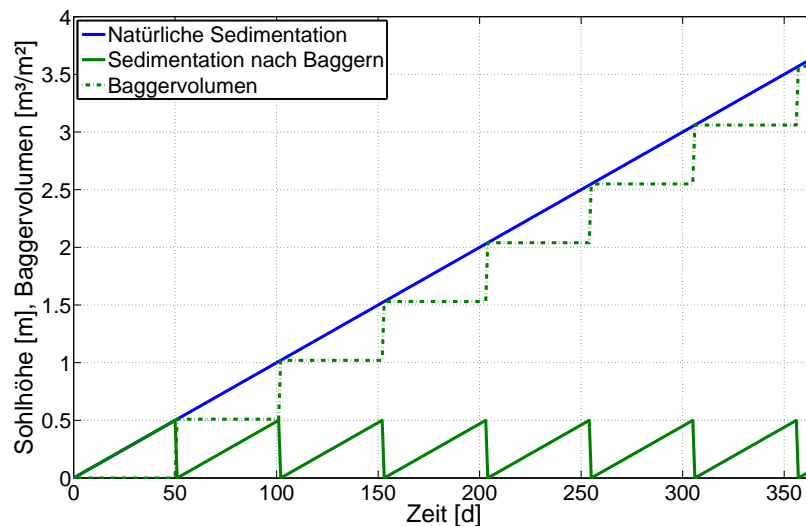


Abbildung 4.9: Beispielhafte Ergebnisse des Simulinkmodells für einen linearen Sedimentationsverlauf

Eine derartige Analyse ist auch mit zeilenorientierten Programmen wie MATLAB möglich. Dazu müssen die Funktionalitäten der Simulinkblöcke in einer Programmiersprache aufgelöst werden. In diesem Fall sind dazu lediglich logische Abfragen und mathematische Funktionen in ein Beziehungsgeflecht zu setzen.

Mit dem hier vorgestellten Simulinkmodell werden nachfolgend die drei ausgewählten Verläufe der Sedimentation für verschiedene Baggerstrategien untersucht.

4.4.2 Analyse für unterschiedliche Sedimentationsfunktionen

Bei den untersuchten Baggerstrategien wurde analysiert, inwieweit eine Variation des Entscheidungsprozesses über eine Baggerung zu einer Verringerung der Baggerkosten führen kann. Dabei soll auf die Fragestellung fokussiert werden, ob Baggern zu einem früheren oder späteren Zeitpunkt zu einer Reduktion der Gesamtbaggermengen führen kann. Dazu wird die kritische Tiefe variiert. Beide Varianten sind plausibel. So kann man problemlos zu einem früheren Zeitpunkt baggern, da in diesem Fall die gewünschten Fahrwassertiefen nie beeinträchtigt werden. Bei einem Einsatz zu einem späteren Zeitpunkt kann das nicht immer gewährleistet werden. Hier ist zu beachten, dass ein sicherer Schiffsverkehr weiterhin möglich ist, indem die Untiefen umfahren werden können oder trotz Überschreiten der kritischen Tiefe noch eine ausreichende Wassertiefe vorhanden ist. Letzteres ist der Fall, wenn die Solltiefen gegenüber dem Tiefgang der Bemessungsschiffe größer sind.

In diesem Kontext kann das Ein-Punkt-Modell als Instrument der Einsatzplanung genutzt werden. Darüber hinaus kann mit Hilfe dieser Strategien untersucht werden, welchen Einfluss ein zeitlicher Verzug auf die gesamten Operationskosten hat oder ob es sich als unwirtschaftlich herausstellt, wenn die Baggerung zu früh vorgenommen wird. Zusammenfassend wurden folgende Strategien oder Ereignisse betrachtet:

- Baggerbeginn sobald die kritische Sohlhöhe erreicht ist
- Baggerbeginn vor Erreichen der kritischen Sohlhöhe
- Baggerbeginn nachdem die kritische Sohlhöhe bereits überschritten ist.

Da über den zeitlichen Verlauf der Sedimentation in einem Hafen wenig belastbare Daten zur Verfügung stehen, wurden in einem ersten Schritt Sedimentationsfunktionen mit linearem, konvexem und konkavem Verlauf konstruiert. Das Problem besteht darin, dass zwar häufig langfristige Daten über die Anlandung in Häfen verfügbar sind (z.B. in Nassner, 1992 [80]), jedoch diese in der Regel nicht die zeitliche Auflösung besitzen, um Baggerstrategien, die sich auf kürzere Zeitintervalle beschränken, analysieren zu können.

Aus Peilungen ist bekannt um welches Maß die Sohlhöhe über einen längeren Zeitraum in einem Hafenbecken anwächst. Aus der Differenz zwischen Anfangs- und Endzeitpunkt der Untersuchungen, der Größe des Hafenbeckens und des Betrachtungszeitraums kann die Sedimentationsrate ermittelt werden. Häufig wird diese in der

Einheit m/a angegeben, worin sich schon der Betrachtungszeitraum widerspiegelt. Die Sedimentationsrate ist die Steigung der Funktion der Sohlhöhenentwicklung über die Zeit. Welchen Verlauf die Funktion zwischen diesen beiden Punkten annimmt, kann durch diesen Wert nicht aufgelöst werden. Wenn die Sedimentationsrate einen konstanten Wert besitzt, muss der Verlauf der Sedimentationsfunktion der Schlussfolgerung nach linear sein.

Wahrscheinlicher ist, dass die Sedimentationsrate selbst zeitlich variiert. Dies kann durch saisonale Schwankungen hervorgerufen werden, beispielsweise resultierend aus unterschiedlichen Oberwasserverhältnissen. Darüber hinaus ist denkbar, dass die Rate zu- oder abnimmt je mehr Sedimente bereits in den Ruhewasserbereichen abgelagert wurden. Zur genaueren Untersuchung könnten höher aufgelöste Monitoringkampagnen der Sedimentationsverhältnisse durchgeführt werden.

Indem man den Verlauf der Sedimentationsfunktion in den Modellen direkt vorgibt, ist die genaue Kenntnis der Sedimentationsrate in diesen Anwendungen zunächst nicht erforderlich. Beim Aufstellen der Sedimentationsfunktionen wurde auf möglichst realistische Größenordnungen geachtet, indem sie auf die langfristigen Daten aufgebaut wurde. Messungen belegen die unterschiedlichsten Werte für die Sedimentation in Ruhewasserbereichen, je nachdem wie transportaktiv sich das sie umgebende System verhält (z.B. in [80]). Im Bereich des Vorhafens Kaiserschleuse in Bremerhaven wurde eine Sedimentationsrate von $q_S = 3$ m/a aufgenommen [80]. Dieser Wert diente als Orientierung für den Entwurf plausibler Sedimentationsfunktionen nach dem oben beschriebenen Muster. So wurde eine lineare Funktion gewählt, die diesem Wert zustrebt. Die konvexe und konkave Funktion liegen etwas darüber und darunter. Für den konvexen Verlauf wurde als Grundfunktion eine quadratische Funktion gewählt, während der konkave Verlauf durch eine Wurzelfunktion abgebildet werden kann.

Ihr jeweiliger Verlauf wurde bereits in Abbildung 4.7 dargestellt. Auf diese exemplarischen Sedimentationsfunktionen werden nun die verschiedenen Baggerstrategien angewendet. Als Referenzfall wird die Variante betrachtet, bei der eine Baggerung eingeleitet wird, sobald die kritische Sohlhöhe erreicht wird. Dabei soll das Ausgangsniveau ($z = 0$ m) wieder hergestellt werden. Der Wert für die kritische Sohlhöhe wird bei den anderen Strategien um je 25 % erhöht und verkleinert.

Lineare Sedimentationsfunktion

Die Ergebnisse der Simulation unterschiedlicher Baggerstrategien bei einer linearen Sedimentationsfunktion sind in Abbildung 4.10 zu sehen. Die kritische Tiefe, ab der eine Baggerung erfolgen soll, wurde im Vergleich zu der Referenzsituation von $z_{krit} = 1$ m zum einen zu $z_{krit} = 1.25$ m und zum anderen zu $z_{krit} = 0.75$ m variiert. Wie zu erwarten, reagiert das Modell auf diese Situation, indem im ersten Fall später gebaggert wird und in der Gesamtbetrachtung auch weniger häufig. Für den zweiten Fall ist das Gegenteil zu beobachten.

Man erkennt weiterhin, dass die Baggermengen nach 1000 Tagen Simulationszeit trotz der unterschiedlichen Strategien nicht voneinander abweichen, sondern sich auf den gleichen Wert einstellen. Dadurch, dass die Sedimentationsrate bei einem linearen

Verlauf der Sedimentationsfunktion konstant ist, macht es in diesem Fall keinen Unterschied, ob die Baggerung eher oder etwas später eingeleitet wird. In der Summe sind die Gesamtbaggermengen gleich. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass zum einen ein zeitlicher Verzug die Baggermengen nicht zu stark ansteigen lassen würde. Zum anderen können keine Baggerkosten eingespart werden, da auch die Gesamtbaggermengen durch eine abweichende Strategie nicht verringert werden können.

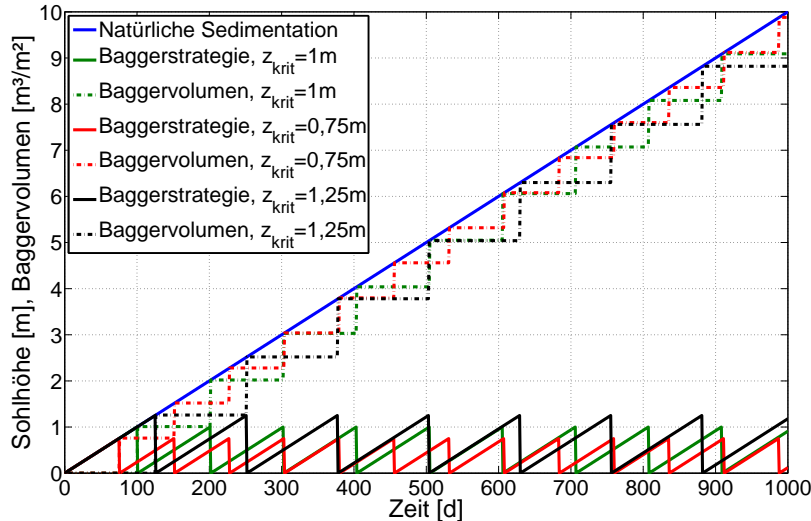


Abbildung 4.10: Simulation verschiedener Baggerstrategien mit einem Ein-Punkt-Regelungsmodell für eine lineare Sedimentationsfunktion

Konvexe Sedimentationsfunktion

Im Unterschied zu dem linearen Sedimentationsverlauf werden die Gesamtbaggermengen bei Verwendung einer konvexen Sedimentationsfunktion sehr wohl durch die Wahl der Baggerstrategie beeinflusst (Abb. 4.11). So werden größere Mengen an Sedimenten gebaggert, wenn es zu einem zeitlichen Verzug kommt oder man sich dafür entscheidet, erst bei einer größeren kritischen Sohlhöhe einzugreifen.

Sieht die Baggerstrategie die Verwendung eines geringeren Grenzwerts für die Einleitung einer Baggerung vor, sind zwar mehr Baggerumläufe erforderlich, jedoch liegt die Gesamtbaggermenge unterhalb der des Referenzfalls. Hier kann eine tieferegehende Kostenbetrachtung Aufschluss darüber geben, ob die Mobilisierungs- und Baustelleneinrichtungskosten häufigere Einsätze rechtfertigen, wenn dadurch größere Mengen an Baggergut eingespart werden.

Konkave Sedimentationsfunktion

Im Vergleich zu der konvexen Sedimentationsfunktion liefert die Verwendung eines konkaven Sedimentationsverlaufs ein konträres Bild (Abb. 4.12). Hier wird die Gesamtbaggermenge am kleinsten, je später gebaggert wird. Dadurch, dass dieser Fall zudem die geringste Anzahl an notwendigen Baggereinsätzen hervorruft, kommen hier gleich zwei positive Aspekte zum Tragen, da die Kosten, die ein Baggerumlauf unabhängig von den Baggermengen mit sich bringt, hier ebenfalls am kleinsten ausfallen.

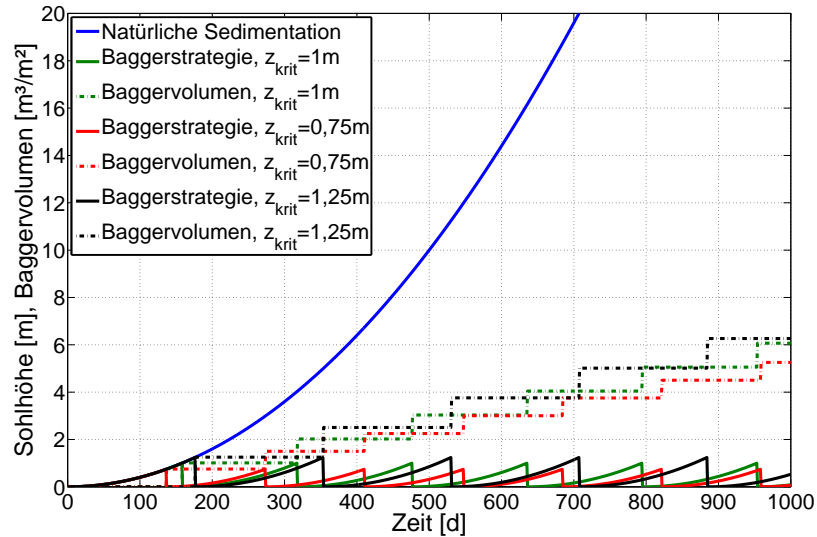


Abbildung 4.11: Simulation verschiedener Baggerstrategien mit einem Ein-Punkt-Regelungsmodell für eine konvexe Sedimentationsfunktion

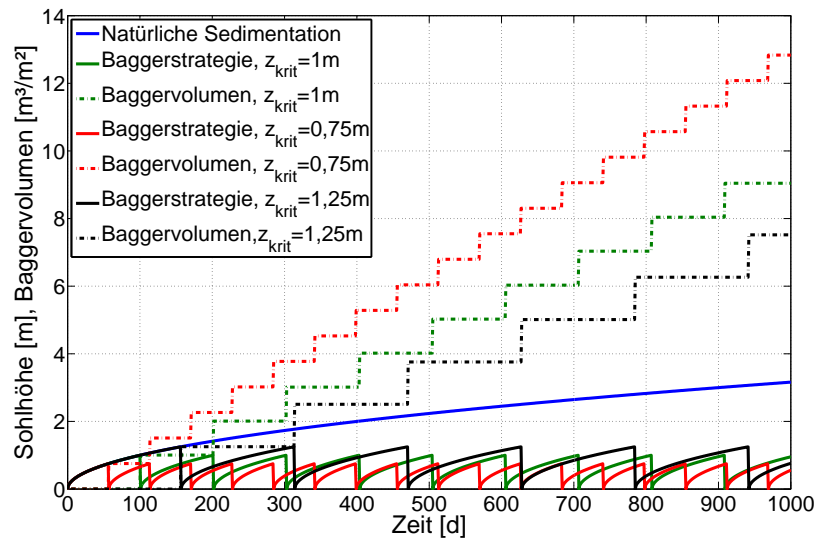


Abbildung 4.12: Simulation verschiedener Baggerstrategien mit einem Ein-Punkt-Regelungsmodell für eine konkave Sedimentationsfunktion

Abschließende Betrachtung

Die Anwendung des Ein-Punkt-Modells ermöglicht nicht nur die Bewertung von Baggerstrategien, sondern kann darüber hinaus in der Planung von Baggereinsätzen genutzt werden, da der Zeitpunkt, wann eine Baggerung notwendig ist, bestimmt werden kann. Zudem erhält man Aufschluss darüber, mit welcher Menge Baggergut bei einem Einsatz zu rechnen ist. Allerdings hängt die Anwendbarkeit eines solchen Modells sehr stark von der abgebildeten Sedimentationsfunktion ab und wie diese die wirklichen Verhältnisse wiedergibt. Je genauer der Sedimentationsverlauf erfasst wird, um so verwertbarer werden die Ergebnisse eines derartigen Modells.

Die Sedimentationsfunktion könnte über die Zeit aus Messungen abgeleitet werden. In diesem Fall ließe sie sich in ihrer einfachsten Form als allein zeitabhängige Größe darstellen. Ein detailliertes langfristiges Monitoring kann zu einer Präzisierung der Sedimentationsverhältnisse beitragen, woraus ein einfacher zeitlicher Zusammenhang hergestellt werden kann. Eine solche Sedimentationsfunktion hätte unter diesen Umständen für einen längeren Zeitraum ihre Gültigkeit.

Sollen weitere physikalische Aspekte in die Sedimentationsfunktion einfließen, wie beispielsweise die Sedimenteigenschaften auf der Feststoffseite oder die Strömungsgeschwindigkeiten auf Regimeebene, würde sie komplizierter werden. Gegebenenfalls ist hier bereits der Einsatz eines mehrdimensionalen Strömungs- und Transportmodells zur Verifikation erforderlich, wodurch die Anwendungsgrenzen eines Ein-Punkt-Modells bereits überschritten werden.

In der Realität ist es zudem sicher nicht hinreichend ein ganzes Hafenbecken durch einen charakteristischen Punkt abzubilden, da der Sedimentationsverlauf räumlich variiert. Hier könnten jedoch die einzelnen Sedimentationsschwerpunkte durch eigene Ein-Punkt-Modelle beschrieben werden. Sollte das unzureichend sein, muss hier jedoch ebenfalls ein mehrdimensionales Modell zum Einsatz kommen, durch das räumliche Varianzen im Sedimentationsverlauf genau erfasst werden können.

Unter der Annahme sehr einfach zu beschreibender Sedimentationsverhältnisse wurden beispielhaft Anwendungen des Ein-Punkt-Modells diskutiert. Der Vergleich der Ergebnisse verdeutlicht den Einfluss der Sedimentationsfunktion. Bei gleichbleibender Strategie ergeben sich je nach Verlauf vollkommen unterschiedliche Baggermengen, die man a priori so nicht erwarten würde. Die Steigung der konvexen Funktion nimmt kontinuierlich zu. Je größer der betrachtete Zeitraum ist, um so größer wird auch der Wert der Sedimentation. Über den Zeitraum von einem Jahr liefert sie in unserem Beispiel den größten Wert für die sich daraufhin einstellende Sohlhöhe (Abb. 4.7). Als „Sedimentationsrate“ q_S erhält man hier einen Wert von mehr als 5 m/a, wie er sich beispielsweise auch aus Peilungen zu Beginn und zum Ende eines Jahres ergeben würde. Zu erwarten wäre, dass angesichts dieser Zahl die Baggermengen für dieses q_S am größten werden müssen. Jedoch zeigen die Auswertungen des Ein-Punkt-Modells, dass sich für den konvexen Verlauf die geringsten Baggermengen ergeben. Das liegt allein an der Wahl der Baggerstrategie und der damit assoziierten kritischen Werte für die Sohlevolution, ab der Baggern notwendig wird.

Diese liegen für den konvexen Verlauf in einem Bereich, wo die Steigung der Sedimentationsfunktion noch klein ist und die damit verbundenen Sohlhöhenänderungen

unter denen der linearen und der konkaven Funktion liegen (Abb. 4.13). Aufgrund dieser Konstellation werden für einen derartigen funktionalen Verlauf geringere Baggermengen berechnet, als das der Wert für q_S vermuten lässt.

Der gleiche Effekt zeigt sich im Vergleich zwischen der konkaven und der linearen Sedimentationsfunktion. So lang die konkave Funktion oberhalb der linearen verläuft, werden für kritische Sohlhöhen in diesem Bereich größere Baggermengen erhalten. Das ist für die Baggerstrategie $z_{krit} = 0,75$ m der Fall. Sobald der Kurvenverlauf unter die lineare Funktion fällt, zum Beispiel für $z_{krit} = 1,25$ m werden geringere Baggermengen erzielt.

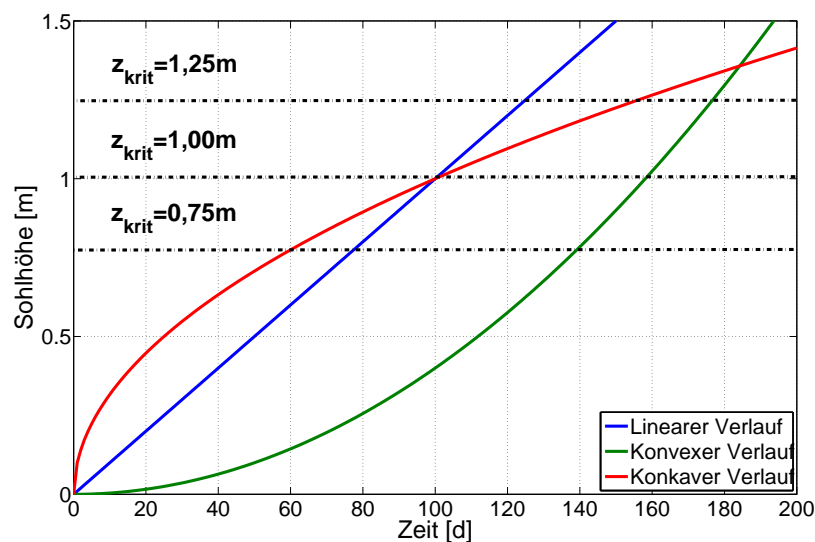


Abbildung 4.13: Gewählte Sedimentationsfunktionen im Bereich der kritischen Sohlhöhen

Eine Größe wie die jährliche Sedimentationsrate allein lässt sich demnach nur schwer hinsichtlich zu erwartender Baggermengen und in Bezug auf eine Optimierung der Nassbaggerarbeiten interpretieren. Zudem sind Informationen über ihre Gestalt schwierig zu erhalten. Da sich die realen Verhältnisse selten in ein so einfaches System überführen lassen, ist es sinnvoll Baggerstrategien mit mehrdimensionalen gekoppelten Feststofftransportmodellen zu simulieren, um die Problematik möglichst detailliert zu bearbeiten.

4.5 Die Simulation von Bagger- und Verbringmaßnahmen in mit mehrdimensionalen Strömungs- und Transportmodellen

Die Formulierung von Bagger- und Verbringmaßnahmen als Steuerungs- und Regelungssystem in numerischen Modellen führt zur Definition von konkreten Use Cases,

die im nächsten Kapitel des Softwareentwurfs eingehender beschrieben werden (Kapitel 5.2). Grundsätzlich kann die Nassbaggerei und die damit verbundenen Einzelprozesse als

- reaktives
- kalendarisches
- zielorientiertes

Ereignis modelliert werden. Ein reaktives Eingreifen führt zu einer Regelungsaufgabe, wie im vorangegangenen Kapitel beschrieben, während Ereignisse, die rein kalendarisch ablaufen und bei denen nicht auf eine Regelgröße reagiert wird, ein Steuerungsproblem darstellen. Zu solchen Problemen gehört die Geschiebezugabe, bei der zwar auf ein Sedimentdefizit reagiert wird, bei der jedoch in der Praxis zu einem definierten Termin eine bestimmte Menge an Sedimenten verbraucht wird.

In die dritte Kategorie lassen sich alle Bagger- und Verbringmaßnahmen einordnen. Baggerungen laufen mit dem Ziel ab, eine gewisse Fahrwassertiefe sicher zu stellen, während man sich bei Verbringmaßnahmen der gebaggerten Sedimente entledigen will. Geschiebezugaben werden immer dann durchgeführt, wenn das Ziel verfolgt wird die Sohle zu stabilisieren.

Für eine Modellierung von Nassbaggermaßnahmen in mehrdimensionalen Strömungs- und Transportmodellen können die wesentlichen Ansätze der vorangegangenen Abschnitte aufgegriffen und in ein anwendungsbezogenes Umfeld übertragen werden. Dazu wurde das Modellpaket DredgeSim entwickelt, das in Kopplung mit bestehenden 2- und 3-dimensionalen Strömungs- und Sedimenttransportmodellen die Simulation von Bagger- und Verbringmaßnahmen ermöglicht.

Grundsätzlich besteht in DredgeSim die Möglichkeit der reaktiven Modellierung eines Regelungsproblems oder der kalendarischen Modellierung eines Steuerungsproblems (Abb. 4.14). Bei dem reaktiven Modus wird der Entscheidungsprozess über Bagger- und Verbringmaßnahmen anhand von Baggerkriterien erfasst. Hier flossen die Ergebnisse der Formulierung des Entscheidungsprozesses über eine Baggerung und die Betrachtung von Baggerstrategien als Regelungssystem ein. Der Kern des reaktiven Teilmodells ist die Verwendung von verschiedenen Baggerkriterien, durch die eine Baggerung eingeleitet wird, sobald ein kritischer Wert für die Sedimentation erreicht wurde. Die Sedimentation wird bei der Verwendung von Strömungs- und Transportmodellen im Gegensatz zu dem vorgestellten Ein-Punkt-Regelungsmodell selbst modelliert und nicht vorgegeben. Das Baggermodul reagiert auf die dabei erzeugten Simulationsergebnisse der Sohlhöhenänderung und ändert die Sohlhöhen, sofern eine Baggerung notwendig ist.

Verbringmaßnahmen werden bei der reaktiven Modellierung dann simuliert, wenn durch ein Baggerkriterium bereits mindestens eine Baggerung eingeleitet wurde und dadurch Baggergut vorhanden ist. In diesem Fall reagiert das Modell auf dieses Vorhandensein, indem das Material verbraucht wird. Der reaktive Modus kann vor allem zu Prognosezwecken genutzt werden.

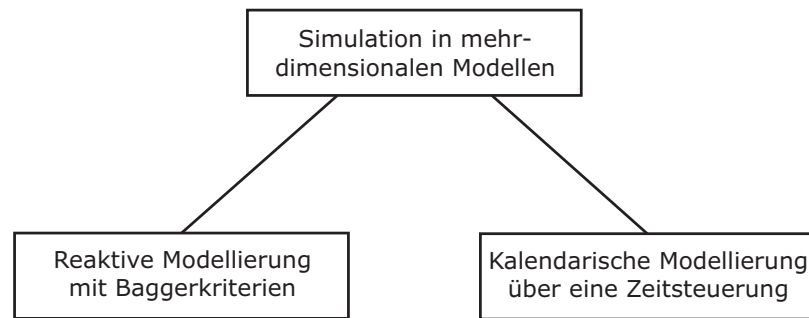


Abbildung 4.14: Optionen bei der Modellierung von Nassbaggermaßnahmen in mehrdimensionalen numerischen Modellen

Bei der kalendarischen Modellierung wird unabhängig von dem übrigen Modellgeschehen eine Baggerung oder eine Verbringmaßnahme simuliert, sobald ein festgelegtes Datum für den Beginn der Maßnahme im Simulationsfortgang erreicht wurde. Auch Geschiebezugaben fallen unter diese Funktionalität. Ein derartiger Modus kann zum Variantenstudium bei der Entwicklung von Nassbaggerstrategien herangezogen werden aber des weiteren auch zur Simulation von Ausbaumaßnahmen genutzt werden.

4.6 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurde der Frage nachgegangen, wie Bagger- und Verbringmaßnahmen als anthropogene Handlungen in ein Computermodell übertragen werden können, das auf mathematische und logische Algorithmen aufgebaut ist. Dabei wurde von allgemeinen Aspekten ausgehend der Weg zu einem einsatzfähigen Softwarepaket aufgezeigt, das im nächsten Kapitel eingehend beschrieben werden soll.

Es handelt sich keinesfalls um ein neues, unerforschtes Unterfangen durch den Menschen angetriebene Prozesse zu modellieren. Das wird anhand einiger weniger einleitender Beispiele schnell deutlich.

Es zeigt sich weiterhin, dass Nassbaggerarbeiten als klar definierbare Handlungen durch Entscheidungsmodelle beschrieben werden können. Dadurch kann der Entscheidungsprozess, wann und in welchem Umfang eine Maßnahme erforderlich ist, modelliert werden.

Unter Verwendung systemtheoretischer Grundlagen können Sedimentmanagementaspekte weiter als Steuerungs- und Regelungsproblem verstanden werden. Als Beispiel wurden verschiedene Baggerstrategien in Form eines Ein-Punkt-Modells untersucht. Abseits des theoretischen Gewinns zeigt sich jedoch schnell, dass die Modelleregebnisse nur aussagekräftig sind, wenn eine Rückkopplung mit der Realität in Form von belastbaren Messergebnissen vorhanden ist.

Die gesammelten Erkenntnisse aus der Formulierung von Nassbaggerarbeiten in einem Entscheidungs- und einem Steuerungs- und Regelungsmodell flossen schließlich in die Entwicklung des anwendungsbezogenen Softwarepakets DredgeSim, das mit samt seiner Hauptfunktionalitäten anschließend kurz vorgestellt wurde.

Im Wesentlichen können Nassbaggerarbeiten damit als reaktive und kalendarische Ereignisse modelliert werden. Reaktive Ereignisse werden dabei als Regelungsproblem behandelt, indem auf die aktuellen Ereignisse der Morphodynamik reagiert wird. Kalendarische Ereignisse können hingegen als Steuerungsaufgabe aufgefasst werden, da unabhängig von der Morphodynamik Baggereignisse zu einem bestimmten Zeitpunkt definiert werden, die dann abgearbeitet werden.

Kapitel 5

Das Modellpaket DredgeSim

Auf Grundlage eines Entwicklungsauftrags der Bundesanstalt für Wasserbau an das IfW der Universität der Bundeswehr München wurde die Software DredgeSim für die Simulation von Unterhaltungsmaßnahmen mit HMN-Modellen entwickelt. DredgeSim ermöglicht die Modellierung von Bagger- und Verbringmaßnahmen unter Berücksichtigung verschiedener Anwendungsmöglichkeiten. Dabei wird zwischen den beiden Maßnahmen Baggern und Baggergutverbringung unterschieden.

Der Softwareentwurf erfordert in einem ersten Schritt die Zusammenstellung von „Use Cases“ für diese beiden Aktivitäten, um ein Anforderungsprofil herzustellen. Dieses Anforderungsprofil wird dann in Form verschiedener Funktionalitäten in Programmcode umgesetzt.

Bei der Programmierung der Software wurde auf eine Kompatibilität zu bestehenden Hydrodynamik- und Morphodynamikmodulen geachtet. Die einzelnen Schritte zu einem anwendbaren Programmpaket werden in diesem Kapitel erläutert.

5.1 DredgeSim in HMN-Modellen

Das Paket DredgeSim wurde so konzipiert, dass es mit bestehenden hydrodynamisch-morphodynamisch-numerischen (HMN-)Modellen gekoppelt werden kann. Klassische HMN-Modelle simulieren die Strömungsprozesse und die natürlichen Sedimenttransportvorgänge, die durch die Strömung induziert werden. Die daraus resultierenden Ergebnisse werden von DredgeSim als Eingangsdaten verwendet, um die Unterhaltungsbaggerungen zu modellieren. DredgeSim ist demnach allein für die Simulation menschlicher Eingriffe aus Bagger- und Verbringmaßnahmen anzuwenden.

Im Wesentlichen werden bei der Kopplung mit dem HMN-Modell Informationen über die Sohlthiefen und das Sedimentinventar ausgetauscht (Abb. 5.1). Das Baggermodul benötigt diese Daten, um die Bagger- und Verbringprozesse zu modellieren. So wird das Baggervolumen und die entnommene Sedimentverteilung gespeichert, um bei einer Verbringmaßnahme die Menge und die Zusammensetzung des Baggerguts korrekt zu erfassen. Im Gegenzug werden die Sohlthiefen und das Sedimentinventar durch die

Unterhaltungsbaggerei beeinflusst, so dass ein Rücktransfer der geänderten Daten erforderlich ist, damit die Strömungs- und Transportprozesse auf der aktualisierten Topografie simuliert werden können.

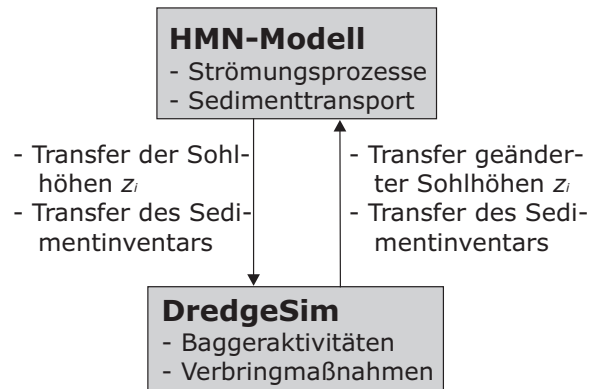


Abbildung 5.1: Simulationsumgebung für DredgeSim

5.2 Use Cases für DredgeSim

Ein wesentlicher Bestandteil im Rahmen der Anforderungsermittlung und des Entwurfs bei der Entwicklung eines Softwaresystems ist die Definition von Anwendungsfällen („Use Cases“). Use Cases sind Funktionen der Benutzer eines Anwendungssystems, die diese zur Durchführung ihrer Aufgaben verwenden. Jeder nur aus Sicht des Benutzers beschriebener Anwendungsfall stellt dabei eine abgeschlossene Teilfunktionalität der Anwendung dar und präzisiert mögliche Abläufe und Wechselwirkungen zwischen den Anwendern und dem Softwaresystem (Six et. al, 2000 [94]).

Wie und was aus programminterner Sicht bei Zugriff auf einen Use Case geschieht, ist nach dieser Definition vorerst uninteressant. Es gilt hier, die einzelnen Funktionen für die Aufgaben eines Programms zu sammeln, zu ordnen und zu visualisieren. Die Uses Cases können im Fall einer Vielzahl an erforderlichen Funktionen und bei sehr komplexen Softwaresystemen einem Beziehungsmuster unterliegen.

Nachfolgend sollen wesentliche Use Cases für die Software DredgeSim entworfen werden. Diese beziehen sich darauf, wie die beiden Hauptanwendungen der Simulation von Baggervorgängen und der Baggergutverbringung erfolgen können und wie sie gesteuert werden.

5.2.1 Use Cases Baggermaßnahmen

Das Ziel für Anwendungsfälle innerhalb der Funktionalität „Baggern“ ist in einem festgelegten Bereich eine bestimmte Menge an Sohlmaterial zu entnehmen. Dazu muss eine Bedingung festgelegt werden, wann die Entnahme von Sedimenten erfolgt. Hier

sind, wie im vorangegangenen Kapitel erwähnt, zwei Szenarien denkbar, das kriteriengesteuerte Baggern und das zeitgesteuerte Baggern.

Kriteriengesteuertes Baggern

Bei der ersten Möglichkeit wird ein Parameter wie die Wassertiefe überprüft, der Auskunft über Anlandungen und eine Beeinträchtigung des Schiffsverkehrs gibt. Wird eine erforderliche Wassertiefe infolge der Ablagerung von Sedimenten durch morphodynamische Prozesse unterschritten, wird eine Baggerung initiiert. Das reicht jedoch unter Umständen nicht aus, um einen Baggereinsatz zu rechtfertigen. Das kann beispielsweise der Fall sein, wenn nur geringe Baggermengen anfallen, das Einsatzgebiet zu klein und die Erfüllung des Kriteriums in diesem Bereich damit zu unbedeutend für eine wirtschaftliche Operation wäre. Daher ist ein Kriterium, welches berücksichtigt, dass flächenhaft zu viel Material ansteht, sinnvoller. Der Anwendungsfall des kriteriengesteuerten Baggerns kommt beispielsweise in numerischen Simulationen zur Prognose von Baggermengen zum Tragen.

Aus dieser Bedingung über den Baggerbeginn kann automatisch auch das Erkennen der Einsatzfläche resultieren, indem betroffene Elemente oder Knoten, die die Initiierungsbedingung erfüllen, detektiert werden. Darüber hinaus sollte es jedoch trotzdem möglich sein, die geografische Lage eines Baggerpolygons direkt festlegen zu können, um zum einen von dieser Prüfbedingung auszunehmende Bereiche von vornherein auszuschließen und zum anderen Bereiche mit unterschiedlichen kritischen Tiefen definieren zu können. Aus diesen Überlegungen resultieren vom Anwender zu spezifizierende Angaben über den **Baggerbeginn** und die geografische Lage des **Einsatzpolygons**.

Als nächstes muss der Anwender die Möglichkeit bekommen ein **Baggerziel** vorgeben zu können. Dies kann in der Unterhaltungsbaggerei beispielsweise die Angabe der Wassertiefe und im Fall des Materialgewinns die Definition eines Sedimententnahmenvolumens sein.

Der eingesetzte **Baggertyp** verändert die Sedimentstruktur an der Sohle. So kann es zu einer Vergröberung oder Verfeinerung der Oberschicht kommen. Dem Anwender sollte durch geeignete Vorgaben die Möglichkeit gegeben werden hierauf Einfluss zu nehmen.

Der zeitliche Verlauf der Baggerarbeiten ist hauptsächlich von der Ladekapazität und der Fördergeschwindigkeit des Nassbaggers abhängig. Er sollte durch entsprechende Vorgaben oder Unterfunktionalitäten wie die multiple Definition von Bearbeitungsblöcken oder **Förderraten** berücksichtigt werden. Der Einfluss der Ladekapazität kann dabei auch dem Baggertyp zugeordnet werden. Eine Generalisierungsbeziehung ist hierbei denkbar.

Zeitgesteuertes Baggern

Bei der zweiten Möglichkeit des zeitgesteuerten Baggerns wird eine Baggerung eingeleitet, wenn ein bestimmter Zeitpunkt erreicht ist. Anwendungsmöglichkeiten einer solchen Funktionalität liegen in der Simulation von Baggervorgängen aus der Vergan-

genheit, wenn beispielsweise die Änderung der Gewässersohle aus bereits abgeschlossenen Vorgängen nachvollzogen werden soll. Darüber hinaus können zeitgesteuerte Operationen auch zur Modellierung von Ausbauvorhaben verwendet werden. Neben Angaben über den **Baggerbeginn** sind Informationen über das **Baggerziel** erforderlich. Dabei handelt es sich um die Vorgabe eines Zeitpunkts, zu dem die Baggerung abgeschlossen sein soll und die Operation zeitlich abgegrenzt wird. Des Weiteren muss hierin die Entnahmemenge durch ein vorzuziehendes Baggervolumen spezifiziert werden.

Die Baggertiefe ergibt sich bei diesem Anwendungsfall aus dem definierten Entnahmevolumen und der Größe der definierten **Baggereinsatzfläche**, indem davon ausgegangen wird, dass alle in dieser Fläche liegenden Elemente oder Knoten um das gleiche Maß vertieft werden. Die Förderraten müssen im Gegensatz zu dem kriteriengesteuerten Baggern nicht vorgegeben werden, da sie sich unmittelbar aus dem Baggerzeitraum, der Größe der Baggerfläche und dem Entnahmevolumen berechnen lassen. Auch bei dem Use Case des zeitgesteuerten Baggerns ist es denkbar, dass durch die Vorgabe des **Baggergeräts** die prozessbedingte Vergrößerung und Verfeinerung der Sedimentstruktur an der Gewässersohle berücksichtigt werden kann.

In Abbildung 5.2 sind die erforderlichen Anwendervorgaben der Use Cases „Baggern“ aufgeführt. Da der Einfluss des Baggergeräts eine untergeordnete Rolle spielt, ist dieser Aspekt abgeschwächt dargestellt und wird in der aktuellen Programmversion vernachlässigt. Die übrigen Vorgaben für die beiden Anwendungsfälle werden in DredgeSim berücksichtigt.

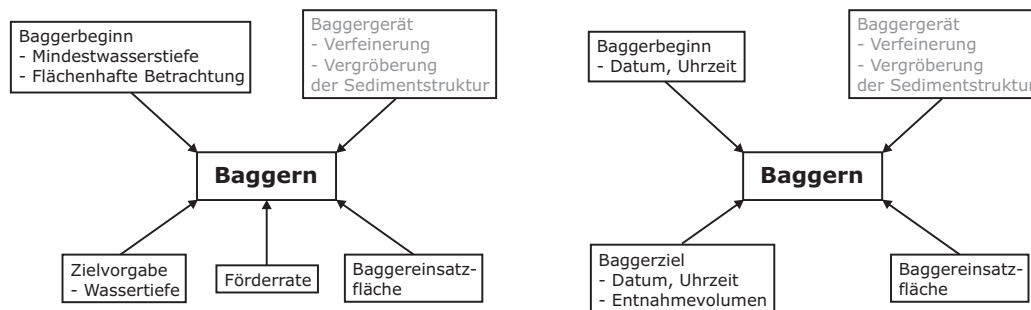


Abbildung 5.2: Use Cases kriteriengesteuertes Baggern (links) und zeitgesteuertes Baggern (rechts)

5.2.2 Use Cases Verbringmaßnahmen

In dem Use Case „Verbringen“ soll das während der Baggerarbeiten entnommene Material dem Gewässer an geeigneter Stelle wieder zugeführt werden und alle dabei auftretenden Handlungsoptionen erfasst werden. Im Wesentlichen muss dazu spezifiziert werden, wann Material verbracht werden soll und an welcher Stelle im Gewässer das Baggergut umgelagert werden soll. Auch hier sind zwei Modi denkbar, das kriteriengesteuerte und das zeitgesteuerte Verbringen.

Die Geschiebezugabe stellt einen Spezialfall des zeitgesteuerten Verbringens dar. Hier wird unabhängig von einem Baggerereignis Material eingebracht, das nicht aus dem Gewässer selbst stammt. Daher soll ein dementsprechender Use Case „Geschiebezugabe“ gesondert aufgeführt werden.

Kriteriengesteuertes Verbringen (Umlagern)

Wann immer ein Baggerkriterium dazu führt, dass Material entnommen werden muss, kann auch ein automatisches Umlagern des Baggerguts simuliert werden. Dazu muss dem Baggerschwerpunkt eine oder mehrere Verbringstellen zugeordnet werden. Der **Umlagerungsbeginn** muss nicht explizit durch den Anwender spezifiziert werden, wenn die Baggermenge direkt verbracht werden kann, da in diesem Fall keine Kontamination vorliegt, die eine Behandlung an Land erfordert. Es ist jedoch möglich einen zeitlichen Verzug zu berücksichtigen, um beispielsweise den Anwendungsfall zu simulieren, dass die Aufnahmekapazität des Baggers noch nicht erreicht ist und demzufolge noch auf die Überprüfung anderer Baggerschwerpunkte zu warten.

Da die Verbringstellen nicht unbegrenzt Baggergut aufnehmen können, ist ein Kriterium zur Überprüfung ihrer **Aufnahmekapazität** sinnvoll. Dem Anwender sollte beispielsweise die Möglichkeit gegeben werden das Verbringen in Kolken oder Übertiefen zu modellieren und dabei auch Grenzen ihrer Befüllung vorzugeben. Zur Bestimmung der Aufnahmekapazität muss zudem die Größe der definierten **Verbringfläche** bekannt sein.

Auch das Verbringen unterliegt einem gewissen zeitlichen Verlauf. So ist ein Verbringen über Klappschuten deutlich schneller, als wenn das Material in Sohlnähe durch Pumpen eingebracht wird. Den variablen Verbringzeiten kann durch Vorgabe einer jeweiligen **Verbringrate** Rechnung getragen werden. Das Ende des Verbringvorgangs wird dann ebenfalls durch diese Rate implizit definiert. Des Weiteren ist auch hier die Simulation eines zeitlichen Verzugs denkbar, indem der Verbringbeginn explizit vorgegeben wird. Dadurch kann der Transportweg vom Baggerschwerpunkt zur Verbringstelle oder in Küstengewässern das Verbringen zu einer bestimmten Tidephase abgebildet werden. Zwar steht dieser Verzug kaum im Verhältnis zu morphologisch relevanten Zeitmaßstäben, aber insbesondere das Verbringen zu einer bestimmten Tidephase kann die Baggerstrategie nachhaltig beeinflussen, da das Baggergut ebb- oder flutstrombedingt rasch in unerwünschte, sensitive Bereiche verdriften kann.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Vorgabe einer **Umlagerungsstrategie**. Hier gilt es verschiedene Szenarien zu berücksichtigen. Wird jeweils nur eine Verbringstelle pro Baggerschwerpunkt genutzt, sind keine weiteren Vorgaben erforderlich, als diese Ablagerungsstelle mit der Baggerstelle in Beziehung zu setzen. Komplizierter wird es, wenn mehrere Verbringstellen in Frage kommen. Dann kann das Baggergut beispielsweise prozentual auf die angegebenen Stellen verteilt werden. Des Weiteren sind kompliziertere Algorithmen möglich, bei denen der Weg zwischen Bagger- und Verbringstellen und deren Aufnahmekapazität verwendet werden, um eine Abarbeitungshierarchie zu erstellen.

Zeitgesteuertes Verbringen (Umlagern)

Ähnlich wie beim zeitgesteuerten Baggern muss beim zeitgesteuerten Verbringen der Beginn der Maßnahme als **Umlagerungsbeginn** und das zu **verbringende Volumen** durch den Anwender vorgegeben werden. Dieses kann sich von dem Bagger-volumen unterscheiden, falls die Möglichkeit simuliert werden soll, dass ein Teil des entnommenen Volumens für andere Zwecke genutzt wird. Für die Zuordnung mehrerer Verbringstellen zu einem Baggerschwerpunkt sind keine weiteren Spezifikationen notwendig, da dies durch mehrmalige Definition des Use Cases „Verbringen“ erfolgen kann.

Für die Vorgabe der **Aufnahmekapazität** können auch hier spezifische Parameter vereinbart werden, die das Umlagern in Übertiefen und Kolken berücksichtigen. Wesentlich hierfür und etwas allgemeiner für die sich ergebende Aufhöhung einer Verbringstelle ist jedoch wieder die Größe der definierten **Verbringfläche**. Eine weitere wichtige Vorgabe ist die Dauer des Verbringvorgangs, die durch Angabe eines expliziten Zeitpunkts für das **Umlagerungsende** spezifiziert wird.

Die benötigten Vorgaben zur Simulation von Verbringmaßnahmen sind in Abbildung 5.3 dargestellt. Der zeitliche Verzug, der sich zwischen Bagger- und Verbringvorgang ergeben kann, wird in der Folge beim kriteriengestützten Verbringen vernachlässigt. Er ist im Wesentlichen auf den Transportweg zwischen Bagger- und Verbringstelle zurückzuführen und spielt für die Simulation einer Baggerstrategie mit dieser Funktionalität eine untergeordnete Rolle, da diese am ehesten zu Prognosezwecken genutzt wird.

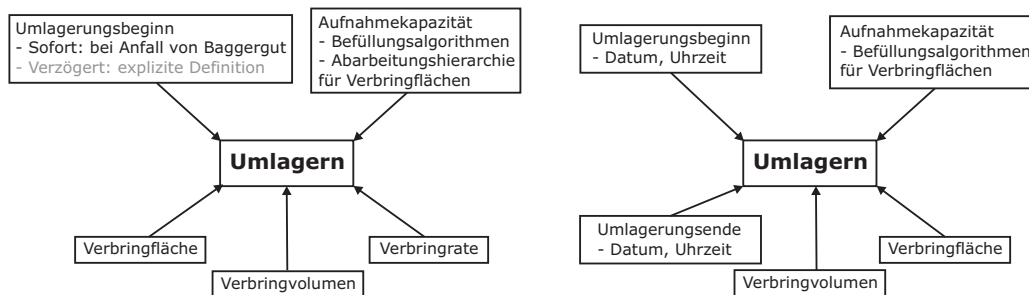


Abbildung 5.3: Use Cases kriteriengesteuertes Verbringen (links) und zeitgesteuertes Verbringen (rechts) und Geschiebezugabe (unten)

Geschiebezugabe

Wie eingangs erwähnt, wird der Use Case „Geschiebezugabe“ in DredgeSim ähnlich dem zeitgesteuerten Verbringen behandelt. Die dazu beschriebenen Vorgaben sind auch für die Simulation einer Geschiebezugabe erforderlich.

Allerdings steht im Unterschied zur Baggergutverbringung noch kein Verbringvolumen zur Verfügung, da bei einer Geschiebezugabe Sedimente aus anderen Quellen verwendet werden. Diese gilt es zu definieren. Bei einem fraktionierten Transportmo-

dell ist daher neben dem Verbringvolumen auch eine **Sedimentverteilung** anzugeben, die verbracht werden soll (Abb. 5.4).

Grundsätzlich ist aber auch denkbar, dass die Geschiebezugabe auf ähnliche Weise wie das kriteriengesteuerte Baggern simuliert wird. Eine Geschiebezugabe ist immer dann erforderlich, wenn in einem bestimmten Bereich ein Sedimentdefizit besteht. Die Sohlhöhe ist infolge von Erosionen verringert worden und muss nun auf ein neues Zielniveau aufgefüllt werden. Dazu kann eine Grenzsohlhöhe definiert werden ab deren Erreichen eine Zufuhr von Sedimenten erforderlich ist. Das erfolgt dann so lange, bis eine Zielsohlhöhe erreicht ist.

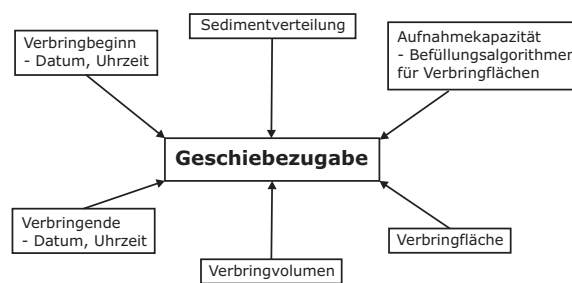


Abbildung 5.4: Use Cases Geschiebezugabe

5.3 Die Definition von Einsatzflächen

In einem ersten Schritt muss es dem Anwender möglich sein, die Einsatzflächen für Bagger- und Verbringmaßnahmen auf einfache Weise zu definieren. Das wurde durch Verwendung des IPDS-Pakets der Bundesanstalt für Wasserbau erreicht (Bundesanstalt für Wasserbau, 2012 [13]).

IPDS steht für Initial Physical Data Set. Dieser Baustein wird in numerischen Modellen zur Definition von flächenhaft vorliegenden Anfangsdaten verwendet. Dadurch können beispielsweise eine über das Modellgebiet unterschiedliche Sedimentverteilung oder räumlich variierende Salzgehalte und Wasserstände als Anfangswerte einer Simulation bereit gestellt werden.

Dazu werden in einer speziellen Steuerdatei Polygonzüge definiert, innerhalb derer festgelegte Werte zu diesen Größen auf die in dem Polygon liegenden Elemente, Kanten oder Knoten interpoliert werden. Dieser Schritt ist essentiell, da alle Informationen eines numerischen Modells auf den Komponenten eines Simulationsgitters abgelegt werden. Auf diese Weise kann einem speziellen Gebiet beispielsweise eine eigene Sedimentverteilung zugewiesen und derart vorgehalten werden, dass sie durch das numerische Modell auch verarbeitet werden kann. In DredgeSim wird das IPDS-Konzept dazu verwendet, durch verschiedene Polygonzüge die Baggereinsatzflächen, die Verbringstellen oder die Beobachtungsgebiete räumlich festzulegen (Abb. 5.5).

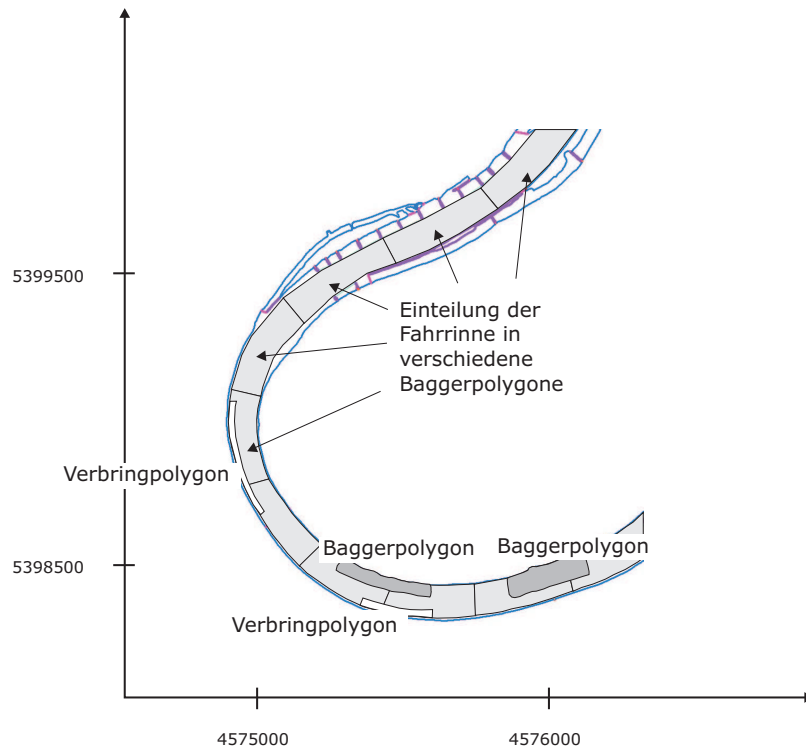


Abbildung 5.5: Die Definition von Baggereinsatzflächen und Verbringstellen im IPDS-Paket durch Polygonzüge

Auf diese Weise kann man beispielsweise die Fahrrinne in verschiedene Beobachtungspolygone unterteilen, auf denen jeweils eine andere Solltiefe definiert ist, Bagger-schwerpunkte explizit für Vorratsbaggerungen definiert oder Kolke zur Baggergutunterbringung festgelegt werden. In der Folge werden alle Elemente oder Knoten herausgefiltert, die innerhalb solcher Polygone liegen (Abb. 5.6). Sie werden in entsprechenden Datenstrukturen gespeichert. Bei den Elementen erfolgt die Prüfung, ob sie zu einer Einsatzfläche gehören oder nicht, anhand ihrer Zentrumskoordinaten. Dadurch können alle zu einer Einsatzfläche gehörenden Elemente und Knoten explizit angesprochen werden, wodurch sie für die numerische Simulation der Unterhaltungsmaßnahmen zugänglich sind.

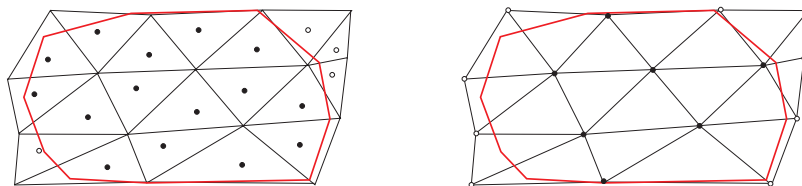


Abbildung 5.6: Die Zuordnung von Gitterelementen oder Gitterknoten im IPDS-Paket

5.4 Die Algorithmisierung von Baggeroperationen

Für die Umsetzung in mathematischen Modellen bedarf es eines definierten Algorithmus zur Simulation von Bagger- und Verbringvorgängen. Dadurch werden sie auf dem Simulationsgitter abgebildet, das auf der Topografie des Untersuchungsgebiets aufgebaut ist.

Die Genauigkeit der Ergebnisse hängt von Aspekten wie der Diskretisierung ab und ob die relevanten Daten auf Knoten oder Elementen gespeichert werden. Durch Kontrollstrukturen wird im Rahmen von Baggerkriterien und zeitgesteuerten Maßnahmen der Baggervorgang initiiert und gesteuert. Sodann wird durch eine Berechnungsvorschrift der Baggervorgang auf dem Berechnungsgitter ausgeführt. Das Gesamtergebnis ist die Algorithmisierung der Baggeroperationen.

Die Berechnungsvorschriften für Baggermaßnahmen werden im Wesentlichen dadurch beeinflusst, ob ein Volumen vorgegeben wird, das entnommen wird oder eine Solltiefe, die durch das Baggern erreicht werden soll. Der erste Fall spiegelt eine zeitgesteuerte Baggeroperation wider, während durch die Definition einer Zieltiefe ein Baggerkriterium vorgegeben wird.

Daher soll gezeigt werden, welche Baggerkriterien in DredgeSim zur Steuerung der Maßnahmen implementiert sind und wie diese im Vergleich mit den zeitgesteuerten Baggervorgängen funktionieren. Zunächst wird jedoch darauf eingegangen, wie die Gestalt des Simulationsgitters und die Datenstruktur die Ergebnisse beeinflussen. Als Beispiel wird die davon abhängige Berechnung des Entnahmevolument näher beschrieben, das für die Auswertung von Prognoserechnungen aber auch die anschließende Simulation von Verbringmaßnahmen bekannt sein muss.

5.4.1 Baggern auf Knoten und Elementen

Je nach verwendetem numerischen Verfahren werden Werte der physikalischen Größen entweder auf Knoten oder auf Elementen gespeichert. Das Finite-Volumen-Verfahren SediMorph verwaltet die Daten beispielsweise auf Elementen, während Sisyphus als Finite-Elemente-Modell die Größen als Knotenwerte verarbeitet. Je nachdem ob eine Unterhaltungsmaßnahme auf Elementen oder Knoten modelliert wird, beeinflusst das die Gestalt der sich daraus ergebenden Topografie in erheblichem Maße.

Wird durch einen Baggervorgang ein Knoten vertieft, werden die direkt angeschlossenen Elemente ebenfalls beeinflusst, da der abgesenkte Knoten auch zu ihnen gehört (Abb. 5.7). Daraus ergibt sich ein definiertes Volumen, das dem Gitter entnommen wird.

Beim Vertiefen eines Elements werden zunächst auch alle dazu gehörigen Knoten mit vertieft. Darüber hinaus werden infolge der Veränderung an den Knotenpunkten des Elements auch alle an diese angrenzenden Nachbarelemente miteinbezogen. Das Entnahmevolumen ist in diesem Fall größer, da mehr Knoten und Elemente involviert sind, als wenn nur an einem Knoten gebaggert wird. Diese Unterscheidung ist bei der Interpretation von Simulationsergebnissen von Bedeutung, da prognostizierte Baggermengen im zweiten Fall überschätzt werden können.

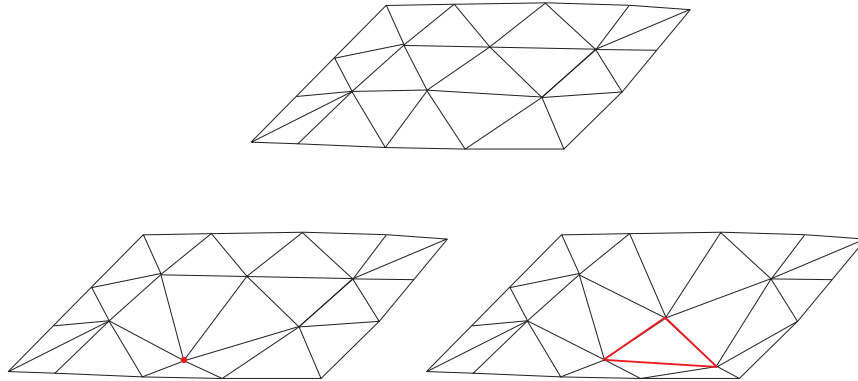


Abbildung 5.7: Vergleich einer Vertiefung aus Baggerungen auf Knoten und Elementen

5.4.2 Entnahme eines Volumens aus dem Simulationsgitter

Infolge der Einbindung in das Simulationsnetz wird bei Baggerung eines Knotens oder Elements, wie soeben gezeigt, nicht nur dieses, sondern auch angrenzende Gitterkomponenten beeinflusst. Das muss bei der Ermittlung des Entnahmevervolumens berücksichtigt werden. Ein möglicher Algorithmus für Dreiecksgitter findet sich in Malcherek (2007, [74]). Dieser soll für beliebige Simulationsnetze erweitert werden. Wenn in einem waagerechten Dreiecksgitter ein Knoten i infolge einer Baggerung abgesenkt wird, ergibt sich für das gesamte Element mit der Grundfläche A eine Volumenänderung von (Abb. 5.8):

$$\Delta V_i = \frac{1}{3} \Delta z_i A.$$

Diese wird negativ sein, da Δz_i infolge der Absenkung negativ ist. Dadurch wird zugleich der Fall abgebildet, dass bei der Baggerung Volumen entnommen wird.

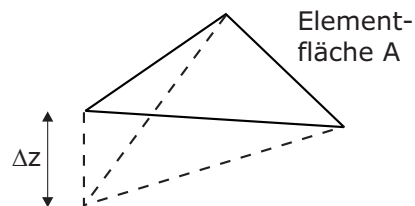


Abbildung 5.8: Vertiefung eines Knotens und daraus folgendes Entnahmevervolumen

Dieser Ansatz entspricht der Volumenberechnung für eine Pyramide mit beliebiger Grundfläche A :

$$V = \frac{1}{3} h A.$$

Dieser gilt auch für schiefe Pyramiden, bei denen die Höhe h , die senkrecht auf der Grundfläche steht, außerhalb von selbiger liegt. Um diesen Sachverhalt auf ein Dreiecksgitter zu übertragen, muss die Differenzhöhe Δz_i in eine Höhe h_i umgerechnet werden. Das wird erreicht, indem das Δz_i mit dem Normaleneinheitsvektor \vec{n}_i multipliziert wird, der senkrecht auf der Grundfläche A_i steht. Für den Berechnungsansatz des Entnahmevolumens ergibt sich damit:

$$\Delta V_i = \frac{1}{3} \vec{n}_i \Delta z_i A.$$

Zur Verifikation des Ansatzes sei angenommen, dass jeder Knoten des Dreieckselements j um den selben Betrag $\Delta z_i = \text{konst.}$ abgesenkt werden soll und lediglich die Volumenänderung ΔV über dieses eine Element bestimmt wird. Diese ergibt sich sodann aus der Summierung der knotenbezogenen Änderungen über jenes Element und ist an deren Ende das Produkt aus der konstanten Höhenänderung Δz und der Grundfläche des Elements A_j (Abb. 5.9):

$$\Delta V = \sum_{i(j)=1}^3 \frac{1}{3} \vec{n}_i \Delta z_i A_j = \vec{n}_i \Delta z A_j.$$

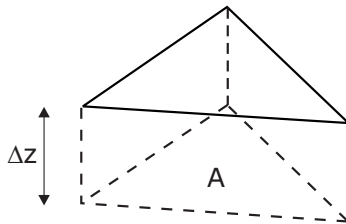


Abbildung 5.9: Vertiefung von drei Knoten eines Dreieckselements und daraus folgendes Entnahmevolumen

Die Absenkung eines Knotens i betrifft im Gitterverband jedoch nicht nur ein Element, sondern alle Elemente j , zu denen dieser Knoten gehört. Die daraus folgende Volumenänderung ergibt sich somit aus der Summierung über alle an diesen Knoten angeschlossenen Elemente des Dreiecksgitters mit der Anzahl m (Abb. 5.10):

$$\Delta V_i = \frac{1}{3} \Delta z_i \sum_{j=1}^m \vec{n}_i A_j = \Delta z_i \sum_{j=1}^m \frac{1}{3} \vec{n}_i A_j.$$

Zur Ermittlung des gesamten Entnahmevolumens müssen alle auf diese Weise berechneten knotenbezogenen Einzelvolumina addiert werden:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^k \Delta V_i = \sum_{i=1}^k \Delta z_i \sum_{j=1}^m \frac{1}{3} \vec{n}_i A_j.$$

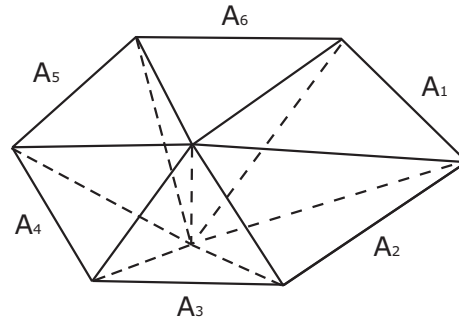


Abbildung 5.10: Vertiefung eines Knotens im Gitterverband und daraus folgendes Entnahmeevolumen

Für ein Simulationsgitter, das aus n -Ecken mit einer unterschiedlichen Anzahl an Knoten pro Element besteht, ändert sich die Formel nicht, da die Formel zur Volumenberechnung einer Pyramide auch für beliebige Grundflächen gilt. Die Volumenänderung aus der Absenkung eines Knotens im Gitterverband ergibt sich somit aus dem Summierung der m angeschlossenen Elementflächen:

$$\Delta V_i = \Delta z_i \sum_{j=1}^m \frac{1}{3} \vec{n}_j A_j.$$

Die Ermittlung des gesamten Entnahmeevolumens folgt wieder, indem die auf diese Weise berechneten Einzelvolumina aller gebaggerten Knoten addiert werden.

5.4.3 Baggerkriterien zur automatischen Baggerinitiierung

Für DredgeSim wurden verschiedene Baggerkriterien entworfen, die Ergebnisse des modellierten Sedimenttransports bewerten und in der Folge gegebenenfalls einen Baggervorgang einleiten, wenn eine kritische Tiefe unterschritten wird. Dazu wird die Sohlhöhe z_{ist} eines Elements mit einem Grenzwert z_{krit} verglichen. Wird dieser überschritten, erfolgt eine Baggerung auf eine festzulegende Zieltiefe z_{soll} . Ist das nicht der Fall, wird die Rechnung fortgesetzt und zum nächsten Beobachtungszeitpunkt die Prüfung wiederholt (Abb. 5.11).

Eine derartige Prüfung kann anhand verschiedener Kenngrößen erfolgen, die ein Maß für die Ablagerung von Sedimenten darstellen. In DredgeSim kann der Anwender zwischen der Sohlhöhe, der aktuellen Wassertiefe und einer Tiefe bezogen auf ein Referenzniveau auswählen. Außerdem hat das Baggern auf einem Element praktisch keine Relevanz, da unabhängig von der Feinheit der Diskretisierung des Simulationsgebiets eine Baggereinsatzfläche in der Regel nicht durch ein einziges Element beschrieben werden kann. Hier muss sicher gestellt werden, dass Knotengruppen oder ganze Polygonflächen gebaggert werden können. Im Folgenden sollen die einzelnen Baggerkriterien und ihre Anwendungsoptionen kurz vorgestellt werden.

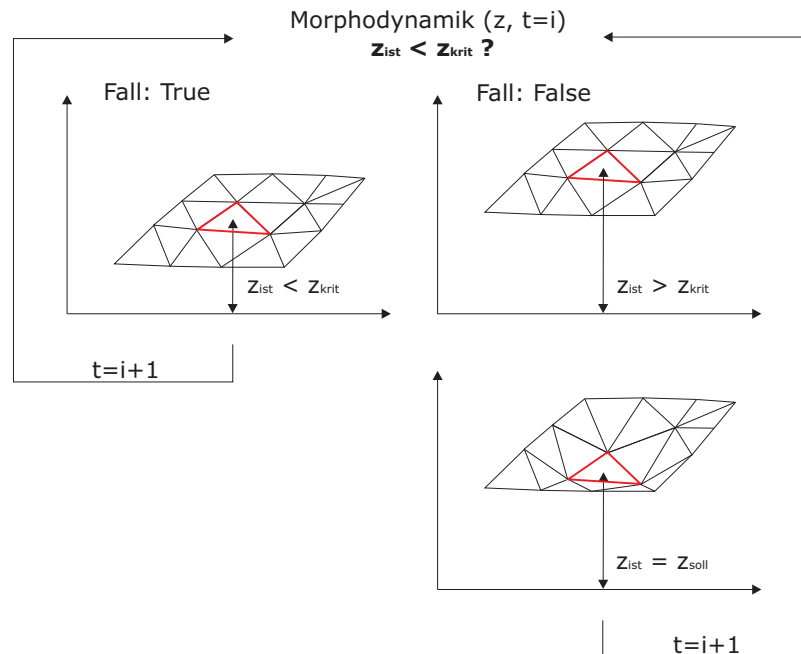


Abbildung 5.11: Die Prüfung der Sohlhöhe eines Elements im Rahmen eines Baggerkriteriums

Sohlhöhenkriterium

Das Sohlhöhenkriterium ist das einfachste Baggerkriterium in DredgeSim. Hier werden die aktuellen Werte der Sohlhöhe z_{ist} von dem Morphodynamikmodul importiert, um dann, analog zu oben beschriebener Vorgehensweise, das Erfordernis eines Baggervorgangs zu prüfen.

In Erweiterung des vorangegangenen Falls erscheint es sinnvoll, nicht nur ein Element sondern mehrere Elemente in einem festgelegten Bereich gemeinsam zu behandeln. Das kann in radikaler Weise dadurch erfolgen, dass alle Elemente einer Baggerfläche gebaggert werden, sobald nur ein Element das Baggerkriterium erfüllt. In diesem Fall würde eine Vorratsbaggerung simuliert werden. Eine andere Möglichkeit ist die Berücksichtigung einer Mindestbaggermenge innerhalb eines definierten Umkreises. Hier wird eine Menge an Elementen gebaggert, die innerhalb eines definierten Umkreises das Baggerkriterium erfüllen und dabei mindestens eine bestimmte Baggermenge hervorrufen. Diese Anwendungsmöglichkeit wird am Ende dieses Unterkapitels noch eingehender erläutert.

Das Sohlhöhenkriterium kann ausschließlich in vergleichsweise ebenen Gewässern, mit mäßigem Gefälle und geringen Sohlprüngen angewendet werden. Der Grund für diese Beschränkung liegt vor allem darin, dass über ein Beobachtungspolygon eine festgelegte kritische Tiefe definiert werden muss. Bei Fließgewässern mit einem mittleren bis starken Gefälle bedeutet das, dass eine große Anzahl relativ kleiner Beobachtungspolygone nötig wären, um den Sohlhöhenverlauf adäquat abbilden zu können. In der Praxis wird dieses Baggerkriterium aus diesen Gründen eine geringe Relevanz haben.

Die Analyse der Wassertiefe

Die für die Schifffahrt entscheidende Größe ist die Fahrwassertiefe. Daher erscheint es logisch in einem Simulationsmodell die aktuelle Wassertiefe zu betrachten, um ein Baggerkriterium festzulegen. Dieses macht vor allem im Binnenbereich Sinn, wo im Gegensatz zu den Ästuaren keine Tideeinflüsse auftreten und über kürzere Simulationszeiten daher von einer konstanten Wasserspiegellage ausgegangen werden kann. In gleicher Weise wie im vorher dargestellten Fall können daher auch alle Elemente eines definierten Baggerpolygons hinsichtlich ihrer aktuellen Wassertiefe h_{ist} überprüft werden. Wird eine vorzugebende Mindestwassertiefe h_{krit} auf einem dieser Elemente überschritten, wird diesem eine neue Sohlhöhe h_{soll} zugewiesen, die sich aus einer definierten Sollwassertiefe errechnet (Abb. 5.12).

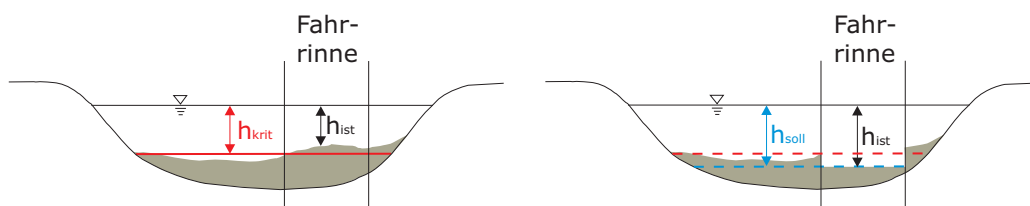


Abbildung 5.12: Baggerkriterium bezüglich der Wassertiefe

Im Gegensatz zu dem vorangegangenen Baggerkriterium wird somit den Elementen einer Baggerstelle nicht die gleiche Sohlhöhe zugewiesen, sondern eine flächenhaft variable Höhe, die sich am Wasserspiegelgefälle orientiert. Typische Einsatzgebiete sind Fließgewässerabschnitte mit relativ konstanten Abflussverhältnissen, wie zum Beispiel unterhalb von Stauhaltungen oder entlang von Kanälen.

Das Referenzwasserspiegellagenkriterium

Wie in Kapitel 3.3 beschrieben, werden Nassbaggermaßnahmen in Form der Solltiefen auf ein festes Referenzniveau bezogen. Dieses ist im Fall von Küstengewässern das Normalnull oder das Seekartennull und an Binnengewässern eine berechnete Referenzwasserspiegellage. In beiden Bereichen handelt es sich um fest definierte Bezugsniveaus, wodurch eine Baggerung weitgehend unabhängig von aktuellen Wasserspiegelverhältnissen geplant werden kann.

Da es sich hierbei um das Standardvorgehen handelt, muss auch dieser Vorgang als Baggerkriterium in DredgeSim berücksichtigt werden, um eine möglichst realistische Simulation von Nassbaggermaßnahmen zu ermöglichen. In dem Referenzwasserspiegellagenkriterium muss der Anwender zunächst den Referenzwasserspiegel definieren. Dazu müssen in einer externen Datei Profile definiert werden, denen ein bestimmter Wert für den Referenzwasserspiegel zugewiesen wird (Abb. 5.13). In einer Interpolationsroutine werden sodann Werte für die Gitternetzpunkte und -elemente ermittelt, die innerhalb von zwei Profilen liegen.

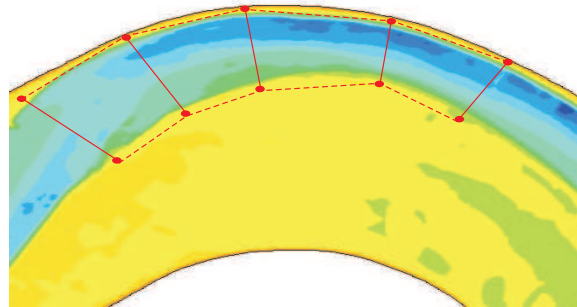


Abbildung 5.13: Definition von Profilen zur Interpolation des Referenzwasserspiegels

Für die Prüfung, ob eine Baggerung ausgeführt werden kann, wird aus diesen Werten und der aktuellen Sohllage die Tiefe unterhalb des Referenzniveaus h_{ist} für die betrachteten Punkte bestimmt. Liegt diese unterhalb einer kritischen Tiefe h_{krit} ist eine Baggerung auf die Zieltiefe h_{soll} notwendig (Abb. 5.14).

Diese Art des Baggerkriteriums kann in verschiedenen Fragestellungen zum Einsatz kommen. Es eignet sich aber insbesondere für die Untersuchung des Bedarfs an Nassbaggereinsätzen und die Vorhersage dabei anfallender Baggermengen.

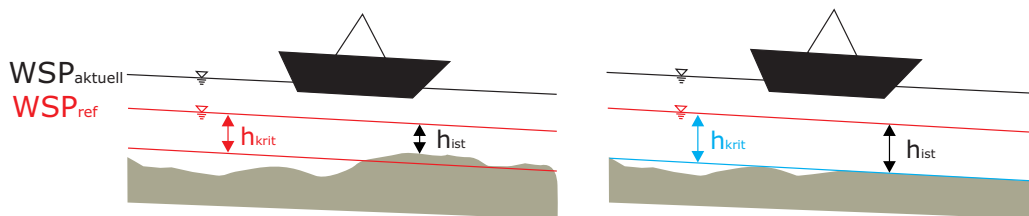


Abbildung 5.14: Kriterium bezüglich eines Referenzwasserspiegels

Berücksichtigung eines Mindestbaggervolumens

Die soeben beschriebenen Baggerkriterien sind darauf ausgerichtet, einzelne Knoten oder Elemente zu detektieren, die gebaggert werden müssen. In der Folge können diese dann als singuläres Ereignis vertieft werden oder aber vorsorglich die gesamte sie umgebende Fläche. Eine solche Vorratsbaggerung soll in der Folge vernachlässigt werden, da sie nicht besonders präzise beschrieben werden kann. Auch einzelne Punkte werden in der Realität eher nicht gebaggert, da solche Stellen in der Regel umfahren werden können. Zudem ist es wirtschaftlich nicht lohnenswert, aufgrund singulärer Untiefen gleich einen Nassbaggereinsatz zu planen. Vielmehr wird abgewartet, bis eine größere Menge an Baggergut anfällt, sofern die Schifffahrt dabei nicht beeinträchtigt wird. Diese Vorgehensweise kann durch eine Verfeinerung der Baggerkriterien in Dredge-Sim simuliert werden. Dazu wird ein Mindestbaggervolumen definiert, das in einem

bestimmten Umkreis anfallen sollte, bis eine Baggerung der betroffenen Stellen eingeleitet wird. Ein solches Mindestvolumen kann sich beispielsweise an der Laderaumgröße eines Saugbaggers orientieren.

In der programmtechnischen Umsetzung wird dann überprüft, wie viele Knoten oder Elemente im Umkreis einer zu baggernden Stelle ebenfalls das Baggerkriterium erfüllen und welches Gesamtbagervolumen dabei anfällt (Abb. 5.15).

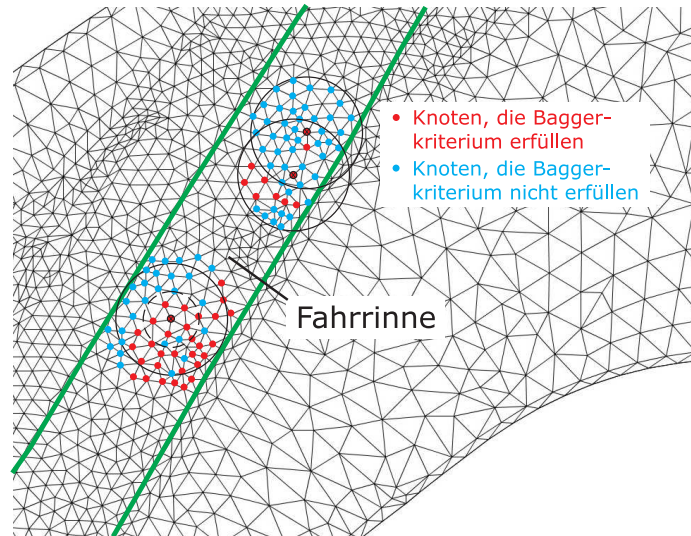


Abbildung 5.15: Ermittlung aller baggerrelevanten Knoten innerhalb eines definierten Umkreises

Der Umkreis ist anhand seines Radius um den Prüfpunkt (Knoten oder Schwerpunkt einer Elementfläche) zu spezifizieren. Ausgehend von den Koordinaten des Prüfpunkts $P_0(x_0, y_0)$, die den Mittelpunkt des Umkreises bilden, wird der Ortsvektor zu den umliegenden Punkten $P_j(x_j, y_j)$ berechnet. Wenn die berechnete Länge eines Vektors kleiner ist als der Radius r des Umkreises, liegt der betreffende Punkt in selbigem.

$$\sqrt{(x_0 - x_j)^2 + (y_0 - y_j)^2} < r$$

Das Gesamtbagervolumen ergibt sich dann aus der Summe der Einzelvolumina innerhalb eines Umkreises. Dieses wird mit dem Mindestbagervolumen verglichen, um zu entscheiden, ob diese Stellen auch wirklich baggert werden sollen.

Baggeraten

Bislang wurde nur der Umfang eines Nassbaggervorgangs diskutiert, um diesen für eine numerische Simulation zugänglich zu machen. Ein weiterer relevanter Punkt ist der zeitliche Rahmen für eine Unterhaltungsmaßnahme. Die Entscheidung, ob eine Baggerung erforderlich ist, kann innerhalb eines Zeitschritts des numerischen Modells getroffen werden und die daran geknüpften Berechnungen der neuen Zieltiefen sowie

des Entnahmevolumentums in diesem Moment erfolgen. Die Ausführung sollte sich jedoch aus zwei Gründen über mehrere Zeitschritte erstrecken:

1. Die Simulation wird dadurch realistischer, da sich ein Nassbaggervorgang immer über mehrere Stunden bis Tage erstreckt. Der Zeitschritt eines numerischen Modells liegt üblicherweise im Sekunden- bis Minutenbereich.
2. Ein morphodynamisches Modell verfügt immer über eine definierte Austauschschicht. Diese begrenzt die zulässigen Sohlhöhenänderungen innerhalb eines Zeitschritts auf ein bestimmtes Maß. Bei einer Baggerung kann eine Zieltiefe ermittelt werden, die dieses Maß innerhalb eines Zeitschritts überschreitet, was nicht zulässig wäre.

Zur Umsetzung wurde eine Baggerrate q_D eingeführt, die für jeden Baggereinsatz einzeln vereinbart werden kann. Diese ist in der Einheit m^3/s vorzugeben und in ihrer Größe beliebig wählbar. Sie geht in die Berechnung der aktuellen Sohlhöhe z eines Elements oder Knotens dergestalt ein, dass in Abhängigkeit vom Zeitschritt Δt die Sohle um das Maß Δz bis zum vorgegebenen Unterhaltungsziel vertieft wird (Abb. 5.16). Dieses wirkt als Abbruchkriterium, das bei Erreichen zur Beendigung des Baggervorgangs auf den entsprechenden Knoten und Elementen führt.

$$\Delta z(\Delta t) = \frac{q_D \cdot \Delta t}{A}$$

Durch die Möglichkeit verschiedene Baggerraten einzustellen kann auch der Einsatz unterschiedlicher Baggertypen berücksichtigt werden, die sich hinsichtlich ihrer Förderraten unterscheiden. So erreicht der Eimerkettenbagger “Erik Viking“ je nach Bodenbeschaffenheit Förderraten von $500\text{-}1500 \text{ m}^3/\text{h}$, während der Schneidkopfsaugbagger “Spüler V“ Förderströme von $4000\text{-}5000 \text{ m}^3/\text{h}$ erzielt (beide in Kühn, 1997 [67]).

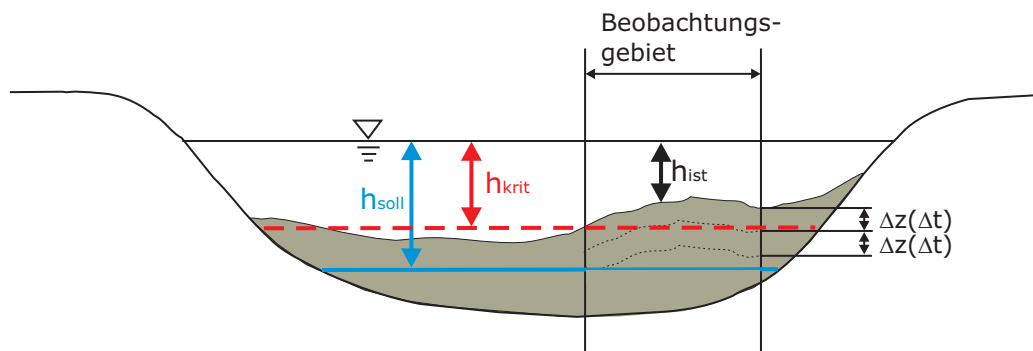


Abbildung 5.16: Vertiefung eines Baggerpolygons zu jedem Zeitschritt um das Maß Δz bis zum Erreichen des Aushubziels

Berechnung des Entnahmevolumentens

Ein wesentliches Ergebnis ist das Entnahmevolumen, das während einer automatischen Baggerung anfällt. Dieses lässt sich mit Hilfe der in Kapitel 5.4.2 beschriebenen Vorgehensweise berechnen. Die Differenziefen aus der Vertiefung eines Knotens oder Elements ergeben sich aus dem aktuellen Baggerfortgang, die wiederum von der Baggerrate und der Zieltiefe des gewählten Baggerkriteriums abhängen.

Eine einfache Aufsummierung aller knoten- oder elementbezogenen Entnahmevolumenta eines Baggerpolygons führt zu der gesamten Baggermenge. Das gesamte Entnahmevolumen V_{ges} wird in ein Feststoffvolumen V_S und ein sich aus der Porosität u ergebendes Wasservolumen V_W aufgeteilt.

$$\begin{aligned} V_{ges} &= V_S + V_W \\ V_{ges} &= (1 - u) V_{ges} + u V_{ges} \end{aligned}$$

Das Feststoff- oder Sedimentvolumen lässt sich sodann weiter in die verschiedenen Sedimentfraktionen b aufteilen, wobei sich die Fraktionierung aus den prozentualen Anteilen p der aktuellen Kornverteilung der insgesamt d Fraktionen an der Baggerstelle ergibt.

Der Zwischenschritt der Ermittlung des aktuell vorhandenen Entnahmevolumentens ist für die Simulation des Verbringvorgangs wichtig, der direkt im Anschluss einer Baggerinitiierung erfolgen kann, da dann bereits Material dazu bereit steht. Auch die Ermittlung des fraktionierten Baggervolumens ist an dieser Stelle von Bedeutung, da die zu verbringende Sedimentverteilung die Sedimentstruktur im Bereich der Verbringstelle maßgeblich beeinflusst.

$$\begin{aligned} V_{ges} &= \sum_{b=1}^d V_{frac,b} + u V_{ges} \\ V_{ges} &= \sum_{b=1}^d p(b) V_S + u V_{ges} \\ V_{ges} &= (1 - u) \sum_{b=1}^d p(b) V_{ges} + u V_{ges} \end{aligned}$$

Notwendige Informationen

Unabhängig davon, ob nun die Wassertiefe oder die Sohlhöhe untersucht wird, sind demnach bestimmte Informationen immer für die Anwendung eines Baggerkriteriums erforderlich. Zusammengefasst sind das:

- Lage und Größe der Einsatzfläche
- Kritische Tiefe
- Solltiefe
- Mindestbaggervolumen
- Baggerrate.

5.4.4 Zeitgesteuerte Baggeroperationen

Zeitgesteuerte Baggeroperationen folgen einem kalendarischen Ablauf. Wie in den Use Cases dargestellt, beginnen sie zu einem definierten Zeitpunkt und sind zu einem weiteren, festgelegten oder zu ermittelnden Zeitpunkt beendet. Dieser Zeitpunkt lässt sich bestimmen, wenn das Aushubziel erreicht ist oder das Entnahmevolumen verarbeitet wurde. In DredgeSim wird vereinfacht davon ausgegangen, dass der Endzeitpunkt bekannt ist.

Neben dem Bearbeitungszeitraum aus Beginn und Ende wird das Entnahmevolumen sowie die Lage und Ausdehnung für eine Baggerfläche spezifiziert. Zur Berechnung der sich einstellenden neuen Sohlhöhe, die sich nach der Baggerung einstellt, wird aus der gesamten Baggerfläche und dem vorgegebenen Baggervolumen ein Sohlhöheninkrement Δz berechnet. Alle Elemente oder Knoten innerhalb eines Baggerpolygons werden insgesamt um diesen Wert vertieft. Zur korrekten Darstellung des zeitlichen Verlaufs wird aus der Differenz zwischen Endzeitpunkt und Beginn der Baggermaßnahme und dem Baggervolumen eine Baggerrate q_D bestimmt. Aus ihr lässt sich sodann die Baggertiefe Δz pro Zeitschritt Δt auf einem Element oder Knoten errechnen.

$$\Delta z(\Delta t) = \frac{q_D \cdot \Delta t}{A} = \frac{V}{A(t_e - t_a)} \cdot \Delta t$$

Man erkennt, dass bei dieser Art des Algorithmus die Gestalt der Sohle durch das Baggern unverändert bleibt. Sie wird lediglich um den Wert Δz im Bereich der Baggerfläche abgesenkt (Abb. 5.17). Eine konstante Absenkung der Sohle beim Baggervorgang ist nur bei einer vergleichsweise ebenen Ausgangssohle sinnvoll, weshalb die Anwendung des zeitgesteuerten Baggers von Fall zu Fall genau analysiert werden muss. Eine Alternative bei einer sehr unebenen Ausgangssohle ist die Aufteilung des Baggerabschnitts in mehrere Teilgebiete, die unterschiedlich intensiv gebaggert werden.

Auch wenn dies nur eine grobe Vereinfachung darstellt, kann durch diese Vorgehensweise in erster Näherung eine Simulation zeitgesteuerter Prozesse erfolgen. Insbesondere abgeschlossene Unterhaltungsmaßnahmen sind gut hinsichtlich ihres Ortes und des Entnahmevolumens dokumentiert. Zudem übersteigen solche anthropogenen

Eingriffe in Bezug auf die Sohlhöhenänderung häufig das Ausmaß natürlicher Sedimenttransportprozesse, wodurch die Simulation von zeitgesteuerten Unterhaltungsmaßnahmen einen wichtigen Aspekt darstellen kann, um die gesamte Sohlevolution eines Fließgewässers zu simulieren. Darüber hinaus können auf diese Weise verschiedene Baggerstrategien auf einfache Weise untersucht werden, indem beispielsweise die Baggermengen erhöht oder verringert werden und das Intervall der Baggereinsätze in der Folge verlängert oder verkürzt wird.

Zusammengefasst müssen folgende Informationen bekannt sein:

- Lage und Größe der Einsatzfläche
- Beginn der Maßnahme
- Ende der Maßnahme
- Baggervolumen.

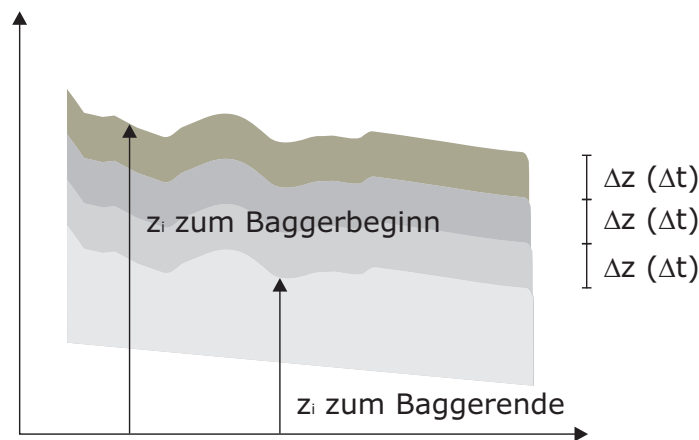


Abbildung 5.17: Sohlhöhenabsenkung infolge Baggers mit konstantem Δz für alle Elemente eines Baggerpolygons

5.5 Die numerische Erfassung von Verbringmaßnahmen

Die Berücksichtigung von Verbringvorgängen stellt einen wichtigen Aspekt bei der Simulation von Unterhaltungsmaßnahmen dar, da dadurch Baggergutumlagerungen erfasst werden können, die die wichtigsten Unterhaltungsmaßnahmen sind. Denn wie bereits erläutert, ist die Umlagerung von Baggergut im Gewässer der häufigste Entledigungspfad. Gerade die Suche nach geeigneten Verbringstellen ist im Zuge steigender Baggermengen eine große Herausforderung, für die sich insbesondere numerische Modelle eignen.

Grundsätzlich kann zwischen einer gleichmäßigen Verbringung von Baggergut, bei der sich eine konstante Aufhöhung ergibt, und einem variablen Vorgang, bei dem in tieferen Stellen mehr Material eingebracht wird als in flacheren, unterschieden werden. Beide Varianten der Verbringung von Sedimenten können bei zeitgesteuerten Operationen und kriteriengesteuerten Unterhaltungsmaßnahmen simuliert werden, indem sie für jedes Verbringpolygon aktiviert werden können.

5.5.1 Kriteriengesteuertes und zeitgesteuertes Verbringen

Auch beim Verbringen ist es möglich, zwischen einer kriteriengesteuerten und einer zeitgesteuerten Operation zu wählen. Beim kriteriengesteuerten Verbringen wird das zuvor im Rahmen eines Baggerkriteriums gebaggerte Sediment auf einer oder mehreren Verbringstellen untergebracht. Auch hier muss eine Verbringrate spezifiziert werden, die den zeitlichen Ablauf eines Verbringvorgangs bestimmt. Sie ist identisch zur Baggerrate definiert, nur mit dem Unterschied, dass sie in die entgegengesetzte Richtung wirkt, indem sie eine Aufhöhung beschreibt. Es ist auch möglich mehrere Verbringpolygone von einer Baggerstelle aus mit Baggergut zu beaufschlagen. In diesem Fall muss die prozentuale Aufteilung angegeben werden. Zusammengefasst sind bei diesem Verfahren folgende Vorgaben erforderlich:

- Anzahl der Verbringflächen
- Lage und Größe der Einsatzflächen
- Prozentuale Verteilung des Baggerguts auf die Verbringflächen
- Verbringrate.

Dem zeitgesteuerten Verbringen liegen die gleichen Parameter zu Grunde, wie dem zeitgesteuerten Baggern. Auch hier muss ein Anfangs- und Endzeitpunkt und das Volumen vorgegeben werden, das auf einer spezifizierten Einsatzfläche verbracht werden soll. Das Verbringvolumen kann kleiner als das Baggervolumen sein, da auch der Anwendungsfall auftreten kann, dass ein Teil des Baggerguts für andere Zwecke verwendet werden soll. Damit sind folgende Informationen für das zeitgesteuerte Verbringen nötig:

- Lage und Größe der Einsatzfläche
- Beginn der Maßnahme
- Ende der Maßnahme
- Verbringvolumen.

Einen Sonderfall des zeitgesteuerten Verbringens stellt die Geschiebezugabe dar. Anders als bei den sonstigen Verbringvorgängen, bei denen Baggergut einer bekannten Kornzusammensetzung verarbeitet wird, kann hier Material von außen in das System gebracht werden. Dazu muss eine Sedimentverteilung explizit vorgegeben werden.

5.5.2 Das gleichmäßige Verbringen von Baggergut in der Fläche

Die einfachste Art einen Verbringvorgang zu simulieren ist aus dem vorhandenen Baggergutvolumen und der Grundfläche der Umlagerungsfläche eine konstante Aufhöhung zu berechnen, die dann für die gesamte Einsatzfläche gilt. Das dazugehörige Δz und die Zieltiefe z_{aim} lassen sich mit Hilfe des zwischengespeicherten Sedimentvolumens V_S , der Element- bzw. assoziierten Knotenflächen A des Verbringpolygons und der Porosität u wie folgt ermitteln:

$$\Delta z = \frac{V_S}{\sum A(1-u)}$$

$$z_{aim} = z + \Delta z .$$

Die hierbei verwendete Porosität entspricht in erster Näherung der vorliegenden Porosität im Bereich der Verbringfläche. Das bedeutet, dass die Porosität nach dem Auftragen von Baggergut die gleiche ist wie zuvor. Zukünftig kann hier auch eine neue Porosität vorgesehen werden, die sich aus der Schüttung des Baggerguts unter Wasser ergibt. Um den Vorgang jedoch in seiner Gänze richtig zu beschreiben, müsste dann im Anschluss ein Konsolidierungsmodell vorgesehen werden, um die Änderung der Porosität infolge der Belastung der Sohle durch das eingebrachte Baggergut simulieren zu können.

Die Gestalt der Ausgangssohle im Bereich der Verbringfläche ändert sich durch diesen Berechnungsalgorithmus nicht, sondern wird lediglich durch den Betrag Δz in der Vertikalen verschoben. Somit ist diese vereinfachte Vorgehensweise nur für relativ ebene Ausgangssohlen geeignet, da beim Verbringen in der Regel das Ziel verfolgt wird an tieferen Stellen größere Mengen Baggergut zu verbringen, um den Unterschied zwischen tieferen Stellen und Untiefen auszugleichen und die Gewässersohle dadurch einzuebnen (Abb. 5.18).

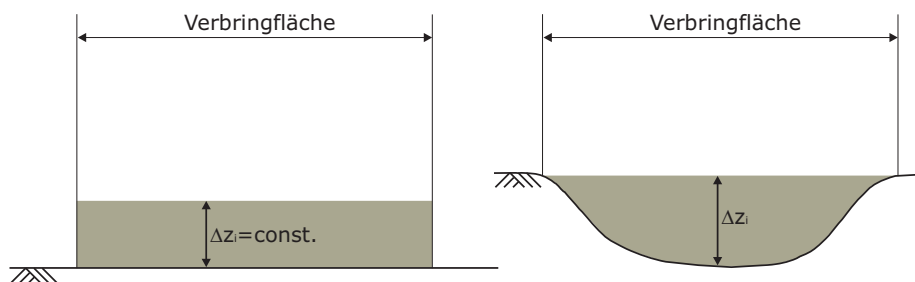


Abbildung 5.18: Vergleich zwischen gleichmäßigem Verbringen und dem Befüllen von Kolken

5.5.3 Das Verbringen in Kolken

Eine weitaus realistischere Variante der Simulation von Verbringvorgängen besteht demnach darin, tiefe Stellen eines Verbringpolygons mit grösseren Mengen Baggergut zu belegen als flache, so dass sich am Ende einer Umlagerung eine ebene Oberfläche einstellt. Ein solches Vorgehen entspricht beispielsweise der Verfüllung von Kolken. Das Ziel ist die Ermittlung eines Verfüllhorizonts, der parallel zur Wasseroberfläche liegt. Dazu muss ein variables Δz für jeden Knoten oder jedes Element eines Verbringpolygons bestimmt werden (Abb. 5.19).

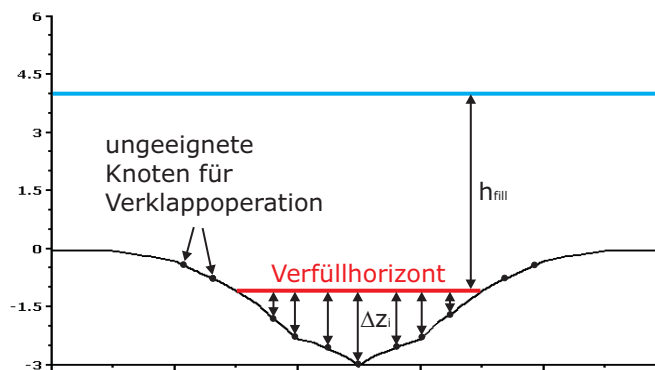


Abbildung 5.19: Das Verbringen mit variabler Differenzhöhe und der sich dabei einstellende Zielhorizont bei der Befüllung von Kolken

Bei der Bestimmung des Zielhorizonts muss beachtet werden, dass sich zum einen in der Summe aller einzelnen verbrachten Knoten- oder Elementvolumen das gesamte Verbringvolumen einstellt und zum anderen nur Knoten und Elemente berücksichtigt werden, auf die auch wirklich Material aufgebracht werden kann. So kann sich in dem obigen Beispiel bei einem geringen Verbringvolumen eine Fülllinie einstellen, die unterhalb der höher liegenden Knoten oder Elemente des Kolks liegen, die dann nicht für das Verbringen verwendet werden können. Die Bestimmung der Knoten und Elemente, die unter der Fülllinie liegen, ist wichtig, da auf diese Weise wiederum die Einzelvolumen bestimmt werden, die in die Berechnung des gesamten Verbringvolumens eingehen. Es besteht also eine gegenseitige Abhängigkeit zwischen der Lage der Fülllinie und der verwendeten Knoten bzw. Elemente, die in einem Kolk liegen.

Es handelt sich hier um ein Optimierungsproblem, bei dem die Verfülllinie derart bestimmt werden muss, dass alle unter ihr liegenden Knoten eines Verbringpolygons so tief liegen, dass der damit zur Verfügung stehende Raum dem unterzubringenden Volumen entspricht. Da deren Lage aber von dem explizit eingehenden Gesamtverbringvolumen und den implizit über ihre assoziierten Flächen zu berücksichtigenden Knoten und Elementen abhängt, die für eine Verbringung in Frage kommen, existiert hier keine analytische Lösung. Es ist ein iteratives Verfahren notwendig, das als Ergebnis den Wert einer Differenzhöhe h_{fill} , bezogen auf eine Referenzwasserspiegellage, liefert (Maerker & Malcherek, 2009 [69]). Der Wert für h_{fill} ist dabei konstant und

ändert sich demzufolge auf einem Verbringpolygon nicht (Abb. 5.19).

In dem iterativen Verfahren wird ausgehend von einem Startwert für h_{fill} dieses so lang variiert, bis das Füllvolumen V_{fill} , das unterhalb von h_{fill} verbraucht wurde, dem gesamten Verbringvolumen V_{disp} entspricht. Das Füllvolumen berechnet sich wie erwähnt aus den Einzelvolumen der Aufhöhung der betreffenden Knoten und Elemente. Diese hängen von der Lage des Referenzwasserspiegels z_s an der entsprechenden Stelle, der konstanten Füllhöhe h_{fill} , der aktuellen Höhe z und der Fläche A ab. Für ein knotenbasiertes Lösungsschema ergibt sich

$$V_{fill} = \sum_{i=1}^l (z_{s,i} - h_{fill} - z_i) A_i ,$$

mit den assoziierten Knotenflächen A_i . Durch Umformen erhält man daraus eine Bestimmungsgleichung für die notwendige Fülltiefe h_{fill} , wobei hierin $V_{fill} = V_{disp}$ angenommen wird:

$$h_{fill} = \frac{\sum_{i=1}^l ((z_{s,i} - z_i) A_i) - V_{fill}}{\sum_{i=1}^l A_i} .$$

Darin müssen die insgesamt zu berücksichtigenden Knoten l ermittelt werden, um die zwei enthaltenen Summationen durchführen zu können. Die betroffenen Knoten müssen die Bedingung erfüllen:

$$z_i < z_{si,ref} - h_{fill}$$

Zudem müssen sie in dem jeweiligen Verbringpolygon liegen, um verwendet werden zu können. Dadurch hängt die Anzahl der zulässigen Knoten l wieder von h_{fill} ab. Aus dieser Bedingung und der Bestimmungsgleichung für h_{fill} kann nun ein iteratives Verfahren konstruiert werden, bei dem die betroffenen Knoten l während des Zeitschritts t für h_{fill}^t ermittelt werden, um daraus h_{fill}^{t+1} zu bestimmen.

$$h_{fill}^{t+1} = \frac{\sum_{i=1}^{l(h_{fill}^t)} ((z_{s,i} - z_i) A_i) - V_{fill}^t}{\sum_{i=1}^l A_i}$$

Dieser Ablauf wird bei der Berechnung des Verfüllvorgangs so lange wiederholt, bis das folgende Abbruchkriterium erfüllt ist oder die Anzahl der zugelassenen Iterationen zur Erfüllung dieser Bedingung überschritten werden.

$$\|V_{disp} - V_{fill}(h_{fill})\| \leq \varepsilon$$

Das Iterationsschema lässt sich demnach wie folgt zusammen fassen:

1. Bestimmung der zulässigen Knoten l für h_{fill}^t
2. Berechnung von h_{fill}^{t+1} aus l und für $V_{fill}^t = V_{disp}$
3. Berechnung von V_{fill}^{t+1} aus h_{fill}^{t+1} und l
4. Prüfung über Erfolg der Berechnung aus Vergleich von V_{fill}^{t+1} und V_{disp}
5. Wiederholung der Prozedur mit $h_{fill}^t = h_{fill}^{t+1}$, falls die Prüfung negativ ausfällt

Die maximal zulässige Abweichung ε wird wie der Startwert h_{fill}^0 und die Anzahl der zulässigen Iterationen durch den Anwender vorgegeben.

5.5.4 Das Einmischen von fraktioniertem Baggergut in die Austauschschicht

Aus den Fraktionsanteilen des Baggerguts und jenen an der Verbringstelle wird eine neue Komposition der Sedimentverteilung an der Verbringstelle berechnet. Hier wird in der Folge von einem einfachen Einschichtmodell der Austauschschicht ausgegangen. Aus der sich ergebenden Aufhöhung und der Dicke der Austauschschicht wird das Verhältnis bestimmt, zu welchen Anteilen sich die Austauschschicht aus der zu verbringenden und der aktuellen Kornverteilung zusammensetzt. Ist die Aufhöhung beispielsweise genau so groß wie die Austauschschichtdicke, wird die Kornverteilung in der Austauschschicht an der Verbringstelle allein aus dem einzubringenden Baggergut bestehen. Ist die Aufhöhung halb so groß wie die Austauschschicht, besteht die Kornverteilung an dieser Stelle zu 50% aus der aktuell vorhandenen Sedimentverteilung und zu 50% aus Baggergut (Abb. 5.20).

Zum Abschluss dieses Vorgangs wird die Austauschschicht aktualisiert. Dabei wird aus dem Verhältnis der beiden verschiedenen Kornverteilungen eine neue einheitliche Kornverteilung bestimmt, die sodann gleichmäßig über die Austauschschicht verteilt wird. Diese Vorgehensweise erfolgte in Anlehnung an die Handhabung von Anlandungen aus morphodynamischen Simulationen in den Transportmodellen Sisyphé (Villaret, 2010 [99]) und SediMorph (Malcherek et al., 2005 [73]), in denen die Austauschschicht in analoger Weise aktualisiert wird.

In einigen Morphodynamikmodellen wie zum Beispiel Sisyphé ist die maximal zulässige Evolution aus Stabilitätsgründen auf einen Teil der Austauschschicht begrenzt. Dadurch wird sicher gestellt, dass nicht innerhalb eines Zeitschritts die komplette Austauschschicht wegerodiert oder zugeschüttet werden kann. Für die Simulation eines Verbringvorgangs bedeutet das ein kontinuierliches Einmischen des Baggerguts über die den Verbringzeitraum umfassenden Zeitschritte.

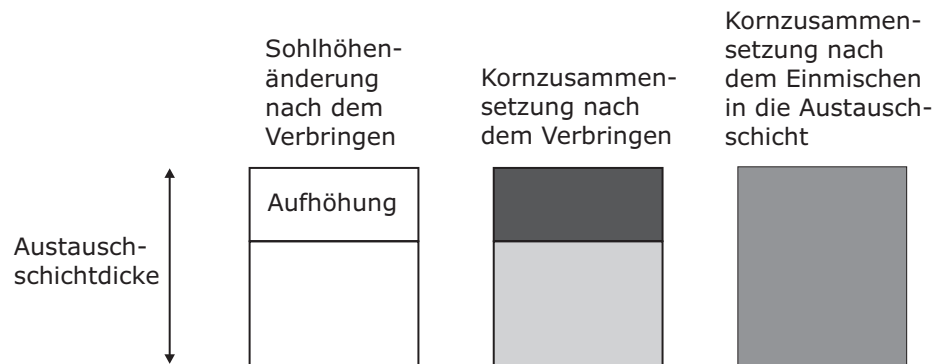


Abbildung 5.20: Einmischen einer Kornverteilung aus verbrachtem Baggergut in die Austauschschicht

5.5.5 Die Simulation von Geschiebezugaben

Im Gegensatz zu Verbringmaßnahmen, bei denen zuvor gebaggerte Mengen in einer Fläche verbracht werden, wird bei einer Geschiebezugabe externes Material eingebracht. Dieses stammt in der Regel von landseitigen Abbaustellen. Dem Ablauf nach entspricht die Geschiebezugabe dem zeitgesteuerten Verbringen. Neben den dazu erforderlichen Angaben muss die zu verbringende Kornverteilung vorgegeben werden, da sonst keine Informationen über die Zusammensetzung des Schüttguts vorliegen. Demzufolge könnte dann auch nicht die Komposition der Austauschschicht bestimmt werden:

- Lage und Größe der Einsatzfläche
- Beginn der Maßnahme
- Ende der Maßnahme
- Verbringvolumen
- Kornverteilung.

Als Ergebnis kann die Geschiebezugabe unter Berücksichtigung dieser Kornverteilung in flächenhafter Weise oder als Kolkbefüllung simuliert werden. Der Algorithmus ist dabei identisch zu einer Verbringung von zuvor gebaggerten Sedimenten.

5.5.6 Verbringstrategien

Durch die oben beschriebenen Verfahren ist die Modellierung des Unterbringens von Sedimenten auf einer Verbringstelle möglich. Häufig ist der Anwender jedoch nicht nur an einer möglichst detaillierten Simulation des Verbringvorgangs interessiert sondern

vielmehr an der Simulation von Verbringstrategien. Dazu sind weitere Berechnungen notwendig.

Die einfachste Variante besteht darin, die Baggermengen prozentual auf mehreren Verbringstellen zu verteilen. Auf diese Weise kann beispielsweise die zur Verfügung stehende Aufnahmekapazität der verschiedenen Verbringstellen berücksichtigt werden oder aber der Fall, dass nur ein gewisser Teil des Baggerguts für das Verbringen geeignet ist. Der andere wird dann direkt verwendet oder erfüllt nicht die Qualitätskriterien für Baggergut zur Umlagerung. Beide Strategien können durch die Standardfunktionalität abgebildet werden, bei der ein prozentualer Anteil der Gesamtbaggermenge einer Baggerstelle einem Verbringpolygon zugewiesen wird.

Eine weitere Strategie kann darin bestehen, das Baggergut der nächst gelegenen Verbringstelle zuzuordnen (Abb. 5.21). Dabei wird eine Liste an Verbringstellen hinsichtlich ihrer Entfernung zu der Baggerstelle überprüft. Die Entfernung zwischen den beiden Einsatzflächen kann aus dem Ortsvektor zwischen zwei charakteristischen Punkten ermittelt werden. Jedoch wird die daraus resultierende Strecke nicht immer im Bereich der schiffbaren Bereiche liegen, da sie den kürzesten Weg zwischen zwei Punkten beschreibt. Das kann zu einer fehlerhaften Beurteilung der Zuordnung der Verbring- zu den Baggerflächen führen, wenn das modellierte Gebiet beispielsweise enge Kurven enthält. Zielführender ist es daher, wenn man sich an der Flusskilometrierung orientiert, da hierbei die wirkliche Fließstrecke und damit der tatsächliche Fahrweg abgebildet wird.

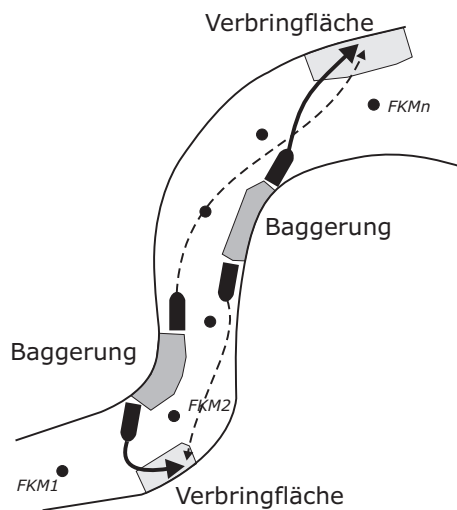


Abbildung 5.21: Bestimmung der nächstgelegenen Verbringstelle zur Baggergutumlagerung

Dazu muss den Elementen und Knoten einer Einsatzfläche zunächst ein Wert für die Flusskilometrierung zugeordnet werden. Die Vorgehensweise erfolgt analog zu der Ermittlung der Referenzwasserspiegellage. In bestimmten Abständen wird entlang des Flusses die Kilometrierung festgelegt. Ausgehend von diesem Raster werden sodann die Knoten- oder Elementwerte durch Interpolation bestimmt. Wird nun ein

Knoten oder Element gebaggert, ist auch bekannt welchem Flusskilometer sie zugeordnet werden können. Um der Verbringstelle einen charakteristischen Wert für die Lage entlang der Fließstrecke zuzuordnen, wird der Mittelwert der Kilometrierungen der Knoten oder Elemente ermittelt, die in der Verbringfläche liegen. Diese werden in Bezug auf die Elementgrößen und die Gesamtfläche der Verbringstelle gewichtet. Damit hat man Aussagen darüber, an welcher Stelle des Fließwegs gebaggert und wo das dabei entnommene Material verbracht werden soll.

Werden in einer Simulation mehrere Umlagerungsstellen definiert, liegt damit eine Liste vor, an welcher Stelle entlang des Fließwegs sie liegen. Aus den Kilometrierungswerten der verschiedenen Verbringstellen n und der zu baggernden Elemente oder Knoten i kann sodann die Differenz gebildet werden. Die betragsmäßig kleinste Differenz zeigt an, welche Verbringstelle zu bevorzugen ist.

$$\|fkm_{disp,n} - fkm_{dredge,i}\| \stackrel{!}{=} \min$$

5.5.7 Beispiel Kurvenmodell

Am Beispiel eines sehr einfachen Kurvenmodells soll die Benutzung eines Baggerkriteriums und das anschließende Verbringen der gebaggerten Mengen im Rahmen einer festgelegten Verbringstrategie veranschaulicht werden. Das Modell ist 3500 m lang und hat bei einer Breite von 200 m eine Ausgangswassertiefe von durchgehend 4 m. Die Sohle ist mit Feinsand belegt.

Infolge eines kontinuierlichen Durchflusses können typische Sohlhöhenänderungen beobachtet werden, indem sich an den Innenseiten der beiden Kurven Anlandungen ausprägen und an den Außenseiten Erosionen sichtbar werden (Abb. 5.22, links). Die Aufgabe soll nun darin bestehen die Anlandungen zu einem gewissen Grad durch ein Baggerkriterium zu entfernen. Dazu wird das Referenzwasserspiegellagenkriterium verwendet. Dieses soll bei einer kritischen Tiefe von 2,5 m unterhalb des Referenzniveaus eine Baggerung anleiten und die entsprechende Stelle auf 3 m unterhalb des Referenzniveaus vertiefen. Das hierzu festzulegende Beobachtungspolygon erstreckt sich über die gesamte Fahrrinne. Das Baggergut soll in einer ersten Simulation aus dem System genommen werden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 5.22, Mitte zu sehen. Man erkennt, dass die markanten Anlandungen an den Innenseiten der Kurven verschwunden sind. Insgesamt wurden durch das gewählte Baggerkriterium 4567,14 m³ entnommen.

In einer zweiten Studie soll das während der Baggerung entnommene Material in den beiden Kolken an den Außenseiten der Kurven verbracht werden. Dazu werden die Kolkbereiche grob mit einem Polygonzug beschrieben, um sie als potenzielle Verbringstelle zu deklarieren. Die Verbringstrategie soll darin bestehen, dass jeweils die von den Baggerknoten aus nächstgelegene Stelle für das Einbringen des Baggerguts verwendet wird und dabei der Verbringalgorithmus für Kolke verwendet werden soll. Man sieht in Abbildung 5.22, rechts sehr deutlich, wie die tieferen Erosionsbereiche deutlich flacher geworden sind, da hier das Baggergut verbracht wurde. Eine ab-

schließende Auswertung der Baggermengen zeigt, dass der Baggerbedarf infolge der Zunahme der morphologischen Geschwindigkeit in diesem Bereich auf 5198,01 m³ angestiegen ist, da hier die Erosionstendenzen durch die Verringerung der Wassertiefe und die gleichzeitig erhöhte Verfügbarkeit von transportfähigem Material nach dem Verbringen wieder verstärkt wurden. Allerdings fällt die Zunahme mit rund 15% vergleichsweise gering aus, was auf eine geringe Remobilisierung der verbrachten Sedimente schließen lässt.

Das Beispiel zeigt in knapper Weise, wie ein Baggerkriterium zur Prognose von Baggermengen in DredgeSim verwendet werden kann. Darüber hinaus ist anhand der berechneten Baggermengen auch ein Vergleich der beiden Unterhaltungsstrategien „Dredge and Remove Sediment“ und „Dredge and Place Sediment“ und eine Beurteilung über die Auswirkungen möglich.

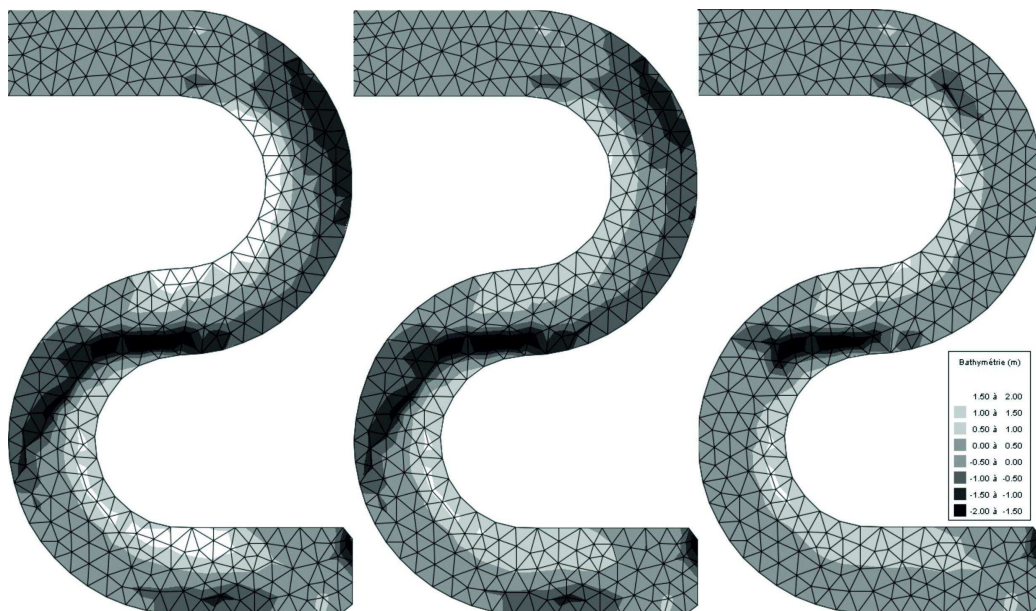


Abbildung 5.22: Beispielanwendung eines einfachen Kurvenmodells. Sohlhöhenänderung infolge des natürlichen Sedimenttransports (links), nach eingeleiteter Baggerung (mittig) und nach Baggern und Verbringen des Baggerguts (rechts)

5.6 Softwaretechnische Umsetzung

DredgeSim wurde in der Programmiersprache FORTRAN90 umgesetzt und mit verschiedenen Sedimenttransportmodellen und Hydrodynamikprogrammen gekoppelt, die am Ende dieses Kapitels aufgeführt sind. Die bei der Programmierung befolgten Paradigmen werden nachfolgend kurz erläutert.

Eine praxisnahe Anwendung erfolgt üblicherweise auf Parallelrechnern, da die verwendeten Modellierungsgebiete häufig sehr fein aufgelöst sind und über längere Simulationszeiträume gerechnet wird. Demzufolge musste der Programmcode von DredgeSim

parallelisiert werden. Die dabei zu beachtenden Aspekte werden ebenfalls aufgeführt. Zuvor wird jedoch die Input-Output-Struktur von DredgeSim beschrieben. Der Anwender muss durch bestimmte Vorgaben in Eingabedateien das Simulationssetup spezifizieren und erhält Ergebnisse der Simulation in Form von Ausgabedateien.

5.6.1 IO-Struktur

Die Eingabedaten dienen dazu die Inhalte und den Umfang einer Simulation festzulegen. Das geschieht im Wesentlichen anhand von drei Dateien (Abb. 5.23):

1. In der DredgeSim-Steuerdatei werden die reinen Baggerdaten spezifiziert, indem hier beispielsweise das Baggerkriterium oder die Parameter zur Verbringung in Kolken definiert werden.
2. Die Einsatzflächen werden mit Hilfe des IPDS-Pakets definiert. Dazu werden Polygonzüge in der IPDS-Steuerdatei festgelegt.
3. Weiterhin muss der Anwender die Referenzwasserspiegellage beschreiben, falls diese benötigt wird. Das geschieht ebenfalls in einer separaten Eingabedatei.

Als Ergebnis erhält man zum einen flächenhafte Daten, wie die resultierende Sohlhöhe und Kornverteilung, die auf dem Simulationsgitter abgebildet sind. Diese werden allerdings nicht explizit durch DredgeSim ausgegeben, sondern sie sind in den Ergebnissen des Sedimenttransportmoduls enthalten, da es sich bei beiden nicht um eigenständige DredgeSim-Größen handelt. Sie werden von dem Morphodynamikpaket verwaltet, die im Fall eines Bagger- oder Verbringvorgangs durch DredgeSim geändert werden. Allerdings werden explizite Ergebnisse der Baggermengen ausgegeben, die dann zur Auswertung weiterverarbeitet werden können.

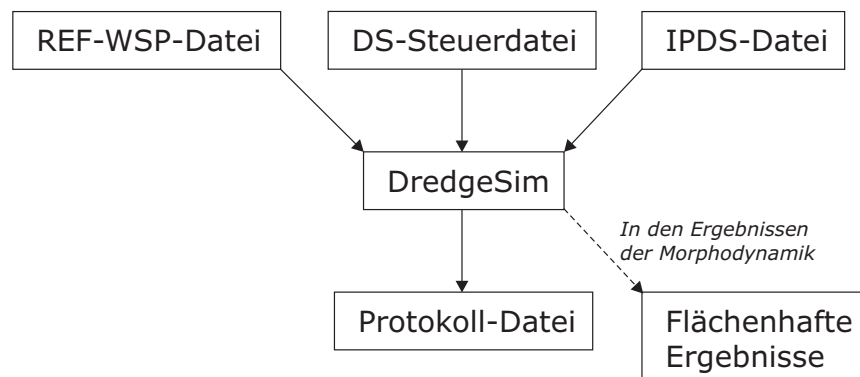


Abbildung 5.23: IO-Struktur für DredgeSim

5.6.2 Module und Pakete

Grundsätzlich kann beim Softwareentwurf zwischen Modulen und Paketen unterschieden werden. Während Pakete eine bestimmte Teilaufgabe innerhalb einer umfangreichen Simulationsumgebung übernehmen, werden durch Module einzelne Funktionalitäten innerhalb eines Pakets bereit gestellt. Das Gesamtsystem einer komplexen Software besteht demnach aus einem Geflecht aus Modulen und Modulpaketen (Pagel et. al, 1995 [85]). Bei einer DredgeSim-Simulation werden unter anderem die Pakete DredgeSim, IPDS sowie ein Hydrodynamik- und Morphodynamik-Paket verwendet (Abb. 5.24). Das DredgeSim-Paket stellt dabei alle Bagger- und Verbringfunktionalitäten bereit, während durch das IPDS-Paket die Einsatzflächen spezifiziert werden. Durch Hydrodynamik- und Morphodynamik-Pakete wird der natürliche Sedimenttransport simuliert, der die Grundlage für DredgeSim bildet.

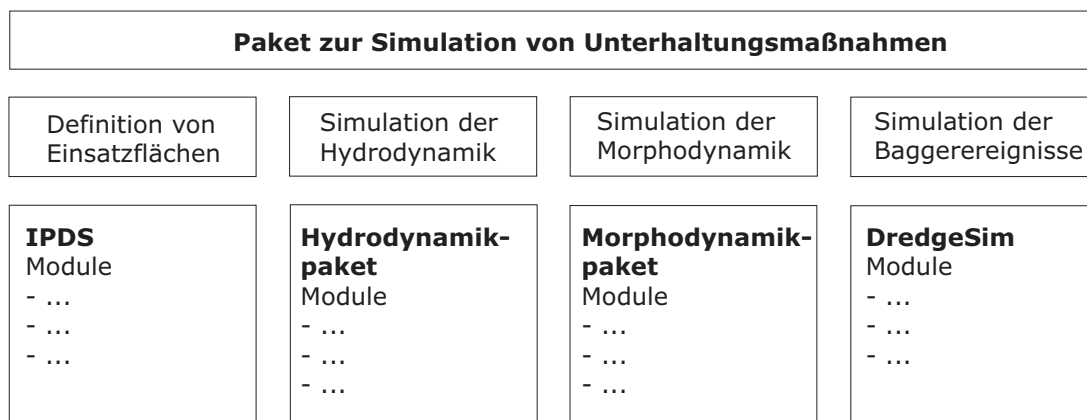


Abbildung 5.24: Simulationsumgebung aus Modulen und Paketen

Module und Pakete können untereinander interagieren, Informationen austauschen und Teilfunktionalitäten füreinander nutzbar machen. Beide sind strukturell ähnlich aufgebaut, arbeiten aber auf unterschiedlichen Maßstäben. Module und Pakete lassen sich in die beiden Teile Exportschnittstelle und Modulrumpf zerlegen. Über die Exportschnittstelle werden Daten und Funktionalitäten nach außen nutzbar gemacht. Nur die hierin enthaltenen Informationen stehen anderen Modulen und Paketen zur Verfügung. Im Modulrumpf werden die zu exportierenden Funktionalitäten ausprogrammiert. Der Sinn des Ganzen liegt darin, dass für eine erfolgreiche Gesamtsimulation gewisse Funktionalitäten verfügbar sein müssen, es aber nicht unbedingt erforderlich ist, die zu Grunde liegende Operation ebenso öffentlich verfügbar zu machen.

Das Ziel der modularen Zerlegung steckt im Wesentlichen in der Beherrschung der Komplexität der Anwendungssoftware. Pagel et. al (1995) [85] stellen zusammenfassend an Module folgende Anforderungen, die aufgrund ihrer Ähnlichkeit zueinander

auch auf Modulpakete der übergeordneten Ebene übertragen werden können:

- Module lösen Teilprobleme der Gesamtaufgabe.
- Die Abhängigkeit von anderen Modulen sollte möglichst klein sein.
- Konkrete Funktionsweisen und Realisierungsdetails einzelner Komponenten müssen nicht bekannt sein. Sie müssen lediglich von anderen Komponenten benutzt werden können.
- Ein Modul sollte so konzipiert werden, dass es innerhalb eines begrenzten Zeitraums erstellt und getestet werden kann.

5.6.3 Programme in Kopplung

Die als Eingang zur Simulation von Unterhaltungsmaßnahmen mit DredgeSim benötigten Ergebnisse der Morphodynamik wurden mit dem Modulpaket SediMorph in Kopplung mit dem Telemac-System berechnet. Telemac liefert hierbei mit der Simulation der Hydrodynamik die benötigten Eingangsgrößen für SediMorph. Die beiden Komponenten interagieren, so dass Veränderungen der Sohle durch die Simulation der Morphodynamik mit SediMorph auch einen Einfluss auf die Berechnung der Hydrodynamik besitzen. Im folgenden werden diese beiden Programmpakete kurz vorgestellt. Alternativ zu Telemac kann unter anderem auch das mathematische Verfahren UnTrim verwendet werden, dass ebenfalls nachfolgend beschrieben wird.

5.6.4 Telemac2D

Das mathematische Verfahren Telemac2D löst zur Berechnung einer Strömung mit freier Oberfläche numerisch die tiefengemittelten Impulsgleichungen in 2 Raumrichtungen und die tiefengemittelte Kontinuitätsgleichung (Hervouet, 2002 [58]). Lösungen des Telemac-Modells sind im Wesentlichen Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten, die für die Berechnung der morphodynamischen Kenngrößen verwendet werden.

Impulsgleichungen in x- und y-Richtung:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + g \frac{\partial z_S}{\partial x} &= \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_{xx}^D h}{\rho} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\tau_{xy}^D h}{\rho} - \frac{1}{h} \frac{\tau_{Bx}}{\rho} + \frac{1}{h} \frac{\tau_{\text{Wind},x}}{\rho} + f_x \\ \frac{\partial \bar{v}}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + g \frac{\partial z_S}{\partial y} &= \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial x} \frac{\tau_{yx}^D h}{\rho} + \frac{1}{h} \frac{\partial}{\partial y} \frac{\tau_{yy}^D h}{\rho} - \frac{1}{h} \frac{\tau_{By}}{\rho} + \frac{1}{h} \frac{\tau_{\text{Wind},y}}{\rho} + f_y \end{aligned}$$

Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial \bar{u} h}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v} h}{\partial y} = 0$$

mit:

\bar{u}, \bar{v}	: tiefengemittelte Strömungsgeschwindigkeiten
h	: Wasserstand
z_S	: Tiefenkoordinate der freien Oberfläche
τ_{ij}^D	: Dispersionstensor
τ_{Bi}	: Vektor der Sohlschubspannung
$\tau_{\text{Wind},i}$: Vektor der Windschubspannung
f_i	: Vektor der äußeren Kräfte

Die Terme τ_{ij}^D sind dabei eine Zusammenfassung für den sich bei der Mittelung ergebenden Ausdruck $\overline{\tau_{ij}} - \overline{\rho u'_i u'_j}$, der wie bei den Reynoldsgleichungen ein Schließungsproblem darstellt und durch die turbulente Wirbelviskosität ν_t oder auch die turbulente Diffusion ν_D modelliert werden. Dazu stehen in Telemac2D verschiedene Möglichkeiten wie der Elderansatz oder das tiefengemittelte k- ϵ -Modell zur Verfügung [58]. Die mit τ_{ij}^D assoziierten Terme werden auch als Impulsdispersion bezeichnet.

Die obigen Gleichungen zur Modellierung der Strömung sind nur unter Verwendung einer hydrostatischen Druckapproximation und der Vernachlässigung dichteinduzierter Strömungen bei einer vertikalen Schichtung der Fluidichte gültig [58].

Als Eingangsgrößen benötigt das Telemacmodell ein Berechnungsgitter, in dem die Gebietstopografie enthalten ist, Randbedingungen und in der Steuerdatei anzugebende Informationen über die Lösung der Gleichungen sowie deren Anfangswerte. Das im Preprocessing zu erzeugende Gitternetz besitzt Selafin-Format und besteht aus unstrukturiert angeordneten Dreiecken. Die Anfangs- und Randwerte können dem Modell konstant oder als Zeitreihe vorgegeben werden sowie Ergebnissen vorhergehender Berechnungen auf dem Modellgebiet entnommen werden [58].

Telemac bietet eine Vielzahl an Ergebnissen, die zu Beginn der Berechnung in der Steuerdatei spezifiziert werden müssen. So können neben den Strömungsgeschwindigkeiten und Wasserständen auch daraus ableitbare Größen wie die Courant- oder Froudezahl ausgegeben werden. Des Weiteren werden bei Berücksichtigung des Seegangs durch ein entsprechendes Modul auch daraus folgende Ergebnisse berechnet. In Telemac2D stehen vier Ansätze zur Erfassung der turbulenten Wirbelviskosität ν_t zur Verfügung [58]:

- Konstante Wirbelviskosität $\nu_t = \text{const.}$ mit der entsprechenden Spezifikation der Größe von ν_t .
- Das Eldermodell zur Berechnung einer tiefengemittelten Wirbelviskosität ν_t in Abhängigkeit von der Schubspannungsgeschwindigkeit u_* und der Wassertiefe h .

$$\nu_t = \begin{cases} 6.0u_*h & , \text{ lateral zur Strömungsrichtung} \\ 0.6u_*h & , \text{ transversal zur Strömungsrichtung} \end{cases}$$

In Telemac2D besteht zudem die Möglichkeit, die Werte 6.0 und 0.6 durch

Aufruf entsprechender Steuerwörter in der Steuerdatei zu ersetzen und das Hydrodynamikmodul bei Unstimmigkeiten auf diese Art zu kalibrieren.

- Bei der Verwendung des tiefengemittelten k - ϵ -Modells werden zwei zusätzliche Differentialgleichungen zur Bestimmung der tiefenintegrierten turbulenten kinetischen Energie k und der Energiedissipationsrate ϵ gelöst. Daraus ergibt sich die turbulente Wirbelviskosität ν_t :

$$\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\epsilon} .$$

- Der Smagorinskyansatz lässt sich durch Projektion auf die horizontale Ebene auch in Telemac2D verwenden. Dabei werden die vertikalen Gradienten der ursprünglichen Formulierung vernachlässigt.

Der Einfluss von Quellen- und Senkentermen in der Massenerhaltungs- und den Impulsgleichungen wurde in den in dieser Arbeit beschriebenen Simulationen vernachlässigt. Im Falle ihrer Berücksichtigung würden sich die oben beschriebenen Gleichungen erweitern.

5.6.5 UnTRIM

Das mathematische Verfahren UnTRIM ist ein semiimplizites Finite-Differenzen-Verfahren, das die Vorzüge der impliziten und expliziten numerischen Lösung von Gleichungssystemen miteinander kombiniert (Casulli & Lang, 2004 [31]). Dabei werden Terme, die maßgeblich die Stabilität beeinflussen, implizit gelöst. Alle weiteren Ausdrücke werden hingegen explizit gelöst, um die Rechenzeit zu verkürzen. Mit UnTRIM können Lösungen für verschiedene ein-, zwei- und dreidimensionale, instationäre, nicht-lineare Differentialgleichungen ermittelt werden. Das Programm wurde von Prof. Casulli an der Universität Trient, Italien entwickelt.

Die Lösung der Gleichungssysteme erfolgt in Abhängigkeit von Zeit und Ort auf Grundlage folgender Erhaltungssätze [31]:

- Kontinuitätsgleichung inkompressibler Fluide
- Reynoldsgemittelte Navier-Stokes-Gleichungen mit hydrostatischer und nicht-hydrostatischer Druckverteilung
- Transportgleichung für gelöste und partikuläre Substanzen sowie der Temperatur.

Für die Schließung der Reynoldsgleichungen werden die Reynoldsspannungen durch das Prinzip der Wirbelviskosität ν_t parametrisiert. Diese wird von dem Programm

durch das Gleichgewichtsmodell berechnet [31].

$$v_t = \kappa^2 z^2 \left(1 - \frac{z}{h}\right) \frac{\partial u}{\partial z}$$

Die horizontale Berechnungsebene muss vollständig mit nicht überlappenden konvexen Polygonen ausgefüllt sein. Dabei müssen die Kanten der Polygone mit denen benachbarter Polygone oder mit den Modellrändern zusammenfallen. UnTRIM arbeitet auch auf einem unstrukturierten Gitter. Allerdings müssen die einzelnen Maschen orthogonal zueinander liegen. Das bedeutet, dass in jedem Polygon ein Zentrum liegt, dessen Lage durch einen Umkreis, der alle Eckpunkte des Polygons durchläuft, definiert ist und die Verbindungslinie der Zentren zweier benachbarter Maschen die Polygonkanten in ihrer Mitte im rechten Winkel schneidet (Abb.5.25). Durch Berücksichtigung einer beliebigen Anzahl von Schichten mit frei wählbarer Höhe wird aus dem 2D-Gitter ein 3D-Berechnungsmodell des Simulationsgebietes. In den Koordinaten der Polygonzentren werden der nichthydrostatische Druck, die Lage des Wasserspiegels und die Konzentration der transportierten Substanzen berechnet, während die Strömungsgeschwindigkeiten senkrecht zu den Kanten am Schnittpunkt der Verbindungslinie zweier benachbarter Zentren mit der Polygonumrandung ermittelt werden [31].

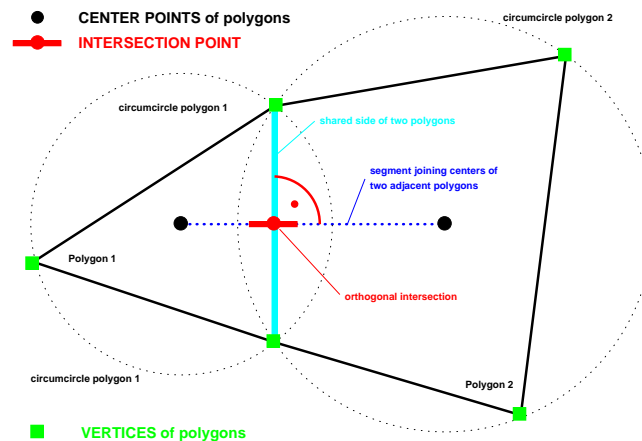


Abbildung 5.25: Unstrukturiertes orthogonales UnTRIM-Gitter [31]

Die erforderlichen Randbedingungen für ein Modell können aus gemessenen Zeitreihen verschiedener Größen, aus Simulationsergebnissen angrenzender Bereiche oder aus den Ergebnissen früherer Berechnungen in dem betrachteten Gebiet ermittelt werden. In dem Programm ist ein Impulstransfer zwischen der Wassersäule und gelösten oder partikulären Substanzen nicht möglich. Barokline Strömungen werden hingegen von dem Modell berücksichtigt [31].

Folgende Ergebnisse werden von UnTRIM in Abhängigkeit von Zeit und Ort ausgegeben [31]:

- Wasserspiegelhöhe bezüglich eines Referenzniveaus $h(x, y, z, t)$
- Strömungsgeschwindigkeit $u(x, y, z, t)$
- bei nicht-hydrostatischen Anwendungen der hydrodynamische Druck $p(x, y, z, t)$
- Konzentrationen gelöster und partikulärer Wasserinhaltsstoffe sowie der Temperatur $c_i(x, y, z, t)$
- turbulente Wirbelviskosität $\nu_t(x, y, z, t)$
- Sohlschubspannung $\tau_B(x, y, z, t)$
- Fluidichte $\rho(x, y, z, t)$.

5.6.6 SediMorph

Der Wirkungsbereich des Hydrodynamikmoduls endet an den Umrandungsflächen des Fluidkörpers. Veränderungen an der Gewässersohle können daher durch die Software SediMorph berechnet werden, die morphodynamische Prozesse dreidimensional simuliert (Malcherek et al., 2005 [73]). Das SediMorph-Modul löst auf numerischem Weg die Bodenevolutionsgleichung und ermittelt alle dafür erforderlichen Größen. Dazu werden verschiedene physikalische und empirische Zusammenhänge aufgegriffen.

Die horizontale Diskretisierung des Modellgebietes erfolgt wie für das Programm UnTRIM durch unstrukturierte orthogonale Polygone. In vertikaler Richtung werden hier ebenfalls verschiedene Schichten definierbarer Dicke festgelegt. Daraus folgt ein zwei- oder dreidimensionales Bodenmodell (Abb. 5.26). Durch die Diskretisierung des Modellgebietes wird es in finite Volumina eingeteilt, in denen das Sedimentinventar definiert werden kann. Dieses kann eine heterogene Struktur besitzen, denn SediMorph ermöglicht es dem Anwender eine eigene charakteristische Korngrößenverteilung unter Verwendung einer geeigneten Anzahl an Sedimentklassen, die z.B. anhand des Korndurchmessers, der Sinkgeschwindigkeit oder auch der Korndichte eingeteilt werden können, zu wählen. Es handelt sich also um ein fraktioniertes Bilanzmodell, in dem die Bodenevolutions- oder Exnergleichung gelöst wird [73].

Orts- und zeitabhängige Ergebnisse aus SediMorph sind [73]:

- Sohlrauheit k_s aus der Korn- und Formrauheit
- Sohlschubspannung τ_B aus der Sohlrauheit und der Strömung
- Geschiebetransportraten q_s

- Erosionsraten ϕ_{ero}
- Entwicklung der Sohlhöhe $\frac{\partial z_B}{\partial t}$.

Der Depositionsfluss wird von dem verwendeten HN-Modell berechnet und von SediMorph zur Ermittlung der Sohlevolution verarbeitet. Die Sohlschubspannung, die Rauheit und der Erosionsfluss werden an die HN-Software weitergegeben und gehen dort in die Berechnung der Strömungs- und Transportprozesse ein. Bei der Kopplung beider Programme erfolgt der Datenaustausch nach jedem Zeitschritt, um die Wechselwirkungen optimal zu erfassen.

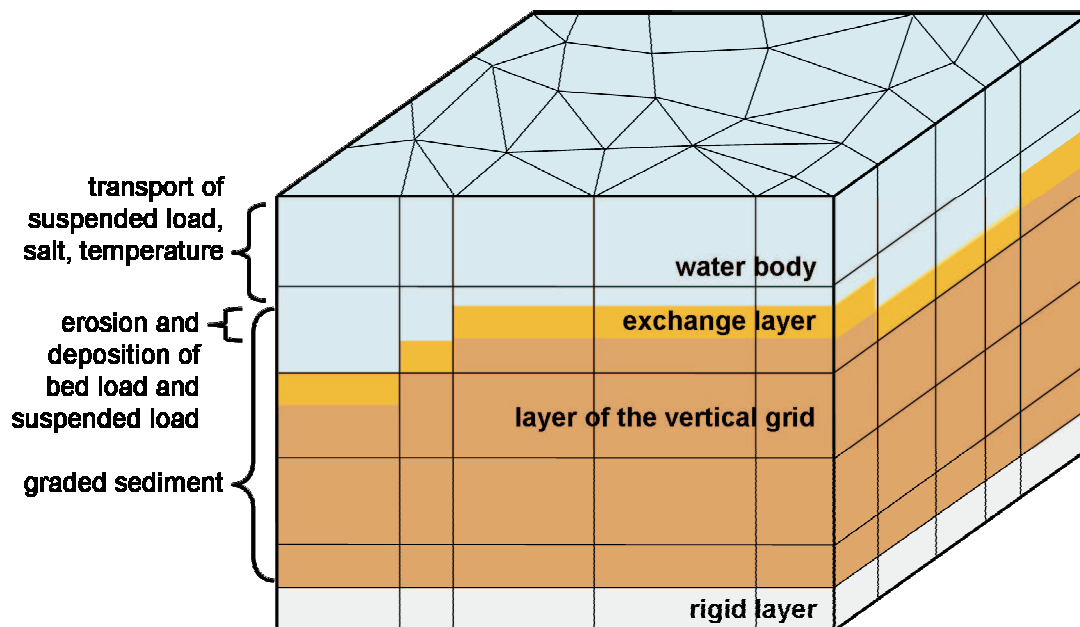


Abbildung 5.26: Struktur des dreidimensionalen Bodenmodells in SediMorph (Knoch und Malcherek, 2005 [65])

5.6.7 Sisyphe

Das Morphodynamikmodul Sisyphe ist fester Bestandteil des Telemac-Pakets und daher für die Kopplung mit Telemac2D und Telemac3D optimiert, da es auf Knoten operiert. Wie andere Sedimenttransportmodelle wird in Sisyphe die Exnergleichung zur Ermittlung der Sohlhöhenänderungen über die Zeit gelöst (Villaret, 2010 [99]). Dazu werden Finite Elemente- oder Finite Volumen-Techniken verwendet.

Die erforderlichen Eingangswerte der Sedimenttransportraten, die sich aus Geschiebe- und Schwebstofftransport zusammensetzen, werden aus den aktuell verfügbaren Daten des Strömungsfelds und den Sedimenteigenschaften ermittelt. Sisyphe kann zu jedem Zeitschritt von Telemac aufgerufen werden oder nur in definierten Intervallen,

um die Rechenzeit zu verkürzen [99]). Die wesentlichen Eingangswerte zur Ermittlung der Sedimenttransportraten sind dabei die gleichen, wie sie auch in SediMorph verwendet werden. Grundsätzlich können verschiedene Einflüsse berücksichtigt werden, wie der Sedimenttransport unter Wellen, kohäsive und nicht-kohäsive Sedimente oder das Trockenfallen von Bereichen in Gebieten mit Tideeinfluss [99]).

Kapitel 6

Die Optimierung und Bewertung von Nassbaggerstrategien

Um eine optimale Lösung für die Unterhaltung der Fahrwassertiefen zu finden, müssen in der Regel verschiedene Baggerstrategien untersucht werden. Bei der dahingehenden Beurteilung von Nassbaggermaßnahmen müssen verschiedene Einzelaspekte berücksichtigt werden, für die jeweils unterschiedliche optimale Lösungen existieren. So ist die kostengünstigste Lösung nicht automatisch die aus ökologischer Sicht zu bevorzugende. Ebenso sind Zwangspunkte zu berücksichtigen, die eine freie Wahl der Strategie erschweren. In der Summe ist die Analyse von Nassbaggerstrategien eine komplexe Aufgabe, für die im Regelfall keine allgemein gültige und umfassende Lösung existiert. Vielmehr ist diese Aufgabe als mehrdimensionales Bewertungs- und Optimierungsproblem aufzufassen.

In dem vorangegangenen Kapitel wurde gezeigt, wie Nassbaggermaßnahmen in mehrdimensionalen numerischen Modellen simuliert werden können. Die daraus resultierenden Ergebnisse können analysiert werden, um zu entscheiden, ob eine Maßnahme besser geeignet ist als eine andere. In diesem Kapitel soll nun untersucht werden, wie die Beurteilung einer Nassbaggerstrategie aufgrund dieser Interpretation der Modellergebnisse in Bezug auf die unterschiedlichen Bewertungskriterien durch weitergehende Verfahren unterstützt werden kann.

Zur Beschreibung eines solchen Problems stehen unterschiedliche Ansätze aus der Entscheidungstheorie oder der mathematischen Modellierung eines mehrkriteriellen Optimierungsproblems zur Verfügung. Grundlagen und Möglichkeiten ihrer Verwendung bei der Beurteilung von Baggerstrategien werden in diesem Abschnitt dargestellt. Dazu werden zunächst einige theoretische Grundsätze erläutert. Darauf aufbauend sollen anschließend die wesentlichen Bewertungskriterien für Baggerstrategien zusammengetragen werden, um schließlich ein Bewertungsmodell für Nassbaggerstrategien vorzuschlagen.

6.1 Mehrkriterielle Analysen

Bei mehrkriteriellen Analysen handelt es sich um die Ermittlung von Kompromisslösungen für Entscheidungsprobleme, bei denen mehrere und zum Teil konkurrierende oder auch gegenläufige Ziele verfolgt werden (Geldermann, [48]). Aufgrund des interdisziplinären Charakters der Problematik haben sich eine Vielzahl von Methoden etabliert. Grundsätzlich lassen sich mehrkriterielle Analysen in zwei Kategorien einteilen ([48] und Branke et al., 2008 [5])). Wenn die Kompromisslösungen durch einen stetigen Lösungsraum beschrieben werden können, kann dieses mehrkriterielle Entscheidungsproblem durch eine mehrkriterielle Optimierung („Multi Objective Decision Making“) gelöst werden. Ein Hauptbestandteil der dabei anzuwendenden Methodik besteht darin, den Lösungsraum zu ermitteln. Dazu muss das Problem als mehrdimensionale Optimierungsaufgabe modelliert werden. Für eine diskrete Menge bekannter Lösungsalternativen kann die Entscheidung mittels multiattributiver Entscheidungsmodelle („Multi Attribute Decision Making“) getroffen werden. Im Unterschied zu der mehrkriteriellen Optimierung ist die Lösungsmenge begrenzt und muss nicht durch mathematische Methoden aufwendig bestimmt werden.

In der Praxis setzt sich die Lösung einer mehrkriteriellen Analyse immer aus zwei Anteilen zusammen, der Bestimmung der möglichen Lösungsalternativen und der Entscheidung für einen dieser Lösungsvorschläge. In Abbildung 6.1 ist der Vorgang einer mehrkriteriellen Analyse am Beispiel der Auswahl einer geplanten Trasse für den Schienen- oder Straßenverkehr als multiattributives Entscheidungsmodell schematisch dargestellt. Auf die Formulierung der Aufgabe folgt die Überlegung, welche Ziele oder Zwangspunkte beachtet werden müssen. Natürlich ist man bestrebt einen möglichst direkten Weg einzuschlagen. Allerdings sollten die Befindlichkeiten der Bewohner einer Ortschaft, die passiert werden soll, beachtet werden. Um die Lärmbelästigung einzuschränken, sind unter Umständen Abweichungen von einem direkten Weg notwendig. Bei einer Umgehung der Ortschaft ist wiederum darauf zu achten, dass Naturschutzgebiete nicht beeinträchtigt werden oder landwirtschaftliche Nutzflächen un bebaut bleiben. Zu diesen mit hoher Wahrscheinlichkeit konkurrierenden Zielvorstellungen werden sodann mögliche Lösungsvorschläge erarbeitet, die alle Interessen möglichst gut befriedigen. Aus diesen Lösungsalternativen muss der Entscheidungsträger sodann eine Variante auswählen. Man erkennt anhand dieses Beispiels wie die unterschiedlichen Zielvorstellungen miteinander konkurrieren.

In der Literatur werden verschiedene Begriffe synonym für mehrkriterielle Analyseverfahren verwendet. Zudem ist die Abgrenzung der einzelnen Methoden voneinander mitunter unscharf. So wird mehrkriterielle Optimierung häufig als Überbegriff verwendet, auch wenn es sich um diskrete Ansätze handelt, die keiner mathematischen Optimierung bedürfen, da Lösungsalternativen bereits bekannt sind (siehe [48]). Zudem sind Jayaswal & Patton (2006,[61]) zufolge

- Multiattribute decision-making
- Multicriteria decision-making

- Multiojective decision-making

Synonyme für den gleichen Ansatz. Branke et al. (2008, [5]) verwenden den Begriff „Multiobjective Optimization“ anstelle „Multi Objective Decision Making“. In dieser Arbeit sollen **mehrkriterielle Optimierung** oder **Multiobjective Optimization** als Begriffe für Modelle verwendet werden, die einen mathematischen Optimierungsprozess beinhalten und einen kontinuierlichen Lösungsraum beschreiben. Demgegenüber sollen mit **multiattributiven Entscheidungsmodellen** oder **Multi Attribute Decision Making** Lösungskonzepte bezeichnet werden, für die diskrete Lösungen vorliegen.

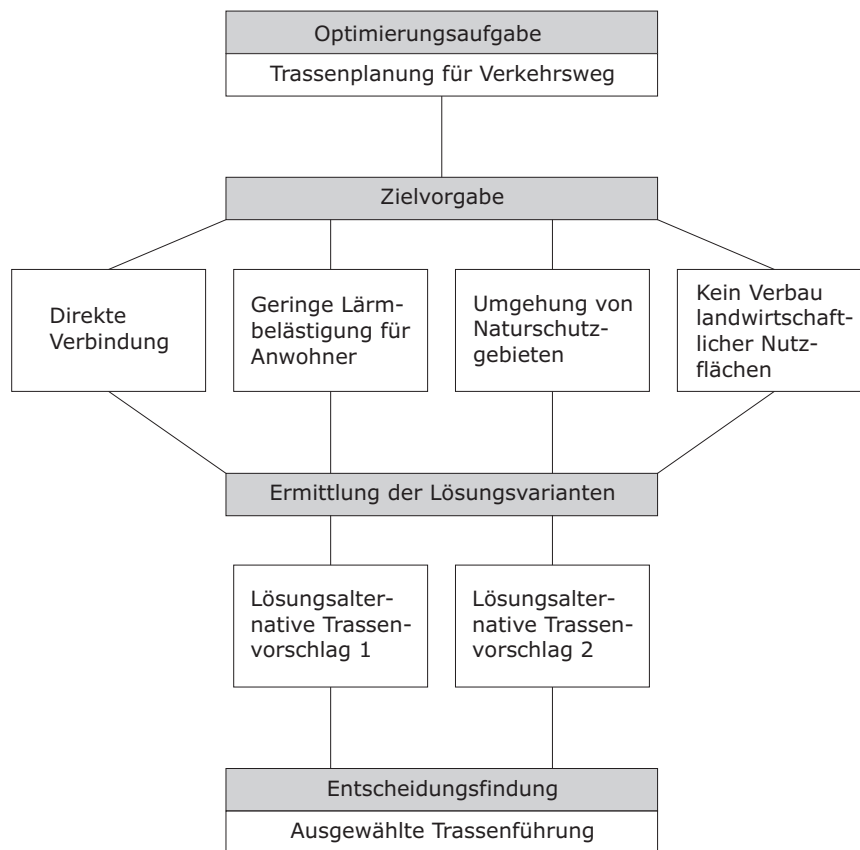


Abbildung 6.1: Beispiel einer mehrkriteriellen Optimierungsaufgabe

6.2 Mehrkriterielle Optimierung

Bei der mehrkriteriellen Optimierung gilt es zunächst die Lösungsmenge für ein mehrdimensionales Optimierungsproblem zu bestimmen. Aus dieser Lösungsmenge muss sodann in einem Entscheidungsprozess eine Lösung bestimmt werden. Mehrkriterielle Optimierung wird auch als multikriterielle Optimierung, Pareto-Optimierung oder

Vektoroptimierung bezeichnet und kann mittels Methoden des Operational Research gelöst werden. Dabei gibt es im Gegensatz zu einer einfachen Optimierungsaufgabe („Single-objective Optimization“) keine alleinige optimale Lösung (globales Optimum), sondern vielmehr verschiedene Lösungsalternativen. Diese werden als Pareto-optimale Lösungen bezeichnet (Branke et al., 2008 [5]).

Ein mehrkriterielles Optimierungsproblem kann in ein einfaches Optimierungsproblem überführt werden, indem der Entscheidungsprozess vor der Optimierung stattfindet. Dieser Entscheidungsprozess ist jedoch mitunter schwierig, da dazu eine gute Kenntnis der Lösungsmöglichkeiten erforderlich ist. Eine Modellierung als mehrkriterielles Optimierungsproblem kann zu einem tieferen Verständnis der Problematik führen, wenn die Pareto-optimalen Lösungen hinsichtlich Abhängigkeiten untereinander und Einschränkungen aus Zwangsbedingungen analysiert werden [5].

Wenn dem Entscheidungsträger die Möglichkeit gegeben wird in den Lösungsprozess einzugreifen, spricht man von interaktiven Modellen, da er durch den Abgleich der bereits zur Verfügung stehenden Informationen mit den Zielvorstellungen die Lösungsfindung optimieren will. Dabei handelt es sich um einen iterativen Prozess, bei dem die Entwicklung der Lösungen während ihrer Ermittlung mit den Zielvorstellungen des Entscheidungsträgers abgeglichen wird. Im Gegensatz dazu wird bei nicht-interaktiven Ansätzen der Entscheidungsträger nicht in den Lösungsprozess mit einbezogen, sondern bekommt die Lösungsalternativen des mehrkriteriellen Optimierungsproblems zur Entscheidungsfindung präsentiert.

Bei den nicht-interaktiven Methoden kann der Entscheidungsträger seine Prioritäten vor der Ermittlung der Lösungsmöglichkeiten artikulieren und damit bereits die Lösungsmöglichkeiten beeinflussen (a priori). Alternativ kann das auch direkt nach der Lösungsfindung erfolgen (a posteriori). Darüber hinaus können die verschiedenen Lösungen neutral und ohne Definition von Präferenzen auf Seiten des Entscheidungsträgers analysiert werden (no-preference method) (alle [5]). Welches Verfahren letztlich verwendet wird, hängt von der Optimierungsaufgabe selbst ab. Zwar bieten a posteriori-Methoden und no-preference-Methoden eine größere Lösungsvielfalt, jedoch stehen dadurch auch deutlich mehr Informationen zur Entscheidungsfindung bereit, für deren Auswertung große Rechenkapazitäten erforderlich sind, welche die Entscheidungsfindung dadurch erschweren. Auch bei interaktiven Methoden ist die Rechenintensität zu beachten.

6.2.1 Pareto-Optima

Ein wesentliches Ziel der mathematischen Lösung des Optimierungsproblems bei mehrkriteriellen Entscheidungsprozessen ist die Bestimmung Pareto¹-optimaler Lösungen. Eine Pareto-Lösungsmenge beschreibt den effizientesten Systemzustand, der verschiedene Zielstellungen möglichst gut erfüllen soll. Das bedeutet, dass keine Änderung eines bestimmten Parameters zur Optimierung einer Teillösung möglich ist, ohne gleichzeitig eine andere Teillösung zu verschlechtern.

¹Nach dem italienischen Ingenieur, Ökonom und Soziologen Vilfredo Pareto benannt.

Die Suche nach Pareto-Optima ist in unterschiedlichen Fachdisziplinen von Bedeutung. In der Mikroökonomie stellen sie ein zentrales Konzept zur wohlfahrtstheoretischen Beurteilung von Gleichgewichten dar (Feess, 2004 [47]). Diese sind Pareto-effizient, wenn kein Wirtschaftssubjekt besser gestellt werden kann, ohne dass ein anderes Nutzeneinbußen erleidet. Das Pareto-Kriterium wurde für die Effizienz des Tauschs und der Produktion formuliert (Bofinger, 2007 [4]). Beim Tausch gilt erneut, dass ein effizienter Zustand erreicht wurde, wenn eine Position nicht durch Handel verbessert werden kann ohne eine andere Position zu schwächen. Für eine effiziente Produktion gilt, dass durch Wettbewerb und freie Preisbildung ineffiziente Lösungen verhindert und Ressourcen effizient genutzt werden.

Mit den Pareto-optimalen Lösungen werden demnach die optimalen Kompromissmöglichkeiten bei konkurrierenden Zielstellungen bestimmt (Bestle, 2006 [2]). Das Optimierungsproblem bei mehrkriteriellen Fragestellungen lässt sich mathematisch ausdrücken als

$$\begin{aligned} \min & \quad \left\{ \vec{f}(\vec{x}) \right\} \\ \max & \quad \left\{ \vec{f}(\vec{x}) \right\} \end{aligned}$$

je nachdem, ob es sich um ein Minimierungs- oder Maximierungsproblem handelt [2], [5]. Aufgrund der Beziehung

$$\max \left\{ \vec{f}(\vec{x}) \right\} = - \min \left\{ -\vec{f}(\vec{x}) \right\}$$

kann jede Maximierungsaufgabe auch als Minimierungsauftrag formuliert werden [2]. Daraus ergibt sich allgemein folgende Optimierungsvorschrift:

$$\min \left\{ \vec{f}(\vec{x}) \right\} = \min \{ f_1(\vec{x}), f_2(\vec{x}), \dots, f_k(\vec{x}) \}, f_i : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}.$$

Der Kriterienvektor („Objective Vector“) \vec{f} enthält demnach die Zielfunktionen mit den entsprechenden Zielvorgaben. Für $k \geq 2$ handelt es sich um ein mehrkriterielles Optimierungsproblem. Das Argument des Kriterienvektors enthält die verschiedenen Entwurfsvariablen \vec{x} („Decision Vector“) und kann ebenfalls mehrdimensional sein. Der Kriterienvektor ist der Abbildungsoperator des Entwurfsbereichs. Der durch ihn definierte Bildbereich enthält eine Vielzahl an Kompromisslösungen, die die Kriterien erfüllen. Ein eindimensionaler Kriterienvektor führt zu dem klassischen eindimensionalen Optimierungsproblem.

Entwurfsvariablen x' sind als Lösungen Pareto-optimal, wenn keine andere Entwurfsvariable \vec{x} existiert, für die gilt

$$f_i(\vec{x}) \leq f_i(\vec{x}') \wedge f_j(\vec{x}) \leq f_j(\vec{x}')$$

für alle i und irgendein j [5]. Dies entspricht dem oben genannten Merkmal eines Pareto-Optimums, nach dem keine Verbesserung einer Zielfunktion f_i ohne Verschlechterung einer anderen f_j möglich ist. Ermittelt man alle Pareto-optimalen Lösungen einer Optimierungsaufgabe, erhält man daraus die Pareto-Front, die den Lösungsraum beschränkt. Diese ist bei bis zu dreidimensionalen mehrkriteriellen Problemen einfach darstellbar. Bei höherwertigen Problemen sind Vereinfachungen oder

komplexere Darstellungsformen notwendig (siehe z. B. in [5]).

Pareto-Fronten zweidimensionaler Optimierungsprobleme sind am Beispiel einer beliebigen Lösungsmenge in Abbildung 6.2 dargestellt. Die besten Lösungen sind hervorgehoben. Müssen beispielsweise beide Kriterien minimiert werden, liegen die relevanten Pareto-optimalen Lösungen im linken unteren Bereich. Im Gegensatz dazu befinden sich bei der Maximierung der gleichen Kombination von Zielfunktionen die optimalen Lösungen am oberen rechten Rand.

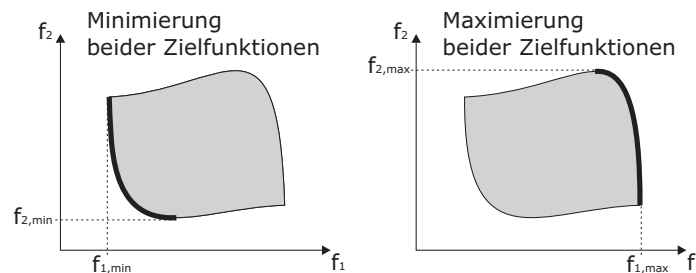


Abbildung 6.2: Pareto-optimale Lösungen eines gleichgerichteten zweidimensionalen Optimierungsproblems in einer Lösungsmenge

Die Pareto-optimalen Lösungen liegen zwischen den Extremwerten der beiden Kriterien. Der Entscheidungsträger sollte sich bei der Auswahl einer endgültigen Variante aus den möglichen Lösungen auf diese Bereiche konzentrieren. Bei der gegenläufigen Optimierung gilt es, die Pareto-optimalen Lösungen für den Fall zu finden, dass eine der beiden Zielfunktionen minimiert und die andere maximiert werden soll. Sie sind für das obige Beispiel in Abbildung 6.3 aufgeführt. Sie liegen zwischen den jeweiligen globalen Minima und Maxima der beiden Zielfunktionen.

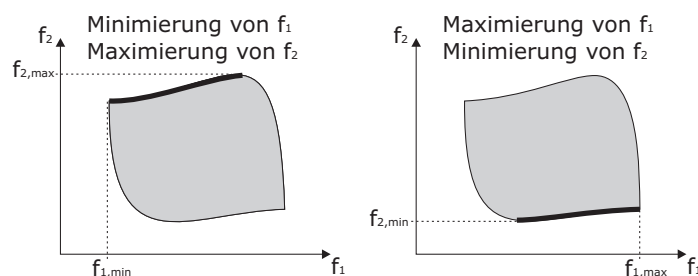


Abbildung 6.3: Pareto-optimale Lösungen eines gegenläufigen zweidimensionalen Optimierungsproblems in einer Lösungsmenge

Diese Beispiele zeigen sehr anschaulich, wie die Pareto-Front dargestellt werden kann und welche Aussagen in Bezug auf Optimierungsfragen mit ihr verknüpft werden können. Die Darstellung der Pareto-optimalen Lösungen gelingt nur in seltenen Fällen auf solch einfache Weise [2]. Neben den Schwierigkeiten der Wiedergabe von Lösungen höherwertiger Optimierungsaufgaben gilt es, beispielsweise Unstetigkeiten und

lokale Ausprägungen der Pareto-Front in der Abbildung der Kompromisslösungen zu vermeiden oder gegebenenfalls frühzeitig zu erkennen.

6.2.2 Entscheidungsfindung

Nach Ermittlung der Pareto-Optima muss sich der Entscheidungsträger für eine Lösungsoption entscheiden. Auch hier können verschiedene Entscheidungskriterien berücksichtigt und jede der Lösungen in ihrem Sinne bewertet werden. Auf die Techniken und Möglichkeiten der klassischen, passiven Entscheidungsfindung, die insbesondere a posteriori angewendet werden können, wird in den folgenden Abschnitten näher eingegangen.

Eine Sonderstellung nimmt die interaktive mehrkriterielle Optimierung ein, da hier der Entscheidungsträger seine Präferenzen während der Optimierung einbringt und auf diese Weise selbige steuert. Die Entscheidungsphase und der Lösungsprozess alternieren bis die bestmögliche Lösung erreicht oder ein Abbruchkriterium aktiviert wird. Nach jedem Iterationsschritt werden Informationen an den Entscheidungsträger übermittelt, der daraufhin diese Informationen bearbeitet und seine daraus folgenden Präferenzen über die Lösung formuliert. Diese werden sodann modelliert, um sie in den Lösungsprozess einfließen zu lassen und auf deren Grundlage in dem nächsten Schritt neue, bessere Lösungen erzeugt werden. Auf diese Weise wird nur der für die Fragestellung interessante Teil an Pareto-optimalen Lösungen erzeugt [5]. Zudem kann der Entscheidungsträger seine Vorlieben und Wünsche während der Lösungsfindung an die bisherigen Zwischenergebnisse anpassen und dadurch den Vorgang weiter optimieren.

6.3 Multiattributive Modelle

Multiattributive Modelle werden bei denjenigen Entscheidungsproblemen angewendet, für die bereits mögliche Lösungsalternativen in diskreter Form vorliegen. Diese gilt es anhand festzulegender Kriterien zu bewerten, um die Auswahl einer Lösung zu forcieren. Dabei kann man zwischen monetären Verfahren und nicht-monetären Verfahren unterscheiden. Bei letzteren wird das Ergebnis nicht nur anhand der Kosten bewertet, sondern auch andere Beurteilungsparameter berücksichtigt.

Bei multiattributiven Modellen wird der Entscheidungsprozess einer Maßnahme abgebildet. Dazu sind die in Kapitel 4.2 aufgeführten Informationen notwendig. Ein wesentlicher Aspekt in diesen Analysen ist das Aufstellen von verschiedenen Kriterien, anhand derer die Lösungsmöglichkeiten miteinander verglichen werden können. Dazu werden ihnen beispielsweise bestimmte Werte zur Beurteilung zugeordnet. Je nach Methode, kann es sich dabei um Geldwerte oder andere vergleichbare Größen handeln.

Die klassischste Methode zur Analyse eines mehrkriteriellen Entscheidungsproblems

sind Pro und Contra-Listen. Dabei werden die Vor- und Nachteile der Lösungsalternativen qualitativ verglichen. Die Alternative mit der größten Zahl an Pros und den wenigsten Contras ist die am besten geeignete. Allerdings ist dieses Vorgehen nur bei sehr einfachen Problemen mit wenigen Lösungsalternativen anzuwenden, da sonst die Gefahr besteht, dass zu viele gleichwertige Lösungen auftreten, bei denen der Auswahlprozess nicht mehr rein qualitativ fortgeführt werden kann. Zudem wird überhaupt nicht berücksichtigt, was die einzelnen Pros und Contras wert sind. Es ist davon auszugehen, dass die Erfüllung bestimmter Eigenschaften ein größeres Gewicht hat als andere. Intuitiv wird das auch bei nahezu jeder Pro und Contra-Liste gemacht, da selten die Alternative mit den quantitativ meisten Vorteilen ausgewählt wird, sondern eher diejenige, die die meisten wichtigen Vorteile aufzuweisen hat.

Eine weitere Technik zur Lösung eines mehrkriteriellen Entscheidungsproblems sind Entscheidungsdiagramme, in denen das gesamte Problem logisch aufgebaut und anhand festgelegter Werte für Eintrittswahrscheinlichkeiten und Nutzwerte von Teilaspekten einer Variante gelöst wird (siehe Kapitel 4.2). Sie werden vor allem für analytisch klar definierte Problemstellungen verwendet, deren Lösungsvorschläge sich genau ermitteln lassen. Bei der Anwendung von Entscheidungsdiagrammen werden in der Regel relativ einfache Ziele verfolgt, wie die Maximierung des Gewinns oder die Minimierung der Kosten und damit verbundene wirtschaftliche Risiken und Unsicherheiten (Dodgson et al., 2009 [39]).

Allerdings trifft man in der Realität häufig auf Entscheidungsprobleme, die analytisch nicht so eindeutig definiert sind oder deren unterschiedliche Lösungsalternativen ein hohes Konfliktpotenzial beinhalten. Die Lösungsmöglichkeiten lassen sich unter diesen Umständen nur schwer anhand eines aussagekräftigen Parameters bewerten. Für sie gilt es, belastbare Kriterien zu entwerfen. Anhand von Entscheidungsdiagrammen lassen sich solche Probleme jedoch gut darstellen, insbesondere wenn es um die Herausarbeitung von Abhängigkeiten untereinander geht. Bei Fragestellungen, in denen sowohl wirtschaftliche als auch andere Faktoren berücksichtigt werden müssen, sind auch hybride Modelle möglich. Diese werden jedoch häufig den nicht-monetären Modellen zugeordnet.

6.3.1 Monetäre Verfahren

Die bekanntesten monetären Bewertungsverfahren bei mehrkriteriellen Analysen sind die Kosten-Nutzen-Analyse und die Kosteneffizienzanalyse. Dabei wird dem Aufwand und dem Ertrag eines Lösungsvorschlags ein Wert zugeordnet. Der Vergleich lässt dann eine quantitative Bewertung der Maßnahmen zu.

Bei der Kosten-Nutzen-Analyse werden Kosten und Nutzen mit einem Geldwert beziffert. Sobald der Geldwert des Nutzens größer ist als der der Kosten, ist eine Maßnahme erstrebenswert. Kommen mehrere Maßnahmen in Frage, ist die mit dem besten Kosten-Nutzen-Verhältnis zu bevorzugen [39].

Wenn der Nutzen einer Untersuchung nicht mit einem Geldwert versehen werden kann, bieten sich bei mehreren Lösungsvorschlägen Kosteneffizienzanalysen an. Auf diese Weise kann der günstigste Vorschlag identifiziert werden. Dazu wird dem zu

erwartenden Nutzen eine repräsentative Einheit zugeordnet und die Kosten zu dieser ins Verhältnis gesetzt. Die Variante mit dem besten Quotienten ist dann die effizienteste. Dabei ist darauf zu achten, dass die gegebenenfalls unterschiedliche Qualität des Outputs durch den Wert der repräsentativen Einheit berücksichtigt wird [39].

6.3.2 Nicht-monetäre Verfahren

Dodgson et al. (2009, [39]) beschreiben eine Reihe von nicht-monetären Modellen, durch die ein Entscheidungsprozess abgebildet werden kann². Des weiteren zeigen sie anhand von Beispielen, wie monetäre und nicht-monetäre Verfahren in verschiedenen Entscheidungsmodellen der administrativen Planung eingesetzt werden. Bei der Beurteilung der Lösungsvorschläge für ein Entscheidungsproblem kann dabei nicht nur die am besten geeignete Lösung ermittelt werden, sondern man kann als Ergebnis auch eine Rangfolge aller Lösungen erhalten und geeignete in einfacher Weise von unbrauchbaren Lösungen unterscheiden.

Mittlerweile haben sich viele verschiedene Techniken auf dem Gebiet der mehrkriteriellen Analysen entwickelt und ihre Zahl nimmt weiter zu. Das liegt hauptsächlich daran, dass sie in den unterschiedlichsten Fachdisziplinen zum Einsatz kommen und dadurch auch speziellen Vorstellungen von Entscheidungen genügen müssen. Darüber hinaus variieren maßgebliche Größen wie die Zeit, die zur Analyse zur Verfügung steht und auch die Dichte an Daten, die eine solche Analyse unterstützen. Ihr Einsatz in verschiedenen Fachdisziplinen macht Entscheidungsmodelle anfällig für die unterschiedlichen analytischen Herangehensweisen bei der Problemlösung, die einem Fachgebiet eigen sind. So wird sich ein Modell der Sozialwissenschaften aufgrund des geisteswissenschaftlichen Hintergrunds erheblich von einem ingenieurwissenschaftlichen Problem unterscheiden, das in einem mathematischen Kontext angesiedelt ist. Im einfachsten Fall reicht es schon aus, die Ziele und Bewertungskriterien eines zu untersuchenden Problems zu spezifizieren, da allein dadurch derart viele Informationen zusammengetragen werden, dass der daraus folgende beste Lösungsvorschlag bereits aufgedeckt wird oder die Anzahl der möglichen Lösungen so stark reduziert wird, dass nur noch eine übrig bleibt. In komplizierteren Fällen muss eine Performance-Matrix erstellt werden, in der das Verhalten der verschiedenen Lösungsmöglichkeiten gegenüber den einzelnen Kriterien beschrieben wird. Der dabei verwendete Bewertungsmaßstab kann je nach Kriterium variieren und aus Geldwerten, Farblegenden, Punktesystemen oder Symbolen bestehen. Anhand dieser Performance-Matrix kann der Entscheidungsträger bereits die am besten geeignete Lösung auswählen, indem er die Einträge qualitativ mit seinen Vorschlägen vergleicht.

Es ist allerdings auch möglich, die Bewertung der einzelnen Aspekte numerisch auszudrücken und den Entscheidungsprozess in einer analytischeren Form zu betrachten. Eine der bekanntesten Techniken ist das Scoring und Weighting. Beim Scoring wird

²Die nachfolgenden Absätze enthalten im Wesentlichen Informationen aus diesem Bericht. Auf Quellenhinweise zu diesem Dokument wird daher verzichtet. Andere Quellen werden explizit aufgeführt.

einem Lösungsvorschlag in Bezug auf ein Bewertungskriterium ein numerischer Wert zugeordnet. In der Regel sind diese Werte für zu bevorzugende Lösungen hoch und für weniger geeignete klein. Eine typische Scoring-Skala reicht von 0 bis 100. Durch Weighting wird jedem Kriterium ein Wert zugeordnet, der seine Wichtigkeit für die Gesamtbeurteilung beschreibt. Klassischerweise wird hier durch prozentuale Angaben die Wertigkeit der Kriterien zum Ausdruck gebracht. Aber auch andere Maßstäbe sind hier anwendbar.

Diese beiden Werte werden miteinander kombiniert, um eine Aussage darüber zu erhalten, wie gut eine Lösung in Bezug auf ein Bewertungskriterium im Rahmen der Gesamtbeurteilung abschneidet. Solche Ansätze werden häufig als kompensatorische mehrkriterielle Analysetechniken bezeichnet, da eine ungünstige Bewertung in Bezug auf ein bestimmtes Beurteilungskriterium durch eine bessere Bewertung bei einem gleichwertigen anderen ausgeglichen werden kann. Ein möglicher Schritt zum Erreichen der Gesamtbeurteilung für einen Lösungsvorschlag ist die Berechnung eines gewichteten Mittelwerts. Dieser liefert jedoch nur eine belastbare Aussage, wenn die Scoring- und Weighting-Werte für die einzelnen Lösungsvorschläge unabhängig voneinander sind.

Bekannte Analysemöglichkeiten werden nachfolgend dargestellt. Die Ansätze und Methoden können einzeln oder in Kombination miteinander angewendet werden.

Multiattribute Utility Theory

Die Multiattribute Utility Theory (MAUT) stellt eine Weiterentwicklung der Nutzwertanalyse dar. Durch sie können Attributdiagramme oder Bewertungsmatrizen eines multiattributiven Modells anhand der durch den Anwender gewählten Scoring- und Weighting-Größen analysiert werden. Die Scoring-Größen werden dabei auf einen einheitlichen Wert gebracht, um anhand eines gesamtumfassenden numerischen Parameters die Entscheidungsfindung zu unterstützen. Eine Besonderheit der MAUT liegt darin, dass Unsicherheiten bei der Ermittlung der Nutzwerte berücksichtigt werden können, indem man die Wahrscheinlichkeit einrechnet, mit der ein Nutzen erzielt wird. Der Gesamtnutzen U_i einer Lösungsmöglichkeit i lässt sich dann aus der Summe der Einzelbewertungen pro Kriterium u_{ij} und ihrer Eintrittswahrscheinlichkeiten p_j berechnen:

$$U_i = p_1 u_{i1} + p_2 u_{i2} + \dots + p_n u_{in} = \sum_{j=1}^n p_j u_{ij}$$

Die Gesamtbeurteilung einer Lösungsmöglichkeit wird erhalten, indem die Werte in Bezug auf ein Beurteilungskriterium mit dem Wichtungsfaktor multipliziert und anschließend über alle Kriterien aufsummiert werden. Diese Art der Auswertung wird als linear additives Verfahren bezeichnet und ist die am häufigsten verwendete bei multiattributiven Modellen. Die Nutzwerte u_{ij} können in entsprechende Scoring-Werte s_{ij} überführt werden. Aus ihnen ergibt sich durch Verknüpfung mit den Wichtungsfaktoren w_j ein Scoring-Wert S_i für eine Lösungsoption i :

$$S_i = w_1 s_{i1} + w_2 s_{i2} + \dots + w_n s_{in} = \sum_{j=1}^n w_j s_{ij}$$

Für eine Darstellung als Nutzwertaufgabe im Rahmen der MAUT lassen sich die beiden Formulierungen ineinander überführen:

$$U_i = w_1 p_1 u_{i1} + w_2 p_2 u_{i2} + \dots + w_n p_n u_{in} = \sum_{j=1}^n w_j p_j u_{ij}.$$

Analytischer Hierarchieprozess

Beim analytischen Hierarchieprozess (AHP) nach Saaty (1980, [91]) werden jeweils zwei Projektvarianten miteinander verglichen, mit dem Ziel, die bessere der beiden zu bestimmen. Dabei wird nicht nur festgestellt, ob eine Lösung besser ist als eine andere, sondern auch um welches Maß. Dazu wird eine Skala verwendet, um den Vergleich numerisch zu beschreiben. Dabei geht es vornehmlich darum, die Wichtigkeit von Bewertungskriterien untereinander zu vergleichen. Die Ergebnisse können dann verwendet werden, um die Scoring- und Weighting-Größen festzulegen. Eine typische Skala sollte das gesamte Spektrum der Möglichkeiten eines Vergleichs abdecken. So kann üblicherweise eine Variante

- 1: Gleichbedeutend
- 3: Etwas wichtiger
- 5: Sehr viel wichtiger
- 7: Erheblich wichtiger
- 9: Absolut wichtiger

gegenüber einer anderen sein. Die Zahlen bilden dieses Verhältnis ab und können später als Multiplikatoren in die weitergehende Analyse eingebunden werden. Wenn die Skala in die entgegengesetzte Richtung angewendet werden soll, können die Reziproken eingesetzt werden. Wird dieser Vergleich für alle Varianten durchgeführt, erhält man eine Matrix, die diese Verhältniswerte beinhaltet (Tab. 6.1). Will man eine abschließende Gesamtbeurteilung erstellen, kann diese Matrix durch einfache (Mittelwertbildung) oder kompliziertere Analysen (programmgestützt) ausgewertet werden. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass der analytische Hierarchieprozess einen Entscheidungsprozess abbildet, bei dem das relative Urteil gegenüber dem absoluten ein stärkeres Gewicht hat.

Tabelle 6.1: Matrix über die paarweisen Vergleiche von Bewertungskriterien im Rahmen des analytischen Hierarchieprozesses

	C_1	C_2	...	C_n
C_1	1	C_1/C_2	...	C_1/C_n
C_2	C_2/C_1	1	...	C_2/C_n
...
C_n	C_n/C_1	C_n/C_2	...	1

Outranking

Auch beim Outranking wird untersucht, ob ein Lösungsvorschlag gegenüber einem anderen vorteilhafter beurteilt werden kann. Mit Methoden dieser Kategorie kann überprüft werden, inwieweit eine Variante andere Möglichkeiten dominiert. Allerdings können hier im Unterschied zum analytischen Hierarchieprozess auch die Ergebnisse des Scoring und Weighting und die darin anschließende Analyse eines linear additiven Verfahrens interpretiert werden.

Demnach wird die Performance einer jeden Lösung mit anderen verglichen. Dabei wird untersucht, welche Lösungen dominant und welche dominiert sind. Eine Lösung ist dominant, wenn sie in keinem Bewertungskriterium schlechter abschneidet als andere und für mindestens ein Kriterium die besten Werte liefert. Hilfestellungen bei der Beurteilung liefern Beurteilungsintervalle für die einzelnen Wertungen. Diese legen fest, ab welchem Zustand eine Lösung dominiert wird. Sie sind ein Qualitätskriterium, wie detailliert Outranking untersucht werden soll und stellen beispielsweise sicher, dass nur bei ausreichend deutlichen Unterschieden eine Rangfolge festgelegt wird.

Fuzzymethoden

Wenn die Unsicherheiten eines Beurteilungsmodells untersucht werden sollen, können auch Fuzzy-Ansätze verwendet werden. Diese helfen beispielsweise bei der Festlegung der Intervallgrenzen für Outranking-Prozesse. Darüber hinaus können sie auch in der Multiattribute Utility Theory zum Einsatz kommen, um die Unsicherheiten bei der Abschätzung eines zu erzielenden Nutzens abzubilden.

Sensitivitätsanalyse

Zur Überprüfung, wie empfindlich das Modell auf andere Vorgaben für Wichtungsfaktoren der Beurteilungskriterien reagiert, wird häufig eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dadurch wird die Unsicherheit der Gesamtbeurteilung überprüft, die unter anderem daher rührt, dass die Wichtigkeit eines Kriteriums bei mehreren Entscheidungsträgern unterschiedlich empfunden wird. Als Ergebnis erhält man entweder eine Bestätigung des ohnehin bereits favorisierten Lösungsvorschlags oder einen Hinweis, den verwendeten Bewertungsmaßstab noch einmal zu überprüfen. Auch die Bewer-

tung der Lösungen selbst kann einer Sensitivitätsanalyse unterzogen werden. Da Wertungen einer Lösung jedoch tendenziell eher auf Fakten und Zahlen als auf Empfindungen basieren, ist dieser Fall selten.

6.3.3 Entscheidungsmodell für eine Beispielanwendung

In einem Beispiel über die Analyse von verschiedenen Standorten einer Windkraftanlage soll die Anwendung eines multiattributiven Modells dargestellt werden. Dieses wurde nach Steele et al. (2008, [97]) erweitert. In diesem Beispiel werden zwei Standorte evaluiert. Diese variieren hinsichtlich der Energieausbeute, der Nähe zu bebautem Gebiet und zu Ballungs- und Brutgebieten von Vögeln. Daher werden als Bewertungskriterien die von den Windkraftanlagen ausgehende CO₂-Einsparung, die Lärmbelästigung und die Gefahr für Vögel festgelegt. Die Kosten spielen in diesem Beispiel keine Rolle, da davon ausgegangen wird, dass an beiden Standorten die gleiche Anlage errichtet werden soll.

Zunächst werden die Bewertungen der beiden Standorte für die genannten Kriterien ermittelt. Tabelle 6.2 zeigt mögliche Größenordnungen der Vogelsterblichkeit, der CO₂-Einsparung, wie sie aus Statistiken und Vorabuntersuchungen bestimmt wurden sowie die Beurteilung der Lärmbelästigung der nächstgelegenen Siedlungen.

Tabelle 6.2: Bewertung der Standorte bezüglich der gewählten Kriterien

Standort	Vogelsterblichkeit	CO ₂ -Einsparung	Lärmbelästigung
A	400 Vögel pro Jahr	5 %	gering
B	1.000 Vögel pro Jahr	15 %	mittel

Nun muss noch das jeweilige Maß der Lärmbelästigung in einen numerischen Wert umgerechnet werden, um diesen im Rahmen der Gesamtbeurteilung verarbeiten zu können. Da nur zwei Lösungen zu Auswahl stehen, bilden die Bezeichnungen „gering“ und „mittel“ die beiden Extreme für dieses Kriterium und werden daher durch die beiden Enden einer numerischen Skala ausgedrückt. Eine geringe Lärmbelästigung ist sicher als positiv einzuschätzen, weshalb ihr auf einer Skala von 0 bis 1 der Wert 1 zugeordnet wird. Im Vergleich dazu ist eine mittlere Lärmbelästigung schlechter einzuschätzen und bekommt daher den Wert 0 zugewiesen.

Da es im Rahmen der MAUT wünschenswert ist, alle Bewertungen auf der gleichen Skala zu messen, muss die Beurteilung der Vogelsterblichkeit umgerechnet werden. Steele et al. [97] haben dazu eine lineare Beziehung aufgestellt, die in Abhängigkeit von der Wunschvorstellung, wie wenig Vögel sterben sollten sowie einer unteren Intolerabilitätsgrenze, wie viele Vögel sterben dürfen, einen Nutzwert der Anlage in Bezug auf das Mortalitätskriterium für Vögel liefert. Es ist natürlich wünschenswert, dass kein Vogel stirbt, so dass die Anzahl 0 durch den Nutzwert 1 in der MAUT repräsentiert werden soll. Nimmt man nun an, dass der Tod von 5.000 Vögeln jährlich

das schlechteste ist, was für eine Windkraftanlage zugelassen ist, wird diese Zahl den Nutzwert 0 bekommen. Daraus ergibt sich folgende Beziehung für die Ermittlung der Nutzwerte:

$$u(N) = 1 - 0,0002 \cdot N.$$

Anschließend müssen die Kriterien gewichtet werden. Steele et al. [97] schätzen die Bedeutung der CO₂-Einsparung und der Vogelsterblichkeit als gleich wichtig ein. Die Lärmbelästigung soll im Vergleich dazu als geringbedeutend gewählt werden, da der Unterschied zwischen einer geringen und einer mittleren Lärmbelästigung von dem Entscheidungsträger als zu klein empfunden wird. Die Kriterien werden daher mit

- Vogelsterblichkeit: 45 %
- CO₂-Einsparung: 45 %
- Lärmbelästigung: 10 %

gewichtet. Im Zweifel kann hier auch ein analytischer Hierarchieprozess zur Klärung der Wichtung beitragen. Ein weiteres beliebtes Hilfsmittel sind Befragungen oder Diskussionen unter mehreren Entscheidungsträgern.

Die errechneten Nutzwerte und der daraus folgende Gesamtwert sind nach Anwendung dieser Wichtungsfaktoren in Tabelle 6.3 dargestellt. Demnach ist der Standort A aufgrund seines größeren Gesamtnutzens zu bevorzugen.

Tabelle 6.3: Nutzwerte und Gesamtbewertung der Standorte nach Wichtung der Kriterien

Standort	Vogelsterblichkeit	CO ₂ -Einsparung	Lärmbelästigung	Gesamtnutzen
A	0,92	0,05	1,00	0,31
B	0,80	0,15	0,00	0,23

Im Rahmen einer Sensitivitätsanalyse können nun die gewählten Wichtungsfaktoren oder die berechneten Nutzwerte überprüft werden. So wurde in diesem Beispiel davon ausgegangen, dass der maximale Nutzwert der CO₂-Einsparung bei 100 % liegt. Das ist eine etwas überzogene Vorstellung. Vielmehr sollte davon ausgegangen werden, im Idealfall einen gewissen Prozentsatz an CO₂ durch den Betrieb einer Windkraftanlage einzusparen. Diesem Prozentsatz sollte sodann der Nutzwert von 1 zugeordnet werden. Darüber hinaus können natürlich noch strengere Vorgaben zum Schutz der Vögel angewendet werden, wodurch auch dieser Nutzwert verändert werden würde. Durch eine Änderung der Wichtung könnte diesem Kriterium zudem ein stärkeres Gewicht gegeben werden. Unter diesen Voraussetzungen kann sodann noch einmal der Gesamtnutzen ermittelt werden und mit dem bisherigen Ergebnis verglichen werden.

6.4 Bewertungskriterien für Nassbaggerstrategien

Nachdem die Grundlagen der Beurteilung und Optimierung von Prozessen dargestellt wurden, sollen nun die bestimmenden Bewertungskriterien für Nassbaggerstrategien zusammengestellt werden. Dazu muss man zunächst spezifizieren, was unter Nassbaggerstrategien zu verstehen ist.

Im Gegensatz zu dem eigentlichen Wortlaut soll der Nassbaggervorgang selbst in Form verschiedener Strategien nicht näher in dieser Arbeit analysiert werden. Die Herstellungstiefen haben sich für die einzelnen, durch die Schifffahrt genutzten Oberflächengewässer in einem langen Prozess aus immer wieder korrigiertem Bedarf und Beobachtungen entwickelt. Zudem sind die Folgen auf das gesamte Gewässer, die beispielsweise eine Variation der Baggertiefe mit sich bringen würde, nur schwer abzuschätzen. Für die Zusammenstellung der Beurteilungskriterien wären weitreichende Untersuchungen notwendig, die unter Umständen für ein einfaches Entscheidungsmodell zu komplex sind.

Der Kern der Untersuchungen soll sich daher vielmehr auf die Suche nach geeigneten Umlagerungsflächen für taugliches Baggergut konzentrieren. Diese Fragestellung ist in nahezu jedem Gewässer von Bedeutung, da die Unterbringung der großen Mengen an gebaggerten Sedimenten zum einen mit erheblichen Kosten verbunden ist und zum anderen diese Sedimente Folgeprozesse auslösen, deren Wirkung beurteilt werden muss (Abb. 6.4). So wird direkt nach dem Verbringen das vorhandene Sohlsubstrat mit Baggergut überdeckt. Davon sind verschiedene Arten von Flora und Fauna betroffen, für die die Folgen des Einbringens der Sedimente gemäß den Handlungsanweisungen der Bundesanstalt für Gewässerkunde untersucht werden müssen. Darüber hinaus kann verbrachtes Baggergut von der Umlagerungsstelle verdriften. Es ist möglich, dass die Sedimente in angrenzende Schutzbereiche transportiert werden oder aber in unbedenkliche Bereiche gelangen. Durch Verdriftungsvorgänge kann verbrachtes Baggergut allerdings auch wieder zurück in die Fahrrinnenbereiche transportiert werden, von wo es unter Umständen erneut entfernt werden muss. Bei der Untersuchung verschiedener Nassbaggerstrategien sollte demnach das Ziel verfolgt werden, geeignete Umlagerungsstellen zu finden, auf denen das Verbringen von Baggergut keine negativen Folgen hat.

Für die Beurteilung von Nassbaggermaßnahmen ist am ehesten der Einsatz von multiattributiven Modellen denkbar. Durch rechtliche Bestimmungen ist die Lösungsmenge von vornherein stark eingeschränkt. So erfüllen in der Regel nur bestimmte Gebiete die Anforderungen an eine Umlagerungsfläche. Als wichtigste Randbedingung neben den Grenzwerten für die Schadstoffbelastung ist hier der Grundsatz zu nennen, dass die Kornzusammensetzung des Baggerguts dem Sedimentinventar an der Umlagerungsstelle gleichen muss. Das führt insbesondere in Gebieten mit einer sehr heterogenen Sohlstruktur zu einer erheblichen Einschränkung auf der Suche nach einer optimalen Verbringfläche. Zudem müssen die Flächen derart beschaffen sein, dass sie das Baggergut auch aufnehmen können. Ihre Fläche und Tiefe muss ausreichend sein, damit ein bestimmtes Volumen auf ihnen verbracht werden kann.

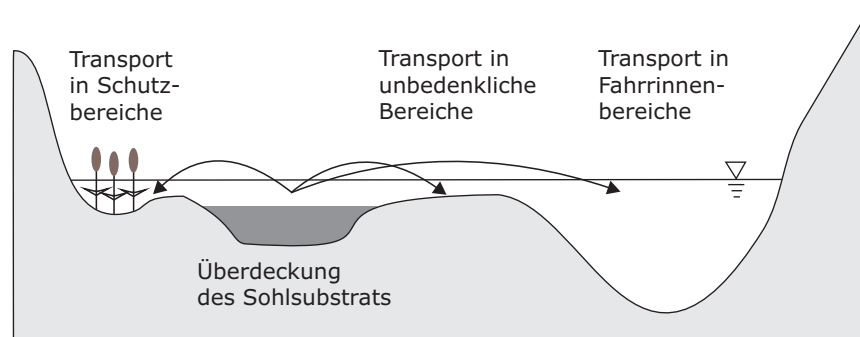


Abbildung 6.4: Mögliche Folgeprozesse bei der Baggergutverbringung

Es handelt sich demzufolge um ein diskretes Entscheidungsproblem, für das angenommen werden kann, dass die Lösungsalternativen aus Voruntersuchungen bekannt sind. Die wichtigsten verbleibenden Bewertungskriterien für die Beurteilung dieser Lösungsmöglichkeiten von Baggerstrategien sind:

- Kosten
- Auswirkungen auf die Umwelt
- Langfristige Entwicklung
- Verwendung bei Sicherungsmaßnahmen.

Wie bei vielen Optimierungsaufgaben sind im Zuge der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit die mit Nassbaggermaßnahmen verbundenen Kosten ein wesentliches Bewertungskriterium. Ziel ist es, möglichst kostengünstige Strategien zu verfolgen, um den hohen finanziellen Aufwand, der im Rahmen der Gewässerunterhaltung zu beobachten ist, zu verringern. Ein weiterer wichtiger Untersuchungsgegenstand ist die Beurteilung der Beeinflussung der Umwelt. Diese muss im Zuge einer Auswirkungsprognose detailliert analysiert werden und sollte nicht negativ ausfallen. Für die Beurteilung der möglichen Verbringflächen ist auch von großer Bedeutung, was mit dem Baggergut geschieht, wenn es verbracht wird. Die Tatsache, ob es aufgrund der Strömungsverhältnisse an diesem Ort verbleibt oder abtransportiert wird, ist ein entscheidendes Kriterium und beeinflusst überdies auch die beiden vorigen. Baggergut kann auch zur Sicherung von baulichen Anlagen Verwendung finden, wenn diese durch Erosionsprozesse in Gefahr sind. De facto handelt es sich dabei um eine Umlagerung von Baggergut, so dass der zu sichernde Bereich als Verbringstelle bezeichnet werden kann. Da der Schutz dieser Anlagen eine hohe Priorität genießt, konkurriert diese Art der Baggergutnutzung mit anderen Ablagerungsoptionen.

Da die hier aufgeführten Kriterien nicht kongruent hinsichtlich ihres Optimierungsverlaufs sind, handelt es sich um ein mehrkriterielles Beurteilungsproblem. Man kann sich leicht vorstellen, dass die kostengünstigste Lösung nicht automatisch auch die ökologisch beste ist. Es gilt also auch hier, die angesichts dieser Kriterien beste

Kompromisslösung zu finden. Die vier Beurteilungskriterien können zur genaueren Beschreibung in weitere Unterkriterien aufgeteilt werden, was nachfolgend näher erläutert werden soll.

6.4.1 Kosten

Die Kosten einer Bagger- und Verbringmaßnahme setzen sich aus verschiedenen Posten zusammen:

- Baggerkosten
- Transportkosten
- Monitoringkosten.

Die reinen Baggerkosten hängen im Wesentlichen von den Randbedingungen ab. Handelt es sich beispielsweise um leicht zu lösendes Material in einer geringen Fördertiefe, können einfache Baggergeräte verwendet werden. Dadurch fallen auch die Kosten deutlich geringer aus, da weniger Energie nötig ist und kein schweres Gerät bewegt werden muss. Als Unterkriterium werden die Baggerkosten jedoch fortan vernachlässigt. Zum einen soll die Eignung von Verbringstellen untersucht werden. Da Baggerkosten keine Funktion der Eigenschaften an der Verbringstelle sind, sind sie für die dahingehende Optimierung der Nassbaggerstrategie unerheblich. Zum anderen bestehen an dieser Stelle kaum Optimierungsmöglichkeiten, die über die technische Weiterentwicklung des Baggergeräts hinaus gehen.

Ein weitaus wichtigerer Punkt bei der Aufteilung der Kosten ist der Transport zwischen Bagger- und Verbringstelle. Diese fallen natürlich um so größer aus, je weiter die Umlagerungsstelle von dem Baggerschwerpunkt entfernt ist. Demzufolge wird nach möglichen Ablagerungsstellen in der Umgebung der Baggerstelle gesucht, um die Entfernung zu reduzieren. Laut einer Auskunft des WSA Cuxhaven können die Transportkosten sogar die reinen Baggerkosten übersteigen, wenn der Transportweg zu lang wird. Einer internen Auskunft zu Folge, wird für den reinen Baggervorgang 1 € pro m³ Sediment an Kosten angesetzt, während für den Transport dieser Menge 2,50 € für jeden gefahrenen Kilometer veranschlagt werden (siehe Kapitel 1.6). Diese Aufteilung der Kosten zeigt, dass der Suche nach einer möglichst nahe gelegenen Ablagerungsstelle ein erhebliches Optimierungspotenzial innewohnt, das durch eine entsprechende Wichtung dieses Kriteriums im Entscheidungsmodell berücksichtigt werden sollte.

Überdies können auch Monitoringmaßnahmen erforderlich sein, um die Unbedenklichkeit von verbrachtem Baggergut für eine Verbringstelle zu überprüfen. Aufgrund der Voruntersuchungen wird davon ausgegangen, dass alle Verbringstellen, die durch dieses Beurteilungsmodell bewertet werden, auch weitestgehend für eine Umlagerung geeignet sind. Bei grenzwertigen Eigenschaften des Baggerguts sind jedoch weitere

Analysen im Hinblick auf nachteilige Auswirkungen für die Umwelt notwendig. Aufschluss über die Beeinflussung der Ökosysteme geben unter anderem Messkampagnen (siehe z.B. Karrasch, 2010 [62]), deren Ergebnisse auch für spätere Untersuchungen interpretiert werden können. In einem Beurteilungsmodell müssen somit unter Umständen zusätzliche Monitoringmaßnahmen vorgesehen werden, wodurch weitere Kosten entstehen.

6.4.2 Umweltauswirkungen

Durch das Unterkriterium über Monitoringmaßnahmen werden bereits Umweltaspekte in dem Entscheidungsmodell abgebildet. Darüber hinaus können auch weitere Umweltauswirkungen im Entscheidungsprozess berücksichtigt werden. Der Einfluss von Baggergut auf die Umwelt hängt hauptsächlich von seiner Zusammensetzung ab. Dazu zählen der mineralogische Aufbau, die Verunreinigung mit Schadstoffen, die lediglich bis zu gewissen Grenzwerten zulässig ist, und die organischen Inhaltsstoffe. Eine Verbringstelle ist um so geeigneter, je weniger sie die umgebende Flora und Fauna beeinträchtigt. Das gilt während der Überdeckung mit Baggergut direkt im Anschluss an den Verbringvorgang aber auch als Folge des späteren Verdriftens von der Ablagerungsstelle.

Durch den rechtlichen Rahmen ist bereits sichergestellt, dass der Schadstoffbelastung von Baggergut Grenzen gesetzt werden und seine stoffliche Zusammensetzung im Rahmen einer Verbringmaßnahme überprüft wird (siehe Kapitel 1.4). Allerdings kann es vorkommen, dass trotz der Einhaltung der Grenzwerte eine Verbringstelle besser für eine Umlagerung geeignet ist als eine andere, da sie zum Beispiel nicht in der Nähe von Naturschutzgebieten liegt. Um diesem Beurteilungsmerkmal Rechnung zu tragen, kann ein derartiges Kriterium angewendet werden.

6.4.3 Langfristentwicklung

Einen besonderen Punkt stellt die Langfristentwicklung um eine Ablagerungsstelle dar. Es gilt herauszufinden, ob das verbrachte Baggergut auf der Verbringstelle verbleibt oder von ihr mobilisiert wird. Beide Szenarien können positiv und negativ beurteilt werden.

Wird ein nachhaltiges Ergebnis angestrebt, kann es erwünscht sein, dass das Baggergut lange auf einer Verbringstelle verweilt. So kann sicher gestellt werden, dass es nicht in baggersensitive Bereiche transportiert wird, wo es erneut gebaggert werden muss und dadurch einem Kreislaufprozess unterliegt. Hierdurch können zusätzliche Kosten entstehen, die durch das Verbringen auf einer von vornherein geeigneteren Fläche unter Umständen vermieden werden können. Darüber hinaus ist es negativ zu bewerten, wenn umgelagertes Baggergut in ökologisch sensible Bereiche transportiert wird, wie zum Beispiel angrenzende Naturschutzgebiete.

Das Verdriften von Baggergut von Verbringstellen kann auch erwünscht sein. Das ist insbesondere in Bereichen der Fall, in denen große Mengen Baggergut anfallen und

nur wenig Möglichkeiten der Unterbringung bestehen. Dann ist es vorteilhaft, wenn die bestehenden Aufnahmekapazitäten möglichst schnell wieder zur Verfügung stehen, indem genutzte Umlagerungsstellen zügig durch die natürliche Strömung frei geräumt werden. Darüber hinaus entspricht die Sedimentbewegung um eine Umlagerungsstelle herum auch den aktuellen Vorstellungen eines dynamischen Sedimenttransportregimes, welches als ökologisch wertvoll gilt, da es zu ständigen Umlagerungsprozessen kommt. Diese beiden Aspekte sind mit der obigen Zielstellung in Einklang zu bringen. Im Idealfall wird demzufolge Baggergut auf Verbringstellen verbracht, die dauerhaft als solche zur Verfügung stehen, ohne dass die von ihr remobilisierten Sedimente die baggerelevanten Bereiche der Fahrrinne erreichen, aus denen sie erneut gebaggert werden müssen.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Langfristentwicklung um eine Verbringstelle herum wiederum Kosten und Umweltaspekte beeinflusst. Daher sollte in der Beurteilung dieser Eigenschaft darauf geachtet werden, ob durch eine Umlagerungsstelle Kreislaufbaggerungen gefördert werden oder das verbrachte Material in anderen Baggerschwerpunkten akkumuliert und inwieweit das Baggergut in ökologische Schutzbereiche transportiert wird.

6.4.4 Verwendung bei Sicherungsmaßnahmen

Einen Sonderfall stellt das Verbringen in Kolken dar. Dabei wird Baggergut an Orten verbracht, von denen es wieder abtransportiert wird, mitunter auch unabhängig davon, ob es wieder in baggerelevante Abschnitte verdriftet. Das Ziel einer solchen Maßnahme ist, bauliche Strukturen und Uferlinien, die durch Erosionsprozesse gefährdet sind, zu schützen. Das wird erreicht, indem dem fortschreitenden Abtrag von Sedimenten frisches Material zur Verfügung gestellt wird, um den bestehenden Zustand weitestgehend zu erhalten. Natürlich wäre es dem Nachhaltigkeitsempfinden zufolge vorteilhafter, eine längerfristige Lösung zur Sicherung dieser Stellen zu finden, jedoch muss man sich auch des angefallenen Baggerguts entledigen. Wenn sich Baggergut zur Umlagerung eignet, sollte das auch erfolgen. Auf diese Weise können zwei Ziele miteinander in Einklang gebracht werden.

In Abbildung 6.5 ist der Prozess der Entscheidungsfindung, welche Verbringstelle für die untersuchten Baggerstrategien am geeignetsten ist, noch einmal zusammengefasst. Der rechtliche Rahmen gibt im Wesentlichen die Lösungsmenge vor. Die darin enthaltenen n Lösungen werden hinsichtlich der vier Kriterien beurteilt, so dass man als Ergebnis die bestmögliche Verbringstelle erhält.

Diese Grafik erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern soll einen möglichst allgemeinen Überblick darüber geben, welche Eigenschaften über die Eignung einer Verbringstelle entscheiden. Darüber hinaus sind natürlich auch weitere Kriterien denkbar. Im Küstenbereich kann der Einfluss der Tidephase, während derer umgelagert wird, auf das Transportgeschehen bedeutend sein. Darüber hinaus bestimmt in Ästuaren der Oberwassereinfluss über die Größe der Flut- und Ebbestromtransporte und kann daher auch als Beurteilungskriterium mitentscheidend sein.

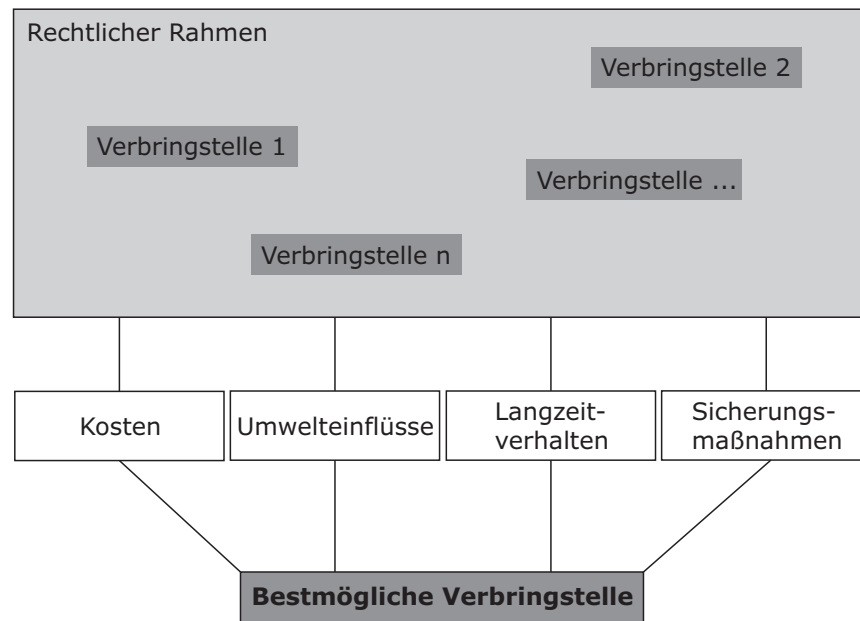


Abbildung 6.5: Beurteilungsmodell zur Bewertung von Verbringstellen

6.5 Nassbaggerstrategien in Beurteilungsmodellen

Für ein Entscheidungsmodell zur Bewertung von Nassbaggerstrategien müssen in einem ersten Schritt die Kriterien gewichtet und die einzelnen Lösungsmöglichkeiten mit Blick auf die Beurteilungskriterien bewertet werden. Anschließend kann die Gesamtbeurteilung mittels des linear additiven Verfahrens berechnet und das Ergebnis interpretiert werden. Man erhält sodann die Aussage, welche Verbringstelle in Bezug auf die verschiedenen Anforderungen am geeignetsten ist. Ein solches Beurteilungsmodell und die mit ihm verknüpfte Ermittlung von Eingangsdaten stellt einen Optimierungsprozess dar, an deren Ende die unter diesen Randbedingungen optimale Verbringstelle ermittelt wird.

6.5.1 Wichtung der Kriterien

Eine Wichtung der Kriterien unabhängig von der anzutreffenden Situation wäre im Sinn einer Allgemeingültigkeit erstrebenswert. Auf diese Weise stünde ein Modell zur Verfügung, dass auf jedes Untersuchungsgebiet anwendbar ist. Allerdings ist das in der Praxis kaum zu erreichen, da die betrachteten Gebiete zu unterschiedlich sind und die Beschaffenheit des Baggerguts stark variiert. So spielen beispielsweise im Binnenbereich an der Donau die Umwelteinflüsse keine derart große Rolle wie an der Tideelbe, da die Sedimente nicht so stark verunreinigt sind und sie eine eher einheitliche, grobe Kornzusammensetzung haben. Im Binnenbereich hingegen ist das Verbringen von Baggergut in Kolken wichtiger als im Küstenbereich, da hier eine viel größere Zahl an baulichen Anlagen vor Erosionsangriff zu schützen ist. Daher soll-

te bei der Beurteilung von Verbringstellen diesem Kriterium unter Umständen ein größeres Gewicht beigemessen werden, wenn das Beurteilungsgebiet im Bereich einer Binnenwasserstraße liegt. Unabhängig von ihrer Bedeutung sind die oben zusammengestellten Bewertungskriterien und ihre Aufschlüsselung in Unterkriterien zunächst noch einmal zusammenfassend in Abbildung 6.6 aufgeführt. Diese können bei Bedarf um weitere Kriterien C_i erweitert werden.

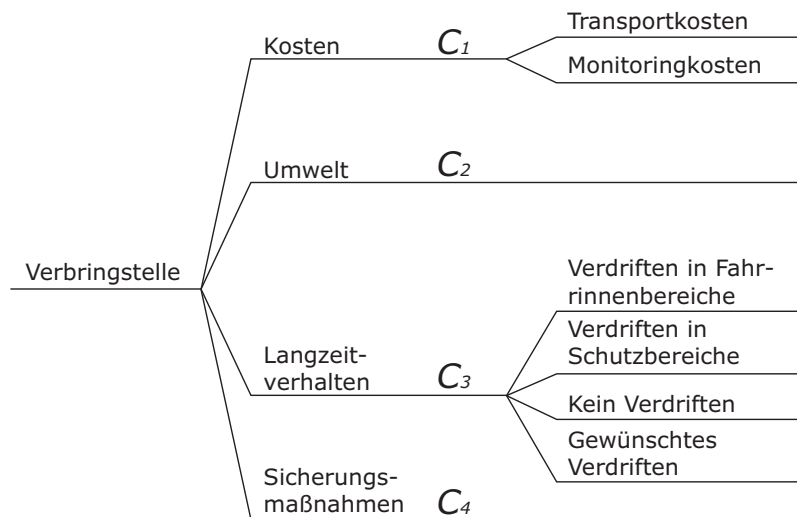


Abbildung 6.6: Beurteilungskriterien und Unterkriterien zur Bewertung von Verbringstellen

Bei der Wichtung können entweder nur die Zweige auf der untersten Ebene betrachtet werden, da diese eine Verfeinerung der darüber liegenden darstellen. Oder aber man zieht das größere Kriterium heran, um eine Wichtung festzulegen. Letzteres macht vor allem dann Sinn, wenn nicht alle Unterkriterien eindeutig bewertet werden können. Die untere Ebene kann dann als Hilfestellung zur Bewertung der Wichtung der Oberkriterien verwendet werden. Kann man beispielsweise keine detaillierte Aussage zu den einzelnen Langzeitverhältnissen treffen, ist es sinnvoll, in diesem Fall das Kriterium Langzeitverhalten geschlossen zu bewerten und auf diese Weise in den Wichtungsprozess einfließen zu lassen.

Bei der Wichtung ist also darauf zu achten, ein Oberkriterium nicht gleichzeitig mit Unterkriterien zu berücksichtigen, da sonst dieses Oberkriterium doppelt in die Beurteilung eingeht. Für die Beurteilung von Baggerstrategien wird eine Wichtungsskala von 0,0 bis 1,0 gewählt. Die Summe der Einzelwichtungen w_j sollte am Ende 1,0 ergeben:

$$\sum_{j=1}^n w_j = 1.$$

Im einfachsten Fall sind alle Kriterien gleich wichtig, wodurch jedem der gleiche Wichtungsfaktor zugeordnet wird. In der Realität wird es jedoch immer Beurteilungskriterien geben, die wichtiger sind als andere. Für die Festlegung der Werte sind verschiedene Vorgehensweisen denkbar. Am besten wäre es, die Entscheidungsträger gemeinsam darüber entscheiden zu lassen, wie die Kriterien gewichtet werden sollen. Idealerweise sollte dabei jedes Kriterium durch Vertreter in der Gruppe der Entscheidungsträger repräsentiert werden. In Analysen, Diskussionen und Abstimmungen könnte sodann ein Beurteilungsmaßstab erstellt werden. Repräsentative Befragungen wären eine weitere Methode die Wichtigkeit der Beurteilungskriterien zu bestimmen. Beide Varianten würden relativ viel Zeit in Anspruch nehmen und tendenziell eher auf das Gespür der Befragten und der Entscheidungsträger vertrauen.

Um diese Aussagen zu bestätigen oder ein unabhängigeres Verfahren zu verfolgen, können die Wichtungen auch in Abhängigkeit der Bewertungen der Einzellösungen vergeben werden. Wenn der Unterschied zwischen zwei Lösungsalternativen in Bezug auf ein Kriterium klein ist, wird der Einfluss dieses Kriteriums auf die Gesamtbeurteilung ebenfalls klein sein. Daher kann diesem Kriterium ein kleiner Wert zugewiesen werden und die eingesparten Wichtungsprozente auf andere Kriterien aufgeteilt werden, bei denen die Lösungsmöglichkeiten größere Unterschiede aufweisen. Diese häufig verwendete Herangehensweise wird als *Swing Weighting* bezeichnet (siehe Dodgson et al., 2009 [39]). Die Wichtigkeit von Kriterien hängt demnach sowohl von den Unterschieden innerhalb eines Kriteriums ab als auch wie schwer diese Unterschiede wiegen. Sind beispielsweise die Unterschiede zwischen zwei Verbringstellen im Hinblick auf die von ihnen ausgehenden Umweltbelastungen gering, spielt dieses Kriterium für die Gesamtbeurteilung, welche Verbringstelle geeigneter ist, eine untergeordnete Rolle, wenn in einer anderen Kategorie, wie zum Beispiel den Transportkosten, größere Unterschiede vorliegen. Das kann, wie eingangs dieses Kapitels erläutert, bei Binnenflüssen der Fall sein. Das bedeutet jedoch ausdrücklich nicht, dass Umweltaspekte hier per se nicht wichtig sind. Sie spielen lediglich für den Entscheidungsprozess eine untergeordnete Rolle, da die Beurteilung, welche der Verbringstellen besser ist, aufgrund der geringen Unterschiede für dieses Kriterium nicht aussagekräftig genug ist. Im Gegenzug sollte bei großen Unterschieden zwischen zwei Varianten nicht automatisch der größte Wichtungsfaktor auf das davon betroffene Kriterium vergeben werden, da dieser Unterschied dann unter Umständen überbewertet wird.

Wenn für alle untersuchten Nassbaggerstrategien keine Bewertung für ein bestimmtes Kriterium abgegeben werden kann, ist dessen Wichtungsfaktor zu Null zu setzen. Das kann beispielsweise bei der Bewertung einer Klappstelle hinsichtlich ihrer Schutzwirkung vor Erosionsangriffen vorkommen, da nur einige Verbringstellen diese Sicherungsfunktion übernehmen. Ebenso ist die Beeinflussung der Umwelt unter gewissen Randbedingungen komplett auszuschließen.

Intuitive Wichtung

Auch wenn grundsätzlich eine Entscheidung für die Wichtung der Kriterien in Abhängigkeit von dem jeweiligen Untersuchungsgebiet und gegebenenfalls der Einzellösungen innerhalb der Kriterien getroffen wird, soll als Grundlage für folgende Untersu-

chungen eine Wichtung der Kriterien an dieser Stelle vorgenommen werden. Diese ist zunächst intuitiv, wobei sie mit Erfahrungen und Beobachtungen unterfüttert wird. Es ist davon auszugehen, dass die Sicherung von strombaulichen Anlagen eine sehr hohe Priorität hat. Wenn eine solche Anlage aufgrund der fortschreitenden Erosionen durch Baggergutverbringung dringend geschützt werden muss, wird nicht erst ein Beurteilungsmodell aufgestellt, um eine geeignete Verbringstelle zu identifizieren. Vielmehr werden die gebaggerten Sedimente unmittelbar an entsprechender Stelle verbracht. Das Kriterium über die Sicherung von baulichen Strukturen kommt also nur zur Anwendung, wenn keine akute Bedrohung selbiger besteht, sondern die Verbringung im Vorgriff darauf erfolgt. Unter diesen Voraussetzungen muss der Sicherungsfunktion grundsätzlich keine hohe Wichtung beigemessen werden. Sie könnte bei einer vergleichbaren Bewertung anderer, wichtigerer Kriterien das entscheidende Kriterium sein.

Ähnlich verhält es sich mit der Bewertung der Umweltbeeinflussung. Auch sie ist grundsätzlich überaus wichtig. Allerdings wird durch die rechtlichen Bestimmungen bereits sicher gestellt, dass eine möglichst umweltschonende Nassbaggerstrategie verfolgt wird. Des weiteren sind mit den Monitoringkosten und der Bewertung der Verdriftung von Sedimenten zwei wichtige Aspekte in anderen Kriterien berücksichtigt. Daher soll dem verbleibenden Aspekt Umwelteinfluss ebenfalls kein hohes Gewicht beigemessen werden. Allerdings können sie bei vergleichbarer Beurteilung der Verbringstellen in Bezug auf die anderen Kriterien bedeutend werden. Sie sollen wie die Sicherungsfunktion mit 0,1 Punkten gewichtet werden.

Die Kosten, bestehend aus Transportkosten und Montoringkosten, sind ein wichtiger Beurteilungsgegenstand, da sie einen direkten monetären Wert haben, der den Aufwand beschreibt. Das sollte sich auch in ihrem Gewicht bei der Gesamtbewertung ausdrücken. Wenn man bedenkt, dass im Zuge der Änderung der Baggerstrategie für den Hamburger Hafen Baggergut aus Mangel an Alternativen bis in die Nordsee gebracht wurde, um unter anderem den Baggerkreislauf zu durchbrechen, ist davon auszugehen, dass dieses Kriterium unwichtiger als die Langzeitwirkung einer Maßnahme ist. Es soll daher einen Wichtungsfaktor von 0,35 erhalten.

Die restlichen 0,45 Punkte entfallen somit auf die Beurteilung des Langzeitverhaltens. Dieses ist bedeutend, da es so wichtige Punkte wie die Nachhaltigkeit, weitere Kosten, Akzeptanz der Anlieger eines Gewässers und den Schutz der Umwelt in sich trägt. Die Wichtigkeit dieses Punktes würde sich am deutlichsten bemerkbar machen, wenn er im Fall einer untersuchten Verbringstelle schlechte Ergebnisse liefern würde. Die Wichtungsfaktoren sind zusammenfassend in Tabelle 6.4 aufgeführt.

Tabelle 6.4: Wichtung der Kriterien für Nassbaggerstrategien

Kriterium	Kosten	Umwelt	Langzeitverhalten	Sicherungsfunktion
Neutral	0,35	0,1	0,45	0,1
Küstenbereich	0,35	0,2	0,45	0,0
Binnenbereich	0,35	0,0	0,45	0,2

In der Summe liefern die Wichtungsfaktoren den Wert 1,0. Die Tabelle wurde um zwei Zeilen erweitert, in denen für ein Untersuchungsgebiet im Küstenbereich und im Binnenbereich festgelegt wurde, dass Sicherungsmaßnahmen oder Umweltaspekte in dem Beurteilungsprozess keine Rolle spielen. Die nunmehr verbelebenden Wichtungspunkte wurden wiederum den Umwelteinflüssen und der Sicherungsfunktion zugeordnet.

Analytischer Hierarchieprozess

Eine weitere Möglichkeit, die Wichtungsfaktoren zu bestimmen, liefert der analytische Hierarchieprozess. Dabei werden die Kriterien untereinander hinsichtlich ihrer Wichtigkeit verglichen und Werte für die Wichtungsfaktoren aus der Vergleichsmatrix errechnet. Sie stellt eine analytischere Form der Ermittlung der Kriterienwichtung dar.

Dazu wird in einem ersten Schritt ein paarweiser Vergleich der Wichtigkeit der Kriterien durchgeführt und dieser durch einen Zahlenwert ausgedrückt. Dabei wird nach Saaty (1980, [91]) die bekannte Skala von 1 bis 9 und deren Reziprokwerte verwendet (siehe Kapitel 6.3.2). Für die Untersuchung der Nassbaggerstrategien wurde angenommen, dass die Kriterien über die Umwelteinflüsse und die Sicherungsfunktion gleichbedeutend sind ($C_2/C_4 = 1$). Im Vergleich dazu ist das Kriterium der Kosten erheblich wichtiger ($C_1/C_2 = C_1/C_4 = 7$). Das Langzeitverhalten hingegen ist etwas wichtiger als die Kosten ($C_3/C_1 = 3$) und dominant zu den Umwelteinflüssen und der Sicherungsfunktion ($C_3/C_2 = C_3/C_4 = 9$). Somit ergibt sich die in Tabelle 6.5 aufgeführte Matrix der Verhältniswerte der Kriterienwichtigkeiten. Diese wurde analog zu Tabelle 6.1 erstellt.

Tabelle 6.5: Matrix über die paarweisen Vergleiche von Bewertungskriterien für Nassbaggerstrategien

	C_1 : Kosten	C_2 : Umwelt	C_3 : Langzeit	C_4 : Sicherung
C_1 : Kosten	1	7	1/3	7
C_2 : Umwelt	1/7	1	1/9	1
C_3 : Langzeit	3	9	1	9
C_4 : Sicherung	1/7	1	1/9	1

Nach Saaty (1980, [91]) kann eine solche Matrix ausgewertet werden, indem ihr Eigenvektor zu dem größten Eigenwert berechnet wird. Dieser wird sodann normiert, wodurch man die typische Skala der Wichtung der Kriterien erhält. Für die obige Matrix lautet der Eigenvektor

$$(5, 76; 1; 11, 41; 1)^T$$

für den größten Eigenwert $\lambda = 4,09$. Durch Normierung ergeben sich die in Tabelle 6.6 angegebenen Wichtungen. Man erkennt, dass diese von der intuitiven Festlegung der

Wertigkeiten abweichen. Jedoch liegen diese Abweichungen in einem relativ kleinen Rahmen, so dass die unabhängig voneinander erfolgte Wertung der Kriterien nach dem AHP die Ergebnisse weitgehend bestätigt hat. Eine Variation von $C_1/C_2 = C_1/C_4 = 7$ zu $C_1/C_2 = C_1/C_4 = 5$ und von $C_3/C_2 = C_3/C_4 = 9$ auf $C_3/C_2 = C_3/C_4 = 7$ lieferte vergleichbare Ergebnisse der Wichtungen, wodurch obiges Urteil noch einmal untermauert wird. Wenn die verwendete Skala jedoch in ihrer Abstufung zu groß ist, können auch Zwischenwerte verwendet werden.

Tabelle 6.6: Wichtung der Kriterien für Nassbaggerstrategien nach AHP

Kosten	Umwelt	Langzeitverhalten	Sicherungsfunktion
0,3	0,05	0,6	0,05

Diese Verteilung stellt den einfachsten Fall dar, indem die obere Beurteilungsebene betrachtet wurde. Bei Verwendung der untergeordneten, verfeinerten Kriterien wird ein komplexeres Beurteilungsmodell mit einer größeren Anzahl an festzulegenden Wichtungen erhalten. Man kann die Unterkriterien von vornherein in den Beurteilungsprozess aufnehmen und beispielsweise einen AHP durchführen. Dann erhielte man für den hier betrachteten Fall eine 8 x 8-Matrix über die Hierarchieverhältnisse. Vereinfacht kann man auch die Unterkriterien wichten, indem ein autonomer AHP durchgeführt wird. Die daraus folgende Wichtung der Unterkriterien kann mit der oberen Ebene verbunden werden, indem deren Ergebnis dann mit dem Wichtungsfaktor des Oberkriteriums multipliziert wird. Oder aber man folgt einem anderen Beurteilungsschema, wenn eine Wichtung der Unterkriterien auf diese Weise einfacher zu erhalten ist.

Insgesamt wird jedoch deutlich, dass die Festlegung der Wichtungsfaktoren unabhängig von den eigentlichen Nutzwerten der Lösungsoptionen mit gewissen Unsicherheiten behaftet ist. Daher ist es in einem konkreten Anwendungsfall ratsam, zunächst die Nutzwerte in Bezug auf die Kriterien zu ermitteln, um sodann die Wichtigkeit der Kriterien zum Beispiel in Form der Swing Weighting-Methode zu ermitteln.

6.5.2 Bestimmung von Nutzwerten

Beim Scoring wird jede Verbringstelle mit Blick auf die einzelnen Beurteilungskriterien bewertet, um einen Nutzwert zu ermitteln. Dabei gilt es, monetäre und nicht-monetäre Wertungen zu vereinheitlichen und qualitative in quantitative Größen zu überführen.

Die Beurteilung der Kosten stellt den einfachsten Punkt dar. Für die Transportkosten wird der Betrag pro gefahrenen Kilometer mit der Entfernung zwischen Ablageungsfläche und Baggerstelle multipliziert, wodurch man einen monetären Wert zur Beurteilung erhält. Auch in Bezug auf Monitoringkosten lässt sich dieser Wert sehr genau quantifizieren. Diese beiden Kosten müssen nun auf eine andere Skala überführt

werden, um sie nach Multiplikation mit den Wichtungsfaktoren mit den Nutzwerten anderer Kriterien zu einem Gesamtnutzwert addieren zu können. Es soll ein Maßstab von 0 bis 1 für die Nutzwerte gewählt werden. Die geringsten Kosten bekommen den höchsten Nutzwert $u = 1$ zugeordnet und die größten Kosten den kleinsten $u = 0$. Dazwischen liegende Kosten werden interpoliert.

Der Umwelteinfluss hängt von verschiedenen biologischen, mineralogischen und chemischen Parametern ab. Diese können einzeln ausgewertet und in einer eigenen Beurteilungsmatrix analysiert werden. Oftmals sind detaillierte Untersuchungen jedoch nicht notwendig, so dass der Umwelteinfluss hier nur qualitativ abgeschätzt werden soll. Dazu können auch bereits durchgeführte Monitoringkampagnen als Erfahrungswerte interpretiert werden. Als Ergebnis kann man beispielsweise die Aussage erhalten, ob an einer Verbringstelle

- keine
- geringe
- mittlere
- hohe

Auswirkungen auf die Umwelt zu erwarten sind. Die Überführung eines solchen Bewertungsmaßstabs auf eine einheitliche Skala erfolgt in vergleichbarer Weise wie für die Baggerkosten. Dem besten Ergebnis, dass keine Auswirkungen auf die Umwelt zu erwarten sind, wird der Wert $u = 1$ zugeordnet und das schlechteste Urteil, dass die Folgen hoch sind, bekommt den Wert $u = 0$ zugewiesen. Da die Werte für die dazwischen liegenden Urteile interpoliert werden, erhält man Werte von $u = 0,33$ für geringe Auswirkungen und $u = 0,67$ für mittlere Auswirkungen.

Für die Beurteilung des Langzeitverhaltens sind weitergehende Analysen notwendig. Beobachtungen an der Verdriftungsstelle können hier Aufklärung bringen. Allerdings eignen sich auch numerische Modelle, um die Ausbreitung des verbrachten Baggerguts von der Umlagerungsstelle zu beurteilen. Dazu können Verdriftungsrechnungen für jede der zu untersuchenden Verbringstellen durchgeführt werden, anhand derer ihre Transportcharakteristik bewertet werden kann. Die Bewertung kann sowohl qualitativ als auch quantitativ erfolgen. Analog zu der Bewertung der Umwelteinflüsse kann die Verdriftung des Baggerguts von einer Verbringstelle mit Blick auf eines der Unterkriterien als positiv, indifferent oder negativ beurteilt werden. Alternativ ist bei der qualitativen Begutachtung auch ein Notensystem denkbar. Bei einer quantitativen Einschätzung können die Massen der verbrachten Sedimente weiterverfolgt werden. So kann beispielsweise ermittelt werden, welcher Prozentsatz über einen repräsentativen Zeitraum in die Fahrrinnenbereiche oder in Schutzzonen transportiert wird, welche Mengen an der Verbringstelle verbleiben und wie viel Prozent des Baggerguts unbedenklich verdriftet. Diese prozentualen Angaben bedürfen keiner Überführung in eine andere Skala, sondern können direkt verarbeitet werden. Das Ergebnis kann auf dieser Kriterienebene weiter analysiert werden, um einen Gesamtnutzwert für

das Oberkriterium über das Langzeitverhalten zu erhalten. An dieser Stelle wäre es jedoch vorteilhafter, die Unterkriterien zu wichten und diese Ebene auf das Gesamtmodell zu übertragen, um das bisherige Oberkriterium zu ersetzen. Ansonsten würde die Genauigkeit und Transparenz des Beurteilungsverfahrens abnehmen.

Die abschließende Bewertung, ob eine Verbringstelle eine Sicherungsfunktion für Strombauwerke erfüllt, lässt nur die beiden Urteile JA oder NEIN zu. Die Überführung in die Skala für Nutzwerte liefert die beiden Zahlen $u = 1$ und $u = 0$.

Die abschließende Tabelle 6.7 fasst noch einmal die Bewertungsgrößen und die daraus folgenden Nutzwerte der einzelnen Kriterien und ihre Wichtungsfaktoren zusammen.

Tabelle 6.7: Bewertungsgrößen, Nutzwerte und Wichtungen der einzelnen Beurteilungskriterien

Kriterium	Bewertungsgröße	Nutzwert u_j	Wichtungsfaktor w_j
Kosten	monetär	0,0-1,0	0,3
Umwelt	qualitativ	0,0-1,0	0,05
Langzeitverhalten	prozentual	0,0-1,0	0,6
Sicherungsfunktion	ja/nein	0,0-1,0	0,05

6.6 Zusammenfassung

In diesem Abschnitt wurden Möglichkeiten der Bewertung von Unterhaltungsmaßnahmen diskutiert. Dabei handelt es sich um ein Optimierungsproblem, um beispielsweise die am besten geeignete Nassbaggerstrategie zu finden. In diesem Sinn müssen die verschiedenen Lösungen mit Blick auf festzulegende Kriterien beurteilt werden. Durch diese Kriterien werden Zielvorstellungen formuliert, die möglichst durch eine bestimmte Nassbaggerstrategie erreicht werden sollen. Die unterschiedlichen Zielvorstellungen können zu konträren optimalen Einzellösungen führen. In diesem Fall ist bei einem solchen mehrkriteriellen Entscheidungsproblem die beste Kompromisslösung zu finden.

Hilfe bei der Auswahl der besten Lösung bieten Werkzeuge aus der Entscheidungstheorie und der Optimierungsrechnung. Handelt es sich bei dem zu untersuchenden Problem um eine durch stetige Funktionen beschreibbare Optimierungsaufgabe, für die ein kontinuierlicher Lösungsraum bereit steht, kann die Aufgabe als mehrkriterielles Optimierungsproblem durch mathematische Techniken gelöst werden. Als Ergebnis erhält man eine Menge Pareto-optimaler Lösungen, die allesamt die Vorgaben der Kriterien erfüllen und von denen eine im Rahmen eines Entscheidungsprozesses ausgewählt wird.

Wenn der Lösungsraum einer mehrkriteriellen Untersuchung durch diskrete und bekannte Optionen beschrieben wird, können diese durch multiattributive Modelle beurteilt werden, um zu ermitteln, welche der Lösungen am geeignetsten ist. Für die

Beurteilung von Nassbaggerstrategien im Rahmen der Optimierung der Unterhaltungsbaggerei kann in einem ersten Schritt ein solches multiattributives Modell angewendet werden. Häufig sind die Lösungsmöglichkeiten in Form verschiedener miteinander zu vergleichender Verbringstellen bekannt, da eine Reihe an Voruntersuchungen notwendig ist, um überhaupt die Eignung einer solchen Fläche zu überprüfen. Sie stehen dadurch als diskreter Datensatz zur Beurteilung zur Verfügung. Außerdem wird die Optimierungsaufgabe aufgrund der Anforderungen an eine Verbringstelle und der räumlich sehr unterschiedlichen Struktur eines Fließgewässerabschnitts nur schwer als stetiges Problem darstellbar sein oder viele Einschränkungen beinhalten.

Für ein multiattributives Modell müssen zunächst passende Beurteilungskriterien festgelegt werden, die Auskunft über die Güte einer Verbringstelle geben. Für ein sehr allgemein gehaltenes Beurteilungsmodell für Nassbaggerstrategien wurden mit Unterhaltungskosten, Beeinflussung der Umwelt, Langzeitverhalten und Sicherungsfunktion einer Verbringstelle zunächst vier Kriterien identifiziert, die in verschiedenen Anwendungsfällen zum Einsatz kommen können. Da die Untersuchungsgebiete sehr unterschiedlich sein können, ist es möglich, diese Kriterien auch um andere zu erweitern oder gegebenenfalls zu reduzieren.

Zu Beginn des Beurteilungsprozesses sollten die Lösungsmöglichkeiten hinsichtlich dieser Kriterien bewertet werden. Die Bewertung kann dabei numerisch oder auch rein qualitativ erfolgen. Mit Abschluss der Bewertungen können diese anhand einer einheitlichen Zahlenskala in Nutzwerte übertragen werden, aus denen später der Gesamtnutzen ermittelt werden kann. Zuvor müssen die unterschiedlichen Beurteilungskriterien gewichtet werden, da in der Regel nicht jedes Kriterium gleich viel wert ist. Im vorliegenden Fall der Beurteilung von Verbringstellen ist davon auszugehen, dass die Kosten und das Langzeitverhalten die wichtigsten Beurteilungskriterien sind und dadurch stärker berücksichtigt werden als die Umwelteinflüsse und die Sicherungsfunktion. Hierbei ist zu bedenken, dass mit dem Verdriften von Baggergut in ökologisch sensitive Bereiche bereits ein wichtiger Beurteilungsfaktor für die Belastung der Umwelt dem Langzeitverhalten zugeordnet wurde.

Der Wichtungsprozess sollte immer nach der Bewertung der Lösungsmöglichkeiten erfolgen, da das Entscheidungsmodell hier noch effizienter gestaltet werden kann. Kriterien, innerhalb derer die Unterschiede zwischen verschiedenen Lösungsmöglichkeiten klein oder gar nicht vorhanden sind, bekommen dann einen geringeren Wichtungsfaktor zugeordnet. Auf diese Weise wird sicher gestellt, dass ein Kriterium, das aufgrund zu ähnlicher Performance der Lösungsmöglichkeiten nicht zu stark berücksichtigt wird, da andere ausschlaggebender sind. Mit dem analytischen Hierarchieprozess steht ein anerkanntes Werkzeug bereit, um im Rahmen eines paarweisen Vergleichs der Beurteilungskriterien untereinander die Wichtungsfaktoren zu bestimmen. Durch ein linear additives Verfahren kann dann für die Lösungsvorschläge der Gesamtnutzen bestimmt und somit der Vergleich der verschiedenen Optionen anhand von Zahlenwerten durchgeführt werden.

Kapitel 7

Anwendungen

In diesem Abschnitt werden Anwendungsbeispiele der Nutzung DredgeSims in Systemstudien oder im laufenden Projektbetrieb gezeigt. Dabei werden die drei Grundfunktionalitäten „Kriteriengesteuertes Baggern“, „Zeitgesteuerte Unterhaltungsmaßnahmen“ und „Geschiebezugabe“ abgedeckt. Darüber hinaus wird auch das Verbringen von Kolken in einem einfachen Anwendungsfall zur Untersuchung der Aufnahmekapazität exemplarisch gezeigt.

Die Beispiele verdeutlichen, auf welche Weise DredgeSim in Kopplung mit bestehenden HMN-Modellen für die Untersuchung verschiedener Sachverhalte wie die Prognose von Baggermengen, die Vorhersage über den Einfluss einer Geschiebezugabe auf ein Untersuchungsgebiet oder die Analyse von unterschiedlichen Verbringstrategien genutzt werden kann. Zudem wird im Rahmen der Untersuchung von Verbringstrategien auch die Verwendung des multiattributiven Beurteilungsmodells gezeigt, da hierin verschiedene Einflüsse wie Kosten oder der Eingriff in die Umwelt berücksichtigt werden können.

7.1 Die Prognose von Baggermengen in einem Donauabschnittsmodell

Die in DredgeSim programmierten Baggerkriterien eignen sich besonders zur Prognose von Baggermengen, die aufgrund der Morphodynamik eines kalibrierten Modells generiert werden. Für eine belastbare Prognose der Baggermengen müssen in erster Linie die aus dem Sedimenttransport folgenden Anlandungen korrekt prediktiert werden, damit sie im Rahmen eines Baggervorgangs entfernt werden können. Insofern stellt die richtige Vorhersage der Baggermengen auch ein Gütekriterium für ein numerisches Modell dar.

In diesem Kontext ist das folgende Anwendungsbeispiel über die Anwendung eines Baggerkriteriums in DredgeSim zu sehen, das von der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe zur Verfügung gestellt wurde (Glander & Kopmann, 2010 [49] in Maerker & Weilbeer, 2010 [72]). Für einen Abschnitt der Donau zwischen Straubing und

Vilshofen, oberhalb der Isarmündung wurden in einer Simulation über drei Jahre die anfallenden Baggermengen ermittelt und mit bestehenden Messdaten verglichen.

7.1.1 Modellgebiet und Methodik

Der hier betrachtete Abschnitt befindet sich zwischen Donaukilometer 2318 und 2282 und reicht somit von der Stadt Straubing bis zur Isarmündung (Abb. 7.1). Das verwendete Simulationspaket bestand aus den Modulen Telemac2D zur Simulation der Hydrodynamik, Sisyphé zur Simulation des Sedimenttransports und DredgeSim für die Baggerereignisse. Eines der wesentlichen Ziele der Kalibrierphase bestand darin die Baggerereignisse korrekt zu erfassen und realistische Baggermengen zu simulieren. Dazu zählt auch die räumliche Verteilung, indem die Orte, an denen gebaggert werden musste, richtig abgebildet werden. In der Summe müssen sowohl der Sedimenttransport als auch die Unterhaltungsbaggerungen möglichst genau modelliert werden.

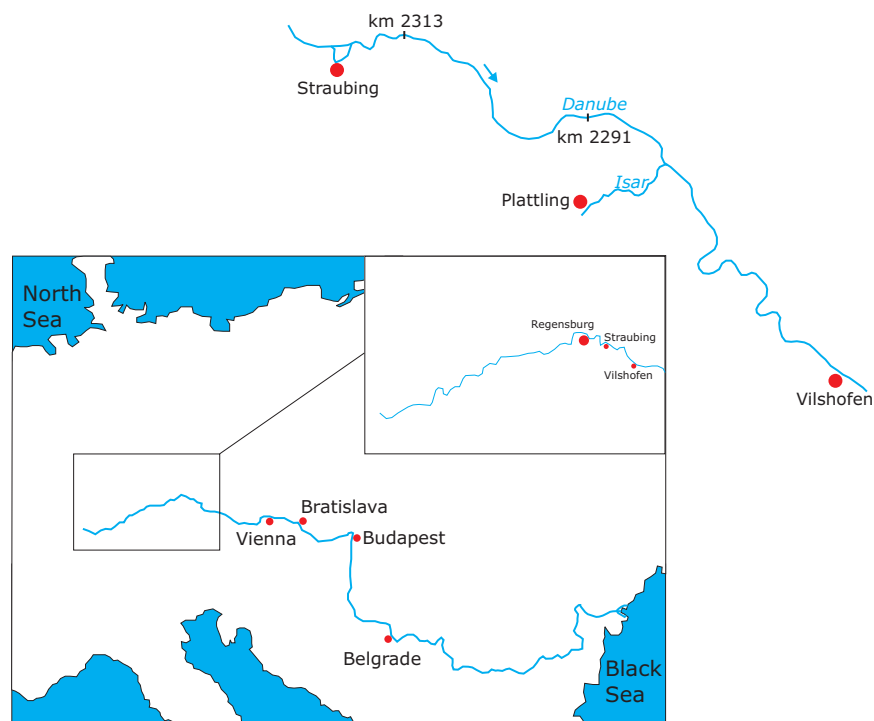


Abbildung 7.1: Donauabschnitt Straubing bis Vilshofen und Modellabschnitt

Für die Modellsteuerung wurden als Randbedingungen die Abflussganglinie vom Januar 2000 bis zum Dezember 2002 und die dazugehörigen Wasserstände vorgegeben. Das Sedimentinventar wurde aus Proben bestimmt und wird ausschließlich als Geschiebe transportiert. Dazu wurde die Transportformel nach Meyer-Peter und Müller verwendet. Das Simulationsgitter ist eng auf die topografischen Verhältnisse abgestimmt, so dass auch Buhnen und Leitwerke korrekt erfasst werden, indem diese

Bereiche fein aufgelöst sind. Die Kantenlänge liegt an diesen Stellen im Mittel bei 15 m.

Für die Simulation der Baggervorgänge wurde das Referenzwasserspiegellagenkriterium gewählt. Die Eingangsdaten wurden derart gewählt, dass eine Baggerung eingeleitet wird, sobald die Tiefe unterhalb des Referenzwasserspiegels einen kritischen Wert von 2.00 m unterschreitet. Sodann wird die betreffende Stelle auf einen Sollwert von 2.15 m unter dem Referenzwasserspiegel gebaggert. Beide Werte liegen in für Binnenwasserstraßen realistischen Größenordnungen.

Das Baggerpolygon erstreckt sich über die gesamte Fahrrinne. Das bedeutet, dass jeder Knoten, der in der Fahrrinne liegt und das Baggerkriterium erfüllt, gebaggert werden kann. Dadurch werden die wirklichen Baggermengen überschätzt, da dann auch einzelne Knoten gebaggert werden. Da dieser Fall unrealistisch ist, wird geprüft, ob der betrachtete zu baggernde Knoten zusammen mit anderen zu baggernden Knoten einen Baggerschwerpunkt bildet oder ob er sich entfernt, in isolierter Lage zu den nächsten zu baggernden Knoten befindet. In der Folge werden nur Knotengruppen gebaggert, sobald ein gewisses Mindestbaggervolumen in einem definierten Umkreis überschritten wird. Dieses hat die Rolle eines Kalibrierparameters, indem es variiert wurde, bis die simulierten Baggermengen möglichst gut die gemessenen Baggermengen wiedergeben und diese nicht mehr überschätzen. Die auf diese Weise ermittelten Baggermengen werden für die Fahrrinne abschnittsweise aufsummiert und mit einer gemessenen Summenkurve verglichen. Eine gute Übereinstimmung wurde für ein Mindestvolumen von 450 m^3 erzielt, das über einen Zeitraum von einem Jahr in einem Umkreis mit dem Radius von 30 m anfällt. Diese Werte bewegen sich in einem realistischen Rahmen. Das Mindestvolumen ist beispielsweise mit den geringsten Mengen vergleichbar, die pro Nassbaggervorgang in diesem Bereich gebaggert wurden [49].

7.1.2 Simulationsergebnisse

Die flächenhaften Daten über die simulierten Sohlhöhenänderungen nach einem Jahr machen deutlich, wie Bereiche, in denen es zu Anlandungen kommt (weiß) infolge einer eingeleiteten Baggerung abgetragen werden und es an diesen Stellen zu Eintiefungen kommt (schwarz) (Abb. 7.2).

Diese Ergebnisse können nun anhand von Differenztopografien ausgewertet und in Ergänzung mit der Lage von Baggerschwerpunkten verglichen werden. Auf diese Weise erhält man Aussagen über die Qualität der Kalibrierung des morphodynamischen Modells. Allerdings sollte darüber hinaus auch das simulierte Baggeraufkommen und die Baggermengen belastbare Ergebnisse liefern.

Um Aussagen in Bezug auf die Baggermengen und die Baggermengenverteilung über einen Simulationszeitraum von drei Jahren zu machen, bietet es sich an, eine Summenkurve über den Betrachtungszeitraum zu erstellen. Dazu wurde die Fahrrinne in Abschnitte von 25 m Länge eingeteilt und die pro Bereich simulierten Baggermengen aufsummiert. Trägt man diese Mengen als Summenkurve über die Fließlänge des Modells auf, ist es auf diese Weise möglich, sowohl die Stellen einzusehen, an denen gebaggert wurde, als auch die Mengen, die dabei angefallen sind.

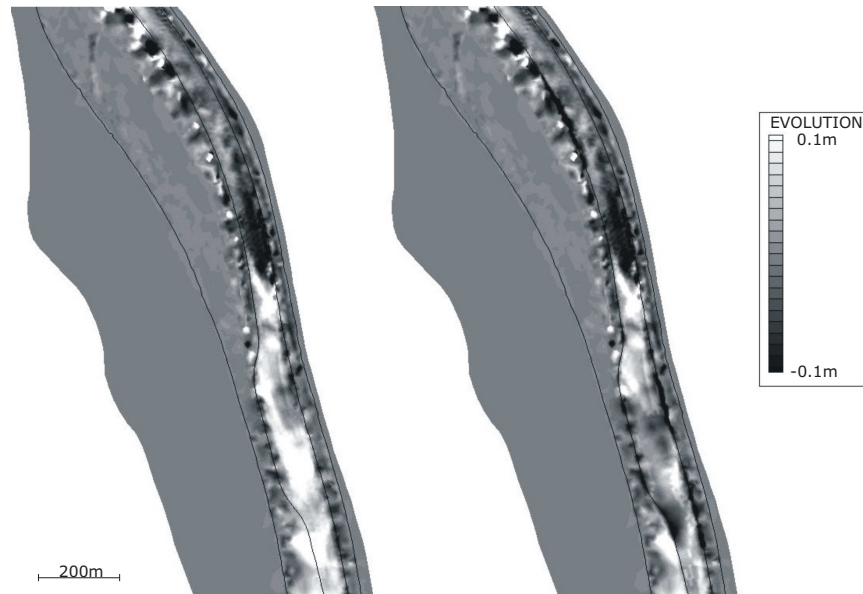


Abbildung 7.2: Modellerte Sohlevolution nach einem Jahr Simulationszeit vor (links) und nach (rechts) einer eingeleiteten Baggerung [49]

Zudem können vorliegende Daten über die tatsächlich angefallenen Baggermengen auf gleiche Art aufbereitet werden und somit die Simulationsergebnisse direkt mit den Messdaten verglichen werden. In Abbildung 7.3 ist dieser Vergleich für den Zeitraum Januar 2000 bis Dezember 2002 zu sehen. Man erkennt, dass die simulierten Baggermengen und die gemessenen einem ähnlichen Verlauf folgen. Sowohl die Bereiche, in denen gebaggert werden muss, als auch die Mengen stimmen gut überein. Daraus kann geschlussfolgert werden, dass die Kalibrierung sehr gut ist und darauf aufbauend zukünftig anfallende Baggermengen mit Hilfe des numerischen Modells in Prognoserechnungen quantifiziert werden können.

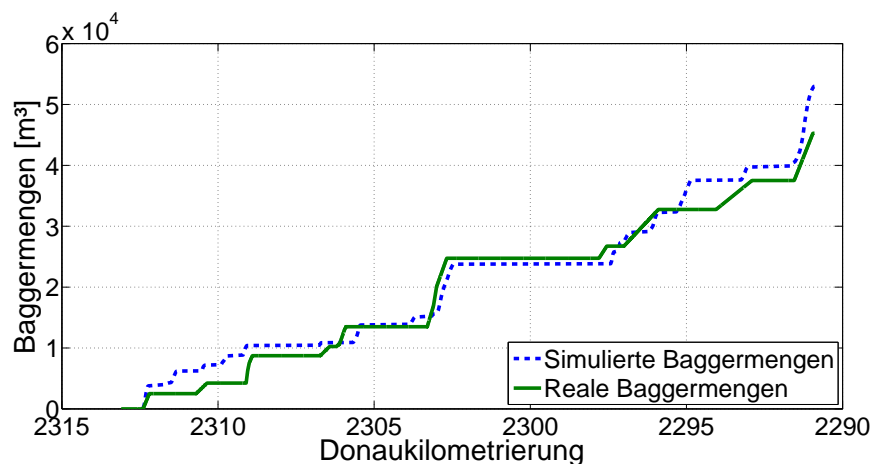


Abbildung 7.3: Summenkurven der simulierten und gemessenen Baggermengen im Modellgebiet, nach [49]

7.1.3 Zusammenfassung

Das Beispiel Donauabschnittsmodell oberstrom der Isar zeigt eine sehr gute Übereinstimmung der simulierten und der gemessenen Baggermengen für den Kalibrierungszeitraum. Es ist daher davon auszugehen, dass dieses Modell für künftige Prognoserechnungen geeignet ist. Diese Anwendung der BAW Karlsruhe zeigt aber auch, dass die Güte der Kalibrierung nicht allein von der Korrektheit der morphodynamischen Simulation abhängt. Selbst bei sehr guter Kalibrierung können Baggermengen überschätzt werden, wenn auch einzelne Punkte durch das gewählte Baggerkriterium als baggerrelevant eingestuft werden. Das entspricht jedoch nicht der Realität, da lokale, kleinräumige Untiefen der Schifffahrt bekannt gegeben und von dieser dann umfahren werden können. Vielmehr hat sich gezeigt, dass die richtige Anwendung der Unterbedingung über ein Mindestbaggervolumen den Erfolg bei der Kalibrierung sicher stellen kann.

7.2 Die Ausbreitung einer Geschiebezugabe entlang eines Rheinabschnitts

Die Simulation einer Geschiebezugabe soll am Beispiel eines Rheinabschnitts unterhalb der Staustufe Iffezheim beschrieben werden. Dabei wurden Simulationsergebnisse der Ausbreitung von zugegebenen Sedimenten mit Messdaten verglichen. Die hier verwendeten Daten wurden ebenfalls durch die BAW Karlsruhe zur Verfügung gestellt (Riemann & Brudy-Zippelius, 2011 [90] in Maerker et al., 2011 [71]).

7.2.1 Modellgebiet und Methodik

Unterhalb der Staustufe Iffezheim werden jährlich ca. 200.000 m³ Sedimente in verschiedenen Verbringflächen im Rahmen von Geschiebezugaben verbracht, um die Gewässersohle zu stabilisieren und den Wasserspiegel zu stützen, da es in diesen Bereichen starke Erosionstendenzen gibt (Abb. 7.4). Das dabei verwendete Material stammt aus Kiesgruben rund um Iffezheim. Diese anthropogenen Maßnahmen beeinflussen den Sedimenthaushalt und die Transportcharakteristik sehr stark, so dass sie in einem Sedimenttransportmodell berücksichtigt werden müssen. Nur wenn alle nennenswerten Einflüsse und Eingriffe berücksichtigt werden, ist mit verlässlichen Modellergebnissen zu rechnen.

Daher wurde das Simulationspaket Telemac2D, Sisyphe und DredgeSim auf ein Modell des Rheins zwischen Iffezheim (Rhein-km 334,7) und Speyer (Rhein-km 394,3) angewendet, um typische Geschiebezugabeszenarien zu simulieren. Die dabei ermittelten Transportgeschwindigkeiten der zugegebenen Korngrößen wurden mit Ergebnissen aus Tracerversuchen verglichen, die von der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) durchgeführt wurden (BfG, 2010 [12]).

Für die Simulationen in DredgeSim wurden die in Abbildung 7.4 gezeigten fünf Zugabefelder über einen Simulationszeitraum von fünf Jahren beaufschlagt. Die Zugabemenge wurde abhängig vom Durchfluss gestaltet und variierte zwischen 100.000 und 300.000 m³ pro Jahr. Die Sedimentverteilung, die im Rahmen der Geschiebezugabe verbracht wurde, entsprach einer typischen Körnung für Vorhaben in diesem Bereich und bestand aus kiesigem Material. Sie wurde in Form von vier Fraktionen in DredgeSim explizit definiert. Die eingebrachten Sedimente werden als Geschiebe transportiert, was durch die Transportformel nach Meyer-Peter und Müller simuliert wird. Hiding and Exposure wird durch den Ansatz von Karim, Holly und Yang berücksichtigt.

Die aus der Simulation erhaltene Ausbreitung kann für die eingebrachten vier Fraktionen in eine Ausbreitungsgeschwindigkeit überführt werden, die sodann validiert wird, indem sie mit den Messungen der Tracer-Ausbreitung verglichen wird.

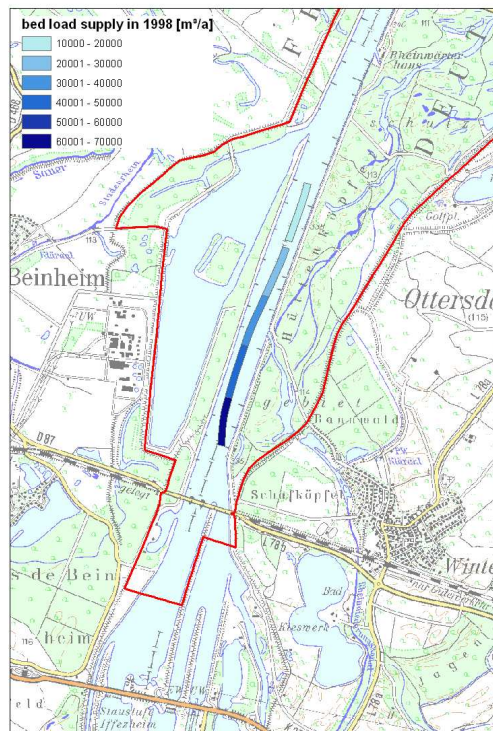


Abbildung 7.4: Geschiebezugabefelder am Rhein unterhalb von Iffezheim [90]

7.2.2 Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse der Verdriftung von den Zugabefeldern sind in Abbildung 7.5 dargestellt. Dort sieht man, dass die kleineren Fraktionen tendenziell schneller transportiert werden als die größeren. Eine Besonderheit stellt die Ausbreitung der zweitkleinsten Korngröße dar, die deutlich schneller bewegt wird als die kleinste. Der Grund könnte

hier in der Wirkung der verwendeten Hiding and Exposure- Formel liegen, die den Transport der 11 mm-Fraktion stärker unterstützt als die 2 mm-Fraktion.

Der Vergleich der simulierten Ausbreitungsgeschwindigkeiten und der gemessenen ist anhand der Transportfront in Tabelle 7.1 dargestellt. Hier sieht man grundsätzlich eine gute Übereinstimmung der simulierten und der gemessenen Werte. Den einzigen Unterschied bildet auch hier wieder die zweitkleinste Fraktion, bei der die beiden Geschwindigkeiten deutlicher voneinander abweichen. Die Frontgeschwindigkeiten sind hierin die Geschwindigkeiten der schnellsten Partikel einer Fraktion. Der Grund für die Abweichungen der 11 mm-Fraktion könnte darin liegen, dass während der Tracermessungen dieser Korngröße andere Abflussverhältnisse vorlagen als bei den Simulationen. Eine weitere Erklärung könnte sein, dass die verwendete Hiding and Exposure-Formel den Transport dieser Fraktion überschätzt und damit die wirklichen Verhältnisse nicht korrekt wiedergibt. Zudem ist es im Rahmen solch langfristiger Tracerversuche auch möglich, dass die tatsächliche Front nicht genau erkundet werden konnte.

Betrachtet man jedoch alle Fraktionen zusammen, kann geschlussfolgert werden, dass das Modell eine gute Validität in Bezug auf das Transportverhalten der zugegebenen Sedimente besitzt. Somit kann es für die Simulation verschiedener Sedimentmanagement-Szenarien verwendet werden, da es verlässliche Daten für die Bewertung von verfolgten Optimierungsansätzen liefert.

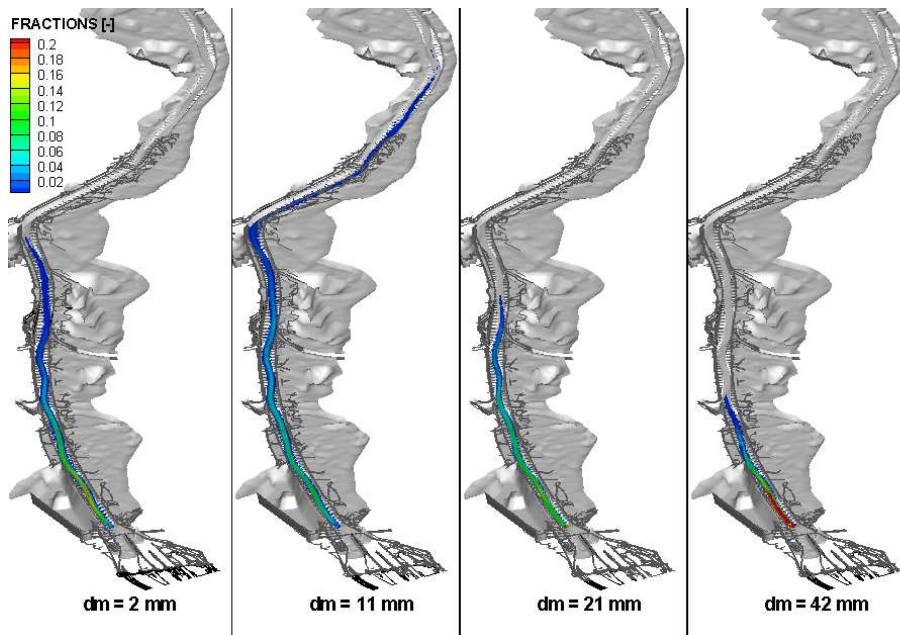


Abbildung 7.5: Ausbreitungsgeschwindigkeiten der vier Sedimentfraktionen nach dem Verbringen unterhalb von Iffezheim [90]

Tabelle 7.1: Vergleich der Frontgeschwindigkeiten aus Simulationen und Tracerversuch [90])

Korngröße [mm]	Modellierte Frontgeschwindigkeit [km/a]	Korngröße [mm]	Gemessene Frontgeschwindigkeit [km/a]
0-8	10.5	4-8	11.5
8-16	18.5	8-16	11.5
16-32	6.5	16-31.5	8.9
32-64	2.5	31.5-62	6.0

7.2.3 Zusammenfassung

Eine Geschiebezugabe bedeutet immer starke anthropogene Eingriffe in das Fließgewässer. Je genauer diese durch ein numerisches Modell erfasst werden können, desto besser ist ein solches Modell für Prognoserechnungen zu unterschiedlichen Sedimentmanagement-Ansätzen geeignet. In dem vorliegenden Fall ist es bereits durch eine einfache DredgeSim-Anwendung gelungen, die Transportwege der verbrachten Sedimente nachzuvollziehen.

7.3 Die Beurteilung von Umlagerungsstrategien in der Tideelbe

Um das in Kapitel 6.5 vorgestellte Beurteilungsmodell anzuwenden, wurden Ergebnisse der Simulation von verschiedenen Umlagerungsstrategien an der Tideelbe ausgewertet. Diese wurden an der Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg durchgeführt (Weilbeer, 2012 [102]). Dabei handelt es sich um Systemstudien, in denen der Einfluss des Oberwasserzuflusses und der Lage der Verbringstelle auf die Baggergutverdriftung untersucht wurde. Die dabei erzeugten Simulationsergebnisse werden mit Hilfe des Beurteilungsmodells einander gegenüber gestellt, um einen Vergleich der Lösungen in Bezug auf verschiedene Kriterien durchzuführen.

7.3.1 Modellgebiet und Methodik

Ziel der Untersuchungen der BAW war es, den Transport von verbrachten Sedimenten von einer Umlagerungsstelle in die angrenzenden Bereiche zu analysieren. Der in den vorliegenden Studien untersuchte Baggerschwerpunkt war das Becken des Parkhafens, unmittelbar vor der Einfahrt in den Hamburger Hafen in der Nähe des Zusammenflusses von Norder- und Süderelbe. Von dort aus wurde das Baggergut in den Simulationen bei variierenden Oberwasserzuflüssen auf die Verbringstellen Neßsand und 689 verbracht (Abb. 7.6). Durch Verdriftungsrechnungen, bei denen die verbrachten Sedimente durch den modellierten Sedimenttransport aus dem Bereich der Verbringstelle

ausgetragen und in die umliegenden Ästuarbereiche verfrachtet wurden, konnten die Ausbreitungswege unter den gewählten Randbedingungen analysiert werden.

Die Simulationen wurden mit den Programmpaketen UnTrim für die Hydrodynamik, SediMorph für die Morphodynamik und DredgeSim für die Baggerereignisse durchgeführt. Die Bagger- und Verbringvorgänge wurden mit Hilfe der Funktionalitäten des zeitgesteuerten Baggern und Verbringens modelliert. Dabei wurden 500.000 m^3 Sedimente über einen Zeitraum von 12 Tagen entnommen. Alle 2,75 Stunden werden zunächst 5.000 m^3 Feinsedimente gebaggert und direkt anschließend unabhängig von der Tidephase umgelagert. Daraus ergeben sich innerhalb der ersten 12 Tage 100 Umläufe der Baggerschiffe.



Abbildung 7.6: Lage der Baggerstelle Parkhafen und der Verbringstellen Neßsand und 689

In diesen Systemstudien wurde lediglich der Bereich des Parkhafens mit Sedimenten vorbelegt, während die übrige Sohle im Anfangszustand keine Sedimente enthält. Dies ist eine grobe Vereinfachung, da dadurch Wechselwirkungen zwischen den Sedimenten der einzelnen Bereiche ausgeklammert werden. Es ist zu erwarten, dass sich die verbrachten Sedimente des Parkhafens bei dem gewählten Model-Setup schneller ausbreiten, als sie es unter Berücksichtigung weiterer Sedimente tun würden. Dadurch wird in den Systemstudien jedoch die maximal mögliche Ausbreitungsgeschwindigkeit modelliert, wodurch die Ergebnisse die obere Grenze des Spektrums der Verdriftungsrechnungen darstellen.

Die Kornverteilung der Sedimentvorbelegung im Parkhafen besteht zu gleichen Anteilen aus den drei Fraktionen Mittlerer Schluff (mU), Grobschluff (gU) und Sehr feiner Sand (sfS). Diese drei Korngrößen werden als Schwebstofftransport gerechnet. Der Simulationszeitraum betrug 31 Tage, wodurch eine Dauer von etwas mehr als zwei Spring-Nipp-Zyklen erfasst wird. Dieser Zeitraum ist sehr kurz, weshalb eine umfassende Bewertung der Nassbaggerstrategie anhand dieser Ergebnisse schwierig ist.

Jedoch enthält dieser Zeitraum durch den aufgebrauchten Spring-Nipp-Zyklus einen wesentlichen bettbildenden Einfluss wodurch belastbare Tendenzen der Baggergutverdriftung bewertet werden können.

Zur Auswertung der Baggergutverdriftung wurden insgesamt sieben Bilanzquerschnitte definiert. Diese befinden sich im Bereich der Verbringstelle Neßsand und im Hafengebier Hamburgs und repräsentieren sensitive ökologische Bereiche sowie signifikante Fahrinnen- und Hafenabschnitte, die im Rahmen der Unterhaltung der Fahrwassertiefen relevant sind (Abb. 7.7).

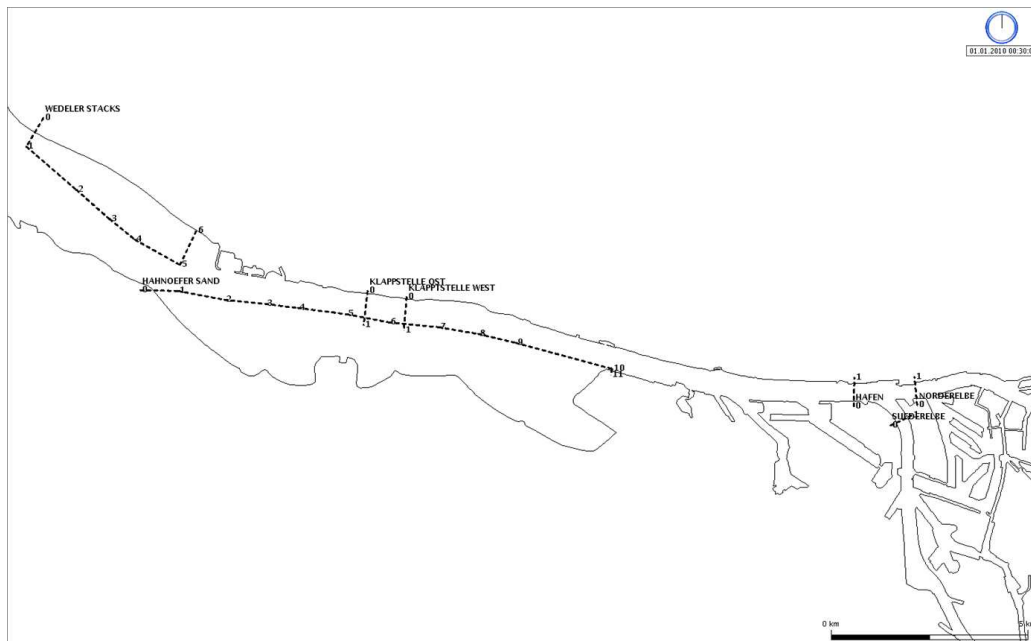


Abbildung 7.7: Festgelegte Kontrollabschnitte zur Beurteilung der Verbringstrategie [102]

Über diese Querschnitte können die ein- und austretenden Schwebstoffmengen bilanziert werden, um Aussagen darüber zu treffen, wie viel Sediment in dem betreffenden Abschnitt verbleibt. Dazu werden die Stoffströme über die Querschnitte integriert.

1. Verbringstelle Neßsand stromab
2. Verbringstelle Neßsand stromauf
3. Wedeler Stacks
4. Hahnöfer Nebelbe
5. Eingang Hafengebier
6. Norderelbe
7. Süderelbe

7.3.2 Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse zeigen, wie die an der Verbringestelle Neßsand untergebrachten Sedimente ausgetragen werden. Je nach Oberwassersituation werden sie stärker mit den Flutströmen stromauf oder mit den Ebbeströmungen stromab verlagert. Da durch die Systemstudie der Einfluss des Oberwassers auf die Verdriftung in unterhaltungsrelevante Bereiche näher quantifiziert werden sollte, wurde dieses bei im übrigen gleichem Model-Setup in Schritten von $180 \text{ m}^3/\text{s}$ variiert.

In Abbildung 7.8 ist die im System befindliche Sedimentmasse in der Summe aller drei Fraktionen bei einem sehr geringen Oberwasserzfluss von $180 \text{ m}^3/\text{s}$ nach Ablauf der Simulation dargestellt. Man erkennt, wie ein beachtlicher Teil der Sedimente in die Bereiche Norder- und Süderelbe verfrachtet wird. Auch im Kontrollabschnitt Hahnöfer Nebelbe sind erhöhte Sedimentmengen zu verzeichnen. In den Bereich Wedeler Stacks werden ebenfalls Sedimente eingetragen. Allerdings handelt es sich hier um deutlich geringere Mengen.

Die Verdriftung in stromauf gelegene Bereiche nimmt mit zunehmendem Oberwasser ab. Das wird in Abbildung 7.9 deutlich, in der die Verteilung der Sedimentmengen im System bei einem Oberwasserabfluss von $720 \text{ m}^3/\text{s}$ zu sehen ist. Deutlich weniger Sedimente werden von der Verbringestelle Neßsand in die Bereiche des Hamburger Hafens transportiert. Es ist allerdings ebenso zu sehen, dass der Abschnitt Hahnöfer Nebelbe auch unter diesen Bedingungen signifikante Mengen an verbrachten Sedimenten aufnimmt. Für den Abschnitt Wedeler Stacks ist zu konstatieren, dass hier größere Mengen an Sedimenten eingetragen werden, als bei einem geringeren Oberwasserzfluss.

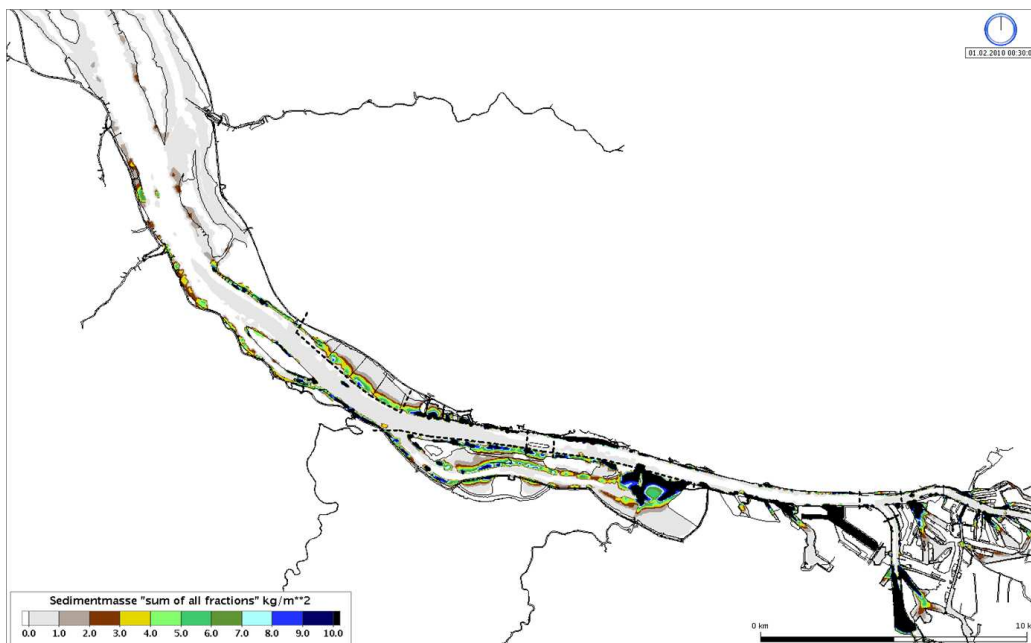


Abbildung 7.8: Verteilung der Sedimentmengen nach Verbringen auf Neßsand und anschließender Verdriftung bei $Q_{OW} = 180 \text{ m}^3/\text{s}$ [102]

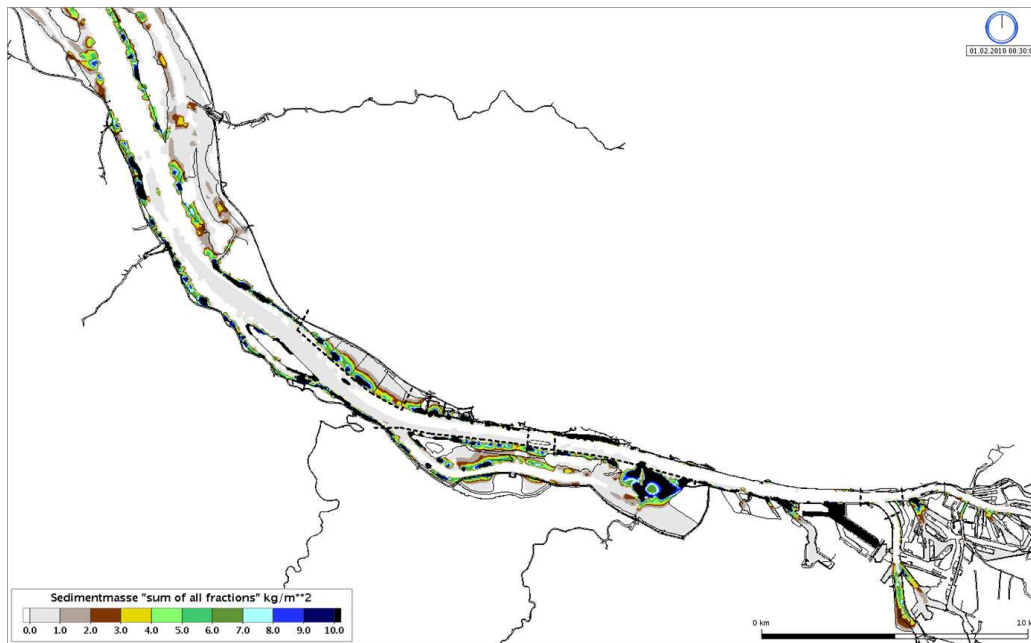


Abbildung 7.9: Verteilung der Sedimentmengen nach Verbringen auf Neßsand und anschließender Verdriftung bei $Q_{OW} = 720 \text{ m}^3/\text{s}$ [102]

Die Verdriftung in die ausgesuchten Kontrollbereiche nimmt scheinbar ab, wenn die Sedimentmengen nicht auf Neßsand, sondern auf der Verbringestelle 689 umgelagert werden. Das wird anhand der Abbildungen 7.10 und 7.11 deutlich, in denen die simulierte Verteilung der Sedimentmengen dargestellt sind. Aufgrund der Entfernung der Verbringestelle von den sensitiven Abschnitten, können innerhalb des gewählten Simulationszeitraums keine großen Mengen an Sedimenten hierhin transportiert werden. Allerdings ist hervorzuheben, dass trotz des langen Transportwegs bereits innerhalb von zwei Spring-Nipp-Zyklen verbrachtes Baggergut in diesen Bereichen aufzufinden ist. Auch bei Verwendung dieser Verbringestelle ist der signifikante Einfluss des Oberwassers auf die Baggergutverbringung zu erkennen, da bei höherem Oberwasser deutlich weniger Sedimente stromauf transportiert werden.

Durch die Integration der ein- und austretenden Sedimentmengen über die oben definierten Querschnitte erhält man die prozentuale Verteilung der zunächst umgelagerten und dann verdrifteten Sedimentmengen in den Kontrollabschnitten (Tab. 7.2). Man erkennt anhand der Ergebnisse für die Querschnitte stromauf und stromab der Verbringestelle Neßsand, dass in der Summe beider Ergebnisse während der Simulationen das gesamte Verbringgut ausgefragt wird. Dieses verteilt sich dann über das Modellgebiet und findet sich zu gewissen Anteilen in den anderen Kontrollabschnitten wieder.

Auch anhand dieser quantitativen Ergebnisse wird deutlich, wie der Transport in den Hafbereich bei größerem Oberwasserzufluss abnimmt und der Aufrag am stromabseitigen Querschnitt der Verbringestelle Neßsand zunimmt. Der Bereich Wedeler Stacks wird unabhängig von dem Oberwasser zu ähnlichen Beträgen mit Sedimenten aus der

Verbringstelle gespeist. Im Bereich Hahnöfer Nebelbe ist eine Abnahme der Sedimentmengen bei hohem Oberwasserzufluss zu erkennen. Allerdings werden hier auch in diesem Fall noch vergleichsweise große Mengen eingetragen.

Auf die gleiche Art wurden Daten über die Verbringstelle 689 für die gewählten Kontrollabschnitte analysiert (Tab.7.3). Vergleicht man die erhaltenen quantitativen Aussagen, ist zu erkennen, dass durch das Verbringen bei geringen Oberwasserzuflüssen auf 689 bereits innerhalb dieses kurzen Simulationszeitraums zum Teil größere Mengen an Sedimenten in die Kontrollabschnitte eingetragen werden als bei einem Verbringen auf Neßsand bei höheren Oberwasserzuflüssen.

Tabelle 7.2: Prozentuale Verteilung der Sedimente (Summe aller Fraktionen) in den Kontrollabschnitten nach Umlagerung und Verdriftung von der Verbringstelle Neßsand (nach [102])

Kontrollabschnitt	180 m ³ /s	360 m ³ /s	540 m ³ /s	720 m ³ /s	1260 m ³ /s
Nessand stromab	29.5	49.8	68.7	83.3	98.0
Nessand stromauf	70.5	50.2	31.3	16.7	2.0
Wedeler Stacks	1.3	2.2	2.5	2.3	1.4
Hahnöfer Nebelbe	39.7	42.9	37.4	33.6	17.4
Hafeneingang	41.6	26.9	16.1	15.3	1.5
Norderelbe	19.0	11.7	6.6	3.8	0.9
Süderelbe	16.1	10.6	6.4	8.0	0.6

Tabelle 7.3: Vergleich der Verteilung der Sedimente (Summe aller Fraktionen) in den Kontrollabschnitten nach Umlagerung und Verdriftung von den Verbringstellen 689 und Neßsand (nach [102])

Kontrollabschnitt	689	Neßsand
	180 m ³ /s	1260 m ³ /s
Nessand stromab	5.9	2.0
Nessand stromauf	5.6	1.4
Wedeler Stacks	1.1	1.4
Hahnöfer Nebelbe	0.8	17.4
Hafeneingang	1.7	1.5
Norderelbe	0.8	0.9
Süderelbe	0.6	0.6

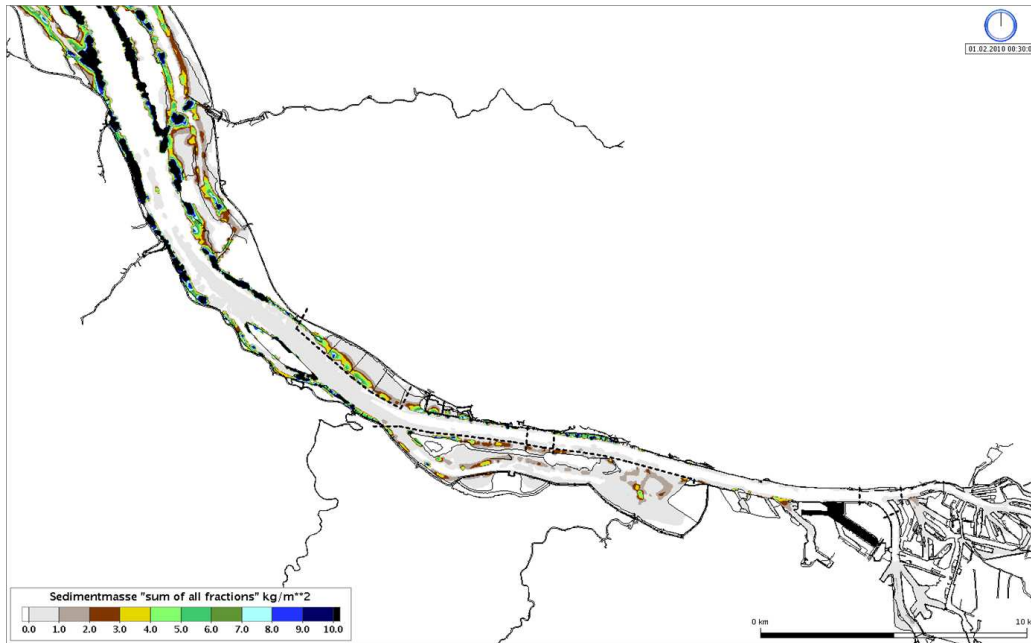


Abbildung 7.10: Verteilung der Sedimentmengen nach Verbringen auf 689 und anschließender Verdriftung bei $Q_{OW} = 180 \text{ m}^3/\text{s}$ [102]

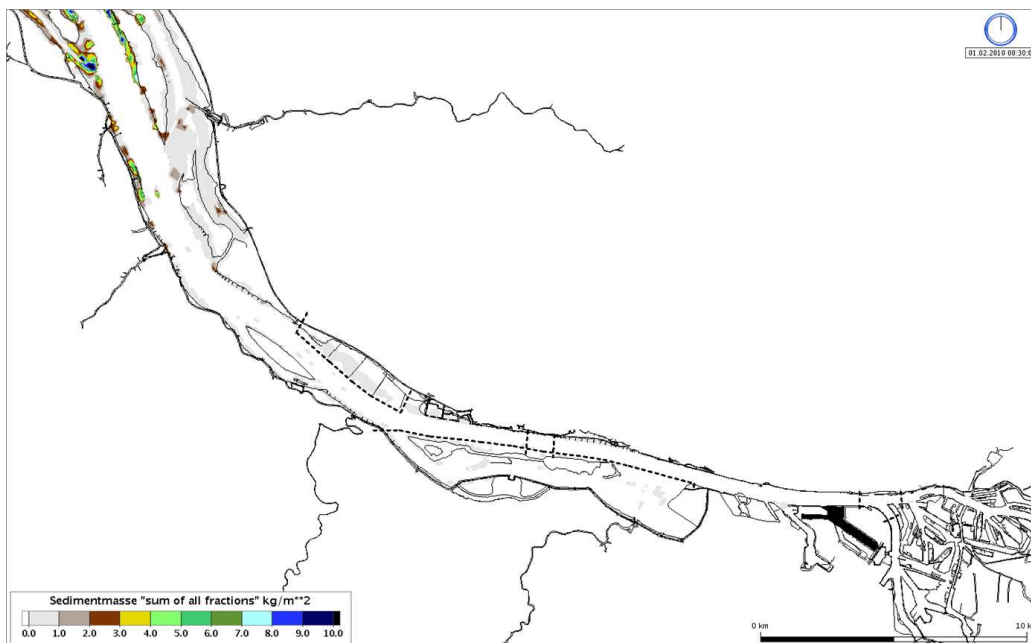


Abbildung 7.11: Verteilung der Sedimentmengen nach Verbringen auf 689 und anschließender Verdriftung bei $Q_{OW} = 720 \text{ m}^3/\text{s}$ [102]

Anhand dieser Aussagen aus den Systemstudien lassen sich bereits die Verbringstrategien beurteilen. Es kann konstatiert werden, dass angesichts dieser Ergebnisse ein Verbringen bei niedrigen Oberwasserzuflüssen sowohl auf Neßsand als auch auf 689 zu vermeiden sind, da die Sedimente innerhalb kurzer Zeit wieder in die unterhaltungsintensiven Bereiche transportiert werden. Je höher der Oberwasserzufluss ist, umso ausgeprägter ist der Stromabtransport, der die Sedimente von den kritischen Bereichen fern hält. Zudem wird durch das Verbringen auf 689 die Transportstrecke für die Sedimente verlängert, weshalb es länger dauert, bis sie zurück in die Hafengebiete transportiert werden können. Allerdings ist auch hier zu beachten, dass bei geringen Oberwasserständen davon abzusehen ist, da dadurch der Stromauftransport auch für diese Sedimente begünstigt wird.

7.3.3 Beurteilung der Ergebnisse durch Multiattributive Modelle

In Erweiterung der vorigen Ergebnisse und Schlussfolgerungen soll in einem nächsten Schritt das aufgestellte Beurteilungsmodell verwendet werden, um die Aussagen zu untermauern und andere Aspekte, wie die Umwelteinflüsse im Vergleich zu monetären Faktoren hinzuziehen. Dazu wird das in Kapitel 6.5 entworfene Beurteilungsmodell verwendet. Dieses sieht vier wesentliche Beurteilungskriterien vor, die allgemein für die Beurteilung von Baggerstrategien festgelegt wurden. Die Wichtungsfaktoren w_j für das Beurteilungsverfahren folgen den Ergebnissen des analytischen Hierarchieprozesses der hierauf angewendet wurde (siehe Tab. 6.6).

Das Beurteilungsmodell wird zunächst dazu verwendet, die Ergebnisse der Untersuchungen zu der Verbringstelle Neßsand bei verschiedenen Durchflüssen miteinander zu vergleichen. Anschließend werden die beiden Verbringstellen Neßsand und 689 einander gegenüber gestellt. Nachdem die Wichtungsfaktoren bekannt sind, gilt es im nächsten Schritt die Nutzwerte festzulegen. Da das Baggervorgang nicht zu Sicherheitsmaßnahmen verwendet wird und des Weiteren durch sorgfältige Vorabuntersuchungen sicher gestellt wurde, dass das Baggervorgang zur Verbringung an diesen Stellen geeignet ist, sollen die Kriterien 'Sicherheitsfunktion' und 'Umwelt' vernachlässigt werden. Das kann durch Neuvergabe der Wichtungsfaktoren erfolgen oder aber, indem die Nutzwerte zu diesen Kriterien auf Null gesetzt werden. Im Rahmen dieser Anwendung wird den Nutzwerten für die beiden Kriterien die Null zugewiesen, um die Wichtungskriterien nicht zu verändern und damit für unterschiedliche Unterhaltungsstrategien anwendbar bleiben.

Die Nutzwerte für die Kosten ergeben sich, wie in Kapitel 6.5 gezeigt, aus Baggervorgangskosten, Transportkosten und Monitoringkosten. Die Baggervorgangskosten werden in den hiergezeigten Beispielen immer die gleichen sein, da an den Einstellungen für den Baggervorgang im Parkhafen nichts geändert wurde. Sie entfallen demzufolge beim nachfolgenden Vergleich. Monitoringkosten sollen im Zuge der Auswertung der Systemstudien ebenfalls vernachlässigt werden. Somit sind als einzig relevanter Posten die Transportkosten zu berücksichtigen. Bei der Beurteilung der verschiedenen Ober-

wasserszenarien für die Verbringstelle Neßsand sind sie für die einzelnen Fälle ebenfalls gleich, da der Weg sich nicht ändert und entfallen in der entsprechenden Betrachtung. Beim Vergleich der Verbringstellen 689 und Neßsand stellen sie jedoch einen wichtigen Bestandteil dar. Da die Kosten direkt von der Entfernung abhängen, kann hier der zurückgelegte Weg von der Bagger- zur Verbringstelle in Kilometern als Nutzwert für die beiden Varianten eingesetzt werden. Da jedoch das Bestreben verfolgt wird Nutzwerte zwischen Null und Eins zu vereinbaren, soll hier ein anderes Vorgehen verfolgt werden. Der Vorteil des Verbringens auf Neßsand besteht darin, dass im Vergleich zur Verbringstelle 689 der Transportweg kürzer ist. Neßsand liegt bei Elbe-km 639. Somit werden gegenüber der Verbringstelle 689 50 km Transportweg eingespart, die noch in das Verhältnis zum größten Abstand einer Verbring- zur Baggerstelle gesetzt werden. Das ist in diesem Beispiel der Weg von der Baggerstelle Parkhafen zur Verbringstelle 689. Allgemein ausgedrückt lässt sich für die Transportkosten der Nutzwert für eine Verbringstelle bestimmen, indem man zunächst den Weg $km_{VS,i}$ zwischen ihr und der Verbringstelle $km_{VS,max}$, die am weitesten von der Baggerstelle km_{BS} entfernt ist, bestimmt. Anschließend wird dieser Wert wiederum ins Verhältnis zur maximalen Entfernung zwischen der Baggerstelle und einer Verbringstelle gesetzt. Für den Vergleich der Verbringstellen 689 und Neßsand ergibt sich nach diesem Verfahren für 689 ein Nutzwert von 0 und für Neßsand ein Nutzwert von 0.81. Aus dieser Vorschrift geht also hervor, dass der Nutzwert Eins zustrebt, wenn die Verbringstelle nahe an der Baggerstelle liegt. Umgekehrt geht er gegen Null, je weiter man sich von der Baggerstelle entfernt.

$$\frac{km_{VS,max} - km_{VS,i}}{km_{VS,max} - km_{BS}}$$

Als wichtigste Bewertungsgröße kann das Langzeitverhalten angesehen werden. Dieses wird insgesamt mit dem Wert $w_{Langzeit} = 0.6$ gewichtet. Das Langzeitverhalten kann weiter aufgeteilt werden in die Unterkriterien „Verdriften in Fahrinnenbereiche“ und „Verdriften in Schutzbereiche“. In dem vorliegenden Fall soll das erste Kriterium durch die Analyseergebnisse der Verdriftung des verbrachten Baggerguts in die Hafengebiete abgedeckt werden. Die Bereiche Wedeler Stacks und Hahnöfer Nebenelbe sind Flachwasserbereiche, die ökologisch besonders wertvoll sind und demzufolge geschützt werden müssen. Diese sollen durch das Unterkriterium „Verdriften in Schutzbereiche“ berücksichtigt werden. Die Gesamtwichtung für das Langzeitverhalten soll anfänglich gleichmäßig mit einem Wert von $w = 0.3$ auf die Unterkriterien aufgeteilt werden. In einer Sensitivitätsanalyse können diese noch zu einem späteren Zeitpunkt variiert werden.

Die Nutzwerte für das Langzeitverhalten ergeben sich aus den Simulationsergebnissen und den anschließenden Analysen über die Verteilung der Sedimente auf die Kontrollabschnitte. Der Nutzen für die einzelnen Bereiche ergibt sich in diesem Fall allerdings aus den Mengen, die nicht an diese Stellen verdriftet sind. Je weniger verbrachtes Baggergut in Schutzbereiche oder zurück in den Hafen transportiert wird, umso besser. Die Nutzwerte lassen sich demzufolge aus den prozentualen Mengenangaben p

bestimmen, indem sie von Eins subtrahiert werden, da dadurch genau die Sedimente erfasst werden, die nicht in die kritischen Bereiche gelangt sind. Dabei können Wedeler Stacks und Hahnöfer Sand zu einem Nutzwert für die Schutzbereiche zusammengeführt werden.

$$u_j = 1 - p_{\text{Kontrollabschnitt}}$$

Für die Untersuchungen des Oberwassereinflusses auf die Baggergutverbringung auf Neßsand ergeben sich zusammengefasst die in Tabelle 7.4 dargestellten Wichtungsfaktoren, Nutzwerte und der daraus berechnete Gesamtnutzen. Die Ergebnisse weisen wenig überraschend die Variante mit dem höchsten Oberwasserzufluss als die beste aus, indem hier der größte Nutzwert erreicht wird. Da die beiden entscheidenden Wichtungsfaktoren über die Verdriftung in Schutzbereiche und die Verdriftung in unterhaltungsintensive Hafengebiete gleich groß sind, ist letztlich bei dieser Auswertung entscheidend, wieviel Sedimentmasse in die Kontrollabschnitte eingetragen wird. Diese nimmt mit steigendem Oberwasserzufluss ab. Die einzige Ausnahme bildet der Bereich Hahnöfer Nebelbe, da hier bei einem Durchfluss von $360 \text{ m}^3/\text{s}$ der höchste Eintrag zu verzeichnen ist. Dieser ist jedoch nur gering, so dass dieser Anstieg im Vergleich zu dem Abfall des Sedimenteintrags in den Hafengebiet bei diesen Abflussbedingungen nicht sonderlich ins Gewicht fällt.

Tabelle 7.4: Nutzwerte, Wichtungsfaktoren und Gesamtnutzen beim Vergleich der Simulationsergebnisse zur Verbringestelle Neßsand

Oberwasserzuflüsse	180 m ³ /s	360 m ³ /s	540 m ³ /s	720 m ³ /s	1260 m ³ /s
Nutzwerte					
Schutzbereiche	0.59	0.55	0.60	0.64	0.81
Hafen	0.58	0.73	0.84	0.85	0.99
Kosten	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Umwelt	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sicherungsfunktion	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Wichtungsfaktoren					
Schutzbereiche	0.30				
Hafen	0.30				
Kosten	0.30				
Umwelt	0.05				
Sicherungsfunktion	0.05				
Gesamtnutzen	0.35	0.38	0.43	0.45	0.54

In einer zweiten Anwendung werden die Ergebnisse der Verbringestelle Neßsand bei einem geringen Oberwasserzufluss mit denen der Verbringestelle 689 bei geringem Oberwasserzufluss verglichen. In diesen Untersuchungen spielen die Transportkosten eine wichtige Rolle. Gemäss der oben beschriebenen Vorgehensweise ergeben sich für die

Analyse die in Tabelle 7.5 aufgeführten Nutzwerte, Wichtungsfaktoren und Gesamtnutzen. Man sieht, dass durch die Berücksichtigung des Einflusses Transportkosten die Variante der Verbringung auf Neßsand besser abschneidet, obwohl hier, wenn auch zu geringen Anteilen, signifikante Sedimentmengen in die kritischen Bereiche verfrachtet werden. Auch hier werden die Erkenntnisse aus den vorigen Analysen der Simulationsergebnisse bestätigt, nach denen ein Verbringen auf 689 nicht in jedem Fall besser ist.

Grundsätzlich kann man anhand einer solchen Auswertung weitere Rückschlüsse ziehen. Allerdings sollte zur Absicherung eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden, bei der relevante Werte variiert werden, um ihren Einfluss und ihre Festlegung zu überprüfen.

Tabelle 7.5: Nutzwerte, Wichtungsfaktoren und Gesamtnutzen beim Vergleich der Simulationsergebnisse von Verbringstelle 689 mit Verbringstelle Neßsand

Verbringstelle Oberwasserzuflüsse	VS 689 180 m ³ /s	VS Neßsand 1260 m ³ /s
Nutzwerte		
Schutzbereiche	0.98	0.81
Hafen	0.98	0.99
Kosten	0.0	0.81
Umwelt	0.0	0.0
Sicherungsfunktion	0.0	0.0
Wichtungsfaktoren		
Schutzbereiche		0.30
Hafen		0.30
Kosten		0.30
Umwelt		0.05
Sicherungsfunktion		0.05
Gesamtnutzen	0.58	0.78

Sensitivitätsanalyse

Zur Absicherung der Aussagekraft des Beurteilungsmodells sollen in einer Sensitivitätsanalyse die Wichtungsfaktoren geändert werden, um ihren Einfluss auf den Gesamtnutzen zu untersuchen. Die Nutzwerte der Einzelkriterien bleiben unverändert. Für den Vergleich der Ergebnisse der Verbringstelle Neßsand sollen die Wichtungsfaktoren für das Langzeitverhalten bei der Verdriftung in Schutzbereiche und den Hafen variiert werden. Dabei sollen ausgehend von der gleichen Gewichtung, die sie bislang erfuhren, abwechselnd die Schutzbereiche und der Hafen eine stärkere Berücksichtigung bekommen. Dazu wird der Wichtungsfaktor der beiden für ausgewählte Abflusereignisse auf 0.2 verringert beziehungsweise auf 0.4 erhöht. Die daraus folgenden Ergebnisse sind in Tabelle 7.6 aufgeführt. Die vernachlässigten Kriterien 'Umwelt' und 'Sicherungsfunktion' wurden der Übersichtlichkeit halber weggelassen.

Man erkennt darin, dass sich die Reihenfolge der Ergebnisse auch bei Variation der Wichtungen nicht ändert, da die Ergebnisse bei einem Oberwasser von $1260 \text{ m}^3/\text{s}$ immer noch die höchsten Nutzwerte liefern. Des Weiteren erkennt man, dass die Unterschiede in den Ergebnissen mit zunehmendem Oberwasser kleiner werden, da die Nutzwerte immer größer werden. Zuletzt ist erkennbar, dass die Verringerung der Wichtung für die Verdriftung in Schutzbereiche den Nutzen erhöht und eine Erhöhung der Wichtung den Nutzen verringert. Auch hier macht sich der im Vergleich zum Hafengebiet geringere Nutzwert bemerkbar.

Zusammenfassend lässt sich anhand der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse feststellen, dass die Variation des Gesamtnutzens in diesem Fall relativ gering ausfällt und die Reihenfolge der zu preferierenden Variante nicht beeinflusst wird.

Bei der Sensitivitätsanalyse der Lösungen für unterschiedliche Verbringstellen und Oberwassersituationen soll das Augenmerk auf die Wichtung des Einflusses der Transportkosten gerichtet werden. Dieser soll bei entsprechender Anpassung der anderen relevanten Wichtungen für das Langzeitverhalten auf 0.1 verringert beziehungsweise auf 0.5 erhöht werden. Die Ergebnisse bei unveränderten Nutzwerten sind in Tabelle 7.7 aufgeführt.

Man sieht auch hier, dass sich im Rahmen der Parametervariation die Reihenfolge der Lösungen nicht ändert. Das Verbringen auf Neßsand liefert immer noch den höchsten Nutzwert, auch wenn es bei kleineren Wichtungsfaktoren für die Kosten nur noch geringfügige Unterschiede zu dem Nutzen für das Verbringen auf 689 gibt. Wenn der Wichtungsfaktor noch kleiner gewählt werden würde, dürfte sich die Reihenfolge der Lösungsalternativen ändern. Im Gegenzug vergrößert sich der Unterschied zwischen den Nutzen der Verbringstellen signifikant, sobald die Wichtung für die Kosten erhöht wird. Zusammengefasst kann hier festgehalten werden, dass sich das Beurteilungsmodell für die beiden Lösungen aufgrund der ermittelten Nutzwerte über die Baggergutverdriftung und die Kosten deutlich sensibler reagiert als in dem obigen Beispiel.

Tabelle 7.6: Sensitivitätsanalyse für den Vergleich der Simulationsergebnisse zur Verbringstelle Neßsand

Oberwasser	$360 \text{ m}^3/\text{s}$	$720 \text{ m}^3/\text{s}$	$1260 \text{ m}^3/\text{s}$
Nutzwerte			
Schutzbereiche	0.55	0.64	0.81
Hafen	0.73	0.85	0.99
Kosten	0.0	0.0	0.0
Wichtung			
Schutzbereiche	0.20/0.30/0.40		
Hafen	0.40/0.30/0.20		
Kosten	0.30		
Gesamtnutzen	0.40/0.38/0.37	0.47/0.45/0.43	0.56/0.54/0.52

Tabelle 7.7: Nutzwerte, Wichtungsfaktoren und Gesamtnutzen beim Vergleich der Simulationsergebnisse von Verbringstelle 689 mit Verbringstelle Neßsand

Verbringstelle Oberwasserzuflüsse	VS 689 180 m ³ /s	VS Neßsand 1260 m ³ /s
Nutzwerte		
Schutzbereiche	0.98	0.81
Hafen	0.98	0.99
Kosten	0.0	0.81
Wichtungsfaktoren		
Schutzbereiche	0.40/0.30/0.20	
Hafen	0.40/0.30/0.20	
Kosten	0.10/0.30/0.50	
Gesamtnutzen	0.79/0.58/0.39	0.80/0.78/0.77

7.3.4 Zusammenfassung

Am Beispiel der Systemstudien der BAW Hamburg zur Baggergutverdriftung von den Verbringstellen Neßsand und 689 in der Tideelbe konnte sehr gut verdeutlicht werden, in welchem Rahmen das Programmpaket DredgeSim in Kombination mit einem Strömungs- und Transportmodell eingesetzt werden kann. Obwohl es sich um ein vereinfachtes Modell handelt, bei dem Wechselwirkungen zwischen der zu beobachtenden Kornverteilung der Baggerstelle und dem übrigen Sedimentinventar des Modells fehlen, lassen die Ergebnisse Rückschlüsse auf die angewandte Verbringstrategie zu. Die beobachtete Baggergutverdriftung kann aufgrund des Modell-Setups als die maximal mögliche angesehen werden.

Bei geringen Oberwasserzuflüssen zeigt sich in den Modellergebnissen, dass größere Mengen des auf Neßsand verbrachten Baggerguts innerhalb kurzer Zeiträume von der Verbringstelle in kritische Bereiche des Modellgebiets verdriften können. Das gilt auch für Baggergutumlagerungen auf der Verbringstelle 689. Daraus lässt sich die Empfehlung ableiten, Baggergut vornehmlich bei größeren Oberwasserzuflüssen umzulagern und die Unterhaltungsbaggerungen im Zweifel hinauszuzögern, wenn diese Situation nicht gegeben ist.

Ein Beurteilungsmodell eignet sich bei der Analyse der Berechnungsergebnisse mit Hinblick auf verschiedene Kriterien. Dazu sollten quantitative Ergebnisse über die einzelnen Nutzwerte zur Verfügung stehen. Da selbst die Ergebnisse eines solchen Modells über einen gewissen Interpretationsspielraum verfügen, wie beispielsweise die einzelnen Kriterien gewichtet werden, sollte im Anschluss zur Überprüfung der Aussagen eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt werden.

7.4 Die Befüllkapazität eines Donaukolks

Die hier vorgestellte Programmumgebung eignet sich nicht nur für komplexe Anwendungen im Projektbetrieb, sondern kann auch in vergleichsweise einfachen Untersuchungen zur Unterstützung des operativen Geschäfts verwendet werden. Ein Beispiel ist die Ermittlung der Befüllungskapazität eines Kolks, um ermitteln zu können, wie viel Baggergut maximal an dieser Stelle verbracht werden kann. Insbesondere im Binnenbereich werden gebaggerte Sedimente häufig für Sicherungsmaßnahmen verwendet und in Kolken verbracht. Im Folgenden soll dieser Anwendungsfall daher exemplarisch für einen Donaukolk gezeigt werden.

7.4.1 Modellgebiet und Methodik

Der zu untersuchende Kolk befindet sich innerhalb des Donauabschnitts Mühlhamer Schleife bei Donau-km 2269,8. Ziel ist es, das mögliche Verbringvolumen zu ermitteln, das unterhalb einer definierten Fülllinie in Bezug auf die Referenzwasserspiegellage eingebracht werden kann. Dazu wird das Verbringvolumen so lange variiert, bis die Fülllinie erreicht ist. Die Untersuchungen erfolgten mit Hilfe der Funktionalität der Geschiebezugabe in DredgeSim, das für diese Anwendung in Kopplung mit den Modulpaketen Telemac2D und Sisyphe betrieben wurde.

Als maximal zulässige Tiefe unterhalb der Referenzwasserspiegellage wurde mit 2.5 m ein Wert definiert, der durchaus realistisch ist, wenn man bedenkt, dass diese Zahl auch die Zieltiefe bei der Gewässerunterhaltung darstellen könnte. Die Absoluthöhe zu diesem Wert beträgt 302,5 m+NN.

Um den Kolk in seiner Ausdehnung richtig zu erfassen, wurde er mit einem großflächigen Polygon umrissen. Der Algorithmus der Kolkverbringung ist derart aufgebaut, dass die tiefsten Punkte innerhalb dieses Polygons die größten Mengen an Baggergut aufnehmen müssen. Die Stellen, die zu hoch sind und über der Fülllinie liegen, werden im Zuge dieser Prozedur von der Verbringung ausgeschlossen.

7.4.2 Simulationsergebnisse

Zunächst wurde als Einstieg ein Verbringvolumen von 20.000 m³ auf die vom Polygonzug umrissene Fläche aufgebracht, für das überprüft werden soll, ob es unterhalb der Fülllinie verbracht werden kann. Die Ergebnisse dieser Simulation können Abbildung 7.12 entnommen werden. In dem linken Bild erkennt man die Differenztopografie, die sich infolge dieses Verbringvorgangs einstellt. Darin ist zu erkennen, wie tiefe Stellen mehr Material aufnehmen als flachere, was sich in einer größeren Differenztopografie in diesen Bereichen äußert. In der Mitte und rechts sind die Ausgangstopografie und die Endtopografie zu erkennen. In dem unteren Bild ist die zeitliche Entwicklung des Füllhorizonts über die Simulationsdauer aufgetragen. Man sieht, dass die maximale Füllhöhe noch nicht erreicht ist. Das bedeutet, dass noch mehr

Material eingebracht werden kann, bis dieser Wert erreicht ist.

Das Verbringvolumen wurde daraufhin weiter variiert, um letztlich die Befüllkapazität dieser potenziellen Verbringstelle zu bestimmen. Es konnte noch bis zu 70.000 m^3 gesteigert werden, um noch gerade so unterhalb der maximalen Verfüllhöhe zu verbleiben. In Abbildung 7.13 erkennt man zum einen, dass am Ende der Kolkbefüllung die Sohllage in dem Verbringpolygon parallel zum Referenzwasserspiegel verlaufen wird und zum anderen, dass der Füllhorizont der Lage der maximal zulässigen Füllhöhe entspricht.

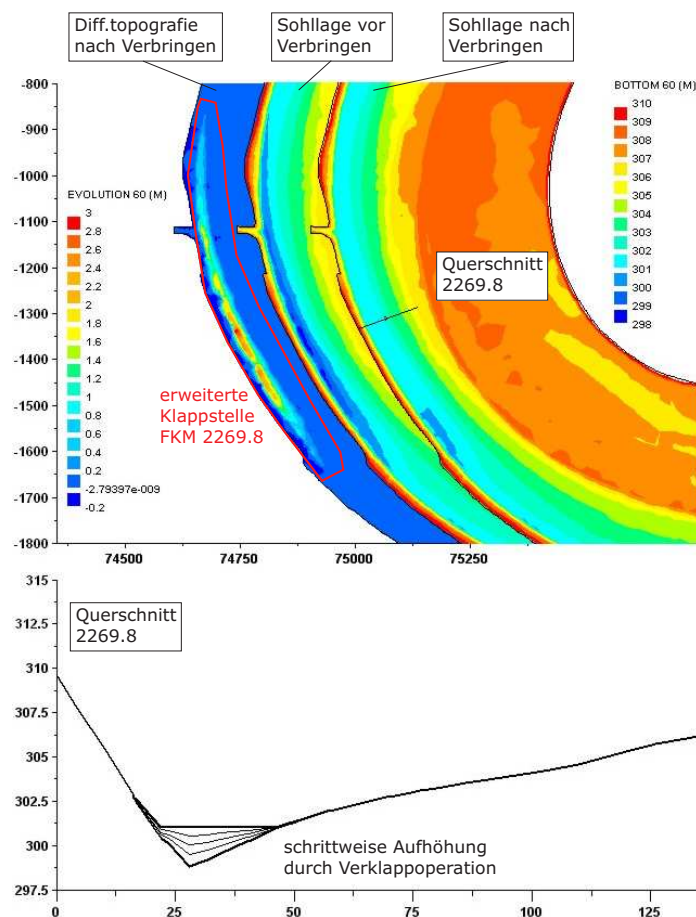


Abbildung 7.12: Ergebnisse einer Kolkverbringung an der Donau bei einem eingebrachten Volumen von 20000 m^3 - Links: Differenztopografie, Mitte und rechts: die dazugehörigen Sohllagen vor und nach dem Verbringen, Unten: Ergebnisse der Sohlhöhenentwicklung über die Simulationszeit am Beispiel eines Querschnitts innerhalb der Verbringstelle FKM 2269.8 (Maerker & Malcherek, 2009 [69])

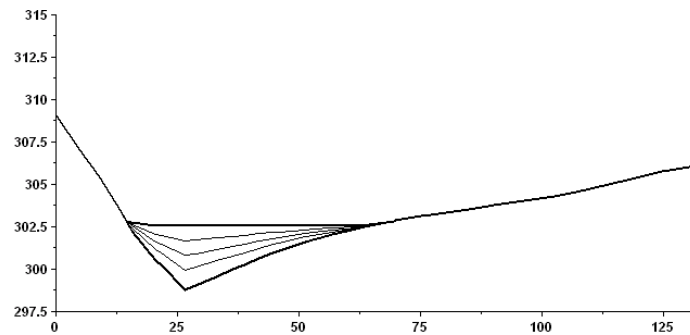


Abbildung 7.13: Ergebnisse der Sohlhöhenentwicklung für ein Verbringvolumen von 70000 m^3 über die Simulationszeit [69]

7.4.3 Zusammenfassung

Dieses sehr einfache Beispiel illustriert eine weitere Anwendungsmöglichkeit Dredge-Sims. So könnte diesem Muster folgend an kritischen Stellen in Kurzzeitsimulationen die zur Verfügung stehende Befüllkapazität von Verbringstellen durch Variation der Eingabeparameter ermittelt werden. Dadurch kann das Sedimentmanagement insbesondere im Binnenbereich, wo Baggergut häufig zu Sicherungsmaßnahmen verwendet wird mit detaillierten Daten unterstützt werden. Auch sind im direkten Anschluss an diese Studien Analysen zur Verdriftung von verbrachtem Baggergut in das System möglich.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Das Thema der vorliegenden Arbeit setzt sich mit der Optimierung von Nassbaggerstrategien im Rahmen der Unterhaltung der Fahrwassertiefen der Wasserstraßen und Häfen auseinander. Der Bedarf daran zeigt sich vor allem in den auftretenden Unterhaltungskosten und den bewegten Sedimentmengen. Zum Beginn dieser Arbeit werden nähere Beispiele dazu aufgeführt. So liegen die jährlich anfallenden Baggermengen allein für die Unterhaltung der Wasserstraßen und Häfen in letzter Zeit kontinuierlich zwischen 40 und 50 Millionen m³. Grundsätzlich bewegt sich die Optimierung von Unterhaltungsmaßnahmen in einem interdisziplinären Spannungsfeld, in dem verschiedene Akteure eine bestimmte Funktion des Gewässers schützen und fördern wollen. Die dabei verfolgten Ziele tragen ein gewisses Konfliktpotenzial in sich, wenn beispielsweise die Hafенbetreiber die Notwendigkeit einer Nassbaggermaßnahme sehen, und im Gegenzug Ökologen die anthropogenen Eingriffe mit Verweis auf den Gewässerschutz so gering wie möglich halten wollen oder aus Schutzgründen eine augenblickliche Ausführung nicht möglich ist.

Damit in diesem Spannungsfeld möglichst viele Interessen gewahrt werden sowie Regeln zum jeweiligen Verhalten vorliegen, gibt es eine Reihe von gesetzlichen Bestimmungen, auf die sich gestützt werden kann. Zudem kann aufgrund der Tatsache, dass die Unterhaltungsproblematik nicht neu ist, sondern sich mit ihr schon seit vielen Jahrzehnten auseinander gesetzt werden muss, auf eine Reihe von Erfahrungen zurückgegriffen werden. Vor diesem Hintergrund wurden Handlungsanweisungen für den Umgang mit Baggergut konzipiert, die durch den richtigen Umgang mit angefallenem Baggergut führen und Empfehlungen für den Verfahrenshergang geben (HABAK [9], HABAB [10], GÜBAK [18]). Das Ziel besteht bei einer Maßnahme darin, den Eingriff in das System so gering wie möglich zu halten und das Baggergut nach der Entnahme wieder dem Gewässer zurückzuführen, um den Sedimenthaushalt im Gleichgewicht zu halten und Kosten zu sparen. Kontaminierte Partikel müssen behandelt und gegebenenfalls entsorgt werden. Ein kurzer Abriss über allgemeine Grundsätze zur Unterhaltungsproblematik sowie gesetzliche Grundlagen erfolgt in Kapitel 1.

Ziel dieser Arbeit war es, mit Hilfe numerischer Verfahren den Optimierungsprozess zu unterstützen und eine Bewertung verschiedener Konzepte zu ermöglichen. Aus

diesem Grund wird in Kapitel 2 näher auf die verschiedenen Ideen und Paradigmen eingegangen, wie ein Unterhaltungskonzept für ein Fließgewässer oder einen Hafen entwickelt werden kann. Grundsätzlich kann man zwischen konstruktiven strombaulichen Maßnahmen und Nassbaggerarbeiten unterscheiden, die beide zur Unterhaltung der Wasserstraßen und Häfen eingesetzt werden. Durch strombauliche Maßnahmen werden die Strömungs- und Transportprozesse derart beeinflusst, dass eine Ablagerung von Sedimenten in kritischen Bereichen erschwert wird. Typische Beispiele sind Buhnen und Strömungsumlenkwände. Durch Nassbaggerarbeiten wird hingegen eine störende Untiefe entfernt. Aus den verschiedenen Verfahren kann eine Systematik abgeleitet werden, die ebenfalls in diesem Kapitel vorgestellt wird (PIANC [89]) Der Hauptsatz, dem bei Unterhaltungskonzepten gefolgt wird, lautet „Keep sediment in the system“ und verdeutlicht damit das Bestreben, den Eingriff gering und den Sedimenthaushalt ausgeglichen zu gestalten.

Die Notwendigkeit mit neuen Ideen und Wegen die möglichst beste Lösung zu finden, wird in immer umfangreicheren Konzepten sichtbar, in denen langfristige und nachhaltige Lösungen durch die Beteiligten angestrebt werden. Ein Beispiel hierfür ist das aktuelle Sedimentmanagement-Konzept der Tideelbe, das eine Reihe von unterschiedlichen Maßnahmen vorsieht und alle zuständigen Behörden mit einbezieht. Alle Konzepte verfolgen das Ziel, den vermehrten Anfall von Baggergut zu vermeiden, um die dabei entstehenden Kosten und Eingriffe möglichst gering zu halten. Es zeigt sich jedoch auch, dass kaum ein Unterhaltungskonzept ohne Nassbaggermaßnahmen auskommt.

Aufgrund der variierenden Einflüsse auf den Entnahmevergong, der räumlichen Unterschiede der Einsatzgebiete und der steigenden Herausforderungen an die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Technik hat sich eine Vielzahl an verschiedenen Nassbaggerverfahren entwickelt. Die bekanntesten, wie auch einige Exoten sind in Kapitel 3 aufgeführt. Sie lassen sich nach unterschiedlichen Kriterien systematisieren. So kann man zwischen selbstfahrenden Baggerschiffen und Pontonbaggern sowie Baggern mit und ohne Laderaum unterscheiden. Bei letzteren wird das Material in der Regel in Schuten vom Einsatzort abtransportiert. Die Unterschiede der eingesetzten Verfahren zeigen sich auch in den Förderraten und der Zusammensetzung des Baggerguts.

Für die Beschreibung eines Nassbaggervorgangs mit einem numerischen Modell müssen die Zieltiefen richtig beschrieben werden. An Binnenwasserstraßen werden diese in der Regel auf einen statistisch ermittelten Referenzniedrigwasserstand bezogen, der an einer bestimmten Anzahl an Tagen im Jahr mindestens erreicht wird. Beispiele zu Rhein und Donau finden sich ebenfalls in Kapitel 3. Im Küstenbereich werden die Zieltiefen in Bezug auf das Normalnull oder das Seekartennull angegeben. Eine Besonderheit stellt Flüssigschlick dar. Dieser besteht aus verschiedenen Anteilen Wasser und Feststoffen und weist eine vertikale Struktur auf, die sich anhand von Dichteunterschieden der Suspension in verschiedene Schichten einteilen lässt und den Übergang von der Gewässersohle zur Wasserphase markiert. Der wesentliche Parameter, der für die Sicherheit des Schiffsverkehrs in diesem Fall bestimmt werden muss, ist die nautische Tiefe. Diese ist erreicht, wenn beim Durchfahren der Schlickschichten eine Gefahr für die Schiffshülle und eine Einschränkung der Naviergierfähigkeit

nicht auszuschließen ist. Laut PIANC liegt dieser Wert bei einer Schlickdichte von 1200 kg/m^3 .

Ein entscheidender Schritt zur numerischen Simulation von Nassbaggerstrategien ist die Modellierung anthropogener Eingriffe in ein System. Nassbaggerarbeiten lassen sich als klar definierbare Handlungen durch Entscheidungsmodelle beschreiben, wodurch der Prozess, wann und in welchem Umfang eine Maßnahme erforderlich ist, erfasst werden kann. Die Formulierung von Baggereinsätzen als Entscheidungsproblem kann in Kapitel 4 nachvollzogen werden. Aufbauend auf diesem Entwurf konnte das Programmsystem DredgeSim entwickelt werden, wodurch die Modellierung von Baggerstrategien in mehrdimensionalen numerischen Modellen möglich ist.

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, den Entscheidungsprozess als Steuerungs- und Regelungsproblem darzustellen. Dies wurde mit Hilfe von Simulink umgesetzt. Die darin enthalten Standardfunktionalitäten konnten für den Entwurf eines solchen Modells herangezogen werden. Jedoch ist dieser Ansatz nur für ein Ein-Punkt-Modell praktikabel. Zudem ist eine enge Rückkopplung mit Messdaten über das Sedimentationsverhalten erforderlich, um belastbare Aussagen zu ermöglichen.

In Kapitel 5 wurde schließlich das Programmpaket DredgeSim vorgestellt, dessen Entwicklung vom Softwareentwurf über verschiedene Ansätze zur Umsetzung von Teilprozessen, die Beschreibung der Funktionalitäten bis hin zu einem einfachen Anwendungsbeispiel beschrieben wird. Grundsätzlich wurde das Ziel verfolgt, eine breite Anwendbarkeit der Software zu erreichen. Baggermaßnahmen lassen sich daher als zeitgesteuerter Prozess modellieren, bei dem durch Vorgabe von Einsatzzeiten ein Baggervorgang simuliert werden kann, sowie als kriteriengesteuerte Maßnahme, wo bei Erreichen einer kritischen Wassertiefe durch Sedimentationsprozesse eine Baggerung automatisch eingeleitet wird. Das Verbringen von Baggergut kann flächenhaft, mit einer konstanten Aufhöhung modelliert werden oder als Befüllung eines Kolks, indem in tiefen Bereichen mehr Material eingebracht wird als in flacheren. Als Sonderfall eines Verbringvorgangs in DredgeSim kann die Geschiebezugabe betrachtet werden, bei der im Vorfeld eine Sedimentverteilung definiert werden kann.

Das Software Engineering ist derart gestaltet, dass eine Kopplung zu bestehenden Strömungs- und Transportprozessen auf einfache Weise möglich ist. Überprüft wurde die Kopplung, indem DredgeSim mit den Verfahren UnTrim und SediMorph, Telemac2D und SediMorph sowie Telemac2D und Sisyphe zur Modellierung von Baggermaßnahmen verwendet wurde. Grundsätzlich hängt die Güte der Modelle, insbesondere beim kriteriengesteuerten Baggern und Verbringen, von der Qualität der morphodynamischen Teilergebnisse ab.

Die Optimierung von Nassbaggerstrategien ist als mehrkriterielles Problem zu betrachten, zu dem unterschiedliche, mitunter konkurrierende Lösungen für die verschiedenen Zielvorstellungen existieren. Aus dieser Lösungsmenge ist die am besten geeignete herauszusuchen. Hilfestellung bei der Analyse können Methoden der mehrkriteriellen Optimierung bieten. Hierauf wird in Kapitel 6 eingegangen.

Liegen alle Lösungen eines Problems in diskreter Form vor, kann die Analyse mittels multiattributiver Modelle erfolgen. Dabei wird der Wert einer Lösung in Bezug auf die

verschiedenen zu wichtenden Kriterien ermittelt und ein Gesamtnutzen der Lösung über alle Kriterien bestimmt. Die Variante mit dem größten Gesamtnutzen ist dann die zu bevorzugende Lösungsmöglichkeit. Wenn die Lösungsmöglichkeiten unbekannt sind und sich das Optimierungsproblem als stetige Funktion beschreiben lässt, kann durch mathematische Verfahren eine Menge an Pareto-optimalen Lösungen ermittelt werden. Aus diesen lässt sich sodann durch ein geeignetes Bewertungsmodell die beste Kompromisslösung in Bezug auf die definierten Kriterien bestimmen.

Die Optimierung von Nassbaggerstrategien beschränkt sich häufig auf die Suche nach einer bestmöglichen Verbringstelle für das angefallene Baggergut. Dieser Vorgang lässt sich am ehesten durch multiattributive Modelle beschreiben, denn die Lösungen sind in der Regel in Form der möglichen Verbringstellen bekannt, da eine Vielzahl an Randbedingungen beachtet werden muss, die im Rahmen von Vorabuntersuchungen überprüft werden und die Lösungsvielfalt einschränken. Vor diesem Hintergrund wurde ein Beurteilungsmodell für die Auswahl der bestmöglichen Verbringstrategie entworfen, welches die Kriterien über anfallende Kosten, Umweltauswirkungen, Langfristentwicklung und Sicherungsfunktion enthält. Die Wichtung der einzelnen Kriterien wurde unter Verwendung des analytischen Hierarchieprozesses ermittelt.

Das abschließende Kapitel 7 enthält verschiedene Anwendungsbeispiele der Software DredgeSim. An einem Modell der Donau wurde im Rahmen der Kalibrierung die Funktionalität des kriteriengesteuerten Baggers eingesetzt, um die anfallenden Baggermengen in dem betrachteten Abschnitt zu prognostizieren. Die Ergebnisse zeigten eine sehr gute Übereinstimmung mit den beobachteten Werten. Weiter wurde an einem Rheinabschnitt die Modellierung einer Geschiebezugabe mit Hilfe des zeitgesteuerten Verbringens durchgeführt. Auch hier konnten sehr belastbare Ergebnisse erzeugt werden, wie ein Vergleich der Ausbreitungsgeschwindigkeiten zeigte. Dieses Modell kann im Rahmen der Geschiebebewirtschaftung wertvolle Erkenntnisse über die möglichen Strategien liefern.

In Simulationen an einem Modell der Tideelbe wurden verschiedene Verbringstrategien mit Hilfe des vorgeschlagenen Bewertungsmodells analysiert. Die Ergebnisse der qualitativen Begutachtung konnten dadurch bestätigt werden. Schließlich zeigte die Simulation einer Kolkverbringung an einem Donauabschnittsmodell, wie DredgeSim im operativen Bereich eingesetzt werden kann, um beispielsweise die Aufnahmekapazität von Kolken zu ermitteln. Durch alle Anwendungsbeispiele konnte die hohe Praxistauglichkeit des Pakets DredgeSim bestätigt werden.

In der Zukunft könnte die Rolle der klassischen Pareto-Optimierung noch eingehender untersucht werden, indem sie für die Ermittlung weiterer Lösungsalternativen für Nassbaggerstrategien herangezogen wird. Das bedeutet, dass grundsätzlich eine größere Lösungsvielfalt entsteht und dadurch auch vermeintlich unkonventionelle Wege erschlossen werden könnten. Zunächst muss dazu eine stetige Optimierungsfunktion entwickelt werden und der Lösungsraum nicht durch zu viele Randbedingungen eingeschränkt werden. Im Anschluss sollten dann durch geeignete Kriterien die bestmöglichen Lösungsalternativen bestimmt werden. Die notwendigen Randbedingungen könnten später in den Beurteilungskriterien berücksichtigt werden.

Des Weiteren ist es grundsätzlich erstrebenswert, wenn Fragestellungen rund um die

Optimierung von Nassbaggerstrategien mit Standardsoftware analysiert werden können, so dass man Werkzeuge zur Verfügung hat, die eine breitere Verwendung besitzen als mehrdimensionale Strömungs- und Transportmodelle. Ein Beispiel, welche Richtung eingeschlagen werden kann, ist die Benutzung von Simulink im Rahmen der Betrachtung von Nassbaggermaßnahmen als Steuerungs- und Regelungsproblem.

Literaturverzeichnis

- [1] ANGERMANN, A., BEUSCHEL, M., RAU, M., WOHLFARTH, U.: *MATLAB - Simulink - Stateflow. Grundlagen, Toolboxes, Beispiele*. Oldenbourg Verlag, München, 2009.
- [2] BESTLE, D.: *Strategien der Mehrkriterien-Optimierung*. In: GRABE, J. (Herausgeber): *Optimierung in der Geotechnik - Strategien und Fallbeispiele*, Hamburg, 2006.
- [3] BOEHLICH, M.J.: *Tidedynamik in der Elbe*. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, 86, Dezember 2003. Bundesanstalt für Wasserbau.
- [4] BOFINGER, P.: *Grundzüge der Volkswirtschaftslehre - Eine Einführung in die Wissenschaft von Märkten*. Pearson Studium, München, 2007.
- [5] BRANKE, J., DEB, K., MIETTINEN, K., SLOWINSKI, R. (HERAUSGEBER): *Multiobjective Optimization - Interactive and Evolutionary Approaches*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [6] BRAY, R.N., BATES, A.D., LAND, J.M.: *Dredging: A Handbook for Engineers*. Arnold, London, 1997.
- [7] BREMEN PORTS (HERAUSGEBER): *Green Ports. Nachhaltig wirtschaften - erfolgreich handeln. Broschüre*, 1999.
<http://www.bremen-ports.de>.
- [8] BRINKMANN, B.: *Ein Beitrag zur Bestimmung des Wasseraustausches zwischen Fluss und Hafen in Tidegebieten*. Heft 70, Franzius-Institut für Wasserbau und Küsteningenieurwesen, Universität Hannover, 1990.
- [9] BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE: *Handlungsanweisung für den Umgang mit Baggergut im Küstenbereich (HABAK-WSV)*. BfG-Nr. 1100, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz, 1999.
<http://www.bafg.de>.

- [10] BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE: *Handlungsanweisung für den Umgang mit Baggergut im Binnenland (HABAB-WSV)*. BfG-Nr. 1251, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, Koblenz, 2000.
<http://www.bafg.de>.
- [11] BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE: *Kommentar zur Handlungsanweisung für den Umgang mit Baggergut im Binnenland (HABAB-WSV)*. BfG-Nr. 1365, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, Koblenz, 2002.
<http://www.bafg.de>.
- [12] BUNDESANSTALT FÜR GEWÄSSERKUNDE (HRSG.): *Analyse und Bewertung der hydraulisch-morphologischen Situation zwischen Iffezheim und Mainz*. Projektbericht, Bundesanstalt für Gewässerkunde, 2010.
- [13] BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: *Informationen zum IPDS-Konzept zur Definition von flächenhaften Eingangsdaten*.
<http://www.baw.de/methoden/index.php5/IPDS.DAT>.
- [14] BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: *Anpassung der Fahrrinne von Unter- und Außenelbe an die Containerschifffahrt*. Gutachten zum Verbringungskonzept für Umlagerungen im Medembogen und im Neuen Luechtergrund BAW-Nr. A3955 03 10062, Ästuarsysteme II (K3), Bundesanstalt für Wasserbau - Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, 2006.
- [15] BUNDESMINISTERIUM DER FINANZEN: *Bundshaushaltsplan 2010*. Einzelplan 12 für das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung.
- [16] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT: *Referentenentwurf eines Gesetzes zur Neuordnung des Kreislaufwirtschafts- und Abfallrechts*. Gesetzentwurf, Referat WA II 2, Az: 30101-5/0, 2010.
http://www.bmu.de/files/download/application/pdf/krwg_entwurf.pdf.
- [17] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN: *Wirtschaftlich und umweltverträglich: Nassbaggerstrategien in Deutschland*. Broschüre zum World Dredging Congress XVII, Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn, 2004.
<http://www.dredging-in-germany.de>.
- [18] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG, FREIE HANSESTADT BREMEN, FREIE UND HANSESTADT HAMBURG, LAND MECKLENBURG-VORPOMMERN, LAND NIEDERACHSEN, LAND SCHLESWIG-HOLSTEIN: *Gemeinsame Übergangsbestimmungen zum Umgang mit Baggergut in den Küstengewässern*, 2009.

-
- [19] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Bundeswasserstraßengesetz (WaStrG)*, 1968.
- [20] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Umwelteinwirkungen durch Luftverunreinigungen, Geräusche, Erschütterungen und ähnliche Vorgänge (Bundes-Immissionsschutzgesetz - BImSchG)*, 1974.
- [21] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz - KrW-/AbfG)*, 1994.
- [22] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG)*, 1998.
- [23] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Gesetz über das Verbot der Einbringung von Abfällen und anderen Stoffen und Gegenständen in die Hohe See (Artikel 1 des Gesetzes zur Ausführung des Protokolls vom 7. November 1996 zum Übereinkommen über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffen von 1972) (Hohe-See-Einbringungsgesetz)*, 1998.
- [24] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV)*, 1999.
- [25] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Verordnung über die umweltverträgliche Ablagerung von Siedlungsabfällen (Abfallablagerungsverordnung - AbfAblV)*, 2001.
- [26] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Verordnung über die Verwertung von Abfällen auf Deponien über Tage (Deponieverwertungsverordnung - DepVerwV)*, 2005.
- [27] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Verordnung über Deponien und Langzeitlager (Deponieverordnung - DepV)*, 2009.
- [28] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG)*, 2010.
- [29] BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND: *Gesetz über Naturschutz und Landschaftspflege (Bundesnaturschutzgesetz - BNatSchG)*, 2010.
- [30] BURT, N.: *Sediment Management Strategies in the Elbe Estuary. A Review*, HR Wallingford, UK, 2006.
- [31] CASULLI, V., LANG, G.: *Technical Report Mathematical Model UnTRIM. Validation Document, Version 1.0, June 2004*, Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste, Hamburg, 2004.

- <http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/untrim/PDF/vd-untrim-2004.pdf>.
- [32] CHRISTIANSEN, H.: *Erfahrungen mit der Strömungsumlenkwand*. Hansa, 12/1997:70–73, 1997.
- [33] CONNOLLY, T., ARKES, H.R., HAMMOND, K.R. (HERAUSGEBER): *Judgment and Decision Making - An Interdisciplinary Reader*. Cambridge University Press, New York, 2000.
- [34] DEMIRBILEK, Z., SMITH, J. S., ZUNDEL, A. K., JONES, R. D., MACDONALD, N. J., AND DAVIES, M. H.: *Particle Tracking Model (PTM) in the SMS: II. Overview of Features and Capabilities*. Dredging Operations and Engineering Research Technical Notes Collection (ERDC TN-DOER-D4), U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS, 2005.
- [35] DEUTSCHE NORM: *DIN 19731: Bodenbeschaffenheit - Verwertung von Bodenmaterial*. Beuth, Berlin, 1998.
- [36] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E.V.: *Merkblatt ATV-DVWK-M 362-3, Umgang mit Baggergut, Teil 3: Mindestuntersuchungsprogramm für Baggergut*. DWA e.V., Hennef, 1999.
- [37] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E.V.: *Merkblatt ATV-DVWK-DWA-M 362-2, Umgang mit Baggergut, Teil 2: Fallbeispiele*. DWA e.V., Hennef, 2004.
- [38] DEUTSCHE VEREINIGUNG FÜR WASSERWIRTSCHAFT, ABWASSER UND ABFALL E.V.: *Merkblatt DWA-M 362-1, Umgang mit Baggergut, Teil 1: Handlungsempfehlungen*. DWA e.V., Hennef, 2008.
- [39] DODGSON, J.S., SPACKMAN M. PEARMAN A. PHILLIPS L.D.: *Multi-criteria analysis: a manual*. Technischer Bericht, Department for Communities and Local Government, London, 2009.
- <http://eprints.lse.ac.uk/id/eprint/12761>.
- [40] DORF, R.C., BISHOP, R.H.: *Moderne Regelungssysteme*. Pearson Studium, München, 2006.
- [41] EUROPÄISCHE UNION: *Richtlinie 1999/31/EG des Rates vom 26. April 1999 über Abfalldeponien*. Amtsblatt der EG L 182/1.
- [42] EUROPÄISCHE UNION: *Richtlinie 2000/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2000 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Wasserpolitik*. Amtsblatt der EG L 327/3.

- [43] EUROPÄISCHE UNION: *Richtlinie 2008/105/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16. Dezember 2008 über Umweltqualitätsnormen im Bereich der Wasserpolitik und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien des Rates 82/176/EWG, 83/513/EWG, 84/156/EWG, 84/491/EWG und 86/280/EWG sowie zur Änderung der Richtlinie 2000/60/EG*. Amtsblatt der EG L 348/84.
- [44] EUROPÄISCHE UNION: *Richtlinie 2008/56/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Juni 2008 zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie)*. Amtsblatt der EG L 164/19.
- [45] EUROPÄISCHE UNION: *Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien*. Amtsblatt der EG L 312/3.
- [46] EUROPÄISCHE UNION: *Richtlinie 92/43/EWG des Rates vom 21. Mai 1992 zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen*. Amtsblatt der EG L 206/7.
- [47] FEES, E.: *Mikroökonomie - Eine spieltheoretisch- und anwendungsorientierte Einführung*. Metropolis Verlag, Marburg, 2004.
- [48] GELDERMANN, J.: *Enzyklopädie der Wirtschaftsinformatik: Multikriterielle Optimierung*. Online-Lexikon, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, Abgerufen im April 2012. Herausgeber: Kurbel, K., Becker, J., Gronau, N., Sinz, E., Suhl, L. <http://www.encyklopaedie-der-wirtschaftsinformatik.de>.
- [49] GLANDER, B., KOPMANN, R.: *Persönliche Mitteilung*, 2010. Bundesanstalt für Wasserbau - Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Karlsruhe.
- [50] HAFENTECHNISCHE GESELLSCHAFT (HERAUSGEBER): *Umgang mit Baggergut, Definitionen - Erläuterungen - Empfehlungen*. Positionspapier des HTG-Fachausschusses Baggergut, Hafentechnische Gesellschaft, Hamburg, 2002. <http://www.htg-baggergut.de/sites/Positionspapier.html>.
- [51] HAFENTECHNISCHE GESELLSCHAFT (HERAUSGEBER): *Berichte des HTG-Fachausschusses Baggergut: Verwertung von feinkörnigem Baggergut im Bereich der deutschen Küste*. Hansa, 7/2007:97–100, 2007.
- [52] HAMBURG PORT AUTHORITY (HERAUSGEBER): *Geschäftsbericht 2007*. <http://www.hamburg-port-authority.de/presse-und-aktuelles/broschueren-publikationen.html>.
- [53] HAMBURG PORT AUTHORITY (HERAUSGEBER): *Geschäftsbericht 2008*. <http://www.hamburg-port-authority.de/presse-und-aktuelles/broschueren-publikationen.html>.

- [54] HAMBURG PORT AUTHORITY (HERAUSGEBER): *Tideelbe-Journal*.
<http://www.tideelbe.de>.
- [55] HAMBURG PORT AUTHORITY UND WASSER- UND SCHIFFFAHRTSVERWALTUNG DES BUNDES: *Strombau- und Sedimentmanagementkonzept für die Tideelbe*, 2008.
<http://www.hamburg-port-authority.de/presse-und-aktuelles/umfragen.html>.
- [56] HELSINKI COMMISSION: *Guidelines for the Disposal of Dredged Materials at Sea*. Adopted in June 2007, Baltic Marine Environment Protection Commission, 2007.
- [57] HERBICH, J.B.: *Dredged Navigational Channels*. In: HERBICH, J.B. (Herausgeber): *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, Band 3: Harbors, Navigational Channels, Estuaries and Environmental Effects. Gulf Publishing Company, Houston, 1992.
- [58] HERVOUET, J.-M., TITLE = TELEMAC2D SOFTWARE, TYPE = USER MANUAL, VERSION 5.2 INSTITUTION = EDF ADDRESS = CHATOU YEAR = 2002 NOTE =
<HTTP://WWW.OPENTELEMAC.ORG>. Technischer Bericht.
- [59] HEYER, H.: *Die Beeinflussung der Tidedynamik in Ästuarien durch Steuerung - Ein Beitrag zur Anwendung von Optimierungsverfahren in der Wasserwirtschaft*. Bericht Nr. 23, Institut für Strömungsmechanik und Elektron. Rechnen im Bauwesen der Universität Hannover, Universität Hannover, Hannover, 1987.
- [60] INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION: *Specific Guidelines for Assessment of Dredged Material*. Twenty-second consultive meeting of contracting parties to the convention on the prevention of marine pollution by dumping of wastes and other matter 1972, Resolution LC 22/5/Add.1, London Convention, 2000.
- [61] JAYASWAL, B.K., PATTON, P.C.: *Design for Trustworthy Software*. Prentice Hall International, Upper Saddle River, New Jersey, 2006.
- [62] KARRASCH, M.: *Monitoringergebnisse von Verbringungen Hamburger Elbsedimente*. In: *6. Rostocker Baggergutseminar*. Universität Rostock, 2010.
- [63] KINDSMÜLLER, M.C., LEUCHTER, S., SCHULZE-KISSING, D., URBAS, L.: *Modellierung und Simulation menschlichen Verhaltens als Methode der Mensch-Maschine-System-Forschung*. MMI-Interaktiv, Nr. 7, Juni 2007.
- [64] KIRBY, R., PARKER, W.R.: *Seabed density measurements related to echo sounder records*. Dock and Harbour Authority, 54(641), 1974.

- [65] KNOCH, D., MALCHEREK, A.: *The influence of waves on the sediment composition in a tidal bay*. Vortrag, 9th International Conference on Estuarine and Coastal Modeling, October 31 - November 2 2005, Charleston, 2005.
- [66] KRON, T.: *Fuzzy-Logik für die Soziologie*. Österreichische Zeitschrift für Soziologie, 3/2005:51–88, 2005.
- [67] KÜHN, G.: *Der maschinelle Wasserbau*. B.G. Teubner, Stuttgart, 1997.
- [68] LI, C.W., MA, F.X.: *3D Numerical Simulation of Deposition Patterns due to Sand Disposal in Flowing Water*. Journal of Hydraulic Engineering, March 2001.
- [69] MAERKER, C., MALCHEREK, A.: *Anpassungen der Funktionalitäten des Moduls DredgeSim zur Optimierung des Geschiebemanagements im Rahmen der Unterhaltung von Wasserstraßen*. Projektbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau, Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, 2009.
- [70] MAERKER, C., MALCHEREK, A.: *Die Untersuchung von Unterhaltungsstrategien im Bereich des WSA Cuxhaven mit dem Software-Paket DredgeSim im Rahmen des aktuellen Sedimentmanagementkonzepts für die Tideelbe*. Projektbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Wasserbau, Institut für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, 2011.
- [71] MAERKER, C., RIEMANN, J., BRUDY-ZIPPELIUS, T., MALCHEREK, A.: *Modelling and Analyzing Dredging and Disposal Activities Using Telemac, Sisyphe and DredgeSim*. In: *XVIIIth Telemac & Mascaret User Club*. EDF Chatou, 2011.
- [72] MAERKER, C., WEILBEER, H.: *Die Anwendung des Softwarepakets DredgeSim zur Simulation von Unterhaltungsmaßnahmen an der Ems*. In: *6. Rostocker Baggergutseminar*. Universität Rostock, 2010.
- [73] MALCHEREK, A., PIECHOTTA F. KNOCH D.: *Technical Report Mathematical Module SediMorph*. Validation Document, Version 1.1, March 2005, Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste, Hamburg, 2005.
<http://www.baw.de/vip/abteilungen/wbk/Methoden/hnm/sedimorph/vd-sedimorph.pdf>.
- [74] MALCHEREK, A.: *Numerische Methoden der Strömungsmechanik. Version 6.0*. Vorlesungsskript, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2007.
- [75] MALCHEREK, A.: *Gezeiten und Wellen - Die Hydromechanik der Küstengewässer*. Vieweg und Teubner, Wiesbaden, 2010.
- [76] MALCHEREK, A.: *Hydrostatik und Hydraulik im Wasserbau. Version 3.0*. Vorlesungsskript, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2011.

- [77] MALCHEREK, A., CHA, H.: *Zur Rheologie von Flüssigschlickten: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Ansätze*. Heft 111, Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen, Universität der Bundeswehr München, Neubiberg, 2011.
- [78] MCANALLY, W.H.: *Personal Communication*. Presentation, Annual Meeting of the Estuary Study Group, Vicksburg, 2011.
- [79] MEYER, B.: *Arbeitskreis Nassbaggerei Küste - eine besondere Einrichtung der WSV*. In: *Zwischen Weser und Ems*, Band 38, Seiten 36–46. Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest, Schlossplatz 9, 26603 Aurich, 1997.
- [80] NASSNER, H.: *Sedimentation in Tidehäfen - Phase 1*. *Die Küste*, 53:127–169, 1992.
- [81] NETZBAND, A.: *Umgang mit Baggergut im Bereich der Nordseeküste*. *Hansa*, 12/1997:63–66, 1997.
- [82] NETZBAND, A.: *Umgang mit Sedimenten in Europa - Aktuelle Entwicklungen*. In: *4. Rostocker Baggergutseminar*. Universität Rostock, 2006.
- [83] NETZBAND, A.: *Aktuelles zum Umgang mit Sedimenten in Europa*. In: *5. Rostocker Baggergutseminar*. Universität Rostock, 2008.
- [84] OSPAR CONVENTION: *Revised OSPAR Guidelines for the Management of Dredged Material*. Reference number: 2004-08, Convention for the Protection of the Marine Environment of the North-East Atlantic, 2004.
- [85] PAGEL, B.-U., SIX, H.-W.: *Software Engineering I*. Skript, Fern-Universität, Gesamthochschule Hagen, Fachbereich Informatik, Hagen, 1995.
- [86] PALERMO, M.R.: *Dredged Material Disposal*. In: HERBICH, J.B. (Herausgeber): *Handbook of Coastal and Ocean Engineering*, Band 3: Harbors, Navigational Channels, Estuaries and Environmental Effects. Gulf Publishing Company, Houston, 1992.
- [87] PEW, R.W., MAVOR A.S.: *Modeling Human and Organizational Behaviour - Application to Military Simulations*. National Academy Press, Washington, D.C., 1998.
- [88] PIANC - PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF NAVIGATION CONGRESSES (HERAUSGEBER): *Underkeel Clearance For Large Ships In Maritime Fairways With Hard Bottom*. Permanent Technical Committee II Report, MarCom Working Group 05, Bruxelles, 1985.
<http://www.pianc.org>.
- [89] PIANC - PERMANENT INTERNATIONAL ASSOCIATION OF NAVIGATION CONGRESSES (HERAUSGEBER): *Minimising Harbour Siltation*. MarCom Report No. 102, MarCom Working Group 43, Bruxelles, 2008.
<http://www.pianc.org>.

- [90] RIEMANN, J., BRUDY-ZIPPLIEUS, T.: *Persönliche Mitteilung*, 2011. Bundesanstalt für Wasserbau - Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Karlsruhe.
- [91] SAATY, T.: *The Analytical Hierarchy Process*. John Wiley, New York, 1980.
- [92] SCHÄFER, B.: *Wenn das UGB kommt - welche Veränderungen ergeben sich zum Umgang mit Baggergut*. In: 5. Rostocker Baggergutseminar. Universität Rostock, 2008.
- [93] SCHÄFER, B.: *Baggergut der WSV - aktuelle rechtliche Entwicklungen*. In: 6. Rostocker Baggergutseminar. Universität Rostock, 2010.
- [94] SIX, H.-W., WINTER, M., JUNGMAHR, S.: *Software Engineering II - Objektorientierte Softwareentwicklung*. Skript, Fern-Universität, Gesamthochschule Hagen, Fachbereich Informatik, Hagen, 2000.
- [95] SPANNRING, M.: *Die Wirkung von Buhnen auf Strömung und Sohle eines Fließgewässers - Parameterstudie an einem numerischen Modell*. Heft 86, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München, 1999.
- [96] STAMM, J., WAHRHEIT-LENSING, A., SCHMIDT, A.: *Nassbaggerstrategien - ein Beitrag zum nachhaltigen Management der Binnenwasserstraßen*. Wasserwirtschaft, 4/2007:10–14, 2007.
- [97] STEELE, K., CARMEL Y. CROSS J. WILCOX C.: *Uses and Misuses of Multi-Criteria Decision Analysis (MCDA) in Environmental Decision-Making*. Technischer Bericht, Australian Centre of Excellence for Risk Analysis (ACERA), Melbourne, 2008.
http://www.acera.unimelb.edu.au/materials/endorsed/0607_0610.pdf.
- [98] STENGLIN, J.: *Unterhaltungskonzept für den freifließenden Rhein*. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, 84, Mai 2002. Bundesanstalt für Wasserbau.
- [99] VILLARET, C., TITLE = SISYPHE SOFTWARE, TYPE = USER MANUAL, VERSION 6.0 INSTITUTION = EDF ADDRESS = CHATOU YEAR = 2010 NOTE =
[HTTP://WWW.OPENTELEMAC.ORG](http://www.opentelemac.org). Technischer Bericht.
- [100] VISSER, B.: *Significant Dredgers - Class of 2008*. Dredging and Port Construction, Dezember 2008.
- [101] VOLLMERS, H.-J.: *Systematik der Maßnahmen zur Verringerung der Schwebstoffablagerungen in Binnenhafenmündungen*. Heft 152, Theodor-Rehbock-Flussbaulaboratorium, Technische Hochschule Karlsruhe, 1963.

- [102] WEILBEER, H.: *Persönliche Mitteilung*, 2012. Bundesanstalt für Wasserbau - Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Hamburg.
- [103] WURPTS, A.: *Numerische Simulation von Dichteeffekten am Beispiel der Umlagerung von Baggergut im Ästuarbereich*. Heft 140, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität Darmstadt, 2006.
- [104] WURPTS, R., TORN, P.: *15 Years Experience with Fluid Mud: Definition of the Nautical Bottom with Rheological Parameters*. *Terra et Aqua*, 99:22–32, 2005.
- [105] YATES, J.F.: *Judgment and Decision Making*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1990.

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für Hydromechanik und Wasserbau des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München. Allen, die mich hierbei unterstützt haben, möchte ich herzlich danken.

Besonders hervorheben möchte ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Malcherek, der diese Arbeit betreut hat. Er gab den Anstoß zu dieser Promotion und ich habe ihm viele fachliche Ratschläge zu verdanken, die mich immer wieder herausgefordert haben, aber auch sehr zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Darüber hinaus gab er mir als Lehrstuhlassistent die Möglichkeit in verschiedenen Projekten und durch die unterstützenden Tätigkeiten, die ich in der Lehre übernehmen durfte, über den Tellerrand hinaus zu blicken. Sein Vertrauen in meine Arbeitsfähigkeit war jederzeit spürbar und ich danke ihm für das Maß an Freiraum, um mich wissenschaftlich entfalten zu können.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Stamm möchte ich herzlich für die Übernahme des Korreferats danken. Als früherer Leiter der Abteilung Wasserbau im Binnenbereich an der Bundesanstalt für Wasserbau war er an der Initiierung des DredgeSim-Projekts beteiligt und für mich ein wertvoller Ansprechpartner.

Herr Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Günthert hat freundlicherweise den Vorsitz des Prüfungsausschusses übernommen, wofür ich auch ihm danken möchte.

Das DredgeSim-Projekt wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau gefördert. An den beiden Dienststellen in Karlsruhe und Hamburg hatte ich das Glück mit sehr freundlichen und kompetenten Kollegen zusammen zu arbeiten. Frau Dr.-Ing. Rebekka Kopmann und Herr Dipl.-Ing. Boris Glander waren auf Karlsruher Seite meine wichtigsten Ansprechpartner und ich danke Ihnen sehr für die Bereitschaft, die jeweiligen Anforderungen einer neuen Programmversion gemeinsam zu diskutieren und für die Zusammenarbeit während der Umsetzung in ein einsatzfähiges Programm. Frau Dipl.-Ing. Judith Riemann und Herrn Dr.-Ing. Thomas Brudy-Zippelius danke ich für die Zusammenarbeit an der gemeinsamen Veröffentlichung über die Modellierung der Geschiebezugabe am Rhein. An der BAW Hamburg hat mich Herr Dr.-Ing. Günther Lang bei der Erstellung einer ersten lauffähigen Grundversion im komplexen Programmapparat der BAW unterstützt, wofür ich ihm herzlich danken möchte. Herr Dr.-Ing. Holger Weilbeer, ebenfalls von der BAW Hamburg, hat mir als Betreuer meiner Diplomarbeit den letzten Schubs auf den Weg nach München gegeben. Wir hatten danach Gelegenheit im Rahmen der Weiterentwicklung von DredgeSim und an

der Modellierung der Tideelbe zusammenzuarbeiten und Holger ist im Lauf der Zeit ein guter Freund geworden. Ich danke ihm für die Tipps und Ratschläge in fachlichen Dingen aber auch in anderen Lebenslagen.

Am Institut für Wasserwesen hatte ich das Glück regelmäßig mit studentischen Hilfskräften zusammenzuarbeiten. Stellvertretend möchte ich mich bei Jens Marschner, Ivo Baselt, Andreas Götze, Franziska Münzberg und Sebastian Müller für ihren Einsatz bedanken.

Zuletzt möchte ich meinen Teamkollegen von Anker München für den zweimaligen Triumph beim Aquamasters danken.

Konstanz im April 2014