



DIPLOMARBEIT
Master Thesis

**Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherun-
gen an Binnenwasserstraßen**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades
einer Diplom-Ingenieurin

unter der Leitung von

Ao.Univ.Prof.-Dipl.-Ing. Dr.techn. Nobert Krouzecky

E 222

Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie

eingereicht an der Technischen Universität Wien
Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Adriana Nikolova-Kehayova

1229334

Hristo Botev Str.3
4980 Zlatograd

Wien, im Oktober 2015

Danksagung

Ich bedanke mich bei meinen Eltern für die Unterstützung und die Motivation während des ganzen Studiums.

Ich bedanke mich bei meinem Ehemann dafür, dass er Geduld erwiesen und mir Mut auf allen möglichen Weisen gemacht hat.

Ich bedanke mich bei allen Lektoren, die mir in der Universität für Architektur, Bauingenieurwesen und Geodäsie und in der Technischen Universität Wien unterwiesen und gelehrt haben.

Ich bedanke mich speziell bei Univ. Assoc. Prof. Dipl.-Ing. Dimitar Kislqkov für das Verständnis und die engagierte Betreuung während meines Studiums in der Universität für Architektur, Bauingenieurwesen und Geodäsie.

Ich möchte Ao.Univ.Prof.-Dipl.-Ing. Dr.techn. Nobert Krouzecky meine herzlichsten Glückwünsche und auch meinen größten Dank überbringen. Ich danke ihm für den gewährten Beistand während der Erarbeitung und Erfassung dieser Diplomarbeit.

Kurzfassung

Die Sicherung der normativen Schifffahrtsbedingungen an Wasserstraßen ist eine sehr wichtige Aufgabe für im Wasserbau tätige Ingenieure. In der vorliegenden Diplomarbeit werden zu Beginn nach einem kurzen historischen Überblick die bedeutendsten europäischen Binnenwasserstraßen dargestellt.

Nach einer Übersicht über die hydrodynamischen Belastungen des Gewässerbettes und der Ufer ist der Hauptteil der Arbeit den Deckwerken und deren Sicherungsmaßnahmen in Form von Regelbauweisen auf Basis von Literaturstudien gewidmet. Die Untersuchungen, Beurteilungen und Schlussfolgerungen sind durch entsprechende Bilder, Tabellen und Fotos veranschaulicht.

Ergänzend werden am Schluss der Arbeit Varianten der biologischen Ufersicherung als ökologisch verträglichere Variante für Böschungssicherungen vorgestellt.

Abstract

The protection of the normative navigation conditions of waterways is a very important task for hydraulic engineers. In this thesis, after a brief historical overview, at first the most important European inland waterways are presented.

After an overview of the hydrodynamic loads on the river bed and the banks the main part of this work is dedicated to the bankreinforcements and their security measures in the form of standard construction methods on the basis of literature studies. The investigations, assessments and conclusions are illustrated by corresponding images, tables and photos.

In addition variations of the biological bank protection are introduced at the end of the work as an ecologically more acceptable variation for embankment protections.

Inhaltverzeichnis

Vorbemerkung	9
1. Einleitung	11
2. Binnenwasserstraßen	14
2.1. Geschichtliche Entwicklung der Binnenwasserstraßen	14
2.2. Europäisches Binnenwasserstraßennetz	17
2.2.1. Rhein-Rhone-Kanal, Main-Donau-Kanal, Mittellandkanal.....	18
2.2.2. Donau-Oder-Elbe-Kanal	19
2.2.3. Schifffahrtskanäle in Russland und Kasachstan.....	20
2.3. Grundlegendes über Binnenwasserstraßen	21
2.4. Übersicht der hydraulischen Gewässerbelastungen	22
2.4.1. Natürliche Belastungen	24
2.4.2. Schifffahrtsbedingte Belastungen.....	25
3. Deckwerksbau.....	28
3.1. Allgemeines	28
3.2. Arten von Deckwerken	30
3.2.1. Durchlässige Deckwerke	30
3.2.1.1. Entwurfsgrundlagen.....	30
3.2.1.2. Filterschicht	32
3.2.1.3. Deckschicht	34
3.2.2. Dichte Deckwerke	37
3.2.2.1. Innendichtung	37
3.2.2.2. Außendichtung.....	38
3.2.2.3. Dichtigkeit.....	38
3.2.2.4. Dichtungsarten	41
3.3. Deckwerkskomponenten	45
3.3.1. Wasserbausteine	45

3.3.1.1. Klassifizierungsmerkmale	46
3.3.1.2. Festlegung der erforderlichen Steingröße	47
3.3.1.3. Hinweise zur Ermittlung der mittleren Steingröße D_{50} bzw. des mittleren Steingewichtes G_{50}	50
3.3.1.4. Erforderliche Deckschichtdicken d_D für die Stabilität des Steingerüsts	51
3.3.2. Verguss	52
3.3.2.1. Teilverguss	52
3.3.2.2. Vollverguss	54
3.3.3. Filter-und Trennlagen	54
3.3.3.1. Kornfilter in einem Deckwerk	55
3.3.3.2. Kornfilter als Auflastdrän am luftseitigen Fuß eines Kanaldamms	56
3.3.3.3. Die Anwendung eines Geotextils als Filter oder Trennlage	58
3.3.3.4. Trennlage	58
3.3.4. Dichtungssysteme	59
3.3.4.1. Weichdichtungen	59
3.3.4.2. Hartdichtungen	61
3.3.5. Boden	61
3.4. Schadenklassifizierung	68
3.4.1. Schaden im Deckwerksbau	68
3.4.1.1. Deckwerke mit Dichtungsfunktion	70
3.4.1.2. Deckwerke ohne Dichtungsfunktion	73
4. Regelbauweisen	78
4.1. Allgemeines	78
4.2. Bauweisen	79
4.2.1. Bauweise D1 mit losen Schüttsteinen	79
4.2.2. Bauweise D2 mit teilvergossenen Schüttsteinen	87
4.2.3. Bauweise D3 mit vollvergossenen Schüttsteine	90

4.2.4. Bauweise D4 Beläge	91
4.2.5. Fußsicherung.....	92
4.3. Auswahl einer Regelbauweise	93
4.3.1. Erfordernisse bei Auswahl einer Deckschicht	94
4.3.2. Erfordernisse bei Auswahl eines Filters bzw. einer Trennlage	94
4.3.3. Erfordernisse bei Auswahl einer Dichtung	94
4.3.4. Höhe des Freibords	96
4.4. Bauausführung.....	96
4.4.1. Planungshinweise bei Vergussarbeiten.....	96
4.4.1.1. Anforderungen an den Vergussstoff bei der Bauausführung.....	97
4.4.1.2. Einbauverfahren.....	99
4.4.2. Planungshinweise beim Einbau von Filtern bzw. Trennlagen.....	101
4.4.2.1. Kornfilterbauweisen	101
4.4.2.2. Geotextilien-Filterbauweisen	104
4.4.3. Planungshinweise beim Einbau von Dichtungssystemen	112
4.4.3.1. Dichtungen aus natürlichen Dichtungsmaterialien.....	112
4.4.3.2. Dichtungen mit Kunststoffen oder Kunststoffmischungen.....	114
5. Technisch – biologische Ufersicherung an Wasserstraßen	117
5.1. Allgemeines	117
5.2. Weidenspreitlage	118
5.3. Pflanzmatten.....	119
5.3. Röhrichtgabionen	119
5.4. Steinmatratzen.....	120
5.5. Faschinenbündeln.....	121
6. Literatur und verwendete Unterlagen.....	123
6.1. Literaturverzeichnis	123
6.2. Bilderverzeichnis	130

6.3. Tabellenverzeichnis	136
--------------------------------	-----

Vorbemerkung

Bereits vor langer Zeit entstand die Idee, die natürlichen Wasserwege miteinander zu verbinden und zu einem großen Verkehrsnetz zusammenzuschließen. Zuzufolge der hydraulischen Ausbaugrundsätze wurde ein System „Wasserlauf-Schiff“ mit eigener Beschaffenheit und Leistungsfähigkeit strukturiert, welches Voraussetzung für die Realisierung für den Schiffsbetrieb mit stabilem Fahrwasser und schiffahrtstechnisch günstigen Strömungsverhältnissen ist.

Damit die Anforderungen an ein europäisches Wasserstraßennetz erfüllt werden können, müssen die Verkehrswasserwege dieses Netzes mindestens den technischen Spezifikationen, die mit der Klassifizierung der europäischen Binnenwasserstraßen verbunden sind, entsprechen. Das Ziel dieser Klassifizierung ist die Förderung einer einheitlichen Technik beim Ausbau. Alle Binnenwasserstraßen - frei fließende und staugeregelte Flüsse und Kanäle - werden unterschiedlichsten natürlichen und schifffahrtsinduzierten hydraulischen Belastungen ausgesetzt, die Auswirkungen auf die Stabilität und den Bestand des gesamten Gewässerbettes haben. Instabilitäten infolge Oberflächenerosion und nicht gewährleistete geotechnische Standsicherheit, die durch Strömungen, Wellen, schnelle Wasserspiegelabsenkungen oder starken Grundwasser-zustrom verursacht werden, stellen vielerorts eine Gefährdung der angrenzenden Infrastruktur dar.

Zu deren Verhinderung sind die Ufer und die Sohle der Wasserstraßen auf weiten Strecken durch geeignete Maßnahmen, wie z.B. Deckwerke, gesichert. Diese Deckwerke dienen als Auskleidungen von Böschungen und Sohle des Binnengewässerbetts zur Begrenzung und Erhaltung des Wasserstraßenprofils bzw. der Fahrrinne. Gleichzeitig können diese Bedeckungen durch das Gewicht der Baukörper den angreifenden Kräften Widerstand leisten. Wegen der Vielzahl von Aufgaben, die sie erfüllen, wie z. B. die Böschung gegen die Kräfte des strömenden Wassers und des Schiffsschraubenstrahles sowie gegen mechanische Beanspruchung durch Schiffe und Eisangriff zu schützen, werden die Deckwerke im Küsten - und Flusswasserbau erfolgreich eingesetzt. Dabei wird zwischen durchlässigen und dichten Deckwerken in Abhängigkeit von den mit der Standsicherheit und der Beständigkeit gegen äußere Belastungen verbundenen Anforderungen unterscheiden. Gleichzeitig bestimmen diese technischen Umstände die Bestandskomponenten der Deckschichten für Böschungs - und Sohlensicherung. Ist die Standfestigkeit der Deckschicht in stark belasteten Bereichen nicht zufrieden stellend, so

kann diese durch Vergussmaterial der Wasserbausteine erhöht werden. Auf der anderen Seite hat der Filter, der in Anwendung gebracht wird, die Aufgabe, den Boden vor Ausspülungen und Umlagerungen infolge von Grund – und Sickerwasserströmungen oder äußerer Belastungen durch Oberflächenwasser zu schützen. Die Dichtungssysteme haben auch eine wichtige Rolle in der Instandhaltung des Gewässerprofils, denn sie vermeiden die Kriecherscheinungen an Böschungen und besitzen eine ausreichende Erosionsstabilität, passen sich bestehenden und im Verlaufe der Baumaßnahme und des Gebrauchszustandes entstehenden Untergrundverformungen gut an und nach der Bildung von Rissen zeigen sie einen gewissen „Selbstheilungseffekt“.

Den Entwürfen des Deckwerkes und der Dichtung liegen mehrere gemeinsame Gesichtspunkte zugrunde: der Schifffahrtsbetrieb, die Spiegelschwankungen im freien Wasser und im Grundwasser, die Baustoffe, Bauweisen und Baubedingungen und schließlich der Landschaftsschutz, deshalb müssen sie ein gewisses Maß von Anpassungsfähigkeit aufweisen.

Denn der Untergrund als gewachsener Boden erfährt im Laufe der Jahre unter der Beanspruchung aus der Wasserstraße und unter dem Einfluss von Tagwasser oder Grundwasser Verformungen, die an starren Konstruktionen zu Schäden führen würden. Die Fähigkeit des Tragwerks und seiner tragenden Teile allen auftretenden mechanischen Kräften oder Zwangsverformungen während der Errichtungs- und Nutzungsdauer zu widerstehen, ist ein Faktor der Betriebssicherheit, den planmäßigen Bestand entsprechend festgelegter Bedingungen zu ermöglichen. Bei fehlender Tragfähigkeit kommt es zum Einsturz oder zu anderen Formen des Tragwerks – bzw. Bauteilversagens, d.h. die Anlage kann nicht entsprechend ihrer Funktion verwendet werden. Zur Feststellung von Schäden an den Deckwerken werden die Methoden wie z.B. visuelle Begutachtung oberhalb des Wasserspiegels vom Land aus, im Wasserwechselbereich bei Schiffvorbeifahren, im Unterwasserbereich durch Taucher angewendet.

1. Einleitung

Zu den wichtigsten Zielen des Wasserbaus zählen seit jeher einerseits der Schutz gegen die zerstörende Gewalt des Wassers, im Binnenland mit Hilfe von Flussregelungen und Hochwasserdämmen und an der Küste durch Deiche und Sperrwerke, und andererseits das Dienstbarmachen der nützlichen Eigenschaften des Wassers für Bewässerungsanlagen, Kraftwerke und Schifffahrtswege. Mit letzteren befasst sich der Verkehrswasserbau, welcher die Binnenwasserstraßen und die Seewasserstraßen umfasst. [1]

Von altersher werden die Wasserstraßen zur Beförderung von Personen und Gütern genutzt, geschichtlich haben sie sich als Verkehrswasserstraßen entwickelt. Ihre Umgestaltung erfolgte laufend nach den wachsenden Anforderungen. Nicht immer sind die getroffenen Maßnahmen zum Ausbau der Wasserstraßen entsprechend den weiter fortgeschrittenen Verkehrsbedürfnissen auf längere Sicht zweckmäßig gewesen. Häufig haben der Mangel an berücksichtigender Planung und vorausschauender Ausführung und die nicht bedachten oder falsch bewerteten Folgen später zu erheblichen anderweitigen Schäden geführt. Trotz der Anwendung der neuesten Erkenntnisse können immer Fehler auftreten, da nicht alle Faktoren erkennbar und erfassbar sind. Daher ist es nötig laufend Beobachtungen durchzuführen, um, falls erforderlich, nach Erkennen der Ursachen rechtzeitig eingreifen zu können. [2]

Die Planung und Ausführung von Wasserstraßen soll nach den neuesten technischen Erkenntnissen erfolgen und auf die voraussichtlichen Entwicklungen in den kommenden Jahrzehnten Rücksicht nehmen. Der Ausbau der natürlichen und künstlichen Wasserstraßen sollte dabei nicht nur aus dem Blickwinkel des Verkehrs, sondern auch unter Berücksichtigung von wasserwirtschaftlichen, landeskulturellen, flussbaulichen, ökologischen und teilweise auch energiewirtschaftlichen Aspekten erfolgen. Auch ist zu beachten, dass die Wasserstraßen große Wasserbecken darstellen, die mannigfaltige Auswirkungen auf den gesamten Wasserhaushalt ausüben. Schließlich sind gemäß den erheblichen Fortschritten die Einzelbauwerke mit den neuentwickelten Bauverfahren, den neuesten Baukonstruktionen und Baumethoden nach Feststellung der wirklich maßgebenden Faktoren, wie der Kräfte, ihrer Größe und ihres Angriffes, mit ausreichender Sicherheit zu errichten. [2]

Der Betrieb und die Unterhaltung der Wasserstraßen als Teil der Infrastruktur des Landes sind in der Regel Sache des Staates, während die Bereitstellung der Verkehrsmittel und die Nutzung des Verkehrsweges oft der freien Wirtschaft vorbehalten sind.[3]

Die Leistungsfähigkeit dieses Verkehrszweiges beruht auf modernen Einheiten mit qualifiziertem Personal, auf einer guten Organisation des Transportablaufes und auf einer leistungsfähigen Wasserstraße mit optimalen Fahrbedingungen. Im Interesse eines technischen und wirtschaftlichen Optimums des Verkehrssystems Binnenschiff –Wasserstraße muss der Verkehrswasserbauer Schiff und Betrieb kennen und engen Kontakt mit der Schifffahrt halten.[4]

Das Streben nach Sicherung des Schifffahrtsbetriebes und die technische Vervollkommnung der Anlagen haben zu berücksichtigen, dass trotz der modernen Steuerungstechnik die Hauptursache von Unfällen in der Schifffahrt menschliches Versagen ist, meistens aufgrund einer Fehleinschätzung der objektiven Gegebenheiten und der subjektiven Fähigkeiten.

Die Wasserstraße soll deshalb unkompliziert, übersichtlich und leicht erfassbar sein, vor allem an den Unstetigkeitsstellen wie den Einfahrten und Ausfahrten, den Abzweigungen, aber auch auf der freien Strecke hinsichtlich der Begrenzung des Fahrwassers. Der Ausbau von Flüssen zu Wasserstraßen und in höherem Maße der Bau von Kanälen stellen Eingriffe in die Landschaft dar, welche sie in ihrem ökologischen Aufbau verändern und schädigen können. Andererseits hat die Erfahrung auch gelehrt, dass durch den Bau der Wasserstraße die Gelegenheit geboten wird, eine Landschaft zu sanieren, die durch unkontrollierten Kiesabbau, durch bauliche Fehlentwicklungen im Ufervorland oder durch die Auswirkungen einer Sohleneintiefung mit Einbußen der Tierwelt und Pflanzenwelt Schaden erlitten hat. Zum meist schon gesetzlich festgelegten Bestandteil der Wasserstraßenplanung gehört daher eine Umweltverträglichkeitsprüfung, in welcher ergänzend zu dem rein technischen Bereich den Belangen der Ökologie Rechnung getragen werden muss. [5]

Das Thema der Diplomarbeit, welche in Form einer Literaturrecherche im Bereich Wasserbau durchgeführt wird, ist „Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs –und Sohlensicherung an Binnenwasserstraßen“. Neben einer Gesamtdarstellung der geschichtlichen Entwicklung der schiffbaren Wasserstraßen, unter besonderer Berücksichtigung der bestehenden Binnenwasserstraßennetzen in Europa, werden Fragen, der

hydraulischen Gewässerbelastung, (natürliche und schiffsinduzierte Belastungen) und deren mögliche Auswirkungen auf die Böschung und Flusssohle behandelt. Diese hydraulischen Einwirkungen sind die Ursache für notwendige Sicherungen des Gewässerbettes mit so genannten Deckwerken.

Auf Basis des oben beschriebenen Sachverhalts werden die Deckwerksbauweisen im Detail dargestellt (Arten und Komponenten von Deckwerken, Klassifikation möglicher Schäden, Regelbauweisen etc.)

2. Binnenwasserstraßen

Unter Binnenwasserstraßen versteht man die von Natur aus schiffbaren Flüsse und Seen, sowie die durch Regelung schiffbar gemachten Flüsse, und die künstlichen Wasserstraßen, die sogenannten Kanäle.

2.1. Geschichtliche Entwicklung der Binnenwasserstraßen

Die Geschichte der Wasserstraßen begann lange vor Christi Geburt. Pharao Necho II (610-595 vor Christus) begann in Ägypten mit den Arbeiten an einer Kanalverbindung zwischen dem Mittelmeer und dem Roten Meer, die allerdings erst um 280 vor Christus unter der Führung von Ptolemaios II fertiggestellt wurde. [7] In Gallien entstand vermutlich um 12 vor Christus die "Fossa Drusiana", ein Kanal, der den Rhein mit dem Oberlauf der IJssel verband. Unter dem Befehlshaber Gnaeus Domitius Corbulo wurde ab dem Jahr 47 nach Christus die "Fossa Corbulonis" erbaut, ein künstlicher Wasserweg, der den Rhein bei Matilo mit der Maas verband. Dieser Kanal war 34,5 km lang. Seine Breite variierte zwischen 12 und 14 Metern, die Wassertiefe betrug zwei Meter. Der größte antike Kanal des Nahen Ostens war der "Nahrawan-Kanal" entlang des Tigris in der Nähe von Ktesiphon. Er stammte aus dem 3. Jahrhundert, war 400 km lang und 122 m breit. 793 nach Christus gelang es Karl dem Großen, eine Verbindung zwischen Rhein und Donau zu schaffen. "Fossa Carolina", die aber keinen längerfristigen Bestand hatte. [7]

In China war der wahrscheinlich aus dem 6. Jahrhundert vor Christus stammende "Hong-Gou-Kanal" die erste künstliche Wasserstraße. Eine bekanntere technische Leistung war jedoch der magische "Kanal Ling Qu" aus der Zeit Qin Shihuangdis um 219 vor Christus, der zwei entgegengesetzt fließende Flüsse-Li und Xiang-bändigte und miteinander verband. Er war der erste Kanal, der in unebenem Gelände entlang von Höhenlinien geführt wurde. Der chinesische Kaiserkanal aus dem 7. Jahrhundert ist über 1700 km lang, oft 30 m breit, Höhenunterschied ca. 42 m. Einzelne Teile des Kanals entstanden schon vor mehr als 2.400 Jahren. Es gibt auch Daten, dass in Indien Nandivardhana "Śiśunāga-Dynastie" im 5. Jahrhundert vor Christus einen künstlichen Wassertransportweg errichtete. [7]

Im Mittelalter dienten die Flüsse für Transporte als einzige Alternative zum Landweg. Gleichzeitig waren sie aber auch die Ursache für katastrophale Gefährdungen und Überschwemmungen, [8] denn die Hauptströmung änderte ihren Verlauf häufig, folglich veränderten die unbefestigten Ufer ihre Gestalt. Der Strom begann zu mäandrieren und

der Fluss suchte ein neues Bett, wodurch sich laufend zahlreiche Altarme bildeten. [8]
Wegen der problematischen Wasserverhältnisse bei naturbelassenen Flüssen wurde ab dem 8. Jahrhundert versucht, die Flüsse durch Bauwerke schiffbar zu halten. [7]

Seit dem späten Mittelalter wurden Baumaßnahmen wie Regulierung des Stroms, Bau von Schutzdeichen, Krippen und Buhnen in Gang gesetzt, um die Fahrrinne zu stabilisieren und den Fluss eine bestimmte Strömungsrichtung zu geben. [8]

Bis zum Ersten Weltkrieg wurde die Abflussgeschwindigkeit erhöht und eine Mindesttiefe für die Schifffahrt geschaffen. Wegen der wenigen ausgebauten Wege hatten die entstandenen Kanäle eine hohe verkehrstechnische Bedeutung. [8]

Ferner dienten sie der Verkehrsnetzentwicklung. Der große Zeitabschnitt vom 8. bis zum 19. Jahrhundert, ist jene Periode, in welcher Mensch und Tier als natürliche Kraft für die Bewegung der Schiffe gegen den Strom eingesetzt worden. [7]

Eine der wichtigsten Bedingungen für Handel und Verkehr bis zur Mitte des 19. Jahrhunderts waren daher ausgebaute Treidel – oder Treppelwege, geeignete Transportmittel, eine gut funktionierende Schifffahrtorganisation bis zum Aufkommen der Dampfschiffe. [8]

Schwere Lasten wie Steine und Getreide wurden hauptsächlich auf Schiffen transportieren. Gesteuert wurde das Schiff durch ein großes schweres Senkruder, das am Heck an der Steuerbordseite angebracht war. Ließ man das Schiff in der Strömung treiben, so konnte es mit einem Bugsteuer, das vorne am Bug herausragte und von mehreren Knechten bedient werden musste, in der Strömung gehalten werden. Ein Nachteil war die geringe Ladekapazität der Schiffe. Zur Lösung dieses Problems wurden häufig Einwegschiiffe eingesetzt. Das Holz dieser Schiffe wurde an dem Endpunkt der Fahrt weiterverwendet. [7] Mit dem Aufblühen der Städte im Mittelalter bildeten die Flüsse die frequentesten Verkehrs – und Handelsstraßen, das gab wiederum im 15. Jahrhundert den Anstoß für die großen Kanalbauten Mitteleuropas. [8]

In Frankreich wurde unter Ludwig XIV und Jean-Baptiste Colbert der „Canal du Midi“ gebaut. Später setzte sich Napoleon I für einen großzügigen Kanalbau „Canal de Saint-Quentin“ ein. In der Zeit der Besetzung Deutschlands begann Napoleon mit dem Bau des Nordkanals und konzentrierte sich auch auf den „Canal de la Seine a la Baltique“, der den Rhein mit der Ostsee bei Lübeck verbinden sollte. In Belgien und den Niederlanden be-

gannen größere Kanalbauten ebenfalls im 15. Jahrhundert, während Russland und Deutschland erst ab 1700 die Anlage großer künstlicher Wasserstraßen durchführte. Etwa zur gleichen Zeit begann der erste bedeutendere Kanalbau in Großbritannien „Sankey-Book-Kanal“-1720. [8]

Im Zeitraum von 1700 bis 1850 erfolgte eine Systematisierung des Flussausbaus. Mit dem Ausbau und Neubau der Wasserstraßen änderten sich auch die Standortbedingungen für die Industrieproduktion. Es entstanden größere Manufakturen und Fabriken, welche eine rationellere Fertigung ermöglichten. [7]

-1663 bis 1693 wurde der Friedrich-Wilhelm-Kanal von Neuhaus an der Spree bis zur Oder bei Frankfurt gebaut. Dadurch entstand die erste künstliche Verbindung zweier großer Stromsysteme (von Oder und Elbe) in Europa.

-1743 wurde mit dem Bau des Plauer Kanals begonnen, der nach dem Ersten Weltkrieg zum Elbe-Havel-Kanal ausgebaut wurde.

-1773 bis 1774 wurde der Bromberger Kanal errichtet.

-1817 begann unter Leitung von Johann Gottfried Tulla die Rheinbegradigung, diese wurde im Jahr 1876 zunächst beendet. [7]

Eine grundlegende Wandlung ergab sich erst mit Erfindung der Dampfmaschine im 19. Jahrhundert, sowie des Dieselmotors im 20. Jahrhundert. In Jahre 1807 erfolgten die ersten planmäßigen Fahrten mit Dampfschiffen. 1823 befuhr das erste Dampfschiff den Rhein. [7]

Allmählich wurde Europa eine riesige Baustelle im Bereich der Binnenwasserstraßen. Im späten 19. und frühen 20. Jahrhundert begann der Bau der künstlichen Wasserstraßen. Im Jahre 1784 wurde der Bau des Rhein-Rhone-Kanals begonnen. Erst 1833 konnte der Kanal in Dienst gestellt werden. [9]

Zwischen 1960-1992 entstand durch die Fertigstellung des „Main-Donau-Kanals“, auch Europakanal genannt, eine durchgehende Großschiffahrtsstraße zwischen der Nordsee und dem Schwarzen Meer, die über Rhein, Main und Donau verläuft. [10] Die 32-jährige Bauzeit des „Rhein-Elbe-Kanals“, auch Mittellandkanal genannt, begann 1906. [11]

Andere wichtige Binnenwasserstraßenkorridore Europas entstanden auf dem Gebiet von Russland und Kasachstan. Von 1925 bis 1961 ermöglichte der „Wolga-Don-Kanal“ den Schiffsverkehr zwischen dem Kaspischen Meer und dem Schwarzen Meer.

Peter der Große hatte an eine Verbindung zwischen Wolga und Moskwa gedacht. -1844 wurden die Bauarbeiten begonnen und 1931 abgeschlossen.

Im 18.Jahrhundert wurde mit dem Bau eines Wolga-Ostsee-Kanalsystems unter Peter I begonnen. Der „Weißes Meer-Ostsee-Kanal“ wurde vom 16. Oktober 1931 bis zum 30. August 1933 auf Anweisung Stalins erbaut. [12]

Die bezeichneten Wasserwege stellen den Grund eines europäischen Binnenwasserstraßennetzes dar, welches im nächsten Kapitel dargestellt wird.

2.2. Europäisches Binnenwasserstraßennetz

Auf Basis der natürlichen Wasserstraßen entstand ein europaweites Binnenwasserstraßennetz, das als ein ausgedehntes und hervorragendes Wasserstraßensystem ausgebaut wurde, um die Binnenschifffahrt als gefahrlosen Verkehrsträger zu etablieren. Damit die erwähnten Anforderungen erfüllt werden können, müssen die Verkehrswasserwege dieses Netzes mindestens den technischen Spezifikationen, die mit der Klassifizierung der europäischen Binnenwasserstraßen verbunden sind, entsprechen. Das Ziel dieser Klassifizierung ist die Förderung einer einheitlichen Technik beim Ausbau. Dabei sind die räumlichen Grundabmessungen und Tonnagen abgestimmter Schiffstypen und auch die Brückendurchfahrtshöhen zu beachten. [13]

2.2.1. Rhein-Rhone-Kanal, Main-Donau-Kanal, Mittellandkanal



Bild. 2.2.1 Rhein-Rhone-Kanal, Main-Donau-Kanal, Mittellandkanal [16]

Das Rheinstromgebiet setzt sich aus frei fließenden, teils geregelten Flussläufen und den künstlich angelegten Kanalstrecken wie Rhein-Rhone, Rhein-Main-Donau, Rhein-Elbe, die ein hinreichend dichtes Infrastrukturnetz bilden zusammen. Eine sehr wichtige Streckenführung stellt der französische Rhein-Rhone-Schiffahrtskanal dar. [14]

Der Kanal ist nicht nur Verbindung zwischen den Tälern der Flüsse Saone und Rhein über die Wasserscheide der Burgundischen Pforte, sondern auch Teil eines quer durch Europa führenden Binnenwasserweges, der die Küsten des Mittelmeeres und der Nordsee verbindet. Diese Strecke mit einer Gesamtlänge von 237 km in der Richtung zum Rhein überwindet einen Höhenunterschied von insgesamt rund 280 Metern, davon liegen 170 Meter auf der Seite des Saone-Tals und 110 Meter auf der Seite des Rhein, die gesamt 132 Schleusen benötigen. [14]

Von der Rheinmündung in die Nordsee bis zur Donaumündung in das Schwarze Meer reicht die Rhein-Main-Donau-Großschiffahrtsstraße, die zu den fünf wichtigsten Wasserstraßenprojekten von europaweiter Bedeutung gehört. [16]

Dieser 3,500 km lange Verkehrsweg, mit einer Kanalstrecke mit 100 Schleusen, gliedert sich in vier Wasserstraßenabschnitte: Rheinstrecke von Rotterdam bis zur Einmündung des Mains bei Mainz, Mainstrecke von Mainz bis Bamberg, Kanalstrecke von Bamberg bis Kelheim und Donaustrecke von Kelheim bis zur Donaumündung in das Schwarze Meer und verbindet 14 europäische Staaten.[17]

Dagegen ist der Rhein-Elbe-Kanal, der auch als Mittellandkanal bezeichnet wird, die längste künstliche und gleichzeitig die wichtigste Ost-West -Verbindung in europäischer Dimension. Trotz der großen Länge von 324,4 km kommt der Kanal mit nur zwei Schleusen, die Zeitverluste für die Schifffahrt bedeuten, aus. Seine Funktion als zentrales Wasserstraßensystem wird darauf gegründet, dass er den Rhein durch den Rhein-Herne-Kanal und den Dortmund-Ems-Kanal mit der Ems, der Weser, der Elbe und weiter über brandenburgische Flüsse und Seen bis hin zur Oder verbindet. [19]

2.2.2. Donau-Oder-Elbe-Kanal

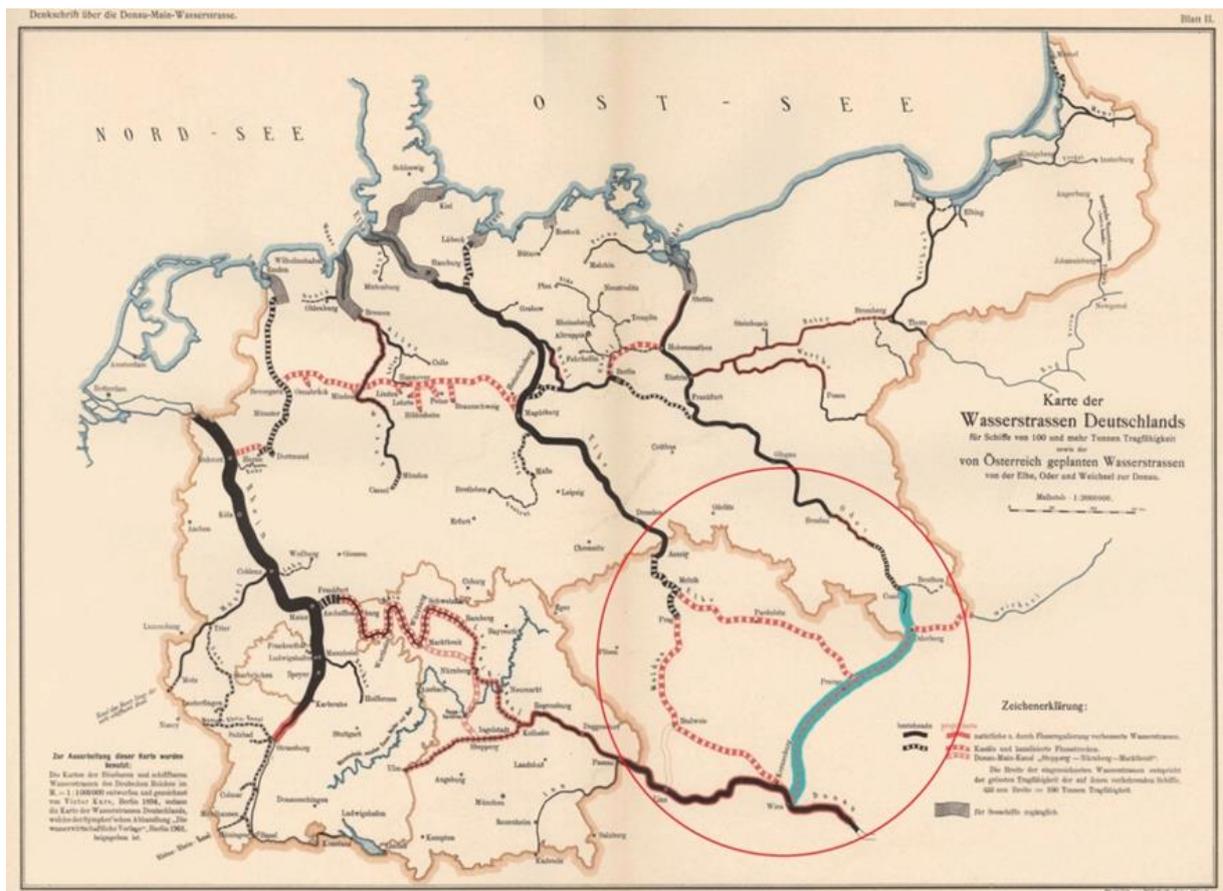


Bild. 2.2.2. Donau-Oder-Elbe-Kanal [21]

Der Wasserkorridor Donau-Oder-Elbe (Bild. 2.2.2) wird als unverwirklichter Traum im System der europäischen Wasserwege bezeichnet.

Schon vor Jahrhunderten entstand die Idee zum Ausbau einer schiffbaren Kanalverbindung zwischen den Flüssen Donau und Oder. Das multifunktionale Projekt, das später um eine Anbindung an die Elbe erweitert wurde, war von grundlegender Bedeutung für die europäische Wasserwirtschaft. Trotzdem wurde die künstliche Wasserstraße im Mittel-Osteuropa nicht vollendet. Nur wenige Kilometer von der Strecke wurden auf der polnischen und österreichischen Seite realisiert. Die Donau-Oder-Verbindung könnte relativ kostengünstig hergestellt werden (heutiges Badegewässer Donau-Oder-Kanal), da die Höhen-differenz zwischen Donau- und Oderseite nur 125m beträgt. Dagegen müsste im Fall der Elbe ein Höhenunterschied von 250m überbrückt werden, was zu einem sehr großen technischen Aufwand führen würde. [22]

2.2.3. Schifffahrtskanäle in Russland und Kasachstan

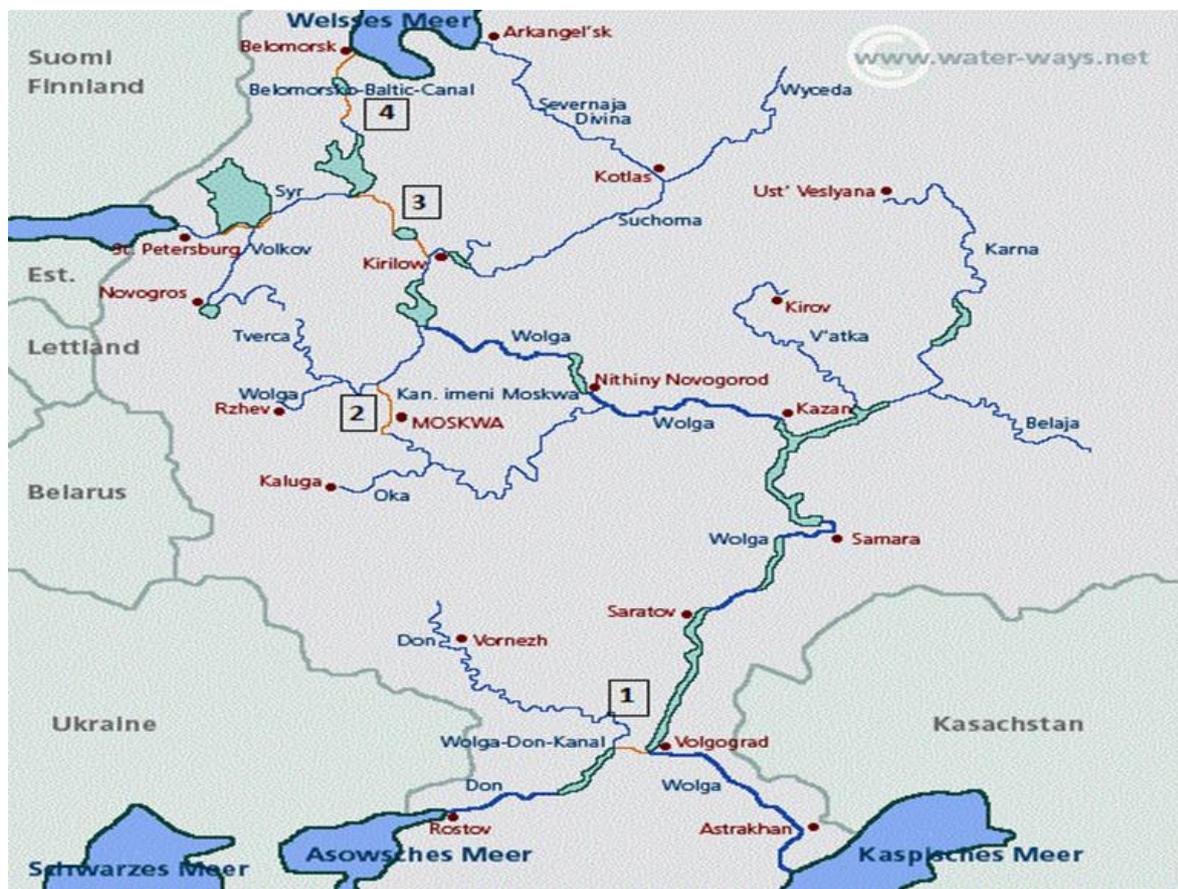


Bild 2.2.3. 1-Wolga-Don-Kanal, 2-Wolga-Moskwa-Kanal, 3-Wolga-Ostsee-Kanal, 4 -WeißesMeer-Ostsee-Kanal [22]

Der Binnenschifffahrtsweg vom Kaspischen Meer zur Ostsee und zum Weißen Meer setzt sich aus den folgenden Kanalverbindungen auf dem Gebiet der Länder Russland

und Kasachstan zusammen: (Bild.2.2.3) Wolga-Don-Kanal, Wolga-Moskwa-Kanal, Wolga-Ostsee-Kanal und auch Weißes Meer-Ostsee-Kanal. [24]

Der 101km lange Wolga-Don-Kanal ist eine Wasserstraße im Südwesten von Russland. Mit Hilfe der 13 Schleusen wird eine Höhe von 88 m an der Wolga-Seite und von 44 m an der Don-Seite überwunden. [26] Der künstliche Wasserweg in West-Ost-Richtung von der Ostspitze des Zimljansker Stausees verbindet nicht nur die Unterläufe der Wolga und des Don miteinander, sondern ermöglicht dadurch auch den Schiffsverkehr zwischen dem Kaspischen Meer und dem Schwarzen Meer. Der Wolga-Moskwa-Kanal beginnt nördlich von Moskau an der Wolga in der Nähe der Stadt Dubna und führt über 8 Schleusen in den Fluss Moskwa, der danach die Stadt Moskau durchquert und zugleich 120 kmsüdlich der russischen Hauptstadt in die Oka mündet. Die Gesamtlänge der Kanalstrecke beträgt 128 Kilometer. [27]

Auf seinen ersten 74 km verläuft der Moskwa-Kanal über den nördlichen Hang des Klein-Dimitrow-Höhenzugs, dabei müssen 38 Höhenmeter mit Hilfe von sechs Schleusen überwunden werden. In seinem weiteren Verlauf liegt eine Reihe von Stauseen, mit einer Gesamtlänge von 19,5 km. Der schiffbare Teil des Kanals endet im nördlichen Binnenhafen von Moskau. Anschließend reicht er auf einer Länge von drei Kilometern die Moskwaabstrom, wo sich zwei weitere Schleusen befinden.

Im Nordwesten Russlands befindet sich der Wolga-Ostsee-Kanal, auch Wolga-Baltik-Kanal genannt, der die Wolga mit der Newa verbindet. Dieser Wasserweg mit einer Länge von knapp 1000km beginnt an der Mündung der Newa in die Ostsee, bei Sankt Petersburg, wo die großen Schiffseinheiten den Weg durch den größten See Europas – den Ladogasee nehmen. Die letzte Verbindung vom Wolga-Ostsee-Kanal stellt der Fluss Sheksna her, der in den Rybinsker Stausee mündet und parallel dazu den Anschluss an die Wolga hat. Die letzte Kanalverbindung des Binnenschiffsfahrtsweges vom Kaspischen Meer zur Ostsee und zum Weißen Meer, mit Länge von 227 km wird als Weißes Meer-Ostsee-Kanal bezeichnet. Diese Wasserstreckenführung verbindet das Weiße Meer bei Belomorsk mit dem Onega-See, auf diesem gelangt man über den Swir zum Ladogasee und von da über die Neva nach Sankt Petersburg, und damit an die Ostsee. [29]

2.3. Grundlegendes über Binnenwasserstraßen

Die Flüsse wurden bereits im Mittelalter für Warentransport genutzt, daher entstand die Idee, die Wasserwege in den Laufrichtungen miteinander zu verbinden und so zu einem

großen Verkehrsnetz zusammenzuschließen. Auf Basis der hydraulischen Ausbaugrundsätze wurde ein System „Wasserlauf-Schiff“ mit eigener Beschaffenheit und Leistungsfähigkeit strukturiert, das eine Voraussetzung für die Realisierung des Schifffahrtsbetriebes auf Basis der naturgegebenen Wasserführung ist. Daraus wird die Schlussfolgerung gezogen, dass ein Fluss schiffbar ist, wenn er ein stabiles Fahrwasser mit schifffahrtstechnisch günstigen Strömungsverhältnissen bietet. Für dieses Ziel ist es erforderlich, die Ausgangsgrößen aus den natürlichen Gegebenheiten und verschiedenen Charakteristiken der einzelnen Wasserläufe bei der Planung des Flussausbaues zu berücksichtigen und daraus folgend die notwendigen technischen Grundvoraussetzungen für eine Schiffbarmachung zu schaffen. [31]

Die Hauptaufgaben bei der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung sind die Sicherung des Verkehrsweges und die Leichtigkeit des Schifffahrtsverkehrs. Zu ihren Aufgaben gehören die Instandhaltung des Gewässerbettes und der Anlagen, die Regulierung des Schifffahrtsverkehrs und Maßnahmen zur Gefahrenabwehr, Hochwasserschutz, Eisbekämpfung, Beobachtung des Gewässerzustandes und hydrologische Messungen und auch Gewährleistung von Kommunikationseinrichtungen an den Wasserstraßen. In diesem Sinn stellt die Binnenschifffahrt ein System dar, in dem die einzelnen Elemente wie die Wasserstraße, die Schiffe und deren Ladung und die Häfen als Knotenpunkte für die Verknüpfung mit den Verkehrsträgern Straße und Schiene in starker Wechselwirkung miteinander stehen. Aus diesem Grunde wird bei der Wasserstraßenplanung großes Augenmerk auf das Verhalten des Schiffes während der Fahrt und auf seine Einwirkung auf die Wasserstraße und ihre Bauwerke gerichtet. Die Erfahrungen zeigen, dass Schäden im Bereich von Gewässersohle und Böschungen oft als Resultat der hydraulischen Wellen- und Strömungsbelastungen infolge der Schifffahrt entstanden sind. Ihre Beseitigung führt zu dem Ausbau der Deckwerke und der Anwendung von Regelbauweisen zur Sicherung und Unterhaltung der Trasse der Binnenwasserstraßen, die im Kapitel 3 dargestellt werden. Sie sind die Grundlage für eine fachgerechte Struktur, damit die Wasserstraße ihrer Funktion als ein sicherer und leistungsfähiger Transportweg gerecht wird und so ausgerüstet ist, dass sie den mit der Schifffahrt verbundenen Wechselkräften standhalten kann. [33]; [34]

2.4. Übersicht der hydraulischen Gewässerbelastungen

Das Gewässerbett der Wasserstraßen wird durch seinen Gewässer – oder Kanalquerschnitt charakterisiert. Es gibt zwei hauptsächlich anzutreffende Standard-Kanal-profile: Trapezprofil (T-Profil) und Rechteck-Trapezprofil (RT-Profil).[40] Die wesentliche Geometrie der beiden Profile ist in Tabelle 2.4.1 zusammengestellt.

Profil	Wasserspiegelbreite	Wassertiefe	Böschungsneigung	
	$b(ws)$		1:m	
	[m]	[m]	1.Ufer	2.Ufer
T	55	4	1;3	1;3
RT	48,5	4	1;3	∞

Tabelle 2.4.1. Geometrie der zu Grunde liegenden Standard-Kanalprofile als Angabe für künstliche deutsche Binnenwasserstraßen. Für die Deckwerksbemessung wird das 1. Ufer betrachtet. [40]

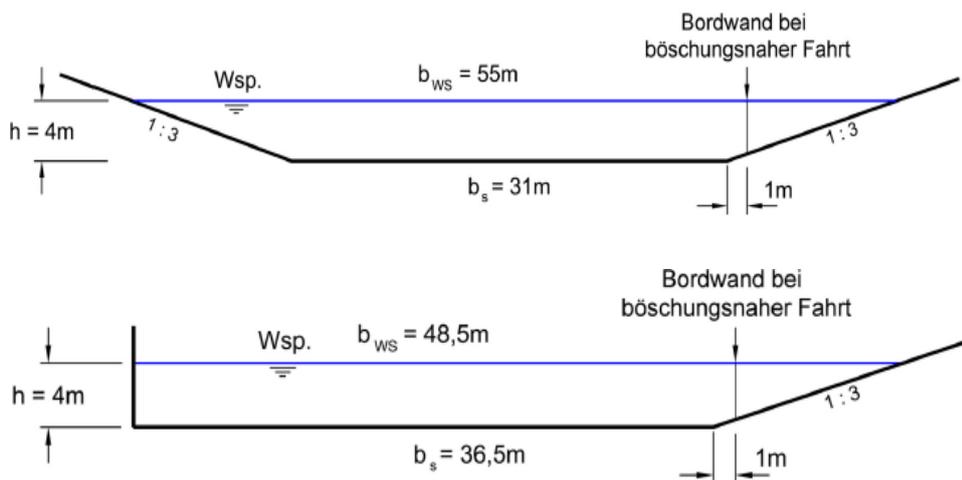


Bild 2.4.1. Die Standard – Kanalprofile für deutsche Binnenwasserstraßen mit ihren geometrischen Parameters entsprechend Trapezprofil (T – Profil) und Rechtecktrapezprofil (RT – Profil) [40]

Alle Binnenwasserstraßen – frei fließende und staugeregelte Flüsse und Kanäle – werden unterschiedlichsten natürlichen und schiffahrtsinduzierten hydraulischen Belastungen ausgesetzt, welche Auswirkungen auf die Stabilität und den Bestand des gesamten Gewässerbettes haben. [35]

Instabilitäten infolge Oberflächenerosion und nicht gewährleisteter geotechnischer Standsicherheit, die durch Strömungen, Wellen, schnellen Wasserspiegelabsenk oder starken Grundwasserzustrom initiiert werden, stellen vielerorts eine Gefährdung der angrenzenden Infrastruktur dar. [36]

Zu deren Verhinderung sind die Wasserstraßen auf weiten Strecken durch geeignete Maßnahmen zu sichern, wie erforderliche Deckwerke an Sohle und auf Uferböschungen. (s. Kapitel 3)

2.4.1. Natürliche Belastungen

In Gewässern sind die Ufer ständig oder temporär natürlichen hydraulischen Belastungen ausgesetzt. In frei fließenden Gewässern sind zwei Komponenten von großer Bedeutung:

- Grundströmung: Sie bestimmt bis zum bordvollen Abfluss das Fließgeschehen. Unstetigkeiten der Gewässertopografie führen zu Sekundärströmungen und dem Bestreben, Mäander auszubilden. Die Prallufer sind ständig einem direkten Angriff ausgesetzt.
- Hochwasser: Hierbei treten im Hauptgerinne vorübergehend große erosive Fließgeschwindigkeiten auf. (Bild 2.4.2) [41]



Bild 2.4.2. Starke Ufererosionen am Neckar bei Mannheim [41]

Bei staugeregelten Gewässern und Kanälen kann Wind eine Rolle spielen:

- Windwellen: Auf Stauhaltungen mit großer Gewässerfläche und Kanälen mit langer gerader Erstreckung kann lang andauernder Wind zu Wellen führen, die die Ufer angreifen.

In allen Fällen können zwei weitere Effekte hinzukommen:

- Regen: Besonders Starkregen bewirken auf der Böschung eine starke Oberflächenerosion.

- Grundwasser: Liegt der Grundwasserspiegel in der Böschung über dem Ruhewasserspiegel des Gewässers nach dem Ablauf eines Hochwassers, so erfolgt ein Grundwasserzustrom zum Gewässer. Dadurch entsteht ein höherer hydrostatischer Wasserdruck, welcher im Böschungsuntergrund eine Strömungskraft in Richtung auf das Gewässer bewirkt. Wenn die Strömungen und die Wellen die Bildung von Erosion und Kolken an der Sohle und den Ufern verursachen, führt der starke Grundwasserzustrom zu Rutschungen und Auflockerungen des Bodens, die durch die Anwendung Stärkungsmethoden verhindert werden müssen. Anderfalls können schädliche Auswirkungen der hydraulischen Belastungen im Uferbereich Oberflächenerosion und eine Gefährdung der Standsicherheit der Uferböschung sein. [36]

2.4.2. Schifffahrtsbedingte Belastungen

Bei der Betrachtung der Belastungen infolge Schifffahrt ist zu unterscheiden zwischen einem in der Wasserstraße mit etwa gleicher Geschwindigkeit fahrenden Schiff (Normalfahrt) und dem in Vorhafen, Liegestellen anfahren oder abbremsenden, d. h. manövrierenden Schiff (Manövrierfahrt). In beiden Fällen sind unterschiedliche hydraulische Einwirkungen für die Bemessung einer Ufer – und Sohlensicherung relevant. Die Fahrt eines Binnenschiffs in der Wasserstraße ist eine Verdrängungsfahrt im seitlich- und tiefenbegrenzten Fahrwasser, die durch die hydraulische Wechselwirkung zwischen Schiff und Wasserstraße lokale und temporäre Veränderungen sowohl der Wasseroberfläche als auch der Strömungen um das Schiff herum bewirkt. Die für die Ufersicherungen relevante hydraulische Einwirkung entsteht bei der Durchfahrt eines Schiffs durch einen in der Tiefe und Breite beschränkten Wasserquerschnitt (siehe Bild 2.4.3). [42]

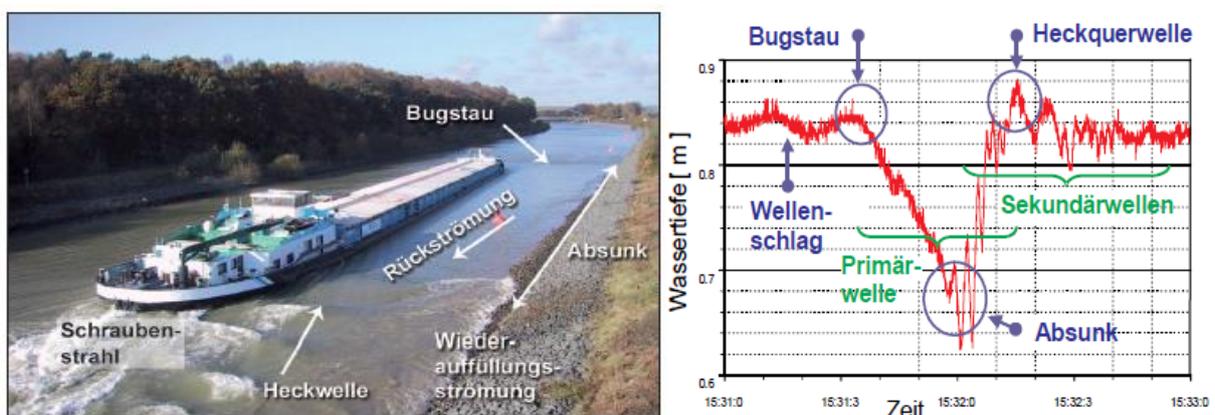


Bild 2.4.3. Schiffsinduzierte Einwirkungen auf das Ufer während einer Schifffahrt [42]

Hierbei muss das vom Schiff verdrängte Wasser vom Bug in Richtung Heck fließen (Rückströmung). Dadurch entsteht das Primärwellenfeld mit dem Absenk neben dem Schiff, der kurz vor dem Schiffsheck durch die Heckquerwelle wieder aufgefüllt wird. Die Heckquerwelle kann sehr energiereich mit hohen Strömungsgeschwindigkeiten in der Größenordnung der Schiffsgeschwindigkeit sein. Zusätzlich entsteht ein Sekundärwellenfeld mit einer Folge von kurzwelligen, relativ energiearmen kleineren Wellen, die jedoch nur untergeordnet relevant für die Ufersicherung mit technischen Maßnahmen ist. [36];[42] Bei der dargestellten Fahrsituation treten besondere Wasserspiegelverformungen auf, die durch stark turbulente Strömungen und fortschreitende Welle bedingt werden. [38]

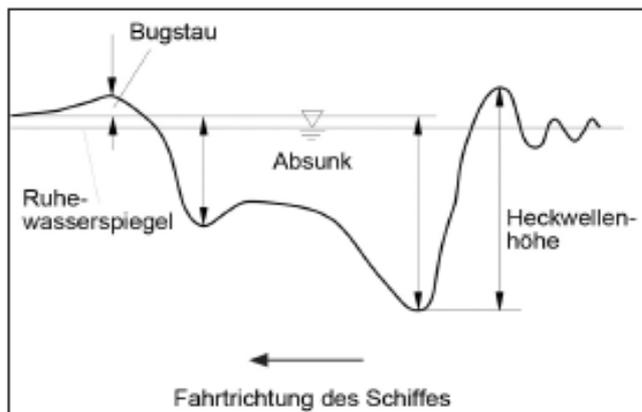


Bild 2.4.4. Schematische Darstellung der zeitlichen Wasserspiegelveränderung am Ufer [42]

Die durch die Schifffahrt erzeugten Lasten können aufgeteilt werden in Propellerstrahl oder Schraubenstrahl aus dem Hauptantrieb am Heck, Rückströmung und daraus resultierende Wasserspiegelabsenkung neben dem Schiff, Bugschräg- und Heckquerwellen mit Wiederauffüllungsströmung auf Höhe des Schiffshecks und Primär – und Sekundärwellensysteme. [35];[38]

Die Rückströmung entgegen der Fahrtrichtung wird durch die Verdrängungswirkung des Schiffes verursacht. Diese greift vor allem entlang der Böschung unter dem Ruhewasserspiegel an, wo sie Sohlschubspannungen hervorruft, die bei der Erosionssicherheit des entstehenden Bodenmaterials und des Uferdeckwerks eine Rolle spielen. Der Propellerstrahl vom Hauptantrieb und der Bugruderstrahl am Ufer führen zusätzlich zu temporären Schubspannungen und dadurch Kolk in der Sohle bilden.

Diese turbulenten Strömungen, die nach Korngröße des vorhandenen Materials im Gewässerbett Böschungsoberflächenerosion erzeugen, sind von wesentlicher Bedeutung für die Dimensionierung von Deckwerken an Binnenwasserstraßen.[39]; [35]

Im Heckbereich von Schiffen kann eine uferparallel mitlaufende Welle (Heckwelle) vom Primär – und Sekundärwellensystem überlagert werden. Wenn die Heckquerwellen brechen, erhalten sie eine Sonderform, welche Rollbrecher genannt wird. Der Rollbrecher wird von achtern wieder aufgefüllt und bildet die Wiederauffüllungs-strömung, die aufgrund lokal große Geschwindigkeiten Umlagerungen von Steinen zur Folge hat. [36]

Als Folge der Wechselwirkung zwischen Schiff und Wasserstraße entsteht eine mit dem Schiff fortschreitende Welle(Primärwelle), die aus der Verdrängungs-strömung um den Schiffskörper resultiert. Zu dem Primärwellensystem gehört der Wasserspiegelabsenk, dessen Fortschrittsgeschwindigkeit der Schiffsgeschwindigkeit entspricht.Bei Vorbeifahrt eines Schiffes erfolgt der Wasserspiegelabsenk, der je nach Durchlässigkeit des Untergrundes schneller als der entsprechende Druckabfall im Porenwasser sein kann. Der Effekt ist ein über den hydrostatischen Porenwasserdruck hinausgehender Wasserdruck in den Poren des Ufermaterials, dessen Scherfestigkeit dadurch herabgesetzt, was zu einem Stabilitätsverlust führt. Zur Abwendung dieser Gefahr müssen schwere Deckwerke angewandt werden, die über die Rohdichte der Wasserbausteine und die Deckwerksdicke dimensioniert werden.[36];[38]

Aufgrund der Konturänderungen am Schiffsrumpf ergeben sich kurzperiodische Wasserspiegeländerungen, die ein Resultat vom Aufstau des anströmenden Wassers direkt vor dem Bug des Schiffes sind. Die Bildung von Sekundärwellen zu beiden Schiffsseiten und ihre Belastungen am Ufer sind, bei der Freibordfestlegung und Wellen zu beachten. [38]

3. Deckwerksbau

3.1. Allgemeines

Uferdeckwerke dienen als Auskleidungen von Böschungen und Sohle des Binnengewässerbetts zur Begrenzung und Erhaltung des Wasserstraßenprofils bzw. der Fahrrinne. Gleichzeitig können diese Bedeckungen durch das Gewicht der Baukörper den angreifenden Kräften Widerstand leisten. Wegen der Vielzahl von Aufgaben, die sie erfüllen, wie z. B. die Böschung gegen die Kräfte des strömenden Wassers und des Schiffschraubenstrahles sowie gegen mechanische Beanspruchung durch Schiffe und Eisangriff zu schützen, die Umwandlung der Wellen- und Strömungsenergie durch eine rauhe Oberfläche und die Sperrwirkung des Deckwerks, unter diesem liegende Erdstoffe zurück zu halten, werden die Deckwerke im Küsten- und Flusswasserbau erfolgreich eingesetzt. [46];[43]

Dabei wird zwischen durchlässigen und dichten Deckwerken in Abhängigkeit von den mit der Standsicherheit und der Beständigkeit gegen äußere Belastungen verbundenen Anforderungen unterscheiden. Den Entwürfen des Deckwerkes und der Dichtung liegen mehrere gemeinsame Gesichtspunkte zugrunde: der Schifffahrtsbetrieb, die Spiegelschwankungen im freien Wasser und im Grundwasser, die Baustoffe, Bauweisen und Baubedingungen und schließlich der Landschaftsschutz. [46];[59];[60]

Deckwerke und Dichtung müssen ein gewisses Maß von Anpassungsfähigkeit aufweisen. Denn der Untergrund als gewachsener Boden oder als verdichteter Auftrag ist bis zu einem gewissen Grade inhomogen und erfährt im Laufe der Jahre unter der Beanspruchung aus der Wasserstraße und unter dem Einfluss von Tagwasser oder Grundwasser Verformungen, die an starren Konstruktionen zu Schäden führen. Deshalb müssen die Baustoffe gegen den Angriff von Hitze, Frost und aggressiven Bestandteilen des Wassers beständig sein und nach Möglichkeit Reparaturen oder Auswechslungen auch unter Wasser und ohne Schifffahrtsunterbrechung zulassen. [59];[60]

Werden Deckwerke aus Einzelstücken ohne gegenseitige Verklammerung gebildet, dann muss das Gewicht der Teile so groß sein, dass es allein den Strömungsangriffen standhalten kann. Anderenfalls sind die Einzelteile durch eine verzahnende Formgebung, durch elastischen Verguss oder durch Verdrahtung miteinander zu verklammern. Technische und wirtschaftliche Gründe können zu Lösungen mit großen zusammenhängenden Teilflächen führen, die entweder in situ hergestellt oder als große Matten vorgefertigt

werden. Die Elemente sind durch Reibung allein nicht standfest, besonders wenn ein erhöhter Wasserdruck auf die Unterseite die Reibungskraft noch vermindert. Es bedarf vielmehr einer kräftigen Abstützung auf ein solides kolkfestes Widerlager am Fuß der Böschung, oder die zugfeste Konstruktion wird am oberen Böschungsrand in einem standfesten Widerlager verankert. Ein wesentlicher Entscheidungsfaktor bei der Wahl der Bauweise ist die Baubedingung, ob die Stand-sicherheit auf Böschungen und Sohlen-gewässer gewährleistet ist.(s. Bild 3.1.1.) [43]

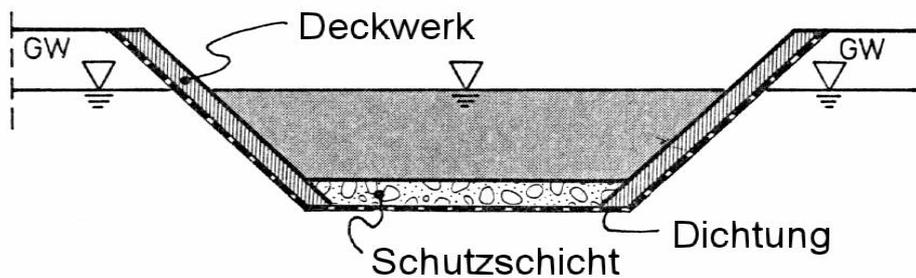


Bild 3.1.1. Definitionen: Deckwerke, Dichtung, Schutzschicht. [44]

Im Fall, dass der Wasserspiegel über dem Grundwasserspiegel liegt, muss die Wasserstraße mit einer Dichtung ausgestattet werden. Die Aufgabe der Dichtung ist es Wasserverlust vorzubeugen und schädliche Veränderungen im tragenden Gewässerbett zu vermeiden, d.h. es soll ein Austausch von Kanalwasser und Grundwasser verhindert werden. Die Dichtung kann unmittelbar unter dem Deckwerk an der Außenseite des abzugrenzenden Erdreiches liegen, dann wird sie als „Außendichtung“ bezeichnet, aber wenn sie im Innern der abgrenzenden Dämme ist, geht es um „Innendichtung“. [58];[60]

Deckwerke können als offene Deckwerke ausgeführt werden z.B. Steinschüttung oder Steinsatz, Betonsteinpflaster. Geschlossene Deckwerke können z. B aus Asphaltbeton, Betonplatten, Steinschüttungen oder Steinsatz mit Vollverguss bestehen. [58]

Bei feinkörnigem Untergrund werden häufig Filter wie Kiesfilter und Geotextilien erforderlich. Eine Filterschicht verhindert, dass bei Wasserspiegelabfall Überdruck unter den Deckwerken entsteht: Eine besondere Sicherung ist am Fuß des Deckwerkes erforderlich in Form einer flachen Flussvorlage oder einer Spundwand. [43]

3.2. Arten von Deckwerken

3.2.1. Durchlässige Deckwerke

Im Flusswasserbau und auch im Kanalbau werden die durchlässigen Deckwerke angewendet, wenn das anstehende Grundwasser über dem freien Wasserspiegel im Gewässerbett liegt. Die Gründe für diese Umstände können die Wasserspiegelabsenkung bei Schifffahrt und die Strömungsschwankungen bei Stausenkung sein. [43]

Durch durchlässige Deckwerke werden die Zerstörung des ausgebauten natürlichen Ufers in der Niederwasserregelung, sowie die Wasserböschung in der Stauregelung vermieden. Ihre Schutzfunktion basiert auf dem Fließen des Grundwassers durch die Deckwerke hindurch in den Kanal oder den Fluss. Auf diese Weise wird das Porenwasser im Boden mit dem offenen Wasser im Gewässerbett ausgleichspiegelt. [43];[62]

3.2.1.1. Entwurfsgrundlagen

Der konstruktive Aufbau des Deckwerkes ist durch die schützende Deckschicht, die auf einer Filterschicht ruht, charakterisiert. Während die Deckschicht als Schutz gegen Strömung, Eisgang und Schiffstoß dient, verhindert die Filterschicht eine mögliche Erosion des Untergrundes infolge der Durchströmung des Deckwerkes. [43] Die durchlässigen Deckwerke erstrecken sich in der Regel nur über die Böschung des trapezförmigen Querschnittes. (Bild 3.2.1.) [44];[58]

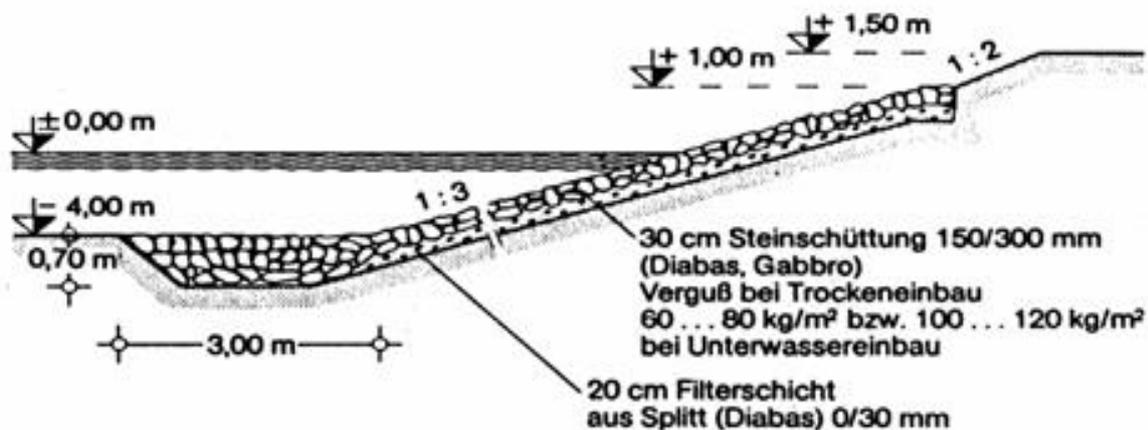


Bild 3.2.1. Deckwerk am Elbe-Seitenkanal [44]

Ein schützendes Deckwerke auf der Sohle wird meistens nur bei sehr feinkörnigen Böden angewendet und weiterhin an den Stellen, wo die Sohle aufgrund der örtlichen Verhältnisse besonders kolkgefährdet ist, wie z. B. an Liegeplätzen durch die starken Strö-

mungen beim Ablegen. Ein Extremfall ist die Panzerung der Sohle mit schwerem Steinmaterial in starken Stromkrümmungen. [43]

Ein Beispiel dafür ist der Verbau des Düsseldorfer Kolkes, Rhein-Strom km 743,9 dafür bei welchem die Flusssohle durch Kiesverfüllung und Abdeckung mit schwerem Basalt-
schotter gesichert wurde. [45];[58];[59]

Der maßgebende Lastfall für die Bemessung des Deckwerkes ist das schnelle Absinken des freien Wasserspiegels bei Vorbeifahrt eines Schiffes. Unter dem Deckwerke gerät das anstehende Grundwasser in Bewegung und strömt in das freie Wasser aus. Der entstehende Strömungsdruck kann unter ungünstigen Umständen eine zulässige Grenze überschreiten und Rutschungen auslösen, wenn nicht die Deckschicht ein ausreichendes Gewicht und eine zuverlässige Abstützung oder Aufhängung besitzt. [43];[60]

Das Kräftebild der Wasserdrücke auf Deckwerke wird in Bild 3.2.2 dargestellt. [44]

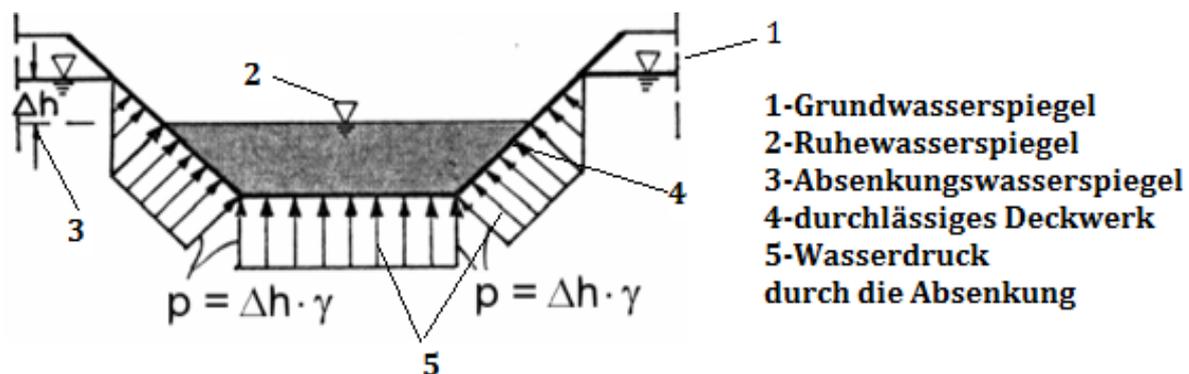


Bild 3.2.2. Grundwasserdruck auf die Unterseite eines Deckwerkes bei Wasserspiegelabsenkung Δh im Kanal. [44]

Die Hauptbelastung resultiert aus den hydrostatischen Druckspannungen infolge der Druckhöhendifferenz Δh zwischen Grundwasser und Kanalwasserspiegel. Bereits ein Druckhöhenunterschied von $\Delta h=1m$ erzeugt eine Druckspannung von $10kN/m^2$. Diese muss bei Auftrieb durch das Eigengewicht der Schutzschicht aufgenommen werden. [44];[62]

Besonders zu beachten sind die plötzlich auftretenden Auftriebskräfte durch Wellenabsenkung bei passierenden Schiffen. Bei Versuchen am Main-Donau-Kanal mit dem Europaschiff (1350 t) wurden folgende Werte gemessen:

Beladen bei $11,5 km / Std \rightarrow \Delta h = 0,6 m$

Leer bei $15 km / Std \rightarrow \Delta h = 0,7 m$

Mit Absenkgeschwindigkeiten bis $0,07\text{m/s}$

Beim Nord-Ostsee-Kanal waren die Werte noch höher. Bei Seeschiffahrtstraßen können größere Auftriebswerte auch infolge von brechenden Schwerewellen auftreten. [44];[62]

3.2.1.2. Filterschicht

Die Filterschicht hat die wichtige Aufgabe, den raschen Abbau eines Grundwasser-Überdruckes zu ermöglichen, aber dabei einen Feststofftransport vom Untergrund her zu unterbinden. Dazu kommt ihre Funktion als tragendes Element des Deckwerkes. Der Filter muss den Regeln der Bodenmechanik genügen, weshalb die Richtwerte hinsichtlich der Kornverteilungen des Untergrundes und der Deckschicht berücksichtigt werden müssen. (Bild 3.2.3.)

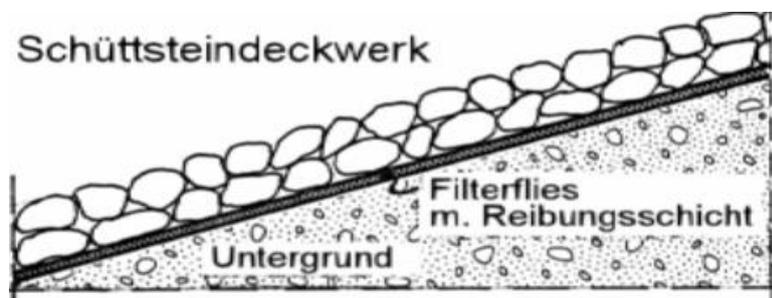


Bild 3.2.3. Vertikalschnitt des durchlässigen Deckwerkes [44]

Nach dem Baustoff unterscheidet man zwischen Kornfilter und Kunststofffilter, auch geotextiler Filter genannt. [43]

Kornfilter bestehen aus mineralischen Stoffen wie Sand, Kies, Hochofenschlacke, Ziegelbruch, der nur bei geringen Ansprüchen im Flusswasserbau angewendet wird. Beim Unterwassereinbau des Mischkornfilters, der in einer einzigen Lage den gesamten geeigneten Kornbereich umfasst, kann eine mögliche Entmischung nie ganz vermieden werden, wodurch die gewünschte Reihenfolge der Schichten umgedreht werden könnte. Deshalb ist der Stufenfilter in mehreren Lagen mit den nach dem Filtergesetz abgestuften Körnungen zuverlässiger. [43];[59]

Der maßgerechte Einbau der verhältnismäßig dünnen Einzellagen ist aber besonders auf Böschungen mit technischen Schwierigkeiten verbunden und unter Wasser nahezu unmöglich. Eine Verbesserung der Einbaubedingungen kann die vorübergehende Bindung der Körnung durch Additive bringen. Dagegen hat sich bei Einbau im Trockenen eine dauernde Bindung auf bituminöser Basis im Bitumensand oder Bitusplitt, je nach

der Körnung des Untergrundes, bewährt. (Bild3.2.4.) In der Regel werden sie als Filter unter durchlässigen Asphaltdeckwerken verwendet.[43]

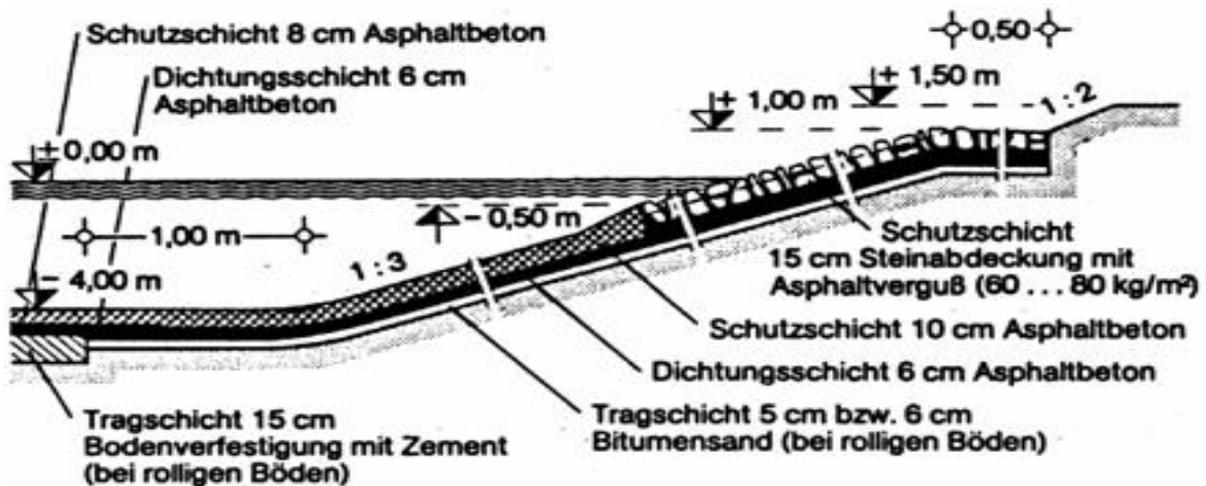


Bild 3.2.4. Deckwerke und Dichtung am Elbe-Seitenkanal [44]

Aufgrund der Ergebnisse von Bodenproben im Labor werden die geotextilen Filter immer öfter praktisch angewendet. Man unterscheidet zwischen Geweben und Vliesstoffen.(Bild3.2.5.) Die zweidimensionalen Gewebe dienen nur zur Trennung von zwei Schichten ungleicher Körnung, sie werden als Zwischenlage zwischen Kornfilterschichten oder zwischen einem Kornfilter bzw. dem anstehenden Untergrund und einer groben Steinschüttung verwendet. Die Maschenweite des Gewebes richtet sich nach der feinen körnigen Seite. Diese Anpassung an den Untergrund bietet Schwierigkeiten in Baustrecken mit ständig wechselnder feiner Körnung. [43];[59];[60]

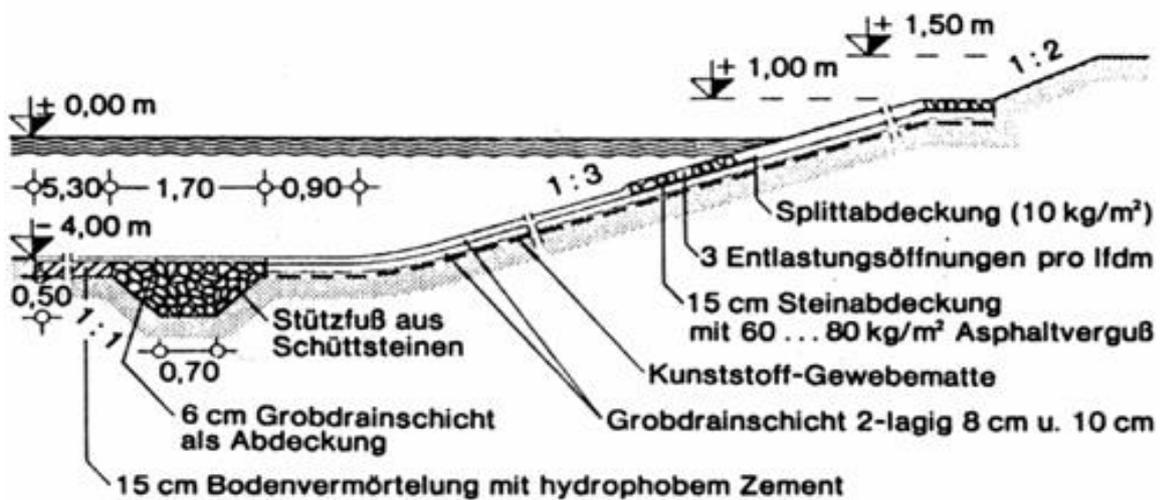


Bild 3.2.5. Deckwerk am Elbe-Seitenkanal [44]

Bei groben Böden eignen sich die preisgünstigen Matten, sie neigen aber auch zu Rutschungen bei steileren Böschungen, weshalb sie mit eingewebten Bändern versehen sind, an denen Faschinen aufgebunden werden. Demgegenüber bestehen die Vliesstoffe aus einer oder mehreren abgestuften Faserschichten, deren Durchlässigkeit an die Kornverteilung des schützenden Bodens angepasst wird. Dadurch können sowohl die feinen gleichkörnigen Sande als auch eine vom Schluff bis Grobsand reichende Körnung bei gutem Durchfluss zurückgehalten werden. Die raue Oberfläche kann mit zusätzlichen „Krallen“ versehen werden, die dem Vlies im Interesse der Standfestigkeit des Deckwerkes einen hohen Reibungsbeiwert sichert. Die Standfestigkeit von Deckwerken mit Kunststoffmatten erfordert ein hohes Gewicht der Deckschicht und eine nicht punktförmige, sondern flächenhafte Anpressung der Matte an den Untergrund durch die Deckschicht, damit Schwingungen vermieden werden. [43];[58]

Die hohe Festigkeit der Kunststoffmatten kann dazu genutzt werden, das Deckwerk als zusammenhängendes Ganzes aus Filtermatte und Betonsteinen vorzufertigen und mit schwerem Gerät einzubauen. (Bild 3.2.6) Die früher viel verwendete Buschmatte hat sich zumindest in feinkörnigen Böden und unter den durch die Schifffahrt gesteigerten dynamischen Belastungen als Filterschicht nicht bewährt, da die Filterwirkung zu schwach ist, um Erosionen des Untergrundes zu verhindern. [43]



Bild 3.2.6. Anpressen der Matte mit schwerem Geräte [44]

3.2.1.3. Deckschicht

Die Deckschicht schützt die Filterschicht, indem sie Widerstand gegen den Angriff von Strömung, Wellenschlag, Eisgang und Schiffsstoß leistet. Die Standfestigkeit der Deckschicht muss ohne Inanspruchnahme der Auflagerreibung durch Abstützung auf ein

kräftiges, kolkfreies Widerlager oder durch eine Aufhängung mit korrosionsfreien Zuggliedern und einer dauerhaften Verankerung gewährleistet sein. [43]

Das Material sind Schüttsteine in loser Lagerung oder im Verbund und Betonsteine als Fertigsteile (Bild 3.2.7), dabei müssen beide wenigstens in der Wasserwechselzone frostunempfindlich sein.



Bild 3.2.7. Vertikalschnitt und Draufsicht-Böschungsparelle Anordnung von Beton -Fertigteilen als Deckschicht. [44]

Die lose Steinschüttung hat den Vorzug, dass sie unter Wasser eingebaut und in einfacher Weise ausgebessert werden kann und dass sie umweltfreundlich ist. Da der Zusammenhalt durch die Verkeilung verhältnismäßig gering ist, müssen große und schwere Steine verwendet werden, damit erreicht man entsprechende Schichtdicken und Steingewichte, die sich nach den maßgebenden Belastungen richten. Zur Verbesserung der Verzahnung wird die Größe der Steine abgestuft, das heißt, dass die größte Kantenlänge etwa bei $2/3$ der Schichtdicke liegt. Natursteine, deren Abmessungen für eine lose Schüttung ausreichen, sind nur bei relativ geringer Entfernung der Wasserstraße vom Vorkommen wirtschaftlich, wie z. B bei den bayerischen und österreichischen Donaustufen. [59];[60]

Kleinere Steine bedürfen eines Verbunds durch Teilverguss (Bild 3.2.8) oder durch eine Verpackung in Drahtkörben, so genannte Gabionen.

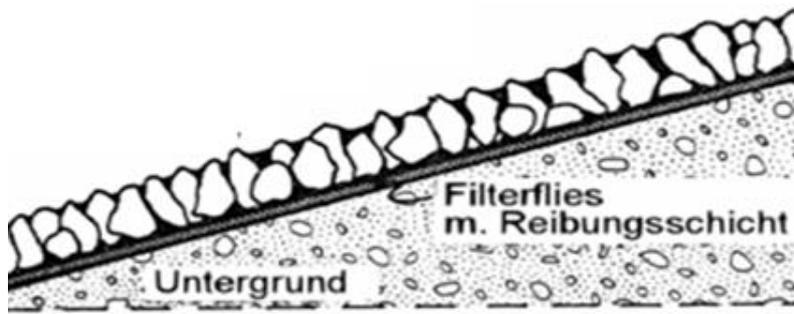


Bild 3.2.8. Deckwerk aus Schütt-oder Setzsteinen mit Verguss (Asphalt oder Beton) [44]

Im Interesse der Flexibilität des Deckwerkes sind die Vergussmassen auf bituminöser Basis. Der Verguss fungiert als Verklammerung der Steine, wobei die Gefahr besteht, dass durch das Übergießen der Steinlage die notwendige Durchlässigkeit der Schicht beseitigt wird. Bei Gabionen, bei welchen die Steine in Drahtkörben gefüllt werden, stellt die Deckschichtdurchlässigkeit kein Problem dar. Für die Drahtkörbe wird dicker und an den Kreuzungspunkten mehrfach verzinkter Draht verwendet, da die Drähte bei einer einfachen Kreuzung sich gegenseitig durchreiben würden.[43]; [56]

Durch die Verwendung von nichtrostenden Drähten als verbindende Elemente werden diese Ausführungen zu Hängewerken mit Verankerungen am oberen Böschungsgrad, wie z. B am Mississippi, wo der Verbund durch Drähte und Klemmen hergestellt wurde oder am Mittellandkanal, wo die verbindenden Drähte durch Öffnungen in fabrikmäßig hergestellten Spezial-Betonformsteinen gezogen und damit Matten mit offenen Fugen gefertigt worden sind. Derartige Matten passen sich gut den Veränderungen des Untergrundes an. Sie können auch im Nassen ohne Schifffahrtsunterbrechung eingebaut werden und ermöglichen durch offene Fugen einen Bewuchs. [43];[59];[60]

Nachdem auch diese Fertigteil-Deckschichten einer Filterschicht bedürfen, führte der nächste Schritt zum Verbund beider Teile.Auf das besonders kräftige Kunststoff-Filtervlies mit herausstehenden Verbundnadeln werden die Betonformsteine gegossen. Das Vlies ist also Filter-und Trägerschicht zugleich. Die Deckschichte kann auch aus einer porenreichen bitumengebundenen Stein- oder Schotterschicht bestehen, wie sie im größeren Umfang am Elbe- Steine-Kanal, am Amsterdam- Rhein-Kanal und am Main-Donau-Kanal eingebaut worden sind und sich in Schifffahrtsversuchen bewährt haben. Vom Standpunkt des Umweltschutzes ausgesehen sind die unvergossenen Natursteinlagen wohl am günstigsten, denn sie fügen sich gut in die Umgebung ein und ermöglichen einen Pflanzenwuchs, der die Steinfläche belebt oder überdeckt und sie gewähren unter

Wasser in den Hohlräumen Unterschlupf für Fischbrut und Kleingetier. In der Wasserwechselzone schaffen die offenen Fugen aus aneinander liegenden Betonformsteinen aber eine Gefahr durch diese Belebung der Böschung. Durch eine Neigung von 1:3 wird Mensch und Tier genügend Halt zum Aussteigen geboten. [43];[58]

3.2.2.Dichte Deckwerke

3.2.2.1.Innendichtung

Ein für Staudämme und Deiche häufig angewendetes Bauverfahren, das in verschiedener Weise ausgeführt werden kann, ist die Innendichtung. Die einfachste Art, die an der Rhone aufgrund der vorhandenen Bodenstruktur angewendet wird, ist der Aufbau des Dammes über dem natürlichen Untergrund aus feinkörnigen Böden durch Auftrag und Verdichten dieses Materials. Die zweite Möglichkeit ist die Dichtung mit einem Damm-Kern aus mineralischen Stoffen, die nach Körnung aufbereitet und nach einem erprobten Mischungsverhältnis zusammengesetzt werden. (Bild 3.2.9-a)

Der Einbau und die Verdichtung des Kernes und des umgebenden Dammkörpers in einzelnen Schichten erfordern einen vermehrten Arbeits- und Zeitaufwand und eine strenge Überwachung. Bei mangelnder Dichtigkeit der Dammaufstandsschicht wird der Kern durch eine Dichtwand ausreichender Tiefe verlängert. Diese Dichtungsart ist z. B. die Standardausführung an den österreichischen Donau-Stufen. Schließlich kann die eigentliche Dichtung auf eine Schmalwand oder eine Schlitzwand im Damm-Kern konzentriert werden. Eine Damminnendichtung kann aber auch durch eine Spundwand erfolgen, wie z.B. bei der Planung einer Erweiterung des Dortmund-Ems-Kanals. Durch die technische Entwicklung der Schmal- und Schlitzwandverfahren hat sich in den letzten Jahren sowohl die ausführbare Wandtiefe vergrößert, auch das Durchfahren schwieriger Zwischenschichten wurde ermöglicht. Gleichzeitig wurde die Zuverlässigkeit der durchgehenden Dichtungswand gesteigert. [43];[62]

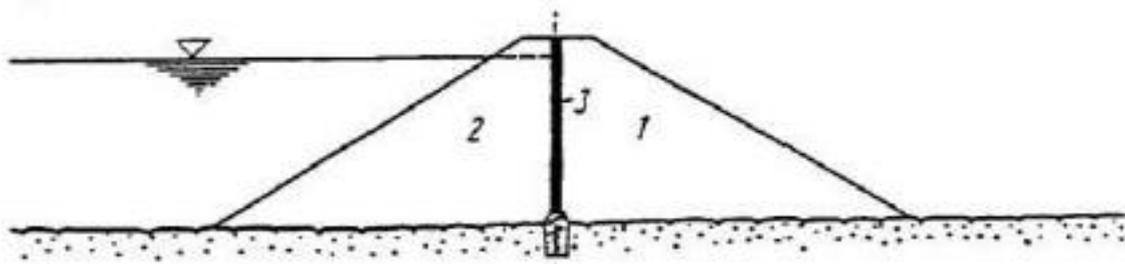


Bild. 3.2.9. Staudamm mit bituminöser Innendichtung (Kerndichtung)[44]1 - Stützkörper Luft-seite, 2 - Stützkörper Wasserseite, 3 - Dichtungskörper

3.2.2.2. Außendichtung

Bei der Stauregelung eines Flusses kann die Böschung des Staudammes durch dichte Deckwerke gesichert werden. Der Aufbau des dichten Deckwerkes enthält allgemein die eigentliche Dichtungsschicht, die durch eine Schutz- oder Deckschicht gegen die Angriffe aus der Schifffahrt geschützt werden muss. (Bild 3.2.9 b) Die Art und die Dicke dieser Schutzschicht sind von dem Baustoff der Dichtungsschicht abhängig. Je nach Untergrund kann sie aus einer Vermörtelung sandigen Bodens oder aus einer Bitumen-Sandschicht auf dem festen bindigen Boden bestehen. An nässenden Böschungen wird durch den Anschluss einer Bitumen-Splittschicht an die Filterschicht gleichzeitig eine feste Unterlage und eine Entwässerung gebildet. Wenn die Dichtungsmasse an Ort und Stelle mit schwerem Gerät verdichtet werden muss, ist eine tragfähige Unterschicht erforderlich.[43]

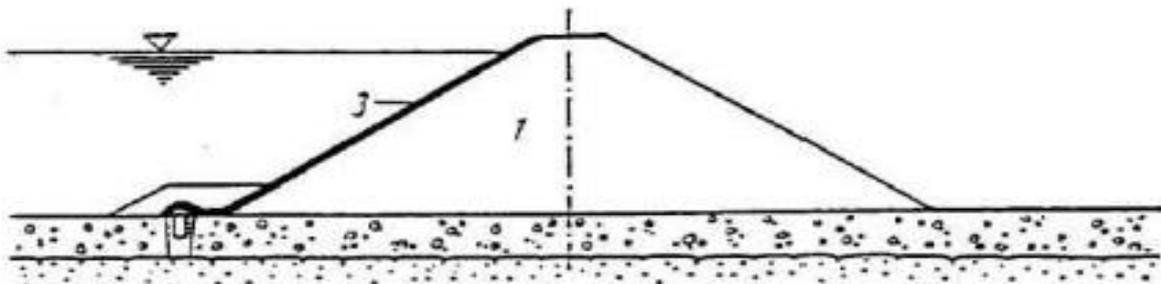


Bild 3.2.10. Staudamm mit bituminöser Außendichtung [44]1-Stützkörper Luftseite, 3 - Dichtungskörper

3.2.2.3. Dichtigkeit

Der Dichtigkeitsgrad des Deckwerkes ist eine Funktion des Baustoffes in seiner Zusammensetzung und seiner Verarbeitung. Deshalb spielen die Gütemerkmale und die Aufbereitungs- und Einbaubedingungen auf der Baustelle eine entscheidende Rolle. Keine Kanaldichtung ist undurchlässig im physikalischen Sinne. Ihre bautechnische Eigenschaft als Dichtung ist vielmehr definiert durch ein festgesetztes Höchstmaß der Durchlässigkeit. In diesem Zusammenhang wird das Darcy-Gesetz angewendet, das lautet: [48]

$$Q = v_f \cdot A \quad (3.2.1)$$

$$v_f = k \cdot i \quad (3.2.2)$$

$$i = \frac{h_a - h_b}{L} \quad (3.2.3)$$

Beziehungsweise $Q = -k \cdot \frac{h_a - h_b}{L} \cdot A$ (3.2.4) wobei:

Q – Durchflussrate; [m³/s]

v_f – Filtergeschwindigkeit; [m/s]

A – Gesamtquerschnitt (Porenraum + Matrix); [m²]

k – Durchlässigkeitsbeiwert; [m/s]

i – hydraulischer Gradient (auch hydraulisches Gefälle oder Potentialgefälle); [m/m]

h_a – Spiegelhöhe an der Stelle A; [m]

h_b – Spiegelhöhe an der Stelle B; [m]

L – Fließstrecke zwischen A und B; [m]

Der Begriff Filtergeschwindigkeit bezeichnet einen flächenbezogenen Durchfluss, der eben die Einheit einer Geschwindigkeit aufweist [L³ · L⁻²/T = L/T]. [48]; [65]

Das Minus-Vorzeichen bringt zum Ausdruck, dass die Strömung in Richtung fallender Piezometerhöhen erfolgt. Zugleich wird es erläutert, dass die Wassermenge Q, die eine Fläche A in einem porösen Medium (z. B. Sand) durchströmt, direkt proportional zum hydraulischen Gradienten i ist. Der Proportionalitätsfaktor dieser Beziehung, der k – Wert (Durchlässigkeitsbeiwert), ist ein Kennwert für das poröse Medium und das durchströmende Fluid. [65]

Der hydraulische Gradient oder das hydraulische Gefälle i ist definiert als der Quotient der Differenz der Kanalspiegelhöhen (Piezometerhöhen) h_a und h_b an zwei Punkten A und B entlang der Fließstrecke und dem Abstand L der beiden Punkte voneinander. [65]

In den Abbildungen 3.2.11. a und b werden die kennzeichnenden Größen (der Sickerverlust, die Durchlässigkeitszahl und die Wasserspiegelabsenkung) dargestellt. [48]

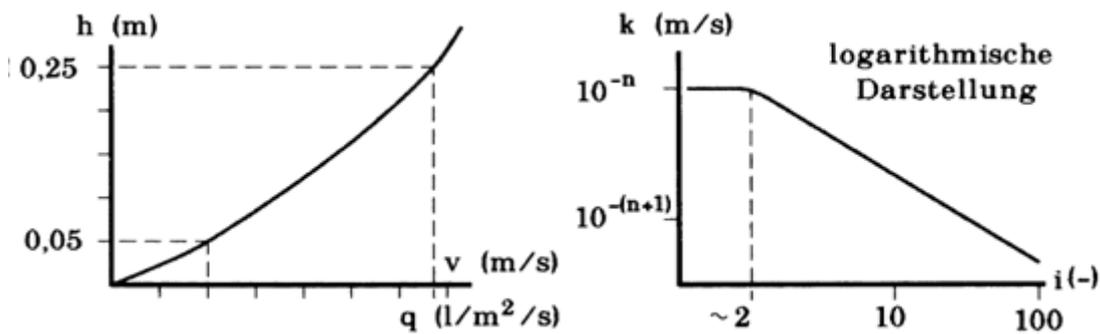


Bild 3.2.11. Logarithmische Darstellung von Durchlässigkeit [48]

Der höchstzulässige Sickerverlust Q [l/s km] wird nach wasserwirtschaftlichen Gesichtspunkten und nach den Sicherheitsbedingungen festgelegt.

Damit wird die Durchlässigkeitszahl k [m/s] näherungsweise unter Annahme der Gültigkeit des Gesetzes von Darcy für die Durchströmung der Dichtungsmasse bestimmt. Sie stellt den Kennwert für die Überprüfung der Dichtungsmasse im Labor und während der Bauausführung dar. Die beobachtete Wasserspiegelabsenkung Δh [mm/d] am fertigen Bauwerk ist die Messgröße zur Beurteilung des tatsächlich vorhandenen Sickerverlustes. [48];[44]

Der Durchlässigkeitsbeiwert berücksichtigt sowohl die Beschaffenheit und die Form der Porenkanäle als auch die Zähigkeit der strömenden Flüssigkeit. Die Gültigkeitsbereich des Darcy-Gesetzes beschränkt sich auf den Bereich linearer Strömung mit konstantem Durchlässigkeitsbeiwert k in der Beziehung k zu i . (Abbildungen 3.2.12 und 3.2.13.) [67]

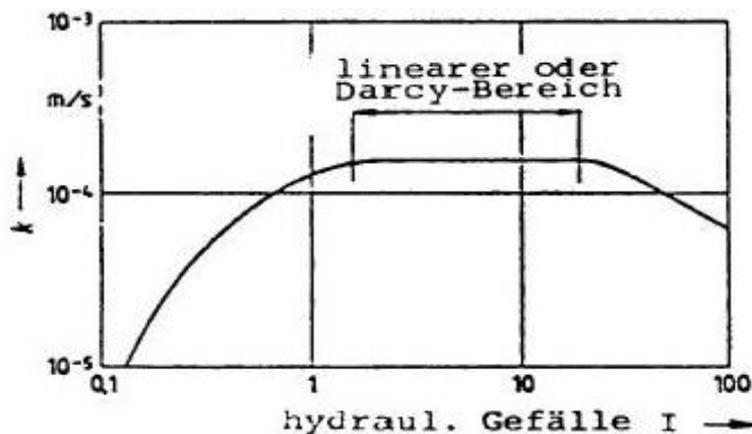


Bild 3.2.12. Gültigkeitsbereich des Darcy-Gesetzes [67]

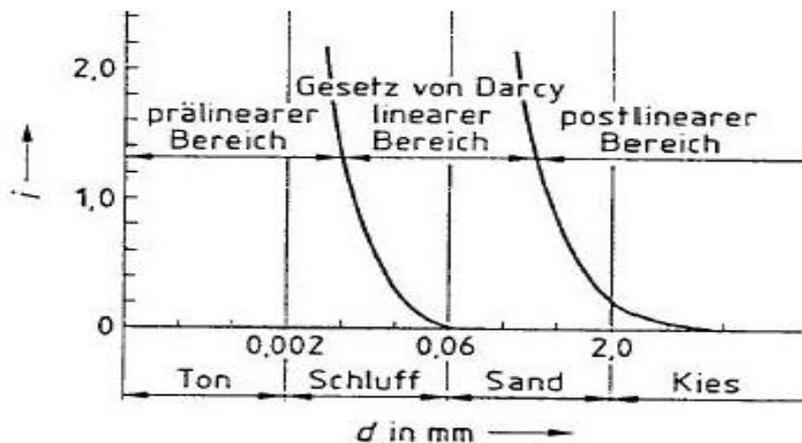


Bild 3.2.13. Einfluß des mittleren Korndurchmessers d auf die Grenzen des linearen Bereichs des Filterströmungsgesetzes [67]

Der in der Planung festgelegte Wert Q wird zunächst auf einen theoretischen Wert k umgerechnet, an dem die Eignung der gewählten Dichtung im Labor gemessen wird. Zur Kontrolle des tatsächlichen Wertes am ausgeführten Kanal wird an jedem fertiggestellten Teilabschnitt der Wert von Δh ermittelt. Bei der Wahl des Dichtungstoffes spielt auch der Gesichtspunkt der Baubedingungen, ob Einbau im Trockenen oder im Nassen, sowie seine Witterungsempfindlichkeit beim Einbau und im Betrieb eine ausschlaggebende Rolle. [43]

3.2.2.4. Dichtungsarten

Der Ton war früher praktisch der einzige Dichtungstoff. Die Eigenschaften der Tondichtung hängen in hohem Maße von dem zur Verfügung stehenden Tonmaterial, dem Feuchtigkeitsgehalt bei der Verarbeitung und der von schwerem Gerät geleisteten Verdichtungsarbeit ab. Dementsprechend ist der Einbau der Dichtung außerordentlich witterungsempfindlich. Bei einem gewissenhaften Einbau muss mit zahlreichen und unter Umständen längeren Arbeitsunterbrechungen gerechnet werden, so dass Bauzeitverlängerungen und Stillstandzeiten des aufwendigen Geräteparks unvermeidlich sind. [44]

Tondichtungen haben unmittelbar nach dem Einbau einen ziemlich hohen Durchlässigkeitsbeiwert $k > 10^{-7}$ m/s, nehmen aber im Laufe der Zeit an Dichtigkeit zu und erreichen Endewerte in der Größenordnung von 10^{-8} m/s. Der Sickerverlust betrug bei der Tondichtung des Hohenzollern-Kanals unmittelbar nach der Füllung 90 l/s km. Nach einigen Jahren ging er auf 4 l/s km zurück. Zum Schutz gegen die stärkste Beeinträchtigung aus dem Schiffsverkehr ist eine Überdeckung mit Ton von 60÷70 cm notwendig. [43]

Gemeinsam mit der Dicke der Tonschicht von mindestens 40 cm ergibt sich im Einschnitt ein nicht unerheblicher Mehraushub, der zusammen mit den oben genannten Einbauproblemen die Wirtschaftlichkeit stark herabsetzt. Tondichtungen im Trocken-einbau werden deshalb nur noch unter dafür besonders günstigen örtlichen Bedingungen angewendet. Demgegenüber wurde schon 1955 plastisch aufbereiteter Ton in eine Dicke von 50 cm mit einem Spezialgerät unter Wasser mit Erfolg eingebaut. In neuerer Zeit wird mit verbesserter Methode ein 10 cm dicker Presstonstrang im Mittellandkanal und im Main-Donau-Kanal unter hohem Druck unter Wasser bei Aufrechterhaltung des Schifffahrtbetriebes verlegt. (Bild 3.2.14-a) [43]

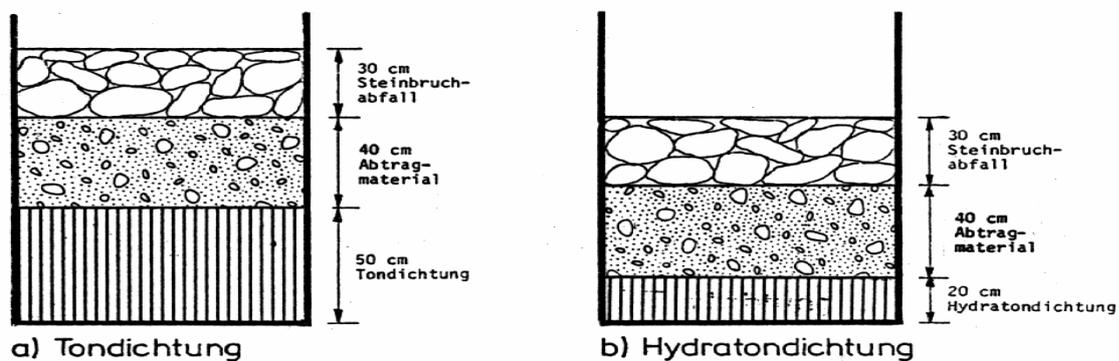


Bild 3.2.14. a, b. Varianten von Sohldichtungen am Main-Donau-Kanal[44]

Der Hydraton ist eine plastische Mischung aus Ton, Sand, Wasserglas und Soda. Er erreicht von Anfang an k -Werte zwischen $10^{-8} \div 10^{-9}$ m/s mit einer im Laufe der Zeit noch etwas steigenden Dichtigkeit. Die Dauerbeständigkeit ist bis zu einem gewissen Grad vom Chemismus abhängig, ist jedoch bei sorgfältiger Wahl der Bestandteile, besonders des Tons gegeben. [44]

Der Einbau ohne besondere Verdichtung ist beträchtlich weniger witterungsempfindlich als bei Ton. Die Dichtungsmasse ist aber frostempfindlich, deshalb muss sie im Uferbereich bis auf Frosttiefe durch eine verstärkte Überdeckung geschützt werden. [43] Die Dicke der Dichtungsschicht beträgt in der Regel etwa 20 cm. (Bild 3.2.14-b.)

Hydraton wurde auch in den Haltungen Bamberg und Strullendorf des Main –Donau – Kanal mit Erfolg angewendet. Die Dicke der Schutzschicht beträgt dort 70 cm und im Uferbereich mit Rücksicht auf die erwähnte Frostempfindlichkeit 1,10 m. [44]

Wettbewerbshemmend sind lediglich der größere Aufwand für den Aushub und die Kosten für die Überdeckung. Dieser Umstand führte auch dazu, beim Bau des Main-

Donau-Kanals nach zwei Haltungen mit Hydratondichtung auf Asphalt überzugehen, obwohl der Hydraton sich in langjährigen Laborversuchen als stabil erwiesen hat.[43]

Die Notwendigkeit eines Unterwasser-Einbaues der Dichtung bei der Erweiterung bestehender Kanäle auf ein größeres Profil wie z. B in großem Maßstab bei Ausbau des Mittellandkanals, führte neben dem schon erwähnten Presston, der durch eine Schutzschicht überdeckt werden muss und deshalb eine größere Vertiefung der Sohle erfordert, zu Lösungen mit einem Baustoff, der unter Wasser eingebaut werden kann und nur einer kleinen Schutzschicht bedarf, also neben der Dichtigkeit noch eine ausreichende Festigkeit aufweist. Nach zahlreichen Vorläufern mit Ton-Sand-Zement-Gemengen wurde eine Mischung aus Tonmehl, hydraulischen Bindern, Puzzolanen, feinkörnigem Sand und Wasser entwickelt als HOTON bezeichnet, der eine hohe Undurchlässigkeit mit der gewünschten Festigkeit vereinigt und zudem den Vorteil hat, schon in frischem Zustand eine Erosionsfestigkeit zu besitzen, welche den Einbau unter Aufrechterhaltung der Schifffahrt möglich macht. [44]

Eine andere Mischung, der sogenannte HEIMO-Teppich, setzt sich aus Kies-Sand, Tonmehl, Zement und chemischen Zusätzen zusammen. Sie wurde als Dichtung beim Ausbau der Altmühl im Zug des Main-Donau-Kanals entwickelt. Für die endgültige Beurteilung derartiger Dichtungsmassen wird entscheidend sein, ob sie sich langfristig bei langsam ablaufenden Verformungen des Untergrundes als ausreichend flexibel erweisen und diesen Veränderung ohne Schaden folgen. [43]; [44]

Der Asphalt steht heute technisch und preislich im Vordergrund. Die verschiedenen Möglichkeiten seiner Zusammensetzung lassen einen weiten Spielraum in der Wahl der Durchlässigkeit zu, von der Dichtung mit $k = 10^{-8}$ m/s darunter bis zum durchlässigen Deckwerk mit $k = 10^{-5}$ m/s. (Bild 3.2.15- a, b)

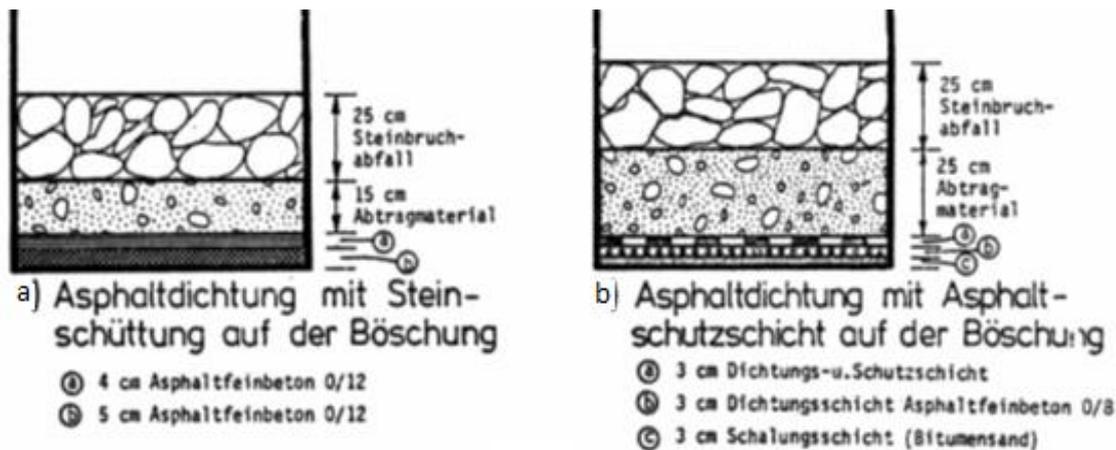


Bild 3.2.15 –a, b : Varianten von Sohldichtungen am Main-Donau-Kanal[44]

Die Asphalt-Dichtungsschicht bedarf beim Einbau einer intensiven Verdichtungsarbeit mit schwerem Gerät. Deshalb kommt eine ausschlaggebende Bedeutung der Festigkeit bzw. Unnachgiebigkeit des Dichtungsuntergrundes zu. Voraussetzung für einen festen Untergrund in feinkörnigen Böden ist eine gründliche Dränung. Gleichkörnige rollige Böden werden wie im Straßenbau üblich mit Zement verfestigt. Eine Abdeckung mit Bitumensand erleichtert die Reinhaltung der Flächen und verringert die Stillstandszeiten bei Regen. [43]

Zum Einbau einer Asphaltichtung unter Wasser wurde am Mittellandkanal das heiße Mischgut in einem Spezialverfahren mit Förderschnecken durch beheizte Rohre als Pressasphalt in die Einbaustelle gepresst. [43]

Der Sieblinienbereich des Asphalts liegt für den Trockeneinbau mehr beim Asphaltbeton und für den Unterwassereinbau mehr beim Gussasphalt. Die Dicke der Dichtungsschicht schwankt zwischen 6÷10 cm. Als Schutzschicht wird in der Regel eine zweite Asphalt-schicht mit derselben Mischung wie für die Dichtung verwendet. Der Einbau beider Schichten in einer Lage bringt erhebliche Schwierigkeiten bei der Verdichtung mit sich. Zudem bietet der Einbau in zwei Schichten die Möglichkeit einer Überlappung der Stöße und damit einer zuverlässigen Dichtung. Die Anwendung der Asphalt-Außendichtung im Flusswasserbau findet ihre Grenze in den Baubedingungen. Eine Oberflächendichtung aus Asphaltbeton kann nur im Trockenen eingebaut werden. [44]

Im Hinblick auf die Verdichtung durch Walzen bedarf sie einer ebenen und festen Unter-schicht. Asphaltmatten auf Böschungen für den Unterwassereinbau werden auf schwimmendem Gerät gefertigt und von dort abgesenkt. Probleme bereiten die Zug-

verankerung am oberen Rand und die Stöße der einzelnen Bahnen unter Wasser. Matten geringerer Dicke bedürfen einer Überdeckung als Schutz und zur Befestigung gegen Schwingungen aus der Wellenbewegung. Asphaltmatten werden heute nur noch für die Böschungssicherung verwendet.[44]

Kunststofffolien finden als Dichtung von Wasserbecken mäßiger Tiefe und ohne Strömung Verwendung. Im Kanal wäre wie bei Ton eine schwere Überdeckung als Schutz und Belastung notwendig. Die gelieferten Kunststoffbahnen haben nur wenige Meter Breite, so dass eine außerordentlich große Länge der unter Baustellenbedingungen zu fertigenden Stöße anfällt, welche die Ausführung mit nicht vertretbaren Unsicherheiten behaftet. Kunststoffbahnen werden im Kanalbau nur in begrenztem Ausmaß als zusätzliche Sperrschichten an ausgewählten Punkten wie Bauwerkanschlüssen verwendet. (Bild 3.2.16) [43]

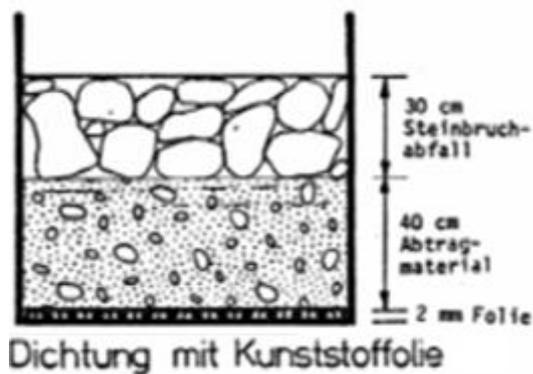


Bild 3.2.16 Variante von Sohldichtungen am Main-Donau-Kanal[44]

3.3.Deckwerkskomponenten

3.3.1.Wasserbausteine

Wasserbausteine müssen aus dauerhaft festen Gesteinen bestehen. Sie müssen eine hohe Trockenrohdichte haben und verwitterungsbeständig sein. Zugleich müssen sie gegen chemische Einflüsse des Grund- und Oberflächenwassers unempfindlich und gegen mechanische Beanspruchungen widerstandsfähig sein. [49];[72]

Wasserbausteine müssen eine weitgehend kubische Form und ein gleichmäßig dichtes Gefüge haben. Die Kategorien Größe und Gewicht von Wasserbausteinen werden nach dem Verwendungszweck und den einwirkenden Kräften aus Wellen, Strömung, Schiffs-schraubenstrahl und Eis festgelegt. [72]

3.3.1.1. Klassifizierungsmerkmale

Das Klassifizierungsmerkmal für Wasserbausteine ist die größte Steinlänge L , über die das Ausmessen des Wasserbausteins ermittelt wird. Diese Steinlänge wird als D bezeichnet und entspricht eigentlich der größten Diagonale der Steine, wie es in Bild 3.3.1 dargestellt ist. Anhand der Steinlänge D wurden die verschiedenen Standard-Steinklassen mit unterschiedlicher Widerstandsfähigkeit gegen hydraulische Einwirkungen festgelegt. [49]



Bild 3.3.1. Größte Steinlänge L bzw. D [49]

Diese Grundsteinklassen werden in bestimmten technischen Normen wie z. B. DIN EN 13383 verwendet, die beim Deckwerksbau im Bereich von Binnenwasserstraßen eingehalten werden müssen. Die Größenklassen werden über den Durchgang durch ein Quadratlochsieb definiert, d.h. über den Siebdurchmesser D -Kantenlänge des Quadratlochsiebes. Bild 3.3.2 zeigt diese Korngrößendefinition anschaulich. Entsprechend den Klassengrenzen werden die Korngrößeklassen als $CP_{x/y}$ bezeichnet, mit x als unterer und y als oberer Klassengrenze in mm. [49]



Bild 3.3.2. Größenermittlung D über ein Quadratlochsieb [49]

Die Gewichtsklassen $LM_{x/y}$ - als Leichte Gewichtsklasse und $HM_{x/y}$ -als schwere Klasse sind über die Masse der Einzelsteine definiert. [49] Sie werden weiter unterschieden in Klassen mit einem vorgegebenen Wertebereich für das mittlere Steingewicht (Klassen A: LMA und HMA) und ohne diesbezügliche Vorgaben (Klassen LMB und HMB). [40] Die B-Klassen wurden im Deckwerksbau aufgenommen. Für den Einsatz in Deck-schichten an Binnenwasserstraßen werden üblicherweise die Klassen $CP_{90/250}$ mit Korn-größen zwischen 9 und 25 cm, $LMB_{5/40}$, $LMB_{10/60}$ und seltener $LMB_{40/200}$ verwendet. [49];[40]

3.3.1.2. Festlegung der erforderlichen Steingröße

Bei der hydraulischen Bemessung von Deckwerken mit losen Deckschichten ergibt sich über die Festlegungen der DIN EN 13383 als Bemessungsgröße der Wert, der von 50 Gewichtprozent der Steinfraktion unterschritten wird (G_{50} bei Gewichtsklassen und D_{50} bei Größenklassen). [49] Maßgebende Einwirkungsgröße bei den Wasserbausteinen ist D_{50} , die Siebgröße bei 50% Siebdurchgang, d.h. 50% der Steine sind größer als die Bemessungsgröße D_{50} . Da die CP-Klassen wie das D_{50} über quadratische Siebgrößen definiert sind, ist eine direkte Zuordnung zwischen dem Bemessungsergebnis und der Steinklasse möglich. Für die Auswahl der Gewichtsklassen ist zunächst eine Umrechnung des Bemessungswertes D_{50} in ein G_{50} erforderlich. (Bild 3.3.3.) [49]

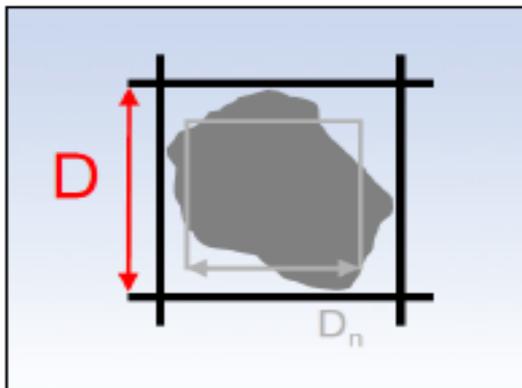


Bild 3.3.3. Zusammenhang zwischen Durchmesser D und nominalen Durchmesser D_n . Auf den Formeln [72]

$$D_n = 0,866D \quad \text{und (3.3.1)}$$

$$G = D_n^3 \rho_s \quad \text{basierend gilt der Zusammenhang: (3.3.2)}$$

$$G_{50} = 0,65 \rho_s D_{50}^3 \quad (3.3.3)$$

D_n – nominaler Durchmesser(Kantenlänge eines gewichtsgleichen Würfels) [m]

D – Siebdurchmesser [m]; $\rho_s = 2,3 \div 3,0$ [kg/m³] – Rohdichte, G – Masse Einzelstein [kg]

Die Ermittlung des Bemessungswertes G_{50} an einer Steinfraktion ist beispielhaft in (Bild 3.3.4) gezeigt. [40];[49]

Beispielhaft ist G_{50} für eine Steinfraktion der Klasse $LMB_{5/40}$ (rot) in (Bild 3.3.4) dargestellt. Ergänzend ist G_{50} für eine mittlere Steinfraktion (grün), die über die lineare Verbindung der oberen und unteren Nenngrenze festgelegt ist, eingetragen. Ergänzend zu dem erforderlichen G_{50} (D_{50})-Wert muss die Summenlinie nach DIN EN 13383 innerhalb bestimmter Grenzen liegen (beispielhaft für die Klasse $LMB_{5/40}$ in Bild 3.3.4 schraffiert dargestellt). [40]

Bei Auswahl einer Steinklasse auf der Grundlage einer Bemessung müssen die Klassenparameter als D_{50} oder G_{50} vorgegeben werden, dabei müssen die verwendeten Wasserbausteine mindestens den 50%-Wert der mittleren Summenkurve/loglineare Verbindung der Klassen-Nenngrenzen entsprechen. (Bild 3.3.5 a-c) Dieser Wert ist im Rahmen der Bauausführung, soweit vertraglich vereinbart, zu kontrollieren. [49]

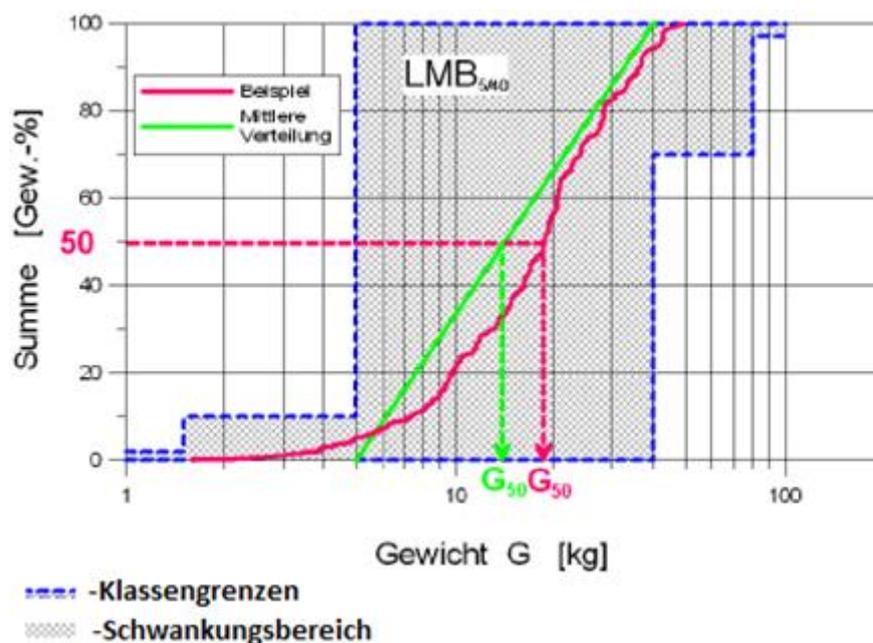


Bild 3.3.4. Definition der Bemessungswert G_{50} beispielhaft für eine $LMB_{5/40}$ Klasse [40]

Für die hauptsächlich verwendeten Steinklassen sind diese in Tabelle 3.3.1 aufgeführt und mit Ihren Klassengrenzen, mittleren Summenkurven und üblichen Schwankungs – Breiten in Bild 3.3.5 dargestellt. [40]

Steinklasse	50% - Wert
CP 90/250	D50 = 150 mm
LMB 5/40	G50 = 14 kg
LMB 10/60	G50 = 25 kg

Tabelle 3.3.1. 50%-Wert für Standard-Steinklassen loser Deckschichten [40]

Summenkurven der Wasserbausteine-Klassen LMB_{10/60}, LMB_{5/40}, CP_{90/250}

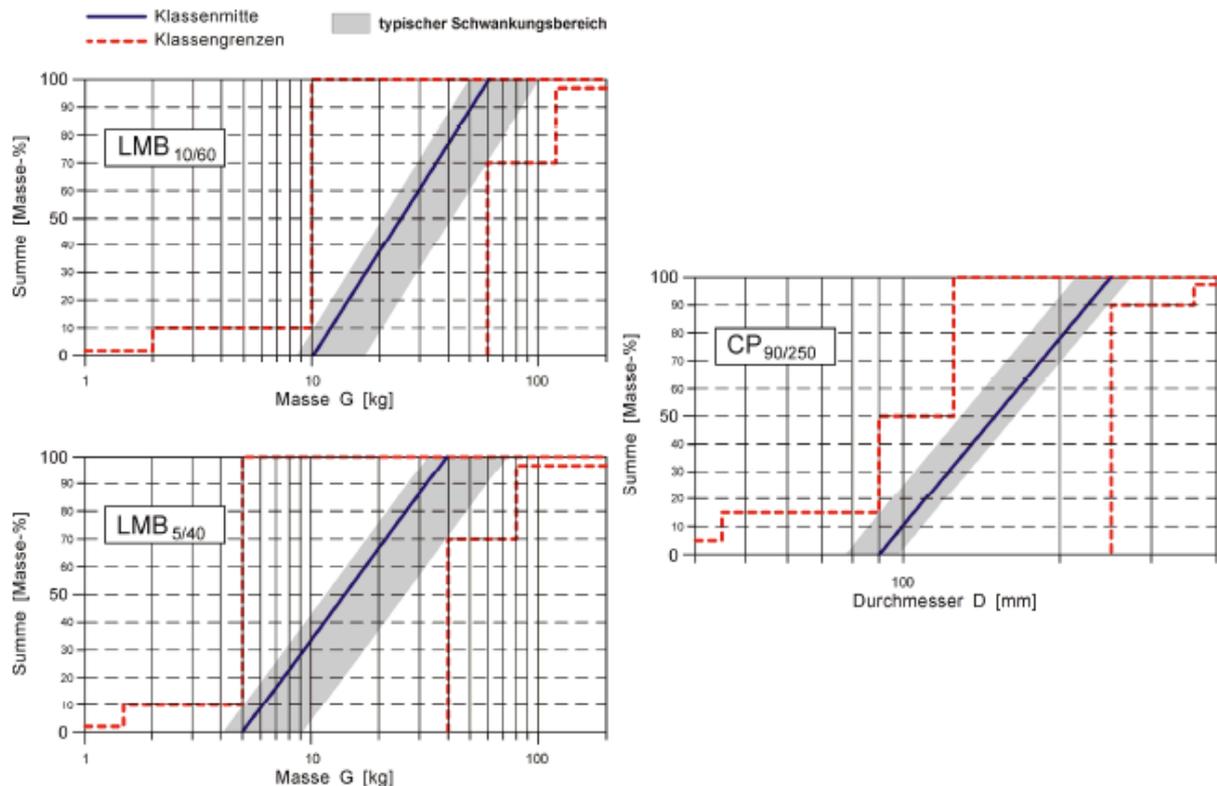


Bild 3.3.5. Typischer Schwankungsbereich: Bereich in dem die Summenkurven in der Regel zum Großteil verlaufen [40]

3.3.1.3. Hinweise zur Ermittlung der mittleren Steingröße D_{50} bzw. des mittleren Steingewichtes G_{50}

Entsprechend EN13383-2 und DIN 52101 sollten Kontrollprüfungen für Ermittlung des Bemessungswertes aus dem gelieferten Material untersucht werden. Aus der Summenkurve der gewogenen Steine könnte G_{50} bestimmt werden, aber die Ermittlung von D_{50} ist nicht zielgenau möglich, da die Kornverteilung versuchstechnisch bedingt stufenweise über diskrete Quadratlochsiebe ermittelt wird. [40]

Deshalb wird die folgende Methodik (nach BAW) zur Bestimmung von D_{50} vorgeschlagen. Bei der Ausrechnung der Größenverteilung sind es alle im Wertebereich der jeweiligen Steinklasse vorhandenen Standardsiebe zu verwenden.

z.B. bei $CP_{90/250}$: 45/63/90/125 180/250/360 mm. [49];[40] Die den 50% am nächsten liegenden prozentualen Siebdurchgänge P in % (nach unten P_u , nach oben P_o) und die entsprechenden Siebdurchmesser D_o und D_u werden für die Ermittlung von D_{50} herangezogen, indem zwischen den zwei Werte-Paaren P_u/D_u und P_o/D_o logarithmisch-linear interpoliert wird. (Bild 3.3.6) [49]

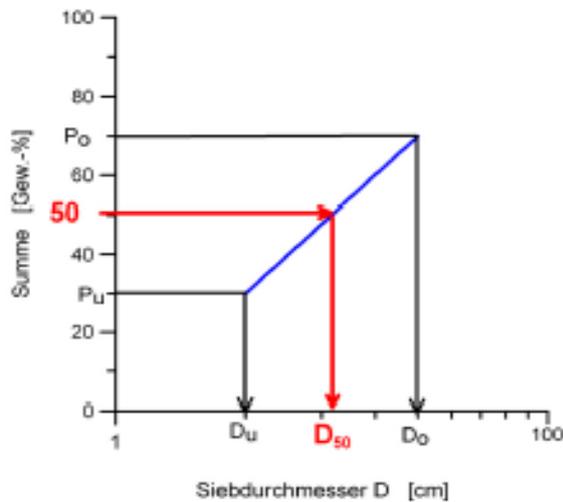


Bild 3.3.6. Ermittlung von D_{50} durch Interpolation [40]

Bei der log-linearen Interpolation berechnet sich D_{50} zu: [40]

$$D_{50} = D_u \left(\frac{D_o}{D_u} \right)^{\frac{50 - P_u}{P_o - P_u}} \quad (3.3.4)$$

3.3.1.4. Erforderliche Deckschichtdicken d_D für die Stabilität des Steingerüsts

Die erforderliche Deckwerksdicke d_D ergibt sich aus den Steinlängen für die verschiedenen Steinklassen. Es wird angenommen, dass die Steinform ein Ellipsoid ist, dann ist der größte Halbmesser des Ellipsoids entsprechend EN13383 nicht größer als das 3-fache der kleinsten Halbmesser, dabei wird die Steinlänge L eines Steines mit dem Gewicht G durch Formel berechnet. [49];[50]

$$L = \sqrt[3]{\frac{18G}{\pi\rho_s}} \quad (3.3.5)$$

Zusammen mit den Formeln (3.3.1) und (3.3.2) ergeben sich die in Tabelle 3.3.2 aufgeführten größten Steinlängen L für die Klassenobergrenze und das zulässige Unterkorn. [50]

Steinlänge L cm			
	CP 90/250	LMB 5/40	LMB10/60
obere Grenze	35	44	51
Unterkorn	50	56	64

Tabelle 3.3.2. Berechnete größte Steinlängen L (D) Ellipsoid [49]

Die in Tabelle 3.3.3 aufgeführten Minstdicken der Deckschichten d_D sind aus den Steinlängen für die verschiedenen Steinklassen abgeleitet. Dabei wurde auf die erreichbare Einbaugenaugigkeit von 5cm gerundet. [49];[50]

Steinklasse	d min cm
CP 90/250	50
LMB 5/40	60/55/*
LMB 10/60	70/65/*

Tabelle 3.3.3. Minstdicken $d_{D,min}$ der Deckschicht / *Werte für $\rho_s > 3,0[t/m^3]$

Die Werte der Minstdicken erfüllen die Kriterien, die mit dem Erfordernis für Stabilität des Steingerüstes, Minstdicken aus Ankerwurf und Schiffsanfahrt und Festigkeit der Gewässerböschung verbunden werden. [49];[50]

3.3.2. Verguss

Ist die Standfestigkeit der Deckschicht in stark belasteten Bereichen nicht zufrieden stellend, so kann diese durch den Verguss der Wasserbausteine erhöht werden, wie es in (Bild 3.3.7) dargestellt ist. Je nach Anwendungsfall kann ein Teil-oder ein Vollverguss vorgesehen werden.



Bild 3.3.7. Einsatz des Vergussmaterials im Deckwerksbau[40];[51]

3.3.2.1. Teilverguss

Wenn die Lagestabilität der Wasserbausteine in einem Streckenabschnitt wegen der Größe der dynamischen hydraulischen Einwirkungen wie Wellen und turbulente Strömungen, oder aufgrund des Einzelgewichtes und Einbaudicke der Wasserbausteine nicht ausreicht, kann das wasserdurchlässige Deckwerk durch einen Teilverguss aus dichtem Vergussstoff erzielt werden. Dieser wird auch beim Auftreten von lokalen mechanischen

Belastungen z.B in engen Kurvenbereichen, beim Übergang von einem festen Bauwerk wie Spundwand oder Flügelmauer auf ungebundene Wasserbausteine, an bauzeitlichen Anlegestellen als Schutz gegen Schraubenstrahlgriff, bei verstärkten Freizeiteinwirkungen von Anglern und Badenden oder einfach als eine konstruktive Befestigung des Deckwerkes angewendet. [51]

Beispiele:



Bild 3.3.8. Sachgerecht hergestelltes teilvergossenes Deckwerk (30 l/m², CP_{90/250}, Einbau von Hand) [51]



Bild 3.3.9. Nicht sachgerecht hergestelltes teilvergossenes Deckwerk mit zu steifem Vergussstoff (70 l/m² CP_{90/250}, Einbau von Hand) [51]



Bild 3.3.10. Versuchskasten eines sachgerecht hergestellte teilvergossenen Deckwerks (90 l/m², LMB_{5/40}, streifenförmiger maschineller Einbau) [51]

3.3.2.2. Vollverguss

Ein Vollverguss aus dichtem Vergussstoff führt zu einem wasserundurchlässigen Deckwerk. Bei vollvergossenen Dichtungsschichten werden in einem Arbeitsgang die Hohlräume einer verlegten Schicht aus losen Schüttsteinen vollständig mit einem dichten Material vergossen. In der Regel wird ein Vollverguss von Wasserbausteinen für Deckschichten in besonders stark belasteten Deckwerken, als eine Sicherung des Anschlusses eines Deckwerksfilters an Spundwände oder sonstige Bauwerke, oder als Randstreifen beim Übergang von einem festen Bauwerk wie Spundwand und Flügelmauer auf teilvergossene Wasserbausteine angewendet. Die Deckwerke aus Vollverguss könnten eine mögliche Dichtungsbauweise in Schifffahrtskanälen, so wie der Kolkschutz unterhalb eines Wehres oder eine Schutzschicht zur Sicherung von gefährdeten Bauwerken, z. B. Ankerschutz über Dükern, sein.[40];[51]



Bild 3.3.11. Blick in eine Großbohrung in einem vollvergossenen Deckwerk [51]

3.3.3. Filter-und Trennlagen

Ein Filter hat die Aufgabe, den Boden vor Ausspülungen und Umlagerungen infolge von Grund-und Sickerwasserströmungen oder äußerer Belastungen durch Oberflächenwasser zu schützen. Bei hydraulischer Beanspruchung sind sowohl Lockergesteine als auch veränderlich feste Gesteine, die unter dem Einfluss von Wasser, Luft und Temperaturschwankungen verwittern und nicht erosionsfest sind, zu sichern. Auf den Anwendungsfall bezogen muss der Filter technische Anforderungen hinsichtlich der mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit erfüllen, d. h. er ist auf den zu schützenden Boden abzustimmen. [40]

Die Filter unterliegen hydraulischen Beanspruchungen durch innere und äußere Strömungskräfte. Eine innere hydraulische Beanspruchung wird durch Strömungskräfte im Korngerüst des Kornfilters verursacht. Eine äußere hydraulische Beanspruchung durch Strömungskräfte an der Oberfläche des Kornfilters. Hinsichtlich der hydraulischen Beanspruchung ist dabei zu unterscheiden, ob sich der Kornfilter in einem Gewässer z. B. Filter innerhalb eines Deckwerks oder an der Luftseite z.B. Auflastdrän am luftseitigen Fuß eines Kanaldamms befindet. [52]

Die Kornfilter unterliegen auch mechanischen Beanspruchungen, z. B. durch Befahren mit Baugeräten, Aufbringen einer Deckschicht aus Schüttsteinen und Überbauten oder Verkehrslasten. Sie sind durch eine ausreichende Dicke auf diese Beanspruchungen auszulegen, oder es sind geeignete Schutzmaßnahmen zu treffen. [40];[52]

3.3.3.1. Kornfilter in einem Deckwerk

Ein Kornfilter in einem Deckwerk muss einen Bodenaustrag in die Deckschicht hinein bzw. durch die Deckschicht hindurch verhindern, d.h. er muss gegen den anstehenden Boden und gegen die Deckschicht filterstabil sein.[52]

Schnelle Wasserspiegeländerungen im Gewässer z.B. infolge Schiffsvorbeifahrt können große innere hydraulische Beanspruchungen in Form hoher hydraulischer Gradienten erzeugen und dadurch hydrodynamische Bodenverlagerungen bewirken, dies gilt sowohl für den Boden unterhalb des Filters als auch für den Filter. Eine Beschädigung des Filters infolge hydrodynamischer Bodenverlagerung wird durch eine ausreichende Auflast der Deckschicht verhindert. Die Deckschicht schützt den Filter auch gegen Erosion infolge äußerer hydraulischer Beanspruchungen wie z.B. Wellenschlag oder Hochwasser-abfluss. (Bild 3.3.12.) zeigt den Aufbau eines Deckwerks mit einem Kornfilter auf einer Uferböschung. [52]

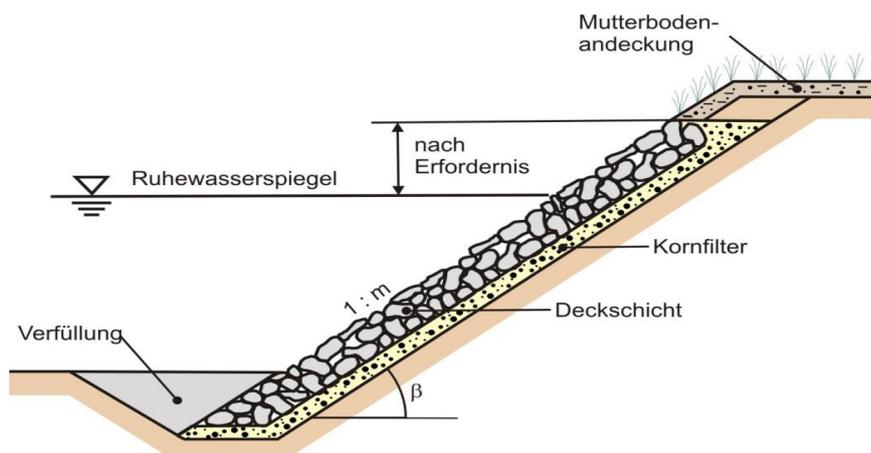


Bild 3.3.12. Kornfilter in einer Böschungssicherung mit Deckwerke [52]

3.3.3.2. Kornfilter als Auflastdrän am luftseitigen Fuß eines Kanaldamms

Ein Auflastdrän am luftseitigen Dammfuß stabilisiert die Dammböschung durch sein Eigengewicht und leitet gleichzeitig das zuströmende Sicherwasser ab. Gegenüber dem Dammmaterial und dem Untergrund muss er filterstabil sein. Hinsichtlich der hydraulischen Beanspruchungen werden zwei Fälle unterschieden, entweder ob ein Gewässer eingestaut wird oder nicht, wie es in den Bildern 3.3.13 und 3.3.14 gezeigt ist. Bei einem nicht eingestauten Auflastdrän erfolgt eine innere hydraulische Beanspruchung nur durch die Zuströmung aus dem Damm. Da die hydraulische Durchlässigkeit des Auflastdräns wesentlich größer ist als die des Dammkörpers, beschränkt sich die Durchströmung auf einen teilgesättigten Übergangsbereich zwischen Dammkörper und Auflastdrän sowie einen gesättigten Bereich geringer Dicke an der Sohle des Auflastdräns. [52]

Bild 3.3.13 zeigt die Durchströmungsverhältnisse bei Anströmung eines Auflastdräns am luftseitigen Dammfuß. Der hydraulische Gradient der wassergesättigten Strömung und damit die Strömungskräfte an der Sohle des Auflastdräns sowie im luftseitigen Wasseraustrittsbereich sind gering und daher nicht standsicherheitsrelevant. [52]

Äußere hydraulische Beanspruchungen ergeben sich durch Starkniederschlag, deshalb ist die Oberfläche eines Auflastdräns durch Grasbewuchs gegen äußere Erosion zu schützen. [52];[53]

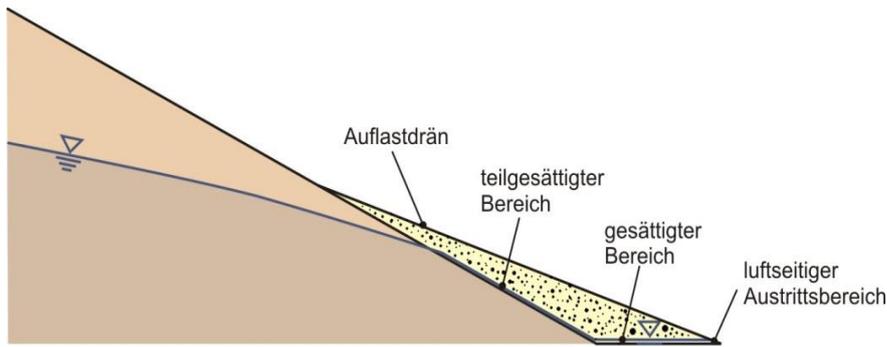


Bild 3.3.13. Durchströmungsverhältnisse bei Anströmung eines Auflastdräns am Dammfuß, nicht eingestaut [52]

Wird ein Auflastdrän auf der Luftseite eingestaut, so treten auch innere hydraulische Beanspruchungen auf. Die unter Wasser befindlichen Partikel des Kornfilters stehen bei luftseitigem Einstau unter Auftrieb, wodurch die Standsicherheit des Dräns verringert werden kann. Bei einem schnellen Wasserspiegelabfall im einstauenden Gewässer können außerdem in Abhängigkeit von der Durchlässigkeit des Bodens und des Auflastdräns sowie der Absenkgeschwindigkeit Porenwasserüberdrücke entstehen, die die Standsicherheit der Dammböschung reduzieren. [52]

Eine äußere hydraulische Beanspruchung auf einen eingestauten Auflastdrän ist die Strömung im angrenzenden Gewässer z.B. Seitengraben. In Abhängigkeit von der maßgebenden Strömungsgeschwindigkeit sind Maßnahmen zum Schutz des Auflastdräns gegen äußere Erosion erforderlich. Zumeist erfolgt dies durch Aufbringen einer Deckschicht z.B. aus Wasserbausteinen, die filterstabil gegenüber dem Auflastdrän sein muss. Bild 3.3.14 zeigt einen Auflastdrän an einer luftseitigen Dammböschung, der am Dammfuß durch einen wasserführenden Seitengraben eingestaut wird. [52];[53]

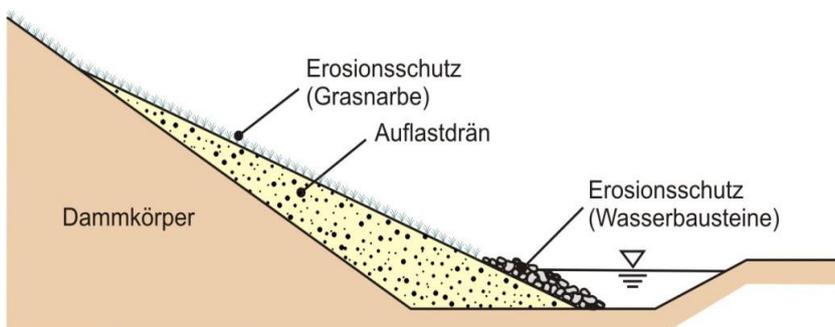


Bild 3.3.14. Auflastdrän mit Einstau durch ein Gewässer. [52]

3.3.3.3. Die Anwendung eines Geotextils als Filter oder Trennlage

Ein Geotextil ist ein wasserdurchlässiger, flächenhaft gefertigter textiler Baustoff, der als Vliesstoff, Gewebe oder Verbundstoff hergestellt wird. Ein geotextiler Filter ist zwischen zwei unterschiedlichen Mineralkornlagen erforderlich, wenn ein maßgebender Kornanteil der feinkörnigeren Lage bei den zu erwartenden Porenwasserströmungen nicht von der grobkörnigeren Lage zurückgehalten werden kann. Dabei ist er nicht nur auf turbulente und laminare Wasserströmungen, sondern auch auf mechanische Beanspruchungen während der Bauausführung und durch den Wasserstraßenbetrieb auszulegen. [53];[48]

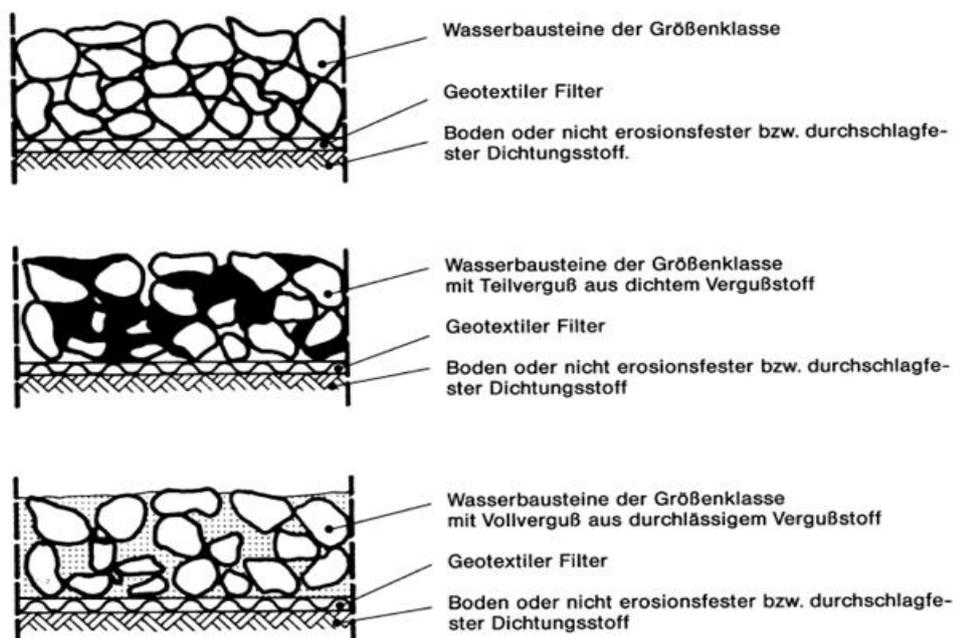


Bild 3.3.15. Regeldeckschichten für Böschung- und Sohlensicherung [48]

3.3.3.4. Trennlage

Eine Trennlage hat die Aufgabe, eine Durchmischung von unterschiedlichen Mineralkornlagen im Hinblick auf langfristige Setzungen zu verhindern z. B Sand oder Mutterboden auf Grobkies oder Steinen, Bühnen aus Wasserbausteinen auf Schlick, grobes Betriebswegmaterial auf feinkörnigem Boden, Wasserbausteine auf Tondichtung, Tondichtung auf sehr grobkörnigem Baugrund. Eine geotextile Trennlage ist auszulegen auf einen sicheren Bodenerückhalt, die mechanischen Beanspruchungen während der Bauausführung und durch den späteren Betrieb, die chemischen Eigenschaften des Wassers, eine mögliche kurzzeitige Bewitterung während der Ausbauphase und eine Durchwurzelung. Deshalb wird die Trennlage als ein Schutzmittel gegen die Erosion des

Bodens angewendet. Im Gegensatz zum Filter besitzt ihre Wasserdurchlässigkeit eine untergeordnete Bedeutung, denn sie kann auch zur Unterstützung einer erwünschten Kolmation d.h. eine Selbstheilung der Dichtung durch Kolmation verwendet werden. [53];[48]

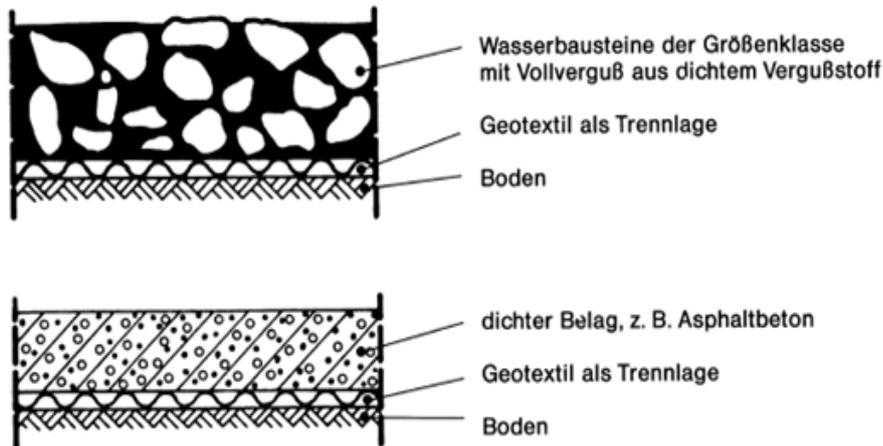


Bild 3.3.16. Geotextil als Filter-oder Trennlage[48]

3.3.4. Dichtungssysteme

Dichtungen der Regelbauweisen sind ausschließlich Oberflächendichtungen. Detaillierte Hinweise zu den unterschiedlichen Dichtungssystemen und deren Eigenschaften und Anwendungsgrenzen werden im Kapitel 4 gegeben. [54]

Vertikaldichtungen und Innendichtungen der Seitendämme werden in den Regelbauweisen nicht behandelt, da sie nicht Bestandteil des Deckwerks sind. [53]

3.3.4.1. Weichdichtungen

Als Weichdichtungen werden die folgenden Dichtungsarten an Wasserstraßen eingesetzt:

-Naturtondichtung: Naturton ist ein feinkörniger Erdstoff, der bei zahlreichen Baumaßnahmen seine Langzeitbeständigkeit als ein bewährtes Dichtungsmaterial bewiesen hat. Der Ton wird in der Natur gewonnen und in der Regel ohne weitere Zusatzstoffe, jedoch mit Aufbereitung wie Kneten und Wasserzugabe eingebaut wird, um die entsprechenden Anforderungen zu erfüllen. Unterschiedliche Mischungen aus Ton, Schluff und Sand oder Tondichtungen aus Tonmehl und Tongranulat wurden beim Bau der bestehenden Kanäle eingesetzt. [55]

-Dauerplastische Dichtungen mit Ton und hydraulischen Bindemitteln: Dabei handelt es sich um ein Gemisch aus Sand, Wasser und einem speziellen Compound, das nicht aushärtet. Das Compound besteht aus Tonmineralien, Zement und Additiven. Die Zementmenge ist so gering bemessen, dass die Mischung im Sinne einer Weichdichtung dauerhaft flexibel bleibt. Durch eine hochoptimierte Aufbereitung in einem Zwangsmischer wird eine große Erosionsstabilität erreicht. [55]



Bild 3.3.17. Fertig verlegte Tonbahnen [68]

-Geosynthetische Tondichtungsbahnen (GTD): Geosynthetische Tondichtungsbahnen bestehen aus zwei Lagen Geokunststoffen, zwischen denen eine Dichtungsschicht eingeschlossen ist. In Abhängigkeit von der verwendeten Geokunststoffen können sie große Zugbeanspruchungen aufnehmen, weshalb sie sich für Befestigung der Böschungen in Wasserstraßen eignen. [55]



Bild. 3.3.18. Geosynthetische Tondichtungsbahnen [69]

3.3.4.2. Hartdichtungen

Als Hartdichtungen werden bei den Regelbauweisen lediglich Wasserbausteine mit einem Vollverguss aus dichtem hydraulisch gebundenem Vergussstoff betrachtet.

Eine Schüttsteindeckschicht wird durch einen undurchlässigen Mörtel vergossen. Durch das Vermörteln verzahnen die Einzelsteine stark untereinander und bilden eine starre Deckschicht, die den hydraulischen Angriffen durch einen wesentlich höheren Widerstand und aufgrund der Festigkeit des Dichtungsmaterials entgegensetzt. [55]



Bild 3.3.19. Verklammertes Uferdeckwerk aus Wasserbausteinen, von Hand gesetzt und fest verpackt. [70]

3.3.5. Boden

Im Vergleich zu allen anderen Baustoffen ist der Boden das vielseitigste Material im Baubereich, das je nach Art des Bauwerkes als Baugrund oder Baustoff bewertet wird. Nach dem Korndurchmesser d werden die Böden in die Hauptbodenarten Ton, Schluff, Sand und Kies sowie Steine und Blöcke unterteilt. (Tabelle 3.3.4) [72]

Korngröße [mm]	Bezeichnung
$\leq 0,002$	Ton
$> 0,002$ bis $0,063$	Schluff
$> 0,063$ bis $2,0$	Sand
$> 2,0$ bis 63	Kies
> 63 bis 200	Steine
> 200 bis 630	Blöcke
> 630	Große Blöcke

Tabelle 3.3.4. Bödenarten in Abhängigkeit von Korngrößen [72]

Die Zusammensetzung der Böden nach der Korngröße wird durch Schlämmanalyse bzw. durch Sieben ermittelt und mit Kornverteilungslinien dargestellt (Bild 3.3.20). [72]

In Bezug auf den Korndurchmesser können die losen Böden als nichtbindige und bindige Böden klassifiziert werden. Nichtbindige – kohäsionslose Böden sind Kiese, Sande und grobe Schluffe mit einer Korngröße $>0,02$ mm. Bindige – kohäsive Böden sind die feineren Schluffe und Tone mit Korngrößen $<0,02$ mm. [72]

Im Weiteren werden jene fünf verschiedene Böden berücksichtigt, für welche die im Kapitel 4 dargestellten Regelbauweisen:(Tabelle 3.3.5.) [40]

B1: Sande und Kiese B2: Sande

B3: schluffige Sande und Kiese

B4: Schluffe, stark schluffige Sande und Kiese

B5: kohäsive Böden

Boden	Durchlässigkeits - beiwert	Effektiver Reibungswinkel	effektive Kohäsion	Feuchtwichte	Wichte unter Auftrieb	Korndurchmesser d bei i-% Siebdurchgang		
	k [m/s]	ϕ [°]	c [kN/m ²]	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	d_5 [mm]	d_{10} [mm]	d_{15} [mm]
B1	$k \geq 5 \cdot 10^{-4}$	35	0	19	11	(-)	$\geq 0,2$	(-)
B2	$5 \cdot 10^{-4} > k \geq 5 \cdot 10^{-5}$	35	0	19	11	(-)	$\geq 0,07$	(-)
B3	$5 \cdot 10^{-5} > k \geq 5 \cdot 10^{-6}$	32,5	0	18	10	$\geq 0,002$	$\geq 0,02$	(-)
B4	$5 \cdot 10^{-6} > k \geq 1 \cdot 10^{-6}$	30	$0 > c < 3$	18	10	(-)	$\geq 0,002$	$\geq 0,02$
B5	$1 \cdot 10^{-6} > k$	> 30	$c \geq 3$	(-)	(-)	(-)	$< 0,002$	$< 0,02$

Tabelle 3.3.5. Charakteristische Bodenkenwerte für Böden B1 bis B5 [40]

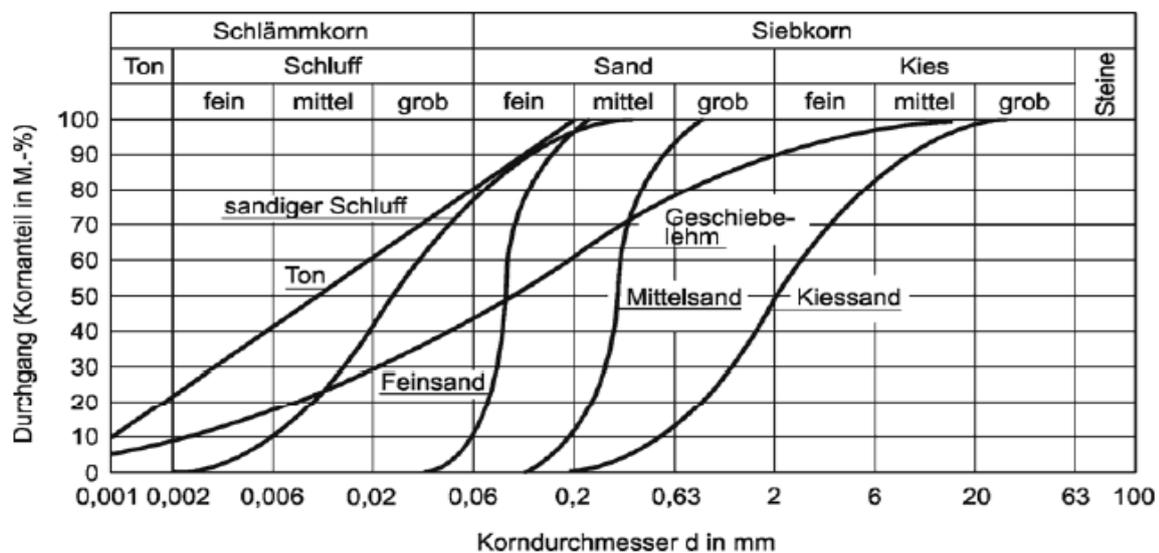


Bild 3.3.20. Kornverteilungslinien [72]

Der unter dem Deckwerk anstehende Boden hat einen maßgeblichen Einfluss auf die Deckschichtdicke, die zur Gewährleistung der lokalen Standsicherheit der mit dem Deckwerk geschützten Böschung erforderlich ist. [40]

Ein wesentlicher Faktor, der bei der Deckwerksbemessung berücksichtigt werden muss, ist die Durchlässigkeit des Bodens. Wenn der anstehende Boden weniger durchlässig ist, ist der Porenwasserüberdruck unter dem Deckwerk infolge eines Wasserspiegelabsunkes bei einer Schiffsvorbeifahrt größer und seine destabilisierende Wirkung auf das Deckwerk und den Untergrund stärker. Diese Regel gilt nur für kohäsionslose Böden (B1 bis B4). [40]

Der kohäsive Boden B5 besitzt eine auch unter Wasser dauerhaft wirksame Kohäsion c von mindestens 3 kPa, d.h, dass die lokale Standsicherheit der Deckwerke auf die bemessene Mindestdicke der Deckschicht gegründet wird. Wenn die wirksame Kohäsion $0 < c < 3$ kPa ist, ist das erforderliche Deckwerk zu bemessen. Bei Böden mit einer Durchlässigkeit von $5 \cdot 10^{-6} > k \geq 1 \cdot 10^{-6}$ m/s könnte Boden 4 angesetzt werden. [40]

In der Tabelle 3.3.5 sind die bodenmechanischen Kennwerte der Böden entsprechend den Regelprofilen zusammengestellt, mit deren Hilfe eine Zuordnung der jeweils anstehenden Böden zu den Böden B1 bis B5 erfolgt werden kann. Der jeweilige Feinanteil (d_5 , d_{10} , d_{15}) entsprechend Tabelle 3.3.5, der für die Zuordnung maßgebend, bestimmt die charakteristische Durchlässigkeit k des Bodens. [40]

Andererseits muss die lokale Standsicherheit der Uferböschung gewährleistet sein. Sie hängt vom Porenwasserüberdruck im anstehenden Boden ab, der durch den schnellen Wasserspiegelabsunk entstehen kann und dessen Größe von Absunktiefe und -geschwindigkeit sowie der Durchlässigkeit des Bodens bestimmt wird.

Ist die Absunkgeschwindigkeit größer als die Durchlässigkeit, kann sich der im Boden vorhandene hydrostatische Porenwasserdruck mit zunehmender Tiefe nicht schnell genug anpassen (Bild 3.3.21.). Der Porenwasserüberdruck gehorcht einer logarithmischen Funktion: [36]

$$\boxed{\max \Delta u(z, t) = \gamma_w z_a \left(1 - e^{-b \cdot z_a}\right)} \quad (3.3.6)$$

Symbole s. Bild 3.3.21.b = $f(t_a, k)$ – Porenwasserdruckparameter [-]; k – Bodendurchlässigkeit [m/s]

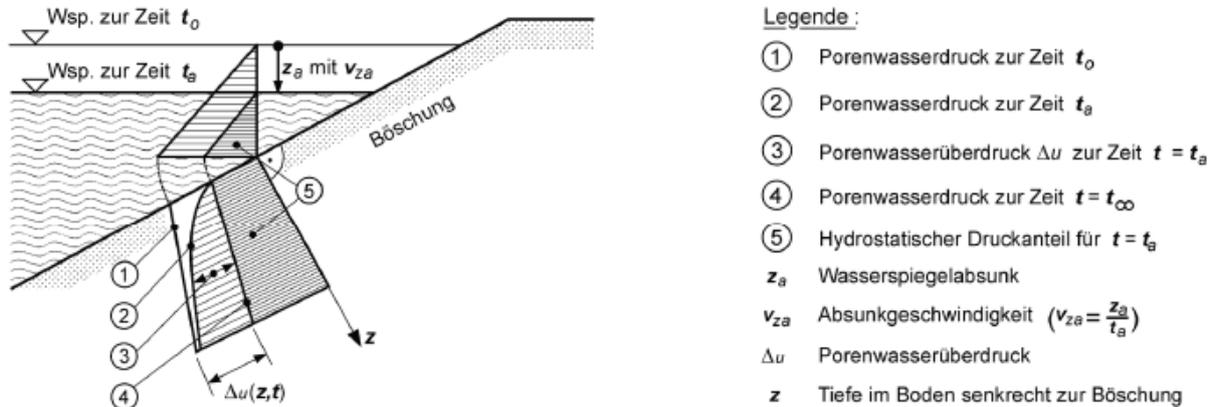


Bild 3.3.21. Hydrostatischer Porenwasserdruck und Porenwasserüberdruck während eines schnellen Wasserspiegelabsinks [36]

Das physikalische Verhalten der Luft als dritter Komponente im System Boden-Wasser führt zu Grundwasserströmungen in Richtung der Bodenoberfläche, die die effektiven Spannungen im Boden und damit die Reibungskräfte soweit reduzieren, dass statische Grenzzustände auftreten können. Zum Einen kann es zu oberflächennahen Auflockerungen (hydrodynamische Bodenverlagerung) in der Böschung oder der Sohle kommen, zum Anderen kann eine Uferböschung (mit oder ohne Deckwerk) in einer böschungsp parallelen Bruchfläche in der Tiefe d_{krit} , die in Höhe der maximalen Differenz zwischen Porenwasserüberdruck und vorhandener effektiver Spannung des Bodens liegt, abgleiten (Bild 3.3.22). [71]

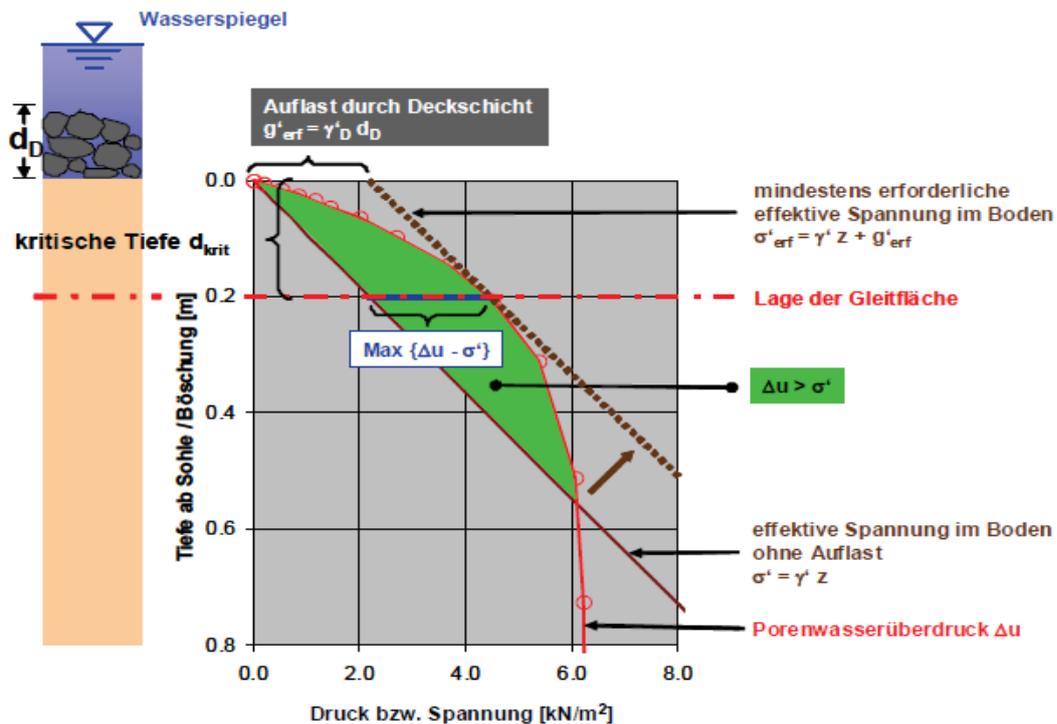


Bild 3.3.22. Gleichgewicht zwischen effektiver Spannung und Porenwasserüberdruck im Boden; Lage der kritischen Tiefe und damit der Gleitfläche; Ableitung der erforderlichen Deckschichtdicke [71]

Diese Grenzzustände im Boden können durch ein Deckwerk verhindert werden, dessen erforderliches Flächengewicht, abhängig von der Rohdichte der Wasserbausteine und der Schichtdicke, dimensioniert wird. [36]

Unter dem Deckwerk ist es möglich, dass hydrodynamische Bodenverlagerungen infolge des Porenwasserüberdruckes auftreten. Auf diesem Grund wird bei kohäsionslosen Böden ($c'=0$) empfohlen, ein höheres Flächengewicht anzusetzen, das durch seine Auflast mögliche Umlegungen im Boden verhindert. Dies gilt nicht bei kohäsiven Böden ($c'>0$). [36]

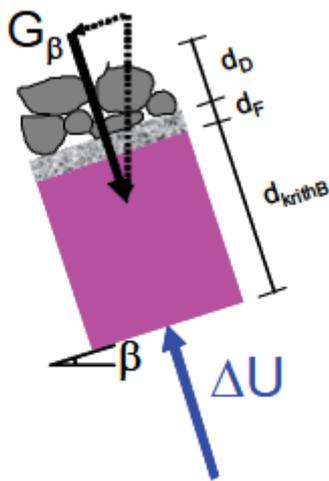
Zur Verhinderung hydrodynamischer Bodenverlagerungen ist es erforderlich, das Flächengewicht g' der Deckschicht unter Auftrieb zu bestimmen. Mit Hilfe der Bestimmungsgleichung für die Dicke d_D der Deckschicht wird das Gleichgewicht an einem Bodenelement (Bild 3.3.23) zwischen treibender Kraft aus Porenwasserüberdruck PWÜD und haltender Kraft (= Eigengewicht Boden bis kritische Tiefe, Gewichte der Deckschicht aus Schüttsteinen und des Filters) ausgedrückt: [36]

$$g' = \underbrace{\gamma'_D}_{\text{Deckschicht}} d_D \geq \underbrace{\frac{\Delta u}{\cos \beta}}_{\text{PWÜD}} - \underbrace{\gamma'_F}_{\text{Filter}} d_F - \underbrace{\gamma' d_{\text{kritB}}}_{\text{Boden}} \quad (3.3.7)$$

γ' , γ'_F , γ'_D – Boden-, Filter- und Deckschichtwichte unter Auftrieb [kN/m³]

d_{kritB} – kritische Tiefe der Bruchfuge [m], maßgeblich für hydrodynamische Bodenverlagerungen

$$d_{\text{kritB}} = \frac{1}{b} \ln \left(\frac{\gamma_w z_a b}{\cos \beta \gamma'} \right) \geq 0 \quad (3.3.8)$$



Symbole:

G_β – Auflast aus Boden, Deckschicht und Filter [kN/m²]

ΔU – Kraft inf. Porenwasserüberdruck [kN/m²]

d_D – Dicke der Deckschicht [m]

d_F – Dicke des Filters [m]

β – Böschungswinkel [°]

Bild 3.3.23 Bodenelement zum Nachweis der hydrodynamischen Bodenverlagerung (h_B) mit Kräftegleichgewicht. [71]

Bei entsprechender Ausbildung des Deckwerks am Böschungsfuß kann bei der Ermittlung des Flächengewichts der Deckschicht eine Fußstützkraft berücksichtigt werden, deren Größe aus der Scherfestigkeit des Deckwerks (Bruchmechanismus 1) oder aus der Standsicherheit des Deckwerksfußes (Bruchmechanismus 2) resultiert. [36]

Um ausreichende Sicherheit gegen Abgleiten nachzuweisen, sind zwei Bruchmechanismen zu betrachten (Bild 3.3.24): [36]

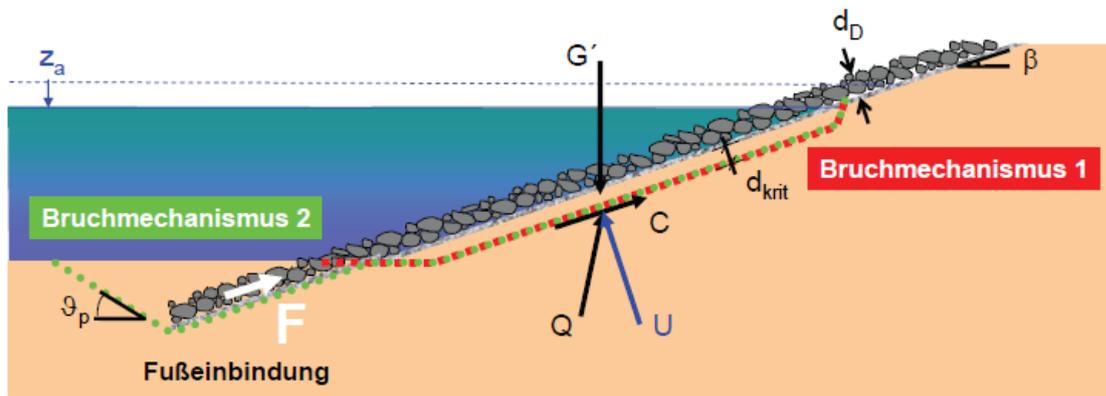


Bild3.3.24. Bruchmechanismus beim lokalen Standsicherheitsnachweis einer losen Steinschüttung [71]

Symbole:

C – Kohäsionskraft; F – Fußstützkraft [kN/m²]

G' – Auflast aus Boden, Deckschicht und Filter [kN/m²]

Q – Resultierende [kN/m²]; U – Kraft inf. Porenwasserüberdruck [kN/m²]

d_D – Dicke der Deckschicht [m]; d_F – Dicke des Filters [m];

d_{krit} – kritische Tiefe der Gleitfläche [m];

z_a – Wasserspiegelabsenkung [m]; β – Böschungswinkel [°]; θ_p – Gleitflächenwinkel [°]

Beim Bruchmechanismus 1 schneidet die Gleitfläche das Deckwerk auf der Höhe der Gewässersohle. Beim Bruchmechanismus 2 verläuft die Gleitfläche bis unter eine i. d. R. vorhandene Fußstützung (häufig Fußeinbindung oder -vorlage, selten Fußspundwand). Es werden die Spannungen in der Gleitfläche ermittelt. Darüber hinaus einwirkende Kräfte (z. B. Fußstützung) werden in äquivalente Spannungen umgerechnet. Die Berechnung des Flächengewichts der Deckschicht bzw. der zugehörigen Dicke einer Böschungssicherung erfolgt für die oberflächennahe, böschungsparelle Bruchfuge in der kritischen Tiefe d_{krit}. Bei Berücksichtigung einer Fußstützung wird die daraus resultierend äquivalente Zusatzspannung τ_F eingesetzt. Das Gleichgewicht hierzu bildet eine weitere Bedingung für die erforderliche Schichtdicke d_D: [71];[36]

$$g' = \underbrace{\gamma'_D d_D}_{\text{Deckschicht}} \geq \underbrace{\frac{\Delta u \tan \phi' - c' - \tau_F}{\cos \beta \tan \phi' - \sin \beta}}_{\text{PWÜD+Kohäsion+Fußstützung}} - \underbrace{\gamma'_F d_F}_{\text{Filter}} - \underbrace{\gamma' d_{\text{kritB}}}_{\text{Boden}} \quad (3.3.9)$$

φ' – effektiver Reibungswinkel des Bodens [°]

τ_F – Zusatzspannung aus einer Fußstützung [kN/m²]

Die Gleichung ist nur für Böden mit einem Reibungswinkel $\phi' > \beta$ definiert.

3.4. Schadenklassifizierung

Als Schaden wird die Überschreitung des Toleranzbereiches für die Abweichung zwischen dem Ist – und dem Sollzustand eines Bauteils zum Zeitpunkt der Bauwerksinspektion im Hinblick auf die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit, z.B. Betonabplatzung, freiliegende Bewehrung, Korrosion bezeichnet. Die Fähigkeit des Tragwerks und seiner tragenden Teile allen auftretenden mechanischen Kräften oder Zwangsverformungen während der Errichtungs – und Nutzungsdauer zu widerstehen, ist die Betriebssicherheit, die planmäßige Nutzung entsprechend festgelegter Bedingungen zu ermöglichen. Bei fehlender Tragfähigkeit kommt es zum Einsturz oder zu anderen Formen des Tragwerks-bzw. Bauteilversagens, d.h. die Anlage kann nicht entsprechend ihrer Funktion verwendet werden. [56]; [57]

Bei der Bauwerksinspektion sollen nur Schäden erfasst und dokumentiert werden. Die Schäden sollen im Hinblick auf die Tragfähigkeit und die Gebrauchstauglichkeit bewertet werden. Andere Begriffe wie Standsicherheit, Funktionssicherheit und Betriebsfähigkeit sind damit mitberücksichtigt. Ausschlaggebend für die Bewertung der Schäden ist der aktuelle Zustand zum Zeitpunkt der Bauwerksinspektion. [36]

Die erfassten Schäden sind einer Schadensklasse zuzuordnen. Mit den festgelegten Definitionen der Schadensklassen können vorgefundene Schäden ausreichend genau eingestuft werden z.B: Schadensklasse 1 – für die Schäden, die am Bauwerk gefunden werden, aber voraussichtlich keine Schadensentwicklung erfahren werden, bei dem sich der Zustand weiter verschlechtern wird. Klassische Beispiele sind Risse aus abfließender Hydratationswärme, Korrosion an Bewehrungsabstandshaltern oder kleinere Setzungen. Die Schadensklassen 2-4 beschreiben den Schadensentwicklungsprozess, der sich auf die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Bauteils auswirkt. [56];[64]

3.4.1. Schaden im Deckwerksbau

Je nach der Funktion, die die Deckwerke im Binnenwasserstraßenbereich erfüllen, können sie in zwei Gruppen aufgeteilt werden. Unter Deckwerken mit Dichtungs-funktion werden Böschungs – Sohlensicherungen eines Gewässers verstanden, die vor allem den Wasseraustausch zwischen Wasserstraße und Untergrund bzw. Wasserstraße und Ge-

lände verhindern sollen. Deckwerke, die den Untergrund oder das Ufer in Manövrierbereichen von Schiffen oder im Bereich von Wehrvorfeldern ausschließlich vor Erosion schützen, werden als Deckwerke ohne Dichtungsfunktion bezeichnet. Die Klassifizierung von Deckwerken entsprechend der Abbildung (Bild 3.4.1) könnte als Basis für eine ausreichende Bewertung auf Schäden im Deckwerksbau dienen. [40]

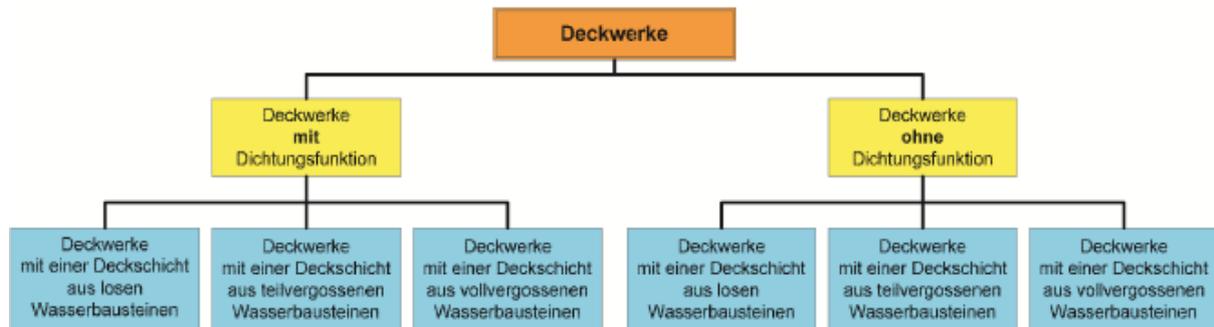


Bild 3.4.1. Darstellung von Deckwerken in Abhängigkeit von ihrer Funktion [56]

Ein Schaden im Bereich der Deckwerke ist die Beeinträchtigung des Zustand eines Deckwerkes zum Zeitpunkt der Bauwerksinspektion im Hinblick auf die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Deckwerke selbst und des zu schützenden Erdbauwerkes unter den hydraulischen Belastungen infolge Schifffahrt bzw. natürlicher Strömung, insbesondere bei Hochwasser. Bei nicht mehr gegebener Fähigkeit der Deckwerke können Erosion, hydrodynamische Bodenverlagerungen und böschungsparalleles Abgleiten in einer oberflächennahen Bodenschicht auftreten. Die Funktion der Dichtung kann verloren gehen. Letztendlich kann es bei nicht mehr gegebener Tragfähigkeit der Deckwerke zum Versagen der gesamten Böschung kommen und damit zum Verlust der Gebrauchstauglichkeit des zu schützenden Massivbauwerkes. [40]

Ursache für Schäden an den Deckwerken ist überwiegend eine unzureichende Bemessung hinsichtlich der hydraulischen Belastungen infolge der Schifffahrt: [56]

- Maßgebende Belastungen im Streckenbereich: Wasserspiegelabsenkung, Wellenauf- und ablauf an den Uferböschungen, Rück- und Wiederauffüllungsströmung
- Maßgebende Belastungen im Manövrierbereich (Anlegestellen, Schleusenvorhäfen)
- Belastungen aus Propellerstrahl von Haupt- und Bugstrahlruder, die auf Böschung und Sohle auftreten

- Weitere Schadensursachen: Schiff-Anfahrungen, Eisgang, Hochwasserbelastungen, Wasserüberdruck durch höhere Grundwasserstände

Zur Feststellung von Schäden an den Deckwerken werden folgende Methoden empfohlen: [36]

- visuelle Begutachtung oberhalb des Wasserspiegel vom Land aus
- visuelle Begutachtung im Bereich des Wasserspiegelabsunks vom vorbeifahrenden Schiff aus (Wasserwechselbereich)
- visuelle Begutachtung durch Taucher (Unterwasserbereich)
- Peilungen im Deckwerksbereich z.B. Stangenpeilungen, Flächerecholotpeilungen
- Trockenlegung des zu untersuchenden Deckwerksbereichs
- Begutachtung des luftseitigen Dammbereichs hinsichtlich Vernässungen (Wasseraustritten /Versagen der Dichtung)

3.4.1.1. Deckwerke mit Dichtungsfunktion

Generell lassen sich Schäden an Deckwerken nicht allein durch ein Kriterium beschreiben. Daher wurden für den Schadensfall mehrere Eigenschaften definiert. Diese sind im Folgenden in den blauen Kästchen dargestellt. Für die Einordnung in die richtigen Schadensklassen müssen die verschiedenen Eigenschaften erfasst, überprüft und bewertet werden. Dabei ist eine unterschiedliche Ausprägung verschiedener Eigenschaften durchaus denkbar und möglich. Die Gesamtbewertung des Schadens entspricht im Regelfall der Maximalbewertung einer Eigenschaft. [56]

-Deckwerke mit einer Deckschicht aus losen Wasserbausteinen:Die Regelbauweise besteht aus geschütteten Wasserbausteinen, einem geotextilen Filter bzw. Trennlage oder Kornfilter und einer Dichtung.



Bild3.4.2. Deckwerke mit einer Deckschicht aus losen Wasserbausteinen[40]

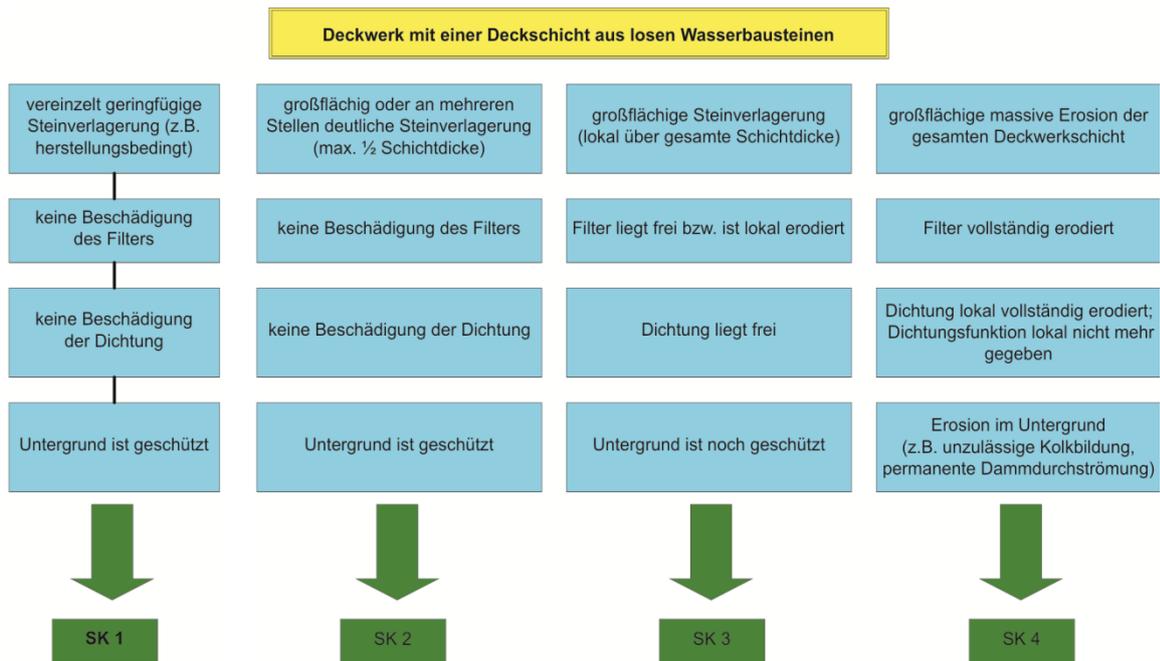


Bild 3.4.3. Schadenklassifizierung bei Deckwerk mit einer Deckschicht aus losen Wasserbausteinen [56];[57];[64]

Schadenklassenbeispiele:



- großflächige Steinverlagerung-max.1/2 Schichtdicke;
- keine Beschädigung des Filters und der Dichtung;
- Untergrund ist geschützt

Bild 3.4.4. Schadenklasse 2-SK2 [56]



- großflächige Steinverlagerung-lokal über die gesamte Schichtdicke
- Filter liegt frei bzw. ist lokal beschädigt
- Dichtung liegt frei
- Untergrund ist noch geschützt

Bild 3.4.5. Schadenklasse3-SK3 [56]

-Deckwerke mit einer Deckschicht aus teilvergossenen Wasserbausteinen:Die Regelbauweise besteht aus einer Deckschicht aus geschütteten Wasserbausteinen und

einem Teilverguss aus einem dichten Vergussstoff, einem geotextilen Filter bzw. Trennlage oder Kornfilter und einer Dichtung.



Bild 3.4.6 Deckwerke mit einer Deckschicht aus teilvergossenen Wasserbausteinen [40]

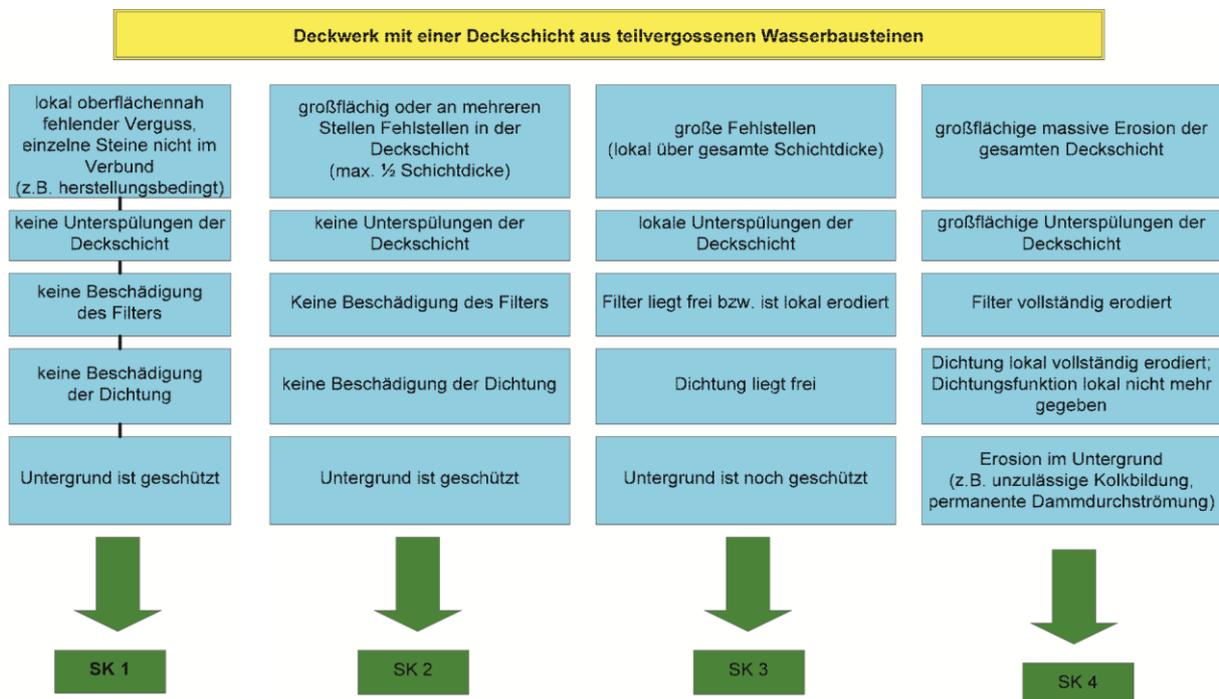


Bild 3.4.7. Schadenklassifizierung bei Deckwerk mit einer Deckschicht aus teilvergossenen Wasserbausteinen [56];[57];[64]

Schadenklassenbeispiel:



- große Fehlstelle-lokal über die gesamte Schichtdicke
- lokale Unterspülung der Deckschicht
- Filter liegt frei bzw. ist lokal erodiert
- Dichtung liegt frei
- Untergrund ist noch geschützt

Bild 3.4.8. Schadenklasse 3-SK3 [56]

-Deckwerke mit einer Deckschicht aus vollvergossenen Wasserbausteinen: Diese Regelbauweise besteht aus einer Deckschicht aus geschütteten Wasserbausteinen, einem Vollverguss aus einem dichten Vergussstoff und einer geotextilen Trennlage.



Bild 3.4.9. Deckwerke mit einer Deckschicht aus vollvergossenen Wasserbausteinen[40]

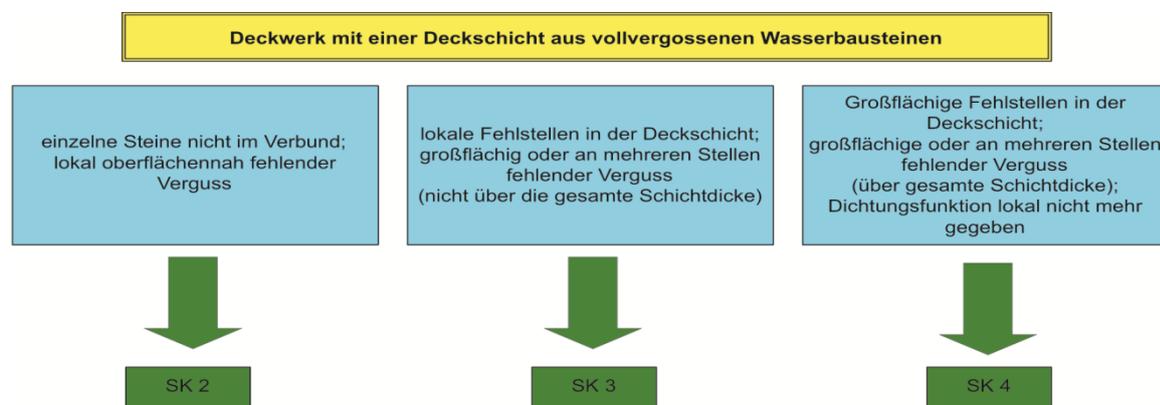


Bild 3.4.10. Schadenklassifizierung bei Deckwerke mit einer Deckschicht aus vollvergossenen Wasserbausteinen [56];[57];[64]

Schadenklassenbeispiel:



- einzelne Steine nicht im Verbund
- lokal oberflächennah fehlender Verguss

Bild 3.4.11. Schadenklasse 2-SK2[56]

3.4.1.2. Deckwerke ohne Dichtungsfunktion

Es handelt sich um Deckwerke, die ausschließlich den Untergrund oder das Ufer vor Erosion schützen, aber keine Dichtungsfunktion besitzen, z.B. in Manövrierbereichen von Schiffen oder im Bereich von Wehrvorfeldern. [56]

-Deckwerke mit einer Deckschicht aus losen Wasserbausteinen: Die Regelbauweise besteht aus einer Deckschicht aus geschütteten Wasserbausteinen und einem geotextilen Filter bzw. Trennlage oder Kornfilter.

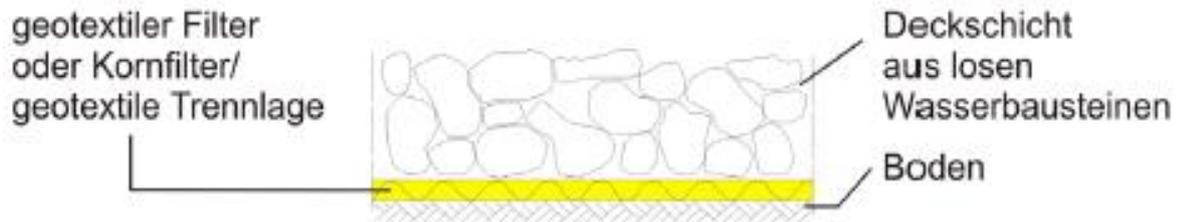


Bild 3.4.12. Deckwerke mit einer Deckschicht aus losen Wasserbausteine [56]



Bild 3.4.13. Schadenklassifizierung bei Deckwerk mit einer Deckschicht aus losen Wasserbausteinen [56];[57];[64]

Schadenklassenbeispiele:



- vereinzelt geringfügige Steinverlagerung
- keine Beschädigung des Filters
- Untergrund ist geschützt

Bild3.4.14. Schadenklasse 1-SK1[56]



- großflächige Steinverlagerung-lokal über die gesamte Schichtdicke
- Filter (Geotextil) liegt frei bzw. ist lokal beschädigt Untergrund ist lokal nicht mehr geschützt, aber noch keine großflächige Erosion

Bild 3.4.15. Schadenklasse 3-SK3 [56]

-Deckwerke mit einer Deckschicht aus teilvergossenen Wasserbausteinen:Die Regelbauweise besteht aus einer Deckschicht aus geschütteten Wasserbausteinen und einem Teilverguss aus einem dichten Vergussstoff und einem geotextilen Filter bzw. Trennlage oder Kornfilter.



Bild 3.4.16. Deckwerke mit einer Deckschicht aus teilvergossenen Wasserbausteinen[56]

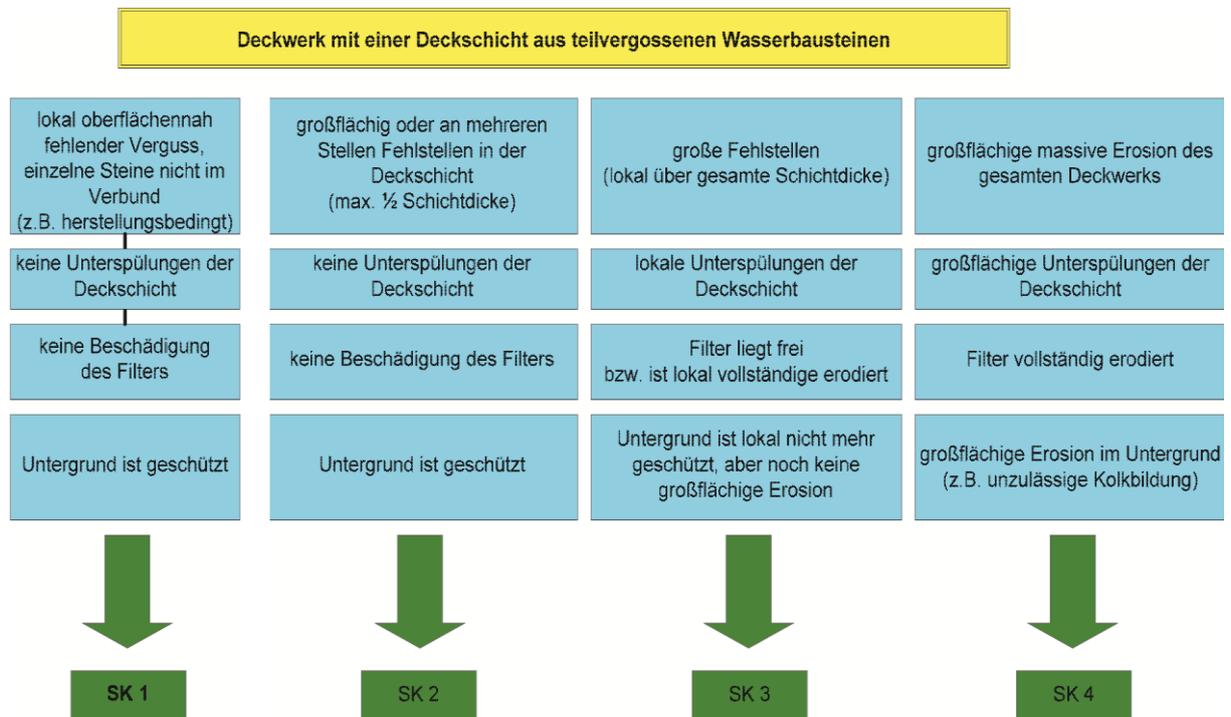


Bild 3.4.17. Schadenklassifizierung bei Deckwerke mit einer Deckschicht aus teilvergossenen Wasserbausteinen [56];[57];[64]

Schadenklassenbeispiele:



- große Fehlstellen-lokal über gesamte Schichtdicke
- lokale Unterspülung der Deckschicht
- Filter liegt frei bzw. ist lokal vollständig erodiert
- Untergrund ist lokal nicht mehr geschützt, aber noch keine großflächige Erosion

Bild 3.4.18. Schadenklasse 3-SK3 [56]



- großflächig oder an mehreren Stellen Fehlstellen in der Deckschicht -max.1/2 Schichtdicke
- keine Unterspülung der Deckschicht
- keine Beschädigung des Filters
- Untergrund ist noch geschützt

Bild 3.4.19. Schadenklasse2-SK2 [56]

-Deckwerke mit einer Deckschicht aus vollvergossenen Wasserbausteinen:Die Regelbauweise besteht aus einer Deckschicht aus geschütteten Wasserbausteinen, einem Vollverguss aus einem dichten Vergussstoff und einer geotextilen Trennlage.

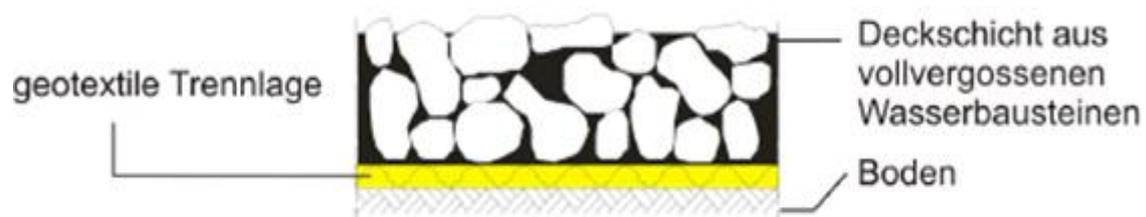


Bild 3.4.20 Deckwerke mit einer Deckschicht aus vollvergossenen Wasserbausteinen[56]



Bild 3.4.21. Schadenklassifizierung bei Deckwerke mit einer Deckschicht aus vollvergossenen Wasserbausteinen[56];[57];[64]

4.Regelbauweisen

4.1. Allgemeines

Böschungs-und Sohlensicherungen dienen dazu, eine ausreichende Stabilität des Gewässerbettes, insbesondere bei begrenzten Querschnitten in Schifffahrtskanälen, zu gewährleisten. Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über die umfassenden Bauweisen und Bauelemente, behandelt Möglichkeiten und Grenzen eines naturnahen Bauens und gibt Hinweise zur Bauausführung. Da die Baugestaltung in großem Maße durch die lokalen Anforderungen bestimmt wird, wird die Ausbildung im Einzelfall sehr unterschiedlich sein. [73];[82]

Andererseits haben die Diskussionen um den Deckwerksbau gezeigt, dass es wünschenswert ist, objektive Bemessungsverfahren zur Verfügung zu haben, weshalb immerwieder der Versuche unternommen wurden, allgemeingültige Regeln aufzustellen. Dabei müssen sowohl einzelne Bauteile als auch das Deckwerke als Gesamtheit behandelt werden. Die enge Zusammenarbeit von Geotechnik und Hydraulik ist dabei unerlässlich, da die Deckwerksdimensionierung beide Fachbereiche betrifft. Basierend auf den Bemessungsregeln und auf jahrzehntelangen praktischen Erfahrungen mit Deckwerken, wurden daher Regelbauweisen für Ufer -und Sohlensicherungen entwickelt.[73]

Eigentlich sind die Regelbauweisen standardisierte Bauweisen, die unter bestimmten Umständen ohne rechnerischen Nachweis ausführbar sind. Für gleichbleibende Randbedingungen wie z.B. Regelquerschnitte der Kanäle, können Regelbauweisen aufgestellt werden. Bauweisen an Flüssen sind demgegenüber vielfältiger. Diese Regelbauweisen beruhen auf Erfahrungen beim Bau und der Unterhaltung von Böschungs-und Sohlensicherungen. Die Basis von Kenntnis ist für die einzelnen Bauweisen jedoch sehr unterschiedlich. Ferner muss berücksichtigt werden, dass auf Praxis beruhende Bauweisen sich nur auf bisher Bekanntes beziehen können. [40]; [83];[85]

Man weiß nur, dass bislang bei diesen Bauweisen kein Schaden aufgetreten ist, ohne dass genaue Kenntnis über das herrschende Sicherheitsniveau vorhanden ist. Während für die Deckwerksstabilität in Analogie zum Böschungsbruch mehrere verschiedene Modelle vorhanden sind, gibt es für die hydrodynamische Bodenverlagerung bislang kein verlässliches Modell. Der einzige diesbezügliche Nachweis in Normen und Empfehlungen ist der Nachweis ausreichender Sicherheit gegen hydraulischen Grundbruch.

Dieser Nachweis besteht in einem Kräftevergleich in Bodenschnitten, wobei der ungünstigste Schnitt maßgeblich ist. Das Modell in Analogie zum hydraulischen Grundbruchnachweis wird den wirklichen Vorgängen nicht gerecht, sodass auf diesem Gebiet sicher noch weiterer Erkenntniszuwachs vonnöten ist. Solange jedoch kein Ersatz gefunden wird, kann nur mit diesem Ansatz ein unzureichendes Sicherheitsniveau vermieden werden. [83]; [40]

Zukünftige Entwicklungen können daher zu unliebsamen Überraschungen führen, insbesondere wenn die bestehende Sicherheitsmarge gering ist. Ein Beispiel für solch eine Entwicklung sind die nicht mehr ausreichend widerstandsfähigen Sohlsicherungen von Häfen, die den neuen Schiffsantrieben nicht mehr standhalten.[83]

In diesem Zusammenhang wird immer wieder die Frage aufgeworfen, ob die Wasserstraßen- und Schiffsfahrverwaltung denn zu sicher bauen würde. Dünnere Deckwerke brächten denselben Schutz wie die jetzt gebauten, sofern sie nur in sich stabil seien. [40]

Dabei wird aber häufig vergessen, dass man die Stabilität der Deckwerke nicht nur hinsichtlich der Stabilität gegen hydraulischen Angriff betrachten darf, sondern dass das Gesamtsystem einschließlich des anstehenden Bodens und des Grundwassers betrachtet werden muss.[40]

Die gesammelten Bauerkenntnisse und Unterhaltungs-erfahrungen schaffen nämlich einen geschlossenen Rahmen, der als Basis bei der Planung und der Ausführung des Deckwerkes mit Ziel zur Gewährleistung der Gesamtstandsicherheit der Wasserstraßen hinsichtlich des Gewässerbetts zur Verfügung steht, wie man maßgebende Verkehrslasten- und geotechnischen Nachweisen bei Regelbauweisen berücksichtigt.[83]

4.2. Bauweisen

4.2.1. Bauweise D1 mit losen Schüttsteinen

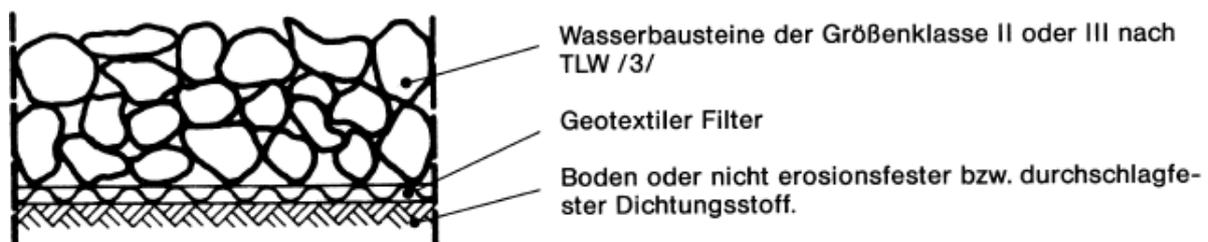


Bild 4.2.1. Schematische Darstellung einer durchlässigen Deckschicht aus losen Wasserbausteinen im Querschnitt [48];[73]

Erläuterung zu Bild 4.2.1.: Die Kürzung „TLW “ bedeutet „Technische Lieferbedingungen Wasserbausteine“, die als eine Norm in den Regelwerken berücksichtigt werden. Hiermit sind die Anforderungen an Wasserbausteine normativ geregelt. [49]

„TLW 1997“ wurden als „TLW 2003“ überarbeitet. Wesentliche Änderung gegenüber den früheren Regelungen der „TLW 1997“ wurden mit den neuen Regelwerken neue Größen- und Gewichtsklassen eingeführt. Aufgrund der Erfahrungen können für natürliche Gesteine mit $\rho_s = 2,3-3,0 \text{ t/m}^3$ die alten Steinklassen wie in Tabelle in die neuen Steinklassen überführt werden. [49]

TLW 1997 (alt)	TLW 2003 (neu)
Klasse II	CP 90/250
Klasse III	LMB 5/40
Klasse IV	LMB 10/60

Tabelle 4.2.1.Überführung der alten in die neuen Steinklassen [49]

Anmerkung: Die Steinklassen CP 90/250, LMB 5/40, LMB 10/60 werden im Kapitel 3.3.1 ausführlich dargestellt.

Die Regelbauweise aus einer durchlässigen Deckschicht, die geschüttete, lose Wasserbausteine auf einem geotextilen Filter oder Kornfilter ausgemacht wird, besitzt eine große Anpassungsfähigkeit und eine ausreichend gute Flexibilität bei Untergrundverformungen. Außerdem kann diese Bauweise in Abhängigkeit von der Größe der gelegten Einzelsteine und die festgesetzte Einbaudicke der Deckschicht hoheLagen-stabilität und Widerstände gegen Schiff- Anfahrungen aufweisen. Diese Angaben werden von der Rohdichte der Steine und dem Hohlraumgehalt der Steinschüttung bestimmt. [40]

Als Minimalwert der Steinrohichte auf Böschungen wird $\rho=2,3\text{t/m}^3$ angenommen, während bei Wasserwechselzone mit hohen Strömungsbelastungen z.B. in Manövrierbereichen, Vorhäfen und Liegestellen eine höhere Rohdichte wegen der deutlichen Steinverlagerungen gefordert wird. [73];[86]

Abhängig von der Steinrohichte sind die empfohlenen Steinklassen für die entsprechenden Sicherungsbauweisen der Böschung oder der Flusssohle in der Tabelle 4.2.2. bezüglich der mittleren Einzelsteingrößen D_{50} bzw. Einzelsteingewichte G_{50} , die eine ausreichende Lagestabilität der Einzelsteine für eine festgelegten Belastungsszenariengewährleisten, zusammengestellt. [40];[86]

Rohdichte ρ_s	erforderliches D50	erforderliches G50	Empfohlene Steinklasse
[kg/m ³]	[mm]	[kg]	-
2300	≥ 260	≥ 25	LMB10/60
2650	≥ 200	≥ 14	LMB5/40
3000	≥ 160	≥ 8	LMB5/40
3600	≥ 120	≥ 4	CP90/250

Tabelle 4.2.2. Erforderliche Steindurchmesser bzw. Steingewichte und notwendige Steinklassen für Regelprofile bei Zulassung aller Schiffstypen/ES, GMS, SV, ÜGMS/ für verschiedene Rohdichten (2300-3600 kg/m³). Siehe die Erläuterung der Steinklassen im Kapitel 3.3.1 [40]

Anmerkung: (Abweichend von der Tabelle kann es auch sinnvoll sein, die jeweils kleinere Steinklasse zu wählen. Dies ist eine erhöhte Anforderung an die jeweils kleinere Steinklasse und schränkt daher deren Verfügbarkeit ein) [40]

In Bezug auf die Stabilität des Steingerüsts ist die Rohdichte der Steine wieder von wesentlicher Bedeutung, denn durch sie könnte die Mindestdicke an der Sohle und an der Böschung der Deckschicht aus losen Wasserbausteinen definiert werden, (siehe Tabelle 4.2.3) [40]

Die erforderlichen Mindestdicken nehmen für eine bestimmte Rohdichte der Steine mit größer werdender Steinklasse zu. Das ist eine Möglichkeit, die nächst kleineren Steinklassen mit einem G₅₀ bzw. D₅₀-Wert, der über dem mittleren Wert dieser Steinklasse liegt, zu prüfen. [40]

Bei Zwischenwerten für die Rohdichten ist auf der sicheren Seite liegend die Steingröße für die nächst kleinere Rohdichte zu wählen, oder es ist ein rechnerischer Nachweis mit der genauen Rohdichte nach GBB (Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlsicherungen an Binnenwasserstraßen) zu erbringen. [40]

Es ist erforderlich, bestimmte technische Anforderungen hinsichtlich der Steinrohden zu berücksichtigen. z. B. bei Rohdichten $\rho_s < 2650 \text{ kg/m}^3$ werden große Steine verwendet, in diesem Fall wird eine relativ große Schichtdicken erfolgen. Aus diesem Grund wird empfohlen, die Rohdichte 2650 kg/m^3 nicht zu unterschreiten. [40]

Bei Rohdichten über 3000 kg/m^3 werden nur mit industriell hergestellten Wasserbausteinen (Schlacken) erreicht, bei deren Verwendung die Regeln zur Umweltverträglichkeit zu beachten sind. [40]

Rohdichte [kg/m³]	Stein-Klasse [-]	D ₅₀ Siebkorn-durchmesser [m]	Mindestschichtdicken an der Sohle		Mindestschichtdicken an der Böschung	
			auf Kornfilter [m]	auf Geotextil [m]	auf Kornfilter [m]	auf Geotextil [m]
2300	CP _{90/250}	0,150	0,50	0,60	0,50	0,50
	LMB _{5/40}	0,211	0,62	0,62	0,62	0,62
	LMB _{10/60}	0,254	0,71	0,71	0,71	0,71
2650	CP _{90/250}	0,150	0,50	0,60	0,50	0,50
	LMB _{5/40}	0,202	0,59	0,60	0,59	0,59
	LMB _{10/60}	0,242	0,67	0,67	0,67	0,67
3000	CP _{90/250}	0,150	0,50	0,60	0,50	0,50
	LMB _{5/40}	0,194	0,56	0,60	0,56	0,56
	LMB _{10/60}	0,232	0,65	0,65	0,65	0,65
3600	CP _{90/250}	0,150	0,50	0,60	0,50	0,50
	LMB _{5/40}	0,176	0,53	0,60	0,53	0,53
	LMB _{10/60}	0,219	0,61	0,61	0,61	0,61

Tabelle 4.2.3. Berechnete Mindestdicken der durchlässigen Deckschichten aus losen Wasserbausteinen [40]

	wegen Stabilität des Steingerüsts - Gl. (4.2.1) und (4.2.2)
	wegen Ungleichförmigkeitsgrad - Gl. (4.2.3) und (4.2.4)
	wegen Ankerwurf - Gl.(4.2.5)
	wegen Schiffsanfahrung - Gl.(4.2.6)
	wegen Kornfilter - Gl. (4.2.7)
	wegen UV-Schutz bei geotextilen Filtern (nurBöschung) - Gl.(4.2.8)

Beilage zu Tabelle 4.2.3 [40]

Erklärungen zu Tabelle 4.2.3:Die genannten Gleichungen in der Beilage zu Tabelle 4.2.3 werden als Bemessungs-formeln für die erforderliche Steingröße weiter in den Erklärungen zur Tabelle dargestellt. Ihre Anwendung setzt voraus, dass die Einzelsteine untereinander ein stabiles Steingerüst bilden. Daher muss eine Deckschicht aus losen Wasserbausteinen eine Mindestdicke d_D der Wasserbausteine besitzen.Diese ergibt sich aus den Randbedingungen der verschiedenen Modellversuche, die den Bemessungs-ansätzen zu Grunde liegen, sowie aus den lang-jährigen Erfahrungen in dem Betrieb der Wasserstraßen. [36]

Mindestens erforderliche Deckschichtdicke d_D [m]

$$\min d_D = (1,5 \div 2,0) D_{n50} \quad [36] \quad (4.2.1)$$

mit

min d_D – mindestens erforderliche Einbaudicke einer Deckschicht [m]; D_{n50} – erforderlicher mittlerer nominaler Steindurchmesser [m]

$$\boxed{D_{50} = D_u \left(\frac{D_o}{D_u} \right)^{0,5}}, \text{ bzw. } \boxed{G_{50} = G_u \left(\frac{G_o}{G_u} \right)^{0,5}} \quad [36] \quad (4.2.2)$$

D_u – untere Klassengrenze und D_o – obere Klassengrenze der gleichmäßig verteilte Summenlinie, für die sich D_{50} berechnet.

Wird der Ungleichförmigkeitsgrad U der Steinschüttung berücksichtigt, so kann als geringste erosionsfeste Einbaudicke geschütteter Steine folgende Dicke empfohlen werden.

Mindestens erforderliche Deckschichtdicke d_D [m] bei Beachtung der Ungleichförmigkeit:

$$\boxed{\min d_D = 1,5 D_{n50} \sqrt{U}} \quad [36] \quad (4.2.3) \text{ mit}$$

D_{n50} – erforderliche mittlere nominale Steingröße [m]

D_{10} – Korndurchmesser bei 10% Siebdurchgang [m]

D_{60} – Korndurchmesser bei 60% Siebdurchgang [m]

min d_D – mindestens erforderliche Einbaudicke einer Deckschicht [m]

U – Ungleichförmigkeitszahl der Steinschüttung [-]

$$\boxed{U = D_{60} / D_{10}} \quad [36] \quad (4.2.4)$$

Zur Sicherstellung verschiedener Schutzfunktionen der Deckschicht sind zusätzlich nachfolgend genannte Minstdicken einzuhalten. Die Minstdicke einer Deckschicht (auf der Sohle) für eine ausreichende Sicherheit gegenüber Ankerwurf beträgt unabhängig von der verwendeten Steinklasse:

$$\boxed{\begin{array}{l} \min d_D \geq 0,5m + x \quad \text{auf Kornfilter} \\ \min d_D \geq 0,6m + x \quad \text{auf Geotextilfilter} \end{array}} \quad [36] (4.2.5)$$

Mit $\min d_D$ Mindestdicke der Deckschicht [m]; x – Zuschlag für verschiedene Steinmaterialien [m]

$x = 0 \text{ m}$ bei Verwendung von Wasserbausteinen $x = 0,2 \text{ m}$ bei feinkörnigem oder unsortiertem Material
--

Die Mindestdicke (an der Böschung) für einen ausreichenden Schutz gegen Schiffsanfahrunge beträgt unabhängig von der verwendeten Steinklasse:

$\min d_D \geq 0,3 \text{ m} + x$ auf Kornfilter $\min d_D \geq 0,5 \text{ m} + x$ auf Geotextilfilter	[36](4.2.6)
---	-------------

Bei Verwendung von Kornfiltern ist generell abhängig von der verwendeten Steinklasse folgende Mindestdeckschichtdicke einzuhalten:

$\min d_D \geq 1,5L_{50} + 0,10 \text{ m}$ [36]	(4.2.7)
---	---------

mit L_{50} – Steinlänge [m] bei 50% Massendurchgang der Summenlinie

Bei der Verwendung von geotextilen Filtern ist zur Gewährleistung eines ausreichenden UV-Schutzes folgende Mindestdeckschichtdicke einzuhalten:

$\min d_D \geq \text{Maximum} \left\{ \begin{array}{l} 1,5L_{50} \\ 0,10 \text{ m} \end{array} \right\}$ [36]	(4.2.8)
---	---------

Mit L_{50} –Steinlänge [m] bei 50% Massendurchgang der Summenlinie

Nach Festlegung der Steinklasse und der Rohdichte sind die empfohlenen Deckschichtdicken unter Berücksichtigung des Bodens und der Filterart in den Tabellen 4.2.4., 4.2.5., 4.2.6. zu entnehmen. Dabei ist der jeweils größere Wert maßgebend. Die sich aus der geotechnischen Bemessung für Böschungen rechnerisch ergebenden Deckschichtdicken wurden in den Bildern 4.2.2 und 4.2.3. grafisch dargestellt, wo es keine Unterscheidung für das Trapez- und Rechtecktrapezprofil gibt. Grundlage der empfohlenen Deckschichtdicken sind Mittelwerte aus den berechneten Ergebnissen für beide Profilarten.[40];[87]

Bei Deckschichten auf Weichdichtungen sind zusätzlich besondere Anforderungen zu beachten. Wenn Steine mit Rohdichten zwischen den in Tabellen 4.2.4., 4.2.5., 4.2.6. aufgeführten Werten zu verwenden sind, kann die erforderliche Dicke der Deckschicht

unter Berücksichtigung der Minstdicken nach den Diagrammen in Bildern 4.2.2. und 4.2.3. interpoliert werden. [40]

WBSt-Klasse	Rohdichte ρ_D [kg/m ³]	Empfohlene Deckschichtdicken d_D [m] bei Fußeinbindung (Einbindetiefe: 1,50 m)			
		Böschung		Sohle	
		Geotextil	Kornfilter ^{c.)}	Geotextil	Kornfilter ^{c.)}
CP _{30/250}	3600	0,50	0,50	0,60	0,50
LMB _{5/40}	2650	0,60	0,60	0,60	0,60
	3000	0,55	0,55	0,60	0,55
	3600	0,55	0,55	0,60	0,55
LMB _{10/60}	2300	0,70	0,70	0,70	0,70
	2650	0,65	0,65	0,65	0,65
	3000	0,65	0,65	0,65	0,65
	3600	0,60	0,60	0,60	0,60

Tabelle 4.2.4. Empfohlene Deckschichtdicken d_D für Böden: B1, B2, B5 [40]

WBSt-Klasse	Rohdichte ρ_D [kg/m ³]	Empfohlene Deckschichtdicken d_D [m] bei Fußeinbindung (Einbindetiefe: 1,50 m)			
		Böschung		Sohle	
		Geotextil	Kornfilter ^{c.)}	Geotextil	Kornfilter ^{c.)}
CP _{30/250}	3600	0,50	0,50	0,60	0,50
LMB _{5/40}	2650	0,70	0,60	0,60	0,60
	3000	0,60	0,55	0,60	0,55
	3600	0,55	0,55	0,60	0,55
LMB _{10/60}	2300	0,85	0,70	0,70	0,70
	2650	0,70	0,65	0,65	0,65
	3000	0,65	0,65	0,65	0,65
	3600	0,60	0,60	0,60	0,60

Tabelle 4.2.5. Empfohlene Deckschichtdicken d_D für Boden B3 [40]

WBSt-Klasse	Rohdichte ρ_D [kg/m ³]	Empfohlene Deckschichtdicken d_D [m] bei Fußeinbindung (Einbindetiefe: 1,50 m)			
		Böschung		Sohle	
		Geotextil	Kornfilter ^{c.)}	Geotextil	Kornfilter ^{c.)}
CP _{30/250}	3600	0,60	0,50	0,60	0,50
LMB _{5/40}	2650	0,80	0,60	0,60	0,60
	3000	0,70	0,55	0,60	0,55
	3600	0,60	0,55	0,60	0,55
LMB _{10/60}	2300	0,95	0,70	0,70	0,70
	2650	0,80	0,65	0,65	0,65
	3000	0,70	0,65	0,65	0,65
	3600	0,60	0,60	0,60	0,60

Tabelle 4.2.6. Empfohlene Deckschichtdicken d_D für Boden B4 [40]

	wegen Stabilität des Steingerüsts - Gl. (4.2.1) und (4.2.2)
	wegen Ungleichförmigkeitsgrad - Gl. (4.2.3) und (4.2.4)
	wegen Ankerwurf - Gl.(4.2.5)
	wegen Schiffsanfahrung - Gl.(4.2.6)
	wegen Kornfilter - Gl. (4.2.7)
	wegen UV-Schutz bei geotextilen Filtern (nur Böschung) - Gl.(4.2.8)
	geotechnischer Bemessung

Beilage zu Tabellen 4.2.4, 4.2.5, 4.2.6

Anmerkung zu Tabellen 4.2.4, 4.2.5, 4.2.6.:B1: Sande und Kiese; B2: Sande; B3: schluffige Sande und Kiese; B4: Schluffe, stark schluffige Sande und Kiese; B5: kohäsive Böden

Erklärungen zu Tabellen 4.2.3., 4.2.4., 4.2.5.:Zur Berechnung der erforderlichen Deckschichtdicken d_D für Böschung und Sohle unter Beachtung der Böden B1, B2, B3, B4, B5 werden die identischen Gleichungen aus Tabelle 4.2.3 verwendet. Der einzige Unterschied ist das eingesetzte Rechenverfahren der Deckschichtdicken d_D nach geotechnischer Bemessung, die sich für den Bruchmechanismus ergibt. (Kapitel 3-3.3.5.) [36]

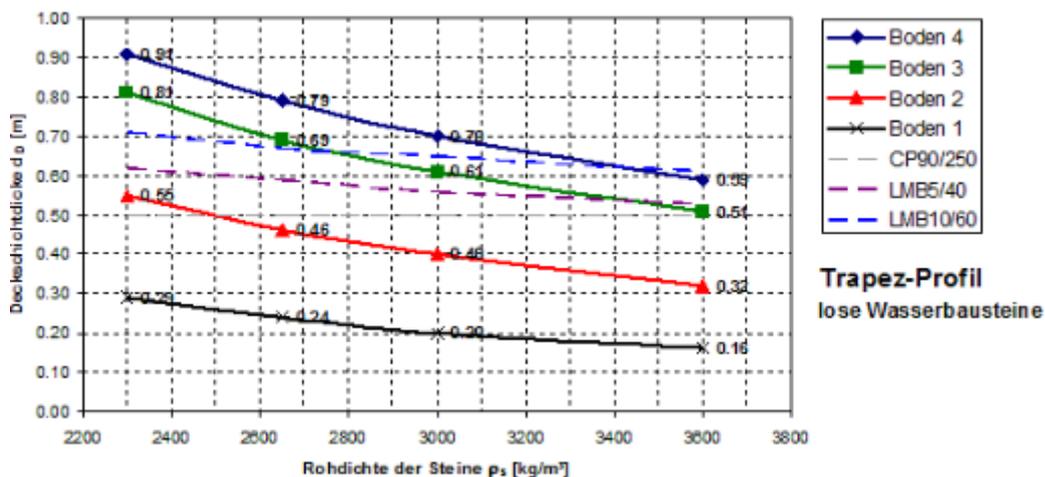


Bild 4.2.2. Grafische Darstellung der berechneten Deckschichtdicken d_D aus losen Wasserbausteinen für Trapezprofil. [40]

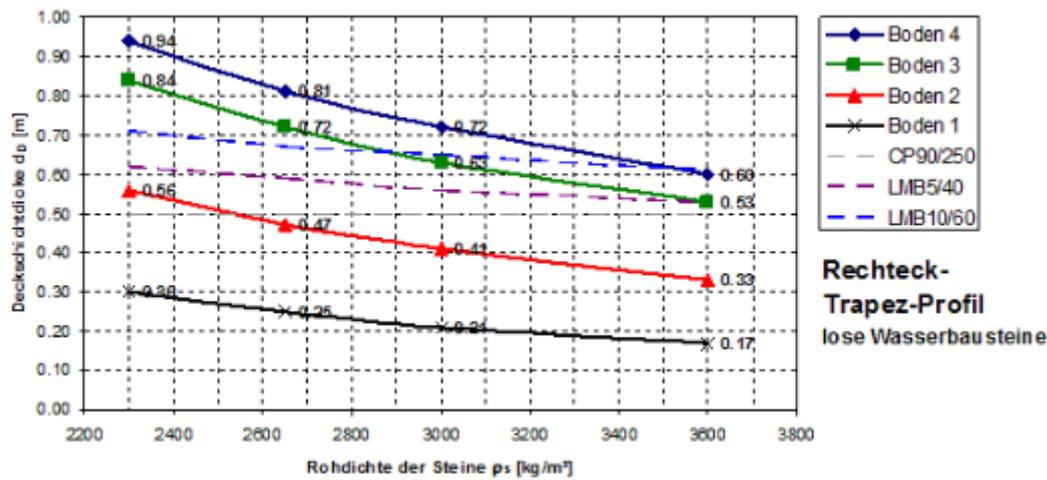


Bild 4.2.3. Grafische Darstellung der berechneten Deckschichtdicken d_D aus losen Wasserbausteinen für Rechtecktrapezprofil. [40]

4.2.2. Bauweise D2 mit teilvergossenen Schüttsteinen

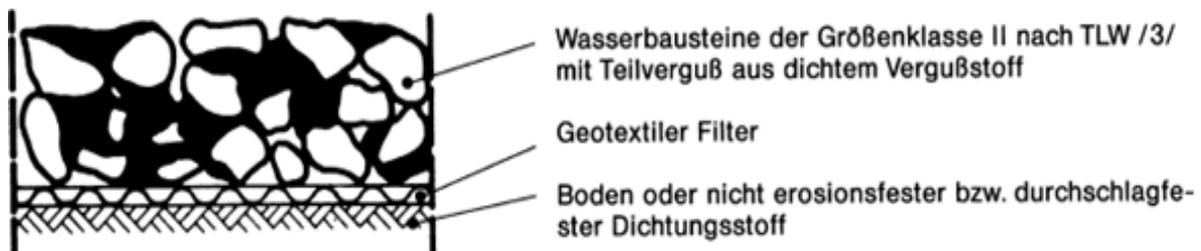


Bild 4.2.4. Schematische Darstellung einer durchlässigen Deckschicht aus teilvergossenen Wasserbausteinen im Querschnitt. Siehe die Erläuterung zu Bild 4.2.1 [48];[86]

Diese Art der Befestigungsarbeiten an der Böschung und an der Flusssohle stellt eine Deckschicht aus geschütteten Wasserbausteinen, die teilweise mit einem dichten Vergussstoff vergossen werden, dar. Gleichzeitig könnte sie auf einem geotextilen Filter oder Kornfilter angewendet werden. [40];[73]

Die Vergussmasse, die maximal 40% des Hohlraumes zwischen den Wasserbausteinen vergießt, bestimmt eine begrenzte Anpassungsfähigkeit der durchlässigen Deckschicht, die die Flexibilität nur durch streifenförmiges oder punktuelltes Einbringen des Mörtels erreicht. Durch das Vermörteln verzahnen die Einzelsteine stark untereinander und bilden Brocken, die den hydraulischen Angriffen einen wesentlich höheren Widerstand entgegensetzen. [40];[87]

Für eine optimale Bauausführung der Deckschichten an den Uferböschungen und an der Sohle sollte die notwendige Verklammerungsmenge unter Baustellenbedingungen festgelegt werden. Jede Kombination aus Deckschichtdicke, Steingröße, Rohdichte des Stei-

nes sollte einer abgestimmten Vorgehensweise entsprechen. Dabei werden für die Herstellung von Deckschichten aus teilvergossenen Wasserbausteinen die Größenklassen CP_{90/250} oder LMB_{5/40} (siehe Kapitel 3-3.3.1.) empfohlen, wie in der Tabelle 4.2.7 dargestellt wird. [40];[73]

Stein- klasse	Rohdichte ρ_s [kg/m ³]	Empfohlene Deckschichtdicken [m] bei Fußeinbindung (Einbindetiefe: 1,50 m)				
		Boden B1	Boden B2	Boden B3	Boden B4	Boden B5/ Weichdichtung
CP _{90/250} oder LMB _{5/40}	2300	0,40	0,40	0,45	0,70	0,40
	2650	0,40	0,40	0,40	0,55	0,40
	3000	0,40	0,40	0,40	0,45	0,40
	3600	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Tabelle 4.2.7. Empfohlene Deckschichtdicken d_D der durchlässigen Deckschichten aus teilvergossenen Wasserbausteinen für Böschung und Sohle unter Beachtung der verschiedenen Böden B1 bis B5 [40]

	wegen Stabilität des Steingerüsts - Gl. (4.2.1) und (4.2.2)
	wegen Kornfilter - Gl. (4.2.7)
	wegen UV-Schutz bei geotextilen Filtern (nur Böschung) - Gl.(4.2.8)

Beilage zu Tabelle 4.2.7

Erläuterung zu Tabelle 4.2.7.: Gelbe Markierungen bedeuten, dass die Mindestdicke maßgebend ist. Diese beträgt für vergossene Deckschichten bei Verwendung der Stein- klassen CP_{90/250} und LMB_{5/40} unabhängig von der Filterart (geotextiles Filter oder Korn- filter). Bei Verwendung eines Kornfilters kann die rechnerisch erforderliche Deck- schichtdicke um die Dicke des Kornfilters verringert werden, wobei die Mindestdicke von 40 cm jedoch nicht unterschritten werden darf. Bei Anwendung eines Zweistufen- Mineralkornfilters (Schichtdicke-2 x 20 cm) ist für die in der Tabelle dargestellten Vari- anten immer die Mindestdicke für die teilvergossene Deckschicht maßgebend. [40];[73]

Unter Berücksichtigung der Mindestdicke, die für die verwendeten Steinklassen generell 40 cm betragen, wurden die letztendlich maßgebenden Deckschichtdicken mathe- matisch auf 5/100 m auf- bzw. abgerundet. Grundlage der empfohlenen Deckschicht- dicken sind Mittelwerte aus den berechneten Ergebnissen für beide Profilarten. Die sich aus der geotechnischen Bemessung für die Böschung rechnerisch ergebenden Deck- schichtdicken, die in den Bildern 4.2.5 und 4.2.6 für Trapez – und Rechtecktrapezprofil

grafisch dargestellt werden, wurden gemittelt. Bei Verwendung von Steinen mit Rohdichten zwischen den in der Tabelle 4.2.6 aufgeführten Werten kann die erforderliche Schichtdicke unter Beachtung der Minstdicken nach den nach den Diagrammen in Bildern 4.2.5. und 4.2.6. interpoliert werden. [40]

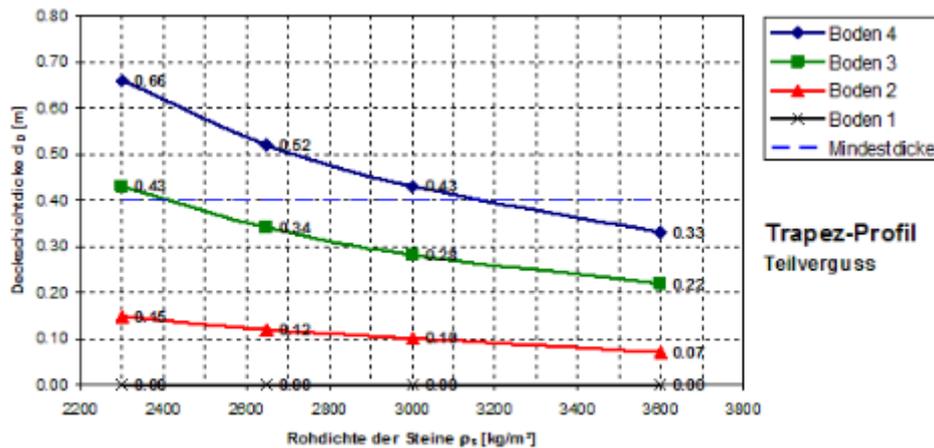


Bild 4.2.5. Grafische Darstellung der berechneten Deckschichtdicken d_D aus teilvergossenen Wasserbausteinen für Trapezprofil. [40]

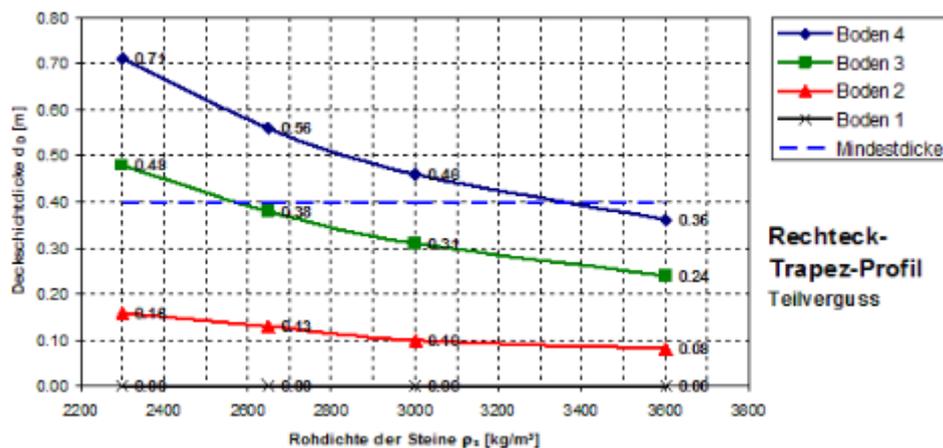
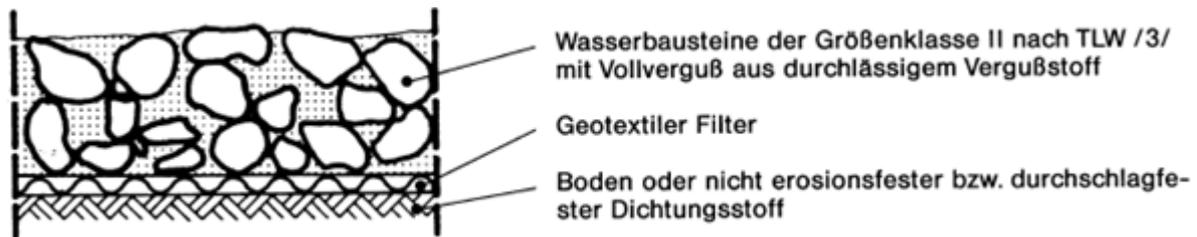


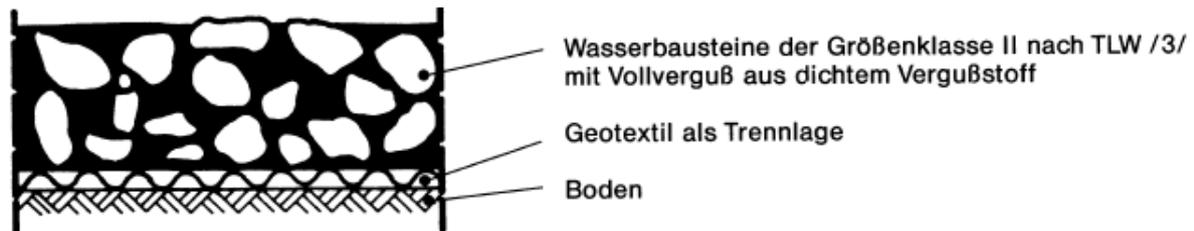
Bild 4.2.6. Grafische Darstellung der berechneten Deckschichtdicken d_D aus teilvergossenen Wasserbausteinen für Rechtecktrapezprofil. [40]

Erläuterung zu Bildern 4.2.5, 4.2.6.: Dargestellt sind die für den Böschungsbereich berechneten Deckschichtdicken für die Böden B1 bis B4 und die Minstdicken für die Steinklassen CP_{90/250} und LMB_{5/40} (gestrichelte Kurve), die für Boden B5 immer gelten. [40]

4.2.3. Bauweise D3 mit vollvergossenen Schüttsteine



a) D3a - Schüttsteine mit Vollverguß aus durchlässigem Vergußstoff



b) D3b- Schüttsteine mit Vollverguß aus dichtem Vergußstoff

Bild 4.2.7. Schematische Darstellung der Deckschichten aus vollvergossenen Wasserbausteinen im Querschnitt. Siehe die Erläuterung zu Bild 4.2.1 [48]

Die Deckschicht aus vollvergossenen Wasserbausteinen könnte Regelbauweise sein, sowohl aus dichtem als auch aus durchlässigem Vergussstoff. Der Unterschied zwischen diesen Methoden der Ufer- und Sohlbefestigung ist, dass geschüttete Wasserbausteine mit Vollverguß aus durchlässiger Masse auf geotextilem Filter angewandt werden, während bei einer Deckschicht aus dichtem Vergussstoff eine Trennlage aus Geotextil, die Selbstheilungsprozesse bei Rissbildung fördert, notwendig ist. Gleichzeitig hat diese Trennlage eine Bedeutung als Ausgleichsschicht, die gegenüber dem anstehenden Untergrund weniger durchlässig, jedoch filterstabil sein muss, ansonsten besteht die Gefahr, dass sich das Druckpotenzial des Kanalwassers in der Ebene unter der Deckschicht verteilt und zu Schäden führt. [40]; [73]

Aufgrund des Mangels an Flexibilität bei diesen starren Deckwerken könnten Beschädigungen nach Schiff-Anfahrungen auftreten, da sie keine Fähigkeit haben, etwaigen Untergrundverformungen zu folgen. Daher dürfen sie nur angewandt werden, wenn Setzungen des Baugrundes nahezu ausgeschlossen sind, um eventuelle Fehlstellen zu vermeiden. [40]; [87]

Die erforderlichen Deckschichtdicken zur Gewährleistung einer ausreichenden Sicherheit könnten nach Auftriebsgrundlagen berechnet werden. [40]

Berechnungsgrundlagen:

Auftriebssicherheit $\gamma_a = 1,0$

Absenk $z_a = 0,89 \text{ m}$ → maßgebender Absenk für Auftriebsberechnungen

$$z_a = H_{u,H\ddot{a}ck} - \frac{1}{2} H_{sek,q}$$

→ $H_{sek,q}$ – Höhe der Sekundärquerwelle

→ $H_{u,H\ddot{a}ck}$ – Maximalwert der Wellenhöhe am schiffsnäheren Ufer bei exzentrischer Fahrt am Heck

Hohlraumanteil $n = 50\%$

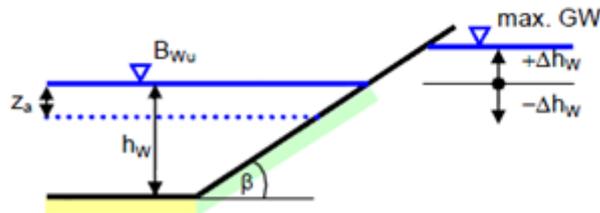
$$\gamma_w = 9,81 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_v = 22 \text{ kN/m}^3$$

$$d_D = \frac{\frac{\gamma_A (\Delta h_w + z_a) \gamma_w}{\cos \beta} - \gamma'_F d_F}{(1-n)(\gamma_s - \gamma_w) + n(\gamma_v - \gamma_w)}$$

mit $\gamma'_F d_F \approx 0$

und $\gamma_s = \rho_s \cdot g$

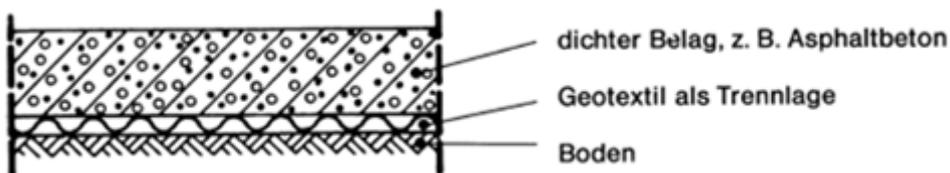


In Bezug auf den erforderlichen Deckschichtdicken in der Tabelle 4.2.7 sind die Mindestdicke für vollvergossene Deckwerke in Abhängigkeit von der empfohlenen Gewichtsklasse LMB_{5/40} oder LMB_{10/60} und Rohdichte dargestellt. [40];[86]

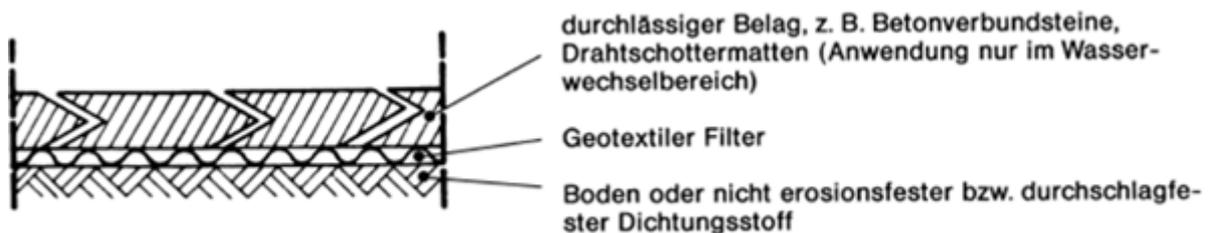
	LMB _{5/40}	LMB _{10/60}
$\rho_s < 3000 \text{ kg/m}^3$	40 cm	50 cm
$\rho_s \geq 3000 \text{ kg/m}^3$	40 cm	40 cm

Tabelle 4.2.8. Mindestdicke in Abhängigkeit von der verwendeten Steinklasse und Rohdichte [40]

4.2.4. Bauweise D4 Beläge



a) D4a – Dichter Belag, z. B: Asphaltbeton



b) D4b – Durchlässiger Belag, z. B: Betonverbundsteine

Bild 4.2.8. Schematische Darstellung des dichten und durchlässigen Belages im Querschnitt[48]

Die Uferbefestigung mit Betonbauweisen findet eine große Anwendung im Bau von Kanälen, da mit dem maschinellen Einbau mittels Straßenfertiger wesentliche Tagesleistungen und gleichzeitig mit der industriellen Vorfertigung des Deckwerks d.h. seiner Komponenten eine hohe Materialqualität möglich sind. Diese Bauweisen werden nach Bemessungsansätzen auf Basis von Erfahrungswerten dimensioniert. [73];[89]

Betonbauweisen können dichte und durchlässige Beläge, die auf einer Filter- bzw. Trennschicht angeordnet werden, sein. (Bild 4.2.8. a) In Bezug auf die dichten Bauweisen für Deckwerke werden vollständig mit Mörtel vergossene Wasserbausteine oder Betonbeläge angewendet. Sie können in großen Flächen eingebaut werden, aber im Dauerbetrieb sind sie anfällig gegen Wasserüberdruck (z.B. bei hoch anstehendem Grundwasser) aufgrund ihres geringen Eigengewichts, was die Gefahr eines plötzlichen unkontrollierten Einbruchs schafft. [91]

(Bild 4.2.8. b) Die zweite Art sind die durchlässigen Beläge, die entweder aus einem Steinsatz oder aus Steinen im Verbund auf einem geotextilen oder Mineralkorn-Filter bestehen. Der Zusammenhalt der Steine, die untereinander beim Steinsatz gelegt werden, wird durch Reibung in den Fugen erzeugt. Bei Bauweisen mit Steinen im Verbund entsteht der Verbund mittels Drähten oder besonderer Ausformungen an den Steinelementen (z.B. Nasen und Aussparungen). Aus diesem Grund finden diese Beläge wesentliche Verwendung bei steilen Böschungsneigungen. [91]

4.2.5. Fußsicherung

Die Fußsicherung stellt einen Deckwerksabschluss von 1,50 m unter Gewässersohle im Bereich der Uferböschung dar. Bei einer konstruktiven Ausbildung des Deckwerksfußes entsteht jedoch ein Fußgraben, der mit gröberem Material als der anstehende Boden (z.B. Kies) verfüllt werden muss, um die Stabilität der Befestigungsdeckschicht am Böschungsfuß gegen lokale Kolke zu gewährleisten. (Bild. 4.2.9)[55]; [40]

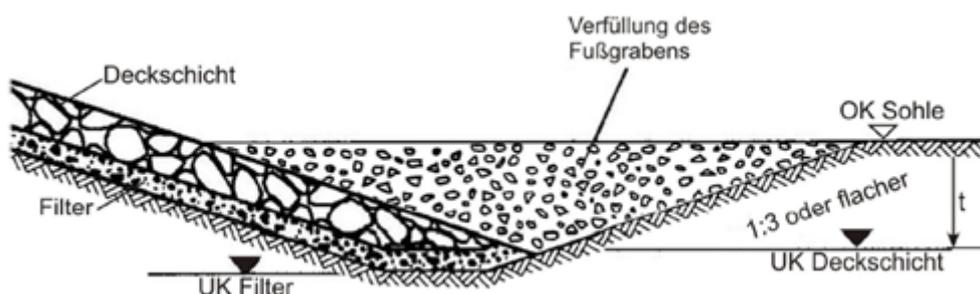


Bild 4.2.9 Konstruktive Ausbildung der Fußstützung mit Fußeinbindung [83]

Auf Grund der bisherigen Erfahrungen stehen auch andere Alternativen für die Fußsicherung bzw. Fußvorlage zur Verfügung. Die Fortführung des Böschungsdeckwerks in der Sohle kann nur bei geringer Neigung eingesetzt werden. Aufgrund ihrer Widerstandsfähigkeit kommt sie gelegentlich in den Wasserstraßenabschnitten, wo mit Schiffanfahrungen zu rechnen ist, zur Anwendung.[83]; [40]

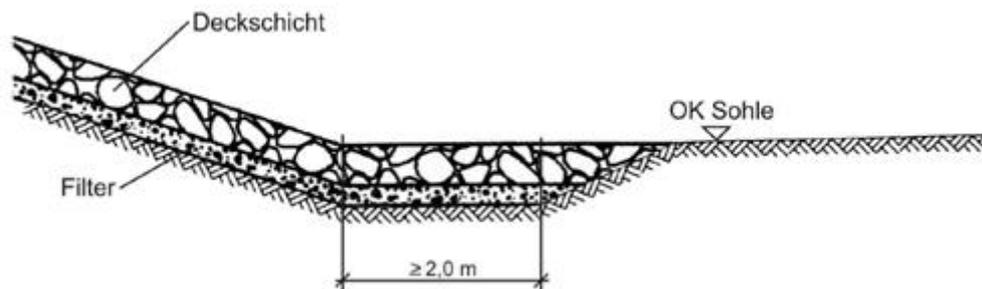


Bild 4.2.10 Konstruktive Ausbildung der Fußstützung mit Fußvorlage [40]

Nur in Ausnahmefällen werden Fußspundwände mit einer Tiefe von 1,5 m (in allen Böden anwendbar) ausgeführt, weshalb diese Methode bei den Regelbauweisen nicht betrachtet wird. Trotzdem ist es unabdingbar, beim Anschluss des Deckwerks an die Spundwand, neben einem guten Kraftschluss, auch auf die ausreichende Filterstabilität an der Stoßstelle Rücksicht zu nehmen. [73]; [40]

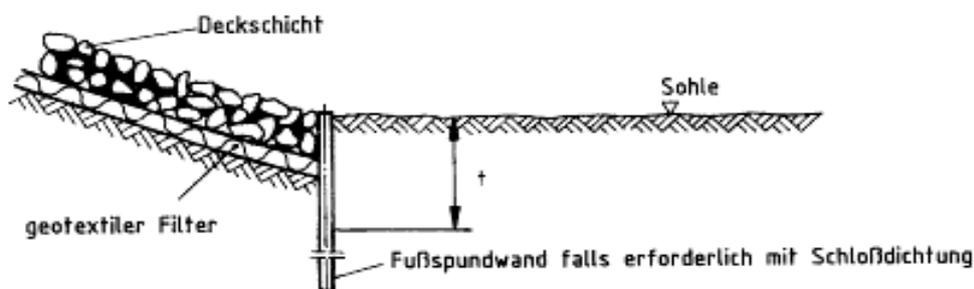


Bild 4.2.11 Konstruktive Ausbildung der Fußstützung mit Fußspundwand [48]

4.3. Auswahl einer Regelbauweise

Der Aufbau eines Deckwerks muss mit geotechnischen Randbedingungen und hydraulischen Anforderungen, die mit Baugrund, Topographie, Grundwasserstand, Schifffahrtsbelastungen verbunden sind, berücksichtigt werden. Diese wesentlichen Faktoren haben eine bestimmende Beeinflussung bei der Auswahl einer Regelbauweise für Böschung- und Sohlensicherung. [40]

4.3.1. Erfordernisse bei Auswahl einer Deckschicht

Eine Deckschicht als oberste erosionsfeste Schicht aus Wasserbausteinen, die durch hydraulische Kriterien bestimmt wird, muss nach ordnungsgemäßer Ausführung den Deckschichtbauweisen technisch entsprechend sein. Im Dauerbetrieb muss sie ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen große Belastungen aus den Antriebs- und Steuerorganen der Fahrzeuge in Liege- und Wendestellen, oder Bereichen mit starken Querschnittwechseln besitzen. Durch eine projektspezifische Bemessung der Einzelsteine kann eine hohe Lagestabilität trotz großer hydraulischer Einwirkungen wie Strömungen und Wellenangriffen, die zu einer möglichen Schädigung der Schicht führen könnten, erreicht werden. [40];[74]

Andererseits kann die Standfestigkeit einer Deckschicht durch die Verwendung zusammenbindender Schüttsteine-Mörtel erhöht werden, so dass denkbare Verlagerungen von Bauelementen verhindert und gleichzeitig hydraulische Druckschläge schadlos aufgenommen werden können. [73]

4.3.2. Erfordernisse bei Auswahl eines Filters bzw. einer Trennlage

Der Filter als ein wichtiges Element des Deckwerks, der in den letzten Jahrzehnten eine lebhafte Entwicklung als Korn- und Geotextilfilter hatte, wird zum Schutz vor großen Beanspruchungen angeordnet. [73]; [40]

Gleichzeitig werden Trennlagen aus Geotextilien unterhalb einer dichten Deckschicht und oberhalb einer Tondichtung eingesetzt, um eine mögliche Durchmischung von unterschiedlichen Mineralkornlagen zu vermeiden. [40]

Unabhängig von der Bauweise handelt es sich um Probleme, die mit hydrodynamischer Kornverlagerung und intensiven Filtrationsvorgängen verbunden sind. Sie werden mit Hilfe einer entsprechenden Filter- oder Trennlagebemessung gelöst, die auf empirisch belegten positiven Erfahrungen begründet werden. [73]

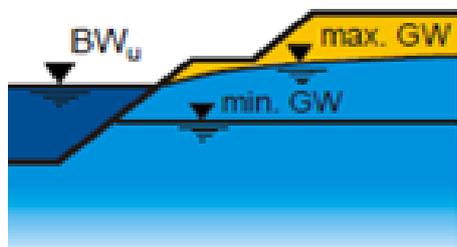
4.3.3. Erfordernisse bei Auswahl einer Dichtung

Die Anwendung einer Dichtung in den Wasserstraßen wird durch das Bestehen eines hydraulischen Gefälles vom Kanal zum Grundwasser bestimmt, d. h. wenn der niedrigste Betriebswasserstand eines Kanals über dem höchsten Grundwasserstand liegt, ist eine dichte Schicht erforderlich, die eine denkbare Durchströmung von Kanalseitendämmen verhindern und gleichzeitig zu Verringerung von Wasserverlusten dient. [40]

In Bezug auf die Kriterien für Auswahl dichter oder durchlässiger Deckwerksbauweisen (Bild 4.2.12), die in Übergangsbereichen mit stark wechselnden Grund- und Kanalwasserständen angewendet werden, ist die hydraulische Dimensionierung von wesentlicher Bedeutung, falls große Belastungen durch Wasserüberdruck von der Landseite entstehen können. [40];[36]



a) dichte Deckwerke ($BW_U > \text{max. GW}$)



b) dichte Deckwerke ($BW_U \leq \text{max. GW}$)



c) durchlässige Deckwerke ($BW_0 \geq \text{min. GW}$)



d) durchlässige Deckwerke ($BW_0 < \text{min. GW}$)

Bild 4.2.12. Kriterien für die Auswahl einer dichten oder einer durchlässigen Deckwerksbauweise [40]

Erläuterung: max. GW/min. GW - höchster/niedrigster zu erwartender Grundwasserstand
 BW_U/BW_0 - unterer/oberer Betriebswasserstand

4.3.4. Höhe des Freibords

Die Höhe des Freibords sollte mindestens 70 cm höher als der entsprechende Bemessungswasserstand geführt werden, um an der Böschung einen möglichen Wellenauflauf abzudecken.[40]

Dieser Bemessungswasserstand ist der obere Betriebswasserstand BWo bzw. der höchste schiffbare Wasserstand HSW. (Siehe Bild 4.2.12 d). [40]

4.4. Bauausführung

Jedes Deckwerk kann immer nur so gut sein, wie es hergestellt wurde. Die Erfahrung an den Binnenwasserstraßen zeigt immer wieder, dass jede bewährte Bauweise bei falscher Ausführung zu baldigen Schäden führt, und dass bei der Planung die Möglichkeiten und Grenzen der Bauausführung berücksichtigt werden müssen. [36]

Der hohe Aufwand für Qualitätssicherungsmaßnahmen bei der Produktion vieler Baustoffe und Bauteile darf nicht durch unzureichende Qualitätssicherung bei der Bauausführung zunichte gemacht werden. Andererseits nutzen Forderungen in der Ausschreibung gar nichts, wenn sie nicht überwachbar oder nicht baubar sind. [73];[36]

Das Deckwerk insgesamt zu betrachten ist daher nicht nur eine Forderung der Dimensionierung, sondern ist auch erforderlich, um Probleme bei der Ausführung zu antizipieren. [36]; [90]

4.4.1. Planungshinweise bei Vergussarbeiten

Bei der Planung der Vergussarbeiten müssen bestimmte Einbaubedingungen berücksichtigt werden, da der frische bzw. der feste Vergussstoff sowohl beim Einbau als auch im Endzustand unterschiedlichen Einwirkungen ausgesetzt ist. In Bereichen mit hohen Strömungs- oder Wellenangriffen darf der frische Vergussstoff während des Einbauvorgangs nicht so verändert werden, sodass er die vorgesehene Funktion beim Abbinden nicht mehr erfüllen kann. In diesem Fall ist ein hoher Widerstand gegen Erosion erforderlich, der durch die Zugabe von geeigneten Zusatzmitteln erzielt werden kann. Gleichzeitig muss die feste Vergussmasse eine gute Standfestigkeit in Abhängigkeit von den erwartenden mechanischen Beanspruchungen in Vorhäfen und an Liegestellen während der Nutzungsphase besitzen. [51]; [90]

Auf anderer Seite dürfen nur zugelassene unbedenkliche Ausgangsstoffe verwendet werden, die keine mobilisierbaren umweltrelevanten Bestandteile enthalten. Bisher sind

diesbezüglich keine Schadensfälle bekannt. Trotzdem lässt sich nicht auszuschließen, dass bei Vergussarbeiten unter Wasser nachteilige Auswirkungen auf die Umwelt infolge der Alkalisierung auftreten können. Aus diesem Grund wird empfohlen, den Verguss nicht im Sommer durchzuführen, denn in stehenden Gewässern mit hohem Ammoniumgehalt kann es durch die pH-Wert Erhöhung zur Ammoniakbildung in fischtoxischen Konzentrationen aus gelöstem Ammonium kommen. [53];[90]

4.4.1.1. Anforderungen an den Vergussstoff bei der Bauausführung

Die Grundfunktion eines Vergussstoffs ist es die losen Steine zu größeren Einheiten zu verbinden, sodass das hergestellte Deckwerk gegen starke mechanische und hydraulische Belastungen in Schifffahrtskanälen ausreichend widerstandsfähig wird. [51];[90]

Deshalb muss das Steingerüst eines vergossenen Deckwerks hinsichtlich der Hohlraumverteilung optimiert sein. Zugleich dürfen die Hohlräume weder zu groß noch zu klein sein. Im ersten Fall würde der Verklammerungsmörtel durch das Deckwerk durchfallen, im zweiten nicht im erforderlichen Umfang in den Hohlraum eindringen können. Vor allem wird die Größe der Hohlräume von der verwendeten Steinklasse bestimmt, sodass für die Herstellung von teilvergossenen Deckwerken die Größenklasse CP_{90/250} empfohlen wird. [51]

Bei dieser Steinklasse ist das Vorhandensein von Lieferungen mit sehr hohem Unterkornanteil max. 15 % (Masse) < 90 mm möglich, die sehr schlecht vergossen werden können. Auf diesem Grund sollte der Unterkornanteil D_s < 90 mm auf 5 % (Masse) in Verdichtungsunterlagen begrenzt werden. Es können auch die Klassen LMB_{5/40}, LMB_{10/60} eingesetzt werden, dabei sind höhere Vergussmengen vorzusehen. Der Hohlraumgehalt sowie die Lagerungsdichte der Steinschüttung sind hauptsächlich vom Einbauverfahren, und der Abstufung der Größe der Wasserbausteine abhängig.[51]

Lagerungsdichte	Hohlraumgehalt	Einbauverfahren
locker	50-55 %	bei Vrklappen unter Wasser
mitteldicht	45%	bei Schüttung im Trockenen
dicht	30-40 %	bei Nacharbeiten von Hand

Tabelle 4.2.9. Hohlraumgehalt von Wasserbausteinen in Abhängigkeit vom Einbauverfahren [51]

Bei der Herstellung eines Vollvergusses ist der gesamte Hohlraumgehalt des Steingerüsts vollständig mit Vergussstoff zu füllen, deshalb wird eine Steinklasse mit mög-

lichst großen Hohlräumen gewählt. Für vollvergossene Deckwerke haben sich die Gewichtsklassen LMB_{5/40} und LMB_{10/60} bewährt. [51]

Die maximal zulässige Vergussstoffmenge könnte durch Berechnung des gesamten vorhandenen Hohlraumvolumens pro Quadratmeter Deckschicht ermittelt werden.

$$\boxed{V_{n,ges} = 10 \cdot n \cdot d_D} \quad (4.4.1)$$

$V_{n,ges}$ – gesamtes Hohlraumvolumen pro m² [l/m²]

n – Hohlraumgehalt [%]; d_D – Dicke der Deckschicht [m]

Die empirische Formel zeigt, dass die Vergussstoffmenge von dem Hohlraumanteil des Steingerüsts und der vorgesehenen Einbaudicke des Vergussstoffes bestimmt wird.[51] Betreffend die Dicke der Deckschicht sind die Minstdicken, welche sich aus der erforderlichen Sicherheit gegen Ankerwurf bzw. aus einbautechnischen Gründen ergeben, in der Tabelle 4.2.10. zu entnehmen. [51];[90]

	CP _{90/250}	LMB _{5/40}	LMB _{10/60}
$\rho_s < 3000 \text{ kg/m}^3$	40 cm	40 cm	50 cm
$\rho_s \geq 3000 \text{ kg/m}^3$	40 cm	40 cm	40 cm

Tabelle 4.2.10. Minstdicken in Abhängigkeit von der verwendeten Steinklasse und der Rohdichte [51]

In Bezug auf das Einbringen des Vergussmörtels wird die Verteilung über die Tiefe von der eingebrachten Vergussmenge abhängen. (Bild. 4.2.13)

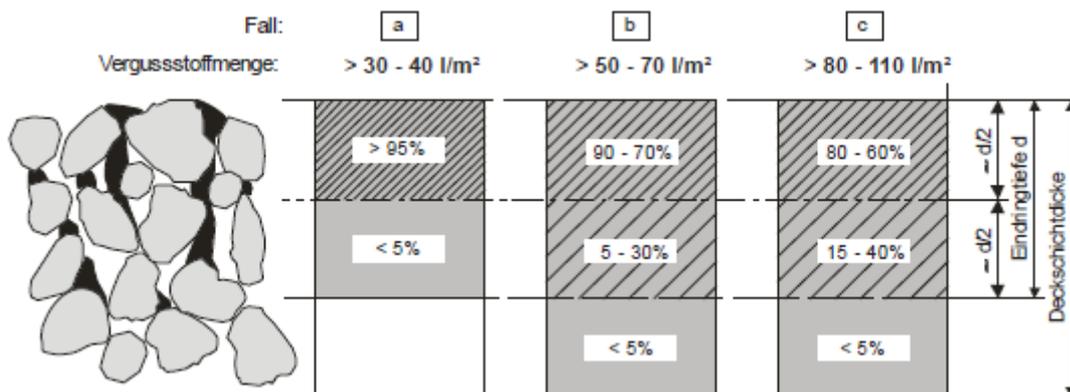


Bild 4.2.13. Anzustrebende Vergussstoffverteilung in % der Vergussstoffmenge [53]

Als Eindringtiefe des Vergussstoffes für die Steinklassen CP_{90/250} und LMB_{5/40} ist $d=40\text{cm}$, auch für die Klasse LMB_{10/60} $d=50\text{cm}$ anzusetzen. Maximal 5% der Verguss-

stoffmenge darf in die darunterliegenden Bereiche eindringen, zugleich sind einzelne lose Steine an der Oberfläche zulässig. [51];[53]

Mit Zunahme der Vergussstoffmenge nimmt jedoch die Flexibilität einer Deckschicht aus Wasserbausteinen ab, was zu einer Unterhöhlung bei großen Spannweiten führen könnte. Durch Verbesserung der Ausführung der Vergussarbeiten z. B. (punktuelle oder streifenförmige Einbringen des Vergussstoffes) müssen die Bruchverformungen verhindert werden. [51]; [90]

Bei der Festlegung der Vergussstoffmenge müssen die angestrebte Vergusstiefe bei der erforderlichen Deckschichtdicke, benötigte Verbundwirkung und auch die Wasserdurchlässigkeit abgewogen werden, um eine erwünschte Rauigkeit der Deckschicht aus Vergussstoff zu erzielen.[51]; [90]

Nach Erfahrungswerten sind die Bedingungen für ausreichende Wasserdurchlässigkeit der Deckschicht, auch bei einer guten Verbundwirkung zwischen Wasserbausteinen und Vergussstoff erfüllt, wenn die Anforderung hinsichtlich der Wasserdurchlässigkeit der gesamten Deckschicht befriedigt wird: [51]

$$k_{\text{Deckschicht}} < 1 \cdot 10^{-9} \text{m/s}$$

4.4.1.2. Einbauverfahren

Das Einbauverfahren eines Deckwerkes mit Vergussstoff kann von Hand, was vorwiegend über Wasser und im Wasserwechselbereich angewendet wird, oder maschinell bei Wassertiefen von $t > 1\text{m}$ erfolgen. Bei kleinen Vergussflächen kann man aufgrund einer ungünstigen Geometrie, auch die Unterwasserarbeiten von Hand ausführen lassen, wenn es zu unwirtschaftlich ist, um ein maschinelles Einbaugerät einzusetzen. [51]

Das punktuelle Einbringen des Vergussstoffes wird in einem Durchmesser von 1m durchgeführt, während bei der streifenförmigen Vergussmasse eine Streifenbreite von 1m nicht überschritten werden soll. (Bild 4.2.14) [51];[90]

Der Abstand zwischen den Einbaubereichen darf im Mittel die dargestellte Breite nicht überschreiten: [53]

Wasserbausteine der Größenklasse CP_{90/250}: 30cm

Wasserbausteine der Gewichtsklasse LMB_{5/40}: 50cm

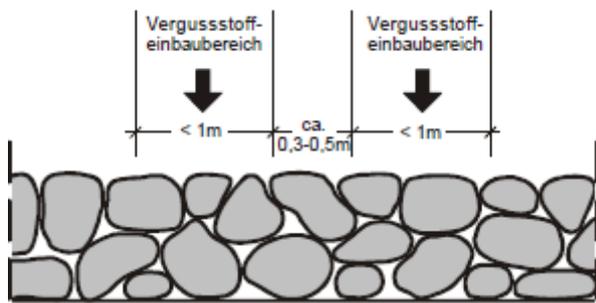


Bild 4.2.14. Das punktuelle oder streifenförmige Vergusseinbringen zur Verbesserung des Bruchverhaltens bei dichten Vergussstoffen [53]

Das Einbringen der erforderlichen Vergussstoffmenge wird von erfahrenen Tauchern mittels Pumpen mit einer ausreichend geringen Förderrate erfüllt. Je größer die Förderrate, desto schwieriger wird es für einen Taucher, eine gleichmäßige Verteilung des Vergussstoffes während seiner Bewegungen im Wasser zu gewährleisten. Deshalb wird ein Schlauchdurchmesser an der Austrittsöffnung von nicht mehr als 60 mm empfohlen. [51]

Im Gegensatz dazu hat der maschinelle Einbau den wesentlichen Vorteil, dass sich die pro m² eingebrachte Vergussstoffmenge durch Geräteeinstellungen regeln lässt. [51] Mit einem Verteilerwagen, der mit definierter Schrittgeschwindigkeit über das Deckwerk fährt kann man den Vergussmörtel durch gesteuerte Schlauchbewegungen gleichmäßig in etwa böschungparallelen Linien verteilen. Eine maschinelle punktuelle Verteilung der Vergussmasse kann mittels Schläuchen, die an einem stabilen beweglichen Stahlrahmen befestigt und gleichzeitig durch Ventile gesteuert sind, durchgeführt werden. [51]

Mit Hinblick auf die Ausführung der Vergussarbeiten dürfen die Wasserbausteine nicht vollständig überdeckt werden, da man nach einer möglichst großen Oberflächenrauigkeit streben muss. Bei einem Vollverguss muss jedoch die Einbaudicke des Vergussstoffes der Dicke der Deckschicht entsprechen, um bei Ankerwurf und Schiffsanfahrungen keine Angriffsflächen zu bieten. Daher müssen die Vergussarbeiten bald nach dem Einbau der Wasserbausteine vor eventuellen Schlammablagerungen bei Hochwasser durchgeführt werden. Gleichzeitig müssen die Wasserbausteine eine saubere Oberfläche besitzen, um die erwünschte Verbundfestigkeit mit dem Vergussstoff errei-

chen zu können. Deshalb müssen die Hohlräume frei vor dem Einbringen der Vergussmasse gespült werden. [51]

Zusätzlich muss die Oberflächentemperatur der Wasserbausteine in Intervall von 5° C bis 40° C berücksichtigt werden, auch die Einbautemperatur des Vergussstoffes darf 30° C keinesfalls überschreiten. [51]

Der Bauvorgang von einer Deckschicht mit Vergussstoff auf eine Deckschicht aus losen Wasserbausteinen ist abgestuft auszuführen, da bei schnellem Wasserspiegelabsenk ein konzentrierter Wasseraustritt, die losen Wasserbausteine in den Randbereichen zusätzlich belastet. Daher sollte eine ca. 10 m breite Übergangszone mit einer Abstufung der Vergussstoffmenge ausgeführt werden. Der Abschluss einer vergossenen Deckschicht an Bauwerken oder Spundwänden ist auf einem mindestens 0,5 m breiten Streifen als Vollverguss zu erfüllen. [51]

4.4.2. Planungshinweise beim Einbau von Filtern bzw. Trennlagen

Die wesentlichen Funktionen von Filtern bzw. Trennlagen ist die Erhöhung der Festigkeit und der Tragfähigkeit des Bodens durch Anspannungsfähigkeit, einen sicheren Bodenschicht bei mechanischen und hydraulischen Beanspruchungen sowohl während der Bauausführung und als auch der Betriebsperiode zu gewährleisten. [52]

Andererseits muss ein Filter den Boden vor Ausspülungen und Umlagerungen infolge von Grund- und Sickerwasserströmungen oder äußerer Belastungen durch Oberflächenwasser schützen. Im Hinblick auf langfristige Setzungen hat eine Trennlage jedoch die Aufgabe, eine Durchmischung von unterschiedlichen Mineralkornlagen im Hinblick auf langfristige Setzungen zu verhindern z. B grobes Material auf feinkörnigem Boden, Wasserbausteine auf Tondichtung, Tondichtung auf sehr grobkörnigem Baugrund. [52];[77]

4.4.2.1. Kornfilterbauweisen

Bei dem Einbau eines Kornfilters ist es erforderlich, bautechnische Angaben hinsichtlich des Baugrundes, des Aufbaues der Deckschicht wie Bodenklassifikation, Korngröße, Wasserdurchlässigkeit, Anforderungen an Materialien vorzulegen. Aufgrund des Bodenschichtenaufbaues kann eine relevante Beurteilung der Notwendigkeit eines Filters, durch eine hydraulische Untersuchung mit Rücksicht auf die Filterwirksamkeit gemacht werden. [52]

Unter Kenntnis der Fließgrenze, der Korngrößenverteilung und der Plastizitätszahl des Bodens lassen sich bei bekannten hydraulischen und mechanischen Beanspruchungen, die von wesentlicher Bedeutung für die Festlegung des Einbauverfahrens bei Filtern bzw. Trennlagen sind, solche Filter bei Wasserstraßen einbauen. [76]; [52]

Bei Einbau des Filters sollen die Minstdicken bezüglich der erforderlichen Filtrationslänge berücksichtigt werden. In Tabelle 4.2.11. sind Richtwerte für Minstdicken von Kornfiltern in Abhängigkeit von der Filterart (Stufenfilter- und Mischkornfilter) angegeben. [52];[76]

Filterart	Minstdicke D min bei Einbau		
	im Trockenen	unter Wasser	
Einstufen- und Stufenfilter			
	d _{50,F} ≤ 30 mm	15 cm je Stufe	20 cm je Stufe
	d _{50,F} > 30mm	30 cm je Stufe	30 cm je Stufe
Mischkornfilter	30 cm	30 cm	

Tabelle 4.2.11. Minstdicken von Kornfiltern[52]

Häufig kann die erforderliche Filterstabilität bei Deckwerken nicht mit einer Filterstufe realisiert werden, deshalb ist der Einbau eines Zweistufenfilters zwischen Deckschicht und Boden sinnvoll. Auf dem Bild 4.2.15 wird der prinzipielle Aufbau eines Deckwerks mit einem Zweistufenfilter in der Abfolge Boden-Kornfilter-Deckschicht gezeigt. [76]

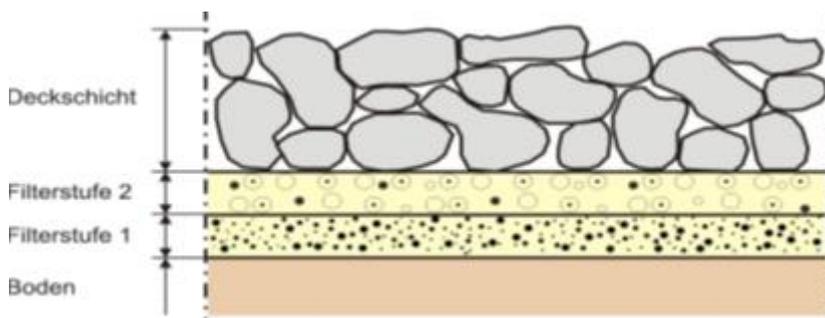


Bild 4.2.15. Kornfilter als Zweistufenfilter in einem Deckwerk [52]

Wenn der Boden homogen und sein Kornanteil $d_{15} < 0,06$ mm ist, sind keine expliziten Filternachweise erforderlich. Bei einem Kornanteil des Bodens $d_{15} > 0,06$ mm ist der Standard-Zweistufenfilter dann anwendbar, wenn die Durchlässigkeit der ersten Filterstufe größer als die Durchlässigkeit des Bodens ist. Die Körnungslinien der Filterstufen müssen innerhalb der festgelegten Grenzen verlaufen. Für den Standard-Zweistufenfilter gelten die Grenzen der Korngrößenverteilung aus Bild 4.2.16., wo der typische Bereich für Wasserbausteine der Klasse LMB_{5/40} informativ dargestellt ist.

Erfüllt der anstehende Boden die oben genannte Forderung nicht bzw. sind andere Steinklassen als CP 90/250, LMB 5/40 oder LMB 10/60 für die Deckschicht vorgesehen, muss eine Filterbemessung vorgenommen werden. [76];[52]

Für das Körnungsband des Kornfilters sind folgende Parameter vorzugeben, die ohne Toleranzen einzuhalten sind: Für die linke Grenze die Körnungsanteile d_{10} und d_{100} , dazwischen linearer Verlauf in halblogarithmischer Darstellung und $d_5 > 0,06$ mm und für die rechte Grenze die Körnungsanteile d_0 und d_{85} , dazwischen linearer Verlauf in halblogarithmischer Darstellung, zur Begrenzung des Überkorns $d_{100} < 5 \cdot d_{85}$. [53]

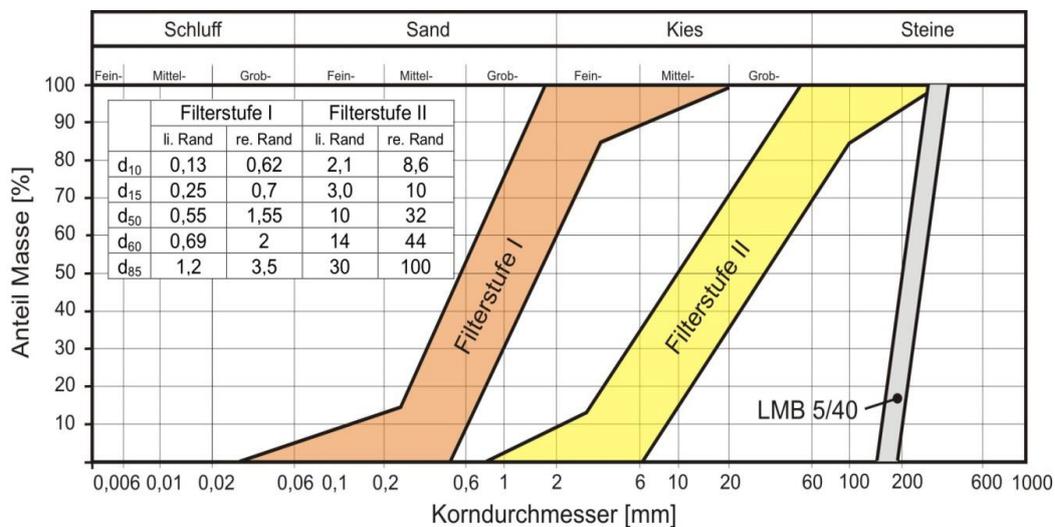


Bild 4.2.16: Zulässige Bereiche für Körnungslinien im Standard-Zweistufenfilter [52]

In Bezug auf inhomogene Untergrundverhältnisse, die bei Wechsellagerung von Böden mit deutlich unterschiedlicher Korngrößenverteilung bzw. Durchlässigkeit vorliegen, ist es in der Kontaktfläche zwischen Untergrund und Filter oft nicht möglich, mit einem Filter sowohl die hydraulische als auch die mechanische Filterwirksamkeit für alle Bodenschichten zu erfüllen. [52]

In diesem Fall ist hinsichtlich der Anforderungen an einen Kornfilter folgendes zu beachten: Wird eine höher durchlässige Bodenschicht mit einer geringer durchlässigen Filterlage überdeckt, führt dies zu einem Ansteigen des Wasserdrucks im Boden unterhalb des Filters und damit zu einer Verschlechterung der Standsicherheit z.B. einer Böschung. Wird eine geringer durchlässige Bodenschicht mit einer zu grobkörnigen Filterlage überdeckt, so kann aufgrund fehlender Filterstabilität eine unerwünschte Erosion des feinkörnigen Bodens eintreten.[76]; [52]

Es ist im Einzelfall zu entscheiden, ob entweder ein Anstieg der Sickerlinie oder eine Erosion toleriert werden kann. Falls beides nicht zugelassen werden kann, ist die Filterkörnung lokal an die inhomogenen Untergrundverhältnisse anzupassen. [52]

Bezüglich des Einbauvorganges bei Mischkornfiltern sind sie lagenweise mit Lagenstärken von maximal 30 cm einzubauen und zu verdichten, sodass keine Entmischung eintreten wird. Besondere Sorgfalt beim Filtereinbau ist im Anschlussbereich von Bauwerken erforderlich, in denen der Filter nur schlecht verdichtet werden kann. Der Anschluss eines Kornfilters an ein Bauwerk ist so zu bauen, dass der zu schützende Untergrund an keiner Stelle freiliegt. Dabei müssen die Verformungen des Anschlusses unter Berücksichtigung genommen werden, damit es infolge von Sackung keine Fugenbildung gibt, was eine konzentrierte Durchströmung begünstigen würde. Wegen möglicher höherer Strömungsgradienten unmittelbar an Bauwerken und eventuell vorhandener Einbauschwierigkeiten am Bauwerk sollte der Filter in diesen Bereichen entsprechend Bild 4.2.17. ausgeführt werden. [52];[76]

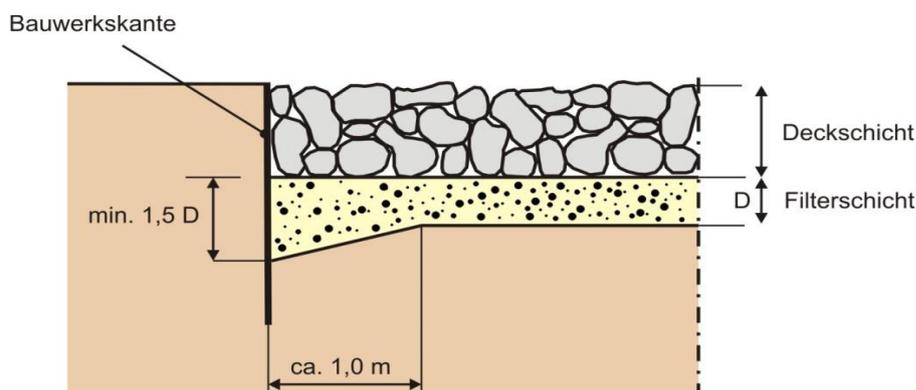


Bild 4.2.17. Anschluss eines Deckwerks mit Kornfilter an eine vertikale Bauwerkskante [52]

Beim Einbau unter Wasser neigt das Filtermaterial zur Entmischung. Deshalb ist nur die Anwendung von gleichförmigen Korngemischen durch Verklappen zulässig. Während ungleichförmiges Filtermaterial unter Wasser nur dann eingebaut werden darf, wenn durch Versuche nachgewiesen wird, dass eine Kornentmischung durch ein geeignetes Einbauverfahren vermieden wird. [53]

4.4.2.2. Geotextilien-Filterbauweisen

Auf der Grundlage von Systemversuchen, Bemessungsregeln, und aus gesicherten Erfahrungswerten können die Regelanforderungen an die Geotextilanwendung in den Deckschichtbauweisen festgelegt werden. Wird ein Geotextil als Filter an einer Wasserstraße

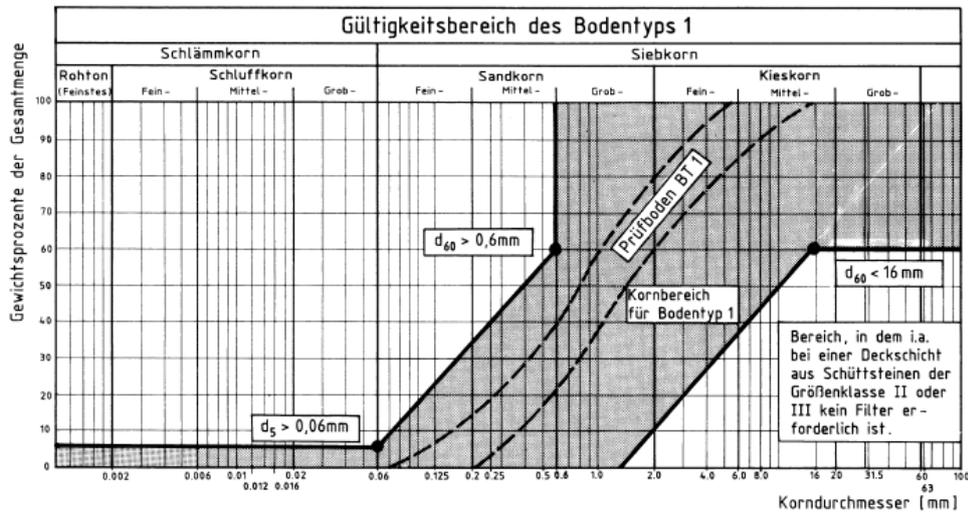
eingesetzt, so müsste nach Filterkriterien bezüglich der mechanischen und hydraulischen Filterwirksamkeit bemessen werden. [80]

Die Geotextilien-Filterbauweisen müssen eine stabile Grenzschicht zwischen Filter und Boden unter Einwirkung der dynamischen Beanspruchungen besonders auf Böschungen gewährleisten, da entstandene Erosionsrinnen unter dem Geotextil ein Ansatzpunkt für die Zerstörung einer Böschungssicherung sein können. Bei schnellen Wasserpiegeländerungen können die Hohlräume unter dem Geotextil mit großem Wasservolumen die örtliche Standsicherheit einer Böschung infolge des Wasserüberdrucks beeinträchtigen. Daher muss das Geotextil einen vollflächigen Kontakt mit dem Planum erhalten, um mögliche Bodenumlagerungen auszuschließen. [77];[78]

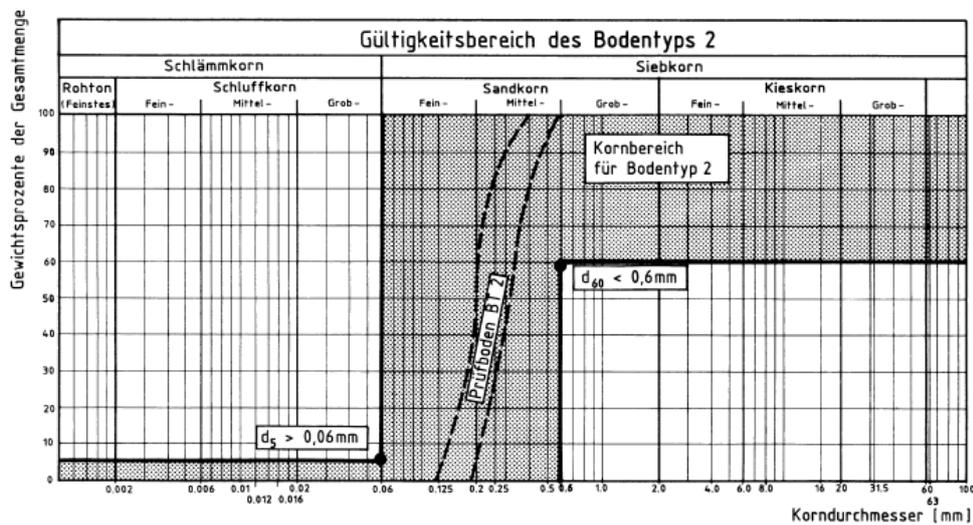
Die Beurteilung für die Eignung eines geotextilen Filters an Schifffahrtskanälen für Sohlen- und Böschungssicherung wird auf ein Bodentyp-Verfahren ausgelegt, bei dem der Bereich der schwachbindigen Böden vom Mittelschluff bis zum Mittelkies in Anlehnung an die Korngrenzen in vier Bodentypen eingeteilt ist. (Bild 4.2.18 a-d)

Bei durchlässigen Böden (Bodentyp 1-3 - Bild 4.2.18 a-c) werden schneller Absink und Wiederanstieg des Wasserspiegels mit dem Durchströmungsverfahren untersucht, während bei gering durchlässigen Böden (Bodentyp 4 - Bild 4.2.18 d) oberflächenparallele turbulente Anströmungen des Filters durch Rückströmungen und Wellen mit dem Turbulenzverfahren untersucht werden. [77]

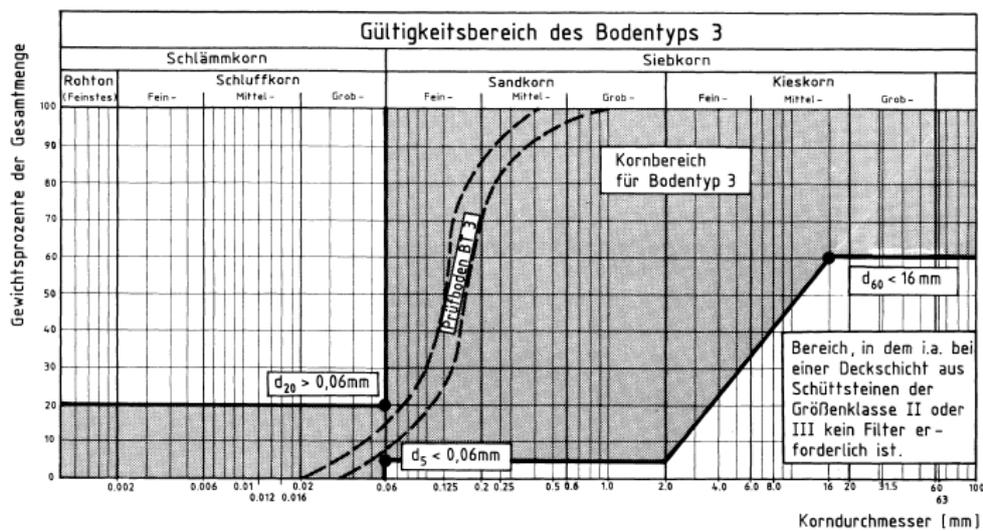
In diesem Zusammenhang müssen sowohl statisch als auch dynamisch hydraulische Belastungen der Filterebene berücksichtigt werden, um die erforderliche Analyse der Festigkeitseigenschaften eines Geotextils durchführen zu können. [77];[14]



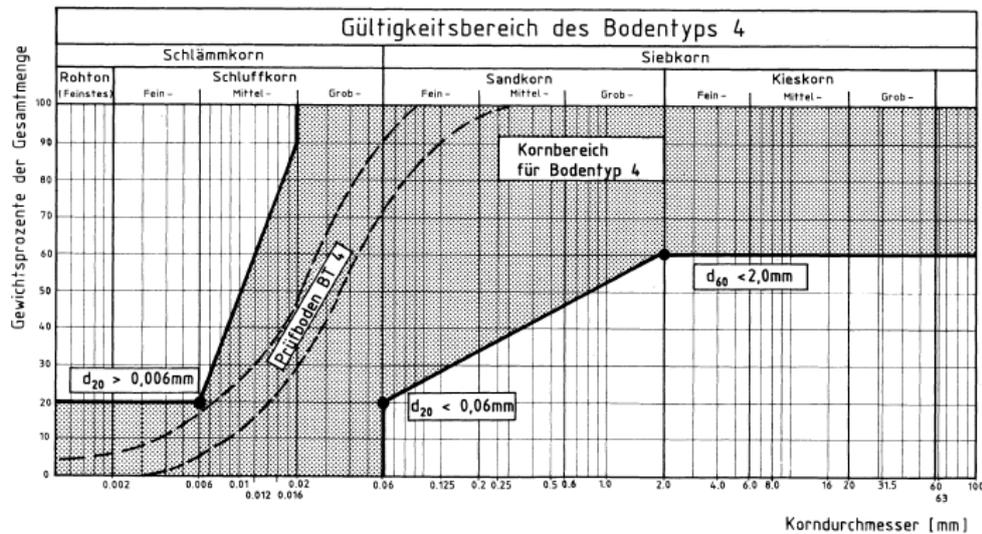
Prüfboden BT 1: $k=4 \cdot 10^{-4}$ m/s (Mittelwert)



Prüfboden BT 2: $k=4 \cdot 10^{-4}$ m/s (Mittelwert)



Prüfboden BT 3: $k=6 \cdot 10^{-5}$ m/s (Mittelwert)

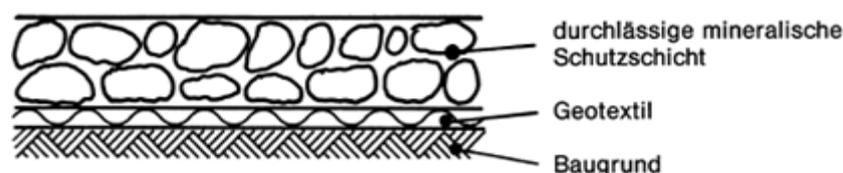


Prüfboden BT 4: $k=1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ (Mittelwert)

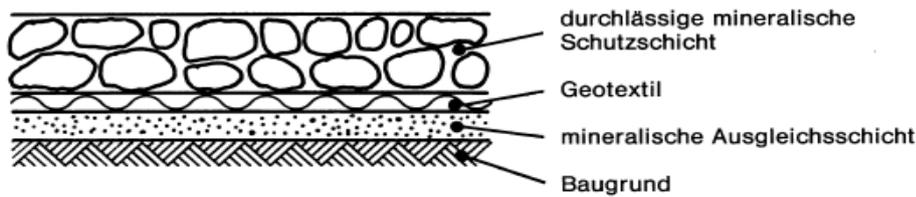
Bild 4.2.18. Gültigkeitsbereich der Bodentypen von 1 bis 4 (a-d) [77]

Der Einbau von Geotextilien im Trockenem ist in der Regel unproblematisch. Es muss jedoch beachtet werden, dass die Sicherung des Geotextils gegen Lageveränderungen infolge Wind und Wellen nicht zu einer Perforation des Geotextils in der später durchströmten Filterfläche führt und dass sie nicht unkontrollierte Zugspannungen beim Schutzschichteinbau zur Folge haben darf. Das Geotextil muss nachrutschen können, deshalb dürfen Geotextilien nicht ohne ausreichende Schutzschicht befahren werden. Das Filterplanum ist eben herzustellen, da andernfalls Erosionsrinnen und Löcher, häufig bei bindigem Boden, entstehen. Danach sind sie mit filterstabilem Boden abzugleichen. Zugleich sind Bewuchs, frei liegende Steine oder Fremdkörper zu beseitigen, da durch große Hohlräume unter dem Geotextil die örtliche Stand-sicherheit der Deckschicht beeinträchtigt werden kann.[78]

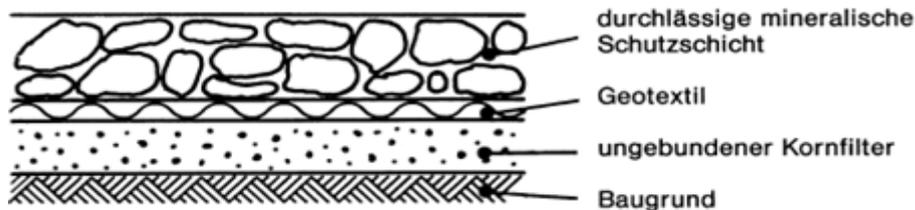
Auf dem Bild 4.2.19 a-d werden die Regelbauweisen bei Einbau der geotextilen Filter mit einer durchlässigen Deckschicht gezeigt.



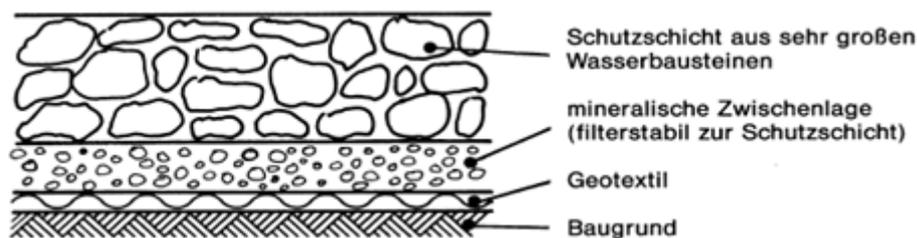
a) Geotextil unmittelbar auf dem Baugrundplanum



b) Geotextil auf einer mineralischen Ausgleichsschicht



c) Kombination eines Geotextils mit einem ungebundenen Kornfilter



d) Mineralische Zwischenlage auf dem Geotextil

Bild 4.2.19. Filterbauweisen bei einer durchlässigen Deckschicht je nach Einbau-Bedingungen-Baugrund, Böschungsneigung und hydraulischen Einwirkungen. [77]

Die Standardbauweise nach MAG (Merkblatt Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen) wird angewendet, bei einem homogenen Baugrund, der sich aufgrund seiner Bödeneigenschaften ebenflächig und standsicher herstellen lässt. Bei Erosionsgefahr bewirkt die Deckschicht einen vollflächigen Bodenkontakt. Die Verwendung eines Geotextils unmittelbar auf dem Baugrund verhindert die Entstehung eines konzentrierten Grundwasserzustroms, der die Leistungsfähigkeit der geotextilen Filterschicht übersteigen würde. (Bild 4.2.19. a) [77]

Die Anordnung einer mineralischen Ausgleichsschicht unter einem Geotextil wird empfohlen, wenn das Planum sich aufgrund der Baugrundeigenschaften nicht ebenflächig herstellen lässt oder im Bauzustand nicht standsicher ist. Der inhomogene Untergrund ist zu Bodensuffosion geneigt, deshalb wird eine Ausgleichsschicht eingesetzt, um einen homogenen Filterunterbau zu bewirken. Andererseits muss sie auf den Baugrund abgestimmt sein, da bei zu grober Körnung Setzungen möglich sind bzw. bei zu feiner Körnung die Sickerlinie angehoben werden kann. (Bild 4.2.19. b) [77]

Ein Geotextil kann als obere Filterlage auf einem ungebundenen Kornfilter bei unterschiedlichen Bodenarten zur Druckentlastung bei örtlich starkem Grundwasser-zustrom und gleichzeitig als Dränmaßnahme angewendet werden. (Bild 4.2.19. c) Im Tidebereich hat es sich bei erosionsgefährdeten Böden als vorteilhaft erwiesen, wenn auf Böschungen zwischen dem geotextilen Filter und einer durchlässigen Deckschicht aus Wasserbausteinen der Klasse CP 90/250 oder größer eine feinkörnigere mineralische Zwischenlage angeordnet wird, deren Körnung jedoch auf die Deckschicht filtermäßig abgestimmt sein muss. (Bild 4.2.19 d) Bei dieser Bauweise wird durch die Zwischenlage ein vollflächiger Kontakt des Geotxtils mit dem Baugrund auch bei sehr großen dynamischen hydraulischen Belastungen bewirkt.[77]

Der Anschluss eines geotextilen Filters an ein Bauwerk ist so auszubilden, dass der zu schützende Untergrund an keiner Stelle, auch unter Berücksichtigung von Verformungen des Anschlusses (Fugenbildung), freiliegt. Dabei muss der Anschluss dauerhaft filterstabil bleiben. Bauwerksanschlüsse, die im Trockenen hergestellt werden, können an ebene Anschlussflächen z.B. in Form eines überlappenden Passstücks hergestellt werden, das am Bauwerk hochgeführt und fest mit diesem verbunden wird.(Bild.4.2.20) Zugleich muss das Passstück so ausgebaut werden, dass es bei Bauwerksbewegungen keine schädlichen Zugbeanspruchungen erfahren kann. [78]

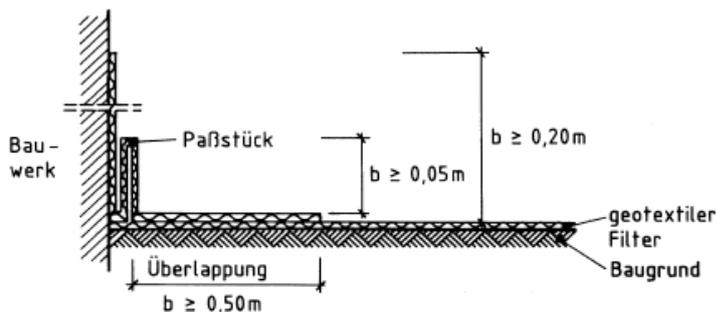


Bild 4.2.20. Bauwerk mit ebener Anschlußfläche [77]

Die Verbindung ebener Anschlussflächen kann durch Überlappung von zwei Geotextilbahnen in Fallrichtung durchgeführt werden. [77]

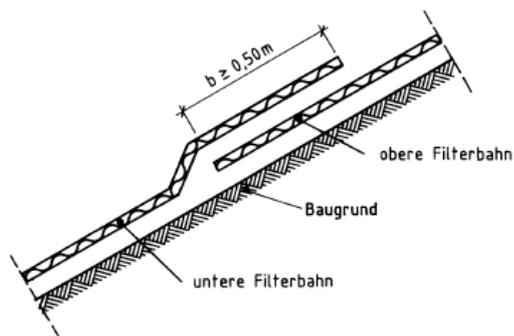


Bild: 4.2.21.Überlappung auf Böschungen [77]

Eine andere Methode für Befestigung der geotextilen Filterflächen ist eine Nahtverbindung, die mit einem Abstand von weniger als 3 cm ab der Geotextilkante hergestellt werden muss.

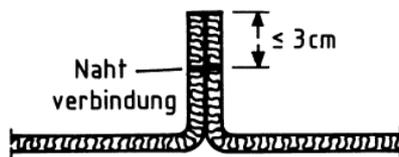


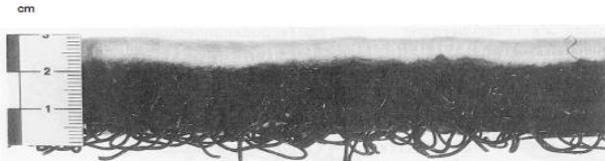
Bild 4.2.22. Nahtverbindung [77]

Wegen des geringen spezifischen Gewichtes und infolge von Lufteinschlüssen ohne eine zusätzliche Auflast können die Geotextilien nicht unter Wasser auf das Planum abgesenkt werden. Aus diesem Grund ist ein plangerechter Unterwassereinbau nur mit technischen Hilfsmitteln oder mit einer Zusatzausrüstung möglich. [77]

Eine Zusatzschicht an der Unterseite eines Geotextils könnte die Faltenbildung beim Unterwassereinbau verringern und dadurch zugleich den Bodenkontakt bereits vor dem Aufbringen der Deckschicht verbessern. Auch bei erosionsgefährdeten Böden wird die Erhöhung der Festigkeit gegen Durchdrücken, des Reibungsbeiwertes und damit die Lagestabilität an steilen Böschungen begünstigt. Trotzdem ist es wünschenswert, bei starkem Grundwasserzustrom eine Zusatzschicht nicht anzuwenden, da sich wegen der wesentlich geringeren Wasserdurchlässigkeit der Filterschicht ein großflächig wirksamer Wasserüberdruck hinter dem Geotextil aufbauen kann, was zu Schaden führen könnte. (Bild 4.2.23 a-b) [77];[78]



a) mit relativ engporiger Struktur



b) mit relativ offenporiger Struktur

Bild 4.2.23. Geotextil mit Zusatzschicht [77]

Ein vollflächiger, weitgehend faltenfreier Einbau von Geotextilien ist mittels eines Faschinenrostes möglich, der die Lagestabilität des Schüttmaterials auf dem Geotextil deutlich verbessert. Bei Einbau unter Wasser muss die Konstruktion durch Aufbringen des Schüttmaterials oder mit Hilfe eines Balkens abgesenkt werden. Diese Filterbauweise kommt vor allem bei Sohlensicherungen in großer Wassertiefe und Böschungssicherungen ohne Fußstützung z.B. bei sehr langen Unterwasserböschungen in Betracht. [77];[78]



Bild 4.2.24 Geotextil mit Faschinenrost /Sinkstück/[77]

Wenn die einwandfreie Lage einer Geotextilbahn nicht durch das Einbauverfahren gewährleistet ist, dann muss vor dem Einbau die Schutzschicht durch Taucher kontrolliert werden. Deshalb soll die Geotextilbahn im Moment des Einbaues der Deckschichtmaterialien möglichst auf dem Planum aufliegen oder nur in geringer Höhe < 50cm mit einer geringen Vorspannung darüber gehalten werden. [78]

Im Baustellenbereich darf die Geotextilbahn über abgerundete Kanten umgelenkt werden, um Scheuerbeanspruchungen durch Bewegungen der Verlegeeinrichtung oder des Geotextils gering zu halten. Außerdem sollte die Geschwindigkeit der Schifffahrt auf $V_s = 6\text{km/h}$ begrenzt werden, um Rutschungen oder eine Erosion des Filterplanums, Beschädigungen der Filterbahn durch den Staudruck und Lageveränderungen der Über-

lappungen durch Rückströmungen oder Wellen so weit wie möglich auszuschließen.
[77]; [78]

4.4.3. Planungshinweise beim Einbau von Dichtungssystemen

4.4.3.1. Dichtungen aus natürlichen Dichtungsmaterialien

-Naturtondichtungen: Beim Einbau von aufbereitetem Naturton muss eine gleichmäßige Dichte und die vorgegebene Dicke über die Fläche eingehalten und die Arbeitsfugen kontrolliert werden. Ferner muss gewährleistet sein, dass keine Risse auftreten, d.h. Stumpfstoße sind zu vermeiden, bzw. mit großer Sorgfalt auszuführen. Die Rissbildung in Naturtondichtungen kann erfolgen durch:

- ungeschützte Exposition, insbesondere bei starker Sonneneinstrahlung,
- nicht ausreichende Verdichtung beim im Trockenen eingebrachten Dichtungen,
- nicht aufeinander abgestimmte Vorschubgeschwindigkeiten von Tonstrang und Mundstück bei extrudierenden Verlegeverfahren.

Infolge zu geringer Aufbereitung des Dichtungstons können Trocknungsrisse entstehen, weshalb mit besonders großer Obacht zur Verhinderung ihrer Ausbildung vorgegangen werden muss. Außerdem ist es unerlässlich, die Dichtung bis zum Aufbringen der Deckschicht feucht zu halten, d.h. Der Ton darf nicht wieder fest sein, um ausreichende Flexibilität zu behalten. Gleichzeitig darf er nicht zu weich sein, da dadurch die Rissbildung begünstigt würde. Es ist sicherzustellen, dass etwaige Risse durch Schwebstoffe aus dem Wasser gedichtet werden, oder dass Kriechverformungen zu einem Schließen des Risses führen können, was eine deutliche Erosionsbeständigkeit bei aufbereitetem Naturton beweist. Naturton sollte stets eine Konsistenz aufweisen, die in gewissem Umfang eine Anpassung an Verformungen von Bauteilen z.B. Spundwänden erlaubt. Anschlüsse an Bauwerke oder Bauteile sind mit langer Kontaktfläche auszuführen, um bei Verformungen des Bauwerks oder des Bauteils keinen durchgehenden Spalt entstehen zu lassen. Beim Einbau im Trockenen mit Verdichtung muss die undrained Scherfestigkeit zumindest in einem 2-3 m breiten Anschlussbereich an das Bauwerke $c_u \leq 50\text{kPa}$ betragen.[91];[81]

Die Tondichtung darf lange ungeschützt liegen, ohne dass Trocknungsrisse auftreten, das zeigt die Langzeitbeständigkeit, die der Ton als Baumaterial besitzt. Trotzdem ist er

empfindlich gegenüber Frost-Tau-Wechseln, sodass vor der ersten Frostperiode stets eine Schutzlage mit einer geotextilen Deckschicht erforderlich ist. [81]

Bei mehrlagigem Einbau wird eine Mindestdicke von 10 cm pro Lage gefordert. Für einlagige Dichtungen aus Naturton beträgt die Mindestdicke 20 cm, um Unwägbarkeiten bei der Aufbereitung und beim Einbau des Tones abzudecken. Bei hohen Sicherheitsanforderungen wird eine Mindestdicke von 30 cm empfohlen. Daher müssen keine Schichten mit großen Poren unter einer Naturtondichtung gelegt werden, da sonst Erosion des Dichtungsmaterials auf der Austrittsseite des Sickerwassers entstehen kann. Deshalb muss eine Durchlässigkeit $k > 1 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ als Anhaltswert für ungeeignete liegende Schichten angesehen werden. [81];[53]

-Geosynthetische Tondichtungsbahnen:Die Geosynthetischen Tondichtungsbahnen bestehen aus zwei Lagen Geokunststoffen, zwischen denen eine Schicht Bentonit als Dichtungsschicht eingeschlossen ist. Eine geotextile Tondichtungsbahn besitzt typischerweise eine Durchlässigkeit $k \leq 2 \cdot 10^{-11} \text{ m/s}$, die auf eine Dicke von 1cm bezogen wird, trotzdem erhöhen Frost – Tau – Wechsel ebenfalls die Durchlässigkeit, sodass eine Schutzlage aus Sand erforderlich ist. Basis - und Deckgeotextil müssen miteinander verbunden sein, um einerseits ein Verlagern des Bentonits in der GTD(Geosynthetischen Tondichtungsbahnen)- Ebene zu verhindern und um Scherbeanspruchungen bei der Verlegung auf Böschungen aufzunehmen. Bei Verwendung von Geweben als Basisgeotextil ist ein ausreichender Reibungswinkel bei Verlegung auf Böschungen sicherzustellen, gleichzeitig wird Faltenbildung während der Verlegung verhindert. GTD besitzen eine gute Verformbarkeit und passen sich bestehenden und im Verlaufe der Baumaßnahme und des Gebrauchszustandes entsprechenden Untergrundverformungen gut an, trotzdem sind sie gegenüber direkt mechanischer Beanspruchung infolge der geringeren Dicken als empfindlich einzustufen.[91]

Anschlüsse an Bauwerke und Bauteile erfordern besondere Konstruktionen, wie Flansche, Stöße und andere verlässliche Lösungen bekannt aus Dichtungen mit Kunststoffbahnen. Unter Wasser können Anschlüsse nur durch ausreichende Überlappungsbreiten hergestellt werden. Meist ist ein Dichtungskeil aus aufbereitetem Naturton oder anderen geeigneten Materialien erforderlich, der mit dem Bauteil eine Kontaktlänge von mindestens 0,5m und mit der GTD von mindestens 0,8m in der möglichen Fließrichtung haben muss. Stöße dürfen nur als Überlappungen mit einer Mindestbreite von 0,5m ausgeführt

werden, andererseits sind horizontal liegende Überlappungen auf Böschungen nicht zulässig. Jede Wasser-Wegsamkeit in der GTD-Ebene muss ausgeschlossen werden, da eine Nachbehandlung wie beim Einbau im Trockenen (Versiegeln mit Bentonitpaste) nicht möglich ist. Wird die endgültige Überlappung erst nach längerer Liegezeit der GTD aufgebracht, ist eine größere Überlappungsbreite von 1,5 m erforderlich. Wird der Überlappungsbereich in der Mitte bis zur Verlegung der gegenüberliegenden Bahnen temporär mit einem GTD-Streifen abgedeckt und gesichert, ist eine Überlappung von ca. 1 m ausreichend. [81]; [53]

4.4.3.2. Dichtungen mit Kunststoffen oder Kunststoffmischungen

Auf Grund der Festigkeit des Dichtungsmaterials können diese Dichtungen auf Verformungen des Untergrundes mit Rissbildung reagieren, oder sie überspannen im Untergrund auftretende Setzungsmulden. Dadurch können Hohlräume entstehen, die Erosionsvorgänge unter der Dichtung begünstigen. Trotzdem sind sie gegenüber Frost-Tau und Trocken-Nass-Wechseln im Rahmen der hiesigen klimatischen Bedingungen weitgehend unempfindlich, eine gewisse Rissbildung durch Temperatureinflüsse ist allerdings nicht auszuschließen. Risse können auch entstehen durch Beanspruchungen aus anhaftenden Eisschichten. [81]; [53]

Anschlüsse an Bauwerke oder Bauteile sind mit ausreichend langer Kontaktfläche auszuführen, um bei Verformungen des Bauwerks oder des Bauteils keinen durchgehenden Spalt entstehen zu lassen. Es wird eine Kontaktlänge von mindestens 0,8 m gefordert. Die Anschlüsse nach Arbeitspausen werden überlappt oder über einem Dichtungskeil gestoßen [81]

-Dauerplastische Dichtungsschicht: Dauerplastische Dichtungsschichten sind ein Gemisch aus Sand, Tonmineralien und Zement, das nicht aushärtet. Kriecht das Material auf einer Böschung mindestens im frischen Zustand hangabwärts, so kann die Dichtungsschicht nur in der Horizontalen eingebaut werden. Wird das Material durch Austrocknung geschädigt, so ist es ebenfalls nur für einen dauerhaften Einsatz unter Wasser geeignet. [81];[91]

Dauerplastische Dichtungsschichten werden wie Vergussmörtel eingebracht und deswegen sind Anschlüsse und Stöße problemlos, da das Material infolge seiner Fließfähigkeit an jeder Grenzschicht dicht anliegt. [81]

Es ist sicherzustellen, dass unter der Dichtung keine Schichten mit großen Poren liegen, da das fließende Material in die Hohlräume der Grobschicht eindringen (Kriechvorgänge) und eine Erosion des Dichtungsmaterials auf der Austrittsseite des Sickerwassers auftreten kann. Andererseits kann eine Durchlässigkeit $k > 1 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$ als Anhaltswert für ungeeignet liegende Schichten angesehen werden. [81]; [53]

-Wasserbausteine mit Vollverguss: Vor der Verlegung des Vergusses ist das zu vergießende Schüttsteingerüst auf Schlammfreiheit zu überprüfen. Es ist Sorge zu tragen, dass unmittelbar nach dem Einbau des Schüttsteingerüsts der Vollverguss beginnt. An der Böschung ist die Arbeitsrichtung von unten nach oben. [53]

Unter der Schüttung ist eine Trennlage anzuordnen, um das Einsinken der Steine zu tief in den Untergrund zu verhindern. Diese Trennlage darf nicht wie eine Dränschicht unter der Dichtungsschicht wirken, d.h. die Durchlässigkeit in der Ebene darf nicht höher sein als die Durchlässigkeit des anstehenden Bodens. [81]

Bei Hartdichtungen ist auf richtige Konsistenz des undurchlässigen Vergussstoffes zu achten, da zu flüssige Konsistenz an der Böschung zu einem Abfließen des Vergussstoffes führt und zu steife Konsistenz den Vergussstoff nicht eindringen lässt und zu einer dünnen Dichtungsschicht nur an der Oberfläche führt, dem keine lange Haltbarkeit zugesprochen werden kann. Beim Einbau unter Wasser ist eine Temperatur $T > 160^\circ$ an der Einbaustelle erforderlich. Die schnelle Abkühlung des Vergussstoffes kann leicht dazu führen, dass das Material erstarrt, bevor die Hohlräume des Steingerüsts vollständig ausgefüllt sind. Aus diesem Grund wird das Verfahren im Unterwassereinbau seit längerem nicht mehr angewandt. [81]

Diese Dichtungen werden kontinuierlich hergestellt, deshalb sind Anschlüsse an bestehende Bauteile problemlos, da der Vergussstoff (bei richtiger Konsistenz) infolge seiner Fließfähigkeit dicht an der Grenzschicht anliegt. Nach Arbeitspausen sind Anschlüsse keilförmig auszuführen. Probleme können nach dem Aushärten entstehen, wenn sich die Stoßfuge durch Verformungen öffnen kann (z. B. Anschluss an eine Spundwand, wechselnde Wasserstände oder Temperaturen oder Verformungen durch direkte äußere Kräfte). Diesen Beanspruchungen ist durch entsprechend tiefreichende Kontaktflächen oder zusätzliche Maßnahmen Rechnung zu tragen. [81]

-Betonplatten/Betonmatratzen:Dichtungen mit Betonplatten sind selten angewendet worden und stellen somit eher ein Ausnahmeverfahren dar. Die Standard – Betonmatratze besteht aus zwei hochfesten synthetischen Gewebelagen mit Reißfestigkeiten von 40-100kN/m in Längs - und in Querrichtung, die mittels gleichlangen hochfesten Abstandshaltern und Diagonalbewehrungsbändern verbunden werden. [81]

Nach Befüllung mit erosionsfestem Vergussmörtel gewähren sie einen einheitlichen Querschnitt.Gleichzeitig müssen sie ausreichend stabil sein, um dem Fülldruck widerstehen zu können. Durch die Längen der Abstandshalter und Diagonalbewehrungsbänder können gleichmäßige Matratzendicken von 10 bis 60 cm mit Flächengewichten von 200 bis 1200 kg/m² hergestellt werden. [81]

Immerhin handelt es sich um eine Hartdichtung aus wasserundurchlässigem Beton, die gegenüber Frost-Tau- und Trocken-Nass-Wechseln im Rahmen der hiesigen klimatischen Bedingungen weitgehend unempfindlich ist. Etwaige Risse werden durch Schwebstoffe im Wasser (Selbstheilungseffekt) gedichtet. [81]

Die Gewebeschalung für die Betonmatratzen wird im Werk hergestellt und in großen Einzelsegmenten vorkonfektioniert. An der Einbaustelle werden die Ober - und Unterlage der Gewebeschalung zu endlosen Bahnen in der erforderlichen Breite vernäht. Außerdem werden Injektionsschläuche in die Gewebeschalung geführt. Nach Freigabe des Planums wird die Geotextilschalung mit Hilfe von Pontons oder Unterwasser-einbaugeräten auf dem zu dichtenden Bereich verlegt. Vor dem kontinuierlichen Einpumpen des Injektionsmörtels wird die Lage der Gewebeschalung kontrolliert und dann von unten nach oben bis zum Erreichen des erforderlichen Befüllungsgrades mit Mörtel befüllt. Die Fertigung der Dichtungen mit Betonmatratzen erfolgt kontinuierlich. [53];[81]

5. Technisch – biologische Ufersicherung an Wasserstraßen

5.1. Allgemeines

Unter „technisch-biologischen Ufersicherungen“ werden Ufersicherungen verstanden, die entweder ausschließlich aus biologischen (pflanzlichen) Komponenten oder aus einer Kombination aus biologischen und technischen Komponenten bestehen. [42]

Sie stellen eine Möglichkeit für umweltbewusste Verbesserungen an den Wasserstraßen dar, bei welcher die Ufer bisher durch die üblichen technischen Deckwerke aus groben Wasserbausteinen vor schiffsinduzierten Beanspruchungen geschützt wurden. Diese robuste Bauweise hat sich vielerorts bewährt, sie ist sicher, unterhaltungsarm und wirtschaftlich, aber aus ökologischer Sicht besitzt sie eine geringe Wertigkeit. [92]; [93]

Die technisch-biologische Ufersicherung als ökologisch verträglichere Alternative zur klassischen Steinschüttung könnte dabei eine ausreichend gute Stabilisierung der Uferböschung durch die oberirdischen Pflanzenteile und die Wurzeln im Boden darstellen. Für die zukünftige Befestigung von Böschungen an Wasserstraßen wird sich deshalb in vielen Fällen eine Zweiteilung ergeben: Eine Steinschüttung als Sicherung der Unterwasserböschung und eine Ufersicherung im Überwasserbereich, die je nach Belastungstechnisch-biologisch, d. h. rein pflanzlich oder als Kombination aus pflanzlichen und technischen Komponenten, oder bei großen hydraulischen Belastungen und in Dammbereichen mit durchwurzelungsgefährdeten Dichtungen auch weiterhin rein technisch als Steinschüttung ausgebildet wird. [42]; [40]

Nur wenige dieser Verfahren aber können den hohen Beanspruchungen in den heutigen Binnenwasserstraßen standhalten. Hierzu sind vor allem ingenieurbiologische Ufersicherungsvarianten vorzustellen, bei denen die Böschungsneigung erhalten bleibt, die sofortigen Oberflächenschutz bieten und bei denen sich technische und biologische Wirkungen ergänzen: [71]

- Vegetationsmatten (stein- und bodengefüllte Kammerdeckwerke mit integrierten Pflanzen, die über eine Vegetationsperiode komplett vorgezogen werden)
- Initialbepflanzungen von Steinschüttungen mit Steckhölzern oder Pflanzenbulten (hügelförmige bewachsene Erhöhungen)
- Spreitlagen (enge Oberflächenabdeckung mit fixierten Weidenruten)

Mit anderen Verfahren wird in die Böschungsneigung eingegriffen oder ist nur lokaler Schutz gewährleistet, weshalb sie an Wasserstraßen nur in Einzelfällen in Frage kommen, wie z. B.: [71]

- Gabionen (steingefüllte Drahtkörbe mit integrierter Bepflanzung)
- Pfahlreihe als Lahnung oder Flechtzaun (ohne Bewuchs)
- Doppelpfahlreihe (stein-/bodenbefüllt mit Bepflanzung)
- Faschinen (Bündel aus ausschlagfähigen Weidenruten)

5.2. Weidenspreitlage

Weidenspreitlagen bestehen aus austriebsfähigen Weidenästen, die quer oder schräg zur Fließrichtung nebeneinander flächig auf die Uferböschung verlegt und mit Pflöcken und horizontalen Querriegeln und Drahtverspannungen sicher am Boden befestigt werden (siehe Bild 5.1). [42]



Bild 5.1. Weidenspreitlagen, in die Steinschuttung einbindend [42]

Für die Herstellung werden dünne, etwa 100 bis 250 cm lange Zweige und Ruten auf der Böschung mit Stangen, oder besser, niedrigen Flechtzäunen niedergehalten. Geeignetes Material für Spreitlagen sind wiederum schmalblättrige Strauchweiden, die auch als Buschwerk flexibel bleiben, sich bei Überströmung umlegen und im Stromstrich pendeln. Nach Festigen wird die Spreitlage einige Zentimeter mit bindigem Boden abgedeckt, damit diese bis zum Verwurzeln nicht austrocknet. (Bild. 5.2)[92]



Bild 5.2. Weideneinbau als Böschungssicherung [92]

Bei Spreitlagen ist der Böschungsfuß meist einzeln zu sichern, etwa mittels Faschinenwalze oder Steinwurf. Mit Spreitlagen können Uferböschungen bis zu einer Neigung von etwa 1:1 oder etwas steiler gesichert werden. Begrenzend wirkt diesbezüglich die Standfestigkeit der Erdböschung vor dem Verwurzeln der Spreitlage. [94]

5.3. Pflanzmatten

Pflanzmatten bestehen aus einem geeigneten Trägermaterial, meist Kokosgewebe, mit vorgezogenen Einzelpflanzen (z. B. Röhrichte oder Gräser). Sie sind in ähnlicher Weise wie die Spreitlagen auf der Böschung zu befestigen. [42]



Bild. 5.3. Pflanzmatten [42];[96]

5.3. Röhrichtgabionen

Röhrichtgabionen besitzen eine feste Umhüllung aus unverrottbaren Kunststoffnetzen oder verzinktem Stahl, die Steine, Schotter, Kies und gegebenenfalls eingeschlammten Boden, gehalten durch ein Filtervlies, einschließen. Die Schichtdicke beträgt 20 cm bis 30 cm. (Bild 5.3) [96]



Bild 5.4. Röhrichtgabionen – vorgezogene Einzelemente [42];[96]

5.4. Steinmatratzen

Steinmatratzen sind mit kleinen Wasserbausteinen (z. B. CP45/125) gefüllte hochfeste, kunststoffarmierte Netze mit einer Fläche von 1 m bzw. 2 m x 2 m und einer Schichtdicke von 20 cm bis 30 cm, auf denen vorgezogene Pflanzmatten befestigt werden können. [42];[97] (Bild 5.5)



Bild 5.5. Steinmatratzen aus kleinen Wasserbausteinen CP45/125. [97]

Die vorgefüllten Elemente werden mittels einer Verlege-Traverse eingebaut oder mit Hebebändern transportiert. So ist eine schnelle und passgenaue Verlegung auch an steilen Böschungen problemlos durchführbar. Eine zusätzliche Befestigung der Steinmatratzen z.B. durch Bodenanker kann in Ausnahmen erforderlich sein und ist durch eine entsprechende bodenstatische Untersuchung vorzugeben. In der Regel werden Steinmatratzen nach dem Einbau übererdet und begrünt. [95];[93]

Als Sicherungsbauweisen können sie hohen Schleppspannungen widerstehen und bieten bei geringem Gewicht maximalen Erosionsschutz. (Bild 5.6.)

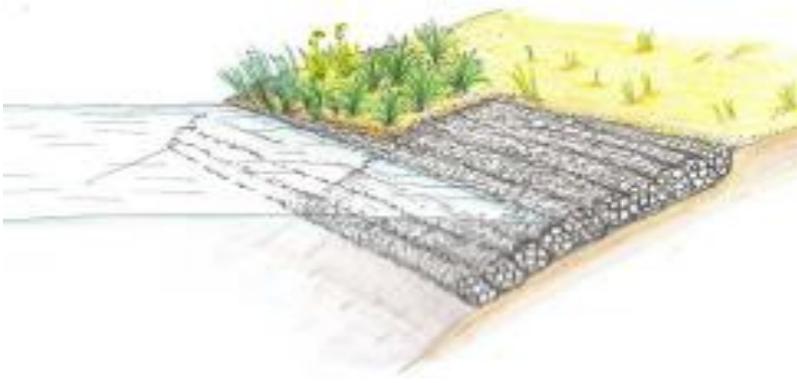


Bild 5.6. Steinmatratzen als Sicherungsbauweise [97]

Gleichzeitig werden sie als ökologisch hochwertig bezeichnet, da sie eine langjährige Begrünung ermöglichen. Die Steinmatratzen sind eine Weiterentwicklung der bewährten Steinwalzen zu flächig-monolithischen Einheiten. Mit Steinmatratzen steht ein technisch ausgereiftes System zur Verfügung, das erforderliche Anforderungen mit naturnahen Entwicklungsmöglichkeiten ideal verbindet und zudem kostengünstig und unkompliziert in der Anwendung ist. [92];[97]

5.5. Faschinenbündeln

Faschinenbündeln oder auch Faschinenwalzen werden zur Böschungssicherung verwendet. Zur Herstellung des Längsverbauens werden etwa 5 bis 6 m lange Weidenruten von Daumenstärke mit Rödeldraht zu etwa 20 bis 40 cm starken Bündeln zusammengebunden. (Bild 5.7)



Bild 5.7 Faschinenbündeln [93]

Faschinenbündeln werden im Bereich der Mittelwasserlinie eingebaut, indem sie mit Pflöcken fixiert werden. Eine Überdeckung mit Erdreich hält die Faschinen feucht und verbessert das Anwachsen und es entsteht daraus ein Saum aus Buschwerk, der langfris-

tig die Ufersicherung übernimmt. Geeignetes Ausgangsmaterial sind langtriebige und schmalblättrige Strauchweiden, da diese biegsam sind. Faschinenbündel können vielseitig verarbeitet werden. Werden mehrere parallel nebeneinander gelegt, so entsteht eine Faschinenmatte als flächige Sicherung. Wenn die Faschine gegen Aufschwimmen durch eine Auflast aus Kies oder Steinen am Einbauort beschwert wird, wird sie auch als Sinkstück bezeichnet. Ohne Auflast müssen die Faschinen mit Pfählen an der Flusssohle befestigt werden, da das Gewerk sonst aufschwimmen würde. Über die Faschinenmatte quer gebundene Wippen (Hebebaum/Reck) ergeben kastenartige Konstruktionen, die Packwerk genannt werden. Solche räumliche Konstruktionen sind sehr stabil und können als massiver Uferschutz, als Bühnen oder Parallelwerke eingesetzt werden. Faschinenbauwerke sind sehr flexibel und als Bauweise ökologisch positiv zu bewerten. Zwischen den Zweigen und Ruten bleiben stets genügend Hohlräume, die einer Vielzahl von Lebewesen als Unterschlupf dienen. Faschinen aus abgestorbenem Material sind daher ein durchaus erwünschter Eintrag von Totholz in die Gewässer. [94];[93]



Bild 5.8 Mit Faschienen befestigtes Ufer des Kanals in Templin [95]

Die Ufersicherungsmaßnahmen müssen so konzipiert werden, dass sie sowohl den Uferschutz zuverlässig gewährleisten als auch gute ökologische Bedingungen im Uferbereich schaffen. Beide Ziele in gleicher Weise maximal zu erreichen, ist allerdings auf Grund der gegensätzlichen Anforderungen kaum möglich. Die Belastbarkeit einer Ufersicherung nimmt mit zunehmendem Anteil technischer Komponenten zu, die ökologische Wirksamkeit dagegen ab. Der mögliche Anteil biologischer Komponenten in der Ufersicherungsmaßnahme hängt entscheidend von der Größe der hydraulischen Belastungen ab. Ziel wird sein, einen optimalen Kompromiss in Abhängigkeit der jeweils gegebenen Randbedingungen zu finden. [42];[40]

6. Literatur und verwendete Unterlagen

6.1. Literaturverzeichnis

[1] Rudolf Kuhn "Binnenverkehrswasserbau"/1984/

- [2] Heinrich Press „Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen“/1956/
- [3]Kuhn,Binnenschiffahrtsbetrieb und Wasserstraßenbau,Ergebnisse der Kanal und Schiffahrtsversuche/1967-1972/
- [4] Kuhn, Binnenschiffbau und Wasserstraßenbau. Jahrbuch der Schiffbautechnischen Gesellschaft 65.Band,1971 Berlin
- [5]Techniken und Organisationsformen der Binnenwasserstraßen von Detlev Ellmers/162-183/
- [6]Handbuch der Donauschiffahrt 2013/via donau/
- [7]Geschichte der Wasserstraßen-
Wikipedia/http://de.wikipedia.org/wiki/Geschichte_der_Wasserstraßen[18.03.2015 11:31:46]
- [8]Zur Entwicklung der Rheinschiffahrt vom Mittelalter bis ins 19. Jahrhundert. -Clemens von Looz-Corswarem(veröffentlicht in: "Düsseldorf und seine Häfen",1996, /aus Anlaß des 100jährigen Hafenjubiläums)
- [9] David Edwards-May: Binnengewässer Frankreichs, 5. Auflage, Verlag Edition Maritim,Hamburg 1997
- [10]M. Eckoldt (Hrsg.): Flüsse und Kanäle, Die Geschichte der deutschen Wasserstraßen. S. 451–457, DSV-Verlag 1998
- [11] Ralf Molkenthin: Straßen aus Wasser, Technische, wirtschaftliche und militärische Aspekte der Binnenschiffahrt im Mitteleuropa des frühen und hohen Mittelalters.
- [12] http://de.wikipedia.org/wiki/Kaspisches_Meer
- [13] „Studienblätter Verkehrswasserbau“-pdf
- [14]<http://www.bigell.de/Hausboot/Frankreich/rhonerhin.htm>Gerhard Bigell 1986 - 2013
- [15] Wasserwege.Eu/<http://www.water-ways.net/d/info/frankreich/index.php>
- [16]Wasserwege.Eu /<http://www.water-ways.net/d/info/deutschland/index.php>

- [17]<http://www.schiffahrtsverein.de/index.php/die-rhein-main-donau-wasserstrasse> Berufsm. Stadtrat und Wirtschaftsreferent Dr. Michael Fraas, Nürnberg, Dipl.-Kfm. Axel Eisele, Nürnberg, **DWSV e.V.** - Beatrix Wegner
- [18]http://de.wikipedia.org/wiki/Liste_deutscher_Binnenwasserstrasse
- [19]<http://www.water-ways.net/d/info/deutschland/mittellandkanal.php>
- [20]<http://de.wikipedia.org/wiki/Mittellandkanal>
- [21]<http://de.wikipedia.org/wiki/Donau-Oder-Elbe-Kanal> Jíra Janác: Amsterdam University Press, Amsterdam 2012,
- [22]http://wirtschaftsblatt.at/home/nachrichten/europa_cee/1385816/Gegenwind-fur-Kanal-DonauOderElbe von Simone Brunner
- [23]http://bankwatch.org/documents/letak_DOL_DE.pdf Herausgegeben von Hnutí DUHA – Freunde der Erde Tschechien, Juni 2006
- [24]<http://www.water-ways.net/d/info/russland/index.php>
- [25] Martin Eckoldt / Flüsse und Kanäle, Die Geschichte der deutschen Wasserstraßen. DSV, Hamburg 1998
- [26] http://www.water-ways.net/d/info/russland/don_wolga_don_kanal.php
- [27] <http://de.wikipedia.org/wiki/Wolga-Don-Kanal>
- [28]http://www.water-ways.net/d/info/russland/moskau_kanal_wolga_moskau_kanal_moskwa.php
- [29] <http://dietmarwalch.at/russland/> 13. bis 25. Juli 2004 Dietmar und Helene Walch
- [30] http://www.water-ways.net/d/info/russland/weissmeer_ostsee_kanal.php
- [31] Binnenverkehrswasserbau/Rudolf Kuhn/s 38-41/
- [32] Studienblätter Verkehrswasserbau.pdf
- [33] <https://www.wsv.de/wsa-ver/wirueberuns/aufgaben/index.html>
- [34] http://www.via-donau.org/unternehmen/leistungen/rechtliche_grundlagen/

- [35] Kolloquium „Alternative technisch-biologische Bundesanstalt für Gewässerkunde Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen Wirkungsweise, Belastbarkeit, Anwendungsmöglichkeiten 26. Oktober 2010, Hannover - Petra Fleischer, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- [36] BAW Merkblatt_ Grundlagen zur Bemessung von Böschungs-und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen /GBB/ Ausgabe 2010
- [37] <http://www.wasserwirtschaft.steiermark.at/cms/ziel/4579744/DE/>
- [38] Empfehlungen des Arbeitsausschlusses „Ufereinfassung “ Hafen und.../12.1.2. Belastungen an Binnenwasserstraßen/
- [39] Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft Tom 39- Erster Baudirektor Dr.-Ing. A. Bolle
- [40] BAW Merkblatt _Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs-und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (MAR)/Ausgabe 2008
- [41] Geotechnische Wirkungsweise technischer und pflanzlicher Ufersicherungen Dr.-Ing. Renald Soyeaux, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe
- [42] BAW Mitteilungen Nr. 95 „Johann-Ohde-Kolloquium“ Bundesanstalt für Wasserbau- Technische Universität Dresden in Karlsruhe am 7./8. Mai 2012
- [43] Binnenverkehrswasserbau - Rudolf Kuhn/ Deckwerke und Dichtung/
- [44] [verkw07.pdf/Durchlässige Deckwerke/](#) © Büsching, F.: Verkehrswasserbau
- [45] Binnenverkehrswasserbau Rudolf Kuhn/Niedrigwasserregelung von Flüssen/
- [46] <http://www.geodz.com/deu/d/Deckwerk>
- [47] [http://www.auf-kw.uni-rostock.de/lehre/studentenarbeiten/gestaltungs grundlagen-und-bemessung-von-deckwerken-im-kuestenwasserbau/Dr.-Ing.Peter Fröhle, Dipl.-Ing. Frank Weichbrodt](http://www.auf-kw.uni-rostock.de/lehre/studentenarbeiten/gestaltungs_grundlagen-und-bemessung-von-deckwerken-im-kuestenwasserbau/Dr.-Ing.Peter_Fröhle,_Dipl.-Ing._Frank_Weichbrodt)
- [48] Bundesanstalt für Wasserbau/BAW-1993/_Merkblatt Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen/MAG/
- [49] Anwendung_DIN_EN_13383- Dr.-Ing. Jan Kayser Bundesanstalt für Wasserbau

- [50] TLW/Technischen Lieferbedingungen Wasserstraßen/TLW/-Ausgabe 2003 - EG-Notifizierung Nr. 2003/0362/D vom 29. Dezember 2003
- [51] BAW Merkblatt_ Anwendung von hydraulisch-und bitumengebundenen Stoffen zum Verguss von Wasserbausteinen an Wasserstraßen /MAV/_Ausgabe 2008
- [52] BAW Merkblatt _ Anwendung von Kornfiltern an Bundeswasserstraßen /MAK/ Ausgabe 2013
- [53] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen-Wasserbau /ZTV-W/ für Böschungs- und Sohlensicherungen /Leistungsbereich 210/ Ausgabe 2014 EU-Notifizierung
- [54] Richtlinien für Prüfung von mineralischen Weichdichtungen im Verkehrswasserbau- EU – Notifizierung Nr. 2006/370/D vom 23.10.2006 Ausgabe 2006/ Herausgeber (im Eigenverlag): Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
- [55] Empfehlungen zur Anwendung von Oberflächendichtungen an Sohle und Böschung von Wasserstraßen /Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr.85 /2002/
- [56] BAW Merkblatt Schadensklassifizierung an Verkehrswasserbauwerken (MSV) Ausgabe 2011
- [57] <http://www.baw.de/de/geotechnik/projekte/projektarchiv/deckwerke/index.html>
- [58] <http://www.etg-bau.de/wasserbau2.html>
- [59] <http://www.sgdsued.rlp.de/Themen/Wasserwirtschaft/Hochwasserschutz/Bodenheim-Laubenheim/Deiche/>
- [60] <http://www.huelskens-wasserbau.de/Deckwerksbau-Verklammerung.72.0.html>
- [61] <https://www.google.at/search?q=Teilverguss>
- [62] http://vzb.baw.de/publikationen/kolloquien/0/3_Stein_Verguss%20Dichtungen.pdf
- [63] Dimensionierung von Ufersicherungen mit Deckwerken unter Beachtung der Belastungsintensität Dr.-Ing. Jan Kayser, Bundesanstalt für Wasserbau
- [64] Handbuch der Baugeologie und Geotechnik von Wolfgang R. Dachroth

[65] BMU-Broschüre „Tiefe Geothermie – Nutzungsmöglichkeiten in Deutschland“ (Sep. 2011) Ingrid Stober, Regierungspräsidium Freiburg, Thomas Fritzer, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Karsten Obst, Landesamt für Umwelt, Naturschutz und Geologie Rüdiger Schulz, Leibniz-Institut für Angewandte Geophysik

[66] <http://de.wikipedia.org/wiki/Darcy-Gesetz>

[67] Staudämme und Dichtungselemente- Bauhaus-Universität-Weimar-Lehrstuhl Wasserbau- Univ.Prof. Dr.-Ing.H.P.Hack

[68]- Unterwassereinbau von Oberflächendichtungen in Bundeswasserstraßen- Stand der Entwicklungen 02/2011- Dipl.-Ing. Petra Fleischer Bundesanstalt für Wasserbau, Referat Erdbau und Uferschutz petra.fleischer@baw.de

[69] https://www.google.bg/?gws_rd=ssl#q=Geosynthetische+Tondichtungsbahnen- Dipl.-Ing. Katja Werthund Bearbeiterin BBG Bauberatung Geokunststoffe GmbH & Co. KGkwerth@bbgeo.com in Abstimmung mit UAG 5.1/6.1 Prof. Dr. F. Saathoff, Rostock

[70] http://www.thieling.eu/bau_gmbh/referenzen.php

[71] Geotechnische Wirkungsweise technischer und pflanzlicher Ufersicherungen Dr.-Ing. Renald Soyeaux, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

[72] Hauke Nakoinz Wasserstraßen – Schifffahrt – Umwelt/Handbuch für den Beruf Wasserbauerin/Wasserbauer- Hauke Nakoinz Koblenz, im Juli 2010

[73] Böschungs- und Sohlensicherungen im Wasserstraßen /Dir Dr.-Ing. M. Heibaum, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

[74] Uferunterhaltungsmaßnahmen an der Ems-WSA RHEINE- http://www.wsa-rheine.de/wasserstrassenbereich/ems/bilder_ems/pdf/Emspraesentation.pdf

[75] MMB 2013/ Merkblatt Materialtransport im Boden- Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)

[76] Merkblatt Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen (MAK)- Selbstverlag 1989

[77] Bundesanstalt für Wasserbau/BAW-2012/_Merkblatt Anwendung von geotextilen Filtern an Wasserstraßen/MAG/

[78]Filter mit Geokunststoffen/2008-Merkblatt

[79] www.strabag-wasserbau.com

[80] Anforderungen an Geotextilien für die Funktion Trennen und Filtern/TIEFBAUAMT GRAUBÜNDEN / Besondere Bestimmungen Teil 2 01.12.2014 ag

[81] Empfehlungen zur Anwendung von Oberflächendichtungen an Sohle und Böschung von Wasserstraßen 2010/ NORBERT BROECKELMANN (bis 2002),ROLF DIETRICH,PETRA FLEISCHER,RUDOLF FRÜKE (OBMANN),MICHAEL HEIBAUM,ARNO LIEBRECHT,HEINZ-JAKOB THYßEN (seit 2002)

[82]LHW /Landesbetrieb für Hochwasserschutz und Wasserwirtschaft Sachsen/-Anhalt Dezember 2011, Genehmigungsplanung /-Burkhard Henning

[83]BAW Mitteilungen Nr: 95 _Johann-Ohde-Kolloquium/Bundesanstalt für Wasserbau Technische Universität-Dresden in Karlsruhe am 7./8.Mai 2012

[84] Wasserbau-Praxis mit Berechnungsbeispielen-2010/-von Eberhard Lattermann

[85]Wasserbau/Aktuelle Grundlage_ Neue Entwicklungen/Ausgabe 2014

[86] 5.Umgang mit der Natur, Umweltschutz_ Erfahrungen mit Deckwerken an Binnenwasserstraßen in Deutschland

[87]Binnenschifffahrt, Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen_1_ Analyse bestehender Deckwerke für den Uferschutz an Bundeswasserstraßen.

[88] BAW_ Kolloquium Aktueller Stand und Herausforderungen der Geotechnik im Verkehrswasserbau am 24.September 2009 in Karlsruhe/Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen im Wandel der Zeit/Jan Kayser, Bundesanstalt für Wasserbau, Abteilung Geotechnik

[89] Sanierung der Kolke am Eidersperrwerk_ Geotechnische Stabilität von Deckwerke und Untergrund_ Dr. Ing. Michael Heibaum

[90] DIN 1045-2 / DIN EN 206-1

[91] Unterwassereinbau von Oberflächendichtungen in Bundeswasserstraßen-Stand der Entwicklungen 02/2011 _Bundesanstalt für Wasserbau, Referat Erdbau und Uferschutz

[92] [www.baw.de/Naturnahe Ufersicherungen an Wasserstraßen/Bundesanstalt für Wasserbau Kußmaulstr. 17, 76187 Karlsruhe](http://www.baw.de/Naturnahe_Ufersicherungen_an_Wasserstraessen/Bundesanstalt_fur_Wasserbau_KuBmaulstr.17,76187_Karlsruhe)

[93] [www.Massnahmen des Schutzwasserbaus](http://www.Massnahmen_des_Schutzwasserbaus)

[94] Naturnaher Wasserbau H.Patt ,Springer 2011 /Naturnahe Gestaltung

[95] [http://www.oekon-](http://www.oekon-vegetationstechnik.de/oekon/Steinmatratzen.html)

[vegetationstechnik.de/oekon/Steinmatratzen.html](http://www.oekon-vegetationstechnik.de/oekon/Steinmatratzen.html) Beratung: Herr Dr. Volker Seidel (Zentrale, West, Süd) e-mail seidel@oekon-veg.de Herr Lutz Herrmann (Zentrale, Ost) e-mail herrmann@oekon-veg.de Herr Detlef Dunker (Nord-West) e-mail dunker@oekon-veg.de Herr Klaus Sandler (Süd-West)

[96] Alternative technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen/ Bundesanstalt für Wasserbau Kußmaulstr. 17, 76187 Karlsruhe Postfach 210253, 76152 Karlsruhe

[97] Steinmatratzen – Körnung 32/64 Schottermatratzen – Schotterwalzen/ÖKON-Vegetationstechnik GmbH * Hesterhörn 4 * 25499 Tangsted.* Tel. 04101-373234 * www.oekon-vegetationstechnik.de

6.2. Bilderverzeichnis

Bild 2.2.1. Rhein-Rhone-Kanal, Main-Donau-Kanal, Mittellandkanal.....	18
Bild 2.2.2. Donau-Oder-Elbe-Kanal.....	19
Bild 2.2.3. 1-Wolga-Don-Kanal, 2-Wolga-Moskwa-Kanal, 3-Wolga-Ostsee-Kanal, 4 -Wiess Meer-Ostsee-Kanal.....	20

Bild 2.4.1. Die Standard – Kanalprofile mit ihren geometrischen Parameter entsprechend Trapezprofil (T – Profil) und Rechtecktrapezprofil (RT – Profil).....	23
Bild 2.4.2. Starke Ufererosionen am Neckar bei Mannheim.....	24
Bild 2.4.3. Schiffsinduzierte Einwirkungen auf das Ufer während einer Schiffspassage...25	
Bild 2.4.4. Schematische Darstellung der zeitlichen Wasserspiegelveränderung am Ufer.....	26
Bild 3.1.1. Definitionen: Deckwerke, Dichtung, Schutzschicht.....	29
Bild 3.2.1. Deckwerk am Elbe-Seitenkanal.....	30
Bild 3.2.2. Grundwasserdruck auf die Unterseite eines Deckwerkes bei Wasserspiegelabsenkung Δh im Kanal.....	31
Bild 3.2.3. Vertikalschnitt des durchlässigen Deckwerkes.....	32
Bild 3.2.4. Deckwerke und Dichtung am Elbe-Seitenkanal.....	33
Bild 3.2.5. Deckwerk am Elbe-Seitenkanal.....	33
Bild 3.2.6. Anpressen der Matte mit schwerem Geräte.....	34
Bild 3.2.7. Vertikalschnitt und Draufsicht-Böschungsparrallele Anordnung von Beton – Fertigteilen als Deckschichte.....	35
Bild 3.2.8. Deckwerk aus Schütt-oder Setzsteinen mit Verguss (Asphalt oder Beton).....	36
Bild 3.2.9. Staudamm mit bituminöser Innendichtung (Kerndichtung) 1 - Stützkörper Luftseite, 2 - Stützkörper Wasserseite, 3 – Dichtungskörper.....	38
Bild 3.2.10. Staudamm mit bituminöser Außendichtung 1 - Stützkörper Luftseite, 3 – Dichtungskörper.....	38
Bild 3.2.11. Logarithmische Darstellung von Durchlässigkeit.....	40
Bild 3.2.12. Gültigkeitsbereich des Darcy-Gesetzes.....	41
Bild 3.2.13. Einfluß des mittleren Korndurchmessers d auf die Grenzen des linearen Bereichs des Filterströmungsgesetzes.....	41

Bild 3.2.14. a, b. Varianten von Sohldichtungen am Main-Donau-Kanal.....	42
Bild 3.2.15 –a, b : Varianten von Sohldichtungen am Main-Donau-Kanal.....	44
Bild 3.2.16 Variante von Sohldichtungen am Main-Donau-Kanal.....	45
Bild 3.3.1. Größte Steinlänge L bzw. D.....	46
Bild 3.3.2. Größenermittlung D über ein Quadratlochsieb.....	47
Bild 3.3.3. Zusammenhang zwischen Durchmesser D und nominalen Durchmesser D_n Auf den Formeln.....	48
Bild 3.3.4. Definition der Bemessungswert G_{50} beispielhaft für eine LMB _{5/40} Klasse.....	49
Bild 3.3.5. Typischer Schwankungsbereich: Bereich in dem die Summenkurven in der Regel zum Großteil verlaufen.....	50
Bild 3.3.6. Ermittlung von D_{50} durch Interpolation.....	51
Bild 3.3.7. Einsatz des Vergussmaterials im Deckwerksbau.....	52
Bild 3.3.8. Sachgerecht hergestelltes teilvergossenes Deckwerk (30 l/m ² , CP _{90/250} , Einbau von Hand).....	53
Bild 3.3.9. Nicht sachgerecht hergestelltes teilvergossenes Deckwerk mit zu steifem Vergussstoff (70 l/m ² CP _{90/250} , Einbau von Hand).....	53
Bild 3.3.10. Versuchskasten eines sachgerecht hergestellte teilvergossenen Deckwerks (90 l/m ² , LMB _{5/40} , streifenförmiger maschineller Einbau).....	54
Bild 3.3.11. Blick in eine Großbohrung in einem vollvergossenen Deckwerk.....	54
Bild 3.3.12. Kornfilter in einer Böschungssicherung mit Deckwerke.....	56
Bild 3.3.13. Durchströmungsverhältnisse bei Anströmung eines Auflastdräns am Dammfuß, nicht eingestaut.....	57
Bild 3.3.14. Auflastdrän mit Einstau durch ein Gewässer.....	57
Bild 3.3.15. Regeldeckschichten für Böschung-und Sohlensicherung.....	58
Bild 3.3.16. Geotextil als Filter-oder Trennlage.....	59
Bild 3.3.17. Fertig verlegte Tonbahnen.....	60
Bild. 3.3.18. Geosynthetische Tondichtungsbahnen.....	60

Bild 3.3.19. Verklammertes Uferdeckwerk aus Wasserbausteinen, von Hand gesetzt und fest verpackt.....	61
Bild 3.3.20. Kornverteilungslinien.....	62
Bild 3.3.21. Hydrostatischer Porenwasserdruck und Porenwasserüberdruck während eines schnellen Wasserspiegelabsunks.....	64
Bild 3.3.22. Gleichgewicht zwischen effektiver Spannung und Porenwasserüberdruck im Boden; Lage der kritischen Tiefe und damit der Gleitfläche; Ableitung der erforderlichen Deckschichtdicke.....	65
Bild 3.3.23 Bodenelement zum Nachweis der hydrodynamischen Bodenverlagerung (h_B) mit Kräftegleichgewicht.....	66
Bild 3.3.24. Bruchmechanismus beim lokalen Standsicherheitsnachweis einer losen Steinschüttung.....	67
Bild 3.4.1. Darstellung von Deckwerken in Abhängigkeit von ihrer Funktion.....	69
Bild 3.4.2. Deckwerke mit einer Deckschicht aus losen Wasserbausteinen.....	70
Bild 3.4.3. Schadenklassifizierung bei Deckwerk mit einer Deckschicht aus losen Wasserbausteinen.....	71
3.4.4. Schadenklasse 2-SK2.....	71
Bild 3.4.5 Schadenklasse 3-SK3.....	71
Bild 3.4.6 Deckwerke mit einer Deckschicht aus teilvergossenen Wasserbausteinen.....	72
Bild. 3.4.7 Schadenklassifizierung bei Deckwerk mit einer Deckschicht aus teilvergossenen Wasserbausteinen.....	72
Bild 3.4.8. Schadenklasse 3-SK3.....	72
Bild 3.4.9. Deckwerke mit einer Deckschicht aus vollvergossenen Wasserbausteinen.....	73
Bild 3.4.10. Schadenklassifizierung bei Deckwerke mit einer Deckschicht aus vollvergossenen Wasserbausteinen.....	73
Bild 3.4.11. Schadenklasse 2-SK2.....	73
Bild 3.4.12. Deckwerke mit einer Deckschicht aus losen Wasserbausteine.....	74
Bild 3.4.13.	

Schadenklassifizierung bei Deckwerk mit einer Deckschicht aus losen Wasserbausteinen.....	74Bild
3.4.14. Schadenklasse 1-SK1.....	74
Bild 3.4.15. Schadenklasse 3-SK3.....	75
Bild 3.4.16. Deckwerke mit einer Deckschicht aus teilvergossenen Wasserbausteinen...	75
Bild 3.4.17. Schadenklassifizierung bei Deckwerke mit einer Deckschicht aus teilvergossenen Wasserbausteinen.....	75
Bild 3.4.18. Schadenklasse 3-SK3.....	76
Bild 3.4.19. Schadenklasse2-SK2	76
Bild 3.4.20 Deckwerke mit einer Deckschicht aus vollvergossenen Wasserbausteinen...	76
Bild 3.4.21. Schadenklassifizierung bei Deckwerke mit einer Deckschicht aus vollvergossenen Wasserbausteinen.....	77
Bild 4.2.1. Schematische Darstellung einer durchlässigen Deckschicht aus losen Wasserbausteinen im Querschnitt.....	79
Bild 4.2.2. Grafische Darstellung der berechneten Deckschichtdicken d_D aus losen Wasserbausteinen für Trapezprofil.....	86
Bild 4.2.3. Grafische Darstellung der berechneten Deckschichtdicken d_D aus losen Wasserbausteinen für Rechtecktrapezprofil.....	87
Bild 4.2.4. Schematische Darstellung einer durchlässigen Deckschicht aus teilvergossenen Wasserbausteinen im Querschnitt.....	87
Bild 4.2.5. Grafische Darstellung der berechneten Deckschichtdicken d_D aus teilvergossenen Wasserbausteinen für Trapezprofil.....	89
Bild 4.2.6. Grafische Darstellung der berechneten Deckschichtdicken d_D aus teilvergossenen Wasserbausteinen für Rechtecktrapezprofil.....	89
Bild 4.2.7. Schematische Darstellung der Deckschichten aus vollvergossenen Wasserbausteinen im Querschnitt.....	90
Bild 4.2.8. Schematische Darstellung des dichten und durchlässigen Belages im Querschnitt.....	91
Bild 4.2.9 Konstruktive Ausbildung der Fußstützung mit Fußeinbindung.....	92

Bild 4.2.10 Konstruktive Ausbildung der Fußstützung mit Fußvorlage.....	93
Bild 4.2.11 Konstruktive Ausbildung der Fußstützung mit Fußspundwand.....	93
Bild 4.2.12. Kriterien für die Auswahl einer dichten oder einer durchlässigen Deckwerks- bauwei- se.....	95Bild
4.2.13. Anzustrebende Vergussstoffverteilung in % der Vergussstoffmenge.....	98 Bild
4.2.14. Das punktuelle oder streifenförmige Vergusseinbringen zur Verbesserung des Bruchverhaltens bei dichten Vergussstoffen.....	100
Bild 4.2.15. Kornfilter als Zweistufenfilter in einem Deckwerk.....	102
Bild 4.2.16: Zulässige Bereiche für Körnungslinien im Standard-Zweistufenfilter.....	103
Bild 4.2.17. Anschluss eines Deckwerks mit Kornfilter an eine vertikale Bauwerkskan- te.....	104
Bild 4.2.18. Gültigkeitsbereich der Bodentypen von 1 bis 4 (a-d).....	107
Bild 4.2.19. Filterbauweisen bei einer durchlässigen Deckschicht je nach Einbau- Bedingungen- Baugrund, Böschungsneigung und hydraulischen Einwirkungen.....	108
Bild 4.2.20. Bauwerk mit ebener Anschlußfläche.....	109
Bild: 4.2.21.Überlappung auf Böschungen.....	110
Bild 4.2.22. Nahtverbindung.....	110
Bild 4.2.23 Geotextil mit Zusatzschicht.....	111
Bild 4.2.24 Geotextil mit Faschinenrost /Sinkstück/.....	111
Bild 5.1. Weidenspreitlagen, in die Steinschuttung einbindend.....	118
Bild 5.2. Weideneinbau als Böschungssicherung.....	119
Bild 5.3. Pflanzmatten.....	119
Bild 5.4. Röhrichtgabionen – vorgezogene Einzelelemente.....	120
Bild 5.5. Steinmatratzen aus kleinen Wasserbausteinen CP45/125.....	120
Bild 5.6. Steinmatratzen als Sicherungsbauweise.....	121
Bild 5.7 Faschienenbündeln.....	121
Bild 5.8 Mit Faschienen befestigtes Ufer des Kanals in Templin.....	122

6.3. Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.4.1. Geometrie der zu Grunde liegenden Standard-Kanalprofile als Angabe für künstliche Wasserstraßen. Für die Deckwerksbemessung wird das 1. Ufer betrachtet...	23
Tabelle 3.3.1. 50%-Wert für Standard-Steinklassen loser Deckschichten.....	49
Tabelle 3.3.2. Berechnete größte Steinlängen L (D) Ellipsoid.....	52
Tabelle 3.3.3. Mindestdicken $d_{D,min}$ der Deckschicht / *Werte für $\rho_s > 3,0[t/m^3]$	52
Tabelle 3.3.4. Bödenarten in Abhängigkeit von Korngrößen.....	61
Tabelle 3.3.5. Charakteristische Bodenkennwerte für Böden B1 bis B5.....	62
Tabelle 4.2.1. Überführung der alten in die neuen Steinklassen.....	80
Tabelle 4.2.2. Erforderliche Steindurchmesser bzw. Steingewichte und notwendige Steinklassen für Regelprofile bei Zulassung aller Schiffstypen/ES, GMS, SV, ÜGMS/ für verschiedene Rohdichten($2300-3600 \text{ kg/m}^3$).....	81
Tabelle 4.2.3. Berechnete Mindestdicken der durchlässigen Deckschichten aus losen Wasserbausteinen.....	82
Tabelle 4.2.4. Empfohlene Deckschichtdicken d_D für Böden: B1, B2, B5.....	85
Tabelle 4.2.5. Empfohlene Deckschichtdicken d_D für Boden B3.....	85
Tabelle 4.2.6. Empfohlene Deckschichtdicken d_D für Boden B4.....	85
Tabelle 4.2.7. Empfohlene Deckschichtdicken d_D der durchlässigen Deckschichten aus teilvergossenen Wasserbausteinen für Böschung und Sohle unter Beachtung der verschiedenen Böden B1 bis B5.....	88
Tabelle 4.2.8. Mindestdicke in Abhängigkeit von der verwendeten Steinklasse und Rohdichte.....	91
Tabelle 4.2.9. Hohlraumgehalt von Wasserbausteinen in Abhängigkeit vom Einbauverfahren.....	97
Tabelle 4.2.10. Mindestdicken in Abhängigkeit von der verwendeten Steinklasse und der	

Rohdich-	
te.....	98Tabelle
4.2.11. Mindestdicken von Kornfiltern.....	102