

"ENTWICKLUNG UND STAND DER DECKWERKSBAUWEISEN IM  
BEREICH DER WASSER- UND SCHIFFAHRTSDIREKTION MITTE"

Dipl.-Ing. W. Mühling  
NBA Osnabrück und Minden

Der Mittellandkanal gehört zu den Wasserstraßen von europäischer Bedeutung und wird ausgebaut nach den Richtlinien der Wasserstraßenklasse IV (Abb.1).

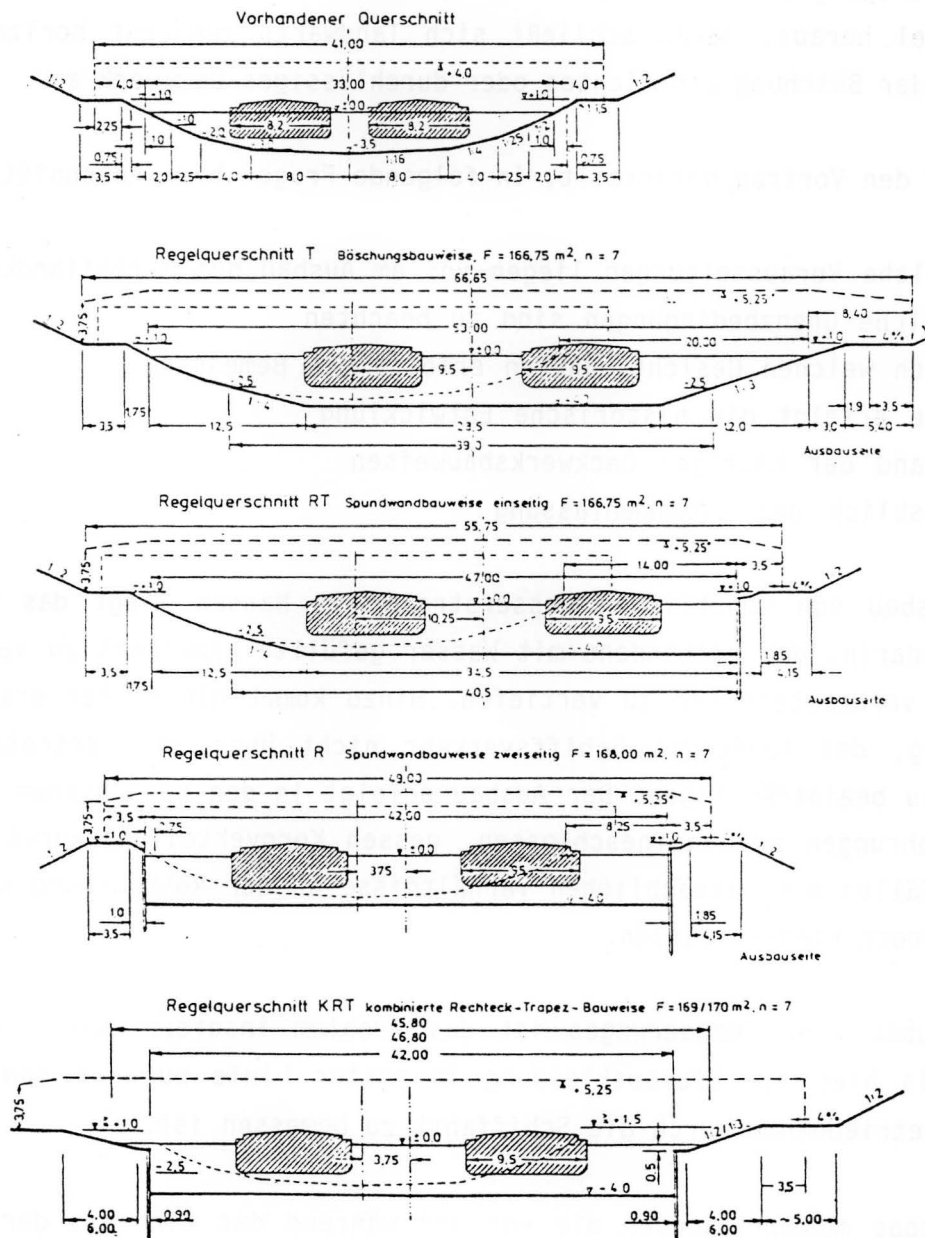


Abb. 1: Regelquerschnitte

Das vorhandene Muldenprofil hat eine Wasserspiegelbreite von rd. 33 m und in der Mitte eine Wassertiefe von 3,50 m. Dieses Profil wird in Abhängigkeit der örtlichen Möglichkeiten aufgeweitet zu einem Wasserquerschnitt von rd. 167 m<sup>2</sup>, der damit 7 mal größer ist als der eingetauchte Querschnitt des Regelschiffes.

In meinem Vortrag werde ich eingehen auf die Entwicklung und den Stand der Deckwerksbauweisen am Mittellandkanal, in Form der dichten Uferauskleidung und des durchlässigen Deckwerkes, vom Fuß bis zur Ausbildung am oberen Wasserspiegelrand einschließlich der Ausbildung des Deckwerkes in KRT-Profil.

Hier endete die Oberkante der Spundwand auf der freien Strecke 0,70 m über dem Wasserspiegel. Heute ragt diese Spundwand nur noch 10 cm aus dem Wasserspiegel heraus, daran schließt sich landwärts zunächst horizontal und dann in der Böschung ein dichtes oder durchlässiges Deckwerk an.

Ich habe den Vortrag unterteilt, in folgende Fragen bzw. Abschnitte:

- welche Voraussetzungen liegen vor am Ausbau des Mittellandkanals
- welche Grenzbedingungen sind zu beachten
- nach welchen Gesichtspunkten erfolgt die Bemessung
- wie erfolgt die historische Entwicklung
- Stand der heutigen Deckwerksbauweisen
- Ausblick und Zusammenfassung

Beim Ausbau von künstlichen Wasserstraßen im Nassen liegt das besondere Problem darin, das vorhandene mit Wasser gefüllte Kanalbett zu vergrößern, d.h. zu verbreitern und zu vertiefen. Hinzu kommt die weiter erschwerende Bedingung, den laufenden Schiffsverkehr nicht über ein vertretbares Maß hinaus zu beeinträchtigen. Der Ausbau erfolgt in den gewachsenen Boden der durch Bohrungen zwar aufgeschlossen, dessen Kornverteilungskurven aber in vielen Fällen die tatsächlichen Verhältnisse an der Rohböschung unter Wasser nur noch erahnen lassen.

Beim Neubau eines Wasserweges ist das Problem insofern sehr viel einfacher, als hier die Uferauskleidung in erster Linie nur für den Lastfall nach Inbetriebnahme durch die Schifffahrt zu bemessen ist.

Beim Ausbau müssen dagegen die vor und während des Einbaues der Uferauskleidung auftretenden Beanspruchungen, die in der Vielzahl kritischer sind

als bei der fertiggestellten Uferauskleidung, zusätzlich berücksichtigt worden.

Unter Berücksichtigung dieser vorgenannten Gegebenheiten sind beim Bau von Uferauskleidungen nachstehende Bedingungen zu beachten:

- geotechnische Grenzbedingungen
- hydraulische Grenzbedingungen
- sonstige Grenzbedingungen, wie z. B. Wirtschaftlichkeit, Berücksichtigung der Belange der Umwelt.

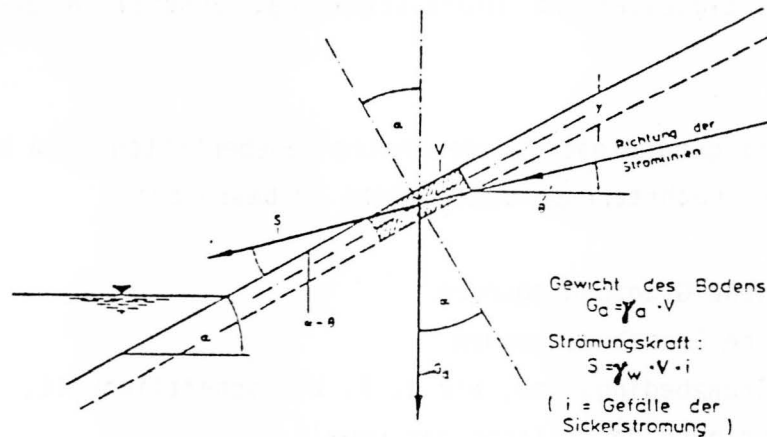
### GEOTECHNISCHE GRENZBEDINGUNGEN

Der Baugrund Boden ist vom Stoff hergesehen ein visko-plastisches System, dessen Spannungs-Verformungsverhalten je nach Belastung und Entwässerungsmöglichkeiten zeitabhängig ist.

Bei der Herstellung der Rohböschung im Nassen werden Oberflächen geschaffen, die im Überwasserbereich unbelastet und im Unterwasserbereich eine Entlastung um das Gewicht des abgetragenen Bodens erfahren. Hierdurch entsteht im Oberflächenbereich des Bodens eine Auflockerungszone, die durch eine nach oben gerichtete Bewegung gekennzeichnet ist. Diese Auflockerungsbewegung wird nun begünstigt durch das abfließende Wasser im Überwasserbereich, wenn der Grundwasserstand höher liegt als der Kanalwasserspiegel. Im Unterwasserbereich wird die Standsicherheit der Rohböschung beansprucht durch Porenwasserausgleichsströmungen.

Hinzu kommt noch, daß durch die die Baustelle passierenden Schiffe Wellen verursacht werden, die, wenn auch in geringer Höhe, die durchlässigen Bodenschichten an der Rohböschung durchdringen, um anschließend der Schwerkraft folgend wieder abzufließen. Hierbei entsteht an der Böschung im Bereich der Fluktuationszone ein instabiler Gleichgewichtszustand, da bei der vorgegebenen Böschungsneigung - beim vorgesehenen Böschungsprofil von meistens 1 : 3 - die Gleichgewichtsbedingung für die örtliche Standsicherheit an der Böschung nicht mehr vorhanden ist.

In Abb. 2 ist der Berechnungsansatz nach DAVIDENKOFF dargestellt, d. h. für kohäsionslose Böden mit einem inneren Reibungswinkel von  $\phi = 33^\circ$  ist die örtliche Standsicherheit einer durchströmten Böschung gefährdet. Dies zeigt



$$\begin{aligned} & [ V \cdot \gamma_a \cdot \cos \alpha - V \cdot \gamma_w \cdot i \cdot \sin (\alpha - \theta) ] \cdot \tan \varphi = \\ & = V \cdot \gamma_a \cdot \sin \alpha + V \cdot \gamma_w \cdot i \cdot \cos (\alpha - \theta) \end{aligned}$$

1. Bedingung: Sickerwasser || Böschung

—  $\theta = \alpha$  u.  $i = \sin \alpha$  dann wird:

$$\tan \alpha = \frac{\tan \varphi}{2}$$

2. Bedingung: Sickerwasser horizontal zur Böschung

—  $\theta = 0$  u.  $i = \tan \alpha$  dann wird:

$$\alpha = \frac{\varphi}{2}$$

Abb. 2: Örtliche Standsicherheit der durchströmten Rohböschung

sich in der Form von Erosionszonen im Wasserwechselbereich, die um so größer werden, je länger die Rohböschung ungeschützt bzw. ungesichert liegen bleibt. In extremen Fällen, wenn keine Maßnahme zur Sicherstellung der örtlichen Standsicherheit getroffen werden, kann es zu einem erheblichen Abtrag der gesamten Böschung kommen (Abb. 3).

Bei besonders rutschgefährdeten Böschungen, z. B. bei kohäsionslosen Sanden, müssen die Betrachtungen dahingehend durchgeführt werden, daß man tieferliegende Schichten in die Gleichgewichtsbetrachtung mit einbezieht. Hier kommt es darauf an, die Bodenfuge mit dem kleinsten Standsicherheitskoeffizienten zu finden. Hier geht es also darum, Zustände zu untersuchen, die zwischen der örtlichen und allgemeinen Standsicherheit liegen.

Bei den üblichen Baugrundverhältnissen am Mittellandkanal hat sich daher eine Vorschüttung von rolligem Material in den Bereich der Fluktuationszone als notwendig erwiesen, da immer ein längerer Zeitraum vergeht zwischen der Fertigstellung des Feinplanums an der Rohböschung und dem Einbau des Deckwerks. Die Menge des vorzuschüttenden Materials hängt ab von der Kohäsion des Bodens und der Höhe des Grundwasserstands.



Abb. 3: Böschungserosion

Erschwerend für die Bemessung des Deckwerks wirkt sich außerdem das Vorhandensein einer Sedimentations- bzw. Schmierschicht aus. Diese auf der Rohböschung unter Wasser befindliche Schicht ist von oben nicht sichtbar; ihre Dicke hängt zum einen vom Kornaufbau des abzubaggernden Bodens ab, d. h. je höher der Schlammkornanteil, desto mehr Feststoffe gelangen bei der Baggerung in Suspension und zum anderen von der Art des Bodenabtragens, z. B. können beim Cutterbetrieb bei Böden mit hohem Schlammkornanteil große Suspensionsmengen entstehen, die durch die Strömung infolge Schiffsverkehrs abtransportiert werden. Je nach den vorhandenen Strömungsverhältnissen lagern sich diese Sedimentationsraten an Böschung und Sohle in Schichtlamellen ab, und zwar in den Schichtdicken zunehmend von der Wellenwurzel zur Kanalsohle.

Entsprechend den Konsolidierungsmöglichkeiten nimmt der Wassergehalt in den Lamellen von oben nach unten ab (Abb. 4).

Beim Ausbau unter Wasser ist keine Sicht vorhanden, daher sind die für diese Aufgabe verantwortlichen Ingenieure zu Ing.-Tauchern ausgebildet worden, ohne die die Bauweisen, wie sie sich im Laufe der Zeit entwickelt haben, heute gar nicht existieren würden.

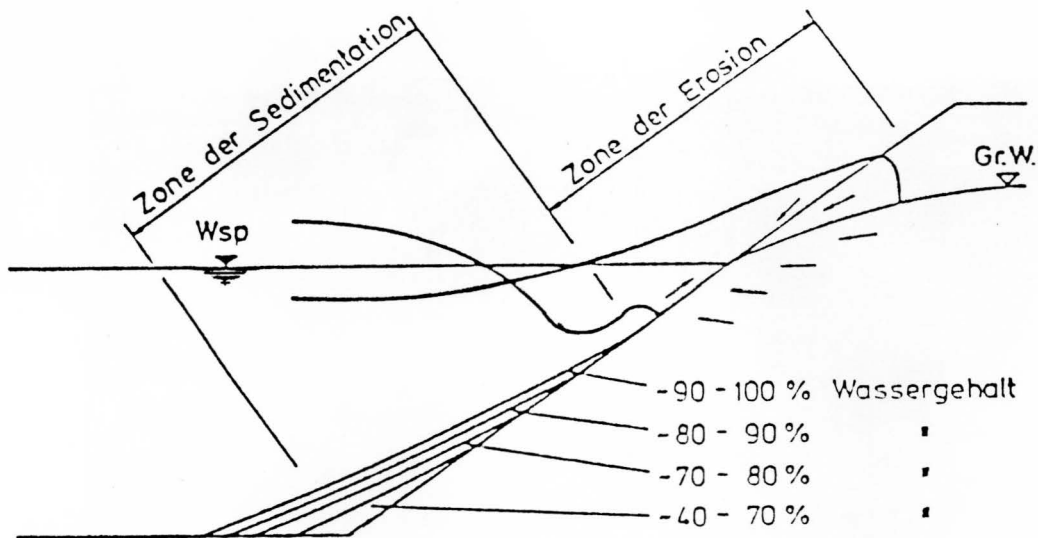


Abb. 4: Darstellung der Rohböschung

#### HYDRAULISCHE GRENZBEDINGUNGEN

Der Kanal stellt mit seinen Querschnitt-Abmessungen, seiner Wassertiefe und seinem benetzten Umfang, hydraulisch gesehen, ein Gerinne dar, dessen Stauwellengeschwindigkeit sich berechnen läßt nach:

$$c_h = \sqrt{g \times \frac{A_k}{U_k}}$$

wobei  $A_k$  = Kanalquerschnitt und  
 $U_k$  = benetzter Umfang

ist. Sie beträgt je nach Ausbauprofil (als Rechteck-, Rechteck-, Trapez- oder Trapezprofil) rd. 20 km/h. Nähert sich die Schiffsgeschwindigkeit einem bestimmten Betrage dieser Stauwellengeschwindigkeit  $V_s = 0,5 \times c_h$ , wobei die Schiffsgeschwindigkeit im wesentlichen von der Schiffsform, -völligkeit, -antriebsart abhängt, so geht im Bereich der oberen Böschungshälfte die strömende Wasserbewegung in den schießenden Fließzustand über.

Hieraus ergeben sich die zwei verschiedenen Beanspruchungen, im oberen Bereich die aus der sich überschlagenden Rollwelle resultierenden turbulenten Belastungen mit großen Liftkräften und im unteren Bereich die aus dem strömenden Zustand erzeugten Längskräfte und damit verbundenen Umlenkkräfte (Abb. 5).



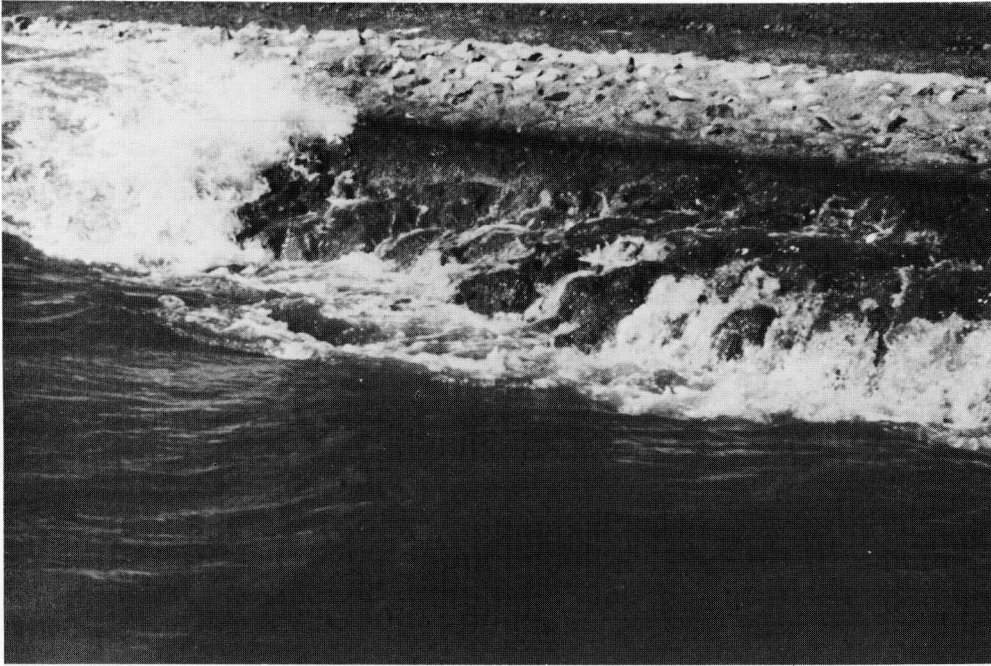


Abb. 5: Rollwelle

Da die zugelassenen Schiffsgeschwindigkeiten in Schiffahrtskanälen meistens nur wenig von den möglichen Schiffsgeschwindigkeiten abweichen, muß diese letztgenannte als Ausbaugeschwindigkeit der Konzeption und Bemessung der Uferauskleidung zugrunde gelegt werden. Hieraus ergibt sich letztthin die Forderung, daß die Bemessung eines Uferdeckwerks für die größten zugelassenen Schiffseinheiten, die mit maximal möglicher Geschwindigkeit fahren, erfolgen muß.

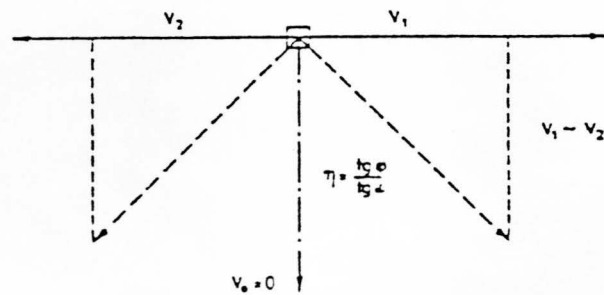
Im Gegensatz zu den natürlichen Wasserstraßen, wo die Strömungsrichtung bei Schiffsvorbeifahrten ihr Vorzeichen nicht wechselt, findet bei künstlichen Wasserstraßen eine bei Schiffsvorbeifahrt ständig pendelnde Beanspruchung des Einzeldeckwerkselementes an der Böschung statt (Abb. 6).

Das Einzelelement des Deckwerks wird hier beim Passieren eines Schiffes infolge des Absunks zunächst zum Schiff hin gezogen und dann nach der Vorbeifahrt in umgekehrter Richtung beansprucht.

Die hydraulischen Grenzbedingungen liegen also in der Berücksichtigung der Beanspruchungen aus Schiffsvorbeifahrt als Verdrängungsströmung bzw. Beschleunigung, des Wasserspiegelabsunks bei Schiffsvorbeifahrt und der kritischen Heckquerwelle, auch Rollwelle genannt.

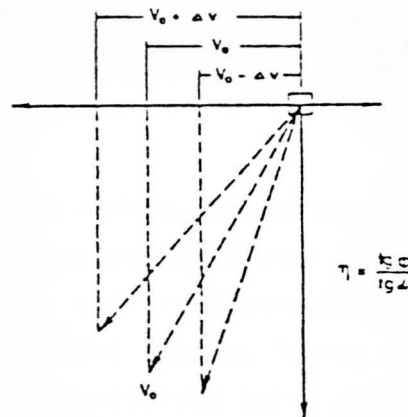
Weitere durch die Schifffahrt verursachten Lastfälle sind der Ankerfall und der Schraubenstrahl. Diese Lastfälle werden berücksichtigt in Dichtungs-

## künstliche Wasserstraßen



$v_0$  = Geschwindigkeit ohne Schiffsbetrieb

## natürliche Wasserstraßen



$v_0$  = Strömungsgeschwindigkeit ohne Schiffsbetrieb

Abb. 6: Strömungsrichtungen infolge Schiffsbetrieb an künstlichen und natürlichen Wasserstraßen

strecken, vor Schleusenein- und -ausfahrten und Schraubenstrahl in Liegestellen.

Weitere Lastfälle wie z. B. Windwellen und Eisdruck sind von untergeordneter Bedeutung und werden durch die von der Schifffahrt verursachten Beanspruchungen abgedeckt.

## BEMESSUNGSGESICHTSPUNKTE

Definitionsgemäß besteht das Deckwerk aus einem Filter und einer Deckschicht. Der Filter soll in der Grenzschicht zwischen der Böschungsoberfläche und dem Deckwerk hydrodynamische Grenzflächenerosionen vermeiden. Die



Aufgabe der Deckschicht besteht darin, diese Filterschicht zu schützen und für ausreichendes Gewicht zu sorgen.

Je nach Ausbildung können sich Filter und Deckschicht in ihren Funktionen gegenseitig ergänzen.

Dies gilt sowohl für die durchlässigen als auch für die dichten Deckwerke. Auch bei einer gedichteten Deckschicht muß aus Sicherheitsgründen ein Filter vorhanden sein. Es handelt sich hierbei immer um einen geotextilen Filter, da ein Kornfilter wegen seiner Mindestdicke zu unerwünschten Drücken unter der Dichtung führen könnte.

Die Forderung, keine Dichtung ohne Filter gilt insbesondere bei der Naßbauweise bei der Anwendung starrer Dichtungsschichten. Bei Ausführung von nicht erosionsfesten Dichtungsschichten (z. B. Ton) ist ebenfalls ein Filter erforderlich, und zwar hier zwischen der Deckschicht und der zu schützenden Dichtungsschicht.

Voraussetzung für die Standsicherheit jedes Deckwerks ist zunächst die Standsicherheit des geböschten Erdkörpers. Diese ist erfüllt, wenn der Böschungswinkel kleiner ist als der Winkel der inneren Reibung des anstehenden Bodens unter eventueller Berücksichtigung der Kohäsion  $c$ .

Wird die Böschung durch ausströmendes Wasser beansprucht, so müßte zur Gewährleistung der örtlichen Standsicherheit der Böschungswinkel entsprechend flacher ausgebildet werden. Da dies jedoch bei der vorgegebenen Böschungsneigung nicht möglich ist, muß diese Forderung bei der Bemessung des Deckwerks durch Erhöhung der Dichte der Deckschichtselemente oder durch Vergrößerung der Dicke der Deckschicht oder durch beides berücksichtigt werden.

Bei der Bemessung eines Uferdeckwerks ist dem Filter besondere Aufmerksamkeit zu widmen, handelt es sich hierbei doch um den wichtigsten Bestandteil der Auskleidung. Die Bemessung des Filters ist abhängig von dem darunter liegenden Baugrund und der darüber liegenden Deckschicht einschließlich ihrer Verklammerung.

Filter müssen so ausgebildet sein, daß sie im Verbund mit der Deckschicht die Standsicherheit der Böschung gewährleisten.

Sie müssen auf der einen Seite ausreichend wasserdurchlässig sein, damit kein für den Bestand des Deckwerks schädlicher Überdruck entstehen kann

(hydraulische Filterwirksamkeit). Auf der anderen Seite müssen Erosionen an der Böschungsoberfläche des Untergrundes vermieden werden (mechanische Filterwirksamkeit). Bei unzureichender Bemessung der mechanischen Filterwirksamkeit können Erosionen dadurch entstehen, daß Bodenteilchen durch die Filterschicht hindurchgespült werden (Böschungsausspülung) oder daß es zu einer Umlagerung der Bodenteilchen in der Grenzfläche des Bodens, und zwar in Böschungsfallrichtung kommt.

Darüber hinaus muß natürlich die Filterschicht so bemessen werden, daß sämtliche angreifenden Kräfte aus den mechanischen und dynamischen Beanspruchungen sicher in den Untergrund abgeleitet werden können.

Bei der ausreichenden Bemessung einer Filterschicht müssen zusammengefaßt nachstehende maßgebende Größen berücksichtigt werden:

- Eigenschaften des Untergrundes  
(bodenphysikalische Kennwerte, hydraulische Verhältnisse)
- Belastungen infolge Einbau und Betrieb  
(die von Schiffsvorbeifahrten im Baustellenbereich verursachten Schwingungskräfte sollten von den Haltevorrichtungen der schwimmenden Einbaugeräte aufgenommen werden und nicht von den Filtermatten. Witterungseinflüsse: Durch z. B. Frost und UV-Bestrahlung)
- Art der Deckschicht  
(einschließlich der Einbauart der Deckschicht und der Verklammerungsart)
- Belange der Umwelt  
(Grundwasserunschädlichkeit, Begrünungsmöglichkeit des Deckwerks).

## ENTWICKLUNG DER DECKWERKSBAUWEISEN

Als mit dem Bau der Uferdeckwerke Mitte der 60-iger Jahre begonnen wurde, erfolgte bereits eine Befestigung der gesamten Böschung vom Knickpunkt in der Sohle bis 1 m über dem Wasserspiegel. Die bis dahin durchgeführten Gürtelbefestigungen im Wasserspiegelbereich wurden nicht mehr ausgeführt. Eingebaut wurden zunächst Kornfilter einlagig in Dicken von 20 bis 30 cm und Schüttsteindeckschichten in eben solchen Dicken. Die Kantenlänge der Schüttsteine entsprachen in etwa den Kantenlängen der heutigen Schüttstein-

klasse II. Aufgrund seiner Zeit erstmals aufgetretener Schäden wurden Versuche am Wesel-Datteln-Kanal durchgeführt mit Schüttsteinen größerer Kantenlänge, die sich aber nicht bewährten.

Bei der Filterbemessung kamen in dieser Zeit auch erstmals Kunststoffe zur Anwendung.

Die Entwicklung begann bei den Geweben verschiedener Art und Ausführung. Die Gewebe versagten jedoch als Filter unter den verwendeten Schüttsteindeckschichten in erster Linie, weil die erforderliche Lagestabilität, die die Voraussetzung für das Entstehen eines jeden wirkenden Filters darstellt, bei den auftretenden dynamischen Beanspruchungen, nicht erreicht werden konnte.

Zur richtigen Lagerung gehört u.a. die schwingungsfreie Lagerung auch bei der größten Beanspruchung. Jede Lageinstabilität zieht auch eine neue Filtereinlaufzeit nach sich, die wiederum die Kontakterosion vergrößert.

Zur Verbesserung der Lagestabilität kam dann Gewebe mit kreuzweise aufgebundenen Faschinenwürsten zur Anwendung, die aber auch nicht den gewünschten Erfolg brachten. Als Deckschicht wurden einfach Schüttsteine aufgebracht, aber auch zur Unterstützung des Gewebes eine Sand-Kies-Lage.

Nach den Geweben kamen die Vliesstoffe auf den Markt. Diese, gegenüber den Geweben dickschichtig ausgebildeten Filterstoffe, haben aufgrund ihrer räumlichen Gestaltung den Vorteil einer günstigeren Ausbildungsmöglichkeit des wirkenden Filters unter und in dem Vliesstoff. Hinzu kommt, daß durch vorgebbare Dehnbarkeit mechanisch verfestigter Vliesstoffe eine bessere Anpassungsfähigkeit der Kunststofffilter an die Oberfläche des Untergrundes gegeben ist.

Die Probleme in diesen Jahren der Entwicklung lagen in dem Erkennen der Schadensursache, in der Definition der neu zu stellenden Anforderungen, in der Erfüllung dieser Anforderungen durch Herstellung entsprechender Filtermaterialien und nicht zuletzt in deren Überprüfung. Die Versagensursachen von Deckwerken konnten häufig nicht eindeutig geklärt werden, da diese Ursachen oft mehrere Gründe hatten, deren Gewichtung nicht immer eindeutig war.

Den homogenen Vliesstoffen schien eine ganze Zeit lang Erfolg beschieden zu sein; es stellte sich jedoch alsbald heraus, daß auch diese Vliesstoffe den

Anforderungen noch nicht voll gewachsen waren. Dies zeigte sich, als nach wie vor in Abhängigkeit von den Bodenverhältnissen und der Beanspruchungsintensität und -dauer auch hier Böschungsdurchgänge auftraten oder ausreichende Sicherheit gegen Abrutschen des gesamten Deckwerks nicht vorhanden war. Es mußte festgestellt werden, daß diese homogenen Vliesstoffe eine Bodenumlagerung unterhalb der Matte nicht verhindern konnten, weil die Mattenunterseite zu eben und dadurch keine Verzahnung mit dem Untergrund möglich ist. Die in das Deckwerk einfließende Welle bewirkte so beim Abfließen unterhalb der Filtermatte die vorher erwähnte Bodenumlagerung. Diese Bodenumlagerung führte teilweise zu Hohllagen, über die der geotextile Filter frei schwingen konnte. Infolge der Belastungswechsel wurden nun die darauf befindlichen Schüttsteine zum Abgleiten gebracht (Abb. 7). In Abb. 8 ist diese Grenzflächenerosion dargestellt.



Abb. 7: Schäden in der Deckschicht

Nachteilig zum anderen war bei den homogenen Filtermatten der Reibungsbeiwert Matte/Boden, dessen Wert kleiner war als der Tangens des Winkels der inneren Reibung des Untergrundes, so daß die sichere Übertragung von Schubspannungen zwischen Deckwerk und Untergrund nicht vorhanden war.

Der Durchbruch in der Anwendung geotextiler Filter im Verkehrswasserbau erfolgte erst, als die mehrschichtigen Vliesstoffe (Verbundstoffe) angeboten wurden. Diese Verbundstoffe bestehen aus mehreren Schichten, die die an eine Filtermatte gestellten Anforderungen durch gezielte Bemessung der Ein-

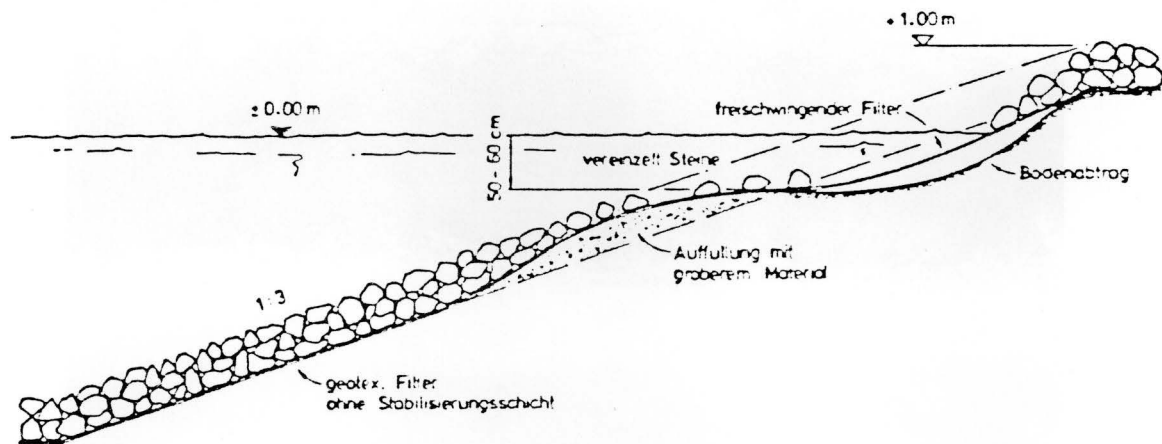


Abb. 8: Hydrodynamische Grenzflächenerosion an einer Böschung

zelschichten füllen. Sie begünstigen aufgrund der gezielten Abstimmung des Porenvolumens der Einzelschichten im so vorgelegten Filtergerüst die Entstehung des wirkenden Filters aus den eingewanderten Kornanteilen zusammen mit den oben liegenden Feinfilterschichten. Die der Rohböschung zugewandte Stabilisierungsschicht sorgt für einen innigen Kontakt zum Untergrund und ermöglicht auf der einen Seite ausreichende Schubkraftübertragung zwischen Deckwerk und Untergrund und verhindert auf der anderen Seite Bodenumlagerungen unterhalb der Filtermatte in Böschungsfallrichtung. Die darüber liegenden eigentlichen Filterschichten müssen so beschaffen sein, daß sie langfristig zusammen mit den während der Filtereinlaufzeit eingewanderten Bodenteilchen als wirkender Filter ihre Aufgaben wahrnehmen können. Abb. 9 zeigt einen Ausschnitt aus einem Verbundstoff.

Optimal wäre ein Verbundstoff, der aus einer Vielzahl von Schichten mit von unten (Untergrund) nach oben abnehmenden Porenvolumen besteht. Diesem Wunsch stehen jedoch Wirtschaftlichkeitsüberlegungen entgegen.

Verbundstoffe aus drei Schichten einschließlich der Stabilisierungsschicht dürften ausreichen. Es sollte dabei in jedem Fall darauf geachtet werden, daß die Übergänge zwischen den Einzelschichten stetig sind.

Wie die Filterwirksamkeiten der Filterschichten so ist auch die Stabilisierungsschicht mit ihrer oben liegenden Übergangs- bzw. Zwischenschicht auf den Untergrund abzustimmen.



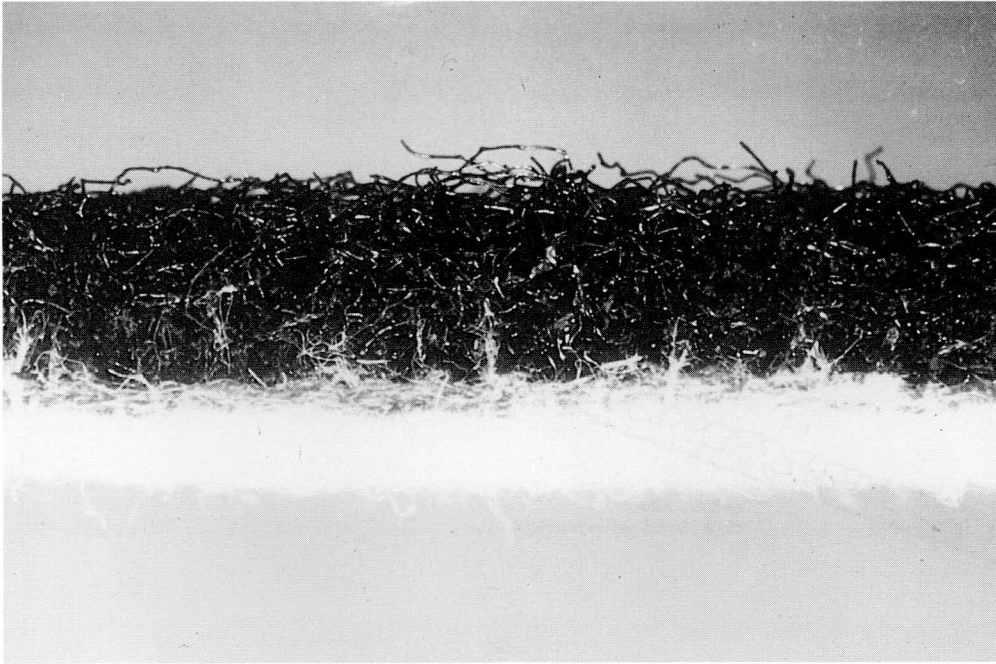


Abb. 9: Verbundstoff

Die Flexibilität dieser Stabilisierungsschicht muß dem anstehenden Boden in Abhängigkeit von der zu erwartenden Dicke der Sedimentations- bzw. Auflockerungszone angepaßt werden. So wird z. B. bei einem sandig-kiesigen Boden eine größere Auflockerungszone und eine geringere Sedimentationszone vorhanden sein als bei einem Boden, dessen Sieblinie im schluffig-tonigen Bereich liegt. Hier wird die Sedimentationsschicht dicker und die Auflockerungszone kleiner, das bedeutet, daß beim sandig-kiesigen Boden die Stabilisierungsschicht offenerporiger und härter ausgebildet werden muß als beim oben genannten Bodentyp, wo die unterste Schicht weich, dichtporig mit größerer Zusammendrückbarkeit hergestellt werden muß, um eine Ständerwirkung auf der Böschung zu vermeiden.

Für die Lagebeständigkeit der Filtermatte und damit des gesamten Deckwerks muß immer die Forderung erfüllt sein, daß der relative Reibungsbeiwert in der Grenzfläche Filtermatte/Boden größer oder gleich dem Tangens des Winkels der inneren Reibung des Bodens (Kriterium der örtlichen Lagebeständigkeit) sein muß.

Jede von einer vorgegebenen Neigung abweichende Unebenheit (z. B. Kolk) führt zu ungünstigeren Auflagerverhältnissen der Deckschicht. Die Bereiche relativ steilerer Neigung können dann zum Ausgangspunkt von Bodenumlagerungen werden, wenn auf die Verzahnung mit dem Untergrund nicht geachtet wird (Abb. 10).



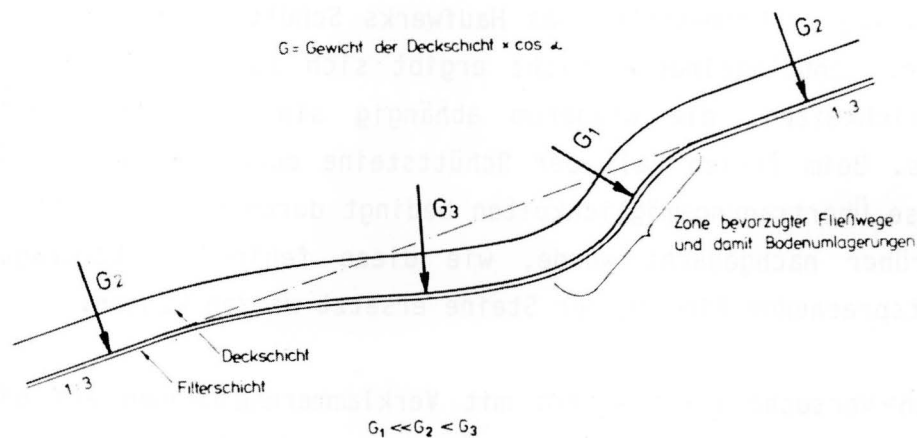


Abb. 10: Auflagerverhältnisse bei verschiedener Neigung

Um die beim Einbau und Betrieb auftretenden mechanischen Beanspruchungen abzudecken, muß der geotextile Filter mit ausreichend großen Materialfestigkeiten versehen sein. Zur Erhöhung der Zugfestigkeit wurden mehrschichtige Filtermatten häufig mit Geweben ausgerüstet. Hierbei muß beachtet werden, daß bei Deckwerken, die begrünt werden sollen, Gewebe nachteilig sind, weil sie aufgrund der punktverschweißten Fäden in die Wurzeln der Pflanzen einwachsen. Vliesstoffe behindern den Pflanzenwuchs dagegen nicht, da die Wurzelkraft der Pflanzen ausreicht, die einzelnen Fasern zu verdrängen, ohne den Vliesstoff zu zerstören.

Bei der Bemessung der Zugfestigkeit eines geotextilen Filters muß beachtet werden, daß sie nur für Kräfte aus den Beanspruchungen beim Einbau durchgeführt werden kann. Geotextile Filter haben thermoplastische Eigenschaften und können daher keine langandauernde Zugbeanspruchungen aufnehmen. Müssen in einem Deckwerk Zugkräfte aufgenommen werden, so sind hierfür besondere Tragglieder heranzuziehen. Dies kann z. B. auch die Deckschicht sein. Des weiteren muß unbedingt darauf geachtet werden, daß die geotextilen Filter keiner dauernden Beanspruchung durch Antrieb beim Scheuern ausgesetzt sind.

Parallel mit der Entwicklung der Filterschichten lief die Entwicklung der Deckschichten.

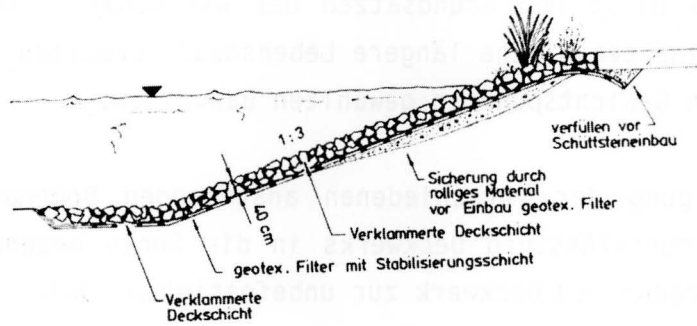
Als erste Schäden an den bis dahin meistens verwendeten losen Schüttsteindeckschichten auftraten, wurden Fallversuche durchgeführt i. M. 1 : 1, um Angaben zu bekommen über das Ausmaß der durch den freien Fall durch das Wasser bedingten Entmischung des Haufwerks Schüttsteine. Die Standsicherheit einer Schüttsteindeckschicht ergibt sich aus den Stützkraftübertragungsmöglichkeiten, die wiederum abhängig sind von der Geometrie des Haufwerks. Beim freien Fall der Schüttsteine durch das Wasser verringern sich diese Übertragungsmöglichkeiten bedingt durch die Entmischung, so daß dann darüber nachgedacht wurde, wie diese fehlenden Übertragungskräfte durch entsprechende Bindung der Steine ersetzt werden können.

Es wurden Versuche durchgeführt mit Verklammerungsmengen auf bituminöser und auch auf hydraulischer Basis. Daneben wurden Untersuchungen durchgeführt mit Bitumenemulsionen und mit SM-Schlacken sowie Hüttensanden.

Bei der Anwendung in der Naßbauweise mußte das Problem gelöst werden, auf der einen Seite eine ausreichende Menge zur Verklammerung jedes Einzelsteines in der oberen Deckschichtebene einzubringen und auf der anderen Seite zu vermeiden, daß bei zuviel eingebrachter Menge die Durchlässigkeit des Deckwerks gefährdet wird. Es bedurfte jahrelanger Versuche, um die jeweils möglichen Verklammerungsarten auf bituminöser oder hydraulischer Basis (Punktverguß und Raumverguß mit dichtem, durchlässigem bzw. filterwirksamem Material) auf die jeweiligen Steindeckschichten abzustimmen.

#### HEUTIGER STAND:

Durchlässige Deckwerke am Mittellandkanal bestehen heute aus geotextilen Filtern in Form von mehrschichtigen Verbundstoffen mit Stabilisierungsschicht und einer 40 cm dicken Schüttsteindeckschicht. Zur Sicherung der Lagestabilität der einzelnen Schüttsteine in der Deckschicht erfolgt eine Verklammerung entweder teilweise mit dichtem undurchlässigen Beton oder ein Vollverguß des gesamten Porenvolumens mit einem durchlässigen oder besser einem filterwirksamen Unterwasserbeton oder -mörtel (Abb. 11).



Durchlässiges Deckwerk am Mittellandkanal

Abb. 11: Durchlässiges Deckwerk am Mittellandkanal

In Abb. 12 sind Ausführungsbeispiele von Deckwerksfüßen in verschiedenen Ausführungen dargestellt.

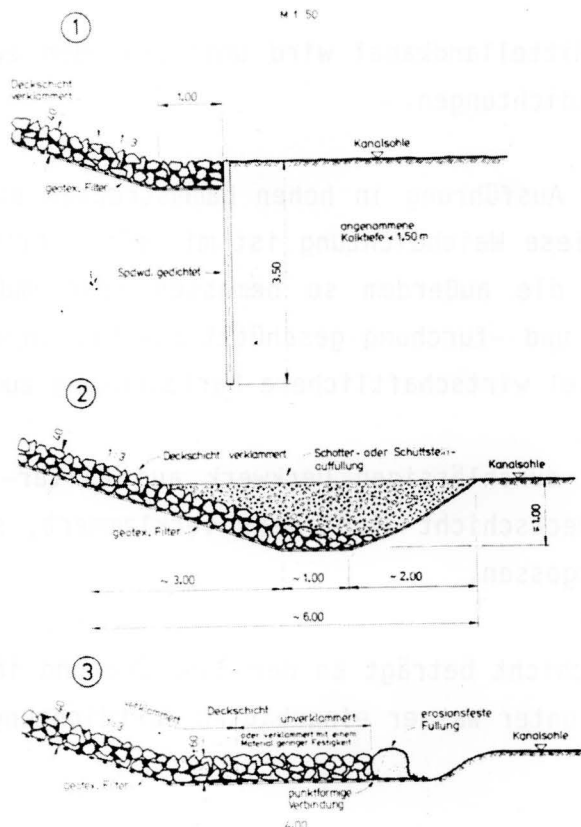


Abb. 12:

Ein Deckwerk wie es in Abb. 11 dargestellt ist, wurde im Jahre 1981 einem Bruchversuch unterzogen. Dieses Deckwerk wurde etwa eine Stunde lang durch Schraubenstrahl beansprucht, ohne das Deckwerk zu beschädigen. Wenn auch Schraubenstrahl auf der freien Kanalstrecke kein Dauerlastfall ist, so wird doch bewiesen, daß diese den Grundsätzen der Wirtschaftlichkeit entsprechende Bauweise, eine erhebliche längere Lebensdauer erwarten läßt, als die bisher nach anderen Gesichtspunkten gewählten Bauweisen.

Unter Berücksichtigung der verschiedenen anstehenden Bodenarten ist der Einbindung dieses durchlässigen Deckwerks in die Sohle besondere Rechnung zu tragen. Der Übergang vom Deckwerk zur unbefestigten Sohle stellt hydraulisch gesehen eine Unstetigkeitsstelle dar.

Die Fußausbildung in Spundwandlösung ist sicherlich die beste aber teuerste Lösung. Die Einbindung im 2. Beispiel ist nur dann ausführbar, wenn der Schluffanteil im Boden gering ist, weil sich sonst dieses Beispiel nicht ausführen läßt. Daher muß dann in diesen Fällen das Beispiel 3 gewählt werden. Dieser Fuß besteht am Ende aus einem Sack, der mit technischem Ton oder anderen latent plastischen Materialien gefüllt ist, damit bei einer evtl. Zerstörung durch Ankerfall der Sack nicht leerläuft. Dieser Sack ist in Längsrichtung in Abständen von etwa 12 m durch Abstimmung unterteilt. Alle diese Füße sollen den Zweck erfüllen, entstehende Kolke vom Knickpunkt der Böschung mit der Sohle fernzuhalten.

Bei dichten Deckwerken am Mittellandkanal wird unterschieden zwischen den Weichdichtungen und den Hartdichtungen.

Die Weichdichtung kommt zur Ausführung in hohen Dammstrecken und auf setzungsempfindlichen Böden. Diese Weichdichtung ist mit einer filterstabilen Schutzschicht zu versehen, die außerdem so bemessen sein muß, daß die Weichdichtung vor Ankerfall und -furchung geschützt bleibt. In allen anderen Fällen kommt die sehr viel wirtschaftlichere Hartdichtung zum Zuge.

Sie besteht genau wie beim durchlässigen Deckwerk aus Filter- und Deckschicht, nur ist hier die Deckschicht nicht mehr verklammert, sondern das gesamte Porenvolumen vollvergossen.

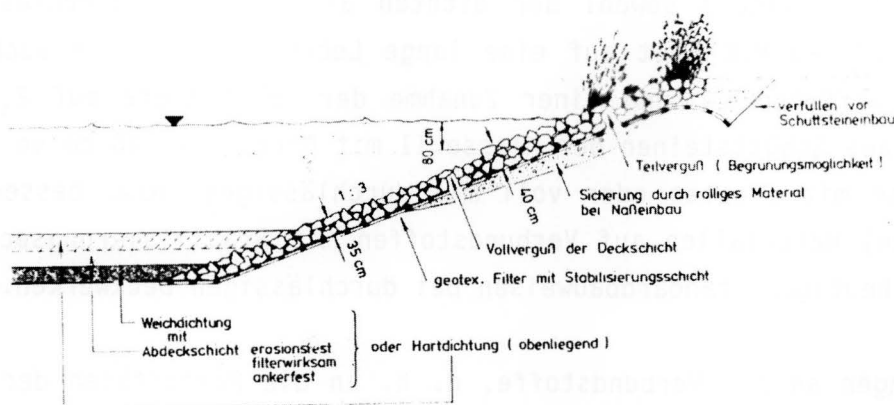
Die Dicke dieser Dichtungsschicht beträgt an der Böschung und in der Sohle 40 cm. Die Kontrolle dieser unter Wasser eingebauten Hartdichtung ist inso-

fern problemlos, als hier der Unternehmer durch Bohrungen nachweisen muß, daß das Schüttsteingerüst über eine Mindesthöhe von 40 cm vollvergossen wurde.

In Abb. 13 ist an der Böschung eine Hart- und in der Sohle eine Weichdichtung dargestellt.

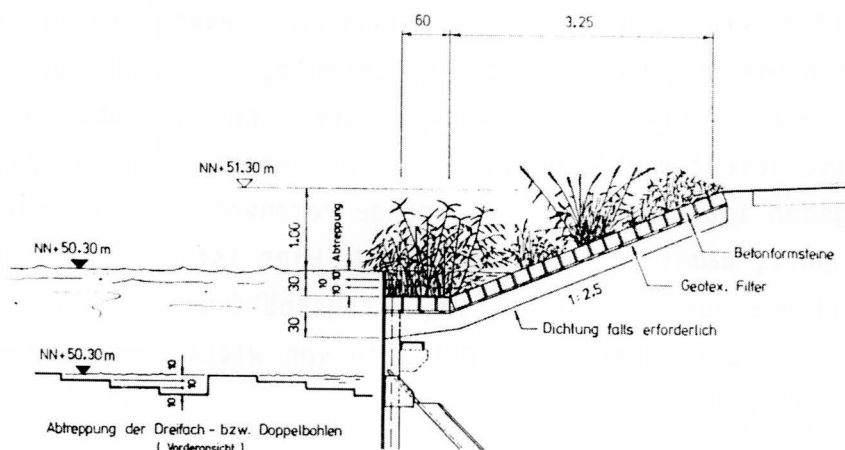
In den ersten Jahren der Anwendung dieser Hartdichtung wurde das Porenvolumen der Schüttsteine auch über Wasser vollvergossen. Heute erfolgt dieser Vollverguß nur noch bis zu 50 cm über dem Wasserspiegel und nur noch im unteren Bereich auf max. 20 cm. Der Bereich darüber und nach oben hin wird nur noch punktwiese leicht verklammert, so daß der Kontakt der Schüttsteine untereinander gegeben ist, und das verbleibende Porenvolumen wird mit Oberboden voll eingespült, damit es begründbar wird. Hier ist darauf zu achten, daß der Boden voll bis auf den Filter hin durchgespült wird, damit der Kapillarsaum, der für die Ernährung der Pflanzen von Wichtigkeit ist, nicht unterbrochen wird.

Uferbauweisen in Spundwand werden nicht mehr wie früher so gebaut, daß die Spundwand 70 cm über dem Wasserspiegel liegt, sondern heute wird auf der freien Strecke die Spundwand abgesenkt, so daß ein Übergang vom Wasserspiegel zum Land weiter möglich ist (siehe Abb. 14).



Undurchlässiges Deckwerk am Mittellandkanal

Diese Wand ragt nur noch etwa 10 cm aus dem Wasserspiegel heraus und ist in Längsrichtung in Abständen von 12 - 15 m, 2 - 3 m unterbrochen. Die Plattform des dahinterliegenden Deckwerkes liegt 30 cm unter dem Wasserspiegel und wird unregelmäßig mit größeren Schüttsteinen angefüllt und bepflanzt.



Begrünung eines Spundwandufers auf der freien Strecke

Abb. 14: Gestaltung eines Spundwandufers auf der freien Strecke

## AUSBLICK

Die derzeitige Ausbildung sowohl der dichten als auch der durchlässigen Uferauskleidungen am MLK läßt auf eine lange Lebensdauer hoffen auch bei zunehmendem Schiffsverkehr und einer Zunahme der Abladetiefe auf 2,80 m. Deckschichten aus Schüttsteinen der Klasse II mit Dicken von 40 cm verklammert, teilweise mit dichten oder voll mit durchlässigen (bzw. besser mit filterwirksamen) Materialien auf Verbundstoffen mit Stabilisierungsschichten, sind die heutigen Standardbauweisen bei durchlässigen Deckwerken.

Die Anforderungen an die Verbundstoffe, d. h. an die Porositäten der Einzelschichten und Stabilisierungsschichten müssen noch weiter differenziert werden.

Auch die Begrünung der Deckwerke bedarf noch weiterer Forschung.