

Dipl.-Ing. Hans-Gerhard K n i e ß

UNTERSUCHUNGEN ZUM NACHWEIS DER WIRTSCHAFTLICHKEIT  
VON UFERDECKWERKEN AN WASSERSTRASSEN

Studies in the proof of the profitability of  
waterway revetments

Inhaltsangabe

An Uferdeckwerken aus losen Steinschüttungen wurde der übliche Unterhaltungsaufwand ermittelt. Die Ergebnisse bilden die Grundlage für Richtwerte und Strategiemodelle zur Berechnung des zu erwartenden Unterhaltungsaufwandes und der technischen Nutzungsdauer, mit denen bei Anwendung des Diskontierungsverfahrens die Wirtschaftlichkeit unterschiedlich aufgebauter Deckwerke untersucht werden kann.

Summary

The usual maintenance costs of riprap revetments have been ascertained. The results are the basis for standard values and strategy models for the calculation of the future maintenance costs and the technical service life. With that and with the discounting method the profitability of different constructed revetments can be investigated.

I N H A L T

	Seite
1 Vorbemerkungen	21
1.1 Belastungen	22
1.2 Bemessung	23
1.3 Wirtschaftlichkeit	23
2 Unterhaltungsaufwand	23
2.1 Umrechnung von Kosten	24
2.2 Frühere Planungsansätze	25
2.3 Untersuchungsberichte	25
2.4 BAW-Umfrage 1980/81	26
2.5 Folgerungen	29
3 Unterhaltungsverfahren	29
3.1 Begriffe	29
3.2 Gebrauchswert	30
3.3 Strategiemodelle	31
3.4 Instandsetzungsintervall	34
3.5 Nutzungsdauer TN	35
4 Wirtschaftlichkeitsrechnung	37
4.1 Berechnungsansätze	38
4.2 Untersuchungszeitraum n	39
4.3 Restwert R	39
4.4 Rechenprogramm	41
4.5 Ausgewählte Bauweisen	43
4.6 Vergleiche	43
4.7 Sensitivitätsanalyse	44
4.7.1 Mehrfachvariation	45
4.7.2 Nutzungsdauer TN	46
4.7.3 Untersuchungszeitraum n	47
4.7.4 Unterhaltungsaufwand U	48
4.7.5 Restwert R	49
4.7.6 Zusammenfassung	50
5 Schlußfolgerung	51
6 Schrifttum	52
7 Begriffe/Definitionen	55

## 1 Vorbemerkungen

Die für dichte und durchlässige Auskleidungen von Binnenschiff- fahrtsstraßen maßgebenden Einflußgrößen stehen in einem engen Zusammenhang mit den Wechselwirkungen zwischen Schiff und Was- serstraße. Solange die Schifffahrt auf den Binnenwasserstraßen maßgeblich durch Schleppschiffe bestimmt wurde, war die Bean- spruchung der Auskleidung an Ufer und Sohle gering. Erst mit Aufkommen der Motorgüterschifffahrt ab Mitte der 50er Jahre entstanden Belastungen, die in kurzer Zeit alle bis dahin scheinbar stabilen Bauweisen in Frage stellten.

Als Gegenmaßnahme wurden lose Steinschüttungen zunächst nur in der Uferzone, dann aber auch unter Wasser mit einem Teil- verguß gebunden. Daraus entwickelte sich bis in die Gegenwart eine Reihe von Bauweisen, die zwar technisch brauchbare, aber auch zunehmend teure Auskleidungen ergaben. Die in den letz- ten 10 Jahren eingetretene Verknappung und Verteuerung von Rohstoffen wie Steine, Bitumen und Zement zwingen dazu, die zweckmäßigen Bauweisen nicht nur nach technischen, sondern auch nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten unter Verwendung probabilistischer Belastungsansätze zu bemessen. Hierbei sind die Kosten für Investition und Unterhaltung zu optimieren.

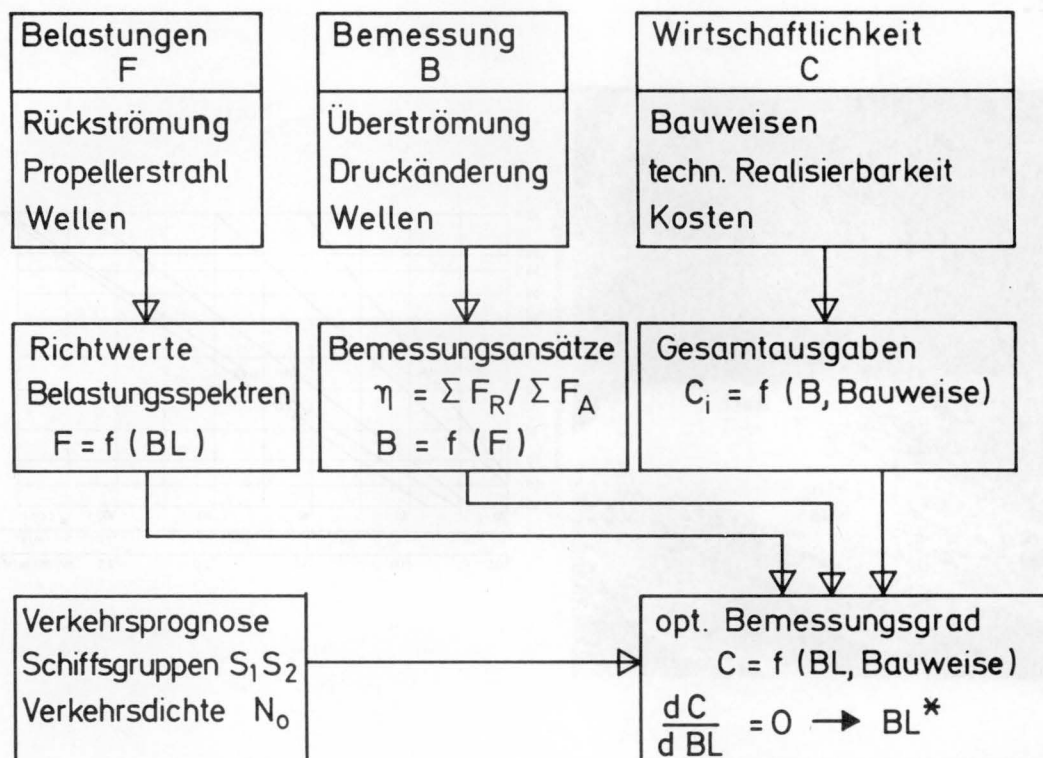


Bild 1 Probabilistische Bemessung von Uferdeckwerken

Außer der technischen Bemessung, auf die hier nicht eingegangen wird, ist für den Nachweis der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Bauweisen eine Reihe von Basisdaten über Unterhaltungsaufwand und Nutzungsdauer erforderlich, die im vorliegenden Bericht auf der Grundlage von Erhebungen angegeben und diskutiert werden.

### 1.1 Belastungen

Die für Böschungs- und Sohlenauskleidungen von Wasserstraßen maßgebenden Belastungen gehen vom Schiffsverkehr aus. Sie können in Größe, Verteilung und Ereignishäufigkeit auf der Grundlage zahlreicher Naturmessungen in Form von Belastungsspektren als Funktion des Belastungsgrades BL ermittelt werden. Derartige für die Auskleidungen maßgebende Belastungsspektren sind für die Teil-Belastungen

- Rückströmung  $(V_x, V_y, dV/dt, z_A)$
- Propellerstrahl  $(V_x, dV/dt)$
- Wellen  $(z_H, z_A, H)$

bekannt.

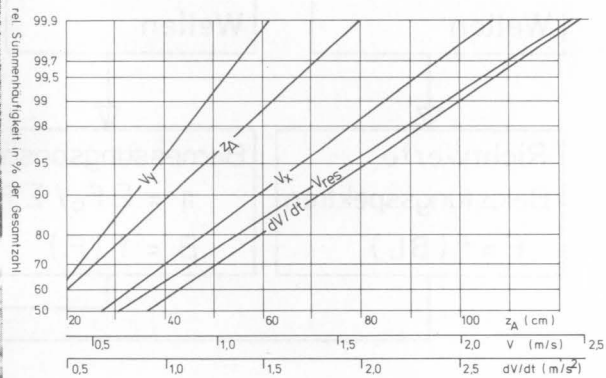
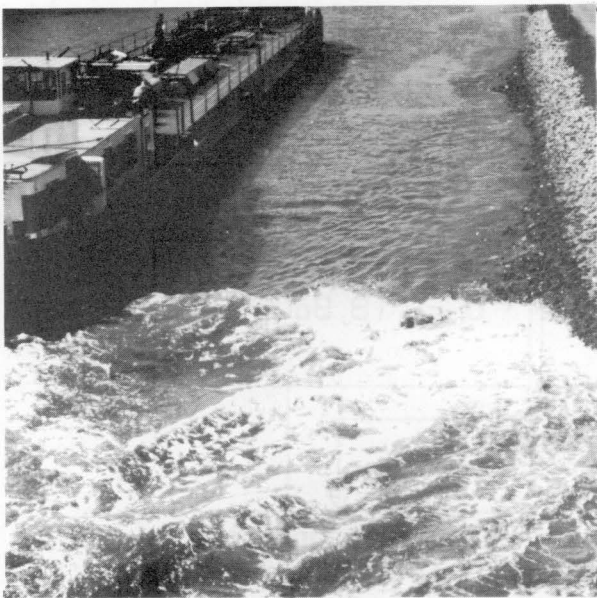


Bild 2 Belastung eines Uferdeckwerks im Mittellandkanal

## 1.2 Bemessung

Für lose und gebundene Bauweisen von Auskleidungen sind die repräsentativen Steingröße  $D_r$  von losen Deckschichten und das Flächengewicht  $g$  von gebundenen Deckschichten zu bemessen. Bei Berücksichtigung der maßgebenden Belastungen und der daraus resultierenden Versagensmöglichkeit wird bei allen nachstehenden Überlegungen grundsätzlich eine in sich standsichere Uferböschung, eine auf den Boden und auf die Deckschicht abgestimmte Filterschicht und eine hinreichend stabile Ausbildung der Deckschicht vorausgesetzt. Daraus folgt, daß der mögliche Verschleiß des Deckwerks primär die Deckschicht betrifft.

## 1.3 Wirtschaftlichkeit

Das Kriterium der Beurteilung der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher Bauweisen wird durch die Minimierung der Investitions- und Unterhaltungskosten innerhalb bestimmter Prognosezeiträume unter Beibehaltung der bautechnischen Belastbarkeit bzw. der Versagenswahrscheinlichkeit gebildet.

Zur exemplarischen Darstellung der Wirtschaftlichkeit unterschiedlicher für Auskleidungen in Betracht kommender Bauweisen werden aus der Palette möglicher, aktueller Bauweisen repräsentative Bauweisen mit ihren kennzeichnenden Abmessungen und Investitions- und Unterhaltungskosten so zusammengestellt, daß die zu erwartenden, auf die Gegenwart diskontierten gesamten Kostenaufwendungen  $C_i$  einen Vergleich ermöglichen.

## 2 Unterhaltungsaufwand

Die Unterhaltung von Uferdeckwerken aus losen Steinschüttungen gehört zu den traditionellen Unterhaltungsmaßnahmen einer Wasserstraße, so daß es über diesen Komplex eine Reihe früherer Untersuchungen gibt. Von diesen wurden die wichtigsten mit den hier verwertbaren Ergebnissen wie Unterhaltungsaufwand, Nutzungsdauer und Unterhaltungsverfahren verwendet. Zu unterscheiden sind hierbei Untersuchungen in Form von Planungsansätzen und in Form von konkreten Fallstudien.

Von besonderem Gewicht ist die 1980/81 von der BAW durchgeführte Erhebung des im Bereich von Binnenwasserstraßen anfallenden Aufwandes zur Unterhaltung loser Steinschüttungen /6/.

## 2.1 Umrechnung von Kosten

Da der finanzielle Aufwand erheblich von den örtlichen Verhältnissen wie Unterhaltungsverfahren, Materialbeschaffung und Art der Ausführung abhängig ist, wurden die Unterhaltungsaufwendungen zunächst grundsätzlich nur in Materialmengen - Tonnen pro m Ufer und pro Jahr (t/m.a) - ermittelt.

Bei Kostenangaben wurden die Kosten mit Hilfe der Preisindizes für den Straßenbau nach den Angaben des Statistischen Bundesamtes auf die Preisbasis von 1981 umgerechnet. Hierbei erwies es sich als zweckmäßig, drei Bereiche der Wasserstraßen mit unterschiedlichen Materialkosten frei Lager bzw. frei Baustelle zu wählen:

Bereich 1 : Bereich der nord- und nordwestdeutschen Wasserstraßen, in dem die Lieferung von Steinen in jedem Fall mit einem langen Transport und ggf. auch mit mehrmaligem Umschlag verbunden ist.

Bereich 2 : Bereich der west- und nordwestdeutschen Wasserstraßen, in dem die Lieferung mit mäßigen Transportwegen und nur in Ausnahmefällen mit mehrmaligem Umschlag verbunden ist.

Bereich 3 : Bereich der süd- und südwestdeutschen Wasserstraßen, in dem die Lieferung wegen der direkten Nähe von Steinbrüchen auf kurzem Weg mit geringem Umschlag möglich ist.

Bei einem durchschnittlichen Aufwand für den Umschlag der Steine auf das Schüttgerüst, für das Vorhalten und für das Betreiben des Schüttgerüsts sowie für Nebenarbeiten wie Peilen und Nacharbeiten der Schüttung wurde weitgehend unabhängig von der Dicke der Steinschüttung ein Preis von DM 20,--/m<sup>3</sup> ermittelt.

Für die drei gewählten Bereiche ergaben sich damit die in der Tabelle 1 angegebenen Preise:

Tabelle 1 Preise für lose Steinschüttungen (DM/m<sup>3</sup>)

Rohdichte (t/m <sup>3</sup> )	Bereich					
	1		2		3	
	Mat.	Bau	Mat.	Bau	Mat.	Bau
2,65	70	20	40	20	20	20
3,00	80	20	55	20	35	20
3,60	90	20	110	20	-	-

## 2.2 Frühere Planungsansätze

Aus einer Reihe von Studien über Neubau und Ausbau von Wasserstraßen liegen Richtwerte über den zu erwartenden Unterhaltungsaufwand an Uferdeckwerken aus losen Steinschüttungen in Form von Kostenschätzungen vor. Die darin enthaltenen Richtwerte werden mit dort jeweils angenommenen Randbedingungen auf Materialaufwendungen umgerechnet und in der Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2 Unterhaltungsaufwendungen q in früheren Planungsstudien

Verfasser	Schrifttum	Jahr	Unterhaltungsaufwand q (t/m.a)
Helm-Wöltinger	/3/	1953	$q_1 = 0,051$
Steinmatz	/13/	1960	$q_2 = 0,116$
Graewe	/3/	1967	$q_3 = 0,0625 \cdot N \cdot 10^{-4}$
Seiler	/9/	1967	-
Westhaus	/14/	1969	$q_5 = 0,267$
N = Anzahl der Schiffe pro Jahr			

In einer Studie /9/ ermittelte Seiler 1967 den Anlagenwert der bundeseigenen Binnenschiffahrtsstraßen. In der dortigen Anlage 3 werden durchschnittliche Nutzungszeiten der Bauwerke angegeben, die die Grundlage für die Wertberechnung bilden. Dazu gehören auch Uferdeckwerke in der damaligen Regel-Bauweise aus losen Steinschüttungen.

## 2.3 Untersuchungsberichte

Zur Unterhaltung einzelner Wasserstraßen bzw. Streckenabschnitte liegen einige Untersuchungsberichte vor, in denen z.T. auf umfangreiches Datenmaterial Bezug genommen wird. Sie ergeben im Gegensatz zu den Planungsansätzen konkrete Richtwerte, die jedoch mit den jeweiligen Ausgangsbedingungen wie Aufbau und Lage der Deckwerke, Belastungen und Unterhaltungsverfahren zu werten sind und nur mit Einschränkungen eine Verallgemeinerung gestatten. Insbesondere sind die Ausgangsbedingungen des üblichen Aufbaues der früheren "Regel"-Bauweisen von Uferbefestigungen zu beachten. Diese bestanden fast ausnahmslos aus losen Steinschüttungen und Pflasterungen auf einer Bettungsschicht aus Kies, Schotter oder Splitt. Kornverteilung und Dicke dieser Bettungsschicht dürften dabei nach den heutigen Kenntnissen nur sehr bedingt filterstabil gegenüber Boden und Deck-

schicht gewesen sein. Es ist daher nicht verwunderlich, wenn die bei zunehmendem Schiffsverkehr einwirkenden Belastungen je nach Intensität und Ereignishäufigkeit zu ausgedehnten und nicht mehr ausgleichenden Schäden führten und damit früher bewährte Bauweisen in kurzer Zeit völlig unwirksam machten.

Die in den Untersuchungsberichten enthaltenen Richtwerte sind - umgerechnet auf Materialaufwendungen - in der Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3 Unterhaltungsaufwendungen in Untersuchungsberichten

Verfasser	Schrifttum	Jahr	Unterhaltungsaufwand q (t/m·a)
WSD Würzburg (Main)	/15/	1968	q <sub>7</sub> = 0,140 q <sub>8</sub> = 0,037 q <sub>9</sub> = 0,045
Kienbaum(DEK)	/4/	1968	q <sub>10</sub> = 0,137
WSD Nord (NOK)	/16/	1979	q <sub>11</sub> = 0,242
WSD West (WDK)	/17/	1980	q <sub>12</sub> = 0,137 q <sub>13</sub> = 0,213

#### 2.4 BAW-Umfrage 1980/81

In die im Herbst 1980 vom BMV in Auftrag gegebene Umfrage wurden 16 Strecken der Binnenwasserstraßen einbezogen. Die Auswahl richtete sich einmal nach den zur Verfügung stehenden Daten des in den vergangenen 10 Jahren angefallenen Unterhaltungsaufwandes und zum anderen nach dem Verkehrsaufkommen in den betreffenden Strecken, das nach Möglichkeit verschieden sein sollte, um evtl. Abhängigkeiten zwischen dem Unterhaltungsaufwand und dem Verkehrsaufkommen feststellen zu können. Die meisten ausgewählten Strecken liegen daher im Bereich der west- und nordwestdeutschen Kanäle.

Bei der Bearbeitung der mit Fragebögen durchgeführten Umfrage ergaben insbesondere die über den Einsatz des freifahrenden Schwimmgreifens "Krabbe" der WSD West geführten Tagesberichte detaillierte Informationen über die Unterhaltungsaufwendungen. Dadurch standen für die im Bereich der WSD West liegenden Kanäle besonders umfangreiche Daten zur Verfügung, die in Anbetracht der dort typischen Art und Häufigkeit der Belastungen auch weitgehend repräsentativ für stark belastete Binnenschiffahrtskanäle sind.



In Bild 3 sind die aus der Umfrage und aus den im Bereich der WSD West gesondert vorgenommenen Erhebungen ermittelten Unterhaltungsaufwendungen einschließlich der zuvor angegebenen früheren Ansätze mit dem jeweils zugehörigen Verkehrsaufkommen  $N$  angegeben.

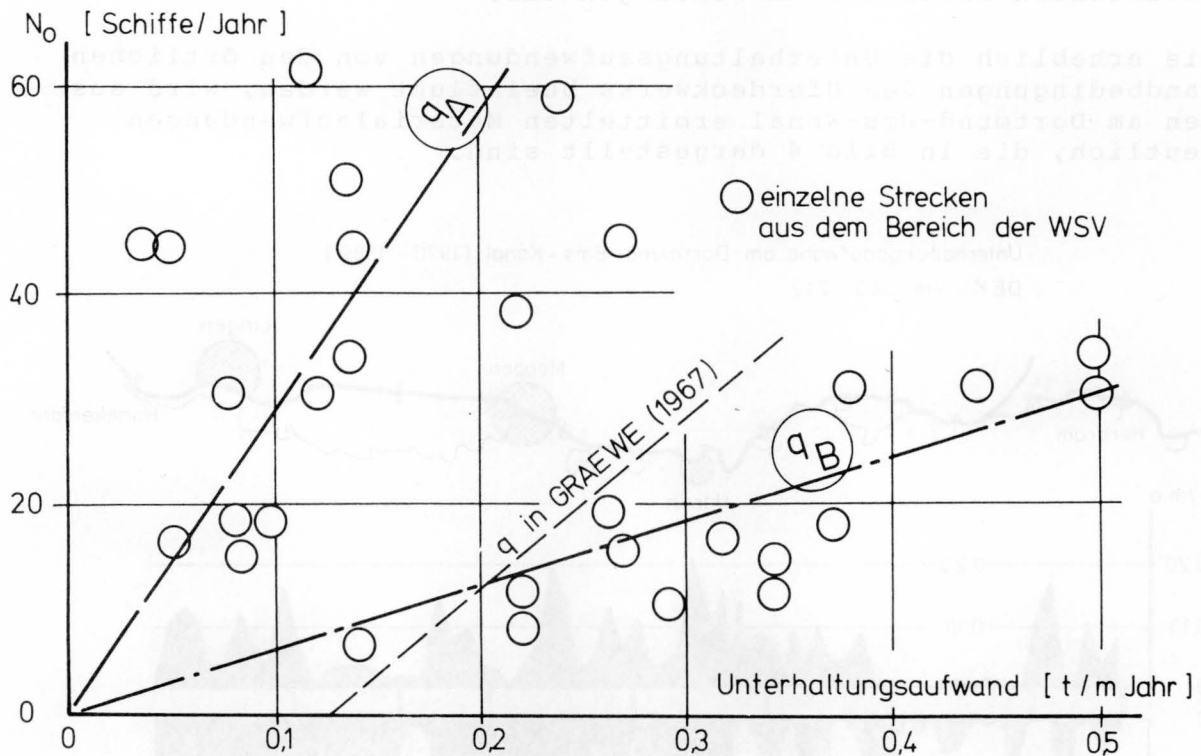


Bild 3 Unterhaltungsaufwendungen in Abhängigkeit vom Verkehrsaufkommen

Es fallen zwei voneinander getrennte Punktescharen A und B auf. Die Punkteschar A umfaßt im wesentlichen die geringeren Aufwendungen  $q$  und die Punkteschar B die größeren Aufwendungen, zu denen außer Durchschnittswerten alle ermittelten Maximalwerte gehören. Bei weiterer Betrachtung fällt dann auf, daß zur Punkteschar B offensichtlich die durchschnittlichen Aufwendungen an solchen Uferbefestigungen gehören, die aufgrund ihrer Bauweise, Böschungsneigung und Lage von vornherein gefährdeter als die der Punkteschar A sind und damit auch folgerichtig einen größeren Unterhaltungsaufwand erfordern.

Es ist daher zweckmäßig, die beiden Punktescharen A und B voneinander zu trennen und durch Regressionsgeraden zu ersetzen:

$$q_A = 3,3 \cdot 10^{-6} \cdot N \text{ (t/m}\cdot\text{a)} \quad (1)$$

$$q_B = 16,7 \cdot 10^{-6} \cdot N \text{ (t/m}\cdot\text{a)} \quad (2)$$

$N$  = Schiffsdurchgänge pro Jahr

Da die Maximalwerte in die Punkteschar B fallen, stellt  $q_B$  zugleich die Beziehung für die bei technisch guter Ausbildung zu erwartenden maximalen Aufwendungen dar.

Wie erheblich die Unterhaltungsaufwendungen von den örtlichen Randbedingungen des Uferdeckwerks beeinflusst werden, wird aus den am Dortmund-Ems-Kanal ermittelten Materialaufwendungen deutlich, die in Bild 4 dargestellt sind.

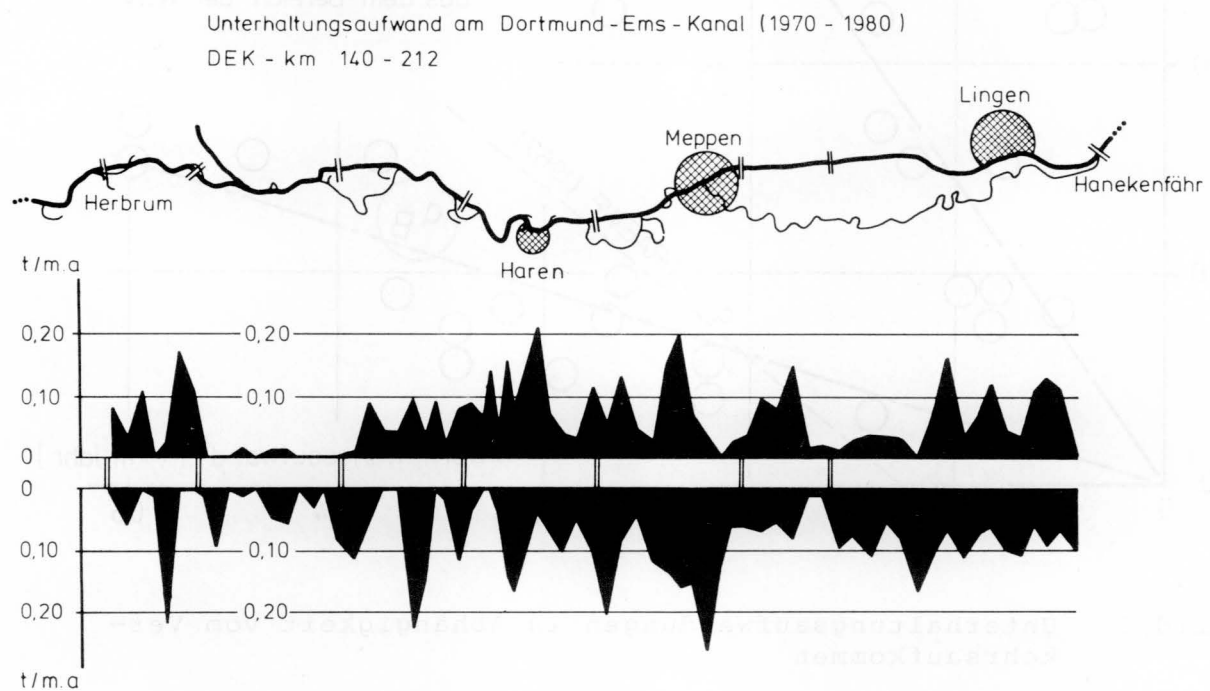


Bild 4 Unterhaltungsaufwendungen am Dortmund-Ems-Kanal

Ausgeprägte Spitzen des Unterhaltungsaufwandes werden offensichtlich von mehreren unterschiedlichen Randbedingungen beeinflusst. Dazu gehören Stadtbereiche, Schleusenvorhöfen, Strecken mit engen Krümmungen und - das wird hier erstmals deutlich! - gerade, übersichtliche Strecken, die Begegnungen und Überholungen mit großer Geschwindigkeit begünstigen. Deutliche Unterschiede zwischen den Aufwendungen an Innen- und Außenkurven sind dagegen nicht zu erkennen.

## 2.5 Folgerungen

Aus den angegebenen Ergebnissen der Umfrage und den ausführlichen Datenangaben des DEK lassen sich mehrere, für die weitere Untersuchung wichtige Folgerungen ziehen:

1. Der Begriff des durchschnittlichen Unterhaltungsaufwandes  $q$  ( $t/m \cdot a$ ) stellt als Mittelwert eine grobe, aber unumgängliche Vereinfachung dar. Die entsprechende Bezugsstrecke sollte möglichst einheitlich ausgebildet und beansprucht werden.
2. Der Durchschnittswert  $q$  kann je nach Strecken- und Verkehrsablauf in Maximalwerten bis zu 500 % überschritten werden.
3. Bei weitgehend gleichen Uferausbildungen werden die Maximalwerte im wesentlichen von vier Randbedingungen beeinflusst:
  - Besiedlungsdichte, Häfen und Liegestellen
  - Schleusenvorhäfen
  - gerade, übersichtliche Strecken ("Rennstrecken")
  - Strecken mit engen Krümmungen.

Insgesamt ergibt sich daraus, daß überall dort überdurchschnittliche Aufwendungen anfallen, wo der Verkehrsablauf eine Vielzahl von häufigen Besonderheiten wie Anfahren, Wenden, Überholen und kurzzeitiges Beschleunigen aufweist. Da diese Besonderheiten innerhalb jeder längeren Strecke vorkommen können und sich somit eine Summe vieler einzelner, jeweils besonders beanspruchter Strecken ergibt, sollte außer dem durchschnittlichen Unterhaltungsaufwand  $q_A$  auch der maximale Aufwand  $q_B$  berücksichtigt werden.

## 3 Unterhaltungsverfahren

Aus den zuvor angegebenen Ergebnissen der bei Uferdeckwerken auslösen Steinschüttungen zu erwartenden Unterhaltungsaufwendungen ergeben sich grundsätzliche Folgerungen hinsichtlich der bei Uferdeckwerken zweckmäßigen Unterhaltungsverfahren und hinsichtlich der für lose und gebundene Deckschichten anzusetzenden Richtwerte /7/.

### 3.1 Begriffe

Die verwendeten Begriffe bedürfen zunächst einer schärferen Definition, um Mißverständnisse zu vermeiden. Die Begriffe "Unterhaltung" und "Unterhaltungsaufwand" lassen eine ständige, lücken-

lose Ausbesserung der Uferdeckwerke in Form einer auf Erfahrungswerten basierenden Vorsorge erwarten, durch die der Gebrauchswert der Deckwerke ständig erhalten wird. Die Praxis zeigt aber, daß eine derartige ständige und lückenlose Unterhaltung technisch und wirtschaftlich nicht möglich ist. Praktisch werden Unterhaltungsmaßnahmen erst bei Erkennen von bestimmten Merkmalen in Form von Schadstellen in der Deckschicht ausgeführt. Da diese Schadstellen in aller Regel erst in Höhe oder oberhalb des Wasserspiegels erkannt werden können, vergeht zwischen Entstehen einer Schadstelle und ihrer Ausbesserung zwangsläufig eine gewisse Zeit, in der der Gebrauchswert des Deckwerkes zumindest lokal erheblich gemindert wird. Die nach Erkennen der Schadstelle ausgeführte Baumaßnahme stellt dann keine Unterhaltung, sondern eine Instandsetzung dar, da ja ein akuter Schaden behoben wird. Die zuvor ermittelten Unterhaltungsaufwendungen  $q$  stellen damit Verschleißwerte dar. Für die weitere Untersuchung werden nach /10/, /12/ die Begriffe für Baumaßnahmen verwendet:

Unterhaltungsmaßnahmen (U):

Laufende oder einzelne Sofortmaßnahmen und Maßnahmen kleinen Umfangs, die im Detail meist nicht erfaßt werden können. Sie umfassen im wesentlichen die Ausbesserung lokal eng begrenzter Flächen der Deckschicht.

Instandsetzungsmaßnahmen (I):

Einzelne oder periodisch wiederkehrende Maßnahmen in größeren zusammenhängenden Flächen (mindestens  $6\text{m}^2/\text{m}$  Ufer), sofern nur die Deckschicht betroffen ist.

Erneuerungsmaßnahmen (E):

Einzelne oder periodisch wiederkehrende Maßnahmen in größeren zusammenhängenden Flächen, sofern mehr als nur die Deckschicht betroffen ist.

### 3.2 Gebrauchswert W

Als weiterer wichtiger Begriff ist der Gebrauchswert  $W$  eines Uferdeckwerks zu definieren.

Bei allen Überlegungen hinsichtlich planmäßig unterhaltungsbedürftiger Uferdeckwerke, d.h. Deckwerke mit einkalkulierbarem Verschleiß, wird grundsätzlich vorausgesetzt, daß nur die den direkten äußeren Belastungen ausgesetzte Deckschicht einem Verschleiß unterliegt. Die unter der Deckschicht liegende Filterschicht ist dabei so zu bemessen und zu bauen, daß sie sowohl gegenüber dem Boden als auch gegenüber der Deckschicht eine ausreichende hydraulische und mechanische Filterstabilität besitzt.

Der Gebrauchswert eines Deckwerks wird dann vom Zustand der Deckschicht bestimmt, die aus technischer Sicht zwei Funktionen zu erfüllen hat:

1. Schutz der Filterschicht vor äußeren Belastungen wie Strömung, Schiffsstoß, Ankerwurf und menschliche Einwirkungen (z.B. durch Badende, Angler).
2. Beschwerung der Böschung zur Vermeidung hydraulischer Aufbrüche und Rutschungen bei schnellen Druckänderungen (Absenk bei Schiffsvorbeifahrt).

Beide Funktionen werden maßgeblich durch die Dicke  $d$  der losen Steinschüttung bestimmt, so daß der Gebrauchswert eines derartigen Deckwerks allein mit der Dicke bzw. mit dem Verhältnis von Soll- und Ist-Dicke der Deckschicht definiert werden kann.

Ist  $d_0$  die aus der Bemessung resultierende Soll-Dicke der Deckschicht, die sich wiederum nach der Größe der verwendeten Steine und nach der aus statischen Gründen erforderlichen Auflast richtet, dann wird der Gebrauchswert mit abnehmender Dicke  $d$  verringert. Der Gebrauchswert erreicht die untere noch zulässige Grenze, wenn  $d$  ein bestimmtes Maß von  $d_0$  erreicht. Unter Berücksichtigung der üblichen Bemessungsformeln für die Schütthöhe  $d_0$  und unter Berücksichtigung der Forderung, daß bei lokalen Schadstellen die Filterschicht nicht freifallen darf und somit mindestens noch eine Steinschicht der Dicke eines Steines  $D_r$  vorhanden sein muß, wird die geringste noch hinnehmbare Dicke  $d_1$  angesetzt:

$$d_1 = 0,50 \cdot d_0 \quad (3)$$

$$1,5 \cdot D_{100} < d_0 < 2,0 \cdot D_{100} \quad (4)$$

Wird  $d_1$  großflächig erreicht oder gar unterschritten, ist der technische Gebrauchswert  $W$  des Deckwerks kritisch.

### 3.3 Strategiemodelle

Für die Planung, d.h. für die technische und finanzielle Vorbereitung von Unterhaltungsmaßnahmen an losen Steinschüttungen lassen sich die Abhängigkeiten der dafür maßgebenden Parameter an Strategiemodellen /6/ untersuchen, bei denen zunächst die Frage nach der technischen Lebensdauer/Nutzungszeit  $T_N$  ausgeklammert wird.

In Bild 5 ist das Strategiemodell 1 des möglichen Unterhaltungsverfahrens dargestellt. Der Gebrauchswert  $W$  nimmt in Abhängigkeit von Verkehrsaufkommen  $N$  stetig ab, indem die Dicke der Steinschüttung stetig um den Verschleiß  $q$  verringert wird. Der Verschleiß entspricht dabei innerhalb einer größeren Strecke (= Haltung) dem durchschnittlichen Unterhaltungsaufwand  $q_A$  und innerhalb lokal besonders hoch belasteter Streckenabschnitte dem maximalen Unterhaltungsaufwand  $q_{max} = q_B$ . Die Instandsetzung  $I$  wird erforderlich, wenn die untere noch zulässige Dicke  $d_1$  in lokal hoch beanspruchten Streckenabschnitten erreicht

wird. Aus  $q_{\max}$  und  $d_o$  können das Instandsetzungsintervall  $\Delta T_1$  und der Umfang der Instandsetzungsmaßnahme I berechnet werden.

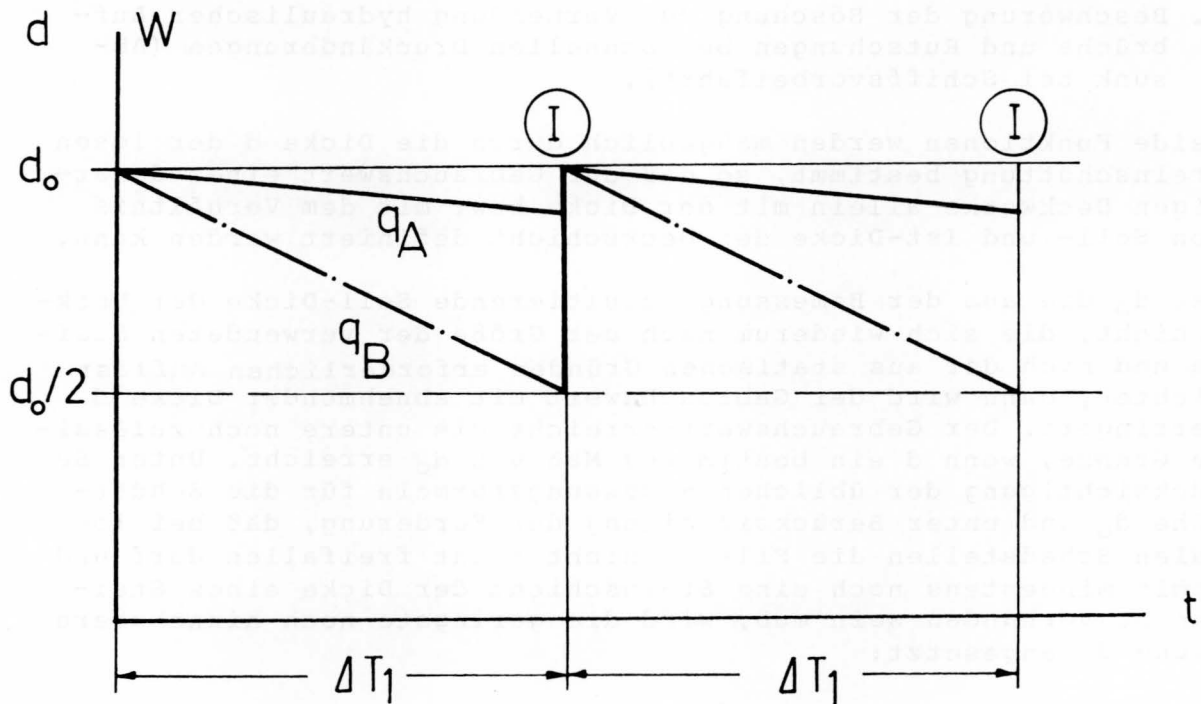


Bild 5 Strategiemodell 1

Aus der Feststellung, daß nach den praktischen Erfahrungen der Verschleiß des Uferdeckwerks sich in erster Linie auf die Wasserwechselzone von ca.  $6 \text{ m}^2/\text{m}$  erstreckt, ergibt sich folgender Rechenansatz:

$Q$  = Steinmenge, die dem direkten Verschleiß ausgesetzt ist  
(t/m·Ufer)

$$Q = 6 \cdot 1,7 \cdot \frac{d}{2} = 5,1 \cdot d \text{ (t/m)} \quad (5)$$

$q_B$  = Verschleiß (t/m · a) (s. Ziffer 2.5)

$$\Delta T = Q : q_B = \frac{5,1 \cdot d}{q_B} \text{ (a)} \quad (6)$$

$$I = q_A \cdot \Delta T \quad (7)$$

In Bild 6 ist ein weiteres Strategiemodell 2 angegeben, bei dem das Instandsetzungsintervall  $\Delta T_2$  bei sonst gleichen Randbedingungen größer als  $\Delta T_1$  gewählt wurde. Es wird angenommen, daß in hochbeanspruchten Streckenabschnitten der Verschleiß  $q_{\max}$  wie im Basismodell 1 verläuft, während der durchschnittliche Verschleiß  $\bar{q}$  bei Ausbleiben der Instandsetzung nach  $\Delta T_1$  Jahren progressiv anwächst. Hierbei wird angenommen, daß sich die Ver-

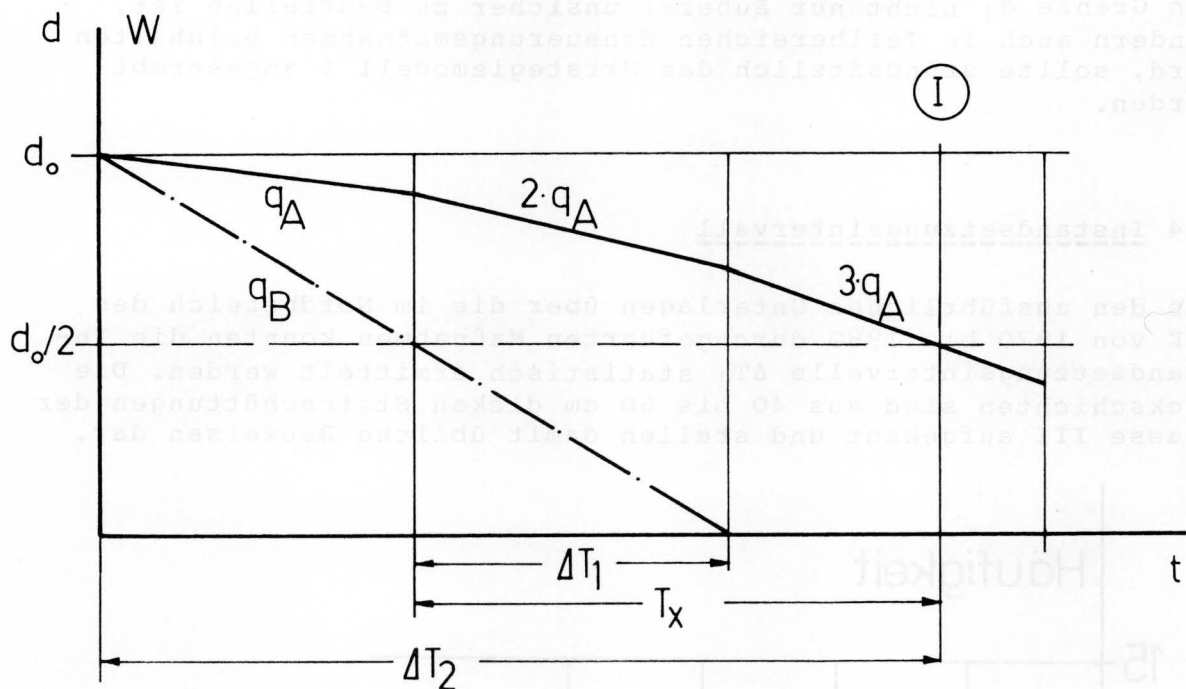


Bild 6 Strategiemodell 2

schleißrate  $\bar{q}$  von Intervall zu Intervall um  $q_1$  vergrößert. Auf der Grundlage der in Ziffer 2.5 ermittelten Beziehungen für  $q_A$  und  $q_B$  wird angenommen:

$$q_B = 5 \cdot q_A \quad (8)$$

Damit ergibt sich aus den geometrischen Beziehungen der beiden Strategiemodelle:

$$\Delta T_2 = 8/3 \cdot \Delta T_1 \quad (9)$$

$$\text{bei } t = \Delta T_2 : I_2 = 5 \cdot q_A \cdot \Delta T_1 + E \quad (10)$$

$$\text{bei } t = \Delta T_2 : I_1 = 8/3 \cdot q_A \cdot \Delta T_1 < I_2 \quad (11)$$

Bei Anwendung des Strategiemodells 2 ergibt sich somit nicht nur ein größerer Instandsetzungsumfang  $I_2$  als bei Anwendung des Modells 1, sondern noch zusätzlich ein in besonders hoch belasteten Bereichen erforderlicher Erneuerungsumfang  $E$ , da Teilbereiche über einen Zeitraum von  $2/3 \Delta T_1$  ohne Deckschicht liegen und damit Schäden in Filterschicht und Baugrund eintreten können.

Da jeder Verlauf der Gebrauchsminderung unterhalb der zulässigen Grenze  $d_1$  nicht nur äußerst unsicher zu beurteilen ist, sondern auch in Teilbereichen Erneuerungsmaßnahmen beinhalten wird, sollte grundsätzlich das Strategiemodell 1 angestrebt werden.

### 3.4 Instandsetzungsintervall

Aus den ausführlichen Unterlagen über die im Nordbereich des DEK von 1970 bis 1980 durchgeführten Maßnahmen konnten die Instandsetzungsintervalle  $\Delta T_1$  statistisch ermittelt werden. Die Deckschichten sind aus 40 bis 60 cm dicken Steinschüttungen der Klasse III aufgebaut und stellen damit übliche Bauweisen dar.

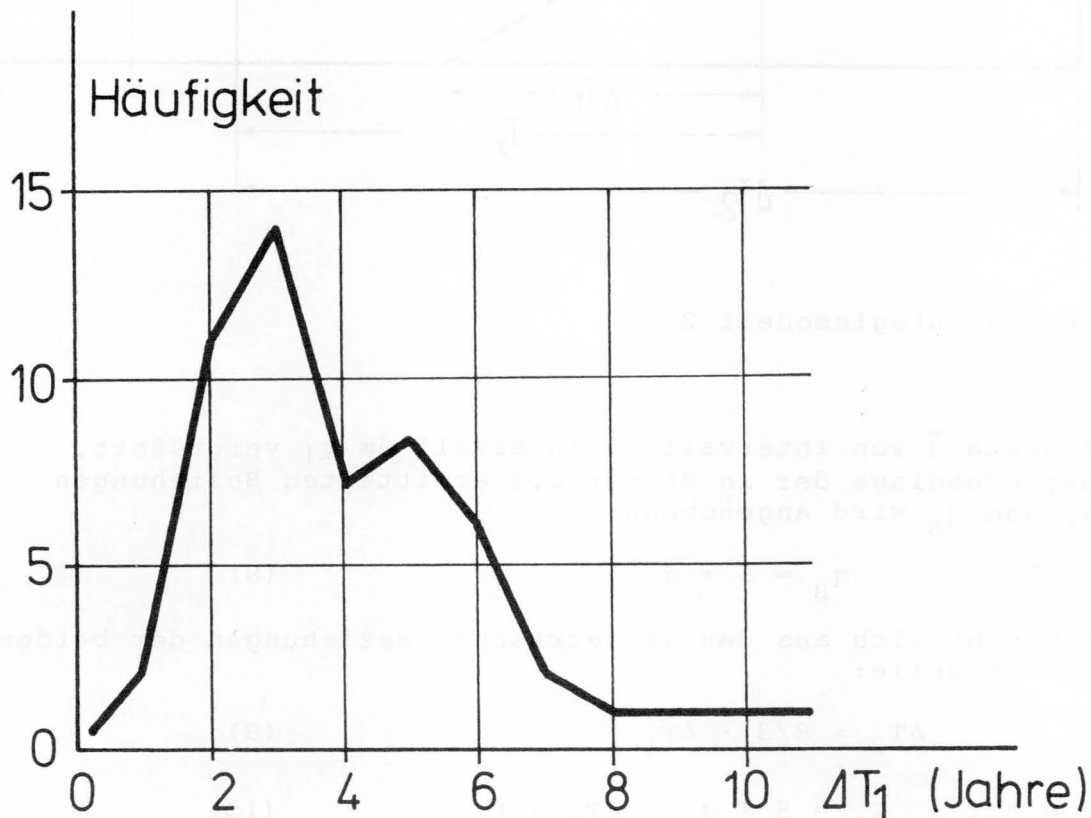


Bild 7 Instandsetzungsintervalle am DEK

Bild 7 zeigt einen Ausschnitt aus der zeitlichen Reihenfolge der Maßnahmen aus einem Abschnitt des DEK und die statistische Verteilung der im Nordbereich (km 138 - km 225) festgestellten Intervalle. Daraus kann  $\Delta T_1$  zwischen 2 und 6 Jahren, mit der größten Häufigkeit von 3 Jahren angenommen werden. Dieser Zeitraum stimmt auch in der Größenordnung mit dem in Ziffer 3.3 ermittelten Intervall überein.



Auch in der Umfrage der BAW und in den übrigen Berichten über den zeitlichen Ablauf von Unterhaltungsmaßnahmen ist überwiegend ein Intervall von 3 bis 5 Jahren angegeben. Dieser Zeitraum wird daher für die Unterhaltung überwiegend in Form periodisch wiederkehrender Instandsetzungsmaßnahmen vorgeschlagen:

$$\Delta T = 3 \text{ bis } 5 \text{ Jahre} \quad (12)$$

### 3.5 Nutzungsdauer

Die Nutzungsdauer  $T_N$  eines einem ständigen Verschleiß ausgesetzten Deckwerks wird durch die Intensität der Abnutzung  $q_A$ ,  $q_B$  und durch die Dauer der Instandsetzungsintervalle  $\Delta T$  bestimmt.

Um die nur schwer und in aller Regel nur schätzungsweise quantitativ faßbaren Begriffe wie "Lebensdauer", "technische Lebensdauer" und "wirtschaftliche Lebensdauer" zu umgehen, ist es zweckmäßiger, die in den vorangegangenen Untersuchungen bereits definierten Begriffe "Instandsetzungsintervalle"  $\Delta T$  und "Erneuerungsintervall"  $\Delta T_E$  zu verwenden.

Es wird hierbei angenommen, daß nach einer Reihe von Instandsetzungsmaßnahmen  $I$  nach  $n \cdot \Delta T$  Intervallen eine Erneuerung  $E$  erforderlich wird, bei der die Deckschicht und die Filterschicht zu erneuern sind. Das Erneuerungsintervall  $\Delta T_E$  entspricht dann der Nutzungsdauer  $T_N$ .

Diese Annahme ist gerechtfertigt, denn selbst bei regelmäßiger Durchführung von Instandsetzungsmaßnahmen ist unter Berücksichtigung der besonderen Verhältnisse der zum größten Teil ständig unter Wasser liegenden Deckwerksfläche nicht zu verhindern, daß außer der Deckschicht auch die Filterschicht einem Verschleiß unterliegt.

In Anlehnung an das Strategiemodell 1 kann für eine Strecke der in Bild 8 angegebene Ablauf der Unterhaltung als weiteres Strategiemodell angenommen werden. Hierbei stellt sich die Frage, wie oft die Instandsetzung  $I$  bis zur Erneuerung  $E$  der Filterschicht wiederholt werden kann. Da es hierfür keine Erfahrungen gibt, wird auf der Grundlage des durchschnittlichen Verschleißwertes  $q_A$  angenommen, daß dieser Wert auch zugleich den Gesamtverschleiß von Deck- und Filterschicht darstellt und eine Erneuerung  $E$  erforderlich wird, wenn der Gesamtgebrauchswert unter Zugrundelegung von  $q_A$  die untere zulässige Grenze  $d_1$  erreicht. Daraus folgt:

$$q_B = 5 \cdot q_A$$

$$T_E = 5 \cdot \Delta T$$

$$T_N = 5 \cdot \Delta T$$

Bei einer durchschnittlich üblichen Intervallzeit von  $\Delta T = 3$  bis 5 Jahren ergibt sich daraus ein Erneuerungsintervall  $T_E$  von 15 bis 25 Jahren:

$$TN = TE = 15 - \underline{25 \text{ Jahren}} \quad (14)$$

Dieser Zeitraum entspricht den in Ziffer 2.2 von Seiler /9/ und Ziffer 2.3 von Kienbaum /4/ veranschlagten Nutzungszeiten. Unter der Voraussetzung eines stabilen Filteraufbaues wird daher als Basiswert eine Nutzungsdauer von TN = 25 Jahren vorgeschlagen. Voraussetzung für eine derartige Annahme ist, daß das Uferdeckwerk nach technischen Gesichtspunkten hinreichend stabil ausgebildet ist und nicht bereits in der Planung und Bauausführung gravierende Schwächen beinhaltet. Zu derartigen Schwächen gehören insbesondere folgende Punkte:

- zu steile Böschungsneigung (>1:2)
- zu dünne Schüttdicke der Deckschicht ( $d < 1,5 \cdot D_{100}$ )
- fehlende Stabilität der Filterschicht gegenüber Boden und Deckschicht
- zu kleine, leichte Steine mit zu geringer Belastbarkeit.

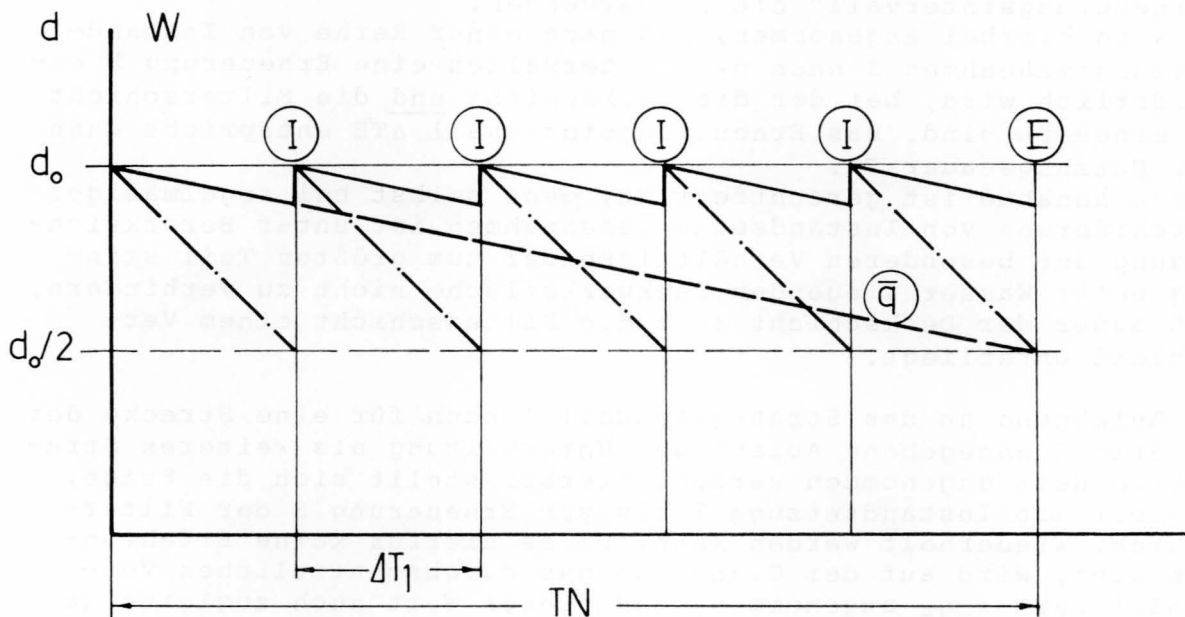


Bild 8 Strategiemodell für die technische Nutzungsdauer TN

#### 4 Wirtschaftlichkeitsrechnung

Die Berechnungen werden nach der Diskontierungsmethode (=Barwertmethode) durchgeführt, bei der alle im Laufe eines gewählten Untersuchungszeitraums anfallenden Kosten auf einen einheitlichen Bezugszeitpunkt bezogen und in abgezinste Werte transformiert werden. Es werden für alle Bauweisen die Gegenwartswerte (Barwerte)  $C$  ermittelt /7/.

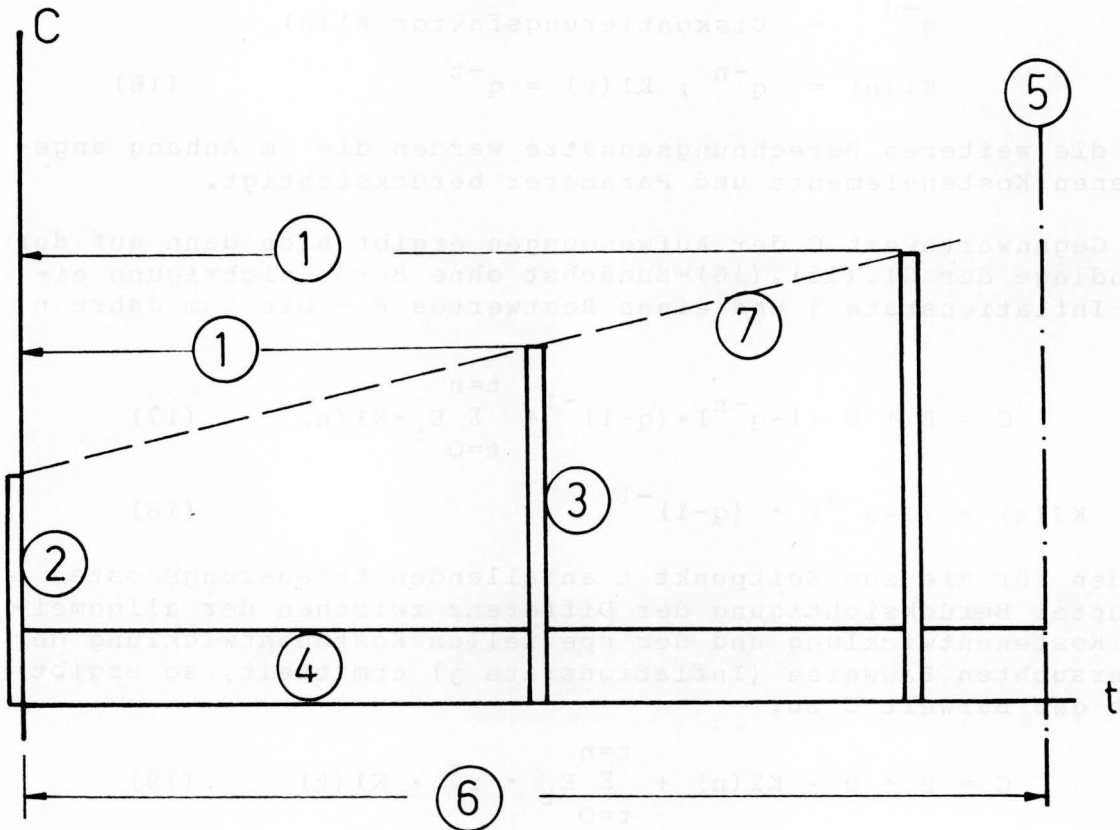


Bild 9 Schema der Diskontierungsmethode

Da außer den in der Kosten-Nutzen-Analyse üblichen Rechenverfahren Besonderheiten der Deckwerksbauweisen zu berücksichtigen sind, werden in Abweichung von den Rechenansätzen des K-N-Kompandiums /1/ erweiterte Berechnungsansätze /10-12/ verwendet. Grundlage bildet das Basis-Strategiemodell der im Laufe der Zeit  $t$  anfallenden Aufwendungen des Bildes 8.

4.1 Berechnungsansätze

Der Barwert C einer in Zukunft nach n Jahren fälligen Zahlung G ergibt sich aus

$$C = G \cdot \frac{1}{(1+i)^n} = G \cdot q^{-n} \quad (15)$$

i = Zinsfuß

$q^{-n}$  = Diskontierungsfaktor  $K1(n)$

$$K1(n) = q^{-n} ; K1(t) = q^{-t} \quad (16)$$

Für die weiteren Berechnungsansätze werden die im Anhang angegebenen Kostenelemente und Parameter berücksichtigt.

Der Gegenwartswert C der Aufwendungen ergibt sich dann auf der Grundlage der Gl. (15), (16) - zunächst ohne Berücksichtigung einer Inflationsrate j und eines Restwertes R - bis zum Jahre n zu:

$$C = B + U (1 - q^{-n}) \cdot (q-1)^{-1} + \sum_{t=0}^{t=n} E_t \cdot K1(n) \quad (17)$$

$$K2(n) = (1 - q^{-n}) \cdot (q-1)^{-1} \quad (18)$$

Werden für die zum Zeitpunkt t anfallenden Erneuerungskosten  $E_t$  unter Berücksichtigung der Differenz zwischen der allgemeinen Kostenentwicklung und der speziellen Kostenentwicklung der untersuchten Bauweise (Inflationsrate j) ermittelt, so ergibt sich der Barwert C zu:

$$C = B + U \cdot K2(n) + \sum_{t=0}^{t=n} E_t \cdot r^t \cdot K1(t) \quad (19)$$

Wird innerhalb der Nutzungsdauer TN ein linearer Abbau des Gebrauchswertes des Deckwerks angesetzt, dann beträgt der Wert eines Deckwerks zum Zeitpunkt n:

$$R_n = B - \frac{n}{TN} (B - RN) \quad (20)$$

Daraus ergibt sich ein anteiliger Barwert von:

$$C(R) = R_n \cdot K1(n) \cdot r^n \quad (21)$$

Aus den Gl. (19), (21) folgt dann:

$$C = B + U \cdot K2(n) + \sum_{t=0}^{t=n} E_t \cdot r^t \cdot K1(t) - R_n \cdot K1(n) \cdot r^n \quad (22)$$

In der späteren Analyse wird der Barwert C in vier Teil-Barwerten schrittweise berechnet:

$$C = C_1 + C_2 + C_3 - C_4 \quad (23)$$

$$C_1 = B$$

$$C_2 = U \cdot K_2(n)$$

$$C_3 = \sum_{t=0}^{t=n} E_t \cdot r^t \cdot K_1(t) \quad (24)$$

$$C_4 = R_n \cdot K_1(n) \cdot r^n$$

Da  $C_3$  und  $C_4$  jeweils nach Ablauf von  $t = TN$  Jahren Unstetigkeitsstellen aufweisen, sind in den Rechenansätzen weitere Annahmen erforderlich - s. Ziffer 4.3.

#### 4.2 Untersuchungszeitraum

Die in Ziffer 4.5 (Tab. 4) als vorläufige Richtwerte angenommenen Nutzungszeiten  $TN$  betragen bei den einzelnen Bauweisen zwischen 15 und 60 Jahren. Es wird daher erforderlich, die Basiswerte  $C$  der Bauweisen innerhalb eines Betrachtungszeitraums  $n$  zu untersuchen, der gleich oder größer als die einzelnen Nutzungszeiten  $TN_i$  ist.

Der Betrachtungszeitraum  $n$  muß dabei so gewählt werden, daß der gesamte Zeitraum zwischen der frühest und spätest möglichen Erneuerung und zumindest eine repräsentative Unterhaltungs-Periode erfaßt wird. Andererseits darf der Zeitraum nicht so groß gewählt werden, daß der darin zu erwartende technische und technologische Fortschritt und die Entwicklung des Verkehrs nicht mehr hinreichend übersehen werden können. Es muß somit ein Kompromiß getroffen werden. In Anlehnung an vergleichbare Untersuchungen im Straßenbau werden Barwerte  $C$  hier zunächst auf einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren bezogen.

#### 4.3 Restwert

Der Restwert  $R_n$  wird aus dem Gebrauchswert der Deckschicht ermittelt, wobei ein linearer Verlauf über die Nutzungszeit  $TN$  angenommen wird.

Aus der Gl. (5) folgt:

$$R_n = B_D - \frac{n}{TN} (B_D - R_N)$$

$$= B_D \left(1 - \frac{n}{TN} \left(1 - \frac{RN}{B_D}\right)\right) \quad (25)$$

Der Verhältnswert  $RN/B_D$  wird jeweils vorgegeben.

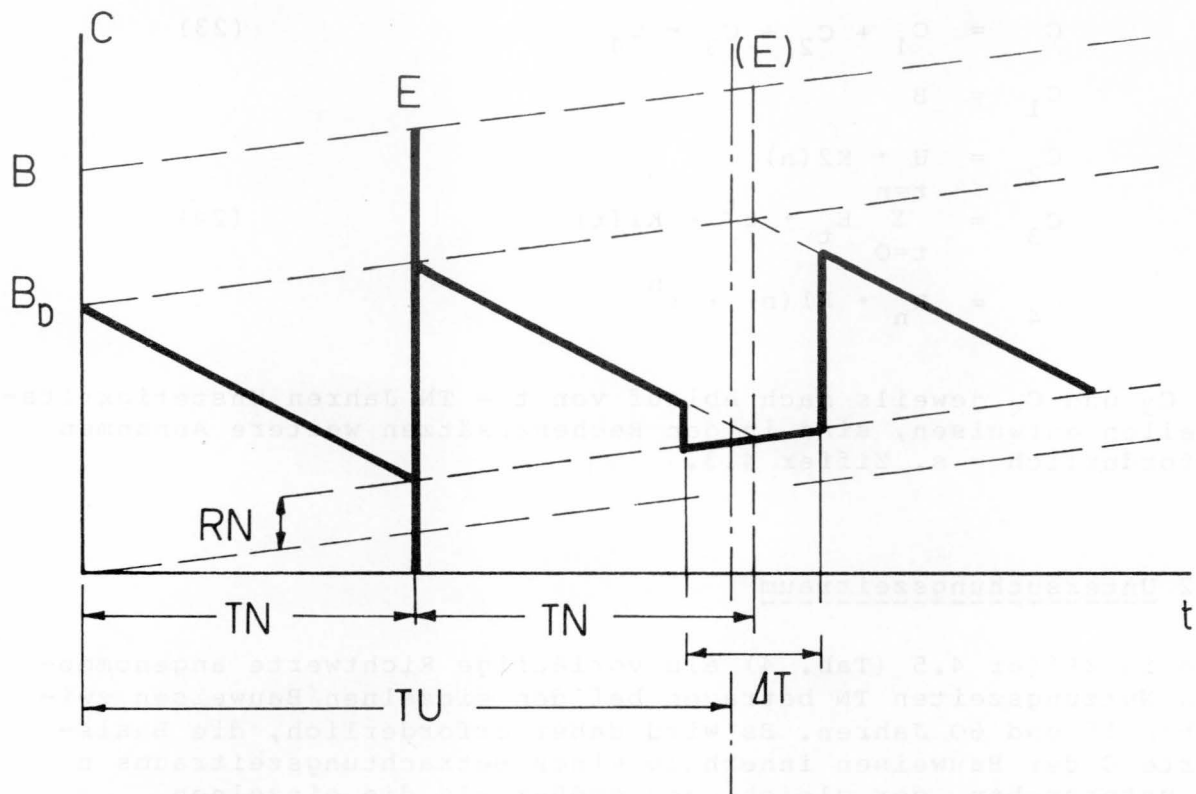


Bild 10 Schema des angenommenen Restwert-Verlaufs

Da nach dem gewählten Basismodell nach Intervallen von TN Jahren eine Erneuerung des Deckwerks aus Deck- und Filterschicht angenommen wird, wird der Gebrauchswert nach jeweils TN, 2·TN, 3·TN ... Jahren wieder auf den Ursprungszustand angehoben. Daraus folgt für den Restwert folgender Rechenansatz:

$$R_n = B_D \left( 1 - \left( 1 - \frac{RN}{B_D} \right) \right) \cdot \frac{\Delta t}{TN} \quad (26)$$

$$\Delta t = n - \left[ \frac{n}{TN} \right] \cdot TN$$

$$\left[ \frac{n}{TN} \right] = \text{ganzzahliger Anteil von } \frac{n}{TN}$$

$$\left[ \frac{n}{TN} \right] = \beta = \text{Dezimal-Anteil von } \frac{n}{TN}$$

$$R_n = B_D \left( 1 - \left( 1 - \frac{RN}{B_D} \right) \cdot \beta \right) \quad (27)$$

Der im Basis-Modell angenommene Verlauf des Gebrauchswertes bzw. der Einzel-Ausgaben E weist in Form einer Sägezahnlinie nach Intervallen von TN-Jahren jeweils Unstetigkeitsstellen

auf, indem bei  $t = TN$  z.B. der Gebrauchswert  $R_n$  zu gleicher Zeit

$$R_n (TN) = B_D$$

$$R_n (TN) = RN$$

ist. Für den Fall, daß der Untersuchungszeitraum  $n$  mit  $TN$  bzw. eines ganzzahligen Vielfachen von  $TN$  zusammenfällt, wird zur Umgehung dieser Unstetigkeitsstelle in der Rechnung eine Zeitlücke von

$$\Delta T = \Sigma TN - 1 \text{ bis } \Sigma TN + 1$$

eingeführt. Es wird angenommen, daß innerhalb dieser Zeitlücke  $\Delta T$  keine Erneuerungsmaßnahmen  $E$  angerechnet werden und der Restwert  $R_n$  gleich  $RN$  ist.

Bevor die Berechnung der Teil-Barwerte  $C_3$  und  $C_4$  erfolgt, wird im Rechengang daher vorab geprüft, ob der gewählte Untersuchungszeitraum  $n$  in die Zeitlücke  $\Delta T$  fällt. Fällt  $n$  in die Zeitlücke  $\Delta T$ , so werden die dort fälligen Erneuerungskosten  $E_{(t=n)}$  nicht auf  $C_3$  angerechnet. Der Restwert  $R_n$  wird zu  $RN$  angenommen:

$$(\Sigma TN) + 1 > n > (\Sigma TN) - 1 \quad (28)$$

$$E_{(t=n)} = 0$$

#### 4.4 Rechenprogramm

Für die Berechnung der Barwerte  $C$  nach der Grundgleichung (22) genügt ein einfaches Rechenprogramm, das mit einem Tischrechner des Typs HP-97 mit geringem Aufwand zu bewältigen ist.

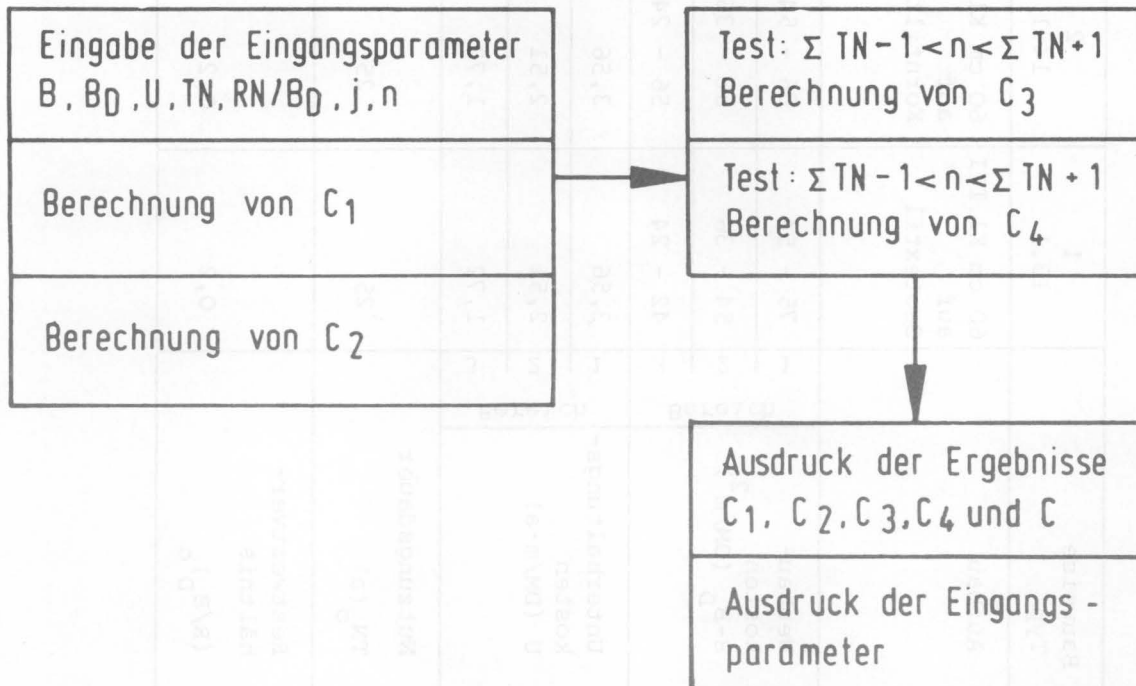


Bild 11 Flußdiagramm des Rechenprogramms

Tabelle 4 Richtwerte der ausgewählten Bauweisen

Bauweise Typ	1 13.1	2 14.1	3 3.1	4 4.1	5 5.1	6 22.1	
Aufbau	60 cm Kl.III auf Geotextil	60 cm Kl.III auf Kornfilter	40 cm Kl.II auf Geotextil mit Teilverguß	40 cm Kl.II auf Kornfilter mit Teilverguß	40 cm Kl.II auf Geotextil mit Vollverguß	14 cm Beton-Verbund- steine mit Edelstahl auf Geotextil	
Neubau- kosten $B-B_D$ (DM/m <sup>2</sup> )	Bereich 1 2 3	75 - 54	86 - 54	73 - 55	87 - 55	88 - 76	72 - 54
		54 - 36	68 - 36	61 - 43	75 - 43	76 - 64	72 - 54
		42 - 24	56 - 24	53 - 35	67 - 35	68 - 56	72 - 54
Unterhaltungs- kosten U (DM/m·a)	Bereich 1 2 3	3,56	3,56	0,99	0,99	0,68	0,88
		2,51	2,51	0,77	0,77	0,58	0,88
		1,72	1,72	0,63	0,63	0,50	0,88
Nutzungsdauer $TN_o$ (a)	25	25	40	40	60	30	
Restwertver- hältnis $(R/B_D)_o$	0,2	0,2	0,08	0,08	0,08	0	



#### 4.5 Ausgewählte Bauweisen

Zur Veranschaulichung der Wirtschaftlichkeitsrechnung werden aus den gegenwärtig im Verkehrswasserbau angewandten Uferdeckwerkskonstruktionen 6 Bauweisen ausgewählt, die für einen hinreichend repräsentativen Vergleich geeignet sind. Die dafür geltenden Richtwerte sind auf der Grundlage der zuvor für lose Steinschüttungen ermittelten Richtwerte und auf der Preisbasis von 1981/82 grob angenommen worden /7/. Sie sollten nicht ohne weitere Prüfung für Planungen oder konkrete Vergleiche übernommen werden.

Die Neubaukosten eines Deckwerks summieren sich aus den Preisen von Filterschicht ( $B_F$ ), Deckschicht ( $B_S, B_{VS}, B_B$ ) und ggf. vom Verguß ( $B_V$ ) einer Steinschüttung:

$$\begin{aligned}
 B_i &= B_F + B_S \\
 B_i &= B_F + B_S + B_V \\
 B_i &= B_F + B_{VS} \\
 B_i &= B_F + B_B
 \end{aligned}
 \tag{29}$$

Für die Umrechnung der auf die Flächeneinheit bezogenen Neubaukosten  $B_i$  ( $\text{DM/m}^2$ ) in die auf die Uferstrecke bezogenen Kosten wird bei allen Deckwerken einheitlich eine zu bedeckende Böschungslänge von 15 m zusätzlich einer 3 m breiten Fußvorlage verwendet:

$$L_D = 15 + 3 = 18 \text{ m}$$

#### 4.6 Vergleiche

Die auf die Gegenwart ( $t = 0$ ) bezogenen Barwerte  $C_i$  der zuvor ausgewählten Bauweisen 1 bis 6 werden zunächst mit folgenden Rechenannahmen ermittelt:

$$\begin{aligned}
 i &= 4 \% \\
 j &= 0 \% \\
 n &= 50 \%
 \end{aligned}$$

Ungeachtet der technischen Belastbarkeit und Brauchbarkeit der einzelnen Bauweisen ergeben sich Barwerte zwischen 1000 DM/m und 3000 DM/m, die auf den ersten Blick die Staffelung der Neubaukosten  $B_i$  widerspiegeln. Infolge der längeren Nutzungszeiten der verklammerten bzw. der voll vergossenen Steinschüttungen /7/ tritt jedoch im Gegensatz zu den Neubaukosten eine gegensätzliche Tendenz der Barwerte auf. Am Beispiel zweier in den Neubaukosten  $B_i$  etwa gleicher, aber in den Nutzungszeiten unterschiedlicher Lösungen wird deutlich, wie sich die längere Nutzungszeit auf die Barwerte auswirkt.

Tabelle 5 Vergleich der Bauweisen 2 und 3

Bauweise	2.2 (Bereich 1)	3.1 (Bereich 1)
Aufbau	40 cm lose Steinschüttung (3,0 t/m <sup>3</sup> ) Kl. II auf Kornfilter	40 cm verklammerte Steinschüttung (2,5 t/m <sup>3</sup> ) auf geotex. Filter
B/B <sub>D</sub> (DM/m <sup>2</sup> )	72,- / 40,-	73,- / 55,-
(DM/m)	1296,- / 720,-	1314,- / 990,-
U (DM/m)	3,63	0,99
RN/B <sub>D</sub> (-)	0,2	0,08
TN (Jahre)	25	40
C (DM/m)	$C_1 = 1296$ $C_2 = 78$ $C_3 = 486$ $C_4 = 20 (-)$ <hr/> $C = 1840$	$C_1 = 1314$ $C_2 = 21$ $C_3 = 274$ $C_4 = 11 (-)$ <hr/> $C = 1598$

An diesem Beispiel wird deutlich, daß die Barwerte C in erster Linie von den Neubaukosten ( $C_1$ ) und den nach Ablauf der Nutzungsdauer fälligen Erneuerungskosten ( $C_3$ ) bestimmt werden, während der Unterhaltungsaufwand ( $C_2$ ) und der Restwert ( $C_4$ ) von untergeordneter Bedeutung sind. Selbst für den Fall, daß kurz vor dem Untersuchungszeitpunkt  $t = n = 50$  eine Erneuerung stattfand, fällt der diskontierte Restwert infolge des kleinen Wertes für  $K_1(50) = 0,14$  nicht groß ins Gewicht.

#### 4.7 Sensitivitätsanalyse

Aufgabe der Sensitivitätsanalyse ist es, die Auswirkungen der bei der Festlegung der Eingangsdaten unumgänglichen Unsicherheiten zu ermitteln. Unter der Sensitivität wird daher die Empfindlichkeit der berechneten Barwerte  $C_i$  infolge Änderung eines oder mehrerer Eingangsparameter verstanden. Es soll hierbei untersucht werden, wie sich die Barwerte ändern und inwieweit sich die Eingangsparameter ändern dürfen, ohne daß das Ergebnis einen vorgegebenen Wert über- oder unterschreitet.

Bei der Sensitivitätsanalyse ist zwischen der Einfach- und Mehrfachvariation der maßgebenden Parameter zu unterscheiden. Bei der Einfachvariation wird nur jeweils ein Parameter unter Beibehaltung der übrigen Parameter verändert. Bei der Mehrfachvariation werden gleichzeitig mehrere Parameter verändert.

4.7.1 Mehrfachvariation

Ein Beispiel einer Mehrfachvariation der beiden Parameter Nutzungsdauer  $TN$  und Untersuchungszeitraum  $n$  ist für das Deckwerk A1 (Bereich 2) mit den Rechenannahmen  $i = 4 \%$ ,  $j = 0 \%$  in Bild 12 in Form eines 3-dimensionalen Diagramms dargestellt. Darin ist deutlich zu erkennen, daß der Barwert  $C$  der vorgegebenen Bauweise bei Variation von  $TN$  und  $n$  in erster Linie von der Nutzungsdauer  $TN$  bestimmt wird, deren kritischer Wert bei  $TN = 40$  Jahren liegt. Bei  $TN < 40$  nehmen die Barwerte erheblich zu, bei  $TN > 40$  ist eine stetige, langsame Abnahme der Barwerte zu erkennen. Der Einfluß des Untersuchungszeitraums  $n$  ist dagegen weitaus weniger ausgeprägt. Die Barwerte nehmen mit zunehmender Untersuchungszeit  $n$  allmählich zu. Diese Tendenzen werden noch ausgeprägter, wenn das gleiche Beispiel mit einer Inflationsrate  $j = 2 \%$  wiederholt wird. Die bei kleinen Nutzungszeiten  $TN < 40$  entstehende Barwertsteigerung wird infolge der angenommenen Inflationsrate von  $2 \%$  in Abhängigkeit von der Untersuchungszeit  $n$  noch verstärkt.

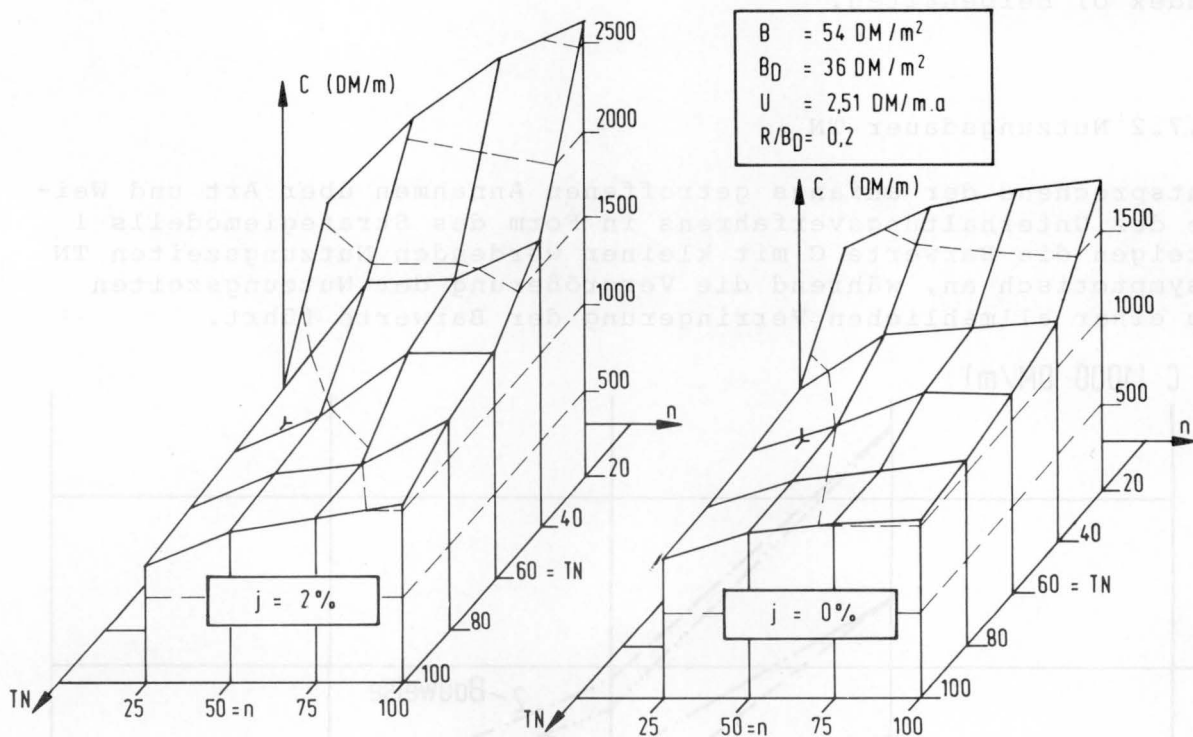


Bild 12 Mehrfachvariation von  $TN$  und  $n$

Die Mehrfachvariation ist in übersichtlicher Weise praktisch nur mit zwei gleichzeitig veränderlichen Parametern möglich und auch dann noch sehr aufwendig, so daß für den praktischen Gebrauch die Einfachvariation angewendet wird. Die beiden zuvor gezeigten Beispiele einer Mehrfachvariation zeigen zudem,

daß bei der hier zu untersuchenden Kostenstruktur von Deckwerken die wesentlichen Abhängigkeiten der Barwerte auch als Einfachvariation von  $n$  und  $TN$  verdeutlicht werden können. In den nachfolgenden Analysen werden deshalb nur Einfachvariationen angewendet.

Analysiert werden die folgenden Eingangsparemeter jeweils für den Bereich 2:

- Nutzungsdauer  $TN$
- Untersuchungszeit  $n$
- Unterhaltungsaufwand  $U$
- Restwert  $RN/B_D$
- Zinsfuß  $i$
- Inflationsrate  $j$

Während der Variation eines der angegebenen Parameter werden die übrigen Parameter entsprechend der Basis-Rechnung (mit dem Index 0) beibehalten.

#### 4.7.2 Nutzungsdauer $TN$

Entsprechend der anfangs getroffenen Annahmen über Art und Weise des Unterhaltungsverfahrens in Form des Strategiemodells 1 steigen die Barwerte  $C$  mit kleiner werdenden Nutzungszeiten  $TN$  asymptotisch an, während die Vergrößerung der Nutzungszeiten zu einer allmählichen Verringerung der Barwerte führt.

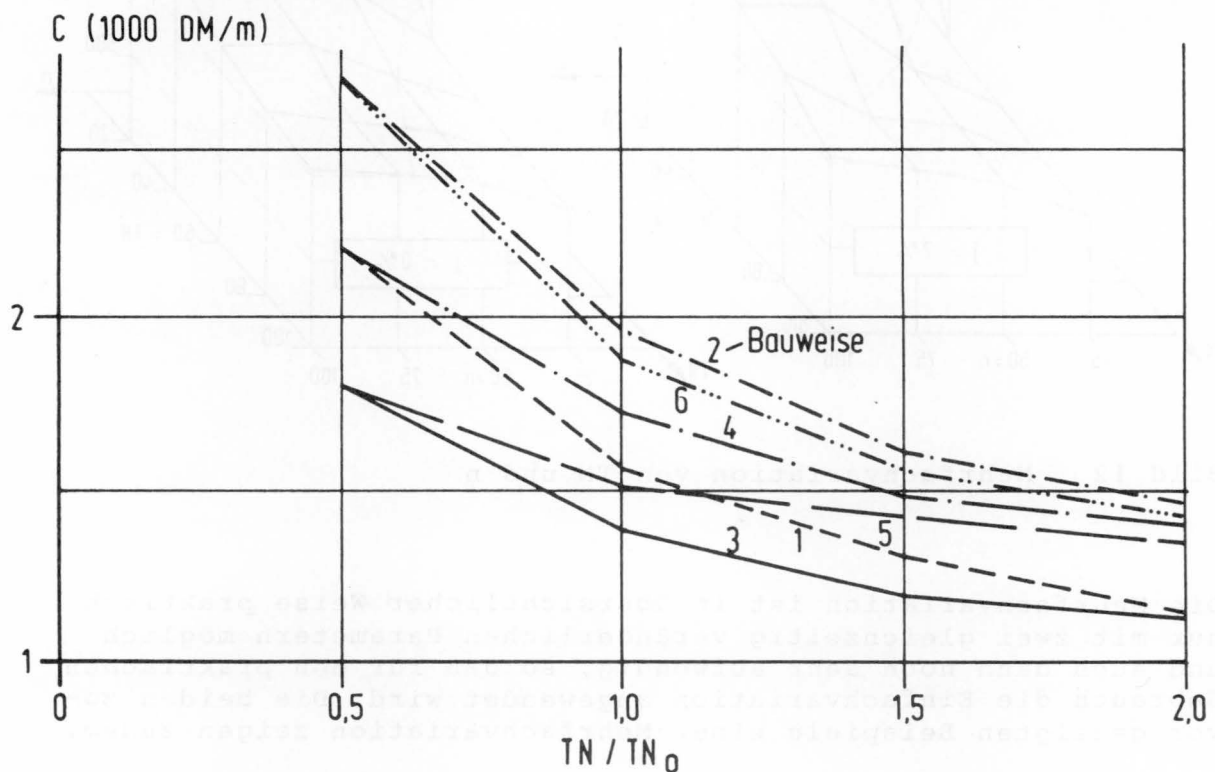


Bild 13 Variation der Nutzungsdauer  $TN$

Bei Betrachtung der jeweils kostengünstigsten Lösung fällt auf, daß in dem Anwendungsbereich 2 die Bauweise 3 die niedrigsten Barwerte ergibt. Wird die Frage dahingehend zugescharft, bei welcher Nutzungszeit die lose Steinschüttung (1) oder die verklammerte Steinschüttung (3) kostengünstiger ist bzw. bei welcher Nutzungszeit Kostengleichheit entsteht, ergibt sich aus dem Diagramm eine Kostengleichheit bei:

$$TN(1) = 1,4 \cdot TN_0 = 35 \text{ Jahre}$$

$$TN(3) = 1 \cdot TN_0 = 40 \text{ Jahre}$$

Wird die Nutzungszeit der Bauweise 3 verringert, so tritt Kostengleichheit bei folgenden Werten ein:

$$TN(1) = 1,1 \cdot TN_0 = 27,5 \text{ Jahre}$$

$$TN(3) = 0,85 \cdot TN_0 = 35 \text{ Jahre}$$

Diese Spannen der technisch möglichen Nutzungszeiten erscheinen als gerechtfertigt, wenn die Bauweise 1 technisch außergewöhnlich gut hergestellt und unterhalten wird und damit die Risiken beim Bau loser Steinschüttungen auf ein Minimum reduziert werden.

#### 4.7.3 Untersuchungszeitraum $n$

Der zuvor gewählte Untersuchungszeitraum von  $n_0 = 50$  Jahre wird für Verhältniswerte  $\beta_n$  von 0 bis 2 variiert.

Bei Verhältniswerten  $\beta_n < 1$  nehmen die Barwerte erheblich ab, da sich nach dem gewählten Modell einerseits die Kostenanteile aus der Erneuerung ( $C_3$ ) verringern und sich andererseits die Anteile aus dem Restwert ( $C_4$ ) vergrößern. Bei  $\beta_n > 1$  nehmen die Barwerte deutlich schwächer zu. Insgesamt ist jedoch festzustellen, daß der ursprünglich gewählte Zeitraum von  $n_0 = 50$  Jahren im Übergangsbereich beider Tendenzen liegt und damit hinreichend brauchbare Ergebnisse ermöglicht.

Der Vergleich der Kostenverhältnisse der einzelnen Barwerte der Bauweisen 1 bis 6 ergibt bei Variation von  $n/n_0$  keine wesentlichen Änderungen in den Kostenrelationen. Es fällt auf, daß sich die Kosten von 3 und 4 bei  $\beta_n > 1$  am deutlichsten stabilisieren und dadurch in der Rangfolge der kostengünstigsten Bauweisen zu Verschiebungen führen.

Beim Vergleich der beiden Bauweisen 1 und 3 zeigt sich, daß bei  $\beta_n < 1$  beide Bauweisen nahezu gleich teuer sind. Bei  $\beta_n > 1$  ist 3 günstiger als 1.

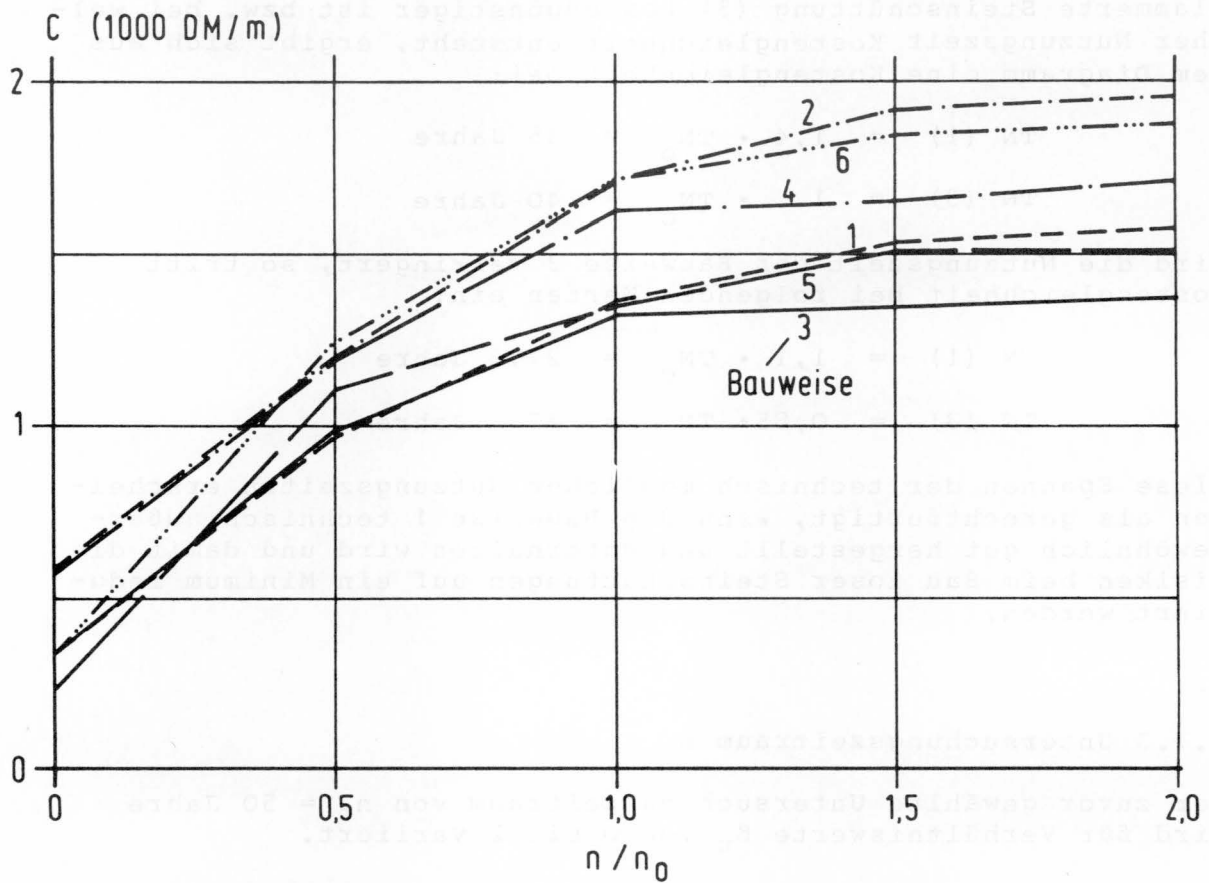


Bild 14 Variation des Untersuchungszeitraumes  $n$

#### 4.7.4 Unterhaltungsaufwand $U$

Die in der Basis-Rechnung angenommenen Unterhaltungsaufwendungen  $U_0$  werden in Verhältniszahlen  $\beta_U$  von 0 bis 10 variiert. Die Ergebnisse in der Abb. 15 zeigen, daß die Barwerte aller Bauweisen bei  $\beta_U < 1$  nahezu unverändert bleiben, während bei  $\beta_U > 1$  die Barwerte ansteigen. Sie nehmen auffallend stark zu bei den Bauweisen 1 und 2, so daß wiederum eine Änderung in der Rangfolge entsteht.

Der Vergleich der beiden Bauweisen 1 und 3 ergibt für Verhältniszahlen  $\beta_N > 1$ , daß sich die Barwerte von 1 mit zunehmendem Verhältnis  $\beta_N$  stärker vergrößern als die von 3.

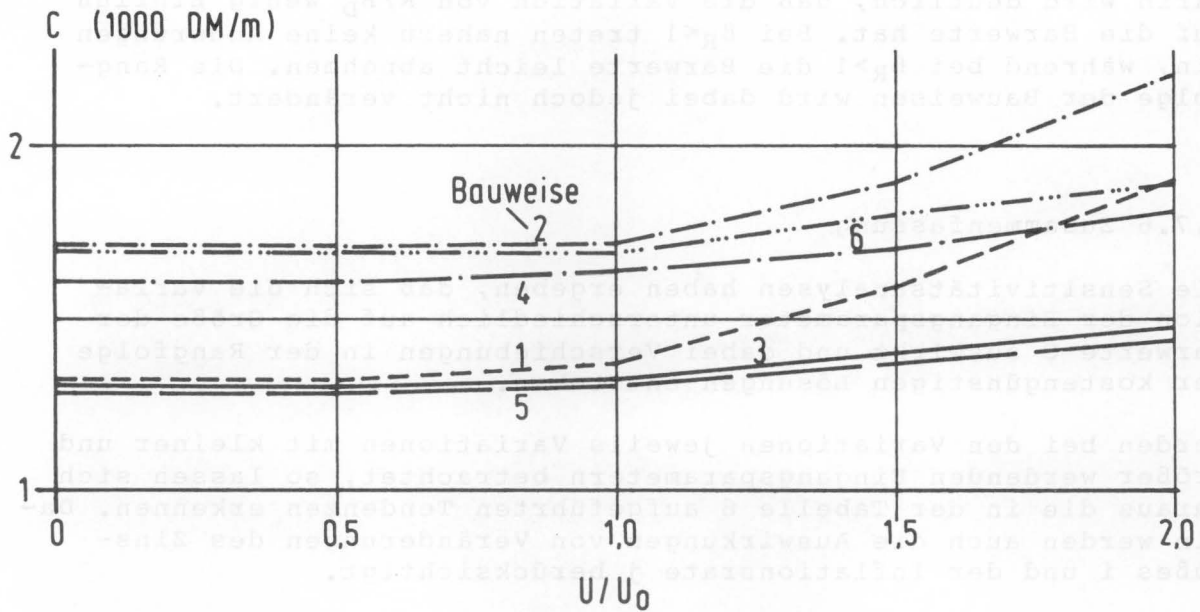


Bild 15 Variation des Unterhaltungsaufwandes  $U$

#### 4.7.5 Restwert $R$

In der Ziffer 4.6 wurden für die gewählten Bauweisen Verhältnisse  $R/B_D$  zwischen dem Restwert  $R$  und die Neubaukosten  $B_D$  der Deckschicht zwischen 0 und 0,2 gewählt.

Die Verhältniszerte  $\beta_R$  werden für die Bauweisen 1 bis 5 von 0,01 bis 12,5 variiert, wobei sich die obere Grenze mit  $R/B_D = 1$  ergibt. Die Ergebnisse sind in Bild 16 dargestellt.

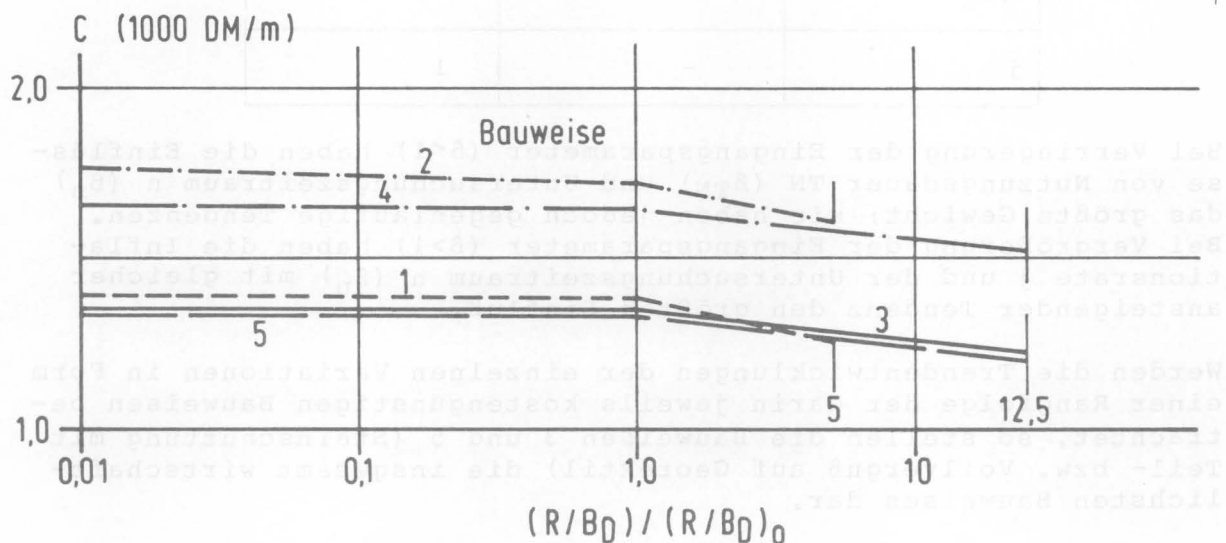


Bild 16 Variation des Restwertverhältnisses  $R/B_D$

Darin wird deutlich, daß die Variation von  $R/B_D$  wenig Einfluß auf die Barwerte hat. Bei  $\beta_R < 1$  treten nahezu keine Änderungen ein, während bei  $\beta_R > 1$  die Barwerte leicht abnehmen. Die Rangfolge der Bauweisen wird dabei jedoch nicht verändert.

#### 4.7.6 Zusammenfassung

Die Sensitivitätsanalysen haben ergeben, daß sich die Variation der Eingangsparameter unterschiedlich auf die Größe der Barwerte  $C$  auswirkt und dabei Verschiebungen in der Rangfolge der kostengünstigen Lösungen entstehen.

Werden bei den Variationen jeweils Variationen mit kleiner und größer werdenden Eingangsparametern betrachtet, so lassen sich daraus die in der Tabelle 6 aufgeführten Tendenzen erkennen. Darin werden auch die Auswirkungen von Veränderungen des Zinsfußes  $i$  und der Inflationsrate  $j$  berücksichtigt.

Tabelle 6 Tendenzen der Sensitivitätsanalyse

Variation von $\beta$	Rangfolge und Tendenz der Auswirkungen auf $C_1$	
	$\beta < 1$	$\beta > 1$
$TN/TN_0$	1	3
$n/n_0$	2	5
$U/U_0$	4 (5)	2
$(R/B_D)/(R/B_D)_0$	5 (4)	6
$i/i_0$	3	4
$j$	-	1

Bei Verringerung der Eingangsparameter ( $\beta < 1$ ) haben die Einflüsse von Nutzungsdauer  $TN$  ( $\beta_{TN}$ ) und Untersuchungszeitraum  $n$  ( $\beta_n$ ) das größte Gewicht; sie haben jedoch gegenläufige Tendenzen. Bei Vergrößerung der Eingangsparameter ( $\beta > 1$ ) haben die Inflationsrate  $j$  und der Untersuchungszeitraum  $n$  ( $\beta_n$ ) mit gleicher ansteigender Tendenz den größten Einfluß.

Werden die Trendentwicklungen der einzelnen Variationen in Form einer Rangfolge der darin jeweils kostengünstigen Bauweisen betrachtet, so stellen die Bauweisen 3 und 5 (Steinschüttung mit Teil- bzw. Vollverguß auf Geotextil) die insgesamt wirtschaftlichsten Bauweisen dar.



Die Wirtschaftlichkeitsrechnung liefert hinreichend verwertbare Ergebnisse, wenn folgende Randbedingungen angesetzt werden:

Untersuchungszeitraum  $n = 50$  Jahre

Zinsfuß  $i = 4 \%$

Inflationsrate  $j = 0 \%$

## 5 Schlußfolgerung

Die auf der Grundlage von an Uferdeckwerken aus losen Steinschüttungen ermittelten Verfahren und Aufwendungen zur Unterhaltung aufgestellter Richtwerte und Strategiemodelle ermöglichen eine praxisnahe Abschätzung des zu erwartenden Unterhaltungsaufwandes und der technischen Nutzungsdauer. Mit Hilfe der Diskontierungsmethode können die für Investition und Unterhaltung zu erwartenden Gesamtkosten unterschiedlich aufgebauter Deckwerkskonstruktionen ermittelt und miteinander verglichen werden. Die hierbei unumgänglichen Unsicherheiten in den Annahmen von Kosten, Verschleiß und Nutzungsdauer sollten jedoch bei der Anwendung der aufgezeigten Verfahren beachtet und möglichst durch die Aufnahme aktueller und örtlich maßgebender Daten gemindert werden. Besondere Bedeutung kommt bei der Wirtschaftlichkeitsrechnung den Investitionskosten ( $B$ ,  $B_D$ ) und der technischen Nutzungsdauer  $T_N$  zu, während die oft überschätzten Unterhaltungskosten im üblichen Rahmen keine entscheidende Rolle spielen.

Aufgabe der vorliegenden Untersuchung war es jedoch nicht, Kostenvorteile der einen oder anderen Bauweise herauszuarbeiten. Hierfür sind von Fall zu Fall die örtlichen Gegebenheiten im Detail zu erfassen und in den Eingangsparametern zu berücksichtigen. Sinn und Zweck war es vielmehr, die für die Wirtschaftlichkeitsberechnung maßgebenden Strategiemodelle, Rechenansätze und Eingangsparameter anzugeben und anhand exemplarischer Berechnungen und Analysen das Vorgehen aufzuzeigen.

6 Schrifttum

- /1/ Bundesminister für Verkehr : Kompendium Kosten-Nutzen-Analysen für Investitionen an Binnenschiff-fahrtsstraßen. Bonn 1981, Teil I - IV, unver-  
öffentlicht
- /2/ Graewe, H. : Der zweckmäßige Querschnitt von Binnenschiffahrtskanälen der Was-  
serstraßenklasse IV. Dr.-Ing. Diss., 1967, RW Techn.  
Hochschule
- /3/ Helm, K., Wöltinger, O. : Untersuchung der Beziehung zwischen einerseits der Querschnittsgestalt, der Bodenbeschaffenheit, der Art der Auskleidung und der Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten in einem Wasserlauf, und andererseits dem Fahrwiderstand, dem Wirkungs-  
grad der Schrauben und den zulässigen Geschwindigkeiten der Schiffe in Bezug auf die Unterhaltungskosten des Wasserlaufs. Deutsche Berichte zum XVIII. Inter-  
nationalen Schifffahrtkongreß, Rom 1953, S. 97 - 128
- /4/ Kienbaum Unternehmensbera- tung : Untersuchung über den zweckmäßigen Transport und Einbau von Schütt-  
steinen bei Unterhaltungsarbeiten an Binnenwasserstraßen, 1968 -  
unveröffentlicht
- /5/ Knieß, H.-G. : Bemessung von Schüttsteindeckwer-  
ken im Verkehrswasserbau - Teil 1: lose Steinschüttungen. Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (1977) Nr. 42, S. 40 - 70
- /6/ Knieß, H.-G. : Unterhaltungsaufwand an Uferdeck-  
werken aus losen Steinschüttungen. BAW-Bericht O1 3033 vom 10.11.1981 -  
unveröffentlicht
- /7/ Knieß, H.-G. : Studie zu Wirtschaftlichkeitsbe-  
rechnungen an Uferdeckwerken von Wasserstraßen. BAW-Bericht O1 3033 vom 13.11.1981 -  
unveröffentlicht

- /8/ Knieß, H.-G.,  
Köhler, H.-J. : Stabilität loser Steinschüttungen,  
Modellversuche im Maßstab 1:1,  
BAW-Bericht 11 3047 vom 22.12.1981  
- unveröffentlicht
- /9/ Seiler, E. : Die Ermittlung des Anlagenwertes  
der bundeseigenen Binnenschiff-  
fahrtsstraßen und Talsperren und  
des Anteils der Binnenschifffahrt  
an diesem Wert.  
Mitteilungen des Institutes für  
Wasserwirtschaft, Grundbau und  
Wasserbau der TH Stuttgart, 1967,  
Heft 6
- /10/ Schmuck, A. : Einflußgrößen, Berechnungsansätze  
und Sensitivitätstests für die  
Straßenbaulastträgerkosten im  
Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbe-  
rechnungen für Straßenbefestigun-  
gen.  
Schlußbericht zum Forschungsauf-  
trag 9.020 G 77 M des BMV vom  
15.05.1978 - unveröffentlicht
- /11/ Schmuck, A. : Erweiterung von Berechnungsan-  
sätzen und Sensitivitätstests so-  
wie Entwicklung von Verhaltens-  
und Managementmodellen als Grund-  
lagen der Wirtschaftlichkeitsbe-  
rechnung für Straßenbefestigungen.  
Schlußbericht zum Forschungsauf-  
trag 9.022 G 78 M des Bundesmini-  
sters für Verkehr, 15.11.1979
- /12/ Schmuck, A. : Exemplarische Anwendung der In-  
vestitionsrechnung auf praxisnahe  
Aufgabenstellungen.  
Schlußbericht zum Forschungsauf-  
trag 9.032 G 80 M des Bundesmini-  
sters für Verkehr vom 30.11.1980
- /13/ Steinmatz, Fr. : Uferschutzwerke des Dortmund-Ems-  
Kanals.  
Die Bautechnik 37 (1960), S. 81
- /14/ Westhaus, H.H. : Der Strukturwandel in der Binnen-  
schifffahrt und sein Einfluß auf  
den Ausbau der Binnenschifffahrts-  
kanäle.  
Mitteilungen des Instituts für  
Wasserwirtschaft, Grundbau und  
Wasserbau der Universität Stutt-  
gart, 1969, Heft 13

- /15/ WSD Würzburg : Unterhaltungskosten am Main für Böschungen mit Steinbewurf in den Jahren 1960 - 1964.  
Würzburg 01.04.1968 - unveröffentlicht
- /16/ WSD Nord : Die Systemwertanalyse zur Beurteilung der bisher am Nord-Ostsee-Kanal angewandten Deckwerksbauweisen.  
Nord-Ostsee-Kanal, Heft 40/1980, S. 27 - 46
- /17/ WSD West : Ausbau des Wesel-Datteln-Kanals, Strecke Flaesheim-Ahsen, Ausbildung des Uferdeckwerks und Wirtschaftlichkeit der Verklammerung.  
Bericht der WSD West vom 28.08.80 - unveröffentlicht

## 7 Begriffe / Definitionen

### 7.1 Deckwerk

d	Dicke der Deckschicht
$d_o$	Dicke der Deckschicht nach Neubau bzw. Instandsetzung
D	Steinlänge nach TLW
$D_{100}$	größte Steinlänge einer Steinschüttung
$D_r$	repräsentative Steinlänge

### 7.2 Verkehr

G	Güteraufkommen (Mio t/a)
N	Schiffsdurchgänge /a
L	Leistungsvermögen (tkm)
$P_m$	mittlere Tragfähigkeit

### 7.3 Unterhaltung

Q	Steinmenge im Wasserwechselbereich ( $6 \text{ m}^2/\text{s}$ ) in (t)
W	Gebrauchswert des Deckwerks (= d)
$q_{A,i}$	durchschnittlicher Unterhaltungsaufwand (= Verschleiß) (t/m·a) in der Strecke i
$q_{B,i}$	durchschnittlich maximaler Unterhaltungsaufwand (= Verschleiß) (t/m·a) in der Strecke i
$\Delta T$	Instandsetzungsintervall (a)
$T_E = T_N$	Erneuerungsintervall (a) = Nutzungsdauer (a)

### 7.4 Wirtschaftlichkeitsrechnung

B	Baukosten (DM/m)
$B_D$	Kosten der Deckschicht (DM/m)
U	Unterhaltungs-/Instandsetzungskosten (DM/m·a), die in der Praxis zwar intervallmäßig in Form von Instandsetzungskosten I im Jahr t anfallen, hier aber als gleichmäßige Unterhaltungskosten in DM/Jahr eingesetzt werden
$E_t$	Erneuerungskosten im Jahr t
TN	Nutzungsdauer (Jahre)

$R_t$	Restwert im Jahr $t$
$R_N$	Restwerte nach Ablauf der Nutzungszeit $T_N$
$t$	Zeitkoordinate
$n$	Betrachtungszeitraum
$i$	Zinsfuß (%)
$q$	$(1 + i)$
$j$	Inflationsrate (%) als Differenz zwischen allg. Kostenentwicklung und speziellem Kostentrend einer Bauweise
$r$	$(1 + j)$
$C$	Barwert (DM/m) aller auf die Gegenwart bezogenen Ausgaben $C = C_1 + C_2 + C_3 - C_4$
$C_1$	Neubaukosten (B)
$C_2$	Unterhaltungs-/Instandsetzungskosten (U/I)
$C_3$	Erneuerungskosten (E)
$C_4$	Restwert (R)
$\beta_{TN}$	$TN/TN_0$
$\beta_n$	$n/n_0$
$\beta_U$	$U/U_0$
$\beta_R$	$(R/B_D)/(R/B_D)_0$
$\beta_i$	$i/i_0$
$\beta_j$	$j/j_0$