

Eine theoretische Betrachtung über Sandvorspülungen mit Wiederholungsintervallen

Von ALFRED FÜHRBÖTER

Zusammenfassung

Es wird zunächst gezeigt, daß sich unter der Annahme einer im langjährigen Mittel konstanten Wellenbelastung der Abbau einer Sandvorspülung nach einem Exponentialgesetz vollzieht, das analog zu der Kernphysik durch eine Halbwertszeit ausgedrückt werden kann. Aus diesem Exponentialgesetz folgt, daß bei Wiederholungsintervallen – langjährig gesehen – der kleinste mittlere Massenbedarf mit den kürzesten Wiederholungsintervallen und den damit verbundenen kleinsten Vorspülmengen erhalten wird. In der Praxis sind hier Grenzen gesetzt, die diskutiert werden.

Summary

Under the assumption that the local longterm wave climate is constant it is shown that the decay of beach nourishments follows the same exponential law like that known from nuclear physics with the definition of a half-life period. The mathematical subsequence is that the lowest longterm demand for beach supply exists for repetitions of nourishments with the shortest repetition intervals with which besides the lowest masses are connected. For practical applications, however, here limitations exist which are discussed.

Inhalt

1. Einleitung und Aufgabenstellung	241
2. Theoretische Überlegungen über den Massenbedarf	242
2.1 Exponentialgesetz, Halbwertszeit und Wiederholungsintervall	242
2.2 Abweichungen vom Exponentialgesetz	249
3. Nachweis des Exponentialgesetzes durch Naturmessungen	251
4. Folgerungen und Ausblick	253
5. Schriftenverzeichnis	254

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Für die Optimierung von Wiederholungsvorspülungen besteht die Frage, mit welchen Wiederholungsintervallen und mit den damit verbundenen Vorspülmengen die wirtschaftlichste Form einer solchen Küstenverteidigung erreicht werden kann. Die vorliegende theoretische Betrachtung zeigt, wie unter Verwendung eines theoretischen Ansatzes (Exponentialgesetz und Halbwertszeit) diese Frage quantitativ beantwortet werden kann.

Es sei darauf hingewiesen, daß in der vorliegenden Arbeit nur diejenigen Massen berücksichtigt werden, die nach einer Vorspülung auf dem Strande abgelagert und die dort durch ein entsprechendes Aufmaß erfaßt werden; die Fragen der sog. Spülverluste während des Einbauverfahrens werden nicht behandelt.

2. Theoretische Überlegungen über den Massenbedarf

2.1 Exponentialgesetz, Halbwertszeit und Wiederholungsintervall

Den folgenden Betrachtungen liegen zwei Annahmen zugrunde:

- Es wird angenommen, daß die angreifende Wellenenergie im zeitlichen Mittel annähernd konstant bleibt. Damit ergibt sich bei natürlichen Strandverhältnissen eine konstante Verlustrate Q_{\min} (z. B. als Q_a in m^3 je Jahr und lfm Strand); es kann die Zeit t als lineare Interpretation der Summe der angreifenden Wellenenergie verwendet werden.
- Es wird eine zweidimensionale Behandlung mit einem Regelprofil vorgenommen, dessen Massenverhältnisse als repräsentativ für die gesamte Länge der Vorspülung angesehen werden können.

Eine schematische Darstellung einer solchen Strandvorspülung zeigt Abb. 1. Die Breite der Strandvorspülung ist durch die Strecke Δx zwischen x_1 und x_2 gegeben; der Punkt x_1 bezeichnet den Fuß der Düne, des Kliffes oder der Ufermauer als landseitige Begrenzung, der

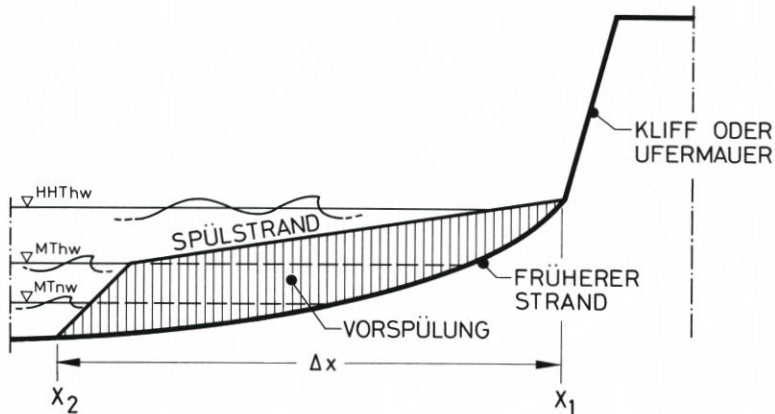


Abb. 1: Strandvorspülung (schematisch)

Punkt x_2 das seeseitige Ende der Vorspülung oder eine bestimmte Tiefenlinie, auf die das Aufmaß der Spülmassen bezogen wird.

Eine Vorspülung weist nach ihrer Fertigstellung i. a. einen flachen Strand (Spülstrand) oberhalb des Tidehochwassers bzw. des Mittelwassers und einen steileren Strand unterhalb dieses Horizontes auf. Nach Abb. 2 sind unmittelbar nach einer Vorspülung folgende Massen zu unterscheiden, die sich als Volumina V oberhalb eines (für das Aufmaß festzusetzenden) Horizontes auf der Breite Δx befinden; der Abschluß der Vorspülung wird mit dem Zeitpunkt $t = 0$ bezeichnet:

V_o = gesamte Masse, die sich auf der Strecke Δx oberhalb des Bezugshorizontes befindet (Zeitpunkt $t = 0$)

V_w = die Masse, die als Wiederholungsaufspülung aufgebracht wird (Zeitpunkt $t = 0$)

V_{\min} = die Masse, die als Minimalvolumen für den Schutz der Uferstrecke (Fußbedeckung einer Düne, eines Kliffes oder einer Uferbefestigung) erforderlich ist.

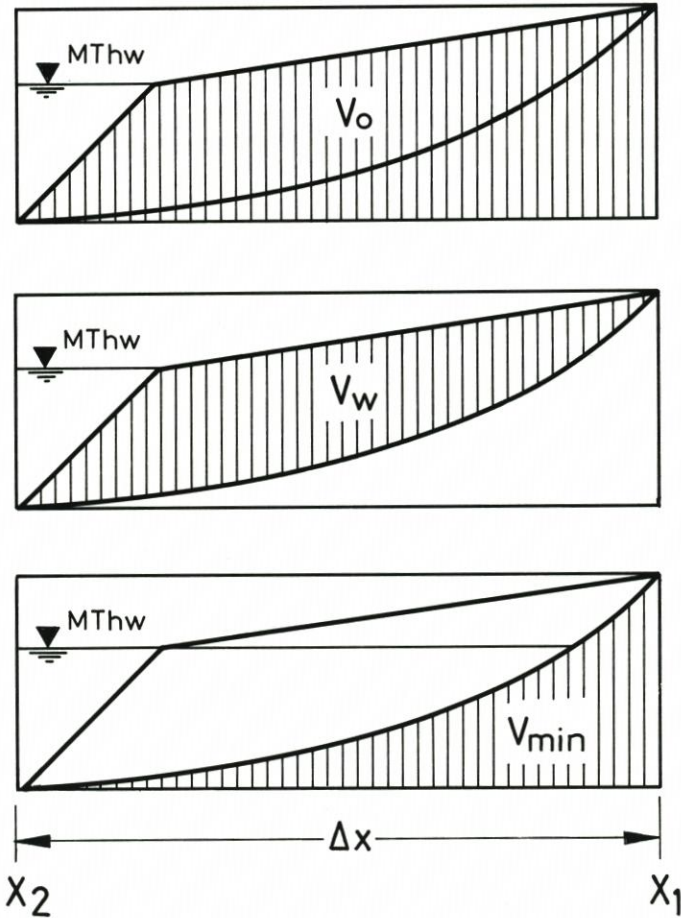


Abb. 2: Zur Definition der Volumina V_o , V_w und V_{min} unmittelbar nach einer Vorspülung (schematisch)

Es wird davon ausgegangen, daß eine Wiederholungsvorspülung spätestens zu dem Zeitpunkt erfolgen muß, an dem mit fortschreitendem Abbau des Vorspülvolumens V_w dieses Minimalvolumen V_{min} erreicht wird.

Das Strandprofil, das zu diesem Minimalvolumen V_{min} gehört, kann in erster Näherung als natürliches Strandprofil angesehen werden; die Zusatzmassen durch die Vorspülung stellen eine Störung dieses Ausgangsprofils dar. Wird jetzt angenommen, daß – bei zeitlich annähernd konstanter Wellenenergie – die zeitliche Abbruchrate dV im Zeitabschnitt dt linear proportional dieser Abweichung V vom natürlichen Strandprofil ist, so ergibt sich ein Exponentialgesetz für den zeitlichen Abbau der Vorspülungen, das mit der Definition der Halbwertzeit aus der Kernphysik beschrieben werden kann (FÜHRBÖTER 1974 und 1985; k_1 bedeutet eine Konstante, die von der Halbwertzeit abhängig ist):

$$dV = k_1 \cdot V \cdot dt \quad \dots (1)$$

Durch Integration ergibt sich dann das Volumen V als Funktion der Zeit t zu

$$V(t) = k_2 \cdot e^{k_1 \cdot t} \quad \dots (2)$$

$V(t)$ ist dabei nach Abb. 2 das gesamte Volumen oberhalb des Bezugshorizontes; es beträgt zum Zeitpunkt $t = 0$ (Aufmaß unmittelbar zum Abschluß der Vorspülung) nach Abb. 2:

$$V(t) = V_o \text{ für } t = 0$$

Daraus ergibt sich die Integrationskonstante k_2 zu

$$k_2 = V_o$$

Es ist dann

$$V(t) = V_o \cdot e^{k_1 \cdot t} \quad \dots (3)$$

Die Konstante k_1 ergibt sich nach der Definition der Halbwertzeit T_h aus der Bedingung, daß für die

$$\text{Halbwertzeit } T_h: V(t = T_h) = V_o/2$$

werden soll; es folgt daraus $k_1 = -\ln 2/T_h$ und es wird

$$V(t) = V_o \cdot 2^{\frac{-t}{T_h}} \quad \dots (4)$$

Diese Halbwertzeit ist eine Funktion des (mittleren) Wellenklimas und des Vorspülmaterials; sie nimmt mit zunehmender Wellenenergie ab und steigt mit zunehmendem Korndurchmesser des Strandmaterials. In gewissem Maße ist sie auch noch von der Form der Vorspülung abhängig; für eine gegebene Vorspülung kann sie aber als eine Konstante $T_h = \text{konst.}$ angesehen werden, wenn die Forderung nach einer im langzeitigen Mittel konstanten Wellenenergie erfüllt ist.

Das Anfangsvolumen V_o für $t = 0$ setzt sich aus dem Volumen der Wiederholungsvorspülung V_w und dem Minimalvolumen V_{\min} zusammen (Abb. 2):

$$V_o = V_w + V_{\min} \quad \dots (5)$$

Damit wird

$$V(t) = (V_w + V_{\min}) \cdot 2^{\frac{-t}{T_h}} \quad \dots (6)$$

Eine Wiederholungsspülung wird nötig, wenn

$$V(t) = V_{\min} \quad \dots (7)$$

wird; aus dieser Bedingung ergibt sich das erforderliche Wiederholungsintervall T_w aus der Gleichung

$$V_{\min} = (V_w + V_{\min}) \cdot 2^{\frac{-T_w}{T_h}} \quad \dots (8)$$

zu

$$T_w = \frac{T_h}{\ln 2} \cdot \ln \left(1 + \frac{V_w}{V_{\min}} \right) \quad \dots (9)$$

Das zu dem Wiederkehrintervall T_w erforderliche Vorspülvolumen V_w ist nach Gleichung (8):

$$V_w = V_{\min} \left(2^{\frac{T_w}{T_h}} - 1 \right) \quad \dots (10)$$

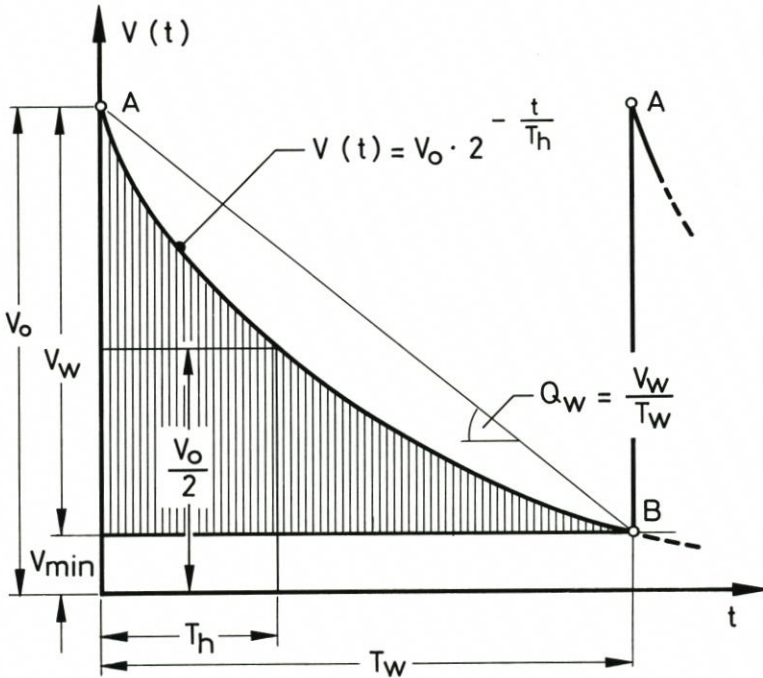


Abb. 3: Zeitliches Verhalten einer Vorspülung nach dem Exponentialgesetz

Auf Abb. 3 ist die Funktion $V(t)$ mit ihren Beziehungen zu dem gesamten Anfangsvolumen V_0 , dem Vorspülvolumen V_w und dem Minimalvolumen V_{\min} sowie zu der Halbwertszeit T_h und dem notwendigen Wiederholungsintervall T_w für $V(t) = V_{\min}$ dargestellt.

Aus der Gleichung (10) geht hervor, daß bei konstantem Minimalvolumen V_{\min} das erforderliche Volumen V_w einer Wiederholungsspülung allein von dem dimensionslosen Verhältnis des Wiederholungsintervalls T_w zu der Halbwertszeit T_h abhängt. Es kann dabei das gleiche Ziel – Erhaltung des notwendigen Minimalvolumens V_{\min} – sowohl durch eine größere Anzahl von Wiederholungen mit kleineren Vorspülmengen als auch durch eine geringe Zahl von Vorspülungen mit größeren Massen erreicht werden; Abb. 4 veranschaulicht das zeitliche Verhalten von Vorspülungen mit den dimensionslosen Verhältniswerten $T_w/T_h = 1, 2$ und 4 . Es geht aus Abb. 4 hervor, daß der mittlere Gesamtbedarf an Vorspülmassen offenbar abnimmt, wenn das Wiederholungsintervall T_w verkleinert wird.

Dieser – für langfristige Planungen sehr wichtige – mittlere Sandbedarf soll mit Q_w bezeichnet werden und ergibt sich aus dem Verhältnis der Vorspülmenge V_w zu dem Wiederkehrintervall T_w zu

$$Q_w = \frac{V_w}{T_w} \quad \dots (11)$$

Dies ergibt mit Gleichung (10):

$$Q_w = \frac{V_{\min}}{T_w} \left(2^{\frac{T_w}{T_h}} - 1 \right) \quad \dots (12)$$

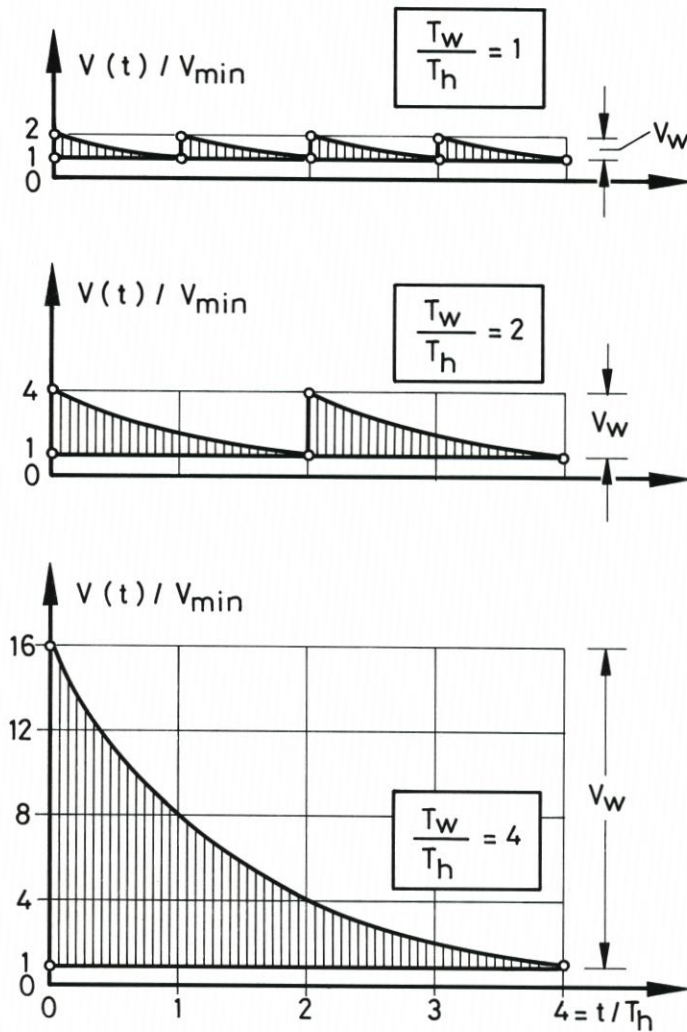


Abb. 4: Zeitliches Verhalten von Wiederholungsspülungen mit verschiedenen Wiederholungsintervallen T_w/T_h

Dieser mittlere Sandbedarf könnte z. B. mit $T_w = 1$ Jahr auf den Jahresbedarf bezogen werden. Aus einem Grenzübergang für $T_w \rightarrow 0$ kann aber auch die Abbruchrate bestimmt werden, die bei dem Minimalvolumen V_{\min} als Verlustrate Q_{\min} auftritt; es ist diese Verlustrate

$$Q_{\min} = \lim_{T_w \rightarrow 0} Q_w \quad \dots (13)$$

Dieser Grenzübergang liefert für Gleichung (12) zunächst einen unbestimmten Ausdruck der Form $Q_{\min} = 0/0$; nach L'HOSPITAL ergibt sich aber:

$$Q_{\min} = \lim_{T_w \rightarrow 0} V_{\min} \frac{2 \frac{T_w}{T_h} - 1}{T_w} = \lim_{T_w \rightarrow 0} V_{\min} \frac{\frac{\ln 2}{T_h} \cdot 2 \frac{T_w}{T_h}}{1}$$

$$= \ln 2 \cdot \frac{V_{\min}}{T_h}$$

Mit

$$Q_{\min} = \lim_{T_w \rightarrow 0} Q_w = \ln 2 \cdot \frac{V_{\min}}{T_h} \quad \dots (14)$$

ist die niedrigste Verlustrate gegeben, sie steigt linear mit dem Minimalvolumen V_{\min} und ist umgekehrt proportional der Halbwertszeit T_h .

Diese minimale Verlustrate Q_{\min} gibt denjenigen Sandbedarf an, durch den mit einer kontinuierlichen Materialzugabe die Verlustrate ständig kompensiert werden könnte.

Unabhängig von der Frage, ob diese kontinuierliche Materialzugabe technisch möglich oder sinnvoll ist, kann jetzt der langfristige mittlere Sandbedarf als Funktion des Wiederholungsintervalles T_w in dimensionsloser Form auf diesen Mindestbedarf bezogen werden; es kann durch die Funktion

$$\alpha = \frac{Q_w(T_w)}{Q_{\min}} \quad \dots (15)$$

festgestellt werden, wie groß der Mehrbedarf $Q_w(T_w)$ gegenüber dem Mindestbedarf Q_{\min} wird. Mit Gleichung (12) ergibt dies eine dimensionslose Funktion, die nur von dem ebenfalls dimensionslosen Verhältniswert T_w/T_h abhängt:

$$\alpha = \frac{2 \frac{T_w}{T_h} - 1}{\ln 2 \cdot \frac{T_w}{T_h}} \quad \dots (16)$$

Dieser Verhältniswert ist unabhängig von dem Minimalvolumen V_{\min} .

Auf Tafel 1 sind die dimensionslosen Verhältniswerte V_w/V_{\min} nach Gleichung (10) und α nach Gleichung (16) in Abhängigkeit von T_w/T_h angegeben; die grafische Darstellung dieser Funktionen zeigt Abb. 5. Aus Tafel 1 und Abb. 5 geht vor allem hervor, daß mit zunehmenden

T_w/T_h	V_w/V_{\min}	α
0	0	1
1	1	1,44
2	3	2,16
3	7	3,37
4	15	5,41
5	31	8,94

Tafel 1. Vorspülmengen V_w/V_{\min} und mittlerer Mehrbedarf α als Funktionen von T_w/T_h

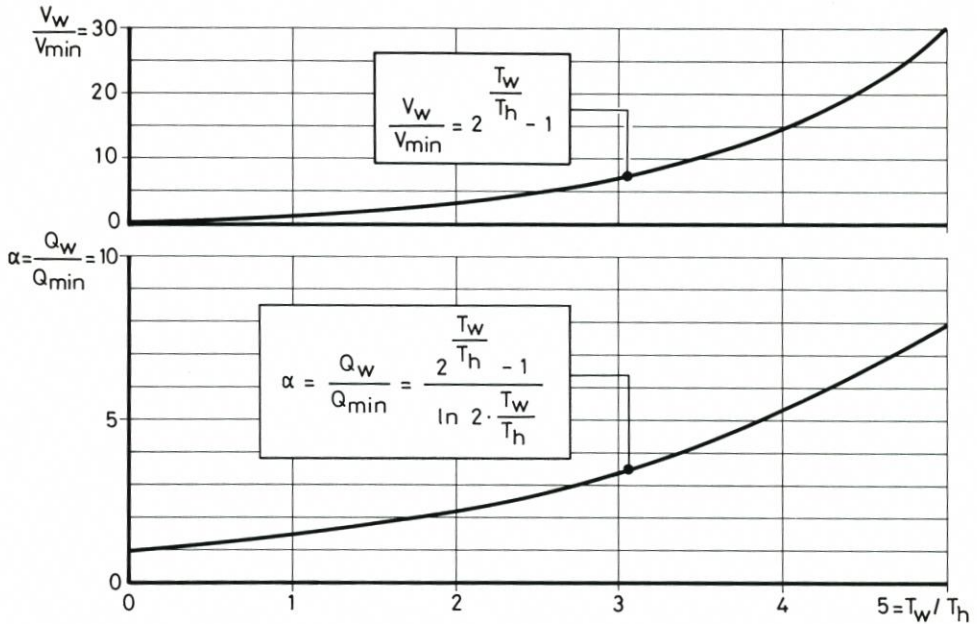


Abb. 5: Einfluß des dimensionslosen Wiederholungsintervalles T_w/T_h :
 oben: Zunahme der Vorspülmenge
 unten: Zunahme des mittleren Mehrbedarfes

dem Wiederholungsintervall sowohl die einzelnen Vorspülmengen als auch der mittlere Massenbedarf exponentiell ansteigen; wird ein Wiederholungsintervall T_w gewählt, das dem 5fachen der Halbwertzeit T_h entspricht, so steigt die Vorspülmenge auf das 31fache gegenüber einem Wiederholungsintervall von gleicher Größe wie die der Halbwertzeit $T_w/T_h = 1$, der mittlere Massenbedarf beträgt fast das 9fache des Minimalbedarfes nach Gleichung (14).

Wenn daher in einem Langzeitkonzept ein bestimmtes Minimalvolumen V_{\min} zum Schutz einer Küstenlinie – Düne, Kliff oder Uferschutzwerk – ständig vorgehalten werden soll und wenn dabei nur allein der mittlere Massenbedarf nach Gleichung (15) und (16) berücksichtigt wird, so zeigen die vorliegenden Betrachtungen eindeutig, daß nur das kürzeste Wiederholungsintervall den geringsten mittleren Massenbedarf erzeugt; der mögliche Mindestwert ergäbe sich mit dem Wiederholungsintervall $T_w = 0$ durch den Grenzwert nach Gleichung (14) mit $\alpha = 1$ zu

$$Q_{\min} = \ln 2 \cdot \frac{V_{\min}}{T_h} \quad \dots (14)$$

Dies entspricht, wie bereits erwähnt, einer kontinuierlichen Aufspülung, bei der die Verlustrate von V_{\min} ständig ersetzt wird.

Die wichtigste Folgerung dieser theoretischen Betrachtung ist daher, daß es allein vom mittleren Massenbedarf her keine Optimierungsmöglichkeiten bei Wiederholungsvorspülungen geben kann. Eine Optimierung muß daher nach baubetrieblichen oder auch nach anderen Gesichtspunkten (z.B. Störung durch den Spülbetrieb) vorgenommen werden (vgl. Abschnitt 4).

2.2 Abweichungen vom Exponentialgesetz

Auch wenn die Forderungen nach einer im langjährigen Mittel nahezu konstanten Wellenenergie und der Möglichkeit einer zweidimensionalen Betrachtung erfüllt sind, können unter bestimmten Umständen Abweichungen vom Exponentialgesetz auftreten, die sowohl negative als auch positive Änderungen der notwendigen Wiederkehrintervalle zur Folge haben können.

Abb. 6 zeigt Fälle, in denen eine Verkürzung des Wiederkehrintervalles T_w bewirkt wird. Abb. 6a zeigt das zeitliche Verhalten einer normalen Vorspülung nach dem Exponentialgesetz mit dem Wiederkehrintervall T_w . Abb. 6b zeigt schematisch das Verhalten einer Vorspülung

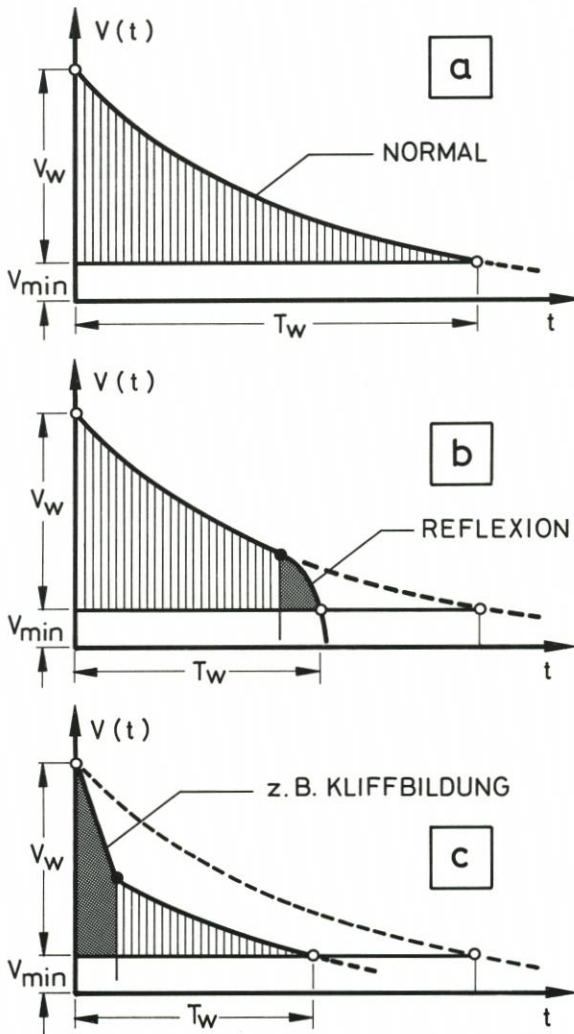


Abb. 6: Verkürzung des Wiederholungsintervalles T_w :

- Normales Verhalten nach dem Exponentialgesetz
- Verkürzung von T_w z. B. durch Reflexionen an einer Ufermauer
- Verkürzung von T_w durch hohe Anfangsverluste z. B. durch Kliffbildung

mit gleicher Vorspülmenge V_w , bei der aber mit der Unterschreitung eines bestimmten Volumens, z. B. durch Reflexionen vor einer Ufermauer, der Strandrückgang beschleunigt wird, was eine Verkürzung des Wiederkehrintervalles T_w bedeutet; es ist in diesem Falle das Mindestvolumen V_{min} zu gering bemessen. Während hier der beschleunigte Abbruch gegen Ende des Wiederkehrintervalles erscheint, ist dies auf Abb. 6c bereits zu Anfang der Fall, wenn nämlich durch eine ungünstige Form der Vorspülung hohe Anfangsverluste (die nicht mit den Spülverlusten während des Einbaues verwechselt werden dürfen) auftreten. Dies kann z. B. durch eine Kliffbildung bei zu breitem und zu hohem Spülstrand verursacht werden. Durch die auch hier entstehenden Reflexionen werden sowohl durch den Quer- als auch durch den Längstransport bei gleicher Wellenenergie wesentlich größere Massen als bei einem normalen Strand abgetragen; die lineare Beziehung zwischen Volumen und Verlust nach Gleichung (1) ist hier nicht mehr erfüllt.

Auf der anderen Seite kann auch bei gleichem Einbauvolumen durch geeignete Einbauverfahren eine Verlängerung des Wiederholungsintervalles erreicht werden. Eine solche Baumaßnahme stellt z. B. die Anlage eines Depots (Abb. 7) unmittelbar vor der zu schützen-

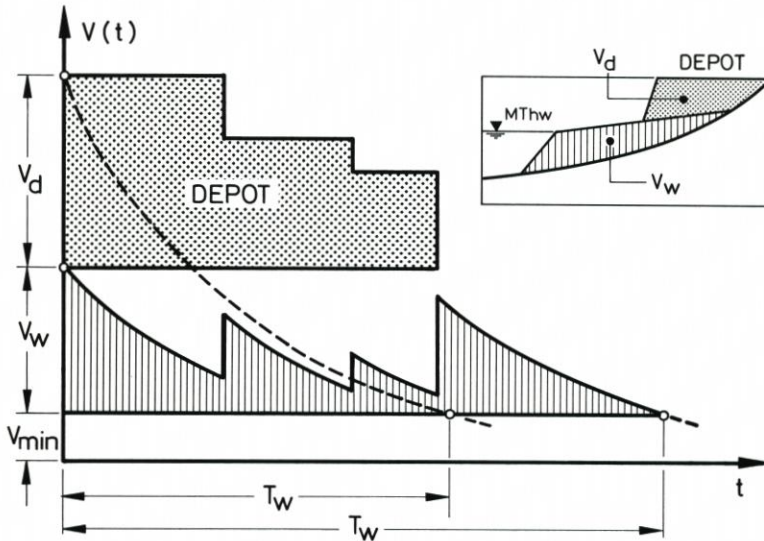


Abb. 7: Verlängerung des Wiederholungsintervalles T_w durch Anlage eines Depots (schematisch)

den Küstenlinie dar (Düne, Kliff) (vgl. FACHPLAN KÜSTENSCHUTZ SYLT 1985 des ALW HUSUM). Wenn der Fuß eines Depots in einer solchen Höhe angelegt wird, daß ein Abbruch dieses Depots nur bei höheren Sturmfluten eintreten kann, so wirken diese Abbruchmassen wie zusätzliche Wiederholungsspülungen und ergänzen die Vorspülmenge V_w , die unmittelbar auf den Strand aufgebracht wurde. Wie Abb. 7 schematisch zeigt, wird auf diese Art eine Verlängerung dieses Wiederholungsintervalles T_w gegenüber dem Fall erreicht, daß das Depotvolumen V_d zusammen mit der Spülmenge V_w auf den Strand aufgebracht wird (gestrichelte Linie auf Abb. 7). Besonders vorteilhaft wirkt sich dabei aus, daß diese Abbruchmasse aus dem Depot gerade zu den Zeitpunkten dem Strand zugutekommen, wo mit hohen Wellenenergien besonders hohe Verlustraten verbunden sind. Mit der Verlängerung des Wiederholungsintervalles wird hier eine Verringerung des mittleren Massenbedarfes erzeugt, weil die Depotabbrüche während des Wiederkehrintervalles wie kurzfristige Wiederholungsspülungen nach Gleichung (16) wirken.

3. Nachweis des Exponentialgesetzes durch Naturmessungen

Nach Daten des AMTES FÜR LAND- UND WASSERWIRTSCHAFT (ALW) HUSUM sind auf Abb. 8 und 9 für sechs Vorspülungen vor der Westküste der Insel Sylt die zeitlichen Massenentwicklungen dargestellt; für die drei Vorspülungen vor Westerland (1972, 1978 und 1984, Abb. 8 und 9) wurden dabei die Massen oberhalb eines Bezugshorizontes von NN - 4,0 m, für die Vorspülungen vor Rantum (1987), Hörnum (1986) und Kampen (1985) die Massen oberhalb des Bezugshorizontes NN - 1,0 m als $V(t)$ aufgemessen (Abb. 9).

Die Funktionen $V(t)$ sind auf Abb. 8 und 9 sowohl in linearer (= LIN) als auch in einfachlogarithmischer (= LOG) Darstellung aufgetragen; auf Abb. 9 sind außerdem die Volumina $V(t)$ in dimensionsloser Form auf das Anfangsvolumen V_0 für $t = 0$ nach Gleichung (4) bezogen. Es geht aus Abb. 8 und 9 hervor, daß der Abbau der Vorspülvolumina weitgehend dem Exponentialgesetz nach Gleichung (4) entspricht; dies drückt sich dadurch aus, daß bei allen Vorspülungen die Meßpunkte in den einfachlogarithmischen Auftragungen durch Geraden genähert werden können.

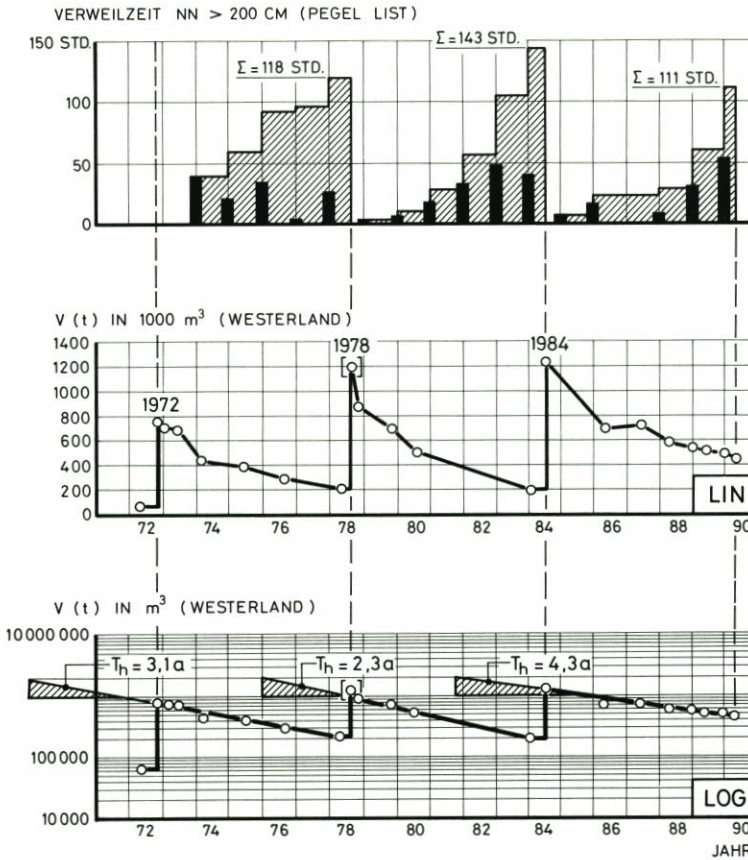


Abb. 8: Vorspülungen vor Westerland (Sylt):
 oben: Jährliche Verweilzeiten oberhalb NN + 200 cm am Pegel List
 Mitte: Vorspülvolumina als $V(t)$ in linearer Auftragung
 unten: Vorspülvolumina als $V(t)$ in logarithmischer Auftragung
 (Daten: ALW HUSUM)

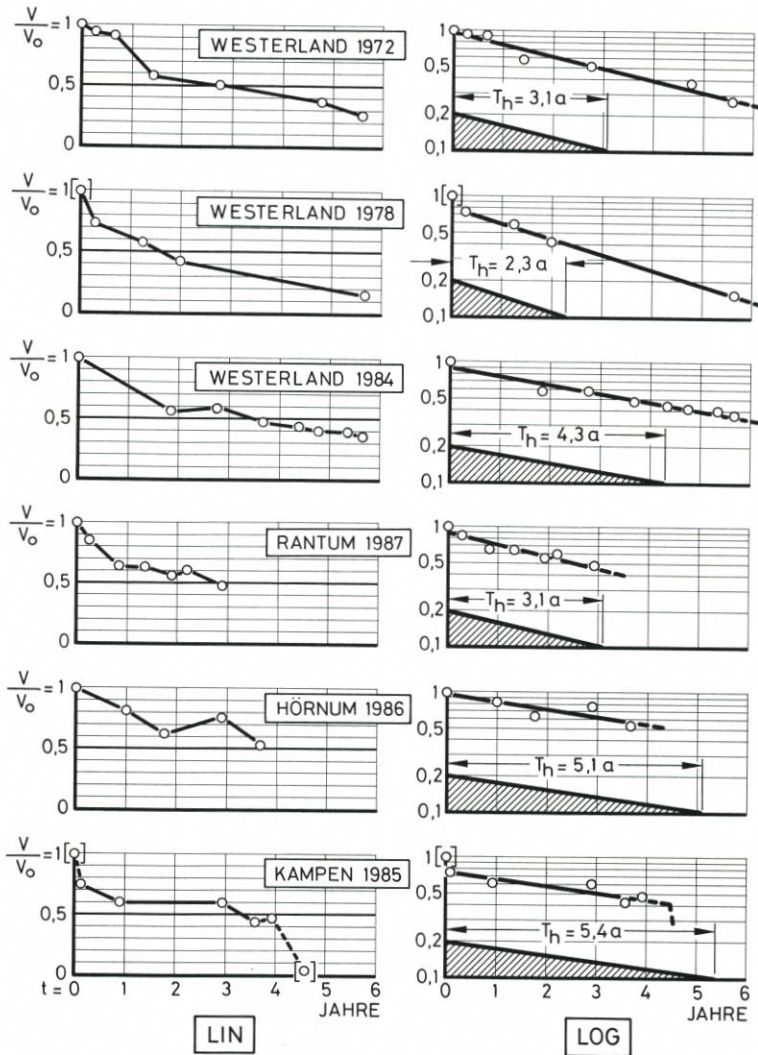


Abb. 9: Vorspülungen vor der Westküste von Sylt in dimensionsloser Darstellung:
 links: Vorspülvolumina $V(t)/V_0$ in linearer Auftragung
 rechts: Vorspülvolumina $V(t)/V_0$ in logarithmischer Auftragung
 (Daten: ALW HUSUM)

Abweichungen können damit erklärt werden, daß die Forderung einer zeitlich konstanten Wellenergie (vgl. Abschnitt 2.1) nicht streng erfüllt ist. Als Maß für die Wellenergie sind auf Abb. 8 die jährlichen Verweilzeiten oberhalb eines Indikatorhorizontes von NN + 200 cm am Pegel List sowie deren Summenfunktionen für die Vorspülungen vor Westerland aufgetragen; dies entspricht Wasserständen von etwa 1,3 m über MThw. Hier ist z.B. bei der Vorspülung von 1972 die starke Volumenabnahme durch die Sturmflutserien des Herbstes 1973 deutlich an dem Meßpunkt für 1974 zu erkennen.

Die Steigungen bzw. die Gefälle der Ausgleichsgeraden auf Abb. 8 und 9 stehen in einer linearen Beziehung zu den Halbwertzeiten, die ebenfalls auf Abb. 8 und 9 eingetragen sind;

sie liegen zwischen $T_h = 2,3$ Jahren (Westerland 1978) und $T_h = 5,4$ Jahren (Kampen 1985). Die großen Unterschiede in den Halbwertzeiten können teilweise durch die unterschiedlichen Wellenenergien erklärt werden; so ist die kurze Halbwertzeit der Vorspülung von 1978 vor Westerland mit der höchsten Summe der Verweilzeiten von 143 Std. oberhalb NN + 200 cm in dem Zeitraum von 1978 bis 1984 verbunden (Abb. 8). Bei der kurzen Verweilzeit von $T_h = 3,1$ Jahren bei der Vorspülung vor Rantum (1987) ist zu berücksichtigen, daß hier in der nur dreijährigen Beobachtungszeit die Sturmflutserien Anfang 1990 enthalten sind, die mit Verweilzeiten von rd. 53 Std. den Höchstwert der jährlichen Verweilzeiten seit 1900 (Beginn der Auswertungen) lieferten.

Außerdem aber sind auch Einflüsse nach Abschnitt 2.2 erkennbar. Bei der Vorspülung vor Westerland 1978 trat unmittelbar nach der Aufspülung als ein hohes Depot eine Kliffbildung auf (ANDRESEN et al., 1988), die nach Abb. 6c einen negativen Einfluß auf die Halbwertzeit bzw. auf das Wiederholungsintervall ausübt. Bei allen Vorspülungen vor Westerland sind außerdem bei erhöhten Wasserständen Reflexionen an den starren Uferschutzwerken wirksam, die nach Abb. 6b ebenfalls zu einer Verkürzung der Halbwertzeit (oder des erforderlichen Wiederholungsintervalles) führen. Dagegen wurden die Vorspülungen vor Rantum (1987), Hörnum (1986) und Kampen (1985) als Depotvorspülungen durchgeführt, was sich nach Abb. 7 positiv auf die Volumenentwicklung bemerkbar macht. Bei der Vorspülung vor Kampen (1985) kam es allerdings bei den Sturmflutserien von 1990 am Ende zu einer völligen Aufzehrung des Depots mit anschließender Kliffbrandung und Reflexion, wodurch ein starker Massenverlust entstand (Abb. 9, vgl. Abb. 6b).

Unabhängig von den örtlichen Besonderheiten sowie von den unterschiedlichen Sturmfluthäufigkeiten und Wellenenergien zeigen aber Abb. 8 und 9 durch die Möglichkeit der linearen Näherung in den einfachlogarithmischen Darstellungen die Gültigkeit des Exponentialgesetzes nach Gleichung (4) für die einzelnen Sandvorspülungen.

4. Folgerungen und Ausblick

Aus den vorstehenden Überlegungen geht hervor, daß eine Minimierung des langzeitigen Massenbedarfes nur durch möglichst kurzfristige Wiederholungsintervalle mit entsprechend geringen Vorspülmengen möglich ist; im Extremfall ist der geringste Massenbedarf dann vorhanden, wenn die entstehenden Verluste augenblicklich ausgeglichen werden. Wie bereits im Abschnitt 2.1 erwähnt, ist dieses weder technisch möglich noch sinnvoll. Auch Vorspülungen in Jahresintervallen (jeweils nach den sturmflutaktiven Wintermonaten) sind problematisch, auch wenn z. B. an eine stationäre Rohrleitung (Korrosion!) gedacht wird.

Wenn Wiederholungsvorspülungen im Ausschreibungsverfahren durchgeführt werden, muß die baubetriebliche Regel beachtet werden, daß der Einheitspreis um so höher wird, je geringer die Vorspülmenge ist. Dies hängt von den Festkosten der Baustelleneinrichtung ab, die wiederum eng mit dem Einbauverfahren (Vorspülung von der Landseite her oder Hopperbetrieb mit Übergabestation und anschließender Übergabeleitung usw.) abhängig sind; BRUUN (1991) schlägt Einbauverfahren mit relativ kleinen Geräten vor, bei denen auch bei geringen Vorspülmengen wirtschaftlich gearbeitet werden kann. Es müssen aber auch diejenigen Kosten berücksichtigt werden, die dem Auftraggeber für die Vorbereitung der Ausschreibung, für Bauaufsicht, Aufmaße usw. entstehen. Es können hier keine allgemeinen Regeln aufgestellt werden, sondern es ist von Fall zu Fall zu ermitteln, welche Mindestvorspülungen wirtschaftlich sind; die Ergebnisse nach Tafel 1 und Abb. 5 können dazu aber wichtige quantitative Entscheidungshilfen geben.

Da Wiederholungsvorspülungen meist an Orten mit starkem Fremdenverkehr stattfinden, muß auch die Störung des Strand- oder Badebetriebes als ernstzunehmender Faktor berücksichtigt werden.

Bei starren Uferschutzwerken, bei denen die Vorspülungen nur die Funktion einer Fußsicherung erfüllen müssen, ist eine erhebliche Verminderung des mittleren Massenbedarfes dadurch möglich, daß das Mindestvolumen V_{\min} auf das eben nötige Minimum beschränkt wird, weil sich dadurch bei gegebener Halbwertzeit die längsten Wiederholungsintervalle ergeben (Gleichung [9]).

Werden aber Wiederholungsvorspülungen zum Schutze abbruchgefährdeter Uferstrecken (Kliffstrecken oder Dünen) angelegt, so besteht hier immer das Risiko, daß durch extreme Sturmflutereignisse wie z. B. Anfang 1990 das Restvolumen einer Vorspülung ausgeräumt wird und es dann zu Abbrüchen kommt. Da diese Sturmflutereignisse nicht vorhergesagt werden können, muß hier immer eine gewisse Reserve z. B. als Depot bestehen (Abb. 7). Für die deutsche Nordseeküste ist es hier aber von Bedeutung, daß ein meteorologischer Zyklus von fünf bis sechs Jahren, auf den LAMB bereits 1975 aufmerksam machte, auch in den Sturmflutaktivitäten nachzuweisen ist (FÜHRBÖTER, 1976; SIEFERT, 1988; FÜHRBÖTER und TÖPPE, 1991). Eine Ausrichtung der Wiederholungsintervalle auf diesen Zyklus kann sinnvoll sein; auch hier liefern Tafel 1 und Abb. 5 quantitative Entscheidungshilfen dafür, mit welchem Mehrbedarf an Vorspülmengen diesem Risiko begegnet werden kann.

Schließlich sei noch darauf hingewiesen, daß durch die Form einer Vorspülung eine gewisse Beeinflussung der Halbwertzeit möglich ist (FÜHRBÖTER, 1985). Auf jeden Fall sollten Wiederholungsvorspülungen von regelmäßigen Aufmaßen begleitet sein, damit über die Bestimmung der Halbwertzeiten (vgl. Abb. 8 und 9) eine genauere Prognose des langfristigen Massenbedarfes ermöglicht werden kann.

5. Schriftenverzeichnis

- ALW Husum: Fachplan Küstenschutz Sylt. Amt für Land- und Wasserwirtschaft Husum, Husum, 1985.
- ANDRESEN, F. H., DETTE, H. H. und GÄRTNER, J.: Schutz sandiger Küsten durch Sandvorspülungen am Beispiel der Insel Sylt. Jahrbuch der Hafentechnischen Gesellschaft, 1987, 42. Band, 1988.
- BRUUN, P.: Optimum dredging procedures for the artificial nourishment of beaches. Journ. Dredging + Port Construction, Vol. XVIII, No. 1, Trade Publications Ltd., Redhill, Surrey, U.K., 1991.
- FÜHRBÖTER, A.: A Refraction Groyne Built by Sand. 14th Internat. Conference on Coastal Eng., Copenhagen, Dänemark, 1974, a) Summaries, Chapter 3.7-2, b) Proc., Vol. II, Chapter 85.
- FÜHRBÖTER, A.: Über zeitliche Änderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste. Mitt. des Leichtweiß-Instituts der Techn. Universität Braunschweig, Heft 51, 1976.
- FÜHRBÖTER, A.: Stabilität von Sandvorspülungen. Berichte von der 5. Nationalen Tagung für Ingenieurgeologie, Fachsektion Ingenieurgeologie, Herausgeber: Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V. und Deutsche Geologische Gesellschaft e.V., Kiel, 1985.
- FÜHRBÖTER, A. und TÖPPE, A.: Duration of Storm Tides at High Water Levels. UNESCO IHP, Storm Surges, River Flow and Combined Effects. Intern. Workshop „Storm '91“, April 1991, Hamburg.
- LAMB, H. H.: Remarks on the Current Climatic Trend and its Perspective. Proceedings WMO/IAMAP, Symposium on Long-Term Climatic Fluctuations, Norwich, August 1975.
- SIEFERT, W.: Einige Anmerkungen zur Sturmflutentwicklung im Nordsee-Küstengebiet. HANSA - Schifffahrt-Schiffbau-Hafen, 125. Jg., Nr. 20, 1988.