

Über den Sicherheitszuwachs im Küstenschutz durch eine zweite Deichlinie

VON ALFRED FÜHRBÖTER

Zusammenfassung

Es wird der relative Sicherheitszuwachs behandelt, der durch eine zweite Deichlinie hinter der Hauptdeichlinie erhalten wird. Dazu wird dargestellt, wie dieser Sicherheitszuwachs von den einzelnen Parametern wie Wasserständen, Deichhöhen, Kooggrößen, Wellenauflauf usw. abhängig ist; abschließend werden Vorschläge für Maßnahmen an den Hauptdeichen vorgelegt, die deren Bruchsicherheit erhöhen können.

Abstract

The topic deals with the relative increase of safety by means of a second dykeline behind the main seadyke. It is shown how this increase is dependent upon different parameters such as water levels, crest heights of the dykes, area of inundation between the two dyke lines, wave run-up. Finally recommendations are pointed out with respect to possible reinforcements at the main seadyke against total failure.

Inhalt

1. Einleitung und Aufgabenstellung	181
2. Zur Wahrscheinlichkeit von Deichbrüchen	183
2.1 Deichbruchgefahr eines Einzeldeiches	183
2.2 Sicherheitszuwachs durch eine Verkürzung der Deichlinie.	187
2.3 Sicherheitszuwachs durch eine Zweitdeichlinie.	188
3. Zur Überflutung eines Kooges	194
3.1 Zur Hydromechanik eines Deichbruches	194
3.2 Näherungslösungen für die Deichbruchfunktionen	197
3.3 Überschlagsrechnungen von Koogfüllungen	198
3.3.1 Abhängigkeit von der mittleren Überfallhöhe \bar{h} und der Verweilzeit	198
3.3.2 Abhängigkeit von der Koogfläche A und der Verweilzeit	200
4. Zum Seegang in einem überfluteten Koog	202
5. Sicherheitszuwachs durch Maßnahmen an der Hauptdeichlinie	204
6. Zusammenfassung	206
7. Schriftenverzeichnis	207

1. Einleitung und Aufgabenstellung

Es kann nicht festgestellt werden, wann in der Geschichte des Deichbaues zum ersten Male bewußt Zweitdeichlinien in den Küstenschutz einbezogen wurden. Es ist anzunehmen, daß nach den schweren Sturmfluten des Mittelalters, nach denen durch wiederholte Vordeichungen versucht wurde, das verlorene Land schrittweise zurückzugewinnen, bald erkannt wurde, welche Bedeutung der alten Deichlinie im Falle eines Bruches der neuen Hauptdeichlinie zukam; zum Ausgang des Mittelalters wurden die Zweitdeiche stellenweise den Hauptdeichen gleichgestellt. So heißt es im letzten Artikel des Spade-Landesrechts von 1517 (aus PETERSEN, 1966):

„Wenn die Haff-Deiche, nach aller Nothdurft auf das fleißigste gefertigt, sollen auch die Mitteldeiche verhöhet und verbessert werden, und Niemand selbige unter den Pflug legen oder besäen, diejenigen, die sich hier entgegen erdreisten, sollen zum Halse gefället seyn.“

In dieser harten aber unmißverständlichen Formulierung werden die Zweitdeiche als Mitteldeiche bezeichnet. Aber auch Bezeichnungen wie Achterdeiche oder auch Schlafdeiche werden verwendet; über die regionale und temporäre Verwendung dieser Begriffe wird ausführlich bei LÜDERS (1963), PETERSEN (1966) und KAMBECK (1981 u. 1982) berichtet; in den Arbeiten von PETERSEN und KAMBECK sind außerdem eingehende Beschreibungen der Behandlung von Zweitdeichlinien in den verschiedenen Deichrechtsordnungen von den ältesten Spaderechten bis zu den Empfehlungen des KÜSTENAUSSCHUSSES NORD- UND OSTSEE und den Generalplänen der Küstenländer nach der Sturmflut von 1962 enthalten. Allgemein lehrte dabei die Geschichte, daß zu Zeiten geringer Sturmfluttätigkeit oft die Funktion der Zweitdeichlinie vergessen und die Anlagen vernachlässigt oder sogar beseitigt wurden; regelmäßig aber nach Sturmflutkatastrophen mit Beschädigungen oder gar Brüchen der Hauptdeichlinie wurde der Wert einer zweiten Deichlinie, oft durch schmerzliche Erfahrungen, wiedererkannt. Es sollen in dieser Studie diese geschichtlichen Entwicklungen nicht weiter verfolgt werden; von PETERSEN und KAMBECK soll aber die einheitliche Bezeichnung „Zweitdeiche“ für Mitteldeiche, Achterdeiche usw. in dem Sinne übernommen werden, daß es sich um Deichlinien hinter den Hauptdeichen (= Landesschutzdeichen) handelt, die im Falle eines Bruches des Hauptdeiches dessen Funktion – und wenn auch nur vorübergehend – übernehmen können.

Zweitdeichlinien entstehen meist durch Vordeichungen, wobei dann der vorherige Hauptdeich zum Zweitdeich wird. Oft wird mit der Vorverlegung der Hauptdeiche auch eine Verkürzung der Deichlinie angestrebt; in diesem Jahrhundert wird dieses Prinzip besonders bei den Sturmflutsperrwerken angewendet, deren Dämme und bewegliche Verschlussstore eine stark verkürzte Hauptdeichlinie bilden, während gleichzeitig alle Deiche, die binnenseitig des Sperrwerkes oder der Sperrwerke liegen, zu Zweitdeichlinien werden; im Delta-Plan der Niederlande ist dieses Verfahren in bisher größter und radikalster Form verwirklicht worden.

Die Wirkung einer Zweitdeichlinie beruht – außer auf der Verkürzung der Hauptdeichlinie – auf dem sog. Redundanzprinzip. Mit diesem Begriff (lat. Redundanz = „Überfülle“) ist bei technischen Systemen gemeint, daß absolut notwendige Bestandteile eines Systems doppelt oder mehrfach in einer solchen Art vorhanden sein müssen, daß im Falle eines Ausfalles des einen das zweite (oder das nächste) Teil die jeweilige notwendige Funktion übernehmen kann. Redundante Systeme werden vor allem in der Kerntechnik und in der Weltraumfahrt in hohem Maße angewandt; aber selbst die Vorschrift für Kraftfahrzeuge, die zwei voneinander unabhängige Bremssysteme fordert, stellt eine Anwendung des Redundanzprinzips dar.

Mathematisch wird das Redundanzprinzip durch den Multiplikationssatz der Wahrscheinlichkeitsrechnung

$$P = p_1 \cdot p_2 \quad (1)$$

ausgedrückt, in dem p die Wahrscheinlichkeit dafür bedeutet, daß die Systemteile 1 und 2 zugleich versagen; p_1 und p_2 stellen die Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Systemteile dar. Bei einem System aus Haupt- und Zweitdeich sind p_1 und p_2 die Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Deichlinien; werden beide zu einmal – im Mittel! – in 100 Jahren angesetzt, so ist die Wahrscheinlichkeit für den Bruch beider Deichlinien einmal in 10 000 Jahren, wobei noch nicht einmal berücksichtigt ist, daß die Zweitdeichlinie bei einer

Sturmflut erst nach dem Bruch der Hauptdeichlinie, also für wesentlich kürzere Zeit als diese, belastet wird.

Welche Wahrscheinlichkeit für einen Deichbruch besteht – es wird hierauf im nächsten Abschnitt eingegangen werden –, kann allgemein nicht gesagt werden, es hängt von der Lage, der Form und dem Zustand des Deiches, vom Untergrund und von vielen anderen Einflußgrößen ab. Es können aber allgemeine Überlegungen darüber angestellt werden, welcher Sicherheitszuwachs durch eine zweite Deichlinie gewonnen werden kann. Auch dieser Sicherheitszuwachs ist je nach den Gegebenheiten von verschiedenen Parametern mehr oder weniger stark abhängig; im Folgenden sollen einige dieser wichtigsten Einflüsse auf den Sicherheitszuwachs behandelt werden.

Mit dem Sicherheitszuwachs ist dabei immer die Zunahme an Sicherheit in dem Bereich binnenseits der zweiten Deichlinie gemeint; die Sicherheit in dem Gebiet zwischen den beiden Deichlinien (im Folgenden immer als Koog bezeichnet) bleibt allein von der Bruchsicherheit des Hauptdeiches abhängig.

2. Zur Wahrscheinlichkeit von Deichbrüchen

2.1 Deichbruchgefahr eines Einzeldeiches

Der mathematische Begriff der Wahrscheinlichkeit $p = m/n$ als das „Verhältnis der für ein bestimmtes Ereignis A günstigen Zahl m zur Zahl der möglichen Fälle n “ ist für das Ereignis eines Deichbruches insofern schwer zu übertragen, da, weil nur ein einziges Deichbruchereignis nötig ist, um eine Katastrophe auszulösen, der Ausdruck $m = 1$ zwar eindeutig festgelegt werden kann, daß aber die Zahl n , die allgemein als die Zahl der Jahre angesehen wird, in der das Ereignis – im Mittel! – einmal auftritt, nicht sicher bestimmt werden kann.

Im Gegensatz zum Würfelspiel, wo die „abstrakte Wahrscheinlichkeit“ $p = 1/6$ für jede Augenzahl deduktiv festgelegt werden kann und jeder Wurf zugleich als „Ereignis“ gewertet werden kann, und ebenfalls im Gegensatz zu den Statistiken der Versicherungsmathematik, die sich auf ein sehr großes Datenmaterial („Gesetz der großen Zahlen“) stützen können, sind bei der Deichbruchgefahr die Bestimmungen der Wahrscheinlichkeitsfunktionen wesentlich schwieriger; es sei hier auf die eingehenden Betrachtungen von v. Mises (1972) zur Frage der Bildung eines „Kollektives“ verwiesen. Dies gilt bereits für die Frage der Wasserstandsstatistiken, wenn es um die Frage der Extremereignisse geht (vgl. FÜHRBÖTER, 1976).

Auf Abb. 1 und 2 ist schematisch dargestellt, wie qualitativ die Bruchwahrscheinlichkeit eines Deiches in Abhängigkeit von dem Wasserstand (= Sturmflutscheitelwasserstand) h_1 (auf das Vorland vor dem Deich oder auf NN bezogen) und dem Wellenauflauf r_1 im Verhältnis zur Deichhöhe H_1 (ebenfalls entweder auf die Vorlandhöhe H_v oder auf NN bezogen) betrachtet werden kann; es sei hier dabei bewußt zunächst die Frage ausgeklammert, welche Wahrscheinlichkeiten wiederum den Höhen des Wasserstandes h_1 und des Wellenauflaufes r_1 zuzuordnen sind. Wird die Summe von Wasserstand und Wellenauflaufhöhe mit

$$h_1 + r_1 = x \quad (2)$$

bezeichnet, so sind grundsätzlich zwei Bereiche für die Deichbruchwahrscheinlichkeit $p = 1/n$ zu unterscheiden (Abb. 1 u. 2):

- a) der unterkritische Bereich mit
 $h_1 + r_1 < H_1$

und

b) der überkritische Bereich mit

$$h_1 + r_1 \cong H_1$$

Es ist nun eine Erfahrungstatsache, daß beim Übergang vom unterkritischen Bereich, wo der Wellenauflauf die Deichkrone nicht erreicht, zum überkritischen Bereich sich eine starke Veränderung der Deichbruchwahrscheinlichkeit in der Art vollzieht, daß im unterkritischen

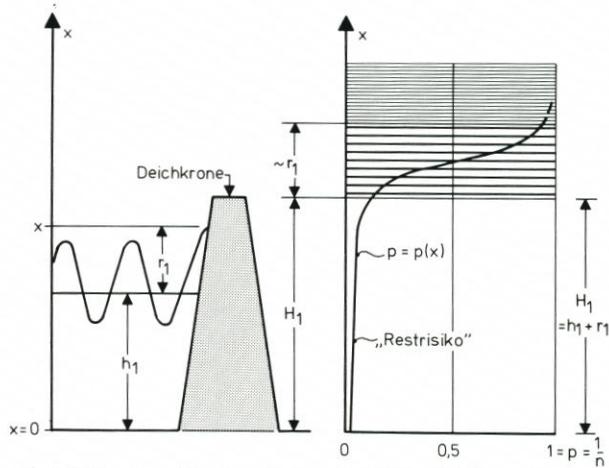


Abb. 1: Bruchwahrscheinlichkeit $p = 1/n$ eines Deiches in Abhängigkeit von Wasserstand und Wellenauf-
lauf im Verhältnis zur Deichhöhe (schematisch)

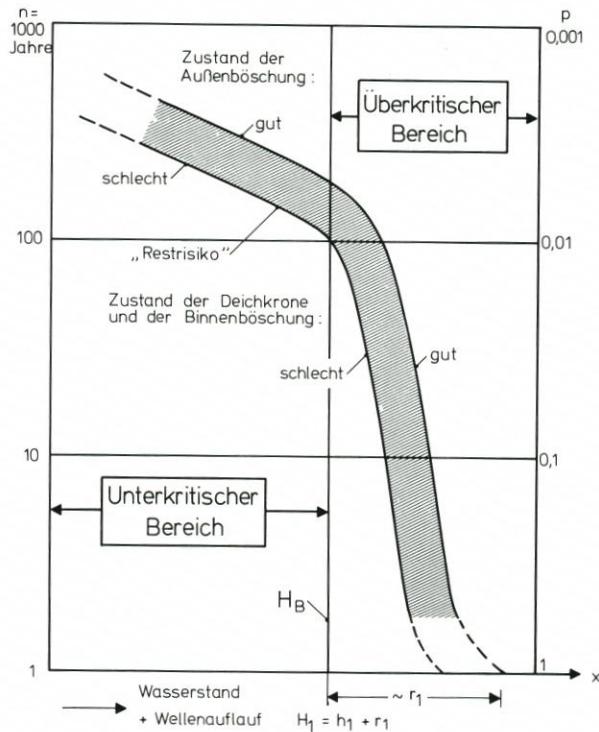


Abb. 2: Deichbruchwahrscheinlichkeit $p = 1/n$ in logarithmischer Darstellung

Bereich die Funktion $p = p(x) = 1/n$ Werte nahe Null besitzt, während sie im überkritischen Bereich, wo Wellenüberschlag oder gar ständige Überströmung eintritt, mit zunehmenden Werten von $x = h_1 + r_1 > H_1$ mit schnellem Anstieg asymptotisch auf den Wert 1 strebt (Abb. 1).

Im unterkritischen Bereich ist die Deichbruchgefahr allein von dem Zustand der Außenböschung in Verbindung mit der des Deichkörpers abhängig; die Deichkrone und Binnenböschung werden nicht unmittelbar belastet, wenn der Wellenauflauf unterhalb der Deichkronenhöhe bleibt. Ein „Restrisiko“ ist aber auch in diesem Bereich vorhanden, weil die Zerstörung von Deichen durchaus auch von der Außenböschung her erfolgen kann; es sei hier z.B. auf die eingehende Analyse von ZITSCHER (1962) verwiesen. Die höchste Belastung erfolgt an der Außenböschung als Wellenbelastung um den Bereich des jeweiligen Ruhewasserspiegels, wobei oberhalb dieser Höhenlage die Deichhaut im wesentlichen durch die erosiven Schubspannungen aus dem Wellenaufschwall (ZITSCHER, 1962), unterhalb des Ruhewasserspiegels durch Druckschlagwirkungen (FÜHRBÖTER, 1966) angegriffen wird. Es ist heute allgemein bekannt, daß durch eine geeignete Formgebung der Außenböschung diese Kraftwirkungen weitgehend abgemindert werden können, wobei besonders die Wahl der Neigung der Außenböschung eine wichtige Rolle spielt; bei Böschungsneigungen flacher als 1:6 werden sowohl die Druckschlaggefährdung als auch die Erosionswirkung des Wellenaufschalles stark vermindert; ebenso nimmt die Wellenaufhöhe mit der Böschungsneigung ab. Dennoch ist auch bei denjenigen Deichen, die nach den vorstehenden Erkenntnissen entworfen und gebaut wurden, auch im unterkritischen Bereich immer noch ein bestimmtes „Restrisiko“ vorhanden (vgl. Abb. 1 u. 2), das sich in einer wenn auch kleinen Bruchwahrscheinlichkeit $p = 1/n$ (und damit einer verhältnismäßig großen Zahl von Jahren = n) ausdrückt; es ist dabei ohne weiteres einsichtig, daß dieses „Restrisiko“ monoton mit der Höhe von Wasserstand und Wellenauflauf zunehmen wird, wie es auf Abb. 1 und 2 schematisch angedeutet ist.

Dieses „Restrisiko“ ist erheblich von der Pflege und dem Zustand der Grasnarbe und der darunter liegenden Kleidecke abhängig; Schwachstellen mit abgestorbenem Bewuchs und vor allem Wühltiergänge können Ansatzpunkte von gefährlichen Anfangsschäden werden (vgl. WOHLLENBERG, 1965). Ebenso aber kann grobes Treibzeug, das von den brechenden Wellen in ständiger Wiederholung entsprechend den Wellenperioden auf die Außenböschung geschleudert wird, der Deichhaut bedrohlich werden; dieses „Treibzeug“ kann in seiner Größe bis zu gestrandeten Kleinfahrzeugen reichen. Aber auch sonst werden in zunehmendem Maße grobes Balkenwerk, Öltonnen usw. als Treibsel gefunden, so daß diese Gefahr in Zukunft immer größer werden wird.

Alle diese Schäden, die als Anfangsschäden im unterkritischen Bereich beginnen und sich zum vollständigen Deichbruch verstärken können, hängen entscheidend von der Verweilzeit und dem Zeitraum ab, in dem sich der Wasserstand in einem bestimmten Höhenstufenbereich aufhält; bei Sturmfluten an Tidemeeren ist die größte Verweilzeit am Sturmflutscheitel vorhanden (FÜHRBÖTER, 1979b). Neben dem Scheitelwasserstand ist also auch die Verweilzeit ein wichtiges Maß für die Schwere einer Sturmflut.

Es ist aber weiterhin bekannt, daß die Deichbruchgefahr schlagartig in dem Augenblick zunimmt, in dem der Wellenauflauf die Deichkrone erreicht und aus dem Wellenauflauf der Wellenüberlauf beginnt; hier beginnt dann der überkritische Bereich (vgl. Abb. 1 u. 2). Die meisten Deichbrüche zumindestens des vergangenen Jahrhunderts traten beim Erreichen oder beim Überschreiten dieser Bereichsgrenze ein.

Im Gegensatz zum unterkritischen Bereich sind es im überkritischen Zustand die Deichkrone und die Binnenböschung, die durch das Überschlagwasser der Wellen angegriffen

werden; es ist aus zahlreichen Untersuchungen bekannt, daß die Überschlagmenge je überlaufender Welle mit zunehmendem Verhältnis $x = h_1 + r_1 > H_1$ (vgl. Abb. 1) äußerst stark zunimmt (vgl. z.B. TAUTENHAIN, 1981). Im Gegensatz zur Außenböschung, wo die Schwerkraft dem Wellenaufwurf sowohl entgegen als auch gleichgerichtet wirkt, ist das Wellenüberlaufwasser, das bereits an der Deichkrone eine bestimmte Anfangsgeschwindigkeit besitzt, beim Abfließen auf der Binnenböschung einer stetigen positiven Beschleunigung ausgesetzt, so daß es zu wesentlich stärkerer Erosionskraft als bei Außenböschungen kommt. Außerdem ist die Binnenböschung fast immer steiler als die Außenböschung geneigt.

Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen Außen- und Binnenböschung ist, daß die Außenböschung in fast jedem Winter den Wellenbelastungen ausgesetzt wird, während eine Belastung der Binnenböschung durch Wellenüberlauf einen Ausnahmezustand darstellt, der nur bei Extremsturmfluten (etwa 1962 oder 1976), und auch dort nur für eine verhältnismäßig kurze Zeit, auftritt. Wenn die heutigen Empfehlungen besagen, daß zur Sicherheit gegen Erosionen aus Wellenüberlauf die Binnenböschung – bei gutem Kleiboden und gesundem Bewuchs – mindestens 1:3 (oder flacher) geneigt sein soll, so reicht doch hier das „Kollektiv“ bei weitem nicht aus, um verlässliche Angaben über die wirkliche Sicherheit einer Binnenböschung unter der Wirkung des Wellenüberlaufes zu erhalten; auf jeden Fall wird auch hier die Verweilzeit (FÜHRBÖTER, 1979b) eine entscheidende Rolle spielen.

Die bisherigen Erfahrungen können dahingehend zusammengefaßt werden, daß vom Erreichen der Grenze des überkritischen Bereiches an die Deichbruchwahrscheinlichkeit stark zunimmt; spätestens dann, wenn der Ruhewasserstand h_1 auf die Höhe der Deichkrone H_1 ansteigt und dann jede Welle überläuft – also der Zustand der ständigen Überströmung nicht mehr weit ist –, kann damit gerechnet werden, daß an irgendeiner Stelle der Deichstrecke der vollständige Deichbruch eintritt, die Bruchwahrscheinlichkeit $p = 1/n$ also asymptotisch auf 1 und n damit auf 1 strebt (Abb. 1 und 2).

Bemerkung: Es wurden (und werden auch in den folgenden Ausführungen) nur die üblichen Kleideiche mit Grasbewuchs betrachtet, die bei den heutigen Bauweisen fast immer einen Sandkern enthalten. Es besteht Einigkeit darüber, daß Deiche mit Asphaltbekleidung eine höhere Sicherheit gegen Wellenüberschlag haben, vorausgesetzt, daß auch die Binnenböschung befestigt wird. Dennoch kann auch hier eine Bruchgefahr nicht ausgeschlossen werden, wenn bei stetiger Überströmung durch Wellen schließlich der Deichkörper wie ein Wehrrücken wirkt, nur mit dem Unterschied, daß die hydrodynamischen Kräfte, die auf ein normales, stationär überströmtes Wehr wirken, ungleich geringer als die hochfrequentig-hydrodynamischen Belastungen des durch Wellen überspülten Deiches sind; es ist aber undenkbar, daß Deiche in gleicher Art wie Wehre (mit Tosbecken u. a.) bemessen werden. Beim Asphaltdeich genügt aber wegen der verhältnismäßig dünnen Deichhaut bereits ein geringer Anfangsschaden, um den fast sofortigen Deichbruch einzuleiten; dieses gilt auch für die Außenböschung von Asphaltdeichen in bezug auf grobes Treibzeug. Hier können schwere Balken o. ä. wie mittelalterliche „Rammwidder“ wirken.

Es liegen hier noch wesentlich weniger Erfahrungen über das Bruchverhalten solcher Deiche vor als bei den üblichen Kleideichen, so daß selbst schematische Diagramme wie die auf Abb. 1 und 2 nicht für diese Deiche aufgestellt werden können.

Wie in der Einleitung (vgl. Abschnitt 1) betont wurde, kann es hier nicht darum gehen, eine absolute Deichsicherheit zu untersuchen, sondern es soll der relative Sicherheitszuwachs behandelt werden, der durch eine Zweideichlinie erreicht werden kann. Hierzu ist es aber notwendig, die nur qualitativ zu verstehenden Darstellungen nach Abb. 1 und 2 einer gewissen überschlägigen Quantifizierung zu unterziehen, was auf Abb. 3 wie folgt geschieht:

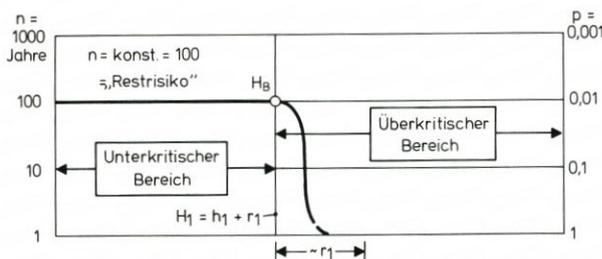


Abb. 3: Deichbruchwahrscheinlichkeit $p = 1/n$ als Näherungsfunktion (schematisch)

Als Näherungsfunktion wird für den unterkritischen Bereich die Wahrscheinlichkeit $p = p(x)$ (vgl. Abb. 1 u. 2) durch einen über diesen Bereich konstanten Wert $p = 1/n$ genähert, wobei bei den folgenden Betrachtungen $n \sim 100$ gesetzt werden soll. Dies ist als Erfahrungswert insofern gerechtfertigt, weil im unterkritischen Bereich bei Deichen, die nach den derzeitigen Erkenntnissen auf sicherem(!) Untergrund gebaut wurden, größere Bruchwahrscheinlichkeiten bisher – im Mittel! – nicht aufgetreten sind; selbst aber dann, wenn dieser Wert auf die Hälfte, also auf $n = 50$ Jahre, vermindert wird (was eine sehr pessimistische Annahme im unterkritischen Bereich darstellen würde), wird davon der relative Sicherheitszuwachs nicht nennenswert betroffen.

Für den Übergangspunkt vom unterkritischen zum überkritischen Bereich wird ebenfalls noch mit dem Konstantwert $p = 1:n = 1:100$ gerechnet (Abb. 3); er dürfte an dieser Stelle mit dem Höchstwert für den mit Wasserstand und Wellenauflauf veränderlichen Wert $p(x)$ auf Abb. 1 und 2 identisch sein.

Im überkritischen Bereich wird – zur unsicheren Seite hin! – vereinfacht angenommen, daß hier für $h_1 + r_1 \geq H_1$, also für den Beginn des Wellenüberlaufes, die Sicherheit im Bereich $H_1 < x < h_1 + \sim r_1$ unmittelbar auf Null und damit die Bruchwahrscheinlichkeit p sowie n auf 1 fallen; eine gewisse Restsicherheit ist durch die Kurve rechts des Punktes H_B zwar angedeutet, sie soll aber quantitativ im Folgenden nicht berücksichtigt werden.

2.2 Sicherheitszuwachs durch eine Verkürzung der Deichlinie

Wenn hier vorausgesetzt wird, daß bei einer Verkürzung (oder auch Verlängerung) einer Deichstrecke die gleiche Sicherheit (oder Bruchwahrscheinlichkeit) bei gleichen Deichstreckenlängen besteht, so kann die Gleichung, die POISSON (1941) für nacheinanderfolgende und voneinander unabhängige Ereignisse anwendete, auch für gleichzeitig stattfindende, unabhängige Ereignisse verwendet werden, sofern die Zufallsgrößen stationär (und ergodisch) sind. Es wird dann die zusammengesetzte Wahrscheinlichkeit p_z

$$p_z = 1 - (1 - p)^m \quad (3)$$

oder mit der veränderten Deichlänge L gegenüber der ursprünglichen Deichstrecke L_0

$$p_z = 1 - (1 - p)^{\frac{L}{L_0}} \quad (4)$$

Dies bedeutet, daß die zusammengesetzte Wahrscheinlichkeit p_z als Bruchwahrscheinlichkeit

$$\begin{aligned} p_{z_0} &= 1 - (1 - p)^1 = p && \text{für } L = L_0 \\ p_z &= 1 - (1 - p)^\infty = 1 && \text{für } L \gg L_0 \\ p_z &= 1 - (1 - p)^0 = 0 && \text{für } L \ll L_0 \end{aligned}$$

wird.

Ist also $p_{z_0} = 1 : n_0 = p$ die Bruchsicherheit der Deichstrecke der Länge L_0 und $p_z = 1 : n$ die der Länge L , so kann der Sicherheitszuwachs durch die Verkürzung der Deichlinie von der Ursprungslänge L_0 auf L durch

$$\frac{p_z}{p_{z_0}} = \frac{1 - (1 - p)^{\frac{L}{L_0}}}{p} \quad (5a)$$

oder über n durch

$$\frac{n}{n_0} = \frac{p}{1 - (1 - p)^{\frac{L}{L_0}}} \quad (5b)$$

ausgedrückt werden, wobei jede Deichverkürzung von L_0 auf L einer Zunahme von n gegen n_0 entspricht; dieser Sicherheitszuwachs n/n_0 ist auf Abb. 4 in Abhängigkeit von der relativen Deichverkürzung L/L_0 dargestellt.

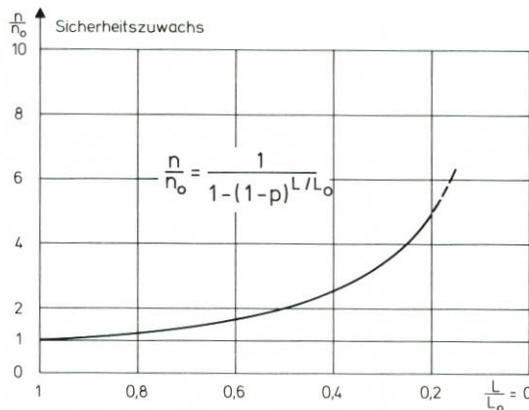


Abb. 4: Sicherheitszuwachs n/n_0 durch Verkürzung der Deichlinie von L_0 auf L

Es geht aus Abb. 4 hervor, daß dieser Sicherheitszuwachs n/n_0 bei Werten von L/L_0 , die wenig unter 1 liegen, nur langsam zunimmt, bei einer Verkürzung um 20 % (entsprechend $L/L_0 = 0,8$) liegt er bei 1,2, erst bei der Verkürzung auf die Hälfte der ursprünglichen Deichlinie ($L/L_0 = 0,5$) wird der annähernd doppelte Sicherheitszuwachs erreicht, eine dann allerdings sehr starke Zunahme tritt erst bei Werten von $L/L_0 < 0,2$ ein (Abb. 4).

Dieser Sicherheitszuwachs gilt – gleiche Verhältnisse auf allen Deichstrecken vorausgesetzt – sowohl im unterkritischen als auch im überkritischen Bereich.

2.3 Sicherheitszuwachs durch eine Zweitdeichlinie

Vorbemerkung: Im Folgen ist mit n_2 immer (in $p = 1/n_2$) die Sicherheit (in Jahren) gemeint, die zwei Deichlinien für die dadurch geschützten Niederungen bieten, mit n_1 (in $p = 1/n_1$) die Sicherheit, die nur eine einzige Deichlinie aufweist; der

$$\text{Sicherheitszuwachs } \frac{n_2}{n_1}$$

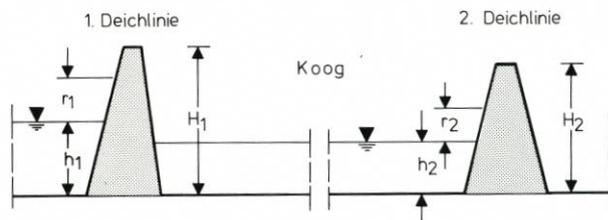


Abb. 5: Wasserstände h und Wellenaufhöhen r bei zwei Deichlinien

ist also die relative Zunahme der Sicherheit, die eine zweite Deichlinie gegenüber nur einer einzigen Linie aufweist.

Die Bezeichnungen für die Verhältnisse beim Bestehen einer Zweideichlinie gehen aus Abb. 5 hervor; die Vorlandhöhe vor der ersten Deichlinie sowie die Geländehöhe im Koog gehen dabei zunächst noch nicht in die folgenden Betrachtungen ein; sie werden im Folgenden zunächst als gegeben angenommen; das gleiche gilt für die Wellenaufhöhen.

Der Sicherheitszuwachs beim Bestehen einer Zweideichlinie ist auf Abb. 6 in Abhängigkeit von den Ausgangsgrößen $h_1 + r_1$ (Wasserstand und Wellenaufwurf vor der 1. Deichlinie) und $h_2 + r_2$ (Wasserstand und Wellenaufwurf vor der 2. Deichlinie) dargestellt; der Wellenaufwurf r_2 ist dabei i. allg. wesentlich geringer als der an der Hauptdeichlinie (vgl. Abschnitt 4). Es bedeutet der Punkt H_{B1} den Übergang vom unterkritischen zum überkritischen Bereich bei der ersten Deichlinie, der Punkt H_{B2} den entsprechenden Punkt an der zweiten Deichlinie; der Sicherheitszuwachs wird hier durch die Zunahme von n gegenüber dem Wert, der bei einer einzigen Deichlinie besteht, ausgedrückt.

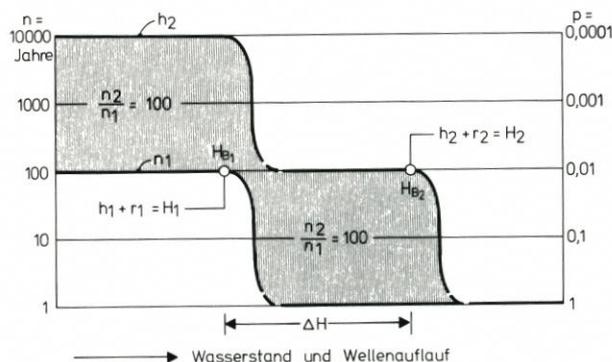


Abb. 6: Sicherheitszuwachs n_2/n_1 durch eine Zweideichlinie (schematisch)

Es sind auf Abb. 6 drei Bereiche zu unterscheiden:

1. Bereich: $h_1 + r_1 < H_1$

Beide Deiche befinden sich hier im unterkritischen Bereich; hier gilt das Produktengesetz der Wahrscheinlichkeitsrechnung in der Art, daß in den unterkritischen Bereichen die Wahrscheinlichkeiten sich in der Form $p = p_1 \cdot p_2$ (1)

p = Wahrscheinlichkeit für den Bruch beider Deiche

p_1 = Wahrscheinlichkeit für den Bruch der 1. Deichlinie

p_2 = Wahrscheinlichkeit für den Bruch der 2. Deichlinie

überlagern. Ist nach Abb. 3 die Bruchwahrscheinlichkeit beider Deiche gleich groß und zu $1:n$ angenommen, so wird mit

$$p_1 = 1/n \text{ und } p_2 = 1/n$$

$$p = \frac{1}{n^2} \quad (6)$$

oder, wenn die Wahrscheinlichkeit für den Bruch beider Deichlinien mit n_2 ausgerechnet wird:

$$n_2 = n^2 \quad (7)$$

was mit $n = 100$ (vgl. Abb. 3)

$$n_2 = 10\,000 \text{ Jahre}$$

oder einen Sicherheitszuwachs von

$$\frac{n_2}{n_1} = n = 100$$

ergibt.

Hiermit wird die in Abschnitt 2.1 dargelegte Behauptung verständlich, daß auch bei Restrisiken von $n = 50$ Jahren für eine einzelne Deichlinie sich keine grundlegende Änderung des Sicherheitszuwachses ergibt, denn ob ein Ereignis im Mittel im Zeitraum von 10 000 Jahren oder 2500 Jahren oder einmal in 100 Jahren oder 5 Jahren zu erwarten ist, liegt als Zeitgrößenunterschied in derartigen Größenordnungen, daß in beiden Fällen allein die Zehnerpotenz im Sicherheitszuwachs entscheidend ist.

2. Bereich:

$$h_1 + r_1 \geq H_1$$

$$h_2 + r_2 < H_2$$

Hier wird zur unsicheren Seite hin wiederum angenommen, daß die erste Deichlinie sofort nach Erreichen des kritischen Bereiches bricht (Punkt H_{B1}) und daß dann allein die zweite Deichlinie den Landesschutz übernehmen muß. Auch hier gilt weiterhin das Produktengesetz der Wahrscheinlichkeitsrechnung, nur daß hier für die erste Deichlinie $n = 1$ zu setzen ist; bei gleichen Wahrscheinlichkeiten wird jetzt

$$n_2 = 100 \text{ Jahre}$$

es bleibt aber nach wie vor der Sicherheitszuwachs von

$$\frac{n_2}{n_1} = n = 100$$

auch in diesem 2. Bereich erhalten.

3. Bereich:

$$h_2 + r_2 \geq H_2$$

Hier wird, nochmals wie im 2. Bereich, zur unsicheren Seite hin angenommen, daß auch die zweite Deichlinie bricht, sobald sie in den überkritischen Bereich gelangt (Punkt H_{B2}); hier erst wird wie bei der einzelnen Deichlinie die Bruchwahrscheinlichkeit zu

$$p_2 = p_1 = 1$$

Es soll aber noch einmal betont werden, daß die Festlegung, daß sofort nach Erreichen des überkritischen Bereiches ein Deichbruch eintreten muß, eine extrem ungünstige Annahme ist. Dies gilt besonders für die zweite Deichlinie, die erst bei voll entwickeltem Wasserstand und

entwickeltem Seegang und Wellenauflauf eine vergleichbare Belastung wie die erste Deichlinie erfährt; die dazu gehörige Verweilzeit wird immer nur ein Bruchteil derjenigen bei der ersten Deichlinie sein.

Für die Größe des 2. Bereiches, der durch die „Wasserstandsreserve“ ΔH zwischen den Punkten H_{B1} und H_{B2} ausgedrückt werden kann (Abb. 6), ist neben der Verweilzeit des Sturmflutwasserstandes besonders die Koogfläche A zwischen den beiden Deichlinien von Bedeutung, wie Abb. 7 schematisch zeigt.

Je größer nämlich diese Koogfläche A ist, umso länger dauert es, bis sich der Wasserstand h_2 vor der zweiten Deichlinie aufbauen kann; diese Fragen werden in Zusammenhang mit der Verweilzeit eingehend im folgenden Abschnitt untersucht.

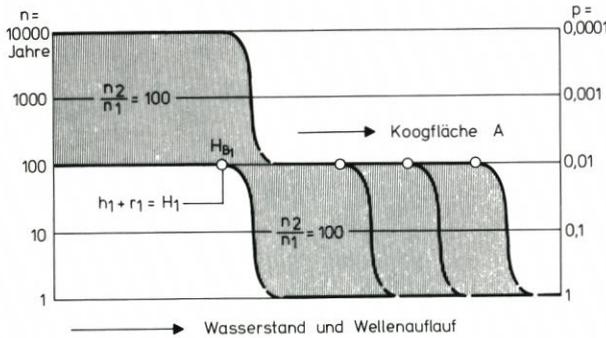


Abb. 7: Sicherheitszuwachs n_2/n_1 bei zunehmender Koogfläche A (schematisch)

Der Sicherheitszuwachs durch eine zweite Deichlinie kann auch mit einer Wasserstandshäufigkeitslinie untersucht werden, die in einfachster Form (vgl. z.B. WEMELSFELDER, 1939) durch eine logarithmische Funktion

$$H = H(n) = H_o + \alpha \cdot \ln n \tag{8}$$

genähert werden kann (Abb. 8).

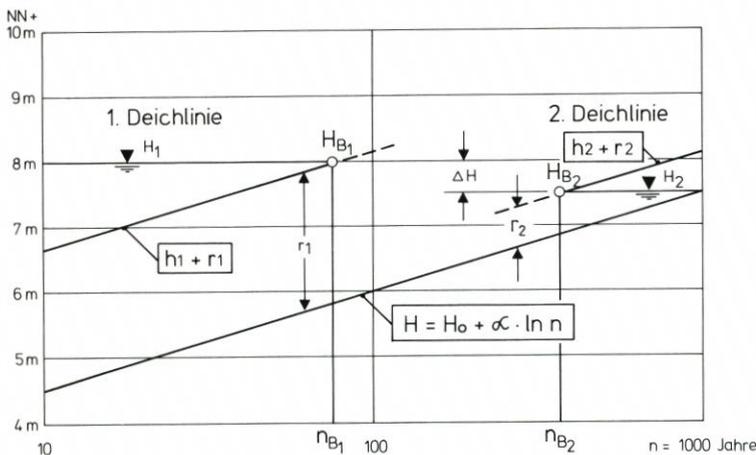


Abb. 8: Darstellung des Sicherheitszuwachses einer Zweideichlinie in einer Wasserstandshäufigkeitslinie (schematisch)

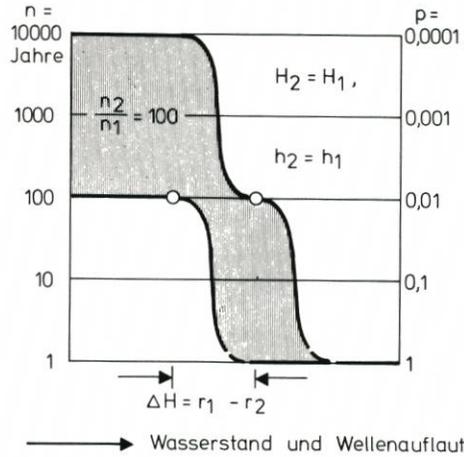


Abb. 9: Sicherheitszuwachs bei verminderter Wellenaufbauhöhe r_2 (Koog ausgespiegelt, gleiche Deichhöhen H_1 und H_2)

Die Wasserstandshöhe h_1 ist dabei durch die Funktion $H(n)$ ausgedrückt; darüber liegt die Wellenaufbauhöhe r_1 , die beim Schnitt mit der Höhe H_1 den Punkt H_{B1} ergibt; entsprechend verläuft die Funktion $h_2 + r_2$; ihr Schnitt mit H_2 ergibt den Punkt H_{B2} , der um die Höhe der „Wasserstandsreserve“ ΔH unter dem Punkt H_{B1} liegt. Zu beiden Punkten H_{B1} und H_{B2} lassen sich die Bruchwahrscheinlichkeiten zu n_{B1} und n_{B2} bestimmen; es ist

$$H_1 = H_o + \alpha \cdot \ln n_{B1} + h_1 + r_1 \quad (9)$$

$$H_2 = H_o + \alpha \cdot \ln n_{B2} + h_2 + r_2 \quad (10)$$

was
$$\ln n_{B2} - \ln n_{B1} = \frac{1}{\alpha} (H_2 - h_2 - r_2 - [H_1 - h_1 - r_1])$$

oder
$$\frac{n_{B2}}{n_{B1}} = e^{\frac{1}{\alpha} (H_2 - h_2 - r_2 - [H_1 - h_1 - r_1])} \quad (11)$$

ergibt, wobei der Verhältniswert

$$\frac{n_{B2}}{n_{B1}}$$

als Bruchsicherheitszuwachs – der zusätzlich zu dem Sicherheitszuwachs n_2/n_1 nach Abb. 6 und 7 auftritt – die Größe des Bereiches 2 zwischen den Punkten H_{B1} und H_{B2} wiedergibt.

Für ein einfaches Beispiel, in dem angenommen werden soll, daß die Deichhöhe H_1 gleich der Deichhöhe H_2 ist und wo außerdem der (nur bei kleinen Kögen wahrscheinliche) Zustand angenommen wird, daß in der Nähe des Höchstwasserstandes der Koogwasserstand mit dem Außenwasserstand ausgespiegelt ist, h_2 also ebenfalls $= h_1$ wird, ist auf Abb. 9 der zusätzliche Sicherheitszuwachs im überkritischen Bereich für $h_1 + r_1 > H_1$ schematisch dargestellt, der sich aus der kleineren Wellenaufbauhöhe r_2 an dem Zweitdeich gegenüber der Aufbauhöhe r_1 an der ersten Deichlinie ergibt; für das Verhältnis der zusätzlichen Bruchwahrscheinlichkeit ergibt dies

$$\frac{n_{B2}}{n_{B1}} = e^{\frac{1}{\alpha} (r_1 - r_2)} \quad (12)$$

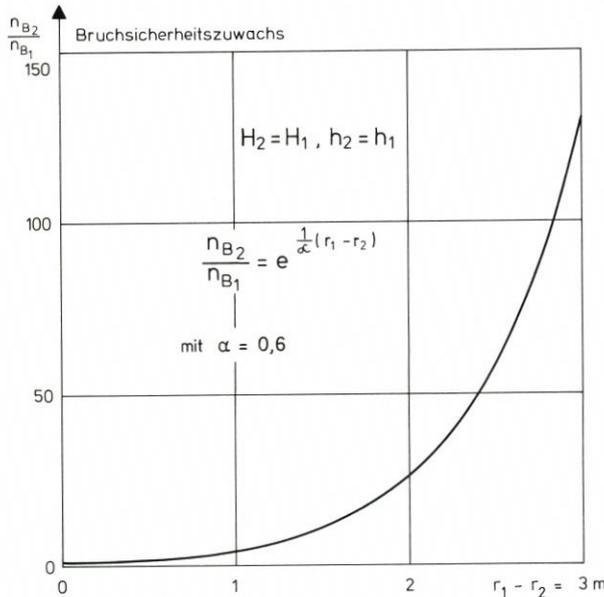


Abb. 10: Bruchsicherheitszuwachs n_{B2}/n_{B1} in Abhängigkeit von der Differenz der Wellenaufauhöhen $r_1 - r_2$ (Koog ausgespiegelt, gleiche Deichhöhen H_1 und H_2)

Wird $\alpha = 0,6$ gesetzt, was nach FÜHRBÖTER (1976) annähernd für die deutschen Pegel gilt, so ist mit diesem Wert der Bruchsicherheitszuwachs – der zusätzlich zu dem Sicherheitszuwachs n_2/n_1 im unterkritischen Bereich wirkt – auf Abb. 10 aufgetragen. Abb. 10 zeigt, daß dieser zusätzliche Sicherheitszuwachs bei Differenzwerten um 1 m noch klein ist (ungefähr das 4fache), aber bei $r_1 - r_2 = 2 \text{ m}$ bereits das rd. 25fache erreicht und bei $r_1 - r_2 = 3 \text{ m}$ das rd. 130fache beträgt.

Es kann also zusammengefaßt werden, daß der Sicherheitszuwachs durch eine zweite Deichlinie

- im unterkritischen Bereich (der Wellenaufauflauf erreicht nicht die Deichkrone der ersten Deichlinie) um etwa 2 Zehnerpotenzen (Verhältnis n_2/n_1)
- im überkritischen Bereich (der Wellenaufauflauf überschreitet die Höhe der ersten Deichlinie, und es wird zur unsicheren Seite hin angenommen, daß der erste Deich dann sofort bricht) um etwa 1 bis 2 Zehnerpotenzen und mehr (Verhältnis n_{B2}/n_{B1})

beträgt, wobei im überkritischen Bereich das Verhältnis des Wasserstandes h_2 und des Wellenauflaufes r_2 im Koog zur Höhe der Zweitdeichlinie H_2 eine entscheidende Rolle spielen.

Daß ein einzelner Deich niemals die gleiche Sicherheit wie eine Zweitdeichlinie bieten kann, zeigt Abb. 11. Sowohl im unterkritischen als auch im überkritischen Bereich fehlen die Reserven, die die zweite Deichlinie bietet.

Die Sicherheiten bleiben um die Größenordnungen von Zehnerpotenzen gegenüber denen zurück, die durch eine zweite Deichlinie erreicht werden können.

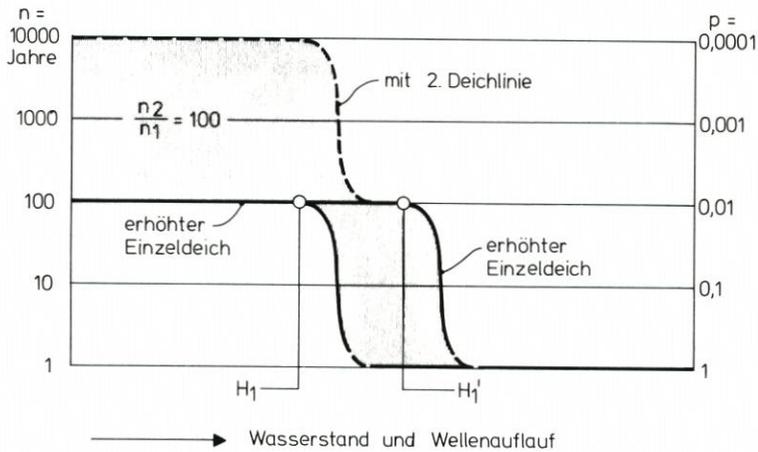


Abb. 11: Sicherheit eines Einzeideiches im Vergleich zu der einer Zweideichlinie (schematisch)

3. Zur Überflutung eines Kooges

3.1 Zur Hydromechanik eines Deichbruches

Unabhängig von der Entstehung des Anfangsschadens – ob von der Außenböschung oder von der Binnenböschung her – setzen nach der Zerstörung der Deckschicht (Klei) Vorgänge ein, die eine schnelle Ausweitung des Deichbruches sowohl in die Tiefe als auch in die Breite zur Folge haben. Wenn der Deichkern aus Sand besteht, wird die Tiefenerosion in Kürze bis auf die Deichsohle (= gewachsener Boden) gehen und wird dann in und stromab der Bruchstelle einen Kolk erzeugen, dessen Grenzen sowohl stromauf als auch stromab erweitert werden; es hängt von der Erosionsfestigkeit des Deichuntergrundes ab, wie schnell diese Kolkbildung fortschreitet.

Obwohl die Abmessungen des Kolkes von großer Bedeutung für die Beseitigung des Deichbruches und der Deichbruchschäden sind, haben seine Tiefen und Längen für den Einströmvorgang (und damit auf die Füllung des Kooges) unmittelbar keinen Einfluß. Dies ist dadurch bedingt (Abb. 12), daß bei der Koogfüllung durch die Deichbruchstelle zunächst ein Fließwechsel über der höchsten Stelle im Bruchquerschnitt entsteht; diese Stelle ist meistens durch den Rest des stehengebliebenen Deichfußes gegeben (vgl. die Beschreibung des Deichbruches am Ülvesbüller Koog bei WOHLBERG, 1963). Ist die Höhe dieser Schwelle H_s (über NN) und $H(t)$ der augenblickliche Wasserstand (über NN), so ist die Überfallhöhe h (vgl. Abb. 12)

$$h = H - H_s \quad (13)$$

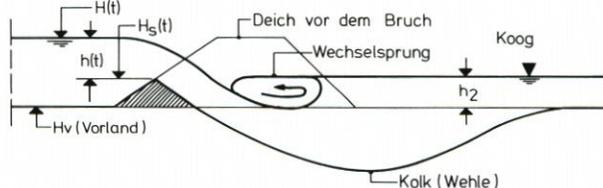


Abb. 12: Deichbruchstelle (schematisch)

Die Höhe der Überlaufschwelle H_s nimmt mit fortschreitender Tiefenerosion ab, ebenso ändert sich der Ruhewasserstand H entsprechend der Tidekurve; so ist die Überfallhöhe h ebenfalls als $h(t)$ eine Funktion der Zeit:

$$h(t) = H(t) - H_s(t) \quad (13)$$

Dabei muß weiterhin bedacht werden, daß in $H(t)$ auch noch die hochfrequentigen Wasserspiegeländerungen infolge der Wellenbewegung enthalten sind.

Solange der Fließwechsel auftritt, kann für den Durchfluß q je Breitereinheit die Formel für den vollkommenen Überfall verwendet werden:

$$q = \frac{2}{3} \cdot \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} \quad (14)$$

q = Durchfluß in m^3/s je m Breite

μ = dimensionsloser Beiwert, von der Form der Wehrschwelle abhängig

g = Erdbeschleunigung = $9,81 m/s^2$

h = Überfallhöhe in m

= $H - H_s$ nach Abb. 12

Es wird dabei die Anströmgeschwindigkeit vernachlässigt, was zulässig ist, weil die Zuflußquerschnitte vor der Bruchstelle bei der radialen Zuströmung von See her groß sind.

Bei dem dimensionslosen Beiwert μ muß berücksichtigt werden, daß die Schwellenhöhe H_s über der Vorlandhöhe H_v (Abb. 12) sehr klein werden und bei vollständigem Deichbruch ganz verschwinden kann (Abb. 13). Es ist dann günstiger, die Abflußleistung der Deichbruchstelle unmittelbar aus dem Extremalprinzip des Energiesatzes zu berechnen.

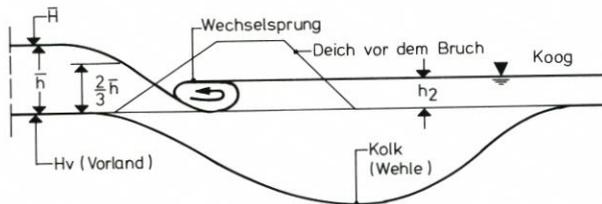


Abb. 13: Vollständiger Deichbruch (schematisch)

Dadurch entfällt am engsten Fließquerschnitt $2/3$ der Energiehöhe (= h) auf die Wassertiefe und $1/3$ auf die Geschwindigkeitshöhe $v^2/2g$, so daß sich hier der Durchfluß q je Breitereinheit mit der Durchflußfläche $F = 1 \cdot 2/3 \cdot h$ zu

$$q = F \cdot v = \frac{2}{3} \cdot h \cdot v \quad (15)$$

und mit
$$v^2/2g = \frac{1}{3} h \text{ oder } v = \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt{2gh} \quad (16)$$

zu
$$q = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{1}{3}} \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} \quad (17)$$

ergibt, was einem Beiwert

$$\mu = \sqrt{\frac{1}{3}} = 0,577$$

entspricht; es kann für q dann

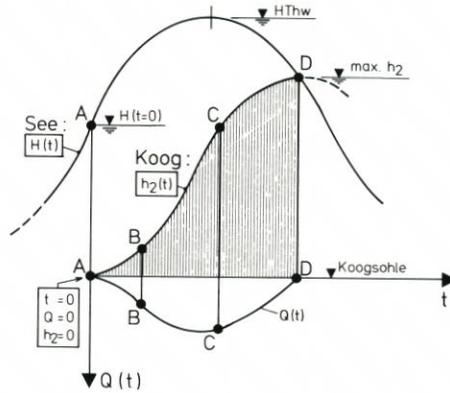


Abb. 14: Koogfüllung als Funktion der Zeit t (schematisch)

$$q = \sqrt{\frac{8}{27}} \cdot g \cdot h^{3/2} \quad (18)$$

geschrieben werden, wobei mit der Breite b der Bruchstelle dann der Gesamtdurchfluß

$$Q = b \cdot q = b \cdot \sqrt{\frac{8}{27}} \cdot g \cdot h^{3/2} \quad (19)$$

wird.

Da sich die Bruchstelle ständig erweitert und auch h zeitlich veränderlich ist, ist Q ebenfalls eine zeitabhängige Größe

$$Q = b(t) \cdot \sqrt{\frac{8}{27}} \cdot g \cdot h(t)^{3/2} = Q(t) \quad (19)$$

Auf Abb. 14 ist schematisch gezeigt, wie sich nach dem Beginn eines Deichbruches (t = 0) der zeitliche Verlauf einer Koogfüllung nach der Gleichung einstellt:

$$h_2(t) = \frac{1}{A} \int_0^t Q(t) \cdot dt \quad (20)$$

mit

$h_2(t)$ = Wasserstand über der Koogsohle in m

A = Koogfläche in m²

Q(t) = Durchfluß in m³/s

t = Zeit von Beginn des Deichbruches an in s

Es sind hierbei drei Zeitabschnitte zu unterscheiden:

Zeitabschnitt A - B:

In dieser Zeit erweitert sich der Deichbruch bis zur Deichsohle, bis annähernd $H_s = 0$ und damit $h = H - H_v$ wird;

Zeitabschnitt B - C:

Dieser Zeitabschnitt ist hauptsächlich durch eine stetige Verbreiterung der Deichbruchweite $b = b(t)$ gekennzeichnet. Außerdem folgt hier die Überfallhöhe $h(t)$ im wesentlichen dem Tidewasserstand $H(t)$, der Durchfluß verändert sich also mit der Potenz $3/2 = 1,5$ der Überfallhöhe h ;

Zeitabschnitt C - D:

Hier wird bei zunehmendem Koogwasserstand h_2 von einer bestimmten Wassertiefe an, die etwa bei $h_2 = 2/3 h$ liegt, der Zustand des unvollkommenen Überfalls erreicht, bei dem mit dem Fließwechsel auch der Wechselsprung (Abb. 12 und 13) verschwindet. Damit wird der Durchfluß gegenüber dem vollkommenen Überfall auch von dem Wasserstand h_2 beeinflusst und dadurch verkleinert (Rückstauereffekt).

Die Form der Füllungskurve $h_2(t)$ ist stark sowohl von den Tiefen- und Breitenentwicklungen des Deichbruches, von dem Verlauf der Tidekurve $H(t)$ sowie der Tidephase, bei der der Bruchbeginn einsetzt, und – vor allem! – von der Koogfläche A abhängig; sie beginnt aber immer mit $h_2(t=0) = 0$ bei Punkt A und endet mit $h_2(t) = H(t)$ am Punkt D zu dem Zeitpunkt, wo bei Ausspiegelung der Wasserstände zwischen der See und dem Koog mit max. h_2 im Koog der höchste Wasserstand dieser Sturmflut erreicht wird; von diesem Zeitpunkt an beginnt der Wasserstand im Koog wieder zu fallen. Es sei aber an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß der Füllungsverlauf wesentlich schneller verläuft, wenn durch eine kurz vorhergegangene Sturmflut diese Deichbruchstelle schon vorhanden war.

Da die Funktionen $H(t)$, $H_s(t)$ und damit $h(t)$ sowie $b(t)$ und damit auch $Q(t)$ nicht voraussehbar sind, dagegen der Füllungsgrad des Kooges (ausgedrückt durch die Wassertiefe h_2) von größter Bedeutung für die Wirksamkeit einer zweiten Deichlinie ist, sollen für eine Anwendung mit Näherungsverfahren diese Beziehungen durch Bildung von Mittelwerten linearisiert werden.

3.2 Näherungslösungen für die Deichbruchfunktionen

Es geht hier darum, für die Funktionen $H(t)$, $H_s(t)$ und damit $h(t)$ sowie für $b(t)$ sinnvolle Mittelwerte einzuführen, die eine überschlägige Untersuchung und Analyse derjenigen Parameter erlauben, die bei einem Deichbruch den größten Einfluß auf den Füllungsgrad des betroffenen Kooges haben. Von der Sturmflut her $H = H(t)$ ist allgemein bekannt, daß der Scheitelwert $H_{\max} = H_{\text{Hthw}}$ in den meisten Fällen darüber entscheidet, ob ein Deichbruch eintritt oder nicht. Es ist für die Auswirkungen eines Deichbruches aber ebenfalls von größter Bedeutung, wie lange dieser Wasserspiegel sich in der Nähe des Scheitelwertes aufhält, also ob es sich um eine „schlanke“ oder „füllige“ Windstaukurve (HENSEN, 1962) handelt. Diese kann quantitativ durch den Begriff der Verweilzeit (FÜHRBÖTER, 1979b) ausgedrückt werden.

Für den vorliegenden Fall hat es sich als vorteilhaft erwiesen, die maßgebende Verweilzeit Δt auf einen Höhenbereich von $\Delta H = 1$ m unter dem Scheitelwasserstand H_{Hthw} zu beziehen, wie es auf Abb. 15 schematisch dargestellt ist. Die Auswertungen der bisherigen Extremsturmfluten haben gezeigt, daß die Verweilzeiten am 16./17. Februar 1962 mit rd. 6 Stunden gegenüber denen der Sturmflut am 3. 1. 1976 mit nur rd. 3 Stunden nahezu doppelte Werte aufwiesen (FÜHRBÖTER, 1979b). Zwischen 3 und 6 Stunden kann also nach den bisherigen Erfahrungen der Wertevorrat dieser Verweilzeiten schwanken; als mittlerer Wasserstand dazu kann entsprechend dem Höhenunterschied $\Delta H = 1$ m der Wasserstand angesetzt werden, der dann als mittlerer Wasserstand \bar{H} um 0,5 m unter dem Scheitelwasserstand H_{Hthw} liegt.

Für die Schwellenhöhe H_s muß angenommen werden, daß, wenn nicht besondere Vorkehrungen getroffen werden (worauf noch eingegangen wird, vgl. Abschn. 5), die Tiefenerosion bis auf die Höhe des Vorlandes H_v fortschreitet; daß beim Ülvesbüller Koog noch nach Ablauf der Sturmflut eine gewisse Schwellenhöhe vorhanden war (WOHLENBERG, 1973), ist wahrscheinlich darauf zurückzuführen, daß der verhältnismäßig kleine Koog

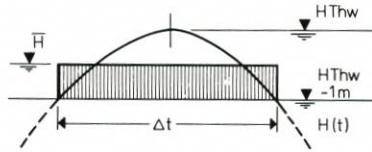


Abb. 15: Verweilzeit Δt und Mittelwert \bar{H} am Hochwasserscheitel

(105 ha) bereits nach 1,5 Stunden gefüllt war, die hohen Strömungsgeschwindigkeiten also nur kurze Zeit bestanden und daher die Tiefenerosion nicht voll wirksam wurde.

Es kann damit die mittlere Überfallhöhe \bar{h} zu

$$\bar{h} = \bar{H} - H_v \quad (21)$$

angesetzt werden.

Wesentlich schwieriger ist es, einen sinnvollen Mittelwert für die Deichbruchweite b anzunehmen. Es ist sicher, daß die seitliche Ausweitung eines Deichbruches bei einem Deich, der massiv aus gutem Klei besteht, langsamer als bei einem Deich mit Sandkern vor sich geht; ein Anhaltspunkt ist hier wieder die Bruchstelle des Ülvesbüller Koogdeiches, die am Morgen des 17. 2. 1962 eine Breite von 80 m aufwies, wobei allerdings auch hier die kurze Füllzeit zu beachten ist. Im allgemeinen ist zu erwarten, daß bei kleinen Kögen die Bruchstelle sich nicht so stark verbreitert wie bei großen Kögen, wo die Füllzeit und damit die Dauer der Seitenerosion erheblich länger sind.

Es sollen im Folgenden mittlere Breiten von

$$\bar{b} = 100 \text{ m}$$

in Rechnung gestellt werden, womit eingeschlossen ist, daß am Ende des Füllvorganges die Bruchstelle 200 m und mehr breit ist; in einer besonderen Überlegung wird aber außerdem auf die Frage eingegangen werden, welchen Einfluß auch größere Breiten auf den Füllungsvorgang haben.

Sind auf diese Art Mittelwerte gebildet worden, so kann der Füllungsvorgang nach Abb. 14 im Bereich zwischen den Punkten A und B durch eine lineare Funktion (vgl. Abb. 16) genähert werden:

$$\begin{aligned} h_2(t) &= \frac{1}{A} \int_0^t Q(t) \cdot dt & (20) \\ &= \frac{1}{A} \cdot \bar{Q} \cdot dt \\ &= \frac{1}{A} \cdot \bar{b} \cdot \sqrt{\frac{8}{27}} \cdot g \cdot \bar{h}^{3/2} & (22) \end{aligned}$$

Mit bekannter Koogfläche A kann diese Funktion mit den entsprechenden Mittelwerten unter Berücksichtigung der Verweilzeiten ausgewertet werden.

3.3 Überschlagsrechnungen von Koogfüllungen

3.3.1 Abhängigkeit von der mittleren Überfallhöhe \bar{h} und der Verweilzeit

Es wurde hier angenommen, daß bei einem Scheitelwasserstand von NN + 6,0 m (entsprechend einem \bar{H} von NN + 5,5 m) der Deichfuß nach dem Deichbruch in kürzester Zeit auf Vorlandhöhen abgetragen wird, die bei den neuen Hauptdeichen zwischen $H_v = \text{NN} +$

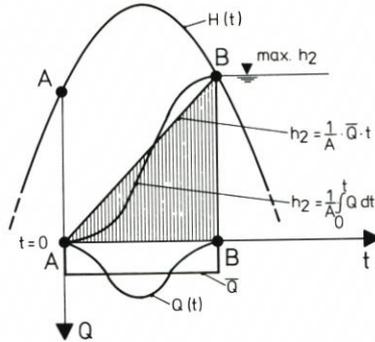


Abb. 16: Lineare Näherung der Koogfüllung als Funktion der Zeit

0,5 m und $H_v = 1,5$ m liegen; bei dieser sehr günstigen Annahme wird keine Vorlandaufhöhung berücksichtigt und außerdem die vollständige Zerstörung einer etwaigen Deichfußsicherung vorausgesetzt. Es ergeben sich damit drei mittlere Überfallhöhen zwischen 4,0 m und 5,0 m:

$$\bar{h} = 5,5 - 1,5 = 4,0 \text{ m}$$

$$\bar{h} = 5,5 - 1,0 = 4,5 \text{ m}$$

$$\bar{h} = 5,5 - 0,5 = 5,0 \text{ m}$$

Mit der angenommenen mittleren Breite $\bar{b} = 100$ m ergibt sich dann zunächst die Füllmenge

$$V = \bar{Q} \cdot t = \bar{b} \cdot \sqrt{\frac{8}{27}} \cdot g \cdot \bar{h}^{3/2} \cdot t \quad (23)$$

die in Abhängigkeit von der Füllzeit t auf Abb. 17 dargestellt ist; außerdem zeigt Abb. 17 die Füllhöhen H_2 für Koogflächen von 100 ha und 1000 ha.

Es geht aus Abb. 17 hervor, daß die Variation der Überfallhöhen im Bereich $4,0 \text{ m} \leq \bar{h} \leq 5,0$ bei weitem nicht den Einfluß auf Füllmengen und Füllhöhen hat, den die Zeit t und damit die Verweilzeit Δt aufweist.

Entsprechend der linearisierten Abhängigkeit bedeutet die Verdoppelung der Zeiten auch die der zeitabhängigen Variablen.

Ein höherer Sturmflutwasserstand wirkt sich aber wesentlich geringer auf den Füllungsvorgang als eine längere Verweilzeit aus.

Aus Abb. 17 ist aber ebenfalls zu ersehen, wie stark sich die Kooggrößen (Koogflächen) auf die Füllungsgrade bei den vorgegebenen Zeiten innerhalb der größten Verweilzeit von $\Delta t = 6$ Stunden bemerkbar machen. Nahezu unabhängig von der mittleren Überfallhöhe ist ein Koog von $A = 100$ ha Fläche in weniger als einer Stunde gefüllt, während bei einer Koogfläche von $A = 1000$ ha auch nach 6 Stunden bei keiner der drei mittleren Überfallhöhen eine Ausspiegelung erreicht wird.

Es wurde dabei hier wie auch bei den folgenden Abschnitten vereinfacht angenommen, daß die Vorlandhöhe vor dem Deich der mittleren Geländehöhe im Koog entspricht. Die Koogflächen liegen aber in den meisten Fällen eher niedriger als die Vorlandhöhen; dieses kann aber nur für den Einzelfall berücksichtigt werden. Die folgenden Überschlagsrechnungen liegen daher immer auf der sicheren Seite, weil durch eine tiefere Kooglage zusätzlicher Speicherraum besteht; es sei daran erinnert, daß beim vollkommenem Überfall der Durchfluß unabhängig von der Unterwassertiefe ist.

Der Ülvesbüller Koog mit $A = 105$ ha war nach dem Deichbruch am 16. Februar 1962 in

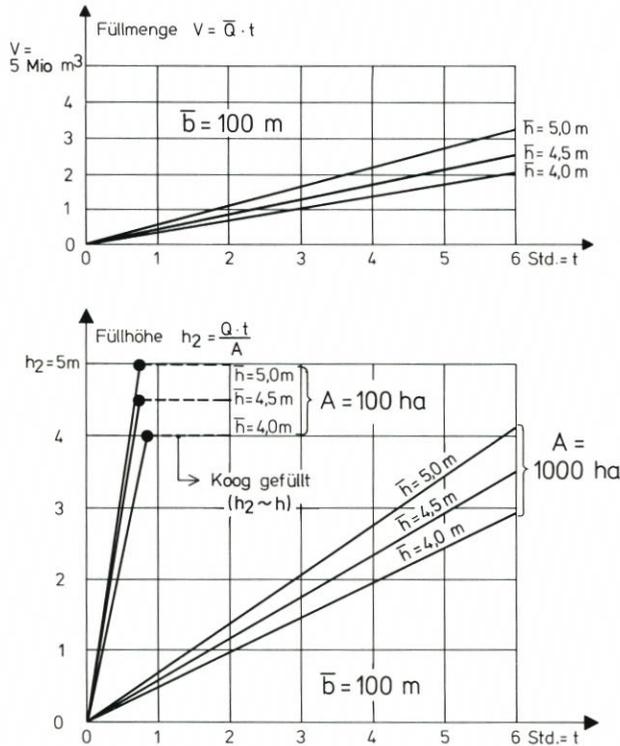


Abb. 17: Füllmenge V und Füllhöhe h_2 in Abhängigkeit von der Zeit t und der mittleren Überfallhöhe \bar{h}

1½ Stunden gefüllt (WOHLENBERG, 1963). Da sowohl die Deichbruchbreite als auch die mittlere Überfallhöhe (durch die verbleibende Schwelle) kleiner als $\bar{h} = 4$ m war, steht dieser Wert in guter Übereinstimmung mit den auf Abb. 17 dargestellten Ergebnissen.

3.3.2 Abhängigkeit von der Koogfläche A und der Verweilzeit

Der auf Abb. 17 aufgezeigte starke Einfluß der Koogfläche gegenüber den anderen Parametern wird auf Abb. 18 betont, wobei ebenfalls wieder der starke Zeiteinfluß zum Ausdruck kommt.

Nach $t = 3$ Std. sind – wiederum nahezu unabhängig von der mittleren Überfallhöhe \bar{h} – alle Köge mit Flächen unter 400 ha gefüllt und ausgespiegelt, während bei 1000 ha hier die Füllhöhen zwischen rd. 2 m bei $\bar{h} = 5,0$ m und rd. 1,5 m bei $\bar{h} = 4,0$ m liegen. Nach $t = 6$ Stunden dagegen sind, hier aber auch wieder bei allen 3 mittleren Überfallhöhen \bar{h} , auch Köge bis zu 800 ha voll gefüllt und ausgespiegelt.

Noch stärker tritt bei Koogflächen >1000 ha die starke Abminderung der Füllhöhe durch die Koogfläche A hervor; wegen des geringen Einflusses der mittleren Überfallhöhe \bar{h} wird auf Abb. 19 nur mit der mittleren Überfallhöhe $\bar{h} = 4,5$ m gerechnet, dafür aber als Parameter $t = 3$ Stunden und $t = 6$ Stunden verwendet. Wie aus Abb. 19 hervorgeht, ist bei einer Koogfläche von 5000 ha selbst bei einer Füllzeit von $t = 6$ Stunden noch nicht einmal eine Füllhöhe von 1 m erreicht. Bei dieser Koogfläche ($A = 5000$ ha) bringt auch eine

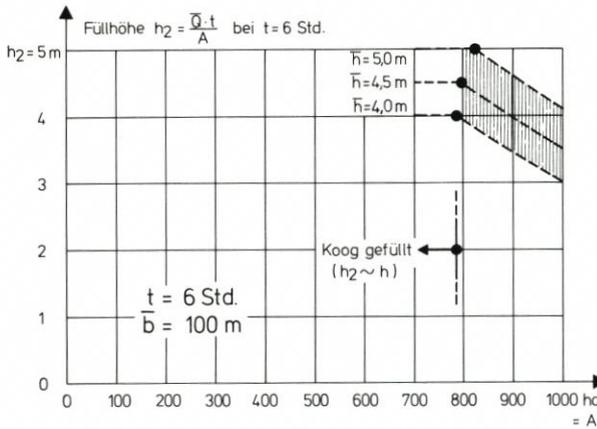
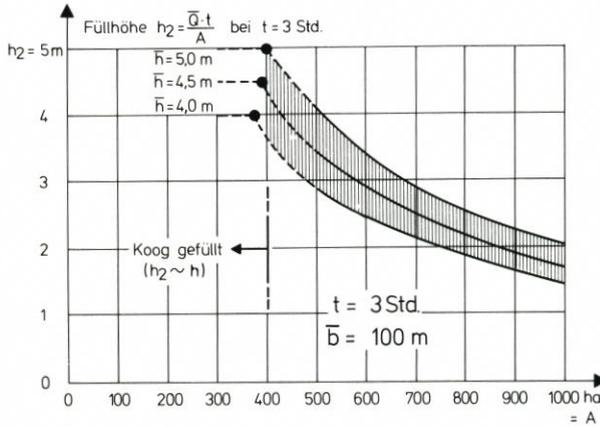


Abb. 18: Füllhöhe h_2 in Abhängigkeit von der Kooggröße A und der Füllzeit t

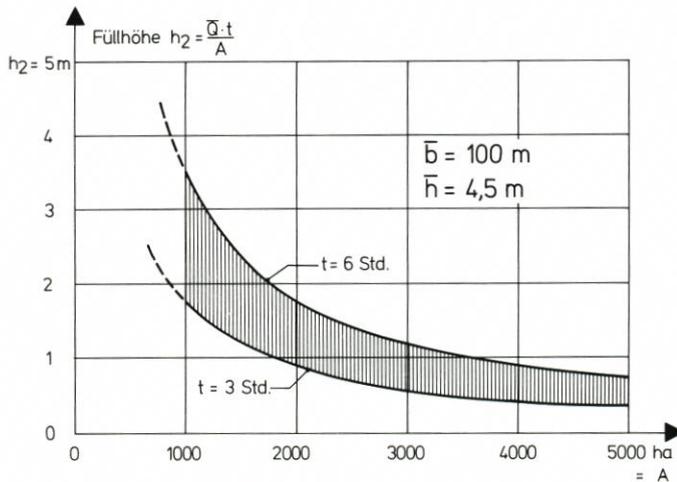


Abb. 19: Füllhöhe h_2 bei großen Koogflächen A

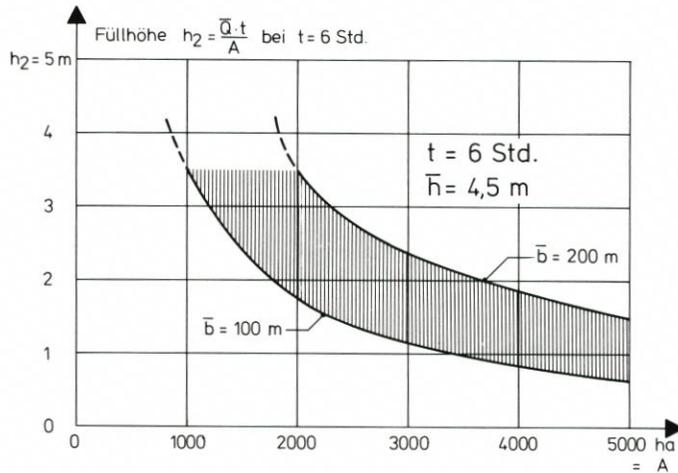


Abb. 20: Füllhöhe h_2 bei großen Koogflächen A in Abhängigkeit von der Bruchbreite \bar{b}

Verdoppelung der mittleren Deichbruchbreite von $\bar{b} = 100 \text{ m}$ auf $\bar{b} = 200 \text{ m}$ nur eine Füllhöhe von 1,5 m nach 6 Stunden (Abb. 20).

So zeigen Abb. 17 bis 20 übereinstimmend, wie mit zunehmender Kooggröße der Einfluß der übrigen Parameter zurückgeht. Da die Kooggrößen bekannt sind (bzw. bei Neueindeichungen gewählt werden können), treten die Unsicherheiten bei der Auswahl der übrigen Parameter zurück, so daß auch die Überschlagsrechnungen wichtige und interpretierbare Ergebnisse für die Sicherheiten liefern, die nach einem Deichbruch in einer zweiten Deichlinie liegen können.

Der Füllungsvorgang nach einem Deichbruch ist aber außer von der Koogfläche entscheidend von der Verweilzeit abhängig, die nach Eintreten des Deichbruches das zeitliche Wasserstandsverhalten in der Nähe des Scheitelwertes bestimmt. Wie die vorliegenden Überschlagsrechnungen überzeugend beweisen, ist dagegen die Höhe des Scheitelwertes von zweitrangiger Bedeutung; die Schwere einer Sturmflut wird durch die Kombination von Scheitelwasserstand und Verweilzeit bestimmt (FÜHRBÖTER, 1979b).

4. Zum Seegang in einem überfluteten Koog

Nach dem Bruch eines Hauptdeiches ist auch eine Zweitdeichlinie einem bestimmten Seegang ausgesetzt, der zusammen mit der Form der Außenböschung des Zweitdeiches eine Wellenaufbauhöhe r_2 ergibt, die in die Sicherheit des Zweitdeiches eingeht (vgl. Abschn. 2.3). Dieser Seegang ist allerdings von derartig vielen Einflüssen abhängig, daß allgemein-quantitative Angaben hier nicht möglich sind. Denn vor allem hängt dieser Seegang von der Topographie der Deichlinien und ihrer Lage zu den angreifenden Wind- und Wellenrichtungen ab und kann daher nur gesondert für jeden Ort ermittelt werden. Dennoch existieren einige allgemeine Gesetzmäßigkeiten, die hier kurz qualitativ behandelt werden sollen.

Nach einem Deichbruch mit einem überfluteten Koog mit dem Wasserstand h_2 , der sich als Funktion $h_2(t)$ mit der Zeit ändert, besteht der Seegang in diesem Koog aus dem einen Anteil, der von dem von außen durch die Deichbruchstelle eindringenden Seegang gebildet wird und der sich durch Diffraktion von der Deichbruchstelle her ausbreitet und dem anderen Anteil, der als ortsständiger Seegang durch den (bei einem Deichbruch immer vorhandenen)

Sturm auf der Wasserfläche des überschwemmten Kooges erzeugt wird; an jedem Ort der Zweitdeichlinie besteht die resultierende Seegangsbelastung aus der Überlagerung dieser beiden Seegangsanteile. Durch diese wird zusammen mit der Außenböschung der Wellenauf-
lauf r_2 (Abschn. 2.3) erzeugt.

Wie stark der durch die Bruchstelle von außen her einlaufende Seegang wird, hängt außer von der Breite der Bruchstelle empfindlich von der Restschwellenhöhe H_S ab, die zusammen mit dem Außenwasserstand $H(t)$ die jeweilige Überfallhöhe $h(t)$ ergibt (Abb. 12). Eine hohe Schwellenhöhe H_S wirkt wie ein Unterwasserwellenbrecher und dämpft vor allem die hohen Wellen des einlaufenden Wellenspektrums. Außerdem ist aber auch der Wasserstand im Koog von Bedeutung; der Seegang breitet sich umso schneller und reibungsfreier aus, je höher dieser Wasserstand ist. Durch die Diffraktion werden die Wellenkämme, die an der Bruchstelle noch Geraden sind, in der Nähe der Bruchstelle zu Korbbögen und in größerer Entfernung dann zu konzentrischen Kreisen mit der Bruchstelle als Mittelpunkt verformt; die Wellenhöhen nehmen dabei reziprok zur Quadratwurzel der Entfernung von der Bruchstelle ab. Es geht daraus hervor, daß derjenige Punkt der Zweitdeichlinie am stärksten durch den Seegang aus der Bruchstelle belastet wird, der ihr in der Luftlinie am nächsten ist.

In unmittelbarer Nähe der Bruchstelle können durch Interferenzen größere Wellenhöhen als in der Bruchstelle selbst auftreten. Eine besondere Belastung stellt eine Flutwelle dar, die bei einem plötzlichen Deichbruch in den Koog stürzt und die eine erhebliche kinetische Energie aufweisen kann. KAMBECK (1982) spricht hier von einer „Ejektorwirkung“ und von ihren zerstörerischen Folgen.

Der eigenständige Seegang im Koog wird durch das örtliche Windfeld über der Wasserfläche des Kooges erzeugt und kann nach einem der herkömmlichen Wellenvoraberechnungsverfahren (z. B. nach BRETSCHNEIDER) berechnet werden; es ist zu beachten, daß eine Katastrophenflut mit Deichbrüchen auch immer mit extremen Windstärken verbunden ist. Hier sind für die Wellenhöhen vor allem die Streichlängen zwischen den beiden Deichlinien bei den entsprechenden Windrichtungen von Bedeutung, außerdem aber auch der Wasserstand; mit zunehmender Wassertiefe im Koog nehmen auch die Wellenhöhen zu. Bei einer Wassertiefe von 4 m und nur 2 km Streichlänge werden bei einer extremen Windgeschwindigkeit von 30 m/s bereits signifikante Wellenhöhen von rd. 1 m Höhe erzeugt.

In diesem Zusammenhang soll kurz auf die Frage eines optimalen Abstandes zweier Deichlinien eingegangen werden. Die Angaben darüber liegen weit auseinander; KAMBECK (1982) nennt Werte zwischen 500 m und 4 bis 5 km. Von der Belastung der Zweitdeichlinie her kann hier keine allgemeine Regel abgeleitet werden, weil die einzelnen Komponenten der Belastung sich gegenläufig in ihrer Abhängigkeit von dem Abstand verhalten. Wie im Abschnitt 3.3 gezeigt wurde, steigt der Wasserstand umso langsamer, je größer der Koog ist; umso später kann also auch eine eigenständige Windsee entstehen, die dann allerdings durch die mit der großen Koogfläche verbundenen Streichlängen wesentlich höher als bei einem kleinen Koog wird, der auf der anderen Seite wiederum schneller gefüllt wird. Bei geringem Abstand der beiden Deichlinien ist die Belastung des Zweitdeiches durch den durch die Bruchlücke einlaufenden Seegang erheblich; wenn diese hohe Belastung auch nur an den Strecken auftritt, die der Bruchstelle am nächsten liegen, so muß noch die gesamte Zweitdeichlinie darauf bemessen werden, weil die entsprechenden Bruchstellen in der Hauptdeichlinie nicht voraussagbar sind. Bei zunehmendem Abstand nimmt zwar der Einfluß des Seeganges aus der Bruchstelle ab; dafür wird aber die örtliche Windsee erheblich verstärkt. Auch örtliche Gegebenheiten spielen hier eine große Rolle; es folgt hieraus, daß hier keine allgemeinen Regeln für den Deichabstand oder die Kooggröße als Optimum abgeleitet werden können; diese Fragen müssen daher nach anderen Gesichtspunkten entschieden werden.

5. Sicherheitszuwachs durch Maßnahmen an der Hauptdeichlinie

Sowohl die Schnelligkeit der Koogfüllung (vgl. Abschn. 3.3) als auch die Stärke des durch die Bruchlücke einlaufenden Seeganges (vgl. Abschn. 4) hängen erheblich von der Breite b der Deichbruchstelle und der Schwellenhöhe H_s (vgl. Abb. 12) in Zusammenhang mit dem Außenwasserstand ab ; beide Einflüsse sind Bestandteile der Belastung der Zweitdeichlinie. Es sind daher für den Sicherheitszuwachs auch solche Maßnahmen geeignet, die bei einem Deichbruch an der Hauptdeichlinie diese Einflußgrößen in Schranken halten können; auf Abb. 21 sind drei solcher Möglichkeiten schematisch dargestellt.

In allen drei Fällen wird angenommen, daß – entweder durch Schäden an der Außenböschung durch Druckschlag und/oder Wellenaufschlag oder durch Wellenüberschlag an der Binnenböschung – ein Deichbruch an der Deichkrone bereits eingetreten ist und ein ständiger Überlauf stattfindet. Es soll jetzt durch geeignete Maßnahmen dafür gesorgt werden, daß die Überlaufhöhe $h(t)$ nach Abb. 12 und damit die Überlaufmenge nach Gleichung (19) auch nach dem Deichbruch unter Kontrolle gehalten wird, so daß es nicht zum fortgeschrittenen oder vollständigen Deichbruch nach Abb. 13 kommt. Dieses kann dadurch erreicht werden, daß die Restschwellenhöhe $H_s(t)$ nach Abb. 12 in geeigneter Form zu $H_s \sim \text{konst.}$ stabilisiert wird.

Eine Möglichkeit besteht in der Beschaffung eines hohen künstlichen Vorlandes (KRAMER, 1969), das z.B. aufgespült werden kann und mit einer Deckschicht mit ortsständiger Vegetation (Grasdecke) versehen wird. Seit langem sind bereits die günstigen Wirkungen von natürlichen Vorländern bekannt; die Ausführungen von BRAHMS (1754) wurden experimentell im Modell durch die Wattwellenversuche von HENSEN (1954) bestätigt. Ein solches Vorland bewirkt aber nicht nur eine Entlastung des anschließenden Seedeiches von den Wellenangriffen, sondern sorgt auch nach einem Deichbruch dafür, daß die Überlaufhöhe $h(t)$ durch die Vorlandhöhe in Grenzen gehalten wird. Wie Abb. 21 a zeigt, wird zwar durch die rückschreitende Erosion die Breite des Vorlandes fortwährend verringert, bei ausreichender Bemessung kann aber ausgeschlossen werden, daß durch diese Erosion während einer Sturmflut die gesamte Vorlandbreite aufgezehrt wird. Die Bemessung des Vorlandes nach Höhe und Breite muß dabei nach den örtlichen Gegebenheiten und entsprechenden Untersuchungen erfolgen.

Ein ähnlicher Effekt wird durch einen Stranddeich (Abb. 21 b) erreicht; als Stranddeiche sollen hier Deiche mit Außenböschungen bezeichnet werden, deren Neigungen denen natürlicher Strände (flacher als 1:12) entsprechen; an der Ostsee sind die Seedeiche vor der Probstei, an der Nordseeküste der deutsch-dänische Deich vor dem Rickelsbüller Koog Beispiele hierfür. Wie gerade der letztere Deich bei der Extremsturmflut vom 24. 11. 1981 gezeigt hat, werden durch die flachen Außenböschungen die Belastungen durch Druckschlag und Wellenaufschlag stark vermindert; ein solcher Deich wird aber auch nach einem Bruch an der Krone bei rückschreitender Erosion wesentlich kleinere Überlaufmengen liefern als ein Seedeich mit konventioneller Außenböschung. Die Wirkung wird umso größer sein, je flacher die Außenböschung ist (vgl. Abb. 21 b); bei der Bemessung ist die Schnelligkeit der rückschreitenden Erosion unter Berücksichtigung des Deichbaumaterials zu berücksichtigen.

Sowohl das künstliche Vorland (Abb. 21 a) als auch der Stranddeich (Abb. 21 b) beanspruchen breite Vorlandflächen. Wenn diese nicht verfügbar sind, kann auch ein Deich herkömmlicher Bauart eine bestimmte Restbruchsicherheit dadurch erhalten, daß das (bei einem Schardeich fast immer vorhandene) Außendeckwerk nach Abb. 21 c überlaufsicher gemacht wird. Es kann hierbei davon ausgegangen werden, daß die Außenböschung des Deckwerkes, die immer erhebliche Wellenbelastungen aushalten muß, auch bei einem ständigen Überlauf stabil bleibt; sie muß nur gegen eine Unterspülung vom oberen Ende her geschützt werden. Dies kann nach Abb. 21 c durch eine einfache Spundwand ausreichender

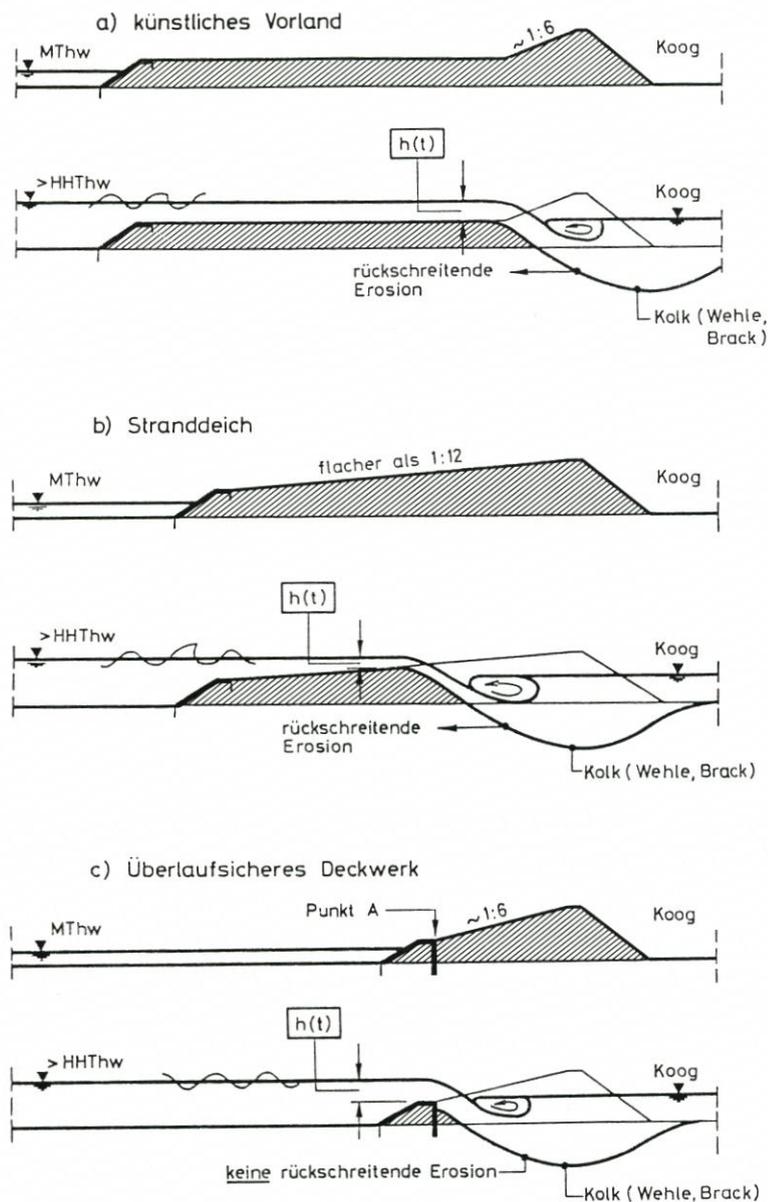


Abb. 21: Möglichkeiten zur Einschränkung von Deichbruchschäden an der Hauptdeichlinie (überhöht und schematisch)

Länge und geeigneter Bauart erreicht werden; wichtig ist dabei, daß am Punkt A der Anschluß dieser Spundwand an das Deckwerk konstruktiv so ausgebildet wird, daß Ausspülungen unter der Deckwerkschulter unbedingt vermieden werden. In diesem Fall wirkt das solchermaßen verstärkte Deckwerk nach einem Deichkronenbruch und nach Zerstörung der oberen Außenböschung wie ein Wehrrücken, wobei der Kolk das Tosbecken bildet (Abb. 21c). Die rückschreitende Erosion ist damit gestoppt; die Überlaufmenge hängt von der

Deckwerkhöhe ab und kann durch deren Bemessung gesteuert werden. Da gerade mit einer solchen Bauweise noch keine Erfahrungen vorliegen, sollten hier vor einer Ausführung eingehende theoretische und experimentelle Untersuchungen vorgesehen werden.

Bei allen Maßnahmen nach Abb. 21 wird die Überfallhöhe $h(t)$ und damit der Durchfluß vermindert; die Überfallhöhe geht dabei nach Gleichung (19) mit der Potenz 1,5 ein. Das bedeutet, daß bei einer Verminderung der mittleren Überfallhöhe auf 50 % die Überlaufmenge (Durchfluß) auf 35 % verringert wird; bereits dies macht sich erheblich auf die Füllungszeiten der Köge nach Abschnitt 3.3 bemerkbar.

Hinzu kommt aber, daß bei einer Verminderung der Überfallhöhe $h(t)$ auch die Strömungsgeschwindigkeiten an der Überlaufschwelle mit der Potenz 0,5 abnehmen (Gleichung [16]). Da die Seitenerosionen, die die Deichbruchbreite $b(t)$ zu vergrößern trachten, eng mit diesen Strömungsgeschwindigkeiten zusammenhängen, werden bei gleichen Randbedingungen vom Außenwasserstand her also auch die Breiten der Bruchlücken vermindert, was nach Gleichung (19) zusätzliche Verminderungen der einlaufenden Wassermengen und damit weitere Verzögerungen der Koogfüllungen bedeutet.

Abschließend sei erwähnt, daß ein vollständiger Deichbruch (vgl. Abb. 13) zu schwerwiegenden Folgeschäden dann führen kann, wenn die Koogfläche tiefer als das mittlere Tidehochwasser liegt; in vielen Kögen an der deutschen Nordseeküste sind die Landoberflächen sogar noch wesentlich tiefer (unter NN \pm 0 m). Hier wird aus einem vollständigen Deichbruch ein sog. *S t r o m b r u c h* (Bemerkung: oft auch als *G r u n d b r u c h* bezeichnet, dieser Begriff ist aber von der Bodenmechanik her sorgfältig in mehreren Formen definiert und sollte hier nicht verwendet werden), wo auch nach Ablauf der Sturmflut mit jeder Tide erhebliche Wassermassen ein- und ausströmen und in der Deichbruchstelle schnell einen tiefen Priel stehen lassen, wie es von vielen historischen Sturmflutkatastrophen berichtet wird; die Schließung des Deichbruches bedeutet dann einen erneuten Deichschluß mit all seinen Risiken und Kosten. Bei Ausbildungen der Hauptdeichlinie nach Abb. 21, wo selbstverständlich die Schwellenhöhen H_3 nach Abb. 12 wenigstens 1 m höher als das MThw gelegt werden würden, ist die Gefahr eines Strombruches auch nach einem Bruch der Deichkrone nicht gegeben.

Die hier (Abb. 21) angegebenen Baumaßnahmen sind selbstverständlich auch für solche Köge von Vorteil, die von nur e i n e r Deichlinie geschützt werden; sie machen aber auch bei dem Vorhandensein einer zweiten Deichlinie einen erheblichen zusätzlichen Sicherheitszuwachs aus.

6. Zusammenfassung

Zweitdeiche (auch Mitteldeiche, Achterdeiche u. a. genannt) haben die Aufgabe, im Falle eines Bruches des Hauptdeiches (Landesschutzdeiches) als zweite Verteidigungslinie dessen Aufgabe zu übernehmen. Die Bedeutung von Zweitdeichlinien ist seit dem Mittelalter bekannt.

Zweitdeiche stellen die Anwendung des sog. Redundanzprinzips im Küstenschutz dar. Redundante Systeme sind dadurch gekennzeichnet, daß im Falle des Versagens eines notwendigen Systemteils ein anderes dessen Funktion übernimmt. Von der Versagenswahrscheinlichkeit her ist ein Redundanzsystem durch das Multiplikationsgesetz der Wahrscheinlichkeitsrechnung

$$p = p_1 \cdot p_2$$

beschrieben, wo p die Wahrscheinlichkeit bedeutet, daß beide Teile zugleich versagen, während p_1 und p_2 die Versagenswahrscheinlichkeiten der einzelnen Teile (hier: der 1. und 2. Deichlinie) bedeuten.

Die Versagenswahrscheinlichkeit eines einzelnen Deiches ist schwer zu quantifizieren, weil das Versagen eine große Zahl von Ursachen haben kann. Es ist aber möglich, relative Aussagen über den Sicherheitszuwachs zu machen, der durch eine zweite Deichlinie erreicht werden kann.

Es werden zunächst die Versagensmöglichkeiten einer einzelnen Deichlinie behandelt; sie gerät auf jeden Fall in einen überkritischen Zustand, wenn es bei hohen Sturmflutwasserständen zum Wellenüberlauf kommt. Es wird weiterhin gezeigt, daß bereits durch die Verkürzung einer Deichlinie, wie sie bei Vordeichungen angestrebt wird, ein gewisser Sicherheitszuwachs eintritt, der aber keinesfalls die Größenordnung erreicht, die durch eine Zweitdeichlinie erhalten wird (etwa 2 Zehnerpotenzen).

Der Sicherheitszuwachs hängt entscheidend davon ab, ob der Zweitdeich nach dem Bruch des Hauptdeiches selbst in einen überkritischen Zustand gerät; dies ist wiederum davon abhängig, wie schnell der Koog zwischen den beiden Deichen nach einem Deichbruch gefüllt wird. Hierzu werden in Näherungsrechnungen die hydromechanischen Vorgänge an einer Deichbruchstelle untersucht; die einströmende Wassermenge hängt außer von der Breite der Deichbruchstelle entscheidend von der Resthöhe ab, die an der Bruchstelle von dem gebrochenen Deich verbleibt.

Bei der Koogfüllung ist selbstverständlich die Fläche des Kooges von großer Bedeutung; ein kleiner Koog wird schneller als ein großer gefüllt. Interessant ist aber das Ergebnis, daß nach einem Deichbruch nicht so sehr die Höhe des Sturmflutscheitels, sondern daß vor allem die Verweilzeit des Wasserstandes an diesem Scheitel eine entscheidende Rolle für den Grad der Koogfüllung spielt; diese Abhängigkeiten werden mit entsprechenden Näherungsrechnungen quantifiziert.

Ist ein Koog ganz oder teilweise gefüllt, so wird auch der Zweitdeich durch einen Seegang belastet, der sich aus dem Seegang, der sich durch die Deichbruchstelle mit Diffraktionen ausbreitet, und dem Seegang, der im Koog als ortständiger Seegang durch den Wind (Sturm!) entsteht, durch Überlagerung zusammensetzt.

Eine allgemeine Regel für den optimalen Abstand zweier Deichlinien kann nicht gegeben werden, weil die einzelnen Belastungsgrößen der Zweitdeichlinie sich gegenläufig in ihren Abhängigkeiten von dem Abstand (oder der Kooggröße) verhalten.

Abschließend werden Möglichkeiten aufgewiesen, wie ein erheblicher Sicherheitszuwachs durch Maßnahmen gewonnen werden kann, die an der Hauptdeichlinie dafür sorgen, daß auch nach einem Bruch der Deichkrone noch eine stabile und hohe Überlaufschwelle verbleibt. Geeignet sind dafür ein hohes künstliches Vorland, eine sehr flache Außenböschung mit der Neigung eines natürlichen Strand (Stranddeich) und Deckwerke, die durch entsprechende konstruktive Maßnahmen auch nach einem Deichbruch stabil bleiben (überlaufsichere Deckwerke). Besonders bei tiefliegenden Kögen, wo die Gefahr eines Strombruches mit der Bildung eines Prieles in dem Koog besteht, kann durch solche Maßnahmen nicht nur die Überflutung begrenzt, sondern auch ein erneuter Deichschluß vermieden werden.

7. Schriftenverzeichnis

- BRAHMS, A.: Die Anfangsgründe der Deich- und Wasserbaukunst. Band I, 1754.
 ERCHINGER, H.-F.: Wellenaufbau an Seedeichen – Naturmessungen an der ostfriesischen Küste. Mitt. Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 41, 1974.
 FÜHRBÖTER, A.: Der Druckschlag durch Brecher auf Deichböschungen. Mitt. Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 28, 1966.

- FÜHRBÖTER, A.: Äußere Belastungen der Seedeiche. In: BRÖSSKAMP et al.: Seedeichbau – Theorie und Praxis. Verlag Vereinigung der Naßbaggerunternehmen, Hamburg, 1976.
- FÜHRBÖTER, A.: Über zeitliche Änderungen der Wahrscheinlichkeit von Extremsturmfluten an der deutschen Nordseeküste. Mitt. Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 51, 1976. Kurzfassung „Entwicklung und Bewertung von Wasserstandsstatistiken in Hinblick auf das Sturmflutgeschehen“. Jahrbuch d. Hafenbautechnischen Gesellschaft, 35. Band 1975/76.
- FÜHRBÖTER, A.: Wahrscheinlichkeiten und Häufigkeiten von Extremsturmfluten. Die Küste, H. 34, 1979.
- FÜHRBÖTER, A.: Über Verweilzeiten und Wellenenergien bei Sturmfluten. Mitt. Leichtweiß-Inst. der TU Braunschweig, H. 65, 1979. Jahrbuch der Hafenbautechnischen Gesellschaft, 38. Bd., 1981.
- HENSEN, W.: Modellversuche über den Wellenaufbau an Seedeichen im Wattengebiet. Mitt. Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 5, 1954.
- HENSEN, W.: Gedanken über den Deichbau. HANSA 99. Jahrg., Nr. 13. 1. Juli H. 1962.
- HUNDT, C.: Der maßgebende Sturmflutseegang und Wellenaufbau für das Deichbestick der deutschen Nordseeküste auf Grund der Sturmflut vom 16. Februar 1962. Die Küste, Jg. 10, H. 2, 1962.
- KAMBECK, W.: Die zweite Deichlinie. Eine Untersuchung über Begriff und Bedeutung (Teil I). Nordfriesland, 15. Band, 2. bis 4. Heft, 1981.
- KAMBECK, W.: Die zweite Deichlinie. Eine Untersuchung über Begriff und Bedeutung (Teil II). Nordfriesland, 16. Band, 1. u. 2. Heft, 1982.
- KRAMER, J.: Neue Deiche, Siele und Schöpfwerke zwischen Dollart und Jadebusen (ab 1945), aus: Ostfriesland im Schutze des Deiches, Band II, 1969. Deichacht Krummhörn, Sitz Pewsum.
- LÜDERS, K.: Von „Achterdeich“ bis „Zwistdeich“. Neues Archiv für Niedersachsen, Band 12, 1963.
- v. MISES, R.: Wahrscheinlichkeit, Statistik und Wahrheit. 4. Auflage, Springer-Verlag, 1972.
- PETERSEN, M.: Über die Grundlagen zur Bemessung der schleswig-holsteinischen Landesschutzdeiche. Die Küste, Jg. 3, Doppelh. 1/2, 1954.
- PETERSEN, M.: Die zweite Deichlinie im Schutzsystem der deutschen Nordseeküste. Die Küste, Jg. 14, H. 2, 1966.
- POISSON, S. D.: Lehrbuch der Wahrscheinlichkeitsrechnung, übersetzt von D. H. SCHNUSE. G. E. E. Meyer-Verlag, Braunschweig, 1841.
- TAUTENHAIN, E.: Der Wellenüberlauf an Seedeichen unter Berücksichtigung des Wellenaufbaues – Ein Beitrag zur Bemessung. Mitt. Franzius-Inst. der TU Hannover, H. 53, 1981.
- WEMELSFELDER, P. J.: Wetmatigheden in het optreden van stormvloeden. De Ingenieur, Maart, 1939.
- WOHLENBERG, E.: Der Deichbruch des Ülvesbüller Kooges in der Februar-Sturmflut 1962. Die Küste, Jg. 11, 1963.
- WOHLENBERG, E.: Deichbau und Deichpflege auf biologischer Grundlage. Die Küste, Jg. 13, 1965.
- ZITSCHER, F.-F.: Analyse von Außenböschungen scharliegender Seedeiche gegen Wellenbeanspruchung. Wasser und Boden, H. 10, 1962.