

# Folieneinsatz zur Notsicherung von Dämmen und Deichen

Von Harold Wagner

## 1 Einleitung

Die Hochwasser der letzten Jahre an Oder und Elbe, aber auch im Rhein- und Donaugebiet haben nachdrücklich gezeigt, dass auch in der Bundesrepublik Deutschland zahlreiche Deichabschnitte existieren, die den Sicherheitsanforderungen nicht genügt haben und leider auch in naher Zukunft nicht genügen werden.

Allein bei den deutschen Elbdeichen sind aus unterschiedlichsten Gründen augenblicklich ca. 350 km Deiche nicht in einem ausreichend sicheren Zustand. Da gemäß der momentan vorliegenden Planung selbst nach dem Jahr 2020 davon noch 93 km Deiche zu sanieren sind, ist auch dann noch hier wie auch in anderen Gebieten eine akute Gefährdung durch z. T. marode Deichabschnitte vorhanden. Gleichzeitig bleibt damit die Notwendigkeit von temporären, behelfsmäßigen, möglichst verbesserten Deichverteidigungsarbeiten bei extremen Hochwassersituationen bestehen.

Im Katalog der Notmaßnahmen, die in der Vergangenheit zur Deichsicherung gegen gefährliche Durchsickerungszustände getroffen wurden, spielten Folienabdeckungen auf der Wasserseite bei stark durchlässigen Deichen eine wesentliche Rolle. Nicht selten wurden diese Arbeiten erst nach dem Auftreten von ergiebigen Hangquellen in Angriff genommen. Oft erst nachdem im starken Maße Erdmaterial auf der Luftseite des Deiches ausgespült wurde, haben Einsatzkräfte der Deutschen Lebens-Rettungs-Gesellschaft (DLRG) in risikobe-

Es ist ein analytischer Ansatz zur Einschätzung der Dichtungswirkung von Folienauflagen auf grasbewachsene Deiche entwickelt worden. Als untere Einsatzschwelle dieser temporären Notsicherungsmaßnahmen im Hochwasserschutz wird ein kritischer Zustand definiert, bei dem Folien und Gras den Wasserüberdruck gegen den Erdkörper des Deiches gedrückt werden. Im Ergebnis der Untersuchung wird detailliert ausgewiesen, dass Folienauflagen bei stark durchlässigen, maroden Deichen notwendige und zweckmäßige Maßnahmen darstellen, die die gesamte Standsicherheit wesentlich verbessern können.

hafteter Taucherarbeit Folien auf der Wasserseite verlegt und mit Sandsäcken fixiert. In anderen Fällen wurden diese Maßnahmen bei maroden Deichabschnitten schon vorab als Prävention ergriffen.

In jüngster Zeit sind z. T. nicht unberechtigte Zweifel an der Effektivität solcher Arbeiten aufgetreten. Brauns u. a. [1] zeigten im Großversuch mit einem grasbewachsenen Deich (Durchlässigkeitsbeiwert  $k = 2 \cdot 10^{-4}$  m/s), dass eine analog zur üblichen Deichverteidigung vorgenommene Folienbelegung ohne erkennbare Wirkung auf die Verringerung der Sickerströmung geblieben ist.

In den nachfolgenden Ausführungen soll nun gezeigt werden, dass aus dem Sachverhalt dieses speziellen Versuchsergebnisses nicht pauschal die Schlussfolgerung abgeleitet werden darf, dass grundsätzlich Folienabdeckungen von Deichen als nutzlos zu betrachten sind.

Es soll deshalb detailliert nachgewiesen werden, wann und wie solche Abdeckungen wirken. Dabei wird die Funktion dieser Dichtungsmaßnahmen durch Absenkung der Sickerlinie hinter der Folienauflage, durch Verringerung des Sickergefälles und der Sickergeschwindigkeit sowie durch die Verminderung des Sickerdurchflusses gekennzeichnet.

Alle diese verkleinerten Einflussgrößen sind für die Deiche standsicherheitserhöhend. Sie verringern die Gefährdungen durch innere Erosion, durch Erosionsgrundbruch,

durch Rutschungen von Teilbereichen der luftseitigen Böschung und damit insgesamt von Deichbrüchen.

Im Vorgriff auf das Ergebnis ist hier folgender Sachverhalt anzumerken: In Deichbereichen mit hohem Sickerwasseranfall, d. h. sowohl bei großen Durchlässigkeiten wie auch bei großem Gefälle, also vorwiegend in maroden Teilabschnitten, ist die Not- und Zweckmäßigkeit provisorischer Sicherungsmaßnahmen durch Folienauflagen stets vorhanden.

## 2 Plastikfolien als Notabdeckungen von Deichen

Die erprobte Dichtungswirkung von Kunststoffbahnen im Wasserbau, mit ihren kleinen Bauhöhen und dem geringen Materialeinsatz, ließen Plastikfolien (Kunststoffdichtungsbahnen mit unter 1 mm Stärke) im Katastrophenschutz, bei Sicherungsarbeiten gegen gefährliche Durchströmungszustände an Deichen, als besonders geeignete Elemente erscheinen.

Dabei dürfen allerdings gravierende konstruktive und funktionelle Unterschiede zwischen der standardmäßigen Anwendung von Kunststoffbahnen und den Notmaßnahmen zur Deichsicherung nicht übersehen werden. Sie sind in Wesentlichen in **Tabelle 1** aufgelistet und gegenüber gestellt.

Die Wertung dieser Faktoren lässt, und das soll nicht abgestritten werden, Zweifel an der Wirkung der im Hochwasserschutz

Tabelle 1: Gegenüberstellung technisch relevanter Faktoren der standardmäßigen Anwendung von Kunststoffbahnen im Wasserbau und der Folienabdeckung von Deichen als Notmaßnahme bei der Deichverteidigung

	Standardmäßige Anwendung von Kunststoffbahnen im Wasserbau	Folienabdeckung als Notmaßnahme zur Deichverteidigung
<b>Gründung</b>	Kunststoffdichtungsbahnen werden auf eine standfeste, sorgfältig verdichtete, großformatig begrenzte, geebnete Unterlage im Trockenen verlegt. Die Unterlage wird ggf. noch durch ein Geotextil verbessert.	Folien werden direkt auf die Grasdecke der Deichaußenböschung sowohl im Trockenen wie auch unter Wasser verlegt.
<b>Materialdicken</b>	Kunststoffdichtungsbahnen werden mit Mindestdicken von 2,5 mm verwendet.	Folien haben grundsätzlich Materialstärken unter 1 mm. Sie werden oft mit Materialstärken von 0,3 mm verwendet.
<b>Materialverbindungen</b>	Kunststoffdichtungsbahnen werden je nach Werkstoff durch Schweißen, Vulkanisieren oder Kleben sorgfältig zusammengefügt.	Folien werden ausschließlich überlappt verlegt und meist an den Überlappungen mit Sandsäcken fixiert.
<b>Rand-einbindungen</b>	Kunststoffdichtungen werden an den Fuß-, an den Kopf- und an den Seitenanschlüssen mit besonderem Aufwand hergestellt.	Folienabdeckungen werden am Fuß, am Kopf und an den Seiten ausschließlich durch Sandsackauflagen gesichert.
<b>Abdeckungen</b>	Kunststoffdichtungen werden grundsätzlich mit einer Deckschicht versehen, die einerseits die Kunststoffbahnen vor lokalen, äußeren Einwirkungen schützt und sie gleichzeitig an die Unterlage presst.	Folienabdeckungen von Deichen werden als Notsicherungen außer an den Rand- und Überlappungsfixierungen nicht überdeckt.

Dazu gehören allgemein folgende Anteile:

- Sickerzuflüsse durch Löcher und Beschädigungen (Durchschläge) in den Folien
- Sickerzuflüsse durch die Überlappungen der Bahnen
- Sickerzuflüsse durch den Grasspalt unter den Folien am Deichfuß
- Zuflüsse durch Umsickerung der Einbindung am Deichfuß
- Sickerdurchflüsse durch den Grasspalt unter den Folien an den Längsseitenenden
- Zuflüsse durch Umsickerung der Einbindungen der Längsseitenenden
- Zuflüsse durch Überlauf über das Kopfende der Folienabdeckung

Für einen solchen Nachweis der hydraulischen Effektivität von Folienabdeckungen muss absehbar durch die Vielfalt dieser Einflussfaktoren ein umfangreiches, schwer handhabbares Bestimmungssystem entstehen. Die Arbeit mit diesem Berechnungssystem wird aber zusätzlich durch die besondere Wirksamkeit der Grasabdeckungen unter den Folien erschwert, die örtlich unterschiedlich sind und zusätzlich unter Druck geometrisch und hydraulisch veränderliche Eigenschaften ausweisen.

Die möglichst umfassende Einbeziehung aller wichtigen Wirkungsfaktoren kann deshalb nachfolgend auch nur zu einer Abschätzung der Effekte führen. Sie wird auf ein Deichsystem gemäß **Bild 1** bezogen, das unmittelbar auf undurchlässigem Untergrund aufbaut und am oberen Ende in der Folienabdeckung statisch nicht überströmt wird.

Für ein solches System kann die prinzipielle Abhängigkeit zwischen der hydraulischen Wirksamkeit  $\eta$  (relative Absenkung der Sickerlinie hinter der Folie), den Deich-

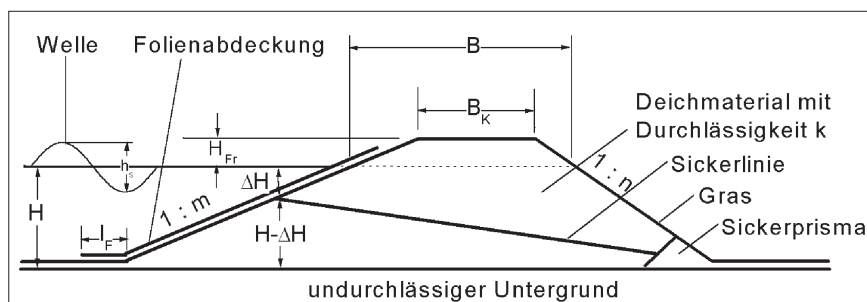


Bild 1: Systemskizze

praktizierten Folienabdeckung aufkommen. Da darüber hinaus erfahrungsgemäß schon relativ kleine Durchschläge und Öffnungen im System von Kunststoffdichtungen bedeutende Effekte für Durchfluss und Standsicherheit hervorrufen können, sind massive Bedenken gegen die Praxis der Deichverteidigung durch Folienabdeckungen mit ihren zahlreichen Öffnungsstellen nicht unberechtigt.

Eine reale Einschätzung der Wirkung solcher Folienabdeckungen ist jedoch nicht auf der Grundlage eines einzelnen Versuches, sondern nur einer vergleichenden, die Vielzahl und die Variation der Einflussparameter einbeziehenden Untersuchung möglich.

Um die Wirksamkeit von Folienabdeckung auf der Wasserseite eines grasbewachsenen Deiches zu bewerten, muss die Sickerwassermenge, die bei den vorhandenen

Druckhöhenverhältnissen pro Zeiteinheit durch den Erdkörper des Deiches sickern kann, mit dem Zufluss verglichen werden, der unter den jeweils bestehenden Verhältnissen von der Wasserseite unter die Folie möglich ist.

## Plastic Sheetting to the Emergency Measures of Dams and Dikes

by Harold Wagner

There has been developed an analytical approach to rate the sealing effect of plastic sheetting onto grassy dikes. A critical state was defined as a lower threshold of these temporary measures of emergency protection, where the plastic sheets and the grass have been pressed down against the dike body, as an effect of the overpressure of the water. As a result of the investigation, it is elaborated in detail, that plastic sheetting indeed can significantly increase the stability of the dike in something special case of high permeability and in danger through internal erosion.

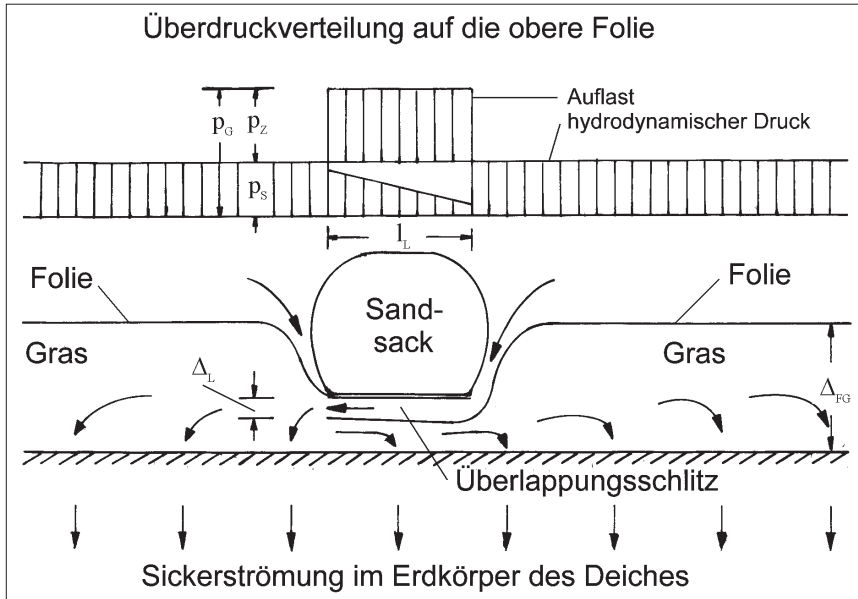


Bild 2: Systemskizze für den Überlappungsbereich vor Erreichen des Grenzzustandes

### 3 Grenzzustand der Dichtungswirkung

Damit ein effektives Dichtungsverhalten aber überhaupt zustande kommen kann, muss ein Grenzzustand erreicht und überschritten werden, bei dem die zunächst fast widerstandsfreie Verteilerfunktion der Grasschicht unter der Folie überwunden wird. Das Gras muss flächenhaft umgebogen, komprimiert und zusammen mit der Folie gegen den Deichkörper gepresst werden. Diese Situation kann unter bestimmten geometrischen und hydraulischen Bedingungen durch einen initialen Überdruck auf die Oberseiten der Folien entstehen, der durch Widerstände bei der Fließbewegung durch die verschiedenen Öffnungen (Auflagen, Überlappungen, Durchschläge) in den Raum unter der Folie hervorgerufen wird. Es ist deshalb bedeutsam, die Verlegetechnik der Folien so zu gestalten, dass die primären Fließwiderstände hoch ausfallen und dass damit der Grenzzustand möglichst frühzeitig erreicht und überwunden wird.

kennwerten und den speziellen Besonderheiten der Folienabdeckung folgendermaßen abgeschätzt werden:

Dieses Gleichungssystem, für das die Kenngrößen am Schluss unter „Symbolen“ erläutert sind, sieht komplizierter aus, als

zun, die rechte Seite von Gl. (1), und zwar in ihrer Gesamtheit, so klein zu halten, dass ausreichend große Werte für  $\eta$  ausgewiesen werden können, die dann den

Durchfluss verringern und die Stand-sicherheit verbessern.

Nach Überschreitung dieses Grenzzustandes verringert sich die Verteilerfunktion der Grasschicht, der Durchflussquerschnitt wird reduziert, der Strömungswiderstand in dieser Schicht wächst beachtlich, die Stromlinien im angrenzenden Erdteil des Damms werden gespreizt, und die Dichtungswirkung steigt sprunghaft an. Das Niederdrücken der Grasschicht unter der Folie ist in der Praxis umgekehrt auch immer ein Indiz für den Beginn einer effektiven Wirkung der eingesetzten Not-sicherung.

$$\frac{1}{\sqrt{\eta} \cdot \left(1 - \frac{\eta}{3}\right)} \cdot \frac{(1-\eta)^2}{(1+C \cdot \eta)} = \frac{\phi}{\sqrt{\eta} \cdot \left(1 - \frac{\eta}{3}\right)} = \frac{4 \cdot m^2}{3 \cdot C} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}}{k} \cdot (Z_D + Z_L + Z_F + Z_U + Z_S) \quad (1)$$

es in der Grundaussage tatsächlich ist.

Auf der rechten Seite von Gl.(1) steht die Summe der verschiedenartigen Zuflüsse hinter die Folie im Verhältnis zum Sickerabfluss ohne Dichtung. Dabei kennzeichnet der Wert mit dem Formparameter C der Deichprofile

$$\frac{3}{4} \cdot k \cdot \frac{C}{m^2}$$

den spezifischen Sickerabfluss durch den Erddeich ohne Folienabdeckung pro Einheitsgröße der Böschungsoberfläche. Der Ausdruck

$$\frac{3 \cdot C}{2 \cdot m}$$

bezeichnet das dazu gehörige Sickergefälle.

Auf der linken Seite von Gl. (1) steht in impliziter Abhängigkeit die gesuchte Größe der hydraulischen Effektivität  $\eta$ .

Aufgabe der Bemessung bzw. der Ausführung der Notdichtung mit Folien ist es

$$\eta = \frac{\phi}{H} \quad (2)$$

$$\phi = \frac{(1-\eta)^2}{1+C \cdot \eta} = (1-\eta) \cdot \phi \quad (3)$$

$$C = \frac{2m}{3 \left( \frac{B}{n} + \frac{m}{3} \right)} \quad (4)$$

$$Z_D = \mu_D \cdot \chi \quad (5)$$

$$Z_L = \mu_L \cdot \frac{\Delta L}{b_F} \quad (6)$$

$$Z_F = \mu_F \cdot \frac{\Delta FG}{m \cdot H} \cdot \frac{1}{1-\eta/3} \quad (7)$$

$$Z_S = \mu_S \cdot \frac{2 \cdot \Delta FG}{b_L} + \frac{k}{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}} \cdot \frac{H}{b_L} \cdot \frac{A}{2} \quad (8)$$

$$Z_U \leq \frac{1}{\sqrt{\eta} \cdot (1-\eta/3)} \cdot \frac{0,35 \cdot \sqrt{g \cdot h_S^3}}{m \cdot H} \cdot \exp\left(-m \cdot \frac{H_F}{h_S}\right) \quad (9)$$

Nach bisher vorliegenden Untersuchungen kann der Grenzzustand, bei dem die elastischen Eigenschaften des Grasbewuchses überwunden und die Folie zusammen mit dem Grasmaterial an den Erdkörper des Damms angepresst werden, durch einen minimalen, kritischen Überdruck von

$$p_{kr} = \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta_{kr} = 0,5 \text{ kPa} \quad (10)$$

bzw. durch

$$\eta_{kr} \cdot H = 0,05 \text{ m}$$

charakterisiert werden. Weitere Spezifizierungen dieses Grenzwertes in Abhängigkeit vom Graswuchs, von der Folienelastizität und der Untergrundbeschaffenheit sind zukünftig wünschenswert.

Da das Erreichen dieses Grenzzustandes und damit des Beginns der Aktivierung der Fließwiderstände in der unter der Folie

liegenden Grasschicht gleichzeitig als untere Einsatzschwelle für Folienabdeckung von Deichen im Katastrophenschutz anzusehen ist, wird seiner Darstellung besondere Bedeutung zugemessen.

#### 4 Wirkung von Überlappungsschlitzten der Folienabdeckung

Aus Platzgründen kann nachfolgend nur zum Hauptfaktor der Durchlässigkeit von Folienauflagen Stellung genommen werden. Es sind die Überlappungen in den Folienabdeckungen der Deiche. Sie stellen im allgemeinen die größte Öffnungsfläche in der provisorischen Dichtung dar und haben damit auch gleichzeitig die dominierende Bedeutung für die Dichtungswirkung.

Ähnlich wie die Folienauflage am Bauwerksfuß und an den Seitenenden der Notsicherung, zu denen in einem weiteren Bericht Stellung genommen werden kann, sind auch Überlappungen (siehe Bild 2) von Folien und Kunststoffbahnen auf der Wasserseite von Dämmen und Deichen ein zum Teil selbstdichtendes System.

Das Wasser muss vor der Durchsickerung des Deichkörpers den schmalen Überlappungsspalt mit Richtungsänderungen sowohl beim Ein- wie auch beim Auslauf und auch zumindest teilweise den unterschiedlich komprimierten Grasschlitz passieren. Zu diesem Strömungsvorgang wird eine Druckhöhe  $\Delta H$  benötigt, die sich aus der Geschwindigkeitshöhe, den Ein-, Aus- und Umlenkungsverlusthöhen sowie der Reibungsverlusthöhe entlang des Strömungsweges im Überlappungs- und Grasschlitz zusammensetzt. Sie vermindert dabei zwangsläufig die Ausgangsdruckhöhe für die Erdkörperdurchsickerung des Deiches und ist mit dem Überdruck

$$p_s = \rho \cdot g \cdot \Delta H = \rho \cdot g \cdot H \cdot \eta \quad (11)$$

auf der Außenseite der Folie darstellbar. Dieser Überdruck presst den Überlappungsschlitz weiter zusammen und die gesamte Kunststoffabdeckung an die jeweilige Unterlage an.

Ein solcher, selbsttätiger Dichtungseffekt ist abhängig

- von der Anfangsschlitzweite  $\Delta_{L0}$  und damit von der Untergrundbeschaffenheit, der Verlegungstechnologie, der Folienstärke, der Art des Kunststoffmaterials

und der Temperatur (Schlitzweitencharakteristik),

- von der Vorbelastung  $p_z$  (Schutzschicht, Sandsackauflast),
- von der Überlappungslänge  $l$ ,
- sowie von der Durchflussgeschwindigkeit  $v_L$  zwischen den Folien und darüber hinaus von der hydraulischen Effektivität  $\eta$  des Gesamtsystems und der Gesamtdruckhöhe  $H$ .

Wenn Folien mit ihrer Wirkungsbreite  $b_F$  in Neigungsrichtung der Deichböschung ausgerollt werden, kann der analytische Ansatz für die Einschätzung der Effektivität einer solchen Notdichtung allein infolge der Undichtigkeiten in den Folienüberlappungen direkt aus Gl.(1) und Gl. (6) mit der Bedingung

$$Z_{D+} + Z_{F+} + Z_{G+} + Z_S = 0 \text{ und } Z_L \uparrow 0 \text{ abgeleitet werden.}$$

Es ist

$$\frac{1}{\sqrt{\eta}} \cdot \frac{(1-\eta)^2}{(1+C \cdot \eta)} \cdot \frac{1}{1-\eta/3} = \frac{4 \cdot m^2}{3 \cdot C} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}}{k} \cdot \mu_L \cdot \frac{\Delta_L}{b_F} \quad (12)$$

mit

$$\mu_L = \frac{\sqrt{0,5 \cdot g \cdot H} \cdot \sqrt{\eta} \cdot (1-\eta/3)}{1,25v_L + \frac{12 \cdot v \cdot l_L}{\Delta_L^2} + \frac{a \cdot b_F \cdot g \cdot \Delta_L}{8 \cdot k_G \cdot \Delta_{FG}} - \frac{g \cdot \Delta_L}{\pi \cdot k} \cdot \ln \sin \left( \frac{\pi}{2} \cdot \frac{c \cdot \Delta_{FG}}{b_F} \right)} \quad (13)$$

Im Nenner von Gl. (13) kennzeichnen die 4 Summanden die Wirkung der unterschiedlichen Widerstände, die bei der Durchsickerung des Dichtungssystems auftreten.

Der erste Summand beschreibt die Wirkung der Beschleunigung der Sickerströmung vom Wert 0 auf den Wert  $v_L$ , den Ein-, Austritts- und Krümmungsverlust. Das zweite Glied unter dem Bruchstrich kennzeichnet die Reibungsverluste im Überlappungsschlitz zwischen den Folien. Der dritte Summand charakterisiert die Widerstandswirkung für die Strömung in der komprimierten Grasschicht unter den Folien, und schließlich beschreibt der letzte Summand die Widerstandserhöhung, die durch Spreizung der Stromlinien im Deichkörper nach Teilpassage des Grasschlitzes zustande kommt.

Die Schlitzweite zwischen den Folien der Überlappung  $\Delta_L$  kann nach bisherigen Abschätzungen für  $p_c > 0,5$  kPa mit

$$\Delta_L = 0,52 \cdot 10^{-3} \cdot \left( 2,2 - \sqrt{1 - \log \frac{p_G}{p_O}} \right) \quad (14)$$

in Ansatz gebracht werden.

Analog dazu gilt als unterer Mittelwert für die Stärke der Grasschicht unter der Folie bei  $p_c > 1$  kPa

$$\Delta_{FG} \cong 1,56 \cdot 10^{-3} \cdot \left( 2,2 - \sqrt{1 - \log \frac{p_G}{p_O}} \right) \quad (15)$$

Für die druckabhängige Durchlässigkeit der Grasschicht wird angesetzt:

$$k_G \cong 0,035 \cdot \sqrt{\frac{p_O}{p_G}} = 0,035 \cdot \sqrt{\frac{p_O}{p_Z + p_S}} \quad (16)$$

Die Größe  $p_c$  kennzeichnet in diesen Beziehungen den gesamten Überdruck, der auf die einzelnen Abschnitte der Folienabdeckung wirkt. Er setzt sich aus der Vorbelastung  $p_z$  (z. B. Sandsackauflast) und dem strömungsbedingten Anteil  $p_s$  zusammen.

Aus Gl. (12) und Gl.(13) ist direkt die Charakteristik des Grenzzustandes ableitbar:

$$\frac{1}{\eta_{Kr}} \cdot \left( \frac{1-\eta_{Kr}}{1+C \cdot \eta_{Kr}} \right)^2 = \frac{g \cdot m^2 \cdot H}{9 \cdot v \cdot k \cdot C} \cdot \frac{\Delta_L^3}{b_F \cdot l_L} \cong \frac{1}{\eta_{Kr}} \quad (17)$$

Gl.(17) sagt aus, dass das Erreichen des Grenzzustandes, bei dem die Selbstdichtung einsetzt, direkt proportional ist zur Durchlässigkeit des Dammmaterials  $k$ , zum Formparameter  $C$  des Profils, zur Systembreite der Folienabdeckung  $b_F$  und zur Überlappungsbreite  $l_L$ . Umgekehrt proportional ist das Zustandekommen der Selbst-

dichtung vom Quadrat der wasserseitigen Deichneigung sowie von der dritten Potenz der Schlitzweite  $\varnothing$  zwischen den Folien bei der Überlappung.

Die besten Voraussetzungen zu einer erfolgreichen Notdichtung durch Folieneinlage haben deshalb steile, schmale Deiche mit großer Durchlässigkeit. Erfolgversprechend sind weiterhin Verlegungstechnologien, bei denen es vorrangig gelingt, die Schlitzweite zwischen den Folien auf ein Minimum zu reduzieren, mit möglichst breiten Folieneinlagen zu arbeiten und eine ausreichende Überlappungsbreite  $l_{Lkr}$

$$l_{Lkr} \geq \frac{g}{9 \cdot v} \cdot \eta_{Kr} \cdot \frac{m^2 \cdot H}{k \cdot C} \cdot \frac{\Delta L^3}{b_F} \quad (18)$$

mit  $\eta_{Kr} = 0,05 \cdot H$  zu garantieren.

Für ein Vergleichsbeispiel mit  $H = 5,00 \text{ m}$ ;  $H_{Fr} = 1,00 \text{ m}$ ;  $B_k = 2,00 \text{ m}$ ;  $b_L = 200 \text{ m}$ ;  $m = 3$ ;  $n = 2$ ;  $k = 10^{-4} \text{ m/s}$  sowie mit  $b_F = 3,50 \text{ m}$ ;  $h_{sa} = 0,12 \text{ m}$ ;  $\eta_{Kr} = 0,05 \cdot H = 0,01$  und  $p_z = p_s + p_s (\rho_s - \rho) \cdot (1 - n_F) \cdot h_{sa} + \rho \cdot g \cdot \eta_{Kr} \cdot H = 1438 \text{ Pa} = 1,438 \text{ kPa}$

ergibt sich:  
 $l_{Lkr} \geq 8,38 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 9,90 \cdot 10^5 \cdot 2,34 \cdot 10^{-10} = 1,98 \text{ m}$

Eine nach üblicher Art mit einreihiger Sandsackauflage hergestellte Foliendeckung bleibt damit ebenso wie der Großversuch von Brauns [1] ohne jede bemerkbare Wirkung, weil der Grenzstand nicht erreicht werden konnte. Es wird also in diesem Fall mehr Fließwiderstand, d. h. konkret, unter den hier vorliegenden Verhältnissen, eine durch Sandsäcke belastete Überlappungsbreite von ca. zwei Metern benötigt, um ohne Berücksichtigung der Füsseinbindung und weiterer Öffnungen in der Folieneinlage den Vorgang der Selbstdichtung einzuleiten.

Trotz dieses erheblichen, kaum noch zu steigenden Aufwandes beträgt in dieser Situation die hydraulische Effektivität  $\eta = 0,01$ ; das Durchflussverhältnis  $\Phi = 0,976$  und das Geschwindigkeitsverhältnis nur  $\phi = 0,986$ . Eine Folieneinlage auf der wasserseitigen Böschung des Deiches ist also in diesem Fall unwirksam und unsinnig.

Da sich die kritische Überlappungsbreite umgekehrt proportional zur Durchlässigkeit  $k$  verhält, ist es aus diesem Beispiel und aus dem analytischen Zusammenhang leicht erkennbar, dass Deiche Durchlässig-

keiten von etwa  $k > 2 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$  aufweisen sollten, um durch Folieneinlagen mit der bisher praktizierten Technologie eine wirksame Notdichtung zu erhalten.

Folieneinlagen sind damit besonders als Notsicherungsmaßnahme für stark durchlässige, marode, durch innere Erosion gefährdete Deiche und Dämme geeignet.

### 5 Dichtungsverhalten von Notsicherungen durch Folieneinlagen bei Existenz von Erosionsröhren

Erosionsröhren können bei Durchsickerungen von unsachgemäß aufgebauten Deichen durch ungleichmäßige Setzungen, durch Tätigkeit von Wühltieren sowie durch verrottende Wurzeln entstehen. Sie erhöhen den Sickerdurchfluss maßgebend und stellen eine gravierende Gefahr für die Standsicherheit von Deichen dar.

Um auch derartige Verhältnisse mit in eine Berechnung der Effektivität von Oberflächendichtungen einzubeziehen, können ideale, kennzeichnende Durchlässigkeitsbeiwerte  $k^x$  gebildet werden.

Der einfachste Ansatz dafür wird unter der Annahme von relativ gleichmäßig über die Böschungsoberfläche verteilten Erosionsöffnungen erhalten.

Dafür gilt:

$$k^x = k + 0,42 \cdot \frac{m^2}{C} \cdot \sqrt{g \cdot H} \cdot \frac{\sum D_i^2}{F_B} \quad (19)$$

Werden die einzelnen Erosionsröhren in ihrer Höhenlage  $\varepsilon \cdot H$  über Gründungsniveau mit in die Untersuchung einbezogen, so gilt:

$$k^x = k + 0,60 \cdot \frac{m}{C \cdot \phi} \cdot \sqrt{\frac{g}{H}} \cdot \frac{\sum (\sqrt{1 - \eta - \varepsilon_i} \cdot D_i^2)}{b_B} \quad (20)$$

Mit den Durchlässigkeitsbeiwerten  $k^x$  nach Gl. (19) und Gl. (20) können allgemein Dichtungseffekte von Folien auf Deichen nach der modifizierten Gl. (21) abgeschätzt werden.

$$\frac{1}{\sqrt{\eta} \cdot \left(1 - \frac{\eta}{3}\right)} \cdot \frac{(1 - \eta)^2}{(1 + C \cdot \eta)} = \frac{\phi}{\sqrt{\eta} \cdot \left(1 - \frac{\eta}{3}\right)} = \frac{4 \cdot m^2}{3 \cdot C} \cdot \frac{\sqrt{2 \cdot g \cdot H}}{k^x} \cdot (Z_D + Z_L + Z_F + Z_U + Z_S) \quad (21)$$

#### Berechnungsbeispiel:

Es ist zu untersuchen, ob ein durch innere Erosion gefährdeter Deichbereich mit Grasabdeckung als Notmaßnahme durch Folieneinlage gesichert werden kann.

Bei einer kurz vor dem Hochwasser durchgeführten Deichinspektion wurden in besonders gefährdeten Bereichen im Mittel zwei Erosionsröhren mit Durchmessern von ca.  $D = 0,06 \text{ m}$  auf einer Deichlänge von  $b_B = 3,00 \text{ m}$  festgestellt ( $F_B = b_B \cdot m \cdot H = 3 \cdot 3 \cdot 5 = 45 \text{ cm}^2$ ).

Die Folien sollen von der Deichkrone aus in Böschungsneigungsrichtung ( $m = 3$ ) überlappt ausgerollt werden. Im Überlappungsbereich werden die Folien durch Sandsackauflagen dicht an dicht beschwert.

Die Notsanierung wird ohne Beschädigung der Folien durchgeführt ( $\chi = 0$ ). Die Folien sind  $4 \text{ m}$  breit und werden bei der Verlegung  $l_L = 0,50 \text{ m}$  überlappt ( $b_F = 3,50 \text{ m}$ ).

Der Deich ist wie vorher gekennzeichnet durch Abmessungen von  $H = 5,00 \text{ m}$ ;  $H_{Fr} = 2,00 \text{ m}$ ;  $B_k = 2,00 \text{ m}$ ;  $n = 2$ ;  $m = 3$  und eine Materialdurchlässigkeit von  $k = 10^{-4} \text{ m/s}$ .

Zunächst wird ermittelt: Durchlässigkeit des Deichkörpers mit Erosionsröhren (Gl.(19)):

$$k^x = 10^{-4} + 0,42 \cdot \frac{9 \cdot \sqrt{9,81 \cdot 5}}{0,4545} \cdot \frac{2 \cdot 0,06^2}{45} = 9,42 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$$

Sandsackauflast unter Wasser bei Auflagehöhen von rd.  $0,12 \text{ m}$ :

$$p_z = 0,12 \cdot (2650 - 1000) \cdot (1 - 0,4) \cdot 9,81 = 1188 \text{ Pa} \approx 1,19 \text{ kPa}$$

Ein Überschlag nach Gl. (18), in die an Stelle von  $k$  der Wert  $k^x$  eingesetzt wird, zeigt, dass nur wenige Zentimeter belastete Überlappung genügen, um den Grenzstand zu überschreiten und die Phase der partiellen Selbstdichtung einzuleiten. Es ist also unter den vorliegenden Bedingungen mit einer effektiven Dichtungswirkung der Folieneinlage zu rechnen.

Durch Iteration der Gln. (21), (13), (16), (15) und (14) wurde weiterhin ermittelt:

$$\eta = 0,53 \quad \phi = 0,38 \quad \phi = 0,18$$

Durch die Folieneinlage konnten damit in

diesem Fall die Sickerlinie unter die Hälfte ihres Ausgangswertes gedrückt, das Sickergefälle bzw. die Sickergeschwindigkeit auf 38% verringert und der Sickerdurchfluss auf 18% des Ausgangswertes reduziert werden.

Da diese Dichtungseffekte bei Vergrößerung der Erosionsröhren wachsen, ist die geplante Notsicherungsmaßnahme als effektiv und zweckmäßig anzusehen. Sie sollte aber notwendiger Weise durch stabilisierende Maßnahmen an der luftseitigen Böschung, insbesondere am Böschungsfuß, ergänzt werden.

## 6 Schlussbemerkungen

Der vorliegende Beitrag soll dazu dienen, den im Katastrophenschutz verantwortlich Tätigen bei Hochwassereinsätzen einige Entscheidungshilfen zu speziellen Problemen der Deichsicherung in die Hand zu geben. Diesen Darstellungen sollen später detaillierte Ausführungsempfehlungen, die auch die Fuß-, Seiten- und Kopfeinbindungen mit einschließen, folgen.

Es konnte analytisch gezeigt werden, dass auch sorgfältig und sachgemäß durchgeführte Folienabdeckungen der Wasserseite bei quasi intakten, homogenen, grasbewachsenen Deichen mit Durchlässigkeiten im Mittel kleiner als  $k = 10^{-4}$  m/s keine merkbare Dichtungswirkung und damit auch keinen Erfolg haben können. Die Folien schwimmen faktisch hierbei auf einer relativ dichten Unterlage und werden vom Wasserdruck nicht an den Deichkörper angepresst.

Grundsätzlich anders ist jedoch die Situation bei besonders belasteten Deichabschnitten, die beispielsweise durch innere Erosion gefährdet sind. Hier ist die Wirkung einer Folienabdeckung nicht null und nichtig, sondern sie kann im Gegenteil sehr effektiv sein und die Standsicherheit des Bauwerks erhalten.

Erosionsröhren, die primär durch Wühltiere oder faulendes organisches Material entstanden sein können, vergrößern die Wasserdurchlässigkeit des Deichkörpers. Eine wesentliche Erhöhung des Wasserdurchflussvermögens durch den Deich wird aber dann von der Abflussleistung der Überlappungsschlitzte und der anderen Fehlstellen in der Folienauflage begrenzt. Durch den bei der Durchströmung dieser Bereiche auftretenden Druckverlust, der gleichzeitig als relativer Überdruck auf

Tabelle 2: Symbole

Symbole		
a	[1]	Verteilungsparameter der durchströmten Grasschicht $a = 0, 1$
b	[m]	Folienbreite
$b_D$	[m]	Länge des betrachteten Deichabschnittes mit Erosionsröhren
$b_E$	[m]	effektive Folienbreite
$b_L$	[m]	Gesamtbreite der Folienabdeckung entlang des Deiches
c	[1]	Verteilungsparameter der Stromlinienspreizung $c = 2, b_E/\Delta s_6$
g	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
$h_S$	[m]	signifikante Wellenhöhe
$h_{Sa}$	[m]	Füllstärke der Sandsäcke
k	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert des Deichmaterials ohne Erosionsröhren
$k^*$	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert des Deichmaterials mit Erosionsröhren
$k_G$	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert der komprimierten Grasschicht unter den Folien
l	[m]	belastete Überlappungslänge
$l_{kr}$	[m]	kritische Überlappungslänge
m	[1]	Neigung der wasserseitigen Böschung $m = \cot \alpha_w$
n	[1]	Neigung der luftseitigen Böschung $n = \cot \alpha_l$
$n_P$	[1]	Porenraum des Sandmaterials
$p_G$	[kPa]	Gesamtwert des Überdruckes auf die obere Folie
$p_{kr}$	[kPa]	kritischer Überdruck, bei dem die Folie an den Deichkörper gepresst wird
$p_0$	[kPa]	Atmosphärendruck $p_0 = 10$ kPa
$q_0$	[m <sup>3</sup> /s m]	Sickerdurchfluss durch den Deichkörper ohne Abdeckung mit Kunststoffbahnen
$q_1$	[m <sup>3</sup> /s m]	Sickerdurchfluss durch das Gesamtsystem Kunststoffdichtungsbahnen-Erdkörper
$v_L$	[m/s]	Strömungsgeschwindigkeit zwischen den Folien der Überlappung
A	[1]	Verteilungsparameter für die Seitenumwicklung
B	[m]	Deichbreite in Höhe des Wasserspiegels $B = B_0 + H_E(m+n)$
$B_K$	[m]	Kronenbreite des Deiches
C	[1]	Formparameter des Deichprofils
D	[m]	Durchmesser der Erosionsröhre i
$F_E$	[m <sup>2</sup> ]	Bezugsfläche der Böschung für die in Ansatz gestellten Erosionsröhren
H	[m]	Stauhöhe, Druckhöhe
$H_E$	[m]	Kopfhöhe der Folienabdeckung über dem Wasserspiegel
$H_{E_1}$	[m]	Freibordhöhe
H (1- $\eta$ )	[m]	Anfangsdruckhöhe für die Deichdurchsickerung hinter den Folien
$Z_0$	[1]	rel. Zuflussrate durch Durchschläge in den Folien
$Z_F$	[1]	rel. Zuflussrate über den Böschungsfuß
$Z_L$	[1]	rel. Zuflussrate durch die Überlappungen der Folien
$Z_S$	[1]	rel. Zuflussrate über die seitlichen Begrenzungen der Folienabdeckung
$Z_0$	[1]	rel. Zuflussanteil über die Oberkante der Folienabdeckung durch Wellen
$\chi$	[1]	Verhältnis der Öffnungsfläche (Lochfläche) zur Böschungsoberfläche
$e_i$	[1]	el. Höhenlage der Erosionsröhre i über Ausgangsniveau $H_E = e_i H$
$\phi$	[1]	Durchflussverhältnis, $\phi = q_1/q_0$
$\Phi$	[1]	Geschwindigkeitsverhältnis
$\eta$	[1]	hydraulische Wirksamkeit der Oberflächendichtung $\eta = \Delta H/H$
$\eta_{kr}$	[1]	Grenzwert der hydraulischen Wirksamkeit bei dem die Folie angepresst wird
$\mu_0$	[1]	Abflussbeiwert für die Strömung durch die Durchschläge
$\mu_F$	[1]	Abflussbeiwert für die Strömung im Grasschlitz am Böschungsfuß zwischen Folie und Erdkörper
$\mu_L$	[1]	Abflussbeiwert für die Strömung durch die Überlappungen
$\mu_S$	[1]	Abflussbeiwert für die Strömung im Grasschlitz an den seitlichen Enden der Notdichtung zwischen Folie und Erdkörper
v	[m <sup>2</sup> /s]	kinematische Zähigkeit des Wassers
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Wassers
$\rho_S$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Dichte des Sandmaterials
$\Delta_L$	[m]	Schlitzbreite zwischen den überlappenden Folien
$\Delta_{s6}$	[m]	Schlitzabstand zwischen Folie-Gras-Erdkörper
$\Delta_w$	[m]	partieller Druckhöhenverlust beim Durchsickern der Dichtungsstruktur

die Außenteile der Folien wirkt, kann unter solchen Bedingungen ein definierter Grenz-zustand überschritten und ein partieller Selbstdichtungseffekt eingeleitet werden. Dieser Selbstdichtungseffekt entsteht hauptsächlich durch Widerstandserhöhung der unter der Folie liegenden, dann komprimierten Grasschicht. Aus diesen Faktoren resultieren schließlich Durchflussminderungen und Standsicherheitsverbesserungen.

Da eine Gefährdung durch innere Erosion im Vorfeld selten erkennbar ist, aber leicht zum Deichbruch führen kann, ist es angeraten, in solchen Deichbereichen eine Folienabdeckung als Prävention vorzunehmen. In keinem Fall ist eine derartige Folienauflage auf der Wasserseite und der Deichkrone systemschädlich. Sie stellt stets eine Absicherung auch gegen verdeckte Mängel in der Deichstruktur dar, die sonst bei sich plötzlich dramatisch vergrößern-

den Durchflüssen zu ernststen Schäden und Gefahren führen könnten.

Folienbelegungen für Deichabschnitte mit Wühltrieb, mit unsachgemäßem Erdkörperaufbau, mit ungleichmäßigen Setzungen, mit Pumpbetrieb und mit beschädigten Oberflächendichtungen sind damit temporäre Notmaßnahmen, die die Bauwerkssicherheit ggf. auch in Verbindung mit anderen Sanierungsarbeiten wesentlich verbessern können.

Zur Abschätzung der auftretenden Dichtungseffekte sind Übersichtsbeziehungen angegeben worden, die sowohl die Absenkung der Sickerlinie hinter der Dichtung, die Verringerung der Sickergeschwindigkeit und auch die Durchflussminderung charakterisieren.

Es muss abschließend darauf hingewiesen werden, dass Notsicherungen von Deichen mit Folien stets als Gesamtheit und deshalb im Kontext mit anderen Maßnahmen zu sehen und anzuordnen sind. Dazu gehören meist Stabilisierungen des luftseitigen Böschungsfußes durch Neigungsverflachung oder Filterauflagen im unteren Drittel des Böschungsbereiches sowie Böschungsstütungen und Gegendruckbelastungen im anschließenden, luftseitigen Nahfeld. Alle Maßnahmen sind darauf ausgerichtet, das gefährdete Deichbauwerk mit einem Minimum an Aufwendungen in der verfügbaren Zeit effektiv zu sichern.

## Literatur

- [1] Brauns, J. u. a. (2003): Folien als Notsicherung bei durchsickerten Deichen – nützlich oder vergeblich? Wasserwirtschaft 93 (2003), H.3.

---

Anschrift des Verfassers:  
Prof. Dr.-Ing. habil. Harold Wagner  
Deutsche-Lebens-Rettungs-Gesellschaft  
LV Brandenburg  
Postfach 600553  
14405 Potsdam

