

# Die Alterung von Deichen und Dämmen

## Theoretische Grundlagen, Wissenschaft und Praxis

Dr.-Ing. Ronald Haselsteiner

### Abstract

Die Alterung von Deichen und Dämmen bezeichnet die zeitliche Änderung des Verhaltens der Erdbauwerke, welche auf biogene, geogene, anthropogene und/oder klimatische Faktoren zurückgeführt werden kann. Die Alterungsprozesse können periodisch, temporär, kontinuierlich und auch plötzlich auftreten. Wird durch die Alterungsprozesse das System Deich oder Damm mit Untergrund derart verändert, können die Schadensprozesse analog den Alterungsprozessen kontinuierlich, langsam oder auch plötzlich eintreten.

Es sind unterschiedliche Definitionen der Alterung in den Ingenieurwissenschaften zu finden. Mit Alterung verbindet man i.d.R. einen Verschlechterungsprozess, wobei es mit zunehmender Nutzungsdauer auch zu Verbesserungseffekten kommen kann, was z. B. durch die Festigkeitsentwicklung von Beton, das Zusetzen von Dichtungen mit Feinsediment, etc. erfolgen kann. Langzeitverformungen verbessern i.d.R. das Verhalten von Deiche und Dämmen nicht.

In der Praxis wird die Standsicherheit von Deichen und Dämmen bei der Bemessung nicht selten ausgereizt. Langwierige Alterungsprozesse werden hierbei i.d.R. nur indirekt über spezielle Lastfälle bzw. Bemessungssituationen, wie z. B. der Ausfall eines Sicherungselementes berücksichtigt. Eine Lebenszyklusbetrachtung, wie diese systematisch in Abb. 1 dargestellt ist, wird in der Praxis nicht durchgeführt. Bei der Planung werden zwar noch Aspekte des Baus, des Betriebes und der Nutzung berücksichtigt, aber nur selten werden bei der Planung bereits die Möglichkeiten für eine zukünftige Ertüchtigung und der Folgenutzung/Verwertung in Betracht gezogen.

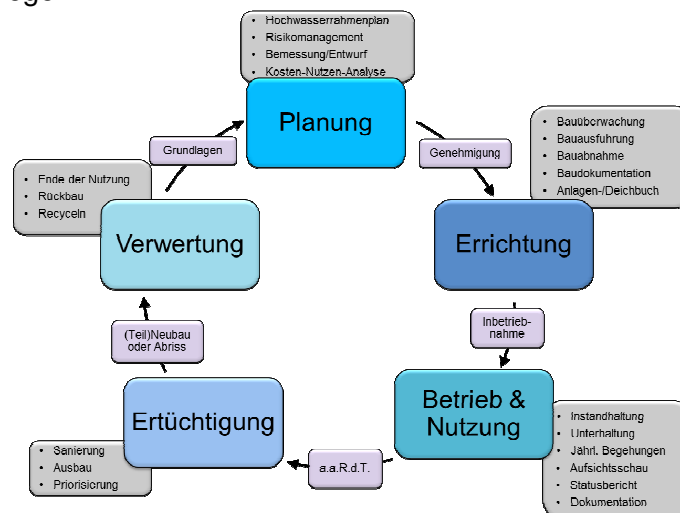


Abb. 1: Lebenszyklus bzw. Phasenmodell eines Deiches bzw. Damms

Der Alterungsprozess betrifft alle Materialien und Bestandteile eines Erdbauwerks und übt bereits während des Baus Auswirkungen auf die Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit im Vergleich zu den Bemessungsannahmen aus. Die Forschung auf diesem Gebiet betrachtet i.d.R. kleiner Teilprozesse, wie z. B. das Verhalten von dispersiven Tonen. Die Zusammenhänge im Hinblick auf Lebenszyklus und Langzeitverhalten sowie Auswirkungen auf die Praxis wurden bis dato noch nicht explizit für Deiche und Dämme betrachtet. Hier besteht eine klaffende Wissenslücke und ein erheblicher Forschungsbedarf.

## 1 Einleitung zur Alterung von Deichen und Dämmen

Der Alterungsprozess von Erdbauwerken in Form von hydraulisch temporär oder dauerhaft beaufschlagten Deichen und Dämmen beginnt mit der Errichtung des Bauwerks (Sackmann, 2001). Die Planung, die Herstellung und der Betrieb der Erdbauwerke legen den Grundstein für den Alterungsprozess. Unsachgemäß geplante, betriebene und hergestellte Erdbauwerke unterliegen i.d.R. einem stärkeren Alterungsprozess.

Nicht selten werden Deiche und Dämme so bemessen, dass die Sicherheit voll in Anspruch genommen wird. Dies gilt auch für den mit dem Teilsicherheitskonzept verbundenen Auslastungsgrad. Die Teilsicherheitsbeiwerte decken hier die Unsicherheiten und Variation der Einwirkungen und Widerstände ab, jedoch nicht die Änderung der Parameter infolge eines Alterungsprozesses. Werden bereits bei der Bemessung die Sicherheitsreserven ausgereizt, können mangelnde Bauausführung und Unterhaltung das Erdbauwerk hinsichtlich Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit relativ schnell in einen kritischen Zustand bringen, so dass den Einwirkungen nicht mehr mit der entsprechenden Sicherheit widerstanden werden kann.

Dieser Alterungsprozess wird von unterschiedlichen Faktoren bestimmt bzw. beschleunigt. Die Faktoren können nach Sackmann (2001) in vier Gruppen unterteilt werden:

- Biogene Faktoren
- Geogene Faktoren
- Anthropogene Faktoren
- Klimatische Faktoren

Andere Quellen beziehen sich nicht explizit auf Erdbauwerke, sondern auf Hochbauten und unterteilen die Einwirkungen entsprechend allgemeiner (IP Bau, 1992).

Die Alterungsprozesse können periodisch, temporär, kontinuierlich und auch plötzlich auftreten. Wird durch die Alterungsprozesse das System Deich oder Damm mit Untergrund derart verändert, können die Schadensprozesse analog den Alterungsprozessen kontinuierlich, langsam oder auch plötzlich eintreten. Die Schädigung des Erdbauwerks kann in unterschiedliche Prozesse oder Phasen unterteilt werden (Fell et al., 2005) und wird in letzter Konsequenz z. B. in einem Bruch des Erdbauwerks mit Bildung einer Deichbresche und Flutung des Hinterlandes führen.

Das Langzeitverhalten von Deichen und Dämmen wird erst seit relativ kurzer Zeit intensiver untersucht, was darin liegt, dass die Fragestellungen durch die „ins Alter gekommenen“ wasserbaulichen Bauwerke eine monetäre Relevanz besitzen. Die Frage, inwiefern wasserbauliche Erdbauwerke, welche vor Jahrzehnten errichtet wurden und seitdem den Einwirkungen bzw. den Alterungsprozessen unterliegen sind, ihre Funktion noch im Rahmen einer gewünschten Sicherheit erfüllen, beschäftigt alle Betreiber, zumindest in Mitteleuropa.

In der Schweiz wurde in diesem Zusammenhang bereits vor einiger Zeit folgendes festgestellt, dass *„Im Übrigen ... über den Zusammenhang zwischen Art und Intensität einer Einwirkung und eines Baustoffwiderstandes noch sehr wenig bekannt ist“*. (IP Bau, 1992)

Nur wenig ist über das Langzeitverhalten von wasserbaulichen Erdbauwerken bekannt. Auch wenn für die großen Talsperrendämme nicht selten lange Messreihen vorliegen, welche den Verformungs- und Durchsickerungszustand überwachen sollen, sind kleinere Dämme und Deiche i.d.R. nicht mit Messinstrumenten versehen und werden i.d.R. auch aufgrund des geringeren Schadenspotentials auch weniger strikt überwacht und unterhalten. Dabei haben i.d.R. Einwirkungen auf kleinere Erdbauwerke i.d.R. eine größere Wirkung, was dazu führt, dass bei kleineren Erdbauwerken die zeitliche Änderung von Eigenschaften eher zu einem

kritischen bauwerksverhalten führt, als dies bei großen Erd- oder Steinschüttdämmen der Fall sein kann.

## 2 Definition und Prozessabgrenzung

Eine exakte Definition für die Alterung (engl.: „ageing“, „aging“) ist in der Literatur im Zusammenhang mit Ingenieurbauwerken schwer zu finden. Der Begriff „Alterung“ beschreibt i. Allg. den zeitabhängigen Prozess der Änderung von Bauwerks- und/oder Materialeigenschaften (Suarez, 2012). Hierbei wird i. d. R. die Verschlechterung von Eigenschaften betrachtet, die i. d. R. auch zu einer Verschlechterung des Bauwerksverhaltens hinsichtlich Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit führt. Im Ingenieurwesen werden die Alterungsprozesse vor allem in der Chemie und im Bauwesen im Zusammenhang mit Polymerwerkstoffen betrachtet.

Auf die Tatsache, dass eine Veränderung von Eigenschaften, z. B. von Böden, nicht unbedingt zu einer Verschlechterung des Bauwerksverhaltens führen muss, wurde bereits hingewiesen (Sackmann, 2001).

In der Chemie wird die Alterung als eine Änderung der physikalischen und chemischen Eigenschaften eines Stoffes nach längerem Lagern oder bei Gebrauch bezeichnet. Weitere Definitionen sind aus dem Weinbau (Alterungsprozess) oder auch der Softwaretechnik (Softwarealterung) zu entnehmen. Im Duden ist die Alterung (auch „Altern“) mit Veränderung des Gefüges, der Zusammensetzung oder der Eigenschaften durch natürliches oder künstliches Altern definiert.

Im ICOLD Bulletin Nr. 93 aus dem Jahr 1994 „Ageing of Dams and Appurtenant Works“ ist auch eine Definition zu finden: *„For the purposes of this therefore, ageing is defined as a class of deterioration associated with time-related changes in the properties of the materials of which the structure and its foundation is constructed. Excluded are the effects of exceptional events. Under normal conditions during the operation of structures ageing will usually affect the performance requirements, and then later affect the safety if corrective measures are not taken.“* (ICOLD 93, 1994)

USSD (2010) nimmt Bezug zu ICOLD Bulletin 93 und gibt für Erd- und Steinschüttdämme folgende Definition zum Besten. Dabei grenzt man den Alterungsbegriff auf die zeitabhängige Änderung der Materialien ein. *„The aging of dams, constructed of earth and rockfill material, as defined herein is due to time-related changes in the properties of the materials of which the structure and its foundation are composed.“* (USSD, 2010, Seite 1)

*„Bauwerke sind, je nach Nutzung und Exposition den verschiedenartigsten Einwirkungen ausgesetzt. Diese können in natürliche und anthropogene, d.h. vom Menschen verursachte Einflüsse eingeteilt werden. Der Begriff Alterung kann den natürlichen Einwirkungen und der Begriff Schädigung den anthropogenen Einflüssen zugeordnet werden.“* (IP Bau, 1992)

Der Prozess der Alterung (natürlich) wird nach IP Bau (1992) gegen die Schädigung (anthropogen) abgegrenzt. Diese Abgrenzung scheint bereits nach einer ersten Überlegung für Erdbauwerke nicht hinreichend zutreffend zu sein, da auch natürliche Prozesse eine Schädigung herbeiführen können.

Sackmann (2001) verzichtet auf eine derartige Unterscheidung, sondern differenziert nur nach Einwirkungsgruppen und definiert, wie bereits oben aufgelistet wurde, vier (Faktoren)Gruppen.

Eine wesentliche Unterscheidung, welche wahrscheinlich auch im Sinne von IP Bau (1992) war, ist jedoch, ob es sich um einen Alterungsprozess handelt oder um eine Schädigung

bzw. um einen Schaden. Die Unterscheidung ist auch hier nicht immer ganz einfach, weil auch Alterungsprozesse einen Schaden bzw. eine Schädigung verursachen können, jedoch hiervon Ursachen zu unterscheiden sind, welche keine zeitliche Entwicklung bedürfen.

Die Schädigung bzw. der Schaden selbst können jedoch wiederum einem Alterungsprozess unterliegen, wobei auch hier die zeitliche Änderung sowohl eine heilende als auch eine Intensivierung des Schadens nach sich ziehen kann. Einige Beispiele sollen den Sachverhalt näher erläutern und die damit verbundenen Schwierigkeiten der Prozesszuordnung verdeutlichen.

Die zeitabhängige Verschlechterung von Baumaterialien und des Untergrundes wird auch in ICOLD 93 (1994) von den unvorhersehbaren oder außerordentlichen Vorkommnissen sowie Fehlfunktionen abgegrenzt.

Die Durchwurzelung von Dichtungen ist zweifelsohne eine biogene Einwirkung. Die Durchlässigkeit der Dichtung wird aufgrund der zeitlichen Entwicklung der Wurzeln i.d.R. erhöht, was zum kompletten Verlust der Dichtwirkung führen kann. Diese biogene Einwirkung setzt jedoch voraus, dass entweder die Unterhaltung nicht ordnungsgemäß durchgeführt wurde, was eine anthropogene Einwirkung wäre, oder dass bereits in der Konzeption bzw. dem Entwurf und der Planung der HWS-Anlage durch die Auswahl des falschen Dichtungssystems z. B. ohne ausreichendem Durchwurzelungswiderstand oder durch die Auswahl einer schädlichen Vegetationsform auf dem Erdbauwerk Fehler gemacht wurden, was wiederum ein anthropogener Faktor wäre. Als primäre Einwirkung, welche die physikalische Eigenschaft bzw. die Bemessungsgröße der Dichtung verändert, steht natürlich die biogene/biologische Einwirkung durch die Durchwurzelung im Vordergrund. Diese kann auch abgeschätzt oder zumindest mit Annahmen hinsichtlich einer quantitativen Änderung der Durchlässigkeit belegt werden.

Ausführungsfehler bzw. Mängel bei Planung und Bauausführung sind hingegen keine Alterung und hier anthropogener Art. Werden z. B. unsachgemäße Erdschüttstoffe verbaut, können bei entsprechender Belastung Verformungen, Durchsickerungszustände und Bodenumlagerungsprozesse auftreten, welche relativ schnell zu einer Schädigung des Erdbauwerks führen. Dies wird i. d. R. wiederum wieder zu einer Beschleunigung der „Alterungsprozesse“ führen. Eine Ausnahme stellen hier das Zusetzen von Dichtungen durch Feinteile (engl. „clogging“) dar. Hier wirkt sich ein zeitlicher Prozess positiv auf das Systemverhalten aus. Das Zusetzen von Fugen durch Feinteile wird im Talsperrenbau oft qualitativ berücksichtigt. Gleiches gilt für die „Selbsteheilungskräfte“ von tonbasierten Erdstoffen und Dichtungen.

Wachsen größere Gehölze auf oder an Erdbauwerken auf, dann ist dies eine biologische Einwirkung, welche sich über Wurzelwachstum, Beschattung der Oberfläche, etc. (vgl. Haselsteiner & Strobl, 2008) auf die Eigenschaften der Materialien und somit auch auf das Verhalten des Erdbauwerks selbst auswirkt. Tritt ein Versagen des Gehölzes auf, bei dem es zu einem Wurzelkrater kommt und der Stamm selbst eine Einkerbung in die Krone schlägt, ist dies eine Folge des Alterungsprozesses, jedoch der Prozess bewirkt keine Änderung der Materialeigenschaften mit der Zeit, sondern eine plötzliche Systemänderung/-schwächung bzw. ein Versagen eines Teils des Bauwerks bzw. des Systems.

Klimatische Einwirkung, wie z. B. Frost-Tau-Wechsel oder Austrocknung, sind klar erkennbare Alterungsprozesse, die sich zeitlich durch Rissbildung auf die Eigenschaften von betroffenen Materialien auswirken können.

Eine weitere klimatische Einwirkung stellt die Änderung der Hydrologie dar. Eine Unterscheidung zu den Bemessungs- bzw. äußeren Randbedingungen sollte erfolgen, da sich hier das Erdbauwerk und dessen Eigenschaften nicht ändern müssen, um nicht mehr den Anforderungen zu genügen. Ggf. ist eine Ertüchtigung des Erdbauwerks notwendig, obwohl die Ei-

enschaften des Erdbauwerks selbst sich nicht, sondern nur die äußeren Randbedingungen verändert haben. Die Änderung der äußeren Randbedingungen ist somit auch im Rahmen von Alterung zu betrachten. Zu diesen äußeren Randbedingungen zählen u. a. auch der Klimawandel und dessen Auswirkungen auf die Abflusssituation und die Wasserstände.

Ein ähnliches Beispiel von äußeren Randbedingungen bildet die Sedimentation von Reservoirs oder Abflussquerschnitten, welche sich auf die Bemessungswasserstände auswirken kann.

### **3 Lebenszyklus(-betrachtung)**

Die Betrachtung der Lebenszyklen von Ingenieurbauwerken tritt in letzter verstärkt in den Fokus von Ingenieuraufgaben in Form von ganzheitlichen Betrachtungen (Rudloff & Schwarz, 2008). Erweiterte Phasenmodelle betrachten zusätzlich Phasen, wie z. B. die Ertüchtigung und die Verwertung bzw. Folgenutzung (siehe Abb. 1).

In der Praxis werden i.d.R. immer noch die Phasen Planung, Bau und Betrieb/Unterhaltung als Bestandteil von Genehmigungsplanungen und der während des Betriebs vorgeschriebenen Überwachung, Unterhaltung und Dokumentation (DIN 19712, DIN 19700, etc.) berücksichtigt. Der Alterungsprozess wird in den neueren Regelwerken zu den HWS-Anlagen (DIN 19712) im Rahmen von Unterhaltung und Ertüchtigung maßnahmentechnisch erfasst. Themen wie Folgenutzung, Verwertung, Rückbau, etc. werden nicht explizit, jedoch im Zusammenhang der Thematik zu verwendende Baustoffe behandelt.

Im Kontext von Lebenszyklusbetrachtungen spielen die Alterung und auch die Nutzungsdauer (auch Lebensdauer, Betriebsdauer) eine wesentliche Rolle. Die Nutzungsdauer und die Alterung interagieren unweigerlich miteinander. Je stärker die Alterung sich auf das Bauwerk auswirkt, desto geringer wird die Nutzungsdauer sein. Geht man von einer fixen Nutzungsdauer aus, wie diese bei HWS-Anlagen zwischen 50 und 100 Jahre angesetzt wird, dann sind die Auswirkungen der Alterung (Kapitel 6) entsprechende Maßnahmen (vgl. Kapitel 7) entgegenzusetzen, um den Betrieb bzw. die Nutzung des Bauwerks unter den akzeptierten Sicherheitsstandards weiterführen zu können (Wieland, 2010).

Eine wichtige, jedoch auch veränderliche Stellgröße für die Bewertung einer regelkonformen Nutzung des Erdbauwerks sind die allgemein anerkannten Regeln der Technik (a.a.R.d.T.), welches sich im Laufe der relativ langen Nutzungsdauern ändern und i.d.R. verschärfen können. Auch in dieser Hinsicht unterliegt ein Deich oder Damm einem Alterungsprozess, der dadurch begründet ist, dass neuere Regelwerke ausführlicher und mit weitaus mehr Anforderungen verfasst werden, als dies früher der Fall war. Dies resultiert zum einen aus stichhaltigen Erfahrungen und einem Wissensgewinn auf den jeweiligen Fachgebieten und zum anderen auch aus dem Drang heraus, alle ingenieurtechnischen Sachverhalte bis ins Detail regeln zu wollen und auch zu können.

Im Rahmen des Lebenszyklus muss das Bauwerk nach festzusetzenden Perioden vertieft überprüft und mit den Anforderungen der a.a.R.d.T. verglichen werden. Das Resultat des Vergleichs ist Startpunkt für mögliche Ertüchtigungs- und Unterhaltungsarbeiten oder einer (Rest-)Verwertung.

International wurde die Thematik z. B. bereits für Deiche im „International Levee Handbook“ aufgegriffen und diskutiert (Abb. 2). Hier wird der Kreislauf von der Beurteilung des Zustandes und der Funktionstüchtigkeit des Deiches über Maßnahmen zur Anpassung und der Sanierung/Ertüchtigung geschlossen, wobei der Kreislauf dann enden kann, wenn der Deich von seiner Hochwasserschutzwirkung entbunden (entwidmet) wird.

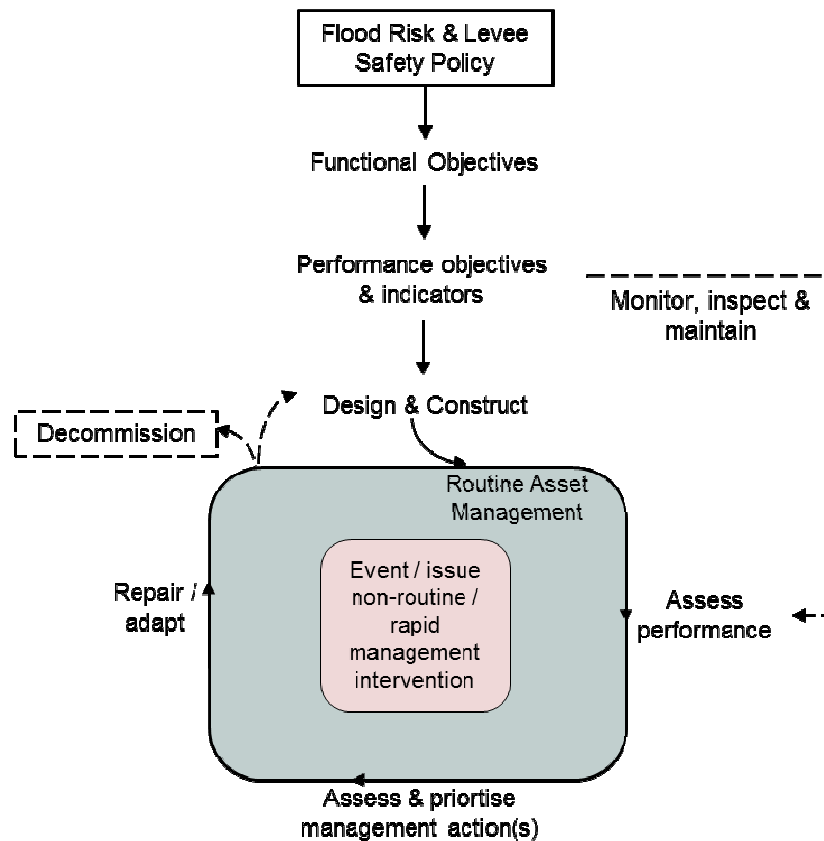


Abb. 2: Life Cycle Management of Levees (after Ciria, 2013)

#### 4 Langzeitverhalten von wasserbaulichen Erdbauwerken

In der Praxis wurde das Langzeitverhalten vornehmlich von größeren Dammbauwerken durch entsprechenden Überwachung und Messungen beobachtet. Hierbei wurden in erster Linie Messgrößen wie Verformungen, Spannungen, Porenwasserdrücke und Durchsickerungsmengen erfasst. In Einzelfällen wurden und werden die Veränderung von Materialeigenschaften durch eine direkte Probenentnahme und Laborversuchen ermittelt.

Nach ICOLD 93 (1994) sind Erdbauwerke von folgenden Alterungsprozessen bzw. deren Auswirkungen betroffen:

- Verformungen
- Verlust der Scherfestigkeit
- Porenwasserdruckerhöhung
- Erosion/Suffusion
- Oberflächenerosion
- Verschlechterung der Charakteristiken von Baustoffen

Besonders Kriech- und Konsolidierungsvorgänge tragen zu Langzeitverformungen bei. Die genannten Prozesse bedingen bzw. beeinflussen sich gegenseitig, so dass die Prozesse zwar einzeln dominieren können, jedoch stets den einen oder anderen Prozess mitbeeinflussen.

In Fell et al. (2005) wird für die Langzeitverformungen von größeren Erdschütt- und Steinschüttdämmen, welche nach „modernen“ erdbaulichen Kriterien hinsichtlich Materialauswahl, Verdichtungsarbeit, Wassergehalt, Schütthöhe, etc. errichtet wurden, ein Wert von 1 % der Dammhöhe („total settlement“) nachweislich nicht überschritten. Die maximalen Langzeitsetzungen werden erst nach Jahrzehnten erreicht und der Zuwachs an Verformungen nimmt i.d.R. mit fortschreitender Betriebsdauer ab. I. d. R. werden die Langzeitsetzungen von Erd-

bauwerken auch unter dem Begriff „Kriechen“ subsumiert, wenn diese nicht durch Veränderung des Spannungszustandes auftreten.

Die zeitliche Verformung kann dazu führen, dass aneinander grenzende Materialien an den Schichtgrenzen Risse, Spannungsumlagerungen oder ähnliche ungünstige Merkmale aufzeigen, welche das Verhalten des Dammes bei hydraulischer Belastung entscheidend beeinflussen können. Derartige Vorgänge an Schichtgrenzen können zum Beginn (engl.: „Initiation“) von Bodendeformationsvorgängen führen (vgl. Perzlmaier & Haselsteiner, 2006; Haselsteiner, 2009).

Die Zunahme an Porenwasserdrücken jenseits der angenommenen Bemessungswerte kann auf Alterungsprozessen von Dichtungen, Dränelemente, Filtermaterialien und/oder des Untergrundes zurückzuführen sein.

In Bettzieche & Bieberstein (2009) ist geschildert, wie Großtriaxialversuche an Steinschüttmaterial aus mehr oder minder Grauwacke durchgeführt wurden und ein stark spannungsabhängiges Verhalten detektiert wurde. Das Verhalten von Steinschüttungen ist in Haselsteiner et al. (2017) näher erläutert. Je nach Einfluss, besonders der Sättigung, können Steinschüttungen einen erheblichen Anteil (bis zu 50 %) der Scherfestigkeit verlieren.

Infolge von Austrocknung können wenig durchlässige Erdbaustoffe Risse erleiden, welche sich nicht selbst heilen und zu einer deutlichen Erhöhung der Systemdurchlässigkeit führen können. Das gleiche gilt für den Frost-Tau-Wechsel, welcher zu Verformungen und/oder einer Änderung des Korngefüges führen kann.

## **5 Änderung der physikalischen Parameter von Baustoffen und –materialien**

### **5.1 Allgemeines**

Im Damm- und Deichbau werden i.d.R. Erdschüttmaterialien, Geokunststoffe, Dichtungsmaterialien, Beton, Asphalt, etc. eingesetzt (siehe DWA M-507-1). Alle Materialien unterliegen einem Alterungsprozess. Je nach Material-/Stofftyp und Intensität der Einwirkung wirken sich die Alterungsprozesse mehr oder weniger stark auf die Eigenschaften aus.

Die Eigenschaften von Materialien können langfristig durch die o.g. Einflussfaktoren der Alterung beeinflusst werden. Zu den Einflussfaktoren zählen Frost und Tau, Wasserzutritt, Sättigung, Wind, UV-Strahlung, Hitze, etc. Es fällt vorerst nicht leicht, faunistische Einflussfaktoren als Alterungsprozess zu definieren. Denn während kleine Lebewesen wie Regenwürmer oder Ameisen eher langfristig auf Böden und Materialien eine gewisse Wirkung haben könnten, können Wühltiere wie Biber oder Fuchs relativ rasch zumindest bei kleinen Erdbauwerken zu schwerwiegenden Schadensbildern führen (vgl. DVWK 247). Die Schwierigkeit besteht schon darin, eine Grenze der Einwirkung hinsichtlich der Intensität bzw. der zeitlichen Entwicklung zu ziehen.

Alonso & Cardoso (2009) fassten möglich Einwirkungen von Alterungsprozessen von natürlichen Dammschüttmaterialien zusammen. Demnach unterliegen Steinschüttungen vor allem dem Kornbruch, Schluffe destabilisierenden Saugspannungseffekten und Tone Schwell- und Kollapsvorgängen. Sande werden mehr oder weniger als stabil angesehen, wobei bei Sanden eine mit der Zeit zunehmende Sättigung nahe der Fließgrenze zu einer Erhöhung des Verflüssigungspotentials führen kann.

### **5.2 Wenig durchlässige Böden und natürliche Dichtungen**

Das Langzeitverhalten und die Alterung von Tonen und tonigen Böden werden von der Zusammensetzung der Tonböden und den entsprechenden Tonmineralien bestimmt. Im Was-

serbau spielen vor allem dispersive Tone eine Rolle. Dispersive Tone können sich durch einen hohen gelösten Natriumgehalt auszeichnen und können sich entsprechend empfindlich bei Belastung verhalten. Normale Tone weisen i.d.R. im Porenwasser Magnesium oder Calcium auf. Dispersive Tone sind nicht erosionsstabil und sollten deshalb im Wasserbau für Dichtungen nicht angewendet werden. Mittels des sogenannten „pinhole“-Tests wird die Dispersivität von Tonen geprüft.

Zur Beständigkeit von natürlichen Dichtungen ist z. B. in DWA 512-1 zu finden, dass empfindlich gegenüber Austrocknung und Frost sind. Risse bieten einer Durchwurzelung Platz. Schutzschichten inklusiver einer Vegetationstragschicht sowie die Vegetation sollten so gewählt werden, dass es zu keiner Beeinträchtigung der Dichtung kommen kann. Natürliche Böden weisen auch keinen verlässlichen Widerstand gegen Wühltiere auf. Auf die Gefahr der chemischen Reaktionen bei Tonmineralien wird hingewiesen.

Das Vorhandensein einer „echten“ Kohäsion ist generell gegen das Auftreten von Bodendeformationsprozessen immer hilfreich. Ein Kriterium stellt hier der Massenanteil von Feinteilen  $d_{10} \leq 0,002$  m dar (vgl. BAW MSD, 2011). Generell wird bei natürlichen Dichtungen ein kritischer hydraulischer Gradient von  $i_{krit} = 4$  bis 5 betrachtet (DVWK 215).

In Kutzner (1996) wird im Zusammenhang mit dem feinsten Filter der Prozess der „Flockenbildung“ von Tonen beschrieben, welches hilft, dass auch bei sehr feinen Dichtungsstoffen, der feinste Filter ein Sand sein kann, der keine Kohäsion aufweist.

### 5.3 Künstliche Dichtungen

In DWA M-512-1 ist die Beständigkeit von künstlichen Dichtungen im Wasserbau beschrieben. Generell werden hier massive Dichtungen wie Zweiphasenschlitzwände, Bohrpfahlwände, Verfahren der Bodenvermörtelung oder Asphaltinnendichtungen mehr oder minder als uneingeschränkt beständig bezeichnet, wohingegen Tonbetone auch für Einphasenschlitzwände i.d.R. nicht frostbeständig sind. Schmalwände werden i.d.R. auch als Alterungsbeständig angesehen, jedoch wird auf die Anwendungsgrenzen und das Vermeiden von mechanischer Belastung durch Gehölze hingewiesen.

Injektionen aus unterschiedlichen Materialien werden in DWA M-512-1 durchgehend als beständig bewertet. Dies gilt auch für Hochdruckinjektionen.

Asphaltoberflächendichtungen sind zwar sehr widerstandsfähig, können aber nach DWA M-512-1 durchwurzelt werden.

### 5.4 Filter/Dräns, durchlässige Böden

Filter und Dräns sind wesentliche Bestandteile des Aufbaus von Dämmen und Deichen, um Erosionsprozesse zu verhindern und die Durchsickerung zu kontrollieren. Filter und Dräns müssen deshalb bei Verformungen geometrische Mindestabmessungen aufweisen und prinzipiell kein kohäsives Verhalten zeigen (Fell et al., 2005).

Filter und Dräns können bei nicht sachgerechter Planung und/oder Ausführung durch Materialtransport verstopft werden, was deren Durchlässigkeit kritisch herabsetzen kann. In diesem Zusammenhang können Suffusionsvorgänge entsprechend zu einer Verringerung der Durchlässigkeit des anschließenden Bodenmaterials beitragen. Auf die Verwendung der richtigen Materialien und die Führung der entsprechenden Nachweise sollte deshalb stets Wert gelegt werden (Foster & Fell, 1999).

Bei Neubauten wird generell empfohlen, die geometrische Filterwirksamkeit herzustellen und einen ungefilterten Austritt der Sickerlinie an die Oberfläche (bei entsprechend hohen hydraulischen Gradienten) zu vermeiden. Bei Bestandsbauwerken müssen oft zum Nachweis



der hydrodynamischen Bodendeformation (Haselsteiner, 2009) hydraulische Kriterien betrachtet werden. Bei Neubauten sollte dies nur unter besonderen Randbedingungen, wie z. B. bei der Anordnung von homogenen Deich- oder Dammbauquerschnitten, erfolgen. Hier sollten auch die instationären Durchsickerungszustände betrachtet werden (Haselsteiner, 2007).

## 5.5 Geokunststoffe

Die Anforderungen an Geokunststoffe im Wasserbau sind relativ strikt. So wird z. B. für Geomembrane im Talsperrenbau (ICOLD 135, 2010) eine Lebensdauer je nach Anwendung von  $T = 100$  bis  $200$  a vorgeschlagen und gefordert. Damit sind die Anforderungen an eine solche Membran denen an Beton gleich. Das Thema „Alterung“ wird in ICOLD 135 (2010) explizit aufgegriffen. Referenzprojekte werden herangezogen, um das positive Langzeitverhalten der unterschiedlichen Membrantypen darzustellen. Die ersten Membranen wurden 1959/60 an einer Talsperre in Italien eingebaut. Nach DWA M-512-1 weisen Kunststoffdichtungsbahnen eine Funktionsdauer von  $> 25$  bis  $100$  a auf.

In Deutschland wurden geosynthetische Tondichtungsbahnen im Trockeneinbau zum ersten Mal 1995 an einer Bundeswasserstraße in Minden eingesetzt. Im Nasseinbau erfolgte 1997/98 der Einsatz in der Havel-Oder-Wasserstraße. Die Maßnahme ist z. B. in Heibaum & Fleischer (2001) beschrieben. Heibaum & Fleischer (2001) berichtet ferner, dass die Durchlässigkeit von im Jahr 2000 entnommene Proben im Bereich der Wasserwechselzone um eine Zehnerpotenz höhere Werte aufzeigte, als dies vor dem Einbau der Fall gewesen ist. In diesem Zusammenhang stellt sich natürlich gleich die Frage, ob es sich hier um eine Auswirkung aus dem Einbauprozess oder um einen kontinuierlichen Prozess der Einwirkungen in der Wasserwechselzone handelt. Weitere Erkenntnisse wurden von Fleischer & Heibaum (2008) einige Jahre später veröffentlicht.

Die Beständigkeit des Langzeitverhaltens der GTD wird in DWA M-512-1 deutlich beschrieben. Die GTD ist nicht austrocknungs- und frostsicher. Sie kann durchwurzelt werden und weist gegen Wühltiere keinen Schutz auf. Eine entsprechende Schutzschicht ist notwendig (vgl. auch EAG-GTD, 2002). Die Selbstheilung kann nur von statten gehen, wenn eine ausreichende Auflast vorhanden ist. Risse führen relativ schnell zu einer starken Erhöhung der Permittivität. Dennoch wird der GTD attestiert, dass man eine Lebenszeit von  $100$  a nachweislich erreichen kann.

Geosynthetische Filter oder andere Geotextilien werden seit

Da Geokunststoffe stark abhängig von deren chemischen Zusammensetzung und folglich von den zukünftigen Einwirkungen (Chemismus, UV-Strahlung, etc.) ist eine Prognose der Beständigkeit bzw. der Alterung nur unter genauen Kenntnis und Richtigkeit der Annahmen möglich. Eine falsche Anwendung, z. B. das Einwirken von UV-Strahlung eines nicht gegen UV-Strahlung beständigen Kunststoffes kann dessen Lebenszeit extrem auf wenige Monate verkürzen.

## 5.6 Beton

*„Unter hiesigen klimatischen Bedingungen ist die chemische, physikalische und biologische Widerstandsfähigkeit gegeben, wenn die Expositionsklassen richtig gewählt und Betonherstellung sowie Bauausführung regelwerkskonform durchgeführt wurden. Grundwasser und Oberflächenwasser müssen hinsichtlich ihrer Betonaggressivität untersucht werden. Beton mit höherem Wassereindringwiderstand ist dichter und damit widerstandsfähiger gegenüber ständigen/dauerhaften chemischen Angriffen.“*

(aus DWA M-512-1, Abschnitt 5.2.10 „Beständigkeit“ von Betonoberflächendichtungen)

(Stahl)Beton als Baustoff ist bei sachgerechter Planung und Ausführung im Vergleich zu anderen Bauteilen u. a. Stahlbauteilen zusammen am Beständigsten.

## **6 Auswirkungen auf die Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit**

### **6.1 Allgemeines**

Rein physikalisch beginnt die Alterung eines Materials bzw. eines Deiches und Dammes als System mit dem Bau. Im Einzelfall kann die Alterung eines Materials bereits im Rahmen der (unsachgemäßen) Lagerung eintreten. Im Hinblick auf das Gesamtbauwerk wird praktischer Weise als Beginn des Alterungsprozesses die Fertigstellung des Gesamtbauwerks bzw. des Bauteils betrachtet.

ICOLD 93 (1994) vertritt hierbei einen anderen Standpunkt. Bei Talsperren werden Prozesse bzw. Schäden, die in den ersten fünf Jahren nach Fertigstellung auftreten, nicht der Alterung zugerechnet, sondern Mängeln des Entwurfes oder bei der Ausführung. Prozesse, die sozusagen erst einen Zeitraum länger als fünf Jahre brauchen, und sich fortsetzen werden somit als Alterungsprozesse bezeichnet. Eine klare Abgrenzung gibt es nicht. Alle Prozesse, die vor den genannten fünf Jahren aufgetreten und abgeschlossen sind, wären demnach auch nicht den Alterungsfaktoren zuzuweisen.

### **6.2 Erkennen / Detektion / Bewertung**

Während die Sickerwasserverhältnisse im Erdbauwerk selbst durch Porenwasserdruckgeber, Sickerwasser, ggf. durch verteilte optische Glasfasermessungen, etc. in der Praxis i.d.R. ausnahmslos betrachtet werden (vgl. DWA M-514), sind Prozesse im Untergrund aufgrund der schwierigen Erfassung durch ein Messsystem sehr schwer festzustellen.

Bei kleinen Deichen und Dämmen (vgl. DWA M-507-1, DWA M-522, DIN 19712, DIN 19700-10, DIN 19700-12, etc.), welche zum Teil lediglich einer temporären hydraulischen Belastung ausgesetzt sind, wird i.d.R. auch auf eine kontinuierliche, messtechnische Überwachung verzichtet.

Bei Deichen an Fließgewässern reduziert sich die Überwachung im Hochwasserfall im überwiegenden Fall auf die visuelle Kontrolle. Dadurch können nur sichtbare Verformungen an der Oberfläche (Rutschungen, Risse, Sackungen, Setzungen, etc.) sowie sichtbares Sickerwasser erfasst werden. Sichtbare Verformungen lassen bereits darauf schließen, dass etwas passiert ist, was das Bauwerk nicht „verkräftet“ hat. Auch wenn bereits eine erhöhte Menge an Sickerwasser austritt, ist der Deich i.d.R. überlastet, da ein Deich i.d.R. darauf ausgelegt sein sollte, keine großen Sickerwassermengen und keinen ungefilterten Sickerwasseraustritt zuzulassen. Die visuelle Erfassung von Verformungen und Sickerwasser erfassen somit einen Zustand, der einem Schaden entspricht.

Bei größeren Absperrbauwerken von Talsperren (vgl. DWA M-514; DIN 19700-11) ist i.d.R. das Überwachungskonzept in Deutschland relativ „ausgetüftelt“, so dass man zeitliche Veränderungen des Verhaltens von Bauwerken erkennen kann.

Um Langzeiteffekte zu identifizieren, sind entsprechend genaue Messungen und Auswertungen notwendig. Diese bilden die Basis für die Interpretation der Vorgänge. Es ist jedoch nicht immer möglich, auf die Ursachen zu kommen, welche für das gemessene Verhalten verantwortlich sind.

Wünschenswert ist es, über die Länge eines Bauwerks kontinuierliche Messungen der Verformung, der Durchsickerung, etc. durchzuführen und sich nicht nur punktuell, querschnitts-

weise an einen möglichen „Tatort“ herantasten zu müssen. Verstärkt wird hier auf die verteilte faseroptische Temperaturmessung zurückgegriffen.

Im Rahmen der jährlichen Maßnahmen zur Überwachung von Deichen und Dämmen (Anlagenbuch, Deichschau, etc.) ist ein Rahmen gesteckt, durch welchen der Zustand der Anlagen und auch die Auswirkungen des Alterungsprozesses entdeckt, dokumentiert und bewertet werden sollen. Die Bewertung des Zustands kann oft nicht immer auf einheitliche Bewertungskriterien zurückgeführt werden. Vertiefte Überprüfungen von Anlagen sollten in einem Abstand von 10 bis 20 Jahren durchgeführt werden. Die Vertieften Überprüfungen sind im Bedarfsfall auch mit entsprechenden Felduntersuchungen und Laborversuchen verknüpft, so dass der Zustand erfasst und im Zuge der Bewertung die Möglichkeit besteht, den Alterungsprozessen durch Maßnahmen entgegenzuwirken.

Die Entnahme von Proben zur weiteren Untersuchung im Labor ist oft mit Unsicherheiten hinsichtlich der Probenqualität und einer damit einhergehenden Veränderung der Messparameter im Vergleich zum in-situ-Zustand verbunden. Neuere Feldversuche, wie z. B. der Phicometerversuch, können bei der Beurteilung der tatsächlichen Scherfestigkeit von Deichen und Dämmen in-situ Ergebnisse liefern, welche auch zur Beurteilung der Alterung herangezogen werden können. Weitere Felderkundungen durch Rammsondierungen, Druckplattenversuche, etc. können zur Beurteilung des Zustands auch hilfreich sein. Ungestörte Probennahmen von größeren, grobkörnigen Bodenproben sind nach einem neueren Verfahren auch bereits möglich (Eitner, 2017).

### **6.3 Entwicklungs-/Alterungsszenarien**

Wie bereits erwähnt, unterliegen alle Deiche und Dämme einem Alterungsprozess. Unter günstigen Bedingungen wirkt sich der Prozess nur sehr langsam aus und es kommt über die Nutzungsdauer betrachtet zu keiner wesentlichen Verschlechterung des Bauwerks.

In einem Gedankenmodell, welches als Bewertungsparameter die absolute Standsicherheit betrachtet, sind unterschiedliche Szenarien dargestellt. Hierbei wird als Ausgangssituation noch unterschieden, ob das Erdbauwerk am Bemessungssoll oder an der Bemessungsgrenze entworfen wurde (Abb. 3).

Sofern das Bauwerk an der Bemessungsgrenze erstellt wurde und der Alterungsprozess eintritt, wird sich die Standsicherheit kontinuierlich verschlechtern. Die Wahrscheinlichkeit, dass es zu einer Überlastung kommt, wird größer. Die dafür notwendigen Hochwasserereignisse kleiner (Alterungsszenario 1). Wird nach dem Bemessungssoll entworfen und die Alterung innerhalb der Nutzungsdauer korrekt berücksichtigt, dann wird das Bauwerk am Ende der Nutzungsdauer gerade das Standsicherheitssoll noch gerade erfüllen.

Periodisch wiederkehrende Maßnahmen in Form Ertüchtigung oder Sanierung können die Standsicherheit erhöhen, wobei der Alterungsprozess danach wieder einsetzt (Alterungsszenario 3 und 4).

## **7 Hinweise für die Bemessung und den Entwurf**

Die Alterung des Gesamtsystems des Dammes oder Deiches für die anvisierte Nutzungsdauer muss bei der Bemessung und dem Entwurf berücksichtigt werden. Grundlegend werden deshalb beim Entwurf und den auszuwählenden Materialien die Dauerhaftigkeit bzw. Beständigkeit gefordert (vgl. DIN 19712, DIN 19700, ...).

Bei der Festlegung der Bemessungsparameter für die Nachweise, z. B. die Durchlässigkeitswerte von Dichtungen oder Dräns, sind Aspekte der Alterung mit zu berücksichtigen. Im Rahmen der zu berücksichtigenden Bemessungssituationen, wie z. B. BS-A.2 und BS-A.3 nach DIN 19712, können Langzeiteffekte und die Verschlechterung der Eigenschaften von

Dichtungen und Dräns bereits bei den Nachweisen berücksichtigt werden. Ähnliches gilt z. B. auch für die Durchlässigkeit des Untergrundes und die Scherfestigkeitsentwicklung von Böden.

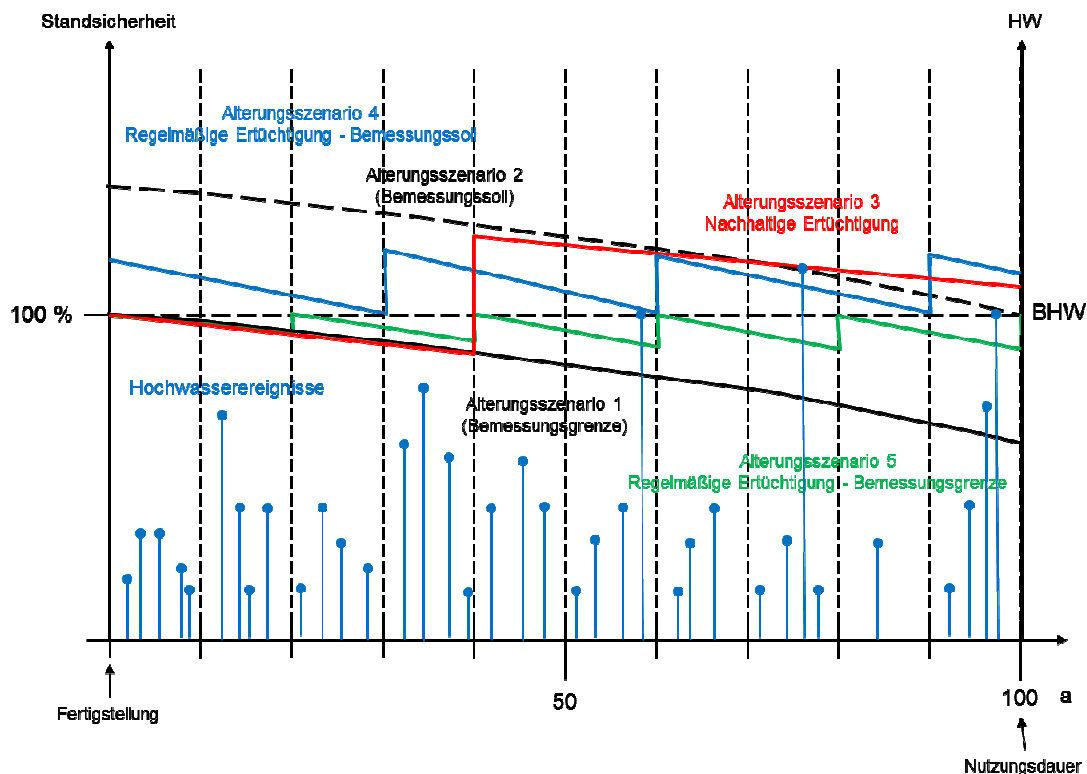


Abb. 3: Alterungsszenarien – Dargestellt an einem absoluten Standsicherheitsbegriff über die Nutzungsdauer

Bei Unsicherheiten hinsichtlich des Einflusses der Alterung empfiehlt es sich, nicht an die Bemessungsgrenze zu gehen, sondern bei den kritischen Nachweisen eine gewisse Zusatzsicherheit durch einen konservativen Entwurf vorzusehen. Diese Zusatzsicherheit variiert je nach Nachweis.

In der Praxis werden oft Nachweise an der Bemessungsgrenze ausgeführt und die Sicherheitsreserve bei den geotechnischen Bemessungsparametern „versteckt“, um den Entwurf optimal hinsichtlich Wirtschaftlichkeit und Sicherheit darzustellen.

In Abb. 4 ist die Auswirkung der Alterung auf unterschiedliche Bemessungsansätze dargestellt. Sobald die Schadensgrenze innerhalb der Nutzungsdauer erreicht wird, liegt eine Unterbemessung vor. Wenn die Bemessungsgrenze während der Nutzungsdauer trotz Alterungseffekten nicht ausgeschöpft wird, liegt eine Überbemessung vor. Auf der sicheren Seite entworfene und bemessene Deiche und Dämme sind aus Ingenieursicht nicht unbedingt negativ zu sehen.

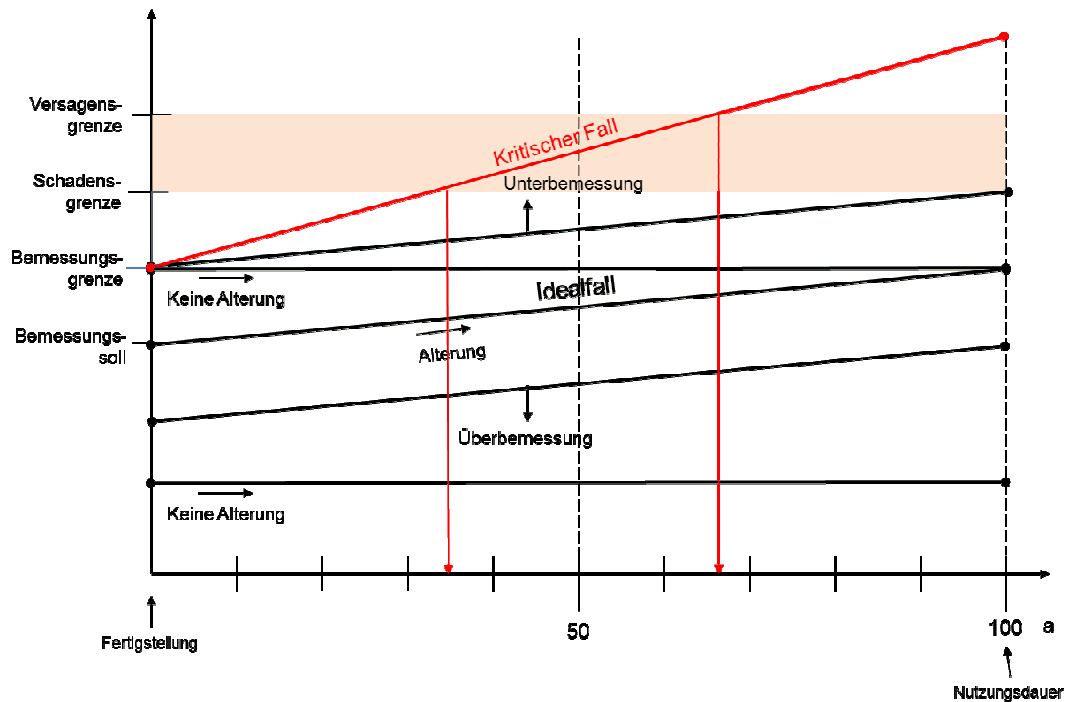


Abb. 4: Auswirkung der Alterung bei unterschiedlichen Bemessungsansätzen

Eine optimale Ausnutzung der Sicherheiten ist jedoch hinsichtlich der Ressourcen wünschenswert. Im Zweifelsfall würde sich der Ingenieur jedoch immer für die Hochwassersicherheit entscheiden wollen.

## 8 Gegenmaßnahmen - Ertüchtigung, Sanierung und Unterhaltung

Unterhaltungsmaßnahmen sind i.d.R. jährlich durchzuführen. Die Vegetation ist zu kontrollieren durch Mäharbeiten oder Beweidung. Kleinere Schäden sind zu beseitigen. Die Wege sind entsprechend funktionstüchtig zu erhalten.

Bei Feststellung, dass das Bauwerk nicht mehr den a.a.R.d.T erfüllt bzw. die Standsicherheit nicht mehr gewährleistet ist, besteht Handlungsbedarf.

Hierbei können unterschiedliche Maßnahmen zur Verbesserung des Erdbauwerks in Form von Sofortsicherungs-, Teilertüchtigungs- oder normalen Ertüchtigungs- oder Sanierungsmaßnahmen umgesetzt werden. Die Sanierung hat zum Ziel, den alten Zustand wiederherzustellen. Die Ertüchtigung bewirkt dagegen eine Verbesserung des ursprünglichen Zustands.

Unterhaltungsmaßnahmen werden mit hoher Wahrscheinlichkeit kontinuierlich bzw. jährlich umgesetzt, während Ertüchtigungs- und Sanierungsmaßnahmen bei Dämmen und Deichen ohne gravierende Mängel bei der Herstellung und dem Entwurf nach mehreren Jahrzehnten und idealerweise nach der Nutzungsdauer notwendig werden.

Ertüchtigungsmaßnahmen reichen von einfachen erdbaulichen Deicherhöhungen oder –erweiterungen bis zu einem Komplettabriss mit anschließendem Neubau (Haselsteiner, 2008; DWA M-507-1; DIN 19712).

## 9 Wissenschaftliche Ansätze & Forschung

### 9.1 Äußere Randbedingungen

Im Zuge der integralen Betrachtung von z. B. Polderbereichen, Gewässern oder auch nur einzelnen Talsperren, etc. stellt sich die generelle Frage, wie werden sich die äußeren Einwirkungen/Faktoren entwickeln.

Ein zentrales Thema ist derzeit der Klimawandel. Wie werden sich die Abflüsse und Wasserstände aber auch die lokalen Starkniederschlagsereignisse in naher und ferner Zukunft auf Deiche und Dämme auswirken. Am Rhein beispielsweise scheint es so, dass mit häufigeren kleineren Sommerhochwassern zu rechnen sein wird. Dies wird wahrscheinlich auch für die südlichen mittelfgroßen Fließgewässer, wie Isar, Neckar, Lech, etc. gelten, wobei hier auch verstärkte Sommer- und Frühjahrshochwasser nicht ausgeschlossen werden können.

Derzeit werden zahlreiche Projekte zur Untersuchung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Wasserwirtschaft bearbeitet. Neben den einschlägigen Universitäten, Hochschulen und Forschungsinstituten sind zahlreiche nationale Organisationen wie z. B. der DWD auf diesem Bereich tätig.

Die mittleren Temperaturen steigen, so dass es ggf. verstärkt zu Austrocknung und im Mittel zu weniger Frosttagen kommen kann. Die Frost-Tau-Zyklen könnten jedoch bei schwankenden Wetterbedingungen jedoch zunehmen.

Der Biber breitet sich in Deutschland von Ost nach West und von Süd nach Nord aus. Als großes Wühltierexemplar stellt ein Biber stets eine Gefahr für kleinere Dämme und Deiche dar. Die Entwicklung ist schwierig vorherzusehen, da der Mensch entsprechend eingreifen kann und ggf. auch eingreifen werden muss.

Besonders für kleinere Dämme und Deiche stellen Bewuchsformen wie große Bäume, ohne dass das Bauwerk über spezielle Sicherungselemente verfügt, ein Risiko dar. Die Unterhaltung von kleineren Anlagen, besonders weiten Deichstrecken, kann oft nicht so konsequent umgesetzt werden, wie dies notwendig wäre, um einen technisch einwandfreien Bauwerkszustand jederzeit gewährleisten zu können. Die Durchwurzelung von Dichtungen, die Auflockerung von Böden, etc. sind Auswirkungen, die in diesem Zusammenhang das Langzeitverhalten beeinflussen. Hier sind und waren mehrere Forschungsvorhaben in Deutschland damit beschäftigt, die Auswirkung von Wurzeln auf die geotechnischen Bodenparameter zu ermitteln (Hähne, 1991). Langzeitversuche werden teilweise auf Volldeichmodellen, z. B. von der BoKu Wien, durchgeführt.

### 9.2 Untersuchung des Langzeitverhaltens/der Alterung von Materialien

Die in Kapitel 5 beschriebenen im Damm- und Deichbau üblicherweise verwendeten Materialien unterliegen stets einem Alterungsprozess. Die Geschwindigkeit der Alterung wird hierbei von dem Material selbst, den Einwirkungen und der Nutzung bzw. der Funktion bestimmt.

Um die Alterungsprozesse zu messen, werden i. d. R. Proben aus dem Bauwerk entnommen und im Labor getestet. Manchmal können auch in-situ Versuche Aufschluss über die vorhandenen geotechnischen Parameter geben.

Neuere Felderkundungsmethoden bieten die Möglichkeiten, den in-situ-Zustand z. B. in Form der geotechnischen Scherfestigkeitsparameter zu bestimmen. Eine turnusmäßige Ermittlung der in-situ-Parameter kann helfen, die zeitabhängige Entwicklung der Materialien abzubilden. Hierzu ist es u. a. auch notwendig, die Einwirkungen wie z. B. Temperatur, Ein-

stauereignisse, Sättigung, etc. zu erfassen, um auch die Ursachen für eine mögliche zeitliche Veränderung der Parameter zu erfassen.

Eine besondere Rolle spielen Dichtungsmaterialien bzw. Dichtungen in Dämmen und Deichen. Bei deren Beurteilung ist i.d.R. die Materialdurchlässigkeit von der Systemdurchlässigkeit zu unterscheiden. Die im Labor ermittelte Materialdurchlässigkeit ist nur eine Komponente der Systemdurchlässigkeit. Die Systemdurchlässigkeit kann nur über Felderkundungsmethoden ermittelt werden. Hierzu sind z. B. große Versuchsanlagen notwendig, wie diese z. B. für die Untersuchung von Schmalwänden am Lech hergestellt wurden (Cetinkaya, 2006).

Praxis ist heute noch, dass Materialien nach mehreren Jahrzehnten aus den Wasserbauwerken entnommen und im Labor untersucht werden. Kommt es z. B. zu einer Erhöhung/Verschlechterung der Durchlässigkeit eines Dichtungsmaterials kann man i. d. R. nicht ausschließen, dass die Entnahme und/oder der Einbau in den Versuchsapparat die Probe nachteilig beeinflusst hat.

### 9.3 Langzeitverhalten von Wasserbauwerken

Werden Wasserbauwerke in Form von Dämmen und Deichen als System betrachtet, sind maßstäbliche Großversuche, in-situ-Erkundungen, etc. sowie die Modellierung auf physikalische und numerische Weise Stand der Technik.

Hierbei spielt besonders bei der numerischen Modellierung im Rahmen der Formulierung von Modellgesetzen, die ein Alterungsverhalten von Bau-/Anlagenteilen beschreiben, empirische Ergebnisse und Auswertungen immer noch eine wesentliche Rolle, da der Alterungsprozess und dessen Ursache an sich, i.d.R. nicht hinreichend genau bekannt sind. Die empirischen Daten können aus den vorhandenen Messungen gewonnen werden. Dies stellt sich, wie bereits erwähnt, für größere Anlagen i.d.R. günstiger dar, als für kleinere Deichanlagen. Letztere weisen i.d.R. keine Messinstrumentierung auf.

Die Modellierung des Langzeitverhaltens auf numerischem Wege können so weit entwickelt werden, dass sich auch Hinweise zu einer notwendigen „Sicherheitsreserve“ bei der Bemessung ableiten lassen können. Hierfür sind die aktuellen Nachweise nach EC 7 für den Herstellungs- und Alterungszustand zu vergleichen.

### 9.4 Lebenszyklusbetrachtungen

Lebenszyklusbetrachtungen sind im Wasserbau für Dämme und Deiche immer noch selten anzutreffen. Im Maschinenbau und im Hochbau sowie bei der Produktentwicklung sind die Forschungsarbeiten weiter und intensiver.

Im internationalen Talsperrenbau wird im Rahmen von „Dam Safety“-Betrachtungen die Lebenszyklusbetrachtung bereits bis zum Rückbau von Talsperren im Einzelfall durchgeführt. Meist geschieht dies jedoch auch nur, wenn eine Anlage ihren konkreten Nutzen verloren hat und der Abbruch eine beschlossene Sache ist.

### 9.5 Forschungsbedarf

Nach meines des Autors besteht dezidiert Forschungsbedarf auf folgenden Gebieten:

- Definition/Prozessbeschreibung zur klaren Abgrenzung von Einzelprozessen und Erkenntnissen → Vertiefte Berücksichtigung in den Regel-/Normenwerken
- Langzeitverhalten von Materialien → Forschung von Materialentwicklung hinsichtlich von Suffusions- und Erosionsprozessen → Quantifizierung der Änderung von Materialeigenschaften

- Anlagenbetrachtung → Auswirkungen der Alterungserscheinungen quantifizieren und prognostizieren → Festlegung einer Sicherheitsreserve unter Berücksichtigung vom Anlagentyp → Verminderung von (unbekannten) Risiken
- Lebenszyklusbetrachtung für Deiche und Dämme → Konzeptionelle Fortentwicklung von einfachen Phasenmodellen unter Berücksichtigung der Alterung → Optimierung des Ressourceneinsatzes

Auch wenn das in Deutschland über die Regelwerke und Normen vorgehaltene Sicherheitsniveau für wasserbauliche Deiche und Dämme vergleichsweise hoch ist, fehlt in den Regelwerken u. a. bei der Festlegung von Bemessungsparametern, bei der Festlegung von Teilsicherheitsbeiwerten und bei der Zuordnung von alterungsbedingten Erscheinungen zu den Bemessungssituationen ein klares Vorgehen. Auf dem Gebiet der Forschung kann hier von Deutschland etwas geleistet werden, was auch weltweit zu Weiterentwicklung des Verständnisses von Alterungsprozessen beitragen wird.

## Literatur

Alonso, E.; Cardoso; R. (2009): Behaviour of materials for earth and rockfill dams: Perspective from unsaturated soil mechanics. Long Term Behaviour of Dams (LTBD09), Technical University Graz, Austria, 12th –13th October 2009

BAW MSD (2011): Merkblatt Standsicherheit von Dämmen an Wasserstraßen. Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe

Bettzieche, V.; Bieberstein, A. (2009): Investigations of the material of a 50 years old dam in the course of the deepened examination. Long Term Behavior of Dams (LTBD09), Technical University Graz, Austria, Proc., 2009, pp. 743–748.

Cetinkaya, A. (2006): Das Langzeitverhalten von Schmalwänden. Diplomarbeit am Lehrstuhl und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München

CIRIA (2013): The International Levee Handbook. Construction industry research and information association (Ciria), C731, London 2013

DIN 19700 (2004): Stauanlagen. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin

DIN 19712 (2013): Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin

DVWK 215 (1990): Dichtungselemente im Wasserbau. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 215, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin

DVWK 247 (1997): Bisam, Biber, Nutria – Erkennungsmerkmale und Lebensweisen – Gestaltung und Sicherung gefährdeter Ufer, Deiche und Dämme. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 247, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin

DWA M-507-1 (2011): Deiche an Fließgewässern. Merkblatts Nr. 507, Teil 1, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef



- DWA M-512-1 (2012): Dichtungssysteme im Wasserbau. Merkblatt Nr. 512, Teil 1: Erdbauwerke. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef
- DWA M-514 (2011): Bauwerksüberwachung an Talsperren. Merkblatt Nr. 514, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef
- DWA M-522 (2015): Kleine Talsperren und kleine Hochwasserrückhaltebecken. Merkblatt Nr. 522, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef
- EAG-GTD (2002): Empfehlungen für die Anwendung von geosynthetischen Tondichtungsbahnen (Bentonitmatten). Empfehlungen des Arbeitskreises 5.1 „Kunststoff in der Geotechnik und für den Wasserbau“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), Ernst & Sohn, 2002
- Eitner, V. (2017): Anforderungen an die Baugrunderkundung. Nationale und internationale Normen. Tagung „Einfluss der Alterung von Erdbauwerken auf die Nachweisführung von Deichen und Dämmen“, Vortrag, LAWA-AH und Bayr. LfU, Nürnberg, 04.07.2017
- Fell, R.; Foster, M.; Wan, C.-F. (2005): A framework for assessing the likelihood of internal erosion and piping of embankment dams and their foundations. Contribution to the Workshop of internal erosion and piping of dams and foundations. Aussoise, France, April 05
- Fell, R.; MacGregor, P.; Stapledon, D.; Bell, G. (2005): Geotechnical Engineering of Dams. A. A. Balkema, Taylor & Francis Group, London
- Fleischer, P.; Heibaum, M. (2008): Excavation of GCL Lining (GBR-C) in Navigation Canals and Dikes after several years of service. EuroGeo 4, Geosynthetics in Civil Engineering Applications, September 2008, Edinburgh, Scotland
- Foster, M.; Fell, R. (1999): A framework for estimating the probability of failure of embankment dams by piping using event tree methods. UNICIV Report No. R-377. School of Civil and Environmental Engineering, The University of New South Wales
- Haselsteiner, R. (2007): Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung. Dissertation. Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Mitteilungsheft Nr. 111, Technische Universität München
- Haselsteiner, R. (2008): Maßnahmen zur Ertüchtigung von Deichen. Korrespondenz Wasserwirtschaft (KW), Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef, Heft 3/08, S. 139 - 149
- Haselsteiner, R. (2009): Die Beurteilung von hydrodynamischen Bodendeformationsvorgängen in Dämmen und Deichen - Ein integraler Ansatz, 3. Symposium Sicherung von Deichen, Dämmen und Stauanlagen, Universität Siegen, 12.-13.03.2009; S. 289-338
- Haselsteiner, R.; Ersoy, B. (2011): Seepage control of concrete faced dams with respect to the surface slab cracking. 6th International Conference on Dam Engineering,

Lisbon, Portugal, February 15-17, 2011, Proceedings Pina, E. Portela, J. Gomes (ed.), pp. 611-628.

Haselsteiner, R.; Pamuk, R.; Ersoy, B. (2017): Aspects concerning the shear strength of rockfill material in rockfill dam engineering. Journal Geotechnik, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik (DGGT), 2017

Hähne, K. (1991): Der Einfluss von Gräser- und Gehölzwurzeln auf die Scherfestigkeit von Böden und damit die Standsicherheit von Hängen und Böschungen. Dissertation. Fachbereich 14 Landschaftsentwicklung der Technischen Universität Berlin, 1991

Heibaum, M., Fleischer, P. (2001): Erkenntnisse zur Unterwasserverlegung von geosynthetischen Tondichtungsbahnen. Geokunststoffe in der Geotechnik, Band III, 2. Geokunststoff-Kolloquium, 25./26. Januar 2001, Krefeld

ICOLD 93 (1994): Ageing of Dams and Appurtenant Works. Bulletin No. 93, International Commission on Large Dams, 1994.

ICOLD 135 (2010): Geomembrane Sealing Systems for Dams. Bulletin No. 135, International Commission on Large Dams, 2010.

IP Bau (1992): Schutzsysteme im Tief- und Ingenieurbau. Impulsprogramm Bau (IP Bau) – Erhaltung und Erneuerung, Bundesamt für Konjunkturfragen, Bern, 1992

Kutzner, C. (1996): Erd- und Steinschüttdämme für Stauanlagen. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart

Perzmaier, S.; Haselsteiner, R. (2006): Die prozessorientierte Beurteilung der hydrodynamischen Bodendeformation. Geotechnik 29, Heft 4, S. 335 – 348

Sackmann, A. (2001): Schwachstellengenese an Erddämmen als Resultat sedimentär/diagenetischer Alterungsprozesse: Ursachenforschung und Möglichkeiten der zerstörungsfreien Erkundung. Dissertation, Julius-Maximilians-Universität, Würzburg, 2001

Suarez, N. R. (2012): Micromechanical Aspects of Aging in granular Soils. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Faculty for Civil and Environmental Engineering, Blacksburg, VA, 2012

USSD (2007): The Aging of Embankment Dams. United States Society on Dams (USSD), Denver, USA

Wieland, M. (2010): Life-span of storage dams. International Water Power & Dam Construction (IWP & DC), pp. 32-35