

WASSERBAU

Marie-Therese van Keßel, Hanna Viefhaus, Katja Last, Volker Bettzieche und Tom Schanz

Bemessungsdiagramme für Staudämme kleiner Talsperren und Regenrückhaltebecken nach Eurocode 7

Zahlreiche Stauanlagen, die der Bewirtschaftung von Flüssen, Seen und auch der Schlammentwässerung dienen, werden durch kleine Dämme eingestaut. Vor der Einführung des Eurocode 7 konnten diese Dämme anhand von Bemessungsdiagrammen aus der Empfehlung der Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau von 1962 bemessen werden. Für eine Vorbemessung bzw. überschlägige Überprüfung der Tragfähigkeit kleiner Staudämme werden nun Bemessungshilfen geliefert, die den aktuellen normativen Regeln entsprechen.

1 Einführung

Stauanlagen sind in Deutschland wichtige Elemente für die Bewirtschaftung von Flüssen. So tragen sie maßgeblich zum Hochwasserschutz und zur Wasserversorgung bei. Eine wichtige Rolle übernehmen dabei die kleinen und eher unscheinbaren Stauanlagen. Viele kleine Flüsse werden durch Dämme eingestaut, die eine Kronenhöhe von unter 6 m aufweisen. Bei diesen kleinen Stauanlagen handelt es sich oft um einfach strukturierte Bauwerke mit homogenen Querschnitten.

Die Regelungen für den Bau, die Planung, die Überwachung und die Bewirtschaftung von Stauanlagen sind in der DIN 19 700 [2] zusammengefasst. Stauanlagen werden darin wie folgt klassifiziert: Die sogenannten großen Talsperren werden durch eine minimale Kronenhöhe von 15 m und ein minimales Stauvolumen von 1 000 000 m³ als Talsperrenklasse 1 charakterisiert. In der Talsperrenklasse 2 sind die mittleren und kleinen Talsperren, die diese Anforderungen unterschreiten, zusammengefasst. Eine weitergehende Unterteilung bietet Teil 12 der DIN 19 700 für Hochwasserrückhaltebecken. Es werden die Begriffe der mittleren, kleinen und sehr kleinen Becken eingeführt. In der Kategorie der sehr kleinen Absperrbauwerke werden die Stauanlagen bis zu einer Kronenhöhe von 4 m zusammengefasst. Mit der Erarbeitung des DWA-Merkblattes M 522 „Kleine Talsperren und kleine Hochwasserrückhaltebecken“ der Ar-

beitsgruppe WW-4.5 „Kleine Stauanlagen“ des DWA-Fachausschusses „WW-4 Talsperren und Flussperren“ konnte die Klassifizierung der Stauanlagen aus der DIN 19 700 erweitert werden. Außerdem werden hiernach Vereinfachungen unter Berücksichtigung des Eurocode 7 getroffen, die ohne Reduzierung der Sicherheitsstandards für kleine Staudämme angewendet werden können [3].

Eine vereinfachte Hilfe für die Bemessung der Standsicherheit von Böschungen und Einschnitten boten bis zur Einführung des Eurocode 7 drei Tabellen aus der Empfehlung der DGEG [1]. Für nichtbindige Böden, die ohne den Einfluss von Wasser geböscht werden sollen, wurden darin maximal zulässige Böschungsneigungen vorgeschlagen. Die Böschungsneigungen waren anhand eines Bemessungsdiagramms nach Jelinek [4] unter Berücksichtigung der in der Empfehlung gegebenen Abminderungsfaktoren für die Scherparameter ($\gamma_0 = 1,20$ und $\gamma_c = 1,50$) ermittelt worden. Unter Verwendung dieser Böschungsneigungen konnten Böschungen aus feinem Sand, grobem Sand, Kies und Steinen standsicher hergestellt werden. Außerdem wurden in der Empfehlung Böschungsneigungen für Einschnitte und Dämme aus bindigem Material gegeben. Für die Bodengruppen Schluff, magerer Lehm, fetter Lehm und fetter Ton waren die maximal zulässigen Böschungsneigungen in Abhängigkeit von der Böschungshöhe zwischen 0 m und 15 m dargestellt.

Die neuen Bemessungshilfen entsprechen den aktuellen normativen Vorgaben und berücksichtigen darüber hinaus eine Durchströmung. Hierfür werden Böschungshöhen bis zu 6 m betrachtet.

2 Tragfähigkeit kleiner Staudämme

2.1 Normative Grundlagen

Nach DIN 19 700 gilt die Tragfähigkeit eines Staudammes als gegeben, wenn die Aufnahme der Spreizigkeit in der Aufstandsfläche, das Abgleiten des gesamten Dammes und die Böschungsbruchsicherheit nachgewiesen werden kann. Bei der Nachweisführung wird das globale Sicherheitskonzept angewendet. Dieses wurde jedoch mit der Einführung des Eurocode 7 vom Teilsicherheitskonzept abgelöst. Darüber hinaus bietet der Eurocode 7 in Abschnitt 12 selbst Regelungen zur Bemessung von Erddämmen, die als Verkehrsdämme oder als zeitweise oder ständig wasserstauende Dämme mit einem Stauwasserspiegel unter 15 m erbaut werden, denen kleine Stauanlagen untergeordnet werden können. Der Eurocode 7 und der nationale Anhang mit Verweisen auf die ergänzenden Regelungen aus der DIN 1 054, Stand 2010, bilden das Normhandbuch für die Sicherheitsnachweise in der Geotechnik in Deutschland. Die DIN 1 054 ihrerseits verweist auf die deutschen für Geotechnik relevanten Normen, wie z. B. die DIN 4 084. Die nationalen

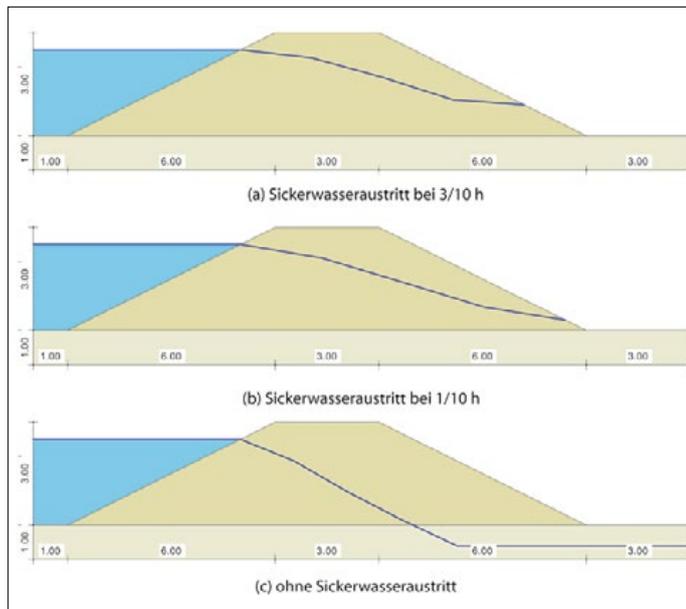


Bild 1: Durchströmungssituationen von Dämmen

Anhänge sind dem Eurocode untergeordnet und dürfen keine Widersprüche enthalten oder auf solche in ergänzenden Normen verweisen. Somit ist der Nachweis der Tragfähigkeit für kleine Staudämme gemäß Eurocode 7 zu führen. Das DWA-Merkblatt M 522 bietet dafür eine Übersicht der zu berücksichtigenden Bemessungssituationen und Einwirkungen. Diese Übersicht stellt eine Verknüpfung der in der DIN 19 700 geforderten Lastfälle mit den Neuerungen des Eurocode 7 dar. Danach zählen die ständigen Einwirkungen (Eigenlast, Erddruck, Übersättigung) und die veränderlichen Lasten (Verkehrslasten, Wasserdruck, Strömungskraft bei Vollstau, Teilstau oder infolge betriebsbedingter Stauspiegelabsenkung aus dem Stauziel) unter den angegebenen Kombinationen zur Bemessungssituation P (persistent situations). Der Nachweis beim Hochwasserstauziel 1, bei schnellstmöglicher Stauspiegelabsenkung und während des Baus wird in Bemessungssituation T (transient situations) geführt. Zu den außergewöhnlichen Einwirkungen, deren Tragsicherheit in der Bemessungssituation A (accidental situations) nachgewiesen wird, zählt eingeschränkte Wirkung bzw. der Ausfall der sicherheitsrelevanten Einrichtungen wie z. B. Drainage oder Dichtungen. Zusätzlich gilt es zu be-

achten, dass der Böschungsbruch nach der Neuordnung der Grenzzustände im Grenzzustand GEO-3 geführt wird. Dieser entspricht dem ehemaligen GZ 1C und wird geführt, wenn das Versagen oder die große Verformung des Baugrundes auf unzureichende Festigkeit des Baugrundes zurückzuführen ist.

2.2 Böschungsbruchsicherheit

In den neuen Bemessungsdiagrammen wird explizit die Böschungsbruchsicherheit nachgewiesen. Dabei ist zu beachten, dass es zahlreiche Verfahren zur Berechnung der Böschungsbruchsicherheit gibt. Darunter sind beispielhaft die Verfahren der logarithmischen Spirale, das Reibungskreisverfahren und die Lamellen-

verfahren zu nennen. Bei all diesen Verfahren ist es nicht möglich, die exakte Spannungsverteilung in der Gleitfuge zu bestimmen, so dass Annahmen erforderlich sind. Bei den Lamellenverfahren, nach Gussmann, Janbu, Bishop und Fellenius bzw. Terzaghi wird die unbekannte Spannungsverteilung in der Bruchfuge durch eine plausible Annahme der Erddruckneigung zwischen den Lamellen kompensiert. Durch diese Näherung gibt es nun genauso viele Unbekannte wie Gleichgewichtsbedingungen. Der Fehler, der durch die Annahme der Erddruckneigung entsteht, ist für die Lamellenverfahren je nach Anwendungsbereich unterschiedlich groß.

Es wurden vergleichende Berechnungen sowie eine Literaturrecherche durchgeführt, damit das geeignete Lamellenverfahren zur Erstellung der Bemessungsdiagramme ausgewählt werden konnte. Das Verfahren nach Janbu eignet sich besonders für langgestreckte Bruchformen oder geschichtete Böden. Für böschungsparalleles Versagen wird das Versagen nach Fellenius bzw. Terzaghi empfohlen. Für kreisförmige Gleitkörpergeometrien liefert das Verfahren nach Bishop im Vergleich zu den oben genannten Berechnungsverfahren die geringsten Fehler. Aus der Literatur konnte jedoch entnommen werden, dass mit den verschiedenen Verfahren bei einem Damm mit einem homogenen Querschnitt und gemischt-körnigem Boden annähernd gleiche Ausnutzungsgrade ermittelt werden können [5]. Dies bestätigte eine vergleichende Rechnung.

3 Entwicklung der Diagramme

Die Berechnungen wurden mit der Software GGU-Stability durchgeführt, wobei der Ausnutzungsgrad nach Bishop ermittelt wurde. Dafür wird ein Damm mit der

Tab. 1: Übersicht der maßgebenden Einflussparameter

Parameter		Einheit	Wertebereich
Böschungsneigung	1:n	–	1:1,25 bis 1:3,00
Freibord	f	m	0,5
Kronenbreite	b_k	m	1,0
Böschungshöhe	h	m	1,0 bis 6,0
Kohäsion	c'_k	kN/m ²	1,0 und 2,5
Reibungswinkel	φ'_k	°	20,0 bis 40,0
Wichte	γ_k	kN/m ³	19,0

WASSERBAU

gewünschten Geometrie abgebildet. Eine zweite Schicht unterhalb des Dammes stellt den Untergrund dar, für den dieselben Materialkennwerte wie die Dammschüttung und eine Mächtigkeit von einem Meter angenommen werden. Die Durchströmung wird durch die Annahme von Porenwasserhöhen in das System integriert. Bei den Berechnungen werden ausschließlich Böschungfußkreise berücksichtigt. Ziel der Berechnungen war es, für die jeweilige Böschungsgeometrie und Parameterkombination das Ergebnis $\mu = 1$ zu erhalten. Im Bemessungsdiagramm werden somit die Grenzbedingungen dargestellt.

3.1 Parameterstudie

Damit die maßgebenden Parameter, die die Böschungsbruchsicherheit eines Dammes beeinflussen als Eingangsgrößen im Bemessungsdiagramm ausgewählt werden können, wurden die Materialeigenschaften, wie Kohäsion, Reibungswinkel und Wichte, die Geometriemerkmale, wie Kronenbreite, Böschungsneigung, Höhe und Freibord, sowie die Durchströmung untersucht.

Bemessungssituation

Damit die Bemessungshilfen auf möglichst zahlreiche Bauprojekte anwendbar sind, wurde bei den Berechnungen zur Erstellung der Diagramme keine einheitliche Annahme zu Wasserständen bei Vollstau (Z_v) getroffen. Durch die Annahme eines Freibords von 0,5 m können hingegen die Wasserstände bei Hochwasserstauziel 2 (ZH_2) eindeutig und auf viele Staudämme zutreffend angesetzt werden. Damit liegt den Berechnungen, aus denen sich die Bemessungsergebnisse zusammensetzen, die außergewöhnliche Bemessungssituation (BS-A) zu Grunde.

Durchströmung

Für die Durchströmung werden drei verschiedene Sickerwasserlinien angenommen, um verschiedene Durchströmungssituationen abzubilden (Bild 1). Bei der ersten und zweiten Möglichkeit der Sickerwasserlinienform tritt das Sickerwasser am Böschungsfuß bei 3/10 bzw. 1/10 der Böschungshöhe an der luftseitigen Böschung aus. Bei der dritten Annahme versickert das durchströmende Wasser nach 2/3 der Böschungsbreite im Untergrund. Der Böschungsfuß ist somit trocken. Diese Sickerlinie bildet sich aus, wenn die Durchlässigkeit ausreichend gering und

die Dichtigkeit des Staudammkörpers gegeben ist. In Verbindung mit der Annahme der außergewöhnlichen Einwirkung des Wasserdruckes und der Strömungskraft bei Hochwasserstauziel 2 (ZH_2) und der Berücksichtigung der ständigen oder häufig wiederkehrenden Einwirkungen der Eigen-, Verkehrs- oder Auflasten kann die Standsicherheit für diese Sickerwasser-

linie in der Bemessungssituation A nachgewiesen werden. Die Sickerwasserlinie mit einer Austrittshöhe von 1/10 h beschreibt den Verlauf einer Sickerwasserlinie, die sich bei einem kleinen Staudamm mit einem funktionstüchtigen, im Böschungsfuß integrierten Filterkörper einstellt. Die Standsicherheit für diesen Fall kann unter denselben Bedingungen wie

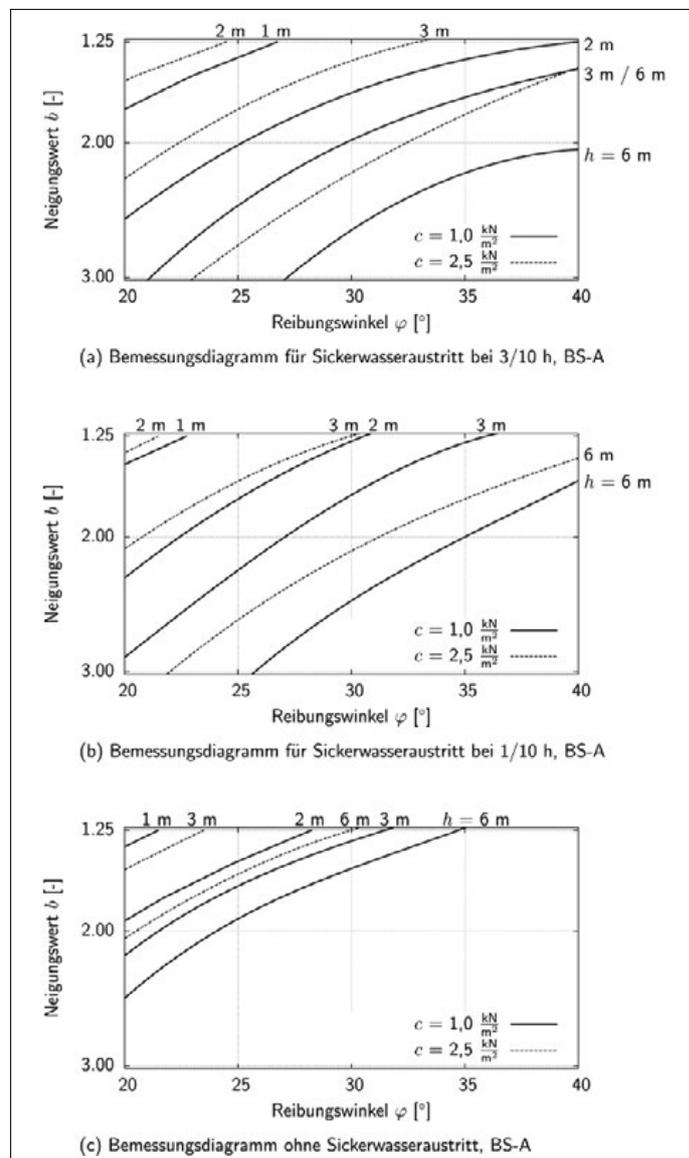


Bild 2: Bemessungsdiagramme für die in Bild 1 dargestellten Situationen

im ersten Fall in der Bemessungssituation BS-A nachgewiesen werden. Die letzte Annahme mit einem Austritt des Sickerwassers bei 3/10 h betrachtet den Ausfall einer der maßgeblichen baulichen Einrichtung, so dass das Sickerwasser am Böschungsfuß austreten kann. Laut DWA-Merkblatt M 522 wird diese außergewöhnliche Einwirkung mit den ständigen oder häufig wiederkehrenden Einwirkung der Eigen-, Verkehrs- und Auflasten sowie dem Wasserdruck und der Strömungskraft bei Vollstau Z_v für die außergewöhnliche Bemessungssituation BS-A.2 kombiniert. Bei der Erarbeitung der Bemessungsdiagramme wurde jedoch das Hochwasserstauziel 2 (ZH_2) für diese Bemessungssituation angesetzt.

Bodenparameter

Bei den homogenen Staudämmen übernimmt der Dammkörper sowohl die stützende als auch die dichtende Funktion, was vielseitige Anforderungen an das Dammbaumaterial stellt und ein gemischtkörniges Material erfordert. Während grobkörnige Materialien hohe Festigkeiten, hohe Tragfähigkeiten und eine Unempfindlichkeit gegenüber Witterungseinflüssen aufweisen, zeichnen sich feinkörnige Materialien durch geringe Durchlässigkeiten aus. Diese sind für einen homogenen und dichten Dammkörper unerlässlich. Die notwendigen Eigenschaften treffen auf Materialien mit Korngrößenanteilen $\leq 0,06$ mm zwischen 5 Gew.-% und 40 Gew.-% zu [6]. Die Kornfraktion mit Korngrößen größer als 2,00 mm soll zu über 40 Gew.-% vertreten sein. Diese Bedingungen halten Kies-Schluff-Gemische und Kies-Ton-Gemische ein. Der Einfluss der Wichte, die zur Berechnung der Gewichtskraft in die Böschungsbruchberechnung eingeht, wurde in vergleichenden Berechnungen untersucht und als gering eingestuft. Somit wurde dieser Parameter im Bemessungsdiagramm als konstant angenommen.

Geometrie

Die Böschungsneigung wird auf einen Bereich zwischen 1:1,25 und 1:3,00 beschränkt. Laut DWA-Merkblatt M 522 können Sicherheitsnachweise für Böschungen mit einer Neigung flacher als 1:3,00 entfallen. Steiler als 1:1,25 sollte die Böschung nicht hergestellt werden, um die Pflege und die Instandhaltung sicherzustellen. Neben dem Freibord, welches mit einer Höhe von 0,5 m angenommen wurde, ist die Kronenbreite ein weiterer geometriebestimmender Parameter. Die Krone schließt das Absperrbauwerk ab und kann mit einem Weg oder einer Straße versehen werden. Über diesen Weg soll der Damm für Kontrollbegehungen, Wasserstandsmessungen und für die Instandhaltung der Böschungen begehbar sein. Für diese Arbeiten wird oft eine Kronenbreite von mehreren Metern notwendig, damit ein Befahren des Dammes, beispielsweise mit einem Mähfahrzeug, möglich ist. Für durchströmte Dämme kann die Kronenbreite einen Einfluss auf die Berechnung der Standsicherheit nehmen. Da sich der Anteil der durchströmten Gleitkreisfläche mit steigender Kronenbreite verringert, erhöht eine größere Kronenbreite die Sicherheit gegen Böschungsbruch. Im Vergleich zum Einfluss der Scherparameter oder der Böschungshöhe ist der Einfluss der Kronenbreite auf die Böschungsbruchsicherheit jedoch gering. Auf der sicheren Seite liegend wurde die Kronenbreite $b_k = 1$ m in die Berechnungen integriert.

3.2 Darstellungsform

Die Darstellung des Diagramms soll sich durch Übersichtlichkeit und einfache Handhabung auszeichnen, so dass das Bemessungs-

WASSERBAU

sungsdiagramm für die Planung von kleinen Staudämmen leicht herangezogen werden kann. Aus dem Hochwasserstauziel 2 (ZH₂) folgt nach Einbeziehung der Freibordhöhe die notwendige Kronenhöhe. Des Weiteren muss berücksichtigt werden, welche Grundfläche für den Bau beansprucht werden darf und wie viel Material mit welchen möglichen Eigenschaften verbaut werden kann. Daraus ergibt sich unter Einbeziehung der Grenzen aus dem Bau und Bewirtschaftung die Staudammgeometrie, die möglichst platz- und kostensparend umgesetzt werden soll.

Mittels des neuen Bemessungsdiagramms kann mit den Eingangsgrößen Reibungswinkel, Böschungsneigung und Kronenhöhe in den praxisrelevanten Wertebereichen (Tabelle 1) eine Aussage über die Standsicherheit von Dämmen getroffen werden. Auf der Abszissenachse ist der Reibungswinkel aufgetragen. Die Böschungsneigung befindet sich auf

der Ordinatenachse. Die Kronenhöhe, als dritter Eingangsparameter, wird über eine Kurvenschar im Diagramm dargestellt. In jedem Diagramm wurden außerdem zwei durch verschiedene Linienarten symbolisierte Kohäsionen berücksichtigt. So kann bei der Planung mithilfe der Materialparameter des zur Verfügung stehenden Materials und der Höhe des zu planenden Dammes die steilste mögliche Neigung im Diagramm als Ordinatenabschnitt in Höhe des Schnittpunktes von Reibungswinkel und Kronenhöhe abgelesen werden. Dabei stehen Diagramme für drei verschiedene Durchströmungssituationen zur Verfügung (Bild 2). Bei der Überprüfung der Standsicherheit bestehender Dämme kann das Diagramm ebenfalls zum Einsatz kommen, indem der Ausnutzungsgrad abgeschätzt werden kann. Dafür wird das Verhältnis der steilsten möglichen Böschungsneigung zur vorhandenen Böschungsneigung gebildet, was in seiner

Größenordnung dem Ausnutzungsgrad entspricht.

4 Zusammenfassung

Mit kleinen Stauanlagen werden zahlreiche Flüsse, Regenrückhaltebecken und Schlammteiche begrenzt. Die DIN 19 700 fasst die Regelungen für den Bau, die Planung, die Überwachung und die Bewirtschaftung von Stauanlagen jeglicher Größe zusammen, ohne dabei eine differenzierte Klassifizierung der Stauanlagen unter 6 m zu bieten. Um eine vereinfachte Bemessung und eine Überprüfung vorhandener kleiner Dammbauwerke zu ermöglichen, wurden unter Berücksichtigung der Regelungen des Eurocode 7 Bemessungsdiagramme entwickelt und erläutert.

Autoren

Marie-Therese van Keßel, M. Sc.

HUESKER Synthetic GmbH
Fabrikstraße 13-15
48712 Gescher
vankessel@HUESKER.de

Prof. Dr.-Ing. habil. Tom Schanz

Dipl.-Ing. Hanna Viefhaus
Lehrstuhl für Grundbau, Boden- und Felsmechanik
Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften
Ruhr-Universität Bochum
Universitätsstr. 150
44780 Bochum
tom.schanz@rub.de

Prof. Dr.-Ing. Volker Bettzieche

Dipl.-Ing. Katja Last
Ruhrverband
Kronprinzenstr. 37
45128 Essen
vbe@ruhrverband.de

Marie-Therese van Keßel, Hanna Viefhaus, Katja Last, Volker Bettzieche and Tom Schanz

Design Charts for small Dams and small Flood Control Reservoirs according to Eurocode 7

Many reservoirs which are installed for river or lake management as well as sludge dewatering are often designed with small dams. With help of design charts published in 1962 by Deutschen Gesellschaft für Erd- und Grundbau the design and the construction of small dams were simplified. Today the design charts do not correspond to relevant standards of Eurocode 7 introduced in 2012. Therefore new design charts according to Eurocode 7 are presented. They enable preliminary designs of new small dams and stability examination of existing small dams.

Мари-Терезе ван Кессель, Ханна Фифхаус, Катя Ласт, Фолькер Беттцихе и Том Шанц

Расчетные диаграммы для плотин с небольшими водохранилищами и для аккумулирующих дождевую воду бассейнов согласно Еврокоду 7

Многочисленные водоподпорные сооружения, служащие для хозяйственного использования рек, озер, а также осушения шлама, запруживаются с помощью небольших дамб. До введения Еврокода 7 эти дамбы могли быть рассчитаны на основе расчетных диаграмм согласно рекомендациям Немецкого общества земляных и фундаментных работ от 1962 года. Для предварительного проектирования или ориентировочной проверки несущей способности малых водоподпорных плотин теперь предоставляется расчетная база, которая соответствует современным нормативам.

Literatur

- [1] Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau (Hrsg.): Empfehlungen für den Bau und die Sicherung von Böschungen. In: Die Bautechnik (1962), Nr. 2, S. 404-415.
- [2] Norm DIN 19 700: Stauanlagen. Berlin: Beuth Verlag, 2004.
- [3] DWA (Hrsg.): Kleine Talsperren und kleine Hochwasserrückhaltebecken. In: DWA-Merkblätter (2013), M 522 (Gelbdruck).
- [4] Jelinek, R.: Grundbautaschenbuch. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1955.
- [5] Franke, E.: Einige Bemerkungen zur Definition der Standsicherheit von Böschungen und der Geländebruchsicherheit beim Lamellenverfahren. In: Die Bautechnik (1967), Nr. 1, S. 68-74.
- [6] Striegler, W.: Dammbau in Theorie und Praxis. Berlin: Verlag für Bauwesen, 1998.