

Qualifizierte Bodenverbesserung im Flusdeichbau

Sirko Lehmann, Technische Universität Darmstadt, FG Wasserbau und Hydraulik

Kurzfassung des Vortrags

Das Fachgebiet Wasserbau und Hydraulik der TU Darmstadt beschäftigt sich unter anderem seit einiger Zeit mit dem Komplex Flusdeichbau. Hier stehen die Fragen nach neuen Baumaterialien (Steuernagel, 2008) und der Überströmbarkeit (Kubetzek 2015 und Lehmann 2015) im Fokus. Aus dieser Forschung heraus und in Kooperation mit ortsnahen Ingenieurbüros entwickelte sich die Fragestellung nach dem Einsatz qualifizierter Bodenverbesserung im Flusdeichbau.

Hierzu laufen seit 2015 erste Untersuchungen im wasserbaulichen Forschungslabor und dem geotechnischen Prüflabor der TU Darmstadt. Bei der qualifizierten Bodenverbesserung geht es darum, dem anstehenden Boden Bindemittel (zumeist eine Mischung aus Kalk und Zement) beizumischen, um dessen bodencharakteristische Eigenschaften (z.B. Scherparameter, Steifemodul und Durchlässigkeit) zu beeinflussen. Die Art und Menge des zugegebenen Bindemittels hängen hierbei von der zu verbessernden Bodenart ab. Bindigem Bodenmaterial wird hier mehr Kalk und nichtbindigem Bodenmaterial mehr Zement zugesetzt. Dabei liegt die Zugabemenge in der Regel unter zehn Masseprozent. Es existieren von Seiten der Hersteller und aus Fachpublikationen (Witt 2002) Anhaltswerte für z.B. entsprechende Sieblinien des Basisstoffes in Bezug auf die Bindemittelzusammensetzung und -menge, jedoch ersetzen diese keine gesonderten geotechnischen Voruntersuchungen.

Die grundsätzliche Eignung von verbessertem Bodenmaterial (hier nur mit Zement) wurde bereits von Walz et al. (1977) vor Jahren bestätigt, jedoch fehlen bis heute vertiefende Untersuchungen. In einem Forschungs- und Entwicklungsprojekt der TU Darmstadt, über das hier berichtet wird, sollen nun weitere Grundlagen geschaffen werden, um diese Technologie, welche im Verkehrswege- und Tiefbau bereits seit Jahrzehnten erfolgreich angewendet wird, für den modernen Flusdeichbau zugänglich zu machen. Neben einer Erhöhung der Festigkeit des Bodens (und damit der Widerstandsfähigkeit) gegenüber Wassereinstau und mechanischen Belastungen (z.B. vorbei- oder überfließendes Wasser) lassen sich so gleichzeitig erdmechanisch wesentlich steilere Böschungen realisieren, wodurch die Technologie gerade im begrenzten Raum mit anderen Spezialtiefbaumaßnahmen in Konkurrenz treten kann.

Um qualifiziert verbessertes Bodenmaterial als Baustoff für den Flusdeichbau zu überprüfen, wurde bei der Sanierung eines Weschnitzdeiches ein Teil des anfallenden Altdeichmaterials (fgr'si*Sa) genutzt, um zusammen mit entsprechendem Bindemittel im wasserbaulichen Forschungslabor der TU Darmstadt ein Deichausschnittsmodell in eine Wasserbaurinne einzubauen. Die besonderen Maße der Rinne (30 m Länge, 2,95 m Höhe und 0,75 m Breite) ermöglichten ein naturnahes 2 m hohes Deichausschnittsmodell einzubauen. Um viele Strömungsprozesse beobachten zu können, wurde bei dem Ausschnittsmodell eine verkürzte Kronenbreite (1,5 m) und eine steilere Böschungsneigung (1:1,5) gewählt. Gemäß der Forschungs idee kann Raum gespart werden, gleichzeitig befindet sich der Versuchsstand hierdurch erdstatisch auf der unsicheren und damit konservativen Seite.

Die Böschungsneigung ist zu steil, um mit modernen Mähmaschinen den Deich zu bewirtschaften. Außerdem ist bei dieser Steigung eine Begehung des Deiches (Deichschau) deutlich erschwert. Damit kann diese Neigung als für die Praxis zu steil angenommen werden und eignet sich somit sehr gut, um das verbesserte Material unter extremen Bedingungen zu untersuchen.

Während dieses Ausschnittsmodell eingebaut war, wurden eine Reihe von Versuchen an ihm durchgeführt, welche in Bild 1 sachlogisch geordnet dargestellt sind. Hierbei gibt es vier verschiedene Randbedingungen, welche den Versuchssettings zugrunde liegen:

- Sättigungsgrad des Deiches
- Einstauggrad, bzw. Überströmung des Deiches
- Landseitiger Wechselsprung am Böschungsfuß (W1 und W2 sowie TW)
- Landseitig eingebrachte Wühlтиergänge (T0 und TW)

In den in Bild 1 dargestellten Versuchsszenarien sind verschiedene Kombinationen dieser Randbedingungen untersucht worden. Dabei wurde jedes Szenario mit unterschiedlichen Wasserständen und (im Falle der Überströmung) Durchflüssen gefahren. Bei jedem Teilversuch wurde dabei mindestens 2 h lang die Belastung aufrechterhalten und anschließend eine visuelle Begutachtung der Deichoberfläche durchgeführt.

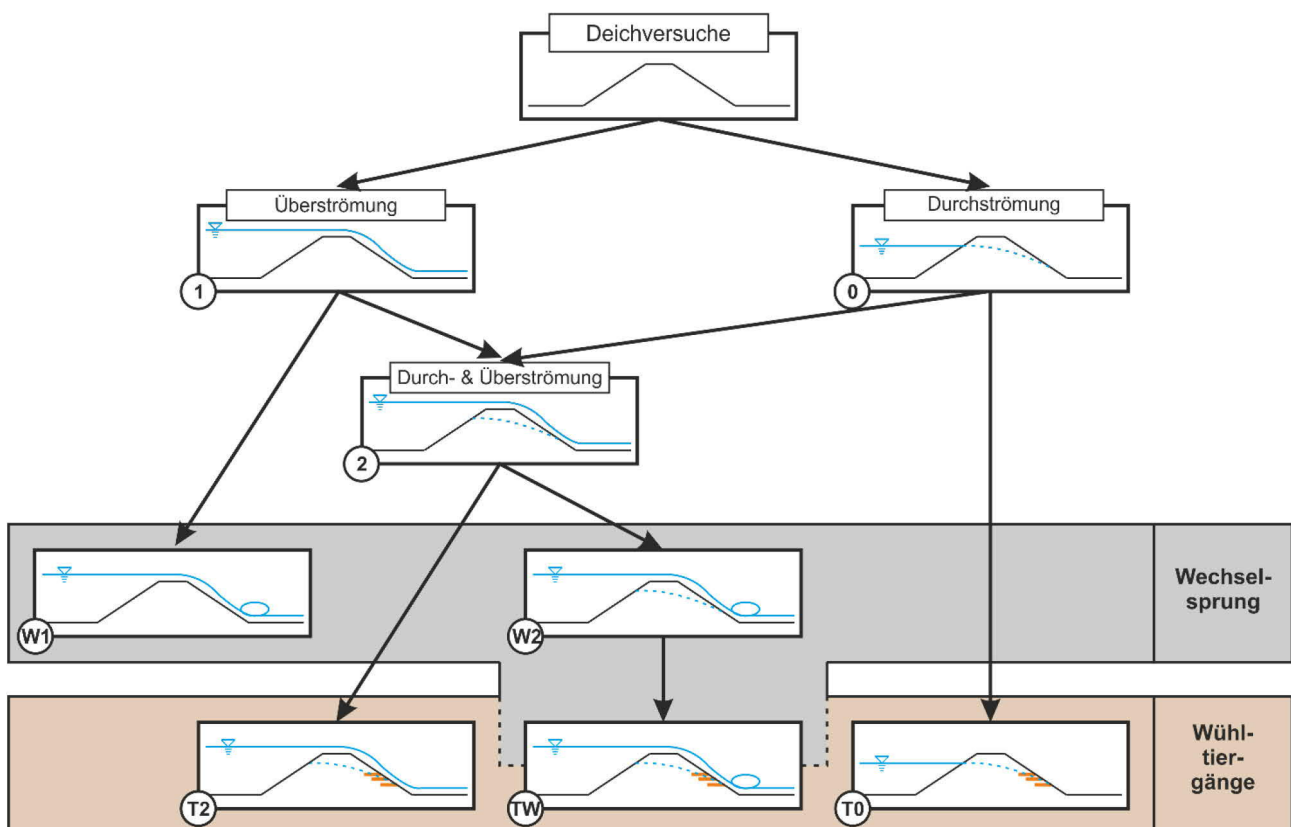


Bild 1: Versuchsprogramm an dem qualifiziert verbesserten Deichausschnittsmodell

Ohne Kräfte aus dem Wechselsprung zu berücksichtigen, wurde die Deichböschung hierdurch insgesamt 51 h mit einer Schubspannung von 0 bis 547 kN/m² (nach Gleichung 1) belastet. Zudem wurde der Deich über 365 Tage am Stück eingestaut. Die unterschiedlichen Versuchseckdaten können Tabelle 1 entnommen werden.

Tabelle 1: Parameter der durchgeführten Untersuchungen (τ nach Gleichung 1 am Böschungsfuß)

	Überströmung (1)	Über-+ Durchströmung (2)	WSP (W1 & W2)	Wühltiere (T0, T2, TW)
Q in l/s	63 bis 291	114 bis 484	212 bis 883	100 bis 899
q in l/s m	84 bis 388	152 bis 641	283 bis 1177	133 bis 1199
τ^1 in N/m ²	120 bis 288	168 bis 384	240 bis 541	158 bis 547
h _{grenz} in cm	0,2 bis 4,8	0,7 bis 13,3	2,5 bis 44,1	0,5 bis 45,7
v _{grenz} in m/s	0,15 bis 0,69	0,27 bis 1,14	0,5 bis 2,1	0,24 bis 2,12
t in h	12	16	16	7

$$\tau_{0,i,v} = \frac{\lambda}{8} \cdot v_i^2 \cdot \rho_w$$

Mit:

$\tau_{0,i,v}$	Sohlschubspannung an der Stelle i	[N/m ²]
λ	Rohrreibungszahl	[-]
v_i	Fließgeschwindigkeit an der Stelle i	[m/s]
ρ_w	Dichte des Wassers	[kg/m ³]

Gleichung 1: Schubspannung in Abhängigkeit der Geschwindigkeit (nach Heinemann, 2003); dabei wurde die Fließgeschwindigkeit v_i sowohl über die Messstreifen gemessen und mittels Kontinuität rückgerechnet als auch mittels Spiegellinienberechnung bestimmt.

Die Beobachtungen der Versuche mit Wechselsprung zeigen den in Bild 2 dargestellten Effekt. Hier ist zu erkennen, dass sich durch die Überströmung ein oberflächennaher Schussstrahl ausbildet, der unter dem Wechselsprung wegtaut und dadurch die Dechoberfläche vor einem Durchschlagen des Wechselsprunges und somit dessen Krafterwirkungen schützt. Es ist noch zu prüfen, ob sich dieser Strahl bei einem begrüntem Deich ebenfalls ausbilden kann oder ob hierdurch weitere Belastungen auf den Deich einwirken.

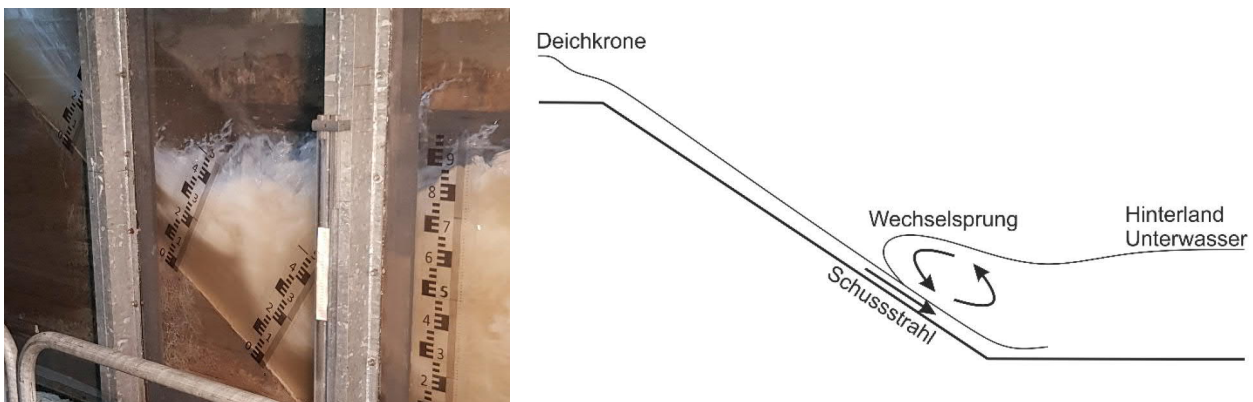


Bild 2: Landseitiger Wechselsprung bei der Deichüberströmung mit abtauchendem Schussstrahl, links Fotografie, rechts Prinzipskizze.

¹ Ohne Kräfte aus dem Wechselsprung, nach Gleichung 1, da der Wechselsprung nicht angegriffen hat (Bild 2)

In den Versuchsszenarien T0 und TW wurden dabei wühlmausgroße (Durchmesser 4 cm) Initialschäden in den Deichkörper eingebracht. Die Versuche wurden videodokumentarisch und mittels verschiedener Sensoren (MID, UAS, Porendruckgeber) und Messskalen dokumentiert. Aus den so erhaltenen Messwerten wurde eine mittlere Fließgeschwindigkeit und Schubspannung auf der Deichböschung rückgerechnet. Anschließend wurde mittels eines versteckten Köders ein Grabeversuch durch einen Hund (Labrador) unternommen. Dieser hatte keine Chance das Loch mit den Pfoten oder der Schnauze zu erweitern.



Bild 3: Köder (links unten), im Deich eingebracht (links oben) und Grabeversuch (rechts).

Nach diesen Ergebnissen lässt sich festhalten, dass kleinere Initialschäden, selbst bei Einstau und Überströmen, den stabilisierten Deich nicht in seiner Widerstandsfähigkeit beeinträchtigen. Gleichzeitig ist durch den Grabeversuch bewiesen, dass ein klassisches Wühltier dem so qualifizierten verbesserten Deich keine solchen Initialschäden zufügen kann, da der Hund auch nach mehrminütigen Versuchen nicht alleine an seine Beute kommen konnte.

Da ein so aufgebauter Deich sich jedoch nicht viel besser in die Umgebung einpasst, als ein betonierter Wall (mit der Ausnahme seiner Durchströmbarkeit) stellt sich nun die Frage, ob der Deich begrünbar und damit durchwurzelbar ist. Eine dichte Grasnarbe würde dem Deich zusätzlichen Schutz gegen mechanische und hydraulische Belastungen bieten. Außerdem könnte die Grasnarbe leichtere chemische Angriffe (z.B. sauren Regen) auf den Deichkörper abdämpfen oder verhindern. Die Effektivität einer geschlossenen Grasnarbe auf einem Deich konnte beispielhaft in Lehmann (2015) nachgewiesen werden.

Um die Begrünbarkeit des Materials zu untersuchen, wurde in einen Versuchstand mit der Grundfläche $35 \times 70 \text{ cm}^2$ eine 20 cm mächtige Schicht des verbesserten Baugrundes eingebaut. Dieser wurde in zwei Teilabschnitte unterteilt. Der eine wurde mit einer 10 cm dicken Oberbodenschicht, der andere nur mit einem Flaum dieses Bodens ausgestattet. Anschließend wurde auf beide Seiten der Grassamen, der von Lehmann (2015) untersuchten Grasnarbe, gesät. Ca. 10 Tage später sind die ersten Grashalme herangewachsen. Dabei wuchs das Gras auf beiden Seiten, wobei es auf der Seite mit weniger Oberboden sichtbar langsamer und nicht gleich dicht heranwuchs (vgl. Bild 4).



15.10.2018



30.01.2019

Bild 4: Grasvegetation auf qualifiziert verbessertem Baugrund (links im Bild mit Oberbodenflaum und rechts im Bild mit 10 cm Oberboden) zu den angegebenen Zeitpunkten (Einsaat am 22.01.2018).

Zusammenfassend lässt sich daher festhalten, dass qualifizierte Bodenverbesserung im Flussdeichbau nicht nur sehr vielversprechend ist, sondern richtig ausgeführt allen notwendigen Anforderungen gerecht wird. Zukünftige Forschungsfragen sind in diesem Bereich die Variation von Bindemittelart und -menge sowie des Ausgangsbodens. Untersucht wurde ein einziger Deich, wobei das Material als Kernmaterial eines Mehrzonendeiches oder als Sanierungshülle eines bestehenden Deiches ebenfalls denkbar ist.

Literatur

- Heinemann, E. und Feldhaus, R. (2003): Hydraulik für Bauingenieure. 2. Auflage. Teubner-Verlag, Köln 2003.
- Kubetzek, T. (2015): Erosion an geotextilbewehrten Deichen bei langeinstauenden Hochwassern und Deichüberströmung. Darmstadt: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Technische Universität Darmstadt. Online verfügbar unter <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/5202>, zuletzt geprüft am 17.05.2019.
- Lehmann, S. (2015): Realmaßstäbliche Überströmversuche zur Ermittlung der Deckwerksstabilität eines grasbewachsenen Deichs. Darmstadt: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Technische Universität Darmstadt. Online verfügbar unter <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/55057>, zuletzt geprüft am 17.05.2019.
- Steuernagel, J. (2008): Möglichkeiten zur Optimierung von Sanierungsmaßnahmen an Flußdeichen. Darmstadt: Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft Technische Universität Darmstadt. Online verfügbar unter <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/1174>, zuletzt geprüft am 17.05.2019.
- Walz, E.h.K.; Hallazer, O.; Siebel, E.; Bayer, E. Borrowsky, U.; Dahms, J.; Kramer, J.; Loch, W.; Mitusch, H.; Petersen, K.; Probst, B.; Scherenberg, R.; Schubenz, D. (1977): Vorläufiges Merkblatt für Bodenverfestigung mit Zement im Wasserbau. In Beton 1/78 S. 20 ff. Beton-Verlag GmbH, Düsseldorf 1978.
- Witt, K.J. (2002): Zement – Kalk – Stabilisierung von Böden. In Witt, K.J.: Schriftenreihe Geotechnik Heft 7 – Geotechnik Seminar Weimar 2002, Bauhaus-Universität Weimar 2002.

