

# Sternsiebanlagen und Flüssigboden-Technologie Innovative Verfahren der Bodenaufbereitung für den Deichbau

Prof. Dr.-Ing. Ralf Thiele / Dipl.-Ing. Friedemann Sandig

G<sup>2</sup> Gruppe Geotechnik

Institut für Grundbau und Verkehrsbau

Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig

## KURZFASSUNG

Altdeiche stellen oft wertvolle Ressourcen für moderne Deichsanierungsaufgaben zur Verfügung. Die Aufbereitung dieser Böden zu hochwertigen Baustoffen in der direkten Verarbeitung oder als Ausgangsmaterial zur Herstellung von Spezialdichtungen aus Flüssigböden wird durch die G<sup>2</sup> Gruppe Geotechnik an der HTWK Leipzig erforscht. In mehreren vergleichenden Untersuchungen werden die Bodenaufbereitung durch Sternsiebanlagen und eine Flüssigboden-Technologie für den Deichbau vorgestellt.

## 1. EINLEITUNG

Dichtende Elemente im Deichbau werden klassischerweise durch Tone realisiert. Diese hochwertigen natürlichen Materialien werden grundsätzlich als geeignet beschrieben, die Durchsickerung im Belastungsfall zeitlich und geometrisch zu reduzieren. Einige material- oder ausführungstechnische Schwächen bei der Herstellung von Flächendichtungen in Deichen führten in der Vergangenheit mitunter zu einem Diskussionsbedarf. Echte Ausführungsprobleme ergeben sich jedoch aus dem simplen Umstand, dass auf die natürliche Ressource Ton flächendeckend sehr unterschiedlich, in einigen Jahren jedoch in großen Teilen Deutschlands nicht mehr ausreichend zurückgegriffen werden kann. Diesem Ressourcenmangel kann deshalb nur mit geeigneten Verfahren der Bodenaufbereitung und -verbesserung am Standort Deich entgegen gewirkt werden.

Die G<sup>2</sup> Gruppe Geotechnik an der HTWK Leipzig verfolgt seit einiger Zeit die Lösungs idee der Kombination von Aufbereitung und Verbesserung von Altdeichmaterialien und entwickelt ein Technologie-Konzept zur Bodenaufbereitung durch Sternsiebanlagen sowie modifizierte Spezialmischungen für geeignete Flächendichtungen auf Basis des Flüssigboden-Verfahrens. Die Zusammenführung dieser getrennten Betrachtung sichert die notwendige hochwertige Qualität und ordnet das Bestandsmaterial von Altdeichen wieder in den Stoffkreislauf ein. Die Untersuchungen finden begleitend zu realen Deichsanierungsprojekten auf einem Versuchsfeld und an dem Versuchsdeich der Hochschule statt.

## 2. DAS BESTANDSMATERIAL

### 2.1. Beschreibung

Die Altmaterialien des Deichbaus stellen aufgrund ihrer Ablagerungsgeschichte und ihrer historischen Alterungsprozesse besondere Anforderungen an eine wirtschaftliche Umsetzung eines Bodenverbesserungsverfahrens. Diese typischerweise gemischtkörnigen bindigen Böden liegen in der Praxis üblicherweise als inhomogene, zum Teil stark durchwurzelte Materialien vor (Abb. 1). Diese Tatsache der z.T. sehr unterschiedlichen Materialqualität lässt einheitliche Betrachtungen hydraulischer oder geotechnischer Art nicht zu.

Zusätzlich sind die Art, Intensität und Verzweigungsrichtung eines ungewollten Deichbewuchses nicht selten auch Sanierungshintergrund [BAW MSD]. Durch Wurzelstrukturen im Deich, insbesondere in Dichtungen, lassen sich bisher piping-Effekte, Austrocknungs- und Auflockerungsmechanismen beschreiben [Witt 2007, Haselsteiner 2010, Liebeheim 2011], sie stellen „...langfristig ein latentes Gefahrenpotential dar.“ [DWA M 507]. Eigene Untersuchungen an Bestandsdeichen bestätigen diese Beobachtungen der Strukturschädigung (Abb. 2). Obwohl im Allgemeinen davon ausgegangen werden kann, dass die Standsicherheit eines Deiches durch Bewuchs beeinträchtigt wird, ist ein kritisches Maß an Wurzelmasse bisher nur schwer definierbar.



Abb. 1: stark durchwurzeltes Deichmaterial



Abb. 2: Wurzeleinlagerung, Austrocknung und Rissbildung in einer gealterten Tondichtung

Die historisch verbauten Erdstoffe in der häufig vorliegenden Form sind deshalb für die weitere Verwendung insbesondere zu homogenisieren, unter Umständen ist eine Zumischung oder Abtrennung von Stoffanteilen zusätzlich zielführend.

### 2.2. Aufbereitung

Die Untersuchungen zur Aufbereitung von Altdeichmassen durch die HTWK Leipzig stehen im Fokus der beiden Zielrichtungen Abtrennen und Zumischen von Stoff-/Fremdanteilen und erfolgten auf diversen Versuchsflächen sowie einem stark durchwurzelten Sanierungsbereich eines Leipziger Fließgewässers im Zeitraum 2011 bis 2012. Ausgehend von begleitenden Betrachtungen zum aktuellen Ausführungsstandard durch diverse Fräs-

und Siebtechnologien [Voigt 2011] konzentrierten sich die Versuche auf die Bodenaufbereitung durch den Einsatz einer mobilen Sternsiebanlage Typ 3-mtb (Abb. 3).



Abb. 3: Sternsiebanlage 3-mtb, vorn: aufbereiteter Erdstoff

Die Aufbereitung des Bodens erfolgt dabei in zwei Stufen: Überkorn, grobe Wurzel- und Fremdstoffanteile > 60 mm werden in der ersten Siebstufe exakt separiert und ausgelesen. Anschließend gelangt das Unterkorn frei von Störstoffen auf die zweite Siebstufe der Feinabsiebung. Dabei brechen auf Wellen angeordnete Sternräder durch gleichläufige Rotation größere Agglomerate auf (Abb. 4). Durch Bunkerzuführung oder manuelles Direktbeladen mittels Baggergerät können während dieses Prozesses zusätzlich fehlende Kornfraktionen gesteuert zugemischt werden. Das Aufliegergerät ist auf der Baustelle über Kettenantrieb mobil steuerbar und im Baufortschritt laufend integrierbar.



Abb. 4: Sternsieb-Deck im Einsatz

## 2.3. Ergebnisse

Für die Untersuchungen zur Analyse des Aufbereitungsprozesses wurde Material sowohl direkt als auch über eine vorgeschaltete zusätzliche Tonbrecherwellen-Schaukel geladen. Die bisherigen Ergebnisse belegen eine gute bis sehr gute Verarbeitbarkeit gemischtkörniger und bindiger Böden. Das Abtrennen typischerweise schwer bearbeitbarer bindiger Aggregate mit hohen Wassergehalten gelingt und lässt die weitere Verarbeitung insbesondere infolge des Belüftungsprozesses zu. Durch die erste Zerkleinerung in der Tonbrecherwellen-Schaukel konnte eine weitere Reduzierung der bindigen Auswurf-Anteile von 3 % auf unter 1 % erreicht werden. Das aufbereitete Feinkorn weist infolge der Abtrennung von stark bindigen Anteilen generell einen leicht kleineren Plastizitätsbereich und infolge der starken

Belüftung in der Sternsiebanlage höhere  $I_c$ -Werte auf. Bei den Untersuchungen wurden Mindestdurchsatzleistungen von 90 bis 120 t/h ermittelt.

Die Abtrennung von Überkorn und insbesondere Wurzelmaterial ist im Gegensatz zu gängigen technologischen Ausführungsvarianten durch Fräszüge überaus positiv zu bewerten. Es findet so keine „Problemvergleichsmäßigung“ durch Zerkleinerung und Durchmischung, sondern eine echte Entfernung ungewünschter Anteile statt. Während die Abtrennung von großen Kornfraktionen in Abhängigkeit der Anlagen-Ausrüstung nahezu vollständig erfolgt, ist das Entfernen eines Anteiles an Wurzelmasse differenzierter zu betrachten. Die Forderung nach niedrigen Organikgehalten für Materialien des Deichbaus ( $V_{gr}$  i.d.R. unter 5 %) umfasst die strukturellen (Wurzeln) und gelösten (Huminsäuren u.ä.) organischen Anteile. Eine Reduzierung des Gesamtorganikgehaltes ist durch mechanisches Abtrennen folglich nur auf den sichtbaren Wurzelanteil bezogen. Dieser ist nach aktuellem Regelwerk „... vollständig zu entfernen.“ [DIN 19 712]. Untersuchungen an einem Probefeld auf einer Deichkrone eines Altdeiches in zwei Tiefenlagen (0,2 bis 0,8 m und 0,8 bis 1,1 m) belegen trotz Absiebung von Strukturen mit Durchmesser ab 5 mm von bis zu 94 % keine signifikante Änderung des Glühverlustes (Reduzierung um 0,1 %). Begleitende Untersuchungen zu Abmessung und Lage verbleibender Wurzelstrukturen im Boden weisen grundsätzlich auf einen Zusammenhang zwischen z.T. ungünstigerer Wasserwegsamkeit entlang der Durchsickerungsrichtung hin, werfen jedoch weiterhin die Frage nach nicht beobachteten Zersetzungsvorgängen auf.

Weitere Forschungsschwerpunkte bezogen sich auf die Zumischung unterschiedlicher Kornfraktionen. Für die Zumischung von Feinkorn wurden ein Rhyolith-Gesteinsmehl (0 bis 0,063 mm) sowie ein Aktivbentonit (Montmorillonit-Gehalt mind. 85 %) verwendet. Im Siebkornbereich wurde mit Füllsand 0/2 optimiert. Alle Materialien wurden über das Bunkersystem der Sternsiebanlage 3-mtb zugeführt (Feinkorn: 1, 2, 4 und z.T. 8 %, Siebkorn: 1 und 2 %).

In der Auswertung wurde die Mischqualität anhand der Steuerauslesung der Anlage, über vergleichende Kornverteilungsdarstellungen von Ausgangs- und Mischmaterialien sowie visuelle Strukturuntersuchungen bewertet. Im direkten Vergleich der beiden Feinkorn-Zumischungen zeigt sich die gute Übereinstimmung mit den rechnerisch vorermittelten „Soll-Kornverteilungen“. Während die Anhebung der Kornverteilungslinie durch Zumischung von hochwertigem Aktivbentonit im Bereich von bis 0,02 mm erkennbar ist (Abb. 5), bewirkt die Mischung mit Gesteinsmehl eher die Optimierung im Grobschluffbereich (Abb. 6).

Begleitend fanden Untersuchungen zur Beeinflussung der Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18 130 an den Mischmaterialien mit Verdichtungsgraden von  $D_{pr} = 97$  % statt. Während bei den im Siebkorn optimierten Böden eine Erhöhung des  $k_p$ -Wertes bisher nicht deutlich nachgewiesen werden konnte, wurden durch die Feinkorn-Optimierungen ca. 10-fach reduzierte Wasserdurchlässigkeiten pro 2 % Zugabemenge erreicht. Die Lage der Proctorkurven veränderte sich nur unwesentlich.

### 3. ALTERNATIVE DICHTUNG

#### 3.1. Grundidee

Die Methode der gezielten Bodenaufbereitung durch mobile Sternsieberanlagen stellt Baustoffe für den Deichbau zur Verfügung, welcher in direkter Verwertung im Rahmen von Sanierungsprojekten eingesetzt werden kann. Durch den Einsatz einer „nachgeschalteten“ Technologiestufe der kurzzeitigen Bodenverflüssigung zu einem dichtenden Baustoff können aus Altdichtmaterialien jedoch zusätzlich hochwertige Dichtungselemente gewonnen werden, welche die Anforderungen des modernen Deichbaus erfüllen. Basierend auf dieser Grundidee beschäftigt sich die Gruppe G<sup>2</sup> Gruppe Geotechnik an der HTWK Leipzig seit Jahren mit dem sogenannten Flüssigboden-Verfahren und seiner technologischen und materialseitigen Weiterentwicklung.

#### 3.2. Forschungsgegenstand

Bei der Herstellung von Flüssigböden werden Böden unter Zugabe von Wasser und quellfähigem Montmorillonit verflüssigt. Durch die Beimischung verschiedener Bindemittel und weiterer Zusätze können die späteren Endeigenschaften des Gemisches wie Festigkeit, Tragfähigkeit, Abbindezeitraum, Wasser- und Gasdurchlässigkeit, Elastizität u.v.a. gesteuert werden. Der Vorteil dieses Materials liegt vor allem in der verdichtungsfreien Verfüllung schwer zugänglicher Rohr- und Leitungsgräben. Die fließfähigen und selbst verdichtenden Materialien werden seit ca. 20 Jahren vor allem im deutschsprachigen Raum unter den Bezeichnungen Flüssigboden, Bodenmörtel oder liquid soil vermarktet.

In Zusammenarbeit mit STRABAG Leipzig und dem Flüssigboden-Hersteller Parcoplan finden seit 2009 Untersuchungen speziell zur Entwicklung geeigneter Flächendichtungen aus Flüssigböden in Deichen statt, welche durch die Landestalsperrenverwaltung des Freistaates Sachsen begleitet und bewertet werden. Seit 2010 werden Technologie und Material im Rahmen einer laufenden BMBF-Förderung zusätzlich an einem 1:1-Versuchsdeich (Abb. 9) in unterschiedlichen Rezeptur- und Einbauvarianten erforscht (Abb. 10).

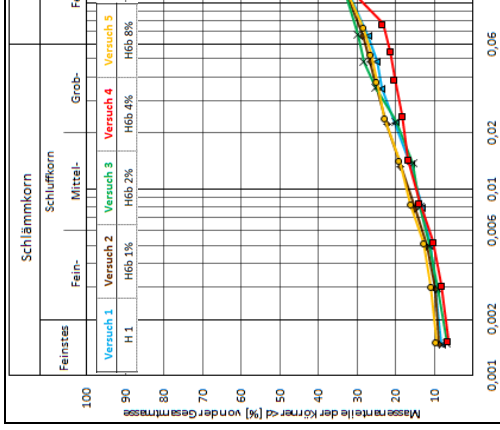


Abb. 6: Gesteinsmehlvergütung

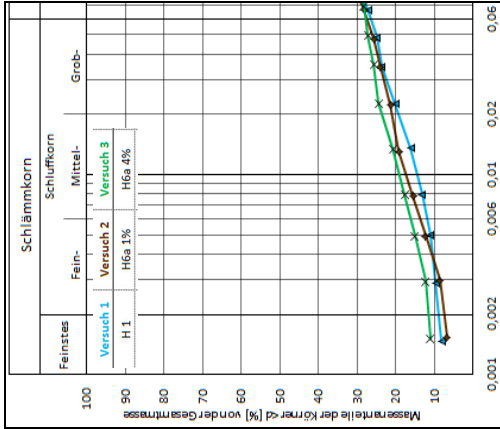


Abb. 5: Bentonitvergütung

In der optischen Auswertung der Aufbereitungs- und Mischqualität können folgende Aussagen getroffen werden: Die aufbereiteten Böden der untersuchten gemischtkörnigen und bindigen Ausgangsstoffe besitzen maximale Aggregatgrößen von 3 cm im Mengenverhältnis von etwa 2 %.



Abb. 7: Aggregatummüllung mit Gesteinsmehl

Abb. 8: Umhüllung mit Sandfraktion

Bei der technologischen Optimierung durch Zumischfraktionen werden diese Einzelaggregate mit dem Mischgut oberflächlich vollständig umhüllt. Es ist durch nachfolgende Einbau- und Verdichtungsprozesse von einem positiv wirkenden zusätzlichen Vermischen/Verketten dieser Stoffanteile auszugehen.



Abb. 9: Versuchsdeich der HTWK Leipzig

Diese im Rahmen der Forschung weiter entwickelten Flüssigböden wirken den momentanen Schwachstellen bisheriger Gemische entgegen, indem gezielt Grenzbereiche der Wasseraufnahmefähigkeit sowie Wirkungsmechanismen von Bindemitteln, -gemischen und Zusätzen erfasst und für die jeweiligen Ausgangsböden genutzt werden. Diese Gemische zeichnen sich durch eine niedrige Wasserdurchlässigkeit, geringere Festigkeiten und geringe Schwindmaße aus und wurden für einen Einbau im flüssigen bis breigen Zustand entwickelt. Der für die klassische Rohrgrabenfüllung wesentliche Aspekt der Tragfähigkeit hat für die dichtenden Flüssigböden im Deich eine untergeordnete Bedeutung. Andere Baustoffeigenschaften wie Rissanfälligkeit, Schrumpf- und Quellmaße werden dagegen intensiv betrachtet. Zusätzlich werden mehrere Methoden der Bauteilverzahnung, der Nachbehandlung zum Schutz und die Ausbildung einer Flüssigbodendichtung entwickelt.

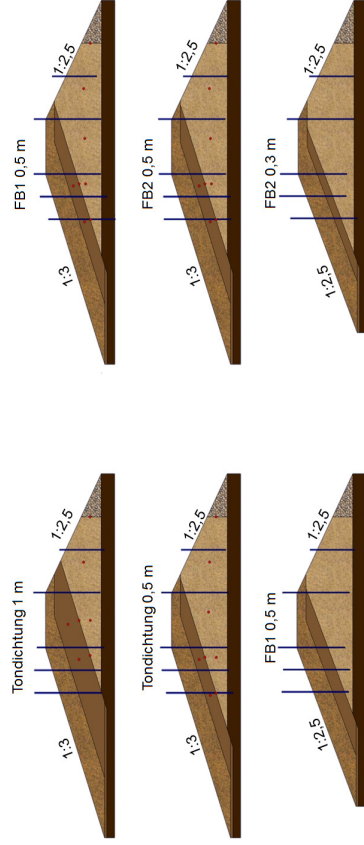


Abb. 10: geometrische Aufbauvarianten der ersten Versuchsflächen Q1 bis Q6

Der Einsatz von Flüssigböden als geeignete Flächendichtungen in Deichen erfordert über die bisher erfolgreich gesteuerten Baustoffeigenschaften auch Betrachtungen spezieller Detailbereiche sowie der Bewertung des Bauteils im Gesamtsystem. Da Dichtungen sicherheitsrelevante Elemente des Deichbaus bilden, ist zusätzlich an diese Materialien eine Gewährleistung dieser Eigenschaften auch im Langzeitverhalten unter extremen Stauwechsellast sowie unter Frost-Tau- oder Austrocknungs-Einflüssen gefordert. Dies betrifft sowohl die Nachweise am verwendeten Bodenbaustoff im Rahmen der Gegenüberstellung und positiven Bewertung mit klassischen mineralischen Dichtungen als auch am geometrischen Körper im realen, naturgetreuen Gesamtsystem.

### 3.3. Ergebnisse

Durch Festlegung einer neuen Systematik einer Rezepturfindung wurden die alternativen Flüssigbodendichtungen im Versuchsdeich mit vergleichsweise geringeren Bindemittelmengen und höheren Tonanteilen definiert. Die für die Umwandlung des gewählten Ausgangsbodens SU\* in ein breiges bis flüssiges Gemisch benötigte hohe Wassermenge wurde unter Zugabe von 2,3 % quellfähigem Montmorillonit aufgenommen und durch Festlegung von Mischprozessen und Prüfmethoden abgesichert. Als Zielgröße der Rückverfestigung des Materials wurde die einaxiale Zylinderdruckfestigkeit (Lagerungstemperatur 20 °C) definiert. Unter den Randbedingungen Verformungsfähigkeit

und Tragfähigkeit wurden durch Voruntersuchungen Materialien positiv bewertet, deren einaxiale Druckfestigkeit sich an der unteren Grenze der bisher baupraktisch eingesetzten Flüssigböden anlehnt.

Die neuen Flüssigbodendichtungen orientieren sich sehr am bodenmechanischen Verhalten relevanter Dichtungs-Tone. Zusätzlich wurden Methoden der Nachbehandlung zum Schutz und zur Ausbildung der Oberflächen entwickelt und geeignete Einbautechnologien erprobt. Die in der Versuchsanlage eingebauten Flüssigböden weisen Zylinderdruckfestigkeiten von  $q_u = 0,08$  bis  $0,32 \text{ N/mm}^2$  bei Stauchungen von  $\epsilon = 1,0$  bis  $2,3 \%$  auf (28-Tage-Prüfwert, Probenhöhe:  $h_A = 0,20 \text{ m}$ , Vorschubgeschwindigkeit:  $0,2 \text{ \%} \cdot h_A = 0,4 \text{ mm/min}$ ).

Auf Oberflächen von Dichtungen kommt es jedoch direkt nach dem Einbau durch Verdunstungsprozesse zur Entstehung eines kapillaren Unterdruckes und Meniskenbildung im Gefüge. Dadurch können sich ohne Gegenmaßnahmen bereits im frühen Alter sogenannte kapillare Mikrorisse bilden, die sich im Laufe der Zeit zu Schwachstellen im Bauteil entwickeln könnten [Slowik/Schmidt 2010]. Sie haben einen negativen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und Gebrauchstauglichkeit des Bauteils. Für Flüssigbodendichtungen muss somit als Qualitätskriterium eine Frührissfreiheit definiert werden. Nach bisherigem Forschungsstand ist diese allein durch eine Rezepturabstimmung nicht zu erreichen. In Labor- und Feldversuchen wurde das Schwindverhalten verschiedener Flüssigbodenzeturen bestimmt. Der maximale und damit kritische Kapillardruck wurde bei den neuen Mischungen im Freiversuch erst nach über 5 h erreicht. In Verbindung mit dem Wasserverlust, konnte eine Aussage über die Rissanfälligkeit der einzelnen Rezepturen getroffen werden. Es wurden über kabellose Sensoren im Bauteil ein verhältnismäßig hoher kritischer Kapillardruck von -600 mbar bestimmt und Nachbehandlungsmethoden geprüft.

Bei der Bewertung der Oberflächendichtung hat der Parameter der Wasserdurchlässigkeit eine besondere Bedeutung. Die Rezepturen der neuen Flüssigbodendichtungen im Versuchsdeich wurden für eine Durchlässigkeit von  $k \leq 10^{-9} \text{ m/s}$  entworfen. Bisherige Feldprüfungen in den letzten Jahren mittels Infiltrometerversuchen nach DIN 18130-2 lieferten bei dieser geringen Durchlässigkeit zu ungenaue Ergebnisse und sollten für Nachweise der Wasserdurchlässigkeit nicht Verwendung finden. Die bei der Herstellung der alternativen Dichtungen gezogenen Chargenproben (Stützen, Verhältnis  $h/d = 2/1$ ) belegen Wasserdurchlässigkeiten der Materialien von  $4 \cdot 10^{-10} \leq k_3 \leq 2 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$  und sind vergleichbar mit der Wasserdurchlässigkeit des Bezugsmaterials TL. Aus den bisherigen Langzeituntersuchungen am Material im Freiversuch konnte zudem keine signifikante Verschlechterung dieses Parameters ermittelt werden. Die maximalen Werte der realen Gesamtdurchlässigkeit der Dichtungsschichten werden mit der ca. 50-fachen Geschwindigkeit abgeschätzt.

Seit Herbst 2011 wurden die neuen Oberflächendichtungen aus Flüssigboden in mehreren hydraulischen Simulationen getestet. Die unterschiedlichen Einstauhöhen von 0,3 bis 1,7 m in den beiden Becken wurden dabei kontinuierlich überwacht. Die Erfassung der wechselnden Feuchteverteilung in den einzelnen Querschnitten ergab die Schlussfolgerung, den bisherigen Ansatz der Simulation stationärer Zustände von Durchsickerung und

Durchfeuchtung nicht weiter zu verfolgen, da die Einflüsse von Untergrund- und/oder Niederschlagsdurchfeuchtung ein stationäres Verhalten von Deichkörpern in der Realität verhindern. Die Auswertung von Sickerwasserpegeln ergab eine tendenziell niedrige und weitgehend plausible Lage der jeweiligen Sickerwasserflinien, insbesondere in Abhängigkeit zur variablen Lagermächtigkeit der ausgebildeten Dichtungssarten. Im landseitigen Stützkörperbereich wurden bei allen Feldversuchen im Vergleich zu den numerischen Modellen erhöhte Sickerpegel von bis zu 10 cm nachgewiesen, was auf den lokal wirksamen Niederschlagsanfluss in diesem ungedichteten Bereich zurückzuführen ist.

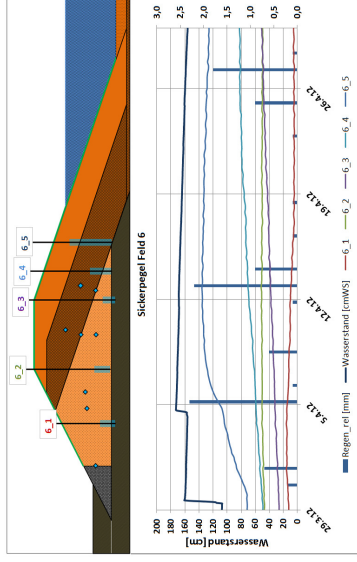


Abb. 11: Ausschnitt aus dem Messprogramm

Auf Basis der bodenmechanischen Untersuchungen aus Materialproben in den Querschnittselementen sowie der Messergebnisse der hydraulischen Simulationen wurden hydraulische und erdstatistische Modelle unter GGU SSFlow 2D und Stability gebildet und kalibriert. Abb. 12 und 13 zeigen beispielhaft die Ergebnisse am Querschnitt einer 0,5 m mächtigen Dichtungslage aus Flüssigboden mit 0,85 m Schutzschicht unter hydraulischer Belastung von 1,00 m. Erkennbar ist der messtechnisch nachgewiesene schmale Saum der gesättigten Zone im Stützkörper. Der Ausnutzungsgrad der Gleitkreisberechnung auf Landseite wird mit 0,30 ausgegeben. Ursachen sind sowohl in der Abstufung der hydraulischen Bodenparameter untereinander als auch in der geometrischen Ausbildung des eher kleinen Deichkörpers zu finden.

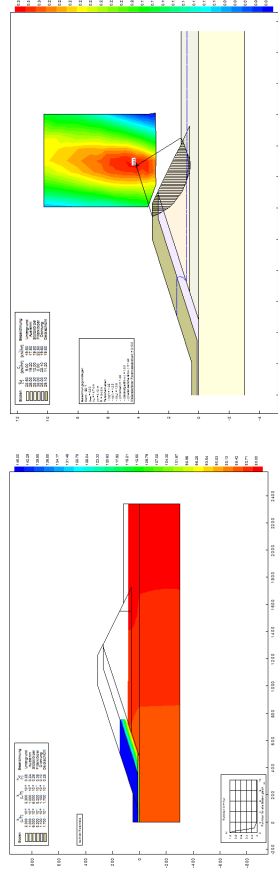


Abb. 12: Q3/H1,00 - GGU SSFlow 2D

Unter Beachtung der Durchlässigkeiten der angrenzenden Bauteile Stützkörper und Deckschicht werden die Potentiallinien im Bereich der Dichtung stark gebündelt und sind auch in der Berechnung der Gleitkreise von sicherheitsbildender Bedeutung. Dies könnte auch in Hinblick einer potentiellen Alterung des Gesamtsystems und tendenzieller Verschlechterung der Bodenkennwerte vorteilhaft sein.

Abb. 13: Q3/H1,00 - GGU Stability

Aus bisherigen Untersuchungen ist bekannt, dass die Ursachen der schnellen Alterung bestehender Dichtungen häufig in der ungenügenden Schutzwirkung infolge zu geringer Deckschicht, aus einem Wasserzug durch tief reichende Wurzeln eines möglichen Bewuchses [SANDIG 2011] und der bedingt verbundenen Austrocknungsproblematik liegen. Der für die Betrachtungen der Alterungserscheinungen kritische Bereich ist demnach vor allem der Kronenbereich der Versuchsanlage. Die deshalb durchgeführten Aufgrabungen an über 4 Jahren eingebaute Flüssigbodendichtungen zeigen, dass diese sich in einem äußerst frischen, steifen Zustand befinden und keine Strukturschädigungen aufweisen. Die ermittelten Wassergehalte dieser Alternativdichtungen lassen nicht auf Austrocknungserscheinungen schließen.

#### 4. ZUSAMMENFASSUNG

Die im Rahmen von Deichsanierungsmaßnahmen typischerweise vorliegenden ungeeigneten Materialgemische können durch Sternsiebanlagen zu qualitativ hochwertigen Baustoffen überführt werden. Neben der Abtrennung ungewünschter Bestandteile wie Überkorn und/oder Wurzelstrukturen wurde erstmals auch die Zumischung einzelner Fraktionsanteile im Fein- und Siebkornbereich geprüft und positiv bewertet. Damit gelangen die gezielte Anpassung bisher ungenügender Parameter und die Ressourcenschonung im Sinne des Kreislaufgedankens. Darüber hinaus wurde die effektive Weiterverarbeitung von typischem Aldeichmaterial zu hochwertigen dichtenden Bauteilen nachgewiesen.

Als Alternativmaterial zum verknappenden Naturbaustoff Ton sind Flüssigbodendichtungen im Deichbau in ihren grundlegenden Eigenschaften vergleichbar. Die bisherigen Versuchsreihen belegen deutlich, dass es gelingt, aus bislang ungeeigneten Materialien über spezielle Rezepturen dichtende Flüssigböden herzustellen, welche die Anforderungen der Durchlässigkeit sicher erfüllen. Als wesentlicher Parameter der Praxisüberwachung des Materials wird der kritische Kapillardruck als Ursache potentieller Rissbildung im Frühstadium benannt. Bisher ermittelte Kapillardrücke ließen sich in ersten Versuchen um ca. 40 % verringern. Die Verfestigungsprozesse von Flüssigböden lassen sich im Allgemeinen mit den bisherigen Theorien der Bodenverfestigung auf Basis unterschiedlicher Bindemittel erklären. Besondere Relevanz wird dabei der Begrenzung der Nachverfestigung ab 14 Tagen zugesprochen. Bestimmte bodenmechanische Parameter lassen sich über die Prinzipien der Flüssigbodenherstellung auch für den Einsatz der Baustoffe im Deichbau gezielt anpassen. Insbesondere die Kohäsionsanteile der Scherfestigkeit führen beim Material zur besseren Bewertung am Hang, Durchlässigkeiten können durch das Flüssigboden-Verfahren gezielt um mindestens den Faktor 100 verringert werden.

Im Allgemeinen lässt sich durch die bisherigen Versuchsreihen eine sehr gute Vergleichbarkeit zwischen klassisch mineralisch und alternativ durch Flüssigböden gedichteten Deichkörpern beschreiben.

Besonderer Dank gilt der Parcoplan GmbH und der STRABAG Niederlassung Leipzig für die unkomplizierten und dauerhaften Hilfeleistungen im Rahmen dieser Untersuchungen.

## LITERATUR

- Bundesanstalt für Wasserbau BAW (2011): *Standssicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD)*. Selbstverlag, Karlsruhe.
- Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e.V. (2011): *DWA-Merkblatt M 507-1, Deiche an Fließgewässern*. DWA-Verlag, Hennef.
- DIN-Ausschuss (2011): *DIN 19712, Hochwasserschutzanlagen an Fließgewässern*. Beuth Verlag, Berlin.
- Haselsteiner, R. (2010): *Der Bewuchs an und aus Hochwasserschutzdeichen an Fließgewässern aus technischer und naturschutzfachlicher Sicht*. Dresdner Wasserbaukolloquium 17.-18.04.2010.
- Landestalsperrenverwaltung Sachsen (2009): *Qualitätssicherung im Deichbau*. Handbuch für den internen Gebrauch des Betriebes E/M/UWE der Landestalsperrenverwaltung Sachsen, Röttha.
- Liebeheim, C. (2011): *Beeinflussung der bodenmechanischen Eigenschaften durch Wurzeleinschaltungen im Boden*. Diplomarbeit an der Fakultät Bauwesen, HTWK Leipzig.
- Sandig, H. (2011): *Numerische Überprüfung der Wirksamkeit der Oberbodenschicht zum Schutz der mineralischen Dichtung eines 3-Zonen-Deiches gem. DWA-M 507*. Masterarbeit Bauhaus Universität Weimar.
- Slowik, V., Schmidt, M. (2010): *Kapillare Schwindrissbildung in Beton*. Forschungsbericht zu Ursachen und Auswirkungen sowie zur Vermeidung von Fröhschwindrissen, Beuth Verlag, Berlin.
- Witt, K.-J. (2007): *Bedingungen der Beständigkeit tonmineralischer Komponenten in Oberflächenabdichtungssystemen*. in Henken-Mellies, W. U. (Hrsg.): 18. Nürnberger Deponieseminar 2007, Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstitutes Heft 86, S. 115-134, Nürnberg.
- Voigt, C. (2011): *Variantenuntersuchung zur Separierung von Wurzeln im Baustoff Boden*. Diplomarbeit an der Fakultät Bauwesen, HTWK Leipzig.