

# BAUGRUNDVERBESSERUNG MIT GEOPIER<sup>®</sup> BOHR- RAMMSÄULEN UND GEOGITTERPOLSTER BEI DER ORTSUMFAHRUNG HUNGEN

Dr.-Ing. U. Köhler

vgs Ingenieure Dr. Köhler & Kirschstein GmbH, Erfurt

Dipl.-Ing. T. Philipp

vgs Ingenieure Dr. Köhler & Kirschstein GmbH, Leipzig

## KURZFASSUNG:

Die Straßentrasse einer Ortsumfahrung um die hessische Kleinstadt Hungen im Landkreis Gießen kreuzt ein ehemaliges Bergbaugesamt. Insbesondere bei der bis zu 12 m hohen, unsymmetrischen Querung eines Tagebaurestloches wurden Standsicherheitsprobleme und große Setzungen bis 50 cm, infolge des im Restloch angetroffenen Spülguts aus ausgeprägt plastischem Ton, berechnet. Verschärft wurde die Situation durch eine Randüberkipfung des ehemaligen Tagebaus. Darüber hinaus war eine sehr kurze Bauzeit von ca. 1 Jahr bis zur Verkehrsfreigabe zu realisieren.

In einem weiteren Bereich wurden in einer Einschnittlage breiiger, wassergesättigter Schluff, anthropogenes Material ehemaliger Spülteiche angetroffen.

In beiden Bereichen wurde eine Kombination aus einer Baugrundverbesserung mit säulenförmigen Tragelementen im Bodenentnahmeverfahren und einem Geogitterpolster zur Stabilisierung des Untergrundes und zur Reduzierung der Verformungen eingesetzt. Als Baugrundverbesserungsverfahren wurde das Geopier-Verfahren gewählt. Die Bemessung der Geogitterpolster erfolgte nach EBGE0.

Aufgrund der teilweise immer noch beträchtlichen Setzungen aus dem Bauwerksentwurf im Dezimeterbereich wurde ein umfangreiches Messsystem installiert. Dieses auf die unsymmetrischen Verhältnisse abgestimmte Messsystem ermöglichte durch eine fortlaufende Beobachtung und Bewertung der Setzungen eine Fertigstellung des Oberbaus vor dem vollständigen Abklingen der Konsolidationssetzungen. Die Details zu diesem Projekt sind Gegenstand des Vortrags.

## 1 EINLEITUNG

Im Bundesland Hessen wurde von Mitte 2005 bis Ende 2006 die Ortsumfahrung Hungen im Landkreis Gießen als Bestandteil der B 457 errichtet. Die Trasse quert dabei ein ehemaliges Bergbaugesamt des Eisenerzabbaus. Das Erz wurde bei Hungen schon seit dem Mittelalter im Tiefbau abgebaut. Darüber hinaus wurde das Erz seit den 1950er Jahren im Tagebau gewonnen. Für Historiker und Archäologen ist die Baumaßnahme aufgrund von Ausgrabungen am Limes von Interesse, der im Bereich von Hungen ein Tor und Befestigungsanlagen aufwies.

Bestandteil des Projektes ist eine Querung des Restlochs eines ehemaligen Tagebauses, Abbildung 1-1. Der Tagebau wurde in den 1950er Jahren zur Erzgewinnung angelegt und nach Schließung als Spülteich (Schlammteich Landwehr-West) für die Aufbereitungsrückstände der Eisenerzaufbereitung genutzt. Die Tagebaukante von 1959/60 ist heute im Gelände nicht mehr sichtbar, da zeitgleich mit der Nutzung des Restlochs als Spülteich die Tagebauränder überkippt wurden. Die vor Beginn der Arbeiten noch sichtbare, stark bewachsene, in ihrer ursprünglichen Fläche reduzierte Muldenstruktur hat im Trassenbereich noch eine Länge von ca. 50 m. Durch die Baugrunderkundung konnte festgestellt werden, dass die ursprüngliche Länge der Tagebauquerung ca. 150 m beträgt.

Die Dammoberkanten liegen maximal 12 m über der Spülteichebene. Dabei reicht der Dammfuß der Trasse weit in den Bereich des ehemaligen Schlammteiches hinein.



Abbildung 1-1 Ausgangssituation Restlochquerung mit Arbeitsebene im Dammaufstandsbereich

## 2 GEOLOGISCHE SITUATION

Das Bebauungsgebiet für die Ortsumfahrung wird dominiert durch mächtige tertiäre Vulkanite des Vogelsbergmassivs. Dabei treten insbesondere mehrfach übereinander liegende Basaltdeckenergüsse auf. Sehr häufig wird das Liegende der einzelnen Ergüsse von Tuffiten (vulkanische Aschen und tertiäre Sedimente) gebildet. Stellenweise können auch echte Tuffe auftreten. Oberflächennah liegt eine Lößdecke vor.

Die Basalte sind oft körnig und zerfallen bei Verwitterung zu sandig-kiesigem Grus. Dabei bildeten sich aus den eisenreichen Basalten laterithaltige Roterden mit schalig-krustigem Brauneisenstein (Limonit) und erdi-

gem Bauxit. Die in der Baugrunderkundung angetroffenen natürlichen Tone und Schluffe sind meist von steifer bis halbfester Konsistenz. Allerdings wurden in den Erkundungsbohrungen auch weiche bzw. weich-steife Zonen in unterschiedlichen Niveaus und mit schwankender Mächtigkeit angetroffen, Abbildung 2-1.

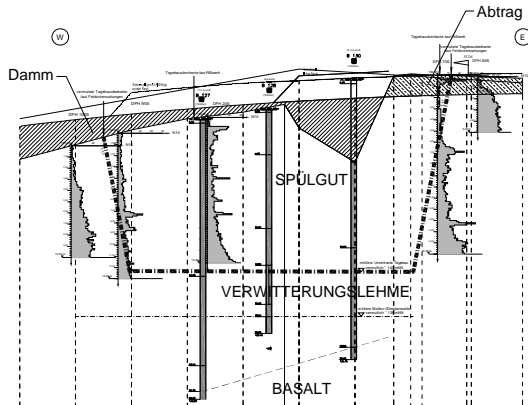


Abbildung 2-1 Geologischer Längsschnitt durch die Restlochquerung

Den standortrelevanten Vorfluter bildet die Horloff. Sie fließt von Norden nach Süden. Der Bereich der geplanten Umgehungsstraße befindet sich in einem Wasserschutzgebiet. Freies Grundwasser befindet sich deutlich unterhalb des Einflussbereichs der Baumaßnahme als Kluftgrundwasser. Der ehemalige Spülteich ist im Baueinflussbereich nicht mehr wasserführend. Wasser tritt ausnahmslos als Staunässe auf.

Maßgebende Baugrundsichten für die Tagebauquerung sind Kippenböden, Spülgut und Felszersatz. Der Baugrund wurde bis 20 m Tiefe (Basalt) aufgeschlossen.

Für den Bereich der größten Dammhöhe gilt folgende maßgebende Baugrundsichtung unter der Dammaufstandsebene:

bis 0,5 m	Schotter (Arbeitsebene)	GW
bis 7,0 m	Spülgut	TA
bis 10,0 m	bindiger Zersatz	TM/UM
bis 11,0 m	gemischtkörniger Zersatz	GT*
ab 11,0 m	Festgestein Basalt	VE/VA

Bei dem Spülgut handelt es sich um einen extremen, ausgeprägt plastischen Ton, der im Plastizitätsdiagramm der DIN 18196 am äußersten Ende der A-Linie zu finden ist. In Übereinstimmung mit diesen plastischen Eigenschaften sind in den zwar steifen Tönen dennoch natürliche Wassergehalte um 45 % und Trockendichten in der Größenordnung von 1,2 t/m<sup>3</sup> festgestellt worden. Die Wassergehalte sind bis zur Basis der Tone in 5 m Tiefe nahezu konstant.

Das bedeutet, dass der Porenanteil des Spülguts bei ca.  $n = 60\%$  liegt. Damit besteht mehr als die Hälfte des Spülgutes aus Wasser und Luft. Deshalb war davon auszugehen, dass das Spülgut unter Neubelastung durch die geplante Dammschüttung seine ursprüngliche Strukturfestigkeit verändern wird. Da das Spülgut nahezu wassergesättigt war, musste mit Porenwasserspannungen infolge der Belastung gerechnet und die Standsicherheit des Dammes unter den Bedingungen der undrainierten Scherung betrachtet werden. Um das Zeitsetzungsverhalten des Spülguts zu untersuchen, wurden Ödometerversuche durchgeführt und in den einzel-

nen Laststufen das Zeitsetzungsverhalten aufgezeichnet.

Charakteristische Bodenkenngrößen des Spülgutes für die Bemessung

- Reibungswinkel:  $\varphi' = 14^\circ$
- Wirksame Kohäsion:  $c' = 11 \text{ kN/m}^2$
- Anfangsscherfestigkeit:  $c_u = 35 \text{ kN/m}^2$  (undrainierte Kohäsion aus Flügelscherversuchen)
- Steifemodul:  $E_s = 4 \text{ MN/m}^2$
- Rohwichte:  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$
- Konsolidationsbeiwert:  $c_v = 2 \cdot 10^{-7} \text{ bis } 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$

### 3 ENTWURF DER BAUGRUNDVERBESSERUNG

#### 3.1 Bauliche Randbedingungen und Lösungsweg

Für die Erdarbeiten standen nur kurze Fristen zur Verfügung:

- Dammschüttung Dauer ca. 6 Monate
- Beginn Straßenoberbau ca. 15 Monate nach Beginn Dammschüttung
- Verkehrsfreigabe ca. 20 Monate nach Beginn Dammschüttung

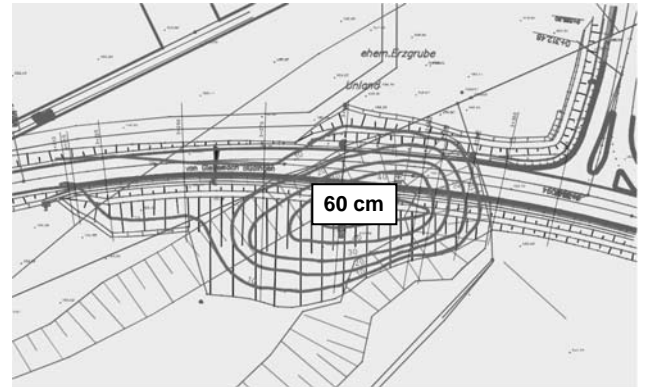


Abbildung 3.1-1 Setzungsprognose der Restlochquerung ohne Baugrundverbesserung

In der Entwurfsplanung wurden ohne Baugrundverbesserung maximale Setzungen von 50 cm prognostiziert, Abbildung 3.1-1. Mit den Kennwerten des unverbesserten Spülgutes wurde ein Konsolidationsgrad in dieser Zeit von nur ca. 20 % bestimmt. Die Restsetzungen betragen dann noch ca. 30 ... 40 cm nach Verkehrsfreigabe. Das war für Gradienten und Querneigung unzulässig.

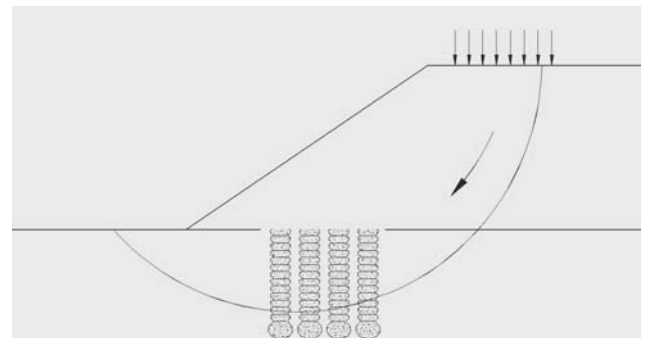


Abbildung 3.1-2 Prinzip Baugrundverbesserung zur Erhöhung der Standsicherheit von Dammkonstruktionen

Eine Baugrundverbesserung sollte die Setzungen auf ca. 20 cm reduzieren. Dabei ist rechnerisch mit Restsetzungen von ca. 8 cm nach Dammfertigstellung zu rechnen. Neben der Gewährleistung der Standsicherheit des Dammes auf den Spültonen war daher die Kontrolle der Setzungen das Hauptproblem.

Bezogen auf die Schwachstelle des Gesamtsystems, den Spülton, wurde eine Untergrundverbesserung bis 6 m unter Dammbasis entworfen. Bemessungskriterium war in erster Linie der zeitliche Setzungsverlauf und die Gewährleistung ausreichender Böschungsstandsicherheit im Bau und während der Nutzung, Abbildung 3.1-2.

Gewählt wurde eine Kombination aus einer Untergrundverbesserung mit Geopier-Bohr-Rammsäulen und einem mit Geokunststoff bewehrten Polster, welches nach EBGEO Abschnitt 6.9 (Fassung 2004) bemessen wurde.

### 3.2 Kurzdarstellung Geopier-Verfahren

Geopier Bohr-Rammsäulen sind ein System zur Baugrundverbesserung im Bodenentnahmeverfahren. Das heißt, für die Herstellung der Säulen wird der zu verbessernde schlechte Baugrund entnommen, in dem er aus der Säulenspur ausgebohrt wird, Abbildung 3.2-1.



Abbildung 3.2-1 Herstellung Geopier® Bohr-Rammsäulen

Geopier-Elemente werden hergestellt, indem zunächst eine einfache Drehbohrung mit 0,75 m Durchmesser im Boden abgeteufelt wird (a). Anschließend wird Grobschotter rammend, mit einem patentierten Verfahren lagenweise verdichtet eingebaut (b,c). Die Bodenverbesserung durch rasterförmig angeordnete Säulen wird somit primär durch den anteilmäßigen Bodenaustausch gegen Pfeilerartige, sehr steife und tragfähige Elemente erreicht, Abbildung 3.2-2.

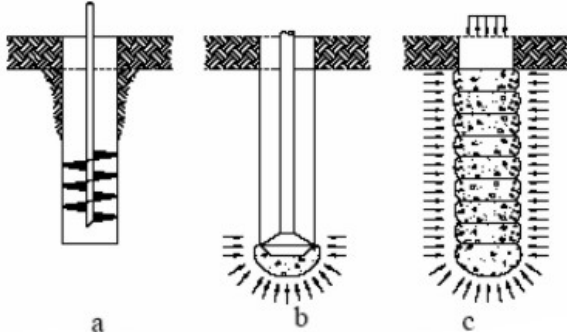


Abbildung 3.2-2 Prinzipdarstellung Herstellung Geopier® Bohr-Rammsäulen

### 3.3 Entwurf der Untergrundverbesserung im Bereich der Tagebauquerung

Die Tagebauquerung erfolgt unsymmetrisch. In der Dammaufstandsebene, welche der OK des Spülteichs entspricht, wurde die Baugrundverbesserung mit Geopier Säulen angeordnet, auf die ein Tragschichtpolster eingebaut wurde. Die im Raster von 2,45 m x 2,45 m angeordneten Geopier Säulen wurden gleichmäßig 5 m lang ausgebohrt und in den natürlich gewachsenen Tonen und Schluffen (Zersatz) abgesetzt. Das Tragschichtpolster wurde als Drainage mit umlaufendem Sicherstrang konzipiert. Im Übergangsbereich zur Kippenböschung wurden im abgetreppten Böschungsbereich Geopier Säulen unter Beibehaltung des Rasters aus dem Dammaufstandsbereich fortgeführt, um die Setzungsgradienten gleichmäßig auszurunden.

Entwurfsparameter der Untergrundverbesserung mit Geopiersäulen:

#### Geopiersäule

- Reibungswinkel Säule:  $\varphi' = 50^\circ$
- Bettungsmul Säule  $k_{gp} = 45 \text{ MN/m}^3$
- Steifemodul:  $E_{gp} = 200 \text{ MN/m}^2$
- Rasterfläche pro 1 Säule:  $6 \text{ m}^2$
- Entwurfswert Säulenkopfspeicherung:  $679 \text{ kN/m}^2$

Flächenverhältnis  $R_A = 0,5 \text{ m}^2/6 \text{ m}^2 = 0,083$

Anordnung der Säulen (Raster) folgte nur den Kriterien Scherfestigkeit und Setzung. Die Geopier Säulen erhöhen die Standsicherheit des Dammes (Abbildung 3.3-1) und reduzieren die im Dammaufstandsbereich auftretenden Setzungen. Für die Nachweise gelten folgende Parameter der verbesserten Schicht:

$$c'_{comp} = (1-R_A) c'_m$$

$$\varphi'_{comp} = \arctan [R_A \tan \varphi'_g + (1-R_A) \tan \varphi'_m]$$

#### Komposit Säule + Spülgut

Anfangszustand / Bau (undrännert)

- Kohäsion:  $c'_{comp} = 32 \text{ kN/m}^2$
- Reibungswinkel:  $\varphi'_{comp} = 6^\circ$

Endzustand konsolidiert

- wirksame Kohäsion:  $c'_{comp} = 10 \text{ kN/m}^2$
- Reibungswinkel:  $\varphi'_{comp} = 18^\circ$

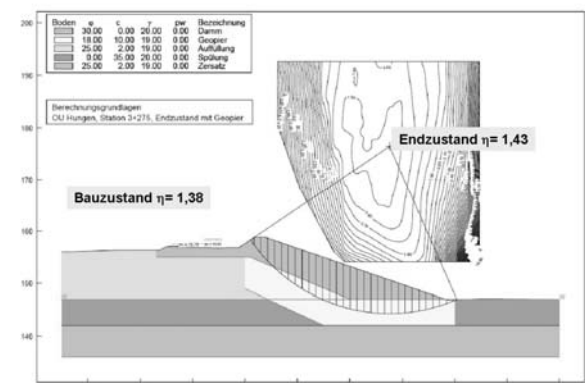


Abbildung 3.3-1 Dammsicherheitsberechnungen mit Baugrundverbesserung

Es ergibt sich ein Steifemodul der verbesserten Schicht:

$$E_{s,comp} = R_A * E_{gp} + (1-R_A) E_{s,comp} = 20 \text{ MN/m}^2$$

mit dem die Setzungsnachweise für den verbesserten Baugrundaufbau geführt wurden. Darüber hinaus wirken die Säulen als Vertikaldränagen setzungsbeschleunigend. Die entsprechenden Zeitsetzungsberechnungen mit und ohne Wirkung der Säulen als Dränelement ergeben für die Schicht der Tone folgende Werte für 95 % Konsolidation:

- ohne Wirkung der Geopierssäulen als Dränelement: 5...7 Jahre
- mit Ansatz der Geopierssäulen als Dränelement: 4...6 Monate

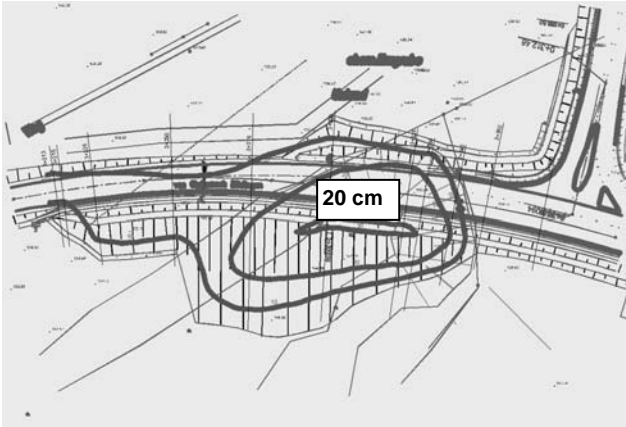


Abbildung 3.3-2 Setzungsprognose der Restlochquerung mit Baugrundverbesserung

Die Säulen wurden überwiegend „schwimmend“ eingebaut, d.h. sie müssen die vorhandenen Kippenböden und das Spülgut nicht restlos durchfahren. Für den Baugrundbereich unterhalb des Polsters war ein Setzungsanteil von rd. 20 cm prognostiziert worden.

Für das Polster über den Säulen wurde die Bemessung nach EBGE0 6.9 2004 geführt. Dabei wurden folgende Bemessungswerte/Eingangsgrößen angenommen.

- Bewehrung biaxial
- Anordnung der Geogitter zweilagig über den Säulen
- Erforderliche Kurzzeitfestigkeit der Bewehrung:

$$F_{bk} \geq 215 \text{ kN/m}$$

- Gewähltes Produkt: Polyfelt Rock GX 400/30
- Achsabstand zwischen den 2 Gitterbahnen: 30 cm Stärke
- Reibungswinkel des Polstermaterials:  $\varphi = 35^\circ$
- Achsabstand zwischen den Säulen: 2,45 m
- Durchmesser Tragelement: 80 cm
- Bettungsmodul Geopierssäule:  $k_{ST} = 30 \text{ MN/m}^3$
- Bettungsmodul Untergrund:  $k_s = 0,66 \text{ MN/m}^3$
- Steifigkeitsverhältnis:  $k_{ST}/k_s = 45$   
(Soll nach EBGE0 Abschnitt 6.9 = 100!)
- rechnerischer Lastumlagerungsfaktor:  $E_L = 50 \%$
- Kopfspannung auf Stützfläche:  $A_s = 1076 \text{ kN/m}^2$

Im Entwurf der Geopierbemessung war ein vorläufiger Entwurfswert der Kopfspannung von  $679 \text{ kN/m}^2$  angenommen worden. Die zumindest rechnerisch höhere Kopfspannung im Entwurf nach Abschnitt 6.9 EBGE0 war akzeptabel, weil einerseits eine Überschreitung der Kopfspannung als nicht kritisch bewertet wurde und weil das Säulenverhalten aus vergleichbaren Baugrundverhältnissen hinreichend bekannt war.

#### 4 MESSTECHNISCHES PROGRAMM

Das Konsolidationsverhalten des Baugrundes bedingt Verformungen, die mit der Baugrundverbesserung zwar vermindert und dessen Abklingen beschleunigt, jedoch nicht vollständig vermieden werden können. Zusätzlich dazu führt die räumliche Heterogenität der Untergrundsteifigkeit zu Setzungsdifferenzen in Längs- und in Querrichtung, die ein Schadenspotential für die Straßenkonstruktion darstellen. Die messtechnische Überwachung wurde im Rahmen des Bauwerksentwurfs geplant und ausgeschrieben. Aufgrund der geometrischen Zwänge des Bauvorhabens mit einem Damm, der über einem Talkessel geschüttet wurde, war eine Setzungserfassung mit Horizontalinklinometern nicht möglich. Setzungsmesspegel wurden aufgrund der Behinderungen und der Unzuverlässigkeit bei Erdbauarbeiten ausgeschlossen.

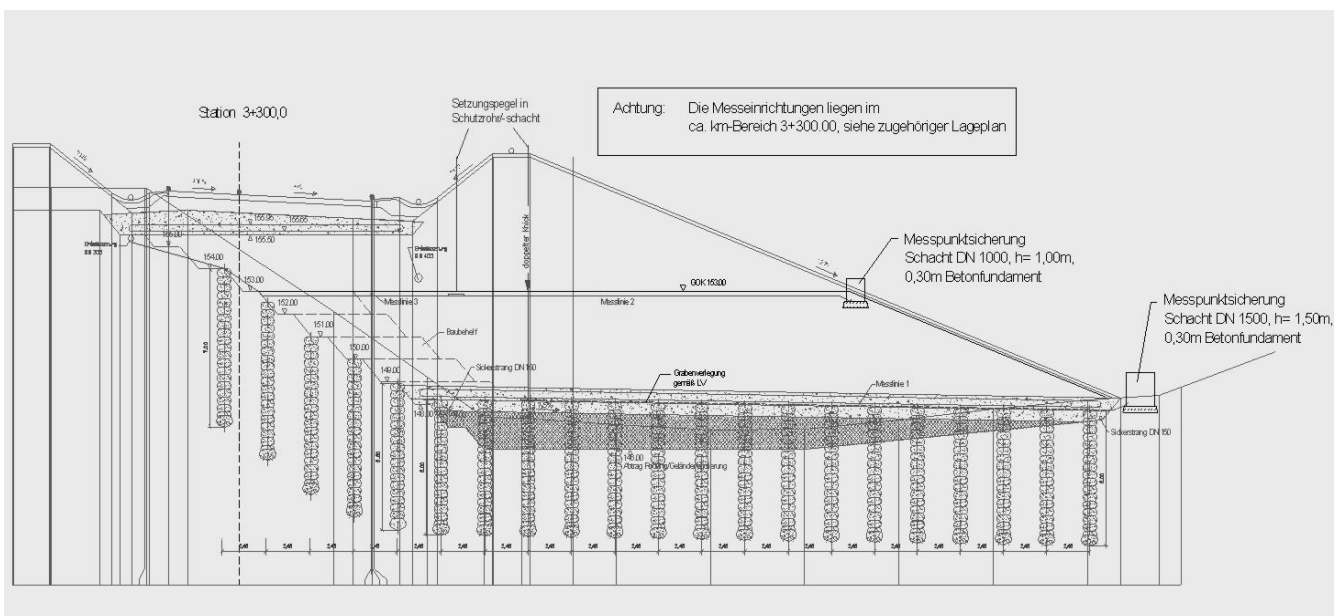


Abbildung 4-1 Messtechnische Überwachung der Baugrundverformungen

Es wurde eine Kombination aus einem hydrostatischen Linienmesssystem für die Setzungsbeobachtung (Lhotzki) sowie Porenwasserdruckgebern und Erd-druckgebern gewählt.

Durch die Verwendung eines flexiblen Messschlauches sind beim Linienmesssystem faktisch beliebige Messanordnungen möglich. Die Messgeber/-linien wurden so verteilt, dass die Setzungen des Dammes in 2 Ebenen und die Setzungsverläufe des Baugrundes zwischen den Geopiersäulen und über den Säulenköpfen erfasst wurden. Durch die getrennte Anordnung von Erd-druckgebern über und zwischen den Säulen konnten die Entwurfparameter der Spannungswerte über und zwischen den Säulen, die sich aus der Bemessung nach EBGE0 Abschnitt 6.9 ergaben, überprüft werden. Die Porenwasserdruckgeber wurden innerhalb und unterhalb der verbesserten Schicht eingesetzt.

## 5 BAUFORTSCHRITT UND MESSERGEBNISSE

### 5.1 Zeitliche Abfolge des Baugeschehens

Nach Einbau der punktuellen Messgeber und Verlegung der Messlinie im Dammaufstandsbereich (Abbildung 5.1-1) wurde das zweilagige Geogitterpolster eingebaut.

Mit der Dammschüttung wurde ab März 2006 begonnen. Die Nullmessung fand aufgrund der schnell fortschreitenden Dammschüttung in einer Schüttpause Ende März 2006 bei einer Dammhöhe von ca. 3,5 m statt. Zu diesem Zeitpunkt waren durch Nivellement i.M. ca. 5 cm erfasst worden. Die Dammschüttung wurde Anfang April 2006 fortgesetzt. Zwischen der Nullmessung und der 1. Folgemessung erfolgte eine Dammschüttung von nahezu gleichmäßig 2,5 m über die gesamte Böschung. Mitte April 2006 erfolgten zunächst keine Schüttungen mehr, so dass die Belastung für ca. 1 Woche unverändert blieb.



Abbildung 5.1-1 Verlegung der Messlinie des hydrostatischen Linienmesssystems im Dammaufstandsbereich

Ende April 2006 wurden die Schüttungen sehr langsam bis zum Sommer 2006 fortgesetzt. Im Oktober wurde die Schwarzdecke geschlossen. In der Bauphase verliefen die Schütтарbeiten faktisch schneller als ursprünglich geplant. Am 21.12.2006 erfolgte die Verkehrsfreigabe. Im südlichen Bereich ist noch ein ca. 2 m hoher Lärmschutzwall mit einer Kronenbreite von 2 m anzu-

schütten, so dass mit neuen Belastungen gerechnet werden muss. Im Bereich des Lärmschutzwalls beträgt die max. Dammhöhe 12 m.

### 5.2 Probelastung Geopiersäule

Die Geopiersäule wurde im Test bis zur 1,5 fachen kalkulierten Belastung geprüft. Dabei wurden folgende Prüfwerte erreicht:

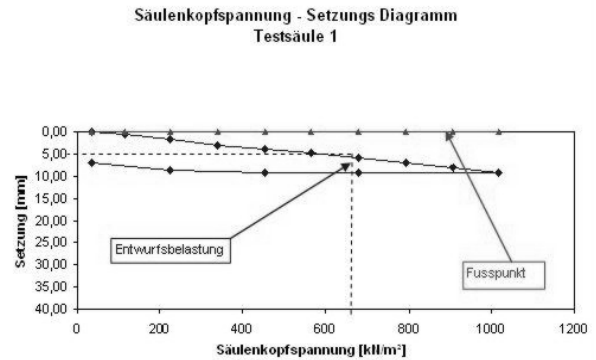


Abbildung 5.2-1 Kopfspannung-Setzungs-Verlauf der Probe-säule

#### Testergebnisse, Abbildung 5.2-1

- Steifemodul:  $E_{gp} = \text{rd.} 400 \text{ MN/m}^2$
- Prüfung bis zur Säulenkopfspannung: 1019 kN/m²
- Bettungsmodul der Säule:  $k_{gp} = 72 \text{ MN/m}^3$
- Gebrauchslast: 300 kN

### 5.3 Messergebnisse der Erd-druckgeber

Die Ergebnisse der Erd-druckgeber verdeutlichen zusätzlich zur Messung der Schütthöhen das zeitliche Schüttagesehen. Dabei wurde im Bereich der größten Dammhöhe 1 Messgeber in der Dammaufstandsebene über einem Geopier Säulenkopf und 1 Messgeber mittig zwischen 4 Säulen angebracht, Abbildung 5.3-1. Zwischen der Nullmessung und dem Sommer 2006 sind die Spannungen zwischen den Säulen von ca. 50 kN/m² auf 100...110 kN/m² gestiegen und haben sich somit verdoppelt. Gleichzeitig sind die Kopfspannungen auf den Geopier-Säulen von ca. 200 kN/m² auf 450...500 kN/m² gestiegen. Die Säulenbelastungen liegen damit bei ca. 250 kN. Die in der Probelastung bestätigte Entwurfsbelastung der Säulen liegt bei 300 kN.



Abbildung 5.3-1 Verlegung der Erd-druckgeber

#### 5.4 Messergebnisse der Porenwasserdruckgeber

Die Porenwasserdruckgeber wurden in unterschiedlichen Tiefen unter der Dammaufstandfläche in Bohrlöcher eingebaut.

Die in den Porenwasserdruckgebern gemessenen Porenwasserdrücke sind insgesamt sehr niedrig und liegen in einem Bereich von maximal 10 kN/m<sup>2</sup>, was ca. 10 % der aufgetragenen Dammlasten entspricht. D.h. Porenwasserdrücke spielen bei dem Setzungsprozess kaum eine untergeordnete Rolle.

#### 5.5 Setzungsmessergebnisse

Die Setzungsmessungen zeigen den für Konsolidationssetzungen typischen Verlauf mit einer relativ hohen Anfangssetzung in der Zeit der Belastung und einem deutlichen Abklingen der Setzungen ab September 2006 ca. 1,5...2 Monate nach Beendigung der Schüttphase, Abbildung 5.5-1.

Im Dammaufstandsbereich erfolgen die Setzungen sehr gleichmäßig. Ein unterschiedliches Setzungsverhalten zwischen den Säulenköpfen und dem Boden ist nicht zu vermerken. Die Setzungen von Säulenfuß und Säulenkopf differieren nur um 10...20 mm, was mit dem Ergebnis der Probebelastung korrespondiert und die sehr geringe Säulenstauchung belegt.

Das „Paket“ aus verbesserter Baugrundsicht und Geogitter-Polster verhält sich wie ein quasi-homogener Körper und nimmt mit einer Eigenverformung von rd. 2 cm kaum an der Gesamtsetzung teil. Die Setzungswerte unterhalb der Geopier-Säulen nehmen erwartungsgemäß mit der Tiefe ab. Signifikant ist der Setzungsanteil aus der Setzung unterhalb der Baugrundverbesserung.

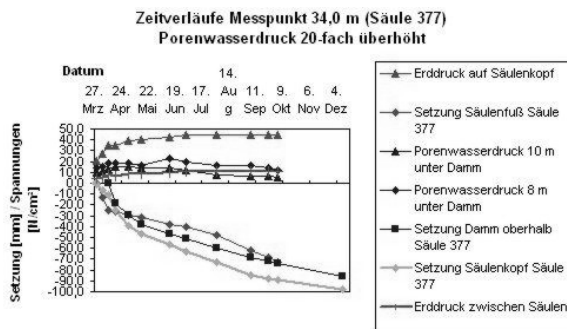


Abbildung 5.5-1 Zeitliche Verläufe der Messergebnisse

## 6 VERGLEICH MIT DEN ENTWURFSWERTEN

### Setzungen

Die im Zeitraum von 8 Monaten gemessenen Setzungen der Messlinie im Dammaufstandsbereich liegen unter voller Dammlast bei 10 cm. Unter Hinzurechnung des Setzungsanteils aus der Dammschüttung vor der Nullmessung von rd. 5 cm beträgt die max. Setzung 15 cm innerhalb der Bauzeit. Sie liegt damit noch geringfügig unterhalb der in der Entwurfsplanung prognostizierten Setzungen von 20 cm in der Dammaufstandsebene.

Der zeitliche Verlauf der Setzungen zeigt eine deutliche Verlangsamung der Setzungsgeschwindigkeiten seit September 2006. Die Setzungsgeschwindigkeit im Dammaufstandsbereich lag im Herbst 2006 nur noch bei 0,1 mm/Tag, was den Setzungsprognosen „mit Drän“ entspricht. Diese Setzungsgeschwindigkeit erlaubte einen zügigen Abschluss der Straßenbauarbeiten vor dem Winter 2006/2007. Die Setzungsprognose zum Zeitpunkt des Einbaus der Schwarzdeckenarbeiten lag

bei 3...5 cm Restsetzungen aus Konsolidation. Hier sind die Lasterhöhungen aus Verkehrsfreigabe und noch zu schüttemdem Lärmschutzwahl mit 2 m Höhe bereits berücksichtigt

### Spannungen:

Gegenüber der Entwurfspannung bei Umlagerungsfaktor  $E_L = 50\%$  auf OK Säule von rd. 1076 kN/m<sup>2</sup> und der Spannung zwischen den Säulen rd. 90 kN/m<sup>2</sup> ergaben die Erddruckmessungen davon abweichende Werte:

### Tatsächlich:

Spannung auf OK Säule: rd. 450...500 kN/m<sup>2</sup>

Spannung zwischen den Säulen: rd. 110...120 kN/m<sup>2</sup>

Diese Spannungswerte entsprechen einem Umlagerungsfaktor von  $E_L = 25...30\%$ . Der Bettungsmodul der Geopier-Säule wurde mit  $k_{gp} = 72 \text{ MN/m}^3$  bestimmt. Folglich steigt das tatsächliche Steifigkeitsverhältnis auf  $k_{ST}/k_s = \text{rd. } 100$  an.

Diese Tendenz (sinkender  $E_L$ -Wert gegen steigendes Steifigkeitsverhältnis) widerspricht aber der Logik der Bemessung nach EB GEO Abschnitt 6.9. Wenn die Säulen nachweislich steifer sind, müssten sie noch mehr Spannungen anziehen und nicht weniger. Es liegen nur wenige geeignete Messungen vor, so dass ein Vergleich nicht möglich ist. Die Geopiersäulen sind nachweislich sehr steif. Über den oberen Bereich liegen genaue Setzungsmessungen vor, so dass ein „Einstanzen“ der Säulen in die Tragschicht des Polsters ausgeschlossen ist. Aber im unteren Bereich ist eine Plastifizierung möglich. Die Säulen wurden schwimmend in die Verwitterungslehme eingestellt. Hier ist ein „Einstanzen“ durchaus möglich. Die Grundbruchspannung in den Lehmen ist deutlich niedriger als die Kopfspannung der Säulen. Unter diesen Bedingungen könnten sich hohe Kopfspannungen kaum entwickeln. Diesem Detail sollte bei künftigen Messungen Aufmerksamkeit gewidmet werden. Es könnte letztlich zu einer „Entschärfung“ der Geokunststoffanforderungen bei Polstern auf Geopiersäulen führen.

## 7 AUSBLICK

Das gewählte System aus Geopiersäulen mit Geokunststoff-Polster hat sich sehr gut bewährt. Die Bemessung nach Abschnitt 6.9 der EB GEO in der Fassung von 2004 hat zu einer praktikablen Baulösung geführt. Tatsächlich zeigte sich, dass das System steifer reagiert hat als erwartet; die Setzungen waren folglich gleichmäßiger, was wiederum ein Hinweis darauf ist, dass bei dieser Kombination (Geopier + Polster + EB GEO 6.9) hinreichende Reserven impliziert sind. Das Ziel „Vergleichmäßigung der Setzungen“ wurde aber sehr gut verwirklicht.