

# Soilfrac- Verfahren kombiniert mit Horizontalbohrungen

Baurat Dipl. Ing. Helge Huxoll, Wasser- und Schiffsamt Uelzen  
 Bauamtsrat Dipl. Ing. Eckhard Dietel, Wasser- und Schiffsamt Uelzen  
 Dipl. Ing. Martin Krentz, Keller Grundbau GmbH

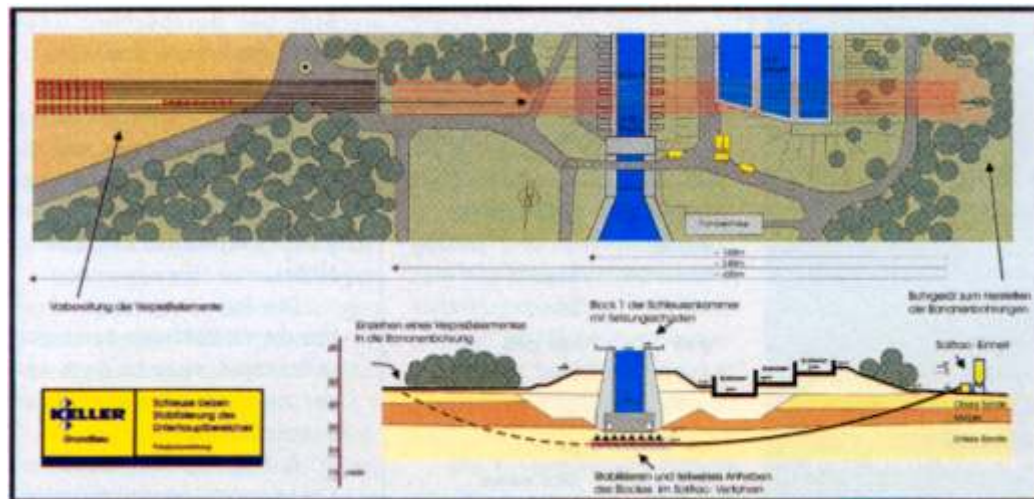
**Verfahrenstechnisches Neuland wurde bei der Baugrundstabilisierung im Unterhauptbereich der Schleuse Uelzen betreten. Erstmals wurde das Soilfrac-Verfahren in Kombination mit der gesteuerten Horizontalbohrtechnik angewandt. Eine in jeder Hinsicht anspruchsvolle Maßnahme, deren Ergebnis als uneingeschränkt erfolgreich zu bezeichnen ist.**

Die Bauarbeiten zur Stabilisierung des Unterhauptbereiches wurden nach öffentlichem Teilnehmerwettbewerb beschränkt ausgeschrieben. Der

geforderten Bietern eingereicht. Nach Abwägung aller wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkte kam ein Nebenangebot der Firma KELLER Grundbau

einer Arbeitsebene westlich der Sparbecken 10 parallel liegende („Bananen“-) Bohrungen unter der Schleuse durch bis zur Geländeoberkante auf der Ostseite geführt, von wo aus anschließend die Verpreßelemente mit den Injektionsventilen eingezogen wurden. Die Verpreßarbeiten sind dann von der Westseite im SOILFRAC- Verfahren ausgeführt worden.

Der wesentliche technische Vorteil gegenüber dem Verwaltungsentwurf lag darin, daß nicht über Preventer gegen 2 bar



■ Abb. 1

Verwaltungsentwurf sah vor, die Injektionen in den Baugrund über 32 m lange waagerechte Manschettenrohre einzubringen, die von einem - östlich neben der Schleusenkommer - abgesenkten Stahlbetonschacht 5 m unter der Bauwerkssohle eingebaut werden sollten.

Nebenangebote waren zugelassen und wurden von allen auf-

GmbH, Nordbereich, als das annehmbarste und auch preisgünstigste zur Ausführung: Vorgesehen war, die Injektionsebene 5 m unter der Schleusensole über ca. 154 m lange Verpreßelemente herzustellen, die mit Hilfe von gesteuerten Horizontalbohrungen von der Geländeoberkante aus positioniert wurden (s. Abb. 1). Dazu wurden von

drückendes Grundwasser gebohrt werden mußte, und somit das Risiko von unkontrollierten Wasser- und Bodeneinbrüchen im Bereich der Schleuse ausgeschlossen war. Zudem konnten sämtliche Bohr- und Verpreßarbeiten - wie in der Ausschreibung gefordert - ohne Unterbrechung des Schleusenbetriebes durchgeführt werden.

## 1 Das Bauwerk

Im Zuge des 115 km langen Elbe-Seitenkanals, welcher den vollschiffigen Wasserstraßenanschluß des Seehafens Hamburg an die Industrie-Regionen des Binnenlandes herstellt, wird der Höhenunterschied von 61 m zwischen der Elbe und der Scheitelhaltung des Mittellandkanals mit zwei imposanten Abstiegsbauwerken überwunden: Dies sind das Schiffshebewerk in Scharnebeck mit einer Hubhöhe von 38 m und die Schleuse Uelzen, welche mit einer Fallhöhe von 23 m zu den größten Binnenschiffahrtsschleusen Deutschlands zählt (Abb. 2). Sie ist eine Sparschleuse mit 3 offenen, terrassenförmig seitlich der Kammer angeordneten Sparbecken. Die nutzbare Kammerlänge beträgt 185 m bei einer Breite von 12 m. Die Schleusenkommer besteht aus dem Oberhaupt und Unterhaupt und den dazwischen liegenden zehn Blöcken mit je 15 m Länge, die im Querschnitt als U-Rahmen ausgebildet sind. Die Gründung der Schleusenkommer erfolgte auf tertiären, eiszeitlich vorbelasteten Sanden mit sehr hohen Festigkeiten.

Die hydraulische Verbindung der Kammer mit dem unteren und oberen Vorhafen wird über das Längskanalsystem mit Grundkanal und Füllbatterien hergestellt.

## 2 Veranlassung/ Zielsetzung

Im Laufe der Betriebsjahre der Schleuse Uelzen sind am Block 1 Setzungen und Kippungen in Richtung des Unterhauptes bis zum - oberhalb der Schleusenberme sichtbaren - Anlehnen der Blöcke entstanden. Durch den unmittelbaren Kontakt zwischen dem Unterhaupt und dem Kammerblock 1 wurde die erforderliche freie Beweglichkeit der Blöcke quer zur Kammerachse eingeschränkt, so daß es während der Schleusungsvorgänge Ende 1994 zu Erschütterungen



■ **Abb. 2: Schleuse Uelzen, im Vordergrund die Sparbecken, hinten links die Trasse zur Vorbereitung der verpreßelemente.**

im Bauwerk kam. Zur Verringerung dieser Zwängungen wurden im Frühjahr 1995 auf beiden Kammerseiten jeweils eine Hydraulikpresse mit Gleitlager in der Fuge Unterhaupt/Block 1 etwa 1 m unterhalb der Plattform mit Schubrichtung parallel zur Kammerlängsachse eingebaut. Die Pressen wurden beide bis 3100 kN belastet. Eine gleichzeitige Baugrunduntersuchung ergab, daß unter der Nordwest-Ecke des Blockes 1 eine mindestens 1,65 m tief reichende Auflockerungszone im Boden vorhanden ist, die sich vermutlich bis unter das Unterhaupt hinzieht. Weitere unerwünschte Blockbewegungen konnten daher nicht ausgeschlossen werden, von der BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU wurden für die dringend notwendige Verbesserung der Lagerungsverhältnisse im Bereich Unterhaupt / Block 1 geotechnische Stabilisierungsmaßnahmen empfohlen.

Ziel war es demnach, die Auflockerungszonen im Baugrund durch Einpressen einer Feststoffsuspension zu beseitigen und die gleichmäßigen Auflagerbedingungen mit der ursprünglich hohen Lagerungsdichte der Sande unterhalb der Sohle von Block 1/Unterhaupt wieder herzustellen. Dabei sollte durch das Verpreßgut zusätzliches Volumen in den Untergrund gebracht werden und nicht

in den Porenraum der anstehenden Sande eindringen.

Als erwartete Indizien für den Erfolg der Verpreßarbeiten dienen:

- die Entlastung der in die Fuge Unterhaupt/Block 1 eingesetzten Hydraulikpressen.

- die Erzeugung einer Hebung des Blockes 1 von maximal 5 mm relativ zum Unterhaupt.

Des Weiteren wurde - als Hinweis für die Erhöhung der Lagerungsdichte des Baugrundes - während der Injektionsarbeiten ein ansteigender Verpreßdruck erwartet.

<b>Kennwerte:</b>	<b>Obere Sande</b>	<b>Geschiebe-mergel</b>	<b>Untere Sande</b>
gemäß DIN 18 300:	Klasse 3	Klasse 5/6	Klasse 3
gemäß DIN 18 196:	SE, SW	ST, TL	SE
Festigkeit:	groß	groß	sehr groß
Sondierungsspitzenwiderstand [MN/m <sup>2</sup> ):	2 - 6	6 - 11	> 19
Bohrbarkeit:	gut lokal schwer	gut lokal schwer	gut lokal schwer
Tab. 1	bohrbar	bohrbar	bohrbar

### 3 Erstellung der Horizontalbohrungen

#### 3.1 Voraussetzungen

Die Technik des oberflächennahen Horizontalbohrens ist eine verhältnismäßig junge aber zuverlässige Technik, wenn die Qualität des Arbeitsergebnisses von folgenden Faktoren bestimmt wird:

- den Einsatz von korrekt ausgewählten und effektivem Equipment,

- der guten Pflege und Wartung der Bohrgeräte,

- der Kompetenz des eingesetzten Personals,

- die Ausschaltung von magnetischen Fremdeinflüssen zur Meß- und Steuergenauigkeit und

- die Vorlage eines soliden Baugrundgutachtens.

#### 3.2 Baugrund

Die im Vorfeld der Maßnahme vorliegenden Baugrundergebnisse brachten folgende Aufschlüsse: Speziell unter der Schleusensohle (NN + 30 m) stehen abwechselnd feinsandige Mittelsande bzw. mittelsandige Feinsande an, die abschnittsweise auch grobsandige Beimengungen haben.

Die Lagerungsdichte ist bis auf die Auflockerungszonen im Bereich des Unterhauptes/Block 1 sehr groß. Darüber stehen Geschiebemergel und Bekenschluffe in einer Mächtigkeit von ca. 10 m an.

Sie besitzen tonige und schwach kiesige Beimengungen, vereinzelt sind Steine ein-

stark verfestigtem Zement in Bereichen alter Baustraßen zu rechnen.

Die Klassifizierung des Bodens ergab die in Tab. 1 gezeigten Kennwerte.

#### 3.3 Hauptdaten der Bohrungen

Zur Erfüllung der Stabilisierungsmaßnahme wurden zehn gesteuerte Horizontalbohrungen (A bis K) in einem Abstand von 1,50 m bis 2,0 m jeweils zueinander hergestellt.

Zur Führung der Pilotbohrungen wurden zusätzlich zwei sog. „Referenzbohrungen“ notwendig. Die Bohrarbeiten wurden von der Firma Bohlen & Doyen ausgeführt.

Zum Einsatz kam eine Jet Drill-Anlage mit einer Rückzugskraft von max. 380 kN und einem Drehmoment von 15 kNm.

Die installierte Leistung des Bohrgerätes beträgt 225 kW.

Die verpumpte Spülmengemenge während der Pilotbohrungen betrug etwa 18 mn/Std. bei durchschnittlichen Spüldrücken von etwa 21 bar.

Während des jeweils einmaligen Räumvorganges auf 280 mm wurde eine Bentonitmenge von ebenfalls ca. 18 mn/Std. verpumpt, bei Drücken von 14 bar im Mittel.

Die Recyclinganlage bereitete die mit Bohrklein durchsetzte Bohrspülung zu ca. 65 % wieder zu einer gebrauchsfähigen Suspension auf.

Auf der Rig-Seite stand eine Fläche von ca. 25 x 30 m zur Verfügung, auf der Pipe-Seite ca. 160 x 30 m.

Der Eintrittswinkel der Bohrungen wurde gleichbleibend mit 21,6°, der Austrittswinkel mit ca. 32° gemessen. Die Bohrlänge von den Bohransatzpunkten bis zu den Zielpunkten betrug horizontal 235 m und 243 m unter Beachtung der Raumkurve. In einer Tiefe von 5 m und einer Länge von 32 m unter der Schleusensohle (NN + 25 m) mußten

gelagert. Die Formation hat eine große Festigkeit.

Darüber, bis zur Geländeoberkante (NN + 50 m), befinden sich sog. „Obere Sande“ mit einer Mächtigkeit von ca. 6 m. Sie sind durch Feinsand, Mittelsand und grobsandige Anteile charakterisiert.

Aus der Bauzeit der Schleuse war auch mit Betonresten und



■ **Abb. 3:** Jet-Drill-Anlage der Firma **BOHLEN & DOYEN** beim Bohren, vorn fertiggestellte Bohrungen mit eingezogenen 225 mm Verpreßelementen.

sämtliche Bohrungen möglichst horizontal ausgeführt werden, um die Verpreßrohre in einem gleichmäßigen Abstand positionieren zu können.

Die Rückzugskräfte zur einmaligen Aufweitung der Pilotbohrungen auf 280 mm betragen im Mittel 5 to und zum Einziehen der 225 mm PE-HD Verpreßelemente mit vorlaufenden 260 mm Vorräumen durchschnittlich 4,5 to. Die Druckkräfte für die Pilotbohrungen betragen im Mittel 18 to. Lokale Hindernisse in den Mergelzonen und oberen Sanden führten kurzzeitig zur Inanspruchnahme der max. Rückzugskraft der Bohranlage bis zu 40 to und Drehmomenten von 15 kNm.

### 3.4 Bohrdurchführung

Die insgesamt 12 Bohrungen wurden in einer Zeit von 4 Monaten durchgeführt.

Vom Steuerstand wurden sämtliche Funktionen während des Bohrens, Räumens und Ein-

ziehens gesteuert und überwacht.

Darüber hinaus wurden hier die Meßwerte über Richtung, Neigung und Stellung des Bohrwerkzeuges aufgezeichnet, dargestellt und ausgewertet. Das zum Einsatz gekommene Bohrwerkzeug sog. „Bottom Hole Assembly“ (BMA) bestand aus einer um 0,5 bis 2° gekrümmten Spüllanze mit Spüldüse, dem Jet Bit.

Die Lösearbeit des Bodens erfolgte hydraulisch durch den gerichteten Spülungsstrahl. Um Lagekorrekturen vornehmen zu können wurde durch partielles Drehen des Pilotgestänges die Stellung des Bohrmeißels geändert. Die Ablenkung der Pilotbohrung erfolgte dann in die Richtung, in die die Abknickung des Meißels zeigte. Durch entsprechende Steuerbewegungen war auch die Erstellung eines völlig gradlinigen Bohrlochs möglich.

Nach erfolgter Richtungsän-

derung wird der Bohrmeißel von den übertägigen Motoren, deren Drehmomente über das Pilotgestänge nach Unterlage übertragen wird, drehend vorgetrieben.

Die Meß- und Steuereinheit besteht aus einer Meßsonde, dem sog. „Steering Tool“ und dem Jet Bit.

Das Steering Tool wird in einer nichtmagnetischen Bohrstange montiert, um Einflüsse aus dem magnetischen Teil des Gestänges auf die Meßsonde auszuschalten. Über ein Kabel wird die Sonde mit Energie versorgt und zum anderen die Meßdaten zum Rechner transportiert. Die Parameter Richtung der Achse der Meßsonde, bezogen auf die horizontale Ebene, das sog. „Azimut“, die Neigung, als Richtung der Achse bezogen auf die vertikale Ebene, die sog. „Inklination“ und die Stellung der Steuerfläche wurden auf dem Computer aktuell dargestellt und konnten durch das Meßteam der Firma Sperry-Sun mit den Solldaten verglichen, bewertet und bei Bedarf die erforderlichen Korrekturen durch den Bohrmeister vorgenommen werden.



■ Abb. 4: Räumler mit integriertem Wirbel, Ziehkopf am Verpreßelement.

Sehr stark beeinflusst wurden die Meßergebnisse durch die Eisenbewehrung in den Sparbänken und der Schleusensole, was den Einsatz der magnetischen Bohrführung erforderlich machte. Dieses Verfahren wurde im beschriebenen Fall erstmals in der Flachbohrtechnik für Präzisionsbohrungen neben nahegelegenen Bezugslöchern sog. „Referenzbohrungen“ verwendet. Die Referenzbohrung wurde als erste Bohrung überhaupt unter

den vorgenannten Fremdeinflüssen abgeteufelt. Die beachtlichen Abweichungen dieser „Fastblind-Bohrung“ von mehreren Metern gegenüber den Sollwerten verdeutlichen v.g. Einflußfaktoren. Die planmäßig anschließend durchgeführte Kreiselkompaßvermessung ergab die erforderlichen Koordinaten des Referenzbohrloches, auf deren Basis die sich anschließenden Pilotbohrungen mit der erforderlichen Zielgenauigkeit durchgeführt werden konnten.

Die Meßhäufigkeit wurde in den kritischen Bodenbereichen 2 x pro Bohrstange, d. h. alle 2,50 m durchgeführt.

Die zum Einsatz kommenden Aufweitgarnituren bestanden aus einem 280 mm sog. „Bojenräumer“ mit Molybdänbeschichtung und Spüldüsen bzw. einem 260 mm Vorräumler für den Einziehvorgang. Der zwischen Vorräumler und Zugkopf montierte Drehwirbel trennte den drehenden Teil (Bohrstrang, Räumler) vom nicht drehenden Teil (Zugkopf, PE-HD Verpreßelement), übertrug aber die von der Bohranlage eingeleiteten Zugkräfte.

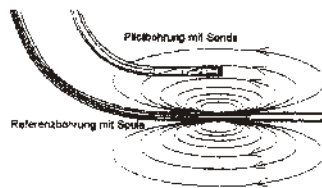
Eine hydraulisch angetriebene Hochdruck-Kolbenpumpe verpumpt die Spülflüssigkeit durch das Bohrgestänge zur Bohrlochsole und über den Ringraum wieder nach Übertage.

Die verwendete Bohrspülung wurde hinsichtlich ihrer Viskosität auf den Baugrund abgestimmt.

Durch den Quellzusatz Stabilose wurde eine gute Standfestigkeit der Bohrlöcher bis zum Einzug der PE-HD Verpreßelemente erreicht.

Die Kontrolle der Qualität der Bentonitpülung erfolgte durch Messung der Suspensionsviskosität mittels Marsh-Trichter in regelmäßigen Abständen.

Die erzielten Werte lagen bei regenerierten, mit Feinanteilen angereicherten Suspensionen bei ca. 50 Sek., bei frischer Spülung nach einer Quellzeit von ca. 1 Stunde bei 40 Sek.

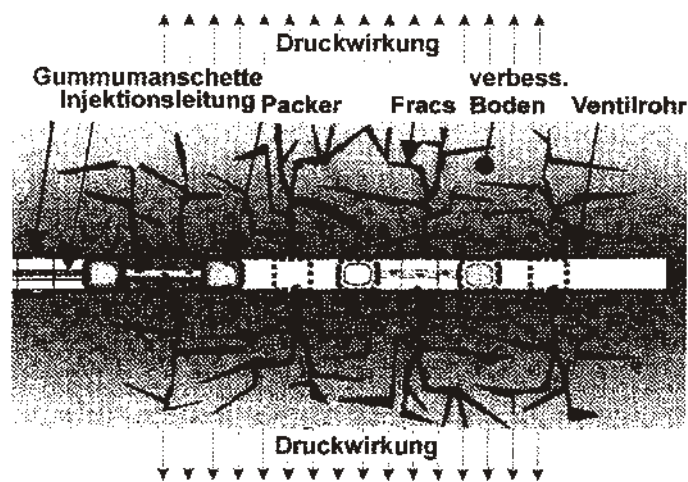


■ Abb. 5: Die Wirkungsweise der magnetischen Bohrführung von Vector Magnetics (MGT).

### 3. 5 Magnetische Bohrführung von Vector Magnetics (MGT)

Um den Erfolg der Pilotbohrungen zu sichern, wurde zur Abschirmung der bereits erwähnten elektromagnetischen Fremdeinflüsse das Meßsystem der magnetischen Bohrführung von Vector Magnetics durch die Firma Sperry-Sun eingesetzt. Nach diesem Prinzip wird das elektromagnetische Feld, der MGT an der Sonde des Steuerungsinstruments gemessen und erzeugt im Bezugsbohrloch (Referenzbohrloch) einen Leitstrahl zur Führung der Pilotbohrung in einem festgelegten Abstand (Abb. 1).

Mit jeder MGT-Messung können direkt Richtung und Abstand zwischen dem aktuellen Bohrloch und der Bezugsbohrung mit einer Abweichung von wenigen Zentimetern ermittelt werden, wenn für den jeweiligen Abstand zwischen den beiden Bohrlöchern der richtige Sondentyp eingesetzt wird.



■ Abb. 6: Soilfrac-Verfahrensprinzip: Wiederholte Verpressung begrenzter Injektionsmengen über einzeln ansteuerbare Ventilstufen, Verdichtung des örtlich umgebenden Bodens durch Frac-Erzeugung.

Lenkkorrekturen ließen sich leicht festlegen, wobei der gewünschte Abstand zwischen den Bohrungen ohne Schwierigkeiten aufrechterhalten werden konnte. Die Methode hat eine Reichweite bis 20 m, die Meßgenauigkeit beträgt bei einem Abstand der Sonden in den Bohrlöchern von z. B.  $8\text{ m} \pm 0,1\text{ Meter}$ . Die Meßmethode hat sich gut bewährt, anfängliche Unsicherheiten wurden ausgewertet und abgestellt.

Die Zielpunkte der Bohrungen wurden in erster Linie durch die Anwendung der magnetischen Bohrführung sehr genau erreicht, wobei vor allem die präzise Platzierung der PE-HD Verpreßelemente unter dem Schleusenkörper von ausschlaggebender Bedeutung gewesen ist.

Im Verlauf der Bohrungen vorhandene Grundwasserbrunnen, die bis unter die Bohrebene (NN + 25 m) reichten, mußten erhalten bleiben. Zur Markierung wurden sie mit einer Sonde bestückt, die ein elektromagnetisches Feld als Leitstrahl erzeugte. Eine sichere Führung des Pilots war ständig gewährleistet.

Die durchschnittlichen Abweichungen der Istwerte der 10 Pilotbohrungen von den Solldaten lagen im vereinbarten Toleranzbereich.

Im Mittel in der Horizontalen bei - 0,10 m (nördliche Abweichung) und in der Vertikalen bei 0,12 m. Im Verpreßbereich unter der Schleuse lagen die Mittelwerte mit + 0,05 m (südliche Abweichung) bzw. 0,11 m noch günstiger.

### 3.6 Verlegen der PE-HD Hüllrohre

Für das Verschweißen und Verlegen der PE-HD Rohrstanzen waren die „Vorschriften der Verlegetechnik“ zu beachten. Die Herstellung der Rohrverbindungen erfolgte nach Ri-DVS 2207, Teil 1, die Schweißgeräte mußten die Anforderungen gemäß Ri-DVS 2208, Teil 1, erfüllen.

Die Rohre wurden unter einem Druck von 10 bis 12 bar ca. 2 min am Heizelement bei 200 bis 220 °C gefügt, anschließend bei einem Druck von ca. 18 bar die Enden angeglichen und abschließend 20 min abgekühlt. Die Schweißwulstbreiten lagen mit 8 bis 10 mm gemäß DVS 2207, Teil 1, im Wertebereich.

Die zum Einziehen der Verpreßelemente erforderlichen Spülungsdrücke betragen im Mittel 11 bar, bei einer Spülmenge von ca. 16 mn/h.



Abb. 7: Vorbereitung der Verpreßelemente auf der Pipe-Seite.



Abb. 8: Verpreßelementköpfe und Verpreßcontainer westlich d. Schleuse.

## 4 Soilfrac-Arbeiten

### 4.1 Das Soilfrac-Verfahren

Mit Hilfe des Soilfrac-Verfahrens als Sonderform der Injektionstechnik werden locker gelagerte Böden verdichtet und somit stabilisiert. Im Gegensatz zur herkömmlichen Injektion, bei der das Korngefüge nicht verändert, und lediglich der Porenraum der Kornstruktur verfüllt wird, basiert das Soilfrac-Verfahren auf dem gezielten hydraulischen Aufreißen der Bodenstruktur mit Hilfe eines unter entsprechendem Druck eingepreßten Bindemittels. Voraussetzung für das Entstehen der sogenannten „Fracs“ im Boden ist ein nach dem Einpressen erhärtendes Bindemittel mit möglichst großem Feststoffanteil, das aufgrund hoher Viskosität bzw. entsprechender Korngröße des Feststoffanteils nicht in der Lage ist, in den Porenraum des Bodens zu penetrieren. Durch das Aufreißen und gleichzeitige Einbringen zusätzlichen Volumens entstehen im behandelten Boden Risse (Fracs), gleichzeitig wird der anstehende Boden zwischen den Fracs verdichtet. Bei fortgeführter oder wiederholter Verpressung erzeugt die gesteigerte Spannung im Boden nach oben hin wirksam werdende Hebungen.

Das Einbringen des Verpreßgutes erfolgt über zuvor mittels

Bohrungen in den Baugrund eingebrachter Manschettentventilrohre. Üblicherweise werden für Soilfrac-Arbeiten Rohre verwendet, die in der Verpreßstrecke mit mehreren Ventilen in bestimmten Abständen versehen sind. Das gezielte Bearbeiten bestimmter Bodenbereiche erfolgt dann mittels in das Verpreßrohr eingeführter Doppelpacker (Abb.6).

### 4.2 Neuartige, einziehbare Verpreßelemente

Im hier beschriebenen Fall wurde aufgrund der erstmalig in Verbindung mit dem SF-Verfahren eingesetzten „Bananenbohrungen“ und den damit verbundenen großen Strecken zwischen Bohransatzpunkt und Verpreßbereich ein neuartiges System, ein komplexes Verpreßelement entwickelt. Es besteht im wesentlichen aus einem Bündel von 96 Verpreßrohren unterschiedlicher Länge, wobei jedes einzelne Rohr lediglich am Ende mit einem Ventil versehen ist (Fußventilprinzip). Da jedes Ventil eine eigene Verbindung zur Erdoberfläche besitzt, kann auf den Einsatz von Packern verzichtet werden.

Dieses Bündel wird von einem PE-HD Hüllrohr umgeben, das einerseits die während des Einziehvorganges auftretenden Zugkräfte aufnimmt und ferner

gewährleistet, daß die Verpreßventile in der geplanten Position im Baugrund platziert und gehalten werden.

Auf diese Weise entsteht unterhalb der Schleusenkammersohle mit jeder Bohrung eine 32 m lange Verpreßstrecke, die in 33 cm-Abständen mit Injektionspunkten versehen ist.

### 4.3 Einbau

Die Verpreßelemente wurden jeweils unmittelbar nach dem letzten Räumgang in die Bananenbohrungen eingezo-gen. Zur Aufnahme des Ziehkopfes hatte das Hüllrohr gegenüber dem darin befindlichen Verpreßrohrbündel einen Überstand von ca. 50 cm. Nachdem das Element bis zum Bohransatzpunkt gezogen und in der Sollage ausgerichtet war, wurde über das im Tiefpunkt der Bohrung befindliche Verpreßventil eine Binde-mittelsuspension als Sperrmittel gepumpt, die aufgrund ihrer spezifischen Dichte die vergleichsweise leichtere, noch im Bohrloch befindliche Bentonit-bohrspülung nach oben hin zur Start- u. Zielseite zutage drängte. Auf diese Weise wurde die Bohrung dauerhaft verfüllt, und durch das erhärtete Sperrmittel wurde weiterhin erreicht, daß das später eingepreßte Injektionsgut nicht im Ringraum zwischen Verpreßelement und Bohrlochwandung aus dem Verpreßbereich entweichen kann, sondern statt dessen zum Eindringen in den Baugrund gezwungen wird.

### 4.4 Arbeitsanweisungen/QM

Der Ablauf der Soilfrac-Arbeiten wurde in der Arbeitsanweisung, die vom QM-zertifizierten Hauptauftragnehmer KELLER GRUND-BAU GmbH vorab aufgestellt wurde, in drei Arbeitsschritte gegliedert:

**Phase 1:** Lokalisation der gestörten Baugrundbereiche durch Beobachtung der Verpreß-

drücke bei konstanter Verpreßmenge pro Ventil.

**Phase 2:** Steigerung der Sohlspannung in den Lockerzonen durch erneutes Beaufschlagen der Bereiche mit geringeren Aufnahmedrücken

**Phase 3:** Steigerung der Sohlspannung / Anhebung des Bauteils durch wiederholtes Beaufschlagen der entsprechenden Punkte bis zum Erreichen der bereits beschriebenen Ziele.

Weiterhin wurde auf Basis einer von KELLER aufgestellten Statik die Festlegung von maximal zulässigen Verpreßdrücken, Pumpraten und Chargengrößen (Verpreßmenge pro Arbeitsgang) vorgenommen. Besondere Beachtung erforderten hierbei die in der Kammersohle befindlichen Füllkanalsolehlen, die aufgrund der zusätzlich von unten her aufgebrachten Sohlspannungen neuen Biegebeanspruchungen ausgesetzt würden. Für diese Bereiche wurde der maximal zulässige Verpreßdruck gemäß den Ergebnissen der statischen Berechnung abgemindert (siehe Kasten ).

#### 4.5 Verpreßgut

Vor Beginn der Soilfrac-Maßnahme wurde das zu verwenden-

de Verpreßgut anhand von Laborversuchen ausgewählt. Zur Anwendung kam ein Hochofenzement- Kalksteinmehlgemisch der Firma Anneliese BUT, das auf der Baustelle zu einer Suspension mit einem Wasser/Feststofffaktor = 0,8 aufbereitet wurde. Anhand von Kornverteilungskurven des Bodens und des Bindemittels wurde der Nachweis geführt, daß das gewählte Material nicht in der Lage ist, in den Porenraum des Baugrundes zu penetrieren.

Während der Verpreßarbeiten wurde der Nachweis durch eindeutige Druckspitzen in der Zeit-Drucklinie der online geschriebenen Verpreßprotokolle bestätigt.

#### 4.6 Dokumentation

##### 4.6.1 Visualisierung der Verpreßdaten

Die für die Verpreßungen relevanten Arbeitsparameter wie Verpreßdrücke, Pumpraten und Mengen wurden während der Arbeiten kontinuierlich elektronisch erfaßt und regelmäßig mit der von KELLER GRUNDBAU GmbH entwickelten Software „Inj\_Vis“ ausgewertet. Mit Hilfe dieser Programme können die registrierten Arbeitsdaten als

zwei- oder dreidimensionale Graphik in eine maßstäbliche CAD-Zeichnung des Bauwerkes eingebettet werden, so daß eine lokale Zuordnung der Parameter möglich wird. So können z.B. locker gelagerte Baugrundbereiche erkannt werden, da in diesen Zonen größere Mengen bei geringeren Drücken verpreßt werden können, als in dichter gelagerten Bereichen.

##### 4.6.2 Bauwerksbeobachtung

Neben der EDV-gestützten Injektionsbeobachtung- und Steuerung wurde die Bewegung der bearbeiteten Bauteile während der gesamten Bauphase durch ein automatisches Meßsystem registriert.

Hierzu wurde von der Firma Interfels im Rahmen eines Nachunternehmervertrages ein elektronisches Schlauchwaagensystem installiert, das die höhenmäßige Bewegung der Bauteile sowohl im erdbedeckten Sohlbereich, als auch oberhalb der Bermenanschüttung erfassen konnte. Diese außerhalb der Schleusen-kammer befindlichen Meßgeräte wurden durch einen auf der Kammersohle befindlichen Meßkreis aus sogenannten Fissurometern ergänzt, die die horizontale und vertikale Relativ-

verschiebung zwischen Block 1 und Unterhaupt, bzw. zwischen Block 1 und Block 2 registrierten. Die Bauwerksbeobachtung erfolgte online oder in variablen Zeitintervallen im 24 Stundenbetrieb. Die Beurteilung des Hebungserfolges wurde anhand von in der Nacht gewonnenen Datensätzen durchgeführt, da die Schleuse in den Nachtstunden nicht betrieben wird, und somit eine Verfälschung der Meßergebnisse durch den Lastwechsel infolge der Schleusen-kammerfüllung und -leerung (23m Hubhöhe, dadurch bis zu 2mm temporäre Setzung) ausgeschlossen werden konnte.

Die Meßwerte der Bauwerksbeobachtung wurden ebenfalls durch Software der KELLER GRUNDBAU GmbH aufbereitet und als zwei- oder dreidimensionale Graphik ausgegeben (siehe Abb. 9). Ferner ist das langfristige Verhalten jedes einzelnen Meßpunktes anhand von Zeit-Ganglinien darstellbar.

Mit Hilfe dieser komplexen, auf die Bauaufgabe zugeschnittenen EDV-Anlage war es möglich, die Verpreßarbeiten in Anlehnung an die Beobachtungsmethode durchzuführen; so wurden während der Arbeiten die Ausführungsparameter und die Bearbeitungsabfolgen entsprechend den aus der Verpressung resultierenden Erkenntnissen und der Reaktion des Bauwerkes mehrmals angepaßt.

#### 4.7 Ablauf/Ergebnis der Soilfrac-Arbeiten

##### 4.7.1 Meßergebnisse

Nach der in Phase 1 vorgenommenen Erstverpressung wurden mit Beginn der Phase 2 die ersten eindeutigen Hebungstendenzen im Schlauchwaagensystem gemessen. Kurze Zeit später sprachen auch die in den Blockfugen befindlichen Fissurometer in der Form an, daß die Fuge zwischen Block 1 und Unterhaupt sich öffnete und die Fuge zwischen Block 1 und Block 2 klei-

ner wurde. Da die größten Hebungswerte in der Nord-West-Ecke des Blockes 1 beobachtet wurden, konnte aus dem Gesamtbild der Meßergebnisse geschlossen werden, daß der Block 1 eine Aufwärtsdrehung Richtung SüdOsten erfuhr, also entgegengesetzt zu der ursprünglichen Setzungsrichtung. Dazunächst die vom Auftraggeber festgelegte Hebungsgrenze von 5mm bereits vor Abschluß

der Phase 2 in einigen Bauteilbereichen gemessen worden war, wurde eine ca. dreiwöchige Verpreßpause angeordnet, in der man den teilweisen Rückgang der erzeugten Hebungen erwartete. Diese stellten sich jedoch lediglich in der Größenordnung von einigen Zehntel Millimeter ein. Daraufhin wurde beschlossen, daß die Soilfrac-Arbeiten bereits mit der Phase 2 abgeschlossen werden sollten,

### Schleuse Uelzen

### SOILFRAC

EDV-gestützte Injektionsdatenauswertung mit Inj\_Vis

Die Verpreßebene für SOILFRAC liegt 5,0 m unter Bauwerkssohle und wird zur Visualisierung der Injektionsdaten in Teilflächen gegliedert. Jeder Teilfläche werden die registrierten Arbeitsdaten zugeordnet. Es können 2D- oder 3D-Diagramme in den maßstäblichen Bauplänen erzeugt werden.

Beispiel links: Darstellung der drei Verpreßphasen:

**Phase 1:** Die gesamte Fläche wird gleichmäßig mit definierter Menge (grün) bearbeitet, Druckniveau (blau) auf der Westseite tiefer = Hinweis auf Lockerzone

**Phase 2a:** „Druckstiller“ werden erneuert mit Verpreßgut beaufschlagt, der Aufnahmedruck (grau) steigt

**Phase 2b:** Durch wiederholtes Verpreßen kleiner Chargen werden annähernd gleiche Spannungsverhältnisse (rot) unter der gesamten Sohle, jetzt auch im nordwestlichen Bereich erzeugt. Im Bereich der Füllrinne ist der abgeminderte Arbeitsdruck erkennbar

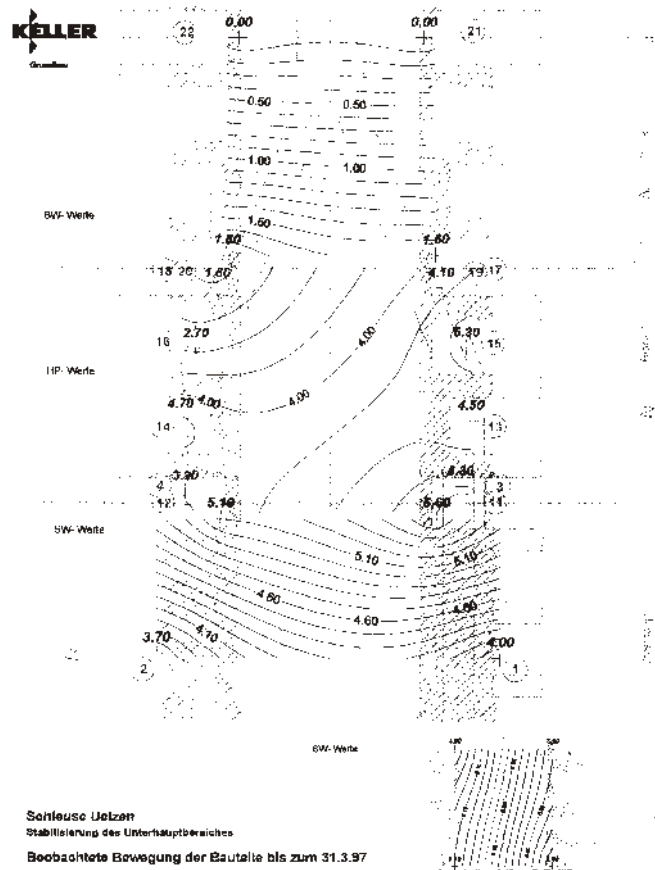


Abb. 9

so daß nach der Verpreßpause lediglich diejenigen Bereiche bearbeitet wurden, die das Verpreßgut bisher mit extrem niedrigen Drücken aufgenommen hatten.

Um weiteren Hebungstendenzen entgegenzuwirken, wurde die arbeitsanweisung dahingehend geändert, daß die Fortsetzung der Soilfrac-Arbeiten nicht mehr wie bisher mit vier gleichzeitig laufenden, sondern nur noch mit einer Pumpe durchgeführt wurde. Ferner wurden die Verpreßarbeiten in die Nachtstunden verlegt, da nur bei stillstehender Schleuse und verkürzten Meßintervallen das sofortige Erkennen von Hebungstendenzen möglich war.

Wurden vor der Verpreßpause maximal 150l/m<sup>2</sup> feststoffbildende Suspension unter das Bauwerk gepumpt, so konnten

im Fortgang der Arbeiten in einzelnen Zonen später noch mehr als 200 l/m<sup>2</sup> nachverpreßt werden, was auf eine weitere Verdichtung lokal begrenzter, extrem aufgelockerter Bodenbereiche hindeutete.

Insgesamt wurden während der Verpreßarbeiten innerhalb von knapp drei Monaten ca. 50 m<sup>3</sup> zusätzliches Volumen in Form von erhärteten Soilfrac-Lamellen in den Baugrund unterhalb des Blockes 1 und des Unterhauptkörpers eingebracht.

#### 4.8 Meßsysteme des Wasser- und Schiffsamtes zur Bauwerksüberwachung

Ergänzend zu den vorgenannten Meßsystemen des Auftragnehmers sah die amtseigene Überwachung des Wasser- und Schiffsamtes Uelzen folgendes Meßkonzept vor:

**4. 8. 1 Kraftmessungen an den installierten Pressen**

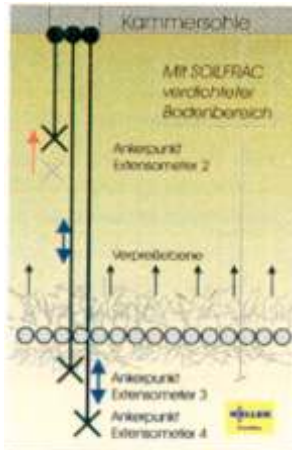
Das Unterhaupt führt bei jeder Bergschleusung - bedingt durch den steigenden horizontalen Wasserdruck - eine Nickbewegung zum Unteren Vorhafen aus. Gleichzeitig öffnet sich die Fuge zum Block 1 und die Pressen werden geringfügig entlastet. Generell sind daher die Pressenkräfte bei Oberwasserständen auf beiden Kammerwandseiten kleiner als bei Unterwasserständen.

Aus Vorlaufmessungen ist weiterhin bekannt, daß die Pressenkräfte saisonal in weiten Bereichen des Jahres tendenziell annähernd wie die Luft-Temperaturganglinie schwanken. Steigende Temperaturen verursachen - infolge Erwärmung und Ausdehnung des Stahlbetons - eine Verengung der Fuge Unterhaupt/Block 1 in Schleusenlängsrichtung und somit ein Anwachsen der Pressenkräfte. Vor Beginn der Soilfrac-Arbeiten wurden die bisherigen Minimalwerte Mitte September 1996 auf der Ostseite mit 1 374 kN und auf der Westseite mit 1 307 kN gemessen.

Mit Beginn der Injektionsarbeiten am 03.03.1997 fielen die Pressenkräfte kontinuierlich ab und die bisherigen Minimalwerte wurden bereits nach 10 Tagen unterschritten (s. Ganglinien der Pressenkräfte in Abb. 11). Die gegenläufige Tendenz von steigender Lufttemperatur und weiterhin fallenden Pressenkräften auch in den darauf folgenden Tagen zeigte eindeutig eine Beeinflussung des Unterhaupt/Block 1-Bereiches durch die erfolgten Verpreßarbeiten an. Nach 3 Wochen, nachdem am 25.03.1997 ca 35 mn Suspension verpreßt worden waren, waren die Pressen auf beiden Kammerwandseiten entlastet.

**4. 8. 2 Weguhren an der Fuge Unterhaupt/Block 1**

An der Fuge Unterhaupt/Block 1 sind auf beiden Kammer-



**Abb. 10: Funktionsprinzip Mehrfachextensometer im mit SOILFRAC behandelten Baugrund. Konzept BAW, Außenstelle Küste.**

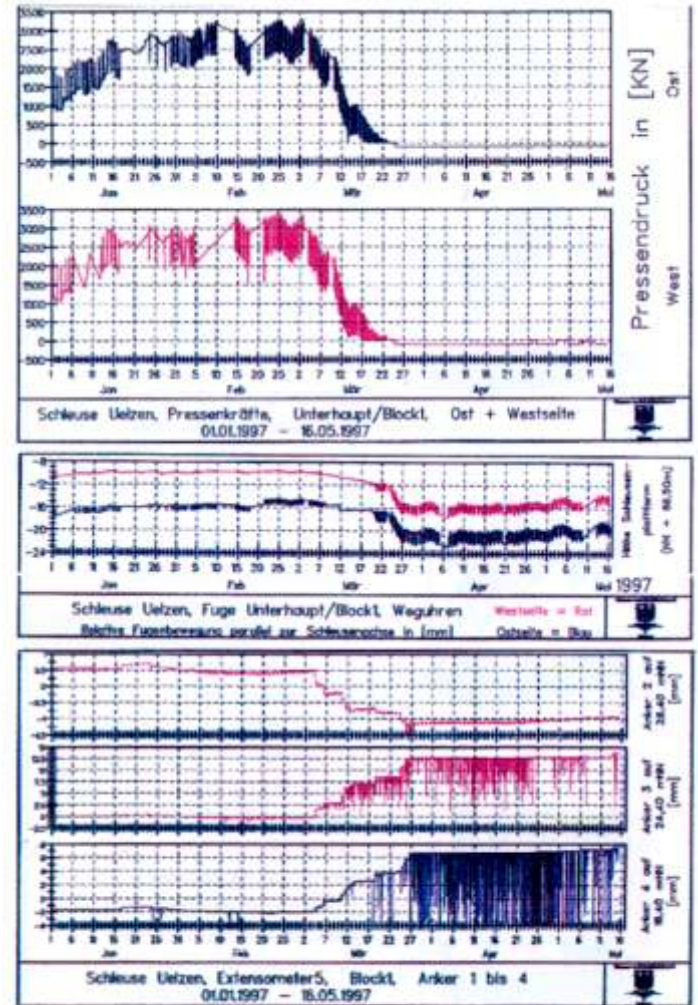
wandseiten Weguhren installiert, die die Relativbewegungen zwischen den Blöcken u. a. in Schleusenlängsrichtung messen. Die Weguhren sind auf Höhe der Schleusenplattform (NN + 66,50 m) und oberhalb der seitlich angeschütteten Berme (auf NN + 57,50 m) angeordnet.

Die Meßwerte (Abb. 12) zeigten nach Beginn der Soilfrac-Arbeiten - wie auch die Fissurometer-Daten des AN - eine langsame, geringfügige Aufweitung der Fuge an. Diese Bewegung lief der „Normaltendenz“ der Fuge (Verengung mit steigenden Temperaturen zum Frühjahr/Sommer hin) entgegen und war daher als Folge der Einpressungen zu deuten.

Die steiler verlaufenden Zeit-Ganglinien seit dem 24.03.1997 wiesen darauf hin, daß sich die Fuge Unterhaupt/Block 1 horizontal in Schleusenlängsrichtung schneller aufweitete als in den Verpreßtagen zuvor. Aus dieser Bauwerksreaktion zum Ende der Verpreßphase 2a konnte auf eine Vergleichmäßigung und Zunahme der kraftschlüssigen Lagerung unter den beaufschlagten Blöcken geschlossen werden.

**4. 8. 3 Vierfach-Stangen-Extensometer (Abb. 10 + 13)**

Unter der Nordwest-Ecke des Blockes 1 (mit Abstand 1,0 m von



**Abb. 11, 12 und 13 (von oben). Die Meßergebnisse des WSA Uelzen dokumentieren den Erfolg der Maßnahme.**

der Fuge zum Unterhaupt und 1,5 m von der westlichen Kammerwand) ist ein Vierfach-Stangen-Extensometer installiert, welches über vier unabhängige Meßstrecken Längenänderungen zwischen den Ankerfußpunkten und den Extensometerköpfen messen kann.

Drei Fußpunkte sind im Baugrund in unterschiedlichen Tiefen bei NN 28,4 m (Anker 2 zwischen Gründungssohle und Verpreßebene) NN 24,4 m und NN 16,4 m (Anker 3 und 4 unterhalb der Verpreßebene) verankert. Der vierte Fußpunkt liegt in der unteren Schleusensohle bei NN 30,5 m.

Die Extensometerköpfe enden in der oberen Sohle etwa bei NN 37,8 m (siehe Abb. 10) .

Die Messungen zeigten seit dem Verpreßbeginn mit fort-

schreitender Verpressung beim Anker 2 oberhalb der Verpreßebene eine Verkürzung sowie bei den Ankern Nr. 3 und 4 (unterhalb der Verpreßebene) eine Verlängerung der Meßstrecke an. (Abb. 13)

Dies ließ erkennen, daß der anstehende Boden in diesen Tiefen durch das eingepreßte Injektionsmaterial zusammengedrückt und verdichtet wurde.

Die Tendenz setzte sich in der Injektionsphase 2 fort: Geringfügiger abnehmende Werte als in der Verpreßphase 1 beim Anker 2 deuteten auf eine kraftschlüssige Lagerung der Bauwerkssohle hin.

Zum Ende der Soilfrac-Arbeiten war zusätzlich an allen Meßankern eine gleichmäßige Verlängerung infolge Temperatur-



erhöhungen im Boden festzustellen.

Des Weiteren wurden vom Wasser- und Schifffahrtsamt Uelzen punktuelle Neigungen auf der Kammersohle an der Fuge Unterhaupt/Block 1 gemessen (auf Empfehlung der Bundesanstalt für Wasserbau), und es wurden wöchentliche Nivellements der Blöcke durchgeführt.

Auch diese Messungen bestätigten die Meßergebnisse des Auftragnehmers und rundeten das einheitliche Gesamtbild aller Meßwertinterpretationen ab.

## 5 Zusammenfassung/ Bewertung

Indem die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung -beraten durch die BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU- dem Hauptauftragnehmer KELLER Grundbau

GmbH nebst Nachunternehmern die Chance zur Verwirklichung neuer Ideen gab, wurde für den Spezialtiefbau, insbesondere aber für die HDD- Technik ein neuer Maßstab gesetzt.

Erstmals wurden 10 parallele horizontal gesteuerte Bohrungen mit Einzelabständen von nur 1,5 bis 2 m Abstand und einer Steuergenauigkeit von weniger als 20 cm bei einer Überdeckung von ca. 30 m und zudem unterhalb eines außergewöhnlich stark bewehrten Bauwerkes hergestellt.

Komplizierter Baugrund und metallische Fremdeinflüsse in Baukörpern können zu magnetischen Interferenzen führen und beim Anlegen von Bohrlöchern mit konventioneller Richtbohrtechnik große Unsicherheiten in der lagemäßigen Ausrichtung verursachen. Durch den Einsatz der magnetischen Bohrführung

unter dem Unterhaupt/Block 1 der Schleuse Uelzen konnte das Horizontal-Drilling-Verfahren erfolgreich als Vorstufe für weitere Verfahrensschritte praktiziert werden.

Durch die Entwicklung speziell für das Einziehen in „Bananenbohrungen“ geeigneter Verpreßelemente wurde es möglich, Bauwerksgründungen mit einer Bodenüberdeckung von mehr als 30 m im SOILFRAC-Verfahren zu sichern, ohne bei den Arbeiten ein zusätzliches Risiko durch Bohrarbeiten gegen drückendes Grundwasser einzugehen.

Beim Einsatz des SOILFRAC-Verfahrens konnte mit modernster Meß- und Regeltechnik die ursprüngliche Schadenssituation und der erreichte Hebungs- und Stabilisierungserfolg anhand genauer Darstellungen gesteuert und dokumentiert wer-

den, was für den Auftraggeber zur Schaffung sicherer, überschaubarer Verhältnisse dienlich war. Abschließend ist festzustellen, daß neben dem uneingeschränkten technischen Erfolg durch die Beauftragung des Nebenangebotes durch das WSA UELZEN auch eine bedeutende wirtschaftliche Ersparnis gegenüber dem Amtsentwurf erzielt werden konnte.

Der erfolgreiche Abschluß dieser Stabilisierungsmaßnahme an der Schleuse Uelzen basiert auf der außerordentlich guten, konstruktiven und kooperativen Zusammenarbeit aller am Projekt Beteiligten.

Ebenso trug die Erfahrung der an der Ausführung beteiligten Teams und die richtige Auswahl der technischen Ausrüstungen wesentlich zum erfolgreichen Gelingen der gestellten Aufgabe bei.