

Geotechnische und geodätische Messungen zur Überwachung und Steuerung eines großen Rohstofflagers auf breiig-weichem Schwemmland in Südamerika

Christian Moormann,
Andreas Glockner

Teil 2

4 Stock Yard: Erz- und Kohlelager

4.1 Aufgabe und Anforderungen

Besondere Anforderungen ergaben sich im Bereich des ‚Stock Yards‘, des 380.000 m² großen Rohstofflagers von Kohle/Koks, Eisenerz und Additiven, das im Folgenden näher betrachtet werden soll (Bild 5).

Das Rohstofflager dient zentral der Materiallagerung und –bewirtschaftung: das mit Zügen aus dem Landesinneren von Brasilien angelieferte Eisenerz wird hier ebenso gelagert wie die aus China bzw. Australien mit Schiffen importierte Kohle, der in der Kokerei erstellte Koks und die zahlreichen Additive, die für die Stahlherstellung benötigt werden. Die Materialien werden in bis zu 100 m breiten und 800 m langen Halden gelagert. Die Halden erreichen dabei Höhen von bis zu 13 m (Bilder 5 und 6). Daraus ergeben sich Flächenlasten zwischen 100 kN/m² im Bereich der Lagerfläche für Kohle/Koks und 340 kN/m² in der Lagerfläche für das Eisenerz. Ohne be-

sondere Maßnahmen zur Baugrundertüchtigung waren unter diesen Randbedingungen rechnerische Setzungen von bis zu 4 m zu erwarten.

Erschwerend ist zu berücksichtigen, dass die Aufhaltungs- und Abbauvorgänge der Halden sehr rasch vor sich gehen können, so dass im Oberen Ton erhebliche relative Porenwasserüber- und –unterdrücke entstehen. Die Form und Ausdehnung der Halden ist dabei unregelmäßig und ergibt sich aus den Anforderungen der Lagerbewirtschaftung.

Die Aufhaltungs- und Abbauvorgänge werden von sogenannten Stacker/Reclaimern (SR) wahrgenommen. Dabei handelt es sich um 750 t schwere, gewaltige Bagger mit 50 m langen Auslegern (Bilder 1 und 6), die aus dem Braunkohle-Tagebau bekannten Großbaggern ähneln. Allerdings sind die Bagger hier schienengebunden (Spurweite: 8 m) und operieren auf Fahrgassen zwischen den Kohle- und Erz-Halden. Auf Grund des Gewichts und der weiten Ausladung der Stacker/Reclaimer ergeben

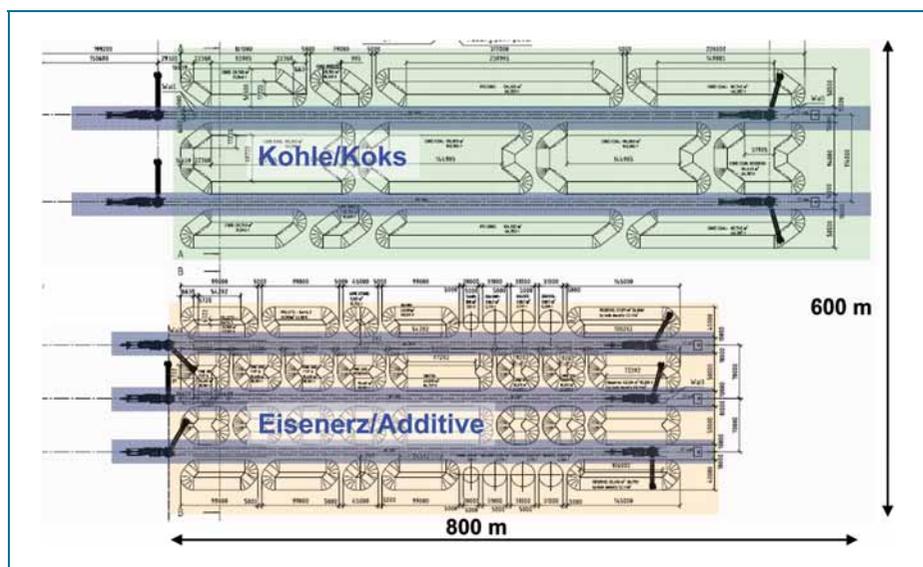


Bild 5: Layout des Stock Yard (Grundriss)

sich höchste Anforderungen an die Lagegenauigkeit der Schienenwege (Runways) und ihre Verfügbarkeit.

4.2 Gründungskonzept

Als Ergebnis eines Optimierungsprozesses, der die technischen, ökonomischen und insbesondere die bautechnischen Möglichkeiten in Brasilien berücksichtigte, wurde das Konzept einer Baugrundverbesserung in Verbindung mit einem im Schotterbett verlegten und damit justierbaren, schwelengestützten Schienensystem für die SR verfolgt (Bild 6). Eine Pfahlgründung der Runways war hinsichtlich des aus den Setzungen der Halden resultierenden horizontalen Seitendrucks nicht realisierbar.

Im Bereich Kohle/ Koks erfolgt in den Runways eine Baugrundertüchtigung mit geotextilummantelten Sandsäulen (Bild 7). Die Säulen mit einem Durchmesser von $D = 0,78\text{ m}$ wurden in einem Raster von $2,0\text{ m} \times 2,0\text{ m}$ angeordnet und die Säulenlänge auf rund 10 m begrenzt. Insgesamt wurden rund 100 km geotextilummantelte Sandsäulen hergestellt. Die Lagerflächen im Bereich Kohle/ Koks wurden durch insgesamt 400 km laufende Vertikaldräns ($1,5\text{ m} \times 1,5\text{ m}$) vorbereitet. Die geplante Vorlast für die geplante Vorkonsolidierung konnte in Form von minderwertigem Eisenerz bzw. Schlacke nur für kleine Teilflächen zur Verfügung gestellt werden, so dass die Erstbelastung mit allen begleitenden Beanspruchungszuständen nunmehr im Zuge der Inbetriebnahme der Anlage erfolgen muss.

Im Bereich Eisenerz/ Additive erfolgt die Baugrundverbesserung der hoch belasteten Lagerflächen und der

Runways mit Rüttelstopfsäulen (Säulendurchmesser: $D = 1,0\text{ m}$), die mit dem S-Alpha-System der Firma Keller Grundbau hergestellt wurden. Das Raster der 10 m bis 17 m , im Mittel 12 m langen Säulen liegt bei $1,75\text{ m} \times 1,75\text{ m}$, bei geringeren Haldenlasten bei $2,2\text{ m} \times 2,2\text{ m}$. Im Mehrschichtbetrieb wurden für den Iron Ore Yard insgesamt rund 400 km Schottersäulen hergestellt (Wegner et al. 2009). Der Schotter-Bedarf überstieg die Kapazitäten des Marktes im Staate Rio de Janeiro erheblich, während der Sand für die Sandsäulen bei der Herstellung des Hafens gewonnen werden konnte.

Über den Sand- und Schottersäulen wird ebenso wie im Bereich der Vorkonsolidierung eine geotextilbewehrte Tragschicht mit einer Dicke von rund 65 cm eingebaut. Als Bewehrung kommen zweilagig bidirektional verlegte, hochzugfeste Geogitter und -gewebe der Firma Huesker mit einaxialen Zugfestigkeiten bis 1.600 kN/m zum Einsatz (Alexiew et al. 2009).

Für die Runways der Stacker/Reclaimer wurde im Hinblick auf die sich aus den zu erwartenden Setzungen einerseits und den Anforderungen an die Reduktion von Setzungsdifferenzen ergebenden Anforderungen an die Justierbarkeit, aber auch Biegesteifigkeit des Systems ein in einem Schotterbett verlegtes, optimiertes Schiene-Schwelle-System entwickelt, das mit einem zusätzlichen Stahlbeton-Längsbalken ausgestattet ist. Trotz seiner Biegesteifigkeit und seines hohen Eigengewichtes ermöglicht dieses System die Justierung durch Nachschottern (Stopfen) (Bild 8). Im Hinblick auf die Setzungsraten, die in der Anfangsphase bei 2 cm bis 5 cm pro Woche lagen, werden gegenwärtig Maintenance-Strukturen mit au-

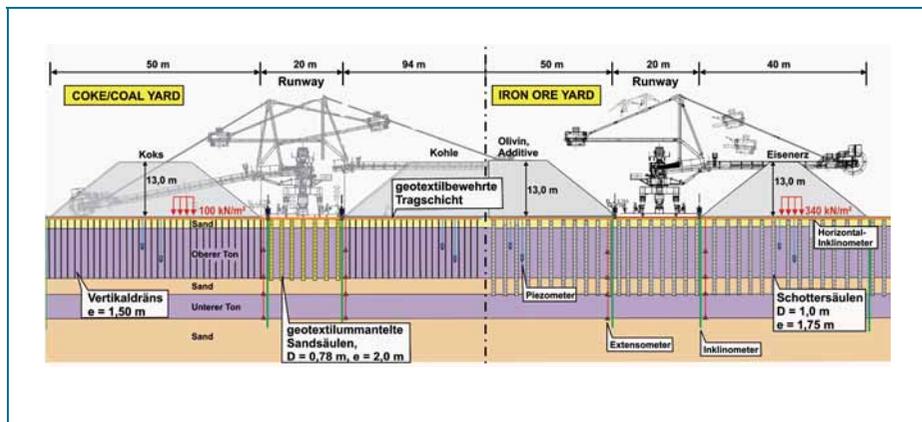


Bild 6: Gründungskonzept für den Stock Yard; links: Kohle/Koks mit geotextilummantelten Sandsäulen in Runways und Vertikaldräns in Lagerflächen; rechts: großflächig Schottersäulen (Rüttelstopfverfahren).



Bild 7: Herstellung der geotextilummantelten Sandsäulen (links), der Vertikaldräns (Mitte) und der Rüttelstopfsäulen (rechts)



Bild 8: Aufbau der Stacker/Reclaimer und erste Nachstopfarbeiten am optimierten Schiene-Schwelle-System

tomatisierten geodätischen Messsystemen und halbautomatischen Stopfeinheiten aufgebaut, die in der Lage sein werden, 700 m Runways je Woche zu justieren.

4.3 Bemessungskonzept

Im Ergebnis der diametralen Anforderungen an eine Optimierung des Umfanges der Baugrundverbesserungsmaßnahmen einerseits und der Anforderungen an die Instandsetzungsarbeiten während der Betriebsphase andererseits wurden unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit und der Standsicherheit von Halden und Stacker/Reclaimern als Zielvorgabe für die Bemessung zulässige Setzungen von 1,5 m im Bereich der Halden und von 0,5 m (vertikal und horizontal) für die Runways definiert.

Bei der Bemessung der Baugrundverbesserungen für den Stock Yard wurden umfangreiche analytische Stabilitätsbetrachtungen (Alexiew & Moormann 2009) kombiniert mit umfangreichen Finite-Element Berechnungen, die unter Einsatz eines gekoppelten, elastoplastischen Stoffmodells die realistische Abbildung der zeitvarianten Konsolidierungsvorgänge und die Prognose der Auswirkungen der raschen Auf- und Abhaldungsprozesse auf die Stabilität der Halden und die Verformungen im Bereich der Runways ermöglichen (Bild 9). Die stoffliche Modellierung erfolgt mit einem ‚Soft Soil Creep Modell‘, mit dem auch die Kriechvorgänge des ausgeprägt plastischen Oberen Tons prognostiziert werden können. Die numerischen Berechnungen bildeten dabei nicht nur die Basis für die Prognose der Verformungen und damit für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Lagerflächen und Runways unter Berücksichtigung der Konsolidierungs- und Kriechvorgänge, sondern auch für den Nachweis der Standsicherheit der Haldenböschungen und der Dimensionierung der Geotextilbewehrung der Tragschicht.

Die numerischen Modellierungen bildeten dabei das zentrale Werkzeug für eine unter dem Druck der Rohstoff- und Bauzeitknappheit erforderlich gewordene, weitere Optimierung der Baugrundverbesserungsverfahren. So

konnte durch die rechnerische Berücksichtigung der zeitvarianten Erhöhung der Scherfestigkeiten beim stufenweisen Aufhalten der Umfang der Baugrundverbesserungsmaßnahmen nachhaltig optimiert werden. Die numerischen Werkzeuge wurden schließlich auch genutzt, um Konzepte für den Einlagerungsprozess von Kohle/Koks und Eisenerz/Additiven zu entwickeln, indem auf der Basis der Simulation von unterschiedlichen Ein-/Auslagerungsszenarien erforderliche Liegezeiten von Lagergut und – zeitabhängig – zulässige Haldenhöhen ermittelt wurden.

Die Berechnungen wurden validiert durch instrumentierte Feldversuche im 1:1-Maßstab: Bild 10 zeigt den Test für die Rüttelstopfsäulen (Eisenerz-Fläche), bei dem eine Gruppe mit 4x4 Säulen durch eine Totlast stufenweise belastet und die Spannungen und Verformungen im Bau-

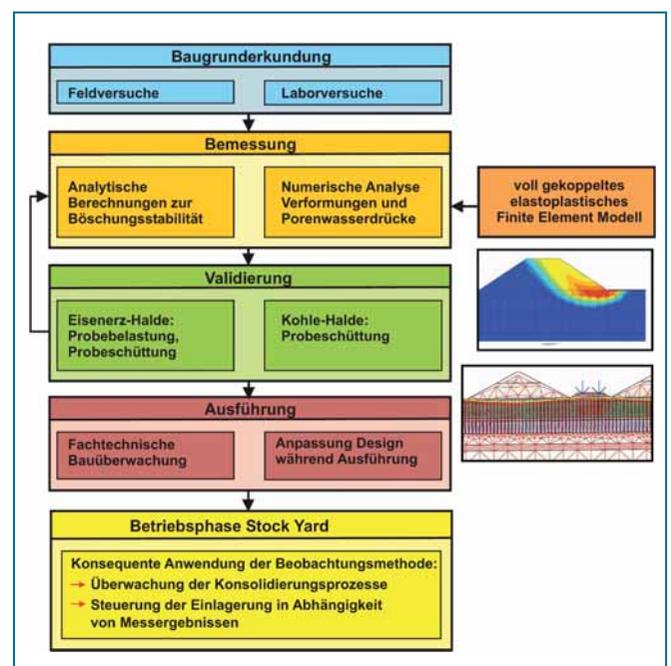


Bild 9: Bemessungskonzept der Baugrundverbesserung für den Stock Yard

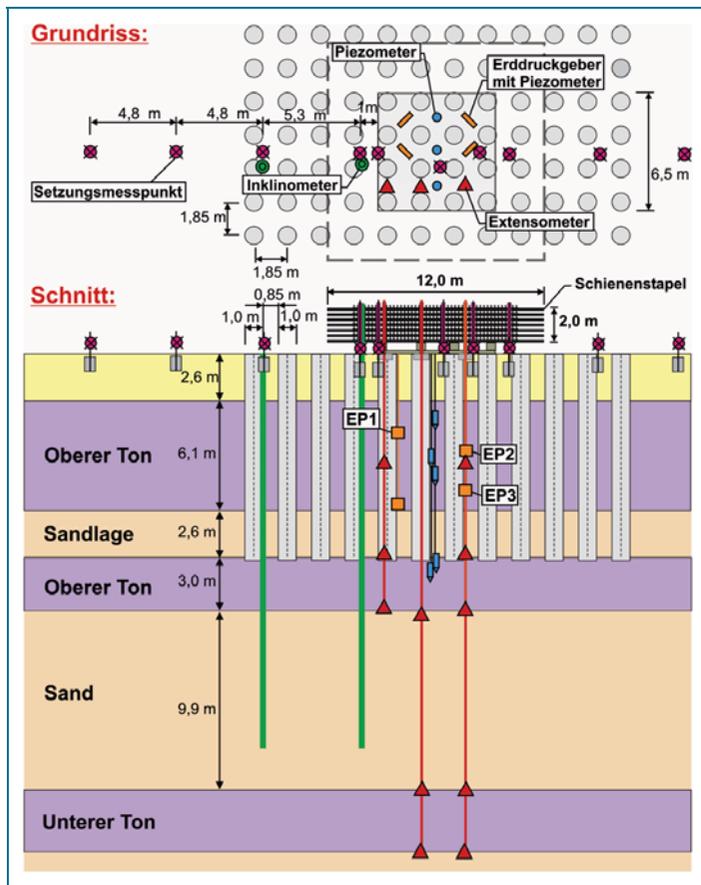


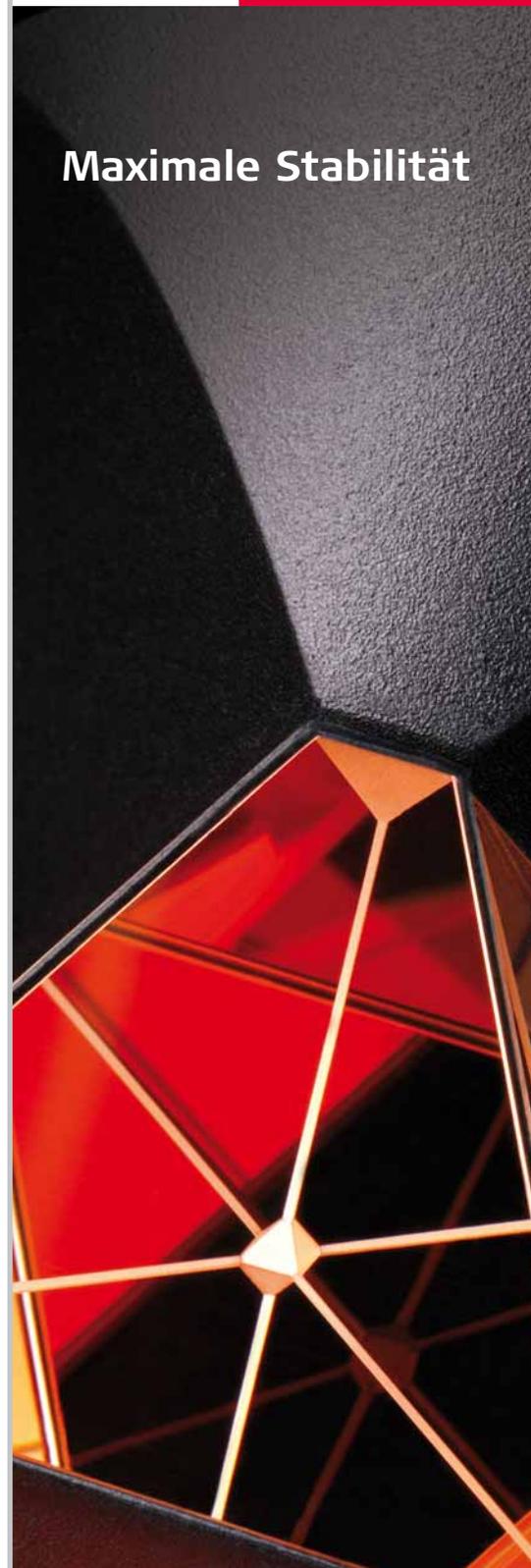
Bild 10: Probekonstruktion an einer Gruppe von 4x4 Schottersäulen in der Eisenerz-Lagerfläche

grund gemessen werden. Für die Kohle/Koks-Lagerfläche wurden in instrumentierten Testquerschnitten die zeitvarianten Porenwasserdrücke und Verformungen unter der Vorschüttung beobachtet und die Auswirkungen auf die Fahrgassen gemessen.

4.4 Beobachtungsmethode als zentrales Element beim Betrieb des Stock Yards

Die konsequente Anwendung der Beobachtungsmethode im Sinne der DIN 1054:2005 ist ein zentrales Element des Bemessungs- und Nachweiskonzeptes (Bild 9). Dabei kommen umfangreiche messtechnische Instrumentierungen nicht nur für die Feldversuche/Probekonstruktionen zur Validierung der numerischen Modelle zum Einsatz. Vielmehr müssen in den ersten Jahren der Betriebsphase alle Auf- und Abhaldungsprozesse im gesamten Stock Yard begleitet und gesteuert werden durch ein geodätisches und geotechnisches Messprogramm. Bedingt durch das gewählte duktile Gesamtsystem und die im Zuge des Planungs- und Bemessungsprozesses vorgenommenen erheblichen Optimierungen bei der Bemessung der Baugrundverbesserungen konnten signifikante Einsparpotentiale bezüglich Bauzeit und -kosten generiert werden. Auf der anderen Seite bedingt die Ausschöpfung dieser Einsparpotentiale, dass nicht alle Lagerflächen von Beginn an uneingeschränkt bis zur finalen, geplanten Haldenhöhe zur Verfügung stehen. Vielmehr gilt es, die Aufhaldungsprozesse so zu steuern, dass die im Oberen Ton induzierten Konsolidierungsvorgänge und die zeitvariante Scherfestigkeitserhöhung genutzt

Maximale Stabilität



Mit Sorgfalt ausgesuchte Materialien garantieren höchste Robustheit. Die Verwendung von **Karbon für die Zentralachse** des 360°-Präzisionsprismas gewährleistet maximale Stabilität unter allen Einsatzbedingungen.

www.leica-geosystems.de

when it has to be right

Leica
Geosystems

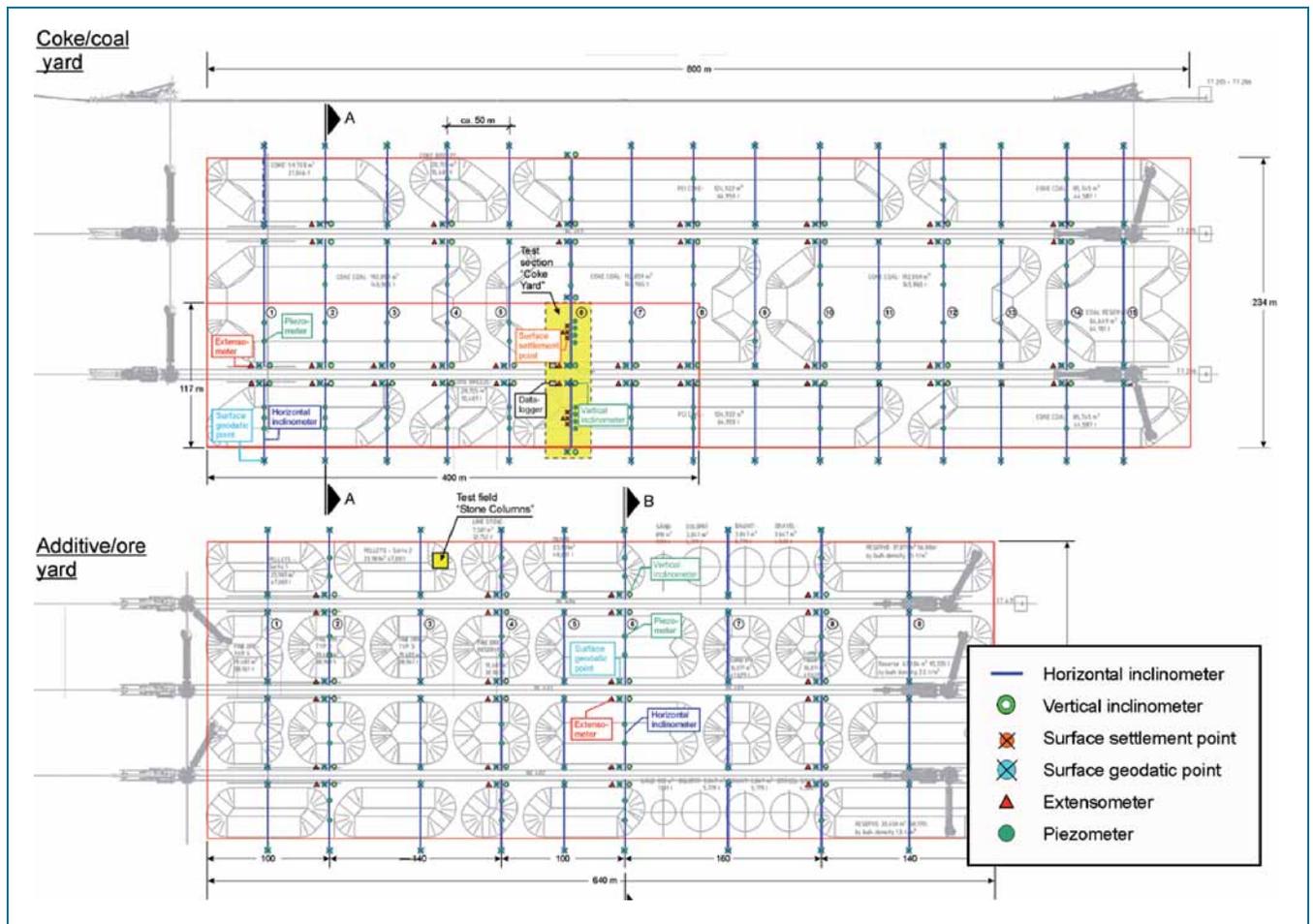


Bild 11: Messprogramm Stock Yard im Grundriss

werden können, ohne dass die durch die Einlagerung erzeugten Porenwasserüberdrücke die Standsicherheit von Haldenböschungen und Runways gefährden. Diese Anforderungen setzen - bedingt durch die kleinräumigen Auf- und Abhaltungsvorgänge - eine flächendeckende und zeitnahe Kenntnis über die Verformungen und die Porenwasserdrücke im Oberen Ton voraus. Es wurde daher ein umfangreiches Messprogramm entwickelt, das nachfolgend vorgestellt wird.

5 Geotechnisches und Geodätisches Messprogramm

5.1 Anforderungen

Das Gesamtkonzept der messtechnischen Instrumentierung musste darauf ausgelegt werden, eine Echtzeit-Beobachtung aller Verformungen und Porenwasserdrücke in der gesamten Lagerfläche zu ermöglichen und dabei einen möglichst einfachen und übersichtlichen Zugang zu allen relevanten Daten zu gewährleisten, um die Personalkosten in der Betriebsphase möglichst gering zu halten, aber dennoch nicht planmäßige Zustände zu erkennen und die Bewirtschaftung der Lagerfläche aus geotechnischer Sicht steuern zu können. Es wurde daher soweit als möglich automatisch operierenden Systemen, die über Datenlogger

erfasst werden können, der Vorzug gegeben vor händischen Messverfahren. Dabei war zu berücksichtigen, dass zunächst weder eine Strom- noch eine Telekommunikationsversorgung zur Verfügung stehen würde. Zugleich waren an die Datensammlung und -visualisierung erhöhte Anforderungen zu stellen. Hinsichtlich der Messgeberwahl und der Instrumentierungen im Feld mussten die äußerst ungünstigen Randbedingungen berücksichtigt werden: neben tropischen Niederschlagsereignissen und extrem hohen Lufttemperaturen ergeben sich aus der Lagerhaltung durch Kohle- und Erzstäube sowie durch Beregnungsanlagen extreme Umwelteinwirkungen. Die Messeinrichtungen mussten auf die großen Verformungen von bis zu 1,5 m ausgelegt werden. Und letztlich mussten alle Maßnahmen in einem engen Zeitrahmen unter Berücksichtigung der besonderen Anforderungen des brasilianischen Marktes realisiert werden.

5.2 Konzept

Das unter Berücksichtigung dieser ungewöhnlichen Anforderungen entwickelte und realisierte Konzept ist in den Bildern 11 und 12 visualisiert. Danach wurden entlang der Runways etwa alle 50 m instrumentierte Messquerschnitte angelegt, die durch die Halde bis zum benachbarten Runway geführt werden. Jeder Messquerschnitt besteht mindestens aus folgender Instrumentierung:

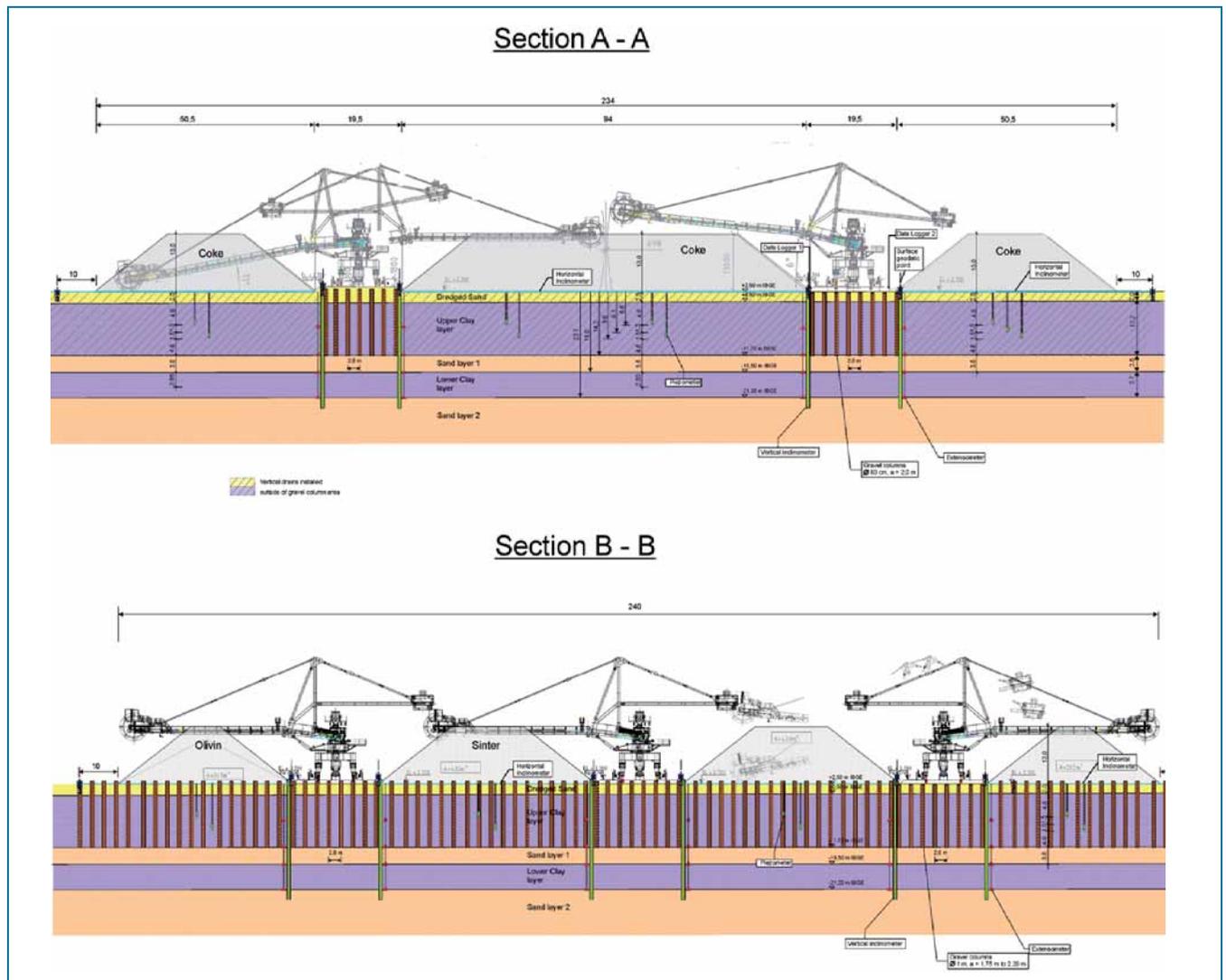


Bild 12: Messprogramm Stock Yard in Querschnitten

- sogenannten ‚Settlement Profilern‘, einem händischen, hydraulischem Messverfahren, mit dem die Setzungsmulde unter den Halden im Profil von Runway zu Runway gemessen werden kann und
 - geodätischen Messpunkten am Anfangs- und Endpunkt der Settlement Profiler am Rand der Runways.
- Mindestens in jedem zweiten Messquerschnitt, d.h. alle 100 m, wird diese Instrumentierung ergänzt durch:
- Porenwasserdruckgeber, mit denen die Entwicklung der relativen Porenwasserüberdrücke im Oberen Ton, die in den vorlaufenden Probelastungen als Leitparameter für die geotechnische Steuerung identifiziert wurden, automatisiert überwacht werden kann,
 - Inklinometer auf beiden Seiten der Runways, oft ausgestattet mit Inklinometermessketten, die eine automatisierte Messung der für die Gebrauchstauglichkeit der Runways maßgebenden horizontalen Verschiebungen im Baugrund ermöglichen,
 - Extensometern am Rande der Runways, mit denen die Entwicklung der Setzungen bis in 25 m Tiefe unter Arbeitsebene ermittelt werden kann sowie
 - automatischen Setzungsmesszellen, i.e. nach dem hydraulischen Verfahren arbeitende Geber, die über eine

Druckmessung die hochpräzise, punktuelle Ermittlung der Geländesetzungen in den Haldenaufstandsflächen ermöglichen.

Insgesamt werden

- 154 Porenwasserdruckgeber,
- 44 Settlement Profiler,
- 120 hydraulische Setzungsmesszellen,
- 58 Inklinometer, davon 46 Messstellen ausgestattet mit 11-fach Inklinometermessketten, und
- 26 Extensometer

installiert.

Für die automatisierte Erfassung der Porenwasserdruckgeber, der hydraulischen Setzungsmessstellen und der Inklinometermessketten wurde ein dezentralisiertes Datenerfassungssystem mit solargetriebenen, akkugepufferten Datenloggern installiert. Die Datenlogger wurden über eine funkbasierte Datenübertragung an einen auf der Baustelle installierten Server angeschlossen. Über eine internetbasierte Plattform werden die Messdaten graphisch aufbereitet den Anwendern zur Verfügung gestellt.

Die geotechnischen Messungen werden ergänzt durch ein automatisch operierendes geodätisches Messverfahren, im Wesentlichen einen mit Neigungssensoren und GPS

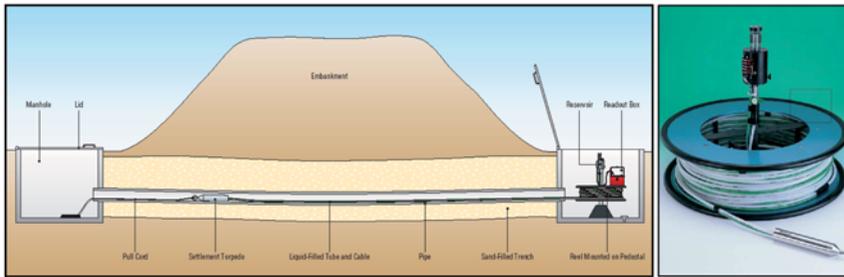


Bild 13: Settlement Profiler zur händischen Messung der Setzungsmulden unter den Haldenflächen (System Geokon)

ausgestatteten Messschlitten, mit dem die Höhenlage des Schienensystems der Stacker/ Reclaimer regelmäßig messtechnisch überprüft wird.

5.3 Messgeber und -verfahren

Automatische Setzungszellen und ‚Settlement Profiler‘

Um einerseits eine automatische Erfassung der unter den Halden eintretenden Setzungen zu ermöglichen und andererseits die Setzungsmulden im gesamten Profil erfassen zu können, wurden in regelmäßigen Abständen manuell abzulesende ‚Settlement Profiler‘, ein mit einer Druckmesszelle zu befahrendes Rohr, zur Erfassung der Setzungen im Querschnitt und einzelne, automatische Setzungsmesspunkte installiert.

Der Settlement Profiler besteht aus einem in einem ‚Torpedo‘ installierten Piezometer, der über einen entsprechend langen, wassergefüllten Schlauch mit einem Reservoir am Anfang der Messstrecke, d. h. am Rande der Runways verbunden ist (Bild 13). Der Torpedo wird in Messschritten von hier 1 m durch ein in der Tragschicht unter den Halden verlegtes PVC-Rohr gezogen und misst die Potentialdifferenz zwischen seiner Position im Rohr und dem bekannten Ausgangspotential im Reservoir. Im Vergleich zu einem Horizontalinklinometer besitzt dieses Messverfahren den Vorteil, dass auch große Setzungen und Setzungsdifferenzen gemessen werden können, da das Rohr nur mit einem relativ kleinen Torpedo, nicht aber mit einer 0,5 m oder 1,0 m langen Inklinometer-sonde befahren werden muss. Zudem kann die Messschrittlänge von 1 m auf 2 m, 5 m oder größere Intervalle beliebig vergrößert werden. Der Messvorgang stellt geringere Anforderungen an das Personal und zudem können anstelle von speziellen Inklinometerrohren mit Führung Standard-PVC-Rohre zum Einsatz kommen, was erhebliche wirtschaftliche Vorteile birgt.

Die händisch zu messenden Settlement Profiler werden ergänzt durch einzelne automatisch messbare Setzungsmesszellen, deren hydraulisches Messverfahren demjenigen der Settlement Profiler ähnelt, bei dem aber der mit einem Reservoir am Rande der Runways verbundene Piezometer stationär an einer ausgewählten Stelle in der Tragschicht unter den Halden installiert wird und die Druckmessung über einen mit einem Datenlogger verbundenen Piezometer erfolgt.

Inklinometer und Extensometer

Zur Erfassung der horizontalen Verformungen und zur Erfassung der Setzungsanteile über die Tiefe wurden ent-

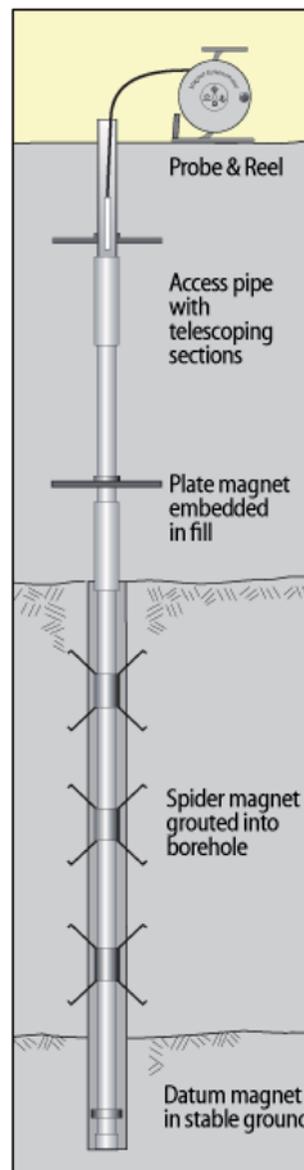
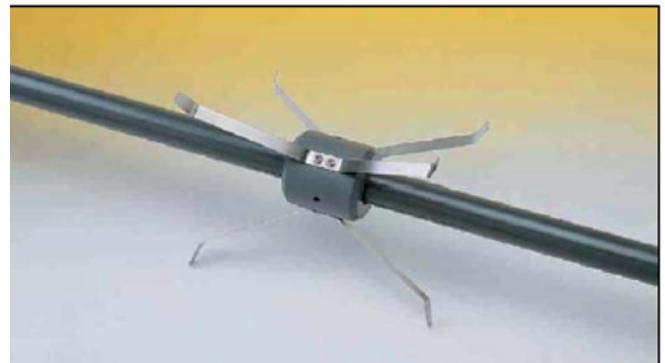


Bild 14: Extensometer mit magnetischen Ankerpunkten zur Messung großer relativer Vertikalverschiebungen

lang der Fahrwege der Stacker/Reclaimer Inklinometer und Extensometer eingebaut.

Das Inklinometersystem besteht konventionell aus einem in einer Bohrung installierten PVC-Rohr mit Führungsnuten und wird händisch mit einer 1 m langen Inklinometersonde befahren. In 46 Inklinometerrohren wurden Inklinometermessketten aus 11 Gliedern installiert, die eine automatische Erfassung der Horizontalverschiebungen ermöglichen.

Im Hinblick auf die großen Setzungsbeträge wurden anstelle konventioneller Stangen-Extensometer im vorliegenden Fall Extensometer mit magnetischen Ankerpunkten gewählt, bei dem in einem Bohrloch magnetische Ankerpunkte mit entsprechenden Federbeinen installiert und zusammen mit einem eingestellten PVC-Rohr in dem Bohrloch verdämmt wurden (Bild 14). Für die Messung wird dann in dem PVC-Rohr eine Sonde abgelassen, die beim Passieren der magnetischen Ankerpunkte durch Schließen eines elektromagnetisch induzierten Kontaktes ein Licht- bzw. Tonsignal senden. Abgelesen wird dann die Tiefenlage der Sonde über eine Längenskala am Kopf des PVC-Rohres. Die Messgenauigkeit liegt üblicherweise bei ± 3 mm.

5.4 Installation und Messvorgang

Die Installation der Messeinrichtungen erfolgte stufenweise in Abhängigkeit vom Fortschritt der Baugrundverbesserungs- und der Erdarbeiten in mehreren Kampagnen. Dabei ergaben sich aus den Randbedingungen im Baufeld und den besondere Anforderungen des brasilianischen Marktes individuell zu optimierende Lösungsansätze.

Piezometer

Die Installation der Piezometer erfolgte nach Herstellung der geotextilbewehrten Tragschicht. Die Einbautiefe betrug bezogen auf diese Arbeitsebene meist 4 m bis 16 m. Beim Einbau musste die rund 65 cm starke und zweilagig geotextilbewehrte Tragschicht sowie die rund 1,5 m mächtige Sandschicht, die im Zuge der Wegbarmachung des Schwemmland aufgespült worden war, bis zum Erreichen des breiig-weichen Oberen Tons durchfahren werden. Der Einbau der sogenannten ‚Push-in‘ Piezometer, erfolgte anfänglich mit einem CPT-, also einem Drucksondier-Gerät. Um die Druckmembran der Piezometer beim Durchfahren der Tragschicht und des aufgespülten Sandes vor unzulässigen Beanspruchungen zu schützen, wurde vorab eine Drucksondierung bis etwa 1 m über Endteufe niedergebracht, um dann in einem zweiten Arbeitsschritt den Piezometer von diesem Bohrloch aus mit geringem Widerstand den verbleibenden Meter in den Ton einzudrücken. Wegen der großen Festigkeiten in der Tragschicht, vor allem im Bereich von Planumsverbesserungen, meist mit Kies, konnten die Bohrlöcher mit dem Drucksondiergestänge nicht ohne zusätzliche Auflockerungsbohrungen abgeteufelt werden. Deshalb wurde ab der zweiten Installationsphase auf den Einsatz eines relativ kostenintensiven Drucksondierungs-Geräts verzichtet. Der Einbau erfolgte nun mit einem einfachen und leichten Bohrgerät, mit dem die Tragschicht und die Sandschicht mit einer Schnecke aufgebohrt und das Bohrloch temporär mit einer Verrohrung stabilisiert wurde. Im Schutze der Verrohrung wurde der breiig-weiche Ton bis 2 m über geplanter Einbautiefe erbohrt und der Piezometer

Einzigartige Präzision



Leica Prismen garantieren höchste Ziel- und Streckenmessgenauigkeit. Die optisch-mechanische Fertigung der Präzisionsprismen mit **0,3mm Zentriergenauigkeit** liefert höchste Koordinatengenauigkeit.

www.leica-geosystems.de

when it has to be right

Leica
Geosystems



auf den letzten 2 m mit dem Bohrgestänge eingedrückt. Mit dieser Vorgehensweise konnten im Mittel etwa vier Piezometer pro Schicht und Gerät installiert werden. Die erforderliche Verkabelung zum Datenlogger erfolgte in den Gräben der ‚Settlement Profiler‘. Nach Einbau und Verkabelung wurden nur an einem einzigen Piezometer unbrauchbare Messergebnisse aufgezeichnet, die wohl auf Probleme in der Verkabelung zurückzuführen sind, während alle anderen Porenwasserdruckgeber verlässliche und plausible Messwerte liefern. Die Ausfallrate liegt damit unter 1 %. Die Messwerte belegen, dass die aus dem Einbau resultierenden Auswirkungen, überwiegend aus dem Eindringen resultierenden relativen Porenwasserüberdrücke, bereits kurz nach dem Einbau, meist bereits innerhalb einer Woche, abgebaut waren und die Geber in der Folgezeit stabile Werte liefern.

Automatische Setzungsmesszellen und „Settlement Profiler“

Beide Messsysteme wurden in einem rund 40 cm flachen Graben nach Fertigstellung der Tragschicht in den Lagerflächen eingebaut. An den Enden, jeweils randlich des Fahrweges der Stacker/ Reclaimer wurden Festpunkte in Form von Fertigteilplatten installiert, die sowohl die Rohrenden des ‚Settlement Profilers‘ fixieren, also die Auflager für die manuelle Messung der ‚Settlement Profiler‘ darstellen, als auch der Befestigung für die hydraulischen Höhenbezugspunkte der Setzungsmesszellen dienen und zudem als geodätische Messpunkte im jeweiligen Mess-Querschnitt genutzt wurden. Für die händischen Messungen in den ‚Settlement Profilern‘ ergab sich bei den eingebauten Messlängen von rund 50 m und 90 m ein Zeitbedarf von etwa 30 min bzw. 60 min. Bei den bis dato durchgeführten Messungen in bislang weitgehend unbelasteten Flächen wurden Messgenauigkeiten von etwa ± 5 cm erreicht. Alle installierten Messquerschnitte funktionieren nach dem Einbau ein-

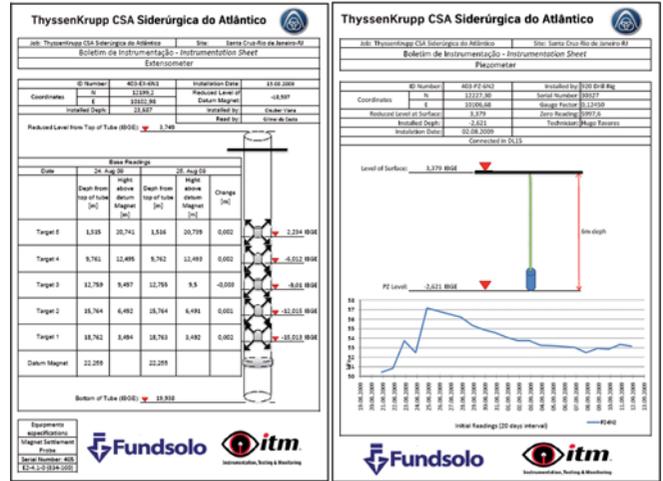


Bild 15: Einbaudokumentation eines Extensometers und eines Piezometers

wandfrei, nur bei einem Messquerschnitt war das Messrohr blockiert und konnte daher nicht über die gesamte Strecke befahren werden. Ob sich die erwarteten großen Setzungsdifferenzen zwischen dem Zentrum der Halden und deren Rändern auf die Messgenauigkeit oder gar die Messdurchführung auswirken, muss im Zuge der Inbetriebnahme der Lagerflächen noch näher beobachtet werden. In den wenigen bereits belasteten Messquerschnitten im Kohlelager (Kapitel 5) konnten maximale Setzungen bzw. Setzungsdifferenzen von etwa 80 cm vom installierten Messrohr problemlos aufgenommen werden. Keiner der installierten automatischen Setzungsmessgeber wurde bislang durch Lagergut überschüttet, so dass bislang noch keine Erfahrungen unter Last vorliegen. Durch das zur Atmosphäre offene hydraulische System der Sensoren ergaben sich bei der Auswertung bedingt durch die Abhängigkeit der Messwerte vom Luftdruck zu-

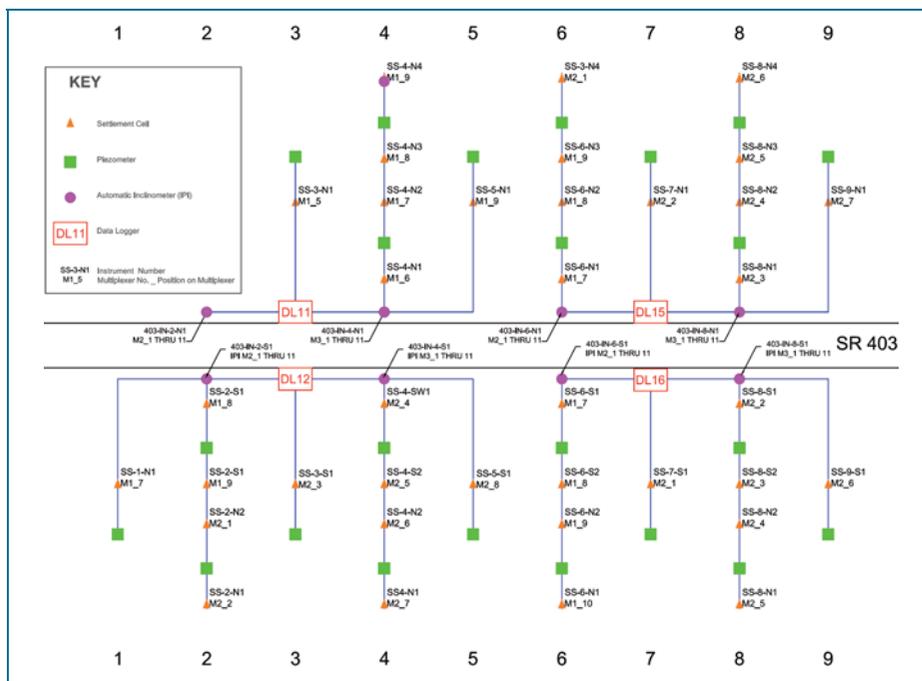


Bild 16: Verkabelung und Datenerfassung der Messgeber entlang Runway SR 403



Bild 17: Settlement-Profiler Endplatte und Festpunkt mit Ausgleichsbehälter für Setzungsmesspunkte (links) sowie Datenlogger mit autarker Stromversorgung über Solarzellen und Funkmodul

nächst Schwierigkeiten. Alle Messwerte müssen um die täglichen Luftdruckschwankungen bereinigt werden. Hierzu wurde ein gesonderter Sensor für kontinuierliche Luftdruck-Messungen installiert. Trotz der Bereinigung zeigen die Messgeber weiterhin periodisch auftretende

Schwankungen, die die Messgenauigkeit des Systems auf etwa ± 5 cm begrenzen. Einige Messgeber zeigen sogar deutlich größere Schwankungen der Messwerte (bis 20 cm). An der Bereinigung dieser bisher nicht restlos nachvollziehbaren Schwankungen wird derzeit gearbeitet. Hierbei werden z. B. lokale Schwankungen im atmosphärischen Druck und der Einfluss nicht ausreichend entlüfteter Messflüssigkeit untersucht.

Inklinometer und Extensometer

Die Installation beider Messgeberarten erfolgte im Spülbohrverfahren mit Verrohrung. Im Hinblick auf die schwer zu spülenden Tragschichten und die im Vorfeld realisierten Baugrundverbesserungsmaßnahmen, also die Rüttelstopfsäulen und die geotextilmantelten Sand-säulen, wurden die Bohrungen bis in eine Tiefe von rund 10 m mit einer Hohlbohrschnecke abgeteufelt. Extensometer und Inklinometer wurden bis in eine Tiefe von rund 25 m in die anstehenden mitteldicht bis dicht gelagerten Sande geführt.

Zur Realisierung repräsentativer Messergebnisse galt es, für die Inklinometer eine Bohrlochverfüllung zu wählen, deren Steifigkeit auf die Verformungseigenschaften der anstehenden Bodenschichten abgestimmt ist. Die Bohrlochverfüllung erfolgte daher durchgängig mit einer Zement-Bentonit Mischung mit einem Mischungsverhältnis von 25 kg Wasser / 5 kg Zement / 1 kg Bentonit. Mit dieser Mischung wurden an vorab hergestellten Probekörpern mit dem Penetrometer undrännierte Scherfestigkeiten zwischen $c_u = 25$ kN/m² und $c_u = 40$ kN/m² nachgewiesen.

Wegen der zu erwartenden großen Setzungen von bis zu 1,5 m und der im Vorfeld festgestellten Probleme mit Mehrfachstangen-Extensometern (Glasfieberstäbe) wurden zur tiefenabhängigen Erfassungen von Setzungen entsprechend der Schichtung ringförmige Magnete an einem PVC-Rohr eingebaut. Die Verankerung der Magnete erfolgte über einen Spreizmechanismus der die Lage des

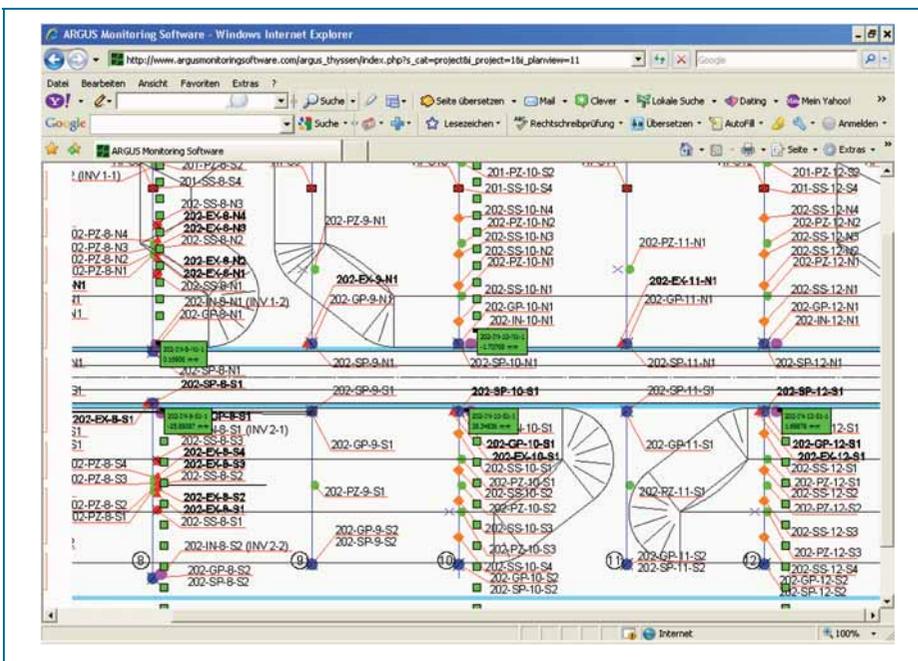


Bild 18: Internetbasierte Messwertvisualisierung: Ausschnitt aus dem Lageplan (Fahrgasse mit anschließenden Halden) mit Messgeber-Nummerierung

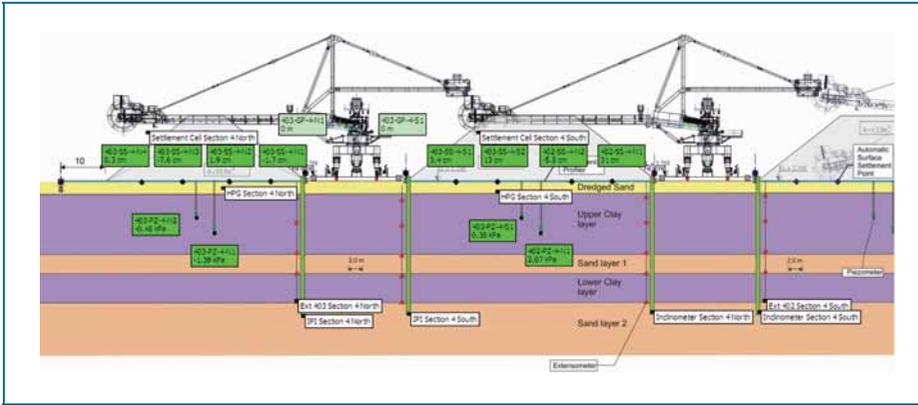


Bild 19: Internetbasierte Messwertvisualisierung: Exemplarische Darstellung eines Messquerschnitts

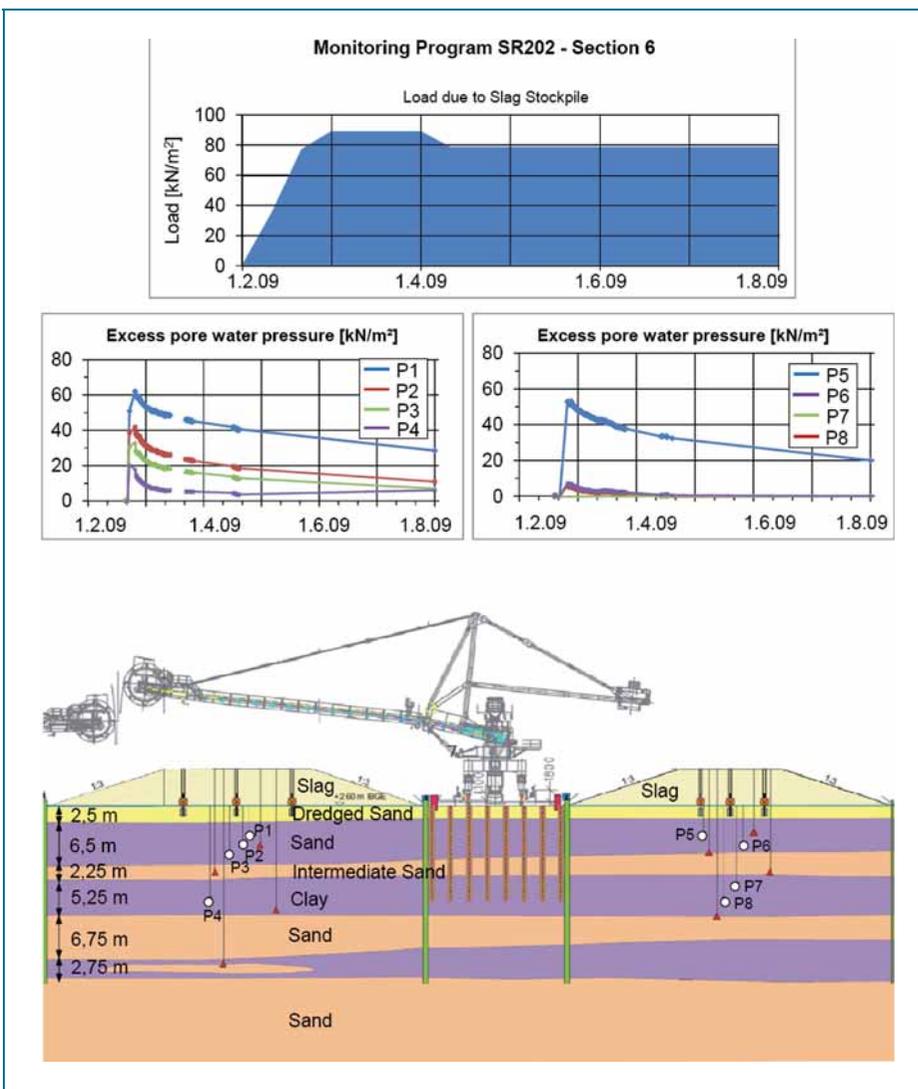


Bild 20: Erste Messergebnisse im Kohlelager · Messquerschnitt 6

Messgebers im Bohrloch fixiert. Messungen werden durch Abteufen eines Signagebers, geführt an einem Maßband mit Millimeterteilung ausgeführt. Damit kann die Tiefe der einzelnen Messgeber bezogen auf die Rohroberkante festgestellt werden. Absolutsetzungen an der Oberfläche, werden über den Bezug auf den am Bohrlochfuß angebrachten Magnet rechnerisch ermittelt. Anfängliche Schwierigkeiten bei der Durchführung der Messungen führten zu Abweichungen von bis zu 30 mm zwischen in kurzen Zeitabständen durchgeführten

Folgemessungen. Dies konnte jedoch durch Schulung des Messpersonals auf eine Maß von etwa 5 mm reduziert werden.

Einbaudokumentation

Für alle Messgeber wurden Einbaudokumentationen mit den maßgeblichen Daten zum Messgeber, den Einbaudaten sowie der zugehörigen Nullmessung erstellt. Für manuell auszulesende Messgeber wird über die Einbau-

dokumentation gleichzeitig die Reproduzierbarkeit der Nullmessung durch mindestens 2 Messreihen dokumentiert.

Für automatisch auszulesende Messgeber wurden die Messwerte des ersten Messzeitraumes bis zum Erreichen eines stabilen Messwertes und damit vom Einbau unbeeinflusster Messwerte dokumentiert. Beispielhaft sind die Einbaudokumentationen eines Extensometers und eines Piezometers in Bild 15 dargestellt.

Messwerverfassung und Datenaufbereitung

An die Messwerverfassung waren im Hinblick auf den Umstand, dass die Messgeber auf einer Fläche mit einer Ausdehnung von etwa 600 m mal 800 m verteilt sind, die zudem durch fünf Fahrwege der schienengeführten Stacker/Reclaimer zum Ein- und Ausstapeln der zu lagernden Rohstoffe und Förderbandanlagen in Längsrichtung unterteilt wird, besondere Anforderungen gestellt. Unter Berücksichtigung dieser geometrischen Vorgabe wurden zunächst alle Messkabel eines Messquerschnittes in den Gräben der ‚Settlement Profiler‘ bis an den Rand der Fahrwege der Stacker/Reclaimer geführt und dort an dezentral aufgestellten Datenloggern gesammelt (Bild 16). Die Stromversorgung der Datenlogger erfolgt netzunabhängig und völlig autark über Solaranlagen mit Akkupuffer. Im Hinblick auf die extremen Umwelteinflüsse wurden Datenlogger und Akku in aufgeständerten, spritzwasser- und staubdichten Stahlgehäusen untergebracht, die am Rand der Fahrwege aufgebaut wurden (Bild 17).

Das Auslesen der Datalogger erfolgt ‚wireless‘ von einem am östlichen Rand der Lagerfläche platzierten Server. Da eine stabile Funkverbindung nur über eine hindernisfreie Strecke von rund 300 m erreicht werden kann, ist ein direktes Auslesen aller Datenlogger vom Standort des zentralen Servers aus nicht möglich und erfolgt deshalb über die Funkstationen dazwischen liegender Datenlogger. Dabei werden die weitgehend barrierefreien Fahrwege der Stacker/Reclaimer genutzt, da die bis zu 13 m hohen Halden einen direkten Funkkontakt unmöglich machen. Dort wo eine direkte Funkverbindung über benachbarte Datenlogger nicht möglich war, wurden gesonderte Funkstationen dazwischengeschaltet.

Die erfassten Daten aus den Messungen an den manuell zu messenden Inklinometern, Settlement Profilern und Extensometer, werden entweder direkt aus den zur Messung genutzten PDA-Geräten oder über vorgefertigte Datenmasken in den Server aufgespielt und von dort zusammen mit den automatischen Messgebern in die datenverarbeitende Software auf einer Internetplattform übergeben.

Die internetbasierte Visualisierungsplattform (‘ARGUS’) mit einer projektspezifisch optimierten Struktur und Oberfläche stellt alle erfassten und verarbeiteten Daten entweder in Messquerschnitten, im Grundriss oder als Messkurven dar. Bei der Gestaltung der Messwertdarstellung wurde vor allem darauf geachtet, dass eine ganzheitliche Darstellung eine schnelle Erfassung der relevanten Messwerte ermöglicht, um so schnell auf unvorhergesehene Mechanismen durch Haldenregulierungen oder Maßnahmen am Gleiskörper reagieren zu können. Dabei hilft auch die vom Status abhängige farbliche Markierung der einzelnen Messwerte, die es ermöglicht, das Überschreiten definierter Grenzwerte anzuzeigen (Bild 18 und 19).

Beste Verarbeitung



Das Leica Qualitätsmanagement sichert eine Fertigung nach höchsten Ansprüchen. Die Präzisionsprismen werden mit einer **Genauigkeit von 1"** geschliffen und garantieren hohe Reichweiten bei bester Genauigkeit.

www.leica-geosystems.de

when it has to be **right**

Leica
Geosystems

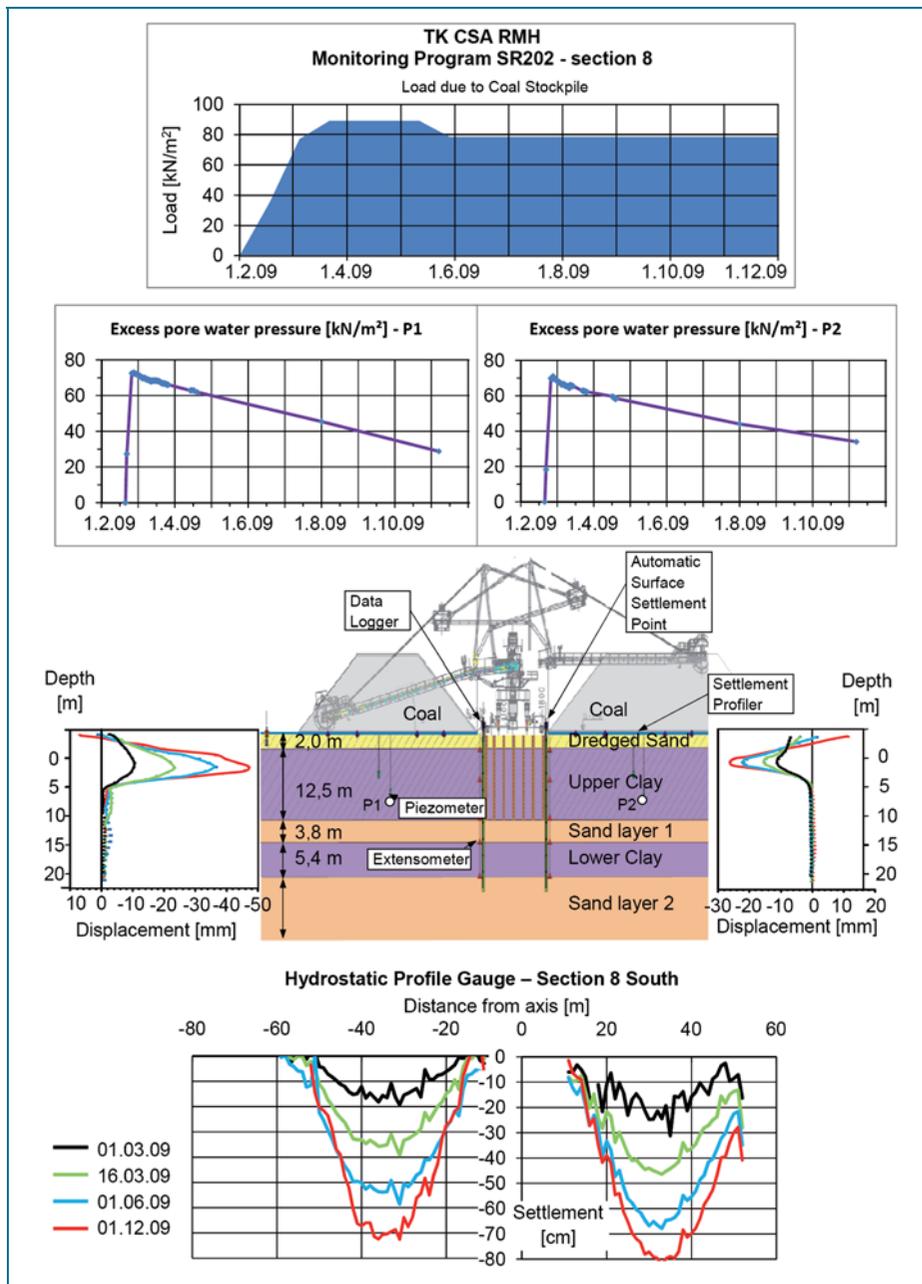


Bild 21: Erste Messergebnisse im Kohlelager · Messquerschnitt 8

5.5 Messergebnisse

Im Februar 2009 wurde in einem Teilbereich des Kohlelagers beidseitig des Runways 403 in einem Test Kohle eingehaldet. Die resultierende Sohlspannung an der Haldenbasis beträgt rund 80 kN/m^2 . In den Bildern 20 und 21 sind die über einen Zeitraum von einem halben Jahr nach Einhaltung bei konstanter Einwirkung aufgezeichneten Messergebnisse für die Messquerschnitte 6 und 8 ausgewertet. Da der Messquerschnitt 6 (Bild 20) in einer vorlaufenden Probeschüttung bereits beansprucht wurde, stellt die Aufhaldung im Februar 2009 eine wiederholte Belastung dar, während die Aufhaldung im Messquerschnitt 8 (Bild 21) zu einer Erstbelastung führt. Aus den aufgetragenen zeitvarianten Verläufen der automatischen und händischen Messungen ergeben sich folgende Erkenntnisse:

- Bei der Erstbelastung entstehen im Oberen Ton in einer Tiefe von 6 m bis 10 m unter Lagerfläche trotz der eingebrachten Vertikaldräns relative Porenwasserüberdrücke ($\Delta u = 70\text{-}75 \text{ kN/m}^2$) in einer Größenordnung von rund 90 % der aufgebracht Oberflächenlast, die sich innerhalb eines Zeitraums von 6 Monaten um rund 50 % auf $\Delta u = 30\text{-}35 \text{ kN/m}^2$ abbauen (Bild 21).
- Bei einer Wiederbelastung reduzieren sich die induzierten maximalen relativen Porenwasserüberdrücke ($\Delta u = 55\text{-}60 \text{ kN/m}^2$) auf rund 75 % der aufgebracht Oberflächenlast. Die Porenwasserüberdrücke bauen sich innerhalb von 6 Monaten ebenfalls auf die Hälfte ihres initialen Wertes ab (Bild 20).
- Die Ergebnisse der Messungen mit den Settlement Profilern zeigen, dass sich unter den Halden im sechsmonatigen Beobachtungszeitraum Setzungsmulden mit Setzungsbeträgen von rund 70 cm bis 80 cm in Hal-

denmitte und rund 10 cm im Haldenfußbereich ausbilden (Bild 21).

- Die am Rand der Runways vor dem Haldenfuß mit den Inklinometern über die Tiefe gemessenen horizontalen Verschiebungen im Baugrund konzentrieren sich ausschließlich auf die ersten Meter im Oberen Ton und erreichen hier Größtwerte von rund 2,5 cm bis 4,5 cm, liegen also in einer für die Gebrauchstauglichkeit der Runways unkritischen Größenordnung (Bild 21).

6 Resümee und Ausblick

Die Realisierung des Rohstofflagers für das neue Hüttenwerk der ThyssenKrupp AG war aus geotechnischer Sicht bedingt durch die extrem ungünstigen Baugrund- und Grundwasserverhältnisse auf der einen Seite und die hohen Anforderungen, die sich aus dem hohen Gewicht (750 t) der Stacker/Reclaimer und den Ansprüchen an die Lagegenauigkeit der Runways andererseits ergaben, eine große Herausforderung. Das entwickelte Konzept einer duktilen Lösung mit Baugrundverbesserungsmaßnahmen und einem justierbaren Schiene-Schwelle-Schotter-System für die Runways der schienengebundenen Großbagger stellt unter den gegebenen Randbedingungen im Vergleich zu anderen Lösungsansätzen mit Abstand ein technisches und ökonomisches Optimum dar. An das Bemessungskonzept waren im Hinblick auf die numerische Prognose von Verformungen, Beanspruchungen und Standsicherheiten unter Berücksichtigung des durch ausgeprägte Konsolidierungs- und Kriechprozesse bedingten, komplexen Materialverhaltens des Oberen Tons hohe Anforderungen zu stellen.

Die nachhaltigen Optimierungen, die im Zuge des Planungsprozesses bei dem Design von Baugrundverbesserungen und Dimensionierung der Geotextil- und Geogitter-Bewehrung der Tragschichten erzielt werden konnten und die angesichts der Knappheit an Arbeitsmitteln und Werkstoffen erst die fristgerechte Fertigstellung des Stock Yards ermöglichten, bedingen aber auch, dass nicht alle Lagerflächen von Beginn an vollumfänglich bis zur maximalen Haldenhöhe zur Verfügung stehen. Vielmehr werden der zeitvariante Abbau der relativen Porenwasserüberdrücke und der zeitvariante Zuwachs der effektiven Scherfestigkeit des Oberen Tons rechnerisch in Anspruch genommen.

Die Anwendung der Beobachtungsmethode war daher von Beginn an zentraler Bestandteil des Bemessungs- und Sicherheitskonzeptes. Das entwickelte Messkonzept wird in den ersten ein bis zwei Jahren der Betriebsphase das maßgebende Werkzeug zur Steuerung der Einhaltungs- und Aushaltungsabläufe sein. Damit realisiert sich hier der seltene Fall, dass eine bauliche und betriebliche Einrichtung nicht nur in Abhängigkeit von den messtechnisch aufgezeichneten Reaktionen des Baugrundes errichtet, sondern auch betrieben werden wird.

Das Messkonzept konzentriert sich dabei auf den in den numerischen Prognosen als ‚Leitparameter‘ identifizierten Messgrößen wie Porenwasserdruck und Verformungen des Oberen Tons. Das Konzept entspricht hinsichtlich der Messgebarung und der Kombination von händi-

schon und automatischen Messungen auch durch die internetbasierte Messwertauswertung den Anforderungen an eine zügige Visualisierung der Messergebnisse. Besondere Anforderungen ergaben sich aus den extrem widrigen Umwelteinflüssen und aus der großen räumlichen Ausdehnung des Stock Yards mit durch die Halden variierenden Bezugsachsen.

Die ersten Messergebnisse belegen die Funktionalität des entwickelten Messkonzeptes, aber auch die Übereinstimmung der rechnerischen Prognosen mit den bis dato beobachteten Reaktionen des Oberen Tons.

Literatur

- [1] ALEXIEW, D., MOORMANN, CHR., JUD, H. (2009) *Optimierter Einsatz von Geokunststoffen für die Gründung eines 380.000 m² großen Rohstofflagers in Brasilien*. 11. Tagung über Kunststoffe in der Geotechnik, FS-KGEO 2009, Technische Universität München
- [2] ALEXIEW, D., MOORMANN, CHR. (2009) *Optimized geosynthetic solutions for a large stock yard on soft soils*. Proc. 2nd International Conference ‚Geosynthetics Middle East‘ - Waterproofing Systems and Reinforced Structures, Dubai/UAE., 10-11 November 2009
- [3] GLOCKNER, A., IGELBÜSCHER, A., MOORMANN, CHR., JUD, H., KUNZMANN, M. (2008) *Bau eines neuen Stahlwerks auf weichen Sedimentböden nahe Rio de Janeiro - Geotechnische Herausforderungen in ungewöhnlichen Dimensionen*. Vorträge der 30. Baugrundtagung 2008 in Dortmund, 24.-27.09.2008, Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Essen, 199-206
- [4] MACHADO, R., DEMANGE, M., MCREATH, I. and MOUTTE, J. (2000) *Crustal Zoning of Neoproterozoic Pre-Collisional Granitoids*. The Paraíba do Sul Belt, Rio de Janeiro, Brazil in Revista Brasileira de Geociências 30 (2000/1): 070-073.
- [5] WEGNER, R., CANDEIAS, M., MOORMANN, CHR., JUD, H., GLOCKNER, A. (2009) *Soil improvement by stone columns for the ore storage yard at the Rio de Janeiro steel plant in soft alluvial deposits*. Proc. 17th Int. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ICSMGE, Alexandria, Egypt, 5-9 October 2009

Anschriften der Verfasser:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. CHRISTIAN MOORMANN
IGS · Institut für Geotechnik
Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 35 · 70569 Stuttgart
Tel.: 0711/685-64237, Fax: 0711/685-62439
christian.moormann@igs.uni-stuttgart.de
zuvor: SMOLTCZYK & Partner GmbH

Dr.-Ing. ANDREAS GLOCKNER
Uhde GmbH
Friedrich-Uhde-Straße 15 · 44141 Dortmund
Tel.: 0231/547-0, Fax: 0231/547-3032
andreas.glockner@thyssenkrupp.com