

# Optimierter Einsatz von Geokunststoffen für die Gründung eines 380.000 m<sup>2</sup> großen Rohstofflagers in Brasilien

D. Alexiew

Huesker Synthetic GmbH, Gescher

Ch. Moormann, H. Jud

Smolczyk & Partner GmbH, Stuttgart

**KURZFASSUNG:** Die ThyssenKrupp Steel AG errichtet derzeit auf einem 9 km<sup>2</sup> großen Baufeld, einem Schwemmland in der Bucht von Sepetiba im Bundesstaat Rio de Janeiro, ein neues Hüttenwerk mit einer Jahresproduktion von 5 Mio. t Rohstahlbrammen. Die tiefreichenden bindigen Sedimentböden breiiger bis weicher Konsistenz und ein in Höhe der Geländeoberfläche liegender Grundwasserspiegel sind für Anforderungen der Schwerindustrie denkbar ungünstig.

Neben anderen hoch belasteten Bauwerken war auch die Gründung der Lagerflächen für Kohle, Koks, Erz und Additive (Rohstofflager, Stock Yard) eine besondere geotechnische Herausforderung.

Die Fläche des Rohstofflagers beträgt ca. 380.000 m<sup>2</sup> und beinhaltet auch die empfindlichen Gleiswege (Runways) für die sogenannten Stacker/Reclaimer, große Aufnahme- und Absetzgeräte, die im Tagebau eingesetzten Großbaggern ähneln. Die aus den Halden resultierenden Flächenlasten liegen zwischen 100 kN/m<sup>2</sup> und 340 kN/m<sup>2</sup> und ließen auf Grund der sehr ungünstigen Baugrundverhältnisse ohne Bodenverbesserungsmaßnahmen rechnerisch Setzungen von bis zu 4 m erwarten.

Das entwickelte Gründungskonzept besteht aus Bodenverbesserungskomponenten (Geokunststoffummantelte Sandsäulen (GEC), Schottersäulen, Streifendrängs) und zweilagig, orthogonal verlegter, hochfester dehnsteifer Horizontalbewehrung in den Tragschichten unter den Halden und den Runways. Das entwickelte Lösungskonzept berücksichtigt nicht nur theoretische Überlegungen und Ansätze zur technischen und ökonomischen Optimierung, sondern auch den extrem engen Zeitrahmen und die bautechnischen Möglichkeiten in Brasilien.

Der Beitrag behandelt schwerpunktmäßig die große Lagerfläche für Kohle/Koks. Die Stabilitätsberechnungen und die Verformungsabschätzungen erfolgten mit analytischen und numerischen Ansätzen. Dabei mussten zum Teil neue oder modifizierte analytische Verfahren entwickelt werden, um spezifische Belastungssituationen oder Bruchmodi zu erfassen.

Es wird über die geotechnischen Rahmenbedingungen, Lagergeometrien, Belastungen und projektspezifische Besonderheiten berichtet. Lösungsansätze, Rechenverfahren und Ergebnisse werden ebenso kurz dargestellt, wie die endgültige Wahl von Lösungen und korrespondierenden Geokunststoffen. Schließlich wird kurz über die bis jetzt vorliegenden Ausführungserfahrungen und erste Messungen berichtet.

## 1 EINLEITUNG

Als Schlüsselprojekt beim Ausbau ihrer Kapazitäten errichtet die ThyssenKrupp Steel AG derzeit mit einer Investitionssumme von rund 3,7 Mrd. € im Bundesstaat Rio de Janeiro, Brasilien, ein neues integriertes Hüttenwerk mit einer Jahresproduktion von 5 Mio. t Rohstahlbrammen. Bild 1 zeigt als Modell das Thyssen Krupp Stahlwerk, das sich rund 60 km südlich der Millionenmetropole Rio de Janeiro befindet.

Das voll integrierte Hüttenwerk wird auf einem rund 2.000 m mal 4.500 m großen Baufeld an der Bucht von Sepetiba errichtet. Es gliedert sich bezüglich seiner Hauptkomponenten in eine Kokerei, eine Sinteranlage, zwei Hochöfen, das Stahlwerk, ein Kraftwerk, die großen Rohstofflagerflächen sowie umfangreiche Infrastrukturmaßnahmen, zu denen u.a. ein eigener Tiefseehafen und eine Eisenbahnstrecke für Eisenerzzüge zählen. Für ThyssenKrupp Steel ist das neue Hüttenwerk ein Jahrhundertprojekt, dessen Realisierung maßgeblich durch die besonders schwierigen geotechnischen Randbedingungen beeinflusst wird (Bild 1).

Das von zwei Flussläufen begrenzte, nur 0 bis 2 m über dem Meeresspiegel liegende Baufeld war im Ausgangszustand ein Sumpf- und Grasland, dessen Baugrundverhältnisse, tiefreichende bindige fluviale Sedimente und ein in Höhe der Geländeoberfläche liegender Grundwasserspiegel für die Anforderungen der Schwerindustrie mit ihren hohen Bauwerkslasten äußerst ungünstig sind

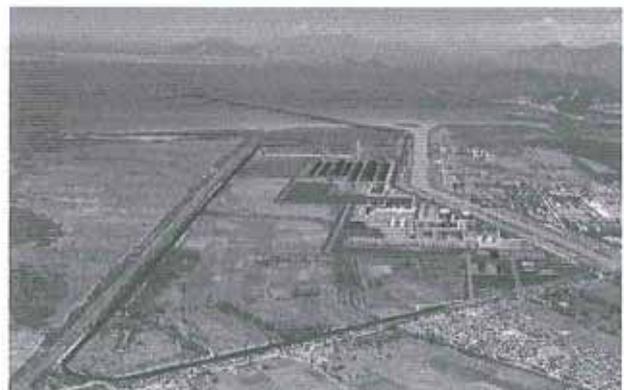


Bild 1. Übersicht des ThyssenKrupp Stahlwerks in der Bucht von Sepetiba; im Hintergrund das Rohstofflager (Stock Yard)

und daher hohe Anforderungen an die geotechnischen Konzepte für Gründungen, Baugruben und die Vorbereitung von Lager- und Verkehrsflächen stellten. Nachfolgend werden ausgewählte, geotechnisch besonders anspruchsvolle Aspekte vorgestellt, bei denen der Schwerpunkt bei der optimierten Anwendung von Geokunststoffen liegt. Eine erweiterte Beschreibung des Projektes insgesamt findet sich in (Glockner et al. 2008).

## 2 BAUGRUNDSITUATION

Die Baugrundsituation in der Bucht von Sepetiba ist geprägt durch mächtige fluviatile und fluviomarine quartäre Sedimente, die als unregelmäßige Wechselfolge von Sanden, Schluffen und Tonen, fluviatilen Kiesen und jüngeren Mangroven-Sedimenten abgelagert wurden. Sie werden in 30 m bis 50 m Tiefe unterlagert vom präkambrischen Festgestein, das je nach Ausgangsgestein auf den oberen 1 m bis 5 m verwittert ist.

Am Standort des neuen Hüttenwerkes lassen sich die quartären Sedimente weitgehend gliedern in einen 12 m bis 15 m, lokal auch über 17 m mächtigen Oberen Ton vorwiegend breiiger und weicher Konsistenz, der meist erhöhte organische Anteile besitzt. In den Oberen Ton ist verbreitet zwischen 6 m und 9 m unter Gelände eine geringmächtige, schluffige Sandlage eingelagert. Unterlagert wird der Obere Ton von einer ersten, meist 4 m bis 10 m mächtigen, eng gestuften Mittel- bis Grobsandlage mitteldichter bis dichter Lagerung, auf die in der Regel wieder eine bindige Zwischenschicht, der Untere Ton, mit einer meist steifen Konsistenz in einer Schichtdicke von 2 m bis 8 m folgt. Zur Tiefe hin überwiegen dann bis zur Festgesteinsoberfläche zunehmend dicht gelagerte, feinkornarme, teils kiesige Sande mit eingeschalteten Schlufflagen (Bild 2).

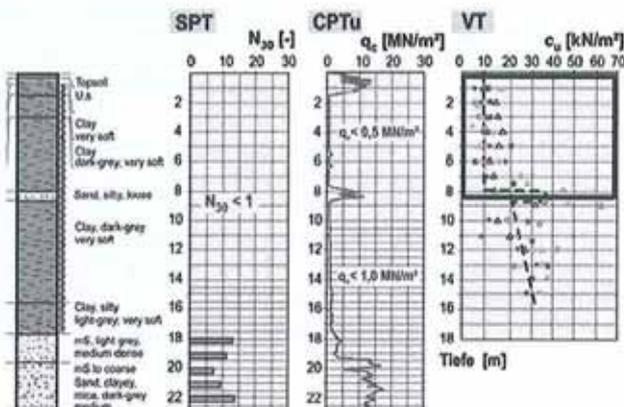


Bild 2. Typische bodenmechanische Situation

Das Grundwasser steht überwiegend in Höhe der ursprünglichen Geländeoberfläche an. Bei heftigen Regenfällen und hohen Grundwasserständen wird das Gelände bereichsweise überflutet.

Im Ausgangszustand war das Baufeld bedingt durch die breiig-weichen Oberen Tone und den hohen Grundwasserstand nicht befahrbar und nur eingeschränkt begehbar. Es wurden daher rund 3,5 Mio. m<sup>3</sup> Sand, der im Rahmen von Nassbaggerarbeiten für den Bau des neuen Tiefseehafens in der Bucht von Sepetiba gewonnen wurde, flächig in einer Mächtigkeit von 1,5 m bis 2,0 m aufgespült. Nach Abfluss des Meerwassers stand eine weitgehend mitteldicht gelagerte Sandschicht als Bau- und Arbeitsebene zur Verfügung. Da der ausgeprägt plastische Obere Ton mit seinen insbesondere auf den obersten ca. 8 m extrem geringen Scherfestigkeiten und Steifigkeiten (auf Bild 2 umrahmt) für alle baulichen Maßnahmen von maßgebender Bedeutung ist, sollen dessen bodenmechanischen Eigenschaften näher betrachtet werden. Der Obere Ton ist weitgehend normalkonsolidiert und hat folgende typische Kennwerte: natürlicher Wassergehalt  $w_n = 95\%$ , Fließgrenze  $w_L = 112\%$ , Porengehalt  $e_0 = 1,5-3,5$ , totale Dichte  $\rho = 1,4 \text{ t/m}^3$  und Kompressionsbeiwert  $C_c = 0,4-1,8$ . Der Steifemodul für Erstbelastung kann spannungsabhängig mit dem Ansatz  $E_{s,E} = (1+e_0) \cdot 2,3 / C_c \cdot \sigma'_v$  abgeschätzt

werden zu  $E_{s,E} [\text{MN/m}^2] = 0,1 + 0,06 \cdot t$  mit  $t$ : Tiefe in [m]. Die undrained Scherfestigkeit im oberen, kritischen Bereich des Oberen Tons war mit  $c_u = 5 \text{ kN/m}^2$  und  $15 \text{ kN/m}^2$  sehr gering.

## 3 ROHSTOFFLAGER (STOCK YARD)

Besondere Anforderungen ergaben sich im Bereich des 'Stock Yard', des 380.000 m<sup>2</sup> großen Rohstofflagers für Kohle, Eisenerz und Additive, dessen Betrieb durch rasche Aufhaldungs- und Abbauvorgänge der bis zu 13 m hohen Halden geprägt ist. Auf den bis zu 800 m langen und 100 m breiten 'Beeten' ergeben sich dabei Flächenlasten zwischen 100 kN/m<sup>2</sup> (Kohle/Koks) und 340 kN/m<sup>2</sup> (Eisenerz), die ohne besondere Maßnahmen rechnerisch Setzungen von bis zu 4 m erwarten ließen. Dahingegen stellen die in Fahrgassen (Runways, RWs) zwischen den Halden operierenden Stacker/Reclaimer (S/R), große schienengeführte Bagger mit 50 m langen Auslegern und einem Gewicht von ca. 750 Tonnen, höchste Anforderungen an die Lagegenauigkeit der Runways und ihre uneingeschränkte Verfügbarkeit (Bild 3).

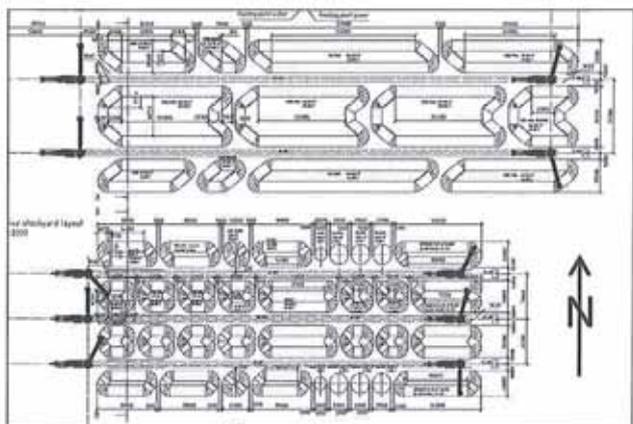


Bild 3. Rohstofflager (Stock Yard) mit Lagerflächen für Kohle/Koks im Norden und für Erz/Additive im Süden, Runways verlaufend in Ost-West-Richtung

Als Ergebnis einer Variantenuntersuchung und eines intensiven 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 S/R entwickelt. In Abhängigkeit von den bereichsweise unterschiedlichen Anforderungen wurden angepasste Lösungen entwickelt: während für die gesamte Fläche des Erz/Additive-Lagers eine Baugrundverbesserung mittels Rüttelstopfsäulen erfolgt, werden im Kohle/Koks-Lager die Halden-Beete mit Vertikaldräns in Verbindung mit einer Vorschüttung vorbelastet und hier die Runway-Bereiche mit geotextilummantelten Sandsäulen ertüchtigt. Bei allen Lösungen stellt der Einsatz von Geokunststoffen ein zentrales Element dar. Nachfolgend wird schwerpunktmäßig das Kohle/Koks-Lager betrachtet.

### 3.1 Gründung der Kohle/Koks-Halden

Zentrale Anforderungen an das Gründungskonzept für die Halden sind die Gewährleistung der lokalen und globalen Standsicherheit, die Reduktion der Setzungen und Setzungsdifferenzen im Einflussbereich und insbesondere der horizontalen Verformungen („Spreizung“) auf ein vertägliches Maß. Von besonderer Relevanz ist die Redukti-

on der aus den Halden resultierenden horizontalen Verschiebungen im Bereich der Runways, da hohe Anforderungen an die Lagegenauigkeit der Gleise der Stacker/Reclaimer gestellt wurden. Ein Ausfall eines Stacker/Reclaimers auf Grund unzulässig großer Verformungen des Schienenwegs wäre mit weitreichenden Folgen für die Produktion verbunden. Trotz der flexiblen Lösung eines auf einem Schotterbett abgesetzten und damit nachjustierbaren Schienenweges mussten daher die Baugrundverformungen minimiert werden. Die rechnerische Bemessung des Gründungskonzeptes musste zugleich die Spezifika der Rohstofflager-Bewirtschaftung berücksichtigen: die Halden ändern im Zuge der Aufhaldungs- und Materialentnahmeprozesse sowohl ihre Position in den „Haldenbeeten“ als auch ihre Größe und Grundrissgeometrie innerhalb teilweise sehr kurzer Zeiträume. Bei den Abbauvorgängen ergeben sich temporär sehr steile Böschungen. Folglich musste bei der rechnerischen Untersuchung der Grenzzustände GZ 1 (Standicherheit) und GZ 2 (Gebrauchstauglichkeit) eine große Anzahl von Bemessungssituationen betrachtet werden. Durch die wechselnde Haldengeometrie mussten die Nachweise auch für zwei Hauptrichtungen geführt werden: senkrecht zu den Runways und parallel dazu.

Die Berechnungen erwiesen sich nicht nur aufgrund dieser Tatsache als sehr komplex. Auf Grund der Möglichkeiten, aber auch Grenzen der jeweiligen Modellbildung kamen parallel sowohl analytische als auch numerische Berechnungsmodelle (FEM) zum Einsatz. Die analytischen Berechnungen und Nachweise erfolgten vorwiegend bei HUESKER in Gescher in Abstimmung mit dem federführenden Ingenieurbüro Smolczyk & Partner (S&P), Stuttgart, die FE-Analysen bei S&P.

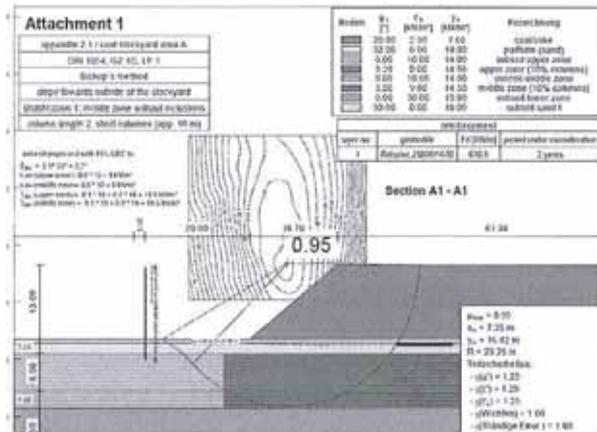


Bild 4. Beispiel einer Standsicherheitsberechnung (0,95 ist der Ausnutzungsgrad nach DIN 1054:2005-01)

Die Standsicherheit der Halden wurde unter Berücksichtigung von Arbeitsebene, Baugrundsichtung und S/R-Runway zunächst nach dem BISHOP-Verfahren und teilweise zusätzlich mit der Blockgleitmethode untersucht. Bild 4 zeigt ein Beispiel.

Die numerischen Berechnungen wurden mit einem voll gekoppelten Finite-Element Algorithmus durchgeführt, der die Spannungs-Verformungsanalyse mit einer hydraulischen Strömungsberechnung koppelt. Dabei werden die beiden Grundgleichungen für das Kräftegleichgewicht der festen Phase und die Kontinuitätsgleichung für das strömende Porenwasser integral formuliert, wodurch die Abfolge der Auf- und Abhaldungsvorgänge, die dabei auftretende Porenwasserdruckentwicklung mit den zeitvarianten Konsolidierungsprozessen zutreffend abgebildet werden (Bild 5).

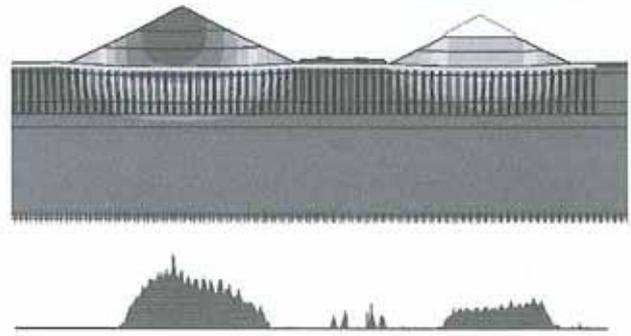


Bild 5. Beispiel der gekoppelten numerischen Berechnungen mit Prognose der Porenwasserdruckentwicklung (oben) und der Kräfte in der geotextilen Horizontalbewehrung (unten)

Aus den Analysen ergab sich in allen Fällen die Notwendigkeit, in der Sandplattform unter den Halden Geokunststoffbewehrungen vorzusehen und zwar orthogonal in beide Richtungen (Nord-Süd und Ost-West).

Die dabei erforderlichen Bemessungsfestigkeiten der Geokunststoffbewehrungen variierten je nach Bemessungssituation und Richtung deutlich, waren aber insgesamt stets vergleichsweise hoch. Unter Berücksichtigung der Bemessungsergebnisse bestand eine wesentliche Aufgabe darin, die endgültige Lösung unter Berücksichtigung mehrerer Aspekte zu optimieren: konstruktive, logistische und verlegetechnische Anforderungen inklusive. Es galt, grundsätzlich Überlappungen in den Bewehrungshauptrichtungen zu vermeiden bzw. zu minimieren. Sowohl bei den Berechnungen wie auch bei den konstruktiven Überlegungen spielte der Verbund zwischen den Bewehrungskunststoffen und dem aufgespülten Sand der Arbeitsebene eine wichtige Rolle, wobei das Verbundverhalten bei einem optimierten Geogitter als tendenziell besser zu beurteilen ist als bei einem Gewebe. Auf eine detaillierte Darstellung der endgültigen, optimierten Lösung für die Horizontalbewehrungen unter den Kohle/Koks-Halden soll hier verzichtet werden. Generell sah die konstruktive Lösung folgendermaßen aus: senkrecht zu den Ost-West-Längsachsen der „Haldenbeete“ und den Runways wurde ein Geogewebe vorgesehen, teilweise - dort, wo die rechnerischen Bewehrungsanforderungen dies erlaubten - durchgehend im Bereich der Halden und der S/R-Runways. Darauf folgte eine ca. 15 cm dicke verdichtete Sandzwischenlage, auf die dann parallel zu den Runways eine Geogitterbewehrung folgte.

Zum oben erwähnten entscheidenden Problem der Reduktion von horizontalen Spreiz-/Schubverformungen wurde neben den FE-Berechnungen auch eine auf einem geeigneten analytischen Verfahren basierende Schätzung der Spreizverformung durchgeführt. Dabei wurde eine vereinfachte analytische Methode, die von Alexiew vor längerer Zeit entwickelt wurde, angewendet, über die in einer separaten Veröffentlichung berichtet werden wird. Die Methode erlaubt eine Ermittlung von Spreizspannungen unter den Böschungsbereichen von Dämmen und zwar für beliebige Randbedingungen, Geometrien, Bodeneigenschaften, Belastungen etc. Unter Verwendung des ermittelten Spreizspannungsdiagramms für die Basis der Haldenböschungen lassen sich die erforderlichen Zugkräfte der Geokunststoffbewehrung berechnen. Bild 6 zeigt ein Beispiel eines solchen Zugkraftdiagramms.



Bild 6. Beispiel eines Zugkraftdiagramms in der Basisbewehrung unter einer Halde infolge „Spreizung“

Durch Anwendung der Isochronen der entsprechenden Bewehrung und Integration der Dehnungen wird die für den anschließenden Runway entscheidende, horizontale Verschiebung des Haldenfußes nach außen berechnet („Spreizverschiebung“). Sie beträgt für das in Bild 6 dargestellte Beispiel mit einer starken PVA-Bewehrung (s.u.) ca. 0,30 m. Analytische und numerische Ansätze lieferten dabei vergleichbare Verformungsergebnisse und erlaubten so eine technisch und ökonomische Optimierung der Horizontalbewehrungen. Obwohl die Spreizverschiebungen senkrecht zu den Runways maßgebend sind, sind auch die analogen Verschiebungen in den anderen Richtungen nicht ohne Belang, auch in Anbetracht der rasch wechselnden Ausdehnung und Position der Halden im Betrieb. Im Hinblick auf die strikte Begrenzung dieser Verschiebungen sind Bewehrungen aus hochfestem Polyester nicht mehr dehnsteif genug. Daher wurden Geogewebe und Geogitter aus deutlich dehnsteiferem Polyvinylalkohol (PVA) gewählt (Alexiew et al. 1999). Zur Anwendung kamen die PVA-Geogewebe-Familie „ROBUTEC<sup>RM</sup>“ und die PVA-Geogitter-Familie „FORTRAC<sup>RM</sup>“ mit Kurzzeitfestigkeiten im Bereich von 500 kN/m bis 1600 kN/m. Diese Festigkeiten ergaben sich einerseits aus den Standsicherheitsnachweisen des GZ 1 für die Kohlehalden und andererseits aus den Verformungs-Nachweisen des GZ 2 insbesondere hinsichtlich der horizontalen Bodenbewegungen am Haldenfuß. Bild 7 zeigt eine Teilübersicht des optimierten Konzepts (zum Thema Runways siehe Abschnitt 3.2).

Eine großmaßstäbliche, detailliert messtechnisch überwachte Probeschüttung diente der Validierung des rechnerischen Prognosemodells. Die Messergebnisse des Feldversuches bestätigen die rechnerischen Prognosen, wobei die am Haldenfuß im Boden über die Tiefe gemessenen Horizontalverschiebungen tendenziell geringer sind als rechnerisch vorab ermittelt.

Rückrechnungen belegen, dass dies überwiegend durch ein günstiges Querdehnungsverhalten des in diesem Tiefenbereich anstehenden breiig-weichen Oberen Tons bedingt wird (Bild 8).

Ein zusätzlicher Effekt der Anwendung der dehnsteifen PVA-Bewehrungen war eine Reduktion des Seitendrucks auf die geokunststoffummantelte Säulen (GEC) unter den Runways (siehe Abschnitt 3.2).

Für alle Flächen wurden präzise Verlegepläne ausgearbeitet, einerseits um eine qualitativ hochwertige Ausführung zu ermöglichen und andererseits um dem Bauherrn durch differenziert gefertigte Rollenlängen ohne Überschuss für alle Materialien eine ökonomisch optimale Lösung zu bieten. Trotz sorgfältiger Planung ergaben sich vor Ort standortspezifisch Änderungen der Baugestaltung: so mussten z.B. die Montageflächen (erection areas) für die Stacker/Reclaimer an den Runways früher als zunächst geplant ausgeführt werden.

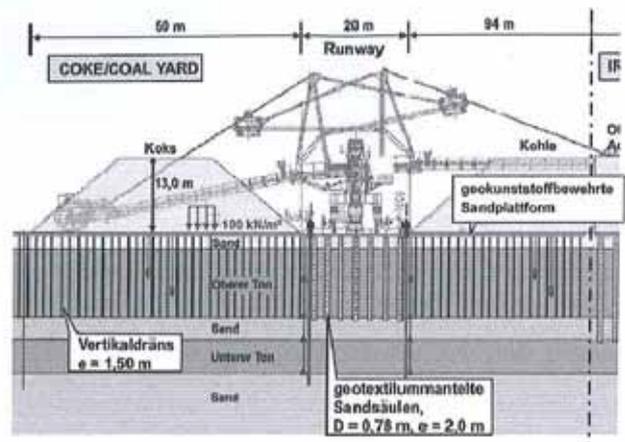


Bild 7. Ausschnitt des Gründungskonzepts für die Kohle/Koks-Halden und die Runways

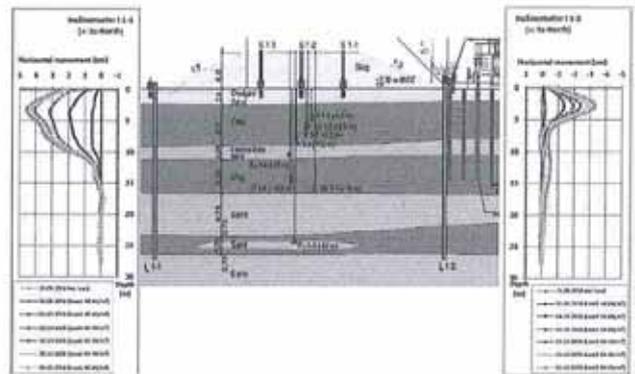


Bild 8. Feldversuch mit gemessenen Horizontalverschiebungen bei einem Konsolidierungsgrad von etwa  $U = 60\%$

Dadurch wurden erneute Überlegungen, umfangreiche Berechnungen und Analysen auch für Teile der „Haldenbeete“ notwendig. Es galt, Bewehrungen aus dem Haldenbereich zu kürzen und durch entsprechend dimensionierte aufgerollte, wartende Bewehrungen aus dem Runway-Bereich zu ersetzen. Auch wenn sich diese Problemstellungen als alles andere als einfach erwiesen, gelang letztlich auch hier eine optimale Lösung.

Im Hinblick auf die Baugrundverbesserung des breiig-weichen Oberen Tons unter den Kohle/Koks-Halden wurden verschiedene Konzepte analysiert. Dabei waren zahlreiche, teilweise kontroverse Faktoren zu berücksichtigen: Wirtschaftlichkeit, Abwägung von Sicherheiten, Risiken und Folgen, Ausführungs- und etwaige Konsolidierungszeiten und - mitentscheidend - Verfügbarkeit und Kapazitäten für die jeweilige Lösung in Brasilien. Letztendlich kommen vertikale Geodrains - soweit logistisch möglich - in Verbindung mit Vorschüttungen zur Anwendung. Da die Konsolidationsprozesse bis zur Inbetriebnahme des Rohstofflagers nicht ausreichen, ist eine qualifizierte geotechnische und messtechnische Betreuung für die Anfangszeiten des Betriebs vorgesehen, die dann die Aufhaltung unter Betrieb in der Fläche und der Höhe so steuert, dass der Zustand des Untergrundes (Porenwasserdruck, Scherfestigkeit etc.) mit den berechneten und nachgewiesenen Zuständen und Belastungssituationen korrespondiert. Es handelt sich also um eine stringente Anwendung der Beobachtungsmethode in der Geotechnik - hier in Kombination mit Geokunststoffen.

Besonderes Augenmerk wurde bei der bis ins Detail geplanten baulichen Ausführung auf die sachgemäße Handhabung und Verlegung der Geokunststoffbewehrung gelegt. Dabei waren die projektspezifischen Faktoren wie der

enorme Zeitdruck, die sehr großen zu bewehrenden Flächen, das beträchtliche Rollengewicht der Geokunststoffe, die große Länge vieler präzise parallel zu verlegender Bahnen, die brasilianische Sonne oder der brasilianische Regen und die mangelnde Erfahrung des Baustellenpersonals zu beachten. Zahlreiche Details, wie die Entladung der Rollen aus den Containern und der Transport über einen denkbar ungünstigen Untergrund, die saubere Planierung der Sandlagen, die stramme Parallelverlegung unter Einhaltung der Überlappungsmaße, die Überwachung der Ausführung, der Schutz von teilverlegten zusammengerollten Bewehrungen mit Folie vor der UV-Strahlung etc. wurden vorab geplant. Alle Rollen wurden ab Werk mit genauen projekt- und ortsspezifischen Bezeichnungen versehen und die hochwertigen Bewehrungen in der Rolle verstärkt geschützt. Dank dieser Maßnahmen gelang und gelingt ein sauberer, fachgerechter Einbau.

### 3.2 Gründung der Runways für die Stacker/Reclaimer (S/R)

Bei den Runways der Stacker/Reclaimer (S/R) handelt es sich, wie anfangs erwähnt, um hoch belastete Schienenwege (Spurbreite: 8 m) zwischen den „Haldenbeeten“. Die auf diesen Schienen fahrenden Stacker/ Reclaimer nehmen ein über den gesamten Runway laufendes Transportband auf und halten die Rohstoffe über einen langen Ausleger in den Lagerflächen auf bzw. ab. Das Gewicht eines S/R beträgt rund 750 Tonnen. An den Schienenweg werden für die Betriebsphase höchste Anforderungen an die Begrenzung der vertikalen Setzungsdifferenzen und der Horizontalverschiebungen des Schienenweges gestellt.

Im Bereich der Montageflächen der S/R mussten zudem die hohen lokalen Pressungen unter den Stützplatten der Montagegeräte mit maximalen Belastungen bis zu 2.000 kN aufgenommen werden.

Sowohl für die Runways unter Betrieb wie auch für die Montageflächen wurden wiederum analytische Stabilitätsberechnungen (z.B. BISHOP) und parallel FE-Analysen durchgeführt, woraus sich analog zu den Halden die entsprechenden Bewehrungen ergaben. Zur Reduktion der Setzungen und Setzungsdifferenzen war eine Baugrundverbesserung oder Tiefgründung der Runways unverzichtbar. Neben technischen und ökonomischen Faktoren und dem zur Verfügung stehenden Zeitrahmen spielten auch die typischen brasilianischen Faktoren eine Rolle: Verfügbarkeit einer Technologie und vorhandene Kapazitäten. Eine Alternative, für die auch in Brasilien Erfahrungen vorlagen, war eine Gründung auf Fertigbetonrammpfählen o.Ä. in Verbindung mit einer Geogitterbewehrung. Diese Lösung wurde nicht verfolgt, da einerseits nicht annähernd ausreichende Ressourcen für die Herstellung und das Rammen der Pfähle zur Verfügung standen, andererseits aber auch die horizontalen Bodenverschiebungen aus den Halden zu unverträglichen Beanspruchungen in den steifen Gründungselementen mit begrenzter Quer- und Biegesteifigkeit geführt hätten. Letztendlich ergab sich als optimale Lösung die Gründung der Runways und der Montageflächen auf geokunststoffummantelten Sandsäulen (GEC) (Alexiew et al. 2005). Dabei stand aus den Hafearbeiten Füllsand mit geeigneten Körnungsbereichen de facto in unbegrenzten Mengen zur Verfügung. Alle Berechnungen wurden nach dem Ansatz von Raithel (1999 & 2005) und dem EBGeo-Entwurf (EBGeo Entwurf 2007) durchgeführt. Der Durchmesser der Säulen wurde bedingt durch den in Brasilien gängigen Rohrdurchmesser mit 0,78 m festgelegt. Die Länge der geokunststoffummantelten Sandsäulen beträgt ca. 10 m bis 12 m, das Rastermaß 1,75 m bis 2,0 m. Die Säulen durchdringen den oberen, sehr weichen Ton und setzen in der sandigen Zwischen-

schicht auf. Als geotextile Ummantelung wurden die Produkte RINGTRAC® 100/250 und 100/275 eingesetzt, die projektspezifisch produziert wurden. Angewendet wird das Verdrängungsverfahren, der RINGTRAC®-Durchmesser entspricht dabei dem Installationsrohrdurchmesser, um eine frühzeitige Systemmobilisierung bei geringen Setzungen zu garantieren. Erschwerend für die Ausführung erwies sich das Vorhandensein der großflächigen Sandaufspülung als Arbeitsplanum (Abschnitt 1) mit Dicken von bis zu 2,0 m und damit deutlich mächtiger als gängige Arbeitsplattformen. Die technologischen Möglichkeiten (geeignete Trägergeräte und Vibratoren) waren in Brasilien begrenzt und führten anfangs zu Installationsschwierigkeiten und nicht zufriedenstellenden Einbaugeschwindigkeiten. Das Nachliefern geeigneter Technik hat inzwischen das Problem gelöst, es wurde das gängige Einbautempo von 3 bis 4 Säulen pro Stunde erreicht, mit durchgehend guter Sandverdichtung und präziser Positionierung. Im Rahmen der Qualitätssicherung wird die Verdichtung des Sandes in mindestens jeder zehnten Säule mit einer Drucksondierung überprüft.

Eine besondere Betrachtung verdiente das Langzeitsetzungsverhalten der GEC's unter konzentrierten schweren darüberfahrenden Lasten durch die S/R bei einer großen Differenz Verkehrslast/Totlast, also einer langsam eher stochastisch pulsierenden Belastung großer Amplitude. Dabei zeigt eine Studie von Di Prisco et al (2006), dass mit einer (günstigen) Versteifung der GEC's infolge Belastung-Entlastung-Zyklen zu rechnen ist.

Nachfolgend soll auf die zuvor erwähnten projektspezifisch entwickelten analytischen Berechnungsansätze für die „bewehrten Tragschichten“ der Runways und der Montageflächen der S/R eingegangen werden. In etlichen Fällen gab es keine geeigneten analytischen Modelle - diese mussten erst entwickelt werden, z.B. in den Fällen „Durchstanzmodus des bewehrten Runways quer zur Längsachse“, „Durchstanzmodus des bewehrten Runways parallel zur Längsachse“ (Kippen des S/R bei der Fahrt nach vorne/hinten), „Durchstanz der bewehrten Tragschicht unter Stützplatten in der Montagefläche“ (mit und ohne Berücksichtigung der darunterliegenden GEC's) etc. In einigen Fällen wurden verschiedene Modelle unter unterschiedlichen Voraussetzungen entwickelt, durchgerechnet und verglichen. Auf Details muss hier aus Platzgründen verzichtet werden. Bild 9 zeigt nur illustrativ ein Konzept für einen von mehreren Fällen.

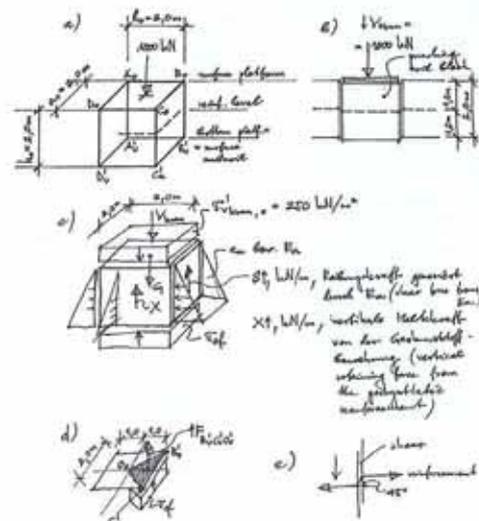


Bild 9. Beispiel eines neuentwickelten projektspezifischen analytischen Berechnungsansatzes

Bei allen Bruchmodi war eine biaxial wirkende Bewehrung notwendig, die analog zu der Bewehrung unter den Halden durch zwei einaxiale Lagen (Geogewebe ROBUTEC<sup>R</sup> unten quer, Sandzwischenlage, Geogitter FORTTRAC<sup>R</sup> M oben längs usw.) realisiert wurde. In manchen Fällen waren die globalen Stabilitätsbetrachtungen maßgebend (z.B. Bishop, s.o.), in manchen die Ergebnisse der spezifischen Analysen der lokalen Bruchmodi.

Letztendlich galt es, die Bewehrungen quer zu den Längsachsen der Haldenbeete und der Runways (also Bewehrungen Richtung Nord-Süd, Geogewebe ROBUTEC<sup>R</sup>) soweit möglich zu vereinheitlichen, um sie optimalerweise ohne Unterbrechung/Überlappung durch mehrere Haldenbeete und Runways durchzuziehen.

Die Bilder 10 und 11 zeigen Beispiele für verlegte Bewehrungen und für eine frisch eingebaute geokunststoffummantelte Säule (GEC) bevor sie von dem Runway überdeckt wird. Bei der GEC ist die Ringspannung bereits nach der Ausführung sichtbar.

Zwischenzeitlich wurde ein Stacker/Reclaimer im Bereich Kohle/Koks mit einem auf GEC-Säulen gegründeten Runway erfolgreich in Betrieb genommen (Bild 12).



Bild 10. Verlegte Bewehrungen aus PVA: unten Geogewebe, dann Sandzwischenlage und Geogitter



Bild 11. Geokunststoffummantelte Säule (GEC) mit RINGTRAC<sup>R</sup> 100/250



Bild 12. Inbetriebnahme des ersten Stacker/Reclaimers

Die messtechnische Überwachung des Gleiskörpers zeigt dabei zunächst Setzungen im Gleisbereich aus Eigengewicht, also infolge der bewehrten Sandplattform, den Tragschichten und dem Schotterbett von knapp 20 cm, wobei ein Großteil dieser Setzungen innerhalb von 3 bis 5 Monaten abklingt. Die Setzungen aus dem Betrieb des Stacker/Reclaimers werden derzeit intensiv überwacht. Aus der linienförmigen Belastung im Bereich des Fahrweges von rund 250 kN/m bis 350 kN/m je Schiene, werden beim erstmaligen Überfahren Setzungen von rund 2 cm gemessen. Bei Standzeiten des Stacker/Reclaimers von bis zu einer Woche haben sich im Schienebereich Setzungen bis rund 5 cm eingestellt. Trotz wechselnder Belastungszustände durch wechselnde Auslegerstellungen liegen die Setzungsunterschiede der nicht miteinander verbundenen Schienenstränge bei weniger als 10 % der eingetretenen Gesamtsetzung. Abschließende Aussagen zum Zeitsetzungsverhalten unter der Last des Stacker/Reclaimers können auf Grund der bislang nur kurzen Standzeiten an einer Position noch nicht gemacht werden. Die durchgeführten Messungen zeigen jedoch einen schnellen Rückgang der Setzungsgeschwindigkeit.

Die bisher vorliegenden Messergebnisse zeigen eine gute Übereinstimmung mit den im Vorfeld durchgeführten Setzungsberechnungen in den GEC-ertüchtigten Runways und bestätigen auch die für die Bemessung der statisch wirksamen Bauteile (Schwellen, Längsbalken unter Schienen) im Gleiskörper getroffenen Annahmen. Neben den am Schienenkörper während des Betriebs begleitend durchgeführten geodätischen Messungen, die es erlauben, die Ruhezeiten und die Parkpositionen des Stacker/Reclaimers zu steuern, wird derzeit ein umfangreiches Monitoring-Programm im Bereich der Lagerflächen installiert. Mit den überwiegend automatisch operierenden Messinstrumenten und der online-Visualisierung der Messwerte kann der Aufhaltungsprozess im Hinblick auf die Vertikal- und Horizontalverschiebungen der Gleiskörpers in den Runways sowie im Hinblick auf die Verformungen und der für die Beurteilung der Standsicherheit maßgebenden Porenwasserdruckentwicklung unter den Haldenbeeten lückenlos und kontinuierlich überwacht und gesteuert werden. Daneben können mit den erfassten Messwerten auch die maßgeblichen rechnerischen Annahmen für die Standsicherheitsberechnungen dem jeweiligen Belastungszustand folgend überprüft werden (Beobachtungsmethode).

#### 4 SCHLUSSBEMERKUNGEN

Die Gründung jeglicher Bauwerke - von den Straßen bis zu den Hochöfen - des neuen Hüttenwerkes von ThyssenKrupp an der brasilianischen Küste bei Sepetiba stellt eine große Herausforderung dar. Die bodenmechanischen Verhältnisse sind wegen der mächtigen wassergesättigten Weichbodenschichten geringster Tragfähigkeit äußerst ungünstig. Dazu kamen enge Planungs- und Bauzeiten sowie eine Reihe ökonomischer, logistischer und bautechnischer Anforderungen. Diese komplexen Bedingungen prägten auch das für das 380.000 m<sup>2</sup> große Rohstofflagerfläche samt Runways (Stock Yard) zu entwickelnde Gründungskonzept. Es konnte dazu eine optimierte Lösung unter verstärktem Einsatz von Geokunststoffen erarbeitet und umgesetzt werden (horizontale Basisbewehrungen hoher Dehnsteifigkeit und Festigkeit sowie geokunststoffummantelte Säulen). Insbesondere die Bemessung, aber auch die Ausführung erforderte zahlreiche innovative Ansätze, von denen einige in diesem Beitrag beschrieben wurden. Vor kurzem gestartete Messungen bestätigen insoweit die Korrektheit und Effizienz der gewählten Konzepte und Materialien. Über die Langzeiterfahrungen nach vollständiger Inbetriebnahme des Stock Yards soll zu gegebener Zeit separat berichtet werden.

Komplexe Projekte wie das hier beschriebene mit engstem Zeitrahmen sind ohne die intensive Zusammenarbeit aller Beteiligten nicht machbar. Die Verfasser danken allen, die durch Kompetenz, Engagement, Verständnis und Innovationswillen dazu beigetragen haben, insbesondere den Verantwortlichen bei ThyssenKrupp CSA.

#### 5 LITERATUR

- Alexiew D., Sobolewski J., Pohlmann H. (1999): Projektbezogene Anwendungsmöglichkeiten von Geoglitern aus neuartigen Polymeren, 6. Informations- and Vortragstagung über „Kunststoffe in der Geotechnik“, München 1999, Sonderheft Geotechnik. 199 – 206.
- Alexiew D., Brokemper D., Lothspeich S. (2005): Geotextile Encased Columns (GEC): Load capacity, geotextile selection and pre-design graphs. Proc. of the Geo-Frontiers Conference, Austin, Texas. 318-324.
- Di Prisco C., Galli A., Cantarelli E., Bongiorno D. (2006): Georeinforced sand columns: Small scale experimental tests and theoretical modelling. Proc. 8th International Conference on Geosynthetics 2006, Yokohama. 1685-1688.
- Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen (EBGEO) Entwurf Stand 2007, DGGT Essen.
- Glockner A., Igelbüscher A., Moormann C., Jud H., Linder K.-J., Kunzmann M. (2008): Bau eines neuen Stahlwerks auf weichen Sedimentböden nahe Rio de Janeiro - Geotechnische Herausforderungen in ungewöhnlichen Dimensionen. Vortragsband Deutsche Baugrundtagung Dortmund 2008. 199-206.
- Raithel M. (1999): Zum Trag- and Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen, Schriftenreihe Geotechnik, Universität Kassel, Heft 6
- Raithel M., Kirchner A., Schade C., Leusink E. (2005): Foundations of constructions on very soft soils with geotextile encased columns - State of the Art. Proc. of the Geo-Frontiers Conference, Austin, Texas. 401-407.

**11. Informations- und Vortragstagung  
über  
"Kunststoffe in der Geotechnik"**

**München Februar 2009**

Under the auspices of



*Zeitschrift für  
Bodenmechanik,  
Erd- und Grundbau  
Felsmechanik,  
Ingenieurgeologie  
Geokunststoffe  
Deponien · Altlasten*

*Sonderheft 2009  
Special Issue 2009*

**Organ der  
Deutschen Gesellschaft  
für Geotechnik**

**geo  
tech  
nik**