Polderumschließung durch einen auf geokunststoff-ummantelten Sandsäulen gegründeten Deich

Prof. Dr.-Ing. H.-G. Kempfert – *Fachgebiet Geotechnik, Universität Kassel*

Dr.-Ing. M. Raithel – *Kempfert + Partner Geotechnik, Kassel, Würzburg*

Dipl.-Ing. W. Möbius, Dipl.-Ing. P. Wallis –
Josef Möbius Bau-Gesellschaft GmbH & Co. Hamburg

Zusammenfassung: Zur Ansiedlung neuer Produktionszweige wird das Werksgeländes der Flugzeugwerft (EADS) in Hamburg-Finkenwerder in der westlich an das Werksgelände angrenzenden Binnenwattfläche des „Mühlenberger Lochs“ erweitert. Als Voraussetzung für die gleichmäßige Geländeaufhöhung wurde die vorgesehene Erweiterungsfläche zunächst u.a. mit einem ca. 2,4 km langen Umschließungsdamm eingefaßt, um in der entstehenden Polderfläche den Aufstau eines konstanten Wasserspiegels zu ermöglichen. Der Umschließungsdamm stellt hierbei zugleich den neuen Hochwasserschutzdeich des Werksgeländes dar. Zur Gründung des Deiches wurden ca. 60.000 geokunststoffummantelte Sandsäulen (GSM) eingesetzt. Mit Hilfe dieses Gründungssystems konnte die rechtzeitige Erstellung einer ausreichend sturmflutsicheren Umschließung bis ca. 7 m Höhe in einer Bauzeit von nur 9 Monaten erreicht werden. Dabei war die Anwendung der Beobachtungsmethode ein wesentliches Sicherheitselement.

1. Einleitung

Zur Ansiedlung neuer Produktionszweige, insbesondere zum Bau des neuen Airbus A 380 wird eine Erweiterung des Werksgeländes der Flugzeugwerft (EADS) in Hamburg-Finkenwerder um ca. 160 ha (140 ha Nutzfläche) erforderlich. Die Flächenerweiterung erfolgt in dem westlich an das Werksgelände angrenzenden Binnenwattfläche des „Mühlenberger Loch“.

Der Untergrund im Mühlenberger Loch besteht aus mächtigen Schlickschichten über den holozänen organischen Weichschichten aus Klei, Mudde und Torf der sog. Elbmarsch, die von holozänen und pleistozänen Sanden unterlagert werden. Die Weichschichten bis 14 m Mächtigkeit werden durch die außerordentlich ungünstige Scherfestigkeit (undränierte Scherfestigkeit z.T. $c_u < 1{,}0$ kN/m²) und Steifigkeit charakterisiert.

Die Ausschreibung sah zunächst eine Polderumschließung durch eine bauzeitliche Spundwand PSp 1000 mit Längen bis ca. 40,0 m, rückverankert durch Schrägpfähle, vor. Im Schutze der temporären Spundwand sollte die Fläche aufgehöht und nach ausreichenden Konsolidationszeiten polderseits der erforderliche Hochwasserschutzdeich errichtet werden.

Die zur Ausführung gekommene Bauweise ermöglichte die rechtzeitige sturmflutsichere Deichaufhöhung auf einer Gründung aus ca. 60.000 geokunststoffummantelten Säulen und somit zugleich den Entfall der Spundwand, die nach der Aufhöhung auf Wattniveau abgebrannt oder gezogen werden sollte. Bild 1 zeigt eine Übersicht über die Baumaßnahme mit dem hergestellten Deich und der eingestauten Erweiterungsfläche. In Bild 5 ist die Baumaßnahme grafisch im Grundriss dargestellt.

Bild 1: Überblick über die Erweiterungsfläche mit dem hergestellten Deich

2. Baugrundverhältnisse

Zur genauen Feststellung der erforderlichen Gründungstiefen und Säulenlängen, zur Bestätigung der Baugrundeigenschaften und auch zur Überprüfung der bodenmechanischen Randbedingungen wurden baubegleitend 49 Bohrungen, 45 Flügelsondierungen und 268 Drucksondierungen ausgeführt. Maßgebend für die Bemessung des Säulensystems, die Setzungsprognose des Deichkörpers und die Standsicherheitsuntersuchungen im Zuge der Ausführungsstatik waren die schematisierten Berechnungsprofile, die Vertragsgrundlage für die Ausführung waren. Ein typisches Berechnungsprofil im Deichabschnitt VI ist beispielhaft in Bild 2 dargestellt. Weitere Angaben zu den Baugrundverhältnissen sind in (1) dargestellt.

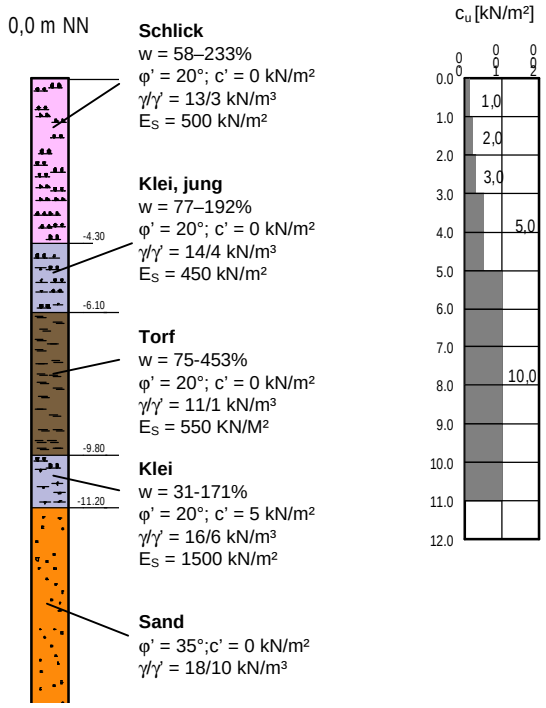

Bild 2: Berechnungsprofil im Deichbereich VI

Die in Bild 2 dargestellten Steifemoduln gelten für eine Bezugsspannung von 100 kN/m². Da die Steifeziffern im Baugrundgutachten lediglich für die Durchführung von Setzungsberechnungen definiert wurden und somit für die Säulenbemessung keine spannungsabhängigen Steifemoduln in Form einer Potenzfunktion (Steigung der Tangente an die Last-Setzungslinie bei der jeweiligen Auflastspannung) gegeben waren, wurde eine statistische Auswertung der vorliegenden Oedometerversuche vorgenommen. Eine Auswertung ist exemplarisch in Bild 3 dargestellt. In Abstimmung mit dem Prüfingenieur wurden die anzusetzenden Steifemoduln für die Ringzugkraftbemessung unter Zugrundelegung der 5% Fraktile bestimmt. Für die Setzungsberechnung wurde die Potenzfunktion durch Angleichung an die nach dem Baugrundgutachten ansetzbaren Steifigkeit bestimmt.

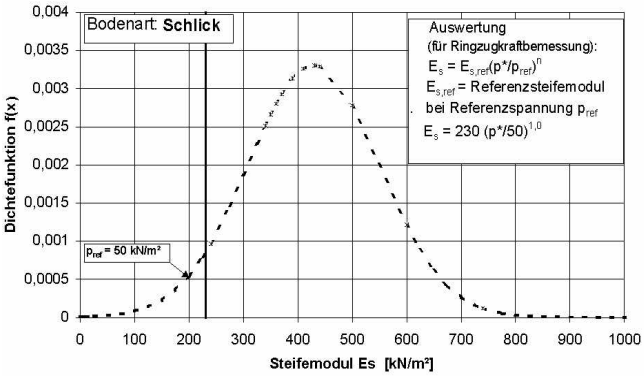

Bild 3: statistische Auswertung zur Festlegung des Bemessungsansatzes für den Steifemodul

3. Bemessung des Gründungssystems

Das Trag und Verformungsverhalten der geokunststoffummantelten Sandsäulen sowie das Berechnungsverfahren zur Dimensionierung der Geokunststoffummantelung ist in der Literatur ausreichend beschrieben, siehe z.B. (2) und (3).
Es sei an dieser Stelle nur darauf hingewiesen, daß konventionelle, nicht ummantelte Säulen bei den vorliegenden Baugrundverhältnissen aufgrund der ungenügenden horizontalen Stützung der Säulen nicht eingesetzt werden können. Dagegen wird bei einer ummantelten Säule die radiale, horizontale Stützung durch die Geokunststoffummantelung im Verbund mit der Stützwirkung der umgebenden Weichschicht sichergestellt.
Die Bemessung der geokunststoffummantelten Sandsäulen GSM erfolgte analytisch nach (2). Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Baugrundschichtungen auf der gesamten Deichtrasse wurden aus den verschiedenen Deich- und Baugrundlasten die berechneten Ringzugkräfte in der Geokunststoffumantelung den zulässigen Ringzugkräften der Ummantelung gegenübergestellt. Grundsätzlich wurden zwei unterschiedliche rundgewebte Geotextilien der Firma Huesker Synthetics, Ringtrac® 100/200 (Kurzzeitfestigkeit F_k = 200 kN/m) und Ringtrac® 100/400 (Kurzzeitfestigkeit F_k = 400 kN/m), eingesetzt. Eine typische Rastereinteilung über den Querschnitt des Deiches ist in Bild 4 dargestellt.

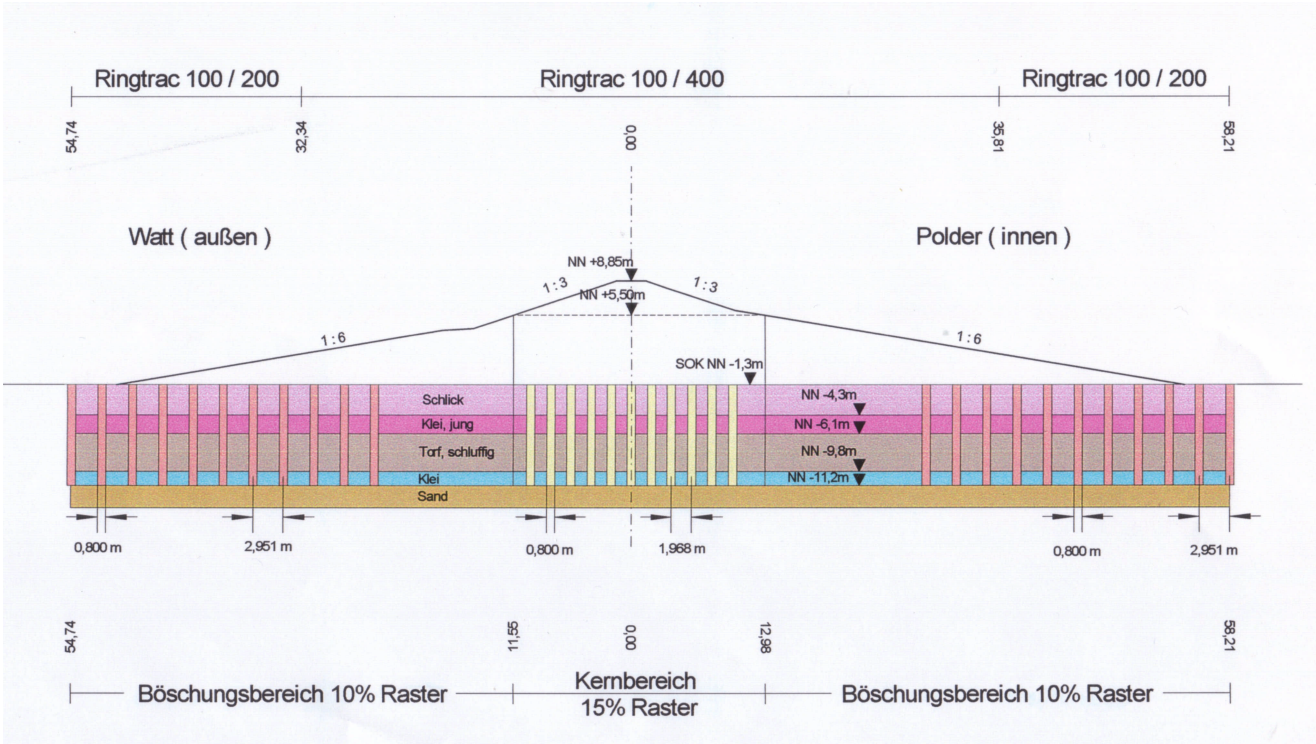

Bild 4: Deichquerschnitt mit Rasterdarstellung

Die in den einzelnen Deichabschnitten II bis VII ermittelten Rastereinteilungen (für Böschungsbereich und Kernbereich) sowie die Säulenanzahl ist in Bild 5 dargestellt.

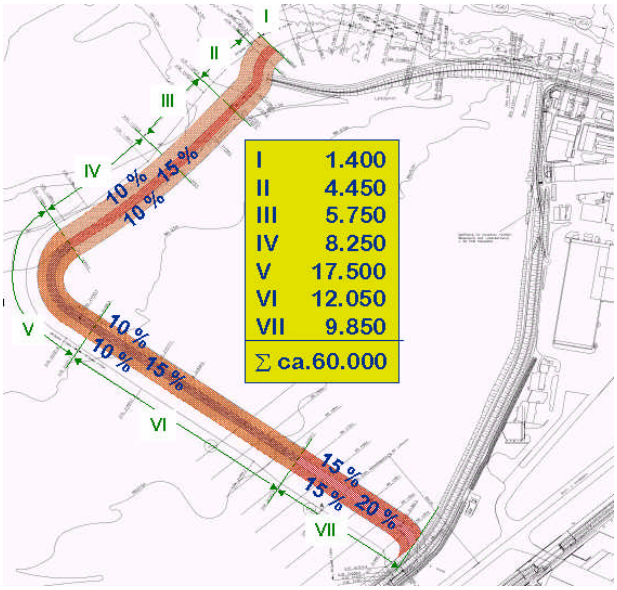

Bild 5: Rastereinteilung und Säulenanzahl in den einzelnen Deichabschnitten II bis VII

Die Setzungsprognose wurde unter Verwendung des analytischen Berechnungsverfahrens (2) in Kombination mit FEM-Analysen durchgeführt. Die Baugrundverbesserungsfaktoren β (Setzung ohne GSM / Setzung mit GSM) wurden hierbei i.M. zu ca. 2,5 bis 3,5 bestimmt. Nähere Details zur Bemessung des Säulensystems und zur Definition der maßgebenden Berechnungsrandbedingungen sind in (4) dargestellt.

4. Herstellung der GSM-Gründung

Die Säulen wurden generell im Verdrängungsverfahren hergestellt. Hierbei wurde eine Verrohrung ∅ 80 cm unter Vibration in den Untergrund eingebracht, wobei die Weichschicht durch zwei konisch angeordnete Fußklappen verdrängt wird.

Bild 6: Herstellung einer Sandsäule im Verdrängungsverfahren

Nach dem Einlegen der Ummantelung und dem Verfüllen wird die Verrohrung unter Vibration bei einem automatischen Öffnen der Fußklappen gezogen, wobei der Sand in der entstehenden Säule verdichtet wird.
Bedingt durch die variable Schlickoberfläche zwischen ca. –2,5 mNN und + 0,8 mNN wurden verschiedene Herstellungsverfahren notwendig.
Der Großteil der geokunststoffummantelten Sandsäulen wurde im Verdrängungsverfahren durch mäklergeführte Rammen auf bis zu 100 m langen, schwimmenden Pontons (Bild 7) ausgeführt.

Bild 7: Säulenherstellung vom schwimmenden Ponton

Bei Niedrigwasser wurde die Säulenherstellung fortgesetzt, wobei die Pontons dann auf dem Schlick auflagen (Bild 8).

Bild 8: Säulenherstellung vom aufsitzenden Ponton

In Teilbereichen mit hohen Schlickoberkanten wurde zudem das bekannte und bei einer Vielzahl von Projekten angewendete Herstellungsverfahren (siehe (5)) von Land kommend angewendet, da in diesen Bereichen eine ausreichende Schwimmtiefe der Pontons nicht mehr gegeben war.
Hierbei steht das Einbringegerät auf den schon hergestellten Säulen und stellt die weiteren Säulen vor Kopf her (Bild 9).

Bild 9: Herstellung im herkömmlichen Verfahren von Land

Zur Lagestabilisierung wurde bei Einbringung der Säulen der Säulenkopf dann jeweils 0,5 m bis max. 1,0 m mit Sand überschüttet. Dieser sog. Sandkragen stellte eine ausreichende Stabilisierung sicher, d.h. eine horizontale Verschiebung der einzelnen Säulen infolge Verdrängungswirkung bei fortschreitendem Säulenfeld oder durch Aufliegen des Pontons auf den Säulen wurde verhindert. In Bild 10 ist ein Gesamtüberblick über die Säulenherstellung dargestellt.

Bild 10: Gesamtüberblick über die Säulenherstellung

5. Standsicherheit und Schüttstufen

Die Standsicherheitsberechnungen wurden i.d.R. mit effektiven Scherparametern φ' und c' unter Ansatz des sich aus der jeweiligen Schüttstufe ergebenden Porenwasserüberdruckes für die einzelnen Profile auf Grundlage der DIN 4084 mit Kreisgleitflächen durchgeführt. Zusätzlich erfolgten für die maßgebenden Lastfälle Berechnungen mit Starrkörperbruchmechanismen.
Zunächst wurde eine Prognose des Konsolidationsverlaufes unter Berücksichtigung der geokunststoffummantelten Sandsäulen als Vertikaldräns und darauf basierend eine Prognose der zeitliche Folge der einzelnen Schüttstufen vorgenommen.
Zur Vermeidung eines Gelände- bzw. Böschungsbruches und zur Reduzierung der Spreizverformung wurde oberhalb der Säulenköpfe eine über den Deichquerschnitt durchlaufende zugfeste horizontale Geokunststoffbewehrung Comtrac® 1000/100 A15 (Kurzzeitfestigkeit F_k = 1000 kN/m) bzw. Comtrac® 500/100 A15 (Kurzzeitfestigkeit F_k = 500 kN/m) benötigt.
Basierend auf den Messungen des Konsolidationsverlaufes und der Verformungen des Deichkörpers wurde dann baubegleitend die Prognose überprüft und, soweit möglich, die Schüttfolgen beschleunigt. Zur schnellen Bewertung der einzelnen maßgebenden Bauzustände des von Anfang an zeitkritischen Bauvorhabens wurde hierbei ein kontinuierliches und konstruktives Zusammenwirken von allen Beteiligten (Bauherr, Bauausführung, Statikersteller und Prüfingenieure), sowie umfangreiche, kurzfristige Messauswertungen und zusätzliche geotechnische Berechnungen erforderlich.

6. Messungen

6.1 Messungen während der Säulenherstellung

Die Herstellung der Säulen im Verdrängungsverfahren führt zu einer Aufwölbung der Schlickoberfläche, die im allgemeinen als ‚Aufwuchs' bezeichnet wird. Dieser i.d.R. gleichmäßige Aufwuchs der Geländeoberfläche war schon durch ausgeführte Projekte bekannt und wurde auch schon durch Modellversuche untersucht (siehe Bild 11). Bei der Säulenherstellung im Mühlenberger Loch wurden diese Effekte bestätigt. Generell wurde ein Aufwuchs ca. zwischen 3 % und 8 % der Säulenlänge festgestellt.

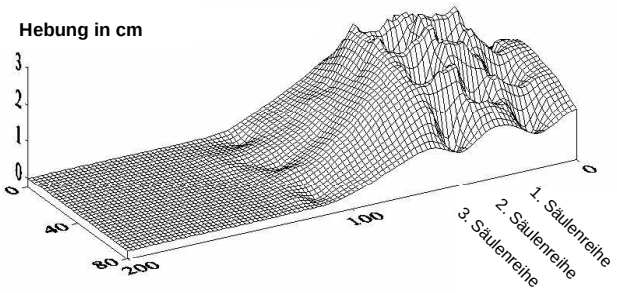

Bild 11: Gemessene Hebung der Geländeoberfläche bei Anwendung des Verdrängungsverfahrens nach (6)

Eine Verflüssigung oder Abnahme der Scherfestigkeit infolge der Säulenherstellung in der Weichschicht zwischen den Säulen war nach Auswertung von Flügelsondierungen vor und nach der Säulenherstellung nicht festzustellen.
Vielmehr wurde nach Einbringen der geokunststoffummantelten Sandsäulen eine Erhöhung der Scherfestigkeit infolge der Verdrängungswirkung beobachtet (Bild 12).

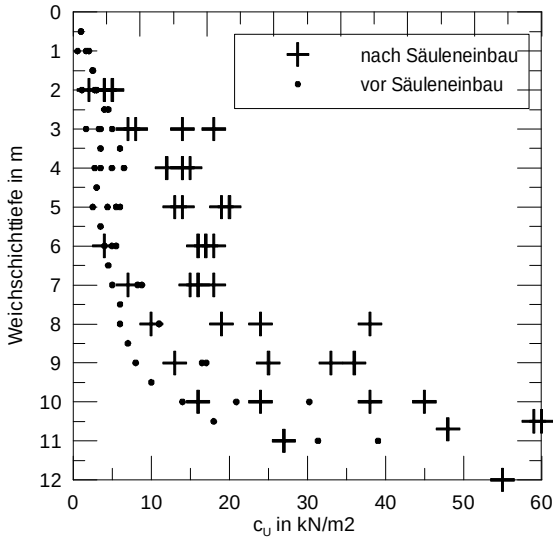

Bild 12: Vergleich von durch Flügelsondierungen gemessenen undränierten Scherfestigkeiten vor und unmittelbar nach der Säulenherstellung

6.2 Messungen während der Aufhöhung

Bedingt durch die unterschiedliche Baugrundschichtung wurden insgesamt 7 Messquerschnitte entlang der Deichtrasse eingebaut. Insgesamt wurden je Messquerschnitt 4 Staffeln mit jeweils einem Erddruck- und einem Wasserdruckgeber

über der Weichschicht, sowie zwei Piezometern in der Weichschicht angeordnet; außerdem dienen jeweils ein Horizontal- und zwei Vertikalinklinometer zur Beobachtung des Verformungsverhaltens.
Eine typische Anordnung der Messgeber über den Messquerschnitt im Deich ist in (4) dargestellt.
Schon frühzeitig konnte erkannt werden, daß gegenüber dem Bodengutachten günstigere Bodenkenngrößen, insbesondere im Hinblick auf das Konsolidationsverhalten vorliegen.
Der zum Zeitpunkt des Erreichens der Endhöhe des Deiches auf ca. 9 mNN anhand der Messungen abgeleitete und für die statische Bewertung angesetzte Konsolidationsgrad der Schüttstufe auf 7,5 mNN ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Konsolidationsgrade bei der Schütthöhe von 7,5 mNN vor der weiteren Aufhöhung

Deichabschnitt	Anhand der Messungen abgeleiteter Konsolidationsgrad U Mittelwerte	
	Böschung	Kern
II, III, IV	0,78	0,94
V, VI	0,91	0,96
VII	0,74	0,88

In Bild 13 ist ein Vergleich der gemessenen und prognostizierten Setzungen und des Schüttverlaufes im Deichabschnitt VI dargestellt.

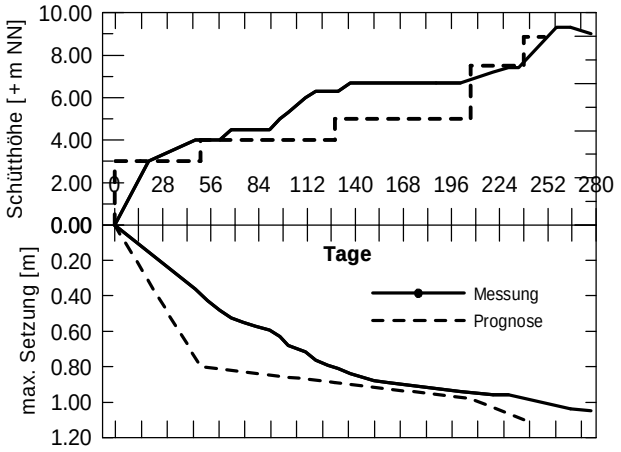

Bild 13: Vergleich der gemessenen und prognostizierten Setzungen und des Schüttverlaufes im Deichabschnitt VI

Es ist zu erkennen, daß, insbesondere bedingt durch günstigere Konsolidationsverhalten des Untergrundes, bis zum Erreichen der sturmflutsicheren Umschließung bei ca. 7 mNN zunächst eine schnellere Schüttfolge gegenüber der Prognose ermöglicht wurde. Im Winter 2001/2002 wurde dagegen eine längere Liegezeit eingehalten, da das Aufbringen der Kleiandeckung witterungsbedingt nicht möglich war.
Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Beitrages ist die Aufhöhung bis auf die Endhöhe mit Ausnahme des Deichabschnittes VII erfolgt. Im Deichabschnitt VII sind besondere Verhältnisse vorhanden, die nicht repräsentativ für die gesamte Deichgründung sind, da hier in jüngerer Zeit Sandentnahmen und nachfolgend Verschlickungen bis in Tiefen über 10 m stattgefunden haben. Auch zeigen sich in einem kleinen Bereich von ca. 50 m größere Setzungen als zunächst prognostiziert, wobei allerdings nördlich und südlich dieser Stelle die Größenordnung der prognostizierten Setzungen bestätigt werden konnte. Die Aufhöhung im Deichabschnitt VII beträgt zum jetzigen Zeitpunkt ca. 7,5 mNN, die Endhöhe wird im Sommer 2002 erreicht, so dass die Übergabe des fertiggestellten Deiches an den Bauherrn voraussichtlich zum August 2002 erfolgen kann.

7. Restsetzungsprognosen und Überhöhung

Um die Mächtigkeit der Kleiandeckung (ca. 2 m) zu erhalten, soll die notwendige Überhöhung des Deichkörpers zum Ausgleich der Restsetzungen des Tragsystems durch eine Erhöhung des bis ca. 7 mNN reichenden Sandkerns berücksichtigt werden.
Die noch zu erwartenden Restsetzungen wurden auf der Grundlage des Hyperbelverfahrens nach (8) an jedem Standort der in einem Abstand von 50 m angeordneten Setzungspegel über die Deichlänge bestimmt.
Mit diesem Verfahren wird auf der Grundlage der Messungen während der Lastaufbringung eine Hyperbel definiert, die den zu erwartenden Verlauf der weiteren Setzungen wiedergibt. Hierbei geht die Belastungshistorie, die zum jeweiligen Zeitpunkt gemessene Setzung bei der entsprechenden Deichhöhe und der Zeitpunkt des Überhöhungseinbaus mit der jeweiligen Schütthöhe ein. In Bild 14 ist eine Auswertung exemplarische dargestellt.
Da dieses Verfahren den Setzungsverlauf nur während der Primärphase befriedigend wiedergibt wurden die Kriechsetzungen der Sekundärphase getrennt bewertet.

Es ist in der Literatur (siehe z.B. (7)) beschrieben, dass die Kriechverformungen auch eine Funktion der Größe der Belastungsänderung ist, welche die Deformation erzeugt. Da die Weichschicht durch die Spannungskonzentration über den Säulenköpfen geringer belastet wird, ist somit durch den Einsatz der geokunststoffummantelten Sandsäulen generell von einer Kriechsetzungsreduktion im Vergleich zum unverbesserten Baugrund auszugehen. Daher wurden bei der Abschätzung der Kriechsetzungen und der Festlegung von Überhöhungen für die vorliegende Deichgründung auf geokunststoffummantelten Sandsäulen pragmatisch näherungsweise nur 50% der Kriechsetzungen eines unverbesserten Baugrundes angesetzt. Die so ermittelten Kriechsetzungen betragen im Zeitraum von 5 Jahren nach Übergabe des Deiches ca. 5 bis 10 cm.

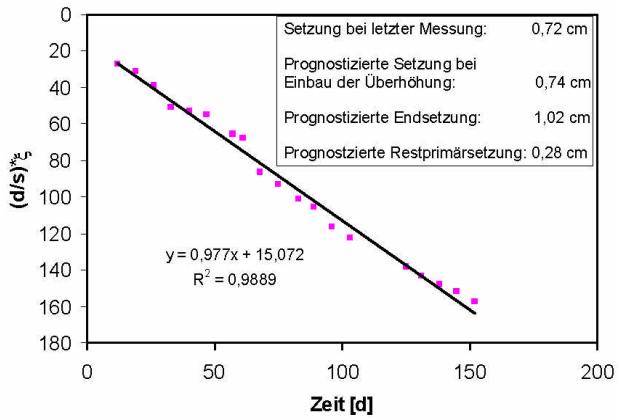

Bild 14: Restsetzungsprognose

Unter Zugrundelegung der Restsetzungsprognosen wurden die Überhöhungsmaße bei Berücksichtigung eines zusätzlichen Vorhaltemaßes (10 cm) zwischen 30 cm bis 50 cm bestimmt.
Im Abschnitt VII wurden die Überhöhungsmaße noch nicht abschließend festgelegt, hier werden weitere Messungen abgewartet.

8. Schlussbemerkung

Durch die Gründung auf über 60.000 geokunststoffummantelte Sandsäulen (GSM) konnte erstmalig ein Deich innerhalb einer Bauzeit von rund 9 Monaten bis in eine Höhe von ca. 7 m hochwassersicher auf einen Untergrund mit sehr geringer Scherfestigkeit und ausgeprägter Verformbarkeit (1) aufgebracht werden.
Das Gründungssystem ‚geokunststoffummantelte Sandsäulen' hat sich hierbei durch eine hohe Flexibilität in der Ausführung und durch schnelle Konsolidierungszeiten ausgezeichnet, so dass die einzelnen Schüttlagen nahezu fortlaufend mit geringen Zwischenliegezeiten aufgebracht werden konnten.
Durch die Herstellung eines nur ca. 25 m breiten und ca. 2,5 m hohen, ebenfalls auf geokunststoffummantelten Sandsäulen gegründeten Randdammes konnte zudem vor dem Aufstau eines konstanten Wasserspiegels in der Gesamtfäche eine Teilfläche (Teilfläche Sektionsbau) eingepoldert werden und vorlaufend mit den Verrieselungsarbeiten begonnen werden. Ausführlich wird die Aufhöhung dieser Fläche in (9) behandelt.
Somit konnte durch die rechtzeitige Erstellung einer ausreichend sturmflutsicheren Deichumschließung bis ca. 7 m Höhe und die erforderliche Geländeaufhöhung um ca. 6,5 m in einer vorgegebenen Teilfläche der Baubeginn der Gründungsmaßnahmen für die erste AIRBUS Sektionshalle eingehalten werden. Mit herkömmlichen Deichbauweisen wäre eine solche Einpolderung bei den vorliegenden bodenmechanischen Randbedingungen in nur 9 Monaten Bauzeit nicht möglich gewesen.
Der fertige Deich mit Höhe bis ca. 10 m wird zum August 2002 an den Bauherrn übergeben.

9. Quellennachweise

(1) Reiner, J.; Stadie, R.: Geotechnisches Konzept der Flächenaufhöhung im Mühlenberger Loch. 27. Baugrundtagung der DGGT, 2002.
(2) Raithel, M.; Kempfert, H.-G.: Bemessung von geokunststoffummantelten Sandsäulen. Bautechnik 76, Heft 11, Seiten 983-991, 1999.
(3) Raithel, M.: Zum Trag- und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen. Schriftenreihe Geotechnik. Universität Gh Kassel, Heft 6, Kassel, 1999.
(4) Raithel, M.; Kempfert, H.-G.; Möbius, W.; Wallis, P.: Gründungsmaßnahmen zur Tragfähigkeitserhöhung und Setzungsreduktion beim Projekt Mühlenberger Loch – Los 1. Geotechnik 25/Nr.1, Seiten 21 – 30, 2002.
(5) Raithel, M., Kempfert, H.-G.: Erfahrungen mit dem Gründungsverfahren „geokunststoffummantelte Sandsäulen". 3. Österreichische Geotechniktagung, Wien, 2001.
(6) Geduhn, M.; Kempfert, H.-G.; Raithel, M.: Practical Aspects of the Design of Deep Geotex-

tile Coated Sand Columns for the Foundation of a Dike on Very Soft Soils. Landmarks in Earth Reinforcement. Proc. International Symposium, Kyushu, Japan. Swets & Zeitlinger, 2001.
(7) Edil, T. B.; Fox, P. J.; Lan, L.-T.: Stress-Induced One-Dimensional Creep of Peat. Advances in Understanding and Modelling the Mechanical Behaviour of Peat, Balkema, Rotterdam, 1994.
(8) Schultze, E.; Horn, A.: Setzungsberechnung. Grundbautaschenbuch, Vierte Auflage, Teil 1, 1990.
(9) Lund, N.-Ch.; Küster, V.; Chaumeny, J.-L.; Vierck, H.; Wendt, B,.: Anwendung von Baugrundverbesserungsmaßnahmen zur Landgewinnung in kürzester Bauzeit. 27. Baugrundtagung der DGGT, 2002.