

# Möglichkeiten und Nutzen von objektivierten Untergrundmodellen und deren Integration in raumbezogene Informationssysteme

Christian GAU & Joachim TIEDEMANN

Dipl.-Ing. Christian Gau, Prof. Dr. rer. nat. Joachim Tiedemann, Fachgebiet Ingenieurgeologie, Technische Universität Berlin, Ackerstraße 76  
c.gau@inggeo.tu-berlin.de bzw. tiedemann@tu-berlin.de

## 1 EINLEITUNG

In Berlin existiert bereits eine Reihe von verschiedenen raumbezogenen Informationssystemen, deren Datenbestände sowohl vom Umfang als auch von der Qualität her als sehr hochwertig einzustufen sind. Dazu gehören beispielsweise die Flächennutzungsplanung, der Liegenschaftskatalog und das Baulückenmanagement.

Eine effektive Stadt- und Regionalplanung muss jedoch auch die Einflüsse des Untergrundes auf Möglichkeiten und Kosten der Bebauung oder anderweitiger Flächennutzung ins Kalkül ziehen. In innerstädtischen Ballungszentren wie Berlin mit einer langen Bauhistorie existieren über die Geologie des Stadtgebietes, das Grundwasser und die technischen Eigenschaften des Untergrundes umfangreiche Datensätze. Solche Daten für Planungszwecke nutzen zu können, setzt neben einem zeitsparenden Datenmanagement die mathematische Modellierung der Daten voraus. Dadurch entsteht ein gravierender Unterschied zu den klassischen Daten von Informationssystemen, deren wesentliches Ziel eine zusammenfassende Darstellung ist.

Am Fachgebiet Ingenieurgeologie der TU Berlin sind hierzu bislang Bohr- und Sondierungsdaten aus dem Berliner Untergrund mit verschiedenen geostatistischen Modellierungstechniken verarbeitet worden. So konnten die oberflächennahen quartären Schichten in geometrischen dreidimensionalen Modellen dargestellt werden, die zugleich Auskunft über die Auftretenswahrscheinlichkeit der darin verarbeiteten geometrischen und geotechnischen Parameter (z.B. Spitzendruck) geben. Derzeit laufende Forschungen beschäftigen sich mit den aus der Normung resultierenden Problemdefinitionen der charakteristischen Werte und der Homogenbereiche bzw. deren Einbindung in die Modellierungspraxis. Dadurch und durch die Modifikation der geostatistischen Verfahren sollen die existenten Modelle nochmals optimiert werden. Mittelfristiges Ziel ist dabei die Kopplung von geometrisch-geologischen und geotechnischen Modellen. Langfristige Zielsetzung muss jedoch die Integration dieser Modelle in bestehende Informationssysteme sein, die mit den zusätzlichen Daten aus objektivierten Untergrundmodellen einen erheblichen Fortschritt erfahren würden.

Dieser Beitrag soll zunächst den aktuellen Stand der Geoinformationssysteme in Berlin und im Bundesland Brandenburg darstellen. Anschließend soll der Nutzen der Integration baugelogischer Modelle dargestellt werden. Die damit in Verbindung stehenden Schwierigkeiten werden beschrieben und die derzeit am Fachgebiet laufenden Forschungen vorgestellt.

## 2 GEOINFORMATIONSSYSTEME IN BERLIN UND BRANDENBURG

In Berlin bestehen bereits zahlreiche Informationssysteme, die den räumlichen Bezug ihrer Daten berücksichtigen und verwerten. Von den entsprechenden Senatsverwaltungen der Stadt werden diese Informationssysteme mit teils sehr hohem Aufwand unterhalten. Einige Beispiele zeigt die folgende Abb.1. Die jeweils enthaltenen Daten sind von hoher Qualität, der Inhalt der Systeme wird ständig aktualisiert und erweitert.



Abb.1: Geoinformationen in Berlin (verfügbar unter [www.berlin.de](http://www.berlin.de))

Für das Bundesland Brandenburg sind zusätzlich insbesondere die Daten der Landesvermessung (Karten, Orthophotos u. a.) hervorzuheben. Allen Systemen ist jedoch in ganz deutlicher Weise das gemein, was bereits durch mehrere Studien (u. a. MICUS 2001, 2002, 2003) belegt wurde und was den Nachholbedarf der deutschen Geoinformationswirtschaft zum Ausdruck bringt: Sofern der potentielle Nutzer überhaupt von der Existenz der Systeme Kenntnis hat und versteht, welchen Vorteil oder gar wirtschaftlichen Nutzen der Erwerb GIS-gestützter Informationen für ihn haben könnte, hat er sich mit den unterschiedlichen Abgabeverfahren und

der Preisgestaltung der Behörden auseinander zu setzen. Hinzu kommt, dass viele Daten ohnehin nur einem vordefiniertem und begrenztem Nutzerkreis zu Verfügung gestellt werden.

Die damit einhergehende und seit Jahren anhaltende Diskussion über die Zurverfügungstellung von Daten des öffentlichen Sektors wird durch unterschiedliche Interessen von Nutzern, Anbietern und Verarbeitern genährt. Die dabei erscheinenden juristischen Hürden sind insbesondere der Datenschutz, das Urheberrecht und die derzeit stark restriktiv wirkenden Nutzungsrechte der Daten für Weitergabe oder Veröffentlichung. Diese Diskussion hat durch die Gründung des Verbandes GEOkomm Anfang 2003 neuen Auftrieb erfahren ([www.geokomm.de](http://www.geokomm.de)). Diesem Verband gehören insbesondere kleinere und mittlere Unternehmen der Geoinformationswirtschaft an – hauptsächlich aus der Region Berlin-Brandenburg – aber auch Universitätsinstitute und Landesbehörden. Binnen Jahresfrist konnte er sich zum Sprachrohr der regionalen Geoinformationswirtschaft entwickeln. Die infolge der o. a. Limitationen entstandenen Wünsche an umfassende gesetzliche Neuregelungen werden derzeit seitens des GEOkomm in konkrete Forderungen an die Politik formuliert.

Über diese rechtlichen Hindernisse hinaus bestehen scheinbar technische Schwierigkeiten, die verschiedenen Systeme effektiv zu kombinieren. Dass jedoch gerade Berlin auf eine geeignete existente Technologie zurückgreifen könnte, wird von Müller (2003) dargelegt. Dort sind verschiedene beispielhafte Anwendungsszenarien dargestellt, die deutlich werden lassen, dass die technischen Möglichkeiten dafür bereits vorhanden sind. Zudem wird der wirtschaftliche Effekt, den eine Verquickung der verschiedenen Systeme nach sich ziehen würde, demonstriert.

### 3 ZUR INTEGRATION GEOLOGISCHER DATEN IN GEOINFORMATIONSSYSTEME

Die finanziellen Aufwendungen für geologisch-geotechnische Vorerkundung stellen mit 0,1-0,5 % Anteil an den Gesamtkosten eines Projektes einem im Vergleich zum Nutzen geringen Aufwand dar. Denn die nachträgliche Sanierung aus dem Baugrundverhalten resultierender Schäden ist gewöhnlich ungleich teurer. Die auf den projektbezogenen geotechnischen Vorerkundungen aufbauenden Prognosen des zu erwartenden Baugrundverhaltens können durch die Einbeziehung bereits vorhandener Daten, die dann Bestandteil eines komplexen Geoinformationssystems sein müssten, wesentlich zutreffender gestaltet werden. Darüber hinaus ließen sich unter dieser Voraussetzung bereits Machbarkeitsstudien und die Konzeptionen projektbezogener Vorerkundungen optimieren. Zu beachten ist jedoch, dass sich geologische und geotechnische Daten von denjenigen, die normalerweise in Geoinformationssystemen verarbeitet werden, markant unterscheiden. Sie weisen eine Vielzahl von Eigenschaften auf, die ihre Aufnahme in bestehende Systeme verhindern oder durch eine vorher notwendige – wie auch immer geartete Standardisierung oder Transformation – erheblich erschweren. Eigenschaften, die verdeutlichen, welchen Aufwand die Integration solcher Daten in raumbezogenen Informationssysteme erfordern dürfte, sind zum Beispiel von Reik & Vardar (1999) beschrieben worden. Dazu gehören im wesentlichen

- Inhomogenität der Gebirgskörper und Komplexität der geologischen Strukturen,
- Diskontinuitäten in verschiedenen Größenbereichen und daraus resultierend
- Größen- und Maßstabsabhängigkeiten, etwa von Materialkennwerten,
- Anisotropie und Mehrphasigkeit,
- Unsicherheiten hinsichtlich geologischer Grenzflächen, charakteristischer Eigenschaften, Spannungszustand, bedingt durch Unzugänglichkeit und die geringe Aufschlussdichte, sowie die
- Zeitabhängigkeit der Eigenschaften und Zustandsgrößen.

Zwar ist damit eine Visualisierung der Daten selbst möglich, doch können auf diese Weise keine Aussagen über die meist sehr großen Untergrundbereiche abgegeben werden, aus denen keine Daten vorliegen. Resultierend aus der Unzugänglichkeit sowie der räumlichen Struktur der Objekte wird deshalb eine dreidimensionale Modellierung erforderlich, die möglichst objektiv durchgeführt werden sollte. Im Hinblick auf die unvermeidliche Unzulänglichkeit der Daten – im statistischen Sinne liefert jede noch so umfangreiche geotechnische Untersuchung nur eine verschwindend kleine Stichprobenpopulation verglichen mit der Grundgesamtheit – sowie die natürliche Streuung aller geogenen Daten können die Modellierungen zusätzlich auch zu Simulationen ausgeweitet werden. Eine vollständige Kenntnis des Untergrundes kann daher nie – nicht einmal bei dichtestem Erkundungsraster – erlangt werden. Erst seit Entwicklung der Geostatistik in den 1960er Jahren und ihrer rasanten Fortschritte in den darauf folgenden Jahrzehnten ist es möglich, die unbeprobten Zwischenräume zu interpolieren und das dortige Auftreten bestimmter Lithologien mit Wahrscheinlichkeiten zu belegen. Damit wird eine gewisse Objektivität in der Darstellung erreicht, was einer signifikante Optimierung der sonst nur durch lineare Interpolation gezeichneten Profile gleichkommt.

Die Geostatistik macht sich sämtliche intrinsische Eigenschaften geologischer Daten zu Nutze, so die etwaige Teufenabhängigkeit, eine im allgemeinen vorhandene Anisotropie und die Autokorrelation. Letztere ist Resultat der nicht zufälligen genetischen und postgenetischen Prozesse der jeweiligen Schicht und führt innerhalb eines begrenzten zwei- oder dreidimensionalen Raumes um die Probenlokation zu einer graduellen Abhängigkeit aller anderen Proben. Diese als Reichweite bezeichnete Abhängigkeitsentfernung kann mittels der Variographie erfasst werden und wird im folgenden Schritt des Kriging zur geostatistischen Modellierung benutzt. Diese Abhängigkeit einzelner Proben bewirkt bereits die fehlerhafte Berechnung von Mittelwerten u. ä., was durch andere Faktoren noch verstärkt werden kann. Dabei handelt es sich um die bevorzugte Platzierung von Aufschlüssen an Punkten, an denen man sich bessere oder mehr Informationen erhofft, die also für die Planung von größerem Interesse sein dürften. Hierzu gehören beispielsweise Aufschlussbohrungen, die bevorzugt in der lateralen Nähe eines vermuteten Schichtauskeilens oder direkt in geologische Anomalien abgeteuft werden, wie etwa in die Geschiebemergelfenster, die in Berlin für Grundwasserhaltungsmaßnahmen tief reichender Baugruben von besonderem Interesse sind. Damit ergeben sich zwangsläufig Unterschiede in der Dichte der Aufschlussraster und lokale Cluster. Ebenfalls von zentraler Bedeutung sind die typischerweise vorhandene Heteroskedastizität und die Instationarität der Daten.

## 4 ARBEITEN AM FACHGEBIET INGENIEURGEOLOGIE DER TU-BERLIN

### 4.1 Generierung geologischer Modelle

Auf eine Darstellung der theoretischen Grundlagen der Geostatistik muss an dieser Stelle verzichtet werden. Standardwerke sind z. B. Davis 2002 und Deutsch & Journel. Die geostatistischen Modellierungsmethoden nutzen die oben beschriebenen Eigenschaften geologischer Daten und erstellen ein objektives Modell, anhand dessen sich etwa die Auftretenswahrscheinlichkeit bestimmter Lithologien in den nichtbeprobten Stellen quantifizieren lässt. Eine allgemeine Verfahrensweise gibt Abb.2 wieder.

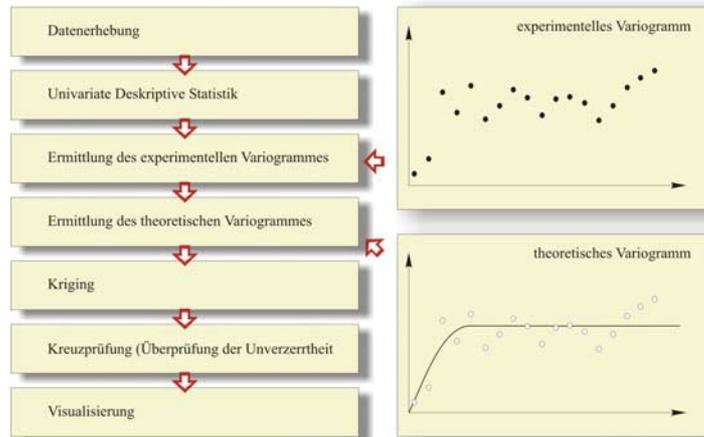


Abb.2: Schematischer Ablauf einer durch Anwendung der Geostatistik objektivierten Untergrundmodellierung

Marinoni (2000) hat solche Modelle für die glazialen Ablagerungen im zentralen Teil Berlins erstellt. Damit ist die Konstruktion von Isohypsenkarten einzelner Schichtober- oder -unterseiten möglich. In gleicher Weise können auch Isopachenkarten einzelner Schichtglieder erstellt werden (Abb.3).

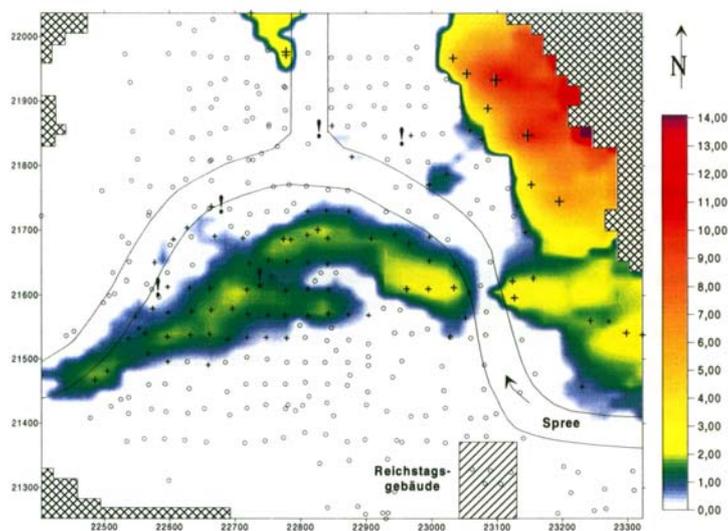


Abb.3: Geostatistisch modellierte Mächtigkeit der organischen Schichtablagerungen holozänen Alters im zentralen Bereich Berlins als Beispiel eines geologisch-geometrischen Modells (aus Marinoni 2000)

Bei den hier beschriebenen geometrisch-geologischen Modellen handelt es sich im Grunde um 2,5-dimensionale Modelle, die die Oberfläche einer Funktion  $z = f(x, y)$  beschreiben. Das bedeutet, dass an jedem Punkt über die Fläche innerhalb einer Schicht nur ein Parameter modelliert wird, hier die Schichtmächtigkeit  $z$  an der Stelle  $(x, y)$  oder die jeweiligen Schichtober- oder -unterseiten. Dazu werden an den zu modellierenden Rasterpunkten alle benachbarten Bohrungen mit den bekannten erforderlichen Parametern in den Modellierungsprozess eingebracht. Vollständige geometrisch-geologische Modelle ergeben sich durch Stapelung der Mächtigkeiten der einzelnen Schichtglieder in genetischer Reihenfolge. Es können nun Profilschnitte beliebiger Richtung und beliebiger Linienführung abgerufen werden, sofern sich deren Verlauf an den Rasterpunkten des Netzes orientiert.

## 4.2 Generierung geotechnischer Modelle

Im Unterschied dazu handelt es sich bei der Modellierung gemessener geotechnischer Parameter um echte dreidimensionale Modelle. Die Variographie erfordert somit dreidimensionale Suchbereiche. Der besseren Visualisierung wegen werden sie jedoch durch horizontale Ebenen beliebiger geodätische Höhe geschnitten, die dann separat dargestellt werden. Abb.4 zeigt ein derartiges Beispiel, basierend auf dem Parameter „Spitzendruck“ aus Drucksondierungen. Die mit dem Spitzendruck korrelierbare Lagerungsdichte des Baugrundes kann dann in beliebiger Tiefe unterhalb des Gründungssohle veranschaulicht werden.

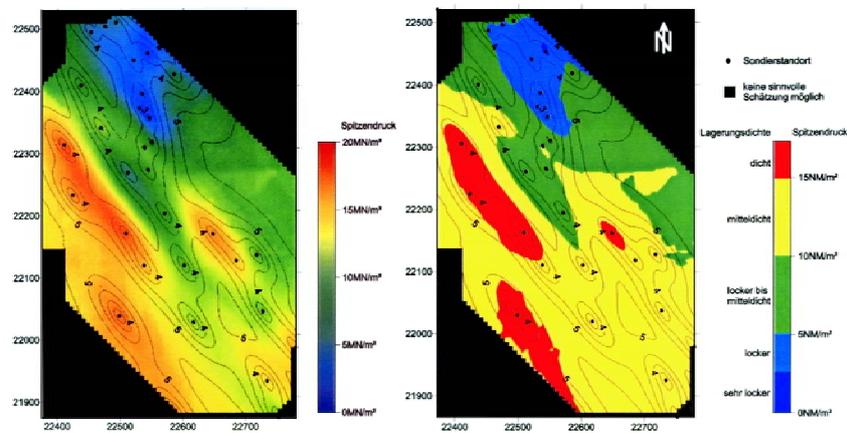


Abb.4: Geostatistisch modellierter Spitzendruck aus Drucksondierungen (CPT) nach DIN 4096 in der Ebene 32 mNN und Ableitung der Lagerungsdichte  $D$  des Bodens nach DIN 18126 im zentralen Bereich Berlins als Beispiel eines geotechnischen Modells (aus Tiedemann & Grunow 2000)

## 4.3 Charakteristische Werte

Am Fachgebiet Ingenieurgeologie laufende Forschungen beschäftigen sich u. a. mit der Problematik der charakteristischen Werte (DIN 4020) und der damit in direkter Verbindung stehenden Ermittlung der Teilsicherheitsbeiwerte auf statistischer Basis. Motiviert wurde dies durch die unscharfen Erläuterungen dieser beiden Begriffe in den geotechnischen Normen, die auch nach der Entwicklung und bereits teilweise erfolgten Etablierung der europäischen Normung verblieben sind. Zum Übergang vom globalen Sicherheitskonzept zum Teilsicherheitskonzept siehe z. B. Witt (1998).

Hinsichtlich der Forderungen der Normen nach Festlegung charakteristischer Werte für die projektrelevanten geotechnischen Parameter kann eine Objektivierung nur auf breiter statistischer Basis erfolgen, wie Kruse (2003) anhand von Scherversuchen an Geschiebemergeln zeigt.

## 4.4 Homogenbereiche

Eine zweite, erst in jüngerer Zeit initiierte Forschungsrichtung am Fachgebiet Ingenieurgeologie beschäftigt sich mit der objektivierten Abgrenzung von Homogenbereichen im Lockergestein. Auch dieser Begriff ist in den entsprechenden Normen nur unscharf definiert. So bleibt es dem Projektbearbeiter überlassen, wie er den Untergrund unter Berücksichtigung seiner Erfahrung und etwaiger aus dem Projekt selbst resultierender Vorgaben in Homogenbereiche einteilt. Im Fels erfolgt die Homogenbereichsabgrenzung meist anhand der Gefügestatistik und der Lithologie. Vereinzelt finden sich Anwendungen von rechnerischen Verfahren auf statistischer Basis, die als Eingangsparameter auch andere Daten, z. B. Werte eines beliebigen geotechnischen Parameters entlang einer Tunnelachse zulassen (z. B. Liu, Brosch, Klima & Riedmüller 1999).

Im Lockergestein zeigen die Häufigkeitsverteilungen von Schichtmächtigkeiten oder geotechnischen Parametern oftmals bi- oder gar multimodalen Charakter. Zudem können Untersuchungen von separaten Bereichen innerhalb des Gesamtgebietes völlig abweichende geostatistische Parameter (Reichweite, Schwellenwert, Anisotropie) erbringen. Beides lässt die Existenz distinkter Subpopulationen und damit unterschiedlicher Homogenbereiche vermuten, sofern die ermittelten Abweichungen statistisch signifikant und also nicht rein zufällig sind. Zusammen mit der Forderung der DIN 4020 bestehen folglich insgesamt drei Gründe, sich mit der Abgrenzung und Definition von Homogenbereichen zu beschäftigen (siehe Abb.5).

Zur Homogenbereichsabgrenzung existieren diverse Verfahren, wie etwa Diskriminanz-, Cluster- oder Korrespondenzanalyse, die sich entweder direkt oder erst nach Modifikation des Datensatzes oder des Verfahrens auch auf geologische und damit räumlich strukturierte Daten anwenden ließen. Dabei könnten sowohl uni- als auch multivariate Datensätze verwendet werden. Zusätzlich sind außerdem bereits Methoden vorhanden, in die die räumlichen Eigenschaften direkt eingehen, wie etwa Split Moving Windows Dissimilarity Analysis.

Künftige Untersuchungen sollen die Frage beantworten, welche dieser Methoden sich in bezug auf geologische Datensätze am besten für die Homogenbereichsabgrenzung in lateraler und vertikaler Richtung eignet und welche Auswirkungen dies auf eine nachfolgende geostatistische Modellierung hat. Dass dies bislang noch nicht stattgefunden hat, lässt sich auf die mit einer Homogenbereichsabgrenzung meist verbundene Reduktion der für Variographie und Kriging zur Verfügung stehenden Datenmenge zurückführen. Es sind folglich schlicht praktische Erwägungen, die den wissenschaftlichen Erfordernissen vorgezogen werden. Es wird jedoch vermutet, dass die Variographie weniger sensibel auf geringe Datenmengen reagiert, wenn alle verwendeten Daten aus einer einzigen Subpopulation stammen. Ein darauf aufbauendes Kriging könnte daher gegenüber herkömmlichen Modellen trotzdem eine Verbesserung darstellen.

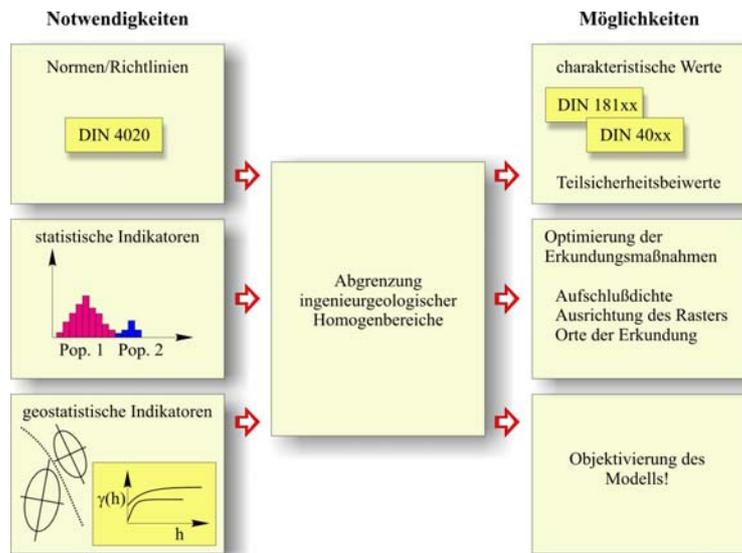


Abb.5: Argumente für die Homogenbereichsabgrenzung

Die solchermaßen generierten Untergrundmodelle müssen schließlich einer Evaluierung unterzogen werden. Dieses sind zunächst *statistische Kriterien*, die den räumlichen Bezug der Daten untereinander unberücksichtigt lassen, und *geostatistische Kriterien*, die den räumlichen Bezug der Daten mit einbeziehen. Sämtliche Modelle sind danach auch hinsichtlich *allgemeiner Kriterien* zu bewerten, die auch zur Bewertung anderer, nicht-geologischer, Modelle geeignet wären, wie etwa Plausibilität, Reliabilität, Portabilität usw.

## 5 ZUSAMMENFASSUNG UND SCHLUSSFOLGERUNGEN

Die in Berlin für ein städtisches Geoinformationssystem in Betracht kommenden Daten und Datenbanken stellen ein wirtschaftliches Potential dar, das durch die Integration von geotechnischen Daten noch erheblich vergrößert werden könnte. Gelänge es, alle Datenpools miteinander zu verknüpfen, entstünde eine schnell abrufbare, wahrscheinlich auch kostengünstige Grundlage für die Stadtplanung. Die Hindernisse, die der Entwicklung eines solchen komplexen Geoinformationssystems im Wege stehen, sind informationstechnischer und juristischer Art.

Hinsichtlich der geologischen und geotechnischen Datensätze haben Untersuchungen den prinzipiellen Weg zum objektivierten Baugrundmodell aufgezeigt, der über die geostatistischen Verfahren Variographie und Kriging führt. Offen sind bislang die Antworten auf die Fragen nach einer objektivierten Homogenbereichsabgrenzung als Voraussetzung für die Definition statistisch korrekter Grundgesamtheiten sowie deren Auswirkungen auf die Ergebnisse geostatistischer Modellierung.

## 6 LITERATURHINWEISE

- Davis J.C.: Statistics and Data Analysis in Geology. Wiley and Sons, Chichester, 3. Aufl., 638 S., 2002.
- Deutsch C.V., Journel A.G.: GSLIB Geostatistical Software Library and User's Guide, Oxford University Press, 340 S., 2002.
- Kruse B.: Die Festlegung charakteristischer Werte von Bodenkenngrößen – Empirie oder Statistik?, 14. Tagung für Ingenieurgeologie, Kiel, S. 247 - 252, 2003.
- Liu Q., Brosch F.-J., Klima K. & Riedmüller G.: Anwendung des Tunneldatenbanksystems DEST, in: Reik G. & Paehge W. [Hrsg.]: 1. Clausthaler FIS-Forum TU Clausthal Oktober 1997, Papierflieger-Verlag, Clausthal-Zellerfeld, S. 67-73, 1999.
- MICUS: Aktivierung des Geodatenmarktes in Nordrhein-Westfalen – Marktstudie, im Auftrag der Landesregierung NRW, media NRW: Band 24, Düsseldorf, 84 S., 2001.
- MICUS: Produktkonzept zur Öffnung des Geodatenmarktes, im Auftrag der Landesregierung NRW, Düsseldorf, 75 S., 2002.
- MICUS: Der Markt für Geoinformationen: Potenziale für Beschäftigung, Innovation und Wertschöpfung, im Auftrag der Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit, 171 S., 2003.
- Marinoni O.: Geostatistisch gestützte Erstellung baueologischer Modelle am Beispiel des Zentralen Bereiches von Berlin, Dissertation am Fachgebiet Ingenieurgeologie der TU Berlin, Mensch & Buch Verlag, Berlin, 149 S., 2000.
- Müller F.: Geo-Broker – Eine Chance für Berlin – Die Geoinformationen von Berlin wirtschaftlich nutzbar machen -, Baukammer Berlin 2/2003, S. 1 - 28, 2003
- Reik G. & Vardar M.: Zur Besonderen Problematik der Modellierung geologischer Systeme und ihrer Reaktion auf technische Eingriffe, in: Reik G. & Paehge W. [Hrsg.]: 1. Clausthaler FIS-Forum TU Clausthal Oktober 1997, Papierflieger-Verlag, Clausthal-Zellerfeld, S. 25-38, 1999.
- Tiedemann J. & Grunow R.: Geostatistische Schätzmodelle des Baugrunds als objektiviert Planungsgrundlagen, Geotechnik 23, Nr. 4, 2000
- Witt K.J.: Grundsätzliches zum Teilsicherheitskonzept in der Geotechnik, Beitrag im Seminar „Geotechnische Nachweise nach dem neuen Sicherheitskonzept, Bauhaus-Universität Weimar, 1998.
- www.berlin.de (Zugriff 12.12.2003)
- www.geokomm.de (Zugriff 12.12.2003)