

Bauhaus - Universität Weimar

Fakultät Bauingenieurwesen

Professur Grundbau

Diplomarbeit

Thema: **Strategien zur optimalen Baugrunderkundung auf der Basis geostatistischer Baugrundmodelle**

eingereicht von: Andreas Zahlten

Reg.-Nr. B/ 2004/ 106

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. K.J. Witt
Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau

Zweitprüfer: Dipl.-Ing. M. Schönhardt
Bauhaus-Universität Weimar, Professur Grundbau

Ausgabedatum: 09.05.2005

Abgabedatum: 01.08.2005

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abkürzungen und Symbole	5
1. Einleitung.....	8
2. Grundlagen der Geostatistik und Interpolation.....	10
2.1 Geostatistik, Grundlegende Konzepte.....	10
2.2 Geostatistische Modellbildung	10
2.3 Variographie	11
2.3.1 Das Variogramm - Modellierung räumlicher Autokorrelationen.....	11
2.3.2 Das experimentelle (empirische) Variogramm.....	11
2.3.3 Modellierung des theoretischen Variogramms.....	12
2.3.4 Parameterstudie zum Verlauf der exponentiellen Variogrammfunktion.....	14
2.3.5 Empfehlungen zur Wertepaarbildung in der Variographie	15
2.3.6 Isotropie - Anisotropie des Datenfeldes.....	17
2.4 Interpolationsmethoden	18
2.5 Nichtstatistische Verfahren zur räumlichen Interpolation von Punktdaten	19
2.5.1 Grundlagen der räumlichen Interpolation.....	19
2.5.2 Polygonmethode	19
2.5.3 Interpolation mittels Triangulierung.....	20
2.5.4 Inverse - Distance Methode (IDW)	20
2.5.5 Vergleich nichtstatistischer Interpolationsmethoden	21
2.6 Statistische Interpolationsverfahren	23
2.6.1 Bestimmung von Verteilungskennwerten.....	23
2.6.2 Grundlage geostatistischer Verfahren	23
2.6.3 Geostatistische Verfahren - Das Interpolationsverfahren Ordinary Kriging.....	24
2.6.3.1 Grundlagen des Krigings.....	24
2.6.3.2 Der Krige - Schätzer.....	24
2.6.3.3 Bestimmung der Gewichte des Krige-Schätzers.....	25
2.6.3.4 Wichtige Aussagen und praktische Aspekte zum Krigingverfahren	27
2.6.4 Geostatistische Verfahren - Simulation	28
2.6.5 Geostatistische Verfahren - Messnetzoptimierung	29
2.6.6 Geostatistische Verfahren - Hybridverfahren.....	29
3. Krigingsimulationen mit streuenden Kenngrößen.....	30
3.1 Einfluss der Variogramm-Funktionsparameter a, b auf die Krigingvarianz	30
3.2 Einfluss der streuenden Kenngrößen auf die Krigingergebnisse	34
3.3 Vorbereitung der Computersimulationen.....	35
3.3.1 Ermittlung der Eingangsparameter zur Simulation mit streuenden Kenngrößen	35
3.3.2 Stochastische Simulation der Streuung.....	35

3.4	Ablaufschritte der Computersimulationen mit streuenden Kenngrößen	37
3.5	Auswertung der Krigingresultate des Datensatzes „Zufallsdaten“	39
3.5.1	Krigingschätzer und Krigingvarianz unter Annahme deterministischer Variogrammparameter a, b und nicht streuender Kenngrößen	39
3.5.2	Krigingresultate unter Annahme variierender Variogrammparameter a und deterministischer Variogrammparameter b und determ. Kenngrößen	40
3.5.3	Krigingresultate unter Annahme variierender Variogrammparameter b und deterministischer Variogrammparameter a und determ. Kenngrößen	42
3.5.4	Krigingresultate unter Annahme variierender Variogrammparameter a und b und unter Annahme deterministischer Kenngrößen	44
3.5.5	Krigingresultate unter Annahme variierender Variogrammparameter a und b und streuender Kenngrößen.....	46
3.6	Auswertung der Krigingresultate des Datensatzes „Artern_OK_Schicht“	48
4.	Messnetzplanung und Optimierung	50
4.1	Einordnung der Messnetzplanung im Prozess der geostat. Analyse	50
4.2	Ablauf einer Messnetzplanung und Optimierung	55
4.3	Ermittlung von Klassen des zusätzlichen Untersuchungs- und Erkundungsbedarfs	56
4.3.1	Klassen des Erkundungsbedarfes bezüglich der Messnetzkonfiguration (Reduktion der Krigingvarianz) festlegen	57
4.3.2	Klassen des Erkundungsbedarfes bezüglich der Unsicherheit der Messwerte (Reduktion der Kenngrößenvarianz) festlegen	59
4.3.3	Klassen des Erkundungsbedarfes bezüglich der Vorgaben für Abstände direkter Aufschlüsse nach DIN 4020 und für besondere Bauwerkspunkte festlegen	60
5.	Strategien der Optimierung	61
5.1	Reduktion der Kenngrößenvarianz	61
5.1.1	Ablaufschritte bei der Bestimmung von Baugrundkenngrößen und den damit verbundenen Unsicherheiten.....	61
5.1.2	Anwendung statistischer Verfahren zur Bestimmung charakteristischer Werte	64
5.1.3	Systematische und zufällige Fehler bei der Messwertbestimmung und deren Ursachen.....	64
5.1.4	Verbesserung der Baugrundkenngrößen mittels BAYES´scher Schätzung.....	65
5.1.5	Aussagekraft der BAYES´schen Schätzung.....	69
5.1.6	Empirische Studie zum BAYES - Verfahren anhand des Datensatz „Zufallsdaten“ KW5	70
5.2	Reduktion der Krigingvarianz durch Einfügen neuer Erkundungspunkte im Messnetz	76
5.2.1	Optimierung einer nicht ausreichend beprobten Fläche.....	76

5.2.2	Berechnung des Integrals über die Krigingvarianz durch numerische Integration	79
5.2.3	Berechnung des Flächenintegrals der Krigingvarianz über dem Detailerkundungsgebiet durch numerische Integration	80
5.2.4	Fallbeispiel zur Reduktion der Krigingvarianz durch Einfügen neuer Erkundungspunkte, berechnet mit „GEOSTAT“	82
5.2.4.1	Updating der Krigingvarianz	82
5.2.4.2	Auswertung der Ergebnisse des Updating - Prozesses	90
5.2.4.3	Untersuchung eines Schnittes durch das Detailerkundungsgebiet	98
5.3	Reduktion der Krigingvarianz - Bestimmung eines mittleren Erkundungsabstandes.....	100
5.3.1	Optimierung einer nicht beprobten Randfläche mit Hilfe der Variogrammfkt.....	100
5.3.2	Empirische Studie zur Optimierung des mittleren Erkundungsabstandes anhand des Datensatz „Artern_OK_Schicht“ KW3	102
5.3.3	Fallbeispiel zur Optimierung des mittleren Erkundungsabstandes mit Hilfe von „GEOSTAT“	107
5.3.3.1	Variation des mittleren Erkundungsabstandes (Rasterweite) im Detailgebiet	107
5.3.3.2	Auswertung der Ergebnisse der Variation des mittleren Erkundungsabstandes (Rasterweite) im Detailgebiet	115
5.3.3.3	Untersuchung eines Diagonalschnittes durch die Detailerkundungsfläche.....	121
5.3.3.4	Untersuchung des Einflusses der Vorinformation auf die Detailerkundung	125
5.4	Der Unsicherheitsplot	130
5.4.1	Verknüpfung der Unsicherheiten bedingt aus Kenngrößen- und Krigingvarianz	130
5.4.2	Generierung und Auswertung eines Unsicherheitsplots	133
5.4.3	Beispiel 1 - Anwendung von Unsicherheitsplots bei der Detailerkundung eines Standortes.....	137
5.4.4	Beispiel 2 - Anwendung von Unsicherheitsplots bei der Planung eines neuen Erkundungsrasters für einen Standort (Variation der Rasterweite).....	149
5.4.5	Untersuchung des Einflusses der Anzahl der Erkundungspunkte und der Rasterweite eines regelmäßigen Erkundungsrasters auf das Kenngrößenvarianz - Konfidenzintervall.....	153
5.4.6	Beispiel 3 - Anwendung von Unsicherheitsplots bei der Planung eines neuen Erkundungsrasters für einen Standort (Variation der KG-Streuung).....	155
6.	Zusammenfassung und Ausblick	160
	Literaturverzeichnis	164
	Selbständigkeitserklärung	166
	Abbildungsverzeichnis.....	167

Abbildungsverzeichnis (Anhang).....	174
Tabellenverzeichnis.....	177

Anhang

Seite Anhang

A-1.	Anforderungen an geotechnische Erkundungen nach DIN 4020	1
A-1.1	Bewertung der geotechnischen Untersuchungen	1
A-1.2	Einstufung von bautechnischen Maßnahmen in Geotechnische Kategorien (GK).....	1
A-1.3	Anordnung, Abstände, Aufschlusstiefe direkter Aufschlüsse nach DIN 4020.....	2
A-1.3.1	Anordnung der Erkundungspunkte	2
A-1.3.2	Abstände der Erkundungspunkte	3
A-1.3.3	Aufschlusstiefen an den Erkundungspunkten.....	3
A-2.	Dokumentation Datensatz „Zufallsdaten“	4
A-2.1	Überblick, statistische Kennwerte, Randbedingungen	4
A-2.2	Auflistung Datensatz „Zufallsdaten“	6
A-3.	Dokumentation Datensatz „Artern_OK_Schicht“	10
A-3.1	Überblick, statistische Kennwerte, Randbedingungen	10
A-3.2	Auflistung Datensatz „Artern_OK_Schicht“	12
A-4.	Einfluss der streuenden Kenngrößen auf das theoretische Variogramm	13
A-4.1	Einfluss der streuenden KG auf den Parameter a (Schwellenwert).....	14
A-4.2	Einfluss der streuenden KG auf den Funktionsparameter b (Reichweite).....	15
A-4.3	Einfluss der streuenden KG auf σ_a des Funktionsparameters a.....	17
A-4.4	Einfluss der streuenden KG auf σ_b des Funktionsparameters b	18
A-5.	Simulations- Eingangparameter a, b, σ_a, σ_b.....	20
A-6.	Krigingergebnisse Datensatz „Zufallsdaten“, KW4	24
A-7.	Krigingergebnisse Datensatz „Zufallsdaten“, KW5	55

1. Einleitung

Der Baugrund ist durch seine geologische Entstehung und verschiedener anthropogener Einflüsse geprägt. Dadurch ist er in seinen physikalischen und geometrischen Eigenschaften inhomogen. Aufgrund des oftmals geringen Erkundungsumfangs durch wenige punktförmige Aufschlüsse unterliegen die Baugrunddaten einer zufälligen und systematischen räumlichen Streuung. Die Unsicherheit der Messergebnisse ist u.a durch Fehlerquellen in den Messverfahren, in den empirischen Beziehungen zur Bestimmung der Baugrundparameter und bei der Datenbearbeitung sowie in der Heterogenität des Mediums Boden begründet.

In der Praxis werden aus den Erkundungsergebnissen des Baugrundes Schichtenverzeichnisse erstellt, in denen Homogenbereiche definiert werden können. Mittels definierter Schichtmächtigkeiten oder festgelegter Schichtgrenzen lässt sich ein dreidimensionales geologisches Schichtenmodell aufbauen, das aus mehreren miteinander verbundenen zweidimensionalen Datensätzen besteht. Für Interpolationen innerhalb eines Untersuchungsraumes im geologischen Modell haben sich geostatistische Methoden als geeignet erwiesen.

Die Modellierung des Baugrundes mit Hilfe von geostatistischen Verfahren in der Praxis geschieht bisher in der Regel auf der Annahme deterministischer Eingangsgrößen. Die Untersuchung des Einflusses streuender und unsicherer Ausgangskennwerte auf die Ergebnisse der einzelnen Stufen der geostatistischen Modellbildung erlaubt eine bessere Beurteilung der Berechnungsergebnisse. In der Geotechnik wird deshalb versucht, die Vorteile geostatistischer Verfahren in bodenmechanische Nachweise einzubeziehen. Bodenkenngrößen können damit qualifizierter und mit verbesserter Aussagesicherheit in die Gründungsberechnungen und Nachweise eingehen.

Baugrunderkundungen sind immer ein bedeutender Kostenfaktor bei der Entwicklung und Durchführung eines Bauprojektes. Der Baugrund kann deswegen unter dem Gesichtspunkt der Wirtschaftlichkeit nur an wenigen Stellen untersucht werden. Großflächige Areale, die z.B. für eine Ansiedlung von Industrie und Gewerbe vorgesehen sind, werden im Rahmen einer Vorerkundung punktuell beprobt. Sind dann innerhalb von Lokalbereichen konkrete Projekte geplant, werden diese Flächen in einer Nacherkundung detailliert und spezifisch untersucht.

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung von Strategien, die es erlauben, unter Einbeziehung von Ergebnissen aus Vorerkundungsuntersuchungen und anderen zusätzlichen Informationsquellen eine optimale Anordnung der Punkte für eine Nacherkundung eines Lokalbereiches mit möglichst geringen zusätzlichen Kosten zu finden. Mit Hilfe einer optimierten Messnetzkonstellation und einer verbesserten Aussagekraft der Messwerte soll die Aussagesicherheit der räumlichen Schätzung der Baugrundkenngrößen an unbeprobten Orten verbessert und gesteigert werden.

Hierzu gilt es die Unsicherheiten aus dem Messnetz und aus den Baugrundkenngrößen zu analysieren, miteinander zu verknüpfen und Strategien zur Reduktion der Unsicherheiten zu entwickeln.

Vorgehensweise

Die Arbeit ist in folgende Kapitel gegliedert:

➤ Kapitel 2

In der vorliegenden Arbeit werden in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen der Geostatistik, insbesondere der Variographie mit ihren Teilschritten, erläutert. Im Anschluss werden nichtstatische und (geo)statistische Interpolationsverfahren vorgestellt und detailliert auf das Verfahren des Ordinary Krigings eingegangen, das in nachfolgenden Simulationen Anwendung findet.

➤ Kapitel 3

Methoden zur Berücksichtigung von unsicheren Eingangsgrößen beim Kriging werden in Kapitel 3 vorgestellt. Der Einfluss unsicherer Kenngrößen auf geostatistische Interpolationsmethoden wird erörtert. Die Bearbeitung unsicherer Eingangswerte ist mit Hilfe des Programms „Geostat“ realisierbar. Das geostatistische Interpolationsverfahren Ordinary Kriging wird hinsichtlich der Aussagefähigkeit der Ergebnisse mit unsicheren Eingangsgrößen untersucht. Dafür werden streuende Parameter der theoretischen Variogrammfunction sowie die Eigenvarianz der Kenngrößen im Kriging berücksichtigt. Die Erkenntnisse werden als Ausgangsinformationen für Kapitel 4 und 5 genutzt.

➤ Kapitel 4

In Kapitel 4 wird das Verfahren der „Messnetzplanung und Optimierung“ als ein Unterpunkt einer geostatistischen Analyse vorgestellt. Informationen über Unsicherheiten, die sich aus der Varianz des Krigingschätzers (Kenngrößenvarianz) und der Krigingvarianz ergeben, werden miteinander verknüpft. Danach werden der zusätzliche Untersuchungsbedarf und die notwendigen Optimierungsstrategien festgelegt.

➤ Kapitel 5

Die Strategien der Optimierung bezüglich der Reduktion der Kenngrößenvarianz und der Krigingvarianz werden in Kapitel 5 behandelt. Insbesondere werden die Unsicherheiten bei der Bestimmung von Baugrundkenngößen thematisiert, Verbesserungsmöglichkeiten mittels der BAYES-Methode erläutert. Nachfolgend werden Strategien der Messnetzoptimierung zur Reduktion der Krigingvarianz behandelt. Im Anschluss wird die Verknüpfung der Unsicherheiten der KG-Varianz und der Krigingvarianz in einem Unsicherheitsplot dargestellt und ausgewertet.

➤ Kapitel 6

Im abschließenden Kapitel 6 werden die Hauptpunkte und die Ergebnisse der Arbeit zusammengefasst und ein Ausblick für eine Weiterentwicklung des Programms „Geostat“ gegeben, damit die aufgezeigten Strategien der Optimierung anwenderfreundlich und nutzerorientiert in der Praxis zum Einsatz kommen können.