

# Baugrundmodellierung unter Nutzung stochastischer Methoden

*Matthias Schönhardt*

*Karl Josef Witt*

## Zusammenfassung

Der klassischen Beschreibung des Baugrundes liegen punktförmige Aufschlüsse in Form von Schichtenprofilen oder Sondierdiagrammen zugrunde. Aussagen über Zwischenbereiche werden meist linear interpoliert oder subjektiv festgelegt. In diesem Beitrag wird gezeigt wie mit Hilfe geostatistischer und statistischer Methoden solche Baugrundmodelle präzisiert und in ihrer Zuverlässigkeit quantifiziert werden können. Die zusätzliche Berücksichtigung von Entscheidungsalgorithmen, beispielsweise eines Indikatoransatzes für Systemrandbedingungen, ermöglicht die Modellierung von Schichtgrenzen wie auch von Inhomogenitäten im Baugrund. Methoden der Geostatistik erlauben zudem, die Zuverlässigkeit des Baugrundmodells zu überprüfen.

Den einzelnen Homogenbereichen des Baugrundmodells werden die beschreibenden Baugrundkennwerte dreidimensional zugeordnet. Diese Grundlage ermöglicht geotechnische Grenzzustände unter Einbeziehung aller streuenden Kenngrößen auszuwerten und daraus abgeleitete Versagenswahrscheinlichkeiten bzw. Zuverlässigkeiten anzugeben.

## Einleitung

Der Baugrund ist aufgrund der genetischen und anthropogenen Prozesse hinsichtlich seiner geometrischen und physikalischen Eigenschaften inhomogen. Aufbauend auf Baugrunderkundungen sind vom geotechnischen Sachverständigen Aussagen zur Schichtenfolge, zu Homogenbereichen und den ihnen zuzuordnenden Kennwerten zu treffen.

In der Praxis wird stets eine relativ geringe Anzahl von Baugrundaufschlüssen zur Beurteilung einer Baufläche ausgeführt. Bereits bestehende Informationsquellen aus dem Umfeld sind oft nicht verfügbar oder in ihrer Qualität nicht einschätzbar. Die Aussagen zu unbeprobten Zwischenbereichen eines Untersuchungsgebietes werden durch subjektive Erfahrung beeinflusst, gelegentlich auch durch Interpolationen zwischen den Aufschlussstellen abgeleitet. Aufbauend auf einem solchen Baugrundmodell werden Grenzzustände deterministisch untersucht.

Um den streuenden Charakter der Kennwerte zu berücksichtigen, wird hier ein Baugrundmodell auf der Grundlage statistischer und geostatistischer Methoden entwickelt. Aus den diskreten Informationen zur Baugrundsichtung wird auf der Basis verknüpfter geostatistischer Methoden das Baugrundsichtenprofil des Untersuchungsgebietes aufgebaut. Anthropogene Einflüsse und Baugrundinhomogenitäten werden manuell integriert. Innerhalb der nun vorliegenden Homogenbereiche (Baugrundsichten) können die charakteristischen Baugrundkennwerte dreidimensional generiert werden.

Als beispielhafte Anwendung wird der Baugrund eines unmittelbar am Mittelrhein gelegenen Stadtgebietes beschrieben. Die Methodik der geostatistischen Modellbildung wird aufgezeigt. Das erstellte Baugrundmodell ermöglicht dann die Untersuchung von Grenzzuständen, wie beispielsweise der hydraulischen Grundbruchsicherheit.

## **Ermittlung geometrischer Kenngrößen und charakteristischer Baugrundkennwerte aus Aufschlüssen**

Die geotechnische Beurteilung von Untersuchungsgebieten beruht auf diskreten Standorterkundungen (Bohrungen, Sondierungen) und deren Auswertung in Laborversuchen. Als Resultat erhält man für den Erkundungsort Schichtungsprofile sowie Datensätze zu unterschiedlichen Baugrundkennwerten. Der Umfang der Datensätze ist abhängig von der Anzahl der Aufschlüsse und der Laborversuche. Die ermittelten Realisationen streuen.

Die jeweiligen relevanten Standortkenngrößen, wie beispielsweise die Schichtmächtigkeiten oder die maßgebenden Baugrundkennwerte, werden basierend auf diesen Datensätzen zumeist durch subjektive Erfahrung festgelegt. Für nicht erkundete Zwischenbereiche eines Untersuchungsgebietes werden die Schichtmächtigkeiten des Baugrundprofils sowie die zugehörigen Baugrundkennwerte geschätzt, beziehungsweise durch einfache Interpolationen bestimmt. Zusätzliche Informationen aus anderen Quellen werden meist nicht berücksichtigt oder nur untergewichtet in Modellvorstellungen zur Unterstützung abgeleiteter Aussagen übernommen. Im Bezug zu den eigenen Aufschlüssen sind oft Maßstabeffekte und Redundanzerscheinungen zu erkennen und zu eliminieren. So weisen beispielsweise Laboruntersuchungen unterschiedlicher Bearbeiter für die gleiche Erkundungsstelle unterschiedliche Ergebnisse aus.

Für die Festlegung der charakteristischen Kennwerte sind einheitliche Methoden anzuwenden. Abgeleitet aus den Empfehlungen des Eurocode 7 wird ein Algorithmus vorgestellt, welcher auf umfangreichen statistischen Auswertungen beruht und im Resultat den charakteristischen Kennwert angibt [5].

Zu Beginn sind innerhalb des Datenbestandes neben den Ausreißern, Realisationen die nicht dem Homogenbereich entsprechen oder die, welche offensichtlich aus systematischen Fehlern beginnend von der Probenahme bis hin zu den Laborversuchen resultieren, zu entfernen. Die verbleibende Datengesamtheit zu einem Kennwert ist anschließend durch eine geeignete Verteilungsfunktion bzw. Dichtefunktion zu repräsentieren, welche auf der Grundlage von statistischen Testverfahren ermittelt wird. Der Mittelwert dieser Dichtefunktion ist zwar erwartungstreu besitzt aber wiederum eine eigene Verteilungs- und Dichtefunktion. Aus dieser sogenannten Mittelwertverteilung ergibt sich der charakteristische Kennwert als 5% Fraktil. Dieser entspricht auch der unteren 5% Schranke des Konfidenzintervalls für den Mittelwert der Datengesamtheit (Bild 1).

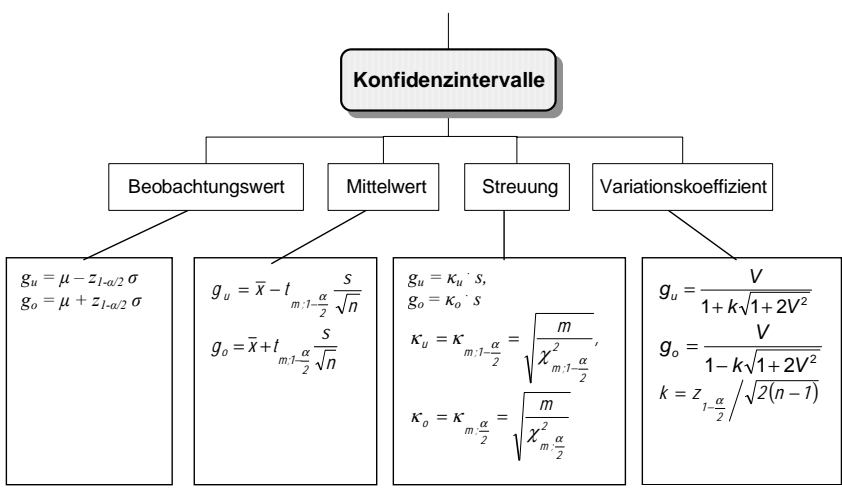
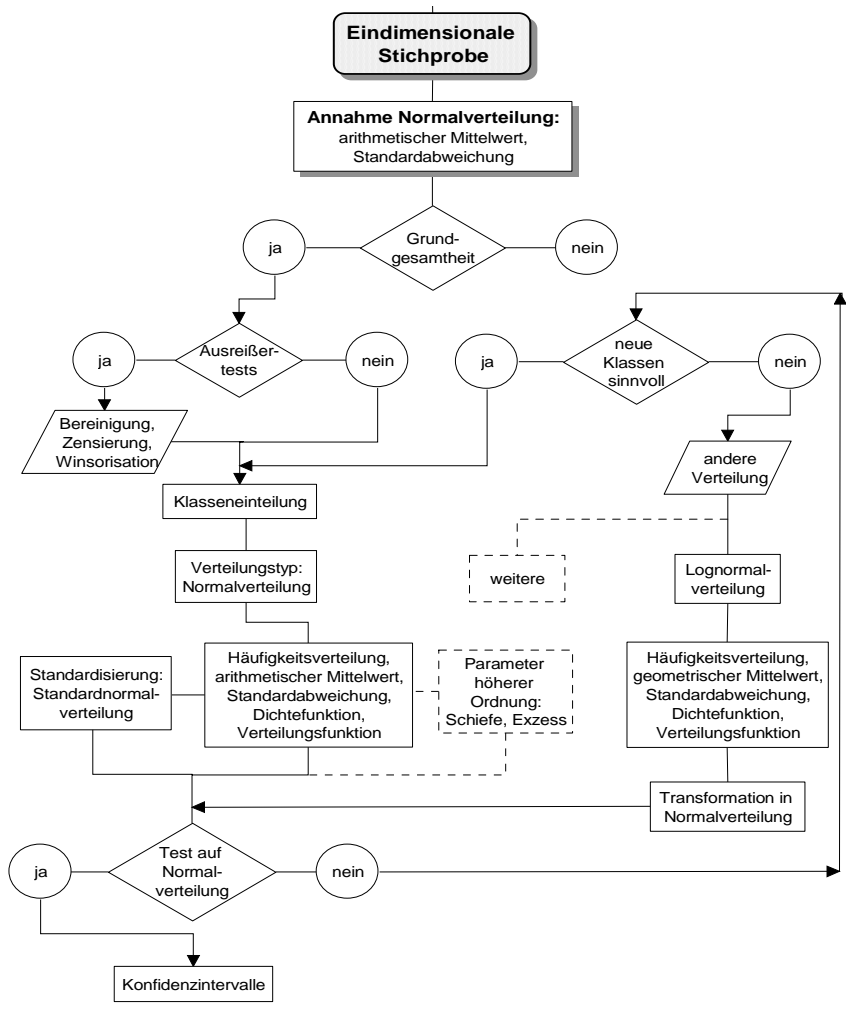


Bild 1 Beispiel eines schematischen Ablaufes zur Bestimmung des charakteristischen Kennwertes einer eindimensionalen Stichprobe

Das Hauptproblem des dargestellten Verfahrens ist in der Praxis oft der zu geringe Datenumfang. So bedingen die Testverfahren auf Normalverteilung beispielsweise einen Mindestumfang von 15-30 Werten [3], [4]. Liegen aber Beziehungen (Korrelationen) zwischen zwei oder mehr Kenngrößen vor, so können diese zur Erhöhung der Datenbasis durch den Einsatz multivariater Methoden beitragen.

Die ermittelten charakteristischen Baugrundkennwerte und Geometriegrößen werden dem Schichtenprofil der einzelnen Aufschlussorte innerhalb des Untersuchungsgebietes zugewiesen und repräsentieren dieses. Der aus mehreren charakteristischen Kennwerten und den aus dem Verfahren resultierenden statistischen Parametern gebildeten Datenvektor wird als Punktinformation im Untersuchungsgebiet räumlich eingeordnet (Bild 2). Die anschließende Baugrundmodellierung baut auf einem ausreichenden Satz solcher Punktinformationen auf.

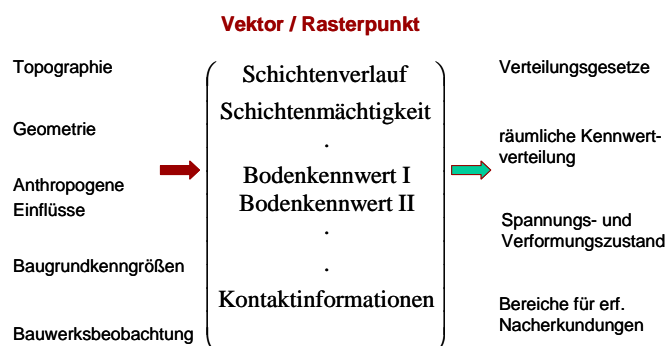


Bild 2 Beispielhafte Struktur eines Datenvektors

## Baugrundmodellierung

Neben den eindimensionalen statistischen Korrelationen zwischen zwei oder mehr Baugrundkennwerten basiert die mehrdimensionale Baugrundmodellierung eines Untersuchungsgebietes auf Autokorrelations- bzw. Variogrammfunktionen. Diese beschreiben die Abhängigkeit der charakteristischen Kennwerte der einzelnen Standorte im Untersuchungsgebiet in Bezug zu ihrem räumlichen Abstand. Entgegen den herkömmlichen, oft subjektiven Verfahren zur Schätzung von Baugrundkenngrößen und Schichtenmächtigkeiten an unbeprobten Orten im Untersuchungsgebiet, werden mathematische Algorithmen eingesetzt, die eine nachträgliche Beurteilung des generierten Baugrundmodells zulassen. Hierzu stehen statistische und geostatistische Verfahren zur Verfügung. Die statistischen Verfahren beruhen auf der Ermittlung der Autokorrelationsfunktion, während die geostatistischen Verfahren durch die Bestimmung der Variogrammfunktion gekennzeichnet sind.

Die Autokorrelationsfunktion beschreibt die Korrelation zwischen den charakteristischen Kennwerten in Abhängigkeit des Abstandes im Untersuchungsgebiet durch eine Exponentialfunktion. Der Funktionsverlauf ist stetig, monoton fallend und beginnt im Abstand  $h=0$  stets mit  $\Gamma^2=1$ . Plötzlich auftretende Differenzen (Sprungstellen) mit dem Abstand  $h \rightarrow 0$ , sind nicht abbildbar. Die Autokorrelationslänge  $\Gamma^2(h)=\delta_e=e^{-1}$  ist dabei ein Indikator für die Stärke der Korrelation eines charakteristischen Kennwertes zwischen zwei Punkten im Untersuchungsgebiet mit dem Abstand  $h$ . Sie ist kein natürlicher Grenzabstand der räumlichen Korrelation, sondern ein definiertes Maß, das sich aus der Näherung als Exponentialfunktion ergibt (Bild 3 oben).

Die Variogrammfunktion hingegen kann verschiedene Funktionsstrukturen annehmen. Sie ist eine Varianzfunktion gebildet aus den Differenzen der charakteristischen Baugrundkennwerte in Bezug zu deren räumlichen Abstand. Im Unterschied zu der zuvor beschriebenen Autokorrelationsfunktion wird mit der Variogrammfunktion die räumliche Korrelation ortsabhängiger (regionalisierter) Variablen unter stärkerer Berücksichtigung geologischer Aspekte beschrieben. Die Struktur der Variogrammfunktion ist trotz einer Anzahl von anerkannten Funktionsverläufen [1] frei wählbar. Des weiteren ist die Formulierung von Sprungstellen möglich, so dass Kenngrößen im Abstand  $h \rightarrow 0$  voneinander verschiedene Werte (Nuggeteffekt) annehmen können (Bild 3 unten).

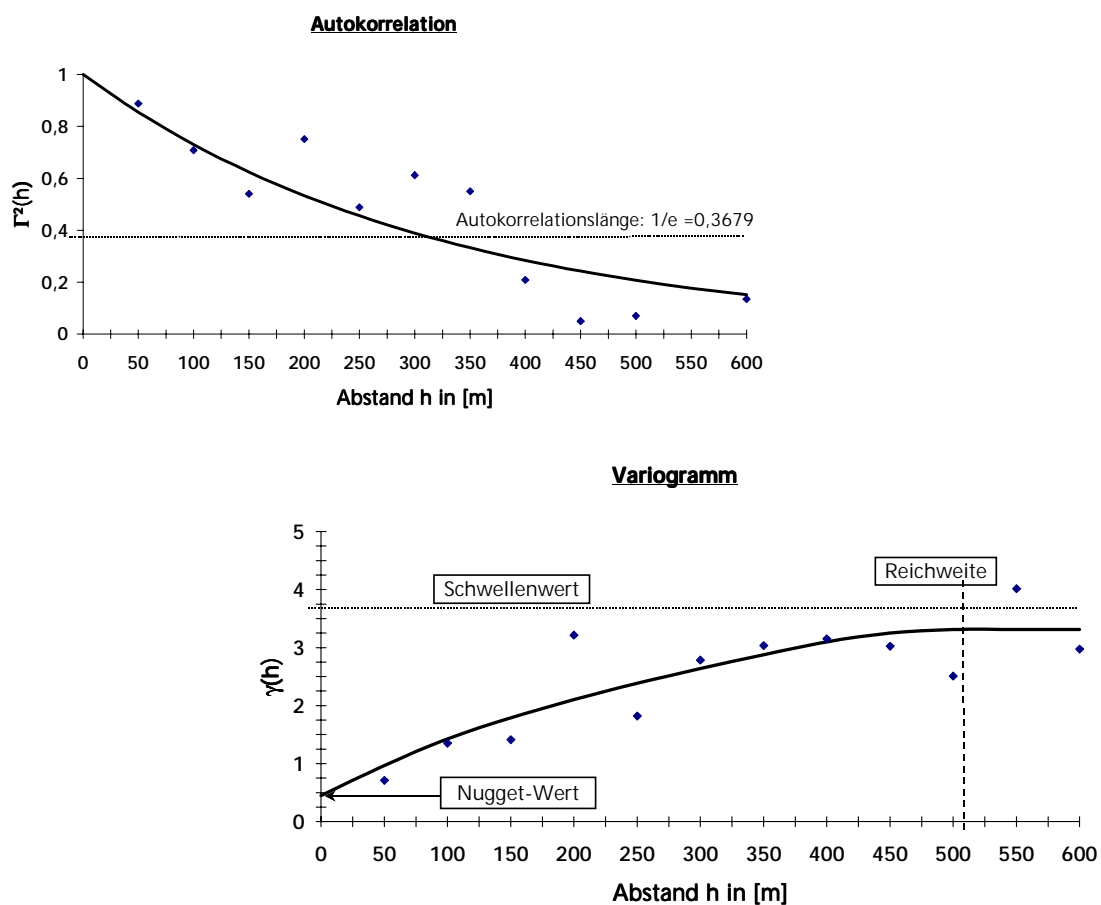


Bild 3 Darstellung einer typischen Autokorrelations- und Variogrammfunktion

Bedingt durch die Inhomogenität des Baugrundes ist partiell mit hohen Schwankungen der verschiedenen Kenngrößen in regional eingeschränkten Orten des Untersuchungsgebietes zu rechnen. Die geostatistische Baugrundmodellierung wird daher i.A. bevorzugt. Der Überblick über den strukturellen Ablauf ist Bild 4 zu entnehmen.

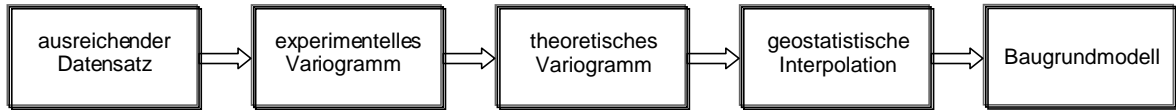


Bild 4 Struktur der geostatistischen Modellierung

Als Datengrundlage werden die ermittelten charakteristischen Standortkennwerte und deren statistische Parameter im Untersuchungsgebiet übernommen. Diese werden in eine subjektiv festgelegte, der Problemstellung angepasste, Gitterstruktur projiziert. Die Maschenweite ist für die Genauigkeit der Ergebnisse der Interpolationsverfahren maßgebend. Die Netzknoten sind die geographischen Orte für die im weiteren Verlauf der geostatistischen Modellierung Lösungsvektoren erzeugt werden sollen.

In einem ersten Schritt ist der Schichtenverlauf des Untersuchungsgebietes zu generieren. Hierzu ist das experimentelle Variogramm der Mächtigkeit für jede Schicht zu bestimmen.

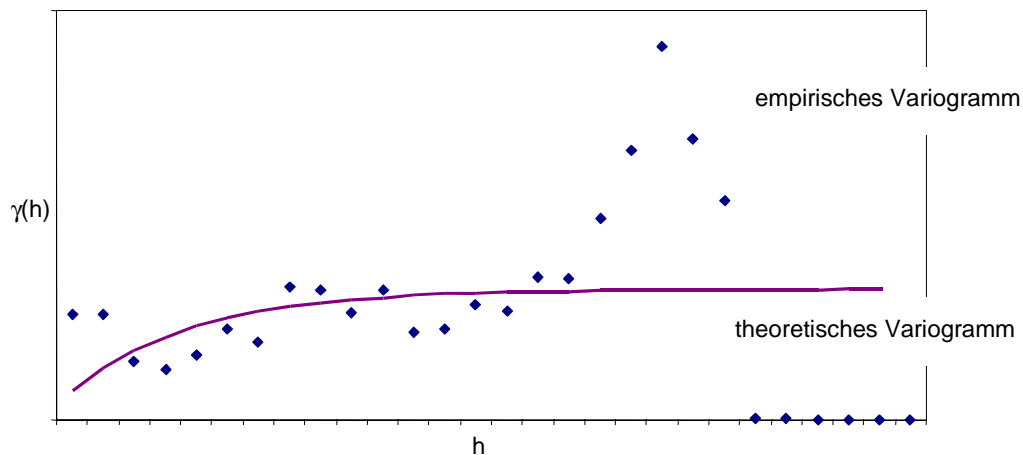


Bild 5 Beispielhafte Darstellung eines empirischen und eines theoretischen Variogramms

Aus dem empirischen Variogramm sind Aussagen zur Isotropie der einzelnen Schichten ableitbar. Isotropie liegt genau dann vor, wenn alle richtungsabhängigen Variogramme durch ein theoretisches Variogramm geeignet approximiert werden können. Ebenso kann auf Trendverläufe geschlossen werden, wenn das empirische Variogramm nach der asymptotischen Annäherung an seinen Schwellwert einen weiteren monotonen Anstieg verzeichnet.

Der Verlauf des empirischen Variogramms wird im Weiteren durch das theoretische Variogramm angenähert. Der funktionelle Verlauf kann auf der Basis von Optimierungsverfahren (Methode der kleinsten Quadrate) aber auch durch subjektive Definition an die Funktionswerteverteilung des empirischen Variogramms angepasst werden. Das theoretische Variogramm bildet die Grundlage der geostatistischen Interpolation, insbesondere die Grundlage des Krigings, das als ausgezeichnetes geostatistisches Interpolationsverfahren ursprünglich zur Lagerstättenexploration eingesetzt wurde.

Beim Kriging wird der Kennwert für einen unbeprobten Standort aus einer definierten Anzahl benachbarter Kennwerte abgeleitet. Die jeweiligen Abstände  $h$  bestimmen bedingt durch die Variogrammfunktion die Wichtung dieser auf den zu ermittelnden Kennwert.

Handelsübliche Anwendungen zur Modellierung, wie beispielsweise SURFER oder ArcInfo, sind bereits in der Lage dreidimensionale Abbilder einer Kenngröße oder einzelner Schichtmächtigkeiten zusammenhangslos (eine Fläche über einer Ebene) für ein Untersuchungsgebiet zu erzeugen. Die räumliche Baugrundmodellierung ist jedoch nicht möglich. Die Charakteristika des zu modellierenden Kennwertes können ebenfalls nicht berücksichtigt werden. Die so erzeugten Ergebnisse sind daher immer in Zusammenhang mit dem Sachverstand des Anwenders zu sehen. Darauf aufbauende Aussagen berücksichtigen die Modellgesamtheit nicht, eine Plausibilitätskontrolle wird nicht durchgeführt.

Auf der Grundlage des Krigings wird nun das Baugrundmodell generiert. Die Homogenitätsannahme, das Vorhandensein von Bereichen mit annähernd gleichen physikalischen Eigenschaften, ist für die Modellierung der Baugrundsichtung eine Voraussetzung. Stark streuende Kennwerte oder stark strukturierte Baugrundsichtungen, wie bsp. Kippen- oder Deponieböden, können mittels Geostatistik allein nicht modelliert werden, da die notwendigen Korrelationsreichweiten zu gering sind.

Grundlegende Randbedingungen (bsp. die große Mächtigkeit des Baugrundprofils oder die Ausdehnung des Untersuchungsgebietes) für die Homogenbereiche sind vorab festzulegen, um im weiteren Fortgang Polylinien zur Abgrenzung von markanten Bereichen zu integrieren. Im Ergebnis des Krigings treten zunächst strukturelle Mängel auf. So können beim „Zusammensetzen“ getrennt erzeugter Baugrundsichtungen nicht reale Schichtungsverschnitte entstehen.

Die Entscheidungen, ob Schichtungsverschnitte möglich sind, bzw. Baugrundsichtungen auslaufen, basieren außer auf numerischen Entscheidungshilfen auch auf subjektiven Erfahrungen bei der Definition von Nominalvariablen und deren Interpolationsansätzen (Indikatorkriging). Das Kriging wird dazu mit speziellen kennwertabhängigen Indikatoren gekoppelt. Durch Verifikationsmodelle bsp. auf der Grundlage der Krigingvarianz (=Fehlervarianz ermittelt aus dem Krigingverfahren) wird eine erste qualitative Beurteilung der geostatistischen Interpolation ermöglicht.

Die dabei herausragenden Fehlstellen verweisen gezielt auf Standorte, an welchen Nacherkundungen zur Verbesserung des Baugrundmodells in der Untersuchungsregion durchzuführen sind (Bild 13).

Das Resultat des ersten Arbeitsschrittes ist ein dreidimensionales Baugrundschichtenmodell mit Angabe von Homogenbereichen und deren Isotropie- und Trendverhalten.

Innerhalb der nun festgesetzten Homogenbereiche werden die notwendigen bodenmechanischen Kennwerte geostatistisch interpoliert, so dass der Datenvektor (Bild 2) an jedem bislang unbeprobten Gitterpunkt vollständig existiert.

In einem weiteren Bearbeitungsschritt können Störungen in das Modell integriert werden. Diese repräsentieren anthropogene Eingriffe durch Baumaßnahmen, Relikte früherer Baubauung sowie Inhomogenität infolge der Genese des Baugrundes.

Baugrundmodelle müssen gepflegt werden. Durch fortschreitende Baugrunderkundungen als auch durch eine anschließende subjektive Beurteilungen werden neue Baugrundinformationen bereitgestellt. Diese sind entsprechend ihrer Informationstreue zu bewerten. Zusammen mit den bestehenden Datensätzen werden die Datenvektoren der Gitterstützstellen aktualisiert. Eine anschließende neue Generierung der Datenstruktur resultiert in einem verbesserten Baugrundmodell.

Die Generierung eines dreidimensionalen Baugrundprofils sowie der zugeordneten Kennwerte ist ein komplexe Aufgabe, welche durch die gegenwärtig marktübliche Anwendungssoftware nicht gelöst werden kann.

Die Aktualisierung des Baugrundmodells bedingt die Integration zusätzlicher Informationen in die Ausgangsdaten. Diese werden in aktuellen Anwendungen in die zur Verfügung stehende Datenmenge ohne Berücksichtigung ihrer Aussagekraft übernommen. Die Quellen, die Randbedingungen ihrer Gewinnung sowie bereits erfolgte Wertungen und damit subjektive Beeinflussungen werden nicht berücksichtigt.

## **Grenzzustandsanalysen**

Die Datenstruktur des beschriebenen Baugrundmodells ermöglicht neben der Integration von Baugrundinformationen auch die Einbeziehung von Beanspruchungsgrößen in den Datenvektor der Gitterstützstellen in Abhängigkeit vorgegebener geotechnischer Aufgabenstellungen, so dass definierte Grenzzustände ausgewertet werden können.

Dafür erweist es sich als vorteilhaft Blockstrukturen, eingegrenzte Abschnitte im Baugrundmodell, des generierten räumlichen Zufallfeldes in stochastische Simulationen einzubeziehen (Bild 6).



## Ein Baugrundmodell zur Beurteilung der Gefährdung durch hydraulischen Grundbruch

Am Beispiel der Stadtgebietes Neuwied wird ein Baugrundmodell zur Beurteilung der hydraulischen Grundbruchsicherheit erstellt. Bedingt durch die geologischen Vorgänge der vergangenen 500.000 Jahre und die sich bis zur Neuzeit anschließenden Sedimentationen des Rheins, welcher von Süden nach Norden das Neuwieder Becken durchströmt, bildete sich die charakteristische Baugrundsichtung der Region.

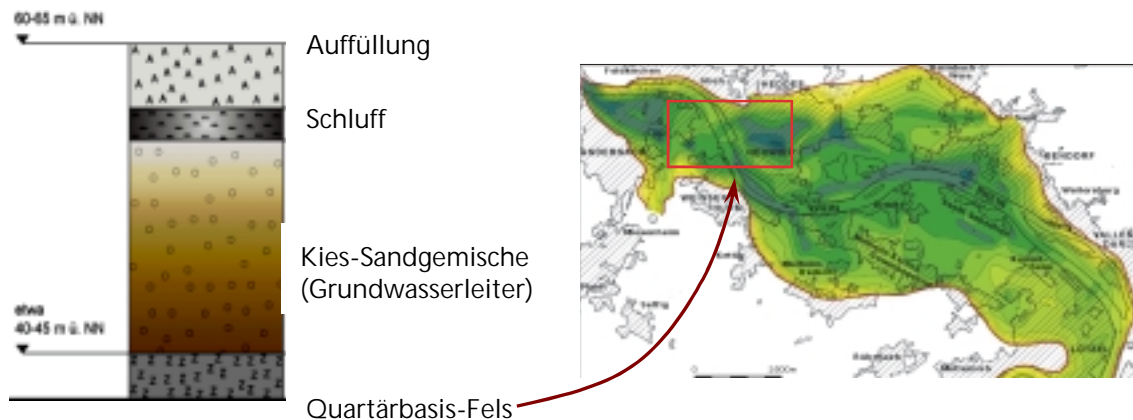


Bild 7 Baugrundsichtung Neuwied / Höhenlage der Quartärbasis

Bild 7 zeigt den Schichtenverlauf der Flussaue, der typisch für den Mittellauf von großen Flüssen ist. Unter einer anthropogenen Überdeckung aus Auffüllung und Kulturschutt folgt zunächst eine bindige Deckschicht. Darunter stehen nichtbindige Sand-Kies Sedimente an, die gleichzeitig den obersten Aquifer darstellen. Diese als Niederterrasse bezeichneten quartären Sedimente liegen hier auf devonischen Tonschiefer auf.

Während Niedrig- und Mittelwasser verläuft die Grundwasserströmung ungespannt etwa parallel zum Rhein. Während Hochwasser ändert sich die Strömungsrichtung, das Grundwasser infiltriert vom Fluss in die Niederterrassen (Bilder 8 und 9).



Bild 8 GW- Strömung parallel zum Rhein  
(bei Rheinniedrigwasser - Pfeile)



Bild 9 GW- Strömung orthogonal zum Rhein  
(bei Rheinhochwasser - Pfeile)

Infolge der Deckschicht kann sich der Grundwasserspiegel und somit das hydrostatische Druckgefälle bei Hochwasser nicht frei ausbilden. An der bindigen Deckschicht bilden sich gespannte Grundwasserverhältnisse, welche bei ungenügendem Überlagerungsdruck zu hydraulischen Grundbruchsituationen führen können.

Um diesem Umstand entgegen zu wirken ist das Stadtgebiet derzeit durch Dränagesysteme (Entspannungssystem für das Grundwasser) geschützt. Das Dränagesystem unterteilt sich in mehrere Polderflächen, das durch Deiche mit Kerndichtung entlang des Rhein und der Wied, sowie durch eine 500 m lange, auf Pfählen gegründete Schutzmauer im Bereich der Altstadt abgegrenzt ist.

Die Grundlage der Betrachtung bilden zunächst 125 Datensätzen aus überwiegend älteren Aufschlüssen im Stadtgebiet, die im Zusammenhang mit Baumaßnahmen gewonnen wurden. Diese beinhalten Informationen zu den Schichtmächtigkeiten am Erkundungsort, sowie Untersuchungsergebnisse zu einzelnen Baugrundkenngrößen der Homogenbereich wie beispielsweise Dichte, Reibungswinkel, Kohäsion sowie Durchlässigkeitsbeiwert.

Für die Generierung des Baugrundmodells der Untersuchungsregion wurde eine eigenständige modular erweiterbare Softwareanwendung entwickelt. Die Ermittlung der charakteristischen Kennwerte sowie die Bestimmung notwendiger statistischer Parameter und deren Integration in die verschiedenen Modellebenen bildet den ersten wesentlichen Abschnitt zur Generierung des Baugrundmodells. Diese werden mit ihren statistischen Parametern einem subjektiv generierbaren Datenvektor zugeordnet.

In einem weiteren Schritt wurde das Untersuchungsgebiet mit einem räumlichen zunächst regulären Raster untersetzt. Jedem Gitterpunkt wird anschließend ein entsprechender Datenvektor zugeordnet.

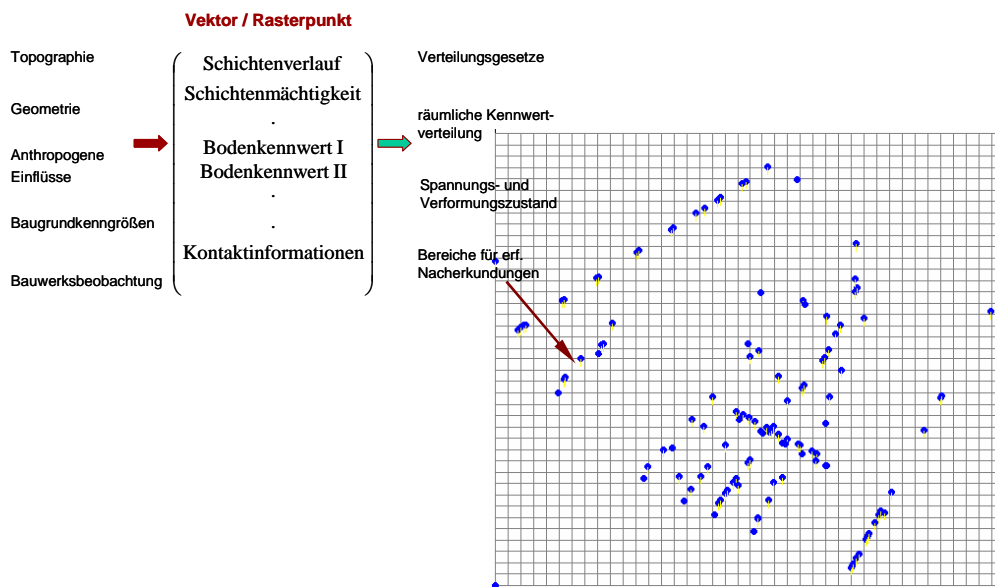


Bild 10 Zuordnung von Datenvektoren auf einer Gitterebene des räumlichen Rasters

Basierend auf dieser Gitterstruktur werden empirische Variogramme ermittelt, welche unter Anwendung der Methode der kleinsten Quadrate, durch theoretische Variogramme mit unterschiedlichen Funktionsansätzen repräsentiert werden. Die unterschiedlichen Verläufe der theoretischen Variogramme in den verschiedenen Raumrichtungen beinhalten das anisotrope Verhalten der entsprechenden Kennwerte. Ebenso sind Trendverläufe erkennbar und quantifizierbar. Diese können somit entweder im Vorfeld eliminiert oder aber durch die Wahl eines geeigneten Interpolationsverfahren, bsp. dem Universal Kriging, berücksichtigt werden.

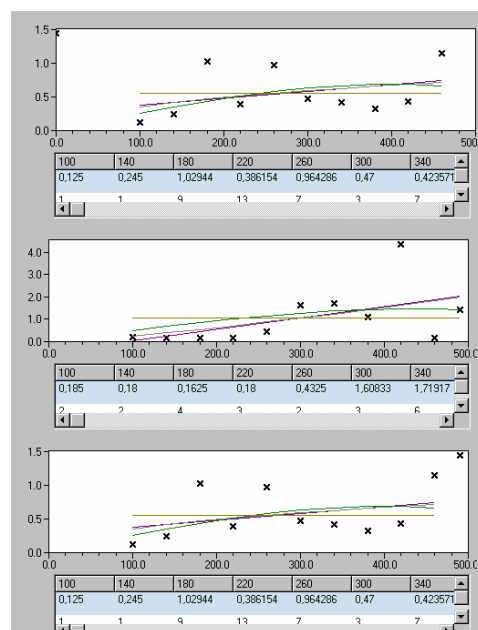


Bild 11 Ermittlung der theoretischen Variogramm für die Unterkante der Deckschicht

Unter Berücksichtigung des Trendverhaltens der Unterkante der Lehmschicht ist es möglich, erste Modellstrukturen zu erstellen, welche aber partiell große Varianzen aufweisen. Diese können über der Beispielregion dargestellt werden.



Bild 12 Darstellung der Höhenlage der Deckschicht über dem Stadtgebiet Neuwied (Höhenlinien)

Die einzelnen Modellierungsphasen sind beispielsweise durch die Bestimmung der Modellvarianz überprüfbar. Diese weicht um so mehr von null ab je unsicherer der geschätzte Wert ein „Mittelwert“ für eine umgebende Blockstruktur des räumlichen Gitters ist. Insbesondere in Bereichen mit einem geringen Erkundungsumfang oder in Bereichen mit stark streuenden Erkundungswerten über geringe Entfernungen ist ein Anwachsen der Krigingvarianz festzustellen. Für praktische Interpretation können aus den dargestellten Orten hoher Krigingvarianz mögliche Standorte für Nacherkundungen festgelegt werden, da gerade dort zusätzliche Informationen zu einer Verbesserung des Baugrundmodells beitragen (Bild 13).

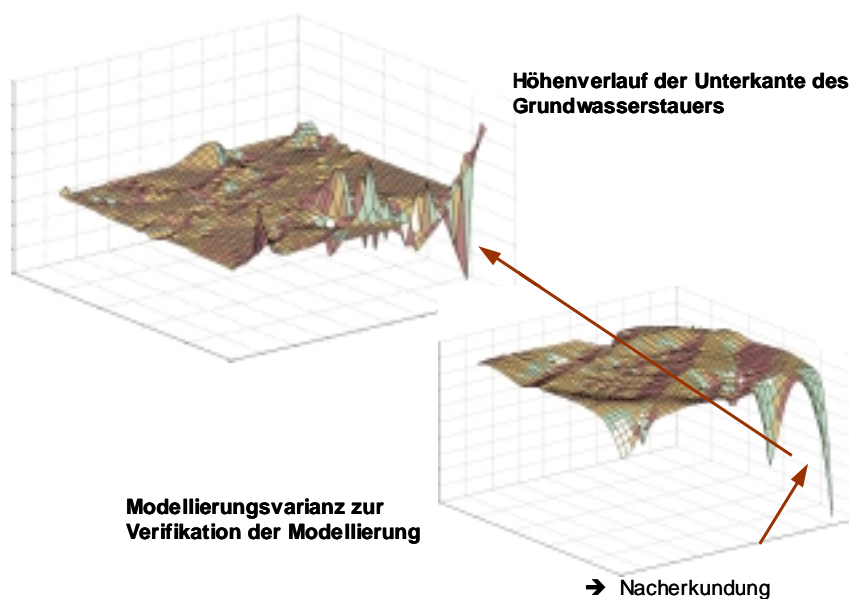


Bild 13 Modell der Höhenlage der Deckenschicht gegenübergestellt der aufgetretenen Modellierungsvarianz

Das Baugrundmodell kann durch die Verknüpfung mit weiteren Informationssystemen fortlaufend aktualisiert werden. Stehen weitere bisher nicht berücksichtigte Datenmengen zu Verfügung, so werden diese in das Baugrundmodell übernommen. Eine nachfolgende Aktualisierung der Datenvektoren sichert die Aktualität des Fachinformationssystems.

Für die Verifikation des Grenzzustandes, bsp. die hydraulische Grundbruchsicherheit, im Stadtgebiet Neuwied ist die Mächtigkeit des Grundwasserstauers sowie die Verteilung der Durchlässigkeitsbeiwerte des Grundwasserleiters maßgebend. In Abhängigkeit des Wasserstandes des Rheins wird der Verlauf der Grundwasserströmung simuliert. Die generierten Druckwasserhöhen werden in den Datenvektor der Gitterpunkte äquivalent den Informationen zum Baugrund in Bezug zu ihrem zeitlichen Auftreten übernommen.

Nach der Generierung des Baugrundmodells sind alle Datenvektoren vollständig besetzt. Mittels der streuenden Parameter von begrenzten Bereichen des räumlichen Gitters (Blöcke) kann durch ein weiteres Modul die hydraulische Grundbruchsicherheit auf der Basis stochastischer Simulationsverfahren [6] bestimmt und die Resultate in den Datenvektor aufgenommen werden.

## Literaturverzeichnis

- [1] Clemens, T. (1995): Ausgewählte Schätz- und Testprobleme bei räumlich korrelierten Daten, Dissertation, Bielefeld
- [2] Kreuter, H.: Ingenieurgeologische Aspekte geostatistischer Methoden. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe. Heft 138 (1996).
- [3] Nathabandu T. K. ; Renzo, R. (1997) : Statistics, Probability and Reliability for Civil Environmental Engineers. The McGraw-Hill Companies, Inc, New York
- [4] Sachs, L. (1992): Angewandte Statistik. 7. Auflage, Springer-Verlag
- [5] Schuppener, B. (1999): Die Festlegung charakteristischer Bodenkennwerte – Empfehlung des Eurocodes 7 Teil 1 und die Ergebnisse einer Umfrage. in: Geotechnik, Sonderheft : Deutsche Beiträge zur Europäischen Normung
- [6] Vose, D. (2000): Risk Analysis. John Wiley & sons, Inc., New York