

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Wacker, Markus; Neumann, Thomas; Engel, Jens; Gräfe, Gunter Nutzung von Verfahren der Bildanalyse zur Baugrundbeurteilung

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102378>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Wacker, Markus; Neumann, Thomas; Engel, Jens; Gräfe, Gunter (2014): Nutzung von Verfahren der Bildanalyse zur Baugrundbeurteilung. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): Aktuelle Themen der Geotechnik. Karlsruhe: Herle, Ivo. S. 137-152.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Nutzung von Verfahren der Bildanalyse zur Baugrundbeurteilung

M. Wacker, T. Neumann, J. Engel, G. Gräfe

HTW Dresden

Moderne Verfahren der Bildverarbeitung erlauben die automatische Analyse von Digitalaufnahmen und die Erkennung und numerische Beschreibung von unterschiedlichen Mustern. Der Beitrag behandelt erste Schritte zur Nutzung dieser Methoden für geotechnische Zwecke. Dabei liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung praxistauglicher Methoden unter Berücksichtigung der bekannten Arbeitsweisen und Erfahrungen. Voraussetzung dafür ist die Sicherung einer ausreichenden Qualität der Digitalbilder. Zu diesem Zweck wurde eine entsprechende Vorrichtung entwickelt. Mittels spezieller Algorithmen und der Einbindung in ein Datenmanagementsystem ist ein System entstanden, das durch Anlernen und die Sammlung von Daten eine zunehmende Verbesserung der Prognosequalität ermöglicht.

1 Einleitung

1.1 Geotechnische Eigenschaften von Boden und Fels

Die Eigenschaften von Boden und Fels als Baugrund oder Baustoff müssen durch Kennziffern erfasst werden. Grundlage dafür sind Stoffgesetze, mit denen das Verhalten mathematisch beschrieben werden kann, sowie experimentelle Verfahren zur Durchführung von Messungen, mit denen sich die erforderlichen Kennwerte bestimmen lassen. In Bezug auf die Praxis in den geotechnischen Versuchsanstalten haben sich spezielle Untersuchungsmethoden etabliert, wobei auch regionale Besonderheiten und Erfahrungen eine Rolle spielen.

Durch Einbeziehung von Erfahrungen, Korrelationen und anderen Näherungen lässt sich die Datengrundlage bei der Festlegung charakteristischer Kennwerte wesentlich erhöhen. In Abb. 1 sind die Schritte zur Ableitung der charakteristischen und der Bemessungswerte in Anlehnung an den EC 7 dargestellt. Korrelationen und Erfahrungen dürfen als „abgeleitete Werte“ berücksichtigt werden.

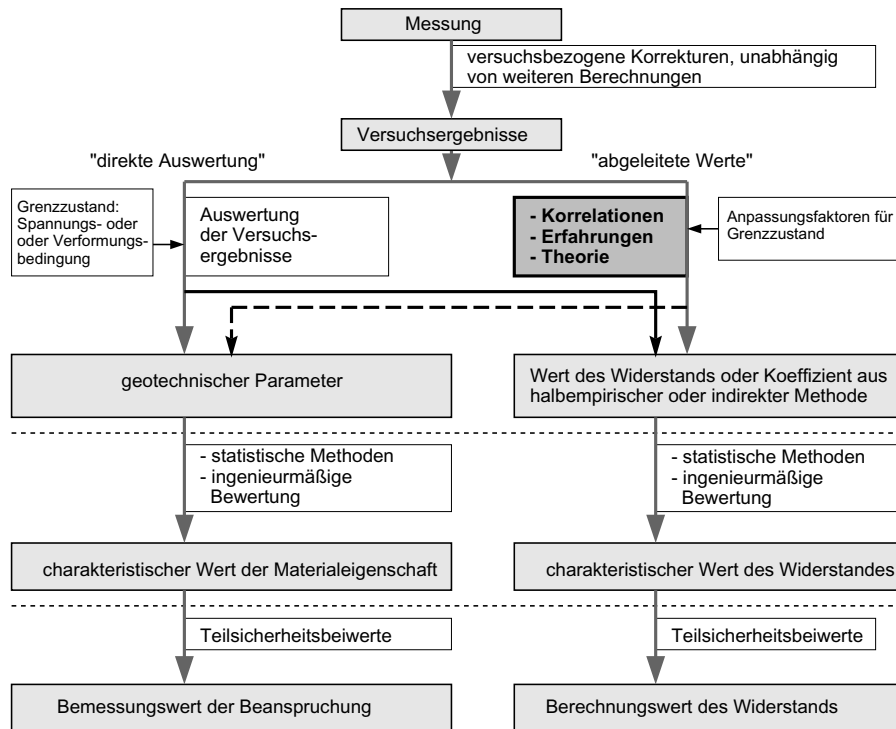


Abbildung 1: Schematischer Ablauf bei der Ermittlung von Bemessungswerten, Einfluss von Korrelationen und Erfahrungen

Kennzeichnend für die Lösung geotechnischer Aufgaben ist oft eine Vorgehensweise, die Erfahrungswerte mit quantitativen Aussagen kombiniert. Erfahrungen zu sammeln und weiterzugeben ist ein unverzichtbarer Teil der geotechnischen Arbeitsweise. Dies ist die Grundlage für die Bereitstellung verbesserter Werkzeuge für die sichere und wirtschaftliche Bemessung von Bauwerken. Nicht zuletzt kann die systematische Nutzung von Erfahrungen auch ein Wettbewerbsvorteil sein.

Tabelle 1: Beschreibung der Druckfestigkeit und Einteilung der *Verwitterungsgrade* im Feld

Bezeichnung	Untersuchungsverfahren in situ	einaxiale Druckfestigkeit q_u in MN/m ²
außerordentlich gering, <i>zersetzt</i>	mit Fingernagel leicht ritzbar, kann mit Hand gelöst werden, plastifiziert in Wasser	<1,0
sehr gering, <i>stark entfestigt</i>	mit Messer gut ritzbar, zerbröckeln bei Hammerschlägen, Rückprallhammer $R_m \approx 0$	$1,0 \leq q_u < 5,0$
gering, <i>mäßig entfestigt</i>	mit Messer schwer ritzbar, durch feste Schläge mit Hammer schwach einkerbbar, dumpfer Klang, $R_m < 10...15$	$5,0 \leq q_u < 25,0$
mäßig hoch, <i>angewittert</i>	mit Messer nicht ritzbar, durch einen festen Hammerschlag zu zerbrechen, wenig heller Klang, $R_m \approx 10-30$	$25,0 \leq q_u < 50,0$
hoch, <i>unverwittert</i>	mehrere Hammerschläge zum Zerbrechen, heller Klang, $R_m \approx 20-40$	$50,0 \leq q_u < 100,0$
sehr hoch	sehr viele Hammerschläge erforderlich zum Zerbrechen, sehr heller Klang	$100,0 \leq q_u < 250,0$
außerordentlich hoch	durch Schläge mit dem Geologenhammer lösen sich nur Splitter, sehr heller Klang	$250,0 \leq q_u$

In Bezug auf die Bewertung der Eigenschaften von Boden und Fels liegt der Benennung und Beschreibung des Materials eine Vorstellung über die Größenordnung bestimmter Eigenschaften zugrunde. Ein Beispiel dafür ist die begriffliche Beschreibung der Festigkeit und des Verwitterungsgrads von Fels, z. B. nach Tabelle 1. Eine Zuordnung von Spannweiten eines Kennwerts zu einer begrifflichen Beschreibung setzt voraus,

1. dass eine bestimmte Eigenschaft, die als wichtig für ein Material anerkannt ist, mit umgangssprachlichen oder Fachbegriffen von vielen beteiligten Fachleuten in ähnlicher Art beschrieben, und
2. die Eigenschaft durch eine messbare Größe oder einen abgeleiteten Kennwert beschrieben werden kann. Es muss dafür ein Untersuchungsverfahren und eine Vorschrift zur Auswertung zugrunde liegen.

Diese Vorgehensweise ermöglicht die Berücksichtigung von Erfahrungen und die Optimierung des Untersuchungsaufwands.

1.2 Geotechnisches Modell

In den letzten Jahrzehnten sind die numerischen Verfahren der Geotechnik wesentlich weiterentwickelt worden. Es ist mittlerweile möglich, dreidimensionale Problemstellungen mit einem vertretbaren Aufwand numerisch zu modellieren. Zur Bereitstel-

lung der erforderlichen Informationen für die Erstellung dreidimensionaler Baugrundmodelle fehlen ähnliche leistungsfähige und praktisch einsetzbare Verfahren. Da der Aufwand für die Erkundung und Untersuchung des Baugrunds in vielen Fällen eher reduziert wird, entsteht eine zunehmende Diskrepanz zwischen vorhandener Informationsdichte und rechnerischer Modellierung.

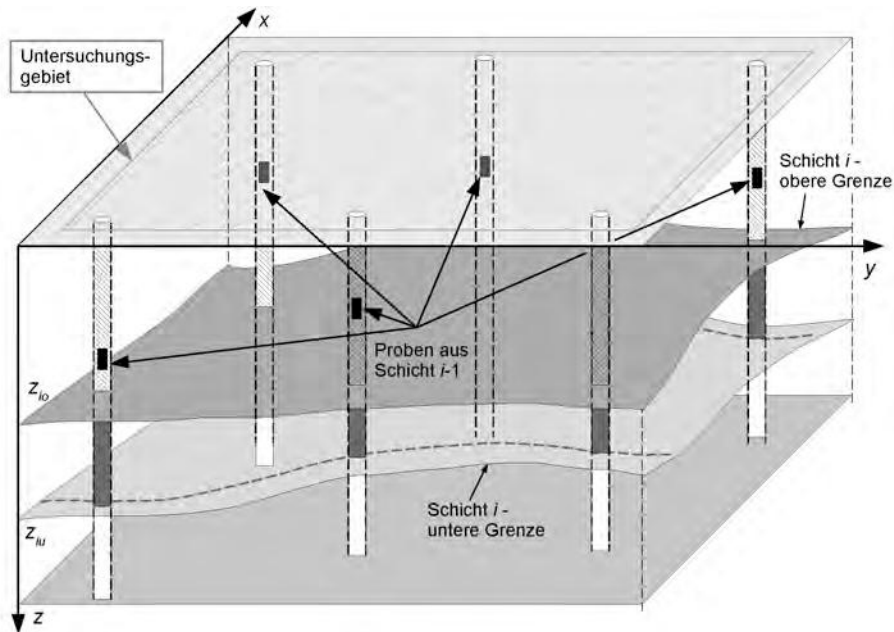


Abbildung 2: Baugrundsichtung und geotechnisches Modell

Ein wichtiger Aspekt der Nutzung gesammelter Erfahrungen ist die Ableitung eines der Aufgabenstellung angepassten geotechnischen Modells. Dafür ist der Untergrund zunächst zu erkunden und auf Grundlage der Bewertung der Eigenschaften in Homogenbereiche zu unterteilen, die zahlenmäßig durch Kennwerte beschrieben werden.

Der erste Schritt ist die Benennung und Beschreibung und die Festlegung von Schichtgrenzen. Im Unterschied zur geologischen Idealisierung des Untergrunds sind die Schichtgrenzen so festzulegen, dass die für das Bauvorhaben maßgebenden Einflüsse berücksichtigt werden.

Der Umfang spezieller Materialuntersuchungen und Messungen zur Ermittlung von Arbeitslinien des Baugrunds wird wegen des hohen technischen und zeitlichen Aufwands meist auf ein Minimum begrenzt. Mit den Ergebnissen von Untersuchungen an wenigen Stichproben müssen die Eigenschaften von ausgedehnten Bereichen des Untergrunds beschrieben werden. Statistische Verfahren können wegen der begrenzten Anzahl der Stichproben nur selten eingesetzt werden.

Deshalb wird in der Geo- und Umwelttechnik seit vielen Jahrzehnten an der Entwicklung effektiver Verfahren gearbeitet, die mit wenig Zeit- und Kostenaufwand die gesuchten Kennwerte liefern. Zwei unterschiedliche Vorgehensweisen sind üblich:

1. Messung von wenigen, einfach bestimmbareren Leitparametern, die mit den interessierenden Kennziffern über Korrelationen verknüpft sind,
2. indirekte Messungen, bei denen aus der Antwort des Systems auf eine definierte Einwirkung auf die Eigenschaften geschlossen wird.

Bei beiden Vorgehensweisen ist die Kalibrierung der Methode erforderlich. Dazu werden für ein Untersuchungsgebiet an ausgewählten Stichproben Messungen durchgeführt und die Ergebnisse miteinander in Beziehung gebracht. Typische Beispiele für dieses Vorgehen sind die Methoden zur Ableitung der Eigenschaften des Gebirges bei Fels. Neben den Kenngrößen, die an kleine Gesteinsprüfkörpern ermittelt werden, ist in besonderem Maße das Trennflächengefüge zu berücksichtigen. Für die Bewertung der Gebirgseigenschaften von Fels spielt der RQD-Wert eine wichtige Rolle. Er ist eine einfach durch Ausmessen am Bohrkern bestimmbar Größe.

1.3 Baugrundaufschlüsse – Dokumentation, Interpretation

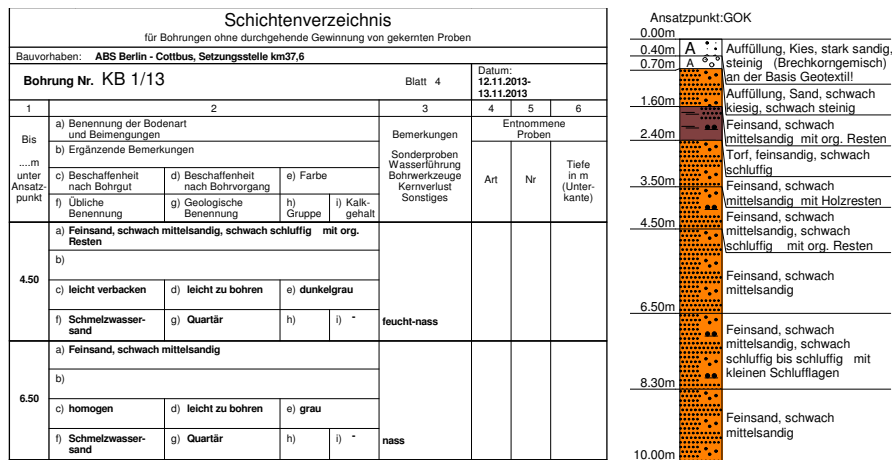


Abbildung 3: Schichtenverzeichnis und Bohrprofil

Die Ergebnisse von Aufschlüssen werden in Formularen erfasst und in der Regel fotografisch dokumentiert. Abb. 3 zeigt ein Beispiel für die Dokumentation der Aufschlussergebnisse mittels Schichtenverzeichnis und die grafische Darstellung als Bohrprofil.

Während für die Erfassung und Darstellung einheitliche Vorgaben in Normen und Regelwerken zusammengestellt sind, wird die fotografische Dokumentation vielfach



Abbildung 4: Kernkiste mit erbohrten Bodenschichten

lediglich zum Nachweis der erbrachten Leistung genutzt. Die Aufnahme einer Kernkiste mit Beschriftung ist in Abbildung 4 dargestellt.

2 Nutzung von Informationsverarbeitung und Bildanalyse

2.1 Projekt-Archiv-Geotechnik PrAG

Seit mehreren Jahren wird am Fachgebiet Geotechnik am Aufbau eines Informationsmanagementsystems für Geotechnik und Umwelt gearbeitet. Der Beginn der Entwicklung war zunächst auf die automatische Erfassung und Auswertung von Laborversuchen ausgerichtet. Schrittweise ist aus dem Anfangsdatenmodell ein Konzept entwickelt worden, mit dem es möglich wird, bisher dezentral und individuell abgelegte Daten in einem zentralen Server zu sammeln. Bei der Entwicklung wurde versucht, auch die seit vielen Jahrzehnten gesammelten Erfahrungen zu berücksichtigen.

Mit dem in Abb. 5 dargestellten Datenkonzept ist es möglich, die Informationen im Zusammenhang mit der Bewertung des Untergrunds nach den Kategorien *Versuch*, *Probe* und *Schicht* zu unterteilen. Diese Zuordnung erfordert den Aufbau unterschiedlicher Datenstrukturen und die Entwicklung von Algorithmen zur

1. automatischen Interpretation von Ergebnissen einzelner Versuche zur Ableitung von Kennwerten der Probe,
2. der Berücksichtigung von anderweitig erfassten Kennwerten von Proben,
3. der Zusammenführung und Interpretation von Probendaten zur Ableitung von Kennwerten einer Schicht und
4. der Sicherung der Konsistenz der Daten innerhalb des gesamten Systems PrAG.

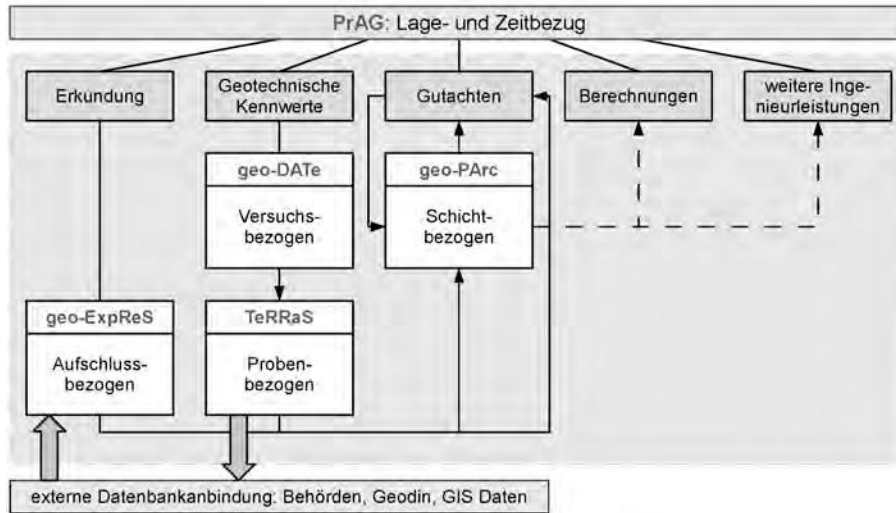


Abbildung 5: Gliederung und Komponenten des Projektarchivs PrAG

Neben der bisher im Mittelpunkt stehenden Nutzung des Systems geo-DATE zur Verwaltung von Versuchsergebnissen sollen zunehmend andere Inhalte, insbesondere multimediale Daten, Berechnungen, Pläne und Berichte, innerhalb von PrAG mit verwaltet werden können. Für die Umsetzung dieser Ziele hat sich eine interdisziplinär zusammengesetzte Arbeitsgruppe an der HTW Dresden etabliert, die sich aus Mitarbeitern der Fachgebiete Informatik/Datenbanken, Medieninformatik, Gestaltung und Geotechnik zusammensetzt.

Zu den wesentlichen Schwerpunkten, die in der zurückliegenden Zeit verfolgt worden sind, gehören folgende Inhalte:

- Aufbau einer Datenbank für Kennwerte von Einzelproben (TeRRaS)
- Vervollständigung des Datenverwaltungssystems PrAG
- Einbeziehung von Verfahren zur Georeferenzierung und Visualisierung
- Konzeption zur Nutzung der Bildanalyse

Zur globalen Referenzierung aller Informationen innerhalb von PrAG ist das Informationsverwaltungssystem mit Clientanwendungen und Georeferenzierungskomponenten erweitert worden. Neben der eigentlichen Referenzierung musste außerdem die Art der Daten Berücksichtigung finden. Zu diesem Zweck wurden unter anderem die folgenden Kategorien von Daten eingeführt.

- auf einen Punkt bezogene, nicht sachverständig interpretierte Ergebnisse von Messungen,

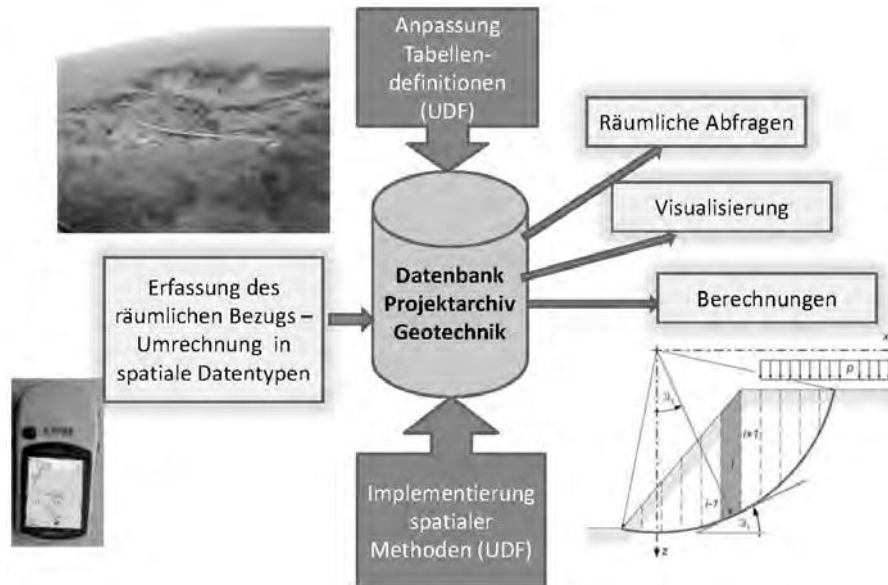


Abbildung 6: Sammlung von Informationen mit Lage- und Zeitbezug

- punktbezogene Daten aus der Interpretation indirekter Informationen,
- auf eine Schicht bezogene Kennwerte, aus Bewertung *direkter Messungen* abgeleitet,
- schichtbezogene Kennwerte, aus Bewertung *indirekter Informationen* abgeleitet.

Es wurde die Geodatenkomponente PostGIS eingebunden, welche fortgeschrittene Datentypen (Geographie) und Routinen für die Geodatenhaltung bietet. Der Typ Geographie führt alle Berechnungen (Umkreis, Abstand etc.) auf das definierte Sphäroid durch. Im genaueren wird dafür das bekannte WGS84 (SRID:4326) genutzt. Dadurch entfallen die Nachteile lokaler projizierter Koordinatensysteme bei der Rechnung über deren angedachte Ausbreitung hinweg. Daten, die in kartesischen Koordinaten durch den Nutzer eingegeben werden, werden deshalb transformiert. Die Präsentationsebene ist davon unberührt, da über Rücktransformation in ein beliebiges Koordinatensystem überführt werden kann.

2.2 Arbeitsplatz Bilderfassung

Die fotografische Erfassung von Bohrkernen und Proben gehört zur üblichen Praxis. Qualität und Informationsumfang der Aufnahmen sind bisher sehr unterschiedlich und

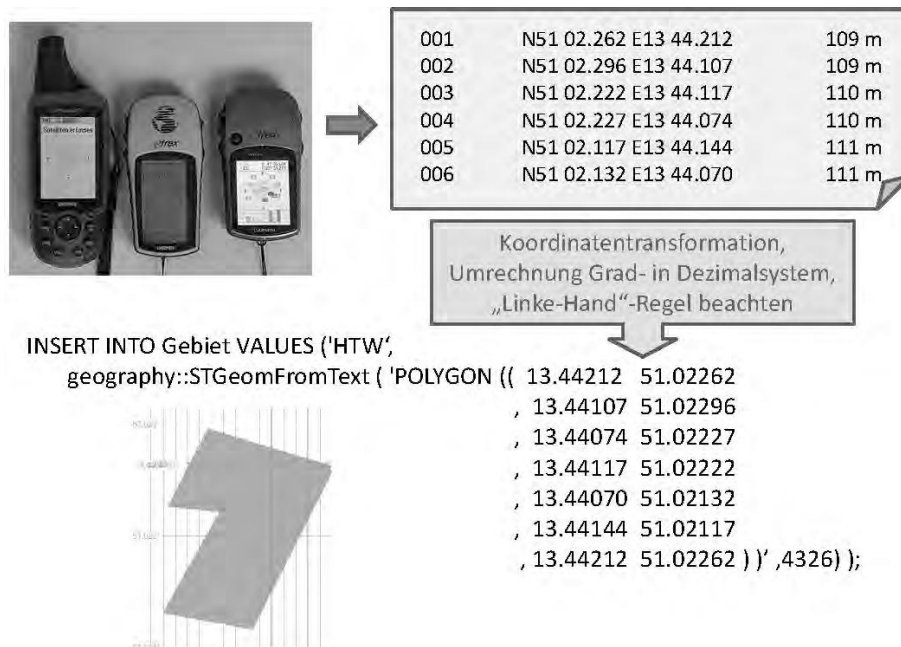


Abbildung 7: Beispiel für die Erfassung der Koordinaten mit Trackern

von der individuellen Arbeitsweise des Sachverständigen abhängig. Es war deshalb ein Ziel in der Arbeitsgruppe, einen Arbeitsplatz zu entwickeln, der praxistauglich ist und die Einbindung von Bilddaten in das Datenbanksystem ermöglicht.

Der Arbeitsplatz soll wichtige Arbeitsschritte bei der Erfassung von Bodenproben unterstützen und automatisieren. Die zwei wichtigsten Komponenten sind ein System zur standardisierten Aufnahme von Fotos der Bodenproben sowie ein lernfähiges System zur automatischen Bildanalyse.

Bei der Probenerfassung werden zunächst hochqualitative Fotos der Bodenproben erstellt. Zu diesem Zweck ist eine leistungsfähige digitale Spiegelreflexkamera im Arbeitsplatz integriert. Diese wird automatisch von der Analyse-Software angesteuert. Um verzerrungsfreie Fotos zu garantieren, wird die Kamera des Arbeitsplatzes einmalig vorkalibriert. Ein möglichst einheitliche und standardisierte Farbdarstellung ist grundlegend für die Auswertung der Fotos. Daher werden in den Arbeitsplatz Referenz-Farbkarten fest integriert, wodurch die Farben der Fotos automatisch ausgeglichen werden können. Selbst bei wechselnder Außenbeleuchtung ist somit die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse gegeben.

Es sind zwei QR-Marker fest in der Ebene der Oberkante des Bohrkerns installiert. Diese werden von der Kamera erfasst und von der Software automatisch erkannt. Die bekannten räumlichen Abstände der Marker erlauben es, das Bild mit einem vir-



Abbildung 8: Prototyp eines beweglichen Arbeitsplatzes zur Bilderfassung



Abbildung 9: Testbeispiele von Kernkisten mit deutlichen und nahezu stufenlosen Übergängen zwischen den Schichten

tuellen Längenmaß auszustatten. Dadurch kann die Schicht-Tiefe sowie Größe von Bruchstücken direkt am Foto ausgemessen werden. Das Anlegen eines Maßbandes an die Bodenprobe entfällt. Alle Messungen können auch nachträglich kontrolliert und nachvollzogen werden.

2.3 Algorithmen der Bildanalyse

In einer weiteren Entwicklungsstufe wird die Software um Algorithmen zur automatischen Erkennung von Schichtgrenzen erweitert. Dabei müssen farbliche und strukturelle Unterschiede berücksichtigt werden. Ziel ist die Identifikation unterschiedlicher Bodenschichten und die Vermessung der Schichtgrenzen. Zur Erkennung der Schichten wird auf Verfahren aus den Bereichen Computer Vision und Bildverarbeitung zurückgegriffen. Ein besonderer Schwerpunkt ist die Einbeziehung von Techniken zur automatischen und lernfähigen Identifikation von Texturen und Objekten in Bildern.



Abbildung 10: Analysesoftware mit freigestelltem Bohrkern und eingezeichneten Schichtgrenzen

Eine Detektion von Schichtgrenzen anhand der unbearbeiteten Bilddaten, z. B. anhand der Pixelfarben der Fotos direkt, ist von keinem Algorithmus direkt umsetzbar. Stattdessen wird auf Feature-Transformationen aus der Computer-Vision zurückgegriffen. Zu den aktuellen Entwicklungen der letzten Jahre gehören Feature-Transformationen wie Gabor-Wavelets [KP02], Histograms of Gradients [DT05], Co-Occurance Matrizen [PCG05], Local Binary Patterns [OPH96] oder Bag-of-Features sowie Pyramid Pooling [CN11]. Welche Feature-Transformation für die Erkennung von Schichtgrenzen in Bodenproben am besten geeignet ist, muss zunächst anhand von Test-Daten ermittelt werden. Dabei kommt es aber nicht nur auf die Genauigkeit, sondern auch auf die Rechengeschwindigkeit bei hochauflösten Eingangsbildern um die 20 MegaPixel an. Der hier umgesetzte Ansatz geht davon aus, dass innerhalb einer Schicht in einer Bohrprobe das farbliche sowie strukturelle Aussehen (die Textur) sich nicht verändert. Sprünge in diesem strukturellen Aussehen deuten auf mögliche Schichtgrenzen hin. Diese erscheinen nach der Feature-Transformation als Sprünge in Richtung der Bohrung.

Prototypisch wurde im Projekt ein erster lernfähiger Algorithmus implementiert. Dazu wurde ein Sliding-Window-Ansatz genutzt, ähnlich wie es bei der Gesichts-Detektion in Bildern üblich ist. Wie in Abb. 11 dargestellt wird das Bild der Probe in sich überlappende Teilbilder (windows) zerlegt. Ob sich in der Mitte jedes Teilbildes eine Schichtgrenze befindet, oder nicht, kann nun von einem Klassifikator gelernt werden. Dabei können diesem Klassifikator positive (Schichtgrenze vorhanden) und negative (keine Schichtgrenze vorhanden) Lern-Beispiele aus einer Datenbank gegeben werden. Je mehr Lern-Beispiele vorhanden sind, also je größer die Datenbank mit der Zeit wird, desto besser wird auch der Klassifikator.

Nachdem die Bilder der Bohrkernproben aus der Datenbank mittels des Sliding-Window Ansatzes in N Teilbilder I_k zerlegt wurden, soll gelernt werden, ob sich in der Mitte der Teilbilder eine Schichtgrenze befindet. Für eine prototypische Umsetzung wurde zunächst auf nur zwei Verfahren, die Histogram of Gradients (HOG) und Grey-Level Co-Occurance Matrizen (GLCM) zurückgegriffen. Später kann dies um zusätzliche

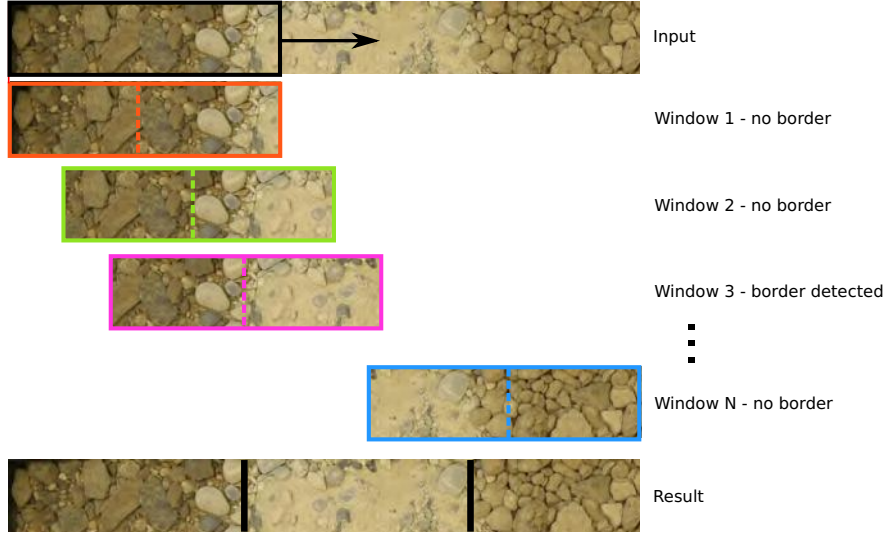


Abbildung 11: Schematische Darstellung des Sliding-Window-Ansatzes zur Detektion von Schichtgrenzen.

Feature-Transformationen erweitert werden, was eine höhere Genauigkeit verspricht, jedoch eine größere Datenbank an Bohrproben erfordert. Die Feature-Transformation wird nicht direkt auf dem Teilbild I_k angewendet. Statt dessen wird das Teilbild in der Mitte in ein rechtes $I_k^{(r)}$ und linkes $I_k^{(l)}$ getrennt. Sollte in der Mitte von Teilbild I_k eine Schichtgrenze sein, so ist zu erwarten dass $I_k^{(r)}$ sich stark von $I_k^{(l)}$ unterscheidet. Der hier zugrunde gelegte Ansatz ist, den Abstand des rechten und linken Teilbildes nach der Feature Transformation zu berechnen, woraus sich zwei skalare Werte ergeben,

$$f_k^{(\text{glcm})} = \Omega(\text{glcm}(I_k^{(r)}) - \text{glcm}(I_k^{(l)})) \quad (1)$$

$$f_k^{(\text{hog})} = \Omega(\text{hog}(I_k^{(r)}) - \text{glcm}(I_k^{(l)})) \quad (2)$$

Als Distanzfunktion ist in den ersten Tests die ℓ_1 norm (die sogenannte Manhattan-Distanz), d. h. $\Omega(\cdot) = |\cdot|_1$ benutzt worden. Somit ergibt sich nach Verarbeitung aller Bilder eine Eingabe Matrix $\mathbf{X} \in \mathcal{R}^{N \times 2}$ mit

$$\mathbf{X}_k = [f_k^{(\text{glcm})}, f_k^{(\text{hog})}] \quad (3)$$

Diese Matrix wird als Trainings-Vektor für das Lernverfahren verwendet.

Das Lernverfahren erfordert Fotos von Bohrkernproben, in denen die Schichtgrenzen von Fachleuten festgelegt worden sind. Für jedes der Teilbilder lässt sich eine Zielvariable $y_k \in \{0, 1\}$ ermitteln, welche nur dann 1 ist, wenn der Fachmann genau in der

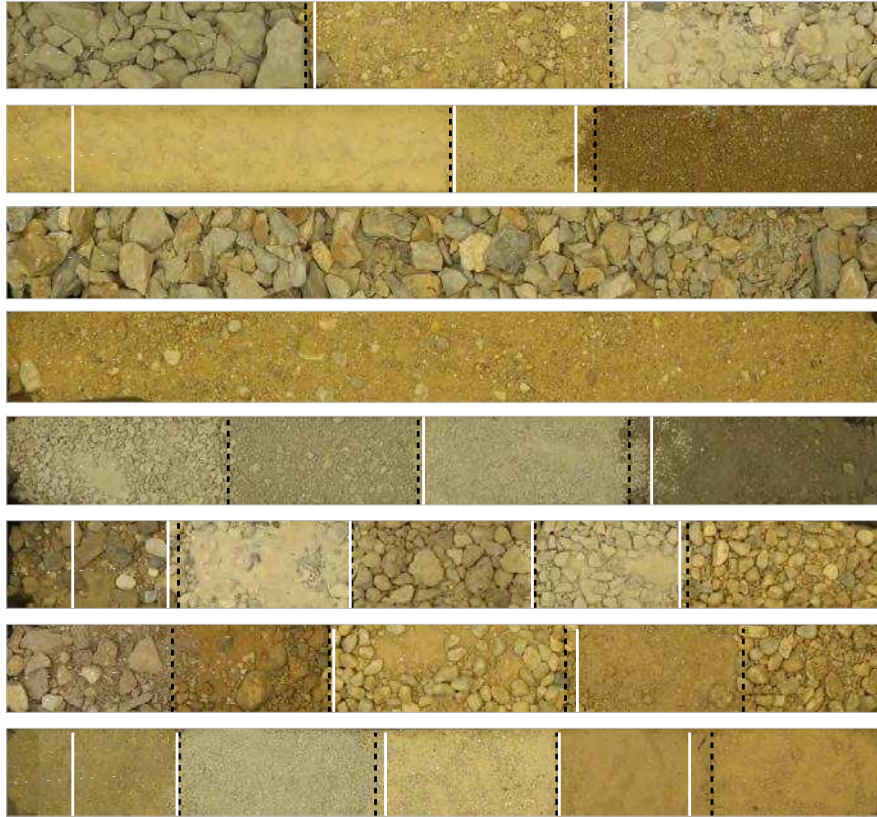


Abbildung 12: Tatsächliche (schwarze gestrichelte Linien) und automatisch detektierte Schichtgrenzen (weiße durchgehende Linien).

Mitte des Teilbildes eine Schichtgrenze eingezeichnet hat (sonst 0). Damit Schichtgrenzen in neuen Fotos von Bohrkernproben automatisch detektiert werden können, wird eine Klassifikationsfunktion $f: \mathcal{R}^2 \rightarrow \{0, 1\}$ gelernt. Es ist für die ersten Experimente eine lineare Support Vector Machine [DT05] genutzt worden. Um die Schichtgrenzen in einem neuen Foto zu detektieren, werden die Teilbilder (sliding window) extrahiert, die Feature-Vektoren nach Gleichung (1) errechnet und zur Prediktion an die Support Vector Machine weitergereicht. Danach werden eng benachbarte Detektionen zusammengefasst.

Um die Genauigkeit des Systems zu testen wurde eine Datenbank mit 8 Fotos genutzt, in welchen Schichtgrenzen von Experten eingezeichnet waren. Der Algorithmus wurde systematisch für jedes Foto evaluiert. Dabei wurde je ein Foto als Testdatensatz genutzt, und nur anhand von den restlichen 7 Fotos wurde das System angelehrt.

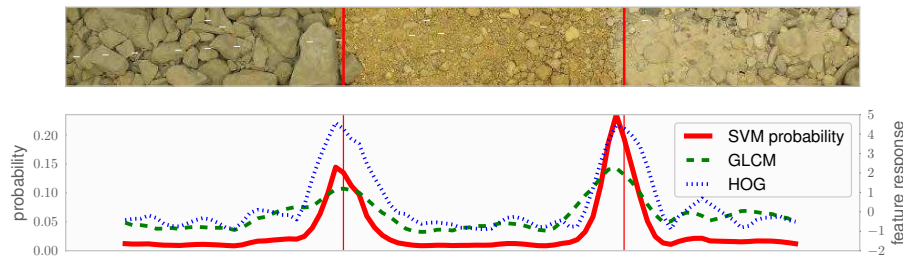


Abbildung 13: Feature-Distanzen sowie Prädiktionssicherheit anhand einer Probe mit 3 verschiedenen Erdschichten.

Die Ergebnisse sind in Abb. 12 dargestellt. Das System erkennt 16 der 19 Schichtgrenzen korrekt. Drei Schichtgrenzen wurden falsch erkannt. In Abb. 13 ist der Detektionsprozess dargestellt. Die Grafik unter dem Bild zeigt die Werte der Feature-Distanzen $f_k^{(glcm)}$ ("GLCM") und $f_k^{(hog)}$ ("HOG"), sowie die Prädiktionssicherheit der Support Vector Machine ("probability"). Beide Detektoren reagieren unterschiedlich stark auf Änderungen des Aussehens. Mit dem QR-Code kann mittels eines virtuellen Maßbandes die Tiefe der detektierten Schichten zentimetergenau ermittelt werden.

Es besteht die Möglichkeit, dass in manchen Fällen visuell erkennbare Unterschiede fälschlich als Schichtgrenzen interpretiert werden, z. B. infolge von Lichteinflüssen oder Umsortierung der Körner. In anderen Fällen weisen wirkliche Schichtgrenzen nur geringe visuelle Unterschiede auf, die ein Fachmann aber als Schichtgrenze deuten würde. Das lernfähige System soll dazu in Zukunft weiter verbessert werden. Beispielsweise könnten zusätzliche Features eingefügt werden.

Untersucht werden soll auch die Frage, ob die Schichtgrenzen direkt am Bild anstatt in getrennten sliding windows detektiert werden können und ob die Support Vector Machine durch einen nichtlinearen Klassifikator (z. B. Radial Basis Function SVM) oder ein neuronales Netz ersetzt werden kann [KSH12]. Dazu werden Trainingsdaten in Form von Fotos sowie von Fachleuten festgestellte Schichtgrenzen erfasst und zusätzlich mit Informationen in der Datenbank PrAG verknüpft. Das System kann sich dabei während der Verwendung des Arbeitsplatzes stetig verbessern, indem es auf Korrekturen von Laboranten und Bauingenieuren reagiert und sich entsprechend anpasst.

3 Zusammenfassung, Ausblick

Obwohl der Umfang an Untersuchungen zur Aufstellung geotechnischer Modelle nicht zunimmt und auch die Verfahren nicht wesentlich weiterentwickelt worden sind, werden zunehmend dreidimensionale Modelle in der Geotechnik für numerische Untersu-

chungen genutzt. Eine Möglichkeit zur Aufstellung solcher Modelle ist die umfassende Nutzung der verfügbaren Informationen. Bilddaten von Bohrkernen und Bodenproben können dafür einen wesentlichen Beitrag liefern. Ziel der weiteren Entwicklungen ist es deshalb, die Erfassungseinheit für den Einsatz im Feld auszubauen und die Referenzierung der Bilddaten mit Bezug zu den Kennwerten und Schichtenverzeichnissen umzusetzen.

Das Grundkonzept besteht in der interdisziplinären Verknüpfung und Weiterentwicklung von Methoden zur Vorhersage der Untergrundeigenschaften mit Informationen aus Bildanalyseverfahren, klimatischen Parametern und numerischen Prognoseverfahren. Die Verknüpfung wird im Rahmen eines Datenmanagementsystems umgesetzt. Der Schlüssel dafür ist die ort- und zeitbezogene Erfassung der Daten.

Die digitale Kennzeichnung vereinfacht die Zuordnung von Materialproben oder Beobachtungspunkten. Zur Umsetzung ist ein geländetaugliches und multimediales Dokumentationswerkzeug zu entwickeln, welches eine schnelle und komfortable Informationsaufnahme auf dem Baufeld ermöglicht. Alle Angaben zu einem geografisch festgelegten Punkt, zusätzliches Bildmaterial und andere Daten werden online auf der Baustelle („online on site“) erfasst und über eine Datenbank auf einem zentralen Server gespeichert.

Literatur

- [CN11] COATES, Adam ; NG, Andrew: The Importance of Encoding Versus Training with Sparse Coding and Vector Quantization. In: *In Proc. Int. Conf. Artif. Intell. Stat.*, 2011, S. 215–223
- [DT05] DALAL, Navneet ; TRIGGS, Bill: Histograms of Oriented Gradients for Human Detection. In: *Computer Vision and Pattern Recognition*, 2005, S. 886–893
- [EL10] ENGEL, J. ; LAUER, C.: *Einführung in die Boden- und Felsmechanik*. Leipzig : Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2010
- [KP02] KUMAR, Ajay ; PANG, Grantham: Defect detection in textured materials using Gabor filters. In: *IEEE Transactions on Industry Applications* 38 (2002), Nr. 2, S. 425–440
- [KSH12] KRIZHEVSKY, Alex ; SUTSKEVER, Ilya ; HINTON, Geoffrey E.: ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks. In: *Advances in Neural Information Processing* 25, 2012
- [Mas05] MASIN, David: *TRIAX-Single element program for soil mechanics*. 2005
- [Nie03] NIEMUNIS, Andrzej: *Extended hypoplastic models for soils*, Universität Bochum, Diss., 2003

- [OPH96] OJALA, Timo ; PIETIKÄINEN, Matti ; HARWOOD, David: A Comparative Study of Texture Measures with Classification Based on Feature Distributions. In: *Pattern Recognition* 29 (1996), Nr. 1, S. 51–59
- [PCG05] PARTIO, Mari ; CRAMARIUC, Bogdan ; GABBOUJ, Moncef: Block-based Ordinal Co-occurrence Matrices for Texture Similarity Evaluation. In: *IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*, 2005
- [Woo90] WOOD, David M.: *Soil behaviour and critical state soil mechanics*. Cambridge university press, 1990