

Paper-ID: VGI_197703



Zur Bestimmung der Bodendichte aus Schwereprofilen

Bruno Bauer ¹

¹ *Institut für Vermessungswesen und Photogrammetrie der Universität Innsbruck,
Technikerstraße 13, A-6020 Innsbruck*

Österreichische Zeitschrift für Vermessungswesen und Photogrammetrie **65** (2), S.
41–54

1977

Bib_TE_X:

```
@ARTICLE{Bauer_VGI_197703,  
Title = {Zur Bestimmung der Bodendichte aus Schwereprofilen},  
Author = {Bauer, Bruno},  
Journal = {{\u}sterreichische Zeitschrift f{\u}r Vermessungswesen und  
Photogrammetrie},  
Pages = {41--54},  
Number = {2},  
Year = {1977},  
Volume = {65}  
}
```



Zur Bestimmung der Bodendichte aus Schwereprofilen

Von *Bruno Bauer*, Innsbruck

Zusammenfassung

Die Voraussetzung der unendlichen, horizontalen, ebenen Bouguerplatte bei der Schwere-reduktion zum Zwecke der Bestimmung eines Vertikalgradienten, der auf die Dichte des Gesteins im Reduktionswege schließen läßt, kann im allgemeinen nur sehr aufwendig durch digitale Geländemodelle geschaffen werden. Nach umfangreichen Modellrechnungen konnte ein Zusammenhang zwischen den Fehlern der Nettletondichte aus nicht topographisch reduzierten Messungen und der Abweichung des gemessenen Vertikalgradienten vom Normalgradienten gefunden werden. Mit Hilfe einer einfachen Beziehung läßt sich nun die aus den rohen Profilen gerechnete Dichte mit dem Vertikalgradienten deutlich verbessern.

1. Einleitung

Unbefriedigende Ergebnisse bei der Bestimmung der Gesteinsdichte aus gravimetrischen Messungen im Bregenzer Wald (Schneckenlochhöhle) veranlaßten den Verfasser zur Untersuchung der üblicherweise verwendeten Formeln.

Die Messungen waren zunächst nicht zum Zwecke der Dichtebestimmung ausgeführt worden, diese erwies sich jedoch in Anbetracht des bewegten Reliefs zur späteren Berechnung bzw. Abschätzung topographischer Einflüsse als notwendig.

Um möglichst gefühltsfreie Ergebnisse zu erhalten, wurden die aus der Zusammenstellung in [1] bekannten Verfahren untersucht und eine möglichst allgemein gehaltene Version programmiert. An digitalen, theoretischen Geländemodellen konnten Modellrechnungen vorgenommen werden. Sie dienten zur Erprobung verschiedener verbessernder Formelansätze, deren Anwendung auf die Praxis bei den oben erwähnten Messungen in Vorarlberg der Verifikation diene.

2. Die Bestimmung der Bodendichte aus Schwereprofilen im kuperten Gelände

Eine den Methoden in [1] im Ergebnis entsprechende Berechnung kann bei Verwendung von Rechenanlagen und digital gegebenem Gelände auch auf folgende Art (2.1. und 2.2.) erfolgen, wobei sich die Vorstellung am ehesten an Nettleton anlehnt.

2.1. Nimmt man die Erdoberfläche zunächst im Punkt P_i horizontal an, so ist die auf den Vergleichshorizont VH reduzierte Schwere g_i im Punkt P_i (Abb. 1)

$$\bar{g}_i = g_i + 0.3086 H_i - 2 \pi k^2 H_i \sigma. \quad (1)$$

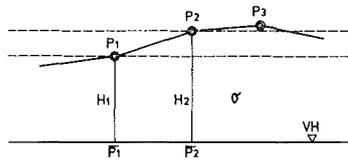


Abbildung 1

Die Annahme des Vergleichshorizonts an der tiefsten Stelle des Meßgebiets (dem tiefsten Meßpunkt) ist für konstante Dichten im Meßprofil nicht erforderlich. Diese sind aber grundsätzlich eine Voraussetzung der Methoden bei mehr als zwei Meßpunkten und Ausgleich.

Mit

$$H_i = \bar{H}_i + \Delta H$$

schreiben wir

$$\bar{g}_i = g_i + 0.3086 (\bar{H}_i + \Delta H) - 2 \pi k^2 \sigma (\bar{H}_i + \Delta H). \quad (2)$$

Die Differenz der Schwerewerte in allen Punkten bei Reduktion auf verschiedene Horizonte ist damit

$$\bar{g}_i - g_i = 0.3086 \bar{H}_i + 2 \pi k^2 \sigma \bar{H}_i + (0.3086 \Delta H - 2 \pi k^2 \sigma \Delta H) \quad (3)$$

wobei der rechte Klammerausdruck unter der obigen Voraussetzung nur mehr konstante Glieder enthält, alle reduzierten Schwerewerte g_i also um einen konstanten Betrag g_h verschoben werden und die Horizontalgradienten unverändert bleiben.

Bei bewegtem Relief – das ja für das Verfahren unerlässlich ist – müßte die Voraussetzung horizontalen Geländes durch Berechnung der topographischen Reduktion geschaffen werden:

$$g_i'' = g_i + T_i.$$

Dazu kann man nur eine vorläufige Dichte verwenden.

2.1.1. Alle auf VH reduzierten Schwerewerte sind bei homogenem Untergrund (konstantes σ) gleich groß. Durch regelmäßige Änderung der Dichte mit der Länge des Schwereprofils erhält man eine linear veränderliche, reduzierte Schwere, bei unregelmäßigen Dichteschwankungen einen ebensolchen Verlauf der auf den Vergleichshorizont reduzierten Werte.

Daraus ergibt sich auch die schlechte Fehlerfortpflanzung für gleichmäßig geneigte Hänge*), da man dort nicht feststellen kann, ob eine gleichmäßige Änderung der Oberflächendichte oder eine großräumige, d. h. tiefliegende Störung vorliegt.

*) Vgl. dazu [1], Seite 108

Die Bedingungsgleichung lautet:

$$2 \pi k^2 H_i \sigma - 0.3086 H_i - g_i = \text{const.} \quad (4)$$

Da wir mit dem Gravimeter in der Regel nur Schweredifferenzen im Profil messen, dieses also nicht an das absolute Schwerenetz anschließen und das auch gar nicht nötig haben, ist der Wert g_i ein um den Wert $\Delta g'$ verschobener Schwerewert

$$g_i = g_i' + \Delta g'.$$

Bei Zusammenfassung von $\Delta g'$ und const kann man schreiben

$$\Delta g' + \text{const} = \Delta g.$$

Somit heißt die Bedingung

$$2 \pi k^2 H_i \sigma - 0.3086 H_i - \Delta g = 0. \quad (5)$$

Bei mehr als zwei Meßpunkten kann man nach der Methode der kleinsten Quadrate ausgleichen. Man darf dabei jedoch nicht vergessen, daß die von der Annahme und dem Meßgerät herrührenden systematischen Fehler als zufällige angesehen werden. Das kann zu unberechtigtem Vertrauen in die Resultate führen.

Diese Art der Berechnung nimmt keine Rücksicht auf die Entfernung der Meßpunkte. Bei größeren Punktabständen treten mehr störende Einflüsse (Gerätetransport) und damit Meßfehler auf; es ist jedoch auch die Annäherung an die ohne Berechnung der Topographie vorausgesetzte Bouguerplatte besser. Dazu kommt die geringere Remanenz im Gravimeter.

2.1.2. Treten regionale Störungen auf, kann dieser Ansatz nicht mehr befriedigen. Ein von der Länge im Profil (a), vom Abstand zu einem Ausgangspunkt (b) oder von der Projektion auf eine theoretische Profilgerade (c) abhängiges Neigungsglied nimmt linear veränderliche, großräumige Schwereanomalien auf. Dazu ist zumindest ein dritter Meßpunkt nötig.

Die Bedingungsgleichung lautet

$$2 \pi k^2 H_i \sigma - 0.3086 H_i - \Delta g - S_i g_N = 0, \quad (6)$$

wobei g_N den positiven Anstieg des regionalen Feldes in Profilrichtung darstellt.

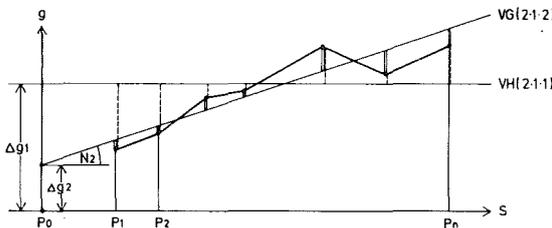


Abbildung 2

3. Schwerewirkung geneigter Bouguerplatten

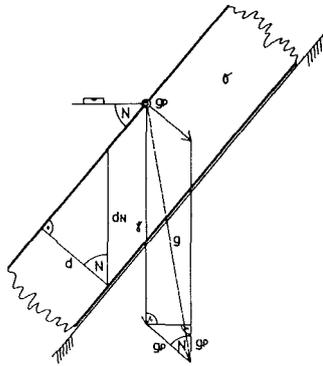


Abbildung 3

Bezeichnungen:

γ ... Normalschwere

k^2 ... Gravitationskonstante

σ ... Dichte der Platte

d ... Plattendicke ($dN \cdot \cos N$)

N ... Plattenneigung

g ... Resultierende

Die erste Ableitung des Potentials einer unendlichen Platte ist

$$g_p = 2 \pi k^2 \sigma d = 2 \pi k^2 \sigma \cdot dN \cdot \cos N \quad (7)$$

Die Resultierende der Summe der beiden Schwerevektoren ergibt sich zu

$$g = \sqrt{\gamma^2 + g_p^2 + 2 \gamma g_p \cdot \cos N} \quad (8)$$

Es ist

$$g_p' = g_p \cdot \cos N. \quad (9)$$

Für $g_p \ll \gamma$ gilt

$$g_p^2 \doteq g_p'^2. \quad (10)$$

Damit ist die durch Hinzufügen der geneigten Platte vergrößerte Schwere genähert:

$$g \doteq \gamma + g_p' = \gamma + 2 \pi k^2 \sigma dN \cdot \cos^2 N. \quad (11)$$

In Tabelle 1 sind für eine Reihe von Fällen die Fehler dieser Näherung zusammengestellt. Man sieht, daß sie für den normalen Meßgebrauch unbedeutend sind.

Tabelle 1 $\gamma = 980 \text{ gal}, \sigma = 2.67 \text{ g.cm}^{-3}$, Fehler in $\mu\text{gal.}10^{-3} = \text{mgal.}10^{-6}$

Dicke dN	N = 1 ⁹ d[m]		N = 5 ⁹ d[m]		N = 10 ⁹ d[m]		N = 25 d[m]		N = 50 ⁹ d[m]	
1 m	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.99	0.00	0.92	0.00	0.71
10 m	0.00	10.00	0.00	9.97	0.02	9.88	0.08	9.24	0.16	7.07
100 m	0.02	99.99	0.39	99.70	1.53	98.77	7.99	92.39	15.97	70.71

4. Modellrechnungen

Als praxisbezogenes, anschauliches Beispiel wurde zunächst ein zweifach symmetrisches Rippengelände gewählt (Abb. 4), danach auch andere Formen.

Die Anlage der digitalen Geländemodelle erfolgte in rechteckigen bzw. quadratischen, stehenden Prismen.

Die Einführung einer theoretischen, regionalen Störung mit linearer Abhängigkeit von der Länge im Profil ist unnötig, da sie genauso wie angenommen bei der Dichteberechnung wieder herausfallen muß. Aus demselben Grund wurde auch der Normalgradient von 0.3086 mgal/m als Repräsentant einer unter dem Modell angehängten Erdmasse (Kugel) nicht angebracht.

Die simulierten Schwereprofile wurden entweder an der Kammlinie des Rückens (Grat) oder in annähernd horizontal laufenden Linien am Hang bis hinunter zum Fuß angeordnet. Außerdem wurden Modelle mit zwei nebeneinander liegenden Bergrücken untersucht, die es gestatten, Profile im Talgrund zu legen.

Die aus den umfangreichen Modellrechnungen erhaltenen Erkenntnisse, die zum größten Teil erwartet werden konnten, teilweise aber auch überraschten, sollen im folgenden kurz zusammengefaßt werden. Eine Auswahl systematisch geordneter Ergebnisse folgt im Anhang (Tabelle 3).

4.1. Bei Schwereprofilen symmetrisch zur Rippenmitte (gleich viele Höhenminima und -maxima) ist das Ergebnis unabhängig von der Anzahl der Punkte. Das gilt auch für Profile mit horizontalen Zwischenstücken (Abb. 6).

4.2. Eine Verfeinerung des Rasters für das digitale Geländemodell wirkt sich auf die Dichtebestimmung nicht aus.

4.3. Die Unebenheit des Profils in der Längsrichtung (Rippung R), die allerdings erst eine Dichtebestimmung nach (6) ermöglicht, wirkt sich auf die erhaltene Dichte verkleinernd aus.

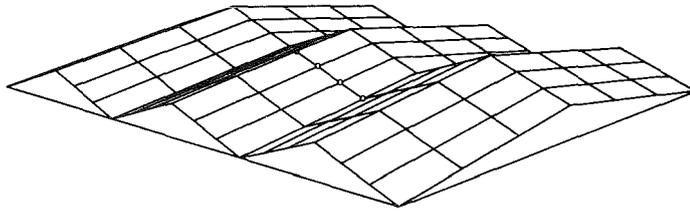


Abbildung 4

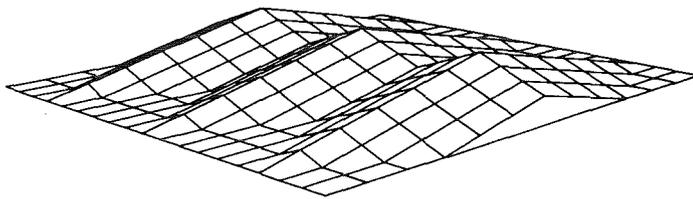


Abbildung 5

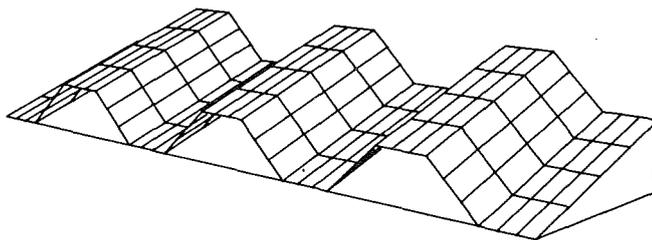


Abbildung 6

4.4. Eine Geländeneigung quer zur Profilrichtung vermindert ebenfalls die aus den Schwerewerten zurückgerechnete Dichte.

4.5. Nur bei sehr flachen Rippen und in Hangmitte sehr ausgedehnter Hänge kann die geringere Schwerewirkung einer geneigten Bouguerplatte mit dem Faktor $\cos^2 N$ bzw. $\cos^2 N \cdot \cos^2 R$ erfolgreich berücksichtigt werden.

4.6. Die Anbringung der topographischen Reduktion*) verbessert im allgemeinen die errechnete Dichte von Modellen mit stark kupiertem Gelände. Wo dies nicht der Fall ist, ist die Ausdehnung des Modells zu gering. Insbesondere am Grat wird der dort beträchtliche Fehler absolut stark verringert.**)

4.7. Die Berücksichtigung des Vertikalgradienten bringt eine sehr gute Annäherung an die richtigen bzw. die Werte für die Dichte, die man mit topographischer Reduktion erhält.

5. Dichteverbesserung

5.1. Die Voraussetzungen der Plattenreduktion von (1) bzw. (6) kann man sich im quergeneigten Gelände genähert durch Verkleinerung der Plattenwirkung nach (11) schaffen.

$$\sigma = \sigma' \cdot \cos^2 N \cdot \cos^2 R \quad (12)$$

wobei σ' die nach Formel (6) berechnete Dichte, N die Hangneigung quer zum Schwereprofil und R die durchschnittliche Längsneigung zwischen zwei benachbarten Punkten darstellt.

Es kommt aber diese Methode nur in Frage, wenn die Rippenneigung gering ist gegen die Ausdehnung des Hanges ober- und unterhalb des Profils, da ansonsten die Wirkung der unendlich angenommenen Platte immer noch größer ist als die der in der Natur vorliegenden Masse.

5.1.1. Tabelle 2 zeigt die Ergebnisse in eher günstigen Fällen. Aus den Beispielen kann man eindeutig erkennen:

5.1.2. Die Voraussetzung der unendlich ebenen Platte ist am ehesten in der Mitte erfüllt. Allgemein muß das Verhältnis von Länge zu Dicke, d. h. die Hanglänge zum Höhenunterschied von einem Profildiverticulum zum nächsten Maximum, genügend groß sein.

*) Einebnung des Geländes durch Hinwegnahme von Material über und Aufschüttung mit dichtegleichem Material unter dem Niveau des Aufpunktes.

***) Tabelle 3, Beispiele 3 und 4.

5.1.3. Im unteren Hangviertel, das ist in der Nähe des Profils, in dem der Vertikalgradient eines symmetrischen Bergrückens gleich Null ist, bringen die Profile bei praktisch jeder Kombination von Rippen- und Hangneigung nahezu richtige Resultate, im oberen Teil des Hanges viel zu geringe Dichten.

5.1.4. Voraussetzungsgemäß bringt die Verkleinerung der Plattenwirkung einer unendlichen Platte in Hangmitte den größten Nutzen. Er wächst – absolut gesehen – mit der Neigung des Hanges.

Tabelle 2 Modelldichte = $2.67 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, Hang = 136 m, 10 Rippen zu 16 m

Hang- neigung N %	Rippen- neigung R %	σ' σ ¼ Hang	σ' σ ½ Hang	σ' σ ¾ Hang
10	1	2.71 2.74	2.56 2.58	2.38 2.40
10	5	2.69 2.73	2.55 2.59	2.39 2.42
10	10	2.68 2.73	2.55 2.60	2.39 2.43
20	1	2.76 2.87	2.43 2.53	2.05 2.14
20	5	2.73 2.85	2.45 2.55	2.12 2.21
20	10	2.72 2.85	2.44 2.56	2.12 2.23
30	1	2.80 3.05	2.30 2.51	1.71 1.86
30	5	2.76 3.01	2.34 2.55	1.85 2.03
30	10	2.74 3.02	2.34 2.57	1.87 2.06

5.2. Die in Punkt 4.5. genannte, theoretisch einwandfreie Möglichkeit zur Verbesserung der erhaltenen Dichte wird nur beschränkt anwendbar sein, da ein ausreichendes digitales Geländemodell nur photogrammetrisch und damit meist sehr teuer zu erhalten ist. Sie sollte trotzdem angestrebt werden.

5.3. Betrachtet man die folgenden drei Eigenschaften des Vertikalgradienten der Schwerkraft, so drängt sich seine Verwendung (Punkt 4.7.) zur Verbesserung des Verfahrens von Nettleton auf.

5.3.1. Abhängigkeit von der Topographie (0.21 – 0.44 mgal/m*).

*) Nach W. Embacher, ÖZfV 1970, Seite 175, und eigenen Messungen.

5.3.2. Lineare Abhängigkeit von der Dichte.

Der Differenzquotient entspricht der praktischen Messung:

$$VG = \left(\frac{k^2 \cdot M}{R_1^2} - \frac{k^2 \cdot M}{R_2^2} \right) / (R_1 - R_2) = k^2 M \cdot \left(\frac{1}{R_1^2} - \frac{1}{R_2^2} \right) / (R_1 - R_2)$$

Für $M = \text{Volumen} \times \text{Dichte}$ sind alle übrigen Faktoren bei der Ableitung nach der Dichte konstant.

5.3.3. Abhängigkeit von der dritten Potenz der Entfernung von einer Masse (Topographie bzw. gesuchte Bodendichte)

$$G = k^2 M / R^2;$$

$$VG = dG / dR = - 2 k^2 M / R^3.$$

5.4. Bei den heute zur Verfügung stehenden Meßmitteln im Feld kommt vorläufig nur ein mittlerer Gradient (VG) über das gesamte Profil in Frage*).

Als Ansatz für die Dichteverbesserung mit Hilfe des Vertikalgradienten wurde die Form

$$\sigma = \sigma' (1 + \Delta VG \cdot C) \tag{13}$$

gewählt.

Es bedeuten: σ die verbesserte Dichte

σ' die aus dem Verfahren nach (6) gewonnene Dichte

ΔVG die Differenz mittlerer Vertikalgradient-Normalgradient

C eine aus Beispielen zu errechnende Konstante

Die Dimensionen sind: $\sigma \dots g.cm^{-3}$

$\sigma' \dots g.cm^{-3}$

$\Delta VG \dots mgal.m^{-1}$

demnach C $\dots 100.sec^2$

5.5. Wie aus Tabelle 3 zu ersehen ist, liegt der Wert von C in der Nähe von 3. Es wurde daher für die weiteren Berechnungen dieser Wert gewählt, da es keinen Sinn hat, aus allen berechneten oder gar den hier angeführten Beispielen einen genauen Mittelwert zu bestimmen. Auch ein gewichtetes Mittel hat keine Berechtigung, da die in der Praxis auftretenden Unregelmäßigkeiten der Geländeflächen Fehler derselben Größenordnung bringen können.

*) Siehe dazu auch [3], Seite 20ff.

5.6. Anwendung auf praktische Messungen

Bei homogenem Untergrund ($\sigma = \text{const.}$ im ganzen Meß- und Einflußbereich) und geringer Geländeunebenheit hängt der mittlere Fehler von σ im wesentlichen nur von der Meßgenauigkeit der Schwerewerte und Höhen ab.

Bei Messungen in der Natur werden vor allem zwei Einflüsse Fehler von σ bewirken:

5.6.1. Abweichungen der Geländeform von der horizontalen Platte

Besonders sehr nahe Felsabbrüche oder -anstiege zeigen starke Wirkung. Der Vertikalgradient reagiert darauf wegen 5.3.3. sehr empfindlich und ermöglicht so mit (13) eine Verbesserung der berechneten Dichte.

5.6.2. Änderungen der Bodendichte im Bereich des Schwereprofils

Soweit man das vorhersehen kann, wird eine entsprechende Verlängerung des Profils später durch Unterteilung Schlüsse auf die verschiedenen Dichten und die Stelle oder den Bereich der Änderung zulassen.

6. Fehlerbetrachtung und Diskussion der Modellrechnungen

Auf Grund der vom Verfasser berechneten Modelle kann man sagen, daß für mäßige Neigungen C keinen größeren Fehler als 10% seines Wertes hat. Wie jedoch sehr kleine, stark gestufte bzw. geneigte Modelle gezeigt haben, kann der Faktor auch einen erheblich größeren Fehler aufweisen. Man darf dabei nicht übersehen, daß die Kenntnis von C nicht Selbstzweck, sondern nur zur Verbesserung der Dichte notwendig ist! Das gelingt aber in allen Fällen eindeutig. Im Beispiel 3 der Tabelle 3 ist der aus dem Nettletonprofil erhaltene Dichtewert um 116% seines Wertes zu klein; trotz eines theoretischen Faktors von 4.87 erhält man aber bei $C = 3$ immer noch eine Dichteverbesserung von 62% des Fehlers.

Die Gradienten wurden, in etwa der praktischen Messung entsprechend, als Differenzquotienten aus Höhenunterschieden von 1 m berechnet. Infolge der relativ geringen Ausdehnung der Modelle ergeben Vertikalgradienten, die aus einem Höhenunterschied von 1 dm berechnet werden, optisch bessere Resultate*).

Weitere umfangreiche praktische Messungen könnten C und seinen Fehler genauer festlegen oder eventuell eine differenziertere Gesetzmäßigkeit feststellen. Eine weitere Verbesserung der Dichtebestimmung kann damit allerdings nicht mehr so gravierend ausfallen.

*) In Beispiel 9 wird $C' = 1.80$ und $\sigma = 9.68$.

Tabelle 3 Modellichte = 10.0 g.cm⁻³, Block = 116 × 140 m, Rippen zu 16 m

Bei- spiel Nr.	Hang- neigung N %	Rippen- neigung R %	Dichte (6) σ'	Mittlerer Gradient VG 1 m	Konstante C'	Verbesserte Dichte σ mit c = 3	Verbesserte Dichte mit Topographie	Bemerkung	Ab- bildung
1	10	10	7.22	+ 0.128	3.01	9.99	9.04	Kamm	4
2	20	10	6.92	+ 0.136	3.27	9.74	8.26	Kamm	4
3	20	20	4.62	+ 0.239	4.87	7.93	8.10	Kamm	4
4	10	10	9.16	+ 0.031	2.96	10.01	9.29	2/3 Hang	4
5	10	10	9.47	+ 0.018	3.11	9.98	9.40	1/2 Hang	4
6	20	10	9.03	+ 0.030	3.58	9.84	8.89	1/2 Hang	4
7	20	10	10.31	- 0.025	1.20	9.54	9.24	1/6 Hang	4
8	10	10	9.76	+ 0.006	2.73	9.94	9.49	1/3 Hang	4
9	10	10	10.47	- 0.028	1.60	9.59	9.85	1/6 Hang	5
10	10	10	9.57	+ 0.014	3.21	9.97	9.49	1/2 Hang	5

7. Praktisches Beispiel

Zur Untersuchung der praktischen Tauglichkeit dienten die in der Einleitung erwähnten Messungen am Schneckenloch im Bregenzer Wald (Vorarlberg). Das Schwereprofil umfaßt die Punkte 44–57 (Abb. 6), welche alle bis auf eine Ausnahme (50) nahe der Erdoberfläche liegen. Im Punkt 50 mußte wegen der örtlichen Gegebenheiten auf einem Baumstrunk mit ca. 70 cm Höhe aufgestellt werden. Obwohl für diese Untersuchung kaum von Bedeutung, wurde dieser Schweremeßwert mit dem Freiluftgradienten auf den durchschnittlichen Bodenabstand hinuntergerechnet.

Als Dichte ergibt sich nach (6)

$$\sigma = 3.13 \pm 0.24 \text{ g.cm}^{-3}$$

was ganz eindeutig zu hoch erscheint.

Die Abbildung 8 zeigt sehr schön die starke Korrelation zwischen Schweremeßwert und Punkthöhe vor der Plattenreduktion.

Da es aus Kostengründen nicht möglich war, ein ausreichendes digitales Geländemodell zu erstellen, kann die Verbesserung nur nach 4.7. erfolgen.

Es wurden zwei – zunächst nur interessehalber, und deshalb eher wenige – Vertikalgradienten der Schwerkraft gemessen. Dabei wurde wie in [2] und [3] vorgegangen, also mit Stativ und Höhenunterschieden von 1.3 bis 1.5 m. Damit können natürlich nicht die Laborgenauigkeiten von [4], die in jüngster Zeit durchgeführt wurden, erreicht werden.

Im Bereich der Profilmittle ergaben sich die Gradienten zu 0.263 und 0.267, im Mittel also 0.265 mgal/m.

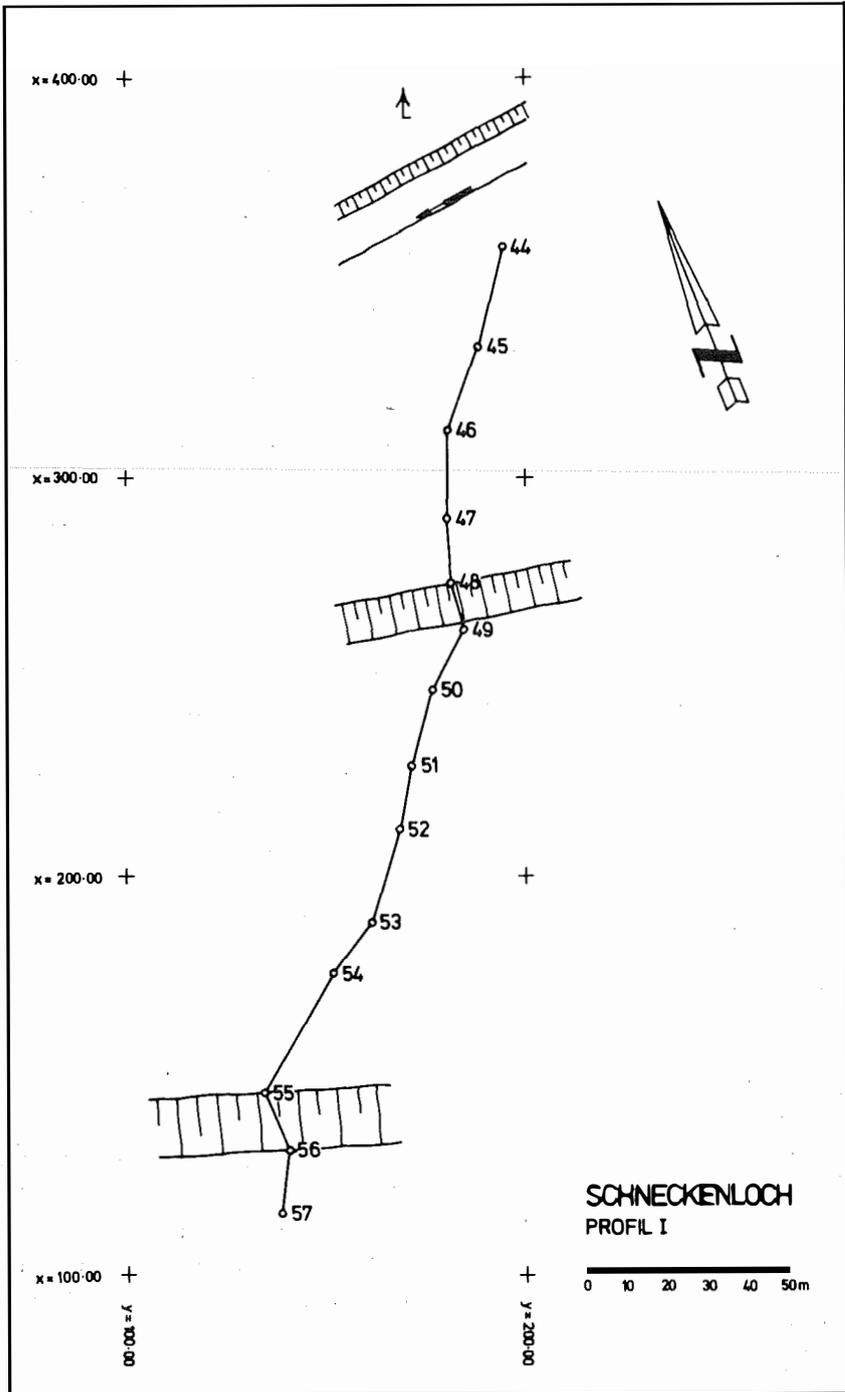


Abbildung 7

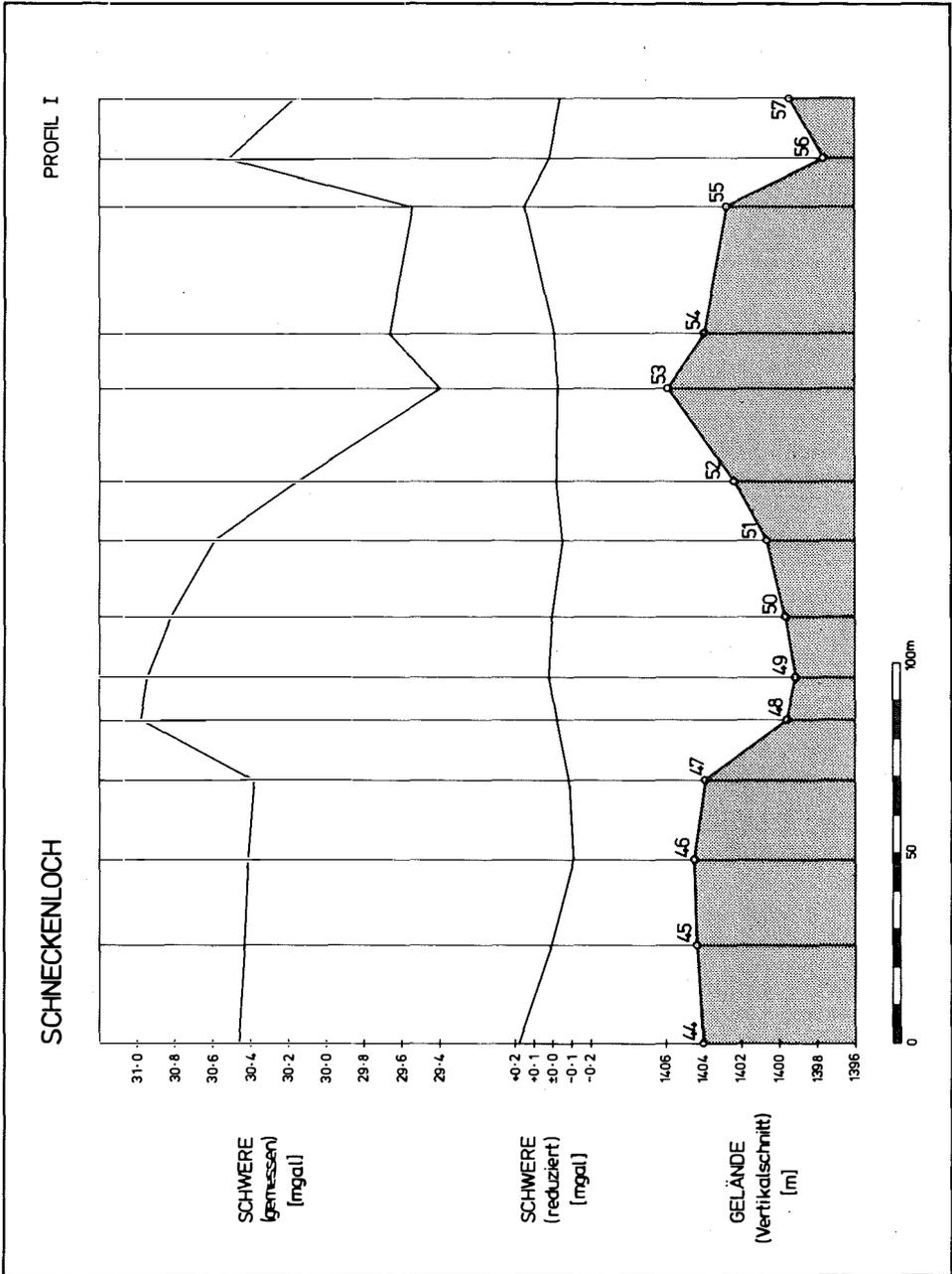


Abbildung 8

Nach Anwendung der Formel (13) ergibt sich damit eine Dichte von

$$\sigma = 2.72 \text{ g/cm}^3.$$

Aus mehreren Handstücken wurde durch Herrn Dipl.-Ing. Reinhard Rostek am Institut für Bodenmechanik, Felsmechanik und Grundbau der Universität Innsbruck (Vorstand Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Walter Schorber) die Dichte mit 2.68 g/cm^3 bestimmt. Die Tauchwägung wurde auf 0.01 g Genauigkeit vorgenommen und bringt somit einen mittleren Fehler von $\pm 0.02 \text{ g/cm}^3$.

Die Übereinstimmung erscheint ein wenig zu perfekt, da man im Bereich der Klüfte und vor allem nahe der darunterliegenden Höhle aus der gravimetrischen Bestimmung durch die Integration eine etwas geringere Dichte erhalten müßte.

Tabelle 4 Schneckenloch Profil I

Punkt	Y	X	H	G
44	194.890	357.510	1403.950	30.462
45	188.170	332.700	1404.340	30.433
46	180.400	311.750	1404.460	30.413
47	180.140	289.530	1403.930	30.379
48	181.310	273.460	1399.630	30.986
49	184.580	261.530	1399.210	30.957
50	176.690	246.820	1399.630	30.815
51	171.540	227.400	1400.640	30.591
52	168.450	211.940	1402.420	30.157
53	161.150	188.210	1405.970	29.399
54	151.860	175.870	1403.990	29.659
55	134.460	145.970	1402.800	29.540
56	140.400	131.360	1397.720	30.506
57	138.580	115.650	1399.520	30.160

Literatur

[1] Embacher, W., Ein Vergleich von Methoden zur Bestimmung der Bodendichte, ÖZfV 1961, 49. Jg.

[2] Bauer, B., Messung von Vertikalgradienten im kleinen Vermessungsbereich, ÖZfV 1971, 59. Jg.

[3] Bauer, B., Auffinden oberflächennaher Hohlräume mit dem Gravimeter, ÖZfVuPH 1975, Sonderheft 30.

[4] Götze, H. J., Rosenbach, O., Schöler, W., Zur Reproduzierbarkeit von Vertikalgradientenmessungen, ÖZfVuPH 1976, 63. Jg.