

8 Modell des Pulvermaares - Diskussion

8.1 3D-Dichtemodellierung

Bei vielen geologischen Strukturen handelt es sich um zweidimensionale Strukturen: Horste, Gräben, Stufen u.a., die i.d.R. hinreichend gut zweidimensional modelliert werden können. Ausgeprägte dreidimensionale Strukturen wie z.B. Maarvulkane, Meteoritenkrater und vergleichbare Formen verbieten eine zweidimensionale Berechnung.

Schon Anfang der sechziger Jahre haben TALWANI & EWING (1960) und GOGUEL (1961) die Grundlagen für eine dreidimensionale Berechnungen der Schwerewirkung beliebig geformter Körper mit dem Computer geschaffen. Zahlreiche Ansätze zur dreidimensionalen Modellierung bestehen heute (PISKAREV, pers. Mitteilung).

Mit dem an der Freien Universität Berlin entwickelten Programm IGMAS ist eine Verfeinerung der dreidimensionalen Modellierung von beliebig geformten Schwerekörpern erfolgt. Dabei können synchron die gravimetrischen und magnetischen Anomalien modelliert werden. Im Rahmen der vorliegenden Arbeiten wurden keine magnetischen Anomalien mit IGMAS modelliert (S. 77).

Bei der Modellierung gemessener Schwereanomalien wird eine Massenverteilung im Untergrund gesucht, deren Schwerewirkung eine befriedigende Übereinstimmung mit den gemessenen Anomalien aufweist. Dabei gibt es eine Vielzahl von Lösungen (theoretisch: unendlich viele), die unter Einbeziehung anderer Informationen (andere geophysikalische Messungen, Bohrungen, geologische Daten) beurteilt und eingeschränkt werden müssen.

Beim hier verwendeten Vorwärtsmodellieren wird das berechnete Schwerfeld eines Dichtemodells mit dem gemessenen Schwerfeld direkt verglichen. Die Modellparameter Dichte und Geometrie der Modellkörper werden solange

verändert, bis zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Modellschwere und gemessener Schwere erzielt ist.

Im Gegensatz zum Modellfeld kann es für das gemessene Feld schwierig sein, ein Null-niveau festzulegen, was mit dem grundsätzlichen Problem zusammenhängt, lokale und regionale Anteile des Feldes zu trennen. IGMAS trägt dem Rechnung durch den Abzug einer Konstanten, um die Felder auf das selbe Niveau zu bringen. IGMAS erlaubt eine konstante Niveaushiftung, um unterschiedlichen Bezugs- und Nullniveaus Rechnung zu tragen.

8.1.1 Vorbemerkungen

Die Modellierung des Störkörpers Pulvermaar-Vulkan mit dem Computerprogramm IGMAS erfolgte auf Basis der Freiluftanomalie. Sämtliche Dichtekörper gehen in die Modellierung mit ein. So können der Seekörper, der durch die Echolotvermessung in seiner Form und Dimension gut erfaßt worden ist, und der Tuffwall, dessen schwankende Mächtigkeiten durch die geoelektrischen Widerstandstiefensondierungen bedingt bestimmt wurden, direkt in das Modell eingefügt werden. Insbesondere der zentral liegende Seekörper mit seiner geringen Dichte ist diesbezüglich wichtig. Der Tuffwall, dessen Volumenberechnung den Ausgangspunkt der Berechnung des Volumens der unterirdischen Struktur darstellt, erhält bei der Modellierung mit IGMAS ebenfalls eine besondere Bedeutung.

Der möglicher Nachteil in der Modellierung der Freiluftanomalie liegt darin, daß die Anomaliebilder an geologischer Anschaulichkeit verlieren könnten.

Im Rahmen der vorliegenden Modellierung des Pulvermaar-Vulkans mit dem Programm IGMAS wurde mit absoluten Dichten gearbeitet. Es besteht kein Unterschied zwischen der Modellierung mit absoluten oder relativen Dichten. Denn für die Schwereberechnung ist lediglich der an einer Grenzfläche wirksame Dichtekontrast bedeutsam.

8.1.2 Einschränkende Bedingungen

Zur Einschränkung der Mehrdeutigkeit der Modellierung der gravimetrischen Anomalie am Pulvermaar wurden folgende geophysikalische und / oder geologische Zusatzinformationen hinzugezogen: die Dichten, die Berechnung der Volumina der ejektierten Massen, geo-elektrische Widerstandstiefensondierungen und magnetische Messungen. Diese Informationen und Untersuchungsergebnisse stellen die Rahmenbedingungen für die Modellierung des Pulvermaar-Vulkans dar.

8.1.2.1 Dichte

Die Dichten des ejektierten Materials wurden von ZIMANOWSKI (1985) ermittelt, die des devonischen Nebengesteins von BÜCHEL (1984, 1988) und PIRRUNG (1991) übernommen. Die Dichten der Seesedimente wurden von Messungen von SCHARF (1980, 1987) und NEGENDANK (1993) übernommen. Für die nicht zugänglichen unterirdischen Dichteeinheiten wurden folgende Werte angenommen.

Tab. 1: Dichteeinheiten und zur Modellierung verwendete Dichten

Dichteeinheit	Dichte
unterdevonische Nebengestein (BÜCHEL, 1984; PIRRUNG, 1991)	2,67 g/cm ³
Seekörper	1,0 g/cm ³
Seesedimente (SCHARF 1980, 1987; NEGENDANK 1993)	2,0 bis 2,1 g/cm ³
Ejekta (Tuffwall) (ZIMANOWSKI, 1985)	2,1 g/cm ³
Intrusiva	3,0 g/cm ³
im Diatrem verbliebene, mit zunehmender Tiefe durch Auflast stärker verdichtete Pyroklastika	2,15 bis 2,6 g/cm ³

8.1.2.2 Volumenkalkulation

Mit dem berechneten Volumen (Kap. 6) von $V_D = 124,5 * 10^6 \text{ m}^3$ und dem Radius des Kraters von 350 m errechnet sich unter Annahme eines geraden Kreiskegels ein Tiefgang des Diatremms von rund 1200 m bei einem Einfallswinkel von 80 bis 85°, wie von HAWTHORNE (1985) für derartige Körper postuliert.

Die Modellierung mit IGMAS zeigt, daß bei Veränderungen des Diatremms, d.h. der Parameter Dichte und / oder Geometrie, unterhalb von 500 m unter der Erdoberfläche die Wirkung auf die Schwere nicht mehr zu erfassen ist. Umso wichtiger ist es, für die tieferen Bereiche zusätzlich zur Gravimetrie weitere Informationen zu erhalten. Die Modellierung der tiefer liegenden Bereiche des Diatremms muß demnach auf Basis der Ergebnisse der Volumenkalkulation erfolgen.

8.1.2.3 Magnetfeldmessungen

Die magnetischen Messungen haben im Bereich des Sees eine positive Anomalie von 100 bis 150 nT ergeben (Kap. 7.2.3) bei einer Magnetisierung von ca. 0,4 A/m. Diese positive magnetische Anomalie deutet auf einen Intrusionskörper in Form eines Lavasees hin. Die gemessene Anomalie entspricht einem modellierten Körper von ca. 40 m Mächtigkeit und grob 300 m Durchmesser in einer Tiefenlage von ca. 120 m.

8.1.2.4 Widerstandsmessungen

Die geoelektrischen Tiefensondierungen haben ergeben, daß der praevulkanische Untergrund ein deutliches Relief mit Höhenunterschieden der Größenordnung von 50 m aufweist (Kap. 7.3.4). Dieses Relief muß bei der Modellierung berücksichtigt werden. Das Volumen der Ejekta wurde u.a. auf Basis dieser Ergebnisse berechnet.

In den Bereichen, in denen geoelektrische Sondierungen durchgeführt wurden, existiert eine Schicht mit sehr hohen spezifischen Widerständen, die als Schlackenhorizont gedeutet wird. Dieser Horizont ist jedoch so geringmächtig,

daß er auf die Schwere praktisch keinen Einfluß hat und nicht mehr in die IGMAS-Modellierung eingefügt wurde.

Die pyroklastischen Ablagerungen der drei Maare Pulvermaar, Oberwinkler und Ellscheider Maar, konnten durch die elektrischen Widerstandstiefensondierungen nicht voneinander getrennt werden. Aufgrund des deutlich höheren Alters der beiden benachbarten Maarvulkane kann jedoch davon ausgegangen werden, daß die von Pulvermaarpyroklastika überdeckten und folglich konservierten Ablagerungen der beiden Maare Oberwinkel und Ellscheid bereits erheblich erodiert waren. Die Mächtigkeiten dieser Ablagerungen sollten nur noch relativ gering sein.

8.1.2.5 Der Seekörper

Der Seekörper, dessen Wirkung durch seine Lage im Störkörperzentrum von großer Bedeutung ist, wurde mit Hilfe eines Echolots vermessen. Durch die Modellierung der Freiluftanomalie mit absoluten Dichten geht dieser Körper wie alle anderen direkt in die Modellierung mit ein.

8.1.3 Das Computerprogramm IGMAS

Die Modellierung des Pulvermaar-Störkörpers erfolgte mit dem an der Freien Universität Berlin entwickelten Programm IGMAS (**I**nteraktives **G**ravimetrisches und **M**agnetisches **A**uswerte-**S**ystem) zur dreidimensionalen Modellierung gravimetrischer und magnetischer Anomalien. Das Programm dient der quantitativen Modellierung dreidimensionaler Dichte- und Magnetisierungsstrukturen.

Die magnetischen Messungen wurden mit IGMAS nicht modelliert, da die Datenmenge zu gering ist.

IGMAS dient als Modellierwerkzeug dazu, gemessene Schwerefelder und / oder magnetische Felder durch numerische 3D-Modellrechnungen zu interpretieren (GÖTZE & LAHMEYER, 1988). Das Verfahren gehört zu den interaktiven „trial and

error“-Verfahren, wobei alle unabhängig gewonnenen Informationen (geophysikalische oder geologische Volumen-, Flächen- und Punktdaten) miteinbezogen werden. Das Resultat des Interpretations-prozesses ist ein synoptisches Modell, in dem es keine offensichtlichen Widersprüche gibt.

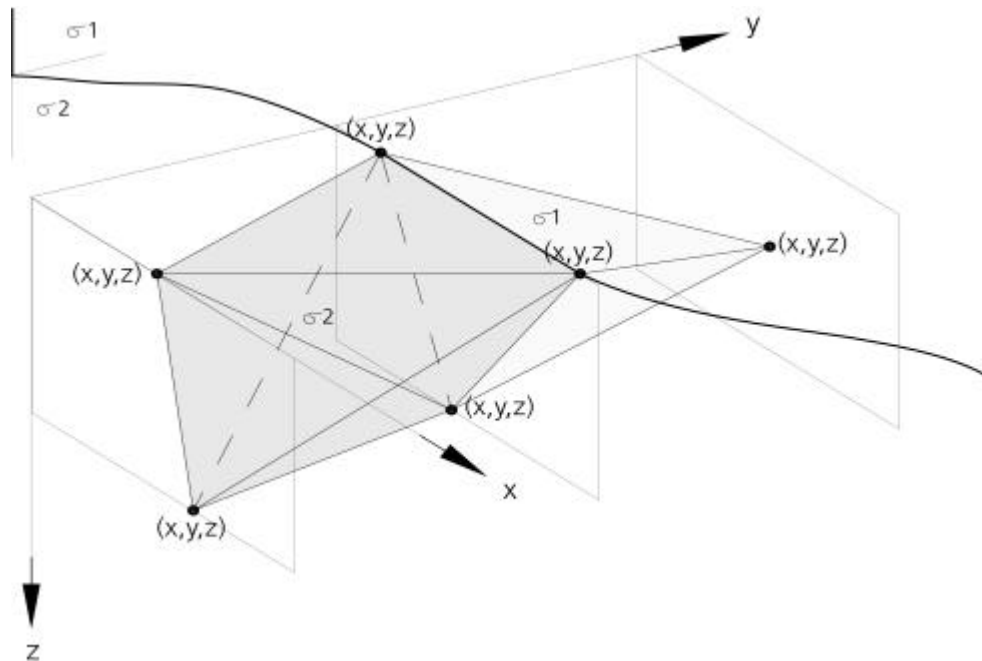


Abb. 34: Konstruktion der Dichtekörper aus Polyedern mit dreieckigen Begrenzungsflächen im Modellersystem IGMAS (verändert nach GÖTZE & LAHMEYER, 1988; KIRCHNER, 1997)

In IGMAS wird die der Schwereberechnung zugrundeliegende Dichteverteilung durch aneinandergrenzende Polyeder aus Dreiecksflächen modelliert. Die Eckpunkte der homo-genen Polyeder liegen in einem (x-, y-, z-) Koordinatensystem (Abb. 34) in zuvor mit einer y-Koordinate festgelegten x-z-Ebenen, die sinnvollerweise senkrecht zum dominierenden geologischen Streichen verlaufen. Im Fall des annähernd runden Pulvermaares erübrigen sich Überlegungen zum geologischen Streichen; als x- und y-Koordinaten wurden der Einfachheit halber die Gauss-Krüger-Koordinaten gewählt und die 32 ausgewählten Ebenen E-W orientiert (Abb. 35).

IGMAS

3-D Gravity and Magnetic Modeling

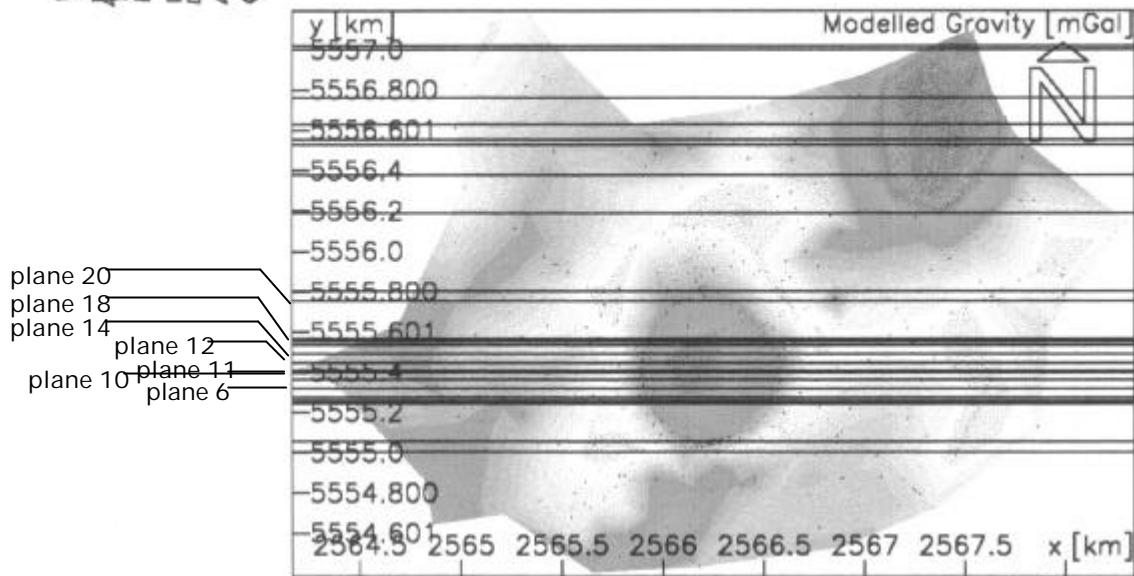


Abb. 35: Lage der E-W-verlaufenden Profile, die das Modell für IGMAS aufspannen; mit Beschriftung der im folgenden Text verwendeten Ebenen (plane)

Man bemerkt, daß die Abstandsdichte der Ebenen variiert, was den unterschiedlichen Kenntnissen über die Struktur Rechnung trägt:

- Form und Lage des Seekörpers,
- Form und Lage des Diatremes,
- Lage des Kraterrandes (z.B. durch das anstehende devonische Nebengestein);
- die erhöhte Liniendichte im Norden bezieht die Kenntnisse über das Oberwinkler Maar ein.

Die vermutete sukzessive Zunahme der Dichte der Diatremfüllung kann nur vereinfachend in Form von "Dichtesprüngen" in der Modellierung dargestellt werden (Abbildung 36). Anstelle eines Dichtekörpers für die Diatremfüllung, wird das Diatrem in mehrere Körper unterteilt, die eine jeweils höhere Dichte besitzen als der im Hangenden befindliche ($\sigma_5 > \sigma_4 > \sigma_3$ usw.). Die Dichte σ_1 in Abbildung 36 entspricht dem Dichtekörper des unterdevonischen Gesteins.

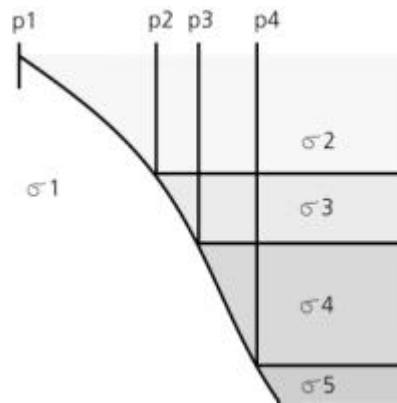


Abb. 36: Zur Erläuterung der Lagen der Schnittebenen p (Abb. 35): Am Berührungspunkt verschiedener Dichtekörper σ wird eine neue Ebene (plane) eingefügt

8.1.4 Ergebnisse der 3D-Modellierung

Abbildung 37 zeigt den direkten Vergleich zwischen der gemessenen und der modellierten Schwere. Deutlich zu erkennen sind die zwei stärksten Minima: das zentral liegende Pulvermaar und das nordöstlich gelegene Oberwinkler Maar. Geht man davon aus, daß in der Abbildung 37 grün grob näherungsweise das Nullniveau bei ca. 35 mGal (Freiluftanomalie) stellt, dann betragen die vom Pulvermaar und Oberwinkler Maar verursachten Anomalien ca. -8 mGal. In ihrer Amplitude und v.a. in ihrer Form stimmt die modellierte mit der gemessenen Anomalie gut überein. Das Pulvermaar besitzt eine negative Anomalie von -6 bis -8 mGal, das Oberwinkler Maar von -8 bis -10 mGal.

In den beiden Feldern, der gemessenen (unterer Teil der Abbildung) und der modellierten (oberer Teil der Abbildung) Schwere, sind gewisse Abweichungen zu erkennen. Diese gilt es nicht überzubewerten. Sie werden teilweise durch den vom Programm IGMAS automatisch durchgeführten shift, der vermutlich nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet wird, verursacht. So können mehrere "Inseln" und Bögen, z.B. die Anomalien im nördlichen Teil des Tuffwalls, die sich um ca. 0,25 mGal zwischen gemessener und modellierter Anomalie unterscheiden, auf den shift zurückgeführt werden.

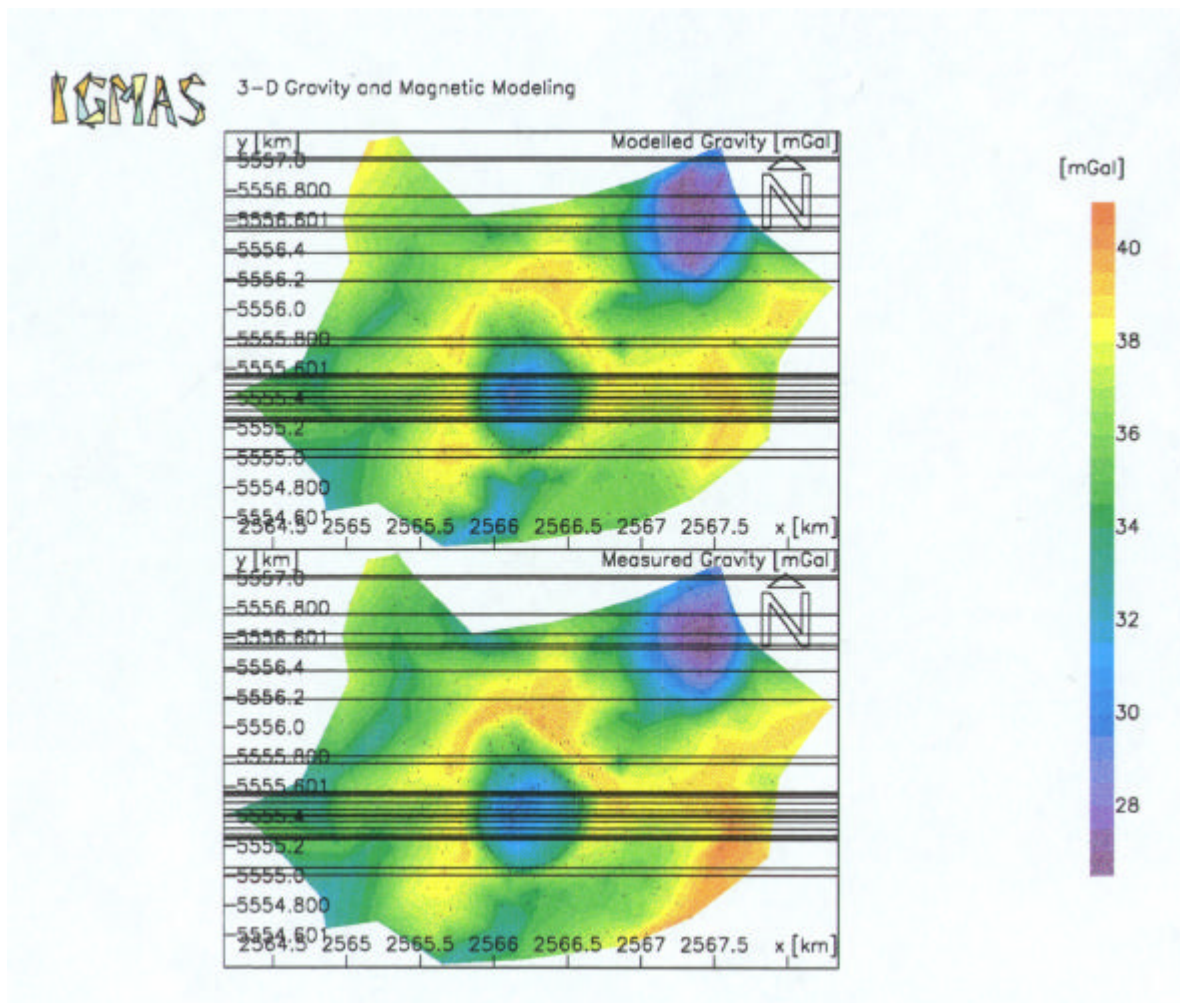
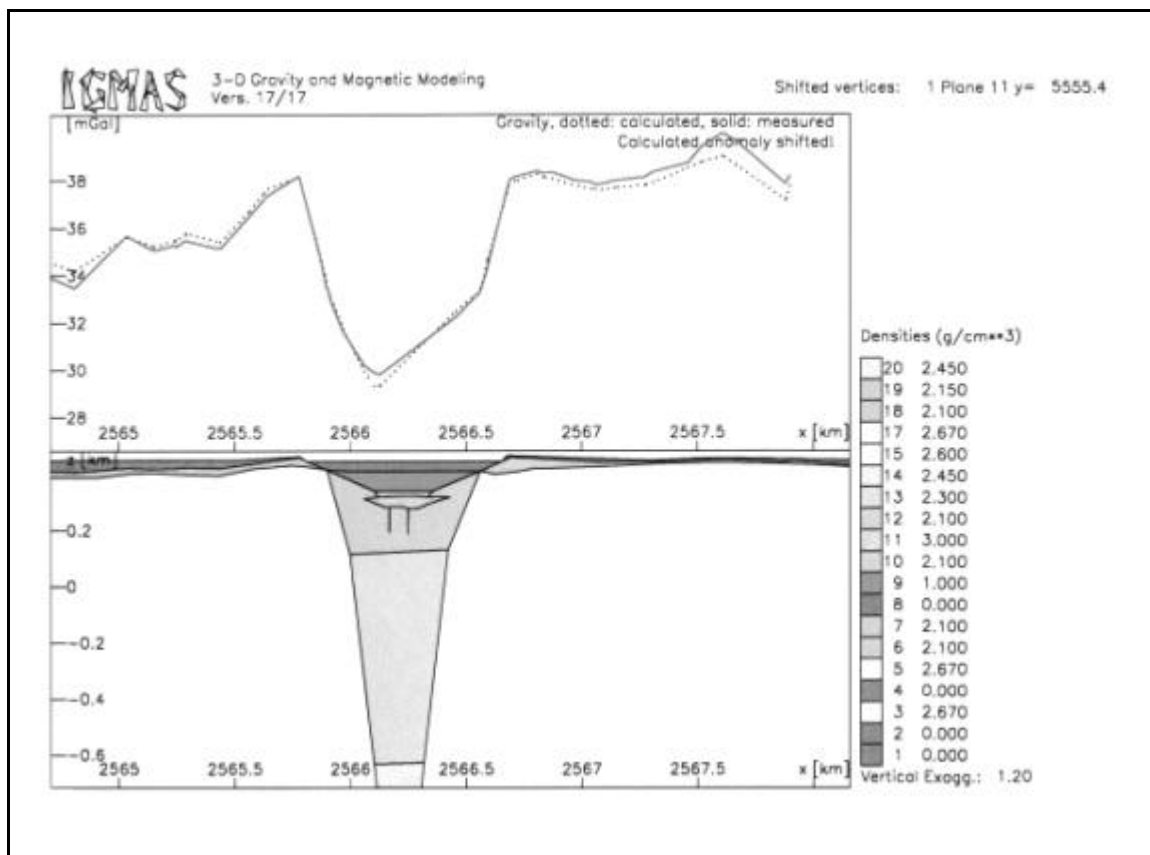


Abb. 37: Vergleich der gemessenen und der modellierten Schwere

Die geologisch ausgewiesenen Strukturen wie z.B. der Schlackenkegel Römerberg und das Strohn Märchen im Süden des Pulvermaares, das Ellscheider Maar im Nordwesten sowie das aus diesem herausführende, NE-SW-verlaufende Laubachtal, fallen im Schwerefeld nicht auf und sind nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Die folgenden Abbildungen (Abb. 38 bis Abb. 43) für die Schnitte (plane) 6, 10, 11, 14, 18 und 20 (Abb. 35) sind die Ergebnisse der Modellierung des Pulvermaar-Vulkans. Der untere Teil der Abbildungen stellt jeweils das Modell in der entsprechenden Schnittebene (Hochwert) dar. Im oberen Teil der IGMAS-Abbildung sind die modellierte (durchgezogene Linie) und die gemessene (gestrichelte Linie) Kurve zu dem in der unteren Bildhälfte gehörigen Schnitt gezeichnet. Die Kurven wurden mittels des oben erwähnten

shifts einan-der angenähert. Rechts in der Abbildung stehen die verwendeten Dichten sowie der Betrag der Überhöhung der Darstellung.



1 - Surrounding Outside; 2 - "Luft rechts"; 3 - Devon rechts; 4 - "Luft links"; 5 - Devon links; 6 - Pyroklastika 1 links; 7 - Pyroklastika 1 rechts; 8 - "Luft Mitte"; 9 - Wasserkörper; 10 - Seesedimente; 11 - Lavasee; 12 - Pyroklastika 2; 13 - Pyroklastika 3; 14 - Pyroklastika 4; 15 - Pyroklastika 5; 17 - Devon rechts; 18 - Pyroklastika; 19 - Pyroklastika 1; 20 - Pyroklastika 1

Abb. 38: E-W-Schnitt (plane 11) durch den Störkörper Pulvermaar-Vulkan. Das Modell ist nur bis zu einer Tiefe von 600 m unter der Erdoberfläche dargestellt

Die Abbildungen 38 und 39 zeigen zentral gelegene E-W-Profile durch den Pulvermaar-Vulkan (Abb. 35, plane 10 und 11). Das Diatrem besitzt hier nahezu seinen größten Durchmesser und Tiefgang. In Abbildung 38 sind nur die oberen 600 des Pulvermaar-Vulkans dargestellt, in Abbildung 39 das ganze Diatrem.

In der Modellierung mit IGMAS zeigt sich, daß anders als bisher angenommen das Modell eines geraden Kreiskegels für das Diatrem die Anomalie nicht zufriedenstellend erklärt. In den Schnitten wird deutlich, daß in einer Tiefe von rund 300 m unter der Erdoberfläche die Diatremwände steiler einfallen. Dies kann in Form eines wie in der Modellierung derart abrupten Knicks erfolgen oder innerhalb eines bestimmten, aber vermutlich nicht sehr mächtigen Übergangsbereiches. Durch die Einführung dieses Knicks, der auf die Schweremessungen basiert, wird eine bessere Anpassung erzielt. Durch die Veränderung des Einfallswinkels der Diatremwände innerhalb der oberen 300 m muß die untere Spitze des Diatremes weiter in die Tiefe gezogen werden, um der Berechnung der Volumina Rechnung zu tragen. Damit vertieft sich das Diatrem auf eine Tiefe von grob 2000 m unter der Erdoberfläche.

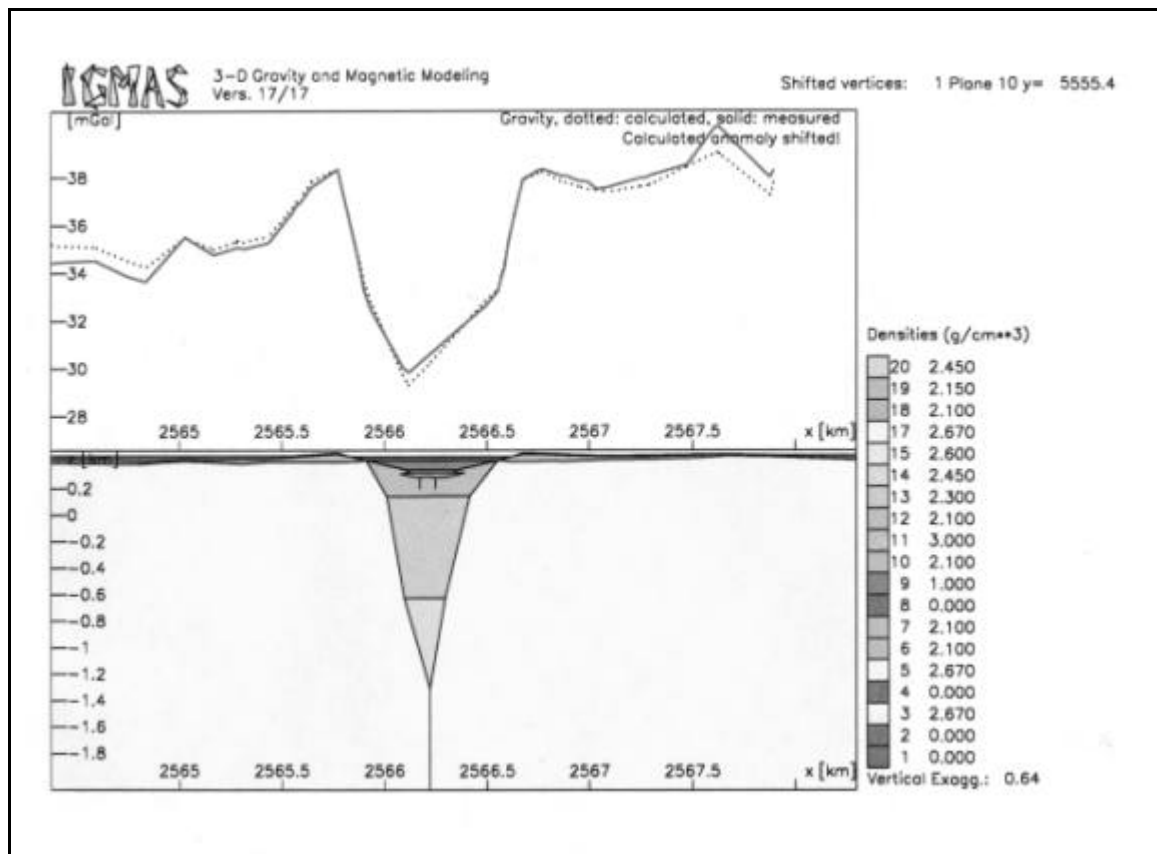


Abb. 39: E-W-Schnitt (plane 10) durch den Störkörper Pulvermaar-Vulkan. Das Modell zeigt das gesamte Diatrem

In den Abbildungen 38 und 39 sowie in den weiter unten folgenden Abbildungen mit IGMAS ist darüberhinaus eine Unsymmetrie des Diatremes zu

erkennen. Im Westen ist das Einfallen der Diatremwände um ca. 2 Grad steiler als im Osten. Diese relativ geringe Unsymmetrie spiegelt sich in einer deutlichen Unsymmetrie der Kurve wider.

In der Modellierung mit IGMAS wurde mit vier verschiedenen Dichten zwischen $2,1 \text{ g/cm}^3$ und $2,6 \text{ g/cm}^3$ (Dichtekörper 12 bis 15) für das Material der Diatremfüllung gearbeitet (Abb. 38, 39 und 40). Es wird angenommen, daß das Material der Diatremfüllung bei vermutetem gleichbleibendem Nebengesteinsanteil (Kap. 6) mit der Tiefe zunehmend kompaktiert ist. Durch die vier Dichtekörper soll die sukzessive Dichtezunahme dargestellt werden.

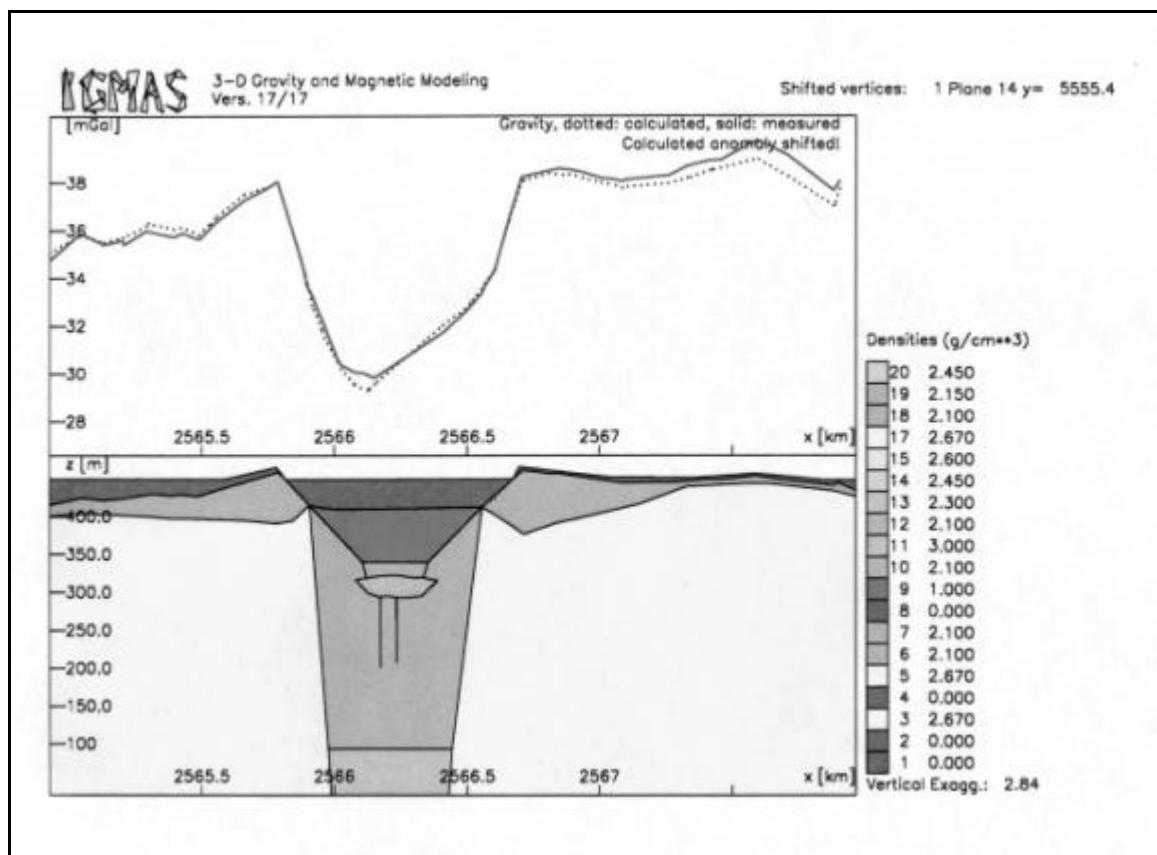


Abb. 40: E-W-Schnitt (plane 14) durch den Störkörper Pulvermaar-Vulkan. Der untere Teil der Abbildung zeigt die oberen 300 m des Maarvulkans.

In Abbildung 40 ist der Störkörper nochmals stark überhöht dargestellt, um Details im oberen Bereich zu zeigen. Unterhalb der Seesedimente (Dichtekörper 10) erkennt man den postulierten Lavakörper. Seine Einführung ermöglicht, die fehlende Dichte zu kompensieren (Abb. 40). Er ist in einer Tiefe

von 100 bis 120 m unter der Wasseroberfläche lokalisiert und besitzt vermutlich eine Mächtigkeit von rund 40 m. Die Materialdichte wurde mit 3,0 g/cm³ angenommen (Kap. 8.1.2.1).

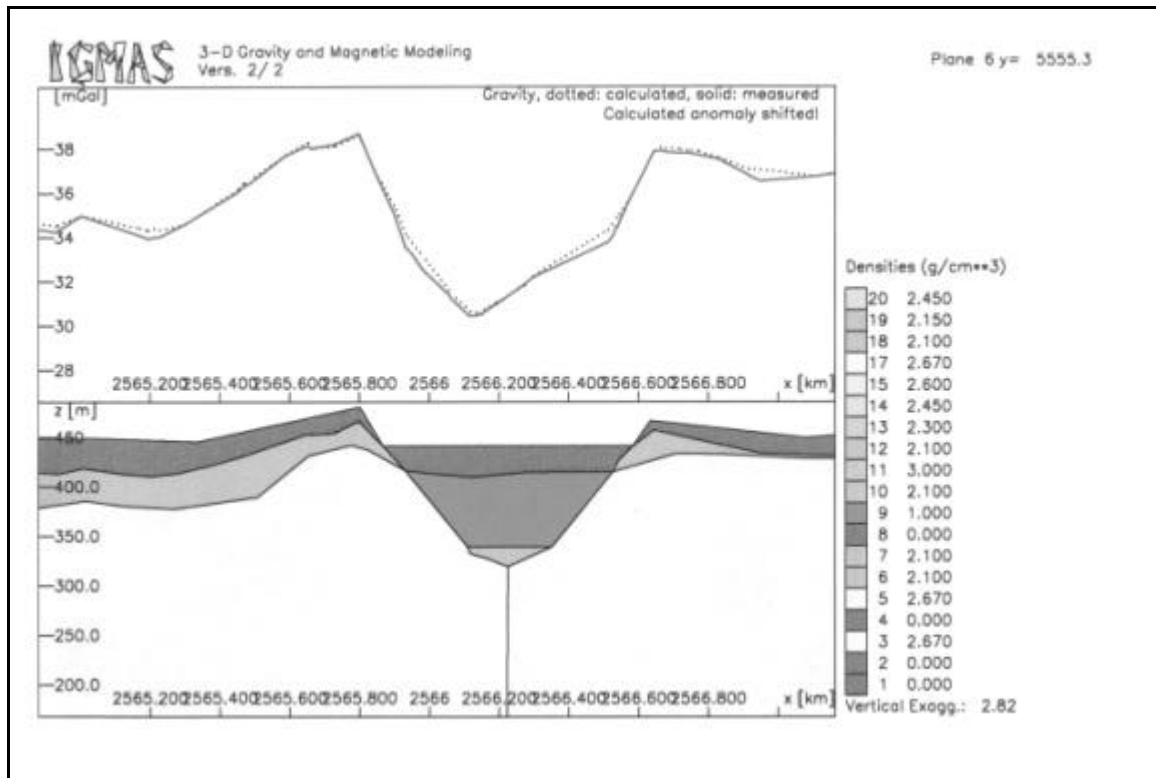


Abb. 41: E-W-Schnitt (plane 6) durch den Störkörper Pulvermaar-Vulkan.

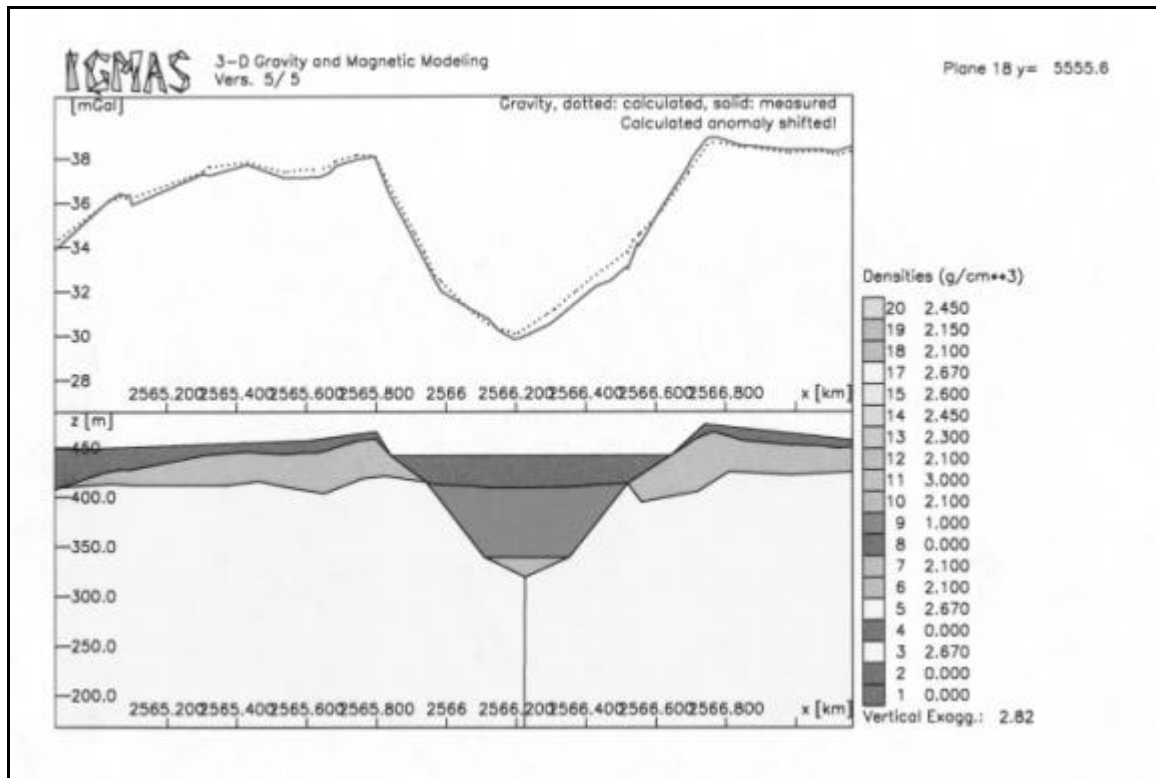


Abb. 42: E-W-Schnitt (plane 18) durch den Störkörper Pulvermaar-Vulkan. Die in den Abbildungen 41 und 42 dargestellten Schnittebenen stellen E-W-Schnitte dar, die in der Tiefe das Diatrem nur noch knapp anschneiden. Schnittebene 6 (Abb. 40) schneidet den See in der südlichen, Ebene 18 in der nördlichen Hälfte. Es ist nur der obere Teil der Struktur dargestellt, insbesondere der Tuffwall. Im Südosten (Abb. 41) des Pulvermaares ist der Tuffwall relativ geringmächtig und läuft sich bereits nach wenigen hundert Metern auf eine sehr geringe Mächtigkeit (< 5 m) aus. Im Ostnordosten des Pulvermaares dagegen (Abb. 42) ist der Wall mit rund 40 m wesentlich mächtiger.

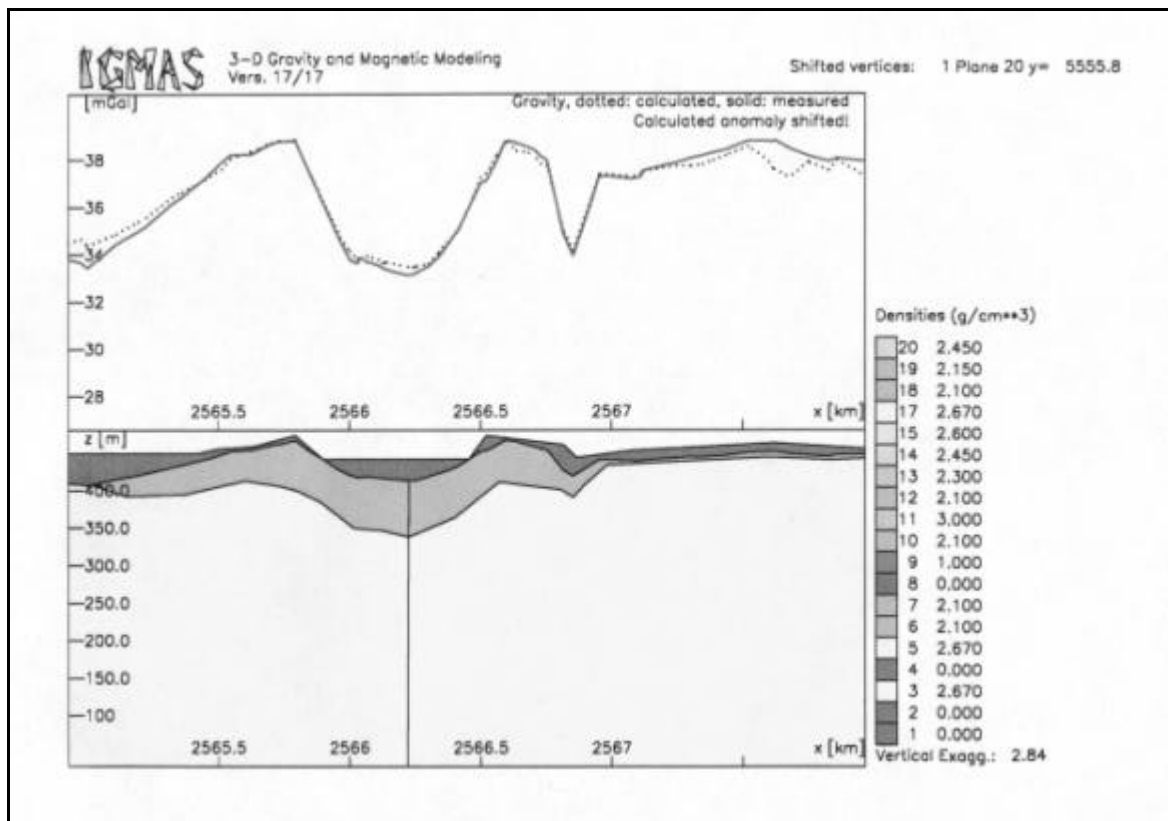


Abb. 43: E-W-Schnitt (plane 20) durch den Störkörper Pulvermaar-Vulkan.

Abbildung 43 zeigt einen E-W-Schnitt (plane 20), der wenige Meter nördlich des Sees die Struktur schneidet. Weder der See noch das Diatrem werden angeschnitten. Der Tuffwall ist mit grob 40 m relativ mächtig. Auffällig in diesem Schnitt ist ein lokales Minimum, welches sich auf der Schwerekarte (Abb. 37) zwischen dem Pulvermaar und dem Oberwinkler Maar befindet. Die Anomalie beträgt ca. -3 mGal. Entsprechend der Modellierung mit dem Programm IGMAS wird diese lokale Anomalie, die im wenige Zehner Meter nördlich liegenden E-W-Schnitt nur noch ca. 1,5 mGal beträgt, ausschließlich von der Morphologie verursacht.

Als Zusammenfassung der Ergebnisse der 3D-Modellierung ist das Folgende festzuhalten:

Die Anpassung der Modellschwere an das gemessene Feld ist sehr weit vorangetrieben worden; die maximalen Abweichungen betragen nicht mehr als 1,5 mGal (an den äußersten nordwestlichen und südöstlichen Rändern des

Untersuchungsgebietes), im Mittel sind sie geringer als 0,3 mGal. Eine weitere Verfeinerung wäre bei einigem Zeitaufwand zu erzielen. Andererseits wurden im Rahmen der Modellierung auch ganz andere Modelle durch Variation der Dichten und Geometrie berechnet. Sie zeigen aber, daß große Variationsmöglichkeiten im Rahmen der Daten nicht möglich sind. Ganz anders geartete Modelle bleiben somit wenig wahrscheinlich.

Es gibt unendlich viele äquivalente Störungsmassen, mit denen man eine gemessene Dichteverteilung erklären kann. Eindeutig bestimmbar sind der Betrag der gesamten Störungsmasse aus dem Integral über die Anomalie, der Ort des Anomalieschwerpunktes und die ideelle störende Schicht (JUNG, 1961). Weiterführende Auskünfte erhält man nur durch die Hinzunahme andersartiger Messungen.

8.2 Synthese der Untersuchungen

Mit 503 Meßstationen ist der Bereich um den Pulvermaar-Vulkan gravimetrisch flächen-deckend vermessen worden. Ergänzend wurden magnetische Profile und geoelektrische Widerstandstiefensondierungen durchgeführt. Die Interpretation des Schwerefeldes ohne Hinzunahme weiterer Informationen und die dreidimensionale Modellierung unter Berücksichtigung der Ergebnisse der geologischen Untersuchungen und der geophysikalischen Messungen sowie der Kalkulation der Volumina führen zu sehr unterschiedlichen Ergebnissen. Besonders im vorliegenden Fall des Pulvermaar-Vulkans mit seiner geringen negativen Anomalie sind zusätzliche Informationen, die die Lösungsmöglichkeiten der gravimetrischen Ergebnisse einschränken, von entscheidender Bedeutung.

Dies führte zu einem geologischen und geophysikalischen 3D-Modell des Pulvermaar-Vulkans. Dieses Modell ist in Abbildung 44 dargestellt.

Pulvermaar-Vulkan

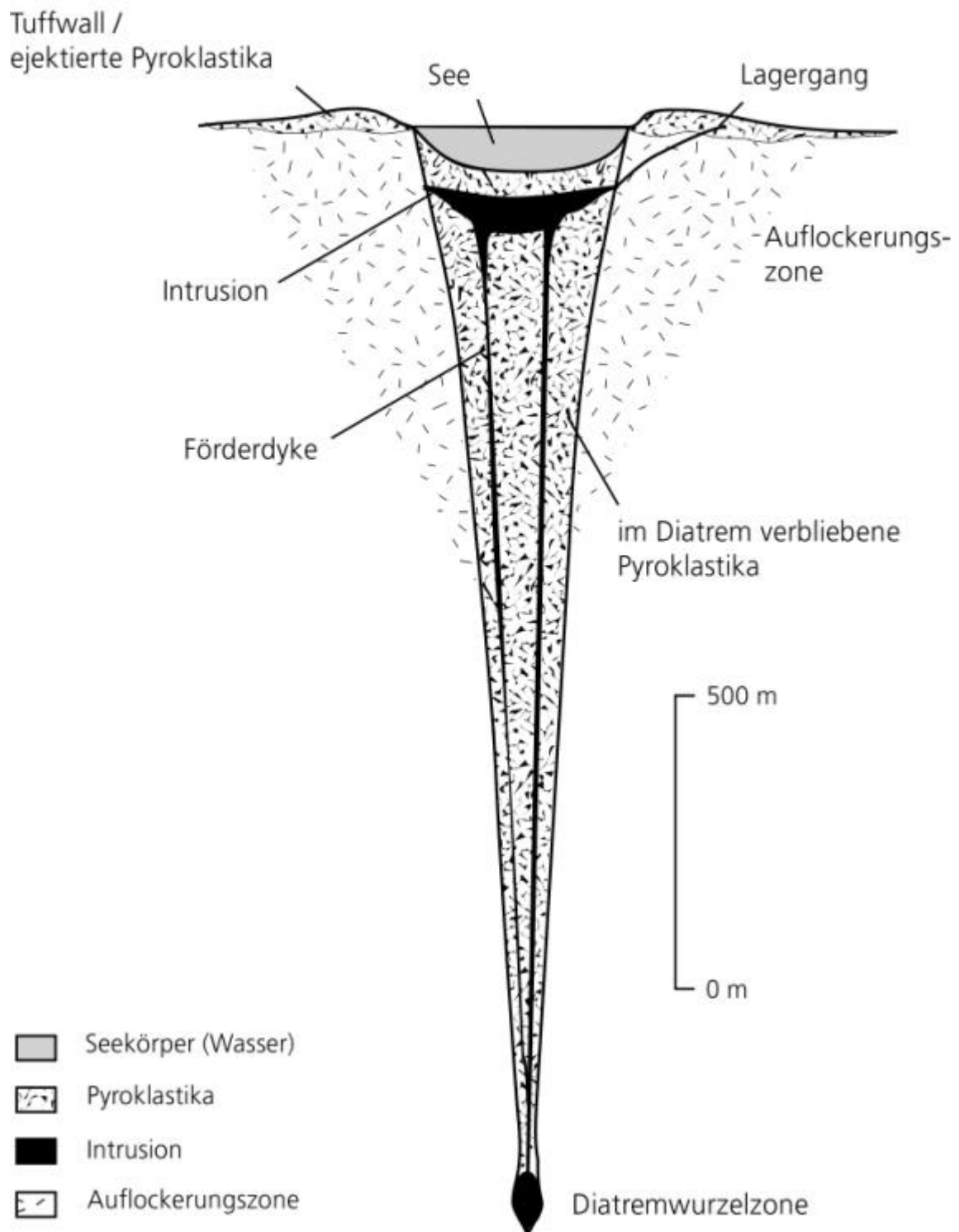


Abb. 44: Schematische Darstellung des Pulvermaar-Vulkans beruhend auf der Kombination sämtlicher Ergebnisse geologischer und geophysikalischer Untersuchungen und der Berechnung der Volumina

Das mit Pyroklastika verfüllte Diatrem ist vermutlich mehr als 2000 m tief. Das Einfallen der Diatremwände ändert sich in einer Tiefe von grob 300 m unter der Erdoberfläche (Knick) und ist um ca. 2° unterschiedlich. In einer Tiefe von ungefähr 120 bis 160 m unter der Wasseroberfläche (409 m ü. NN) liegt ein ca. 40 m mächtiger Lavasee bzw. Intrusivkörper. Stellenweise führen vermutlich Lagergänge bis nahe unter die Erdoberfläche. In der direkten Umgebung des Diatrems existiert in den oberen mehreren hundert Metern eine tektonische Schwächezone, die in Kapitel 8.3.1 näher beschrieben wird. Die Mächtigkeiten der pyroklastischen Ablagerungen betragen stellenweise mindestens 45 m.

Die in Abbildung 44 dargestellten Förderdykes konnten weder magnetisch noch gravimetrisch nachgewiesen werden. Sie seien lediglich schematisch dargestellt.

Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag in der gravimetrischen Modellierung unter Einbeziehung sämtlicher zusätzlicher Ergebnisse als Randbedingungen.

Die geoelektrischen Widerstandstiefensondierungen haben ergeben, daß die Mächtigkeiten des Tuffwalls mit 8 bis 46 m stark schwanken (Kap. 7.3.4). Dies entspricht bei einer angenommenen Dichte von $2,1 \text{ g/cm}^3$ der Pyroklastika gegenüber der Reduktionsdichte von $2,3 \text{ g/cm}^3$ rechnerisch einer Wirkung von maximal rund 0,4 mGal (Bouguer-Plattenreduktion). Der praevulkanische Untergrund besitzt ein Relief mit Höhendifferenzen von bis zu mehr als 30 m, was bei einem Dichteunterschied zwischen dem devonischen Nebengestein ($2,6 \text{ g/cm}^3$) und der Reduktionsdichte ($2,3 \text{ g/cm}^3$) von ca. $0,3 \text{ g/cm}^3$ ungefähr 0,4 mGal entspricht. In der Summe ergeben sich damit durch die Mächtigkeitsdifferenzen und die praevulkanische Morphologie Schwankungen von maximal rund 0,8 mGal. Bei einer so geringen Anomalie, wie sie vom Pulvermaar erzeugt wird, ist dieser Betrag bereits erheblich.

Auf der Basis eines dreidimensionalen Geländemodells unter Berücksichtigung der Ergebnisse der geoelektrischen Widerstandstiefensondierungen wurde das gesamte ejektierte Volumen des Pulvermaar-Vulkans berechnet. Die Volumenkalkulation ergab ein Gesamt-fördervolumen von rund $163,3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$.

Bei einem für Diatreme typischen Einfallswinkel von etwa 85° wurde ausschließlich auf der Basis des berechneten Volumens ein Tiefgang von mindestens 1200 m errechnet (Kap 6).

Im Vergleich dazu wurde mit IGMAS - unter Berücksichtigung des Gesamtvolumens (s.o.) und der Existenz der Intrusion - ein Tiefgang des Diatremes von ungefähr 2000 m modelliert (Abb. 39). Der Lavakörper bewirkt jedoch durch sein im Vergleich zum ejektierten Gesamtvolumen verschwindend kleines Volumen ($< 1\%$) eine sehr geringe Tiefenzunahme. Der in der Volumenkalkulation noch unberücksichtigte Lavakörper kann demnach den Unterschied in der Berechnung der Tiefen nicht bedingen. Die Asymmetrie bzw. das unterschiedliche Einfallen der Diatremwände können diesen Unterschied in der Tiefenerstreckung nur zum Teil erklären. Entscheidend ist der Unterschied in der Form des Diatremes: Für die Volumenkalkulation wurde die Form eines geraden Kreiskegels angenommen, mit konstantem Einfallen der Diatremwände. Dagegen ergab die Modellierung mit IGMAS eine Änderung des Einfallswinkels der Diatremwände in einer Tiefe von rund 300 m unter der Erdoberfläche. Schließlich muß noch in Betracht gezogen werden, daß die den Berechnungen zugrunde liegenden Dichteverhältnisse (Verdichtung im unteren Diatremteil), sich wesentlich anders verhalten als angenommen, wofür es keine Anhaltspunkte gibt.

Es ist jedoch zu bemerken, daß dieser Ansatz über die Kalkulation der Volumina nur bei sehr jungen Störkörpern wie dem Pulvermaar möglich ist, wo der Tuffwall noch weitgehend erhalten ist. Die Rekonstruktion des Materials erfolgte sehr konservativ. Dadurch stellen die Ergebnisse Mindestvolumina und -tiefgang dar.

Die gravimetrischen Untersuchungen ergaben eine negative Anomalie von -4 bis -5 mGal. Es verbleibt nach Abzug der vom Seekörper verursachten Anomalie von ca. -3 mGal noch eine vom unterirdischen Diatrem des Pulvermaar-Vulkans erzeugte Anomalie von ca. -1 bis -2 mGal, was bei einem Dichteunterschied von $0,5 \text{ g/cm}^3$ rein rechnerisch einem Tiefgang von ca. 50 m entspricht (Abb. 45, a). In diesem Falle würde es sich nicht mehr um einen Maarvulkan handeln, sondern um einen Tuffring (unterlagerndes Diatrem mit

geringem Tiefgang; S. 10). Die Analyse der Zusammensetzung des ejektierten Materials mit einem für Maarvulkane typischen hohen Nebengesteinsanteil von mindestens 70 Vol.% (ZIMANOWSKI, 1985) zeigt aber, daß es sich nicht um einen Tuffring (Nebengesteinsgehalt < 10 Vol.%) handelt. Dieser berechnete, geringe Tiefgang muß also in Frage gestellt werden.

Der ausschließlich über die ejektierte Materialmenge berechnete Tiefgang des Diatremms beläuft sich immerhin auf ca. 1200 m (Kap 6; Abb. 45, b). Erst durch die Kalkulation der Volumina wird klar, daß dieser ausschließlich aus der Interpretation der gravimetrischen Untersuchungen ermittelte Tiefgang von 50 m (Abb. 45, a) nicht den geologischen Gegebenheiten entsprechen kann.

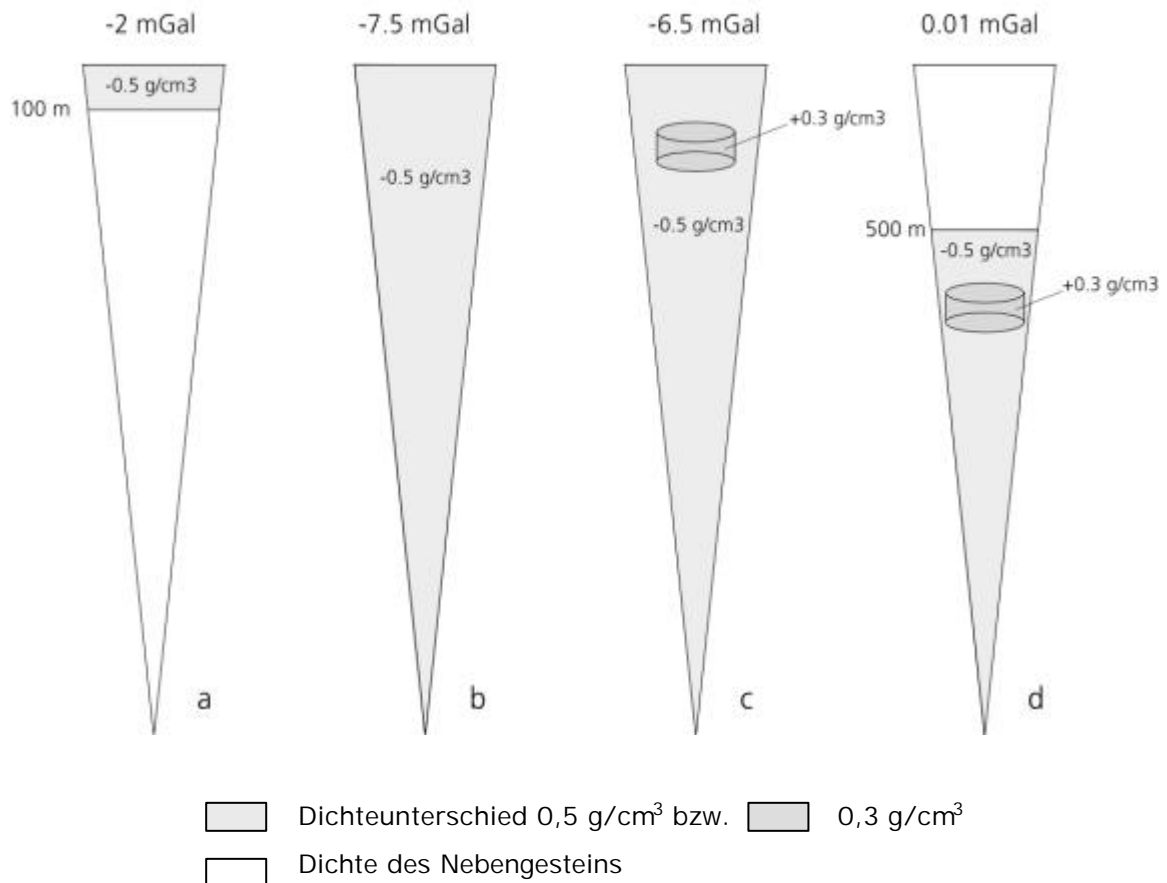


Abb. 45: Schematische Skizze des Pulvermaar-Vulkans unter Berücksichtigung unterschiedlicher Informationen; Vergleich der unterschiedlichen Basisinformationen: Anomalie und Modell (gerader Kreiskegel) a) auf Basis der Meßdaten und b) der Volumen-kalkulation; c) mit Lavakörper

in einer Tiefe von rund 120 m und d) in größerer Tiefe inclusive Lavakörper

Eine unterirdische Struktur mit einem Tiefgang von 400 m bei einem Dichteunterschied von $0,5 \text{ g/cm}^3$ würde entsprechend der Formel für Zylinderscheiben (nach JUNG, 1961) eine negative Anomalie von mehr als -4 mGal erzeugen. Der Pulvermaar-Vulkan verursacht je-doch eine maximale negative Anomalie von nur -1 bis -2 mGal.

Eine mögliche Erklärung für die auffällig geringe negative Anomalie des Pulvermaar-Vulkans liegt in der Existenz eines Körpers, dessen Dichte höher ist als die des umgebenden Gesteins. Dieser bewirkt eine positive Anomalie. Die vom Diatrem erzeugte negative Anomalie wird dadurch gemindert, und in der Summierung dieser Anomalien mit entgegengesetzten Vorzeichen verbleibt eine geringe Anomalie von ca. -1 bis -2 mGal, wie sie gemessen wurde. Ein Störkörper, der eine Anomalie des erforderlichen Betrages verursacht, ist z.B. ein Lavakörper (Intrusion oder Lavasee) mit der Materialdichte von ca. $3,0 \text{ g/cm}^3$ in einer Tiefenlage von ca. 100 bis 120 m (Oberkante) unter der Wasseroberfläche (310 bis 290 m ü.NN) bei einer Mächtigkeit von ungefähr 40 m (Abb. 45, c).

Läge ein solcher Körper in größerer Tiefe, so würde die bewirkte Anomalie zu gering sein. Abb. 45, d zeigt zum Vergleich einen diatremartigen Körper in einer Tiefe von mehr als 500 m (Oberkante) unter der Erdoberfläche, der einen vergleichbaren Intrusivkörper besitzt, wie er am Pulvermaar vermutet wird. Dieser Störkörper würde eine Gesamtanomalie von weniger als einem Zehntel mGal erzeugen.

Die gravimetrische Modellierung eines solchen Intrusionskörpers gibt nur ungenügend Aufschluß über seinen Durchmesser. Nach der Formel für die Schwerewirkung eines Zylinders nach Jung (1961) verursachen Körper in dieser vermuteten Tiefenlage bei den gegebenen Dichten bei Radien zwischen 100 und 300 m um lediglich $0,4 \text{ mGal}$ unterschiedliche gravitative Anomalien zwischen 1 und $1,4 \text{ mGal}$.

Erst die magnetischen Messungen über dem See geben Aufschluß über diesen Bereich, denn auf dem Gebiet des Sees existieren gravimetrische Messungen von 1985, deren Einbindung in die neueren Untersuchungen technisch bedingt nur ungenau erfolgen konnte und deshalb mit besonderer Vorsicht zu behandeln sind (DIELE, 1993). Die Rekonstruktion der Lage der Meßprofile war durch die Veränderung der Gegebenheiten vor Ort problematisch und konnte nicht eindeutig geklärt werden. Auch unter Einbeziehung dieser älteren Messungen bleibt der Bereich des Sees nur ungenügend vermessen.

Die magnetischen Untersuchungen auf dem See ergeben magnetische Anomalien von 100 bis 130 nT. Der Intrusivkörper befindet sich rein rechnerisch in einer Tiefenlage von 100 bis 120 m (Oberkante) und besitzt eine Mächtigkeit von ungefähr 40 m (Abb. 46).

Schematisch ist in dieser Abbildung ebenfalls der Förderdyke dargestellt. Über seine Lage und Größe liegen keine Informationen vor. Nicht dargestellt sind lokale gangartige Lava-vorkommen (Abb. 44), wie sie vermutlich z.B. in einem Profil südwestlich des Pulvermaares (nordöstlich des Grubenberges) erfaßt wurden (Abb. 23).

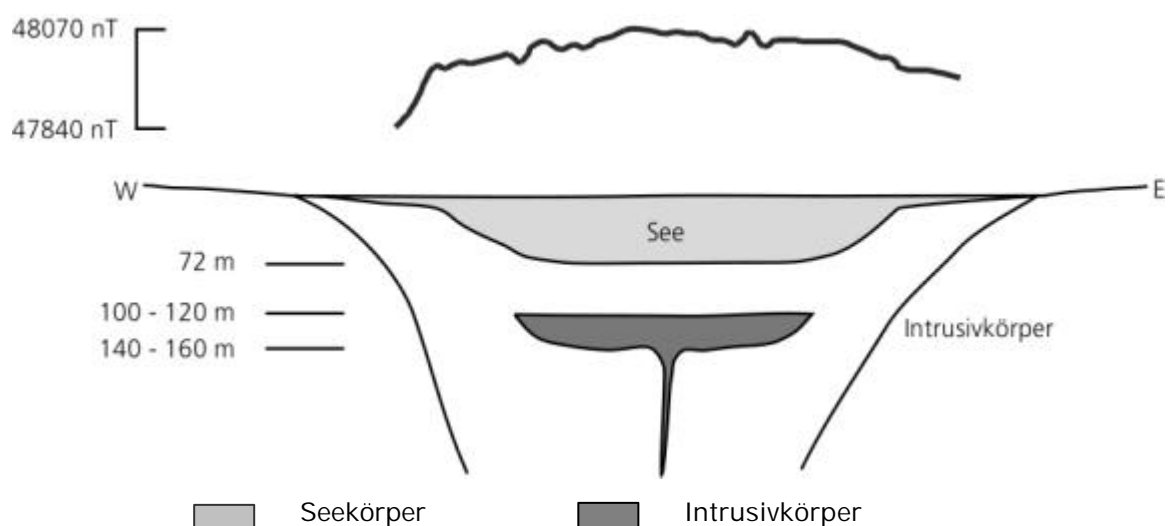


Abb. 46: Schematische Darstellung des Intrusivkörpers auf Basis der magnetischen Messungen; in diesem Schnitt auf Höhe des Profils P2 (HW 5555410)

8.3 Begleitende Strukturen

8.3.1 Der "Hof" erniedrigter Dichte

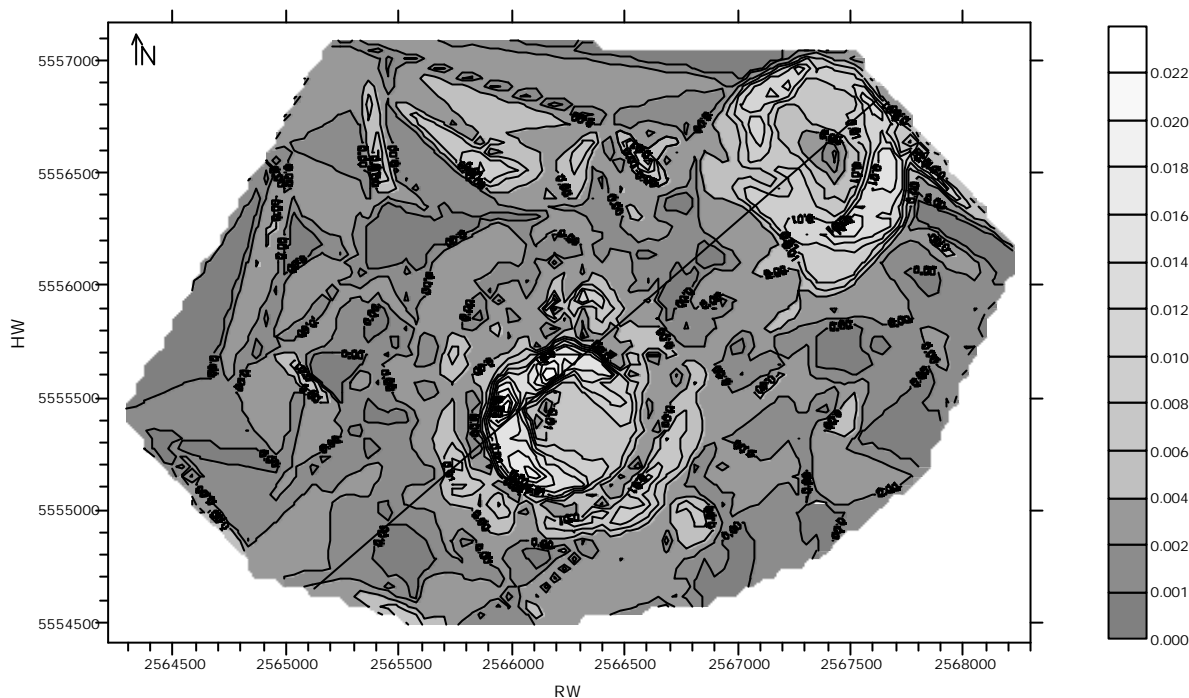


Abb. 47: Horizontale Ableitung der Schwere am Pulvermaar. Profillinie für die Abb. 48

Anders als bei ähnlichen gravimetrischen Untersuchungen an anderen Maarvulkanen (z.B. PIRRUNG, 1991; HENK, 1984; STACHEL, 1987) können auf der großen Datenbasis am Pulvermaar verlässliche Gradientenfelder berechnet werden. Es zeigt sich ein breiter Gürtel verminderter Dichte, der den Maarvulkan umgibt (Abb. 47).

Besonders auffällig am Pulvermaar ist der Verlauf der Isogammen am Südwestrand des Oberwinkler Maares (Abb. 47). Hier ist die Reichweite des Einflusses des Pulvermaares mit knapp 1300 m (vom Zentrum des Pulvermaares aus gemessen) am auffälligen Versteilen der Gradientenkurve in Abbildung 48 zu fassen (Pfeil). Diese strukturell beanspruchte Zone besitzt eine Reichweite von maximal 600 m (in östlicher Richtung) und minimal 420 m

(

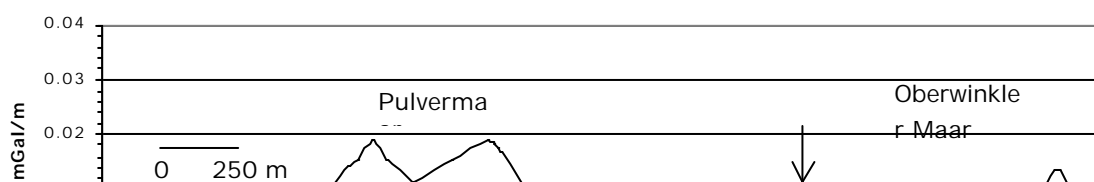


Abb. 48: Profil des horizontalen Schweregradienten in der Umgebung des Pulvermaares

Erst ab einer bestimmten Entfernung vom Pulvermaar-Zentrum existieren nur noch vereinzelt lokale Maxima bzw. Minima, und der Kurvenverlauf beruhigt sich (Abb. 47 und 48). Dieser Übergang definiert das Ende der strukturellen Schwächezone.

Seine Entstehung ist vermutlich auf die Wirkung der Druckwellen der Eruptionen zurück-zuführen. Es wird angenommen, daß die Druckwellen das Gestein in diesen Bereichen durch die Bildung von Rissen und / oder Mikrorissen fragmentierten, aber nicht ejektierten. Außerdem ist anzunehmen, daß durch den unmittelbar nach den einzelnen Eruptionen kurzfristig zumindest teilweise unverfüllen Krater als Hohlraum ein Stabilitätsdefizit bestand, welches eine Auflockerung des Nebengesteins ermöglichte. Dies führte ebenfalls zu einer Dichteerniedrigung. Dieser Effekt ist eruptionszentrumsnah sicherlich am größten und nimmt vermutlich nach außen hin rasch ab.

Diese Beobachtung gibt Anlaß, die Schwereanomalie des Pulvermaares mit Schwereanomalien zu vergleichen, die bei Impakt-Strukturen („Meteoriten-Krater“) auftreten, und vielfach vermessen wurden. In der Regel ist ebenfalls eine negative Anomalie vorhanden, die durch Ejektion, Brecciiierung und Mikrorißbildung hervorgerufen wird. Bei einem Meteoriteneinschlag wie z.B. im Ries (POHL et al., 1977) erfolgt eine breccierende Wirkung der Streißwellen bis in mehrere Kilometer Tiefe. Eine Auflockerung des Gesteins um $0,01 \text{ g/cm}^3$ bis

zu einer radialen Entfernung von 8 bis 9 km wird in erster Näherung diskutiert (ERNSTSON & POHL, 1977).

Die Energie der die Eruptionen begleitenden Stoß- bzw. Streßwellen nimmt mit der Tiefe und zunehmender Entfernung vom Eruptionsort ab. Über genaue Dimensionen und Form der strukturellen Schwächezone können nur Vermutungen angestellt werden, weswegen sie in Abbildung 44 nicht weiter geometrisch beendet wurde. Da die Eruptionen und damit der Ausgangsort der Streßwellen im Laufe der Entstehung eines Maarvulkans sich zunehmend in die Tiefe verlagern, muß jedoch ein gewisser Tiefgang erreicht werden. In den tieferen Regionen, in denen der Durchmesser dieser Zone bereits wesentlich geringer sein sollte, leistet vermutlich die Auflast schließlich zu viel Widerstand und behindert bzw. verhindert wahrscheinlich letztlich die Rißbildung. Sie könnte aber lokal sogar durch den ausgeübten Druck die Rißbildung fördern.

Die Isogammen des Schweregradienten am Pulvermaar verlaufen nicht streng rotations-symmetrisch. Möglicherweise spiegelt sich darin eine Anisotropie des Gesteins wieder. Denkbar wäre eine richtungsbetonte Ausbreitung der Druckwellen im Gestein, z.B. entlang tektonisch vorgezeichneter Richtungen, der Faltung bzw. der Schieferung. Entsprechend variiert dann vielleicht auch der Grad der Fragmentation des Gesteins in Abhängigkeit von der Richtung.

Die Methodik zeigt, daß solche kreisförmigen Strukturen, wie der Halo um das Pulvermaar, erst durch Gradientenbildung in Erscheinung treten. Zum Vergleich sei der Horizontalgradient der Schwere des Impact-Krater Chicxulub Kraters in Yucatán (Abb. 49) hier abgebildet. Diese Mehrfachringe werden erst in den Abbildungen des Horizontalgradienten sichtbar. Bezüglich der originalen Schwereanomalie, in der diese Ringe nicht zu erkennen sind, sei auf die Arbeit von HILDEBRAND, A.R. et al., 1995 verwiesen.

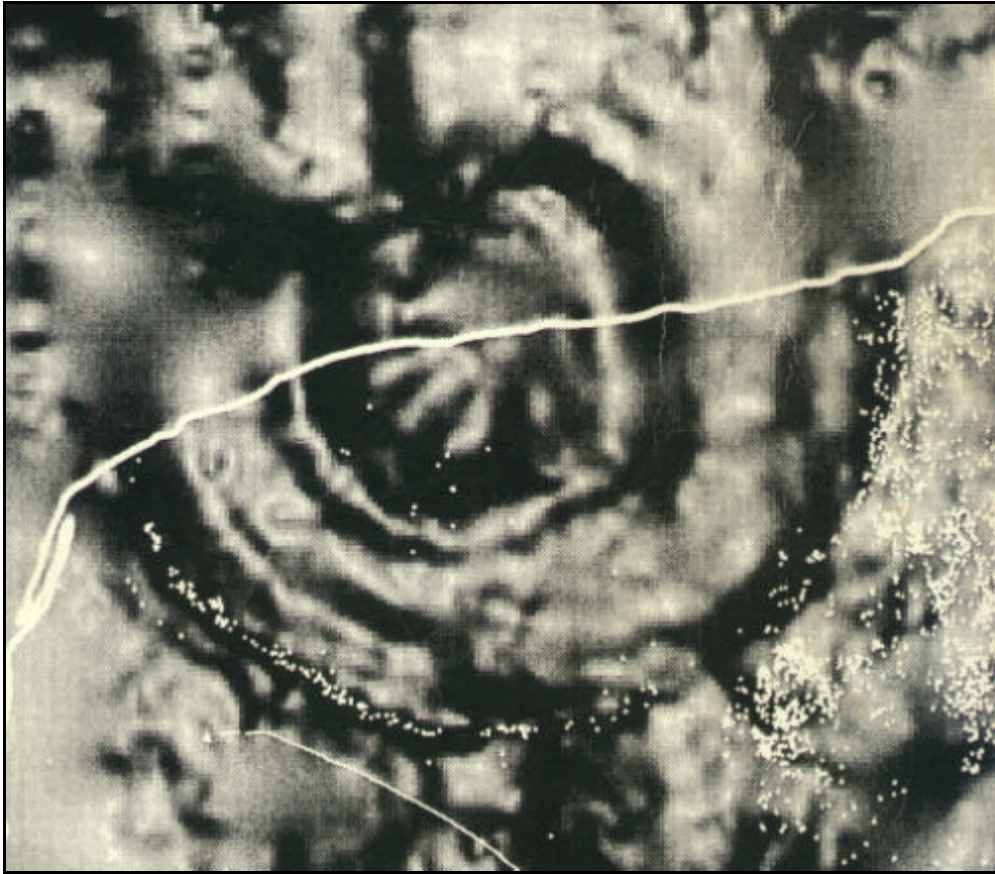


Abb. 49: Schwereanomalie des Chicxulub Kraters in Yucatán (HILDEBRAND, A.R. et al., 1995)

8.3.2 Tektonische Strukturen

Nach HEMFLER (1989) dominieren im Arbeitsgebiet drei tektonische Richtungen: 20-30° (rheinische Streichrichtung; senkrecht zum Streichen des Vulkanfeldes), 110-120° (Richtung zahlreicher Talsegmente in der Westeifel und Ausrichtung der gesamten Vulkanzone) und 150-160° (paläozoisch angelegte, NW-streichende Querstörungen).

Geophysikalisch bestehen entsprechend der 1. und 2. Ableitung der Schwere zwei Maxima bei 45° und ca. 135°, die tektonisch gedeutet werden können (Kap. 7.1.4). Es ist bemerkenswert, daß mit der Gravimetrie offenbar alte variskische Strukturen viel stärker dokumentiert werden als junge morphologische Richtungen.

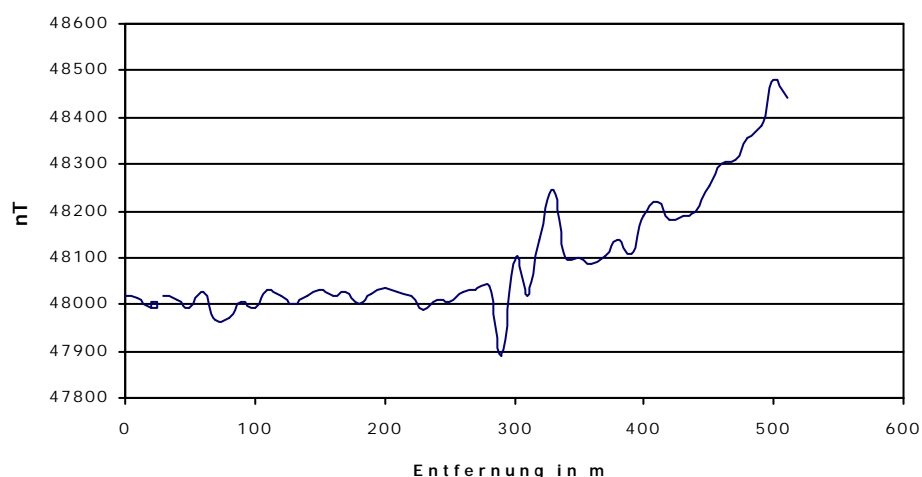
Möglicherweise orientierte sich die bereits weiter oben erwähnte Riß- bzw. Microrißbildung

an tektonisch vorgezeichneten Richtungen. Dann spiegeln die teilweise nicht gleichmäßig kreisförmig verlaufenden Isogammen u.a. eine tektonische Beanspruchung der Gesteine, die bereits präeruptive angelegt und während der Ausbrüche verstärkt wurde.

8.3.3 Andere Strukturen

Außer den großen Strukturen Pulver-, Oberwinkler und Ellscheider Maar sind noch weitere kleine lokale Anomalien zu sehen (Abb. 16-1). So befindet sich z.B. im SE (ca. RW 2566800 / HW 5554950) des Pulvermaares (E des Johanneshofes) eine lokale Anomalie der Bouguerschwere (Abb. 16-1). Sie beträgt -0,4 bis -0,6 mGal. Ihre Halbwertsbreite beträgt in N-S-Richtung ca. 110 m und in E-W-Richtung etwa 140 m. Es kann sich hierbei um einen kleinen Schlot handeln. Aufgrund der geringeren Meßpunktdichte in diesem Bereich macht es jedoch keinen Sinn, diese lokale Schwereanomalie genauer zu modellieren.

Im Rahmen der magnetischen Untersuchungen wurden lokale Anomalien gemessen, die gangartigen Lavavorkommen zugeordnet werden können. In Abbildung 48 ist ein magnetisches SW-NE-Profil im Südwesten des Pulvermaares dargestellt. Mit einer Amplitude von ca. 350 nT wird diese lokale Anomalie bei 280 bis 340 m durch einen Lavagang erklärt. Durch die Beanspruchung des Gesteins während der Eruptionen ist die Möglichkeit für die Lava geschaffen worden, in das Gestein einzudringen und in Form von



Gängen zu erstarren. Gravimetrisch sind diese schmalen Gänge nicht erfaßt worden.

Abb. 50: Magnetik-Profil Grubenberg bis Steinbruch; SW des Pulvermaares