

## 5 Geodätische Vermessung

### 5.1 Vorbemerkungen

Für die Auswertung gravimetrischer Messungen muß jeder Meßpunkt in seinen Koordinaten Rechtswert, Hochwert und Höhe geodätisch erfaßt werden.

Die Reduktionen der gemessenen Schwerewerte erfordert ein dreidimensionales Gelände-modell, welches auf der Basis der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen in Kombination mit einer neuen Vermessung durch das Landesvermessungsamt Koblenz (20 – bzw. 40 m-Meßpunktraster) entstand. Dieses Geländemodell geht ebenfalls in die dreidimensionale Modellierung ein.

Im Bereich des Sees wurden Echolotmessungen zur Erfassung der Seemorphologie durch-geführt. Der See erlangt durch seine zentrale Lage innerhalb des Störkörpers für die Modellierung eine besondere Bedeutung.

Der pyroklastische Wall verursacht durch seine Mächtigkeit und seine Nähe am unterirdi-schen Störkörper eine starke Wirkung bezüglich der Schwere und muß daher erfaßt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit kamen erstmals die seit 1995 erhältlichen 12-Kanal Differential GPS Instrumente RS12 der Firma Zeiss in grö ßerem Ma ße zum Einsatz.

In Kombination mit den schnell durchführbaren gravimetrischen Messungen sollte ihr Einsatz bezüglich des Zeitaufwandes, der erreichbaren Präzision und der Handhabung innerhalb eines größeren Projektes erprobt werden.

Ein weiterer beachtenswerter Aspekt im Gebrauch dieser Instrumente ist die optimale Aufstellung des Basispunkes und des mobilen Empfängers. Stehen diese nicht völlig frei, so nimmt die rechnergestützte Lösbarkeit rasch ab. Obwohl die Messungen am Pulvermaar fast ausschließlich im Winter

stattfanden, waren die Messungen im Bereich des bewaldeten Walls zu einem hohen Prozentsatz nicht brauchbar. In diesem Bereich wurde mit optischen Instrumenten vermessen.

## **5.2 GPS-Messungen für die Gravimetrie**

Die Gravimetrie zählt zu den von den Koordinaten der Meßstation stark abhängigen Meßmethoden. Bei einer Ablesegenauigkeit von 0,01 mGal und einer Abnahme der Schwerebeschleunigung von 0,3086 mGal/m (Freiluftgradient) mit zunehmender Entfernung vom Erdmittelpunkt wird die Erforderlichkeit einer genauen Vermessung deutlich. Die Bestimmung der Rechts- und Hochwerte (X- und Y-Koordinaten) ist für die Breitenreduktion notwendig. Ihre Änderung beträgt ca. 0,8 mGal / 1000m Änderung in der geographischen Breite.

In der Vergangenheit sind die entsprechenden Vermessungen meist mit optischen Instrumenten (Nivellier, Tachymeter) durchgeführt worden. Mit der Satellitenvermessung entstand die Möglichkeit, zeitsparend synchron mit der Gravimetrie zu vermessen. Davon wurde in dieser Arbeit Gebrauch gemacht, zumal die entsprechenden Messungen von nur einer Person durchgeführt werden können.

### **5.2.1 GPS (Global Positioning System)**

Bei dem GPS-System handelt es sich um ein Satellitenpositionierungsverfahren. Die Vermessung mittels GPS-System beruht auf der Berechnung der Koordinaten eines Meßpunktes durch das Anmessen von Satelliten. Diese liefern 3D-Koordinaten in einem geozentrischen rechtwinkligen Koordinatensystem, die sich in ellipsoidische Längen, Breiten und Höhen jedes beliebigen Landeskoordinatensystem transformieren lassen.

Das GPS-Verfahren beruht auf Streckenmessungen. Da es sich um Mikrowellen-EDM handelt, sind an beiden Endpunkten der Raumstrecke aktive

Instrumente nötig (Satellit und Empfangsstation). Es sind sowohl Impulslaufzeit- als auch Phasenmessungen möglich. In beiden Fällen werden die auszuwertenden Signale des Satelliten mit entsprechenden Signalen des Empfängers verglichen, so daß die Zeit eine entscheidende Rolle spielt. Die GPS-Systemzeit ist eine gleichförmige Zeitskala, die von der Weltzeit (UTC) um die Schaltsekunden (z.Z. GPS - UTC = 10s) abweicht, die gelegentlich zur besseren Anpassung an die tatsächliche Erdrotation angebracht werden.

Bei den geodätischen Anwendungen von GPS sind zwei oder mehr Empfänger simultan im Einsatz. Die Signale von mindestens vier Satelliten müssen empfangen und in Aufzeichnungsintervallen registriert werden. Satelliten, die nicht über dem Horizont stehen, können wegen nicht modellierbarer Atmosphäreneffekte nicht verarbeitet werden. Daher werden grundsätzlich nur Satelliten ab einem gewissen Höhenwinkel über dem Horizont (Elevation 15°) beachtet bzw. deren Informationen gespeichert. Sichthindernisse zwischen Antenne und Satellit führen zur Abschattung des Satellitensignals.

Die Auswertung der Messung erfolgt in einem Rechenprozeß, dem sogenannten Post Processing. Die Genauigkeit der relativen Positionsbestimmung ist wesentlich höher als die der absoluten Positionsbestimmung, da hier die Distanz zum Satelliten nicht aus der Laufzeit der Codesignale bestimmt wird, sondern mittels einer Phasenmessung der Trägerwelle erfolgt. Zur Messung der Trägerphase wird im Empfänger ein Referenzsignal erzeugt und das ankommende Signal damit verglichen. Eine weitere Genauigkeitssteigerung ergibt sich daraus, daß bei der Differenzbildung die Uhrfehler eliminiert werden und die systematischen Einflüsse der Positionsbestimmung herausfallen.

Den Trägerfrequenzen ist weiterhin die Satelliten-Nachricht (satellite message) aufmoduliert. Sie enthält Angaben für die Positionsbestimmung der Satelliten: die Ephemeriden (Bahndaten) und den Almanach („Fahrplan“), die GPS-Systemzeit und Korrekturparameter für die Satellitenuhr, Korrekturwerte für den Ionosphärenzustand und die allgemeinen Systemmeldungen (z.B. Funktionsfähigkeit eines Satelliten).

Systematische Verfälschungen ergeben sich im wesentlichen aus den Störungen der Wellenausbreitung in der Ionosphäre und den Ungenauigkeiten der Satellitenbahnen. Aus diesen Gründen ist es im allgemeinen vorteilhafter, einen Satelliten über einen größeren Bogen zu beobachten, als viele Satelliten wechselnd nur kurzzeitig zu verfolgen.

Der Einsatz dieser differentiellen GPS-Instrumente ist in Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Arbeitsgebietes (z.B. Bewuchs oder Bebauung) mitunter sehr zeitaufwendig und nicht unproblematisch. Ein Vorteil dieser Vermessungstechnik besteht insbesondere darin, daß zwischen den beiden Empfängern, dem mobilen Empfänger und der feststehenden Basisstation, keine Sichtverbindung bestehen muß. Innerhalb eines Umkreises von 5 km kann der mobile Empfänger beliebig bewegt werden. Für das Gebiet um das Pulvermaar herum erwies sich dies wegen der deutlichen Morphologie und der Bewaldung des Walls, des Römerberges und kleinerer Gebiete im NNW des Pulvermaares von Vorteil.

Stehen die Instrumente mobiler Empfänger und Basisstation weiter als fünf Kilometer voneinander entfernt, dann ist die Verfälschung bzw. künstliche Verschlechterung (durch Selective Availability SA, der Verfälschung der gesendeten Bahn- und Uhrkorrekturdaten, oder Anti-Spoofing, der Umwandlung des Codes in einen nur von autorisierten Benutzern lesbaren Code) der Messungen für beide Empfänger nicht mehr - mit einem vernachlässigbar kleinen Fehler - annähernd identisch und folglich die Genauigkeit nicht mehr ausreichend.

### **5.2.2 Das RS12-System**

Bei den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten GPS-Instrumenten handelt es sich um die RS12 der Firma Zeiss. Der Empfang erfolgt über 12 kontinuierlich messende, unabhängige Kanäle auf der L1-Frequenz (Auswertesignal). Das Speichermedium ist eine PCMCIA-Speicherkarte mit 2.0 MB Speicherkapazität.

Das Aufzeichnungsintervall ist zwischen 1 und 60 Sekunden frei wählbar. Das RS12 hat folgende verschiedene Meßverfahren zur Auswahl: statisches Meßverfahren (längeres Beobachtungsintervall je Meßpunkt), schnelles statisches Verfahren (kürzere Meßzeit je Meßpunkt), Wiederbesetzung (kurzzeitige Besetzung von Meßpunkten in Form einer Schleife, die einmal wiederholt wird), Stop-and-Go Kinematisches Verfahren (zusammenhängende Messung mehrerer Meßpunkte), Kinematik (Bestimmung einer kontinuierlichen Antennenspür anstelle diskreter Punkte).

Laut Herstellerangaben besitzt dieses System eine Genauigkeit von 15 m für die Echtzeitposition, 5 mm + 2 ppm für den Raumvektor und 10 – 20 mm für Real Time. Für die praktischen Messungen der Gravimetrie bedeutet dies eine Genauigkeit von 0,01 mGal in der geographischen Breite und 0,001 mGal in der Höhe. Damit sind die Anforderungen für die Gravimetrie erfüllt.

### **5.2.3 Messungen im Gelände**

Die GPS-Messungen der verschiedenen Meßkampagnen wurden alle auf denselben Basispunkt bezogen. Dieser wiederum wurde durch das Vermessen von vier Trigonomischen Punkten in das Gauß-Krüger-Netz eingehängt.

Es stellte sich in der Praxis heraus, daß das Meßverfahren Stop-and-Go nicht funktionierte. Dieses Verfahren erlaubt einen großen Meßfortschritt, indem die einzelnen Meßpunkte nur kurz angegangen werden (< fünf Minuten). Während der einzelnen Meßschleifen bleibt auch der mobile Empfänger auf Empfang geschaltet, wodurch die einzelnen Messungen untereinander in Verbindung stehen. Im Gegensatz dazu stehen bei dem kurzstatischen Meßmodus die einzelnen Messungen nur sekundär über die Basisstation miteinander in Verbindung. Die RS12 Instrumente waren aber Ende 1995 und auch später noch nicht fehlerfrei einsetzbar. Die Funktionsstörung bezüglich des Stop-and-Go Verfahrens wurde bis zur Beendigung der Geländearbeiten im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht behoben. Deshalb mußte mit dem sogenannten kurzstatischen Meßverfahren gearbeitet werden. Hierbei bleibt das mobile Gerät je nach der Anzahl der zu empfangenden Satelliten, der Abschirmung oder Uhrzeit

(Satellitenmangel zwischen 14 und 16 Uhr) zwischen 10 Minuten (bei optimalen Verhältnissen) und bis zu einer Stunde am Meßpunkt stehen. Im Vergleich mit dem geringen Zeitaufwand für die gravimetrischen Messungen rechnet sich ein derartiger Einsatz der Instrumente unter diesen Umständen nicht.

#### **5.2.4 Auswertung der GPS-Messungen**

Die GPS-Messungen wurden mit dem von Carl Zeiss entwickelten Programmsystem GePoS CEO ausgewertet. Vor der eigentlichen Auswertung werden die von den Empfängern auf-gezeichneten Messungsrohdaten mittels der zugehörigen Übertragungssoftware auf den Rechner übertragen.

Zu Beginn einer GPS-Auswertung wird mit Hilfe des Projektmanagement-Moduls eine Projekteröffnung bzw. -festlegung vorgenommen. Dabei wird gleichzeitig der Transformationsweg bis zu den gewünschten Gebrauchskoordinaten festgelegt.

Mit der passenden Lade- bzw. Importroutine werden die Meßdaten der Empfänger nun zu den externen Daten gelesen und die Datensätze in einem Auswahlmenu präsentiert. Die Datenvorbereitung ist abgeschlossen, wenn sämtliche erforderlichen Informationen vorhanden und bestätigt sind. Dann startet GePoS die entsprechenden Konvertierungsprogramme, mit denen die Meß- und die Bahndaten aus der empfängerspezifischen Form in die GePoS-spezifische Form umgerechnet werden.

In der neuen Version von GePoS CEO ist ein automatisches Prozessieren integriert. Diese Automatik nimmt dem Anwender alle weiteren Schritte ab und errechnet selbständig die Lösung der Meßaufgabe. Es hat sich jedoch herausgestellt, daß unter den teilweise schwierigen Meßbedingungen, unter welchen die hier zu verarbeiteten Messungen durchgeführt wurden, der manuelle Programmlauf in der Regel zu einem besseren Ergebnis führte.

Nachdem alle Daten über die Vorbearbeitung geladen werden, müssen für alle Beobachtungen zunächst Einzelstationslösungen berechnet werden. In diesem Prozeß können verbesserte Näherungskordinaten unter Berücksichtigung aller aufgezeichneten Beobachtungstypen, Pseudoentfernungen und Trägerphasenmessungen berechnet werden. Gute Näherungskordinaten können über eine Option festgehalten werden.

Die Verarbeitung der Meßdaten ist nach Sessionen organisiert. Die Dauer einer Session wird durch den Zeitraum von sich zeitlich überschneidenden Messungen festgelegt, unabhängig von der Anzahl der gleichzeitig operierenden Empfänger. Die strenge Multistationsauswertung (Sessionslösung) in GePoS erfolgt mit undifferenzierten Beobachtungen; daher müssen weder Basislinien ausgewählt noch Referenzstationen festgelegt werden. Die zeitgleichen Messungen vernetzen automatisch die besetzten Stationen untereinander und stützen gegenseitig die Mehrdeutigkeitsfestsetzung. Die Zusammenführung und Vernetzung der Messungen erfolgt durch den Vorbereitungslauf. Die Multistationslösung kann ohne absolute Zwänge, also Bezugskordinaten, als freies Netz berechnet werden. Besser ist jedoch, wenn möglichst gute WGS-84-Kordinaten mit ihrem mittleren Lagefehler als Vorinformation eingeführt werden können, eventuell sogar die Kordinaten aus der Einzelstationslösung. Vor allem bei kleinräumigen Netzen, wie es hier vorliegt, ist es empfehlenswert, in jeder Session die Kordinaten eines Punktes in der Größenordnung von ca. 0,10 m festzuhalten. Dazu ist am besten der Punkt mit den meisten Meßdaten, also i.d.R. eine Dauerstation, geeignet. Als Ergebnis der Multistationsauswertung erhält man drei-dimensionale kartesische Kordinaten X,Y und Z im GPS-Bezugssystem (derzeit WGS-84) aller in der Session besetzten Stationen, mit ihrer vollständigen Kovarianzmatrix für die nachfolgende strenge Netzausgleichung.

Die in der Multistationsauswertung erzeugten Kordinaten und stochastischen Informationen mehrerer Sessionen werden in dem Programm-Modul Multisessionslösung oder freie Netzausgleichung zu einer strengen Multisessionsauswertung zusammengeführt. Unter Einbeziehung der vollständigen Kovarianzmatrizen bei gleichzeitiger zwangsfreier Lagerung des

gesamten GPS-Netzes wird eine mathematisch strenge Ausgleichung aller Sessionen durchgeführt. Wenn die Sessionen untereinander mehr als einen Verknüpfungspunkt oder mehr als einen Bezugspunkt haben, also in der Gesamtheit der bestimmten Punkte eine Redundanz enthalten ist, dann wird aus der Multisessionslösung eine freie Netzausgleichung. An den Verknüpfungs- und Bezugspunkten treten in diesem Fall Restklaffen (Residuen) auf, die nach der Methode der kleinsten Quadrate bestmöglich verteilt werden. Das Endergebnis der Multisessionsauswertung ist ein zusammenhängender Satz von dreidimensionalen Koordinaten im GPS-Bezugssystem einschließlich aller stochastischen Informationen für das gesamte Projekt.

Die Ausgangs- oder Näherungskordinaten werden an sehr vielen Stellen in der GPS-Auswertung verwendet, und der Fehlereinfluss ist schwer zu überblicken, v.a. seit die künstliche Verschlechterung des GPS durch SA aktiviert ist. Es beginnt mit einer falschen troposphärischen Korrektur der Meßdaten und endet in einer schlechten Linearisierung des Ausgleichungsmodells mit numerischen Ungenauigkeiten. Zur Umgehung dieses Problems kann in GePoS der Bogen von den Näherungskordinaten zu den ausgeglichenen Projektergebnissen zu einem Kreis geschlossen werden, indem das Ergebnis als verbesserter Ausgangspunkt einer wiederholten Berechnung dient.

Mit Hilfe der in GePoS eingebundenen Transformation können die berechneten Koordinaten (im GPS-Bezugssystem) nun in Gebrauchskordinaten überführt werden. Diese Bearbeitung erfolgt in der Regel durch die Datums- und Koordinatentransformation. Durch die Datumstransformation (Bezugssystemwechsel) werden die Parameter für den Übergang vom GPS-System in das gewünschte Gebrauchssystem mittels Ausgleichung über identische Anschlußpunkte bestimmt, wobei die Koordinaten in beiden Systemen gegeben sind. Das Ergebnis sind sieben Parameter: drei Verschiebungen in X, Y und Z, drei Drehungen um X, Y und Z und ein Maßstabsfaktor. Diese Transformation erfolgt auf der Basis dreidimensionaler kartesischer Koordinaten.

Die Koordinatentransformation (Abbildungswechsel) ist im Gegensatz zur Datumstransformation eine rein mathematische Umrechnung der Koordinaten



anhand bekannter Umrechnungsfaktoren in eine andere Darstellungsform. Im Normalfall ist dieser Rechengang jedoch nicht erforderlich, da die notwendigen Transformationen im Exportmodul automatisch gelöst werden.

Nach Abschluß der Auswertungen können die Ergebnisse mit dem Exportmodul in Form übersichtlicher Ergebnisprotokolle zusammengestellt und ausgegeben werden.

Für weiterführende Erklärungen wird auf das Handbuch zur Auswertesoftware GePos verwiesen.

### **5.3 Optische Vermessung**

Im Bereich des dicht bewaldeten Tuffwalls konnten keine GPS-Messungen durchgeführt werden. Die Unterbrechungen des Signalempfangs durch Äste verhinderte die Auswertung der Messungen. In diesem Bereich wurden die Messpunkte mit optischen Vermessungsinstrumenten durchgeführt.

Dafür wurden der Tachymetertheodolith SM41 der Firma Zeiss (FU Berlin) und das elektronische Tachymeter GTS-3 der Firma Topcon (Univ. Würzburg) verwendet. Hierbei wurden die Aufstellpunkte der Vermessungsinstrumente zunächst mit dem GPS vermessen, um die Fehlerfortpflanzung durch das Umstellen der Instrumente zu vermeiden. Außerdem wurden Kontrollmessungen zwischen den einzelnen Aufstellpunkten sowie Mehrfachmessungen durchgeführt.

Bei der Vermessung mit herkömmlichen optischen Instrumenten sind Kontrollmessungen zwischen den einzelnen Aufstellpunkten unerlässlich. Durch diese Kontrollen und die Tatsache, daß bei optischen Vermessungsgeräten die Instrumente Meßgerät und Spiegel in Sichtweite sein müssen, entsteht eine u.U. zeitraubende und fehlerträchtige Vermessung, insbesondere bei einem morphologisch ausgeprägten Gelände wie am Pulvermaar. Mit dem mobilen GPS-Empfänger kann man sich dagegen völlig frei bewegen.

## 5.4 Echolot

Zur Erfassung der Morphologie des Seebodens, seiner Tiefe und Geometrie, wurde ein Echolot verwendet. Durch seine zentrale Lage über dem unterirdischen Störkörper kommt diesem Körper eine besondere Bedeutung zu.

Die Messungen wurden mit einem Echolot der Firma Lowrance durchgeführt. Dabei wurden die gleichen Profile mit dem Boot gefahren wie bei den in Kapitel 7.2 beschriebenen magnetischen Messungen. Da die elektrischen Impulse des Sonars die magnetischen Messungen störten, mußten alle Profile zweimal befahren werden: auf der Hinfahrt (E-W) wurden die magnetischen Messungen durchgeführt, auf der Rückfahrt (W-E) die Tiefe bestimmt. Außerdem wurden noch weitere Echolotprofile quer über den See in NS, NW-SE und SW-NE Richtungen gemessen. Es konnten technisch bedingt nur die Anfangs- und Endpunkte der einzelnen Profile an Land eingemessen werden: weder GPS-Messungen (durch die Wasserbewegung sowie die Abschirmung durch den Tuffwall) noch optische Vermessung (durch die Wasserbewegung) der auf dem Wasser gelegenen Punkte waren möglich.

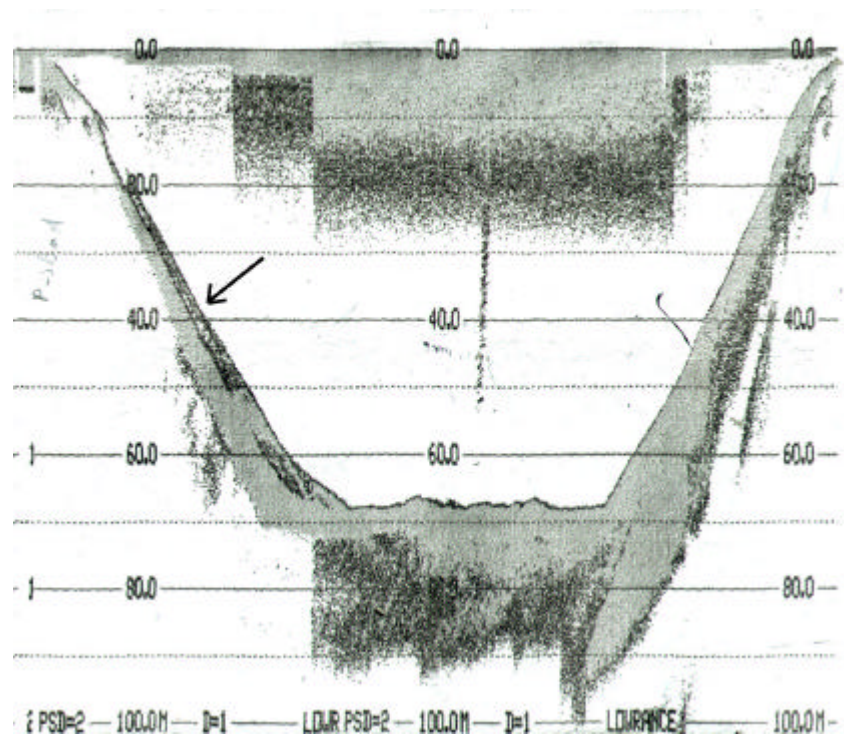


Abb. 10: Echolotprofil (P BP) über den See: Auf dem Steilhang links ist abgerutschtes Material zu erkennen (Pfeil)

Die Instrumente lagen in einem von einem Tretboot an einer ca. 5 m langen Leine gezogenen Schlauchboot. Durch die möglicherweise nicht konstante Fahrgeschwindigkeit sowie die nicht ganz gerade Linienführung der Profile können Fehler in der Erfassung des Seebodens entstanden sein. Diese führen jedoch zu einer tolerierbaren Verzerrung der Aufnahmen.

Die Seiten des 72 m tiefen Sees fallen steil zu dem flachen Boden ab. Anhand der Profile sind Rutschungskörper am Seeboden und an den Wänden zu erkennen (Abb. 10).

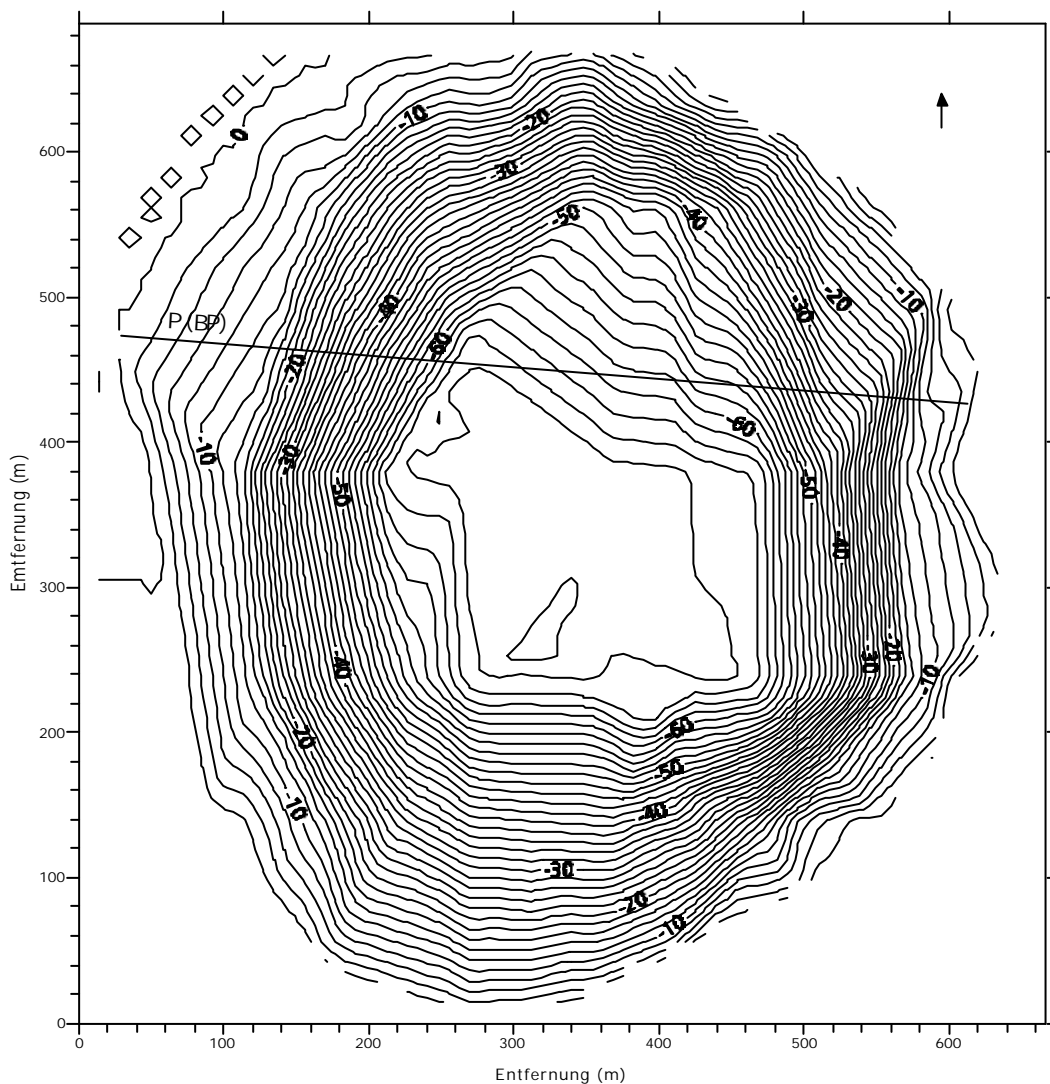


Abb. 11: Seemorphologie auf Basis der Echolotmessungen; Tiefenangaben in m bezogen auf die Seeoberfläche; P (BP) Profil aus Abbildung 10

In Abbildung 11 ist die Morphologie des Seebodens entsprechend der Echolotmessungen dargestellt. In Richtung NNE scheint ein altes Tal erkennbar zu sein. Mit gut 72 m ist die größte Seetiefe im Süden lokalisiert.