Institut für Theoretische Geodäsie der Universität Bonn

Zeitabhängige Gravitationseffekte am Beispiel des Pumpspeicherkraftwerkes Vianden

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Grades

Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

der

Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät

der

Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität

zu Bonn

vorgelegt am 22. April 1994

von

Dipl.-Ing. Dietmar Sperling

aus Olpe

Referent:	Prof. Dr.-Ing. Manfred Bonatz
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Siegfried Heitz
Tag der mündlichen Prüfung:	13.06.1994

INHALTSVERZEICHNIS

1. Einleitung 6

2. Zielsetzung 7

3. Das Pumpspeicherwerk (PSW) Vianden 7
3.1 Geographische Lage/Standort 7
3.2 Zweck des PSW Vianden 9
3.3 Die Oberbecken des PSW Vianden 10
3.4 Das Unterbecken des PSW Vianden 10
3.5 Die Kraftwerksanlagen des PSW Vianden 11

4. Vermessungstechnische Überwachungsarbeiten im Kraftwerksbereich 12
4.1 Diskrete Messungen in Vianden 13
4.2 Kontinuierliche Messungen in Vianden 16
4.2.1 Ein neu entwickelter Neigungsmesser 17
4.2.2 Messungen im Bereich des Oberbeckens 18
4.2.3 Messungen innerhalb der Staumauer 21

5. Die Geologie im Bereich des PSW Vianden 21
5.1 Geologische Untergrundverhältnisse im Bereich Oberbecken/Staumauer 22
5.2 Deformationen des Untergrundes durch Auflasteffekte 23

6. Zur Gravitation 26
6.1 Vorbemerkung 26
6.2 Die Gravitation als eine der vier Grundkräfte 26
6.3 Zum Wesen der Gravitation 27
6.4 Das Newtonsche Gravitationsgesetz 28
6.5 Die Berechnung der Gravitationswirkung ausgedehnter Körper (Kugel, Kreisscheibe, Quader) 29
6.6 Zur Genauigkeit der Berechnung von Gravitationseffekten 31
6.6.1 Der Einfluß der Entfernung prismatischer Körper 31
6.6.2 Die Approximation prismatischer Körper durch Punktmassen 31
6.7 Die Bestimmung der Gravitationskonstanten G 32
6.7.1 Labormessungen zur Bestimmung von G 33
6.7.2 Große Massen-Experimente zur Bestimmung von G 33

7. Gravitationseffekte im Bereich der Oberbecken 34
7.1 Vorbemerkungen 34
7.2 Das Berechnungskonzept 34
7.3 Die Berechnung von Lotrichtungsänderungen 35
7.4 Die Modellierung der Oberbeckengeometrie 35
7.4.1 Das Modellraster 35
7.4.2 Problemzonen der Beckenmodellierung 35
7.4.3 Der Einfluß der Modell-Rasterweite 37
7.4.4 Die Entfernungsabhängigkeit der Gravitationseffekte 39
7.4.5 Schlußfolgerungen 40
7.5 Ergebnisse für den Bereich der Oberbecken 40
7.6 Der Einfluß der Genauigkeit der Speicherbecken- und Stationskoordinaten 42
7.6.1 Gravitative Horizontalkomponenten 42
7.6.2 Gravitative Vertikalkomponente 44
7.6.3 Schlußfolgerungen 45

7.7 Zur Dichte des Wassers 45
7.7.1 Physikalische Eigenschaften des Wassers 46
7.7.1.1 Volumenänderung durch thermische Ausdehnung 46
7.7.1.2 Volumenänderung durch isotherme Kompressibilität 47
7.7.2 Inhaltsstoffe des Wassers 49
7.8 Die Genauigkeit der Wasserstandshöhe 49
7.9 Die gravitativen Wirkungen von Wasserstandsvariationen des Unterbeckens auf den Bereich des Oberbeckens 50

8. Gravitationseffekte im Bereich des Unterbeckens 52
8.1 Vorbemerkung 52
8.2 Die Rasterung 52
8.3 Ergebnisse für den Bereich des Unterbeckens 53
8.4 Der gravitative Einfluß von Wasserstandsvariationen im Bereich der Staumauer Lohmühle . . . 56
8.5 Der Gravitationseffekt entlang eines Vertikalprofils in der Staumauer Lohmühle 57
8.6 Die gravitativen Wirkungen von Wasserstandsvariationen des Oberbeckens auf den Bereich des Unterbeckens 58

9. Die wasserstandsabhängigen Variationen der Lotrichtung 58

10. Schwerevariationen im Kraftwerksbereich 60

11. Auswirkungen der Gravitationseffekte im Bereich der Kraftwerksbecken 60
11.1 Allgemeine Betrachtungen 60
11.2 Deformationen der Äquipotentialflächen 63
11.3 Ein Profil der Äquipotentialflächenverlagerung am Oberbecken II 65
11.3.1 Der Einfluß des Stützstellenabstandes 65
11.3.2 Der Einfluß der Äquipotentialflächenhöhe 66
11.3.3 Der Einfluß von Oberbecken I 67
11.4 Die flächenhafte Struktur der Äquipotentialflächenverlagerung 67
11.4.1 Oberbecken 67
11.4.2 Unterbecken 68
11.5 Änderungen dynamischer und nivellitischer Höhendifferenzen 68
11.6 Schlußfolgerungen 71
11.7 Der rechentechnische Aufwand zur Modellierung von Äquipotentialflächen-Verlagerungen . . . 72

12. Die Eichung von Registriergravimetern mit Hilfe gravitativer Effekte 73
12.1 Vorbemerkungen 73
12.2 Problemstellung 73
12.3 Methoden der Eichung von Gezeitengravimetern 74
12.3.1 Die nicht-stationäre Eichung 74
12.3.2 Die stationäre Eichung 74
12.4 Gravimetrische Messungen unter dem Oberbecken II des PSW Vianden 76
12.4.1 Lage und Ausstattung der Beobachtungsstation 76
12.4.2 Registrierblöcke 77
12.4.3 Die Digitalisierung der Analogdaten 77
12.4.4 Das Digitalisierungsintervall 77
12.4.5 Die gravimetrischen Eichdaten 78
12.4.6 Bemerkungen zur Einsatzmöglichkeit von Askania-Gravimetern mit kapazitivem Abgriff 78
12.5 Die Pegelbeobachtungen für die Oberbecken des PSW Vianden 79
12.6 Das Auswerteverfahren 80
12.6.1 Vorbemerkungen 80
12.6.2 Die iterative Bestimmung der Eichfaktoren 80
12.6.2.1 Die Maßstabsnormierung der Standardabweichungen 81

12.6.3 Das Analyseverfahren 81
12.6.4 Die Analyseintervalle 82
12.6.5 Die Partialtidenzerlegung 82
12.7 Der vertikale Auflasteffekt 83
12.8 Auflastinduzierte Neigungen 83
12.9 Ergebnisse 83
12.9.1 Entscheidungsparameter für den günstigsten Eichfaktor 83
12.9.2 Test der Wasserstandsdaten 84
12.9.3 Die erreichte Modellanpassung 85
12.9.4 Eichergebnisse 85
12.9.5 Analysenergebnisse 88
12.9.5.1 Zeitlicher Verlauf der Sechswochen-Analysen 88
12.9.5.2 Mittelwerte der Sechswochen-Analysen 92
12.9.5.3 Ergebnisse der Vierteljahres-Analysen 92
12.9.5.4 Ergebnisse der Halbjahres-Analysen 94
12.9.5.5 Ergebnisse der Jahres-Analysen 94
12.9.5.6 Zusammenstellung der Amplitudenfaktoren δ für die Haupttiden O_1 und M_2 96
12.10 Ergebnisbeurteilung und -interpretation 97
12.10.1 Vorbemerkungen 97
12.10.2 Das Auswerteverfahren 98
12.10.3 Temperatureinflüsse 98
12.10.4 Die Dichte des Wassers 98
12.10.5 Die Korrelation der Amplitudenfaktoren der Hauptpartialtiden mit dem Temperaturverlauf 99
12.10.6 Die Korrelation der Phasen der Hauptpartialtiden mit dem Temperaturverlauf 99
12.10.7 Instrumentelle Temperatureffekte 100
12.10.8 Luftdruckeinflüsse 101
12.10.9 Die Drift der gravimetrischen Signale 101
12.10.10 Schlußfolgerungen 101

13. Zusammenfassung und Ausblick 101

Abbildungsverzeichnis 103
Tabellenverzeichnis 105
Literaturverzeichnis 106

Anhang: Tabelle der wasserstandsabhängigen vertikalen Gravitationskomponenten für die Gravimeterstation unter dem Oberbecken II 109

Lebenslauf 111
Dank 112

1. Einleitung

Im Rahmen deformationstechnischer Überwachungsaufgaben werden vielfältige geodätische Beobachtungen höchstmöglicher Genauigkeit durchgeführt. Sofern diese Beobachtungen sich auf das Schwerefeld der Erde beziehen, wie dies bei Winkelmessungen und nivellitischen Höhenbestimmungen der Fall ist, werden die relevanten Parameter des Schwerefeldes im allgemeinen als zeitinvariabel angesehen. Diese Annahme ist im Hinblick auf die erreichbare geodätische Meßgenauigkeit aus praktischer Sicht durchaus gerechtfertigt, da die Gezeiten des Schwerefeldes der Erde als dem größten zeitabhängigen Einwirkungseffekt in mittleren Breiten ~ 0,05 Bogensekunden für die Richtung des Schwerevektors und ~ 0,3 mGal für den Betrag der Schwere erreichen. Alle anderen gravitationsrelevanten Vorgänge innerhalb eines Meßgebietes (oder im Bereich eines Bauwerkes) sind im allgemeinen um mehrere Zehnerpotenzen kleiner und somit von untergeordneter Bedeutung. Die Verhältnisse sind jedoch anders, wenn in einem gewissen Nahbereich eines geodätischen Meßgebietes große Massenverlagerungen stattfinden. Solche Gebiete findet man z.B. in Küstennähe - besonders in den Regionen, in denen große Amplituden der Meeresgezeiten auftreten, wie z.B. in der Normandie - oder im Bereich der Braunkohletagebaue, im Einflußbereich von Talsperren oder Pumpspeicherkraftwerken. Nun ist bekannt, und es läßt sich durch Abschätzungen leicht nachweisen, daß im Rahmen **ingenieurtechnischer** Vermessungsaufgaben auch in solchen Gebieten zeitabhängige Effekte des Schwerefeldes im allgemeinen durchaus vernachlässigt werden können, zumal Gravitationseffekte mit dem Quadrat der Entfernung von den wirksamen Massen abklingen.

Geodätische Strecken- und Richtungsbeobachtungen weisen im Hinblick auf die Aufgaben der Deformationsüberwachung im wesentlichen zwei Nachteile auf. Zum einen ist ihre Genauigkeit meist insofern begrenzt, als sie eine Früherkennung sicherheitsrelevanter Deformationsprozesse nur sehr spät (falls überhaupt) ermöglichen. Sie sind also als Mittel zur Erfassung von Vorläuferphänomenen nur bedingt geeignet. Zum anderen werden sie nur zu diskreten Zeitpunkten ausgeführt, wobei das Diskretisierungsintervall häufig willkürlich und nur ganz selten aufgrund physikalischer Entscheidungsparameter gewählt wird. Damit entfällt die Möglichkeit, aus der bei einer Wiederholungsmessung eventuell festgestellten unstetigen und signifikanten Signaländerung auf den Deformationstrend zu schließen, der zu der beobachteten Signaländerung geführt hat. Wird der Deformationstrend aber als eine wesentliche, deformationstechnische Information zur Ursachenanalyse anerkannt, so bietet sich vermessungstechnisch die Alternative an, eben diesen Deformationstrend durch die Beobachtung **deformationsinduzierter** Parameter zu erfassen - an dieser Stelle sei auf entsprechende Überlegungen und Messungen im Rahmen der Erdbebenvorhersageforschung verwiesen -. Voraussetzung für die Anwendung dieser Idee ist jedoch das Vorhandensein eines stationären, linearen Zusammenhanges zwischen Deformation und Deformationswirkung. Besonders sensible, deformationsinduzierte Informationen kann man z.B. durch hochauflösende Neigungsbeobachtungen gewinnen.

Die vorstehenden Überlegungen waren der Anlaß und Grund für die Entwicklung eines hochauflösenden, breitbandigen Neigungsmessers für bautechnische Überwachungsaufgaben im Rahmen einer Zusammenarbeit zwischen dem Institut für Theoretische Geodäsie der Universität Bonn und der RWE Energie AG/SEO*. Das Grundprinzip des Meßsystems wird u.a. in Kapitel 4.2 beschrieben. Wenn aber hochauflösende Neigungsmesser, als Ergänzung zu den geodätischen Stützstellenbeobachtungen, eingesetzt werden, so stellt sich zwangsläufig die Frage nach der zeitlichen Variation der Lotrichtung als Referenzrichtung, und zwar notwendigerweise in einem erhöhten Genauigkeitsrahmen.

* SEO = Société Electrique de l'Our S.A., Centrale de Vianden

2. Zielsetzung

Hochauflösende Neigungsbeobachtungen werden seit mehreren Jahren unmittelbar unter dem Oberbecken II des Pumpspeicherkraftwerkes Vianden ausgeführt. Diese Beobachtungen dienen der Erfassung und Untersuchung auflastinduzierter, bodenmechanischer Prozesse, wobei die Signalauflösung je nach aktueller Fragestellung zwischen 0,1 bis 0,01 Bogensekunden beträgt. Ebenfalls werden seit einigen Jahren Neigungsprozesse von Baukomponenten der zum Kraftwerk gehörenden Talsperre Lohmühle (als Abschluß des Unterbeckens) registriert. Bei diesem Objekt werden der Aufgabe entsprechend modifizierte Pendelsysteme eingesetzt, die in 30 m tiefen Vertikalschächten der Staumauer installiert sind und die Möglichkeit der variablen Ankopplung entlang eines Vertikalprofils bieten. Hierdurch lassen sich - potentiell - Zonen unterschiedlichen Reaktionsverhaltens der Talsperre auf die wasserstandsabhängigen, einseitig horizontalen Lastvariationen orten. Auch bei diesem Objekt erreicht die Signalauflösung je nach Aufgabenstellung einen Wert zwischen 0,1 und 0,01 Bogensekunden.

Die relativ hohe Signalauflösung erfordert eine Untersuchung der Frage, inwieweit und bis zu welcher Grenze unter den vorgegebenen Bedingungen von Größe und zeitlicher Struktur der Massenverlagerungen die Richtung des Schwerevektors als zeitlich konstant angesehen werden kann. Die vorgelegte Arbeit ist daher primär der Beantwortung dieser Frage gewidmet und zwar auf dem Wege der Quantifizierung der auftretenden Gravitationseffekte.

Im Hinblick auf die umfangreichen nivellitischen Überwachungsarbeiten im Bereich der Oberbecken des Kraftwerks Vianden soll ferner untersucht werden, inwieweit die Geometrie des Schwerefeldes durch die Massenvariationen beeinflußt wird. Desweiteren sollen diese primär ingenieurtechnischen Fragestellungen durch eine gravimetrisch-geowissenschaftliche Anwendung der auftretenden Gravitationseffekte ergänzt werden. Sofern diese hinreichend genau modelliert werden können, ermöglichen sie eine In-situ-Eichung von Registriergravimetern. Die vorgelegte Arbeit soll daher auch einen Beitrag zur aktuellen Diskussion über die erreichte Maßstabsgenauigkeit gravimetrischer Gezeitenbeobachtungen liefern, wobei der Schwerpunkt auf die Amplitudenquotienten der beiden lunaren Hauptschwingungen O_1 und M_2 gelegt wird. Für diese Untersuchungen werden die seit mehreren Jahren unmittelbar unter dem Oberbecken II mit zwei Askania-Gravimetern durchgeführten Schwereregistrierungen genutzt. Sowohl der Betrag der auftretenden wasserstandsabhängigen Gravitationseffekte als auch die Struktur ihrer zeitlichen Variation als Folge des täglichen Kraftwerkbetriebes lassen eine gravitative Eichung der Gravimeter als erfolgversprechend erscheinen.

3. Das Pumpspeicherwerk (PSW) Vianden

Vor dem Hintergrund der zuvor dargelegten Fragestellungen und Zielsetzungen sollen nun zunächst einige relevante Informationen zum Kraftwerk Vianden vorgelegt werden.

3.1 Geographische Lage/Standortwahl

Das Pumpspeicherwerk Vianden der Société Electrique de l'Our liegt im Nordosten des Großherzogtums Luxemburg direkt an der Grenze zum Bundesland Rheinland-Pfalz (Eifel).

Die Our, deren Wasserzulauf genutzt wird, bildet die Grenze zwischen beiden Staaten. Das Pumpspeicherwerk besteht hauptsächlich aus den Bauwerken: Oberbecken, Unterbecken mit Staumauer, Druckschächten, Unterwasserstollen, Kaverne und dem Schachtbauwerk der 10. Maschine. Die geographische Länge und Breite für den Gesamtkomplex erstreckt sich von:

Östliche Länge:	6° 10'.0 - 6° 12'.5
Nördliche Breite:	49° 56'.2 - 49° 58'.3

Einen Überblick über den Gesamtkomplex gibt die Abb. 3.1.

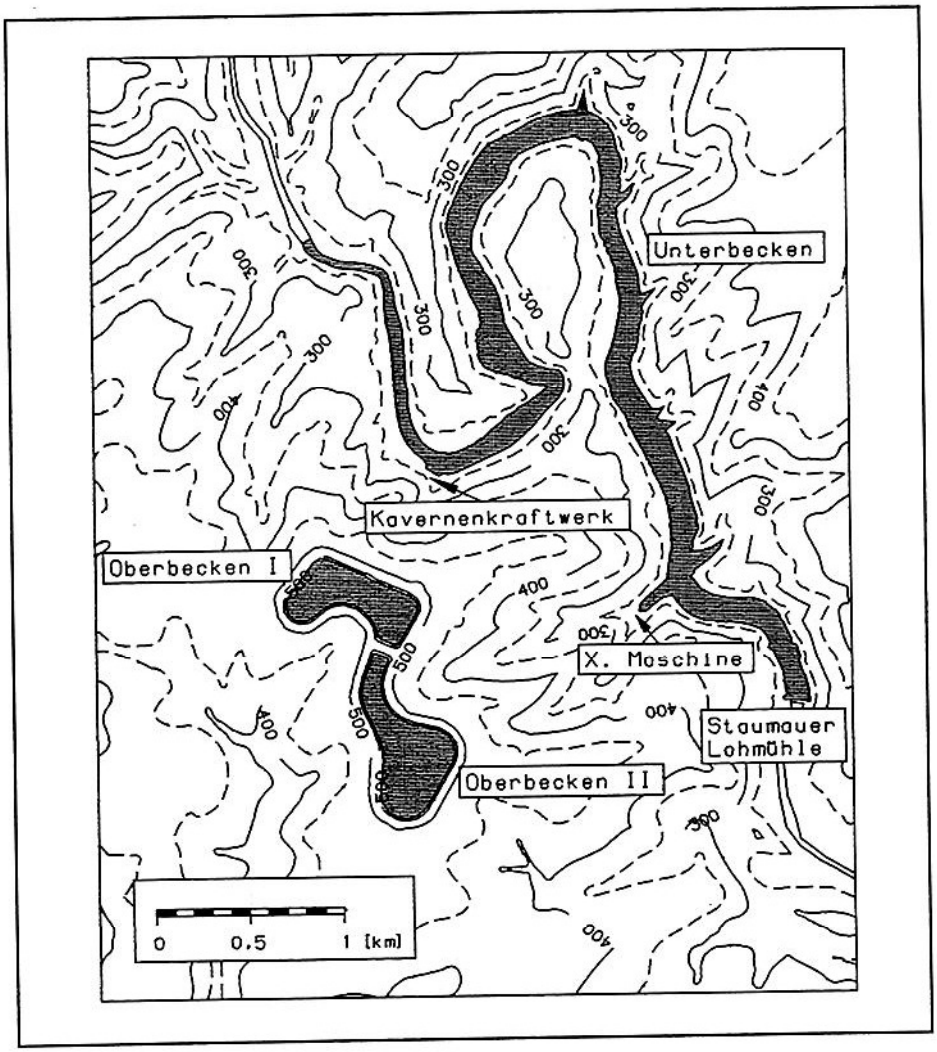


Abb. 3.1 Gesamtkomplex PSW Vianden

Unter den Auswahlkriterien für die Wahl des Ourtals als Standort für ein Pumpspeicherwerk größter Leistung (1200 MW) sind als wichtigste zu nennen die günstige topographische Lage, die unmittelbare Nähe zum Industriegebiet Nordwesteuropas mit seinen großen Energieverbrauchern, der Felsgrund, der aus wasserundurchlässigem Devonschiefer besteht, sowie die geringe Bevölkerungsdichte. Dies waren die Voraussetzungen, die 1959 zum Baubeginn dieses Kraftwerkes führten.

3.2 Zweck des PSW Vianden

Zur Stromerzeugung werden zur Deckung der Grundlast überwiegend konventionelle Wärmekraftwerke (Stein- und Braunkohlekraftwerke) sowie Kernkraftwerke eingesetzt. Sie erzeugen elektrische Energie über 24 Stunden und sind damit überaus wirtschaftlich (keine Leistungsschwankungen, kein An- und Abfahren von Kraftwerksblöcken). Grundlast-Kraftwerke können sich aber nur schlecht wechselnder Energienachfrage anpassen. Da man elektrische Energie aber nicht in beliebiger Menge speichern kann, wird in Schwachlastzeiten (z.B. nachts) die vorhandene elektrische Überschußenergie hydraulisch in Pumpspeicherwerken gespeichert.

Dabei wird Wasser aus einem Unterbecken (Our) in ein hochgelegenes Oberbecken (Speicherbecken) gepumpt. Zur Zeit einer Lastspitze läßt man durch das gespeicherte Wasser die Wasserturbinen, die mit Generatoren gekoppelt sind, hochwertigen (im kaufmännischen Sinn) Spitzenstrom erzeugen.

Das Pumpspeicherwerk Vianden stellt somit eine sehr wirtschaftliche Momentanreserve mit niedrigen Betriebskosten dar. Zudem kann das PSW Vianden durch die Möglichkeit der sehr schnellen und kurzen Veränderungen der Betriebszustände (ein Steinkohleblock braucht mehrere Stunden vom Anfahren, bis er die geforderte Leistung erbringt) einen wichtigen Beitrag zur Frequenzstabilisierung des europäischen Verbundnetzes leisten (Abb. 3.2).

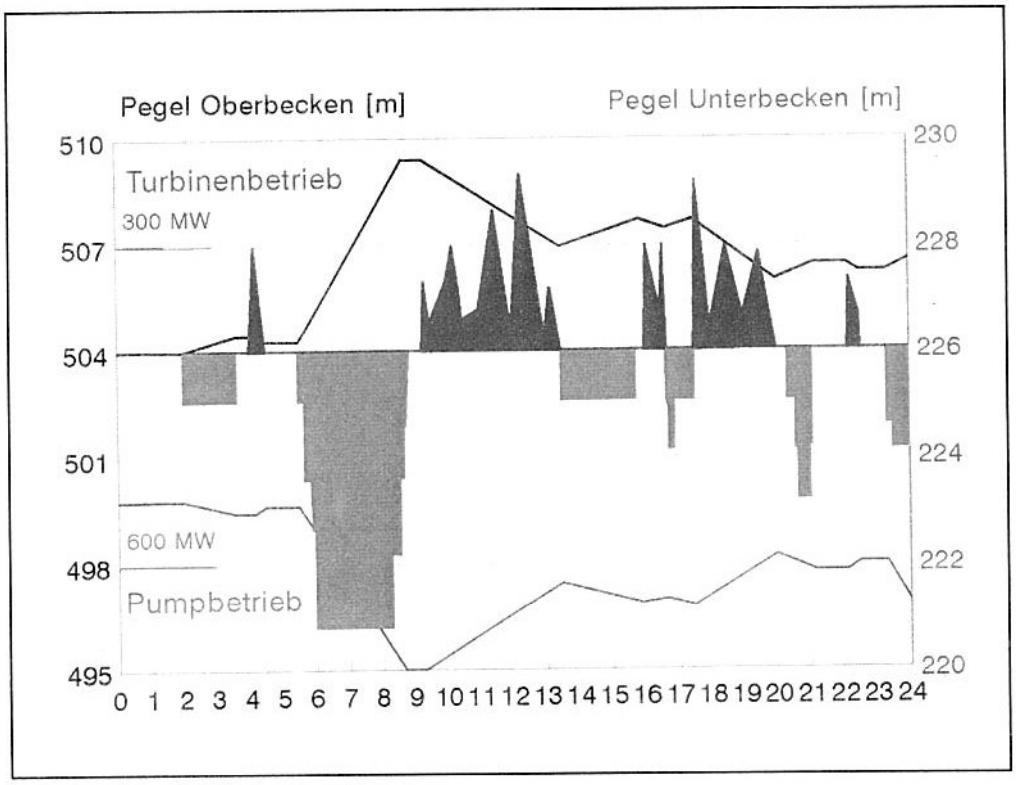


Abb. 3.2 Tagesdiagramm über Lastwechsel (21.02.1988)

3.3 Die Oberbecken des PSW Vianden

Beide Oberbecken (Abb. 3.3) sind durch Abtragen der vorhandenen Bergrücken entstanden, wobei für die Ringdämme das ausgebrochene Felsmaterial verwendet wurde. Die Abdichtung der wasserseitigen Dammanlagen sowie der Beckensohlen erfolgte durch einen Asphaltbetonteppich, der auf eine bitumengebundene Filterschicht aus Hochofenschlacke aufgelegt ist. Unter der gesamten Sohlenfläche ist ein teilweise begehbares Drainagenetz verlegt, das die Überwachung der Dichtheit der Becken ermöglicht. Beide Becken sind im normalen Betriebsablauf durch ein geöffnetes Zwischenbauwerk miteinander verbunden.

Technische Daten:	Nutzinhalt Oberbecken I	ca. 3.000.000 m³
	Nutzinhalt Oberbecken II	ca. 3.800.000 m³
	Absenkziel	494,00 m ü. NN
	Stauziel	510,30 m ü. NN
	Dammkrone	511,30 m ü. NN
	Wasserseitige Dammböschung	1:1,75

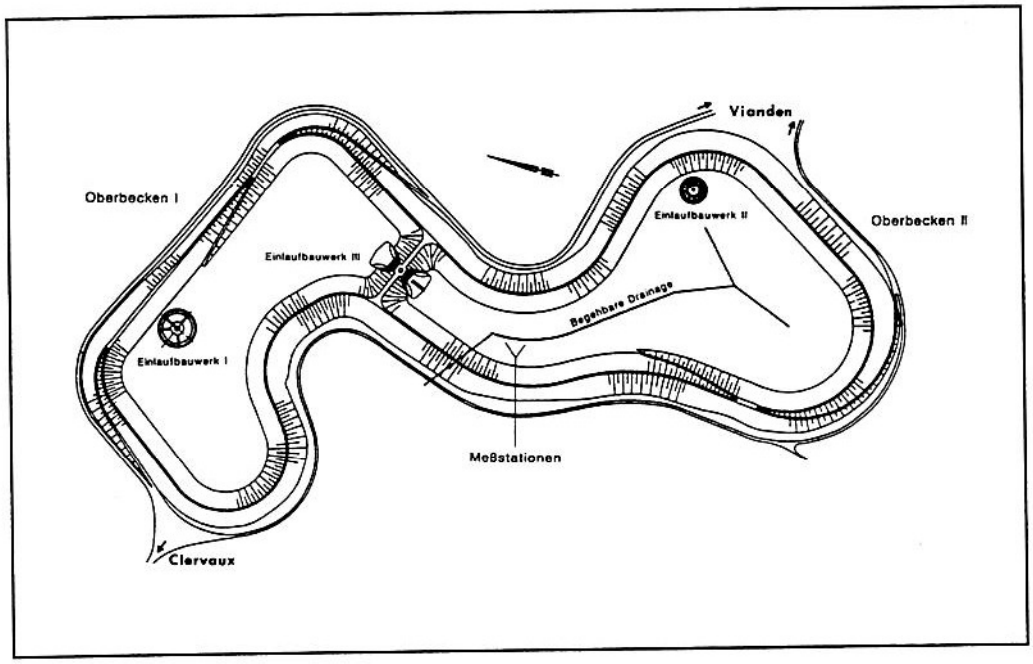


Abb. 3.3 Lageplan Oberbecken

3.4 Das Unterbecken des PSW Vianden

Wegen der größeren Widerstandsfähigkeit gegenüber den zahlreichen und schnell auftretenden Schwankungen des Wasserspiegels wurde als Absperrbauwerk für das Unterbecken eine Schwergewichtsmauer gewählt (Abb. 3.4). Sie ist aus 9 Betonblöcken zusammengesetzt, deren Fugen wasserundurchlässig abgedichtet wurden. Zwischen den Blöcken gibt es Schächte (Dimension ca. 3 x 3 dm), die bis zum begehbaren Drainagegang am Fuße der Staumauer führen.

Technische Daten:	Nutzinhalt Unterbecken	ca. 6.800.000 m³
	Absenkziel	219,00 m ü. NN
	Stauziel	227,50 m ü. NN
	Staumauerkrone	228,50 m ü. NN
	Maximale Staumauerhöhe	30 m
	Länge der Staumauerkrone	130 m
	Fußbreite der Staumauer	28 m
	Breite der Staumauerkrone	3,8 m

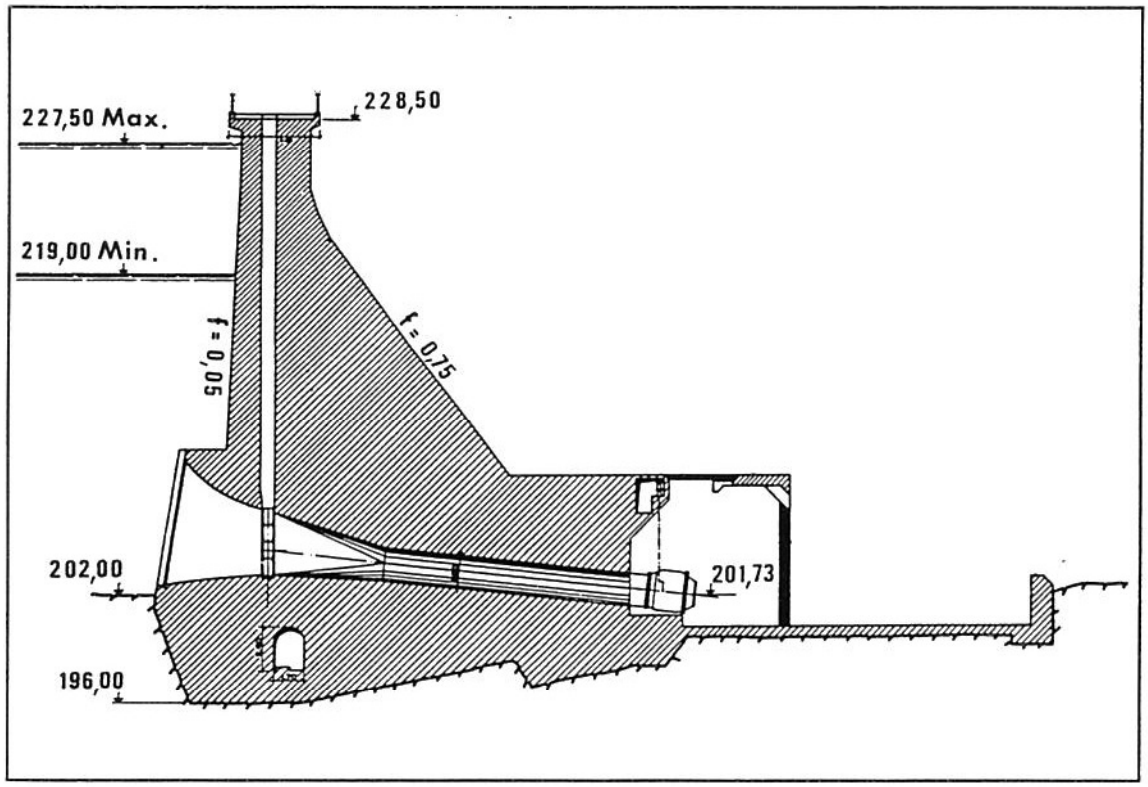


Abb. 3.4 Schnitt durch die Staumauer Lohmühle

3.5 Die Kraftwerksanlagen des PSW Vianden

Zwei Druckrohrleitungen verbinden die Einlaufbauwerke I und III mit dem Kavernenkraftwerk (Gesamtlänge 330 m, Breite 17 m, Ausbruchhöhe 30 m), in dem neun Maschinensätze mit einer Gesamtleistung von 1000 MW installiert sind. Über das Einlaufbauwerk II ist die dritte Druckrohrleitung mit einem Schachtkraftwerk verbunden (50 m Tiefe, 22 m Durchmesser), das die 10. Maschine mit 200 MW Leistung beinhaltet (Abb. 3.5).

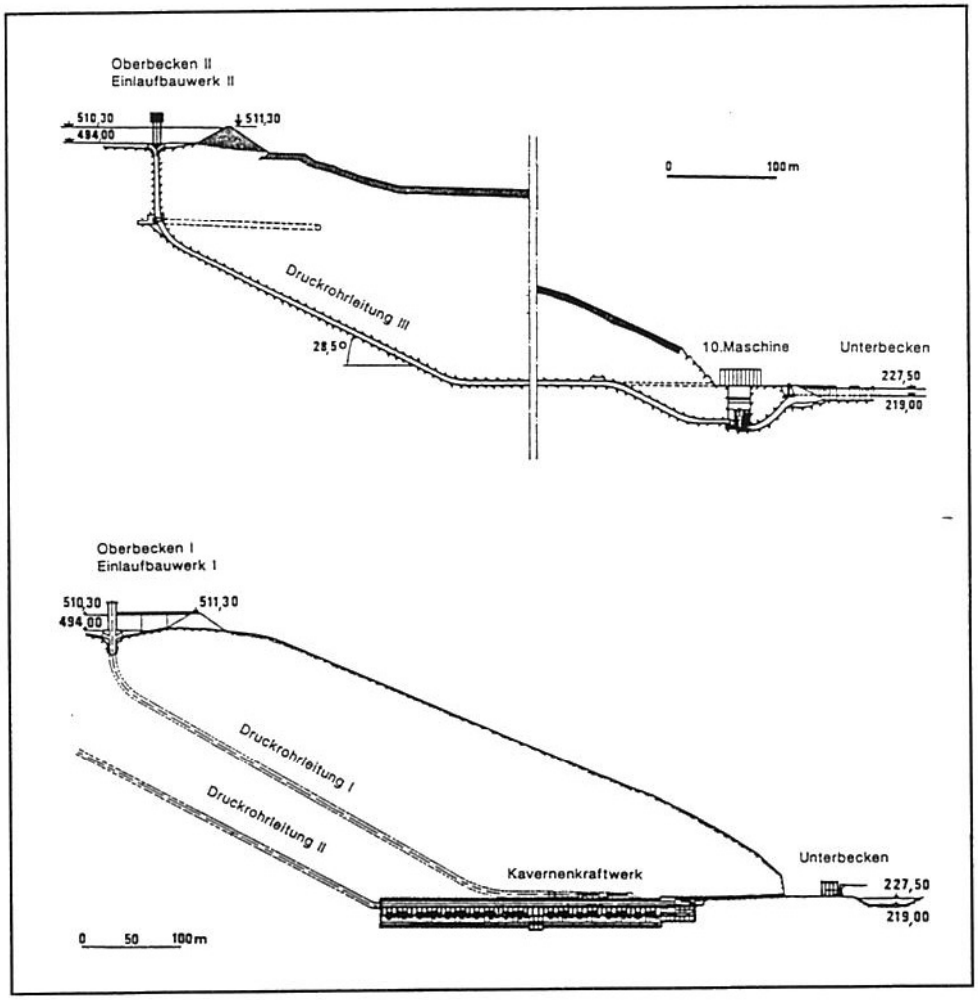


Abb. 3.5 Längsschnitt durch die Kraftwerke

4. Vermessungstechnische Überwachungsarbeiten im Kraftwerksbereich

Die deformationstechnische Überwachung von Großbauwerken stützt sich bisher überwiegend auf lokale, diskrete geodätische Messungen, die in bestimmten Zeitabständen wiederholt werden. Dieses Verfahren hat den prinzipiellen Nachteil, daß zwischen zwei Beobachtungszeitpunkten gegebenenfalls lediglich relative Lageänderungen von Referenzpunkten festgestellt werden können, nicht aber geometrische Trendinformationen, die irgendwann zwischen den Betrachtungszeitpunkten aufgetreten sind. Dieser Nachteil läßt sich auch durch Erhöhung der Meßfrequenz nur partiell verringern. Somit sind diskrete Messungen nicht geeignet, eine **laufende** Überwachung (bei entsprechendem Gefährdungspotential eines Objektes aber in der Regel erwünscht) zu gewährleisten. Daher ist das vermessungstechnische Überwachungsprogramm, das sich bisher beim PSW Vianden auf diskrete Messungen abstützte, durch kontinuierliche Messungen erweitert worden. Beide Methoden werden im weiteren näher vorgestellt.

4.1 Diskrete Messungen in Vianden

Neben der Aktualisierung des Bestandskartenwerkes werden die baulichen und maschinentechnischen Anlagen des PSW Vianden auf der Grundlage der schon im Projektstadium angelegten Überwachungsnetze diskret überwacht. Diese Messungen dienen der Schadensfrüherkennung, der Ursachenfindung bei betrieblichen Störungen, der Beurteilung der Standfestigkeit (-sicherheit) und der Erfassung des Bewegungsverhaltens von Maschinen- und Bauteilen und somit der vorbeugenden Instandhaltung und Qualitätssicherung.

Wegen des besonderen Bezugs dieser Arbeit zu den Oberbecken einerseits bzw. der Staumauer Vianden andererseits beschränken sich die nachfolgenden Erläuterungen über die bisher durchgeführten Vermessungstätigkeiten ausschließlich auf diese beiden Objekte.

Das Überwachungsnetz am **Oberbecken** besteht aus 23 temperaturisolierten, tiefgegründeten Vermessungspfeilern (Abb. 4.1) sowie einem Objektpunktnetz, das auf der Dammkrone eingebracht ist. Zur Deformationsüberwachung wurden von 1964 bis 1988 neun Meßkampagnen durchgeführt, wobei eine Winkel-, Strecken-, Nivellementsgenauigkeit von ±0,2 mgon/± 0,2 mm/± 0,1 mm realisiert wurde. Bezogen auf die Basismessung von 1964 gibt die Abb. 4.2 eine Übersicht über die bis heute eingetretenen Deformationen.

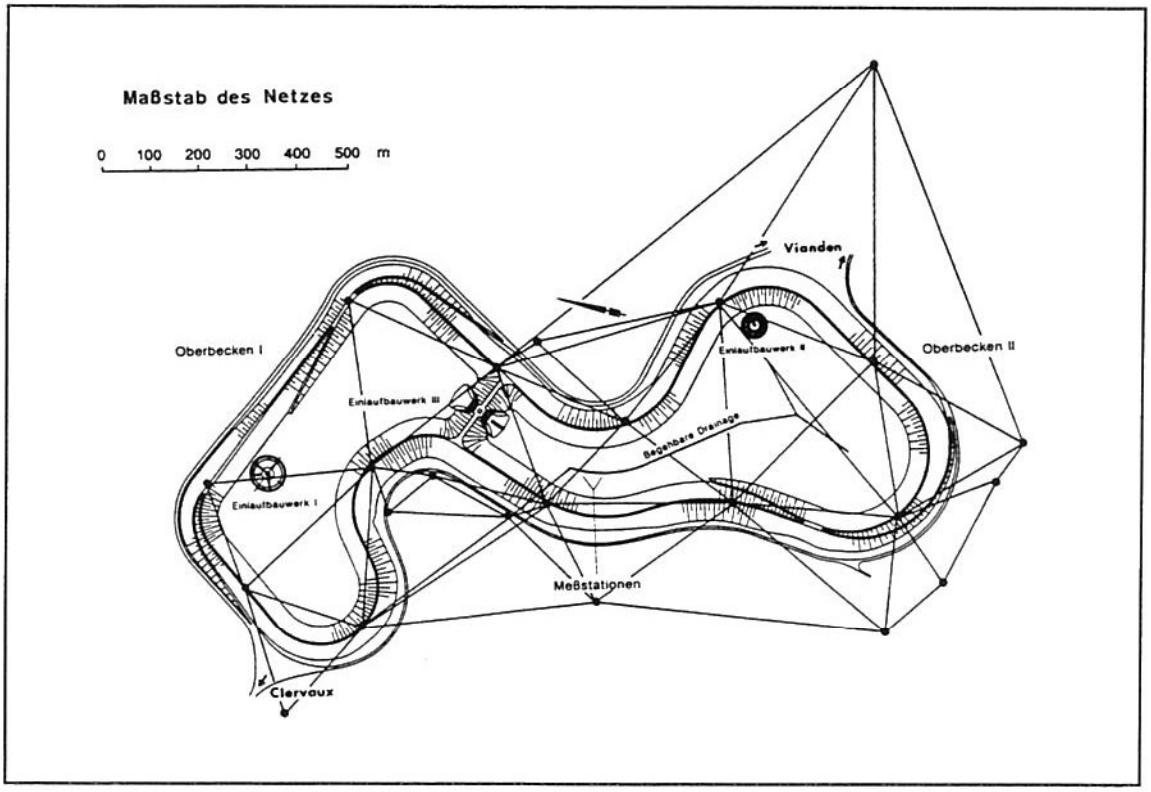


Abb. 4.1 Das Lage-Überwachungsnetz Oberbecken

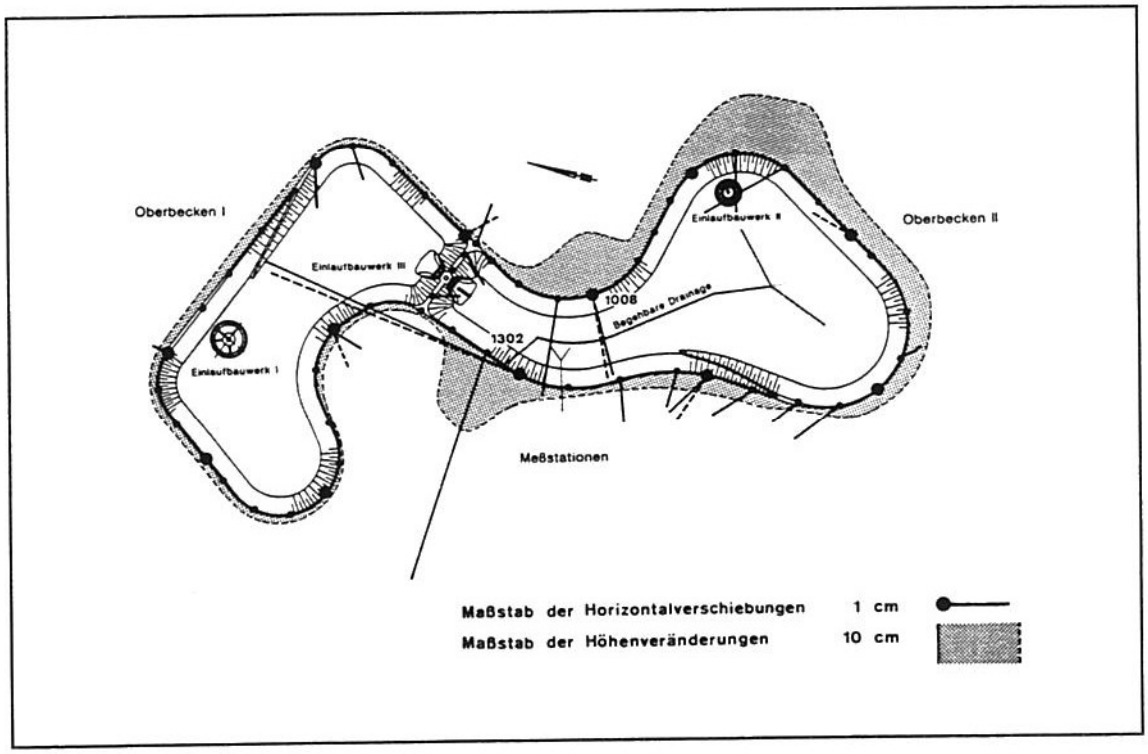


Abb. 4.2 Deformationsergebnisse am Oberbecken

Im Bereich der Punkte 1008/1302 treten die größten Lageverschiebungen/ Höhenveränderungen mit Beträgen bis zu 13,1 cm/14,7 cm auf. In diesem Bereich wurde bei Fertigstellung des Beckens eine Baustraße zuletzt verkippt. Die gemessenen Höhenänderungen deuten darauf hin, daß die gesamte Verdichtung des Untergrundes beim Oberbecken II nicht so gründlich erfolgt ist wie beim Oberbecken I. Beide Oberbecken werden über geodätische Streckenmessungen vorerst weiterhin im 4-Jahreszyklus beobachtet.

Für die **Staumauer** Lohmühle liegt ein Überwachungsnetz vor (Abb. 4.3), das aus 7 Stütz- (Vermessungspfeilern) und 26 Objektpunkten (die talseitige Staumauer ist rasterförmig verteilt mit Zielmarken versehen) besteht, sowie aus 12 Alignementspunkten, die auf der befahrbaren Staumauerkrone eingerichtet wurden und auch höhenmäßig überwacht werden. Wegen der besonderen Lage der Staumauer, die sich direkt oberhalb von Vianden befindet, wird eine Auswahl von Objektpunkten monatlich beobachtet. Die Auswertungen dieses Meßprogramms gehen regelmäßig zur Begutachtung an die Aufsichtsbehörde. Die primäre Deformationsrichtung verläuft senkrecht zur Staumauer in Richtung des Tales, wobei es zu saisonalen Schwankungen (vorwiegend temperaturinduziert) bis zu 5 mm mit einer Standardabweichung von $\pm$ 0,3 mm kommt (Abb. 4.4).

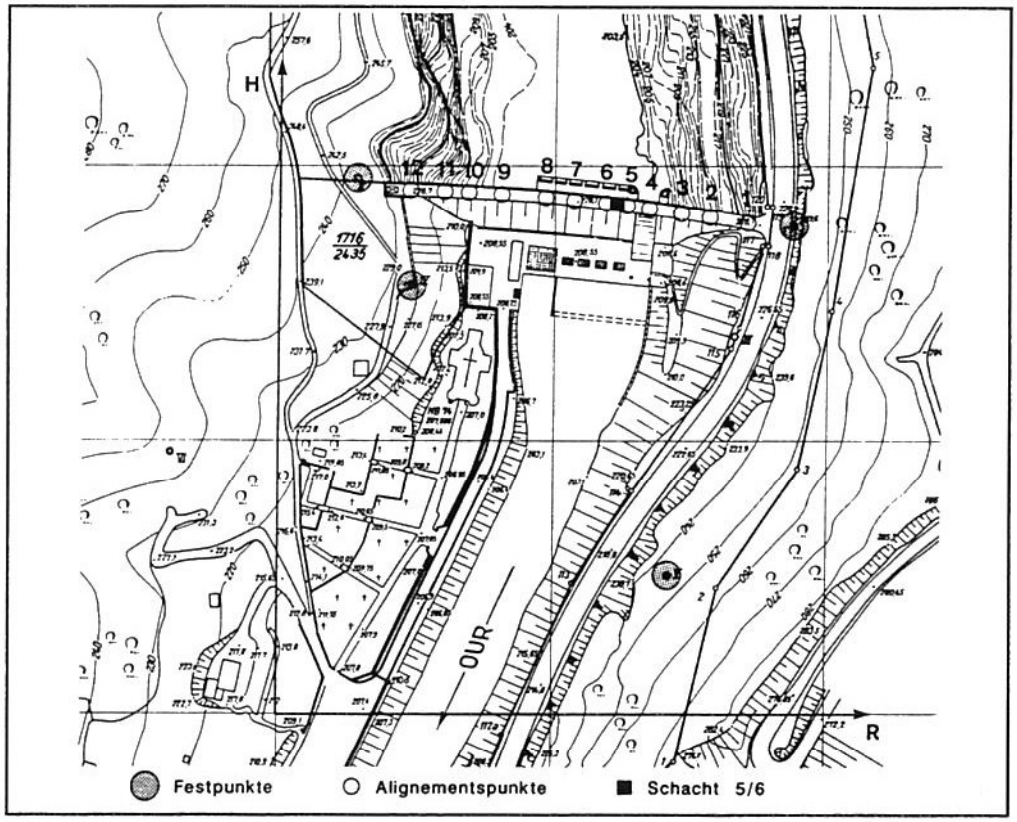


Abb. 4.3 Überwachungsnetz der Staumauer Lohmühle

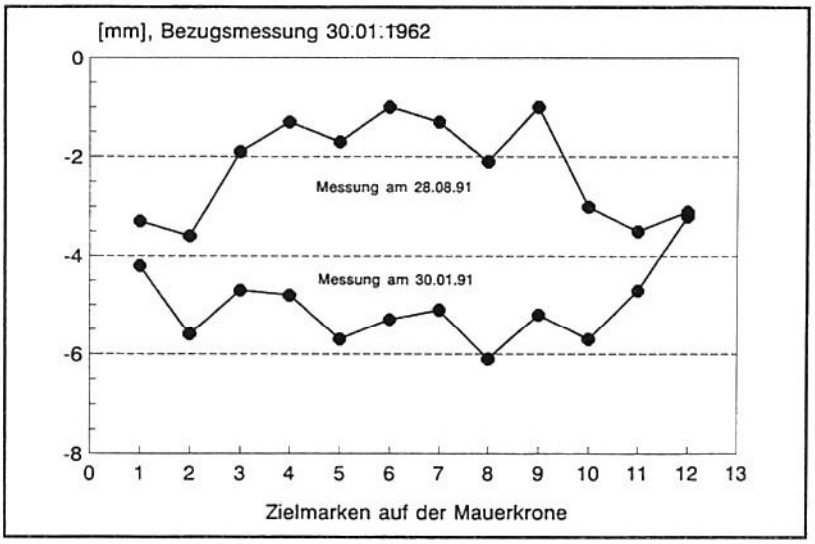


Abb. 4.4 Alignementsauswertungen

4.2 Kontinuierliche Messungen in Vianden

Neigungen von Volumenelementen eines Körpers sind besonders sensible Parameter zur Erfassung von deformationsinduzierten Vorgängen, wobei die relative Lage einer vermarkten, bodenfesten Richtung gegenüber der momentanen Richtung des Schwerevektors (oder der Senkrechten dazu = Horizontale) als Meßgröße verwendet wird. Die einzusetzenden Meßgeräte werden unterschieden in:

1. Pendelneigungsmeßgeräte, wie z.B. Horizontal- und Vertikalpendel,
2. Niveauvariometer, wie z.B. Libellengeräte oder Meßsysteme nach dem Prinzip der kommunizierenden Gefäße.

Besonders zu beachten ist, daß die Lotrichtung eine **dynamische** Größe darstellt, die in einem Punkt die Tangente an eine Kraftlinie des Erdschwerefeldes darstellt. Die Stabilität dieser Referenzrichtung ist insbesondere dann von Bedeutung, wenn das Ziel darin besteht, Vorläuferphänomene potentiell kritischer Deformationszustände zu erfassen, deren Signale naturgemäß umso kleiner sind, je früher dieVorläuferinformation gewonnen werden soll. Erschwerend kommt hinzu, daß es sich bei diesen Aufgabenstellungen zumeist um Langzeitbeobachtungen mit entsprechenden Anforderungen an die Langzeitstabilität der eingesetzten Meßsysteme handelt. Das Maß der instrumentellen Auflösung wird unter anderem wesentlich dadurch bestimmt, wie präzise der Sensor sich auf das vorhandene Kraftfeld einstellt.

Vorläuferphänomenerfassung bedeutet aber, daß für geräte- und maschinentechnische Anwendungen entwickelte Systeme im allgemeinen für diese Fragestellungen nicht geeignet sind. Mit diesen Meßsystemen erfolgt die Überwachung im wesentlichen über Flüssigkeitslibellen oder Pendelsysteme. Hierbei sind hochauflösende Beobachtungen ($\pm$0,1 Bogensekunden) mit teilweise sehr kurzen Basislängen (einige Zentimeter) möglich, da die Überwachung an Körpern mit meist homogener und fester Oberflächenstruktur durchgeführt wird. Aus diesem Grunde werden diese Meßinstrumente in Vianden nicht eingesetzt, da hier die Ankopplung auch an inhomogenen Körpern erfolgen soll.

Mit zunehmender Auflösung ist diese Ankopplung an den zu überwachenden Körper eines der entscheidenden Probleme, da man bei der An- bzw. Einbringung eines Meßsensors zwangsläufig eine Störung der physikalischen Zustände im Nahbereich des Untersuchungsprojektes verursacht. Zudem ist zu berücksichtigen, daß die beobachteten Signale auch durch physikalische Prozesse (z.B. Meteorologie) beeinflußt werden, die außerhalb des zu untersuchenden Deformationsprozesses ablaufen, diesen aber durchaus auch beeinflussen können. Hier ist es wichtig und hilfreich, die Signale auf gezeiteninduzierte Deformationen untersuchen zu können (Signalgröße im Gezeitenbereich ca. $\pm$ 0,05 Bogensekunden), die man im Falle hochauflösender Messungen zur Prüfung heranziehen kann, ob der Ankopplungsprozeß selbst erfolgreich verlaufen ist.

Die erforderlich hohe Auflösung des Neigungssensors bedingt, daß er im **Innern** eines Körpers untergebracht werden muß. Der Bedarf nach solch leistungsfähigen Systemen kann heute jedoch nur sehr eingeschränkt befriedigt werden, da zur Zeit nur das Askania-Bohrloch-Pendel mit einer Auslösung von bis zu $\pm$ 0,0001 Bogensekunden zur Verfügung steht. Dieses Pendel ist mechanisch aufwendig konstruiert, muß zur Abschirmung von Oberflächeneinflüssen einige 10 m tief im Untergrund eingebracht werden und hat einen Preis (ca. 200.000,-- DM), der eine flächendeckende Überwachung von Ingenieurobjekten in der Regel kaum verantworten läßt. Zudem ist die Produktion eingestellt worden. Andere Bohrlochsonden basieren auf dem Horizontalpendelprinzip und sind in ihrer Signalauflösung vergleichsweise begrenzt.

Somit gibt es eine Deckungslücke, die durch marktgängige Produkte nicht geschlossen werden kann und zur Entwicklung eines neuartigen Neigungssensors geführt hat.

4.2.1 Ein neu entwickelter Neigungsmesser

Der im Rahmen technischer Aufgabenstellung zwischen Prof. Bonatz und der RWE Energie AG/SEO für technische Anwendungen entwickelte Neigungssensor besteht im Prinzip aus einem Auftriebs- sowie einem Schwerependel (Abb. 4.5).

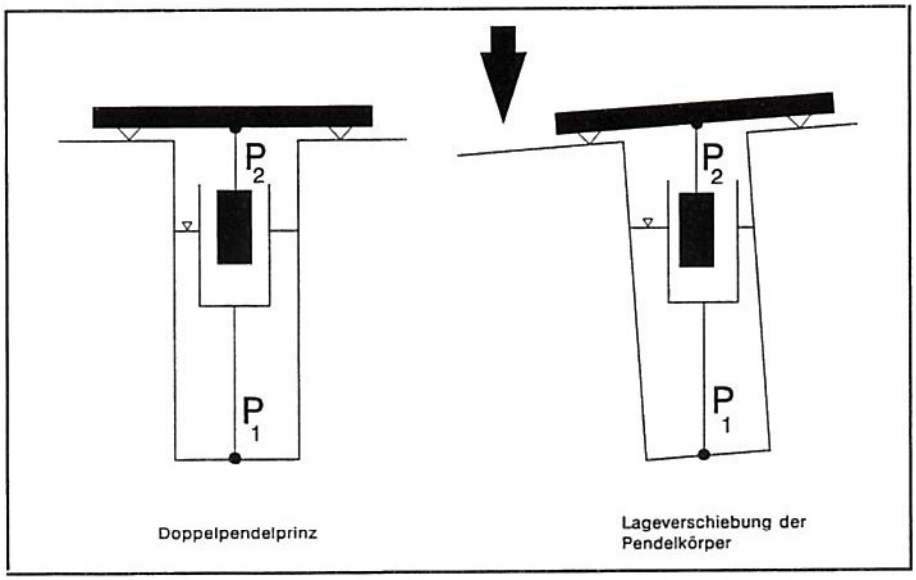


Abb. 4.5 Das Prinzip des Doppelpendels

Bei einer durch Deformationen verursachten Neigung des Untergrundes/Bauwerkes und damit Beeinflussung der statisch zusammenhängenden Punkte P1, P2, treten horizontale, translatorische Verschiebungen der beiden Pendelkörper auf, die ausgemessen werden, wobei durch den streng radialsymmetrischen Aufbau des Systems thermische Effekte minimiert werden. Hierbei kommt dem System auch zugute, daß das Abgriffsystem (als Wärmequelle) am oberen Ende des Sensors angebracht ist. Dies erleichtert außerdem die Zugänglichkeit und damit einen eventuell notwendigen Austausch des Tastkopfes, falls die häufig a-priori unbekannte Signalstruktur und -weite dies erfordern. Die instrumentelle Länge der Richtungsbasis ist über eine Änderung der Länge der Pendelfäden leicht zu variieren und damit dem jeweiligen Meßproblem anzupassen. Dies ermöglicht unter bestimmten Voraussetzungen eine Signalauflösung bis ~ 10^{-4} Bogensekunden (d.h. Gezeitenbeobachtung). Beide Pendel können so ausgebildet werden, daß zusätzlich vertikale Abstandsänderungen zwischen ihnen erfaßt werden, so daß die Funktion eines Vertikalextensometers gleichzeitig integriert ist. Die Eichung des Neigungssensors erfolgt über elektrostatische Kräfte.

Der neu entwickelte Neigungsmesser ist in der Lage, folgende Anwendungen im operationellen Bereich meßtechnisch zu ermöglichen:

- Erfassung von Belastungseffekten eines Untergrundes aufgrund äußerer Einflüsse (z.B. Errichtung eines Bauwerkes; wechselnde Lastfälle)
- Erfassung von Formveränderungen eines Ingenieurbauwerkes als klassische Aufgabenstellung einer kontinuierlichen Bauwerksüberwachung
- Erfassen von bodenmechanischen Prozessen (z.B. im tektonisch aktiven Gebiet; Tagebau-Überwachung)

Weiterführende Informationen zur technischen Beschreibung können der Patentschrift Nr. 38 37 565 vom 04.11.1988 /63/ sowie dem Beitrag /9/ entnommen werden.

4.2.2 Messungen im Bereich des Oberbeckens

Als Testobjekt für die verfahrenstechnische Eignungsprüfung des neu entwickelten Neigungssensors wurde das Oberbecken in Vianden ausgewählt. Die Abb. 4.6 gibt eine Übersicht über die eingerichteten Stationen. Die im weiteren angegebenen Koordinaten beziehen sich auf das lokale Kraftwerks-Koordinatensystem.

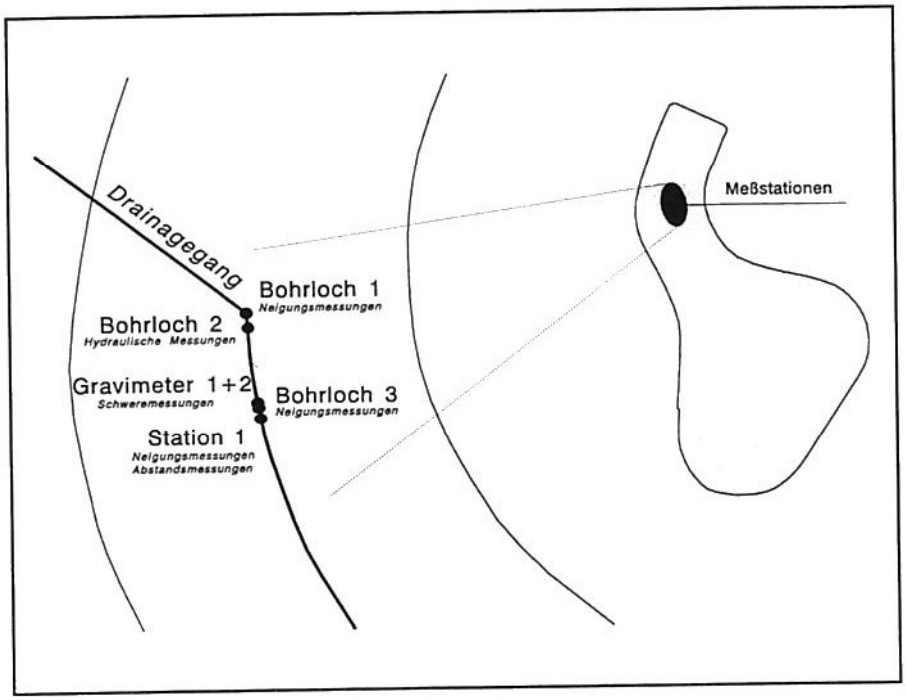


Abb. 4.6 Übersicht der Meßstationen

Bohrloch 1: 80 462.80 11 975.76 488.79
Erste Versuche im Frühexperimentalstadium fanden 1987 in einem Blindstollen des Drainageganges statt. Der Sensor wurde in ein ca. 1,2 m tiefes, vertikales Bohrloch mit vorheriger Verrohrung eingebracht (Abb. 4.7), wobei der Abtastkopf mechanisch mit der Verrohrung verbunden war. Dies hat sich insbesondere wegen der unterschiedlichen Wasserführung im Bohrloch 1 - und der damit verbundenen Krafteinwirkung über die Verrohrung auf den Neigungssensor - als nachteilig erwiesen.

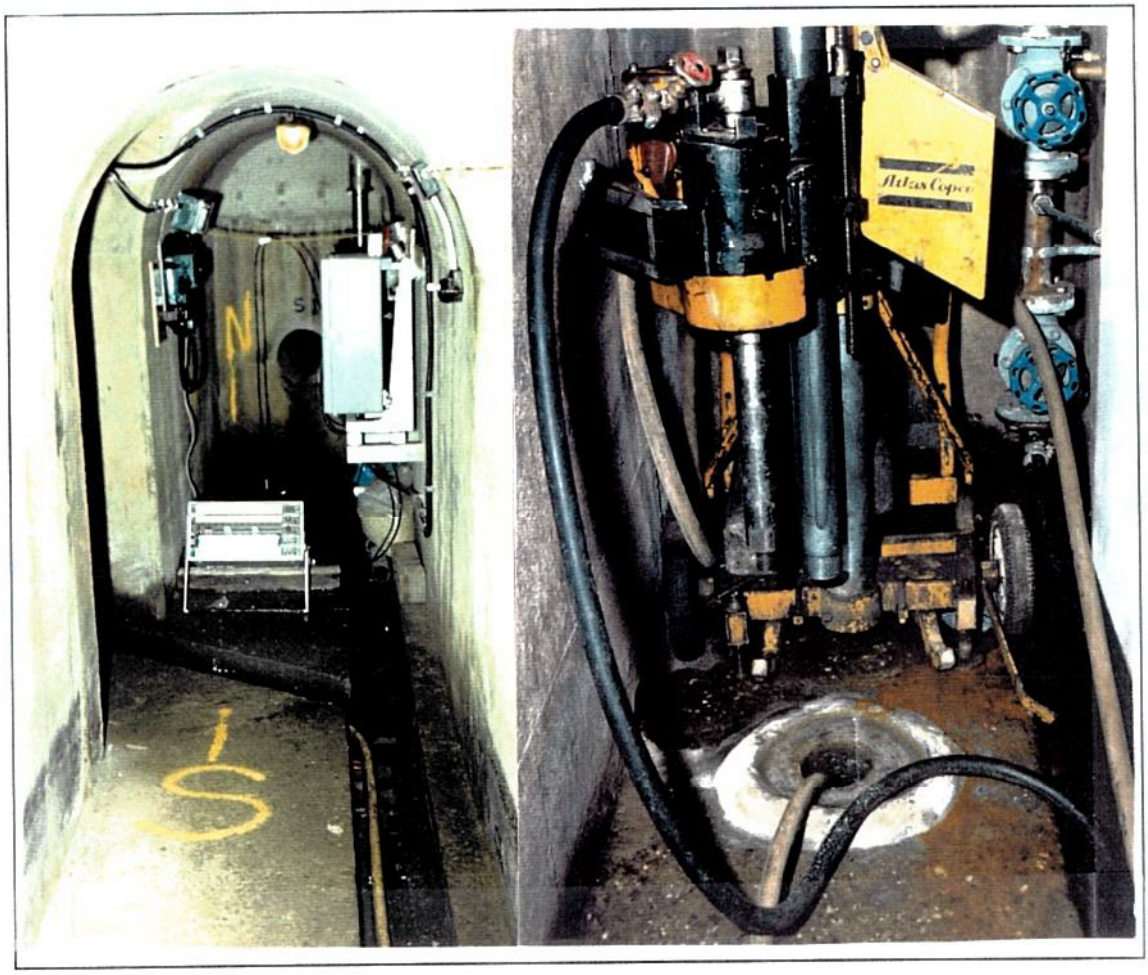


Abb. 4.7 Bohrloch 1 - Installation

Bohrloch 2: 80 462.69 11 970.16 488.76
Das in ca. 5 m entfernt eingebrachte Bohrloch diente dazu, hydraulisch bedingte Ausgleichsvorgänge unter dem Becken über ein Steigrohr sichtbar zu machen. In dieser Station wird nur der hydrostatische Druck gemessen.

Bohrloch 3: 80 466.16 11 931.92 488.78
In Erweiterung der Entwicklung wurde der Tastkopf von der Gehäuse-Verrohrung gelöst und erstmals eine Zweipunktkopplung ohne horizontale Spannkräfte realisiert.

Station 1: 80 466.90 11 928.91 488.78
Die Entwicklung des Neigungssensors fand hier mit der Integration eines Vertikalextensometers ihren vorläufigen Abschluß. Die Installation wurde ohne Verrohrung zwischen dem Scheitel- und Fußpunkt des Drainageganges vorgenommen. Seit März 1990 ist der Prototyp funktionsfähig und hat sich seit dieser Zeit im praktischen Einsatz problemlos bewährt. Eine beispielhafte Registrierung zeigt die Abb. 4.8. Deutlich zu erkennen ist die hohe Korrelation zwischen Wasserstandsänderungen und den beiden Neigungskomponenten. Die Kompressionen und Dilatationen des Drainageganges als Folge der wechselnden Auflasten des Wassers zeigen sich ebenso deutlich in den Aufzeichnungen des Vertikalextensometers.

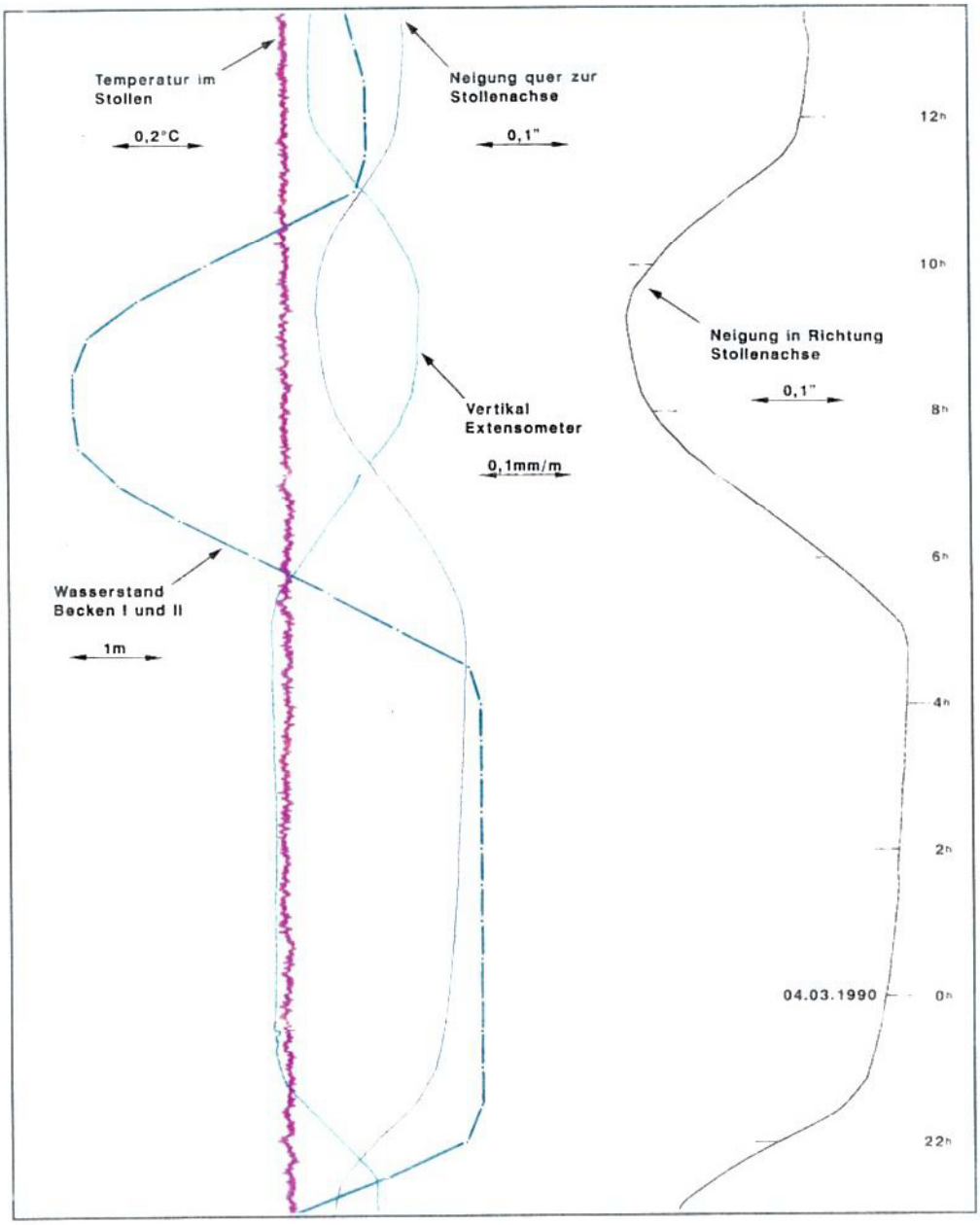


Abb. 4.8 Registrierbeispiel Station 1

Im Rahmen aktueller geophysikalischer Fragestellungen wurden in unmittelbarer Nähe des Bohrlochs 3 zwei Registriergravimeter installiert. Die den Wasserstandsänderungen zugeordneten Gravitationseffekte erreichen Beträge in der Größenordnung der gravimetrischen Gezeiten.

Gravimeter 1: 80 465.74 11 933.62 488.93
Askania-Gravimeter GS 15 Nr. 206

Gravimeter 2: 80 465.83 11 933.12 488.93
Modifiziertes Askania-Gravimeter GS BN Nr. 02

4.2.3 Messungen innerhalb der Staumauer

Nach problemlosem Einsatz des Neigungssensors unter dem Oberbecken wurde das Meßsystem in das Überwachungskonzept der Staumauer Lohmühle integriert. Die geodätischen Messungen, die den absoluten Verformungsprozeß der Staumauer beschreiben, wurden damit durch ein relatives Meßverfahren ergänzt, dessen meßtechnische Information das Sicherheitspotential für den Betreiber beträchtlich erhöht.

Die Schwergewichtsmauer ist in 10 Blöcken unterteilt, wobei im Bereich der Trennfugen Schächte (0,3 m * 0,3 m) eingebracht sind, die von der Mauerkrone bis zum begehbaren Drainagegang reichen (siehe Abb. 3.4/Abb. 4.3) und für Überwachungszwecke genutzt werden können.

Aufgrund der Flexibilität in der Länge der Ankopplungsbasis war es möglich, das konzipierte Meßsystem auch hier zu applizieren. Besonderheiten bestehen allerdings in den **einseitig** wirkenden Horizontalkräften der Gravitation bezogen auf wechselnde Wasserstände. In den nachfolgenden Ausführungen wird deshalb auch auf die Beeinflussung der Referenzrichtung im Staumauerbereich näher eingegangen.

Schacht 5/6: 82723 11885 Höhe variabel (Abb. 4.3)

5. Die Geologie im Bereich des PSW Vianden

Mit hochauflösenden Neigungsmessern werden im allgemeinen komplexe physikalische Prozesse beobachtet. Neben meteorologischen und hydrologischen Effekten sind vor allem die lokalen oder regionalen geologischen Strukturen von Bedeutung. Es werden daher im folgenden einige Angaben zur Geologie im Bereich des PSW Vianden gemacht.
Die Bauwerke des PSW Vianden sind auf devonischem Gelände errichtet, das einer geographischen und geologischen Einheit, dem Ösling angehört, der seinerseits Bestandteil des Ardenner Schiefergebirges ist (Abb. 5.1) /30/.

Zur Beurteilung der Stabilität und Dichtigkeit der geologischen Untergrundverhältnisse stehen im Bereich Vianden Kernbohrungen an Bauwerksstandorten, Untersuchungsstollen in der Nähe dieser Objekte sowie Bergwerksstollen in der Nachbarschaft (Schieferbergwerk Martelange) zur Verfügung, die Informationen über die petrologischen sowie stratigraphischen Eigenschaften des Gesteins liefern. Das Gestein besteht vorwiegend aus schwach sandigem Tonschiefer und ist infolge der variskischen Gebirgsbildung stark gefaltet und meistens sehr steil aufgerichtet, wobei das Streichen der Falten ca. 60° beträgt.

Der Untergrund weist eine hohe mechanische Stabilität auf. Dies wird auch dadurch bestätigt, daß der Bergwerk-Stollenausbau im Ösling über keinerlei Verbauung verfügt. Die Homogenität des Schiefers ist allerdings durch Klüfte, als Resultat von tektonischen Beanspruchungen, unterbrochen, wobei es zwei bevorzugte Kluftrichtungen gibt. Das Azimut der Längsklüftung erstreckt sich von ca. 140° - 170°, die Querklüftung von 50° - 70°. Die Klüfte sind aber in der Tiefe nur latent vorhanden, so daß es im Ösling zu einer untergeordneten Quellenausbildung kommt.

Der Schiefer entstand vor allem aus Tonerdesilikatgestein. Porositätsversuche an Proben wiesen ein Porenvolumen von ca. 1 % nach. Dies bedeutet, daß das Gestein praktisch nur durch Spaltung, Klüfte und Gangspalten durchlässig ist. Gegen chemische Einflüsse hat sich der Schiefer als äußerst widerstandsfähig erwiesen.

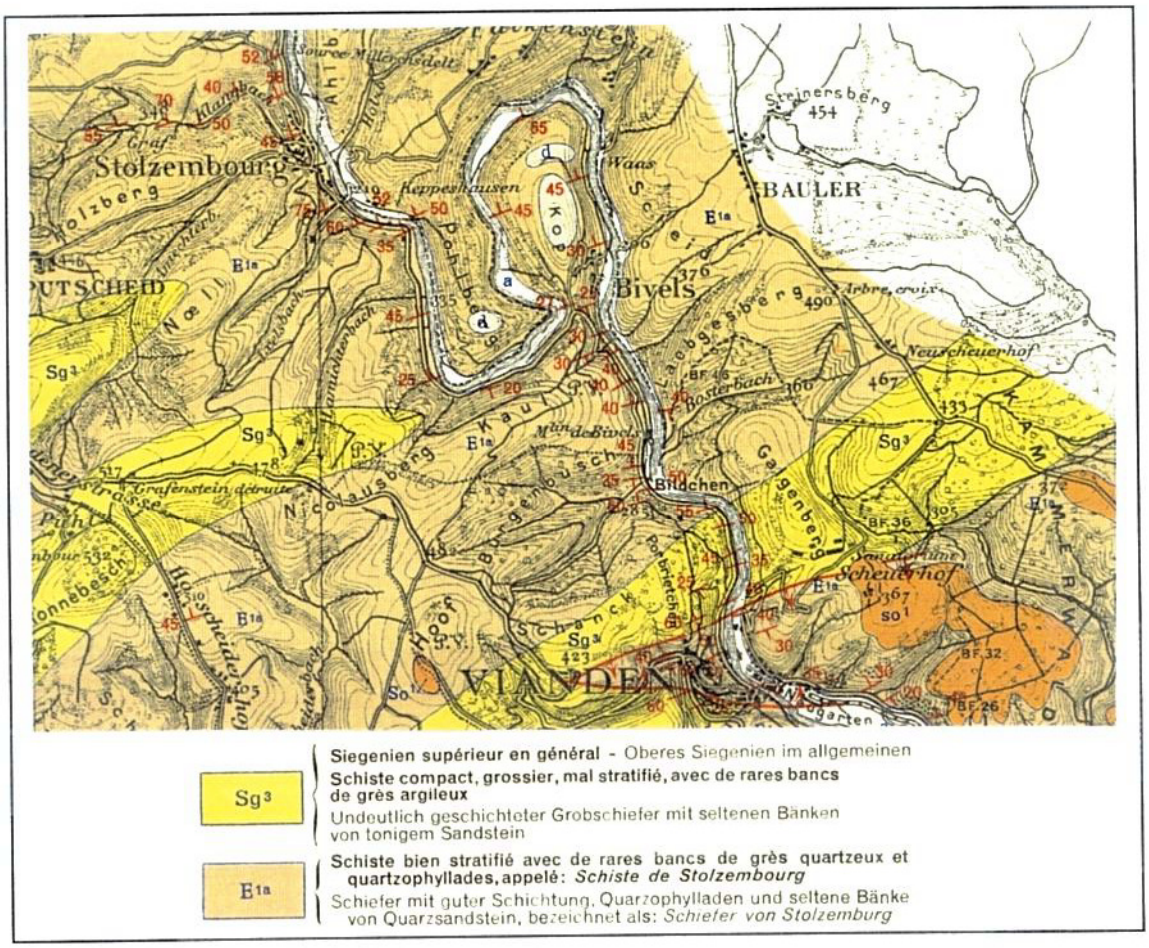


Abb. 5.1 Zur Geologie der Region Vianden*

* Entnommen der Carte géologique du Luxembourg, Feuille No. 8 Wiltz 1:50000 mit freundlicher Genehmigung des Pont et Chaussees Service Géologique

5.1 Geologische Untergrundverhältnisse im Bereich Oberbecken/Staumauer

Anhand von Bohrungen am Oberbecken wurde festgestellt, daß das Gestein bis zu einer Tiefe von 4 m stark aufgelockert, verwittert ist. Ab 7 m Tiefe ist das Gebirge kohärent und die meisten aus tektonischer Druckverformung gebildeten Klüfte sind geschlossen.

Die Beckensohle befand sich nach dem Aushub im stark komprimierten Schiefer, wobei allerdings Klüfte freigelegt wurden, die sich bis zu Gangspalten erweitert hatten. Die Mächtigkeit dieser Gänge variierte zwischen einigen cm bis zu 4 m. Einige Gangspalten, deren Streichen im wesentlichen zwischen 140° und 170° schwankte, konnten bis zu 150 m verfolgt werden. Neben diesen Gebirgs-Unstetigkeitsstellen konnten beim Ausbau des Oberbeckens keine trennenden tektonischen Störungen (Verwerfungen, Überschiebungen) festgestellt werden.

Die Staumauer liegt oberhalb von Vianden in den oberen Siegenerschichten, die aus einem schwach sandigen Tonschiefer bestehen. Es wurden Wasserabpreßversuche bei einem Druck von 3 kg/cm² durchgeführt, die zeigten, daß schon in geringer Tiefe die Klüfte größtenteils geschlossen waren. Auch in vier vorhandenen Verwerfungszonen, die man aufgrund von Bohrungen entdeckte, war die Wasseraufnahme im allgemeinen äußerst gering. In allen Verwerfungen, die in der Baugrube aufgeschlossen waren, wurde das Gestein so tief wie möglich ausgehoben und durch Beton ersetzt. Die Schieferungsflächen streichen mit 65° und fallen mit 80-85° nach Süden ein.

5.2 Deformationen des Untergrundes durch Auflasteffekte

Ob die Deformationen des Untergrundes als Folge von Auflastvariationen mit Hilfe von Modellen beschrieben werden können, hängt unter anderem davon ab, ob das Bewegungsgeschehen in seiner Komplexität beschrieben werden kann und inwieweit es gelingt, die physikalischen Eigenschaften des Untergrundes zu erfassen. Dieser befindet sich ohne den Pumpbetrieb in einer stabilen Gleichgewichtslage. Sie wird durch die wechselnden Wassermassen gestört und erzeugt entweder eine vorübergehende elastische Verformung und/oder eine dauernde plastische Verformung, wobei eine gewisse Stabilität/Verfestigung durch die lange Betriebsdauer des Kraftwerkes mit den häufigen Lastwechseln eingetreten ist. Es kommt zu viscoelastischen Prozessen, die sich deutlich in den Registrierungen von Neigungssignalen bemerkbar machen, da gleichen Wasserständen zugeordnete Neigungssignale (mechanische und elektronische Drift des Meßsystems ausgeschlossen) sich je nach Verlauf der Wasserstandsvariationen mehr oder weniger unterscheiden (Hysterese).

Bei Felsgestein wird das elastische Verhalten von zahlreichen Faktoren beeinflußt. Als wichtigste seien die chemische, petrographische Zusammensetzung, die Kluft-, Schichtungs- und Schieferungsanisotropie, die Gefügeeigenschaften sowie der Feuchtigkeitsgehalt genannt /36/. Diese komplexen Einflüsse haben zur Folge, daß die Elastizitätsmodule - als einige von mehreren die Festigkeit des Gesteins beschreibenden Größen - stark streuen und in der Regel nur am Objekt selbst ermittelt werden können.

Zur Bestimmung des Druck-Verformungsverhaltens des Gebirges wurden beim Ausbau des Kavernenkraftwerks mit der TIWAG-Presse sowie zur Berechnung der Stahlpanzerung der Druckstollenauskleidung beim Bau der X. Maschine mit einer Bohrlochverformungssonde mehrere Versuche gefahren, aus deren Zeit-Verformungsverhalten auch die Elastizitätsmodule abgeleitet wurden /10,49/. Dabei bestätigte es sich auch, daß für die Verformbarkeit des Gebirges dessen Schieferung von ausschlaggebender Bedeutung ist.

In Schieferungsrichtung traten die kleinsten und senkrecht dazu die größten Verformungen auf. Die E-Module wurden zu $70 * 10^3 - 190 * 10^3$ kg/cm² bestimmt.

Kräfte, die auf einen Körper einwirken, können in zweierlei Arten unterteilt werden. Zum einen Massen- oder Volumenkräfte, die in den einzelnen Volumenelementen zentral angreifen, wozu die inneren und äußeren Gravitationskräfte und die Trägheitskräfte zählen. Ferner wirken innere Oberflächenkräfte an den Oberflächenelementen der Volumenelemente und äußere Oberflächenkräfte an den Elementen der Körperoberflächen /21,23/.

Die Feldgröße der Oberflächenkräfte ist der **Cauchysche Spannungstensor** σ_{ij}, mit dem sich die an einem Oberflächenelement df eines Volumenelementes dv mit dem Normalenvektor n_i angreifende **Spannung** zu

$$s_i := Kraft / df = \sigma_{ij} n_j$$

ergibt.

Hieraus folgt für die **Druck- oder Normalspannung** senkrecht df

$$s_{i.}^{N} := s_{j.}n_{j.}n_{i.} = \sigma_{jk.}n_{j.}n_{k.}n_{i.}$$

und für die **Schub- oder Tangentialspannung** parallel df

$$s_{i.}^{T} = s_{j.}(\delta_{ij.}-n_{i.}n_{j.}) = \sigma_{jk.}n_{k.}(\delta_{ij.}-n_{i.}n_{j.}) \ .$$

Wechselnde äußere Druckspannungen werden an den Oberflächen der Ober- und Unterbecken durch Verlagerung von Wassermassen infolge des Pumpbetriebes erzeugt. Diese induzieren innere Spannungen und damit Deformationen (Verzerrungen) des Untergrundes. Feldgröße der Deformationen ist der **Deformationstensor**, der durch die Gradienten der **kartesischen Verschiebungsvektoren** $z_{i.}$ des betrachteten Punktfeldes des Untergrundes in linearer Form durch

$$\epsilon_{ij.} = (\partial z_{i.} / \partial x_{j.} + \partial z_{j.} / \partial x_{i.})/2$$

approximiert wird; $x_{i.}$ sind die kartesischen Koordinaten des Punktfeldes. Der Zusammenhang zwischen Spannungen und Deformationen kann hier in einer ersten guten Näherung durch das geometrisch und physikalisch lineare **Hookesche Gesetz**

$$\sigma_{ij.} = \Lambda_{ijkl.}\epsilon_{kl.}$$

beschrieben werden. Mit Einführung des **Elastizitätsmoduls** E und der **Querkontraktionskonstanten** ν als Elastizitätsparameter lautet das Hookesche Gesetz:

$$\sigma_{ij.} = [\epsilon_{ij.} + (\nu/(1-2\nu))\epsilon_{kk.}\delta_{ij.}] \ E /(1+\nu),$$

$$\epsilon_{ij.} = [\sigma_{ij.} - (\nu/(1+\nu))\sigma_{kk.}\delta_{ij.}] \ (1+\nu)/E \ .$$

Die **lineare Dehnung** q := δl/l in Richtung des Einheitsvektors $r_{i.}$ ergibt sich zu

$$q = \epsilon_{ij.}r_{i.}r_{j.} \ ,$$

beispielsweise in Richtung der Achse 1:

$$q_1 = \epsilon_{11.} = [\sigma_{11.} - (\nu/(1+\nu))\sigma_{kk.}] \ (1+\nu)/E \ .$$

Dieses Gesetz gilt jedoch nur für sehr kleine Deformationen und nur bis zu einer Proportionalitätsgrenze. Wird sie überschritten, treten höhere Potenzen der Spannungen auf. Unter der Voraussetzung, daß die Verzerrungen unterhalb der Elastizitätsgrenze des Untergrundes stattfinden, kann das Hookesche Gesetz als 1. Nährung für die Deformationsermittlung aus Auflasteffekten herangezogen werden.

Beim Streichen der Schichten von ca. 60° treten auch Tangentialspannungen auf, die jedoch im weiteren keine Berücksichtigung finden, weil sie zu unbedeutend im Verhältnis zu den auftretenden Normalspannungen sind. Beide Berichte über die felsmechanischen Untersuchungen /10,49/ befassen sich ausschließlich mit der Ermittlung von Druckspannungen.

Zur Berechnung der Deformation muß man Hypothesen eingehen über die Spannungsverteilung innerhalb des Untergrundes, wobei die DIN-Normen 4017/4018/4019 Hinweise darüber geben, wie bei Flachgründungen mit geringer Gründungstiefe (Vergleichbarkeit mit der Oberbecken-Auflast wird unterstellt) vorzugehen ist. Hiernach kommt es zur Ausbildung von Isobaren (Verbindung von Punkten mit gleicher Spannung), deren Formen - sogenannte Druckzwiebeln - sehr stark von der Ausdehnung eines Fundamentes abhängig sind /41/. Die Grenztiefe für die Einwirkung der Spannungen ist bei Plattengründungen mit geringer Sohlspannung kleiner als deren Breite. Auf die Beobachtungsstation des Oberbeckens bezogen (Wasserbreite ca. 100 m) bestimmt sich hiernach die Grenztiefe des Druckbereichs auf ca. 50 m.

Die Normalspannung am Oberbecken kann bei Vollstau bis zu 1,63 kp/cm² betragen. Über den gesamten Druckzonenbereich gesehen, ergibt sich etwa ein mittlerer Spannungsbetrag von ca. 0,6 * 1,63 kp/cm².

Unter Berücksichtigung dieser Annahmen ($l = 50$ m; $E = 70 - 190 * 10^3$ kg/cm²) zeigt Abb. 5.2 die Auflast-Deformationen am Oberbecken in Abhängigkeit von der Wasserhöhe. Diese Berechnungen sind vom Grundsatz her eher konservativ angelegt, da man davon ausgehen kann, daß durch den häufigen Lastwechsel nicht nur Inhomogenitäten des Untergrundes geschlossen/verdichtet wurden, sondern auch durch die ständigen Wiederbelastungsvorgänge die Elastizitätsmodule größer als bei der Erstbelastung anzunehmen sind. Immerhin kommt es bei maximalen Wasserstandsänderungen im Bereich der Meßstationen zu vertikalen Auflastdeformationen von < 0,7 mm.

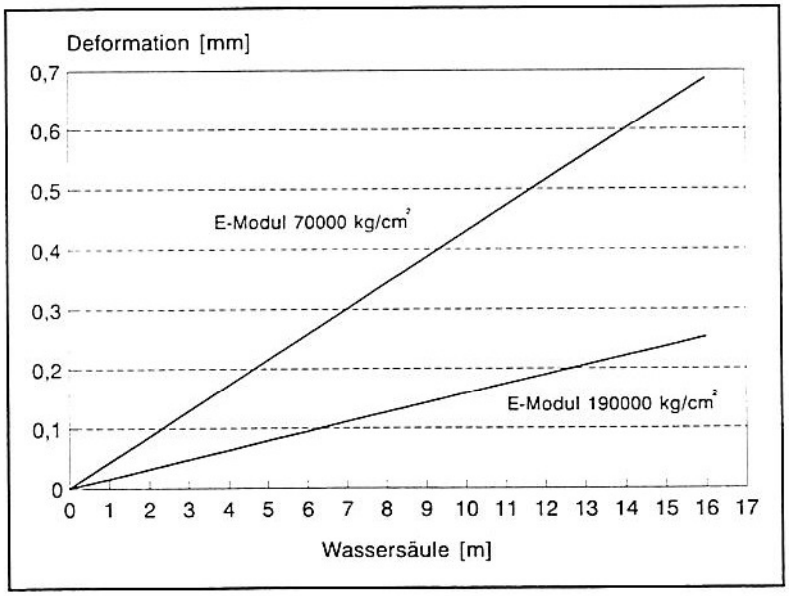


Abb. 5.2 Auflast-Deformationen am Oberbecken II

Für die diskreten, geodätischen Überwachungsmessungen auf dem Böschungsdamm, z.B. durch das Nivellement, bedeutet dies variable Punkthöhen, wenn auch in abgeschwächter Form durch die Randlage der vermarkten Objektpunkte. Als Konsequenz ist jedoch - prinzipiell - dafür zu sorgen, daß eine Meßkampagne unter möglichst gleichen Meßbedingungen (z.B. gleiche Wasserstandshöhen bei verschiedenen Epochen) stattfinden kann; zumal dann, wenn es um hochpräzise Messungen geht.

Nach diesen eher allgemeinen Darstellungen technischer und bodenmechanischer Gegebenheiten und Zusammenhänge, die im Rahmen der Interpretation lastinduzierter Neigungsprozesse von Bedeutung sind, wollen wir uns im weiteren dem eigentlichen Ziel dieser Arbeit, der Untersuchung von Gravitationseffekten in vermessungstechnisch relevanten Kraftwerksbereichen zuwenden.

6. Zur Gravitation

6.1 Vorbemerkung

Im Problemzusammenhang werden nach einigen allgemeinen Aussagen über die Gravitation die relevanten Gleichungen zur Berechnung gravitativer Beschleunigungen nachgewiesen sowie die Grenzen der derzeit erreichbaren Berechnungsgenauigkeit angegeben.

6.2 Die Gravitation als eine der vier Grundkräfte

Alle Grundbausteine im Universum, aus denen sich Materie aufbaut, sind vier verschiedenen Wechselwirkungen - oder Grundkräften - ausgesetzt, wobei als erste Grundkraft der Natur die Gravitation entdeckt wurde, die mathematisch durch NEWTONS Gravitationstheorie 1687 formuliert wurde. Im 19. Jahrhundert wurde durch MAXWELL die Theorie des Elektromagnetismus beschrieben, die die unterschiedlichen Erscheinungen von Elektrizität und Magnetismus zusammenfaßt und zum Begriff der zweiten Kraft führt. Zu Beginn des 20. Jahrhundert entdeckte man zwei weitere Grundkräfte. Zum einen die "schwache Wechselwirkung", die im Zusammenhang mit dem Beta-Zerfall auftritt sowie die "starke Wechselwirkung", eine Kraft, die Quarks und damit Protonen und Neutronen im Atomkern zusammenbindet. Da diese beiden Kräfte nur innerhalb des Kerns wirksam sind, besitzen sie nur eine sehr kurze Reichweite. Setzt man den Wert der starken Wechselwirkungen zwischen zwei Protonen gleich 1, so ist das Verhältnis zwischen den vier Grundkräften der Tabelle 6.1 zu entnehmen /3,44/.

	Stärke	Reichweite
Starke Wechselwirkung	10^{0}	Nukleonenabstand
Elektromagnetische Kraft	10^{-2}	∞
Schwache Wechselwirkung	10^{-5}	Nukleonenabstand
Gravitationskraft	10^{-39}	∞

Tab. 6.1 Verhältnis zwischen den Grundkräften

Trotz der ungleichen Eigenschaften der vier Grundkräfte bemüht man sich, sie in einem einheitlichen mathematisch-physikalischen Modell zusammenzufassen. Bisher ist dies lediglich für die schwache Wechselwirkung und die elektromagnetische Kraft gelungen, WEINBERG /44/.

6.3 Zum Wesen der Gravitation

Die Gravitation ist eine wechselseitige Anziehungskraft, die beliebige Körper auf Grund ihrer Massen, unabhängig von ihrer chemischen Zusammensetzung, elektrischer Ladung u.a. aufeinander ausüben. Zur Zeit gibt es sehr viele alternative Gravitationstheorien, wobei die wohl bekanntesten durch NEWTON 1687 und EINSTEIN 1907 begründet wurden /44,53/.

NEWTON leitete das $1/r^2$-Gesetz für die Kraft der Gravitation aus Beobachtungen der Planetenbewegungen ab. Dabei ging er vor allem von einer absoluten Zeit aus, die vom räumlichen Bezugssystem unabhängig ist. Die **Newtonsche Feldgleichung** für das Gravitationspotential V ist die Poissonsche Differentialgleichung,

$$\Delta V := \partial_i \partial_i V = 4\pi G\theta, \quad \theta = \textit{Massendichte} ,$$

deren Lösung das Gravitationsgesetz ist. Ein wesentliches Merkmal der EINSTEINschen Relativitätstheorie ist die Aufgabe des absoluten Zeitbegriffs zugunsten einer relativen Zeit, die vom räumlichen Bezugssystem abhängt und mit diesem zusammen eine sogenannte Raumzeit bildet. In dieser **Einsteinschen Kinematik** auf der Grundlage der vierdimensionalen Pseudo-Riemannschen Geometrie entsprechen Gravitationskräfte lokalen Krümmungen der Raumzeit. An die Stelle der Newtonschen Feldgleichungen treten die **Einsteinschen Feldgleichungen**, in denen die Massendichte durch den **Energie-Impulstensor** als "Gravitationsquelle" abgelöst wird. Die Lösungen der Einsteinschen Feldgleichungen führen allgemein auf Wellengleichungen für den vierdimensionalen Maßtensor $g_{\alpha\beta}$, dem formalen Äquivalent des Newtonschen Gravitationspotentials V /23,47,53,54/.

Theorien werden im allgemeinen durch Experimente/Beobachtungen verifiziert, modifiziert oder verworfen, wobei vielfach die Genauigkeit der Beobachtungsdaten ein entscheidendes Auswahlkriterium darstellt. So konnte die Newtonsche Theorie bei Vorlage von genaueren Beobachtungen über die Bahnabweichungen beim Planeten Merkur (der sehr nahe an der massenreichen Sonne verläuft) nur in 1. Näherung angesetzt werden. Die Abweichungen in der Planetenbahn fanden erst durch EINSTEINS Theorie eine eindeutige Erklärung. Auch Experimente auf der Erde selbst stützten die allgemeine Relativitätstheorie. So wurden die Anzeigen schnell bewegter Cäsium-Atomuhren (in einem Flugzeug) mit denen erdfester Referenzuhren verglichen; die beobachtete Zeitdilatation sowie die gravitative Rotverschiebung als Folge der Bewegung in Bereichen eines verringerten Gravitationsfelds der Erde (während eines Fluges) stimmten gut mit den nach der Theorie berechneten Werten überein.

Zur Zeit wird aktuell der Frage nachgegangen, ob sich die nach der Einsteinschen Gravitationstheorie existierenden Gravitationswellen nachweisen lassen. Die Kleinheit dieser Amplituden machte einen direkten Nachweis bisher unmöglich. Ein indirekter Nachweis ist allerdings über die Beobachtung des 1974 entdeckten Binärpulsars PSR 1913+16, einem Doppelsternsystem mit sehr starken Gravitationsfeldern, gelungen. Als Energiequelle für die Gravitationsstrahlung kommt die Bahnbewegung in Frage. Da Gravitationswellen dem System Energie entziehen und somit die Bahnenergie langsam abnehmen muß, bedeutet dies langfristig eine Verkürzung der Umlaufperiode, die man bei diesem Doppelsternsystem nachgewiesen hat /44,47,54/.

Die Einsteinsche Theorie hat bisher alle Experimente nachweislich bestanden. Für die meisten technischen Anforderungen (so auch bei den relativ schwachen Gravitationseffekten in Vianden) bietet die klassische Newtonsche Mechanik aber immer noch (außerhalb extrem kompakter Körper oder sehr schnell bewegter Materie) ein hinreichend genaues Modell.

6.4 Das Newtonsche Gravitationsgesetz

Gemäß dem **Newtonschen Gravitationsgesetz** übt eine Punktmasse m_Q im Quellpunkt Q auf eine Punktmasse m_A in einem Aufpunkt A gegenseitig eine Kraft in Richtung A-Q aus, für deren Betrag

$$F = Gm_A m_Q / r^2 \ , \quad G = \textit{Gravitationskonstante} \ , \quad r = \overline{QA}$$

gilt. Mit den Orts- und Kraftvektoren

$$x_{i.P} = (x_P \ , \ y_P \ , \ z_P) \ , \quad P \in \{Q,A\} \ , \quad r_{i.} = x_{i.Q} - x_{i.A} \ , \quad r = |r_{i.}| \ ,$$

$$F_{i.A} = (F_x \ , \ F_y \ , \ F_z)_A$$

lautet das Gravitationsgesetz vollständig

$$F_{i.A} = F \, r_{i.} / r = Gm_A m_Q \, r_{i.} / r^3 = Gm_A g_{i.Q} \, (A) \ ,$$

$$g_{i.Q}(A) = Gm_Q r_{i.} / r^3 = \textit{Gravitationsfeld von } m_Q \textit{ in } A \ .$$

Die Gravitationsbeschleunigung $g_{i.Q}$ ist ein Gravitationsfeld mit dem Gravitationspotential

$$V_A = m_Q / r \ .$$

Das Gravitationsfeld einer innerhalb eines Volumens ν ausgedehnten Quellmassen-Verteilung ergibt sich für beliebige Aufpunkte zu (die Indizes A, Q werden im folgenden fortgelassen)

$$g_{i.} = (g_x \ , \ g_y \ , \ g_z) = \partial V / \partial x_{i.}$$

$$g_{i.} = G \int_\nu (r_{i.} / r^3) \ dm,$$

$$V = G \int_\nu (1/r) \ dm$$

mit den Massenelementen

$$m_Q =: dm = \theta d\nu, \quad \theta = \textit{Massen-Dichte des Quellelementes.}$$

6.5 Die Berechnung der Gravitationswirkung ausgedehnter Körper (Kugel, Kreisscheibe, Quader)

Das Newtonsche Gravitationsgesetz in der in Kapitel 6.4 angegebenen Form gilt nicht nur für Punktmassen, sondern auch für Kugeln zentralsymmetrischer Dichteverteilung, wenn r den Abstand der Schwerpunkte bezeichnet.

$$F = G \frac{\iiint_{V_1} dm \iiint_{V_2} dm}{r^2} = G \frac{M_1 M_2}{r^2}$$

$$g = G \frac{M_2}{r^2}$$

Für zylindrische Körper homogener Dichte erhält man die gravitative Beschleunigung in Aufpunkten auf der Zylinderachse entsprechend der Beziehung /6/:

$$g_z = G\,\theta\,2\pi[\sqrt{z_2^2+r_1^2}-\sqrt{z_2^2+r_2^2}-\sqrt{z_1^2+r_1^2}+\sqrt{z_1^2+r_2^2}],\quad g_x = g_y = 0$$

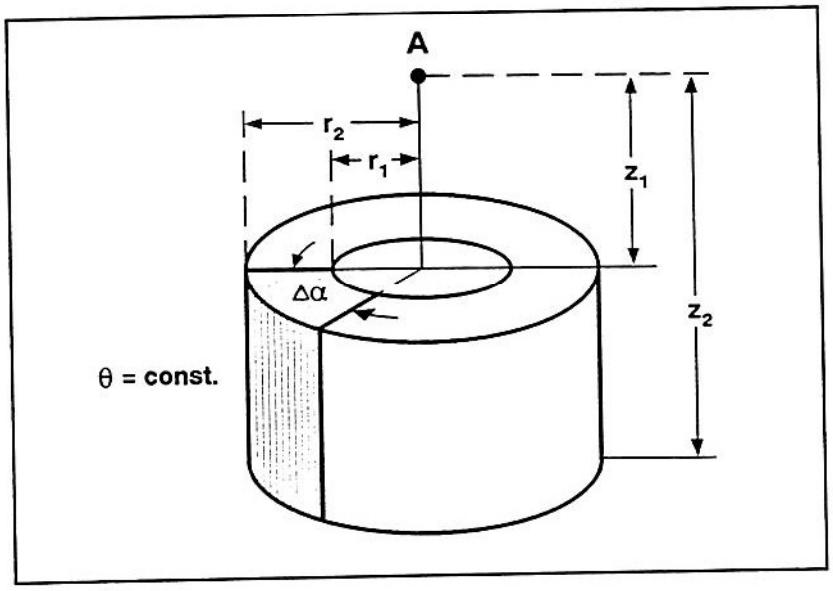


Abb. 6.1 Zur Gravitation vertikaler Säulen

Wenn es für die Berechnung der gravitativen Beschleunigungen eines räumlich ausgedehnten Körpers erforderlich ist, aufgrund dessen Geometrie oder der Dichteverteilung das Gesamtvolumen in ein System lückenfrei aneinanderstoßender Teilkörper zu zerlegen, ermöglicht die Verwendung von Quaderelementen ein hohes Maß an Approximation und Flexibilität.

Für das Potential eines Quaders in einem Aufpunkt A (Abb. 6.2) gilt bei Parallelität der Koordinatenachsen mit zugeordneten Quaderkanten /31/:

$$V = G\,\theta \int_{x_1}^{x_2} dx \int_{y_1}^{y_2} dy \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{\sqrt{x^2+y^2+z^2}}$$

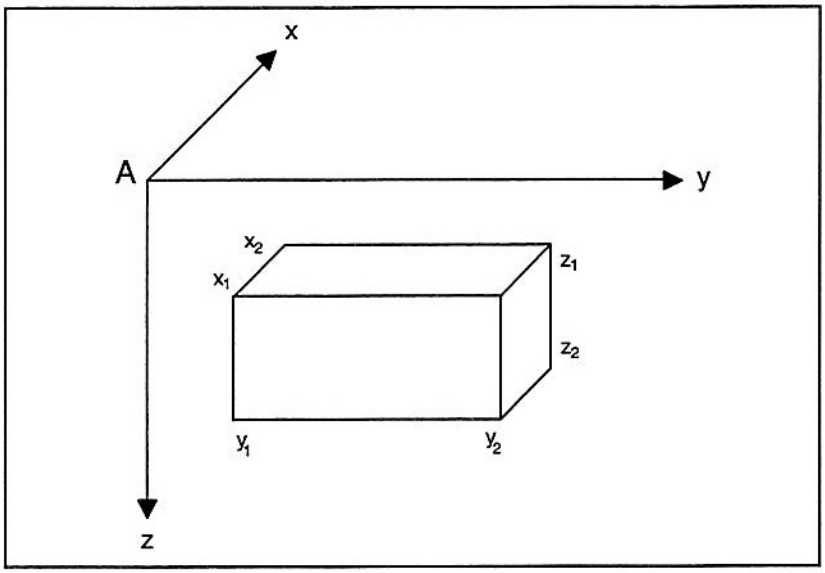


Abb. 6.2 Zur Gravitation von Quadern

Man erhält als Ableitung δg_x (entsprechend der gravitativen Beschleunigung in X-Richtung):

$$\delta g_x = G\,\theta \sum_{i,j,k=1}^{2} [(-1)^{(i+j+k+1)}(z_i \ln(y_j+\sqrt{x_i^2+y_j^2+z_k^2})$$

$$+y_j \ln(z_i+\sqrt{x_i^2+y_j^2+z_k^2})$$

$$-x_k \arctan(\frac{z_i\, y_j}{x_k \sqrt{x_i^2+y_j^2+z_k^2}}))]$$

Durch zyklische Vertauschung gewinnt man δg_y, δg_z.

Nachteilig bei der Prismenzerlegung ist der erhöhte Rechenaufwand, der je nach Problemstellung auch bei Einsatz moderner Rechenanlagen durchaus noch von Bedeutung sein kann.

6.6 Zur Genauigkeit der Berechnung von Gravitationseffekten

Sofern man nicht eine von der Lage des Aufpunktes unabhängige Lösung anstrebt, ist der erforderliche Grad der Approximation eines gravitativ wirksamen Körpers durch Teilkörper von dessen Entfernung zum Aufpunkt sowie der relativen Genauigkeit abhängig, mit der die gravitative Beschleunigung zu berechnen ist.

6.6.1 Der Einfluß der Entfernung prismatischer Körper

Für Zwecke der Abschätzung des möglichen Aufwandes bei der geometrischen Modellierung eines gravitativ wirksamen Körpers im Nahbereich eines Aufpunktes wurde die gravitative Beschleunigung eines Würfels mit der homogenen Dichte 1 g/cm³ als Funktion der Kantenlänge s und der Entfernung e des Schwerpunktes berechnet (Abb. 6.3):

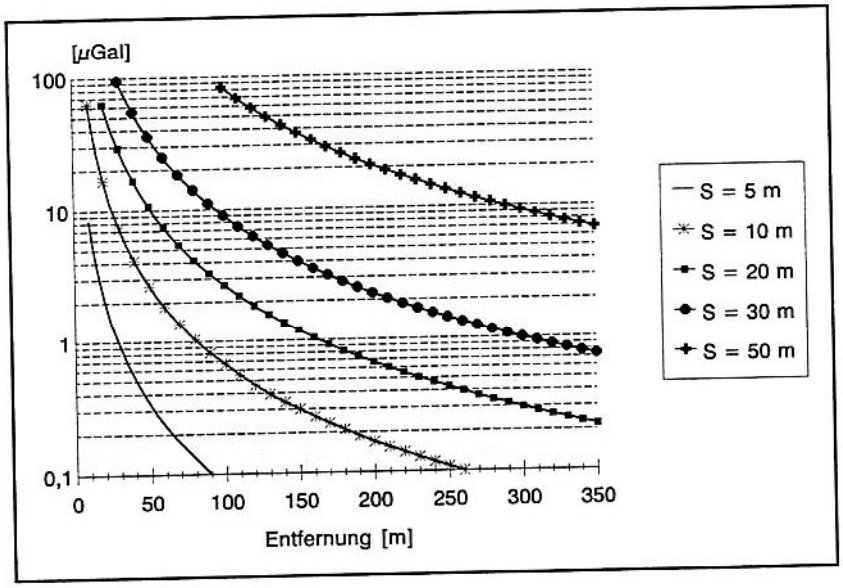


Abb. 6.3 Entfernungsabhängigkeit der gravitativen Beschleunigung eines Würfels mit der Kantenlänge s

Aus der Graphik kann entnommen werden, welche Massendefizite oder -überschüsse als Folge geometrischer Modellierungsfehler bei unterschiedlichen Genauigkeitsschranken zulässig sind.
Beispiel: Bei einer geforderten Genauigkeit der berechneten gravitativen Beschleunigung von 1 μGal kann die Masse eines Würfels von 10 m Kantenlänge (Dichte = 1 g/cm³; Masse = 1000 t) ab einer Entfernung von 90 m vernachlässigt werden. Jedoch ist bei der Modellierung eines Körpers durch eine Vielzahl von Teilkörpern auf eine mögliche Fehlerakkumulation zu achten.

6.6.2 Die Approximation prismatischer Körper durch Punktmassen

Der Entfernungsabhängigkeit gravitativer Beschleunigungen nach Abb. 6.3 ist zu entnehmen, daß ab einer gewissen Entfernung - geometrieabhängig - Unschärfen durch eine nicht exakte Approximation durch Teilkörper durchaus hinzunehmen sind (in Abhängigkeit vorgegebener Genauigkeitswerte). Zu einer weiteren Reduktion des Aufwandes (hier: Rechenzeit) kann es zudem kommen, wenn ein einfacherer Algorithmus

zur Berechnung der Gravitationseffekte angesetzt werden kann. Es wird daher untersucht, welche Fehler bei Würfeln variabler Kantenlänge s in Abhängigkeit von der Schwerpunktentfernung e zum Aufpunkt auftreten, wenn deren Masse als im Schwerpunkt konzentriert angenommen wird (Abb. 6.4).

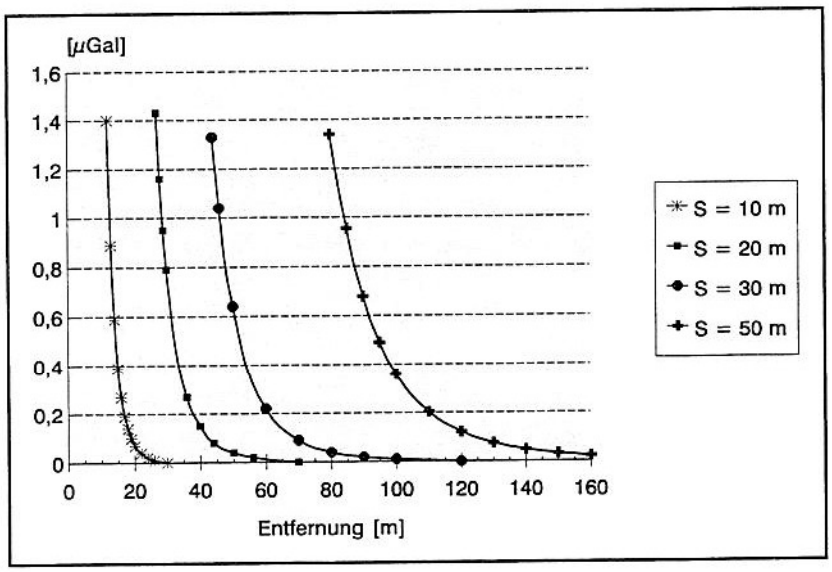


Abb. 6.4 Die Differenz der gravitativen Beschleunigungen eines Würfelkörpers (Dichte = 1 g/cm³) und einer zugeordneten Punktmasse.

Es ist erkennbar, daß - abhängig von Körpervolumen und Masse - bereits bei relativ kurzen Distanzen die Punktapproximation durchaus als eine Alternative zur Vereinfachung der geometrisch-physikalischen Modellbildung angesehen werden kann. Nimmt man wiederum (in Anlehnung an das Beispiel in Kap. 6.6.1) eine Fehlergrenze von 1 µGal an, so kann der Würfelkörper von 10 m Kantenlänge (entsprechend einer Masse von 1000 t) bereits ab einer Entfernung von ~ 13 m durch eine Punktmasse ersetzt werden.

6.7 Die Bestimmung der Gravitationskonstanten G

Die Gültigkeit des Gravitationsgesetzes bildet die Grundlage für die Berechnung von Massenanziehungen. Neben der Genauigkeit der Massen- und Entfernungsparameter bestimmt die Genauigkeit der Gravitationskonstanten G das Berechnungsergebnis. G ist eine Proportionalitätskonstante, deren Betrag vom zugrundeliegenden System der Maßeinheiten abhängig ist. Auf weitergehende Theorien hinsichtlich einer Material- oder Entfernungsabhängigkeit in Zusammenhang mit der Existenz einer fünften Kraft wird hier lediglich hingewiesen /18/.

$$V = \frac{G\,m}{r}\,[1+\alpha\, e^{-\frac{r}{\delta}}]$$

G = Gravitationskonstante jenseits des Bereiches der 5. Kraft
α = Amplitudenfaktor
δ = Abstandsparameter

Zur Bestimmung der Gravitationskonstanten sowie zur Untersuchung einer möglichen Entfernungsabhängigkeit sind eine Vielzahl von Schwerkraftexperimenten durchgeführt worden, die man in zwei Gruppen einteilen kann:

- Laborexperimente mit Hilfe von Waagen und Drehwaagen
- Messungen der Gravitationswirkungen **großer** Massen (z.B. bieten Massenveränderungen in einem Pumpspeicherbecken wegen ihrer Größe potentiell die Möglichkeit der Untersuchung von G)

6.7.1 Labormessungen zur Bestimmung von G

Bis 1890 sind Wägemessungen u.a. von RICHARZ und KRIEGER-MENZEL durchgeführt worden, wobei in verschiedenen Niveaus Bleimassen (0.67 kg) ausgewogen wurden, einmal mit und einmal ohne einer zwischen den Waagschalen liegenden großen Bleimasse (1000000 kg). Als wesentliche Störeffekte traten Inhomogenitäten der Dichte der Massensätze neben den Einflüssen durch die Schneidenlagerung der Waagebalken sowie unterschiedlichen Temperaturgradienten und Bodenunruhen auf, so daß die relativen Unsicherheiten der Messungen bei 10^{-2} bis 10^{-3} lagen.

Eine Genauigkeitssteigerung zur Bestimmung von G wurde mit Hilfe von Torsionswaagen erzielt. Ein Waagebalken wird an einem Torsionsfaden aufgehängt, der in Richtung der Schwerkraft weist. Bringt man äußere Reaktionsmassen in die Nähe des Waagebalkens, so kommt es zur Torsion des Fadens, deren Auslenkwinkel die Meßgröße darstellt. Diese Art von Schwerkraftexperimenten wurde von CAVENDISH (1798) über EÖTVÖS (1896) bis LUTHER und TOWER (1982) immer mehr verfeinert und waren bisher die erfolgreichsten Laborexperimente, so daß in der letzten Ausgabe (1986) der erschienenen Sammlung über die fundamentalen, physikalischen Konstanten der CODATA /12,13/ der Wert:

$$G = 6.67259 \pm 0.00043 * 10^{-11} m^3 s^{-2} kg^{-1}$$

übernommen wurde.

Es wird deutlich, daß G als eine der am wenigsten genau bestimmten physikalischen Konstanten einzustufen ist. Die Messung der Gravitationskonstanten erfordert monatelange Meßreihen höchster Sorgfalt. Meßtechnische Einflußfaktoren sind unter anderem zeitliche Änderungen der Torsionsmomente bei Drehwaagenbeobachtungen, Temperaturvariationen, Dichteinhomogenitäten in den verwendeten Probekörpern, magnetische und elektrische Effekte, Mikroseismik sowie zeitliche Änderungen von Massen im Einflußbereich der Meßanlage.

In die Kategorie der Labormessungen gehören auch geplante Experimente an Bord künstlicher Satelliten.

6.7.2 Große Massen-Experimente zur Bestimmung von G

Diese Schwerkraftexperimente wurden bisher in Schachtanlagen, in Bohrlöchern, im Grönlandeis, auf bis zu 600 m hohen Türmen oder der Nachbarschaft von großen, bewegten Wassermassen (Schleusen, Docks, PSW) mit Gravimetern durchgeführt /34,35/. Es gibt einige Hinweise auf eine mögliche Entfernungsabhängigkeit von G, die bisher jedoch nicht signifikant nachgewiesen sind.

Die Unsicherheiten bei der Bestimmung von G sind größer als in den Laborexperimenten, da in Bohrlöchern und Schachtanlagen die Experimente durch Inhomogenitäten des Untergrundes (unzureichende Dichtebestimmung der Erdkruste) erschwert werden. Eine Alternative besteht prinzipiell in Gravimetermessungen in der Nähe von großen, definierten Verlagerungen von Wassermassen, wie sie z.B. bei Pumpspeicherkraftwerken auftreten. Jedoch treten hier störende Auflasteffekte auf, die sich den Gravitationskräften überlagern.

Es bleibt festzustellen, daß G derzeit lediglich mit einer relativen Genauigkeit von ~ 10^{-4} bestimmt werden kann. Dies ist entsprechend die prinzipielle Genauigkeitsschranke für die Berechnung von Gravitationseffekten.

7. Gravitationseffekte im Bereich der Oberbecken

Für die Berechnungen war es notwendig, umfangreiche Datenbestände aufzubauen, um mit ihnen die entsprechenden Auswertungen durchführen zu können, wobei diese teilweise erheblichen Speicherbedarf (bis zu 2 MByte pro Auswertung) in Anspruch nahmen. Alle relevanten Informationen sind in Datenbanken dokumentiert und können für weiterführende Anwendungen zur Verfügung gestellt werden. Aus Gründen der klareren Darstellung wurde in dieser Arbeit Wert darauf gelegt, die wichtigsten Ergebnisse über Graphiken zu präsentieren.

7.1 Vorbemerkungen

Die Berechnung der Gravitationseffekte setzt die Kenntnis sowohl geometrischer als auch physikalischer Größen (Dichte des Wassers) voraus, wobei diese jedoch nicht fehlerfrei ermittelt werden können. Hier stellt sich die Frage nach der **erforderlichen** Genauigkeit der Eingangsparameter, wobei - wie dargelegt - durch die Gravitationskonstante G eine absolute Genauigkeitsschranke mit 10^{-4} vorgegeben ist. Bezieht man dies auf den maximalen Absolutbetrag (Abb. 7.7, Kapitel 7.5) der Vertikalkomponenten unterhalb des Oberbeckens (bei den Horizontalkomponenten treten teilweise Kompensationseffekte auf), so bedeutet dies, daß der obere Grenzwert für die **mögliche** relative Genauigkeit der zu berechnenden vertikalen Gravitationseffekte mit ~ ± 0,06 µGal anzusetzen ist. Im Hinblick auf die in Kapitel 2 formulierten Aufgabenstellungen, insbesondere jedoch für die Zwecke der Gravimetereichung (siehe Kapitel 12), ist die **höchstens** erforderliche Genauigkeit mit ~ ± 0,3 µGal anzusetzen (1 ‰ des gravimetrischen Gezeiteneffektes). Daraus folgt, daß erstens die Genauigkeit der Gravitationskonstanten zur Lösung der gestellten Aufgaben ausreicht und zweitens die Wirkungen von Fehlern der in die Berechnung der Gravitationseffekte eingehenden geometrischen und physikalischen Parameter einen Grenzwert von ~ ± 0,3 µGal nicht überschreiten sollten.

7.2 Das Berechnungskonzept

Für die zur Berechnung von Gravitationseffekten benötigte finite Elementierung der Wassermassen der Oberbecken werden ausschließlich Quaderelemente benutzt. Elemente mit teilweise gekrümmten Oberflächen, wie sie sich an den Rändern der künstlichen Beckenbauwerke anbieten (siehe Abb. 3.3), führen zu unnötig aufwendigen Berechnungen. Die gekrümmten Beckenränder lassen sich durch eine entsprechend kleinflächige horizontale Rasterung von Quadern genau genug approximieren. Diese bieten den großen Vorteil relativ einfacher Berechnungen nach den Maderschen Formeln (siehe Kapitel 6.5) sowie einer leichten automatischen Bildung der Quaderraster. Auf Problemzonen bei der Quaderelementierung, wie zum Beispiel im Böschungsbereich, wird im Kapitel 7.4 eingegangen.

Desweiteren ist die Forderung hinsichtlich der Aufgabenstellung und Zielsetzung zu erfüllen, daß die Bildung der Rasterung in einer möglichst aufpunktunabhängigen Approximation des Wasserkörpers erfolgt. Nur so sind auch weitere Fragestellungen bei wechselnden Beobachtungsstationen mit nur einem Modell effizient zu bearbeiten.

Ferner wird an den Rechenalgorithmus zur Berechnung der Gravitationseffekte die Forderung gestellt, daß die Wasserstandshöhe (= Quaderhöhe) als Variable in den Auswerteprozeß eingeht.

7.3 Die Berechnung von Lotrichtungsänderungen

Sind in einem lokalen kartesischen Koordinatensystem mit der z-Achse in Nadirrichtung die horizontalen Änderungen der Gravitationsbeschleunigung

$$\delta g_{\alpha.} = (\delta g_x \, , \, \delta g_y)$$

berechnet, so ergeben sich die zugehörigen **Komponeten der lokalen Lotrichtungsänderungen** genau genug zu

$$\delta \beta_{\alpha.} = \delta g_{\alpha.} / g_o \; [rad], \; \alpha \in \{x,y\}.$$

Für die zu fordernde relative Genauigkeit von 10^{-3} kann in den Bereichen der Oberbecken und des Unterbeckens hinreichend genau g_o = konstant = 9,81 ms^{-2} angenommen werden. Für die im Kapitel 11 noch durchzuführenden Untersuchungen zu Variationen der Geometrie des Schwerefeldes sind neben den lokalen Lotrichtungsänderungen $\delta\beta_{\alpha.}$ noch die bezüglich der Lotfußpunkte in einer speziell auswählbaren **Bezugs-Äquipotentialfläche AF** relevant. Ist A ein beliebiger Aufpunkt mit dem Abstand h vom Lotfußpunkt F $\in$ AF, so erhält man für die **Komponenten der relativen Lotrichtungsänderungen** hinreichend genau

$$\beta_{\alpha.} = \int_F^A \delta \beta_{\alpha.} dh = (1/g_o) \int_F^A \delta g_{\alpha.} dh \; [rad], \; \alpha \in \{x,y\} \; .$$

Die Benutzung eines regionalen kartesischen Koordinatensystems mit der z-Achse in Nadirrichtung gilt $dh \approx -dz$.

7.4 Die Modellierung der Oberbeckengeometrie

Für die Topographie sowohl des Oberbeckens, als auch des Unterbeckens, liegt ein digitales Geländemodell (DGM), u.a. zur Berechnung von Schlammablagerungen, vor. Zur Modellierung der Beckengeometrie mit Hilfe der genannten Quaderelemente wurde dieses DGM zugrundegelegt.

7.4.1 Das Modellraster

Grundlage für die Modellierung der Beckengeometrie mit Hilfe von Quadern bildet jeweils ein horizontales, quadratisches Raster. Über den Rasterquadraten werden die vertikal ausgerichteten Quader aufgebaut. Ein für die Berechnung der Gravitationseffekte entwickeltes EDV-Programm ermöglicht sowohl eine stufenweise Variation der Quaderhöhen als auch eine beliebige Lageverschiebung des Aufpunktes unter Beibehaltung des gewählten Modellrasters und der zugeordneten Quaderkonfigurationen.

7.4.2 Problemzonen der Beckenmodellierung

Die Abb. 7.1 zeigt Problemzonen für die Modellierung der Beckengeometrie. Es sind neben den Böschungsbereichen die Topographie der Beckensohle mit Höhendifferenzen bis zu 2,8 m (Bereich A), die Topographie an den Einlaufbauwerken (Bereiche B) sowie die komplizierte Geometrie des Zwischenbauwerks im Damm zwischen den Becken I und II (Bereich C).

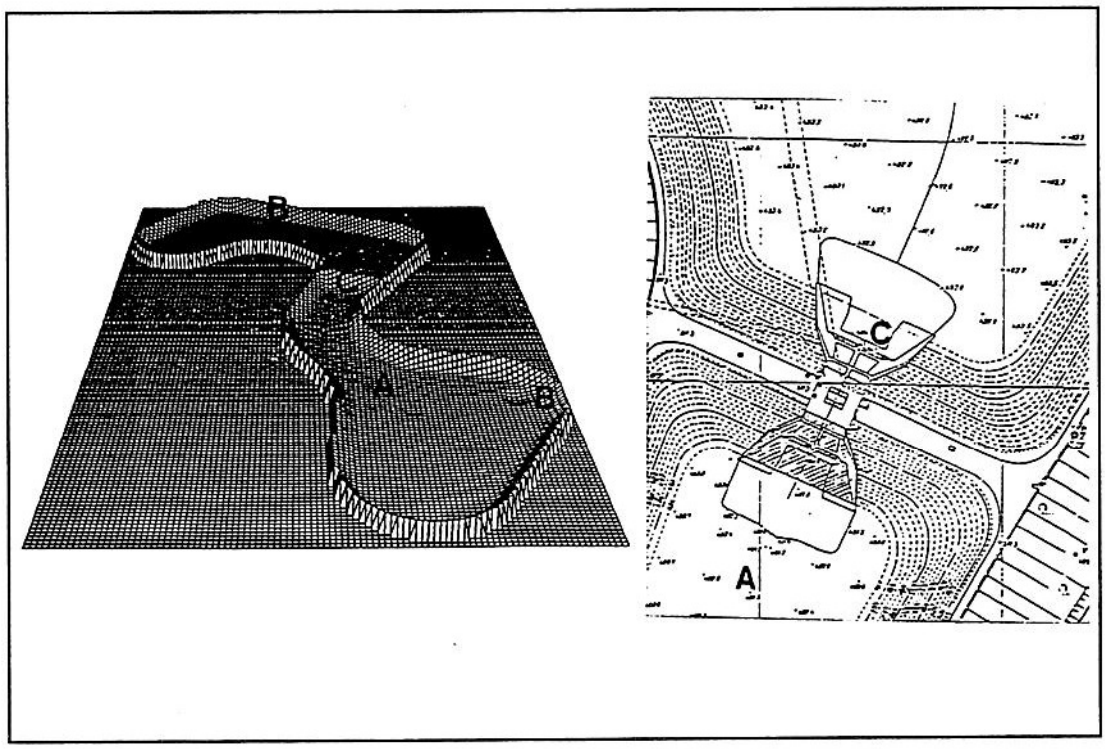


Abb. 7.1 Problemzonen der Beckengeometrie

Die Notwendigkeit der Modellierung der Beckensohle läßt sich auf eine einfache Weise dadurch ausschließen, daß als Referenzebene die Wasserfläche gewählt wird, die dem unteren Stauziel (494,0 m ü. NN) zugeordnet ist. Dadurch können für die Berechnung der Gravitationseffekte der Wassermassen als Funktion der Stauhöhe Quader einheitlicher vertikaler Ausdehnung verwendet werden (oberes Stauziel = 510,3 m ü. NN). Auf diese Weise wird gleichzeitig das Problem der Erfassung der Einlauftrichter der Beckensohle an den Einlaufbauwerken beseitigt, die in allen ihren Teilen unterhalb des Horizontes von 494 m ü. NN liegen.

Anders sind die Verhältnisse jedoch am Zwischenbauwerk. Hier ist zweckmäßigerweise der Grad der geometrischen Approximation von der Lage des Aufpunktes abhängig zu machen. Da jedoch im vorliegenden Falle primär die Gravitationseffekte entlang des Drainageganges unterhalb von Becken II für Anwendungen in Betracht kommen, kann das Zwischenbauwerk - wie sich aus Abschätzungen ergibt - zunächst vernachlässigt werden. Der Damm zwischen Becken I und II wird als ununterbrochen angenommen (der Fehler beträgt < 0,1 μGal).

Im Bereich der Beckenböschungen wird die untere Referenzebene der Modellquader in den Schnittpunkt deren vertikaler Achse mit der Böschungsebene gelegt (Abb. 7.2). Dadurch tritt ein Kompensationseffekt zwischen Massenüberschüssen und -defiziten auf, der den Approximationsfehler weiter verringert. Lediglich der Quader den der Schnittlinie zwischen dem unteren Stauziel zugeordneten Referenzebene und der Böschungsebene erzeugt einen nichtkompensierten Massenüberschuß, der außerhalb des unmittelbaren Nahbereichs aber vernachlässigt werden kann, da der zugeordnete Fehler dort < 0,1 μGal beträgt.

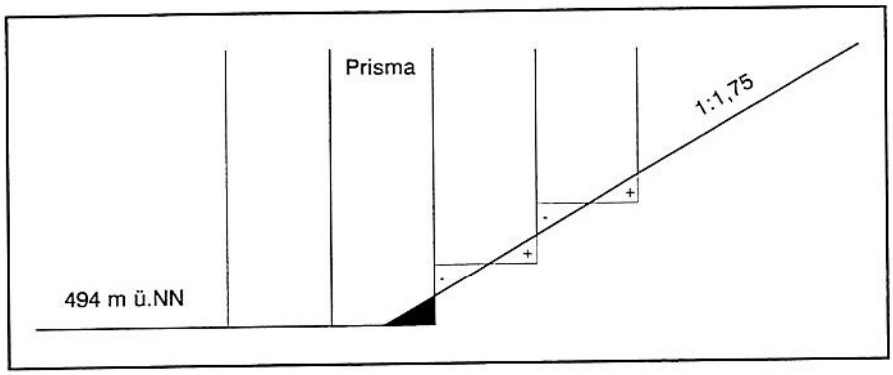


Abb 7.2 Problemzone Böschungsbereich

Die Abb. 4.6 gibt einen Überblick über die Meßstationen, die in diesem Bereich des Oberbeckens II die geringste Entfernung zur Beckenböschung aufweisen. Das bedeutet, daß alle weiteren potentiellen Meßstationen entlang des Drainageganges wesentlich weiter vom Böschungsrand entfernt und damit unempfindlicher gegenüber den Auswirkungen der Quaderapproximation sind. Aufgrund der relativ großen Entfernungen können ferner trichterförmige Deformationen der Wasseroberfläche im Nahbereich der Einlaufbauwerke beim Leistungs- oder Pumpbetrieb (die maximalen Höhendifferenzen liegen im Bereich von ~ 1 dm) in gegebenem Problemzusammenhang unberücksichtigt bleiben.

7.4.3 Der Einfluß der Modell-Rasterweite

Der Grad der geometrischen Approximation des Beckenvolumens durch die Quaderelemente ist abhängig von der Modell-Rasterweite. Selbstverständlich wird die Approximation umso günstiger, je feiner das Raster gewählt wird (siehe Abb. 7.3). Andererseits steigt die Anzahl der Quader mit dem Quadrat der Verkleinerung der Rasterweite (eine Halbierung der Rasterweite führt zu einer Vervierfachung der Quaderzahl). Es gilt also aus Gründen des Rechen- und Arbeitsaufwandes einen vernünftigen Kompromiß zu finden zwischen der Approximationsgenauigkeit und der Rasterweite.

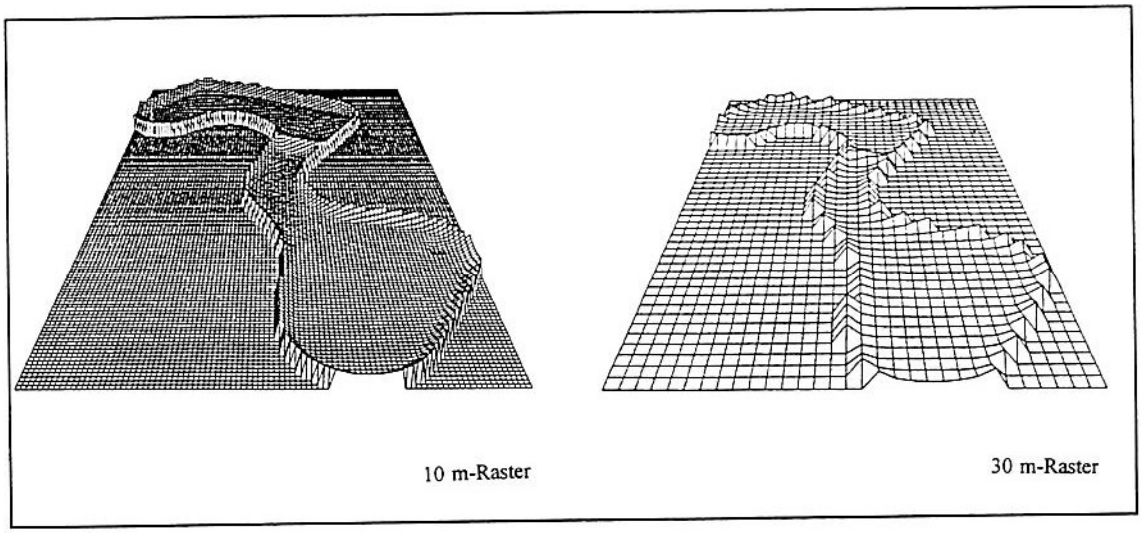


Abb. 7.3 Variationen der Rasterbreiten an den Oberbecken

Um den Einfluß der Modell-Rasterweite zu untersuchen, wurden die maximalen Gravitationseffekte (zwischen den Stauzielen 494,0 und 510,3 m ü. NN) für die Oberbecken bezogen auf die Lage des Bohrlochs 1 mit den Rasterweiten 30, 20, 15, 10 und 5 m berechnet. Die Ergebnisvariationen als Funktion der Modell-Rasterweite sind in Abb. 7.4 nachgewiesen. Es zeigt sich, daß bei allen drei Gravitationskomponenten der Grenzwert innerhalb einer Toleranz von ~ 0,1 µGal mit einer Rasterweite von 5 m erreicht wird.

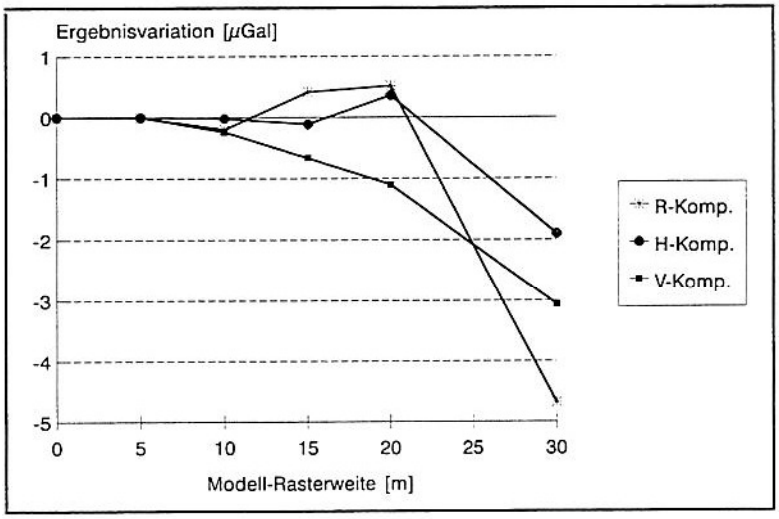


Abb. 7.4 Der Einfluß der Modell-Rasterweite

Berücksichtigt man jedoch den erforderlichen rechentechnischen Aufwand, der mit zunehmender Verfeinerung des Rasters verbunden ist (siehe Tab. 7.1, wobei sich die CPU-Zeit auf die Berechnung der Gravitationseffekte für **einen** Aufpunkt bezieht), so liegt es nahe, den Aufwand wenigstens partiell dadurch zu verringern, daß in geeigneten Zonen der Beckengeometrie Gruppen von Einzel- zu Großquadern zusammengefaßt werden (Abb. 7.5).

Modell-Rasterweite [m]	Quaderanzahl **ohne** Blockbildung	Rechenzeit, CPU [sec]
5	19488	84,72
10	8026	35,68
15	2163	9,78
20	1220	5,46
30	875	3,97
Modell-Rasterweite [m]	**Quaderanzahl mit Blockbildung**	**Rechenzeit, CPU [sec]**
5	7841	32,97
20	740	3,29

Tab. 7.1 Rechentechnischer Aufwand Oberbecken I + II

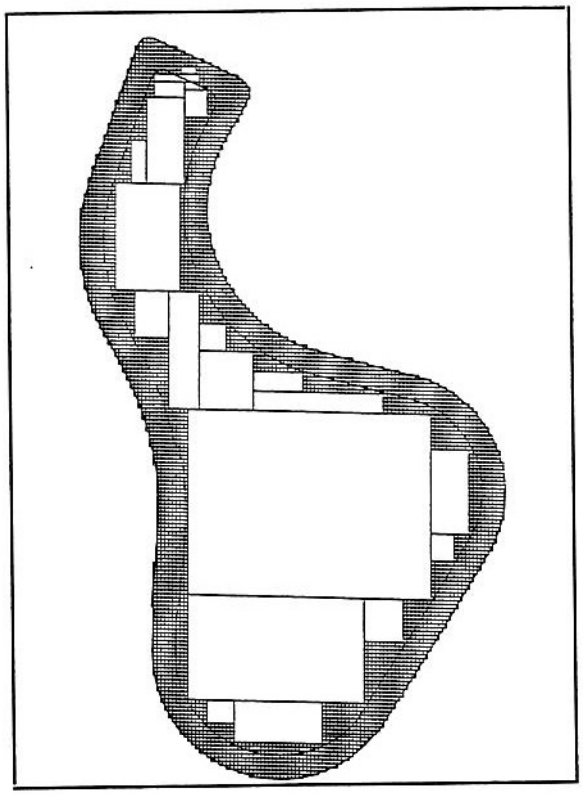


Abb. 7.5 Quaderreduzierung durch Blockbildung am Beispiel des Oberbeckens II

Auf diese Weise ist es möglich, die Anzahl der Quader bei einer Modell-Rasterweite von 5 m von 19488 auf 7841 zu reduzieren entsprechend einer Reduktion der Rechenzeit von ~ 61 %. Das Prinzip der aufpunktunabhängigen Beckenmodellierung wird hierbei nicht verletzt.

7.4.4 Die Entfernungsabhängigkeit der Gravitationseffekte

Als Grundlage für weiterführende, fehlertheoretische Untersuchungen - etwa im Zusammenhang mit möglichen windinduzierten oder betriebstechnisch hervorgerufenen Störungen der horizontalen Lage der Wasseroberfläche - ist es sinnvoll, exemplarisch zu untersuchen, welchen Anteil verschiedene Zonen um einen gewählten Aufpunkt zum berechneten gravitativen Gesamteffekt beitragen. Wählt man problembezogen einen Aufpunkt im Drainagestollen unterhalb des Oberbeckens II, so ist es die vertikale Gravitationskomponente, der das besondere Interesse gilt, da hier die Wassermassen ausschließlich einseitig in Zenitrichtung wirken. Anders als bei den Horizontalkomponenten treten keine kompensierenden Effekte auf.

In Abb. 7.6 ist, bezogen auf die Lage von Gravimeter 1, der Betrag des vertikalen Gravitationseffektes bei maximaler Stauhöhenvariation und unterschiedlicher Ausdehnung des gravitativ wirksamen Wasservolumens graphisch dargestellt.

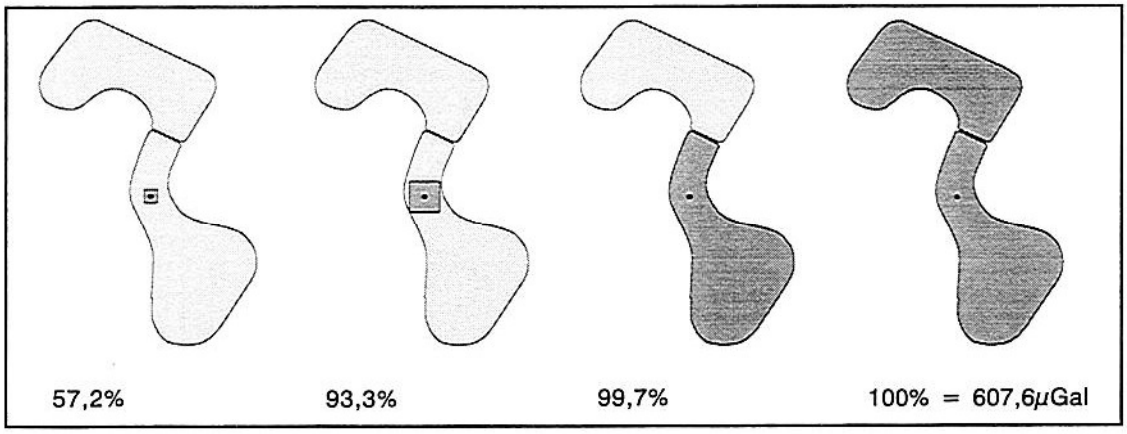


Abb. 7.6 Entfernungsabhängigkeit gravitativer Effekte

Am Gesamteffekt aus beiden Oberbecken (100 %) ist ein Quader von 40 m horizontaler Seitenlänge und 16,3 m Höhe oberhalb der Meßstation mit 57,2 % beteiligt. Dieser relative Wert steigert sich bereits auf 93,3 % bei einer Seitenlänge von nur 140 m. Der Gesamtanteil des Oberbeckens II beträgt 99,7 %, d.h. die Wassermassen im Oberbecken I liefern in der vertikalen Gravitationskomponenten (bezogen auf den Aufpunkt: Gravimeter 1) lediglich einen Anteil von 0,3 % zum Gesamteffekt.

7.4.5 Schlußfolgerungen

Aus der Modellierung der Beckengeometrie anhand der Untersuchungen beim Oberbecken Vianden läßt sich eine allgemeine Strategie für die Approximation endlicher Körper ableiten (entsprechend auch für das Unterbecken Vianden). Sie besteht aus: einer Quaderapproximierung unter Verwendung eines DGM; aus einer Reduktion der Quaderanzahl durch entsprechende Blockbildung und durch eine großzügigere, entfernungs- und volumenabhängige Quaderapproximation (dadurch Reduktion der Quaderanzahl), je weiter die Quader vom Aufpunkt entfernt sind (siehe Kapitel 6.6.1). Durch eine Quaderapproximation mittels Punktmassen - entfernungs-, volumenabhängig - (siehe Kapitel 6.6.2) läßt sich ferner die CPU-Zeit der Berechnungen erheblich verringern.

7.5 Ergebnisse für den Bereich der Oberbecken

Im Hinblick auf die aktuellen Fragestellungen wurden für den Bereich der Oberbecken die maximalen Gravitationseffekte in den drei Komponenten berechnet. Die Ergebnisse sind nach Betragsklassen unterschieden in Abb. 7.7 graphisch nachgewiesen. Grundlage für die Approximation der Beckengeometrie ist ein horizontales Raster von 20 m Seitenlänge; die Höhe der zugeordneten Vertikalquader beträgt 16,3 m entsprechend der Höhendifferenz der minimalen und maximalen Stauziele. Im Hinblick auf geplante weiterführende Untersuchungen im Zusammenhang mit den Gravitationseffekten der Restmassen zwischen der Beckensohle und der unteren Stauebene wurde, anders als in Abb. 7.5 gezeigt, auf die Bildung von Großblöcken verzichtet. Die gewählte Modell-Rasterweite von 20 m diente zur Begrenzung des Rechenaufwandes. Allerdings reduziert sich damit auch die Modellgenauigkeit, so daß die Fehlergrenze der berechneten Gravitationseffekte entsprechend Abb. 7.6 mit ~ 1 μGal anzusetzen ist, wobei in den Zonen der Beckenränder (Böschungen) dieser Betrag durchaus noch überschritten werden könnte. Bei definierter Fragestellung ist es im Bedarfsfall jedoch ohne prinzipielle Schwierigkeiten möglich, die Berechnungen mit geringerer Rasterweite zu wiederholen.

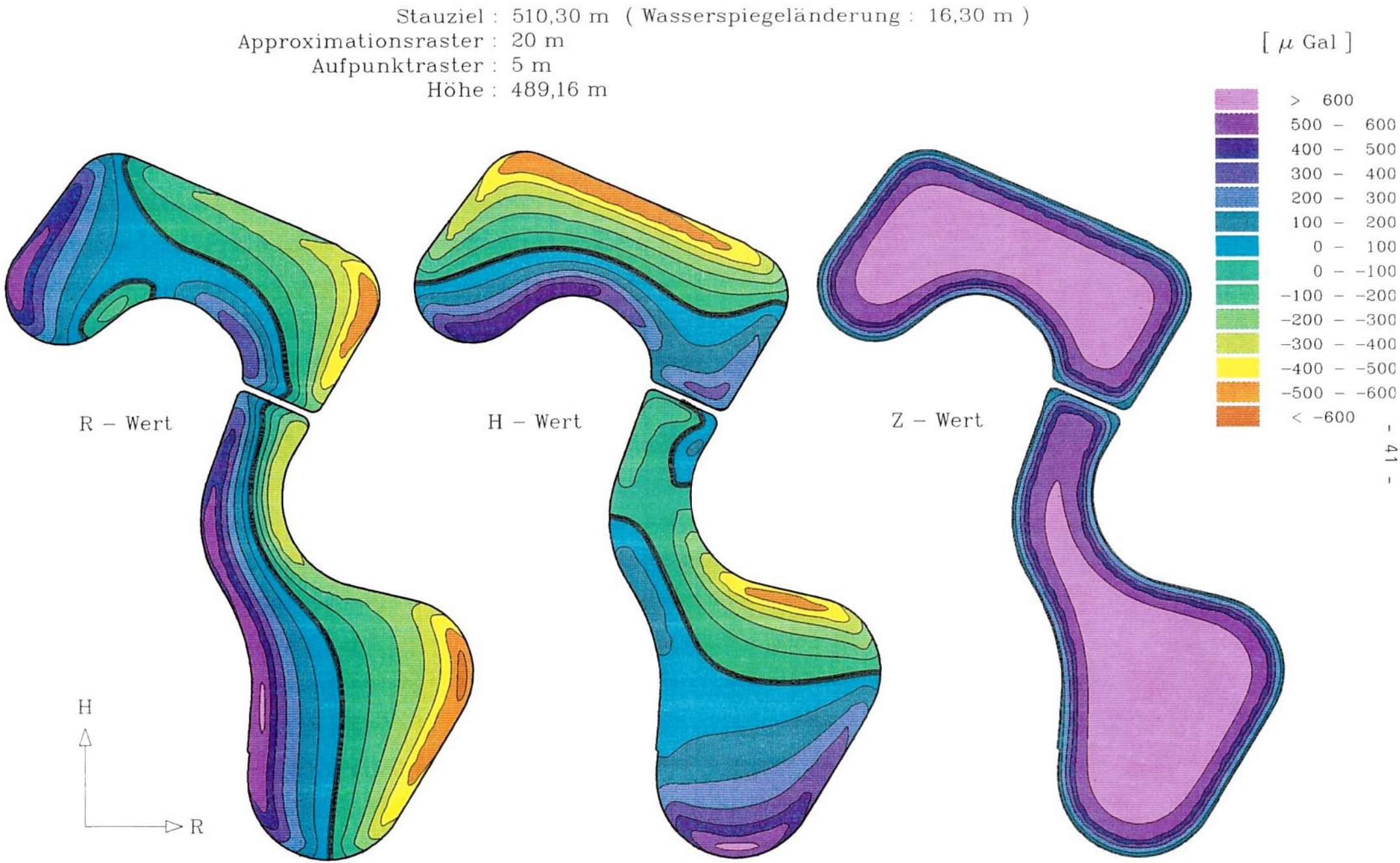


Abb. 7.7 Maximale Gravitationseffekte im Bereich der Oberbecken

Die Rasterweite des Systems der Aufpunkte beträgt 5 m, die Höhe der Aufpunkt-Rasterebene 489,16 m ü. NN entsprechend dem mittleren Höhenniveau der bisher im Drainagegang eingesetzten Meßgeräte. Auch hier können ohne prinzipielle Schwierigkeiten die Berechnungen im Bedarfsfall für andere Bezugshöhen sowie andere Aufpunktraster wiederholt werden. Die Dichte des Wassers wurde in den Berechnungen zu 1 g/cm³ angesetzt.

Der den in Abb. 7.7 dargestellten Ergebnissen zugrunde liegende Datensatz umfaßt 1220 Quader und 19488 Aufpunkte. Die numerischen Einzelwerte der berechneten Gravitationseffekte sind für jeden Aufpunkt in einer Datenbank gespeichert.

Wie zu erwarten, erreichen die vertikalen Gravitationseffekte im Bereich der begehbaren Drainagestollen (vgl. Abb. 3.3) ihre jeweils größten Beträge. Im Zusammenhang mit der Erfassung von Auflastreaktionen des Untergrundes sind bei den Horizontalkomponenten die Zonen der Nullkompensation von besonderem Interesse (keine Lotrichtungsänderung als Funktion der Wasserstände).

7.6 Der Einfluß der Genauigkeit der Speicherbecken- und Stationskoordinaten

Die geometrische Form des Ober- und Unterbeckens ist durch eine photogrammetrische Aufnahme im Jahre 1965 bestimmt. Unter Berücksichtigung des Bildmaßstabes 1:5000, der Flughöhe über Grund von 750 m sowie des Einsatzes einer Weitwinkelkamera (c = 0.15 m) läßt sich hieraus eine Koordinatengenauigkeit von < 0.2 m ableiten. Da die Meßstationen im Drainagegang eingerichtet und somit > 50 m vom Böschungsfuß des Speicherbeckens entfernt sind, können Ungenauigkeiten in der Bestimmung der Speicherbeckengeometrie < 0.2 m für die weiteren Untersuchungen - wie Detail-Berechnungen gezeigt haben - außer Betracht gelassen werden.

Die Koordinatenungenauigkeiten der die Beckengeometrie beschreibenden geodätischen Meßpunkte sind zu unterscheiden von denen der Meßstationen (= Aufpunkte). Der Einfluß von Lagefehlern einer Meßstation auf die berechneten Gravitationseffekte wurde empirisch durch Koordinatenvariationen ermittelt. Die Angabe von zulässigen Fehlertoleranzen basiert auf einem zulässigen Grenzwert von relativ 10^{-3}, der entsprechend den maximalen Anforderungen bei der Eichung von Registriergravimetern (Kapitel 12) für die gravitative Vertikalkomponente festgelegt und der Einfachheit halber auch auf die Horizontalkomponenten übertragen wurde.

7.6.1 Gravitative Horizontalkomponenten

Die Wirkungen von Variationen der horizontalen Stationskoordinaten auf die zugeordneten horizontalen Gravitationsbeschleunigungen wurden im Hinblick auf geplante inklinometrische Profilbeobachtungen entlang des Drainageganges unter dem Oberbecken II für zwei ausgewählte Punkte berechnet: zum einen ist dies der Beobachtungspunkt Bohrloch 1, im Bereich geringster Beckenweite gelegen, sowie der hypothetische Beobachtungsort 2037 - bezeichnet nach einer Nivellementspunktfestlegung -, der sich etwa im Gravitationszentrum befindet und somit auch den größten mittleren Abstand von den Beckenrändern aufweist. Die Stationskoordinaten wurden jeweils schrittweise um den Betrag 5 dm variiert und auf diese Weise der Bereich um den Referenzpunkt mit einem Raster von 5 dm Maschenweite überdeckt. Die Höhe der horizontalen Rasterebene beträgt 488,79 m (Station: Bohrloch 1) bzw. 489,56 m ü. NN (Station: 2037). Die der maximalen Wasserstandsvariation von 16,3 m beider Becken zugeordneten horizontalen Gravitationskomponenten wurden in den Rasterpunkten berechnet. Die Differenzen der Ergebnisse bezogen auf den zentralen Referenzpunkt sind für beide Komponenten in den Abb. 7.8 und 7.9 nachgewiesen.

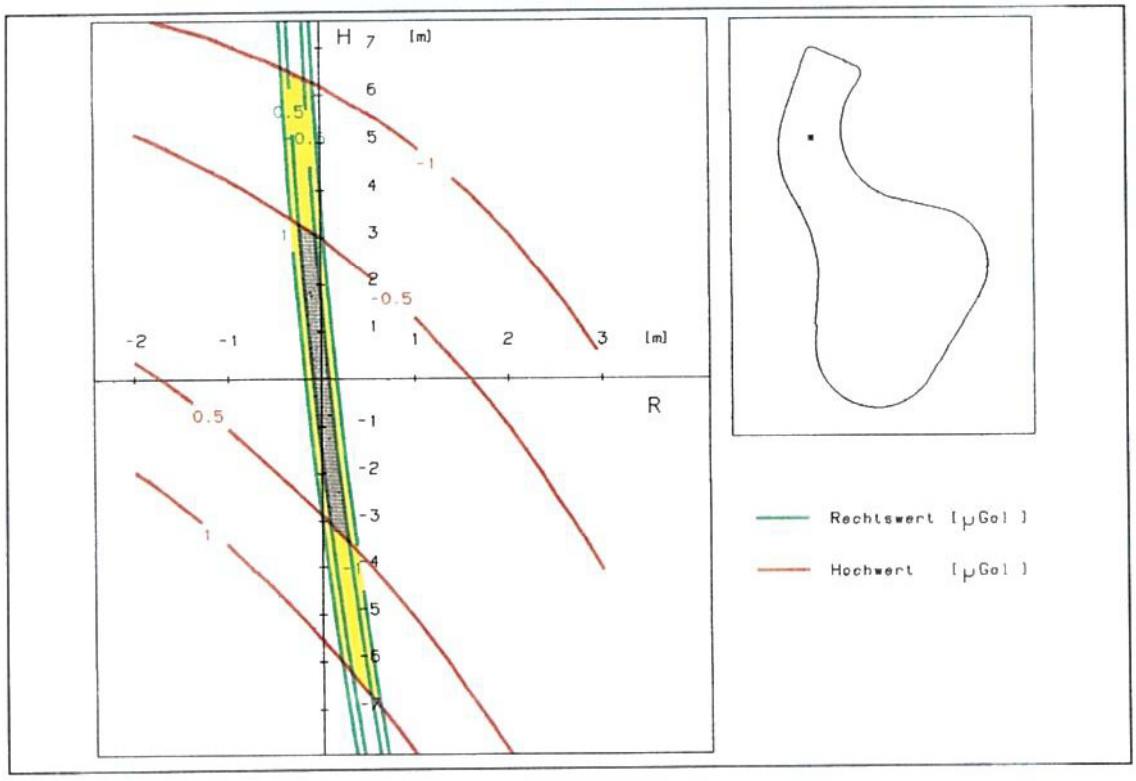


Abb. 7.8 Der Einfluß von Lagefehlern auf die horizontalen Gravitationsbeschleunigungen

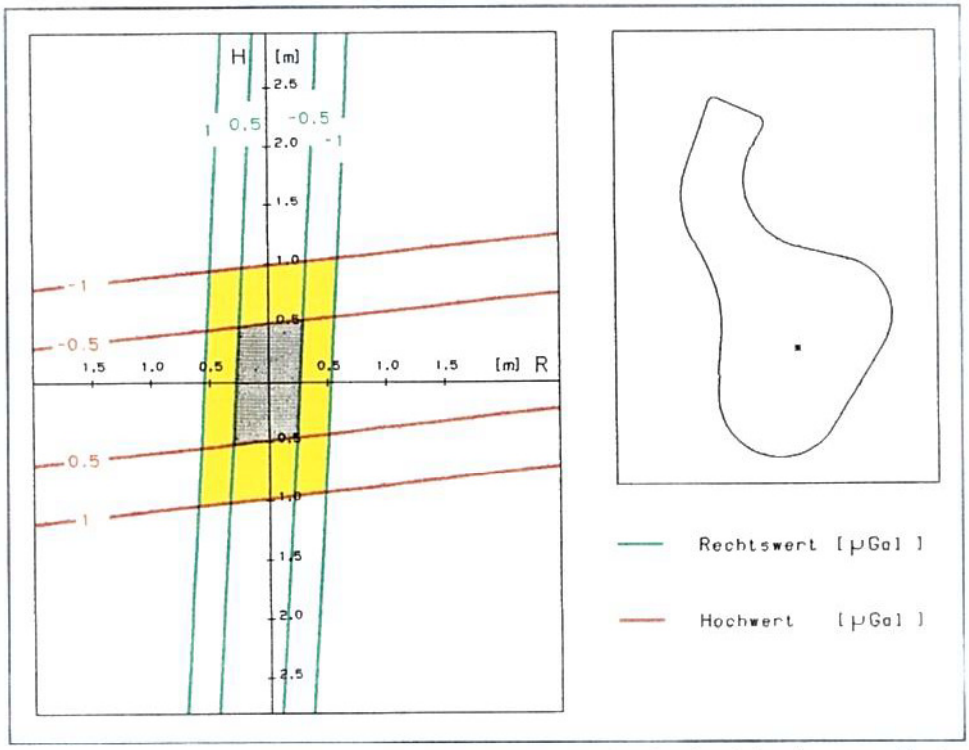


Abb. 7.9 Der Einfluß von Lagefehlern auf die horizontalen Gravitationsbeschleunigungen (Station: 2037)

Legt man, wie zuvor begründet, den zulässigen Fehler mit 1 ‰ der maximalen vertikalen Gravitationsvariation von 600 µGal zugrunde, so entspricht dies einem Betrag von etwa einem halben µGal. Die Lagebereiche um den Referenzpunkt, in denen der Fehlerbetrag von 0,5 µGal (in den horizontalen Gravitationskomponenten) nicht überschritten wird, sind in den Abb. 7.8 und 7.9 schraffiert dargestellt. Für die Meßstation Bohrloch 1 ergibt sich eine zulässige Lageverschiebung in Nord-Süd-Richtung (genähert parallel zur Achse des Drainageganges) von ~ ± 3 m, in der Ost-West-Richtung jedoch lediglich von ~ ± 1 dm. Die große Differenz dieser Beträge ist eine Folge der Beckengeometrie im Haupteinwirkungsbereich um den Referenzpunkt. Im Punkt 2037 betragen die zulässigen horizontalen Koordinatenfehler ~ ± 0,5 m in Nord-Süd-Richtung und ~ ± 0,25 m in Ost-West-Richtung. Die im Vergleich geringere Differenz entspricht der veränderten Beckengeometrie in der Umgebung des Aufpunktes. Will man eine von der Lage des Aufpunktes (Beobachtungspunkt) und der Koordinatenrichtung unabhängige Fehlertoleranz definieren, so ist diese, bezogen auf einen Gravitationsfehler von ± 0,5 µGal, mit ± 1 dm festzusetzen. Verändert man die Fehlertoleranz der berechneten Gravitationseffekte, so ändern sich die zugeordneten Toleranzen der Lagekoordinaten proportional.

Zur Ermittlung der notwendigen Genauigkeit der Höhenkoordinaten wurden die horizontalen Gravitationseffekte für mehrere Aufpunkte auf der Lotlinie durch die beiden Festpunkte berechnet. Man erhält, wieder bezogen auf einen zulässigen Gravitationsfehler von ~ ±0,5 µGal, einen zulässigen Höhenfehler von ~ ± 4,37 m im Punkt Bohrloch 1 und von ~ ± 12,35 m im Punkt 2037. Es ist also ausreichend, die Höhen der Beobachtungspunkte bezüglich der gravitativen Horizontalkomponenten auf ~ ± 4 m zu bestimmen.

7.6.2 Gravitative Vertikalkomponente

Nach den zuvor beschriebenen Verfahren wurde auch der Einfluß von horizontalen Lagefehlern auf die vertikale Gravitationskomponente bei maximalen Wasserstandsvariationen berechnet. Die Ergebnisse sind für den Punkt Gravimeter 1 in Abb. 7.10 nachgewiesen. Selbst bei einer gravitativen Fehlertoleranz von 0,1 µGal beträgt der zulässige Lagefehler < 0,5 m und ist im Punkt 2037 als Folge der lokalen Beckengeometrie sogar noch größer.

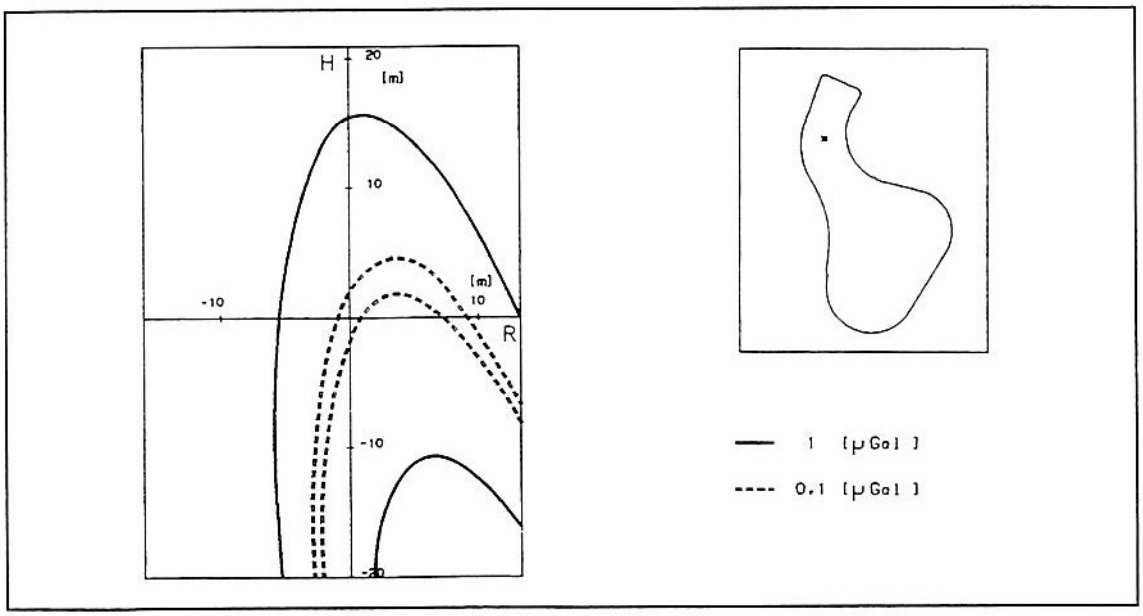


Abb. 7.10 Der Einfluß von Lagefehlern auf die vertikale Gravitationsbeschleunigung (Station: Gravimeter 1)

Der Einfluß von Höhenfehlern auf den berechneten vertikalen Gravitationseffekt wird in Abb. 7.11 dargestellt. Bei einer gravitativen Fehlertoleranz von ± 0,1 μGal beträgt der zulässige Höhenfehler ± 1,5 cm, für ± 1 μGal entsprechend 15 cm.

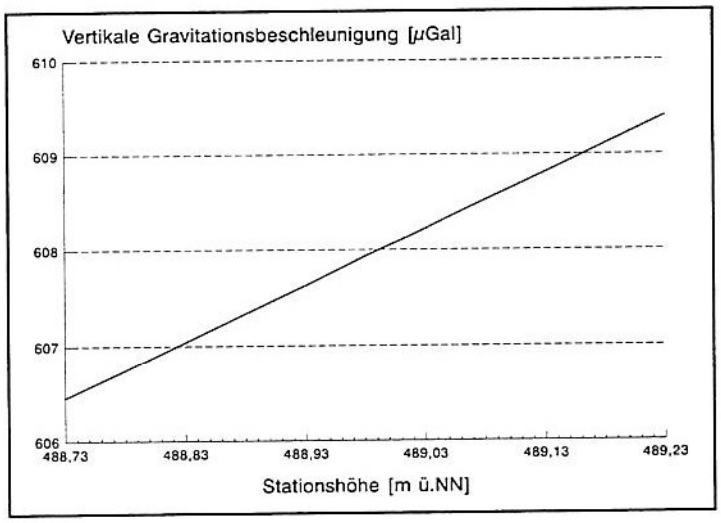


Abb. 7.11 Der Einfluß von Höhenfehlern auf die vertikale Gravitationsbeschleunigung (Station: Gravimeter 1)

7.6.3 Schlußfolgerungen

Zur Vermeidung andernfalls notwendiger Differenzierungen wird die erforderliche Koordinatengenauigkeit für Beobachtungsstationen im Bereich des Drainageganges unter Oberbecken II in der horizontalen Lage mit ± 1 dm und in der Höhe mit ± 1 cm festgelegt. Dies sind Beträge, die vermessungstechnisch ohne großen Aufwand realisiert werden können. Ferner ist zu berücksichtigen, daß sich die vorstehenden Fehleruntersuchungen auf den gravitativ wirksamen Gesamtkörper beziehen. Tatsächlich werden aber bei den geplanten Anwendungen wasserstandsabhängige **Änderungen** der gravitativen Effekte verwendet. Da die berechneten Gravitations**änderungen** in deutlich geringerem Maße von den Koordinatenfehlern beeinflußt werden, kann die Lage von Aufpunkten bei Einhaltung der oben genannten Toleranzen im Problemzusammenhang als fehlerfrei angenommen werden.

7.7 Zur Dichte des Wassers

Allgemein gilt, daß die Genauigkeit, mit der die gravitative Wirkung eines Körpers berechnet werden kann, außer vom Grad dessen geometrischer Beschreibung (oder Approximation) auch von der Genauigkeit der zugeordneten Dichtewerte abhängig ist (und zwar proportional). Während die Genauigkeit der geometrischen Modellierung von Körpern, die der direkten Vermessung zugänglich sind (wie dies bei den Oberbecken der Fall ist), im allgemeinen ausschließlich eine Frage des Aufwandes ist, gilt dies nicht für die Dichte von Körpern inhomogener Zusammensetzung. So läßt sich die Dichte von Gesteinen oder Bodenvolumina aufgrund petrologischer oder bodenmechanischer Beschreibungen kaum besser als auf ~ 5 % genau angeben. Mit Hilfe von Stichproben kann man die relative Genauigkeit zwar verbessern, jedoch nur in Grenzen, die vom Grad der Dichteinhomogenitäten sowie der Anzahl und der räumlichen Verteilung der Stichproben abhängen.

Wesentlich günstiger liegen die Verhältnisse bei durchmischten Flüssigkeiten, da hier naturgemäß die räumliche Dichtevariation wesentlich geringer ist. Daher sind auch Stichprobenwerte wesentlich repräsentativer. Im Falle der Wassermassen in den Becken des PSW Vianden besteht zudem die Möglichkeit, im Bedarfsfall mindestens die physikalisch induzierten Dichtevariationen funktional zu beschreiben, da Wasser (neben Quecksilber) eine der am besten bekannten flüssigen Stoffe ist.

7.7.1 Physikalische Eigenschaften des Wassers

Die Dichte des Wassers ist von zwei physikalischen Parametern abhängig: der Temperatur und dem Druck innerhalb eines Volumenelementes. Variationen der Temperatur bewirken den Effekt der kubischen Wärmeausdehnung; Variationen des Druckes erzeugen Volumenänderungen als Folge der Kompressibilität.

Die Abhängigkeit der Dichte des Wassers als Funktion der Temperatur ist in Abb. 7.12, die Temperaturabhängigkeit der Kompressibilität, dem Verhältnis aus relativer Volumenänderung und hydrostatischem Druck, in Abb. 7.13 graphisch dargestellt. /43/

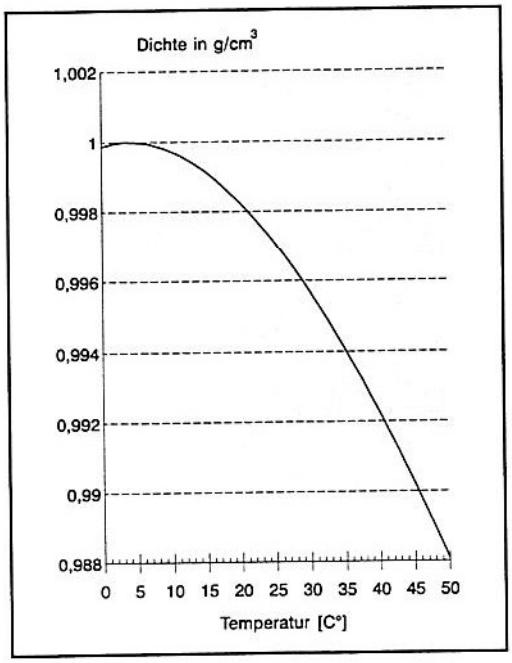


Abb. 7.12 Dichte von reinem Wasser bei 1 bar

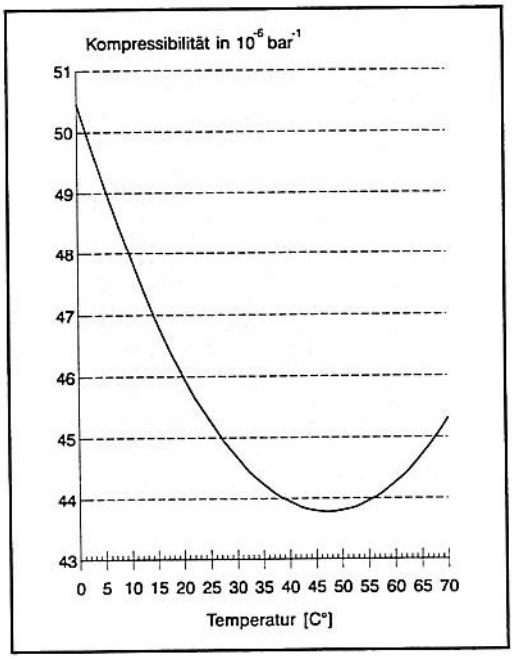


Abb. 7.13 Isotherme Kompressibilität von Wasser bei 1 bar

7.7.1.1 Volumenänderung durch thermische Ausdehnung

Durch Messung der Temperatur läßt sich die jeweilige Dichte des Wassers in den Oberbecken ermitteln und durch einen entsprechenden Korrekturfaktor bei den Gravitationsberechnungen berücksichtigen. Infolge der im allgemeinen durch den Kraftwerksbetrieb erzeugten Verwirbelungen ist das zuvor erwähnte Stichprobenproblem von eher geringem Gewicht, zumal während des Wassertransportes zwischen Ober- und Unterbecken entlang der 650 m langen, im Gebirge verlegten Rohrleitungen auch ein Wärmeaustausch erfolgt. Daher wird im weiteren von einer genähert homogenen Temperaturverteilung ausgegangen.

Im Rahmen bestimmter Fragestellungen ist es ergänzend von Bedeutung, die Höhenvariationen des Flüssigkeitspegels als Funktion der Temperatur bei konstanter Masse und konstanter Volumenbasisfläche zu berechnen. Bezeichnet θ_1 und θ_2 die zwei Temperaturzuständen zugeordneten Dichtewerte sowie h die Höhe einer Flüssigkeitssäule, so gilt für die temperaturinduzierte Höhenänderung Δ h:

$$\Delta h = h\frac{\theta_1-\theta_2}{\theta_2} \approx h\,(\theta_1-\theta_2)$$

Bei maximalem Füllstand beträgt die hydrostatische Höhe in den Becken ~ 17 m (unter Berücksichtigu ng eines Wasservolumens unterhalb der Ebene des unteren Stauziels). Daraus ergibt sich für einen Temperaturbereich von 0°C bis 24°C der in Abb. 7.14 nachgewiesene (nichtlineare) Funktionsverlauf.

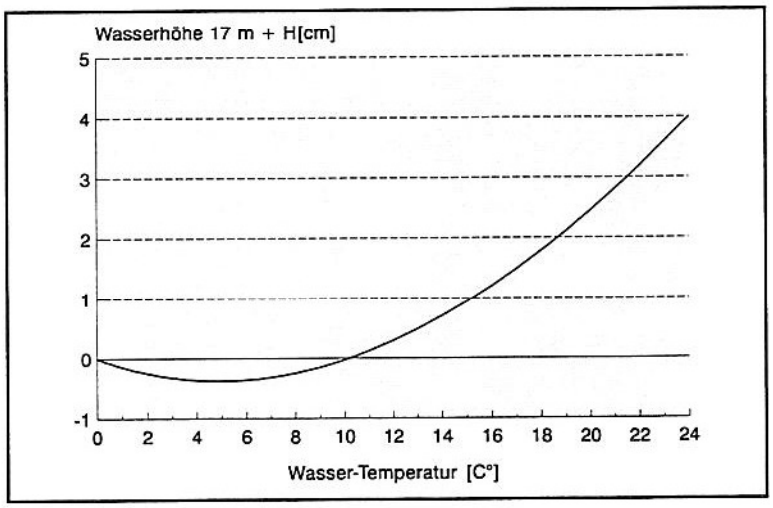


Abb. 7.14 Höhenänderung der Wasseroberfläche in Abhängigkeit von der Temperatur

7.7.1.2 Volumenänderung durch isotherme Kompressibilität

Unter der isothermen Kompressibilität $\varkappa$ versteht man die relative, d.h. auf ein Anfangsvolumen bezogene Volumenänderung dV eines Flüssigkeitsvolumens V als Folge einer Druckänderung um dP bei konstanter Temperatur /43/.

Es gilt:

$$\kappa = \frac{1}{V_A}\left(\frac{V_E-V_A}{P_E-P_A}\right)$$

mit den Symbolen:
V_E = Volumen beim Druck P_E
V_A = Volumen beim Druck P_A
$V_E = V_A\,(1 + \varkappa\,(P_E - P_A))$

Nach SONTHEIMER / SPINDLER / ROHMANN /43/ ist die Kompressibilität von Wasser bei 20° C zu $46*10^{-6}$/bar angegeben. Unterstellt man Luftdruckschwankungen (atmosphärischer Druck) von bis zu 50 mbar pro Jahr, so entspricht die Volumenänderung (bezogen auf das Oberbecken II) einer Wasserspiegeländerung von einigen µm (Abb. 7.15). Wesentlich größer sind jedoch die Druckänderungen innerhalb einer Wassersäule (hydrostatischer Druck). Unterteilt man das Oberbecken II in äquidistante Wasser-Schichten und summiert die Höhenänderungen der jeweiligen Schichten aufgrund der aufliegenden Wassermassen, so ergibt sich aus einer Grenzwertbetrachtung (Abb. 7.16) eine Wasserspiegeländerung bei Vollstau von < 0,55 mm.

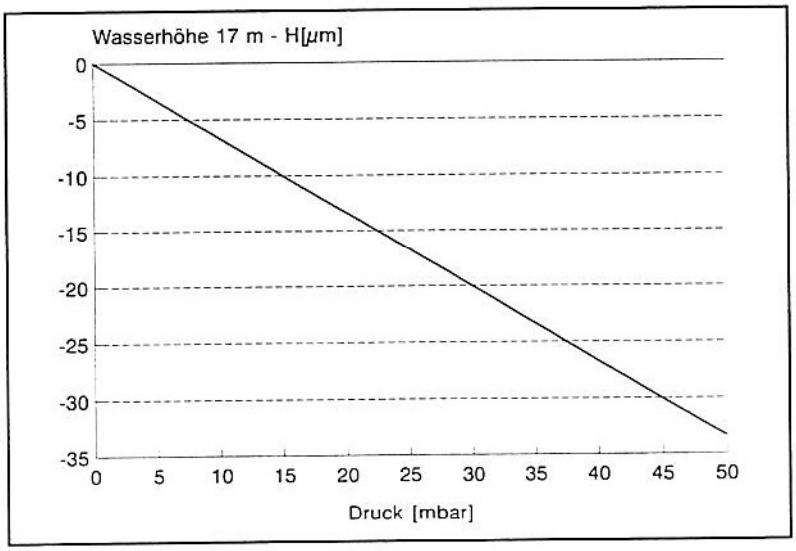


Abb. 7.15 Höhenänderung durch isotherme Kompressibilität beim Oberbecken II

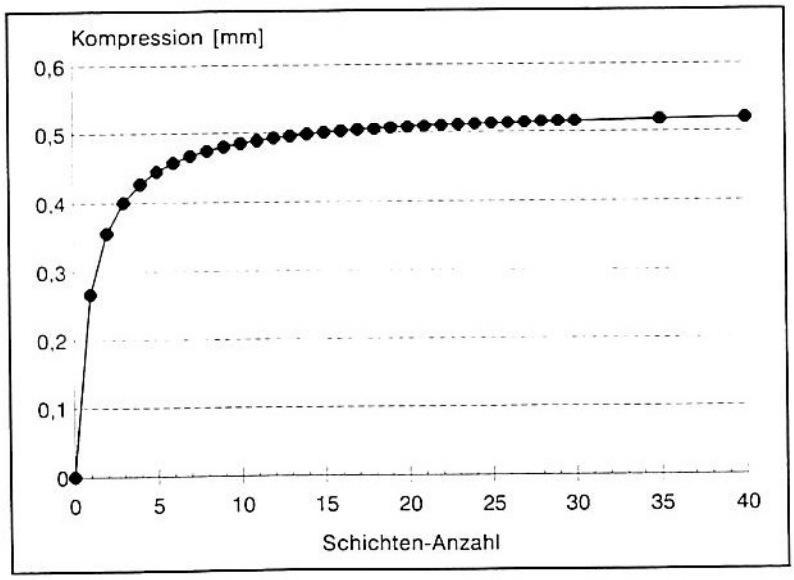


Abb. 7.16 Wasserschichten-Grenzwertbetrachtung

Aber auch dieser Effekt der Kompressibilität des Wassers kann somit im Problemzusammenhang vollständig vernachlässigt werden.

7.7.2 Inhaltsstoffe des Wassers

Art und Menge der Inhaltsstoffe natürlicher Wässer sind eine Folge von biologischen, physikalischen und chemischen Umsetzungen, die während des Wasserkreislaufes vor sich gehen. So weicht bereits das Regenwasser durch die Aufnahme von gasförmigen und festen Bestandteilen (Verunreinigungen) der Atmosphäre von der Zusammensetzung des reinen Wassers ab. Im Boden reichert sich das Wasser, durch CO_2-Aufnahme reaktionsfähig geworden, mit Mineralien an.

Das Wasser in den Oberbecken des PSW Vianden weist vergleichsweise nur geringe Verunreinigungen auf, wie Ergebnisse von Wasseranalysen aus den Jahren 1978 bis 1987 zeigen, die in Tab. 7.2 nachgewiesen sind. Die aus den Verunreinigungen resultierenden Dichtevariationen liegen relativ bei 0,03 bis 0,08 ‰ und können daher im Problemzusammenhang (maximaler Gravitationseffekt < 0,05 µGal) vernachlässigt werden.

		1978	1979	1980	1982	1984	1985	1987
Freie CO_2	mg/l	4	5	2	2.6	0	1.8	3.5
Kalkaggressive CO_2	mg/l	4	3	2	2	0	1.8	3.5
Calcium Ca^{++}	mg/l	10	0	0	0	0	0	0
Magnesium Mg^{++}	mg/l	7	0	0	0	0	0	0
SulfateSO_4^{--}	mg/l	17	14	10	10	11.7	18.1	14.9
Chloride Cl^-	mg/l	21	19	18	18	16.8	19	17.8
Sauerstoff O_2	mg/l	12.6	11.2	9.6	11.9	11.0	10.1	14.8

Tab. 7.2 Wasseranalysen beim Oberbecken

7.8 Die Genauigkeit der Wasserstandshöhe

Die Art der Wasserstandsmessung ist für die Berechnung der gravitativen Wirkung von Massenveränderungen in den Oberbecken von erheblicher Bedeutung.

Bei der Verwendung geometrischer Pegelbeobachtungen (z.B. Schwimmpegeldaten) ist eine hinreichend genaue Kenntnis der zugeordneten Dichtezustände erforderlich. Legt man eine relative Genauigkeit der berechneten Gravitationseffekte von 10^{-3} zugrunde (vgl. Kapitel 7.6), so erfordert die Erfassung der temperaturinduzierten Dichtevariationen eine Genauigkeit der Temperaturmessung von ~ ± 4°C (siehe Abb. 7.12).

Mit Druckpegeln (physikalischen Pegeln) wird die Wasserstandshöhe als indirekt bestimmte Größe aus dem hydrostatischen Druck abgeleitet. Unter Voraussetzung der Massenkonstanz in dem hydrostatischen Vertikalvolumen sowie unter Vernachlässigung des Vertikalgradienten der Schwere (10^{-6} auf 3 m) ist das Messungsergebnis unabhängig von den temperaturinduzierten Dichtevariationen des Wassers. Die zugeordnete

kubische Wärmeausdehnung bewirkt jedoch eine Veränderung der Höhe der Flüssigkeitssäule (vgl. Kapitel 7.7.1.1). Dies führt zu differentiellen Vertikalverschiebungen der Massenschwerpunkte in allen Volumenelementen, so daß auch hier im Bedarfsfall die temperaturinduzierte Dichtevariation über die zugeordnete Volumenänderung (indirekt) zu berücksichtigen ist.

Die für die Berechnung der Gravitationseffekte notwendige Genauigkeit der Wasserstandshöhen läßt sich mit hinreichender Genauigkeit aus dem Betrag der maximalen vertikalen Gravitationsbeschleunigung ableiten. Diese beträgt im Bereich des Drainageganges ~ 600 µGal bei einer wirksamen Wasserstandshöhe von 16,3 m. Bei einer zulässigen Fehlertoleranz der Gravitationswerte von relativ 10^{-3} (entsprechend ~ ± 0,6 µGal) ergibt sich ein zulässiger Höhenfehler von ± 1,6 cm. Dem steht eine theoretische Signalauflösung der an beiden Becken installierten Registrierpegeln von ± 1 cm gegenüber, die jedoch im praktischen Betrieb - wie in Kapitel 12 gezeigt wird - nicht immer erreicht wird.

Als Pegelsensoren werden pneumatische Druckwaagen verwendet, bei denen der genannte temperaturinduzierte Höhenfehler kompensiert wird. Ohne Kompensation und ohne rechnerische Berücksichtigung würde der maximale Höhenfehler, auf ein mittleres Niveau der Wassertemperatur bezogen, für die Oberbecken ~ ± 2,5 cm betragen (siehe Abb. 7.14). Die Pegel befinden sich in unmittelbarer Nähe der Einlaufbauwerke (siehe Abb. 3.3).

7.9 Die gravitativen Wirkungen von Wasserstandsvariationen des Unterbeckens auf den Bereich des Oberbeckens

Durch den Leistungsbetrieb des PSW Vianden kommt es zu Wassermassenverlagerungen zwischen dem Unterbecken und den Oberbecken. Dies bedeutet aber, daß auch Wasserstandsvariationen im Unterbecken Gravitationswirkungen im Bereich der Oberbecken erzeugen. Ob diese Effekte eine Größenanordnung erreichen, die im Rahmen der aktuellen Problemstellung relevant sind, soll im nachfolgenden untersucht werden.

Die Modellierung des Unterbeckens für die Berechnungen erfolgt in gleicher Weise wie beim Oberbecken. Bei der Wahl der Rasterbreite zur Approximation der Unterbeckentopographie ist jedoch die Entfernung zwischen Ober- und Unterbecken besonders zu berücksichtigen (siehe Kapitel 6.6). Der geringste räumliche Abstand zwischen den Becken beträgt ca. 660 m, so daß für die Berechnungen eine Rasterweite von 20 m ausreicht (die Differenz gegenüber den auf der Grundlage eines 10 m-Rasters berechneten Ergebnisse beträgt relativ < 4 ‰).

Die für den Bereich der Oberbecken als Folge von Wasserstandsvariationen im Unterbecken auftretenden Gravitationseffekte sind für drei Stauhöhen in Abb. 7.17 nachgewiesen. In der im Problemzusammenhang (Kapitel 12) besonders interessierenden Vertikalkomponente beträgt der maximale Gravitationseffekt (entsprechend maximaler Stauhöhe) entlang des Drainageganges unter Oberbecken II bis zu ~ 2,0 µGal. Auf ein mittleres Wasserstandsniveau bezogen entspricht dies einem Wert von ~ 1,2 µGal, der sich bei normalem Kraftwerksbetrieb zwar auf einen Toleranzbereich von < ± 1 µGal reduziert, aber bei bestimmten Aufgabenstellungen eben doch zu berücksichtigen sein wird.

Die Ergebnisdarstellung in Abb. 7.17 basiert auf einem Aufpunktraster von 20 m Maschenweite, entsprechend einer Anzahl von 740 Aufpunkten. Die Höhe der horizontalen Rasterebene beträgt 489,16 m ü. NN.

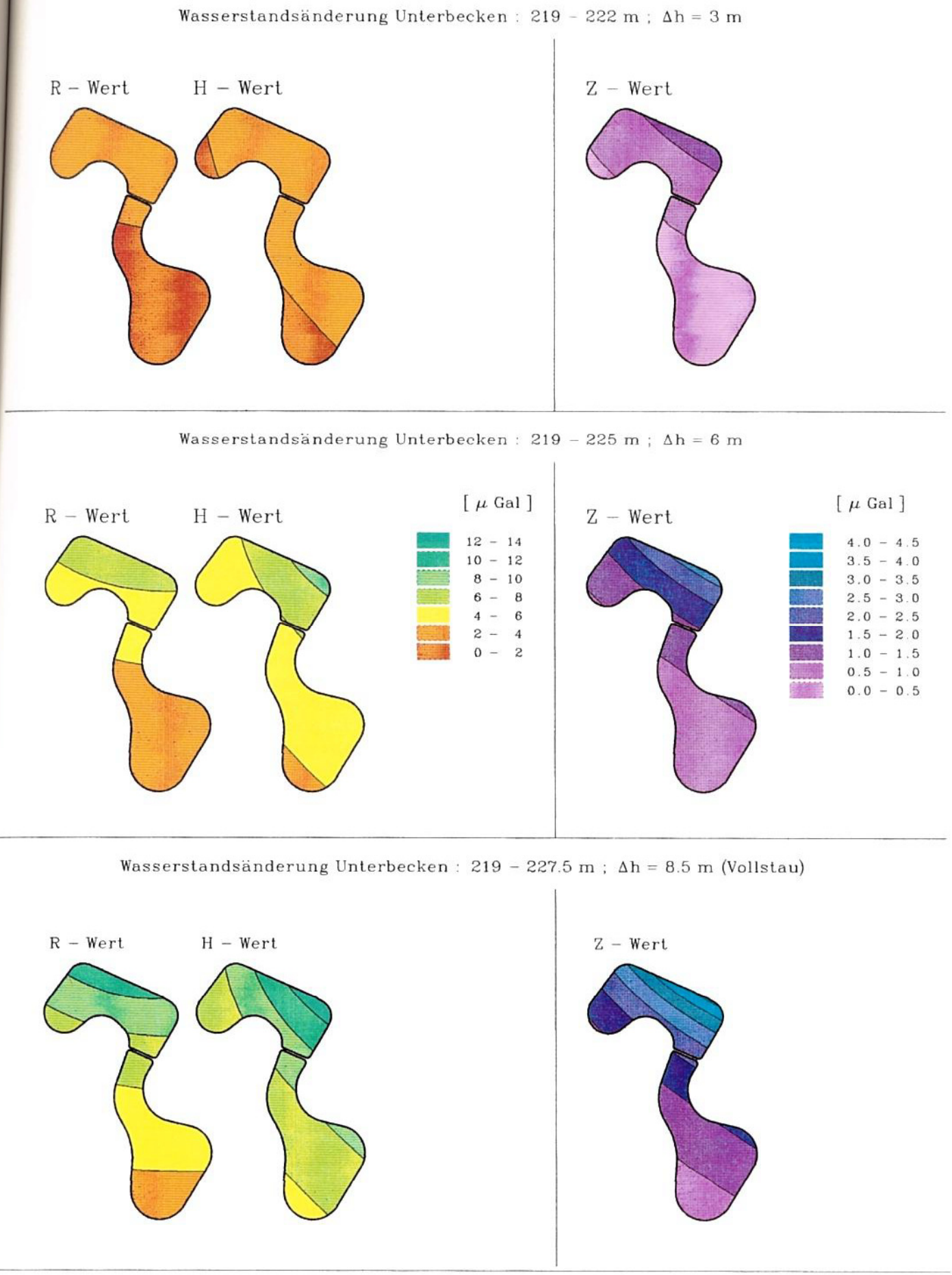


Abb. 7.17 Gravitationsauswirkungen von Wasserstandsänderungen im Unterbecken auf die Oberbecken-Region

8. Gravitationseffekte im Bereich des Unterbeckens

8.1 Vorbemerkung

Anwendungsbezogen ist hinsichtlich der Gravitationseffekte durch Variationen der Wasserstandshöhen im Unterbecken der Bereich der Staumauer Lohmühle von besonderem Interesse, da hier Neigungssensoren zur sicherheitstechnischen Überwachung installiert sind. Als Besonderheit ist herauszuheben, daß im Bereich der Staumauer (sowie talabwärts) bei den horizontalen Gravitationskomponenten quer zur Mauerachse keinerlei Kompensationseffekte auftreten. Dies ist von Relevanz für die Rasterbildung im Nahbereich des Bauwerkes.

8.2 Die Rasterung

Der Modellierung der Geometrie des Unterbeckens wurde wie bei den Oberbecken ein horizontales Raster zugrunde gelegt, dessen Weite jedoch im Nahbereich der Staumauer verkleinert wurde, um auch die Krümmung der stauseitigen, vertikalen Mauerfläche sowie den geometrisch komplizierten Böschungsbereich im Hinblick auf die räumliche Nähe zu der vorhandenen und den geplanten inklinometrischen Beobachtungsstationen hinreichend genau erfassen zu können. Die untere Basisfläche für die Quadermodellierung bildet die Ebene im Höhenniveau 219,00 m ü. NN entsprechend dem unteren Stauziel. Auf diese Weise konnte auch hier auf eine geometrische Erfassung der Beckensohle verzichtet werden.

Zur Abschätzung der im Nahbereich der Mauer notwendigen und sinnvollen Rasterweite wurde der horizontale Gravitationseffekt eines fehlenden oder überschüssigen Quaders mit der horizontalen Seitenlänge S und der vertikalen Höhe 8,5 m (Differenz zwischen oberem - 227,50 m ü. NN - und unterem - 219,00 m ü. NN - Stauziel) sowie der Dichte 1 g/cm³ als Funktion der Entfernung zum Aufpunkt im Niveau 223,25 m ü. NN (maximale Horizontalkomponente im mittleren Niveau) berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 8.1 nachgewiesen. Legt man als Grenzwert für die angestrebte Genauigkeit der berechneten horizontalen Gravitationskomponenten für alle Zonen der Staumauer (in Anlehnung an die Berechnungen für die Oberbecken) einen Betrag von 0,5 µGal fest, so folgt aus den Funktionskurven, daß entlang der wasserseitigen Wand der Staumauer eine Rasterweite von 1 dm eine in jedem Fall hinreichende Sicherheitsreserve beinhaltet.

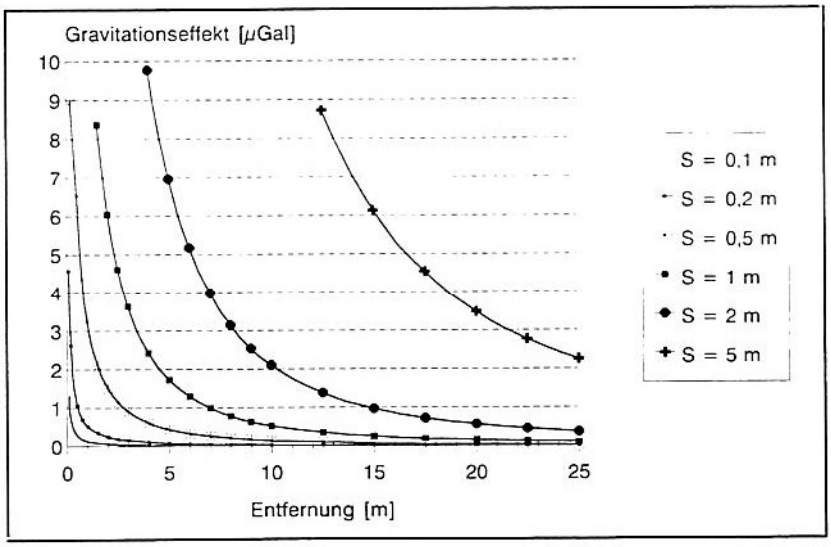


Abb. 8.1 Zur Rasterbildung des Unterbeckens im Nahbereich der Meßstation

Die Abb. 8.2 zeigt die im Nahbereich der Staumauer in Abhängigkeit von der Entfernung gewählte horizontale Rasterweite. Ab einer Entfernung von ~ 400 m wurde das Unterbecken einheitlich auf der Grundlage eines Rasters von 20 m Seitenlänge approximiert.

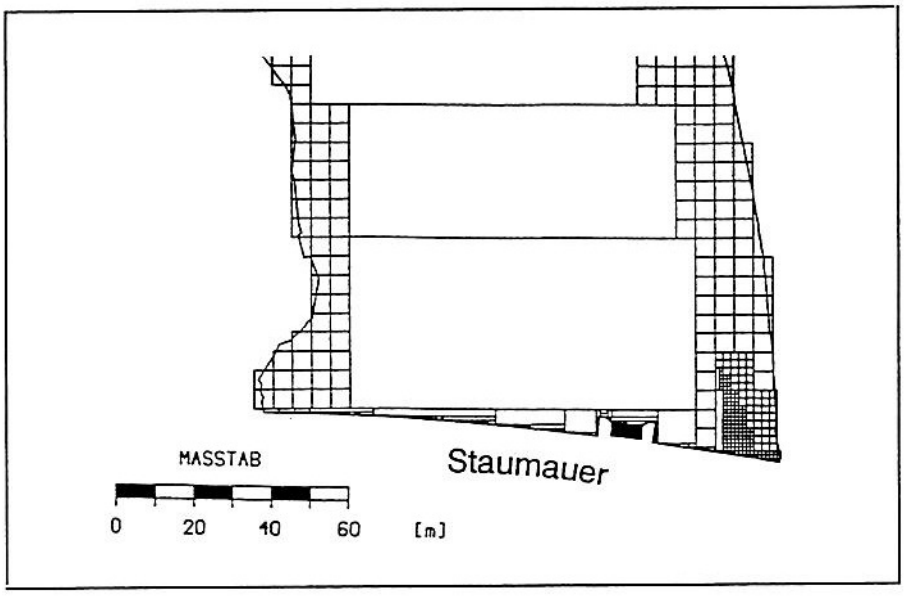


Abb. 8.2 Quaderweite und -reduktion durch Blockbildung m Staumauerbereich

8.3 Ergebnisse für den Bereich des Unterbeckens

Die drei Komponenten der berechneten Gravitationseffekte sind für den ingenieurtechnisch relevanten Bereich des Unterbeckens (Gesamtübersicht siehe Abb. 3.1) in Abb. 8.3a und 8.3b graphisch nachgewiesen. Sie beziehen sich auf ein Aufpunktniveau von 219,00 m ü. NN (Ebene unteres Stauziel). Die Quaderhöhe beträgt einheitlich 8,5 m, entsprechend der Höhendifferenz zwischen unterem und oberem Stauziel, so daß die angegebenen Gravitationswerte (wie in Abb. 7.7) Maximalbeträge darstellen. Den Berechnungen liegen 1620 Quader zugrunde. Diese setzten sich aus Quadern mit einer Modell-Rasterweite von 20 m sowie deren Zusammenfassung zu großen Blöcken (der größte Block hat eine Ausdehnung von 60 m - 280 m Seitenlänge) zwischen den Stauzielen zusammen. Hierdurch konnte die Anzahl der Quadern von 2786 auf 1620 reduziert werden. Die Rasterweite des Aufpunktnetzes beträgt 5 m, die Anzahl der Aufpunkte im Beckenbereich 37194. Somit liegen Berechnungsergebnisse für den **gesamten** Bereich des Unterbeckens mit einer Aufpunktrasterweite von 5 m vor.

Aus Symmetriegründen gelten die berechneten Werte der Horizontalkomponenten auch für die Aufpunktebene 227,50 m ü. NN (219,00 m + 8,5 m); in den Vertikalkomponenten ändert sich lediglich das Vorzeichen.

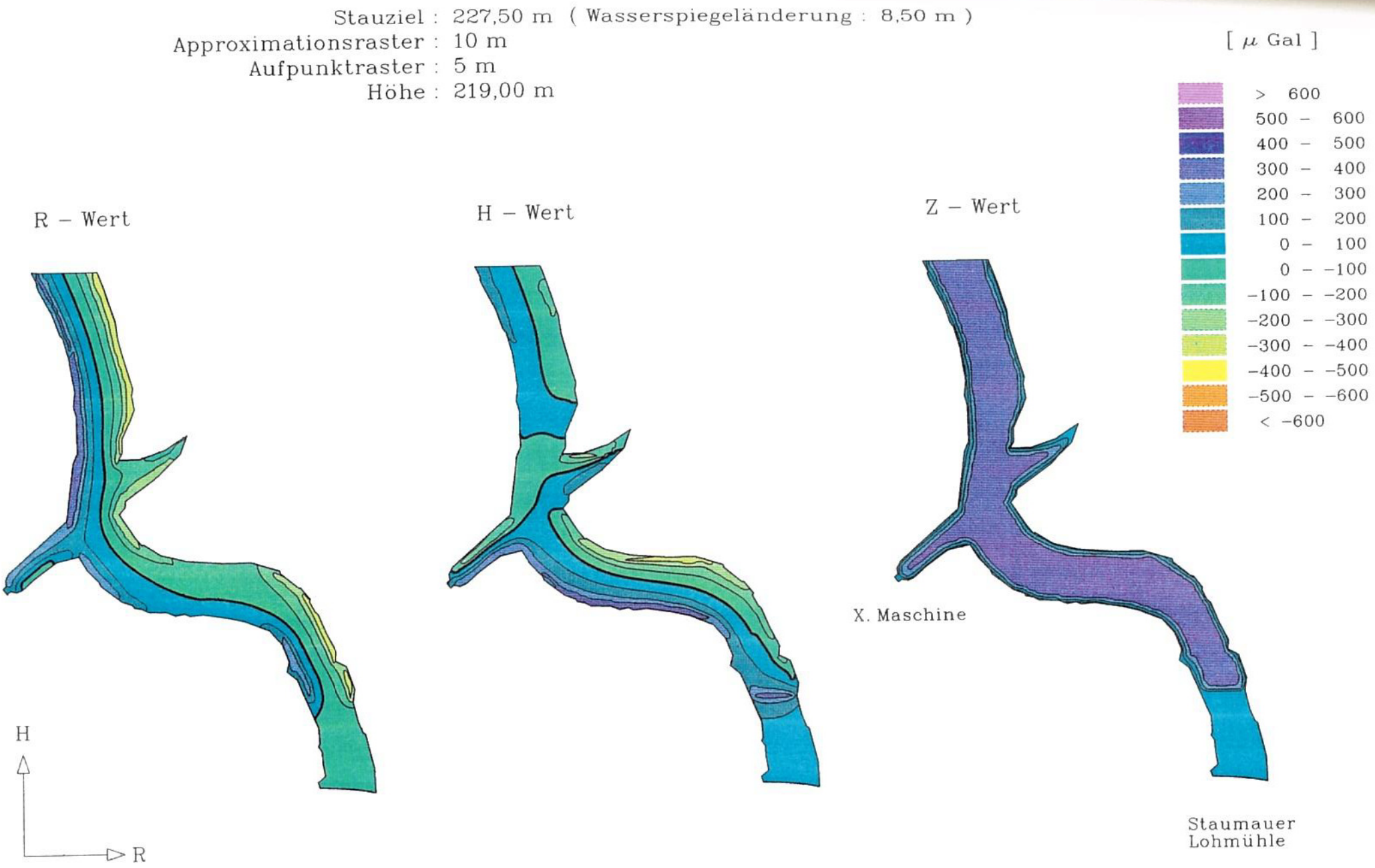


Abb. 8.3a Maximale Gravitationseffekte im Bereich des Unterbeckens

Stauziel : 227,50 m (Wasserspiegeländerung : 8,50 m)
Approximationsraster : 10 m
Aufpunktraster : 5 m
Höhe : 219,00 m

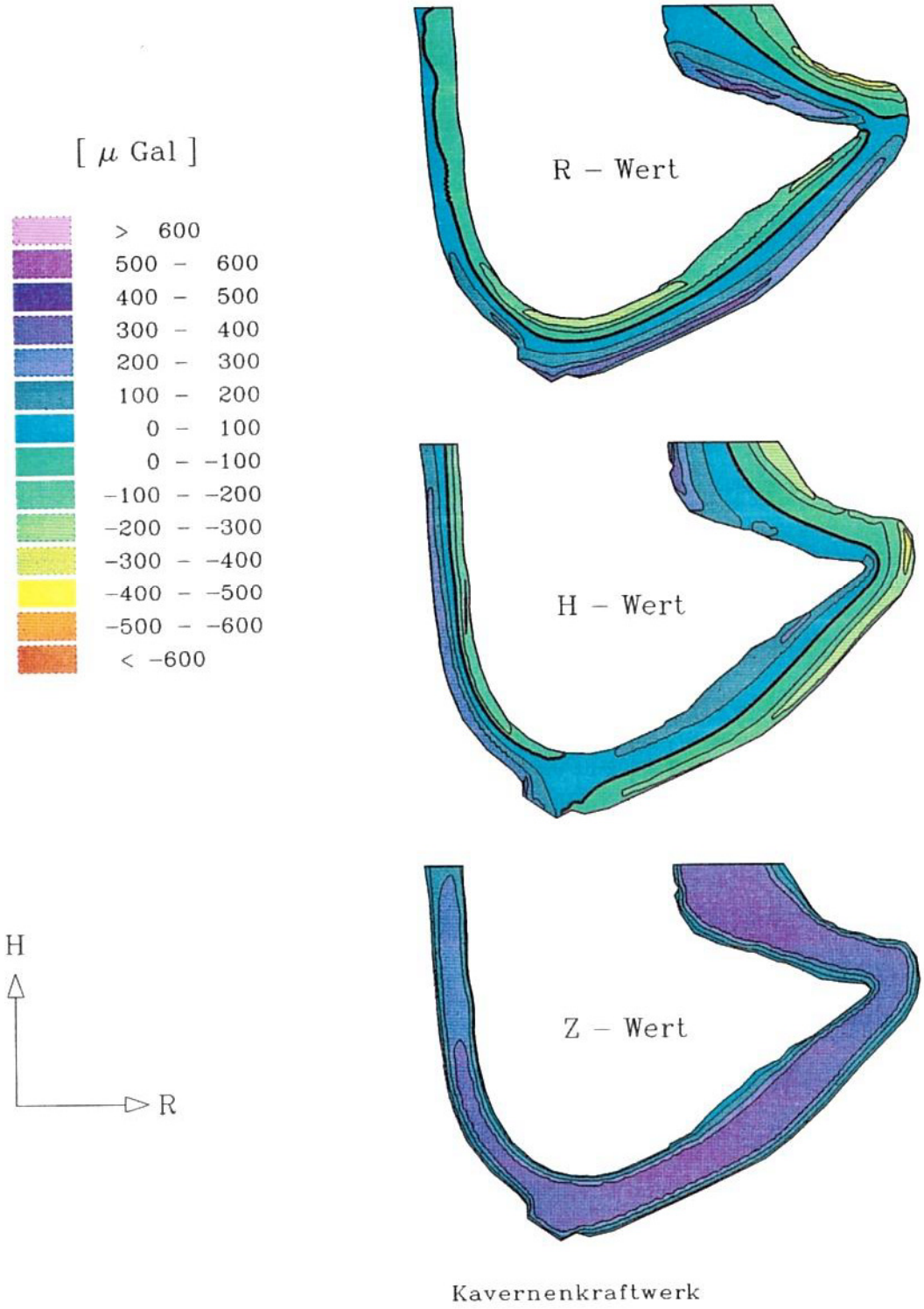


Abb. 8.3b Maximale Gravitationseffekte im Bereich des Unterbeckens

8.4 Der gravitative Einfluß von Wasserstandsvariationen im Bereich der Staumauer Lohmühle

Innerhalb des Schachtes zwischen den Staumauerblöcken 5 und 6 befindet sich, wie bereits erwähnt, ein Neigungsmeßsystem zur sicherheitstechnischen Überwachung der Mauer. Für die Position des inklinometrischen Probekörpers (Höhe 197,90 m ü. NN, Entfernung von der wasserseitigen Wand der Staumauer ~ 3 m) wurden die gravitativen Beschleunigungen in den drei Komponenten als Funktion des Wasserstandes berechnet. Die Ergebnisse sind in Abb. 8.4 dargestellt, wobei für die Darstellung der Horizontal- (H-Komp.) sowie Vertikalkomponenten die rechte Graphikskala gilt.

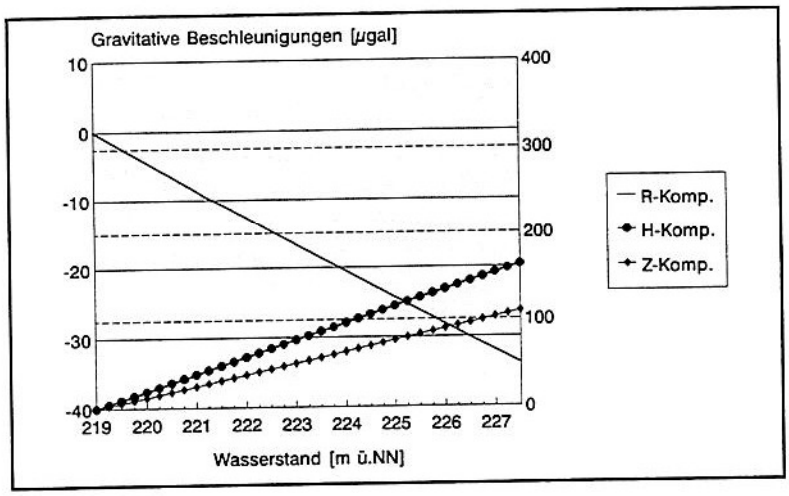


Abb. 8.4 Gravitative Beschleunigungen im Schacht 5/6 der Staumauer Lohmühle (Niveau: 197,90 m ü. NN)

Zum Vergleich der Funktionsverläufe in einer Aufpunkthöhe von 223,25 m ü. NN (maximale Gravitationseffekte in der primär interessierenden Hoch-Komponenten) sind die Ergebnisse in Abb. 8.5 dargestellt, wobei hier die rechte Graphikskala nur für die Horizontal(H-Komp.)komponente gilt.

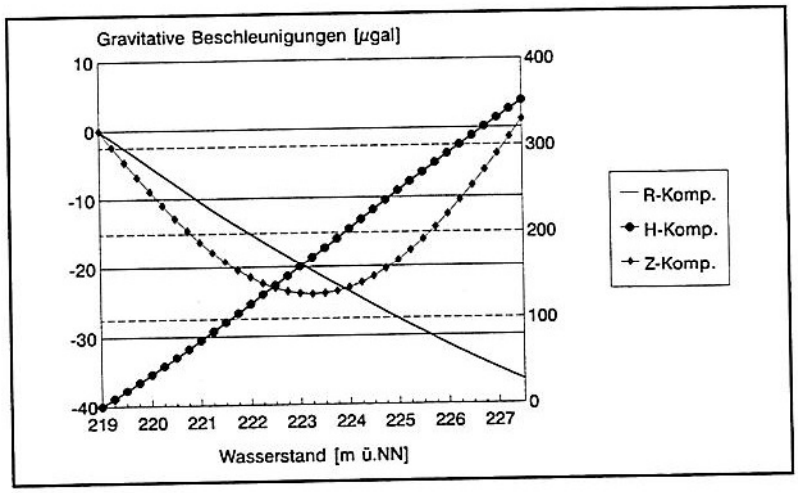


Abb. 8.5 Gravitative Beschleunigungen im Schacht 5/6 der Staumauer Lohmühle (Niveau: 223,25 m ü. NN)

8.5 Der Gravitationseffekt entlang eines Vertikalprofils in der Staumauer Lohmühle

Entlang eines Vertikalprofiles innerhalb des Schachtes zwischen den Blöcken 5 und 6 der Staumauer wurden die drei Komponenten des maximalen Gravitationseffektes (Wasserstandsvariationen zwischen unterem und oberem Stauziel) berechnet und als Ergebnisse in Abb. 8.6 nachgewiesen.

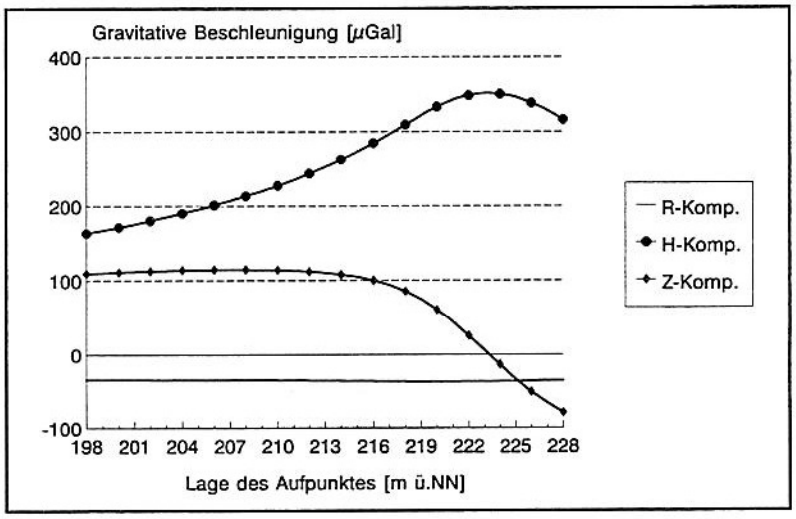


Abb. 8.6 Gravitative Beschleunigungen entlang eines Vertikalprofils

Die Richtung der Hochachse bildet im Bereich des Schachtes mit der Richtung der Mauerachse lediglich einen Winkel von 5,5°, so daß der Gravitationseffekt in H-Richtung in etwa mit dem Wert quer zur Mauerachse übereinstimmt. Nach entsprechender Transformation und Umrechnung in Winkeleinheiten ergibt sich aus Abb. 8.6 der in Abb. 8.7 nachgewiesene Funktionsverlauf; die maximale Variation der Lotrichtung im Aufpunktniveau 223,50 m ü. NN beträgt ~ 0,076 Bogensekunden.

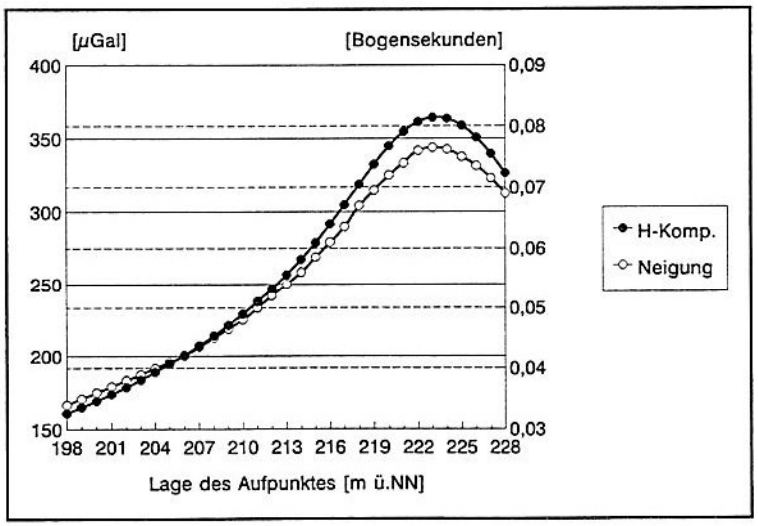


Abb. 8.7 Gravitationseffekte senkrecht zur Staumauerachse

8.6 Die gravitativen Wirkungen von Wasserstandsvariationen des Oberbeckens auf den Bereich des Unterbeckens

Entsprechend Kapitel 7.9 wurde auch für den Bereich des Unterbeckens der gravitative Einfluß der maximalen Wasserstandsvariationen in den Oberbecken ermittelt und in Abb. 8.8 äquivalent zu Abb. 7.17 flächenhaft dargestellt. Während in den Horizontalkomponenten die Gravitationseffekte bis zu 30 µGal betragen, liegt der Maximalbetrag in der Vertikalkomponente bei ~ 10 µGal. Für den Bereich der Staumauer erreichen die Gravitationseffekte des Oberbeckens die Beträge von ~ 10 µGal in der R-Richtung, von ~ 5 µGal in der H-Richtung und ~ 1,5 µGal in der Vertikalkomponenten.

9. Die wasserstandsabhängigen Variationen der Lotrichtung

Die ingenieurtechnische Genauigkeitsgrenze von Neigungsbeobachtungen liegt bei ~ ± 0,01 Bogensekunden. Begründet ist dies aus der Tatsache, daß in mittleren Breiten der inklinometrische Gezeiteneffekt im Bereich von ~ 0,05 Bogensekunden (Doppelamplitude) liegt und infolgedessen eine höhere Meßgenauigkeit ohne parallel laufende geodynamische Beobachtungen wenig sinnvoll ist. Hingegen ist es bis zu einer Grenze von ~ ± 0,01 Bogensekunden noch möglich, theoretische Modellwerte für den inklinometrischen Gezeiten fekt zu verwenden (von Sonderfällen abgesehen, in denen die Spannungsneigungskopplung zu extremen Verhältnissen führt), da der entsprechend zulässige Gezeitenfehler > 20 % beträgt.

Für alle ingenieurgeodätischen Neigungsbeobachtungen im Bereich der Oberbecken und des Unterbeckens lassen sich im Bedarfsfall die wasserstandsabhängigen Lotrichtungsvariationen aus den Ergebnisdarstellungen der horizontalen Gravitationskomponenten in Abb. 7.7 und Abb. 7.17 (Oberbecken) sowie Abb. 8.3a / Abb. 8.3b und Abb. 8.8 (Unterbecken) ableiten. Dabei kann hinreichend genau angesetzt werden: 100 µGal ≙ 0,02 Bogensekunden ($g \approx 10^9$ µGal, $\varrho'' \approx 2 * 10^5$). Die Angaben in den genannten Abbildungen beschreiben jeweils die gravitativen Effekte, die einer Wasserstandsdifferenz zwischen minimalen und maximalen Stauzielen zugeordnet sind. Die bei Zwischenständen der Wasserspiegel auftretenden Effekte können im Problemzusammenhang linear interpoliert werden. Es sind ferner Variationen der Aufpunkthöhen gegenüber den Berechnungsebenen für die Gravitationseffekte je nach Aufpunktlage und Gravitationskomponente bis zu mehreren Zehnmetern zulässig. Die maximalen Lotrichtungsvariationen betragen im Bereich der Oberbecken ~ 0,12 Bogensekunden (entsprechend 600 µGal) und im Bereich des Unterbeckens ~ 0,076 Bogensekunden (entsprechend 380 µGal).

Mit den in den genannten Abbildungen nachgewiesenen Informationen ist der ingenieurtechnische Teil der den Umfang und Verteilung der Lotrichtungsvariationen betreffenden Fragen beantwortet.

Im Falle hochauflösender, geodynamischer Neigungsbeobachtungen in Stationen innerhalb des Wirkungsbereichs der Kraftwerksbecken (bei tektonischen Untersuchungen oder bei Gezeitenbeobachtungen) sind die gravitativen Effekte der variierenden Wassermassen individuell zu berechnen. Dies gilt selbstverständlich auch für ingenieurtechnische Meßstationen in größeren Abständen zu den Becken oder bei größeren Höhendifferenzen gegenüber den gewählten Berechnungsebenen. Für diese Zwecke kann auf die vorhandene Datenbank mit den entsprechenden Quaderapproximationen für die Oberbecken sowie für das Unterbecken zurückgegriffen werden.

Stauziel : 510,30 m (Wasserspiegeländerung : 16,30 m)
Approximationsraster : 20 m
Aufpunktraster : 20 m
Höhe : 219,00 m

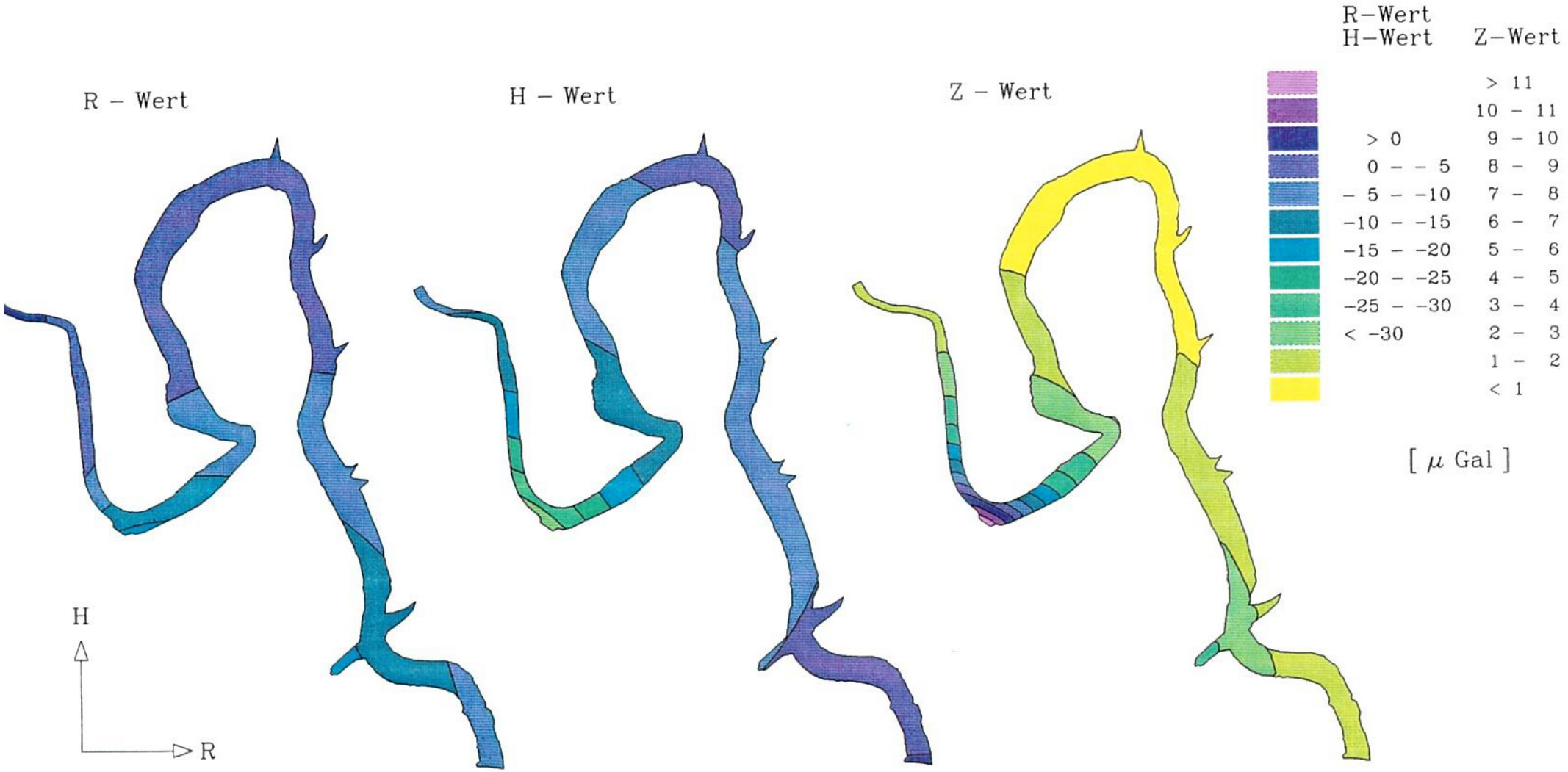


Abb. 8.8 Gravitationsauswirkungen von Wasserstandsänderungen im Oberbecken auf die Unterbecken–Region

10. Schwerevariationen im Kraftwerksbereich

Bei Schweremessungen im Kraftwerksbereich stellt sich die Frage, ob und bis zu welcher Entfernung in Abhängigkeit von der Topographie die Vertikalkomponente der Gravitationseffekte beider Becken zu berücksichtigen ist. Um den Ausdehnungsbereich der vertikalen Schwerekomponente, der für das geometrische Nivellement eventuell bedeutsam ist (nähere Informationen hierzu im Kapitel 11) zu verdeutlichen, ist in einem 1. Schritt die Topographie um die Staubecken in einem digitalen Geländemodell (Abb. 10.1) abgebildet worden. Hierzu wurde das Programmsystem MOSS von der Fa. PAFEC eingesetzt. Die Geländestruktur wird über eine Dreiecksvermaschung abgebildet, die Vorteile gegenüber anderen Lösungen (z.B. Rasterverarbeitung) bietet, da Geländepunkte (und somit auch Bruchkanten) bei dieser Modellbildung erhalten bleiben. Insgesamt beschreiben 2130 Geländepunkte das in Abb. 10.1 dargestellte Modell. Dieser Aufwand war erheblich und findet nur im Hinblick auf weitere Fragestellungen seine Rechtfertigung.

Für jeden Rasterschnittpunkt sind dann getrennt für die Oberbecken (Vollstau 16,30 m) und das Unterbecken (Vollstau 8,50 m) die vertikalen Schwerekomponenten ermittelt worden. Hieraus wurde dann eine Isoliniendarstellung gleicher Schwerewerte abgeleitet (Abb. 10.2), die deutlich macht, wie weit sich die beeinflußten Bereiche in das Umland der beiden Staubecken auswirken. Zudem läßt sich großflächig die gegenseitige gravitative Beeinflussung der Wasserreservoire erkennen, die objektweise schon vorher (Abb. 7.17/Abb. 8.8) vorgestellt wurden.

Setzt man die Signalauflösung von Feldgravimetern mit etwa ~ 5 µGal an, so zeigt sich, daß bei eventuellen gravimetrischen Messungen aus den Wasserstandsvariationen resultierende Gravitationseffekte in bestimmten Fällen sehr wohl zu berücksichtigen sein werden, je nach Lage und Höhe der Meßpunkte zu den Becken.

11. Auswirkungen der Gravitationseffekte im Bereich der Kraftwerksbecken

11.1 Allgemeine Betrachtungen

Schwereänderungen sind aus Sicht der Boden- und Bauwerksüberwachung im Bereich des PSW Vianden vor allem bezüglich folgender Einflüsse relevant:

A **Deformationen der Geometrie des Schwerefeldes**, die sich insbesondere in Deformationen der Niveau- oder Äquipotentialflächen bemerkbar machen. Ihre graphische Darstellung in Form von Höhenänderungen relativ zu einer Bezugs-Äquipotentialfläche ermöglicht eine gute Veranschaulichung von Gravitationseffekten.

B **Änderungen von dynamischen Höhendifferenzen**, die zwischen Stationen P_a - P_b aufgrund von geometrischen Nivellements (dh) und Messungen des Schwerebetrages (g) gemäß der "allgemeinen Nivellementsgleichung"

$$\Delta H_{ab}^{dyn} := \Delta W_{ab} / g_o = -\int_a^b dh - (1/g_o)\int_a^b (g-g_o)\,dh$$

bestimmt sind. ΔW_{ab} ist die Differenz des Schwerepotentials und g_o ist ein konstanter mittlerer Schwerebetrag. Dynamische Höhen sind für alle physikalisch-technischen Aufgabenstellungen maßgeblich, soweit sich diese auf "Höhendifferenzen" im Schwerefeld der Erde beziehen.

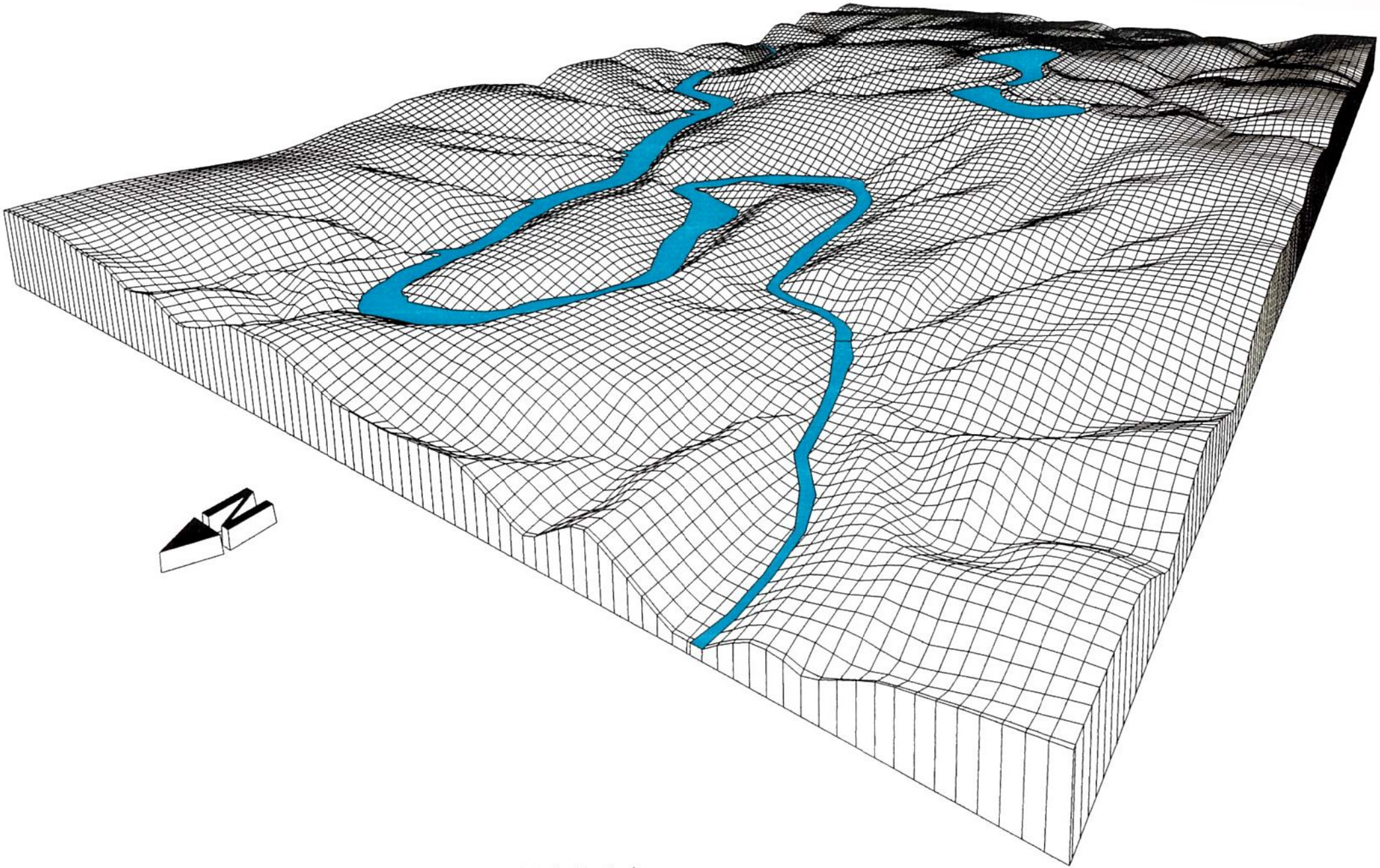


Abb. 10.1 Digitales Geländemodell (40 m-Raster) im Bereich der Staubecken

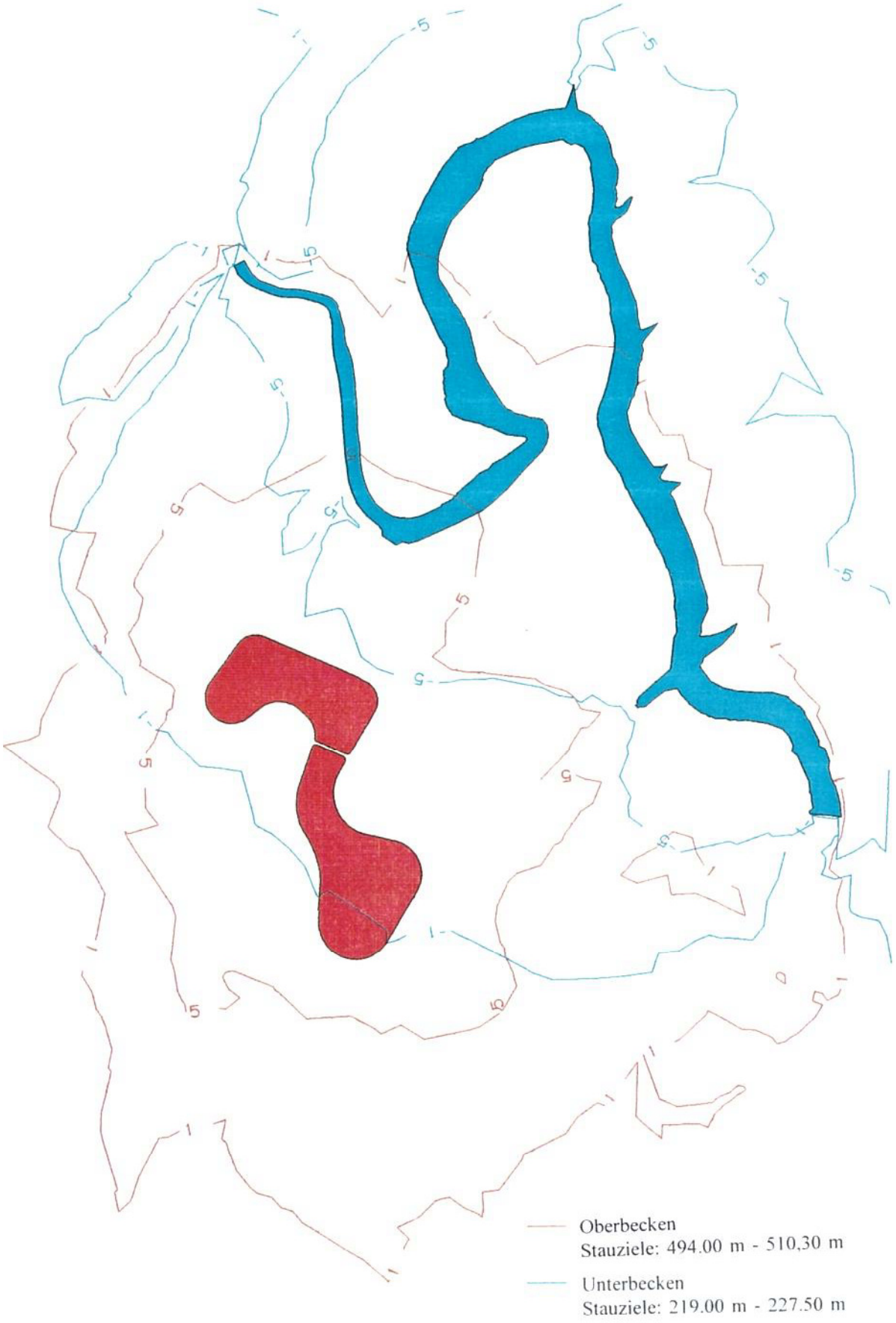


Abb. 10.2 Maximale Schwerevariation in µGal

C **Änderungen des Spannungsfeldes im Untergrund der Kraftwerksbecken.** Diese sind allgemein über ein geeignet formuliertes Randwertproblem der Differentialgleichung der Elastostatik in der Form

$$\partial\sigma_{ij.}/\partial x_{j.} = \theta\delta g_{i.} = \theta(\delta g_x, \delta g_y, \delta g_z) = \theta\partial\delta V/\partial x_{i.}$$

zu bestimmen (siehe /21/, Abschnitte 8.3.2, 8.3.3). Die Begrenzungs- oder Randfläche R des Integrationsgebietes ist nach oben durch die Erd- bzw. Beckenoberflächen zu bilden und im Erdinnern durch einen Quaderstumpf, dessen Kanten so lang zu wählen sind, daß an den Randflächen die $\delta g_{i.}$ vernachlässigt werden können. Dann lauten die Randbedingungen zu obiger Differentialgleichung

$$s_{i.R} = \sigma_{ij.R} n_{j.R} = 0_{i.}, \quad n_{j.R} = \textit{Randnormale.}$$

Auf A wird in den Kapiteln 11.2 bis 11.4 näher eingegangen und auf B im Kapitel 11.5.

Allgemeinere Untersuchungen der Spannungsfelder gemäß C sind nicht Gegenstand der Dissertation. Es wird hier nur eine spezielle lokale Betrachtung zu den Normal- und Tangentialspannungen durchgeführt, deren Berechnungsgrundlagen im Kapitel 5.2 angegeben sind. Für horizontale Flächenelemente ist in einem regionalen kartesischen Koordinatensystem mit der z-Achse in Nadirrichtung $n_{i.} = \delta_{i3.}$, so daß sich hierfür Normal- und Tangentialspannung wie folgt ergeben:

$$s_{i.z}^{N} = \sigma_{33.}\delta_{i3.}, \quad s_{i.z}^{T} = \sigma_{j3.}(\delta_{ij.} - \delta_{i3.}\delta_{j3.}) = (\sigma_{13.}, \sigma_{23.}, 0).$$

Entsprechend den Aussagen zur Untergrundgeologie in Kapitel 5.2 ist von

$$\sigma_{33.} \gg \sigma_{13.}, \sigma_{23.}$$

auszugehen. Werden demgemäß die beiden rechts stehenden Komponenten und damit s_z^T vernachlässigt, so erhält man nach Überschieben der Differentialgleichung der Elastostatik mit $\delta_{i3.}$

$$\partial s_z^N/\partial z \approx \theta\ \partial\delta V/\partial z \Rightarrow s_z^N = |s_{i.z}^N| = |s_{3.z}^N| \approx \theta\delta V + \textit{Konstante.}$$

Es lassen sich also aus den Effekten δV des Gravitationspotentials bei Kenntnis der Dichte unmittelbar Abschätzungen für die resultierenden Normalspannungen s_z^N angeben.

Abschätzung: Unter Annahme einer Untergrunddichte von $\theta \sim 2{,}5$ g/cm³ sowie einem Gravitationseffekt von $\delta g_z \sim 37$ µGal pro m Wasserstandsänderung beider Oberbecken in Bezug auf die Meßstation "Bohrloch 1" ergibt sich s_z^N zu $9{,}2 * 10^{-6}$ Pascal.

11.2 Deformationen der Äquipotentialflächen

Es bieten sich zwei Wege an, die beide einen Lösungsansatz für die aufgeworfenen Fragestellungen aufzeigen. Zum einen, aus einer mehr theoretisch geprägten Sichtweise, der Weg über die Potentialtheorie, nämlich über die Änderung des Betrages von g; zum anderen alternativ ein geometrisch-dynamischer Lösungsansatz, der mehr aus der ingenieurgeodätischen Sichtweise die Fragestellungen aufgreift. Letzterer Weg wird in dieser Arbeit beschritten und am Beispiel des Oberbeckens II (siehe Abb. 11.1) aufgezeigt.

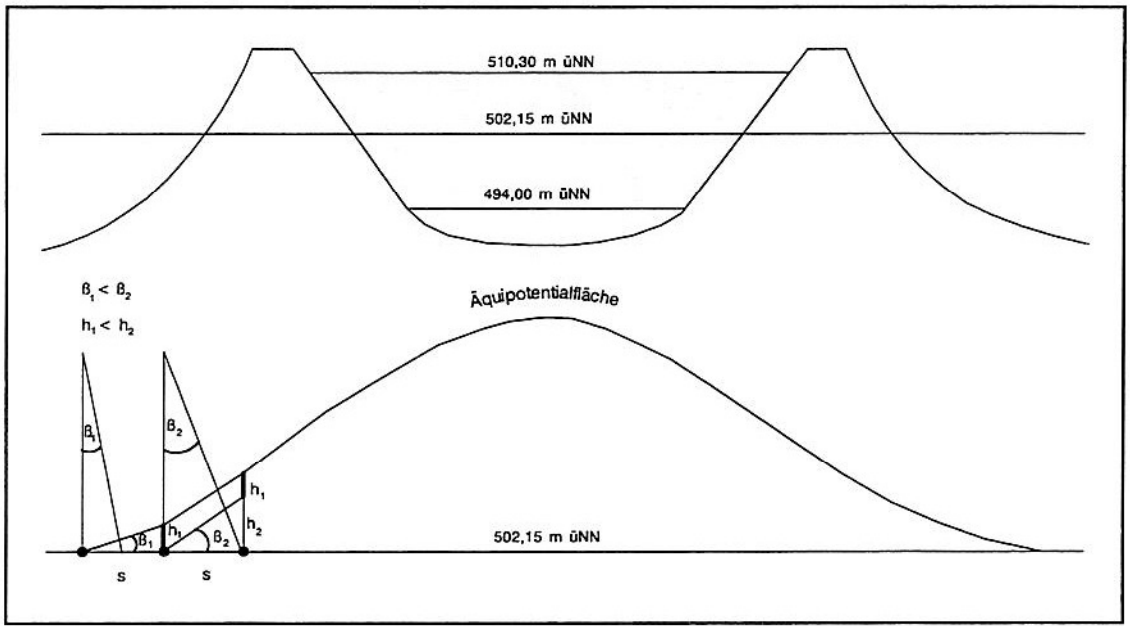


Abb. 11.1 Zur Berechnung der Äquipotentialflächen-Verlagerung als Folge maximaler Wasserstandsänderungen

Entlang der durch das Zentrum des Oberbeckens II verlaufenden Koordinatenlinie Hochwert H = 11600 m wurden für das mittlere Stauniveau h = 502,15 m ü. NN die der maximalen Massenveränderung (ΔH = 16,3 m) zugeordneten horizontalen Gravitationsbeschleunigungen in R-Richtung mit einem Stützstellenabstand von 25 m berechnet, wobei die gravitativen Horizontalbeschleunigungen in der Ebene des mittleren Stauniveaus ihren maximalen Betrag erreichen. Allerdings ist die Differenz dieser Beschleunigungen gegenüber den entsprechenden Werten in den oberen und unteren Stauzielebenen kleiner als relativ 10^{-3}, so daß es sich bei der Wahl der Mittelebene um eine eher theoretisch begründete Entscheidung handelt.

Die horizontalen Gravitationsbeschleunigungen werden in bekannter Weise wieder in Winkeländerungen $\Delta\beta$ umgerechnet, die in Verbindung mit den äquidistanten Stützstellenabständen Δs eine Folge von zugeordneten Höhenänderungen Δh ergeben. Aus diesen kann der Verlauf der durch die Gravitationswirkungen veränderten Äquipotentialfläche in der Vertikalebene durch die genannte Koordinatenlinie punktuell konstruiert werden (Abb. 11.1).

Mit steigendem Rechtswert nehmen die Höhenunterschiede zwangsläufig zu, da die Anziehungskräfte in Richtung des Beckens stärker werden bis zu der Stelle, wo sich Kompensationseffekte einstellen (siehe auch Abb. 7.7), die bis zu einer Zuwachsrate von null führen. Im weiteren Verlauf des Profiles kehrt sich dieser Vorgang mit geändertem Vorzeichen um. Eine Summation der Höhendifferenzen Δh über das gesamte Profil liefert die vertikale Verlagerung der Äquipotentialfläche, wobei streng genommen nur Differenzen-Quotienten berechnet werden. Wählt man den Stützstellenabstand jedoch sehr klein, so nähert man sich dem eigentlich gesuchten Differential-Quotienten.

In den nachfolgenden Kapiteln 11.3 sowie 11.4 werden unter Zugrundelegung dieses Verfahrens die Komponenten der lokalen Lotrichtungsänderungen in **ausgewählten** Äquipotentialflächen benutzt, um die Deformation der Geometrie des Schwerefeldes zu beschreiben.

Hinsichtlich des **"astronomischen Nivellements"** auf der Grundlage von

$$\Delta z = \int \beta_{\alpha.} dx_{\alpha.} \ , \ dx_{\alpha.} \in \{dx, dy\}$$

sind jedoch auch die Komponenten der relativen Lotrichtungsänderungen bezogen auf eine Bezugs-Äquipotentialfläche AF von besonderem Interesse. Wie in Kapitel 7.3 aufgeführt, bestimmen sie sich zu

$$\beta_{\alpha.} = \int_F^A \delta \beta_{\alpha.} dh = (1/g_o) \int_F^A \delta g_{\alpha.} dh \ [rad] \ , \ \alpha \in \{x, y\}.$$

In Tabelle 11.1 sind Lotrichtungsänderungen in Abhängigkeit von Höhenänderungen dh_{FA} nachgewiesen, bezogen auf einen Beobachtungsort am Oberbecken II (R = 80500; H = 11600; Z = 502,15), bei dem die horizontale Gravitationskomponente maximale Beträge bei Vollstau beider Oberbecken (hier: ~ 721 µGal) erreicht.

	dh_{FA} [m]					
	5	10	15	20	25	30
Bogensekunden	0.0060	0.0191	0.0309	0.0410	0.0495	0.0569

Tab. 11.1 Lotrichtungsänderungen

Der Lotkrümmungseffekt kann somit für die Fragestellungen im Bereich des PSW Vianden vernachlässigt werden.

11.3 Ein Profil der Äquipotentialflächenverlagerung am Oberbecken II

11.3.1 Der Einfluß des Stützstellenabstandes

Infolge der Verwendung von Differenzenquotienten anstelle von Differentialquotienten sind die in den Stützstellen berechneten vertikalen Verschiebungen der Äquipotentialfläche abhängig vom Stützstellenabstand. Zur Abschätzung dieses Effektes wurde der aus den vertikalen Verschiebungen abgeleitete Verlauf der Äquipotentialfläche mit drei unterschiedlichen Stützstellenabständen berechnet: Δs = 100 m, 50 m, 25 m. Die Berechnungen sind in Abb. 11.2 nachgewiesen. Es ist erkennbar, daß im Einflußbereich des Oberbeckens II bereits mit einem Stützstellenabstand Δs von 25 m eine Approximationssicherheit von wenigen Mikrometern erreicht wird. Die der maximalen Wasserstandsänderung zugeordnete vertikale Lageverschiebung der Äquipotentialfläche im Bereich des Beckenzentrums beträgt ~ 0,175 mm.

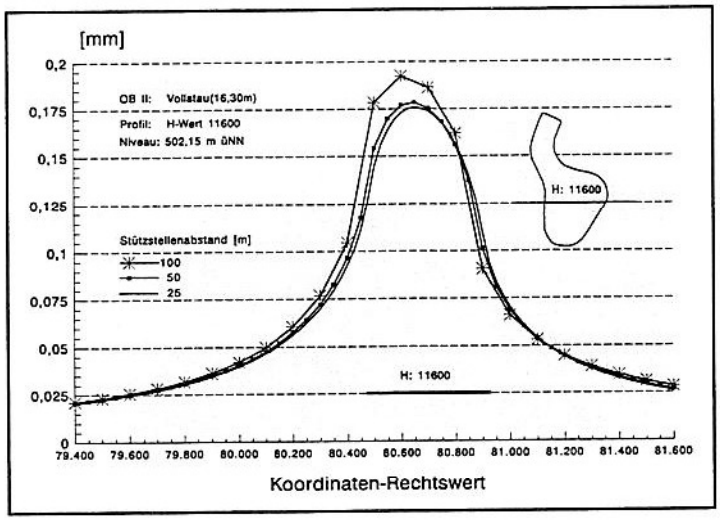


Abb. 11.2 Verlagerung der berechneten Äquipotentialfläche bei Variationen des Stützstellenabstandes

11.3.2 Der Einfluß der Äquipotentialflächenhöhe

Variiert man das Profilniveau zwischen 0 m ü. NN und 500 m ü. NN in einer Schrittweite von 25 m und stellt die Äquipotentialflächen- Verlagerungen dar (Abb. 11.3), so ist deutlich der Unterschied in Abhängigkeit vom gewählten Profilniveau zu erkennen. Je tiefer das Profilniveau liegt, um so geringer wirkt sich die Geometrie des Oberbeckens (die Gravitationskräfte verrringern sich mit dem Quadrat der Entfernung) auf die Höhenverlagerung aus.

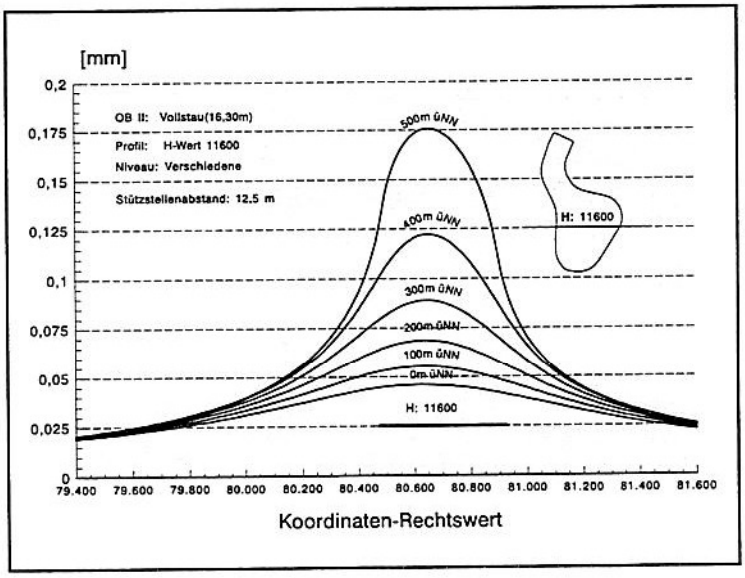


Abb. 11.3 Äquipotentialflächen-Verlagerung bei unterschiedlichen Ausgangsniveaus bei maximaler Wasserstandsänderung Oberbecken II am Profil H-Wert = 11600

11.3.3 Der Einfluß von Oberbecken I

Die bisherigen Berechnungen bezogen sich ausschließlich auf die Massenveränderungen in Oberbecken II. Berücksichtigt man zusätzlich die Gravitationswirkungen der Massen in Oberbecken I, so zeigt Abb. 11.4, daß sich in der gewählten Profillinie die maximale vertikale Verschiebung der Äquipotentialfläche lediglich um den Betrag von ~ 0,025 mm vergrößert.

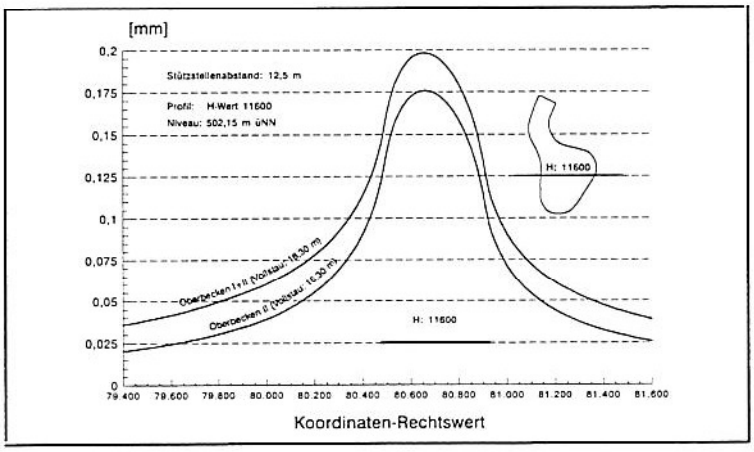


Abb. 11.4 Äquipotentialflächen-Verlagerung bei Einwirkung beider Oberbecken

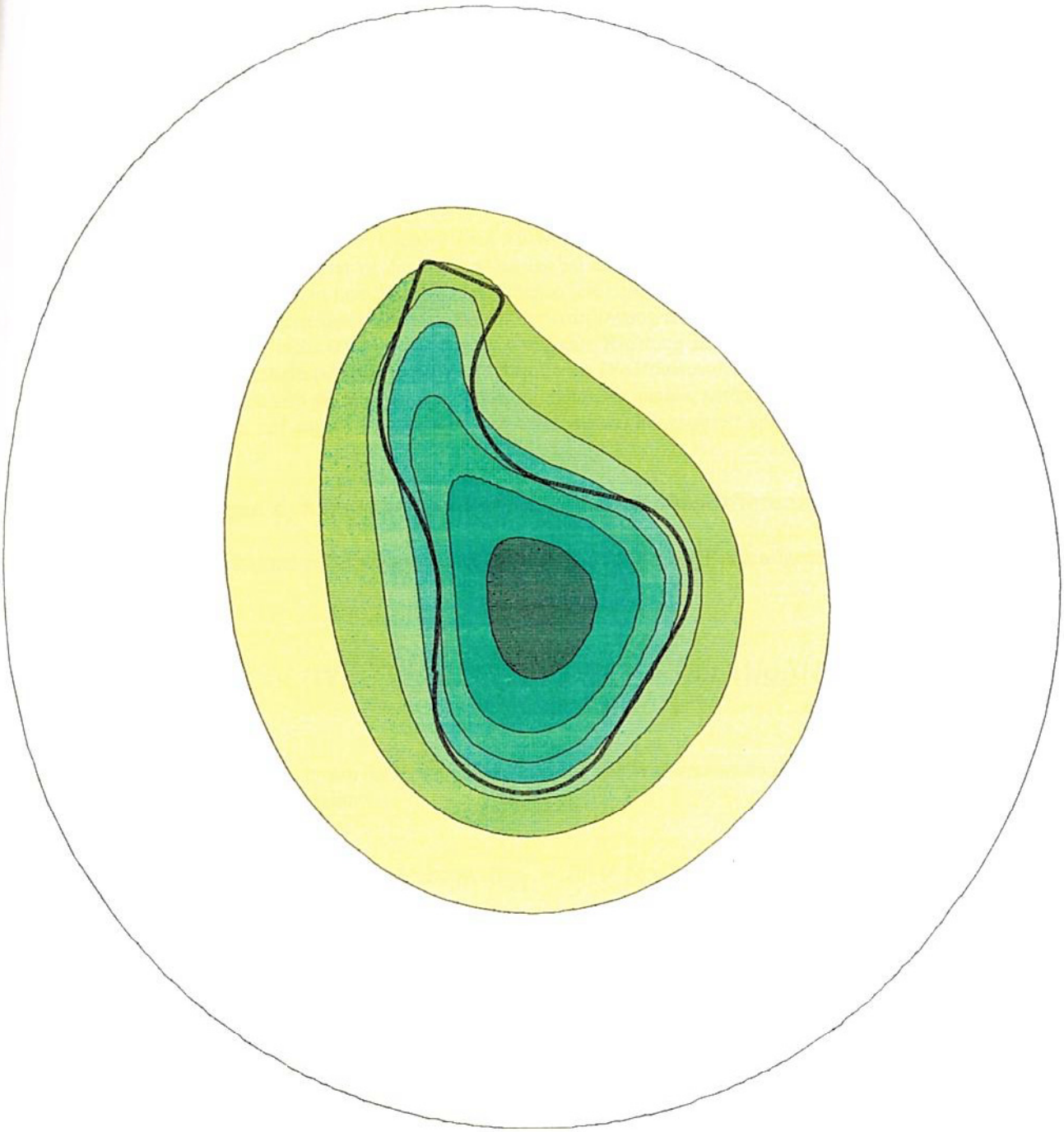
11.4 Die flächenhafte Struktur der Äquipotentialflächenverlagerung

Der Verlauf der vertikalen Verlagerungen Δh der Äquipotentialfläche entlang lediglich einer horizontalen Profillinie liefert nur begrenzte Informationen über den Zusammenhang mit der Beckengeometrie. Es wurden daher ergänzend die flächenhaften Verteilungen der Vertikalverschiebungen Δh für den Bereich des Oberbeckens II und einen Teil des Unterbeckens berechnet.

Es ist jedoch zu beachten, daß aus den in Kapitel 11.6 erwähnten Gründen die Gravitationseffekte des Oberbeckens I **nicht** berücksichtigt wurden. Insofern geben die für das Oberbecken II nachgewiesenen Ergebnisse in den Bereichen des Zwischenbauwerkes nicht den realen physikalischen Sachverhalt wieder, wie er bei Vollstau auch in Oberbecken I auftritt. Genähert läßt sich jedoch sagen, daß sich im Nahbereich des Zwischenbauwerkes die Vertikalverschiebungen Δh gegenüber den dargestellten Werten etwa verdoppeln und mit zunehmender Entfernung e vom Zwischenbauwerk der Effekt des Oberbeckens I mit $1/e^2$ abklingt.

11.4.1 Oberbecken

Die flächenhafte Berechnung der Vertikalverschiebungen Δh im Bereich des Oberbeckens II basiert auf einem Aufpunktraster von 25 m Rasterweite, entsprechend einer Anzahl der Aufpunkte von 32220. Die Ergebnisse der Berechnungen sind in Abb. 11.5 nachgewiesen. Wie erwähnt, haben die dargestellten Ergebnisse im Bereich des Zwischenbauwerkes wegen der Nichtberücksichtigung der Massenveränderungen im Oberbecken I eher exemplarische Bedeutung hinsichtlich des Zusammenhanges zwischen Beckengeometrie und Äquipotentialflächenverschiebung.
Auf den Zusammenhang mit der flächenhaften Verteilung der in Abb. 7.7 nachgewiesenen vertikalen Gravitationseffekte wird verwiesen.



Oberbecken II (Vollstau: 16,30 m)
Höhenänderung Δh [mm]

0.020 – 0.040
0.040 – 0.060
0.060 – 0.080
0.080 – 0.100
0.100 – 0.120
0.120 – 0.140
0.140 – 0.160
0.160 < 0.170

Maßstab

0 100 200 300 400 500 [m]

Abb. 11.5 Isoliniendarstellung der Äquipotentialflächen – Verlagerung beim Oberbecken II bei maximaler Wasserstandsänderung

11.4.2 Unterbecken

In Abb. 11.6 ist das Ergebnis einer flächenhaften Auswertung für das Unterbecken im Bereich der Staumauer graphisch aufbereitet. Hier ist ein Aufpunktraster bei einer Höhe von 223,25 m ü. NN (d.h. Mitte Stauziel) im Abstand von 20 m berechnet worden. Ebenso wie beim Oberbecken ist ein enger Zusammenhang zwischen der Geometrie des Unterbeckens mit der Ausprägung der Höhenveränderung zu erkennen. Die Aufweitung des Bereichs 0.05 - 0.06 mm in westlicher Richtung ist auf die Berücksichtigung des gesamten Unterbeckeninhalts (siehe Abb. 8.8) zurückzuführen. Die Höhenänderungen sind deutlich geringer als beim Oberbecken, da sich die Wassermassen über ein schmales, langes, natürliches Staubecken verteilen und nicht so kompakt auf engem Raum (wie beim Oberbecken) konzentriert sind.

11.5 Änderungen dynamischer und nivellitischer Höhendifferenzen

Ausgangspunkt der folgenden Betrachtungen ist die zu Abb. 11.1-B angegebene allgemeine Nivellementsgleichung

$$\Delta H_{ab}^{dyn} := (W_b - W_a)/g_o =: \Delta W_{ab}/g_o = -\int_a^b dh - (1/g_o)\int_a^b (g-g_o)dh \ ,$$

die hinsichtlich der Auswirkungen der durch die Verlagerung von Wassersmassen in den Kraftwerksbecken entstehenden "Gravitationseffekte"

$$\delta V \ bzw. \ \delta g_i = \partial \delta V / \delta x_i$$

untersucht werden soll.

δV ist der unmittelbare Effekt in ΔW, so daß sich der **Gravitationseffekt δH_{ab}^{dyn} in den dynamischen Höhendifferenzen ΔH_{ab}^{dyn}** zu

$$\delta H_{ab}^{dyn} = (\delta V_b - \delta V_a)/g_o =: \delta V_{ab}/g_o$$

ergibt. Neben diesem ist für die Höhenmeßtechnik vor allem auch der Gravitationseffekt in den nivellitischen Höhendifferenzen von Bedeutung. Hierfür liefert die Nivellementsformel zunächst das Ergebnis

$$\delta h_{ab} = [\delta V_{ab} + \int_a^b \delta g dh]/g_o \ ,$$

und in den lokalen Horizontsystemen S_L mit der z-Achse in Nadirrichtung gilt

$$dh = -dz, \quad \delta g = |g_i + \delta g_i| - g \approx \delta g_z \ .$$

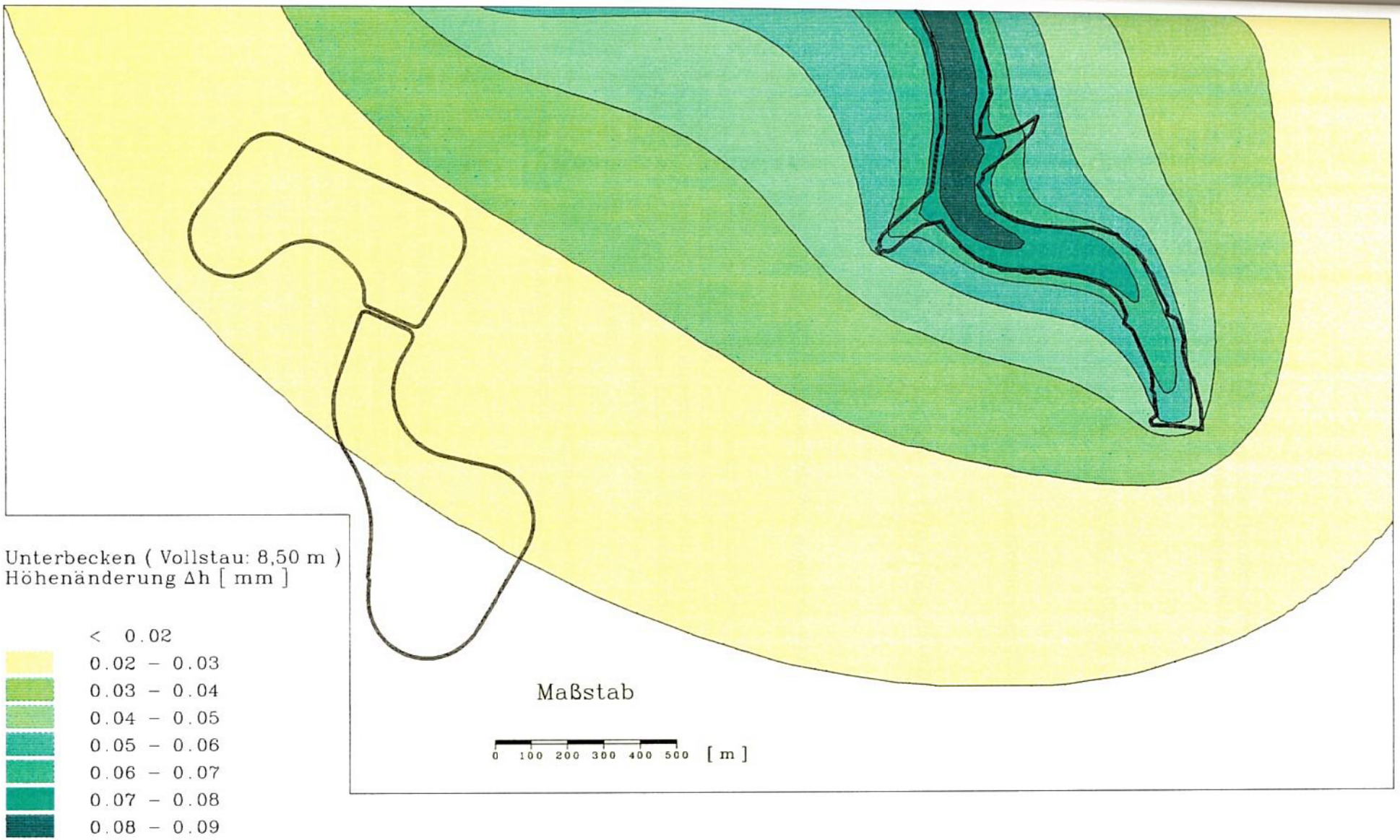


Abb. 11.6 Isoliniendarstellung der Äquipotentialflächen–Verlagerung beim Unterbecken bei maximaler Wasserstandsänderung

Das ganz rechts stehende Linienintegral ist vom gewählten Nivellementsweg zwischen den Stationen P_a-P_b abhängig, was auch für δh_{ab} gilt. Dagegen ist δV_{ab} eine definitionsgemäß wegunabhängige Potentialdifferenz, für die man mit dem Integranden in den S_L erhält:

$$\delta V_{ab} = \delta V_b - \delta V_a = \int_a^b \delta g_i dx_i = \int_a^b \delta g_\alpha dx_\alpha - \int_a^b \delta g_z dh \ , \quad \alpha \in \{x, y\} \ .$$

Damit erhält man für den **Gravitationseffekt δh_{ab} in den nivellitischen Höhendifferenzen**

$$\delta h_{ab} = (1/g_o) \int_a^b \delta g_\alpha dx_\alpha = (1/g_o) \int_a^b (\delta g_x dx + \delta g_y dy).$$

Um eine Größenordnung für den Gravitationseffekt δh_{ab} anzugeben, wird folgende Abschätzung vorgenommen:

Auf der Erdoberfläche wird entlang der Achse der Druckrohrleitung I (siehe Abb. 3.5, 3.3, 3.1) vom Unterbecken bis zum Einlaufbauwerk I mit einer Äquidistanz von 20 m eine hypothetische Stationierung vorgenommen, wobei die beiden Oberbecken gefüllt (Stauziel = 510,30 m ü.NN) und abgesenkt (Stauziel 494 m ü.NN) gegenübergestellt werden (d.h. maximale Gravitationseffekte). Die berechneten δg_x, δg_y liefern in Verbindung mit den Koordinatendifferenzen dx, dy sowie g_0 = konstant = 9,81 ms^{-2} den gesuchten Gravitationseffekt $\delta h_{ab} \sim 0{,}12$ mm.

Bei alleiniger Betrachtung von maximalen Wasserstandsänderungen im Unterbecken (8,5 m) beträgt der Gravitationseffekt bei gleichem Nivellementsweg $\delta h_{ab} \sim -0{,}02$ mm.

11.6 Schlußfolgerungen

Aus den dargelegten Ergebnissen folgt für den Bereich der Oberbecken, daß bei nivellitischen Wiederholungsmessungen für Zwecke der Höhenüberwachung der Effekt der gravitativ induzierten, vertikalen Höhenverschiebung der Niveauflächen gegebenenfalls zu berücksichtigen ist, da dieser Effekt maximal ~ 0,2 mm beträgt und damit größer ist als die für die Höhenbeobachtungen vorgegebene Fehlergrenze von ± 0,1 mm. Für den Bereich des Oberbeckens II können (mit den in Kapitel 11.4 angegebenen Vorbehalten) aus Abb. 11.5 durch lineare Interpolation hinreichend genau wasserstandsabhängige Korrekturwerte abgeleitet werden. Mit geringer, aber in vielen Fällen durchaus noch ausreichender Genauigkeit (etwa ± 0,05 mm) gilt dies auch für Oberbecken I, wenn man die Ergebnisse für das Oberbecken II geometrisch und physikalisch auf das Oberbecken I überträgt. Im Bedarfsfall sind jedoch auch für den Bereich des Oberbeckens I die erforderlichen (aufwendigen) Berechnungen durchzuführen.

Eine einfache Alternative besteht darin, alle nivellitischen Wiederholungsmessungen bei etwa gleichem Füllstand der Becken durchzuführen. Dies führt jedoch wegen des nur bedingt vorhersehbaren Kraftwerksbetriebes potentiell zu arbeitsorganisatorischen Problemen. Eine physikalisch korrekte Lösung ist zweifellos die gleichzeitige Messung von nivellitischen Höhen und Schwere. Es ist jedoch sorgfältig abzuwägen, ob der erhöhte vermessungs- und auswertetechnische Aufwand in Anbetracht der letztlich doch relativ geringen

Genauigkeitsverbesserungen der Höhenkoten wirtschaftlich zu vertreten ist. Somit ist der erstgenannte Lösungsvorschlag aus ingenieurtechnischer Sicht sicherlich als der beste einzustufen.

Für die geodätische Überwachung der Staumauer ergeben die durchgeführten Untersuchungen eine je nach Stauhöhe variierende Beeinflussung des Nivellements von unter 0,05 mm. Diese Effekte brauchen somit bei einer Genauigkeitsanforderung von $\pm$ 0,1 mm nicht berücksichtigt zu werden, zumal sie nur bei extremen Wasserspiegelschwankungen zwischen zwei Meßepochen auftreten würden.

Als Ergebnis dieser exemplarischen Untersuchungen bleibt festzuhalten, daß Massenverlagerungen zu Höhenveränderungen führen, die durchaus relevant im Zusammenhang mit Überwachungsaufgaben zu erkennen, zu bewerten und zu berücksichtigen sind. Insbesondere wenn man an die großräumige Förderung von Rohstoffen im Tagebaubetrieb denkt (es kommen Baggergeräte bis zu einer Leistung von 240.000 t/Tag zum Einsatz) wird man bei Höhenmessungen nicht umhin kommen, die Schwere mit zu erfassen und in die Auswertungen einfließen zu lassen.

11.7 Der rechentechnische Aufwand zur Modellierung der Äquipotentialflächen-Verlagerungen

Die folgenden Aussagen beziehen sich auf die Berechnungen beim Unterbecken, deren Ergebnisse in der Abb. 11.6 graphisch dargestellt wurden. Hier wird besonders deutlich, daß der rechentechnische Aufwand so hoch wurde, daß es keinen Sinn machte, das ganze Unterbecken zu untersuchen, zumal hinsichtlich der gestellten geodätischen Überwachungsaufgabe vordringlich der Staumauerbereich am interessantesten ist.

Der hohe Aufwand liegt darin begründet, daß durch den bandartigen natürlichen Verlauf des Unterbeckens (siehe Abb. 8.8) der durch die Gravitationseffekte betroffene Bereich im Verhältnis zum Oberbecken II (Auswertung siehe Abb. 11.5) sehr groß ist. Zudem mußte wegen der an der natürlichen Topographie anliegenden Wassermassen und damit verbundenen, sehr unregelmäßigen Abständen zu den Profilkoordinaten Rücksicht genommen werden. Das heißt, daß die Stützstellen enger (hier: 20 m) als bei den Berechnungen beim Oberbecken II (25 m) gewählt worden sind, um für die Isoliniendarstellung eine homogene Flächenverteilung der Höhenwerte zu erhalten.

Als Ausgangsdaten gingen in die Berechnungen, die sich auf maximale Wasserstandsänderungen beziehen, ein:

1. Als Quaderapproximation der gesamten Unterbecken-Wassermassen (Ausdehnung siehe Abb. 8.8) 3124 Quader unterschiedlicher Seitenlängen gebildet nach der Strategie in Kapitel 7.4

2. Ein Profilraster unterschiedlicher Dichte in Abhängigkeit von der Entfernung zum Unterbecken, um die Naheinflüsse der Gravitationskräfte besser modellieren zu können. Es wurden für diese Auswertung 44895 Stützstellen verwendet.

Die Berechnungen wurden auf einer VAX 6000-310 mit 64 MB-Memory sowie einer Leistung von 3,8 MIPS durchgeführt, wobei die CPU-Zeit ca. 125 (> 5 Tage!) Stunden betrug. Dies macht deutlich, daß der Rechenaufwand (ohne die Berücksichtigung der dazu notwendigen Vorarbeiten - z.B. Topographiemodellierung, Quaderapproximierung) nur in Sonderfällen möglich ist. In der Bestimmung der Massengeometrie liegt im allgemeinen kein Problem vor, da aus bilanztechnischen, bergrechtlichen Gründen z.B. große Rohstofförderer, für die diese Untersuchungen bedeutsam wären, verpflichtet sind, entsprechende Nachweise vorzuhalten.

12. Die Eichung von Registriergravimetern mit Hilfe gravitativer Effekte

12.1 Vorbemerkungen

Neben den in erster Linie ingenieurtechnischen Fragestellungen, die im Zusammenhang mit der Bauwerksüberwachung in der vorliegenden Arbeit untersucht wurden, wird im folgenden ein primär geowissenschaftlicher Anwendungsfall behandelt, nämlich die Eichung von Gravimetern zur Registrierung der Erdgezeiten.

Die gezeitenbedingten Variationen der Schwere liegen in mittleren Breiten bei ~ 300 µGal. Im Vergleich hierzu betragen die Gravitationsvariationen in ihrer Vertikalkomponente im Bereich des Drainageganges unterhalb des Oberbeckens II ~ 600 µGal. Dieser Effekt ist somit hinreichend groß, so daß er aus fehlertheoretischer Sicht zur Eichung von Registriergravimetern geeignet ist.

An dieser Stelle soll auf einen weiteren Anwendungsfall lediglich hingewiesen werden. Es besteht nämlich auch die Möglichkeit der Eichung elektrostatischer Rückkopplungssysteme von astasierten Gravimetern des Typs LaCoste. Sofern diese Geräte zum Beispiel für mikrogravimetrische Feldbeobachtungen eingesetzt werden sollen, läßt sich durch Kombination der Gravitationsvariationen mit mechanischen Nullpunktverstellungen (Spindeldrehungen) der Eichbereich auf ein mehrfaches des genannten maximalen Gravitationsbetrages ausdehnen.

12.2 Problemstellung

Im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer mathematischer, physikalischer Erdmodelle entstand vor einigen Jahren erneut die Frage nach der Eichgenauigkeit der im Rahmen regionaler und globaler Profile sowie bei Netzwerken eingesetzten Gezeitengravimeter /14, 56/. Wenn man nämlich auf der Basis des Erdmodells von WAHR-DEHANT die gravimetrischen Gezeitenamplituden berechnet, so ergibt sich für die ganztägigen Tiden eine systematische Differenz gegenüber den beobachteten Amplituden bzw. Amplitudenquotienten (Gravimeterfaktoren); die beobachteten Werte sind im Durchschnitt 0,5 - 1% zu groß.

Diese Differenzen können durch systematische Fehler innerhalb des Erdmodells, also durch unvermeidbare Unzulänglichkeiten in der Theoriebildung, verursacht werden. Diskrepanzen zwischen theoretischen und beobachteten Gezeitenamplituden können aber auch durch Eichfehler der eingesetzten Instrumente begründet sein oder durch das Zusammenwirken beider Einflüsse (Modellfehler, Meßfehler). Desweiteren besteht zudem die Möglichkeit, und diese darf nicht völlig außer Betracht gelassen werden, des Einwirkens ganztägiger Störeffekte auf die Registriergravimeter. Eine ganze Reihe potentieller Einflußparameter läuft nämlich ebenfalls mit etwa ganztägiger Periode ab. Zu nennen sind meteorologische Temperaturvariationen oder die durch menschliche Aktivitäten hervorgerufenen Effekte (z.B. die durch den Verkehr induzierte Mikroseismik). Dagegen sind Fehlereinflüsse aus den verwendeten Entwicklungen des Gezeitenpotentials im Hinblick auf die Größenordnung der genannten Differenzen mit Sicherheit auszuschließen. Sie liegen für alle aktuellen Varianten deutlich < 1‰.

Bei neueren Versuchen zur Überprüfung der Eichfunktionen der eingesetzten Gravimeter (bzw. deren erneuter Eichung) werden bisweilen die **Sollwerte** des Erdmodells WAHR-DEHANT als Kriterium für die Güte der Eichung angesehen. Dies ist bedenklich, da unter anderem im Hinblick auf den Toleranzbereich der physikalischen Eingangsgrößen das Erdmodell im Vergleich zur meßtechnischen Auflösung und Eichung der Gravimeter nicht als fehlerfrei angesehen werden kann. Es ist daher durchaus erforderlich, auch das Modell WAHR-DEHANT einer kritischen Überprüfung zu unterziehen /56/.

Ein wesentlicher Teil des globalen Netzes der gravimetrischen Erdgezeitenstationen wurde vom Observatoire Royal de Belgique (ORB) beobachtet; dies ist insofern von Bedeutung, als sich die Skalenwerte (Eichwerte)

der eingesetzten Gravimeter auf die Basiswerte der Station Brüssel beziehen und daher zwar einen einheitlichen inneren Maßstab aufweisen, der jedoch auf Gezeitenregistrierungen beruht, die dort mit mehreren Askania-Gravimetern in den sechziger Jahren (photoelektrischer Abgriff) ausgeführt wurden. Diese Geräte hatten im Vergleich zu heutigen nicht nur eine geringere Signalauflösung, sondern sie waren auch hinsichtlich ihres Driftverhaltens vergleichsweise instabil sowie empfindlicher gegenüber Variationen der Umgebungstemperatur. Durch lange Registrierserien versuchte man zwar diese Nachteile zu verringern, was allerdings nur teilweise gelang. Somit können absolute (im SI-System) Maßstabsunsicherheiten in der Größenordnung von 1 % durchaus als realistisch angesehen werden.

Festzustellen bleibt, daß es erforderlich ist, die Differenz zwischen berechneten und beobachteten Amplitudenquotienten zu untersuchen. In diesem Zusammenhang ist auch das Basis-Experiment in Vianden zu stellen, mit dem versucht wird, einen Beitrag zur Eichung von Registriergravimetern zu leisten.

12.3 Methoden der Eichung von Gezeitengravimetern

Bei der Eichung von Gezeitengravimetern unterscheidet man prinzipiell zwei Methoden:

- die Bestimmung der Eichfunktion bzw. des instrumentellen Skalenmaßstabs mit Hilfe gravimetrischer Basislinien; im folgenden als **nicht-stationäre** Eichung bezeichnet.

- die Bestimmung der Eichfunktion mit Hilfe bekannter Eingangssignale während eines **stationären** Betriebes: In-situ-Eichung

12.3.1 Die nicht-stationäre Eichung

Bei diesem Verfahren werden Gravimeter auf speziellen Basislinien geeicht, die meist in Gebieten mit hinreichend großen Höhenunterschieden aufgebaut wurden. Der Vorteil des Verfahrens besteht in der Größe der vorhandenen Schwereunterschiede, so daß die Eichung von Gezeitensignalen fehlertheoretisch eigentlich besser als auf 1 ‰ durchzuführen sein sollte. Abgesehen von der begrenzten Auflösung der Spindelablesungen - alle bisher für die Gezeitenbeobachtung eingesetzten Federgravimeter sind ursprünglich für den Feldeinsatz konzipiert - besteht bei dieser Methode der prinzipielle Nachteil, daß die Gravimeter zur Eichung von einem Ort zum anderen bewegt werden müssen. Dies ist meßtechnisch gesehen gegenüber dem stationären Betrieb ein wesentlicher Unterschied. Des weiteren erfordert das Verfahren relativ lange Unterbrechungen der Gezeitenbeobachtung, deren Häufigkeit zudem von der Stabilität bzw. der zeitlichen Variationen der Eichfunktion der eingesetzten Gravimeter abhängt.

Aus diesen Gründen richten sich die Bemühungen auf die Entwicklung und Anwendung geeigneter In-situ-Methoden. Eine Zwischenlösung stellt das Verfahren der Eichung von Registriergravimetern mit einer vertikalen Stationseichbasis dar, die BONATZ /6/ entwickelt hat. Auch bei dieser Methode verbleibt jedoch die meßtechnisch unerwünschte Bewegung des Gravimeters von einem Beobachtungsniveau zum anderen.

12.3.2 Die stationäre Eichung

Bei der stationären Eichung sind zwei Verfahren zu unterscheiden:

- die Eichung mit Hilfe von Trägheitskräften
- die Eichung mit Hilfe von Gravitationskräften

Beide Verfahren sind physikalisch gleichwertig, sofern man die Gültigkeit des Äquivalenzprinzips voraussetzt. Im Hinblick auf die im Rahmen der Problemstellung erforderliche Eichgenauigkeit kann man dies jedoch uneingeschränkt als gegeben ansehen.

Ein wesentlicher Unterschied besteht allerdings in der meßtechnischen Realisierung. Im ersteren Fall muß das Gravimeter wiederum bewegt werden, wobei aber anders als bei dem im letzten Kapitel angegebenen Verfahren - das Gravimeter wurde lediglich von einem Festpunkt zum anderen transportiert - die der beschleunigten Vertikalbewegung zugeordneten Trägheitskräfte für die Eichung verwendet werden. Der gedanklichen Einfachheit des Verfahrens widersprechen allerdings die technischen Probleme bei der Realisierung eines geeigneten Bewegungsapparates oder einer -plattform. In diesem Zusammenhang wird beispielhaft auf die Probleme bei der inertialen Eichung von supraleitenden Gravimetern verwiesen /39/.

Die meßtechnisch bessere Lösung stellt die Gravimetereichung mit Hilfe von Gravitationskräften dar. Allerdings entsteht hierbei das Problem, hinreichend große Kräfte zu erzeugen oder zur Verfügung zu haben. Diese Problematik wird bei der ursprünglichen, herstellerseitigen Eichung des supraleitenden Gravimeters mit Hilfe einer großen Masse in der Nähe des gravimetrischen Sensors deutlich. Zum einen beträgt der erreichte Gravitationseffekt nur einen Bruchteil des Betrages der gezeitenbedingten Schwerevariation - aus Gründen der Fehlerfortpflanzung muß dies als bedenklich angesehen werden - zum anderen erfordert die Anwendung des Gravitationsgesetzes nicht nur eine hinreichend präzise Kenntnis von Gravimeter- und Eichmasse, sondern ebenfalls eine genaue Information über die Massenhomogenität bzw. - inhomogenität innerhalb der entsprechenden Volumina. Ein weiteres, besonders schwerwiegendes Problem, liegt in der hinreichend präzisen Ermittlung relevanter Distanzen.

Eine alternative Lösung besteht in der Verwendung einer zylindrischen Eichmasse. Ein Verfahren für diese Art der Eichfaktorbestimmung ist in /55/ angegeben: Ein Zylinder, der eine Masse von 3200 kg besitzt, wird über ein Gravimeter geführt und generiert somit ein Gravitationsfeld bekannter Größe, welches für die Eichberechnung genutzt werden kann. Das zu eichende Gravimeter bzw. dessen gravimetrischer Probekörper befindet sich in der vertikalen Längsachse des Zylinders, auf der sich ebenfalls dessen Massenzentrum befindet. Bewegt man nun den Zylinder vertikal relativ zum Gravimeter, so bewegt man auch das Massenzentrum, das auf diese Weise beliebig nahe an den Probekörper des Gravimeters mit entsprechend großem Gravitationseffekt herangeführt werden kann. Auch bei dieser Methode gibt es eine ganze Reihe von Schwierigkeiten zu lösen. Das entscheidende Problem jedoch liegt bei den Gradienten des dem Eichzylinder zugeordneten Gravitationsfeldes. Die Bauteile des Gravimeters - dies Verfahren ist sicherlich aus Gründen der Gravimeterdimensionen nur bei bestimmten Federgravimetern zu verwenden - werden somit unterschiedlichen Gravitationswirkungen ausgesetzt. Dies widerspricht aber dem Einsatz bei Gezeitenbeobachtungen, da hier von homogenen Gravitationsfeldvariationen ausgegangen werden kann (in einem finiten Volumen sind die Gezeitenkräfte vom Betrag her gleich und gleichgerichtet).

Wenn man also mit Hilfe von Gravitationskräften eichen will, so ist es sicherlich die bessere Lösung, dies unter Verwendung entsprechend großer Massen zu tun. Hierüber kann man allerdings nicht frei verfügen, so daß man aus praktischen Gründen die Eichung von Gravimetern dort durchführt, wo geeignete Bedingungen vorliegen. Die Lage gravimetrischer Gezeitenstationen wird aber im allgemeinen nach anderen Gesichtspunkten ausgewählt als den, hinreichend große und variierende Massen im Nahbereich verfügbar zu haben. Es besteht jedoch die Möglichkeit, Gravimeter vor und nach einem Einsatz an einem geeigneten Ort gravitativ zu eichen, wobei dann allerdings instrumentell eine Vorrichtung zur Überprüfung zeitlicher oder örtlicher Variationen der Eichfunktion erforderlich ist.

Die Verhältnisse sind allerdings günstiger, wenn ein für gravitative Eichungen geeigneter Ort in der Nähe einer Gezeitenstation oder innerhalb eines Netzwerkes solcher Stationen liegt, da die örtliche Änderung der Hauptgezeitenparameter, jedenfalls der des ganztägigen Bandes, klein ist.

Dies begründet den Versuch, Registriergravimeter im zuvor dargelegten Problemzusammenhang an einem geeigneten Beobachtungsort unterhalb des Oberbeckens II des PSW Vianden gravitativ zu eichen. Diese Entscheidung ist auch insofern gerechtfertigt, als daß die erforderlichen Daten für die Eichung bereits vorliegen.

12.4 Gravimetrische Messungen unter dem Oberbecken II des PSW Vianden

12.4.1 Lage und Ausstattung der Beobachtungsstation

Mitte des Jahres 1989 wurde in dem 1 m breiten und 1,8 m hohen Inspektionsgang unterhalb des Oberbekkens II das Gezeitengravimeter Askania GS 15 Nr. 206 installiert. Der Meßplatz wurde wenige Meter neben der inklinometrischen Meßanlage in Bohrloch 3 (siehe Abb. 4.6) gewählt, um so erforderlichenfalls die Möglichkeit zur Untersuchung neigungsinduzierter Gravimetersignale zu eröffnen. Ein zweites Gravimeter wurde Mitte des Jahres 1990 unmittelbar neben dem bereits vorhandenen Instrument mit dem Ziel der meßtechnisch sinnvollen Parallelregistrierung installiert. Bei diesem Instrument handelt es sich um das auf kapazitiven Abgriff umgerüstete Gravimeter GS 12 BN 02 /7/. Eine Übersicht über den Meßort wird durch Abb. 12.1 gegeben.

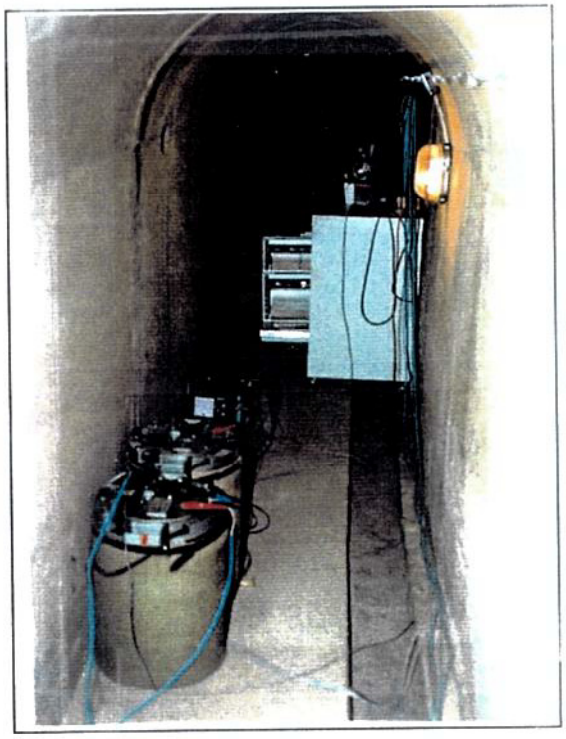


Abb. 12.1 Übersicht der Gravimeter-Standorte

Zur Registrierung der Gravimetersignale wurde im Hinblick auf lokale Gegebenheiten ein Mehrkanalregistrierschreiber vom Typ W+W 340 eingesetzt, der bei Erreichen der Grenzwerte des Registrierbereichs automatisch eine Nullpunktumschaltung vornimmt. Als Zeitbasis fungiert eine quarzgesteuerte Schaltuhr, die je Stunde eine Zeitmarke auf die analoge Registrierung setzt. Desweiteren wird die Temperatur im Beobachtungsstollen mit einer Auflösung von 0,01 °C registriert, wobei die täglichen Temperaturvariationen < 0,1 °C betragen.

Die Koordinaten der Beobachtungsstationen lauten im:

- Kraftwerks-System: 80 465.79 m 11 933.37 m
- geographischen System: 6° 10' 30."94 49° 56' 34."23

Die Höhe der Aufstellungsebene für die Gravimeter beträgt 488,78 m ü.NN, die Horizontalebene durch die gravimetrischen Probekörper liegt 0,15 m über der Aufstellungsebene.

12.4.2 Registrierblöcke

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden folgende Registrierzeiträume bearbeitet:

- Gravimeter GS 15 Nr. 206: 11.08.89 - 30.04.92
- Gravimeter GS BN Nr. 02: 01.06.90 - 30.04.92

Aus verschiedenen Gründen traten zwischenzeitlich Beobachtungslücken auf, die es erforderlich machten, Registrierblöcke zu bilden. Ein Nachweis wird über die Tabellen 12.1 und 12.2 gegeben.

Blockanfang		Blockende		Anzahl der halbstündlichen Daten
Datum	Uhrzeit [UT]	Datum	Uhrzeit [UT]	
11.08.89	12.00	24.10.89	13.00	3543
25.10.89	18.00	03.11.89	18.00	421
08.11.89	10.30	11.02.90	15.00	4558
16.02.90	11.00	14.06.90	14.30	5672
16.06.90	12.00	18.08.90	06.00	3013
23.08.90	09.00	26.09.90	05.30	1626
02.10.90	16.00	12.11.90	20.00	1977
14.11.90	12.00	03.12.90	06.00	901
03.12.90	17.30	16.12.90	22.00	634
17.12.90	02.30	17.12.90	20.30	37
27.12.90	14.00	05.07.91	12.00	9117
20.08.91	22.00	07.10.91	09.30	2280
08.10.91	15.00	05.03.92	14.00	7151
09.03.92	10.00	22.03.92	23.30	652
06.04.92	00.00	30.04.92	23.30	1200

Tab. 12.1 Registrierblöcke GS 15 Nr. 206

12.4.3 Die Digitalisierung der Analogdaten

Die in analoger Form vorliegenden Registrierdaten wurden mit einer Abgriffsgenauigkeit von ~ ± 0,1 mm erfaßt. Dies entspricht einer Auflösung der diskreten Schwerewerte von ~ ± 0,2 µGal.

12.4.4 Das Digitalisierungsintervall

Ziel der Auswertung der gravimetrischen Meßreihen war - wie zuvor schon dargelegt - die Eichung der Registriergravimeter mit Hilfe der das Gezeitensignal überlagernden und als bekannt angesetzten gravitativen Effekte als Folge der Wasserstandsvariationen der Oberbecken. Durch den Kraftwerksbetrieb (siehe Abb. 3.2) weisen die Wasserstandsdaten und somit auch die zugeordneten gravitativen Variationen eine mehr oder weniger ausgeprägte zeitlich veränderliche Struktur auf. Daher wurde das Digitalisierungsintervall auf eine halbe Stunde (statt des sonst überlicherweise einstündigen Intervalls) festgelegt.

Blockanfang		Blockende		Anzahl der
Datum	Uhrzeit [UT]	Datum	Uhrzeit [UT]	halbstündlichen Daten
01.06.90	00.00	14.06.90	13.00	651
16.06.90	12.00	19.07.90	07.00	1575
21.07.90	00.00	01.08.90	11.00	551
09.08.90	09.30	15.08.90	21.00	300
22.08.90	00.00	16.09.90	02.00	1205
20.09.90	16.00	26.09.90	04.30	267
02.10.90	16.30	10.11.90	19.00	1878
14.11.90	11.00	03.12.90	05.00	901
03.12.90	17.30	12.01.91	06.00	1898
04.02.91	11.00	17.03.91	20.00	1987
21.03.91	16.00	22.06.91	05.30	4444
02.07.91	13.30	03.10.91	06.00	4450
04.10.91	15.30	16.10.91	09.00	564
18.10.91	00.00	23.10.91	11.30	264
24.10.91	21.30	26.10.91	15.30	85
27.10.91	00.00	28.10.91	12.00	73
29.10.91	23.30	02.11.91	12.00	170
05.11.91	18.00	13.11.91	11.30	372
13.11.91	23.30	21.11.91	11.00	360
21.11.91	07.00	27.12.91	04.30	1700
28.12.91	14.30	03.03.92	05.00	3150
09.03.92	10.30	30.04.92	23.30	2523

Tab. 12.2 Registrierblöcke GS BN Nr. 02

12.4.5 Die gravimetrischen Eichdaten

Auf der Grundlage der für die Oberbecken I und II vorhandenen Modelldatensätze wurden, bezogen auf die mittlere Position der beiden gravimetrischen Sensoren (R = 80465,79; H = 11933,37; Z = 488,93) die vertikalen Gravitationsbeschleunigungen als Funktion der Wasserstandshöhe in Stauschritten von 1 cm berechnet (entsprechend 1630 Berechnungen mit 7841 Quadern). Das gewählte Diskretisierungsintervall macht die Interpolation von gravitativen Zwischenwerten mit einer Auflösung von < 0,1 µGal überflüssig. Bei gegebener Wasserstandshöhe ist es somit möglich, den jeweils zugeordneten vertikalen Gravitationseffekt mit einer im Problemzusammenhang hinreichenden Genauigkeit zu berechnen, d.h. die Stauhöhe in vertikale Gravitationsbeschleunigungen umzurechnen.

Prinzipiell ist eine Verbesserung der Eichergebnisse durch Einbeziehung der Gravitationseffekte des Unterbeckens möglich (vgl. Kapitel 7.9 und Abb. 7.17). Da jedoch bei normalem Kraftwerksbetrieb die gravitativen Einflüsse des Unterbeckens im Bereich der Gravimeterstation den Betrag von 0,5 µGal nur selten überschreiten, wurde auf eine Berücksichtigung dieser Effekte - auch in Anbetracht des verwendeten Verfahrens zur gravimetrischen Datenanalyse - zunächst verzichtet.

12.4.6 Bemerkungen zur Einsatzmöglichkeit von Askania-Gravimetern mit kapazitivem Abgriff

Als leistungsfähigste Federgravimeter gelten auch in der Erdgezeitenforschung derzeit rückgekoppelte LaCoste-Gravimeter. Dabei wird allerdings überwiegend das gravimetrische Auflösungsvermögen hinsichtlich der Erfassung der Amplituden der ganz- und halbtägigen Tiden als Beurteilungskriterium gewählt, d.h. es ist mit relativ kurzen Registrierserien möglich, diese Tiden mit einem geringen relativen Fehler zu bestimmen. Vergleicht man in diesem Zusammenhang an geeigneten Aufstellungsorten gewonnene Ergebnisse

guter Askania-Gravimeter, so ist allerdings festzustellen, daß ihr Leistungsvermögen wiederum nicht so weit von dem der LaCoste-Gravimeter abweicht, daß ihr Einsatz nach modernen Gesichtspunkten als wenig sinnvoll erscheinen müßte. Eine Beurteilung ist sicherlich vom jeweiligen Forschungsziel abhängig.

Falls lediglich die Auflösung der Amplituden der Hauptpartialtiden im Vordergrund der Aufgabe steht, so läßt sich dieses Ziel auf eine einfache Weise, nämlich durch eine entsprechende Verlängerung des Registrierzeitraums, verbessern. Bei längeren Registrierserien mitteln sich außerdem eher als bei kurzen Reihen mögliche meteorologische Wirkungen heraus.

Wenn man aber die Frage nach der absoluten Genauigkeit der mit beiden Systemen gewonnenen Analyseergebnisse stellt, so besteht insofern Gleichwertigkeit, als die erreichbare Eich**genauigkeit** für beide Gravimetertypen im allgemeinen im Bereich von 0,5 % liegt (das Phasenproblem soll hier nicht behandelt werden). Zum Zwecke der absoluten Bestimmung von Gezeitenamplituden im SI-System können also Askania-Gravimeter sehr wohl auch weiterhin eingesetzt werden, sofern (!) eine geeignete Eichmethode zur Verfügung steht. Dies begründet im vorliegenden Falle ihren Einsatz im Rahmen der zuvor beschriebenen Problemstellung.

Ergänzend sei hinzugefügt, daß Askania-Gravimeter über ein Kugeleichsystem verfügen. Sie besitzen somit eine **relative** In-situ-Eichvorrichtung und sind in diesem Punkt weiterhin allen anderen Federgravimetern prinzipiell überlegen.

12.5 Die Pegelbeobachtungen für die Oberbecken des PSW Vianden

Aus betriebstechnischen Gründen wurden im Bereich der beiden Oberbecken zwei Registrierpegel installiert. Die Pegel befinden sich in unmittelbarer Nachbarschaft (siehe Abb. 3.3) zum Einlaufbauwerk I sowie zum Einlaufbauwerk III (seitlich zum Oberbecken II). Im Hinblick auf das Ziel der Eichung der beiden Gravimeter mit Hilfe der Massenvariationen in den Oberbecken wäre es sicher wünschenswert, Pegeldaten für den Bereich unmittelbar über den Gravimetern zu verwenden. Solche Daten liegen jedoch nicht vor. Die Pegelstände im Bereich der Meßstationen können also durchaus um geringe, im wesentlichen durch Windeinwirkungen verursachte Beträge vom Pegelstand über den Beobachtungsstationen abweichen. Dieser Sachverhalt mußte mangels Alternativen in Kauf genommen werden, wobei auch hier die reale Auswirkung solcher Pegelfehler durch die langen Registrierserien weitgehend kompensiert werden sollte.

Untersuchungen hinsichtlich der mit analogen Registrierungen erreichten Auflösung zeigten, daß diese für den vorgesehenen Gebrauch nicht geeignet waren. So wurde es erforderlich, auf digitale Aufzeichnungen der Steuerungszentrale (Kraftwerks-Warte) zurückzugreifen, wo die Pegelstände halbstündlich in Protokollblättern eingetragen wurden. Der momentane Pegelstand wurde auf Zentimeter niedergeschrieben und ist sicher nicht gleichzusetzen mit der erreichten Genauigkeit. Welleneffekte und geringe Zeitfehler, mit großen Auswirkungen bei starken zeitlichen Wasserstandsänderungen, wurden somit nicht mit der gewünschten Genauigkeit erfaßt. Allerdings zeigten die durchgeführten Untersuchungen, daß die Qualität der Daten ausreicht, um die Gravitationseffekte, was ihre unmittelbare Pegelabhängigkeit betrifft, auf $\sim \pm 0{,}4$ µGal (siehe Kapitel 7.8) zu berechnen.

Hinsichtlich der Anwendung der Gravitationseffekte zur Eichung der beiden Registriergravimeter ist nicht nur der Betrag deren zeitlicher Variation, sondern im Hinblick auf die Gezeitenanalyse auch deren spektrale Verteilung von Bedeutung. Der Betriebsablauf des Kraftwerkes ist nämlich von einer starken zeitlichen Inhomogenität der Struktur der Wasserstandsänderungen mit einer gewissen Dominanz von Abläufen in etwa ganztägiger Periode geprägt. Die Abb. 12.2 zeigt die spektrale Leistungsverteilung für ein repräsentatives Quartal nach Elimination langperiodischer Anteile unter Einbeziehung eines Differenzenfilters 1. Ordnung. Das Abgriffsintervall der Pegeldaten beträgt eine Stunde. Bedeutende Perioden sind im ganz-, halb- und dritteltägigen Bereich zu erkennen.

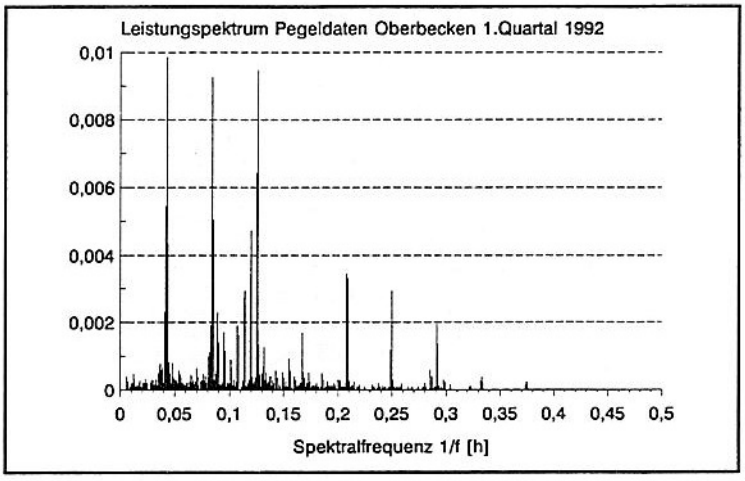


Abb. 12.2 Spektralanalyse von Wasserstandsvariationen

12.6 Das Auswerteverfahren

12.6.1 Vorbemerkungen

Das Gezeitensignal wird durch deterministisch eindeutig bestimmte Zusatzeffekte überlagert. Daher liegt es nahe, die Auswertung mit dem Verfahren der Mehrkanalanalyse durchzuführen, die jedoch hinsichtlich des deterministischen Ansatzes einiger Voraussetzungen bedarf, die zu unbefriedigendem Ergebnis führen, wenn sie nicht erfüllt werden. Außerdem wird ferner im allgemeinen die a-priori-Lösung des Eichproblems als gegeben betrachtet. Aber gerade die Eichung der Registriergravimeter soll das primäre Ziel der nachfolgenden Untersuchungen sein.

Es wird daher in der vorliegenden Arbeit ein überschaubares, iteratives Verfahren eingesetzt. Die spätere Anwendung geeigneterer oder leistungsfähigerer Verfahren soll damit aber keinesfalls ausgeschlossen werden.

12.6.2 Die iterative Bestimmung der Eichfaktoren

Falls eine geeichte Registrierserie vorliegen würde und man von dieser die bekannten Gravitationssignale (als Folge der Wasserstandsvariationen) abziehen würde, so erhielte man eine ungestörte Gezeitenregistrierung, in der nur noch die instrumentelle Drift enthalten wäre. Die Gravitationseffekte sind zwar im System der Maßeinheiten bekannt, die Ausgangssignale des Gravimeters jedoch nicht. Benutzt man daher bei der Eichung von gravimetrischen Registrierserien einen fehlerhaften Eichfaktor und subtrahiert man hiervon die "wahren" Gravitationseffekte, so verbleiben gravitative Restsignale, deren Größe von der Größe des Eichfehlers abhängt. Diese Restsignale beeinflussen nun unmittelbar die Standardabweichung der Ergebnisse nachfolgender Gezeitenanalysen (und zwar sowohl die berechnete Standardabweichung einer Einzelbeobachtung als auch die Standardabweichungen der Gezeitenamplituden). Dies berücksichtigend wird nun folgendes Verfahren zur Bestimmung der Eichfaktoren angewendet:

1. Ermitteln eines Näherungswertes für die Eichung der Registrierwerte. Dies kann durch reines "Probieren" und "Herantasten" geschehen, indem man als Kriterium z.B. die Standardabweichung der Partialtidenbestimmung einer Gezeitenanalyse heranzieht und minimiert oder über die plausible Größe des Amplitudenquotienten O_1 und M_2. Im allgemeinen weiß man aber schon ungefähr über die Größe des Eichwertes aus Vorinformationen (z.B. über eine instrumentelle Eichung) Bescheid.
2. Subtraktion der in den registrierten Schwereeinheiten bekannten "wahren" Gravitationseffekte. Sie werden in Abhängigkeit vom jeweiligen Wasserstand berechnet. Die Abb. 12.3 zeigt exemplarisch als Ergebnis der Subtraktion das ermittelte Gezeitensignal.

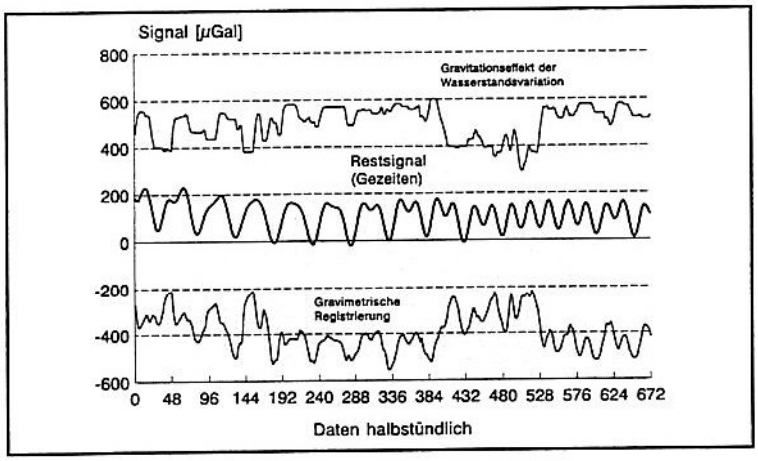


Abb. 12.3 Berechnetes Gezeitensignal (1.3.-14.3.90)

3. Durchführung einer ersten Gezeitenanalyse mit diesem Näherungswert, um erste Ergebnisse einschließlich entsprechender Standardabweichungen zu erhalten.

4. Wiederholung der Berechnungen mit Variationen des Näherungswertes, etwa in 1 % Schritten, in beiden Richtungen.

Als Ergebnis läßt sich nun jener Eichwert ermitteln, dem die kleinsten Standardabweichungen zugeordnet sind. Dies ist aber gerade dann der Fall, wenn die gravitativen Effekte auf die beste Weise eliminiert worden sind. Das als Funktion des Eichwertes ermittelte Minimum der Standardabweichung bedarf allerdings weiterhin noch einer Korrektur, die im folgenden erläutert wird.

12.6.2.1 Die Maßstabsnormierung der Standardabweichungen

Der Betrag der Standardabweichung als Ergebnis einer Gezeitenanalyse ist neben dem Grad der Modellanpassung auch vom Maßstab der Registrierung abhängig:

$$\sigma_\delta = f\,(\text{Modellanpassung} + \text{Eichwert})$$

Man würde also auch außerhalb des zuvor betrachteten Falles bei einer Variation des Eichfaktors zugeordnete Variationen der Standardabweichungen erhalten. Dieser direkte Maßstabseffekt ist jedoch zu beseitigen, wenn man die Lösung sucht, bei der die maßstabsgesteuerten Restfehler nach Abzug der Gravitationseffekte ein Minimum erreichen. Daher ist eine Normierung der Standardabweichung (σ_0, $\sigma_{\delta O1}$, $\sigma_{\delta M2}$) dergestalt vorzunehmen, daß diese auf einen einheitlichen Maßstab bezogen werden. Würde z.B. der Eichfaktor gegenüber einer 1. Analyse um 1 % vergrößert, so werden die Beträge der der 2. Analyse zugeordneten Standardabweichungen anschließend um 1 % verringert.

12.6.3 Das Analyseverfahren

Für die Gezeitenanalysen wurde das Programmsystem GEZA von ZIMMERMANN verwendet. Einzelheiten über den zugrunde liegenden Algorithmus sowie des Programmes sind in /59/ nachgewiesen.

Als Gezeitenreferenz dient die Potentialentwicklung von BÜLLESFELD ETMB85 /11/.

12.6.4 Die Analyseintervalle

Zur Bestimmung der Eichfaktoren der Gravimeter wurden unter Zugrundelegung aufeinanderfolgender, sechswöchiger Registrierabschnitte (keine Überlappung der Zeiträume) Gezeitenanalysen durchgeführt. Die Wahl dieses Analyseintervalls stellt dabei einen Kompromiß dar bezüglich den Anforderungen hinsichtlich der gewünschten Auflösung der Gezeitenparameter, der Auflösung möglicher zeitlicher Variationen der Eichfaktoren und des Rechenaufwandes. Innerhalb der Registrierzeiträume war es erforderlich, 410 Einzelanalysen zu berechnen.

Nachdem die gravimetrischen Registrierdaten auf der Grundlage des unter 12.6.3 beschriebenen Verfahrens geeicht waren, wurden mit den geeichten Daten weitere Analysen mit folgenden Zeitabschnitten berechnet:

- 17 vierteljährliche Gezeitenanalysen
- 7 halbjährliche Gezeitenanalysen
- 3 ganzjährige Gezeitenanalysen

12.6.5 Die Partialtidenzerlegung

Den sechswöchigen Analysen liegt die in Tabelle 12.3 dargestellte Partialtidenzerlegung zugrunde. Die gleiche Kombination wurde auch für die vierteljährliche Gezeitenanalyse beibehalten. Bei der Analyse längerer Registrierzeiträume wurde unter Berücksichtigung einer höheren Auflösungsfähigkeit der Gezeitenparameter eine entsprechende Erweiterung vorgenommen, die in Tabelle 12.4 nachgewiesen ist. Das K1- sowie das S2-Frequenzband (siehe Tab. 12.3) wurden detaillierter aufgelöst.

Nr.	Tiden-Numerierung	SYMBOL	Größte Amplitude A(ETMB) [μGal]	Winkelgeschwindigkeit [Grad/h]
1	173-193	SIQ1	0.230	12.383
2	194-216	SIG1	0.951	12.927
3	217-250	Q1	5.957	13.339
4	**251-283**	**O1**	**31.115**	**13.943**
5	284-309	M1	2.447	14.497
6	310-347	K1	29.916	15.041
7	348-372	J1	2.447	15.585
8	373-392	OO1	1.339	16.139
9	393-422	V1	0.257	16.683
10	423-445	EPS2	0.554	27.424
11	446-471	2N2	1.900	27.895
12	472-497	N2	14.358	28.440
13	**498-526**	**M2**	**74.992**	**28.984**
14	527-550	L2	2.120	29.528
15	551-578	S2	34.832	30.000
16	579-619	ETA2	0.530	30.629
17	620-661	M3	1.472	43.476

Tab. 12.3 Partialtidenzerlegung bei 6-Wochen-Analyse

Nr.	Tiden-Numerierung	SYMBOL	Größte Amplitude A(ETMB) [μGal]	Winkelgeschwindigkeit [Grad/h]
6a	310-320	P1	14.452	14.959
6b	321-324	S1	0.347	15.000
6c	325-347	K1	29.916	15.041
15a	551-561	S2	34.832	30.000
15b	562-578	K2	6.485	30.082

Tab. 12.4 Erweiterte Partialtidenzerlegung

12.7 Der vertikale Auflasteffekt

Aufgrund der vertikalen, viskoelastischen Reaktionen des Untergrundes an den Aufstellungsorten der Gravimeter als Folge der Kompressionswirkungen der Auflasteffekte (Wasserstandsvariationen) war zu prüfen, ob Effekte aus vertikalen Bewegungen des Aufstellungsortes zu berücksichtigen sind. In Kapitel 5.2 wurde festgestellt, daß die Deformationen des Untergrundes $\Delta H < 0{,}7$ mm betragen. Mit dem Freiluftgradienten $\delta_{gF} \sim 0{,}3086$ H (mGal/m) liegt somit der Fehleranteil, der durch die Kompression des Untergrundes bewirkt wird < 0,22 µGal. Daher kann dieser Effekt im Hinblick auf die erzielte Auflösung der Gravitationseffekte vernachlässigt werden.

12.8 Auflastinduzierte Neigungen

Da in unmittelbarer Nähe der Gravimeter ein Neigungsmesser installiert ist, liegen für den gesamten, gravimetrischen Beobachtungszeitraum entsprechend ergänzende Meßreihen vor. Der maximale auflastinduzierte Neigungseffekt lag in einer Größenordnung von wenigen Bogensekunden, so daß ein relevanter instrumenteller Neigungseffekt ausgeschlossen werden konnte, zumal die Gravimeter sehr sorgfältig auf das Minimum der Neigungsempfindlichkeit eingestellt waren. Außerdem wurde diese Einstellung wiederholend überprüft und die Orientierung erforderlicherweise geringfügig korrigiert.

12.9 Ergebnisse

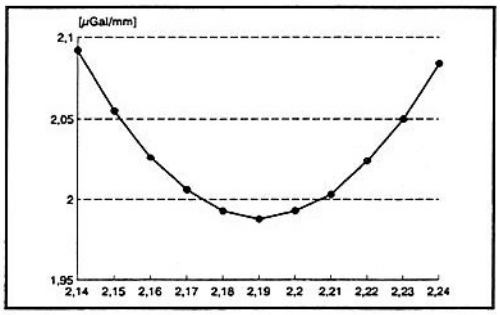
12.9.1 Entscheidungsparameter für den günstigsten Eichfaktor

Die Entscheidung bezüglich der Wahl des günstigsten Eichfaktors, dem die jeweils beste Elimination der wasserstandsgesteuerten Gravitationseffekte zugeordnet ist, wurde in dreifacher Weise getroffen. Als Auswahlkriterien der plausibelsten Werte aufgrund der minimalen Beträge der normierten Standardabweichungen wurden festgelegt:

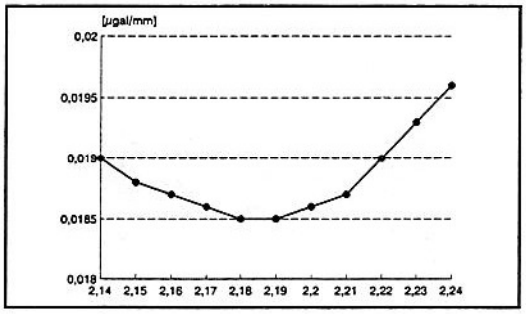
- σ_0 eines einzelnen gravimetrischen Beobachtungswertes
- $\sigma_{\delta O1}$ des Amplitudenfaktors O_1
- $\sigma_{\delta M2}$ des Amplitudenfaktors M_2

Die Auswahl der Partialtiden O_1 und M_2 erfolgte unter dem Gesichtspunkt der maximalen Amplituden und des größten Frequenzabstandes zu benachbarten Haupttiden. Im Hinblick auf den spektralen Verlauf der Wasserstandsvariationen wurde auf eine Differenzierung nach Gezeitenbändern (σ_{O1}, σ_{M2}) verzichtet.

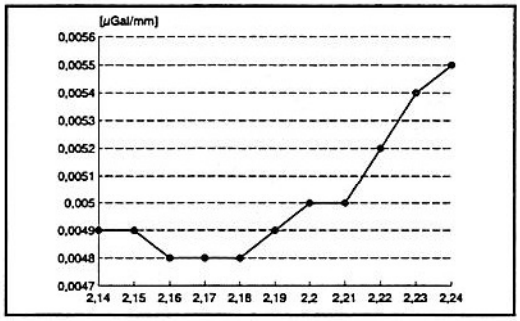
Die Abb. 12.4 zeigt ein repräsentatives Beispiel für die Bestimmung der günstigsten Eichfaktoren $k_{\sigma 0}$, $k_{\sigma O1}$ und $k_{\sigma M2}$.



σ_0; $k_{\sigma 0}$ = 2,19 µGal/mm



σ_{O1}; $k_{\sigma\delta O1}$ = 2,185 µGal/mm



σ_{M2}; $k_{\sigma\delta M2}$ = 2,17 µGal/mm

Abb. 12.4 Zur Bestimmung des günstigsten Eichfaktors GS 15. Nr. 201 (01.04.90 - 15.05.90)

12.9.2 Test der Wasserstandsdaten

In Anbetracht der Art und Weise der Wasserstandsdatengewinnung (siehe Kapitel 12.5) mußte bei der Berechnung der Gravitationseffekte mit einzelnen Fehlern gerechnet werden. Ermittelt wurden sie nach der ersten Gezeitenanalyse mit Hilfe der zugeordneten Residuen. Grundsätzlich wuden alle Residuen < 10 µGal (nach dem Häufigkeitskriterium festgelegter Grenzwert) als zulässig definiert, wobei die Anzahl der Ausreißer weniger als 1 % betrug. In diesen Fällen wurde das Residuum mit umgekehrten Vorzeichen als Korrektur in den der Analyse zugrunde liegenden Datensatz (genähert geeichtes Gravimetersignal minus Gravitationseffekt) eingefügt, wobei in Anbetracht der Variationsbreite des Eichfaktors für die nachfolgenden Analysen von lediglich wenigen Prozent die Korrektur als vom Eichfaktor unabhängig angesehen werden kann. Bisweilen traten auch Gruppen von Residuen > 10 µGal auf, möglicherweise als Folge von Windeffekten; in solchen Fällen wurden diese Daten eliminiert und an entsprechender Stelle eine Lücke eingefügt.

12.9.3 Die erreichte Modellanpassung

Ein Maß für die bei der Wahl des günstigsten Eichfaktors erreichte, nach Frequenbändern nicht differenzierte Modellanpassung, ist die Standardabweichung σ_0 einer einzelnen Beobachtung. Bezogen auf die Mitte der sechswöchigen Analyseabschnitte sind in Abb. 12.5 die zugeordneten Beträge der Werte σ_0 für beide Gravimeter dargestellt.

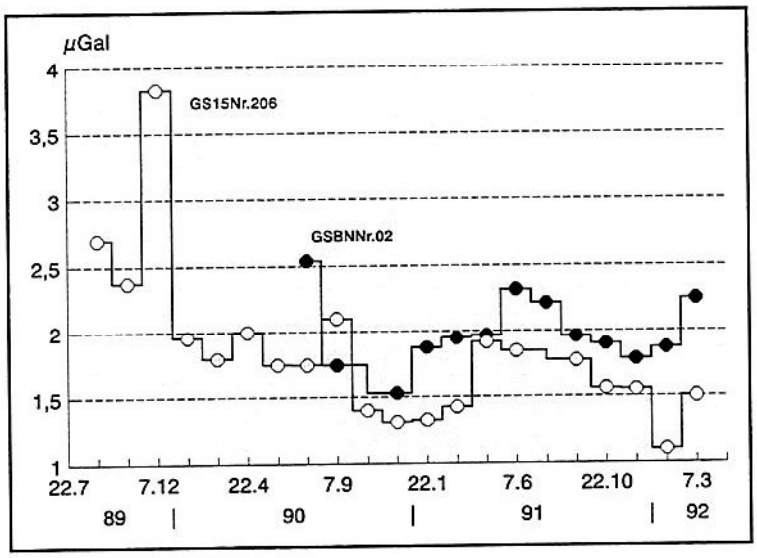


Abb. 12.5 Standardabweichung einer einzelnen Beobachtung

Abgesehen von einer stärkeren Einlaufphase des Gravimeters GS 15 Nr. 206 zum Ende des Jahres 1989, was ein Indiz dafür sein kann, daß bei einem stationären Betrieb von Registriergravimetern des Typs Askania erst nach einer gewissen Beruhigungsphase ein normaler Betriebszustand erreicht wird, liegen diese Beträge zwischen $\pm$ 1,1 µGal und $\pm$ 2,3 µGal. Dies liegt im Bereich dessen, was mit Gravimetern des Typs GS 11, 12 und 15 in reinen Gezeitenstationen erreichbar ist.

Damit besteht ein erster Hinweis auf den erreichten Grad der Elimination der gravitativen Wasserstandseffekte.

12.9.4 Eichergebnisse

In den Tabellen 12.5 und 12.6 sind die den jeweils sechswöchigen Analyseabschnitten zugeordneten plausibelsten Eichfaktoren nachgewiesen. Eine graphische Darstellung liegt über die Abb. 12.6 bzw. 12.7 vor.

Registrierzeit-raum	σ_0	k_0	$\sigma_{\delta O1}$	k_{O1}	$\sigma_{\delta M2}$	k_{M2}	k_{Mittel}
16.08.89-30.09.89	2.695	2.210	0.0263	2.205	0.0072	2.200	2.205
01.10.89-15.11.89	2.391	2.215	0.0262	2.235	0.0075	2.235	2.228
16.11.89-31.12.89	3.826	2.175	0.0246	2.180	0.0062	2.150	2.168
01.01.90-15.02.90	1.986	2.165	0.0165	2.180	0.0062	2.155	2.167
16.02.90-31.03.90	1.794	2.180	0.0211	2.175	0.0042	2.165	2.173
01.04.90-15.05.90	1.997	2.190	0.0185	2.185	0.0048	2.170	2.182
16.05.90-30.06.90	1.748	2.205	0.0122	2.205	0.0039	2.200	2.203
01.07.90-15.08.90	1.746	2.220	0.0142	2.200	0.0037	2.215	2.212
16.08.90-30.09.90	2.097	2.245	0.0150	2.260	0.0068	2.260	2.255
01.10.90-15.11.90	1.400	2.220	0.0107	2.210	0.0030	2.220	2.217
16.11.90-31.12.90	1.311	2.190	0.0097	2.200	0.0033	2.180	2.190
01.01.91-15.02.91	1.325	2.190	0.0073	2.195	0.0030	2.180	2.188
16.02.91-31.03.91	1.424	2.200	0.0103	2.185	0.0032	2.200	2.195
01.04.91-15.05.91	1.915	2.215	0.0179	2.220	0.0045	2.225	2.220
16.05.91-30.06.91	1.847	2.220	0.0145	2.215	0.0039	2.220	2.218
01.07.91-15.08.91	Registrierlücke						
16.08.91-30.09.91	1.774	2.210	0.0132	2.215	0.0033	2.190	2.205
01.10.91-15.11.91	1.560	2.200	0.0131	2.210	0.0038	2.190	2.200
16.11.91-31.12.91	1.551	2.170	0.0132	2.170	0.0035	2.165	2.168
01.01.92-15.02.92	1.103	2.180	0.0090	2.180	0.0026	2.180	2.180
16.02.92-31.03.92	1.501	2.175	0.0223	2.180	0.0059	2.180	2.178

Tab. 12.5 Günstigste Eichfaktoren k auf der Grundlage minimaler Standardabweichungen GS 15 Nr. 206

Registrierzeit-raum	σ_0	k_0	$\sigma_{\delta O1}$	k_{O1}	$\sigma_{\delta M2}$	k_{M2}	k_{Mittel}
01.07.90-15.08.90	2.538	1.840	0.0170	1.825	0.0090	1.805	1.823
16.08.90-30.09.90	1.743	1.955	0.0171	1.975	0.0047	1.950	1.960
01.10.90-15.11.90	1.735	1.935	0.0139	1.940	0.0040	1.945	1.940
16.11.90-31.12.90	1.529	1.840	0.0085	1.835	0.0035	1.835	1.837
01.01.91-15.02.91	Registrierlücke						
16.02.91-31.03.91	1.943	1.885	0.0239	1.835	0.0037	1.895	1.872
01.04.91-15.05.91	1.967	1.880	0.0155	1.900	0.0045	1.880	1.887
16.05.91-30.06.91	2.314	1.895	0.0200	1.915	0.0057	1.900	1.903
01.07.91-15.08.91	2.222	1.895	0.0145	1.930	0.0051	1.870	1.898
16.08.91-30.09.91	1.958	1.895	0.0123	1.895	0.0038	1.870	1.887
01.10.91-15.11.91	1.901	1.900	0.0161	1.910	0.0054	1.900	1.903
16.11.91-31.12.91	1.784	1.890	0.0125	1.875	0.0034	1.880	1.882
01.01.92-15.02.92	1.870	1.865	0.0118	1.835	0.0040	1.870	1.857
16.02.92-31.03.92	2.244	1.865	0.0318	1.850	0.0085	1.870	1.862

Tab. 12.6 Günstigste Eichfaktoren k auf der Grundlage minimaler Standardabweichungen GS BN Nr. 02

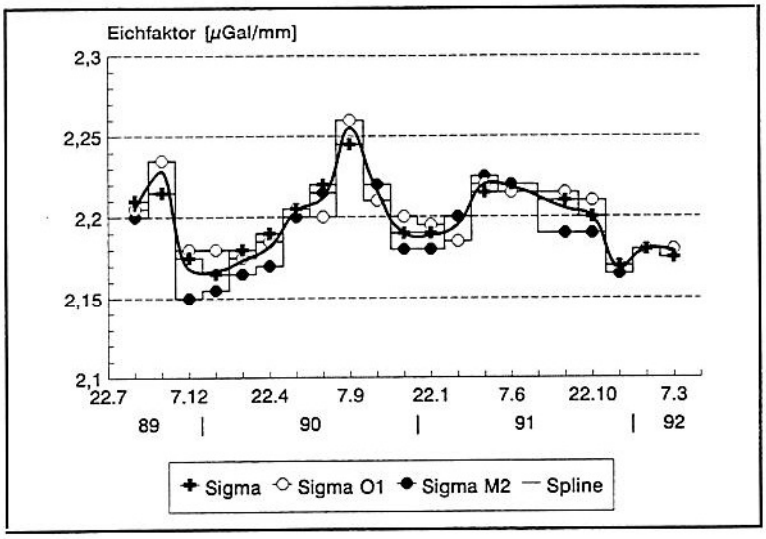


Abb. 12.6 Eichfaktorbestimmung GS 15 Nr. 206

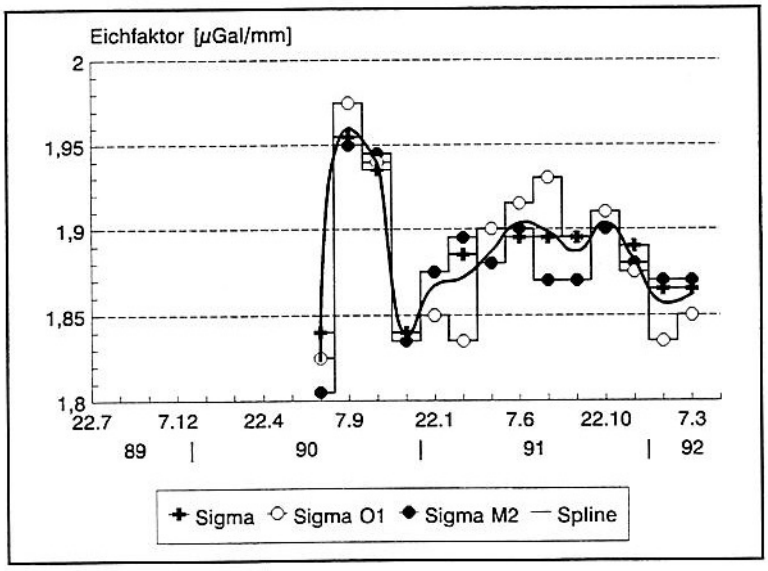


Abb. 12.7 Eichfaktorbestimmung GS BN Nr. 02

Einige statistische Angaben über die Variationsbreite (Spannweite = k_{Max} - k_{Min}) sowie die durchschnittliche Abweichung (lineare Streuung) der zugeordneten Eichfaktoren k_{Mittel} sind der Tabelle 12.7 zu entnehmen.

	Variationsbreite [µGal/mm]	%	Lineare Streuung [µGal/mm]	%
GS 15 Nr. 206	0.088	4.0	0.019	0.9
GS BN Nr. 02	0.137	7.3	0.027	1.4

Tab. 12.7 Statistische Angaben

Der zeitliche Verlauf sowie die Korrelationen der Eichfaktoren k_0, k_{O1} und k_{M2} läßt keine Präferenz bezüglich einer nach auswahltechnischen Gründen günstigsten Variante der Standardabweichungen zu. Als plausibelster Wert wurde daher das jeweilige arithmetische Mittel zugeordneter Eichfaktoren k_i gebildet. Daran anschließend wurde eine Spline-Funktion berechnet, die durch diese Stützstellen verläuft. Mit dieser Funktion wurden danach die halbstündlichen gravimetrischen Beobachtungsdaten für die nachfolgenden vierteljährlichen, halbjährlichen und jährlichen Gezeitenanalysen kontinuierlich geeicht.

Der zeitliche Verlauf des Betrages der Eichfaktoren sowie die erkennbare Korrelation beider Zeitreihen (Gravimeter GS 15 Nr. 206 und GS BN Nr. 02) bedürfen einer weiterführenden Untersuchung, die in Kapitel 12.10 gegeben wird.

12.9.5 Analysenergebnisse

Gravimeter sind durch die Gezeitenwirkungen auf den Erdkörper zusätzlichen Beschleunigungen durch die Auf- und Abwärtsbewegungen des Instrumentes unterworfen. Will man diese Inertialeffekte (~ 0,001 für O_1, K_1 und ~ 0,004 für M_2, S_2) berücksichtigen, so sind die Amplitudenquotienten um die zugehörigen Beträge zu korrigieren /33/.

Alle im folgenden dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf die beobachteten Gravimeterdaten und sind **nicht** inertialkorrigiert.

12.9.5.1 Zeitlicher Verlauf der Sechswochen-Analysen

Die Ergebnisse der aufeinanderfolgenden Sechswochen-Analysen in Verbindung mit dem zugehörigen Eichfaktoren-Spline für die Partialtiden O_1, $P_1S_1K_1$, M_2 und S_2K_2 sind für das Gravimeter GS 15 Nr. 206 in den Abb. 12.8, 12.9, 12.10 bzw. für das Gravimeter GS BN Nr. 02 in den Abb. 12.11, 12.12, 12.13 graphisch dargestellt.

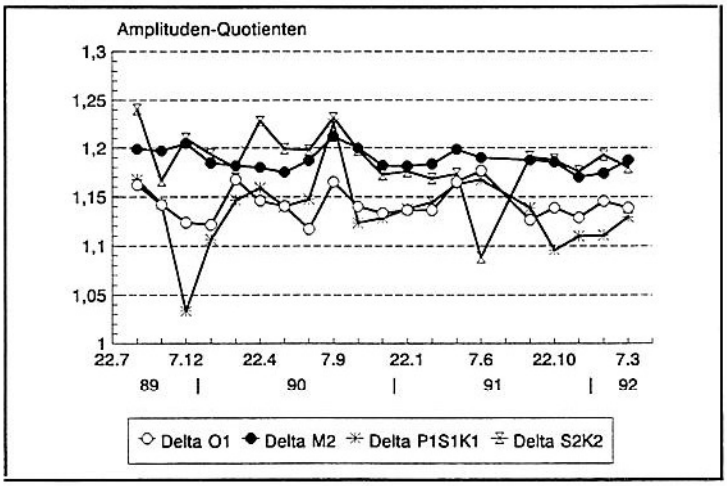


Abb. 12.8 Ergebnisse der Sechswochenanalyse GS 15 Nr. 206 (δ)

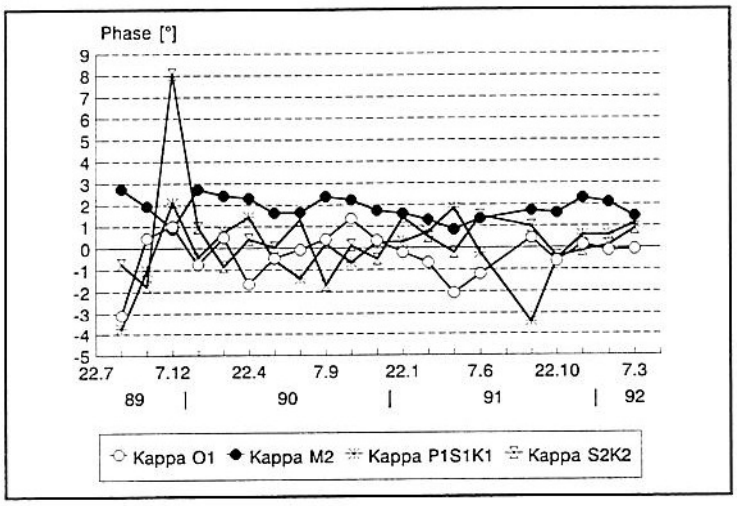


Abb. 12.9 Ergebnisse der Sechswochenanalyse GS 15 Nr. 206 (κ)

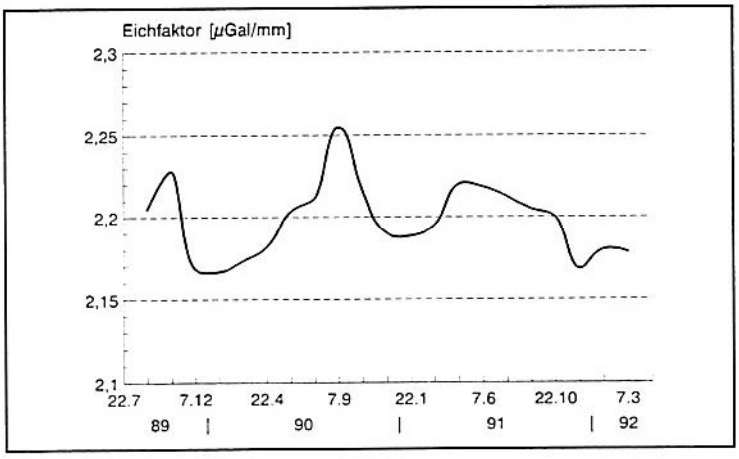


Abb. 12.10 Eichfaktor-Spline GS 15 Nr. 206

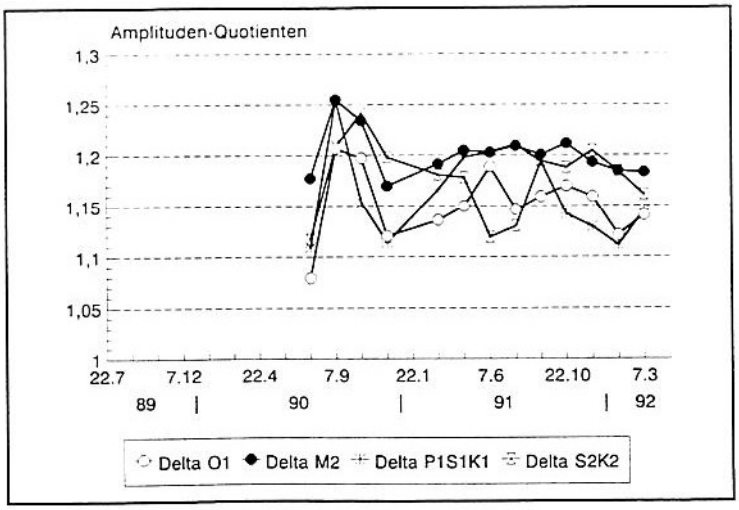


Abb. 12.11 Ergebnisse der Sechswochenanalyse GS BN Nr. 02 (δ)

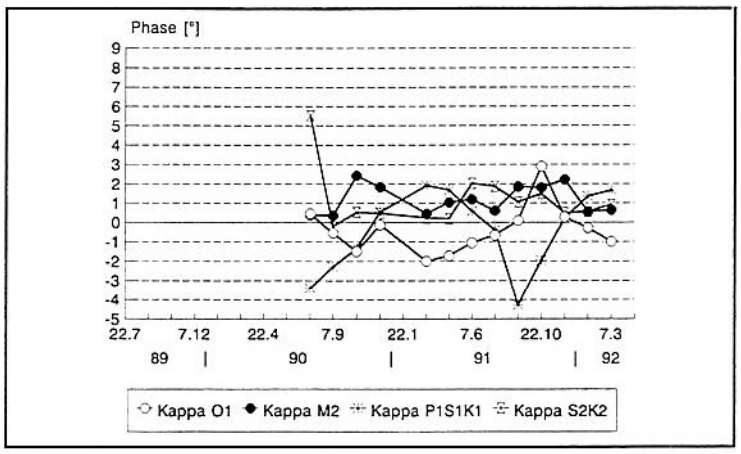


Abb. 12.12 Ergebnisse der Sechswochenanalyse GS BN Nr. 02 (κ)

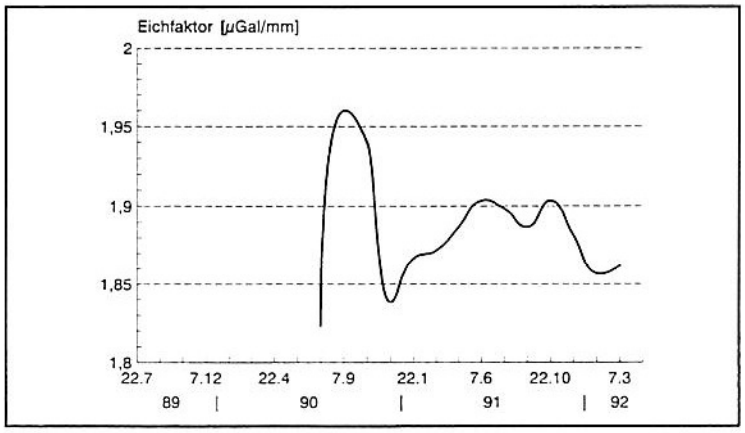


Abb. 12.13 Eichfaktor-Spline GS BN Nr. 02

Um einen möglichen Zusammenhang zwischen der zeitlichen Variation der berechneten Amplitudenquotienten und den zugeordneten Standardabweichungen erkennen zu können, wurde für die Haupttiden O_1 und M_2 in den Abb. 12.14, 12.15, 12.16, 12.17 ergänzend auch der Verlauf dieser Standardabweichungen eingetragen. Eine signifikante Korrelation zwischen dem zeitlichen Verlauf und den Beträgen der Standardabweichungen läßt sich nicht nachweisen.

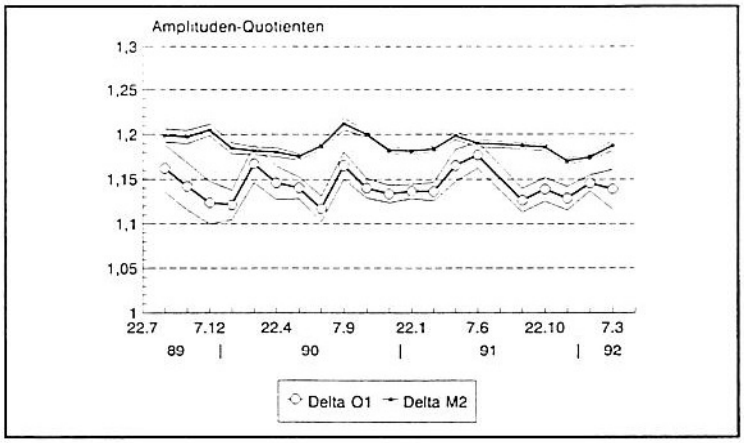


Abb. 12.14 Amplituden-Quotienten GS 15 Nr. 206 mit Standardabweichungen

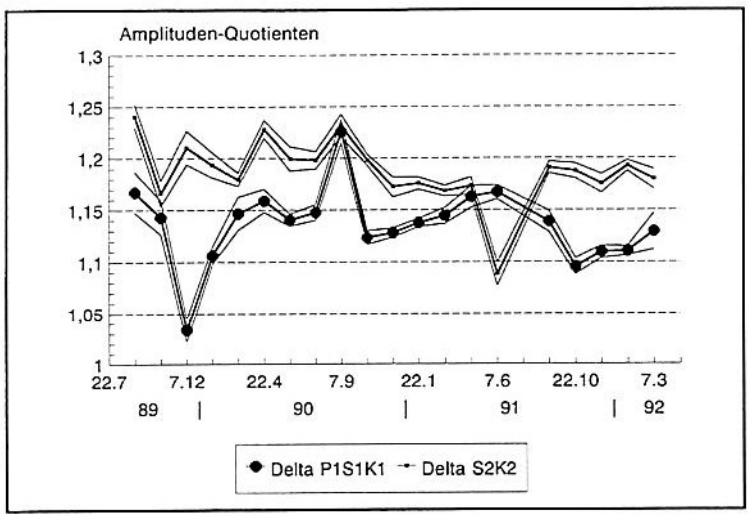


Abb. 12.15 Amplituden-Quotienten GS 15 Nr. 206 mit Standardabweichungen

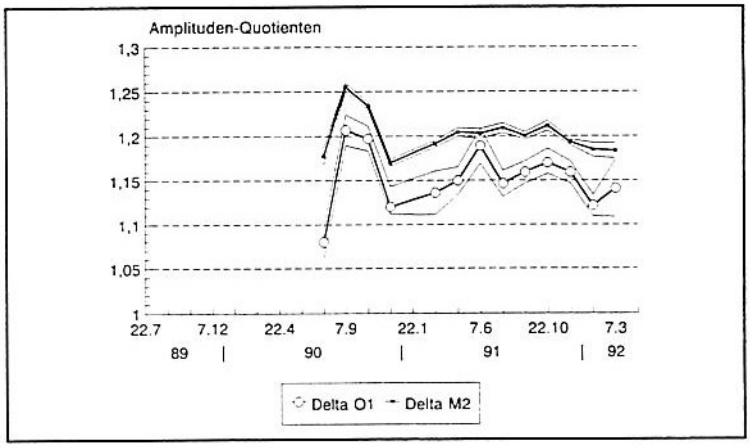


Abb. 12.16 Amplituden-Quotienten GS BN Nr. 02 mit Standardabweichungen

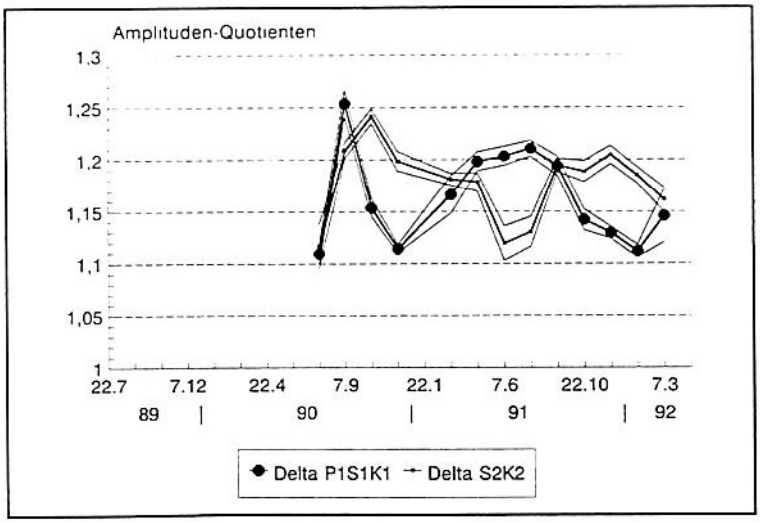


Abb. 12.17 Amplituden-Quotienten GS BN Nr. 02 mit Standardabweichungen

Die Ergebnisse entsprechender Untersuchungen hinsichtlich einer Korrelation zwischen dem zeitlichen Verlauf der Amplitudenquotienten und der Eichfaktoren sind in den Tab. 12.8 und 12.9 nachgewiesen. Der Pearsonsche Korrelationskoeffizient beschreibt die Exaktheit des linearen Zusammenhanges zwischen zwei Merkmalen. Beim Gravimeter GS 15 Nr. 206 zeigt sich lediglich eine schwach ausgeprägte Korrelation. Eindeutig ist jedoch die Korrelation des Verlaufs der Amplitudenquotienten O_1 und M_2 mit dem zeitlichen Verlauf der Eichfunktion beim Gravimeter GS BN Nr. 02.

	GS 15 Nr. 206			
	O_1	$P_1S_1K_1$	M_2	S_2K_2
Korrelations-koeffizient	0.435	0.696	0.613	-0.020

Tab. 12.8 Pearsonsche Korrelationskoeffizienten GS 15 Nr 206

	GS BN Nr. 02			
	O_1	$P_1S_1K_1$	M_2	S_2K_2
Korrelations-koeffizient	0.944	0.735	0.967	0.434

Tab. 12.9 Pearsonsche Korrelationskoeffizienten GS BN Nr. 02

12.9.5.2 Mittelwerte der Sechswochen-Analysen

In der Tabelle 12.10 sind die zuvor dargestellten Einzelergebnisse zu arithmetischen Mittelwerten zusammengefaßt. Für die Standardabweichung des Gesamtergebnisses wurde das Fehlerfortpflanzungsgesetz für Standardabweichungen von Gauß angewendet, wobei die Einzelanalysen mit gleicher Genauigkeit gewichtet wurden.

	O_1		$P_1S_1K_1$		M_2		S_2K_2	
	δ $\sigma_{\delta O1}$	$\kappa[']$ $\sigma_{\kappa O1}$	δ $\sigma_{\delta P1S1K1}$	$\kappa[']$ $\sigma_{\kappa P1S1K1}$	δ $\sigma_{\delta M2}$	$\kappa[']$ $\sigma_{\kappa M2}$	δ $\sigma_{\delta S2K2}$	$\kappa[']$ $\sigma_{\kappa S2K2}$
GS 15 Nr. 206	1.1426 $\pm$0.0167	-0.32 $\pm$0.84	1.1359 $\pm$0.0106	-0.10 $\pm$0.53	1.1881 $\pm$0.0048	1.84 $\pm$0.23	1.1875 $\pm$0.0094	0.50 $\pm$0.45
GS BN Nr. 02	1.1520 $\pm$0.0177	-0.40 $\pm$0.88	1.1640 $\pm$0.0117	-0.44 $\pm$0.57	1.2014 $\pm$0.0057	1.17 $\pm$0.27	1.1775 $\pm$0.0110	1.16 $\pm$0.55

Tab. 12.10 Ergebnisse der Sechswochen-Analysen

12.9.5.3 Ergebnisse der Vierteljahres-Analysen

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 12.11 und 12.12 nachgewiesen. Grundlage sind die halbstündlichen gravimetrischen Registrierwerte, die mit Hilfe der in Kapitel 12.9.4 beschriebenen Spline-Funktion geeicht wurden.

GS 15 Nr. 206	O_1		$P_1S_1K_1$		M_2		S_2K_2	
	δ $\sigma_{\delta O1}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa O1}$	δ $\sigma_{\delta P1S1K1}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa P1S1K1}$	δ $\sigma_{\delta M2}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa M2}$	δ $\sigma_{\delta S2K2}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa S2K2}$
01.10.89 - 31.12.89	1.1369 ±0.0186	-0.74 ±0.94	1.0646 ±0.0095	1.51 ±0.51	1.2034 ±0.0055	1.01 ±0.26	1.1850 ±0.0113	1.77 ±0.55
01.01.90 - 31.03.90	1.1409 ±0.0139	-0.14 ±0.70	1.1164 ±0.0083	-0.13 ±0.42	1.1805 ±0.0039	2.38 ±0.19	1.1890 ±0.0067	-0.41 ±0.32
01.04.90 - 30.06.90	1.1434 ±0.0118	-1.06 ±0.59	1.1473 ±0.0062	0.20 ±0.31	1.1794 ±0.0031	2.00 ±0.15	1.2218 ±0.0069	0.21 ±0.32
01.07.90 - 30.09.90	1.1403 ±0.0113	-0.08 ±0.57	1.1677 ±0.0068	-1.14 ±0.33	1.1995 ±0.0040	1.94 ±0.19	1.2154 ±0.0076	-0.38 ±0.36
01.10.90 - 31.12.90	1.1386 ±0.0077	-0.51 ±0.39	1.1249 ±0.0040	-0.04 ±0.21	1.1916 ±0.0026	2.04 ±0.12	1.1893 ±0.0053	-0.25 ±0.26
01.01.91 - 31.03.91	1.1375 ±0.0062	-0.40 ±0.31	1.1381 ±0.0037	0.31 ±0.19	1.1834 ±0.0023	1.44 ±0.11	1.1726 ±0.0040	0.91 ±0.20
01.04.91 - 30.06.91	1.1710 ±0.0120	-1.43 ±0.59	1.1624 ±0.0062	0.36 ±0.30	1.1924 ±0.0033	1.07 ±0.16	1.1463 ±0.0075	0.32 ±0.37
01.07.91 - 30.09.91	1.1231 ±0.0146	0.34 ±0.74	1.1412 ±0.0107	-3.18 ±0.54	1.1860 ±0.0036	1.66 ±0.17	1.1920 ±0.0058	1.13 ±0.28
01.10.91 - 31.12.91	1.1348 ±0.0092	-0.34 ±0.46	1.1044 ±0.0045	0.29 ±0.24	1.1770 ±0.0026	1.97 ±0.13	1.1832 ±0.0056	-0-13 ±0.27
01.01.92 - 31.03.92	1.1464 ±0.0073	-0.45 ±0.37	1.1151 ±0.0041	0.92 ±0.21	1.1806 ±0.0026	1.92 ±0.13	1.1901 ±0.0047	0.48 ±0.23

Tab. 12.11 Ergebnisse der Vierteljahres-Analysen GS 15 Nr. 206

GS BN Nr. 02	O_1		$P_1S_1K_1$		M_2		S_2	
	δ $\sigma_{\delta O1}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa O1}$	δ $\sigma_{\delta K1}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa K1}$	δ $\sigma_{\delta M2}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa M2}$	δ $\sigma_{\delta S2}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa S2}$
01.07.90 - 30.09.90	1.1655 ±0.0146	-1.30 ±0.72	1.1527 ±0.0088	-3.26 ±0.44	1.2138 ±0.0058	0.58 ±0.27	1.1776 ±0.0106	1.82 ±0.52
01.10.90 - 31.12.90	1.1633 ±0.0087	-0.74 ±0.43	1.1296 ±0.0044	-0,23 ±0.22	1.2045 ±0.0037	2.08 ±0.17	1.2293 ±0.0077	0.46 ±0.36
01.01.91 - 31.03.91	1.1390 ±0.0175	-1.58 ±0.88	1.1406 ±0.0117	0.69 ±0.59	1.1913 ±0.0038	0.63 ±0.18	1.1872 ±0.0061	0.34 ±0.29
01.04.91 - 30.06.91	1.1753 ±0.0133	-1.47 ±0.65	1.1918 ±0.0070	0.84 ±0.34	1.2021 ±0.0037	1.07 ±0.17	1.1618 ±0.0082	0.58 ±0.41
01.07.91 - 30.09.91	1.1536 ±0.0104	-0.59 ±0.52	1.2071 ±0.0063	-1.58 ±0.30	1.2065 ±0.0035	1.28 ±0.17	1.1727 ±0.0065	1.20 ±0.32
01.10.91 - 31.12.91	1.1581 ±0.0100	-0.48 ±0.49	1.1293 ±0.0049	-0.12 ±0.25	1.2000 ±0.0030	2.09 ±0.14	1.1992 ±0.0066	0.91 ±0.32
01.01.92 - 31.03.92	1.1318 ±0.0096	-0.45 ±0.48	1.1166 ±0.0054	1.44 ±0.28	1.1792 ±0.0031	1.20 ±0.15	1.1772 ±0.0055	0.74 ±0.27

Tab. 12.12 Ergebnisse der Vierteljahres-Analysen GS BN Nr. 02

12.9.5.4 Ergebnisse der Halbjahres-Analysen

Die Registrierzeiträume waren lang genug, um die Partialtiden K1 und S2 aufzulösen. Die Ergebnisse der Gezeitenanalysen sind in den Tabellen 12.13 und 12.14 nachgewiesen.

GS 15 Nr. 206	O_1		K_1		M_2		S_2	
	δ $\sigma_{\delta O1}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa O1}$	δ $\sigma_{\delta P1S1K1}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa P1S1K1}$	δ $\sigma_{\delta M2}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa M2}$	δ $\sigma_{\delta S2K2}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa S2K2}$
01.01.90 - 30.06.90	1.1433 ±0.0090	-0.65 ±0.45	1.1355 ±0.0092	-0.18 ±0.46	1.1794 ±0.0025	2.20 ±0.12	1.2012 ±0.0029	0.12 ±0.14
01.07.90 - 31.12.90	1.1372 ±0.0069	-0.34 ±0.35	1.1732 ±0.0075	-0.72 ±0.36	1.1951 ±0.0025	2.00 ±0.12	1.2019 ±0.0024	-0.28 ±0.12
01.01.91 - 30.06.91	1.1545 ±0.0067	-0.90 ±0.33	1.1399 ±0.0068	0.30 ±0.34	1.1879 ±0.0020	1.17 ±0.10	1.1603 ±0.0026	0.72 ±0.13
01.07.91 - 31.12.91	1.1321 ±0.0073	-0.18 ±0.37	1.1426 ±0.0094	0.00 ±0.47	1.1795 ±0.0022	1.83 ±0.11	1.1868 ±0.0025	0.48 ±0.12

Tab. 12.13 Ergebnisse der Halbjahres-Analysen GS 15 Nr. 206

GS BN Nr. 02	O_1		K_1		M_2		S_2	
	δ $\sigma_{\delta O1}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa O1}$	δ $\sigma_{\delta P1S1K1}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa P1S1K1}$	δ $\sigma_{\delta M2}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa M2}$	δ $\sigma_{\delta S2K2}$	$\kappa[°]$ $\sigma_{\kappa S2K2}$
01.07.90 - 31.12.90	1.1610 ±0.0081	-0.58 ±0.40	1.1795 ±0.0078	-1.64 ±0.38	1.2065 ±0.0035	1.46 ±0.16	1.2020 ±0.0028	1.40 ±0.13
01.01.91 - 30.06.91	1.1611 ±0.0106	-1.51 ±0.52	1.1676 ±0.0120	-0.09 ±0.59	1.1977 ±0.0027	0.94 ±0.13	1.1705 ±0.0034	0.27 ±0.17
01.07.91 - 31.12.91	1.1572 ±0.0069	-0.62 ±0.34	1.1809 ±0.0070	0.10 ±0.34	1.2036 ±0.0024	1.65 ±0.11	1.1853 ±0.0026	1.33 ±0.12

Tab. 12.14 Ergebnisse der Halbjahres-Analysen GS BN Nr. 02

12.9.5.5 Ergebnisse der Jahres-Analysen

Die Jahres-Ergebnisse sind in Tab. 12.15 und 12.16 nachgewiesen.

	O_1	P_1	S_1	K_1	M_2	S_2	K_2
	δ $\sigma_{\delta O1}$	δ $\sigma_{\delta P1}$	δ $\sigma_{\delta S1}$	δ $\sigma_{\delta K1}$	δ $\sigma_{\delta M2}$	δ $\sigma_{\delta S2}$	δ $\sigma_{\delta K2}$
GS 15 Nr. 206 1990	1.1408 ±0.0058	1.1420 ±0.0113	3.2037 ±0.6946	1.1386 ±0.0034	1.1868 ±0.0018	1.2008 ±0.0019	1.2017 ±0.0000
1991	1.1449 ±0.0050	1.1889 ±0.0094	5.7986 ±0.5827	1.1380 ±0.0029	1.1840 ±0.0016	1.1716 ±0.0018	1.1867 ±0.0000
GS BN Nr. 02 1991	1.1587 ±0.0062	1.1855 ±0.0117	7.4532 ±0.7107	1.1672 ±0.0036	1.2009 ±0.0019	1.1784 ±0.0021	1.1952 ±0.0000

Tab. 12.15 Ergebnisse der Jahres-Analysen (δ)

Die Partialtide S_1 - mit einer Winkelgeschwindigkeit von 15°/h und einer Amplitude von 0,3 µGal - ist ein sensibler Indikator für tägliche Störeffekte. Aus den Jahresergebnissen ist zu entnehmen, daß der Amplitudenquotient S_1 nur schlecht bestimmt werden konnte. Dies ist primär darauf zurückzuführen, daß der Modellansatz einer konstanten Amplitude und einer konstanten Phasenverschiebung von dem beobachteten Signal nur bedingt erfüllt wird. In weiterführenden Arbeiten ist dieser Sachverhalt näher zu untersuchen.

	O_1	P_1	S_1	K_1	M_2	S_2	K_2
	κ [°] $\sigma_{\kappa O1}$	κ [°] $\sigma_{\kappa P1}$	κ [°] $\sigma_{\kappa S1}$	κ [°] $\sigma_{\kappa K1}$	κ [°] $\sigma_{\kappa M2}$	κ [°] $\sigma_{\kappa S2}$	κ [°] $\sigma_{\kappa K2}$
GS 15 Nr. 206 1990	-0.52 ±0.29	-0.50 ±0.57	162.85 ±12.42	-0.18 ±0.17	2.09 ±0.09	-0.05 ±0.09	-1.58 ±0.00
1991	-0.62 ±0.25	1.43 ±0.45	137.66 ±5.76	-0.31 ±0.15	1.49 ±0.08	0.60 ±0.09	0.43 ±0.00
GS BN Nr. 02 1991	-1.09 ±0.31	1.54 ±0.56	154.02 ±5.46	-0.18 ±0.18	1.31 ±0.09	0.98 ±0.10	-0.93 ±0.00

Tab. 12.16 Ergebnisse der Jahres-Analysen (κ)

Einen Überblick hinsichtlich der Größe und Struktur der den Jahres-Analysen zugeordneten Residuen vermittelt die Abb. 12.18. Mit diesen Residuen wurde eine Fourieranalyse durchgeführt, deren Ergebnisse in Abb. 12.19 dargestellt sind. Erwartungsgemäß treten mehr oder weniger ausgeprägte Spitzen im ganz- und halbtägigen Gezeitenbereich auf. Die größten Amplituden liegen im Bereich von ~ 0,3 µGal, d.h. somit im Bereich von Fehlerwirkungen aus den Pegelbeobachtungen.

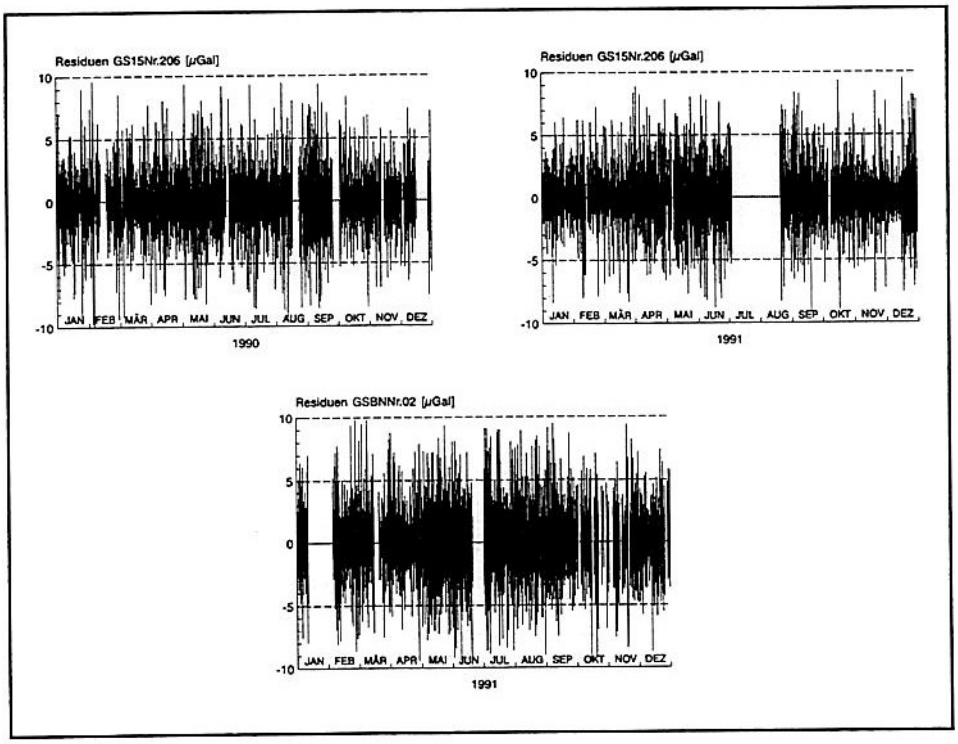


Abb. 12.18 Residuendarstellung nach Jahresanalysen

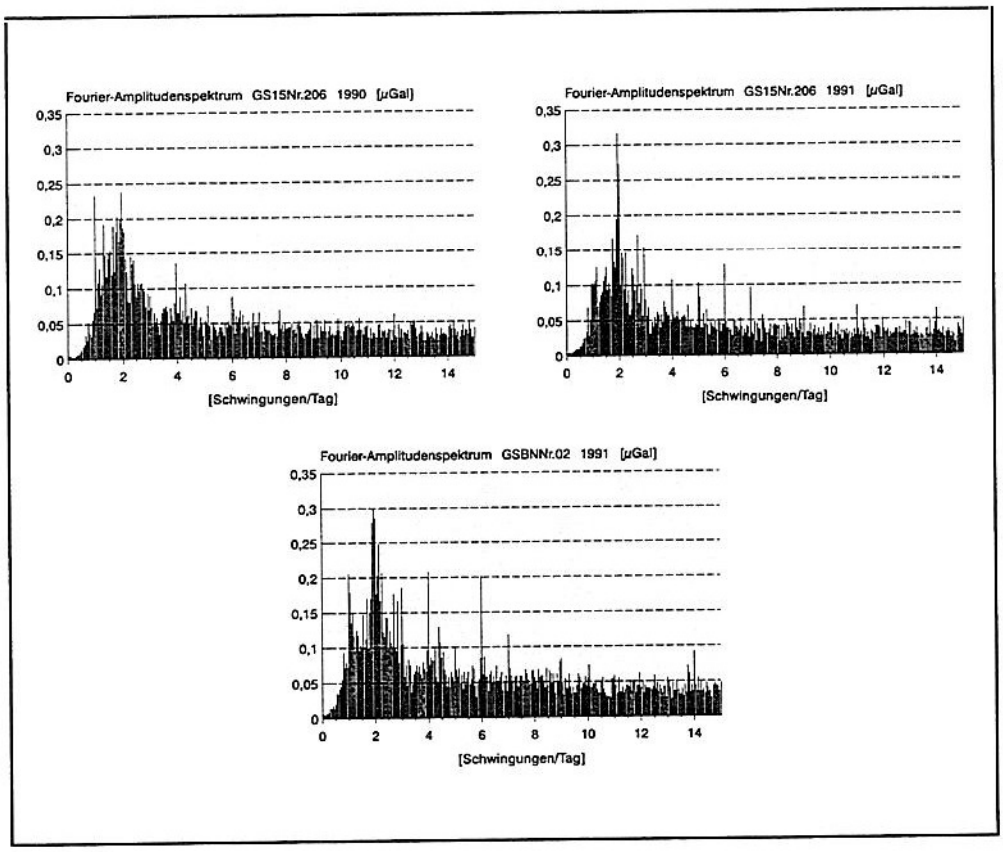


Abb. 12.19 Fourieranalyse der Residuen

12.9.5.6 Zusammenstellung der Amplitudenfaktoren δ für die Haupttiden O_1 und M_2

In den Tab. 12.17 und 12.18 sind die Ergebnis-Mittelwerte der Gezeitenanalysen für die Haupttiden O_1 und M_2 sowie das eichfaktorunabhängige Faktorenverhältnis $\delta_{M2/O1}$ zusammengefaßt.

	δ_{O1}	δ_{M2}	δ_{M2}/δ_{O1}
6-Wochen-Analyse 16.08.89-31.03.92	1.1426 ± 0.0167	1.1881 ± 0.0048	1.0398 ± 0.0158
3-Monate-Analyse 01.10.89-31.03.92	1.1413 ± 0.0118	1.1875 ± 0.0035	1.0405 ± 0.0112
6-Monate-Analyse 01.01.90-31.12.91	1.1418 ± 0.0075	1.1855 ± 0.0023	1.0383 ± 0.0071
1-Jahres-Analyse 01.01.90-31.12.90 01.01.91-31.12.91 ---------- 01.01.90-31.12.91	 1.1408 ± 0.0058 1.1449 ± 0.0050 ---------- 1.1429 ± 0.0054	 1.1868 ± 0.0018 1.1840 ± 0.0016 ---------- 1.1854 ± 0.0017	 1.0403 ± 0.0053 1.0342 ± 0.0047 ---------- 1.0372 ± 0.0051

Tab.12.17 Gezeitenanalysen GS 15 Nr. 206

	δ_{O1}	δ_{M2}	δ_{M2}/δ_{O1}
6-Wochen-Analyse 01.07.90-31.03.92	1.1520 ± 0.0177	1.2014 ± 0.0057	1.0429 ± 0.0168
3-Monate-Analyse 01.07.90-31.03.92	1.1552 ± 0.0126	1.1996 ± 0.0039	1.0384 ± 0.0118
6-Monate-Analyse 01.07.90-31.12.91	1.1598 ± 0.0087	1.2026 ± 0.0029	1.0369 ± 0.0082
1-Jahres-Analyse 01.01.91-31.12.91	1.1587 ± 0.0062	1.2009 ± 0.0019	1.0364 ± 0.0058

Tab. 12.18 Gezeitenanalysen GS BN Nr. 02

Ein wesentlicher Unterschied hinsichtlich der Leistungsfähigkeit und des Verhaltens der beiden eingesetzten Gravimeter ist nicht zu erkennen. Auffällig sind allerdings zwei Merkmale: Zum einen die systematische Differenz der mit beiden eingesetzten Gravimetern gewonnenen Amplitudenfaktoren δ_{O1} (0.0158) und δ_{M2} (0.0155) bezogen auf die Ergebnisse der Jahres-Analysen für das Gravimeter GS BN Nr. 02 und das Mittel der beiden Jahresanalysen für das Gravimeter GS 15 Nr. 206. Für die Haupttide O_1 ist die Differenz $\Delta\delta$ zwar nur schwach signifikant (nach dem t-Test) ausgeprägt, jedoch signifikant im Falle der Haupttide M_2. Die praktische Identität der Beträge $\Delta\delta$ sowie deren einheitliches Vorzeichen weisen auf einen systematischen Fehler hin. Auf der anderen Seite ist die Übereinstimmung des Faktorenverhältnisses δ_{M2}/δ_{O1} beider Gravimeter sowie die Homogenität der Ergebnisse der beiden Jahres-Analysen für das Gravimeter GS 15 Nr. 206 bemerkenswert.

Aus den Ergebnissen ist nicht erkennbar, ob der systematische Fehler dominant einem der beiden Gravimeter zuzuordnen ist (vgl. jedoch Tab. 12.8 und 12.9). Daher verbleibt lediglich die Möglichkeit, die Mittelbildung als repräsentatives Ergebnis zu definieren, wobei sinnvollerweise nur die der Jahresanalysen verwendet werden. Formal erhält man dann für die Haupttiden δ_{O1} und δ_{M2}:

$$\delta_{O1} = 1{,}1508$$
$$\delta_{M2} = 1{,}1932$$

Interessant ist ein Vergleich dieser Ergebnisse mit denen der Nachbar-Gezeitenstation Effelsberg /8/. Für O_1 ergibt sich eine Übereinstimmung < 0,1 ‰ und für M_2 < 0,3 ‰. Aus diesem Grund sind die in der Station Vianden auf der Grundlage der gravimetrischen Eichung gewonnenen Ergebnisse zumindest plausibel, um es sehr konservativ auszudrücken.

12.10 Ergebnisbeurteilung und -interpretation

12.10.1 Vorbemerkungen

Die festgestellte zeitliche Variation der Eichfaktoren sowie die systematischen Differenzen der mit beiden Gravimetern ermittelten Amplitudenfaktoren erfordern weiterführende Untersuchungen. Als Lösungsmöglichkeit bietet es sich an, auch die nach dem 31.03.1992 fortlaufend gewonnenen, weiteren Registrierdaten heranzuziehen, um eine Erklärung für diese Phänomene zu erhalten. Diese Untersuchungen überschreiten jedoch das Ziel der vorgelegten Arbeit sowie deren Umfang, so daß im folgenden lediglich einige Ansätze und Überlegungen für weiterführende Ergebnisanalysen, -interpretationen sowie Modellbildungen gegeben werden.

12.10.2 Das Auswerteverfahren

Das praktizierte Auswerteverfahren weist den Vorteil der Einfachheit auf und damit den Vorzug einer Überschaubarkeit der Berechnungen, obwohl es nicht ganz dem Stand der möglichen aktuellen Auswertetechniken entspricht. Erinnert sei an das Verfahren der Mehrkanalanalyse, mit dem die gewonnenen Registrierdaten zusammen mit möglichen anderen Einflußparametern ausgewertet werden können /59/. Die Erwartungen hinsichtlich einer Ergebnisverbesserung sollten jedoch auf der Grundlage bisheriger Erfahrungen nicht allzu hoch angesetzt werden.

12.10.3 Temperatureinflüsse

Zur Ursachenfindung für die ermittelten Variationen der Eichfaktoren liegt es nahe, die möglichen Einwirkungen von Temperaturvariationen zu untersuchen, da der Verlauf der Eichfaktoren eine jährliche Struktur aufweist. In Abb. 12.20 sind die zeitlichen Änderungen der Eichfaktoren zusammen mit den Variationen der Außen-, der Innentemperatur im Stollen sowie der Wassertemperatur dargestellt. Die Temperaturen sind in einem 15-Tage-Intervall als arithmetisches Mittel nacheinander (nicht gleitend) ermittelt worden.

Die Korrelation zwischen der Wasser- und Außentemperatur ist wie erwartet stark ausgeprägt. Ebenso die Innen- mit der Außentemperatur, wobei hier allerdings eine physikalisch begründete Phasenverschiebung durch die Lage der Beobachtungsstationen innerhalb des Drainageganges offensichtlich wird.

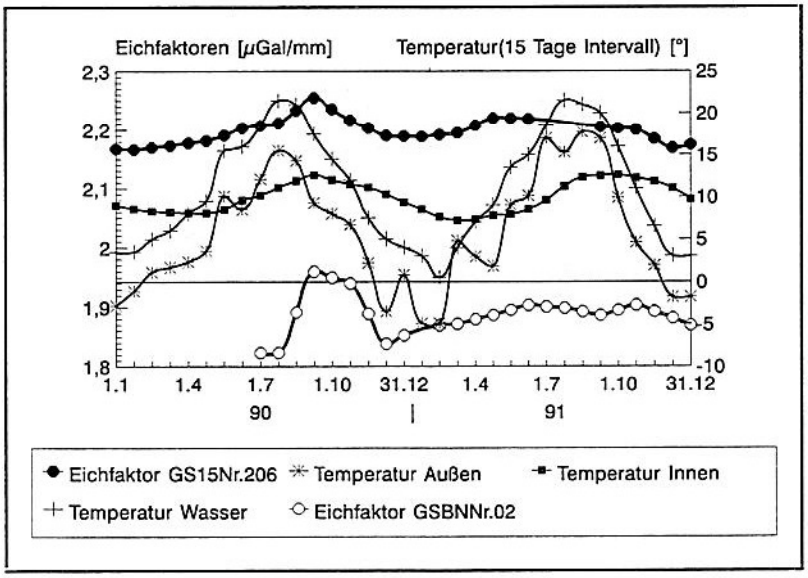


Abb. 12.20 Temperatur-, Eichfaktordarstellung

12.10.4 Die Dichte des Wassers

Meßdaten über den jahreszeitlichen Variationsverlauf der Wassertemperatur lagen zunächst nicht vor. Daher wurde aus arbeitstechnischen Vereinfachungsgründen bei den Berechnungen der Gravitationseffekte eine konstante Dichte von 1 g/cm³ zugrunde gelegt. Allerdings zeigt eine Abschätzung, daß die Berücksichtigung unterschiedlicher Dichteansätze aufgrund Temperaturvariationen nicht problematisch ist. Die maximale, saisonale Änderung der Wassertemperatur beträgt nämlich ~ 20 °C bei einem Temperaturbereich von ~ + 2 °C bis ~ + 22 °C. Wenn man für die Berechnungen eine mittlere jährliche Dichte von 0,999 g/cm³ verwendet, so ist der systematische Einfluß der Dichtevariation mit einer Toleranz von 1 ‰ erfaßt und damit für die Auswertungen vernachlässigbar.

12.10.5 Die Korrelation der Amplitudenfaktoren der Hauptpartialtiden mit dem Temperaturverlauf

Die Amplitudenfaktoren sind in Abb. 12.21 als Spline-Funktionen dargestellt. Die δ-Werte beider Gravimeter weisen eine nur schwache Korrelation mit den Temperaturwerten auf (Tab. 12.19). Für die Korrelationsberechnung wurden die sechs-wöchigen Analyseergebnisse zugrunde gelegt.

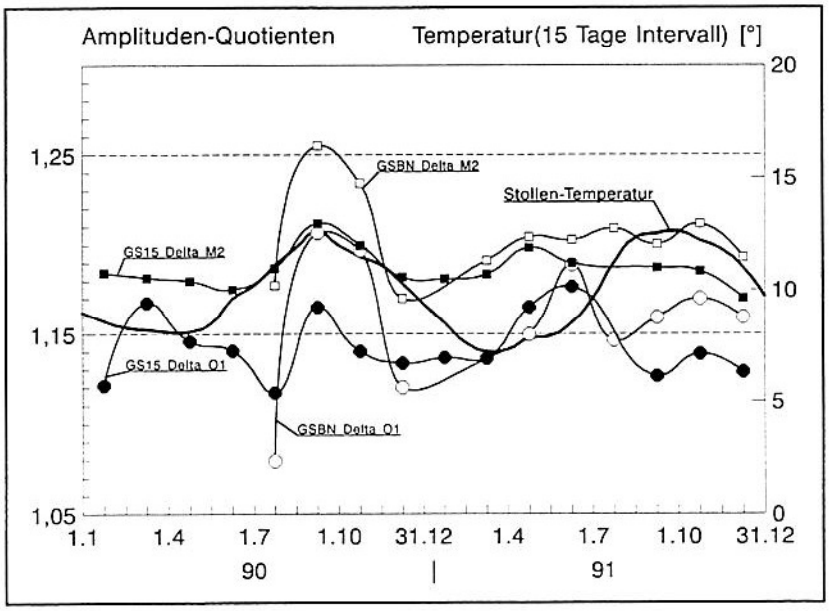


Abb. 12.21 Temperatur-, Amplitudenquotientendarstellung

Temperaturen	GS 15 Nr. 206		GS BN Nr. 02	
	δ_{O1}	δ_{M2}	δ_{O1}	δ_{M2}
STOLLEN	0.18	0.31	-0.28	0.30
WASSER	-0.05	0.28	0.06	0.42
AUßEN	-0.06	0.26	-0.00	0.34

Tab. 12.19 Den δ-Werten zugeordnete Pearsonsche Korrelationskoeffizienten

12.10.6 Die Korrelation der Phasen der Hauptpartialtiden mit dem Temperaturverlauf

In Abb. 12.22 sind die Phasen als Spline-Funktion zusammen mit der Stollentemperatur dargestellt. Auch bei dieser Korrelationsberechnung (Tab. 12.19) wurde auf die Werte der sechs-wöchigen Analysen zurückgegriffen. Bemerkenswert ist die signifikante Korrelation der Phasen κ_{O1} beider Gravimeter mit der Temperatur im Drainagegang.

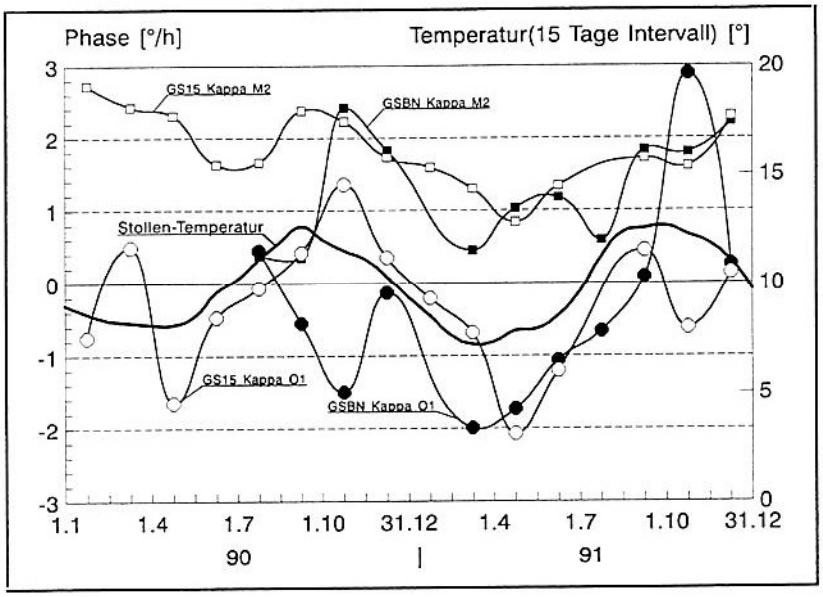


Abb. 12.22 Temperatur-, Phasendarstellung

Temperaturen	GS 15 Nr. 206		GS BN Nr. 02	
	κ_{O1}	κ_{M2}	κ_{O1}	κ_{M2}
INNEN	**0.62**	0.24	**0.60**	0.34
WASSER	0.13	-0.16	0.29	-0.27
AUßEN	0.13	-0.17	0.21	-0.20

Tab. 12.20 Den κ-Werten zugeordnete Pearsonsche Korrelationseffizienten

12.10.7 Instrumentelle Temperatureffekte

Eine Abhängigkeit der Eichfaktoren von der Umgebungstemperatur ist instrumentell nur schwer zu erklären, auch in Anbetracht der unterschiedlichen Regressionen in den Jahren 1990 und 1991. Trotz allem kann jedoch eine solche Abhängigkeit nicht gänzlich ausgeschlossen werden.

Die beiden eingesetzten Gravimeter unterscheiden sich hinsichtlich der Stabilisierung der Innentemperatur insofern, als bei dem Gravimeter GS 15 Nr. 206 nur der äußere Heizkreis aktiviert ist, wohingegen bei dem Gravimeter GS BN Nr. 02 zusätzlich ein thermistorgesteuerter innerer Heizkreis in Betrieb ist. Dies sollte eigentlich zu einer besseren Stabilisierung des inneren Temperaturfeldes führen, jedoch weist gerade dieses Gravimeter die relativ größeren Variationen des Eichfaktors auf.

Ganz- und halbtägige Temperaturvariationen konnten innerhalb einer Auflösung der Temperaturbeobachtungen im Drainagegang von 0,01 °C nicht festgestellt werden, so daß auch die Möglichkeit einer solchen Beeinflussung der ganz- und halbtägigen gravimetrischen Signale, die zu systematischen Differenzen der Amplitudenfaktoren führen würden, praktisch auszuschließen sind.

12.10.8 Luftdruckeinflüsse

Sofern die Gravimeter unterschiedliche Luftdruckempfindlichkeit nachweisen (wovon prinzipiell auszugehen ist), könnten nicht die Eichfaktor-Variationen, aber die systematischen Differenzen $\Delta\delta_{O1}$ und $\Delta\delta_{M2}$ potentiell durch Luftdruckvariationen entsprechender spektraler Verteilung hervorgerufen werden. Jedoch ist das Spektralmuster der im westlichen Europa auftretenden Luftdruckschwankungen - besonders im Hinblick auf deren Amplituden - nicht geeignet, diese relative Differenzgröße zu erklären.

12.10.9 Die Drift der gravimetrischen Signale

Eine Möglichkeit der Ursachenfindung für die Differenzen $\Delta\delta_{O1}$ und $\Delta\delta_{M2}$ wird in der Untersuchung der Instrumentendriften bei gleichzeitiger Berücksichtigung des zeitlichen Verlaufs der Parameter der übrigen Haupttiden gesehen. Der erforderliche Aufwand für diese Untersuchungen ist jedoch erheblich und würde den Rahmen dieser vorliegenden Arbeit übersteigen.

12.10.10 Schlußfolgerungen

Ohne eingehende Detailuntersuchungen ist es nicht möglich, qualitativ und quantitativ signifikante Aussagen zu der tatsächlichen Ursachenfindung zu treffen. Dies gilt sowohl für die zeitlichen Variationen der Eichfaktoren als auch für die Differenzen $\Delta\delta_{O1}$ und $\Delta\delta_{M2}$.

Jedoch wurde nachgewiesen, daß die Genauigkeit der Eichung von Registriergravimetern in der Station Vianden eine Größenordnung erreicht, die derzeit auch mit anderen Eichverfahren für Federgravimeter erreicht wird. Das Genauigkeitspotential des Eichverfahrens mit Hilfe zeitlich variabler Gravitationseffekte ist im vorliegenden Fall mit 1 ‰ anzusetzen.

Genauigkeitssteigerungen bei der Pegelbeobachtung neben einer zugeordneten Erhöhung ihrer zeitlichen Auflösung und durch Einrichtung eines Pegelsensors in den Nahbereich der Beobachtungsstation würden zu einer wesentlichen Verbesserung der gravimetrischen Ergebnisse führen. Aus betriebstechnischen Gründen wurden diese Maßnahmen in Vianden eingeleitet, wodurch potentiell eine Qualitätssteigerung in zukünftigen Verfahrensschritten zu erreichen ist.

13. Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen des Kraftwerksbetriebes Vianden werden Wassermassen bis zu einem Betrag von 7 Mt vom Unterbecken zum Oberbecken bzw. im Lastbetrieb in umgekehrter Richtung verlagert.

Zur Sicherheitsüberwachung bautechnischer Komponenten wird in Zeitabständen die relative und quasi absolute Lage eines Systems von Kontrollpunkten mit geodätischen Methoden überprüft. Diese diskreten Beobachtungen wurden durch kontinuierliche Messungen deformationsinduzierter Neigungsprozesse ergänzt. Aus diesem Grunde, aber auch im Hinblick auf die durchgeführten Nivellements, stellte sich die Frage nach den Auswirkungen der Massenverlagerungen auf das Schwerefeld der Erde, und zwar primär bezüglich der zeitlichen Variation der Lotrichtung als Referenzrichtung.

Auf der Grundlage der bekannten Geometrie der beiden Speicherbecken wurden die zugeordneten Gravitationseffekte nach Richtung und Betrag ermittelt. Durch eine aufpunktunabhängige Beckenmodellierung konnten Datensätze erstellt werden, die es ermöglichten, die Gravitationseffekte für den Kraftwerksbereich ohne lageabhängige Modelländerung zu berechnen. Aus den Ergebnissen sind Entscheidungsprozesse abzuleiten bezüglich der Signalauflösung und an welchen Beobachtungspunkten die zeitlichen Variationen der Lotrichtung zu berücksichtigen sind. Desweiteren zeigen die vertikalen Niveauflächenverlagerungen, daß unter bestimmten Bedingungen auf den Füllstand der Becken bei den Nivellements Rücksicht zu nehmen ist. Aus den Untersuchungen ist die Empfehlung abzuleiten, daß in Gebieten großer Massenverlagerungen

(z.B. in Braunkohlentagebauen) bei Präzisionsnivellements die zeitlichen Variationen des Schwerefeldes mindestens in Betracht zu ziehen sind.

Die Beträge der den maximalen Wasserstandsvariationen zugeordneten Schwereänderungen wurden für den engeren und weiteren Kraftwerksbereich berechnet. Die Ergebnisse zeigen, daß der Wasserstandseffekt bei gravimetrischen Vermessungen in bestimmten Zonen im Hinblick auf die mit Feldgravimetern erreichbare Auflösung nicht zu vernachlässigen ist.

Die ingenieurtechnischen Aspekte der berechneten Gravitationseffekte wurden durch eine gravimetrisch-geowissenschaftliche Anwendung ergänzt. Zwei Registriergravimeter, die unter dem Oberbecken II in einem Drainagegang installiert wurden, konnten mit Hilfe dieser Gravitationseffekte über ein iteratives Auswerte-Verfahren geeicht werden. Dies Verfahren führte zu physikalisch plausiblen Ergebnissen nach Gezeitenanalysen für die gravimetrischen Haupttiden, die anhand der guten Übereinstimmung mit den Werten für die benachbarte Gezeitenstation Effelsberg verifiziert wurden. Im Hinblick auf Differenzen zwischen den mit beiden Gravimetern gewonnenen Amplitudenfaktoren wurden weitergehende Detailuntersuchungen empfohlen.

Das Genauigkeitspotential der gravimetrischen Eichung von Registriergravimetern kann nach Verbesserung der Genauigkeit der Pegelinformationen zu relativ 1 ‰ angesetzt werden. Damit kann der Drainagestollen unter den Oberbecken II des PSW Vianden künftig als Beobachtungsort für die Absoluteichung von Registriergravimetern verwendet werden.

ABBILDUNGS-VERZEICHNIS

		Seite
Abb. 3. 1	Gesamtkomplex PSW Vianden	9
Abb. 3. 2	Tagesdiagramm über Lastwechsel (21.02.1988)	9
Abb. 3. 3	Lageplan Oberbecken	10
Abb. 3. 4	Schnitt durch die Staumauer Lohmühle	11
Abb. 3. 5	Längsschnitt durch die Kraftwerke	12
Abb. 4. 1	Das Lage-Überwachungsnetz Oberbecken	13
Abb. 4. 2	Deformationsergebnisse am Oberbecken	14
Abb. 4. 3	Überwachungsnetz der Staumauer Lohmühle	15
Abb. 4. 4	Alignementsauswertungen	15
Abb. 4. 5	Das Prinzip des Doppelpendels	17
Abb. 4. 6	Übersicht der Meßstationen	18
Abb. 4. 7	Bohrloch 1 - Installation	19
Abb. 4. 8	Registrierbeispiel Bohrloch 3	20
Abb. 5. 1	Zur Geologie der Region Vianden	22
Abb. 5. 2	Auflast-Deformationen am Oberbecken II	25
Abb. 6. 1	Zur Gravitation vertikaler Säulen	29
Abb. 6. 2	Zur Gravitation von Quadern	30
Abb. 6. 3	Entfernungsabhängigkeit der gravitativen Beschleunigung eines Würfels mit der Kantenlänge s	31
Abb. 6. 4	Die Differenz der gravitativen Beschleunigungen eines Würfelkörpers (Dichte = 1 g/cm³) und einer zugeordneten Punktmasse	32
Abb. 7. 1	Problemzonen der Beckengeometrie	36
Abb. 7. 2	Problemzone Böschungsbereich	37
Abb. 7. 3	Variationen der Rasterbreiten an den Oberbecken	37
Abb. 7. 4	Der Einfluß der Modell-Rasterweite	38
Abb. 7. 5	Quaderreduzierung durch Blockbildung am Beispiel des Oberbeckens II	39
Abb. 7. 6	Entfernungsabhängigkeit gravitativer Effekte	40
Abb. 7. 7	Maximale Gravitationseffekte im Bereich der Oberbecken	41
Abb. 7. 8	Der Einfluß von Lagefehlern auf die horizontalen Gravitationsbeschleunigungen (Station: Bohrloch 1	43
Abb. 7. 9	Der Einfluß von Lagefehlern auf die horizontalen Gravitationsbeschleunigungen (Station: 2037)	43
Abb. 7.10	Der Einfluß von Lagefehlern auf die vertikalen Gravitationsbeschleunigungen (Station: Gravimeter 1)	44
Abb. 7.11	Der Einfluß von Höhenfehlern auf die vertikale Gravitationsbeschleunigung (Station: Gravimeter 1)	45
Abb. 7.12	Dichte von reinem Wasser bei 1 bar	46
Abb. 7.13	Isotherme Kompressibilität von Wasser bei 1 bar	46
Abb. 7.14	Höhenänderung der Wasseroberfläche in Abhängigkeit von der Temperatur	47
Abb. 7.15	Höhenänderung durch isotherme Kompressibilität beim Oberbecken II	48
Abb. 7.16	Wasserschichten-Grenzwertbetrachtung	48
Abb. 7.17	Gravitationsauswirkungen von Wasserstandsänderungen im Unterbecken auf die Oberbeckenregion	51
Abb. 8.1	Zur Rasterbildung des Unterbeckens im Nahbereich der Meßstation	52
Abb. 8.2	Quaderweite und -reduktion durch Blockbildung im Staumauerbereich	53
Abb. 8.3a	Maximale Gravitationseffekte im Bereich des Unterbeckens	54
Abb. 8.3b	Maximale Gravitationseffekte im Bereich des Unterbeckens	55
Abb. 8.4	Gravitative Beschleunigungen im Schacht 5/6 der Staumauer Lohmühle (Niveau: 197,90 m ü.NN)	56
Abb. 8.5	Gravitative Beschleunigungen im Schacht 5/6 der Staumauer Lohmühle (Niveau: 223,25 m ü.NN)	56
Abb. 8.6	Gravitative Beschleunigungen entlang eines Vertikalprofils	57
Abb. 8.7	Gravitationseffekte senkrecht zur Staumauerachse	57
Abb. 8.8	Gravitationsauswirkungen von Wasserstandsänderungen im Oberbecken auf die Unterbeckenregion	59
Abb.10.1	Digitales Geländemodell (40 m-Raster) im Bereich der Staubecken	61
Abb.10.2	Maximale Schwerevariationen in µGal	62
Abb.11.1	Zur Berechnung der Äquipotentialflächen-Verlagerung als Folge maximaler Wasserstandsänderungen	64
Abb.11.2	Verlagerung der berechneten Äquipotentialfläche bei Variationen des Stützstellenabstandes	66
Abb.11.3	Äquipotentialflächen-Verlagerung bei unterschiedlichen Ausgangsniveaus bei maximaler Wasserstandsänderung Oberbecken II am Profil H-Wert = 11600	66
Abb.11.4	Äquipotentialflächen-Verlagerung bei Einwirkung beider Oberbecken	67
Abb.11.5	Isoliniendarstellung der Äquipotentialflächen-Verlagerung beim Oberbecken II bei maximaler Wasserstandsänderung	68
Abb.11.6	Isoliniendarstellung der Äquipotentialflächen-Verlagerung beim Unterbecken bei maximaler Wasserstandsänderung	70
Abb.12.1	Übersicht der Gravimeter-Standorte	76
Abb.12.2	Spektralanalyse von Wasserstandsvariationen	80
Abb.12.3	Berechnetes Gezeitensignal (1.3. - 14.3.90)	81
Abb.12.4	Zur Bestimmung des günstigsten Eichfaktors	84
Abb.12.5	Standardabweichung einer einzelnen Beobachtung	85
Abb.12.6	Eichfaktorbestimmung GS 15 Nr. 206	87
Abb.12.7	Eichfaktorbestimmung GS BN Nr. 02	87
Abb.12.8	Ergebnisse der Sechswochen-Analyse GS 15 Nr. 206 (δ)	88

Abb.12.9 Ergebnisse der Sechswochen-Analyse GS 15 Nr. 206 (κ) 89
Abb.12.10 Eichfaktor-Spline GS 15 Nr. 206 89
Abb.12.11 Ergebnisse der Sechswochen-Analysen GS BN Nr. 02 (δ) 89
Abb.12.12 Ergebnisse der Sechswochen-Analysen GS BN Nr. 02 (κ) 90
Abb.12.13 Eichfaktor-Spline GS BN Nr. 02 90
Abb.12.14 Amplituden-Quotienten GS 15 Nr.206 mit Standardabweichungen 90
Abb.12.15 Amplituden-Quotienten GS 15 Nr. 206 mit Standardabweichungen 91
Abb.12.16 Amplituden-Quotienten GS BN Nr. 02 mit Standardabweichungen 91
Abb.12.17 Amplituden-Quotienten GS BN Nr. 02 mit Standardabweichungen 91
Abb.12.18 Residuendarstellung nach Jahresanalysen 95
Abb.12.19 Fourieranalyse der Residuen 96
Abb.12.20 Temperatur-, Eichfaktordarstellung 98
Abb.12.21 Temperatur-, Amplitudenquotientendarstellung 99
Abb.12.22 Temperatur-, Phasendarstellung 100

TABELLEN-VERZEICHNIS

		Seite
Tab. 6.1	Verhältnis zwischen den vier Grundkräften	26
Tab. 7.1	Rechentechnischer Aufwand Oberbecken I + II	38
Tab. 7.2	Wasseranalysen beim Oberbecken	49
Tab.11.1	Lotrichtungsänderungen	65
Tab.12.1	Registrierblöcke GS 15 Nr. 206	77
Tab.12.2	Registrierblöcke GS BN Nr. 02	78
Tab.12.3	Partialtidenzerlegung bei 6-Wochen-Analyse	82
Tab.12.4	Erweiterte Partialtidenzerlegung	83
Tab.12.5	Günstigste Eichfaktoren k auf der Grundlage minimaler Standardabweichungen GS 15 Nr. 206	86
Tab.12.6	Günstigste Eichfaktoren k auf der Grundlage minimaler Standardabweichungen GS BN Nr. 02	86
Tab.12.7	Statistische Angaben	87
Tab.12.8	Pearsonsche Korrelationskoeffizienten GS 15 Nr. 206	92
Tab.12.9	Pearsonsche Korrelationskoeffizienten GS BN Nr. 02	92
Tab.12.10	Ergebnisse der Sechswochen-Analysen	92
Tab.12.11	Ergebnisse der Vierteljahres-Analysen GS 15 Nr. 206	93
Tab.12.12	Ergebnisse der Vierteljahres-Analysen GS BN Nr. 02	93
Tab.12.13	Ergebnisse der Halbjahres-Analysen GS 15 Nr. 206	94
Tab.12.14	Ergebnisse der Halbjahres-Analysen GS BN Nr. 02	94
Tab.12.15	Ergebnisse der Jahres-Analysen (δ)	94
Tab.12.16	Ergebnisse der Jahres-Analysen (κ)	95
Tab.12.17	Gezeitenanalysen GS 15 Nr. 206	96
Tab.12.18	Gezeitenanalysen GS BN Nr. 02	97
Tab.12.19	Den δ-Werten zugeordnete Pearsonsche Korrelationskoeffizienten	99
Tab.12.20	Den κ-Werten zugeordnete Pearsonsche Korrelationskoeffizienten	100

LITERATUR-VERZEICHNIS

/ 1/	BATH:	Spectral Analysis in Geophysics Amsterdam-Oxford-New York 1974
/ 2/	BERGMANN/ SCHÄFER:	Lehrbuch der Experimentalphysik Walter de Gruyter & Co. 1974
/ 3/	BETHGE, K./ SCHRÖDER, V.E:	Elementarteilchen und ihre Wechselwirkungen Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt 1991
/ 4/	BINTZ,J.:	Die Geologie und der variscische Gebirgsaufbau im Bereich des Pumpspeicherwerkes Vianden, Publication Service geologique du Luxembourg Vol. XIV, p. 79-97 Luxembourg 1.12.1964
/ 5/	BIRKENFELD:	Methoden zur Analyse von kurzen Zeitreihen Birkhäuser Verlag, Basel und Stuttgart 1977
/ 6/	BONATZ,M.:	Über die Eichung von Registriergravimetern mittels einer vertikalen Eichstrecke DGK, C. Heft 84, München 1965
/ 7/	BONATZ,M.:	Gezeitenregistrierungen mit einem auf kapazitiven Abgriff umgerüsteten Gravimeter GS 12 Mitteilungen des Instituts für Theoretische Geodäsie Nr. 22, Bonn 1973
/ 8/	BONATZ,M. SCHÜLLER,K. WILMES,H.:	Auswertung gravimetrischer Langzeitregistrierungen in der Station Effelsberg mit einem Gravimeter GS 25, Mitteilungen aus dem Institut für Theoretische Geodäsie der Universität Bonn, Nr. 58, 1980
/ 9/	BONATZ,M. SPERLING,D.:	Ein Doppelpendel zur breitbandigen und hochauflösenden Messung von Neigungsprozessen, Vermessungstechnik 5/91 Wichmann Verlag GmbH, Karlsruhe
/10/	BUNDESAN-STALT F. BO-DENFOR-SCHUNG:	Bericht über felsmechanische Untersuchungen, PSW Vianden, Druckstollen 10. Maschine Hannover 1971, unveröffentlicht
/11/	BÜLLESFELD, F.-J.:	Ein Beitrag zur harmonischen Darstellung des gezeitenerzeugenden Potentials, Dissertation, DGK Reihe C 314, München 1985
/12/	COHEN,E.R.:	CODATA (Commitee on Data for Science and TAYLOR, B.N. Technology) Bulletin 63 (1986)
/13/	DE BOER,H. HAARS,H. MICHAELIS,W.:	Experimente zur Bestimmung der Newtonschen Gravitationskonstante - Eine Übersicht - und das PTB-Experiment PTB-Mitteilungen 98, 1/88 Fachbeiträge
/14/	DEHANT,V. DUCARME,B.:	Comparison between the observed and the computed tidal gravimetric factor, 1987 Phys. Earth planet. Inter., 49, pp. 192-212
/15/	FAHRMEIER:	Rekursive Algorithmen für Zeitreihenmodelle Vandenhoeck & Ruprecht in Göttingen 1981
/16/	FALK/RUPPEL	Mechanik, Relativität, Gravitation; Springer Verlag Berlin, Heidelberg New York 1983
/17/	FUNG,Y.C.:	Foundations of Solid Mechanics; Prentice-Hall, Englewood Cliffs NJ. 1965
/18/	GROTEN,E.:	Beiträge zur physikalischen Geodäsie; DGK, Heft 233, München 1978
/19/	HAMPE:	Zur Theorie und Anwendung der Schätzung zeitabhängiger Spektren Haag + Herchen Verlag 1982
/20/	HART, H.:	Einführung in die Meßtechnik; VEB Verlag Technik, Berlin 1978
/21/	HEITZ,S.:	Mechanik fester Körper mit Anwendungen in Geodäsie, Geophysik und Astronomie Dümmler Verlag, Bonn 1980

/22/	HEITZ,S.:	Zur Eichung von Registrier-Gravimetern Zeitschrift für Vermessungswesen. Heft Nr. 5/62
/23/	HEITZ, S./ STÖCKER- MEIER, E.:	Grundlagen der Physikalischen Geodäsie Dümmler, Bonn 1990
/24/	HÜBSCHMANN LINKS:	Einführung in das chemische Rechnen Handwerk und Technik, HT 1231
/25/	ISERMANN:	Digitale Regelsysteme, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York 1977
/26/	JAROSCH,M.:	Darstellung des Gravitationspotentials der Erde in kartesischen Basisfunktionen VK München 1984
/27/	JENKINS/ WATTS:	Spectral Analysis and its applications; Holden-Day, San Francisco, Cambridge, London, Amsterdam 1968
/28/	JORDAN/ EGGERT/ KNEISSL:	Handbuch der Vermessungskunde, Band V Stuttgart 1968
/29/	LEINER:	Spektralanalyse ökonomischer Zeitreihen, Gabler Verlag 1978
/30/	LUCIUS/ BINTZ:	Amenagement hydroelectrique de l'Our, Reconnaissance geologique du terrain faiteavant l'èxecution des travaux, Revue Technique Luxembourgeoise N°4, 1960
/31/	MADER:	Das Newtonsche Raumpotential prismatischer Körper und seine Ableitungen bis zur dritten Ordnung, Österreichische Zeitschrift f. Vermessungswesen, Sonderheft 11, Wien 1951
/32/	MATHIEU:	Theorie des Potentials; Berlin, Verlag von Julius Springer 1890
/33/	MELCHIOR,P.:	The Earth Tides Oxford/Edinburgh/New York/Paris/Frankfurt 1966
/34/	MÜLLER,G.:	Auf der Suche nach der fünften Kraft, Impressum, Wissenschaftsmagazin der Johann-Wolfgang-Goethe-Universität, Frankfurt 1990
/35/	MÜLLER,G. ZÜRN,W. LINDNER,K. RÖSCH,N.:	Search for non-Newtonian gravitation - a gravimetric experiment in a hydroelectric lake Geophys. J. Int. (1990) 101
/36/	NEUMANN,R.:	Geologie für Bauingenieure Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin München 1964
/37/	PLAGEMANN,W LANGNER,W.:	Die Gründung von Bauwerken, Teil 1 BSB B.G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig 1970
/38/	PROFOS,P.:	Einführung in die Systemdynamik; Teubner Studienbücher, Stuttgart 1982
/39/	RICHTER,B.:	Das Supraleitende Gravimeter DGK, C. Heft 329, München 1988
/40/	SCHLITTGEN STREITBERG:	Zeitreihenanalysen Oldenbourg Verlag München Wien 1987
/41/	SCHULZE SIMMER:	Grundbau, Teil 1, Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen Teubner Stuttgart 1977
/42/	SIGL,R.:	Einführung in die Potentialtheorie, Herbert Wichmann Verlag Karlsruhe 1973
/43/	SONTHEIMER SPINDLER ROHMANN:	Wasserchemie für Ingenieure ZfGW-Verlag, Frankfurt/Main 1980
/44/	SPEKTRUM DER WISSEN- SCHAFT:	Gravitation Verlagsgesellschaft mbH & Co., Heidelberg 1989

/45/	SPERLING,D.:	Spektrale Korrelationsanalyse von klinometrischen Erdegezeitenbeobachtungen unter Berücksichtigung physikalischer Einflußparameter Diplomarbeit unveröffentlicht Bonn 1978
/46/	STEARNS:	Digitale Verarbeitung analoger Signale, Oldenbourg Verlag 1984
/47/	STRAUMANN, N.:	General Relativity and Relativistic Astrophysics Springer, Berlin Heidelberg New York 1984
/48/	TAUBENHEIM:	Statistische Auswertung geophysikalischer und meteorologischer Daten Leißzig 1969
/49/	TIROLER WAS-: SERKRAFT-WERKE	Versuchsbericht über Dehnungsmessungen mit der TIWAG-Radialpresse im Sondierschacht für das PSW Vianden III Unveröffentlicht 1967
/50/	TORGE,W.:	Gravimetry, Walter de Gruyter; Berlin, New York 1989
/51/	UNBEHAUEN:	Parameterschätzverfahren zur Systemidentifikation Oldenbourg Verlag München, Wien 1974
/52/	WEINBERG, S:	Die ersten drei Minuten. Der Ursprung des Universums, Piper, München 1977
/53/	WEINBERG, S.:	Gravitation and Cosmology Wiley, New York Toronto 1972
/54/	WILL, C.M.:	Theory and Experiment in Gravitational Physics Cambridge University Press 1985
/55/	VARGA,P.:	Laboratory calibration of gravimeters. Österreichische Beiträge zur Meteorologie und Geophysik, Heft 2, 1989
/56/	WANG,R.:	Einfluß von Rotation, Elliptizität und lateralen Inhomogenitäten auf Erdgezeiten
/57/	WAHR, J.M.:	The tidal motions of a rotating, elliptical, elastic and oceanless Earth Ph.D. Thesis, University of Colorado, Boulder USA 1979
/58/	WAHR,R.:	Tidal deformations on a rotating, spherically asymmetric, viscoelastic and laterally heterogeneous Earth PH.D. Thesis, Christian Albrechts University of Kiel, Germany European University Studies series, Peter Lang Publ. Comp. 1991
/59/	ZIMMERMANN, A.:	Ein Beitrag zur Analyse der Erdgezeitenbeobachtungen mit zusätzlichen physikalischen Einflußparametern; Mitteilungen aus den Geodätischen Instituten der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn 1990
/60/	DIN 4017	Grundbruchberechnungen; Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1979
/61/	DIN 4018	Berechnung der Sohldruckverteilung unter Flächengründungen Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1974
/62/	DIN 4019	Setzungsberechnungen bei lotrechter, mittiger Belastung Beuth Verlag GmbH Berlin, 1979
/63/	PATENT: Nr. 3837565:	Verfahren zur deformationstechnischen Überwachung eines Baugrundes und/oder Bauwerkes und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens

ANHANG

Tabelle der wasserstandsabhängigen vertikalen Gravitationskomponenten für die Gravimeterstation unter dem Oberbecken II.

Die Wasserstandshöhen wurden in dm-Schritten zwischen unterem und oberem Stauziel variiert, wobei ein Modellraster von 5 m Rasterweite sowie eine Dichte von 1 g/cm³ zugrundegelegt wurde.

Wasserstands-höhe [m ü. NN]	Quader [Anzahl]	Vertikal-komponente [μGal]
494.00	0	0
494.10	2405	3.95
494.20	2446	7.90
494.30	2476	11.84
494.40	2502	15.78
494.50	2535	19.71
494.60	2574	23.64
494.70	2605	27.57
494.80	2625	31.49
494.90	2665	35.41
495.00	2710	39.33
495.10	2742	43.24
495.20	2778	47.15
495.30	2815	51.05
495.40	2841	54.96
495.50	2884	58.86
495.60	2918	62.76
495.70	2956	66.65
495.80	2985	70.54
495.90	3025	74.43
496.00	3045	78.31
496.10	3077	82.19
496.20	3113	86.07
496.30	3152	89.94
496.40	3183	93.81
496.50	3216	97.68
496.60	3253	101.55
496.70	3289	105.41
496.80	3315	109.26
496.90	3346	113.12
497.00	3379	116.97
497.10	3414	120.81
497.20	3441	124.66
497.30	3471	128.50
497.40	3511	132.33
497.50	3555	136.17
497.60	3596	140.00
497.70	3623	143.83
497.80	3665	147.66
497.90	3700	151.49

Wasserstands-höhe [m ü. NN]	Quader [Anzahl]	Vertikal-komponente [μGal]
498.00	3734	155.31
498.10	3771	159.13
498.20	3798	162.95
498.30	3830	166.77
498.40	3866	170.58
498.50	3910	174.39
498.60	3953	178.19
498.70	3984	182.00
498.80	4015	185.80
498.90	4051	189.60
499.00	4075	193.39
499.10	4108	197.18
499.20	4143	200.97
499.30	4180	204.76
499.40	4204	208.54
499.50	4242	212.32
499.60	4281	216.10
499.70	4316	219.87
499.80	4359	223.64
499.90	4391	227.42
500.00	4425	231.18
500.10	4454	234.95
500.20	4489	238.72
500.30	4521	242.48
500.40	4554	246.24
500.50	4591	249.99
500.60	4621	253.75
500.70	4658	257.50
500.80	4680	261.25
500.90	4712	265.00
501.00	4741	268.74
501.10	4781	272.48
501.20	4816	276.22
501.30	4843	279.96
501.40	4867	283.70
501.50	4896	287.43
501.60	4925	291.16
501.70	4951	294.88
501.80	4972	298.61
501.90	5005	302.33

502.00	5034	306.04
502.10	5071	309.76
502.20	5107	313.47
502.30	5140	317.18
502.40	5176	320.89
502.50	5194	324.60
502.60	5225	328.30
502.70	5263	332.00
502.80	5292	335.70
502.90	5318	339.40
503.00	5353	343.09
503.10	5377	346.78
503.20	5414	350.48
503.30	5450	354.16
503.40	5482	357.85
503.50	5515	361.54
503.60	5550	365.22
503.70	5584	368.90
503.80	5617	372.58
503.90	5642	376.26
504.00	5677	379.94
504.10	5712	383.61
504.20	5746	387.28
504.30	5776	390.95
504.40	5808	394.61
504.50	5839	398.28
504.60	5872	401.94
504.70	5904	405.60
504.80	5931	409.25
504.90	5958	412.91
505.00	5998	416.56
505.10	6032	420.21
505.20	6067	423.86
505.30	6088	427.51
505.40	6105	431.15
505.50	6149	434.79
505.60	6190	438.43
505.70	6213	442.07
505.80	6251	445.71
505.90	6294	449.34
506.00	6334	452.97
506.10	6375	456.61
506.20	6404	460.24
506.30	6444	463.87
506.40	6476	467.50
506.50	6516	471.12
506.60	6547	474.75
506.70	6579	478.37
506.80	6614	481.99
506.90	6650	485.61

507.00	6685	489.23
507.10	6715	492.84
507.20	6754	496.46
507.30	6784	500.07
507.40	6810	503.68
507.50	6841	507.29
507.60	6879	510.89
507.70	6920	514.50
507.80	6948	518.10
507.90	6978	521.70
508.00	7016	525.30
508.10	7047	528.89
508.20	7083	532.49
508.30	7111	536.08
508.40	7144	539.67
508.50	7184	543.26
508.60	7221	546.85
508.70	7268	550.43
508.80	7303	554.02
508.90	7331	557.61
509.00	7371	561.19
509.10	7409	564.77
509.20	7446	568.35
509.30	7486	571.93
509.40	7518	575.51
509.50	7552	579.09
509.60	7590	582.67
509.70	7616	586.24
509.80	7650	589.81
509.90	7686	593.38
510.00	7718	596.95
510.10	7754	600.52
510.20	7798	604.08
510.30	7841	607.65

Lebenslauf

19.06.1951	Geboren in 57462 Olpe als Sohn des Bundesbahnsekretärs Kurt Sperling und seiner Ehefrau Lieselotte, geb. Scholz
1957 - 1965	Volksschule in Olpe
1965 - 1971	Neusprachliches Aufbaugymnasium in Bergneustadt Abitur: 11.05.1971
1971 - 1973	Soldat auf Zeit (2 Jahre) in Stadtoldendorf
1973 - 1978	Studium der Geodäsie an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn Diplomprüfung: 08.09.1978
1979 - 1981	Vorbereitungsdienst zum höheren vermessungstechnischen Verwaltungsdienst in Nordrhein-Westfalen Staatsprüfung: 26.03.1981
01.04.81 - 31.10.81	Tätigkeit beim ÖbVI Bosse in Bonn-Bad Godesberg
01.11.81 - 30.06.84	Leiter der Außenstelle der Hauptgruppe Bau-Vermessung der Rheinisch-Westfälischen Elektrizitätswerk AG (RWE) in Neurath
01.07.84 - 31.12.92	Hauptgruppenleiter Bau-Vermessung beim RWE in Essen
01.01.86	Erteilung von Handlungsvollmacht
seit 01.03.90	Übergang des Beschäftigungsverhältnisses von der RWE AG auf die RWE Energie AG
seit 01.01.93	Hauptabteilungsleiter Vermessung bei der RWE Energie AG in Essen
seit 1978	verheiratet mit Gisela Sperling, geb. Schürmann 3 Kinder

Dank

Meinem verehrten Lehrer, Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Bonatz danke ich für die Anregung zu dieser Arbeit sowie für sein außergewöhnlich persönliches und sachliches Engagement, in intensiv genutzten Gesprächsterminen wesentliche Impulse beim Anfertigen dieser Arbeit gegeben zu haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. S. Heitz danke ich für die freundliche Bereitschaft, das Korreferat zu übernehmen.

Dem Verfasser ist es ein besonderes Anliegen, Herrn Direktor H. Weis, Kraftwerksleiter des PSW Vianden, sehr herzlichen Dank zu sagen für die unkonventionelle Hilfestellung bei der Nutzung der Kraftwerkseinrichtungen sowie der freigiebigen Zurverfügungstellung von Daten, die für die umfangreichen Berechnungen notwendig waren.

Ferner gilt mein Dank Frau M. Tarrach, die mir eine unentbehrliche Hilfe bei der überaus zeitaufwendigen Gestaltung und Niederschrift dieser Arbeit war.