

Konzept und Ergebnisse von Deformationsmessungen an der Linachtalsperre

Michael Illner

Zusammenfassung

Dieser Beitrag behandelt den geodätischen Aspekt zur Überwachung der neu renovierten Linachtalsperre/Südschwarzwald. Zunächst wird die Anlage des als Deformationsnetz konzipierten Überwachungsnetzes beschrieben, bevor kurz auf das theoretische Konzept der koordinatenbezogenen, statistisch fundierten Deformationsanalyse (Kongruenzmodell) einschließlich der Möglichkeit zur anschaulichen grafischen Visualisierung der Analyseergebnisse eingegangen wird. Danach werden exemplarisch Analyseergebnisse der bisher vier vorliegenden Messepochen vorgestellt, die neben anderen Überwachungseinrichtungen eine fachliche Komponente zur Beurteilung des Stabilitätsverhaltens der Talsperre durch entsprechende Fachleute darstellen.

Summary

In this paper the geodetic contribution for dam deformation monitoring is described by the example of the Linach dam near Vöhrenbach (Southern Black Forest). First, a short summary of the history of Linach dam is given. Then the design of the observation network and the theoretical basics of geometrical deformation analysis with application of the coordinate based congruence model are presented. After the repair of the concrete dam and after the redamming of Lake Linach up to now the data of four observation epochs are available for analysing the deformation behavior of the dam. Several examples show the results of these analyses both in numerical form and in graphic representation.

1 Einleitung

Die Linachtalsperre bei Vöhrenbach (Südschwarzwald) ist die erste und von ihrer Größe einzige aus Eisenbeton hergestellte Gewölbe-Reihenstaumauer in Deutschland. Das um 1920 als Vielfachbogenmauer konzipierte Bauwerk besteht aus den Konstruktionselementen Gewölbe, Pfeiler und Querriegel. Mit dem im Jahre 2003 gefassten Beschluss der Stadt Vöhrenbach, die dringend notwendige Generalsanierung an der Talsperre durchzuführen, war auch die Erarbeitung eines neuen geodätischen Überwachungskonzeptes für die Staumauer verbunden. Dieses wurde vom Geodätischen Institut der Universität Karlsruhe (TH) in enger Kooperation mit dem Landesvermessungsamt Baden-Württemberg – Abteilung Geodäsie Karlsruhe – konzipiert und in zum jetzigen Zeitpunkt vier Beobachtungsepochen realisiert. Im vorliegenden Beitrag sollen das Überwachungskonzept sowie die Resultate der bisher durchgeföhrten Überwachungsmessungen vorgestellt werden.



Abb. 1: Linachtalsperre

2 Geschichtlicher Abriss

Hintergrund für den Bau der Linachtalsperre und des Kraftwerkshauses in den 20er-Jahren war der gestiegene Energiebedarf der Stadt Vöhrenbach für den Industriesektor, der u. a. durch eine Eigenstromerzeugung gedeckt werden sollte. Nach diesem Beschluss im Jahre 1921 erstreckten sich die Bauarbeiten für die Talsperre von 1922 bis 1925. Durch die aufgelöste Bauweise (Abb. 1) konnte gegenüber der klassischen Vollbauweise der Materialbedarf an Beton auf ca. 1/5 reduziert werden (Seim 2004). Die Staumauer selbst ist 143 m lang, 25 m hoch, und der Stausee hat ein Fassungsvermögen von 1,1 Mio m³.

In den Anfangsjahren konnte mit dem Linachkraftwerk ca. 72 Prozent des Strombedarfs der Gemeinde Vöhrenbach gedeckt werden. Im Jahre 1969 wurde wegen anstehender kostspieliger Sanierungsarbeiten und der zwischenzeitlich unrentabel gewordenen Eigenstromversorgung der Beschluss gefasst, diese ganz einzustellen. Ab diesem Zeitpunkt war die Anlage dem Verfall preisgegeben, was 1988 zu einem vollständigen Ablassen des Stausees führte. 2003 wurde dann entschieden, ein in einem mehrjährigen Prozess entwickeltes Konzept zur Sanierung und Reaktivierung der Linachtalsperre in die Realität umzusetzen. 2005 wurde hierzu die wasserrechtliche Bewilligung erteilt. Im Rahmen der Erneuerungsarbeiten (2006 – 2007) erfolgten eine umfangreiche Betonsanierung sowie die textile Geomembran-Abdichtung der Wasserseite. Im März 2007 konnte dann mit dem Probestau begonnen werden, dessen Verlauf durch geodätische Kontrollmessungen zu überwachen war. Vollstau wurde im Oktober 2007 erreicht (www.voehrenbach.de/linachtalsperre/).

3 Geodätisches Überwachungskonzept an der Linachtalsperre

Im Zuge des Antrags auf wasserrechtliche Bewilligung der Sanierungsmaßnahmen war ein umfangreiches Kontroll- und Messprogramm zu erarbeiten, in dem eine Komponente die geodätische Überwachung maßgeblicher Punkte des Bauwerks sowie der vom Stau möglicherweise beeinflussten Talhänge betraf. Da eine exakte Prognose eventuell auftretender Deformationen nicht möglich war, wurden zunächst als zulässige Grenzwerte für eine horizontale Verformung des Bauwerks +7 mm zur Luftseite und -4 mm in Richtung Wasserveite erachtet. Um Änderungen der Bauwerksgeometrie infolge von Temperaturschwankungen von tatsächlichen Deformationen trennen zu können, sollten die Überwachungsmessungen – mit Ausnahme der Anstauphase – möglichst zu gleicher Jahreszeit und Lufttemperatur erfolgen. Sie waren so zu planen, dass Deformationen in obiger Größenordnung signifikant nachweisbar sind.

Um diesen Ansprüchen an die zu gewährleistende Genauigkeit und Zuverlässigkeit der geodätischen Punktbestimmung gerecht zu werden, war es selbstverständlich, auf die Verfahren der geodätischen Netzmessung und Netzausgleichung sowie für die epochenweise Analyse des Stabilitätsverhaltens auf die statistisch fundierte Deformationsanalyse unter Definition von Stabil- und Objektpunkten zurückzugreifen.

3.1 Vermarkung und Netzanlage

Seit den 60er-Jahren wird die Linachtalsperre vom Landesvermessungsamt Baden-Württemberg über geodätische Netzmessungen mit reiner Richtungsbeobachtung zu den Objektpunkten überwacht. Hierbei konnten Genauigkeiten für die Punktbestimmung von wenigen Millimetern erzielt werden. Aus den archivierten Unterlagen lassen sich wertvolle Informationen über die Stabilität der Beobachtungspfeiler sowie über die Änderungen in den Objektpunkten gewinnen. Weitergehende statistisch fundierte Deformationsanalysen liegen nicht vor.

Bei dem neuen Entwurf des Netzaufbaus galt es zu prüfen, inwieweit das bereits aus früheren Kontrollmessungen vorhandene Überwachungsnetz beibehalten werden konnte bzw. zu modifizieren war. Die auf der Luftseite vorhandenen und von den Sanierungsmaßnahmen weitgehend unbeeinflussten fünf Beobachtungspfeiler (Pkt.-Nr.: 78, 3000, 5000, 6000, 7000) mit am Fundament eingebrachten Pfeilerkontrollbolzen dienten bisher als Referenzpunkte für das als Deformationsnetz angelegte

Überwachungsnetz und werden als solche selbstverständlich weiterhin verwendet.

Da jedoch infolge der umfangreichen Sandstrahlarbeiten an der Betonmauer die vorhandene Vermarkung der Objektpunkte (Zielmarken) beschädigt wurde bzw. verloren ging, war eine neue Signalisierung der Objektpunkte

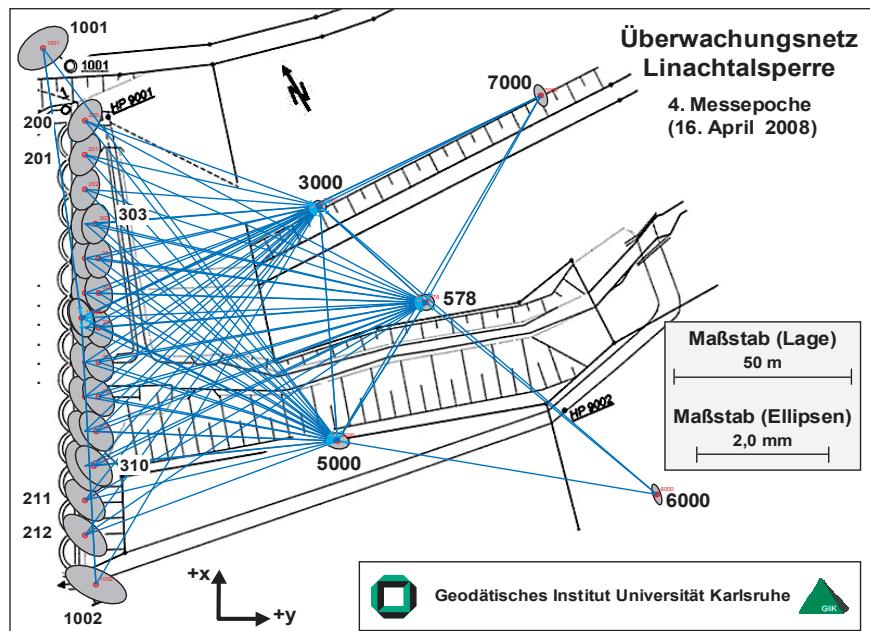


Abb. 2: Netzbild mit Punktfehlerellipsen

an der Staumauer unumgänglich. Dies bot die Möglichkeit, die Objektpunkte mit Reflektoren zu signalisieren und von dem bei der bisherigen Überwachung angewandten reinen Vorwärtsseinschneiden auf Polarmessungen mit den Messelementen Strecke, Richtung und Zenitdistanz überzugehen. Dadurch ist es für die Objektpunktbestimmung möglich, auch das Potential der heute verfügbaren geodätischen Entfernungsmesser zu nutzen und damit neben der Lagekomponente auch trigonometrische Höhen im Netz zu bestimmen. Zur Aufnahme der Reflektoren im Objektpunktbereich wurden im Zuge der Sanierungsarbeiten Horizontalbolzen mit entsprechenden Steckzäpfen zur Aufnahme der Prismen in die Mauer eingebracht. So mit ist eine strenge Zwangszentrierung in Lage und Höhe für diese Punkte gewährleistet. Entsprechend des mit dem Statiker abgestimmten Konzepts für die Bauwerksüberwachung wurden so vermarkte Objektpunkte sowohl im Bereich der Mauerkrone (Pkt.-Nr.: 200-212) als auch im Fußbereich (Pkt.-Nr.: 303-310) der Staumauer in die Pfeilerscheiben eingebracht.

Ferner sollten die Talhänge auf beiden Seiten des Stautes zur Kontrolle ihres Stabilitätsverhaltens durch Vermarkung zusätzlicher Punkte (Pkt.-Nr.: 1001, 1002) überwacht werden. In jeder Messepochen werden die Objektpunkte mit den gleichen zuvor nummerierten Prismen bestückt. Abb. 2 vermittelt einen Eindruck von dem konzipierten Überwachungsnetz Linachtalsperre mit den Pfeilern als Stütz- und den an der Staumauer befindlichen Objektpunkten.

Tab. 1: Mess- und Kontrollprogramm Linachstaumauer

	Aufstau (2007)			1. Jahr (2008)			2. Jahr (2009)	3.–6. Jahr	7. Jahr
Voll- messung	✓	✓	✓	✓		✗	✗		✗
Zwischen- messung					✗	✗	✗	✗	
Datum	März 2007	April 2007	Juli 2007	April 2008	–	–	–	–	–
Anstau- höhe	–	837,5 m	843,2 m	847,4 m	–	–	–	–	–
Tempe- ratur	5 °C	19 °C	23 °C	3 °C (Luft) 5 °C (Wasser)	–	–	–	–	–

Die Überwachung des Bauwerks in der Höhenkomponente erfolgt primär mittels Feinnivellement, wobei die für die Lagemessungen eingebrachten Horizontalbolzen im oberen Bereich der Pfeilerscheiben zusätzlich auch trigonometrisch erfasst werden. Insofern ist zwischen den nivellitischen (Bezug: Bolzen) und trigonometrischen Höhen (Bezug: Mitte Prisma) dieser Punkte ein über alle Beobachtungsepochen theoretisch konstanter Versatz δh zu erwarten. Ferner gehören Pfeilerkontrollnivellelemente der Beobachtungspfeiler zur Erfassung etwaiger Kippungen zum Beobachtungsprogramm jeder Beobachtungsepoke.

3.2 Messprogramm

Grundsätzlich ist zu Beginn einer Objektüberwachung dessen wahrscheinliches Deformationsverhalten nur gährt bekannt. Insofern ist die Fixierung eines sinnvollen Epochenabstandes zur Ausführung von Deformationsmessungen zu diesem Zeitpunkt nicht möglich. Die Beobachtungszeitpunkte sind deshalb zumindest zu Beginn variabel zu halten und dem Verformungsverhalten des Objektes anzupassen. Tab. 1 liefert einen Überblick über die geplante jährliche Verteilung der Messepochen. In den beiden ersten Jahren sieht das Kontrollprogramm einen ca. vierteljährlichen Beobachtungsrhythmus vor, um nach dem jahrelangen Leerstand des Staubeckens insbesondere in der Aufstauphase gesicherte Aussagen über das Stabilitätsverhalten der Staumauer treffen zu können. Später soll dann – in Abhängigkeit der resultierenden Ergebnisse – zu einem jährlichen Beobachtungsturnus übergegangen werden. Hierbei wird in dem Kontrollprogramm zwischen Voll- und Zwischenmessung unterschieden. Im Gegensatz zur Vollmessung wird bei den Zwischenmessungen, die einschließlich Auswertung und Ergebnisanalyse von Studierenden des Geodätischen Instituts im Rahmen ihrer Hauptvermessungsübungen (Ingenieurvermessung) jährlich durchgeführt werden, mit

Ausnahme der Pfeilerkontrollnivellelementen auf das luftseitige Nivellement verzichtet.

Bei der Durchführung von Deformationsmessungen ist sicherzustellen, dass während der Zeit, die für das Messprogramm einer Beobachtungsepoke benötigt wird, die daraus abgeleiteten Objektpunktkoordinaten nicht durch zwischenzeitliche Objektpunktdeformationen verfälscht werden. Da hier keine plötzlich auftretenden Verformungen der Staumauer und nur kleine Bewegungsraten erwartet wurden, ist diese Voraussetzung bei einer Gesamtbeobachtungsdauer von wenigen Stunden für die Lagebeobachtungen sicher gewährleistet.

Nach Beendigung der Sanierungsarbeiten wurde das terrestrische Überwachungsnetz bisher in insgesamt vier Messepochen beobachtet (Tab. 1). Die Nullmessung erfolgte noch bei leerem Staubecken, die beiden Folgemessungen bei unterschiedlichen Stauhöhen und die vierte Messung bei Vollstau des Linachsees.

Für die Lagemessungen wurde das Präzisionstachymeter Leica TCA2003 im Modus Satzmessung mit automatischer Zielerfassung (ATR) eingesetzt. Das Gerät des Geodätischen Instituts weist eine zertifizierte Streckenmessgenauigkeit von $\sigma_s = 0,3 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ auf, die zertifizierten Angaben für Horizontal- und Vertikalwinkelmessung sind $\sigma_{Hz} = 0,06 \text{ mgon}$ bzw. $\sigma_V = 0,10 \text{ mgon}$. Als Standpunkte für die Netzmessung dienen die drei der Staumauer am nächsten gelegenen Beobachtungspfeiler 3000, 78 und 5000. Die Erfassung der meteorologischen Parameter zur Reduktion der gemessenen Strecken erfolgt jeweils am Instrumentenstandpunkt sowie an weiteren für die Zielpunkte möglichst repräsentativen Standorten. Aus wirtschaftlichen Gründen werden als Zielpunktinformation für alle Staumauerpunkte gemeinsam die an einer für diese Punkte zentral gelegenen Station erfassten meteorologischen Daten verwendet.

Für die Überwachung der Pfeilerfundamente (Pfeilerkontrollnivellelemente) kommen die beiden Digitalnivelliere Zeiss DiNi10/T bzw. Leica DNA03 ($\pm 0,3 \text{ mm}$ für 1 km Doppelnivellement) zum Einsatz. Die Bestimmung der für die trigonometrische Höhenbestimmung erforderlichen Kippachshöhen der Gerätetestpunkte erfolgt über an-

genähert horizontale Visuren zu einer analogen Nivellierlatte unter Messung von Zenitdistanz und Strecke.

Die Termine der bisher durchgeführten Messungen sowie die Anstauhöhen des Linachsees und die mittleren Umgebungstemperaturen als äußere Einflussparameter können Tab. 1 entnommen werden.

4 Auswertung der Messeepochen

Die registrierten Datenfiles werden in die Netzausgleichungssoftware NetzCG des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe unter Nutzung leicht anzupassender, flexibler Formatfiles importiert. Die eigentliche Netzausgleichung erfolgt in der Software getrennt nach Lage und Höhe. Die folgenden Ausführungen beschränken sich bewusst auf die Behandlung der Lagekomponente und deren Analyse für die bisher vorliegenden Messeepochen.

Nach dem Import der Rohdaten nach NetzCG werden Mehrfachmessungen (Satzmessung, Hin-Rück) zunächst gemittelt, so dass in die Netzausgleichung für jede beobachtete geometrische Punktverknüpfung nur eine Strecke eingeht. Der Lageausgleichung wird ein Bezugssystem im Messungshorizont zu Grunde gelegt, wobei die Ausrichtung der Koordinatenachsen parallel bzw. senkrecht zur Staumauer gewählt wird. Um keinen äußeren Zwang auf die Beobachtungen auszuüben, wird als Ausgleichungsmodell die freie Netzausgleichung mit Teilspurminimierung über die fünf als stabil angenommenen Beobachtungspfeiler gewählt. Die aus der ersten Messepoche resultierenden ausgeglückten Koordinaten dienen in den nachfolgenden Epochen als Näherungskoordinaten, so dass die Beurteilung der Koordinatenverbesserungen in den Ausgleichungen der Folgeepochen schon einen ersten Eindruck bzgl. der Stabilität der Netzpunkte zulässt.

Durch die Anwendung strenger statistischer Testverfahren werden das mathematische und stochastische Modell global geprüft und das eingeführte Beobachtungsmaterial hinsichtlich grober Fehler untersucht. Unter Einführung der stochastischen Modelle für Strecken und Richtungen

$$\sigma_s \sim 0,0002 \text{ m} + 1 \text{ ppm} \cdot s \text{ [m]}, \quad (1)$$

$$\sigma_r \sim \sqrt{\left(0,3 \text{ mgon}\right)^2 + \left(\frac{0,0003 \text{ m}}{s} \cdot \rho\right)^2} \quad (2)$$

werden in den Epochenausgleichungen durchschnittliche mittlere Punktfehler σ_p zwischen 0,3 mm und 0,4 mm erzielt (vgl. Tab. 2).

Abb. 2 zeigt exemplarisch für die vierte Epoche den Netzplot mit Darstellung der Beobachtungselemente sowie der resultierenden Helmert'schen Punktfehlerellippen. Es ist erkennbar, dass die Stabilpunkte eine deutlich bessere Genauigkeitssituation als die Objektpunkte aufweisen, was jedoch zum Teil auch durch die gewählte Datumsfestlegung bedingt ist.

Für die Analyse eventueller Deformationen eines Überwachungsobjektes über mehrere Messeepochen ist die Stabilität der eingeführten Referenzpunkte von entscheidender Bedeutung. Bevor im Abs. 5 näher auf statistisch fundierte Verfahren zur Prüfung dieses Sachverhaltes und deren Ergebnisse eingegangen wird, soll hier an-

Tab. 2: Kenngrößen der Epochenausgleichungen

Mess- epoche	Anzahl Punkte	Anzahl Strecken	Anzahl Richtungen	Redun- danz	σ_p [mm]
1. Epoche	25	64	66	80	0,30
2. Epoche	28	70	71	84	0,36
3. Epoche	28	72	72	88	0,38
4. Epoche	30	84	87	109	0,37

hand der Analyse der dritten Messepoche relativ zu den beiden vorausgegangenen ein erster Trend durch einen einfachen Koordinatenvergleich aufgezeigt werden. Die Daten der dritten Epoche bieten sich deshalb an, da hier nach der Sanierung zum ersten Mal die Problematik instabiler Referenzpunkte auftrat.

Für die in der Deformationsanalyse als Referenzpunkte dienenden Beobachtungspfeiler enthält Tab. 3 die Koordinatendifferenzen in Lage und trigonometrischer Höhe, gebildet aus den jeweiligen Resultaten der Einzelepochenausgleichungen.

Es ist ersichtlich, dass die Unterschiede zwischen erster und zweiter Messepoche in allen Punkten deutlich unter 1 mm liegen, während in den Vergleichen zur dritten Epoche vorwiegend in der x-Komponente Unterschiede von bis zu 2 mm auftreten. Damit sind diese Werte um ein Vielfaches größer als beim Vergleich der ersten beiden Epochen, was auf eine gewisse Nicht-Kongruenz des Stabilpunktnetzes in der dritten Epoche hindeutet. Welcher der fünf Punkte hierfür verantwortlich ist, lässt sich infolge des bei Kleinst-Quadrat-Lösungen häufig auftretenden Verschmierungseffektes aus den Restklaffungen nicht ablesen. Dass für den Pfeiler 78 in der Höhe Unterschiede von fast 7 mm auftreten, begründet sich in der Verwendung einer um 7,04 mm dickeren Adapterscheibe bei der dritten Messepoche.

Näheren Aufschluss über die Stabilität der Beobachtungspfeiler liefern die Ergebnisse der durchgeführten Pfeilerkontrollnivelllements (Tab. 4). In den Punkten 78 und 5000 treten Epochendifferenzen in den Höhenunterschieden zwischen den Kontrollbolzen in der Größenordnung von mehreren 1/10 mm auf, während diese Werte für die übrigen Beobachtungspfeiler völlig unauf-

Tab. 3: Koordinaten- und Höhendifferenzen in den Beobachtungspfeilern (5 Datumspunkte)

Pkt.	2. Epoche – 1. Epoche				3. Epoche – 1. Epoche				3. Epoche – 2. Epoche			
	dy	dx	ds	dh	dy	dx	ds	dh	dy	dx	ds	dh
3000	-1	-3	3	1	2	-13	14	0	3	-10	11	-1
5000	-2	2	3	-8	-2	10	10	-8	0	7	7	0
6000	4	-3	5	-4	11	-9	14	0	7	-6	9	4
7000	3	6	7	-8	-1	-4	4	2	-5	-10	11	10
78	-4	-3	5	5	-9	16	19	69	-6	19	20	64

Tab. 4: Ergebnisse der Pfeilerkontrollnivelllements für 78 und 5000

(Diff I: Differenz zur vorhergehenden Epoche, Diff II: Differenz zur Nullmessung)

Epoche	HB2 – HB1		HB3 – HB2		HB4 – HB3		HB1 – HB4	
	Diff I [1/100 mm]	Diff II [1/100 mm]						
Pfeiler 78								
1								
2	5		-3		-3		1	
3	-2	3	72	69	7	4	-78	-77
4	-20	-17	-31	38	12	16	40	-37
Pfeiler 5000								
1								
2	-2		-7		2		7	
3	-78	-80	58	51	-16	-14	36	43
4	85	5	96	147	12	-2	-193	-150

fällig sind. Für den Punkt 78 ist im Vergleich der dritten zur zweiten Messepoche eine deutliche Pfeilerneigung in Richtung der positiven x-Achse erkennbar, die sich bis zur vierten Epoche wieder fast um die Hälfte kompensiert. Die dazu senkrechte Komponente ist weitgehend unauffällig. Mögliche Ursachen hierfür können Erdmassenbewegungen und Planierungsarbeiten in unmittelbarer Nähe des Pfeilers sein. Bereits frühere Überwachungsmessungen bestätigen, dass die Stabilität des Punktes 5000 als kritisch zu beurteilen ist und sich dieser Punkt langfristig gesehen hangabwärts bewegt.

Eine Möglichkeit, in ihrer Lage eventuell veränderte Stabilpunkte gezielt zu detektieren, besteht in der Berechnung einer robusten, d.h. gegenüber groben Fehlern oder Ausreißern weniger empfindlichen Transformation der ausgeglichenen Koordinaten der dritten Epoche relativ zur ersten bzw. zur zweiten Messepoche. Eine solche, der Gruppe robuster Schätzer zuzuordnende Methode, ist das Least-Median-Squares (LMS) Schätzverfahren. Dabei werden bei n vorliegenden Beobachtungen und u zu schätzenden Parametern

$$\binom{n}{u} = \frac{(n!)^u}{u! \cdot (n-u)!} \quad (3)$$

Permutationen als Lösungen für den Parametervektor berechnet. Für jedes dieser Ergebnisse wird der Median der Verbesserungskoeffizienten aller Beobachtungen bestimmt und als endgültige LMS-Lösung der Parametervektor mit minimalem Medianwert verwendet (Jäger et al. 2005). In leicht abgewandelter Form ist dieses Verfahren in der Software AURA des Geodätischen Instituts zur robusten Berechnung von Näherungskoordinaten implementiert (Vetter 2006) und liefert bzgl. der Epochentransformationen die in Tab. 5 aufgeführten Ergebnisse. Hier wird

Tab. 5: Restklaffungen in den Beobachtungspfeilern (robuste Transformation)

Pkt.	3. Epoche – 1. Epoche		3. Epoche – 2. Epoche	
	dy [1/10 mm]	dx [1/10 mm]	dy [1/10 mm]	dx [1/10 mm]
3000	4	-3	6	0
5000	-6	23	-0	17
6000	2	-2	6	-0
7000	0	0	0	-2
78	-11	25	-4	28

ganz deutlich, dass sich die Pfeiler 78 und 5000 zwischen der zweiten und dritten Epoche in der x-Komponente um einen Betrag verändert haben, der die Messgenauigkeit um ein Vielfaches übersteigt. Demgegenüber sind die verbleibenden Restklaffungen in den übrigen Pfeilerpunkten unauffällig.

Werden die Punkte 5000 und 78 in der dritten Epoche bei der freien Netzausgleichung nicht mehr als Datums- sondern als Neupunkte behandelt, ergeben sich bei den Vergleichen mit den geschätzten Epochenkoordinaten Differenzen, die bis auf wenige 1/10 mm mit den in Tab. 5 aufgeführten Werten übereinstimmen und durch die Resultate statistisch fundierter Deformationsanalysen unter Anwendung des Kongruenzmodells bestätigt werden.

5 Beurteilung der Epochenresultate mittels Deformationsanalyse

Die geodätische Überwachung von Staumauern ist eine grundlegende Aufgabe der Ingenieurvermessung, zu deren Analyse verschiedene statistisch fundierte Auswertetechniken entwickelt wurden. Bei den Ansätzen zur Auswertung von Überwachungsmessungen kann zwischen rein deskriptiven Ansätzen und an der Vorgehensweise der Systemtheorie orientierten Wirkungsmodellen, bei denen neben den ermittelten Verformungen auch die das Objekt beeinflussenden Kräfte sowie dessen physikalische Eigenschaften in die Betrachtungen mit einbezogen werden, unterschieden werden. In die erste Gruppe sind die Kongruenzmodelle mit einem rein geometrischen Vergleich des Objektzustandes zu verschiedenen diskreten Zeitpunkten und kinematische Ansätze, bei denen die Bewegung des Objektes in Abhängigkeit der Zeit modelliert wird, einzuordnen. Statische Modelle mit der Beschreibung des funktionalen Zusammenhangs zwischen herrschenden Kräften und deren Auswirkung auf das Objekt gehören ebenso zur oben genannten zweiten Kategorie der Ursache-Wirkungsmodelle (Welsch et al. 2000, Welsch und Heunecke 2001) wie dynamische Modelle, bei denen die Objektveränderung als Funktion der beanspruchenden Kräfte und der Zeit betrachtet wird.

Im folgenden werden die Gründzüge des hier zur Deformationsanalyse angewandten Kongruenzmodells kurz erläutert und die daraus resultierenden Ergebnisse für das Staudammüberwachungsnetz Linachtalsperre dargestellt. Es handelt sich also um die Ergebnisse von rein geometrischen Vergleichen in repräsentativ ausgewählten und die Staumauer diskretisierenden Objektpunkten.

Im Sinne der Deformationsanalyse stellt ein Staudammüberwachungsnetz mit der Unterteilung der Netzpunkte in Referenz- und Objektpunkte ein absolutes Überwachungsnetz dar. Hierbei wird davon ausgegangen, dass die auch unter Berücksichtigung geologischer As-

pekte festgelegten Standorte für die Referenzpunkte aller Voraussicht nach langfristig ihre Lage nicht verändern und die relativ zu den Referenzpunkten geschätzten Änderungen in den Objektpunktkoordinaten die Deformation des Überwachungsobjektes zwischen entsprechenden Messepochen repräsentieren.

Die grundlegende Problematik bei der Berechnung von Deformationsanalysen liegt darin, dass sich aufgrund der Stochastizität der durchgeführten Beobachtungen die geschätzten Epochenkoordinaten im Rahmen der Messgenauigkeit unterscheiden werden, selbst wenn keine realen Deformationen vorliegen. Hier gilt es also durch Anwendung statistischer Tests zwischen vorliegendem Messrauschen und eigentlicher Deformation zu unterscheiden.

Das hier zur Anwendung kommende koordinatenbezogene Verfahren zur Deformationsanalyse geht von den Ergebnissen x_i (Koordinaten) und $C_{x,i}$ (Kovarianzmatrizen) der Einzelepochenausgleichungen aus. Es bietet gegenüber den beobachtungsbezogenen Verfahren der Deformationsanalyse den Vorteil, dass lediglich die Ergebnisse der Einzelepochenausgleichungen nicht aber das hierzu verwendete Beobachtungsmaterial für die nachfolgenden Analysen zu archivieren sind. Nachfolgend wird kurz auf die einzelnen Stufen des Analysekonzepts eingegangen, wie es in Karlsruhe in dem Softwarepaket CODEKA2D umgesetzt und z.B. in (Jäger et al. 2005) näher beschrieben ist. Dabei werden nur die Schritte der Deformationsanalyse näher erläutert, auf die bei Vorstellung der Beispiele in Kap. 5.2 Bezug genommen wird.

5.1 Das Analysekonzept

Da Deformationsnetze in den einzelnen Epochen in der Regel frei ausgeglichen werden, können sich die Ausgleichsresultate – sofern Näherungskoordinaten verschieden gewählt oder wenn über den Rangdefekt der Netze unterschiedlich verfügt wurde – auf nicht einheitliche Koordinatenrahmen beziehen. Diesem Umstand ist vor Beginn einer koordinatenbezogenen Deformationsanalyse dadurch Rechnung zu tragen, dass alle beteiligten Koordinatensätze und deren Kovarianzmatrizen unter Schätzung der vom Defekt des Netzes abhängigen Transformationsparameter auf einen einheitlichen Bezugsrahmen transformiert werden.

5.1.1 Prüfung des Referenzpunktfeldes

Auch wenn die Auswahl von Referenz- oder Stabilpunkten für ein Deformationsnetz unter dem Aspekt langfristiger Stabilität zu erfolgen hat, ist in einem ersten Schritt die Kongruenz der verwendeten Stabilpunkte statistisch nachzuweisen. Vorher kann es sinnvoll sein, das Stabilpunktfeld über eine robuste Transformation zu prüfen, um so gezielt a priori Informationen bzgl. eventuell instabiler Referenzpunkte zu erhalten.

Bei der Prüfung von Referenzpunkten wird das funktionale Grundmodell der gemeinsamen Ausgleichung zur Deformationsanalyse um einen Vektor $\nabla \hat{x}_j^T = (\nabla \hat{x}_j, \nabla \hat{y}_j)$ von Störparametern erweitert, über den die Verschiebung im j-ten Referenzpunkt modelliert wird. Für das Vorliegen von zwei Epochen ergibt sich die Darstellung

$$\begin{pmatrix} x_{R1} \\ x_{01} \\ x_{R2} \\ x_{02} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} v_{xR1} \\ v_{x01} \\ v_{xR2} \\ v_{x02} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} I_R & 0 & 0 \\ 0 & I_{0_1} & 0 \\ I_R & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I_{0_2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \hat{x}_R \\ \hat{x}_{01} \\ \hat{x}_{02} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ B_{j,2} \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \nabla \hat{x} \\ \nabla \hat{y} \end{pmatrix}_j. \quad (4)$$

Auf der linken Seite sind die geschätzten Koordinaten aus den Einzelepochen (x_{R1}, x_{R2} : Referenzpunktkoordinaten Epoche 1/2, x_{01}, x_{02} : Objektpunktkoordinaten Epoche 1/2) als Beobachtungen zusammen mit den korrespondierenden Verbesserungen ($v_{xR1}, v_{x01}, v_{xR2}, v_{x02}$) angeordnet. Im Unbekanntenvektor auf der rechten Seite von (4) wird mit \hat{x}_R nur ein für beide Epochen gemeinsamer Satz von Referenzpunktkoordinaten eingeführt, während für die Objektpunkte mit \hat{x}_{01} und \hat{x}_{02} unterschiedliche Koordinatensätze in beiden Epochen parametrisiert werden. Die dem Unbekanntenvektor zugeordnete Designmatrix setzt sich aus den Einheitsmatrizen I_R, I_{0_1}, I_{0_2} , über die jeweils genau die Referenzpunkt- bzw. die Objektpunktkoordinaten für beide Epochen angesprochen werden, und aus lauter Nullmatrizen 0 entsprechender Dimensionierung zusammen.

Das zugehörige stochastische Modell wird aufgebaut aus den Kovarianzmatrizen $C_{x_{\text{Epoch}1}}, C_{x_{\text{Epoch}2}}$ der Einzelepochen ausgleichungen und lautet

$$C_{xx} = \begin{pmatrix} C_{x_{\text{Epoch}1}} & 0 \\ 0 & C_{x_{\text{Epoch}2}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{x_{R1}x_{R1}} & C_{x_{R1}x_{01}} & 0 \\ C_{x_{01}x_{R1}} & C_{x_{01}x_{01}} & 0 \\ 0 & 0 & C_{x_{R2}x_{R2}} \\ 0 & 0 & C_{x_{R2}x_{02}} \\ C_{x_{02}x_{R2}} & C_{x_{02}x_{02}} & 0 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

wobei eine epochenweise Partitionierung in die entsprechenden Submatrizen für die beobachteten Referenz- bzw. Objektpunktkoordinaten beider Epochen vorgenommen wurde. Korrelationen zwischen den Epochen werden dabei ausgeschlossen.

Die eingeführten Störparameter sind im Zuge der Ausgleichung zu schätzen und auf Signifikanz zu prüfen. Diese Vorgehensweise entspricht dem verallgemeinerten »Datasnooping« bzw. der Suche grober Fehler in GPS-Beobachtungen oder stochastischen Anschlusspunkten bei der geodätischen Netzausgleichung (vgl. Illner und Jäger 1993, Jäger et al. 2005). Über die Matrix $B_{j,2}$, die aus lauter Nullen und einer (2×2) -Einheitsmatrix besteht, werden die Störparameter $\nabla \hat{x}_j^T = (\nabla \hat{x}_j, \nabla \hat{y}_j)$ genau

der j-ten Referenzpunktbeobachtung der zweiten Epoche zugeordnet. Den Schätzwert für die Verschiebung erhält man über

$$\nabla \hat{x}_j = - \left(B_j^T P Q_{vv} P B_j \right)^{-1} B_j^T P v$$

mit

$$Q_{\nabla \hat{x}_j \nabla \hat{x}_j} = \left(B_j^T P Q_{vv} P B_j \right)^{-1}. \quad (6)$$

Hierin beschreiben Q_{vv} die Kofaktormatrix der Verbesserungen v und P die Gewichtsmatrix der Koordinatenbeobachtungen beider Epochen. Zur Signifikanzprüfung der Störparameter lassen sich die Testgrößen

$$T_{j, \text{priori}} = \frac{\nabla \hat{x}_j^T Q_{\nabla \hat{x}_j \nabla \hat{x}_j}^{-1} \nabla \hat{x}_j}{m \cdot \sigma_0^2} \sim F_{m, \infty},$$

$$T_{j, \text{post}} = \frac{\nabla \hat{x}_j^T Q_{\nabla \hat{x}_j \nabla \hat{x}_j}^{-1} \nabla \hat{x}_j}{m \cdot \hat{\sigma}_0^2} \sim F_{m, r-m} \quad (7)$$

(σ_0^2 : a priori Varianzfaktor) mit dem a posteriori Varianzfaktor

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{v^T P v - \nabla \hat{x}_j^T Q_{\nabla \hat{x}_j \nabla \hat{x}_j}^{-1} \nabla \hat{x}_j}{r-m} \quad (8)$$

berechnen. Die Dimension des Vektors der Störparameter (Verschiebungsvektor) wird dabei mit m und die Gesamtsumme der Redundanzen aus den Einzelepochen ausgleichungen mit r bezeichnet. Überschreiten die auf die a priori bzw. a posteriori Varianz bezogenen Testgrößen (7) die von der Irrtumswahrscheinlichkeit α abhängigen kritischen Werte $F_{m, \infty, 1-\alpha}$ bzw. $F_{m, r-m, 1-\alpha}$, ist mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von $1-\alpha$ zu vermuten, dass sich der betroffene Referenzpunkt signifikant verschoben hat.

Mit der Software CODEKA2D werden wie beim Data-snooping in der Netzausgleichung alle Referenzpunkte über (7) in einem Berechnungslauf simultan geprüft. Der Referenzpunkt mit der größten signifikanten Testgröße ist aus der Gruppe der Referenzpunkte auszuschließen, den Objektpunkten zuzuordnen und eine Neuberechnung zu starten. Dies geschieht solange, bis für die verbliebenen Referenzpunkte keine signifikanten Verschiebungen mehr nachgewiesen werden können.

5.1.2 Prüfung der Objektpunkte

Auf der Grundlage des stabilen Referenzpunktfeldes erfolgt die Analyse der einzelnen diskreten Objektpunkte, von denen dann auf die Deformation des Überwachungsobjektes geschlossen werden kann. Hierzu ist zunächst aus den Epochenkoordinaten für die Gruppe der Objektpunkte punktweise der m -dimensionale Verschiebungsvektor d_j des j-ten Objektpunktes mit zugehöriger Kovarianzmatrix Q_{dj} zu berechnen (z.B. Niemeier 2008). Die

Prüfung der Nullhypothese, dass keine Verschiebung des Objektpunktes stattgefunden hat, erfolgt über die Fisher-verteilten Testgrößen

$$T_{j, \text{priori}} = \frac{\mathbf{d}_j^T \mathbf{Q}_{\mathbf{d}_j \mathbf{d}_j}^{-1} \mathbf{d}_j}{m \cdot \hat{\sigma}_0^2} \sim F_{m, \infty}, \quad T_{j, \text{post}} = \frac{\mathbf{d}_j^T \mathbf{Q}_{\mathbf{d}_j \mathbf{d}_j}^{-1} \mathbf{d}_j}{m \cdot \hat{\sigma}_0^2} \sim F_{m, r} \quad (9)$$

mit

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\mathbf{v}^T \mathbf{P} \mathbf{v}}{r}. \quad (10)$$

Die Entscheidung, ob ein Punkt als signifikant verschoben zu betrachten ist, erfolgt analog zur expliziten Suche instabiler Referenzpunkte durch Vergleich der berechneten Testgrößen mit ihren zugehörigen kritischen Werten.

Die geometrische Interpretation bzw. Veranschaulichung der Testergebnisse erfolgt durch Interpretation von z.B.

$$\mathbf{d}_j^T \mathbf{Q}_{\mathbf{d}_j \mathbf{d}_j}^{-1} \mathbf{d}_j = m \cdot \hat{\sigma}_0^2 \cdot F_{m, r, 1-\alpha} \quad (11)$$

als Gleichung eines m -dimensionalen Konfidenz-Hyperellipsoide, dessen Volumen dem Signifikanzniveau von $100 \cdot (1-\alpha)\%$ entspricht (vgl. z.B. Heck 1983). Für ebene Lagenetze ($m=2$) geht das Konfidenz-Hyperellipsoid in eine zweidimensionale Konfidenzellipse über, wodurch sich eine einfache Möglichkeit zur grafischen Veranschaulichung der Testergebnisse ergibt. Wird die Konfidenzellipse im Objektpunkt j zusammen mit dem zugehörigen Verschiebungsvektor \mathbf{d}_j dargestellt, gilt die Nullhypothese zur Prüfung des Objektpunktes j solange als angenommen, wie der Verschiebungsvektor innerhalb der Konfidenzellipse liegt. Liegt der Vektor \mathbf{d}_j nicht mehr vollständig innerhalb der Konfidenzellipse, ist mit einer Sicherheitswahrscheinlichkeit von $(1-\alpha)$ zu vermuten, dass sich der betreffende Punkt signifikant verändert hat.

5.2 Analyseergebnisse für das Staudamm-überwachungsnetz Linachtalsperre

Die aus NetzCG resultierenden Ergebnisse $\hat{\mathbf{x}}_i$ (Koordinaten) und $\mathbf{C}_{\hat{\mathbf{x}}, i}$ (Kovarianzmatrizen) der freien Netzausgleichungen für die einzelnen Epochen fließen als Ausgangsdaten in die Berechnung statistisch fundierter Deformationsanalysen mit dem Softwarepaket CODEKA2D ein. Im Folgenden werden die Analyseergebnisse für den Vergleich der ersten beiden Messepochen sowie für den Vergleich der vierten Epoche mit den vorausgegangenen Beobachtungen exemplarisch dargestellt.

Epochenvergleich 1 – 2

Die beiden ersten Beobachtungsepochen weisen zwar nur einen zeitlichen Abstand von sechs Wochen auf. Sie fanden jedoch bei unterschiedlichen äußeren Bedingungen und unterschiedlicher Füllhöhe des Staubeckens (vgl. Tab. 1) statt. Die maximale Testgröße $T_{j, \text{priori}}$ für den

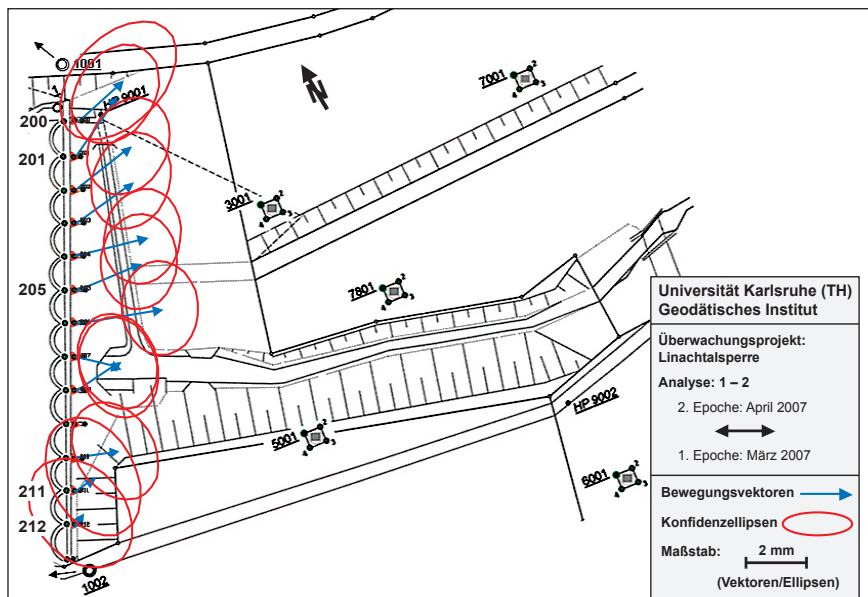


Abb. 3: Epochenvergleich 1 – 2 (Objektpunkte Mauerkrone)

Einzelpunkttest (7) des Referenzpunktfeldes mit den Freiheitsgraden $f_1 = 2$, $f_2 = \infty$ und einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 % beträgt 3,4 gegenüber dem zugehörigen kritischen Wert von 4,6, so dass keine Verschiebungen in den Stabilpunkten nachweisbar sind. Deshalb erfolgt die Objektpunktanalyse relativ zu dem gesamten Referenzpunktfeld. Es ergeben sich dabei Testgrößen, die den kritischen Wert von 4,6 zum Teil um bis das Fünffache übersteigen und damit auf hochsignifikante Bewegungen im Objektpunktfeld hindeuten. Die Ergebnisse der Tests für die Objektpunkte im Bereich der Mauerkrone sind in Abb. 3 in grafischer Form dargestellt (statistische Parameter: Irrtumswahrscheinlichkeit $\alpha = 1\%$, Güte des Tests $\beta = 80\%$).

Mit Ausnahme der Punkte im Widerlagerbereich der Staumauer (Randpunkte) zeigen alle anderen Punkte signifikante Bewegungsvektoren, wobei der Maximalbetrag von 2,7 mm in der Mitte der Staumauer ausgewiesen wird. Nach außen hin nehmen die Verschiebungsbeträge merklich ab. Fast alle Vektoren sind nahezu senkrecht zur Staumauer ausgerichtet. Die Analyseergebnisse für die Objektpunkte im Fußbereich der Staumauer zeigen ein ähnliches Deformationsbild.

Epochenvergleiche 1 – 4 und 3 – 4

Der zeitliche Abstand zwischen der ersten und vierten Messepoche beträgt etwas mehr als ein Jahr. In dieser Zeit wurde der Stausee komplett angestaut. Leider war während der vierten Messepoche der Pfeiler 78 als Beobachtungsstandort nicht zugänglich, so dass dieser Punkt

Tab. 6: Numerische Ergebnisse der Objektpunktanalyse der 4. Epoche relativ zur 1. und 3. Messepoke

Punkt-Nr.	Analyse: 1. Epoche – 4. Epoche 7. März 2007 – 16. April 2008				Analyse: 3. Epoche – 4. Epoche 17. Juli 2007 – 16. April 2008			
	Verschiebungsvektor [mm]	Richtung des Vektors [gon]; Nullr. = x-Achse	Testgröße (krit. Wert: 4,6)	Deformation	Verschiebungsvektor [mm]	Richtung des Vektors [gon]; Nullr. = x-Achse	Testgröße (krit. Wert: 4,6)	Deformation
Stabilpunkte								
78	–	–	–	–	–	–	–	–
5000	7,1	391,0	392,3	JA	4,8	1,7	172,7	JA
Objektpunkte obere Pfeilerscheiben								
200	1,7	33,5	3,3	NEIN	0,7	384,6	0,8	NEIN
201	2,1	38,4	6,3	JA	0,6	232,3	0,5	NEIN
202	2,5	38,9	9,8	JA	0,4	317,2	0,5	NEIN
203	3,8	52,6	29,4	JA	0,7	23,1	0,7	NEIN
204	4,8	69,5	61,1	JA	1,4	58,1	4,5	NEIN
205	5,1	81,1	75,9	JA	1,6	101,2	6,6	JA
206	5,2	73,0	79,6	JA	1,3	36,6	3,9	NEIN
207	3,9	88,3	43,7	JA	1,2	85,7	3,7	NEIN
208	3,9	60,3	44,0	JA	1,5	25,3	4,8	JA
209	3,2	70,7	29,4	JA	0,4	75,4	0,4	NEIN
210	2,7	55,0	15,6	JA	0,9	9,6	1,0	NEIN
211	2,7	44,8	20,5	JA	0,5	58,7	0,6	NEIN
212	3,1	398,2	13,5	JA	2,3	368,0	5,4	JA
Objektpunkte untere Pfeilerscheiben								
303	3,2	60,9	23,7	JA	0,3	286,8	0,1	NEIN
304	3,4	70,5	31,5	JA	1,6	43,9	4,3	NEIN
305	3,2	90,7	31,3	JA	0,6	48,5	1,0	NEIN
306	3,5	75,7	35,3	JA	0,9	399,2	1,3	NEIN
307	2,6	82,4	15,9	JA	0,4	330,5	0,2	NEIN
308	2,7	47,0	11,1	JA	0,9	383,1	1,2	NEIN
309	2,3	53,9	12,4	JA	1,2	365,0	1,7	NEIN
310	–	–	–	–	1,1	366,9	1,3	NEIN
Objektpunkte Talhänge								
1001	–	–	–	–	1,3	46,1	0,9	NEIN
1002	–	–	–	–	1,7	21,6	3,0	NEIN

auch in den Analysen der vierten Epoche relativ zu den vorausgegangenen Messungen nicht vertreten ist.

Bei der Analyse der Referenzpunkte über den gesamten Beobachtungszeitraum wird bei gleicher Wahl der statistischen Parameter α und β wie beim Epochenvergleich 1–2 für den Pfeiler 5000 die maximale Testgröße von 392,3 gegenüber dem zugehörigen kritischen Wert von 4,6 berechnet, weshalb in der Folge dieser Punkt in die Gruppe der Objektpunkte einzuordnen ist. Dies gilt auch für den Epochenvergleich 3–4 mit einer Zeitbasis von neun Monaten, wobei die Testgrößen für den Refe-

renzpunkttest hier etwas kleinere Werte annehmen. Tab. 6 beinhaltet die numerischen Ergebnisse für den Objektpunkttest beider Epochenvergleiche. Während für den Vergleich zwischen erster und letzter Messung deutlich signifikante Verschiebungsvektoren in der Mitte der Staumauer ausgewiesen werden (Maximalbeträge von 5,2 mm im oberen Objektpunktbereich und 3,5 mm im Fußbereich der Mauer), sind diese Größen im Epochenvergleich 3–4 deutlich kleiner (Maximalwert: 1,6 mm) und mit Ausnahme von drei Punkten nicht signifikant. Ferner ist die Ausrichtung der Vektoren bei diesem Vergleich im Unter-

schied zu den übrigen Analysen nicht einheitlich sondern eher zufällig.

Abb. 4 zeigt die in Tab. 6 aufgeführten numerischen Testergebnisse für die oberen Objektpunkte der Staumauer in grafischer Form (Epochenvergleich 1 – 4). Neben den Verschiebungsvektoren sind die zugehörigen

Karlsruhe – wurden seit der Renovierung der Talsperre vier Beobachtungsepochen realisiert. Deren Auswertung und Analyse stehen im Mittelpunkt der Ausführungen, wobei zum einen das theoretische Konzept zur Deformationsanalyse basierend auf dem Kongruenzmodell zusammenfassend dargestellt wird und zum anderen die Ergebnisse der Analysen der letzten Epoche relativ zur ersten und zur vorangegangenen Epoche ausführlich diskutiert werden. Grafische Präsentationen der ermittelten Deformationen in Form von Bewegungsvektoren und zugehörigen Konfidenzellipsen runden die Darstellung ab.

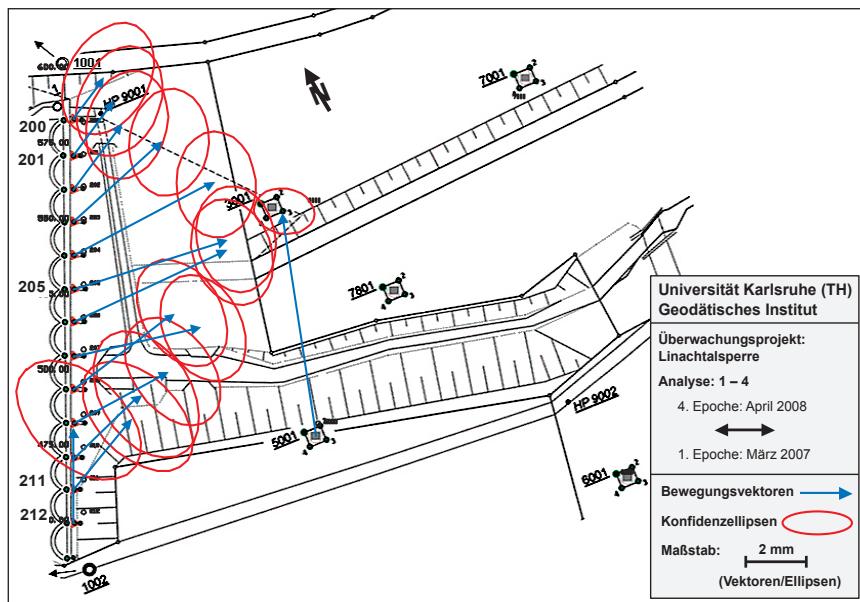


Abb. 4: Epochenvergleich 1 – 4 (Objektpunkte Mauerkrone)

Konfidenzellipsen dargestellt. Entsprechend (11) ist eine Verschiebung dann als signifikant zu bewerten, wenn der Anfangspunkt eines Vektors außerhalb der um die Spitze dargestellten Konfidenzellipse zu liegen kommt.

Nach Tab. 6 muss der größte Anteil der in Abb. 4 dargestellten Bewegungsvektoren durch bauwerkliche Veränderungen zwischen erster und dritter Messepoch verursacht sein. Obwohl diese Messungen bei fast 20 °C unterschiedlichen Umgebungstemperaturen stattfanden, kann der Temperaturunterschied nicht gänzlich für die auftretenden Bewegungsvektoren ursächlich sein, da sich diese sonst im Vergleich der dritten zur vierten Messepoch wieder umkehren müssten. Vielmehr ist bei der Interpretation der Analyseergebnisse auch der durch den Neuanstau des Linachsees verursachte Wasserdruk auf die Mauer zu berücksichtigen. Eine abschließende Beurteilung des Sachverhaltes bleibt jedoch entsprechenden Bausachverständigen vorbehalten.

6 Zusammenfassung

Nach einem kurzen historischen Abriss über die bauliche Entwicklung der Linachtalsperre (Südschw.) wird das geodätische Überwachungskonzept für dieses Bauwerk vorgestellt. In Zusammenarbeit mit dem Landesvermessungsamt Baden-Württemberg – Abteilung Geodäsie

Literatur

- Heck, B. (1983): Das Analyseverfahren des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe Stand 1983. Schriftenreihe Wissenschaft. Studiengang Vermessungswesen, HSBw München, Heft 9, S. 153–182.
- Illner, M., R. Jäger (1993): Ein Konzept zur Integration von GPS in Verdichtungsnetze – Modellbildung und Ableitung von zugehörigen Genauigkeits- und Zuverlässigkeitmaßen –. ZfV 118, S. 552–574.
- Jäger, R., Müller, T., Saler, H., Schwäbile, R. (2005): Klassische und Robuste Ausgleichsverfahren. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Niemeier, W. (2008): Ausgleichsrechnung. 2. Auflage, Walter de Gruyter, Berlin, New York.
- Seim, W.: Instandsetzung der Linachtalsperre in Vöhrenbach im Schwarzwald. Wasserwirtschaft, 6/2004, S. 48–50.
- Vetter, M. (2006): Näherungskoordinatenberechnung und robuste Fehlersuche. Beitrag zu der Fortbildungsveranstaltung »Ausgleichsrechnung – Theorie und aktuelle Anwendungen aus der Vermessungspraxis« des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe (TH), 5. Oktober 2006, Schriftenreihe des Studiengangs Geodäsie und Geoinformatik; 2007/4. ISSN: 1612-9733, www.uvka.de/univerlag/volltexte/2007/213/pdf/Tagungsband_Ausgleichsrechnung.pdf.
- Welsch, W., Heunecke, O., Kuhlmann, H. (2000): Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Reihe Handbuch Ingenieurgeodäsie, Hrsg.: Möser, Müller, Schlemmer, Werner, Wichmann Verlag, Heidelberg.
- Welsch, W., Heunecke, O. (2001): Models and terminology for the analysis of geodetic monitoring observations – Official Report of the Ad-Hoc Committee of FIG Working Group 6.1 – 10th FIG International Symposium on Deformation Measurements, 19–22 March 2001 Orange, California, USA.
- www.vohrenbach.de/linachtalsperre/. Homepage der Stadt Vöhrenbach mit Informationen zur Linachtalsperre.

Anschrift des Autors

Dr.-Ing. Michael Illner
Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe (TH)
Englerstraße 7, 76128 Karlsruhe
Tel.: 0721 608-2313, Fax: 0721 608-6552
illner@gik.uni-karlsruhe.de