

Deformationsanalyse für eine Staumauer in einem zweistufigen Überwachungsnetz

Jan Schmidt und Michael Möser

Technische Universität Dresden, Geodätisches Institut, Ingenieurgeodäsie

ZUSAMMENFASSUNG :

Die Überwachung von Bauwerken mit Überwachungsnetzen und die Auswertung mittels Deformationsanalyse dienen dem Nachweis der Standsicherheit. In diesem Beitrag wird zuerst kurz auf die Geschichte der Staumauer Schräh (Schweiz) und des Netzes eingegangen. Messen und Auswerten, Interpretieren und Analysieren sind notwendige Techniken zum Erkennen und zur Voraussage von Objektbewegungen. Es werden die Anlage des Überwachungsnetzes und das theoretische Konzept der koordinatenbezogenen und statistisch fundierten Deformationsanalyse (Kongruenzmodell) beschrieben. Danach werden die Ergebnisse mehrjähriger Überwachungsmessungen und die Auswertung mittels Programm PANDA und DEFANA vorgestellt.

ABSTRACT:

The supervision of buildings using the methods of engineering network und deformation analysis are to demonstrate the static stability. First a short summary of the history of dam Schräh is given. Measuring and evaluating, interpreting and analyzing are techniques necessary to observe and to predict motions of the object. The design of the network and the theoretical basics of statistical deformation analysis with application of the coordinate based congruence model are presented. Several examples show the results of these analyses both in numerical form and in graphic representation with PANDA and DEFANA.

1 Überwachungsnetz der Stauanlage Schräh

Das für die folgenden Untersuchungen zugrunde liegende Überwachungsnetz befindet sich an einer Stauanlage in der Schweiz. Bereits in den Jahren 1896 bis 1899 gab es erste Planungen, das etwa 50 km südlich des Oberen-Zürichsees im Kanton Schwyz gelegene Innerthal mit einem Absperrbauwerk zu versehen. Die somit aufgestaute Wasserkraft sollte eine im Jahresverlauf gleichmäßige Energiegewinnung ermöglichen und die vorhandene Energieknappheit in den Wintermonaten verringern. Eine ca. 80 m breite Felsenge am Talausgang bot sich als Standort einer Staumauer an. Die hier in den Jahren 1922 bis 1924 errichtete gerade Schwerkraftsmauer war zum Zeitpunkt ihrer Fertigstellung mit einer Gesamthöhe über der Gründungssohle von 110 m die höchste Staumauer weltweit.

Um ein Höchstmaß an Sicherheit für dieses Absperrbauwerk zu gewährleisten, wurden schon frühzeitig Überlegungen angestellt, wie das geometrische Verhalten der Mauer bei Einstau zu beobachten wäre. Es mussten also möglichst genaue Messungen unternommen werden, um die aus dem Druck der Wassermassen auf den Mauerkörper resultierenden Formänderungen ableiten zu können. Die damalige Sektion Geodäsie der Schweizerischen Landestopographie versuchte bereits im Jahre 1921 erstmals die entstehenden Deformationen beim Füllen eines Stausees bei der Mauer Montsalvens mittels geodätischer Beobachtungsmethoden zu erfassen. Hierfür wurden verschiedene Punkte der luftseitigen Mauerfläche trigonometrisch erfasst.

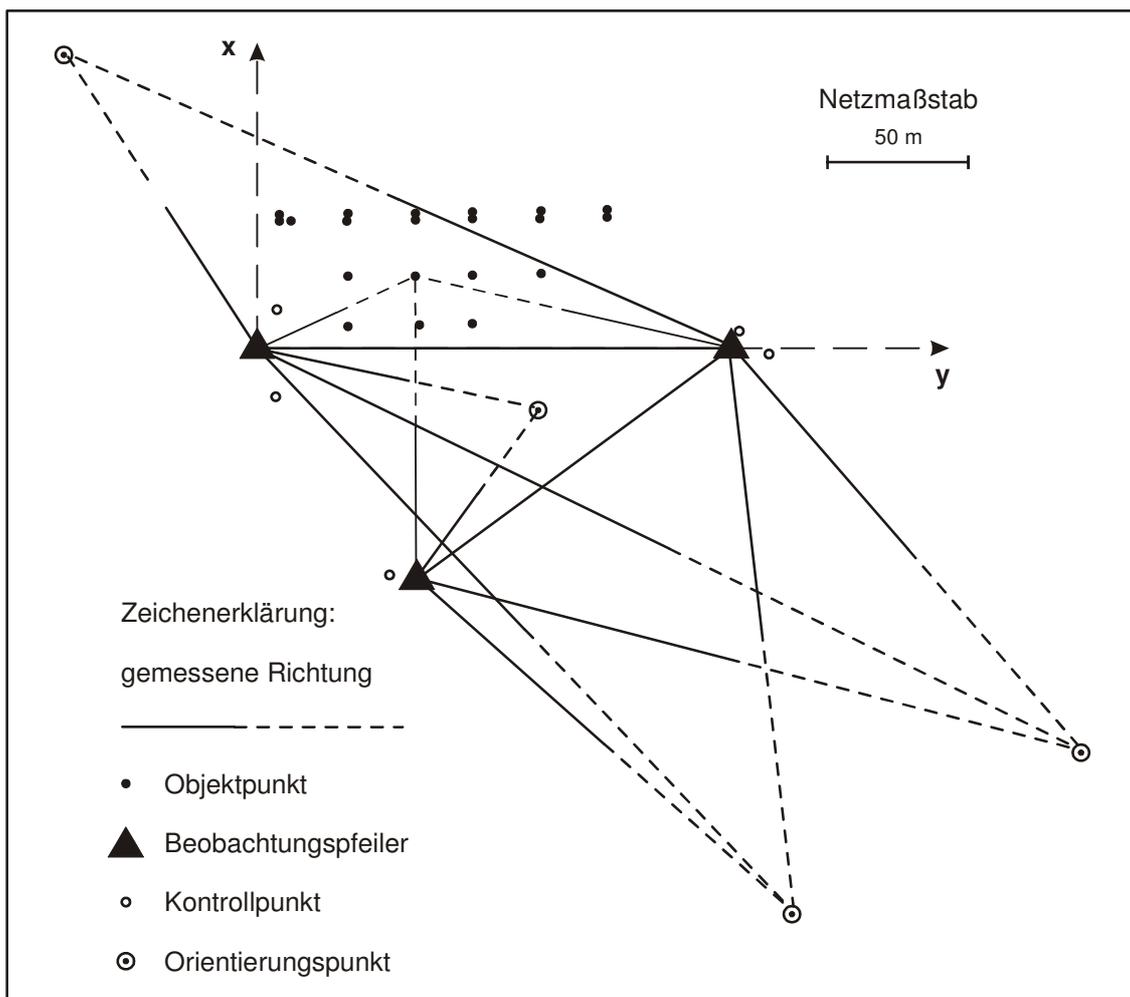


Abb.1 : Überwachungsnetz der Staumauer Schräh aus dem Jahr 1925

Auf Grund dieser ersten Erfahrungen wurde die Schweizerische Landestopographie beauftragt, ein Messkonzept für die Staumauer Schräh zu entwickeln. Das hier angelegte Überwachungsnetz besteht aus 3, auf gutem Fels gegründeten, betonierten Beobachtungspfeilern, sowie insgesamt 20 in vier horizontalen Reihen angebrachten Visierbolzen auf der Luftseite der Mauer. Außerdem wurden zur Versicherung der Pfeiler und zur Orientierung der Beobachtungen weitere 9 Kontroll- bzw. Orientierungspunkt in dem umgebenden Fels eingebracht (siehe Abbildung 1). [Kraftwerk Wägital 1930]

Die Bestimmung der Lage der Beobachtungspunkte am Bauwerk erfolgte mittels Präzisionstheodolit durch Vorwärtseinschneiden von den drei Beobachtungspfeilern aus. Diese Strategie wurde anfänglich halbjährlich verfolgt, um die Reaktion der Staumauer auf die Schwankungen der Stauhöhe zwischen Höchststand im Herbst und Niedrigstand im Frühjahr zu ermitteln. Bereits nach zwei Jahren zeigten sich keine größeren Änderungen mehr zwischen vergleichbaren Epochen, wodurch die Mauer als stabil galt, und es wurde ein fünfjähriger Beobachtungszyklus eingeführt, wobei jeweils in einem Jahr bei Höchststand und im folgenden bei Niedrigstand die Messungen ausgeführt wurden. Auch hierbei wurden keine ernsthaften Deformationen festgestellt, und die Beobachtungsperiode ab 1937 sogar auf 10 Jahre ausgedehnt. Seit 1974 wird wieder alle 5 Jahre eine Trigonometrische Netzmessung durchgeführt, wobei nun neben den Richtungen auch die Distanzen mittels Mekometer beobachtet werden.

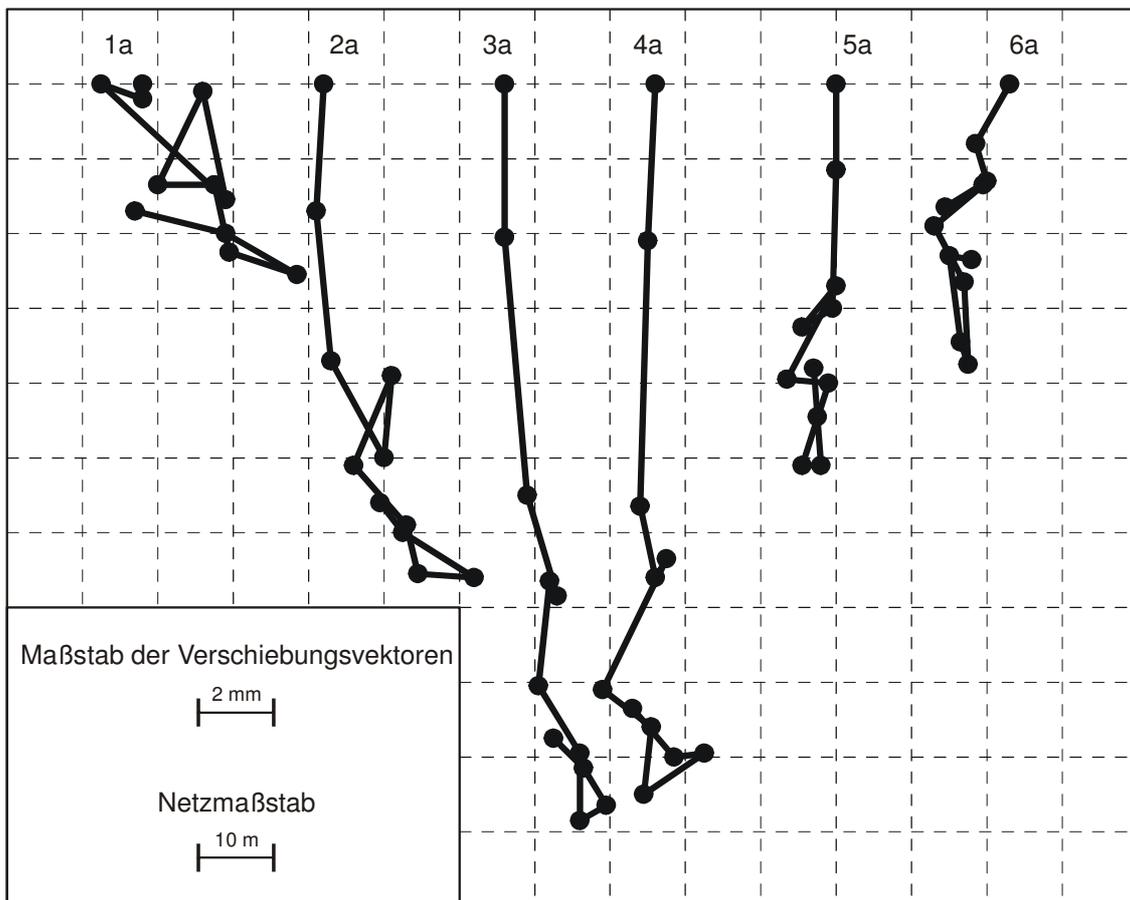


Abb.2 : Verschiebungsvektoren der Objektpunkte auf der Mauerkrone von 1925 – 1979

In obiger Abbildung 2 sind die Verschiebungsvektoren der 6 Objektpunkte auf der Mauerkrone für den Zeitraum von 1925 bis 1979 dargestellt. Die festgestellten Deformationen nehmen in der Mauermitte sowie in den ersten Jahren nach Staubeginn die größten Beträge an. Vor der Messepoche 1984 wurde die Mauerkrone umfangreich saniert, wodurch die hier dargestellten Objektpunkte durch 5 neue ersetzt werden mussten. Des Weiteren wurde in der Talsohle ein

weiterer Beobachtungspfeiler installiert. Zusätzlich wurden alle Beobachtungspfeiler und die neuen Objektpunkte auf der Mauerkrone mit einer Zentriereinrichtung der Firma Kern versehen, was eine sehr exakte Zentrierung von Instrument und Zielzeichen ermöglicht. Außerdem kam für die Richtungsbeobachtung erstmalig ein elektronischer Theodolit (Kern E2) zum Einsatz. Die Verschiebungsvektoren der Brüstungspunkte sind in der folgenden Abbildung (Abbildung 3) dargestellt.

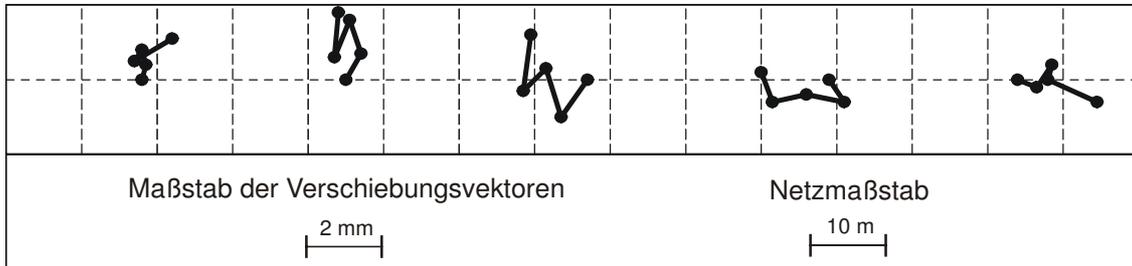


Abb.3 : Verschiebungsvektoren der Objektpunkte auf der Mauerkrone von 1984 – 2004

2 Netzauswertung

Seit 2004 erfolgen zusätzlich jährlich während eines Ingenieurvermessungspraktikums von Studenten der TU Dresden Messungen in dem Überwachungsnetz mittels TCA2003. Hierbei wird allerdings ein abgewandeltes Beobachtungsprogramm gewählt. Auf den 4 Beobachtungspfeilern und den 5 Objektpunkten auf der Mauerkrone werden jeweils alle möglichen Richtungen und Strecken in dem Netz beobachtet. Die somit in 4 Vollsätzen pro Standpunkt gewonnenen Messelemente werden mit dem Programm PANDA der Firma GeoTech ausgeglichen. Hierbei erfolgt zunächst in jeder Epoche eine freie Netzausgleichung mit Teilspurminimierung, wobei die 4 Beobachtungspfeiler als Datumpunkte zur Lagerung des Netzes dienen. (Netzskizze siehe Abbildung 4)

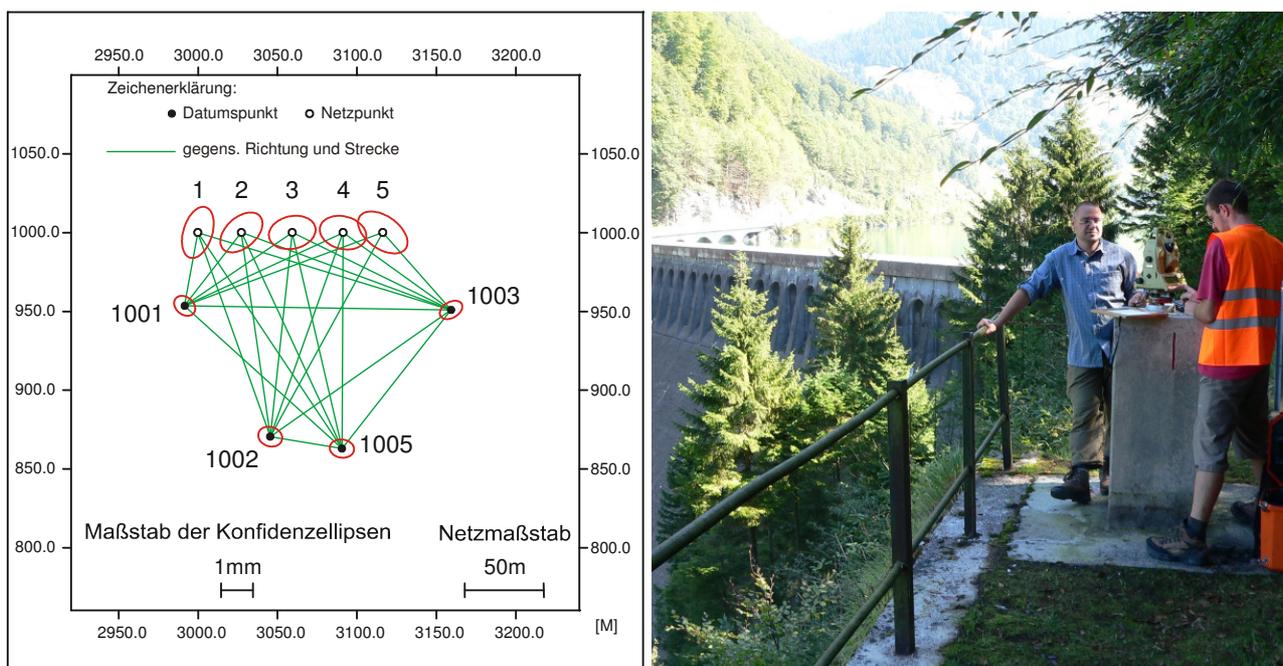


Abb.4 : Netzskizze und Messung mit TCA2003 auf Beobachtungspfeiler 1003

Die Ergebnisse der Auswertung für die letzten 5 Epochen sind in den Tabellen 1 und 2 zusammengefasst. Die Beurteilung der Ergebnisse erfolgt nach den Kriterien der Genauigkeit bzw. Zuverlässigkeit, wobei noch jeweils in innere und äußere unterschieden wird. Die Zahlenwerte die hierfür genutzt werden sind die a posteriori Standardabweichung der Beobachtungen für die innere und z.B. die Größe der Konfidenzellipsen für die äußere Genauigkeit. Die Wertung der Zuverlässigkeit kann durch den Redundanzanteil der Beobachtungen für die innere und mit dem EP-Wert für die äußere erfolgen.

Tab.1 : Beurteilungskriterien der Netzgenauigkeit

	Netzgenauigkeit					
	innere			äußere		
	a posteriori Standardabweichungen der Beobachtungen			Koordinaten		95% Konf.- Ellipse
Jahr	s_{Hz} [mgon]	s_D (abs.) [mm]	s_D (rel.) [ppm]	s_Y (max.) [mm]	s_X (max.) [mm]	a (max.) [mm]
2004	0,25	0,95	0,95	0,31	0,32	0,88
2005	0,25	0,71	0,71	0,28	0,27	0,79
2006	0,35	0,75	0,75	0,33	0,31	0,93
2007	0,19	0,91	0,91	0,26	0,28	0,73
2008	0,20	1,08	1,08	0,28	0,32	0,81

Tab.2 : Beurteilungskriterien der Netz Zuverlässigkeit

	Zuverlässigkeit			
	innere		äußere	
	Redundanzanteile der Richtungen	Strecken	Einfluss auf Punktlage Richtungen	Strecken
Jahr	r_i (min.)	r_i (min.)	EP _i (max.) [mgon]	EP _i (max.) [mm]
2004	0,35	0,85	0,50	0,16
2005	0,37	0,80	0,46	0,22
2006	0,41	0,75	0,54	0,24
2007	0,34	0,88	0,36	0,12
2008	0,33	0,89	0,61	0,17

3 Deformationsanalyse

Die Deformationsanalyse ist eine komplexe Ausgleichungsaufgabe, um die Stabilität von Punkten bzw. Punktbewegungen statistisch nachzuweisen. Grundlage der Messungen ist nach DIN 18710 ein Sondernetz – in diesem Fall ein Überwachungsnetz. Dabei wird unterschieden zwischen einem ein- und zweistufigen Netz, je nachdem ob es aus Stützpunkten besteht oder nicht, wie am Beispiel noch näher erläutert wird. Mit der Deformationsanalyse wird geprüft, ob sich auf der Grundlage der Messungen die Netzpunkte zwischen den Folgemessungen (Epochen) verändert haben. Dabei besteht die Aufgabe, die zwischen den Messepochen veränderten Punkte von den unveränderten zu trennen. Die Lösungsansätze haben sich in den letzten 20 Jahren [Niemeier 1985] kaum verändert und sind durch verschiedene Ausgleichungs- und Auswertprogramme schrittweise optimiert worden [Welsch u.a. 2000].

Der grundlegende Ansatz einer Deformationsanalyse ist der Zwei-Epochen-Vergleich, der in dieser Form auch auf den Vergleich mehrerer Epochen zurückgeführt werden kann. Das Konzept geht

schrittweise vor [Baumann 1998]. Voraussetzung ist, wie im Kapitel 2 gezeigt, dass die Netze der beiden Epochen einzeln und mit dem gleichen geodätischen Datum (identische Näherungskordinaten und Datumsdefekt) frei ausgeglichen wurden. Nur so können die aus den Ausgleichungen bestimmten Koordinatenzuschläge in der Deformationsanalyse verglichen werden. Nachdem zuerst eventuelle grobe Fehler durch den Vergleich der normierten Verbesserungen mit den Grenzwerten aufzudecken sind, wird für beide Epochen die Übereinstimmung der Messgenauigkeit getestet. Mit dem F -Test wird geprüft, ob die Standardabweichungen der Gewichtseinheit für beide Epochen mit den Freiheitsgraden f_1 und f_2 und $\alpha = 5\%$ den gleichen theoretischen Wert besitzen

$$\frac{s_{0Ep1}^2}{s_{0Ep2}^2} < F_{f_1, f_2; 1-\alpha}. \quad (1)$$

Fällt der Test negativ aus, ist die folgende strenge Analyse nicht sinnvoll.

Im zweiten Schritt ist zu testen, ob die Koordinatendifferenzen (Klaffungen) der beiden Epochen auf Punktverschiebungen oder nur auf Messabweichungen zurückzuführen sind. Die Netze sind auf Kongruenz zu prüfen. Durch Transformation von Epoche 2 nach Epoche 1 ergeben sich für die identischen Stützpunkte die Klaffungen für die x -Koordinate $d = X_{Ep2} - X_{Ep1}$. Außerdem ergibt sich aus der Netzausgleichung die vollbesetzte Gewichtsmatrix dieser Punkte \mathbf{P}_{dd} . Damit folgt aus den gewichteten Klaffungen aller Stützpunkte der mittlere Klaffungsvektor

$$\Theta^2 = \frac{\mathbf{d}^T \mathbf{P}_{dd} \mathbf{d}}{r} \quad (2)$$

und aus den Einzelvarianzen wird eine mittlere Varianz der Vergleichsepochen mit dem Freiheitsgrad $r = r_1 + r_2$ gebildet

$$s_0^2 = \frac{(s_{01}^2 + s_{02}^2)}{r}. \quad (3)$$

Falls der F -Test

$$F = \frac{\Theta^2}{s_0^2} \geq F_{1-\alpha; f_1; f_2} \quad (4)$$

mit der entsprechenden Irrtumswahrscheinlichkeit angenommen wird, gilt das Netz der Epoche 2 als kongruent zur Epoche 1 und die Punkte sind stabil geblieben. Überschreitet beim Kongruenztest der Quotient das Quantil der F -Verteilung, so sind in den Klaffungen signifikante Punktbewegungen enthalten und es wird der Punkt mit dem größten Betrag als instabil betrachtet. Ohne diesen Punkt wird der Test wiederholt. Dies wird solange fortgesetzt, bis keine signifikanten Punktveränderungen festgestellt werden.

In einem einstufigen Netz, in dem alle Punkte gleichwertig sind, beginnt der Kongruenztest mit allen Punkten. Im zweistufigen Netz mit Stütz- und Objektpunkten dagegen nur mit den Stützpunkten. Das Überwachungsnetz der Talsperre Schräh ist ein zweistufiges Netz mit den Stützpunkten 1001, 1002, 1003 und 1005 und den Objektpunkten 1 bis 5 (Abb. 4).

Wird der Kongruenztest abgelehnt, so geht man davon aus, dass mindestens 1 Punkt deformiert ist und zwar derjenige mit dem Betrag θ_{\max}^2 . Er wird durch Rückwärtsstrategie ermittelt und zum Objektpunkt erklärt. Dieser Prozess wird so lange wiederholt bis nur noch unveränderte Stütz- und veränderte Objektpunkte vorliegen. Umgekehrt wendet man die Vorwärtsstrategie an, um mit dem Klaffungsbeitrag θ_{\min}^2 stabile Objektpunkte zu finden. Diese werden dann zu Stützpunkten. Abschließend erfolgt noch die Signifikanzprüfung der deformierten Punkte mit der t -Verteilung. Bei

der Vermutung, dass die Deformation in zwei Richtungen erfolgen kann, ergeben sich die Vertrauensgrenzen

$$d = X_{\text{Ep}2} - X_{\text{Ep}1} > s_d \cdot t_{f, 1-\alpha/2} \quad (5)$$

mit s_d Standardabweichung von d
 $t_{f, 1-\alpha/2}$ Fraktile der t -Verteilung
 f Freiheitsgrad des gemeinsamen Netzes.

Die Standardabweichung s_d wird aus den Kofaktoren der Inversen des Gesamtsystems gebildet. Falls sich für einen der Punkte die Deformation nicht als signifikant erweist, kann die Ursache darin liegen, dass der bei der Strategie zuletzt ermittelte Zustand (Punkt stabil oder nicht), zu einem früheren Stadium der Analyse noch anders zu sein schien. In diesem Fall empfiehlt es sich, den Kongruenztest nochmals zu wiederholen.

4 Ergebnisse der Analyse

Nach der Ausgleichung der Netzmessung in der jeweiligen Epoche werden die berechneten Koordinaten auf signifikante Veränderungen bezüglich einer Ausgangsepoche mittels einer Deformationsanalyse untersucht. Voraussetzung hierfür ist eine identische Datumsfestlegung in den einzelnen Beobachtungsepochen, die im hier vorgestellten Beispiel über die 4 Beobachtungspfeiler als Stützpunkte gegeben ist. In der Deformationsanalyse erfolgt nun eine Transformation des Netzes der aktuellen Epoche auf das Netz der Bezugsepoche, wobei die Restklaffen der Stützpunkte minimal sein sollen. Wenn im Bereich der Stützpunkte ein stabiles Teilnetz gefunden wurde, erfolgt die Beurteilung einer möglichen Deformation der Objektpunkte anhand ihrer Restklaffen, welche auf Signifikanz getestet werden.

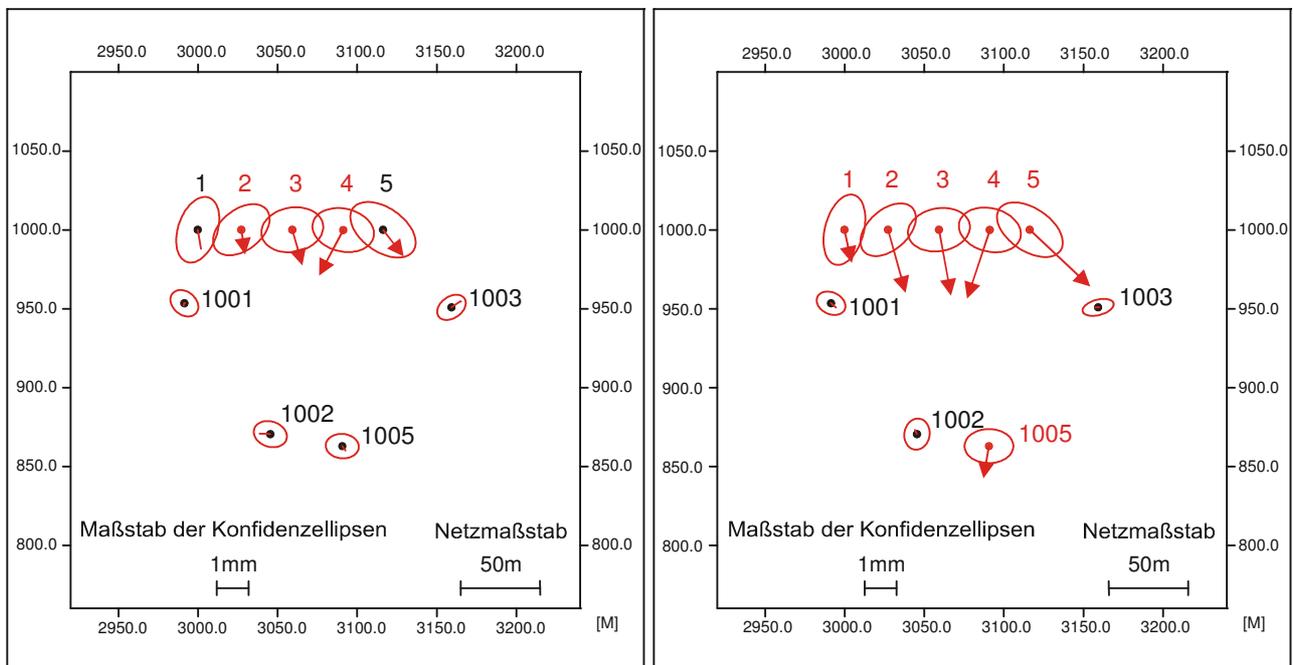


Abb.5 : Ergebnis der Deformationsanalyse 2004 – 2005 (links) und 2004 – 2008 (rechts)

In Abbildung 5 sind die Ergebnisse der Deformationsanalyse für 2 Beispiele (links 2004 zu 2005 und rechts 2004 zu 2008) graphisch dargestellt. In der ersten Folgeperiode, im Abstand von einem Jahr, werden lediglich die drei Objektpunkte in der Mauermitte (Punkte 2 bis 4) als signifikant verschoben erkannt. Betrachtet man allerdings einen größeren Zeitraum, hier 4 Jahre, entsprechen

Betrag und Richtung der Verschiebungsvektoren der Objektpunkte 1 bis 4 den erwarteten Deformationen. Lediglich Punkt 5 zeigt ein Bewegungsmuster, welches sich aus der Geometrie des Bauwerkes nicht ableiten lässt. Auch zeigt der später zum Überwachungsnetz hinzugefügte Beobachtungspfeiler 1005 signifikante Verschiebungen. Diese können darauf beruhen, dass der Pfeiler nicht im anliegenden Fels gegründet ist, sondern lediglich auf der mit Lockersediment verfüllten Erosionsrinne.

In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Deformationsanalyse der Jahre 2005 bis 2008 bezüglich der Ausgangsepoche 2004 dargestellt. Die grau hinterlegten Werte in den Spalten ΔL sollen signifikante Lagerverschiebungen der entsprechenden Punkte anzeigen.

Tab.3 : Ergebnisse der Deformationsanalyse für die Jahre 2005 bis 2008

Punktnr.	2004-2005			2004-2006			2004-2007			2004-2008		
	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔL [mm]	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔL [mm]	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔL [mm]	ΔX [mm]	ΔY [mm]	ΔL [mm]
1001	-0,07	-0,03	0,08	-0,18	-0,04	0,18	0,09	-0,20	0,22	-0,13	0,15	0,20
1002	0,03	-0,34	0,35	0,14	-0,17	0,22	-0,19	-0,07	0,20	0,15	-0,06	0,16
1003	0,19	0,27	0,33	0,03	0,21	0,21	0,09	0,27	0,29	-0,01	-0,09	0,09
1005	-0,14	0,10	0,17	-0,35	-0,82	0,89	-0,60	-0,17	0,62	-1,02	-0,16	1,04
1	-0,59	0,09	0,60	0,02	0,41	0,41	-0,16	0,57	0,59	-1,05	0,22	1,07
2	-0,78	0,12	0,79	-0,23	-0,36	0,42	-0,13	0,28	0,31	-1,99	0,56	2,07
3	-1,12	0,33	1,17	-0,35	0,22	0,41	-0,73	-0,87	1,14	-2,08	0,38	2,12
4	-1,45	-0,75	1,63	-0,98	-1,21	1,56	-1,15	-0,91	1,47	-2,18	-0,71	2,29
5	-0,84	0,65	1,06	-0,86	1,84	2,03	-0,81	1,09	1,36	-1,80	1,90	2,62

Eine graphische Auswertung dieser Werte erfolgt in Abbildung 6. Die Ähnlichkeit dieser Abbildung (mit einer Beobachtungsdauer von 4 Jahren) mit Abbildung 5 (Beobachtungsdauer 20 Jahre) zeigt, dass der von der Schweizer Landestopographie gewählte Beobachtungszyklus von 5 Jahren durchaus gerechtfertigt ist.

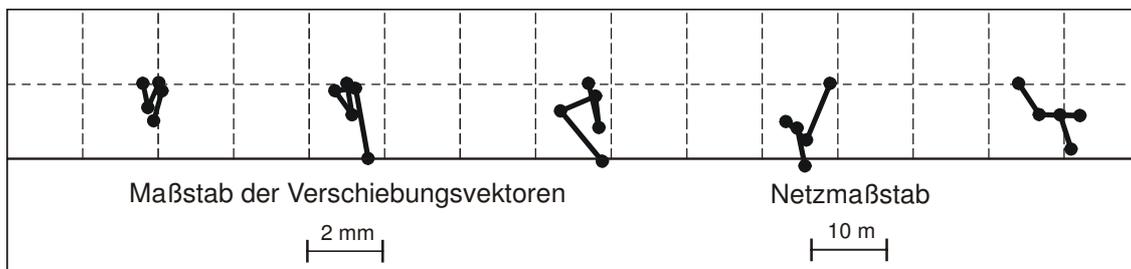


Abb.6 : Verschiebungsvektoren der Objektpunkte auf der Mauerkrone von 2004 – 2008

5 Literatur

[Baumann 1998] BAUMANN, E.: Netzanalyse und Auswertung von Messungen an Mittelgebirgsstaudämmen. In: Beiträge zum 45. DVW-Seminar „Messtechniken und Auswertelgorithmen für die praktische Deformationsanalyse“. DVW-Schriftenreihe 30/1998

[Kraftwerk Wäggital 1930] DAS KRAFTWERK WÄGGITAL: Bericht der Bauleitung. Verlag A.-G. Kraftwerk Wäggital, Siebnen (Schweiz), 1930

- [Niemeier 1985] NIEMEIER, W.: Deformationsanalyse. In: Pelzer, H. [Hrsg.]: Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II. Vermessungswesen bei Konrad Wittwer. Verlag Konrad Wittwer, Stuttgart, 1985
- [Niemeier 2008] NIEMEIER, W.: Ausgleichsrechnung. Berlin: de Gruyter Verlag, 2008
- [Welsch u.a. 2000] WELSCH, W. u.a.: Handbuch Ingenieurgeodäsie – Auswertung geodätischer Überwachungsmessungen. Heidelberg: Herbert Wichmann Verlag, 2000