Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 91 (1999)
Heft: 7-8

Artikel: Geodätische Bestandsaufnahmen mit Exzenterstab im Maschinenbau
Autor: Gillarduzzi, Klaus / Weinold, Thomas / Grimm-Pitzinger, Albert
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940069

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 23.08.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Geodätische Bestandsaufnahmen mit Exzenterstab im Maschinenbau

Klaus Gillarduzzi, Albert Grimm-Pitzinger, Thomas Weinold

Zusammenfassung

Das Andocken neuer an bestehende Maschinenbauteile erfolgte klaglos und praktisch spannungsfrei.

Der Aufbau eines geodätischen Netzes und die davon abgeleitete Aufnahme einzelner Maschinenteile hat sich ebensogut bewährt wie die beiden wesentlichen Hilfsmittel, der Exzenterstab und das Kreisprogramm. Die aus dem Netzausgleich, der Exzenterstabberechnung und der Kreisberechnung resultierenden Genauigkeiten geben sowohl den Geodäten wie auch den Maschinenbauern die für ein solches Projekt absolut nötige Sicherheit.

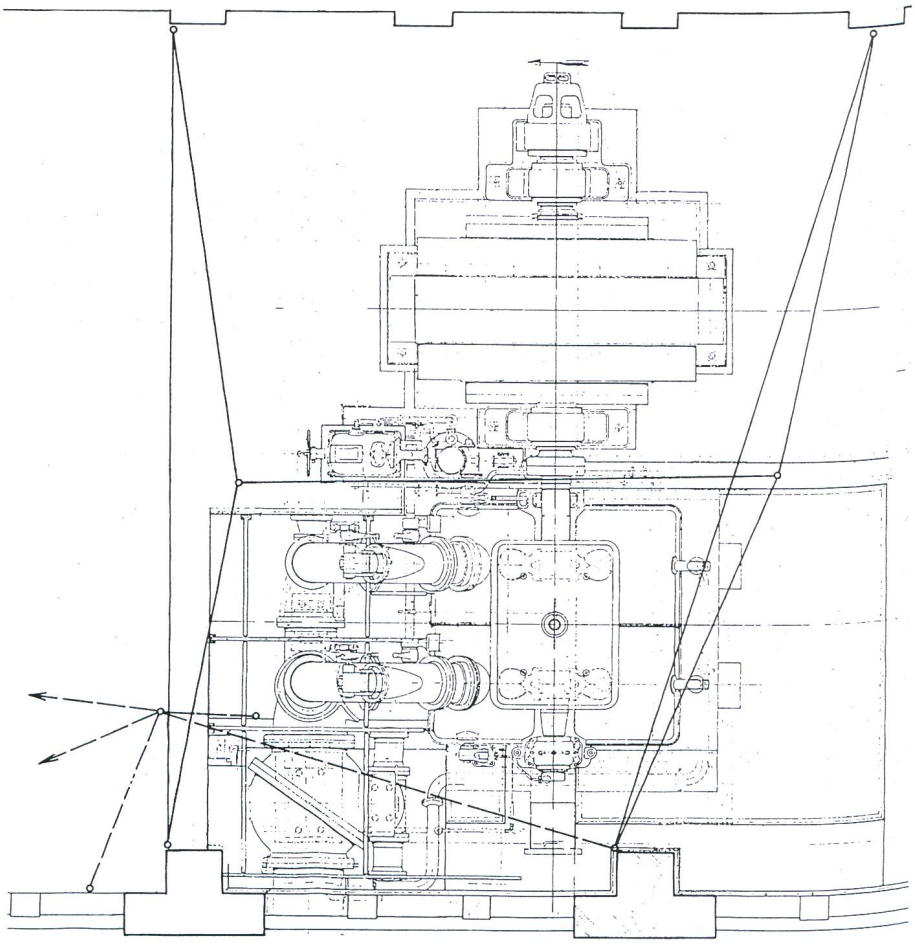


Bild 2. Anordnung der Beobachtungen – Maschine 5.

Veranlassung und Messprinzip

Die Tiwag – Tiroler Wasserkraftwerke AG als wesentlicher Versorger des Landes Tirol mit elektrischer Energie betreibt insgesamt 43 Wasserkraftwerke mit Leistungen von wenigen kW bis 781 MW.

Der Bau der Anlagen reicht teilweise bis zur Jahrhundertwende zurück. Entsprechend der jahrzehntelangen Betriebsdauer werden sukzessive Bauteile wie Verteilleitungen, Kugelschieber, Turbinen und Generatoren als Einheit oder teilweise ersetzt. Dazu sind die einzelnen Maschinen- und Gebäudekomponenten räumlich aufzunehmen, über ein lokales Koordinatensystem gegenseitig zuzuordnen und darzustellen.

Diese Bauteile befinden sich oft in engen Schächten und Gängen, die sich über zwei oder mehr Geschosse erstrecken und damit eine präzise Aufnahme enorm erschweren. Dazu und für Konstruktionen, die nicht direkt einsehbar sind, bietet sich zur Aufnahme ein Exzenterstab an.

Das Gerät besteht aus einem Invarstab mit einer auf den betreffenden Punkt aufzusetzenden Spitze (Bild 1). Mittels einer fünfteiligen Halterung, bestehend aus einem Magneten und beliebig einstellbaren Armen, kann der Stab in seiner Messposition ruhig gehalten werden. Auf dem Stab befinden sich acht Marken in Form von Reflexfolien, welche mit der Spitze einen Vektor definieren. Durch dreidimensionales Einmessen von mindestens zwei, maximal aller acht Marken, kann über deren Koordinaten die Spitze des Vektors berechnet werden.

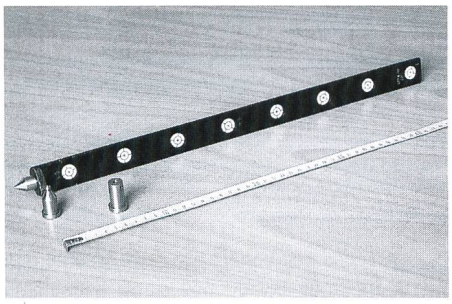


Bild 1. Exzenterstab

Ein konkretes Beispiel

Am Beispiel eines Komponententausches an der Maschine 5 im Achenseekraftwerk wollen wir den Einsatz des Exzenterstabes vorstellen:

Das Achenseekraftwerk als Hochdruckanlage steht seit 1927 in Betrieb. Von den Elementen Verteilleitung, Kugelschieber, Düsen mit Steuerung, mehrteilige Achse mit Turbinen und Generator der Maschine 5 wurden der Kugelschieber gänzlich und die Laufräder beider Turbinen erneuert. In die bestehen bleibende Flanschgeometrie waren demnach neue Bauteile einzupassen.

In der Maschinenhalle und deren Untergeschoss wurde ein Triangulierungsnetz mit im Baukörper eingebauten Konsolen und Miniprismen als Stand- bzw. Anschlusspunkte geschaffen (Bild 2). Die Maschinenachse, in der Natur durch die unterschiedlich, bis zu 475 mm starke Welle gegeben, und deren Schnittpunkt mit der Achse des westlichen Laufrades definieren das lokale Koordinatensystem bezüglich der Lage. Die Höhenangaben entsprechen den absoluten Werten über Adria.

Von den Netzpunkten wurden die Bestandsaufnahme, die Absteckung der Verankerungspunkte der neuen Bauteile und die Deformationen, ausgelöst durch Veränderungen der Temperatur und des Wasserdruckes, abgeleitet.

Der Bestand war bereits für die Ausschreibung bereitzustellen. Entsprechend

waren die Netzpunkte über die gesamte Projektdauer zu erhalten.

Das zwangszentriert mit einem Theodoliten Leica TCA1800 und Präzisions- bzw. fest montierten Minireflektoren über Richtungen und Strecken beobachtete Netz hat eine Ausdehnung von 17×24 m. Die Auswertung der Messdaten – das sind Richtungen, Schrägdistanzen und gegengleich beobachtete Zenitdistanzen – mit einem freien Lagenetzausgleich ergab bei einer A-posteriori-Genauigkeit von 0,0026 Gon und 0,14 mm eine mittlere Unsicherheit der Punktlagen von $\sigma_P = \pm$ 0,3 mm und mit einem freien Höhennetzausgleich eine mittlere Unsicherheit der Punkthöhen von $\sigma_H = \pm$ 0,5 mm. Damit beträgt die Genauigkeit der Raumlage der Netzpunkte $\sigma_S = \pm$ 0,6 mm.

Die einzelnen, mit Exzenterstab einzumessenden Punkte wurden von den Konsolen aus polar beobachtet (Bild 3). Es sind dabei von den acht möglichen Reflektormarken mindestens zwei anzuzielen, so dass eine Raumgerade bis zur Spitze des Stabes, die den Aufnahmepunkt repräsentiert, gerechnet werden kann. Mit zwei bestimmten Messmarken ist die Raumgerade definiert, mit mehr als zwei Marken ist die Bestimmung der räumlichen Standardabweichung σ_S des aufgenommenen Punktes möglich.

Theorie der Stabauswertung

Bei Vorliegen von überschüssigen Messungen (Punktanzahl >2) wird eine räumliche Gerade den 3D-Koordinaten der Marken so angepasst, dass die Quadratsumme der verbleibenden Abstände der Marken von der Geraden ein Minimum bildet («least squares»). Die im folgenden beschriebene Variante wird im Vermessungswesen als «Vermittelnder Ausgleich» bezeichnet. Sie erhöht die Genauigkeit der Ergebnisse und, ein mindestens ebenso wichtiger Effekt, schafft Zuverlässigkeit durch Aufdecken von grob fehlerhaften Messungen.

Da eine komplette Beschreibung den Rahmen dieses Artikels sprengen würde, ist die folgende Beschreibung dieses Verfahrens nicht vollständig. Den interessierten Leser bitten wir, die fehlenden Informationen der umfangreichen Literatur zu entnehmen, z. B. *Koch, Höppke, Pelzer.*

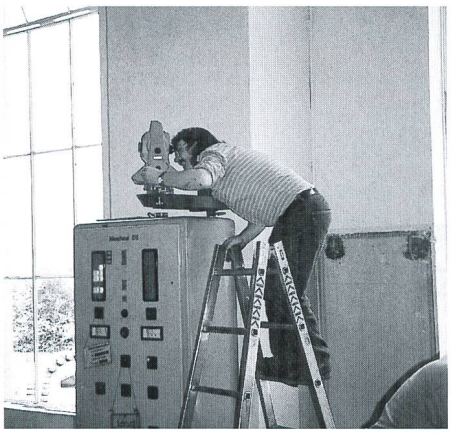


Bild 3. Beispiel für Beobachtungsposition.

Das mathematische Modell beschreibt den linearen bzw. linearisierten Zusammenhang zwischen den Messungen und den zu schätzenden Parametern:

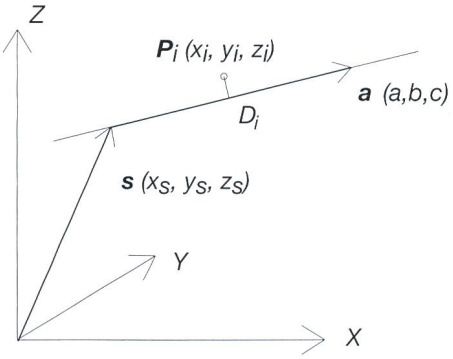


Bild 4. Darstellung der Raumgeraden durch zwei Vektoren.

$$L = A\,x \qquad \text{(Formel 1)}$$

Der Vektor der als gleichgenau und unkorreliert betrachteten Messungen L besteht aus den errechneten 3D-Koordinaten der eingemessenen Marken:

$L^T = (x_1, y_1, z_1, \quad x_p, y_p, z_p)$
x_i, y_i, z_i...3D-Koordinaten der Marke i
p...Anzahl der eingemessenen Marken

Die anzupassende Gerade ist durch einen Positionsvektor *(s)* und durch einen Richtungsvektor *(a)* definiert (Bild 4). Es ist sinnvoll, den Positionsvektor mit der (gesuchten) Spitze des Stabes gleichzusetzen. Die Punkte auf der Raumgeraden werden als die Summe der zwei Vektoren definiert:

$$g_i = s + \lambda_i\, a \qquad \text{(Formel 2)}$$

Der Parametervektor **x** besteht daher aus den drei Koordinaten der Stabspitze und den drei Komponenten des Richtungsvektors:

$$\mathbf{x}^T = (x_S, y_S, z_S, a, b, c)$$

x_S, y_S, z_S.....3D-Koordinaten der Stabspitze (Positionsvektor)
a = da/dx, $b = da/dy$, $c = da/dz$..... Komponenten des Richtungsvektors a

Die Konfigurationsmatrix A besteht aus $3 \times p$ (Anzahl der Messungen) Zeilen und 6 (Anzahl der Parameter) Spalten.

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \lambda_1 \\ \hline 1 & 0 & 0 & \lambda_p & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & \lambda_p & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \lambda_p \end{bmatrix}$$

λ_i = kalibrierte Distanz von der Marke i zur Spitze

Mit dem Modell (Formel 1) werden mittels der «least-squares»-Bedingung die Normalgleichungen errichtet

$$(\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})\hat{x} - \mathbf{A}^T \cdot l = 0 \qquad \text{(Formel 3)}$$

Die wahrscheinlichsten Werte der Parameter werden mittels Inversion der Normalgleichungsmatrix ($\mathbf{A}^T\mathbf{A}$) berechnet:

$$\hat{x} = (\mathbf{A}^T \cdot \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{A}^T \cdot l \qquad \text{(Formel 4)}$$

Damit ergibt sich der Vektor der an die Messungen anzubringenden kleinen Verbesserungen v mit:

$$v = \mathbf{A} \cdot \hat{x} - l \qquad \text{(Formel 5)}$$

Die Elemente von v beschreiben die Abstände der Marken von der ausgleichenden Raumgeraden. So ergibt sich der Abstand D_i der Marke i mit:

$$D_i = \sqrt{v^2_{xi} + v^2_{yi} + v^2_{zi}} \qquad \text{(Formel 6)}$$

v_{xi}, v_{yi}, v_{zi} ..... Abstände der Marke i von der Raumgeraden in den jeweiligen Koordinatenachsen.

Die Werte D_i bieten die Möglichkeit, grobe Messfehler aufzudecken und damit die Zuverlässigkeit des Ergebnisses zu erhöhen. Ein relativ grosser Wert lässt auf eine weniger gut eingemessene Marke schliessen, diese Marke sollte in einer neuerlichen Berechnung aus dem Datensatz genommen werden.

Das Verfahren liefert weiters mit den Standardabweichungen der gemessenen und der berechneten Grössen anschauliche Genauigkeitsmasse. Am interessantesten sind die Standardabweichungen der Koordinaten der Spitze und die daraus abgeleitete räumliche Lage der Spitze:

$$\sigma_s = \sqrt{\sigma^2_x + \sigma^2_y + \sigma^2_z} \qquad \text{(Formel 7)}$$

σ_s .... Standardabweichung der räumlichen Lage der Spitze

$\sigma_x^2, \sigma_y^2, \sigma_z^2$ .... Varianzen der Koordinaten der Spitze

Ergebnisse

Ähnlich der Ermittlung der Verlässlichkeit der einzelnen Beobachtungen und der Ergeb-

Tabelle 1. Gegenüberstellung der von zwei Standpunkten aus gemessenen Koordinaten des Punktes kg.

Standpunkt	Zielpunkt	Y (m)	σ_y (mm)	X (m)	σ_x (mm)	H (m)	σ_h (mm)
1002	K9	106,7123	± 0,13	113,1090	± 0,03	498,7960	± 0,04
1003	K9	106,7122	± 0,06	113,1082	± 0,09	498,7957	± 0,03

nisse der mehrfach miteinander verknüpften Standpunkte des geodätischen Netzes liegen die Koordinaten der mit Hilfe des Exzenterstabes eingemessenen Aufnahmepunkte kontrolliert vor, sofern bei der Polaraufnahme mindestens zwei Anschlüsse und auf dem Stab mindestens drei Marken beobachtet werden.

Die Gegenüberstellung der von zwei verschiedenen Standpunkten aus ermittelten Koordinaten des Punktes K9 gibt Aufschluss über die Leistungsfähigkeit sowohl des Netzes wie auch der Exzenterstabmessung (Tab. 1).

Theorie der Kreisberechnung

Gesuchte Orte wie Flanschmittelpunkte oder Achsen von Wellen müssen indirekt erfasst werden. Es sind an deren zugänglichen Oberflächen nach mathematischer Definition mindestens drei, wenn eine Kontrolle erfolgen soll mehrere, Punkte aufzunehmen und durch diese ein Kreis zu legen.

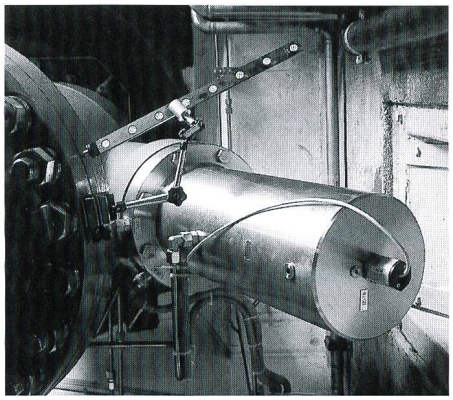


Bild 5. Flanschaufnahme mit Exzenterstab.

Die optimale Anordnung der den Kreis definierenden Aufnahmepunkte – etwa vier oder fünf gleichmässig über 360° verteilt – kann wegen eingeschränkter Sichten nicht generell erreicht werden. Es braucht also auch hier wie beim Exzenterstab ein Auswerteverfahren mit Ermittlung der Signifikanzen der Ergebnisse, um die Plausibilität der berechneten Elemente – Kreismittelpunkt, Rotationswinkel, Zenitwinkel und Radius – prüfen zu können.

Wie beim Exzenterstab werden durch einen Vermittelnden Ausgleich überschüssig vorliegende Messungen (Anzahl der Punkte >3) nach der «least squares»-Methode simultan und gleichberechtigt verarbeitet. Die Bestimmung eines Kreises im Raum erfordert jedoch ein wesentlich komplexeres Modell, da die jetzt anzusetzende Ebene zusammen mit der Kreisbedingung naturgemäss schwieriger zu modellieren ist als die vorhergehende Raumgerade. Die dabei zusätzlich auftretenden Bedingungen erweitern den Ausgleich zu einem «Ausgleich Vermittelnder Beobachtungen mit Bedingungen».

Der Vektor der Messungen L besteht wieder aus 3D-Koordinaten, diesmal der gemessenen und berechneten Kreispunkte:

$$L^T = (x_1, y_1, z_1, \ldots\ldots x_k, y_k, z_k)$$
$$k = \text{Anzahl der Kreispunkte}$$

Für die Definition der Parameter wird die Ebene durch einen Positionsvektor m

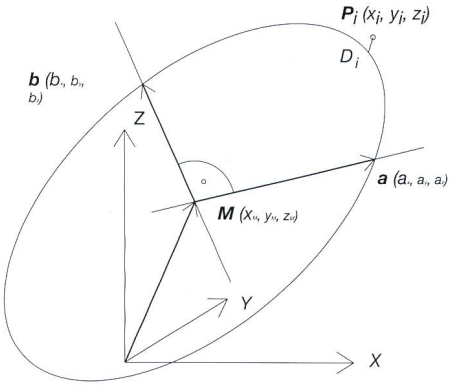


Bild 6. Darstellung der Ebene im Raum durch drei Vektoren.

(gleichgesetzt mit dem Kreismittelpunkt) und die zwei Richtungsvektoren a und b definiert.

Die Punkte h_i in der Ebene werden daher definiert mit

$$h_i = m + \lambda_i a + \mu_i b \qquad \text{(Formel 8)}$$

Der Vektor x der zu schätzenden Parameter (Anzahl = u) besteht aus den drei Mittelpunktskoordinaten, den jeweils drei Komponenten der beiden Richtungsvektoren, dem Radius und (pro Kreispunkt) einem Paar Koeffizienten λ_i und μ_i:

$$x^T = (x_m, y_m, z_m, a_x, a_y, a_z, b_x, b_y, b_z, R, \lambda_1, \mu_i, \ldots\ldots \lambda_k, \mu_k)$$

Dieses System ist unterbestimmt, da es unendlich viele Linearkombinationen gibt, die einen Punkt h_i beschreiben. Dieses Manko wird mittels der vier folgenden Bedingungen zwischen den Parametern behoben:

Die Richtungsvektoren a und b sollen die Einheitslänge haben und normal aufeinanderstehen.

$$|a| = |b| = 1; a \perp b \qquad \text{(Formel 9)}$$

Die vierte Bedingung betrifft die Zuschläge da zum Vektor a und verhindert eine Drehung des Systems.

$$e^T da = 0 \text{ mit } e^T = (1,1,1)$$
$$\text{und } da^T = (da_x, da_y, da_z) \qquad \text{(Formel 10)}$$

Zusätzliche Bedingungen (Anzahl = k = Anzahl der Kreispunkte) entstehen durch die Forderung nach dem Kreis:

$$\lambda_i^2 + \mu_i^2 = R^2 \; i = 1, \ldots\ldots k \qquad \text{(Formel 11)}$$

Die Bedingungen (Anzahl = b) werden

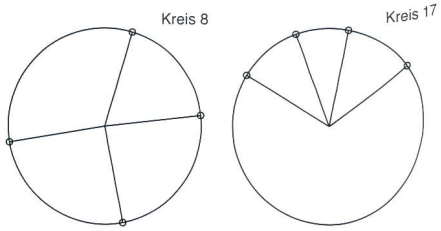


Bild 7. Verteilung der Aufnahmepunkte.

in der ($b \times u$) Matrix B zusammengefasst und an das Normalgleichungssystem (Formel 3) angefügt:

$$\begin{bmatrix} \boldsymbol{A^T A} & \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{B^t} & \boldsymbol{0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}^{\mathrm{T}} \\ w \end{bmatrix} \qquad \text{(Formel 12)}$$

Die Berechnung der Parameter (inklusive der Hilfsunbekannten $\boldsymbol{k}$) und der Verbesserungen geschieht entsprechend zu *(Formel 5)*. Wiederum lassen sich die Abstände D_i *(Formel 6)* der gemessenen Punkte vom ausgeglichenen Kreis angeben. Als

Tabelle 2. Einfluss der Verteilung der Aufnahmepunkte für Kreiselemente.

Kreis			Mittelpunktkoordinaten				Rotationswinkel		Zenitwinkel		Radius	
	Y (m)	σ_Y (mm)	X (m)	σ_X (mm)	H (m)	σ_H (mm)	τ (Gon)	σ_τ	ζ (Gon)	σ_ζ	r (m)	σ_r (mm)
8	104,5468	0,5	102,4464	0,6	499,8847	0,5	0,241	0,1051	149,927	0,0757	0,4748	0,4
17	106,6979	1,2	104,5422	1,4	498,7949	2,9	100,086	0,0430	199,994	0,1186	0,9984	2,5

Mass der erreichten Genauigkeit dienen die Standardabweichungen der Parameter, besonders des Mittelpunktes und des Radius.

Ergebnisse

In folgender Tabelle sollen die Ergebnisse der Aufnahme des Kreises 8 (gute Punktverteilung) und des Kreises 17 (besonders ungünstige Punktverteilung) vorgestellt werden:

Eindeutig ist an der Gegenüberstellung der Genauigkeiten beider Kreiselemente der Einfluss der Verteilung der Aufnahmepunkte zu erkennen.

Literatur

Höpcke, W.: Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung, de Gruyter Lehrbuch, ISBN 3-11-007514-8, Berlin, 1980.

Koch, K.-R.: Parameter Estimation and Hypothesis Testing in Linear Models, ISBN 3-540-18840-1, Berlin Heidelberg New York, 1987.

Pelzer, H. (Hg.): Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung II, Vermessungswesen bei Konrad Wittwer, Band 13, ISBN 3-87919-140-9, Stuttgart, 1985.

Adressen der Verfasser:

Dipl.-Ing. *Klaus Gillarduzzi:* Tiwag – Tiroler Wasserkraftwerke AG, Abteilung Wasserbau, Technisches Büro für Vermessung, Eduard-Wallnöfer-Platz 2, A- 6010 Innsbruck.

Dr. techn. *Albert Grimm-Pitzinger,* Dr. techn. *Thomas Weinold:* Universität Innsbruck, Institut für Geodäsie, Technikerstrasse 13, A-6020 Innsbruck.

Bundesrat legt Eckpunkte des Nachfolgeprogramms zu Energie 2000 fest

UVEK Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie, Kommunikation

Klare quantitative Ziele, freiwillige und marktwirtschaftliche Massnahmen sowie Fortsetzung des partnerschaftlichen, föderalistischen Ansatzes von Energie 2000: Dies sind die wesentlichen Eckpunkte, die der Bundesrat für das Nachfolgeprogramm zu Energie 2000 festgelegt hat.

Der Bundesrat will das Aktionsprogramm Energie 2000 im September des nächsten Jahres nahtlos in das Nachfolgeprogramm überführen. Mit einer einfachen und straffen Organisation will er die erfolgreichen freiwilligen Massnahmen von Energie 2000 fortsetzen und wesentlich verstärken durch den Einbezug von Agenturen gemäss Energiegesetz, durch Vereinbarungen mit Grossverbrauchern gemäss CO_2-Gesetz und durch finanzielle Anreize für die rationelle Energieverwendung und den Einsatz erneuerbarer Energien gemäss Förderabgabebeschluss.

Mit dem Nachfolgeprogramm sollen wesentliche Beiträge geleistet werden, um die auf internationaler Ebene festgelegten schweizerischen Klimaziele sowie längerfristig eine nachhaltige schweizerische Energieversorgung zu erreichen. Die Strategie des Programms soll gemeinsam mit den Kantonen und der Wirtschaft definiert und umgesetzt werden. Die operationelle Leitung soll weiterhin beim Bundesamt für Energie liegen.

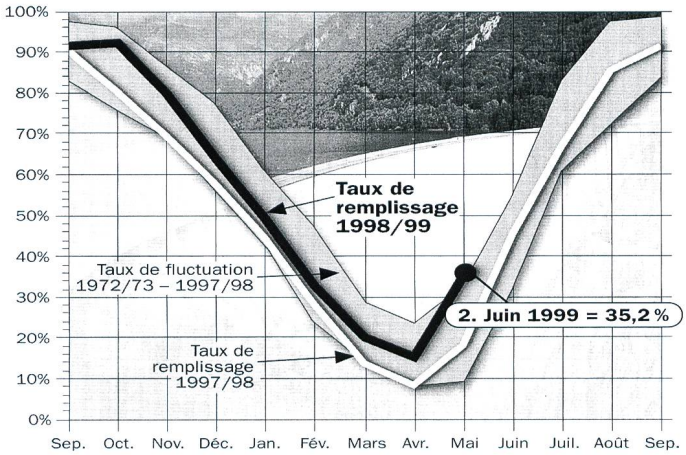
Eine Vernehmlassung bei den Kantonen und den wichtigsten interessierten Organisationen ergab eine breite Zustimmung zum Nachfolgeprogramm und zahlreiche Detailvorschläge. Das Programm wird lediglich von einigen Wirtschaftsorganisationen abgelehnt, während Umweltorganisationen sowie das Solar-, Holz- und Haustechnikgewerbe ein ehrgeizigeres Programm fordern. Die Gespräche mit den Kantonen und der Wirtschaft werden zwecks Konkretisierung des Programms fortgesetzt.

Abondance hydroélectrique au printemps

Union des centrales suisses d'électricité

(UCS) La fonte des immenses quantités de neige du dernier hiver et les pluies torrentielles du mois de mai dernier ont entraîné un niveau de remplissage record des lacs de retenue dans les Alpes suisses. Au début du mois de juin, le taux de remplissage culminait à 35,2 %. L'an dernier, à la même époque, il atteignait 18 %.

La grande capacité de retenue des barrages suisses a également permis d'atténuer les effets catastrophiques des inondations en plaine.



Taux de remplissage des lacs – Record printanier.