

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN
GEODÄTISCHES INSTITUT
LEHRSTUHL INGENIEURGEODÄSIE

Bauwerksüberwachungsmessungen

7.Semester

Inhaltsverzeichnis Wintersemester 2004/2005

1	Zielstellung	4
2	Überwachungsmessungen	5
2.1	Definitionen	5
2.2	Ursache für Deformationen	7
2.3	Bezugssystem	12
2.4	Anforderungen an die Planung und Messung	14
2.5	Einteilung der Messverfahren	16
3	Grundlagennetze für die Bauwerksüberwachung	18
3.1	Lokale Überwachungsnetze	18
3.2	Grundlagennetz für Stauanlagen	19
3.3	Netzauswertung und Netzausgleichung	24
4	Messverfahren zum Nachweis von Lagedeformationen (2D)	30
4.1	Alignement	30
4.1.1	Geometrisches Alignement	30
4.1.2	Trigonometrisches Alignement.....	32
4.1.3	Mechanisches Alignement und Laseralignement.....	34
4.2	Präzisionspolygonierung.....	36
5	Messverfahren zum Nachweis von Setzungen (Höhe)	38
5.1	Präzisionsnivellement.....	38
5.2	Hydrostatische Höhenbestimmungen	40
5.2.1	Präzisionsschlauchwaage.....	40
5.2.2	Wägesysteme.....	42
5.2.3	Überlaufsysteme.....	43
5.2.4	Differenzdruck-Messsysteme.....	46
6	Bestimmung von Abweichungen aus der Vertikalen	48
6.1	Projektionsmethode	48
6.2	Neigungsmessungen.....	49
6.3	Lotungsmessungen	52
6.3.1	Mechanische Pendellotung	52
6.3.2	Referenzpendel.....	55
6.3.3	Schwimm- bzw. Umkehrlotung	56
7	Längenänderungsmessungen	57
7.1	Fugenspaltenmessungen	57
7.2	Extensometer.....	58
7.3	Messprogramm für Staumauern	60
8	Baukontroll- und überwachungsmessungen an hohen Türmen	63
8.1	Baulagenetz und Absteckung von Schornsteinen und Türmen	63
8.2	Turmbewegungen.....	66
9	Absteckung und Überwachung von Brücken	72
9.1	Absteckung	72
9.2	Überwachung.....	74
10	Auswertung und Interpretation der Messungsergebnisse	75
10.1	Bewertung der Messungen und Deformationen.....	75
10.2	Interpretation	76
10.3	Teststatistik.....	78
10.4	Auswertung von Netzen.....	80

Literatur

MÖSER; MÜLLER; SCHLEMMER; WERNER (Hrsg., 2000): WELSCH; u.a. Handbuch Ingenieurgeodäsie, Band: Überwachungsmessungen. Wichmann Verlag Heidelberg.
 HENNECKE; MÜLLER; WERNER; (1989): Handbuch Ingenieurvermessung, Band: Hochbau- und Überwachungsmessung. Verlag für Bauwesen, Berlin.
 XI. Internat. Kurs für Ingenieurvermessung Zürich 1992, Band 1 und 2
 XI. Internat. Kurs für Ingenieurvermessung Graz 1996, Band 1 und 2
 XI. Internat. Kurs für Ingenieurvermessung München 2000, Band 1 und 2
 PELZER, H. (1976): Deformationsmessungen, Zeitschr. f. Verm.wesen, Sonderheft 19
 DVW-Schriftenreihe 29/1998: Hybride Vermessungssysteme, Wittwer Verlag Stuttgart
 DVW-Schriftenreihe 30/1998: Messtechniken und Auswertalgorithmen für die praktische Deformationsanalyse, Wittwer Verlag Stuttgart

Richtlinien

- DIN 1076 Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen, Überwachung und Prüfung (1983)
 Punkt 5 → Bauwerksüberwachung, Angaben über die laufende Beobachtung und Besichtigung sowie deren Zeiträume und Umfang
 Punkt 6 → Bauwerksprüfung, Angaben über verschiedene Arten von Prüfungen, deren Zeiträume und Umfang
- DIN 1319 Grundlagen der Messtechnik: Teil 1 Begriffsbestimmung (1995); Teil 2 Begriffe für die Anwendung von Messgeräten (1996); Teil 3 Auswertung von Messungen einer einzelnen Messgröße, Messunsicherheit (1996); Teil 4 Behandlung von Unsicherheiten bei der Auswertung von Messungen (1999)
- DIN 4107 Setzungsbeobachtungen an entstehenden und fertigen Bauwerken (1978); allgemeine Informationen über Aufgaben der Messung, Auswahl der Messpunkte, Durchführung, Messgenauigkeiten, Messgeräte und –verfahren, Auswertung
- DIN 4020 Geotechnische Untersuchungen für bautechnische Zwecke
 Allgemeine Anforderungen, Veranlassung, Ablauf, Art und Umfang, Verfahren
- DIN 18709-2 Begriffe, Kurzzeichen und Formelzeichen im Vermessungswesen (1986)
 Teil 2 → Ingenieurvermessung; Punkt 6: Überwachungsmessung
- DIN 18710-1 Teil 1 bis 4: Ingenieurvermessung
 DIN 19700 Stauanlagen (1986): Mess- und Kontrolleinrichtungen zur Überprüfung der Standsicherheit“
 Teil 10 → Stauanlagen, gemeinsame Festlegungen; Punkt 9: Bauausführung und Bauüberwachung; Punkt 11: Bauwerksüberwachung und –unterhaltung
 Teil 11 → Talsperren; Punkt 6: Standsicherheit und Gebrauchsfähigkeit von Staumauern, Punkt 8: Bauwerksüberwachung
 Teil 13 → Staustufen; Punkt 7: Mess- und Überwachungseinrichtungen
- DIN 1054 Baugrund "Zulässige Belastung des Baugrunds"
- DIN/ISO 9000 Qualitätsmanagement
- DWVK - Merkblätter zur Wasserwirtschaft

1 Zielstellung

Warum Behandlung der Bauwerksüberwachungsmessungen im Wesentlichen am Beispiel der Talsperrenmesstechnik?

- ⇒ Verfahren sind nicht an Bauwerke gebunden, können praktisch an allen Objekten zum Einsatz kommen
- ⇒ An keinem anderen Industrieobjekt ist eine komplexe Anwendung verschiedener Messgeräte und Beobachtungsverfahren sinnvoll und üblich
- ⇒ Moderne Entwicklungstendenzen der Automatisierung können umfassend erprobt und eingesetzt werden
- ⇒ Ursachen und Wirkungen von Verformungen und Deformationen lassen sich besonders anschaulich demonstrieren

Heute gibt es ca. 15 000 Staubauwerke in der Welt mit $H > 10$ m und 100 000 m³ Stauraum. Bis heute aber auch über 600 Katastrophen.

DIN 19700

Zur Beurteilung der Stand- und Betriebssicherheit einer Stauanlage ist ein Mess- und Überwachungssystem notwendig. Das Messsystem ist so zu konzipieren, dass mit den Messungen und Beobachtungen in **jedem Bau-, Stau- und Betriebszustand** zuverlässig

- Sickerwasserdruck bzw. Sickerwasserverluste
- Bewegungen, Spannungen und Verformungen des Bauwerks
- Sohlen- und Porenwasserdruck

erfasst werden können. In die Überwachung sind auch der Stauraum und der Unterwasserbereich einzubeziehen.

Erste Überwachungsmessungen wurden in den Jahren 1920...30 in der Schweiz, Österreich, Deutschland, USA durchgeführt; ab 1960 schnelle Entwicklung:

- 1) Verbesserung und Weiterentwicklung bestehender Messgeräte und -verfahren
bzw. Neuentwicklung von Messgeräten und -verfahren
- 2) Moderne wissenschaftliche Auswerte- und Interpretationsmethoden



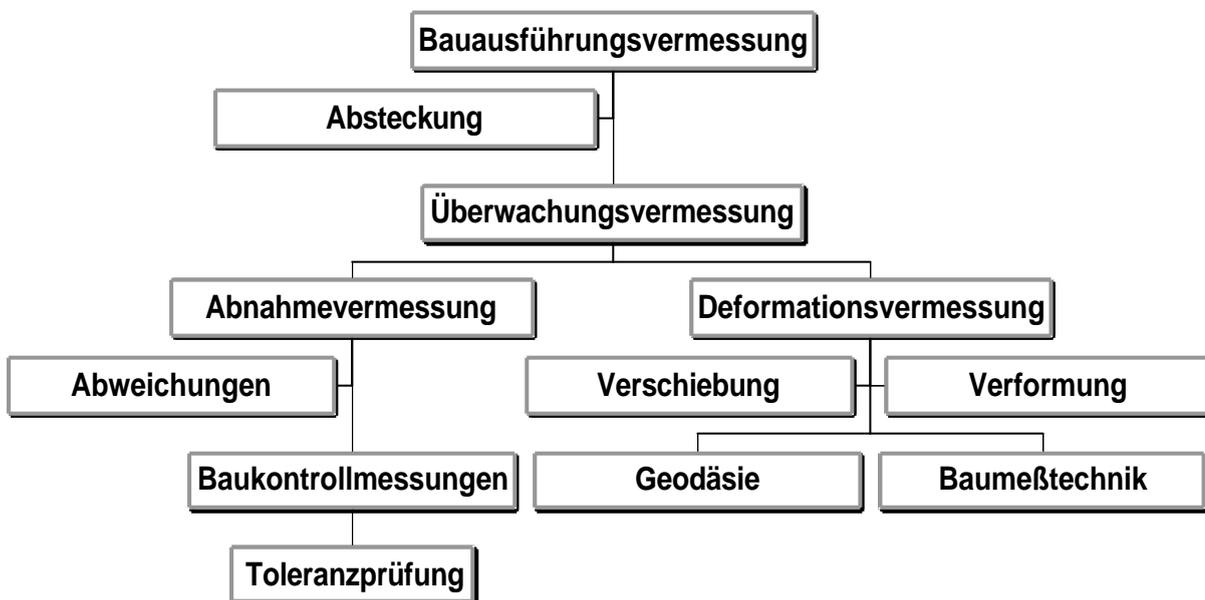
Monitoring und Deformationsanalyse

(Weitere Ausführungen zum Monitoring und zur Deformationsanalyse: Vertiefung/8. Semester)

2 Überwachungsmessungen

- Verantwortung für die "öffentliche Sicherheit" (Schäden)
- Aussage zur Funktions- und Standsicherheit
- Nachweis qualitativer und quantitativer Veränderungen
- Nachweis der Richtigkeit projektierter Kennwerte (theoretischer, statischer Vorausberechnungen)
- rechtzeitigen Erkennen gefahrenanzeigender Verformungen und räumlicher Lageänderungen von Bauwerk, Gründungsbereich und Umgebung

2.1 Definitionen



Baukontrollmessungen

Die **Baukontrollmessung** ist die unabhängige auftraggeberseitige Kontrolle der Bauausführung während und nach Abschluss der Bauarbeiten. Vergleich des Istzustands mit dem projektierten Sollzustand. Der Nachweis der Übereinstimmung zwischen der projektierten Geometrie eines Bauwerks und der Ausführung wird als **Abnahmevermessung** bezeichnet.

- Standsicherheitsnachweise
- Objektive Qualitäts- und Leistungsnachweise
- während der Bauausführung: DIN 4107
- als Nullmessung nach DIN 1076
- Belastungsmessungen für den Nutzlastnachweis
- Kontrolle vereinbarter Toleranzen
- Bestätigung vorgegebener Bauwerksachsen

- Bauabnahme, Bestandspläne, Mengenermittlung

Bauwerksüberwachungsmessungen

Vermessung zur Feststellung von Bewegungen und Verformungen eines Objektes

- Technische Sicherungsmessungen am Bauwerk zum Nachweis auf Veränderungen (Verformungen)
- zivilrechtliche Belange im Schadenfall § 485 Zivilprozessordnung: Ursachenklärung, Sachschaden, Abwehr von Ansprüchen
- Vorsorgemaßnahmen im gerichtlichen Beweisverfahren

?

Geodätische Beweissicherungsmessungen

- Vertikal- und Horizontalveränderungen sowie absolute/relative Veränderungen
- Ausführung: behördliche Vermessungsstellen (Vermessungsgesetz) unter Mitwirkung der ÖbVI

Welche Objekte sind Gegenstand einer messtechnischen Überwachung?

Wenn sie

- statisch und konstruktiv beim Erreichen von Grenzwerten (Hookesches Gesetz: Elastizitätsgrenze; Erhöhung der Belastung - Bruchgrenze) der Verformungen und Deformationen die Sicherheit gefährden und damit nähere und weitere Umwelt bedrohen (Stauanlagen, Brücken, Turmbauwerke, Rutschhänge);
- auf geologisch und baugrundtechnisch ungünstigem Untergrund oder in Bergbau-senkungsgebieten errichtet werden;
- in ihrer Funktionssicherheit durch Deformationen beeinträchtigt werden (Funk- und Fernsehtürme, Maschinen- und Anlagenbau, Teilchenbeschleuniger)

Aufgabe des Vermessungsingenieurs

Wo, in welchen Bereichen von Bauwerk oder Baugrund müssen Messpunkte angebracht werden ?

Wie, mit welcher erforderlichen Genauigkeit und mit welchen Geräten und Messverfahren am zweckmäßigsten die Deformationen erfasst werden können.

Wann sind die Messungen vorzusehen - Messungstermine

Ziel ist es mit geeigneten Tests der mathematischen Statistik zu prüfen,

- ob die erhaltenen Deformationsgrößen
- mit einer vorgegebenen Wahrscheinlichkeit
- tatsächliche Deformationen oder
- Unzulänglichkeiten der Messungen (Geräte, Verfahren, Beobachter) und Vermarkungen sind.

Hieran schließt sich die **Interpretation** des Bauingenieurs, Baugrundspezialisten oder Maschinenbauingenieurs, die an der Klärung der Wechselbeziehung **Ursache - Wir-**

kung interessiert sind.

2.2 Ursache für Deformationen

Deformation: Elastische oder/und plastische Verformung des Bauwerkes oder eines Teiles sowie des Gründungsbereiches und der näheren Umgebung des Bauwerkes; geometrische Veränderungen sind Starrkörperbewegungen und Verformungen

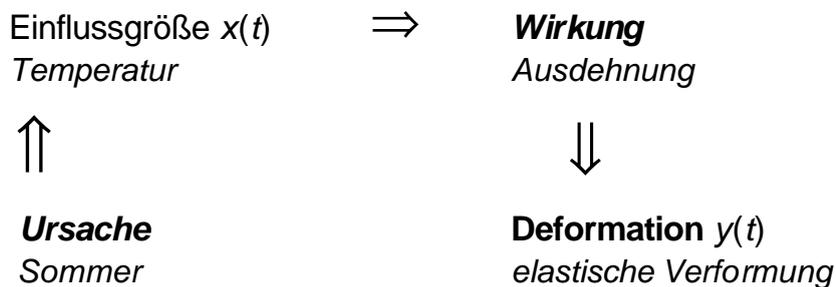
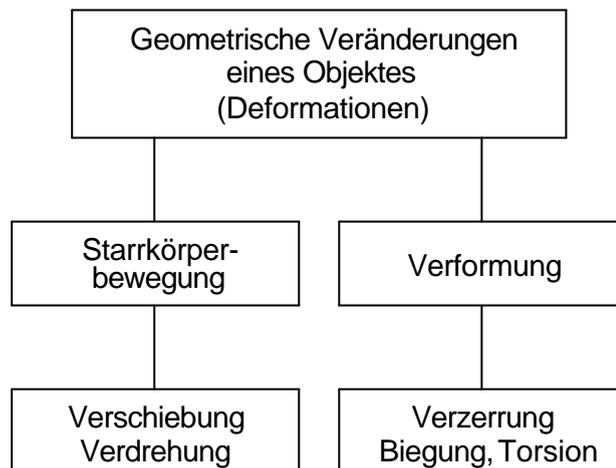


Abb. Kausalkette Ursache/Wirkung

- **plastische oder irreversible** (Setzungen) und
- **elastische oder reversible** (Schwingungen, Ellipse) Deformationen
- Überschreiten von "Grenzwerten - kritischen Werten"

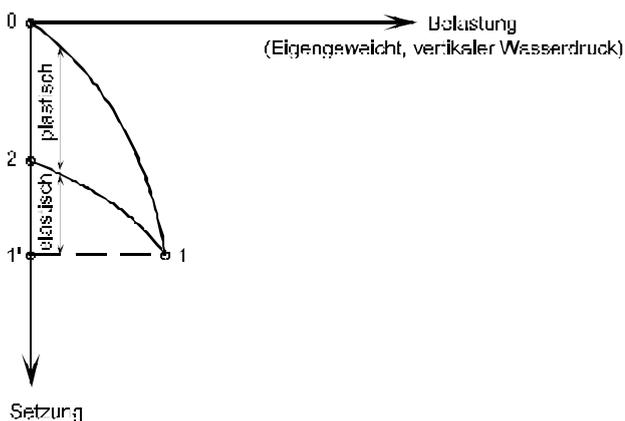


Abb. Elastisch-plastisches Setzungsverhalten einer Stauwand

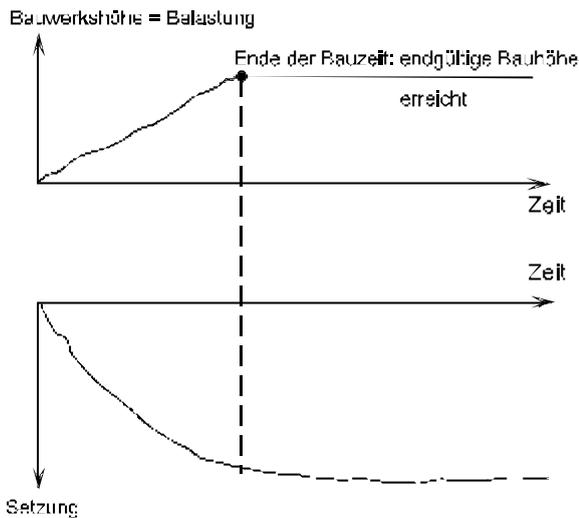


Abb. Langperiodische und langzeitliche Bauwerksdeformationen

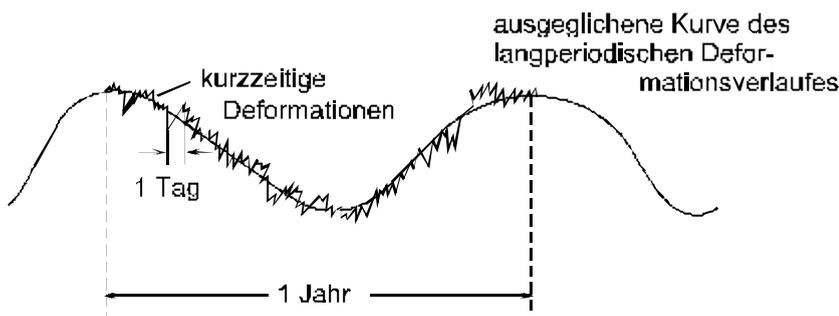


Abb. Überlagerung langperiodischer Deformationen durch kurzzeitige

Ursachen

- (1) Tektonisch und seismisch bedingte Prozesse
- (2) Der Baugrund wird durch **Lasten** und **Verkehrslasten** beansprucht:
Eigenlast des Bauwerks, Erddruck, Erdlasten, Wasserdruck
- (3) Vorgänge im Bauwerkskörper, die zu Eigendehformationen führen
 - (a) äußere Kräfte am Bauwerk
 - (b) innere Kräfte am Bauwerk
 - (c) Kräfte im Gründungsbereich des Bauwerks

Äußere Kräfte am Bauwerk

- Eigengewicht (einschl. größerer Nutzlasten)
- Wasserdruck (horizontale und vertikale Komponente)
- Sohlenwasserdruck bei Stauanlagen und anderen Wasseranlagen
- Wind (Turmbauwerke)

Innere Kräfte am Bauwerk

- Temperaturdifferenzen im Bauwerk (oder am Objekt)
- Spannungen durch Abbindeprozess des Beton (Kriechen; Schwinden)
- Eigenverformungen verursachende Temperaturspannungen sind oft stärker wirksam, z.B. bei Stau Mauern als die äußere Kraft "Wasserdruck".

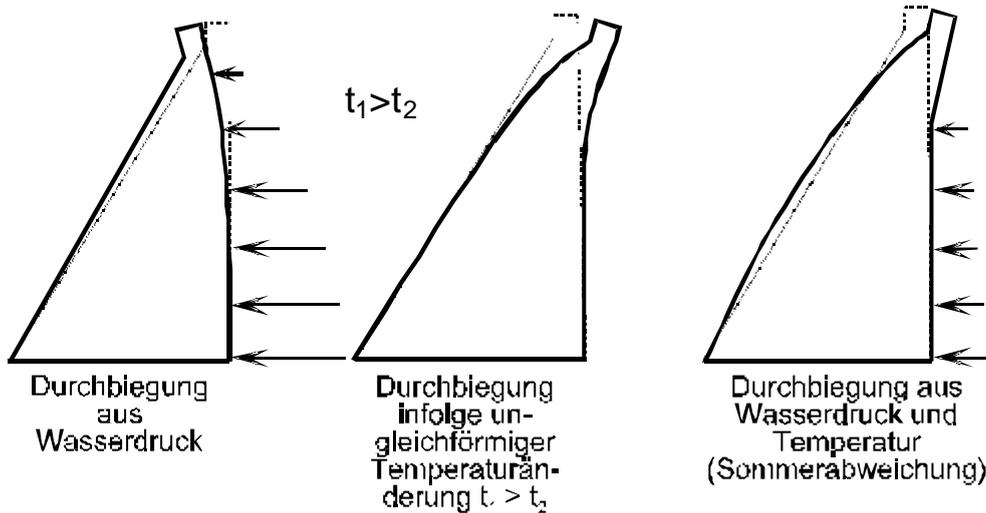


Abb. Eigenverformungen einer Stau mauer

Windverhältnisse: Eigenschaften der Turmschwingungen

Infolge der KARMAN'schen Wirbelbildung lösen sich hinter dem Turm wechselseitig Wirbel ab, die abwechselnd von der einen bzw. der anderen Seite **quer zur Windrichtung** einen 7mal stärkeren Druck als die Windrichtung ausüben: vgl. Querschwingungen (Brückenpfeiler: Wasserwirbel).

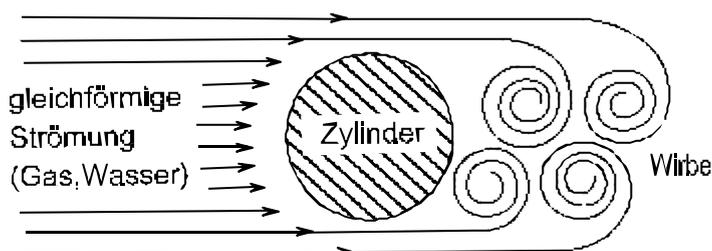


Abb. Karman'sche Wirbelbildung

Temperaturbedingte Deformationen

- Turmbauwerke und Stau mauern (Beton und Sonne)

Für die Klärung der Beziehung **Ursache - Wirkung** ist die Kenntnis der Luft- und Bauwerkstemperaturen erforderlich; z.B.: Stauanlagen: Lufttemperatur - täglich messen; Beton- und Wassertemperatur - wöchentlich bis monatlich messen

Zeitabhängigkeit der Deformationen

Zeit-Verformungs-Abläufe:

- langperiodische und langzeitige (Wochen)
- kurzperiodische und kurzzeitige (1 Tag)

Beispiele:

- langperiodische Bewegungen: Pendeln der Staumauerkrone
- langzeitige Deformationen: Bauwerkssetzungen (Hyperbelfunktion), Pfeilerwanderungen
- kurzzeitige Deformationen:
 - hohe Türme (Ellipse), Wind bei Türmen
 - Tagesbewegungen der Staumauerkrone (< 4mm)
 - Pumpspeicherwerk: Stauregime
- Überlagerung der langperiodischen und kurzzeitigen Deformationen durch kurzzeitige Bewegungen.
- Bei zeitlich auseinanderliegenden Beobachtungsterminen (Wochen, Monate) können diese kurzzeitigen Einwirkungen unentdeckt bleiben und die Interpretation der Messungsergebnisse verfälschen.
- Verformungsgeschwindigkeit:
 - Staumauern (Kronenbereich): 0,05 mm ... 0,3 mm /h
 - Türme (FST): 2...4 cm /h

Baugrundverhalten: DIN 1054 "Zulässige Belastung des Baugrunds"

Für die Ingenieurgeodäsie leitet sich die Forderung ab,

„die Wirkungen der Reaktionskräfte im Baugrund auf diesen selbst sowie auf die oberirdischen Bauwerke durch zuverlässige Messungen nach ihrer Größe, Richtung und Tendenz zu erfassen.“ ? vor allem lotrechte Verschiebungen

- Setzungen bei nichtbindige und bindige Böden
- Grundbruch
- Kippen
- Gleiten
- ? Setzungsbeobachtungen

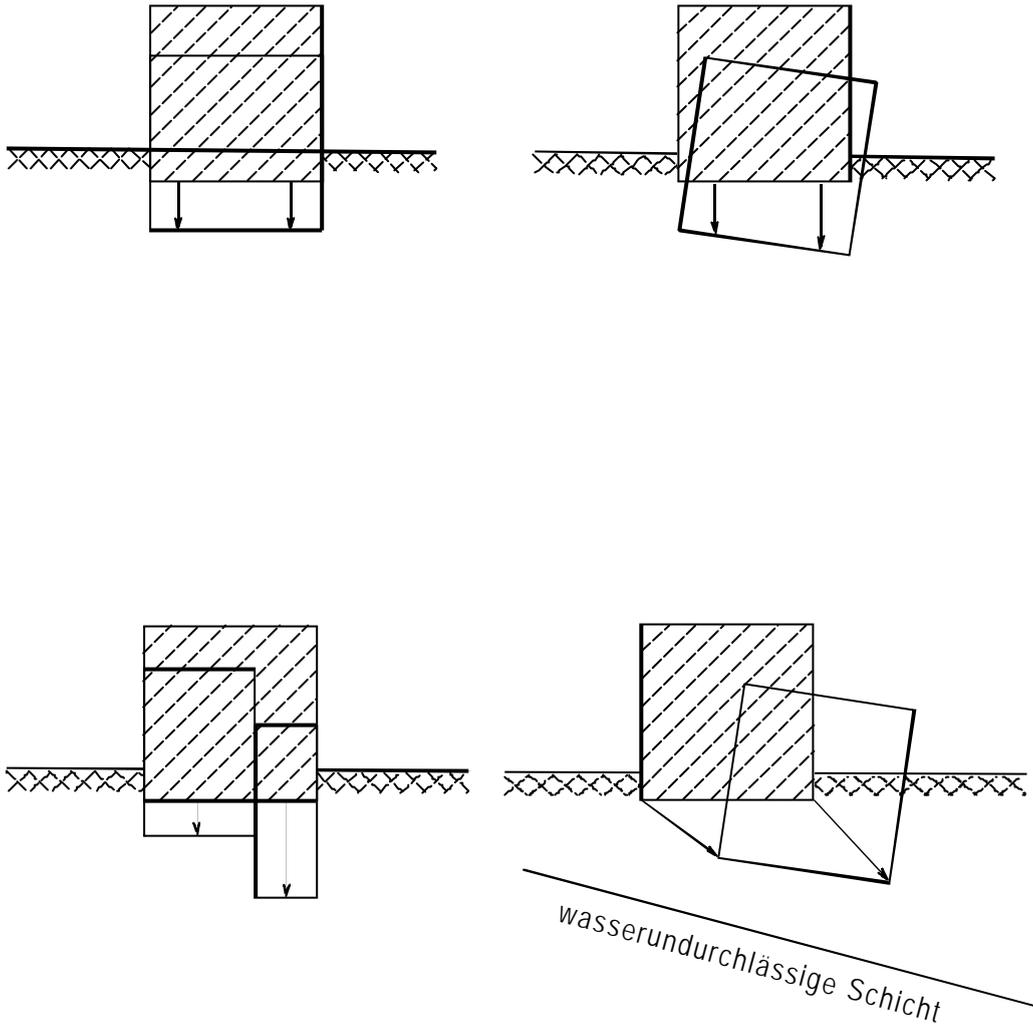


Abb. Belastung des Baugrunds durch Eigengewicht

2.3 Bezugssystem

Das Messungsobjekt muss man sich als räumliche Punkteschar mit einer nach unendlich gehenden Punkanzahl vorstellen. Für Praxisbedingungen ist dieses Modell zu vereinfachen und durch eine vertretbare (wirtschaftlich, wissenschaftlich) **Anzahl** von Punkten zu ersetzen → **Objektpunkten**.

- **Nullmessung** t_0 (zumeist Koordinaten) → Objektpunkte
- **Erfassung** der infolge zahlreicher Einflüsse verursachten:
 - Eigenverformungen des Objektes
 - räumliche Lageänderungen
- **Folgemessungen** t_i (**Messepoche**) mit Deformationen ?

$\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta l, \Delta \alpha$

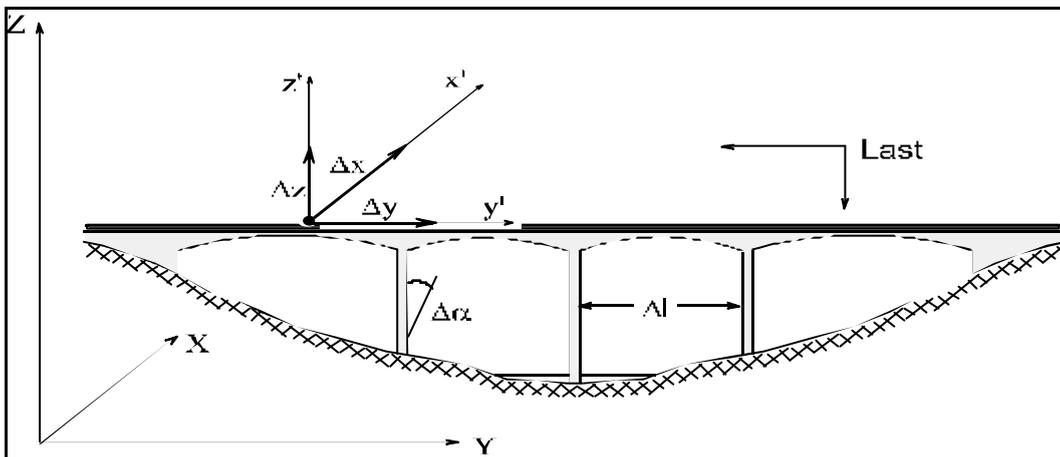


Abb. Deformationsgrößen

Alle Messungen gehen von **Bezugs- oder Festpunkten** aus, die am Objekt selbst oder außerhalb seines Einflussbereiches (physikalische Wirkungen) liegen.

Im ersten Fall haben die abgeleiteten Deformationen **relativen**, im zweiten Fall **absoluten** Charakter. Die Bestimmung räumlicher Deformationen erfolgt meist getrennt durch Lage- und Höhenmessungen.

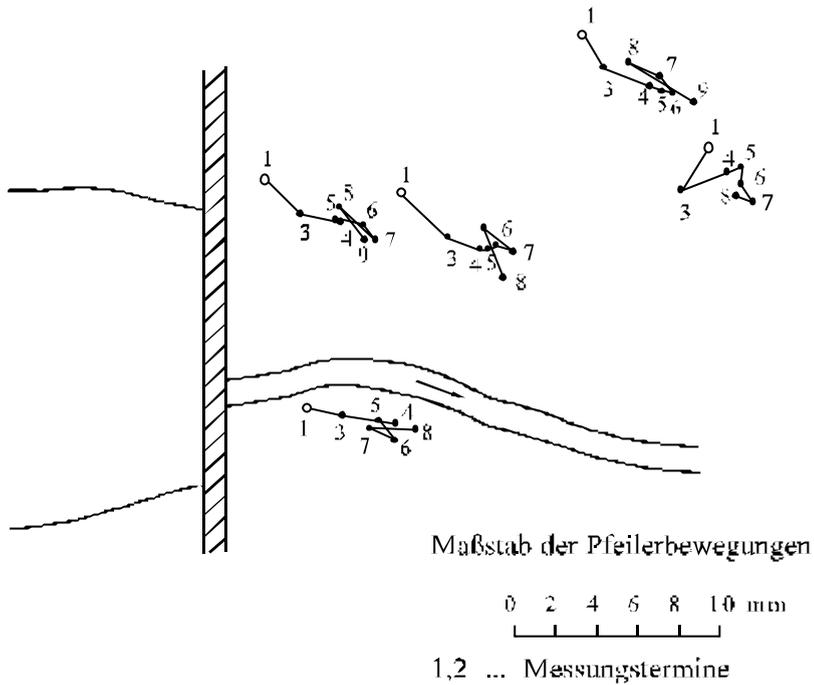


Abb. Pfeilerbewegungen

Absolute Bauwerksüberwachungsmessungen

Relative Bauwerksüberwachungsmessungen

Relativ	Anschluss an Absolut
Hydostatisches Nivellement	Präzisionsnivellement
Lokales Netz (2D)	GPS/WGS 84/GK-Koord.

- Relative Verfahren geringere Ausdehnung als absolute Verfahren
- kürzere Messungsdauer und höhere Genauigkeit
- zum Teil einfache instrumentelle Ausrüstungen und schnelle Primärauswertung
- Voraussetzungen für Automatisierung

Formbestimmungsmessungen

2.4 Anforderungen an die Planung und Messung

- Projektierung der Überwachungsmessungen - Messkonzept
- Vermarkung der Festpunkte und Objektpunkte
- Messungen in den festgelegten Epochen
- Auswertung (Reduktionen und Korrekturen) und Interpretation der Ergebnisse

Grundlage der Planung von Überwachungsmessungen ist ein Deformationsmodell, das qualitative Aussagen über die mutmaßlichen Bewegungs- und Verformungsvorgänge in ihrem zeitlichen und örtlichen Verlauf beinhaltet. Aus dem Deformationsmodell sollten sich die Anforderungen an die Überwachungsvermessung und die Messergebnisse ableiten lassen.

Für die Planung - **vermessungstechnisches Projekt** - sind folgende Angaben notwendig:

- Aufgabe und Zielstellung der Überwachungsvermessung;
- Ausdehnung des durch Deformationen mutmaßlich beeinflussten Bereichs; Betrachtung von Bauwerk und Gründung als Einheit - Gründungsverhältnisse
- voraussichtlicher zeitlicher Ablauf der Bewegung und Verformung;
- Betrag und Richtung zu erwartender Deformationen;
- mögliche Ursachen der Deformationen;
- Randbedingungen: Zugänglichkeit des Objektes, durch das Objekt bedingte Vibrationen oder Wärmeabstrahlungen usw.;
- Aufwand der Überwachungsvermessung, Koordination mit anderen Arbeiten

(1) Messprogramm

- Anzahl, räumliche Verteilung und Vermarkung der Objektpunkte
 - Messgenauigkeit, Messtechnik, Messinstrumente (Kalibrierung und Justierung)
 - Messzeitpunkte und Wiederholungsraten = Epoche
 - Beobachtungsplan und Messgrößen;
 - Festlegungen für die Auswertung, Darstellung und Dokumentation der Ergebnisse.
- Beobachtungen zu **Beginn** des Baugeschehens ? Verhalten von Bauwerk und Gründung vor den einsetzenden Belastungen
 - **Anfangsbelastung** und ein bis zwei Jahre ? Geschwindigkeit irreversibler Deformationen am größten, kürzere Messungstermine, Belastungsstufen; Bei periodisch verlaufenden reversiblen Deformationen sind die Extremzustände messtechnisch zu dokumentieren (Kronenbewegungen).
 - **Beachte:** Aufstellung der Messprogramme mit Vertretern der Anwenderbereiche (Bauwesen, Ingenieurgeologie, Baugrundmechanik, Maschinenbau)

(2) Messpunkte

- Anordnung und Konzentration der Messpunkte an den "neuralgischen", den "schwächsten Stellen"; das sind
 - Bereiche großer statischer, konstruktiver und funktioneller Belastungen, die gefährliche oder bauwerkstypische erwartete Maximaldeformationen auslösen
 - Im Gründungsbereich: Gefügestörungen, Schwächezonen, Gesteinswechsel und andere die Gesteinsqualität mindernde Eigenschaften

- eindeutige Definition des Messpunktes (über Jahrzehnte)
- korrosionsbeständiges Material (Alignment-Setzkegel, Schlauchwaagenbolzen)
- Abdeckung (Schutzkappen) als Schutz gegen äußere Einflüsse

(3) Messtechnik

- geforderten Messgenauigkeit;
 - erwartete Bewegungs- und Verformungsgeschwindigkeit
 - zeitliche Auflösung des Bewegungs- und Verformungsverhaltens des Objektes;
 - dem Schutz gegenüber groben Fehlern und der notwendigen Eliminierung systematischer Messabweichungen (Zuverlässigkeit);
 - Besonderheiten: Zugänglichkeit, Erschütterungen, Feuchtigkeit Sicht
- Einheitliches Bezugssystem für Beobachtungen und Deformationen (Kapitel 3.1)

Beachte: Projektierung einer Messeinrichtung: Baukosten (HOAI) 3% der Bausumme

(4) Messgenauigkeit

Mit dem vertretbaren Messumfang einschließlich notwendiger Kontrollen ist eine gesicherte Aussage über die zu erwartenden Bewegungen und Verformungen des überwachten Objektes zu garantieren.

- a) Größe der **zu erwartenden Deformationen D** , die vom Statiker vorausberechnet werden (meist Maximal-Deformationen) und/oder kritische Werte
- b) verfahrensabhängigen Messgenauigkeiten
- c) Dimension des Objektes
- d) Vermeidung systematischer Fehler bzw. **Kalibrierung der Sensoren**

Das **Verhältnis der Messgenauigkeit** des Messverfahrens (Verfahrensfehler- bzw. Standardabweichung) zur Größe der **zu erwartenden Deformation** beeinflusst die Aussagekraft der Messungsergebnisse der erhaltenen Deformationen.

Um diese Aussage ohne eine Deformationsanalyse zu garantieren, ist im Regelfall ein Verhältnis erforderlich.

$$m_D : D \text{ bzw. } s_D : D = 1 : 5$$

(siehe Kapitel 6: Auswertung und Interpretation bzw. Vertiefung "Deformationsanalyse")

Beispiel: Das vermutete Setzverhalten eines Punktes von $D_x = 1$ mm in einem vorgegebenen Zeitraum soll durch eine Überwachungsvermessung signifikant nachgewiesen werden. Die Standardabweichung zur Bestimmung der Höhe beträgt s_x . Bei unkorrelierten Messergebnissen zu den Zeitpunkten t_0 und t_1 beträgt die Standardabweichung der Höhendifferenz

Vertrauensniveau

Quantil

Standardabweichung

Messgenauigkeit

2.5 Einteilung der Messverfahren

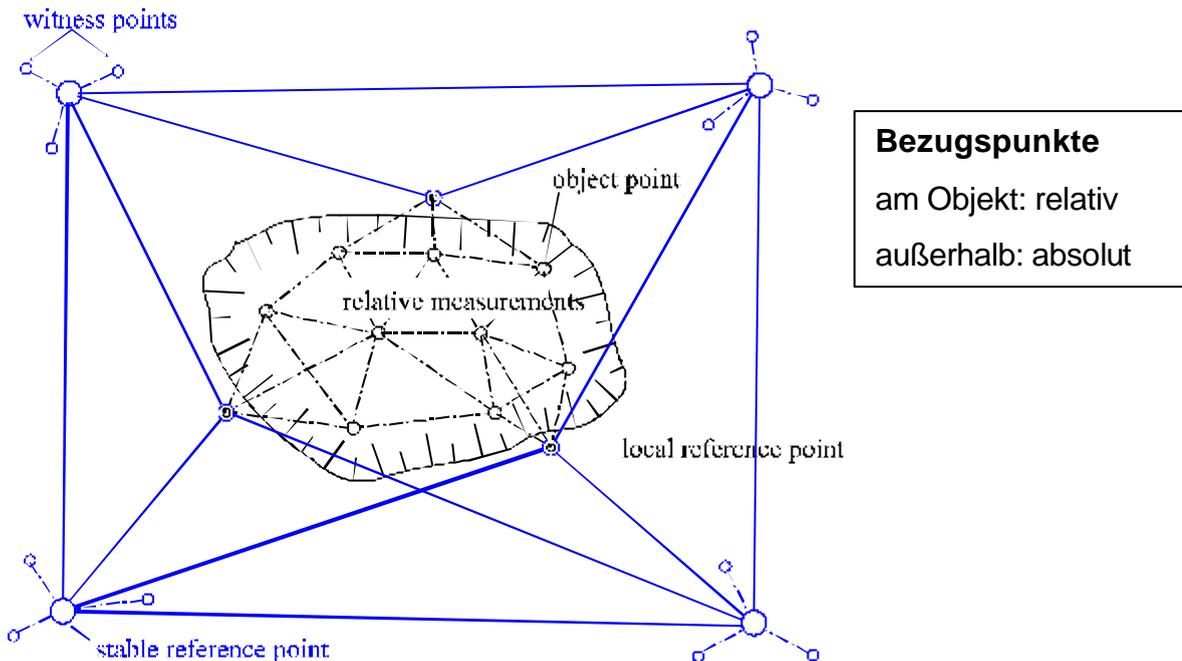


Abb. Deformationsnetz

⇒ Geodätische Verfahren zur Überwachung **horizontaler** Bauwerksbewegungen

- Netze; Präzisionsstreckenmessung
- Präzisionspolygonierung
- Projektionsmethode und Winkelmessung
- Neigungsmessungen und Lotung
- Längenänderungsmessungen: Fugenspaltmessungen, Extensometer
- Alinement

⇒ Geodätische Verfahren zur Überwachung **vertikaler** Bauwerksbewegungen

Präzisionsnivellement, Trigonometrische Höhenbestimmung, Hydrostatisches Nivellement

Geodätische Messverfahren	Messunsicherheit	Anwendungen
Elektrooptische Distanzmessung	fern bis 1km: 1mm + 1ppm nah bis 120 m: 0,5 mm	Aufmessung und Absteckung Präzisionsmessungen
Präzisionsnivellement	0,3 mm/1km Doppelnivellement	Automatisierte Digitalnivelliere
Hydrostatisches Nivellement	0,1 mm	Höhenunterschiede mit Schlauchwaage bis 10 cm
Neigungsmessung	0,01 mm/m bzw. 0,5 mgon	Nivel20 im Maschinenbau
Lotung	0,5 - 1 mm	Erfassung der Biegelinie bis 100 m Höhe
Extensometer	0,4 mm/80 m	Unzugängliche Punkte
Satellitenpositionierung (GPS)	2 mm	Differentielles GPS
Alinement	0,5 - 1 mm	Zielweiten auf Staumauerkronen bis 200 m
Industriemesssystem	0,2 mm	3D-Koordinaten im Nahbereich bis 30 m
Nahbereichsphotogrammetrie	0,5 mm/u.a. abhängig vom Bildmaßstab	Erfassung von Flächendeformationen

Tabelle: Sensoren für die Bauwerksüberwachung

3 Grundlagennetze für die Bauwerksüberwachung

3.1 Lokale Überwachungsnetze

Die Stützpunkte und Koordinaten realisieren das äußere räumliche Bezugssystem:

- ein Objektkoordinatensystem (x', y', z')
- ein übergeordnetes lokales oder
- das Landeskoordinatensystem

Eine Transformation zwischen den Systemen wird nur bei absoluten Überwachungs-messungen realisiert.

Grundlage für den absoluten Bezug ist ein zweistufiges Überwachungsnetz mit „festen“ **Stützpunkten** und den zu überwachenden **Objektpunkten** in einem lokalen Koordinatensystem, das als inneres Überwachungsnetz ausgewertet wird. Aus dem inneren Überwachungsnetz erfolgt häufig, bedingt durch GPS-Beobachtungen im WGS 84, eine Anbindung an das übergeordnete Lagefestpunktfeld mit Landeskoordinaten (ETRS 89).

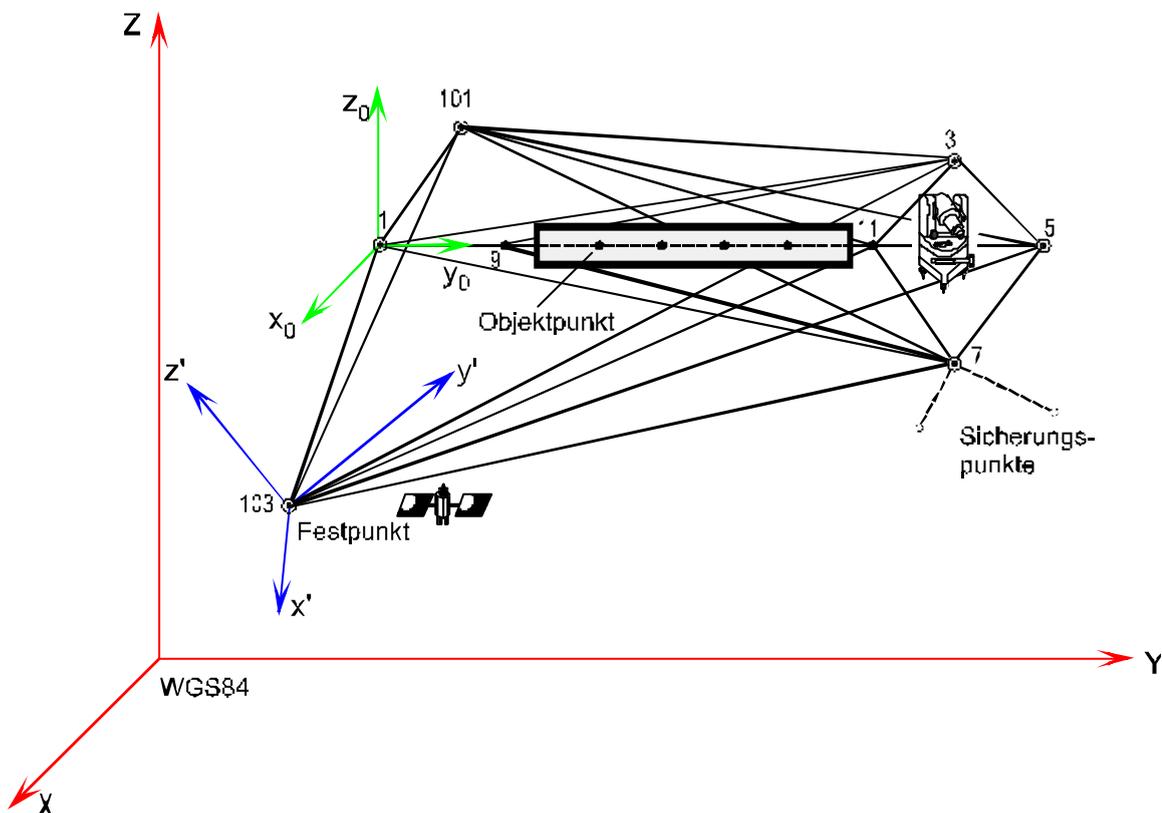


Abb. Referenzrahmen und Koordinatensysteme

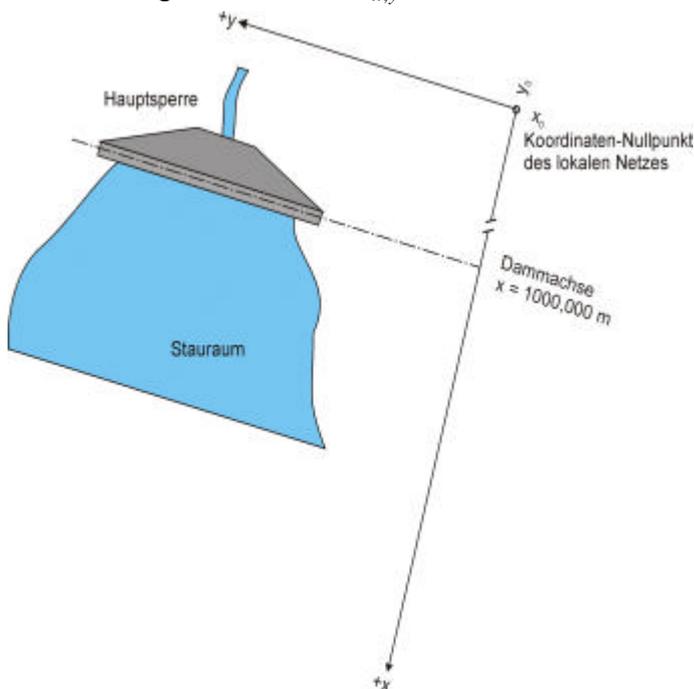
Stützpunkt

- statistisch nachgewiesener unveränderter Festpunkt außerhalb des Objektes und seines Einflussbereiches
- zur Lagerung einmaliger Anschluss an das übergeordnete Netz (Landesnetz)
- Überprüfung durch Messung zu Sicherungspunkten
- dauerhafte Vermarkung mittels Pfeiler

3.2 Grundlagennetz für Stauanlagen

Als Baulagenetz ist ein lokales Netz zu schaffen, dessen Koordinatennullpunkt und die Netzorientierung in Zusammenarbeit mit dem Bauherrn frei gewählt und festgelegt wird. Es wird empfohlen, unabhängig vom lokalen Koordinatennetz, die wichtigsten Festpunkte an das amtliche Lagenetz der Landesvermessung anzuschließen.

- Koordinatensystem und Staumauer: positive y-Achse Richtung der Mauerachse
- Bei gekrümmtem Grundriss verläuft die y-Achse parallel zur größten Bauwerkssehne und die positive x-Achse zeigt grundsätzlich zur Wasserseite
- Genauigkeit: $s_{x,y} \leq 1,2\text{mm}$ für $l < 200\text{m}$ $s_{x,y} \leq 10^{-6} \cdot l$ für $l > 200\text{m}$



Es ist zweckmäßig im Hinblick auf die Folgemessungen, die Hauptachse eines Absperrbauwerkes unter Beachtung der zukünftigen Baustelleneinrichtung außerhalb der zu erwartenden Baugrube und außerhalb des von der Talsperre beeinflussten Bereiches durch mindestens zwei thermisch isolierte Doppelrohr-Messpfeiler mit Zwangszentrier- vorrichtung zu vermarknen.

Netzkonfiguration

- Netzausdehnung: Bauwerksachse : Abstand/Sicherungspfeiler wie 1 : 2
- zu erwartende Lagestandardabweichungen

s_x, s_y Fest- und Bezugspunkte

s_{Dx}, s_{Dy} Messpunkte durch Vorausgleichung bestimmen

$$Q_{xx}, Q_{yy} \Rightarrow s_x, s_y, s_{\Delta x}, s_{\Delta y}$$

- Vergleich der s_D mit den vorausberechneten **Deformationen D**
- Wahl der Pfeilerstandpunkte so, dass

- a) sich fehlertheoretisch günstige Netzfigur ergibt,
- b) Gründung im Fels garantiert ist,
- c) Zielstrahlen in Bauwerks-, Boden- und Hangnähe vermieden werden

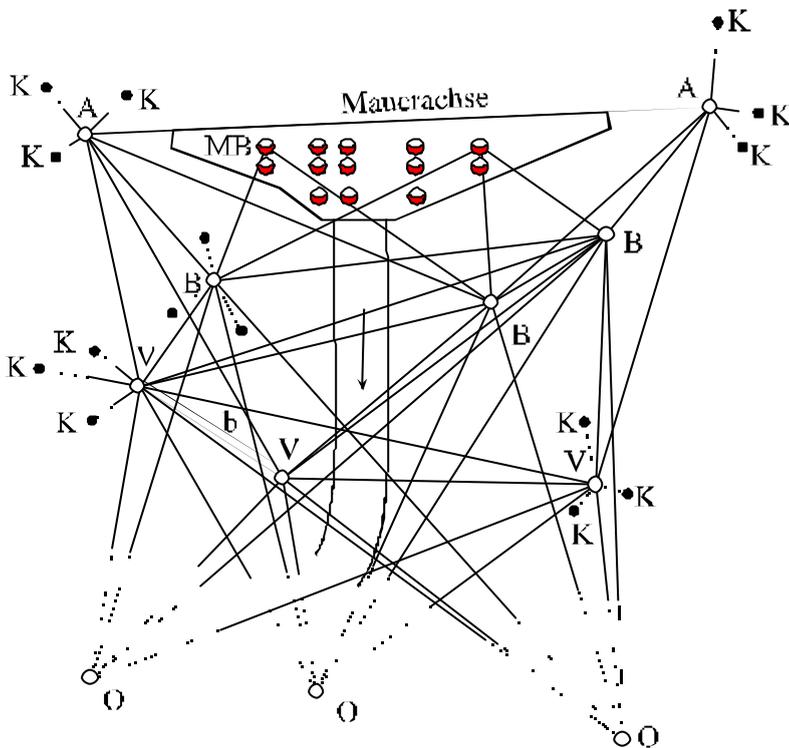


Abb. Vermarkung eines Überwachungsnetzes

Beachte:

Die Anzahl der Netzpunkte hängt von der Dimension des Objektes, von der Netzausdehnung und den geomorphologischen Verhältnissen ab.

(1) Mauerzielpunkte bzw. Messpunkte am Objekt (MB)

- bewegen sich mit der Mauer (Zielzeichen auf Gewindebolzen geschraubt)
- dauerhafte Vermarkung der Mauerzielbolzen (MB) auch mit **Reflektoren**
- von den Beobachtungspfeilern (BP) Vorwärtseinschnitte

$$Dx = x_F - x_0 \quad \text{und} \quad Dy = y_F - y_0$$

O: Nullmessung; **F:** Folgemessung; **D:** Deformation



Abb. Reflexfolie

(2) Beobachtungspfeiler (B)

- Anzahl der BP ist von Länge und Höhe des Bauwerkes abhängig
- jeder Messpunkt (MB) durch eine überschüssige Beobachtung (3 Richtungen) kontrollieren
- günstige Schnittwinkel (~ 100 gon), keine schleifenden Schnitte
- Entfernungen zu den Messpunkten $< 100 \dots 150$ m
- Doppelrohrpfeiler mit Zwangszentrierung (IG 1: "Vermarkung")



Abb. Beobachtungspfeiler und Zwangszentrierung

(3) Sicherungspfeiler (V)

- Die BP befinden sich zwangsläufig in Objektnähe und seinem Einflussbereich, damit sind sie Verschiebungen ausgesetzt
- Zur Ermittlung und evtl. Berücksichtigung von Pfeilerverschiebungen sind außerhalb der Druckzone mindestens 3 Sicherungspfeiler (stabile Lage) notwendig

(4) Kontrollpfeiler (K)

- zur Nahversicherung (der Sicherungspfeiler) 3 bis 4 Kontrollpunkte < 50 m (RE)
- Ermittlung lokaler Bewegungen
- Zielzeichen auf Pfeilern oder am Fels

(5) Orientierungspunkte (OP)

- Orientierung der Richtungssätze auf den BP und den Sicherungspunkten
- geringe Pfeilerverschiebungen ohne Orientierungsänderung \rightarrow OP müssen genügend weit entfernt sein; Empfehlung: 3 OP

Beispiel: Eine Pfeilerverschiebung von 0,5 mm soll ohne Orientierungsänderung bleiben. Dann erhält man überschlägig die entsprechende Mindestentfernung:

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum vv}{(n-1)(s-1)}} = \quad s_r = \frac{s}{\sqrt{n}} = \quad s_{\min} = \frac{0,5\text{mm} \cdot r}{s_r} =$$

Kombinierte Netzmessung

Richtungs- und Streckenmessung genauigkeitsmäßig gleichwertig (vgl. IG 1 - BLN)

- Richtungsmessung: $s_r = 0,2 \dots 0,3 \text{ mgon}$
- Stationsausgleichung oder Netzausgleichung $s_r = \sqrt{\frac{\sum v^2}{n-u}}$
- In s_r Einflüsse von Beobachter, Instrument, äußeren Bedingungen Refraktion, kurzzeitige Bewegungen der Ziel- und Standpunkte meist nicht enthalten
- beim Entwurf von RN steht s_r noch nicht zur Verfügung; als Näherungswert kann s_{r0} als Maß der äußeren Genauigkeit abgeschätzt werden

$$s_{r0} = \frac{q \cdot s_r}{\sqrt{n}} \quad \text{mit } q = 1,9$$

- Richtungsbeobachtungen meist in 4 Sätzen; ($n > 4$ wegen kurzzeitige Bewegungen am Objekt bzw. BP nicht sinnvoll)
- Berechnung des Horizontschlusses für die Anfangsrichtung jedes Beobachtungsstandpunktes; bei Abweichungen $> 0,5 \text{ mgon}$ Wiederholung

⇒ Automatisierte Tachymeter TCA mit „Lernprogramm“ für Richtungsmessung

- kurzzeitige, bei längeren Beobachtungszeiten auch langzeitige Einflüsse wirken auf das Bauwerk und die Standpunkte
- Die Ergebnisse repräsentieren somit nur ein **durchschnittliches Stadium** des Bauwerkes und nicht den Zustand zu einem bestimmten Zeitpunkt.

Präzisions-Streckennetze: Überwachung von Stauanlagen oder Rutschhängen: Bewegungskomponente des Objektes im Profil direkt messen

- **Präzisionsstreckenmessung** mit $s_s = 0,2 \text{ mm} + 0,2 \text{ ppm} \dots 1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ wird die Strecke ab ca. **200 m** zunehmend der Richtungsmessung gleichwertig
- Einfluss der Konstantenbestimmung und äußere Wirkungen (Additionskonstante, Maßstabsfaktor, temperaturbedingte Frequenzänderungen)
- innere Genauigkeit der EDM hat nur für eine bestimmte Standardatmosphäre Gültigkeit → Einfluss des Maßstabsfehlers; meteorologische Korrektur: Temperatur $0,1^\circ\text{C}$; Druck $0,3 \text{ hPa}$, Luftfeuchte $0,5\%$
- Bestimmung des **aktuellen Maßstabs**: simultane Messung der Frequenz während der Streckenmessung (transportable Frequenzmessausrüstungen)

Die Messbedingungen können für $0,2 \text{ ppm}$ als günstig bezeichnet werden:

- Zielstrahl in mind. $1,50 \text{ m}$ Höhe verläuft und nicht über durch Sonneneinstrahlung aufgeheiztem Gelände verläuft
- Distanzen $< 1 \text{ km}$
- die Temperaturdifferenzen zwischen Stand- und Zielpunkt der Normalatmosphäre entsprechen
- Wind, Regen, Schnee haben keinen Einfluss auf den Maßstabsfaktor

GPS - Überwachungsnetze

- keine direkten Sichtverbindungen
- stabile Punkte außerhalb der Deformationszone in das Kontrollnetz einbeziehen; Erweiterung des Netzes durch GPS – Punkte, so dass das eigentliche Deformationsnetz umschlossen wird und darin gelagert werden kann.
- Horizontfreiheit beachten, Mehrwegeausbreitung vermeiden

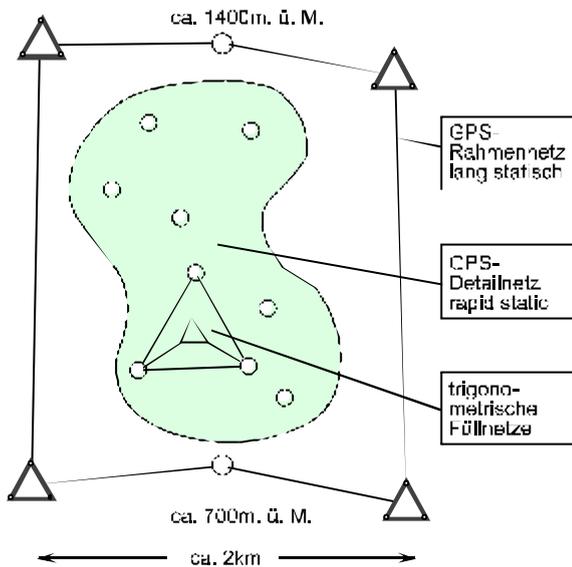


Abb. GPS-Netz

Der Bezug zu den existierenden Punkten kann mit GPS oder mit terrestrischen Messmethoden hergestellt werden. Dabei sollen sich die beiden Teilnetze gegenseitig stützen und kontrollieren. Beide Messverfahren besitzen ein unterschiedliches geodätisches Datum

- GPS mit WGS84: Erdellipsoid
- Terrestrische Punkte Landes- oder Lokalkoordinaten Bezugellipsoid und Geoid ?
Ausgleichung
- Bestimmung der Objektgeometrie durch Richtungs- und Distanzmessungen sowie Präzisionsniv. im Submillimeterbereich und hohe relative Lagegenauigkeit
- GPS-Punkte $s_{x,y} = 2$ bis 3 mm und $s_z = 3$ bis 5 mm (vgl. terrestrischen Messungen $s_P = 0,5$ mm).
- Die Anbindung des zentralen Netzbereiches an Stabilbereiche bietet eine echte Rückversicherung (Absolutbewegungen)

Auswertung und Epochenvergleich

Wegen der sehr langsam ablaufenden Deformationen und langen Beobachtungszeitraumes können die Messergebnisse verfälscht werden. Der Epochenvergleich erfolgt in einem einheitlichen Koordinatensystem (Landes-/ lokale Koordinaten).

- Transformation der GPS-Punkte in dieses Zielsystem mit mindestens drei in beiden Systemen koordinatenmäßig bekannten Netzpunkten. Diese identischen Punkte sollten gleichmäßig um das Untersuchungsobjekt verteilt sein.
- HELMERT-Transformation (7 Transformationsparameter: 3 Rotationen, 3 Translationen und Maßstabsfaktor), um die GPS-Koordinaten der übrigen Netzpunkte in das Zielsystem umzurechnen

3.3 Netzauswertung und Netzausgleichung

Berechnung der Koordinaten der Neupunkte bezüglich der als fehlerfrei angenommenen Festpunkte, d.h. die Koordinaten der Festpunkte sollen aus praktischen Gründen unverändert bleiben.

- **Angeschlossenes Netz:** Die Koordinaten eines Punktes und einer Richtung vorgeben, d.h. als **fehlerfrei vorgegeben**. Das führt zu unterschiedlichen Standardabweichungen der ausgeglichenen Punkte. Bezugspunkt ist der gegebene Netzpunkt. Die Genauigkeit der anderen Netzpunkte ist von der Entfernung zum Bezugspunkt abhängig.



- **Freie Lagenetze:** schließen an keinen vorgegebenen Festpunkt an; alle Netzpunkte werden als Neupunkte behandelt und man erhält eindeutige und minimale Größen der Standardabweichungen

⇒ Überwachungsnetze sind (nahezu) ausnahmslos **lokale Netze**

$$s_x = s_0 \sqrt{Q_{xx}} ; s_y = s_0 \sqrt{Q_{yy}} \qquad s_{D_x} = s_0 \sqrt{2Q_{xx}} ; s_{D_y} = s_0 \sqrt{2Q_{yy}}$$

Sind die aus der Ausgleichung erhaltenen D real oder nicht ?

Dazu müssen mindestens 2 stabile Standpunkte mit ausreichender statistischer Sicherheit gefunden werden, um über Veränderungen von Stand- und Zielpunkten eine gesicherte Aussage geben zu können.

Netzausgleichung, Analyse und Interpretation der Ausgleichungsergebnisse

1) Eingabe der Koordinaten und aufbereiteten Messwerte

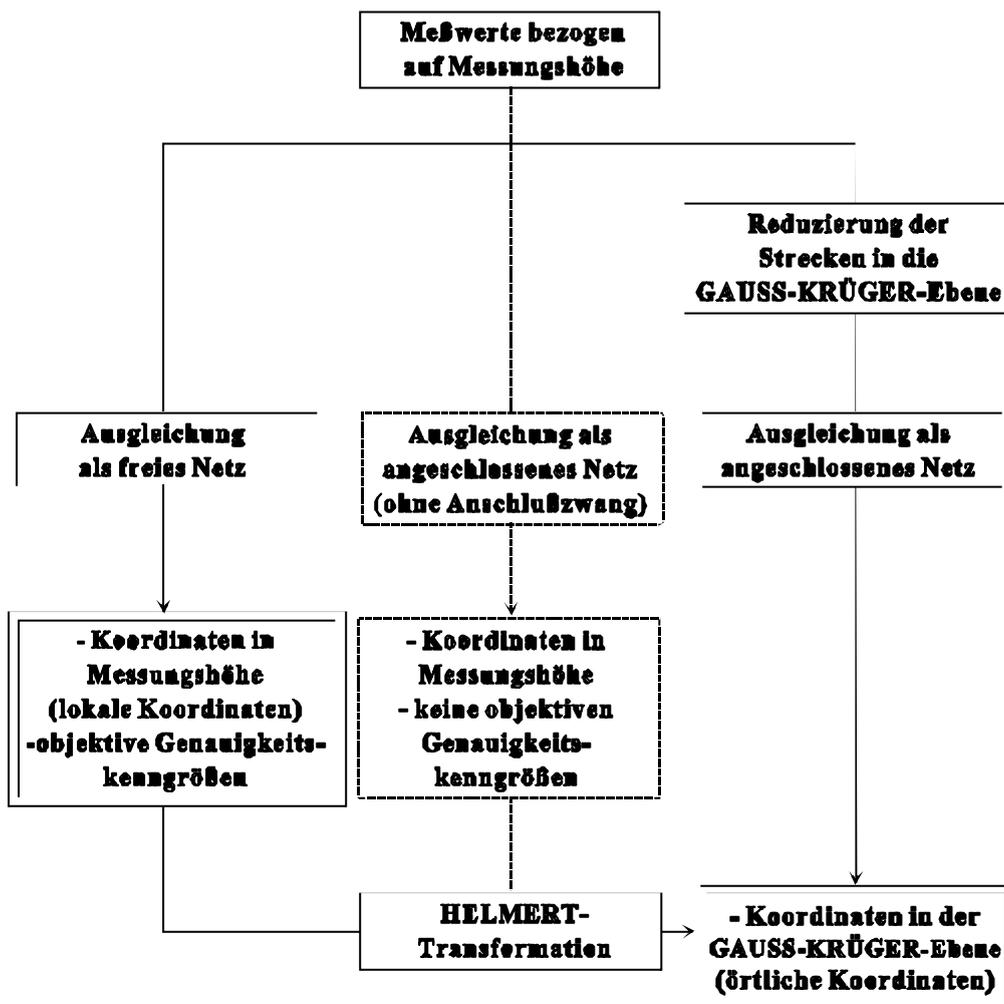
- die Koordinaten der Anschlusspunkte
- die Näherungskordinaten der Neupunkte und
- die aufbereiteten Messwerte.

2) Auswertung

- Plausibilitätsprüfung der Messwerte (Richtigkeit, Widerspruchsfreiheit, Vollständigkeit)
- Doppel- und Mehrfachmessungen mitteln; Winkelmessung: Satzmittel
- Reduktion der gemessenen Schrägstrecken auf die Horizontale in Messungshöhe
- Berücksichtigung der Streckenreduktion infolge des Abstandes Mittelmeridian sowie der Messungshöhen
- Lokalisierung bzw. Eliminierung großer grober Fehler (fehlerhafte Pkt.-Nr.).

Diese Messwertaufbereitung wird gemeinsam mit der Berechnung der Näherungskoordinaten unmittelbar vor der eigentlichen Netzausgleichung durchgeführt.

Beispiel: Datenaufbereitung für Netzausgleichungen mit Leica-Instrumenten und PANDA



3) Festlegen der Steuerparameter

- globale Gewichte für die Richtungs- und Streckenmessung (a-priori)
- Art der Netzausgleichung.

Zur Festlegung der **a-priori-Standardabweichungen** gibt es folgende Möglichkeiten:

- Verwendung der vom Gerätehersteller genannten Messgenauigkeiten
- Berechnung der empirischen Standardabweichungen für die Richtungs- und Streckenmessung auf der Grundlage des vorliegenden Beobachtungsmaterials
- Erfahrungswerte aus zurückliegenden Netzmessungen

4) Festlegung der Gewichtsrelation zwischen Richtungs- und Streckenmessung

Die Gewichte der Beobachtungen (Richtungen bzw. Strecken) ergeben sich zu

$$p_i = \frac{\mathbf{s}_0^2}{\mathbf{s}_i^2}$$

Für die a-priori-Standardabweichung der Richtungen wurde empirisch

$$\mathbf{s}_{r0} = 1,9 \cdot \mathbf{s}_r$$

erhalten, bei der neben der Genauigkeit der Richtungsmessung zusätzlich systematisch wirkende Restfehler (Zentrierfehler, Refraktion) berücksichtigt werden.

Für verschiedenartige Messwerte gilt:

$$p_{r_i} = \frac{\mathbf{s}_0^2}{\mathbf{s}_{r_i}^2} \quad \text{bzw.} \quad p_{s_i} = \frac{\mathbf{s}_0^2}{\mathbf{s}_{s_i}^2}$$

- Die Verwendung der Herstellerangaben berücksichtigt meist nicht die tatsächlichen Messbedingungen und führt deshalb in der Regel zu einem optimistischen Gewichtsansatz.
- Berücksichtigung der eigenen praktischen Erfahrungen aus zurückliegenden, vergleichbaren Messungen sowie die Beachtung der konkreten Messbedingungen.

5) Netzausgleichung

	angeschlossenes Netz	freies Netz
Vorteile	- Koordinaten im System der AP	- zwangsfreie Ausgleichung - objektive Genauigkeitsmaße, da die Koordinaten aller Netzpunkte als Unbekannte in die Ausgleichung eingehen
Nachteile	- keine zwangsfreie Netzausgleichung - keine objektiven Genauigkeitsmaße, da die AP als fehlerfrei angenommen werden	- Koordinaten der Neupunkte werden nur in einem lokalen KS erhalten

Zur Realisierung einer hohen inneren Genauigkeit des Netzes sowie zur Ermittlung minimaler und datumsunabhängiger (eindeutiger) Lage-Standardabweichungen kommt grundsätzlich die **freie** Netzausgleichung zur Anwendung.

6) Analyse und Interpretation der Ausgleichungsergebnisse

- Beurteilung der Qualität des Netzes
- Lokalisierung und Eliminierung sogenannter kleiner grober Fehler: Hierbei handelt es sich um Messfehler in der Größenordnung von etwa $3s \dots 10s$.

Innere Genauigkeit

s_L a-priori-Standardabweichung der Beobachtungen

Äußere Genauigkeit

s_x, s_y a-posteriori-Standardabweichung der Koordinaten

s_L a-posteriori-Standardabweichung der Lage
große und kleine Halbachse der mittleren Fehlerellipsen

Innere Zuverlässigkeit

Kontrolle der Messwerte auf grobe Messungsfehler mit statistischen Testverfahren zur Fehlersuche (Data Snooping; **ausführlich 8. Semester Vertiefung**)

Redundanz

relativer Einfluss (EV) eines groben Fehlers auf die Verbesserung

$$EV = r_i = 1 - \frac{s_i^2}{\mathbf{s}_i} = (\mathbf{Q}_{vv} \mathbf{P})_{ii}$$

s_i Standardabweichung des Messwertes nach der Ausgleichung

\mathbf{s}_i Standardabweichung des Messwertes vor der Ausgleichung

Der **Redundanzanteil** ist der Betrag des Anteils, den der zugehörige Messwert zur Gesamtredundanz ($r = n - u$) beiträgt und wie stark sich ein Fehler im Messwert auf seine Verbesserung auswirkt

Redundanzanteil (r_i)	Messwert
bis 0,1	- nicht kontrolliert
0,1 bis 0,3	- ausreichend kontrolliert
0,3 bis 0,7	- kontrolliert; gute gegenseitige Kontrollierbarkeit
0,7 bis 1,0	- gut kontrolliert (1,0 ... vollständig)

Test der normierten Verbesserung NV: Lokalisierung (kleiner) grober Fehler

$$NV_i = w_i = \frac{|v_i|}{s_{v_i}}$$

- Ist die normierte Verbesserung größer als der Grenzwert wird ein grober Fehler vermutet (**Ausreißertest**).

	NV	≤ 2,5	kein grober Fehler erkennbar
2,5	<	NV	≤ 4,0 grober Fehler möglich
4,0	<	NV	grober Fehler sehr wahrscheinlich

Aufdecken grober Fehler

- vermutlicher grober Fehler in einer Beobachtung: ∇l_i (∇ : "Nabla-Operator")

$$GF_i \cong \nabla l_i = \frac{-v_i}{r_i}$$

Grenzwert für nicht erkennbaren Fehler

$$GRZW_i = \frac{s_i}{\sqrt{r_i}} \cdot d_0 \quad GWDS = d_0 = 3,6$$

- GWDS (Grenzwert Data-Snooping nach BAARDA)**: Funktion der Irrtumswahrscheinlichkeit und der „Testgüte“

Äußere Zuverlässigkeit

Als Maß gilt die durch einen groben Fehler in der Beobachtung hervorgerufene maximale Verfälschung der Koordinaten und Höhen.

EP Einfluss eines etwaigen groben Fehlers auf den Punkt

$$EP_i = -v_i \cdot \frac{1-r_i}{r_i}$$

EGK Einfluss von GRZW auf die Koordinaten der Punkte

$$EGK_i = (1-r_i)GRZW$$

- Verfälschung der Koordinaten durch einen groben Fehler in der Beobachtung

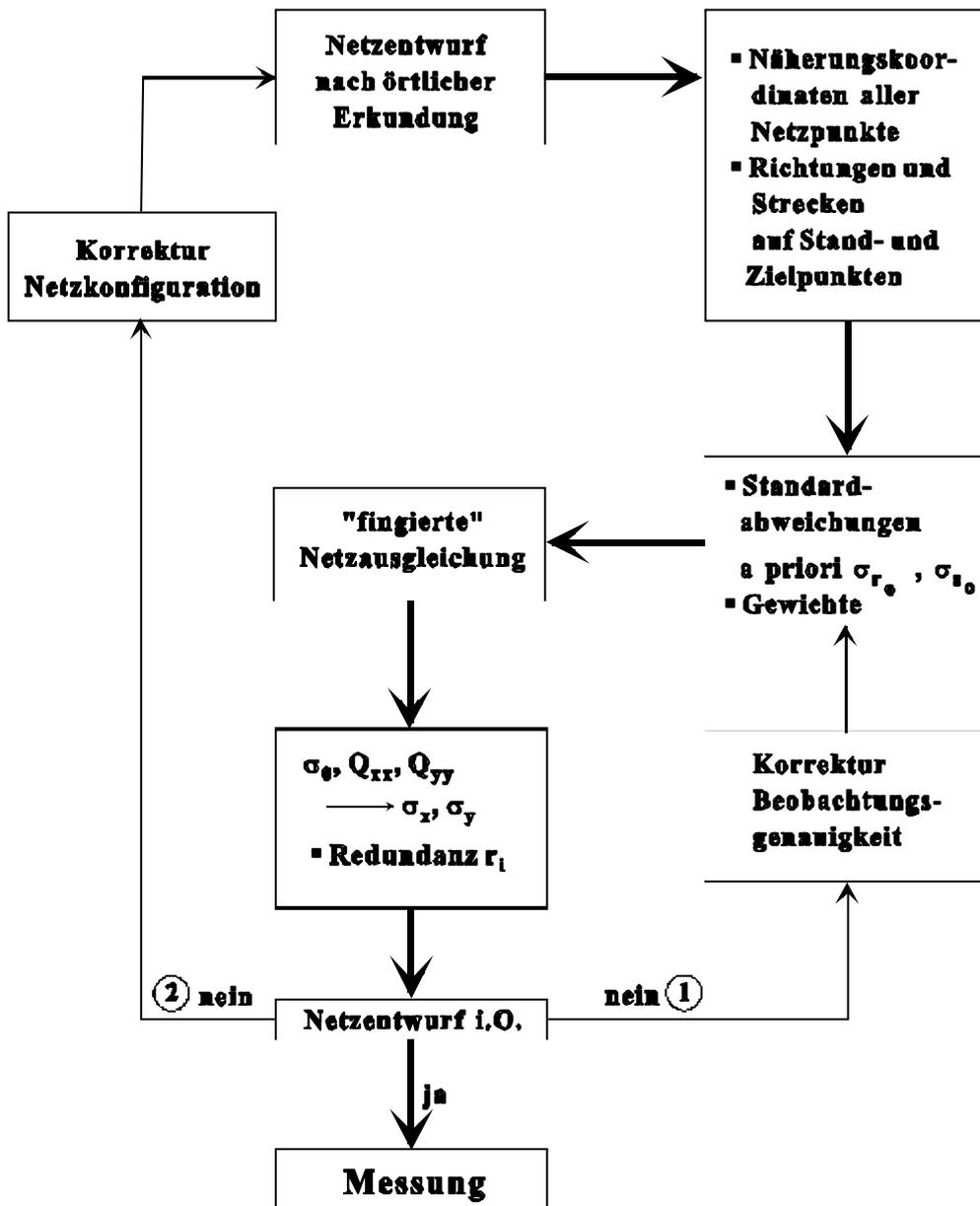
7) Netzoptimierung

- Korrektur der Steuerparameter und Eingabedaten
- Netzausgleichung ist wegen zu großer NV-Werte mit veränderten Steuerparametern

und/oder Eingabedaten zu wiederholen

- Korrektur der **a-priori-Standardabweichung** der Richtungs- und Streckenmessung oder **Reduzierung des Gewichts** einzelner Beobachtungen

Netzoptimierung



4 Messverfahren zum Nachweis von Lagedeformationen (2D)

4.1 Alignement

Alignements dienen zum Ausrichten von Messpunkten längs einer Geraden bzw. zur Ermittlung der Ablagen der Messpunkte von einer Geraden in horizontaler und/oder vertikaler Richtung

- Fluchtungsmessungen: relative Lageveränderungen der Messpunkte
- Alignementsebene/vertikale Bezugsebene durch 2 Alignementsfestpunkte (A,B)

4.1.1 Geometrisches Alignement

- A,B,SA,SB: Doppelrohrpfeiler außerhalb von Bauwerk und Einflussbereich
- Alignierinstrument (Sekundentheodolit oder Nivellier) auf A bzw. B auf zweitem Bezugspunkt feste Mire zwangszentriert
- Vermarkung der Bauwerkspunkte (Alignementspunkte) 1,2...n durch Setzkegel.
- Ausgewählte Alignementspunkte = Aufhängungspunkte für mechanische Lotung und Messpunkte für Präzisionsnivelllement auf der Mauerkrone
- Bewegliche Mire auf 1,4 m langem Standrohr zur Signalisierung (Refraktion)
- Alignementslinie von beiden Festpunkten A und B aus beobachten
- Kontrolle: Alignementspunkt in der Mitte doppelt beobachten

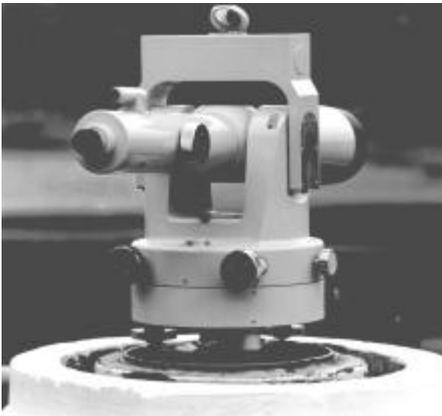


Abb. Alignierinstrument



Abb. Mire auf Pfeiler



Abb. Mire auf Standrohr

Abb. Setzkegel

Messung

- Temperatenausgleich Instrument - umgebende Luft: Wartezeit bis Beobachtungsbeginn in Minuten = Temperaturunterschied; besser: doppelte Zeit
- Auf einen der beiden Alignementspunkte Instrument mittels Dosenlibelle vorhorizontieren
- Zur gleichen Zeit wird die feste Mire auf B zentriert, horizontalisiert und auf A ausgerichtet.
- Nach Grobanzielung der festen Mire muss die Feinhorizontierung mit der Reiterlibelle vorgenommen werden (in beiden Lagen; Justierung überprüfen)
- Grundzielung nach der festen Mire, Neigung Fernrohr
- Grundsätzlich je n Einweisungen ($n = 3$) von der Luft- und Wasserseite
- Grundzielung kontrollieren

Kontrolle der Lage der Alignementspunkte A und B:

- Einbeziehung in das trigonometrische Netz
- Rückwärtseinschnitte nach Kontrollpunkten
- Änderung der Pfeilerneigung der Festpunkte zur Alignementsebene mit Setzkegelneigungsmessern

Auswertung: Feldformular, Ergebnistabelle (Resultate aufeinanderfolgender Messungen), Graphische Darstellung

Fehlereinflüsse und Genauigkeit

- Anzielen nach der festen Mire: s_{z0}
- Eingewiesener Alignementspunkt: s_{zi}
- Genauigkeit der Einweisung eines Punktes:
$$s_E = \sqrt{s_{z0}^2 + s_{zi}^2}$$

Im Ergebnis von insgesamt etwa 1000 Beobachtungen an der Rappbodetalsperre auf einer Versuchsstrecke bei Zielentfernungen von 50 bis 600 m zeigte sich **keine Entfernungsabhängigkeit** von s_{z0} und s_{zi} , dafür traten aber Streuungen infolge sehr unterschiedlicher Bedingungen bis zum vierfachen Betrag auf.

- **innere Genauigkeit** einer relativen Messung:

$$s_E \approx s_Z \cdot \sqrt{2}, \text{ wenn } s_{z0} \approx s_{zi} \approx s_Z \text{ gesetzt wird.}$$

- Entfernungsabhängige Genauigkeit

$$s_{E'} = \frac{s_E}{r} \cdot s$$

Für die **äußere Genauigkeit** einer absoluten Messung muss versucht werden, einige Fehlereinflüsse abzuschätzen.

Die Refraktion ist nicht erfassbar; Messungen bei Witterungsbedingungen durchführen,

die nur einen geringen Refraktionseinfluss erwarten lassen. Die Seitenrefraktion hat in der Mitte der Alignementslinien den maximalen Einfluss

- Standardabweichung der Alignementsfestpunkte aus dem trigon. Sicherungsnetz oder Kontrollmessung; s_E wird für beide Festpunkte nur einmal wirksam

$$s_F \approx 0,5mm \text{ (günstige Annahme)}$$

- kurzzeitige Kronenbewegung während der Alignementsmessung (max, 2 Std.)

$$s_T \approx 0,1mm \text{ bis } 0,2mm$$

- Zwangszentrierung (senkrecht zur Fluchtrichtung nur einmal)

$$s_{ZW} \approx 0,1mm$$

- Standardabweichung für die x -Koord. einer **absoluten** Alignementsmessung:

$$s_x \approx \sqrt{s_E^2 + s_F^2 + s_T^2 + s_{ZW}^2}$$

- kein Zentrierfehler (Fertigung der Setzkegel und Standrohre)
- Genauigkeit einer Alignementspunktverschiebung, bezogen auf die Nullmessung oder eine andere vorausgegangene Messung:

$$s_{D_x} \approx s_x \cdot \sqrt{2}$$

- Einfluss des Ganges der Schalllinse beachten

4.1.2 Trigonometrisches Alignment

- bei gekrümmten Staumauern
- A: satzweise Richtungsmessung nach 1, 2, 3, 4, 5; daraus ergeben sich bei der Nullmessung die Winkel $s_i^{(0)}$
- Vergleich mit den entsprechenden Werten der Folgemessung $s_i^{(n)}$ ergeben kleine Da_i (Differenz: Folgemessung - Nullmessung)
- Berechnung der ? rechtwinklig zum jeweiligen Zielstrahl:

$$D = \frac{s_i \cdot Da_i}{r}$$

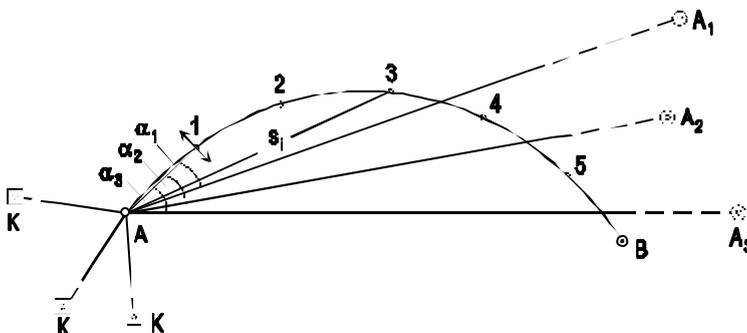


Abb. Trigonometrisches Alignment mit radialer Deformation

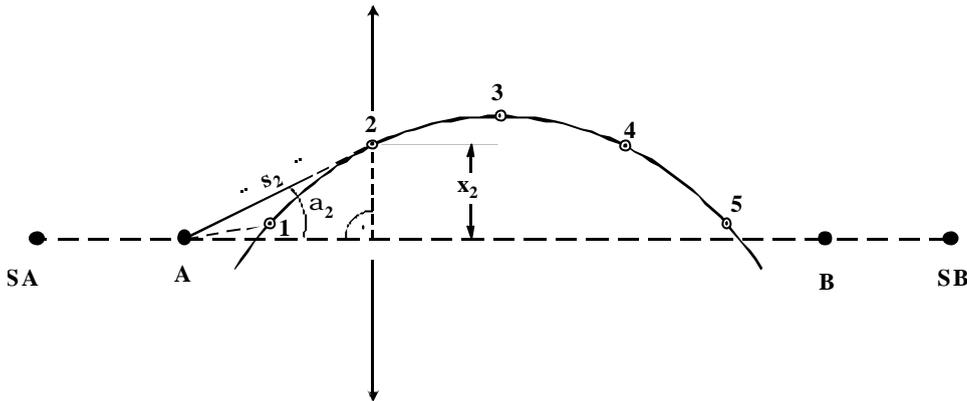


Abb. Trigonometrisches Alignment mit Deformation im KS

Fehlereinflüsse und Genauigkeit

- Zielung einer relativen Messung
$$\mathbf{s}''_E = \frac{\mathbf{s}_{Dr}}{r} \cdot s$$

$s_{?r}$ gilt für die Richtungsdivergenz Bezugspunkt - Alignementspunkt:

$$\mathbf{s}_{Dr} = \sqrt{\mathbf{s}_{r_0}^2 + \mathbf{s}_{r_i}^2} = \mathbf{s}_r \cdot \sqrt{2} \qquad \mathbf{s}_r = \mathbf{s}_z$$

Werden statt nur einer Bezugsrichtung zur Kontrolle n verwendet ergibt sich

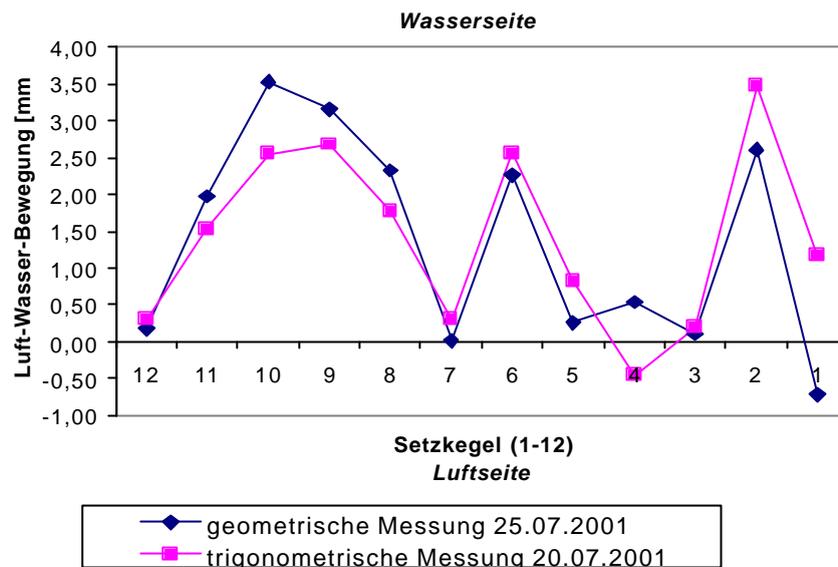
$$\mathbf{s}''_{E_n} = \frac{\mathbf{s}''_E}{\sqrt{n}}$$

$$\mathbf{s}_{AT} \approx \sqrt{\mathbf{s}''_{E_n}^2 + n \cdot \mathbf{s}_F^2 + \mathbf{s}_T^2 + n \cdot \mathbf{s}_{ZW}^2} \quad (\text{entspricht x-Koordinate})$$

n = Anzahl der Festpunkte, \mathbf{s}_{AT} gilt rechtwinklig zur Zielrichtung

- Präzisionsalignment $\approx 1 \text{ mm} / 400 \text{ m}$
 - Genauigkeitsforderung (alt) $m_x = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ s}$ (400m: +/- 0,72 mm)
 - Messungsergebnisse liegen sofort vor
 - direkter Anschluss an Lotungsmessungen
- Das *trigonometrische Verfahren* ist an Objekten mit gekrümmtem Verlauf vorteilhaft, da die Anlage mehrerer Alignementslinien entfällt. Es werden zwei bis drei Anschlusspunkte benötigt.

Beispiel: An den Staumauern Bleiloch, Burgkhammer und Wisenta wurden mit dem TC2003 trigonometrische Messungen durchgeführt. Mit diesen Messungen sollten Luft-Wasser-Bewegungen der Staumauern $\leq 1 \text{ mm}$ nachgewiesen werden. Zur Messausrüstung gehörten Wild-DreifüÙe mit Freiburger Kugel, Wild-Träger GZR2 mit Kreuzlibelle, Präzisionsreflektoren mit Zieltafeln und ein 1,69 m langes Standrohr.



Mit den Messreihen seit 1996 wurden vergleichende Untersuchungen zwischen dem Alinement und Tachymeter durchgeführt. Die Staumauer der Talsperre zeigt das charakteristische jahreszeitlich bedingte Pendeln, welches durch das Temperaturgefälle zwischen Luft- und Wasserseite und den Wasserdruck hervorgerufen wird. Die Maximalauslenkungen betragen im Vergleich zur Nullepoche 1996 in Wasserrichtung 5,2 mm und zur Luftseite 5,1 mm.

4.1.3 Mechanisches Alinement und Laseralignement

Mechanisches Alinement

Beim mechanischen Alinement wird die optische vertikale Bezugsebene durch eine mechanische Bezugslinie ersetzt, einen mit einer Kraft von 500 bis 1500 N (abhängig von Drahtlänge und Anzahl der Zwischenaufleger) gespannten Stahldraht von 1 mm Durchmesser. Dieser Draht wird im horizontalen Kontrollgang von Staumauern installiert. Er wird an den Endpunkten der Alimentslinie, den Widerlagern W befestigt und ruht auf etlichen Zwischenpunkten, die als schwimmende Auflager ausgebildet sind.

Bewegt sich die Staumauer in Luft-Wasser-Richtung, so wird diese Verschiebung unmittelbar auf die Konsole übertragen. Sie verändert dadurch ihre Lage gegenüber dem auf dem Schwimmer gelagerten Draht. Die gesuchte Verschiebung ist die Relativbewegung eines Messpunktes gegenüber dem Draht (Zehntelmillimeter). Durch Hochloten der beiden Endpunkte W der Alimentslinie und Anschluss an das äußere Messungssystem oder deren Anlage in den seitlichen Kontrollgangverlängerungen im Widerlagerfelsen können die Voraussetzungen zur Ermittlung absoluter Verschiebungen getroffen werden.

Dieses mechanische Alinement ist geeignet zur Messung im Mauerinnern bei einer Standardabweichung des Verfahrens von $s_{DX} = 0,1 \text{ mm}$

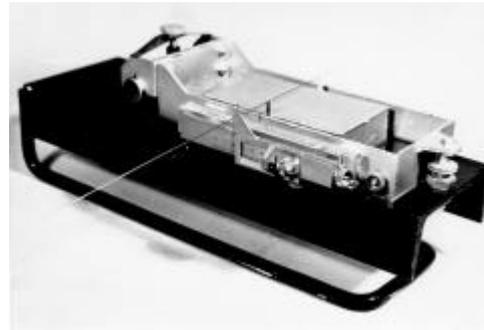
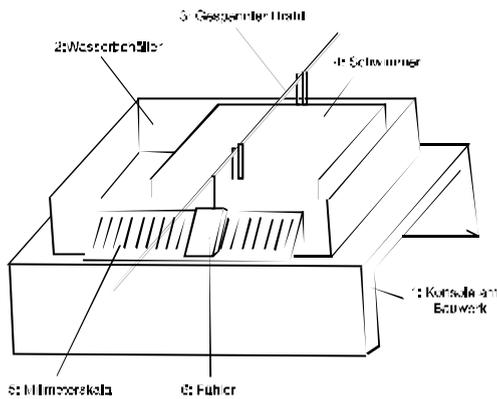


Abb. Draht- (mechanisches) Alignment

Das mechanisch - elektrische Alignment wird bei kontinuierliche Beobachtungen im Bauwerksinneren eingesetzt. Obwohl auch ein optisches Alignment im Staumauerkontrollgang von atmosphärischen Einflüssen abgeschirmt ist, wird ab 500 m Länge die systematische Seitenrefraktion spürbar, die über **ca. +/- 1 mm** liegen.

Laseralignements (Laserfluchtungsmessungen)

Fehlerquelle bei direkten Lasermessungen ist die **Richtungsinstabilität** des Laserstrahles. Ein wesentlicher *Vorteil* des Laser-Alignments ist die mögliche *Bestimmung horizontaler und vertikaler Abweichungen von Bauwerkspunkten*.

a) Lasermessungen ohne spezielle Empfangsvorrichtungen

Zufällige Fehler (Laserstrahl im Zielpunkt): 2", d.h. **1 mm/100 m**. Genauigkeit besser als beim geometrischen Alignment.

b) Lasermessungen mit speziellen Empfangsvorrichtungen

Ab etwa 100 m verhindert die Wärmerturbulenz die exakte Erfassung des Energieschwerpunktes des Laserstrahles. Deshalb wurden verschiedene spezielle Empfangsvorrichtungen, sog. Zentrierdetektoren entwickelt.



c) Interferometrische Alignements

Präzisionslängenmesstechnik: Mit der Interferometrie sind Genauigkeiten von 10^{-8} erreichbar. Wegen Luftturbulenz Anwendung nur in Bauwerken.

4.2 Präzisionspolygonierung

(1) In den Kontrollgängen gekrümmter Staumauern (Bogenstaumauern) in Kombination mit der Lotung

- Problem: Anschluss und Kontrollen
- Verbindung mit äußerem System (Kontrolle der Stabilität der Anschlüsse)
- größere Nachbarschaftsgenauigkeit durch die Längenmessung zwischen jeweils benachbarten Punkten
- Messung unter gleichen äußeren Bedingungen in den Kontrollgängen, welche die störenden äußeren atmosphärischen Einflüsse weitestgehend (Temperatur in oberen Kontrollgängen!) abschirmen: keine Abhängigkeit von der Jahreszeit
- Polygon verläuft mäßig, stetig gekrümmt, alle Polygonseiten etwa gleich lang

Messung und Genauigkeit

- Pfeilvermarkung, Sekundentheodolit, Invardrähte, -bänder oder EDM
- für Vorausberechnung m_Q , m_L Näherungsformeln nach Förstner:
 - beiderseitig koordinatenmäßig angeschlossener PZ (Mauerinnern)
 - beiderseitiger Koordinaten- und Richtungsanschluss (im Freien)

$$L \leq 200m; \quad m_Q = m_L = \pm 1,2mm$$

$$L > 200m; \quad m_Q = m_L = \pm 6 \cdot 10^{-6} \cdot L$$

L: Kontrollganglänge

Beispiel: $s \approx 20m$; $L = 500m$; $m_b = \pm 0,2mgon$; $m_s = \pm 0,15mm$

Längs- und Querfehler	Mauerinnern	im Freien
m_L	0,4mm	0,4mm
m_Q	1,1mm	0,6mm

(2) Polygonzug „ohne Streckenmessung“ auf der Mauerkrone langer geradliniger Staumauern

- Mauerverformungen in x-Achse (Luft/Wasser)
- Strecken nur Maßstab $\sigma_S : s = 1 : 1000$
- sehr genaue Messung der b und Hilfswinkel g

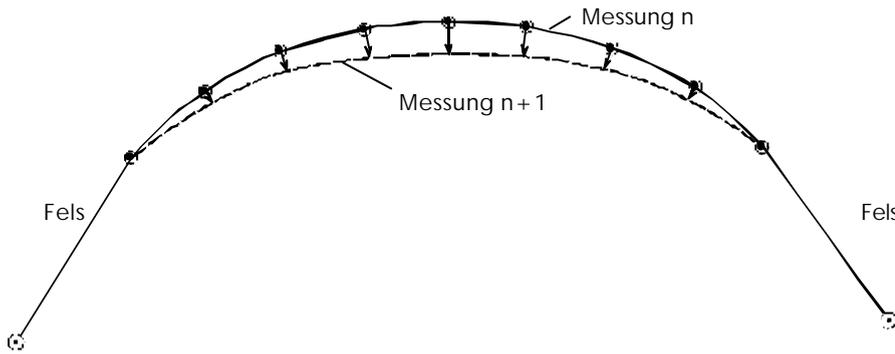


Abb. Mauerdeformationen Luft-/Wasserseite

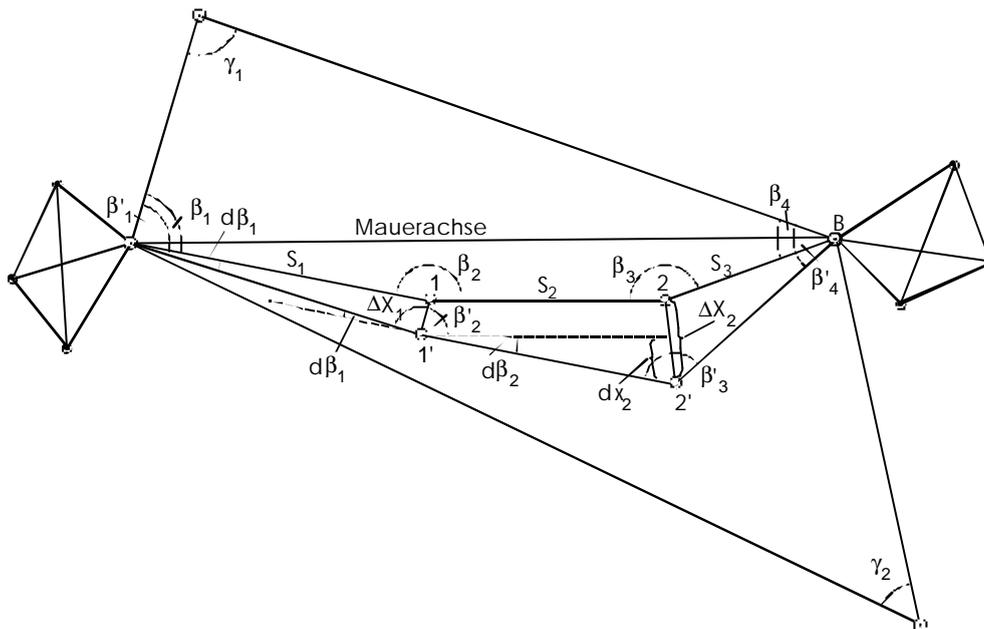


Abb. Präzisionspolygonzug bzw. Winkelzug

Berechnung:

(3) Steinschütt- und gerade Erddämme:

$$L \leq 400m; \quad m_Q = m_L = \pm 2,4mm$$

$$L > 400m; \quad m_Q = m_L = 10^{-6} \cdot 6 \cdot L$$

Hiervon ausgehend sind aus den Näherungsformeln von *Förstner* die erforderlichen Messungsanordnungen, Messgenauigkeiten und Geräte abzuleiten.

$$L = 1km \quad \text{und} \quad s = 100m$$

$$m_W \approx \pm 1,8mgon$$

$$m_S \approx \pm 3,9mm$$

Die Polygonierung wird in großräumigen Rutschungs- und Senkungsgebieten eingesetzt

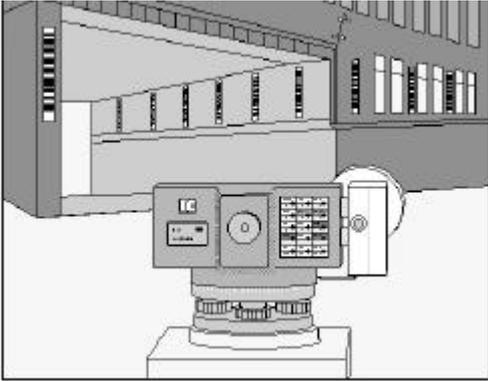
lements

Fehlereinflüsse beim geometrischen Präzisionsnivellement

Fehlerursache	Korrektur
Restfehler der Ziellinie symmetrische Vertikalrefraktion Erdrückmung	exaktes Nivellieren aus der Mitte Einhalten der Zielweitendifferenzen Erdrückmungskorrektur (ab NA 2000)
Horizontalschräge bei Kompensatornivellieren	Ablesefolge $r-v-v-r$ mit sorgfältigem Horizontieren mittels Dosenlibelle in Richtung Rückblick und Vorblick
Temperatureinfluss auf Ziellinie	Messung in zwei Kompensatorlagen Ni 002
Systematische und zufällige Teilungsfehler der Latten Temperatureinflüsse auf die Latten	Kalibrierung der Latten: Verbesserungen für je- den Teilungsstrich; Bestimmung der Ausdeh- nungskoeffizienten der Invarbänder;
Aufsetzflächenfehler der Nivellierlatten	Latten prüfen; Lattenschuh bei WP
Nullpunktfehler des Lattenpaares	gerade Anzahl von Instrumenten-standpunkten pro Strecke
Lattenneigung	Dosenlibelle an Latte justieren; evtl Bolzen aus- lassen
Vertikalbewegungen der Latten Vertikalbewegungen des Instrumentes Vertikalbewegungen der Festpunkte	Messung der Einsinkbeträge der Latten und Kor- rektur und kurze Beobachtungszeit, Doppelniv. Anschlussniv.; Doppelniv.; Mot.-Niv. bei großen Netzen
unsymmetrische Vertikalrefraktion	Beschränkung der Beobachtungszeit; Doppelniv. zu verschiedenen Zeiten Mindestzielhöhe einhalten Zielweitenverringern
Gezeiteneinfluss	Messung von Beobachtungszeit und Azimut
Zufällige Beobachtungsfehler	Mehrfachablesungen Automatisches Feinzielen und Ablesung mit dem NA 3000 u.a.
Grobe Fehler	Doppelnivellement (Doppelmessung)

Motorisiertes Digitalnivellier

Beispiel: Permanente Höhenüberwachung eines Gebäudes in Zürich, unter dem eine Tiefgarage gebaut werden sollte. Neben der motorisierten Fokussierung und Drehung wurde das Nivellier mit einem Scheinwerfer ausgerüstet, um einen vom Tageslicht unabhängigen Betrieb zu gewährleisten.



5.2 Hydrostatische Höhenbestimmungen

Der grundlegende Gedanke eines jeden hydrostatischen Nivellements ist, dass sich die frei bewegliche Wasseroberfläche immer an einer Niveaufläche ausrichtet. Dieses Phänomen tritt ebenfalls in miteinander verbundenen Messgefäßen auf und ist als Prinzip der kommunizierenden Röhren bekannt.

Der Flüssigkeitshorizont dient als stabile Referenz für eine hochgenaue permanente Höhenmessung. Zwei Prinzipien:

- Halbgefüllte Rohre, in denen sich Flüssigkeit und Luft gemeinsam befinden
- Messsysteme mit vollgefüllten Rohren mit einem zusätzlichen Luftdruckausgleichsschlauch, um eine Verfälschung der Messergebnisse durch den Luftdruck zu vermeiden.

5.2.1 Präzisionsschlauchwaage

Ermittlung relativer Höhenunterschiede oder Neigungen mit höchster Genauigkeit

- Für ingenieurgeodätische Anwendungen wird gefordert: $s_{Dh} = 0,01 \text{ bis } 0,02 \text{ mm}$
- Gesamthöhenunterschied aus n Einzelhöhenunterschieden $s_{DH} = s_{Dh} \cdot \sqrt{n}$
- Abschirmung äußerer Einflüsse (Temperaturschwankungen, Wind, Refraktion)
 - Freiburger Präzisionsschlauchwaage
 - stationäre Schlauchwaagensysteme
 - bewegliche Schlauchwaagensysteme mit Fernablesung
 - automatisierte Systeme
- Setzungen/Hebungen (geometr. Nivellement nicht erreichbare Genauigkeit):
 - Bergwerken/Rutschhängen: Nachweis von Bergschäden und Gebirgsbewegungen
 - in Kraftwerken an Turbinentischen zum Überwachen von Neigungen
 - am Fundament hoher Türme zum Überwachen eventueller Turmneigungen
 - Fundamentsetzungen infolge statischer und dynamischer Beanspruchungen
 - Brücken: Verkehrs- und Eigenlast? Setzungen

Automatisierte Systeme

In Talsperren, Dämmen und in setzungsgefährdeten Gebäudefundamenten bevorzugt man **stationäre Schlauchwaagemesssysteme** mit Fernablesungen (manuelle Höhen- bzw. Neigungsmessungen unmöglich oder aufwendig). Speziell für Staumauern mit bis zu 80 Messstellen: ASW 101 von Carl Zeiss Jena 1986, ELWAAG München 1978

Automatische Präzisionsschlauchwaage ASW 2000 (FPM Freiberg)

Das „Automatische Schlauchwaagensystem ASW 2000“ ermöglicht die automatische Ansteuerung und Messwerterfassung. Die ASW 2000 kann als stationäres oder mobiles Messsystem, mit bis zu 60 Messwertaufnehmer, zu einem System zusammengeschaltet und über eine Schnittstelle von einem PC gesteuert werden. Der Messwert wird durch ein mit der Tastspitze verbundenes inkrementales Längenmesssystem (Auflösung 0,005 mm) erfasst.

Durch die Temperaturmessung auf 0,2 K in der Messflüssigkeit mittels Messwiderstand und anschließender Korrekturberechnung erfolgt eine Eliminierung des Temperatureinflusses auf das Messergebnis.

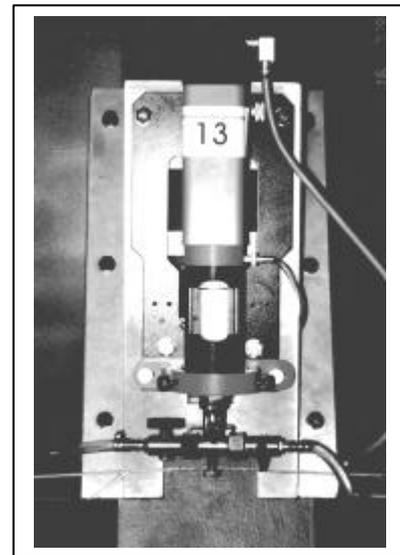
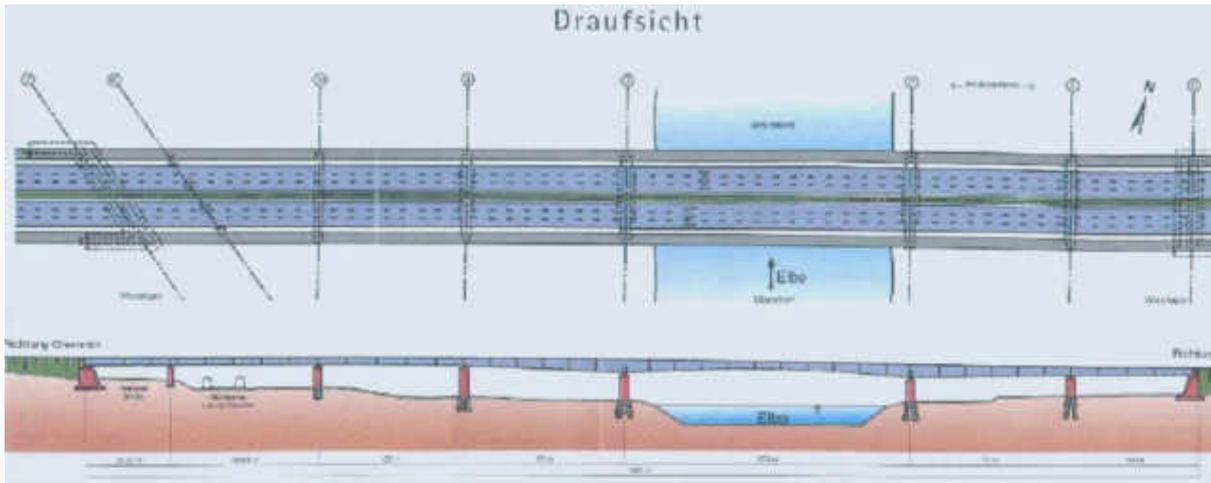


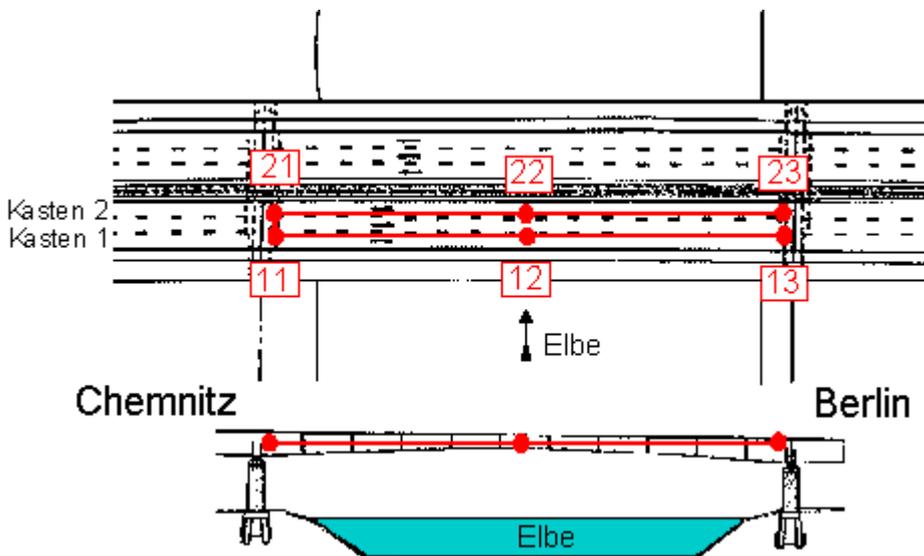
Abb. ASW 2000 (Freiberger Präzisionsmechanik)

Beispiel: Permanente Überwachung der relativen Vertikalbewegungen der Pfeiler der neuen südlichen Brückenhälfte der Autobahnbrücke BAB A4 über die Elbe sowie der Durchbiegung des Überbaues der neue Brückenteile in seiner provisorischen Lage unter voller Verkehrsbelastung (<http://www.fpm.de/p1.htm>)

Es erfolgte eine kontinuierliche automatische Messung alle Einflüsse auf die Brückenkonstruktion, die durch Verkehrsbelastungen, Temperaturen an der Brückenkonstruktion selbst und durch Wind, Luft- und Strahlungstemperatur hervorgerufen werden. In den Bauphasen Brücke in provisorischer Lage, Demontage der alten Brücke, Belastungsprobe und nach Verkehrsübergabe war eine Aussage aller 30 min gewünscht, während des Vorschub aller 5 min.



Die neue Richtungsfahrbahn verfügt über zwei begehbare Hohlkastenträger aus Stahl. Die Anordnung der 6 erforderlichen Messwertaufnehmer erfolgte in diesen Stahlhohlkästen über den Flusspfeilern 2 und 3 sowie im Bereich der Flussmitte zwischen diesen beiden Flusspfeilern jeweils an den einander zugewandten Seiten.



Untereinander wurden die Messwertaufnehmer mittels Schläuchen wasser- und luftseitig verbunden. An den Konsolen wurde ein Stativ mit Kugelbolzen und Klemmbügel für die Aufnahme der Schlauchwaagen angebracht. Diese Spezialstative ermöglichten eine höhenmäßige Ausrichtung der Messwertgeber, so dass die Verlegung der wasserseitigen Verbindung nahezu in einem Niveau erfolgen konnte. Damit konnten Fehlereinflüsse durch Dichteunterschiede wesentlich minimiert werden.

5.2.2 Wägesysteme

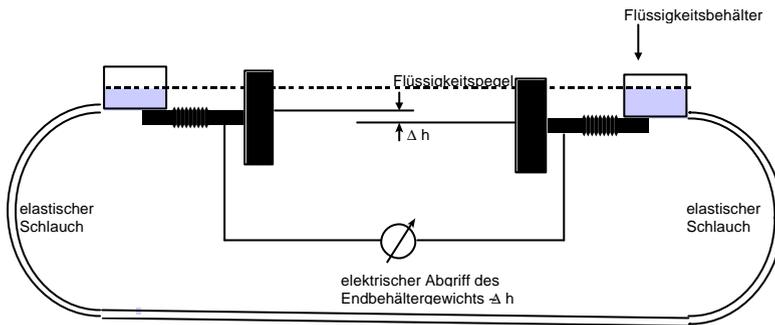


Abb. Prinzipskizze eines Wägemesssystems. Beide Messbehälter sind auf je eine, als Biegebalken ausgeführten Kraftmessdose angebracht.

Eine weitere Art von Schlauchwaagen bilden die *Wägesysteme*. Bei diesen Systemen wird der Flüssigkeitsfüllstand in den Messgefäßen über Wägung ermittelt. Dazu wird das Gewicht des gesamten Messgefäßes bestimmt. Wägesysteme unterliegen nicht den Fehlereinflüssen von Menisken und Kapillarwirkung, die die Auflösung herkömmlicher Schlauchwaagen eingrenzen. Sehr wichtig für zuverlässige Messungen ist hier eine exakt zentrische Aufhängung des Systems.

5.2.3 Überlaufsysteme

Bei *Überlaufsystemen* handelt es sich um einen Schlauchwaagentyp. Der Unterschied zur „richtigen“ Schlauchwaage besteht darin, dass die Messzylinder nicht gleichartig sind. Das Messsystem wird hierbei nur von nur einem Zylinder aus befüllt. Der zweite Messzylinder besitzt eine Überlaufeinrichtung.

Der Vorteil von Überlaufsysteme liegt darin, dass Höhendifferenzen zwischen Punkten gemessen werden können, auch wenn sich einer (bei Vielstellensystemen auch mehrere) an zeitweise unzugänglichen Orten befindet. Das Wasser wird vor der Messung im Messzylinder so hoch aufgefüllt, bis es im gegenüberliegenden Zylinder überläuft.

Die Differenz aufeinanderfolgender Ablesungen bestimmt die in der Zwischenzeit erfolgte Setzung. Am Messgefäß wird die Befüllung und Ablesung vorgenommen. Der Pegel am kommunizierenden Gefäß ist durch die Überlauföffnung festgelegt.

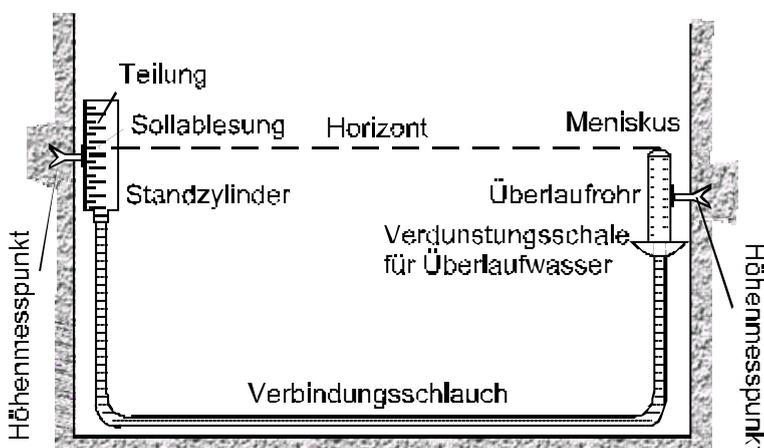


Abb. Überlaufsystem

Stationäre Überlaufschlauchwaage

Zur Ermittlung der bau- und staubedingten Setzungen von Steinschüttdämmen werden jeweils eine Schlauchwaage am unzugänglichen Bauwerkspunkt (Messpunkt) und die zweite an erreichbarer Stelle angeordnet. Der Schlauch wird von einem mit einer Nivellierlatte verbundenen Standrohr auf einem Hilfspunkt an der Luftseite der Stauanlage oder im Kontrollgang zum Überlaufgefäß geführt.

Das Messsystem wird im Abstand von mehreren Minuten solange mit Wasser aufgefüllt, bis sich der Wasserstand genau in Höhe der Überlaufkante des Gefäßes im Innern des Damms eingestellt hat und damit auch im Standrohr über dem Hilfspunkt konstant bleibt.

Die Ablesung erfolgt direkt oder auf elektrischem Wege (Fernablesung) als diskrete oder kontinuierliche Anzeige der Messwerte auf **1/10 mm**.

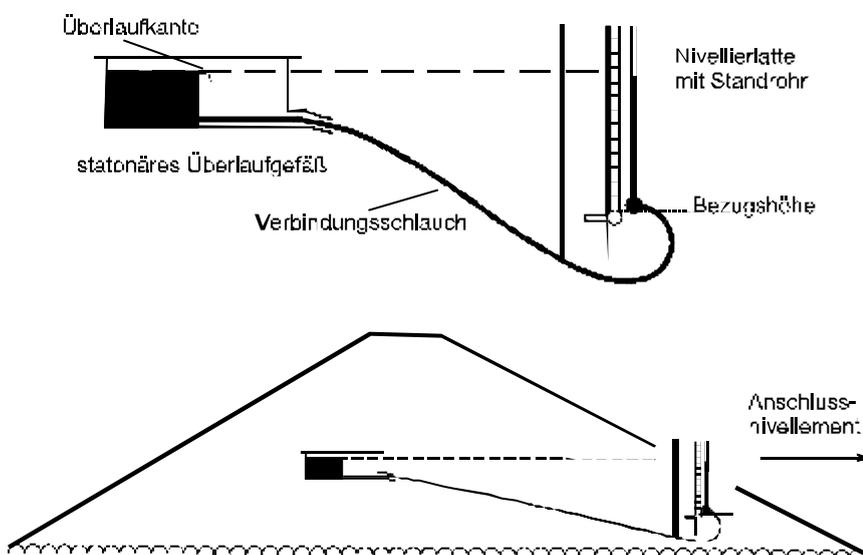


Abb. Stationäre Überlaufschlauchwaage

Bewegliche Überlaufschlauchwaage mit Fernablesung

Von einer kleinen Messkammer an der luftseitigen Außenböschung wird mittels eines Seilzuges ein Messkopf, das Überlaufgefäß, zu beliebig vielen Messpunkten im Rohr bewegt.

In die Steinschüttung werden elektrisch nichtleitende Kunststoffrohre (dient auch Messungen mit elektrischer Sonde) mit einem Gefälle von 1 bis 2 % eingebettet. Sie müssen ausreichend elastisch sein, um alle räumlichen Verformungen der umgebenden Schüttung mitzumachen.

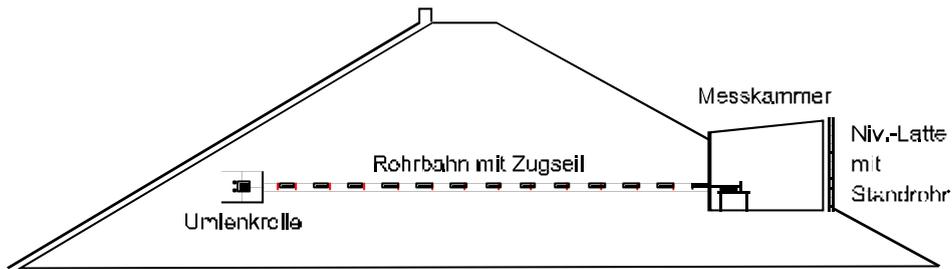


Abb. Rohrbahn mit Zugseil

Die Entfernungen Messkammer - Messpunkte werden mit einem Kabelmessband, welches zu der gesamten mechanischen Vorrichtung gehört, gemessen. An einem Standrohr in der Messkammer, der stationären Schlauchwaage des Systems wird die gesuchte Niveauhöhe in dem als Überlaufgefäß ausgebildeten Messkopf abgelesen.

Gemessen werden Höhenunterschiede zum Hilfspunkt. Werden diese Punkte an das Nivellementsnetz angeschlossen erhält man absolute vertikale Verschiebungen zwischen Bezugs- und Folgemessung. Bei Rohrbahnen bis 80 m Länge erhält man ein $s_H = 4\text{mm}$.

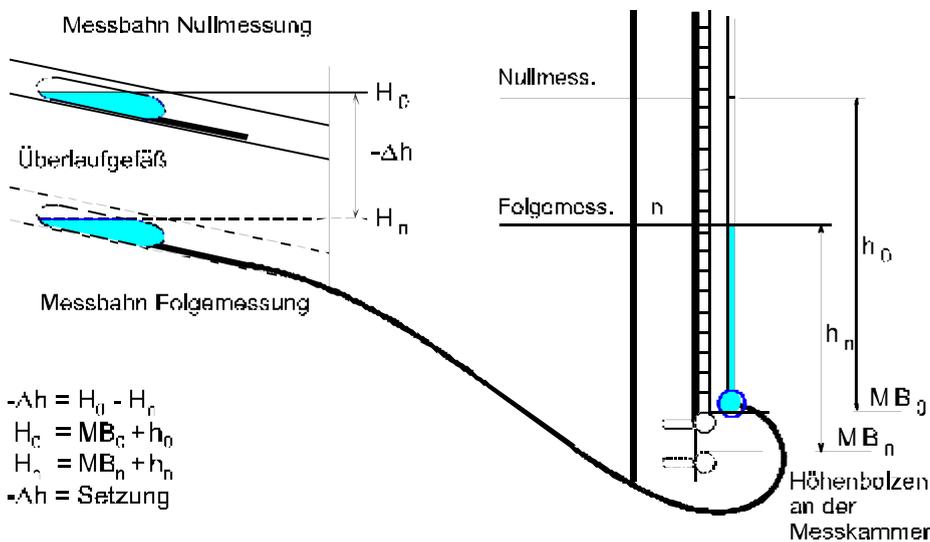


Abb. Bewegliche Schlauchwaage

5.2.4 Differenzdruck-Messsysteme

Differenzdruckmesssysteme basieren auf der Messung des Differenzdruckes zwischen zwei Messzylindern. Der Druck ist proportional zur Höhenänderung:
 $p + \rho \cdot g \cdot h = \text{const.}$

Im Gegensatz zur Schlauchwaage ist die kommunizierende Röhre in der Mitte unterbrochen. An der Unterbrechungsstelle befindet sich eine Membrane. Tatsächlich wird mit zwei verschiedenen Flüssigkeitssäulen gemessen. Bei einer relativen Höhenänderung der beiden Messgefäße bleibt der Flüssigkeitspegel in jedem der zwei oder mehr Gefäße konstant.

Eine Strömung in der Flüssigkeitssäule findet somit nicht statt und damit keine Reibungsverluste an den Rohrwandungen. Diese Systeme zeichnen sich dadurch aus, dass es bei einer „ruckartigen“ Veränderung des Messsystems nicht wie von den einfachen Schlauchwaagen her gewohnt, zu einer lang anhaltenden Schwingung der Flüssigkeitssäule kommt.

Als Messgröße dient hier der Differenzdruck zwischen den beiden Gefäßen, der anschließend in die Höhenänderung umgerechnet wird.

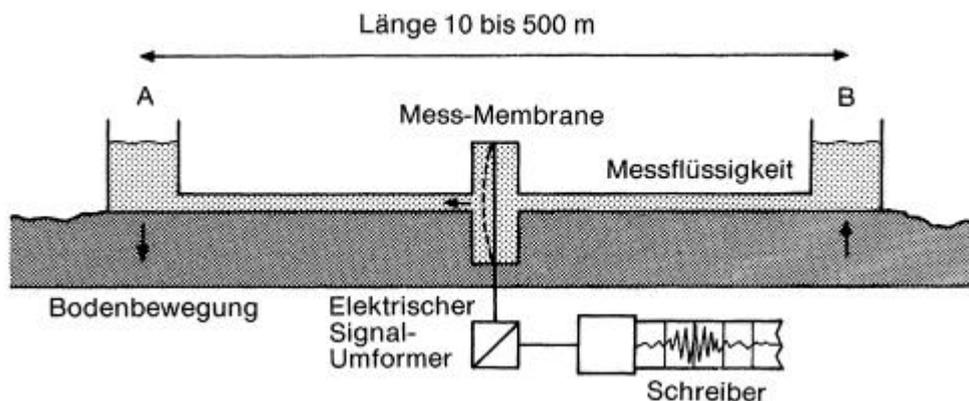


Abb. Funktionsweise eines Differenzdruckmeßsystems

Das Large Area Settlement (LAS) Messsystem basiert auf einer Druckunterschiedsmessung und stellt eine Weiterentwicklung des von Horsfall [1977] an der Universität Cambridge erstmals entwickelten hochgenauen Differenzdruckinstruments dar. Nach dem Anheben oder Absenken eines Messgefäßes wirkt ein Druckunterschied zwischen zwei Wassersäulen auf eine Messmembran, welche sich entsprechend durchbiegt. Die Auslenkung wird kapazitiv erfasst und in ein Stromsignal umgewandelt, das zur Höhendifferenz proportional ist

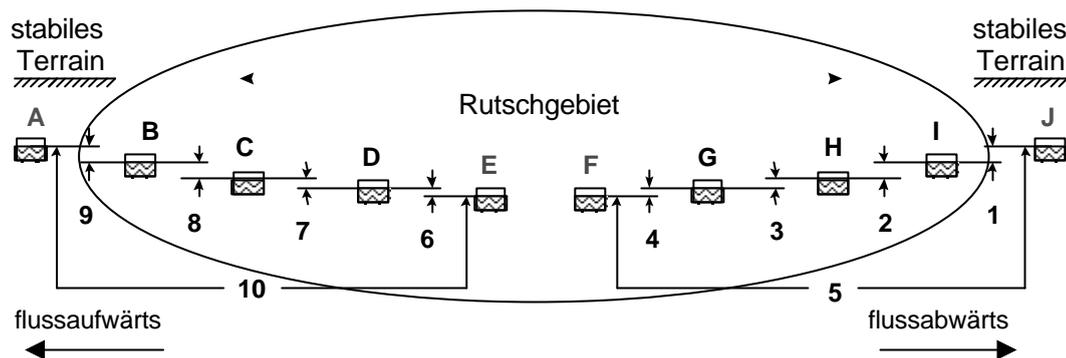


Abb. Messkonzept für den Basler Münsterhang

Dieses System erfordert nur geringen Aufwand bei der Installation. Es genügt die beiden Messzylinder mittels Dosenlibelle ausgerichtet auf ihre jeweilige Messplattform zu stellen. Es gibt Differenzdrucksysteme, die selbständig den **Nullpunktfehler** und die **Langzeitdrift** des Sensors unterdrücken.

Zusammenfassung der Fehlereinflüsse

	Schlauchwaage	Druckmesssysteme
1. Nullpunktfehler	Vertauschen der Messsysteme	Unbedeutend
2. Niveau- und Neigungsfehler	zentrische Aufhängung	Unbedeutend
3. Gangfehler der Messspindel	Verwendung von Spindeln mit gleichen Gangfehlern	-----
4. Schwingungen der Flüssigkeitssäule	Absperrhähne, Mehrfaches der Schwingungszeit als Wartezeit	Unbedeutend
5. Einfluss des Luftdrucks	Luftschlauch zum Druckausgleich	Luftschlauch zum Druckausgleich
6. Schweredifferenzen	wegen geringer Höhendifferenz (7-8 cm) praktisch bedeutungslos	wegen geringer Höhendifferenz (7 cm) praktisch bedeutungslos
7. Temperaturfehler	Temperaturkorrektur bzw. kurze vertikale Schlauchstücke und kurze Messzeiten	Unbedeutend
8. Ablesefehler	unbedeutende Größenordnung	Normal- u. Umkehrmessung
9. Einstellfehler	Glimmleuchtenbeobachtung (Indikator)	Unbedeutend
10. Flüssigkeitsverlust	unbedeutend	Neubefüllung

Tabelle: Fehlerarten und Korrektur (Schlauchwaage gegenüber Drucksystem)

6 Bestimmung von Abweichungen aus der Vertikalen

6.1 Projektionsmethode

- Projektionsmethode: Bestimmung der vertikalen Stellung eines Bauwerkes (Brückenpfeiler, Schornstein geringerer Höhe)
- Optisches Abloten mit Theodolit in 2 FRL
- Projektion eines Bauwerkspunktes auf eine horizontale Bezugsebene am Bauwerksfuß
- relative Schiefstellung des Objektes
- Biegelinie ? relative Winkeländerung zwischen Messpunkten und Bezugspunkt

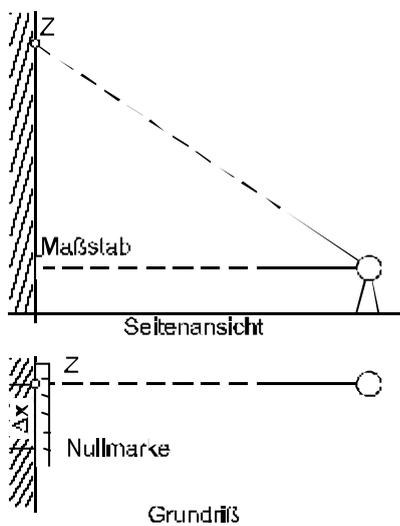


Abb. Projektionsmethode

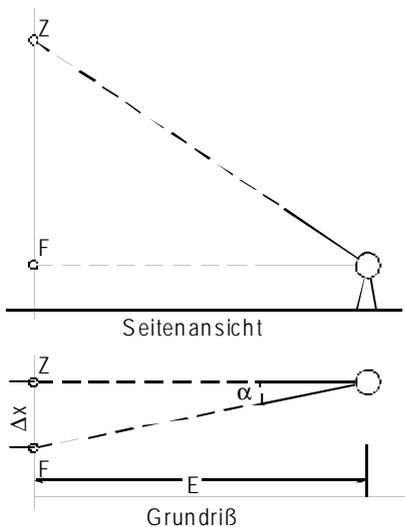
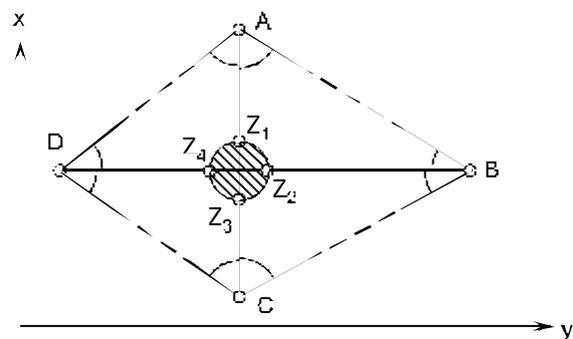


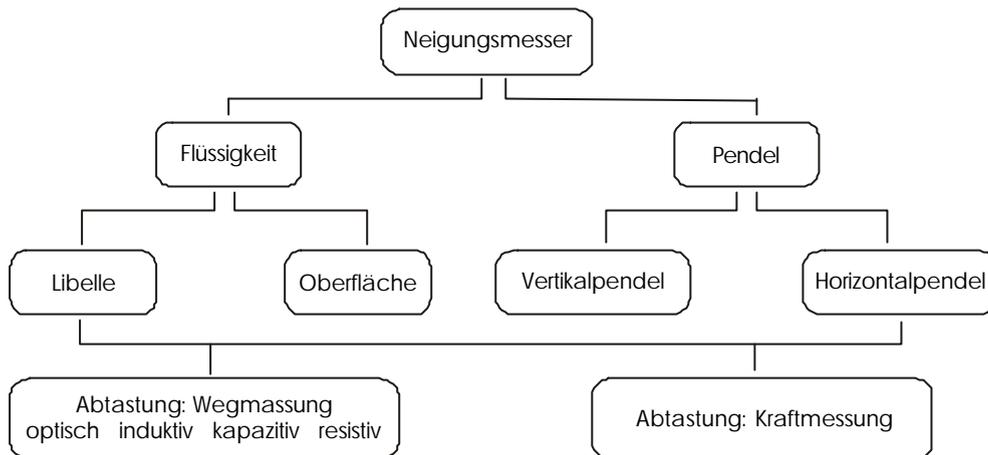
Abb. Parallaktische Winkelmessung



6.2 Neigungsmessungen

Neigung ist die relative Lage einer Richtung gegenüber der Horizontalen oder der Lotrichtung als Bezugsrichtung.

Mit Neigungssensoren - **Inklinometern** - misst man die Abweichung der Stehachse des Instrumentes aus der Lotrichtung, bzw. die Abweichung einer Ebene aus der Horizontalen: Deformationsgrößen **Kippung, Drehung, Rotation**



Wirkungsweise eines elektronischen Neigungsmesser (elektronische Libellen)

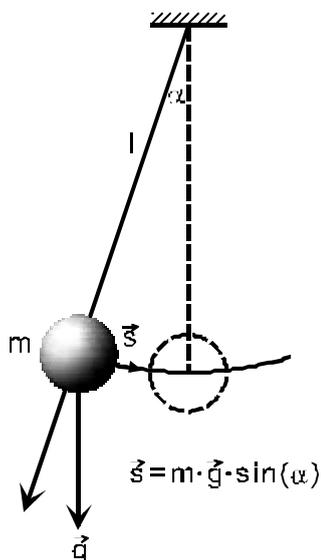


Abb. Prinzip Neigungsmessung

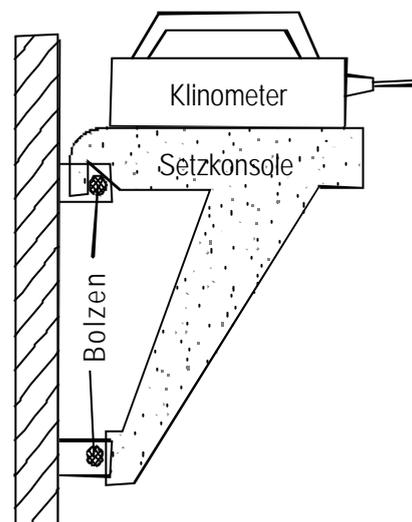


Abb. Klinometer

Der Weg oder die Kraft eines schwereabhängigen Sensors (Pendel) wird in Bezug auf das Instrumentengehäuse oder die Auflagefläche in eine elektrische Größe umgewandelt. Diese schwerkraftabhängigen Sensoren lassen sich nach ihrem Messprinzip in Flüssigkeits- und Pendelsysteme unterteilen. Für die Messung von Neigungen bzw. Neigungsänderungen muss die Bezugsrichtung mit hoher Sicherheit und Genauigkeit realisiert werden.

1) Pendelneigungsmessgeräte (Hz-, V-Pendel)

2) Niveauvariometer: **Klinometer** (Libellengeräte)

- Neigungen werden als Position eines Sensors in einem Bezugssystem erfasst
- Rückstellkraft eines Pendels als neigungsproportionales Signal (vgl. Gleichung)
- Umwandlung in ein elektrisches Messsignal
- Fehlereinflüsse: Temperatur, elektrische und magnetische Störfelder
- Justierung

NIVEL 20

- Zweiachs-Neigungsmess-System
- Prinzip: optoelektronische Messung (Neigungssensor mit Flüssigkeitshorizont)

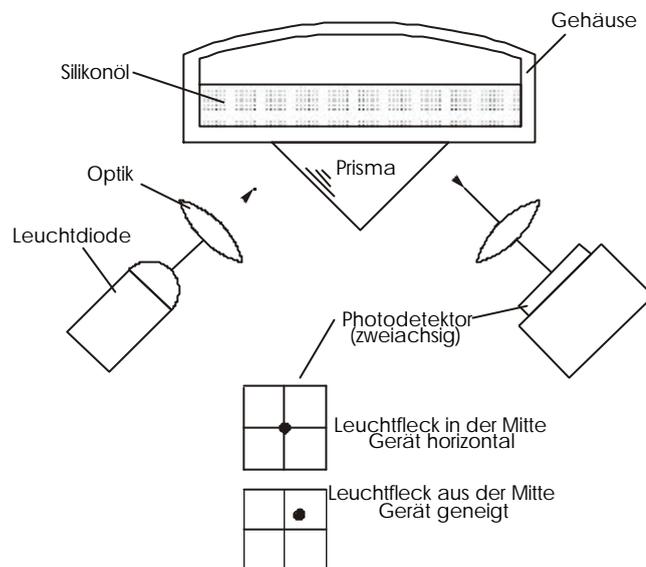


Abb. Neigungssensor Nivel 20

Abb. Prinzip

- je nach Neigung des Messobjekts verändert sich der Winkel zwischen Sensor und absolutem Horizont
- dieser Winkel wird optisch mit einem positionsempfindlichen Photodetektor gemessen und zu digitalen oder analogen Signalen aufbereitet
- Wird ein justierter Neigungsmesser auf eine horizontale Fläche gesetzt, ergibt sich der Anzeigewert Null. Durch **Messen in "2 Lagen"** lassen sich systematische Instrumentenfehler eliminieren.
- Meist kann nur jeweils eine Neigungskomponente ermittelt werden. Deshalb müssen zur Erfassung von Neigungsänderungen in beiden horizontalen Koordinatenrichtungen im gleichen Horizont jeweils 2 Neigungsmesser zueinander angeordnet werden.

Anwendungen

- Staumauern und Türme
- gemeinsam mit automatisierten hydrostatischen Höhenmessungen und Extensometern als System zur Überwachung von Turbinentischen
- Ebenheitsmessungen an Messtischen; Automatische Überwachung der Horizontalisierung von Messmaschinen, Ausmessen von Schienenführungen
- Deformationsmessungen im Bauwesen: Brückenüberwachung
- horizontale und vertikale Führungsbahnen an Fahrstuhlschächten
- Messbereiche 300", 400", 1300", die Auflösung 0,2", Sensor mit analogem Spannungs- oder mit digitalem Signalausgang
- Mit modernen (automatisierten) Neigungsgebern erreichbare Genauigkeit: **$\pm 0,1''$, d.h. 0,0005 mm/m**
- Berechnet man Neigungsänderungen aus hydrost. Nivellement oder Lotung, so erreicht man in Abhängigkeit von der Messgenauigkeit und den horizontalen und vertikalen Abständen der Messpunkte: **$\pm 0,2'' \dots \pm 1,3''$ ($< 0,005$ mm/m)**

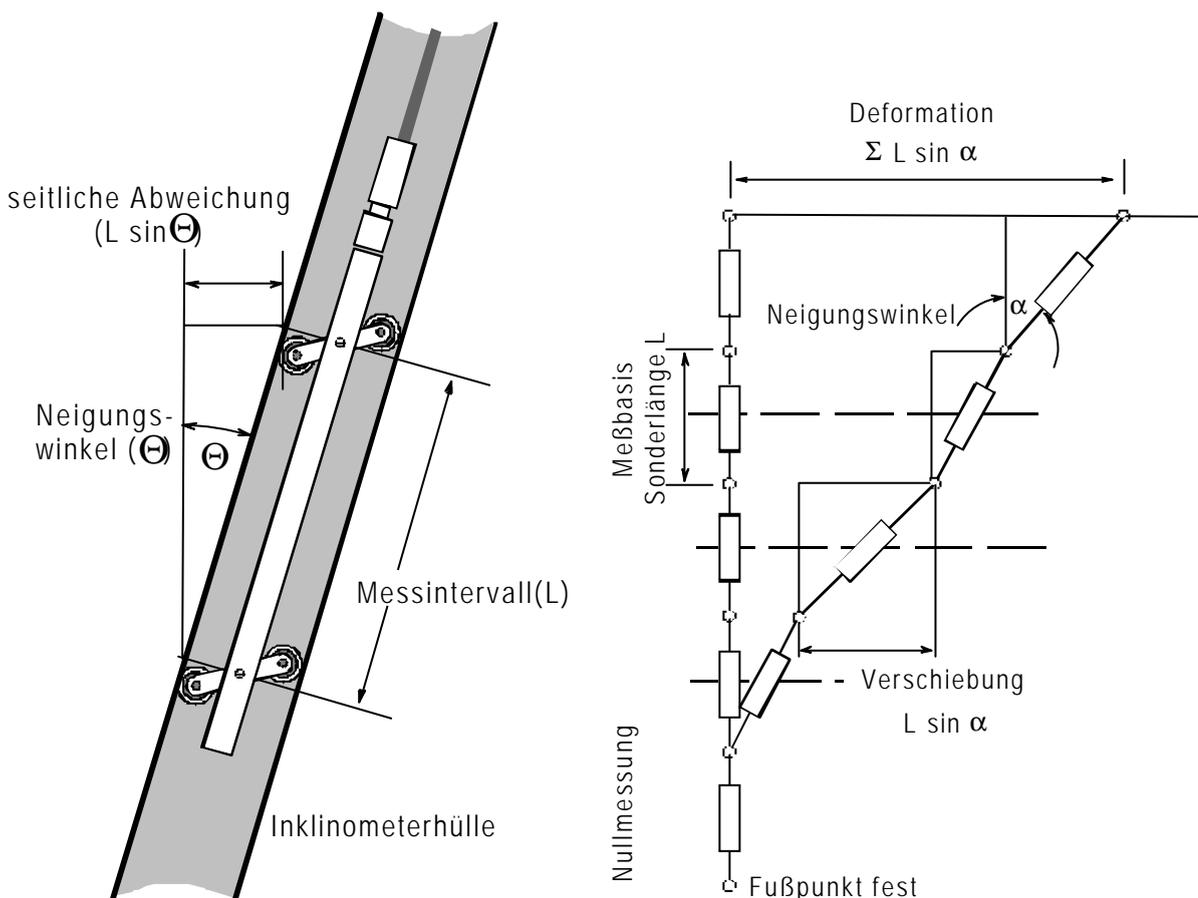


Abb. Messprinzip Inklinometer

6.3 Lotungsmessungen

- Bauwerkskippen, vertikale Biegelinie: Türme, Stau Mauern, Hochhäusern
- mechanische Pendellotung
- Umkehr- oder Schwimm lotung
- Referenzpendel
- optische Lotung

6.3.1 Mechanische Pendellotung

Vertikale Bezugslinie ist ein Draht (0,6 mm; 180 kp/mm²), der am oberen Ende am Bauwerk befestigt ist und am unteren Ende mit Massestück (5...20 kg) gespannt wird, Ölbehälter zur Dämpfung der Schwingungen.

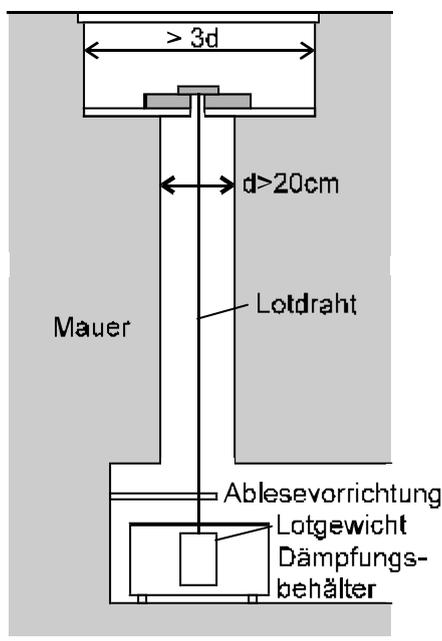
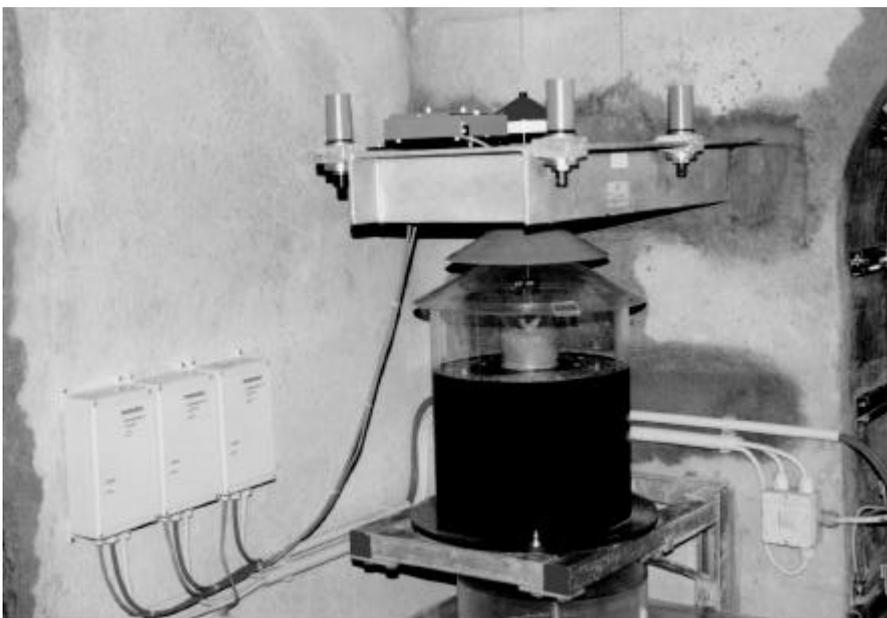


Abb. Pendellot



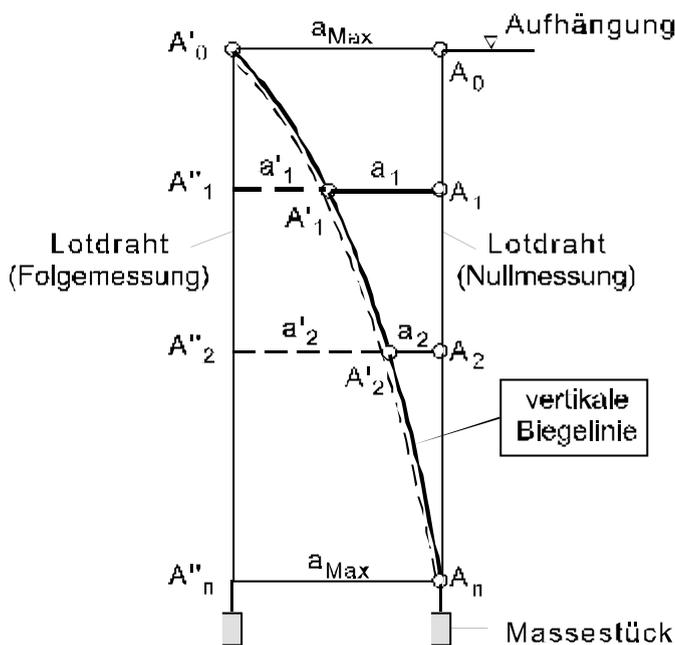


Abb. Messprinzip

- horizontale Auslenkungen a_i bezogen auf Lotlinie der Nullmessung: horizontale Abstände der Messpunkte relativ zur Drahtlage mit geeignetem Ablesefernrohr
- optisches Koordinimeter: 2 Ablesefernrohre; wird zwangszentriert auf Messpunkten (Konsole) aufgesetzt. Gleichzeitige Ablesung der Lotdrahtlage in x- und y-Richtung (Ablesung auf $\pm 0,1$ mm)
- Ergebnisse einer Messung relativ zur tiefstgelegenen Ablesestelle
- Lotkörper muss frei im Dämpfungsbehälter hängen

Fehlereinflüsse und Genauigkeit

Genauigkeit einer relativen Messung wird beeinflusst von

- der Reproduzierbarkeit des Lotdrahtverlaufes (unterschiedliche Anziehungskräfte)
- Lotdrahtverlauf systematisch verfälscht: unterschiedliche Beträge ab 50 m Mauerhöhe Ablenkung bzw. Korrektur; Standardabweichung der Unsicherheit 0,1 mm

Mauerablenkung: $s_M = 0,1$ mm

Ablesung: $s_a = 0,1$ mm

Instrumentenaufstellung/Zentrierung: $s_I = 0,1$ mm

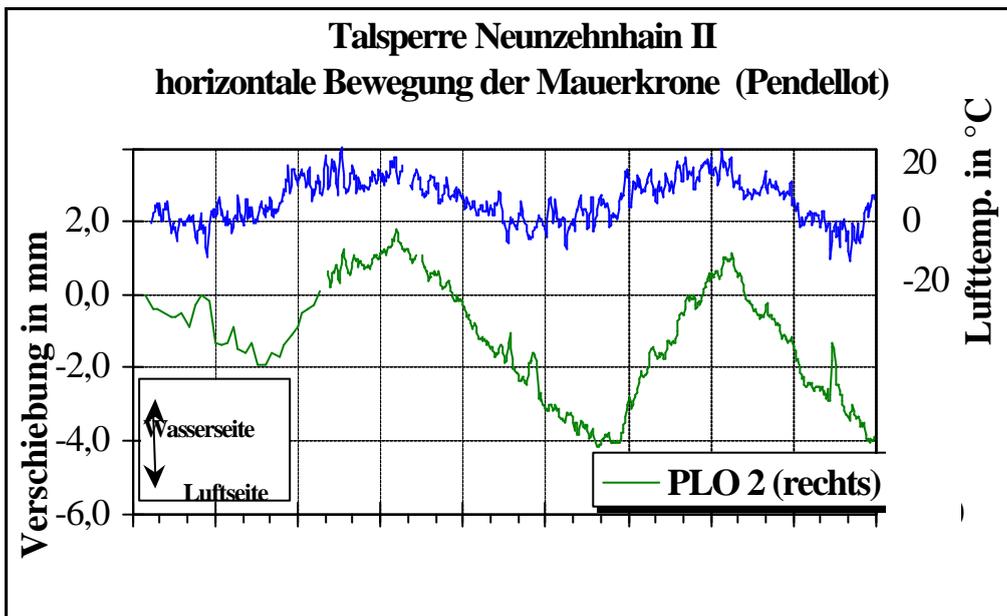
$$s_{L_r} = \sqrt{s_M^2 + s_a^2 + s_I^2} \approx 0,2 \text{ mm}$$

$$\text{Anschluss Lotung an Aligment: } s_{L_a} = \sqrt{s_{L_r}^2 + s_x^2} \approx 0,5 \dots 1 \text{ mm}$$

s_x Standardabweichung der x-Koordinate für den Anschlusspunkt

Ergebnisse der Lotungen: Anzeige von Kippungen an Hochbauten (Alarmsignal)

- Messbereich von 160 mm bedeutet keine Begrenzung der Anwendung, abhängig von der Größe der Lotbewegung
- Geringer Zeitaufwand - keine Verfälschung der Messungsergebnisse durch äußere Einflüsse
- Voraussetzungen zur Automatisierung und Fernübertragung
- auf relativ wenige, zugängliche Messpunkte beschränkt. Das gilt vornehmlich für die Bestimmung der Biegelinie in Staumauern. Kippungen dagegen werden auch mit wenigen Messpunkten sicher angezeigt



6.3.2 Referenzpendel

- Schweiz: Horizontalverschiebungen des Fußes und Gründungsbereiches der Stauwand relativ zu den tief (50 bis 70 m) im Felsgrund befindlichen Verankerungen von Spanndrähten.
- Behält die jeweils tiefstgelegene Verankerung (im Bild Draht C) als Bezugspunkt ihre Lage unverändert bei, sind die gesuchten Verschiebungen Δ absolut
- Verschiebungen: Differenzen der zur Null- und Folgemessung mechanisch oder optisch vorgenommenen Ablesungen der jeweiligen Lage der Spanndrähte und des "Referenzpendels"; gleiche Aufhängung eines Pendellotes
- Die Anzahl der Spanndrähte (Bild: drei) repräsentiert die Anzahl der Messpunkte im Gründungsbereich.
- Der Einbau der Spanndrähte in Bohrlöchern von ca. 15...30 cm muss nicht streng lotrecht sein und kann auch leicht gekrümmt verlaufen.
- Gleiche Fehlereinflüsse wie bei mechanischer Lotung mit optischer Ablesung:
- $s_{\Delta} \approx 0,2 \text{ bis } 0,5 \text{ mm}$

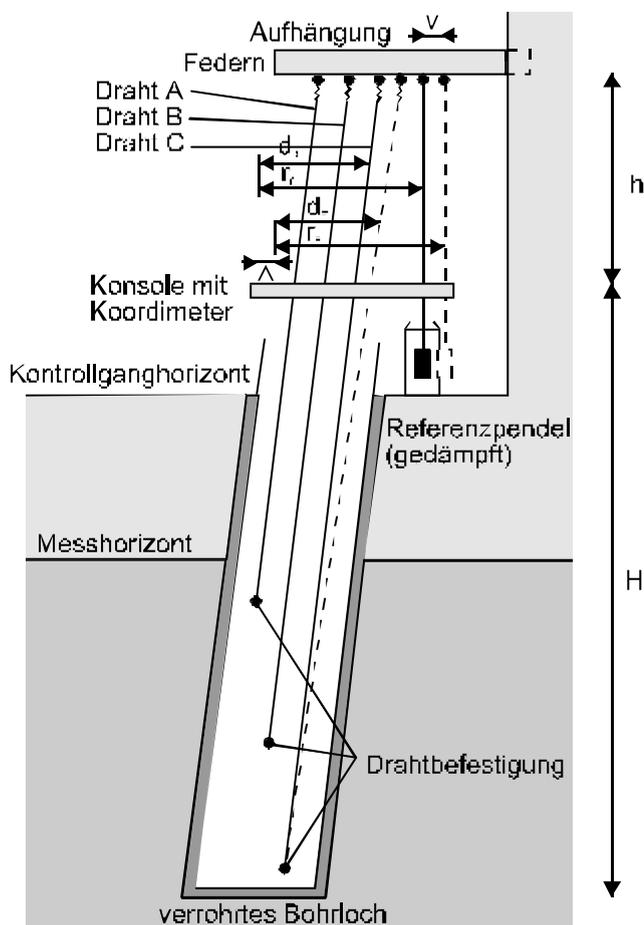


Abb. Referenzpendel

6.3.3 Schwimm- bzw. Umkehrlotung

Oberes Drahtende mit ringförmigem Schwimmkörper (Hohlzylinder) verbunden. Dieser befindet sich in wassergefülltem Behälter und stellt sich gemäß dem Archimedischen Prinzip unter der Auftriebswirkung in die Lotgerade durch den Bezugspunkt (Verankerung) ein. Verlässt Schwimmkörper infolge äußerer Einwirkungen diese Lotgerade, so führt ihn die Rückkehrkraft in Ausgangslage zurück

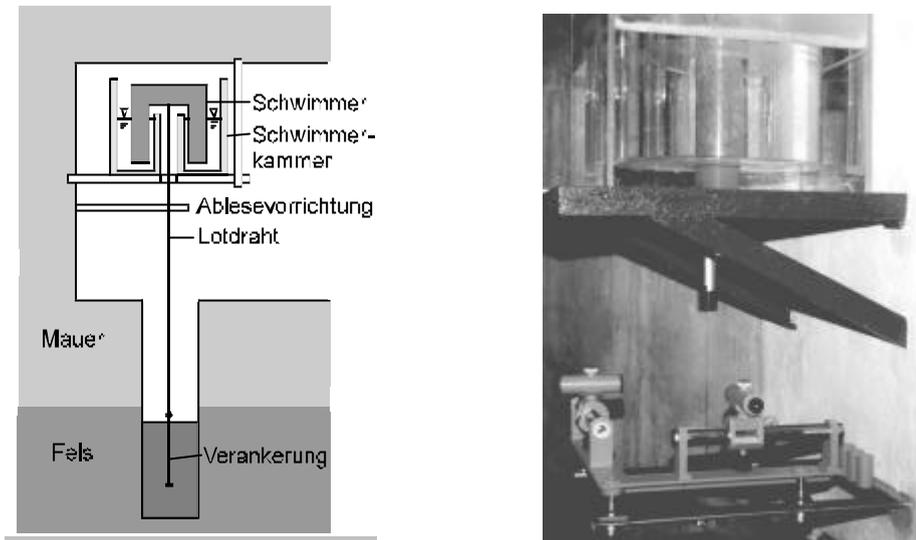


Abb. Schwimm- bzw. Umkehrlotung

Ein in großer Tiefe verankerter Festpunkt, dessen stabile Lage an die Erdoberfläche übertragen wird (Industriebauten mit höchsten Genauigkeitsforderungen).

- Verankerung zumeist in etwa 30...50 m Tiefe im Fels
- Gründungsbereich der Staumauern: Drähte mit Schutzrohr (innen etwa 8...30 cm)
- *Nachteil*: meist nur ein Bezugspunkt und keine weiteren Messpunkte realisierbar
- Zwischenmessstellen in Mauerkörper und Fels (bis zu 4 Messebenen)
- Schwierig: streng senkrechte Bohrung für Drahtführung
- Verschiebungen eines Messpunktes im Bereich des Schwimmers (Konsole im Bauwerk) mittels Koordinimeter
- Schwimmkörper muss sich ungehindert im Bassin bewegen können und Drähte dürfen nicht berührt werden.
- Verfahrensbedingt: Schwingungsdauer des Drahtes
- $s_{DL_r} = 0,1mm$

7 Längenänderungsmessungen

- Absolute Längen kaum von Bedeutung
- **Längenänderungen als Objektdeformationen**
- Überwachung von Rutschhängen: direkte Bestimmung von Bewegungskomponenten in Richtung der Streckenmessung
- Kalibrierung der Streckenmessgeräte

7.1 Fugenspaltmessungen

Messverfahren zur Bestimmung von Änderungen des Abstandes Δ zweier durch eine Fuge oder einen Riss voneinander getrennter Bauwerksabschnitte.

Anwendungen und Messprinzip

(1) In Staumauern zur Erfassung horizontaler Bewegungen der einzelnen Mauerfelder gegeneinander in Abhängigkeit von den Betontemperaturen ("jahreszeitliches Atmen").

(2) Messtechnische Kontrolle von Bauwerksrissen; Messmittel (Bügelmessschraube, Messschieber, Messuhr o.ä.) vor ggf. nach jeder Messung prüfen

- Mit den mechanischen Messmitteln ist eine Ablesegenauigkeit: **0,01 mm bis 0,1 mm** möglich. Es wird eine Genauigkeit von **0,02 mm** (Staumauern) bzw. **0,1 mm** (Massivbauten von Dämmen) gefordert.
- Größenordnung der Δ : meist "**mm**" (bei Rissbildungen auch größer).

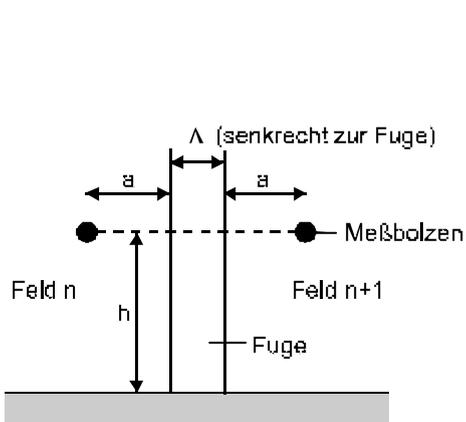


Abb. Fugenspaltmessung

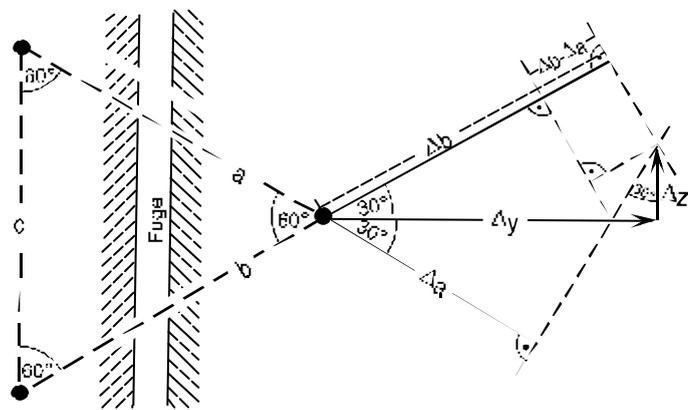


Abb. 2D-Fugenspaltmessung

Kombinierte Fugenspaltmessung

- Zusätzlich Relativbewegung parallel zur Fuge (senkrecht); 2D (z.B. y-z-Richtung)
 - 3 Messbolzen (gleichseitiges Dreieck)
 - 2 rechtwinklig übereinander und im gleichen Abstand wie der 3. von der Fuge entfernt
 - Gemessen: a ; b (0-Messung)
 - Lageänderung: Δa und Δb (Folgemessung)

7.2 Extensometer

Ermittlung von Relativbewegungen zweier Punkte gegeneinander, die durch einen Draht oder eine starre Stange als Bezugsnormal miteinander verbunden sind

- Absolute Länge muss im Regelfall nicht bekannt sein → nur Längenänderungen
- Einen der beiden Messpunkte an sicherer, d.h. unveränderlicher Stelle z.B. im Baugrund vermarken → absolute Längenänderungen
- Baugrunddeformationen.
- Streckenlängen von 1 m bis 80 m
- Messgenauigkeit für Felsmessungen im Ingenieurbau gilt in Abhängigkeit des verwendeten Extensometertyps:

$$s_s = 5 \cdot 10^{-6} \cdot s$$

$$s = 80m; \quad s_s = 0,4mm$$

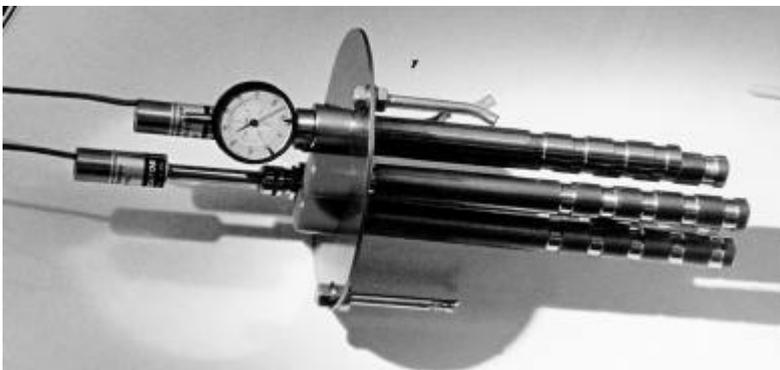


Abb. Extensometer

- **Gespannter Draht:** schwingende Saite, Frequenzänderung, Ableitung der Längenänderung über Vergleichsfrequenz
- **Starre Stange:** Verschiebung eines Eisenkerns in einer Spule - Änderung der Induktivität, elektrische Messung und Ableitung der Längenänderung
- **Kohärenter Lichtstrahl:** Interferenzbild nach erfolgter Reflexion

Mittels Extensometer können Relativbewegungen zweier Messpunkte ermittelt werden. Um den Informationsgehalt über das Deformationsverhalten des Überwachungsobjektes zu erhöhen, baut man oft "**Mehrfachextensometer**" ein (z.B. Dreifach-Extensometer):

- Schacht oder Bohrloch z.B. drei oder auch mehr Stangen bzw. Drähte, die an verschiedenen Punkten der Messstrecke verankert werden:
- Relativbewegung der Gesamtstrecke und n-1 Relativbewegungen der Teilstrecken

Grundsätzlich werden Drähte und Stangen zum Schutz gegen äußere Einwirkungen beim Einbau mit Rohren umgeben. Nahezu alle modernen Extensometer sind als Fernmesseinrichtung mit Gebern und Registriervorrichtung ausgerüstet.

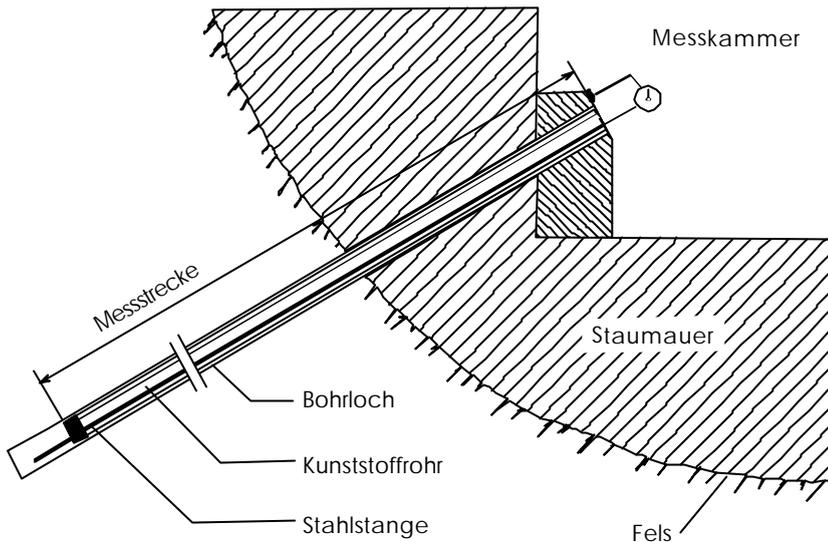


Abb. Einrichtung eines Stangenextensometers

Auswahl der Messstrecken

- speziellen Bedingungen am Objekt jede beliebige Richtung: horizontal, vertikal, geneigte Raumstrecken
- Bei Bogenstaumauern werden Extensometer bevorzugt im Bereich der Widerlager vom Mauerfuß (Ablese- bzw. Registriervorrichtung) in den Felsgrund geführt, und zwar in Richtung der wirkenden Kräfte
- Deformationsverhalten des Gründungsfelsens in Abhängigkeit des Stauregimes
- Größenordnung der Felsdeformationen: 122 m hohe Bogenmauer; Messstrecke 50 m. Nach Erreichen des Vollstaues wurden folgende Verkürzungen als Folge der Wasserlast gemessen: Gesamtstrecke rund 6,6 mm, davon im ersten Streckendrittel rund 4,2 mm, im zweiten rund 1,7 mm und im letzten etwa 0,8 mm.
- Fehlereinflüsse: evtl. Temperaturänderungen
- Temperaturmessgeräte an der Messstrecke (Korrekturen)

Distometer-ISETH

- Konvergenzmessung mit Distometer: Prinzip der Invardrahtmessung
- geeignete Lösungen für Ablesevorrichtungen, Drahtspannung, Eichung, spezielle Messbolzen und weiteres Zubehör.
- Distanzbereich: 1...50 m
- Verschieb-Messbereich: 100 mm
- Messgenauigkeit: $s < 20$ m Drahtlänge: $\pm 0,02$ mm, $s > 20$ m Drahtlänge: 10^{-6} s

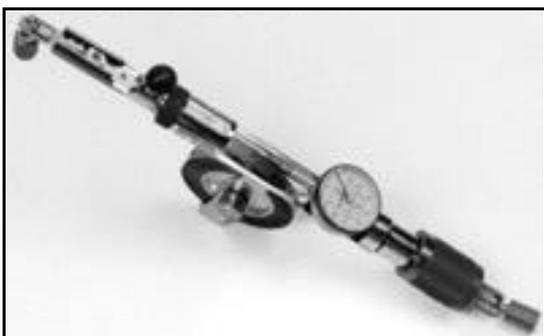


Abb. Distometer zur Konvergenzmessung

7.3 Messprogramm für Staumauern

Überwachungsmessungen während Bauzeit, Probetrieb und Betrieb

Stauanlagen sind zur Bewertung der konstruktiven und betrieblichen Sicherheit zu überwachen. Überwachungsmessungen und visuelle Beobachtungen sind in einem Messprogramm zu planen.

- Messungen zur Bestimmung von absoluten und relativen Verschiebungen und Verformungen durch: Präzisionstachymetrie, Präzisionsnivellement, Neigungsmessungen oder Längenänderungsmessungen
- hydrometrische Messungen z.B. Wasserstands- und Sickerwassermessungen,
- Messungen der Wirkgrößen wie Stauhöhe, Temperatur und Niederschlag,
- visuelle Beobachtungen.

Das individuell für jede Stauanlage zu planende Messprogramm wird durch spezifische Messanweisungen für jedes Verfahren ergänzt.

Die Auswertung von Überwachungsmessungen umfasst die messtechnische und bautechnische Interpretation. Der erste Schritt beinhaltet eine zur Messungsausführung zeitnahe Plausibilitätskontrolle der Messergebnisse. Es folgt der Vergleich mit den Ergebnissen vorangegangener Messungen und mit Kontroll- bzw. Erwartungswerten. Bei größeren Objekten kann sich eine Deformationsanalyse anschließen, die das Erkennen signifikanter Verschiebungen und Verformungen und deren Interpretation aus messtechnischer Sicht zum Ziel hat. Die abschließende bautechnische Interpretation schließt die Bewertung im Hinblick auf die Stand- und Betriebssicherheit ein.

Die Originalmessdaten und die daraus berechneten Ergebnisse sind dauerhaft aufzubewahren. Die Berechnungsalgorithmen sind nachvollziehbar zu dokumentieren.

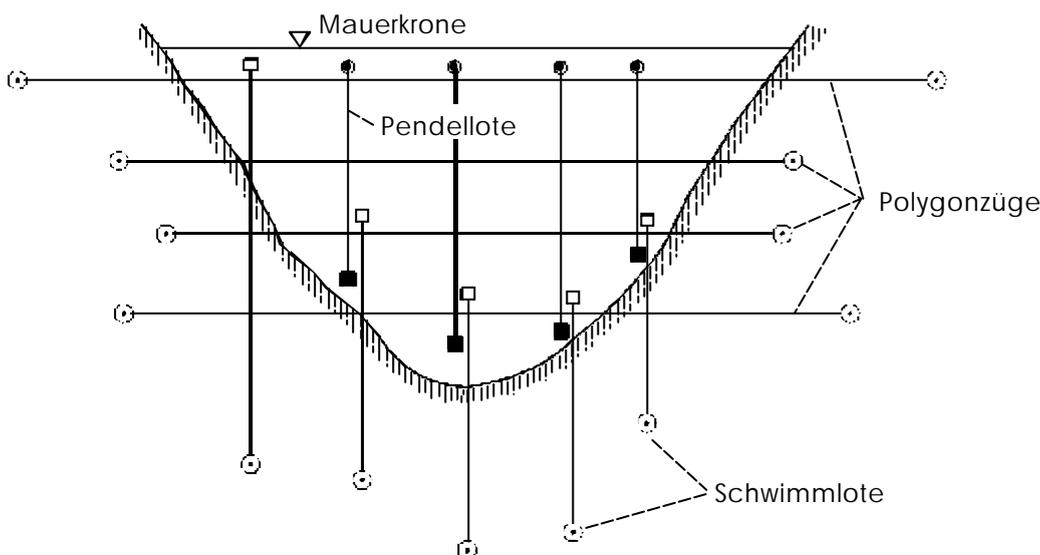


Abb. Messsysteme in einer Staumauer

Regelausstattung und Messprogramm bei Staudämmen (H < 60 m; L < 1000 m)

Messgröße	Messmethode/Messgerät	Zahl der Messstellen	Häufigkeit
Setzungen Verschiebungen	Nivellement auf der Damm- krone, Setzungspegel	je 3 auf jeder Kronenseite	jährlich (während der Damm- schüttung und des Pro- bestaus)
Stauhöhe	Pegel	1	täglich (kontinuierlich)
Sickerwasser	Messgefäß, Messüberfall	3 Abschnitte (Talflanken und Talsoh- len)	wöchentlich wöchentlich (kontinuierlich)
Porenwasserdruck - im Damm - im Untergrund bei erosionsgefähr- deten Böden	geschlossenes System	3 Messquerschnitte in 3 Messebenen mit je 3 Gebern	wöchentlich
Wasserspiegelhöhen	offenes System		wöchentlich
Niederschlag	Regenmesser	1	täglich

Zur Anfertigung der Bestandsdokumentationen sind Bestandsmessungen überwiegend während des Bauens nach Abschluss bestimmter Bauabschnitte auszuführen. Aufmessungen sind auf das Baulage- und Bauhöhenetz zu beziehen.

Die Art und der Umfang der Bestandsdokumentation im Stauanlagenbuch richten sich nach der DIN19700-10. Dazu gehören u. a. folgende Zeichnungen:

- Bestandspläne über das Gebiet des Absperrbauwerkes und weiterer Anlagenteile sowie des Staubeckens,
- Bestandsplan der Gründungssohle,
- Längs- und Querschnitte des Absperrbauwerkes und weitere Anlagenteile,
- Lage und Höhe von Messeinrichtungen,
- Lage- und Höhe von Entwässerungseinrichtungen.

Messverfahren	Zeit des ersten Anstaus	Erste Betriebszeit (2 ... 3 Jahre)	Normale Betriebszeit
Geometrisches Alignement	14-täglich	Monatlich	14-täglich bis monatlich; halb- jährlich
Trigonometr. Methode	bei leerem und gefülltem Stausee	Halbjährlich	halbjährlich bis jährlich; später evtl. alle 2 ... 3 Jahre
Präzisionsnivellement	bei leerem und gefülltem Stausee	2-mal bis 4-mal jährlich	2-mal ... 4-mal jährlich; später evtl. alle 1 bis 3 Jahre
Mechanische Lotmes- sung	wöchentlich	wöchentlich bis 14-täglich	monatlich bis 2-mal jährlich
Hydrostatisches Nivellement	monatlich	alle 2 Monate	1-mal bis 4-mal jährlich
Fugenspaltmessung	14-täglich	14-täglich bis halbjährlich	14-täglich bis halbjährlich
Lufttemperatur- messungen	täglich	Täglich	Täglich
Sohlenwasserdruck- messung	wöchentlich	Monatlich	4-mal bis 12-mal jährlich

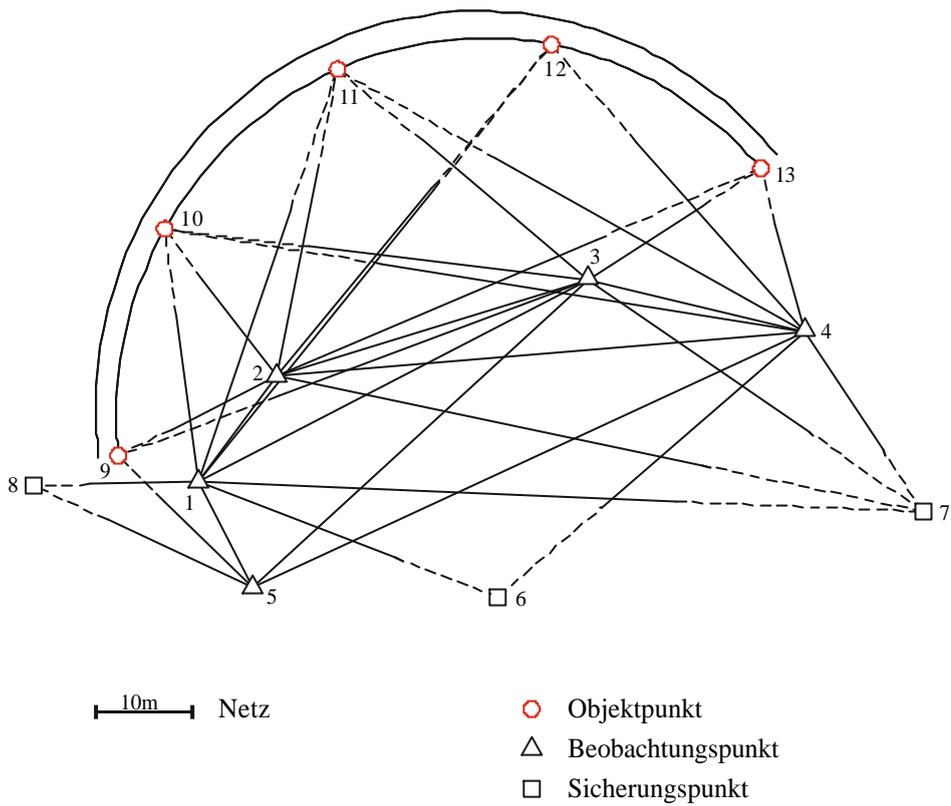


Abb. Überwachungsnetz einer Bogenstaumauer mit Beobachtungsplan

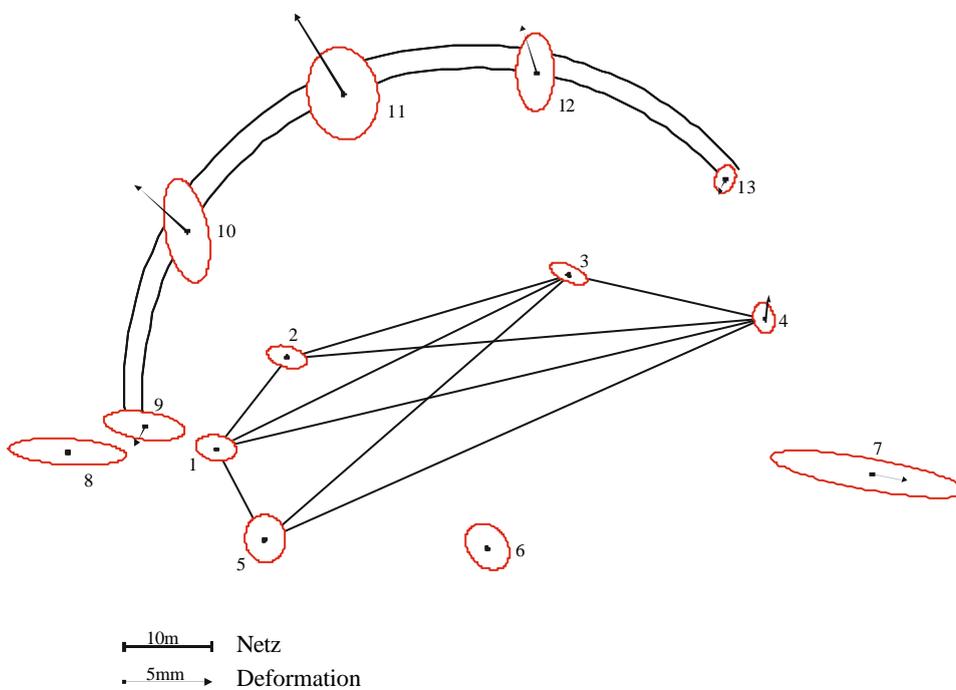


Abb. Überwachungsnetz einer Bogenstaumauer mit Punktverschiebungen und Konfidenzellipsen

8 Baukontroll- und Überwachungsmessungen an hohen Türmen

8.1 Baulagenetz und Absteckung von Schornsteinen und Türmen

- Anlage eines Festpunktnetzes als Absteckungsgrundlage:
 - Rechtwinklige und Polarnetze für Industrieschornsteine und Kühltürme
 - lokale trigonometrische Netze für Fernseh- oder Funktürme.
- Ständige Kontrolle der vertikalen Bauausführung der Bauwerksachse unter
- Berücksichtigung von Temperatur- und Windeinfluss
- Festlegung des Bauwerkszentrums und Kontrolle der Radien in best. Höhen
- Überprüfung des projektgetreuen Bauablaufes
- Höhenabsteckung und Setzungsmessungen
- Bauwerksüberwachungsmessungen: Tachymeter (T3000, TC 2002), GPS, Neigungsmessungen, Lotungsmessungen

Für die Absteckung der Grundrissgeometrie von Schornsteinen und Kühltürmen sowie die Baukontrollmessungen gibt es keine Genauigkeitsforderungen der AG. Empirische Vorgaben für $s_{x,y}$ streuen zwischen 5 mm und 20 mm.

(1) Schornsteine geringerer Höhe < 120 m :

- Achse AB parallel Hauptachse Baulagenetz
- Schornsteinzentrum, Sicherungspunkt, Beobachtungspunkt vermarken
- zur Sicherung Bauablauf Senkrechte in 1 und 2;
- alle S und B außerhalb Druckzone
- Entfernung $B1 = H$ (Höhe), keinesfalls $< 2/3 H$ (steile Visuren - Vergrößerung s_r , Stehachsenneigung, verzerrte Zielbilder)

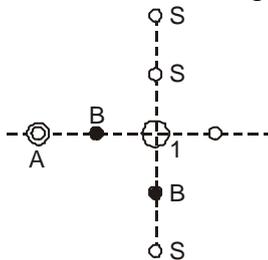


Abb. Absteckung von Schornsteinen

(2) Schornsteine größerer Höhe; z.B. 300 m hohe Schornsteine in Gleitbauweise

- 4 Beobachtungspfeiler
- Genauigkeit der Absteckung von BP \Rightarrow Baukontrollmessungen $s_D \leq 3mm$

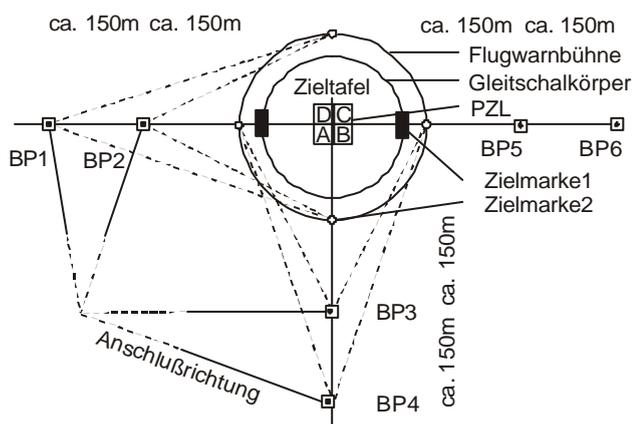


Abb. Absteckungsnetz

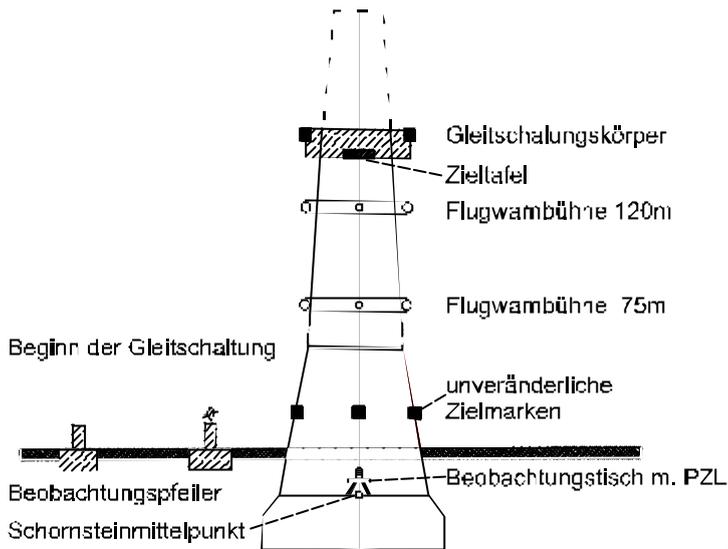


Abb. Schornstein 300m

Geforderte Genauigkeit für die Bestimmung der Querabweichung am Schornstein:

$$s_q = 3\text{mm}$$

$$q = \frac{Dr}{r} \cdot s \quad \text{und} \quad s_q = \frac{S_{Dr}}{r} \cdot s$$

ungünstiger Fall: $s = 300\text{ m}$ (BP 1 und 4) $S_{Dr} =$

$$S_{Dr} = \sqrt{s_{rN}^2 + s_{rF}^2 + s_{rA}^2}$$

s_{rN} Nullmessung

s_{rF} Folgemessung

s_{rA} Orientierung zur Anschlussrichtung

Lokales trigonometrisches Netz

- Fernseh- und Funktürme
- Orientierung nach Geographisch-Nord, Berechnung der Meridiankonvergenz (Geographisch-Nord - Gitternord): $g = (L - L_0) \cdot \sin B$
- Netze dienen der Absteckung und meist auch der späteren Überwachung, für trigon. Messungen (Bau, Überwachung) mindestens 2 BP (x,y-Achsen)
- keine Kontrollmöglichkeit evtl. Pfeilerbewegungen → weitere BP bzw. Festpunkte einbeziehen - möglichst azimutale Verteilung; mittels RE Stabilität prüfen

Beispiel: Genauigkeitsforderungen der Projektanten:

Fernsehturm	Genauigkeitsforderung "Vertikalität"	Genauigkeitsforderung „Höhe“
Berlin	361 m: 3...5 cm	1 cm je 45 m Höhe
Dresden	170 m: 4 cm	1 cm je 30 m Höhe

Forderungen sind als "Grenzfehler" $G = 3s$ aufzufassen

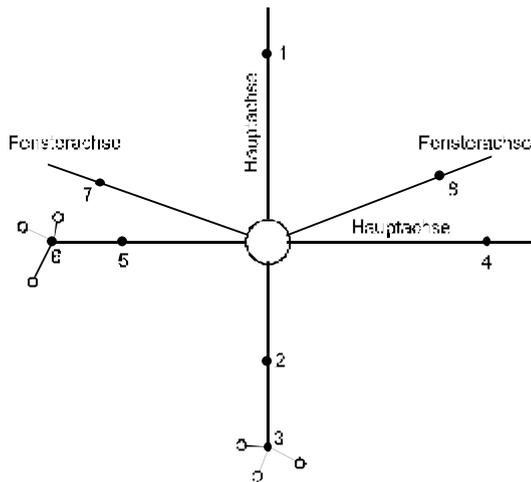


Abb. Fernsehturm Dresden

Beispiel: erreichte Genauigkeit bestätigen die Einhaltung dieser Forderungen

Fernsehturm	erreichte Genauigkeit „Vertikalität“
Berlin	6...7 mm (2 Beob.- Standpunkte) 4,5...5 mm (4 Beob.-Standpunkte)
Moskau	300 m: 15 mm 520 m: 12 mm
Dortmund	174 m: 4 mm
Stuttgart	160 m: 6 mm

Entfernung der Beobachtungspfeiler

- Steile Zielungen mit Theodolit/Tachymeter: **Richtungskorrektur** (vgl. IG I)
Korrektur der gemessenen Richtung wegen Kippachsneigung i , z Vertikalwinkel

$$f(i) = -i \cdot \cot z$$

- Zielpunkt P: Ablesung z_1 ; Drehung um 100 gon; Ablesung: Vertikalwinkel z_2
- Theo um weitere 200 gon drehen: Ablesung z_2
- Kippachsneigung i der in der Horizontalrichtung wirksam ist und durch die Stehachsneigung verursacht wird:

$$i = \frac{z_2 - z_1}{2}$$

8.2 Turmbewegungen

- Kontrolle und Überwachung der vertikalen Errichtung
 - Unvermeidliche **Fehler der Bauausführung** erfassen → Korrekturen des Bauablaufes
 - Auf das Turmbauwerk wirken zusätzlich **äußere Einflüsse** (Sonne, Wind)
- Von der festgestellten Abweichung oberer Turmzentren muss der Anteil infolge äußerer Einflüsse abgespalten werden, um **Baufehler** unverfälscht zur Berechnung der Korrekturen zu erhalten.

Bewegung und Verformung	Ursache (Auswahl)
Eigenschwingungen	Dynamische Anregung (Wind, Betrieb)
Biegeverhalten im Tagesgang (z.T. idealisiert)	Statische Belastung (Temperatur, Wind, Eis, Betrieb)
Biegeverhalten im Jahresgang	Temperatur, Grundwasserstand
Trend, Schiefstellung	Setzungen, Dauerbelastung, Materialverschleiß
Bewegungen und Verformungen aufgrund besonderer Umstände	Baumaßnahmen, Belastungsversuche

Tägliche Turmbewegung infolge Sonneneinstrahlung

(verallgemeinerungsfähige Ergebnisse vom Fernsehturm Dresden)

- Tögl. Bewegungsablauf etwa elliptisch: abhängig von der geografischen Breite f und Turmhöhe H
- Verhältnis der Ellipsendurchmesser (Dresden)
 - 1 : 1,6 $H = 125$ m
 - 1 : 1,8 $H = 190$ m
- Über mehrere Tage zeigt sich ein spiralenförmiger Ablauf, wobei Turm am Folgetag Lage vom Vortag nicht wieder erreicht:
- Beobachtete Maximalauslenkungen des Zentrums in 190 m Höhe:
 - 22 cm in Ost-West-Richtung
 - 12 cm in Nord-Süd-Richtung
- Ermittelte Bewegungsgeschwindigkeiten: 1,6 cm/h in 125 m Höhe
3,1 cm/h in 190 m Höhe
- Größe der Auslenkung abhängig von Strahlungsintensität, Sonnenscheindauer
- Windeinfluss (Böen) berücksichtigen

Schlussfolgerung

- Absteckungs- und Überwachungsmessungen (über Tage oder längere Zeiträume) sind nur im Ausnahmefall exakt miteinander in Beziehungen zu bringen.
- Gilt nicht nur für Messungen unter gleichen äußeren Bedingungen sondern auch unter gleichen günstigen Bedingungen (anhaltend bedeckter Himmel).
- Bewegungsgeschwindigkeiten entsprechen unter der nicht sicheren Annahme einer gleichförmigen Bewegung Beträgen von 1 mm/4 min bis 2 mm/4 min. Hieraus folgt, dass länger andauernde Beobachtungen bzw. Visuren nach mehreren vertikal angeordneten Messpunkten verfälscht werden.
- Bei starker Sonneneinstrahlung ist die Beobachtung von **mehr als einem Satz** we-

gen der großen Bewegungsgeschwindigkeit des Bauwerkes ohne Gewinn.

- Messungen zur Ermittlung der Ruhelage des Turmzentrums in oberen Bereichen sollten nach einem langfristig geplanten Beobachtungsprogramm verlaufen und bei möglichst anhaltend bedecktem Wetter stattfinden.

Beachte: Beobachtungen in den frühen Morgenstunden gegen 4.00 Uhr bis 5.00 Uhr. Bis zu diesem Zeitpunkt sind die Bewegungen des Vortages weitestgehend abgeklungen, und die des beginnenden Tages wurden noch nicht angeregt.

Bestimmung der vertikalen Biegelinie

- **Biegelinie:**

- **Bauabweichung:** Abweichen des Gleitschalungskörpers aus der Lotrechten
 - **Gerüstdrehung:** Drehung des Gleitschalungskörpers um den Mittelpunkt
 - **Deformation D:** Infolge äußerer Einflüsse (Wind, Sonne, Temperatur) - keine Ruhelage
- Aus den Ergebnissen der Beobachtungen zu den unteren, fest mit dem Bauwerk verbundenen Zielmarkierungen erhält man die Daten der Biegelinie: die beiden Komponenten der Horizontalauslenkung für die jeweilige Bauwerkshöhe (Messhorizont).
 - Betrag der abschätzbaren Messungsfehler und Baurestfehler beachten
 - In der Horizontalauslenkung dieses Punktes wird der mit seinem vollen Betrag enthaltene, gesuchte Baufehler von dem Einfluss der Biegelinie überlagert.
 - Ein Vergleich dieser Auslenkung mit dem für die gleiche Bauhöhe extrapoliertem Wert liefert mit der Differenz beider Größen die benötigte Verbesserung der gemessenen Horizontalauslenkung für den jeweils höchsten Punkt.

⇒ Gesamtauslenkung, Baufehler, Horizontalauslenkung infolge Sonneneinstrahlung

Deformation (Biegelinie): ab 75 m (vorher kaum wirksam) Richtungsmessung von 2 BP (rechtwinklig zueinander)

Baufehler: mit PZL vom Turmfuß (-mittelpunkt) nach Zieltafel am Gleitzenit

Gerüstdrehung: Von einem BP, zur Kontrolle besser von 2 (rechtwinklig zueinander oderauf einer Achse) Winkel zwischen Zielmarke am Fuß (unveränderlich) und am Gleitschalungskörper messen.

Extrapolation (Differenz Gesamtauslenkung minus Interpolation = Baufehler): Bewegungsgeschwindigkeit berücksichtigen (z.B. mit Messungsanordnung)

Trigonometrische Messungen

Nach Bauende mit dem Ziel:

- Darstellung ausgewählter Turmpunkte und Bestimmung der Ruhelagepunkte
- Konstruktion der **vertikalen Biegelinie** (2 Aufrissdarstellungen und Grundriss)

TC 1800: $s_{r0} = 0,3 \text{ mgon}$ (günstige Bedingungen möglich, Prüfung nach DIN 18723)

$$s_{r0} = \sqrt{\frac{s_z^2}{\sin^2 z} + s_i^2 \cdot \cot^2 z}$$

s_z Standardabweichung der Anzielung in Abhängigkeit vom Zenitwinkel

s_i Standardabweichung der Kippachsneigung infolge Stehachsfehler

Für längere Messung empfiehlt sich experimentelle Bestimmung von s_{r0} , da atmosphärische Einflüsse, äußere Einflüsse (kurzzeitige Bauwerksschwingungen bei Wind), persönliche Fehler des Beobachters nicht enthalten sind.

Beispiel: Vergrößerung von s_{r0} infolge des Zenitwinkel

Zenitwinkel z	100 gon	55 gon	42 gon	35 gon	30 gon
s_{r0}	0,4 mgon	0,5 mgon	0,6 mgon	0,7 mgon	0,8 mgon

Messungsanordnung

→ **Simultane Beobachtung** (Bewegungsgeschwindigkeiten) von zwei in senkrechten Richtungen zueinander gelegenen Beobachtungspfeilern (Zeitablaufplan, Funksprechgeräte)

→ alle Satzmittel je Zielpunkt aus beiden Fernrohrlagen auf den gleichen Zeitpunkt reduzieren (unvermeidbare Annahme: gleichförmige Bewegung des Bauwerkes)

- Anwendung des Messverfahrens von RAINKIN [Vermessungstechnik (1979) Heft 2]: von nur einem Standpunkt aus Hz- und Zenitwinkelmessungen:

Gemessen:

- **Horizontalwinkel** a zwischen ei-nem Bezugspunkt am Turmfuß, in Richtung des Turmzentrums, und der Zielmarke M
- **Zenitwinkel** z nach M
- **Höhenunterschied** DH beim Bau des Turmes bzw. Nullmessung
- **Bauwerkstemperatur** T am Turmfuß

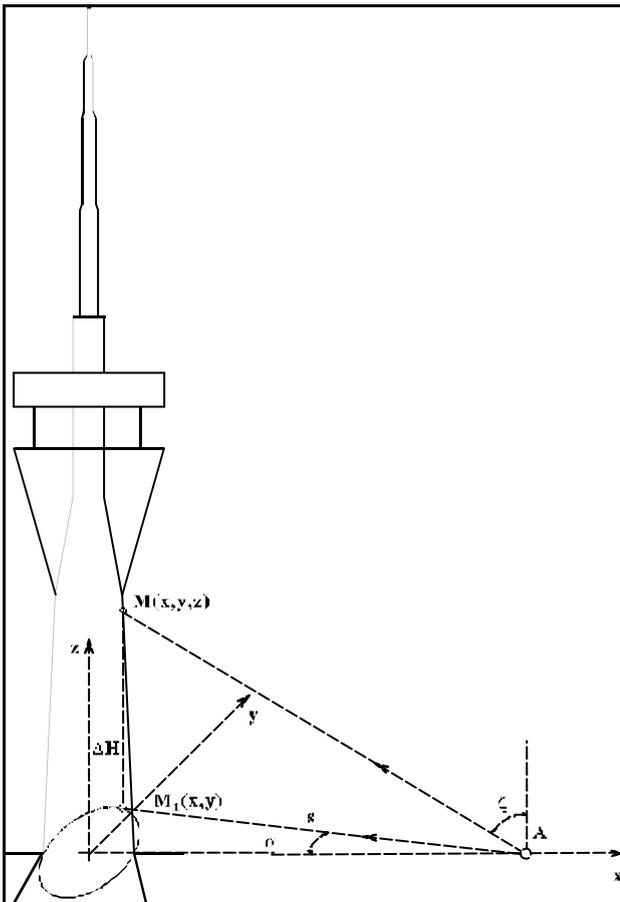


Abb. Turmüberwachung

- Berechnung der Koordinatenänderungen:

- $Dx = x_i - x_0 = -DH_i \tan z_i \cos a_i + DH_0 \tan z_0 \cos a_0$

- $Dy = y_i - y_0 = DH_i \tan z_i \sin a_i - DH_0 \tan z_0 \sin a_0$

- Korrektur des Höhenunterschiedes wegen Neigung und thermischer Längenänderung (Ausdehnungskoeffizient des Turmmaterials)
- erreichte Genauigkeit: $s_{\Delta x, \Delta y} = 5mm..8mm$

Genauigkeitsbetrachtungen

FST Dresden: Von BP 3 und 6 ist die horizontale Verformung Δ der Bauwerkspunkte mit $s_{\Delta} = 5mm$ zu bestimmen.

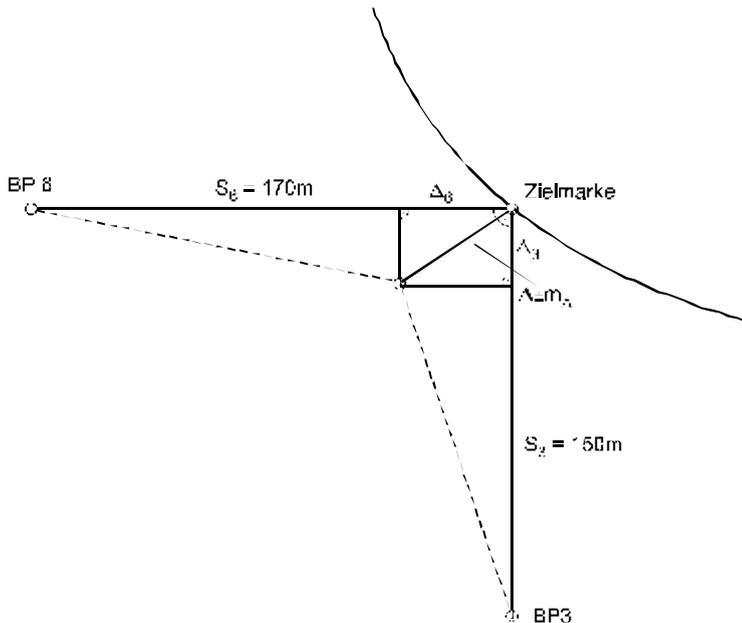


Abb. Genauigkeit der Punktbestimmung

$$D^2 = D_3^2 + D_6^2 \text{ bzw. } S_D^2 = S_{D_3}^2 + S_{D_6}^2$$

Mit der Annahme $S_{D_3} = S_{D_6} = S_{D_i}$ wird $S_{D_i} = 3,5\text{mm}$

D aus Absteckungsmessung und Bezugsmessung (Differenz), für Einzelmessung

$$\frac{S_D}{\sqrt{2}} = S'_{D_i} = 2,5\text{mm}$$

Jede Einzelmessung setzt sich zusammen aus den 2 Anzielungen zum Bezugspunkt (Turmfuß) und zur jeweiligen Zielmarke.

Für die einzuhaltende Standardabweichung folgt hieraus mit $s = 150\text{ m}$

$$s_w = \frac{S'_{D_i}}{s} \cdot r = 1,1\text{mgon}$$

Kann diese Forderung mit welchem Aufwand eingehalten werden:

$$s_{r_0} = \sqrt{\frac{S_z^2}{\sin^2 z} + s_a^2 + s_i^2 \cdot \cot^2 z}$$

Beispiel:

Dies gilt für den ungünstigsten (kleinsten) Zenitwinkel BP3 mit $\zeta = 42\text{ gon}$.

- Mehrere Sätze wegen Bewegungsgeschwindigkeit wenig sinnvoll!
- Bei Verdrehungen des Turmmantels? tangentielle Zielungen
- Änderung des kleinen Winkel Tangente - Zielmarke

Höhenmessungen

a) Höhenabsteckungen

- Auswahl geeigneter Höhenfestpunkte in Bauwerksumgebung (evtl. neu schaffen)
- Vermarkung von mindestens 4 HB (diametral) am Bauwerksfuß (bis zu 6 oder 8 sinnvoll)
- Bezugshöhe nivellistisch an Bauwerksfuß übertragen (innen und außen)
- Anschlussmessung (50 m oder 100 m)
- Übertragung der Zwischenhorizonte mit Nivellier und Messband

b) Setzungsmessungen während der Bauzeit

- Kontrolle des Baugrundes unter ständig zunehmender Belastung
- Vergleich mit Vorausberechnungen
- Präzisionsniv. zur Erfassung gleichmäßiger und ungleichmäßiger Setzungen
- Beispiel zur Ermittlung der Schiefstellung infolge ungleichmäßiger Setzung; Q ist die Schiefstellung

$$Q \approx \frac{H}{D} \cdot Dh$$

Fernsehturm Dresden: $H \approx 250m$; $D \approx 10m$; $\Delta h = 1mm \Rightarrow Q = 25mm$

In gleicher Weise werden die Standardabweichungen dieser indirekten Ermittlung der Schiefstellung beeinflusst:

$$s_Q = \frac{H}{D} \cdot s_{Dh} \quad s_{Dh} = s_{HP} \cdot \sqrt{2};$$

- Dh aus Relativnivellement für HP: dann wird
- Schlauchwaage $s_{hydr} = 0,05mm \dots 0,1mm$;

9 Absteckung und Überwachung von Brücken

9.1 Absteckung

Brücken werden aus Stahl oder meist aus Stahlbeton hergestellt. Um die Längs- und Querkkräfte aufzunehmen wird die Konstruktion heute elastisch ausgelegt, was zu *Schwingungen* des Bauwerks führt. Die Last nehmen am Anfang und Ende die Widerlager sowie Pfeiler (Brücken-Unterbau) auf. Die Längsachse verläuft innerhalb der Trasse geradlinig oder gekrümmt.

Der Bau einer Brücke erfolgt über ein Schalgerüst auf den zuvor errichteten Pfeilern oder im sog. Taktschiebverfahren, bei dem mit dem Ende der Brücke bzw. des Brückenteils begonnen und Element für Element an einem Widerlager erstellt und nach vorne geschoben wird.

1. Übertragung der Länge der Brückenachse mit Zwischenpunkten
2. Ermittlung der Schnittpunkte der Brückenachse mit den Pfeiler- und Widerlagerachsen
3. Absteckung der Pfeiler- und Widerlagerachsen; Bauwerksachse -Verbindungsline Widerlagermitten

Als Maß für die Beurteilung der Genauigkeit wird für die Querabweichung (y) zum Bauwerk eine höhere Genauigkeit als in Längsrichtung (x) gefordert.

Brückentyp	s_x [mm]	s_y [mm]	s_z [mm]
Stahlbrücke, aus Fertigteilen montierte Brücke, vorgespannte Stahlbetonbrücke	10	5	2
Bauwerksüberwachungsmessungen	5	5	1
Sonstige Massivbrücke	20	10	3

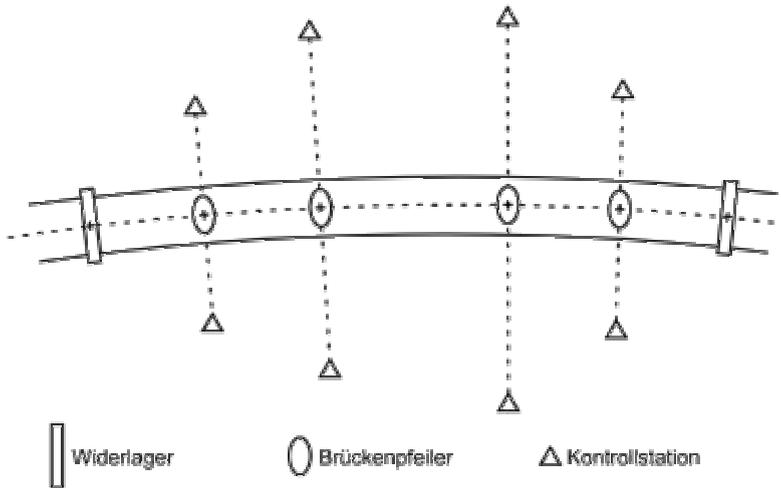
Tabelle: Absteckgenauigkeiten bei Brücken

- Der Koordinatenursprung ist so zu wählen, dass keine negativen x - und y -Koordinaten auftreten und sich die Zahlenwerte der x - und y -Koordinaten deutlich unterscheiden

Baulagenetz und Absteckung

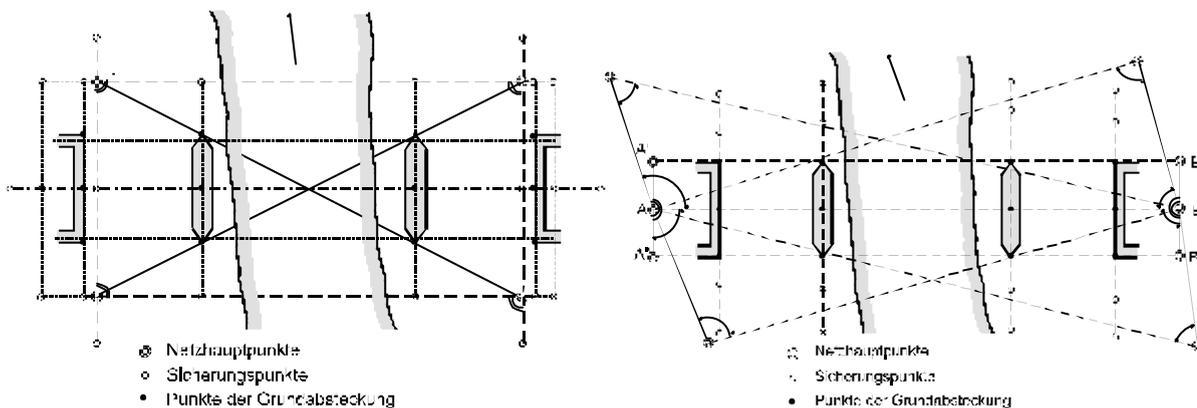
Die Hauptpunkte sowie ihre Kontrollpunkte bilden zusammen ein örtliches Netz, das bei Satellitenbeobachtung dreidimensionale Koordinaten liefert. Falls es die Verhältnisse erlauben, das Verfahren der gleichzeitigen Zenitwinkelbeobachtung zur Höhenübertragung.

- gerade Brücken: Vermarkung der Bauwerksachse oder einer Parallelen
- gekrümmte Brücken: Polygonzug
- Hochbrücken, Talbrücken, Hochstraßen, Kreuzungsbauwerken in mehr als zwei Ebenen: flächendeckende GPS-gestützte Netze



Talbrücke

Rechtwinkliges Vierecksnetz Strecken und Winkel mit anschließender Ausgleichung. Die rechtwinklige Netzgestaltung bringt keine messtechnischen Vorteile, weil die Brückenpunkte mit Polarkoordinaten abgesteckt werden.

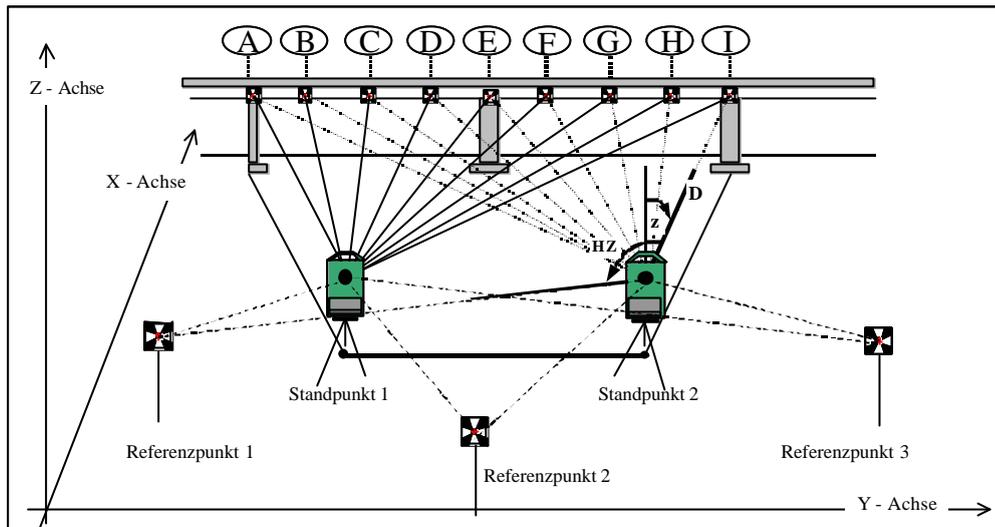


- Polarnetz: hinter den Widerlagern im Abstand der Pfeilerpunkte die Punkte A, A', A'' und B, B', B'' vermarken und sichern
- Pfeilerpunkte: Geraden durchfluchten; Entfernungen im Tracking-Verfahren
- Während des Baufortschritts und nach Beendigung der Bauausführung sind die Lage- und Höhenpunkte auf die jeweilige Plattform zu übertragen.

Strombrücken

- Strombrücken: Pfeiler im Wasser und große Entfernung zwischen den Festpunkten und dem Pfeilerzentrum
- Absteckung von zwei Parallelen als Arbeitsachsen zur Brückenlängsachse
- Abstand zwischen beiden Achsen 20 m bis 50 m
- Bau der Brückenpfeiler: Einweisung von Rammeinrichtungen; Spundwände zur Sicherung der Baugrube oder Pfahlgründungen – Einrichten der Rammen auf Pfeiler
- Pionierarbeiten für die Pfeilergründung; Brückenachsen und die Pfeilerachsen sind auf die Spundwände übertragen.

9.2 Überwachung

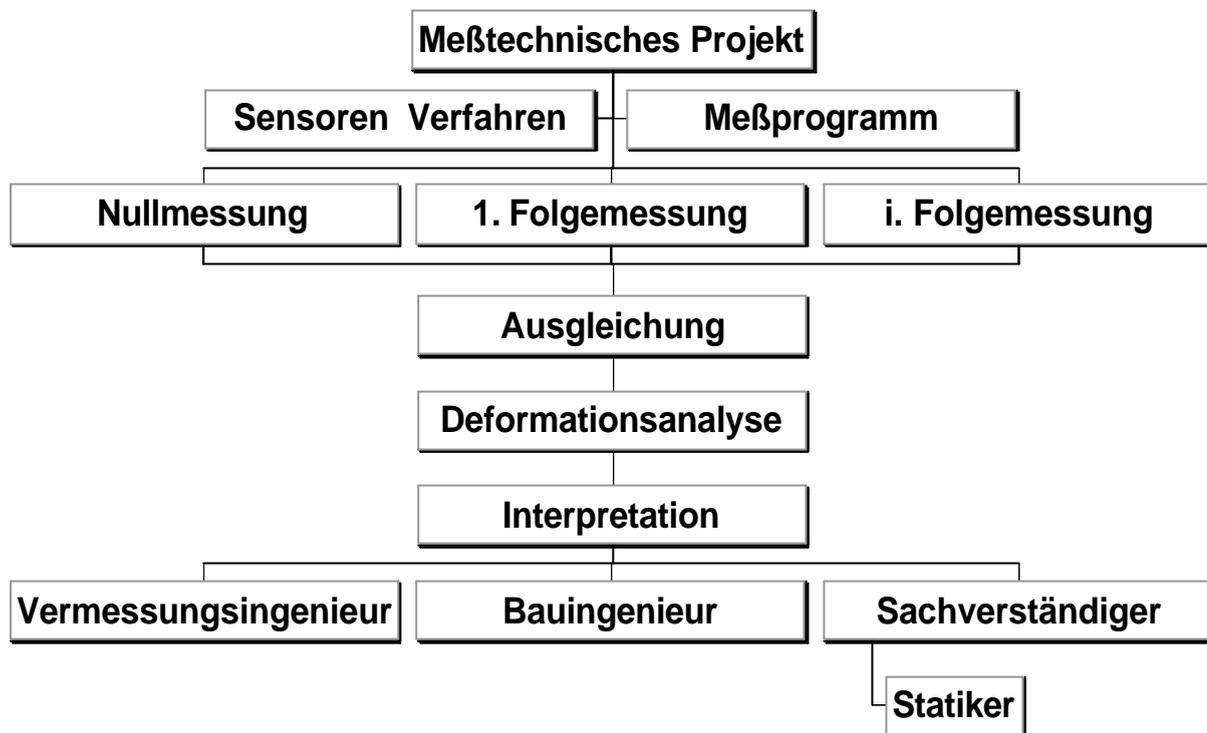


$$D = D_{ZP} \left(\cos(z_{ZP})^{(i)} - \cos(z_{ZP})^{(0)} \right) - D_{RP} \left(\cos(z_{RP})^{(i)} - \cos(z_{RP})^{(0)} \right)$$

$$Dh = s \cdot \cot z + \frac{1-k}{2R} \cdot s^2 + i$$

- Zielentfernungen $s = 100 \text{ m} \dots 200 \text{ m}$
- Zielmarken/Messpunkte am Objekt im Ausnahmefall begehbar: einseitige Beobachtung
- Erdkrümmung; Refraktion minimieren durch **synchrone Beobachtung** von 2 Standpunkten in beiden FRL
- Wiederholungsmessungen unter gleichen meteorologischen Bedingungen
- Stabile Pfeilerstandpunkte

10 Auswertung und Interpretation der Messungsergebnisse



10.1 Bewertung der Messungen und Deformationen

Für die Beurteilung der Sicherheit eines Objektes sind zuverlässige Beobachtungen nicht ausreichend. Deshalb ist es wichtig, eine wissenschaftliche Analyse und Interpretation der Messungen durchzuführen, um die Bewegungsursachen zu erkennen.

Gewöhnlich bricht man bei der **Primärauswertung** der Beobachtungen ab, wenn erwartetes "**normales**" Verhalten des Objektes durch Messungsergebnisse bestätigt wird.

Primärauswertung

Graphische Darstellung des Deformationsverlaufs mit Eintrag einzelner wichtiger Einflüsse, wie z.B. Lufttemperatur, Eigenlast und Stauhöhe bei Stauanlagen.

- Deformationen charakteristischer Punkte (Krone) als Funktion der Stauhöhe
- Projektion der Deformation in eine Hz-Ebene für $\Delta x, \Delta y$
- Voraussetzung: Messungsergebnisse ohne grobe und systematische Fehler

Bewertungsinterpretation

Im Ergebnis von Bauwerksüberwachungsmessungen erhält man in zahlreichen Fällen nur eine Deformationsgröße: **linear, eben oder räumlich** definiert und wird von **Einflussgrößen** verursacht. Der Bauingenieur ist bemüht, Kenntnisse über Richtung und Größe der einzelnen Komponenten zu erlangen, was vielfach recht kompliziert und aufwendig ist.

Es ergibt sich für einen definierten Deformationszustand die Frage:

„ob dieser Bauwerkszustand als "normal" oder ob er als gefahrenanzeigend einzuschätzen ist“,

d. h., zur **Bewertung** eines solchen Zustandes muss ein geeignetes **mathematisches oder physikalisches Modell** zur Verfügung stehen.

Damit kann der Deformationszustand prognostisch für einen begrenzten Zeitraum mit ausreichender Genauigkeit mathematisch oder physikalisch beschrieben werden und mit dem aus Messungen hergeleiteten Zustand zu vergleichen.

Für die „geodätische Interpretation“ ist der Geodät verantwortlich !

Sind die erhaltenen Deformationen D tatsächlich Deformationen oder werden sie durch **Festpunktbewegungen** oder **Messunsicherheiten** (sprich Fehler) vorgetäuscht ?

Die Antwort auf die obige Frage ist meist dann ohne Schwierigkeiten möglich, wenn

$$D > 3s_D \cdot 5 \cdot 10s_D \quad \text{Deformation sicher nachweisbar}$$

wesentlich schwieriger ist es bei einem Verhältnis

$$s_D < D \leq 3s_D \quad \text{Deformation nicht sicher nachweisbar}$$

und nicht lösbar ist

$$D = s_D \quad \text{Deformation nicht nachweisbar}$$

Die Relation **1 : 3** ist nicht selten der Fall: z.B. kleine Δ bei ausklingenden irreversiblen Deformationen.

Gleichzeitig gibt diese Beziehung die Grenze an, bei der die Bestimmung der Signifikanz einer Deformation ohne mathematische Hilfsmittel unsicher wird.

10.2 Interpretation

Bautechnisch - physikalische Auswertung

Zwei grundsätzliche Möglichkeiten zur Vorausbestimmung eines Deformationszustands und dessen Bewertung:

⇒ **a priori** - physikalisches Modell; **a posteriori** - mathematisch-statistische Analyse

Die mathematisch-statistische Analyse setzt mehrjährige, gleichwertige (Belastungsbedingungen, Messgenauigkeit, Beobachter u.a.) Messreihen voraus. Das schließt eine Anwendung an neuen Bauwerken aus.

Die Deformationen für eine Staumauer werden mittels **Bewertungsfunktionen** vorausberechnet: **Funktionales** Modell, das die Abhängigkeit zwischen der Bewegung eines Punktes (Trend) und verschiedenen Einflussgrößen (Temperatur T , Stauhöhe h ,) darstellt.

Sie wird im Ergebnis von Variantenuntersuchungen gefunden. Dabei ist diejenige Modellvariante als optimal anzusehen, die mit der kleinsten Zahl von Parametern auskommt, ohne die Standardabweichungen einer Beobachtung spürbar zu vergrößern.

Die Bewertungsfunktion wird auf der Grundlage von Erfahrungen an Hand der Ergebnisse von Voruntersuchungen aufgestellt. Ihre Unbekannten werden aus vorliegenden Beobachtungen eines bestimmten Zeitraums durch Ausgleichung bestimmt.

Beispiel:

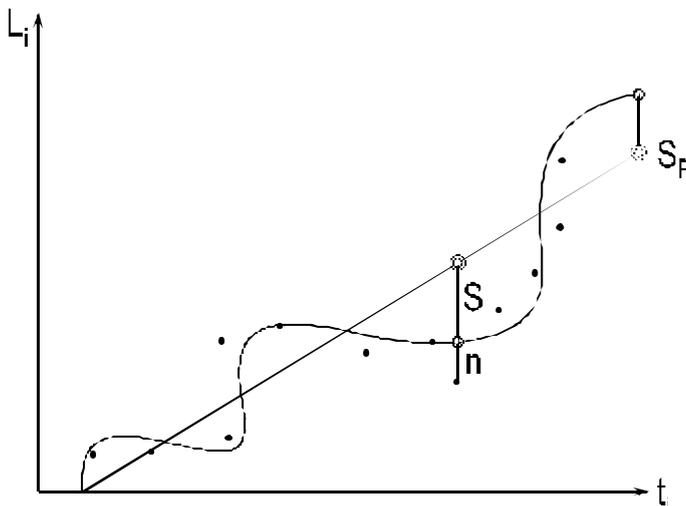
Zur Ermittlung des gesuchten Zusammenhangs Einflussgröße - Objektdeformation sind **Regressions- und Korrelationsuntersuchungen** vorzunehmen.

Die Bewertungsfunktion "dient nicht nur der Bewertung von Beobachtungen innerhalb" des für die Ausgleichung zugrunde gelegten Zeitraums, "sondern soll durch **Extrapolation** die Bewertung aktueller Messergebnisse ermöglichen.

Bei Setzungsmessungen wird der **Zeit-Setzungs-Verlauf** mathematisch durch **Parabeln 2. bis 5. Grades**, Hyperbeln oder geeignete e-Funktionen dargestellt. Die erreichten Fehler blieben unter 5 %, was als sehr gute Genauigkeit einzuschätzen ist, die für den bestimmten Zweck völlig ausreicht.

Ein Vergleich vorausberechneter mit beobachteten Deformationsgrößen erlaubt wertvolle Rückschlüsse auf das Verhalten von Bauwerk und Baugrund. Rechtzeitig können auf diese Weise **Abweichungen vom erwarteten Normalverhalten** und damit erste Gefahrenzeichen erkannt und notwendige Maßnahmen ergriffen werden.

Das **Kollokationsmodell** gibt die Möglichkeit, "Trend", "Rauschen" und "Signal" eines Deformationsvorgangs zu erfassen und mittels "**Prädiktion**" die Bewegung eines Punktes im betrachteten Vektorfeld zu einem nicht durch Messung dokumentierten Zeitpunkt zu bestimmen (Auswertung von Zeitreihen, Interpolation, Extrapolation).



10.3 Teststatistik

Auswahl eines geeigneten Tests

Bei Bauwerksüberwachungsmessungen ist zu entscheiden, ob eine einzelne Differenz zwischen Null- und Folgemessung (Deformation eines Einzelpunktes) oder mehrere Differenzen (z. B. bei Netzen) zu prüfen sind. Wenn bei letzterem auf Deformationen geschlossen werden kann, sind auch die Einzeldifferenzen zu testen.

Wenn Normalverteilung der gemessenen Größen vorausgesetzt werden können folgende Tests angewandt werden:

- STUDENT-Verteilung (t-Test)
- FISHER-Verteilung (F-Test)

Auch die Ergebnisse (Messreihen) von Bauwerksüberwachungsmessungen unterliegen keineswegs in jedem Fall einer Normalverteilung. Das wird vornehmlich bei nicht umfangreichen Messungen zu erwarten sein.

Nullhypothese formulieren

Formulierung einer geeigneten **Nullhypothese** nach der Fragestellung:

Das untersuchte Objekt hat sich im Zeitraum zwischen den betrachteten Beobachtungen nicht verändert!

Nullhypothese $H_0 : m_1 = m_2$

Man stellt die Behauptung auf, dass die Erwartungswerte μ_1 und μ_2 gleichgroß sind, obwohl deren Schätzungen x_1, x_2 voneinander verschieden ausfallen.

Fehler 1. Art

Sie sind die Folge einer Fehldeutung der aufgetretenen Beobachtungsdifferenzen als Deformation, obwohl erstere Unzulänglichkeiten der Messungen u. ä. zuzuschreiben sind. D. h., die Nullhypothese wird abgelehnt, obwohl sie Gültigkeit hat.

Fehler 2. Art

Im umgekehrten Falle bleiben Objektdeformationen unerkannt, wenn die Nullhypothese angenommen wird, obwohl sie nicht besteht. In der Regel sind die Folgen in diesem Fall schwerwiegender, weil u. U. für das untersuchte Objekt Stand- und Funktionssicherheit ernsthaft gefährdet sein können, ohne dass Maßnahmen zur Abhilfe eingeleitet werden können.

Statistische Sicherheit

Festlegung der **statistische Sicherheit** (Signifikanzniveau), die gewöhnlich zwischen $S = 0,90$ und $0,99$ liegt. Meistens wird $S = 0,95$ gewählt.

Ausführung des Tests und

Entscheidung über Annahme oder Ablehnung der Nullhypothese

Zur Ausführung des Tests wählt man nun eine **Testverteilung**, welche neben der bzw.

den Zufallsvariablen auch die durch die Nullhypothese festgelegten Parameter direkt oder indirekt enthält und berechnet die Prüfgröße, auch **Teststatistik T_S** genannt.

Liegt diese in jenem Bereich, in dem gemäß der Testverteilung z.B. 95 % aller Prüfgrößen liegen sollten (Annahmebereich), dann hat man keinen Grund, die Nullhypothese zu verwerfen.

Liegt dagegen die Prüfgröße in dem äußeren Wertebereich, in den z.B. nur 5 % aller Prüfgrößen fallen (Verwerfungsbereich), dann betrachtet man dieses an sich mögliche Ereignis als unwahrscheinlich und lehnt die Nullhypothese ab.

Eine richtige Nullhypothese wird mit der Wahrscheinlichkeit $S = 1 - \alpha$ (= statistische Sicherheit) beibehalten und mit der Wahrscheinlichkeit α (= Irrtumswahrscheinlichkeit oder Signifikanzniveau) verworfen.

Beispiel:

10.4 Auswertung von Netzen

(Deformationsanalyse, 8. Semester)

- statische Modelle (zeitunabhängiges System)
- kinematische Modelle (nur Zeitabhängigkeit der Deformationen)
- dynamische Modelle (Deformationen von physikalischen Wirkungen abhängig).

1. Festpunktanalyse durch Klaffungszerlegung

Transformation der Ergebnisse der Netzausgleichung einer Folgemessung auf die der Nullmessung und mathematisch-statistische Deutung der sich hierbei ergebenden Restklaffungen. Überschreiten diese einen vorgegebenen Grenzwert, so können sie nicht durch Messungsfehler erklärt werden, sondern müssen auf Festpunktbewegungen zurückgeführt werden.

2. Identifizierung von Festpunktbewegungen mittels ausgeglichener Strecken- und Winkeldifferenzen (invariante Größen, sind unabhängig von der Lagerung des Netzes).

Die Deformationsanalyse besteht aus einem Kongruenztest der Netze der beiden Epochen. Dabei ist mit Hilfe eines Hypothesentests (F -Test) zu klären, ob vorhandene Klaffungen zwischen beiden Epochen auf tatsächliche Punktbewegungen zurückzuführen sind oder ob diese durch die Zufälligkeit der Beobachtungen und deren Genauigkeiten entstanden sind.

Dazu bildet man den mittleren Klaffungsvektor:

$$Q^2 = \frac{\mathbf{d}^T \mathbf{P}_{dd} \mathbf{d}}{r}$$

mit r Freiheitsgrad
 \mathbf{d} Differenzvektor
 \mathbf{P} Gewichtsmatrix

und stellt diesen der mittleren Varianz aus beiden Vergleichsepochen gegenüber:

Daraus ergibt sich der Kongruenztest mit der Nullhypothese H_0 :

$$H_0 : F = \frac{Q^2}{s_0^2} \geq F_{1-\alpha; f_1; f_2}$$

$f_1 = n - 1$; $f_2 = r$ mit n : Anzahl der Stützpunkte

Falls das Fraktile der F -Verteilung überschritten wird, geht man davon aus, dass die Nullhypothese: "beide Werte sind statistisch gleich" nicht zutrifft und dies von dem Punkt mit dem größten Anteil am mittleren Klaffungsvektor verursacht wird. Dieser Punkt wird dann als deformiert betrachtet und der Test ohne ihn wiederholt usw. Abschließend erfolgt noch die Signifikanzprüfung deformierter Punkte mittels t -Test.