

## TEIL 3 MESSGERÄTE / MESSMETHODEN

### Inhalt

#### Wasserstand

- 1.01 Druckwaage
- 1.02 Schwimmpegel
- 1.03 Lattenpegel
- 1.04 Manometer
- 1.05 Pneumatischer Pegel
- 1.06 Echolot
- 1.07 Druckmesssonde
- 1.08 Lichtlot

#### Niveau der Sedimente

- 1.09 Wassertiefenmessung

#### Luft- und Wassertemperatur

- 1.10 Thermograph
- 1.11 Normalthermometer
- 1.12 Elektrisches Thermometer

#### Betontemperatur

- 1.13 Normalthermometer
- 1.14 Elektrisches Thermometer
- 1.15 Verteilter faseroptischer Temperaturregeber

#### Niederschlag

- 1.16 Pluviometer / Totalisator / Pluviograph

#### Spannungen im Schüttmaterial und im Beton

- 1.17 Erddruckmessdose

#### Messung von räumlichen Verschiebungen

- 2.01 Triangulation
- 2.02 Satellitengestützte Messungen (GPS)
- 2.03 Photogrammetrie
- 2.04 Laser-Scanning

#### Messung von horizontalen oder vertikalen Verformungen

- 2.05 Nivellement
- 2.06 Einfache Winkelmessungen und Elektrooptische Distanzmessungen
- 2.07 Optisches Alignement
- 2.08 Polygonzug
- 2.09 Lot, Schwimmot
- 2.10 Draht-Alignement
- 2.11 Setzpegel
- 2.12 Schlauchwaage

#### Längenänderungen

- 2.13 Distometer / Distinvar

#### Längenänderungen und Durchbiegungen längs Linien in Bohrungen

- 2.14 Stangen- und Drahtextensometer
- 2.15 Stangenextensometer für Staudämme
- 2.16 Faseroptische Extensometer
- 2.17 Bohrlochmikrometer / Bohrlochmikrometer mit Inklinometer
- 2.18 Rohr-Inklinometer

#### Neigungsänderungen

- 2.19 Klinometer / Tiltmeter

#### Bewegungen von Rissen und Fugen

- 2.20 Mikrometer / Deformeter / Dilatometer / Deflektometer

#### Punktuelle, spezifische Verformungen

- 2.21 Einbetonierte, elektrische Verformungsgeber
- 2.22 Einbetonierte Faseroptik (siehe Blatt 2.15)

#### Sicker- und Drainagewasser

- 3.01 Volumetrische Messung mit Behälter und Stoppuhr
- 3.02 Messüberfall und Messkanal
- 3.03 Messung in völdurchflossenen Rohren
- 3.04 Messung in teildurchflossenen Rohren

#### Druckhöhe im Fels

- 3.05 Piezometer: offene Systeme
- 3.06 Piezometer: geschlossene Systeme
- 3.07 Piezometer: Druckmesszellen (pneumatisch oder elektrisch)

#### Druckhöhe im Lockermaterial

- 3.08 Piezometer: offene Systeme
- 3.09 Piezometer: geschlossene Systeme
- 3.10 Piezometer: Druckmesszellen (hydraulisch, pneumatisch oder elektrisch)

#### Erfassen physikalischer oder chemischer Veränderungen

- 3.11 Trübungsmessung
- 3.12 Chemische Analyse

#### Geophysikalische Methoden

- 4.01 Reflexionsseismik, Refraktionsseismik, Geoelektrik, Elektromagnetik, Georadar, Geomagnetik, Gravimetrie, Seismische Tomographie, Ultraschall, Infrarotaufnahmen, Diagraphie

#### Kamerainspektion

- 4.02 Unterwasserrobotkamera
- 4.03 Bohrlochkamera

#### Betoneigenschaften

- 4.04 Schmidt-Hammer
- 4.05 Laborversuche

#### Feststellung von Wasserzirkulationen

- 4.06 Verteilte faseroptische Temperaturregeber (siehe Blatt 1.15)

#### Verschiedenes

- 5.01 Ankerkraftmessdose





## Wasserstand

### DRUCKWAAGE

#### 1. Messeinrichtung

Messgerät zur Bestimmung des Seestands durch Messung des statischen Wasserdrucks. Die herkömmliche mechanische Druckwaage wird zunehmend durch Quarzsensoren ersetzt.

#### 2. Beurteilung

Dieses Gerät hat sich bewährt; die Messgenauigkeit und die Auflösung der Messwerte übersteigen die zur Überwachung der Staumauern gestellten Anforderungen.



Figur 1.01-1: Quarz-Druckwaage  
(Quelle: Rittmeyer AG, Zug)

Technologische Entwicklungen in neuerer Zeit haben die Zuverlässigkeit dieser Geräte noch verbessert.

Die Fernübertragung der Messwerte ist die Regel, wie auch die automatische Registrierung.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Ablagerungen von Sedimenten können die, Zuleitung vom See her verstopfen und die Messungen stören.

Schwebestoffe im Wasser können die Messwerte verfälschen.

#### 4. Technische Anforderungen

Das Installationskonzept eines solchen Gerätes sollte bereits bei der Sperrenprojektierung festgelegt werden.

Zur Kontrolle der Druckwaage sollte ein Präzisionsmanometer installiert werden.

Die Druck-Entnahmestelle sollte nicht in einem Kanal oder einer Leitung angeordnet werden, wo die Messwerte durch die Fliessgeschwindigkeit des Wassers verfälscht werden (Grundablass, Wasserfassung, usw.).

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Kontrollen:

- bei hohem Seestand: durch Messung ab Nivelements-Fixpunkt oder durch Lattenpegel (Limnimeter)
- bei tiefem Seestand: mittels Präzisionsmanometer oder piezoelektrischer, hydraulischer oder pneumatischer Messzelle
- Unterhalt:
- Leitungen regelmässig spülen.

#### 6. Redundanz

Durch Präzisionsmanometer, eventuell mit Fernübertragung oder durch Druckmesszelle, Lattenpegel, Lichtlot etc.

#### 7. Bemerkungen

Die Fernübertragung dieser Messung sollte im Rahmen der gesamten Messausrüstung projektiert werden.

## Wasserstand

### SCHWIMMPEGEL

#### 1. Messeinrichtung

Gestattet die Seespiegelschwankungen über eine beschränkte Höhe genau zu messen, speziell bei hohem Seestand (Hochwasser).

#### 2. Beurteilung

Einfache und zuverlässige Einrichtung, die jedoch regelmässig kontrolliert werden muss. Der Messbereich ist verhältnismässig beschränkt. Der Schwimmer ist meistens mit einem Registriergerät verbunden oder mit einer Einrichtung für die Fernübertragung ausgerüstet.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

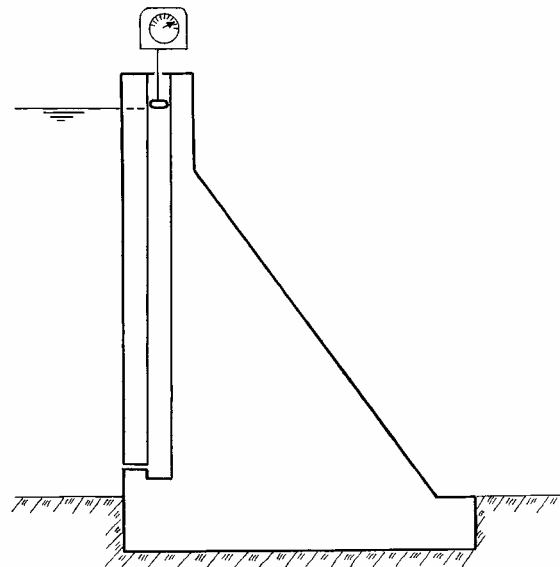
Schwimmer kann durch schwimmende Körper oder durch Eis beschädigt werden. Schlammablagerungen und Geschwemmsel können die Messergebnisse beeinflussen.

#### 4. Technische Anforderungen

Schwimmer darf weder im Bereich einer Wasserströmung noch in einer Zone mit Eisbildung eingerichtet werden. (Nötigenfalls Heizung vorsehen). Zugang zwecks Unterhalt muss gewährleistet sein. Eine spezielle Einrichtung ist zur Dämpfung der Spiegelschwankungen infolge Wellengang vorzusehen. Spülmöglichkeit für den Messschacht vorsehen.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Kontrollieren, dass die mechanischen Teile der Einrichtung sich frei bewegen können. Übereinstimmung zwischen effektivem und angezeigtem Seestand muss periodisch kontrolliert werden.



Figur 1.02-1: Schwimmpegel

#### 6. Redundanz

Lattenpegel (Limnimeter), der auch für die Eichung benutzt wird.

#### 7. Bemerkungen

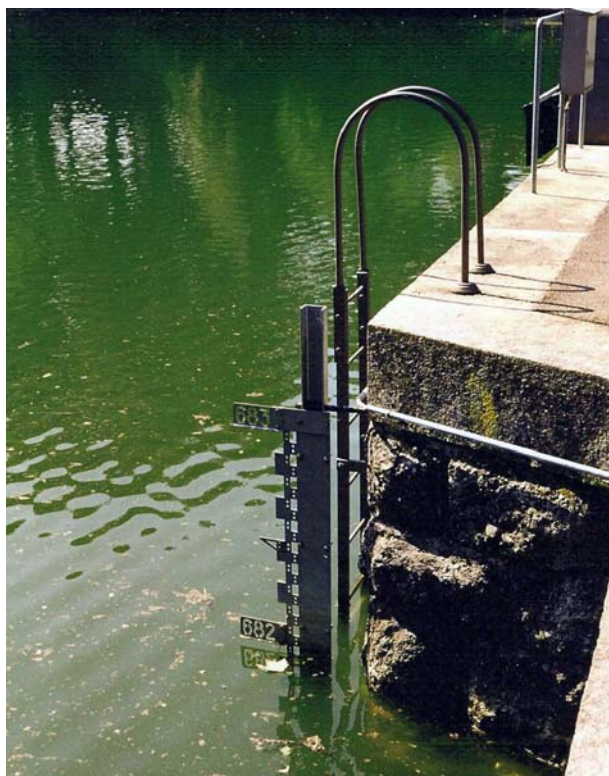
Anstelle des Schwimmers kann auch eine Drucksonde, ein pneumatischer Pegel oder ein Echolot installiert werden, welche den Seestand auf die Registriereinrichtung übertragen und für die Fernübertragung geeignet ist. Eine solche Anordnung weist gegenüber dem Schwimmer keine mechanischen Teile auf.

## Wasserstand

### LATTENPEGEL (LIMNIMETER)

#### 1. Messeinrichtung

Es handelt sich um eine geeichte Latte aus Holz oder Metall, mit Dezimeter- und Zentimereinteilung. Gewisse Modelle sind auch mit einer Einrichtung zum Ablesen des maximal erreichten Seestandes ausgestattet (sogenannte Grenzwertpegel, die einen Papierstreifen enthalten, der sich durch den Kontakt mit dem Wasser verfärbt).



Figur 1.03-1: Lattenpegel

#### 2. Beurteilung

Sehr einfache Seestandsbestimmung durch direkte Ablesung. Gestattet die Seespiegelschwankungen visuell zu verfolgen, z.B. im Falle eines Hochwassers.

Kann vertikal (z.B. auf der Wasserseite einer Staumauer) oder geneigt (längs der Böschung eines Dammes) installiert werden.

Diese Messeinrichtung ist für die Fernübertragung nicht geeignet.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Bei Wellengang kann der Seestand nur ungefähr bestimmt werden. Der Lattenpegel kann durch Geschwemmsel beschädigt werden. Farbe und Markierung verbleichen und blättern ab.

#### 4. Technische Anforderungen

Der Lattenpegel muss so platziert werden, dass er die Wasserströmung nicht behindert; er muss sich ausserhalb des Einflussbereiches einer Hochwasserentlastungsanlage befinden (Verfälschung der Messungen infolge Krümmung der Strömungsoberfläche).

Sicht auf den Lattenpegel und Zugang zu diesem müssen gewährleistet sein.

Der Lattenpegel muss mit einer Markierung versehen werden, die eine sichere Ablesung (eventuell mit Feldstecher) in jedem Falle erlaubt und sollte nötigenfalls eine Beleuchtung aufweisen.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Kontrollieren, ob die Latte stets korrekt fixiert ist und ob sie nicht beschädigt wurde. Regelmässig reinigen und im Bedarfsfall die Farbe der Markierung erneuern.

#### 6. Redundanz

Nicht notwendig.

#### 7. Bemerkungen

Gegebenenfalls kann zur Bestimmung des Unterwasserstandes und des zugehörigen Abflusses ein Lattenpegel luftseits der Talsperre installiert werden.

## Wasserstand

### MANOMETER

#### 1. Messeinrichtung

Eine Verbindungsleitung zum Staubecken überträgt den dem Wasserstand entsprechenden hydrostatischen Druck auf das Manometer.

#### 2. Beurteilung

Einfache, zuverlässige Einrichtung von beschränkter Präzision z.B. als Redundanz zur Grobkontrolle von Druckwaagen.

Diese Messeinrichtung eignet sich nur für die Direktablesung; für eine Fernübertragung der Messwerte müssten Druckmesszellen eingesetzt werden.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Verstopfung, Vereisung, Lufteinschluss in der Zuleitung. Blockieren ("Verhocken") der Mechanik im Messgerät.

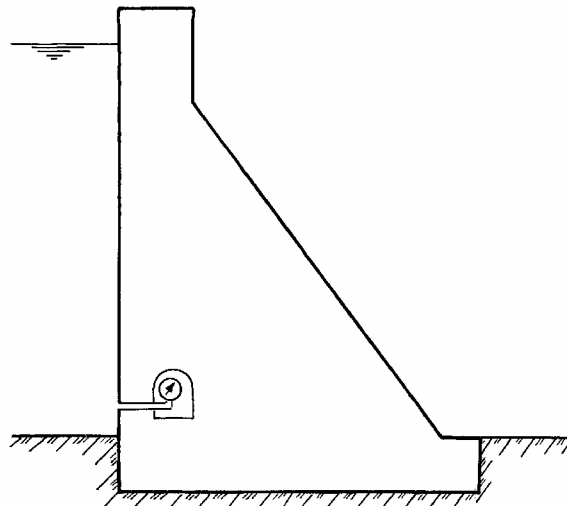
Fehlerhafte Messwerte wegen ungeeigneter Messskala im Gerät.

#### 4. Technische Anforderungen

Frostsichere Anordnung der Zuleitung und des Messgerätes. Spül- und Entlüftungsmöglichkeit in der Zuleitung.

Zuleitung darf nicht im Strömungsbereich von Ein- und Ausläufen (Druckstollen, Grundablass usw.) angeordnet werden.

Die Skala des Manometers sollte den Druck in Höhe über Meer angeben, dadurch entfallen fehleranfällige Umrechnungen.



Figur 1.04-1: Manometer

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Periodische Spülung der Zuleitung.

Periodische Prüfung des Messgerätes (Beschaffung eines Ersatzmanometers für Grobkontrolle ist zu empfehlen).

#### 6. Redundanz

Gleiche Einrichtung an anderer Stelle oder, von Fall zu Fall, andere Einrichtungen wie Lattenpegel, Brunnenpfeife, Lichtlot oder elektrische Druckmesszelle usw.

#### 7. Bemerkungen



## Wasserstand

### PNEUMATISCHER PEGEL

#### 1. Messeinrichtung

Der pneumatische Pegel dient der Erfassung von Wasserständen. Über eine Tauchleitung, die unterhalb des niedrigsten zu messenden Wasserstands angebracht wird und unten offen ist, wird Stickstoff oder Druckluft ausgeperlt. Abhängig vom Wasserstand stellt sich in der Leitung ein Gasdruck von der Grösse des hydrostatischen Druckes ein. Dieser Druck wird mit einer Messzelle registriert und in ein elektrisches Signal umgewandelt.

#### 2. Beurteilung

Diese Messeinrichtung benötigt einen gewissen Installationsaufwand, dafür kann sie sehr flexibel eingesetzt werden.

Sie eignet sich bei geneigten Böschungen von Staudämmen oder Ufern sowie bei Staumauern und Wehren.

Die Messzelle kommt mit dem Wasser nicht in Berührung.

Der Messwertempfänger (Mundstück und Messleitung) benötigt sehr wenig Platz.

Eine Vereisungsgefahr ist praktisch ausgeschlossen.

Diese Messeinrichtung ist für eine Fernübertragung geeignet.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Schlamm- und Geschiebeablagerungen bei der Austrittsöffnung können die Messwerte beeinflussen.

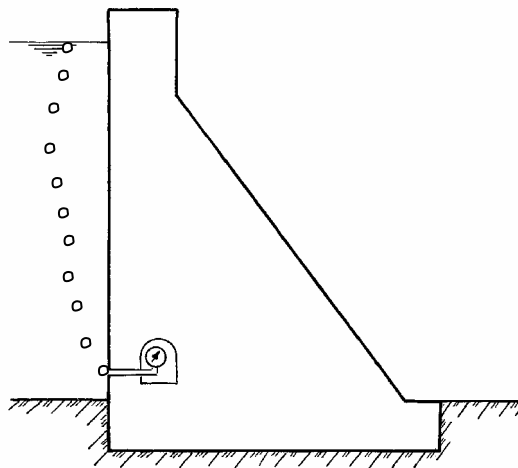
Druckverlust (Stickstoffflasche leer oder Energieausfall am Kompressor) führt zu Messunterbruch.

#### 4. Technische Anforderungen

Die Messleitung muss geschützt vor mechanischen Einwirkungen z.B. in einem Schutzrohr verlegt werden.

Die Mündung der Messleitung sollte nicht in einem Kanal oder einer Rohrleitung angeordnet werden, wo die Messwerte durch das fließende Wasser verfälscht werden können (Grundablass, Wasserfassung).

Auch soll sie ausserhalb des durch die Stromfadenkrümmung beeinflussten Bereichs eines Hochwasserüberfalls zu liegen kommen.



Figur 1.05-1: Pneumatischer Pegel

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Kontrollen:

- bei hohem Seestand: durch Messung ab Nivelements-Fixpunkt oder durch Lattenpegel
- bei tiefem Seestand: mittels Präzisionsmanometer oder piezoelektrischer, hydraulischer Messzelle.
- Unterhalt:
- Die Messleitung ist regelmässig zu spülen.

#### 6. Redundanz

Redundanz kann durch Präzisionsmanometer, Lattenpegel, Druckmesszelle, Lichtlot etc. erreicht werden.

#### 7. Bemerkungen

Die Fernübertragung dieser Messung sollte im Rahmen der gesamten Messausrüstung projektiert werden.

## Wasserstand

### ECHLOT

#### 1. Messeinrichtung

Die Einrichtung ermittelt die Wasserspiegellage mit reflektierten Schallimpulsen. Aus der Zeit zwischen Senden und Empfangen des Signals (Laufzeit) und der Schallgeschwindigkeit im jeweiligen Medium (Luft) wird die Entfernung zwischen dem Sensor und der Wasseroberfläche bestimmt.

#### 2. Beurteilung

Gestattet nach Eichung direkt die Wasserspiegellage zu messen.

Die Installation der Messeinrichtung ist sehr einfach.

Der Messbereich ist auf maximal 8-10 m beschränkt. Die Messgenauigkeit ist  $< 0.5\%$  des Messbereichs.

Die Messeinrichtung ist für eine Fernübertragung geeignet.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Bei Wellengang kann der Seestand nur ungefähr bestimmt werden.

Bei Vereisung der Wasseroberfläche mit Schneeablagerung kann die Messung stark verfälscht werden.

Die Geräte sind empfindlich auf Überspannung und direkte Sonneneinstrahlung.

#### 4. Technische Anforderungen

Die Echolotsonde muss so platziert werden, dass sie sich ausserhalb des Einflussbereichs einer Hochwasserentlastungsanlage befindet (Verfälschung der Messungen infolge Krümmung der Strömungsoberfläche).

Die Wasseroberfläche unter der Messsonde muss vor Turbulenzen, Eisbildungen und Schneeablagerungen geschützt sein.

Die Geräte müssen auch in feuchter Umgebung funktionstüchtig bleiben.

Die Geräte sind gegen Überspannung und vor direkter Sonneneinstrahlung zu schützen.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Kontrollieren, ob die Messsonde stets korrekt fixiert ist (Kontrolle mit Wasserwaage) und ob sie nicht beschädigt wurde.

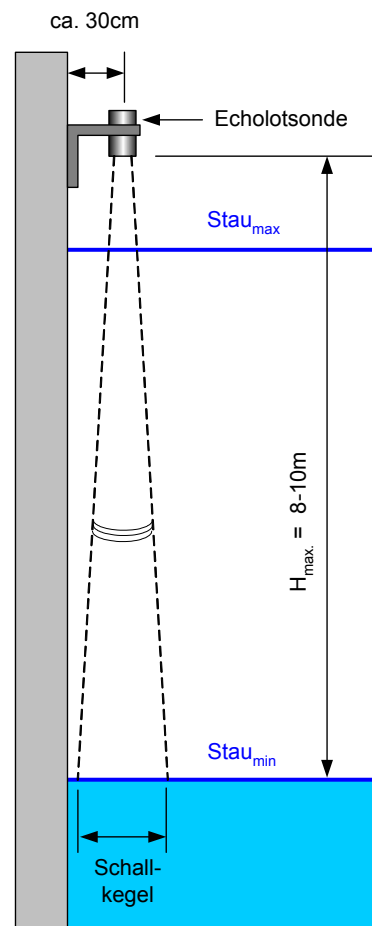
Eichung periodisch mit einem Doppelmeter oder einer Messlatte.

#### 6. Redundanz

Mittels eines anderen Systems für Wasserstandsmessung (z.B. Lattenpegel).

#### 7. Bemerkungen

- Das Echolot muss genau vertikal montiert werden (Kontrolle mit Wasserwaage). Der Schallkegel darf nicht von einer Seitenwand unterschritten werden.
- Innerhalb des Schallkegels dürfen keine festen Gegenstände angebracht sein.
- Direkte Sonneneinstrahlung muss vermieden werden! Das Aufheizen des Sondenkopfes kann zu Messfehlern führen. Gegebenenfalls Schutzdach anbringen.



Figur 1.06-1: Montagebeispiel eines Echolots



## Wasserstand

### DRUCKMESSSONDE

#### 1. Messeinrichtung

Eine Verbindungsleitung zum Staubecken überträgt den dem Wasserstand entsprechenden hydrostatischen Druck auf eine Druckmesssonde (bzw. einen Druckmessumformer). Bei diesem Messverfahren wird der Flüssigkeitsdruck über eine Membrane direkt in ein elektrisches Signal umgewandelt. Die Messwerte werden von einem Datensammler erfasst und abgespeichert oder können an einen PC weitergeleitet werden. Um den störenden Einfluss des unterschiedlichen atmosphärischen Druckes auszuschalten, ist an der Sonde eine Luftkapillare angeschlossen, die in die Signalleitung eingearbeitet ist.

Die Druckmesssonde kann auf der wasserseitigen Oberfläche einer Staumauer, an Böschungen, in Schwimmerschächten oder an Ufermauern montiert werden.

#### 2. Beurteilung

Flexible, zuverlässige Messeinrichtung von genügender Präzision für die Talsperrenüberwachung, welche wenig Platz beansprucht. Der Stromverbrauch von Druckmesssonden ist sehr gering, so dass Batteriestrom für den Betrieb ausreicht. Diese Messeinrichtung eignet sich für die Automatisierung und Datenfernübertragung.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Die Druckmembrane ist anfällig auf Verkalkung, Verschmutzung und mechanische Beschädigung. Kalkablagerungen können die Biegsamkeit und damit die Druckübertragung der Membrane einschränken.

Druckmesssonden können eine Neigung zu Drift aufweisen (zunehmende systematische Abweichung der Messwerte). Ohne Überspannungsschutz ausgerüstete Sonden werden durch Blitzschlag zerstört.

#### 4. Technische Anforderungen

Für den Einbau der Druckmesssonde wird zweckmässigerweise ein Montagerohr verwendet, das Sonde und Kabel aufnimmt, welche dadurch vor Beschädigung geschützt sind. Zudem lässt sich die Sonde im Schadensfall oder für die Reinigung aus dem fest montierten Schutzrohr herausziehen.

Wichtig ist der Einbau eines Anschlages für die Sonde im Inneren des Rohrs, damit sie immer wieder auf die genau gleiche Höhe eingesetzt werden kann.

Die Luftkapillare muss über den maximalen Wasserstand geführt werden und darf nicht geknickt werden.

Eine Sondenmontage auf flacher Böschung ist zu vermeiden; die Sonde soll möglichst steil bzw. senkrecht geführt werden.

Bei grösseren Druckhöhen ist eine feste Montage der Druckmesssonde angebracht (z.B. mit Hilfe einer Bohrung aus dem Innern einer Staumauer).

Die Sonde darf nicht im Strömungsbereich von Ein- und Ausläufen (Druckstollen, Grundablass usw.) angeordnet werden.

Überspannungsschutz ist unabdingbar; gute Druckmesssonden sind in der Regel mit einem Blitzschutz ausgerüstet.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

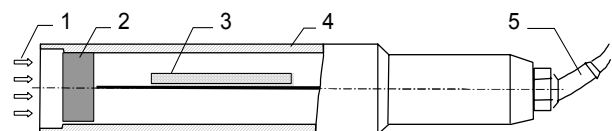
Stark kalkhaltiges Wasser ist ungünstig und verlangt unter Umständen eine häufige Entkalkung, die sorgfältig und gründlich durchgeführt werden muss.

Das Messgerät ist periodische zu prüfen.

#### 6. Redundanz

Gleiche Einrichtung an anderer Stelle oder, von Fall zu Fall, andere Einrichtungen wie Lattenpegel, Brunnenpfeife, Lichtlot oder Manometer.

#### 7. Bemerkungen



Figur 1.07-1: Aufbau einer Druckmesssonde

1. Wasserdruck
2. Messzelle mit Membrane und Sensorelement
3. Auswerteelektronik bzw. Verstärker
4. Gehäuse
5. Kabel mit Druckausgleichskapillare

## Wasserstand

### BRUNNENPFEIFE UND LICHTLOT

#### 1. Messeinrichtung

In einem mit dem Staubecken kommunizierenden Schacht oder Standrohr wird die Lage des Wasserspiegels mit einer Sonde ausgelotet. Die Sonde hängt an einem Messband. Sie signalisiert die Lage des Wasserspiegels mit Pfeifton (Luftverdrängung in der Sonde beim Eintauchen) oder mit dem Aufleuchten einer Lampe, oft zusätzlich mit Summton (Schliessen eines elektrischen Kreises im leitfähigen Wasser).

#### 2. Beurteilung

Einfache, zuverlässige und sehr präzise Einrichtung für alle Messbereiche z.B. als Redundanz zu Druckwaagen. Diese Messeinrichtung ist für eine Fernübertragung ungeeignet.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Verstopfung, Vereisung in der Zuleitung zum Schacht bzw. Rohr.

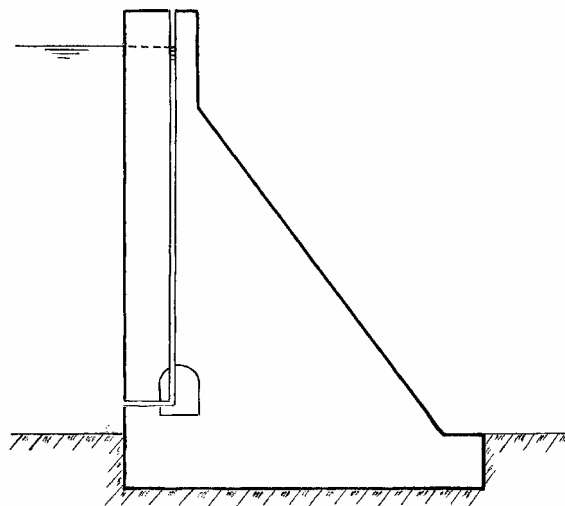
#### 4. Technische Anforderungen

Frostsichere Anordnung der Zuleitung und des Schachtes/Rohres.

Spül- und Entlüftungsmöglichkeit für Zuleitung und Schacht/ Rohr.

Ausreichender Durchfluss in der Zuleitung.

Zuleitung darf nicht im Strömungsbereich von Ein- und Ausläufen (Druckstollen, Grundablass usw.) angeordnet werden.



Figur 1.08-1: Anordnung für Brunnenpfeife oder Lichtlot

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Periodische Spülung der Zuleitung und des Schachtes bzw. Rohres.

#### 6. Redundanz

Gleiche Einrichtung an anderer Stelle.

Behelfsmässige Lotung direkt im Staubecken (mühsam oder unmöglich bei vereistem Becken) oder fallweise andere Einrichtungen wie Lattenpegel, elektrische Druckmesszelle usw.

#### 7. Bemerkungen

## Niveau der Sedimentation

### WASSERTIEFENMESSUNG

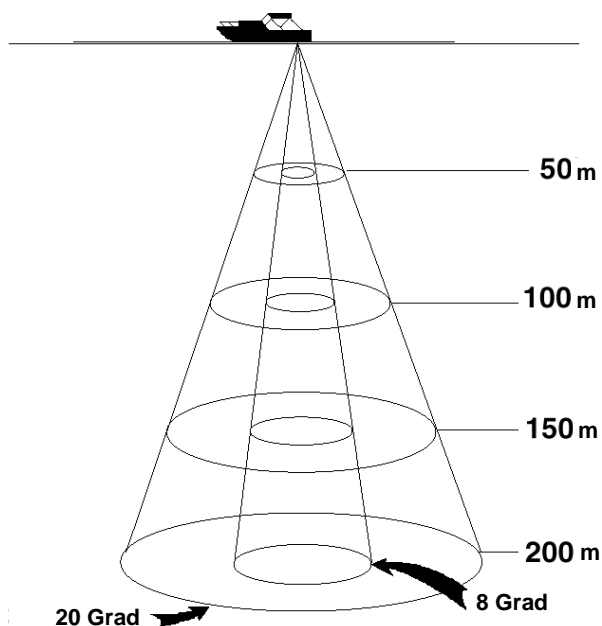
#### 1. Messeinrichtung

Mit der Wassertiefenmessung wird die Sedimentation in Staubecken gemessen.

Durch Abloten oder durch Unterwasser-Ultraschallmessung (Messprinzip siehe Blatt 1.06) wird aus einem Boot die Wassertiefe zwischen der Oberfläche und dem Grund gemessen.

Damit eine räumliche Ermittlung der Sedimentation möglich ist, muss nebst der Wassertiefe auch die Position des Bootes zur Zeit der Abstichmessung bestimmt werden. Diese kann vom Ufer aus durch Winkel- und Distanzmessung oder durch GPS-Messung bestimmt werden. Eine vereinfachte Möglichkeit zur Positionierung des Bootes ergibt sich auch, indem zwischen den Ufern Drähte mit Distanzmarkierungen gespannt werden.

Mit der Auswertung können Kurvenpläne oder Profile erstellt werden.



Figur 1.09-1: Wassertiefenmessung mit Ultraschall

#### 2. Beurteilung

Die Messungen mit Messeil und konventioneller Abstichmessung sind sehr zeit- und personalaufwändig.

Messungen mit modernen Positionierungs- und Tiefenmesssystemen benötigen für die Messung

nur einen Bootführer und einen Operateur. Die Messwerte werden automatisch erhoben und auf einen Datenträger abgespeichert. An einem Mess-tag können bis zu 100 Messprofile von ca. 300 – 400 m Länge aufgenommen werden.

Echolotmessungen mit GPS-Positionierung erfordern jedoch eine teure Ausrüstung und eine günstige Satellitenkonstellation, was in engen Tälern nicht immer gegeben ist.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

**Positionsbestimmung des Bootes:** Mittels automatischen Theodoliten oder über Satellitennavigation ist eine genaue zuverlässige Positionsbestimmung im cm Bereich möglich. In steilen Bergtälern ist die Verfügbarkeit der Satellitennavigation eingeschränkt.

**Tiefenmessung:** Starke Strömungen oder Turbulenzen erschweren oder verunmöglichen gar die Tiefenmessungen. Pflanzenbewuchs oder lockere Ablagerungen können Echolotmessungen beeinflussen. Für Aufnahmen von steilen Talflanken sind spezielle Messanordnungen, Sensoren und Auswertesoftware einzusetzen.

#### 4. Technische Anforderungen

Positionierungsmessung mit automatischem System vom Ufer aus oder über Satellitennavigation. Mobile Ausrüstung, welche auf einem Boot einfach installiert werden kann.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Vergleichsmessungen mit z.B. Messbandlotungen. Regelmässiger Service an der Echolotanlage beim Hersteller.

#### 6. Redundanz

Mehrmaliges Befahren der gleichen Profile und daraus die Tiefenwerte vergleichen. Längs- und Querprofile fahren und Tiefenwerte bei den Schnittpunkten der Profile vergleichen.

#### 7. Bemerkungen

Dieses Messverfahren eignet sich auch zur Kolk-tiefenbestimmung.

## **Luft- und Wassertemperatur**

### **THERMOGRAPH**

#### **1. Messeinrichtung**

Der **Thermograph** dient zur kontinuierlichen Messung und Registrierung der Umgebungstemperatur. Die Aufzeichnung erfolgt auf einem Schreibstreifen, der auf ein Trommeluhrwerk aufgespannt wird. Die Registrierzeit kann je nach Vorschubgeschwindigkeit des Uhrwerks 7 bis 31 Tage betragen. Das Uhrwerk wird mit Handaufzug oder Quarzuhrwerk mit Batterie in Bewegung gesetzt.

Neuere Geräte sind mit einem **elektrischen Thermometer** ausgerüstet, welcher das Messsignal an einen Datenspeicher weitergibt, von wo es für die Auswertung abgerufen werden kann.

#### **2. Beurteilung**

Beide Gerätetypen funktionieren problemlos, sofern sie gut installiert und unterhalten werden.

Der Messbereich liegt gewöhnlich zwischen etwa -35°C und +50°C. Die erwünschte Präzision von  $\pm 1^\circ\text{C}$  kann normalerweise erreicht werden.

Die elektrische Messeinrichtung weist Vorteile für die Auswertung der Daten auf, weil diese bereits in digitaler Form vorliegen. Diese Geräte eignen sich daher auch für die Datenfernübertragung.

#### **3. Mögliche Störungen und Messfehler**

Direkte Sonnenbestrahlung oder Luftzug verfälschen die Messungen.

Fehlende Tinte im Thermograph verhindert die Aufzeichnung.

Stillstand des Gerätes infolge Energiemangels (Uhrwerk nicht aufgezogen, Batterie entladen, Störung in der Stromversorgung).

Ausfälle von Thermographen infolge eindringenden Pulverschnees sind nicht selten.

Bei den elektrischen Geräten ist ein Ausfall infolge Überspannung (Blitzschlag) möglich.

Datenverlust beim Überschreiten der Speicherkapazität von elektrischen Messgeräten.

#### **4. Technische Anforderungen**

Der Thermograph ist möglichst in einem Wetterhäuschen zu installieren, das eine gute Zugänglichkeit (besonders auch im Winter) aufweist. Elektrische Geräte sind mit einem belüfteten Schutzgehäuse zu versehen.

Der Standort des Messgeräts sollte einigermaßen repräsentativ für die Umgebungstemperatur der Talsperre sein.

Das Messgerät ist an einem nicht von der Sonne beschienenen oder durch Abluftwärme beeinflussten Ort zu installieren.

Der Thermograph ist mit einem Minimum/Maximum-Thermometer zu ergänzen.

Elektrische Geräte sind mit einem Blitzschutz zu versehen.

#### **5. Funktionskontrollen und Unterhalt**

Der Unterhalt der Geräte erfolgt nach den Instruktionen des Lieferanten (Streifenwechsel, Tinte, Verkabelung, etc.).

Beim Thermographen müssen laufende Messwertvergleiche mit dem Minimum/Maximum-Thermometer vorgenommen werden.

Beim Wechsel des Schreibstreifens ist das Uhrwerk aufzuziehen, da es nur um ca. 30% bis 50% über die Registrierzeit hinaus weiterläuft.

Bei den elektrischen Geräten ist der Zustand der Energieversorgung (Batterien) regelmässig zu kontrollieren.

#### **6. Redundanz**

Redundanz wird durch das Minimum/Maximum-Thermometer erzielt.

#### **7. Bemerkungen**

## Luft- und Wassertemperatur

### NORMALTHERMOMETER

#### 1. Messeinrichtung

**Lufttemperatur:** Handelsübliche Glasthermometer können verwendet werden. Besonders gut eignen sich auch Minimum/Maximum-Thermometer, die neben der aktuellen auch die niedrigste und höchste Temperatur während einer Messperiode angeben.

**Wassertemperatur:** Das Wasserschöpfthermometer besteht aus einem Metallgehäuse, in dem sich ein Glasthermometer befindet. Das Messprinzip besteht darin, dass sich die Messkammer mit Wasser füllt und somit das Thermometergefäß die Wassertemperatur annimmt. Wird das Thermometer an die Oberfläche gezogen, verbleibt das Wasser aus der Messtiefe in der Messkammer und man ist in der Lage die Temperatur abzulesen.

#### 2. Beurteilung

Die Messung ist sehr einfach und erfolgt durch direkte Ablesung. Defekte Thermometer sind leicht ersetzbar.

Die Temperaturmessung mit Normalthermometern eignet sich nicht für die Fernübertragung.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

**Lufttemperatur:** Direkte Sonnenbestrahlung oder Luftzug können die Ablesung der Lufttemperatur erheblich verfälschen.

**Wassertemperatur:** Das Thermometer soll genügend lange (einige Minuten) in der gewünschten Tiefe belassen werden, damit das Wasser im perforierten Wasserbehälter die Umgebungstemperatur annehmen kann.

Zur Messung ist das Thermometer rasch herauszuziehen und abzulesen, damit Messwertveränderungen während des Herausziehens klein gehalten werden.

#### 4. Technische Anforderungen

**Lufttemperatur:** Für die Lufttemperatur ist ein Messbereich des Thermometers von  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$  erforderlich.

Das Thermometer ist an einem nicht von der Sonne beschienenen oder durch Abluftwärme beeinflussten Ort zu installieren. Ersatzthermometer bereithalten.

**Wassertemperatur:** Der erforderliche Messbereich des Wasserthermometers beträgt  $0^{\circ}\text{C}$  bis  $+30^{\circ}\text{C}$  (handelsübliche gehen bis  $+50^{\circ}\text{C}$ ).

Sehr nützlich sind Wasser-Extrem-Thermometer mit Anzeige der höchsten und niedrigsten Temperatur.

Das Thermometer sollte eine gewisse Trägheit in der Anzeige aufweisen, damit es nicht zu rasch auf die Einflüsse beim Herausziehen (wechselnde Wasser- und Lufttemperatur, Sonneneinstrahlung) reagiert.

Ersatzthermometer vorhalten.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Durch gelegentliche Vornahme von Vergleichsmessungen mit dem Ersatzthermometer ist die korrekte Anzeige zu überprüfen.

#### 6. Redundanz

Mit Ersatzinstrument.

#### 7. Bemerkungen

Durch Installation weiterer Thermometer an verschiedenen Örtlichkeiten kann die Lufttemperatur im gesamten Bereich der Talsperre erfasst werden. Die Luft- und die Wassertemperaturen lassen sich auch mit elektrischen Temperatursonden (siehe Kommentarblatt 1.12), die zum Beispiel fest an den luft- und wasserseitigen Staumaueroberflächen angebracht sind, bestimmen.

Mit fest installierten elektrischen Temperatursonden ist dann eine Fernübertragung der Messwerte möglich.

## Luft- und Wassertemperatur

### ELEKTRISCHES THERMOMETER

#### 1. Messeinrichtung

Die zur Messung der Luft- und Wassertemperatur verwendeten elektrischen Thermometer basieren auf folgenden Prinzipien:

**Widerstandsthermometer:** Durch eine Temperaturänderung wird im metallischen Leiter der Sonde eine Widerstandsänderung bewirkt. Diese wird mit einer Messbrücke gemessen.

**Thermoelement (Thermocouple):** Zwei Drähte aus verschiedenen Metallen werden an einem Ende verschweisst. Dann entsteht zwischen den beiden freien Leiterenden eine Spannung, die von der Temperatur abhängig ist und gemessen werden kann. Die Messstelle ist der Punkt, an dem die beiden Thermodrähte miteinander verschweisst sind.

**Thermometer mit schwingender Saite:** Eine Temperaturänderung bewirkt eine Änderung der Frequenz einer schwingenden Saite, welche in der Sonde mit einem Magnet angeregt wird. Eine im Anzeigergerät befindliche Vergleichssaite wird dann auf diese abgestimmt.

#### 2. Beurteilung

Die Messung ist zuverlässig und einfach durchzuführen. Es können fest installierte oder portable Geräte eingesetzt werden. Defekte Thermometer sind leicht ersetzbar.

Diese Messeinrichtung eignet sich für die Fernübertragung der Messdaten.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Ausfall infolge Überspannung.

Korrosion der elektrischen Anschlusskontakte zum Messinstrument.

Zeitweilig auftretende Probleme können durch Wackelkontakte sowie elektrische und magnetische Störeinflüsse verursacht werden.

Im Laufe der Zeit können bei den Messgeräten Nullpunktverschiebungen auftreten.

Verschleisserscheinungen des Temperaturfühlers sind durch allmähliche Drift des Messsignals erkennbar.

Bei vielen Messbrücken sind Fehler in den vorzunehmenden Kabelverbindungen möglich.

Anzeigefehler können auch vom Anzeigergerät selbst stammen und werden oft nicht vom Sensor selbst verursacht.

#### 4. Technische Anforderungen

Der erforderliche Messbereich beträgt für die Lufttemperatur:  $-30^{\circ}\text{C}$  bis  $+40^{\circ}\text{C}$  und für die Wassertemperatur:  $0^{\circ}\text{C}$  bis  $+30^{\circ}\text{C}$ .

Für die Lufttemperatur ist das Thermometer an einem nicht von der Sonne beschienenen oder durch Abluftwärme beeinflussten Ort zu installieren. Die Qualität des gewählten Materials ist sehr wichtig für Sonde und Kabel (mechanische Widerstandsfähigkeit, Überspannungsschutz).

Kabel sollen zwischen Sonde und Kabelendkasten nicht gespleisst werden.

Nur zuverlässige Sonden verwenden. Portables Ersatzthermometer bereithalten.

Messungen sollten nicht jahrelang unterbrochen werden.

Ablesegeräte (eventuell zentral) mit Datenspeicherungsmöglichkeit erleichtern das Übertragen der Messwerte auf Computer.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Das Messinstrument (Anzeigergerät) muss periodisch überprüft werden.

Die Messsonde ist regelmässig zu kalibrieren. Zur Diagnose der Messeinrichtung sind tragbare Kalibriereinheiten, die das Ausgangssignal der Temperaturfühler messen oder simulieren, sehr hilfreich.

Die Messanschlüsse (Kontakte) benötigen periodischen Unterhalt (Korrosion).

#### 6. Redundanz

Mit Ersatzinstrument.

#### 7. Bemerkungen

Neuere Entwicklungen haben weitere Typen von Temperaturmessgeräten hervorgebracht, wie Thermistoren oder Glasfasersensoren, welche ein vielversprechendes Entwicklungspotential haben.



## Betontemperatur

### NORMALTHERMOMETER

#### 1. Messeinrichtung

Die Betontemperaturen im Innern einer Staumauer können auf einfache Weise mit Normalthermometern (Glasthermometer) bestimmt werden. Diese werden in vertikale oder geneigte Bohrlöcher oder einbetonierte Rohre eingeführt und auf die gewünschte Tiefe abgesenkt. Die Thermometer sind entweder an einer Schnur oder an der Spitze einer Führungsstange befestigt und können so zur Ableseung aus dem Bohrloch gezogen werden.

#### 2. Beurteilung

Die Messung ist einfach und erfolgt durch direkte Ablesung. Defekte Thermometer sind leicht ersetzbar.

Diese Messeinrichtung eignet sich nur für die Direktablesung; für eine Fernübertragung der Messwerte müssten elektrische Thermometer eingesetzt werden (siehe Kommentarblatt 1.14).

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Luft- und Wasserzirkulationen im Bohrloch oder Rohr verfälschen die Messwerte und sind zu vermeiden. Bohrloch oder Rohr sind deshalb mit einem Deckel oder Pfropfen zu verschliessen.

Zur Messung ist das Thermometer rasch herauszuziehen und abzulesen, damit Messwertveränderungen beim Herausziehen klein gehalten werden.

#### 4. Technische Anforderungen

Verwendet werden handelsübliche Thermometer in verschiedenen Grössen, die einen Messbereich von  $-10^{\circ}\text{C}$  bis  $+30^{\circ}\text{C}$  (...  $+60^{\circ}\text{C}$ ) aufweisen und deren Präzision bei  $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$  liegt.

Die Bohrlöcher für die Messstellen sind in genügender Distanz von Leitungen und Hohlräumen (Schächten, Stollen) anzuordnen.

Es ist immer eine genügende Anzahl von Messstellen auszubilden.

Ersatzthermometer vorhalten.



Figur 1.13-1: Normalthermometer  
im Bohrloch

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Durch gelegentliche Vergleichsmessungen mit dem Ersatzthermometer ist die korrekte Anzeige zu überprüfen.

#### 6. Redundanz

Mit Ersatzthermometer.

#### 7. Bemerkungen

## Betontemperatur

### ELEKTRISCHES THERMOMETER

#### 1. Messeinrichtung

Die zur Messung der Betontemperatur verwendeten, einbetonierten oder im Bohrloch verlegten Geber basieren auf folgenden Prinzipien:

**Widerstandsthermometer:** Durch eine Temperaturänderung wird im metallischen Leiter des Gebers eine Widerstandsänderung bewirkt. Diese wird mit einer Messbrücke gemessen.

**Thermoelement (Thermocouple):** Zwei Drähte aus verschiedenen Metallen werden an einem Ende verschweisst. Dann entsteht zwischen den beiden freien Leiterenden eine Spannung, die von der Temperatur abhängig ist und gemessen werden kann. Die Messstelle im Beton ist der Punkt, an dem die beiden Thermodrähte miteinander verschweisst sind.

**Thermometer mit schwingender Saite:** Eine Temperaturänderung bewirkt eine Änderung der Frequenz einer schwingenden Saite, welche im Geber mit einem Magnet angeregt wird. Eine im Anzeigegerät befindliche Vergleichssaite wird dann auf diese abgestimmt.



Figur 1.14-1: Sammelmessstelle für  
Betontemperaturen

#### 2. Beurteilung

Die Messung ist zuverlässig und einfach durchzuführen. Ausfälle einzelner Geber sind möglich. Diese Messeinrichtung eignet sich für die Fernübertragung der Messdaten.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Ausfall infolge Überspannung.

Korrosion der elektrischen Anschlusskontakte zum Messinstrument.

Im Laufe der Zeit können bei diesen Geräten Nullpunktverschiebungen auftreten.

Bei älteren Ablesegeräten mit Messbrücken sind Fehler in den vorzunehmenden Kabelverbindungen möglich.

Bei Messgeräten, die in Bohrlöcher oder einbetonierten Rohren verlegt werden, ist die Zirkulation von Luft oder Wasser darin zu vermeiden.

#### 4. Technische Anforderungen

Der erforderliche Messbereich beträgt:  $-10^{\circ}\text{C}$  bis  $+60^{\circ}\text{C}$  beim Einbau in Frischbeton,  $-10^{\circ}\text{C}$  bis  $+30^{\circ}\text{C}$  bei nachträglichem Einbau.

Die Qualität des gewählten Materials ist sehr wichtig für Geber und Kabel (mechanische Widerstandsfähigkeit, Wasserdichtigkeit, Überspannungsschutz).

Kabel dürfen zwischen Geber und Kabelendkasten nicht gespleisst werden.

Nur zuverlässige Geber verwenden.

Messungen sollten nicht jahrelang unterbrochen werden.

Ablesegeräte (eventuell zentral) mit Datenspeicherungsmöglichkeit erleichtern das Übertragen der Messwerte auf Computer.

Im Bohrloch oder Rohr eingesetzte Geber sind thermisch von der Aussenwelt zu isolieren, weshalb sie mit einem Deckel oder Pfropfen zu verschliessen sind.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Das Messinstrument (Messbrücke etc.) muss periodisch überprüft werden.

Die Messanschlüsse (Kontakte) benötigen periodischen Unterhalt (Korrosion).

#### 6. Redundanz

Mit einer genügend grossen Zahl von Messgebern wird eine gewisse Redundanz erreicht.

#### 7. Bemerkungen

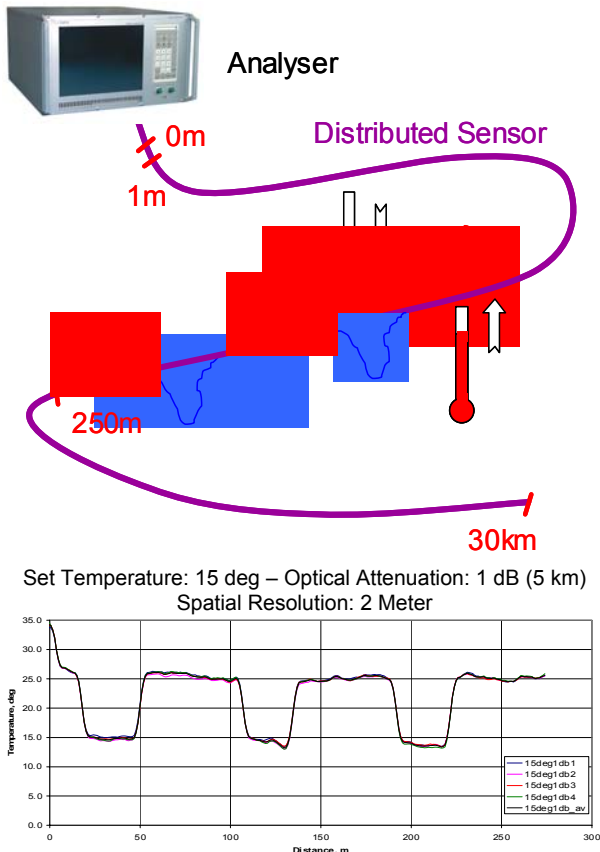
Messgeber, die in offenen Bohrlöchern oder Rohren eingesetzt werden, können bei Beschädigung leicht ersetzt werden. Einbetonierte Messgeber sind bei Ausfall verloren; ein Ersatz ist nur durch das Erstellen von Bohrungen und Einsetzen von neuen Gebern möglich.

**Temperaturverteilung im Beton,  
 Wasserzirkulation im Schüttmaterial  
 Temperaturänderung durch Sickerwasser**

**VERTEILTER FASEROPTISCHER TEMPERATURGEBER**

**1. Messeinrichtung**

Eine Glasfaser (auf Silikonbasis) ist entlang einer vordefinierten Strecke geschützt in ein Kabel eingebaut. Lichtimpulse werden von einem Impulsgeber/-empfänger durch die Faser gesendet. Diese Impulse treten in Wechselwirkung mit dem Silizium.



Figur 1.15-1: Prinzip der verteilten Temperaturmessung

Sie werden auf verschiedene Arten abgelenkt und reflektiert und ein Teil des Lichts gelangt zurück zum Impulsempfänger. Die Intensität des reflektierten Lichts sowie die Phasenverschiebung seiner Impulse geben Auskunft über die Temperatur der Faser, welche an einem Ort herrscht. Wenn zusätzlich die Laufzeit (hin und zurück) des Impulses gemessen wird, kann somit die Temperatur an allen Stellen entlang des Kabels gemessen werden. Aus diesem Grund wird diese Messeinrichtung „verteilt“ genannt.

Die verschiedenen Messgeräte für verteilte Temperaturmessungen sind nach der Art der ausgewerteten Lichtstreuung benannt: Brillouin-Streuung / Raman-Streuung. Die Systeme vom Typ Brillouin erlauben Messungen über Distanzen bis zu 30 km, die Systeme vom Typ Raman sind je nach Lieferant begrenzt auf 1-10 km Reichweite. Die örtliche Auflösung der Messung ist in der Größenordnung von 1 m und die Temperaturgenauigkeit liegt bei 0.1 bis 1.0°C.

Dieser Typ Messgerät wird insbesondere zur Messung der Temperatur an vielen Messpunkten, aber auch zur Erkennung von Wasseraustritten, etwa in Schüttdämmen, verwendet. Im letzteren Fall wird die Temperaturdifferenz zwischen dem durch das austretende Wasser beeinflussten Bereich um das Kabel und der sonst trockenen Umgebung als Indiz für Wasseraustritte an dieser Stelle erkannt.



Figur 1.15-2: Einbau eines Messkabels unter der bituminösen Deckschicht eines Damms (Quelle: GESO, LTV des Freistaates Sachsen)



## 2. Beurteilung

Messgeräte zur verteilten Temperaturmessung sind dort sinnvoll, wo eine grosse Anzahl Messpunkte vorhanden sind. Da die Messung entlang eines einzigen Kabels erfolgt, ist die Installation sehr viel einfacher, als wenn eine grosse Anzahl einzelner, klassischer Temperatursonden eingebaut werden müsste. Die Verwendung von Lichtwellenleitern macht die Messanlage unempfindlich gegen elektromagnetische Störungen (Blitz, Kriechströme, etc.) sowie gegen Korrosion. Im Falle der Anwendung zur Entdeckung von Wasseraustritten ist eine vorherige Kenntnis von Orten möglicher Leckagen nicht notwendig. Bei Installationen in Schüttdämmen können solche Leckageortungen insbesondere direkt an der wasserseitigen Oberfläche erfolgen. Die Fernübertragung der Messresultate ist möglich.

## 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Beim Messsystem vom Typ Raman ist eine Kalibrierung jedes Kabels über den ganzen Temperaturbereich vor dem Einbau unabdingbar. Beim System Brillouin kann diese Eichung für eine einzige Temperatur und einen einzigen Ort gemacht werden. Weil die Licht-Streuung vom Typ Brillouin nicht nur von der Temperatur sondern auch von der Beanspruchung des Kabels abhängt, ist es wichtig, dass das Kabel so gebaut ist, dass die Glasfaser vor Zugspannungen geschützt wird.

## 4. Technische Voraussetzungen

Die Messkabel für verteilte Temperaturmessungen werden auf Rollen aufgespult geliefert. Sie müssen deshalb abgerollt und thermisch mit der zu messenden Umgebung verbunden werden.

Gewisse Kabel können direkt einbetoniert oder in Bitumen eingebaut werden. Sie können auch in Bohrlöcher, im Fels oder im Lockergestein verlegt werden. Der Impulsgeber/-empfänger muss an einem trockenen und relativ sauberen Ort untergebracht werden. Im Falle der Detektion von Wasseraustritten kann es von Vorteil sein, wenn künstliche Temperaturänderungen erzeugt werden. Dies erfolgt durch einen elektrischen Leiter, welcher im gleichen Kabel eingebaut ist und durch einen elektrischen Strom, welcher mit dem Messgerät gekoppelt ist, geheizt wird. Weil die feuchten Zonen sich tendenziell langsamer aufwärmen oder abkühlen als die trockenen, entstehen so grössere Temperaturunterschiede, welche besser verfolgt werden können.

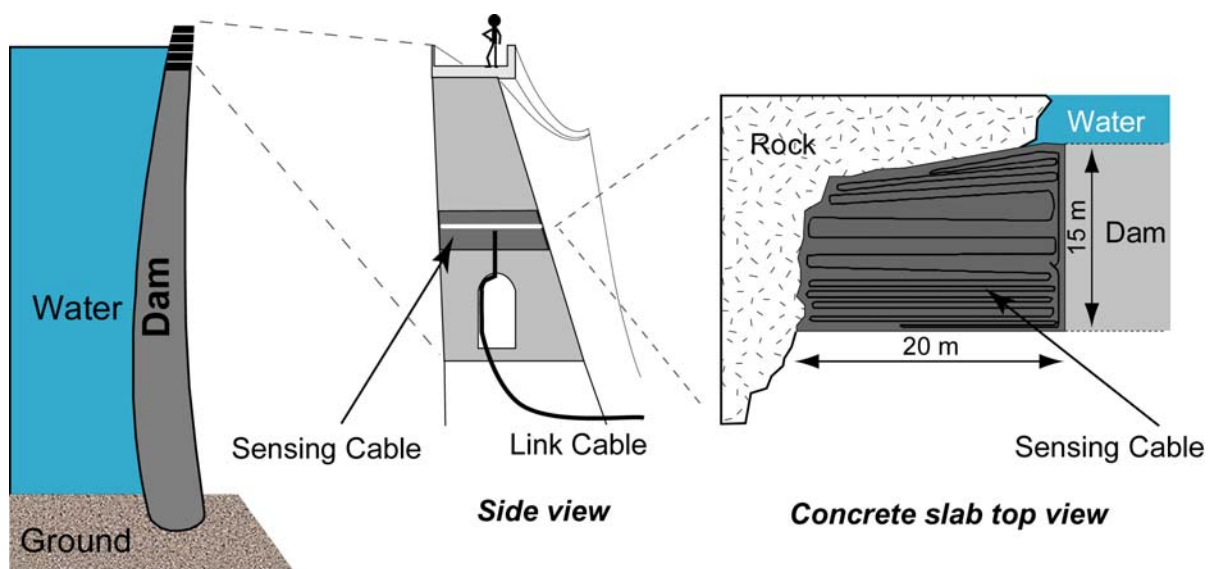
## 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Die Messsysteme zur Messung verteilter Temperaturen liefern in der Regel ein Alarmsignal, wenn sie nicht ordentlich funktionieren. Einzig die optischen Kupplungen verlangen eine Reinigung, wenn sie auseinander genommen und wieder zusammengeslossen werden (Punktmessungen).

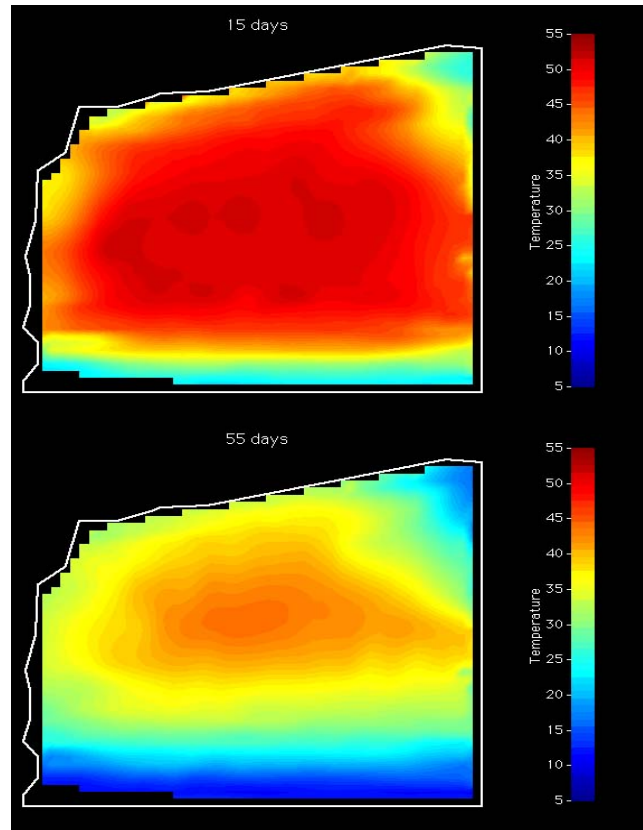
## 6. Redundanz

Redundanz kann geschaffen werden durch die Installation einer zweiten, gleichartigen Messeinrichtung an versetzten Orten oder mit dem Vergleich mit anderen, unabhängigen Messgeräten. Es ist auch möglich, Kabel mit mehr als einem Lichtwellenleiter einzubauen. Im Falle des Bruchs eines Leiters kann dann der Reserveleiter verwendet werden.

## 7. Bemerkungen



Figur 1.15-3: Einbau in einem Betonblock einer Bogenmauer (Quelle: MET-EPFL, Omnisens, SMARTEC)



Figur 1.15-4: Temperaturmessungen, 15 bis 55 Tage nach der Betonierung  
(Quelle: MET-EPFL, Omnisens, SMARTEC)

## Niederschlag im Bereich der Talsperre

### PLUVIOMETER / TOTALISATOR / PLUVIOGRAPH

#### 1. Messeinrichtung

Die Niederschlagsmessgeräte informieren im Rahmen der Talsperrenüberwachung über Niederschläge im Bereich der Stauanlage. Die Messergebnisse gestatten bei der Interpretation der Sicker- und Drainagewasser-Abflüsse sowie der Wasserdrücke im Fundament, welche beide durch die Höhe des Grundwasserspiegels beeinflusst werden, die meteorologischen Bedingungen zu berücksichtigen. Zudem bilden die Messergebnisse eine wichtige Grundlage für hydrologische Studien. Folgende Niederschlagsmessgeräte werden verwendet:

**Pluviometer** sammeln den Niederschlag. Das Messgerät besteht im Wesentlichen aus einem Auffangtopf mit einer Grundfläche von 200 cm<sup>2</sup>, gelegentlich 500 cm<sup>2</sup>. Die gefallene Niederschlagsmenge wird regelmässig mittels Messglas abgelesen.

Beim **Totalisator** gelangt der Niederschlag über eine kleine Einfallöffnung (meist 200 cm<sup>2</sup>) in ein konisch aufgeweitetes Sammelgefäss, das im Stande ist, die Niederschlagsmenge eines halben bis ganzen Jahres aufzunehmen. Die Messung erfolgt in grösseren Intervallen (etwa 1 Monat).



Figur 1.6-1: Pluviograph mit Wippenprinzip

**Pluviographen** sind Geräte, die den Niederschlagsverlauf mechanisch oder elektronisch aufzeichnen. Bekannt ist etwa das Wippenprinzip: Der Niederschlag wird auf eine Wippe geleitet, die beim Überschreiten eines bestimmten Gewichts kippt, sich entleert und einen Impuls auslöst, der aufgezeichnet wird.

#### 2. Beurteilung

Der **Pluviometer** ist ein sehr einfaches Gerät zur Bestimmung der Regenwassermenge, welches gewöhnlich alle 24 Stunden abgelesen wird. Der Wartungsaufwand für den Pluviometer ist gering. Nachteilig wirken sich die Messungenauigkeit aus und die Tatsache, dass der Niederschlagsverlauf nicht detailliert verfolgt werden kann.

Mit dem **Totalisator** werden die Niederschlagsmengen über längere Zeiträume gesammelt. Die Bedeutung dieser Messung liegt weniger in der zeitlichen Auflösung des Niederschlagsgeschehens, als viel mehr in der Information über die Niederschlagsmenge in meist hochgelegenen, schwer erreichbaren Gegenden.

Der **Pluviograph** liefert die Niederschlagsdaten in höherer zeitlicher Auflösung, was insbesondere auch für hydrologische Studien nützlich ist. Zudem erleichtert die elektronische Speicherung der Messdaten die Auswertung. Der Wartungsaufwand ist beträchtlich. Zudem muss eine Energieversorgung für die Aufzeichnung gewährleistet sein.

Für die Anwendung in der Talsperrenüberwachung wird keine hohe Präzision verlangt.

Pluviometer und Totalisator sind Geräte für die Direktablesung; für eine Fernübertragung der Messwerte eignet sich der Pluviograph.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Problematisch können die relativ grossen Messfehler sein, die entstehen können wegen der kleinen Referenzfläche oder infolge Windeinfluss, Schneehauben, Inhomogenitäten in der Umgebung (zum Beispiel Bäume und Häuser, die zu nah sind) bzw. wegen Vereisung.

Bei Stromausfall sind Pluviographen gestört, bzw. ausser Betrieb.

#### 4. Technische Anforderungen

Der Standort muss für das Gebiet repräsentativ und zu jeder Zeit gut zugänglich sein.

Zweckmässigerweise sind der Pluviometer und Pluviograph mit einem Heizsystem auszurüsten.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Unterhalt gemäss Anweisungen des Herstellers.

#### 6. Redundanz

Ist nicht nötig

#### 7. Bemerkungen

Der obige Text gilt nur für die Talsperrenüberwachung.



## Spannungen im Schüttmaterial und im Beton

### ERDDRUCKMESSDOSE

#### 1. Messeinrichtung

Druckaufnehmer in Form einer flachen rechteckigen oder runden Scheibe (Durchmesser ca. 25 cm - 35 cm) zur Messung der totalen Spannung in Schüttdämmen (Erddruck + Porenwasserdruck) senkrecht zur Scheibenebene. Verschiedene Systeme zur Übertragung der Messwerte kommen zur Anwendung (elektrisch, hydraulisch, pneumatisch), je nach Übertragungslänge und Fabrikat. Verbindung mit Endkasten für die Ablesung der Messwerte entweder durch Kabel oder Schläuche. Zur Bestimmung des effektiven Erddrucks müssen gleichzeitig Porenwasserdruckdosen installiert werden.

#### 2. Beurteilung

Die hydraulischen und pneumatischen Systeme sind empfindlich auf Temperaturänderungen. Beim hydraulischen System muss die Messkammer tiefer als die Messdosen im Dammkörper liegen, um den Druckaufbau während der Schüttung beobachten zu können. Die Auswertung der Messergebnisse ist häufig problematisch, und der Aussagewert der Messdaten ist oft gering. Immerhin lässt das System den Trend der Spannungsentwicklung erkennen. Das pneumatische System ist für Drücke bis 3 MPa und Schlauchlängen bis 500 m geeignet.

Die Fernübertragung der Messwerte ist die Regel. Die automatische Registrierung ist möglich.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Schlauchbeschädigung beim Verlegen oder durch unterschiedliche Setzungen von verschiedenen Materialien.

Kabelbeschädigung bei ungenügendem Überspannungsschutz.

Einbettung in inhomogenem Material führt zu unbrauchbaren Messergebnissen.

#### 4. Technische Anforderungen

Die Messkabel müssen gegen Überspannung geschützt sein und dürfen zwischen Einbauort der Messdose und Messkammer nicht gespleisst werden. Beim hydraulischen System: Schläuche unter Vermeidung von Unterdruck verlegen. Die elektrischen Kabel und die Schläuche sollen in schmalen

Gräben verlegt und gegen mögliche Beschädigung durch Baumaschinen geschützt werden.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

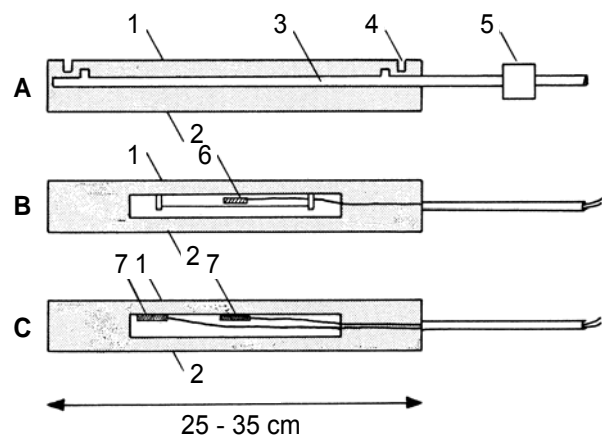
Hydraulisches und pneumatisches System benötigen mindestens einmal pro Jahr eine Durchspülung (Wasser, bzw. Gas) der Schläuche. Die Ablesegeräte benötigen einen regelmässigen und sorgfältigen Unterhalt.

#### 6. Redundanz

Installation von 2 verschiedenen Systemen (z.B. elektrisch und pneumatisch) ist zwar möglich aber nicht unbedingt erforderlich. Hingegen sollen keine Einzelinstrumente verlegt werden.

#### 7. Bemerkungen

Beim Einbau des Gerätes ist auf Homogenität des Umgebungsmaterials besonders zu achten.



Figur 1.17-1: Erddruckmessdosen

- A Hydraulische Messung
  - B Messung mit schwingender Saite
  - C Elektrische Widerstandsmessung
- 1 Aktive Seite
  - 2 Passive Seite
  - 3 Messkammer mit Flüssigkeit
  - 4 Nuten zur Erhöhung der Flexibilität
  - 5 Druckmessmembrane
  - 6 Schwingende Saite
  - 7 Widerstandsdehnmessstreifen

## Messung von räumlichen Verschiebungen

### TRIANGULATION

#### 1. Messeinrichtung

Unter Triangulation versteht man die Ortsbestimmung mit geodätischen Mitteln, in der Regel eine dreidimensionale Koordinatenbestimmung (Lage und Höhe), durch

- Schnitt zweier Richtungen
- Bogenschnitt zweier Distanzen
- in der Regel Kombination beider Messmethoden

Die Bestimmung von "absoluten" Verschiebungen von Kontrollpunkten einer Talsperre und deren Umgebung bezüglich Bezugspunkte ausserhalb des Einflussbereichs der Talsperre, erfolgt durch Messung von Richtungen, Vertikalwinkeln und Distanzen. Die dazu verwendeten Instrumente sind:

- Präzisionstheodolite, mittlerer Beobachtungsfehler für eine Richtung:  $\pm 2''$
- Präzisionsdistanzmesser, mittlerer Beobachtungsfehler:  $\pm (0,1 - 0,2 \text{ mm} + 1,0 \text{ mm pro km Messdistanz})$

Der Zentrierfehler dieser Instrumente ist kleiner/gleich  $\pm 0,1 \text{ mm}$ .



Figur 2.01-1: Präzisionstheodolit T2002

Polygonzüge, einfache Winkelmessung und optische Alignemente (siehe 2.08, 2.06, 2.07) sind vereinfachte Varianten der Triangulation. Sehr oft

erfolgt eine Kombination von Triangulation mit Nivellement (siehe 2.05).



Figur 2.01-2: Präzisionsdistanzmesser ME5000

#### 2. Beurteilung

Die Triangulation ist eine seit Jahrzehnten bewährte Methode zur Bestimmung "absoluter" Verschiebungen. Die Methode ist aufwändig und anspruchsvoll, und wegen der unerlässlichen überzähligen Beobachtungen sehr zuverlässig.

Die Auswertung erfolgt in der Regel mittels Computer. Die Triangulation lässt sich vorteilhaft mit Loten, Polygonzügen und Nivellementen kombinieren.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Triangulationsmessungen sind wetterabhängig. Atmosphärische Fehlereinflüsse infolge Refraktion, Flimmern, etc. können die Messungen erheblich beeinträchtigen.

#### 4. Technische Anforderungen

Die Triangulation erfordert ein umfangreiches Instrumentarium und vermessungstechnisches Fachpersonal.

Das Messnetz ist in enger Zusammenarbeit zwischen Bauingenieur, Geologen und erfahrenem Vermessungsingenieur zu konzipieren.



Eine Sichtverbindung zwischen den Punkten (Berücksichtigung von Bewuchs und Schnee) ist nötig. Dabei sind Einflüsse der Refraktion (bei boden- oder bauwerksnahen Visuren) zu berücksichtigen und dem Zugang zu den Bezugs- und Kontrollpunkten (Winterbedingungen im Hochgebirge) ist gebührend Rechnung zu tragen.

Die Lage und Zahl der Kontrollpunkte richtet sich in der Regel nach den Anforderungen des Bauingenieurs und die Bezugs- oder Festpunkte sind in sicherem, festem Gelände zu versichern (Geologie).

Die Stationspunkte werden in der Regel als Pfeiler ausgebildet (Wirtschaftlichkeitsaspekt: einmalige/wiederkehrende Kosten). Thermischen und mechanischen Einwirkungen auf die Pfeiler ist Rechnung zu tragen.

Die Auswertung (Behandlung der überzähligen Beobachtungen und Berechnung der Koordinaten) erfolgt heute mittels mathematischer, stochastischer Modelle unter Einsatz der Datenverarbeitung. Konzept und Auswertung erfordern hohe theoretische Kenntnisse und grosse praktische Erfahrung seitens der eingesetzten Vermessungsingenieure.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Die permanente Messbereitschaft der Messanlage erfordert die periodische Kontrolle der versicherten

Punkte auf Beschädigungen und der Visuren bezüglich Sichtbarkeit (Ausholzen, Bauten, etc.). Instrumente sind durch periodische Überprüfungen und durch kritische Interpretation der Beobachtungen zu kontrollieren.

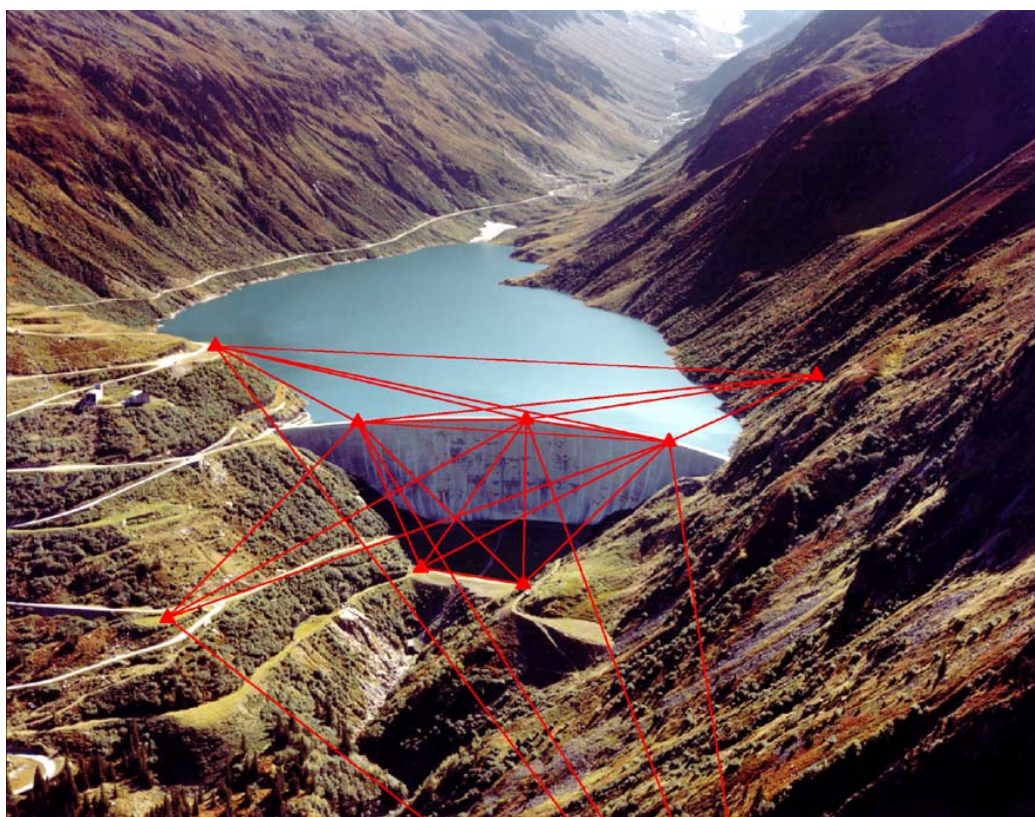
#### 6. Redundanz

Der Verknüpfung der Triangulation mit anderen Messeinrichtungen insbesondere Lote in der Tal-sperre gewährleistet eine hohe äussere Redundanz.

Eine innere oder 'geodätische' Redundanz erfolgt durch eine überschüssige Zahl von Beobachtungen und eine überzähligen Menge von Bezugs- und Kontrollpunkten. Damit werden auch Verluste an Bezugs- und Kontrollpunkten, die im Laufe der Jahre eintreten, wettgemacht.

#### 7. Bemerkungen

Bei der Bestimmung von Lage- und Höhenänderungen geringerer Genauigkeit (und Zuverlässigkeit) z.B. für Rutschhänge, Gletscherbewegungen etc. gelangen heute sehr oft die GPS Methoden (siehe 2.02) zur Anwendung.  
(Fotos: Schneider Ingenieure AG, Chur)



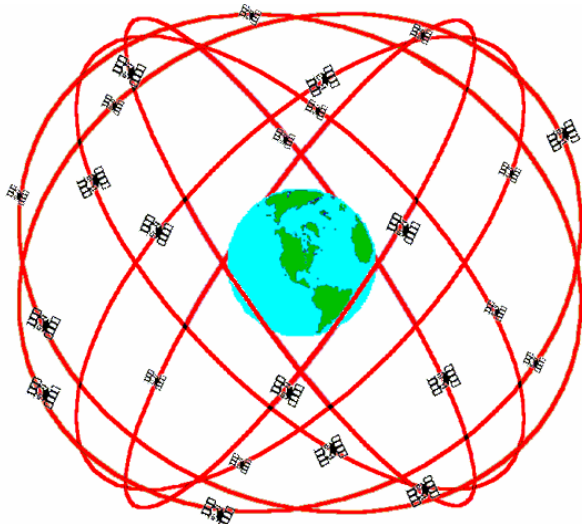
Figur 2.01-3: Beispiel eines Messnetzes

## Messung von räumlichen Verschiebungen

### SATELLITEN-GESTÜTZTE MESSUNGEN (GPS = GLOBAL POSITIONING SYSTEM)

#### 1. Messeinrichtung

In den letzten 20 Jahren entwickelte und realisierte das Verteidigungsministerium der USA ein Navigationssystem mit ca. 24 Satelliten, die in 20'000 km Höhe die Erde zweimal pro Tag umkreisen.



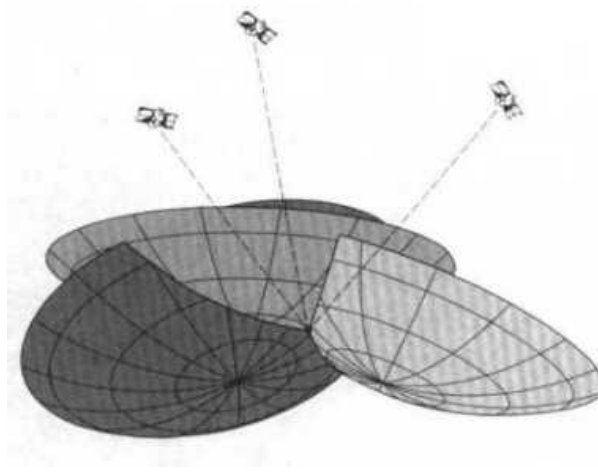
Figur 2.02-1: Satelliten-Konfiguration



Figur 2.02-2: GPS-Antenne

#### a) Navigation

Es werden die Distanzen zwischen der Antenne des Empfängers und den Satelliten gemessen. Für die geometrische Lösung werden drei solcher Distanzen benötigt. Die Position der Antenne erhält man als Schnittpunkt dreier Kugeln mit den Satellitenorten als Kugelzentren und den drei gemessenen Distanzen als Radien.



Figur 2.02-3: Positionsbestimmung mittels räumlichen Kugelschnitts

#### b) geodätische Anwendung

Mittels geeigneter Messverfahren kann dieses Navigationssystem zur präzisen Positionsbestimmung relativ zu einem bekannten Punkt eingesetzt werden. Dazu werden mindestens 2 GPS-Empfänger, welche die Distanzen zu den jeweils "sichtbaren" Satelliten messen, eingesetzt. Mittels geeigneter Auswerteverfahren können anhand der auf den jeweiligen Stationen bestimmten Distanzunterschiede zu den einzelnen Satelliten die relativen Koordinatenunterschiede zwischen den Stationen (Basis-Linien) bestimmt werden (differenzielles GPS).

Für Anwendungen in der Talsperrenüberwachung ist nur das differentielle Verfahren von Interesse.

#### 2. Beurteilung

Die Messung mittels GPS ist im Gegensatz zu den konventionellen geodätischen Messmethoden (z.B. Winkel- und Distanzmessung) weitgehend unabhängig von meteorologischen Verhältnissen. Auch eine Sichtverbindung zwischen den einzelnen Stationen ist nicht notwendig.

Da sich GPS-Messungen immer auf ein Ellipsoid (idealisierte Form der Erde) beziehen, sind bei der Kombination mit konventionellen geodätischen Messmethoden (z.B. Winkel- und Distanzmessung) immer auch die Einflüsse von Lotabweichungen und Geoidundulationen zu berücksichtigen.

Die Bestimmung der Koordinatenunterschiede zwischen zwei Stationen mittels GPS liefert Resultate mit einer Genauigkeit (einfacher mittlerer Fehler) von ca. 1 – 2 cm, abhängig von den verwendeten Mess- und Auswerteverfahren (Standard-

Software). Dieses Messverfahren kann für Aufgaben mit geringen Genauigkeitsansprüchen, z.B. grossräumigen Hangrutschungen, eingesetzt werden.

Eine Steigerung der Genauigkeiten bedingt einen massiv grösseren Beobachtungsaufwand (statische Messungen über mehrere Stunden, bevorzugt während der Nachtstunden) und den Einsatz von spezialisierter Auswerteprogramme (z.B. Bernese GPS-Software). Die Verwendung von GPS bei der präzisen Punktbestimmung erfordert daher den Einsatz von speziellen Mess- und Auswertemethoden. Dazu ist sehr erfahrenes Personal einzusetzen. Dennoch kann im kleinräumigen Bereich (Netzgrösse von ca. 1 - 2 km, so wie sie bei der Überwachung von Talsperren häufig sind), die Genauigkeit von konventionellen geodätischer Messmethoden nicht erreicht werden. Dazu unterliegt GPS einer Vielzahl, nur schwer erfassbaren systematischen Einflüssen.

### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

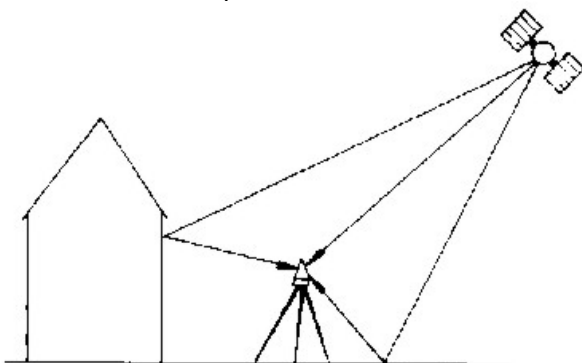
Die GPS-Messungen unterliegen vielfältigen Einflüssen, welche die Qualität der Messungen beeinträchtigen können.

#### a) Satelliten

- Bahndaten: Unsicherheiten in den verwendeten (meist im Voraus berechneten) Satellitenbahnen
- Satelliten-Uhren: Fehler in der zur Distanzmessung verwendeten Satelliten-Uhren

#### b) Fehler bei den GPS-Empfängern

- Antennen: Offsets der Phasenzentren der GPS-Antennen, diese können zudem noch bei unterschiedlichen Satellitenkonstellationen variieren
- Multipathing: Mehrwegausbreitung (z.B. bei Reflexionen) des Satellitensignals verursachen Verfälschungen der Distanzmessung
- Zentrierung: fehlerhafte Zentrierung der Antenne über dem Kontrollpunkt



Figur 2.02-4: Effekt der Mehrwegausbreitung (Multipathing)

#### c) Einfluss der Atmosphäre

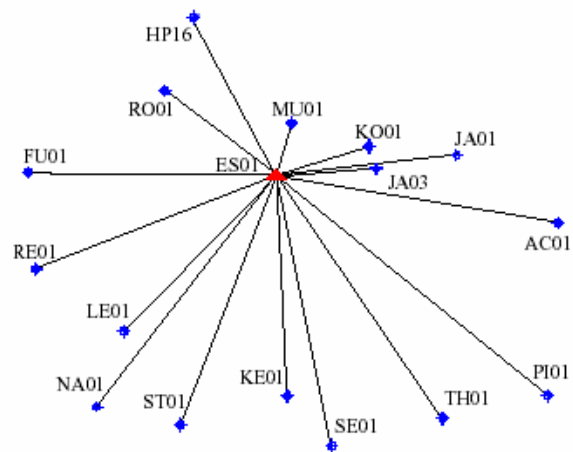
- Ionosphäre: die mit der Sonnenaktivität in Zusammenhang stehende Dicke der Ionosphäre (Höhe ca. 50 - 1'000 km) bewirkt eine Laufzeitverzögerung des GPS-Signals und somit eine Verfälschung der gemessenen Distanzen zwischen dem GPS-Empfänger und den Satelliten und resultiert in einem Massstabsfehler
- Troposphäre: ungenügende Erfassung der meteorologischen Verhältnisse verursacht vor allem Fehler in der Höhenbestimmung mittels GPS

#### d) Satelliten-Konfiguration

- Satelliten-Konfiguration: Unterschiedliche Satellitenkonfigurationen (z.B. bei Ausfall eines Satelliten) können systematische Effekte hervorrufen
- Abdeckung: Geländeerhebungen (Hügel, Berge), Bauten und Vegetation können die "Visuren" zu den Satelliten beeinträchtigen, so dass die zur Messung minimal notwendige Anzahl Satelliten unterschritten wird

#### e) Auswertung

- ungünstige Wahl der Basislinien/Referenzstation

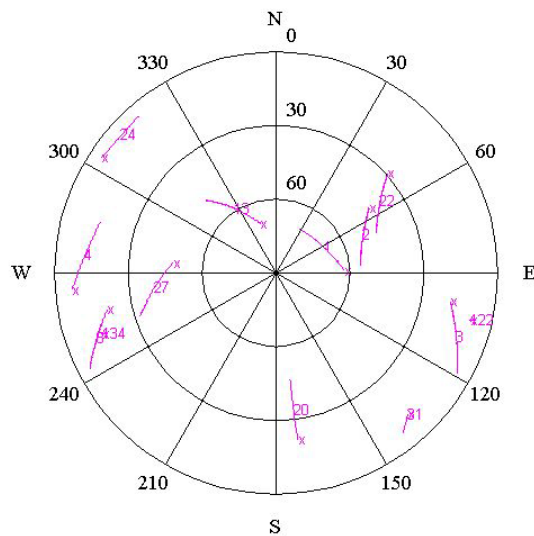


Figur 2.02-5: Beispiel einer günstigen Basislinien-Definition

### 4. Technische Anforderungen

Der Aufstellung der GPS-Antennen ist besondere Beachtung zu schenken. Abdeckung der Sichtbarkeit der Satelliten infolge Topographie, Bauwerken, Vegetation, etc. können eine massive Verschlechterung der Resultate verursachen. Sichtverbindung zwischen den einzelnen Stationspunkten ist jedoch nicht notwendig.





Figur 2.02-6: Vorausberechnete Sichtbarkeit der Satelliten für einen gewissen Zeitpunkt und Ort

### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Überprüfung, resp. Bestimmung der geometrischen Phasenzentren der verwendeten Antennen.

### 6. Redundanz

Wiederholte Messungen mit unterschiedlichen Satellitenkonstellationen.

Überprüfung der berechneten Koordinatendifferenzen mittels herkömmlicher Triangulation.

### 7. Bemerkungen



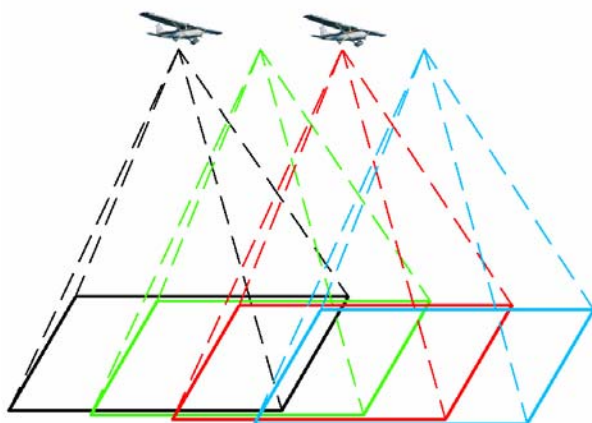
## Messung von räumlichen Verschiebungen

### PHOTOGRAMMETRIE

#### 1. Messeinrichtung

Die photogrammetrische Vermessung unterscheidet sich von den übrigen Vermessungsmethoden hauptsächlich dadurch, dass nicht die Objekte selbst, sondern deren fotografische Abbildung ausgemessen werden.

Die Aufnahmen erfolgen von Flugzeugen aus und zwar so, dass von einem Objekt mindestens zwei Aufnahmen (Überdeckung) erstellt werden. Die Aufnahmen erfolgen in der Regel mit speziellen, teuren Fotoapparaten, so genannten Messkamern, die in speziell für den Fotoflug geeigneten Flugzeugen eingebaut werden.



Figur 2.03-1: Prinzipskizze für photogrammetrische Aufnahmen mit Messkamern

In entsprechenden Auswertegeräten oder mit Hilfe rechnerischer Methoden und EDV-Software lassen sich photogrammetrische Modelle erstellen. Wird dieses Modell mit einigen, nach Koordinaten bekannten, signalisierten und in den Bildern sichtbaren Punkten in ein Koordinatensystem eingepasst, kann es massstäblich genau ausgemessen werden.

Die Photogrammetrie findet hauptsächlich für die grossräumliche Abbildung des Geländes in Form von Karten Verwendung. Sie dient aber auch der Aufnahme einzelner Gebiete (Seeufer, Talhänge im Staugebiet etc.) und eignet sich besonders für die langfristige Überwachung von potentiellen Rutschhängen, Gletschern oder Permafrostzonen. Die Auswertung vorsorglich erstellter Aufnahmen kann erst bei Bedarf, d. h. wenn sich tatsächliche oder vermutete Bewegungen einstellen, erfolgen.

#### 2. Beurteilung

Die Photogrammetrie liefert bei entsprechenden Bedingungen eine grosse Zahl von Informationen. Photogrammetrische Luftbilder sind billige, dauerhafte Massenspeicher (ca. 2 Gb pro Flugbild) in

analoger Form, die jederzeit digitalisiert/ gescannt werden können. Die Photogrammetrie braucht gute Aufnahme- und Lichtbedingungen. Sie erfordert eine hohe Investition in Geräte und speziell ausgebildete Fachleute.

Die Auswertegenauigkeit ist eine Funktion des Bildmassstabes bzw. der Flughöhe. Die mittlere Lagegenauigkeit beträgt ca. 0.1 Promille und die mittlere Höhengenaugigkeit ca. 0.15 Promille der Flughöhe über Grund. Das entspricht bei den üblicherweise verwendeten Messkamern einem Bildmassstab von ca. 1: 5'000 und mittleren Lagefehlern von  $\pm 10$  cm, resp. mittleren Höhenfehlern von  $\pm 15$  cm. Eine Reduktion dieser mittleren Fehler auf etwa die Hälfte ist mit entsprechenden Mitteln und Aufwand möglich.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Mögliche Störungen können durch ungünstige meteorologische Verhältnisse verursacht werden. Sie führen zu einer Verschiebung oder Wiederholung des Aufnahmefluges. Messfehler im üblichen Sinne können fast ausgeschlossen werden.

#### 4. Technische Anforderungen

Die zu überwachenden Objekte müssen aus der Luft sichtbar sein oder allenfalls durch Signalisierung sichtbar gemacht werden. Hohe Vegetation behindert oder verunmöglicht eine Auswertung.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Die Betriebsicherheit der Messkammer wird vorausgesetzt und vor jedem Aufnahmeflug getestet. Ausfälle sind selten.

#### 6. Redundanz

Eine beschränkte Redundanz ist durch eine entsprechende Überdeckung der Flugaufnahmen gegeben. Wiederholungen des Aufnahmefluges sind kostspielig.

#### 7. Bemerkungen

Neben der Photogrammetrie aus Flugaufnahmen gelangt auch die terrestrische Photogrammetrie gelegentlich zur Anwendung. Sie kann zum Beispiel für die Kontrolle von Rutschhängen geeignet sein. Die Bedeutung der Photogrammetrie zur Messung von Geländehöhen wird in Zukunft durch das Laser – Scanning oder eine Kombination der Beiden weitgehend ersetzt werden. Die Kombination mit einer Photo(grammetrie) vermittelt eine viel bessere Visualisierung als Laser-Scanning allein. Siehe dazu das Kommentarblatt 2.04 Laser – Scanning.

## LASER – SCANNING

### 1. Messeinrichtung

Die Entwicklung der Laser-Scanning Methode ist ca. 10 Jahre alt. Laser-Scanning nützt im Prinzip die Methode der reflektorlosen Distanzmessung, kombiniert sie mit einem horizontalen und vertikalen Ablensystem eines Laserstrahles und tastet so in enormer Geschwindigkeit, je nach Gerät von 1000 bis zu 500'000 Vektormessungen pro Zeitekunde, das zu erfassende Objekt (Bauwerk, Tunnel, Geländeoberfläche etc.) ab. Die Steuerung erfolgt elektronisch.

Die Laser-Scanning Methode kann sowohl terrestrisch, z.B. ab Stativen, oder in Bewegung ab Messfahrzeugen als auch aus Flugzeugen oder Helikoptern angewendet werden. Im letzteren Fall spricht man von Airborne Laser-Scanning oder LIDAR (Light Detection and Ranging). Die beiden Systeme unterscheiden sich durch verschiedene Reichweiten und Genauigkeiten.



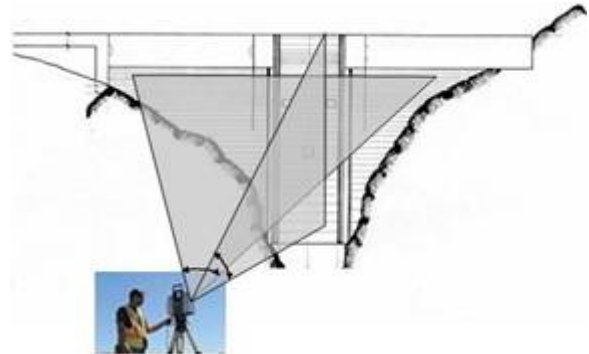
Figur 2.04-1: Mit Laser-Scanning können Staumaueroberflächen aufgenommen und z.B. Schäden kartiert werden

Das rohe Resultat eines Scans ist eine riesige Punktwolke. Durch Einbezug einer Referenz, z. B. Landeskoordinaten-System, und den Einsatz von raffinierter Software erhält man daraus zwei- und dreidimensionale Pläne und Zeichnungen, georeferenzierte Punktwolken, 3D Modelle des Objekts oder des Geländes usw.

### 2. Beurteilung

Laser-Scanning bildet beliebige Objekte praktisch in Echtzeit ab und ersetzt die terrestrische Photogrammetrie. Das Resultat kann in fast beliebiger Form aus der Punktwolke hergeleitet werden und steht in digitaler Form für eine weitere Anwendung zur Verfügung.

## Messung von räumlichen Verschiebungen



Figur 2.04-2: Aufnahme einer Staumaueroberfläche mit Laser-Scanning (schematische Darstellung).

Die Beschränkung liegt wegen der reflektorlosen Distanzmessung in der Distanz zwischen Laser-Scanner Standort und Objekt von maximal 50 bis 200 Metern je nach Gerät und Reflexionsqualität der Objektoberfläche.

Die relative Punktgenauigkeit eines solchen terrestrischen Laser-Scans liegt bei weniger als 1 cm und ist abhängig von der Distanz und der Reflexionsqualität der Objektoberfläche.

Für die Anwendung aus Flugzeugen beträgt die Reichweite (Flughöhe über Objekt) bis zu 2000 Meter. Air-borne Laser-Scanning liefert digitale Geländemodelle mit einer mittleren Höhengenaugigkeit von ca. 10 – 15 cm und besitzt den Vorteil, dass auch in Waldgebieten gute Ergebnisse erreicht werden. Die Lagegenauigkeit ist dagegen stark abhängig von der Flughöhe und der GPS Bestimmung der jeweiligen Lage des Lasers im Flugzeug.

### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Ohne Bedeutung.

### 4. Technische Anforderungen

Die Investitionskosten für eine Laser-Scan Ausrüstung sind hoch. Für die Anwendung und Bedienung sind Spezialisten erforderlich.

### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

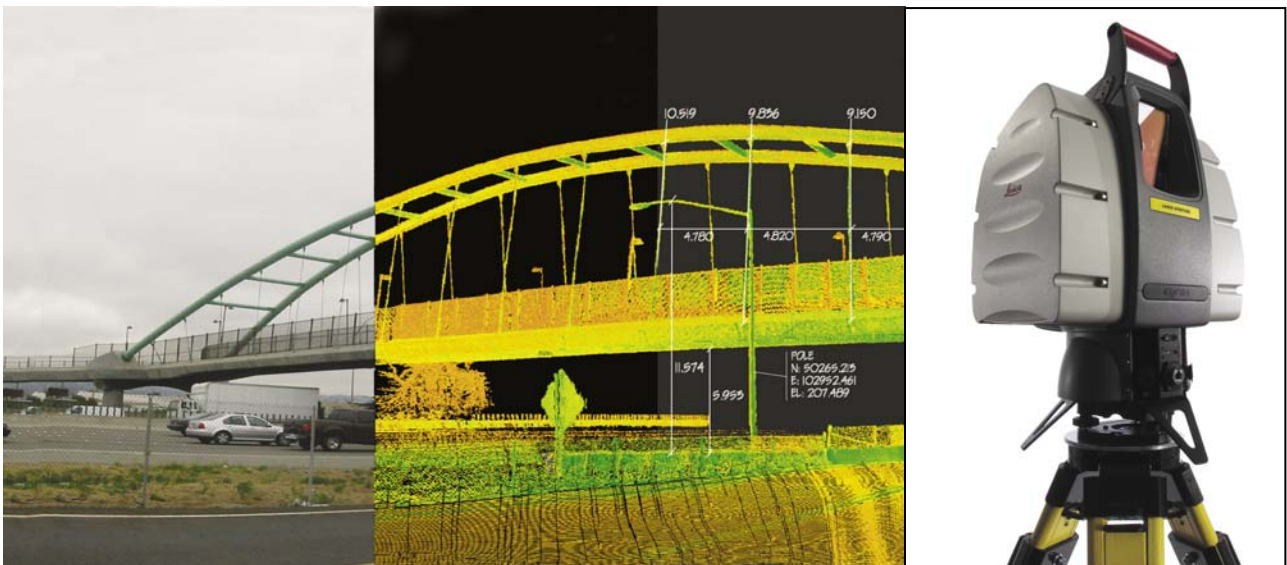
Nicht relevant.

### 6. Redundanz

Nicht relevant.

### 7. Bemerkungen

Laser-Scanning ersetzt besonders in Kombination mit digitalen Farbphotos weitgehend die Photogrammetrie, siehe auch 2.03 Photogrammetrie.



Figur 2.04-3: Beispielhafte Darstellung der erhaltenen Punktwolke des mit einem Laser-Scanner abgetasteten Objekts



## Messung von horizontalen und vertikalen Verformungen

### NIVELLEMENT

#### 1. Messeinrichtung

Das Nivellement ist ein einfaches Verfahren der Höhenmessung. Der Höhenunterschied benachbarter Punkte wird durch horizontales Zielen (mittels Nivellierinstrument) nach lotrechten Messlatten bestimmt. Der Höhenunterschied ist die Differenz der Ablesungen Rückblick-Vorblick an entsprechenden Messlatten.

Die Instrumente für die Beobachtung solcher geometrischer Nivellemente sind

- Libellen-Nivelliere
- Analoge Kompensator-Nivelliere
- Digitale Kompensator-Nivelliere

Die Genauigkeit des nivellierten Höhenunterschiedes ist abhängig von der Genauigkeit der Libelle oder des Kompensators des Nivellierinstrumentes sowie der Messlatten. Sie kann einige 1/100 mm für den Höhenunterschied benachbarter Punkte betragen. Die Messlatten bestehen aus einem Holz- oder Alurahmen, der eine genau geteilte Skala oder einen Strichcode auf einem Invarband trägt.



Figur 2.05-1: Digitalnivellier

Neben geometrischen Nivellements lassen sich Höhenunterschiede auch durch trigonometrische Nivellements (Höhenwinkelmessung) oder in beschränktem Ausmass durch Schlauchwaagen (siehe 2.12) bestimmen.

#### 2. Beurteilung

Altbewährte, einfache und anpassungsfähige Methode zur Bestimmung von Höhenunterschieden.

Für das Erreichen höherer Genauigkeiten (besser als  $\pm 1$  mm zwischen benachbarten Punkten) sind den systematischen Fehlern sowohl der Nivellierinstrumente (besonders Kompensator-Nivelliere) als auch der Messlatten besondere Aufmerksamkeit zu schenken.

Der Einsatz von Digitalnivellieren erleichtert das Messen von Höhendifferenzen. Die Auswertung ist einfach und leicht verständlich.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Nivellemente höherer Genauigkeit sind sehr empfindlich auf systematische Fehler des Instrumentes:

- Einsinken (sichere Aufstellung wählen)
- Fokussierfehler (Neigung der Ziellinie durch Bewegen der Fokussierlinse)
- Elektrische Felder (Magnetismus) bei Kompensator-Nivellieren
- Neigungsfehler (siehe Absatz 5) und der Messlatten:

- Teilungsfehler, Nullpunktfehler
- Schiefe des Lattenfusses
- Schiefe Lattenaufstellung
- Sauberer Lattenfuss und unverschmutzte Aufstellpunkte
- Einsinken der Latte

Bei Digitalnivellieren sind bei künstlicher Beleuchtung der Latte systematische Fehler zu beachten.

Es ist auf alle Fälle empfehlenswert, immer aus der Mitte zwischen benachbarten Punkten zu beobachten (gleiche Zielweiten).

#### 4. Technische Anforderungen

Zwischen Instrument und der Messlatte muss freie Sicht bestehen. Nivellementspunkte sind dauerhaft, z. B. mit Bolzen, zu versichern. Bei häufig wiederholten Nivellementen können auch die Umstellpunkte mit Bolzen versichert werden.

Die Referenz- oder Festpunkte sind als Punktgruppen in geeigneter, dauerhafter Form zu versichern.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Kontrolle der Nivellementspunkte auf Vollständigkeit und Beschädigungen.

Kontrolle von Instrument und Messlatten auf:

- Neigungsfehler evtl. Justierung
- Teilungsfehler der Messlatte (Nullpunktfehler können rechnerisch berücksichtigt werden)
- Lattenschiefe (Dosenlibelle justieren)
- Schiefe des Lattenfusses.

## 6. Redundanz

Für ein kontrolliertes Nivellement sind unabhängige Hin- und Rückmessung des Nivellements unbedingt erforderlich.

Eine Einbindung des Nivellementes in das Triangulationsnetz (trigonometrische Höhenbestimmung) bietet grössere Genauigkeit und Zuverlässigkeit.

## 7. Bemerkungen

Die Durchführung eines Nivellementes scheint eine einfache Arbeit zu sein. Diese Arbeit hat aber ihre Tücken und beim Streben nach höchstmöglicher Genauigkeit sind Überraschungen häufig.  
(Fotos: Schneider Ingenieure AG, Chur)



Figur 2.05-2: Digitalnivellier mit 2 m Strichcode Nivellierlatte

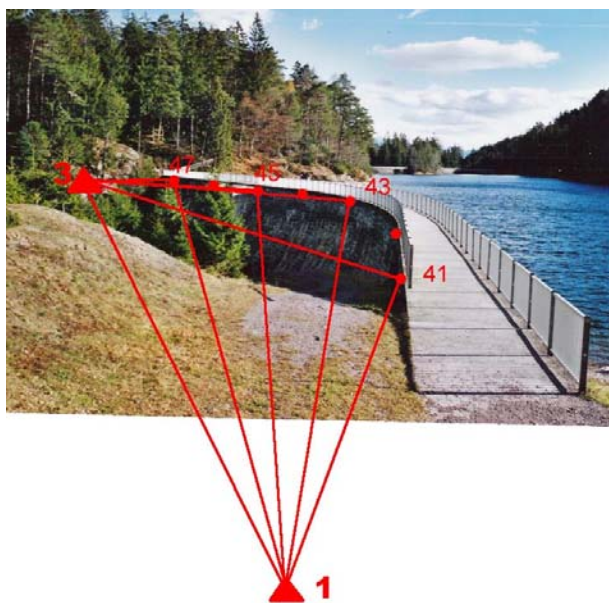
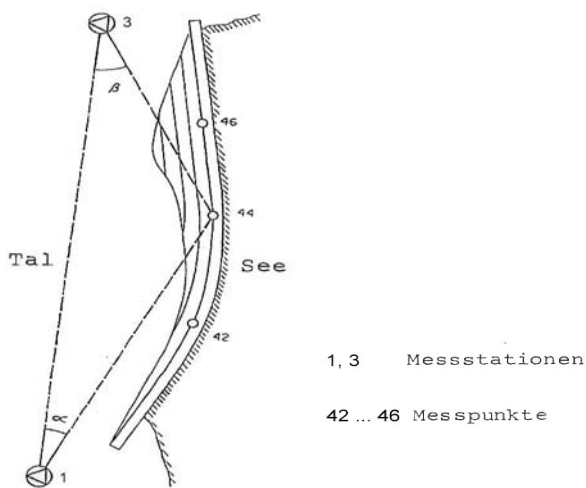
**Messung von horizontalen und vertikalen Verformungen**

**EINFACHE WINKELMESSUNGEN UND ELEKTRO-OPTISCHE DISTANZMESSUNGEN**

**1. Messeinrichtung**

Die **einfache Winkelmessung** ist zwischen dem optischen Alignement und der Triangulation einzuordnen. Mit der einfachen Winkelmessung werden in der Regel eindimensionale horizontale Lageänderungen bestimmt. An Stelle einer horizontalen Linie, auf der beim optischen Alignement Bezugs- und Messpunkte (Kontrollpunkte) liegen, benutzt die einfache Winkelmessung Elemente der Triangulation.

Bezugspunkte sind 1 bis 2 Messstationen im talseitigen Gelände nahe bei den seitlichen Widerlagern.

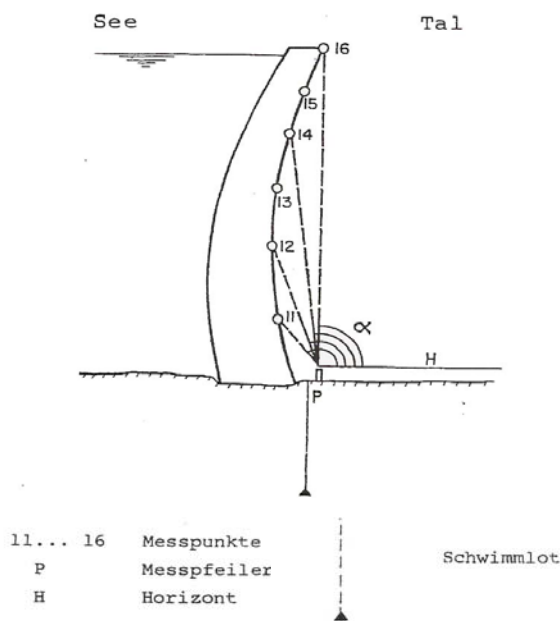


Figur 2.06-1: Einfache Winkelmessung  
 (Quelle: Schneider Ingenieure AG, Chur)

Die periodische Messung der Winkel  $\alpha$  nach geeigneten Messpunkten an/auf der Stauanlage liefert über die Winkeländerung  $\Delta\alpha$  horizontale Lageänderungen der Messpunkte in der Hauptbewegungsrichtung See-Tal. Die stabile Lage der Bezugspunkte A und B wird vorausgesetzt und ist periodisch zu überprüfen und auch die Distanz Bezugspunkt-Messpunkt wird als unverändert angenommen. Die Höhenlage der Bezugspunkte und der Messpunkte ist frei wählbar.

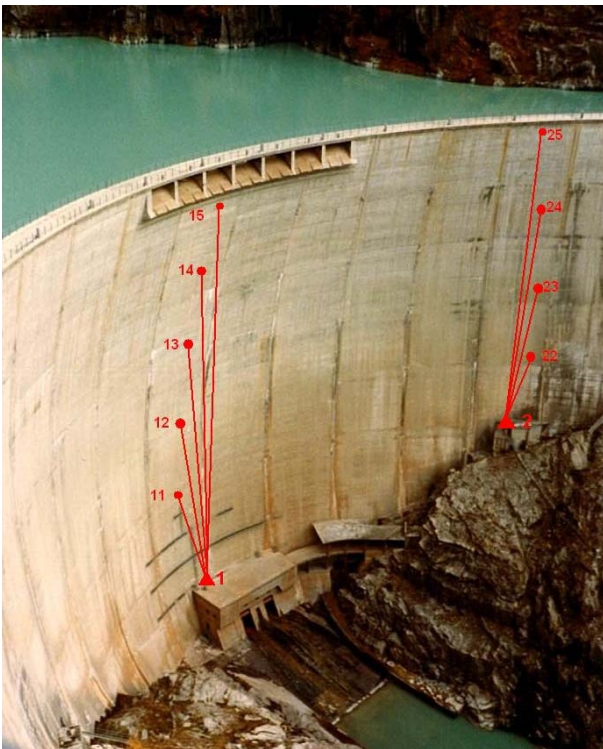
Die Messung erfordert den Einsatz eines geeigneten Theodoliten auf Pfeiler oder Stativ mit entsprechend genauer Zentrierung. Zur Kontrolle können auch die Winkel  $\beta$  von der Messstation B ausgemessen werden. Als Resultat sollten ungefähr dieselben Lageänderungen See-Tal wie von A herauskommen.

Die einfache **Vertikalwinkelmessung** ersetzt die Lotmessung in vertikal stark gekrümmten oder in sehr schlanken Bogenmauern. Sie besteht in der Vertikalwinkelmessung (Zenitwinkelmessung, Höhenwinkelmessung) von einem am Fuss der Mauer gelegenen Stationspunkt (eventuell Messpfeiler) zu Messpunkten an der Luftseite, die in einem vertikalen Querschnitt angeordnet sind.



Figur 2.06-2: Vertikalwinkelmessung bei einer Bogenmauer





Figur 2.06-3: Vertikalwinkelmessung bei einer Bogenmauer

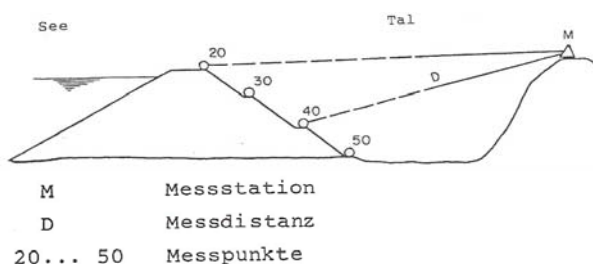
▲ 1,2 Messpeiler ● 11..25 Kontrollpunkte

Die Lageänderung See-Tal der Messpunkte erhält man aus den Winkelmessungen wobei die Lage und Höhe des Messpeilers vorerst als fest angenommen wird, und Distanzänderungen Messpeiler-Messpunkt vernachlässigt werden. Diese Annahmen sind periodisch mittels Triangulation, eventuell Schwimmlot neben dem Messpeiler zu überprüfen.

Theoretisch ist durch Horizontalwinkelmessung auch die Bestimmung der Lageänderungen links-rechts möglich.

Die eher anspruchsvolle Messung benutzt einen Sekundentheodoliten mit gebrochenem Okular für Steilvisuren. Allenfalls erfordert die Vertikalwinkelmessung spezielle Mauerbolzen.

Bei der **einfachen Distanzmessung** werden von einer talseitig gelegenen Messstation Distanzen zu Messpunkten auf/an der Talsperre gemessen.



Figur 2.06-4: Messanordnung bei Dämmen

Die horizontale Distanzänderung  $\Delta D$  zwischen 2 Messepochen ist identisch mit der eindimensionalen Lageänderung des Messpunktes in der Messrichtung.

Die Messung erfordert den Einsatz eines elektrooptischen Distanzmessers und die Zugänglichkeit zu den Messpunkten zum Aufstellen eines Reflektors. Die Genauigkeit des Distanzmessers definiert die Genauigkeit der Lageänderung.

Die Berechnung der Lageänderung der Messpunkte ist bei den vorgenannten Verfahren einfach. Diese Verfahren sind nur als Teil einer Triangulation empfehlenswert.

Der Vollständigkeit halber sei hier auch noch der **Rückwärtseinschnitt mit und ohne Distanzen**, auch freie Stationierung genannt, erwähnt. Die Methode ist für Bestimmung von Lageänderungen eher ungewöhnlich und erfordert in der Regel geodätische Kenntnisse.

## 2. Beurteilung

Die Messverfahren **einfache Winkelmessung** und **einfache Distanzmessung** weisen eine angemessene Genauigkeit, aber wegen des Fehlens überzähliger Messungen, fast keine oder keine Redundanz auf. Das Verfahren der einfachen Distanzmessung setzt ein elektrooptisches Distanzmessgerät voraus.

Die **Vertikalwinkelmessung** setzt qualifiziertes Personal voraus. Da in der Regel die Atmosphäre vor einer Staumauer keine normale Schichtung aufweist, wird die Vertikalwinkelmessung besonders stark durch Refraktionsanomalien beeinflusst. Daneben verfälschen auch andere systematische Fehler wie Instrumentenhöhe, Instrumentenzentrierung, Lotabweichungen infolge veränderlichem Seespiegel etc. die Messungen. Eine Vertikalwinkelmessung sollte nur zur Anwendung kommen, wenn andere Messmethoden nicht vertretbar sind.

## 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Der Erfassung und Behebung von Instrumentenfehlern, der Anwendung einwandfreier Messprinzipien (z.B. 1./2. Lage bei Winkelmessungen) und der Elimination von Messfehlern kommt wegen fehlender Redundanz erhöhte Bedeutung zu (z.B. Indexfehler am Theodolit, Masstabfehler des Distanzmessers).

Die Messungen sind wetterabhängig (Winterbedingungen im Hochgebirge) und werden mehr oder weniger durch Refraktionen beeinflusst.

Die Reinigung verschmutzter Messpunkte ist wegen deren Unzugänglichkeit am Parament von Staumauern problematisch.

#### 4. Technische Anforderungen

Alle diese Messverfahren sind topografieabhängig, sie verlangen Sichtverbindung zwischen Messstation und Messpunkt.

Mindestens die Messstation muss zugänglich sein. Messstationen sind gegen Steinschlag, Lawinen, Schneedruck zu schützen. Messung können durch angelerntes Personal durchgeführt werden.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Kontrolle der Bezugspunkte und Messstationen auf Beschädigungen.

Kontrolle und eventuell Justierung der verwendeten Instrumente.

#### 6. Redundanz

Redundanz wird durch Messung der übergeordneten Triangulation erreicht. Bei der Vertikalwinkel-messung trägt der Anschluss an tief im Fels verankerte Lote zur Redundanz bei.

#### 7. Bemerkungen

## Messung von horizontalen und vertikalen Verformungen

### OPTISCHES ALIGNEMENT

#### 1. Messeinrichtung

Die Visur, z.B. mit einem Alignierinstrument /Kollimator, von einer Messstation zu einem Zielpunkt bildet eine vertikale Bezugsebene. Die Kontrollpunkte sind entlang dieser Ebene angeordnet. Die Verformungen werden als Abstandsänderungen zur Bezugsebene bestimmt. Hierfür dienen verschiedenartige Verfahren:

- Bei den Kontrollpunkten wird ein Messschlitten mit verschiebbarer Zielmarke befestigt. Die Zielmarke wird auf die Visur der Bezugsebene (Fadenkreuz im Theodolit) ausgerichtet (aligniert). Der Abstand zur Bezugsebene wird an der Skala des Messschlittens abgelesen.
- Die Kontrollpunkte sind mit einer direkt am Bauwerk verankerten Zielmarke ausgerüstet. Das Zielinstrument auf der Messstation ist auf einem Messschlitten befestigt. Die auf den Bezugszielpunkt ausgerichtete Visur wird mit dem Messschlitten parallel verschoben und mit der Zielmarke des Kontrollpunktes aligniert.
- Von der Messstation aus werden die Horizontalwinkel zwischen Bezugs-Zielpunkt und der am Bauwerk direkt verankerten Zielmarke gemessen. Die Abstandsänderungen werden anhand der Winkeländerungen berechnet, wobei die einmal grob bestimmte Distanz zum Kontrollpunkt als konstanter Wert verwendet wird (im Prinzip einfache Winkelmessungen gemäss 2.06 als Ersatz für eigentliches Alignement).

Zur allfälligen Rekonstruktion der Bezugsebene dienen Richtungssätze zu Nahversicherungspunkten der Messstation und zu einer Gruppe von Bezugszielpunkten.

In der Regel ist das Alignement in Verbund mit einer Triangulation, zur periodischen Stabilitätskontrolle der Bezugsebene, einzusetzen.

#### 2. Beurteilung

Das optische Alignement ist ein einfaches Messverfahren. Die Genauigkeit ist von den Distanzen, den Refraktionsverhältnissen und den verwendeten Instrumenten abhängig. Die Winkelmessung ist meistens zweckmässiger als der Einsatz von Messschlitten.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Mögliche Störungen bilden Beschädigung oder Zerstörung der Messanlage durch Lawinen, Schneerutsch, Steinschlag usw. und/oder eine Behinderung der Visuren durch Schnee, Pflanzen, Sträucher oder Nebel, Regen usw.

Zu den Messfehlern zählen Refraktionen, vor allem bei Visuren, die zu nahe an Oberflächen von Bauwerken, Gelände, Wasser oder Schnee vorbeistrei-

fen, Zentrierfehler und ganz allgemein Instrumentenfehler.



Figur 2.07-1: Kollimator

#### 4. Technische Anforderungen

Einwandfreie Messprinzipien gewährleisten die Elimination von Beobachtungs-, Instrumenten- und Zentrierfehlern.

Die Messanlage ist mit Rücksicht auf Refraktionsinflüsse, Behinderung usw. zu konzipieren.

Für die Messstation und den Bezugszielpunkt sind möglichst stabile Zonen auszuwählen.

Diese Anforderungen können bei Einsatz von Messschlitten nur bedingt erfüllt werden, vor allem weil die ganze Messanlage sehr genau auf die vertikale Bezugsebene ausgerichtet werden muss. Die Winkelmessungen bieten einen viel grösseren Spielraum zur Anpassung der Messanlage an die örtlichen Verhältnisse, erfordern aber den Einsatz von qualifiziertem Personal.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Messstation, Bezugszielpunkte und Kontrollpunkte sind periodisch auf Beschädigungen zu überprüfen.

Die Visuren sind regelmässig auszuholen.

Periodische Funktionskontrollen bei Instrumenten, Zentrierungen und allfällige Justierungen bzw. Revisionen sind erforderlich.

#### 6. Redundanz

wird erreicht durch Messung der übergeordneten Triangulation oder Anschluss an tief im Fels verankerte Lote.

#### 7. Bemerkungen

Die Methode des optischen Alignements ist heute überholt und wird durch andere Messmethoden, z. B. Triangulation 2.01 oder einfache Winkelmessung 2.06 ersetzt.



## Messung von horizontalen und vertikalen Verformungen

### POLYGONZUG

#### 1. Messeinrichtung

Der Polygonzug ist eine Aneinanderreihung von Vektoren. Er kann auch als eine vereinfachte Triangulation betrachtet werden (siehe 2.01). Zur Messung dieser Vektoren werden dieselben Mess-elemente und -instrumente verwendet:

- Präzisionstheodolite (mittlere Beobachtungsfehler  $\pm 2''$ )
- Präzisions-Distanzmessgeräte (mittlere Beobachtungsfehler je nach Anforderung (von  $\pm 2$  mm für Staudämme bis  $\pm 0,02$  mm für Staumauern)



Figur 2.08-1: Winkelmessung in einem Kontrollgang

Polygonzüge gelangen vorwiegend in horizontalen Kontrollgängen von Staumauern zu Anwendung. Wegen der kurzen Polygondistanzen und der angestrebten hohen relativen Genauigkeit kommt der Zentrierung der Instrumente eine grosse Bedeutung zu. Sie liegt je nach Umständen (z.B. Grösse der zu erfassenden Bewegung, angestrebte Genauigkeit) zwischen  $\pm 1$  mm und  $\pm 0,01$  mm. Die Versicherung der Polygonpunkte als einfache Bodenpunkte, Konsolen, Sockeln oder Pfeiler ist abhängig von diesen Genauigkeitsanforderungen.

#### 2. Beurteilung

Der Polygonzug ist eine altbewährte Methode zur Bestimmung von Koordinaten. Je nach Genauigkeitsansprüchen ist es eine einfache bis aufwändige Messanlage. Höhenänderungen werden in der Regel mit Nivellementen (siehe 2.05) eventuell auch mit Höhenwinkelmessung bestimmt.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Polygonzüge sind empfindlich auf systematische Fehler. Instrumente und deren Zentrierung sind periodisch zu überprüfen. Polygonzüge in Kontrollgängen sind wetterunabhängig; Durchzug führt zu Messabweichungen.

#### 4. Technische Anforderungen

Zwischen benachbarten Polygonpunkten muss eine Sichtverbindung bestehen. Polygonzüge erfordern in der Regel ein umfangreiches Instrumentarium.

Der Polygonzug ist wegen der Fehlerfortpflanzung in der Regel nur in Kombination mit Loten und/oder mit Triangulationsnetzen sinnvoll. Polygonzüge in Kontrollgängen von Staumauern sind womöglich auf beiden Talseiten in den Fels hinein zu verlängern.

Für die Distanzmessung mit Invardrähten oder Invarbändern sind einheitliche Punktabstände und Raum für den freien Durchgang vorzusehen. Durchzug in den Kontrollgängen sollte vermieden werden.



Figur 2.08-2: Distanzmessung mit Invardraht zwischen 2 Konsolen in einem Kontrollgang

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Kontrolle der versicherten Punkte auf Beschädigungen.  
Kontrolle des verwendeten Instrumentariums.

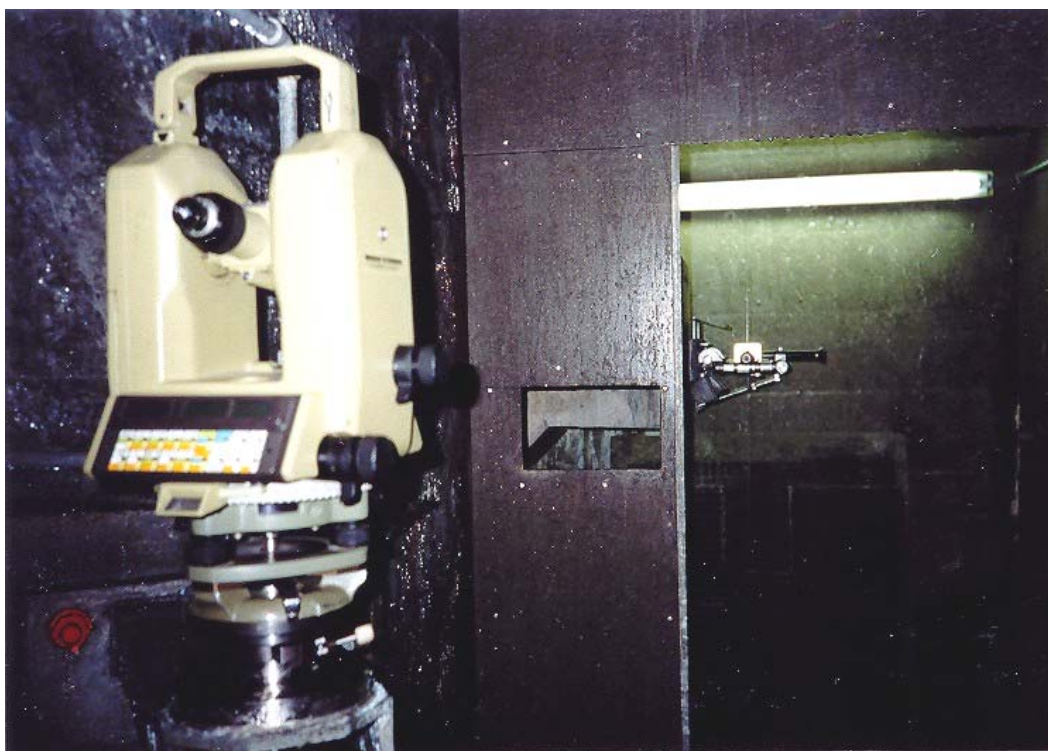
#### 6. Redundanz

Die unabhängige Hin- und Rückmessung der Polygonwinkel und Polygondistanzen gewährleistet eine gute innere Redundanz. Dazu trägt auch die Messung der Polygonseiten mit verschiedenen Invardrähten bei. Die Verknüpfung des Polygonzuges mit Loten und/oder der Triangulation garantiert die äussere Redundanz.

#### 7. Bemerkungen

Polygonzüge ermöglichen durch die grosse Zahl von Punkten entlang horizontaler Linien (Kontrollgänge) eine ideale Messmethode für die Bestimmung von Verformungen. Die erreichbaren relativen Genauigkeiten sind unschlagbar.





*Figur 2.08-3: Einmessung eines Lotdrahtes mit Theodolit und Visur durch eine Öffnung in der Kammerwand*

(Fotos: Schneider Ingenieure AG, Chur)

## Messung von horizontalen und vertikalen Verformungen

### LOT, SCHWIMMLOT

#### 1. Messeinrichtung

Das Lot (oder Pendel) erlaubt die präzise Messung von horizontalen Verschiebungen. Es besteht im Wesentlichen aus einem durch ein Gewicht gespannten Draht, welcher genau zentriert aufgehängt ist. Zur Dämpfung einer eventuellen Lot-schwingung hängt das Spanngewicht in einem mit Wasser oder Öl gefüllten Behälter. Das Schwimm- lot (auch Umkehrlot oder Schwimmpendel ge- nannt) ist an seinem untersten Punkt verankert und endet oben in einem Schwimmer, der sich in einem Schwimmergefäß frei bewegen kann. Die Spann- kraft des Drahtes liegt bei beiden Einrichtungen zwischen rund 200 und 2000 N. Das Schwimm- lot kann zusätzlich mit einem Zentriersystem aus- gerüstet werden, d.h. der Lotdraht kann in einer ver- rührten Bohrung mit einem Gleitanker an jeder beliebigen Stelle zentriert werden. Diese Kombi- nation ermöglicht es, eine zuverlässige Messung der kontinuierlichen Biegelinie einer Schwimm- lotbohrung zu erstellen.



Figur 2.09-1: Schwimm- lot mit Gleitanker und automati- scher Registrierung

Durch optische Ableseung der Drahtlage mittels eines speziellen Ablesegerätes auf verschiedenen Höhenlagen kann die Auslenkung des Mauerquer- schnittes bestimmt werden. Die Ableseung erfolgt in zwei orthogonalen Richtungen, entweder auf einer mit Nonius versehenen Skala oder bei neueren Geräten mit digitaler Anzeige.



Figur 2.09-2: Gleitanker

#### 2. Beurteilung

Beide Lottypen haben sich seit Jahren bewährt; einfache und sehr präzise Messung, welche zum regelmässigen Erfassen der Mauerverformung praktisch unersetzlich ist. Das Zentriersystem kann sehr nützlich sein, wo nachträglich eine Lotmess- anlage installiert werden muss. So können mit einer einzigen Messstelle die Deformationen auf verschiedenen Tiefen gemessen werden. Automatisierung und Fernübertragung sind mög- lich und sind für die Fernüberwachung von Bedeu- tung.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Bei unsorgfältigem Einhängen des Ablesegerätes können merkliche Messabweichungen entstehen.

Ungenügende Quantität von Wasser / Öl:

- im Schwimmergefäß von Umkehrloten führt zu falscher Lotlage infolge Verklemmen des Schwimmers.
- im Dämpfergefäß von Loten führt durch Reduk- tion des Auftriebes zu einer erhöhten Drahtspan- nung, und damit zu einer Lotdraht-Verlänge- rung, mit der Gefahr, dass das Lotgewicht am Gefäß- boden aufsteht.

Bei Abtastgeräten zur Fernübertragung kann die Lotlage durch Auftreten von zu grosser Reibung verfälscht werden. Es sollten daher möglichst berührungslose Abtastgeräte verwendet werden.

Ein Knick im Draht führt zu merklichen Messungenauigkeiten.

Der Lotdraht kann gelegentlich am Hals des Dämpfer- oder Schwimmergefässes anstehen oder das Gewicht resp. der Schwimmer an dessen Boden, bzw. in abgesetztem Schlamm aufstehen.

Die Bewegungsfreiheit des Drahtes in Schächten und Bohrungen kann durch Kalkausscheidungen oder auch durch hineingefallene Gegenstände behindert werden.



Figur 2.09-3: Ablesung mit dem Koordiskop

Unsorgfältig erfolgte Drahtzentrierung kann gelegentlich zu einem scheinbaren Sprung in den gemessenen Verschiebungen führen.

Eisbildung an der Aufhängung oder im Schwimmergefäss können nicht nur zur Verfälschung der Drahtlage führen, sondern gelegentlich auch zum Zerreißen des Drahtes, was bei Schwimmloten auch den Schwimmer beschädigen kann. (Heizdrähte haben sich als Gegenmassnahme bewährt) Infolge bedeutender Deformationen im Felsfundament anlässlich des Erstaufstaus des Sees kommt es auch vor, dass die Bohrlochverrohrung eines Schwimmlotes zerreisst; tritt daraufhin Spritzwasser ins Rohr ein, wird das Lot in Bewegung versetzt, was die Weiterführung der Messung ohne Reparatur des Rohres praktisch verunmöglicht. Durch die Deformationen im Felsfundament oder durch Injektionen kann die Bohrung dermassen verformt werden, dass der Lotdraht an der Verrohrung anstehen. Sofern möglich, muss die Lotverankerung neu versetzt oder allenfalls eine Nachbohrung vorgenommen werden, damit wieder genügend Lichtraumprofil vorhanden ist.

Luftzug im Lotschacht versetzt das Lot in Schwingungen, was die Ablesungen erschwert und verfälscht und manchmal sogar verunmöglicht.

Schliesslich sind auch Ablesefehler nicht selten.

#### 4. Technische Anforderungen

Aufhängepunkte müssen für Inspektionen zugänglich sein.

Das Aufhängedispositiv muss mit einer präzisen Drahtzentrierung versehen sein.

Ablesestellen sollen korrekt beleuchtet und gegen Wasserberieselung aus den Lotschächten möglichst gut geschützt werden.

Luftzug in Lotschächten muss absolut vermieden werden, damit die Lage der Lote nicht gestört wird. Dazu sollen alle Messnischen durch Türen verschlossen und vom System der Kontrollgänge abgetrennt werden.

Eventuelle Gegengewichte von Zwischenzentrierungen müssen zum Schutze des Aufsichtspersonals unbedingt gegen Absturz geschützt werden.

Schwimmlote im Mauerfundament müssen wo immer möglich im luftseitigen (unter Druckspannungen stehenden) Bereich des Mauerfusses angeordnet werden, um ein Zerreißen der Verrohrung mit Sicherheit zu vermeiden.

Für Schwimmlote muss verlangt werden, dass die Zugkraft im Draht:

- entweder durch am Schwimmer angebrachte Eintauchtiefen mit Angabe der entsprechenden Spannkraft leicht überprüft werden kann.
- oder mittels einer geeigneten Einrichtung direkt gemessen werden kann.

Zur Fernüberwachung sollte die Drahtlage berührungsfrei und wo möglich mit einem Gerät abgenommen werden, das keine mechanischen Elemente aufweist.

Bei der Geräteauswahl ist die maximale zu erwartende Amplitude zu berücksichtigen.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Kontrollieren, ob Spielraum für horizontale Bewegungen über die ganze Höhe des Lotes gewährleistet ist. (Durchführen von Bohrlochvermessungen mit Gleitanker)

Kontrollieren, ob genügend Wasser im Dämpfergefäss ist, und durch vertikale Bewegungen kontrollieren, ob der Spielraum zwischen Spanngewicht und dem Boden des Dämpfergefässes noch genügend ist.

Wasserstand bzw. Ölstand im Schwimmergefäss der Schwimmlote muss bei jeder Handmessung kontrolliert werden. Wenn nötig, unbedingt Wasser oder Öl nachfüllen.

Bei Vorhandensein eines Abtastgerätes zur Fernübertragung überprüfen, ob der Draht nach einer Bewegung wieder in die ursprüngliche Lage zurückkehrt. Nötigenfalls Drahtlage bei abgenommener oder ausgeklinkter Messgabel kontrollieren.



Kontrollieren, ob sich im Winter bei der Aufhängung (oder beim Schwimmergefäß) Eis bildet. Wenn ja, Massnahmen treffen um dies zu vermeiden.

Die Lote müssen von Zeit zu Zeit unbedingt geodätisch eingemessen werden (mindestens einmal pro Fünfjahresperiode) um die Stabilität ihrer Fixpunkte zu überprüfen.

### 6. Redundanz

Vergleich der in mehreren Mauerquerschnitten gemessenen Auslenkungen.

Kombination mit geodätischen Messungen sowie mit Alignement (oder Polygonzug).

Vergleich der Ergebnisse von Lot- und anderen

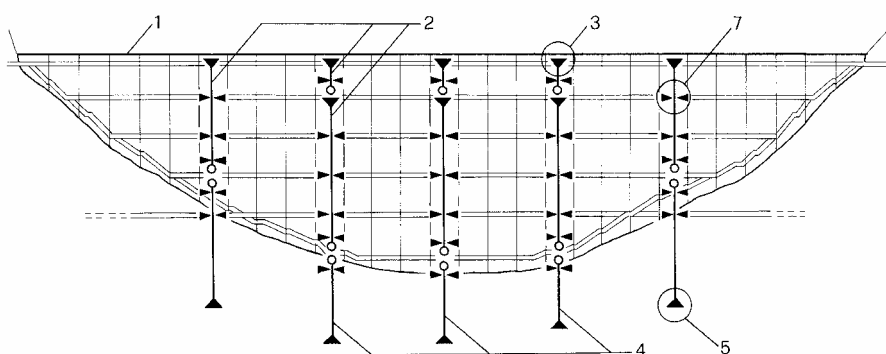
Verformungsmessungen wie Klinometer, Tiltmeter, Extensometer etc.

### 7. Bemerkungen

Es empfiehlt sich unbedingt, ein Ersatzmessgerät bereitzuhalten.

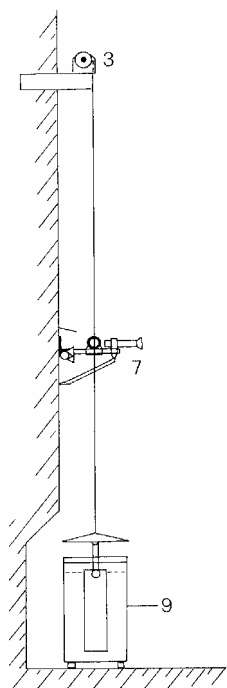
Von Zeit zu Zeit sind damit Vergleichsmessungen durchzuführen.

Bei Geräteersatz sind mehrere Vergleichsmessungen mit dem alten und neuen Gerät durchzuführen. Beim Auswechseln des Lotdrahts unbedingt vor und nach dem Auswechseln eine Messung durchführen.

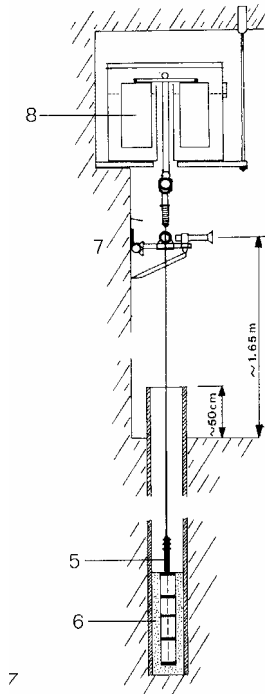


Figur 2.09-4: Typisches Beispiel einer modernen Anordnung der Lotmessstellen

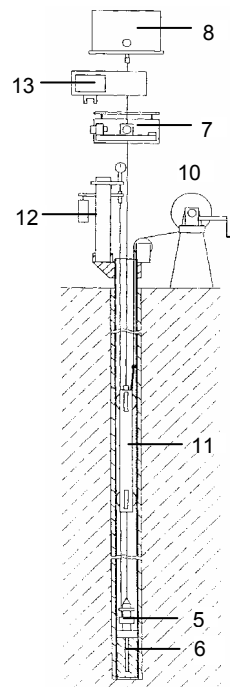
- 1 Dammkrone
- 2 Lotdraht
- 3 Aufhängepunkt
- 4 Schwimmlose
- 5 Verankerung des Schwimmloses
- 6 Zementmörtel
- 7 Messpunkt
- 8 Schwimmer / Schwimmerkübel
- 9 Dämpfungsgefäß
- 10 Winde
- 11 Bewegliche Zentriersonde
- 12 Vertikale Distanzmessung
- 13 Automatische Messung



Figur 2.09-5:  
Gewichtslot



Figur 2.09-6:  
Schwimmlose



Figur 2.09-7:  
Schwimmlose  
mit beweglicher  
Lotdrahtzentrierung



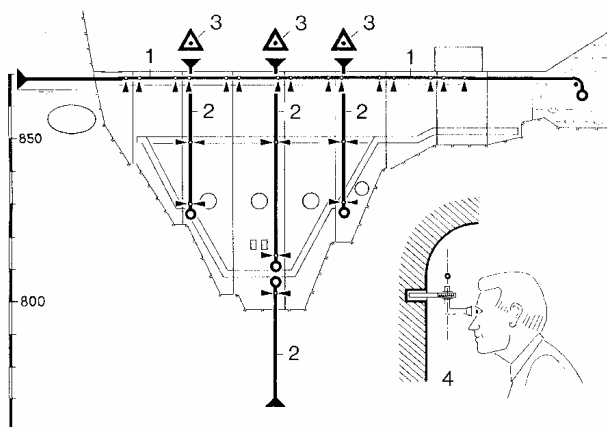
## Messung von horizontalen und vertikalen Verformungen

### DRAHT-ALIGNEMENT

#### 1. Messeinrichtung

Die Elemente des Draht-Alignementes sind im Wesentlichen aus der Lot-Messeinrichtung entlehnt. Längs geradlinigen Wänden in Kontrollgängen oder an Brüstungsmauern auf der Krone wird in der Regel ein Draht von einer Talseite zur anderen freihängend gespannt. Dieser markiert eine vertikale Bezugsebene. Die Verformungen bezüglich dieser Ebene, d.h. die Horizontalkomponenten in Richtung See-Tal, die den Änderungen der Distanz zwischen der Wand und dem Draht entsprechen, werden mit einem Messschlitten bestimmt. Das Messinstrument wird an der Wand befestigt. Die Position des vertikal angezielten Drahtes kann wie bei den Loten am Messschlitten abgelesen werden (Skala mit Nonius oder digitale Anzeige).

- 1 Drahtalignement entlang der Krone
- 2 Lote
- 3 Messpfeiler des geodätischen Messnetzes
- 4 Detail der Alignementsablesestelle



Figur 2.10-1: Typisches Beispiel einer modernen Anordnung der Alignementsmessstellen

Um gleichbleibenden Durchhang des Drahtes bzw. begrenzte Abstände zwischen Instrument und Draht zu gewährleisten, wird der Draht mit konstantem Zug gespannt. Hierfür wird der Draht an einem Ende über eine reibungsarme Rolle umgelenkt und mit einem freihängenden Gewichtskörper gespannt.

Die mögliche Spannweite ist vom Gewicht und von der Qualität des Drahtes abhängig. Spannweiten bis 200 m mit einem Durchhang von höchstens 20 cm sind ohne weiteres möglich. Bei grösseren Spannweiten muss die Sohlenhöhe dem Drahtdurchhang angepasst werden. Denkbar ist auch eine Begrenzung des Durchhanges mit Zwischenabstützungen in Form von Schwimmern, die gewährleisten, dass der Draht sich auf der ganzen

Spannweite in einer vertikalen Ebene einpendelt (Schwimmer analog Schwimmerlot).

Mit dem Drahtalignement können auch differentielle Verschiebungen in Blockfugen (Scherungen) bestimmt werden, indem links und rechts von der Fuge eine Messstelle angebracht wird.



Figur 2.10-2: Zwischenaufhängung des Drahtes mit einem Schwimmer

#### 2. Beurteilung

Den Loten gleichwertige, sehr einfache und präzise Messung.

Nur für geradlinige Bauwerke geeignet.

Vorzüglicher Ersatz für optische Alignements: Präzision ist unabhängig von der Länge des Alignements und von Refraktionen; die Messung ist auch bei schlechter Sicht möglich.

Automatisierung und Fernübertragung sind möglich.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Knickung des Drahtes im Bereich der Drahtaufhängungen und der Ablesestellen.

Mangelhafte Zentrierung des Drahtes bei den Aufhängungen.

Unsorgfältiges Setzen des Messinstrumentes.

Luftzug, der den Draht bewegt oder seine Position verfälscht.

Änderungen des Drahtdurchhanges infolge Kondenswasser.

#### 4. Technische Anforderungen

Lange, geradlinige Wand von Gängen, Stollen oder von Brüstungsmauern auf Kronen.  
Soweit möglich, Messanlage mittels Stollen in Talflanken verlängern und allenfalls Höhenverlauf der Gang- und Stollensohle dem Drahtdurchhang anpassen.



Figur 2.10-3: Alignementsfixpunkt

Keine ausgereifte, serienmässige Herstellung bekannt, jedoch langjährige, durchwegs befriedigende Erfahrungen in Gängen und auf Kronen von Gewichtsmauern: Schräh (ab 1973) und Rempen der Kraftwerke Wägital, Mapragg der Kraftwerke Sarganserland [Barrages Suisses 1985, Seite 62 und 214; ICOLD-Kongress 1985, Q56/R53-Vol I, Seiten 986 und 9991] und Pigniu der Kraftwerke Ilanz.

Präzise Führung des Drahtes in den Aufhängearmaturen: koaxiale Klemmungen; drehbare Elemente genau in einer Ebene ausrichten; zusätzliche "Anlehnung" des Drahtes an vertikale Zylinder-Mantelflächen im Übergang zur freien Spannweite.



Figur 2.10-4: Alignementsmessgerät

Draht darf nicht geknickt oder verbogen sein.  
Konstante Drahtspannung gewährleisten: temperaturbedingte Änderung der Drahtlänge und von Verformungen des Bauwerkes herrührende Änderung der Distanz zwischen den Aufhängungen kompensieren (z.B. reibungsfreie Umlenkrolle und freihängender Gewichtskörper).

Bei Anwendungen im Freien: Draht vor Luftzug schützen, z.B. abgedeckte Nuten in Brüstungsmauern.

Messgerät präzise zentrieren und richten. Die Befestigung des Messgerätes muss genau rechtwinklig zum Draht stehen.

Für Funktionskontrolle des Gerätes in unmittelbarer Nähe der Drahtaufhängungen Messstellen einrichten. Diese ermöglichen zusätzlich eine einwandfreie Rekonstruktion der Bezugsebene beim allfälligen Ersatz des Drahtes oder des Aufhängedispositivs.

Messstellen nicht zu nahe bei Fugen, Ecken und dergl. ausbilden, um Verfälschungen durch lokale, für das Bauwerk nicht repräsentative Verformungen zu vermeiden.



Figur 2.10-5: Alignementsfixpunkt mit Gewicht, welches den Draht spannt.

### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Vor der Messung: allfälliges Kondenswasser am Draht durch "Antippen" entfernen und Draht beruhigen lassen.

Prüfung anlässlich der Messung: freies Spiel für Draht auf der ganzen Spannlänge; freies Spiel für Spannvorrichtung; Instrumentenkontrolle durch Messung an den hierfür vorgesehenen Stellen.

Periodische Prüfung: Knicke, Verbiegungen, Kerben beim Draht; freie Bewegung der Umlenkrolle.

### 6. Redundanz

Kombination mit geodätischen Messungen (z.B. Polygonzug) sowie mit Loten.

### 7. Bemerkungen

Es empfiehlt sich unbedingt, ein Ersatzmessgerät bereitzuhalten.

Von Zeit zu Zeit sind damit Vergleichsmessungen durchzuführen.

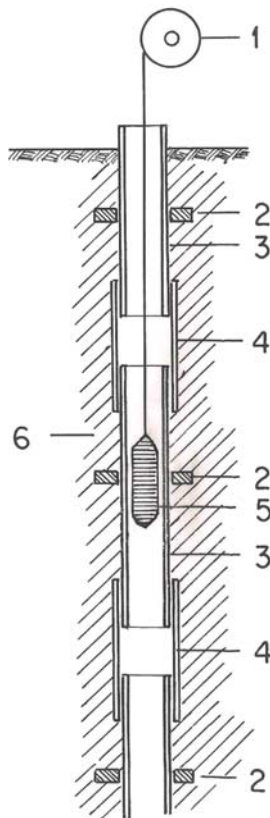
Bei Geräteersatz sind mehrere Vergleichsmessungen mit dem alten und neuen Gerät durchzuführen. Beim Auswechseln des Drahts unbedingt vor und nach dem Auswechseln eine Messung durchführen.

**Messung von horizontalen und vertikalen Verformungen**

**SETZPEGEL**

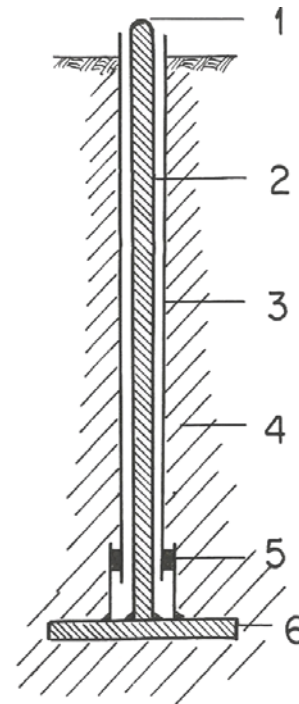
**1. Messeinrichtung**

Vertikales Kunststoffrohr, das in der fortschreitenden Schüttung sukzessive durch Ansetzen mit hochgezogen wird. In geeigneten Abständen (3 bis 10 m) werden metallische (Stahl, Aluminium) Setzplatten, Kreuze oder Ringe über das Rohr gestülpt und "schwimmend" in der Dammschüttung horizontal verlegt. Ihre relative Lage wird durch Induktionsmesssonde bestimmt, deren Abstich von der jeweiligen Rohroberkante gemessen wird. Anzeige: akustisch (Pfeifton) oder optisch (max. Induktionsstrom am elektrischen Messgerät). Bei einer Lockermaterialfundation kann der Pegel einige zehn Meter in ein Bohrloch hinein versetzt werden. Anstelle von Setzplatten werden dann Metallringe verwendet, die im Sand der äusseren Bohrlochfüllung "schwimmen".



Figur 2.11-1: Setzpegel

1. Messband mit Anzeigegerät
2. Setzplatten aus Metal
3. Messrohr
4. Muffe
5. Messsonde
6. Schüttmaterial



Figur 2.11-2: Setzplatte

1. Messpunkt (Nivellement)
2. Messstange
3. Schutzrohr
4. Schüttmaterial
5. Gleitmuffe
6. Setzplatte

Wenn auf die Rohrabschnitte jeweils ein Metallring eingebaut wird, kann die Position aller Rohrabschnitte unabhängig von den Setzplatten bestimmt werden. Zur Korrektur der Messwerte mit der Inklinometermessung kann dies sehr hilfreich sein. In der Regel könnte sogar auf Setzplatten verzichtet werden, wenn die Rohrabschnitte nicht zu lang sind. Viele Vergleichsmessungen zeigen nämlich gleiche Setzungsbeiträge für Rohrabschnitte und Setzplatten.

In Abwandlung kann das Gerät auch horizontal verlegt werden.

**2. Beurteilung**

Einwandfreies Messgerät für homogene Fein- bis Kiesmaterial-Schüttungen bis ca. 50 m, ausnahmsweise 100 m Höhe. Umstritten bei stärkerer Neigung oder bei horizontaler Anordnung. Im letzten Fall muss die Messsonde über eine Umlenkrolle am Pegelende mit Kabelzug gezogen werden oder mit Gestänge eingeführt werden.

Automatisierung und Fernmessung sind nicht möglich.



### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Eindringen von Material und Fremdkörper in das Pegelrohr.

Deformation des Pegelrohres zufolge grosser horizontaler Dammdeformationen (besonders bei hohen Dämmen: Klemmen der Messsonde)

Beschädigung des Pegelrohres unter hohem Erd- druck.

Abscheren des Pegelrohres beim Durchfahren von Materialgrenzen.

Überbeanspruchung der Rohrmuffen.

Verkleben der Setzplatten gegen das Pegelrohr (Gleitmuffe zwischen Platte und Rohr vorsehen).

Einflüsse des magnetischen Umfeldes auf die Messsonde (an Ort und Stelle abstimmen).

Reibungskräfte des an der Pegelwand (insbeson- dere an Krümmungen) anliegenden Messkabels bewirken dessen zusätzliche Streckung und verfäl- schen die Ablesung.

Überdehnung des Aufhängekabels.

Räumliche Deformation des Pegels erschwert korrekte Interpretationen der Messung (eventuell mit Inklinometer kombinieren).

### 4. Technische Anforderungen

#### a) Einbau

Die Pegelrohrelemente sollen nicht länger als 6 m sein (besser 3 m); ihre Verbindungsmuffen müssen eine erhebliche Bewegungslänge erlauben: bis zu mehreren Dezimetern, um Materialkompressionen folgen zu können. Die Muffen müssen z.B. durch übergestülpte Gummischläuche gegen eindringen- des Schüttmaterial gesichert werden. Beim Einbau muss die Vertikalität des Pegels in der steigenden Schüttung laufend überprüft und nötigenfalls korri- giert werden. Die Einbettung des Pegelrohres soll der umgebenden Schüttung durch geeigneten Materialeinbau "von Hand" und ca. 0.50 bis 1.0 m voraussehen. Das über die Schüttung hinausragen- de Pegelrohr ist durch massive Abspermassnah- men und auffällige, optische Signale gegen Be- schädigung durch zirkulierende Erdbaugeräte wirksam zu schützen; allenfalls Aufsichtspersonal einsetzen. Das Pegelrohr ist oben mit einer Kappe stets zu verschliessen. Alternativ kann das Pegel- rohr der Schüttung nachfolgen (Schacht).

Zusätzlich zu den während des Baus erstellten Pegeln sollten nach Bauende einige Setzpegel nachträglich in Bohrungen versetzt werden, um die

Nachsetzungen zuverlässig verfolgen zu können. Die vor allem in sehr hohen Dämmen (> 100 m)

#### b) Messbetrieb

Der Abstich zu jeder Setzplatte ist sowohl beim Absenken als auch beim Heraufziehen der Sonde abzulesen. Die Pegeloberkante ist bei jeder Mes- sung einzunivellieren. Bei grosser Messstrecke ist die Sonde allenfalls mit einem Zusatzgewicht zu belasten, damit das Messkabel immer gestreckt ist.

### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Häufige elektrische Funktionskontrolle der Sonde und des Ablesegerätes. Gelegentliches Überprü- fen der Messkabelstreckung.

Vorhalten von mindestens zwei identischen Mess- sonden und Ablesegeräten auf jedem Damm. Die Kompatibilität der Geräte muss regelmässig über- prüft werden (auch während der Bauzeit).

### 6. Redundanz

Ein zerstörter Messpegel ist meist unwiederbring- lich verloren. Es sind daher mehrere Messprofile des Dammes mit Pegeln auszurüsten, mindestens 3 pro Damm. Eine Redundanz kann mittels Schlauchwaage-Setzungsmessgerät und eventuell Extensometerketten (siehe 2.11 und 2.14) erzielt werden und sollte für kritische Fälle angestrebt werden, z.B. im Bereich von erwarteten grossen differentiellen Setzungen, die zu Überbeanspru- chungen oder gar Rissen des Materials führen könnten. Eine weitere Redundanz mit der Setzpe- gelmessung ergibt sich über das Nivellement des Pegelkopfes und eines anfällig am unteren Ende eines Pegels befindlichen Kontrollstollens.

### 7. Bemerkungen

Setzpegel können sinnvoll mit Inklinometern kom- biniert werden, wenn die Pegelrohre entsprechen- de innere Führungsnuten aufweisen. Die Berück- sichtigung der Horizontaldeformation des Pegels ergibt sodann eine zuverlässigere Interpretation der Dammsetzung.

Müssen Setzpegel in Felsschüttungen gebaut werden, so sind die Pegelrohre und Setzplatten in reichlich bemessenen Kiespackungen einzubetten. In einfachen Fällen kann bei kleinen Dämmen eine Setzplatte am unteren Ende eines Doppelrohres als Setzpegel verwendet werden.

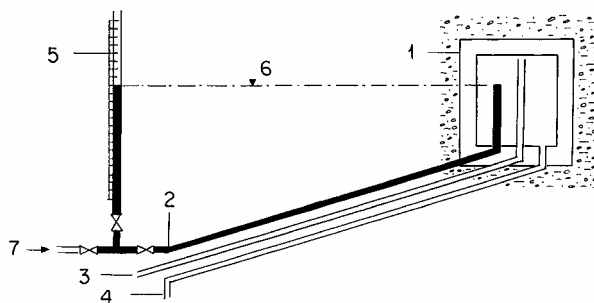
Die mechanische USBR-Sonde ist heute weniger gebräuchlich und wurde von der Induktionssonde abgelöst.

### Messung von horizontalen und vertikalen Verformungen

#### SCHLAUCHWAGE (HYDRAULISCHER „SETZPEGEL“)

##### 1. Messeinrichtung

Die Schlauchwaage funktioniert nach dem Prinzip der kommunizierenden Gefässe. Es handelt sich um eine Messzelle mit innerer Überlaufkante eines offenen hydraulischen Systems. Die Zelle wird in der Schüttung in eine Sandpackung versetzt. Von der Messkammer führt eine Speiseleitung für Messwasser zum Überlauf in der Zelle, und von der Zelle zurück eine Drainageleitung zur Messkammer. Eine Belüftungsleitung von der Messkammer zum Kopf der Zelle dient dem Druckausgleich zwischen Zelle und Messkammer. Ableseung: Niveau an Standgläsern in der Messkammer; eventuelle Verwendung von Quecksilbergegendruck.



Figur 2.12-1: Messprinzip einer Schlauchwaage

1. Messzelle
2. Speiseleitung
3. Belüftungsleitung
4. Drainageleitung
5. Standglas mit Ableseskala
6. Messwasserniveau
7. Zuleitung für entlüftetes Wasser

##### 2. Beurteilung

Einwandfreies Messsystem für alle Schüttungen, insbesondere, wo Rohrsetzpegel nicht ausführbar sind, z.B. auf der Wasserseite von Dämmen mit Aussendichtung. Die Messkammer muss stets unter dem Niveau der Zelle liegen, da die Höhenlage der Zelle über den an der Ablesestelle gemessenen statischen Wasserdruck (an der inneren Überlaufkante) bestimmt wird.

Weil die Lage und Höhe der Messkammer von der Messzellenlage und den zu erwartende Setzungen abhängt, ist das System etwas schwerfällig. Automatisierung und Fernübertragung sind nicht möglich.

##### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Eindringen von Fremdmaterial in die Messleitungen.

Schlechte Entlüftung des Messwassers.

Bruch der Messschläuche zufolge differentieller Setzungen benachbarter Schüttungszonen, deren Grenzen die Schläuche überqueren müssen. Diese Störquelle limitiert den Anwendungsbereich des Systems auf Schüttungen mit mässigen Setzungen.



Figur 2.12-2: Schlauchwaage in einem Kontrollgang im Fundament einer Talsperre

##### 4. Technische Anforderungen

Die Zelle soll möglichst auf einer Grundplatte versetzt werden. Die Schlauchleitungen (3 je Zelle) sollen ununterbrochen (keine Muffen und Briden) von der Zelle bis zur Messkammer verlegt werden. Dabei soll stets ein Gefälle von der Zelle zur Messkammer vorliegen; jedenfalls sollen keine Hochpunkte in der Leitung vorkommen. Speiseleitung und Drainageleitung sind Nylonschläuche von 3 - 4 mm innerem Durchmesser. Die Belüftungsleitung soll 6 - 7 mm inneren Durchmesser aufweisen. Die Leitungen sind im Sandbett in der Schüttung zu verlegen.

Die Leitungen müssen beim Verlegen (z.B. mit Plastikfarbband) zu ihrer eindeutigen Identifikation markiert werden. Die Frostsicherheit der ganzen Anlage muss gewährleistet sein.

Die Leitungen müssen regelmässig gespült und entlüftet werden. Das Messwasser ist durch Kochen zu entlüften. Die Bezugshöhe der Standrohre ist regelmässig nachzumessen.

##### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Die Leitungen müssen regelmässig gespült und entlüftet werden.

Das Messwasser ist durch Kochen zu entlüften. Die Bezugshöhe der Standrohre ist regelmässig nachzumessen.

##### 6. Redundanz

Redundanz der Messanlage wird erzielt über Setzpegel am gleichen Ort oder durch Einbau von zwei Zellen mit je unabhängigem Leitungssystem am gleichen Ort.

##### 7. Bemerkungen

Verglichen mit Setzpegeln ist das System relativ kostspielig.

## Längenänderungen

### DISTOMETER / DISTINVAR

#### 1. Messeinrichtung

Distometer/Distinvar sind hochpräzise Messgeräte zur Bestimmung von Längenänderungen mit Invar oder Stahldrähten.

Beim Distometer werden der Draht und das Messgerät zwischen den Messbolzen, welche die zu messende Strecke definieren, eingehängt. Eine im Messgerät integrierte Spannvorrichtung erzeugt eine konstante Zugkraft von 8 kg. Ein Mikrometer misst den Abstand zwischen dem Distometer und dem daran befestigten Ende des Invardrahtes. Der Distometer ist ein rein mechanisches Gerät mit einer Zugfeder, bei dem der Draht von Hand gespannt wird. Es wurde für die Konvergenzmessungen in Tunnels entwickelt.



Figur 2.13-1: Distometer in Messposition

Das Distinvar und sein Gegenstück, das Pivot, werden mit Hilfe von speziellen Zentrierflanschen auf Pfeilern oder Stahlkonsolen aufgestellt. Der Draht wird durch eine Präzisionswaage elektromechanisch gespannt und eine digitale Anzeige misst den Abstand zwischen Distinvar und dem daran befestigten Ende des Invardrahtes.

Das Distinvar wurde beim CERN entwickelt und dort in der Metrologie (Industrievermessung) verwendet.

Mit beiden Instrumenten können Distanzen von 1 m bis ca. 30 m gemessen werden. Längere Distanzen sind mit Einschränkungen möglich.

Invardraht-Messungen sind im Prinzip relative Messungen. Um absolute Distanzen zu erhalten, ist eine Kalibrierung der gesamten Messeinrichtung (Messgerät und Invardraht) nötig. Beide Geräte werden seit langem bei geodätischen Messungen (z. B. Polygonzüge in Kontrollgängen von

Staumauern) und Streckenmessungen im Gelände (z. B. Felsbewegungen im Staubeckenbereich) eingesetzt.

#### 2. Beurteilung

Die einfache Handhabung und die hohe innere Genauigkeit der Messungen von  $\pm 0.01 - 0.03$  mm machen Distometer/Distinvar zu nützlichen Geräten für spezielle Messungen. Das Distometer kann in allen möglichen Richtungen (horizontal, schräg, vertikal) messen. Das Distinvar ist nur für horizontale bis leicht geneigte (bis 10 %) Strecken einsetzbar.

Der maximale Messbereich vom Distometer beträgt 10 cm, beim Distinvar 5 cm, so dass für verschieden lange Messstrecken verschieden lange Drähte erstellt werden müssen.

Dem Vorteil der geringen Ausdehnung von Invar (ca.  $\pm 1 \cdot 10^{-6}$  pro  $^{\circ}\text{C}$ ) im Vergleich zu Stahl (ca.  $\pm 10 \cdot 10^{-6}$  pro  $^{\circ}\text{C}$ ) stehen Längenänderungen des Invardrahtes gegenüber, die auf mechanische oder thermische Belastungen zurückzuführen sind.



Figur 2.13-2: Distinvar auf einer Konsole zur Messung von Polygonstrecken im Kontrollgang einer Staumauer

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Nicht stabile Messbolzen und unsorgfältiges Arbeiten mit den Messgeräten können zu Störungen und Fehlern führen.

Ungenaueres Eichen des Distometers, Knicke in den Invardrähten durch unsorgfältige Behandlung, Verwechslung von Invardrähten und die bereits erwähnten allgemeinen Probleme bei der Arbeit mit Invar- oder Stahldrähten (Ausdehnung etc.) führen zu Messfehlern.

#### 4. Technische Anforderungen

Beim Distometer müssen die Messbolzen solide im Massenbeton oder massivem Fels versichert sein. Die Messbolzen sind vor jeglicher Beschädigung zu schützen (Deckel etc.).

Temperaturmessungen sind zur Kompensation bei jeder Messungen vorzusehen. Für geodätische Zwecke wird in der Regel ein Durchmesser des Invardrahtes von 1.65 mm gewählt.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Beim Distometer sind vor und nach jedem Messeinsatz die Zugspannung und die Länge des Messteils auf einer dazugehörigen Eichlehre genau zu eichen. Das Distinvar ist in dieser Hinsicht stabiler und benötigt nur in Abständen von 1 – 2 Jahren eine Eichung. Von Zeit zu Zeit sind die Messgeräte durch den Hersteller zu revidieren.

#### 6. Redundanz

Zur Kontrolle der zu messenden Distanzen oder Verschiebungen können die Messungen mit mehreren Drähten erfolgen. Dadurch lässt sich die Stabilität der Drähte prüfen. Die so wiederholten Messungen sind miteinander korreliert und gewährleisten daher keine vollständige Redundanz. Eine bessere Redundanz erreicht man durch den Einsatz von elektro-optischen Distanzmessgeräten z. B. bei geodätischen Messungen.

#### 7. Bemerkungen

Beim gelegentlichen Überschreiten des Messbereichs können Verlängerungsstücke von konstanter Länge nützlich sein. Andernfalls bleibt nur die Anfertigung eines neuen Drahtes.  
(Fotos: Schneider Ingenieure AG, Chur)



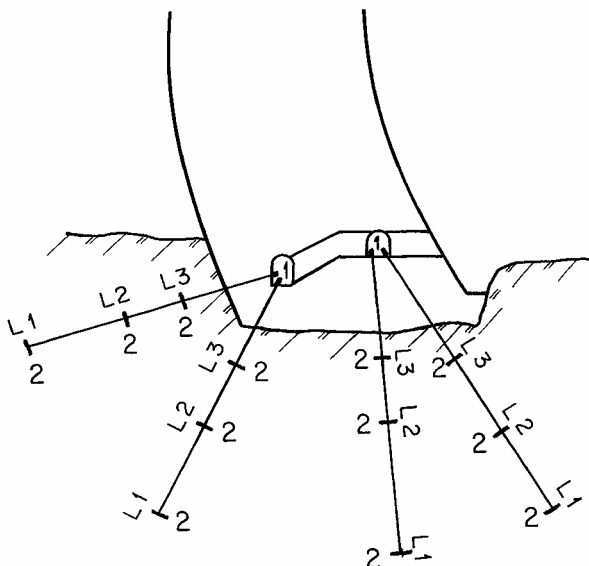
**Längenänderungen und Durchbiegungen längs Linien in Bohrungen**

**STANGEN-UND DRAHTEXTENSOMETER**

**1. Messeinrichtung**

Die auf dem Markt zahlreich angebotenen ein- und mehrstufigen Extensometer gestatten alle, in einem Bohrloch Längenänderungen zwischen einem Verankerungspunkt (eines Gestänges oder eines Drahtes) und dem am Bohrlocheingang angebrachten Messkopf zu erfassen. Extensometer unterscheiden sich prinzipiell in drei Bereichen voneinander:

- Art und Weise der Verankerung.
- Art des Längenelementes: Gestänge oder Draht.
- Art und Weise der Messung der Längenänderung: mechanisch oder elektrisch (Prinzip der Widerstandsveränderung oder Prinzip der schwingenden Saite).



Figur 2.14-1: Mögliche Anordnung von Extensometern im Mauerfundament

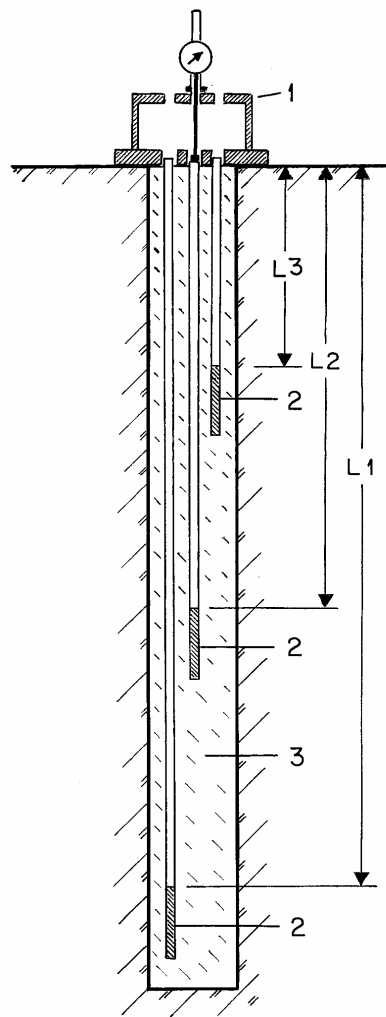
1. Messkopf
2. Verankerungen der einzelnen Stangen

**2. Beurteilung**

Geräte sind nicht von einer sehr hohen Genauigkeit (etwa  $\pm 0.5$  mm). Vorausgesetzt, dass die zu erwartenden Bewegungen mindestens einige Millimeter betragen, geben sie aber zuverlässige Informationen über die im Felsfundament auftretenden Deformationen und Veränderungen. Sind diese zu klein, können die Geräte keine befriedigenden Angaben vermitteln.

Durch geeignete Anordnung der Verankerungen eines mehrstufigen Extensometers, kann auch die ungefähre Lage von sich öffnenden und schlies-

senden Rissen oder Felsklüften bestimmt und deren ungefähren Bewegungen ermittelt werden. Automatisierung und Fernübertragung sind möglich.



Figur 2.14-2: Typisches Beispiel eines Dreifach-Extensometers

3. Messkopf
4. Verankerungen der einzelnen Stangen
5. Injektionsgut

**3. Mögliche Störungen und Messfehler**

Verankerung hält nicht; dieses Problem kann jedoch meistens gelöst werden, da dieser Tatbestand normalerweise schon bei den Kontrollen anlässlich der Gerätemontage oder spätestens anlässlich der ersten Messungen erkannt wird. Gestänge oder Drähte können beim Injizieren blockiert werden.

Messung wird durch Reibung zwischen Gestänge oder Drähten und Hüllrohr mehr oder weniger stark beeinflusst.

Bei ungenügender Stahlqualität tritt Rost auf, was langfristig zum Verlust des Gerätes führt.

Bei Drahtextensometern besteht das Risiko, dass infolge Alterungserscheinungen in den Drähten sprunghafte Veränderungen der Drahtlängen auftreten, welche die Messergebnisse verfälschen.

Messbereich wird überschritten.



Figur 2.14-3: Messkopf mit Setzdeflektometer und Erfassungsgesät mit Messstellenidentifikation

#### 4. Technische Anforderungen

Generell nur bestens ausgewiesene Geräte verwenden.

Montage darf nur durch Spezialisten vorgenommen werden; diese haben auch die ersten Messungen vorzunehmen.

Die Funktionstüchtigkeit, sowie das Ausmass der Reibungseinflüsse zwischen Gestänge / Draht und Hüllrohr muss nach erfolgtem Einbau, sowie alle paar Jahre durch geeignete Zugversuche überprüft werden können. Dazu sollte bei der Gerätewahl vom Lieferanten auch ein geeignetes Zugversuchsgesät verlangt werden. Ein solches Gesät sollte auch zur Kontrolle von seit langem eingebauten Extensometern angefordert werden.

Wo immer möglich, sollen die Messköpfe auch bei Fernmessung zugänglich sein, sodass sie gleichzeitig auch mechanisch (Handablesung) gemessen werden können.

Der Messbereich sollte im Bedarfsfall nachreguliert werden können, ohne dass dabei die Messreihe durch einen unbekanntem Sprung unterbrochen wird.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Geräte müssen alle paar Jahre durch einen Zugversuch überprüft werden (siehe Technische Anforderungen). Unbedingt vor und nach dem Zugversuch eine Messung durchführen.

Bei Fernüberwachung müssen die Ergebnisse periodisch durch mechanische Messung (Handablesung) überprüft werden.

#### 6. Redundanz

Eine gewisse Redundanz kann durch Einbau von mehrstufigen Extensometern erreicht werden, indem der Vergleich der verschiedenen gemessenen Längenänderungen zeigt, ob die Ergebnisse plausibel sind oder nicht.

Kombination mit Schwimmlotmessungen oder mit geodätischen Messungen.

Redundanz kann auch erreicht werden durch räumliche Anordnung mehrerer Extensometer in einem Fundamentbereich.

Auch der Einbau mehrerer Extensometer in einer Sperre führt zu einer Erhöhung der Zuverlässigkeit der Ergebnisse, indem diese einerseits unter sich und andererseits auch mit Sperrenverformungen verglichen werden können.



Figur 2.14-4: offener Messkopf mit drei Messstangen

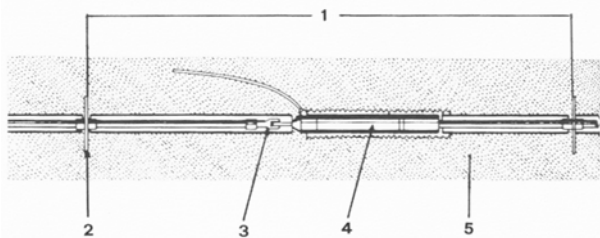
#### 7. Bemerkungen

## Längenänderungen und Durchbiegungen längs Linien in Bohrungen

### STANGENEXTENSOMETER IM LOCKERMATERIAL

#### 1. Messeinrichtung

Messelemente bestehen aus einem Messkopf und Verlängerungsstange (3 m bis 6 m) zwischen zwei Ankerplatten, welche in die Schüttung eingebaut werden. Im Messkopf wird der bis zu 30 cm lange Deformationsmessbereich von einem langen Messkonus über einen Kniehebel auf eine Membrane übertragen, welche den Messwert nach dem Widerstand-Prinzip oder dem der schwingenden Saite elektrisch über Messkabel zur Messkammer überträgt. Meist werden mehrere Messelemente zu Messketten, einander leicht überlappend oder als zusammenhängende Folge aufgebaut (in der Regel nur horizontal).



Figur 2.15-1: Beispiel eines Extensometers

1. Messlänge
2. Ankerplatte
3. Gelenk
4. Messkopf
5. Schüttung

#### 2. Beurteilung

Bewährtes Messsystem zur Überwachung der Dammdeformationen in kritischen Zonen, insbesondere dient es der Kontrolle hinsichtlich differentieller Deformationen der Schüttung bei schwierigen Untergrund- oder Anschlussverhältnissen. Automatisierung und Fernübertragung sind möglich.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Totalausfall bei Überschreiten des Messbereiches. (Da es ganz erhebliche Schwierigkeiten bereitet, die Deformation der Schüttung an kritischen Stellen richtig zu prognostizieren, ist dies ein sehr häufiger Versagensgrund; im Zweifelsfall einen grossen Messbereich auf kleine Messstrecke wählen.). Kabelbruch wegen mechanischer Überbeanspruchung.

Kabelbeschädigung durch Baubetrieb, wirksamer Schutz unerlässlich: z.B. Verlegen der Kabel in Gräben, die in der fertigen Schüttung ausgehoben werden.

Unzulänglicher Blitzschutz.  
Ausfall des Ablesegerätes.

#### 4. Technische Anforderungen

Entsprechend den relativ grossen Deformationen des Schüttkörpers muss der Messbereich angepasst gross sein: mindestens 5 % der Messstrecke (z.B. 15 cm auf 3 m).

Die erwartete Deformation (Verlängerung oder Verkürzung) soll bei der Nulleinstellung berücksichtigt werden, so dass der volle Messbereich genutzt werden kann.

Die Messkabel müssen vollkommen wasserdicht und hermetisch mit dem Messkopf verbunden sein (bei Widerstandsmessungen). Sie müssen gegen Fremdstrom-Überspannung (Blitzschlag) geschützt sein und sollen zwischen Einbauort des Messelements und Messkammer innerhalb der Schüttung nicht gespleisst werden. Die Kabel sollen eine hohe mechanische Festigkeit aufweisen und mäandrierend in Kabelgräben verlegt werden.

In sehr hohen Dämmen werden die Messkabel vorteilhaft vertikal bis zur Dammkrone geführt, um das gefährliche Überqueren von Materialzongrenzen zu vermeiden.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Unterhalt des elektrischen Ablesegerätes, insbesondere der elektrischen Kontakte.

#### 6. Redundanz

Faseroptik, geodätische Vermessung der Dammoberfläche, Invardraht-Distanzmessung. Eine eigentliche Redundanz kann durch parallele Anordnung des gleichen Messsystems erzielt werden.

#### 7. Bemerkungen

Bei der Durchquerung von Dichtungselementen ist besondere Vorsicht geboten (präferenzierter Sickerweg).

Das Einführen der Messkabel in Schächte oder Galerien kann zu grossen Schwierigkeiten und späterem Ausfall der Messanlage führen.

Nullmessung erst nach vollständigem Einbau der Gerätekomponente definieren.



## Längenänderungen und Durchbiegungen längs Linien in Bohrungen

### FASEROPTISCHES EXTENSOMETER

#### 1. Messeinrichtung

Eine Glasfaser, welche zwischen zwei Punkten in einer Talsperre fixiert ist, verlängert und verkürzt sich mit den Verformungen der Sperre und ihrer Fundation. Die Längenänderung der Glasfaser äussert sich in einer Änderung der Lichtdurchlässigkeits- und Lichtstreuungs- Eigenschaften, insbesondere bezüglich der Phase, der Intensität und des Spektrums des Lichts.

Es bestehen verschiedene Typen von faseroptischen Extensometern mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften: interferometrische Sensoren basierend auf langer Messbasis vom Typ SOFO, interferometrische Sensoren basierend auf kurzer Messbasis vom Typ Fabry-Pérot, Faser-Bragg-Gitter-Sensoren oder Sensoren zur Bestimmung von Intensitätsänderungen bedingt durch Mikrokrümmungen (Microbending-Verformungssensoren). Während einer Messung mit einer interferometrischen Faser vom Typ SOFO wird ein Infrarotstrahl in zwei Fasern gesandt. Die eine Faser, die Messfaser ist fest mit dem Bauwerk verbunden und macht dessen Verformungen mit, die andere, die Referenzfaser, ist lose in einem Rohr parallel zur Messfaser eingebaut.



Figur 2.16-1: Oberflächlicher Einbau eines Sensors vom Typ SOFO. Die Messstrecke erstreckt sich zwischen 2 Befestigungspunkten (einer ist auf dem Bild ersichtlich)

Am Ende jeder Faser ist ein Spiegel angebracht. Die Lichtstrahlen werden zu einem Analysegerät geleitet. Aufgrund der Analyse ist es möglich, den Längenunterschied der beiden Fasern zu bestimmen. Die Messung mit einer interferometrischen Faser vom Typ Fabry-Pérot, welche nur eine einzige Faser benutzt, basiert auf der Interferenz des Lichts zwischen zwei beweglichen Oberflächen.



Figur 2.16-2: Einbau im Beton: Das Glasfaserkabel ist an Armierungseisen montiert

Das Spektralfaser-Messgerät mit Bragg-Gitter wertet das Spektrum basierend auf einer Modulation des Refraktionsindex über eine kurze Strecke der Faser aus.

Die Messungen können über grosse Distanzen ausgeführt werden (in der Grösse von 5-10 km mit Hilfe von Kabeln zur optischen Verlängerung) ohne dass eine lokale Signalbearbeitung notwendig wird.

#### 2. Beurteilung

Im Grossen und Ganzen sind die faseroptischen Extensometer stabil und dauerhaft, ein Überspannungsschutz ist nicht erforderlich, weil die Fasern nicht leitend sind. Die interferometrischen Sensoren (Prinzip der Superposition von zwei Lichtbündeln) erlauben sehr zeitstabile Messungen. Die Fernübertragung von Messwerten ist möglich.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Die faseroptischen Sensoren sind temperaturempfindlich. Eine unbeanspruchte Referenzfaser ist deshalb notwendig um auch bei variierender Temperatur zuverlässig messen zu können. Gewisse Systeme enthalten im Messkabel selbst eine Referenzfaser.

Normalerweise erlauben faseroptische Extensometer nur die Bestimmung von Längenänderungen,



welche nicht über 1-2% ihrer Gesamtlänge hinausgehen. Bei darüber hinaus gehenden Längenänderungen kann ein Bruch der Faser eintreten. Kupplungen faseroptischer Sensoren müssen gereinigt werden, wenn sie neu zusammengeschlossen werden. Beschädigte Verbindungskabel können gespleisst werden.



Figur 2.16-3: Einbau im Bohrloch: Nur die Verbindungskabel ragen aus dem Bohrloch und werden in einen Verteilkasten geführt

#### 4. Technische Anforderungen

Faseroptische Extensometer für die Anwendung in Talsperren werden in einer Form geliefert, dass sie relativ einfach eingebaut werden können.

Ihre Integration ins Bauwerk kann auf drei Arten erfolgen: Einbau vor dem Betonieren, Einbau an der Oberfläche oder Einbau in einem Bohrloch. Im Falle des Einbaus vor dem Betonieren sind die Kabel an Armierungseisen oder an Bolzen montiert, um sie in der gewünschten Lage zu fixieren.

Das Einbringen des Betons muss mit Sorgfalt erfolgen, um eine Verschiebung oder Beschädigung der Kabel zu verhindern. Die Austrittspunkte der Kabel aus dem Beton sind heikel. Ihre Ausbildung muss sorgfältig abgeklärt werden. Bei oberflächlicher Verlegung werden die Kabel an der Oberfläche oder entlang von Inspektionsgalerien mit Hilfe von einbetonierten Befestigungswinkeln fixiert. Es wird empfohlen, die Sensoren zu schützen, indem sie in Gehäuse oder in Rinnen platziert werden, um so versehentliche Beschädigungen zu verhindern. Im Falle der Platzierung in einem Bohrloch wird das Kabel in ein Rohr verlegt, welches mittels Injektionen ins Bohrloch verklebt wird.

#### 5. Funktionskontrolle und Unterhalt

Die faseroptischen Extensometer liefern in der Regel ein Alarmsignal, wenn sie nicht ordentlich funktionieren. Einzig die optischen Kupplungen verlangen eine Reinigung, wenn sie auseinander genommen und wieder zusammengeschlossen werden (Punktmessungen).

#### 6. Redundanz

Redundanz kann geschaffen werden durch die Installation einer gleichartigen Messeinrichtung an versetzten Orten oder mit dem Vergleich mit anderen, unabhängigen Messgeräten.

#### 7. Bemerkungen

(Fotos: Smartec SA, Manno)

**Längenänderungen und Durchbiegungen längs Linien in Bohrungen**

**BOHRLOCHMIKROMETER (MIT ODER OHNE INKLINOMETER)**

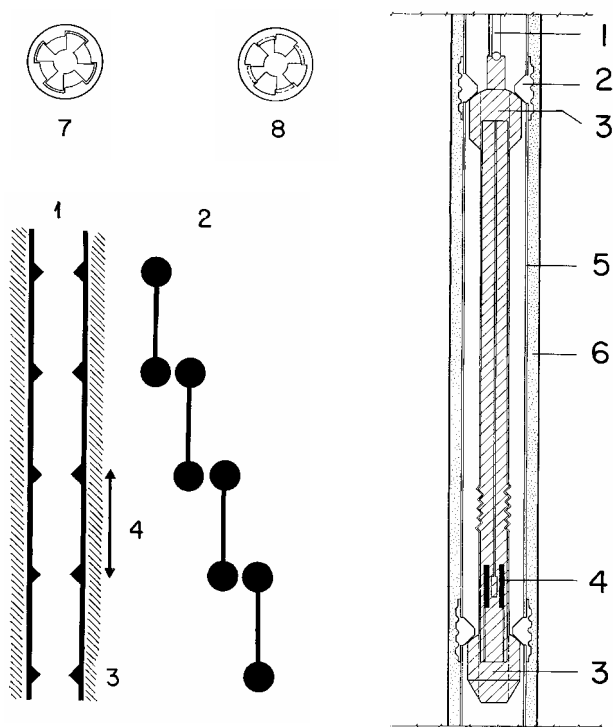
**1. Messeinrichtung**

Das Bohrlochmikrometer ist ein mobiles Messgerät zum Erfassen von differentiellen Längenänderungen längs eines im Raum beliebig gerichteten Bohrloches, in kontinuierlichen Schritten von z.B. 1 m Länge. Das Bohrlochmikrometer mit Inklinometer erlaubt das Messen der drei orthogonalen Verschiebungsvektoren längs eines lotrechten Bohrloches in kontinuierlichen Schritten von 1 m Länge. In das Bohrloch ist ein mit Messmarken versehenes Kunststoffrohr eingesetzt, das aussen injiziert und dadurch satt mit dem umgebenden Medium (Fels, Beton, Boden) verbunden ist. Die Einsatztiefe kann bis ca. 150 m betragen.

ren und deren Bewegungen (z.B. in Abhängigkeit des Seestandes) zu messen. Unter gewissen Voraussetzungen lassen sich durch Anordnung von 2 parallelen Messlinien (Bohrungen) auch Biegelinien bestimmen. Die Messempfindlichkeit und Genauigkeit ist in horizontaler Richtung (Inklinometer) geringer als in vertikaler Richtung (Mikrometer).

Die Messung lässt sich von einer Person durchführen. Die Messwerterfassung und Datenauswertung erfolgt mit Computer und speziellen Anwendungsprogrammen.

Automatisierung und Fernübertragung sind nicht möglich.

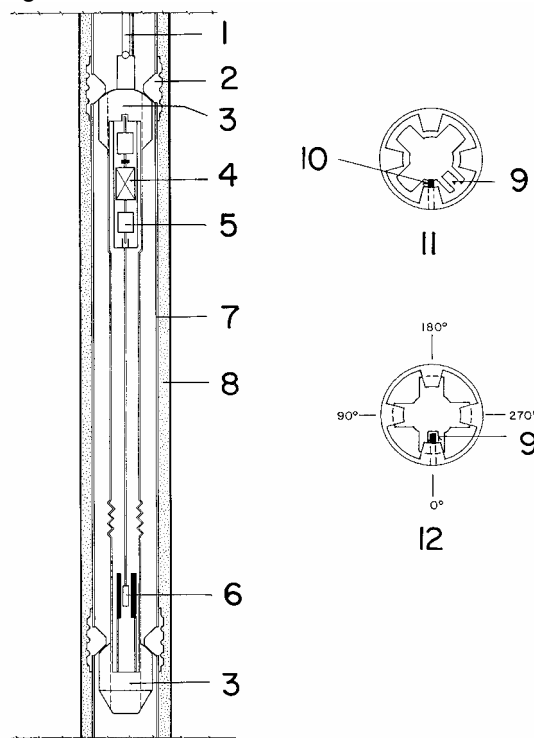


Figur 2.17-1: Beispiel Gleitmikrometer ISETH (Eidg. Technische Hochschule Zürich)

1. Gestänge
2. kegelförmige Messmarke
3. Kugelkopf
4. induktiver Messwertaufnehmer
5. Verrohrung aus HPVC
6. Injektionsgut
7. Gleitlage
8. Messlage (Drehung des Geräts um 45°)

**2. Beurteilung**

Das Messgerät kann mit sehr hoher Genauigkeit (besser als 1/100 mm/m) Längenänderungen im Fels und Beton erfassen. Im Speziellen dient die Messung dazu, im Sperrkörper oder im Fundament mutmassliche Risse und Klüfte zu lokalisieren



Figur 2.17-2: Beispiel Trivec (Gleitmikrometer ISETH mit Inklinometer)

1. Gestänge
2. kegelförmige Messmarke
3. Kugelkopf
4. Klinometer
5. Stellmotor
6. induktiver Messwertaufnehmer
7. Verrohrung aus HPVC
8. Injektionsgut
9. Nute
10. Bolzen
11. Gleitlage
12. Messlage (Drehung des Geräts um 45°)



### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Verschmutzung von Sonde und Messrohr beeinträchtigt die Messgenauigkeit. Sonde und Messkabel sind sauber zu halten; es darf keine Verschmutzung in das Messrohr eingeschleppt werden. Bei starker Verschmutzung wird eine Spülung des Messrohres notwendig.



Figur 2.17-3: Ausführung einer Bohrlochmikrometermessung mit berührungsloser Induktionssonde

Ungenügende Fixierung der Messmarken.  
Zu steife oder zu weiche Einmörtelung des Messrohres in der Bohrung ("Pfahleffekt").  
Verkleben der Sonde bei grossen Verschiebungen quer zur Bohrlochachse.

### 4. Technische Anforderungen

Robuste und verschleissfeste Ausführung aller Gerätekomponenten.  
Sonde und Sondenkabel müssen druckwasserdicht (min. 1.5 MPa) sein.  
Das Sondenkabel muss eine Armierung für die Aufnahme von Zugkräften aufweisen.  
Sonde und Messrohr müssen aus korrosionsfestem Material hergestellt sein.  
Einbau und ausinjizieren der Messrohre sowie das Ausinjizieren des Hohlraumes zwischen Messrohr und Bohrlochwand müssen sorgfältig erfolgen.  
Ablesen und Auswerten der Messresultate ist durch werkeigenes Personal, nach entsprechender Einschulung möglich.

### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Die hohe Präzision bedingt eine Eichmessung vor und nach jeder Messreihe. Die Eichvorrichtung muss ein integrierender Bestandteil der Messausrüstung sein. (Die Eichmessungen geben sofort Auskunft über den qualitativen Zustand der Messausrüstung und deren Zuverlässigkeit).  
Periodische Geräterevisionen sind zu empfehlen, aber nicht Bedingung.

### 6. Redundanz

Kann durch Anordnen von 2 oder mehreren parallelen Messlinien (Bohrungen) in demselben Untersuchungsbereich erzielt werden.

### 7. Bemerkungen

Zur Beobachtung einer bestimmten Stelle (Riss, Fuge) kann das Mikrometer in spezieller Ausführung in diesem Bereich fest installiert werden. Automatische Messungen und Fernübertragung sind in diesem Fall möglich.

**Längenänderungen und Durchbiegungen längs Linien in Bohrungen**

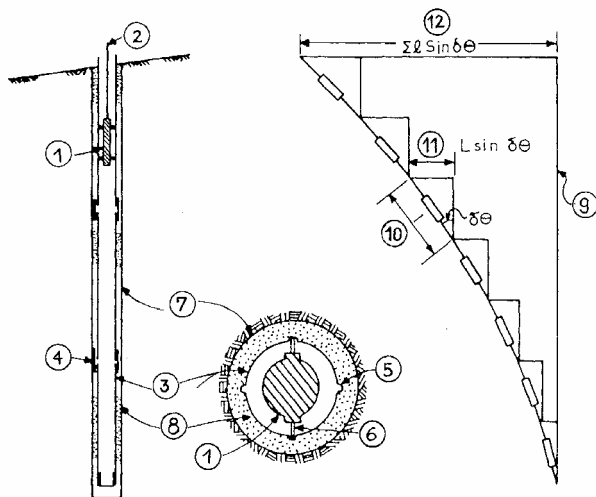
**ROHR-INKLINOMETER**

**1. Messeinrichtung**

Mobiles Messgerät zum linienweisen Erfassen von vorwiegend horizontalen Deformationen einer Dammschüttung bzw. einer Fundation.

Die Installation besteht aus einem meist vertikal angeordneten Kunststoff- oder Aluminiumrohr mit Führungsnuten, das während der Schüttung bis zur Dammoberfläche hinaufgezogen wird. Die einzelnen Rohrlängen sollten dabei 6 m nicht überschreiten (besser 3 m). Bei zu erwartenden grossen Setzungen in Schüttungen sind Teleskop-Rohre einzubauen. Der Einbau der Rohre kann auch in Bohrlöchern erfolgen. Während und nach dem Bau wird eine Pendelsonde (mit eingebautem Lot, das ein Potentiometer antreibt) in das Rohr eingeführt und die Neigung an stets den gleichen Orten abgelesen, bzw. ein eigentliches Neigungsprofil aufgenommen. Die Sonde misst die Neigung in zueinander senkrechten Ebenen. Die Änderungen der Neigung von Messung zu Messung werden in Horizontaldeformationen umgerechnet.

Zweckmässigerweise wird der Kopf des Gerätes in ein geodätisches Messnetz eingebunden. Dies ist vor allem dann notwendig, wenn der Fusspunkt des Inklinometerrohres nicht als unverschieblich angenommen werden kann.



Figur 2-18: Messprinzip des Rohrinklinometers bei Einbau im Bohrloch

- |                                |  |
|--------------------------------|--|
| 1. Sonde                       | 7. Bohrloch                                    |
| 2. Kabel                       | 8. Injektionsgut                               |
| 3. Führungsrohr                | 9. Referenzmessung                             |
| 4. Rohrmuffe                   | 10. Teilmessstrecke                            |
| 5. Führungsnuten               | 11. Horizontalverschiebung der Teilmessstrecke |
| 6. Führungsrollen an der Sonde | 12. gesamte Horizontalverschiebung             |

**2. Beurteilung**

Präzises und flexibles Messgerät zur Deformationskontrolle von Dammschüttung und Fundation. Durch den systematischen Einsatz mehrerer solcher Messeinrichtungen in verschiedenen Profilen kann ein ganzes Netz von Deformationslinien der Schüttung erstellt werden. Die Kombination der Rohr-Inklinometer mit Setzpegeln im gleichen Führungsrohr erlaubt die Ermittlung der räumlichen Deformation. Wird der Inklinometer auch als Setzpegel benutzt, sind Kunststoffrohre zu verwenden. Der Einbau von schiefen Führungsrohren während der Schüttung ist nicht zu empfehlen, ein nachträgliches Versetzen im Bohrloch ist jedoch möglich.

Die Messgenauigkeit und Empfindlichkeit ist geringer als bei dem für Beton und Fels verwendeten Bohrlochmikrometer mit Inklinometern. Im Übrigen hängt die Messgenauigkeit von der Qualität des Führungssystems ab.

Automatisierung und Fernübertragung nicht möglich. Die Messdaten können jedoch vom Messgerät direkt auf einen Computer geladen und weiter verarbeitet werden.

**3. Mögliche Störungen und Messfehler**

Zerstörung und Verlust des Pegelrohres während des Baubetriebs. Wirksame Schutzmassnahmen sind deshalb unerlässlich.

Verdrehen der Rohre beim Einbau z.B. infolge Sonneinstrahlung führt zu ungenauen Messwerten. Die Führungsnuten der Haupt-Messebene soll in Richtung der zu erwartenden Verschiebung orientiert werden

Klemmen der Sonde in verschmutzten Führungsnuten oder zwischen zwei an der Verbindungsstelle geknickten Rohrschüssen. Überschreiten des Messbereichs zufolge starker Horizontaldeformationen, besonders bei hohen Schüttungen aus plastischem Material.

Beeinflussung der Messung durch das an der Sperrstelle bzw. im Schüttkörper herrschende Magnet- bzw. Gravitationsfeld.

**4. Technische Anforderungen**

Robuste und verschleissfeste Ausführung aller Gerätekomponenten.

Sorgfältige Konstruktion der Messsonde; Führungsmechanismus mit gefederten Rollen.

Ausreichende Sondenlänge: ca. 50 cm Abstand zwischen oberen und unteren Führungsrollen. Die Messgenauigkeit erhöht sich mit längerer Messbasis, dafür steigt gleichzeitig auch das Risiko des Verklammerns der Sonde im Rohr.

Armierung des Sondenkabels zur Vermeidung des Reissens oder von Kabelbrüchen; Einführungselement auf dem Kopf des Pegels verwenden.





Umhüllung der Rohrstösse mit Klebeband; die Stösse müssen mit Gleitmuffen ausgeführt werden. Orientierung der Messebenen sorgfältig bestimmen.

Ab- und aufwärts messen in beiden Lagen und in jeder Messebene.

Vorhalten eines kompletten Reservemessgerätes samt Kabel und Ablesegerät.

#### **5. Funktionskontrollen und Unterhalt**

Eichmessungen vor und nach jedem Einsatz wird empfohlen.

Periodische Revision der Sonde und der Ablesegeräte beim Hersteller.

#### **6. Redundanz**

Geodätische Vermessung der Dammoberfläche, kombiniert mit horizontal eingebauten Extensometern. Eine effektivere Redundanz kann durch Anordnung von mehreren Messlinien erreicht werden.

#### **7. Bemerkungen**

## Neigungsänderungen

### KLINOMETER, TILTMETER

#### 1. Messeinrichtung

Klinometer und Tiltmeter sind Neigungsmesssysteme, welche sich in zwei wesentliche Gruppen unterteilen lassen:

- Flüssigkeitssysteme
  - Flüssigkeitslibelle  
Die Neigung wird nach dem Prinzip der Wasserwaage gemessen
  - Elektrolytische Flüssigkeitslibelle  
Durch die Neigungsänderung wird die Luftblase verschoben und dadurch der Widerstand in den beiden Libellenhälften verändert.
  - Flüssigkeitsoberfläche mit optischer Neigungsmessung  
Als Bezugsebene dient ein Flüssigkeitshorizont. Je nach Neigung verändert sich der Winkel zwischen Lichtsensor und absolutem Horizont. Dieser Winkel wird optisch gemessen. (Zweiachsige Messungen möglich)
- Pendelsysteme
  - Hier wird das Prinzip eines Pendelpotentiometers angewendet. (Zweiachsige Messungen möglich)



Figur 2.19-2: Klinometermessung mit mechanischer Justierung

Zur Verbesserung der Messgenauigkeit wird bei tragbaren Geräten in beiden Instrumentenlagen gemessen.

Die Basislänge dieser Geräte variiert zwischen etwa 10 und 150 cm.



Figur 2.19-1: Klinometermessung mit digitaler Ablesung

#### 2. Beurteilung

Bei sorgfältiger Messung geben die Geräte zuverlässige und präzise Werte. Es darf aber nicht ausser Acht gelassen werden, dass Neigungsänderungen vom lokalen Kräftefluss im Bereich der Kontrollgänge und Messnischen beeinflusst werden. Die Basislänge sollte deshalb möglichst gross gewählt werden. Wo dies die lokalen Verhältnisse zulassen, kann die Zuverlässigkeit der Ergebnisse durch Anordnung einer Messkette, bestehend aus 4 bis 6 Messstellen, erhöht werden. Der Klinometer oder das Tiltmeter sollte in der Regel als alleinige Messung zur Überwachung einer Staumauer nicht verwendet werden. Automatisierung und Fernübertragung sind möglich. Bei den elektrischen Messsystemen ist dies sogar die Regel.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

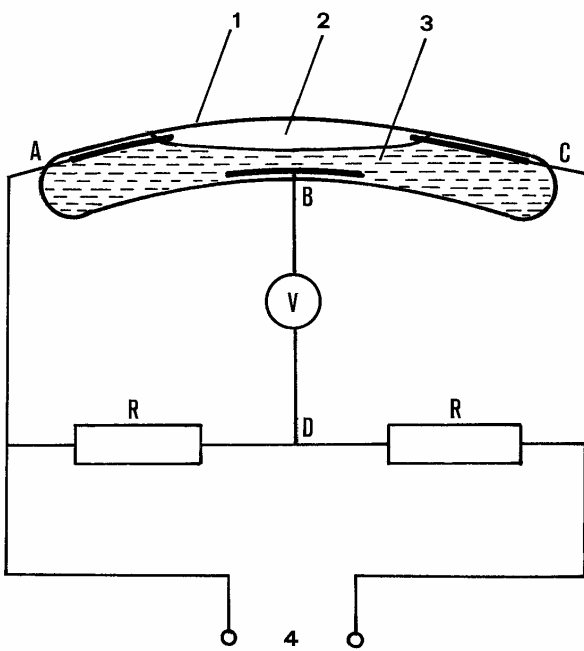
Das Messdispositiv ist sehr empfindlich auf Wärmequellen (Körperwärme, Sonneneinstrahlung, usw.).

Die Anzeige des Gerätes kann infolge Schlagwirkung verfälscht werden.

Durch ein Schlag kann ein Messbolzen verschoben werden.

Verunreinigte Messbolzen können zu Messabweichungen führen.

Bei elektrischen Instrumenten können durch Fremdströme, Nullpunktverschiebungen und Fehler in der Linearität sowie der Empfindlichkeit verfälschte Resultate auftreten. Auch Ausfälle durch Überspannung (Blitz) sind nicht selten.



Figur 2.19-3: Prinzip der elektrolytischen Flüssigkeitslibelle

1. Libelle
  2. Luftblase
  3. Elektrolytische Flüssigkeit
  4. Stromzufuhr
- A, B, C Elektroden  
 R Widerstände  
 V Voltmeter

Bei Neigungsänderung Verschiebt sich die Luftblase und die Widerstandsverhältnisse zwischen AB und BC verändern sich und können mit dem Prinzip der Wheatstone-Brücke gemessen werden

#### 4. Technische Anforderungen

Die Messbolzen müssen periodisch gereinigt, eingefettet und immer mit Schutzdeckel geschützt werden.

Bei tragbaren Geräten muss wo möglich immer in beiden Lagen gemessen werden.

Bei Verwendung von elektrischen Instrumenten muss dem Überspannungsschutz gebührend Achtung geschenkt werden.

Es sollten nur erprobte und feldtaugliche (feuchtigkeitsbeständig) Geräte verwendet werden.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Als Grobkontrolle prüfen, ob Summe der Ablesungen aus beiden Instrumentenlagen, auch über längere Zeit gesehen, konstant bleibt.

Wo möglich eine Kontroll-Messstelle vorsehen, in welcher keine oder nur minimale Neigungen auftreten. Diese Bedingung kann aber oft nur unzulänglich erfüllt werden.

Instrument von Zeit zu Zeit durch Fabrikanten überprüfen und revidieren lassen. Dazu ist zu bemerken, dass die Summe der Ablesungen aus beiden Lagen nach einer Geräterevision oft ändert, d. h. dass in den Ergebnissen ein Sprung eintritt.

Bei fest montierten Geräten sollte als Grobkontrolle die Neigung der Geräteplatte periodisch mit einem tragbaren Instrument überprüft werden.

Bei elektrischen Instrumenten müssen periodisch die Empfindlichkeit, die Linearität und die Nullpunktverschiebung kontrolliert werden.



Figur 2.19-4: Elektrisches Tiltmeter für die Messung der Neigung in zwei Richtungen

#### 6. Redundanz

Redundanz ist in der Regel unentbehrlich; sie wird normalerweise durch Vergleich der Messwerte mit den Tangenten an Verformungslinien von Vertikalschnitten (Lote) erhalten.

In besonderen Fällen kann Redundanz auch durch Nivellieren von zwei geeigneten Punkten erreicht werden.

#### 7. Bemerkungen

## Bewegungen von Rissen und Fugen

### MIKROMETER, DEFORMETER, DILATOMETER UND DEFLEKTOMETER

#### 1. Messeinrichtung

Alle diese Instrumente basieren auf dem gleichen Prinzip und gestatten, auf mechanische Art und Weise an einer Betonoberfläche eine Basislänge zwischen zwei Bolzen, z.B. quer und parallel zu einer Fuge oder einem Riss, genau zu messen. Je nach Marke und Gerätetyp beträgt die Basislänge einige cm bis etwa 120 cm.

Prinzipiell sind folgende 3 Messanordnungen möglich:

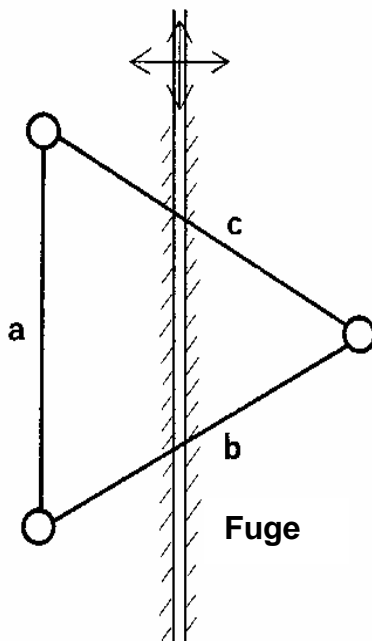
Typ 1: Bewegungen quer zu einer Fuge oder einem Riss.

Typ 2: Bewegungen quer und parallel zu einer Fuge (Riss):

Messung erfolgt durch Ausmessen eines gleichseitigen Dreiecks, dessen eine Seite parallel zur Fuge liegt (siehe Figur).

Typ 3: Bewegungen in 3 zu einander orthogonalen Richtungen (heute am gebräuchlichsten).

Die Bewegungen können mittels eines speziellen Setzdispositives parallel zu einer Betonwand (quer und parallel zu einer Fuge) und normal zu dieser gemessen werden.



Figur 2.20-1: Anordnung der Messstrecken

#### 2. Beurteilung

Präzise Messung, welche in speziellen Fällen sehr wichtig und interessant ist. Die Messungen sind vorsichtig zu interpretieren, da die Ergebnisse durch den lokalen Kräftefluss im Bereich des Kontrollganges beeinflusst werden und somit nicht unbedingt für das Gesamtverhalten einer Mauerzone repräsentativ sind. Messung von längeren

Messketten, z.B. in Stollen oder Kontrollgängen ist aufwendig im Vergleich zum Wert der erhaltenen Ergebnisse.

Automatisierung und Fernmessung ist möglich unter Verwendung von speziellen Geräten.



Figur 2.20-2: Fugenmessgerät mit drei Richtungen die je auf beiden Seiten der Fuge gemessen werden können

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Bolzen kann durch Schlag verschoben werden.

Verankerungsbolzen lösen sich wegen schlechter Betonqualität (z.B. Kiesnester) oder wegen ungenügender Distanz zwischen Bolzen und Fuge/Riss (Absprengen der Betonkante).

Verfälschte Anzeigen des Instrumentes infolge unsorgfältiger Behandlung.

Unpräzises Setzen des Instrumentes auf Messbolzen führt zu Messabweichungen.

Nicht absolut regelmässiges Arbeiten am Regulier- und Messdispositiv führt zu unregelmässigen Ergebnissen.

Messbereich wird überschritten.



Figur 2.20-3: Fugenmessgerät für drei Messrichtungen mit analoger Messuhr



#### 4. Technische Anforderungen

Bolzen, bzw. Verankerungen spezieller Setzdispositive müssen unbedingt in genügender Distanz zur Fuge (Riss) und solide verankert werden.

Zum Schutze der Bolzen sollen diese in der Wand vertieft versetzt und immer mit Deckel geschützt werden.

Messbolzen müssen periodisch gereinigt und eingefettet werden.

Zu jedem Messgerät gehört eine Kontrolleinrichtung (z.B. Kontrollsetzstab in Invar).

In Zweifelsfalle über die zu erwartenden Bewegungen, sollten wo möglich Spezialbolzen verwendet werden, welche gestatten im Bedarfsfall den normalen Messbereich um einige Millimeter zu erweitern.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Messgerät bei jeder Messung mit Kontrolleinrichtung kontrollieren.

Von Zeit zu Zeit Messgerät durch Fabrikanten revidieren lassen; eine solche Revision führt aber oft zu einem Sprung in den Messergebnissen.

#### 6. Redundanz

Im Allgemeinen nicht erforderlich. Oft wird zusätzlich zur digitalen Messuhr ein mechanisches Instrument verwendet.

#### 7. Bemerkungen

Messgeräte von kleinerer Genauigkeit und grösserem Messbereich sind in der Regel solchen von hoher Genauigkeit und kleinem Messbereich vorzuziehen. Eine Präzision von etwa 0.1 mm genügt in der Regel.

In gewissen Fällen, wenn eigentlich keine Bewegung erwartet wird kann eine solche Messung auch durch zweckmässig platzierte Siegel ersetzt werden.

Riss- und Fugenbewegungen können im Bedarfsfall auch mittels elektrischer Verformungsgeber überwacht werden (Siehe Blatt Nr. 2.21).

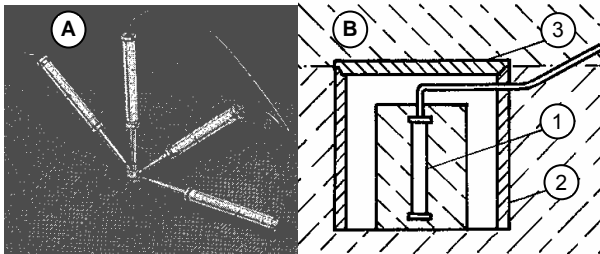
Visuell kann die Rissbreite auch mittels Rissslupe oder Risschablone kontrolliert werden.

## Punktuelle, spezifische Verformungen

### EINBETONIERTE ELEKTRISCHE VERFORMUNGSGEBER

#### 1. Messeinrichtung

Diese Geräte, welche im Allgemeinen während der Bauzeit im Beton eingebaut werden, gestatten lokal sowohl die spezifische Längenänderung als auch die Temperaturänderungen des Betons zu messen. Ein solcher Geber, rund 20 bis 30 cm lang, ist durch ein elektrisches Kabel mit einem Kabelendkasten verbunden, an welchem das Messgerät angeschlossen werden kann. Die Geber basieren entweder auf dem Prinzip der Messung des Ohm'schen Widerstandes oder auf jenem der Eigenfrequenz einer gespannten Saite, da beide - der elektrische Widerstand und die Eigenfrequenz in Abhängigkeit der durch den Beton erfahrenen spezifischen Längenänderungen variieren.



Figur 2.21-1: Einbauart von Teleformetern

- A 4-fach Teleformeter-Rosette
- B Einbauart für Referenzteleformeter
- 1. Teleformeter in zylindrischem Betonkörper
- 2. Zementrohr
- 3. Betondeckel

#### 2. Beurteilung

Die zur Bestimmung der spezifischen Längenänderungen und der entsprechenden Spannungswerte im Beton benötigten Berechnungen sind aufwändig, kompliziert und heikel; sie verlangen eine thermische Kompensation der gemessenen Werte, sowie die Kenntnis der Entwicklung des E-Moduls und des Kriechens des Betons im Laufe der Zeit. Die grösste Schwachstelle dieser Messungen liegt darin, dass die an den Bruttoresultaten vorzunehmenden Kompensationen oft grösser als die Grössenordnung der Nettoresultate sind, was dazu führt, dass letztere ziemlich zufälliger Natur sind. Im Weiteren bestehen zahlreiche Fehlerquellen, welche die Ergebnisse beeinflussen, und die nur schwer festgestellt werden können.

Um in der Lage zu sein, auch spezifische Längenänderungen auszugleichen, welche im Beton unabhängig von den auf diesen wirkenden mechanischen Effekten auftreten, wie zum Beispiel infolge Schwinden und Schwellen von Beton, sowie Verschiebungen des Mess-Nullpunktes, werden im Beton auch vom Spannungsfeld abisolierte Geber

eingebaut. Diese werden als "Zeugen, oder Nullspannungsgeber (No stress meter)" bezeichnet und gestatten die Regelmässigkeit der Messergebnisse langfristig zu beobachten.

Die Zuverlässigkeit dieser Instrumente, vor allem langfristig gesehen, ist unbefriedigend, so dass diese Messungen in keinem Fall gestatten, eine Staumauer wirkungsvoll zu überwachen; sie können höchstens einige interessante, zusätzliche Informationen während der ersten Betriebsjahre der Staumauer liefern. Das Suchen von Fehlerquellen verlangt Spezialkenntnisse im Bereich von elektrischen Messungen. Diese Geräte sind deshalb eher geeignet für gewisse Laborversuche als für die Überwachung von Talsperren.

Automatisierung und Fernübertragung sind möglich.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Die Geräte sind anfällig auf Überspannungen (Blitzschlag) sowie auf andere Fremdströme.

Ungenügende Leitfähigkeit an den Kontakten infolge Korrosion tritt häufig auf.

Das Risiko einer Beschädigung der Geräte schon beim Einbau sowie einer Verwechslung der Kabel ist hoch.

Da der Messbereich ziemlich begrenzt und die Einbaubedingungen meistens recht schwierig sind, wird der Messbereich hier und da schon viel zu früh überschritten und oft, ohne dass dies wahrgenommen wird.

Verschiebungen des Mess-Nullpunktes im Laufe der Zeit sowie unerklärliche Diskontinuitäten in den Messergebnissen sind häufig.

Beim Anschliessen der Drähte an die Messbrücke können leicht Verwechslungen gemacht werden.

#### 4. Technische Anforderungen

Das Versetzen der Messgeber muss sehr sorgfältig vorgenommen werden. Die korrekte Orientierung des Gebers und seine gute Einbetonierung sind ausschlaggebend für brauchbare Messergebnisse. Das Maximalkorn des Betons im Bereich der Geber muss diesen angepasst sein.

Kabel (Drähte und ihre Isolierung) sowie Verkabelungen müssen von bester Qualität sein. Spleisungen zwischen Geber und Kabelendkasten müssen absolut vermieden werden. Die Kabel müssen ausserdem Schlägen und Zugkräften, welche während der Bauzeit unvermeidbar auftreten, widerstehen können.

Das Trasse der Kabel muss so angeordnet werden, dass Wasserinfiltrationen längs der Kabel vermieden werden, und dass ihre Verlegung unter besten Voraussetzungen erfolgen kann.

Kabelendkasten müssen gegen Staub und vor Feuchtigkeit, Korrosion und Überspannungen geschützt werden. Ein regelmässiger Unterhalt ist unbedingt notwendig.

Um Redundanz zu erhalten und die Kontinuität der Messungen auch bei Ausfall von einzelnen Gebern zu gewährleisten, müssen diese in Überzahl versetzt werden.

#### **5. Funktionskontrollen und Unterhalt**

Das Messgerät (Wheatstone-Brücke) sowie die Verbindungsdrähte zu den Kabelendkasten müssen jährlich oder alle zwei Jahre durch einen Spezialisten überprüft werden.

Die Übereinstimmung der Ergebnisse von parallel versetzten Geräten, sowie die Regelmässigkeit der Ergebnisse der "Nullspannungsgeber" (No stress meter) sollte nach jeder Messung überprüft werden.

#### **6. Redundanz**

Redundanz wird ausschliesslich durch Vergleich der Ergebnisse untereinander sowie durch Anordnung der Geber in Überzahl erreicht.

Wo dies möglich ist, ist die gleichzeitige Versetzung eines elektrischen Gebers und die Anordnung von Messbolzen für einen mechanischen Deformeter erwünscht (normalerweise nur in Ausnahmefällen möglich).

#### **7. Bemerkungen**

Auf der gleichen Basis werden auch Dilatometer gebaut, welche im Beton, zum Beispiel quer zu einer Schwindfuge versetzt werden können. Diese Geräte messen die Öffnungsänderungen der Fuge in Millimetern, sowie die Temperaturänderungen des Betons.

Die Berechnungen sind einfach, aber die Fehlerquellen sind die gleichen wie bei den elektrischen Deformetern und ihre Zuverlässigkeit ist ebenso schlecht wie bei diesen.

## Sicker- und Drainagewassermengen

### VOLUMETRISCHE MESSUNG MIT BEHÄLTER UND STOPPUHR

#### 1. Messeinrichtung

Das in einer Rigole fließende oder aus einer Bohrung, einer Fuge oder aus einem Riss austretende Wasser wird in einem geeichten Messgefäß aufgefangen und die dazu benötigte Füllzeit wird gemessen.

Es bestehen auch graduierte Messgefäße, in welche das Wasser während einer definierten Zeit geleitet wird, wonach aus dem gemessenen Volumen direkt der Abfluss abgelesen werden kann.



Figur 3.01-1: Volumetrische Sickerwassermessung mit Messbecher und Stoppuhr

#### 2. Beurteilung

Einfache, zuverlässige Messung, welche sich bewährt hat.

Automatisierung und Fernübertragung nicht zweckmässig (siehe Messüberfall)

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Stoppuhr defekt oder nicht vorhanden.

Messgefäß für korrekte Zeitnahme zu klein.

Mangelhafte, unvollständige Fassung des Wassers.

Ungeeignete Disposition für die Einleitung des Wassers in das Messgefäß.

#### 4. Technische Anforderungen

Messstellen sind den lokalen Verhältnissen anzupassen, so dass Wasser ohne Verluste in das Messgefäß geleitet werden kann.

Grösse des Messgefäßes muss der Abflussmenge angepasst werden, so dass die Messzeit mindestens 20 Sekunden, wenn möglich jedoch mehr beträgt.

Bei grossen Abflussmengen muss ein fixer, entleerbarer Behälter mit geeigneter Wasserzu- und Umleitung erstellt werden.

Die verschiedenen Mauer beziehungsweise Stollenzonen (Sektoren), von wo das Wasser herkommt, sollen klar von einander abgegrenzt werden.

Soweit möglich, Sicker- und Drainagewasser getrennt abführen und messen.

Meteorwasser soweit möglich von Sicker- und Drainagewasser fernhalten.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Sauberhalten von Messgefäß, Messstelle und Rigolen.

Periodisch überprüfen, ob alles Wasser durch die Messung erfasst wird.



Figur 3.01-2: Volumetrische Sickerwassermessung mit schwenkbarem Rohr für grosse Abflüsse



## 6. Redundanz

Redundanz ist nicht erforderlich. Immerhin besteht eine Kontrollmöglichkeit durch Vergleich der Summe von sektoriellen Abflussmengen mit dem Gesamtabfluss der Sperre. Dadurch können eventuelle Versickerungen und nicht erfasste Infiltrationen aufgedeckt werden.

## 7. Bemerkungen

Zur Interpretation der Messergebnisse müssen neben dem Seestand auch die meteorologischen

Verhältnisse berücksichtigt werden (Niederschläge und Schneeschmelze), welche den Abfluss stark beeinflussen können.

Bei geringem Wasserzufluss in nach unten gerichteten Bohrungen kann die Volumenverdrängungsmethode angewandt werden. Dabei wird zuerst ein genau definiertes Wasservolumen aus dem Rohr entnommen oder verdrängt und dann die Zeit bis zum Wiederauffüllen gemessen.

## Sicker- und Drainagewassermengen

### MESSUEBERFALL UND MESSKANAL

#### 1. Messeinrichtung

Die Abflussmenge wird in einem Messkanal mittels eines dreieck- oder trapezförmigen geeichten Messwehres, oder mittels eines geeichten Venturis gemessen. In beiden Fällen wird der Wasserstand oberwasserseits des direkten Einflussbereiches des Wehres oder des Venturi gemessen. Die Messung kann mit Pegellatte, Stechpegel, Echolot, Schwimmer, Drucksonde oder pneumatisch erfolgen.



Figur 3.02-1: Messüberfall mit Stechpegel

#### 2. Beurteilung

Einfache und präzise Messung für Abflüsse von mehr als 0,05 l/s. Für kleinere Abflüsse nicht geeignet, da zu ungenau.

Automatisierung und Fernübertragung sind möglich und sind für die permanente Überwachung, eventuell kombiniert mit Signalgebung bei Grenzwertüberschreitung, von Bedeutung.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Bei Undichtigkeiten im Sammelsystem kann eventuell ein Teil des Wassers die Messstelle umfließen.

Bei Karbonatausscheidungen im Messkanal und auf der Überfallkante wird Messung verfälscht.

Wird der Wasserstandes mittels Drucksonde oder pneumatisch gemessen kann sich die dazu benötigte Leitung verstopfen.

Echolotgeräte sind anfällig auf Überspannung.

Bei Einstau der Unterwasserseite werden die Ergebnisse verfälscht.

#### 4. Technische Anforderungen

Dimensionen des Messwehres und des Messkanals müssen der Abflussmenge angepasst sein und müssen genügend Reserve aufweisen.

Einstau der Unterwasserseite muss unbedingt vermieden werden.

Kanal und Überfall müssen periodisch (oft monatlich oder wöchentlich) gereinigt werden.

Bei Fernüberwachung muss die Messung unbedingt an Ort und Stelle mittels einer Pegellatte oder eines Stechpegels oder durch volumetrische Messung kontrolliert werden können.

Düsen und Leitungen müssen zugänglich und wenn möglich demontierbar sein, damit diese leicht gereinigt werden können.



Figur 3.02-2: Messüberfall mit Echolotmessung

Echolotgeräte müssen auch in feuchter Umgebung funktionstüchtig bleiben und sind gegen Überspannung zu schützen.

Die verschiedenen Mauer- bzw. Stollenzonen (Sektoren), von wo das Wasser herkommt, sollen klar voneinander abgegrenzt werden. Soweit möglich, sollen Sicker- und Drainagewasser getrennt abgeführt und gemessen werden. Meteorwasser soll soweit möglich von Sicker- und Drainagewasser ferngehalten werden.



Figur 3.02-3: Messkanal mit Venturi und Niveaumessung mittels Lufteinperlung

### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Abflussmenge periodisch mittels volumetrischer Messung kontrollieren.

Wasserstand, periodisch mittels einer fest montierten Pegellatte oder eines Stechpegels kontrollieren. Düsen und Leitungen sind periodisch auf Sauberkeit zu überprüfen.

Periodisch kontrollieren, ob alles Wasser durch die Messung erfasst wird.

Messkanal regelmässig reinigen.

### 6. Redundanz

Redundanz ist nicht erforderlich, jedoch besteht eine Kontrollmöglichkeit durch Vergleich der Summe von sektoriellen Abflussmengen mit dem Gesamtabfluss der Sperre. Dadurch können eventuelle Versickerungen und nicht erfasste Infiltrationen aufgedeckt werden.



Figur 3.02-4: Messüberfall für grosse Abflüsse, automatische Abflussmessstation

### 7. Bemerkungen

Zur Interpretation der Messergebnisse müssen, neben dem Seestand, auch die meteorologischen Verhältnisse berücksichtigt werden (Niederschläge und Schneeschmelze), welche den Abfluss stark beeinflussen können.



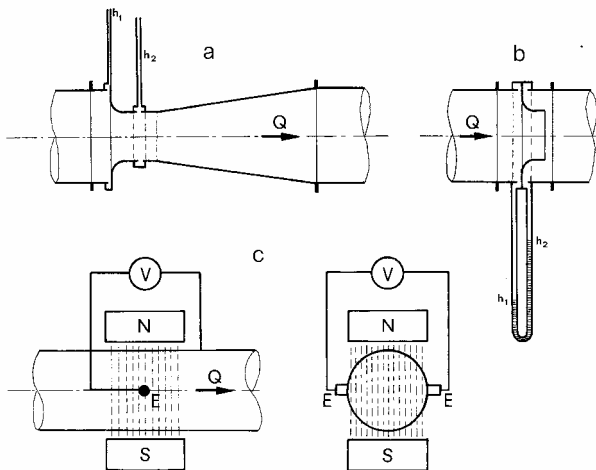
### Sicker- und Drainagewassermengen

## MESSUNG IN VOLL DURCHFLOSSENEN ROHREN

### 1. Messeinrichtung

Man unterscheidet 2 Systeme:

- Venturi-Systeme.
- Elektromagnetische Systeme oder Ultraschalleinrichtungen, welche keine aktiven Teile in Kontakt mit dem Wasser haben.



Figur 3.03-1: Messprinzip

- Venturimeter
  - Messung mit Durchflussdüse
  - Elektromagnetische Durchflussmessung
- $N, S$  Pole des Magnetfeldes  
 $E$  Elektroden  
 $V$  Voltmeter. Die Spannung verändert sich proportional zur mittleren Durchflussgeschwindigkeit.

### 2. Beurteilung

Diese Systeme verlangen nur wenig Unterhalt, wenn sie einmal geeicht sind. Automatisierung und Fernübertragung sind möglich und bei diesen Systemen die Regel.

### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Schlamm- und Kalkablagerungen können ein korrektes Funktionieren stören und die Messergebnisse verfälschen. Zur Vermeidung von Schlammrückständen soll im Messrohr ein Gefälle von mindestens 1% eingehalten werden. Die elektromagnetischen Systeme bzw. Ultraschalleinrichtungen sind auf Überspannung empfindlich.

### 4. Technische Anforderungen

Die Geräte müssen auch in feuchter Umgebung funktionstüchtig bleiben. Metallische Teile müssen aus rostfreiem Stahl gefertigt sein.

Je nach Fall muss ein Schutz gegen Eisbildung vorgesehen werden.

Die elektromagnetischen Systeme und Ultraschalleinrichtungen müssen gegen Überspannung geschützt werden.

Die elektromagnetischen Systeme können bei sehr kleinen Abflüssen Ungenauigkeiten aufweisen. Dies ist besonders zu beachten bei Abflüssen, die zeitweise versiegen.

Bei Ultraschallsystemen ist die Nennweite des Messwertempfängers möglichst so zu wählen, dass beim Messbereichendwert eine Geschwindigkeit von 2 – 3 m/s vorliegt. Das System ist also wenig geeignet für stark schwankende Abflüsse.

### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Periodisch die Eichung überprüfen, zum Beispiel mit einem volumetrischen Messsystem, welches bereits bei der Projektierung der Messanlage zu berücksichtigen ist.

Elektromagnetische Systeme bzw. Ultraschalleinrichtungen sind weitgehend wartungsfrei

### 6. Redundanz

Kontrolle des Durchflusses mittels eines anderen Abflussmess-Systems.

Vergleich des Gesamtabflusses einer Stauanlage mit den Abflüssen aus verschiedenen Sektoren.

### 7. Bemerkungen

Zur Interpretation der Messergebnisse müssen neben dem Seestand auch die meteorologischen Verhältnisse berücksichtigt werden (Niederschläge und Schneeschmelze), welche den Abfluss stark beeinflussen können.



Figur 3.03-2: Durchflussmessgerät. Das Ablaufrohr ist nach oben gekrümmt, damit das Rohr immer voll durchfließen wird



## **Sicker- und Drainagewassermengen**

### **MESSUNG IN TEILWEISE DURCHFLOSSENEN ROHREN**

#### **1. Messeinrichtung**

Es gibt elektromagnetische Systeme oder Ultraschalleinrichtungen, bei welchen die Füllhöhe mit der Fließgeschwindigkeit kombiniert wird. Die Füllhöhe wird mittels Ultraschall gemessen, die Geschwindigkeit mit einer Laufzeitdifferenzmessung.

#### **2. Beurteilung**

Diese statischen Systeme verlangen nur wenig Unterhalt, wenn sie einmal geeicht sind. Automatisierung und Fernübertragung sind möglich und bei diesen Messungen die Regel, oft mit Registrierung und Signalgebung bei Grenzwertüberschreitung.

#### **3. Mögliche Störungen und Messfehler**

Schlamm- und Kalkablagerungen können ein korrektes Funktionieren stören und die Messergebnisse verfälschen. Zur Vermeidung von Schlammrückständen soll im Messrohr ein Gefälle von mindestens 1% eingehalten werden.

Die elektromagnetischen Systeme bzw. Ultraschalleinrichtungen sind auf Überspannung empfindlich.

#### **4. Technische Anforderungen**

Die Geräte müssen auch in feuchter Umgebung funktionstüchtig bleiben. Metallische Teile müssen aus rostfreiem Stahl gefertigt sein.

Je nach Fall muss ein Schutz gegen Eisbildung vorgesehen werden.

Die elektromagnetischen Systeme und Ultraschalleinrichtungen müssen gegen Überspannung geschützt werden.

Die Nennweite soll so gewählt werden, dass die Abflusshöhe nicht über 80% des Nenndurchmessers liegt. Bei grösserer Teilfüllung schlägt die Leitung voll.

Wirbel, Wirbelzöpfe sowie überschlagende Wellen (z.B. nach einem Wechselsprung oder seitlichem Zulauf) sind auszuschliessen. Dafür sind vor und nach dem Messgerät Beruhigungsstrecken vorzusehen. Diese sollten vor dem Messgerät mindestens 5, danach mindestens 3 Rohrdurchmesser betragen. Das Gefälle im Messabschnitt sollte 5% nicht übersteigen.

Die elektromagnetischen Systeme können bei sehr kleinen Teilfüllungen Ungenauigkeiten aufweisen. Dies ist besonders zu beachten bei Abflüssen, die zeitweise versiegen.

#### **5. Funktionskontrollen und Unterhalt**

Periodisch die Eichung überprüfen, zum Beispiel mit einem volumetrischen Messsystem, welches bereits bei der Projektierung der Messanlage zu berücksichtigen ist.

Elektromagnetische Systeme bzw. Ultraschalleinrichtungen sind weitgehend wartungsfrei.

#### **6. Redundanz**

Kontrolle des Durchflusses mittels eines anderen Abflussmess-Systems.

Vergleich des Gesamtabflusses einer Stauanlage mit den Abflüssen aus verschiedenen Sektoren.

#### **7. Bemerkungen**

Zur Interpretation der Messergebnisse müssen neben dem Stauspiegel auch die meteorologischen Verhältnisse berücksichtigt werden (Niederschläge und Schneeschmelze), welche den Abfluss stark beeinflussen können.

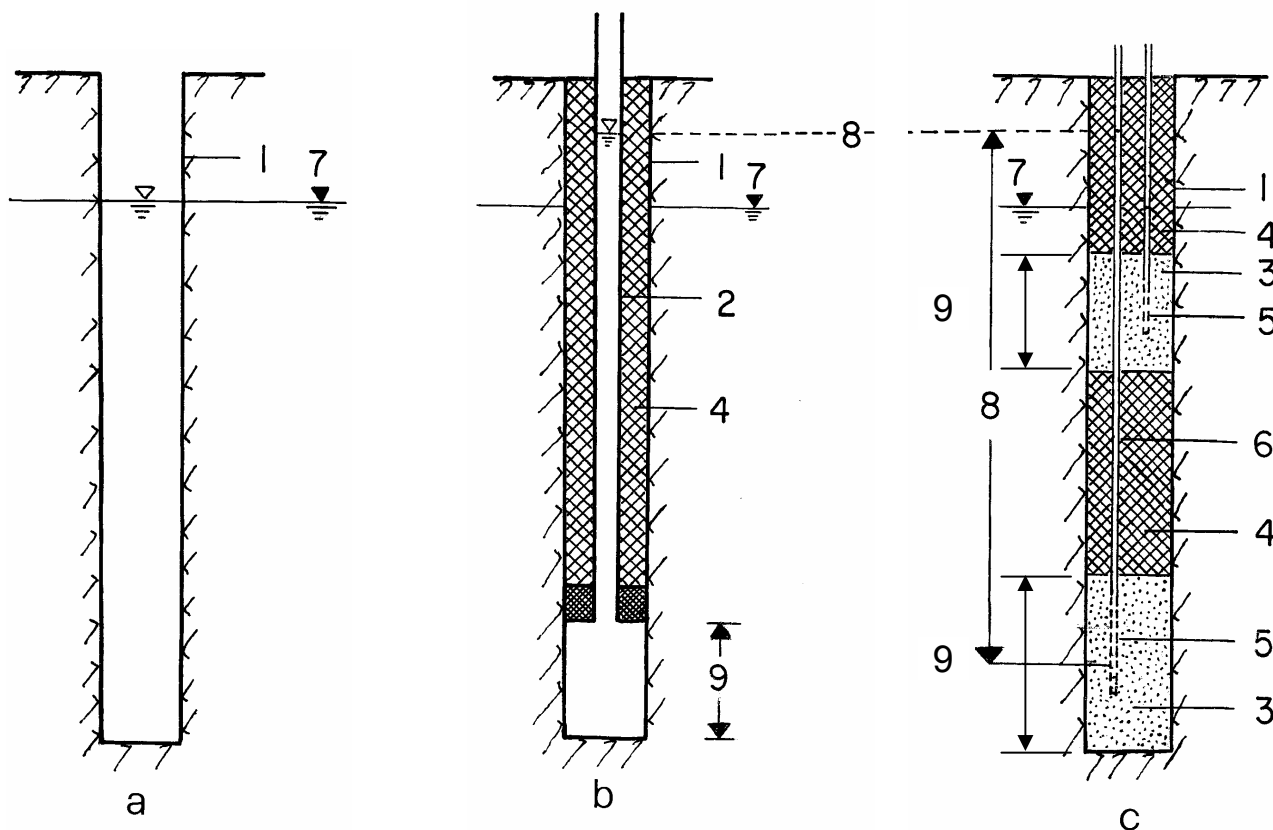
**Druckhöhe im Fels**

**PIEZOMETER: OFFENE SYSTEME**

**1. Messeinrichtung**

Mit Hilfe eines Kabellichtlotes oder einer Brunnenpfeife (selten) wird in einer Bohrung (im Standrohr) die Höhe des Wasserspiegels gemessen. Bei der Messeinrichtung werden drei Systeme

- unterschieden:  
a) Offenes Bohrloch  
b) Rohr  
c) Rohr mit Filter.



Figur 3.05-1: Drei verschiedene Typen von Piezometerbohrungen

- |                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| 1 Bohrloch                           | 6 Kunststoffröhrchen (Innendurchmesser 8 – 12 mm) |
| 2 Standrohr (Durchmesser 50 – 75 mm) | 7 Grundwasserspiegel                              |
| 3 Quarzsand                          | 8 Druckniveau an der Messstelle                   |
| 4 Injektionsgut (Verdämmung)         | 9 Messstrecke                                     |
| 5 Poröser Filterkörper               |   |

Die Bohrungen können vertikal oder geneigt angeordnet werden (Neigung zur Vertikalen kleiner als 30°, damit das Messinstrument gleitet). Das Messsystem a) erlaubt lediglich den Wasserstand im Felsuntergrund zu ermitteln, während die Druckmessung nicht möglich ist. Mit den Messsysteme b) und c) kann der in der Messstrecke bestehende Auftriebsdruck ermittelt werden. Auf die Anwendung des Systems a) für Druckmessung sollte in der Regel verzichtet werden.

**2. Beurteilung**

Das Messsystem eignet sich nur für Messungen, bei welchen der Wasserspiegel tiefer liegt als die Bohrlochmündung. Wenn der Wasserspiegel höher

steigt und Wasser aus dem Rohr austritt, soll am Standrohr ein Manometer angeschlossen werden (siehe Blatt Nr. 3.06). Die Messeinrichtungen a) und b) sind nur für Messungen im durchlässigen Fels geeignet. Bei weniger durchlässigem Fels eignen sich die Messsysteme a) und b) nur bei Anlagen, bei welchen der Ober- und Unterwasserspiegel praktisch konstant bleiben. Bei der Messeinrichtung c) sind die Durchmesser der Messrohre klein, so dass dieses System auch im weniger durchlässigen Fels eingebaut werden kann (kürzere Reaktionszeit). Die Messung ist einfach, genau und hat sich in der Praxis gut bewährt.



Für Fernübertragung und Automation ist das System nicht geeignet.



Figur 3.05-2: Wasserstandsmessung im Piezometerrohr mit Kabellichtlot

### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Der Fels, das Rohr und beim Typ c) auch der Filter oder die Filterkerze können im Laufe der Zeit versintern oder durch Schlamm verstopft werden.

Bei undichter Verrohrung der Einrichtungen b) und c) oder schlechter Ummantelung der Messrohre mit Injektionsmaterial können die Messungen verfälscht werden.

Bei eventuellem Zufluss von Oberflächenwasser wird die Messung verfälscht.

Nach Eindringen von Schlamm, Steinen und anderen Objekten ins Messsystem, kann das Messen (zumindest für gewisse Wasserstände), verunmöglicht werden.

### 4. Technische Anforderungen

Es muss dafür gesorgt werden, dass kein Oberflächenwasser oder Schmutz in das Bohrloch oder Standrohr eindringen kann. Bohrloch bzw. Standrohr sind möglichst mit einer Kappe zu verschliessen. Dieser Abschluss darf die Be- und Entlüftung des Messsystems nicht beeinträchtigen.

Die genaue "Geometrie" der Messeinrichtungen muss ermittelt werden (Kote der Messetage, Kote OK Rohr, Neigung der Bohrung, usw.).

Die Bohrung gemäss System b) muss bis zur Messstelle dicht verrohrt sein; auch die Ummantelung des Rohres muss dicht sein, um Wasserzirkulation längs des Rohres, welche die Messergebnisse verfälscht, zu vermeiden.

Zum Einbau der Messeinrichtungen des Typs c) ist erfahrenes Personal erforderlich. Auf das gute Abdichten der einzelnen Messetagen ist grossen Wert zu legen.

Die Bohrungen für die Auftriebsmessungen dürfen erst nach Abschluss aller Injektionsarbeiten erstellt werden.

### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Alle Standrohre (Bohrungen) sollen periodisch bezüglich Ablagerungen auf der ganzen Länge kontrolliert und bei Bedarf gereinigt werden.

Die richtige Funktion des Kabellichtlotes (der Brunnenpfeife) soll periodisch kontrolliert werden.

### 6. Redundanz

Eine gewisse Redundanz wird durch Vergleich der Ergebnisse aus einer grösseren Anzahl, über das ganze Mauerfundament verteilter Messstellen erreicht. Empfehlenswert ist die Anordnung von Messstellen-Gruppen in mehreren Mauerquerschnitten.

### 7. Bemerkungen

Für die nachträgliche Erstellung der Messeinrichtungen müssen die beschränkten Platzverhältnisse zum Bohren, sowie die Lage der Fundamentfläche (Aufnahmen aus Bauzeit) berücksichtigt werden.

Bei der Wahl der Messstrecken müssen die spezifischen geotechnischen Eigenschaften des Felsuntergrundes in Betracht gezogen werden (nur wenn Klüfte angetroffen werden, kann ein Wasserdruck gemessen werden).

Die Bohrungen sollen als Kernbohrungen (mit Kernentnahme) ausgeführt werden. Vor dem Einbau der Messeinrichtungen ist es vorteilhaft, die Durchlässigkeit des Betons und des Gesteins durch Wasserabpressversuche zu ermitteln.

Sollten die gemessenen Drücke trotz regelmässiger Wartung der Messsysteme im Laufe der Zeit langsam absinken oder bei variablem Seestand konstant bleiben, sind in der Nähe der bestehenden Messanlagen neue Messeinrichtungen zu erstellen. Dadurch lässt sich feststellen, ob die gesamte Felsfundation oder lediglich ein Bereich in unmittelbarer Nähe der Messstellen kolmatiert ist.

## Druckhöhe im Fels

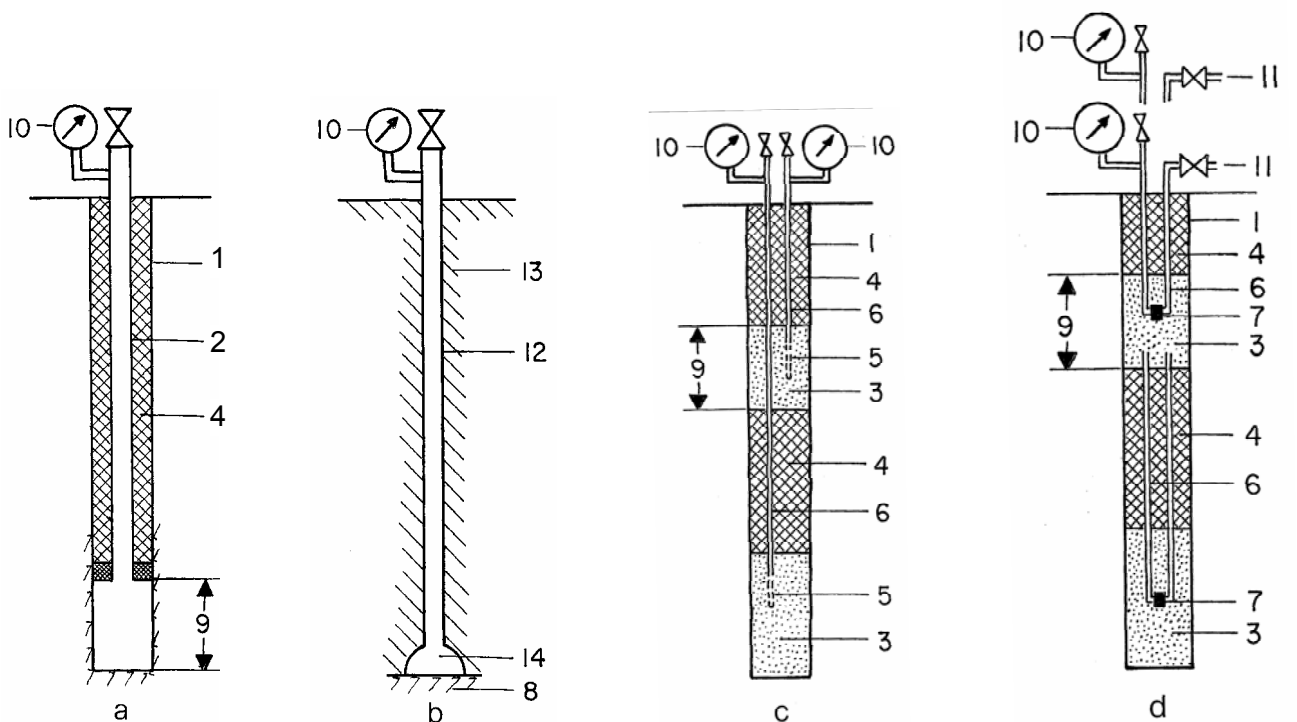
### PIEZOMETER: GESCHLOSSENE SYSTEME

#### 1. Messeinrichtung

Bei Messeinrichtungen nach dem Prinzip der geschlossenen Bohrung erfolgt die Messung des Auftriebsdruckes mit Hilfe eines Manometers, das über ein Rohr mit der Messstelle in der Felsfundament oder im Kontakt Beton/Fels verbunden ist. Das beschriebene Messprinzip wird dann eingesetzt, wenn der zu erwartende Wasserdruck die Bohrlochmündung übersteigt.

Es werden folgende Typen der Messeinrichtung unterschieden:

- Einfaches Rohr mit Messstrecke im Fels
- Rohr mit Auftriebsglocke im Beton/Fels Kontakt
- Rohr mit Filter (evtl. mehrere Messstrecken in einer Bohrung)
- Rohr mit spülbarer Messzelle



Figur 3.06-1 4: verschiedene Typen von Piezometerbohrungen

- |   |   |
|---|---|
| 1 Bohrloch  | 8 Felsuntergrund                                |
| 2 Rohr (Durchmesser 50 – 75 mm)                   | 9 Messstrecke                                   |
| 3 Quarzsand                                       | 10 Manometer                                    |
| 4 Injektionsgut (Verdämmung)                      | 11 Rückspülhahn                                 |
| 5 Poröser Filterkörper                            | 12 Einbetoniertes Rohr (Durchmesser 50 – 75 mm) |
| 6 Kunststoffröhrchen (Innendurchmesser 8 – 12 mm) | 13 Beton  |
| 7 Messzelle                                       | 14 Auftriebsglocke                              |

Die zur Installation der Messeinrichtungen notwendigen Bohrungen lassen sich sowohl vertikal wie auch geneigt anordnen.

Beim Typ a) wird der Druck im ganzen Bereich der Bohrung gemessen, beim Typ b) nur im Mauer/Fels Kontakt. Bei Typ c) und d) werden die Strecken zwischen den Messbereichen mit Injektionsgut abgedichtet. Im gleichen Bohrloch können mehrere mit Filtersand gefüllte Messstellen installiert werden.

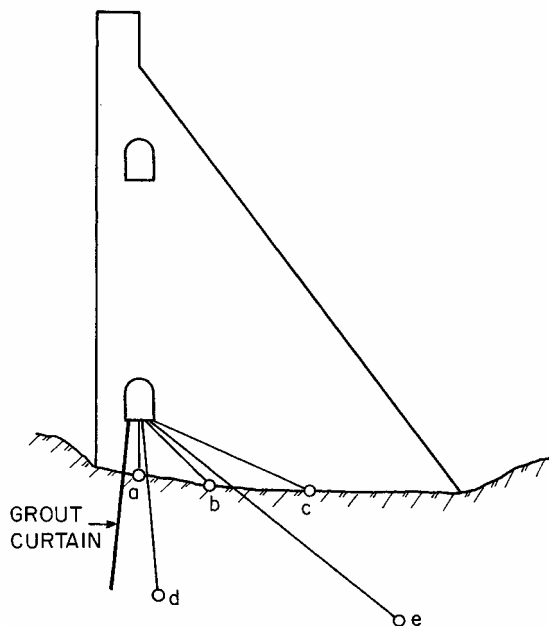
#### 2. Beurteilung

Bei der Messeinrichtung a) handelt es sich um die gebräuchlichste Art der Auftriebsmessung. Die Installation gemäss b) kann nicht nachträglich eingebaut werden. In der Praxis haben sich Auftriebsmessungen nach dem Prinzip der geschlossenen Bohrung gut bewährt. Die Genauigkeit der Manometermessung von 1 % des Messbereiches ist normalerweise ausreichend.

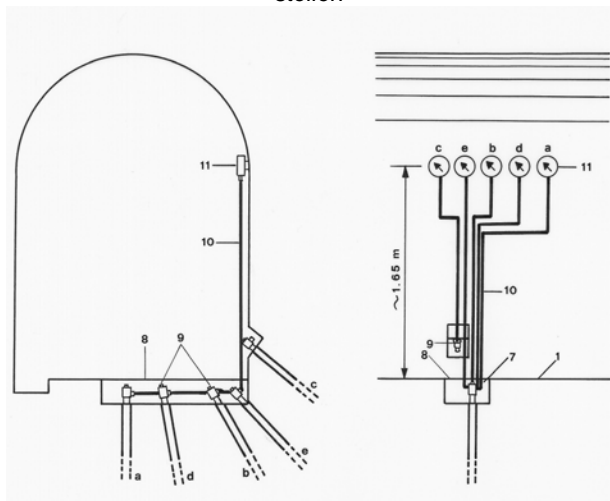
Für Fernübertragung und Automation ist das System nicht geeignet. Oft werden deshalb Druckzel-



len eingebaut (Blatt Nr. 3.07). Diese erlauben eine einfache Datenerfassung und Übertragung.



Figur 3.06-2: Typische Anordnung von Auftriebsmessstellen



Figur 3.06-3: Verbindungen von den Entnahmerohren zu den Manometern

### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

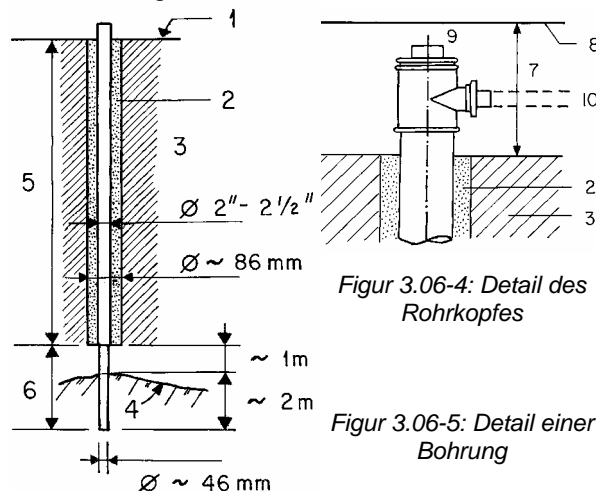
Bei der Installation der Messsysteme vom Typ c) und d) kann infolge der nötigen Injektionen im Bohrloch gelegentlich eine Zelle schon von Anfang an ausfallen.

Das Rohr und im Falle der Messeinrichtung c) auch das Filtermaterial des Filterkörpers, können im Laufe der Zeit versintern oder durch Schlamm verstopft werden. Dies gilt auch für System d), wenn zu wenig oft gespült wird.

Bei undichter Verrohrung oder schlechter Umman- telung der Messrohre mit Injektionsmaterial können die Messungen infolge Wasserzirkulation längs der Messrohre verfälscht werden.

Luft einschlüsse und Wasserverluste im Messsystem können zu verfälschten Anzeigen führen. Infolge Kalkablagerungen oder Ermüdungserscheinungen können am Manometer Messungenauigkeiten auftreten.

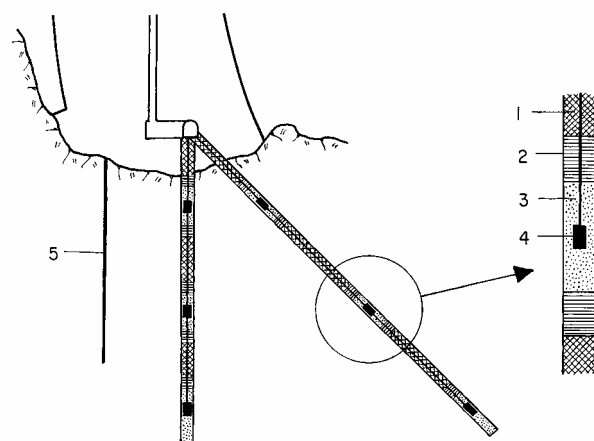
Nach einer allfälligen Entlastung des Messsystems (z. B. bei Reinigungen) baut sich der Druck oft nur sehr langsam auf. Die Resultate der nachfolgenden Messungen können daher verfälscht sein.



Figur 3.06-4: Detail des Rohrkopfes

Figur 3.06-5: Detail einer Bohrung

- 1 Sohle bzw. Nischenwand
- 2 Injektionsgut
- 3 Massenbeton
- 4 Kontakt Fels-Beton
- 5 Verrohrte Bohrlochstrecke
- 6 Unverrohrte Bohrlochstrecke
- 7 Rigole
- 8 Abdeckblech
- 9 T-Stück (z.B. 2" / 1/2") als Rohrabschluss und Druckschlauchanschluss
- 10 Flexibler Druckschlauch oder Metallrohr
- 11 Präzisionsmanometer

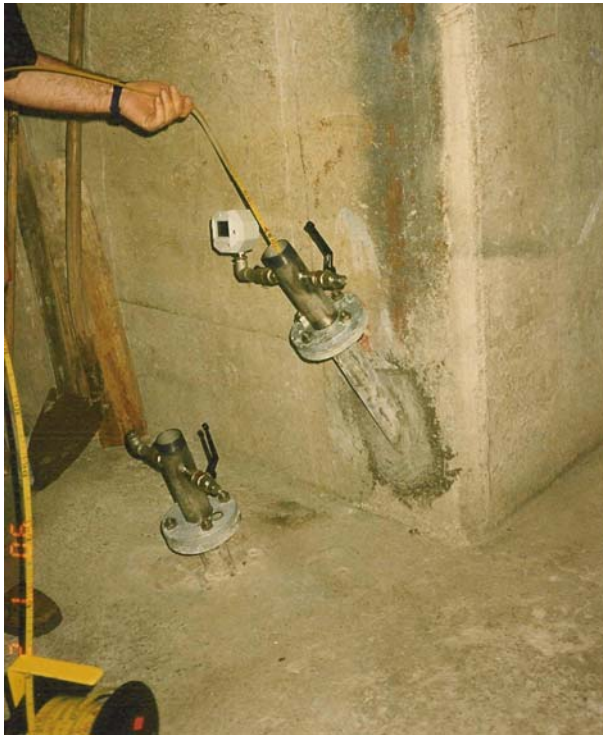


Figur 3.06-6: Mögliche Anordnung einer Auftriebsmessung der Typen (c) und (d) in der Mauerfundation

- 1 Injektionsgut
- 2 Tonkugeln
- 3 Quarzsand
- 4 Piezometer
- 5 Injektionsschirm

#### 4. Technische Anforderungen

Als Manometer sind nur robuste Produkte aus rostfreiem Material zu verwenden. Der Messbereich des Manometers muss den maximal zu erwartenden Druck angemessen überschreiten.



Figur 3.06-7: Offenes Bohrloch für die Messung mit dem Lichtlot. Wenn der Wasserspiegel über Oberkante Rohr steigt wird das Rohr geschlossen und der Druck mit dem Manometer gemessen

Um eine Fehlinterpretation der Auftriebsverhältnisse zu vermeiden, dürfen die Messrohre und Manometer nur in Ausnahmefällen, z. B. zu Reinigungszwecken, entlastet werden.

Das Manometer sollte möglichst nahe bei der Bohrung angeschlossen werden.

Die Messrohre sollen ausschliesslich zur Messung der Auftriebsdrücke verwendet werden. Für eine allfällige Entlastung der Felsfundation sind separate Drainagebohrungen vorzusehen (welche evtl. aber auch mit Manometern ausgerüstet werden können).

Die genaue Geometrie der Messeinrichtungen muss ermittelt und dokumentiert werden (Kote der Messstrecke, Kote OK Rohr, Neigung der Bohrung, Kote Manometer, usw.).

Die Bohrung für Messeinrichtungen der Typen a) und b) muss bis zur Messstelle dicht verrohrt sein; auch die Ummantelung des Rohres muss dicht sein, um Wasserzirkulation längs des Rohres zu vermeiden.

Zum Einbau der Messeinrichtungen des Typs c) und d) ist erfahrenes Personal erforderlich. Auf das gute Abdichten der einzelnen Messetagen ist grossen Wert zu legen.

Die Bohrungen für die Auftriebsmessungen dürfen erst nach Abschluss aller Injektionsarbeiten erstellt werden.



Figur 3.06-8: Geschlossenes System mit Manometern. Die dritte Messstelle von rechts wird über eine Druckmesssonde fernübertragen



3.06-9 Geschlossenes System mit elektrischer Druckmesszelle, direkt am Bohrloch angeschlossen, mit Fernübertragung zur Vermeidung von Druckverlusten

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Die Messrohre sind periodisch auf der ganzen Länge zu kontrollieren und bei Bedarf zu reinigen.

Die Funktionstüchtigkeit der Manometer ist periodisch zu prüfen. Am besten erfolgt dies in mehreren Druckstufen mit Hilfe einer Pumpe und eines separaten Präzisionsmanometers. Behelfsmässig kann das zu prüfende Manometer auch an eine Wasserleitung mit bekanntem Druck (z.B. Seestand) angeschlossen werden. Fehlerhafte Manometer sind sofort zu revidieren oder nötigenfalls ersetzen zu lassen. Ersatzmanometer sind in Reserve zu halten.

Die Verbindungsleitungen zwischen Messrohr und Manometer sowie die entsprechenden Anschlüsse sind periodisch, sowie bei ungewöhnlicher Druckabnahme auf Dichtigkeit und allfällige Verstopfungen zu kontrollieren.

#### **6. Redundanz**

Eine gewisse Redundanz wird durch Vergleich der Ergebnisse aus einer grösseren Anzahl, über das ganze Mauerfundament verteilter Messstellen erzielt. Empfehlenswert ist die Anordnung von Messstellen-Gruppen in mehreren Mauerquerschnitten. Eventuell zusätzlicher Einbau von Druckmesszellen.

#### **7. Bemerkungen**

Für die nachträgliche Erstellung müssen die beschränkten Platzverhältnisse zum Bohren, sowie die Lage der Fundamentfläche (Aufnahmen aus Bauzeit) berücksichtigt werden.

Bei der Wahl der Messstrecken müssen die spezifischen geotechnischen Eigenschaften des Felsuntergrundes in Betracht gezogen werden (Durchlässigkeit, Anzahl Klüfte).

Die Bohrungen sollen als Kernbohrungen (mit Kernenentnahme) ausgeführt werden. Vor dem Einbau der Messeinrichtungen ist es vorteilhaft, die Durchlässigkeit des Betons und des Gesteins durch Wasserabpressversuche zu ermitteln.

Sollten die gemessenen Drücke trotz regelmässiger Wartung der Messsysteme im Laufe der Zeit langsam absinken oder bei variablem Seestand konstant bleiben, sind in der Nähe der bestehenden Messanlagen neue Messeinrichtungen zu erstellen. Dadurch lässt sich feststellen, ob es sich um eine gesamthafte oder lediglich eine auf die Messstellen beschränkte Kolmatierung handelt.

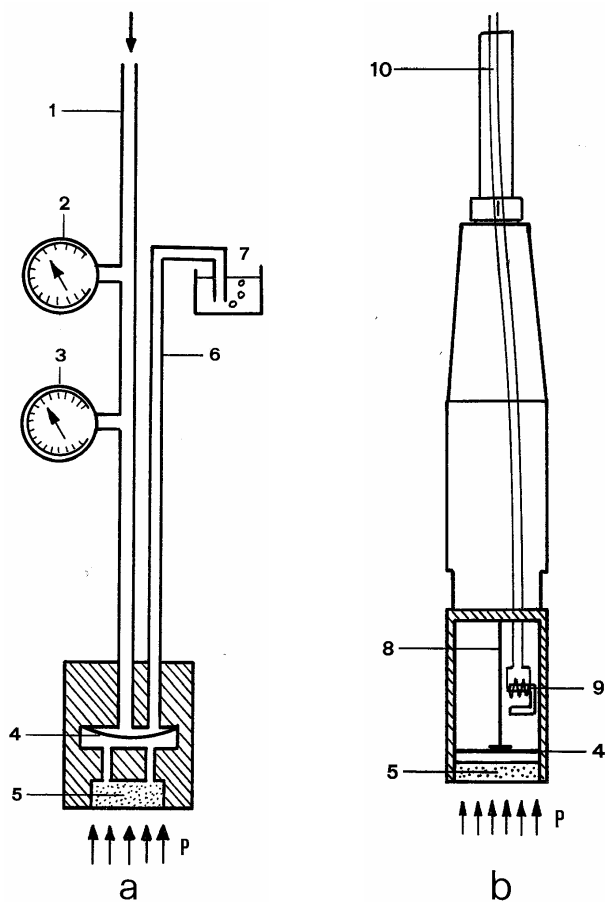
## Druckhöhe im Fels

### PIEZOMETER: DRUCKMESSZELLEN (pneumatisch oder elektrisch)

#### 1. Messeinrichtung

Diese Druckmesszellen messen den Wasserdruck im Felsfundament. Sie werden in Bohrlöchern auf den gewünschten Höhenlagen eingebaut und durch kleinkalibrige Leitungen bzw. elektrische Kabel mit einer meistens zentral angeordneten Messstation verbunden.

Die Zellen messen den örtlichen Wasserdruck indirekt, meistens durch die Verformung einer Membran.



Figur 3.07-1: Zwei verschiedene Typen von Piezometerzellen

- a) Pneumatisches Piezometer
- b) Elektrisches Piezometer
- 1. Gasdruckleitung
- 2. Gasmengenregler
- 3. Manometer
- 4. Membrane
- 5. Poröse Filterplatte
- 6. Rückleitung
- 7. Gasflussanzeige
- 8. Schwingende Saite
- 9. Elektromagnetische Spule
- 10. Übertragungskabel

Bei **pneumatischen Piezometern** wird der Druck in der Zelle mittels Gas (z.B. Stickstoff) oder seltener Öl solange erhöht, bis es zum Ausgleich des Innen- und des zu messenden Aussendruckes kommt. Dieser Druckausgleich führt zur Öffnung eines Ventils und zur entsprechenden Anzeige am Messgerät.

Die **elektrischen Piezometer** beruhen entweder auf dem Prinzip der Widerstandsmessung oder auf jenem der Frequenzmessung der schwingenden Saite.

#### 2. Beurteilung

Alle Messsysteme haben sich in der Praxis bewährt, verlangen jedoch bei Wahl der Produkte und Einbau der Instrumente, inklusive Leitungen bzw. Kabel, grosse Sorgfalt.

Die Messzellen weisen eine kurze Reaktionszeit auf und sind deshalb besonders bei wenig durchlässigem Fels geeignet. Elektrische Messzellen sind besonders einfach zu bedienen und können über eine grössere Entfernung gemessen werden. Automatisierung und Fernübertragung sind bei den elektrischen Systemen möglich.

Bei allen Zellentypen sind Verfälschung der Messergebnisse sowie Ausfälle infolge Kolmatierung der Filter nicht unbedeutend.

Automatisierung und Fernübertragung der elektrischen Piezometer sind möglich.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Bei der Montage kann eine Zelle gelegentlich infolge der nötigen Injektionsarbeiten im Bohrloch schon von Anfang an ausfallen.

Durch unsorgfältige Montage kann eine Leitung (Leitung selbst oder Kupplungsstelle) undicht oder ein Kabel defekt sein.

Piezometer können infolge chemischer Reaktionen ausfallen.

Luft einschüsse in den Filtern führen zu Messungenauigkeiten.

Das längs der Leitungen bzw. Kabel zirkulierende Wasser kann zu einem Ausgleich des Druckes in zwei oder mehreren Messtagen führen und dadurch die Messungen verfälschen.

Bei unsorgfältiger Montage kann die pneumatische Messung durch Kondenswasser oder Fremdkörper in den Leitungen beeinträchtigt werden.

Bei elektrischen Zellen können die Messergebnisse durch verschiedene Einflüsse verfälscht werden, wie zum Beispiel Nullpunktverschiebungen des Messwertgebers, Alterungserscheinungen bei Kabeln, Oxydation von Kontakten, Defekte am Messgerät. Auch Ausfälle durch Überspannung (Blitzschlag) sind nicht selten.



#### 4. Technische Anforderungen

**Alle Piezometertypen:** Der Einbau ist anspruchsvoll und darf nur durch Spezialisten vorgenommen werden.

Vor dem Einbau müssen die Filter gesättigt werden, um Luft einschlüsse zu vermeiden.

In einem Bohrloch muss jede Zelle separat oder allenfalls mit einer Kontroll-Messzelle in geeignetem Sand, in der Regel in Quarzsand, verlegt werden. Um Wasserzirkulation längs des Bohrloches zu vermeiden, müssen die Messstellen sauber abgedichtet und die Bohrlochabschnitte zwischen diesen mit Injektionsgut verfüllt werden.

Die vorherige Abklärung des Wasserchemismus ist für die Wahl des Piezometerfilterkörpers empfehlenswert. (Es existieren Keramikfilter, Filter aus Sintermetall, sowie aus gebundenem Quarzsand. Dabei wird entweder natürlicher Quarzsand oder Sand, aus künstlich hergestelltem Quarz (Silizium), verwendet. Als Bindemittel werden verschiedene Materialien verwendet).

Wo eine Verstopfung des Filters zu befürchten ist, sollen Messzellen mit Spülvorrichtungen vorgesehen werden.

Um Ausfälle zu kompensieren, müssen genügend überzählige Zellen vorgesehen werden. Mit Vorteil können auch verschiedene Messsysteme kombiniert werden.

**Pneumatische Piezometer:** Zur Erzeugung des Innendrucks soll ein trockenes Gas (Stickstoff) verwendet werden.

Zur Verhinderung von Kondenswasser müssen Leitungen beim Einbau total ausgetrocknet werden. Die Leitungen sollen über möglichst grosse Länge zugänglich und kontrollierbar verlegt werden (Suche von undichten Stellen).

**Elektrische Piezometer:** Die Kabel müssen vollkommen wasserdicht sein und eine hohe mechanische Festigkeit aufweisen. Diese dürfen zwischen Messzelle und Kabelendkasten nicht gespleisst sein.

Grosse Beachtung ist dem Blitzschutz zu schenken (abgeschirmte Kabel, Erdung, Überspannungssicherung).

Um dem Problem der Nullpunktverschiebung bei Widerstands- und Frequenzmessungen zu begegnen kann eine zweite (Kontroll-) Messzelle pro Messstelle eingebaut werden.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

**Alle Piezometer:** Um die Langlebigkeit der Zellen zu gewährleisten, müssen diese bei Vorhandensein von Spülvorrichtungen unbedingt periodisch mit entlüftetem Wasser gespült werden, da zu stark versinterte Zellen kaum mehr frei zu bekommen sind (zu grosse Überdrücke sind dabei zu vermeiden).

**Pneumatische Piezometer:** Bei jeder Messung kontrollieren, ob der Druckanstieg normal verläuft, bzw. ob der maximale Druck gehalten werden kann. Ist dies nicht der Fall, ist die Leitung irgendwo undicht und muss (sofern zugänglich) repariert werden.

Zur Elimination von Feuchtigkeit in den Leitungen kann ein periodisches Durchblasen nötig sein.

**Elektrische Piezometer:** Kontaktstellen und Messgerät sind regelmässig zu reinigen und vor Oxydation zu schützen. Diese Piezometer erlauben oft auch das Messen der Temperatur im Bereich der Druckmesszellen. Dies kann wertvolle Hinweise betreffend Durchsickerungen geben und erlaubt auch eine gewisse Kontrolle der gemessenen Wasserdrücke.

Das Ablesegerät muss periodisch mit einer Eichmesszelle oder durch den Fabrikanten geprüft werden.

#### 6. Redundanz

Eine gewisse Redundanz wird durch Vergleich der Ergebnisse aus einer grösseren Anzahl, über das ganze Mauerfundament verteilter Messstellen erzielt. Empfehlenswert ist die Anordnung von Messstellen-Gruppen in mehreren Mauerquerschnitten.

#### 7. Bemerkungen

Für die nachträgliche Erstellung müssen die beschränkten Platzverhältnisse zum Bohren, sowie die Lage der Fundamentfläche (Aufnahmen aus Bauzeit) berücksichtigt werden.

Bei der Wahl der Messstrecken müssen die spezifischen geotechnischen Eigenschaften des Felsuntergrundes in Betracht gezogen werden.

Die Bohrungen sollen als Kernbohrungen (mit Kernentnahme) ausgeführt werden. Vor dem Einbau der Messeinrichtungen ist es vorteilhaft, die Durchlässigkeit des Betons und des Gesteins durch Wasserabpressversuche zu ermitteln.

Sollten die gemessenen Drücke trotz regelmässiger Wartung der Messsysteme im Laufe der Zeit langsam absinken oder bei variablem Seestand konstant bleiben, sind in der Nähe der bestehenden Messanlagen neue Messeinrichtungen zu erstellen. Dadurch lässt sich feststellen, ob die gesamte Felsfundation oder lediglich ein Bereich in unmittelbarer Nähe der Messstellen Kolmatierungserscheinungen zeigt.

Für die Untersuchung spezieller Auftriebsverhältnisse stehen neuere Messeinrichtungen wie z. B. Piezodex oder Piezofor zur Verfügung, welche die punktuelle Messung des Auftriebsdruckes längs eines mit einem speziellen Futterrohr ausgerüsteten Bohrloches gestatten.

**Druckhöhe im Lockermaterial**

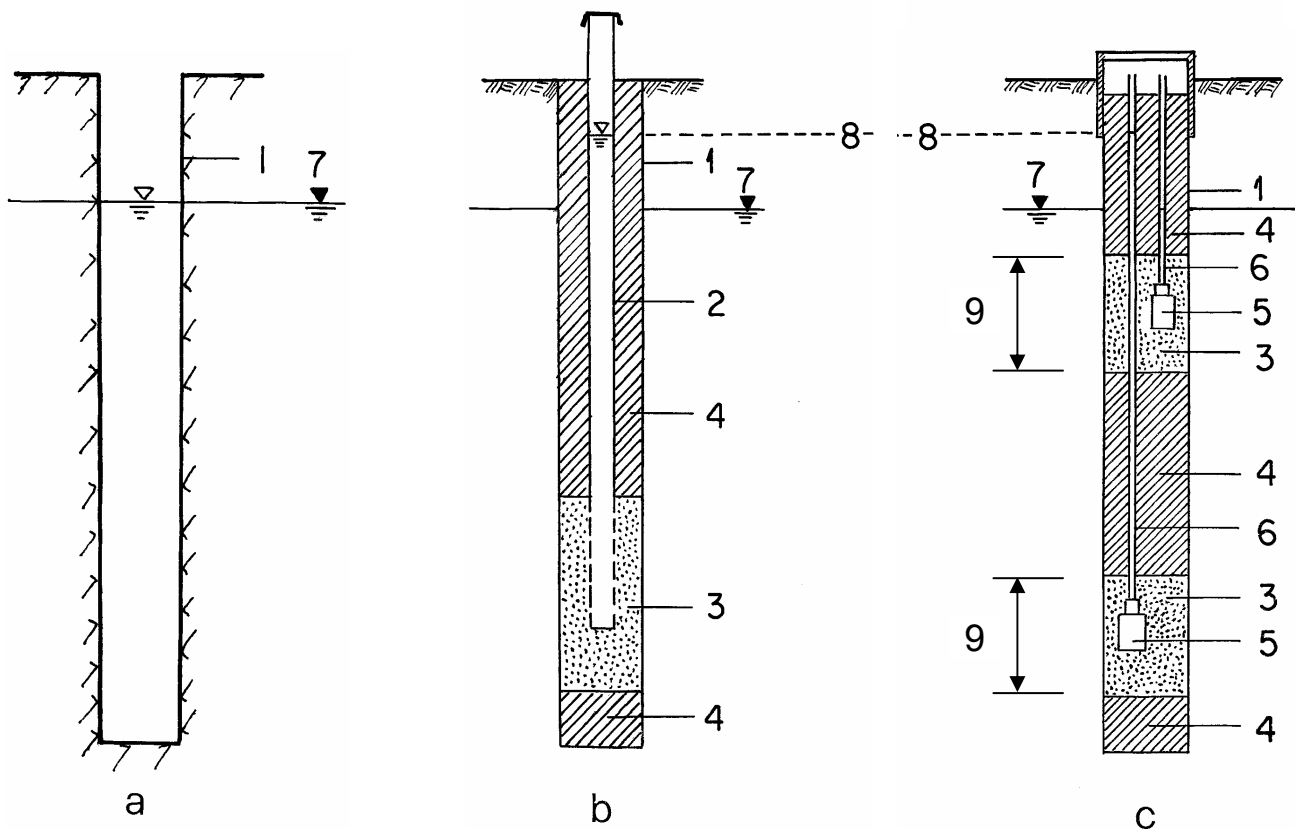
**PIEZOMETER: OFFENE SYSTEME**

**1. Messeinrichtung**

Mit Hilfe eines Kabellichtlots oder einer Brunnenpfeife (selten) wird die Höhe des Wasserspiegels im Damm oder im Untergrund gemessen. Die Ausführung der für die Installation der Messeinrichtung notwendigen Bohrungen erfolgt ab Terrainoberfläche oder ab einem Kontrollgang in vertikaler oder (seltener) geneigter Lage.

Zur Ermittlung des Auftriebs bzw. der Porenwasserspannungen an bestimmten Messstellen des Damms und Untergrundes werden folgende Piezometer verwendet.

- a) Offene Bohrung
- b) Standrohr Piezometer
- c) Standrohr mit Filterspitzen.



Figur 3.08-1: Drei verschiedene Typen von Piezometerbohrungen

- |  |   |
|--|---|
| 1 Bohrloch                                   | 6 Kunststoffröhrchen (Innendurchmesser 8 – 12 mm) |
| 2 Standrohr gelocht (Durchmesser 50 – 75 mm) | 7 Grundwasserspiegel                              |
| 3 Quarzsand                                  | 8 Wasserdruckniveau                               |
| 4 Injektionsgut (Verdämmung)                 | 9 Messstrecke                                     |
| 5 Poröser Filterkörper                       |   |

Die offene Bohrung (Typ a) kann nur im standfesten Material ausgeführt werden. Sie gestattet lediglich die Messung des Grundwasserstandes im Untergrund. Zur Ermittlung der Auftriebsdrücke und Porenwasserspannungen an bestimmten Stellen des Damms und Untergrundes werden Piezometer der Typen b) und c) verwendet.

Beim Standrohr Piezometer (Typ b) wird in das Bohrloch ein an der vorgesehenen Messstelle gelochtes Rohr von 1" bis 2,5" Durchmesser eingelegt. Der Raum zwischen Rohr und Bohrlochwand wird im zu messenden Bereich mit Filterma-

terial, im übrigen Bereich mit dichtendem Material verfüllt (Bentonit Kugeln, Zement/Ton Injektionen). Je nach Durchmesser der Bohrung und der Standrohre können bis zu 3 Piezometer installiert werden.

Standrohre mit Filterspitzen (Casagrande Piezometer, Typ c) kommen bei verhältnismässig undurchlässigem Material zur Anwendung. Dabei werden zur Reduktion der Ansprechzeit des Standrohres dünnere Messrohre aus Kunststoff (Innendurchmesser 8 bis 12 mm) verwendet, die an der Messstelle einen porösen Filterkörper aufweisen.



Im gleichen Bohrloch können mehrere (bis zu 3) Messstellen in verschiedenen Tiefen eingerichtet werden.

## 2. Beurteilung

Die Messeinrichtung Typ a) eignet sich eher im Fels.

Das Standrohr (Typ b) eignet sich gut bei durchlässigem wie auch weniger durchlässigem Material, wenn die Schwankungen des zu messenden Wasserdrucks nicht zu gross und zu rasch erfolgen. Diese Messeinrichtung ist robust und weist eine hohe Betriebssicherheit auf.

Die Messeinrichtung nach Casagrande (Typ c) eignet sich auch für Materialien von geringer Durchlässigkeit, weil infolge des kleinen Messrohrdurchmessers weniger Wasser zu- bzw. abfließen muss, ehe das Piezometer die Druckschwankung erfasst hat. Die Messung ist einfach, genau und hat sich in der Praxis gut bewährt.

Diese Messeinrichtungen eignen sich nur für Messungen, bei welchen der Wasserspiegel tiefer liegt als die Bohrlochmündung. Wenn der Wasserspiegel höher steigt und Wasser aus dem Rohr austritt, soll an diesem ein Manometer angeschlossen werden (siehe Blatt Nr. 3.09).

Diese offenen Systeme sind für Automatisierung und Fernübertragung nicht geeignet.

## 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Die Rohre und die Filterspitzen sowie das umgebende Material im unmittelbaren Bereich der Messstelle können im Laufe der Zeit versintern oder durch Schlamm verstopft werden. Bei undichtem Piezometerrohr oder schlecht verfüllter Ummantelung der Rohre können die Messungen infolge Wasserzirkulation verfälscht werden.

Bei eventuellem Zufluss von Oberflächenwasser wird die Messung verfälscht.

Werden Bodenschichten, die unterschiedliche Wasserdrücke aufweisen, durch den gelochten Bereich des Standrohrs miteinander verbunden, so ist der Messwert verfälscht.

Nach Eindringen von Schlamm, Steinen und anderen Objekten ins Messsystem kann das Messen (zumindest für gewisse Wasserstände) verunmöglicht werden.

## 4. Technische Anforderungen

Es muss dafür gesorgt werden, dass kein Oberflächenwasser oder Schmutz in das Messsystem eindringen können. Das Messsystem ist mit einer abschliessbaren Kappe zu versehen. Dieser Ab-

schluss darf die Be- und Entlüftung des Systems jedoch nicht beeinträchtigen.

Die Messeinrichtung muss genau ermittelt und dokumentiert werden (Kote der Messstrecke, Kote OK Rohr, Neigung der Bohrung, usw.).

Das Bohrloch muss bis zur Messstelle dicht verfüllt werden, um Wasserzirkulation längs der Rohre zu vermeiden.

Für die Erstellung müssen die Lage der Materialzonen des Damms und der Bodenschichten des Untergrundes berücksichtigt werden.

Beim Einbau der Standrohre während der Schüttung des Damms sind Vorkehrungen gegen deren Beschädigung durch zirkulierende Erdbaugeräte zutreffen (Absperrungen, Signale, Wachtposten). Oft ist das nachträgliche Versetzen von Piezometern in Bohrlöchern zweckmässiger.

## 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Alle Standrohre (Bohrungen) sollen periodisch bezüglich Ablagerungen auf der ganzen Länge kontrolliert und bei Bedarf gereinigt werden.

Die richtige Funktion des Kabellichtlots bzw. der Brunnenpfeife soll periodisch kontrolliert werden.

Die Zuverlässigkeit der Messeinrichtung kann mit Absenk- und Steigversuchen im Standrohr überprüft werden, gegebenenfalls sind Druckspülungen vorzunehmen.

## 6. Redundanz

Eine gewisse Redundanz wird durch Vergleich der Ergebnisse einer grösseren Anzahl über Damm und Untergrund verteilter Messstellen erreicht. Empfehlenswert ist die Anordnung von Messstellen-Gruppen in mehreren Dammquerschnitten. Eventuell zusätzlicher Einbau von Druckmesszellen.

## 7. Bemerkungen

Bohrungen sollten mit Kernentnahme ausgeführt und die Durchlässigkeit des Materials im Bereich der Bohrung bestimmt werden.

Sollten die gemessenen Drücke trotz regelmässiger Wartung der Messsysteme im Laufe der Zeit langsam absinken oder bei variablem Seestand konstant bleiben, sind in der Nähe der bestehenden Messanlagen neue Messeinrichtungen zu erstellen. Dadurch lässt sich feststellen, ob es sich um eine gesamthafte oder lediglich eine auf die Messstellen beschränkte Kolmatierung handelt.

Das Standrohr kann in geeignetem Lockermaterial auch ohne vorherige Bohrung direkt gerammt werden, sofern es genügend robust ausgeführt wird.

**Druckhöhe im Lockermaterial**

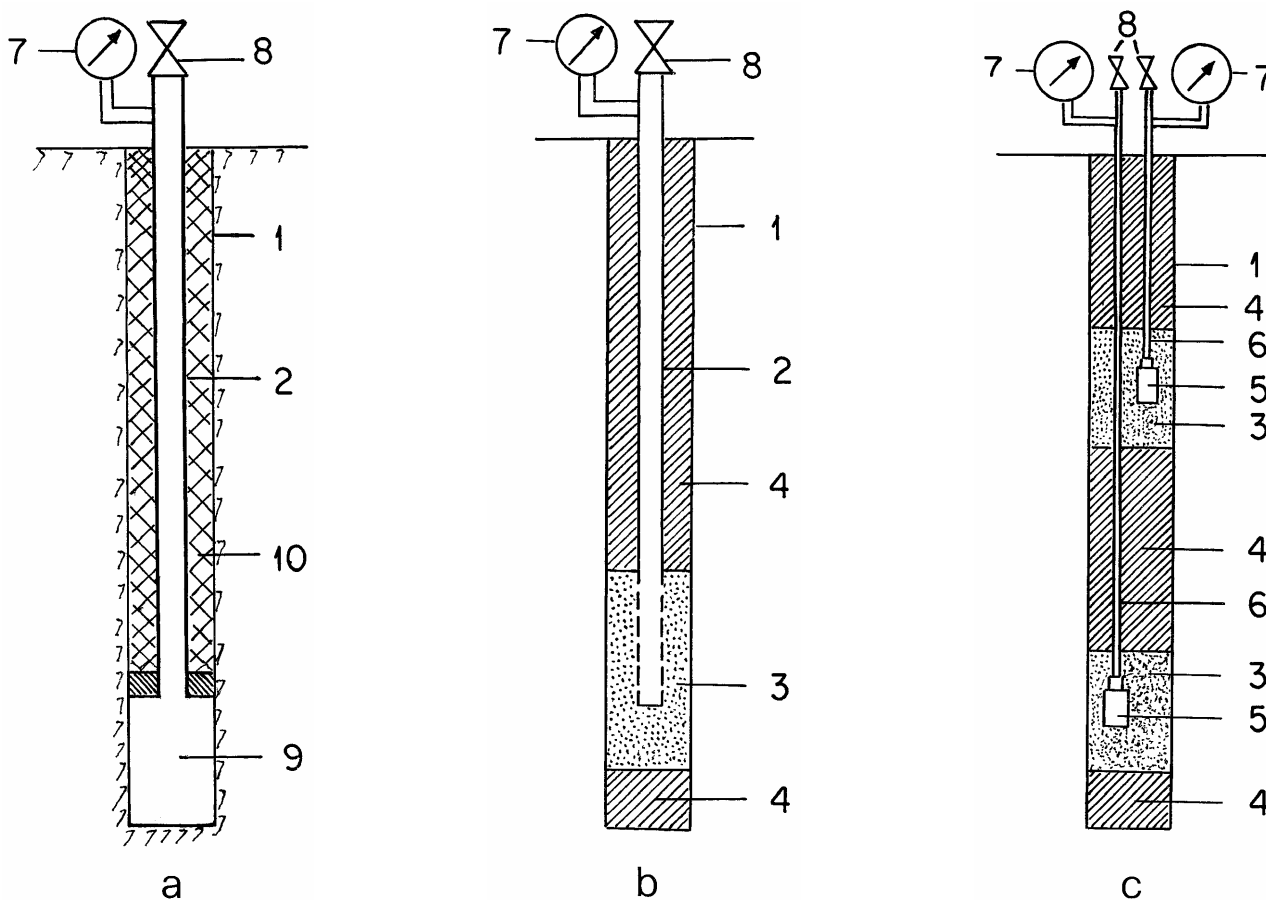
**PIEZOMETER: GESCHLOSSENE SYSTEME**

**1. Messeinrichtung**

Beim geschlossenen System erfolgt die Messung des Wasserdruckes mit Hilfe eines Manometers, das über ein Rohr mit der Messstelle im Damm oder in der Foundation verbunden ist. Dieses Messprinzip gelangt dann zur Anwendung, wenn der zu erwartende Wasserdruck den Bohrlochkopf übersteigt.

Es werden folgende Typen der Messeinrichtung unterschieden:

- a) Einfaches Rohr
- b) Standrohr Piezometer
- c) Piezometer mit Filterspitzen (Casagrande-Typ).



Figur 3.09-1: Drei verschiedene Typen von Piezometerbohrungen

- |                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| 1. Bohrloch                           | 6. Kunststoffröhrchen (Innendurchmesser 8 – 12 mm) |
| 2. Standrohr (Durchmesser 50 – 75 mm) | 7. Manometer                                       |
| 3. Quarzsand                          | 8. Entlastungshahn                                 |
| 4. Verdämmung                         | 9. Messstrecke im Fels                             |
| 5. Poröser Filterkörper               | 10. Injektionsgut                                  |

Die Ausführung der für die Installation der Messeinrichtung notwendigen Bohrungen erfolgt ab Terrainoberfläche oder ab einem Kontrollgang in vertikaler oder geneigter Lage.

Die Messeinrichtung Typ a) kann nur in standfestem Material ausgeführt werden. Die Messstrecke, welche weniger als 5 m betragen sollte, wird durch ein Rohr von 2" bis 2,5" Durchmesser mit dem Manometer verbunden. Mit Injektionen wird der

Raum zwischen Rohr und Bohrloch verfüllt (Packer am unteren Rohrende vorsehen).

Die Messeinrichtungen Typ b) und c) kommen sowohl im Fels als auch im Lockermaterial zur Anwendung.

Beim Standrohr Piezometer (Typ b) wird in das Bohrloch ein an der vorgesehenen Messstelle gelochtes Rohr von 2" bis 2,5" Durchmesser eingebaut, während beim Casagrande-Piezometer



(Typ c) an der Messstelle ein poröser Filterkörper eingelegt wird, der über eine dünne Kunststoffleitung (Innendurchmesser 8 bis 12 mm) mit dem Manometer verbunden ist. Bei beiden Typen wird an der Messstelle ein Sandfilter eingebaut und der übrige Bereich des Bohrlochs mit dichtendem Material (Ton, Injektionsgut) verfüllt. Beim Typ c) können im gleichen Bohrloch mehrere (bis zu 3) Messstellen in verschiedenen Tiefen eingerichtet werden.

## 2. Beurteilung

Bei diesen geschlossenen Messsystemen werden Druckschwankungen mit kleiner Ansprechzeit (Referenzzeit) gut erfasst. Die Messung ist einfach, genau und hat sich in der Praxis gut bewährt.

Die Piezometer-Typen a) und b) sind robuste Einrichtungen, die eine hohe Betriebssicherheit aufweisen, deren Präzision jedoch etwas kleiner ist als beim Casagrande-Typ c). Die Genauigkeit der Manometermessung von + 1 % des Messbereichs ist normalerweise ausreichend.

Diese geschlossenen Systeme sind für eine Automatisierung und Fernübertragung nicht geeignet. Oft werden deshalb Druckzellen eingebaut (Blatt Nr. 3.10). Diese erlauben eine einfache Datenerfassung und Übertragung

## 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Die Rohre und beim Typ c) die Filterspitzen sowie das umgebende Material im unmittelbaren Bereich der Messstelle können im Laufe der Zeit versintern oder durch Schlamm verstopft werden.

Schon bei der Ausführung von Abdichtungsinjektionen im Bohrloch können Messstellen verstopfen und ausfallen.

Bei undichtem Standrohr oder schlecht verfüllter Ummantelung der Messrohre können die Messungen infolge Wasserzirkulation längs der Messrohre verfälscht werden.

Werden Bodenschichten, die unterschiedliche Wasserdrücke aufweisen, durch die Messstrecke miteinander verbunden, so ist der Messwert verfälscht.

Lufteinschlüsse im Messsystem können zu verfälschten Anzeigen führen.

Infolge Kalkablagerung und Ermüdungserscheinungen können im Manometer Messungenauigkeiten auftreten.

Nach einer allfälligen Entlastung des Messsystems (z.B. bei Reinigungen) kann der Wiederaufbau des Druckes unter Umständen sehr lange Zeit beanspruchen. Die Messwerte nach erfolgter Entlastung können daher verfälscht sein.

## 4. Technische Anforderungen

Als Manometer sind nur robuste Produkte aus rostfreiem Material zu verwenden.

Der Messbereich des Manometers muss den maximal zu erwartenden Druck angemessen überschreiten.

Um eine Fehlinterpretation der Druckverhältnisse zu vermeiden, dürfen die Messrohre und Manometer nur in Ausnahmefällen, z.B. zu Reinigungszwecken, entlastet werden.

Hingegen dürfen Manometer nach erfolgter Messung, mittels eines speziellen Absperr- und Entleerungshahnes, dann entlastet werden, wenn das System so konzipiert ist, dass dabei kein Wasserverlust auftritt (keine Verfälschung der Messergebnisse). Die Messeinrichtung soll ausschliesslich zur Messung der Wasserdrücke verwendet werden. Für eine allfällige Druckentlastung der Foundation sind separate Drainagebohrungen vorzusehen. Die genaue "Geometrie" der Messeinrichtungen muss ermittelt werden (Kote der Messstrecke, Kote OK Rohr, Neigung der Bohrung, Kote Manometer, usw.).

Die Bohrung für Messeinrichtungen der Typen a) und b) muss bis zur Messstelle dicht verrohrt sein; auch die Ummantelung des Rohres muss dicht sein, um Wasserzirkulation längs des Rohres zu vermeiden.

Zum Einbau der Messeinrichtungen des Typs c) ist erfahrenes Personal erforderlich. Auf das gute Abdichten der einzelnen Messetagen ist grosser Wert zu legen.

Für die Erstellung der Messeinrichtung müssen die Lage der Materialzonen des Dammes und der Bodenschichten des Untergrundes berücksichtigt werden.

Beim Einbau der Messeinrichtung während der Schüttung des Dammes sind Vorkehrungen gegen deren Beschädigung durch zirkulierende Erdbaugeräte zu treffen (Absperrungen, Signale, Wachtposten).

## 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Die Rohre sind nach Möglichkeit periodisch auf der ganzen Länge bezüglich Ablagerungen zu kontrollieren und bei Bedarf zu reinigen.

Die Funktionstüchtigkeit der Manometer ist periodisch zu prüfen. Am besten erfolgt dies in mehreren Druckstufen mit Hilfe einer Pumpe und eines separaten Präzisionsmanometers. Behelfsmässig kann das zu prüfende Manometer auch an eine Wasserleitung mit bekanntem Druck (z.B. See-stand) angeschlossen werden. Fehlerhafte Manometer sind sofort zu revidieren oder nötigenfalls zu ersetzen. Ersatzmanometer sind in Reserve zu halten.

Verbindungsleitungen zwischen Rohr und Manometer sowie die entsprechenden Anschlüsse sind periodisch, sowie bei ungewöhnlicher Druckabnahme, auf Dichtigkeit und allfällige Verstopfungen zu kontrollieren.



## 6. Redundanz

Eine gewisse Redundanz wird durch Vergleich der Ergebnisse einer grösseren Anzahl über Damm und Untergrund verteilter Messeinrichtungen erzielt. Empfehlenswert ist die Anordnung von Messstellen-Gruppen in mehreren Dammquerschnitten. Eventuell zusätzlicher Einbau von Druckmesszellen.

## 7. Bemerkungen

Die Bohrungen sollten mit Kernentnahme ausgeführt und die Durchlässigkeit des Materials im Bereich der Bohrung bestimmt werden.

Sollten die gemessenen Drücke trotz regelmässiger Wartung der Messsysteme im Laufe der Zeit langsam absinken oder bei variablem Seestand konstant bleiben, sind in der Nähe der bestehenden Messanlagen neue Messeinrichtungen zu erstellen. Dadurch lässt sich feststellen, ob es sich um eine gesamthafte oder lediglich eine auf die Messstellen beschränkte Kolmatierung handelt.

**Druckhöhe im Lockermaterial**

**PIEZOMETER: DRUCKMESSZELLEN (hydraulisch, pneumatisch oder elektrisch)**

**1. Messeinrichtung**

Diese Druckmesszellen messen Grundwasserdrücke und Porenwasserspannungen im Damm während des Schüttvorganges, sobald der Damm das gewünschte Höhenniveau erreicht hat. Im Untergrund werden die Piezometer in Bohrlöchern versetzt. Mittels Schläuchen oder elektrischen Kabeln wird die Verbindung vom Piezometer zur meist zentral angeordneten Messstation hergestellt.

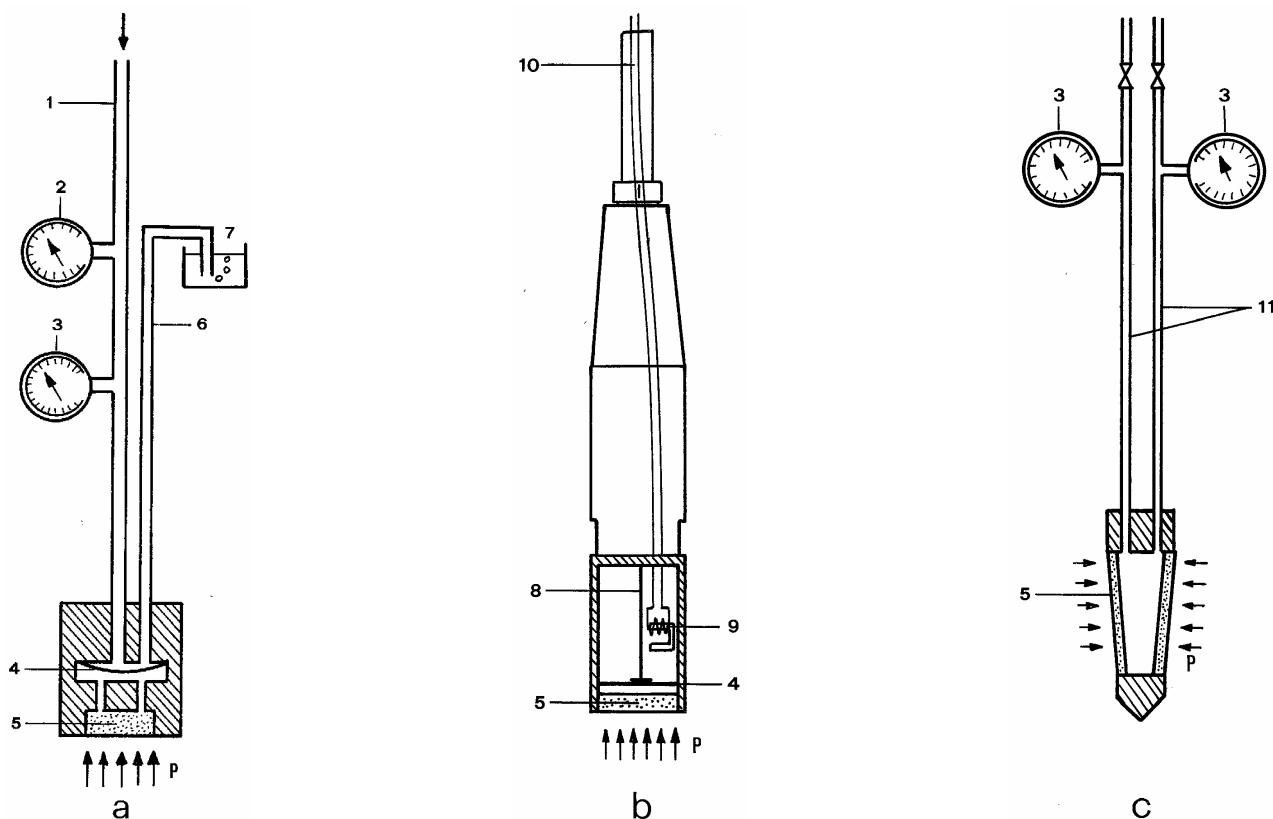
Es werden im Wesentlichen 3 Piezometertypen angewendet:

**Pneumatische Piezometer (Membranventilzelle):** Der Innendruck in der Messzelle wird mittels Gas (beispielsweise Stickstoff) oder seltener mit Öl solange vergrößert, bis es zum Ausgleich des Innen- und des zu messenden Aussendruckes kommt, was zur Öffnung eines Ventils und dadurch

auch zum Druckausgleich im Zu- und Rücklauf der Messzelle und der entsprechenden Anzeige am Messgerät führt.

**Elektrische Piezometer:** Die Porenwasserspannung wirkt auf eine in der Messzelle eingebaute Membrane. Deren dadurch bewirkte Verformung wird als Messwert nach dem Prinzip der Frequenzmessung der schwingenden Saite oder der Widerstandsmessung über elektrische Kabel zur Messstation übertragen.

**Hydraulische Piezometer:** Die Messzelle besteht aus einem porösen Element (Filterkörper), das durch zwei mit entlüftetem Wasser gefüllte Schläuche mit der Messstation verbunden ist. Die Porenwasserspannung wird mit Manometern direkt oder über einen Druckaufnehmer in einem elektrischen Anzeigesystem indirekt gemessen.



Figur 3.10-1: Zwei verschiedene Typen von Piezometerzellen

- |                             |   |
|-----------------------------|---|
| a) Pneumatisches Piezometer | 5 Poröse Filterplatte                         |
| b) Elektrisches Piezometer  | 6 Rückleitung                                 |
| c) Hydraulisches Piezometer | 7 Gasflussanzeige                             |
| 1 Gasdruckleitung           | 8 Schwingende Saite                           |
| 2 Gasmengenregler           | 9 Elektromagnetische Spule                    |
| 3 Manometer                 | 10 Übertragungskabel                          |
| 4 Membrane                  | 11 Zu- und Rückleitung mit entlüftetem Wasser |

## 2. Beurteilung

Alle 3 genannten Piezometer arbeiten sofern sie fachgerecht und sorgfältig ausgewählt und eingebaut wurden - zuverlässig und genau. Sie haben eine kurze Reaktionszeit und sind deshalb besonders bei wenig durchlässigen Materialien geeignet. Die hydraulischen Piezometer sind am längsten in Gebrauch. Da sie gegenüber den anderen Typen jedoch am meisten Sorgfalt im Unterhalt erfordern, geht der Trend in Richtung vermehrter Anwendung der pflegeleichteren elektrischen Piezometer (vorwiegend schwingende Saite).

Ein Vorteil der hydraulischen Piezometer liegt darin, dass die in die Filterkörper eingedrungene Luft aus dem System durch die beiden Schläuche weggespült werden kann, was besonders bei solchen Zellen von Bedeutung ist, die in nicht gesättigten, tonhaltigen Materialien eingebaut sind. Nachteilig beim hydraulischen Piezometer ist, dass die Leitungen unterhalb des Porenwasserdruckniveaus verlegt werden müssen.

Elektrische Piezometer sind besonders einfach zu bedienen und können auf grössere Entfernungen gemessen werden.

Bei allen 3 Piezometertypen ist die zeitliche Ausfallrate nicht unerheblich.

Automatisierung und Fernübertragung der elektrischen Piezometer sind möglich.



Figur 3.10-2: Messkammer für hydraulische Piezometer

## 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Durch unsorgfältigen Einbau kann eine Leitung undicht oder ein Kabel beschädigt werden.

Schläuche und Kabel können beim Durchqueren verschiedener Materialzonen infolge unterschiedlicher Setzungen überdehnt oder abgeschert werden.

Bei unsorgfältiger Montage kann die pneumatische Messung durch Kondenswasser oder Fremdkörper in den Leitungen beeinträchtigt werden.

Bei elektrischen Zellen können die Messergebnisse durch verschiedene Einflüsse verfälscht werden, wie zum Beispiel Alterungserscheinungen bei Ka-

beln, Oxydation von Kontakten, Defekte am Messgerät, Nullpunktverschiebungen des Messwertgebers. Auch Ausfälle durch Überspannung (Blitzschlag) können eintreten.

Lufteinschlüsse in den Filtern der Piezometer führen zu Messungenauigkeiten.

Piezometer können infolge chemischer Reaktionen ausfallen.

Beim Einbau in Bohrlöchern kann ein Piezometer gelegentlich infolge nötiger Verpressarbeiten injiziert werden und von Anfang an ausfallen.

## 4. Technische Anforderungen

Der Einbau ist anspruchsvoll und relativ zeitaufwendig.

Piezometer, die in die Dammschüttung eingelegt werden, sind in separaten Nischen neben dem Graben für die Schläuche oder Kabel sorgfältig in Feinmaterial einzubetten. (Beim Einbau in undurchlässigen Dammschichten sind die Piezometer nicht mit Sandpolstern zu umgeben.)

Um Beschädigungen der Schläuche und Kabel durch zu erwartende Dammdeformationen zu begegnen, sind die Leitungen mäandrierend in den dafür vorgesehenen Gräben zu verlegen. Besondere Aufmerksamkeit ist dabei den heiklen Bereichen (Überquerung verschiedener Materialzonen, Einführungen in Kontrollgänge) zu schenken.

Die Leitungen sollen in den unzugänglichen Bereichen (Schüttung, Bohrlöcher) keine Kupplungen (Schläuche) oder Spleissungen (Kabel) aufweisen. Im Bohrloch sind die Piezometer in ein dem umgebenden Material ähnliches Material einzuspülen. Um vertikale Wasserzirkulation zu vermeiden, ist darüber das Loch abzudichten und zu verfüllen.

Die vorherige Abklärung des Wasserchemismus ist für die Wahl des Piezometerfilterkörpers empfehlenswert.

Um Ausfälle zu kompensieren, sind genügend überzählige Piezometer vorzusehen. Mit Vorteil können auch verschiedene Messsysteme kombiniert werden.

Bei hydraulischen Piezometern muss das ganze System frostsicher angelegt sein. Die Messung ist nur möglich, wenn die Messstation tiefer als das tiefstmögliche Druckniveau liegt.

Bei pneumatischen Piezometern soll zur Erzeugung des Innendrucks ein trockenes Gas (Stickstoff) verwendet werden.

Die Schläuche für hydraulische und pneumatische Piezometer müssen luft- und wasserundurchlässig sein. Die Kabel für die elektrischen Piezometer müssen vollkommen wasserdicht sein, eine hohe mechanische Festigkeit aufweisen und gegen Überspannung geschützt sein.

Elektrische und pneumatische Piezometer müssen beim Einbau gesättigt werden, damit keine Luftpnein- schlüsse in den Filtern vorhanden sind.



Wo eine Verstopfung des Filters zu befürchten ist, sollen Messzellen mit Spülvorrichtung vorgesehen werden.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

**Pneumatische Piezometer:** Bei jeder Messung kontrollieren, ob der Druckanstieg normal verläuft, bzw. ob der Druck gehalten werden kann. Andernfalls ist die Leitung undicht und muss (sofern zugänglich) repariert werden.

Zur Elimination von Feuchtigkeit in den Leitungen kann ein periodisches Durchblasen nötig sein.

Periodische Spülung des Filterkörpers, sofern Spülvorrichtung vorhanden.

**Elektrische Piezometer:** Die Kontaktstellen bei Kabelendkasten und Messgerät sind regelmässig zu reinigen und vor Oxydation zu schützen. Diese Piezometer erlauben oft auch das Messen der Temperatur im Bereich der Druckmesszellen. Dies kann wertvolle Hinweise betreffend Durchsickerungen geben und erlaubt auch eine gewisse Kontrolle der gemessenen Wasserdrücke.

Das Ablesegerät ist periodisch mit einer Eichmesszelle oder durch den Fabrikanten zu überprüfen.

**Hydraulische Piezometer:** Piezometer mit Zu- und Rückleitung sind periodisch mit entlüftetem Wasser zu spülen, um das System luftfrei zu halten. (Zu grosse Überdrücke sind dabei zu vermeiden.)

Mit Steig- und Absenkversuchen kann das richtige Funktionieren überprüft werden.

Periodische Prüfung der Manometer mit einem Referenzmanometer.

#### 6. Redundanz

Eine gewisse Redundanz wird durch Vergleich der Ergebnisse einer grösseren Anzahl über Damm und Untergrund verteilter Piezometer erzielt. Zweckmässigerweise werden die Piezometer in mehreren Dammquerschnitten angeordnet.

Eventuell Installation von Standrohr-Piezometern.

#### 7. Bemerkungen

Der Ersatz ausgefallener Piezometer im Damm ist mittels Bohrlöchern möglich. Bei Bohrungen im Dammkern ist während der Ausführung der Gefahr der hydraulischen Rissbildung durch die Bohrflüssigkeit besondere Beachtung zu schenken.

Bei Piezometern, die im Untergrund versetzt werden, sind beim Bohren der dazu nötigen Löcher zweckmässigerweise Durchlässigkeitsversuche vorzunehmen.

Sollten die gemessenen Drücke trotz regelmässiger Wartung der Messsysteme im Laufe der Zeit langsam absinken oder bei variablem Seestand konstant bleiben, sind in der Nähe der bestehenden Messanlagen neue Messeinrichtungen zu erstellen. Dadurch lässt sich feststellen, ob es sich um eine gesamthafte oder lediglich eine auf die Messstellen beschränkte Kolmatierung handelt.

## Erfassen physikalischer oder chemischer Veränderungen

### TRÜBUNGSMESSUNG

#### 1. Messeinrichtung

Das Gerät dient zur Messung von suspendierten Stoffen im Sickerwasser an ausgewählten Messstellen (wichtige Sickerwasserzuflüsse oder Gesamtwassermenge). Zur Messung der Trübung gibt es zwei gebräuchliche Verfahren.

- Durch Vergleich mit Standardlösung. Die Trübung wird durch den ständigen Vergleich des Streulichtes im Sickerwasser mit der Standardlösung mit Hilfe einer Photozelle gemessen. Als Standardlösung wird Formazin oder Kieselgur benützt. Es gibt verschiedene Stufen (Konzentrationen) der Standardlösung, die in das Gerät eingeschaltet werden können. Trübungswerte (Prozent der bezüglichen Standardlösung) werden auf einem Registrierstreifen aufgezeichnet oder digital erfasst.
- Durch optische Abgleichung. Die Trübung wird durch den ständigen Vergleich des Streulichtes im Sickerwasser mit einem Vergleichsstrahl, welcher direkt durch das Sickerwasser geführt wird mit Hilfe einer Photozelle gemessen. Durch elektrische Abgleichung des Vergleichsstrahls mit dem Streulicht kann der Trübungswert (Prozent Durchlässigkeit) ermittelt und digital erfasst werden.



Figur 3.11-1: automatische Trübungsmessung, kombiniert mit automatischer Sickerwassermessung

#### 2. Beurteilung

Bei den oben erwähnten Messmethoden handelt es sich um empfindliche Geräte, welche häufige Kontrollen verlangen. Eine Trübungsmessung soll nur dort installiert werden, wo es wirklich sinnvoll ist und wirkungsvoll geschätzt werden kann. Andererseits liefert die Registrierung eine lückenlose Information über die Vorgänge im Zusammenhang mit einer allfälligen Sickerwasserverunreinigung (Erosionsvorgänge, Auswaschung von Injektionsgut, etc.).

Automatisierung und Fernübertragung sind möglich und bei diesen Systemen die Regel.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

- Verstopfung des Zuflussrohres oder der Pumpe
- Verunreinigung des Flimmerspiegels
- Defekte Glühbirne
- Unterbrechung der elektrischen Stromversorgung
- Lufteintrag in die Probe
- Vereisung
- Eintrag von Fremdkörpern ins Sickerwasser (z.B. durch Aufwirbeln des Wassers)

#### 4. Technische Anforderungen

Vom Sickerwasser muss ein ständiger Zufluss von (0,2 - 0,5 l/min) abgezweigt werden. Eine Stromversorgung für Beheizung und Licht ist notwendig. Schutz gegen Spritz- und Störwasser von aussen ist unerlässlich. Wo erforderlich, soll Grobabscheider und Entlüfter vorgeschaltet werden.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

- Kontrolle des richtigen Streifenvorschubes bei nicht digitaler Registrierung.
- Kontrolle der Glühbirne, periodischer Ersatz.
- Mindestens einmal im Monat Reinigung des Flimmerspiegels.
- Kontrolle des Entlüftungsgefässes, der Wasserleitung und der Pumpe gegen Verstopfung (monatlich).
- Gelegentliche Überprüfung durch Messung an Kontroll suspension.
- Der Unterhaltsaufwand bei diesen Messeinrichtungen ist beträchtlich.

#### 6. Redundanz

Periodische Laboranalyse von Sickerwasserproben.

#### 7. Bemerkungen

## **Erfassen physikalischer oder chemischer Veränderungen**

### **CHEMISCHE WASSERANALYSEN**

#### **1. Messeinrichtung**

Es sind keine speziellen Messeinrichtungen notwendig. Als Entnahmestellen für die Wasserproben dienen: Sickerwassermessstellen/Drainagen und geöffnete Auftriebs-Messstellen in Kontrollgängen von Mauer oder Damm sowie in Kontrollstollen der Widerlager/Talflanken. Vergleichsproben werden entnommen von Quellen der näheren Umgebung und von Seewasser (direkt aus dem See oder z.B. ab Hahn bei einer Dotierturbine).

#### **2. Beurteilung**

Chemische Wasseranalysen ermöglichen die Beurteilung der Herkunft von Sicker-/Drainagewasser: Formationswasser, d.h. Zufluss aus dem Fels oder aus Lockergestein der Talflanken und aus dem Untergrund der Sperrstelle oder von Seewasser. Sie ermöglichen zudem den Nachweis einer stattgefundenen Interaktion (chemische Veränderung) des Sicker-/Drainagewassers mit dem Mauerbeton und Injektionsgut sowie bei Dämmen mit dem Dichtungskern.

Zur Beurteilung der Herkunft des Sicker-/Drainagewassers aus Formationswasser oder aus dem See sind Vergleichsproben von Seewasser und nach Möglichkeit von Quellen talseits der Sperrstelle zu entnehmen.

Automatisierung und Fernübertragung von chemischen Wasseranalysen sind nicht sinnvoll.

#### **3. Mögliche Störungen und Messfehler**

Wenn die Wasserproben korrekt und mit den vom analysierenden Labor gelieferten und fallweise bereits mit Zusätzen (z.B. Ansäuerung) versetzten Probenahmeflaschen entnommen werden, können keine Messfehler entstehen.

Wichtig zur Vermeidung von Fehlinterpretationen der Analysen ist, dass das analysierende Labor vorgängig der Probenamen über den Zweck und das Ziel der chemischen Analysen instruiert wird, damit die Analysen zielgerichtet vorbereitet und durchgeführt werden.

Bei der Probeentnahme sind äussere Einflüsse wie Niederschläge, Tausalze, Düngemittel etc. zu berücksichtigen.

#### **4. Technische Anforderungen**

Abfüllen des Wasser in die vom analysierenden Labor gelieferten Flaschen.

**Immer zu bestimmen** sind die folgenden Eigenschaften:

- Vor Ort bei der Entnahme
  - Temperatur (°C) des Wassers. Wichtig für korrekte Bestimmung des pH-Wertes im Labor (vgl. unten).
  - Aussehen des Wassers (klar oder Sedimenttrübung). Die Trübung kann von natürlichen Trübstoffen oder von Ausschwemmungen, z.B. von Material des Dichtungskerns bei Staudämmen, herrühren.
  - Rostige Absätze bei den Austrittsstellen. Sie können auf Eisengehalt des Wassers hindeuten.
  - Elektrische Leitfähigkeit ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) mit elektronischem Messgerät. Dieses misst meist auch die Temperatur (vgl. oben).
- Im Labor
  - pH-Wert (bei der Entnahmetemperatur des Wassers, vgl. oben),
  - Gesamthärte (°fH) bzw. (mmol/l),
  - Karbonathärte (°fH) bzw. (mmol/l),
  - Calcium (mg/l),
  - Kohlensäuregleichgewicht, freie und überschüssige, kalkaggressive Kohlensäure ( $\text{CO}_2$  mg/l).

**Fallweise zu bestimmende** Parameter sind:

- Im Labor aus dem Wasser
  - Sulfat (mg/l), unter anderem bei Gegenwart sulfathaltiger Gesteine.
  - Magnesium, Natrium, Kalium, Silizium und weitere eventuelle Spurenelemente (mg/l) bei Gegenwart entsprechender Gesteine (Dolomit, kristalline Gesteine wie Granit, Gneise, kristalline Schiefer und Anhaltspunkte für Tiefenwasser (Mineralwasser).
  - Eisen (mg/l). Erforderlich sind Entnahmeflaschen mit Säurezusatz, damit das gelöste Eisen nicht ausflockt, wodurch der Analysenwert verfälscht wird.
  - Kohlenstoff (gesamt, TOC) und Kohlenwasserstoffe, z.B. Methan aus faulendem organischem Schlamm im Staubecken wasserseits der Sperrstelle (mg/l). Entnahme in Spezialflaschen, möglichst unter Luftabschluss, nach spezieller Anweisung.

- Im Labor aus abfiltriertem Sediment (bei Sedi-menttrübung des Wassers)
  - Untersuchung im Speziallabor mittels Röntgen-Diffraktometrie auf Karbonate, Tonerdemineralien, Silikate, Amphibole aus Ausschwemmungen von Injektions- und Dichtungsmaterial (Zement, Tongele, Wasserglas), insbesondere in Spezialfällen bei Staudämmen.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Vor den Probenahmen mit einem geeichten Zweiteilgerät zu vergleichen ist das für die Messung benutzte elektronische Messgerät zur Bestimmung der Temperatur und der elektrischen Leitfähigkeit. Die Funktionskontrollen der Laborgeräte sind Sache des analysierenden Labors.

Bei mehrmaligen und sich über einen längeren Zeitraum erstreckenden Probenahmen sollte sichergestellt sein, dass die festgelegten Entnahmestellen beprobbar bleiben. Wenn Entnahmestellen infolge Versinterung versiegen, sollte versucht werden, diese mittels Spülen und mechanischer oder chemischer (Säuerung) Reinigung wieder für Wasser durchgängig zu machen. Wenn dies nicht möglich ist, muss eine benachbarte, gleichwertige Kontrollstelle bestimmt werden.

#### 6. Redundanz

Eine Redundanz zu den chemischen Wasseranalysen ist nicht erforderlich.

#### 7. Bemerkungen

**Chemische Wasseranalysen** sind angezeigt:

- Bei besonderen Feststellungen
  - Zunahme des Sickerwassers
  - Zunahme der Versinterungen
  - Neue Wasserzutritte
  - Sedimenttrübung von Sickerwasser, welches bisher klar war.
- Bei besonderen Fragestellungen und Vermutungen
  - Leckagen im Injektionsschirm oder Dichtungskern
  - Beton-, Zementaggressivität des Sickerwassers
  - Um- oder Unterfliessen der Sperrstelle durch Seewasser.

Das **Untersuchungsprogramm** soll vom Spezialisten festgelegt werden (Geologe, Talsperreningenieur bzw. -Experte).

Die **Probenahmen** werden durch das Überwachungspersonal gemäss Anweisung des Spezialisten oder durch diesen selbst vorgenommen.

Die **Auswertung der Analysen** erfolgt anhand der im Bericht des chemisch-analytischen Labors niedergelegten Laborresultate durch den Spezialisten.



## Geophysikalische Methoden

### GEOPHYSIKALISCHE METHODEN

Einige Beispiele geophysikalischer Messmethoden sind nachstehend aufgeführt:

- Reflexionsseismik
- Refraktionsseismik
- Geoelektrische Methoden
- Elektromagnetische Methoden
- Georadar
- Mikrogravimetrische Methoden
- Seismische Tomografie
- Ultraschall
- Infrarot- Thermografie
- Diagrafie („logging“)

Das Grundprinzip der **seismischen Methoden** beruht auf der Ausbreitungsgeschwindigkeit von Wellen, welche sich an der Oberfläche, entlang von Grenzflächen verschiedener Bodenschichten oder im Innern eines Felskörpers (Kompressionswellen, Typ P oder Scherwellen Typ S) ausbreiten. Um Informationen über die Struktur eines Körpers zu erhalten, werden die Laufzeit, die Geschwindigkeit und der Weg der Ausbreitung von Wellen analysiert, welche künstlich durch Explosionen oder Vibrationen erzeugt werden. Man unterscheidet dabei zwei Methoden: die Reflexions- und die Refraktionsseismik.

Die **Reflexionsseismik** dient der Erkundung des Untergrundes, in der Regel in einer Tiefe von mehr als 20 m. Jede Erschütterung, welche durch eine Explosion oder einen Vibrator erzeugt wird, erlaubt es, in einer engen Zone vertikal unterhalb der Erschütterung Grenzflächen zu bestimmen, welche die Wellen aufgrund einer abrupten Änderung der physikalischen Boden-kennwerte oberhalb und unterhalb der Grenzfläche (Dichte, Elastizität) reflektieren. Das Prinzip entspricht etwa der Art, wie eine Scheibe eine Luftwelle reflektiert. Seismografen, welche an der Oberfläche aufgestellt sind, empfangen die reflektierten Wellensignale. Nach jeder Messung werden sowohl die Erschütterungsquelle, als auch die Seismografen verstellt. Durch Gegenüberstellung der Messresultate entlang einer geraden Linie, erhält man ein seismisches Tiefenprofil.

Die Methode der **Refraktionsseismik** basiert auf der Erfassung der ersten ankommenden Wellen (P- oder Kompressionswellen). Jede Erschütterung, welche mit einer Explosion oder einem Vibrator erzeugt wird, erlaubt es, Horizonte zu erfassen, welche Felskörper unterschiedlicher Ausbreitungsgeschwindigkeit der seismischen Wellen abgrenzen. Dazu wird ein Zeit-Weg- Diagramm der zuerst eintreffenden Wellen gezeichnet. Die Ausbreitung der Wellen folgt den Gesetzen der Optik, die Refraktionswinkel sind von den Unterschieden der Ausbreitungsgeschwindigkeit in den Bodenschich-

ten abhängig. Die Resultate ergänzen die Resultate der Reflexionsseismik. Die Methode wird meist zur Bestimmung der Felsoberfläche oder untiefer Kluftsysteme angewendet.

Die **geoelektrische Methode** ist dazu geeignet, unterschiedliche Leitfähigkeiten im Untergrund abzugrenzen. Diese wird entweder aufgrund der natürlichen oder aufgrund künstlich erzeugter elektrischer Felder gemessen. Diese Methode wird hauptsächlich zur Bestimmung von wasserführenden Zonen oder des Grundwasserspiegels, wie auch für Durchlässigkeitsmessungen angewendet. Die **elektromagnetischen Methoden** basieren auf der Leitfähigkeit des Bodens und der Verbreitungsart elektromagnetischer Wellen. Mit diesen Methoden werden die Wellen, die Frequenzen und die resultierenden elektromagnetischen Spannungsfelder gemessen.

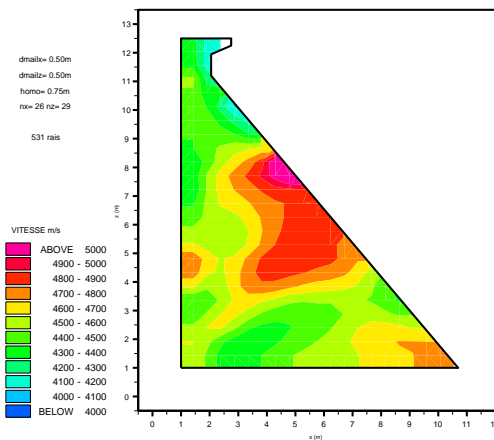
Ein **Georadar** ist ein geophysikalisches respektive -technisches Gerät zur Ermittlung der Ausbreitung und Reflexion elektromagnetischer Wellen in verschiedenen Materialien, insbesondere im Boden. Es stellt ein leichtes und zerstörungsfrei arbeitendes Werkzeug dar. Es erlaubt die rasche und kontinuierliche geologische Untersuchung oberflächennaher Bereiche sowie die generelle Überwachung von Bauwerken. Von der Oberfläche bis in einige Meter Tiefe ist es möglich, Grenzen zwischen verschiedenen Bodenzonen, Hohlräume sowie kleine Objekte, deren Leitfähigkeit sich deutlich von derjenigen des sie umgebenden Materials unterscheiden, zu erkennen. Das Elektroradar erzeugt elektromagnetische Impulswellen zwischen 20 und 2500 MHz Frequenz. Diese breiten sich im Untergrund aus und werden entsprechend den elektrischen Materialeigenschaften gedämpft (Widerstand und dielektrische Konstante), welche ihrerseits von der Porosität, dem Wassergehalt und der Leitfähigkeit des Materials abhängig sind. Das Georadar liefert ein kontinuierliches Echogramm des Innern der untersuchten Struktur. Es wird dadurch möglich, Zonen von porösem, trockenem oder von mineralhaltigem Wasser durchtränktem Beton, aber auch Zonen begünstigter Wasserführung zu erkennen.

Die **Mikrogravimetrischen Methoden** beruhen auf der Bestimmung von Anomalien der Massenverteilung bedingt durch unterschiedliche Materialdichten. Sie erlauben das Erkennen aufgelockerter Zonen, insbesondere aber auch von Hohlräumen.

Die **seismische Tomografie** erlaubt die Ermittlung der Qualität eines Untergrundes oder einer Struktur. Eine Reihe von Energiequellen (Schläge, Explosionen) aktiviert eine Reihe von Empfängern (Beschleunigungsmessgeräte, piezoelektrische Sensoren,...). Zwischen Energiequelle und Empfänger



kann die Ausbreitungszeit ermittelt werden. Daraus bestimmt sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit.



Figur 4.01-1: Tomografischer Vertikalschnitt einer Gewichtsmauer

In einem homogenen Körper sind die Ausbreitungsgeschwindigkeiten überall ähnlich. Eine Zone mit langsamerer oder schnellerer Ausbreitungseigenschaft ergibt eine grössere Änderung der beobachteten Geschwindigkeiten. Mit einem speziellen Algorithmus wird das gemessene Geschwindigkeitsfeld der Wellen im beobachteten Körper ausgewertet. Diese Auswertung erlaubt die Entdeckung von Anomalien

Die **Ultraschall- Methode** erlaubt es, Betonkörper zu untersuchen, die zweiseitig zugänglich sind. Aufgrund der Laufzeit und der Dämpfung zwischen Sender und Empfänger ist es möglich, Fehler im Beton oder Hohlräume zu erkennen. Aussagen zur Elastizität und zum Widerstand können ebenfalls gewonnen werden.

Die **Infrarot- Thermografie** ist eine optische Untersuchungsmethode, welche unterschiedliche Oberflächentemperaturen erkennen lässt. Eine Kamera ermittelt das Energieniveau einer Fläche und vergleicht dies mit dem Energieniveau einer Referenzfläche, welche sich durch unterschiedliche Ausstrahlungen von Infrarotwellen unterscheiden. Die Kamera wandelt die Struktur des einfallenden Infrarotlichts in ein Bild um, welches beispielsweise auf einem Bildschirm in verschiedenen Farben dargestellt werden kann. Aufgrund dieser Ermittlung von Temperaturunterschieden an Oberflächen ist es möglich, Fehlerzonen und feuchte Zonen zu lokalisieren, da die Oberflächentemperatur unter anderem von der thermischen Leitfähigkeit und der Feuchtigkeit des Materials abhängt. Diese Methode eignet sich gut für eine erste Evaluation des Zustandes eines Bauwerks und dessen zeitliche Verfolgung.

**Diagrafien** in Bohrlöchern werden eingesetzt, um hydrogeologische Analysen und Baugrunduntersuchungen durchzuführen. Die gebräuchlichsten Analysen sind insbesondere Messungen der Flüssigkeitszirkulation, der Bohrlochgeometrie und der geomechanischen Felseigenschaften. Schwache Wasserführungen werden durch Anomalien der Durchlässigkeit und/oder der Temperatur ermittelt. Grössere vertikale Strömungen können mit verschiedenartigen Durchflussmessgeräten beobachtet werden. In Verbindung mit Pumpversuchen werden Wasserherkunft und -eintrittsstellen ermittelt. Dichteprüfungen (Qualität von Injektionen) von Felskörpern können mit diesen Methoden ebenfalls durchgeführt werden. Die akustische Sonde („full wave sonic“) kann Ausbreitungsgeschwindigkeiten von S- und P- Wellen entlang einer Bohrung ermitteln. Die Diametersonde (caliper) bringt Bruchzonen zum Vorschein und erlaubt Korrekturen anderer Diagrafien.

**Bemerkungen**

Weil dazu Spezialgeräte verwendet werden müssen, ist die Anwendung der oben erwähnten Methoden Aufgabe von erfahrenen Spezialisten.

## Kamerainspektion

### UNTERWASSERROBOTKAMERA

#### 1. Messeinrichtung

Eine Unterwasserrobotkamera wird eingesetzt, um den Zustand von wasserseitigen Talsperrenoberflächen (bezüglich Fugen oder Rissen), von Verbindungen Beton-Fels oder von Einlaufbauwerken (Rechen, Schützentafeln) zu kontrollieren, aber auch zur Beobachtung von Sedimentablagerungen, wenn der See voll gefüllt bleibt oder nur teilweise abgesenkt wird.

Die Durchführung dieser indirekten Zustandsinspektion erfolgt mit einer Unterwasserrobotkamera,

die von der Oberfläche aus mit Hilfe von Monitoren von Hand gesteuert wird. Die Kamera befindet sich in einem wasserdichten Gerät, das mit steuerbaren Antriebsmotoren versehen ist. Die Kamera kann im Gerät fix montiert oder schwenkbar angeordnet sein.

Die Zustandsbeurteilung und Visionierung von Schäden kann mittels Beobachtung in Echtzeit, der Herstellung von Fotos oder eines Videofilms erfolgen.



Figur 4.02-1: Vorder- und Hinterseite einer Unterwasserrobotkamera

#### 2. Beurteilung

Die gesamte Ausrüstung benötigt relativ wenig Platz und kann verhältnismässig leicht an fast jeden Ort hin transportiert werden.

Die Unterwasserrobotkamera ist gut manövrierbar. Einsatz Tiefen von bis zu 300 – 400 m können erreicht werden.

Die Unterwasserinspektion hat den Vorteil, dass sie fast ohne betriebliche Einschränkungen bei der Wassernutzung auskommt.

Zu beachten ist, dass aufgrund der Wasserqualität die Sichtweite erheblich beeinträchtigt sein kann.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Die Bildqualität wird stark von den Sichtbedingungen beeinflusst (Wassertrübung).

Die Lage der Kamera in Bezug auf die Talsperre ist nicht leicht zu bestimmen, sofern die Inspektion nicht einem vorbestimmten Weg folgt (zum Beispiel längs einer Vertikalfuge).

Die Tiefenlage der Kamera ist gut bestimmbar.

Wenn man nicht über Merkzeichen (Skala) verfügt, ist das Ausmass von beobachteten Schäden schwierig abzuschätzen.

#### 4. Technische Anforderungen

Vor der Inangriffnahme einer Inspektionskampagne sollten die Sichtbedingungen im Wasser überprüft werden.

Die Lage der zu kontrollierenden Stellen ist vor der Kampagne festzulegen und ihr Eintrag auf einem Plan ist unbedingt vorzunehmen.

Die Unterwasserinspektion ist von einem mit der Talsperrenüberwachung vertrauten Spezialisten zu begleiten.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Die gesamte Ausrüstung wird von den die Inspektion durchführenden Spezialfirmen mitgebracht und von diesen auch selbst unterhalten.

#### 6. Redundanz

Mit Tauchern, was jedoch gewisse Grenzen bezüglich Einsattiefen und Einsatzdauer hat.

Inspektion von einem an einem Kran hängenden Korb aus für die über dem Wasserspiegel befindliche Maueroberfläche insbesondere bei vollständiger Entleerung des Sees.

#### 7. Bemerkungen



## Kamerainspektion

### BOHRLOCHKAMERA

#### 1. Messeinrichtung

Eine Bohrlochkamera wird eingesetzt, um den Zustand von Bohrungen für Schwimmlote, Piezometer, Drainagen etc. bezüglich Rissen, Verkrustungen, Einbeulungen, Fremdkörper und dergleichen zu kontrollieren, aber auch zur Erkundung des Untergrundes in offenen Bohrlöchern (Gesteinsart, Klüftung, Klüftöffnungen, Schichtungen etc.).



Figur 4.03-1: Bohrlochkamera mit 42 mm Durchmesser

Durch Kombination mit einem optischen Modul sind auch Aussagen über Grundwasserströmungen (Richtung und Geschwindigkeit) möglich.

Die Durchführung dieser indirekten Zustandsinspektion erfolgt mit einer Bohrlochkamera, die mit Hilfe von Monitoren von Hand gesteuert wird. Zum Einsatz kommt eine Farbvideokamera mit Schwenkobjektiv für Vertikal- und Horizontalansicht.

Die Zustandsbeurteilung und Visionierung von Schäden kann mittels Beobachtung in Echtzeit, der Herstellung von Fotos oder eines Videofilms erfolgen.

Oft ist auch die Einblendung von Zusatzinformationen (Name der Bohrung, Tiefe, Erklärungen und Ton) möglich

#### 2. Beurteilung

Die gesamte Ausrüstung benötigt wenig Platz und kann leicht an fast jeden Ort hin transportiert werden.

Die Bohrlochkamera ist gut manövrierbar. Es können Kameras von nur 70 mm Durchmesser eingesetzt werden.

Einsatztiefen von bis zu 500 m können erreicht werden.

Zu beachten ist, dass aufgrund der Wasserqualität die Sicht erheblich beeinträchtigt sein kann.

#### 3. Mögliche Störungen und Messfehler

Die Bildqualität wird stark von den Sichtbedingungen beeinflusst (Wassertrübung).

Das Lichtraumprofil in der Bohrung kann durch Verkrustungen oder Einbeulungen stark verkleinert werden, so dass für die Kamera nicht mehr genügend Platz vorhanden ist.

#### 4. Technische Anforderungen

Vor der Inangriffnahme einer Inspektionskampagne sollten die Sichtbedingungen im Wasser und die Raumverhältnisse überprüft werden.

Die Bohrlochinspektion ist von einem mit der Talsperrüberwachung vertrauten Spezialisten zu begleiten.

#### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Die gesamte Ausrüstung wird von den die Inspektion durchführenden Spezialfirmen mitgebracht und von diesen auch selbst unterhalten.

#### 6. Redundanz

Vergleiche mit Bohrkernen.

#### 7. Bemerkungen

Drainageleitungen können mit selbstfahrenden Kamerarobotern kontrolliert werden.

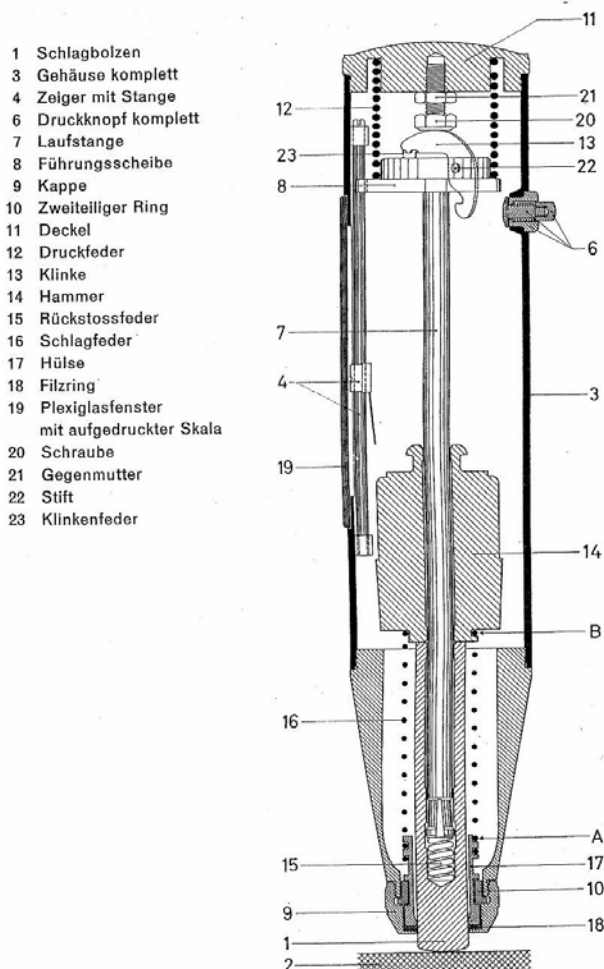
**SCHMIDT-HAMMER**

**1. Messeinrichtung**

Der Schmidthammer (Betonprüfhammer) dient zur zerstörungsfreien Prüfung der Betonqualität. Ein Schlagbolzen wird senkrecht gegen die zu prüfende Fläche gedrückt, wodurch ein Schlaggewicht durch Federkraft auf den Bolzen schlägt. Nach dem Aufschlag prallt das Gewicht zurück und der Rückprall wird auf einer Skala angegeben. Über Eichkurven wird daraus auf die Betonfestigkeit geschlossen.

**2. Beurteilung**

Sehr robuste Methode, mit der man schnell eine grössere Anzahl Messwerte erhält. Über eine statistische Auswertung kann dann auf die Genauigkeit der Resultate geschlossen werden. Es gibt Geräte, welche die Messungen direkt elektronisch aufzeichnen und auswerten.



Figur 4.04-1: Querschnitt durch einen Schmidt-Hammer



Figur 4.04-2: Anwendung des Schmidt-Hammers auf einer Staumaueroberfläche

Neben der Druckfestigkeit kann auch auf die Gleichmässigkeit der Betonqualität geschlossen werden.

**3. Mögliche Störungen und Messfehler**

Instrument unbedingt vertikal zur Prüffläche halten oder bei der Auswertung die Schlagrichtung berücksichtigen. Auch die Richtung des Hammers gegenüber der Horizontalen muss für die Auswertung berücksichtigt werden. Die Oberfläche von altem Beton vor Versuch reinigen (Schleifstein). Grosse Zuschlagkörner etc. können die Messung beeinflussen. Aus mindestens 10 Messwerten soll jeweils ein Mittelwert bestimmt werden. Eliminierung der Extremwerte vor Mittelwertbildung. Bei Würfeldruckfestigkeiten von weniger als 25 MPa nimmt die Genauigkeit stark ab. Der Rückprall hängt auch von der Art der Zuschlagstoffe ab.

**4. Technische Anforderungen**

Es sind die schweren Modelle die für Beton oder Massenbeton bestimmt sind zu verwenden (es existieren leichtere Geräte für Backstein, Kunststein oder Verputze). Die Eichkurven gehören immer zum Instrument.

### 5. Funktionskontrollen und Unterhalt

Periodische Reinigung und Ölen des Bolzens.  
Die Kontrolle des Instruments sollte regelmässig auf einem Prüfaboss durchgeführt werden.  
Die Eichkurven können auch mittels Probekörpern verifiziert werden, von welchen im Labor die Druckfestigkeit bestimmt wird.

### 6. Redundanz

Genauigkeit und Streuung der Werte ergibt sich aus der statistischen Auswertung. Kontrolle mit Prüfkörpern (Bohrkernen) aus dem Bauwerk, die im Labor getestet werden.

### 7. Bemerkungen

Mit dem Gerät können auch die Festigkeiten von Steinverkleidungen oder von Fels bestimmt werden.

## Betoneigenschaften

### LABORVERSUCHE

#### 1. Allgemein

Der Staumauerbeton unterscheidet sich vom Konstruktionsbeton durch das wesentlich grössere Maximalkorn, welches durch die beträchtlichen Einbauvolumen bei Betontalsperren bedingt ist. Dies muss bei der Ausarbeitung von Versuchsprogrammen berücksichtigt werden. Zu beachten ist, dass die Betonversuche bereits im Vorprojektstadium begonnen werden und während dem Bau bis zur Fertigstellung der Staumauer weiter geführt werden. Auch während der Betriebsphase werden Betonkontrollversuche an der im Betrieb stehenden Staumauer ausgeführt, um die Entwicklung der Betoneigenschaften zu bestimmen, eine Unsicherheit abzuklären oder ein Problem des Verhaltens der Staumauer zu erklären.

#### 2. Versuche

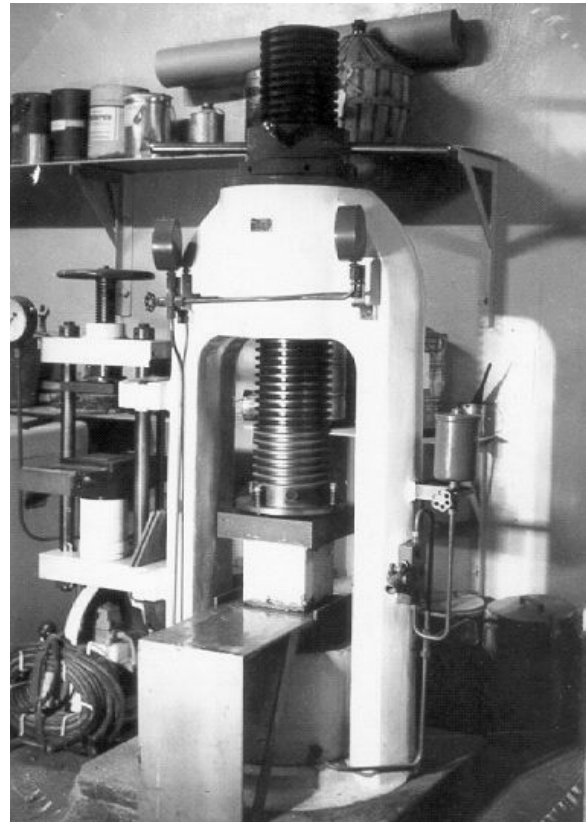
- Druckfestigkeitsversuch
- Zugfestigkeit mit Spaltzugversuch oder direktem Zugversuch
- Raumgewichtsbestimmung
- Messung des Elastizitätsmoduls
- Messung der thermischen Ausdehnung
- Frostbeständigkeitsversuch
- Durchlässigkeitsversuch
- Beurteilung der Zuschlagstoffe hinsichtlich Alkali-Aggregat-Reaktion
- Alkali-Aggregat-Reaktion – Betonversuche
- Kriechversuch

#### 3. Beurteilung

Wegen der erheblichen Grösse des Maximalkorns von Staumauerbeton bildet die Herstellung von Proben angemessener Grösse ein Problem. Die Versuchsergebnisse sind sehr empfindlich bezüglich dieser Dimensionen.

Die Massstabeffekte werden im Allgemeinen durch die Randbedingungen beeinflusst. Das repräsentative Volumenelement ist definiert als dasjenige, bei welchem die Dimensionen das Versuchsergebnis nicht mehr beeinflussen. Man nimmt an, dass das repräsentative Volumenelement bei Probengrössen, die das fünf- bis zehnfache des Grösstkorndurchmessers aufweisen, erreicht wird. Bei den Resultaten von herkömmlichen Laborproben stellt man stets eine mehr oder weniger grosse Streuung fest. Dies bedeutet, dass diese Proben das repräsentative Volumen nicht erreicht haben. Im Allgemeinen muss man sich aber mit Probengrössen zufrieden geben, deren Abmessungen das Zweifache bis Dreifache der maximalen Korngrösse betragen. Solche Betonversuche werden mit aus der Staumauer entnommenen Bohrkernen ausgeführt. Dabei werden Bohrkern mit Probendurchmesser von möglichst 300 mm verwendet,

damit die Vergleichbarkeit zu den während des Baus hergestellten Proben erhalten bleibt. Betonkontrollversuche bei im Betrieb stehenden Staumauern werden oft mit Proben durchgeführt, die aus Bohrungen für den Einbau von Messinstrumenten entnommen wurden. Der Bohrungsdurchmesser wird dabei den Umständen und den Untersuchungen angepasst.



Figur 4.05-1: Druckversuch an Betonwürfeln im Baustellenlabor

Bei einzelnen Staumauern wurden Prismen und Würfel herausgeschnitten für Biegezugversuche, Frostversuche und Durchlässigkeitsversuche. (Die Proben wurden erst mit dem Abbauhammer herausgebrochen und anschliessend zurechtgesägt.)

Bei der Aufstellung eines Untersuchungsprogramms ist mit einer genügend grossen Probenzahl der Streuung der Resultate Rechnung zu tragen.

Bei Staumauern mit bedeutenden und sich weiter entwickelnden bleibenden Deformationen sind Kriechversuche unerlässlich. Dies sind lange anhaltende Versuche.

#### 4. Auswertung der Resultate

Die Auswertung der Versuchsergebnisse ist stets heikel. Man darf nicht ausser Acht lassen, dass ein



Versuch keinen absolute gültigen Wert ergibt. In allen Fällen stellt er lediglich ein beschränktes Abbild der Wirklichkeit dar, welche der Ingenieur in Beziehung zum Bauwerk und zu den vorhandenen Kenntnissen bringen muss.

Weil die Versuchsergebnisse Streuungen unterworfen sind und von Probe zu Probe variieren, sind sie statistisch auszuwerten.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse ist unter Berücksichtigung bekannter Versuchsergebnisse bei anderen Staumauern vom gleichen Typ vorzunehmen.

#### Literatur

- Schweizerisches Talsperrenkomitee 2000; Le béton des barrages suisses: expériences et synthèse - Concrete of Swiss Dams: Experiences and Synthesis; wasser, energie, luft - eau, énergie, air; 92. Jahrgang, Heft 7/8, pp. 205-233, Baden.
- Schweizerisches Talsperrenkomitee, 2001; Le béton des barrages suisses; Arbeitsgruppe Talsperrenbeton; 140 p.



## **Ankerkontrolle**

### **ANKERKRAFTMESSDOSE**

#### **1. Messeinrichtung**

Ankerkraftmessdosen werden zur laufenden Überwachung und Langzeitbeobachtung der am Ankerkopf von Stab- und Litzenankern wirkenden Kräfte eingesetzt. Zum Einsatz kommen elektrische und hydraulische Systeme. Der ringförmige Kraftmessgeber wird zwischen einer Lastverteilungsplatte und einer Auflagerplatte angeordnet, die für eine gleichförmige Belastung des Messgebers sorgen müssen. Bei Litzenankern werden die Messgeber gewöhnlich direkt zwischen Ankerplatte und Ankerkopf, d.h. ohne Ausgleichsplatte angeordnet. Neben ringförmigen Messgebern gibt es auch hufeisenförmige, die man jederzeit einfach auswechseln kann und zwar auch bei Litzenankern.

Beim elektrischen System besteht der Kraftmessgeber aus einem gehärteten Stahlzylinder, auf dessen Aussenseite die Deformationen mittels Dehnmessstreifen oder mittels schwingender Saite in ein elektrisches Signal umgewandelt werden, so dass im Anzeigergerät die Kraft abgelesen werden kann.

Beim hydraulischen System befindet sich zwischen zwei Ringscheiben eine mit Hydraulikflüssigkeit gefüllte Kammer, deren Innendruck gemessen werden kann.

#### **2. Beurteilung**

Die Ankerkraftmesssysteme sind robust und haben sich in der Praxis bewährt.

Die hydraulischen Systeme, welche mit einem Manometer ausgerüstet sind, erlauben die Ableseung der Ankerkraft direkt vor Ort. Die hydraulischen Systeme haben auch eine geringe Temperaturempfindlichkeit. Für die elektrische Fernübertragung der Messwerte ist jedoch eine Umsetzung von hydraulischem Druck in ein elektrisches Signal erforderlich. Andererseits kann auch direkt hydraulisch fern gemessen werden.

Bei den elektrischen Systemen ist die direkte Fernmessung möglich.

#### **3. Mögliche Störungen und Messfehler**

Die Auflageflächen zwischen Kraftmessdose und Ankerplatten müssen eben sein und senkrecht zur Achse des Ankers stehen. Exzentrizitäten verfälschen die Messergebnisse bei den elektrischen Systemen (die hydraulischen Systeme sind unempfindlich auf exzentrische Belastungen).

Fehlende Wasserdichtigkeit der Messdose führt zu Messwertstörungen.

#### **4. Technische Anforderungen**

Die elektrischen Systeme müssen eine Temperaturkompensation aufweisen im Temperaturbereich zwischen  $-30^{\circ}\text{C}$  und  $+50^{\circ}\text{C}$ .

Die Kraftmessdose muss wasserdicht und mechanisch robust sein.

Die Dauerlast sollte geringer als die Nennlast der Kraftmessdose sein.

Die Signalkabel müssen abgeschirmt (blitzgeschützt) sein.

#### **5. Funktionskontrollen und Unterhalt**

Periodisch, d.h. in grösseren zeitlichen Abständen, ist die Ankerkraft durch eine einfache Spannprobe nachzuprüfen. Dies ist nur möglich, wenn der Anker mit einem entsprechenden Gewinde ausgerüstet ist. Ringförmige Messdosen können, mindestens bei Litzenankern, nicht ausgebaut und im Werk geprüft werden, ohne den Anker zu entspannen, wodurch die Litzen im Bohrloch verschwinden würden. Bei Stabankern ist es aber bei entsprechender Verlängerung der Ankerstange möglich.

Die Kraftmessdose ist periodisch im Werk zu prüfen.

Bei hydraulischen Systemen sind die Manometer periodisch zu prüfen.

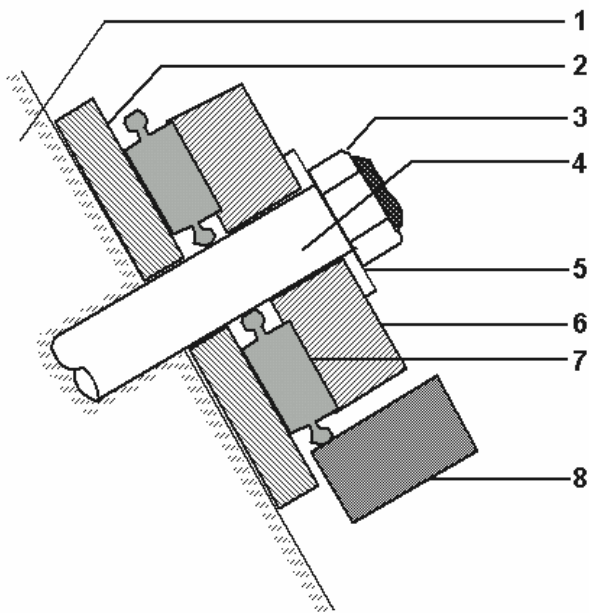
#### **6. Redundanz**

Durch Vergleich mit den Ankerkräften von nebenliegenden Kontrollankern.

#### **7. Bemerkungen**

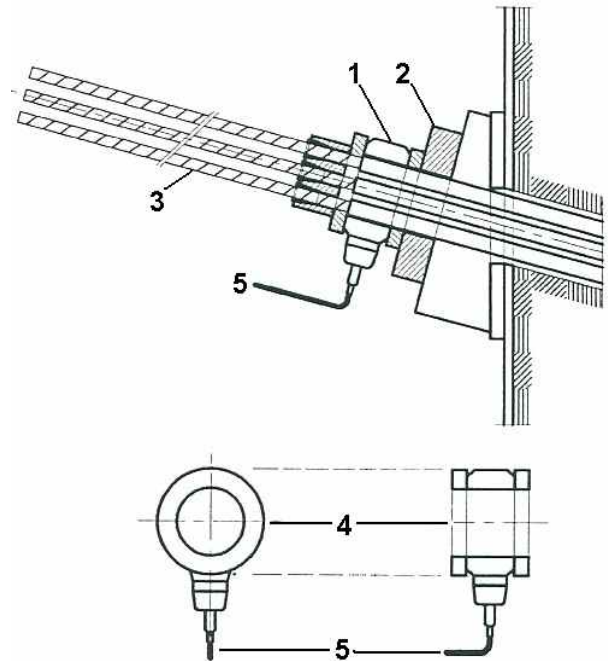
Zusätzlich zur Ankerkraftmessung wird meist noch eine elektrische Widerstandsmessung zwischen Stahlzugglied und Baugrund eingerichtet, welche zur Kontrolle des Korrosionsschutzes des Ankers dient. Diese Widerstandsmessung ist in feuchtnasser Umgebung störungsanfällig.





Figur 5.01-1: Ankerkraftmessdose hydraulisch, Typ Glötzl

- 1 Bauwerk
- 2 Auflagerplatte (Ankerplatte)
- 3 Spannmutter
- 4 Anker
- 5 Unterlage für Spannmutter
- 6 Ausgleichplatte
- 7 Ankerkraftmessgeber
- 8 Anzeigemanometer



Figur 5.01-2: Messankerkopf AVT Typ M

- 1 Kraftmessdose
- 2 Ankerplatte
- 3 Ankerlitzen
- 4 Kraftmessdose (Schnitte)
- 5 Kabel zu Messgerät