

**Schweizerisches Talsperrenkomitee**  
**Comité suisse des barrages**  
**Comitato svizzero delle dighe**  
**Swiss Committee on Dams**



# **MESSANLAGEN ZUR TALSPERRENÜBERWACHUNG**

Konzept, Zuverlässigkeit und Redundanz

**Arbeitsgruppe Talsperrenbeobachtung**

März 2005

## **INHALT**

Teil 1 Messkonzept

Teil 2 Messanlagen und Messmethoden

Teil 3 Kommentarblätter



Figur 1: Stauanlage Hongrin

## VORWORT

1987 publizierte die Arbeitsgruppe Talsperrenüberwachung einen umfassenden Bericht unter dem Titel «Messanlagen: Konzept, Zuverlässigkeit und Redundanz», der aus einer intensiven Arbeit einer Untergruppe resultierte. Es war die Absicht der Arbeitsgruppe das Konzept und die Praxis für die Ausgestaltung von Messanlagen zur Verhaltensüberwachung von Talsperren darzustellen. Der Bericht behandelte die wichtigsten Messmethoden und die in der Schweiz am meisten verwendeten Instrumente wobei für jedes Instrument ein Kommentarblatt erstellt wurde. Man beschränkte sich dabei auf die Erfahrungen mit den in der Schweiz gebräuchlichen Instrumenten und Messmethoden.

Seit dem Erscheinen dieser Publikation hat sich die Messtechnik weiterentwickelt. Daher hat man sich entschlossen, die Publikation zu aktualisieren und zu ergänzen, wobei die Präsentation in drei Teilen beibehalten wurde.

An der Ausarbeitung des vorliegenden Berichts wirkten mit:

*Marcel Lutz*

Nordostschweizerische Kraftwerke AG, 5401 Baden

*Rudolf W. Müller*

Bundesamt für Wasser und Geologie, 2501 Biel

*Henri Pougatsch*

Bundesamt für Wasser und Geologie, 2501 Biel

*Karl M. Steiger*

Colenco Power Engineering AG, 5405 Baden

*Ruedi Straubhaar*

Electrowatt-Ekono AG, 8037 Zürich.

Für die Bearbeitung von spezifischen Themen wurden folgende Spezialisten hinzu gezogen:

Geodäsie:

*Kurt Egger*, Vermessungsspezialist, 7007 Chur

*Felix Walser*, Schneider Ingenieure AG, 7007 Chur

Geologie:

*Dr. Max Kobel*, Geologe, 8832 Wilen

Glasfasertechnik:

*Dr. Daniele Inaudi*, Smartec SA, 6928 Manno

Geophysikalische Methoden:

*Dr. Hans Rudolf Keusen*, Geotest AG, 3052 Zollikofen.

**TEIL 1 MESSKONZEPT**

**Die Messanlage**

**Die Aufgaben der Messanlage**

Die Messanlage zur Überwachung einer Talsperre ist ein sorgfältig geplantes System zur Messung repräsentativer Parameter, damit das Verhalten der Talsperre und ihrer Foundation unter Berücksichtigung der einwirkenden Beanspruchungen beurteilt werden kann. Die Messungen sind während dem Bau und dem Ersteinbau sowie der gesamten Betriebsdauer durchzuführen, um ein allfällig anomales Verhalten frühzeitig erkennen zu können. Die Auswertung der Messergebnisse ermöglicht die Erfassung des Kurz- und des Langzeitverhaltens. Daraus können auch Erkenntnisse für die Weiterentwicklung des Talsperreningenieurwesens gewonnen werden.

Die Überwachung soll auch Auskunft geben über die Umgebungseinflüsse, wie die meteorologischen und hydrologischen Bedingungen, sowie über die Stabilität der Ufer und die Risiken von Lawinen und Gletscherabbrüchen.

**Generelles Konzept der Überwachung**

Der Umfang einer Messanlage, die für die Verhaltensüberwachung erforderlich ist, richtet sich nicht nach fixen Vorgaben. Die Ausgestaltung der Messanlage hängt vielmehr ab vom Talsperrentyp, seinen Dimensionen, der Bauart, dem Alter der Sperre sowie von örtlichen Randbedingungen, insbesondere der Foundation.

Die Messanlage muss so geplant sein, dass sowohl die auf die Talsperre wirkenden Kräfte (Ursachen) als auch die verschiedenen Parameter, welche das Verhalten einer Stauanlage charakterisieren (Reaktionen), gemessen werden können. Die direkten Lasten und die äusseren Einflüsse führen einerseits zu Verformungen sowie insbesondere im Körper von Betontalsperren zu Temperaturvariationen und andererseits zu Drücken (Auftrieb, Porenwasserdrücken) sowie zu Infiltrationen (Durchsickerungen). Tabelle 1 zeigt die wichtigsten Grössen, welche für Staumauern, Staudämme und deren Foundation zu erheben sind.

Staumauer	Staudamm	Foundation
Verformung des Bauwerkskörpers	Verformung des Dammkörpers	Verformungen und Verschiebungen Verschiebungen der Widerlager
Spezielle Bewegungen (Risse, Fugen)	Spezielle Bewegungen (Kontaktbereiche zu Betonbaukörpern)	Spezielle Bewegungen (Risse, Klüfte)
Temperatur im Innern des Bauwerks	eventuell Temperatur im Innern des Dammkörpers, um Durchsickerungen festzustellen	eventuell Temperatur in der Foundation, um Durchsickerungen festzustellen
Auftrieb (an der Kontaktfläche zwischen Beton und Foundation sowie im Fels)	Porenwasserdrücken im Innern des Dammkörpers Sickerlinie	Porenwasserdrücken Auftrieb an der Kontaktfläche zwischen Beton und Foundation Sickerlinie / Grundwasserspiegel
Sicker- und Drainagewassermengen	Sicker- und Drainagewassermengen	Sicker- und Drainagewassermengen Abflüsse von Quellen
Chemische Zusammensetzung des durchgesickerten Wassers Trübung (eventuell)	Chemische Zusammensetzung des durchgesickerten Wassers Trübung	Chemische Zusammensetzung des durchgesickerten Wassers Trübung

Tabelle 1: Messgrössen für die Beobachtung von Talsperren und ihrer Foundation.

Die Messanlage ist auf die Besonderheiten und die Bedeutung der Sperre abzustimmen. Es ist zu beachten, dass die Sperre und ihre Foundation eine Einheit bilden. Dabei soll jedoch die Messanlage eine klare Unterscheidung zwischen dem Verhalten der Sperre, demjenigen der Foundation und demje-

nigen der Umgebung erlauben. Die Messanlage ist kein starres System. Es ist deshalb nötig, regelmässig zu überprüfen, ob sie den Anforderungen und den Bedürfnissen immer noch gerecht wird.



Die Messanlage ist möglichst breit abzustützen, um im Falle einer Anomalie alle notwendigen Grundlagen zur Abklärung der Ursachen des beobachteten Phänomens zur Verfügung zu haben. Gegebenenfalls wird dann auch die Installation zusätzlicher Instrumente notwendig.

Das Verhalten einer Talsperre wird anhand der Auswertung der Messergebnisse beurteilt. Das Erfassen der Messdaten obliegt in der Regel dem Betreiber. Die Auswertung betrifft auf verschiedenen Ebenen alle Beteiligten (Betreiber, erfahrener Ingenieur, ausgewiesene Experten, Aufsichtsbehörde). Der Betreiber ist für die Plausibilitätskontrolle der gemessenen Werte und deren Validierung zuständig. Die erfahrene Fachperson überprüft die Validierung der erhobenen Messwerte und bestätigt sie, wenn sich die Talsperre entsprechend verhält. Diese Vorgehensweise hat zum Ziel, eine Verhaltensanomalie der Stauanlage möglichst früh festzustellen. Dazu sind die Auswertungen unmittelbar nach den Messungen vorzunehmen.



Figur 2: Visuelle Kontrollen

### Eigenschaften der Messinstrumente

Die Wahl der Messinstrumente hängt von den zu beobachtenden Grössen, von der Bauweise der Anlage und den Installationsmöglichkeiten ab. Zudem muss der zu erwartende Messbereich berücksichtigt werden. Bei Instrumenten mit höherer Ablesegenauigkeit als erforderlich ist es nicht immer sinnvoll, die grösstmögliche Anzahl Stellen nach dem Komma zu berücksichtigen, sondern es ist auf die realen Möglichkeiten der Auswertung und Beurteilung abzustellen. Es muss auch auf eine korrekte Installation geachtet werden, damit aussagekräftige Messresultate erhalten werden, die

eine entsprechende Auswertung erlauben. Vorzugsweise sind Instrumente zu wählen, welche folgenden Anforderungen genügen:

- einfache Konstruktion und Handhabung,
- Widerstandsfähigkeit,
- Unempfindlichkeit gegenüber äusseren Einwirkungen (wie Temperatur, Feuchtigkeit, Überspannung),
- Dauerhaftigkeit (Langlebigkeit ist vor allem für Messgeräte erforderlich, welche direkt in den Bauwerkskörper eingebaut werden),
- ausreichende Präzision und Zuverlässigkeit,
- einfache Ablesemöglichkeit.

Sofern sie nicht im Bauwerkskörper unzugänglich eingebaut sind, müssen die Messgeräte ersetzbar sein, wobei die Kontinuität der Messungen gewährleistet sein soll. Um Ausfällen oder dem Versagen von Messgeräten vorzubeugen, sind redundante Messungen einzelner Parameter vorzusehen. Unter Redundanz versteht man, neben der Verdoppelung von Messeinrichtungen, die Möglichkeit einen Messwert mit Hilfe anderer Messeinrichtungen überprüfen oder rekonstruieren zu können (wie Lot-Polygonzug, Setzpegel-Nivellament).

### Äussere Belastungen

Die äusseren Belastungen (im Wesentlichen der Wasserdruck) wirken direkt auf die Talsperre. Die klimatischen Verhältnisse (Umgebungstemperatur) widerspiegeln weitere äussere Einflüsse auf das Bauwerk.

Der Wasserdruck ist ein wichtiger Lastfall und die Schwankungen des Wasserspiegels müssen erhoben und registriert werden, auch wenn das Becken die meiste Zeit leer bleibt (wie beispielsweise im Falle eines Hochwasserrückhaltebeckens). Der Messbereich für den Seestand muss über das Niveau des Hochwasserüberfalls bzw. der Oberkante von Überlaufschützen oder sogar der Talsperrenkrone hinaus gehen, damit auch extreme Wasserspiegellagen bei Hochwasser verfolgt werden können. Die Wassertemperatur gehört ebenfalls zu den Belastungsgrössen.

Erfolgt eine bedeutende Sedimentation mit Veränderung der Belastung und merklicher Verringerung des Nutzinhaltes oder drohender Verstopfung der Ablassorgane, ist ihr Ablagerungsniveau regelmässig zu erheben. Dazu können bathymetrische Aufnahmen durchgeführt werden, deren Häufigkeit von der Sedimentationsrate abhängig ist.

Die klimatischen Verhältnisse (Lufttemperatur, Regen und Schnee) sind ebenfalls wichtige Grössen. Die Lufttemperatur hat einen wesentlichen Einfluss auf die Verformungen einer Staumauer.

Der Temperaturverlauf im Talsperrenkörper wird mit Thermometern, die beim Bau in den Massenbeton verlegt werden, gemessen. Die Thermometer befinden sich dabei auf verschiedenen Höhenlagen und sind zwischen Wasser- und Luftseite über die Mauerstärke verteilt. Diejenigen, welche sich in der Nähe der Mauerflächen befinden, werden durch die äusseren Bedingungen stark beeinflusst (Wasser- bzw. Lufttemperatur). In Bohrlöcher versetzte Temperatursonden können zugänglich und ersetzbar ausgebildet werden, wobei sie gegen äussere Einflüsse thermisch zu isolieren sind.

Mit der Messung der Lufttemperatur wird festgehalten, ob der Niederschlag in Form von Schnee oder Regen gefallen oder vorhandener Schnee einem Schmelzprozess unterworfen ist. Niederschläge und Schneeschmelze üben manchmal einen direkten Einfluss auf die Infiltration durch Untergrund oder Dammschüttung aus.

In speziellen Fällen werden die Erdbebenverhältnisse der Talsperre und ihrer Umgebung aufgezeichnet.

**Verformungen**

**Überwachung der Verformungen von Staumauern**

Das Ziel der Verformungsmessung besteht in der Erhebung von horizontalen und vertikalen Deformationen des Bauwerks. Entsprechend der konstruktiven Ausbildung der Staumauer (mit oder ohne Kontrollgänge und Schächte) werden die Messpunkte auf verschiedenen Höhenlagen im Innern oder auf der Luftseite der Mauer längs horizontalen und vertikalen Linien angebracht. Wenn möglich, sind die Messlinien seitlich in den Fels hinein zu verlängern, um die Verschiebungen im Bereich der Fundation zu bestimmen. Mit diesem Netz von Messlinien können horizontale und vertikale Biegelinien der Talsperre ermittelt werden. Für kleinere Bauwerke, sollten zumindest Verformungsmessungen der Mauerkrone vorgesehen werden.

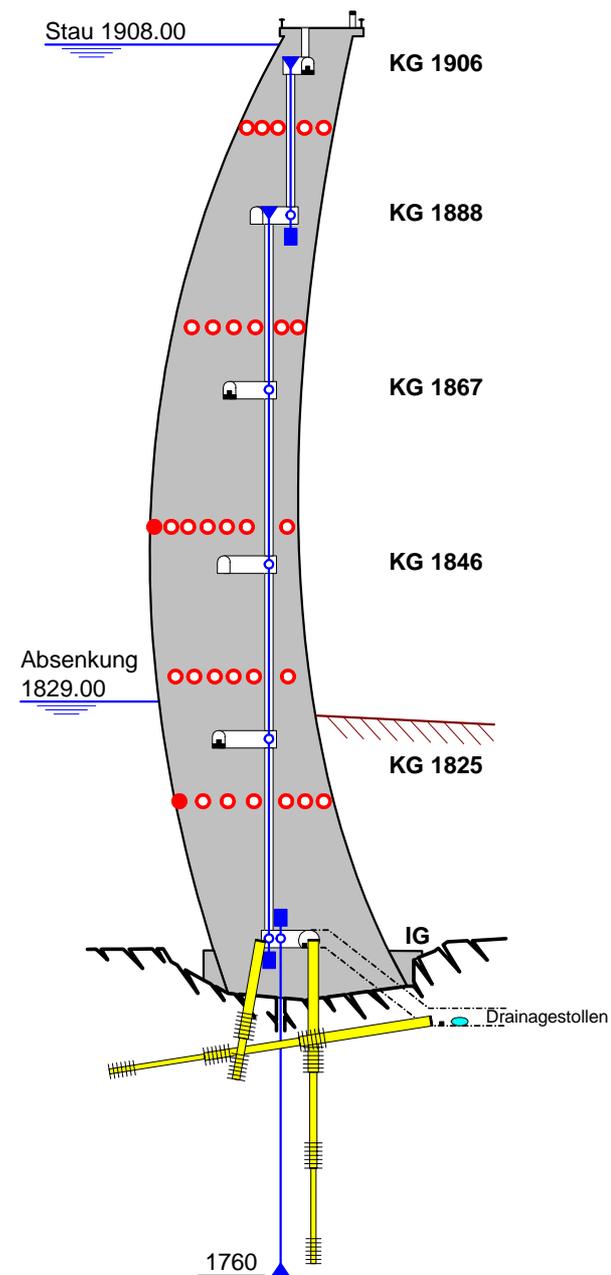
Die radialen und tangentialen Verformungen in der Horizontalebene können mit Gewichts- und Schwimmloten entlang vertikaler Linien oder durch Polygonzüge entlang horizontaler Linien gemessen werden. Schwimmlote mit selbstzentrierendem Gleitanker im Bohrloch erlauben die Verformungsmessung in verschiedenen Tiefen. Solche Verfahren können vor allem bei Nachrüstungen für Staumauern ohne Kontrollgänge eingesetzt werden. Winkel- und Distanzmessungen (Vektormessung) zu Messpunkten auf der Maueroberfläche sowie optische Alignements sind einfache geodätische Verformungsmessmethoden für kleinere Staumauern. Horizontale Verformungen können auch mit

Drahtalignementen, die in horizontalen, geradlinigen Kontrollgängen oder Brüstungsmauern installiert werden, gemessen werden.

Mit dem Nivellement werden vertikale Bewegungen (Setzungen oder Hebungen) gemessen.

Die Messung lokaler Verformungen, beispielsweise im oberen Teil einer Staumauer, kann mit Extensometern erfolgen.

Die Messung von Neigungsänderungen gestattet die Konstruktion einer Biegelinie, die mit derjenigen aus den Lotmessungen verglichen werden kann.



Figur 3: Typischer Querschnitt einer Bogenmauer

Es gibt keine Staumauer ohne Risse. Oft reichen eine visuelle Erhebung der Risse und deren Eintrag auf einen Plan aus.

Die Bewegung struktureller Risse sollte jedoch verfolgt werden. Geeignete Messinstrumente dazu sind beispielsweise Mikrometer, Dilatometer, Deformometer oder solche Messanschläge, welche lediglich die grösste Öffnung eines Risses angeben. Lediglich Siegel über dem Riss bedeuten keine optimale Lösung, weil einmal gerissen, keine weiteren Feststellungen mehr möglich sind.

**Überwachung der Verformungen von Staudämmen**

Die Ermittlung des Verformungsverhaltens von Staudämmen erfolgt durch die Messung von Setzungen (Vertikaldeformationen) und Horizontalverschiebungen von Punkten auf der Krone und - wenn möglich - in verschiedener Höhenlage auf den Böschungen sowie speziell der Setzungen von Punkten der Foundation. Im Allgemeinen werden die Verschiebungen der Punkte durch geodätische Messungen, wie Winkel- und Distanzmessung, Alignemente und Polygonzüge bestimmt. Vertikale Bewegungen (Setzungen oder Hebungen) können mit Hilfe von Nivellementen, Setzpegeln und Schlauchwaagen (hydraulische Setzpegel) gemessen werden.

**Überwachung der Verformungen in der Foundation**

Mit Extensometern können Verformungen in vertikaler, horizontaler oder geneigter Richtung gemessen werden. Die für die Installation der Instrumente zu wählende Richtung ist von der Geologie und, vor allem bei Bogenmauern, von der Richtung des Krafftflusses abhängig. Die Verformung der Foundation kann am besten erfasst werden, wenn die Extensometer mindestens zwei oder sogar drei Richtungen und verschiedene Tiefenlagen aufweisen. In eine Bohrung können bis zu sechs Messstangen unterschiedlicher Länge eingebaut werden.

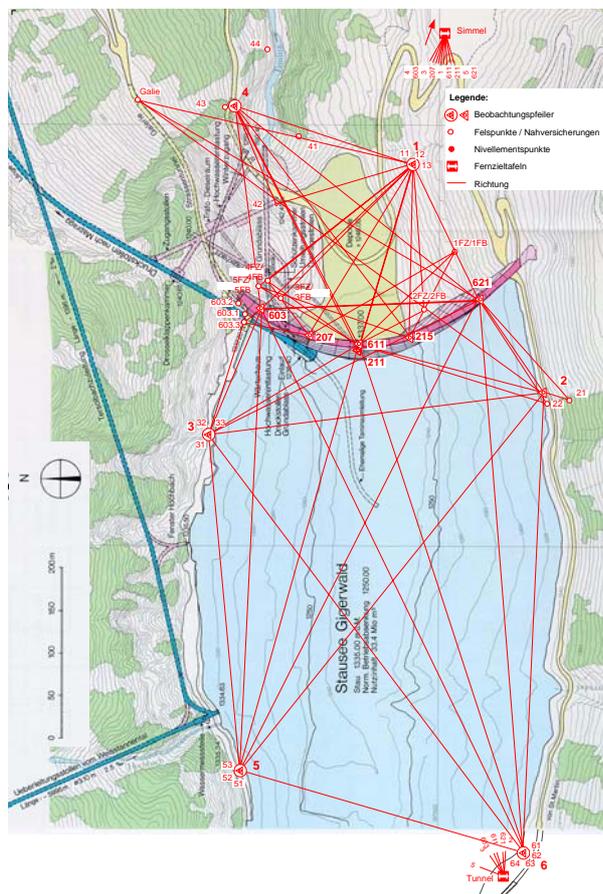
Die Messung der horizontalen Verformung in zwei Richtungen (Wasserseite-Luftseite; linksufrig-rechtsufrig) kann mit Schwimmloten durchgeführt werden (eventuell mit einem selbstzentrierenden Gleitanker, der die Messung in verschiedener Tiefe erlaubt) oder mit einem Inklinometer. In speziellen Fällen können auch Bohrlochmikrometer, bei welchen jeden Meter eine Messung erfolgt, und die gegebenenfalls mit einem eingebauten Inklinometer ausgerüstet sind, damit ausser Längen- auch Neigungsänderungen erfasst werden können, eingesetzt werden.

Nivellement, Setzpegel und Schlauchwaage sind einige der Möglichkeiten die Setzungen im Lockermaterial zu bestimmen. Nivellements-messungen bei Staudämmen können höchstens in allenfalls vorhandenen Quer- und Längsstollen durchgeführt werden.

Die Bewegungen der Widerlager können über in der Nähe angebrachte und in das geodätische Messnetz integrierte Oberflächenmesspunkte beobachtet werden.

**Geodätische Deformationsmessungen**

Das innere Messsystem einer Staumauer liefert nur die relativen Verformungen. Zur Bestimmung der absoluten Verformungen ist es mit nahen Referenzpunkten des geodätischen Netzes zu verbinden. Mit der geodätischen Deformationsmessung ist es dann möglich, die Verschiebungen dieser Referenzpunkte gegenüber dem Netz der Fixpunkte in der weiteren Umgebung zu kontrollieren.



Figur 4: Geodätisches Messnetz

Die Kenntnis der absoluten Deformationen ist nötig für die Beurteilung des Langzeitverhaltens, und wenn Anzeichen eines ausserordentlichen Verhaltens vorliegen. Allerdings sind die geodätischen Messungen stark von den Wetterverhältnissen

abhängig und die Messungen können nur von Spezialisten durchgeführt werden.

Das innere Messsystem der Talsperre wird somit mit dem äusseren Bezugssystem verbunden. Dieses kann in ein erweitertes Bezugssystem eingebunden sein, in welchem gewisse Punkte mit dem GPS (Global Positioning System) bestimmt werden. Das GPS ist dazu geeignet, das geodätische Messnetz in geologisch stabile Zonen ausserhalb des von der Stauanlage beeinflussten Verformungsbereichs einzugliedern. Die Verbindung zwischen bestehenden geodätischen Punkten und dem GPS Netz kann terrestrisch oder mit GPS realisiert werden. Die Kombination zwischen GPS und terrestrischer, geodätischer Messung bildet ein so genanntes hybrides Messnetz.

Für das Platzieren der Fixpunkte für das Triangulationsnetz ausserhalb der Talsperre ist eine Zusammenarbeit zwischen dem Geometer, dem Bauingenieur und dem Geologen notwendig. Fixpunkte sollen sowohl wasserseits als auch luftseits der Sperre vorgesehen werden. Eine Verbindung des Triangulationsnetzes mit Loten und Extensometern im Innern der Talsperre ist ebenfalls vorzusehen.

Die geodätischen Kontroll- oder Messpunkte werden auf der Krone der Talsperre, in den Stollen und auf der Luftseite sowie im Umgebungsgelände angebracht. Bei kleineren Sperrern befinden sich die Punkte vor allem auf der Krone. Die Verformungen werden durch das Messen von Distanzen, Winkeln oder Alignment bestimmt.

Ein Polygonzug gibt Auskunft über die Verformung in der Horizontalebene. Ein Nivellement erlaubt die Bestimmung der Höhenverschiebung. Dabei wird zwischen einem Präzisionsnivellement (direkte Messung des Höhenunterschiedes zwischen zwei Punkten) und Höhenwinkelmessung (Winkelmessung zwischen zwei Punkten, deren Abstand bekannt ist) unterschieden. Das Nivellement ist auf den Ufern luftseits und wasserseits der Talsperre so weit wie möglich zu verlängern.

Die Ausrüstung setzt sich einerseits aus Theodoliten, Nivelliergeräten, Distanzmessgeräten und andererseits aus Zubehör wie Visierscheiben, Reflektoren, optischen Loten, Nivellierlatten, Invardrähten, usw. zusammen.

## Durchsickerung und Wasserdruck

### *Sickerwasser und Drainage*

Die hydrostatische Belastung bewirkt Durchsickerungen durch die Talsperre und ihre Foundation. Bei Staumauern konzentrieren sich diese auf die weniger dichten Zonen, indem sich das Wasser be-

vorzugt Sickerwege entlang von vertikalen Blockfugen und horizontalen Betonierfugen oder im Kontaktbereich zwischen Beton und Fels sucht. Die Sickerströmung im Untergrund bewirkt Auftriebskräfte. Sie sind bei Staumauern aufmerksam zu verfolgen, weil eine Vergrösserung des Auftriebs die Standsicherheit des Bauwerks vermindert. Bei Staudämmen, die aus mehr oder weniger durchlässigem Material bestehen, stellt sich eine Sickerströmung durch Dammkörper und Untergrund ein. Dies bewirkt Porenwasserspannungen, die für die Gesamtstabilität des Bauwerks von grosser Bedeutung sind. Daher sind die Durchsickerungen aufmerksam zu überwachen, weil jede Abweichung vom Normalverhalten auf Vorgänge im Damm oder Untergrund hinweist, die für die Sicherheit des Bauwerks gefährlich werden könnten.

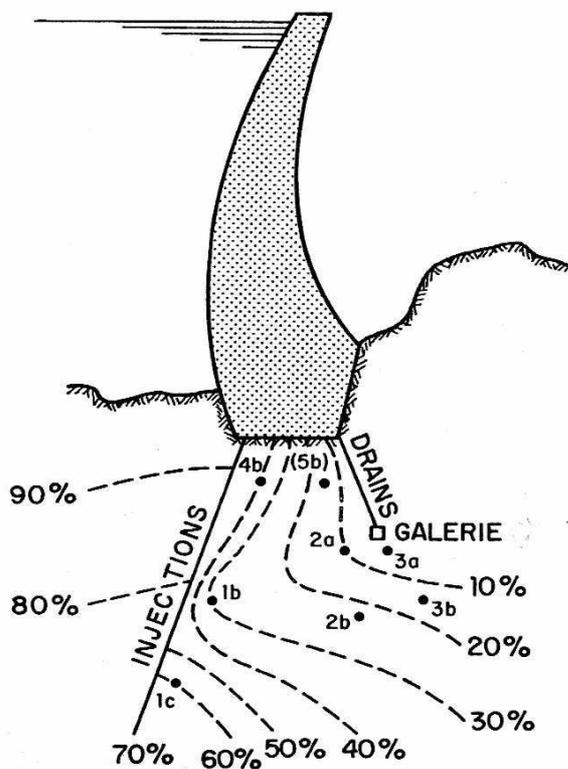
Die Sickerwassermengen sind meist von der Stauhöhe abhängig und können vom Niederschlag oder der Schneeschmelze beeinflusst werden. Eine Globalauskunft, ob sich die Durchsickerung einer Talsperre normal verhält, liefert die Gesamtmenge des Sickerwassers. Die Sickerwassermessung sollte, wo immer dies möglich ist, für einzelne Zonen separat gemessen werden, weil im Falle eines anomalen Verhaltens die Lokalisierung und damit die Ursachenabklärung erleichtert werden. In Staumauern wird das Sickerwasser in den Rigolen der Kontrollgänge gesammelt und den darin angelegten Messstellen zugeführt. Bei Staudämmen fällt das Sickerwasser in Drainagezonen an, die sich luftseits eines Dichtungskerns, unter einer Oberflächendichtung oder am luftseitigen Dammfuss befinden können. Dieses Sickerwasser muss in einer Drainageleitung der Messstelle zugeführt werden. Die Messung des Sickerwassers kann volumetrisch (d.h. mit Gefäss und Stoppuhr), mit Hilfe eines Messüberfalls, eines Venturis oder im durchflossenen Rohr erfolgen. Durchsickerungen an Staudämmen können mit den faseroptischen Kabeln über grösseren Bereichen des Bauwerks festgestellt werden, indem Temperaturänderungen in durchströmten und nichtdurchströmten Zonen registriert werden. Allerdings sind damit keine quantitativen Messungen durchführbar. Mit faseroptischen Temperaturmessungen können auch Leckstellen an Oberflächendichtungen von Staudämmen geortet werden.

Bei Staudämmen, die lösliche oder erosionsanfällige Materialien enthalten oder auf solchen fundiert sind, sollte ständig oder zumindest regelmässig die Trübung und periodisch der Chemismus des Sickerwassers kontrolliert werden. Mit der Trübungsmessung wird die Auswaschung von Feinmaterial überwacht und durch die chemische Analyse können gelöste Stoffe (z.B. aus dem Injektionsschirm) kontrolliert werden.



Sickerwassermengen aus der Fundation sowie aus Drainagebohrungen und Drainagestollen liefern zusammen mit den Auftriebsmessungen Informationen über den Zustand des Dichtungsschirmes und die Wirksamkeit des Drainagesystems. Eine Verminderung der Sickerwassermenge kann auf eine Kolmatierung des Staubeckens oder aber des Drainagesystems hinweisen. Es ist deshalb auch gleichzeitig die Entwicklung des Auftriebs zu beobachten, der in unzulässiger Weise ansteigen könnte.

Wo talseitig der Talsperre Quellen vorhanden sind, sollte die Quellschüttung gemessen werden, weil Änderungen des Ergusses auf Anomalien im Durchsickerungsverhalten hinweisen können. Die Messung kann volumetrisch oder mit einem Messüberfall erfolgen.



Figur 5: Sickerlinien unter einer Staumauer

Wo die Messung der Schwankungen eines Grundwasserspiegels (z.B. im luftseitigen Vorgebäude eines Dammes) angebracht ist, kann dies mit Standrohren (offene Bohrung), in welche ein Lichtlot oder eine mit einem Aufzeichnungsgerät verbundene Drucksonde eingeführt wird, erfolgen.

### Porenwasserdruck und piezometrischer Wasserstand

Signifikant für das Normalverhalten eines Staumdammes sind der Verlauf der Durchsickerungen und die damit verbundenen Porenwasserspannungen, besonders im Kern und in der Fundation. Sie dürfen jene Werte nicht überschreiten, die der Bemessung zugrunde gelegt wurden, und sind deshalb zu überwachen. Dies kann mit eingebauten Druckmesszellen (elektrischen, pneumatischen oder hydraulischen) geschehen, wobei mehrere Querschnitte mit (möglichst vielen) Messgeräten ausgerüstet werden. Dies ist nötig, um eine gewisse Redundanz zu gewährleisten, weil die zeitliche Ausfallrate nicht unerheblich ist.

Wenn man sich darauf beschränkt, den Verlauf der Durchsickerung, d.h. das Niveau der Drucklinie, an ausgewählten Punkten zu kontrollieren, so eignen sich Standrohre, in denen die Höhe des Wasserspiegels eingemessen wird. Standrohre sind sehr zuverlässige und langlebige Messeinrichtungen, wenn sie in einigermaßen durchlässigem Material eingebaut wurden. Befinden sie sich in dichtem Material mit geringer Durchsickerungsrate, braucht es sehr lange, bis das nötige Wasservolumen verschoben wurde, um Änderungen des piezometrischen Wasserstands anzuzeigen. In solchen Fällen sind geschlossene Piezometerzellen die geeigneteren Messgeräte.

### Auftriebsmessung

Die Sickerströmung unter einer Staumauer bewirkt einen Auftrieb, welcher der (stabilisierenden) Gewichtskraft des Talsperrenkörpers entgegenwirkt. Es wird deshalb normalerweise durch Erstellen eines Dichtungsschleiers und von Drainagebohrungen dafür gesorgt, dass die Auftriebskräfte möglichst klein bleiben. Die Wirkung dieser Massnahmen wird durch die Messung des Auftriebs, der meist eine direkte Abhängigkeit vom Seestand aufweist, kontrolliert. Wegen der heterogenen Untergrundverhältnisse (Klüftung, Schichtung) sollte in möglichst vielen Querprofilen und jeweils an mehreren Stellen zwischen der Wasser- und Luftseite der Staumauer gemessen werden, damit der Druckabbau verfolgt werden kann. Vielfach genügt es, die Auftriebsdrücke in der Aufstandsfläche zu bestimmen. In besonderen Fällen ist auch in verschiedenen Tiefen zu messen.

Für Auftriebsmessungen an der Aufstandsfläche sind Piezometer mit aufgesetztem Manometer gebräuchlich. Weil die Sickerströmung selbst bei hohen Drücken oft nur sehr klein ist, wird der effektive Druck im geschlossenen Piezometer unter Umständen erst nach sehr langer Zeit (Tage, Monate) erreicht. Um fehlerhafte Messungen zu

vermeiden, muss die Messeinrichtung deshalb ständig unter Druck gehalten werden. Fehlerhafte Messungen oder Ausfälle können auch infolge Verstopfung oder Leckage der Druckentnahmestelle oder der Schlauchleitung oder durch Defekt am Manometer auftreten. Für Druckmessungen in der Tiefe des Fundationsfelsens kommen Druckmesszellen und allenfalls Standrohrpiezometer mit Manometer in Frage.

**Weitere Messungen im Bereich der Stauanlagen**

Können unterhalb einer Talsperre Kolke infolge bedeutenden Wasserabflusses entstehen, ist eine regelmässige Erhebung der Form und Tiefe der Auskolkungen angezeigt, z.B. alle 3 bis 5 Jahre bzw. nach jedem ausserordentlichen Hochwasser. Diese Erhebung kann topographisch oder - falls der Kolk mit Wasser gefüllt ist - mit Bathymetrie durchgeführt werden.

Instabile Hänge müssen beobachtet werden. Ein Erdbeben in den Stauraum kann eine Welle erzeugen, welche über die Krone überschwappen kann. Mittel zur Überwachung solcher Hänge sind geodätische Messungen (Triangulation zur Bestimmung der räumlichen Verschiebung von Geländepunkten), direkte Distanzmessungen zwischen mehreren Punkten oder Messungen mit Inklinometern zur Bestimmung der Verformung mit der Tiefe.

Zudem können auch grössere Gletscherabstürze, die das Staubecken erreichen, zum Überschwappen der Krone führen. Zur Überwachung solcher Gletscher können photogrammetrische Messmethoden oder spezielle direkte Deformationsmessungen eingesetzt werden.

**Automatisierung und Fernübertragung**

Die Entwicklung im Bereich der Elektronik und der Informatik hat dazu geführt, dass vermehrt automatisierte Messsysteme eingesetzt werden. Diese

Systeme erlauben eine direkte Verbindung zum Beauftragten für die Messdatenauswertung. Sie bestehen aus Messgerät, Übertragung der Daten (Verbindung), automatische Datenakquisition und Speicherung der Daten (Datenbank) sowie Interpretation und Darstellung der Messresultate (Analyse der Messungen, Erstellung von Graphiken und Berichten).

Die Wahl von automatisierten Messungen in ausgewählten Punkten und die Fernübertragung der Ergebnisse bleibt dem Ermessen des Betreibers überlassen. Die Automatisierung gewährleistet eine quasi ständige Überwachung, was bei schlechter Zugänglichkeit der Stauanlage vor allem im Winter von Vorteil sein kann. Wenn eine solche Einrichtung auch die klassischen Handmessungen ergänzt, ist sie jedoch kein Ersatz dafür. Es muss möglich sein, die Kontinuität der Messungen auch im Falle eines Ausfalls der Automatik aufrechtzuerhalten. Schliesslich müssen die automatisch durchgeführten Messungen (beispielsweise die Lote) mindestens einmal monatlich mit von Hand ausgeführten Messungen kontrolliert werden. Dieses Vorgehen zwingt zu einem regelmässigen Besuch der Stauanlage durch den Talsperrenwärter, verbunden mit einer Kontrolle der Messeinrichtungen. Die Instrumente für die automatisierte Erhebung von Messwerten müssen einfach und robust, elektromagnetisch verträglich, gegen Überspannung und Feuchtigkeit geschützt sein und einen angepassten Funktions- und Temperaturbereich aufweisen.

In Tabelle 2 sind einige Messgrössen aufgeführt, welche sich für Permanentmessanlagen mit Fernübertragung eignen. Es ist nicht sinnvoll alles zu automatisieren. Die Beschränkung auf einige ausgewählte, für das Verhalten des gesamten Bauwerks repräsentative Parameter ist zweckmässig. Automatisierte Systeme können von Nutzen sein bei schwer zugänglichen Anlageteilen.

Für alle Stauanlagen	Staumauer	Staudamm
Seestand	Charakteristische Verformungen (beispielsweise Gesamtverformung in einem Querschnitt)	Sicker- und Drainagewasserabflüsse in charakteristischen Punkten (beispielsweise Gesamtabfluss)
Wetterverhältnisse (Niederschläge, Lufttemperatur)	Betontemperatur	Porenwasserdrücke
	Abflüsse des Sicker- und Drainagewassers in charakteristischen Punkten	Trübung des Sicker- und Drainagewassers

Tabelle 2 : Für Permanentmessanlagen und Fernübertragung geeignete Messgrössen.

Bei automatisch erhobenen Messgrößen (See-stand, Lufttemperatur, Verformung, Drücke, Sickerwassermengen) sollte wenigstens ein Wert pro Tag (Momentwert oder Mittelwert) gespeichert werden.

Wichtig ist, dass bei automatischen Messanlagen regelmässig Funktionsprüfungen (Inspektionen an Ort, Ferntests) durchgeführt werden. Eine Fehlfunktion eines Teils der Messanlage könnte zu einem ärgerlichen Datenverlust führen.

### Messprogramm

Messprogramme werden der Grösse, der Bedeutung und den Eigenheiten der Stauanlage angepasst. Messfrequenzen können auch auf den Füllungsgrad des Speichers abgestimmt werden, d.h. unterschiedlich bei Vollstau und bei abgesenktem See. Zudem ist das Verhalten der Stauanlage (normal oder anomal) zu berücksichtigen. Im Falle eines anomalen Verhaltens werden die Messungen verdichtet. Nach ausserordentlichen Ereignissen, wie zum Beispiel Erdbeben oder Hochwasser, werden zusätzlich Messungen durchgeführt.

Parameter, welche über das globale Verhalten der Stauanlage Auskunft geben, wie z.B. die mit Loten gemessenen Verformungen, die Gesamtsickerwassermenge oder charakteristische Auftriebe, werden möglichst häufig gemessen (wöchentlich, zweiwöchentlich, monatlich). Weitere Verhaltensparameter (z.B. Fugenbewegungen oder Neigungsänderungen) werden im Allgemeinen jedoch weniger häufig erhoben (ein- bis zweimal pro Jahr).

Die anspruchsvollen geodätischen Messungen, bei denen Vermessungsspezialisten eingesetzt werden, erfolgen in der Regel alle 5 Jahre. Bei Staudämmen, deren Verformungsverhalten mit Vermessung allein bestimmt wird, werden häufigere Messungen durchgeführt, z.B. pro Jahr ein- oder mehrmaliges Nivellement oder bei grossen Dämmen mehrmaliges (bis zu monatlichem) Bestimmen der Lageverschiebungen von Oberflächenpunkten.

Auch bei kleineren Staudämmen, deren Höhe weniger als etwa 10 bis 15 m beträgt, wird das Messprogramm auf das erwartete Verhalten abgestimmt. Werden geringe und unbedeutende Verformungen erwartet, so wird eine weniger häufige Messung der Verformungen von z.B. einmal jährlich vorgenommen. Hingegen ist es wichtig, dass charakteristische Verhaltensgrößen, wie Sickerwassermengen und die Erhebung der Sickerlinie öfter, d.h. monatlich gemessen werden.

## Faseroptik als neue Technologie im Messwesen

### Einleitung

Seit den 1990er Jahren wird die Technik der Faseroptik für Messinstrumente im Talsperrenbau angewandt. Dabei handelte es sich anfangs vor allem um Testreihen um die sinnvolle Anwendung zu überprüfen oder zu beweisen. Nun werden solche Instrumente aber auch schon von renommierten Instrumentenlieferanten auf dem Markt angeboten, Eigentliche Langzeiterfahrung liegt aber noch nicht vor.

### Prinzip der Faseroptik

An der Grenze eines Lichtdurchlässigen Materials wird Licht mit einem Brechungswinkel vom optisch dichten zum weniger dichten Material abgelenkt. Dabei gibt es einen Grenzwinkel, ab welchem Totalreflexion herrscht und der Lichtstrahl das dichte Material nicht mehr verlassen kann. Glasfaserleiter bestehen aus einem Kern aus Silizium und einem Mantel aus optisch dünnerem Material. Durch möglichst dünne Fasern werden die Anzahl Reflexionen eines Lichtstrahls immer kleiner, bis bei einem Durchmesser von  $d = 8 \mu\text{m}$  gar keine Reflexion mehr erfolgt. Für gewisse Anwendungen werden so genannte Gradientenfasern verwendet, bei welchen die Dichte von der Mitte gegen aussen abnimmt. Anstelle eines Reflexionswinkels erhält man eine sinusförmige Ablenkung des Lichtstrahls.

### Glasfasern in der Messtechnik

Grundsätzlich können drei Anwendungsarten von Glasfasern als Messinstrumente unterschieden werden:

- Anordnungen, bei denen die optische Faser selbst das Messinstrument darstellt (z.B. Extensometer)
- Anordnungen, bei denen entlang der optischen Faser gewisse Phänomene gemessen werden (Temperaturmessung)
- Messinstrumente, bei denen die optische Faser vor allem zum Transport eines Messwertes verwendet wird (Druck, Temperatur, Längenänderung).

### Die optische Faser als Messinstrument

Die typische Anwendung für diese Anordnung ist der Extensometer, wobei die Glasfaser anstelle einer Messstange zwischen dem Anker im Bohrloch und der Ablesestelle beim Messpunkt verlegt wird. Gemessen wird die Länge der Messstrecke, indem ein Lichtstrahl durch die Faser geschickt und am Ende der Faser mit einem Spiegel reflektiert wird.



Aus der Laufzeit kann die Länge der Faser sehr genau bestimmt werden, und eventuelle Änderungen werden ermittelt. Da die Ausdehnung der Faser und damit auch die Laufzeit temperaturabhängig sind, wird zur Kompensation eine parallele, nicht verankerte Faser eingelegt und gleichzeitig gemessen.

### **Temperaturmessung entlang einer Glasfaser**

Bei der Temperaturmessung entlang von Glasfasern, die im Boden oder im Beton verlegt werden, müssen der Ort einer Temperatur und die Temperatur selbst gemessen werden. Der Ort wird über das Streulicht bestimmt. Wenn Licht durch den Leiter strömt erfolgt eine gewisse Streuung. Der Ort dieser Streuung kann bestimmt werden, indem die Zeitdifferenz zwischen ausgesendetem Licht und zurückgestreutem Licht gemessen wird. Mit der klar definierten Lichtfrequenz eines Lasers kann der Punkt eines Signals auf etwa 1 m genau festgestellt werden. Die Temperatur an der bestimmten Stelle kann gemessen werden, weil das Frequenzspektrum des Streulichts von der Temperatur abhängt (die Siliziummoleküle der Glasfaser werden durch die Temperatur angeregt). Aus der Kombination dieser Messungen kann ein Temperaturprofil entlang der verlegten Faser erstellt werden. Verwendung findet dieses System bei der Leckortung in Dämmen, wo Kabel in Längen von mehreren Kilometern verlegt werden können. Zusätzliche Information kann gewonnen werden, wenn parallel zur Glasfaser ein Heizdraht verlegt wird, worauf der Temperaturverlauf beim Aufheizen oder beim Abkühlen analysiert werden kann. Im frischen Beton verlegt kann der Temperaturverlauf während der Abbindephase und beim Abkühlen eines oder mehrerer Querschnitte detailliert verfolgt werden.

### **Messinstrument mit Leitung aus Glasfaser**

Bei den meisten kommerziell angebotenen Instrumenten besteht der Vorteil gegenüber elektrischen Instrumenten vor allem im Leiter aus Glasfaserkabel, welches weniger anfällig auf Erosion und andere äussere Einflüsse ist als normale elektrische Kabel. Zudem ist das ganze System nicht Blitzschlag gefährdet. Die Messzelle selbst funktioniert ähnlich wie ein elektrisches Instrument, indem durch äussere Einflüsse (Temperatur, Deformation, Druck) eine kleine Deformation erzeugt wird. Diese Deformation wird dann mit einem so genannten

Fabry-Pero-Sensor gemessen, indem die Längenänderung eines Spaltes im Glasfaserkabel mittels halbdurchlässiger Spiegel festgestellt wird.

In dieser Art werden folgende Instrumente angeboten:

- Erddruckgeber
- Setzungspegel
- Extensometer für Lockergestein
- Extensometer in Beton
- Jointmeter, Verschiebungsmesser
- Piezometer
- Temperaturgeber.

Die Ableseeinheit kann für die verschiedensten Instrumente verwendet werden. Es wird auch keine Laser-Lichtquelle benötigt, wodurch das System billiger und weniger störungsanfällig ist.

### **Geophysikalische Methoden**

Die Anwendung von geophysikalischen Untersuchungsmethoden ist üblich bei der Erkundung des Fels- und Lockergesteinsuntergrunds. Diese Methoden können auch zur Untersuchung des Innern von Staumauern und Staudämmen eingesetzt werden mit dem Ziel, Anomalien festzustellen oder Materialeigenschaften zu prüfen. (Heterogenitäten, Hohlräume, Risse, Sickerwege etc.). Bei den geophysikalischen Methoden wird die Ausbreitung von mechanischen und elektromechanischen Wellen im Innern eines Festkörpers bestimmt. Sie haben den Vorteil, die Qualität des Bauwerks zerstörungsfrei zu prüfen. Die Anwendung dieser Methoden, wofür spezielle Instrumente benötigt werden, beruht auf den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Baustoffe (Elastizitätsmodul, Temperatur, Leitfähigkeit, Magnetismus).

Beispiele geophysikalischer Methoden sind:

- Reflexionsseismik
- Refraktionsseismik
- Geoelektrik
- Elektromagnetische Methoden
- Georadar
- Mikrogravimetrie
- Tomographie
- Ultraschall
- Infrarot-Thermographie
- Diagrafie.

**Literatur**

- [1] Bartholomew, C.L., Haverland, M.L. (1987). Concrete Dam Instrumentation Manual. Bureau of Reclamation, Denver, CO.
- [2] Bartholomew, C.L., Murray, B.C., Goins, D.L. (1987). Embankment Dam Instrumentation Manual. Bureau of Reclamation, Denver, CO.
- [3] Dunicliff, John (1988). Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- [4] Hanna, Thomas H. (1985). Field Instrumentation in Geotechnical Engineering. Trans Tech Publications, Clausthal-Zellerfeld.
- [5] Huggenberger, A.U. (1951). Talsperren-Messtechnik, Messverfahren, Instrumente und Apparate für die Prüfung der Bauwerke in Massenbeton. Springer, Berlin.
- [6] ICOLD (1969). General Considerations applicable to Instrumentation for Earth and Rockfill Dams. Considérations générales sur l'auscultation des barrages en terre et en enrochements. ICOLD Bulletin No. 21, Paris.
- [7] ICOLD (1972). Reports of the Committee on Observation on Dams and Models. Rapports du comité sur l'observation des barrages et modèles. ICOLD Bulletin No. 23, Paris.
- [8] ICOLD (1988). Dam Monitoring, General Considerations. Auscultation des barrages, considerations générales. ICOLD Bulletin No. 60, Paris.
- [9] ICOLD (1989). Monitoring of Dams and their Foundations, State of the art. Auscultation des barrages et de leurs foundations, La technique actuelle. ICOLD Bulletin No. 68, Paris.
- [10] ICOLD (1992). Improvement of existing Dam Monitoring, Recommendations and case histories. Amélioration de l'auscultation des barrages, Recommandations et exemples. ICOLD Bulletin No. 87, Paris.
- [11] ICOLD (1996). Monitoring of Tailings Dams, Review and recommendations. Auscultation des barrages de stériles, Synthèse et recommandations. ICOLD Bulletin No. 104, Paris.
- [12] ICOLD (1999). Seismic Observation of Dams, Guidelines and case studies. Observations sismiques des barrages, Recommandations et exemples. ICOLD Bulletin No. 113, Paris.
- [13] Penman, A.D.M., Saxena, K.R., Sharma, V.M. (1999). Embankment Dams: Instrumentation, Monitoring and Surveillance. A.A. Balkema, Rotterdam.
- [14] STK - Schweizerisches Talsperrenkomitee / CSB – Comité Suisse des barrages (1991). Measuring Installations for Dam Monitoring. Wasser, energie, luft - eau, énergie, air, Vol. 83, Nr. 5/6, Baden, pp. 105-155.
- [15] STK – Schweizerisches Talsperrenkomitee / CSB – Comité Suisse des barrages (1993). Informatik in der Talsperrenüberwachung / L'informatique dans la surveillance des barrages.
- [16] STK – Schweizerisches Talsperrenkomitee / CSB – Comité Suisse des barrages (1993). Geodätische und photogrammetrische Deformationsmessung für die Überwachung der Stauanlagen / Mesures de déformation géodésiques et photogrammétriques pour la surveillance des ouvrages de retenue. Wasser, energie, luft - eau, énergie, air, Vol. 85, Nr. 9, Baden, pp. 181-242.

