

Dispositif d'auscultation des barrages : projet, fiabilité et redondance = Messanlagen zur Talsperrenüberwachung : Konzept, Zuverlässigkeit und Redundanz

Autor(en): [s.n.]

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **78 (1986)**

Heft 7-8

PDF erstellt am: **13.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-940854>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Dispositif d'auscultation des barrages

Projet, fiabilité et redondance

1^{re} partie: projet

1. Introduction

Un barrage est soumis à des charges extérieures engendrant la déformation de l'ouvrage et de ses fondations ainsi que des infiltrations. Déformation et infiltrations dépendent de manière bien définie de ces charges. Tout écart du comportement de l'ouvrage de retenue par rapport à la normale peut donc, le cas échéant, indiquer une diminution de la sécurité. La grandeur des charges auxquelles un barrage est soumis ainsi que son comportement doivent donc être étroitement surveillés, de façon à pouvoir détecter toute anomalie suffisamment tôt pour qu'il soit possible de prendre à temps les mesures propres à parer au danger. Cette détection est basée à la fois sur les mesures et les contrôles visuels car aucune de ces deux méthodes ne garantit à elle seule une surveillance suffisante du comportement d'un barrage. Par conséquent, chaque ouvrage doit être équipé d'un dispositif d'auscultation convenable, c'est-à-dire d'un dispositif adapté aux buts poursuivis, au type d'ouvrage, aux particularités locales et à la grandeur de la retenue. Comme d'une part l'expérience relative aux barrages s'accroît et d'autre part la technique des mesures évolue sans cesse, il convient d'examiner périodiquement si le dispositif d'auscultation satisfait encore aux exigences et, au besoin, de le compléter ou de procéder à son renouvellement.

Lors du projet d'un dispositif d'auscultation ou de l'examen d'un dispositif existant, on tiendra compte des remarques suivantes:

- l'ouvrage et ses fondations forment un tout encastré dans un massif qui peut lui aussi exercer une influence sur l'ouvrage,
- une déviation du comportement normal peut se développer soudainement comme aussi peu à peu,
- dans le cas d'une anomalie de comportement, les données résultant des mesures doivent permettre de déterminer les causes de cette anomalie.

Il s'ensuit que le dispositif d'auscultation doit être conçu de manière à saisir le comportement d'un ouvrage à court aussi bien qu'à long terme. En outre, le dispositif doit permettre de distinguer clairement le comportement du barrage lui-même, de celui de ses fondations ou du terrain avoisinant. La mesure d'un nombre relativement limité de grandeurs est généralement suffisante pour saisir le comportement d'un ouvrage à court terme pour autant que ces grandeurs soient choisies de façon à indiquer sans équivoque si le comportement de l'ouvrage ou de ses fondations est en principe normal ou non. Ces paramètres principaux doivent par conséquent être contrôlés relativement souvent et il est alors avantageux d'utiliser des appareils de maniement simple conjugués à des méthodes de mesure permettant une interprétation aisée des résultats. Pour saisir le comportement à long terme d'un ouvrage, de même que pour l'analyse d'une anomalie éventuelle, le suivi de son comportement doit être assuré par des mesures différenciées. Comme ces dernières sont moins fréquentes, le procédé de

mesure, ainsi que l'interprétation, peuvent requérir davantage de moyens et même l'intervention de spécialistes. Les résultats des mesures doivent être disponibles en tout temps avec la précision désirée. Toute interruption ou in correction peut compromettre provisoirement la surveillance ou provoquer un sentiment d'insécurité. Même lorsque des équipements ou appareils défectueux sont remplacés immédiatement, le risque est grand de voir le point origine déplacé. La série de mesures perd ainsi son homogénéité et l'analyse du comportement à long terme s'en trouve sensiblement compliquée. On donnera la préférence à des équipements et appareils robustes et donc durables. Une réduction éventuelle de la précision de la mesure a en général des conséquences moins graves qu'une interruption. Pour assurer la fiabilité et la pérennité des équipements et appareils, un entretien soigné est indispensable de même qu'un contrôle périodique (ou régulier) de leur précision.

Le champ de mesure doit être suffisamment étendu de façon à pouvoir saisir également et (si possible) sans limitation d'aucune sorte les cas de charges extraordinaires et un comportement anormal. Ce sont justement ces cas qui compromettent éventuellement la sécurité d'un barrage et nécessitent des mesures particulières.

La précision des résultats des mesures ne doit pas dépasser les possibilités réelles de l'interprétation et de l'analyse. On se souviendra en particulier que les lois qui régissent le comportement des barrages ne sont souvent qu'approximatives et que ces derniers sont également soumis à des influences qui demeurent (pour l'instant) non quantifiables (telles que celle des variations climatiques saisonnières sur le comportement du sous-sol, par exemple).

Même lorsque des équipements simples et robustes ont été choisis, des déficiences et des pannes ne peuvent être exclues. Aussi un dispositif d'auscultation doit-il être conçu absolument de façon à présenter une redondance suffisante.

Par redondance, on entend non seulement le doublement (indépendant) d'un appareil de mesure mais également la possibilité de contrôler ou de rétablir une valeur de mesure sur la base des résultats d'autres modes de mesure (par exemple pendule-polygonale, alignement-triangulation ou indicateur de tassements-nivellement). On fera d'autant plus usage de cette possibilité que le dispositif de mesure redondant fournit également d'autres informations; il est donc bivalent.

2. Charges extérieures

La déformation d'un barrage est déterminée partiellement par la poussée hydrostatique. Pour les ouvrages en béton, les températures jouent également un rôle, de même que le poids de l'ouvrage pour les digues. La poussée des terres peut également être déterminante. Pour les deux types d'ouvrages, les infiltrations dépendent essentiellement du niveau de la retenue et dans une moindre mesure des précipitations et/ou de la fonte des neiges. Pour analyser le comportement d'un ouvrage, il convient donc de mesurer à intervalles convenables le niveau de la retenue, des températures représentatives et les précipitations.

Le *niveau de la retenue* n'est pratiquement plus mesuré aujourd'hui que par des balances de pression. Une redondance doit être recommandée absolument. Elle peut être réalisée par la mise en place d'un manomètre relié à une conduite existante ou à monter, conduite assurant la liaison avec la retenue. Le champ de mesure devrait s'étendre au moins jusqu'au niveau du couronnement. Il est en effet important de connaître les niveaux extrêmes, d'une part pour l'analyse courante lors d'une crue et d'autre part pour la détermination a posteriori des apports de crue.

Des mesures de températures sont requises pour déterminer l'influence de leurs variations sur les déformations d'un

barrage, pour juger si les précipitations tombent sous forme de pluie ou de neige ou encore si l'on se trouve en période de fonte des neiges. Dans ce dernier cas, il suffit de connaître la température de l'air au site du barrage. Lorsque la lecture journalière de la température n'est pas garantie, il est recommandé d'installer un thermographe ou tout au moins un thermomètre à mercure indiquant les maxima et minima. Une redondance n'est pas absolument nécessaire car il est toujours possible de recourir provisoirement à d'autres mesures de températures lors d'une panne. L'analyse de l'influence des variations de température sur les déformations des barrages est facilitée lorsque des thermomètres sont installés en un nombre suffisant de points dans le béton du barrage. On utilisera alors soit des sondes scellées dans le béton, soit des thermomètres à mercure placés dans des trous de forage. La redondance est alors obtenue simplement par la mise en place d'un plus grand nombre de sondes que strictement nécessaire.

La *mesure des précipitations* ne devrait manquer en aucun site de digue; elle s'avère également avantageuse pour un barrage. Les précipitations journalières suffisent. Le point de mesure ne doit pas absolument être situé au droit de l'ouvrage lui-même mais ne doit pas être trop éloigné non plus, de façon que les quantités obtenues restent représentatives. Lorsque la mesure journalière n'est pas garantie, il est recommandé le cas échéant d'installer un pluviographe. Une redondance ne s'impose pas car il est toujours possible de recourir à des stations de mesure plus éloignées.

La *mesure de la poussée des terres* dans le but de déterminer les sollicitations globales s'exerçant sur certains éléments critiques de la structure peut s'avérer utile parfois, dans le cas de digues ou de barrages pour la rétention des crues. L'interprétation des résultats des mesures demeure cependant problématique.

3. Déformation

La déformation d'un barrage dépend du type d'ouvrage, du sous-sol et des charges extérieures. Les barrages et les digues se comportent différemment puisqu'ils sont constitués de matériaux dissemblables. Les barrages se déforment essentiellement de manière élastique sous l'effet de la poussée hydrostatique et des variations de température. Des déformations permanentes peuvent se produire suite à une adaptation du sous-sol aux sollicitations nouvelles auxquelles il est soumis, en tant que résultat du vieillissement du béton ou d'une fatigue du rocher de fondation. Ces déformations sont sans danger pour autant qu'elles ne dépassent pas une valeur critique. Le comportement des digues est tout autre: leur déformation est essentiellement de nature permanente. Sous l'influence du poids du corps de la digue et de l'eau accumulée, le matériau du remblai (et du sous-sol s'il s'agit de terrains meubles) va continuer à se tasser – il est vrai de manière décroissante – des dizaines d'années après la fin de la construction. A cela s'ajoutent des déformations permanentes, principalement horizontales et perpendiculaires à l'axe de la digue, dues à la poussée hydrostatique. La part des déformations véritablement élastiques demeure faible et ces dernières ne sont pas caractéristiques du comportement de l'ouvrage.

Compte tenu du comportement différent des barrages et des digues, les tâches de surveillance ne peuvent être identiques. Pour les barrages, il s'agira essentiellement de suivre le développement des déformations tant élastiques que plastiques. A cet effet, on comparera les déformations effectives – c'est-à-dire mesurées – aux déformations caractérisant un comportement normal et obtenues par le calcul ou toute autre méthode. Pour les digues par contre, on observera attentivement la tendance suivie par les déformations permanentes de façon à détecter tout écart par rap-

port à la normale. La grandeur des déformations à mesurer varie aussi sensiblement: de l'ordre du millimètre ou du centimètre pour les barrages, elles passent au centimètre ou décimètre pour les digues.

La déformation d'un barrage et de ses fondations peut être déterminée par la mesure du *déplacement spatial de points choisis* par rapport à des points de référence. Lorsque ces derniers sont situés à l'intérieur du barrage, seuls les déplacements relatifs sont obtenus. Les déplacements absolus ne peuvent être mesurés que si les points de référence sont situés hors de l'ouvrage (dans les environs ou dans le sous-sol) et de son influence. Les déplacements relatifs sont suffisants pour l'observation des déformations dans le cadre de la surveillance courante de l'ouvrage. Les valeurs absolues sont par contre nécessaires pour suivre l'évolution des déformations permanentes. Un système de mesure ne s'étendant qu'à l'intérieur de l'ouvrage est donc insuffisant. Dans le cas des barrages, il serait idéal de disposer de points de référence suffisamment profonds pour être hors de la zone de rocher influencée par la retenue. On obtiendrait alors la valeur absolue des déformations au moyen de dispositifs de mesure simples pouvant être utilisés fréquemment. Des points de référence situés dans les environs du barrage, mais hors de sa zone d'influence, demeurent cependant indispensables pour saisir le comportement des alentours de l'ouvrage. Il s'ensuit que le système de mesure dans le plan du barrage doit être complété par un réseau de triangulation, si possible de grandes dimensions (et des polygonales), auquel le système sera relié. Une surveillance des déformations adaptée au but poursuivi doit donc s'appuyer sur un *dispositif de mesure spatial*, c'est-à-dire *tri-dimensionnel*.

Le contrôle des déformations d'un barrage et de ses fondations sera réalisé au mieux si les *mesures des déplacements* sont effectuées en des *points alignés horizontalement et verticalement* (mesure le long de lignes) et si ces lignes sont prolongées aussi loin que possible dans le sous-sol (inclusion du sous-sol). La redondance nécessaire est alors obtenue en mesurant les déplacements des points d'intersection des droites orthogonales de ce réseau par différentes méthodes.

Lorsqu'un barrage comporte des galeries de contrôle et des puits, les déformations le long des lignes verticales peuvent être obtenues au moyen de pendules (directs ou inversés) tandis que les déformations le long des lignes horizontales sont déterminées par des polygonales (= installation de mesure à l'intérieur du barrage). Il s'agit de méthodes de mesure éprouvées. En l'absence de galerie de contrôle et de puits (en particulier dans les digues, souvent aussi dans les barrages-voûtes minces et les barrages-poids de faible hauteur), on atteint le même but par la mise en place d'un réseau orthogonal de cibles sur le parement aval de l'ouvrage. Ces cibles sont visées par des mesures d'angles (éventuellement complétées par des mesures optiques de distances) à partir de points fixes situés hors du barrage (= installation de mesure extérieure). La mesure géodésique des déformations présente un certain nombre de désavantages: elle est coûteuse et requiert l'engagement de spécialistes si bien qu'elle ne peut être effectuée à brefs intervalles. Dans le cadre de la surveillance courante (surveillance du comportement à intervalles rapprochés) on se bornera donc à suivre les mouvements de points choisis (habituellement des points situés le long du couronnement, exceptionnellement aussi des points alignés verticalement) au moyen de mesures angulaires simples ou encore par un alignement venant compléter l'installation de mesure. Les tassements des digues peuvent être mesurés simplement et de manière fiable par un nivellement le long du couronnement. Une redondance ne s'impose pas car un nivellement peut être répété sans problème. Il est important cependant

qu'il soit prolongé suffisamment loin sur les rives. Pour la mesure différenciée des déformations du corps de la digue on utilisera des indicateurs de tassement, des tassomètres à vases communicants et des extensomètres.

La *prolongation des lignes de mesure dans le sous-sol* peut être assurée par des pendules inversés, des extensomètres (éventuellement des extensomètres à plusieurs tiges placés dans 2 ou mieux 3 directions de façon à saisir les déplacements spaciaux) et dans des cas particuliers aussi par le micromètre coulissant (le cas échéant muni d'un inclinomètre afin de mesurer non seulement des variations de longueur mais aussi d'inclinaison). Lorsque l'ouvrage comporte des galeries de drainage ou de reconnaissance, les polygonales peuvent être prolongées dans les appuis. On peut renoncer à une redondance proprement dite lorsque le dispositif d'auscultation du sous-sol est suffisamment doté.

4. Infiltrations

Toute retenue provoque des infiltrations à travers l'ouvrage et dans le sous-sol, même en la présence d'un voile d'injection. Dans les barrages en béton, les débits d'infiltration restent généralement faibles et concentrés le long de zones non étanches du béton, le long des joints et du contact béton-rocher. Une augmentation inhabituelle du débit d'infiltration est toujours un signe de danger potentiel pour l'ouvrage. Les courants souterrains produisent des sous-pressions. Dans le cas d'un barrage, leur évolution doit être suivie attentivement puisque leur influence sur la stabilité n'est pas négligeable. Dans les digues se forme un écoulement semblable à celui dans le sous-sol, parce que les matériaux de construction utilisés (y compris celui d'un éventuel noyau étanche) sont plus ou moins perméables. L'écoulement à travers la digue et sous celle-ci est à l'origine des pressions interstitielles qui revêtent une importance primordiale pour ce qui concerne la stabilité de l'ouvrage. Les infiltrations doivent donc être surveillées étroitement car chaque déviation de la normale témoigne d'une évolution dans le corps de la digue ou le sous-sol qui peut influencer dangereusement la sécurité de l'ouvrage.

Le *débit total d'infiltration* à travers un barrage ou une digue indique si les infiltrations demeurent à leur niveau normal. Sa mesure peut être volumétrique (avec un récipient et un chronomètre) ou s'effectuer au moyen d'un déversoir de mesure, méthodes simples et fiables. Une redondance n'est donc pas nécessaire. Par contre et pour autant que possible, on veillera à effectuer des mesures de débit partiel, c'est-à-dire en considérant certaines *zones isolément*. En cas de comportement anormal, la localisation de la zone critique s'en trouve facilitée de même souvent que la recherche des causes.

Pour les digues comportant des matériaux aisément solubles ou érodables, ou qui sont fondées sur de tels matériaux, il est souhaitable de mesurer la *turbidité* en permanence ou tout au moins régulièrement. On procédera en outre à des *analyses chimiques* périodiques de l'eau d'infiltration. Il est possible de recueillir ainsi des informations de valeur concernant la stabilité des matériaux du corps de la digue et du sous-sol (en particulier du voile d'injection).

L'évolution des infiltrations et des *pressions interstitielles* (en particulier dans le noyau et les fondations) qui leur sont liées exerce une influence significative sur le comportement normal d'une digue. Les pressions interstitielles ne doivent pas dépasser les valeurs admises dans le projet; elles doivent donc être surveillées, ce qui peut s'effectuer par la mise en place de cellules de mesure de la pression interstitielle. La qualité de l'information ainsi glanée sera d'autant meilleure que le nombre de profils de mesure sera plus nombreux ainsi que le nombre de cellules par profil. Par ce procédé, on garantit une certaine redondance justifiée déjà

malheureusement par le taux de défaillance de ces appareils qui n'est pas négligeable.

Bien que des expériences récentes aient montré que la mise en place de cellules de mesure de la pression interstitielle est possible même dans les digues existantes, un équipement ultérieur systématique n'entre pas toujours en question. On devra se contenter le cas échéant de contrôler l'évolution des infiltrations par la mesure de la *ligne de pression* de ces dernières en des points choisis. Pour cela, on utilisera un indicateur de niveau de la nappe phréatique (par exemple un tube dans lequel on descend une sonde à témoin sonore). Comme la mesure de la ligne de pression garantit une certaine redondance en ce qui concerne la mesure des pressions interstitielles et que l'évolution de cette ligne est l'un des paramètres importants caractéristiques du comportement des digues, les indicateurs de niveau de la nappe phréatique ne devraient normalement manquer dans aucun ouvrage, mais au contraire être installés dans plusieurs profils transversaux.

Les infiltrations sous un barrage conduisent à l'apparition de *sous-pressions* qui viennent s'opposer à l'effet (stabilisant) du poids propre. C'est pourquoi on veille à ce que les sous-pressions restent faibles par l'exécution d'un voile d'injection complété si nécessaire par des forages de drainage. L'efficacité de ces mesures doit évidemment être contrôlée. On procédera donc à la mesure des sous-pressions et ne renoncera à celle-ci que dans les cas où la sécurité de l'ouvrage est encore suffisante dans les cas de sous-pressions les plus défavorables. Par suite de l'hétérogénéité du sous-sol (discontinuités) il convient d'effectuer des mesures en plusieurs points distribués d'amont en aval le long de plusieurs profils transversaux, de façon à suivre la réduction des pressions de l'amont vers l'aval du barrage. Généralement il suffit de déterminer ces pressions au niveau du contact béton-rocher. Dans des cas exceptionnels, il est souhaitable d'obtenir les pressions à différentes profondeurs. Pour la mesure au niveau du contact béton-rocher, on utilisera un tube sur lequel est monté un manomètre; cette solution s'est révélée fiable, suffisamment précise et robuste. Comme les vitesses d'infiltration sont souvent faibles malgré les gradients importants en jeu, la pression effective ne sera parfois atteinte qu'après une longue période (jours, mois). Afin d'éviter toute mesure erronée, le système tube-manomètre doit être maintenu continuellement sous pression. Les mesures peuvent être faussées ou interrompues par le colmatage de la prise de pression, de la conduite ou encore par une défectuosité du manomètre. On se gardera donc d'interpréter toute chute de pression de manière trop optimiste. Pour la mesure des pressions à plus grande profondeur dans la fondation, on utilisera des cellules ou également un tube muni d'un manomètre. L'expérience montrant que des défaillances de cellules de mesure de la pression interstitielle ne sont pas exclues, une certaine redondance s'impose; elle sera obtenue par la mise en place d'un nombre suffisant de cellules et/ou par la pose de deux appareils indépendants à chaque point de mesure.

Les *débits* provenant d'éventuels *drainages* doivent être mesurés. Une diminution de débit peut indiquer le colmatage du drain. La mesure peut être volumétrique ou s'effectuer au moyen d'un déversoir de mesure; elle est donc simple et fiable et une redondance n'est pas nécessaire.

Le *débit* de toutes les *sources* situées en aval d'un barrage devrait être mesuré. Une variation de ce débit peut en effet indiquer une anomalie dans le réseau des infiltrations. La mesure peut être volumétrique ou s'effectuer au moyen d'un déversoir de mesure. Une redondance ne s'impose pas.

Partie 2: Equipements et méthodes de mesure

Explication des tables

1^{re} colonne: But

Dans cette colonne sont indiqués les buts des mesures déterminant les paramètres du comportement des barrages en béton et des digues selon la nature des charges et des réactions.

2^e colonne: Equipements, appareils et méthodes de mesure

Pour chaque type de mesure, les appareils et les méthodes les mieux adaptés et les plus usuels sont mentionnés.

3^e colonne: Exigences

Les conditions exigées pour les appareils et les méthodes sont définies comme suit:

F – Une grande *fiabilité* est demandée pour la détermination des valeurs des mesures qui sont indispensables pour une surveillance parfaite des barrages et qui doivent de ce fait être possibles en tout temps.

L – Pour les valeurs de mesures importantes – en plus de la redondance – la *longévité* du dispositif de mesure est nécessaire; le

renouvellement de l'équipement ou le rattachement aux mesures antérieures ne doivent pas conduire à une perte de temps trop importante ou à une impossibilité.

M – La *plage de mesure* doit être suffisante pour couvrir une charge exceptionnelle ou un comportement inattendu.

P – La *précision* demandée doit englober les erreurs de tout le dispositif d'auscultation et le déroulement de l'ensemble des mesures (imprécision des instruments et de leur calage, influence de la température, matériau d'enrobage, frottement, usure, déplacement du point zéro, défaut de linéarité, etc.).

Par *redondance*, on entend le doublement (indépendant) d'un moyen de mesure ou la possibilité de contrôler ou de rétablir une valeur de mesure au moyen d'un autre mode de mesure.

4^e colonne: Remarques

Dans cette colonne apparaissent les renseignements et les indications, ou les caractéristiques distinctives concernant les buts des mesures et les dispositifs d'auscultation.

5^e colonne: Référence partie 3

Les feuilles de commentaires de la partie 3 indiquent pour les différents appareils et méthodes de plus amples indications telles que: brève description, possibilités de redondance, exigences techniques, dérangements possibles et erreurs de mesure, contrôles de fonctionnement indispensables et autres remarques.

A) Charges

But	Equipement de mesures Appareils de mesures Méthodes de mesures	Exigences: F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision	Remarques	Réf. dans partie 3
Niveau d'eau				
Charges hydrauliques	Balance Flotteur Latte Manomètre Sonde de niveau Câble sonore, lumineux Capteur ultrasons	F: très élevée L: néant M: jusqu' au-dessus du couronnement P: ± 10 cm Redondance: indispensable	Mesure importante La plage de mesure doit également englober les crues	1.000
Températures				
Air et eau Charges thermiques externes. Influence sur la fonte des neiges	Thermographe Enregistrement continu de l'évolution de la température Thermomètre à mercure Valeurs min, max, et instantanée	F: néant L: néant M: -30° C à +40° C P: ± 1° C Redondance: souhaitable, nécessaire pour les thermographes	Ces instruments sont faciles à remplacer	1.100
Béton Charges thermiques internes influençant directement la déformation du béton	Thermomètre électrique Thermomètre à mercure dans les forages	F: très élevée L: très élevée M: -10° C à +50° C P: ± 1° C Redondance: nécessaire	La plage de mesure + 50° C est nécessaire pendant la période de construction seulement. Lors d'une installation ultérieure, une échelle jusqu' à + 30° C est suffisante	1.110
Précipitations				
Précipitations dans la région de la retenue Influençant les infiltrations	Pluviomètre Pluviographe	F: modérée L: néant Redondance: pas nécessaire	Il n'est pas indispensable que la mesure soit effectuée aux environs immédiats du barrage	1.200
Pression des terres				
Parties d'ouvrages essentielles soumises aux charges des remblais	Mesure de la pression des terres	F: modérée L: élevée M: surcharge de l'ensemble (0 à 3 N/mm ²) P: ± 5% de M Redondance: pas nécessaire	Le module de déformation de l'instrument de mesure doit être adapté aux matériaux de remblais L'interprétation et les résultats sont problématiques	1.300

B) Paramètres du comportement des barrages en béton

But	Equipement de mesures Appareils de mesures Méthodes de mesures	Exigences: F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision	Remarques	Réf. dans partie 3
Déformations du barrage et de sa fondation				
Déformées le long de lignes verticales, prolongées dans le rocher pour comparaison avec les résultats de mesure obtenus pendant des périodes antérieures, ainsi qu' avec les hypothèses et résultats des calculs statiques	Pendule, pendule inversé Dispositif de mesure à deux axes, avec optique permettant de viser le fil du pendule qui sert d'axe de référence	F et L: très élevées M: déformation maximale calculée + 50% P: $\pm 0,2$ mm resp. $\pm 1\%$ de M Redondance: indispensable moyennant: – Instrument de réserve – Station de contrôle pour l'instrument – Combinaison avec triangulation, polygones, alignements, extensomètres	– Méthode de mesure précise et éprouvée – Durée de mesure réduite – Télémessure possible; le dispositif de mesure ne doit pas fausser la position du pendule !	2.100
	Mesure d'angles et mesure de distance électro-optique depuis stations situées à l'aval de l'ouvrage	Exigences à fixer de cas en cas Redondance: indispensable Les déplacements éventuels des stations de mesure doivent être contrôlés périodiquement par triangulation ou pendule inversé	– Méthode de mesure éprouvée mais délicate A n'appliquer qu'au cas où une installation de pendules n'est pas possible – Mesures nécessitant des conditions météorologiques favorables – Précision dépendant des distances et réfractions	2.101
Déformées le long de lignes horizontales avec prolongation dans les appuis et les versants de la vallée	Alignement par fil dispositif de mesure à un axe, avec optique pour viser le fil qui représente un plan de référence vertical	F et L: très élevées M: déformation maximale calculée + 50% P: $\pm 0,2$ mm, resp. $\pm 1\%$ von M Redondance: indispensable moyennant: – Instrument de réserve – Station de contrôle pour l'instrument – Combinaison avec triangulation, pendules, et extensomètres	– Equivalent au pendule Précision dépendante de la portée du fil tendu – Ne convient que pour des ouvrages rectilignes – La portée maximale est limitée par le poids et la qualité du fil d'acier	2.110
	Nivellement	F et L: modérées P: ± 1 mm Redondance: nécessaire selon les circonstances, en combinaison avec triangulation Prévoir des groupes de points de références sur les deux rives	– Méthode éprouvée et simple si on utilise des appareils modernes	2.111
	Alignements optiques	Exigences à fixer de cas en cas Redondance: indispensable en combinaison avec triangulation, pendules	– Méthode éprouvée et simple, Pour le reste mêmes remarques que pour les mesures d'angles	2.112
	Mesure d'angles et de distances	Voir même mesure sous rubrique " Déformées le long de lignes verticales "	Voir mêmes remarques sous rubrique " Déformées le long de lignes verticales "	2.101
	Polygones	Exigences à fixer de cas en cas Redondance: indispensable en combinaison avec triangulation, pendules	– Mesure délicate, Rattachement indispensable à la triangulation ou aux pendules	2.113

B) Paramètres du comportement des barrages en béton

But	Equipement de mesures Appareils de mesures Méthodes de mesures	Exigences: F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision	Remarques	Réf. dans partie 3
Déformation du barrage et de sa fondation				
Variations de longueurs et déformées le long des lignes dans des forages mesure globales sur grands tronçons de mesure ou mesures différentielles entre repères aménagés sous forme d'une chaîne	Extensomètres à tiges et à fils à une ou à plusieurs tiges (ou fils)	F, L et M: à fixer de cas en cas P: $\pm 0,5$ mm Redondance: pas toujours nécessaire; peut être atteinte par: – Installation d' extensomètres en plusieurs endroits comparables – Subdivision en plusieurs tronçons – Combinaison avec pendule inversé ou nivellement	– Travaux de mise en oeuvre de l'ancrage et injection des gaines de protection délicats – Télémessure possible	2.120
	Micromètre coulissant Variations de longueurs différentielles Clinomètre coulissant déformations différentielles, parfois combinées avec micromètre coulissant Défectomètre Déformations globales ou par tronçons, respectivement déformations différentielles	Exigences à fixer de cas en cas Redondance: n' est pas toujours nécessaire	– Précision dépendant fortement du système de guidage de l' instrument; certains instruments fournissent des mesures très précises et fiables – Travaux de mise en oeuvre et injection des tubes de guidage délicats – Indiqué pour localiser des discontinuités (fissures) et observer leurs mouvements – Mesures et interprétation des mesures demandant beaucoup de temps	2.121
Déplacement apatial de points, y compris l' influence des environs	Triangulation de cas en cas combinée avec: – Polygonales et nivellements – Mesures de distances électro-optiques – Pendules optiques, pendules – Alignements, extensomètres	F et L: très élevées P: (triple valeur de l' erreur moyenne à craindre) $\leq \pm 3$ mm pour stations de mesures et points de contrôles importants $\leq \pm 5$ mm pour les autres points Redondance: indispensable moyennant: – Points et éléments de mesures en surabondance – Combinaison avec d' autres équipements de mesure	– Le réseau géodésique doit englober un espace important et permettre: – l' observation à long terme des déformations de l' ouvrage et de ses alentours, et – le contrôle des déplacements éventuels des points de références d' autres équipements de mesure (redondance) – Mesure délicate qui ne peut être exécutée qu' à intervalles importants – Concevoir des mesures réduites permettant l' appréciation rapide de l' état des déformations – Archiver d' une manière sûre les données et les indications relatives aux méthodes de mesures et de calculs	2.130
Mouvements dans les fissures et joints accessibles – Dilatations – Parfois mouvements de cisaillement	Points-repères (boulons, etc) pour: - Fleximètre - Micromètre - Déformètre - Dilatomètre	F et L: selon le but M: 10 mm P: ± 0.05 mm Redondance: selon le but	– Les mesures sur les parois d' une galerie ou d' une niche, ne sont souvent pas représentatives du comportement du massif – Des témoins adéquats peuvent souvent remplacer un équipement de mesure – Télémessure possible	2.140
Rotations locales dans le plan vertical	Clinomètre – Equipé d' un niveau et d' un micromètre – Avec indication digitale (électronique)	F et L: élevées M et P: selon le but Redondance: la mesure n' est indiquée qu' en combinaison avec d' autres équipements de mesures tels que pendules par ex.	– A proximité d' espaces vides, les résultats sont souvent influencés par des concentrations de contraintes – Des chaînes de mesure courtes peuvent améliorer le résultats	2.150
Déformations spécifiques locales pour contrôler les contraintes	Déformètres électriques posés dans le béton Combinés avec mesures de température	F et L: élevées M: – jusqu' à 2 mm/m – température - 10 à + 50° C P: – contrainte ± 0.2 N/mm ² – température ± 0.2 ° C Redondance: nécessaire moyennant : – Instruments en surabondance – autres types d' instruments pour comparaison	– Pannes fréquentes – Résultats souvent influencés par les conditions locales des matériaux au droit de l' instrument – Evaluation problématique des contraintes	2.160

B) Paramètres du comportement des barrages en béton

But	Equipement de mesures Appareils de mesures Méthodes de mesures	Exigences: F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision	Remarques	Réf. dans partie 3
Percolation d'eau à travers le barrage et le massif d'appui				
Débit des eaux d'infiltrations et de drainage (par zones et global)	Mesure volumétrique avec récipient taré et chronomètre resp. par supplantation de volume (par ex. à l'aide d'une tige étalonnée dans des forages inclinés vers le bas)	F et L: modérées M: débit maximal présumé + 100 % P: ± 0,05 l/s, resp. ± 5 à 10 % de M Redondance: pas nécessaire	– Méthode limitée à des débits modérés jusqu' à 10 l/s; Le temps de remplissage du récipient doit être d'au moins 10 secondes	2.200
	Déversoir, canal de mesure parfois avec enregistrement	F et L: élevées M: débit maximal présumé + 100 % P: ± 5% de M Redondance: pas nécessaire	– Enlever périodiquement les dépôts de sédiments – Pas indiqué pour des débits < 0.05 l/s – Pour le débit total du barrage, prévoir l' enregistrement et un signal d'alarme	2.201
Pression de l'eau de percolation à proximité des fondations (sous-pression)	Mesure du flux dans les tubes par ex. pour eaux d'infiltrations dans une conduite alimentée par pompe – Venturimètre (mesure d'une différence de pression) – Mesure de la vitesse d'écoulement par réflexion d'écho ou par mesure magnéto-inductive	F et L: élevées M: débit maximal présumé + 100 % P: ± 5% de M Redondance: nécessaire à l' aide de sondes supplémentaires ou par d' autres mesures	– Prévoir des possibilités simples pour contrôler périodiquement les indications (manomètres, déversoir, canal de mesures à écoulement libre)	2.202
	Forage ouvert, piézomètre Mesure du niveau de la nappe par câble avec témoin lumineux ou sonore	F: néant L: élevée M: longueur totale du forage P: ± 0.2 m resp. ± 1 % de M Redondance: nécessaire moyennant une disposition de piézomètres en groupes	– Tuber le forage d' une manière étanche jusqu'à la prise de pression; protéger la tête du forage contre la pénétration d' eau de surface, de boue, de cailloux, etc. – Garantir une aération permanente	2.300
	Forage fermé Indication de pression par manomètre	F et L: élevées M: toute la hauteur comprise entre le manomètre et le couronnement du barrage P: ± 0.5 m resp. ± 1 % de M Redondance: nécessaire moyennant une disposition des prises de pression en groupes	– Méthode éprouvée – Les tubes et raccords du manomètre doivent être étanches – Ne pas provoquer artificiellement une décharge de pression, afin que les pressions puissent être saisies en totalité, même si elles se constituent très lentement – Aérer périodiquement les conduites – Contrôle périodique des manomètres indispensable	2.301
	Cellules de pression pneumatiques, hydrauliques ou électriques Installées dans des forages, ou à plusieurs niveaux du forage	F et L: élevées M: toute la hauteur comprise entre la cellule et le couronnement du barrage P: ± 0.5 m resp. ± 1 % de M Redondance: nécessaire moyennant un grand nombre de cellules ou une disposition en groupes	– Centralisation possible des mesures – Mesure hydraulique possible seulement si le poste de mesure se situe au-dessous du niveau minimal des pressions – Déterminer soigneusement le genre de filtre, de manière à éviter que des cellules se bouchent trop rapidement – Mise en place délicate surtout si installation de plusieurs cellules dans un même forage	2.302

C) Paramètres du comportement des digues en remblai

But	Equipement de mesures Appareils de mesures Méthodes de mesures	Exigences: F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision	Remarques	Réf. dans partie 3
Déformations de la digue et de sa fondation				
Déformées le long de lignes verticales , prolongées dans le rocher pour comparaison avec les résultats de mesure obtenus pendant des périodes antérieures.	Mesure d'angles et mesure de distance électro-optique depuis stations situées à l'aval de l'ouvrage	Exigences à fixer de cas en cas Redondance: indispensable Les déplacements éventuels des stations de mesure doivent être contrôlés périodiquement par triangulation	– Méthode de mesure éprouvée mais délicate A n'appliquer qu'au cas où une installation de pendules n'est pas possible – Mesures nécessitant des conditions météorologiques favorables – Précision dépendante des distances et réfractions	2.101
Déformées le long de lignes horizontales avec prolongation dans les appuis et les versants de la vallée	Alignement par fil dispositif de mesure à un axe, avec optique pour viser le fil qui représente un plan de référence vertical	F et L: très élevées M: déformation maximale calculée + 50% P: ± 1 mm, resp. $\pm 1\%$ de M Redondance: indispensable moyennant: – Instrument de réserve – Station de contrôle pour l'instrument – Combinaison avec triangulation, pendules, et extensomètres	– Précision indépendante de la portée du fil tendu – Ne convient que pour des ouvrages rectilignes – La portée maximale est limitée par le poids et la qualité du fil d'acier	2.110
	Nivellement	F et L: modérées P: ± 1 mm Redondance: nécessaire selon les circonstances, en combinaison avec triangulation Prévoir des groupes de points de références sur les deux rives	– Méthode éprouvée et simple si on utilise des appareils modernes	2.111
	Alignements optiques	Exigences à fixer de cas en cas Redondance: indispensable en combinaison avec triangulation	– Méthode éprouvée et simple, Pour le reste mêmes remarques que pour les mesures d'angles	2.112
	Mesures d'angles et de distances	Voir même mesure sous rubrique " Déformées le long des lignes verticales "	Voir mêmes remarques sous rubrique " Déformées le long des lignes verticales "	2.101
	Polygonales	Exigences à fixer de cas en cas Redondance: indispensable en combinaison avec triangulation	– Mesure délicate – Rattachement indispensable à la triangulation	2.113
Tassement dû au poids propre et à la charge d' eau	Repère de tassement vertical	F et L: élevées M: 50 + 100 m P: ± 5 cm (phase de construction) ± 1 cm (opération, après reconstruction) Redondance: nécessaire avec nivellement	– Eléments tubulaires < 6m – vérifier soigneusement la verticalité lors de la mise en place, – difficultés de réalisation pour systèmes inclinés – sondes électriques – combinaison possible avec un inclinomètre à tube	3.101
	Repère de tassement hydraulique	F et L: élevées M: quelques mètres P: ± 1 cm Redondance: nécessaire avec repère de tassement et nivellement	– tubes communicants et lecture directe sur le tube de niveau; 3 tuyaux par point de mesure – très précis; quelque fois délicat, sensible au gel – dégazage de l'eau de mesure nécessaire	3.102

C) Paramètres du comportement des digues en remblai

But	Equipement de mesures Appareils de mesures Méthodes de mesures	Exigences: F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision	Remarques	Réf. dans partie 3
Déformation de la digue et de sa fondation (Suite)				
Tassements et déformées le long de lignes mesures globales sur grands tronçons de mesure ou mesures différentielles entre repères aménagés sous forme d'une chaîne	Extensomètres à tiges et à fils à une ou à plusieurs tiges (ou fils)	F, L et M: à fixer de cas en cas P: ± 1 mm Redondance: pas toujours nécessaire; peut être atteinte par: – Installation d' extensomètres à plusieurs endroits comparables – Subdivision en plusieurs tronçons – Combinaison avec nivellement	– Travaux de mise en oeuvre de l'ancrage et injection des gaines de protection délicats – Télémessure possible	2.120
	Défectomètre, Clinomètre Déformations globales ou par tronçons, respectivement déformations différentielles	Exigences à fixer de cas en cas Redondance: n' est pas toujours nécessaire	– Sonde à pendule tubée – Précision dépendant fortement du système de guidage de l' instrument; – Travaux de mise en oeuvre et injection des tubes de guidage délicats – Indiqué pour localiser des discontinuités (fissures) et observer leurs mouvements – Mesures et interprétation des mesures demandent beaucoup de temps	2.121
Déplacement spatial de points, y compris l' influence des environs	Triangulation de cas en cas combinée avec: – Polygonales et nivellements – Mesures de distances électro-optiques – Pendules optiques, pendules – Alignements, extensomètres	F et L: très élevées P: (triple valeur de l' erreur moyenne) $\leq \pm 5$ mm pour stations de mesures et points de contrôle importants $\leq \pm 10$ mm pour les autres points Redondance: indispensable moyennant: – Points et éléments de mesure en sur-abondance – Combinaison avec d' autres équipements de mesure	– Le réseau géodésique doit englober un espace important et permettre: – l' observation à long terme des déformations de l' ouvrage et de ses alentours, et – le contrôle des déplacements éventuels des points de références d' autres équipements de mesure (redondance) – Mesure délicate qui ne peut être exécutée qu' à intervalles importants – Concevoir des mesures réduites permettant l' appréciation rapide de l' état des déformations – Archiver d' une manière sûre les données et les indications relatives aux méthodes de mesures et de calculs	2.130
Mouvements dans les fissures et joints accessibles – Dilatations – Parfois mouvements de cisaillement	Points-repères (boulons, etc) pour: - Fleximètre - Micromètre - Déformètre - Dilatomètre	F et L: selon le but M: 10 mm P: ± 0.05 mm Redondance: selon le but	– Les mesures sur les parois d' une galerie ou d' une niche, ne sont souvent pas représentatives du comportement du massif – Des témoins adéquats peuvent souvent remplacer un équipement de mesure – Télémessure possible	2.140

But	Equipement de mesures Appareils de mesures Méthodes de mesures	Exigences: F = Fiabilité L = Longévité M = Plage de mesure P = Précision	Remarques	Réf. dans partie 3
Percolation d'eau à travers la digue et sa fondation				
Débit des eaux d'infiltrations et de drainage (par zones et global)	Mesure volumétrique avec récipient taré et chronomètre resp. par supplantation de volume (par ex. à l'aide d'une tige étalonnée dans des forages inclinés vers le bas)	F et L: modérées M: débit maximal présumé + 100 % P: $\pm 0,05$ l/s, resp. ± 5 a 10 % de M Redondance: pas nécessaire	– Méthode limitée à des débits modérés jusqu' à 10 l/s; Le temps de remplissage du récipient doit être d'au moins 10 secondes	2.200
	Déversoir / canal de mesure parfois avec enregistrement	F et L: élevées M: débit maximal présumé + 100 % P: $\pm 5\%$ de M Redondance: pas nécessaire	– Enlever périodiquement les dépôts de sédiments – Pas indiqué pour des débits < 0.05 l/s – Pour le débit total du barrage, prévoir l' enregistrement et un signal d'alarme	2.201
	Mesure du flux dans les tubes par ex. pour eaux d' infiltrations dans une conduite alimentée par pompe – Venturimètre (mesure d'une différence de pression) – Mesure de la vitesse d' écoulement par réflexion d' écho ou par mesure magnéto-inductive	F et L: élevées M: débit maximal présumé + 100 % P: $\pm 5\%$ de M Redondance: nécessaire à l' aide de sondes supplémentaires ou par d' autres mesures	– Prévoir des possibilités simples pour contrôler périodiquement les indications (manomètres, déversoir / canal de mesures à écoulement libre)	2.202
Pression de l'eau de percolation dans la digue (noyau et corps d' appui) et dans sa fondation (sous-pression et pression interstitielle de l' eau)	Forage ouvert / piézomètre Mesure du niveau de la nappe par câble avec témoin lumineux ou sonore	F: néant L: élevée M: Longueur totale du forage P: $\pm 0,2$ m resp. $\pm 1\%$ de M Redondance: nécessaire moyennant disposition de piézomètres par groupes	– Tuber le forage d' une manière étanche jusqu' à la prise de pression; protéger tête du forage contre la pénétration d' eau de surface, de boue, de cailloux, etc. – Garantir une aération permanente – Contrôle de fonctionnement par rinçage	2.300
	Forage fermé Indication de pression par manomètre	F et L: élevées M; toute la hauteur comprise entre le manomètre et le couronnement de la digue P: $\pm 0,5$ m resp. $\pm 1\%$ de M Redondance: nécessaire moyennant: – disposition des prises de pression en groupes	– Méthode éprouvée – Les tubes et raccords du manomètre doivent être étanches – Ne pas provoquer artificiellement une décharge de pression, afin que les pressions puissent être saisies en totalité, même si elles se constituent très lentement – Aérer périodiquement les conduites – Contrôle périodique des manomètres indispensable	2.301
	Cellules de pression pneumatiques, hydrauliques ou électriques Installées dans le remblai dans des forages, à une ou plusieurs cellules par niveau	F et L: élevées M: toute la hauteur comprise entre la cellule et le couronnement du barrage P: $\pm 0,5$ m resp. $\pm 1\%$ de M Redondance: nécessaire – Prévoir un grand nombre de cellules ou – les disposer en groupes	– Centralisation possible des mesures – Mesure hydraulique possible seulement si le poste de mesure se situe au-dessous du niveau minimal des pressions – Déterminer soigneusement le genre de filtre, de manière à éviter que des cellules se bouchent trop rapidement – ne pas entrelacer les câbles et les conduites – les câbles et les conduites sont sensibles aux tassements différentiels	2.302
Altérations physiques ou chimiques (Erosion, dissolution)	Turbidimètre	F et L: élevées M: 0 - 500 ppm P: 1 ppm Redondance: nécessaire – Analyse d' échantillons d' eau	– Détermination des matières dissoutes ou en suspension – Un local abrité est nécessaire – Etalonnage après analyse en laboratoire de l' eau de percolation	3.301

Messanlagen zur Talsperrenüberwachung

Konzept, Zuverlässigkeit und Redundanz

Teil 1: Konzept

1. Einleitung

Eine Talsperre ist äusseren Belastungen ausgesetzt. Sie bewirken Verformungen und Durchsickerungen des Bauwerks und seines Untergrunds, die in bestimmter Weise von den Belastungen abhängig sind. Treten Abweichungen vom Normalverhalten auf, ist unter Umständen die Sicherheit der Stauanlage gefährdet. Die Belastungen einer Talsperre und ihr Verhalten müssen deshalb geeignet, d. h. so überwacht werden, dass ein allfällig anomales Verhalten frühzeitig erkannt werden kann, damit rechtzeitig die notwendigen Massnahmen zur Abwendung der aufgetretenen Gefährdung ergriffen werden können. Dazu braucht es sowohl Messungen als auch visuelle Kontrollen, weil weder das eine noch das andere für sich allein genügt, das Verhalten einer Talsperre ausreichend zu überwachen. Jede Talsperre muss deshalb über eine angemessene Messanlage, d. h. über eine Messanlage verfügen, die auf die Zielsetzung, den Sperrtyp, die besonderen Standortgegebenheiten und die Grösse der Anlage abgestimmt ist.

Weil sich sowohl die Erfahrung bezüglich Talsperren als auch die Messtechnik laufend verbessern, müssen die Messanlagen auch periodisch auf ihre Eignung hin überprüft und nötigenfalls ergänzt oder erneuert werden.

Bei der Ausgestaltung respektive Überprüfung einer Messanlage muss berücksichtigt werden, dass

– das Bauwerk und sein Untergrund eine Einheit bilden und beide in ein Umgebungsgebiet eingebettet sind, das ebenfalls einen Einfluss ausüben kann,

– Abweichungen vom Normalverhalten sich sowohl relativ rasch als auch langsam entwickeln können und

– im Falle einer festgestellten Anomalie die Messdaten auch ausreichen sollten, die Ursache zu ermitteln.

Dies verlangt, dass die Messanlage so konzipiert wird, dass sie sowohl das Kurz- als auch das Langzeitverhalten geeignet zu erfassen erlaubt und überdies ein ausreichend differenziertes Bild über das Verhalten des Bauwerks, seines Untergrunds und der Umgebung vermitteln kann. Zur Erfassung des Kurzzeitverhaltens genügen relativ wenige Messwerte, falls diese so gewählt werden, dass sie repräsentativ Auskunft darüber geben, ob das Verhalten des Bauwerks und seines Untergrunds grundsätzlich normal ist oder nicht. Diese Hauptindikatoren müssen zwangsläufig relativ häufig kontrolliert werden, und es sollten hierfür Messgeräte/Messmethoden eingesetzt werden, die bezüglich Messung und Auswertung möglichst einfach, d. h. wenig aufwendig sind. Zur Erfassung des Langzeitverhaltens und zur Beurteilung einer allfälligen Anomalie muss das Verhalten differenzierter gemessen werden. Weil weniger oft gemessen werden muss, können auch Messverfahren eingesetzt werden, die bezüglich Messung und/oder Auswertung aufwendiger sind oder nur von Spezialisten ausgeführt werden können.

Die Messdaten müssen jederzeit mit der gewünschten Zu-

verlässigkeit zur Verfügung stehen. Jeder Ausfall und jede Fehlerhaftigkeit kann die Überwachung vorübergehend beeinträchtigen oder zu einer Verunsicherung führen. Selbst wenn schadhafte Einrichtungen oder Instrumente rasch ersetzt werden können, besteht die Gefahr, dass der Nullpunkt dadurch verändert wird. Die Homogenität der Datenreihe ist damit gestört und die Analyse des Langzeitverhaltens zumindest erschwert. Es sind deshalb dauerhafte und robuste Einrichtungen und Instrumente einzusetzen. Eine allfällige Einbusse an Messgenauigkeit ist in der Regel weniger schwerwiegend als ein Ausfall. Mitentscheidend für die gewünschte Langlebigkeit und Zuverlässigkeit ist, dass die Einrichtungen und Instrumente sorgfältig gewartet und periodisch (oder regelmässig) bezüglich ihrer Genauigkeit überprüft werden.

Der erfassbare Messbereich muss gross genug sein, damit auch ausserordentliche Belastungszustände und anomale Verhaltenswerte (möglichst) uneingeschränkt erfasst werden können. Es sind gerade diese Zustände, die die Sicherheit einer Talsperre allfällig beeinträchtigen und nötigenfalls angemessene Massnahmen erfordern.

Die Präzision der Messdaten muss nicht höher sein, als die realen Möglichkeiten der Auswertung und Beurteilung dies noch rechtfertigen. Dabei gilt es insbesondere zu beachten, dass manche Gesetzmässigkeiten, die das Talsperrenverhalten bestimmen, nur näherungsweise bekannt sind und Einflüsse wirksam sind, die (vorläufig) nicht quantifizierbar sind (wie die saisonalen Klimaeinflüsse auf das Untergrundverhalten).

Weil auch einfache, robuste Einrichtungen und Instrumente fehlerhaft sein oder ausfallen können, sollte die Messanlage unbedingt so konzipiert werden, dass sie ausreichende Redundanzen besitzt. Unter Redundanz wird dabei nicht nur die (unabhängige) Verdoppelung einer Messeinrichtung verstanden, sondern auch die Möglichkeit, einen Messwert mit Hilfe anderer Messeinrichtungen überprüfen oder rekonstruieren zu können (wie z. B. Pendel-Polygonzug, Alignment-Triangulation, Setzpegel-Nivellement). Soweit möglich, ist letzterem der Vorzug einzuräumen, weil die redundante Messeinrichtung auch andere Informationen liefert, also bivalent ist.

2. Äussere Belastungen

Die Verformung einer Talsperre wird teilweise durch den Wasserstand bestimmt. Bei Staumauern sind zusätzlich die Temperaturverhältnisse, bei Staudämmen das Gewicht des Dammkörpers mitbestimmend. Auch Erdrücke können massgebend sein. Die Durchsickerung wird bei beiden Sperrtypen primär durch den Wasserstand und sekundär durch Regen und/oder Schneeschmelze bestimmt. Für die Verhaltensbeurteilung müssen demzufolge der Wasserstand, repräsentative Temperaturen und die Niederschläge bekannt sein, d. h. in angemessenen Zeitabständen gemessen werden.

Das Messen des Wasserstandes erfolgt heute praktisch ausnahmslos mittels Druckwaagen. Eine Redundanz ist unbedingt anzustreben. Sie kann beispielsweise mittels manometrischer Druckmessung an einer vorhandenen oder neu zu erstellenden Verbindungsleitung zum Stausee verwirklicht werden. Der Messbereich sollte wenigstens bis auf die Höhe der Krone reichen, weil die Kenntnis ausserordentlicher Wasserstände für die laufende Beurteilung von Hochwassersituationen und nachher für die Ermittlung der aufgetretenen Hochwasserzuflüsse benötigt wird.

Temperaturmessungen sind erforderlich, um einerseits den Temperatureinfluss auf das Verformungsverhalten einer Staumauer mitberücksichtigen und andererseits beurteilen

zu können, ob der Niederschlag in Form von Regen oder Schnee gefallen ist oder vorhandener Schnee einem Schmelzprozess unterworfen ist. Für letzteres genügt es, die Lufttemperatur am Standort der Talsperre zu kennen. Wo tägliche Temperaturablesungen nicht sichergestellt sind, empfiehlt sich die Installation eines Thermographen oder wenigstens eines Quecksilberthermometers mit Maximal/Minimal-Anzeige. Eine Redundanz ist nicht zwingend erforderlich, weil im Pannenfall vorübergehend auf anderweitige Temperaturmessungen zurückgegriffen werden kann. Zur bestmöglichen Beurteilung des Temperatureinflusses auf das Verformungsverhalten von Staumauern müssen die Betontemperaturen an einer ausreichenden Anzahl Messstellen innerhalb des Staumauerkörpers bekannt sein. Für die Messung stehen entweder einbetonierte Temperatursonden oder Quecksilberthermometer zur Verfügung, die in offene Bohrlöcher eingeführt sind. Die erforderliche Redundanz wird dadurch erreicht, dass mehr Sonden als benötigt eingebaut oder verwendet werden.

Die *Niederschlagsmessung* sollte bei keinem Staudamm, vorteilhafterweise auch bei keiner Staumauer fehlen. Es genügt, die Tagesniederschläge zu kennen. Die Niederschlagsmessung muss nicht zwingend bei der Talsperre, aber auch nicht zu weit entfernt erfolgen, damit sie ausreichend repräsentativ ist. Wo tägliche Messungen nicht sichergestellt sind, empfiehlt sich gegebenenfalls die Installation eines Pluviographen. Eine Redundanz ist nicht erforderlich, weil vorübergehend auf weiter entfernte Niederschlagsmessungen zurückgegriffen werden kann.

Die *Messung von Erdrücken* zur Ermittlung der Gesambelastung kritischer Bauteile kann in gewissen Fällen bei Staudämmen oder Geschieberückhaltesperren zweckmässig sein. Die Auswertung der Messdaten ist problematisch.

3. Verformung

Die Verformung einer Talsperre ist vom Sperrtyp, den Untergrundverhältnissen und den äusseren Belastungen abhängig. Wegen der unterschiedlichen Baumaterialien verhalten sich Staumauern und Staudämme völlig verschieden. Staumauern verformen sich unter dem Einfluss des Wasserdrucks und der Temperatur im wesentlichen elastisch. Bleibende Verformungen können als Folge der Anpassung des Untergrunds an die neue Auflast, Alterung des Betons und Ermüdung des Fundamentsfelsens auftreten. Solange sie ein kritisches Mass nicht übersteigen, sind sie ungefährlich. Völlig anders verhalten sich Staudämme. Ihre Verformung ist vorwiegend bleibender Natur. Unter dem Einfluss des Gewichts von Dammkörper und gestautem Wasser geht die Setzung des Schüttmaterials (und des Untergrunds, sofern dieser aus Lockergesteinen besteht) auch nach dem Bauende über Jahrzehnte weiter, wenn auch mit abnehmender Tendenz. Zusätzlich bewirkt der Wasserdruck vorwiegend bleibende Horizontalverschiebungen des Dammkörpers, und zwar hauptsächlich senkrecht zur Dammachse. Eigentliche elastische Verformungsanteile sind nicht bedeutend und auch nicht charakteristisch für das Bauwerksverhalten.

Wegen des unterschiedlichen Normalverhaltens von Staumauern und Staudämmen ist auch die Aufgabe der Überwachung verschieden. Bei Staumauern handelt es sich im wesentlichen darum, die Entwicklung der elastischen und der bleibenden Verformungen zu erfassen. Hierzu muss die effektive d. h. gemessene Verformung mit dem berechneten oder anders ermittelten Normalverhalten verglichen werden. Bei Staudämmen gilt es demgegenüber den Trend der bleibenden Verformung aufmerksam zu verfolgen, um allfällige Abweichungen vom Normaltrend erkennen zu kön-

nen. Auch die Grössenordnung der zu erfassenden Verformungswerte ist unterschiedlich. Bei Staumauern liegt sie im Millimeter- oder Zentimeterbereich, bei Staudämmen im Zentimeter- oder Dezimeterbereich.

Die Verformung einer Talsperre und ihres Untergrundes kann erfasst werden, wenn die *räumliche Verschiebung ausgewählter Punkte* gegenüber Bezugspunkten gemessen wird. Liegen die Bezugspunkte innerhalb der Talsperre, können nur Relativbewegungen erfasst werden, liegen sie ausserhalb (in der Umgebung oder im Untergrund), und zwar weiter entfernt als der Einfluss der Talsperre wirkt, können absolute Verschiebungen gemessen werden. Für die laufende Überwachung des Verformungsverhaltens genügen Relativbewegungen. Zur Verfolgung bleibender Verformungen werden Absolutwerte benötigt. Ein Messsystem allein innerhalb des Talsperrenkörpers genügt deshalb nicht. Bei Staumauern wäre es ideal, wenn Bezugspunkte in der unbeeinflussten Tiefe des Fundamentsfelsens vorhanden wären, weil mit einfachen Messeinrichtungen direkt absolute Verformungswerte erhalten würden (und auch häufig gemessen werden könnten). Es werden aber in jedem Fall auch Bezugspunkte in der unbeeinflussten Umgebung benötigt, weil damit auch das Verhalten der Umgebung erfasst werden kann. Dies verlangt, dass das Messsystem in der Talsperrenebene durch ein möglichst grossräumiges Triangulationsnetz (und Nivellementszüge) ergänzt und mit jenem verbunden wird. Eine zielkonforme Verformungsüberwachung erfordert also eine räumliche, d. h. *dreidimensionale Messanlage*.

Die Kontrolle des Verformungsverhaltens der Talsperre und ihres Untergrunds kann am besten verwirklicht werden, wenn die *Verschiebungsmessungen* für Punkte erfolgen, die *längs horizontaler und vertikaler Linien* angeordnet sind (Messen längs Linien) und diese Messlinien möglichst weit in den Untergrund verlängert werden (Einbezug des Untergrunds). Werden die Verschiebungen der Schnittpunkte in einem derartigen orthogonalen Messnetz längs der horizontalen und vertikalen Linien mit verschiedenen Messmethoden gemessen, ist die nötige Redundanz erreicht.

Sind in einer Talsperre Kontrollgänge und Schächte vorhanden, können für die Verschiebungsmessung in der vertikalen Richtung Pendel (Gewichts- oder Schwimmpendel) und in der horizontalen Richtung Polygonzüge installiert, also bewährte Messmethoden eingesetzt werden (= innere Messanlage). Fehlen Kontrollgänge und Schächte (insbesondere bei Dämmen, oft auch bei dünnen Bogenmauern und kleinen Gewichtsmauern), kann das gleiche Ziel mit einem orthogonalen Raster von Messpunkten auf der luftseitigen Oberfläche des Bauwerks erreicht werden, die von Fixpunkten ausserhalb der Talsperre mittels Winkelmessungen (eventuell ergänzt mit optischer Distanzmessung) eingemessen werden (= äussere Messanlage). Die Anwendung geodätischer Deformationsmessungen hat allerdings den Nachteil, dass die Messungen aufwendig sind, nur von Spezialisten ausgeführt werden können und somit nicht in kürzeren Zeitabständen vorgenommen werden können. Für die laufende Überwachung (Überwachung des Kurzzeitverhaltens) muss deshalb die Lage ausgewählter Punkte (normalerweise Kronenpunkte, ausnahmsweise auch Punkte längs einer vertikalen Linie) mit einfachen Winkelmessungen oder mit einem die Messanlage ergänzenden Alignment überwacht werden. Die Setzung von Staudämmen kann einfach und zuverlässig mit einem Nivellement über die Krone erfasst werden. Eine Redundanz ist nicht erforderlich, weil Nivellemente nötigenfalls ohne Problem wiederholt werden können. Wichtig ist jedoch, dass sie genügend weit in die Umgebung hinaus verlängert wer-

den. Für die Messung differenzierter Verformungen im Damminnern kommen Setzpegel, Schlauchwaagen und Extensometer zur Anwendung.

Zur *Verlängerung der Messlinien in den Untergrund* können Schwimmpendel, Extensometer (womöglich Mehrstangenextensometer in 2, besser 3 verschiedenen Richtungen zwecks Erfassung der räumlichen Verschiebung), in speziellen Fällen auch Gleitmikrometer (gegebenenfalls mit eingebautem Inklinometer, damit ausser Längen- auch Neigungsänderungen erfasst werden können) eingesetzt werden. Falls Sondier- oder Drainagegöhlen vorhanden sind, können Polygonzüge in die Widerlager verlängert werden. Auf eine eigentliche Redundanz kann verzichtet werden, wenn die Überwachung des Untergrunds nicht zu spärlich dotiert ist.

4. Durchsickerung

Als Folge des gestauten Wassers resultieren im Talsperrenkörper und im Untergrund Durchsickerungen; im Untergrund auch dann, wenn ein Dichtungsschleier vorhanden ist. Bei Staumauern sind die in das Bauwerk eindringenden Sickerwassermengen klein und bedingt durch Undichtigkeiten im Beton, in den Blockfugen sowie längs der Kontaktfläche Beton-Fels. Eine Vergrößerung der Sickerwassermenge gegenüber dem Normalverhalten ist in jedem Fall ein Anzeichen für eine potentielle Gefährdung des Bauwerks. Die Sickerströmung im Untergrund bewirkt Auftriebskräfte. Sie sind bei Staumauern aufmerksam zu verfolgen, weil eine Vergrößerung des Auftriebs die Standsicherheit des Bauwerks vermindert. In Staudämmen resultiert wie im Untergrund eine Sickerströmung, weil die verwendeten Baustoffe (einschliesslich jener eines allfälligen Dichtungskerns) mehr oder weniger wasserdurchlässig sind. Die Durchsickerung und die Unterströmung des Damms bestimmen die Grösse der Porenwasserspannungen und des Auftriebs, die für die Gesamtstabilität des Bauwerks von hoher Bedeutung sind. Die Durchsickerungen müssen deshalb aufmerksam überwacht werden, weil jede Abweichung vom Normalverhalten auf Vorgänge im Damm oder im Untergrund hinweist, die für die Sicherheit des Bauwerks gefährlich werden könnten.

Eine Globalauskunft, ob sich die Durchsickerung einer Talsperre (Staumauer und Staudamm) normal verhält, liefert die *Gesamtmenge des Sickerwassers*. Sie kann volumetrisch (d. h. mit Gefäss und Stoppuhr) oder mit Hilfe eines Messüberfalls, also sehr einfach und zuverlässig bestimmt werden. Eine Redundanz ist deshalb nicht erforderlich. Demgegenüber sollte, wo immer dies möglich ist, dafür gesorgt werden, dass die Sickerwassermenge auch *für einzelne Zonen* separat gemessen werden kann, weil im Falle eines anomalen Verhaltens die Lokalisierung und damit die Ursachenabklärung erleichtert werden.

Bei Staudämmen, die lösliche oder erodible Materialien enthalten oder auf solchen fundiert sind, sollte ständig oder zumindest regelmässig auch die *Trübung* und periodisch der *Chemismus des Sickerwassers* kontrolliert werden. Damit können wertvolle Aussagen über die Stabilität des Materials und der Foundation (insbesondere der Injektionen) erhalten werden.

Signifikant für das Normalverhalten eines Staudamms sind der Verlauf der Durchsickerung und die damit verbundenen *Porenwasserspannungen* besonders im Kern und in der Foundation. «Sie dürfen jene Werte nicht überschreiten, die der Bemessung zugrunde gelegt wurden, und sollten deshalb überwacht werden. Dies kann mit eingebauten Druckmesszellen recht zuverlässig geschehen, und zwar um so

besser, je mehr Querprofile mit (möglichst vielen) Messgeräten ausgerüstet sind. Wird dieser Idee nachgelebt, ist bis zu einem gewissen Grad auch eine Redundanz gewährleistet, die nötig ist, weil leider die zeitliche Ausfallrate nicht unerheblich ist.

Obschon neuste Erfahrungen zeigen, dass ein Einbau von Druckmesszellen auch in bestehende Staudämme möglich ist, dürfte eine nachträgliche Ausrüstung nicht immer in Frage kommen. Man wird sich deshalb gegebenenfalls damit begnügen müssen, den Verlauf der Durchsickerung, d. h. die *Drucklinie der Durchsickerung* an ausgewählten Punkten zu kontrollieren. Dies kann mit Standrohren erfolgen, in denen die Höhe des Wasserspiegels eingemessen wird (z. B. mittels einer Brunnenpfeife). Weil die Messung der Drucklinie eine gewisse Redundanz zur Messung der Porenwasserspannungen darstellt und ihr Verlauf ein wichtiger Verhaltensindikator für Staudämme ist, sollten normalerweise bei keinem Staudamm Standrohre fehlen, und zwar in mehreren Querprofilen angeordnet.

Die Sickerströmung unter einer Staumauer bewirkt einen *Auftrieb*, welcher der (stabilisierenden) Gewichtskraft des Talsperrenkörpers entgegenwirkt. Es wird deshalb normalerweise durch Erstellen eines Dichtungsschleiers und nötigenfalls von Drainagebohrungen dafür gesorgt, dass die Auftriebskräfte möglichst klein bleiben. Dies verlangt jedoch zwangsläufig, dass die Wirkung dieser Massnahmen kontrolliert, d. h. der Auftrieb gemessen wird. Auf Auftriebsmessungen kann nur in Fällen verzichtet werden, wo die Standsicherheit des Bauwerks auch bei ungünstigsten Auftriebsverhältnissen ausreichend ist. Wegen der heterogenen Untergrundsverhältnisse (Klüftung) sollte in möglichst vielen Querprofilen und jeweilen an mehreren Stellen zwischen der Wasser- und der Luftseite der Staumauer gemessen werden, damit der Druckabbau verfolgt werden kann. Vielfach genügt es, die Auftriebsdrücke an der Aufstandsfläche zu bestimmen. In Ausnahmefällen empfiehlt es sich, auch in verschiedenen Tiefen zu messen. Für Auftriebsmessungen an der Aufstandsfläche sind Piezometer mit aufgesetztem Manometer besonders geeignet, weil sie zuverlässig, ausreichend genau und wenig pannen anfällig sind. 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 der Druckentnahmestelle oder -leitung oder Defekt des Manometers auftreten. Druckabnahmen dürfen deshalb nicht a priori positiv bewertet werden. Für Druckmessungen in der Tiefe des Foundationsfelsens kommen Druckmesszellen und Standrohrpiezometer in Frage. Weil Auftriebsmessgeräte ausfallen können, ist eine Redundanz dadurch sicherzustellen, dass genügend Messstellen eingerichtet und/oder bei jeder Messstelle zwei unabhängige Geräte eingesetzt werden.

Wird der Untergrund drainiert, ist das *Drainagewasser* zu messen. Eine Abnahme der Menge kann ein Indiz sein, dass die Wirkung der Drainage nachlässt. Die Drainagewassermenge kann volumetrisch oder mit einem Messüberfall, also einfach und zuverlässig bestimmt werden. Eine Redundanz ist deshalb nicht erforderlich.

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. Eine Redundanz ist deshalb nicht erforderlich.

Teil 2: Messanlagen und Messmethoden

Erläuterungen zu den Tabellen

1. Kolonne: Zweck

In dieser Kolonne sind die Messziele eingeordnet in Belastungsgrößen (Lasten) und Reaktionen (Verhaltensindikatoren für Stau-mauern und für Staudämme).

2. Kolonne: Messanlage, Messgeräte, Messmethoden

Zu jedem Messziel werden die zweckmässigsten und gebräuchlichsten Geräte/Methoden angegeben.

3. Kolonne: Anforderungen

Die an die Geräte/Methoden gestellten Anforderungskriterien werden wie folgt definiert:

Z – Hohe *Zuverlässigkeit* wird für die Ermittlung der Messgrößen gefordert, die zur einwandfreien Überwachung der Talsperren unentbehrlich sind und jederzeit verfügbar sein sollen.

L – Für wichtige Messgrößen sind – nebst ausreichenden Redundanzen – *langlebige* Messeinrichtungen erforderlich, wenn Rekonstruktionen der Messanlagen, Ersatz von Teilen oder die Herstellung der Beziehungen zu den früheren Messungen unverhältnismässig zeitaufwendig oder unmöglich sind.

M – *Messbereiche* müssen für ausserordentliche Belastungen und unerwartetes Verhalten ausreichend ausgelegt sein.

P – Die geforderte *Präzision* muss alle Fehler der gesamten Messeinrichtung und des ganzen Messvorganges abdecken (Unge-nauigkeiten der Instrumente und ihrer Zentrierungen, Fehler-einfluss der Temperaturen, Einbettungsmaterialien, Reibun-gen, Abnützungen, Nullpunktverschiebungen, Linearitätsab-weichungen usw.).

Unter *Redundanz* wird einerseits die (unabhängige) Verdoppelung einer Messeinrichtung verstanden, andererseits aber auch die Mög-lichkeit, einen Messwert mit Hilfe anderer Messeinrichtungen über-prüfen oder rekonstruieren zu können.

4. Kolonne: Bemerkungen

In dieser Kolonne erscheinen wichtige Hinweise und Angaben oder charakteristische Merkmale bezüglich Messziele und Messeinrich-tungen.

5. Kolonne: Blatt in Teil 3

Hinweis auf Kommentarblätter in Teil 3, wo für die einzelnen Mess-geräte und Messmethoden nähere Angaben bezüglich Kurzbe-schrieb, Redundanzmöglichkeiten, technische Anforderungen, mögliche Störungen und Messfehler, notwendige Funktionskontrol-len sowie weitere Bemerkungen gegeben werden.

A) Lasten

Zweck	Messanlage Messgeräte Messmethode	Anforderungen Z = Zuverlässigkeit L = Langlebigkeit M = Messbereich P = Präzision	Bemerkungen	Blatt in Teil 3
Wasserstand				
Hydraulische Belastung	Druckwaage Schwimmpegel Lattenpegel Manometer Lichtlot Brunnenpfeife Echolot	Z: sehr hoch L: keine M: bis über Talsperrenkrone P: ± 10 cm Redundanz: unbedingt notwendig	Wichtige Messung Messbereich muss auch Hoch-wasser erfassen können	1.000
Temperaturen				
Luft und Wasser Äussere thermische Belastung, Einfluss auf Schneeschmelze	Thermograph kontinuierliche Aufzeichnung der Temperaturganglinie Quecksilberthermometer Minimum / Maximum und Momentantemperatur	Z: keine L: keine M: -30° C bis +40° C P: ± 1° C Redundanz: erwünscht, beim Thermo-graphen notwendig	Diese Instrumente sind leicht ersetzbar	1.100
Beton Innere thermische Belastung (da diese die Betonverformung direkt beeinflusst)	Elektrisches Thermometer Quecksilberthermometer in Bohrlochern	Z: sehr hoch L: sehr hoch M: -10° C bis +50° C P: ± 0.5° C Redundanz: notwendig, genügend In-strumente vorsehen	Der Messbereich bis +50° ist nur für den Bauzustand notwendig; bei nachträglicher Einbau ge-nügt ein Bereich bis +30° C	1.110
Niederschlag				
Niederschlag im Bereich der Tal-sperre Einfluss auf das Sickerwasser	Pluviometer Pluviograph	Z: mässig L: keine Redundanz: nicht notwendig	Die Messung ist nicht in un-mittelbarer Talsperrennähe erforderlich	1.200
Erddruck				
Belastung kritischer Bauteile durch Schüttmaterial	Erddruckmessdose	Z: mässig L: hoch M: gesamte Auflast (0 bis 3 N / mm ²) P: ± 5 % des Messbereichs Redundanz: nicht notwendig	Der Deformationsmodul des Messgerätes ist auf das Schütt-material abzustimmen Auswertung und Ergebnisse sind problematisch	1.300

B) Verhaltensindikatoren für Staumauern

Zweck	Messanlage Messgeräte Messmethode	Anforderungen Z = Zuverlässigkeit L = Langlebigkeit M = Messbereich P = Präzision	Bemerkungen	Blatt in Teil 3
Verformungen der Staumauer und ihrer Fundation				
Verformungen längs vertikalen Linien mit Fortsetzung in den Untergrund zum Vergleich mit Messergebnissen vorangegangener Perioden sowie mit den Annahmen und Resultaten der statischen Berechnungen	Pendel, Schwimmpendel zweiachsige Messschlitten mit Optik zum Anzielen des Pendeldrahtes, Pendeldraht dient als Bezugsachse	Z und L: sehr hoch M: maximal berechnete Durchbiegung + 50% P: $\pm 0,2$ mm bzw. $\pm 1\%$ von M Redundanz: unbedingt notwendig mittels – Ersatzinstrument – Prüfstation für Instrument – Kombination mit Triangulation, Polygonzügen, Alignementen, Extensometern	– bewährte präzise Messmethode – geringer Zeitaufwand für die Messung – Fernmessung möglich; Geber darf Pendellage nicht verfälschen	2.100
	Einfache Winkelmessung und Elektro-optische Distanzmessung ab Stationen im talseitigen Gelände	Anforderungen fallweise zu bestimmen Redundanz: unbedingt notwendig Allfällige Verschiebungen der Messstationen müssen periodisch mittels Triangulation oder Schwimmpendel überprüft werden	– bewährte, jedoch anspruchsvolle Messmethoden. Nur anwenden, wenn Einbau von Pendeln nicht möglich – Messung erfordert günstiges Wetter – Präzision von Distanzen und Refraktionen abhängig	2.101
Verformungen längs horizontalen Linien mit Fortsetzung in Widerlager und Talflanken	Draht - Alignement einachsige Messschlitten mit Optik zum Anzielen des Drahtes, der eine vertikale Bezugsebene markiert	Z und L: sehr hoch M: maximale berechnete Durchbiegung + 50% P: $\pm 0,2$ mm, bzw. $\pm 1\%$ von M Redundanz: unbedingt notwendig mittels – Ersatzinstrument – Prüfstation für Instrument – Kombination mit Triangulation, Pendel, Extensometern	– Gleichwertig wie Pendel Präzision unabhängig von Spannweite – nur für geradlinige Bauwerke geeignet – maximale Spannweite ist durch Gewicht und Qualität des Drahtes beschränkt	2.110
	Nivellement	Z und L: mässig P: ± 1 mm Redundanz: unter Umständen in Kombination mit Triangulation erforderlich Referenzpunktgruppen auf beiden Talseiten vorsehen	– bewährte und, bei Einsatz von modernen Geräten, einfache Messmethode	2.111
	Optische Alignemente	Anforderungen fallweise zu bestimmen Redundanz: unbedingt notwendig in Kombination mit Triangulation, Pendel	– bewährte, einfache Messmethode im übrigen gleiche Bemerkungen wie für "einfache Winkelmessungen"	2.112
	Einfache Winkel- und Distanzmessung	Siehe gleiche Messung in Rubrik "längs vertikalen Linien"	Siehe gleiche Messung in Rubrik "längs vertikalen Linien"	2.101
	Polygonzug	Anforderungen fallweise zu bestimmen Redundanz: unbedingt notwendig durch Kombination mit Triangulation, Pendel	– Sehr anspruchsvolle Messung Einpassungselemente aus Triangulation oder Pendelmessungen unentbehrlich	2.113

B) Verhaltensindikatoren für Staumauern (Fortsetzung)

Zweck	Messanlage Messgeräte Messmethode	Anforderungen Z = Zuverlässigkeit L = Langlebigkeit M = Messbereich P = Präzision	Bemerkungen	Blatt in Teil 3
Verformung der Staumauer und ihrer Fundation (Fortsetzung)				
Längenänderungen und Durchbiegungen längs Linien in Bohrungen global in langen Messstrecken oder differentiell in Ketten von kurzen Messstrecken	Stangen- und Drahtextensometer ein- oder mehrstufig	Z, L und M: fallweise zu bestimmen P: $\pm 0,5$ mm Redundanz: nicht immer notwendig; erreichbar durch – Einbau an mehreren vergleichbaren Orten – Unterteilung in Stufen – Kombination mit Schwimmpendel bzw. Nivellement	– Sehr anspruchsvoll bezüglich Einbau der Verankerung und Ummantelung der Hüllrohre – Fernmessung möglich	2.120
	Gleitmikrometer differentielle Längenänderungen Gleitklinometer differentielle Durchbiegungen; teils mit Gleitmikrometer kombiniert Deflektometer globale oder unterteilte Durchbiegungen bzw. differentiell (Ketten-deflektometer)	Anforderungen fallweise zu bestimmen Redundanz: nicht notwendig	– Präzision stark vom Führungssystem abhängig, zum Teil sehr präzise und zuverlässige Messeinrichtungen erhältlich – sehr anspruchsvoll bezüglich Einbau und Ummantelung der Führungsrohre – geeignet zur Lokalisierung und Bewegungsüberwachung von Diskontinuitäten (Klüfte) – Messung und Auswertung rel. zeitraubend	2.121
Räumliche Verschiebungen einzelner Punkte mit Einbezug der Umgebung	Triangulation fallweise kombiniert mit – Polygon- und Nivellementsügen – Elektro-optischen Distanzmessungen – Optischer Lotung, Pendel – Alignment, Extensometer	Z und L: sehr hoch P: (dreifacher mittlerer Fehler) $\leq \pm 3$ mm für Messstationen und wichtige Kontrollpunkte $\leq \pm 5$ mm für übrige Punkte Redundanz: unbedingt notwendig, mittels – überzähligen Punkten und Messelementen – Kombination mit übrigen Messanlagen	– grossräumig anzulegende Messanlage für langfristige Verformungsüberwachung des Bauwerkes und seiner Umgebung sowie für Verschiebungskontrolle der Referenzpunkte anderer Messeinrichtungen (Redundanz) – sehr anspruchsvolle, nur in grossen Zeitabständen durchführbare Messung; Teilmessungen für rasche Zustandsabklärungen einplanen – Daten sowie Angaben über Mess- und Auswertungsverfahren sicher archivieren	2.130
Bewegungen von Rissen und Fugen an zugänglichen Stellen – Dilatationen – fallweise Scherungen	Messanschläge (Bolzen usw.) für: - Tastuhren - Mikrometer - Deformeter - Dilatometer	Z und L: Je nach Zweck M: 10 mm P: ± 0.05 mm Redundanz: je nach Zweck	– an Wänden in Gängen, Stollen, Nischen usw. ist Messung oft nicht für das Verhalten im Massiv repräsentativ – zweckmässige Siegel können oft Messeinrichtungen ersetzen – Fernmessung möglich	2.140
Punktuelle Rotationen (Neigungen)	Klinometer – mit Wasserwaage und Mikrometer – mit direkter Anzeige (elektronisch)	Z und L: hoch M und P: je nach Zweck Redundanz: Messung ist nur in Kombination mit anderen Messanlagen z.B. Pendel geeignet	– im Bereich von Hohlräumen werden Resultate oft durch Spannungskonzentrationen und -umlagerungen beeinflusst – kurze Messketten können Ergebnisse verbessern	2.150
Punktuelle, spezifische Verformungen zur Überprüfung der Beanspruchung	Einbetonierte, elektrische Verformungsgeber mit Temperaturmessung kombiniert	Z und L: hoch M: – spezifische Verformung 2 mm/m – Temperatur - 10 bis + 50° C P: Erfassen der – Spannungen ± 0.2 N/mm ² – Temperatur ± 0.2 ° C Redundanz: notwendig mittels : – überzähligen Messstellen – anderen Messgeräten zum Vergleich	– häufige Ausfälle – oft von spezifischen Materialverhältnissen am Einbauort beeinflusst – Auswertung problematisch	2.160

B) Verhaltensindikatoren für Staumauern (Fortsetzung)

Zweck	Messanlage Messgeräte Messmethode	Anforderungen Z = Zuverlässigkeit L = Langlebigkeit M = Messbereich P = Präzision	Bemerkungen	Blatt in Teil 3
Durchsickerung durch Staumauer und Untergrund				
Sicker- und Drainagewassermengen (sektoriell und gesamtthaft)	Volumetrische Messung mit Behälter- und Stoppuhr bzw. durch Volumenverdrängung (z.B. mit Messstab in fallenden Bohrlöchern)	Z und L: mässig M: maximal erwartete Menge + 100 % P: $\pm 0,05$ l/s, bzw. ± 5 bis 10 % von M Redundanz: nicht notwendig	– nur für kleinere Mengen bis 10 l/s anwendbar, wobei die Fülldauer mindestens etwa 10 s betragen muss	2.200
	Messüberfall / Messkanal fallweise mit Registrierung	Z und L: hoch M: maximal erwartete Menge + 100 % P: ± 5 % von M Redundanz: nicht notwendig	– periodisch Sinterablagerungen entfernen – für Mengen < 0.05 l/s nicht geeignet – für Sammelstelle (Gesamtmenge) Registrierung und Alarmsignal vorsehen	2.201
	Messung in volldurchflossenen Rohren z.B. in Förderleitungen von Sickerwasserpumpen – Venturimeter (Druckdifferenzmessung) – Echolot oder magnetinduktive Messung (Fließgeschwindigkeit)	Z und L: hoch M: maximale erwartete Menge + 100 % P: ± 5 % von M Redundanz: notwendig mittels weiteren Messungen oder Gebern	– einfache Möglichkeiten zur periodischen Überprüfung der Anzeigen vorsehen (Manometer, Messüberfall, Messkanal im freien Abfluss)	2.202
Druckhöhe des im Bereich der Fundamente zirkulierenden Wassers (Auftrieb, Wasserdruck in den Felsklüften)	Offene Bohrung / Standrohr Abtastung der Wasserspiegellage mit Kabellichtlot oder Wasserpfeife	Z: keine L: hoch M: ganze Bohrungslänge P: ± 0.2 m bzw. ± 1 % von M Redundanz: notwendig, Anordnung in Gruppen	– Bohrung bis zur Druckentnahmestelle dicht verrohren; oben gegen Zufluss von Wasser oder Eindringen von Schlamm, Steinen usw. schützen – ständige Be- und Entlüftung gewährleisten	2.300
	Geschlossene Bohrung Druckanzeige mit Präzisionsmanometer	Z und L: hoch M: ganze Höhe von Manometer bis Staumauerkrone P: ± 0.5 m bzw. ± 1 % von M Redundanz: notwendig Anordnung in Gruppen	– Bewährtes Messverfahren – dichte Verrohrung und Manometeranschlüsse erforderlich – Druck in Zuleitungen nicht künstlich entlasten, damit auch sich langsam aufbauende Drücke in vollem Masse erfasst werden – periodische Entlüftung der Zuleitungen vorsehen – periodische Prüfung der Manometer unerlässlich	2.301
	Druckmesszellen pneumatisch, hydraulisch oder elektrisch in Bohrlöchern, einzeln oder in mehreren "Stockwerken"	Z und L: hoch M: ganze Höhe von Messzelle bis Mauerkrone P: ± 0.5 m bzw. ± 1 % von M Redundanz: notwendig; grosse Anzahl oder Anordnung in Gruppen	– ermöglicht zentrale Messung von weiträumig verteilten Messzellen – hydraulische Messung ist nur möglich, wenn die Messstation tiefer als das tiefstmögliche Druckniveau liegt – Filtertyp sorgfältig evaluieren, um frühzeitige Verstopfung zu vermeiden – Einbau sehr anspruchsvoll, besonders bei mehrstufigem Einbau	2.302

C) Verhaltensindikatoren für Staudämme

Zweck	Messanlage Messgeräte Messmethode	Anforderungen Z = Zuverlässigkeit L = Langlebigkeit M = Messbereich P = Präzision	Bemerkungen	Blatt in Teil 3
Verformungen des Staudammes und seiner Fundation				
Verschiebungen längs vertikalen Linien zum Vergleich mit Messergebnissen vorangegangener Perioden	Einfache Winkelmessung und Elektro-optische Distanzmessung ab Stationen im talseitigen Gelände	Anforderungen fallweise zu bestimmen Redundanz: unbedingt notwendig: Allfällige Verschiebungen der Messstationen müssen periodisch mittels Triangulation überprüft werden	– bewährte, jedoch anspruchsvolle Messmethoden – Messung erfordert günstiges Wetter – Präzision von Distanzen und Refraktionen abhängig	2.101
Verschiebungen längs horizontalen Linien mit Fortsetzung in Widerlager und Talflanken	Draht - Alinement einachsige Messschlitten mit Optik zum Anzielen des Drahtes, der eine vertikale Bezugsebene markiert	Z und L : sehr hoch M : maximale berechnete Verschiebung + 50% P : ± 1 mm, bzw. ± 1% von M Redundanz: unbedingt notwendig mittels – Ersatzinstrument – Prüfstation für Instrument – Kombination mit Triangulation, Extensometern	– Präzision unabhängig von Spannweite – nur für geradlinige Bauwerke geeignet – maximale Spannweite ist durch Gewicht und Qualität des Drahtes beschränkt	2.110
	Nivellement	Z und L : mässig P : ± 1mm Redundanz: unter Umständen in Kombination mit Triangulation erforderlich Referenzpunktgruppen auf beiden Talseiten vorsehen	– bewährte und, bei Einsatz von modernen Geräten, einfache Messmethode	2.111
	Optische Alinemente	Anforderungen fallweise zu bestimmen Redundanz: unbedingt notwendig in Kombination mit Triangulation	– bewährte, einfache Messmethode im übrigen gleiche Bemerkungen wie für "einfache Winkelmessungen"	2.112
	Einfache Winkel- und Distanzmessung	Siehe gleiche Messung in Rubrik "längs vertikalen Linien"	Siehe gleiche Messung in Rubrik "längs vertikalen Linien"	2.101
	Polygonzug	Anforderungen fallweise zu bestimmen Redundanz: unbedingt notwendig durch Kombination mit Triangulation	– Sehr anspruchsvolle Messung Einpassungselemente aus Triangulation unentbehrlich	2.113
Setzungen zufolge Eigengewicht und Wasserlast	Setzpegel, vertikal	Z und L : hoch M : 50 + 100 m P : ± 5 cm (Bauphase) : ± 1 cm (Betrieb, nach Neuerstellung) Redundanz: notwendig mit Nivellement	– Pegelrohrelemente < 6m; – Vertikalität beim Einbau sorgfältig überwachen; geneigte Pegel schwierig – elektrische Messsonde – kann mit Rohr-Inklinometer kombiniert werden	3.101
	Schlauchwaage	Z und L : hoch M : wenige Meter P : ± 1 cm Redundanz: notwendig mit Setzpegel und Nivellement	– kommunizierende Röhre mit Direktablesung am Standglas: 3 Schlauchleitungen je Messpunkt – sehr genau; etwas schwerfällig, frostgefährdet – Entlüftung des Messwassers erforderlich	3.102

C) Verhaltensindikatoren für Staumdämme (Fortsetzung)

Zweck	Messanlage Messgeräte Messmethode	Anforderungen Z = Zuverlässigkeit L = Langlebigkeit M = Messbereich P = Präzision	Bemerkungen	Blatt in Teil 3
Verformung des Staudammes und seiner Fundation (Fortsetzung)				
Setzungen und Verschiebungen längs Linien global in langen Messstrecken oder differentiell in Ketten von kurzen Messstrecken	Stangen- und Drahtextensometer ein- oder mehrstufig	Z, L und M: fallweise zu bestimmen P: ± 1 mm Redundanz: nicht immer notwendig; erreichbar durch – Einbau an mehreren vergleichbaren Orten – Unterteilung in Stufen – Kombination mit Aligment bzw. Nivellement	– Sehr anspruchsvoll bezüglich Einbau der Verankerung und Ummantelung der Hüllrohre – Fernmessung möglich	2.120
	Rohr - Inklinometer (Deflektometer) globale oder unterteilte Durchbiegungen bzw. differentiell (Ketten-deflektometer)	Anforderungen fallweise zu bestimmen Redundanz: nicht notwendig	– el. Pendelsonde im Standrohr mit Führungsnuten – Präzision stark vom Führungssystem abhängig – sehr anspruchsvoll bezüglich Einbau und Ummantelung der Führungsrohre – geeignet zur Lokalisierung und Bewegungsüberwachung von Diskontinuitäten – Messung und Auswertung rel. zeitraubend	2.121
Räumliche Verschiebungen einzelner Punkte mit Einbezug der Umgebung	Triangulation fallweise kombiniert mit – Polygon- und Nivellementsügen – Elektro-optischen Distanzmessungen – Optischer Lotung, Pendel – Aligment, Extensometer – Setzpegel	Z und L: sehr hoch P: (dreifacher mittlerer Fehler) $\leq \pm 5$ mm für Messstationen und wichtige Kontrollpunkte $\leq \pm 10$ mm für übrige Punkte Redundanz: unbedingt notwendig, mittels – überzähligen Punkten und Messelementen – Kombination mit übrigen Messanlagen	– grossräumig anzulegende Messanlage für langfristige Verformungsüberwachung des Bauwerkes und seiner Umgebung sowie für Verschiebungskontrolle der Referenzpunkte anderer Messeinrichtungen (Redundanz) – sehr anspruchsvolle, nur in grossen Zeitabständen durchführbare Messung; Teilmessungen für rasche Zustandsabklärungen einplanen – Daten sowie Angaben über Mess- und Auswertungsverfahren sicher archivieren	2.130
Bewegungen von Rissen und Fugen an zugänglichen Stellen – Dilatationen – fallweise Scherungen	Messanschläge (Bolzen usw.) für: - Tastuhren - Mikrometer - Deformeter - Dilatometer	Z und L: je nach Zweck M: 10 mm P: ± 0.05 mm Redundanz: je nach Zweck	– an Wänden in Gängen, Stollen, Nischen usw. ist Messung oft nicht für das Verhalten im Massiv repräsentativ – zweckmässige Siegel können oft Messeinrichtungen ersetzen – Fernmessung möglich	2.140

Herausgeber:

Schweizerisches Nationalkomitee für Grosse Talsperren
 Ausschuss für Talsperrenbeobachtung
 Arbeitsgruppe «Redundanz und Zuverlässigkeit von Messeinrichtungen»

Adresse der Verfasser/
 Adresses des auteurs:

Dr. *Rudolf Biedermann*, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Postfach 2743, CH-3001 Bern.

Dr. *Reimer Bonhage*, Elektrowatt Ingenieurunternehmung AG, Postfach, CH-8022 Zürich.

Editeur:

Comité national suisse des grands barrages
 Groupe de travail pour l'observation des barrages
 Etude des problèmes de redondance par des membres du groupe

Walter Indermaur, Stucky Ingénieurs-Conseils SA, 6, chemin de Rosen-
 eck, CH-1006 Lausanne.

Rudolf W. Müller, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Postfach 2743, CH-3001 Bern.

Zweck	Messanlage Messgeräte Messmethode	Anforderungen Z = Zuverlässigkeit L = Langlebigkeit M = Messbereich P = Präzision	Bemerkungen	Blatt in Teil 3
Durchsickerung von Staudamm und Untergrund				
Sicker- und Drainagemengen (sektoriell und gesamtthft)	Volumetrische Messung mit Behälter- und Stoppuhr bzw. durch Volumenverdrängung (z.B. mit Messstab in fallenden Bohrlöchern)	Z und L: mässig M: maximal erwartete Menge + 100 % P: $\pm 0,05$ l/s, bzw. ± 5 bis 10 % von M Redundanz: nicht notwendig	– nur für kleinere Mengen bis 10 l/s anwendbar, wobei die Fülldauer etwa 10 s betragen soll	2.200
	Messüberfall / Messkanal fallweise mit Registrierung	Z und L: hoch M: maximal erwartete Menge + 100 % P: $\pm 5\%$ von M Redundanz: nicht notwendig	– periodisch Sinterablagerungen entfernen – für Mengen < 0.05 l/s nicht geeignet – für Sammelstelle (Gesamtmenge) Registrierung und Alarmsignal vorsehen	2.201
	Messung in volldurchflossenen Rohren z.B. in Förderleitungen von Sickerwasserpumpen – Venturimeter (Druckdifferenzmessung) – Echolot oder magnetinduktive Messung (Fließgeschwindigkeit)	Z und L: hoch M: maximale erwartete Menge + 100 % P: $\pm 5\%$ von M Redundanz: notwendig mittels weiteren Messungen oder Gebern	– einfache Möglichkeiten zur periodischen Überprüfung der Anzeigen vorsehen (Manometer, Messüberfall, Messkanal im freien Abfluss)	2.202
Druckhöhe des im Damm (Kern und Stützkörper) und im Untergrund zirkulierenden Wassers (Auftrieb, Porenwasserdruck)	Offene Bohrung / Standrohr Abtasten der Wasserspiegellage mit Kabellichtlot oder Brunnenpfeife	Z: keine L: hoch M: ganze Bohrungslänge P: ± 0.2 m bzw. $\pm 1\%$ von M Redundanz: notwendig, Anordnung in Gruppen	– Bohrung bis zur Druckentnahmestelle dicht verrohren; oben gegen Zufluss von Wasser oder Eindringen von Schlamm, Steinen usw. schützen – ständige Be- und Entlüftung gewährleisten – Funktionskontrolle durch Spülung	2.300
	Geschlossene Bohrung Druckanzeige mit Präzisionsmanometer	Z und L: hoch M: ganze Höhe von Manometer bis Staudammkrone P: ± 0.5 m bzw. $\pm 1\%$ von M Redundanz: notwendig, Anordnung in Gruppen	– Bewährtes, Messverfahren – dichte Verrohrung und Manometeranschlüsse erforderlich – Druck in Zuleitungen nicht künstlich entlasten, damit auch sich langsam aufbauende Drücke in vollem Masse erfasst werden – periodische Entlüftung der Zuleitungen vorsehen – periodische Prüfung der Manometer unerlässlich	2.301
	Druckmesszellen pneumatisch, hydraulisch oder elektrisch in der Schüttung, in Bohrlöchern, einzeln oder in mehreren "Stockwerken"	Z und L: hoch M: ganze Höhe von Messzelle bis Dammkrone P: ± 0.5 m bzw. $\pm 1\%$ von M Redundanz: notwendig; grosse Anzahl oder Anordnung in Gruppen	– ermöglicht zentrale Messung von weiträumig verteilten Messzellen – hydraulische Messung ist nur möglich, wenn die Messstation tiefer als das tiefstmögliche Druckniveau liegt – Filtertyp sorgfältig evaluieren, um frühzeitige Verstopfung zu vermeiden – Kabel u. Leitungen nicht spleissen – Kabel u. Leitungen gefährdet durch differenzielle Setzungen	2.302
Erfassen physikalischer oder chemischer Veränderungen (Erosion, Lösung)	Trübungsmessgerät	Z und L: hoch M: 0 - 500 ppm P: ± 1 ppm Redundanz: notwendig; Laboranalyse von Wasserproben	– erfasst suspendierte u. lösliche Stoffe – geschützter Standort ist wichtig – Eichung durch Lab. Analysen des Sickerwassers	3.301