

# HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Article, Published Version

**Köhler, Hans-Jürgen; Feddersen, Ingo**

## **Porenwasserdruckmessungen in Böden, Mauerwerk und Beton**

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

---

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102810>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Köhler, Hans-Jürgen; Feddersen, Ingo (1991): Porenwasserdruckmessungen in Böden, Mauerwerk und Beton. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 68. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 89-104.

### **Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:**

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



## PORENWASSERDRUCKMESSUNGEN IN BÖDEN, MAUERWERK UND BETON

Measurements of pore water pressure in soils and concrete constructions

Mesurages de pressions interstitielles dans les sols, les murs et du béton

Измерения давления воды в порах грунтов, кирпичной и каменной укладки и бетонов



**Hans-Jürgen Köhler**, Dipl.-Ing., wissenschaftlicher Angestellter in der Bundesanstalt für Wasserbau. Geboren 1941, Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Hochschule Darmstadt von 1963 bis 1970, Stellvertretender Leiter in der Baustoff- und Bodenprüfstelle Darmstadt von 1970 bis 1973, Wissenschaftlicher Mitarbeiter beim Ingenieurbüro für Grundbau und Bodenmechanik Hamburg von 1973 bis 1974, seit 1975 in der Bundesanstalt für Wasserbau Karlsruhe.



**Ingo Feddersen**, Dipl.-Ing., Baudirektor in der Bundesanstalt für Wasserbau. Geboren 1939, Studium des Bauingenieurwesens an der Technischen Hochschule Karlsruhe von 1961 bis 1967. Danach zunächst drei Jahre in der Hauptverwaltung der Firma Züblin in Stuttgart als Statiker im Brücken- und Grundbau. Seit 1970 in der Bundesanstalt für Wasserbau, ab 1980 Referatsleiter "Messungen im Erd- und Grundbau", seit 1985 Referatsleiter "Grundbau".

### Inhaltsangabe

Für die möglichst genaue Messung von Porenwasserdrücken bei instationären Strömungen in durchlässigen Materialien verschiedener Art sind besondere Bedingungen zu beachten. Eine speziell dazu entwickelte Meßvorrichtung, die leicht zu handhaben und wiederverwendbar ist, wird beschrieben und deren Einsatz an drei Beispielen erläutert: an einem Böschungsdeckwerk von schiffbaren Wasserstraßen, einer Gewichtsstaumauer (Eder-Talsperre) und einem Schleusenbauwerk (Kiel-Holtenu).

### Summary

To measure pore water pressure in porous materials under the condition of unsteady flow as precisely as possible a special measuring device has been developed. It is described and its use is shown at three examples, an open rip-rap revetment, a gravity dam (EDER-Dam) and a navigation lock (KIEL-Holtenu).

### Résumé

Afin d'obtenir un mesurage assez précis des pressions interstitielles dans les différents matériaux perméables soumis aux courants non-stationnaires, des conditions spéciales doivent être considérées. Un dispositif conçu spécialement à cet effet, facile à manier et réutilisable, ainsi que son application sont décrits et trois exemples sont données: un des voies navigables un d'un mur de barrages et un d'une écluse.

### Резюме

Для обеспечения как можно точного измерения давления воды в порах проницаемых материалов разного вида, подвергаемых нестационарными течениями, необходимо соблюдать особые условия. Описывается разработанное специально для этих целей измерительное устройство, обеспечивающее удобное обслуживание и пригодное для повторного применения, с пояснением его работы на трех примерах: на береговых креплениях судоходных водных путей, на плотине и в шлюзе.

| <b><u>INHALT</u></b> |   | <b>Seite</b> |
|----------------------|---|--------------|
| 1                    | Problem                                     | 91           |
| 2                    | Entwickeltes Meßsystem                      | 91           |
| 3                    | Meßbeispiele                                | 92           |
| 3.1                  | Erdbauwerke                                 | 92           |
| 3.1.1                | Böschungsdeckwerk und eingebautes Meßsystem |              |
| 3.1.2                | Meßergebnisse                               |              |
| 3.2                  | Staumauern                                  | 96           |
| 3.2.1                | Bauwerk und eingebautes Meßsystem           |              |
| 3.2.2                | Meßergebnisse                               |              |
| 3.3                  | Schiffahrtsschleusen                        | 99           |
| 3.3.1                | Bauwerk und eingebautes Meßsystem           |              |
| 3.3.2                | Meßergebnisse                               |              |
| 4                    | Literatur                                   | 104          |

## 1 Problem

Kontrolliert man Wasserdrücke in Staudämmen, die Wasser mit einem nahezu konstanten Wasserspiegel zurückhalten, geht es also um zeitlich kaum veränderliche Wasserdrücke, dann ist es durchaus ausreichend, mit offenen Wasserstandsbeobachtungsrohren zu arbeiten, in welchen durch Brunnenpfeifen, Lichtlote oder Pegelschreiber der Wasserspiegel beobachtet werden kann. Durch die Ausbildung der Meßstrecke als Filterrohr über 1 bis 2 oder auch mehrere Meter wird zwar grundsätzlich das Potentialliniennetz durch den Potentialausgleich über die gesamte Länge der Filterstrecke beeinflusst, dies ist aber für den Zweck der Messung in den häufigsten Fällen ohne Bedeutung. Wenn es jedoch darum geht, kurzfristig veränderliche Potentiale zu messen, ist diese Methode nicht mehr anwendbar, da sie zu groben Fehlern führt. Es werden - bei instationären Vorgängen - niemals Potentiale gemessen, wie sie ohne das Wasserstandsbeobachtungsrohr an der gleichen Stelle vorhanden wären, da die gemessene Wasserstandsveränderung fast ausschließlich von der Menge des dem Beobachtungsrohr zu- oder wegströmenden Wassers abhängig ist. Zur exakten Messung müßte diese Menge aber null sein.

Das zweite Problem stellt die Meßstrecke selbst dar, die außer im Ausnahmefall einer den Potentiallinien parallelen Meßstrecke punktförmig sein müßte, wenn das Potentialliniennetz nicht beeinflusst werden soll.

Während dieses zweite Problem in vielen Fällen nicht relevant ist, wie zum Beispiel bei den unter 3.2 beschriebenen Talsperren-Messungen, erhält es bei anderen Fällen, wie den unter 3.1 behandelten Porenwasserdruck-Messungen unter Deckwerken eine entscheidende Bedeutung hinsichtlich der Ziele der Messung.

In diesem Beitrag werden drei Beispiele präsentiert, bei denen die Kenntnis des Porenwasserdrucks eine wichtige Voraussetzung zur Bestimmung der Bauwerkssicherheit darstellt.

Das erste Beispiel beschreibt das Phänomen der Porenwasserdruckentstehung in Böden, die durch schnelle Wasserspiegelveränderungen im Erdstoff entstehen können.

Im zweiten Beispiel führen die Wasserdrücke in und unter der Talsperre zu Standsicherheitsproblemen. Das dritte Meßbeispiel beschreibt die Wasserdruckveränderungen in der Sohle und in den Wänden einer Schiffahrtsschleuse bei völliger Entleerung der Schleusenammern.

## 2 Entwickeltes Meßsystem

Die wichtigste und bei zeitlich schnell veränderlichen Strömungsvorgängen unbedingt zu erfüllende Forderung ist also die, daß das Meßsystem selbst die Meßergebnisse nicht beeinflussen darf. Diese Forderung ist eigentlich trivial und gilt im Prinzip für alle Arten von Messungen. Sie hat aber wegen der Größenordnung der Verfälschung der gesuchten Ergebnisse und der Tatsache, daß dem Effekt nicht immer die erforderliche Aufmerksamkeit gewidmet wird, in den hier beschriebenen Fällen besondere Relevanz.

Die Meßvorrichtung muß als geschlossenes System ausgebildet sein, wodurch Fließvorgänge in das Meßsystem hinein unterbunden werden. Diese Forderung ist in manchen Fällen relativ einfach durch einen stationären Einbau und endgültig im Bauwerk verbleibenden Meßgebern, z. B. durch Einzementieren in Betonbauteilen zu erreichen. Beim Einbau im Boden sind solche Forderungen jedoch schwieriger zu realisieren. Der Nachteil des direkten Einbaues von Meßgebern im Bauwerk oder im Boden liegt im wesentlichen darin, daß eine nachträgliche Kontrolle oder der vollständige Austausch eines defekten Gebers so gut wie ausgeschlossen ist und darüberhinaus nach Beendigung der Messungen die Sensoren im Regelfall nicht wiedergewinnbar sind.

Es wurde deshalb ein System entwickelt, das einerseits einen geschlossenen Einbau gestattet und andererseits die Messgeber wiederausbaufähig, nachkalibrierbar und letztendlich auch leicht ersetzbar und für neue Meßaufgaben wiederverwendbar macht.

Gerade die Ausbau- und Wiederverwendbarkeit der Sensoren bietet bei kurzzeitigen, vorübergehenden Messungen mit häufig wechselnden Einsatzorten einen erheblichen Vorteil, was sich sowohl im Kosten- wie Zeitbedarf positiv auswirkt.

Bei dem von den Autoren entwickelten System wird der Meßgeber, der durch ein Hüllrohr gegen mechanische Beschädigung geschützt wird, durch einen Gummipacker nach oben hin gegen die im Meßrohr stehende Wassersäule hermetisch abgedichtet. Die über dem Gummipacker angeordnete Spannfeder vergrößert die Federkonstante, wodurch eine langfristige weitere Verformung des Gummis kompensiert wird (Bild 1, Typ 1). Die Spannmutter oberhalb der Feder wird über einen speziellen



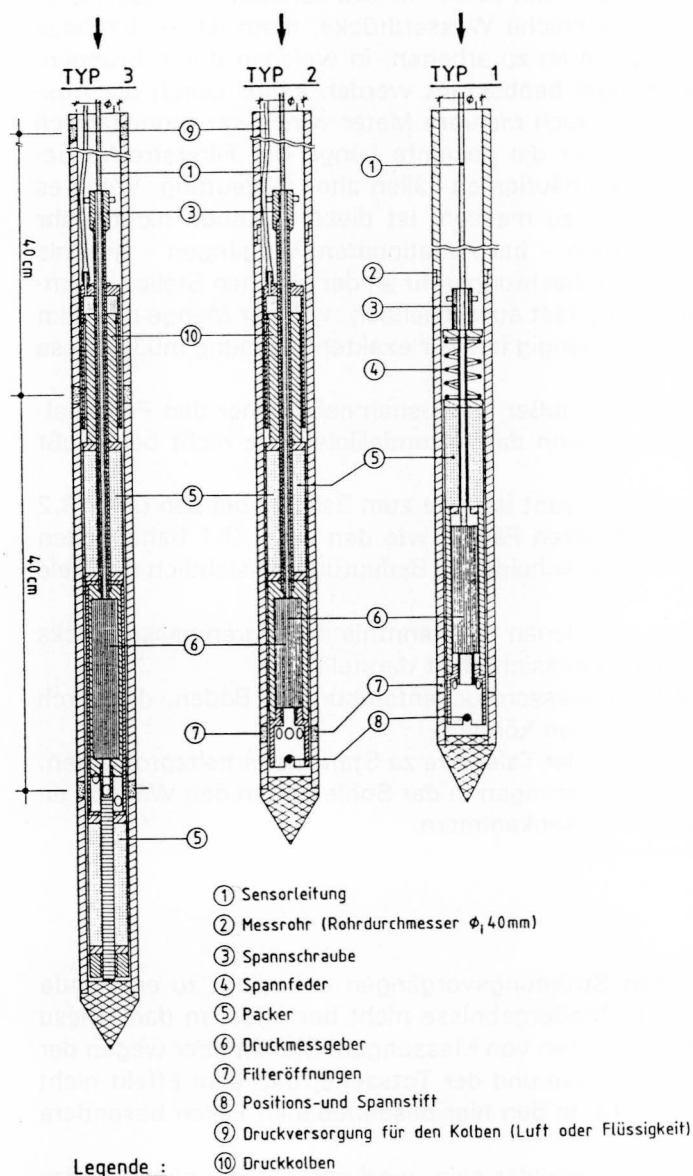


Bild 1 Geber-Packer-System, Typ 1, 2 und 3

### 3 Meßbeispiele

#### 3.1 Erdbauwerke

##### 3.1.1 Böschungsdeckwerk und eingebautes Meßsystem

Änderungen des Porenwasserdrucks sind im wesentlichen abhängig vom Material und von der Struktur des porösen Mediums. Wichtig bei der Charakterisierung dieses Mediums ist daher der Wert der Wasserdurchlässigkeit  $k$  [m/sec]. Ein Porenmedium mit einer geringen Wasserdurchlässigkeit wird auf schnelle Wasserspiegellagenänderungen nur mit einer verzögerten Porenwasserdruckanpassung innerhalb des Bodens reagieren. Dies kann zur Bildung von Porenwasserüberdruck führen, der die Standsicherheit eines Erdbaukörpers gefährdet.

Adapter mit Hilfe eines verdillsteifen Aluminiumgestänges verschraubt.

Das Gestänge kann aus unterschiedlichen Abschnitten (0,5 m - , 1,0 m - und 2,0 m - Stücke) bis zu beliebigen Längen zusammengeschraubt werden, wodurch auch sehr große Einbautiefen erreicht werden. An der Eder-Talsperre betrug diese Einbautiefe z. B. rund 50 m (siehe 3.2), was aber noch keineswegs als Grenze angesehen werden muß. Größere Tiefen sind möglich.

Die Weiterentwicklung dieses mechanischen Packersystems führte zur Anwendung von Druckkolbenpackern (Bild 1, Typ 2 und Typ 3), bei denen die Verpannung des Gummis gegen das Meßrohr mittels eines Zylinderkolbens erfolgt, der über eine Luft- oder Flüssigkeitsleitung über entsprechende Kompressor-einrichtungen von außen mit dem notwendigen Kolbendruck versorgt wird. Diese Art der Verpannung des Gummipackers mittels Druckkolben gestattet eine noch leichtere und schnellere Installation des Messgebersystems und ist speziell für Kurzzeitmessungen konzipiert. Beim Typ 3 dieses Packersystems werden durch den Kolbendruck die beiden Gummipacker ober- und unterhalb des Meßgebers gleichzeitig angespannt, wodurch unterschiedliche Meßhorizonte mit ein und derselben Meßvorrichtung, natürlich zeitlich voneinander versetzt, geprüft werden können.

Der Einsatz der Druckkolbenpacker (Typ 2 und Typ 3) ist generell dort vorteilhaft, wo die äußeren Bedingungen einen schnellen Ein- und Ausbau der Meßgeber voraussetzen (z. B. Einbau unter Wasser oder im Bereich von Tidegewässern) oder Kontrollmessungen in unterschiedlichen Meßhorizonten erforderlich werden. Insbesondere bei Naturmessungen (siehe Abschnitt 3.1 und 3.3), z. B. Porenwasserdruckmessungen unter Deckwerken hat sich die Entwicklung und Verwendung der Druckkolbenpacker besonders bewährt /9/.

Böschungen zum Beispiel sind sehr stark gefährdet, wenn der Porenwasserdruck über das nach der Standsicherheitsbedingung gerade noch zulässige Maß hinaus ansteigt, wodurch die einer möglichen Rutschung widerstehenden Reibungskräfte vermindert werden und der Böschungsbruch unaufhaltsam eintritt.

Nicht unerhebliche Schäden an Deckwerken von schiffbaren Wasserstraßen konnten nicht allein dadurch erklärt werden, daß die erodierende Wirkung von vorbeiströmendem Wasser sowie die fehlende Filterstabilität zwischen Deckwerk und Untergrund als alleinige Ursache für diese Schäden gelten konnte.

Böschungssicherungen an schiffbaren Wasserstraßen erleiden ständige Druckänderungen aus Wellen und längeranhaltenden Wasserspiegellageveränderungen, die sich in steil verlaufenden Wellenfronten und Absunkmulden äußern. Die Form dieser Absunkmulden und Wellen hängt stark mit der Geschwindigkeit der den Kanalabschnitt durchfahrenden Schiffe zusammen und kann mitunter bei ungünstiger Geometrie des Kanalquerschnitts Absunkwerte bis zu einem Meter erreichen, wobei besonders große Absunkgeschwindigkeiten als gefährliche Belastungen für Deckwerke angesehen werden müssen.

Unterhalb des abgesenkten Wasserspiegels entsteht ein senkrecht zur Böschungs- und Sohlfläche gerichteter hydraulischer Druckgradient, der im Boden eine instationäre Porenwasserströmung hin zum freien Wasser auslöst.

Der Porenwasserüberdruck tritt dabei nicht nur im Bereich der Unterwasserböschungen, sondern auch an der Kanal- oder Flußsohle auf. Die Entstehung dieses Porenwasserüberdrucks findet seine Ursache darin, daß das die Porenräume des Bodens ausfüllende Grundwasser noch bis in relativ große Tiefe unterhalb des freien Wasserspiegels bzw. Grundwasserspiegels Luft in gelöster und freier Form enthält. Plötzliche Druckänderungen, wie sie bei schnellen Wasserspiegelabsenkungen oder Wellen auftreten, führen zu Volumenänderungen des Porenmediums, während das Korngerüst des Bodens selbst hierzu als relativ starres System reagiert, also keine den Porenwasserdruck maßgebend verändernden Volumenänderungen erfährt /8/.

Die kurzzeitig wirkenden Porenwasserüberdruckgradienten lösen eine instationäre Porenwasserströmung aus, die im wesentlichen aus der Volumenänderung der vom Wasser eingeschlossenen Luft resultieren. Die Stabilität einer Böschungsabdeckung wird daher entscheidend beeinflusst von der Größe des sich aufbauenden instationären Porenwasserdrucks über die Tiefe  $z$  unterhalb des Deckwerks, die als Folge schneller Wasserspiegeländerungen im freien Wasser der schiffbaren Wasserstraße entsteht /4/.

Die Druckverteilung über die Tiefe  $z$  kann für die Praxis mit ausreichend genauer Näherung als exponentiale Funktion ausgedrückt werden. Die Parameter dieser Funktion beschreiben charakteristische, bodenspezifische Eigenschaften des Untergrundes und bestimmen im wesentlichen die Größe des auftretenden Porenwasserüberdrucks, der wiederum von der Wassersättigung des Bodens (Größe des tatsächlichen Luftanteils im Wasser) und damit von der Kompressibilität des Porenmediums abhängt /1/.

Zur Installierung der Meßgeber werden Stahlrohre in den Boden eingerammt, die oberhalb der Rohrspitze Einlaßöffnungen rund um das Mantelrohr besitzen, die wiederum zum Schutz gegen das mit dem Wasser möglicherweise in das Rohrinne eindringende Bodenmaterial mit speziellen Metallfiltern verblendet sind. Über verdrillsteife Führungsstangen und Halterungsadapter werden die Meßgeber anschließend in der vorgesehenen Tiefe fixiert.

Über eine computerkontrollierte Analog-Digital-Wandlung werden die ankommenden Meßsignale registriert. Eine gleichzeitige Erfassung von bis zu 64, aber auch beliebig mehr Meßkanäle, bis zu einer maximal aufnehmbaren Taktrate von 20 ms je Meßgeber ist möglich. Als aktuelle Meßzyklen sind beliebige Meßzeiten wählbar. Durch automatisch auslösende Meßwertaufnahmen über einstellbare Auslösesignale ist die dem Ereignis vorangehende Vorlaufzeit innerhalb bestimmter wählbarer Zeitgrenzen kontinuierlich zu registrieren /1/, /4/.

Die Geräteausstattung besteht aus:

- Meßwerterfassungsrechnern, bestückt mit Analog-Digital-Wandlern,
- vom Meßwerterfassungsrechner über IEEE-Interfaces zu steuernde Meßverstärker,
- Stahlrohre (Innendurchmesser 40 mm), die in unterschiedlich langen Stücken vor Ort auf die erforderliche Länge (Meßtiefe) aufgeschraubt werden können,
- Geber-Packer-System (Typen 1, 2 oder 3),
- Führungsstangen und Halterungsadapter zum Einbringen der Druckmeßgeber in die zur Installierung vorgesehene Meßtiefe,
- Druckluft- und Stromversorgung für den Feldeinsatz (Bild 2).

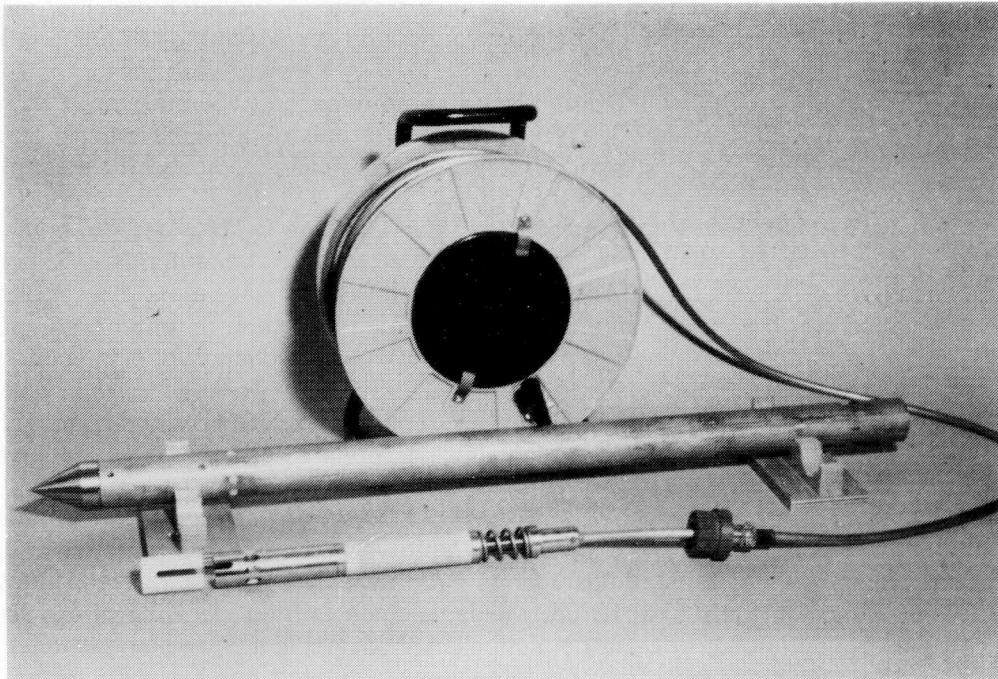


Bild 2 Meßrohr ( $\varnothing$  40 mm) mit Filteröffnungen oberhalb der Rohrspitze und Porenwasserdruckmeßgeber (Packertyp 1)

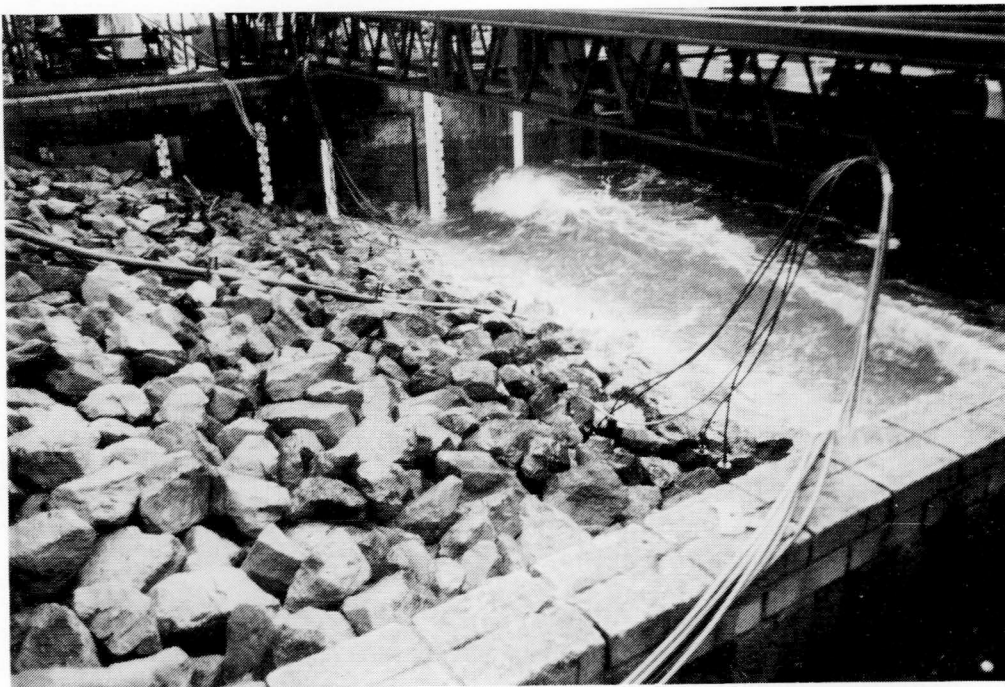


Bild 3 Wellenbelastung auf ein loses Schüttsteindeckwerk auf geotextilem Filter und sandigem Untergrund



### 3.1.2 Meßergebnisse

Bild 3 zeigt eine Ansicht der Versuchseinrichtung zur Erzeugung von Wellen und Absinkvorgängen im großmaßstäblichen Modellversuch. Die auf dem Freigelände der BAW im Naturmaßstab 1 : 1 zu betrie-  
bende Böschungsversuchsgrube gestattet die Simulation von Belastungszuständen, wie sie auf schiff-  
fahrtsbelastete Deckwerke einwirken und deren charakteristische Verläufe aus vorauslaufenden Feld-  
und Naturversuchen an unter Verkehr stehenden Wasserstraßen zu gewinnen sind (Bild 4).

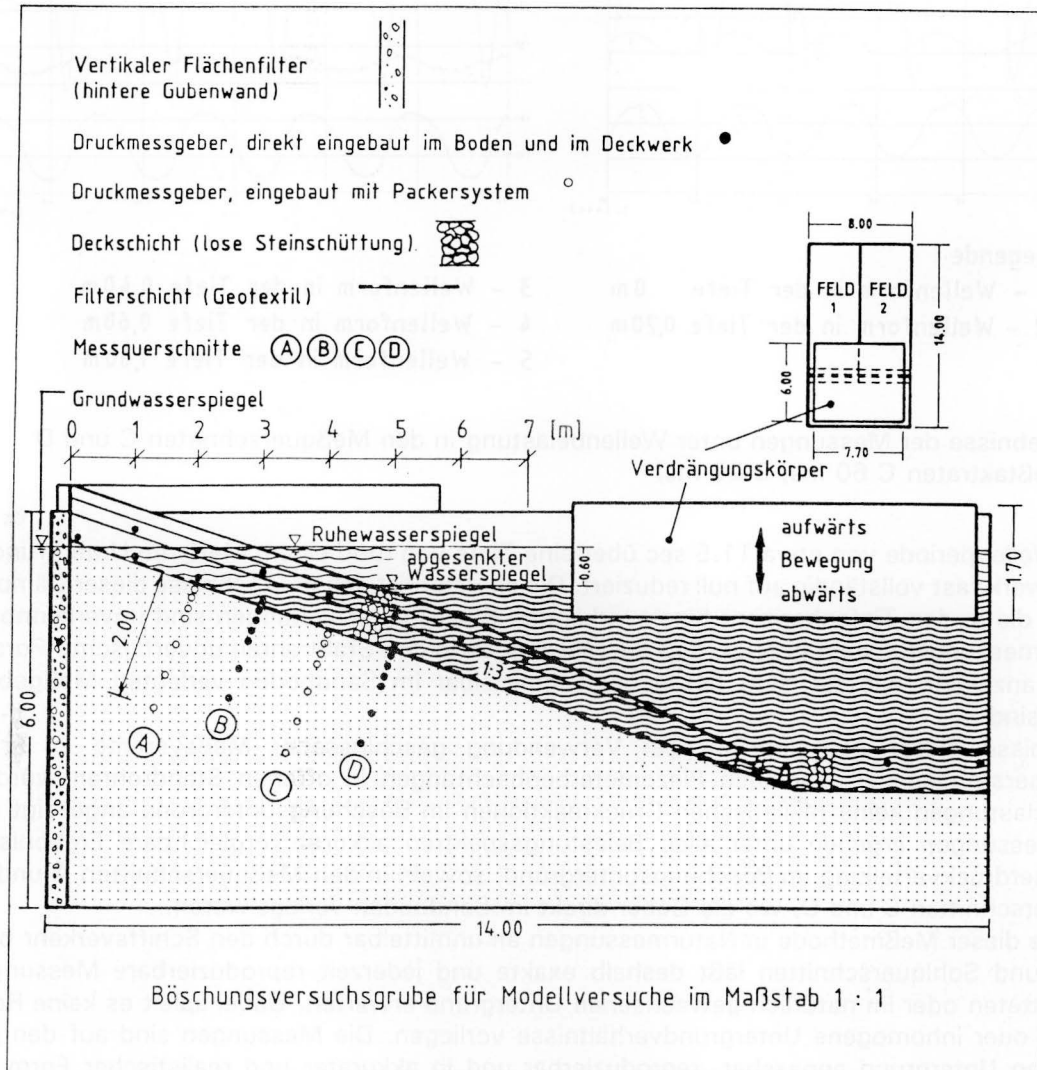


Bild 4 Querschnitt der Böschungsversuchsgrube für großmaßstäbliche Modellversuche

Zur Verifikation der in den Meßrohren zu gewinnenden Porenwasserdrucksignale wurden zwei ver-  
schiedene MeßgebereinbauprozEDUREN ausgeführt. Die in den Stahlrohren der Meßquerschnitte A und  
C eingebauten Porenwasserdruckgeber wurden verglichen mit den in den Meßquerschnitten B und D  
direkt in den Boden verlegten Porenwasserdruckgebern, wobei gleichartige Gebersysteme eingesetzt  
wurden. Die direkt während der Böschungsschüttung im Sand verlegten Geber waren in den zum Ver-  
gleich herangezogenen Tiefenhorizonten (0, 20, 40, 60, 100, 150 cm) unterhalb der aus losen  
Steinschüttungen bestehenden Deckschicht über Sensorleitungen an den Meßwerterfassungsrechner  
angeschlossen in der gleichen Art und Weise, wie es für die in den Stahlrohren mit den Packer-  
vorrichtungen des Typs 1 fixierten Meßgebern ausgeführt wurde.

Das Bild 5 zeigt die Ergebnisse der Messungen unter Wellenangriff in den Meßquerschnitten C und D.  
Die Wellenhöhen in den einzelnen Belastungspunkten oberhalb des Deckwerks, hier in den Meßquer-  
schnittspunkten C und D, schwankten in den Amplitudengößen zwischen 61 und 70 cm und wurden

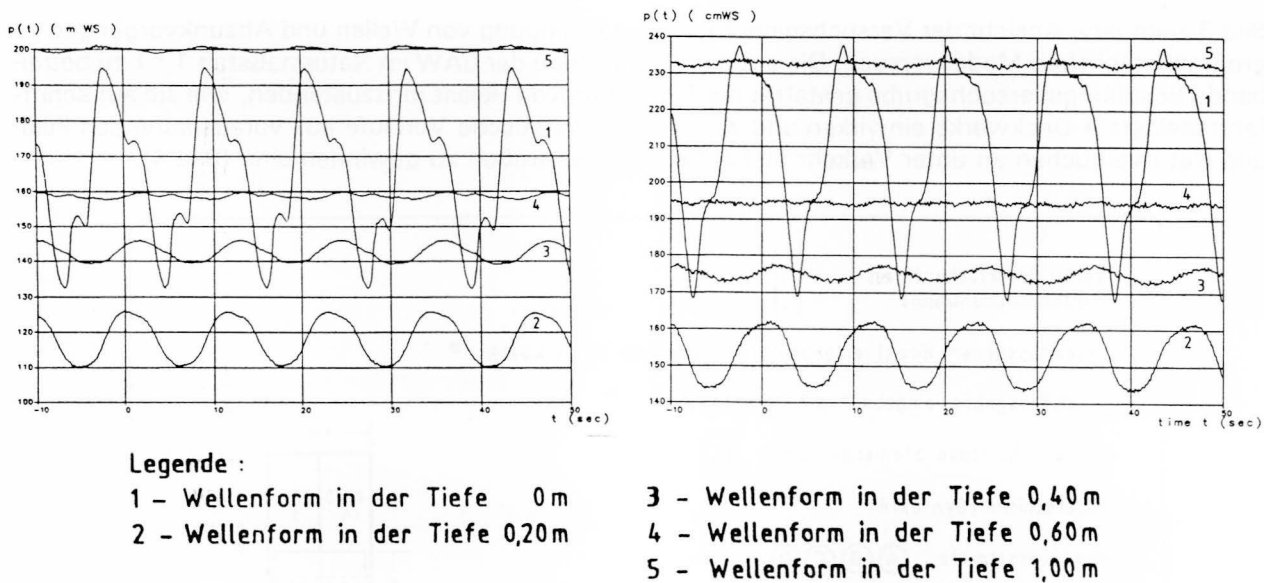


Bild 5 Ergebnisse der Messungen unter Wellenbelastung in den Meßquerschnitten C und D (Meßtaktraten C 60 ms, D 20 ms)

bei einer Wellenperiode von etwa 11.5 sec über eine Tiefe von rund einem Meter im Untergrund unter dem Deckwerk fast vollständig auf null reduziert. Die charakteristischen Ergebnisse dieser Dämpfungsgröße und die in den Tiefenhorizont hineinwirkenden Phasenverschiebungen sind unverkennbar. Die Vergleichsmessungen haben gezeigt, daß die Messungen in den Stahlrohren unverfälschte Porenwasserdrücke anzeigen, wie sie nicht besser aus unmittelbar im Sandboden verlegten Meßgebern zu gewinnen sind.

Meßergebnisse dieser Art sind nur bei Verwendung geschlossener Meßsysteme zu erhalten. Grundwasserstandspegel oder auch Piezometerbeobachtungen in offenen Standrohren würden bei solchen Belastungen keine realistischen Druckreaktionen im Böschungsuntergrund angezeigt haben. Die Testmessungen ergaben unter allen Belastungsspektren akkurat vergleichbare Ergebnisse der Porenwasserdruckverteilung im Böschungsuntergrund, sowohl in den Meßquerschnitten A und C wie in den Querschnitten B und D, wo die Geber direkt im Sandboden verlegt waren.

Der Einsatz dieser Meßmethode in Naturmessungen an unmittelbar durch den Schiffsverkehr belasteten Ufer- und Sohlquerschnitten läßt deshalb exakte und jederzeit reproduzierbare Messungen im aufgeschütteten oder im natürlich gewachsenen Untergrund erwarten. Dabei spielt es keine Rolle, ob homogene oder inhomogene Untergrundverhältnisse vorliegen. Die Messungen sind auf den jeweils vorliegenden Untergrund anpassbar, reproduzierbar und in akkurater und realistischer Form zu gewinnen. Auch in relativ undurchlässigen Böden, wie in Schluff oder Ton, sind realistische Ergebnisse zu erwarten, wodurch die zukünftige Anwendung der hier beschriebenen Art von Porenwasserdruckmessungen im gesamten Spektrum des Erd- und Grundbaus von besonderem Vorteil sein wird /6/, /7/.

### 3.2 Staumauern

#### 3.2.1 Bauwerk und eingebautes Meßsystem

An den westlich Kassel gelegenen EDER- und DIEMEL-Talsperren, die als gekrümmte Gewichtsstaumauern in Bruchsteinmauerwerk errichtet wurden, sind im Jahre 1984 Bohrungen und Messungen durchgeführt worden, um den Zustand der Talsperren und ihre Standsicherheit zu untersuchen /2/, /3/. Da in der ursprünglichen statischen Berechnung vor dem Bau von 1908 bis 1914 (EDER) und 1912 bis 1924 (DIEMEL) von nicht durchströmten Staumauern ausgegangen und folglich in der Gründungssohle und in der Mauer selbst kein Wasserdruck angesetzt worden war, galt es, die tatsächlichen Wasserdrücke zu messen. Da, wie vermutet wurde und sich dann auch so herausstellte, die

Wasserdurchlässigkeit stark schwankte und örtlich auch äußerst klein war, kamen offene Beobachtungsrohre oder Piezometerrohre aus den unter Abschnitt 1 und 2 genannten Gründen nicht in Frage. Hierfür war insbesondere entscheidend, daß das Stauwasser im Herbst und Winter wegen der Hochwassergefahr stark abgesenkt wird und bei einem Hochwasser ein sehr schneller Anstieg bis zur Überfallkrone und darüberhinaus möglich ist. Die hierbei in und unter der Mauer eintretenden Wasserdrücke konnten zutreffend nur durch ein abgeschlossenes System gemessen werden /9/. Es war in diesem Fall nicht nötig, die von dem Geber erfaßte Filterstrecke zu minimieren, sie mußte sogar eine Mindestabmessung haben, die größer als der größte Steindurchmesser (ca. 50 cm) war, da andernfalls der Meßpunkt ganz in einem völlig undurchlässigen Stein hätte liegen können.

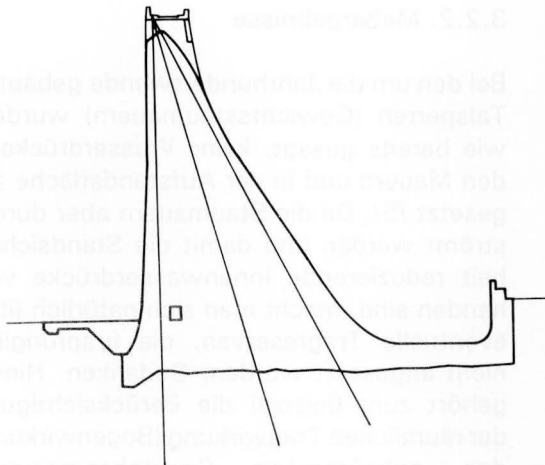


Bild 6 Querschnitt durch die Eder-Staumauer mit der Lage der Bohrungen

In einem Meßquerschnitt wurden meist drei oder vier Bohrungen niedergebracht (Bild 6). Aus Kosten- und Platzgründen wurden in einer Bohrung mit einem Durchmesser von 146 mm vier in verschiedenen Tiefen liegende Meßpunkte angeordnet. Dazu wurden in die Bohrung zunächst vier Kunststoffrohre mit einem Innendurchmesser von 40 mm eingebracht. Diese Rohre waren unten auf einer Länge von 1,0 m als Filterrohre ausgebildet. Die Verfüllung und Abdichtung des Hohlraums zwischen Bohrlochwandung und Rohren erfolgte im Meßbereich mit Kies, darüber nach jeweils etwa 20 cm Feinkies- und Sand-Zwischenlagen mit Zementsuspension bis zur nächsten, darüberliegenden Meßstelle usw.. Dieser Einbauvorgang war vorher in der BAW in einem 5 m langen Rohr auf seine Ausführbarkeit hin untersucht worden. Zur Verhinderung eventueller Umläufigkeiten zwischen der Außenwand der Kunststoffrohre und dem Zementstein wurden vor dem Ein-

bau in die Talsperren Schikanen in Form von dicken Gummiringen über die Rohre geschoben. In diese Rohre wurden nun die oben beschriebenen Geber-Packer-Systeme (Bild 7) mit Aluminiumstangen eingeschoben und die Spannmuttern angezogen. Die tiefsten Meßpunkte befinden sich 52 m unter den auf der Mauerkrone gelegenen Bohransatzpunkten. Nach geringen Modifikationen des Adapters und des Einbau- "handling" liefen die Arbeiten problemlos.

Eine Überprüfung der Geber erfolgte unmittelbar vor und nach dem Einbau. Die uns selbst gestellte Forderung nach der Möglichkeit, die Geber zur Überprüfung bzw. zur Reparatur oder zum Austausch wieder auszubauen, erwies sich schon bald als äußerst wichtige Option, da einige Geber offenbar eine Nullpunktdrift besaßen und deshalb alle Geber überprüft werden mußten. Ein fester Einbau hätte erneute Bohrungen, einen großen Zeitverlust und erhebliche Zusatzkosten gefordert.

Es werden Druckgeber auf DMS-Basis verwendet, wobei die Kabel werksmäßig angeschlossen wurden und so lang sind, daß sie bis zur Krone der Staumauer reichen. Hier endeten diese Kabel in Verteilerkästen, von wo aus vieladrige Kabel in die Meßstation führen. An der EDER-Talsperre werden zusätzlich zu den Wasserdrücken an 62 Meßpunkten noch 58 Stück Temperatur- und Weggeber abgefragt.

Die Erfassung der Meßwerte erfolgt in der Meßstation im rechten Torhaus der Talsperre computergesteuert bis zu 6 und täglich über Vielstellenmeßgeräte UPM60 (Hottinger) und automatische Meßstellenumschalter MDS 500 (Maihak). Die Meßwerte werden dort auf Diskette gespeichert und zur täglichen Kontrolle auch ausgedruckt. Außerdem ist eine tägliche Fernübertragung der Daten in das WSA Hann.Münden zur weiteren Auswertung vorgesehen.

Das Bild 8 vermittelt einen Eindruck der durch den Bombenangriff vom 17.05.1943 stark beschädigten Talsperre. Das Bauwerk wurde noch im gleichen Jahr wieder instandgesetzt und war bis zum Beginn der ersten Überlegungen zur anstehenden Untersuchung voll in Betrieb.

Die jetzt notwendig gewordene Sanierung der Sperrmauer wird im Herbst 1991 in Angriff genommen und entsprechend dem Verwaltungsentwurf durch Vertikalverankerung erfolgen. Dabei wird der Mauerkopf zwischen den Torbauten über eine Höhe von etwa acht Metern abgebrochen und durch



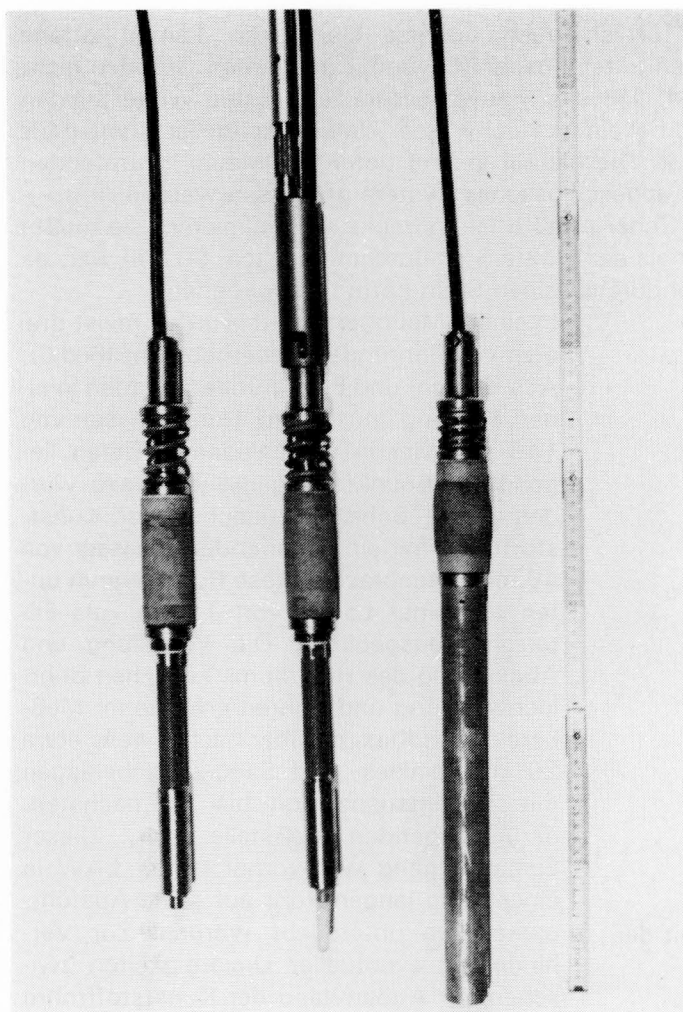


Bild 7 An den Talsperren eingesetzte Packer-Geber-Systeme (Typ 1)

einen Stahlbetonverankerungsbalken mit Ankerstollen ersetzt. Wiederum bestand die Möglichkeit, die Druckgeber vor Baubeginn auszubauen und nach Beendigung der Arbeiten wieder zu installieren. Ohne diese Möglichkeit wären die Bauarbeiten zumindest stark behindert, wahrscheinlich würden durch Beschädigungen oder Zerstörungen zusätzliche Bohrungen und Neuinstallationen erforderlich werden.

### 3.2.2. Meßergebnisse

Bei den um die Jahrhundertwende gebauten Talsperren (Gewichtsstaumauern) wurden, wie bereits gesagt, keine Wasserdrücke in den Mauern und in der Aufstandsfläche angesetzt /5/. Da die Staumauern aber durchströmt werden und damit die Standsicherheit reduzierende Innenwasserdrücke vorhanden sind, macht man sich natürlich über eventuelle Tragreserven, die ursprünglich nicht angesetzt wurden, Gedanken. Hierzu gehört zum Beispiel die Berücksichtigung der räumlichen Tragwirkung (Bogenwirkung) der gekrümmten Gewichtsmauern. Weiterhin wird manchmal die Auffassung vertreten, daß der Wasserdruck in der Mauer nur verzögert einem Wasserspiegelanstieg im Stauraum folgt und als Folge davon der größte äußere Wasserdruck und der größte innere Wasserdruck im Mauerwerk zeitlich nicht zusammenfallen. Man glaubt dabei, davon ausgehen zu können, daß der infolge eines Hochwassers bezüg-

lich der Standsicherheit zu hoch angestiegene Seewasserspiegel schon wieder abgefallen ist, bevor die größten Wasserdrücke in und unter der Mauer auftreten.

Bei einem schnellen Anstieg des Seewasserspiegels im Winter eines der letzten Jahre konnte jedoch nachgewiesen werden, daß diese Verzögerung und eine damit begründete Sicherheitsreserve nicht vorhanden ist.

Dieser Nachweis wäre ohne ein geschlossenes Meßsystem nicht möglich gewesen. Im Gegenteil, man hätte bei offenen Pegelrohren oder Piezometerröhrchen zu geringe Drücke gemessen und einen scheinbaren Effekt bestätigt, der in Wirklichkeit nicht vorhanden ist.

Mit den in verschiedenen Höhen und Schnitten eingebauten Wasserdruckgebern erhielt man weiterhin das Ergebnis, daß die Drücke ähnlich wie bei Erddrücken örtlich stark schwanken und für fast alle Geber eine nahezu lineare Zunahme der Drücke mit der Stauspiegelhöhe über der Meßstelle vorhanden ist. Berücksichtigt man, daß für den statischen Nachweis eine auf der sicheren Seite liegende Annahme der Wasserdruckverteilung über den Mauerquerschnitt und über die Mauerhöhe erforderlich ist, dann ist die generelle Annahme dieser Linearität durchaus gerechtfertigt. Sie vereinfacht die statische Berechnung, da die inneren Wasserdrücke in einfacher Weise als lineare Funktion der Stauspiegelhöhe angesetzt werden können. Für verschiedene Höhenbereiche ließen sich die in Bild 9 beispielhaft dargestellten, dimensionslosen Wasserdrücke und Wasserdruckverteilungen über den Querschnitt angeben. Bei der EDER-Talsperre ist deutlich der Einfluß einer in den Jahren 1961 bis 1962 hergestellten Injektionszone erkennbar. Bei der DIEMEL-Talsperre sind die Drücke wesentlich größer, da hier noch keine Injektionen vorgenommen wurden. Die für den jetzigen Zustand - für die EDER-Talsperre auch

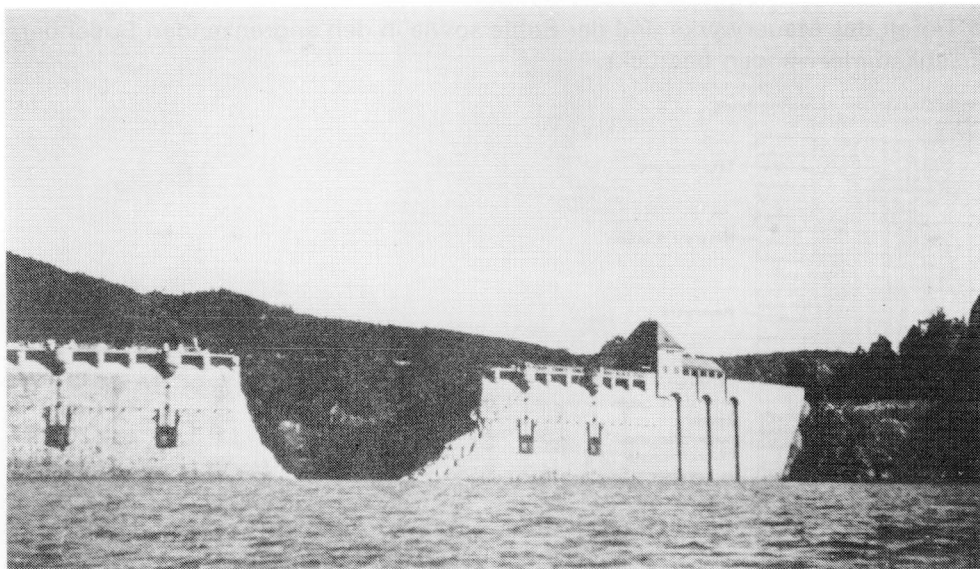


Bild 8 EDER-Talsperre mit dem 22 m tiefen und rund 65 m breiten Ausbruch nach dem Bombenangriff vom 17.05.1943

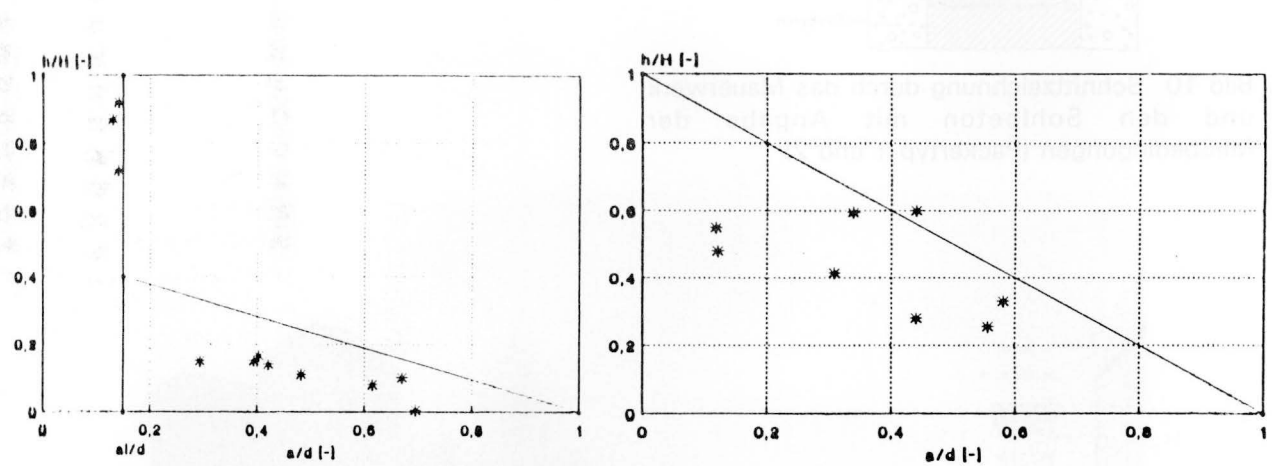


Bild 9 Dimensionslose Darstellung der Wasserdruckverteilung in den Meßquerschnitten der EDER-Talsperre (links) und der DIEMEL-Talsperre (rechts)

noch in Zukunft nach der Sanierung - für die statische Berechnung angesetzten Wasserdrücke sind ebenfalls im Bild 9 dargestellt.

### 3.3 Schiffahrtsschleusen

#### 3.3.1 Bauwerk und eingebautes Meßsystem

Zur statischen Nachrechnung der Standsicherheit der alten Schleuse Kiel-Holtenau am Nordostseekanal (NOK) war die Kenntnis des Wasserdrucks in den gemauerten Schleusenammerwänden und den in Beton ausgeführten Kammersohlen für den Lastfall der vollständig geleerten Schleuse unbedingt erforderlich. Diese Forderungen konnten nur durch Messungen der aktuell auftretenden Wasserdrücke gewonnen werden. Hierzu wurden die zur Beschreibung der Wasserdruckverteilung über die gesamte Schleusenlänge quer zur Schleusenachse erforderlichen Meßquerschnitte mit Wasserdruckgebern in

maßgebenden Tiefen des Mauerwerks und der Sohle sowie in den angrenzenden Bodenbereichen hinter den Schleusenkamerwänden bestückt.

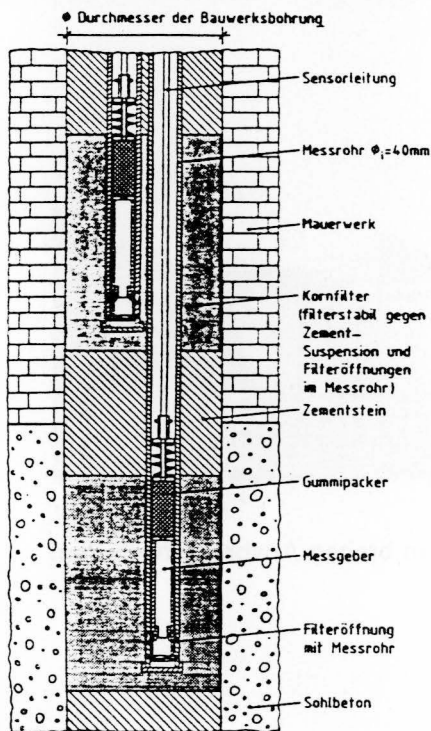


Bild 10 Schnittzeichnung durch das Mauerwerk und den Sohlbeton mit Angabe der Meßbedingungen (Packertyp 1 und 2)



Bild 11 Schleusenammer Süd während der Absenkung



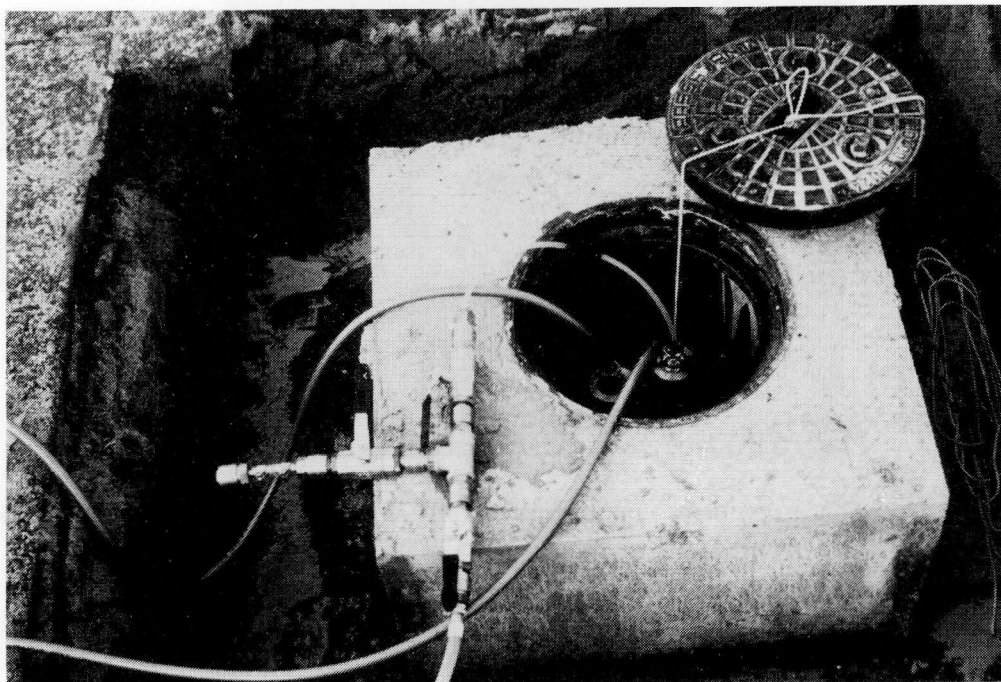
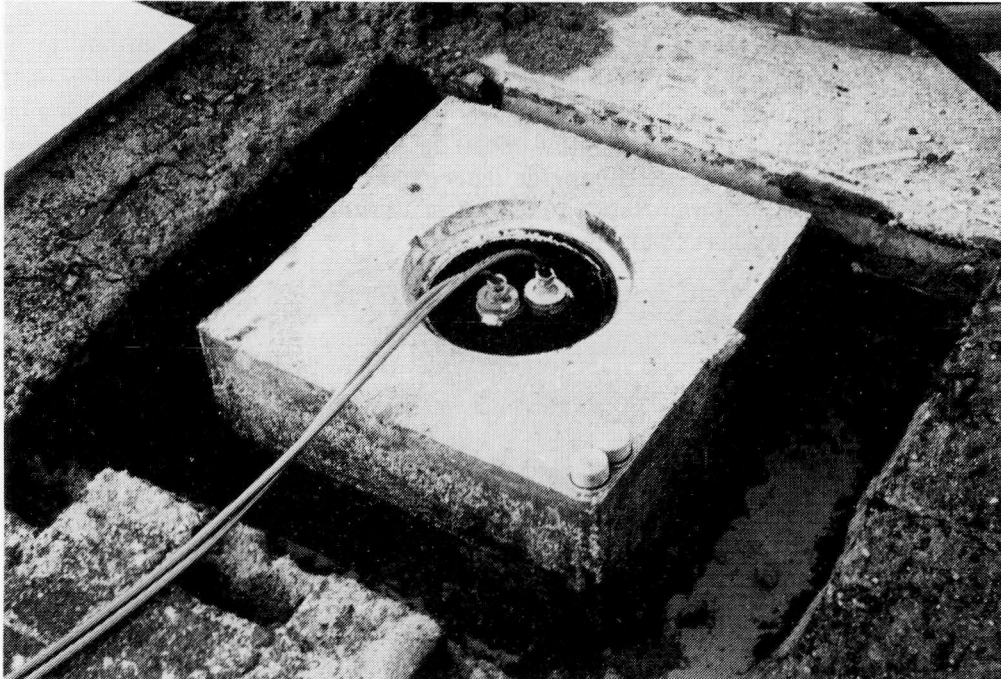


Bild 12 Meßgebereinbau mit Abschluß in der Höhe der Schleusenplattform mit den Meßkabeln und den Druckversorgungsleitungen für den Packertyp 2

Die Wasserdrücke wurden kontinuierlich während der Absenkung und Wiederauffüllung der jeweiligen Schleusenkammer in allen Meßquerschnitten simultan aufgezeichnet. Insgesamt 43 Druckmeßgeber wurden in den Wänden, in den Sohlen und in den Hinterfüllungsbereichen des anstehenden Bodens eingebaut. Das Einbauprinzip der in die Bauwerksbohrungen eingesetzten Meßrohre und den zwischen den angesetzten Meßhorizonten eingebrachten Abdichtungen mittels Zementstein ist auf dem Bild 10 dargestellt. Die nachträglich eingeführten Geber-Packer-Systeme reichten damit in unterschiedliche Meßtiefen innerhalb des Mauerwerks und bis hinein in den Sohlbeton. In den tiefen Horizonten der Sohle wurde der Packertyp 2 eingesetzt, in den höherliegenden Meßhorizonten kam der Packertyp 1 zum Einsatz. Das Bild 11 zeigt die Schleusenkammer Süd während der Absenkung, das Bild 12 zeigt

zwei eingebaute Packersysteme mit dem Ansatzkopf einer Mauerwerksbohrung in Höhe der Schleusenplattform. Die Messungen erfolgten im Februar und März des Jahres 1990. Für die Dauer der Meßzeit von jeweils 5 Tagen war die Schleuse für den Verkehr zeitweise gesperrt. Die eingesetzten Geber-Packer-Systeme haben sich beim Ein- und Ausbau der Geber sowie über den gesamten Meßzeitraum sehr gut bewährt. Die Druckversorgung für die Festsetzung der Kolbendruckpacker (Typ 2) erfolgte über flüssigkeitsgefüllte Kompressorleitungen. Der Vorpressdruck von rund 6 bar wurde über Manometervorrichtungen kontrolliert (Bild 13).

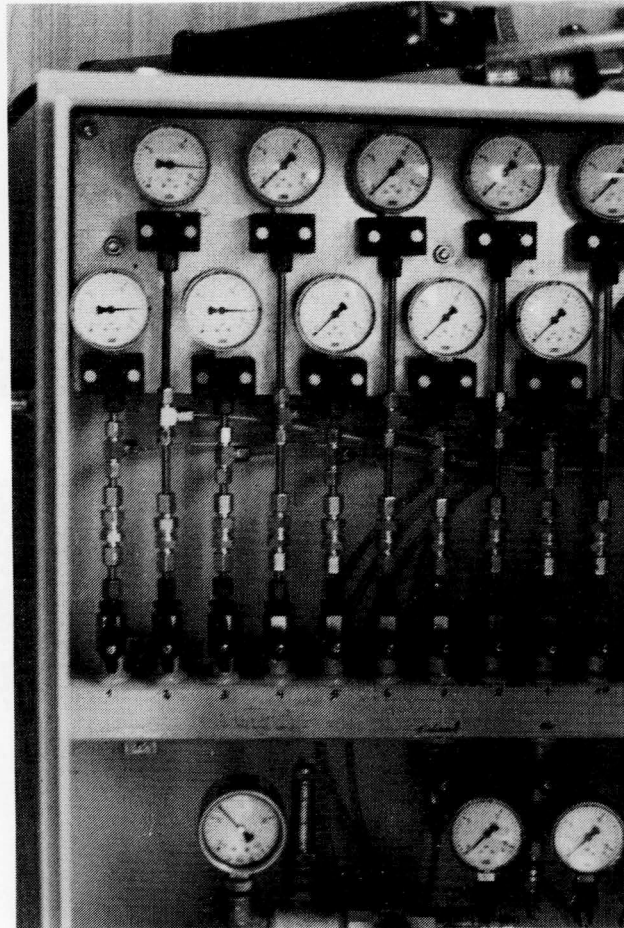


Bild 13 Druckversorgungseinrichtungen mit Kontrolle der Verpreßdrücke für die Kolbendruckpacker (Typ 2)

Die Installation der Druckkolbenpacker ist leicht und schnell in der Handhabung und hat sich bei diesem Meßeinsatz gut bewährt.

### 3.3.2 Meßergebnisse

Das Bild 14 zeigt die typischen Ergebnisse der Messungen in dem Querschnitt 1-1. Die Ergebnisse verdeutlichen, daß die Struktur des Sohlbetons in den Schleusenammern sehr grobporig und damit relativ durchlässig sein muß, daß der Druckabbau in der Schleusensohle nahezu gleichzeitig mit der Absenkung des Wasserspiegels in der Schleusenammer einsetzt, während das Grundwasser nur verzögert nachfolgen kann, hier natürlich verursacht durch den unmittelbar benachbarten, ungestört hoch anstehenden Seewasserspiegel der Förde (Querschnitt 1-1).

Das Prinzip der Meßdatenerfassung wurde bereits im Abschnitt 3.1 beschrieben. Im hier vorliegenden relativ lang andauernden Meßzeitraum wurde mit einer geringen Meßdatensammelrate von einem Meßsignal pro 5 Minuten und Meßgeber über den gesamten Meßzeitraum von 7 Tagen gearbeitet. Der be-

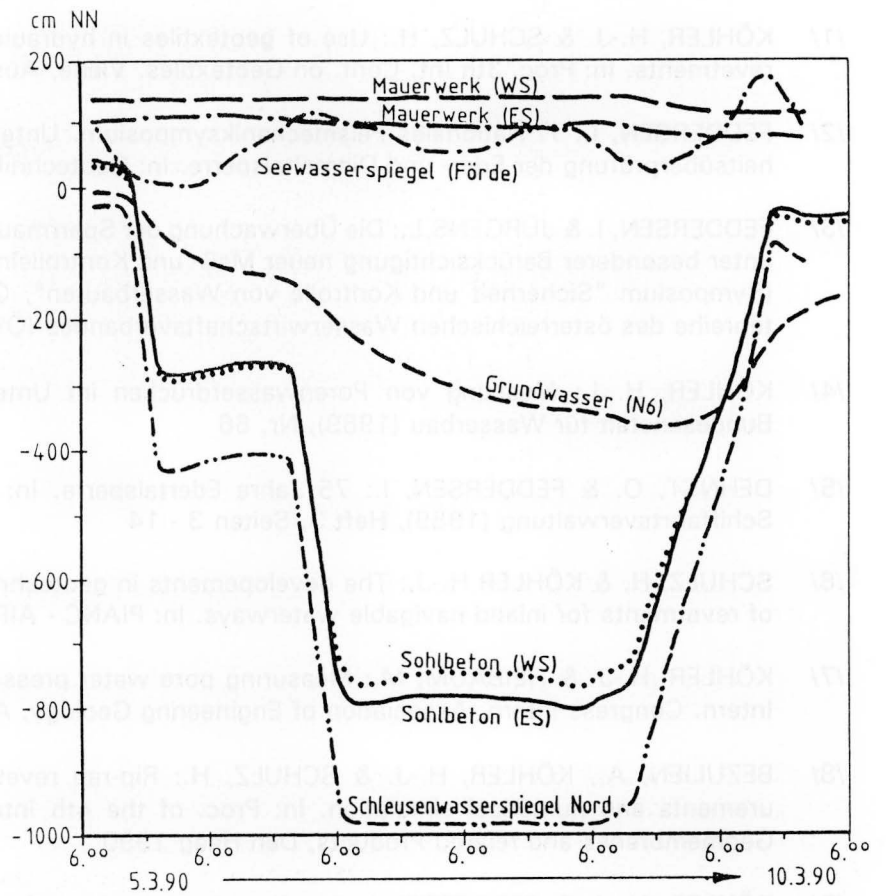
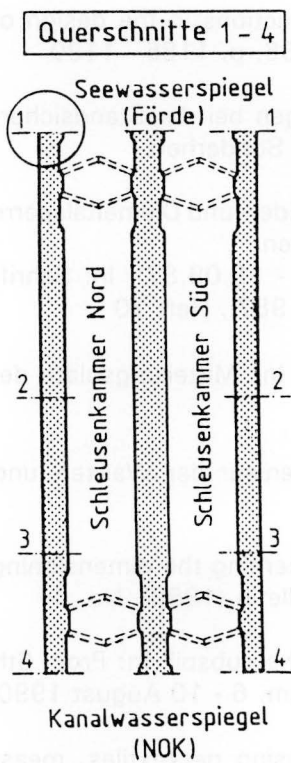
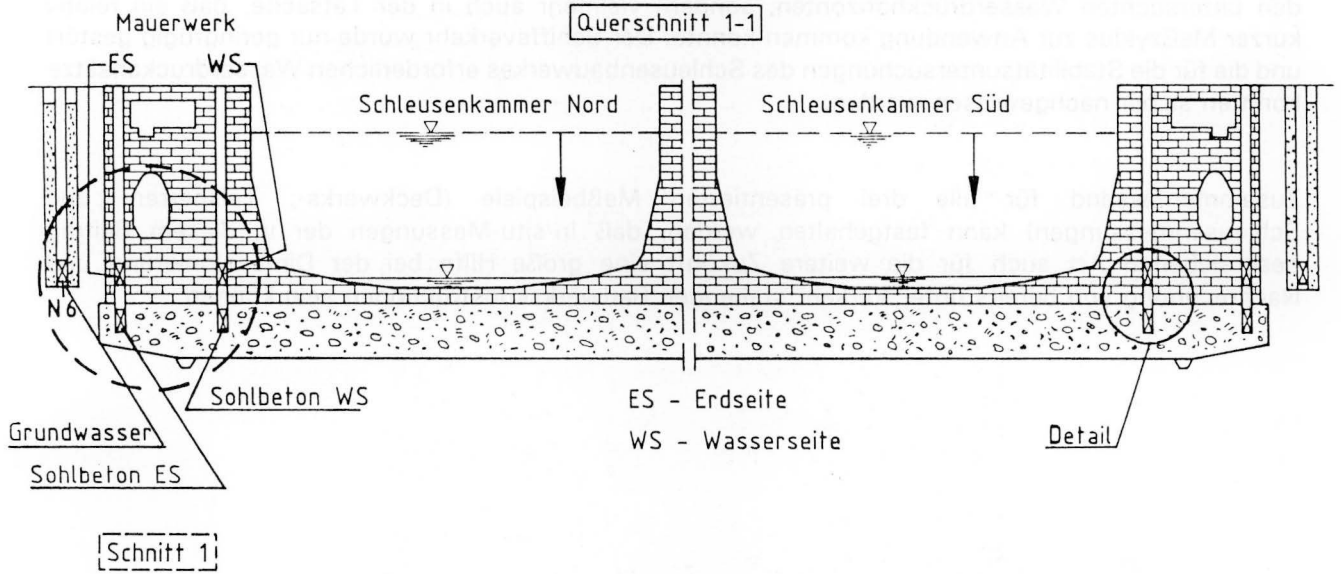


Bild 14 Querschnitt und Lageplan der alten Schleuse Kiel-Holtenau und die Meßergebnisse aus Schnitt 1-1



sondere Vorteil des eingesetzten Meßsystems erwies sich nicht nur durch die präzisen Ergebnisse in den untersuchten Wasserdruckhorizonten, sondern vielmehr auch in der Tatsache, daß ein relativ kurzer Meßzyklus zur Anwendung kommen konnte. Der Schiffsverkehr wurde nur geringfügig gestört und die für die Stabilitätsuntersuchungen des Schleusenbauwerkes erforderlichen Wasserdruckansätze konnten sicher nachgewiesen werden.

Zusammenfassend für alle drei präsentierten Meßbeispiele (Deckwerks-, Talsperren- und Schleusenmessungen) kann festgehalten werden, daß In-situ-Messungen der in diesem Beitrag beschriebenen Art auch für die weitere Zukunft eine große Hilfe bei der Dimensionierung und Nachrechnung von bereits unter Verkehr stehenden Bauwerkskonstruktionen sein können.

#### 4 Literatur

- /1/ KÖHLER, H.-J. & SCHULZ, H.: Use of geotextiles in hydraulic constructions in the design of revetments. In: Proc. 3th Int. Conf. on Geotextiles. Viene, Austria, 1986, p. 1185 - 1190
- /2/ FEDDERSEN, I.: 7. Nationales Felsmechaniksymposium. Untersuchungen bei der Standsicherheitsüberprüfung der Eder- und Diemeltalsperre. In: Geotechnik, 1987, Sonderheft
- /3/ FEDDERSEN, I. & JÜRGENS, L.: Die Überwachung der Sperrmauern der Eder- und Diemeltalsperre unter besonderer Berücksichtigung neuer Meß- und Kontrolleinrichtungen. (Symposium "Sicherheit und Kontrolle von Wasserbauten", Graz 16. - 18.09.87). In: Schriftenreihe des österreichischen Wasserwirtschaftsverbandes (ÖWWV) (1987), Heft 70
- /4/ KÖHLER, H.-J.: Messung von Porenwasserdrücken im Untergrund. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (1989), Nr. 66
- /5/ DEHNST, O. & FEDDERSEN, I.: 75 Jahre Edertalsperre. In: Der Ingenieur der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (1989), Heft 3, Seiten 3 - 14
- /6/ SCHULZ, H. & KÖHLER, H.-J.: The developments in geotechnics concerning the dimensioning of revetments for inland navigable waterways. In: PIANC - AIPCN - Bulletin (1989), No. 64
- /7/ KÖHLER, H.-J. & HEIBAUM, M.: Measuring pore water pressures in the subsoil. In: Proc. 6th Intern. Congress Intern. Association of Engineering Geology, Amsterdam, 6 - 10 August 1990
- /8/ BEZUIJEN, A., KÖHLER, H.-J. & SCHULZ, H.: Rip-rap revetments using geotextiles, measurements and numerical simulation. In: Proc. of the 4th Intern. Conference on Geotextiles, Geomembranes and related Products, Den Haag 1990
- /9/ KÖHLER, H.-J. & FEDDERSEN, I.: In situ measurements of pore water pressure in soils and concrete constructions. In: Proc. 3rd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics. Oslo, 09. - 11 Sept. 1991