

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Article, Published Version

Armbruster-Veneti, Heinrich

Leckageortung an Bauwerken der WSV mittels thermischer Messungen

Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102746>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Armbruster-Veneti, Heinrich (1997): Leckageortung an Bauwerken der WSV mittels thermischer Messungen. In: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau 76. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau. S. 35-46.

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.



LECKAGEORTUNG AN BAUWERKEN DER WSV MITTELS THERMISCHER MESSUNGEN

Dipl.-Ing. H. Armbruster-Veneti
Bundesanstalt für Wasserbau

1 EINLEITUNG

Nach dem Bruch zweier Dämme Ende der 70er Jahre an deutschen Wasserstraßen wurde in der Abteilung Geotechnik eine Arbeitsgruppe installiert, die sich intensiv mit der Ursachenforschung und der Detektion von Schwachstellen in Dämmen befaßte. Dabei war die

von Leckagen (bei gedichteten Dämmen) oder Schwachstellen (bei allen Arten von Dämmen), um damit die aktuelle Standsicherheit fertiger Dämme zu beurteilen. Die ursprünglich nur auf Dämme gerichteten Aktivitäten haben sich in der Zwischenzeit auf alle Arten der Grundwasserströmung bei Bauwerken ausgeweitet (Bild 1).

Dadurch war es möglich, die Erforschung von Grundwasserströmungen an Bauwerken interdisziplinär zu gestalten, d. h. die hydraulischen Auswirkungen von Strömungen mit den durch diese ausgelösten geophysikalischen und anderen Auswirkungen (Bild 2) zu koppeln.

Objekt	Art				
	durch	unter	um	aus	über
Dämme Langgestreckt (Kanäle Flüsse)					
	X	X	/	X	/
Querbauwerke I (Düker) (KÜ)	/	X	X	X	/
Querbauwerke II (Querdamm) (Sperrtor)	(X)	X	X	/	X
Regelungsbauwerke (Wehr) (Mole) (Schleuse)	X	X	X	X	(X)

Bild 1: Arten der GW-Strömung bei Bauwerken

BAW zunächst aktiv am Zustandekommen einer Verwaltungsvorschrift der WSV (Wasser- und Schifffahrtsverwaltung) beteiligt, die das Beobachten und Messen an Dämmen und deren Häufigkeit regelt (VV-WSV 2301 „Damminspektion“ von 1981). Daneben wurde ein Programm erstellt, das mehrere wissenschaftliche Institutionen zu einer Forschungsgemeinschaft zusammenband, um alle heute möglichen Detektionsverfahren auf die Dammproblematik anzuwenden. Ziel der Forschung sollte sein, qualitativ (1. Schritt) oder sogar quantitativ (2. Schritt) Aussagen machen zu können über Ort und Größe

Die nachstehenden Ausführungen beschränken sich auf die Temperature Auswirkungen (thermisches Potentialfeld), den Schwerpunkt der BAW unter Mitarbeit der in Tabelle 1 genannten Institute des gleichen Schwerpunkts. Dabei soll unter Thermometrie die umfassende Messung und Beurteilung von Temperaturmessungen verstanden werden. Sie setzt sich zusammen aus berührungsfreien Messungen von Oberflächen und ihrer Darstellung (Thermographie) und den Messungen von Körpertemperaturen (Berührende Temperaturmessungen).

hydraulisches Potentialfeld	thermisches Potentialfeld	geophysikalische Veränderungen	ökologische Veränderungen
Durchfluß Sickerlinie Druck- / Pot. höhe Geschwindigkeit Strömungskraft Reichweiten Austrittstellen Vorflutfunktion Pumpmengen Einzugsgebiete	Wärmefluß Temperatur Temp. grenzwert Gradienten Energie Reichweiten Oberflächentemp.	Wassergehalt Wichte / Dichte geol. Widerstand geol. Eigenpotent. Chemismus Akkust. Größen Seism. Größen Verformungen Kräfte	Feuchte Nässe Bewuchs Bepflanzung Vitalität Klima Tierpopulation

Bild 2: Auswirkung von Leckagen

2 FORSCHUNGSPROJEKTE DER BAW

Die Leckageforschung, gelegentlich auch unter dem einengenden Begriff „Früherkennung von Dammleckagen“ geführt, nutzte Forschungsmittel aus, die von verschiedenen Geldgebern der öffentlichen Hand [VW-Stiftung (Hannover), BMFT-Projekt (Bonn), BMV (Bonn)] oder aus WSV-eigenen Titeln stammten (Ämter Freiburg, Nürnberg, Stuttgart, bzw. Direktionen Süd/Südwest/Mitte und West). Die Forschungsgruppe der BAW arbeitete mit den in der Tabelle 1 genannten Instituten bzw. Firmen eng zusammen.

Die Forschung umfaßte neben den allgemeinen und theoretischen Arbeiten die Messungen an Modellen und wirklichen Dämmen (siehe Tabelle 2).

3 KRITERIEN FÜR DIE LECKAGEORTUNG

Leckageortung basiert auf der Grundvoraussetzung, daß es einen Sollzustand gibt, der sich vom Leckzustand unterscheidet. Dazu gibt es 4 einzelne Voraussetzungen:

1. Der Leckzustand besitzt:
 - mindestens eine *meßbare* Größe, die sich an
 - mindestens einem *Meßpunkt*

unterscheidet, im Idealfall sind dies jeweils mehrere Größen (geotechnische, hydraulische, geophysikalische etc.) an vielen Meßpunkten.

Tabelle 1: Beteiligte Institute/Firmen

Institut	Abteilung	Vergntwortliche Personen	Schwerpunkte
IBF UNI Karlsruhe	Abt. Erddamm- bau und Deponiebau	Prof. Blinde Prof. Brauns	Hydraulik
AGK UNI Karlsruhe	Abt. Hydrogeologie	Prof. Hötzl Dr. Merkler	Geophysik
Geophysik UNI Karlsruhe	Abt. Geothermie	Prof. Wilhelm	Geothermie
GTC	Kappelmeyer GmbH, Karlsruhe	Dr. Kappelmeyer, Dipl. -Geophys. Dornstädter	thermische Messungen
SPACETEC	Fa. Spacetec GmbH, Freiburg	Dipl. -Ing. Sartori	Thermographie
BAW	Abt. Geotechnik, Referat G 3, Karlsruhe	Dipl. -Ing. Armbruster-Veneti Dipl.-Ing. Schnebele	Thermometrie

Tabelle 2: Meßobjekte

Art	Spezifikation	Standort
physikalisches Modell	Kleine Rinnen Ringdamm Große Rinne	AGK, BAW IBF BAW
physikalisches Modell	Damm im Freien	BAW
Dämme	verschiedene Dammtypen	Oberrhein, ESK, MLK, DEK, Donau, KÜK, OHK
Querbauwerke	Düker Bahnunterführung	MLK MLK
Talsperren	verschiedene Abdichtungsarten	Eder, Diemel, Prims
Schleusen	verschiedene Typen	Kochendorf (Neckar), Uelzen (ESK)
Regelungsbauwerke	Wehr Leitdämme	Oberrhein Neckar

2. Ein Meßgerät befindet sich am Ort (im Einwirkbereich) der meßbaren „Auswirkung“ (Größe) oder hat Verbindung zu diesem Ort. Dies wirft die Frage nach dem geeigneten Ort auf.
3. Die Messung findet zum Zeitpunkt der Auswirkung statt. Dies wirft die Frage nach dem geeigneten Zeitpunkt bzw. einer Zeitreihe auf.
4. Die gemessenen Daten können interpretiert werden (d. h. Parametern zugeordnet werden). Dies wirft die Frage nach dem geeigneten bzw. der Anzahl verschiedener Meßverfahren und deren Genauigkeiten auf.

Ziel der Leckageforschung ist, für jede Bauwerksart, die:

- Optimierung der Lage der Meßpunkte
- Optimierung der Zeitpunkte der Messungen
- Festlegung der geeigneten Meßverfahren
- Minimierung der Anzahl der Meßverfahren und der Meßdaten

zu finden.

Jedes Verfahren (hydraulische, thermische, geoelektrische, chemische, geotechnische, geodätische Verfahren, Tracermessungen etc.) besitzt spezifische Vor- und Nachteile, die in /1/ genannt sind, aber hier nicht weiter ausgeführt werden. Generell gilt, daß nur in Ausnahmefällen einmalige Messungen mit einer Meßmethode eine Ortung von Leckagen ermöglichen.

4 TEMPERATURMESSUNGEN

Im Gegensatz zu anderen Messungen gibt es zu jedem Zeitpunkt und an jedem Ort der Erde schon eine existie-

rende Temperatur, so daß grundsätzlich Interpretationsprobleme auftreten können.

Gemessen wird die Temperatur in K (Kelvin), wobei 1 K = 1 °C (Celsius) bedeutet, der Bezugspunkt der beiden sonst gleichen Skalen aber um 273 K verschoben ist (273 K \cong 0 °C).

4.1 KÖRPERTEMPERATUREN

Körpertemperaturen werden „berührend“ gemessen. Der Sensor befindet sich am Objekt (am „Ort“) und nimmt (bei eigener sehr kleiner Masse) die Temperatur des Körpers (relativ große Masse) an, ohne die Körpertemperatur dadurch zu verändern. Gemessen wird die Sensortemperatur, die gleich der Objekttemperatur ist. Die „Thermometer“ genannten Meßgeräte besitzen völlig unterschiedliche Meßprinzipien (Ausdehnungsthermometer, Widerstandsthermometer, Halbleiterthermometer etc.). Der Sensor befindet sich in der Luft, im Wasser, im Bauwerksteil (z. B. Beton) oder im Boden (Luft-/Wasser-/Korngemisch-Mischung), d. h. vor „Ort“. Dies bedeutet, daß zum Einbringen des Sensors immer dann ein Eingriff ins System erforderlich ist, wenn nicht schon während des Baus Meßgeber (= Sensoren) eingebaut wurden. Selbst dann ist aber eine Inhomogenität im „Bauwerk“ vorhanden, die beachtet werden muß. So ist z. B. das nachträgliche Einbringen von Meßgebern in Dämmen ggf. mit Bohrungen verbunden, die das zu messende System stören können. Die Interpretation der Bauwerkstemperaturen benötigt Referenzmessungen und ortsspezifische Größen. Als Referenztemperaturen werden die Temperaturen der Luft, der Oberflächengewässer und des Grundwassers benötigt, ortsspezifische Größen sind der Wärmefluß aus dem Innern der Erde und anthropogene Wärmequellen (Bild 3).

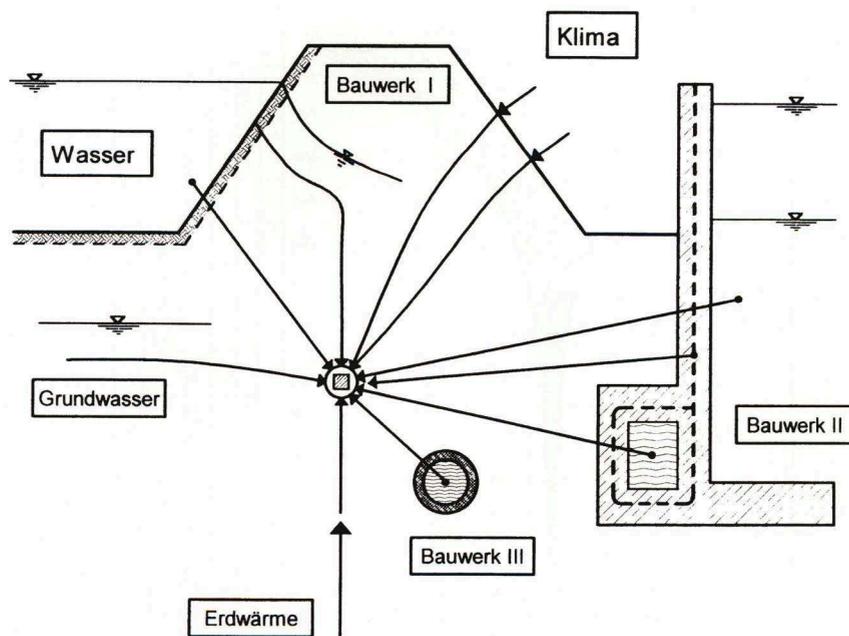


Bild 3: Temperaturen im Baugrund

Da bei den meisten Messungen der Körpertemperaturen das Tagesgeschehen (das nur bis etwa 1 m Tiefe die Bodentemperatur beeinflusst) keine Rolle spielt, genügen für Luft- und Wassermessung meist Tagesmittel ggf. auch einmalige Tagesmeßwerte (z. B. 6 Uhr-Werte der Außenbezirke der Ämter). Lediglich bei Meßgebern, die weniger als 1 Meter vom Wasser entfernt liegen (z. B. bei der Kontrolle von Fugendichtungen), ist die Veränderung der Wasser- bzw. Lufttemperatur im Tagesverlauf zu beachten.

Ortsspezifische Größen lassen sich Standardwerken entnehmen und/oder ergeben sich durch Recherchen vor Ort bzw. eigenen Referenzmessungen im Umfeld.

4.2 OBERFLÄCHENTEMPERATUREN

Die Messung von Oberflächentemperaturen ist weit schwieriger als die Messung der Körpertemperatur. Sie werden indirekt gemessen durch Erfassung der Signalstärke der elektromagnetischen Strahlung im Wellenlängenbereich des thermischen Infrarots, wofür spezielle Detektoren nötig sind. Die Atmosphäre läßt nur die Strahlung im 2 bis 5 µm-Band (kurzwelliges Infrarot) und im 8 bis 14 µm-Bereich (langwelliges Infrarot) durch, worauf die Detektoren der „Thermovisionskameras“ abgestimmt sind. Die Umrechnung der Signalstärke in eine absolute Temperatur benötigt Zusatzmessungen oder zumindest Zusatzinformationen zum Material, dessen Rauigkeit und Strömungskomponenten. Relativ einfach zu interpretieren sind vergleichende Temperaturmessungen, d. h. Messungen der gleichen Fläche zu unterschiedlichen Zeitpunkten oder verschiedener Flächen zum gleichen Zeitpunkt.

Die Temperatur der Oberfläche wird dabei als Summe von Temperaturen einzelner kleiner Flächen erfaßt, de-

ren Größe vom Aufnahmesystem und der Entfernung des Aufnahmesystems (geometrische Auflösung) abhängt. Infrarotscanner tasten zeilenweise ab, ihre eigene Bewegung (z. B. im Fluggerät) ermöglicht das Zusammensetzen von Zeilen zu einem Flächenbild. Thermovisionskameras arbeiten wie eine Fernsehkamera (Auflösung in Pixel), Handgeräte arbeiten punktwise (1 Information pro Gerätestellung). Die Verteilung der Temperatur wird durch ein Bild angegeben, das die Linien gleicher Temperatur angibt (Isolinien) oder Bereiche gleicher Temperaturen mit gleichen Farben versieht (Temperaturkarte).

5 TEMPERATUREN IM BAUGRUND

Die Temperaturen im natürlichen ebenen Boden ohne anthropogene Einwirkungen durch Bauwerke und ohne Wärmequellen von innen (z. B. aufsteigendes Heißwasser) sind nur vom Klima abhängig (Bild 4) und vom Wärmestrom der (heißen) Erde, die im hier zu betrachtenden Rahmen als Gebietskonstante betrachtet werden kann. Alle Wärme wird konduktiv, d. h. über Berührung ohne Fließen, weitergegeben: Die Temperaturen im Tiefenprofil von 0 bis etwa 30 m unter Gelände schwanken im Jahresverlauf in Mitteleuropa um einen Mittelwert von 9 - 11 °C, in der Jahresganglinie besitzen die Kurven einen sinusähnlichen Charakter, im Tiefenprofil zeigt die Einhüllende aller Werte eine kelchähnliche Form (Bild 4). Der Einfluß von Grundwasser (sehr kleine Gefälle) ist dabei nahezu ohne Bedeutung, da die Wärmeleitfähigkeiten von erdfeuchtem und nassem Boden sich wenig unterscheiden und der langsame Transport des Grundwassers bei nicht vorhandener anderer Energiequelle keinen Wärmeeinfluß besitzt.

Im durch Bauwerke beeinflussten Baugrund werden die Bodentemperaturen in Bauwerksnähe verändert:

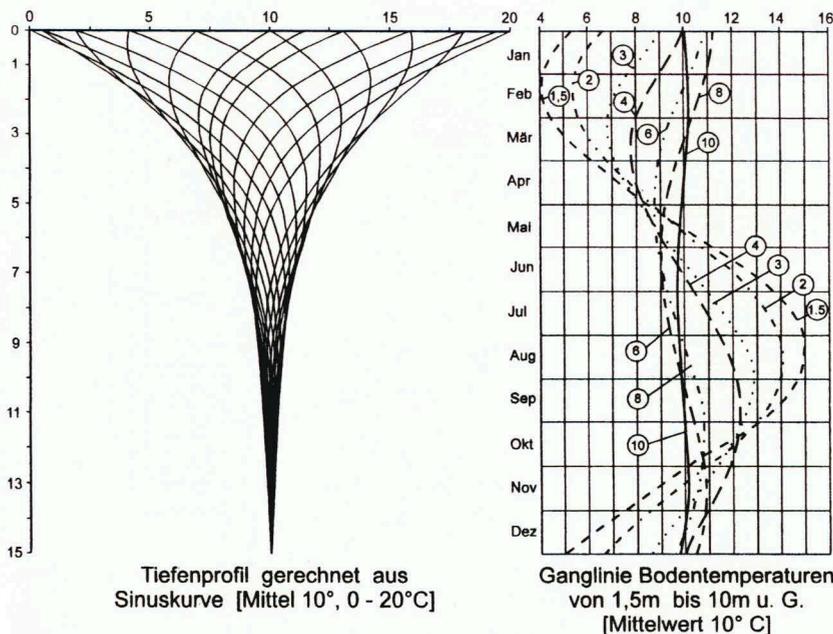


Bild 4: Tiefenprofil der Temperatur ohne Störung, Temperaturen in [°C], Tiefen in [m]

Im *Beispiel I* (Bild 5) bildet eine unterirdische Leitung eine Wärmequelle, die die Temperatur der umliegenden Bodenpunkte verändert, sowohl im Jahresgang erkennbar als auch im Tiefenprofil, außerdem verschiebt sich die Grenzlinie des Einflusses des Jahresgangs (0-Linie) nach unten.

Ist die Leitung dicht, wird die Wärmeübertragung rein konduktiv allseitig vor sich gehen, d. h. zeitverzögert und amplitudengedämpft zur Temperatur der Leitungsflüssigkeit (diese muß bekannt sein). Bei Leck in der Leitung addiert sich zum konduktiven ein konvektiver Anteil, d. h. Wärmetransport durch austretende Flüssigkeit. Dadurch werden die Temperaturen weniger zeitverzögert und weniger amplitudengedämpft von der Leitungstemperatur beeinflusst, außerdem ist keine Symmetrie mehr vorhan-

den, vor allem nicht, wenn sich die Leitung im Grundwasserstrom befindet.

Im *Beispiel II* (Bild 6) ist ein Kanaldamm auf durchlässigem Untergrund dargestellt, dessen Dichtung wirksam ist. Der Untergrund besitzt drei Temperaturbereiche:

- a) Unter der Kanalsohle wirkt die Erdwärme von unten und das Wasser von oben. Bei Schiffsverkehr hat das Wasser überall etwa gleiche Temperatur. Die Wärmeübertragung geschieht konduktiv, ggf. unter Berücksichtigung der Wärmeleitfähigkeit der Dichtung. Ohne Schiffsverkehr ist die Wassertemperatur auf der Sohle anders als an der Oberfläche, das Wasser selbst ist schon ein Dämpfungselement für das Klima.

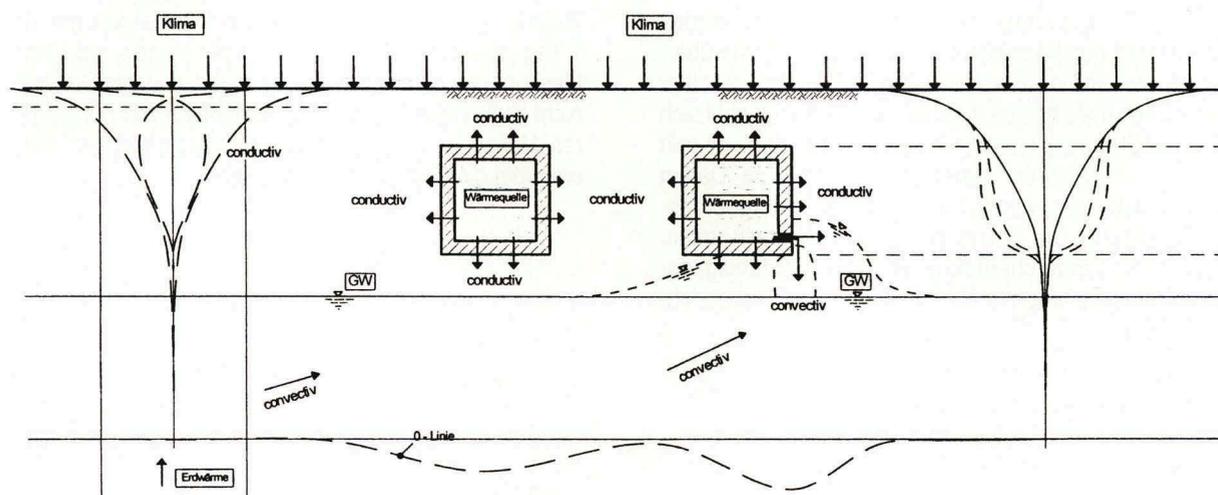


Bild 5: Unterirdische Leitungen

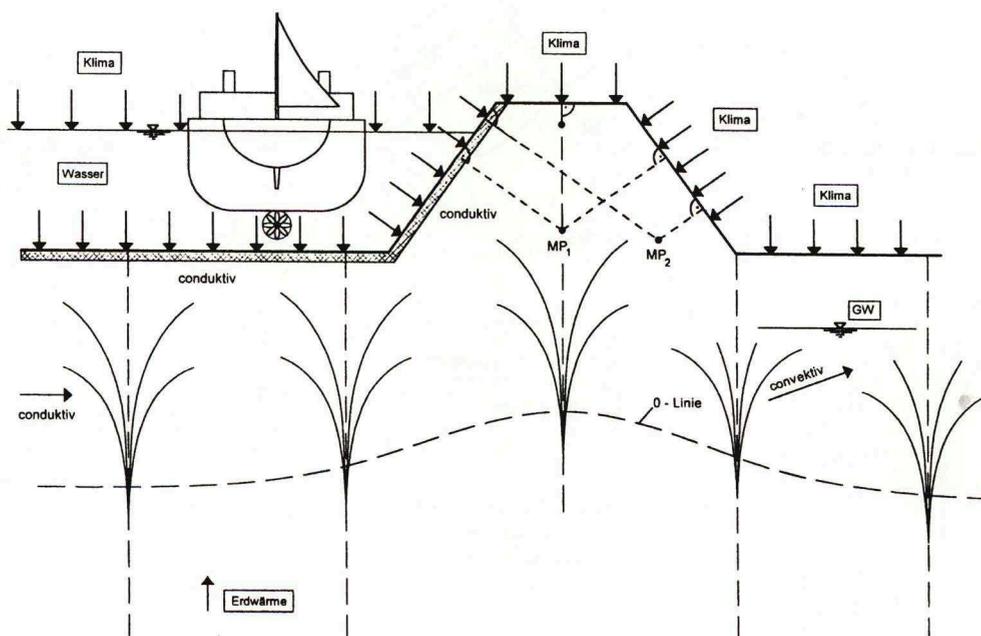


Bild 6: Damm, trocken (gedichtet)

- b) Im Damm und darunter ist von einer Seite die Wasserbelastung aktiv, von der anderen Seite das Klima. Auch bei trockenem Damm können sich also asymmetrische Temperaturverhältnisse einstellen, die 0-Linie hebt sich an. Die Dammtemperaturen selbst sind abhängig von der Geometrie (Kronenbreite, Neigungswinkel). Nur bei breiten Dämmen sind sie in Dammitte dem Hinterlandbereich (siehe c) ähnlich.
- c) Im Hinterland werden sich die normalen Verhältnisse des ebenen Bodens einstellen (etwa in 10 m Entfernung vom Dammfuß).

Im *Beispiel III* (Bild 7) ist ein durchströmter Damm dargestellt, dessen Dichtung nur begrenzt wirksam ist oder fehlt, ein Seitengraben soll den Dammdurchfluß aufnehmen.

Die drei Temperaturbereiche des Beispiels II werden überall dort durch konvektiv transportierte Wärme überlagert, wo Grundwasserströmung vorhanden ist. Über diese Grenzlinie hinaus (hydraulische Grenze) wirkt sich aber die Strömung auch noch dadurch aus, daß von dort aus ein konduktiver Transport (vor allem im Damm selbst) stattfindet, wengleich meist von untergeordneter Bedeutung. Die 0-Linie verschiebt sich nach unten, alle Temperaturen oberhalb ändern sich vollständig, der Einfluß des Seitengrabens muß außerdem berücksichtigt werden.

Das *Beispiel IV* (Bild 8) zeigt das Beispiel der Schleuse Uelzen, Ostseite. Bei dichten Fugen könnte die Beeinflussungslinie des konduktiven Wärmetransports (Grenzlinie) etwa wie die gestrichelte Linie verlaufen, bei Fugenundichtigkeiten sieht diese völlig anders aus. Auf der Westseite der Schleuse existieren eine Pumprohrleitung, Zuleitungen zu den Sparbecken selbst, so daß auch bei völligem Funktionieren aller Dichtungen eine äußerst vielfältige gegenseitige Transportbeeinflussung auftritt. Sind die Fugen nicht dicht, wird eine Überlagerung aus konvektivem Wärmetransport stattfinden.

Ergänzend zu allen Beispielen muß vermerkt werden, daß sich klimatisch bedingte konduktiv transportierte Temperaturen im Baugrund bei den klimatischen Verhältnissen in Mitteleuropa nur langsam ausbreiten. Dies bedingt andererseits, daß der Einfluß des nur relativ kurzfristig wirkenden klimatischen Tagesgangs in die Tiefe lediglich etwa 1 m beträgt. Bei Messungen, die nur 1 Tag oder weniger Zeit in Anspruch nehmen, brauchen Messungen von tieferen Punkten als 1 m unter Gelände nicht zeitkorrigiert zu werden. Ansonsten und bei längeren Messungen sind Referenzmessungen in die Tiefe und über die volle Meßzeit notwendig.

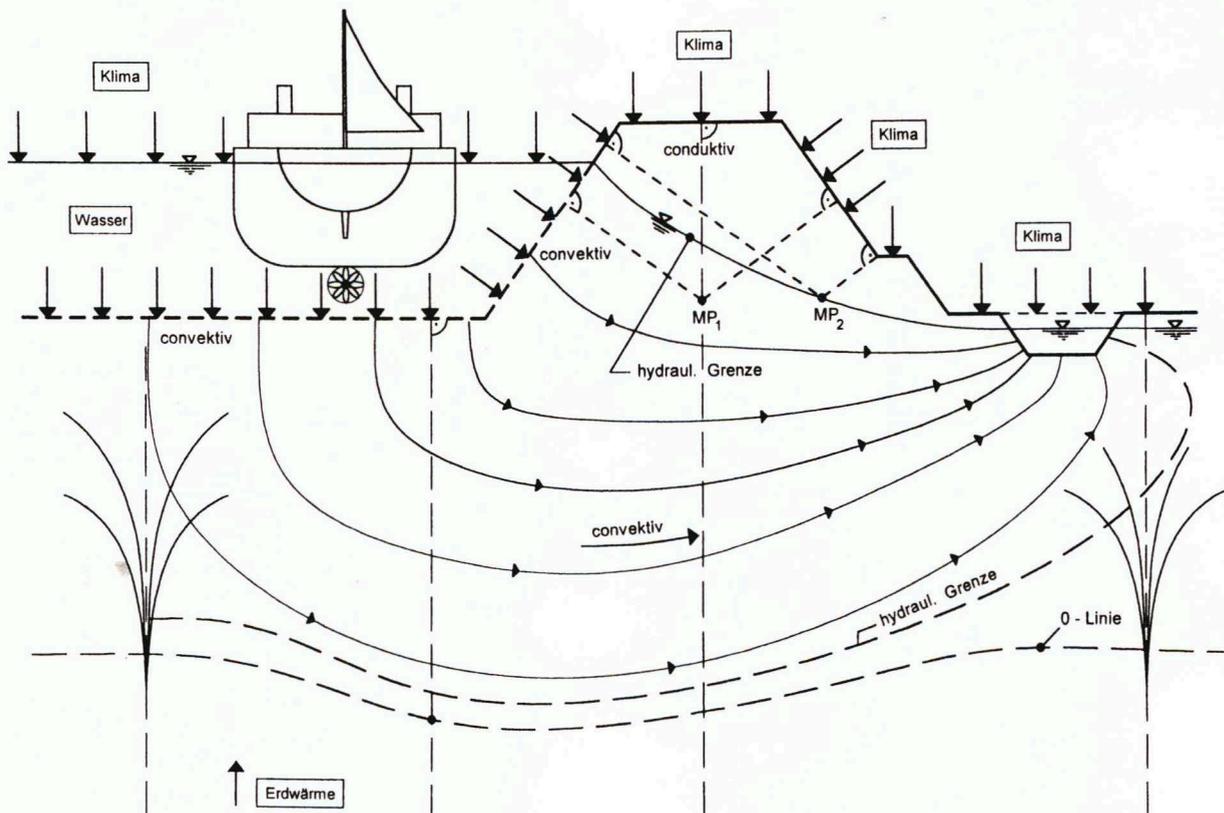


Bild 7: Damm durchströmt

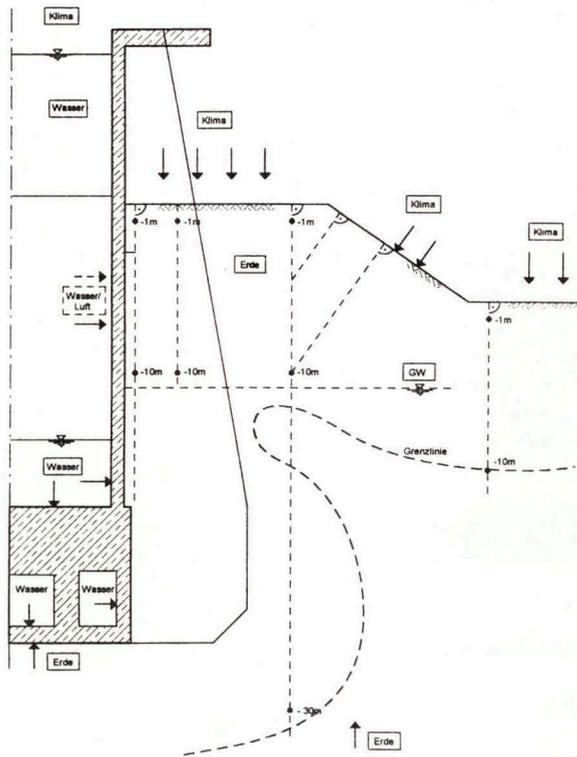


Bild 8: Bauwerkshinterfüllung (Schleuse), Fugen dicht

7 BEISPIELE FÜR MESSUNGEN

7.1 BEISPIEL DAMMDURCHSTRÖMUNG

Das zu untersuchende Bauwerk ist ein *Flußseitendamm*, gebaut aus sandigen Kiesen (Stützkörper) und einem schluffigen Sand als Dichtungskern. Im betrachteten 100 m langen Teilbereich besitzt der Damm mit Ausnahme der ersten 15 m eine Dichtwand (Schmalwand) mit etwas unterschiedlicher Einbindetiefe, die den durchlässigen Untergrund (Sande und Kiese) teilweise abschneidet (Tauchwand, da keine wasserhemmende Schicht erreicht werden kann). Der etwa 6 m hohe Damm (Bild 9, links) ist damit im allgemeinen bis auf 7 m unter Gelände abgedichtet.

Mit Hilfe von Temperatursondierungen sollte die *hydraulische Wirkung der Abdichtung* im genannten Teilbereich erkundet werden. Dazu wurden im Sommer 1996 alle 10 m von der Dammkrone aus je 1 Temperatursonde bis in 20 m unter Krone (= 14 m unter Gelände) geschlagen und mit Hilfe einer Meßkette (System GTC Kappelmeyer) in jedem Meter Tiefe gemessen.

6 TEMPERATUREN AN DER OBERFLÄCHE

Im Gegensatz zu Baugrundtemperaturen spielt für Oberflächenmessungen der Zeitpunkt der Messung eine entscheidende Rolle. Zwar ist die berührend zu messende Temperatur in der Nähe der Oberfläche (z. B. 1 cm unter Wasser) noch relativ stabil, aber die berührungsfrei zu messende Oberflächentemperatur (gemessene Schichtstärke im μm -Bereich) ist äußerst abhängig von:

- Wind, Bewölkung, Sonnenstand, Schatten
- Struktur der Fläche (glatt, gekräuselt, Wellen)
- Material der Fläche
- Bepflanzung.

Die Messung von Oberflächentemperaturen zur Detektion von Schadstellen ist also nur dann sinnvoll, wenn:

- die Temperaturunterschiede zwischen Soll- und Leckzustand groß genug sind, um Nebeneinflüsse zu überdecken
- günstige äußere Bedingungen herrschen (keine Bewölkung, nachts, glatte Flächen, keine oder gleichmäßige Bepflanzung, richtiger Zeitpunkt)
- mehrmalige Messungen miteinander verglichen werden können
- eine Messung über eine größere Strecke genau oder nahezu zeitgleich stattfindet.

Die vorstehenden Einschränkungen können für die Praxis Oberflächenmessungen ausschließen, sie aber auch unter Umständen einsetzbar machen. Vor allem der letzte Punkt der Einschränkungen ist mit einem Fluggerät leicht erfüllbar.

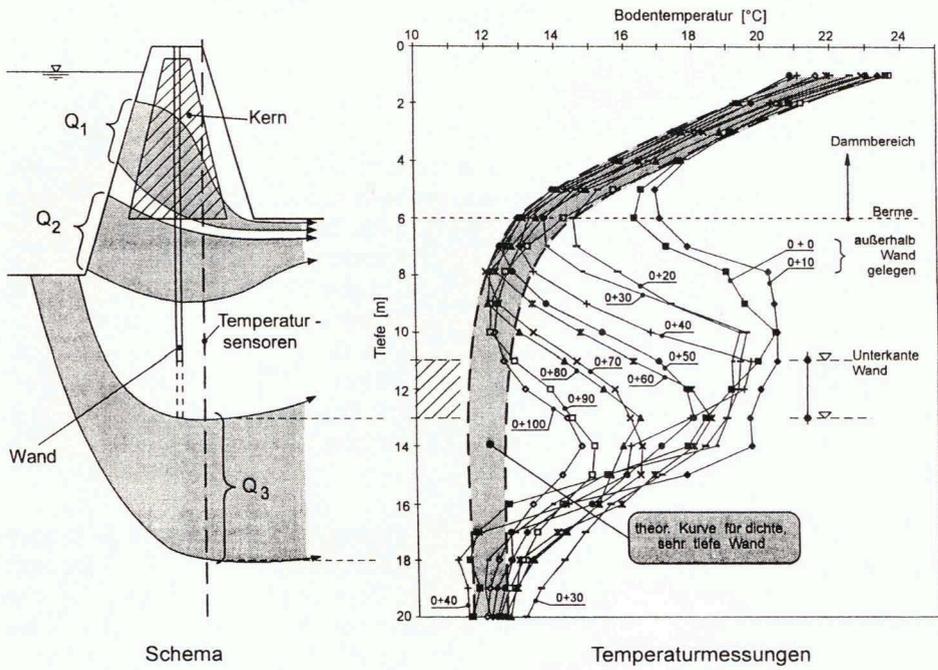
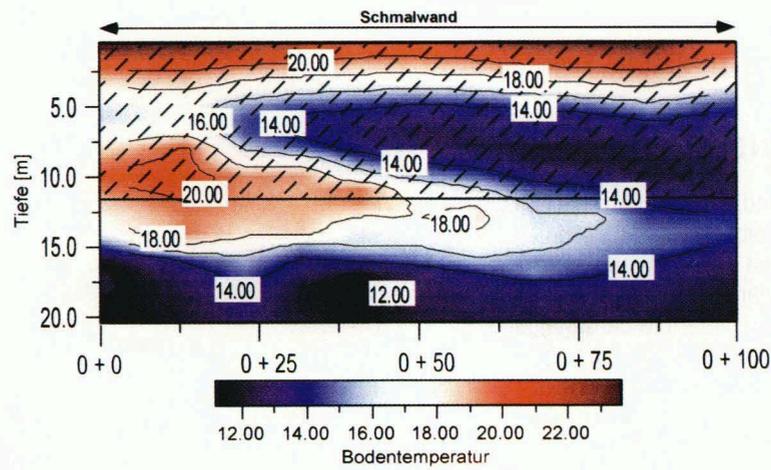


Bild 9: Temperatur im Damm und Untergrund (Prinzip, Tiefenprofil)



Black Abb S 42a

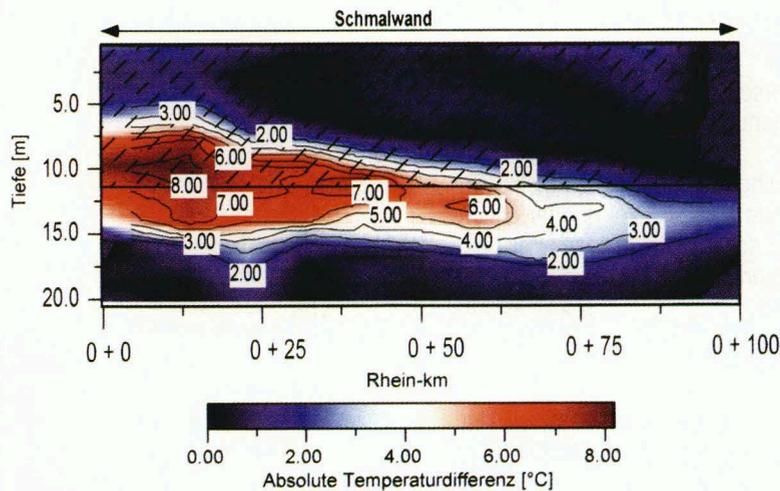


Bild 10: Isothermen (oben) und Temperaturdifferenzen (unten) im Vertikalschnitt längs Dammkrone

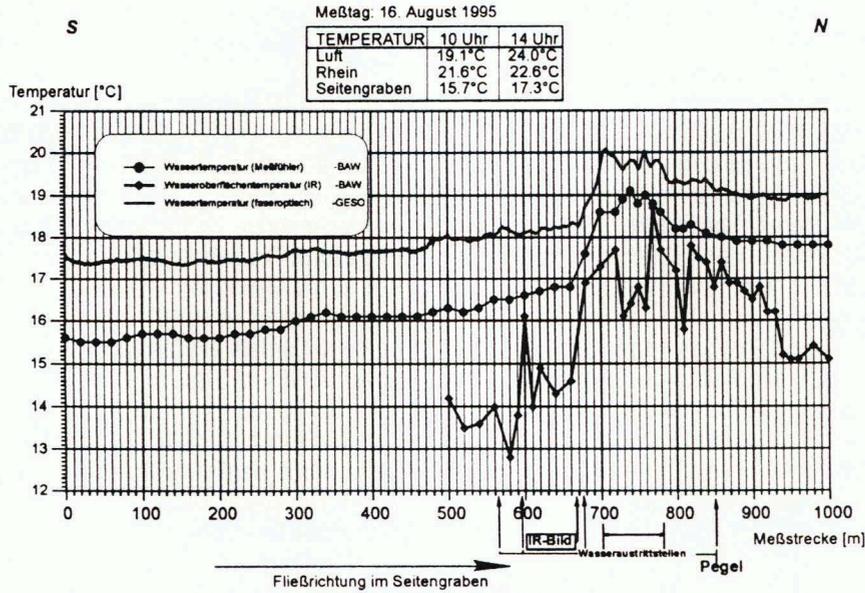


Bild 12: Temperaturen im Seitengraben, verschiedene Meßsysteme

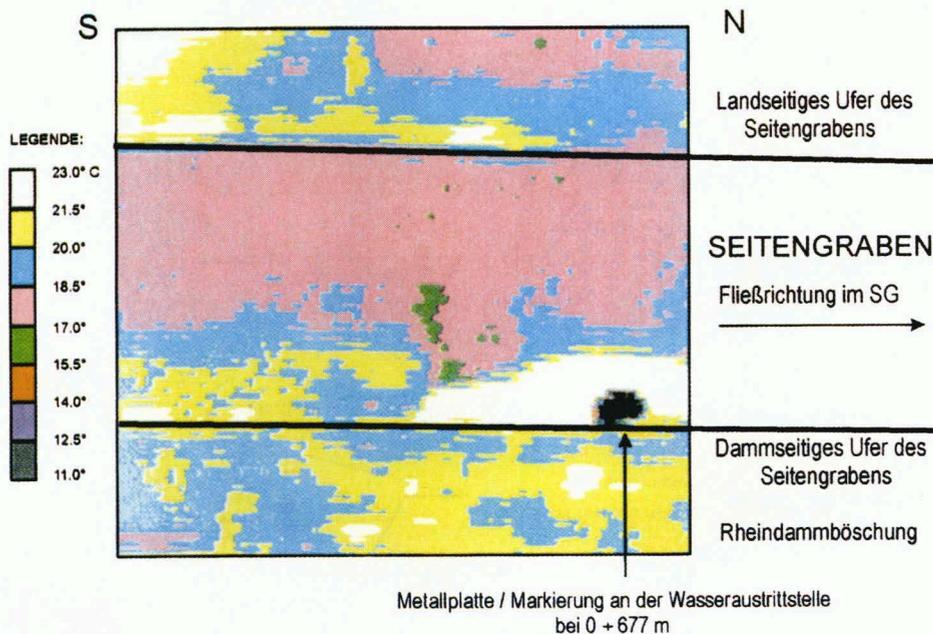


Bild 13: Infrarotbild, Temperatur des Grabenwassers

(bei Tag relativ kälter, bei Nacht relativ wärmer) als auch einen anderen Emissionskoeffizienten als auch - bei längerem Austritt - eine andere Bepflanzung. Die letztgenannte Komponente läßt sich zusätzlich sichtbar machen durch Aufnahmen, die im nahen, nicht thermischen Infrarot des Wellenlängenbereichs liegen und mit sogenannten Multispektralscannern /3/ erfaßt werden.

7.3 BEISPIEL FUGENÜBERWACHUNG EINER SCHLEUSE

Eine *Schleuse* besitzt sehr hohe Kammerwände, die sich während des Betriebs gegeneinander bewegen. Im Übergang zu den Häuptionen kommt außerdem noch eine Bewegung in Längsrichtung der Schleuse dazu. Damit ergibt sich die Gefahr, daß die vorhandenen Fugenbän-

der reißen, Materialtransport durch die Fugen ermöglicht wird und damit ein Sicherheitsproblem geschaffen ist.

Die Schleuse wird nun mittels Temperaturmessungen (siehe Artikel Schwieger in diesem Heft) direkt hinter den Fugenbändern (*Tiefenprofile*) beobachtet, um die Dichtigkeit der Fugenbänder zu kontrollieren. Die Meßketten in die Tiefe verlaufen im Wandbereich etwa 40 cm von der Außenkante der Wand entfernt und messen (alle Meter) sowohl oberhalb als auch unterhalb des (tief liegenden) Grundwasserspiegels (Bild 14). Für die Beurteilung der Fugen im Bereich der Kammersohle und tiefer (Füll-/Entleerungssystem über Kanäle) sind die nachträglich eingebrachten Meßketten naturgemäß zwar nahe am Betonkörper der Sohle, aber in größerer Entfernung zur aufsteigenden Wand.

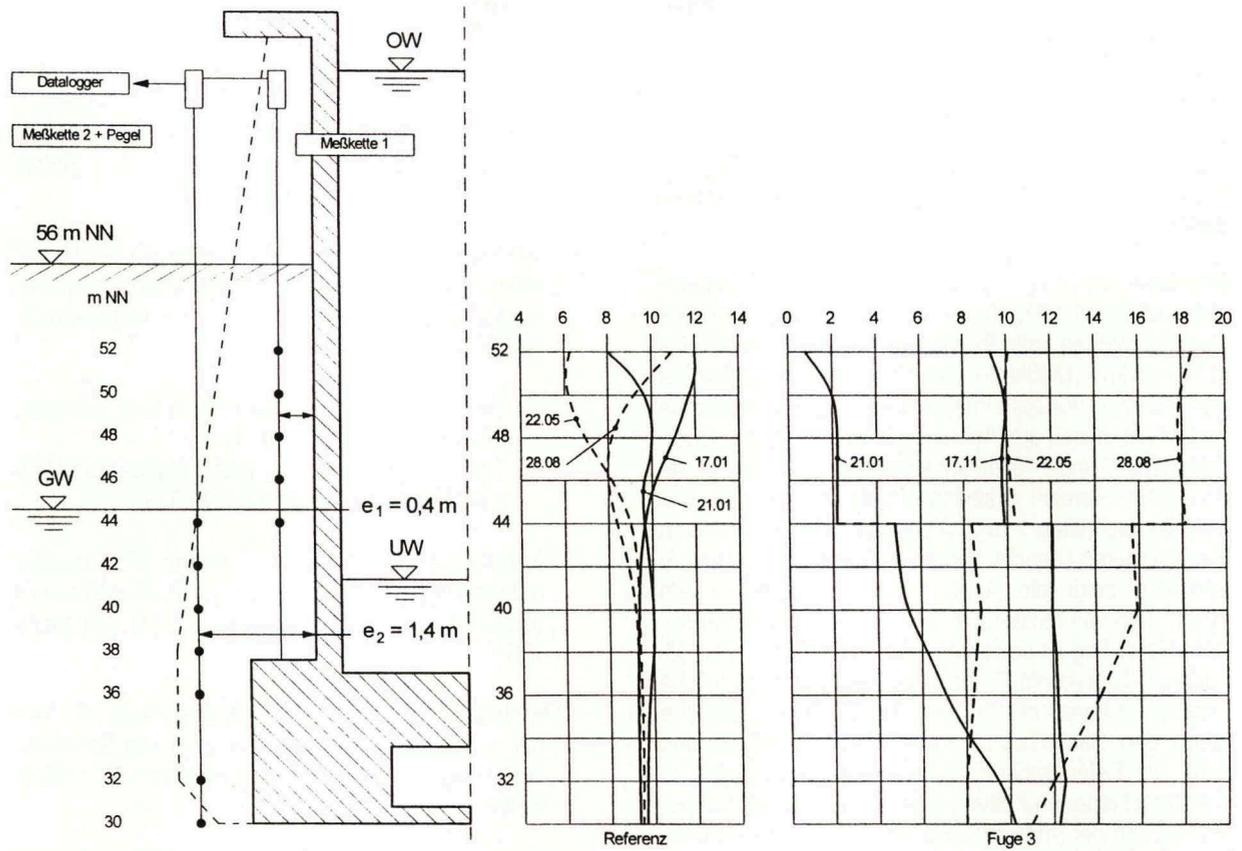


Bild 14: Temperaturen im Tiefenprofil hinter der Wand (Prinzip, Tiefenprofile)

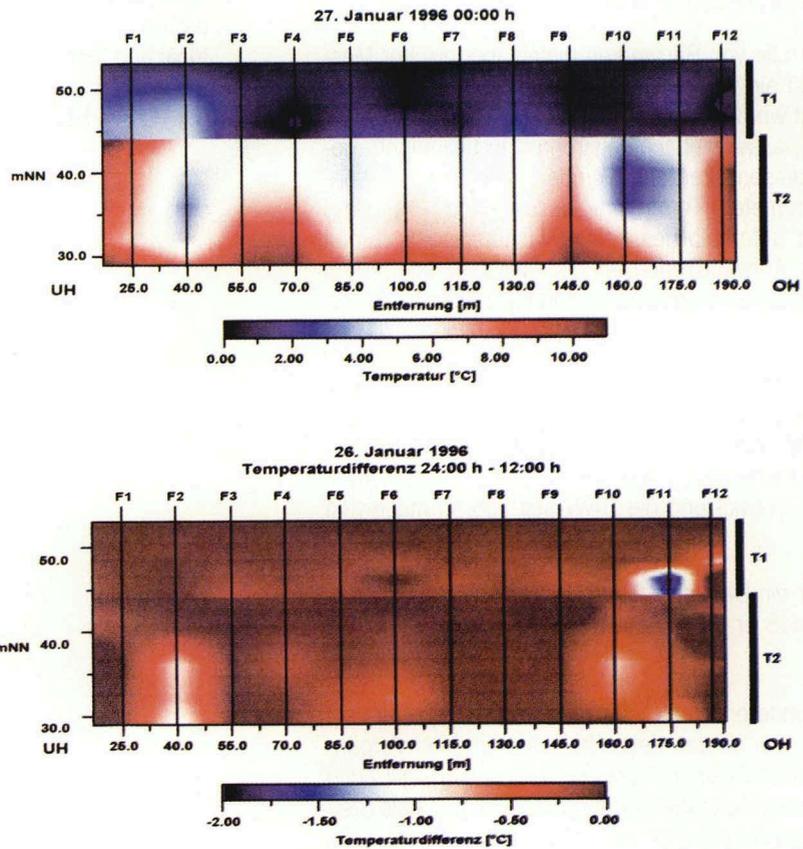


Bild 15: Temperaturen längs der Kammerwand (Isothermen, Differenzen)

Die automatische Verarbeitung der automatisch erfaßten Temperaturdaten ermöglicht Aussagen zur Dichtigkeit über die Zeit-/ und Temperaturbeziehungen (Veränderung der Temperaturen innerhalb eines Zeitraums) und Orts-/Temperaturbeziehungen (Thermischer Zustand zu einem Zeitpunkt bzw. deren Veränderung). Als Beispiel seien die Isothermen zweier Vertikalebene durch die Meßketten gezeigt (Bild 15).

Die obere Bildhälfte zeigt die Absolutwerte der Temperaturen am 26.01.1996. Das Bild ist zweigeteilt: Der nahezu gleichmäßige kalte Bereich ist in einer Vertikalebene in Wandnähe (Meßkette 1 des Bilds 14), der wärmere Bereich ist in der entfernteren Vertikalebene (Meßkette 2). Es zeigen sich drei Anomaliebereiche: Bei den Querschnitten F2 und F10 zeigen sich Kälteanomalien im relativ tiefen Bereich (Kaltwasserzufluß aus Lecks), bei den Querschnitten F1/F2 Wärmeanomalien im oberen Bereich, deren Ursache geklärt werden muß. Die untere Bildhälfte zeigt die Abnahme der Temperatur am 26.01.1996 von Mitternacht bis 12 Uhr (Differenzwerte). An diesem Tag ist sowohl im Querschnitt F11 oben als auch im Querschnitt F2 tief unten eine ungewöhnliche Temperaturabnahme zu verzeichnen, deren Ursache durch den Sachbearbeiter des Amtes geklärt werden muß. Die Tiefenprofile (Bild 14) zweier Querschnitte zu drei verschiedenen Zeiten zeigen, wie stark die Temperaturen von der (miteingezeichneten) Referenzmeßstelle (≈ 12 m entfernt von Wand) abweichen.

8 AUSBLICK, DANKSAGUNG

Die Kontrolle von Bauwerken mittels thermischer Messungen ist ein Verfahren, dessen Bedeutung lange unterschätzt wurde. Dabei kann mit relativ wenig Aufwand in Grundwasserbeobachtungsrohren in beliebigen Tiefen gemessen werden (Temperaturlichtlote, Sekundenthermometer, Temperatursensoren etc. /4/), allerdings nur unterhalb des freien Wasserspiegels. Einen größeren Aufwand erfordert die Messung im Boden, wenn Temperatursensoren nachträglich eingebaut werden.

Die Bestückung von Bauwerken mit Temperatursensoren während des Baus oder die Verlegung von Sensorketten aller Art in konstruktiv vorhandene Kontrollelemente (Seitengräben, Dräns) sind heute Möglichkeiten, an deren Entwicklung die BAW seit Jahren mitgewirkt hat.

Es ist mir ein Bedürfnis, Herrn Professor Dr. Schulz zu danken, daß er diese Entwicklung tatkräftig unterstützt hat.

Ein besonderer Dank - inzwischen leider nur ein nachträglicher für den viel zu früh verstorbenen Vorgänger in meiner Position, Herrn H. D. Döscher - gilt auch dem früheren Referatsleiter Grundwasser, der viele Steine aus dem Weg räumte und sich immer dafür einsetzte, daß „sein Referat“ die Zusammenarbeit mit den anderen wissenschaftlichen Instituten und der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung suchte und fand.

9 LITERATUR

- /1/ Supplement to PIANC-Bulletin No 69 (1990): Supervision and control of long lateral embankments. Deutsch im Eigenverlag der BAW (1992): Überwachung und Kontrolle von langgestreckten Seitendämmen.
- /2/ Armbruster, H./Großwig, S./Hannich, D./Hurtig, E./Merkler, P.G.: Thermische Untersuchungen an Seitengräben zur Kontrolle durchströmter langgestreckter Dämme
 - a) Teil I: Hydraulische Situation und Meßverfahren, Wasserwirtschaft 97 (1997), 4
 - b) Teil II: Meßergebnisse, Interpretation und Wertung, Wasserwirtschaft 87 (1997), 5
- /3/ Armbruster, H./Döscher, H. D./Sartori, M.: The infrared thermography, a control system for the efficiency of sealing elements and drains. ICOLD, Lausanne 1985
- /4/ Armbruster, H./Dornstädter, J./Kappelmeyer, O./Tröger, I.: Thermometrie zur Erfassung von Schwachstellen an Dämmen. Wasserwirtschaft 83 (1993), Heft 4
- /5/ Armbruster, H./Blinde, A./Hötzl, H./Merkler, G.P.: The application of geoelectrical and thermal measurements to locate dam leakages. Int. Sympos. "Detection of flow phenomena by selfpotential/geoelectrical and thermometrical methods", Karlsruhe 1988, erschienen in: Lecture notes in earth science, Springer Verlag, Heidelberg