

Abteilung I

Binnenwasserstraßen und Binnenhäfen (für gewerbliche und Freizeitschifffahrt)

Thema 4

Technische Weiterentwicklung bei Gestaltung, Konstruktion und Unterhaltung von Deichen und Dämmen für Flüsse und Kanäle. Den Problemen der Verbindung zwischen nachgiebigen beweglichen und festen Anlagen und der Erneuerung und Verbesserung vorhandener Dämme ist besondere Aufmerksamkeit zu widmen.

Thema des Berichts

Konstruktive Maßnahmen zur Dichtung von Kanaldämmen und Besonderheiten am Übergang zu festen Anlagen sowie zur Überwachung an Kanal- und Flußdämmen.

Berichtersteller

Ministerialrat Prof. Dr.-Ing. Martin Hager, Bundesministerium für Verkehr, Bonn

Dipl.-Ing. H. Armbruster, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Baudirektor Dipl.-Ing. H.D. Döscher, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Inhalt

Zusammenfassung.....	6
Grundsätzliche Vorbemerkungen.....	6
1. Einleitung.....	7
2. Übersicht zu den Überwachungssystemen.....	7
3. Meßsystem Infrarotthermographie.....	7
4. Vorbereitende Arbeiten.....	7
4.1 Vorbereitung der thermographischen Aufnahme.....	7
4.2 Vorbereitungen für die spätere Auswertung.....	8
5. Auswertung der Messungen.....	8
5.1 Empirische Klassifikation einer einzelnen Infrarotaufnahme (EK).....	8
5.2 Multispektrale Klassifikation (MSK).....	8
5.3 Multitemporale Klassifikation (MTK).....	8
6. Nachuntersuchungen und Ergebnisse.....	8

Zusammenfassung

Die Anforderungen des modernen Schiffsverkehrs und die technischen Möglichkeiten zur Gestaltung kanalisierter Flüsse und zum Aus- und Neubau von Schifffahrtskanälen hat zu erhöhten Anforderungen an die Erdbauwerke im Bereich der Dammstrecken der Wasserstraßen geführt. Neben den unmittelbaren Einflüssen aus der Wasserbelastung und den dynamischen Wirkungen des vorbeifahrenden Schiffes ist, wie eingehende Untersuchungen gezeigt haben, die Zuverlässigkeit der Dämme und Deiche in erster Linie von der zutreffenden Beurteilung der Wahrscheinlichkeit örtlichen Versagens unter dem Einfluß von Sickerströmungen und deren Auswirkungen, besonders der Erosion und Suffosion abhängig. Hieraus haben sich Erkenntnisse für die ausreichend sichere Gestaltung der Erddämme und der Dichtungen sowie der Anschlüsse im Bereich von Kreuzungsanlagen ergeben. Darüber hinaus wurden besondere Verfahren zur Überwachung des jeweiligen Sicherheitszustandes der Dämme entwickelt.

An Beispielen wird gezeigt, in welchem Umfang sich hieraus besondere bauliche und ausführungstechnische Lösungen ergeben. Ein flächendeckendes Überwachungssystem von Dämmen wird beschrieben, dessen Einsatz seit 1980 erprobt wird. Dabei handelt es sich um das Aufnehmen von Dämmen und deren Umgebung mit einem Multispektralscanner, der sowohl die reflektierte Sonnenstrahlung im sichtbaren Wellenlängenspektrum als auch die Infrarotbestrahlung auf Detektoren abbildet und deren Strahlungsintensitäten auf Magnetband speichert. Die gespeicherten Daten können mit Hilfe von EDV-Anlagen dargestellt und verarbeitet werden. Gefundene thermische Anomalien, deren Ursache eine Leckstelle im Damm sein kann, werden mit weiteren Aufnahmedaten in Beziehung gesetzt, wobei diese aus anderen Aufnahmekanälen des Spektrums (multispektral) oder aus anderen thermischen Aufnahmen (multitemporal) stammen. Es wird gezeigt, welche Vorbereitung die Untersuchungsmethode benötigt und wie deren Ergebnisse weiterbehandelt werden.

Grundsätzliche Vorbemerkungen

Besonderheiten bei Dämmen der Wasserstraßen

Die Gestaltungsprinzipien dichter Erddämme sind an sich aus dem Talsperrenbau bekannt. Die Besonderheit der Dämme an Wasserstraßen liegt insbesondere in der großen Längenausdehnung, was verständlicherweise Überwachungsprobleme während des Baues und bei der laufenden Unterhaltung der Anlagen mit sich bringt. Von den rund 1100 km Kanalstrecken und 1250 km kanalisierter Flußstrecken in der Bundesrepublik Deutschland liegt ein großer Teil ganz oder teilweise in einer sogenannten Dammstrecke, d.h. der Wasserspiegel liegt über dem natürlichen Gelände. Mit Zunahme der Schleusenfallhöhen bei modernen Anlagen liegen die meist 4 m tiefen Schifffahrtskanäle zum Teil erheblich über dem Gelände und erreichen Streckenlängen von 40 km und mehr. Während bei den Flußseitendämmen je nach den Untergrundverhältnissen Innendichtungen in Spundwand- oder Schlitzwandbauweise vorkommen, werden bei künstlichen Kanälen meist Oberflächendichtungen verwendet.

Bei neueren Anlagen besteht die Kanaldichtung aus Asphaltbeton, der bei den üblichen Abmessungen eine Durchlässigkeit von nur 2×10^{-7} m/s hat, was einem zulässigen Versickerungsverlust von 2 l/s und ha entspricht (Bild 1a u. b).

befunden wurde, während bei allein durch Oberflächenwasser beanspruchte Flächen die Neigung 1:2 betragen darf. Wenn die so ermittelte Dammfußbreite nicht verfügbar ist, sind nach den bekannten Gesetzmäßigkeiten zur Erosions- bzw. Böschungsbruchverhinderung Abdeck- bzw. Auflastfilter gewählt worden (Bild 2a u. b).

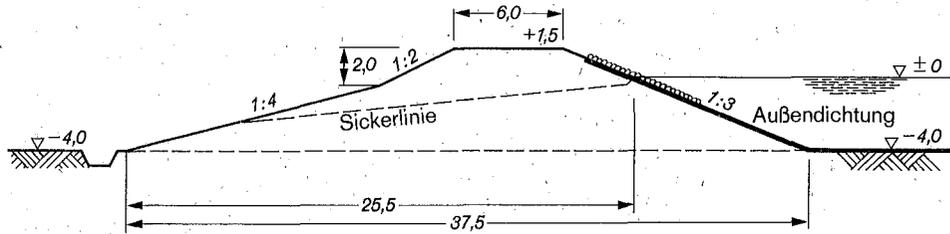


Bild 2a: Kanaldamm, Normalquerschnitt

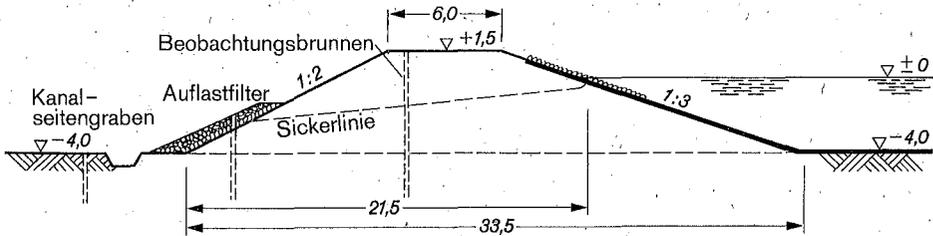


Bild 2b: Kanaldamm, Querschnitt bei beschränkter Breite

Ein besonderes Konstruktionsprinzip liegt darin, daß im Inneren des Dammkörpers keine Druckentlastungseinrichtungen durch Dränagen angeordnet werden, die die Durchlässigkeit begünstigen und zur Röhrenbildung führen könnten, wodurch der Druckgradient erhöht und damit die Gefahr unzulässiger Untergrundverformungen mit schädlicher Wirkung für die Oberflächendichtung herbeigeführt würde.

Konstruktive Ausbildung der Dichtungen an Kreuzungsanlagen

Der Dammsicherheit muß in der Nähe von Durchdringungskonstruktionen durch Kreuzungsanlagen besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden. Das Netz der künstlichen Wasserstraßen in der Bundesrepublik Deutschland wird durchschnittlich auf jedem Streckenkilometer von einem Verkehrsweg und von durchschnittlich zwei Kreuzungen mit Düchern und Versorgungs- und Versorgungsleitungen gekreuzt. Von diesen mehr als 3000 Kreuzungsanlagen befinden sich etwa die Hälfte im Untergrund niedriger oder einseitiger Dammsrecken. Sie begünstigen bekanntlich die Wasserwegigkeit, so daß solche Durchdringungskonstruktionen möglichst ganz vermieden werden sollten. Da dies aber praktisch nicht möglich ist, muß auf jeden Fall sichergestellt werden, daß die Konstruktion nicht durch Anordnung von Druckentlastungselementen die ohnehin bestehende Durchlässigkeit vergrößert. Daher binden an Kreuzungsanlagen sogenannte Schotte möglichst weit in den Dammkörper ein, um den Sickerweg zu verlängern (Fig. 3). Die Folge ist ein erhöhter Druckaufbau unmittelbar am Bauwerk, so daß dieses für diesen erhöhten Wasserdruck bemessen sein muß. Häufig erfüllen

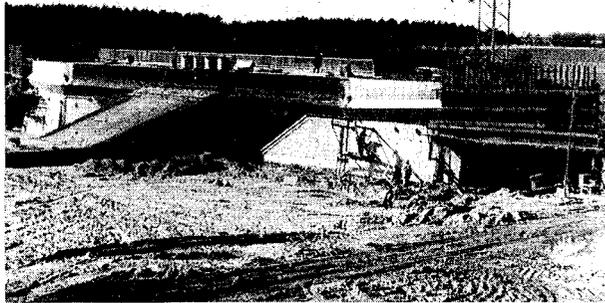


Bild 3: Zur Abschottung im Kanalseitendamm verlängerte Flügelwände eines Kreuzungsbauwerkes

die Durchlaßkonstruktionen aus Wirtschaftlichkeitsgründen diese Forderungen nicht, so daß die Einsickerung aus dem Kanalbett durch eine vollkommene Absperrung verhindert werden muß. Hierzu wird eine Sperrschicht unterhalb der planmäßigen Dichtung angeordnet, in der Sickerwasseranzeigen angeordnet werden. Praktische Ausführungen am Elbe-Seitenkanal und am Main-Donau-Kanal zeigen die folgenden Abbildungen. Als Sperrschicht hat sich eine Kunststoffolie als besonders geeignet erwiesen, wenn sie ausreichend stark — in der Regel

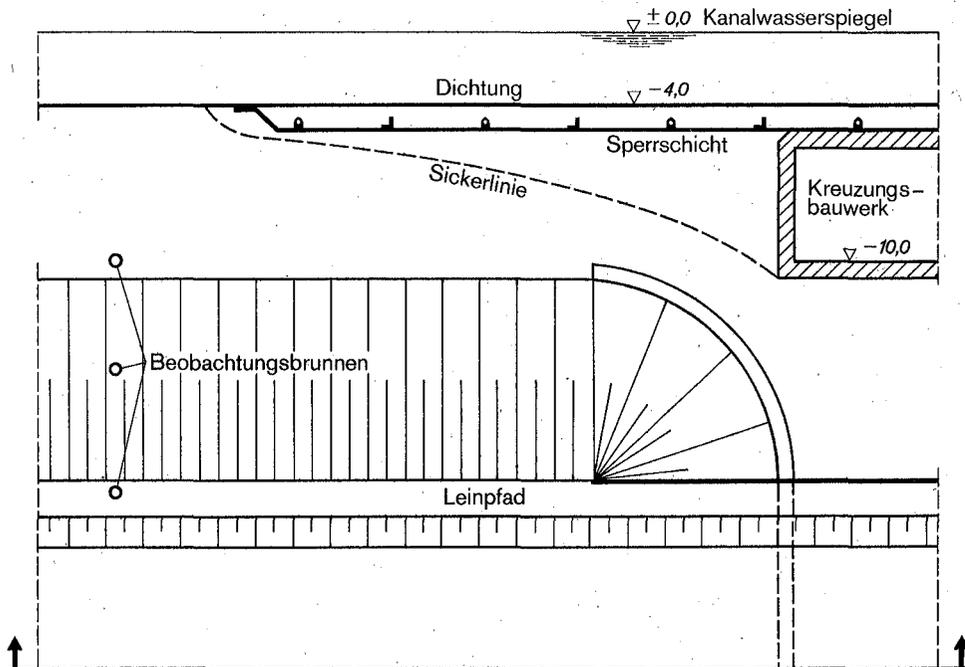


Bild 4a: Sperrschicht für ein von Wasserdruck freizuhaltendes Kreuzungsbauwerk

5 mm — und an den Verbindungsstellen sorgfältig abgedichtet ist. Dabei ist notwendig, die Sperrschicht entweder über die Kreuzungsanlage hinwegzuführen oder an diese mit wasserdichten Klemmanschlüssen anzuschließen (Fig. 4a u. b).



Bild 4b: Einbau der Sperrschicht und Dränageschicht unter der Dichtungsschicht

Häufig ergibt sich auch die Notwendigkeit, die Dichtung der Kanalsohle an seitliche lotrechte Uferwände, wie z. B. in Schleusenvorhöfen, anzuschließen. In diesem Falle empfiehlt es sich, einen bewährten Stahlbetonbalken anzuordnen, an den die Dichtung und die Sperrschicht herangeführt werden (Fig. 5a, b u. c).

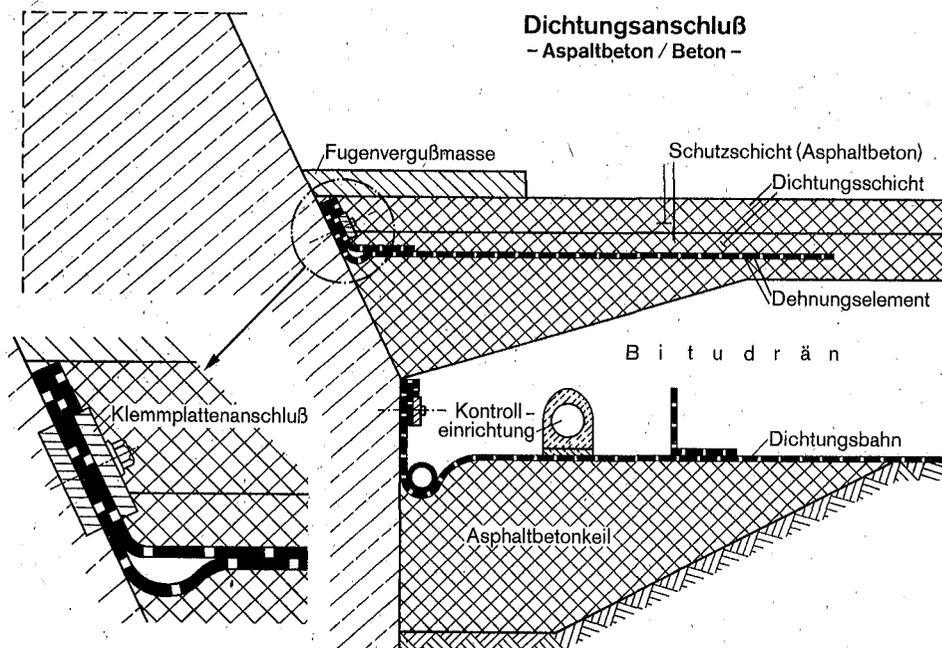


Bild 5a: Dichtungs- und Sperrschichtanschluß mit Klemmplatten

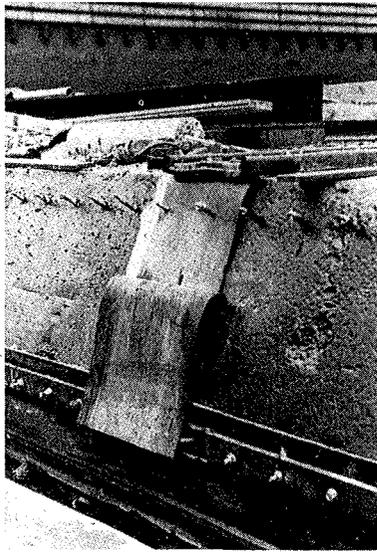


Bild 5b: Anschluß an Betonkonstruktion



Bild 5c: Anschluß an Spundwand

Sonderfälle in Bergsenkungsgebieten

Besonders schwierige Zusammenhänge liegen im Bergsenkungsgebiet des westdeutschen Kanalnetzes vor. Hier wachsen die Kanaldämme im Verlauf der Bergsenkung durch den Bergbau immer höher aus dem Gelände heraus, so daß die Dämme immer wieder aufgehört werden müssen. Wegen des oft fehlenden Geländebedarfs müssen hier die Schiffahrtskanäle in Spundwänden eingefaßt und diese laufend mit dem Absenkvorgang erhöht werden. Diese

Bereiche verlangen sehr sorgfältige Grundwasser- und Sickerwasserbeobachtungen, um plötzliche Erosionserscheinungen mit ihren möglichen Folgen zu vermeiden (Fig. 6a u. b).

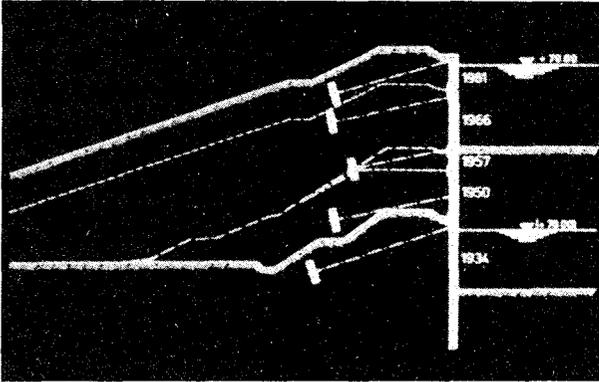
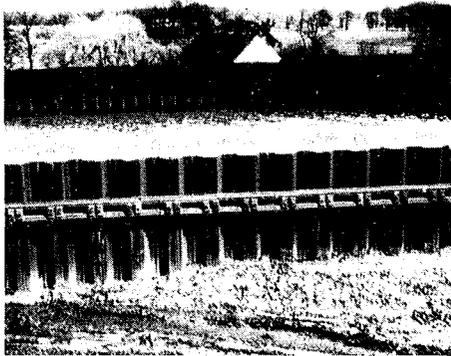


Bild 6a und 6b: Dammaufhöhung mit Spundwand zum Ausgleich von Bergsenkungen



Sonderfälle bei Erweiterung vorhandener gedichteter Kanalstrecken

Eine weitere sicherheitstechnisch schwierige Frage ist ständig in den Erweiterungsstrecken des Mittellandkanals zu bewältigen, wo durch die Verbreiterung und Vertiefung des Kanalbettes die vorhandene Dichtung weitgehend aufgenommen und unter Betrieb durch eine neue Dichtung ersetzt werden muß. Außerdem sind neue Kreuzungsanlagen bei in Betrieb bleibendem Kanal einzubauen. Hier werden häufig Lösungen mit einschwimmenden Fertigteilbaukörpern verwendet, die für den Bau und Betriebszustand zweifellos besondere Probleme hinsichtlich der Abdichtung aufwerfen. Auch in diesem Fall muß der ungünstigste Fall des durchströmten Dammes angenommen werden. Zur Vermeidung von Umströmungen sind auch hier geeignete Abschottungen zur Sickerwegverlängerung unbedingt notwendig. Häufig werden Untergründinjektionen und die Abdichtung mit Naturstoffen neben der Anordnung von Schotten hilfreiche Lösungen sein (Fig. 7a und b).

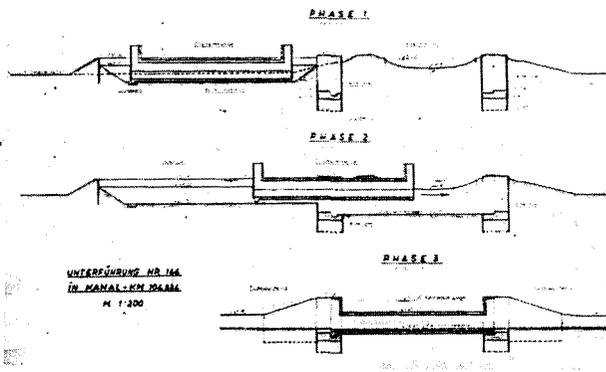
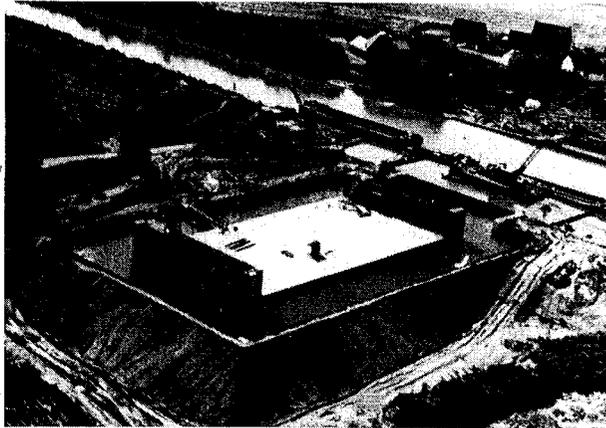


Bild 7a und 7b: Einschwimmvorgang beim Ausbau (Verbreiterung) des Mittellandkanals



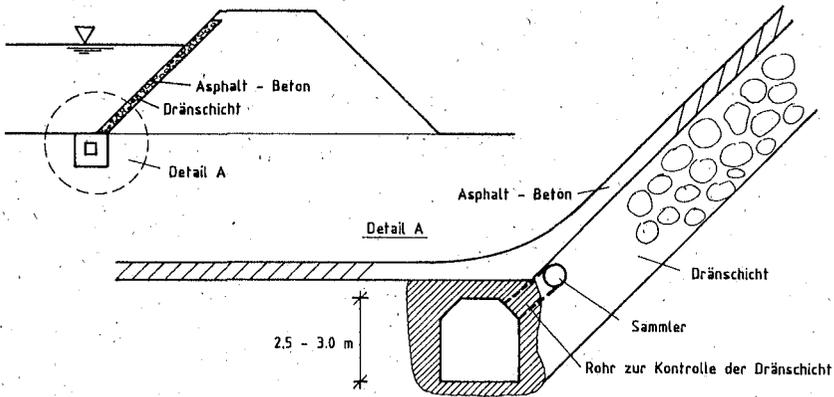
Bauwerksüberwachung

Die bleibenden Unsicherheiten sowohl beim Bau der Kanaldämme als auch während ihre Lebensdauer besonders durch Sickervorgänge erfordert einen hohen Überwachungsaufwand. In der Bundesrepublik Deutschland ist deshalb ein umfangreiches Überwachungssystem entwickelt worden, welches nach Möglichkeit je nach Lage des Einzelfalles so gestaltet ist, daß etwaige kritische Zustände, vor allem aus der Durchsickerung, frühzeitig erkannt werden. Die Beobachtungen beziehen sich auf die Feststellung oberflächlicher Veränderungen und Grundwasserbeobachtungen in einem weitverzweigten Netz. Darüber hinaus sind Verfahren zum Erkennen von Veränderungen im Innern der Dammkörper in der Entwicklung; im nachfolgenden Abschnitt wird über ein erfolgreich entwickeltes Verfahren berichtet.

1. Einleitung

Der vermehrte Ausbau des Verkehrswegesystems mit dem dazu notwendigen Aufstauer von Wasser in Flüssen oder Kanälen führte zu dem Bau von Seitendämmen von Hunderten von km Länge, die zum großen Teil dauernd eingestaut sind. Je nach Art des Untergrunde:

(A)



(B)

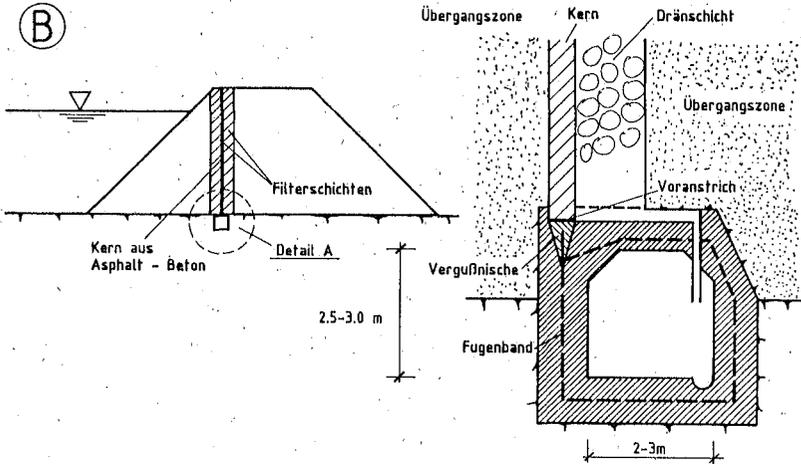


Bild 8: Beispiele für Kontrollgänge bei Staudämmen

und der Breite der Wasserstraße erhielten diese Dämme unterschiedliche Dichtungssysteme, die das Durchsickern der Dämme verhindern oder auch nur reduzieren sollen. Um die damit verbundenen Risiken möglichst gering zu halten, wurde nach einem Überwachungssystem gesucht, das möglichst schnell große Dammbereiche erfassen und auch das Funktionieren des eingebauten Systems kontrollieren kann. Zu diesem Zweck wurde in der Bundesanstalt für Wasserbau ein Projekt gestartet, das alle vorhandenen Systeme auf ihre Brauchbarkeit prüfen und mit einem System vergleichen sollte, das den Damm aus der Luft mittels Infrarotaufnahmen abbildet. Das neue System erhielt den Namen Infrarotthermographie. Es konnte nach etwa einjähriger Vorarbeit im April 1981 erstmals in Stauhaltungen des Main-Donau-Kanals und des Oberrheins eingesetzt werden. Die nachfolgenden Ausführungen fassen die Ergebnisse dieses „Pilotprojektes“ zusammen, ergänzt um weitere Untersuchungen in der Bundesanstalt für Wasserbau.

2. Übersicht zu den Überwachungssystemen

Für die relativ kurzen Querdämme und Talsperren besteht das Überwachungssystem aus Meßeinrichtungen, die gleichzeitig mit dem Bau des Sperrwerks errichtet werden. Dieses System besteht im allgemeinen aus Druck-, Setzungs-, Neigungs-, Verformungs-, Temperatur- und Wasserdruckgebern, verbunden mit Meßeinrichtungen des Sickerwassers in Dränagen oder Stollen, d.h. alle Messungen geben direkten Aufschluß über den Einfluß und die Wirksamkeit des Abdichtungssystems. Bild 8 zeigt zwei Beispiele für Kontrollgänge an kurzen Querdämmen bzw. Talsperren.

Für die wesentlich längeren Seitendämme einer Stauhaltung ist i.a. kein durchgehendes Kontrollsystem wie bei Talsperren vorgesehen. Die Anlage eines Seitengrabens an der Luftseite des Dammes bzw. einer Dränage am Dammfuß kann jedoch als Kontrollsystem angesehen werden, wenngleich es oft konstruktives Element des Bauwerks ist. Die vorhandenen Überwachungssysteme können in vier Gruppen eingeteilt werden (Tabelle 1):

Gruppe I umfaßt das sachkundige Erkennen aller Merkmale, die Hinweise auf gefährdete Dammstrecken geben. Anstelle von Meßinstrumenten werden die Wahrnehmungsorgane eines erfahrenen Dammbesichters eingesetzt. In der WSV ist dafür seit 1981 eine neue Verwaltungsvorschrift in Kraft getreten (VV-WSV 2301).

Gruppe II umfaßt alle Meßsysteme, die ohne Eingriff in das Bauwerk auskommen, wobei das Einstecken von Sonden (≈ 30 cm tief) nicht als Eingriff angesehen werden soll. Zu diesen Systemen zählt die berührungslose Infrarotthermographie, die geoelektrischen Widerstands- und Eigenpotentialmessungen, die Seismik, die radiometrischen Untersuchungen und die Schallemissionsanalyse.

Gruppe III umfaßt alle Meßsysteme, die ein Eindringen des Meßgeräts in das Bauwerk fordern, auch wenn das Meßsystem schon während des Baus plziert wurde. Alle Meßgeber stellen damit eine Störung in der Homogenität des Bauwerks dar, so daß unter Umständen der Meßwert eines Meßpunktes nur für diesen einen Punkt Gültigkeit besitzt und im ungünstigsten Fall durch den Einbau eines Meßgebers sogar eine zusätzliche Gefahr entstehen kann. Zu dieser Gruppe gehören alle oben genannten Gebersysteme, wie sie vornehmlich bei Talsperren zum Einsatz kommen, außerdem die Bohrungen, Sondierungen, Schürfen und nachträglich eingebrachte Beobachtungsrohre und Sonden.

Gruppe IV umfaßt Meßsysteme, die gleichmäßig vorhanden und Teile des Bauwerks sind, nämlich offene oder verrohrte Seitengräben, die nicht unter dem Damm, vor allem nicht unter der Dammdichtung liegen, sondern neben dem Damm verlaufen und dort kontrollierbar und reparierbar sind.

Das hier zu behandelnde flächendeckende Überwachungssystem umfaßt Messungen aus allen vier Gruppen: Mithilfe der Infrarotthermographie, die flächendeckend berührungslos (Gruppe II) eine beliebige Dammmlänge (z.B. eine Stauhaltung) aufnimmt, werden Bereiche mit Temperaturanomalien erkannt, deren Ursachen durch weitere Beobachtungen (Gruppen I, IV) oder Messungen (Gruppen II, III) geklärt werden müssen.

Tabelle 1: Überwachungssysteme von Dämmen

Gruppe	Nr.	Bezeichnung	Meßgröße	Art des gemessenen Feldes	Meßgeräte	Bewertung
I	1	Ablaufen	Beobachtung durch Hören, Fühlen, Sehen	natürlich	keine	gutes Hilfsmittel als Ausgang für weitere Untersuch.
	2	Begehen	Wasserbewegung	natürlich	Wünschelrute	umstritten, nicht quantifizierbar
II	3	Seismische Messungen	Bodenart und Schichtung	künstlich erregt	Seismometer-Geophon, Registrierapparat (Oszillograph)	für spezielle Fälle zusätzliches Hilfsmittel
	4	Elektrische Widerstands-Messung	Bodenart	künstlich erregt	Widerstandsmessgerät, Spezial-elektroden	für flächenhaften Einsatz bei bekanntem Boden
	5	Elektrische Eigenpotential-Messung	Wasserbewegung	natürlich vorhanden	Hochohmiges Millivoltmeter, unpolarisierbare Elektroden	noch in Entwicklung für flächenhaften Einsatz
	6	Seismoakustik	Bewegungsphänomene im Boden	natürlich vorhanden	Geophon-Mikrophon Vorverstärker, Breitbandige Registrierapparat	noch in der Entwicklung
	7	Thermometrie (Oberflächen-Messung)	Temperatur	natürlich vorhanden	Strahlungsthermometer, Infrarot-Kamera, Infrarot-Scanner	noch in der Entwicklung für flächenhaften Einsatz geeignet
	8	Radiometrische Messungen	natürliche Wassergehalte (Feuchtigkeiten)	natürlich	Isotopsonde (Aufsatzsonde)	für flächenhaften Einsatz, schwierig zu quantifizieren
	9	Direkter Bodenaufschluß	Bodenart	natürlich vorhanden	Bohrgerät, Sondiergeräte, Laborgeräte	sehr gut, bei Verdacht gezielt einsetzbar, punktförmig
	10	Hydraulische Messungen	Wasserpotential punktweise	natürlich oder künstlich erzeugbar (Pumpen)	Lichtlot, Pegelschreiber, Radionuclide, Isotopsonde	sehr gut, vielseitig andere Messungen möglich, aber aufwendig
III	11	Untersuchung von Wasser	mechanische chemische und phys.-chemische Parameter	natürlich oder künstlich (Tracer)	Chemielabor tragbare Meßgeräte	gutes Hilfsmittel als Ergänzung anderer Methoden
	12	Messung von Wasser-Temperaturen	Temperaturverteilung Linienförmig	natürlich oder künstlich erzeugbar (Einleiten Heißwasser)	Wasserthermometer	sehr gute billige Zusatzmessung
	13	Messung von Bodentemperaturen	Temperaturverteilung flächenhaft	natürlich oder künstlich erzeugt	Bodenthermometer	sehr gute Zusatzmessung, noch in Entwicklung
IV	14	Beobachtung von Seitengräben	Wassermengen u. Temperaturen	natürlich	Volumenmessung pro Zeiteinheit	sehr gut, weil kontrollierbar und reparierbar
<p>Gruppe I : Nr. 1, 2 Beobachtungsverfahren Gruppe 2 : Nr. 3 - 8 Verfahren ohne Eingriff in den Damm Gruppe 3 : Nr. 9 - 13 Verfahren mit Eingriff in den Damm Gruppe 4 : Nr. 14 Verfahren ohne Eingriff, Kontrollsystem ist Bauwerksteil</p>						

3. Meßsystem Infrarotthermographie

Die Meßgrößen sind die Temperaturen der Oberfläche des Damms, des Wassers und des angrenzenden Hinterlands. Diese Temperaturen, die das Auge des Dammeobachters nicht aufnimmt, hängen von einer Vielzahl von Einflußgrößen ab, z.B. Boden, Bewuchs, Sonnenstand, Jahreszeit, Böschungswinkel, Feuchtigkeiten, Wind und Bewölkung. Jede Temperatureaufnahme muß für eine Interpretation entweder den Einfluß aller genannten Größen voneinander trennen können, oder die Meßwerte ermöglichen nur im Zusammenhang mit Vergleichswerten eine Aussage. Dabei können die Vergleichsmeßwerte aus anderen aber gleichzeitig aufgenommenen Dammbereichen stammen oder im gleichen Bereich zu anderen Zeiten gewonnen sein. Die besten Aussagen ergeben sich, wenn beide Möglichkeiten gegeben sind. Die Auswertung erfolgt dann über das Bewerten von

- a) Abweichungen der Temperaturen gegenüber dem intakten Dammbereich (gleichzeitige Aufnahme),
- b) Abweichungen bei der Temperaturveränderung innerhalb eines Zeitraums (mehrere Aufnahmen z.B. bei Tag und Nacht).

Voraussetzung für die Bewertung der Temperaturmeßwerte ist, daß die Temperatur an der Oberfläche (Wasser, Damm, Hinterland) überhaupt durch die gesuchten Inhomogenitäten im Bauwerk beeinflußt wird. In einem Pilotprojekt der Bundesanstalt für Wasserbau konnte nachgewiesen werden, daß dies im allgemeinen der Fall ist, wenngleich auf unterschiedliche Weise. Eine Leckstelle im Abdichtungssystem kann sich thermisch erkennbar machen durch:

- a) Temperaturanomalien am Damm (Berme, Dammfuß, Dammflanke). Sie entstehen durch Veränderung der Wärmeleitfähigkeit des Bodens aufgrund von Wasseraustritten, Vernässungen, vermehrter Feuchtigkeit oder kapillar aufgestiegenem Wasser.
- b) Temperaturanomalien im Damm. Sie entstehen durch die Veränderung der Temperatur des Bodens aufgrund konvektiven und/oder konduktiven Wärmetransports bei einer Leckstelle.
- c) Temperaturanomalien im Seitengraben bzw. Dränsystem oder im Unterwasser einer Stauanlage. Sie entstehen aufgrund unterschiedlicher Anströmungen (konduktiver Wärmetransport) zwischen Leckstelle und intaktem Damm.
- d) Temperaturanomalien im Hinterland bzw. Vorflutern, wobei die Gründe von a) bis c) in Frage kommen.

Das Meßinstrument zur Aufnahme der Temperaturmeßwerte ist ein Infrarotscanner (Bild 9). Dieser Scanner gibt für jedes Flächenelement auf dem Boden, dessen Größe je nach Flughöhe und Auflösungsvermögen variabel ist (i.a. etwa $0,5 \text{ m}^2$), eine Information über die Intensität der Reflexionsstrahlung im nahen oder mittleren Infrarot (i.a. $8\text{--}14 \mu\text{m}$), die über Referenzmessungen einer bestimmten Temperatur der Genauigkeit von $0,1^\circ \text{ K}$ zugeordnet werden kann. Die Aufnahme erfolgt mit Hilfe eines Drehspiegels über einen Detektor auf ein Magnetband, so daß die Temperaturdaten mit Computern bearbeitet werden können. Die Abbildung aller Bildpunkte erfolgt sehr schnell nacheinander Zeile für Zeile (80 Zeilen pro Sekunde), wodurch nahezu eine Zeitgleichheit der Aufnahme benachbarter Dammschnitte vorhanden ist. Für die Zuordnung der Temperaturdaten zum Gelände werden fotografische Aufnahmen benützt nebst speziellen Referenzpunkten am Damm. Eine Ergänzung zur Scannerbeschreibung folgt in Punkt 5.2.

Die Temperatureaufnahme sollte zu Zeiten erfolgen, wo die erwarteten Anomalien der

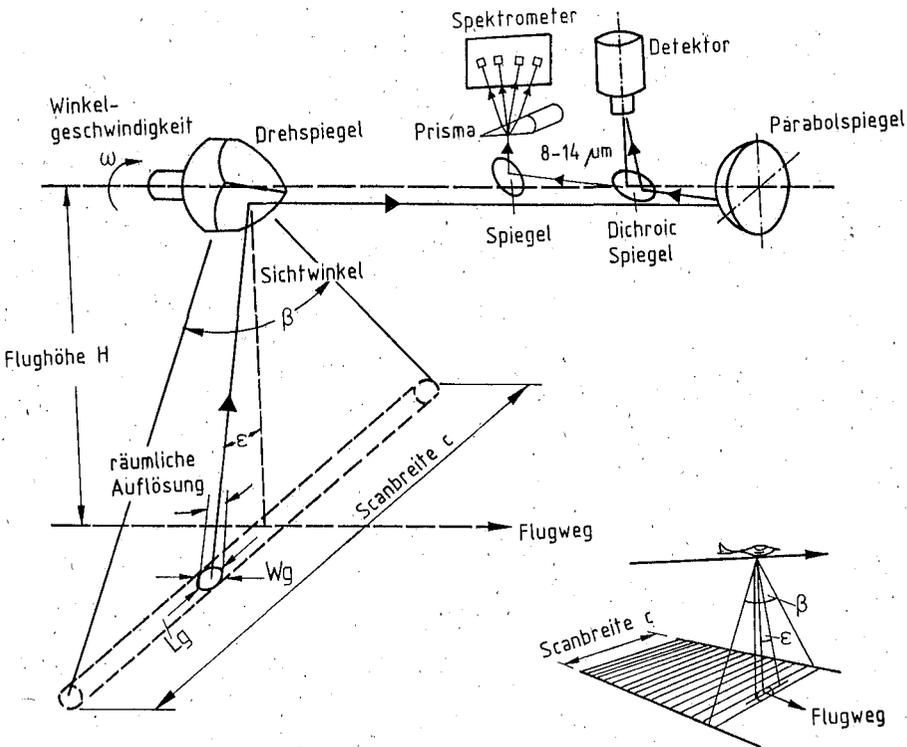


Bild 9: Prinzipskizze des Infrarotscanners

Punkte a) bis d) möglichst groß sind und viele der äußeren Einflußgrößen definiert sind. Zum einen betrifft dies den Bewuchs, der am besten fehlen sollte (Winter), zum anderen die Temperaturunterschiede zwischen Oberflächenwasser (Fluß, Kanal) und Damminnern, der möglichst groß sein sollte (Sommer, Winter), zum dritten die Temperaturunterschiede zwischen Tag und Nacht, die ebenfalls möglichst groß sein sollten, um die Leitfähigkeitsunterschiede optimal ausnutzen zu können (Frühjahr, Herbst). Zieht man all dies in Betracht, ist für Deutschland ein Flug im Frühjahr zu Beginn der Vegetationsperiode am geeignetsten, wobei der „Tagflug“ gegen 15.00 Uhr, der „Nachtflug“ gegen 5.00 Uhr stattfinden sollte.

4. Vorbereitende Arbeiten

4.1 Vorbereitung der thermographischen Aufnahme

Zur Aufnahme muß die Art des Fluggerätes, die genaue Flugstrecke, die Flughöhe und die Fluggeschwindigkeit festgelegt werden.

Beim Fluggerät kann zwischen Hubschrauber und Flugzeug gewählt werden. Der Hubschrauber kann tiefer fliegen und ermöglicht daher eine bessere geometrische Auflösung, das Flugzeug dagegen fliegt ruhiger und ermöglicht daher eine bessere Zuordnung der thermischen Daten zu den Koordinaten, was für die Auswertung (vor allem bei mehreren Aufnahmen) günstiger ist.

Zur Festlegung der Flugstrecke ist darauf zu achten, daß die für die Auswertung wichtige Dammflanke sich möglichst senkrecht zum Scanner befindet, d.h. das Fluggerät fliegt parallel zum Damm in etwa 200—300 m Entfernung (abhängig von Flughöhe und Böschungswinkel). Bei Krümmungen der Flußstrecke werden Schleifen geflogen, wobei die Aufnahme unterbrochen wird. Die dabei entstehenden Flugstreifen werden mit Hilfe von möglichst genauen Plänen vorher festgelegt. Durch die zusätzliche Mitführung einer Kamera wird die spätere Auswertearbeit erleichtert und die Anzahl der Referenzpunkte wesentlich reduziert (s. Punkt 4.2). Flughöhe und Fluggeschwindigkeit sind von örtlichen Vorschriften, dem Fluggerät, der Bauart des Aufnahmegeräts (Scanner), der gewünschten Auflösung und anderen technischen Problemen abhängig.

4.2 Vorbereitungen für die spätere Auswertung

a) Da die Auswertung im wesentlichen im Auffinden von thermischen Anomalien besteht, soll die aufzunehmende Fläche eine möglichst vergleichbare homogene Oberfläche besitzen bei geringstmöglichem Bewuchs. Der beste Erfolg wird an neu angelegten, mit Rasen bepflanzten Kanaldämmen erzielt, die baumlos und frisch gemäht sind.

Andere Strecken können „ausgeputzt“ werden an den Dammflanken, zumindest der Dammfußbereich sollte gleichmäßig gemäht werden. Bei sehr unregelmäßig angelegten Dammflächen ist eine Begehung des Damms anzuraten oder eine Kamera beim Flug mitzuführen, um alle Stellen aufzunehmen, die aufgrund ihrer Ausbildung irreführende Temperaturanomalien ergeben werden (z.B. Steinansammlungen, Böschungsveränderungen etc.). Diese Recherchen können auch später erfolgen, verzögern dann aber die Auswertzeit. Grundsätzlich muß für die thermische Aufnahme nicht mehr vom Damm zu sehen sein als für das Auge des Beobachters.

b) In jedem Fall sollten alle Bereiche gesäubert und abgegangen werden, auf die bei der Auswertung besonders geachtet werden soll. Dies sind z.B. Stellen mit höher zu bewertendem Risiko (hohe Dämme, Kreuzungsbauwerke, überbaute Flußläufe, Erdsenkungsstrecken, Einbauten etc.) oder Stellen, an denen früher eine Sanierung erfolgte oder zumindest in Erwägung gezogen wurde (z.B. bekannte Feuchtstellen, bekannte Rutschungen, Stellen mit Hinterlandvernässung etc.).

c) Zur eindeutigen Zuordnung der thermischen Aufnahmen zum Gelände empfiehlt sich die Anordnung von Referenzpunkten, die thermisch definierte Anomalien darstellen müssen. Da Brücken, Stege, Einbauten usw. aufgrund ihrer vom Boden abweichenden Wärmeleitfähigkeit eindeutige Zuordnungen erlauben, werden solche Referenzpunkte entweder nur an besonders wichtigen Punkten (siehe b) oder an Dammabschnitten notwendig, denen andere eindeutige Markierungen fehlen. Die Referenzpunkte können z.B. Aluminiumbleche auf der Dammkrone sein (Kaltstrahler) mit einer Fläche von etwa 4—5facher Größe des punktiert abgebildeten Oberflächenelements, d.h. in der Regel etwa 2 m^2 .

Bei Überlagerung von verschiedenen Flügen sollte an (vorher eingemessenen) Kaltstrahlern nicht gespart werden. Ihre Lage muß auch anhand der Flugstreifen diskutiert werden.

d) Zur eindeutigen Zuordnung der thermischen Aufnahme zur Temperatur der reflektierten Strahlung ist die Messung von Referenztemperaturen am Boden und im Wasser während des Flugs notwendig. Da der Scanner keine Temperaturen direkt sondern nur Strahlungsintensitäten aufnimmt, müssen alle Einflußgrößen gemessen werden, die die Umrechnung der Strahlungsintensität des Infrarotspektrums über den Emissionskoeffizienten in absolute Temperatur

ren ermöglicht. Dazu müssen, wenn keine meteorologischen Meßstationen in der Nähe der Flußstrecke liegen, an mindestens zwei Referenzstationen folgende Werte gemessen werden: Luftfeuchte, Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Bewölkungsgrad.

e) Das Einrichten der Meßstationen c) und d) muß geräte- und personaltechnisch vorbereitet werden. Es ist empfehlenswert, an einem Tag, kurz vor dem geplanten Flug, eine Probe abzuhalten. An diesem Tag kann auch durch gantztägige Messungen von Bodentemperaturen an Referenzpunkten überprüft werden, ob die beabsichtigten Uhrzeiten der Flüge optimal sind, d.h. ob zu diesem Zeitpunkt die Temperaturdifferenzen zwischen Trocken- und Feuchtstellen maximal sind.

Im Bild 10 sind die Temperaturdifferenzen zwischen Trocken- und Feuchtstellen gezeigt, die bis zu 8°C betragen. Die Meßpunkte befinden sich 5 cm unter der Geländeoberfläche, an der Oberfläche selbst sind die Differenzen noch wesentlich höher (s. Bild 11).

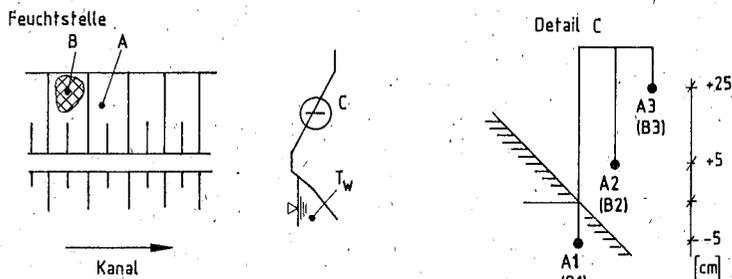
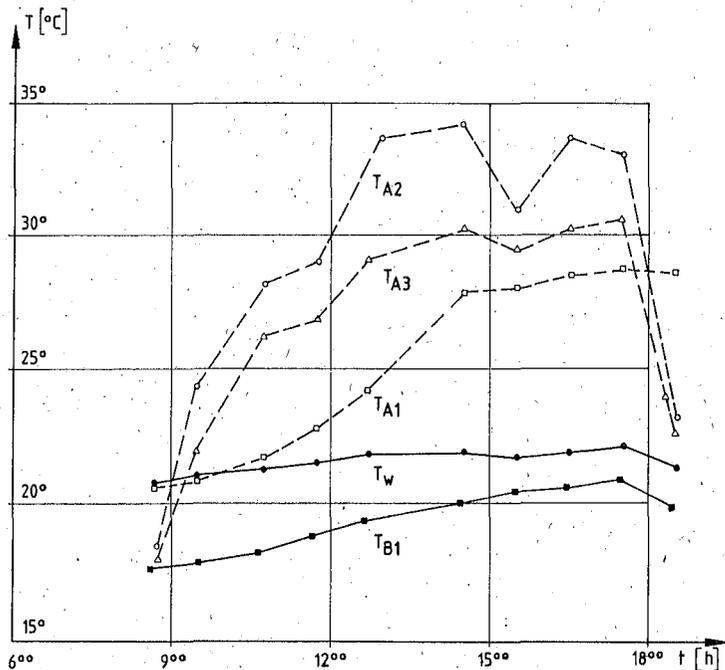


Bild 10: Temperaturdifferenzen zwischen Trocken- und Feuchtstellen

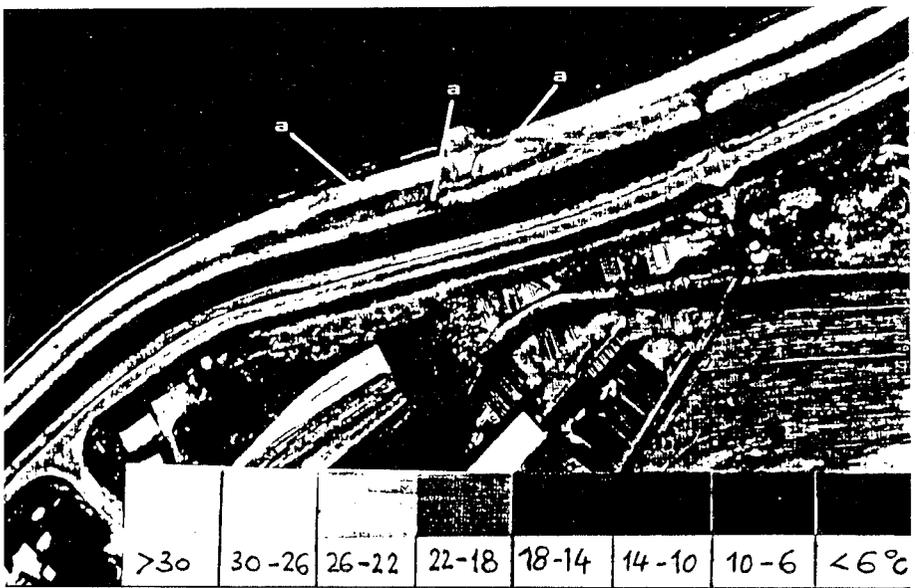


Bild 11: Foto eines Infrarotbildes

5. Auswertung der Messungen

5.1 Empirische Klassifikation einer einzelnen Infrarotaufnahme (EK)

Der thermische Kanal (Kanal 11) des Scanners nimmt im Bereich der Wellenlänge 8—14 μm Strahlungsintensitäten auf, die über eine Referenztemperaturangabe den absoluten Temperaturen zugeordnet werden. Schon bei der Aufnahme wird der Aufnahmebereich auf ein Temperaturband begrenzt, in dem die zu erwartenden Temperaturen liegen werden. Das Temperaturband des Tagflugs (z.B. 6—30°C) ist im allgemeinen breiter als das des Nachtflugs (z.B. 8—24°C), Temperaturen darunter oder darüber werden nicht aufgenommen.

Zur Auswertung werden die auf Magnetband gespeicherten Temperaturen über eine Datenverarbeitungsanlage abgespielt. Die Temperaturwerte werden als Grautöne (6 Intensitätsstufen) oder als Farbtöne (8 bzw. 16 Farbstufen) auf einen Film zeilenweise als Einzelpunkte gedruckt, die zugehörigen Ortskoordinaten ergeben sich aus dem Standpunkt des Scannerdrehwinkels zum Aufnahmezeitpunkt. Die erste Abspiegelung der Daten liefert i.a. ein geometrisch verzerrtes Bild mit punktförmigen Temperaturdaten, bei dem die Temperaturen der Bildpunkte nicht absolut, sondern nur in Grenzen angegeben sind. Zum Beispiel besitzen bei einer 1°-C-Auflösung alle roten Punkte einer Farbdarstellung eine Temperatur zwischen 13,1°C und 14°C, alle orangen Punkte zwischen 14,1°C und 15,0°C.

Im Bild 11 ist ein Beispiel einer Scanneraufnahme an einem Damm gezeigt. Die dunklen Stellen sind Feuchtstellen an der Seitengrabenböschung und am Dammfuß, die Temperaturdifferenzen zu Trockenstellen betragen etwa 18°C.

Für die erste Übersicht wird das gesamte Aufnahmespektrum abgebildet mit einer Grauton- oder Farbabstufung von 3—4°C pro Stufe. Damit können alle größeren Anomalien sofort geortet und lagemäßig zugeordnet werden. Da Wasser-, Damm- und bebaute Flächen sich i.a.

wesentlich in ihren Temperaturen unterscheiden, ergibt die thermische Aufnahme fotoähnlich lesbare Bilder mit leichten Verzerrungen aufgrund der Scannerbewegung bei Fluginstabilitäten oder gekrümmten Dämmen.

Nach Kenntnis der Temperaturgrenzen interessierender Bereiche (Dammflanken, Seitengraben, Hinterland etc.) können die Abstufungen der Farben bzw. Grautöne beliebig verändert werden bis zur Auflösungsgrenze von $0,2^{\circ}\text{K}$. Die Auswertung besteht darin, jede vorhandene Temperaturanomalie zu orten und zu deuten, wobei für die Deutung alle Pläne, alle Fotos und eventuell eine Ortsbesichtigung und die Erfahrung von Dammeobachtern benötigt werden. Das Ergebnis der Auswertung einer Infrarotaufnahme ist die Angabe von Dammbereichen, an denen Temperaturanomalien aufgrund äußerer Einflüsse nicht erklärbar sind.

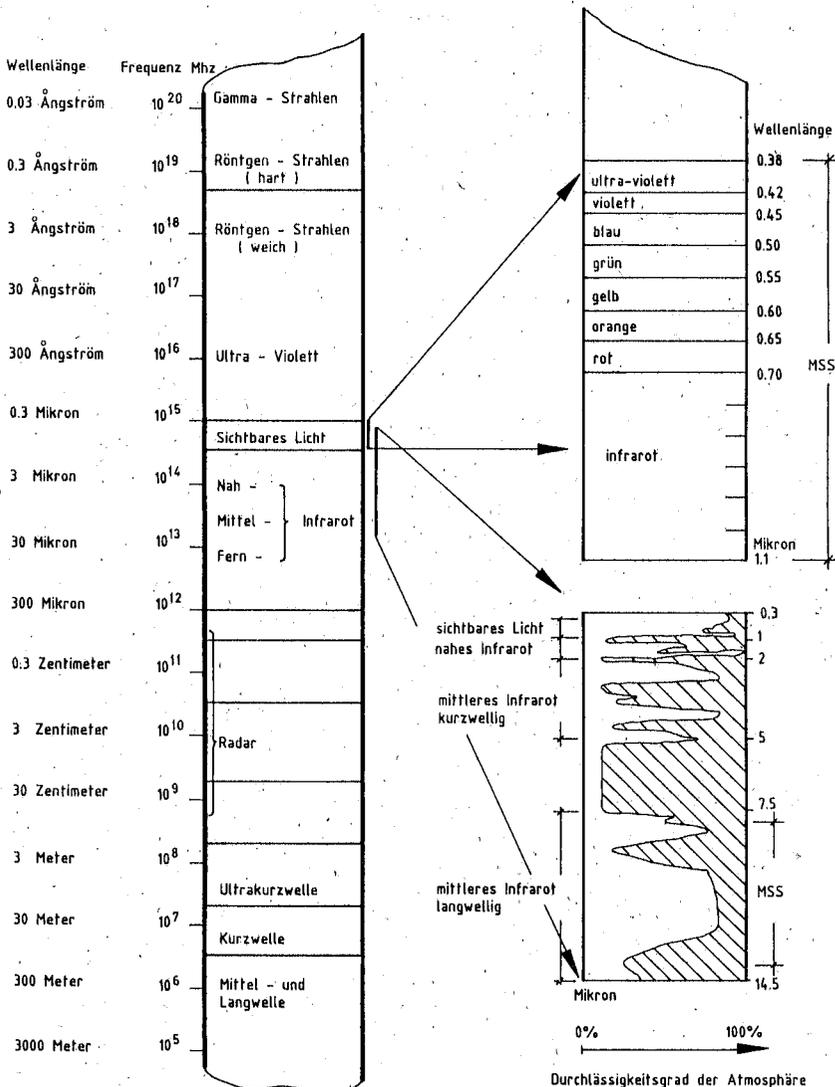


Bild 12: Aufnahmespektrum des Multispektralscanners

5.2 Multispektrale Klassifikation (MSK)

Mit dem eingesetzten Multispektralscanner (MSS) wird von jedem Bildpunkt zusätzlich zu Temperaturinformation auch ein Spektrum des reflektierten Lichts erhalten (Bild 12). Dieses Spektrum ist auf 10 Kanäle der Breite $0,03$ bis $0,20 \mu\text{m}$ im Wellenlängenbereich von $0,38$ bis $1,1 \mu\text{m}$ begrenzt, d.h. das natürliche Licht wird beim Strahlungsgang durch ein Prisma aufgespalten und auf 10 Detektoren statt auf einen abgebildet, womit sich mehr Informationen zu Dammsituation ergeben. Jeder Kanal ist auf dem Magnetband gespeichert und kann einzeln in Ergänzung zum Kanal 11 (thermischer Kanal) aufgezeichnet werden. Für das vorhandene Problem ergeben von diesen 10 Bereichen zwei Spektralbereiche die folgenden zusätzlicher Aussagen:

Die reflektierte Strahlung im Kanal 8 ($0,7$ bis $0,79 \mu\text{m}$, nahes Infrarot) gibt Aussagen zu Vitalität oder dem Gesundheitszustand der Pflanzen, da gleiche Pflanzen mit unterschiedlicher Vitalität stark unterschiedlich reflektieren. Für die Dammuntersuchung ergibt sich dadurch ein bedeutender Indikator auf Feuchtstellen, da auf Flächen mit größerer Feuchtigkeit eine relativ größere Vegetationsvitalität besteht, was zu einem Ansteigen der Signale in Spektralkanal 8 führt (Bild 13). Eine hohe Strahlungsintensität ergibt daher einen Hinweis auf Pflanzen auf feuchtem Grund.

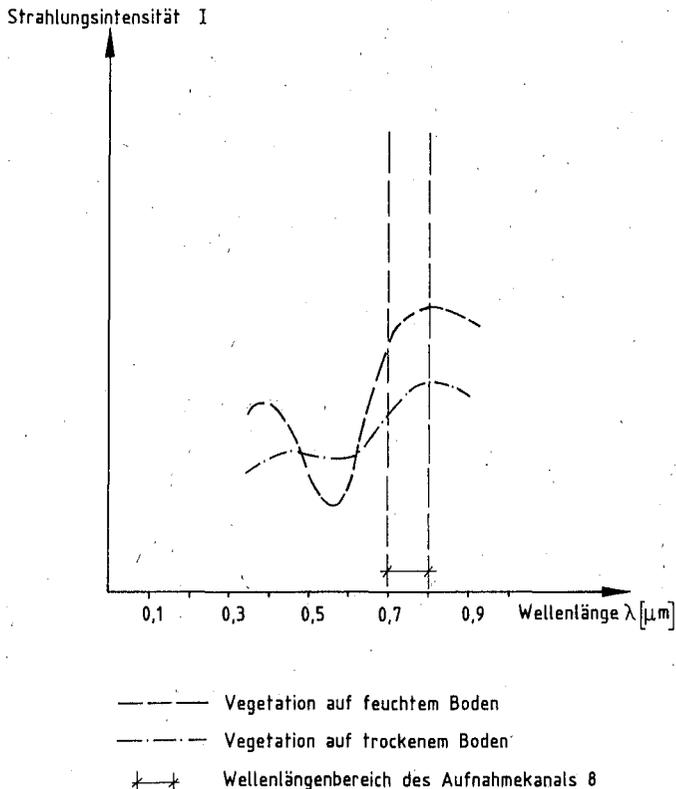


Bild 13: Vergleich von Reflexionsspektren von Pflanzen auf trockenem und feuchtem Boden

Die reiektierte Strahlung im Kanal 6 (0,60 bis 0,65 μm , orange) gibt ebenfalls Aussagen zur Vitalität von Pflanzen, aber mit umgekehrten Vorzeichen wie bei Kanal 8, d.h. vitale Pflanzen reflektieren in diesem Spektralbereich weniger stark. Eine hohe Strahlungsintensität ergibt daher einen Hinweis auf Pflanzen auf trockenem Grund. Da allerdings im Kanal 6 die Differenzen in der Strahlungsintensität weniger stark sind als bei Kanal 8, wird im allgemeinen nur mit dem Kanal 8 gearbeitet.

Die multispektrale Auswertung erfolgt nun über eine Verknüpfung der Strahlungsintensitäten einzelner Kanäle einer Tagesaufnahme, z.B. des Kanals 11 (thermisch) mit dem Kanal 8 (vegetativ). Alle Punkte, die sowohl im Kanal 8 als auch im Kanal 11 das entsprechende Erkennungsmerkmal aufweisen, sind Feuchtstellen und damit eventuelle Leckstellen. Das Erkennungsmerkmal im Kanal 11 ist die relative Kälte, ausgedrückt durch eine Intensität I 11, im Kanal 8 die hohe Intensität I 8 der Strahlung. Für die Auswertung ist eine Überlagerung der gespeicherten Daten beider Kanäle über die Datenverarbeitungsanlage möglich, womit sich eine Darstellung der Funktion $F = I 11 - I 8$ ergibt. Dies ist allerdings nur sinnvoll bei bewachsenen Untersuchungsbereichen, so daß die solcherart erzeugten Bilder der Funktion F nur an vegetationsbedeckten Bereichen ausgewertet werden. Das Ergebnis der Auswertung deckt sich mit dem aus Punkt 5.1, lediglich die Möglichkeiten zum Auffinden gefährlicher Stellen sind verbessert.

5.3 Multitemporale Klassifikation (MTK)

Die multitemporale Klassifikation benötigt zwei zeitversetzte thermische Aufnahmen des ansonsten unveränderten Damms, wobei die Aufnahmen zu möglichst extremen Zeitpunkten gemacht sein sollen. Die MTK wertet nicht Temperaturen, sondern nur die Temperaturänderungen eines Oberflächenelements aus, um zur Unterscheidung von feuchten und trockenen Stellen zu gelangen.

Dabei wird ausgenutzt, daß trockene Stellen sich bei Sonneneinstrahlung stärker erwärmen und während der Abkühlungsperiode stärker abkühlen, während feuchte Stellen aufgrund der höheren Wärmekapazität des Bodens sich nur langsam aufwärmen und ebenso langsam abkühlen (Bild 14). Beim Vergleich eines Tages- und Nachtflugs werden nun alle Bereiche aufgesucht, bei denen die Differenz zwischen den Temperaturen am Tage und in der Nacht möglichst klein war. Dies sind alle Bereiche mit Oberflächengewässern (hohe Wärmekapazität) und Feuchtstellen. Das Aufsuchen dieser so gekennzeichneten Bereiche anhand des Studiums der einzelnen Thermografien ist grundsätzlich möglich, aber sehr umständlich und nur für gezielte Untersuchungen kleiner Bereiche sinnvoll.

Für großflächige Untersuchungen geschieht die MTK mit Hilfe der Datenverarbeitung, wobei allerdings die Überlagerung der Daten erst dann möglich ist, wenn die Aufnahmen geometrisch entzerrt sind, da nur Punkte gleicher Koordinaten verglichen werden dürfen.

Für Bereiche mit Temperaturanomalien aus konvektivem Wärmetransport, die nicht durch Feuchtstellen gekennzeichnet sind (z.B. Leckstellenwasser konstanter Temperatur befindet sich unter der Oberfläche im Kieskörper eines Dammes und ergibt an der Oberfläche eine konstante Temperatur), gilt ebenfalls, daß die Veränderung der Oberflächentemperatur gering ist, so daß auch diese Stellen bei der MTK erfaßt werden.

Das vorstehende für die MTK bei Tag- und Nachtflug Gesagte gilt grundsätzlich auch für den Vergleich zweier Flüge mit längeren Zeiten zwischen den Aufnahmen. So kann z.B. durch

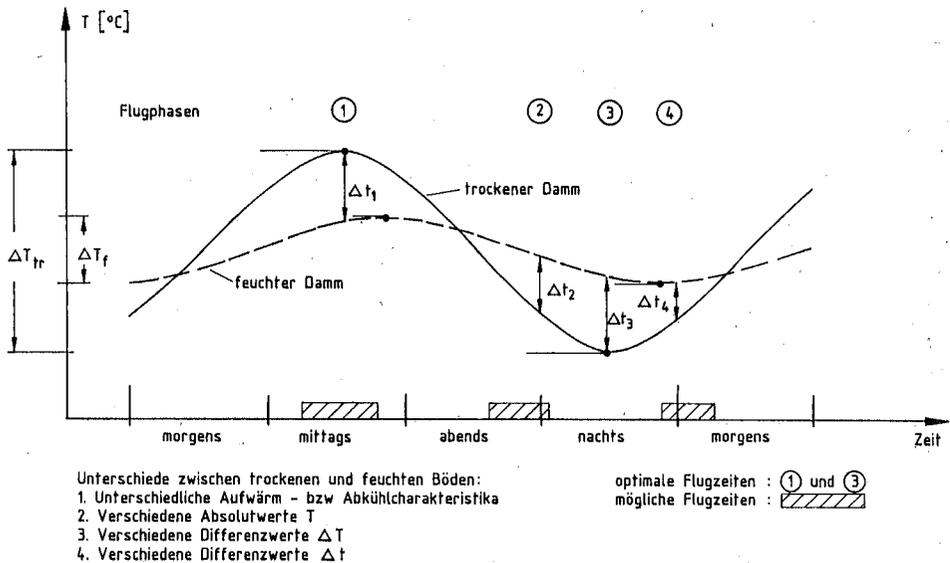


Bild 14: Prinzipskizze zum Auswerten der multitemporalen Aufnahmen

Vergleich zweier Tagesflüge im Frühjahr die Veränderung eines Damms gezeigt werden, wenn sonst vergleichbare Umstände vorliegen oder entsprechende Korrekturen vorgenommen werden können. Derartige Vergleiche konnten bis Ende 1984 noch nicht durchgeführt werden.

Das Ergebnis der Auswertung ist wie bei Punkt 5.1 beschrieben, allerdings sind mit der MTK noch weitere Möglichkeiten zum Auffinden gefährlicher Stellen gegeben.

6. Nachuntersuchungen und Ergebnisse

Das Ergebnis aller Auswertungen ist ein Plan über vorhandene Anomaliebereiche der Anzahl m, deren Ursache aus den Luftbilddaufnahmen und den vorhandenen Unterlagen nicht zu deuten sind. Im Plan werden Angaben über die Lage und Ausdehnung der Anomalien gemacht.

Die Phase 1 der Nacharbeiten besteht in einfachen Recherchen vor Ort an allen m Anomaliebereichen, wobei schon vorhandene Kontrollsysteme einbezogen werden. Als sehr hilfreich hat sich der Einsatz einer leichten Schlitzsonde erwiesen, der Aufschluß über die Tiefe von 1—2 m auf einfache und schnelle Weise ergibt. Durch diese Aufschlüsse und durch Ablaufen des Bereichs unter Beobachtung aller Einzelheiten (siehe Punkt 2, Gruppe I und IV) lassen sich von den m Anomaliebereichen eine Anzahl n hinreichend anderweitig erklären, so daß lediglich $x = (m - n)$ Anomaliebereiche verbleiben, deren Ursache zunächst nicht angegeben werden kann und daher eine Leckage sein könnte.

Die Phase 2 der Nacharbeiten besteht in Untersuchungen an den x Anomaliebereichen, deren Art und Umfang nicht allgemein angegeben werden kann. Es empfiehlt sich, mit Untersuchungen der Gruppe II (Punkt 2) zu beginnen und erst danach auch Untersuchungen der Gruppe III einzuplanen, falls anderweitig keine eindeutigen Aussagen zu gewinnen wären.

Das Ergebnis aller Untersuchungen an Dämmen ist die Feststellung, welche Dammbereiche durch eine Leckage oder eine andere Ursache gefährdet sind und welcher Art diese Gefährdung ist.

Für die Untersuchung von nicht dauernd eingestauten Deichen ist die Anwendung des beschriebenen Meßsystems nicht generell übertragbar. Zwar kann zum Zeitpunkt des Einstaus (z.B. auch bei Probestaus) eine MSS-Aufnahme genau so stattfinden und ausgewertet werden, die Nachuntersuchungen sind i.a. aber nur entsprechend zu führen, wenn auch die Deiche zu dieser Zeit eingestaut sind.

Schrifttum

Armbruster/Merkler (1982): Möglichkeiten der Leckstellenortung an Erddämmen, Geotechnik 1982/1.

Armbruster/Merkler (1983): Measurement of subsoil flow Phenomena by thermic and geoelectrical methods, Bulletin IAEG, No 26—27, Paris.

Armbruster, H.: Messungen von thermischen Feldern zur Überwachung von Dämmen, DGE-Symposium „Meßtechnik im Erd- und Grundbau“, München 1983.

BAW (1982): Gutachten der Bundesanstalt für Wasserbau, Abt. Erd- und Grundbau „Pilotprojekt Thermographie“, unveröffentlicht.

Bentz, A. (1961): Lehrbuch der angewandten Geologie, F. Enke-Verlag, Stuttgart.

Blind, H.: Kontrollmaßnahmen in Stauanlagen, Mitteilungen des Instituts für Wasserbau der TU Berlin, Heft 100.

Kappelmeyer/Haenel (1974): Geothermics with Special Reference to Application, Geoexploration Monographs, Gebr. Bornträger, Berlin, Stuttgart.

Koerner/Reif/Burlingame (1979): Detection Methods of Location of Subsurface Water and Seepage, Journal of the geotechnical engineering division, 11/1979.

S. Schneider (1974): Gewässertüberwachung durch Fernerkundung, Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumordnung, Heft 12, 1974.

Hager, M.: Stand der Risikobewertung bei durchströmten, gewachsenen und geschütteten nichtbindigen Dammbaustoffen im Kanalbau, Vorträge der Baugrundtagung 1982 in Braunschweig, DGE.