

Zusammenfassung	1
Executive Summary	2
Résumé	3
1. Einführung	4
1.1. Projekthintergrund	4
1.2. Umfang	7
2. Anwendungen der Thermographie	7
3. Theoretischer Hintergrund der Thermographie	8
3.1. Wärmestrahlung	8
3.2. Emissionsgrad	9
3.3. Aktive und passive Thermographie	9
3.4. Thermographische Kameras	10
3.5. Wärmefluss	12
4. Messkonzept	19
5. Messverfahren	19
5.1. Untersuchte Bauwerkstypen	19
5.2. Klassifikation der Wassereintrittstellen	20
5.3. Messgeräte	21
5.4. Genereller Messvorgang	22
6. Ergebnisse der Feldarbeiten	24
6.1. Untersuchungen in elf Tunnels	24
6.2. Folgemessungen in zwei ausgewählten Tunnels im Herbst 2005	28
6.3. Problematik der Anwendung von Thermography in Tunnels	31
7. Schlüsselwörter	32
8. Literaturverzeichnis	33
9. Anhänge	33

## **Zusammenfassung**

Erfahrungen aus Zustandserfassungen von bestehenden Untertagbauwerken haben gezeigt, dass das Wasser - in verschiedenen Formen - bei sehr vielen Schäden mitbeteiligt oder verantwortlich ist. Um Wasserschäden zu verhindern, werden Tunnels oft zweischalige und mit einer synthetischen Abdichtungsmembran zwischen innerer und äusserer Schale gebaut. Wenn die Abdichtung eines zweischaligen Tunnels ein Defekt aufweist, wird allfällig vorhandenes Wasser durch die Öffnung fliessen, bis es durch die Innenschale in den Tunnelhohlraum gelangt. Meistens ist die Wassereintrittsstelle nicht identisch mit der Leckstelle der Abdichtung.

Im Rahmen dieses Forschungsauftrags wurde die Aussagekraft der Thermographie mittels tragbaren Wärmebildkameras für die Ortung von Leckstellen in zweischaligen Tunnelabdichtungen untersucht. Das Hauptziel der Untersuchungen war die präzise Ortung von Leckstellen in den Abdichtungsmembranen. Dazu wurden Felduntersuchungen an verschiedenen Objekten durchgeführt.

Die zeitliche Abhängigkeit von Wärmefluss-Phänomenen ist der grösste Nachteil für die Anwendung von passiver Thermographie in Tunnelbauwerken. Sofern Wasser erfolgreich detektiert werden kann, ohne zuerst vorausgehende Massnahmen zur Gewährleistung eines Temperaturgradienten (Temperatur-Vormessprogramm) ausführen zu müssen, könnten thermographische Messungen zur Ortung von Leckstellen ohne zeitabhängige Restriktionen realisiert werden. Der Vorteil wäre, dass solche Messungen parallel und mit reduziertem Vorbereitungsaufwand effizient zusammen mit anderen Unterhalts- oder Inspektionsaufgaben, welche nicht auf der Basis von thermischen Bedingungen geplant werden müssen, ausgeführt werden können.

Aus den erreichten Untersuchungsergebnissen kann festgestellt werden, dass passive Messungen ohne Vormessprogramm eine unzureichende Erfolgsquote erreicht haben.

Die wichtigsten Faktoren, welche die Fähigkeit von erfolgreichen thermographischen Messungen für die Ortung von Leckstellen in zweischaligen Tunnelbauwerken beeinflussen, sind die Realisierung von vorausgehenden Massnahmen zur Gewährleistung eines Temperaturgradienten, ein genügend starker Wasserfluss durch das Gewölbe, geeignete thermographische Geräte und abgestimmte Aufnahmeverfahren, sowie die kompetente Erfahrung bei der Auswertung von thermographischen Bildern und eine gute Arbeitsplanung und Organisation.

## **Executive Summary**

Experience gained through the assessment of damage to tunnel linings has demonstrated that water is the primary cause of or is involved in many types of structural damage and damage processes. To prevent water damage, double-shell tunnel linings are often constructed with a synthetic waterproofing membrane located between the inner and outer shells. If the waterproofing membrane is defective, water will flow through the inner lining and into the tunnel cavity. The visible point of water ingress into a tunnel is usually not the same as the point of leakage through the membrane.

Within the scope of this project, the applicability of infrared thermography using portable thermographic devices for the detection of leaks in double-shell tunnels with full-coverage waterproof membranes was investigated. The main goal was to detect the location of leakage through the waterproofing membrane as precisely as possible. Various investigations were conducted in the field for this purpose.

The time-dependency of heat flow phenomena is the biggest practical disadvantage of conducting passive thermography in tunnels. If water can be successfully detected without first conducting preliminary measures to ensure the presence of a thermal gradient, then thermographic measurements limited in scope to finding leaks could be realized without time-dependent restrictions. The advantage, in addition to reduced preparation time and expense, is that investigations could be carried out efficiently together with other maintenance or inspection tasks that cannot be scheduled based on thermal conditions in the tunnel lining.

From the achieved investigation results it could be determined that the measurements resulted in an unsatisfactory rate of leak detection. The most important factors influencing the ability to realize successful thermographic measurements for the detection of leaks in waterproofing membranes include conducting preliminary measures to ensure the presence of heat flow, a sufficient rate of water ingress, utilization of suitable equipment, systematic field procedures, experience in the interpretation of thermographic images and a thorough project organization.

## **Résumé**

Les expériences retirées des relevés de situation d'ouvrages souterrains existants ont montré que de l'eau – sous diverses formes – contribue ou est la cause de nombreux dégâts. Afin d'éviter les dégâts des eaux, les tunnels sont souvent construits avec deux parois et une membrane d'étanchéité synthétique entre les revêtements internes et externes. En cas de défaut de l'étanchéité d'un tunnel à deux parois, l'eau présente peut s'écouler à travers l'ouverture, passer la paroi interne et arriver jusque dans la cavité du tunnel. Dans la majorité des cas, le point d'entrée d'eau n'est pas identique au point de fuite de l'étanchéité.

Dans le contexte de ce mandat de recherche, le bien-fondé de la thermographie est étudié à l'aide de caméras infrarouges portables pour la localisation des points de fuite dans l'étanchéité des tunnels à deux parois. L'objectif principal de l'étude était la localisation précise de des points de fuite dans les membranes d'étanchéité sur le terrain. En plus était fait des études de champ à différents objets.

La dépendance temporelle des phénomènes de flux de chaleur est le plus grand inconvénient pour l'application de thermographie passive dans les tunnels. Tant que l'eau peut être détectée sans impliquer des mesures préalables garantissant l'instauration d'un gradient de températures, des mesures thermographiques peuvent être effectuées sur les emplacements des points de fuite sans restriction dépendante du temps. L'avantage est que les études ne demandent que des préparatifs réduits ; de plus, elles peuvent être effectuées de manière efficace simultanément à d'autres tâches d'inspection ou d'entretien qui ne doivent pas être planifiées en se basant sur des contraintes thermiques.

On peut constater des résultats d'étude atteints que les mesures passives sans le pré programme de mesure ont atteint un taux de réussite insuffisant.

Le principaux facteurs influençant l'efficacité des mesures thermographiques pour la localisation de points de fuites, dans des tunnels à deux parois, sont la réalisation de mesures préliminaires garantissant un gradient de températures, un courant d'eau à travers la voûte suffisamment important, des appareils thermographiques adaptés et des procédures de relevé déterminées, une compétence suffisante pour d'évaluation des images thermographiques ainsi qu'une bonne planification du travail et de l'organisation.

## **1. Einführung**

### **1.1. Projekthintergrund**

Tunnels sind oft wesentliche Schlüsselemente von Verkehrsinfrastrukturen, deren Realisierung und Unterhalt wichtig sind für die Effizienz von Verkehrskorridoren. Wegen den gegebenen Vorteilen für die Wirtschaft, Kultur und Umwelt werden immer mehr Verkehrswege durch Tunnelbauwerke geführt. In der Schweiz allein sind 257 Nationalstrassentunnels mit einer Totlänge von 280 km entweder im Betrieb, im Bau oder in der Planung. Der kosteneffiziente Unterhalt von Tunnelbauwerken hat eine hohe Wichtigkeit bei den Tunnelbetreibern, welche sichere, zuverlässige und wirtschaftliche Leistungen für ihre Eigentümer und Benützer erbringen müssen.

Schäden an Tunnelverkleidungen vermindern die Tragsicherheit und die Gebrauchstauglichkeit von Tunnels und verursachen negative Auswirkungen auf den Betrieb. Ein wichtiger Aspekt des Tunnelunterhalts ist deshalb die langfristige Tragfähigkeit zu gewährleisten. Dieses Ziel wird erreicht, indem Werkzeuge und Technologien angewendet werden, welche die Wirksamkeit und Geschwindigkeit der Diagnose von baulichen Mängeln in Tunnelschalen erhöhen.

Erfahrungen aus Zustandserfassungen von bestehenden Untertagbauwerken haben gezeigt, dass das Wasser - in verschiedenen Formen - bei sehr vielen Schäden mitbeteiligt oder verantwortlich ist. Ein Wassereintritt in einem Tunnelbauwerk ist oft Ursprung einer Kette von weiteren Schadensbildern wie z.B. Rissformation, Abplatzungen, Frostschäden, Witterung, Fugenschäden, Transport von betonschädlichen Substanzen (Sulfat, Chlorid), Korrosion von Bewehrungsstahl und ästhetischen Beeinträchtigungen wie Verfärbungen oder Kalkablagerungen auf sichtbaren Oberflächen. Der Betrieb kann auch direkt beeinträchtigt werden durch Wasser oder Eis auf der Fahrbahn und durch Schäden an Anlageteilen oder elektromechanischen Installationen.

Abdichtungsmassnahmen werden während der Projektierung von Tunnelbauwerken geplant, um den Eintritt von Grundwasser oder Wasser aus anderen externen Quellen in den Tunnelhohlraum sowie die obengenannten Schadensszenarien zu verhindern. Dabei unterscheidet man zwischen dem zweischaligen und dem einschaligen Ausbau. Beim einschaligen Ausbau wird die Ausbruchssicherung ohne Innenschale als eine endgültige Tunnelverkleidung konzipiert. Der zweischalige Ausbau stellt in der Schweiz beim Bau von Autobahntunnels den Regelfall dar. Zweischalig ausgebaute Tunnels bestehen aus der Aussenschale, welche die vorüberge-

hende Sicherung gewährleistet sowie der Innenschale, welche die endgültige Sicherung und Verkleidung gewährleistet. Zwischen der inneren und der äusseren Schale wird eine Abdichtungsmembran eingebaut. Wenn die Abdichtung eines zweischaligen Tunnels einen Defekt aufweist, wird allfällig vorhandenes Wasser durch die Öffnung fließen und danach dem Weg des geringsten Widerstandes folgen, bis es durch die Innenschale in den Tunnelhohlraum gelangt. Meistens ist die Wassereintrittsstelle nicht identisch mit der Leckstelle der Abdichtung. Destruktive Untersuchungsmethoden zur Ermittlung von Leckstellen sind meistens unpraktisch und unwirtschaftlich, weshalb zuverlässige, zerstörungsfreie Methoden gefragt sind.

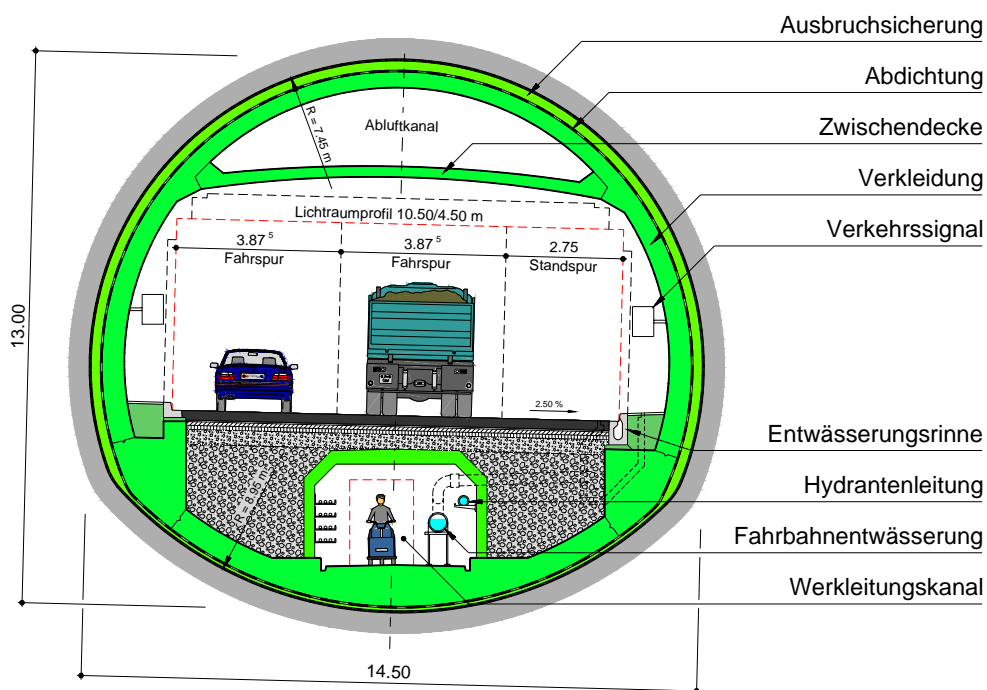


Abbildung 1 - Normalprofil eines zweischaligen Tunnels mit Abdichtung

Die rechtzeitige Erkennung von Schäden in Infrastrukturbauten unterstützt das Bestreben, die Instandsetzungskosten zu vermindern. Ein geeignetes zerstörungsfreies Untersuchungsverfahren für die Untersuchung von Leckstellen in zweischaligen Untertagbauwerken würde dieses Ziel unterstützen. Die genaue zerstörungsfreie Ermittlung einer Leckstelle würde mehrere Vorteile bei der Planung und Ausführung von Reparaturen mit sich bringen, einschliesslich einer Optimierung des Bauvorgangs durch gezielte Reparaturen sowie eine verbesserte Schätzung von Kosten und Terminen.

Seit Anfang der 1970er Jahre hat die thermographische Untersuchung von Bauwerken aus Beton für Bauteile mit direkter Sonneneinstrahlung zugenommen.<sup>1</sup> Brückenplatten, Autobahn-

beläge, Rollbahnen, Parkplatzbeläge, Gebäudewände u.a. werden untersucht, um Anomalien hinter der Oberfläche wie Feuchtstellen, Hohlräume usw. zu orten.

Die Anwendung von Thermographie für die Untersuchung von Betonbauwerken basiert auf dem Prinzip, dass Anomalien innerhalb eines Materials die Wärmeflüsseigenschaften des Materials beeinflussen. Wenn ein genügend starker Wärmefluss durch ein Material vorhanden ist, können die Änderungen des Wärmeflusses lokal Unterschiede der Oberflächentemperaturen verursachen. Die Erfassung von variierenden Oberflächentemperaturen durch thermographische Messungen ermöglicht dadurch die Ortung von Anomalien. Untersuchungen von dieser Art werden Übertage normalerweise kurz nach Sonnenaufgang oder -untergang während der Periode des höchsten Wärmeflusses durch den Bauteil ausgeführt.

Die Thermographie hat schon seit mehreren Jahren im Rahmen von Zustandsanalysen von Untertagbauwerken Anwendung gefunden.<sup>1, 2, 3</sup> In Tunnels entsteht ein Wärmefluss durch das Tunnelgewölbe infolge eines Temperaturunterschieds zwischen Tunnelluft und umgebendem Gebirge. Wenn die Temperaturverteilung auf einer Tunneloberfläche mittels einer Infrarotkamera betrachtet wird, können Anomalien geortet werden, sofern sie aufgrund des Wärmeflusses einen messbaren Temperaturunterschied auf der Oberfläche verursachen. Erfolgreiche Anwendungen sind dokumentiert, generell bei der Abgrenzung von bautechnischen Problemzonen wie Hohlräume oder inhomogenem Beton und bei der Lokalisierung von vorhandenen Wassereintritten auf der Oberfläche sowie feuchten Stellen und Wasser hinter der Verkleidung. Die Aussagekraft von thermographischen Untersuchungen, welche dazu dienen, Leckstellen in Tunnelabdichtungen zu orten, wurde jedoch noch nicht speziell untersucht.

Im Rahmen dieses Projekts wurde deshalb eine Analyse mit der folgende Zielsetzung erstellt:

Eine zuverlässige zerstörungsfreie Untersuchung von Leckstellen bei vollflächigen Tunnelabdichtungen mittels tragbaren thermographischen Geräten zu ermöglichen.

Die Notwendigkeit eines Vormessprogramms zur Sicherstellung eines Wärmeflusses zu untersuchen. Thermographische Messungen ohne Vormessprogramm hätten den Vorteil, dass Untersuchungen mit reduziertem Vorbereitungsaufwand effizient zusammen mit anderen Unterhaltsarbeiten oder Inspektionsaufgaben, welche nicht auf der Basis der thermischen Bedingungen geplant werden müssen, ausgeführt werden können. Es wurde deshalb untersucht, ob das Vorhandensein von Wasser eine genügende Veränderung des Temperaturgradienten verursacht, um die Ortung von Temperaturunterschieden auf der Tunneloberfläche unabhängig der Messzeit zu ermöglichen.

Eine möglichst kosteneffiziente und zweckmässige Untersuchungsmethodik im Bezug auf Vorbereitungen und Realisierung zu prüfen. Tragbare thermographische Kameras sind einfach zu bedienen, leicht zu tragen und benötigen wenige Vorbereitungen.

## **1.2.       Umfang**

Im Rahmen dieses Forschungsauftrages wurde die Aussagekraft von Daten, welche mit tragbaren thermographischen Geräten ohne Vormessprogramm für die Ortung von Leckstellen in zweischaligen Tunnelabdichtungen gemacht wurden, untersucht. Das Hauptziel der Untersuchungen war die präzise Ortung von Leckstellen in den Abdichtungsmembranen am Objekt. Durch dieses Forschungsprojekt wurden klare Erkenntnisse gewonnen, ob die Zweckmässigkeit von thermographischen Untersuchungen für die Ortung von Leckstellen mit der angewendeten Methodik gegeben ist. Andere zerstörungsfreie Untersuchungen, z.B. Georadar oder Ultraschallprüfmethoden, waren nicht Gegenstand der Untersuchungen.

## **2.         Anwendungen der Thermographie**

Thermographie wird seit langem in vielen Industrien als zerstörungsfreie Untersuchungsmethode angewendet. Die folgenden Beispiele sind nur einige der zahlreichen industriellen Anwendungen in den Bereichen Prozesssteuerung, Leckortage, Qualitätskontrolle usw.:<sup>4, 5</sup>

- Prozesssteuerung in der Herstellung von Kunststoffen, Metallen, Papier und Glas
- Inspektion von Leiterplatten während der Herstellung
- Qualitätskontrollen von Nahtschweissarbeiten
- Inspektion von Turbinenschaufeln in Düsentrriebwerken während Produktion und Betrieb
- Schätzung des Füllniveaus von Flüssigkeiten in festen Behältern
- Inspektion von elektrischen Installationen
- Ortung von Wärmeverlust in Wohn- und Industriegebäuden
- Lecksuche bei abgedeckten Leitungen
- Überwachung von Strassenverkehr
- Materialprüfungen, z.B. die Ortung von Hohlräumen in Verbundwerkstoffen

Neue Anwendungen werden dank immer besseren Infrarotkameras, Computern sowie EDV-Programmen kontinuierlich entwickelt.

### 3. Theoretischer Hintergrund der Thermographie

#### 3.1. Wärmestrahlung

Bei allen Körpern mit einer Temperatur über dem absoluten Nullpunkt (0° Kelvin = -273°C) wird eine elektromagnetische Strahlung bzw. Wärmestrahlung emittiert, welche gemäss dem Stefan-Boltzmann Gesetz proportional der vierten Potenz von seiner absoluten Temperatur beträgt. Die maximale Emission von Wärmestrahlung findet in der Regel bei Raumtemperatur im Infrarotbereich statt.<sup>6</sup>

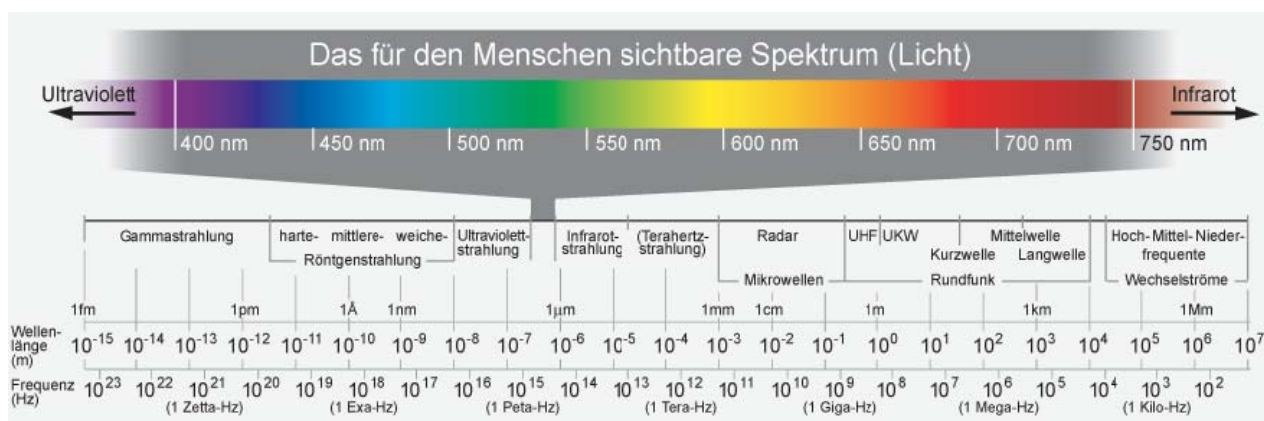


Abbildung 2 - Das elektromagnetische Spektrum<sup>7</sup>; Wärmebildkameras detektieren bestimmte Wellenlängen der Infrarotstrahlung, durch welche die Temperaturbestimmung ermöglicht wird

Die Wellenlänge ( $\lambda_{MAX}$ ) vom Strahlungsmaximum für eine bestimmte Temperatur ( $T_K$ , in °K) ist durch das Wien'sche Verschiebungsgesetz beschrieben:

$$\lambda_{MAX} = \frac{2898}{T_K}.$$

Die maximale Strahlung bei der Raumtemperatur (ca. 300°K) ist bei einer Wellenlänge von ca. 10  $\mu$ m. Mit steigender Temperatur eines schwarzen Körpers senkt sich die Wellenlänge des Strahlungsmaximums. Bei 1000°K beträgt das Strahlungsmaximum ca. 3  $\mu$ m. Durch die Thermographie wird die Wärmestrahlung im Infrarotbereich berührungslos gemessen, um genaue Rückschlüsse auf die Absoluttemperatur der Oberfläche eines Körpers zu ermitteln.

### **3.2. Emissionsgrad**

Den Emissionsgrad bezeichnet man als das Aussenden von Wärmestrahlung im Vergleich zu einem idealen Wärmestrahler aufgrund der Wärmebewegung der Atome, was vom Material, der Oberflächenbeschaffenheit, der Temperatur und der gemessenen Wellenlänge abhängig ist. Ein schwarzer Körper, welcher als Referenz für den Emissionsgrad von Festkörpern dient, ist ein idealisiertes Objekt, welches die eintreffende elektromagnetische Strahlung absorbiert und wieder uniform in alle Richtungen ausstrahlt. Die Beziehung zwischen der spezifischen Ausstrahlung eines schwarzen Körpers, der Temperatur des schwarzen Körpers und der Wellenlänge der ausgesendeten Strahlung ist durch das Plancksche Strahlungsgesetz beschrieben.

Um eine ausreichende Genauigkeit einer Temperaturmessung von realen Objekten zu erreichen, muss der Emissionsgrad eines gemessenen Objekts bekannt sein. Der Emissionsgrad wird als das Verhältnis der tatsächlich ausgesandten Wärmestrahlung zum theoretisch möglichen Emissionsgrad eines schwarzen Körpers ( $\epsilon = 1$  = Emissionsgrad eines schwarzen Körpers) bei einer bestimmten Temperatur definiert. Beispielsweise beträgt der Emissionsgrad von Wasser mit einer Schichtstärke  $>0.1$  mm bei einer Temperatur von  $0^{\circ}\text{C}$  bis  $100^{\circ}\text{C}$  0.95 bis 0.98. Der Emissionsgrad von Beton beträgt ca. 0.92 bis 0.95. Der Einfluss der Temperatur auf den Emissionsgrad wird in den meisten Fällen bei Temperaturen zwischen  $0^{\circ}\text{C}$  bis  $100^{\circ}\text{C}$  vernachlässigt.

### **3.3. Aktive und passive Thermographie**

Infrarotthermographie wird entweder passiv oder aktiv ausgeführt. Aktive Thermographie verwendet externe Wärme- oder Kältequellen, um thermische Aktivität in einem System zu erzeugen, welche sonst nicht vorhanden wäre. Impulsthermographie ist ein Beispiel einer aktiven Methode. Passive Thermographie misst Wärmestrahlung aus Systemen in ihrem natürlichen Zustand, ohne die Verwendung von externen thermischen Quellen.

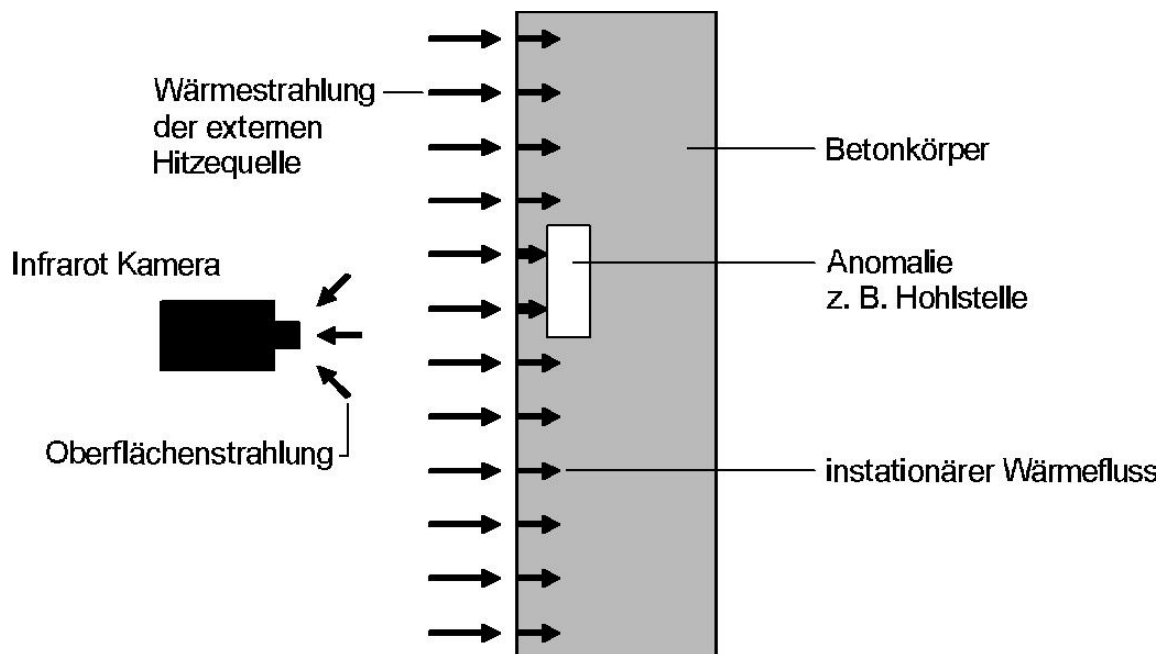


Abbildung 3 - Prinzip der aktiven Thermographie im Rahmen eines Laborversuchs<sup>8</sup>

### 3.4. Thermographische Kameras

Es gibt mehrere Arten von thermografischen Radiometern, welche für die Inspektion von Bauwerken geeignet sind, inklusiv stationäre Instrumente, Laserscanner Systeme und tragbare Geräte, die ähnlich wie Fotoapparate aussehen und funktionieren. Kameradektoren sind mit flüssigen Stickstoff, mit gas oder elektrisch gekühlt. Viele der tragbaren Geräte benützen ungekühlte Mikrobolometer-Technologie. Die Sensoren sind nur für bestimmte infrarote Wellenlängen durchlässig und messen typischerweise in den Bereichen von 3 bis 5  $\mu\text{m}$  und / oder 8 bis 14  $\mu\text{m}$ . Die Strahlung von Objekten bei Raumtemperaturen ist in der längeren infraroten Wellenlänge am Höchsten. Die Messung dieser spezifischen spektralen Bandbreite minimiert die Absorptionseffekte der Atmosphäre, welche bei Messungen über längere Distanzen von besonderer Bedeutung sind. Für Messdistanzen von wenigen Metern ohne Beeinträchtigung durch Nebel oder Wassertröpfchen ist die atmosphärische Adsorption in diesen Bandbreiten vernachlässigbar klein.

Die thermische Auflösung der infraroten Sensoren ist für die Detektion von kleinen Temperaturdifferenzen auf einer Tunnelschale von grosser Bedeutung. Moderne handelsübliche Wärmebildkameras weisen eine thermische Auflösung zwischen 0.06 bis 0.1°C auf. Einige Apparate können die thermischen Aufnahmen durch gleichzeitig aufgenommene Bilder ergänzen, was sowohl die Feldarbeiten als auch die Erstellung von Berichten im Büro unterstützt.



Abbildung 4 - Beispiel einer tragbaren thermographischen Kamera

Einige EDV-Programme erleichtern die Betrachtung, Evaluation und Präsentation von thermographischen Aufnahmen und aufgenommenen Daten. Die meisten Kameras werden mit speziellen kameraspezifischen EDV-Programmen geliefert.

### 3.5. Wärmefluss

#### 3.5.1. Wärmefluss durch Tunnelgewölbe

Wenn die Luft im Innenraum eines Tunnelbauwerkes und das umgebende Gebirge unterschiedliche Temperaturen aufweisen, entsteht ein Wärmefluss von den Bereichen mit höherer Temperatur zu Bereichen mit tieferer Temperatur. Weil Tunnelgewölbe nicht von der Sonne angestrahlt werden, ist die passive Thermographie in Tunnels vom Wärmefluss durch das Tunnelgewölbe abhängig, welcher durch den Temperaturunterschied zwischen Tunnelluft und umgebendem Gebirge entsteht. Der Wärmefluss wird durch die Grösse des Temperaturunterschiedes sowie durch die Wärmeleitverhältnisse beeinflusst.

Bedingt durch Anomalien innerhalb des Tunnelgewölbes können die thermischen Materialeigenschaften (Leitfähigkeit und Speichervermögen) bereichsweise unterschiedlich sein. Als Folge wird der Wärmefluss lokal langsamer oder schneller. Wenn die Temperaturverteilung auf einer Tunneloberfläche mit einer Infrarotkamera betrachtet wird, können Anomalien geortet werden, sofern sie aufgrund des Wärmeflusses einen messbaren Temperaturunterschied auf der Oberfläche verursachen.

#### 3.5.2. Der Einfluss des thermischen Gradienten

Der Wärmefluss durch eine Tunnelschale kann vereinfacht als ein eindimensionaler Vorgang senkrecht zu einer ebenen Platte betrachtet werden. Die Geschwindigkeit des Wärmeflusses ( $q$ ) durch ein solches System ist proportional zum Gradienten der Temperatur über die Tiefe, die Fläche ( $A$ ), durch welche es fliesst sowie der Wärmeleitfähigkeit ( $k$ ). Die Wärmeleitfähigkeit ist eine temperaturabhängige thermophysikalische Eigenschaft des Materials, welche bei den Umgebungstemperaturen von Tunnels als konstant angenommen wird. Die Wärmeleitfähigkeit von Luft ( $0.026 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) bei  $20^\circ\text{C}$  ist ca. 20 - 25 Mal weniger als Wasser (0.6) und ca. 30 - 50 Mal weniger als solider Beton (0.8 – 1.4).

Der Wärmefluss durch das betrachtete System wird durch die Gleichung von Fourier beschrieben:

$$q = -kA \frac{dT}{dx}$$

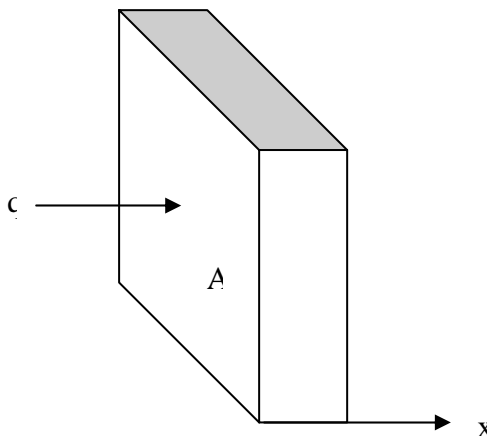


Abbildung 5 - Eindimensionales Wärmeleitsystem senkrecht zu einer ebenen Platte

Diese Gleichung zeigt, dass der Wärmefluss durch die Platte direkt von dem Temperaturgradienten abhängig ist. Wenn der Gradient sehr klein ist, wird die Fähigkeit des Systems, eine Temperaturdifferenz auf der Oberfläche zu erzeugen, infolge von Anomalien innerhalb des Betons, sehr begrenzt.

### 3.5.3. Der Einfluss der thermischen Materialeigenschaften

Mittels der Aufzeichnung der Temperaturverteilung durch eine Betonschale, durch welche Wärme aus der Luft bis zum Fels mit einem stabilen thermischen Gradienten fließt, kann der Zusammenhang der gemessenen Oberflächentemperatur mit den Wärmeleitfähigkeitseigenschaften der Tunnelschale und dem Tunnelzustand erläutert werden.

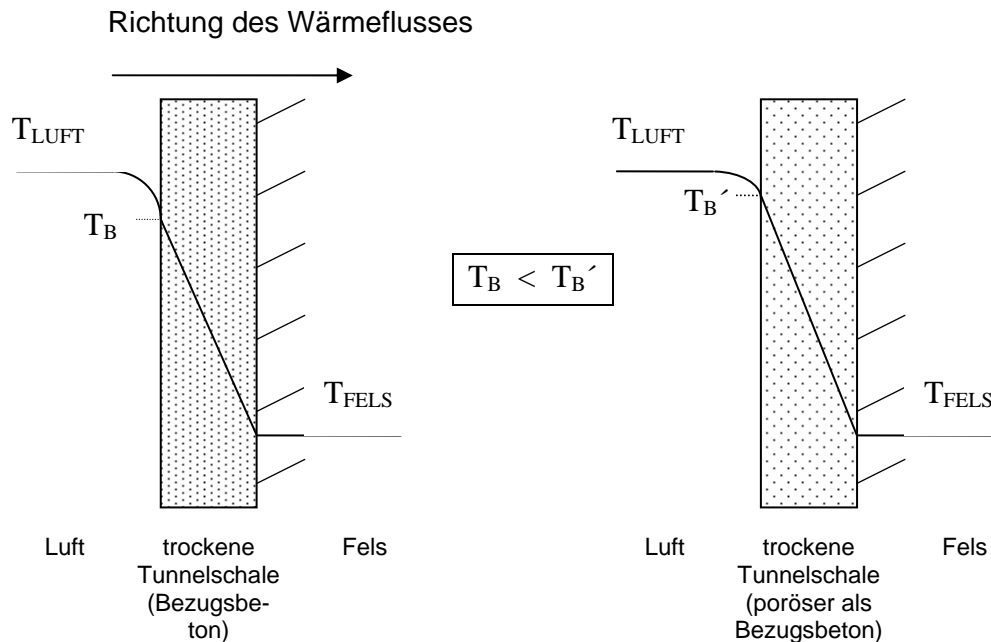


Abbildung 6 - Schematische Darstellung der Temperaturverteilung durch eine trockene Tunnelschale aus Beton niedrigerer (links) bzw. höherer Porosität (rechts)

Die Temperaturverteilung durch eine trockene Tunnelschale, die als Referenzobjekt dient, wird in Abbildung 6 links aufgezeichnet. Die Wärme fließt von der Luft in Richtung Fels. Konvektionseinflüsse in der Nähe der Betonoberfläche verursachen eine nichtlineare Temperaturverteilung auf der Luftseite der Tunnelschale. Die Betonoberfläche hat deshalb eine niedrigere Temperatur als die Luft ( $T_B < T_{LUFT}$ ).

Ein Beton mit einer höheren Porosität (Abb. 6 rechts) würde aufgrund der niedrigen Wärmeleitfähigkeit der Porenluft eine niedrigere Leitfähigkeit als jene des Bezugsbetons aufweisen. Zur Erfüllung der Wärmebilanzbedingung muss daher ein höherer Temperaturgradient im porösen Beton herrschen mit der Folge, dass der Anteil der Temperaturdifferenz zwischen Luft und Fels, welcher innerhalb der Schale abgebaut wird, grösser wird. Die Oberflächentemperatur des porösen Betons ( $T_{B'}$ ) ist deshalb höher als beim Bezugsbeton ( $T_B$ ).

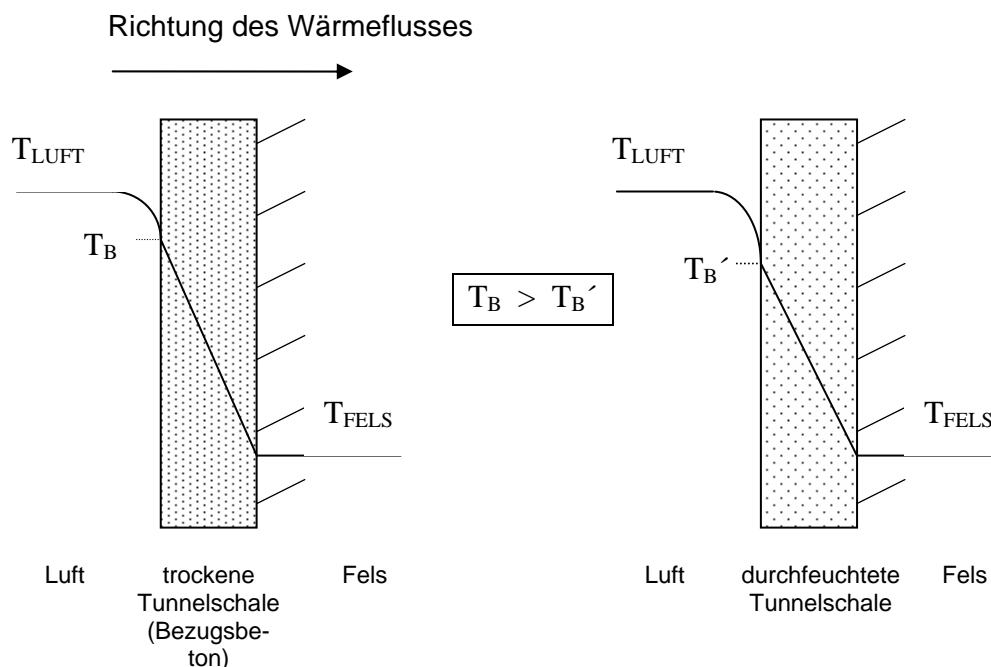


Abbildung 7 - Beispiele von Temperaturverteilungen durch eine trockene Tunnelschale (links) sowie einen durchfeuchteten Beton (rechts)

Wasser im Beton hat einen wesentlichen Einfluss auf den Wärmefluss. Wegen der höheren Wärmeleitfähigkeit des Wassers im Vergleich zur Luft wird durchfeuchteter Beton Wärme schneller durchleiten als trockener Beton. Dies hat folgende Wirkung auf die Resultate der Thermographie: Fließt die Wärme vom Tunnel in Richtung Fels, resultiert eine niedrigere Oberflächentemperatur auf dem Beton im Vergleich zum Bezugsbeton, da der Wärmefluss durch das Wasser beschleunigt wird (Abb. 7 rechts). Fließt die Wärme vom Fels her in Richtung Tunnelhohlraum, resultiert eine höhere Oberflächentemperatur als der umgebende trockene Beton.

Beide oben genannten Modelle basieren auf einer konstanten Betonstärke, stationärem Wärmefluss sowie einem guten Kontakt zwischen Betonausbau und Baugrund. Abrupte Änderungen dieser Parameter können zu Temperaturänderungen auf der Tunneloberfläche und dadurch zu möglichen falschen Interpretationen führen.

### 3.5.4. Zeitabhängigkeit des Wärmeflusses

Wärmefluss ist ein zeitabhängiger Prozess. Die Änderung der Temperaturbedingungen über Zeit hat einen grossen Einfluss auf die Stärke des thermischen Gradienten innerhalb des Betonkörpers. Die folgenden Abbildungen zeigen den Temperaturverlauf als Funktion der Distanz senkrecht zur Tunnelschale im zeitlichen Ablauf.

Die Abbildung 8 zeigt den Fall mit konstanter Temperatur im Fels sowie in der Luft. In diesem Zustand entsteht keinen thermischen Gradient im Beton bzw. der Temperatur der Betonoberfläche ist überall gleich. Mittels Thermographie können keine nutzbaren Informationen zum Zustand gewonnen werden.

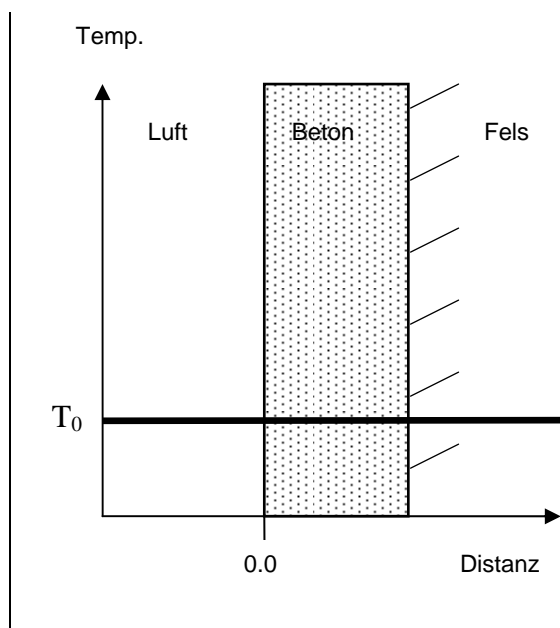


Abbildung 8 - Temperatur im Gleichgewicht

Die Abbildung 9 zeigt die Entwicklung des Temperaturverlaufs nach einer plötzlichen Veränderung der Lufttemperatur von  $T_0$  bis  $T_1$ . Der Wärmefluss ändert sich und ein thermischer Gradient zwischen Fels und Luft entsteht. Abbildung 9 (links) zeigt die Temperaturbedingungen zu einer Zeitpunkt als der Gradient am stärksten ist, d.h. die Messbedingungen sind am günstigsten für die aufgetretenen Veränderung der Lufttemperatur.

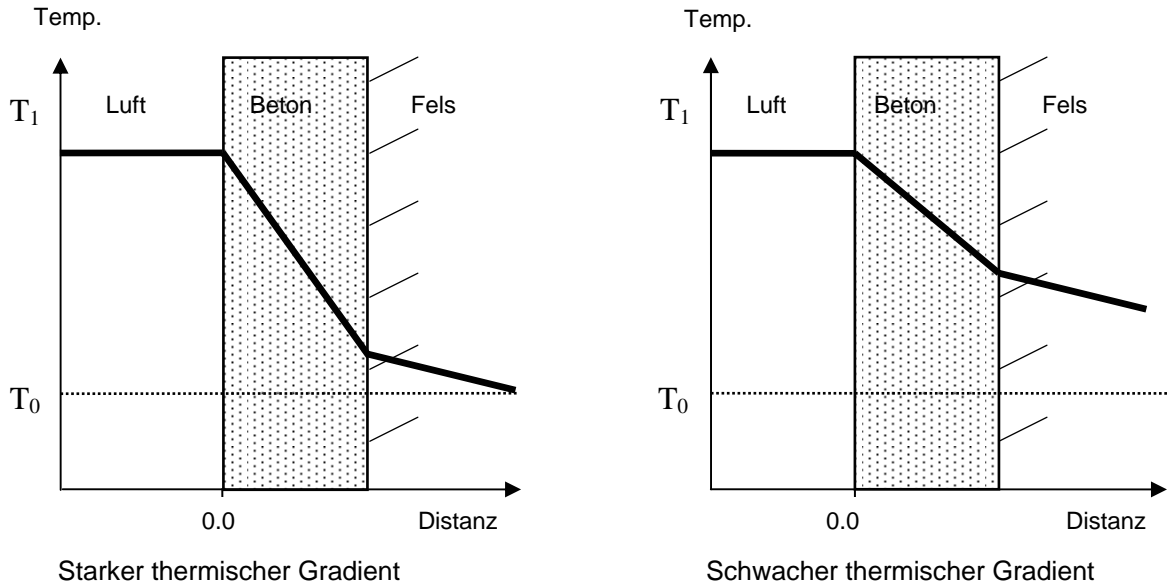


Abbildung 9 - thermischer Gradient nach einer plötzlichen Veränderung der Lufttemperatur von  $T_0$  bis  $T_1$  (links) und die Tendenz falls  $T_1$  konstant bleibt (rechts).

Falls die Lufttemperatur über die Zeit bei  $T_1$  konstant bleibt, wärmt sich der Fels allmählich auf und der thermische Gradient durch den Beton nimmt ab, (Abbildung 9 rechts). Sobald der thermische Gradient zwischen Fels und Luft reduziert, wird die Form von detektierbaren thermischen Strukturen auf der Messoberfläche zunehmend diffus. Durch die Reduktion der Temperaturdifferenzen werden auch Anomalien in Tunnelgewölben schwieriger zu erkennen.

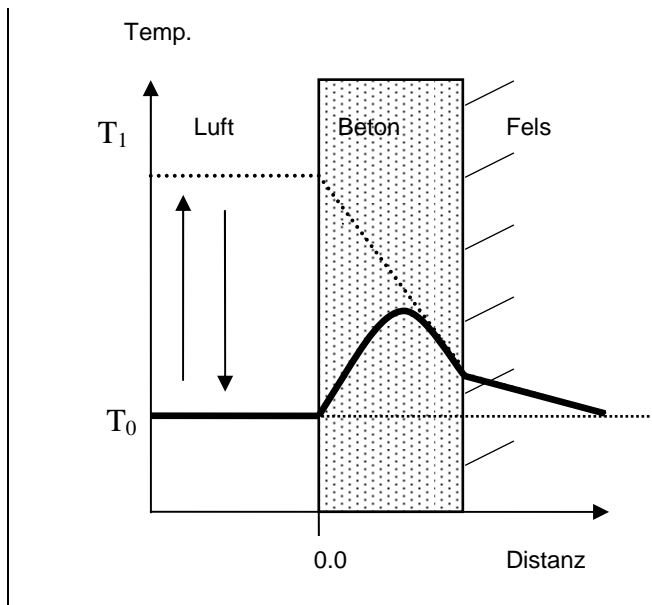


Abbildung 10 - Wechselhafter Gradient

Abbildung 10 stellt dem Fall dar, indem sich die Lufttemperatur von  $T_0$  bis  $T_1$  und kurz danach zurück zu  $T_0$  verändert. Unter diese Bedingungen kann sich ein wechselhafter Gradient innerhalb des Betons einstellen, welcher die Interpretation von Temperaturunterschieden auf der Oberfläche sehr schwierig bis unmöglich macht.

### 3.5.5. Vorausgehende Massnahmen zur Gewährleistung des Wärmeflusses

Die Zeitabhängigkeit von Wärmefluss-Phänomenen ist der grösste Nachteil für die Anwendung von passiver Thermographie in Tunnelbauwerken. Ausserdem sind alle Tunnels bezüglich Wärmefluss unterschiedlich. Stark unterschiedliche Eigenschaften wie Gewölbstärke, Geologie, Hinterfüllung zwischen Fels und äusserer Tunnelschale, Betonqualität, Überlagerung sowie unterschiedliche Wetter- und Temperaturbedingung machen die Voraussage von der Grösse und Richtung des Wärmeflusses in einem bestimmten Tunnel und bei einem genauen Zeitpunkt ohne Messprogramm schwierig.

Der Temperaturgradient ist für die Erzielung von aussagekräftigen thermographischen Resultaten erforderlich. Die folgenden Massnahmen können vor den thermographischen Messungen ausgeführt werden, um die Wahrscheinlichkeit eines ausreichenden Temperaturgradienten durch das Tunnelgewölbe während der Messung zu erhöhen:

Temperaturmessung der Tunnelluft im Tunnel und in verschiedenen Tiefen des Gewölbes über eine Zeitspanne vor der thermographischen Aufnahme, um zu ermitteln, wann ein stärkerer Temperaturgradient vorhanden ist.

Terminierung von thermographischen Messungen in Zeiten, wenn ein Temperaturgradient durch das Gewölbe wahrscheinlich ist, auf der Basis von qualitativen Annahmen in Bezug auf die Wetterbedingungen sowie Erkenntnisse aus früheren Erfahrungen im Feld.

Lokales Heizen oder Abkühlung der Tunneloberfläche im Messbereich, d.h. aktive Thermographie.

Wenn vorausgehende Massnahmen realisiert werden sollen, muss eine entsprechend lange Zeitspanne vom Tunnelbetreiber zur Verfügung gestellt werden. Die Vorbereitungsphase erfordert hohe Flexibilität vom Tunnelbetreiber und den ausführenden Personen. Diese Massnahmen können aufwendig sein.

#### **4. Messkonzept**

Wie erläutert, hat das Wasser, welches durch einen Betonkörper fließt, einen Einfluss auf die Eigenschaften des Betons. Die Wärmeleitfähigkeit nimmt mit zunehmendem Sättigungsgrad des Porenraums des Betons zu. Zudem nimmt der Beton zusätzliche Wärme auf oder gibt sie ab, solange Wasser und Beton unterschiedliche Temperaturen aufweisen. Dadurch ergeben sich Änderungen des thermischen Gleichgewichts innerhalb des Betons.

Es wurde deshalb untersucht, ob die oben genannten Faktoren ermöglichen können, dass das Leckwasser im Tunnelgewölbe detektierbare Temperaturunterschiede auf der Tunneloberfläche verursacht, auch wenn der Temperaturgradient zwischen Fels und Luft gering ist. Sofern Leckstellen erfolgreich bei einem schwachen Temperaturgradienten zwischen Fels und Luft detektiert werden können, könnten Messungen auf die Ortung von Leckstellen ohne zeitabhängige Restriktionen realisiert werden. Vorausgehende Massnahmen zur Sicherstellung eines Temperaturgradienten wären nicht notwendig, mit dem Vorteil, dass Untersuchungen neben reduziertem Vorbereitungsaufwand effizient zusammen mit anderen Unterhalts- oder Inspektionsaufgaben ausgeführt werden könnten. Die thermographischen Messungen wurden deshalb realisiert, ohne den Temperaturgradienten durch das Gewölbe, d.h. zwischen Fels und Tunnelinnerraum, im Voraus zu berücksichtigen.

#### **5. Messverfahren**

##### **5.1. Untersuchte Bauwerkstypen**

Untersucht wurden Untertagbauten mit zweischaligem Ausbau und einer Abdichtungsmembrane zwischen Innen- und Aussenschale. Tunnels mit unterschiedlicher Überlagerung (tief bzw. oberflächennah), geographischer Höhe, Geologie (Fels bzw. Lockergestein) und Tunnellänge wurden untersucht. Es wurden Tunnelgewölbe ohne Abdeckungen, z.B. Wandplatten aus Metall, untersucht, um die Feldarbeit zu vereinfachen.

## 5.2. Klassifikation der Wassereintrittsstellen

Die Intensität von den Wassereintrittsstellen an der Oberfläche wurde zurzeit der Untersuchung klassifiziert. Das Klassifikationssystem ist in Tabelle 1 zusammengefasst.

Klasse	Merkmal	Beschrieb
FK 0	trocken	keine Feuchtigkeit an der Tunneloberfläche sichtbar
FK 1	feucht	vereinzelt kleinere Feuchtstelle auf der Tunneloberfläche
FK 2	nass	Feuchtstelle ohne Tropfwasser oder stark fliessendes Wasser
FK 3	sehr nass	Feuchtstelle mit Tropfwasser und/oder stark fliessender Wassereintritt

Tabelle 1 - Klassifikation des Feuchtigkeitszustands einer Tunneloberfläche bei Wassereintrittsstellen

Die Klassifikation von jeder Wassereintrittsstelle wurde im Feld direkt vor jeder Messung ermittelt. Der Zweck der Klassifikation war es, die Eignung der Thermographie in Abhängigkeit von verschiedenen Eintrittintensitäten zu untersuchen.



Abbildung 11 - Wassereintrittsstelle mit fliessendem Wasser aus Blockfuge (Klassifikation FK 3)

### **5.3. Messgeräte**

#### **5.3.1. Thermographische Messungen mittels tragbaren Wärmebildkameras**

Mehrere Typen von thermographischen Radiometern sind kommerziell verfügbar, z.B. stationäre Einrichtungen, Laserscannersysteme und tragbare Geräte. Im Rahmen dieses Projekts wurden tragbare Infrarot-Messsysteme, welche wie Fotoapparate aussehen und funktionieren, aus folgenden Gründen als geeignetes Mittel für die Untersuchung von Leckstellen gewählt:

- Tragbare Wärmebildkameras sind für die Ausführung von mehreren lokalen Untersuchungen bei vorbestimmten Standorten geeignet, z.B. bei Stellen, wo Wasser in den Tunnel hinein fließt. Moderne tragbare Wärmebildkameras stellen die Temperaturbedingungen des gemessenen Objekts sofort auf einem farbigen LCD-Display graphisch dar. Dadurch können Unterschiede in der Oberflächentemperatur eines Körpers sofort im Feld lokalisiert und bei Bedarf näher untersucht werden. Mit dem Einsatz dieser Geräte hat das Inspektionspersonal die Möglichkeit, alle Faktoren zu vermeiden, welche die Qualität der Messresultate negativ beeinflussen könnten, z.B. Kondensation, starke Luftströmung oder die Oberflächenbeschaffenheit.
- Einfache Handhabung im Feld im Vergleich mit Scannergeräten oder stationären Systemen wegen ihrer kleinen Grösse, ihrem Gewicht und kurzer Einrichtungszeit.
- Einfach zu bedienen, nachdem einige Basisprinzipien verstanden sind.
- Für Untersuchungen in den beengten Platzverhältnissen von Untertagbauwerken sehr geeignet, z.B. in Lüftungs- bzw. Werkleitungskanälen.
- Gute thermische Resolution; kommerziell verfügbare tragbare Wärmebildkameras weisen eine Temporauflösung von ca. 0.06 bis 0.1°C auf.
- Software für die Betrachtung, Evaluation und Präsentation von thermographischen Bildern und aufgenommenen Felddaten wird vom Hersteller zur Verfügung gestellt.
- Kostengünstige Alternative

### 5.3.2. Technische Daten der Kamera

Tragbare Infrarotkameras mit den folgenden technischen Daten wurden eingesetzt:

Sensor	ungekühltes Infrarot-Array
Temperaturbereich	-20 to +250°C
Spektralbereich	8-14 µm
Temperaturauflösung	0.1°C bei 30Hz,
19'200 Messpunkte	160 x 120
Temperaturgenauigkeit (absolut)	±2°C oder 2% vom Maximum [°C]
Öffnungswinkel	20° x 15°

## 5.4. Genereller Messvorgang

### 5.4.1. Organisation der Messungen

Basierend auf der Information des Tunnelbetreibers wurden die Untersuchungen an Stellen mit bekannten Wassereintritten geplant. In der ersten Phase wurden keine vorausgehenden Massnahmen zur Gewährleistung eines genügenden Wärmeflusses ausgeführt (siehe Kapitel 3.5.5).

Die Koordination der Feldarbeiten wurde in Absprache mit den verantwortlichen Stellen durchgeführt. Die Messungen wurden so geplant, dass Verkehrsstörungen minimiert werden konnten. In vielen Fällen haben die Untersuchungen mit geplanten Unterhaltsarbeiten zeitlich übereingestimmt, so dass der Tunnelzugang ohne Störungen aus dem Betrieb gewährleistet werden konnte. Einige der weniger befahrenen Tunnels wurden während dem Betrieb mit Assistenz vom lokalen Unterhaltspersonal für die Verkehrsregelung und Signalisation gemessen.

Die Sicherheit während der Ausführung wurde durch die notwendige Signalisation, Warnausrüstung, Bekleidung und Ventilation für die Ausführenden sowie für Dritte gewährleistet.

### 5.4.2. Feldarbeiten

Die Messungen wurden in den Tunnels ausgeführt, die in der Tabelle 2 (Kapitel 5.1.1) aufgelisteten sind. Die Feldbedingungen wurden aufgenommen, einschliesslich die allgemeinen Wetterbedingungen, die Lufttemperatur ausserhalb der Tunnels und bei jeder Messstelle, die Luftfeuchtigkeit, die Luftgeschwindigkeit und die Uhrzeit der Messungen. Bei jeder Messstelle wurde die Klassifikation der Wassereintrittintensität festgelegt (siehe Kapitel 4.2) und es wurden

Digitalfotos erstellt. Oberflächeneigenschaften, welche die Messresultate negativ beeinflussen könnten, wurden notiert.

Mittels tragbaren Geräten wurden bei Wassereintrittsstelle thermographische Messungen ausgeführt, mit dem Ziel, Hinweise auf Leckstellen in der Abdichtungsfolie rund um die Leckstelle zu finden. Dazu wurde während diesem Vorgang das LCD Farb-Display benützt, um Leckstellen oder Wasserwege hinter der Tunneloberfläche zu suchen.

Alle Feldmessungen wurden als passive Messungen ausgeführt, d.h. sie machten sich nur die natürlich vom Tunnelgewölbe emittierte Infrarotstrahlung ohne externe Wärmequellen zunutze.

#### 5.4.3. Auswertung der Resultate

Nach den Feldarbeiten wurden die aufgenommenen Informationen zusammengestellt, verglichen und hinsichtlich Wasserleckstellen hinter der Tunnelverkleidung und Wasserwegigkeiten ausgewertet. Mit der vom Gerätehersteller gelieferten Software wurde festgestellt, dass die Thermobilder am besten interpretierbar waren, wenn die „Falschfarben-Einstellungen“ auf 11 Farben und die Temperaturabstufungen von ca. 0.1 – 0.3°C begrenzt wurden. Berücksichtigt wurde die Richtung des Wärmeflusses sowie die Wassertemperatur, um die Identifikation von Temperaturunterschieden zu unterstützen, welche eine Indikation von Wasserphänomenen hinter dem Tunnelgewölbe geben könnte und letztendlich, um den Ort der Leckstellen in der Abdichtungsmembrane zu bestimmen.

## 6. Ergebnisse der Feldarbeiten

### 6.1. Untersuchungen in elf Tunnels

#### 6.1.1. Untersuchte Bauwerke

Zu Beginn des Projekts wurden elf Tunnels (Tabelle 2) von variabler Länge, Geologie und Höhe mittels tragbaren Wärmebildkameras untersucht, in welchen vom Tunnelbetreiber Wassereintrittstellen beobachtet wurden.

Die Auswertungen von 32 Leckstellen in Tunnels mit Abdichtungen sind im Endergebnis berücksichtigt.

Bei vier Standorten wurden Messungen in einem Tunnel ohne Abdichtungsmembrane durchgeführt. Diese Resultate sind in der statistischen Auswertung bezüglich Leckortung nicht berücksichtigt. Bei zwei weiteren thermographischen Untersuchungen wurde das statistische Ergebnis auch weggelassen, weil später festgestellt wurde, dass das Wasser an diesen Standorten aus der Fuge zwischen Tunnelgewölbe und Zwischendecke stammte und nicht aus dem Gebirge durch das Gewölbe kam.

Tunnel	Länge [m]	Geologie	Höhe [m ü. M.]
Arisdorf	1402	Fels	400
Bärenburg	998	Fels	1120
Benabbia	192	Fels	790
Blatt	510	Fels	530
Furen	120	Fels	1120
Grenchnenwiti	1790	Füllmaterial	440
Milchbuck	1822	Fels u. Lockergestein	450
Naxberg	290	Fels	1110
Stigern	201	Fels	550
Waldheim	197	Fels	520
Wiler	100	Fels	780

Tabelle 2 - Überblick von untersuchten Tunnels

### 6.1.2. Wassereintrittsstellen

Zur Zeit der Messung wurden vier der 32 Wassereintrittsstellen als sehr nass (FK3) klassifiziert, neun als nass (FK2) und elf als feucht (FK1). Acht der 32 berichteten Leckstellen (25%) waren zurzeit der Untersuchung trocken.

Erste Untersuchungen	Klassifikation der Wassereintrittsstellen				TOTAL
	FK0	FK1	FK2	FK3	
Untersuchte Wassereintrittsstellen [Nr.]	8 (25%)	11 (34%)	9 (28%)	4 (13%)	<b>32</b> <b>(100%)</b>

Tabelle 3 - Klassifikation der Wassereintrittsstellen im Rahmen der Erstuntersuchungen

### 6.1.3. Die Aufnahme von Oberflächenwasser

Der genaue Ort eines Wassereintrittes in einen Tunnel ist wegen den äusseren Einflüssen wie Beleuchtung, dunkle Oberflächen, diversen Ablagerungen, Unregelmässigkeiten von Oberflächen und Schadenprozessen nicht immer eindeutig von Auge sichtbar. In diesen Fällen ermöglicht die Thermographie eine genaue Bestimmung der Ausbreitung von Wasser auf der Tunneloberfläche. Wasser oder Feuchtigkeit an der Tunneloberfläche wurde bei 23 der 24 Wassereintrittsstellen (Klassifikation FK1, FK2 oder FK3) klar detektiert.

Bei einer Messung konnte das Oberflächenwasser nicht detektiert werden, da das Wasser und das Tunnelgewölbe an diesem Ort und zu diesem Zeitpunkt die gleiche Temperatur aufgewiesen haben.

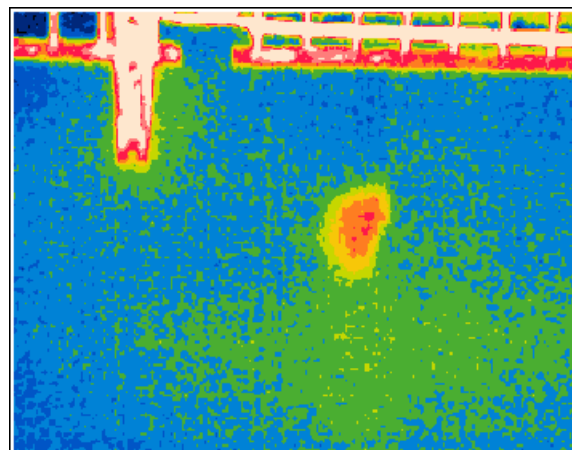
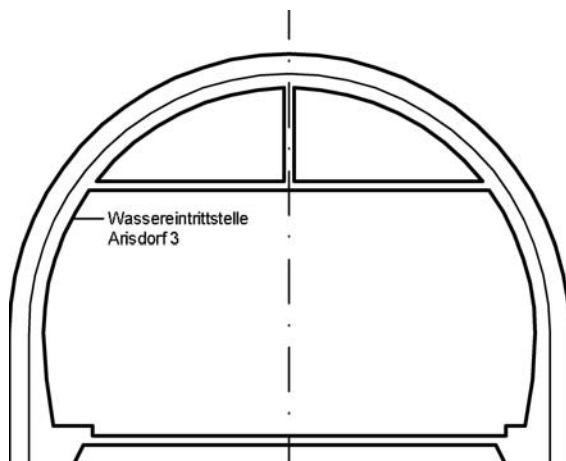
Erste Untersuchungen	Klassifikation der Wassereintrittsstellen				TOTAL	%
	FK0	FK1	FK2	FK3		
<b>Oberflächenwasser</b> auf Tunnelgewölbe klar detektiert	-	11/11	9/9	3/4	<b>23/24</b>	96%

Tabelle 4 - Anzahl von Stellen, wo das Oberflächenwasser detektiert wurde

#### 6.1.4. Die Aufnahme von Wasser hinter der Tunneloberfläche

Eine Gesamtliste der Messpunkte der ersten Untersuchungen zusammen mit den entsprechenden Messbedingungen sowie Messresultaten sind im Anhang A ersichtlich.

Aus den 32 Messpunkten wurde nur ein Temperaturunterschied detektiert, welcher eventuell auf eine Leckstelle durch die Abdichtung hinweist (3%). Der Temperaturunterschied wurde im Arisdorftunnel im oberen Parament direkt oberhalb der Wassereintrittsstelle in der Nähe eines Risses in der Innenschale (siehe Abbildungen 12 und 13) erkannt. Die Wassereintrittsstelle wurde als FK2 (nass) klassifiziert.



Abbildungen 11 bis 13– punktförmiger Temperaturunterschied im oberen Parament des Arisdorftunnels hinweisend auf eine Leckstelle hinter dem Gewölbe

Bei drei Messpunkten (16%) wurden Temperaturunterschiede über grössere Flächen detektiert, welche aussehen, als ob sie durch wassergesättigten oder inhomogenen Beton verursacht wurden. Angesichts der Tatsache, dass Wassersättigung die Wärmeleitfähigkeit von Beton

erhöht und unter Berücksichtigung der Lage der Temperaturunterschiede relativ zur Wassereintrittsstelle sowie die erwartete Richtung des Wärmeflusses, ist das Vorhandensein von wassergesättigtem Material möglich. Bei 26 der 32 Messpunkten (81%) wurden keine Temperaturunterschiede auf der Tunneloberfläche detektiert. Die Resultate aus der ersten Untersuchung sind in der Tabelle 5 zusammengefasst.

Erste Untersuchungsergebnisse	Klassifikation der Wassereintrittsstellen				TOTAL	%
	FK0	FK1	FK2	FK3		
Temperaturunterschiede evtl. hinweisend auf Leckstelle in der Abdichtung (punktueller Anomalie)	0/8	0/11	1/9	0/4	<b>1/32</b>	3%
Temperaturunterschiede hinweisend auf Wassersättigung oder inhomogenen Beton (Fläche)	1/8	1/11	0/9	1/4	<b>3/32</b>	9%

Tabelle 5 - Anzahl Temperaturunterschiede während den ersten Untersuchungen detektiert

#### 6.1.5. Schlussfolgerungen aus den Untersuchungen in elf Tunnels

Aus den erreichten Untersuchungsergebnissen für die Ortung von Leckstellen durch die Abdichtung kann festgestellt werden, dass die Messungen eine unzureichende Erfolgsquote erreicht haben. Das Ziel der ersten Untersuchungen in elf Tunnels war es, die Leckstellen bei den 32 Messstandorten zu ermitteln. Temperaturunterschiede, welche eventuell auf Leckstellen in der Abdichtung hinweisen, konnten aber nur in einem der 32 Standorte detektiert werden, was eine Erfolgsquote von maximal 3% ergibt (Misserfolg mindestens 97%).

Verantwortlich für den Misserfolg sind die Kombination von fehlendem Temperaturgradient zur Zeit der Messung, von der Grösse (Stärke, Ausbreitung) und der Tiefe der Wasserphänomene im Gewölbe sowie die begrenzte Fähigkeit des Wassers, eine lokale Änderung der thermischen Bedingungen durch das Gewölbe zu verursachen. Wenn ein Temperaturgradient durch das Gewölbe tatsächlich vorhanden war, dann ist es möglich, dass die Temperaturunterschiede zwischen Wasser und Betongewölbe nicht gross genug waren, um die Wiederherstellung des thermischen Gleichwichts auf der Tunneloberfläche über eine Gewölbstärke von ca. 30 bis 35 cm zu verhindern.

Die Ortung von diffusen Temperaturunterschieden über einen grösseren Bereich in der Nähe von Wassereintrittsstellen, welche auf wassergesättigten Beton hinweisen, war in drei der 32 Untersuchungen möglich. Die 9% Erfolgsquote zeigt, dass die Wahrscheinlichkeit der Ortung

von diffusen Anomalien höher ist als die klare Ortung von punktförmigen Phänomenen. Sie ist aber mit dieser Methodik immer noch gering.

In drei der vier Untersuchungen, bei denen Temperaturunterschiede detektiert wurden (75%), wurde die Wassereintrittsstelle als FK1, FK2 oder FK3 klassifiziert. Nur bei einer Untersuchung konnte ein Temperaturunterschied bei einer Stelle ohne Wassereintritt (FK0) detektiert werden. Demzufolge wurde die Fähigkeit, Anomalien zu detektieren grösser, wenn ein Wassereintritt im Gang war.

In Bezug auf andere physikalische Parameter wie Geologie, Höhe, Aussentemperatur usw. war die Erfolgsquote zu gering, um eine Korrelation zwischen Parameter und deren Einfluss auf die Leckortung zu etablieren.

Bei allen Leckstellen, wo Anomalien hinter dem Gewölbe detektiert wurden, waren die Bedingungen der Luftgeschwindigkeit im Tunnel optimal, nämlich 0 m/s. Eine Luftströmung erhöht die Konvektion auf der Tunneloberfläche, was zu weniger starken Temperaturunterschiede auf der Oberfläche führt.

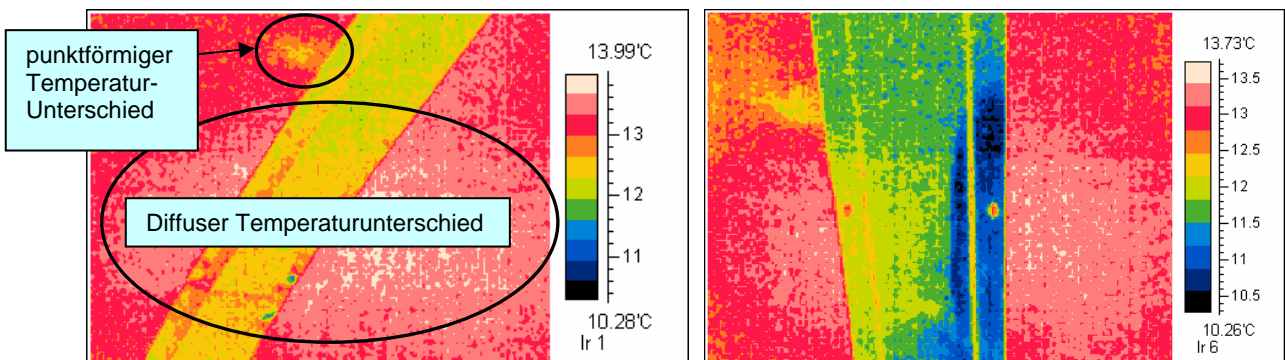
Die tiefe Erfolgsquote von Leckortung weist darauf hin, dass die passive Thermographie nicht geeignet ist, wenn keine vorausgehenden Massnahmen zur Überwachung oder Etablierung eines Wärmeflusses durch das Gewölbe ausgeführt werden. Die angewendete passive Methode ist nicht zu empfehlen.

## **6.2. Folgemessungen in zwei ausgewählten Tunnels im Herbst 2005**

Im Herbst 2005 wurden Folgeuntersuchungen in zwei Tunnels auf der Basis der allgemeinen Wetterlage und Temperaturbedingungen ausgeführt. Nach der Überwachung des Wetters über mehrere Tage wurden die Untersuchungen nach einem schnellen Temperatureinbruch von ca. 6°C, bezogen auf die Tageshöchsttemperatur, ausgeführt. Für die Untersuchungen wurden zwei Messpunkte gewählt, je eine im Milchbucktunnel und im Arisdorftunnel. Diese zwei Wassereintrittsstellen wurden wegen ihrer Lage im Tunnel im Ventilationskanal oberhalb der Fahrbahn selektiert, was die kurzfristige Koordination und Realisierung der Messungen in Bezug auf den Tunnelzugang und die Vermeidung von betrieblichen Störungen deutlich vereinfachte. Zudem wurde die Klassifikation der Wassereintrittsstellen bei den ersten Untersuchungen in Frühling 2005 als FK3 bestimmt.

### 6.2.1. Folgemessungen im Milchbucktunnel

Die Folgemessungen im Milchbucktunnel wurden im Ventilationssystem ausgeführt. Das Wasser fliesst hier durch eine Arbeitsfuge des Betongewölbes in den Tunnelhohlraum. Die Arbeitsfuge wurde seit der ersten Untersuchung mit einer Metallplatte abgedeckt, welche das einfließende Wasser kontrolliert zur Tunneldrainage ableitet. Die starke Einflussintensität konnte wie bei der ersten Untersuchung als FK3 klassifiziert werden. Die thermographischen Aufnahmen um die Metallplatte haben einen punktförmigen Temperaturunterschied detektiert, welcher eventuell auf eine Leckstelle in der Abdichtung hinweist. Direkt unterhalb dieser Punkte wurde ein grösserer flächenartiger Temperaturunterschied detektiert, welcher auf einen Bereich von gesättigtem oder inhomogenem Beton hindeutet.



Abbildungen 14 und 15 - Punktförmiger Temperaturunterschied links der Metallabdeckung, sowie diffuser Temperaturunterschied hinweisend auf wassergesättigten oder inhomogenen Beton im Milchbucktunnel

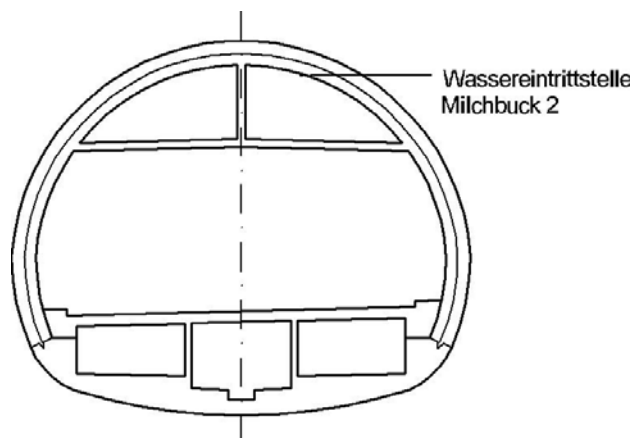


Abbildung 16 und 17 - Wassereintrittsstelle von einer Metallplatte gedeckt im Ventilationskanal des Milchbucktunnels

### 6.2.2. Folgemessungen im Arisdorftunnel

Im Arisdorftunnel wurde festgestellt, dass die Wassereintrittsstelle nach einem regenarmen Zeitraum komplett trocken geworden war und deshalb für die Folgemessung als FK0 klassifiziert werden musste. Bei der Erstuntersuchung hat diese Wassereintrittsstelle eine starke Intensität aufgewiesen. Es war immer noch möglich, eine diffuse Anomalie im Gewölbe um die Wassereintrittsstelle zu detektieren, welche ca. 0.6 bis 0.8°C wärmer als der umgebende Beton war. Dieser diffuse Temperaturunterschied wurde auch schon im Frühling 2005 detektiert. Der Beton in diesem Bereich ist möglicherweise entweder inhomogen oder mit Wasser gesättigt. Der Temperaturunterschied könnte aber auch auf veränderliche Kontaktbedingungen zwischen Gewölbe und Felsuntergrund hinweisen.

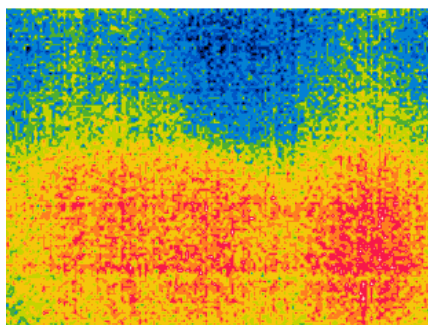


Abbildung 18 – Thermobild und Ort im Profil eines diffusen Temperaturunterschieds am Wand der Lüftungskanal im Arisdorftunnel

### 6.2.3. Schlussfolgerungen aus Folgemessungen

Im Milchbucktunnel und im Arisdorftunnel: Bei Messungen, welche innerhalb von 36 Stunden nach einem raschen Temperatureinbruch ausgeführt wurden, konnten in der Nähe der Wassereintrittsstellen Temperaturunterschiede auf der Tunneloberfläche festgestellt werden. Die Überwachung von Temperaturbedingungen vor den Folgemessungen in den zwei Tunnels erweist sich bezüglich Ortung von Leckagen als viel effektiver, als bei den ersten Untersuchungen ohne qualitative Berücksichtigung der Temperatur.

Im Milchbucktunnel wurden ein klarer punktförmiger sowie ein grösserer diffuser Temperaturunterschied festgestellt. Im Arisdorftunnel wurde nochmals ein diffuser Temperaturunterschied aufgenommen. Es kann deshalb angenommen werden, dass der Temperaturgradient bei den Folgemessungen stärker war als bei den ersten Untersuchungen.

Die Folgemessungen unterstützen die Erkenntnisse, dass die Ortung von thermischen Anomalien mittels thermographische Messungen nur anhand eines genügenden Temperaturgradienten zwischen Luft und Fels möglich ist.

Die These, dass in der Nähe von Leckstellen lokale messbare Temperaturanomalien auf der Tunneloberfläche verursacht werden, konnte nicht bestätigt werden. Anhand der kleinen Anzahl von Folgemessungen kann auch nicht bewiesen werden, dass die Methode überhaupt eine mögliche Untersuchungsmethode für die Leckortung in Tunnelanlagen darstellt. Zusätzliche Aufwendungen zur Gewährleistung eines thermischen Gradienten durch das Tunnelgewölbe wären aber auf jeden Fall notwendig für die Ortung von allfälligen thermischen Anomalien, unabhängig deren Ursache.

### **6.3. Problematik der Anwendung von Thermography in Tunnels**

Die angewendete Methode für die Untersuchung von Leckstellen in Tunnelabdichtungen ist nur unter bestimmten Voraussetzungen möglich:

- Wärmefluss durch Tunnelgewölbe

Thermographische Messungen müssen unter Bedingungen eines ausreichenden Wärmeflusses ausgeführt werden. Der Temperaturgradient zwischen Luft und Fels ist stark zeitabhängig. Deshalb sind vorausgehende Massnahmen zur Sicherstellung des Vorhandenseins eines Temperaturgradienten Voraussetzung, um überhaupt Temperaturanomalien auf Oberflächen zu messen.

Es ist notwendig, ein Vormessprogramm bezüglich Wärmefluss zu installieren. Der Zugang zum Bauwerk ist generell durch die Aufnahmezeit, das Verkehrsvolumen, die benötigten Installationen und den Standort der Messungen im Bauwerk beeinflusst und muss koordiniert sein.

- Wasserfluss durch Gewölbe

Beide gemessenen punktförmigen thermischen Anomalien hatten eine Klassifikation von FK2 oder FK3. Dies erlaubt die Aussage, dass die Ortung von wasserbedingte Phänomenen wahrscheinlicher ist, je stärker die Intensität des Wassereintritts ist. Phänomene in Verbindung mit dem Wasser sind in den meisten Fälle wetterabhängig. Trockenperioden können eine teilweise oder vollständige Reduktion der Intensität von Wassereintrittstellen vor der Messung verursachen.

- **Thermographische Geräte und Aufnahmeverfahren**

Messungen mittels tragbaren thermographischen Kameras sind nur für lokale Untersuchungen von Phänomenen geeignet. Für umfassende Untersuchungen von Tunnelanlagen sind Handkameras ungeeignet. Die systematische Aufnahme von grösseren Flächen ist durch die Aufnahme von mehreren Bildern möglich, die Evaluation von einer grossen Anzahl einzelner Bilder im Büro ist aber aufwendig. Aspekte wie Bildposition, Messdistanz, Messwinkel, Bildmassstab, Aufnahme von Referenzflächen und Abstimmung des Wärmebildes mit dem entsprechenden Foto müssen im Voraus berücksichtigt werden. Ein Verständnis der wichtigsten Geräteeinstellungen und Bedienung sind eine wichtige Voraussetzungen für das Aufnahmepersonal.

- **Auswertung von thermographischen Bildern**

Die richtige Interpretation von Thermobildern aus Tunnels setzt theoretisches Verständnis von Wärmeflussprinzipien, Kenntnisse von Feldbedingungen (z.B. Wetter vor und während Messungen, Lufttemperatur, Luftgeschwindigkeit, Oberflächebedingungen etc.) sowie Verständnis für die Software voraus. Erfahrungen mit der Auswertung von thermographischen Bildern sind erforderlich. Auch wenn Anomalien geortet werden können, ist die typische Betonstärke eines Innengewölbes von ca. 30 bis 35 cm zu gross, dass eindeutige Aussagen zur Leckstelle ohne weitere Untersuchungen, z.B. destruktive Methoden, gewagt werden können. Die Interpretation von Anomalien in Tunnels wird immer problematisch sein, z.B. um zwischen einer Leckstelle, einem inhomogenen Beton, einem wassergesättigten Beton, einer abrupten Änderungen in der Betonstärke oder unterschiedlichen Kontaktbedingungen zwischen Betonausbau und Baugrund zu unterscheiden.

## **7. Schlüsselwörter**

Deutsch: Zerstörungsfreie Prüfung, Infrarotthermographie, Tunnelunterhalt

English: nondestructive testing, nondestructive evaluation, infrared thermography, tunnel maintenance

## 8. Literaturverzeichnis

- <sup>1</sup> Weil, Gary J., Infrared Thermographic Techniques; Chapter 15, Handbook on Non-destructive Testing of Concrete, Second Edition, 2004. CRC Press
- <sup>2</sup> Thermal scanning probes tunnel linings; Railway Gazette International, October 1993, Vol.149 No.10, p. 708
- <sup>3</sup> Friebel, W.-D.; Krieger, J.; Qualitätssicherung und Zustandserfassung von Strassentunneln mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren; Tunnel 8/2001; S. 36-46
- <sup>4</sup> Maldague, Xavier P. V., Theory and Practice of Infrared Thermography for Nondestructive Testing, New York, John Wiley & Sons, 2001
- <sup>5</sup> Schindel, Bernd, Thermography in der Theorie und Praxis, Handbuch im Web, 2004, [www.ebs-thermography.com](http://www.ebs-thermography.com)
- <sup>6</sup> Viridis, Phillippe, Thermographische Messtechnik, Temperaturmessung von Oberflächen, Schweizer Ingenieur und Architekt 14, 1983, S. 375
- <sup>7</sup> Wikipedia contributors. Elektromagnetisches Spektrum [Internet]. Wikipedia, The Free Encyclopedia; May 2005. Available from: [http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches\\_Spektrum](http://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum)
- <sup>8</sup> R. Arndt, Ch. Maierhofer, M. Röllig, F. Weritz, H. Wiggenhauser, Ortung von Putzablösungen auf Beton und Mauerwerk mit der Puls-Phasen-Thermographie, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin, DACH - Jahrestagung 2004 Salzburg

## 9. Anhänge

Anhang A – Zusammenfassung der Messresultate

ANHANG A - Zusammenfassung der Messresultate

ERSTUNTERSUCHUNG	BAUWERKSINFORMATION							AUFNAHME									ERGEBNIS		
	Baumethode	Länge [m]	Höhe [m.ü.M.]	Geologie F - Fels Fü - Füllmaterial L - Lockergestein	Abdichtung	Stärke Beton-Innenschale [cm]	Ausbau	Datum	Wassereintrittsstellen FK 0 - trocken FK 1 - feucht FK 2 - nass FK 3 - sehr nass	Zeit	Temperatur [C°]				Feuchtigkeit [%]	Wind [m/s]	Temperatur-anomalie detektiert?	Form	
											Aussen-Temp.	Tunnel - Luft	Tunnel Gewölbe	Wasser				punktuell (Leckstelle)	flächig (gesättigter od. inhomogener Beton)
Arisdorf 1 - Lüftungskanal Feld 106/107	bergmännisch	1402	400	F	ja	30	2-schalig	24.04.05	FK3	15:40	10.0	10.0	12.0	12.0	60.0	0.0	ja	-	ja
Arisdorf 2 - Fahrraum, Feld 92	bergmännisch	1402	400	F	ja	30	2-schalig	24.04.05	FK1	16:20	10.0	10.0	14.9	15.5	50.0	0.0	nein	-	-
Arisdorf 3 - Fahrraum, Feld 103	bergmännisch	1402	400	F	ja	30	2-schalig	24.04.05	FK2	16:50	10.0	10.0	12.5	11.9	50.0	0.0	ja	ja	nein
Bärenburg 1 - Fuge 110 Fahrspur S - N	bergmännisch	998	1120	F	ja	28	2-schalig	09.05.05	FK0	22:15	11.0	5.0	9.7	-	30.0	0.9	nein	-	-
Bärenburg 2 - Fuge 109 Fahrspur S - N	bergmännisch	998	1120	F	ja	28	2-schalig	09.05.05	FK0	22:30	11.0	5.0	9.2	-	30.0	0.9	nein	-	-
Benabbia 1 - Fahrspur S-N, Fuge 14, km 27.6	bergmännisch	192	790	F	ja	30	2-schalig	10.05.05	FK3	00:15	11.0	11.0	16.0	11.0	50.0	0.6	nein	-	-
Benabbia 2 - Fahrspur S-N, Fuge 15, km 27.6	bergmännisch	192	790	F	ja	30	2-schalig	10.05.05	FK2	00:30	11.0	11.0	14.0	11.4	30.0	0.6	nein	-	-
Benabbia 3 - Fahrspur N-S, Fuge 15, km 27.6	bergmännisch	192	790	F	ja	30	2-schalig	10.05.05	FK2	00:35	11.0	11.0	13.8	11.4	30.0	0.6	nein	-	-
Benabbia 4 - Fahrspur N-S, Fuge 14, km 26.7	bergmännisch	192	790	F	ja	30	2-schalig	10.05.05	FK1	00:45	11.0	11.0	14.0	11.0	30.0	0.6	nein	-	-
Blatt 1 - Normalspur Zürich - Chur	bergmännisch	510	530	F	ja	25	2-schalig	10.05.05	FK 1	07:30	8.0	7.0	6.0	5.0	80.0	1.0 - 1.5	nein	-	-
Blatt 2 - Überholspur Zürich - Chur	bergmännisch	510	530	F	ja	25	2-schalig	10.05.05	FK 1	08:30	8.0	6.0	6.0	5.0	80.0	3.0	nein	-	-
Blatt 3 - Überholspur Zürich - Chur	bergmännisch	510	530	F	ja	25	2-schalig	10.05.05	FK 1	08:30	8.0	6.0	6.0	5.0	80.0	3.0	nein	-	-
Blatt 4 - Überholspur Zürich - Chur	bergmännisch	510	530	F	ja	25	2-schalig	10.05.05	FK 1	08:30	8.0	8.0	6.0	4.5	80.0	2.0	nein	-	-
Blatt 5 - Normalspur Chur - Zürich	bergmännisch	510	530	F	ja	25	2-schalig	10.05.05	FK 2	09:30	8.0	8.0	6.0	4.5	80.0	2.2	nein	-	-
Blatt 6 - Überholspur Chur - Zürich	bergmännisch	510	530	F	ja	25	2-schalig	10.05.05	FK 2	09:30	8.0	8.0	8.0	5.0	80.0	2.2	nein	-	-
Blatt 7 - Überholspur Chur - Zürich	bergmännisch	510	530	F	ja	25	2-schalig	10.05.05	FK 2	10:00	8.0	9.0	6.0	4.5	80.0	2.5	nein	-	-
Furen 1 - Wassereintritt beim unteren Portal	bergmännisch	120	1120	F	ja	30	2-schalig	12.04.05	FK0	09:30	-1.5	-1.5	3.0	-	30.0	0.0	ja	nein	ja
Furen 2 - Wassereintritt in der Tunnelmitte	bergmännisch	120	1120	F	ja	30	2-schalig	12.04.05	FK0	09:45	-1.5	-1.5	3.0	-	30.0	0.0	nein	-	-
Furen 3 - Übergang Tunnel / Galerie	bergmännisch	120	1120	F	ja	30	2-schalig	12.04.05	FK1	00:50	-1.5	-1.5	3.0	3.0	30.0	0.0	nein	-	-
Grenchenwiti 1 - Block 62	Tagbau	1790	440	Fü	ja	45	1-schalig	16.06.05	FK2	10:45	21.0	16.0	15.5	14.0	50.0	0.0	nein	-	-
Grenchenwiti 2 - Block 61 - 63	Tagbau	1790	440	Fü	ja	45	1-schalig	17.06.05	FK1	11:00	21.0	16.0	15.5	14.5	50.0	0.0	nein	-	-
Milchbuck 2 - Lüftungskanal Wassereintrittsstelle 1	bergmännisch	1822	450	F / L	ja	35	2-schalig	04.04.05	FK 3	21:30	20.0	18.0	15.0	12.0	28.0	0.0	nein	-	-
Milchbuck 2 - Lüftungskanal Wassereintrittsstelle 2	bergmännisch	1822	450	F / L	ja	35	2-schalig	05.04.05	FK 2	21:00	20.0	18.0	15.0	12.0	28.0	0.0	nein	-	-
Naxberg 1 - Ausfahrspur Andermatt, Fuge 184	bergmännisch	290	1110	F	ja	30	2-schalig	10.05.05	FK2	21:15	3.5	6.5	6.5	4.2	80.0	1.0	nein	-	-
Naxberg 2 - Ausfahrspur Andermatt, Fuge 181	bergmännisch	290	1110	F	ja	30	2-schalig	10.05.05	FK2	21:30	3.5	6.5	5.2	4.2	80.0	1.0	nein	-	-
Naxberg 3 - Überholspur, Fuge 184	bergmännisch	290	1110	F	ja	30	2-schalig	10.05.05	FK1	21:45	3.5	6.5	7.5	6.5	80.0	1.0	nein	-	-
Stigem 1 - DF6	bergmännisch	201	550	F	ja	30	2-schalig	26.04.05	FK0	13:30	14.0	11.0	7.0	-	60.0	0.0	nein	-	-
Stigem 2 - DF 21	bergmännisch	201	550	F	ja	30	2-schalig	26.04.05	FK0	13:45	14.0	11.0	7.0	-	60.0	0.0	nein	-	-
Stigem 3 - DF 24	bergmännisch	201	550	F	ja	30	2-schalig	26.04.05	FK1	13:50	14.0	11.0	9.0	9.0	60.0	0.0	ja	nein	ja
Waldheim 1 - Dilatationsfuge 11	bergmännisch	197	520	F	ja	30	2-schalig	26.04.05	FK0	14:35	15.0	12.0	9.0	-	60.0	0.0	nein	-	-
Waldheim 2 - Gewölbe 14	bergmännisch	197	520	F	ja	30	2-schalig	26.04.05	FK1	14:50	15.0	12.0	8.5	8.0	60.0	0.0	nein	-	-
Waldheim 3 - Gewölbe 25	bergmännisch	197	520	F	ja	30	2-schalig	26.04.05	FK0	15:00	15.0	12.0	9.0	-	60.0	0.0	nein	-	-

FOLGEUNTERSUCHUNG	BAUWERKSINFORMATION							AUFNAHME									ERGEBNIS		
	Vortriebsmethode	Länge [m]	Höhe [m.ü.M.]	Geologie F - Fels Fü - Füllmaterial L - Lockergestein	Abdichtung	Stärke Beton-Innenschale [cm]	Ausbau	Datum	Wassereintrittsstellen FK 0 - trocken FK 1 - feucht FK 2 - nass FK 3 - sehr nass	Zeit	Temperatur [C°]				Feuchtigkeit [%]	Wind [m/s]	Temperatur-anomalie detektiert?	Form	
											Aussen-Temp.	Tunnel - Luft	Tunnel Gewölbe	Wasser				punktuell (Leckstelle)	flächig (gesättigter od. inhomogener Beton)
Arisdorf 1 - Lüftungskanal Feld 106/107	bergmännisch	1402	400	F	F	30	2-schalig	18.11.05	FK0	11:15	2.0	8.0	8.0	-	30.0	0.0	ja	ja	ja
Milchbuck 2 - Lüftungskanal Wassereintrittsstelle 1	bergmännisch	1822	450	F / L	ja	35	2-schalig	18.11.05	FK3	18:00	-1.0	6.0	12.0	9.0	50.0	0.2	ja	nein	ja