ÖSTERREICHISCHE VERKEHRSWISSENSCHAFTLICHE GESELLSCHAFT

ÖSTERREICHISCHE FORSCHUNGSGESELLSCHAFT STRASSE • SCHIENE • VERKEHR

Wir finden neue Wege.

Zerstörungsfreie Detektion

Wie neue Sensoren einen Beitrag leisten können

Alfred Strauss, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Department für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur

Basis FFG VIF Projekte
„Anlageninspektion und RISK-MONitoring mit Hochleistungsdrohnen (UAS/UAV) (RISKMO)“ „Optimierte Werkstoffnachbehandlung für eine verbesserte strukturelle Performance (OPTINB)“

Partnern
BLADESCAPE, Büro Hoffmann, IQ Soft
SMART Minerals

Sensoren - Zerstörungsfreie Sensoren

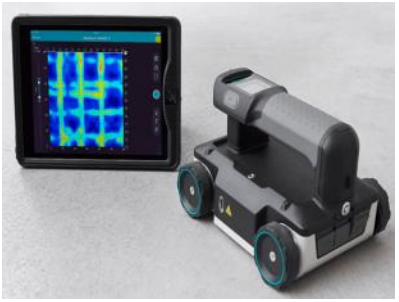
Thermalkamera:

FLIR E60bx

FLIR Vue Pro 640R

Untersuchung von Testkörpern mit Wasserdurchfluss/-einschluss etc.

Georadar:



Proceq GPR Live

Untersuchung von Testkörpern mit Bewehrung, Hohlstellen und Delamination

Photogrammetrie

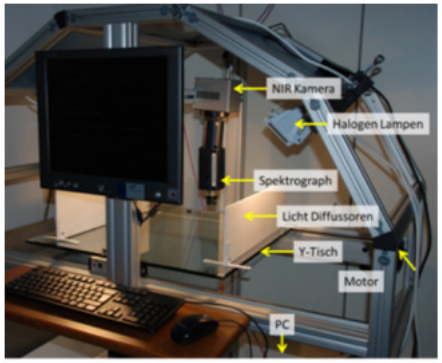
Permeabilität-tester torrent

Ultraschallmessung

Hyperspektralkamera:

Zeilenkamerasystem bestehend aus einer Xenics NIR Kamera, verbunden mit einem Specim N17E Spectrograph

Untersuchung von Testkörpern Chlorideintrag



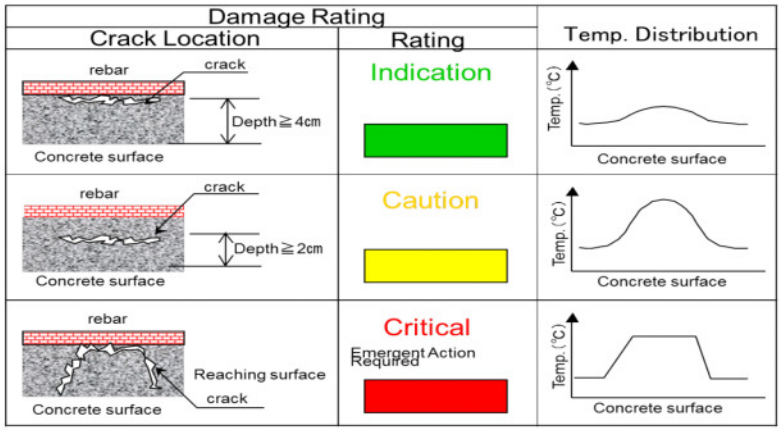
Gassensor:

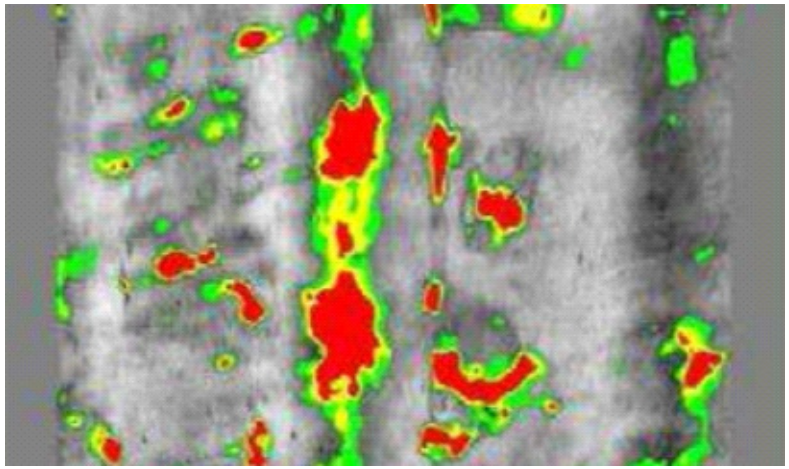
Zunächst erfolgt eine *Spurenelementanalyse mittels Pads*. Je nach Ergebnis der Analyse wird der Einsatz von Gassensoren erwogen.

Thermalkameras

FLIR E60bx	
Spektralbereich:	7,5-13,0 µm
Sensorauflösung:	320x240 Pixel
Sichtfeld:	25*19°
Mindestabstand:	0,4 m
Thermische Empfindlichkeit:	<0,045°C
Abmessungen:	246 × 97 ×184 mm
Gewicht:	825 g
Anwendung:	Handheld

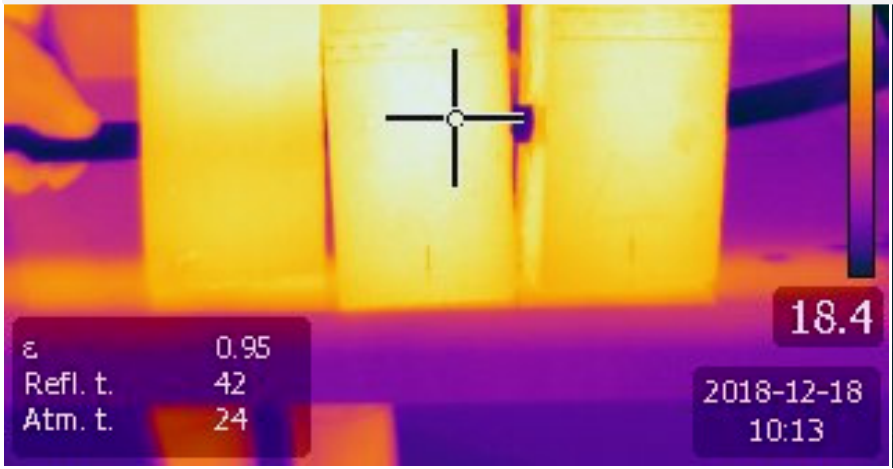
FLIR Vue Pro 640 R	
Spektralbereich:	7,5-13,5 µm
Sensorauflösung:	640x512 Pixel
Sichtfeld:	32*26°
Mindestabstand:	1,0 m
Thermische Empfindlichkeit:	<0,05°C
Abmessungen:	57 × 45 × 45 mm
Gewicht:	115 g
Anwendung:	Drohnen

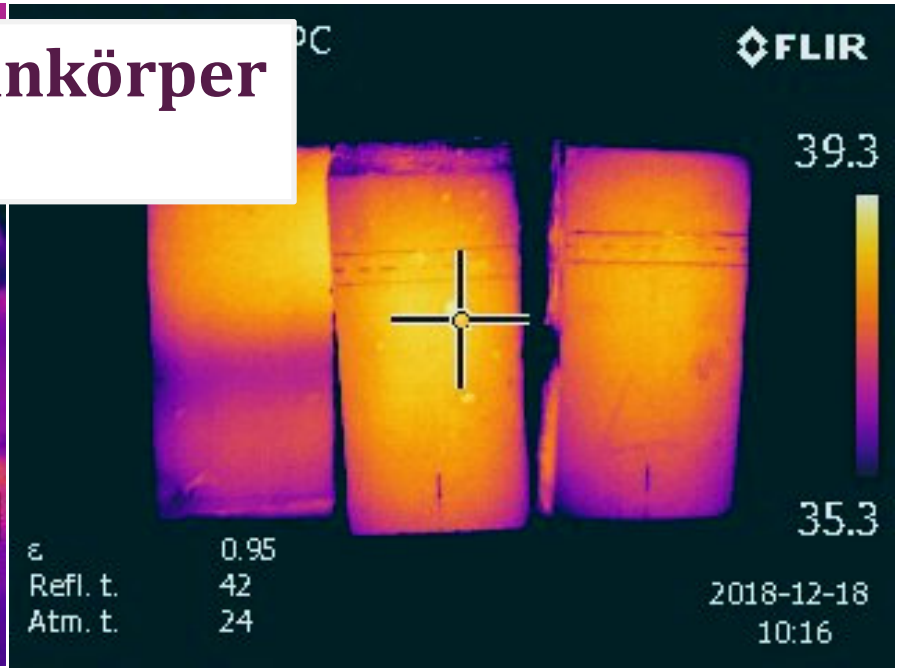


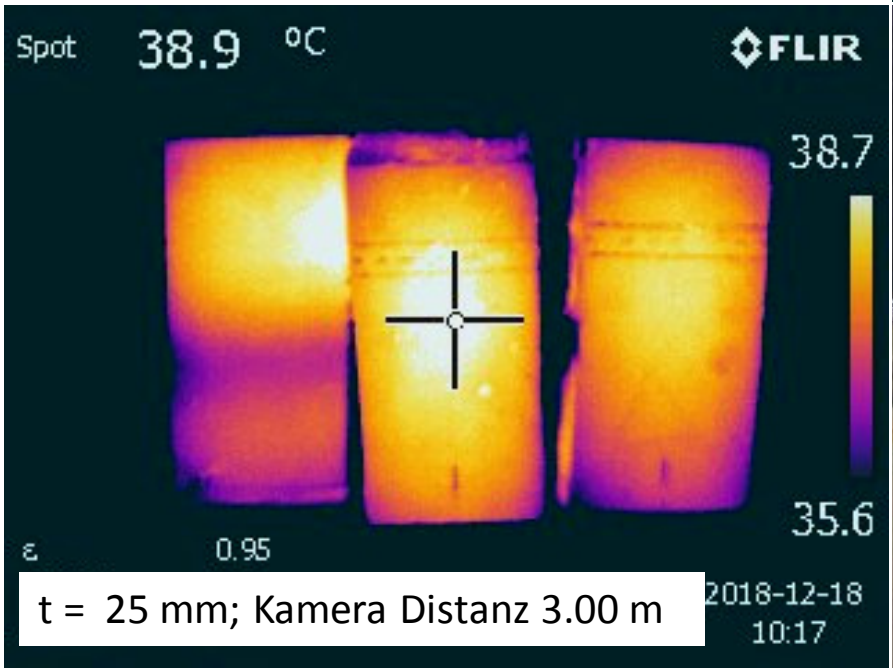


Thermografische Aufnahmen einer Brückenfläche mit Schadensdetektion und Schadensklassifizierung (aus NEXCO-WEST (2014a); *Comparison of Infrared Cameras for Concrete Bridge Deck Scanning: - Vol.1 Laboratory Test;* Research Report Washington; USA)

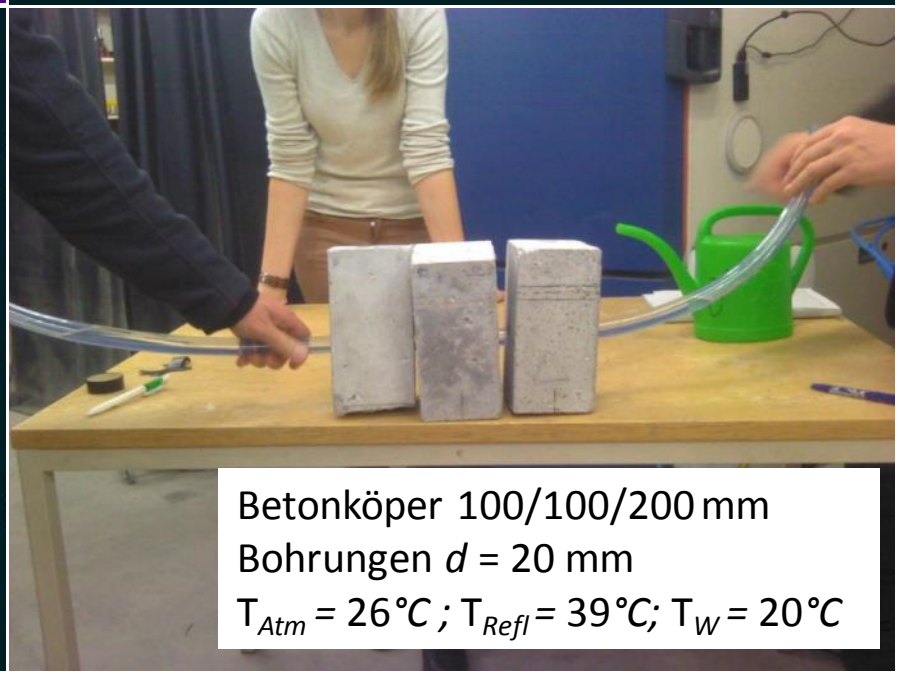
Versuchsprogramm #1 Kleinkörper Thermalkamera







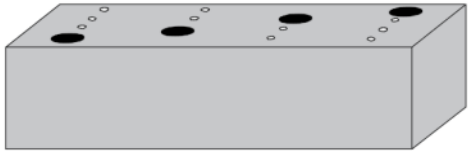
t = 25 mm; Kamera Distanz 3.00 m

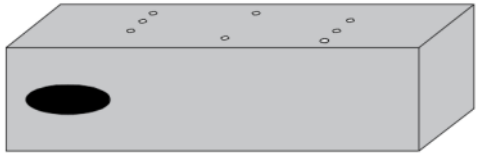


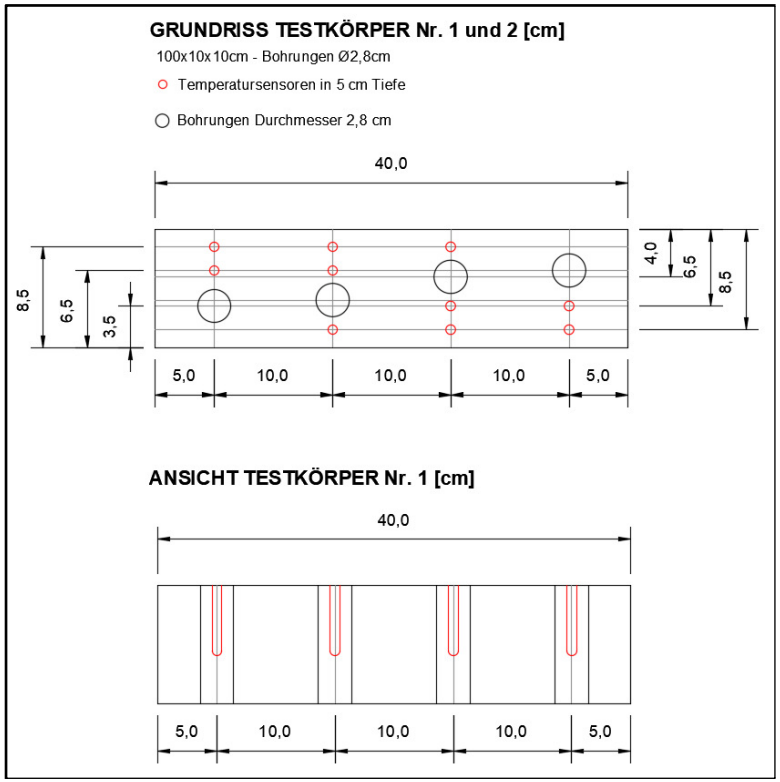
Betonköper 100/100/200 mm
Bohrungen d = 20 mm
T_{Atm} = 26 °C ; T_{Refl} = 39 °C; T_W = 20 °C

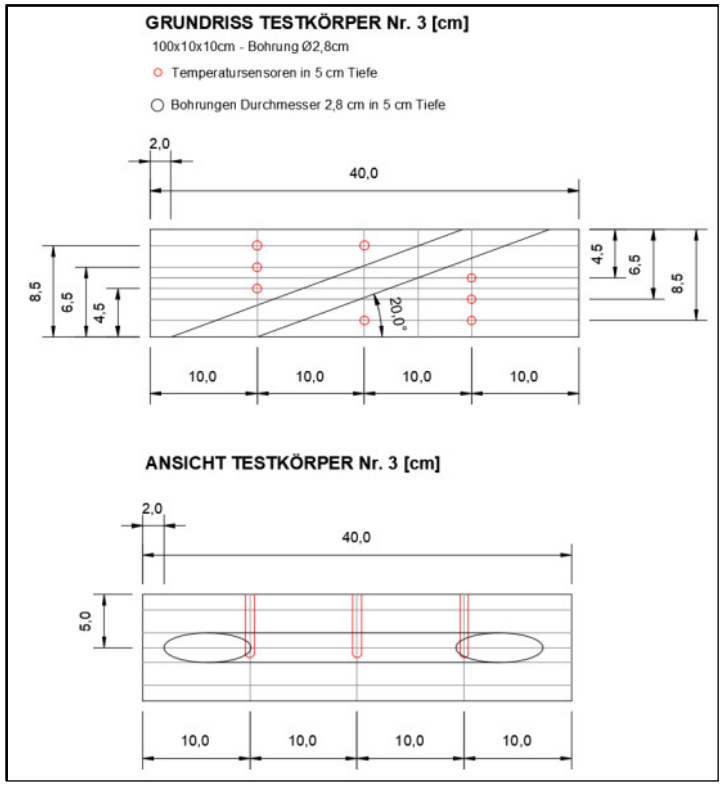
Versuchsprogramm #1 Kleinkörper Thermalkamera

4 Testkörper mit Bohrungen, Abmessungen 400/10/10mm:



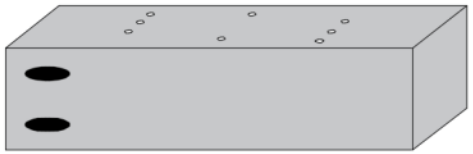


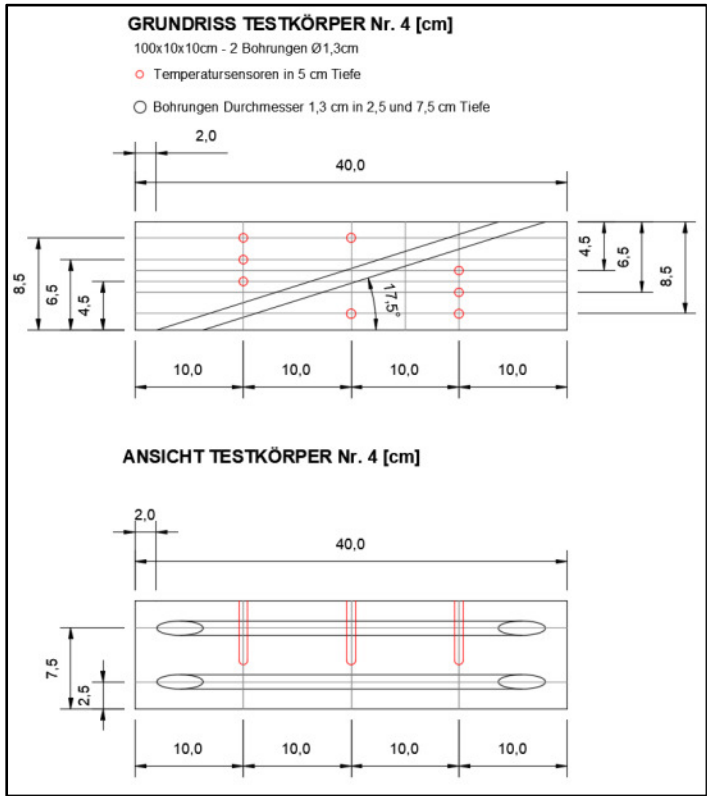


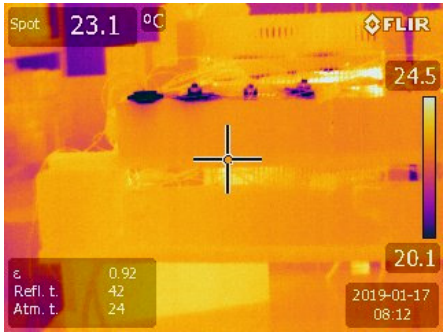


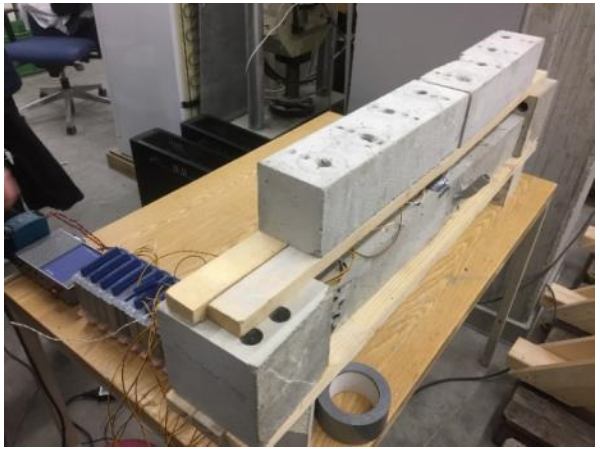
Versuchsprogramm #1 Kleinkörper Thermalkamera

4 Testkörper mit Bohrungen, Abmessungen 400/10/10mm:

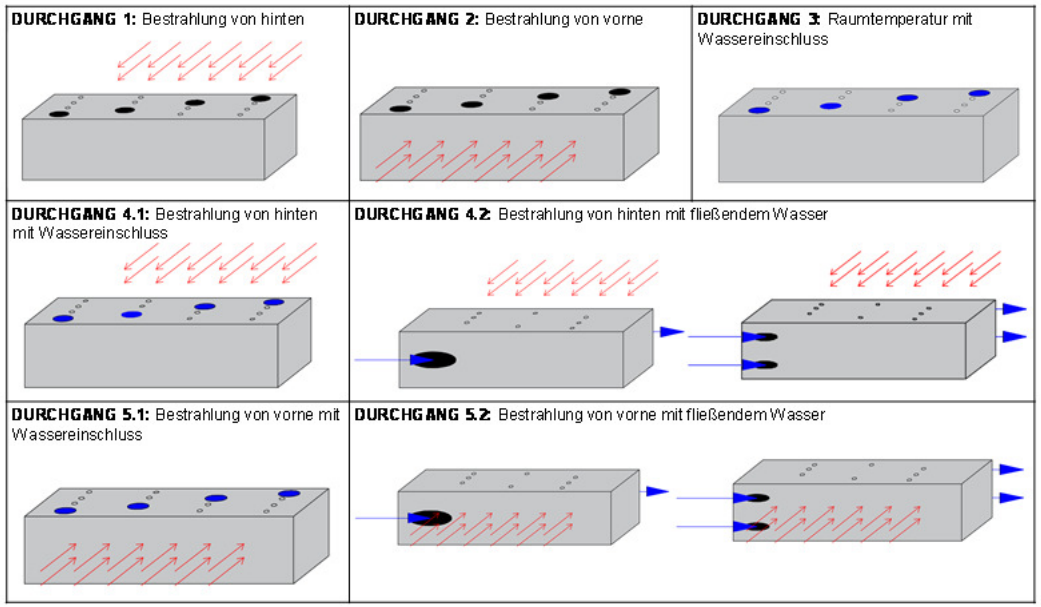








Messdurchgänge (Messungen aus den Abständen 1, 2, 3, 5, und 7 m):



Versuchsprogramm #1 Kleinkörper Thermalkamera

4 Testkörper mit Bohrungen, Abmessungen 400/10/10mm:

DURCHGANG 1

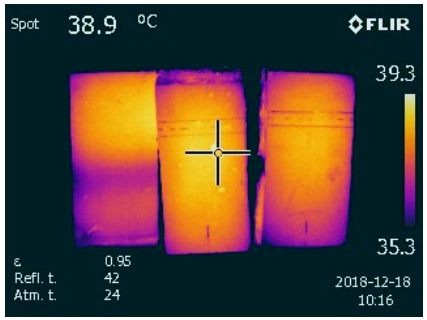
Detektionsgenauigkeit [mm] bei Bestrahlung von hinten

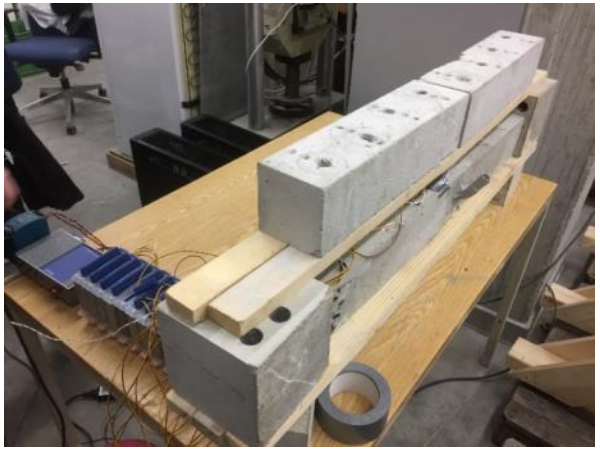
ΔT=30 K, 25/55°	Abstände vom Versuchskörper [m]				
Kamera	**1**	**2**	**3**	**5**	**7**
FLIR E60bx	5*	8*	10*	20*	25*
FLIR Vue Pro 640 R	6*	9*	11*	21*	26*

ΔT=20 K, 25/45°	Abstände vom Versuchskörper [m]				
Kamera	**1**	**2**	**3**	**5**	**7**
FLIR E60bx	6*	9*	11*	21*	26*
FLIR Vue Pro 640 R	7*	10*	12*	22*	27*

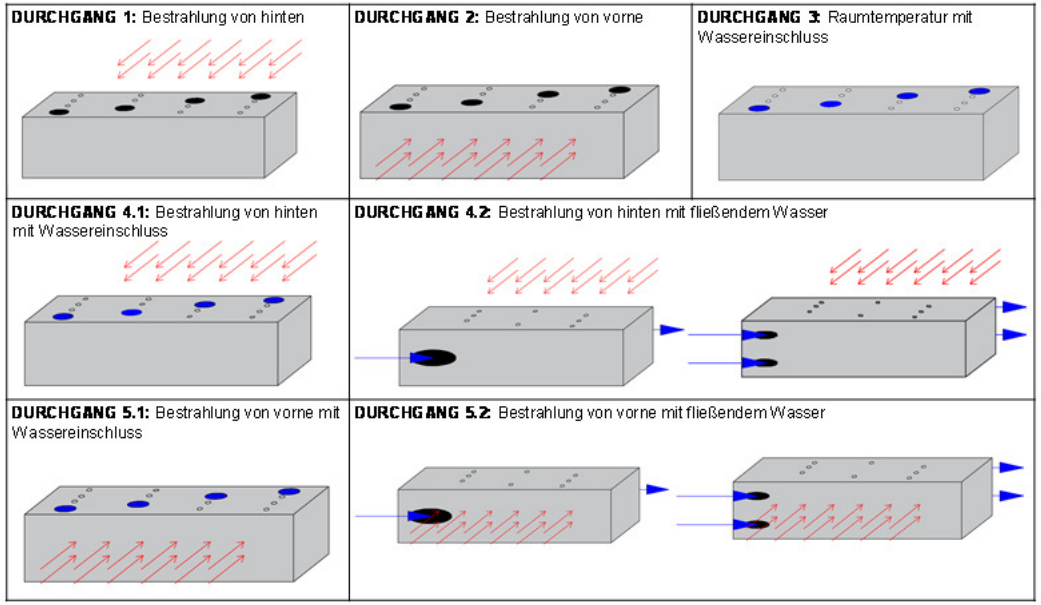
ΔT=10 K, 25/35°	Abstände vom Versuchskörper [m]				
Kamera	**1**	**2**	**3**	**5**	**7**
FLIR E60bx	7*	10*	12*	22*	27*
FLIR Vue Pro 640 R	8*	11*	13*	23*	28*

ΔT=5 K, 25/30°	Abstände vom Versuchskörper [m]				
Kamera	**1**	**2**	**3**	**5**	**7**
FLIR E60bx	8*	11*	13*	23*	28*
FLIR Vue Pro 640 R	9*	12*	14*	24*	29*





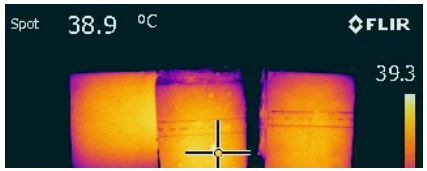
Messdurchgänge (Messungen aus den Abständen 1, 2, 3, 5, und 7 m):

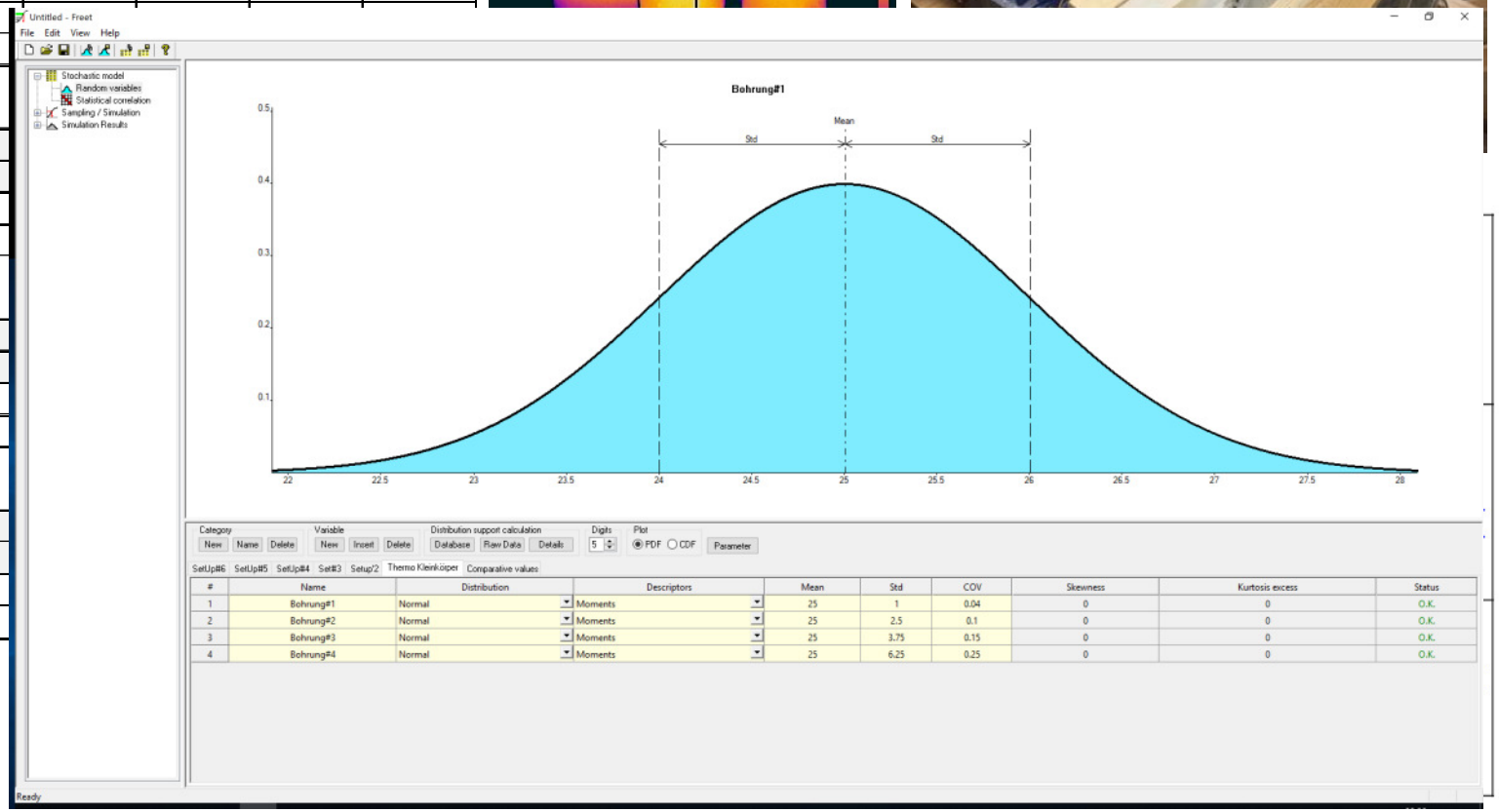


Versuchsprogramm #1 Kleinkörper Thermalkamera

4 Testkörper mit Bohrungen, Abmessungen 400/10/10mm:

DURCHGANG 1					
Detektionsgenauigkeit [mm] bei Bestrahlung von hinten					
ΔT=30 K, 25/55°	Abstände vom Versuchskörper [m]				
Kamera	1	2	3	5	7
FLIR E60bx	5*				
FLIR Vue Pro 640 R	6*				
ΔT=20 K, 25/45°					
Kamera	1				
FLIR E60bx	6*				
FLIR Vue Pro 640 R	7*				
ΔT=10 K, 25/35°					
Kamera	1				
FLIR E60bx	7*				
FLIR Vue Pro 640 R	8*				
ΔT=5 K, 25/30°					
Kamera	1				
FLIR E60bx	8*				
FLIR Vue Pro 640 R	9*				





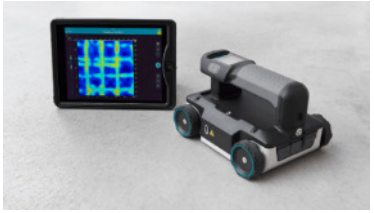
Laborversuche

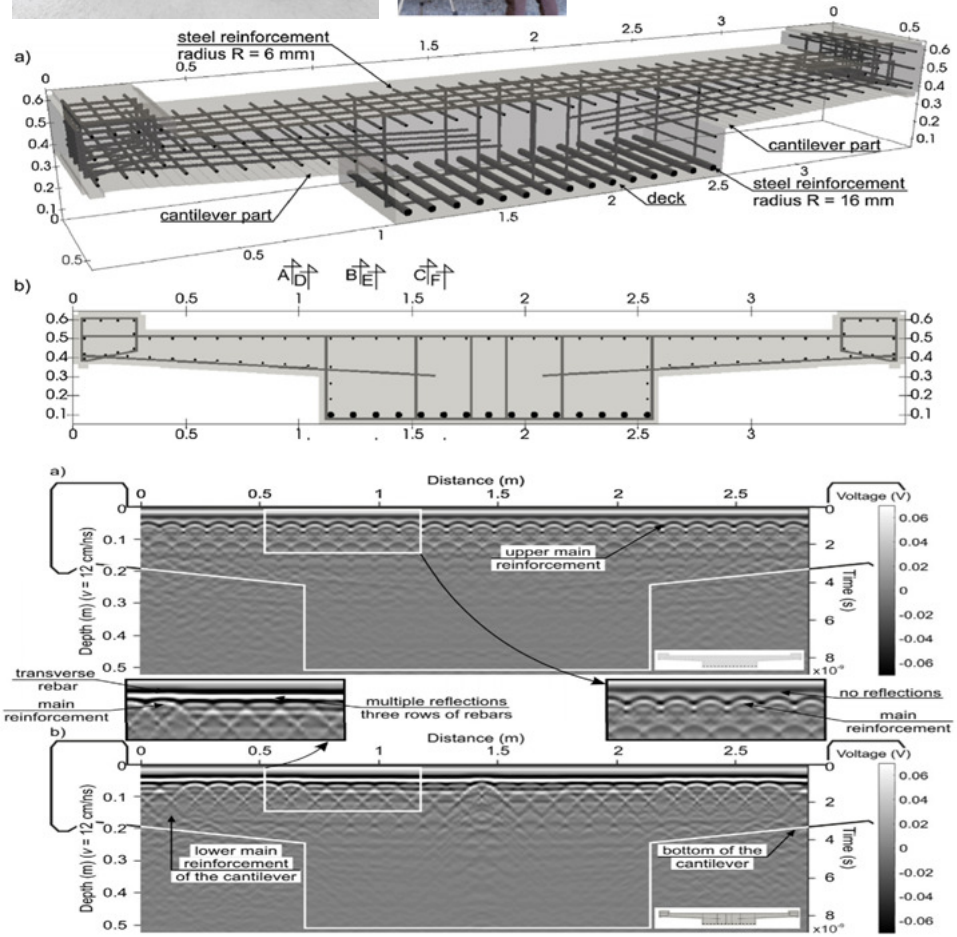
Georadar-Allgemein

Messprinzip: Das Verfahren beruht auf der Aussendung elektromagnetischer Wellen in das zu untersuchende Bauteil. Die Wellen werden an Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlichen Eigenschaften reflektiert. Die Reflexionen werden durch eine Empfangsantenne aufgenommenen und als Funktion der Zeit digital aufgezeichnet.

Schäden: Bewehrungslage, Betondeckung, Hohlräume, Risse, Betondichte, Porosität, Ortung von Spanngliedern, Feuchtstellen, Ortung von Ankern in Betonfahrbahnen

Proceq GPR Live	
Messprinzip:	SFCW-GPR (Stepped-Frequency Continuous-Wave)
Frequenzbereich:	0,2 bis 4,0 GHz
Max. Tiefenbereich:	70 cm bei feuchtem Beton
Betriebstemperatur:	-10 bis 50 °C
Abmessungen:	220 x 180 x 143 mm
Gewicht:	2 kg
Anwendung:	Handheld





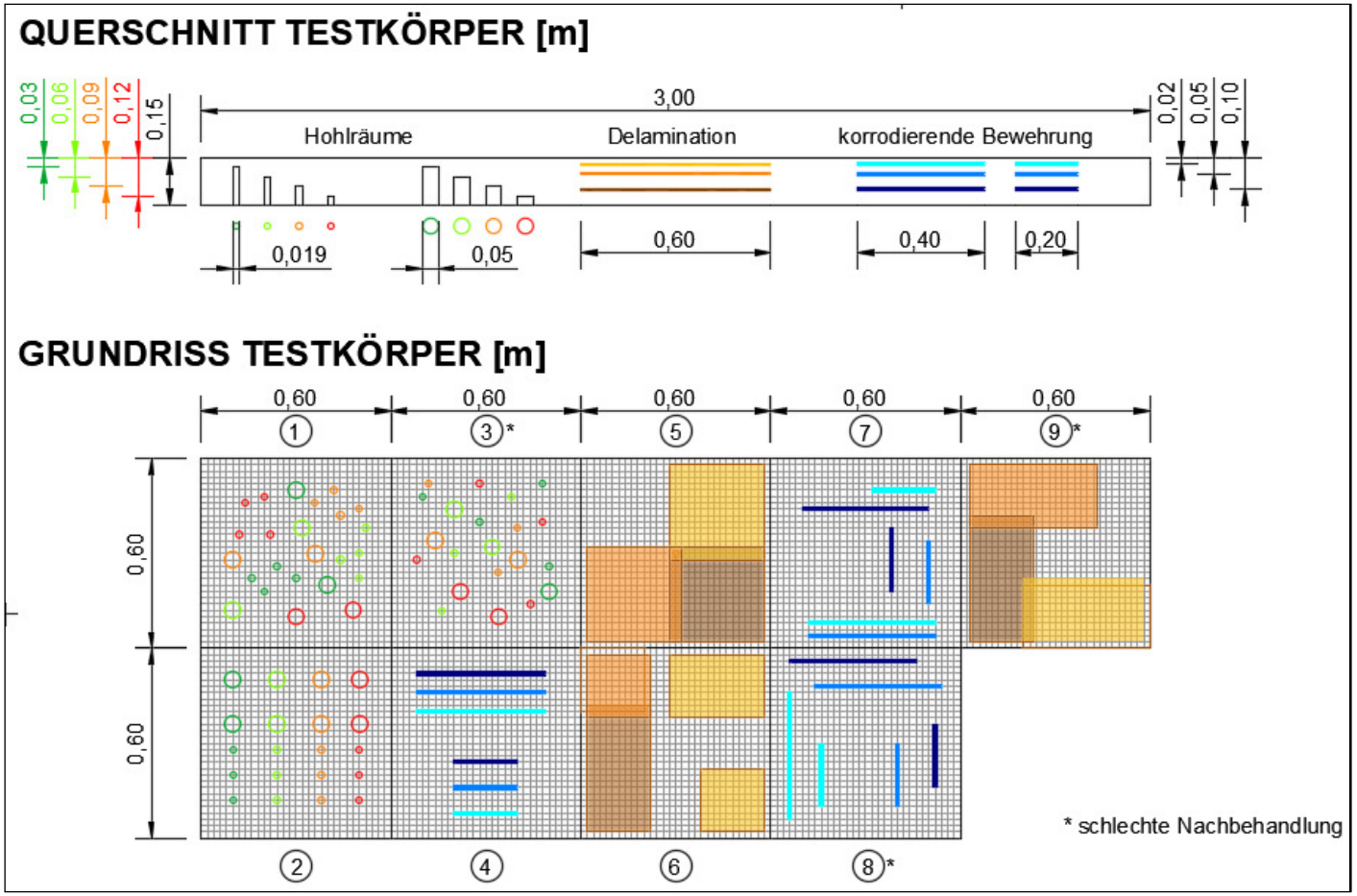
Bestimmung der Bewehrungslage mittels 3D – finite Zeitdifferenzmodellierung des Georadars (aus LACHOWICZ, J. & & RUCKA, M. (2018). *3-D finite-difference time-domain modelling of ground penetrating radar for identification of rebars in complex reinforced concrete structures*; Archives of Civil and Mechanical Engineering, 18(4), 1228–1240. doi:10.1016/j.acme.2018.01.010)

Versuchsprogramm #2 Kleinkörper Thermalkamera / Georadar

9 Betonplatten, Abmessungen 600/600/150mm mit unterschiedlichen Schäden:

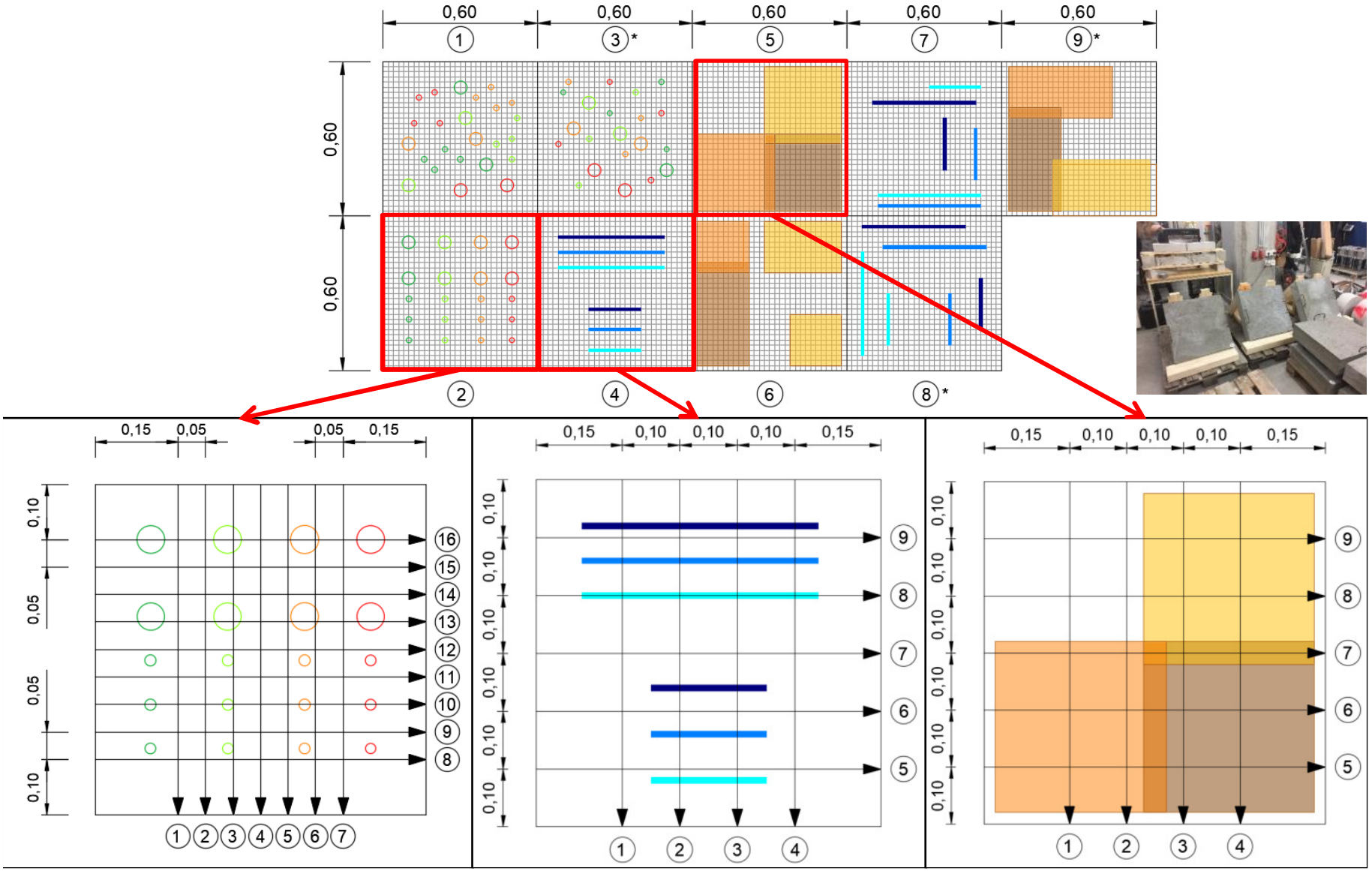
Messdurchgänge (Messungen aus den Abständen 1, 2, 3, 5, und 7 m):

- 1. DURCHGANG: Erhitzen der Platten von hinten
- 2. DURCHGANG: Erhitzen der Platten von vorne
- 3. DURCHGANG: Befeuchtung der Platten
- 4. DURCHGANG: Verschmutzte Oberfläche



Laborversuche

Georadar-Versuchsanordnung



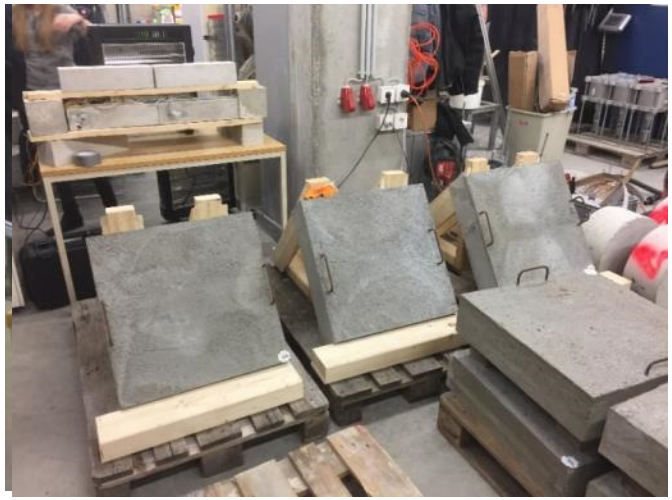
Versuchsprogramm #2 Kleinkörper Thermalkamera / Georadar

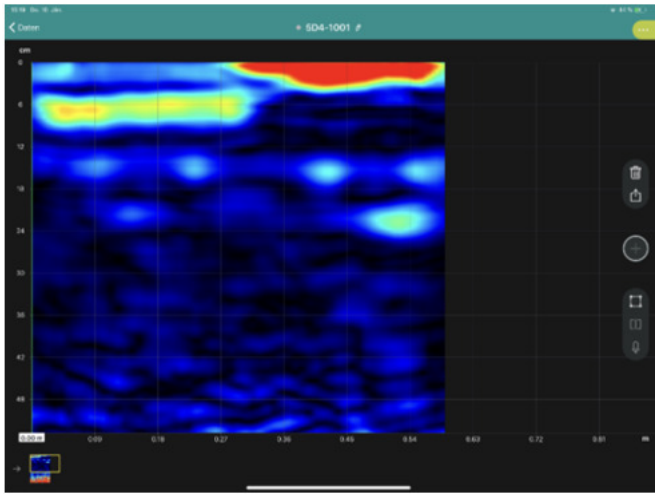
9 Betonplatten, Abmessungen 600/600/150mm mit unterschiedlichen Schäden:

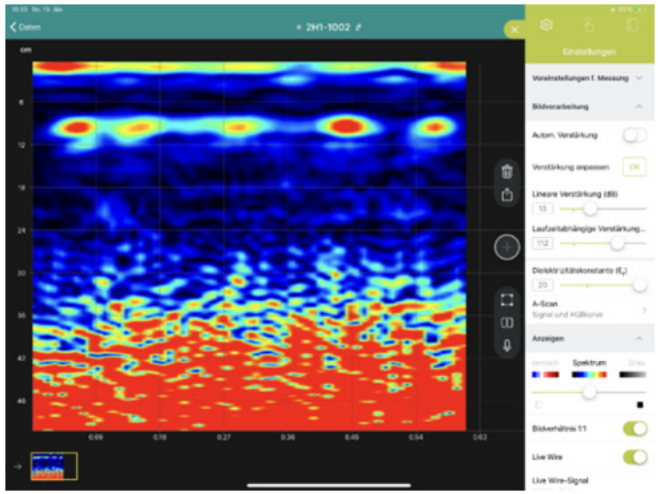
Messdurchgänge (Messungen aus den Abständen 1, 2, 3, 5, und 7 m):

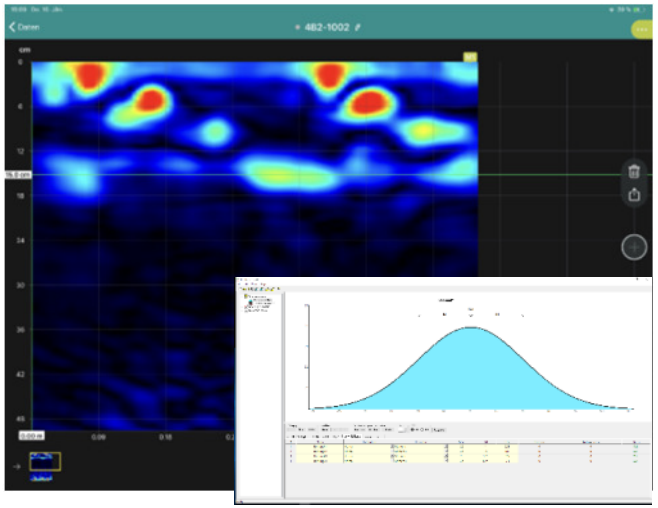
- 1. DURCHGANG: Erhitzen der Platten von hinten
- 2. DURCHGANG: Erhitzen der Platten von vorne
- 3. DURCHGANG: Befeuchtung der Platten
- 4. DURCHGANG: Verschmutzte Oberfläche

Detektionswahr-scheinlichkeiten Nomogramme



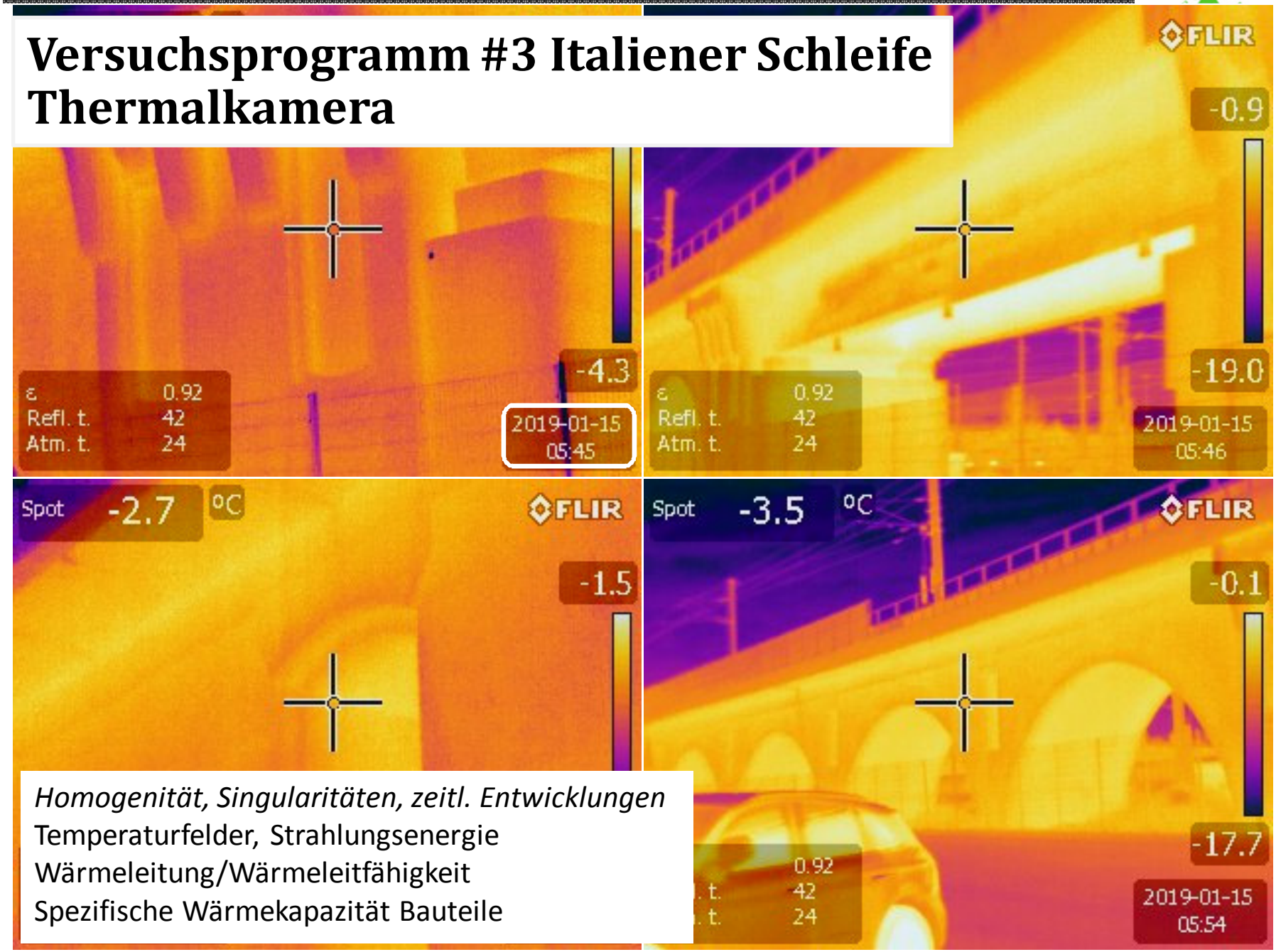






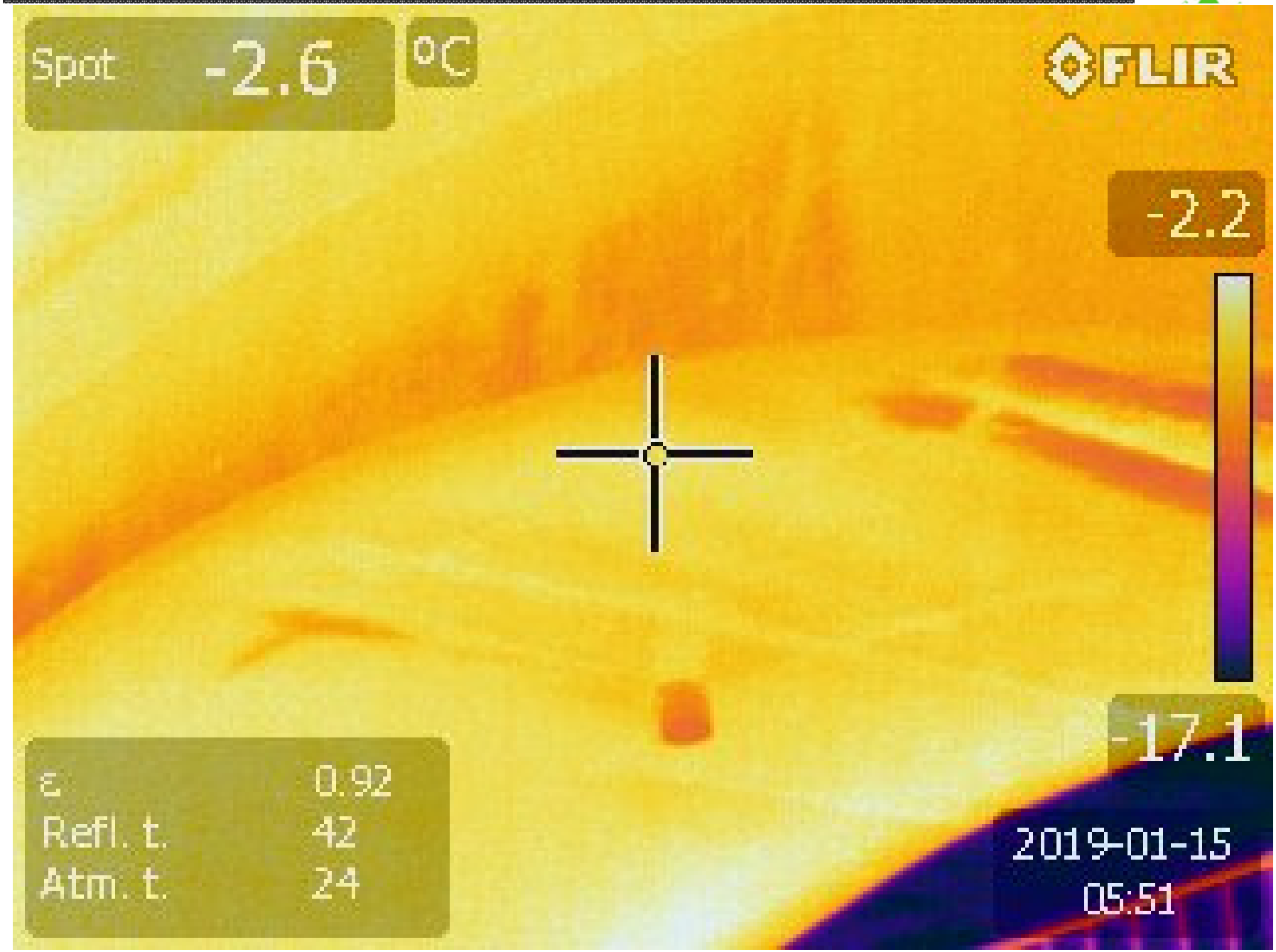
Versuchsprogramm #3 Italiener Schleife Thermalkamera

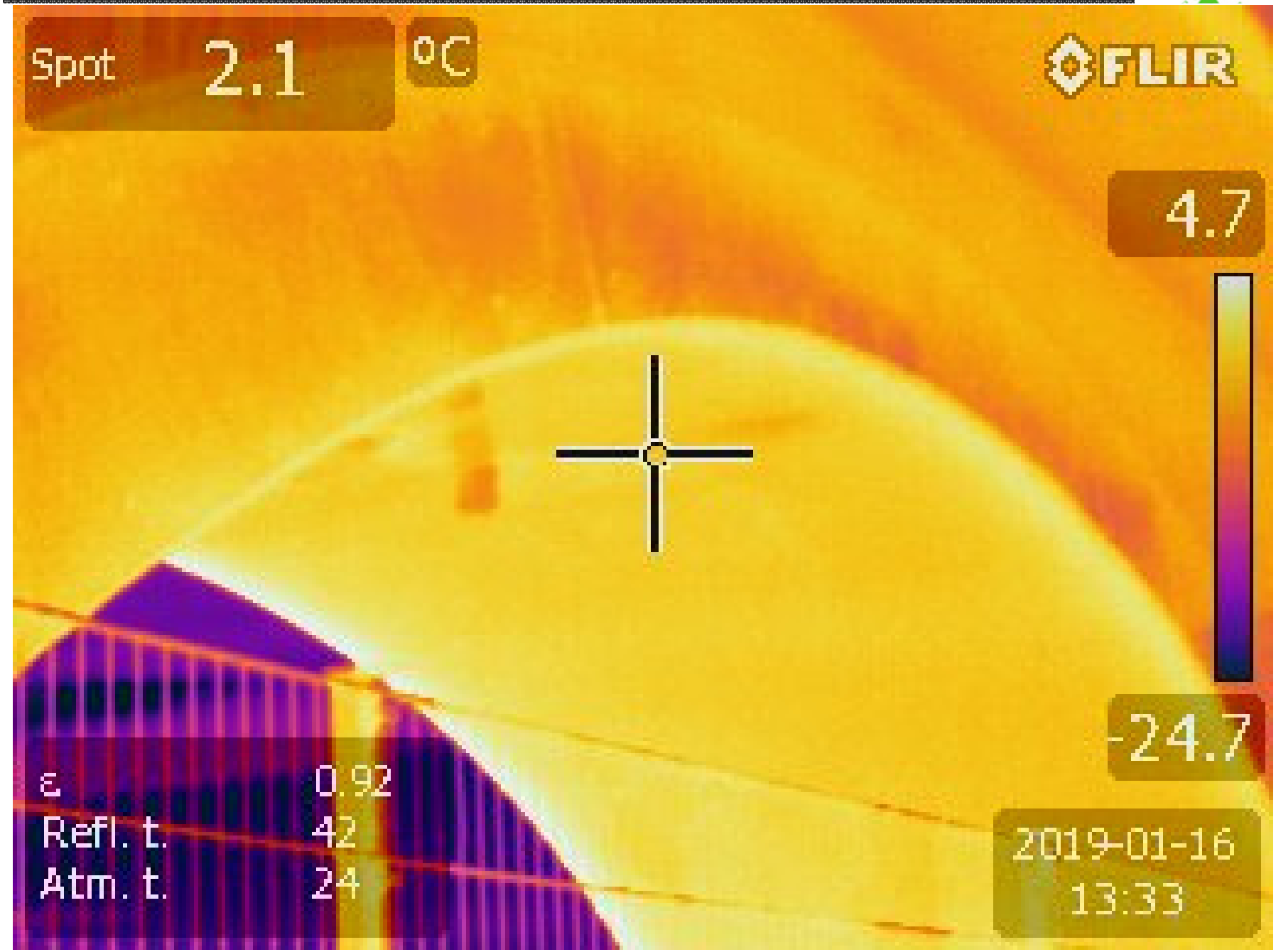
Versuchsprogramm #3 Italiener Schleife Thermalkamera



Homogenität, Singularitäten, zeitl. Entwicklungen
Temperaturfelder, Strahlungsenergie
Wärmeleitung/Wärmeleitfähigkeit
Spezifische Wärmekapazität Bauteile

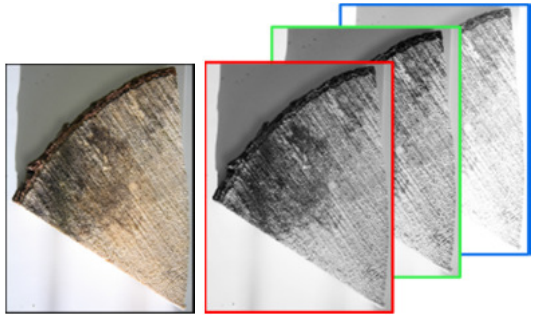
Alfred Strauss, Universität für Bodenkultur

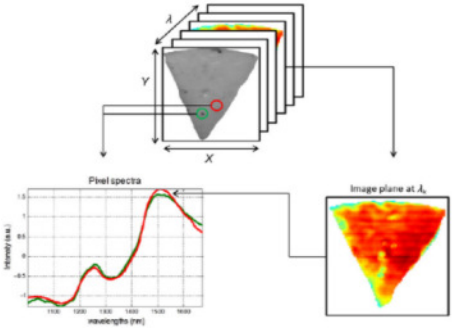

Spot -2.6 °C
FLIR
-2.2
-17.1
ε 0.92
Refl. t. 42
Atm. t. 24
2019-01-15
05:51


Spot 2.1 °C
FLIR
4.7
-24.7
ε 0.92
Refl. t. 42
Atm. t. 24
2019-01-16
13:33

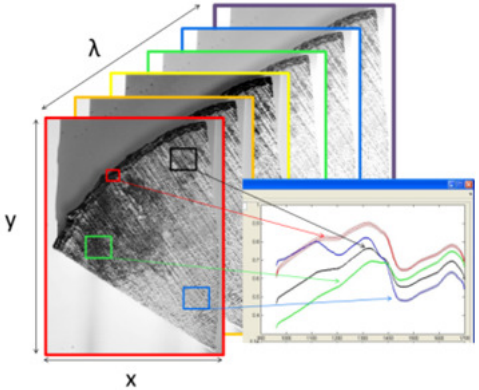
Versuchsprogramm #4 Multi-Hyperspectral Hyperspectral Labor

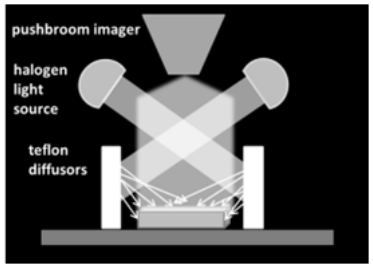
RGB: 3 wavelengths



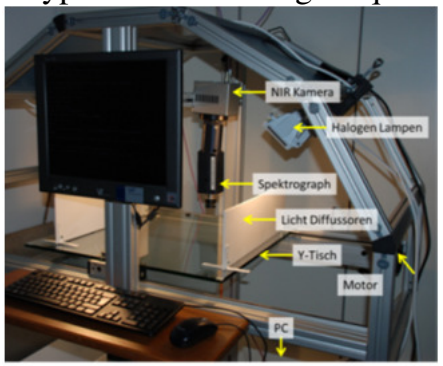


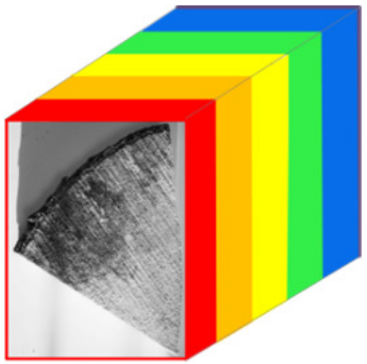
Multi: 4-10 wavelengths

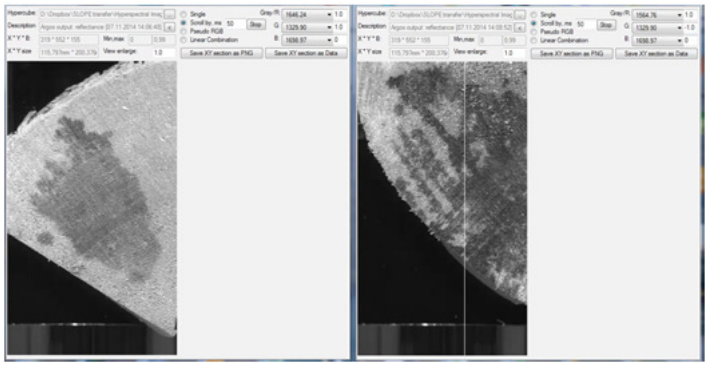




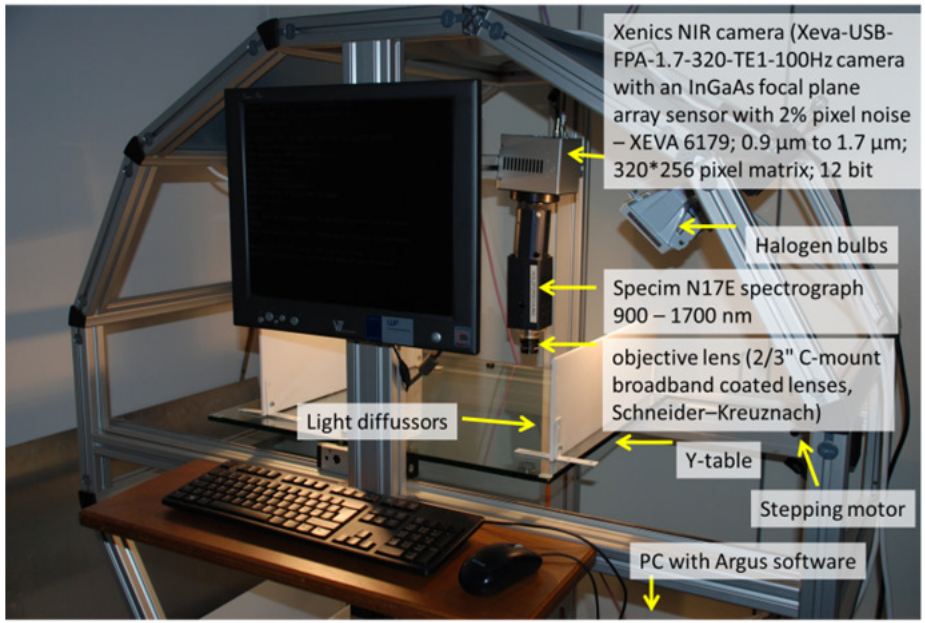
Hyper: 100 wavelengths quasi continous (in nm steps)







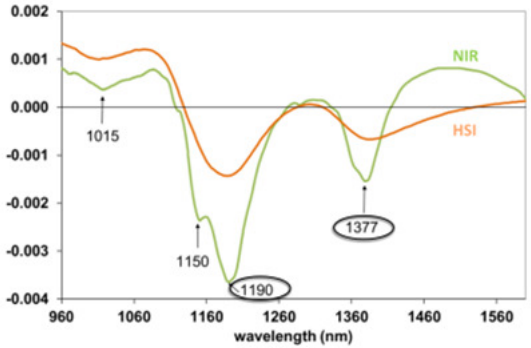
Versuchsprogramm #4 Multi-Hyperspectral Hyperspectral Unit



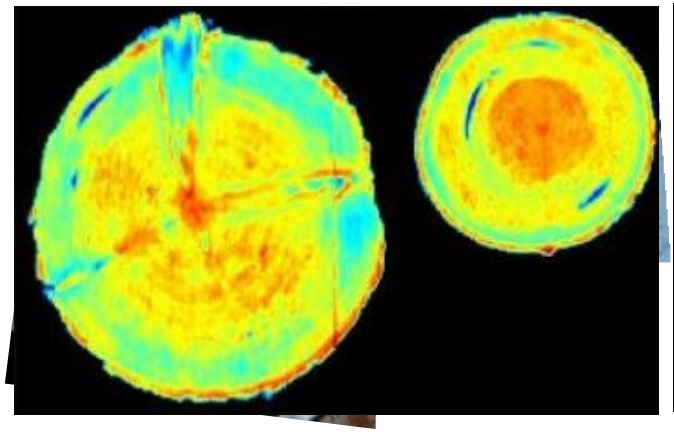
Analyse-Ziele

- Karbonatisierung
- Chlorid Konzentration
- Hydratationsprozessverlä
- Feuchtigkeit
- Betonmikrostruktur
- Char. Zuschlagsstoffe
- Char. Zementstein

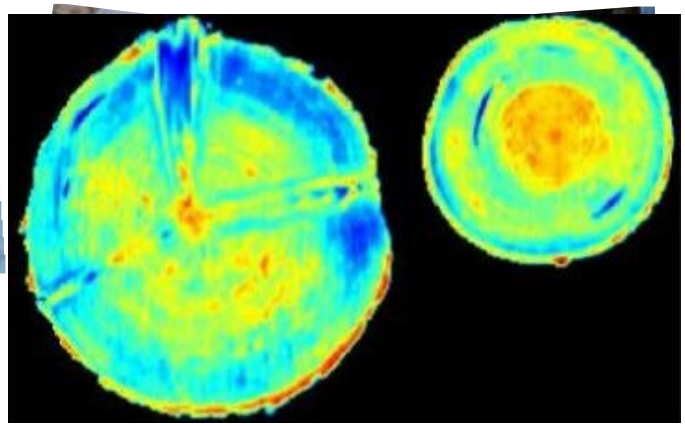
Pre-Tests „Resin Pockets“



1190 nm



1377 nm



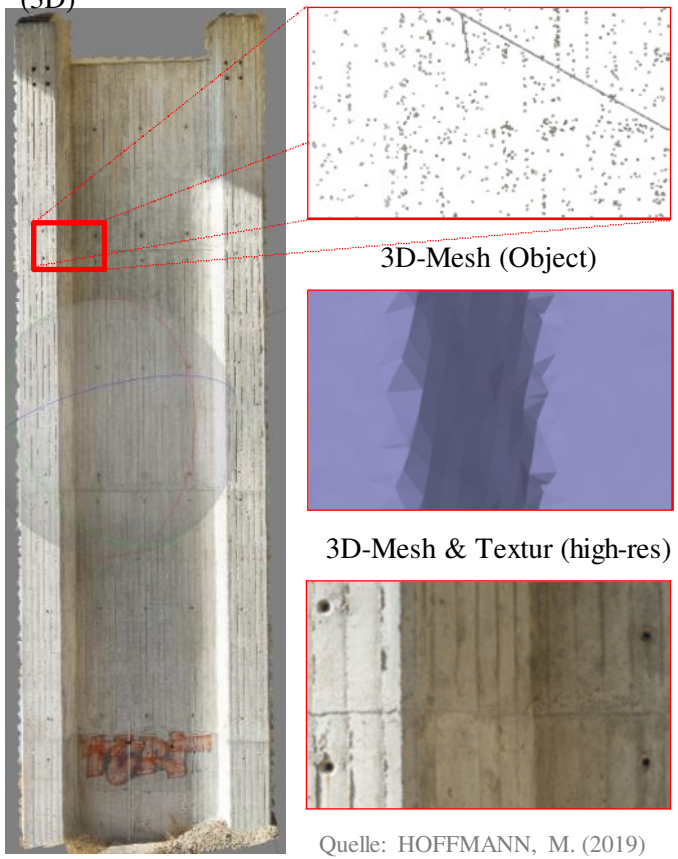
Versuchsprogramm #5 Orthofoto

Automatiserte Erkennung Oberflächenmerkmalen

Hoffmann (2019)

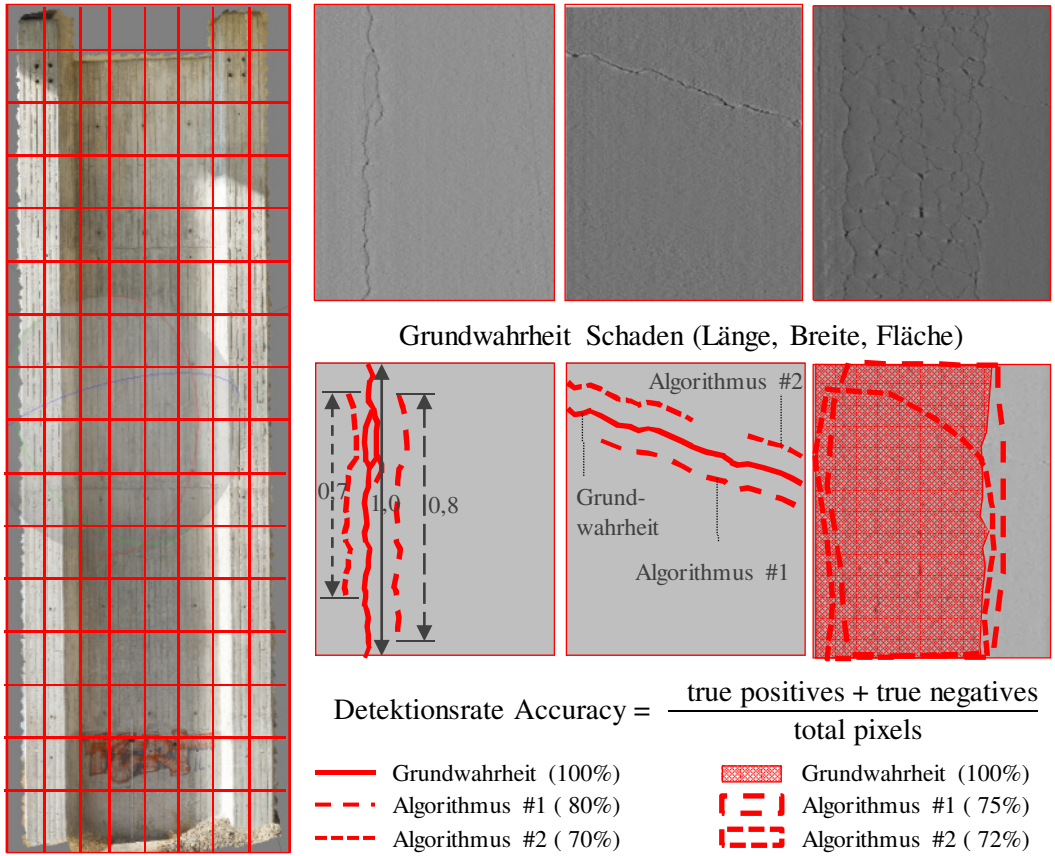
BAUWERKSERFASSUNG

Photogrammetrie (3D)



Quelle: HOFFMANN, M. (2019)

SCHADENSERKENNUNG UND VALIDIERUNG

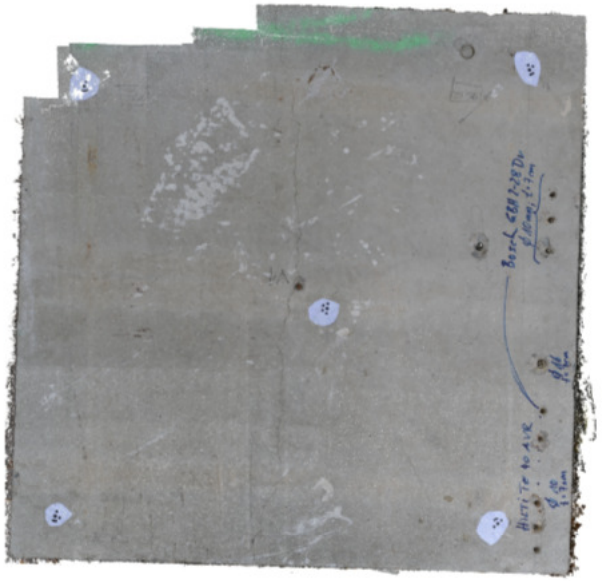


$$\text{Detektionsrate Accuracy} = \frac{\text{true positives} + \text{true negatives}}{\text{total pixels}}$$

- Schadenserkennung erfordert hochauflösenden Nahscan (Laser, Photo) → 2D oder 3D Textur – der kleinste zu erkennende Schaden bestimmt Mindestauflösung/Datenmenge (0,2 mm Riss → 5.000 x 5.000 Pixel = 25 MP / m^2)

Versuchsprogramm #5 Orthofoto

Automatiserte Erkennung Oberflächenmerkmalen



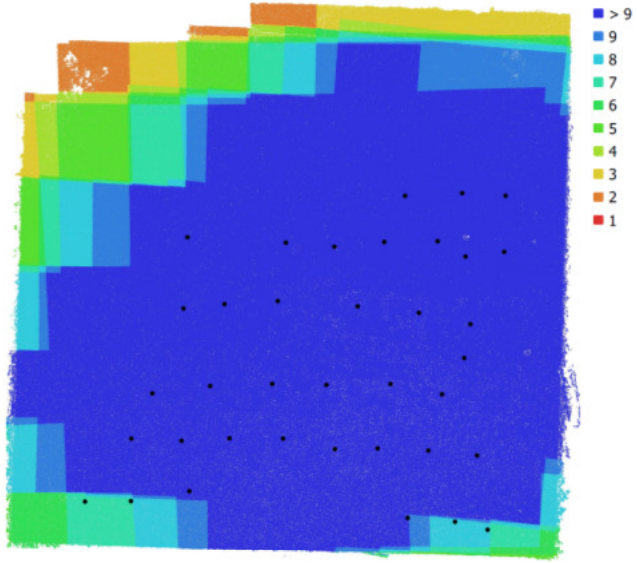


Fig. 1. Kamerapositionen und Bildüberlappung.

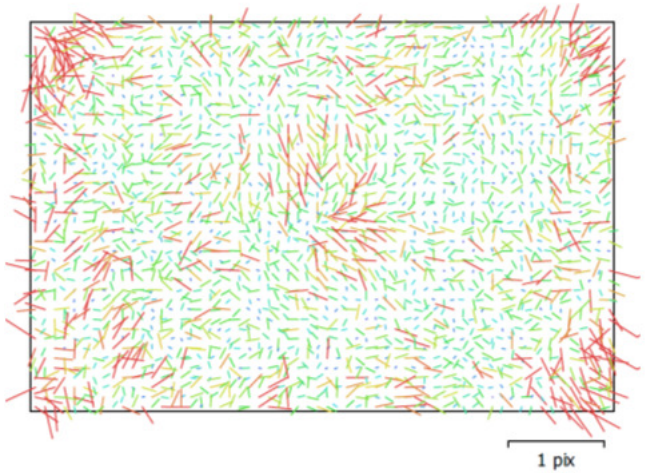


Fig. 2. Bildrestwerte für NIKON D3100 (18mm).

NIKON D3100 (18mm)
76 Bilder

Typ	Auflösung	Brennweite	Pixelgröße
Standard	**4608 x 3072**	**18 mm**	**5.21 x 5.21 um**

	Wert	Fehler	F	Cx	Cy	B1	K1	K2	K3	P1	P2
F	**3589.75**	0.63	1.00	-0.05	-0.11	-0.01	-0.50	0.33	-0.04	-0.13	0.07
Cx	**0.215925**	0.14		1.00	0.06	-0.01	-0.04	-0.01	-0.01	0.39	0.02
Cy	**32.1969**	0.2			1.00	-0.17	0.05	0.00	-0.06	0.01	0.43
B1	**4.34066**	0.14				1.00	-0.10	0.04	0.00	0.08	0.10
K1	**-0.167907**	9.7e-05					1.00	-0.85	0.71	0.01	-0.12
K2	**0.115779**	0.00027						1.00	-0.94	-0.03	0.06
K3	**-0.00656576**	0.00027							1.00	-0.01	-0.04
P1	**0.000234719**	1.7e-05								1.00	0.06
P2	**-0.00120406**	1.7e-05									1.00

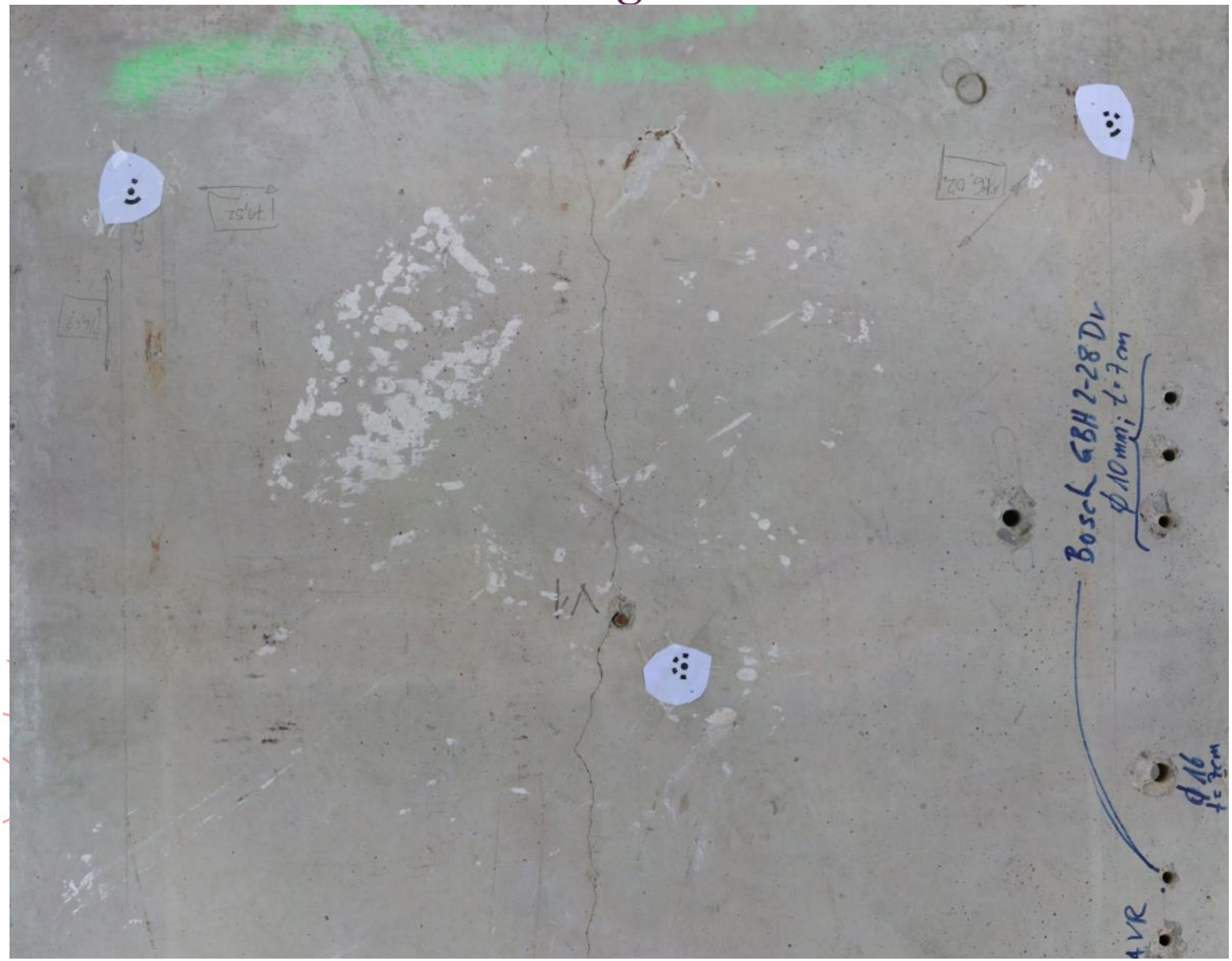
Tabelle 2. Kalibrierkoeffizienten und Korrelationsmatrix.

Verarbeitungsparameter

Allgemein	
Kameras	76
Ausgerichtet Kameras	37
Markierungen	5
Maßstabsbalken	3
Koordinatensystem	Local Coordinates (m)
Drehwinkel	Gier, Nick, Roll
Punktwolke	
Punkte	18,299 von 20,148
Effektiver Reprojektionsfehler	0.252214 (0.693755 pix)
Max. Reprojektionsfehler	0.757557 (7.50588 pix)
Mittlere Schlüsselpunktgröße	2.77091 pix
Punktfarben	3 Kanäle, uint8
Schlüsselpunkte	Ja
Durchschnittliche Verknüpfungspunkt-Multiplizität	7.92684
Ausrichtungsparameter	
Genauigkeit	Hoch
Allgemein Vorauswahl	Ja
Schlüsselpunktlimit	40,000
Verknüpfungspunktelimit	4,000
Adaptive Kamera-Modellanpassung	Ja
Zeit für Abgleich	2 Minuten 2 Sekunden
Zeit für Ausrichtung	10 Sekunden
Tiefenbilder	
Anzahl	37
Rekonstruktionsparameter	
Qualität	Hoch
Filtermodus	Aggressiv
Verarbeitungszeit	7 Minuten 47 Sekunden
Dichte Punktwolke	
Punkte	8,806,038
Punktfarben	3 Kanäle, uint8
Rekonstruktionsparameter	
Qualität	Hoch
Tiefenfilterung	Aggressiv
Zeit Tiefenbilder generiert	7 Minuten 47 Sekunden
Zeit dichte Punktwolke generiert	2 Minuten 31 Sekunden
DEM	
Größe	3,166 x 3,123
Koordinatensystem	Local Coordinates (m)
Rekonstruktionsparameter	
Quelldaten	Dichte Punktwolke
Interpolation	An
Verarbeitungszeit	4 Sekunden
Orthomosaik	
Größe	6,316 x 6,160
Koordinatensystem	Local Coordinates (m)
Farben	3 Kanäle, uint8
Rekonstruktionsparameter	
Überlagerungsmodus	Mosaik
Oberfläche	DEM
Lochfüllung aktivieren	Ja
Verarbeitungszeit	36 Sekunden
Software	
Version	1.4.4 build 6848

Versuchsprogramm #5 Orthofoto

Automatiserte Erkennung Oberflächenmerkmalen

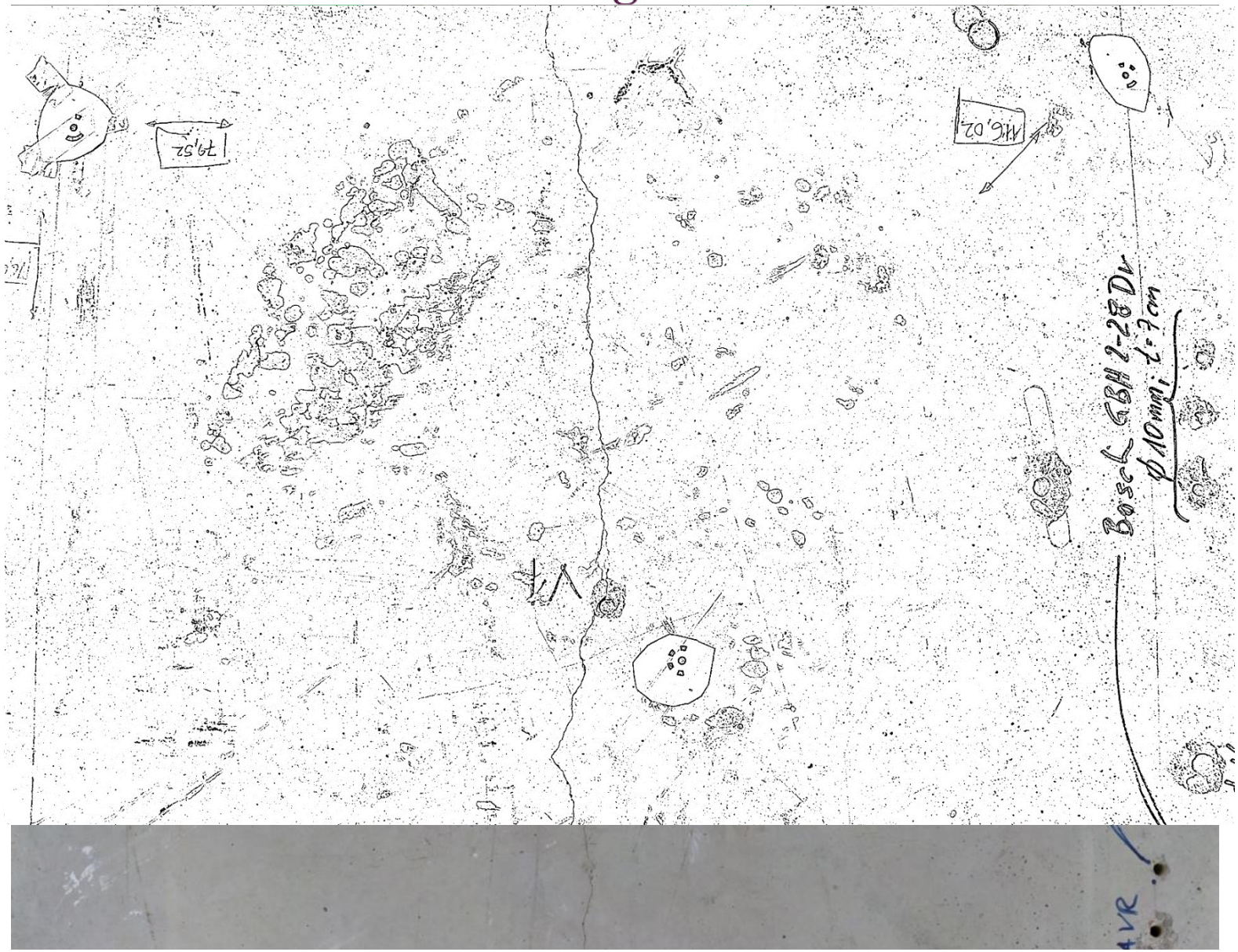


Testobjekt:
Betonplatte
150 cm/ 150 cm

Rissbreite:
w_k = 0.2 mm

Versuchsprogramm #5 Orthofoto

Automatiserte Erkennung Oberflächenmerkmalen



Testobjekt:
Betonplatte
150 cm/ 150 cm

Rissbreite:
w_k = 0.2 mm

Versuchsprogramm #5 Orthofoto

Grundlagen & Algorithmen Schadenserkennung

Hoffmann (2019)

Erfassung / Scanning → Pre-Processing → Image-Processing → Crack-Detection → Parameter Estimation

Überblick Algorithmen Bildverarbeitung (MOHAN, A. et al. 2017)

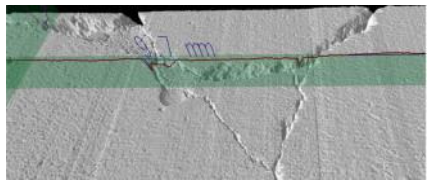
Image processing techniques	Papers
Morphological approach	[9,20,36,42,40]
Digital image correlation	[6,10,43,45]
Randomized hough transform	[1,23]
Ultrasonic pulse velocity technique	[24,43]
Wavelet transform	[11,23,38,46]
Median filtering	[23,48]
Gabor filtering	[49]
Otsu's method	[22,49]
Statistical approach	[19,20]
Threshold method	[6,47,48]
Superpixel algorithm	[26]
Data fusion filtering	[8,44]
Reconstruction technique	[3,8,42]
Photogrammatic technique	[4,8]
PA imaging	[6,11]
Percolation	[27,40]
Centroid method	[34]
Delaying and summing algorithm	[35]
GLCM texture analysis	[38,41]
Dijkstra's algorithm	[49]
Skeletonization techniques	[5,36]

Erreichte Detektionsraten (MOHAN, A. et al. 2017)

Accuracy level	Papers
Below 70%	[9,10,24,16]
70–75%	[41]
80–85%	[46,49,50]
85–90%	[8,39]
90–95%	[2,11,17,25,30,37,38,48]
Above 95%	[12,21,32,40]

- Die Detektionsrate hängt wesentlich von Datenqualität/Auflösung und Algorithmus ab – für Validierung/Prognosen > 90% erreichbar
- Die Entwicklung der Algorithmen erfolgt häufig durch einzelne Forscher oder größere Teams – in Abschlussarbeit, Wettbewerb, Projekt
- CrackNet bzw. CrackNet II (deep learning) wurden durch 10-Mann Team in +18 Monaten entwickelt (Nahscan, >90% Detektionsrate)

3D – NahScan (1 mm Auflösung) basierend auf PaveVision3Dsystem (ZHANG, A. et al. 2018)



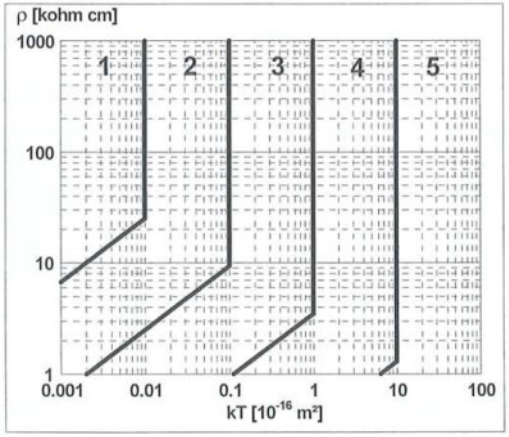
- Unterschiedlichste AI-Techniken und Algorithmen - große Fortschritte in den letzten 5 Jahren - derzeit noch hoher Aufwand für Detektionsraten >90% - Empfehlung: Modulare Systeme, Einbau neue Algorithmen, Testdatensätze

Versuchsprogramm #6 Hydratation / Nachbehandlung
Grundlagen & Algorithmen Schadenserkennung

VIF OPTINB

BETON PERMEABILITÄT-TESTER TORRENT:

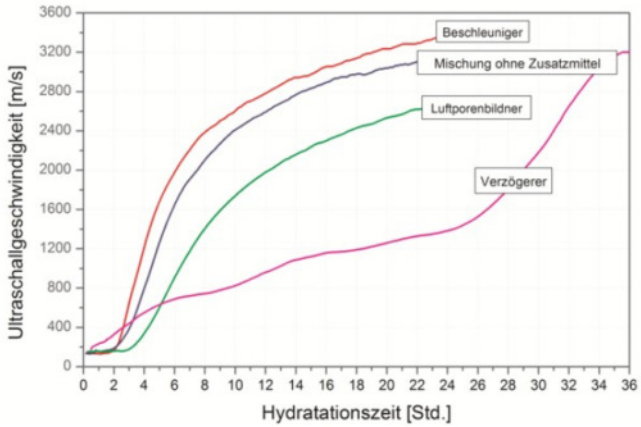
ZERSTÖRUNGSFREIE MESSUNG DER QUALITÄT DER BETONDECKUNG
MESSUNG DER DURCHLÄSSIGKEIT VON LUFT UND WASSER



Quelle: http://www.atppad.com/en/products/concrete/item/1401-air-permeability-tester.html

ULTRASCHALLMESSUNG

KONTINUIERLICHE UNTERSUCHUNG DES HYDRATATIONSVERLAUFS
WIRKUNGSWEISE VON BETONZUSATZMITTEL



Klassifizierung Sensoren, Ergebnisse

Hoffmann & Strauss (2019)

PHOTOGRAMMETRIE (> 36 bis 42 MP, Auflösung < 0,2 mm) zu t_0 :

- Für die Schadenserkennung an Bauwerken mittels Photogrammetrie ist die Erkennung von Rissen im Submillimeterbereich sowie 3D – Modell das Ziel (→ Sensorwahl = Teil Flugplanung)

→ **Ergebnisse: Texturiertes 3D – Modell, Konzept Schadenserkennung, Visualisierung**

LASERSCANNING (> 100,000 meas./sec, Auflösung < 5 cm) zu t_0 :

- Für die Modellverbesserung sowie Validierung der Geometrie bzw. Ergebnisse Photogrammetrie wird empfohlen zumindest ein (Brücken-)Bauwerk zusätzlich mittels Laserscan zu erfassen

→ **Ergebnisse: Punktwolke, Verbesserung 3D – Modell, Validierung Photogrammetrie**

THERMOGRAFIE (> 640 x 480 Pixel, Auflösung < 5 cm) zu t_0 :

- Der ungleiche Wärmefluss bei Temperaturänderungen (< 0,2°C) bei strukturellen Betonschäden kann mittels Thermografie sichtbar gemacht werden (Ergebnisse als Textur am 3D – Modell abbilden)

→ **Ergebnisse: Hohlräume, Feuchtstellen, Delamination referenziert (Labor, 3D – Modell)**

OPTIONAL: HYPERSPEKTRALKAMERA (> 640 x 480 Pixel, Auflösung < 5 cm) zu t_0 :

- Die hyperspektrale Analyse liefert wertvolle Informationen über Materialeigenschaften von Oberflächen (Alter, Härte) sowie allfälliger Schädigungsprozesse (Karbonat, Chlorid)

→ **Ergebnisse: Erkennung Materialparameter, Schädigung referenziert (Labor, 3D – Modell)**

Vielen Dank!

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Konstruktiver Ingenieurbau