



Transfer wiedzy i technologii z zakresu oszczędności energii.
Wymiana ciepła, pomiary termowizyjne.

dr hab. inż. Andrzej Marynowicz, prof. PO
Katedra Fizyki Materiałów WBiA PO

Program wykładu

1. Podstawy wymiany ciepła
2. Radiacyjna wymiana ciepła a pomiary termowizyjne
3. Pomiary kamerą termowizyjną
4. Diagnostyka termowizyjna w budownictwie
5. Wybrane zastosowania termografii pasywnej i aktywnej

Program wykładu

1. Podstawy wymiany ciepła
2. Radiacyjna wymiana ciepła a pomiary termowizyjne
3. Pomiary kamerą termowizyjną
4. Diagnostyka termowizyjna w budownictwie
5. Wybrane zastosowania termografii pasywnej i aktywnej

Program wykładu

1. Podstawy wymiany ciepła
2. Radiacyjna wymiana ciepła a pomiary termowizyjne
3. Pomiary kamerą termowizyjną
4. Diagnostyka termowizyjna w budownictwie
5. Wybrane zastosowania termografii pasywnej i aktywnej

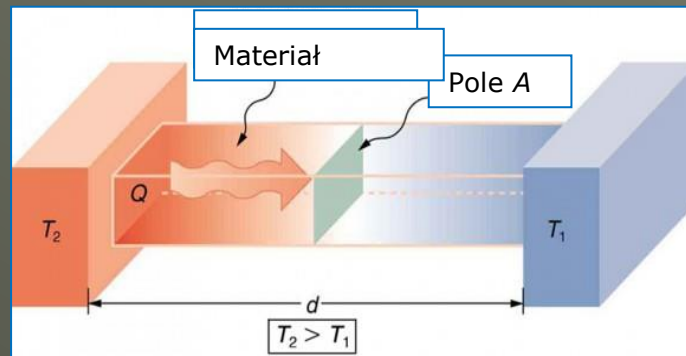
Program wykładu

1. Podstawy wymiany ciepła
2. Radiacyjna wymiana ciepła a pomiary termowizyjne
3. Pomiary kamerą termowizyjną
4. Diagnostyka termowizyjna w budownictwie
5. Wybrane zastosowania termografii pasywnej i aktywnej

Program wykładu

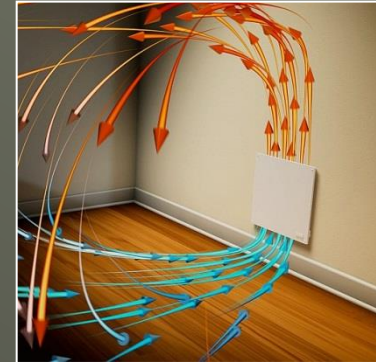
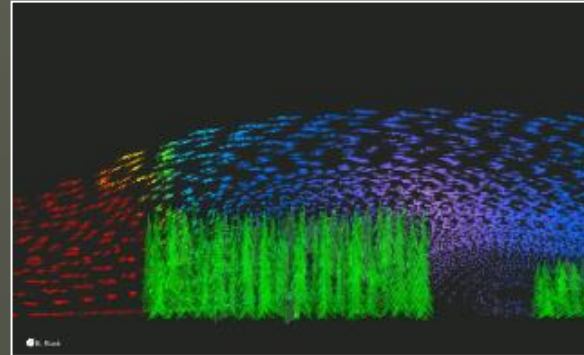
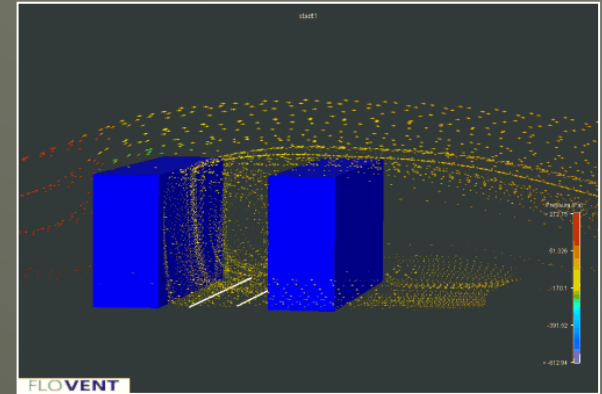
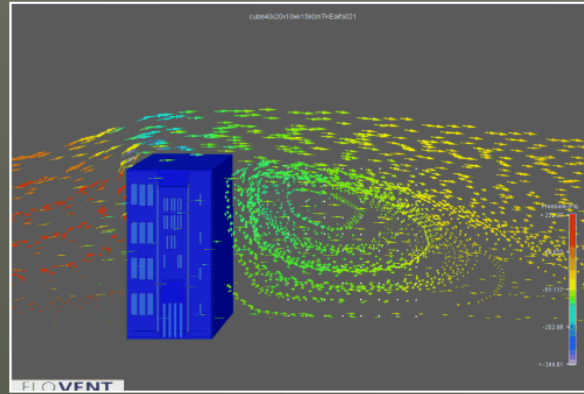
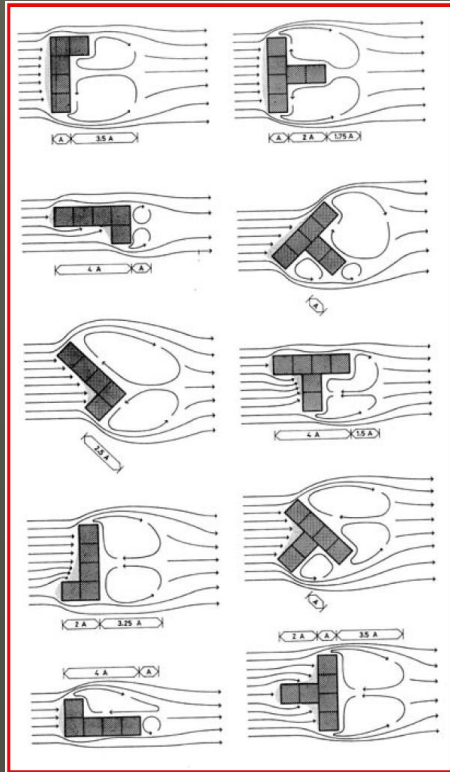
1. Podstawy wymiany ciepła
2. Radiacyjna wymiana ciepła a pomiary termowizyjne
3. Pomiary kamerą termowizyjną
4. Diagnostyka termowizyjna w budownictwie
5. Wybrane zastosowania termografii pasywnej i aktywnej

Przewodzenie



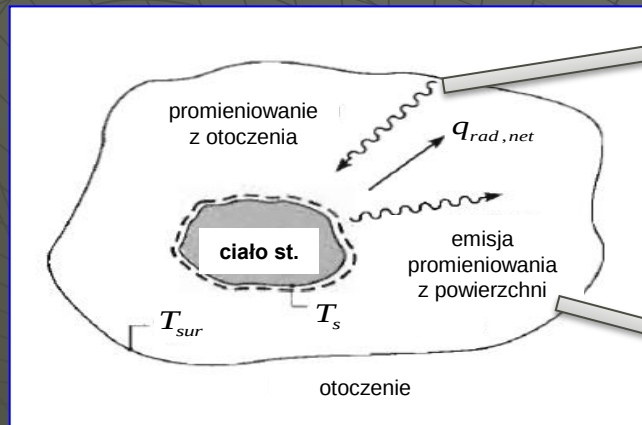
Nietypowy materiał izolacyjny

Konwekcja

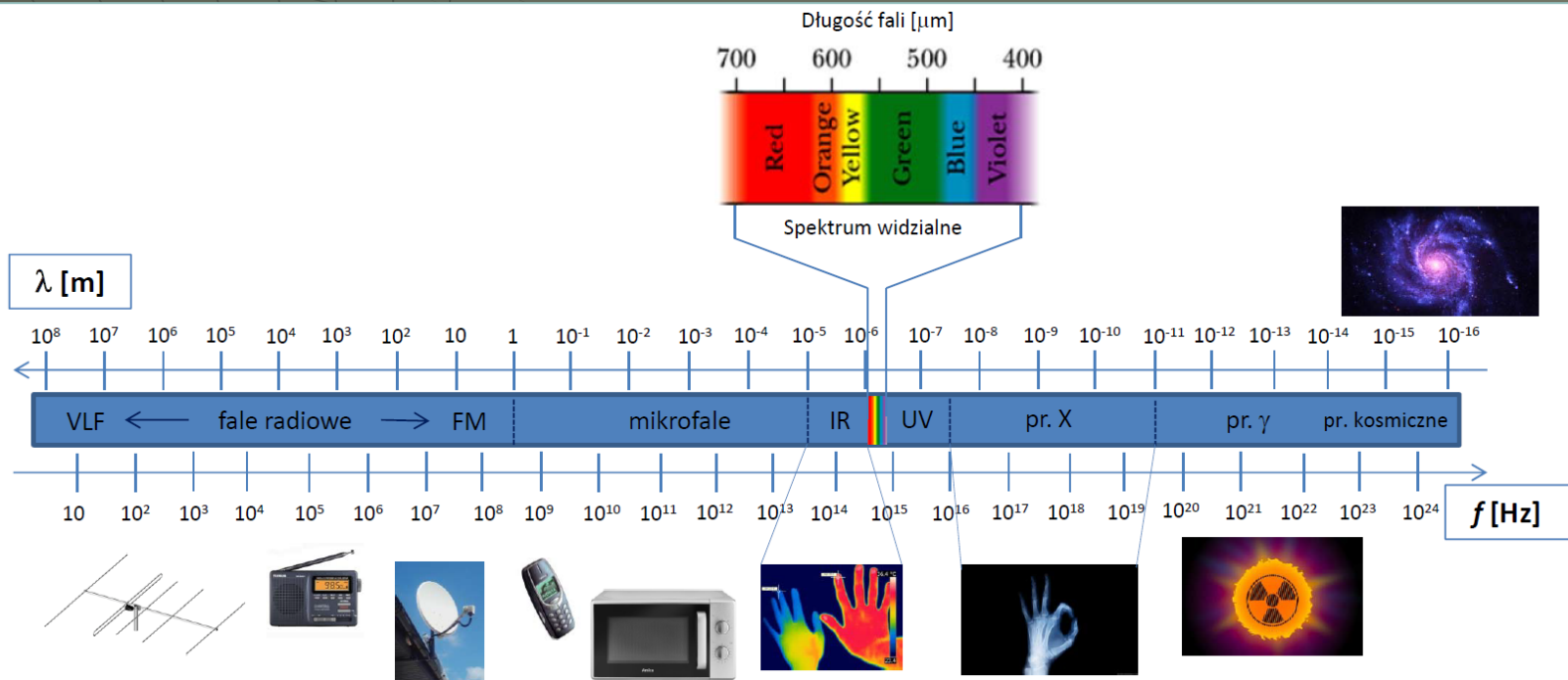


Źródło: <https://www.umweltaerodynamik.de/>

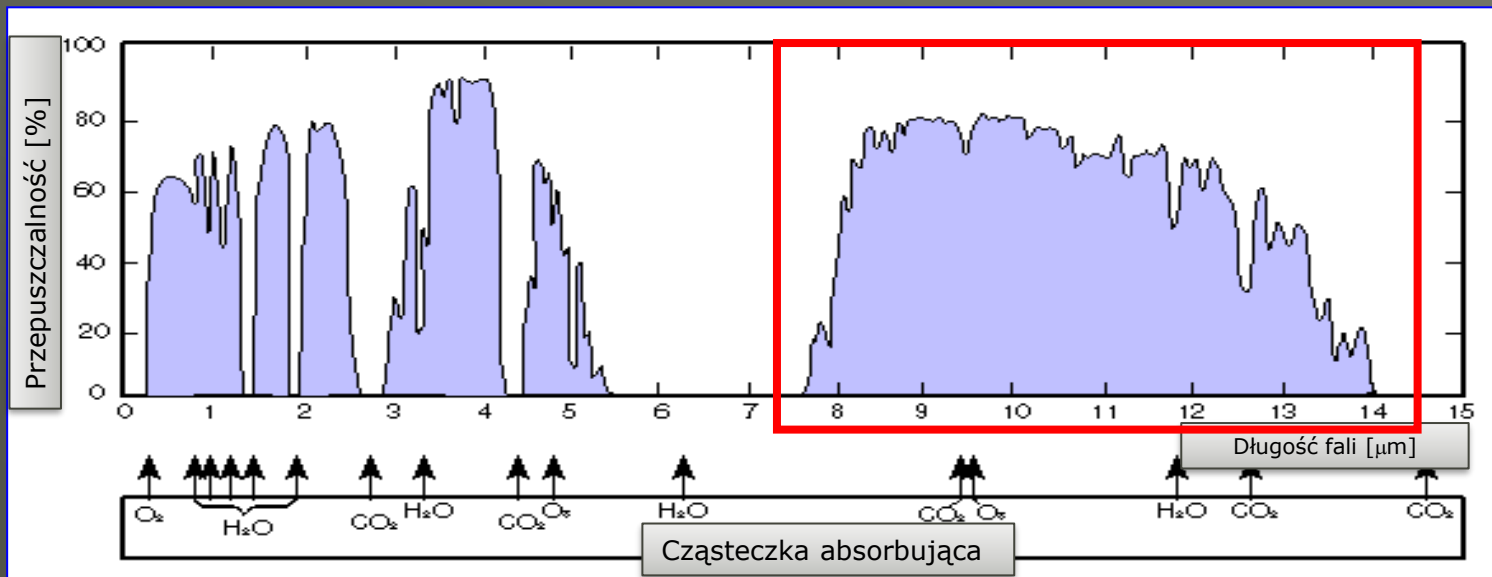
Radiacja



Widmo fal EM



Okna przepuszczalności atmosfery



Właściwości radiacyjne powierzchni ciał stałych

1. Współczynnik absorpcyjności (pochłaniania) – *stosunek pochłoniętego strumienia energii do strumienia padającego*

$$a = \frac{\Phi_a}{\Phi} \quad \left[\frac{W}{W} \right]$$

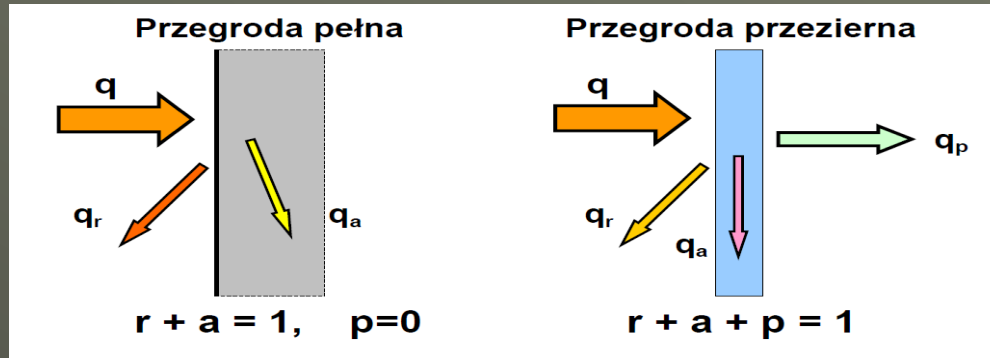
2. Współczynnik refleksyjności (odbicia) – *stosunek odbitego strumienia energii do strumienia padającego*

$$r = \frac{\Phi_r}{\Phi}$$

3. Współczynnik przepuszczalności (transmisyjności) – *stosunek przepuszczonego strumienia energii do strumienia padającego*

$$p = \frac{\Phi_p}{\Phi}$$

Właściwości radiacyjne powierzchni ciał stałych



$$a_\lambda + r_\lambda + p_\lambda = 1$$

- Przypadki szczególne

$$a = 1, \quad r = 0, \quad p = 0$$

c. doskonale czarne

$$r = 1, \quad a = 0, \quad p = 0$$

c. białe (idealne lustro)

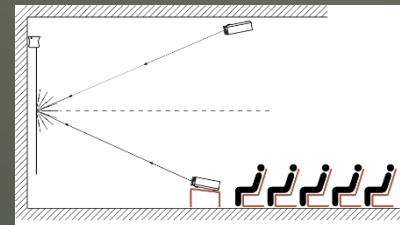
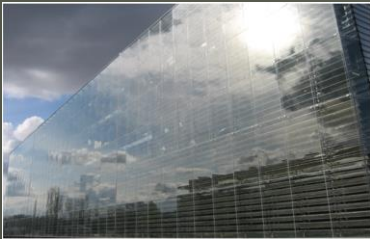
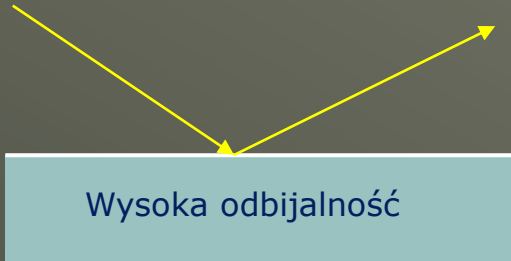
$$p = 1, \quad a = 0, \quad r = 0$$

c. idealnie przezroczyste

$$a < 1$$

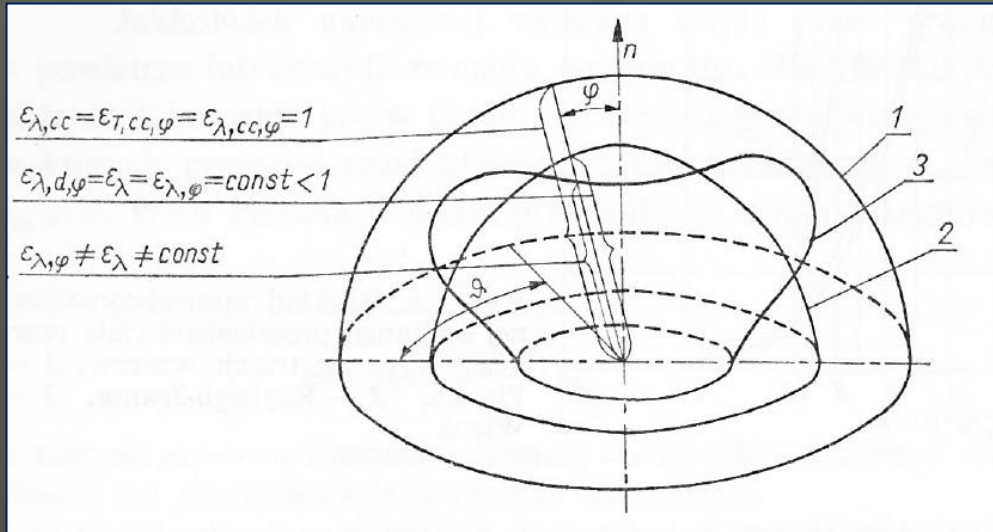
c. szare

Właściwości radiacyjne powierzchni ciał stałych



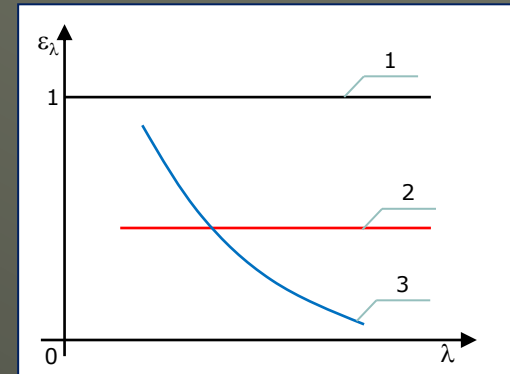
Emisyjność powierzchni

Współczynnik emisyjności (emisyjność): stosunek natężenia promieniowania powierzchni danego ciała do promieniowania ciała doskonale czarnego

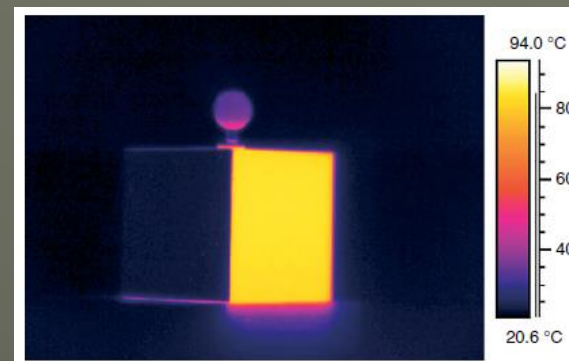
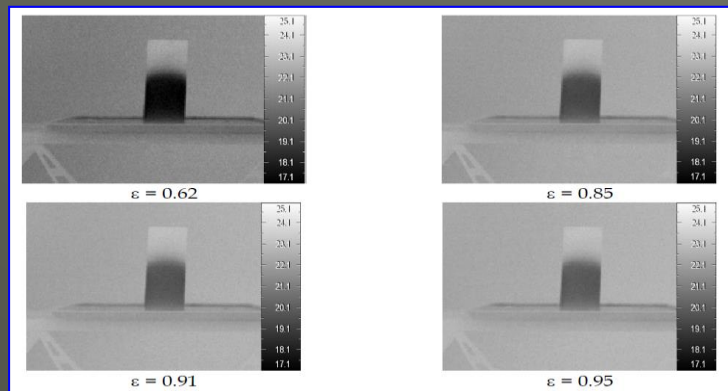


Kierunkowość emisyjności [Sala A.: Radiacyjna wymiana ciepła]: 1: c. doskonale czarne, 2: c. szare, 3: c. rzeczywiste

Rozkład widmowy emisyjności [Sala A.: Radiacyjna wymiana ciepła]: c. doskonale czarne, 2: c. szare, 3: c. rzeczywiste

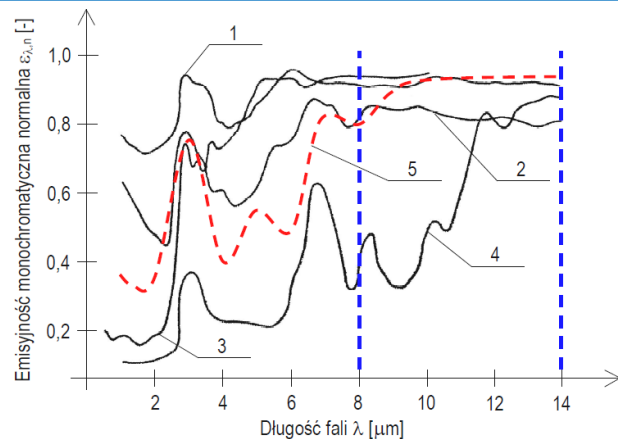


Emisyjność powierzchni



Material	Temperatura (°C)	Emisyjność
stal nierdzewna	25 - 100	0.79 - 0.80
stal, polerowana	100	0.07 - 0.08
aluminium, polerowane	0 - 100	0.03 - 0.06
woda	0 - 100	0.93 - 0.98
beton	-	0.92 - 0.94
ceramika	21	0.93
biały papier	20	0.70 - 0.95
wapień	38	0.95
ludzka skóra	36	0.95

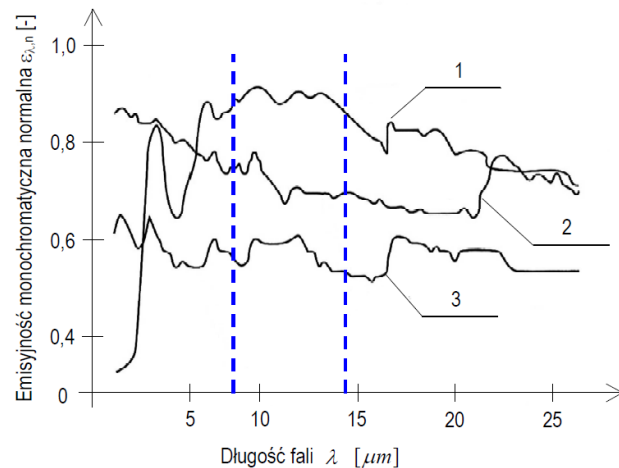
Emisyjność powierzchni



Emisyjność monochromatyczna normalna wybranych dielektryków:
1 – gleba, 2 – cement portlandzki, 3 – dachówka betonowa (biała), 4 – tlenek magnezu, 5 – cegła czerwona; wg [308], [41]. Linia przerywana: zakres spektralny kamery długofalowej (8–14 μm).

[41] BERGMAN T., LAVINE A.S., INCROPERA F.P., DEWITT D.P.: Fundamentals of Heat and Mass Transfer 7th ed., John Wiley & Sons, Jefferson City 2011

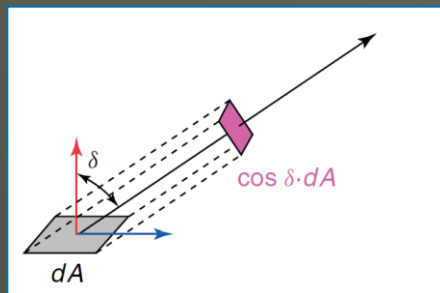
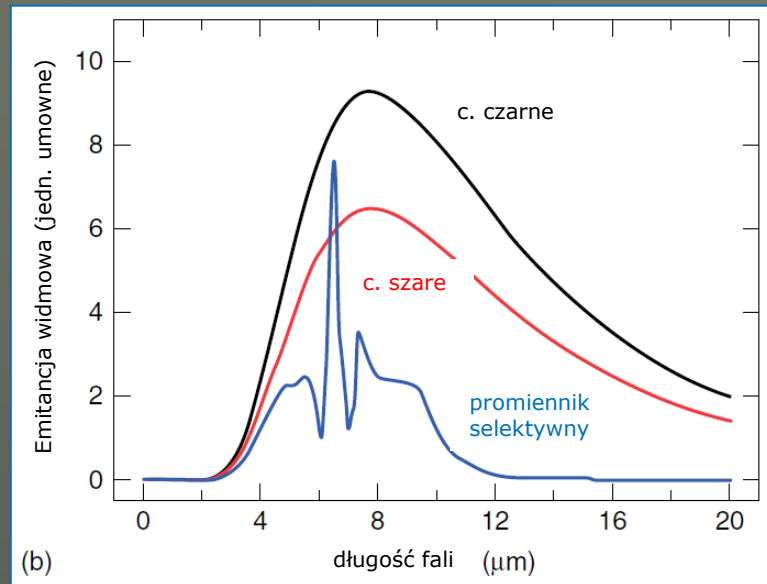
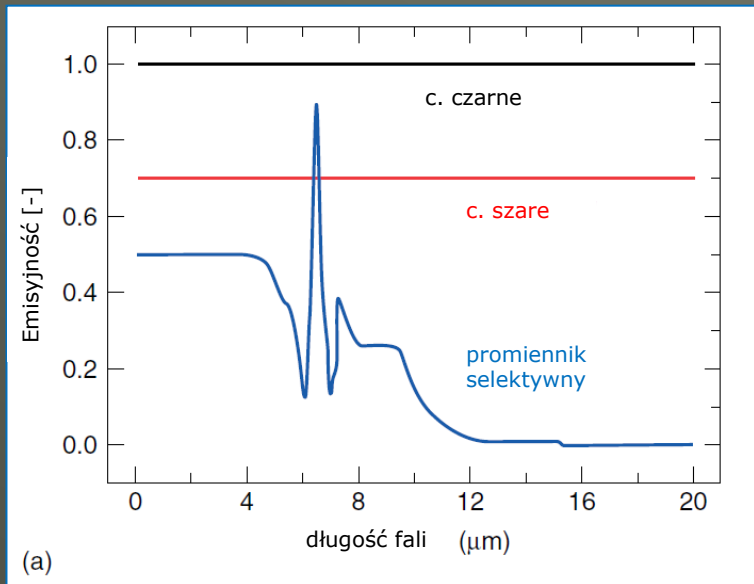
[308] SALA A.: Radiacyjna wymiana ciepła, Wydawnictwo WNT, Warszawa 1982



Emisyjność monochromatyczna normalna wybranych powłok malarskich wg [152]. Oznaczenia: 1 – biała farba (na stali), 2 – czarna emalia (na stali), 3 – farba silikonowa z aluminium (na stopie *Inconel*). Linia przerywana: zakres spektralny kamery długofalowej (8–14 μm).

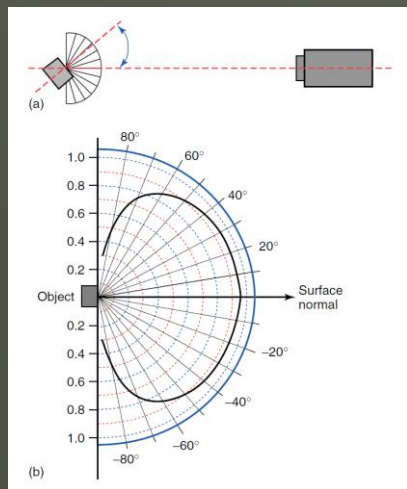
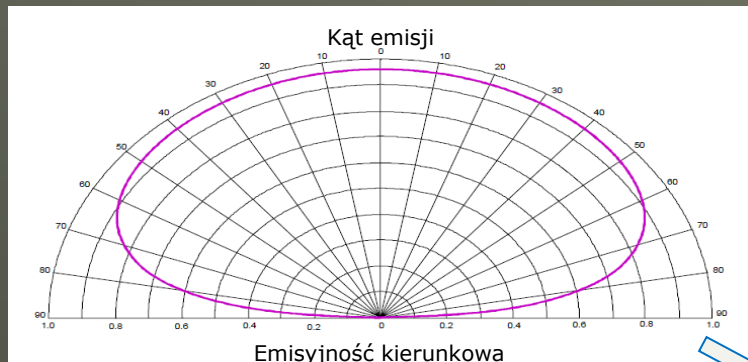
[152] HOWELL J.R., SIEGEL R., MENGUC M.P.: Thermal radiation heat transfer (5th ed.), CRC Press, Boca Raton 2011

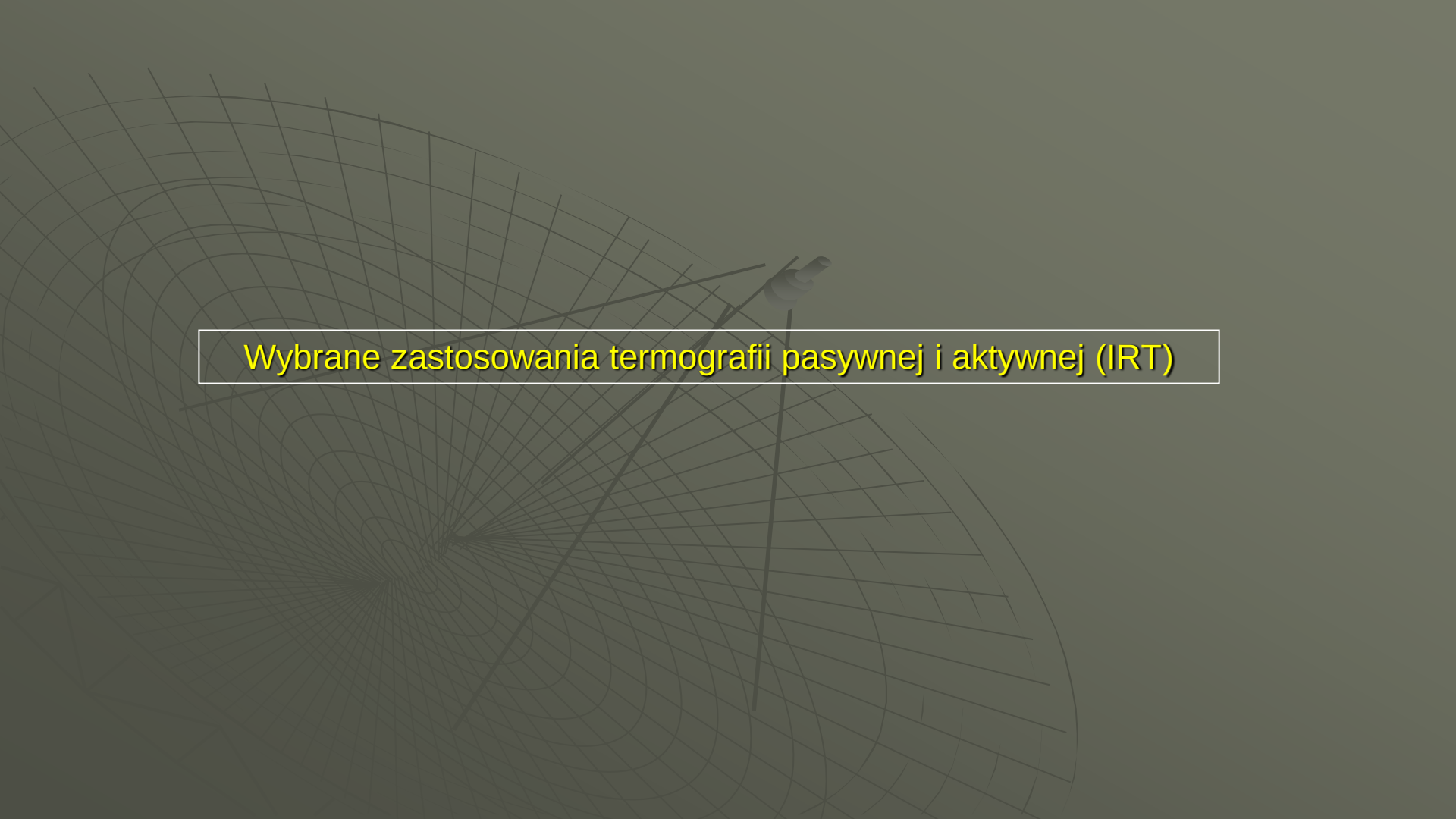
Emisyjność powierzchni



Prawo Lamberta

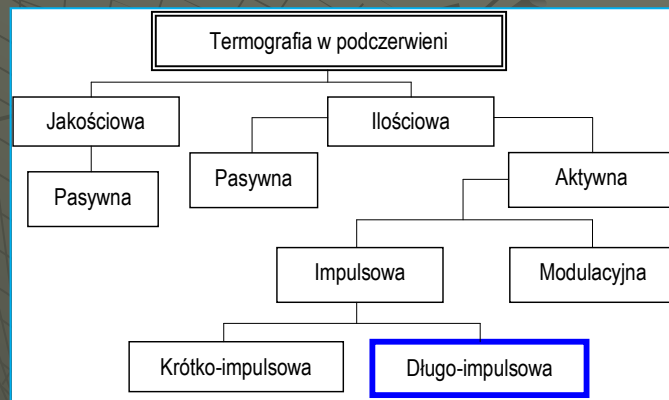
Emisyjność powierzchni





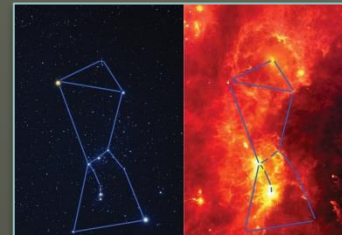
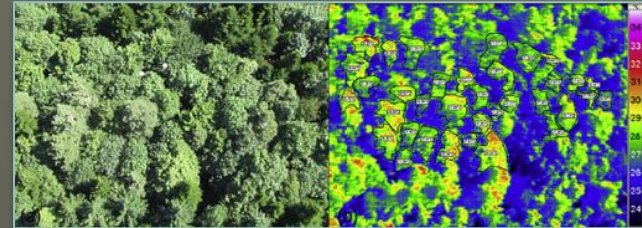
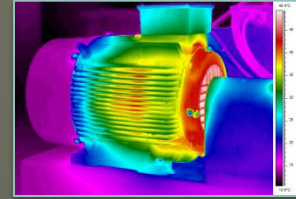
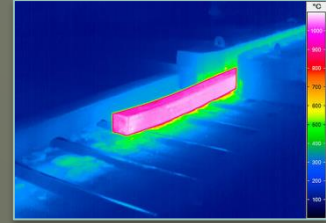
Wybrane zastosowania termografii pasywnej i aktywnej (IRT)

Klasyfikacja termografii pasywnej i aktywnej



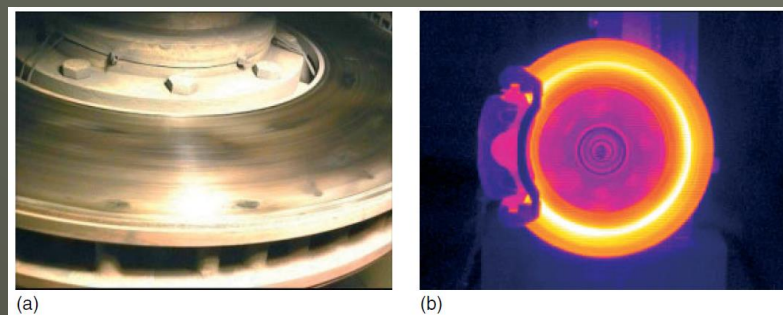
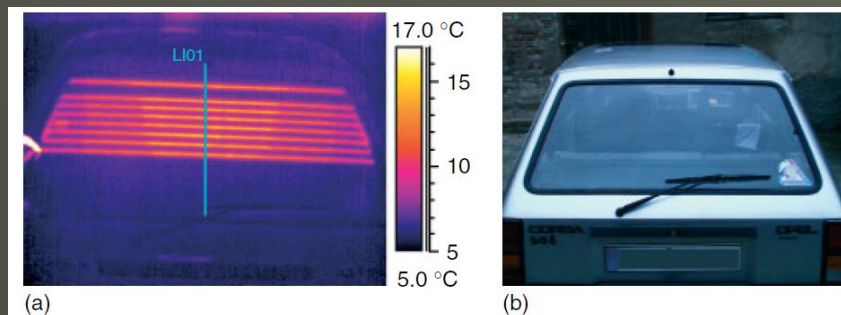
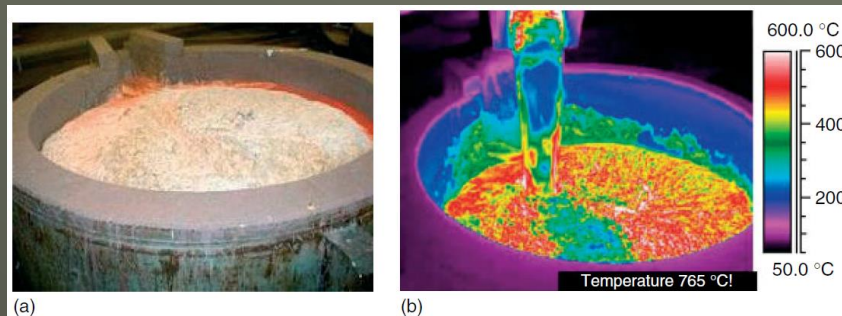
Zastosowania IRT - ogólnie

- kontrola procesów produkcyjnych, w tym spawanie, metalurgia, cięcie wodą
- monitoring maszyn i urządzeń oraz instalacji elektrycznych
- kontrola szczelności gazowych instalacji przesyłowych
- **medycyna**
- detekcja pożarów lasów (aerothermografia) i monitoring ekosystemów
- technika wojskowa
- astronomia
- ratownictwo górskie oraz morskie



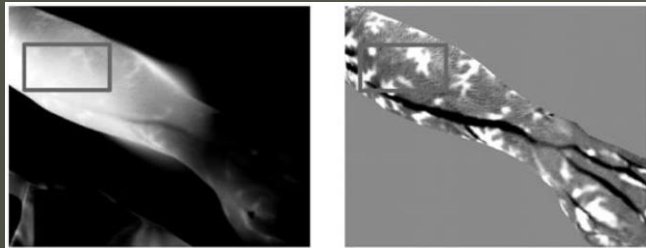
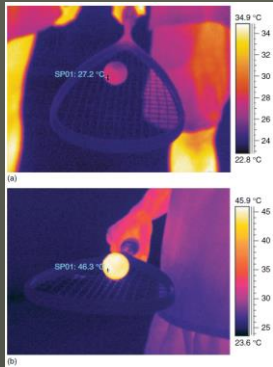
Zastosowania pomiarów termowizyjnych

- kontrola procesów produkcyjnych



Zastosowania pomiarów termowizyjnych

• sport i medycyna

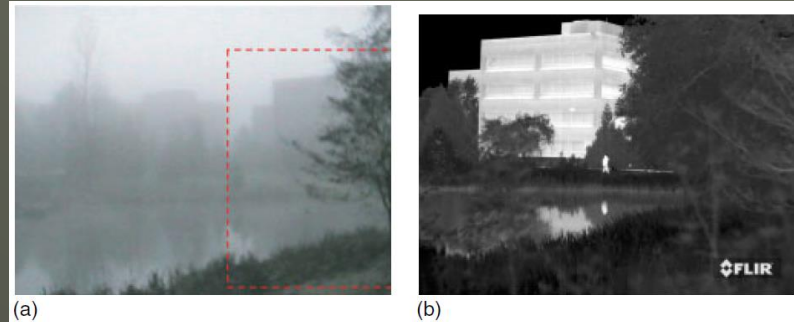
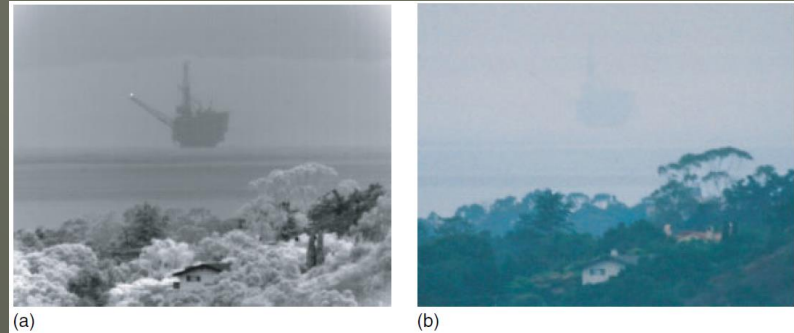


Reconstruction of thermographic signals to map perforator vessels in humans

Wei-Min Liu ^a, Jordan Maivelett ^b, Gregory J. Kato ^c, James G. Taylor VI ^c, Wen-Chin Yang ^a, Yun-Chung Liu ^a, You-Gang Yang ^a & Alexander M. Gorbach ^b

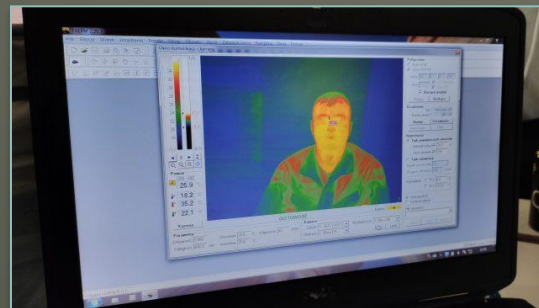
Quantitative InfraRed Thermography Journal

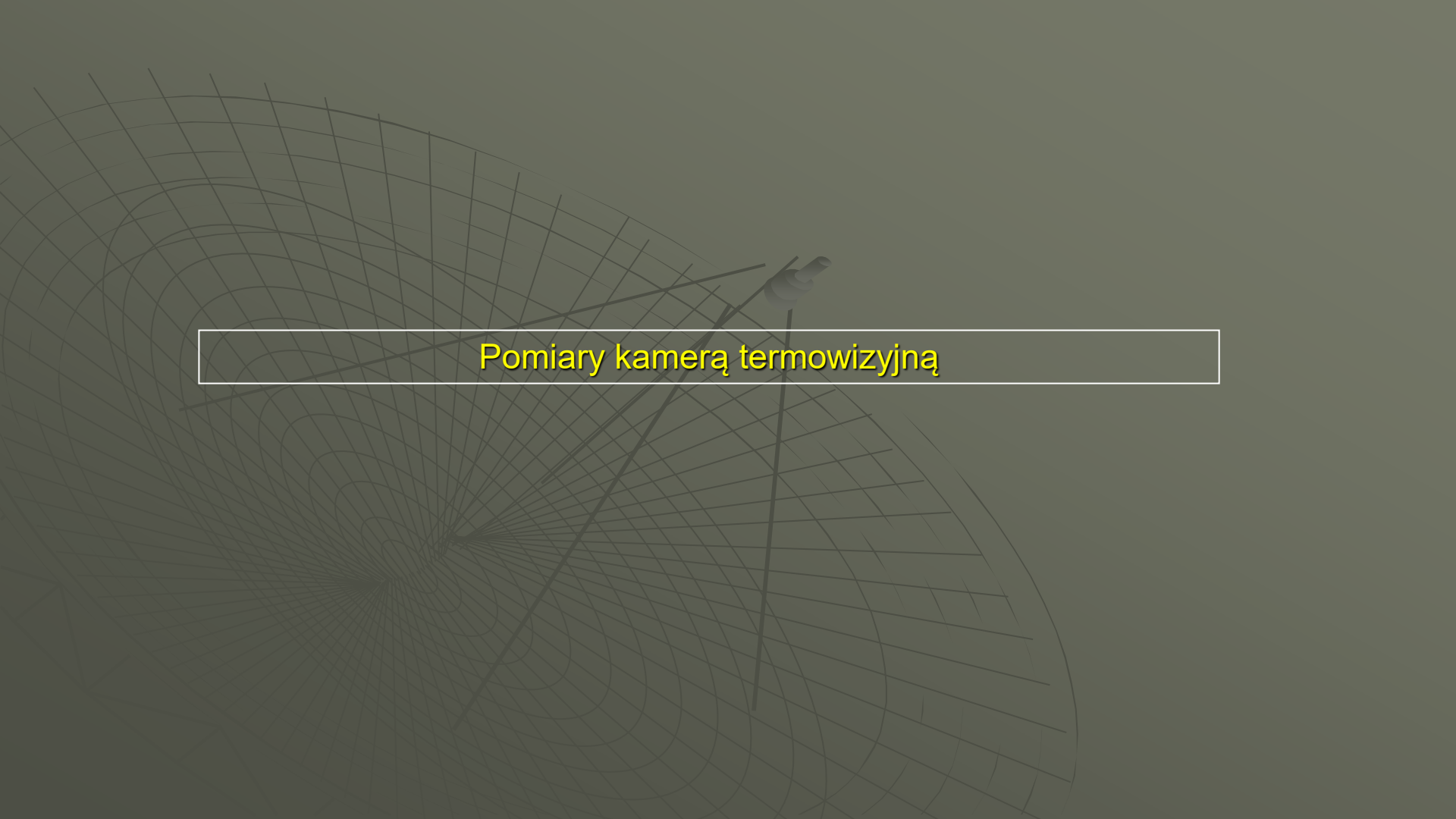
• wojskowość



Zastosowania pomiarów termowizyjnych

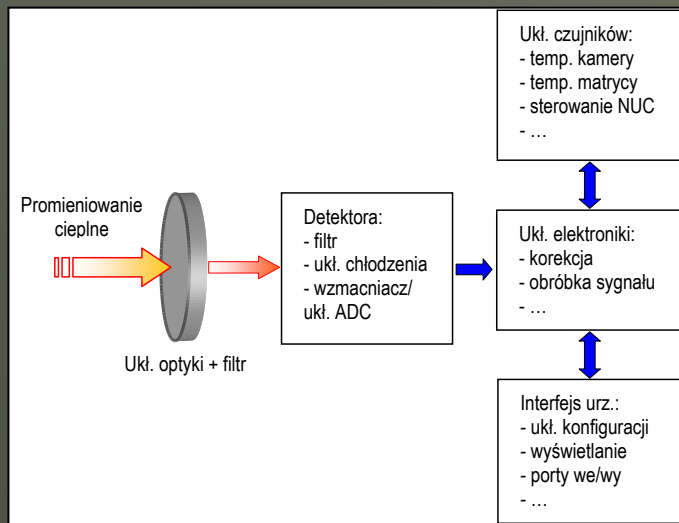
- medycyna - cd





Pomiary kamerą termowizyjną

Kamera termowizyjna



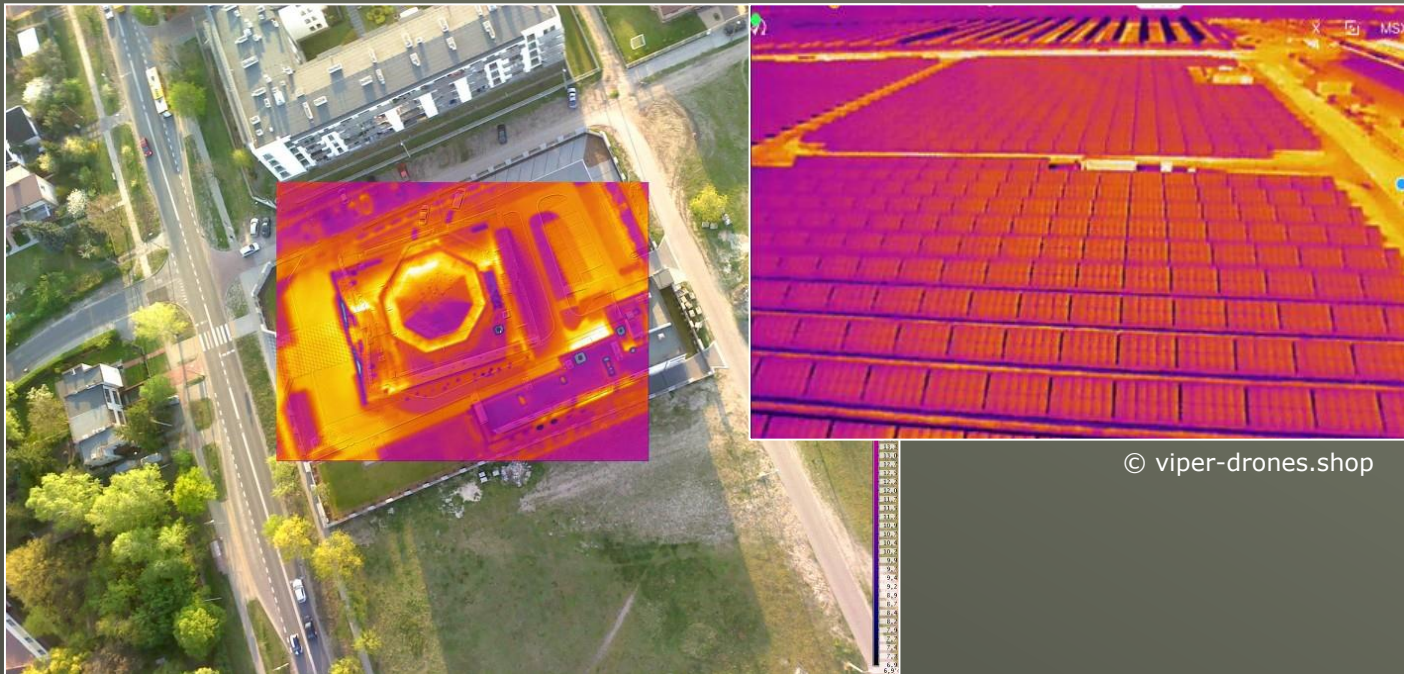
Kamera termowizyjna - drony

Współpraca: dr inż. Łukasz Nowak (PWr)

- **obszarowy** pomiar temperatury w trudno dostępnych miejscach lub z dużej odległości/wysokości
- zakres pomiaru temperatury:
 $-25 \div +135^{\circ}\text{C}$, $-40 \div +550^{\circ}\text{C}$
- rozdzielczość detektora:
336 x 256, 640 x 512,
- **zdalna obsługa kamery** IR, w tym sterowanie w 2 osiach oraz zdalna regulacja ostrości obrazu
- wysokość lotu - max. 120 m, czas lotu ok. 20 min
- zasięg nadajnika 5 km,
- temperatura pracy drona: $-10 \div +40^{\circ}\text{C}$



Kamera termowizyjna - drony

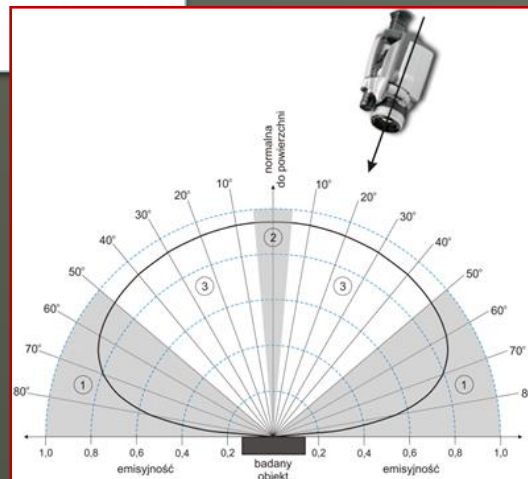
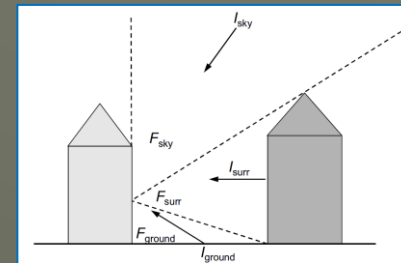
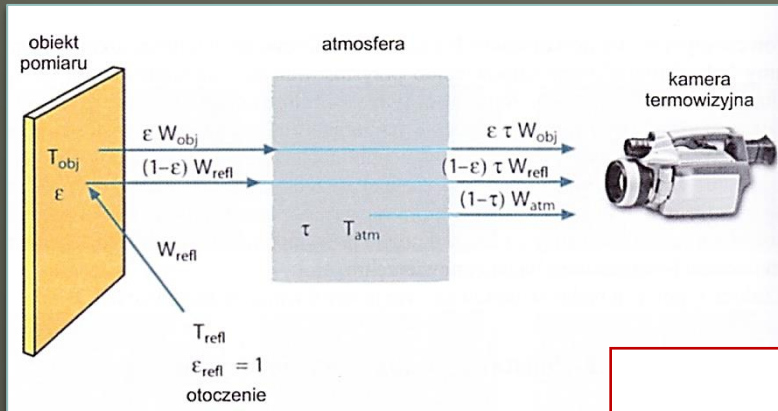


Pomiary termowizyjne w praktyce

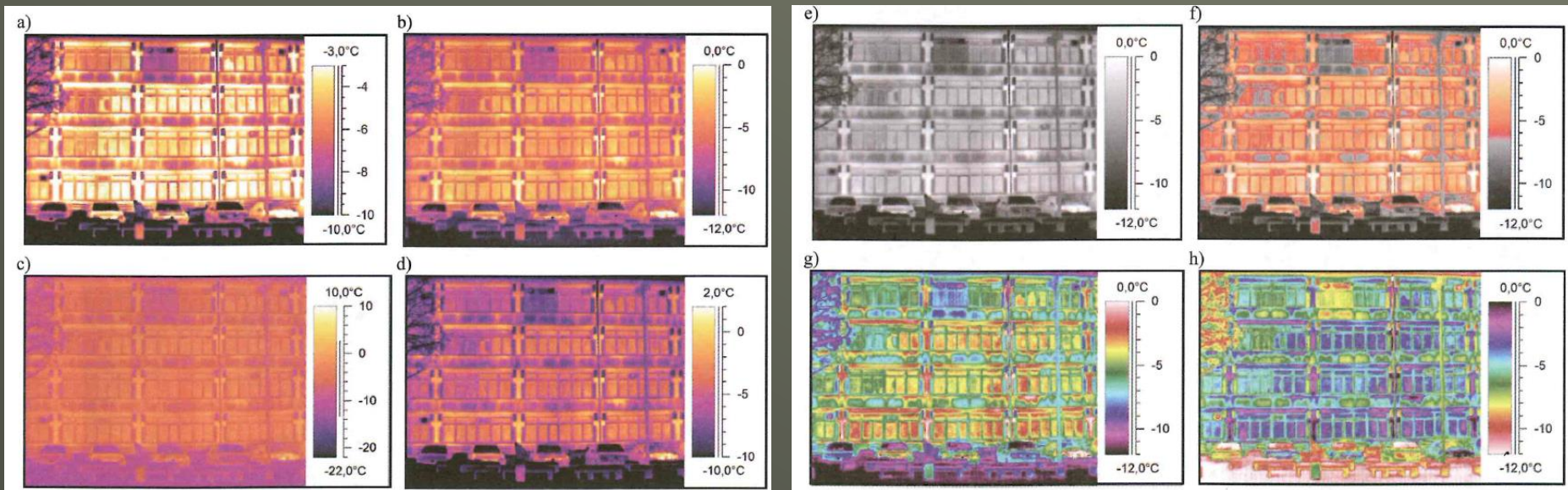
Pomiar termowizyjny wymaga spełnienia szeregu warunków:

- Różnica temperatur między badanym obiektem a otoczeniem (tzw. kontrast termiczny) między 15 a 20°C.
- Dodatkowy sprzęt pomiarowy (np. ciepłomierz, wilgotnościomierz)
- Wiedzy z zakresu budownictwa, fizyki budowli, właściwości termofizycznych materiałów budowlanych, wymiany ciepła (w tym radiacyjnej), tzw. „mostków termicznych”
- Wiedzy i doświadczenia niezbędnego do interpretacji obrazów

Warunki pomiaru termowizyjnego



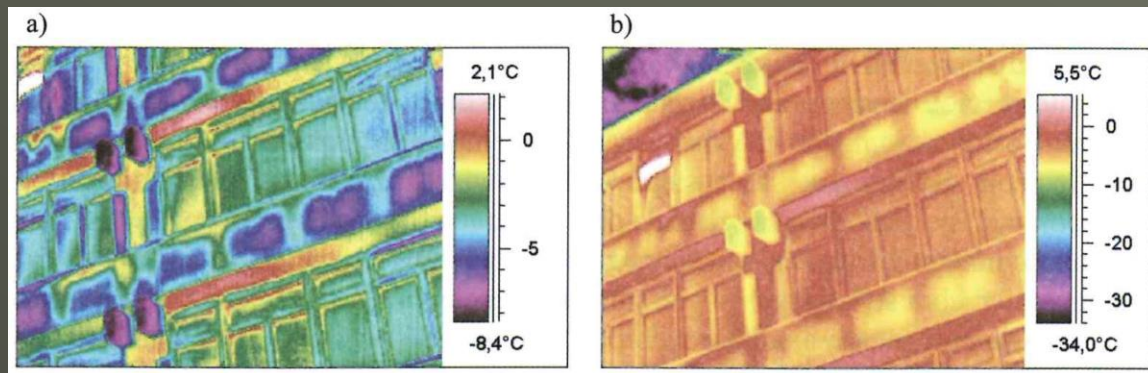
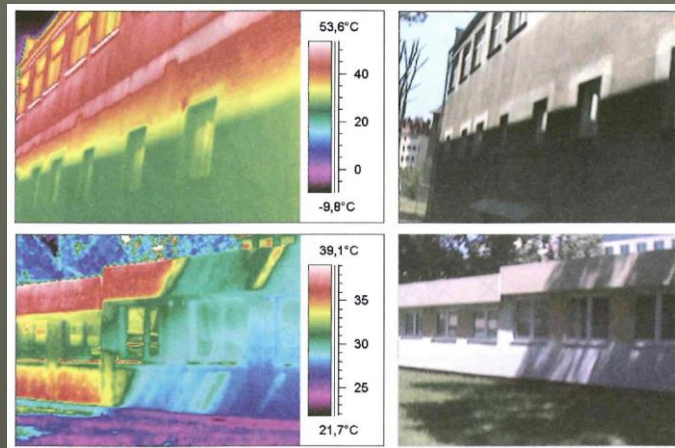
Pomiary termowizyjne w praktyce

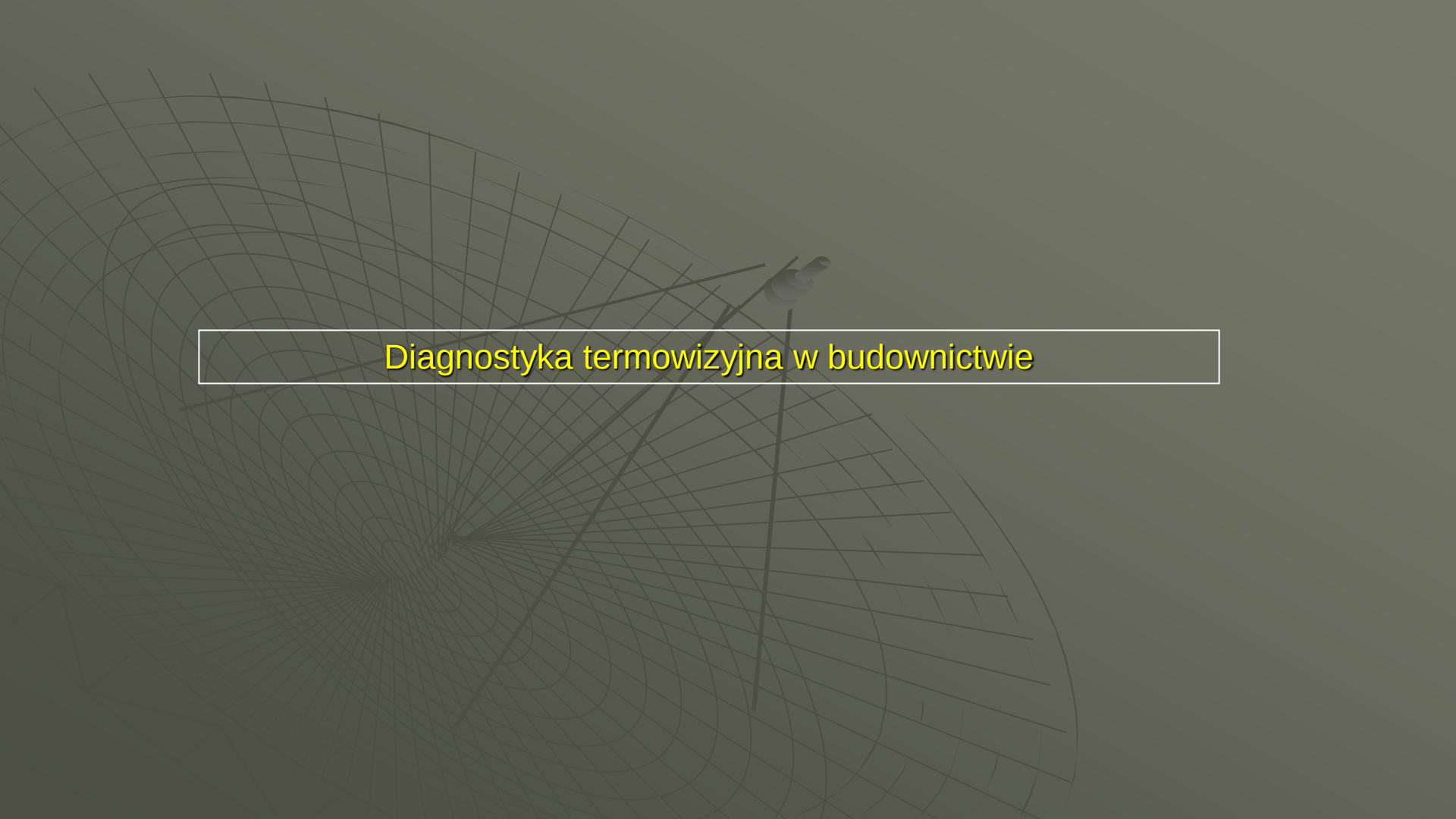


Palety barw

Nowak H.: Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie, OW Polit. Wroc., 2012

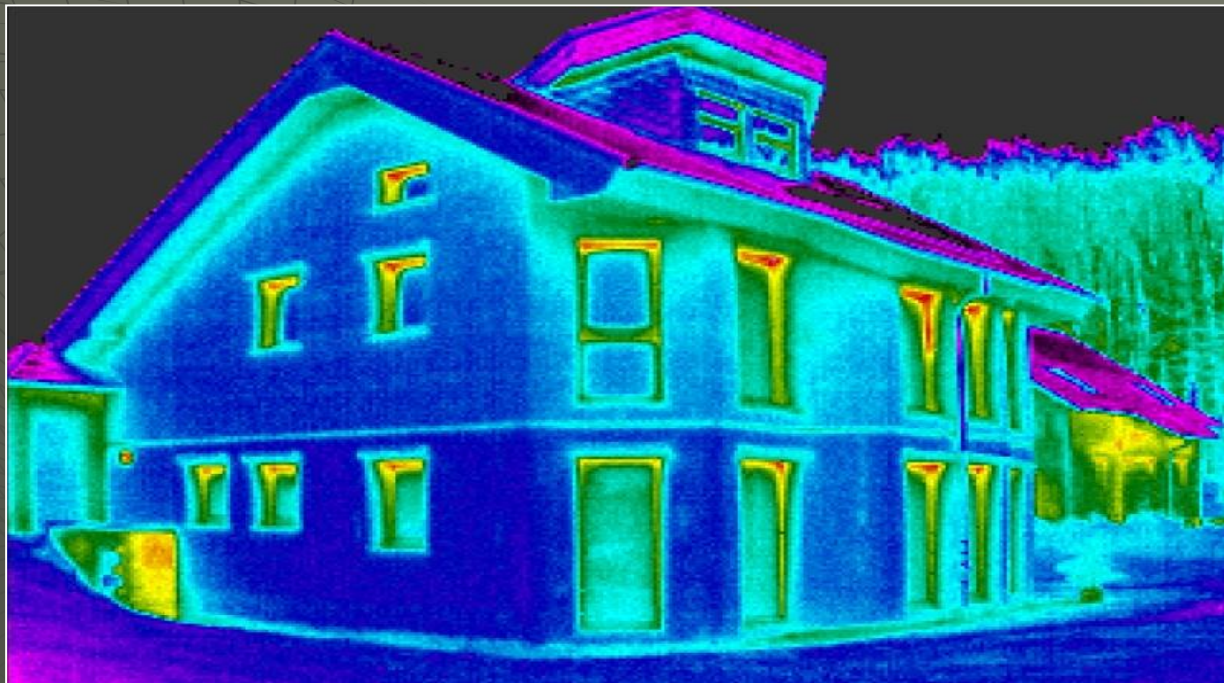
Pomiary termowizyjne w praktyce



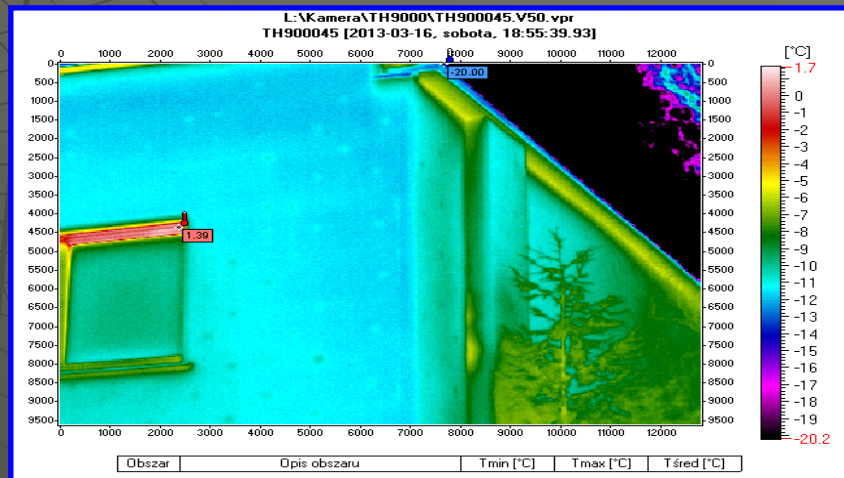
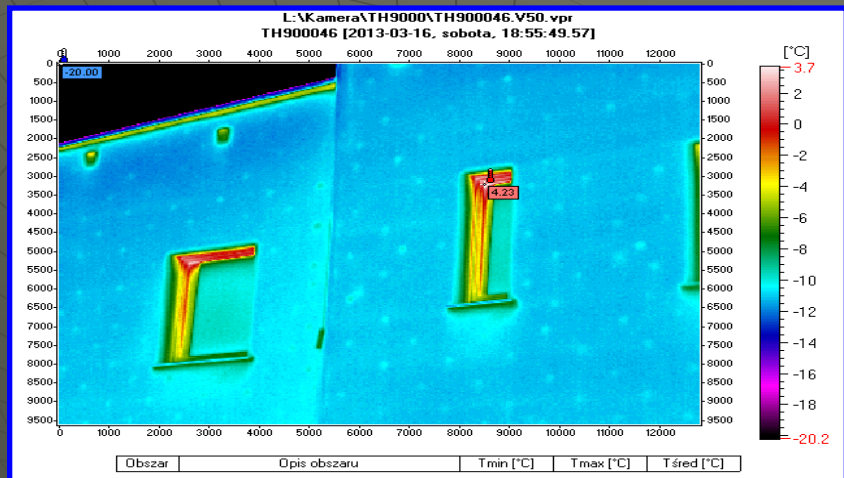
The background of the slide features a faint, stylized graphic of a thermal camera's field of view. It consists of a series of concentric, slightly irregular circles and radial lines emanating from a central point on the left side, creating a spiderweb-like pattern. A small, dark, 3D-rendered object, resembling a thermal camera lens or a sensor probe, is positioned near the top right of the central area, with a few lines radiating from it towards the center. The overall color scheme is a muted, dark gray.

Diagnostyka termowizyjna w budownictwie

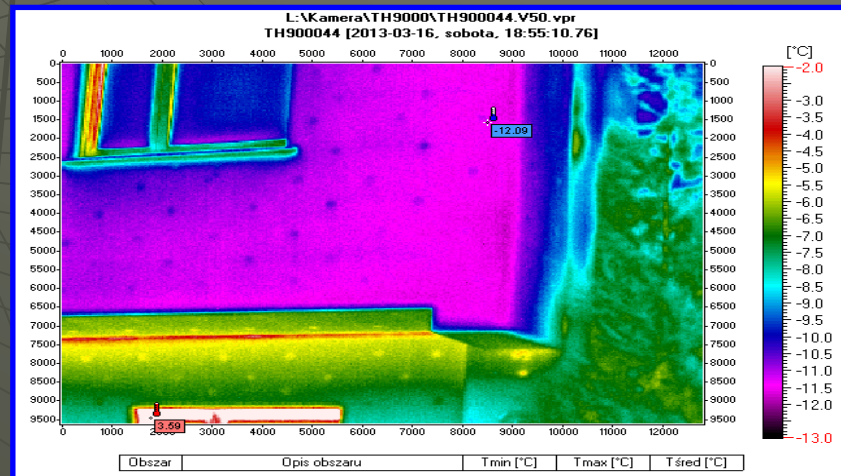
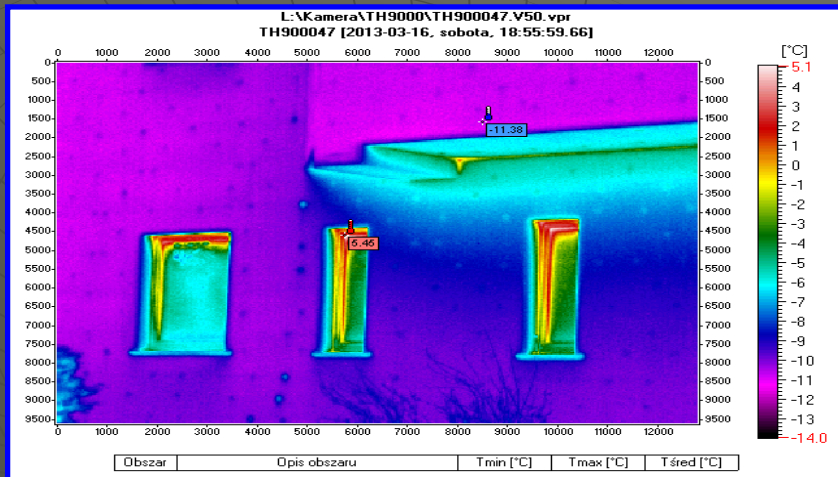
Diagnostyka budynków



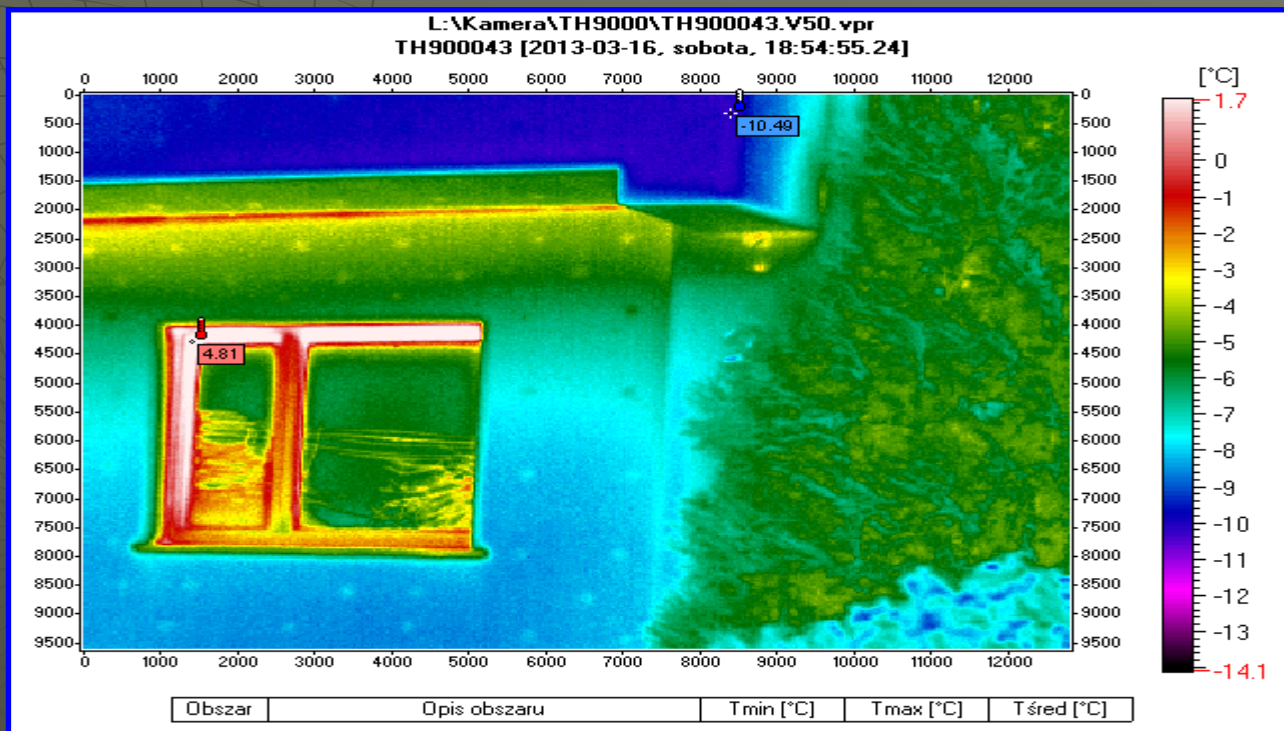
Diagnostyka budynków



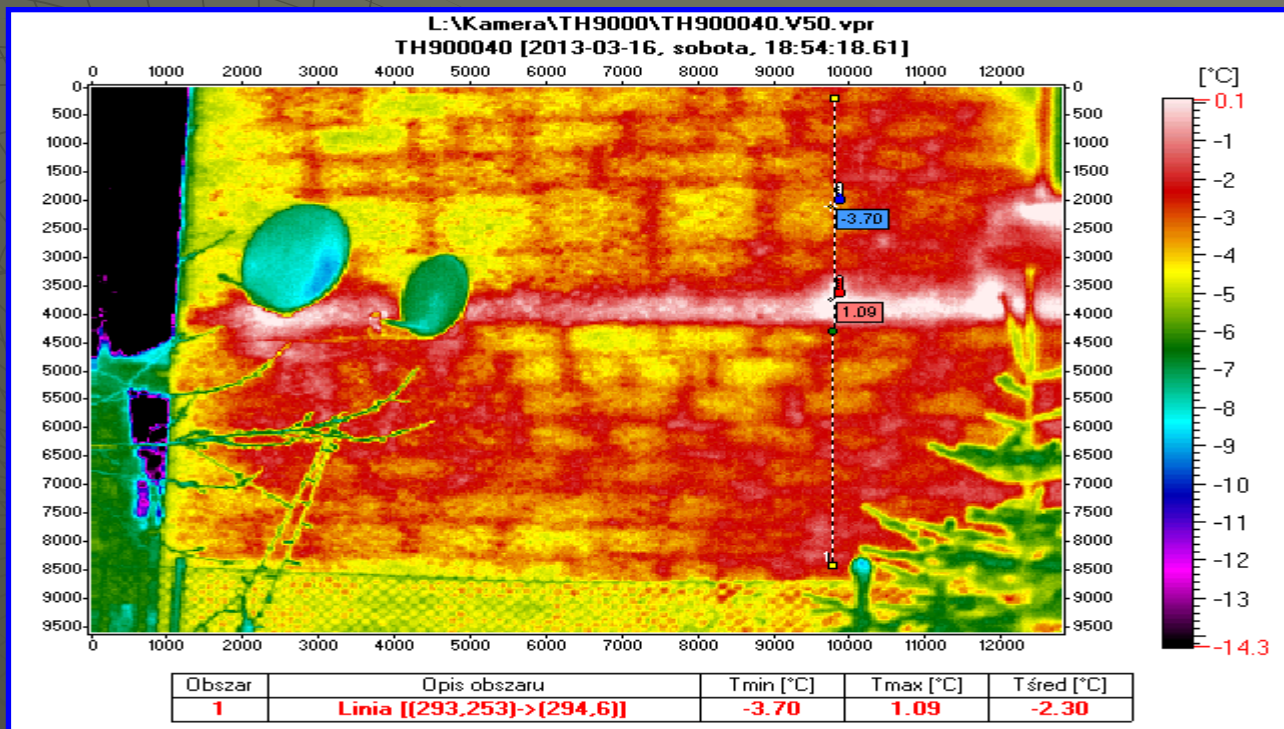
Diagnostyka budynków



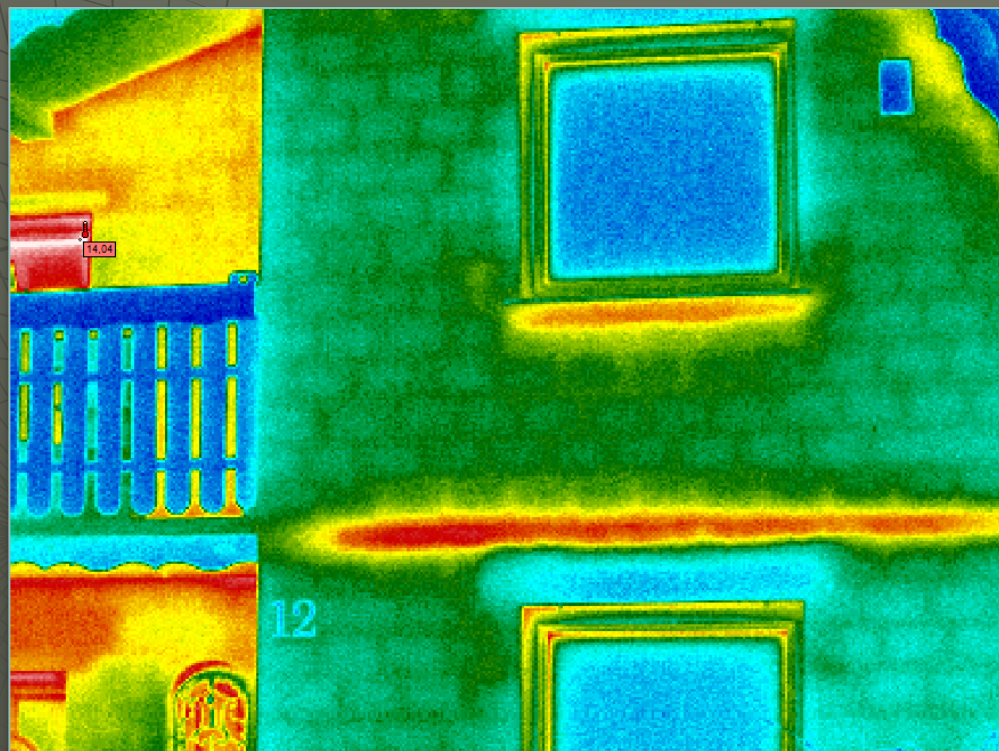
Diagnostyka budynków

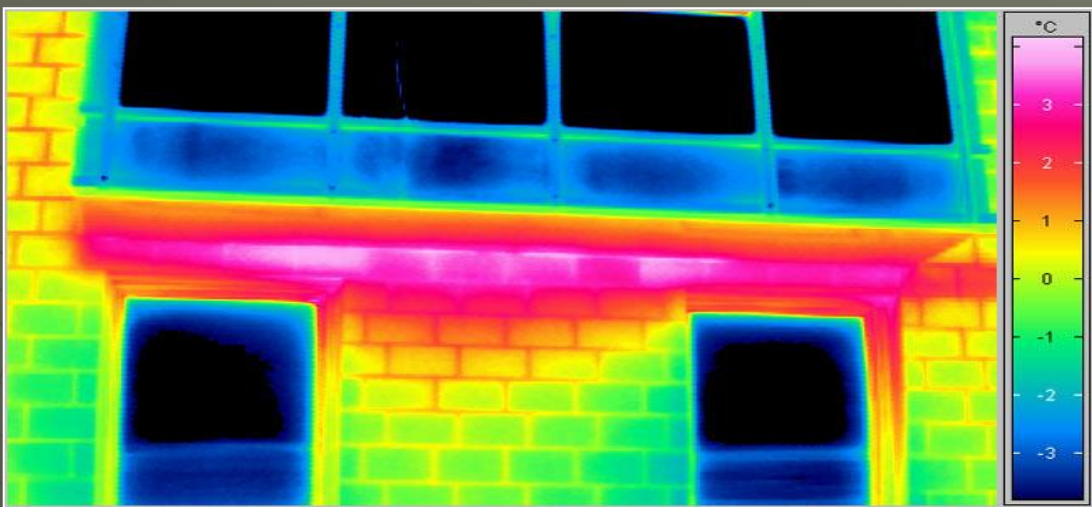


Diagnostyka budynków



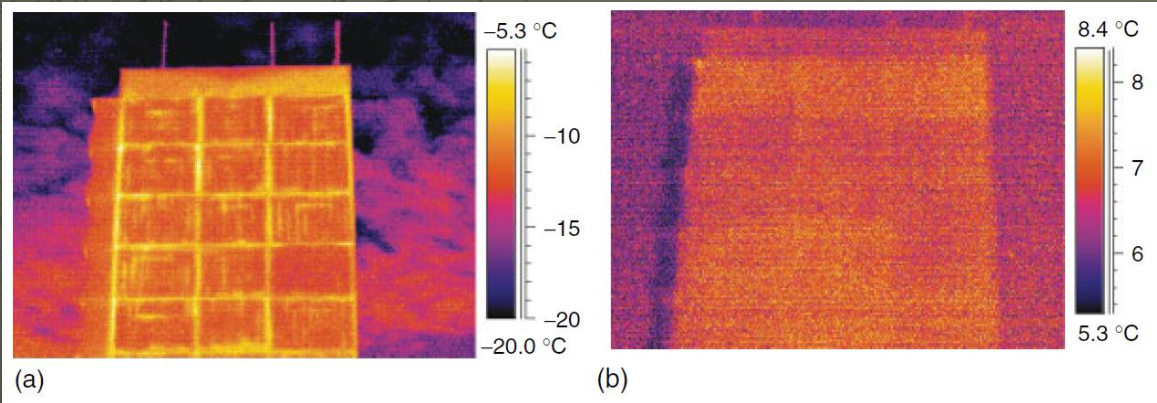
Diagnostyka budynków



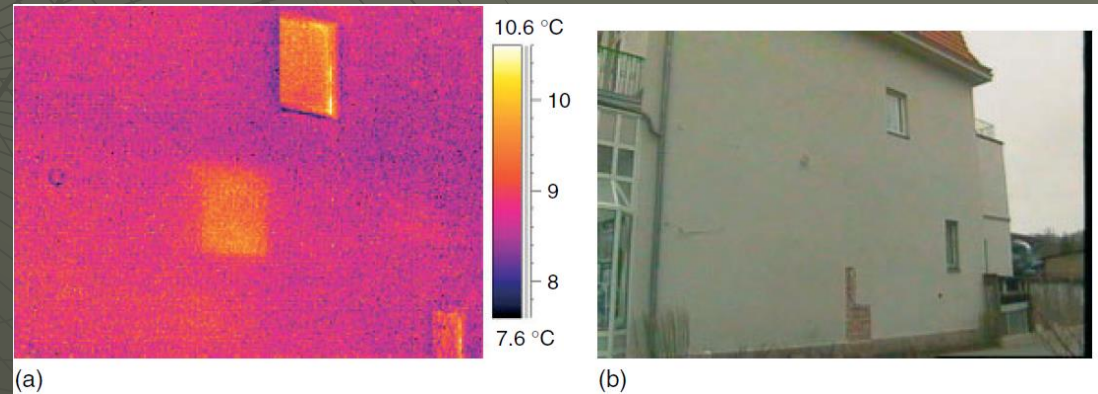
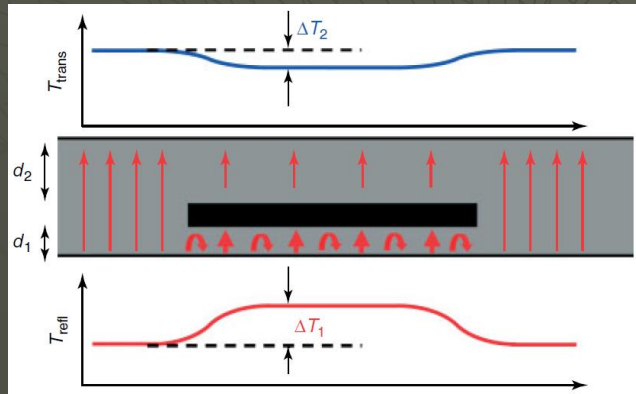
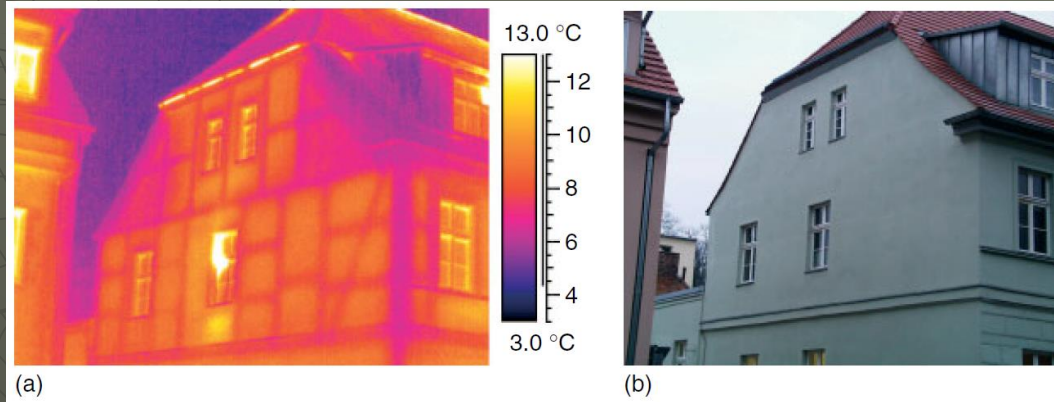


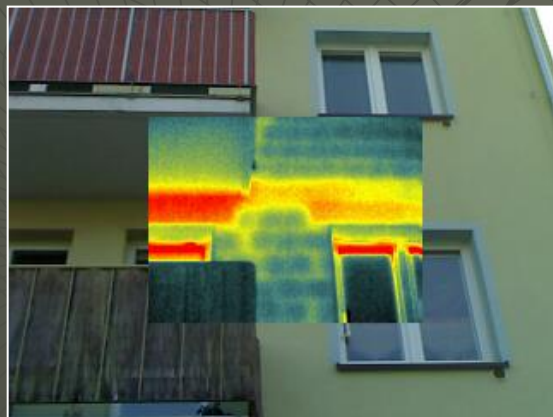
Diagnostyka budynków

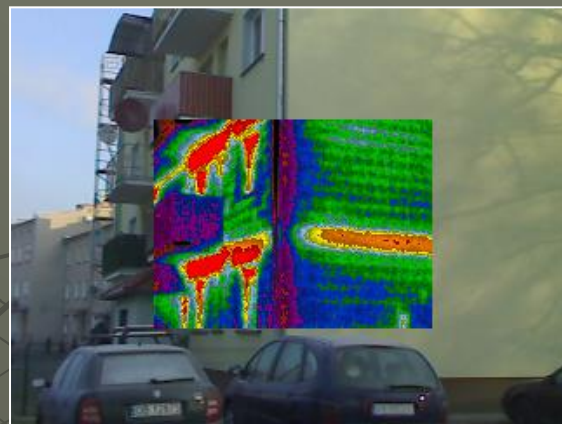
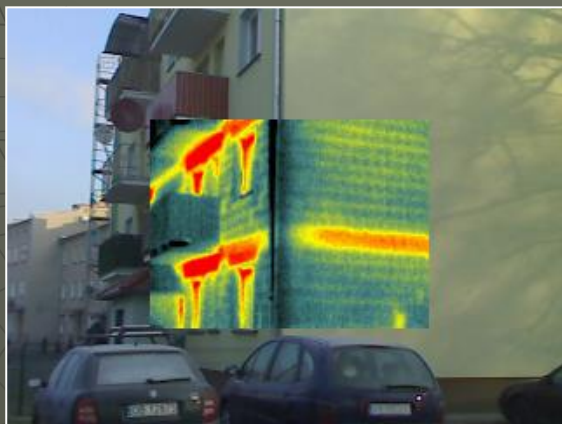
Uszkodzenia lub braki izolacji cieplnej



Diagnostyka budynków

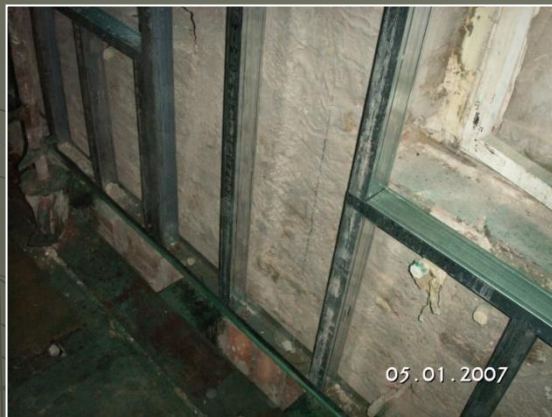




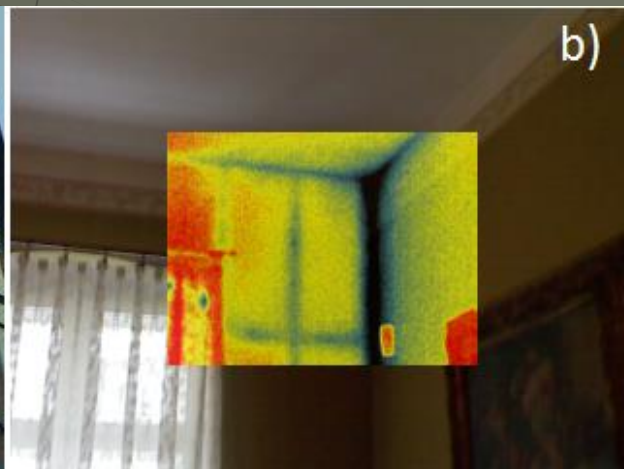
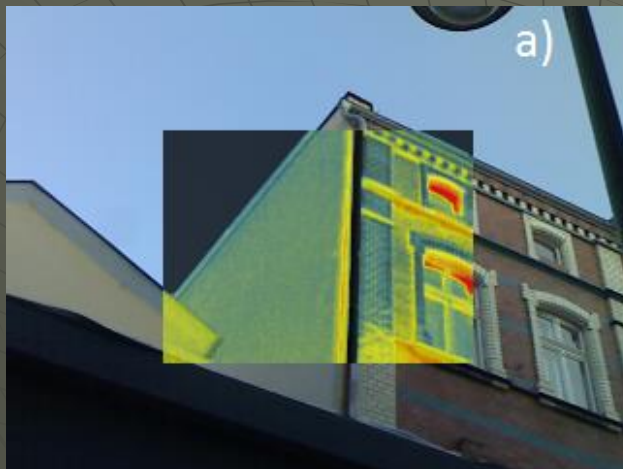


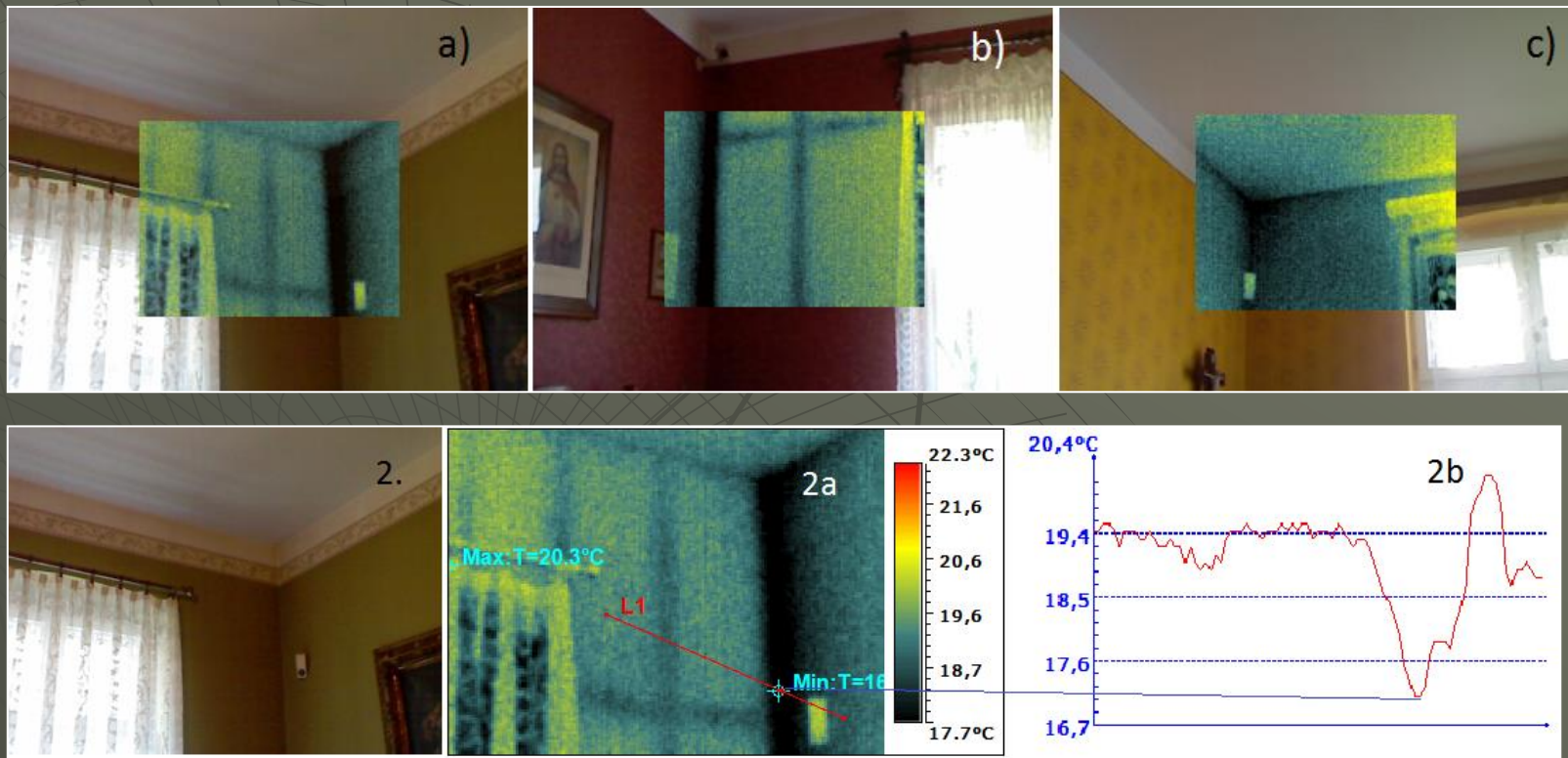
Materiały i współpraca: dr hab. inż. Dariusz Bajno





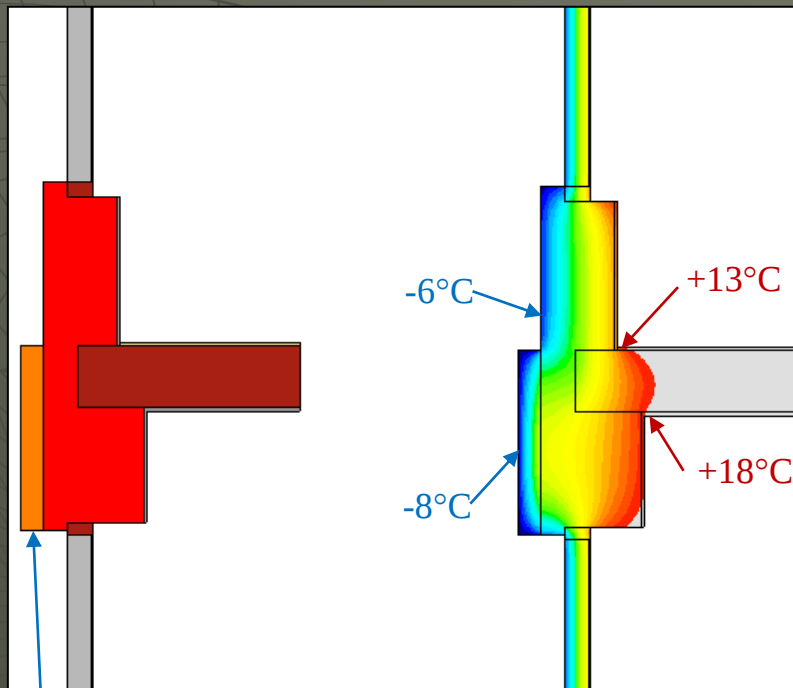
Materiały i współpraca: dr hab. inż. Dariusz Bajno



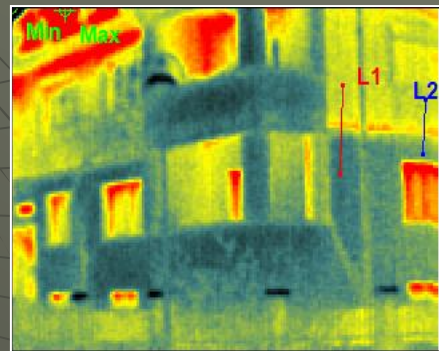


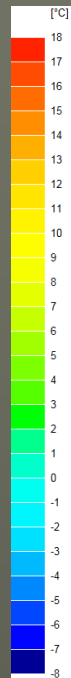
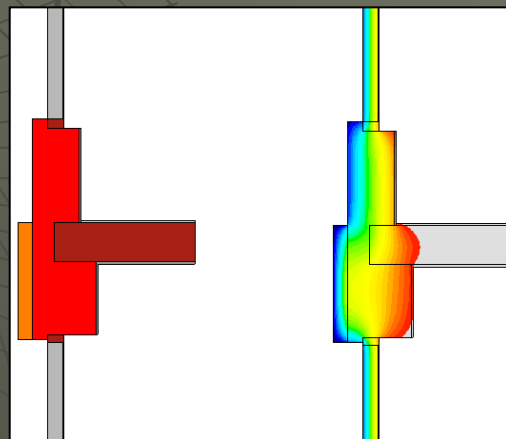
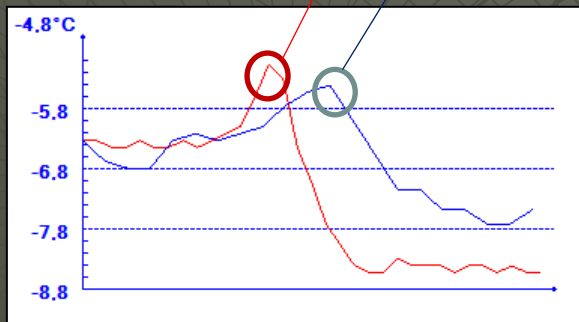
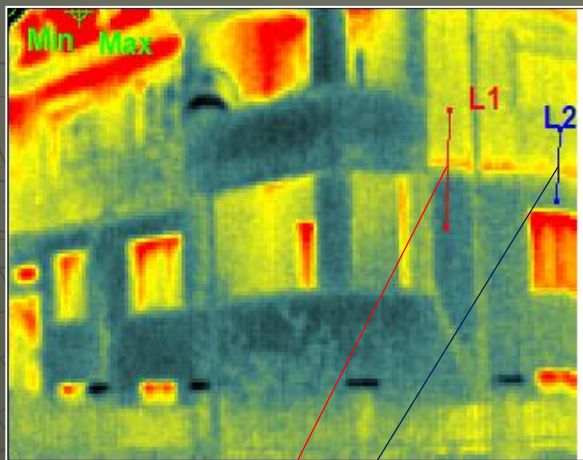
OBRAZ TERMOWIZYJNY ŚCIANY FRONTOWEJ przy temp. otoczenia ok. $\pm 0^{\circ}\text{C}$ i wewnętrznej $+20^{\circ}\text{C}$

Materiały i współpraca: dr hab. inż. Dariusz Bajno



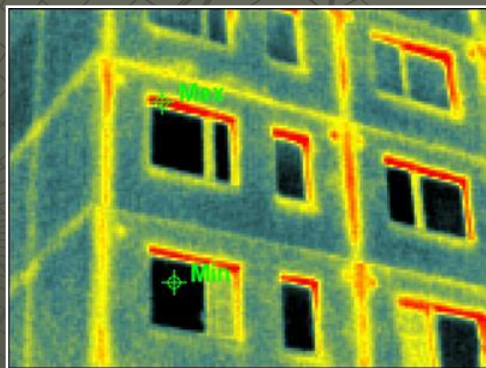
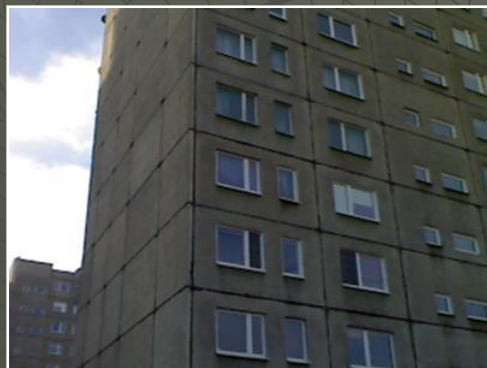
styropian gr. 10 cm

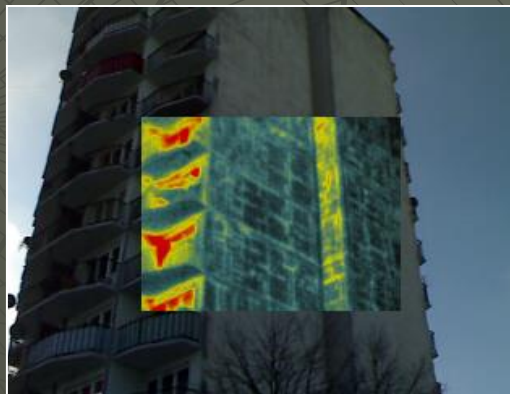
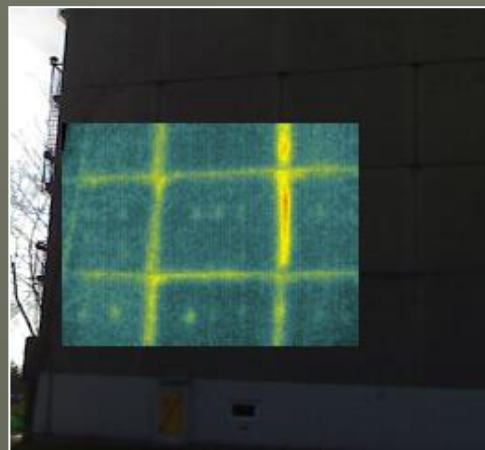




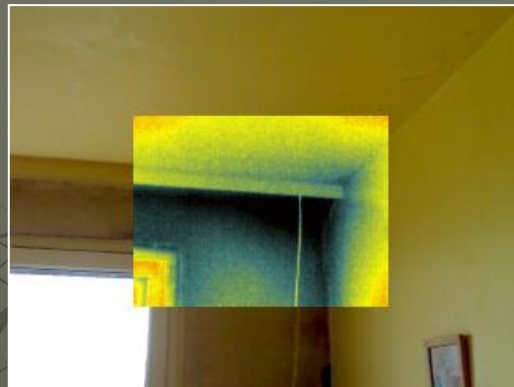
Termomodernizacja istniejących budynków wykonanych w technologiach prefabrykowanych

Materiały i współpraca: dr hab. inż. Dariusz Bajno



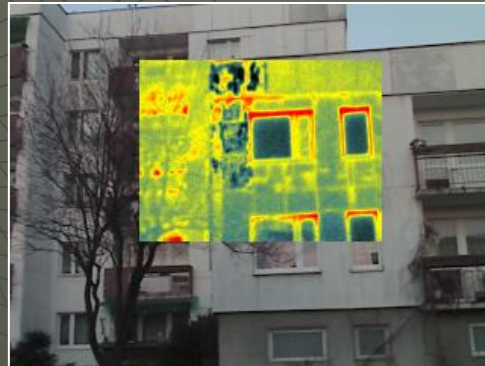
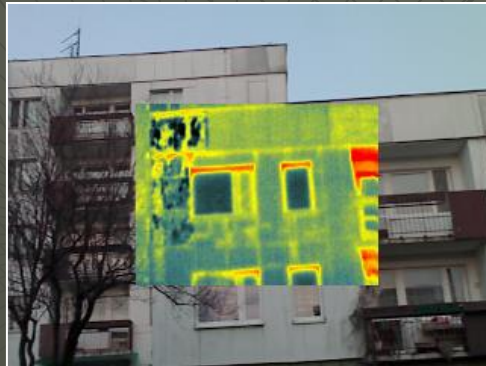
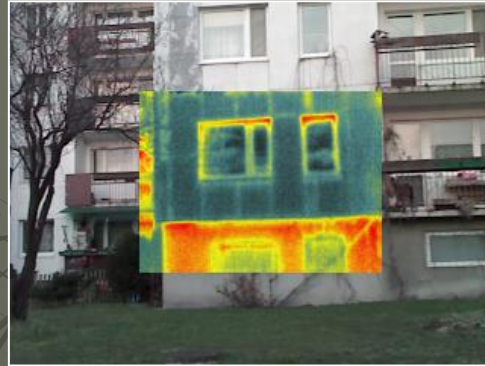
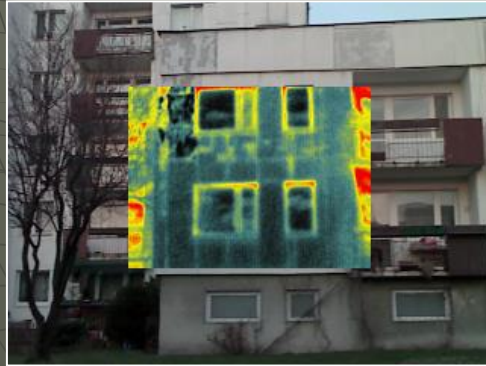


Współpraca: dr hab. inż. Dariusz Bajno



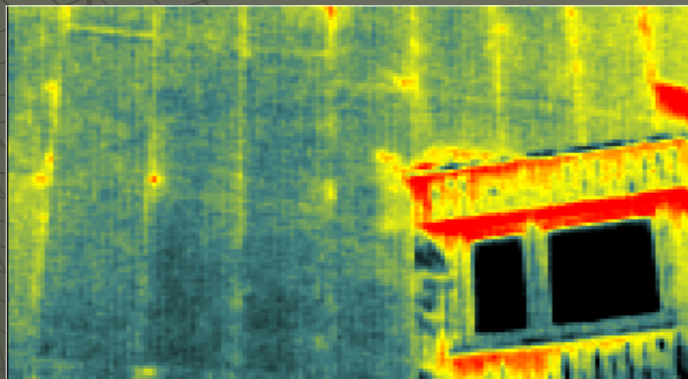
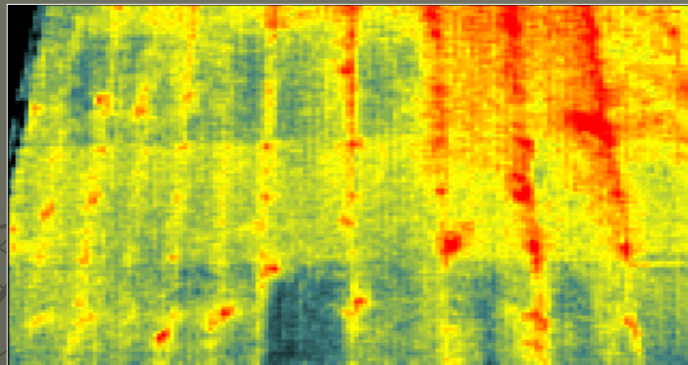
Współpraca: dr hab. inż. Dariusz Bajno

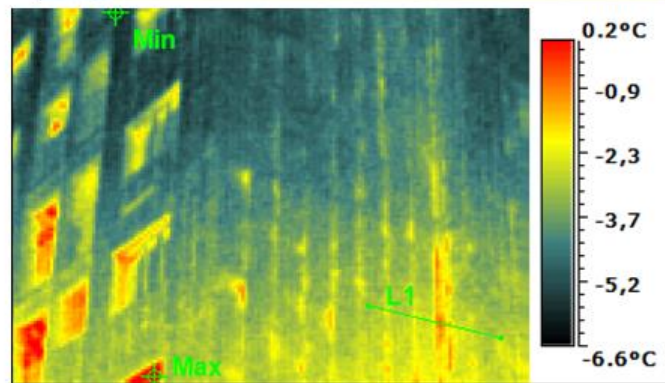
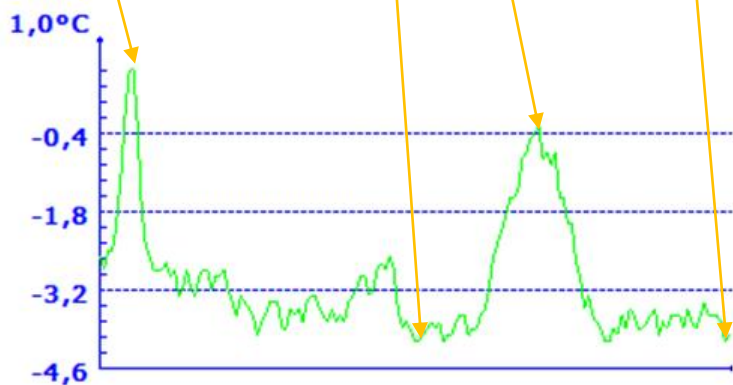
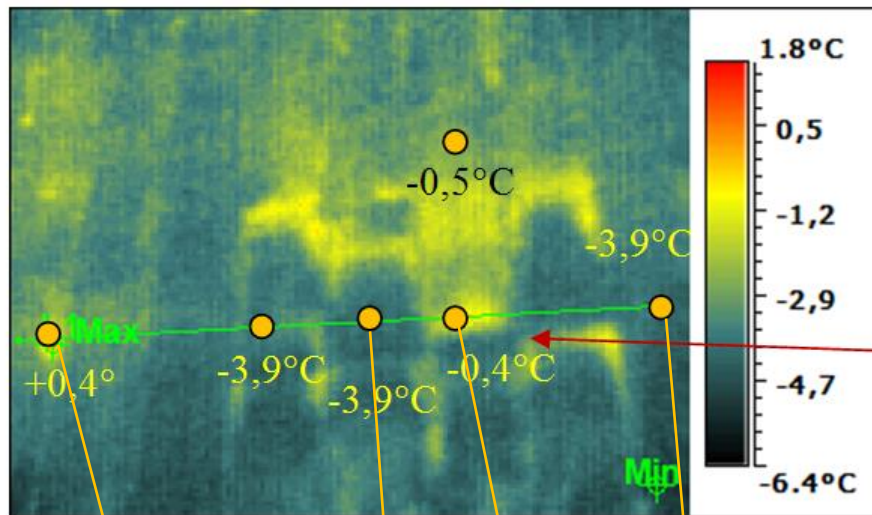
Technologia „Wielka płyta”

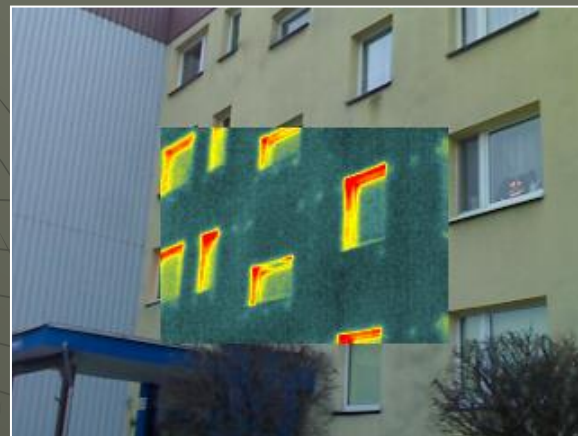
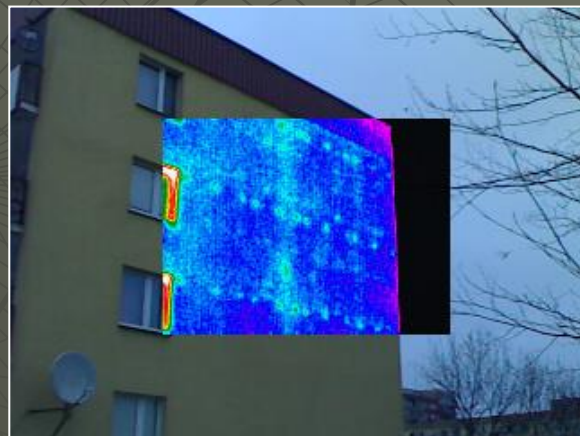
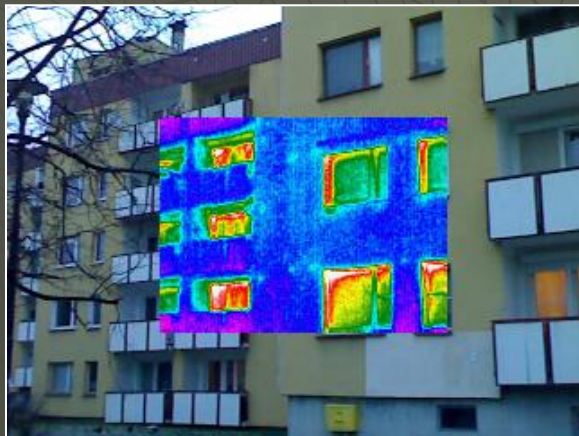
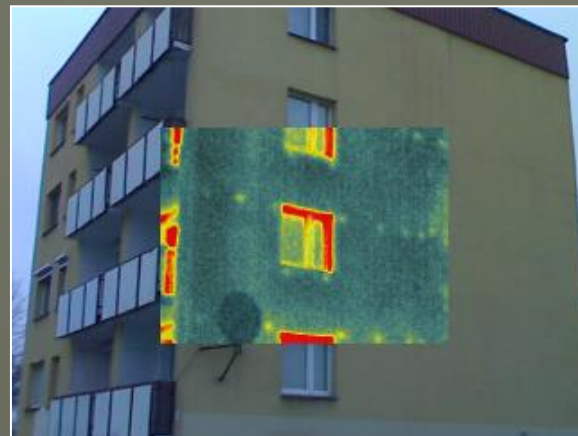
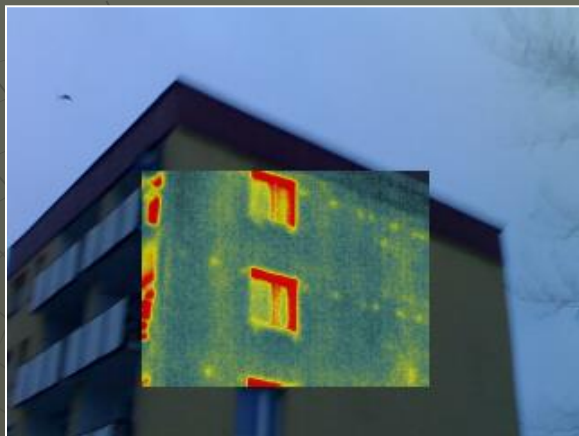


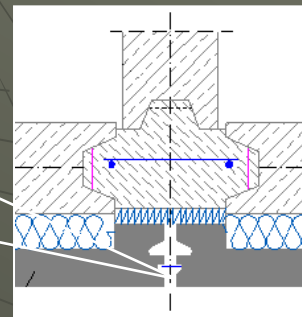
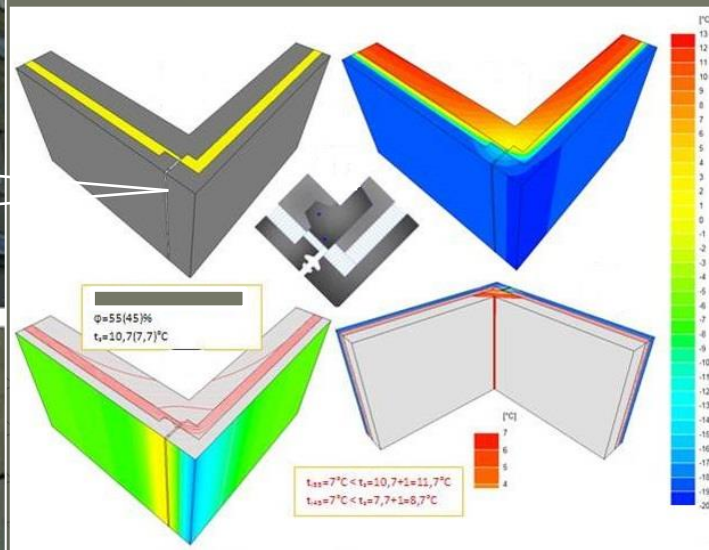
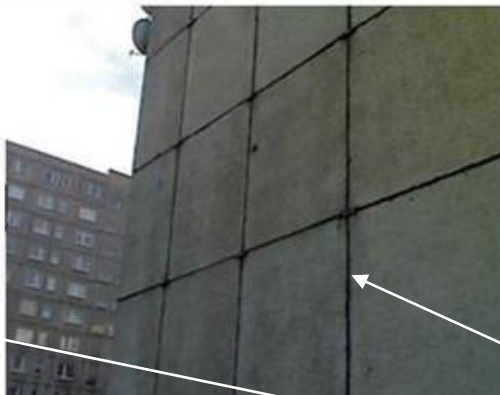
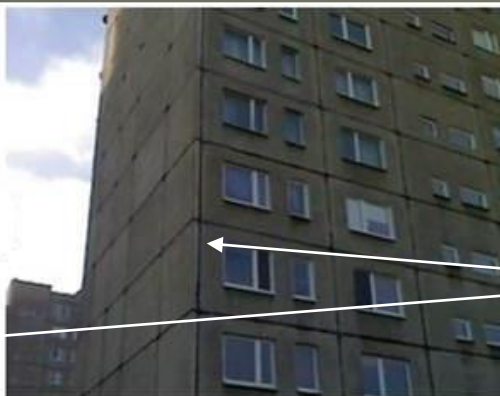
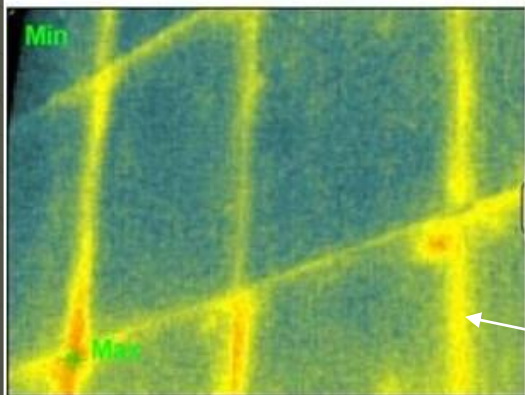
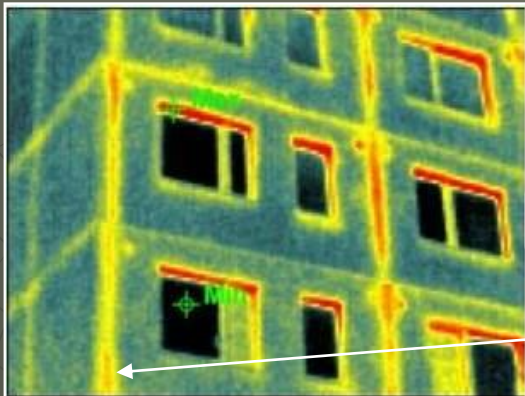


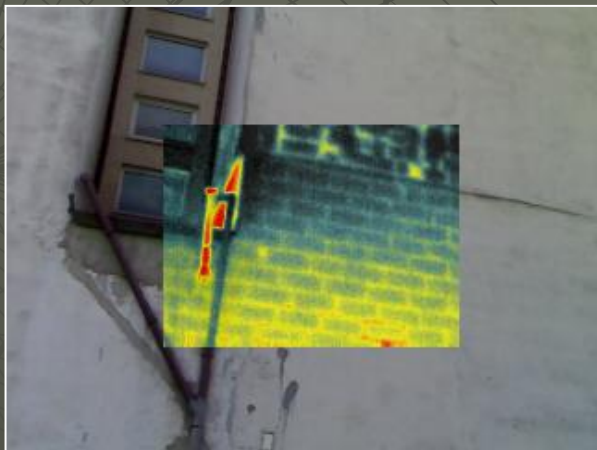
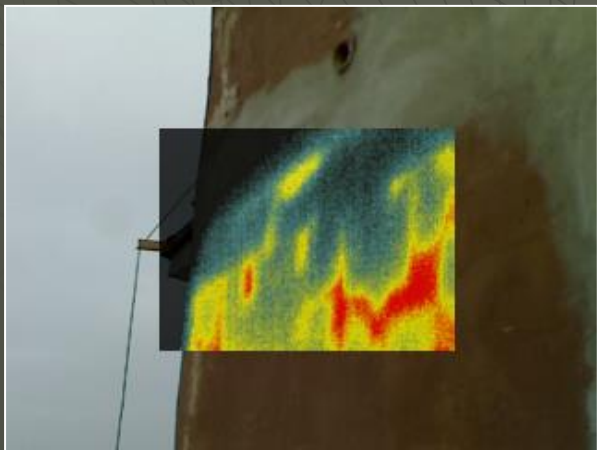
Współpraca: dr hab. inż. Dariusz Bajno



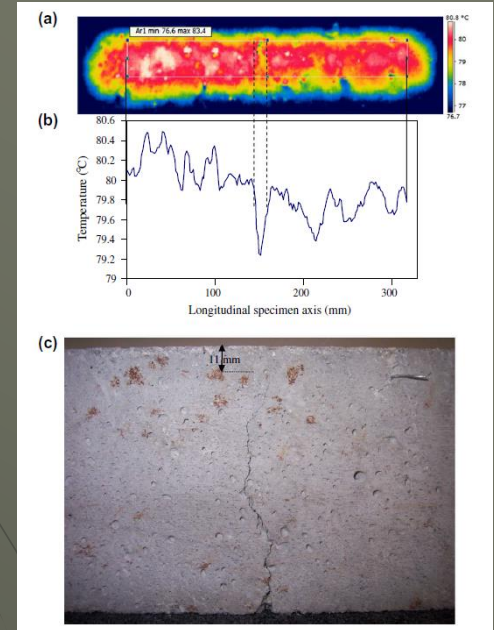
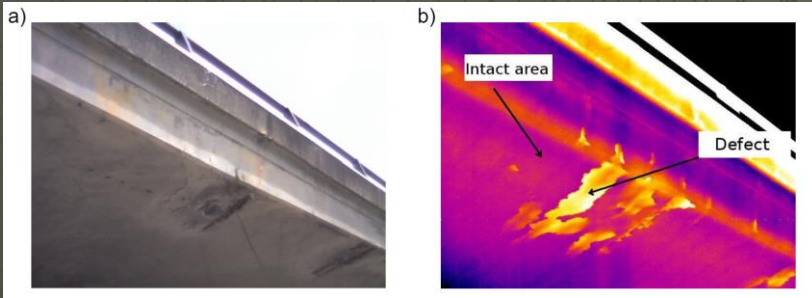


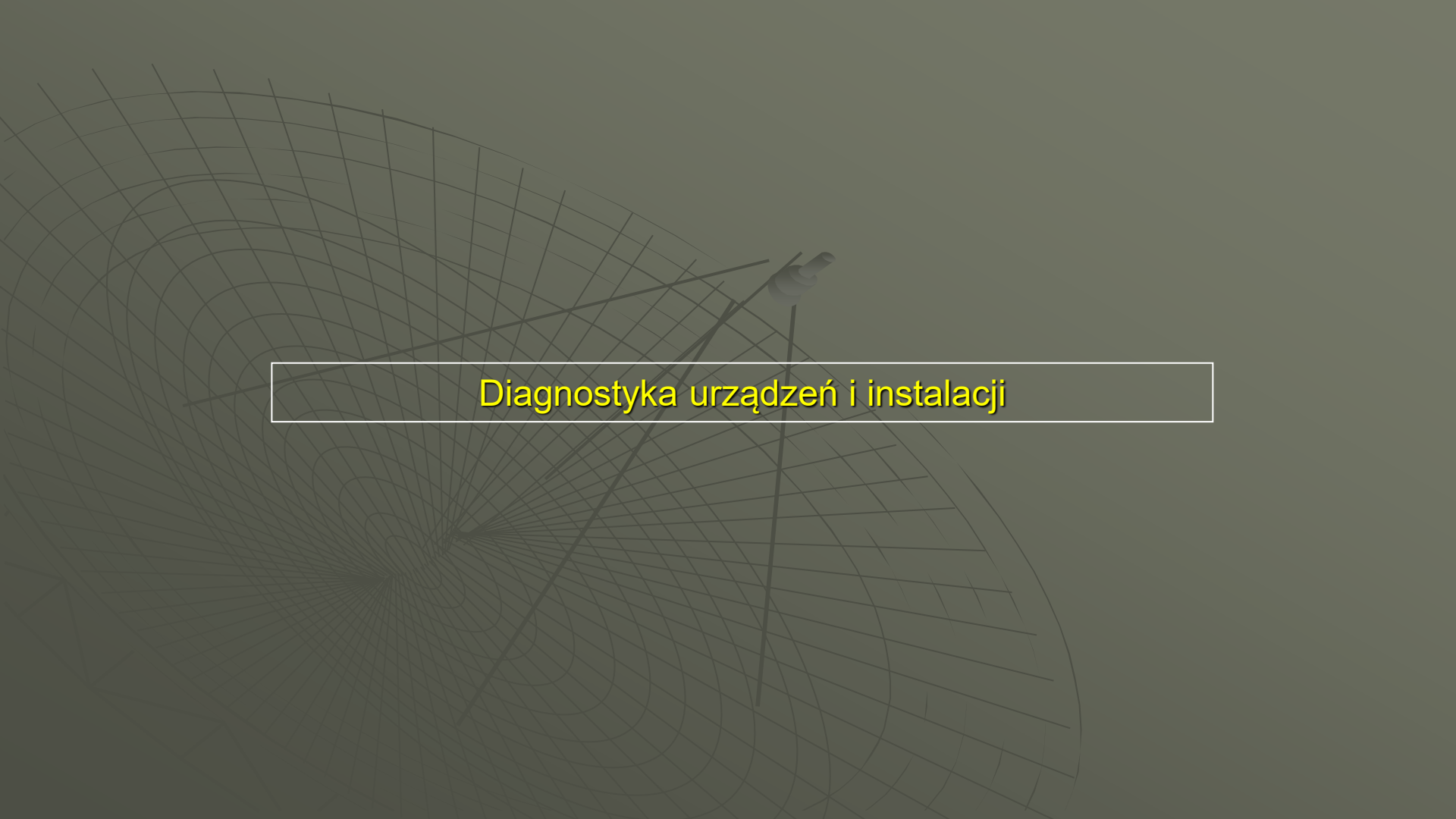






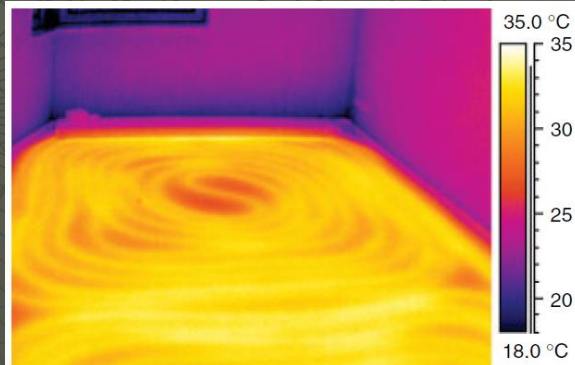
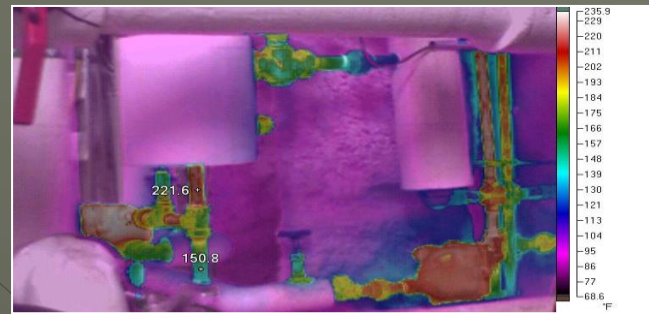
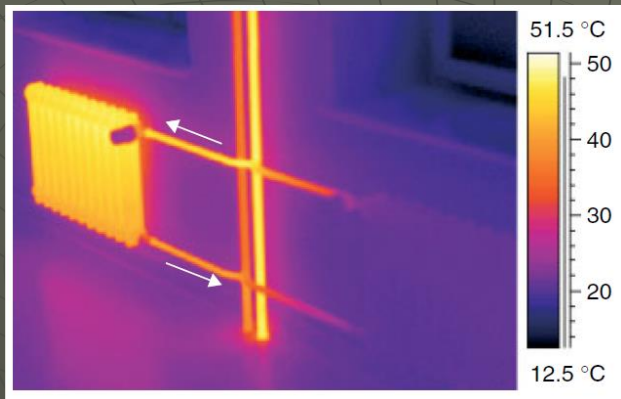
Diagnostyka konstrukcji żelbetowych





Diagnostyka urządzeń i instalacji

Diagnostyka urządzeń i instalacji



(a)

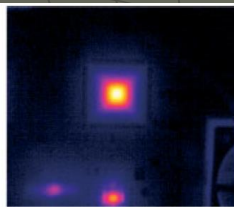


(b)

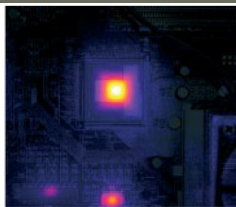
Diagnostyka urządzeń i instalacji



(a)



(b)



(c)



(a)



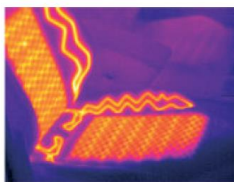
(b)



(c)



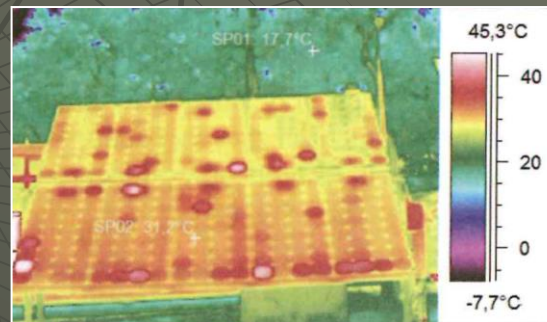
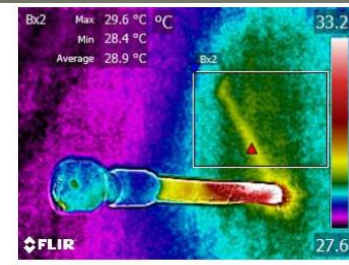
(a)



(b)



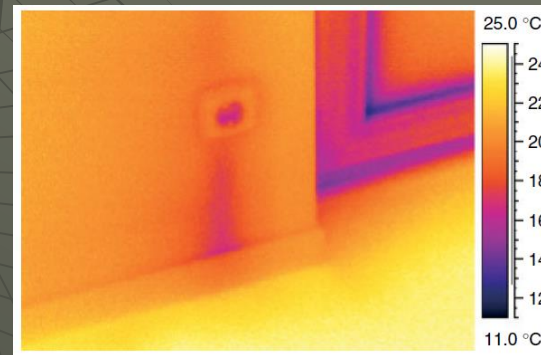
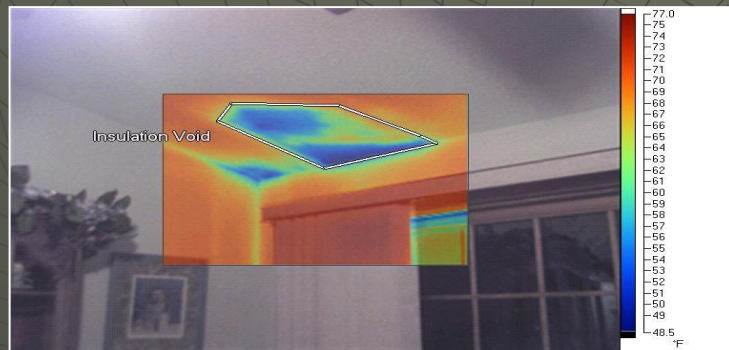
(c)



Nowak H.: Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie, OW Polit. Wroc., 2012

Vollmer M., Mollmann K.P.: Infrared Thermal Imaging, WILEY-VCH, 2010

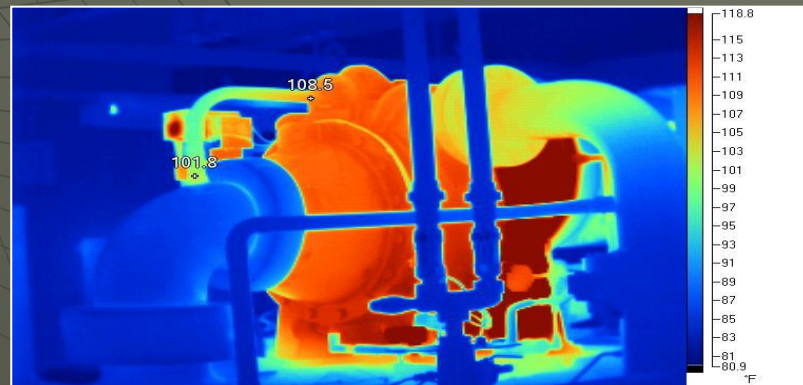
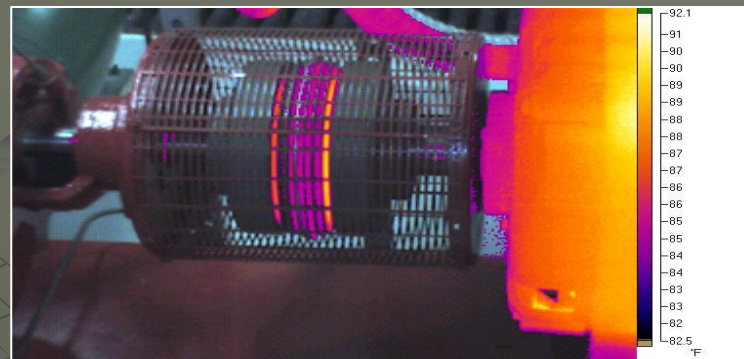
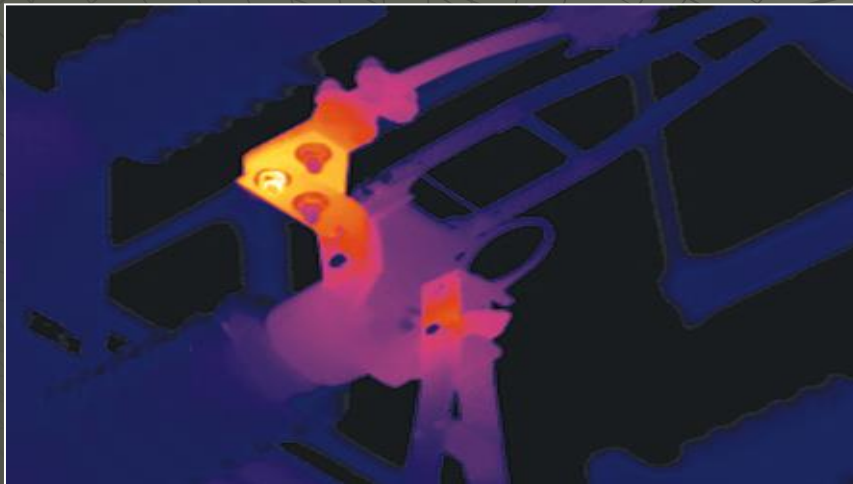
Diagnostyka ukrytych awarii

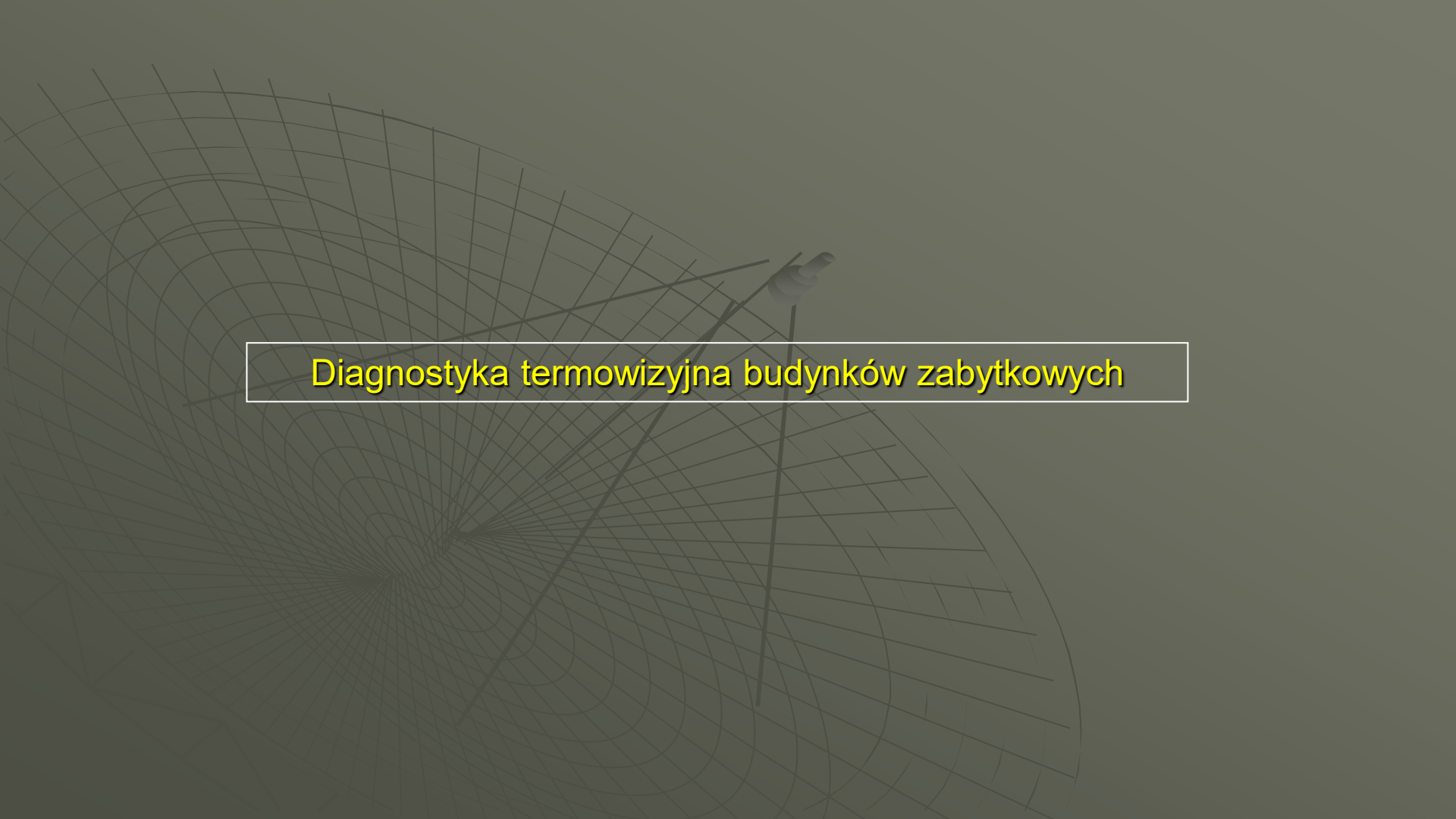


Vollmer M., Mollmann K.P.: **Infrared Thermal Imaging**, WILEY-VCH, 2010

Nowak H.: **Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie**, OW Polit. Wroc., 2012

Diagnostyka urządzeń



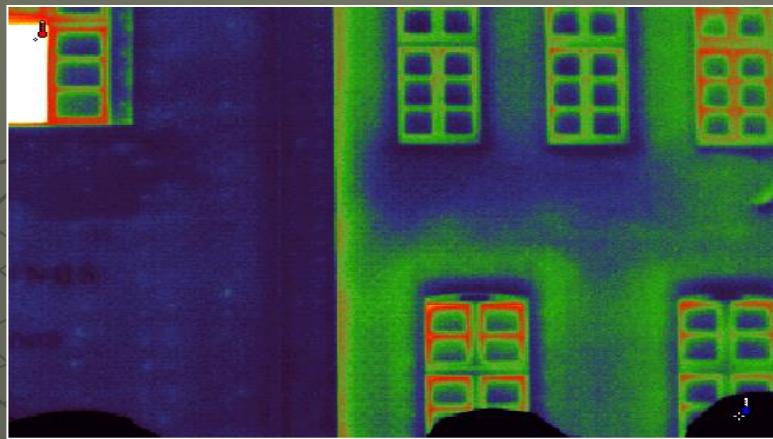
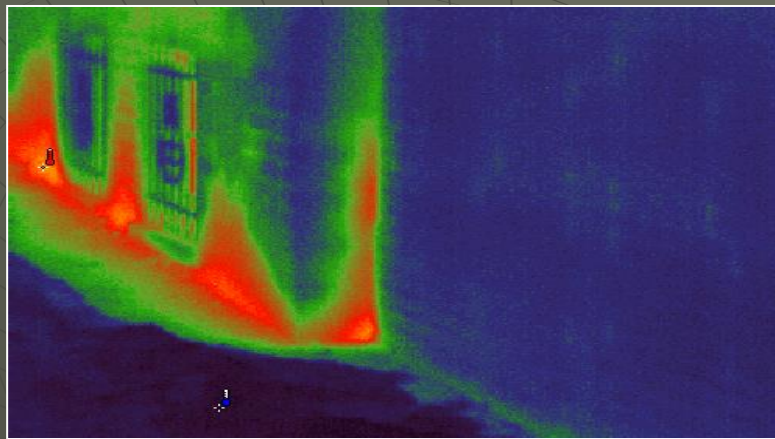
The background of the slide features a faint, stylized thermal image of a building. Overlaid on this is a grid of concentric circles and radial lines, resembling a polar coordinate system or a sonar scan. A small, dark icon of a thermal camera or sensor is positioned near the top right of the grid.

Diagnostyka termowizyjna budynków zabytkowych

Diagnostyka termowizyjna budynków zabytkowych



Diagnostyka termowizyjna budynków zabytkowych



Diagnostyka termowizyjna budynków zabytkowych



Available online at www.sciencedirect.com

SCIENCE@DIRECT®

NDT&E International 18 (2005) 402–410

NDT&E
international

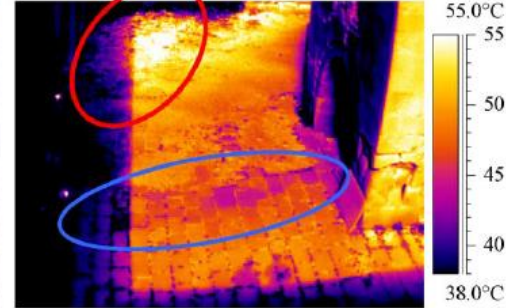
www.elsevier.com/locate/ndt&e

Use of IR thermography for the assessment of surface-water drainage problems in a historical building, Ağzıkarahan (Aksaray), Turkey

A. Tavakuoğlu^{a,*}, A. Düzgüneş^b, E.N. Caner-Saltık^c, Ş. Demirci^d



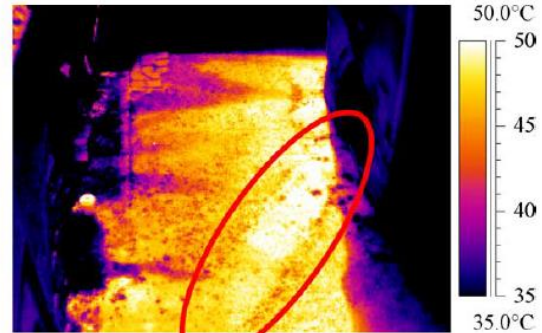
(a)



(b)



(a)



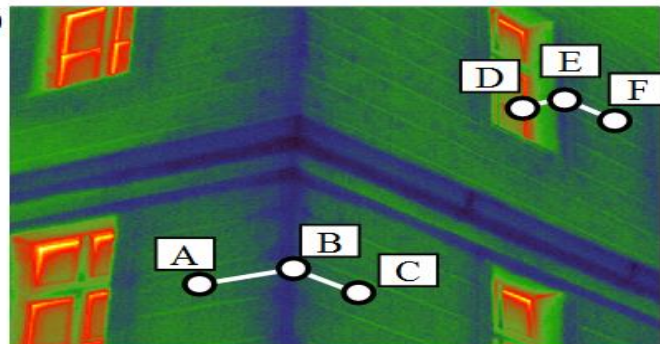
(b)

Diagnostyka mostków cieplnych*

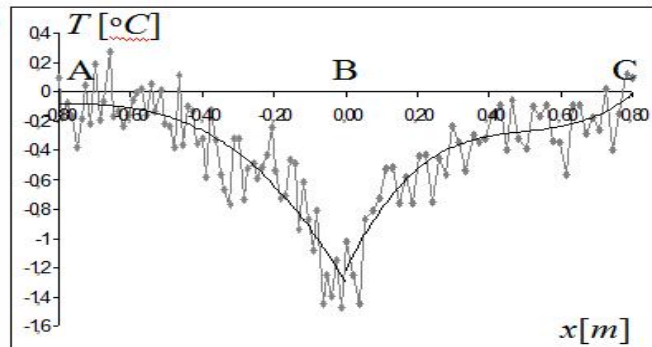
a)



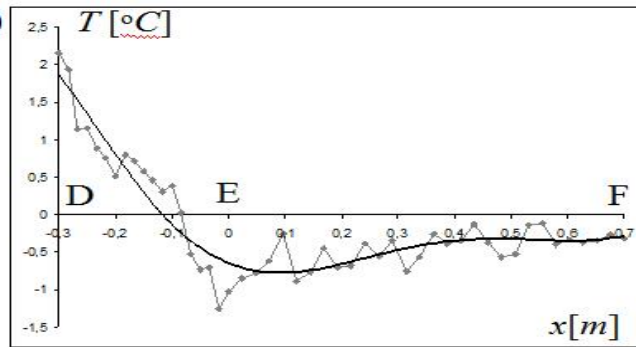
b)



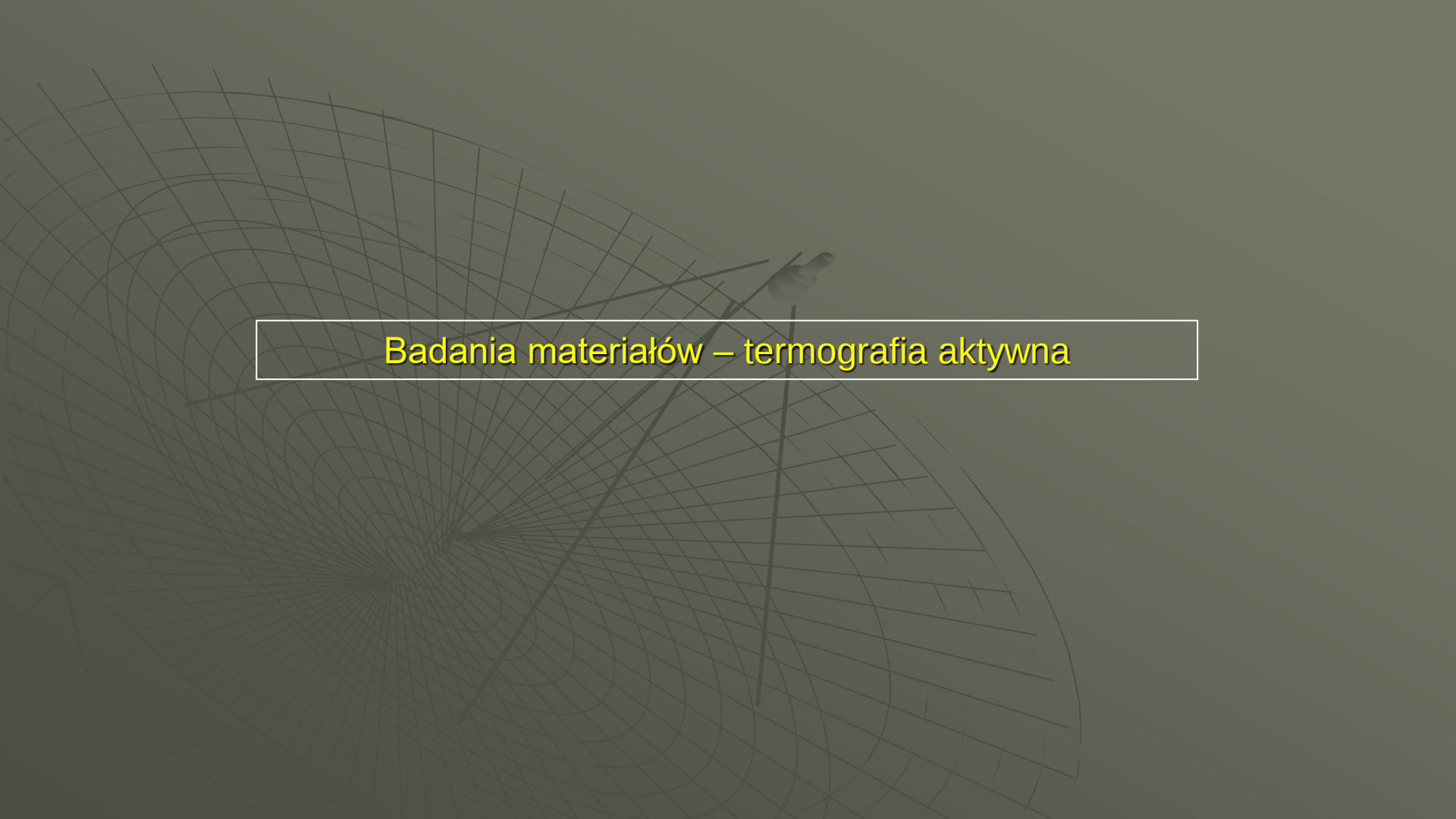
c)



d)

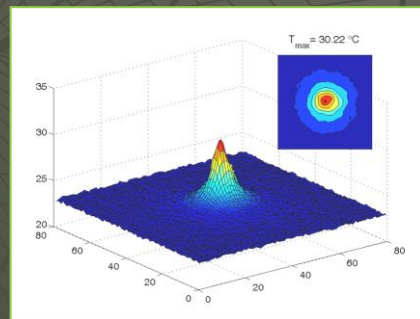
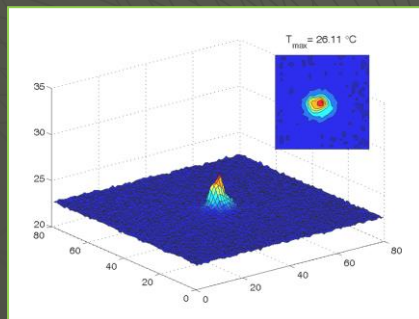
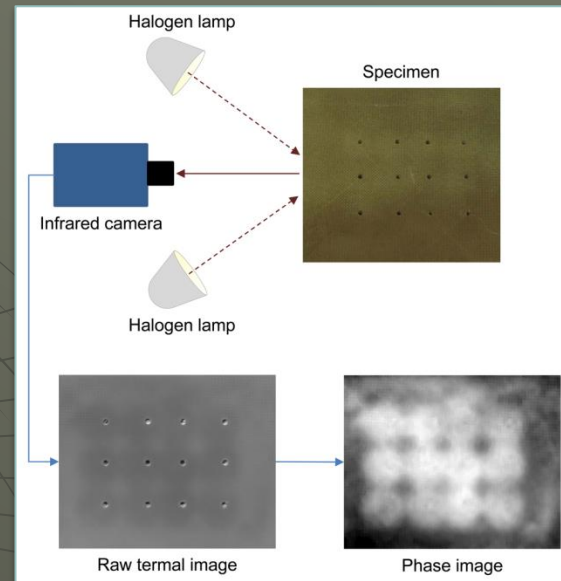
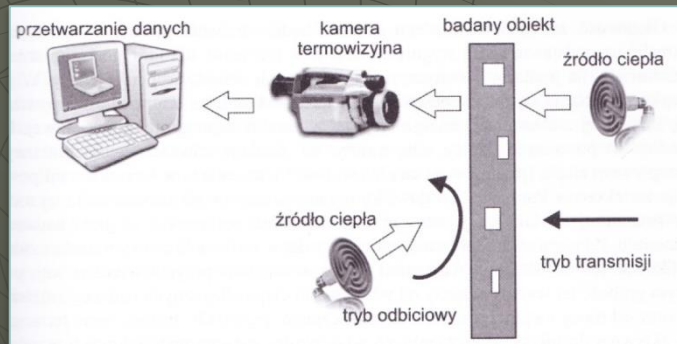


* autorzy: J. Świrski-Perkowska, Z. Perkowski, K. Pawlik – KFM WBia PO



Badania materiałów – termografia aktywna

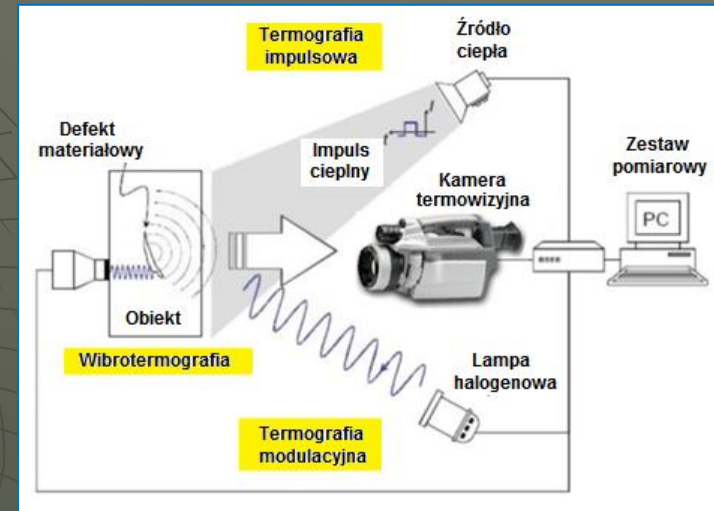
Badania materiałów – termografia aktywna



Systematyka aktywnych badań termowizyjnych

Termografia aktywna obejmuje kilka rodzajów metod:

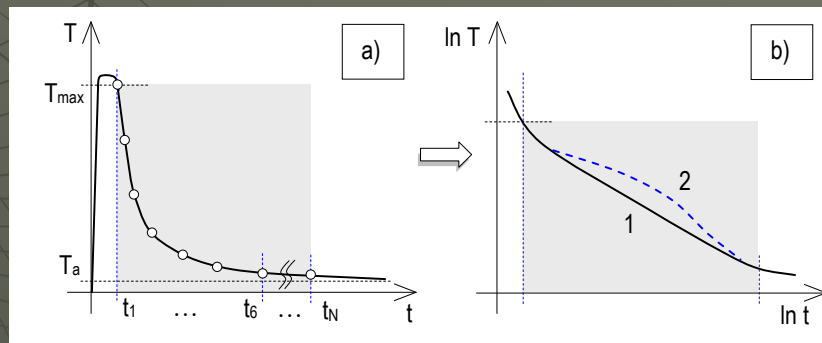
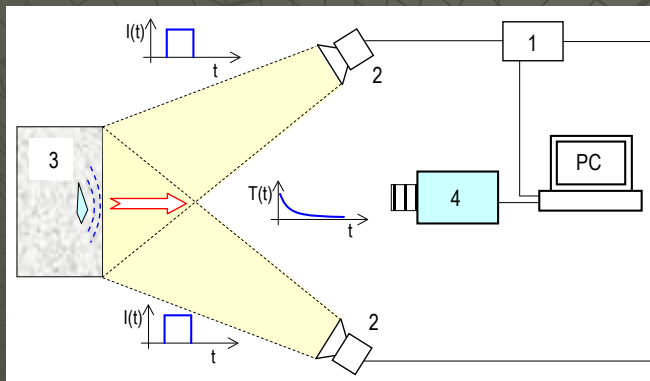
- **impulsową** (ang.: *Pulsed Thermography*, PT, *Transient Thermography*, *Flash Thermography*, *Thermal Wave Imaging*),
- **modulowaną** (ang.: *Lock-in Thermography*, LT),
- nagrzewanie skokowe (ang.: *Time-Resolved Infrared Radiometry*) lub SH (ang.: *Step Heating*),
- **modulowaną częstotliwościowo** (ang.: *Frequency Modulated Thermal Wave Imaging*, TMTWI),
- **laserową transmisyjną i odbiciową** (ang.: *Laser Spot Thermography*, LST),
- **impulsową prądów błędzących** (ang.: *Eddy Current Pulsed Thermography*, ECPT),
- **wibrotermografię** **ultradźwiękową** (ang.: *Vibrothermography*, *Ultrasonic Thermography*, UT)
- **oraz inne**, będące często **kombinacją powyższych**, np. termografia modulowana ultradźwiękowa (ang.: *Ultrasound Lock-in Thermography*, ULT), czy impulsowo-fazowa (ang.: *Pulsed Phase Thermography*, PPT)



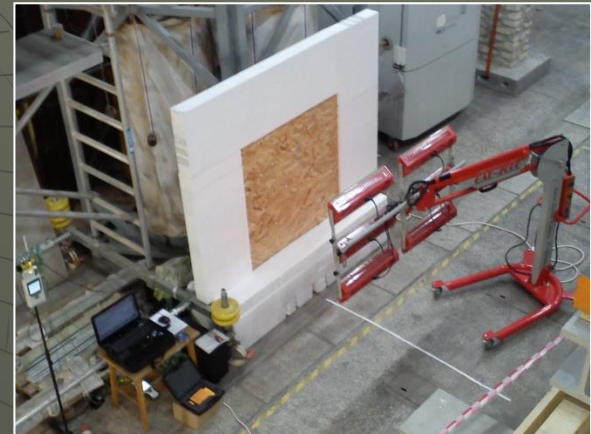
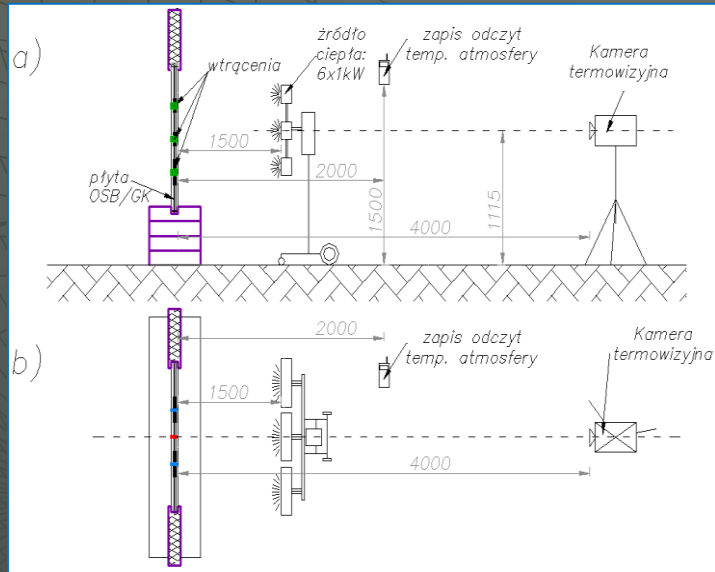
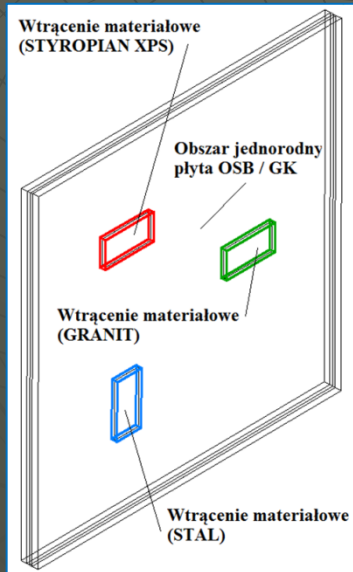
Grafika: dr inż. **Łukasz Nowak** (PWr)

Termografia impulsowa (PT)

Termografia impulsowa (ang. *Pulsed Thermography*) opiera się na rejestracji odpowiedzi termicznej układu na krótki impuls strumienia światła, którego źródłem jest lampa błyskowa (lub ich zespół) o dużej energii (rzędu kilku do kilkunastu kJ) i czasie trwania ok. 2-20 ms.



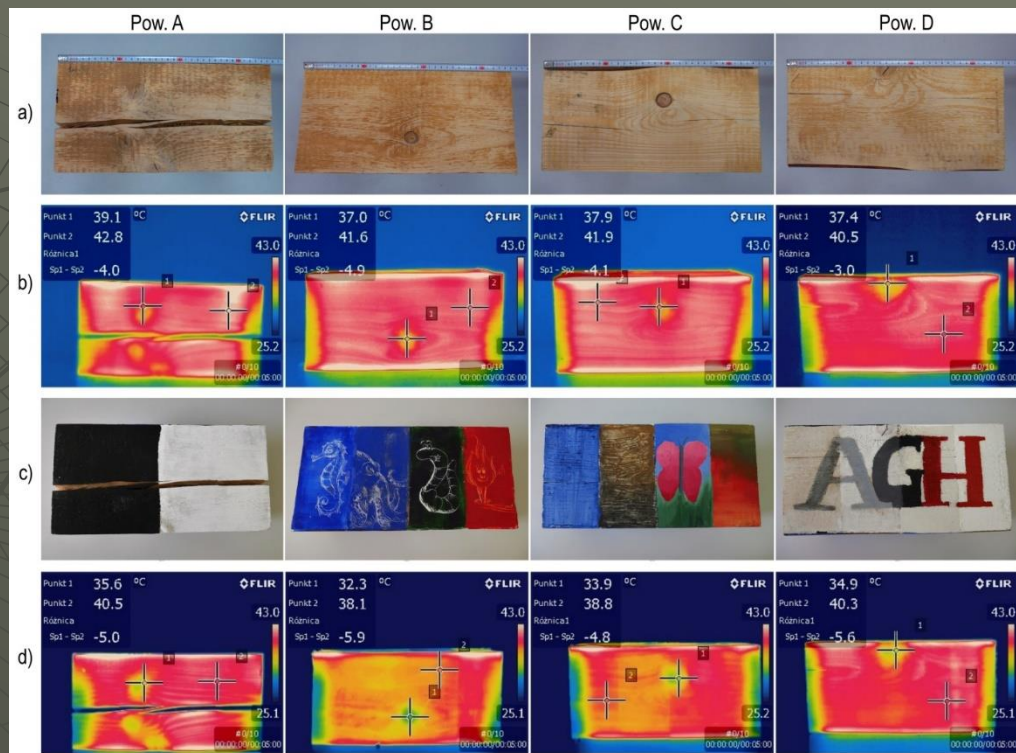
Termografia impulsowa (PT)

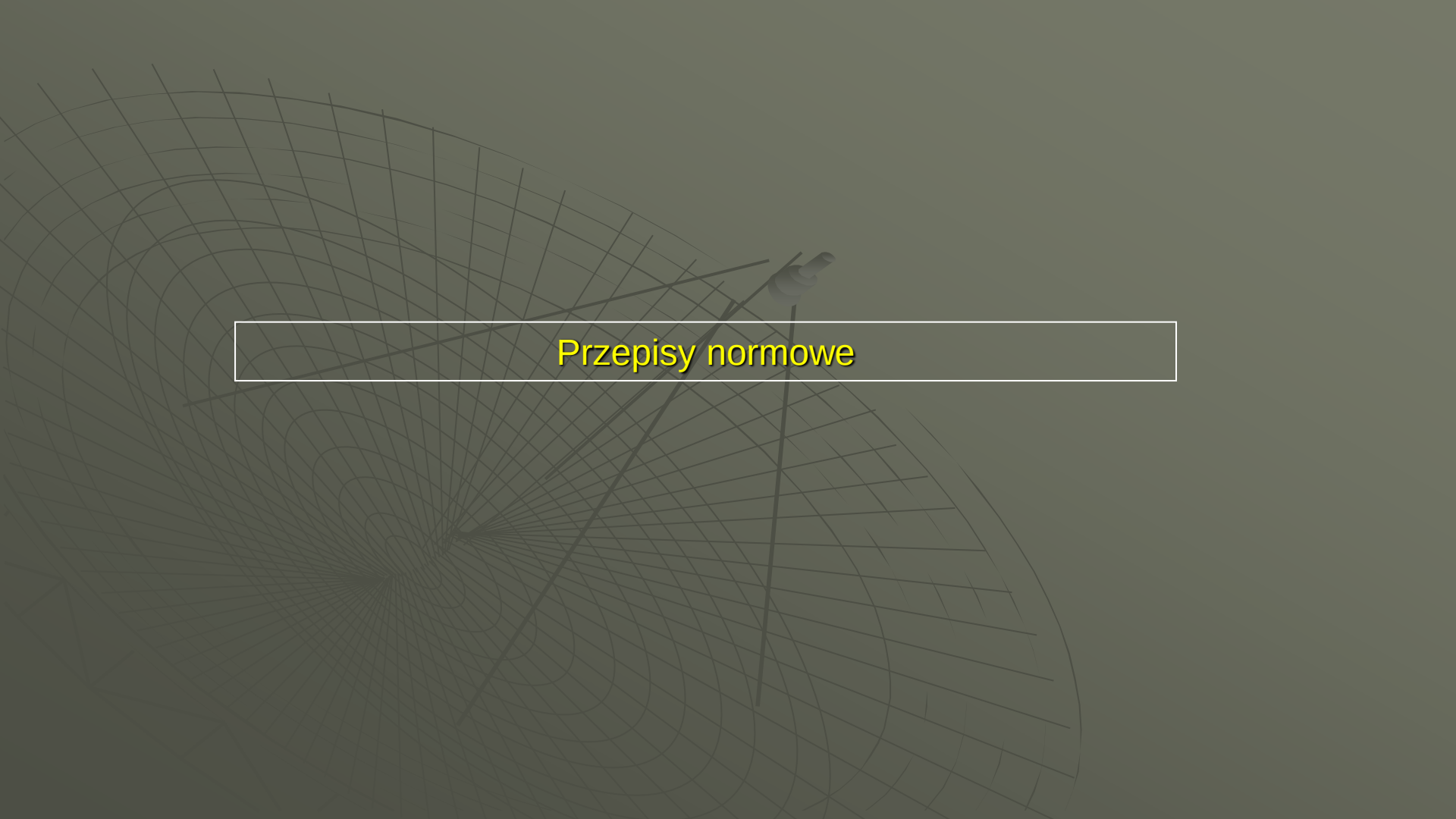


Termografia impulsowa (PT)



© M. Kucharska, M. Skóra

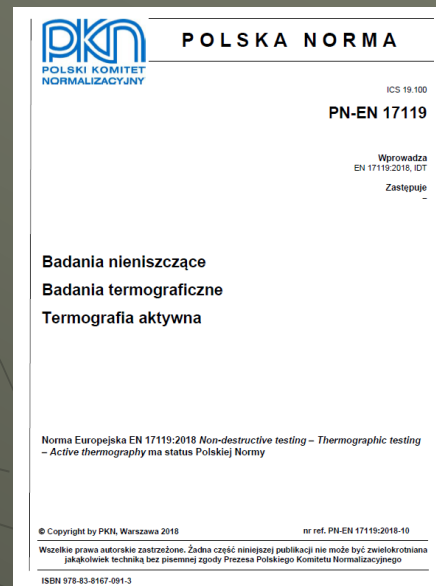
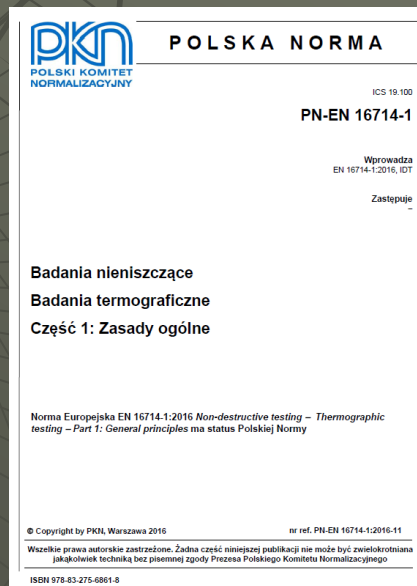
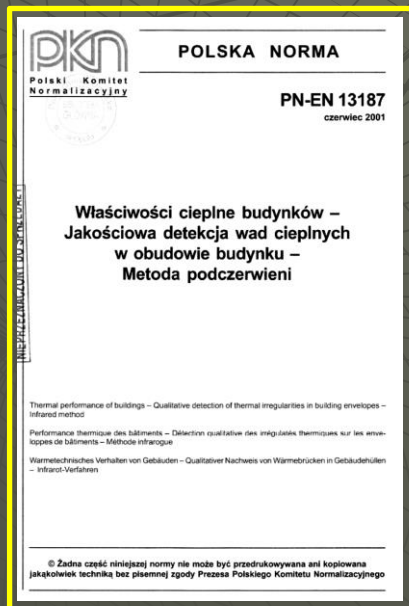
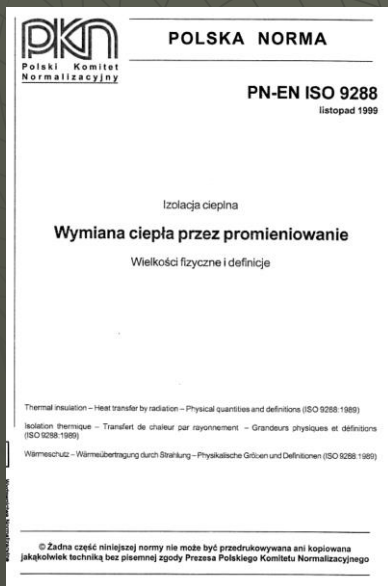




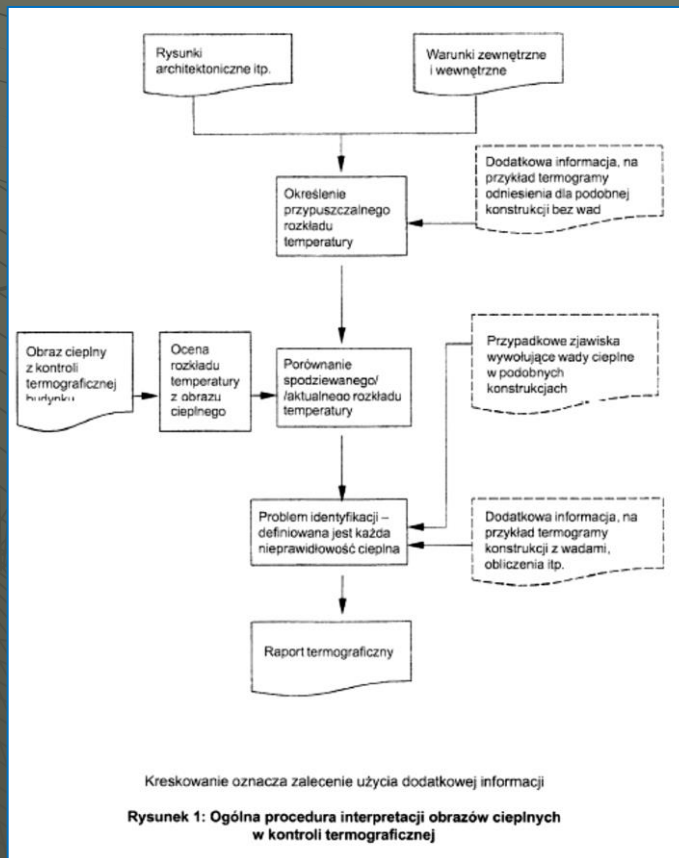
Przepisy normowe

Przepisy normowe

1. PN-EN ISO 9288:1999 Izolacja cieplna. Wymiana ciepła przez promieniowanie. Wielkości fizyczne i definicje.
2. PN –EN 13187:2001 Właściwości cieplne budynków. Jakościowa ocena wad cieplnych w obudowie budynku. Metoda podczerwieni.
3. PN-EN 16714-1 Badania nieniszczące. Badania termograficzne. Część 1. Zasady ogólne. (+ cz. 2 i 3)
4. PN-EN 17119 Badania nieniszczące. Badania termograficzne. Termografia aktywna.



Przepisy normowe



Dziękuję za uwagę