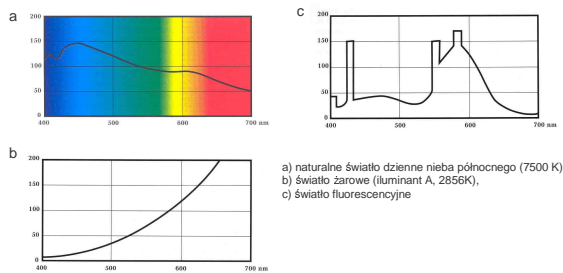


## Barwy i ich modele

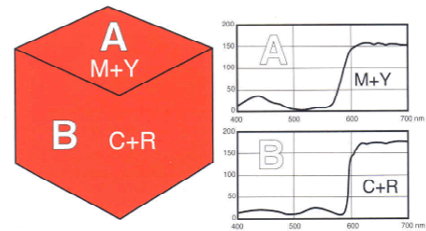
## Światło a percepcja barw

- **Temperatura barwowa** - wielkość służąca do opisu jakości źródeł światła pod względem odcienia barwnego. Jest to temperatura ciała doskonale czarnego, w której rozkład spektralny promieniowania emitowanego przez to ciało jest bardzo zbliżony w widzialnej części widma do rozkładu spektralnego rozważanego źródła światła i obydwie promieniowania wywołują jednakowe wrażenie barwy.
- Normalizacja źródeł światła – **iluminant normalny** (źródło światła odpowiadające promieniowaniu ciała doskonale czarnego o określonej temperaturze)
  - Iluminant normalny A (2855,6 K),
  - Iluminant normalny B (4874 K),
  - Iluminant normalny C (6774 K),
  - Iluminant normalny **D50 (5000 K)** – oryginały przezroczyste (slajdy),
  - Iluminant normalny **D65 (6500 K)** – oryginały refleksyjne (odbijki),

## Przykładowe widma światła



## Metamery



## Barwa a kolor

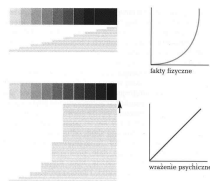
- **Barwa** – psychofizyczna cecha percepcji wzrokowej wymagająca:
  - emisji światła,
  - pobudzenia receptorów siatkówki oka,
  - przetworzenia w korze mózgowej pobudzeń przekazywanych przez nerw wzrokowy,
- Atrybuty barwy:
  - **kolor** (odcień, walor),
  - nasycenie,
  - jasność (jaskrawość, luminancja).

## Barwa

- Złożona – barwa powstała wyniku zmieszania barwników (metoda subtraktywna) lub światła (metoda addytywna),
- Prosta (czysta) – barwa jednorodnego promieniowania monochromatycznego (np. barwy tęczy),
- Główna (pierwotna, podstawowa) – jedna z trzech barw służących do syntezy addytywniej lub subtraktywnej,
- Barwy dopełniające – barwy które przy mieszanii addytywnym dają biel, a przy mieszanii subtraktywnym czernią,
- Niekolorowa – barwa biała, czarna i odcienie szarości

## Progi barw

- Prawo Webera-Fechnera – percepcja w postępie arytmetycznym zależy od geometrycznego postępu faktów fizycznych



- Prawo Bezolda-Bruckego – w zakresie widzenia fotopowego wraz ze zmianą jasności zachodzą zmiany barwy postrzeganej

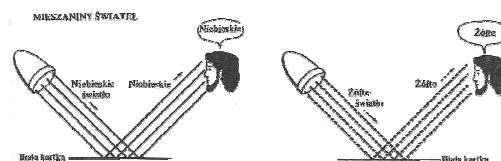
## Metody wyrażania bodźców barwowych

- Wzorce barw - atlasy (Ostwald, Munsella, Hickethiera)
  - wygodne w użyciu,
  - nietrwale - wpływ czasu, warunków atmosferycznych,...
  - uwzględniają rodzaj powierzchni próbek badanych
- Kolorymetria tróchromatyczna
  - obiektywna (choć abstrakcyjna) metoda opisu bodźców barwowych,

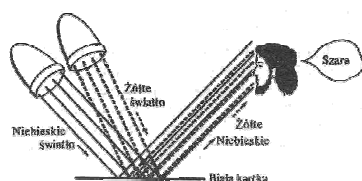
## Kolorymetria tróchromatyczna

- Addytywna synteza barw (mieszanie addytywne)
  - równoczesne działanie trzech światel (np. 3 projektory lub komponowanie pól z bardzo małych punktów - monitory, TV,...)
  - naprzemienne rzutowanie bodźców barwowych z częstotliwością większą od progu migotania (synteza zachodzi w systemie widzenia obserwatora),
- Substraktywna synteza barw (mieszanie substraktywne)
  - warunek - białe światło i trzy substancje posiadające zdolność selektywnej absorpcji w zakresie widma światła białego
  - mieszanie roztworów barwników,
  - nakładanie na siebie nie rozpraszających światła warstw barwników (fotografia barwna),
  - umieszczenie obok siebie bardzo drobnych, nierozróżnialnych okiem cząstek pigmentów (lakier, barwny druk offsetowy)

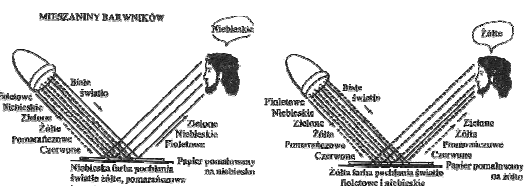
## Addytywna synteza barw



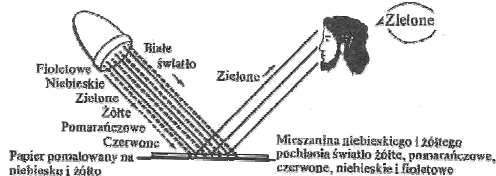
## cd. addytywna synteza barw



## Substraktywna synteza barw



## cd. substraktywna synteza barw



## Podstawy kolorimetrii

### Właściwości:

- obiektywne określenie chromatyczności bodźców barwowych,
- addytywna synteza bodźców barwowych,
- odtwarzanie wielu barw przez zmieszanie trzech światła podstawowych,
- prawa Grassmanna.

## Prawa Grassmanna

1. Każdy bodziec barwowy może być odtworzony jednoznacznie przez zmieszanie addytywne trzech odpowiednio dobranych bodźców porównawczych. Bodźce barwowe muszą spełniać warunek niezależności liniowej, tzn. wrażenia żadnego z nich nie da się uzyskać przez addytywne zmieszanie dwóch pozostałych.

## Prawa Grassmanna

2. Ilości bodźców świetlnych wyrażone w jednostkach fotometrycznych są addytywne, czyli jasność bodźca mieszanego równa się sumie jasności bodźców składowych.
3. Różne bodźce świetlne (różniące się rozkładem spektralnym) wywołujące to samo wrażenie barwy (metamery) zmieszane w jednakowych stosunkach z innym bodźcem świetlnym dają jednakowe nowe bodźce barwowe (bo wywołują jednakowe wrażenia).

## Składowe i współrzędne trójkromatyczne

$$k(K) = r(R) + g(G) + b(B)$$

$$k = r + g + b; \text{ z 2 prawa Grassmanna}$$

$$(r+g+b)(K) = r(R) + g(G) + b(B)$$

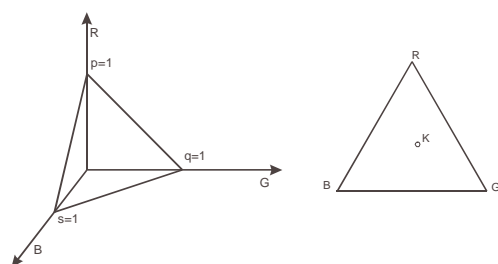
$$(K) = p(R) + q(G) + s(B),$$

gdzie:  $p = r/(r+g+b)$ ,  $q = g/(r+g+b)$ ,  $s = b/(r+g+b)$ ;

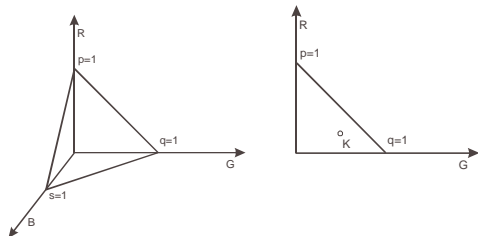
$$p+q+s = 1$$

$p, q, s$  - współrzędne trójkromatyczne  
 $r, g, b$  - składowe trójkromatyczne

## Geometryczne przedstawienie pola chromatyczności



## cd. geometryczne przedstawienie pola chromatyczności



## Jednostki wyrażające ilość bodźców świetlnych

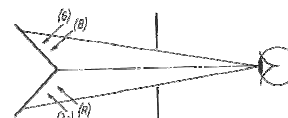
- Jednostki energetyczne - nie,
- Jednostki fotometryczne - nie,
- Jednostki tróchromatyczne - tak:
  - barwa biała - środek pola barw,
  - światło białe - światło ekwienergetyczne  $I_e$  (rozkład widma - stały) porównywalne do światła dziennego o temperaturze barwowej 6500K.

## Układ CIE bodźców podstawowych (RGB)

- Bodźce podstawowe - światła monochromatyczne:
  - (R) = 700 nm ,
  - (G) = 546,1 nm,
  - (B) = 435,8 nm,
  - G, B - jasne linie widma rtęci,
  - jednostka fotometryczna bieli ekwienergetycznej:
 
$$I_e = 0.177(R) + 0.812(G) + 0.011(B)$$

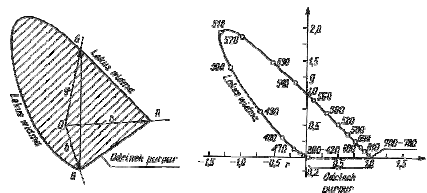
## Kolorymetr

Problem z barwami < 546,1 nm

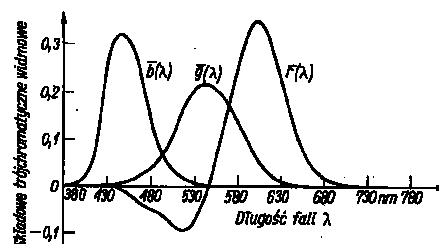


$$\begin{aligned} (\lambda_i) + r(R) &= g(G) + b(B) \\ (\lambda_i) &= -r(R) + g(G) + b(B) \end{aligned}$$

## Pole barw RGB



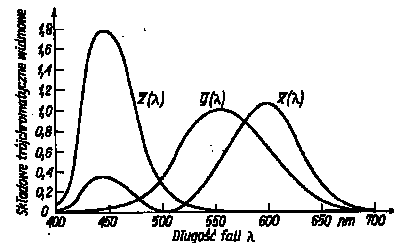
## Rozkład składowych tróchromatycznych w modelu RGB



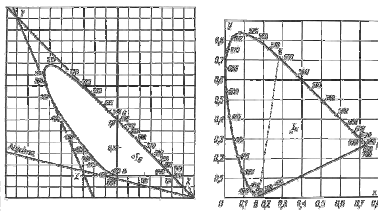
## Układ CIE bodźców odniesienia (XYZ)

- XYZ powstał w wyniku transpozycji układu RGB:
  - Bodźce odniesienia leżą poza powierzchnią objętą krzywą barw widmowych (lokusem widma),
  - Dwa bodźce odniesienia (X i Z) umieszczono na alychnie (prosta na której znajdują się bodźce bezświetlne o zdolności zmiany chromatyczności dowolnego realnego bodźca po zmieszaniu),
  - Jedną z osi układu XYZ poprowadzono stycznie do krzywej czerwonych barw widmowych układu RGB, która w tym zakresie ma na długim odcinku przebieg prostoliniowy.

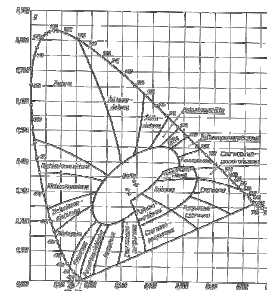
## Rozkład składowych trójkromatycznych w modelu XYZ



## Ilustracja doboru bodźców odniesienia



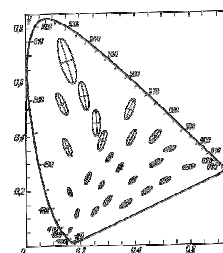
## Pole chromatyczności barw XYZ



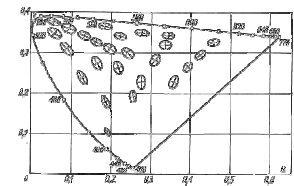
## Układ bodźców odniesienia (UVW)

- Układ nierealnych bodźców U, V, W, powstały przez transpozycję układu XYZ,
- Spełnia wymaganie jednakowego rozróżniania przez narząd wzroku człowieka kontrastu barw jednakowo odległych na polu chromatyczności

## Elipsy Stilesa dla modelu XYZ oraz UVW



$$u = \frac{2x}{6y - x + 1.5} \quad v = \frac{3y}{6y - x + 1.5}$$



## Podsumowanie CIE: RGB, XYZ, UVW

- model CIE RGB
  - Barwy odniesienia - fizyczne (jasne promienie widma rtęci + 700nm - barwa czerwona),
  - Wada: współrzędne trójkromatyczne przyjmują dla niektórych barw ujemne wartości,
- model CIE XYZ ('31)- transformacja modelu RGB
  - Barwy odniesienia - abstrakcyjne (fizycznie nierealne),
  - Zaleta: dla każdej barwy współrzędne trójkromatyczne przyjmują wartości dodatnie; składowa  $y'$  - niesie pełną informację o strumieniu światła,
  - Wada: brak stałości postrzeganych różnic barw na polu chromatyczności (różna wielkość elips Stilesa)
- model CIE UVW – transformacja modelu XYZ
  - Spełnia wymaganie jednakowego rozróżniania przez narząd wzroku człowieka kontrastu barw jednakowo odległych na polu chromatyczności

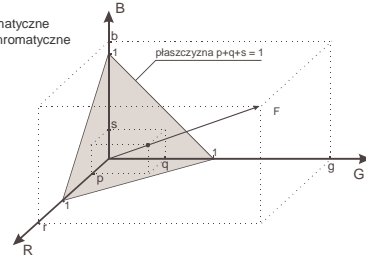
## Składowe a współrzędne trójkromatyczne

$r, g, b$  - składowe trójkromatyczne  
 $p, q, s$  - współrzędne trójkromatyczne

$$p = r/(r+g+b),$$

$$q = g/(r+g+b),$$

$$s = b/(r+g+b);$$



## Wyznaczanie składowych trójkromatycznych światła o znanym rozkładzie energii w widmie

$$x' = \int_{380}^{780} \phi_k \cdot \bar{x} d\lambda$$

$$y' = \int_{380}^{780} \phi_k \cdot \bar{y} d\lambda$$

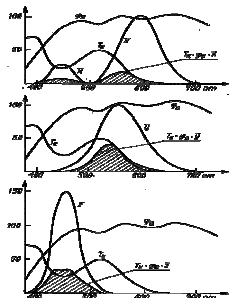
$$z' = \int_{380}^{780} \phi_k \cdot \bar{z} d\lambda$$

## Wyznaczanie składowych trójkromatycznych przedmiotów o selektywnej absorpcji światła

- Światło białe  $\phi = f(\lambda)$ :
  - wzorce fotometryczne: A (2856 K), B (4874 K), C (6774 K),
  - wzorce kolorymetryczne: D<sub>50</sub> (5000 K), D<sub>65</sub> (6500), D<sub>75</sub> (7500 K).
- Przedmiot (pomiar spektrofotometryczny):
  - współczynnik transmisji spektralnej  $T_k = f(\lambda)$  (np. filtry),
  - współczynnik odbicia  $r_k = f(\lambda)$  (np. farby, barwniki).
- Składowe trójkromatyczne:
 
$$x' = \int_{380}^{780} T_k \phi \cdot \bar{x} d\lambda \quad y' = \int_{380}^{780} T_k \phi \cdot \bar{y} d\lambda \quad z' = \int_{380}^{780} T_k \phi \cdot \bar{z} d\lambda \quad \text{lub}$$

$$x' = \int_{380}^{780} r_k \phi \cdot \bar{x} d\lambda \quad y' = \int_{380}^{780} r_k \phi \cdot \bar{y} d\lambda \quad z' = \int_{380}^{780} r_k \phi \cdot \bar{z} d\lambda$$

## Graficzna ilustracja wyznaczania składowych trójkromatycznych bodźca K



## Podsumowanie

W wyniku rachunku kolorymetrycznego uzyskuje się składowe  $x'$ ,  $y'$ ,  $z'$ , a z nich współrzędne  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , przy czym dla jednoznacznego określenia bodźca K, ważne są:

- Składowa trójkromatyczna  $y' = 100r$ , która określa ilość bodźca świetlnego docierająca do oka obserwatora jako ułamek ilości światła białego oświetlającego rozważany obiekt barwny,
- Współrzędne trójkromatyczne  $x$ ,  $y$ , które jednoznacznie określają chromatyczność bodźca K.

## Praktyka

- Zamiast całkowania stosuje się sumowanie iloczynów:  $T_k \phi x$ ,  $T_k \phi y$ ,  $T_k \phi z$ , dla równych odstępów  $\Delta \lambda = 5$  lub  $10$  nm,
- Dla przyjętych w kolorymetrii tróchromatycznej wzorców światła białego, tabele zawierają gotowe wartości iloczynów:  $\phi x$ ,  $\phi y$ ,  $\phi z$ , tak dobrane aby:

$$\sum \phi_i \bar{y} = 100$$

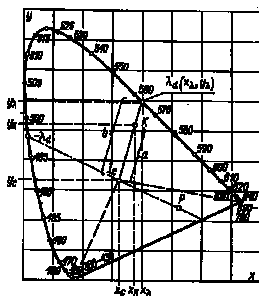
$$\tau = \frac{\int_{380}^{780} T_k \phi d\lambda}{\int_{380}^{780} \phi d\lambda} = \frac{\sum T_k \phi_i \bar{y}}{\sum \phi_i \bar{y}} = \frac{y'}{100}$$

$$y' = 100\tau \quad y' - \text{całkowity współczynnik transmisji } \tau \text{ światła przez ciało o barwie K}$$

## Alternatywny sposób wyznaczania bodźców barwowych

- Metoda klasyczna
  - $x$ ,  $y$  dla modelu XYZ,
- Metoda alternatywna
  - równoważna długość fali  $\lambda_d$ ,
  - czystość wzbudzenia  $p_e$  (miara nasycenia).

## Wyznaczanie $\lambda_d$ i $p_e$



$$p_e = \frac{a}{b} = \frac{y_k - y_c}{y_d - y_c} = \frac{x_k - x_c}{x_d - x_c}$$

$$x_k = p_e(x_d - x_c) + x_c$$

$$y_k = p_e(y_d - y_c) + y_c$$

## Metody oceny zniekształceń bodźców barwowych w procesach reprodukcyjnych

- oryginał ( $y_o', \lambda_o, p_{e_o}$ ), reprodukcja ( $y_r', \lambda_r, p_{e_r}$ )
  - $y_r' > y_o'$  - obraz jest wzg. jaśniejszy od oryginału,
  - $y_r' < y_o'$  - obraz jest wzg. ciemniejszy od oryginału,
  - $\lambda_r > \lambda_o$  - nastąpiło ocieplenie odcienia barwy,
  - $\lambda_r < \lambda_o$  - nastąpiło oziębienie odcienia barwy,
  - $p_{e_r} < p_{e_o}$  - nastąpił wzrost nasycenia barwy,
  - $p_{e_r} > p_{e_o}$  - nastąpił spadek nasycenia barwy.

## Obiektywne metody oceny zniekształceń bodźców barwowych

- Oryginał  $K_o(u_o, v_o)$ , reprodukcja  $K_r(u_r, v_r)$ 

$$I' = \sqrt{(u_o - u_r)^2 + (v_o - v_r)^2}$$

$$e = \sqrt{(u_o - u_r)^2 + (v_o - v_r)^2 + k(y_o' - y_r')^2}$$
- Pomocniczy układ bodźców odniesienia  $U^*V^*W^*$  ('64)
 
$$U^* = 13W^*(u - u_1), \quad u, v_1 - \text{współrzędne tróchromatyczne światła białego, przy którym oceniana jest barwa;}$$

$$V^* = 13W^*(v - v_1), \quad y' - \text{składowa tróchromatyczna wyznaczona w układzie XYZ}$$

$$W^* = 25\sqrt{y'} - 17$$

$$\Delta E_{CIE} = \sqrt{(U_o^* - U_r^*)^2 + (V_o^* - V_r^*)^2 + (W_o^* - W_r^*)^2}$$

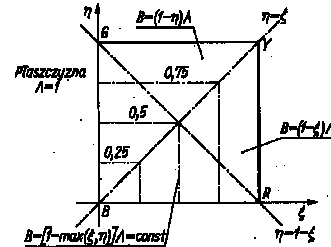
## Komputerowe modele barw

- Modele addytywne:
  - RGB - względy techniczne,
  - HSI (HLS, HSV, HSB):
    - założenie: niezależność percepcyjna parametrów H, S, V,
    - właściwość 1: wszystkie odcienie barw są nasycone przy tej samej (maksymalnej) wartości jasności (uproszczenie),
    - właściwość 2: przestrzenie typu HSI - niejednorodnie percepcyjnie (wada)
  - RGYB
- Modele subtraktywne:
  - CMY(K).

## Model RGYB ('90)

- Właściwości:
  - model oparty na teorii Heringa postrzegania barw (kanał achromatyczny i dwa kanały chromatyczne: R/G i Y/B),
  - łączy cechy modelu HSV (HLS) oraz CIE LUV,
  - organizacja topologiczna - zbiór warstw (związanych z poziomami jasności),
  - parametry:  $\Lambda$  - stała dla danej warstwy (0..2),  $\zeta, \eta$  - definiują współrzędne w ramach warstwy (0..1),
  - Transformacja (RGYB - RGB):
    - $R = \zeta \Lambda$ ,
    - $G = \eta \Lambda$ ,
    - $B = (1 - \max(\zeta, \eta)) \Lambda$

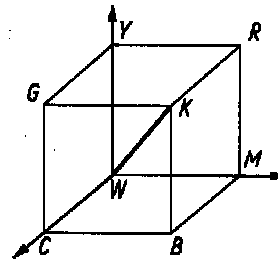
## Warstwa RGYB



## Model CMY(K)

- Model subtraktywny,
- Sześcian barw podobny do RGB (zamienione miejscami składowe CMY z RGB oraz barwy achromatyczne - biała z czarną)
- Transformacja:
  - C (Cyan - zielononiebieski) =  $1 - R$ ,
  - M (Magenta - purpurowy) =  $1 - G$ ,
  - Y (Yellow - żółty) =  $1 - B$ ,
  - (Black) =  $\min(C, M, Y)$

## Sześcian barw modelu CMY



## Zasady doboru barw

- Rola barwy w obrazie: informacyjna, ostrzegawcza, przyciągająca uwagę,
- Barwa tła:
  - wpływ tła na percepcję barwy jest najmniejszy, gdy barwa tła ma tę samą jasność albo gdy jest to barwa o dość małym nasyceniu,
  - jeśli w obrazie występuje jedynie kilka barw, to barwa tła powinna być jedną z barw komplementarnych w stosunku do jednej z barw obrazu,
  - najważniejszemu elementowi w obrazie powinno się przyporządkowywać barwę kontrastującą z tłem,
  - przy dużej liczbie barw, tło powinno stanowić barwę neutralną, np. szara,
- Psychologiczny aspekt percepcji barw:
  - barwy ciepłe (czerwony, pomarańczowy, żółty) wydają się bardziej aktywne i bliższe obserwatorowi, natomiast barwy zimne (zielononiebieskie, niebieskie) są odbierane jako bardziej pasywne (stabilne) i usytuowane głębiej;
  - barwy jasne sprawiają wrażenie bliskości, a barwy ciemne - wrażenie większej odległości

## cd. zasad doboru barw

- Przy wyborze barw należy uwzględnić przeciętną słabą zdolność do pamiętania barw,
- „Wrażliwość psychologiczną” na barwy można uporządkować: czerwona, zielona, żółta, niebieska, purpura,
- Jasność vs. chromatyczność:
  - często oko łatwiej potrafi rozróżnić detale w obrazie monochromatycznym niż w obrazie barwnym (oko jest bardziej czułe na zmiany intensywności niż na zmiany chromatyczności),
  - trudno jest odróżnić granicę między dwoma obszarami, które różnią się tylko zawartością barwy niebieskiej,
  - złe kombinacje barw ze względu na podobną jasność to niebieski-czarny, biały-żółty,
- Barwy mogą być używane do kodowania:
  - lepiej odróżniać obiekty za pomocą barwy niż za pomocą kształtu czy wielkości,
  - źle odróżniane są barwy obiektów małych,
  - barwa czerwona (np. w odróżnieniu od zielonej) jest synonimem: problemu, ostrzeżenia, kłopotów





## cd. zasad doboru barw

- Barw należy używać z ostrożnością i tylko wówczas, gdy jest to konieczne; szczególną ostrożność należy zachować przy reprezentacji danych ilościowych,
- Należy ograniczać liczbę używanych barw,
- Barwy powinny być dobierane w kontekście innych. Zaleca się, żeby barwy wybierać zawsze według pewnej zasady. Np. dobrze jest wybierać barwy leżące na gładkiej ścieżce w bryle barw i jest wskazana, żeby leżały one na jednej płaszczyźnie - dobrze jest wybierać barwy o stałej jasności (albo stałej wartości),
- Wybierając odpowiednią skalę barw można w sposób intuicyjny reprezentować wartości liczbowe (np. w geografii - wysokość terenu, w projektowaniu - stan naprężeń w analizowanej konstrukcji, czy rozkład temperatur)