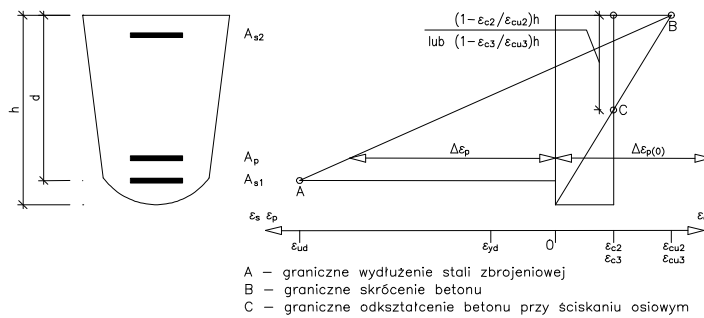


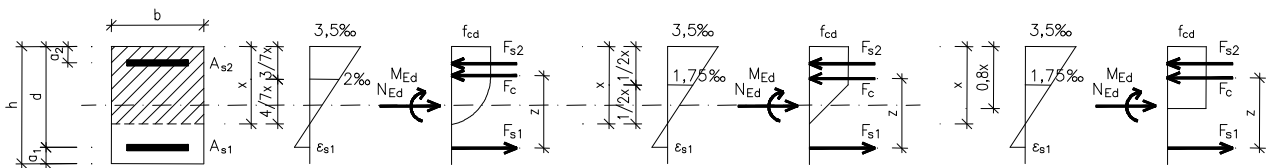
## Informacje ogólne

Założenia dotyczące stanu granicznego nośności przekroju obciążonego momentem zginającym i siłą podłużną, przyjęte w PN-EN 1992-1-1, pozwalają na **ujednoczenie procedur obliczeniowych**, bez względu na znak siły (ściskanie lub rozciąganie) i wielkość jej mimośrod. Jest to inny sposób postępowania niż wcześniej stosowany (PN-B-03264:2002) – z podziałem na zginanie, ściskanie lub rozciąganie, z dużym lub małym mimośrodem, z licznymi dodatkowymi założeniami.

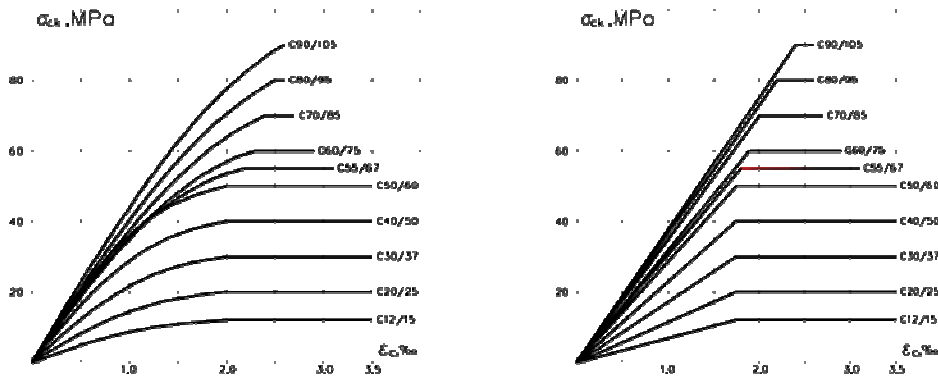
Podstawą analizy jest stan odkształcenia przekroju (rys. 1) oraz zależności  $\sigma - \epsilon$  dla betonu strefy ściskanej (rys. 2 i 3) i stali zbrojeniowej (rys. 4).



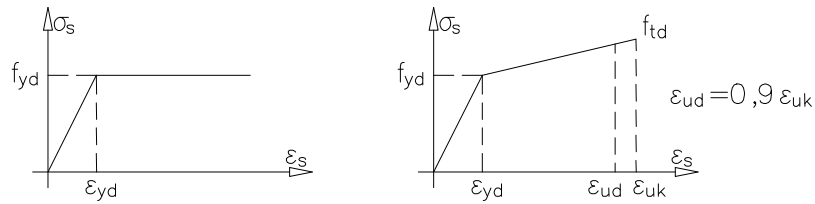
Rys. 1. Rozkłady odkształceń, które mogą powstać w stanie granicznym nośności



Rys. 2. Trzy możliwe postaci obliczeniowej zależności  $\sigma_c - \epsilon_c$ : paraboliczno – prostokątna, trójkątno – prostokątna, prostokątna; dotyczy betonu do klasy C50/60 włącznie



Rys. 3. Wykresy zależności  $\sigma_c - \epsilon_c$  odpowiadające różnym klasom betonu: paraboliczno-prostokątna oraz dwuliniowa



Rys. 4. Dwie postaci obliczeniowej zależności  $\sigma_s - \varepsilon_s$  (przyjmowane są dla stali zarówno rozciąganej, jak i ściskanej)

W projektowaniu należy przyjmować zależność  $\sigma_s - \varepsilon_s$  z poziomą drugą częścią wykresu. Zależność z pochyloną drugą częścią wykresu można przyjmować tylko wtedy, jeżeli znana jest dokładna charakterystyka odkształceniowa zastosowanej stali zbrojeniowej (np. w ekspertyzach istniejących elementów konstrukcji).

Wymiarując przekrój lub określając jego nośność musimy, zgodnie z założeniami PN-EN 1992-1-1 (p. 2), znaleźć taki **stan odkształcenia przekroju**, przy którym siły wewnętrzne w betonie strefy ściskanej i w zbrojeniu – określone na podstawie umownych zależności  $\sigma - \varepsilon$  (naprężenie – odkształcenie) – zrównoważą obciążenie zewnętrzne. Znalezienie takiego stanu odkształcenia przekroju bywa uciążliwe, bo często trzeba zastosować metodę iteracji.

Zadanie można uprościć, posługując się tablicami pomocniczymi. Wymiarując przekrój (określając niezbędne pole przekroju zbrojenia) bez trudu określimy wtedy siły przenoszone przez beton strefy ściskanej oraz zbrojenie dolne i górne, usytuowane przy krawędziach przekroju.

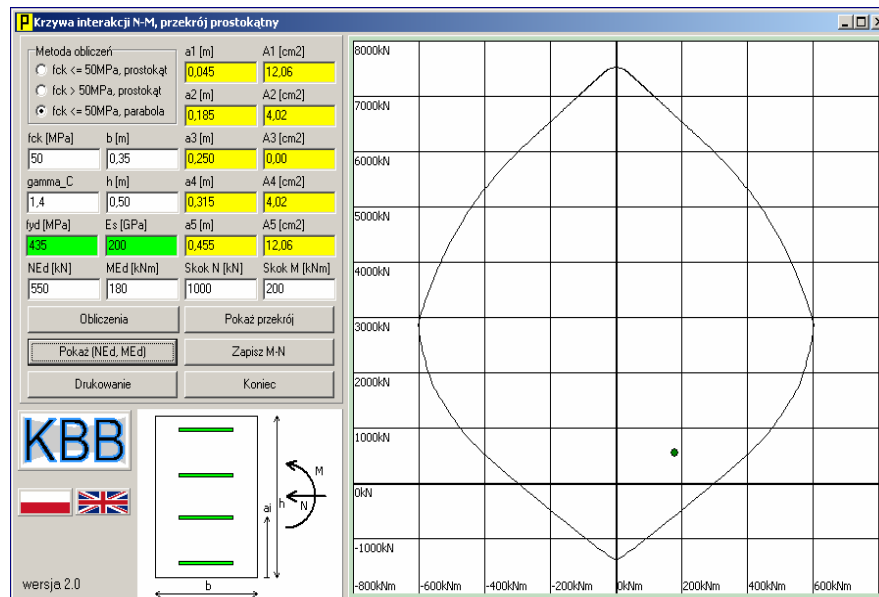
Znacznie wygodniej jest jednak rozważyć kilka możliwych stanów odkształcenia i jako rozwiązanie wybrać taki stan odkształcenia, który prowadzi do satysfakcjonującego nas łącznego pola przekroju zbrojenia. Ten sposób postępowania ilustrują procedury obliczeniowe, umieszczone na tej stronie, oraz przykłady rachunkowe przytoczone w publikacji ŁOIIB.

Znacznie łatwiejsze jest jednak postępowanie odwrotne – przyjmujemy zbrojenie przekroju i dla kolejnych dopuszczalnych stanów odkształcenia przekroju wyznaczamy odpowiadające im pary wartości  $M_{Rd} - N_{Rd}$ . Zbiór tych wartości wyznacza **krzywą interakcji wielkości  $M_{Rd} - N_{Rd}$** . Wystarczy teraz sprawdzić, czy punkt odpowiadający obciążeniu przekroju  $M_{Ed}$  i  $N_{Ed}$  mieści się wewnątrz lub co najwyżej na krzywej interakcji – oznacza to, że przekrój przeniesie zadane obciążenie. Jeżeli tak nie jest, trzeba zwiększyć pole przekroju zbrojenia (lub wymiary przekroju czy klasę betonu) i powtórzyć obliczenia.

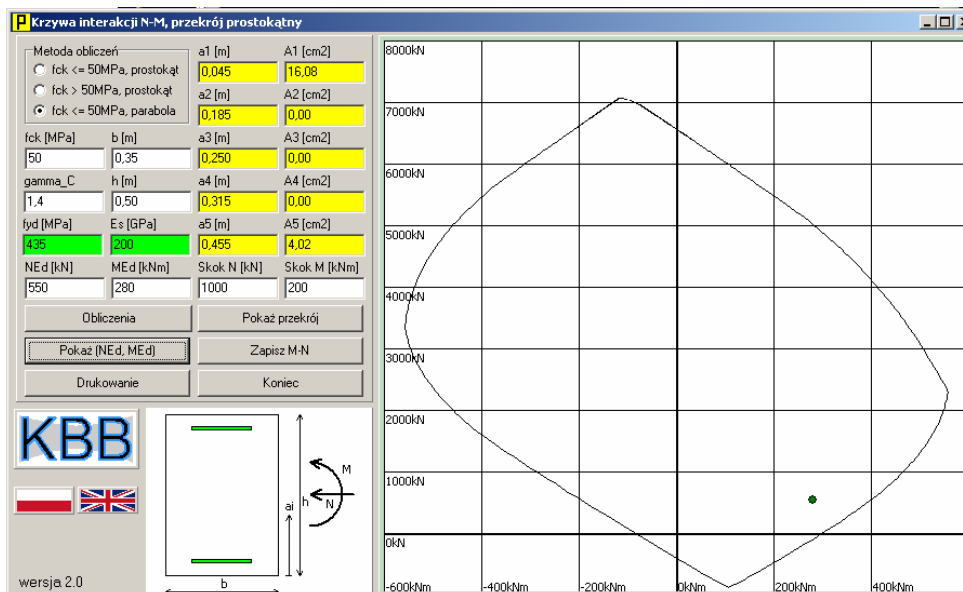
Taki sposób postępowania umożliwia ponadto **uwzględnienie zbrojenia usytuowanego na wysokości przekroju**, a nie tylko przy przeciwległych krawędziach, jak w zwykłych procedurach wymiarowania.

Umożliwiają to programy komputerowe do obliczania krzywych interakcji, umieszczone na tej stronie Katedry Budownictwa Betonowego Politechniki Łódzkiej..

Na rysunkach 5 i 6 przedstawiono przykładowe wyniki dotyczące przekroju prostokątnego – **program (P)**, a na rysunku 7 dotyczące przekroju kołowego – **program (O)**.

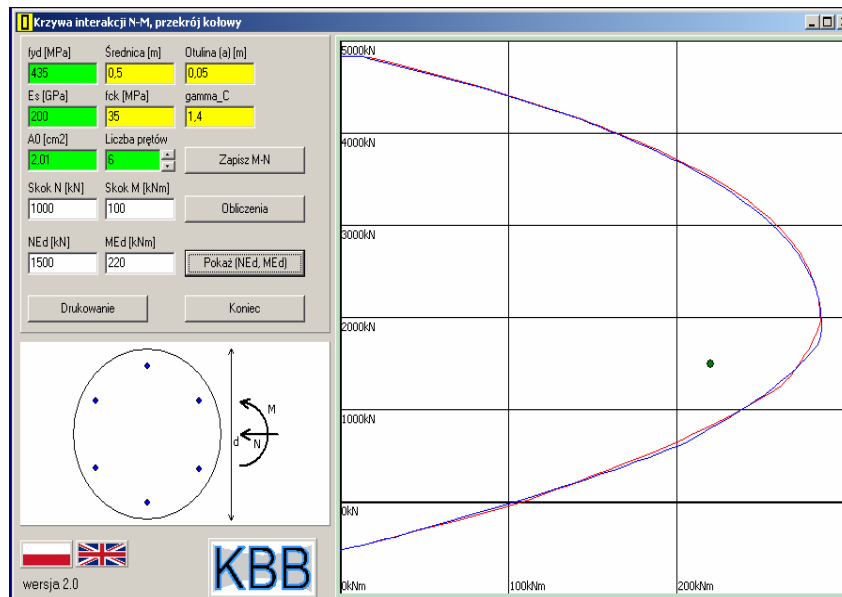


Rys.5. Przykładowy wykres krzywej interakcji  $M_{Rd} - N_{Rd}$ ; przekrój prostokątny, zbrojenie symetryczne



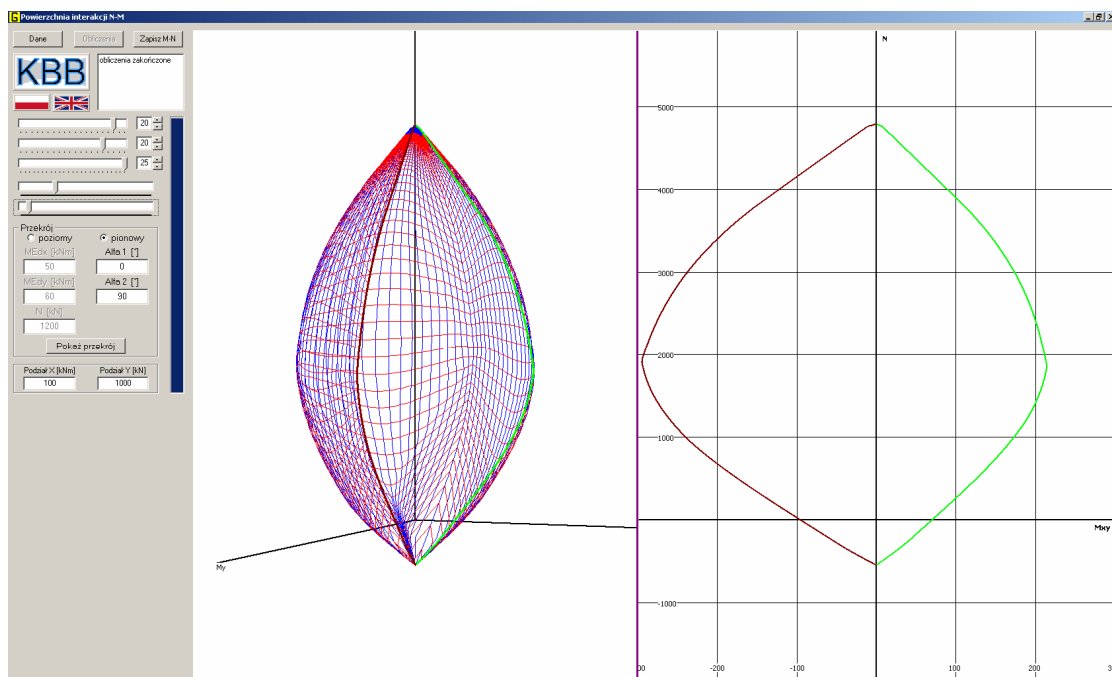
Rys.6. Przykładowy wykres krzywej interakcji  $M_{Rd} - N_{Rd}$ ; przekrój prostokątny, zbrojenie niesymetryczne

Użytkownik musi wprowadzić z klawiatury niezbędne dane (wymiary przekroju, cechy wytrzymałościowe betonu i zbrojenia, wielkość siły podłużnej i momentu zginającego) oraz założyć zbrojenie przekroju – usytuowanie poszczególnych prętów wraz z polem przekroju każdego pręta. Program generuje wykres krzywej interakcji oraz punkt, reprezentujący obliczeniowe obciążenie, o współrzędnych  $M_{Ed}$ -  $N_{Ed}$ .



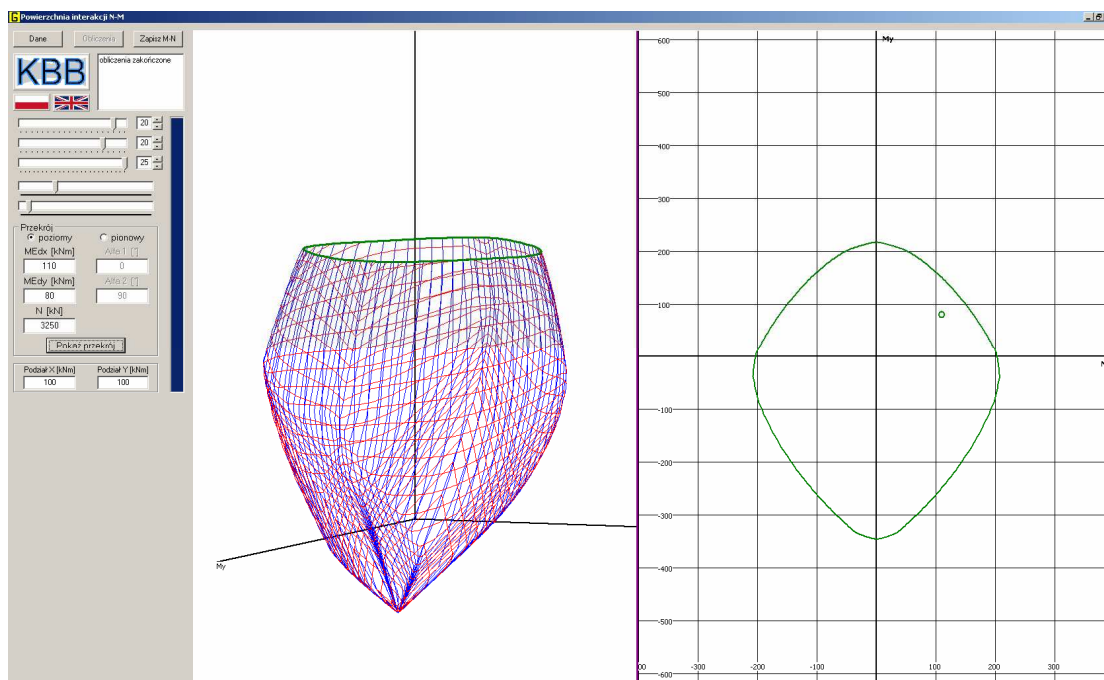
Rys. 7. Przykładowy wykres krzywej interakcji  $M_{Rd} - N_{Rd}$ , przekrój kołowy; dwie krzywe interakcji odzwierciedlają położenie płaszczyzny zginania względem zbrojenia

Powyższe uwagi i przykładowe wyniki odnosiły się do przekroju obciążonego w płaszczyźnie symetrii. Bardzo często przekrój jest jednak obciążony momentami zginającymi w dwóch płaszczyznach, wzajemnie do siebie prostopadłych. Mówimy wtedy o obciążeniu ukośnym, a krzywe interakcji, określone dla kolejnych kątów płaszczyzny odkształcenia, tworzą **powierzchnię interakcji  $M_{Rdx} - M_{Rdy} - N_{Rd}$** . Przykładowy obraz powierzchni interakcji, sporządzony za pomocą programu (G), przedstawia rysunek 8.



Rys. 8. Przykładowy wykres powierzchni interakcji  $M_{Rdx} - M_{Rdy} - N_{Rd}$ ; przekrój prostokątny, zbrojenie symetryczne

**Program (G)** także umożliwiła graficzne sprawdzenie, czy nośność przekroju jest wystarczająca. Zadanie jest wtedy sprowadzone do płaskiego, przez przecięcie powierzchni interakcji płaszczyzną odpowiadającą sile podłużnej  $N_{Ed}$ . Punkt reprezentujący obciążenie przekroju momentami zginającymi  $M_{Edx} - M_{Edy}$  ukazuje się wtedy na tle wykresu nośności przekroju ze względu na zginanie (rys. 9).



Rys. 9. Przykładowy wykres powierzchni interakcji  $M_{Rdx} - M_{Rdy} - N_{Rd}$ ; przekrój prostokątny, zbrojenie niesymetryczne

Program (G) pozwala na obliczanie przekroju prostokątnego, teowego i dwuteowego. Przekrój o innym, dowolnym kształcie, można rozpatrywać za pomocą **programu (G-dxf)**. Przekrój należy wtedy narysować w programie CAD, wybierając opcję tworzenia nowego rysunku. Po przeniesieniu danych przekroju do **programu (G-dxf)**, program ustala położenie środka ciężkości przekroju i jest to uwzględniane w obliczeniach.

**Program (G-dxf)** ma charakter uniwersalny, można dzięki niemu uzyskać krzywe interakcji odpowiadające programom (P), (O) i (G). Nie zawsze będą się one jednak pokrywać, gdyż trzeba pamiętać o przyjętym w obliczeniach modelu zależności  $\sigma_c - \epsilon_c$ .

Na bazie programów (P) i (O) powstały programy **(P-p)** oraz **(O-p)**, które umożliwiają określenie krzywych interakcji w warunkach pożaru. W algorytmach zastosowano metodę izotermy 500, według PN-EN 1992-1-2:2008/NA:2010. Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-2: Reguły ogólne. Projektowanie z uwagi na warunki pożarowe.

Trzeba podkreślić, że przy wymiarowaniu przekroju słupa wartość momentu zginającego powinna być powiększona o wpływ **imperfekcji oraz smukłości słupa**. Jeżeli słup jest obciążony ukośnie, wpływ imperfekcji uwzględnia się tylko w kierunku bardziej niekorzystnym, a wpływy smukłości słupa w obu kierunkach lub tylko w jednym (wtedy, gdy smukłość przekracza smukłość graniczną, rozpatrywaną niezależnie w obu kierunkach).

**Program komputerowy (S)** umożliwia uwzględnienie wpływu smukłości słupa na wielkość momentu zginającego  $M_{Ed}$ , przy znanej sile podłużnej  $N_{Ed}$ . Zastosowano dwie uproszczone metody ujęte w PN-EN 1992-1-1: metodę nominalnej sztywności oraz metodę nominalnej krzywizny. To zagadnienie jest rozwiązywane w płaszczyźnie symetrii przekroju. Przy obciążeniu ukośnym należy rozważyć obydwie płaszczyzny obciążenia słupa, traktując je niezależnie.

Trzeba zauważyć, że efekty II rzędu, określone metodą nominalnej sztywności i nominalnej krzywizny, nie zawsze są zbliżone. Występuje to jaskrawo wtedy, gdy siła podłużna obciążająca przekrój  $N_{Ed}$  jest niewiele mniejsza niż siła krytyczna  $N_B$ , występująca w metodzie nominalnej sztywności. Moment całkowity, określany metodą nominalnej sztywności, osiąga wtedy nierealnie duże wielkości. Problem ulega złagodzeniu, jeżeli przyjmie się upraszczające założenie, że wartość współczynnika  $\beta$  wynosi 1,0. To założenie zostało przyjęte w **programie (S-BETA=1)**.

**Wszystkie programy mogą być stosowane do celów dydaktycznych oraz zawodowych bez żadnych ograniczeń.**