

APLIKACE ČSN EN 1992-1-1 DO STATICKÉHO SOFTWARE APPLICATION OF ČSN EN 1992-1-1 INTO CIVIL ENGINEERING SOFTWARE

JAN GAJDOŠÍK

Poměrně nová norma ČSN EN 1992-1-1 přináší různé otázky při aplikaci do praxe. Tento článek se pokouší na některé z nich odpovědět z pohledu programátora, který prováděl algoritmy do statického softwaru.

The relatively new standard ČSN EN 1992-1-1 brings various questions about its application in the praxis. This article tries to answer some of them from point of view of the programmer, who applied its algorithm into civil engineering software.

S ohledem na blížící se ukončení platnosti normy ČSN 73 1201, podobně jako i ostatních klasických ČSN norem na konci tohoto roku, se tento článek pokusí seznámit čtenáře s určitými úskalími nové normy ČSN EN 1992-1-1, včetně návrhu na řešení z pohledu statika-programátora, který aplikoval tuto normu do statického softwaru. Je jasné, že zde uvedené postřehy se nemusejí shodovat s problémy statika z praxe, nicméně i tak pro něj mohou být určitým obohacením a poskytnout mu trochu jiný pohled na věc. Článek se nesnaží pokrýt celou složitou problematiku betonových konstrukcí, ale pokouší se popsat pasáže, které pro algoritmy představovaly největší problém. V článku se budou vyskytovat odkazy na kapitoly, články, oddíly a vzorce normy, vždy se jedná o části normy ČSN EN 1992-1-1.

MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI PRO OHYBOVÝ MOMENT A/NEBO NORMÁLOVOU SILU

Pro základní výpočet únosnosti konstrukce nebo její části zatížené momentem a/nebo normálovou silou platí jasně stanovená pravidla (viz kap. 6.1 normy). Průřez zůstává rovinný, beton se deformuje stejně jako výztuž a mezní přetvoření pro oba materiály je určené volbou pracovního diagramu. A právě volba vhodného pracovního diagramu je poměrně zajímavou otázkou.

Na výběr jsou celkem tři pracovní diagramy pro beton uvedené v kap. 3.1.7 normy, parabolicko-rektangulární, bilineární nebo obdélníkový diagram. Poslední jmenovaný se běžně používá při ručním výpočtu.

Na volbě pracovního diagramu závisí maximální povolená průměrná deformace betonu ε . Betonový průřez, případně jeho části (např. pásnice u průřezu tvaru T při namáhání ohybem táhnoucím spodní vlákna), musí být po zprůměrování po ploše vyšetřované části průřezu zatíženy maximálně deformacemi ε_{c2} , ε_{c3} předepsaným v tab. 3.1 normy.

Zatímco pro ohyb vycházejí výsledky při srovnání podobně (rozdíl většinou pouze jednotky procent), pro oblast tlaku se mohou výsledky lišit celkem výrazně.

Následuje modelový výpočet pro čtvercový průřez o straně 200 mm z betonu třídy C30/37, který bude pro zjednodušení nevztláčený (respektive bude zanedbán příspěvek k únosnosti od tláčené výztuže), namáhaný čistým tlakem.

• Obdélníkový diagram:

$$N_{Rd} = A \cdot 0,8 \cdot f_{cd} = 0,04 \cdot 0,8 \cdot 20 \cdot 10^6 = 640 \text{ [kN]}$$

• Bilineární nebo parabolicko-rektangulární diagram:

$$N_{Rd} = A \cdot f_{cd} = 0,04 \cdot 20 \cdot 10^6 = 800 \text{ [kN]}$$

• Výpočet pro bilineární diagram vychází z průměrné deformace betonu $\varepsilon_{c3} = 1,75 \text{ ‰}$, které podle pracovního diagramu odpovídá pevnosti betonu o hodnotě $f_{cd} = 20 \text{ MPa}$. Rozdíl únosnosti v tomto případě činí 25 % s tím, že ruční výpočet je konzervativnější.

Nyní tentýž výpočet se započítáním výztuže: čtyři pruty průměru 16 mm z oceli B500A.

• Obdélníkový diagram: $N_{Rd} = E_s \cdot 0,8 \cdot f_{cd} + A_s \cdot \varepsilon_{c2} \cdot E_s = 0,04 \cdot 0,8 \cdot 20 \cdot 10^6 + 8,04 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 10^9 = 961,7 \text{ [kN]}$

• Bilineární diagram: $N_{Rd} = A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot \varepsilon_{c3} \cdot E_s = 0,04 \cdot 20 \cdot 10^6 + 8,04 \cdot 10^{-4} \cdot 1,75 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 10^9 = 1 \, 081,5 \text{ [kN]}$

• Parabolicko-rektangulární diagram: $N_{Rd} = A_c \cdot f_{cd} + A_s \cdot \varepsilon_{c2} \cdot E_s = 0,04 \cdot 20 \cdot 10^6 + 8,04 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 200 \cdot 10^9 = 1 \, 121,7 \text{ [kN]}$

V případě, že je započítána i výztuž, výsledky vycházejí pochopitelně jinak (rozdíly únosnosti jsou menší), ale i tak jsou rozdíly mezi výpočtem prováděným ručně pomocí obdélníkového a parabolicko-rektangulárního diagramu cca 16 % – opět v neprospěch ručního výpočtu. Nevýhodou parabolicko-rektangulárního diagramu je ovšem rychlost.

EFEKTIVNÍ (ÚČINNÁ) VÝŠKA PRŮŘEZU

Dalším zajímavým střípem, který je potřeba nějakým vhodným způsobem vyřešit, je otázka účinné výšky průřezu. S ní je na mnoha místech počítáno, avšak v normě není uvedena přesná definice, jak ji určit.

Existují přinejmenším tři možné interpretace (obr. 1):

- vzdálenost od nejvíce tláčeného okraje betonu ke středu nejvíce taženého prutu,
- vzdálenost od nejvíce tláčeného okraje betonu k těžišti tažené výztuže,
- vzdálenost od nejvíce tláčeného okraje betonu k působišti výslednice tahové složky dvojice vnitřních sil (sil vzniklých integrací kladného a záporného napětí po průřezu).

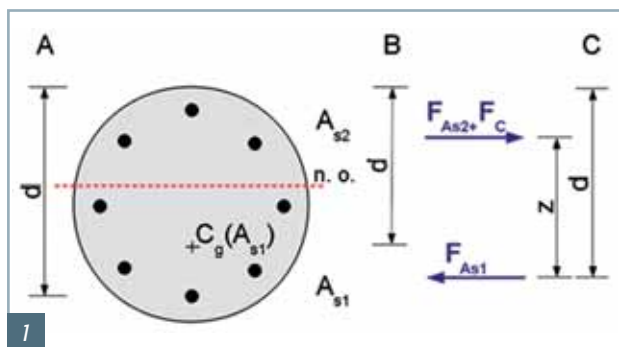
Z obrázku je i patrné, která interpretace účinné výšky je nejdělsí a která nejkratší. Pro nejběžnější případ, kdy je uvažována pouze jedna řada prutů, všechny tyto postupy vrátí stejnou hodnotu. Právě tento případ je v normě většinou uváděn jako ilustrativní. Podstatné je, že účinnou výšku průřezu je možné stanovit pouze pro konkrétní zatížení, protože jinak nejde určit taženou výztuž (tažená výztuž se stává taženou výztuží až na základě zatížení, nikoliv pouze svým umístěním).

Všeobecně přijímaná interpretace pro ruční výpočet je těžiště tažené výztuže. Nicméně protože působiště tahové složky vnitřních sil může poskytnout lepší výsledek, je při softwarovém výpočtu vhodnější definice jako vzdálenost od nejvíce tláčeného okraje betonu k působišti výslednice tahové složky dvojice vnitřních sil.

Jak bylo uvedeno, pro běžné případy na definici nezáleží a výsledek je zřejmý, proto je tato část uvedena spíše jako zajímavost.

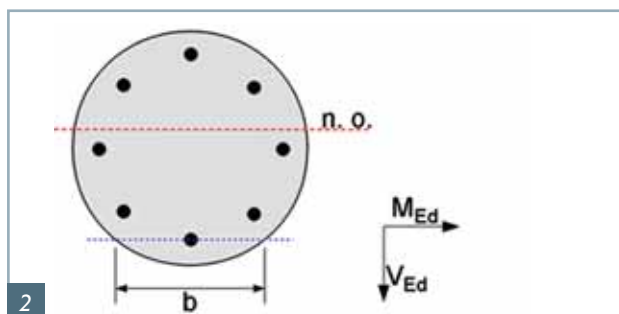
MEZNÍ STAV ÚNOSNOSTI PRO SMYK

Je potřeba pro výpočet smykové únosnosti posuzovat smykové síly dohromady se zadanými vnitřními silami N , M_y , M_z ? Nebo stačí počítat pouze smyk s normálovou silou N ? Jak posuzovat smyk u sloupů, u kterých převládá zatížení tlakem a vyskytuje se



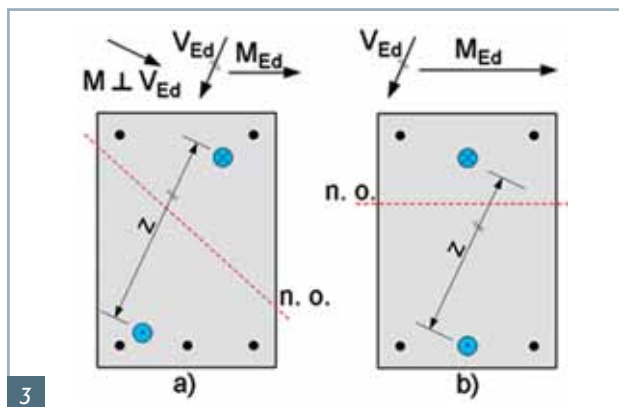
Obr. 1 Tři interpretace efektivní výšky průřezu: A – vzdálenost od nejvíce tlačeneho okraje betonu ke středu nejvíce tažené pruhy, B – vzdálenost od nejvíce tlačeneho okraje betonu k těžišti tažené výztuže, C – vzdálenost od nejvíce tlačeneho okraje betonu k působišti výslednice tahové složky dvojice vnitřních sil (sil vzniklých integrací kladného a záporného napětí po průřezu)

Fig. 1 Three different interpretations of effective depth of the cross-section: A – the distance of the most compressed concrete edge to the axis of tensile steel bar with numerically greatest tension in it, B – the distance of the most compressed concrete edge to the center of gravity tensile reinforcement, C – the distance of the most compressed concrete edge to the point of action of the tensile component of internal forces couple (the forces are product of integration of the positive and negative stress on cross-section)



Obr. 2 Ukázka určení minimální šířky tažené oblasti (výpočet únosnosti průřezu bez smykové výztuže)

Fig. 2 Example of determination of the minimal width of tensile area (the calculation of members not requiring design shear reinforcement)

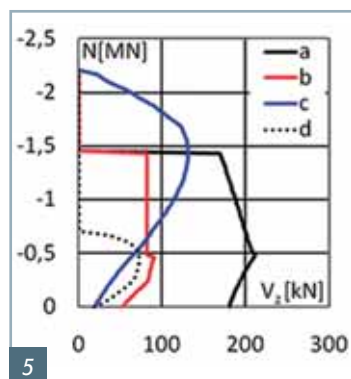
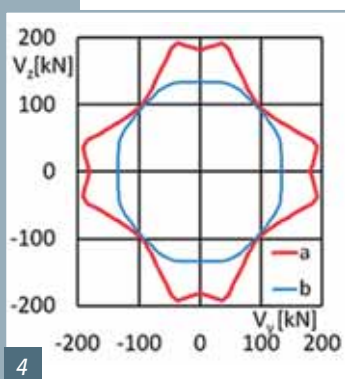


Obr. 3 Srovnání určení vstupních parametrů pro „velký a malý ohyb“; a) využití průřezu ohybem je relativně malé, jedná se o „malý ohyb“; z, d, a b jsou určeny pro namáhání virtuálním momentem, jehož vektor je kolmý na vektor smyku, b) „velký ohyb“; namáhání ohybem je dominantní, z, d, a b jsou přepočítány do směru vektoru smyku

Fig. 3 Comparison of the input parameters of “big and small bending”, a) the bending utilization of cross-section is quite low, therefore it is the case of the “small bending”; z, d, and b are determined from stress state of the virtual moment, which vector is perpendicular to the shear vector, b) “big bending”; flexural stress is dominant; z, d, and b are projected to the direction of the shear vector.

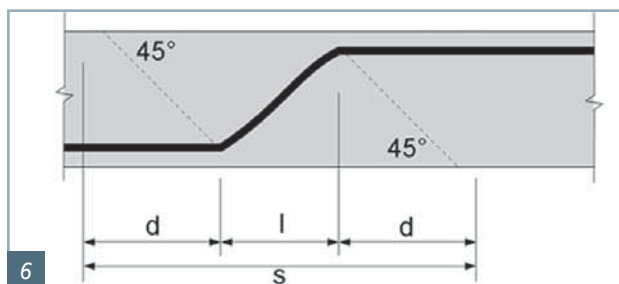
Obr. 4 Interakční diagram $V_y + V_z$: a – čtvercový průřez o straně 300 mm, b – kruhový průřez o průměru 300 mm, oba průřezy jsou vyztuženy podélnou výztuží 8 prutů o průměru 20 mm a tříminky 2×10 mm

Fig. 4 Interaction diagram $V_y + V_z$: a – the square-shaped cross-section with side 300 mm, b – the circular-shaped cross-section with diameter 300 mm. The both cross-sections are reinforced by 8 rods of 20 mm diameter and by the links 2×10 mm.



Obr. 5 Interakční diagram N- V_z pro čtvercový průřez stejný jako u obr. 4: a – smyková únosnost tříminky V_{Rds} ; b – smyková únosnost betonu V_{Rdc} spočtená pro vyztužený beton, c – smyková únosnost betonu V_{Rdc} spočtená pro prostý beton, d – smyková únosnost betonu V_{Rdc} spočtená pro prostý beton – chybně určené napětí v betonu jako $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_{cc}$. Není-li celý průřez tlačěn ($N < 1\,460$ kN), platí únosnosti V_{Rds} (a), V_{Rdc} (b); únosnost V_{Rdc} (c) platí nad touto hranicí. Je zřejmé, že dochází ke skokové změně únosnosti.

Fig. 5 Interaction diagram N- V_z for the square-shaped cross-section of the fig. 4: a – the shear resistance of links V_{Rds} ; b – the shear resistance of concrete V_{Rdc} calculated as reinforced concrete, c – the shear resistance of concrete V_{Rdc} calculated as plain concrete, d – the shear resistance of concrete V_{Rdc} calculated as plain concrete – error in the determination of the stress in concrete as $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_{cc}$. If the whole cross-section is not compressed ($N < 1\,460$ kN), the resistances V_{Rds} (a), V_{Rdc} (b) apply; the resistance V_{Rdc} (c) applies above this limit. The jump of resistance values at the limit is obvious.



Obr. 6 Určení vzdálenosti ohybů pro výpočet smykové únosnosti v případě osamělého ohybu

Fig. 6 The distance of bends determination for the calculation of shear resistance in the single bend case

pouze relativně malé (ve srovnání s velikostí normálové síly) zatížení ohybem a smykem? Na tyto otázky se pokouší odpovědět následující odstavce.

Pro železobetonové prvky bez smykové výztuže je možné uplatnit výpočet uvedený v kapitole 6.2.2 normy. Zde stojí za zmínku, že šířka b_w je definována jako šířka průřezu v tažené oblasti. Což ovšem staví člověka před problém, jaká je smyková únosnost betonu v případě, že na průřezu podle výpočtu pro N , M_y , M_z není žádná tažená část průřezu.

Podobný problém nastává např. u trojúhelníkového nebo kruhového průřezu, kde nejmenší šířka tažené části vychází nulová. Tento případ je možné řešit tak, že pro stanovení nejmenší šířky tažené části průřezu není uvažována část betonového průřezu s deformací větší, než má nejvíce tažený prut výztuže (obr. 2).

Pro prvek se smykovou výztuží norma vychází z modelu náhradní příhradoviny s proměnným sklonem tlakových diagonál. V použitých vzorcích figuruje jako důležitý parametr rameno vnitřních sil z , pro které existuje stejný problém jako pro šířku tažené části průřezu – pokud v průřezu není dvojice sil, rameno sil pochopitelně také není a musí být dosazeno jako nula.

Při porozumění modelu náhradní příhradoviny při zatížení V_y , V_z je důležitá představa, jak je model natočen okolo podélné osy prutu. Nejlepší výsledky vycházejí při uvažování modelu natočeného tak, že jeho svislá osa je rovnoběžná s výslednicí vektorového součtu $V_{Ed} = V_y + V_z$. Vnitřní výslednice $M_{Ed} = M_y + M_z$ však nemusí být vždy kolmá na V_{Ed} (i když se pochopitelně jedná o nejběžnější situaci u nosníku zatíženého prostým ohybem a smykem – $V_z + M_y$), což může vést až k situaci, kdy je rameno vnitřních sil po promítnutí do směru daném V_{Ed} nulové. Je možné předpokládat, že rameno vnitřních sil je stanovené pro takovou kombinaci M_y a M_z , aby vycházelo co největší (obr. 3). Jinými slovy, pro určení hodnot potřebných pro výpočet únosnosti dle metody náhradní příhradoviny (účinné výšky průřezu, rameno vnitřních sil či nejmenší šířky mezi rameny vnitřních sil) je vektor M_{Ed} kolmý na vektor V_{Ed} . Možné kolmé vektory M_{Ed} jsou dva, vzájemně svírají přímý úhel (jsou opačně orientované). Z hlediska časové náročnosti je nepříjemné, že tento přístup přibližně ztrojnásobí čas pro výpočet (výpočet pro vnitřní síly N , M_y , M_z ze statického výpočtu a pro N a dvojici kolmých M_{Ed}).

Odpověď na otázku, jestli posuzovat smyk (a případně kroucení) společně s normálovou silou a ohybovým momentem nebo bez ohybového momentu, zní: při posudku ignorovat zadané M_y , M_z a pro dosazení co nejvyšší smykové únosnosti si vektor M_{Ed} volit. Toto přesvědčení pramení z průběhu sil obyčejného prostého nosníku (v oblasti blízko podpory je vcelku malý ohyb a výrazný smyk). Z toho vyplývá, že při návrhu v této oblasti okolo podpory je možné posuzovat smyk zcela odděleně od ohybu. A protože v normě není žádný ekvivalent definice „velkého smyku“, jako je u posuzování ocelových průřezů, je přípustné tento postup extrapolovat pro všechny případy.

Je možné zvolit následující postup: Je-li průřez využit ohybem na více než např. 50 %, musí se již posuzovat všechny vnitřní síly dohromady. V opačném případě lze posoudit $N + M$ a $N + V$ jako samostatné případy. Tento kompromisní postup je určitě konzervativnější než důsledně oddělené posuzování ohybu a smyku. Z uživatelského hlediska je užitečné mít výchozí nastavení posudku jako kompromis (nad 50% využití ohybem posuzovat smyk s ohybem společně, jinak samostatně). Pokud uživatel usoudí, že si může dovolit jiný postup, může toto výcho-

zí nastavení posudku změnit dle svého uvážení. Tento postup sice nemá oporu v normě, nicméně je konzervativnější než možný jednoduchý výklad normy (oddělený posudek momentu a smyku). V praxi se málokdy stává, že uživatel nastavuje vlastní parametry výpočtu, a proto je tento postup bezpečnější a může upozornit uživatele na problém (jde o konzervativnější přístup).

Pro ilustraci výsledků posudku pro vektorový součet $V_{Ed} = V_y + V_z$ pro dva průřezy (kruhový a čtvercový – kružnice je vepsaná do čtverce) je uveden interakční diagram $V_y + V_z$ (obr. 4). Výpočet je proveden pro ohyb a smyk, normálová síla je nulová.

Nyní se bude řešit otázka, jak počítat případ, kdy je celý průřez v důsledku namáhání normálovou silou tlačěn (řeč je o případě, kdy je celý průřez tlačěn při normálové síle a libovolně velkém ohybovém momentu). V tomto případě cestu k řešení otevírá odstavce 6.2.2 (4) normy, který pro průřez bez ohybových trhlin doporučuje použít postup pro prostý beton uvedený v článku 12.6.3 normy. Mohlo by se zdát, že tím je problém vyřešen, ale napětí v betonu spočtené podle vzorce $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_{cc}$ (vzorec 12.3 normy) vychází u vyztuženého betonu vyšší než je výpočtová únosnost betonu v tlaku f_{cd} . Tedy výsledná smyková únosnost bude nulová, jak je vidět v grafu na obr. 5. Napětí v betonu je potřeba spočítat s předpokladem, že příslušnou část zatížení převezme výztuž, a tudíž se napětí v betonu očitne v předpokládaném rozsahu $\langle 0, f_{cd} \rangle$. Po této korekci již únosnost prostého betonu vychází celkem očekávaně. Mírná nekonzistence je ve skoku smykové únosnosti na přechodu mezi zcela tlačěným průřezem a průřezem, který má taženou výztuž (obr. 5).

Na závěr části řešící smyk následuje krátká zmínka o problému únosnosti ohybů. V praxi nastává situace, kdy je v nosníku jenom jeden ohyb po délce (třeba dva vedle sebe), a tím pádem je otázkou, jak zvolit osovou vzdálenost ohybů při výpočtu únosnosti. Na základě zjednodušujícího předpokladu, že tlaková diagonála v betonu má sklon 45°, je možné osovou vzdálenost s zvolit rovnou délce ohybu a dvojnásobku efektivní výšky průřezu (obr. 6).

SHRNUTÍ

Článek se pokusil přiblížit problematiku algoritmizace normy z pohledu statika-programátora. Nebylo jeho cílem přinést čtenáři nové převratné postupy nebo snad polemizovat s normou. Snahou bylo pouze vnést trochu světla do zákoutí normy, ve kterých může docházet k nedorozumění. To vše v rámci normy, nikoliv na základě nějakých vlastních teorií. Určitě není účelem vyvolávat kontroverzi zpochybnováním práce tvůrců norem – jedná se zcela určitě o kvalitní práci kolektivu lidí, což se podepisuje na různém způsobu výkladu v jednotlivých částech. Je určitě možné, že některé mnou popsané problémy byly pro tvůrce natolik samozřejmé, že je ani nezmiňoval ve znění normy.

Závěrem krátká prosba na všechny uživatele programu pro statiky, aby, v případě že s nějakým konkrétním řešením nebo výsledkem v softwaru nesouhlasí, neváhali a ozvali se firmě, která jim software dodala. Při tvorbě softwaru je nutné postupovat v rámci normy a zároveň dostatečně obecně, tudíž se stává, že konkrétní problém lze řešit i elegantnějším způsobem.

Ing. Jan Gajdošík
Fine, spol. s r. o.

Závěrka 12, 169 00 Praha 6
tel.: 233 324 889, fax: 233 321 754
e-mail: jan.gajdosik@fine.cz, www.fine.cz