

METODA URČENÍ MEZNÍ ÚNOSNOSTI KANALIZAČNÍ STOKY

METHODOLOGY FOR DETERMINATION OF ULTIMATE LOAD-BEARING CAPACITY OF A SEWER

MICHAL SEDLÁČEK, RADOMÍR PUKL, PAVEL DOHNÁLEK

SOUHRN

Z důvodu výstavby protipovodňových opatření došlo k namáhání kanalizační stoky vnitřním přetlakem. Cílem numerické analýzy bylo vyšetřit, zda je tato stoka schopna přenést požadovaný vnitřní přetlak, případně navrhnout vhodná sanační opatření.

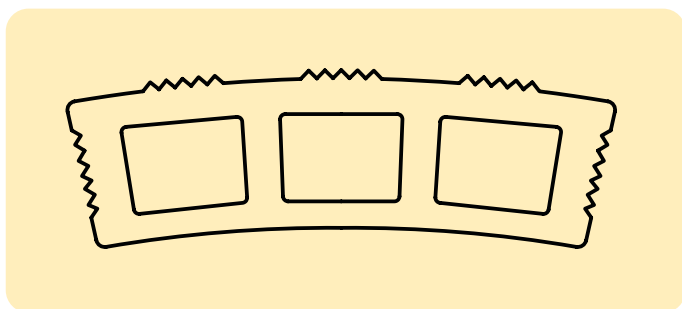
ÚVOD

Kanalizační stoka o vnitřním průměru 2 m byla vybudována v roce 1979 částečně v paženém výkopu a částečně v raženém profilu. Stoka se nachází v proměnné hloubce 3 až 10 m.

Příčný řez je tvořen nosnou konstrukcí z prostého betonu s vloženými kameninovými tvarovkami (obr. 1), které působily během výstavby jako ztracené bednění. Kameninové tvarovky jsou na styčných spárách spojeny maltou (obr. 2). Ze statického hlediska je konstrukce stoky navržena tak, aby odolávala vnějším tlakům, tzn. zatížení zemním tlakem a přitížením povrchu.

V souvislosti s výstavbou protipovodňových opatření vznikl požadavek na zajištění této stoky proti vnitřnímu přetlaku, který ve stoce vznikne při povodňovém stavu v řece Vltavě, která se nachází v těsné blízkosti – obr. 3. Předpokládá se, že hladina řeky Vltavy bude přímo ovlivňovat hydraulické poměry ve stokovém systému, a tím dojde k natlakování této stoky.

Cílem numerické analýzy je tedy určit maximální hodnotu vnitřního přetlaku, kterou je konstrukce schopna bezpečně přenést, popř. navrhnout sanační opatření.



Obr. 1 Segment CS
Fig. 1 CS segment

SUMMARY

Implementation of flood defence measures resulted in stresses generated by excessive internal pressure in a trunk sewer. The objective of the numerical analysis was to examine whether the sewer was capable of withstanding the required internal pressure and, if needed, to propose adequate rehabilitation measures.

INTRODUCTION

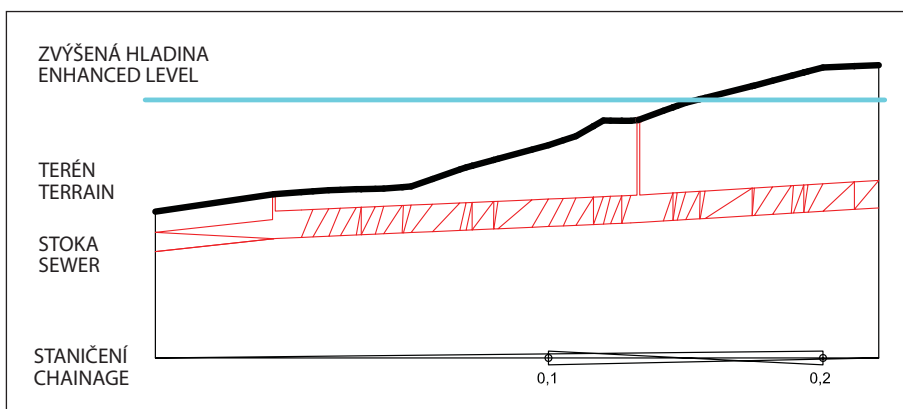
The trunk sewer with the inner diameter of 20 was constructed in 1979, partially in a braced trench and partially in a mined tunnel profile. The sewer is located at a depth varying from 3m to 10m.

The cross section consists of a load-bearing structure of unreinforced concrete with clayware fittings inserted in it (see Fig. 1), which acted as sacrificial formwork during the construction. Joints between the clayware fittings are filled with mortar (see Fig. 2). In terms of a structural analysis, the sewer structure is designed with the aim of withstanding external pressures, i.e. the loads induced by the ground pressure and surface surcharge.

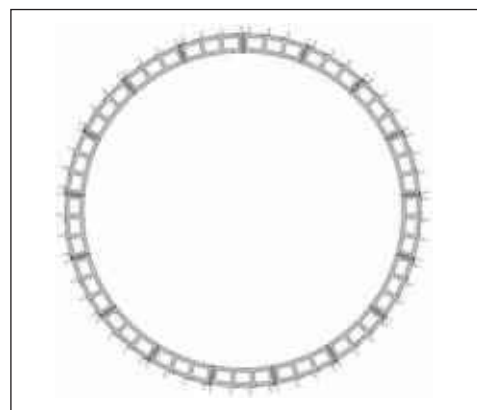
A requirement originated in the context of the implementation of flood defence measures that the sewer be secured against the excessive internal pressure which will develop in the sewer during



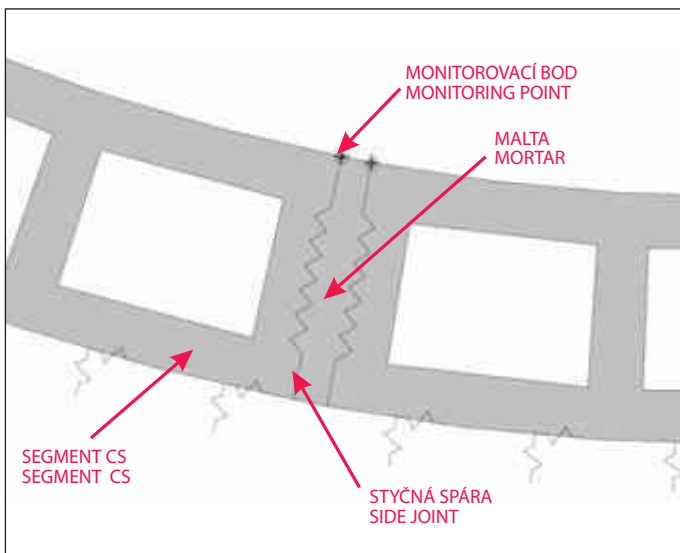
Obr. 2 Stávající stav
Fig. 2 Existing condition



Obr. 3 Podélný profil stoky
Fig. 3 Longitudinal section through the sewer



Obr. 4 Numerický model
Fig. 4 Numerical model



Obr. 5 Detail spáry
Fig. 5 Detail of a joint

VÝPOČTOVÝ MODEL

Model stoky byl vypracován v dostupném komerčním programu ATENA. Model je rovinný, řešení je provedeno ve stavu rovinné deformace (obr. 4 a 5). Při vlastním výpočtu byla konstrukce nejprve zatížena vlastní tíhou a následně bylo aplikováno zatížení od vnitřního přetlaku. Toto zatížení bylo přidáváno postupně, v jednotlivých výpočtových krocích. Pro podrobnou analýzu byly do konstrukce stoky osazeny monitorovací body, které sloužily pro vytvoření zatěžovací křivky.

Po provedení stavebně-technického průzkumu stoky bylo zjištěno, že nelze spolehlivě zaručit statické parametry (kvalita betonu, tloušťka konstrukce).

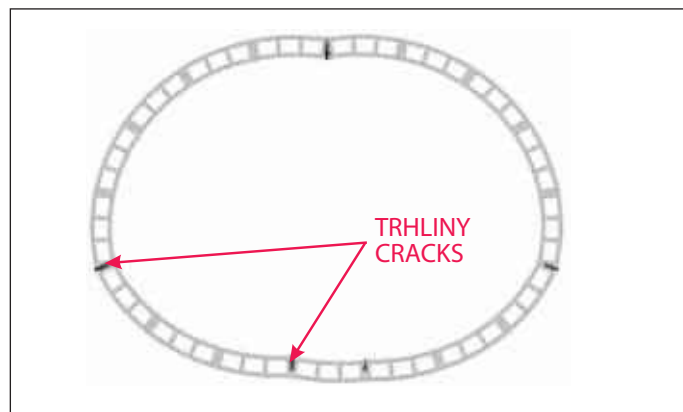
Z tohoto důvodu byla do výpočtového modelu zahrnuta pouze konstrukce z kameninových tvarovek.

Výpočtový model kanalizační stoky se skládal ze tří základních materiálů: kanalizační kamenina, malta a horninové prostředí.

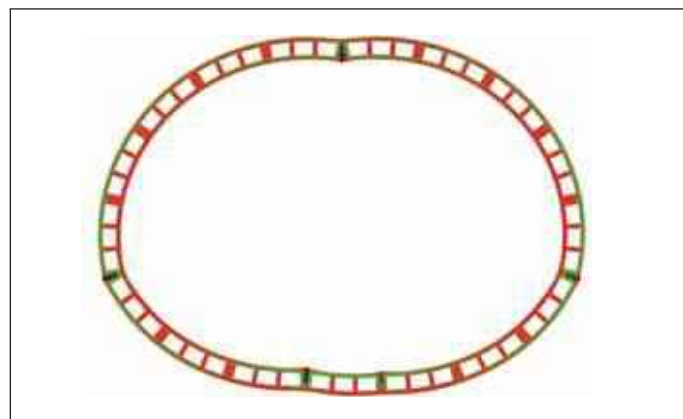
Kanalizační kamenina: pevnost v tlaku 150 MPa, pevnost v tahu 20 MPa, modul pružnosti 50 GPa, objemová hmotnost 22 kN/m³.

Malta: pevnost v tlaku 5 MPa, pevnost v tahu 1,5 MPa, modul pružnosti 13,24 GPa, objemová hmotnost 21 kN/m³.

Horninové prostředí: ve výpočtovém modelu je simulováno za pomoci radiálních a tangenciálních pružin. Radiální pružiny jsou definovány tak, aby působily pouze v tlaku a při vlastním výpočtu dojde k vyloučení tažených částí pružných liniových podpor. Tuhost radiálních pružných podpor je $k = 10 \text{ MN/m}^3$.



Obr. 6 Deformace stoky při kolapsu
Fig. 6 Deformation of the sewer during a collapse



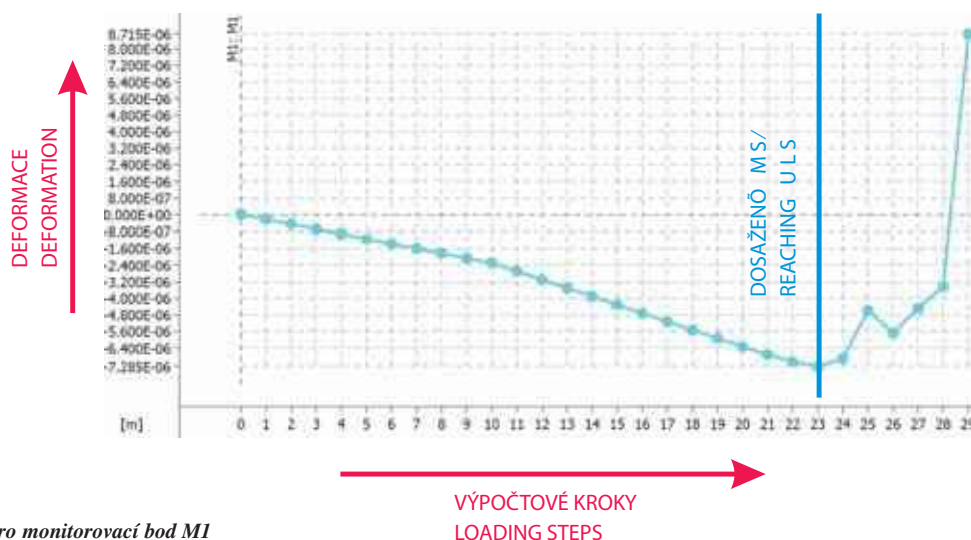
Obr. 7 Hlavní napětí (zelená – tah)
Fig. 7 Principal stress (green for tension)

a flood flow in the Vltava River, which is found in close proximity – see Fig. 3. It is expected that the Vltava River water surface will directly affect hydraulic conditions in the sewerage system, thus this sewer will become pressurised.

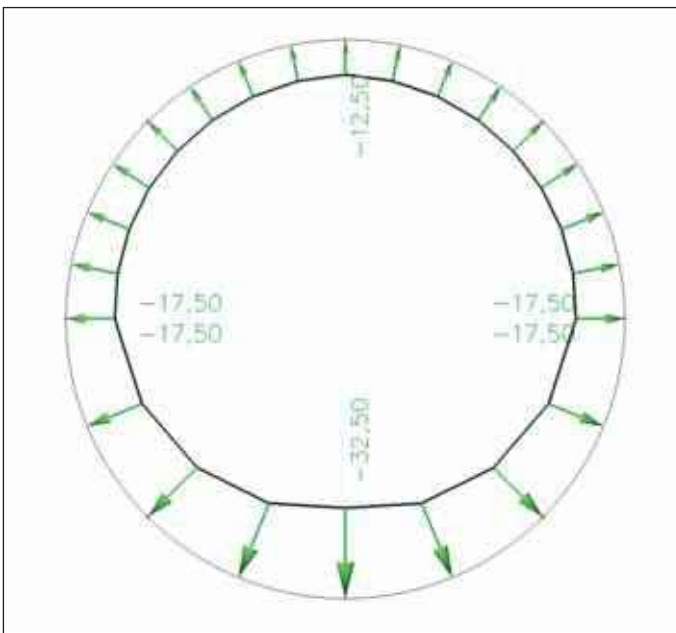
The objective of this numerical analysis is to determine the maximum value of internal pressure which can be safely withstood by the structure and, if needed, design rehabilitation measures.

CALCULATION MODEL

The model of the sewer was developed using a commercial program ATENA, which was available. The model is planar; the solution is carried out in a planar deformation condition (see Figures 4 and 5). During the calculation itself the structure was first loaded



Obr. 8 Zatěžovací křivka pro monitorovací bod M1
Fig. 8 Loading curve for monitoring point M1



Obr. 9 Maximální zatížení stoky v kN/mb
Fig. 9 Maximum loads acting on the sewer in kN/m

Tangenciální pružiny simulují tření na plášti stoky a jsou definovány jako pružný materiál. Tuhost tangenciálních pružných podpor je $k = 0,1 \text{ MN/m}^3$.

METODA ZJIŠTĚNÍ ÚNOSNOSTI STOKY

Z hlediska teorie pružnosti se jedná o rovinnou deformaci, neboť ve směru osy díla je zabráněno deformaci. Posuny jednotlivých bodů se mohou uskutečnit pouze ve dvou směrech a ve třetím směru souřadných os je posun vyloučen, takže platí:

$$\begin{aligned} \varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = \gamma_{zy} = 0 \\ \sigma_x \neq 0; \quad \sigma_y \neq 0; \quad \tau_{xy} \neq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Dostáváme tedy následující rovnice pro napětí σ_x , σ_y , τ_{xy} za stavu rovinné deformace:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [(1-\mu)\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y] \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [\mu\varepsilon_x + (1-\mu)\varepsilon_y] \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)} \cdot \gamma_{xy} \quad (4)$$

$$\tan(2\theta_\sigma) = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (5) \quad \tan(2\theta_\varepsilon) = \frac{2\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (6)$$

$$\tan(2\theta_\varepsilon) = \frac{2\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (7) \quad \varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (8) \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (9)$$

Výpočet probíhá v iteračních krocích a v každém kroku je testováno splnění okrajových podmínek definovaných konstitutivními vztahy. Okrajové podmínky jsou funkcí deformace a v každém iteračním kroku se mohou měnit.

Soustava rovnic rovnováhy je v maticovém tvaru dána následujícím vztahem:

$$[K]\{\Delta\} = \{f\} \quad (10)$$

kde značí: K – matici tuhosti řešeného systému
 Δ – vektor neznámých deformačních parametrů
 f – vektor zatížení

V nelineárním výpočtu je uvažována závislost matice tuhosti K na deformaci konstrukce, která je definovaná vektorem posunutí uzlových bodů Δ . Řešení probíhá v krocích, které odpovídají jistým přírůstkům zatížení.

by its own weight and subsequently the load induced by the internal pressure was applied. This load was raised gradually, in individual calculation steps. Monitoring points were fixed in the sewer structure for the purpose of the analysis, which made the plotting of the loading curve possible.

The structural condition survey which was conducted resulted in a conclusion that structural parameters (concrete quality, thickness of the structure) could not be reliably guaranteed.

This was why only the structure consisting of the clayware fittings was incorporated into the calculation model.

The calculation model of the trunk sewer consisted of the following three constitutive materials: clayware, mortar and ground environment.

Clayware: 22 kN/m^3

Mortar: compressive strength of 5MPa, tensile strength of 1.5MPa, elastic modulus of 13.24Gpa, volume weight of 21 kN/m^3

The ground environment is simulated in the calculation model using radial and tangential springs. The radial springs are defined such that they act only in compression. Tensioned parts of elastic line supports are eliminated during the calculation. Stiffness of the radial elastic supports $k = 10 \text{ MN/m}^3$.

The tangential springs simulate friction on the sewer surface. They are defined as an elastic material. Stiffness of the tangential elastic supports $k = 0.1 \text{ MN/m}^3$.

METHODOLOGY FOR DETERMINATION OF THE LOAD-BEARING CAPACITY OF A SEWER

In terms of the elastic theory this is the case of planar deformation because deformation in the direction of the tunnel axis is restrained. Displacements of individual points can take place only in two directions, while the displacement in the third direction of the coordinate axes is restrained. The following relationships therefore apply:

$$\begin{aligned} \varepsilon_z = \gamma_{xz} = \gamma_{yz} = \gamma_{zy} = 0 \\ \sigma_x \neq 0; \quad \sigma_y \neq 0; \quad \tau_{xy} \neq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Thus we obtain the following equations for the stress σ_x , σ_y , τ_{xy} in the state of planar strain:

$$\sigma_x = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [(1-\mu)\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y] \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1+\mu)(1-2\mu)} [\mu\varepsilon_x + (1-\mu)\varepsilon_y] \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \frac{E}{2(1+\mu)} \cdot \gamma_{xy} \quad (4)$$

$$\tan(2\theta_\sigma) = \frac{2\tau_{xy}}{\sigma_x - \sigma_y} \quad (5) \quad \tan(2\theta_\varepsilon) = \frac{2\gamma_{xy}}{\varepsilon_x - \varepsilon_y} \quad (6)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (7) \quad \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \quad (8) \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \quad (9)$$

The calculation is carried out in iteration steps, with the tests of meeting boundary conditions defined by constitutive relationships conducted in each step. The boundary conditions are a function of strain. They may be changed in each iteration step.

The matrix-shape system of equilibrium equations is given by the following relationship:

$$[K]\{\Delta\} = \{f\} \quad (10)$$

where: K – stiffness matrix for the system being solved
 Δ - vector of unknown strain parameters
 f – load vector

It is assumed in the non-linear calculation that the stiffness matrix K is dependent on deformation of the structure, which is defined by the vector of displacement of node points Δ . The solution takes place in steps corresponding to certain increments in the loads.

V místech předpokládaného porušení byly definovány monitorovací body (obr. 5), které následně posloužily k určení výpočtového kroku, při němž dojde k porušení stoky.

Ze zatěžovací křivky (obr. 9) pak bylo možné určit hodnotu zatížení v příslušném zatěžovacím kroku.

DOPORUČENÉ ZPŮSOBY SANACE

Každá sanace je kompromisním řešením mezi rozsahem stavebních úprav nutných k rekonstrukci a finanční částkou, kterou si tyto úpravy vyžadají.

Pro zajištění statické únosnosti stoky budou prověřeny následující varianty:

- osazení vnitřního prstence z prostého betonu,
- zesílení vnitřního povrchu kompozitní tkaninou,
- vyvločkování na místě tuhnoucí vložkou,
- nové trubní vedení: a) vložením menšího profilu do stávající stoky,
b) uložení do otevřeného výkopu.

ZÁVĚR

Numerický model jednoznačně prokázal, že kolaps samostatné kanalizační stoky je způsoben porušením spojovacího materiálu – malty. K porušení konstrukce dojde přibližně při vnitřním přetlaku 32,5 kN/mb, to odpovídá hodnotě 3,25 m vodního sloupce (vztaženo ke dnu stoky).

ING. MICHAL SEDLÁČEK, sedlacek@ko-ka.cz, KO-KA, s. r. o.,
ING. RADOMÍR PUKL, CSc., cervenka@cervenka.cz, ČERVENKA CONSULTING, s. r. o.,
ING. PAVEL DOHNÁLEK, MSCE, dohnalek.p@betosan.cz, BETOSAN, s. r. o.

Recenzoval: prof. Ing. Jiří Barták, DrSc.

Monitoring points were defined in the locations of the expected failure (see Fig. 5). Subsequently the points were used for the determination of the calculation step during which the sewer would fail.

The value of the load during a particular loading step could be then determined from the loading curve (see Fig. 9).

RECOMMENDED METHODS FOR REHABILITATION

Each rehabilitation is a compromise between the extent of construction work necessary for reconstruction and the financial amount the work will require.

The following variants of methods securing sufficient static load capacity will be analysed:

- installation of an inner ring of unreinforced concrete
- reinforcement of the inner surface by composite fabric
- in-situ relining by a hardening material
- new tubes a) inserting a smaller profile into the existing sewer
b) lowered in an open trench

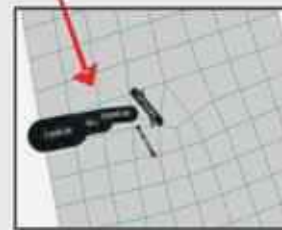
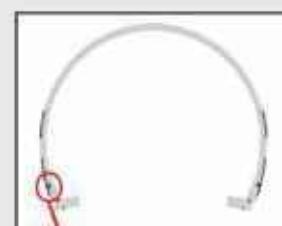
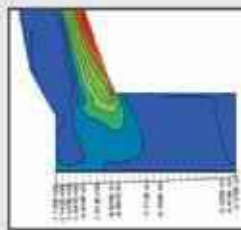
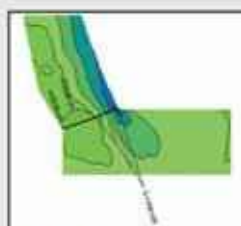
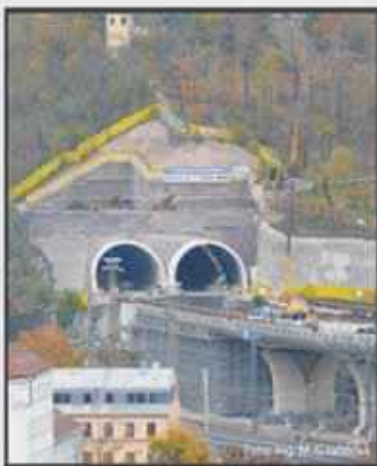
CONCLUSION

The numerical model explicitly proved that the collapse of the independent trunk sewer is the result of a failure of the joint filling material, i.e. the mortar. The structure will fail under the internal positive pressure of 32.5kN/m, which corresponds to the value of 3.25 of water column (related to the sewer bottom level).

ING. MICHAL SEDLÁČEK, sedlacek@ko-ka.cz, KO-KA, s. r. o.,
ING. RADOMÍR PUKL, CSc., cervenka@cervenka.cz, ČERVENKA CONSULTING, s. r. o.,
ING. PAVEL DOHNÁLEK, MSCE, dohnalek.p@betosan.cz, BETOSAN, s. r. o.

Ověřte Vaši konstrukci programem ATENA!

Přidejte se ke špičkovým inženýrům, kteří používají počítačovou simulaci pro kontrolu a navrhování bezpečných a spolehlivých staveb.



Nabízíme:

- programy ATENA Engineering, ATENA Science, ATENA-SARA
- jedinečný software pro nelineární analýzu a hodnocení bezpečnosti
- uživatelskou podporu a údržbu
- poradenství v oblasti nelineárních výpočtů a spolehlivosti konstrukcí

Použití pro:

- tunely, dopravní stavby, mosty
- ověření únosnosti, šířek trhlin v betonu, spolehlivosti
- deformace, optimalizace vyztužení detailů
- bezpečnost konstrukce, požární odolnost