

ZÁKLADNÍ ASPEKTY NAVRHOVÁNÍ VLÁKNOBETONOVÝCH KONSTRUKCÍ

BASIC ASPECTS OF THE DESIGN OF FIBRE REINFORCED STRUCTURES

VOJTĚCH PETŘÍK, HELMUT KURTH

Návrh drátkobetonové konstrukce s využitím pevnosti v tahu po vzniku trhliny je podmíněn znalostí pracovního diagramu, který není závislý pouze na množství drátků v matrici. Provedené experimenty potvrzují vliv řady dalších parametrů.

When designing fibre reinforced structures, to successfully take advantage of the tensile strength after cracks development, the reliable stress-strain diagram has to be available. The stress-strain diagram does not depend solely upon the amount of fibres in the matrix; performed experiments prove effect of number of other parameters.

Beton je, jak známo, stavebním materiálem s vynikající pevností v tlaku. Jeho pevnost v tahu je však velmi nízká a z hlediska návrhu konstrukcí „nespolehlivá“ a nevhodná, neboť po jejím dosažení klesá schopnost přenosu tahového namáhání s rostoucím přetvořením velmi prudce. Beton je tedy křehkým materiálem.

Vhodnou příměsí vláken z různých materiálů lze vlastnosti betonu cíleně ovlivnit. Z hlediska „vylepšení“ vlastností betonu v tahu a dosažení jisté duktility jsou vhodná vlákna s vysokou tahovou pevností a deformabilitou. Nejčastěji jsou používána ocelová vlákna různých tvarů, dále vlákna z hmot na bázi polymerů, vlákna skleněná a v neposlední řadě i vlákna z vysokopevnostních uhlíkových kompozitů.

Používaným ocelovým vláknům se říká drátky a beton s rovnoměrně rozptýlenými drátky v matrici je nazýván drátkobeton.

Sebevětší množství drátků i ve vhodné matrici však nepřinese očekávaný efekt, pokud není jejich správně volenou geometrií a ostatními charakteristikami zajištěno, že vzniklá tahová napětí jimi budou přenesena do trhlínami neporušené matrice. Vysokopevnostní drátky velmi prav-

děpodobně nesplní očekávanou úlohu, pokud budou přidány do betonu s mizivou tahovou pevností a nebude náležitě zajištěno jejich spolupůsobení s betonem ve všech režimech jejich působení. V tomto výčtu je možno pokračovat dál a je zřejmé, že jen pomocí údaje o objemovém podílu drátků v betonové matrici v žádném případě nemůže být pracovní diagram drátkobetonu výstižně definován.

Lze tedy předpokládat, že vlastnosti drátkobetonu významně závisí též na charakteristikách betonové matrice, včetně druhu a vlastností jeho složek. Upozornění na tyto efekty je záměrem tohoto článku.

KVALITATIVNÍ POPIS CHOVÁNÍ DRÁTKOBETONU V TAHU

Drátkobeton se v průběhu čtyřiceti let intenzivního výzkumu „vypracoval“ na úroveň vysokohodnotného konstrukčního materiálu. Při zodpovědném návrhu jakékoliv konstrukce z jakéhokoliv materiálu je třeba, aby jeho vlastnosti byly jednoznačně definovatelné. To platí samozřejmě i pro drátkobeton, ačkoliv se stále ještě lze setkat se „statickými výpočty“, jejichž výsledkem je pouze údaj o objemu drátků přidávaných do objemové jednotky betonu.

Ačkoliv se jedná o důležitý parametr (zejména z technologického hlediska, ale i z jiných důvodů), pro návrh drátkobetonového konstrukčního prvku, ve kterém se má uplatnit jeho nejcharakterističtější vlastnost – a to schopnost přenosu tahových namáhání i po vzniku trhliny, je samotný zcela nepostačující.

Na obr. 1 je znázorněn typický pracovní diagram betonu a drátkobetonu v tahu. Z porovnání obou případů je zřejmé, že

přítomnost drátků rovnoměrně rozmístěných v betonové matrici způsobila několikanásobný nárůst deformační energie – přeměnila původně křehký beton v quasi-duktilní materiál. Velikost tahových namáhání přenášených trhlínou porušeným drátkobetonovým průřezem závisí především na následujících faktorech:

- složení betonové matrice
- geometrii drátků
- tahové pevnosti drátků
- přetvárných charakteristikách drátků
- množství drátků v betonové matrici.

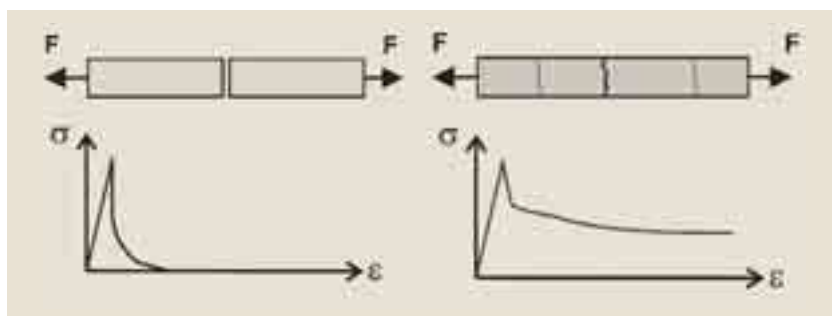
Zda se prvek z drátkobetonu namáhá způsobem uvedeným na obr. 1 poruší pouze jedinou anebo několika trhlínami, závisí na tvaru pracovního diagramu (funkce $\sigma(\epsilon)$) po překročení pevnosti v tahu.

Vliv popsaných faktorů na chování konstrukčních drátkobetonových prvků se projevuje samozřejmě i při jiných druzích namáhání, nikoliv pouze při prostém tahu. V následujícím budou diskutovány výsledky zkoušky nosníků z rozdílných drátkobetonů v tahu za ohybu [1].

Obr. 2 znázorňuje průběh závislosti mezi ohybovým momentem M a křivosťou průhybové čáry k (funkce $M(k)$) drátkobetonového nosníkového prvku čtvercového průřezu o hraně 150 mm. Při odvozování této funkce se vycházelo z průměrů výsledků zkoušek tří sérií po devíti nosnících. Jedná se o směsi se shodným objemovým podílem drátků 30 kg/m³ a s cílovou třídou betonu C25/30, jejichž složení se ovšem mírně liší (např. v použití přírodního kameniva nebo drceného šterku apod.). Použitá vlákna jsou ve všech třech směsích totožná, jedná se o drátky s koncovými háky a poměrem délky ku průměru $L/d = 50$.

Obr. 1 Křehký beton a quasi-duktilní drátkobeton

Fig. 1 Brittle concrete and quasi-ductile fibre reinforced concrete

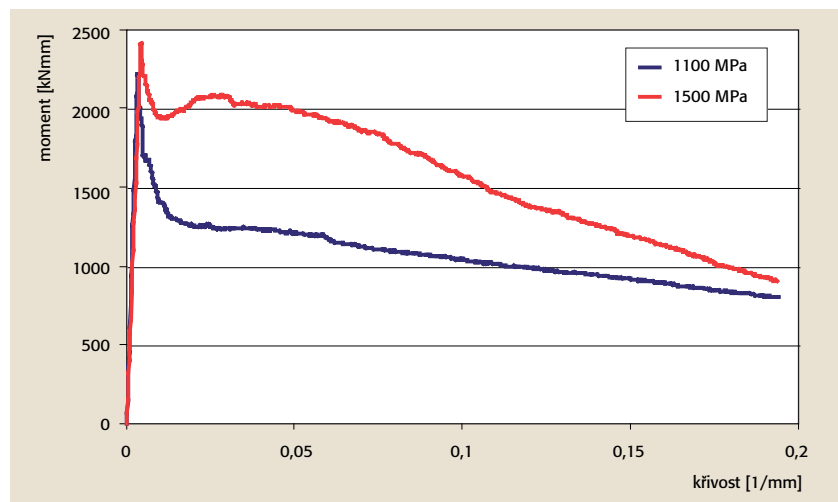
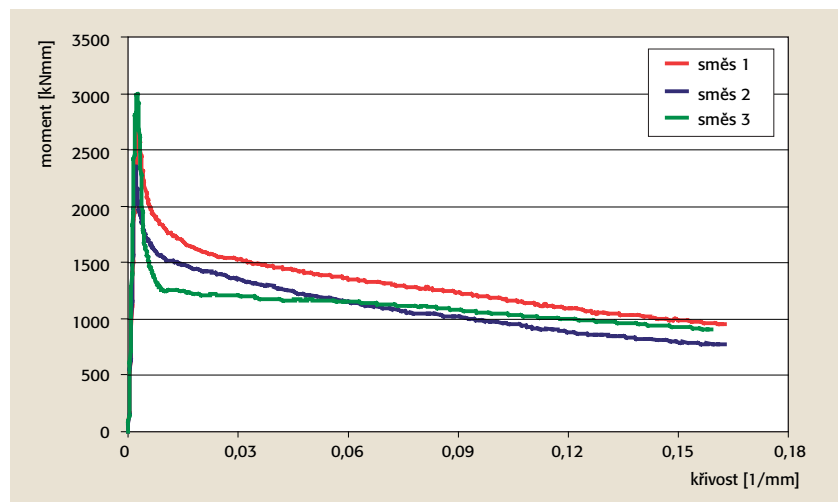


Zajímavé je, že směs s nejvyšší pevností v tahu za ohybu (směs 3) vykazuje největší pokles průřezem přenášených ohybových momentů po vzniku trhliny a průběh křivky v nelineární oblasti je také zcela odlišný. Nosníky ze směsí 1 a 2 vykazují podobné chování, přičemž se zde potvrzuje často uváděná teze o přímé závislosti pevnosti v tahu po vzniku trhlin s pevností v tahu za ohybu nebo v centrickém tahu.

Za povšimnutí stojí i skutečnost, že funkce $M(k)$ nosníků vyrobených ze směsi 3 má v oblasti po vzniku trhliny zcela odlišný průběh, než je tomu u směsí 1 a 2. Zda to souvisí s použitím drceného štěrku namísto přírodního kameniva (tab. 1) nebo s jinými parametry, by mohlo být námětem pro další výzkum.

Obr. 2 Funkce $M(k)$ prvků z drátkobetonů s identickými vlákny

Fig. 2 Function $M(k)$ of fibre reinforced concrete members with identical fibres



Cement	Směs 1	Směs 2	Směs 3
	330 kg/m ³ ; CEM I 32, R	300 kg/m ³ ; CEM II 32, R	330 kg/m ³ ; CEM II 32, R
frakce 0/2	40 %	40 %	39 %
frakce 2/8 (přírodní)	20 %	25 %	–
frakce 4/8 (drcené)	–	–	15 %
frakce 8/16 (přírodní)	20 %	10 %	–
frakce 8/16 (drcené)	–	–	26 %
frakce 16/32 (přírodní)	20 %	25 %	–
frakce 16/22 (drcené)	–	–	20 %
v/c	0,52	0,55	0,6

Tab. 1 Složení drátkobetonových směsí

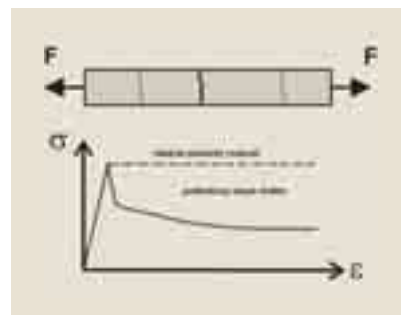
Tab. 1 Composition of fibre reinforced concrete

Další příklad (obr. 3) znázorňuje funkci $M(k)$ geometricky shodných prvků ze stejné směsi, variována byla pouze tahová pevnost drátků. Použitím drátků s vyšší pevností v tahu (geometrie je totožná) bylo dosaženo např. při křivosti průhybové čáry 0,05 mm⁻¹ zvýšení jeho ohybové únosnosti o téměř 60 %; s rostoucí křivostí tento poměr klesá.

V tomto případě se jednalo též o drátky

s koncovými háky, délkou 50 mm a poměrem $L/d = 50$, avšak s rozdílnou pevností v tahu.

Vhodnou volbou složení betonové matrice a variací geometrických a pevnostních charakteristik drátků je možné získat drátkobetonu s velmi vysokou duktilitou. Deformační změkčení při namáhání prostým tahem po dosažení pevnosti v tahu při vzniku trhliny však zůstává typickou vlastností drátkobetonů s, v praxi běžnými, tzv. podkritickými objemovými podíly drátků (obr. 4), což je třeba při návrhu zohlednit.



Obr. 4 Podkritický obsah drátků

Fig. 4 Subcritical amount of fibres

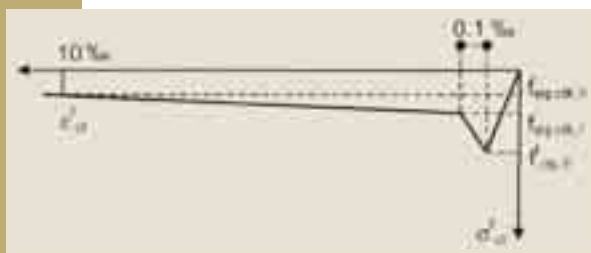
Použití pracovního diagramu v tahu

Schopnost drátkobetonu přenášet tahová napětí po porušení průřezu trhlinou je jeho nejdůležitější a nejcharakterističtější vlastností a je popsána závislostí napětí na přetvoření nebo na šířce trhliny (funkce $\sigma(\epsilon)$, popř. $\sigma(\omega)$).

Přímé experimentální zjištění této funkce zkouškou centrickým tahem je technologicky poměrně náročné, proto se užívá zkoušky v tahu za ohybu [1]. Jednoznačnou nevýhodou této zkoušky však je, že

Obr. 3 Funkce $M(k)$ drátkobetonového prvku při variaci tahové pevnosti drátků

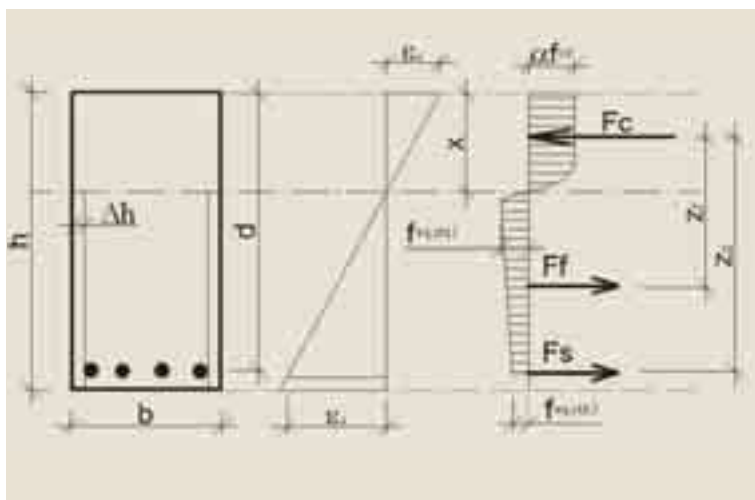
Fig. 3 Function $M(k)$ of a fibre reinforced concrete member with various tensile strength of fibres



Obr. 5 Pracovní diagram drátkobetonu podle [1]
Fig. 5 Stress-strain diagram of fibre reinforced concrete after [1]

Obr. 6 Posouzení železobetonového průřezu namáhaného ohybem

Fig. 6 Ultimate capacity evaluation of reinforced concrete cross section loaded by bending



funkci $\sigma(\epsilon)$ není možné určit přímo. V řadě doporučení lze najít postupy odvozené na základě rovnováhy vnitřních sil a řady předpokladů – často i značně hrubých (např. konstantního průběhu tahového napětí trhlinou porušené části průřezu či na základě odhadu polohy neutrální osy a ramene vnitřních sil, vyvozených tlačnou a taženou částí průřezu, bez ohledu na křivost jeho průhybové čáry). Příklad takového pracovního diagramu drátkobetonu v tahu udává obr. 5.

Typické nelineární deformační změkčení tohoto materiálu po dosažení pevnosti v tahu za vzniku trhliny je v tomto případě zjednodušeně nahrazeno bilineární závislostí, což může být považováno za přijatelné, pokud se jedná o posouzení konstrukce z hlediska mezních stavů.

Nutnost objektivního posouzení únosnosti drátkobetonové konstrukce stoupá s požadavky na její využití. Např. průmyslové podlahy, jejichž zatížení nevyvolá vznik trhlin, byly řešeny – a stále ještě jsou – běžně řešeny jako pružné desky na pružném podkladě, čili je uvažována pouze pevnost v tahu, popř. v tahu za ohybu při vzniku trhliny. Takový postup ovšem neumožňuje uvážit nelineární chování drátkobetonu v tahu po vzniku trhliny a zohlednit jeho duktilitu.

Řešením spočívajícím na představě, že se v průřezu porušeném zatížením vyvolanou trhlinou vytvoří plastický kloub s tuhostí definovanou v závislosti na daném natočení s využitím redistribuce napětí v základové spáře, je možné prokázat daleko větší únosnost než řešením podle teorie pružnosti. Určit s požadova-

nou výstižností tuhost takového kloubu je možné pouze s jasně definovaným pracovním diagramem drátkobetonu, tedy závislostí $\sigma(\epsilon)$.

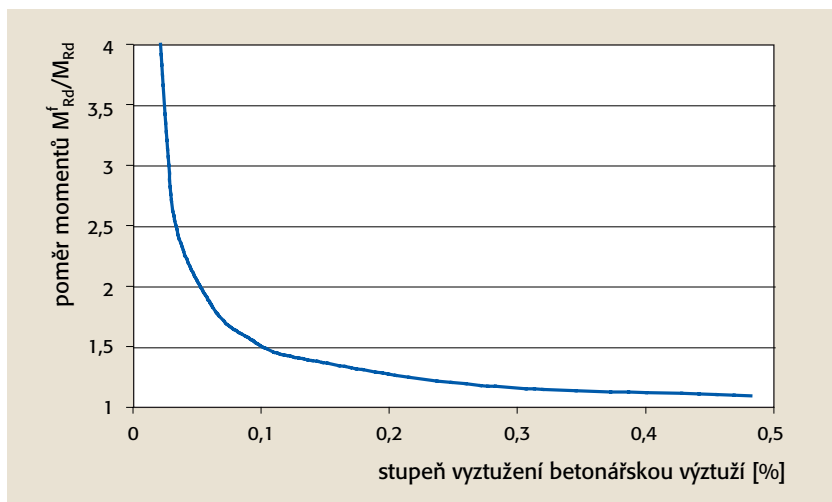
Zjednodušenou možností určení „tuhosti“ plastického kloubu je stanovení momentu únosnosti průřezu z drátkobetonu nebo ze železového drátkobetonu v mezním stavu únosnosti (obr. 6)

Na rozdíl od železobetonového průřezu, kde veškerá tahová napětí musí převzít betonářská výztuž (neboť prostému betonu se v průřezu porušeném trhlinou žádná tahová pevnost nepřisuzuje), mohou být u drátkobetonového prvku buď veškerá tahová napětí, nebo jejich část přenesena pouze drátkobetonem.

Obr. 7 udává závislost poměru momentů únosnosti průřezu $0,25 \times 1 \text{ m}$ z běžného železového drátkobetonu M^f_{Rd} třídy C25/30 a železobetonu M_{Rd} na stupni vyztužení betonářskou výztuží. Z diagramu je zřejmé, že s rostoucím stupněm vyztužení průřezu betonářskou výztuží klesá – podle očekávání – příspěvek

pevnosti drátkobetonu v tahu k celkovému momentu únosnosti. To potvrzuje, že u prvků se silnou staticky nutnou ohybovou výztuží nelze očekávat masivní zvýšení ohybové únosnosti použitím běžného drátkobetonu. Vhodnou volbou pevnostních charakteristik drátkobetonu v tahu je ovšem i v takových případech možné docílit jisté redukce betonářské výztuže (průměr výztužných prutů nebo jejich odstupy) při zachování únosnosti prvku, a tak docílit kromě jiného např. snazšího probetonování.

Pracovní diagram stanovený na základě experimentu umožňuje jednoznačnou definici potřebných pevnostních charakteristik materiálu. Jejich existence má zásadní význam nejenom při návrhu konstrukčního prvku z drátkobetonu či ze železového drátkobetonu, nýbrž také z hlediska zatřídění tohoto materiálu do pevnostních tříd, obdobně jako je tomu v případě pevnosti betonu v tlaku. Projektantovi potom stačí na základě statického výpočtu určenou třídu drátkobetonu



Obr. 7 Poměr momentů únosnosti

Fig. 7 Ratio of ultimate bending moments

Literatura:

- [1] DBV- Merkblatt „Stahlfaserbeton“, Deutscher Beton- und Bautechnik Verein, Okt. 2001
- [2] Petřík V.: Materiálové modely a výpočtové analýzy vláknobetonových konstrukcí, disertační práce; ČVUT Praha, 2004
- [3] Strobach C.-P., Petřík V., Grunert J. P., Kurth H.: Předpjaté betonové dílce ze samozhutňujícího betonu bez běžné betonářské výztuže zesílené rozptýlenou výztuží; Beton TKS 5/2005, str. 22–26
- [4] Strobach C.-P., Kurth H., Petřík V., Grunert J. P.: Steel-fibre-reinforced prestressed, precast beams made of self-compacting concrete, Concrete Engineering International, Volume 10, No.3, Autumn 2006, pp. 37–40

v tahu spolu s pevnostní třídou betonu pouze předepsat – nemusí se zabývat otázkami složení drátkobetonové směsi,

pevností drátků atd., což má řadu předností, nejenom, co se týká úspory času. Forma takových předpisů je v řadě zemí různá, např. v NSR se používá tzv. výkonnostních tříd drátkobetonu – např. C25/30 F 1,0/0,8 ($f_{eq,ctk,I} = 1$ MPa, $f_{eq,ctk,II} = 0,8$ MPa; obr. 5).

Je-li pracovní diagram k dispozici, je možné provádět jakékoliv výpočetní analýzy včetně určení šířky trhlin v mezím stavu použitelnosti, analýzy poddajně uložených deskostěnových konstrukcí pomocí metody konečných prvků apod.

ZÁVĚR

Cílem článku nebylo podat nejnovější teoretické poznatky o chování drátkobetonu, nýbrž upozornit na bohužel stále ještě poměrně často opomíjenou skutečnost, že drátkobeton je konstrukční materiál s jasně definovanými pevnostními charakteristikami stejně jako beton nebo betonářská výztuž. Zohlednění jeho nejcharakterističtější vlastnosti – schopnosti přenosu tahových napětí

po vzniku trhliny – při návrhu a posouzení drátkobetonové konstrukce je možné pouze na základě jeho pracovního diagramu. Pokus o definici vlastností drátkobetonu prostým údajem o objemovém podílu drátků v betonové matici je zcela nedostačující.

Uvedené výsledky byly získány v rámci řešení projektu č. 103/05/2226 Grantové agentury České republiky a najdou též aplikace v projektu MPO v rámci programu POKROK č. 1H – PK 2/17.

Text článku byl posouzen odborným lektorem.

*Ing. Vojtěch Petřík, PhD.
CEMEX Deutschland AG (pův. Readymix AG)
Chr.-Ritter-von-Langheinrichstr. 7, 95448
Bayreuth, Německo
e-mail: vojtech.petrik@cemex.de*

Prof. Dr.-Ing. Helmut Kurth, MBA

FIBRE CEMENT – TECHNOLOGIE A NÁVRH

Jan R. Krause, Architektur Media Management, FH Bochum

Fibre cement – známý pod obchodním označením Eternit začíná v posledním desetiletí svou renesancí. Konstrukce navržené v architektonických ateliérech zvučných jmen, Günter Behnisch, Bearth & Deplazes, Coop Himmelblau, MVRDV, Morphosis ad., využívají jeho ohromné formální i barevné různorodosti v době, kdy právě volné užití forem a barev je ceněnou komoditou architektů. Nová generace fibre cementových desek splňuje náročné a různorodé požadavky na propustnost vzduchu a vody. V interzivní výstavbě bytových domů, objektů občanské vybavenosti i průmyslové výroby je fibre cement stále častěji užíván pro své jedinečné estetické vlastnosti na interiérové dělicí přičky, ve výstavnictví a také na funkční konstrukce a prvky ad.

Kniha vydaná na sklonku loňského roku seznamuje čtenáře s technologií výroby fiber cementu, historií materiálu a jeho užitím v architektonické tvorbě. Na dvaceti vybraných stávajících a nově budovaných stavbách v Evropě a ve Spojených státech představuje různé užití fiber cementu – střešní krytiny, interiérové konstrukce ad.



159 str., 71 barevných ilustrací,
66 č/b ilustrací, 100 nákresů
Cena: CHF 99,-/EUR 59,9 (bez místní DPH)
ISBN-13: 978-3-7643-7591-1 anglická verze

Birkhäuser – Publisher for Architecture,
November 2006
www.birkhauser.com,
www.birkhauser.ch

RSTAB

Program pro výpočet rovinných i prostorových prutových konstrukcí

RFEM

Program pro výpočet konstrukcí metodou konečných prvků

Demoverze zdarma ke stažení
www.dlupal.cz

- Řada přídatných modulů
- Rozsáhlá knihovna profilů
- Snadné intuitivní ovládání
- 6 500 zákazníků ve světě
- Nová verze v českém jazyce
- Zákaznické služby v Praze

Ing. Software Dlubal s.r.o.
Anglická 28, 120 00 Praha 2
Tel.: +420 222 518 568
Fax: +420 222 519 218
E-mail: info@dlupal.cz

Statika, která Vás bude bavit ...