

# NÁVRH BETONOVÉHO DÍLCE ZA POUŽITÍ RŮZNÝCH VÝPOČETNÍCH MODELŮ

Miroslav Šrámek, \*

Katedra betonových a zděných konstrukcí, Fakulta stavební,  
České vysoké učení technické v Praze, Thákurova 7/2077, 166 29 Praha 6, Česká republika.  
miroslav.sramek@fsv.cvut.cz

## ABSTRAKT

Príspevek sa zaoberá analýzou betonového prefabrikovaného dílce pro montované pojezdové plochy letišť. Zvolený prvek je vystaven zatížení od pojezdu letadel, které se s ohledem na polohu imperfekce v souvrství vozovky podílí na způsobu jeho namáhání. V předchozí fázi byl prvek zanalyzován ve 3D a výsledky simulace byly použity ke stanovení potřebného množství výztuže. Cílem tohoto článku bylo porovnat rozdíly mezi komplexním prostorovým modelem a převedením daného problému do roviny za účelem úspory času výpočtu. Druhou částí je rozbor chování a materiálové řešení zatíženého dílce umístěného na pružném podloží. Článek podrobně rozebírá jednotlivé rozdíly mezi oběma uvažovanými přístupy včetně popisu daných jevů. Porovnává hodnocené veličiny, kterými jsou napětí v betonu, oceli a šířka trhlin.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Prefabrikovaný betonový dílec • Pružné podloží • Zatížení pojezdem letadel

## ABSTRACT

The paper deals with an analysis of precast concrete element for airport pavement. The element is subject to airplane pavement loads which together with imperfections in the pavement bedding considerably affect the final stress distribution. The amount of used reinforcement was specified as a result of previous analysis. The objective of this paper is to compare complex three-dimensional model with much simpler and less time-dependent plane solution of the problem. The second part of the article is devoted to an analysis of the element lying on the elastic soil layers. The paper addresses differences between both approaches in detail including descriptions of observed phenomena. It compares both evaluated outcomes such as concrete compressive stress, reinforcement tensile stress and crack width.

## KEYWORDS

Precast concrete element • Elastic soil base • Airplane pavement load

## 1. ÚVOD

S rostoucím stupněm silniční dopravy a s ním souvisejícím rozvojem současné silniční a dálniční sítě roste i tlak na rychlejší údržbu a zároveň výstavbu nových úseků pozemních komunikací a vozovek. Opravy a rekonstrukce stávajících úseků však s sebou nesou nežádoucí uzavírky, kdy jakékoliv omezení provozu se může podílet i na kolapsu dopravy v dané lokalitě. Kromě konvenčních systémů vozovek prováděných na místě se zpět do hry dostávají systémy ze skládaných prefabrikovaných betonových dílců, které byly na delší dobu upozaděny.

Právě špatná technologie výroby a hlavně nedokonalé provedení spojů mezi prefabrikovanými dílci způsobily, že tyto vozovky začaly postupem času vykazovat rozsáhlé poškození a proto začaly být plošně nahrazovány monolitickými systémy. Nové světlo přináší moderní technologie zpracování betonu, přísnější kontroly výroby prefabrikátů a hlavně kvalitněji zpracovaná dokumentace od návrhu až po instalaci na staveništi. Prefabrikované dílce mohou být navrženy pro pozemní komunikace ale i například pro zpevněné plochy letišť, kde díky výrobě daného množství prvků s předstihem nedochází k dlouhodobým uzavírkám a proto rekonstrukce či výstavba nového úseku probíhá v minimálním časovém horizontu.

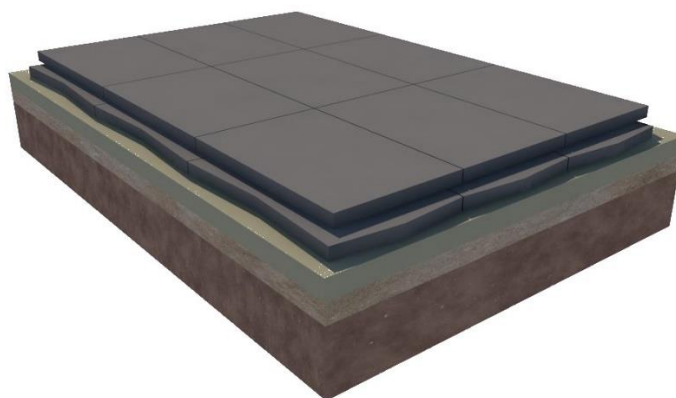
Předkládaný příspěvek se zabývá analýzou dílce, který má sloužit právě k výstavbě zpevněných ploch letišť. Prvek je součástí projektu, jehož cílem je vyvinout inovativního systém skládaných vozovek, na kterém s Fakultou stavební spolupracuje firma KŠ Prefa. Prefabrikát se skládá ze dvou vzájemně propojených desek, které jsou vůči sobě posunuty a tím vytváří jednoduchý zámkový spoj na principu polodrážky. Podkladní vrstvy prvku jsou tvořeny mezerovitým vláknobetonem a betonovým recyklátem.

Cílem článku je zjednodušit komplexní prostorovou nelineární numerickou analýzu chování dílce pod zatížením od podvozku letadla, jejímž cílem bylo s ohledem na výskyt možné imperfekce v celém souvrství stanovit potřebné množství výztuže a která byla velmi časově náročná. Zjednodušení spočívá v převedení celého problému do dvojrozměrné roviny.

Dále je vyšetřováno chování dílce s návazností na podkladní vrstvy, které pro prvek tvoří pružné podloží. Na rozdíl od předchozí simulace tyto vrstvy neposkytují dílci pevné podpory a celý systém se chová odlišně.

---

\* Školitel: prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc., FEng.



Obrázek 1: Systém skládaných prefabrikovaných betonových dílců.

## 2. POPIS SYSTÉMU

Vyšetřovaný systém se skládá ze svrchního železobetonového krytu, který je pojižděn a je tvořený jednotlivými prefabrikáty. Každý prvek se skládá ze dvou vzájemně propojených desek s celkovými půdorysnými rozměry zhruba  $2,6 \times 3,5$  m. Vrchní deska má obdélníkový půdorys a je z části přesazená vůči spodní desce. Vytvořené konzoly zajišťují spolupůsobení dílců. Spodní deska má na každá straně šípovité úkopy, které příznivě ovlivňují vzájemnou interakci mezi prvky a tvoří zámkový spoj bránící půdorysnému posunutí prefabrikátů. Obě desky jsou 200 mm tlusté, celková tloušťka dílce je 400 mm. Výšek celého systému je vyobrazen na Obrázku 1.

Podloží prvků je tvořeno dvojicí vrstev, každá má mocnost 300 mm. Vrstva, na kterou jsou ukládány jednotlivé dílce, je tvořena mezerovitou vláknobetonovou deskou s recyklovaným kamenivem a poplypropylenovými vlákny. Deska s relativně velkou tuhostí přispívá k rovnoměrnému roznosu zatížení do dalších podkladních vrstev. Pod vláknobetonovou deskou je vrstva hutněného betonového recyklátu, který se nachází na spádované zemní pláni.

### 2.1. Materiálové řešení dílce

Kvalitní směs betonu a dostatečná vrstva krytí výztuže jsou klíčovými parametry pro dlouhou životnost prefabrikovaného dílce. S ohledem na agresivní prostředí letištní plochy byla pevnostní třída betonu stanovena na C35/45, krytí výztuže bylo předepsáno na 50 mm. Třída pevnosti betonářské výztuže je B500B, panely jsou vyztuženy pruty vázané výztuže.

### 2.2. Zatížení

Dílce skládané betonové vozovky budou vystaveny pojezdu letadel, proto bylo pro účely numerické analýzy zvoleno zatížení představující hlavní podvozek plně naloženého letounu Airbus A380-800 – v současnosti jednoho z největších dopravních letadel.

## 3. ANALÝZA 3D

Prvotní rozbor chování dílce pod zatížením směřoval k prostorové simulaci problému pomocí pre-processoru GiD následované nelineární numerickou analýzou v programu Atena Studio za účelem vytvoření dostatečně výstižného modelu a také z důvodu nesymetrie prefabrikátu. Cílem bylo determinovat takové vyztužení prvku, které bude schopné zajistit bezpečný přenos zatížení od letadla do podložních vrstev.

### 3.1. Imperfekce

Splnění přísných geometrických odchylek rozměrů prefabrikátu od projektových dimenzí je prakticky nedosažitelným cílem. Podkladní vrstvy cementobetonového krytu budou v praxi vykazovat určité nedokonalosti v souvislosti s ideální rovinností. Proto byla pro účely numerické analýzy stanovena imperfekce o velikosti 9 mm, která se může v celém souvrství skládané vozovky zcela náhodně vyskytovat.

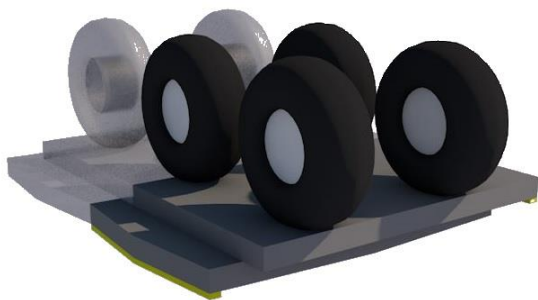
### 3.2. Zatěžovací stav

Během analýzy bylo přijato zjednodušení, že imperfekce ve své podstatě v souvrství způsobuje nedokonalý kontakt mezi jednotlivými panely a podložím. Jinými slovy dílce na sebe přesně nedoléhají. S ohledem na výše zmíněnou náhodnou polohu imperfekce bylo třeba stanovit její nejméně příznivou polohu tak, aby aplikované zatížení vyvolávalo v prvku co nejnepříznivější namáhání. V simulaci nebylo modelováno podloží prvku, bylo nahrazeno prostými podporami.

Nakonec byl vybrán případ, kdy prvek je v kontaktu s podložím pouze svými kratšími stranami a podvozek letadla umístěný v polovině rozpětí způsobuje výrazné ohybové namáhání dílce – Obrázek 2.

---

\* Školitel: prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc., FEng.



Obrázek 2: *Uspořádání zatěžovacího stavu - vyšetřován byl probarvený dílec, podpory vyznačeny žlutě.*

Tabulka 1: *Vyhodnocení návrhu vyztužení dílce.*

Sledovaná veličina	Limit	Ø 8	Ø 10	Ø 12	Ø 14	Ø 16	Ø 18
Tlakové napětí v betonu [MPa]	21	18	20	23	19	16	14
Tahové napětí ve výztuži [MPa]	400	556	552	550	457	391	289
Šířka trhliny [mm]	0,3	0,82	0,72	0,62	0,46	0,36	0,29

#### 4. ANALÝZA 2D

Komplexní trojrozměrný model dokázal spolehlivě vystihnout nesympetrickou geometrii panelu a zároveň umožnil odhalit, zda nedochází k případnému komplikovanějšímu přenosu zatížení do podpor v místech překonzolování horní desky. Z důvodů časově náročného výpočtu bylo později rozhodnuto vytvořit dvojrozměrný model, který by zkrátil čas výpočtu a který by se svými výsledky co nejvíce přiblížil ke 3D analýze.

Veškeré charakteristiky modelu zahrnující pevnostní třídu betonu, krytí výztuže i profil a osové vzdálenosti výztuže byly převzány z předchozí trojrozměrné analýzy.

### 3.3. Výsledky

Model dílce byl vyztužen pruty vázané výztuže kladené v obou směrech při horním i spodním povrchu. Vyztužení dílce bylo postupně zvyšováno, dokud nebyly splněny všechny níže jmenovaná kritéria:

- Napětí ve výztuži je menší než 400 MPa
- Napětí betonu v tlaku je menší než 21 MPa
- Šířka trhliny je menší než 0,3 mm

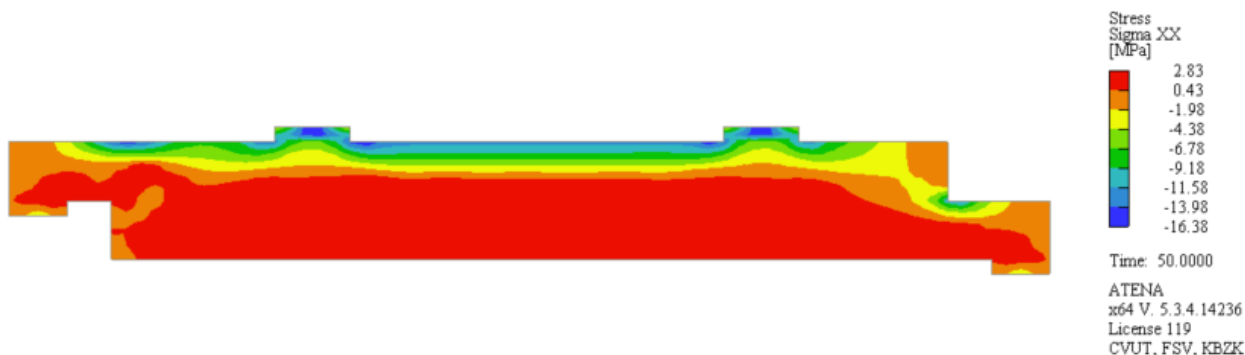
Výsledky pro různé vyztužené dílce jsou prezentovány v následující tabulce. Splnění všech požadavků bylo prokázáno pro pruty s průměrem 18 mm kladenými v obou směrech v osové vzdálenosti 75 mm.

#### 4.1. Zjednodušující předpoklady

Převedení výpočtu do roviny vyžaduje přijetí určitých zjednodušení, které budou dostačovat k zachování výstižnosti celého problému.

Při zadávání geometrie sloužil třetí rozměr prvku pouze k výpočtu ohybové tuhosti. Betonářská výztuž byla ve 3D modelu zavedena pomocí jednotlivých linií, které představovaly samostatné pruty. Rovinný model dovoluje pro každou osnovu výztužných prutů vytvořit pouze jednu linii, která má zdefinovanou plochu jako celá skupina prutů. Příčná výztuž nebyla ve 2D modelu uvažována.

Na panel působí čtveřice pneumatik – Obrázek 2, ve zjednodušeném modelu byly síly od uskupení kol zintegrovány pouze na jednu nápravu. Při výpočtu velikosti sil se uplatnily plochy otisků jednotlivých pneumatik a napětí, jakým působí kolo na panel.



Obrázek 3: *Izooblasy normálového napětí na 2D modelu.*

## 4.2. Porovnání s 3D modelem

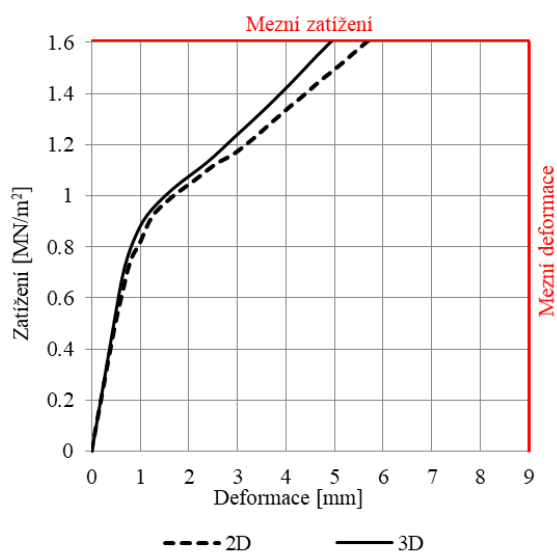
Po provedení výpočtu dvojrozměrného modelu použitím nelineární numerické analýzy metodou konečných prvků byly sledovány stejné parametry jako u komplexnějšího 3D modelu – podrobněji viz kapitola 3.3. Obrázek 3 prezentuje průběh normálových napětí v panelu. Porovnání obou výpočtů demonstuje následující tabulka.

Tabulka 2: Porovnání 2D a 3D modelu.

Sledovaná veličina	2D	3D
Tlakové napětí v betonu [MPa]	14	14
Tahové napětí ve výztuži [MPa]	162	289
Šířka trhliny [mm]	0,25	0,29

Tlaková napětí v betonu se v obou modelech shodují na úrovni 14 MPa. Napětí v tažené výztuži se ale liší o více než 40 %. To je způsobeno jemnější sítí na liniích výztuže u 3D modelu. Hodnoty napětí u 3D modelu představují lokální extrémy. Větší konečné prvky na liniích u 2D modelu způsobily, že napětí se integrovalo i z méně namáhané oblasti výztuže. Šířka trhliny se liší o 0,04 mm.

Závislost deformace na zatížení obou modelů znázorňuje Obrázek 4. Linie „Mezní zatížení“ představuje konečnou hodnotu síly od letounu, „Mezní deformace“ reprezentuje maximální možnou deformaci, která je rovna velikosti imperfekce v souvrství. Po dosažení této hodnoty by se panel více nedeformoval (imperfekce je průhybem dílce vyeliminována a prvek se opírá do okolních konstrukcí). Rovinný model vykazuje konečný průhyb o 0,8 mm větší. To je způsobeno absencí příčné výztuže, která se u prostorového modelu podílela na účinnějším roznosu zatížení od lokálních břemen. Přesto je shoda chování obou modelů dostatečná.



Obrázek 4: Deformační křivky obou modelů.

## 5. MODEL PRUŽNÉHO PODLOŽÍ

Předchozí výpočty se zabývaly vyztužením dílce v nejnepříznivější možné poloze imperfekce bez uvážení přítomnosti pružných podkladních vrstev. Simulace vycházely z teoreticky absolutně tuhých podpor. Analýza neumožňovala redistribuci vnitřních sil vlivem zatlačení dílce do pružného podloží.

Výpočet je založen na předpokladu, že betonový panel, který je oproti poddajným vrstvám podloží relativně tuhý, bude při aplikaci svislého zatížení vykazovat menší deformace a tedy stupeň vyztužení prvku bude oproti předchozí analýze ve výsledku řádově nižší.

### 5.1. Vstupní údaje podloží

Podkladní vrstvy tvořené 300 mm tlustou deskou mezerovitého vláknobetonu a betonovým recyklátem byly do výpočtu uvažovány podle skutečných materiálových charakteristik.

Z dostupných údajů pro vláknobetonovou vrstvu plyne (Tabulka 3), že modul pružnosti, pevnost betonu v tlaku a tahová pevnost se v porovnání s betonem použitým pro prefabrikáty pohybují na zhruba dvakrát nižší úrovni.

Tabulka 3: Materiálové vlastnosti vláknobetonu.

Modul pružnosti	11,4 GPa
Tahová pevnost	1,73 MPa
Tlaková pevnost	21,2 MPa

Zhutněná vrstva betonového recyklátu byla při výpočtu uvažována s efektivními parametry odpovídajícími nesoudržnému ulehlému štěrku v tloušťce stejné jako u vláknobetonové desky – 300 mm. Tloušťka vrstvy rostlé zeminy byla stanovena na 1,5 m s ohledem na hloubku aktivní zóny. Sedání při této a větší hloubce už neprojevovalo. Pokud by byla prokázána nedostatečná únosnost rostlé zeminy, je v systému uvažováno s případnou výměnou za zeminu únosnější. Parametry zemin jsou uvedeny v Tabulce 4.

Tabulka 4: Parametry zemin.

	$E_{def}$	$C_{eff}$	$\phi_{eff}$
Betonový recyklát	600 MPa	0 kPa	44 °
Rostlá zemina	80 MPa	8 kPa	35 °

### 5.2. Analýza

V analýze nebyl uvažován vliv imperfekce, prvek je v plném kontaktu s podkladními vrstvami. Jedná se o prvotní odhad sedání betonového krytu. Poloha a velikost zatížení zůstaly nezměněné. Množství výztuže bylo sníženo na profily  $\varnothing 12$  mm v osové vzdálenosti 150 mm. Zeminy byly namodelovány pomocí Drucker-Pragerova modelu založeného na principu definování plochy porušení materiálu.

\* Školitel: prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc., FEng.

### 5.3. Výsledky

Předpokládaný nižší stupeň vyztužení prvku se po ukončení simulace ukázal být jako plně vyhovující. Prvek byl zatlačen společně s vláknobetonovou deskou do relativně poddajných vrstev zeminy.

V samotném prefabrikátu nevznikaly žádné trhliny, napětí v betonu nepřekročilo mez pevnosti v tahu. Oproti tomu výrazně horší materiálové vlastnosti podkladní vláknobetonové desky se projevíly vznikem mikrotrhlin o šířce nepřesahující setinu milimetru na jejím spodním povrchu. Napětí betonu v tlaku na dílci dosahovala maximální hodnoty 3 MPa a napětí v tažené výztuži nepřesáhlo 4 MPa. Lze konstatovat, že prvek na pružném podloží je namáhán výrazně méně díky velké stlačitelnosti spodních vrstev.

Výsledné sednutí dílce bylo 1,7 mm (tato hodnota byla naměřena v přibližném těžišti dílce). Průběh sedání krytu byl dlouho dobu až do hodnoty 80 % plného zatížení lineární, pouze konečný úsek byl nelineární kvůli přiblížení se k limitní smykové pevnosti zeminy.

## 6. ZÁVĚR

Prezentovaný článek předkládá výsledky nelineární numerické analýzy prefabrikovaného betonového dílce pro letištní plochy.

První zvolený přístup vyšetřoval množství potřebné výztuže prvku k přenesení zatížení od letadla Airbus A380-800 s ohledem na přítomnost možné imperfekce. K tomuto účelu byl vytvořen trojrozměrný model nejnepríznivější polohy zatížení na prvku, který byl vyšetřován pomocí nelineární numerické analýzy v programu Atena Studio. Tento model byl později za účelem snížení časové náročnosti výpočtu převeden do roviny. Na obou modelech bylo ověřeno splnění podmínek maximálních přípustných napětí v betonu a ve výztuži a dodržení maximální šířky trhliny, která ve výsledku nejvíce ovlivnila návrh výztuže.

Z důvodu zjednodušení podmínek podepření v počátečních modelech se další výpočetní model soustředil na vliv pružných podkladních vrstev na výsledné chování prvku pod zatížením. Výpočet prokázal, že zahrnutí pružných vrstev podloží do analýzy příznivě ovlivní množství nutné výztuže, které lze snížit pouze na konstrukčně nutné množství. Protože je prvek v porovnání s podkladní zeminou relativně tuhý, došlo po aplikaci zatížení ke stlačení těchto vrstev a ke snížení normálových napětí v celém panelu. Výsledné sednutí plně zatíženého dílce dosáhlo hodnoty 1,7 mm.

Množství navržené výztuže pro první vyšetřovaný přístup dosahovalo extrémních hodnot, což bylo způsobeno velmi extrémní polohou zatížení vůči uvažovaným podporám a jejich tuhostí. Zahrnutí pružného podloží do výpočtu naopak snížilo množství výztuže na čtvrtinu. Aby byl výpočet výstižnější je jako příští krok plánováno zkombinování obou modelů, kde dojde ke komplexnímu rozboru prvku uloženého na pružném podloží, ve kterém budou uvažovány odchylky

a imperfekce mezi jednotlivými prefabrikáty. Další podstatný vliv na návrh prvku bude mít vliv cyklického namáhání, které bude vyšetřováno v pozdějších fázích projektu.

## PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek vznikl za finanční podpory z prostředků Technologické agentury České republiky v rámci projektu TH02010375 a interní studentské grantové soutěže ČVUT v Praze v rámci projektu SGS18/115/OHK1/2T/11.

## Reference

- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. (2010), *ČSN 73 6131 Stavba vozovek - Kryty z dlažeb a dílců*. Praha.
- Ministerstvo dopravy - Odbor pozemních komunikací. (2015), *TKP 6. Technické kvalitativní podmínky staveb pozemních komunikací: Kapitola 6 - Cementobetonový kryt*, Praha.
- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. (2011). *ČSN EN 1992-1-1 ED.2. Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí: Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*. Praha.
- Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví. (2017), *ČSN EN 206+A1. Beton - Specifikace, vlastnosti, výroba a shoda*. Praha.
- Šrámek, M. & Novák, J. (2018), Simulace betonového dílce zatíženého pojezdem letounu, in '25. Betonářské dny – Sborník příspěvků z konference'.
- ATENA Theory. *ATENA Documentation [online]*. Praha: Červenka Consulting, 2016, 2016, s.
- Turček, P. (2005), *Zakládání staveb*, Bratislava: Jaga, ISBN 80-807-6023-3.
- Vaniček, I. (1983), *Mechanika zemin*. Praha: České vysoké učení technické v Praze.

---

\* Školitel: prof. Ing. Alena Kohoutková, CSc., FEng.