



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

VÝPOČET ŽIVOTNOSTI MOSTNÍ KONSTRUKCE NA ZÁKLADĚ NELINEÁRNÍ ANALÝZY A MODELOVÁNÍ DEGRADACE

LIFE-TIME ASSESSMENT OF BRIDGE BASED ON NONLINEAR ANALYSIS AND DEGRADATION
MODELLING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

MARTIN KUČEK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. DRAHOMÍR NOVÁK, DrSc.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	B3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Bakalářský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608R001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Martin Kucek
Název	Výpočet životnosti mostní konstrukce na základě nelineární analýzy a modelování degradace
Vedoucí bakalářské práce	prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Datum zadání bakalářské práce	30. 11. 2014
Datum odevzdání bakalářské práce	29. 5. 2015
V Brně dne 30. 11. 2014	

.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

Sborníky konferencí IABMAS, ICOSSAR a ICASP.

ATENA - User's and Theory Guides, Červenka Consulting, 2013.

FREET - User's and Theory Guides, Brno/Červenka Consulting, V 1.5, 2014.

SARA - User's and Theory Guides, Červenka Consulting, 2013.

Zásady pro vypracování

Téma je zaměřeno na výpočet životnosti železobetonových mostních nosníků. Využívat se bude MKP software nelineární lomové mechaniky ATENA 2D. Bude modelována navíc degradace (karbonatace betonu, vliv chloridů, koroze výztuže) pomocí vhodných empirických modelů. Cílem je modelovat pokles únosnosti v čase, deterministicky resp. stochasticky. Práce bude realizována ve spolupráci s firmou Dosing, v rámci projektu TAČR.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....
prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí bakalářské práce

Abstrakt

Cílem této práce je výpočet životnosti mostní konstrukce na základě nelineární analýzy a modelování degradace. V řešení bylo použito pravděpodobnostní nelineární analýzy metodou konečných prvků. Nelineární numerickou analýzu zajišťuje program ATENA, vyvinutý firmou Červenka Consulting. Byl modelován jeden prefabrikovaný mostní nosník KA-73, přitěžován silovými účinky až do porušení konstrukce. Sledované mezní stavy, mezní stav dekomprese, vzniku trhlin a mezní stav únosnosti byli porovnání s typovými podklady. Na základě zjištěných hodnot je možné zjistit maximální zatížitelnost pro danou konstrukci.

Abstract

The aim of this work is to calculate the lifetime period of the bridge construction based on the nonlinear analysis and the degradation modelling. As a solution was the probabilistic nonlinear finite element analysis. The nonlinear numerical analysis is provided by the programme ATENA, developed by the Cervenka Consulting. We have modeled one prefabricated bridge beam KA-73, which was overloaded by power effects until the structure was damaged. Observed limit states, limit state of the decompression, crack formation and limit state of the bearing were compared with characteristic material. It is possible to determine the maximum weighted capacity for the given construction based on discovered values.

Klíčová slova

Nelineární analýza, modelování degradace, mostní konstrukce, stanovení zatížitelnosti, předpjatý nosník, výpočtový model, nosník KA-73, mezní stav dekomprese, mezní stav vzniku trhlin, mezní stav únosnosti

Keywords

Nonlinear analysis, degradation modeling, bridge constructions, determining the load capacity, computational model, prestressed beam, beam KA-73, the ultimate limit state, decompression limit state, limit state of cracking

Citace

Martin Kucek: *Výpočet životnosti mostní konstrukce na základě nelineární analýzy a modelování degradace*, Brno, 2015. 52 s., 2 s. příl., bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.

Výpočet životnosti mostní konstrukce na základě nelineární analýzy a modelování degradace

Prohlášení

Prehlasujem, že som túto bakalársku prácu vypracoval samostatne pod vedením pána prof. Ing. Drahomíra Nováka, DrSC. a že som uviedol všetky použité informačné zdroje.

.....

Martin Kucek
27. května 2015

Výpočet životnosti mostní konstrukce na základě nelineární analýzy a modelování degradace

Poděkování

Na tomto mieste by som chcel poďakovať môjmu vedúcemu práce pánovi prof. Ing. Drahomíru Novákovi, DrSc. za odborné vedenie a priateľský prístup počas tvorby tejto práce. Pánovi Ing. Jiřímu Doleželovi, v spolupráci s firmou Dosing, za pomoc pri tvorbe výpočtového modelu. Nakoniec by som chcel poďakovať svojej rodine a priateľom, ktorí mi poskytovali morálnu podporu počas celého môjho bakalárskeho štúdia.

© Martin Kucek, 2015.

Tato bakalářská práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra AdMaS, vznikla jako školní dílo na Vysokém učení technickém v Brně, Fakultě stavební. Práce je chráněna autorským zákonem a její užití bez udělení oprávnění autorem je nezákonné, s výjimkou zákonem definovaných případů.

Obsah

1 Úvod	7
2 Softvér nelineárnej mechaniky	9
2.1 Softvér ATENA	9
2.2 Rozvoj pravdepodobnostného modulu do softvéru nelineárnej lomovej mechaniky	12
3 Numerická štúdia nosníka KA-73	13
3.1 Motivácia	13
3.2 Popis nosníka KA-73	14
3.2.1 Základné informácie	14
3.2.2 Použité materiály	14
3.2.3 Popis nosníka	14
3.2.4 Výroba	15
3.2.5 Zavedenie predpätia	16
3.2.6 Údaje o zaťažiteľnosti	17
3.3 Experimentálne dáta	18
3.3.1 Všeobecné údaje	18
3.3.2 Základné údaje	18
3.3.3 Nosná konštrukcia	19
3.3.4 Zistenie základných materiálových charakteristík	20
3.3.5 Vyhodnotenie stavu mosta	21
3.4 Zjednodušený výpočtový model bez šmykovej výstuže	21
3.4.1 Geometria	21
3.4.2 Materiály	24
3.4.3 Makroprvky	24
3.4.4 Zaťažovacie stavy a podpory	26
3.4.5 Parametre výpočtu	27
3.5 Výpočtový model so šmykovou výstužou	28
3.5.1 Roztpýlená šmyková výstuž	28
3.5.2 Diskrétna šmyková výstuž	28
3.6 Popis modelov degradácie z programu FReET-D	29
3.6.1 Model pre karbonatáciu betónu	29
3.6.2 Model pre koróziu výstuže	30
3.7 Výpočtový model s modelovaním degradácie	30
3.8 Výsledky nelineárneho výpočtu MKP bez modelovania degradácie	31
3.8.1 Diagram v závislosti zaťaženie – priehyb (LD Diagram)	32
3.8.2 Ohybové momenty na MSD, MST, MSU	34

3.8.3	Priebehy hlavných normálových napätí	34
3.8.4	Trhliny	37
3.8.5	Deformácie	39
3.9	Výsledky nelineárneho výpočtu MKP s modelovaním degradácie	41
3.9.1	Diagram v závislosti zaťaženie – priehyb (LD Diagram)	42
3.9.2	Ohybové momenty na MSD, MST, MSU	44
4	Parametrická analýza	45
4.1	Porovnanie výsledkov s T.P.	45
4.2	Vplyv šmykovej výstuže na únosnosť	48
4.3	Vplyv degradácie materiálu	49
4.4	Vyhodnotenie	51
5	Záver	52

Seznam obrázků

2.1	Model rozotřených trhlin pre betón v ťahu založený na lomovej energii [8]	10
3.1	Priečny rez posudzovaného mosta za obcou Lanžhot [11]	13
3.2	Ľavý most ev.č. D2-055..2 cez kanál a lesnú cestu za obcou Lanžhot [11]	18
3.3	Pohľad na inkrustácie v pozdĺžnej špáre medzi nosníkmi [11]	19
3.4	Odvodňovacie otvory prekryté sanačným náterom [11]	20
3.5	Pozdĺžny rez (uvedené kóty sú v cm)	21
3.6	Detail A geometrie príložiek (uvedené kóty sú v cm)	21
3.7	Priečny rez nosníka KA-73 (vľavo) a aproximovaný prierez (vpravo), (uvedené kóty sú v cm)	22
3.8	Umiestnenie predpínacích káblov (uvedené kóty sú v cm) [2]	22
3.9	Prúty predpätej výstuže	23
3.10	Prúty betonárskej výstuže	23
3.11	Zoznam línií a označenia makroprvkov	25
3.12	Detail línií a označenia makroprvkov v oblasti krajnej podpory	25
3.13	Vygenerovaná sieť konečných prvkov	26
3.14	Uloženie podpôr	26
3.15	Rovnomerné spojité zaťaženie	27
3.16	Umiestnenie monitorovacích bodov	27
3.17	Umiestnenie priečných a pozdĺžnych rezov	28
3.18	Schéma rozptýlenej výstuže	28
3.19	Schéma diskkrétnej výstuže	29
3.20	Karbonatačná hĺbka v závislosti na čase	29
3.21	Pokles priemeru výstuže v závislosti na čase	30
3.22	LD Diagram zaťaženie–priehyb pre model <i>bez šmykovej výstuže</i>	32
3.23	LD Diagram zaťaženie–priehyb pre model <i>s rozptýlenou šmykovou výstužou</i>	33
3.24	LD Diagram zaťaženie–priehyb pre model <i>s diskkrétanou šmykovou výstužou</i>	33
3.25	Priebeh hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebeh ohybových momentov v MNm, pre model <i>bez šmykovej výstuže</i>	34
3.26	Priebeh hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebeh ohybových momentov v MNm, pre model <i>s rozptýlenou šmykovou výstužou</i>	34
3.27	Priebeh hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebeh ohybových momentov v MNm, pre model <i>s diskkrétanou šmykovou výstužou</i>	35
3.28	Priebeh hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebeh ohybových momentov v MNm, pre model <i>bez šmykovej výstuže</i>	35
3.29	Priebeh hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebeh ohybových momentov v MNm, pre model <i>s rozptýlenou šmykovou výstužou</i>	35

3.30	Priebeh hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebeh ohybových momentov v MNm, pre model <i>s diskretnou šmykovou výstužou</i>	36
3.31	Priebeh hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebeh ohybových momentov v MNm, pre model <i>bez šmykovej výstuže</i>	36
3.32	Priebeh hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebeh ohybových momentov v MNm, pre model <i>s rozptýlenou šmykovou výstužou</i>	36
3.33	Priebeh hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebeh ohybových momentov v MNm, pre model <i>s diskretnou šmykovou výstužou</i>	37
3.34	Vzniknuté trhliny v integračných bodoch pre model <i>bez šmykovej výstuže</i> , max. šírka roztvorenia trhliny je 4,224E-06 m.	37
3.35	Vzniknuté trhliny v integračných bodoch pre model <i>s rozptýlenou šmykovou výstužou</i> , max. šírka roztvorenia trhliny je 5,185E-06 m.	37
3.36	Vzniknuté trhliny v integračných bodoch pre model <i>s diskretnou šmykovou výstužou</i> , max. šírka roztvorenia trhliny je 9,197E-06 m.	37
3.37	Vzniknuté trhliny v integračných bodoch pre model <i>bez šmykovej výstuže</i> , max. šírka roztvorenia trhliny je 5.128E-03 m.	38
3.38	Vzniknuté trhliny v integračných bodoch pre model <i>s rozptýlenou šmykovou výstužou</i> , max. šírka roztvorenia trhliny je 2,692E-03 m.	38
3.39	Vzniknuté trhliny v integračných bodoch pre model <i>s diskretnou šmykovou výstužou</i> , max. šírka roztvorenia trhliny je 3,370E-03 m	38
3.40	Detail vzniku trhlín v čele nosníka po zaťažení plnou predpínaciou silou pre všetky tri modely	38
3.41	Vzopätie nosníka v násobku deformácie 50x pre model <i>bez šmykovej výstuže</i>	39
3.42	Vzopätie nosníka v násobku deformácie 50x pre model <i>s rozptýlenou šmykovou výstužou</i>	39
3.43	Vzopätie nosníka v násobku deformácie 50x pre model <i>s diskretnou šmykovou výstužou</i>	40
3.44	Pokles nosníka v násobku deformácie 10x pre model <i>bez šmykovej výstuže</i>	40
3.45	Pokles nosníka v násobku deformácie 5x pre model <i>s rozptýlenou šmykovou výstužou</i>	40
3.46	Pokles nosníka v násobku deformácie 5x pre model <i>s diskretnou šmykovou výstužou</i>	41
3.47	LD Diagram zaťaženie–priehyb pre model <i>bez šmykovej výstuže</i>	42
3.48	LD Diagram zaťaženie–priehyb pre model <i>s rozptýlenou šmykovou výstužou</i>	43
3.49	LD Diagram zaťaženie–priehyb pre model <i>s diskretnou šmykovou výstužou</i>	43
4.1	LD Diagram s vyznačenou normálnou a výhradnou zaťažiteľnosťou pre model <i>bez šmykovej výstuže</i>	45
4.2	LD Diagram s vyznačenou normálnou a výhradnou zaťažiteľnosťou pre model <i>s rozptýlenou šmykovou výstužou</i>	46
4.3	LD Diagram s vyznačenou normálnou a výhradnou zaťažiteľnosťou pre model <i>s diskretnou šmykovou výstužou</i>	46
4.4	LD Diagram s vyznačeným limitným vzopätím a priehybom pre model <i>bez šmykovej výstuže</i>	47
4.5	LD Diagram s vyznačeným limitným vzopätím a priehybom pre model <i>s rozptýlenou šmykovou výstužou</i>	47
4.6	LD Diagram s vyznačeným limitným vzopätím a priehybom pre model <i>s diskretnou šmykovou výstužou</i>	48

4.7	Graf pre porovnanie vplyvu degradácie materiálu pre model <i>bez šmykovej výstuže</i>	49
4.8	Graf pre porovnanie vplyvu degradácie materiálu <i>s rozptýlenou šmykovou výstužou</i>	50
4.9	Graf pre porovnanie vplyvu degradácie materiálu <i>s diskretnou šmykovou výstužou</i>	50

Seznam tabulek

2.1	Prehľad materiálových modelov programu ATENA 2D [14]	11
3.1	Prehľad typových dĺžok	15
3.2	Prípustné hodnoty vzopätia po zavedení predpätia	17
3.3	Tabuľka zaťažiteľnosti v M_p/M_N	17
3.4	Tabuľka statických a dimenzačných veličín	17
3.5	Výsledné orientačné pevnosti betónu konštrukcie [11]	20
3.6	Výsledky a vyhodnotenia NDT skúšok betónu, most ev.č. D2-055 Lanžhot [11]	20
3.7	Prúťová výstuž modelovaná v Programe ATENA 2D - Predpäťá výstuž	23
3.8	Prúťová výstuž modelovaná v Programe ATENA 2D - Betonárska výstuž	23
3.9	Materiálové charakteristiky pre materiálový model betónu	24
3.10	Materiálové charakteristiky pre materiálový model predpäťej výstuže	24
3.11	Prehľad makroprvkov s danými parametrami	25
3.12	Hodnoty napínacej sily vnášanej do prúťovej výstuže v programe ATENA 2D	27
3.13	Prehľad prúťov diskkrétnej výstuže	29
3.14	Hodnoty hĺbky karbonatácie a poklesu ef. plochy výstuže	30
3.15	Upravená plocha výstuže v programe ATENA 2D pre model s vplyvom degradácie	31
3.16	Hodnoty zaťaženia a priehybu získané z LD diagramu	32
3.17	Hodnoty zaťaženia a priehybu získané z LD diagramu	32
3.18	Hodnoty zaťaženia a priehybu získané z LD diagramu	33
3.19	Hodnoty ohybových momentov v [MNm]	34
3.20	Hodnoty deformácií v polovici rozpätia v smere „y“	41
3.21	Hodnoty zaťaženia a priehybu získané z LD diagramu	42
3.22	Hodnoty zaťaženia a priehybu získané z LD diagramu	42
3.23	Hodnoty zaťaženia a priehybu získané z LD diagramu	43
3.24	Hodnoty ohybových momentov pre modely s vplyvom degradácie v [MNm]	44
4.1	Porovnanie hodnôt ohybových momentov na <i>medzi dekompresie</i>	48
4.2	Hodnoty ohybových momentov v posudzovaných medzných stavoch v MNm	48
4.3	Hodnoty zaťažiteľnosti v posudzovaných medzných stavoch v MN	49
4.4	Hodnoty priehybu v posudzovaných medzných stavoch v m	49
4.5	Hodnoty zaťaženia a ohybových momentov na MSU s uvážením degradácie	51

Kapitola 1

Úvod

Predpätý betón sa začal používať pri výrobe mostných nosníkov viac ako pred šesťdesiatimi rokmi. Vtedy, ešte v bývalom Československu, prvé predpäté mostné nosníky začala vyrábať výrobná v Liticích nad Orlicí, v závode Baraba. Predtým, ako prvý stupeň vývoja, sa používali prefabrikované mostné trámy proste uložené. Pri projektovaní sa používali Smernice pre navrhovanie mostov, upravené podľa novozískaných poznatkov. Pre predpätú výstuž sa používali za studena ťahané hladké patentované drôty $\text{ØP } 4,5$ združené do káblov, ktoré boli z hľadiska predpätej sily a ceny najvýhodnejšie. Pre mohutnejšie káble sa neskôr začali používať patentované drôty $\text{ØP } 7$. Na výrobu predpätých mostných nosníkov sa používal hutný betón vysokej pevnosti, často pevnostnej triedy B 600, ktorý mal za úlohu preniesť predpätie z výstuže a zároveň chrániť výstuž pred koróziou, čo sa dosiahlo dôkladným zhutnením. Pre umiestnenie predpätej výstuže boli v betónovej časti prierezu pri výrobe nosníkov vytvorené kanáliky. V tej dobe boli na tento účel používané bezošvé rúry, umiestnené tak, aby kopírovali budúcu trajektóriu predpätej výstuže. Muselo sa dbať na dostatočne skoré vytiahnutie rúr po ukončení betónovania, pretože hrozilo zatvrdnutie betónu na mieru, ktorá by znemožnila vytiahnutie rúr a následne by bolo zabránené spolupôsobeniu predpätej výstuže s betónom. Spolupôsobenie výstuže s betónom zaisťovala injektážna malta z portlandského cementu, vŕhaná pod tlakom do káblového kanálika po umiestnení výstuže. Od roku 1950 vývoj postúpil k výrobe spriahnutých železobetónových mostov, vďaka čomu sa mohli dovtedy plné prierezy trámov začať vylahčovať, vznik tzv. komorových prierezov. Zo zaťažovacích skúšok vykonávaných na skúšobných nosníkoch, zaťažovaných do zlomu, bola dokázaná vyhovujúca nosná funkcia konštrukcií z predpätého betónu. Pri zaťažení konštrukcie prevádzkovým zaťažením, v betóne nevznikli trhliny a bola zabezpečená jej tuhosť. Vďaka tomu sa predpäté konštrukcie stali dôležitým prvkom pri efektívnych návrhoch mostov a to pre ich vysokú únosnosť a uspokojivú výrobnú cenu [1].

S narastajúcim vekom mostných konštrukcií a súčasne so zvyšujúcimi sa nárokmi na zaťažiteľnosť je spojený pokles životnosti. Z tohoto dôvodu je potrebný statický prepočet jestvujúcich mostných konštrukcií za účelom stanovenia spoľahlivosti, prevádzkyschopnosti, miery zaťažiteľnosti a zostávajúcej životnosti mostných konštrukcií. Pomocou čo najpresnejšieho výpočtu týchto veličín je možné naplánovať stratégiu rekonštrukcie mostných konštrukcií, v priamej väzbe na stavebný stav konštrukcie. V súčasnosti (rok 2015) sa nachádza na slovenských a českých cestných komunikáciách spolu okolo 25460 mostov z toho 3700 je v zlom, až havarijnom stave s potrebou rekonštrukcie [3, 10].

Jedným z hlavných dôvodov zníženia spoľahlivosti a skrátenia zostávajúcej životnosti železobetónových a predpätých betónových konštrukcií je dopad degradácie betónu, ktorá je ovplyvnená fyzikálnymi, (mechanické vplyvy, teplota, vlhkosť) chemickými, (plynné agresívne látky, roztoky kyselín, zásad a solí) a biologickými (mechanické pôsobenie koreňov rastlín, mikroorganizmov) faktormi. Degradácia betónu spôsobuje vznik trhlin, z čoho následne vyplýva obnaženie betonárskej alebo predpätej výstuže, čo má za následok koróziu výstuže spôsobenú oxidáciou látkami okolitého prostredia [9]. Degradácia betónu a následná korózia výstuže sú jednými z hlavných ukazovateľov pri plánovaní časového sledu rekonštrukcií.

K overeniu jestvujúcich konštrukcií z hľadiska únosnosti, použiteľnosti a zostávajúcej životnosti sú používané všeobecné požiadavky a postupy pre hodnotenie existujúcich konštrukcií uvedené v ČSN ISO 13822 [4]. V tejto norme sú uvedené postupy k overeniu podľa metódy čiastočných súčiniteľov, ako aj alternatívne pravdepodobnostné metódy. Vzhľadom k nepredvídateľnému chovaniu sa celej konštrukcie, je výhodnejšie použiť pri posúdení súčasného stavu mostnej konštrukcie pokročilú pravdepodobnostnú analýzu. Pravdepodobnostná analýza sa líši od klasických deterministických metód. Tie sú väčšinou založené na metóde čiastočných súčiniteľov, zavedením takzvaných ukazovateľov spoľahlivosti, ktorými sú pravdepodobnosť poruchy (pravdepodobnosť prekročenia niektorého s medzných stavov) a index spoľahlivosti. Tieto ukazovatele nám umožňujú lepšie určenie úrovne spoľahlivosti. Rozhodujúcim krokom v overovaní jestvujúcej konštrukcie je určenie rozhodujúceho medzného stavu, ktorého prekročenie by malo za dôsledok kolaps konštrukcie. Môže sa jednať o medzný stav únosnosti (MSU), alebo o niektorý z medzných stavov použiteľnosti (MSP). Pri degradujúcich konštrukciách sa v súvislosti so životnosťou konštrukcie posudzuje aj medzný stav trvanlivosti (MST). S MST sa spája znalosť takzvaného iniciačného času. Jedná sa o časový úsek od zhotovenia konštrukcie, až po porušenie krycej vrstvy betónu s následnou koróziou výstuže, čo má vplyv na celkovú únosnosť konštrukcie. Určenie spoľahlivosti a zaťažiteľnosti jestvujúcich mostov pravdepodobnostnou analýzou je založené na simulácii porušenia konštrukcie daným zaťažením pomocou nelineárnej metódy konečných prvkov (MKP) v spojení s technikami typu Monte Carlo. Postup výpočtu môžeme zhrnúť do nasledujúcich krokov:

- Štatistická analýza nameraných hodnôt
- Matematické modelovanie degradačných procesov betónu
- Deterministická analýza konštrukcie pomocou MKP
- Spoľahlivostná analýza

Kvôli rastúcim požiadavkám na zaťažiteľnosť je potrebné čoraz presnejšie stanovenie zaťažiteľnosti mostných konštrukcií z dôvodu naplánovania včasnej rekonštrukcie. V tejto súvislosti sa ponúka myšlienka skombinovať nelineárnu numerickú metódu s účinnými stochastickými metódami a vytvoriť tak moderný nástroj pre reálne posudky. Reálne posudky by mohli viesť v budúcnosti k finančným úsporám pri rekonštrukciách jestvujúcich betónových konštrukcií, či už mostov, alebo iných stavieb [8, 6].

Kapitola 2

Softvér nelineárnej mechaniky

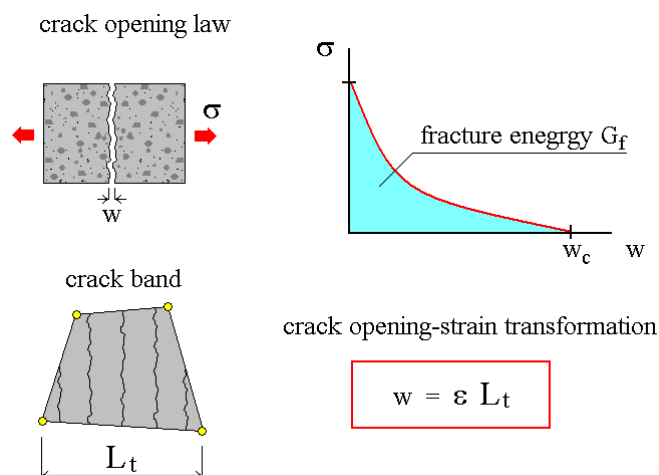
2.1 Softvér ATENA

Softvér ATENA (Červenka & Pukl 2000) predstavuje efektívny nástroj pre nelineárnu analýzu železobetónových konštrukcií. Umožňuje realistické modelovanie štruktúry a odhad porušenia pri danom zaťažení. Zahŕňa tiež použitie numerických metód lomovej mechaniky. Softvér ATENA bol až do roku 2002 čisto deterministický, všetky geometrické, materiálové a zaťažovacie parametre výpočtového modelu boli stanovené z deterministických hodnôt. Všeobecne platí, že materiálové, geometrické a zaťažovacie parametre modelov pre výpočty nelineárnej lomovej mechaniky sú pomerne neisté (náhodné) a modelovanie týchto neistôt vo výpočtových modeloch so zahrnutím pravdepodobnosti je veľmi žiaduce [7].

Softvér ATENA je súčasťou programového systému SARA (Structural Analysis and Reliability Assessment), zloženého zo štyroch hlavných častí:

- SARA Studio, zaisťuje správu dát a riadenie súčastí systému
- ATENA, nelineárna simulácia metódou konečných prvkov
- FReET, štatistika a spoľahlivosť
- Integrovaná databáza stochastických parametrov mechanických vlastností stavebných materiálov

Pomocou softvéru ATENA môžeme modelovať chovanie a odozvu konštrukcie až do jej úplného porušenia. Najdôležitejšou časťou pri nelineárnych výpočtoch je vhodná voľba materiálového modelu, ktorý nám zásadne ovplyvní získané výsledky. Pre betón, ako pre zložitý heterogénny materiál, je vhodné použiť nelineárne materiálové modely, ktoré zahŕňajú všetky dôležité aspekty chovania betónu v ťahu aj tlaku. Pevnostné správanie betónu je modelované na základe nelineárnej lomovej mechaniky, v kombinácii s metódou šírky pásu trhlín a konceptom rozotrených trhlín (vid. obr. 2.1). Hlavné materiálové parametre sú lomová energia, pevnosť betónu v ťahu a tvar funkcie zmäkčenia. Skutočná diskretná trhlinka je simulovaná ako pás lokalizovaných pomerných pretvorení. Pomerné pretvorenie odpovedajúce šírke trhliny sa vzťahuje k veľkosti konečného prvku. Pre model rozotrených trhlín sa funkcia zmäkčenia stanovuje individuálne pre každý konečný prvok tak, aby bol zachovaný predpísaný vzťah pre šírku otvorenia trhliny. Model založený na energetickej formulácii zabezpečí objektivitu riešenia[8].



Obrázek 2.1: Model rozotrených trhlín pre betón v ťahu založený na lomovej energii [8]

Ďalšie materiálové modely sa používajú pri modelovaní výstuže (predpätej, betonárskej, cyklickej, rozptýlenej), zemín a konštrukčnej ocele. Prehľad materiálových modelov je uvedený v tab. 2.1.

Po výbere vhodných materiálov pre danú úlohu môžeme prejsť k zadaniu geometrie modelu, k čomu nám slúžia topologické objekty modelu.

- Styčníky
- Línie
- Makroprvky
- Otvory
- Prútové výstuže

Styčníky sú zadávané pomocou súradníc „x“ a „y“. V okolí styčníka môže byť definovaná hustota siete konečných prvkov zadaná pomocou polomeru oblasti a hustoty siete. Styčník môže byť v prípade potreby podopretý ľubovoľným počtom diskretných pružín.

Línia je určená spojnicou dvoch styčníkov. Môže byť definovaná ako úsečka, kružnica, alebo oblúk. Zahustenie siete pomocou línie môžeme definovať, rovnako ako u styčníkov, polomerom a hustotou, alebo rozdelením línie na ľubovoľný počet dielov. Podopretie pružinami je taktiež možné.

Makroprvky sú definované líniami, ktoré musia tvoriť uzavretú oblasť. Každému makroprvku priradujeme druh materiálu a hrúbku danej vrstvy. Makroprvok určuje typ prvkov siete (štvoruholníková, trojuholníková, zmiešaná) a zahustenie počtom dielov.

Otvory sú zadávané, podobne ako makroprvky, líniami tvoriacimi uzavretú oblasť, bez definície materiálových charakteristík.

Prútové výstuže sú definované polylíniami, tvorenými reťazcami spojených segmentových línií, ktoré môžu byť priame alebo oblúkové. Typ výstuže určuje či sa jedná o výstuž obyčajnú, alebo externú. Rovnako je potrebné zadať plochu výstuže.

Po zadaní geometrie program sám vygeneruje sieť konečných prvkov, podľa užívateľom zadaných upresnení. Nasleduje zadávanie zaťažovacích stavov. Model môže byť zaťažovaný

vlastnou tiažou, poklesom podpôr, silovými účinkami, zmršťovaním, účinkami teploty, predpätím atď.

Typ materiálu	Popis	Materiál
Pružný-rovinná napätosť	Lineárne pružný materiál pre 2D rovinnú napätosť	Akýkoľvek
Pružný-rovinná deformácia	Lineárne pružný materiál pre stav 2D rovinatej deformácie	Akýkoľvek
Pružný-osovo symetrický	Lineárne pružný pre stav rotačnej symetrie	Akýkoľvek
Pružný-1D	Lineárne pružný materiál pre 1D-výstuž	Výstuž
3D Betón	Lomovo-plastický, lineárna tlaková oblasť	Betón
3D Nelineárny betón	Lomovo-plastický, nelineárna tlaková oblasť	Betón
3D Variable Non Linear Cem.	Rovnaký model ako predchádzajúci, ale je možné definovať časový vývoj vybraných materiálových parametrov	Betón
3D Non Linear Cem. User	Rovnaký model ako 3D Nelineárny betón, ale umožňuje užívateľovi definovať pracovný diagram pre ťah, tlak, šmyk potrahaného betónu a interakciu ťahovej a tlakovej pevnosti	Betón, vláknobetón
Betón-Sbeta Materiál	SBETA materiálový model založený na porušení	Betón
Microplane4 Material	Bažantov model Microplane M4	Betón
3D Bi-lineárna Oceľ Von Mises	Von Mises plasticita	Oceľ
2D kontakt	Kontakt na rozhraní, prilnavosť, suché trenie	Kontakt
Výstuž	1D nelineárna, bi-lineárna, multi-lineárna	Oceľ
Cyklická výstuž	1D Cyklická, Pinto-Menegoto	Oceľ
Rozptýlená výstuž	1D nelineárna, bi-lineárna, multi-lineárna	Oceľ
Pružina	1D nelineárna, multi-lineárna	Podpora
Súdržnosť výstuže a betónu	Závislosť medzi napätím a preklzom v súdržnosti	Výstuž
3D Drucker-Prager plasticita	Drucker-Pragerova plasticita	Zemina, horniny

Tabulka 2.1: Prehľad materiálových modelov programu ATENA 2D [14]

Pred samotným výpočtom si môžeme overiť správnosť zadaných dát. Je potrebné zadať vstupné údaje pre správny priebeh výpočtu, poprípade prídavné dáta pre zobrazenie výsledkov. Vstupné údaje pre priebeh výpočtu sa zadávajú pomocou parametrov výpočtu kde máme na výber tri základné metódy riešenia. Štandardná Newton-Raphson a Arc Length sú dve základné metódy pre elimináciu nevyrovnaných síl a znovunastolenie stavu rovnováhy. Dajú sa použiť v kombinácii s metódou Line search pre urýchlenie konvergencie. Po zvolení vhodnej metódy stanovíme postup zaťažovania modelu konštrukcie pomocou výpočtových

krokov. K zobrazeniu výsledkov nám slúži zadávanie rezov a monitorovacích bodov kdekoľvek v konštrukcii. Behom výpočtu môžeme upravovať jeho priebeh a sledovať odozvu a porušenie konštrukcie.

Post-processing nám umožňuje vyhodnotiť všetky potrebné informácie v ktoromkoľvek kroku výpočtu. Môžeme zobraziť priebeh napätí, pomerné pretvorenia, vývoj a šírku trhlín, priebehy napätí v jednotlivých prútoch výstuže atď. Zo zaťažovacieho diagramu, získaného pomocou vhodného umiestnenia monitorovacích bodov môžeme vyhodnotiť odozvu konštrukcie, jej porušovanie, vývoj deformácie a medznú únosnosť [14].

2.2 Rozvoj pravdepodobnostného modulu do softvéru nelineárnej lomovej mechaniky

Vlastnosti mnohých fyzikálnych systémov a vstupy pre tieto systémy vykazujú komplex náhodných výkyvov, ktoré nemôžu byť zachytené a charakterizované kompletne deterministickými modelmi. Pravdepodobnostné modely sú potrebné na kvantifikovanie neistôt týchto vlastností, čo nám umožní vytvoriť reálne znázornenie výstupu a poruchového stavu daného systému a získanie racionálneho a bezpečného návrhu. Získané poznatky poskytujú základ pre skombinovanie efektívnych spoľahlivostných techník s doterajšími poznatkami v oblasti nelineárnej lomovej mechaniky. Vývoj hardvéru umožňuje skombinovať simulačnú metódu typu Monte Carlo s nelineárnou metódou konečných prvkov. Cieľom základnej štatistickej spoľahlivostnej nelineárnej analýzy je získať odhad štruktúrálnej štatistickej odozvy (napätia, priehybu, zaťažiteľnosti atď.), analýzu citlivosti a odhad spoľahlivosti[7]. Pravdepodobnostný postup môžeme rozdeliť do nasledovných krokov:

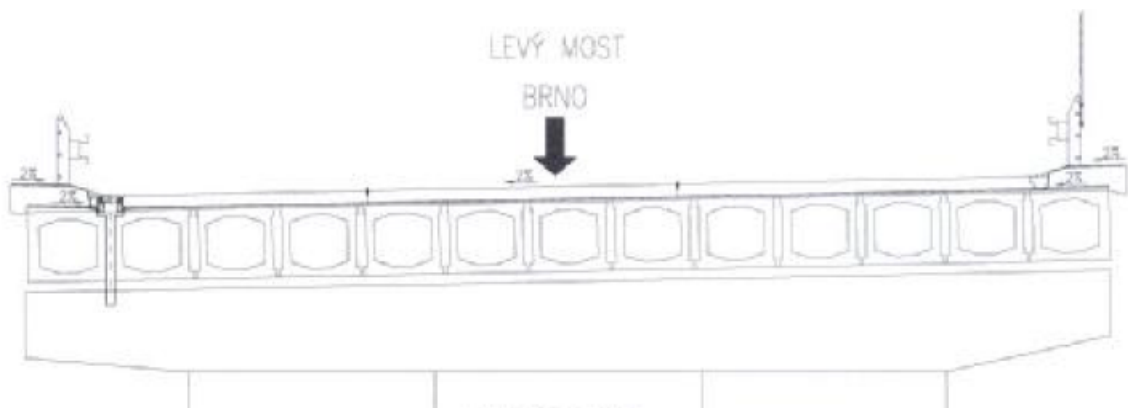
- Neistoty sú modelované ako náhodné veličiny, opísané ich štatistickou rozdeľovacou funkciou. V optimálnom prípade sú všetky náhodné parametre získané meraním a namerané hodnoty odpovedajú skutočnosti. Štatistické vyhodnotenie týchto experimentálnych dát by malo viesť k výberu najvhodnejšej distribučnej funkcie. Výsledkom tohto kroku je množina vstupných parametrov pre výpočtový model v programe ATENA, náhodné veličiny sú charakterizované strednou hodnotou, rozptylom a ďalšími štatistickými parametrami.
- Náhodné vstupné parametre sú generované v závislosti na ich type rozdeľovacej funkcie pomocou simulačných metód typu Monte Carlo.
- Vygenerované realizácie náhodných parametrov sú potom použité ako vstupy pre výpočtový model programu ATENA, po vykonaní komplexu nelineárnych riešení prebehne uloženie výsledkov.
- Posledné dva kroky sa opakujú n-krát (n je počet použitých simulácií), na konci celého simulačného procesu je štatisticky vyhodnotený súbor výsledkov (stredná hodnota, rozptyl, koeficient šikmosti, histogramy).

Kapitola 3

Numerická štúdia nosníka KA-73

3.1 Motivácia

Cestné a diaľničné mosty z prefabrikovaných mostných nosníkov sa používali pri budovaní dopravnej infraštruktúry už od polovice minulého storočia [1]. Od zhotovenia prvých mostov z prefabrikovaných nosníkov uplynulo veľa rokov a mnoho z nich stojí dodnes. V minulosti ešte neexistovali účinné metódy na stanovenie úrovne maximálnej zaťažiteľnosti, prevádzkyschopnosti a s tým spojenej životnosti. V dnešnej modernej dobe s rýchlym vývojom počítačového softvéru sa ponúka možnosť zhotovenia prepočtov existujúcich mostných konštrukcií s využitím počítačového softvéru. V kombinácii s nelineárnou analýzou, zahrňujúcou nelineárne chovanie sa materiálu, hlavne betónu, a účinnými stochastickými metódami, s modelovaním degradácie (karbonatácie betónu a následnej korózii výstuže) dostávame účinný nástroj k stanoveniu potrebných hodnôt k určení maximálnej zaťažiteľnosti a zostávajúcej životnosti mostnej konštrukcie. Výsledky môžeme porovnať s hodnotami, ktoré sú uvedené v Typových podkladoch pre konkrétne prefabrikované mostné nosníky. Z prepočtov existujúcich mostných konštrukcií je možné naplánovať potrebu rekonštrukcie daných mostov s čo najefektívnejším rozdelením finančných prostriedkov.



Obrázek 3.1: Pričný rez posudzovaného mosta za obcou Lanžhot [11]

3.2 Popis nosníka KA-73

3.2.1 Základné informácie

Typový podklad pre konštrukcie cestných a diaľničných mostov z prefabrikátov KA-73 dĺžky 9-18 m bol schválený v Prahe dňa 29. januára 1975 a nadobudol platnosť 1. februára 1975. Cieľom zhotovenia Typového podkladu „Konštrukcie cestných a diaľničných mostov z prefabrikátov KA-73 dĺžky 9-12-15-18 m“ bolo urýchlenie a zhospodárnenie výstavby nosných konštrukcií cestných a diaľničných mostov dĺžky 9-18 m. Návrh nosníkov KA-73 vychádzal z typových podkladov pre prefabrikované nosníky typu KA-67. Rozsah typového pokladu KA-73 bol rozšírený o:

- Podrobnejší statický výpočet
- Poklady pre prípravu a vyhodnocovanie zaťažovacích skúšok
- Zásady pre umiestnenie oceľových a gumových ložísk
- Hodnoty prípustného vzopätia nosníka po jeho plnom predpätí
- Informatívne údaje zaťažiteľnosti

Všetky ďalšie údaje uvedené v sekcii 3.2 boli čerpané z Typového podkladu pre konštrukcie cestných a diaľničných mostov z prefabrikátov KA-73 dĺžky 9-18 m [2].

3.2.2 Použité materiály

Betón: Pre všetky dĺžky nosníkov sa používal betón B 500 o zaručenej kockovej pevnosti $\kappa_{b28} = 500 \text{ kp/cm}^2$ (50 MPa). Pre výplň škár sa používal betón B 330 o zaručenej kockovej pevnosti $\kappa_{b28} = 330 \text{ kp/cm}^2$ (33 MPa).

Predpínacia výstuž: pre predpätie nosníka sa používal hladký patentový drôt $\text{ØP } 4,5 \text{ mm}$ o zaručenej medzi pevnosti $\sigma_a = 16\,500 \text{ kp/cm}^2$ (1650 MPa) a zaručenej medzi prietlačnosti $\sigma_{0,2} = 12\,000 \text{ kp/cm}^2$ (1200 MPa). Táto medza prietlačnosti bola zvýšená podľa článku 35 ČSN 73 1251 na $\sigma_{0,2} = 1,125 \times 12\,000 = 13\,500 \text{ kp/cm}^2$ (1350 MPa).

Betonárska výstuž: Oceľ 10 425 (V)

Normovaná medza prietlačnosti : 4200 kp/cm^2 (420 MPa)

Dovolené namáhanie pre hlavné zaťaženie : 2350 kp/cm^2 (235 MPa)

Vytvorenie kanálikov o vnútornom priemere 32 mm pre káble bolo zabezpečené oceľovými bezošvými rúrami. Kotvy pre kotvenie predpätej výstuže boli predom osadené do čiel foriem a zabetónované.

3.2.3 Popis nosníka

Nosníky všetkých dĺžok boli uzavretého komorového prierezu rovnakej šírky 98 cm. Šírka nosníka v jeho hornej časti bola premenlivá od 90-94 cm kvôli prerušovaným horným výstupkom nosníkov v pozdĺžnom smere, za účelom možnosti dokonalejšieho spracovania betónu škár ponornými vibrátormi. Stojiny, spodná a horná doska u všetkých typov nosníkov boli jednotnej hrúbky 10 mm. Vo vnútri, v rohoch komorového prierezu boli trojuholníkové nábehy rozmerov 8 x 24 cm. Výška samotného komorového prierezu sa menila podľa typovej dĺžky nosníka.

Tvar popísaného betónového prierezu je po celej dĺžke nosníka konštantný okrem koncových častí. Podľa úpravy koncových častí boli nosníky rozdelené na nasledujúce tri druhy:

Typy nosníkov:

Základná typová dĺžka [m]	Dĺžka nosníka [m]	Výška nosníka [cm]
12	11,96	60
15	14,96	70
18	17,96	85

Tabulka 3.1: Prehľad typových dĺžok

- Nosníky druhu „A“ : obidva konce nosníka boli upravené pre ukotvenie mostnej prechodovej konštrukcie, v hornej časti nosníka (vo vzdialenosti 30 cm od každého jeho konca) boli preto vynechané otvory 60/22 cm pre betonáž železobetónových kotevných blokov vo vnútri truhlíka, ktorými sa prenieslo zaťaženie z mostných prechodových konštrukcií do samotných nosníkov. Koncové časti nosníkov tohto druhu boli opatrené zosilnenou betonárskou výstužou v hornej aj spodnej doske.
- Nosníky druhu „B“ : obidva konce nosníka boli upravené pre vytvorenie bezdilatačného prechodu mostovky (typ „ťahlo- krycia doska“) nad medziľahlými podporami. Za týmto účelom boli zhotovené v hornej doske nosníka (na každom jeho konci) výrezy hĺbky 22,5 cm na celú jeho šírku. Tieto výrezy umožnili vybetónovanie krycej železobetónovej dosky. Navyac boli zhotovené 3 kapsy pre zakotvenie oceľových úchytiakov na privarenie tiahla. Betonárska výstuž koncovkej časti nosníkov tohto druhu bola v podstate rovnaká ako v strednej časti. Rozdiel oproti druhu „A“ bol v priebehu vedenia predpätých káblov.
- Nosníky druhu „C“ : zhotovené v kombinácií druhov „A“ a „B“. Jeden koniec upravený podľa druhu „A“, druhý podľa typu „B“

Nosníky typovej dĺžky 9 m sa vyrábali len v prevedení druhu „A“. Pri všetkých nosníkoch boli zhotovené odvodňovacie otvory o priemere 5 cm vždy 1,25 m od konca nosníka, každý nosník mal teda dva takéto otvory.

3.2.4 Výroba

V typovom podklade sa predpokladali dva spôsoby výroby nosníkov:

- Pre všetky dĺžky, výroba vcelku
- Pri dĺžke 9 m vcelku a u ostatných dĺžok z 3 dielcov

Určenie spôsobu výroby záležalo od pomerov a dohode medzi investorom a projektantom.

- Výroba nosníkov v celku

Na výrobu nosníkov boli použité oceľové formy. Nosníky boli predpínané v 2 stupňoch (vid. ďalej). Manipulácia s nosníkmi bola možná až po ich predpätí na 1. stupeň. Nosníky boli opatrené na koncoch v stojinách otvormi o priemere 5 cm, do ktorých sa pre manipuláciu s nosníkom, či už vo výrobní alebo na stavbe, zasunula oceľová kruhová tyč o priemere 40 mm.

- Výroba nosníkov z dielcov

Pre výrobu nosníkov z 3 dielcov sa používali tie isté formy. Na rozdelenie sa používali prepážky umiestnené vo forme podľa výkresovej dokumentácie. Na rozdiel od nosníkov vyrábaných vcelku sa nosníky vyrábané z dielcov predpínali naraz po dosiahnutí kockovej pevnosti $\kappa_b = 500 \text{ kp/cm}^2$ (50 MPa).

Z výrobných skúseností boli stanovené dovolené odchýlky v geometrii nosníka:

- U šírky nosníkov : $\pm 10 \text{ mm}$
- U výšky nosníkov : $\pm 10 \text{ mm}$
- U dĺžky nosníkov : $\pm 20 \text{ mm}$
- U hrúbky dosky (hornej i dolnej) : $\pm 10 \text{ mm}$
- U hrúbky stien : $\pm 10 \text{ mm}$

3.2.5 Zavedenie predpätia

Predpätie bolo do nosníkov vnášané dvojakým spôsobom :

- Zavedenie predpätia v dvoch stupňoch:

Tento postup bol používaný pre výrobu nosníkov v celku.

Určené káble (vid. obr. 3.8):

U nosníkov typovej dĺžky 9 m : 1-1', 3-3'

U nosníkov typovej dĺžky 12 a 15 m : 1-1', 3-3', 5-5'

Predopli sa po dosiahnutí kockovej pevnosti betónu 200 kp/cm^2 (20 MPa) na predpísané hodnoty predpínacej sily.

U nosníkov typovej dĺžky 18 m : 1-1', 3-3', 5-5', 6-6', 7-7', sa káble predopli po dosiahnutí kockovej pevnosti 250 kp/cm^2 (25 MPa). Toto čiastočné predpätie nám umožnilo manipuláciu s nosníkmi. Celkové predpätie na druhý stupeň, bolo uskutočnené po dosiahnutí kockovej pevnosti betónu (B 500) 500 kp/cm^2 (50 MPa). Drôty predpätej výstuže, vyčnievajúce z kotevnej dosky na strane, z ktorej sa káble napínajú, nesmeli byť odpálené, ale naopak, spolu s kotvami museli byť chránené pred koróziou. Po napnutí káblov na druhý stupeň sa vykonala injektáž káblov. Dopnutie všetkých káblov na plnú predpínaciu silu sa odporúčalo najneskôr do šiestich týždňov.

- Zavedenie plného predpätia v jednom stupni

Tento postup bol používaný pri výrobe nosníkov z 3 dielcov. Plné predpätie mohlo byť uskutočnené u všetkých káblov po dosiahnutí kockovej pevnosti betónu 500 kp/cm^2 (50 MPa).

Prípustné vzopätie nosníkov po zavedení predpätia, základných typových dĺžok v strede rozpätia po pripočítaní tolerancie 20 mm, je uvedené v tab. 3.2

Základná typová dĺžka nosníka [m]	Priehyb po predpätí na 1.stupeň [mm]	Plné predpätie všetkých káblov [mm]
9	-19,6	-28,4
12	-20,7	-42,5
15	-19,5	-53,5
18	-19,3	-58,8

Tabulka 3.2: Prípustné hodnoty vzopätia po zavedení predpätia

3.2.6 Údaje o zaťažiteľnosti

V T.P. sú uvedené informatívne hodnoty zaťažiteľnosti stanovené analógiou podľa výpočtu prevedeného v rámci doplnku T.P. nosníkov KA-61 a KA-67. V rámci T.P. pre prefabrikáty KA-73 nebol zhotovený výpočet zaťažiteľnosti vzhľadom na značný počet premenných parametrov. Informatívne hodnoty zaťažiteľnosti pre danú typovú dĺžku nosníka v Mp/MN sú uvedené v tab. 3.3.

Základná typová dĺžka	Normálna	Výhradná	Výnimočná
12 m	31/0,31	68/0,68	139/1,39
15 m	33/0,33	74/0,74	149/1,49
18 m	34/0,34	80/0,8	160/1,6

Tabulka 3.3: Tabulka zaťažiteľnosti v Mp/MN

Statické a dimenzačné veličiny:

Typová dĺžka [m]	l [m]	J_o [m ⁴]	J_k [m ⁴]	E_b [Mp/m ²]	M_{dim} [Mpm]	M_ρ [Mpm]	δ
9	8,40	0,013887	0,024515	3 850 000	41,83	7,03	1,22
12	11,40	0,013943	0,024515	3 850 000	64,48	12,95	1,18
15	14,40	0,020760	0,032914	3 850 000	93,80	22,01	1,15
18	17,40	0,034213	0,046452	3 850 000	131,14	35,09	1,12

Tabulka 3.4: Tabulka statických a dimenzačných veličín

Použité symboly: l - Rozpätie nosníka, J_o - Moment zotrvačnosti prierezu jedného nosníka, J_k - Moment zotrvačnosti prierezu v krútení jedného nosníka, E_b - Modul pružnosti betónu B 500 podľa ČSN 73 1251, M_{dim} - Dimenzačný moment od zať. hlavného včítane dyn. účinkov v 1/2, M_ρ - Moment od vlastnej váhy nosníka bez váhy škárového betónu, δ - Dynamický súčiniteľ,

3.3 Experimentálne dáta

3.3.1 Všeobecné údaje

Experimentálne dáta k bakalárskej práci boli získané zo zhotoveného diagnostického prieskumu ľavého mosta ev.č. D2-055..2 cez kanál Hakalovská a cez lesnú cestu v km 56,913 diaľnice D2 za obcou Lanžhot [11]. Diagnostický prieskum bol zadaný Riaditeľstvom ciest a diaľnic ČR zo sídlom Na Pankráci 56, 145 05 Praha 4 a zhotovený Mostnou a cestnou, s.r.o. Diagnostika stavieb zo sídlom Havlíčkova 72, 602 00 Brno. Diagnostické práce prebehli v období október-november roku 2009.



Obrázek 3.2: Ľavý most ev.č. D2-055..2 cez kanál a lesnú cestu za obcou Lanžhot [11]

3.3.2 Základné údaje

Most bol postavený v roku 1980 v juhomoravskom kraji v katastrálnom území Lanžhot. Jedná sa o objekt čiastočne monolitický (podpery s krídlami a konečné steny, stĺpy medziľahlých podpor, úložné prahy) a čiastočne prefabrikovaný (predpäté nosníky KA-73). Objekt sa skladá z dvoch samostatných mostov - ľavého a pravého s rovnakou konštrukciou. Jedná sa o mostnú konštrukciu o troch poliach podopretú dvomi krajnými a dvomi medziľahlými podporami.

Na mostnom objekte boli vykonané nasledujúce skúšky:

- Pevnosť betónu
- Chemický rozbor betónu (stanovenie pH a obsahu vodorozpustných solí)
- Zistenie korózie predpätej výstuže
- Pevnosť v ťahu povrchových vrstiev
- Skladba vozovky
- Vizuálna prehliadka s fotodokumentáciou

3.3.3 Nosná konštrukcia

Vodorovná nosná konštrukcia ľavého mosta je trojpoľová, tvorená prefabrikovanými nosníkmi KA-73, dĺžky 18 m. Na krajných podporách je uložená na ložiská NGE 125, na medziľahlých ju podopierajú vrubové kĺby. Most je zhotovený z trinástich nosníkov KA-73, s koncami dodatočne upravenými sanačným náterom. Odvodnenie komôr nosníkov je zabezpečené zhotovením dodatočných vrtov.

Hlavné nedostatky nosnej konštrukcie:

- Zatekanie do pozdĺžnych spár medzi nosníkmi (vid. obr. 3.3).
- Korózia pozdĺžnej výstuže, ktorá bola nevhodne použitá ako podklad pod strmienky. Vyskytuje sa ojedinele.
- Korózia zvislej časti strmienkov fasádnych nosníkov, strmienky presvitajú ojedinele po celom moste.
- Zmáčané podhlady nosnej konštrukcie v oblasti odvodňovačov, ktoré sú nekvalitne napojené na hydroizoláciu (vid. obr. 3.4). O dlhodobom zatekaní pozdĺžnymi špármi v oblasti odvodňovačov svedčia aj niekoľko-centimetrové kvaple.
- Nosníky boli odvodnené zhotovením dodatočných vrtov, ich prevedenie však nebolo v súlade s platnými predpismi, poloha výstuže nebola vyhľadaná pomocou diagnostických metód, ale pravdepodobne len na základe T.P. Miestami sa vyskytuje viac neúspešných vrtov vedľa seba.



Obrázek 3.3: Pohľad na inkrustácie v pozdĺžnej špáre medzi nosníkmi [11]



Obrázek 3.4: Odvodňovacie otvory prekryté sanačným náterom [11]

3.3.4 Zistenie základných materiálových charakteristík

Stanovenie pevnosti betónu koštrukcie: Pevnosť betónu nosnej koštrukcie bola stanovená podľa dnes už neplatnej normy ČSN 73 1303, ale pre potreby tejto diagnostiky môžeme uvedené hodnoty brať ako orientačné.

Typ koštrukcie	R_{be}	ČSN 73 1205	ČSN 73 2001	ČSN P ENV 206
nosníky KA	44,6 MPa	B 40	400	C30/40
dobetonávky nosníkov	27,5 MPa	B 25	250	C20/25
krídla	41,9 MPa	B 40	400	C30/40

Tabulka 3.5: Výsledné orientačné pevnosti betónu koštrukcie [11]

Vyhodnotenie NDT skúšok betónu - SCHMIDT N podľa ČSN EN 12504-2 a ČSN 73 1973:

Počet skúšobných miest	42
Počet platných sk. miest	42
Aritmetický priemer pevnosti R_b [MPa]	54,88
Výberová smerodatná odchýlka S_k :	5,69
Reziduálna smerodatná odchýlka S_{rez} :	2,50
Súčiniteľ odhadu 5% kvantilu β_n	1,66
Výberová smerodatná odchýlka S_r :	6,22

Tabulka 3.6: Výsledky a vyhodnotenia NDT skúšok betónu, most ev.č. D2-055 Lanžhot [11]

3.3.5 Vyhodnotenie stavu mosta

Nosná konštrukcia mosta z nosníkov KA-73 je v dobrom stave. Pevnosť betónu nosníkov je vysoká (B40, C30/40), rozptyl nameraných hodnôt je malý. Chemické narušenie betónu nosníka zistené v spodnom líci konštrukcie je nízke, predpínacie drôty sú bez korózie.

Vzhľadom na ostatné prvky konštrukcie mosta, je však most celkovo hodnotený podľa ČSN 73 6221 nasledovne:

Spodná stavba : *V zlý stav*

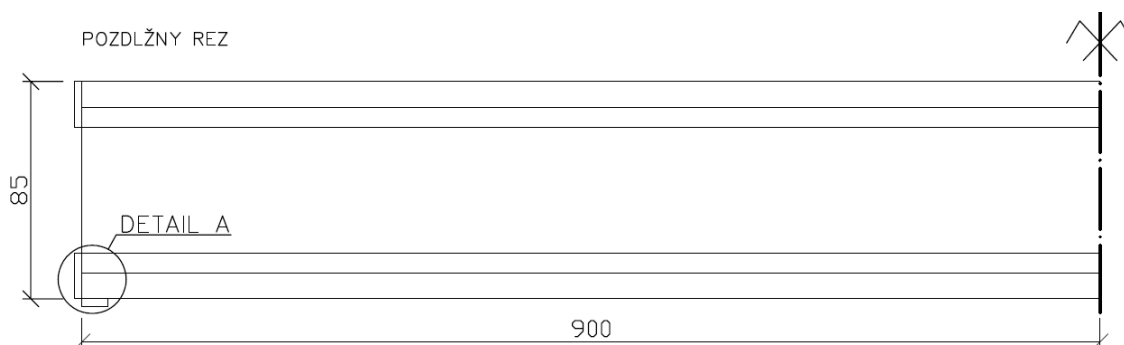
Nosná konštrukcia: *V zlý stav*

Podľa výsledkov diagnostického prieskumu bude vykonaná celková rekonštrukcia mosta.

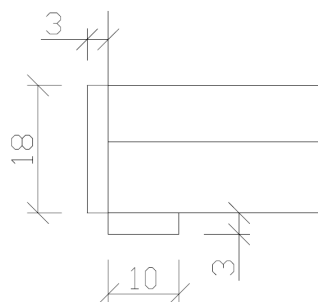
3.4 Zjednodušený výpočtový model bez šmykovej výstuže

3.4.1 Geometria

Model nosníka KA-73 bol vytvorený v programe ATENA 2D. Jedná sa o nosník KA-73 typu „A“ dĺžky 18 m. Pre účely BP bola modelovaná len *jedna polovica nosníka určená osou symetrie* v pozdĺžnom smere (vid obr. 3.5), z dôvodu urýchlenia výpočtu obmedzením počtu konečných prvkov. K modelu nosníka boli pridané príložky vymodelované v oblasti ukotvenia predpínacích káblov (vid obr. 3.6), z dôvodu eliminácie vzniku trhlín v oblasti kotiev po zavedení predpínacej sily.

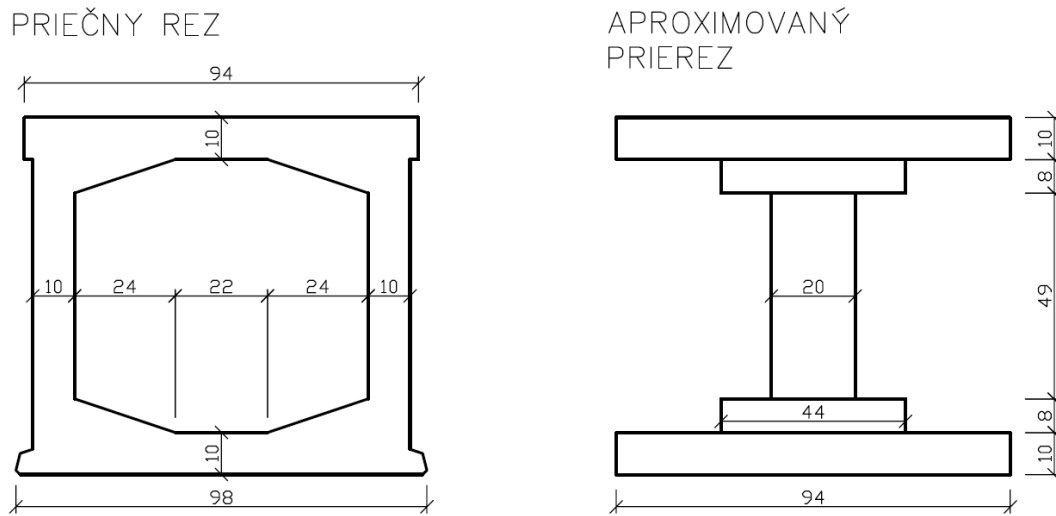


Obrázek 3.5: Pozdĺžny rez (uvedené kóty sú v cm)



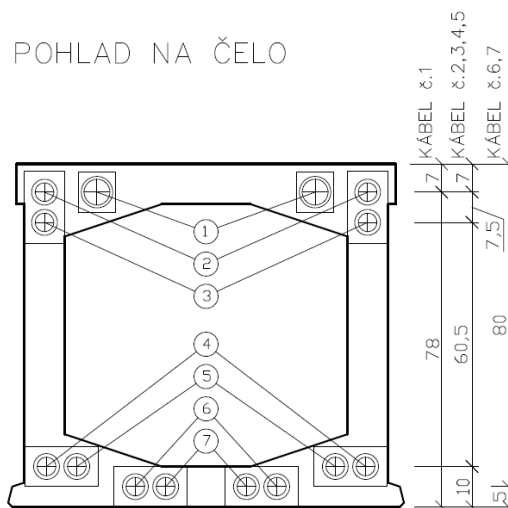
Obrázek 3.6: Detail A geometrie príložiek (uvedené kóty sú v cm)

Vzhľadom na zložitosť priečného rezu (jedná sa o komorový prierez) nosníka bol priečny rez pre účely 2D modelu *aproximovaný* (vid obr. 3.7) s ohľadom na čo najpresnejšie zachovanie prierezových charakteristík.



Obrázek 3.7: Priečny rez nosníka KA-73 (vľavo) a aproximovaný prierez (vpravo), (uvedené kóty sú v cm)

V nosníku sa nachádza 14 predpätých káblov tvoriacich predpätú výstuž (vid obr. 3.8) [2].

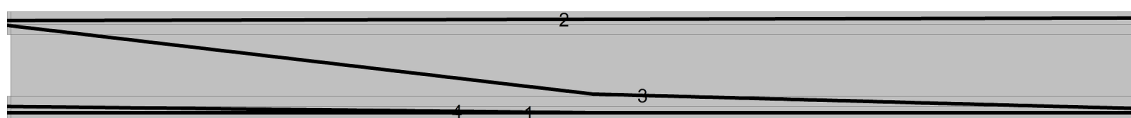


Obrázek 3.8: Umiestnenie predpínacích káblov (uvedené kóty sú v cm) [2]

Pre účely 2D modelu boli predpäté káble vymodelované v programe ATENA 2D do 4 prútových výstuží podľa nasledujúcej tabuľky:

Číslo výstuže	Typ výstuže	Priemer drôtu [m]	Počet drôtov	Plocha výstuže A_s [m^2]	Číslo kábla vo výkrese vid.obr.3.8
1	obyčajná	0,0045	48	7,634E-04	6,7
2	obyčajná	0,0045	12	1.909E-04	1
3	obyčajná	0,0045	48	7,634E-04	2,3
4	obyčajná	0,0045	48	7,634E-04	4,5

Tabulka 3.7: Prútová výstuž modelovaná v Programe ATENA 2D - Predpätá výstuž

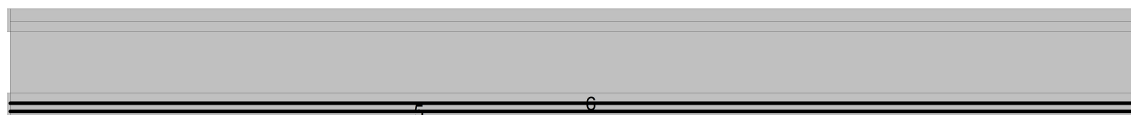


Obrázek 3.9: Prúty predpätej výstuže

Okrem predpätých káblov boli ešte vymodelované 2 prúty betonárskej výstuže [2]:

Číslo výstuže	Typ výstuže	Priemer drôtu [m]	Počet drôtov	Plocha výstuže A_s [m^2]
5	obyčajná	0,01	2	1,571E-04
6	obyčajná	0,01	2	1.571E-04

Tabulka 3.8: Prútová výstuž modelovaná v Programe ATENA 2D - Betonárska výstuž



Obrázek 3.10: Prúty betonárskej výstuže

3.4.2 Materiály

Pre betónovú časť nosníka bol použitý materiálový model 3D Non Linear Cementitious 2, s charakteristickou kockovou pevnosťou $f_{cu} = 54,88$ MPa, ktorá bola získaná ako aritmetický priemer z hodnôt nameraných pri zhotovovaní diagnostického prieskumu (vid. kap. 3.3.4). Ďalšie materiálové charakteristiky uvedené v tab. 3.9 vygeneroval program ATENA 2D:

Modul pružnosti E_{cm}	3,838E+04 [MPa]
Poissonovo číslo μ	0,200 [-]
Pevnosť v ťahu f_t	3,508E+00 [MPa]
Pevnosť v tlaku f_c	-4.750E+01 [MPa]
Špecifická lomová energia G_f	8.770E-05 [MN/m]
Kritická tlaková deformácia w_d	-5,000E-04 [m]
Excentricita tvaru plochy porušenia e	0,520 [-]
Súčiniteľ smeru plastického tečenia β	0,000 [-]
Špecifická tiaž ρ	2,300E-02 [MN/m ³]
Koeficient teplotnej rozťažnosti α	1,200E-05 [1/K]
Súčiniteľ fixovaného modelu trhlín	1,00 [-]
Plast. pretvorenie pri tlak. pevnosti Eps CP	-1,238E-03 [-]
Redukcia f_c vplyvom trhlín $f_{c,LIM}$	0.8 [-]
Faktor šmyk. pevnosti s_F	20,0 [-]
Veľkosť kameniva	0,0200 [m]

Tabulka 3.9: Materiálové charakteristiky pre materiálový model betónu

Materiál predpätej výstuže bol uvažovaný s pomocou bi-lineárneho pracovného diagramu so spevnením. Základné materiálové charakteristiky medza sklzu $f_y = 1325$ MPa a medza pevnosti $f_u = 1650$ MPa boli pre účely pravdepodobnostného modelu v ATENE 2D upravené pomocou variačného koeficientu uvedeného v TP 224 [12]. Upravené hodnoty spolu s ďalšími materiálovými charakteristikami sú uvedené v nasledujúcej tab:

Modul pružnosti E_s	1,950E+05 [MPa]
Medza sklzu f_y	1472,00 [MPa]
Medza pevnosti f_u	1777,00 [MPa]
ϵ_{lim}	0,05 [-]
Špecifická tiaž ρ	7,850E-02 [MN/m ³]
Súčiniteľ teplotnej rozťažnosti α	1,200E-05 [-]

Tabulka 3.10: Materiálové charakteristiky pre materiálový model predpätej výstuže

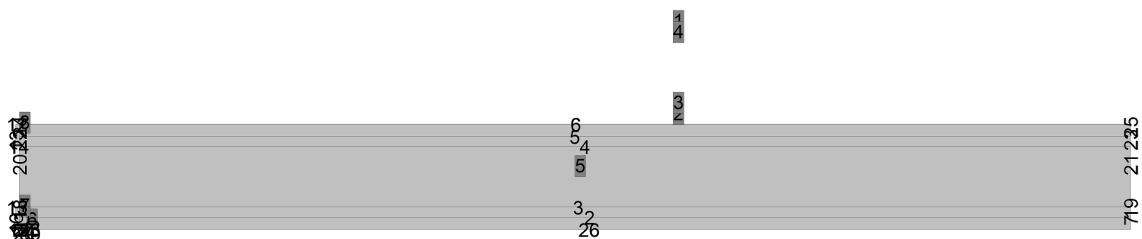
Betonárska výstuž bola uvažovaná s pomocou bi-lineárneho pracovného diagramu bez spevnenia s medzou sklzu $f_y = 425$ MPa, upravenou variačným koeficientom na hodnotu 506 MPa, modul pružnosti $E = 210\,000$ MPa. Materiál príložiek bol použitý pružný- rovinná napätosť.

3.4.3 Makroprvky

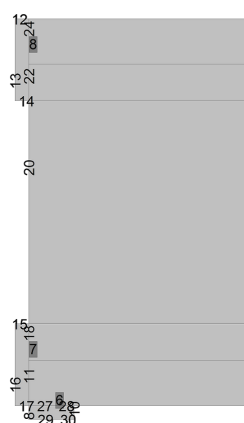
Zoznam makroprvkov:

č. MP	Zoznam línií	Typ prvkov siete	Dĺžka strany prvku [m]	Materiál	Hrúbka [m]
1	5-6,24-25	štvoruholníková	0,10	3D Non Lin. Cem. 2	0,940
2	2,7,11,26-28	štvoruholníková	0,10	3D Non Lin. Cem. 2	0,940
3	2-3,18-19	štvoruholníková	0,10	3D Non Lin. Cem. 2	0,440
4	4-5,22-23	štvoruholníková	0,10	3D Non Lin. Cem. 2	0,440
5	3-4,20-21	štvoruholníková	0,10	3D Non Lin. Cem. 2	0,200
6	8,10,27-30	štvoruholníková	0,50	Pružný-rovn. nap.	0,940
7	11,15-18	štvoruholníková	0,50	Pružný-rovn. nap.	0,440
8	12-14,22,24	štvoruholníková	0,10	Pružný-rovn. nap.	0,440

Tabulka 3.11: Prehľad makroprvkov s danými parametrami

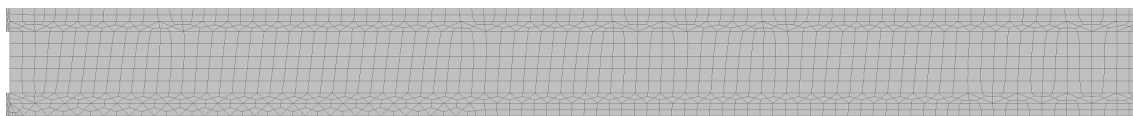


Obrázek 3.11: Zoznam línií a označenia makroprvkov



Obrázek 3.12: Detail línií a označenia makroprvkov v oblasti krajnej podpory

Po vytvorení makroprvkov bola vygenerovaná sieť konečných prvkov (vid. obr.3.13).



Obrázek 3.13: Vygenerovaná sieť konečných prvkov

3.4.4 Zaťažovacie stavy a podpory

Posunu nosníka bolo zabránené umiestnením podpory do ľavého styčníku s pevným uložením v smere „y“ a voľným uložením v smere „x“. Na druhej strane v osi symetrie bola umiestnená líniová podpora s voľným uložením v smere „y“ a s pevným uložením v smere „x“.



Obrázek 3.14: Uloženie podpôr

Boli definované 4 zaťažovacie stavy:

- 1 ZS-Supports (Podpory)
- 2 ZS-Vlastná váha
- 3 ZS-Zaťaženie vnesením predpätia
- 4 ZS-Rovnomerné spojité zaťaženie

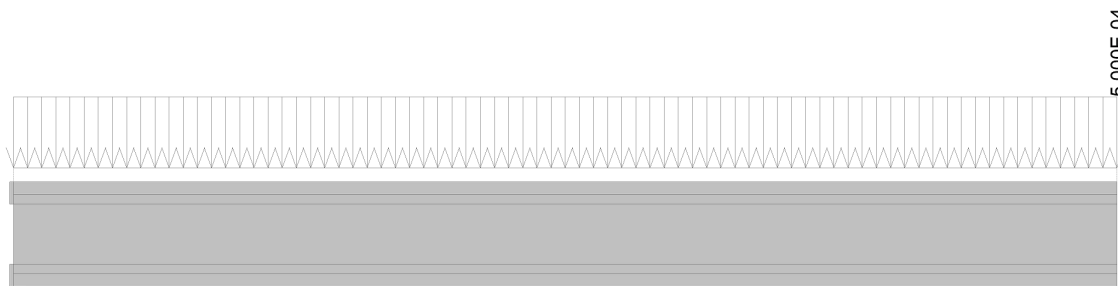
Predpínacia sila vnášaná do jednotlivých prútových výstuží modelovaných v programe ATENA 2D bola stanovená výpočtom z hodnoty napätia po plnom predpätí $\sigma_y = 1325$ MPa a plochy patentovaného drôtu $\text{ØP } 4,5\text{-Ap}=1,5912\text{E-}05$ m^2 . Boli uvažované straty predpätia odhadom:

- Krátkodobé - 10%
- Dlhodobé - 12,5%

Rovnomerné spojité zaťaženie bolo zadané hodnotou 0,5 kN/m (vid. obr. 3.15).

Číslo prútu v modeli ATENA 2D	Počet drôtov ØP 4,5	Plocha [m ²]	Napínacia sila [kN]
1	48	7,634E-04	784,0
2	12	1,909E-04	195,0
3	48	7,634E-04	784,0
4	48	7,634E-04	784,0

Tabulka 3.12: Hodnoty napínacej sily vnášanej do prútovej výstuže v programe ATENA 2D



Obrázek 3.15: Rovnomerné spojité zaťaženie

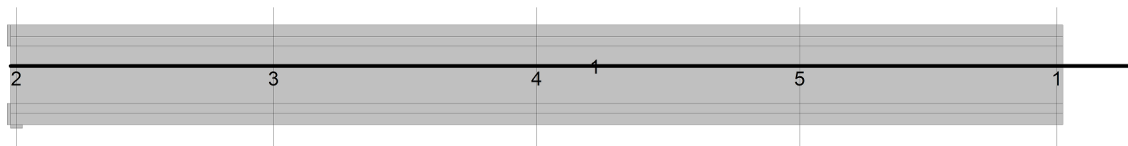
3.4.5 Parametre výpočtu

Nelineárny výpočet bol zhotovený pomocou metódy riešenia Newton-Raphson. V prvých dvoch krokoch histórie výpočtu bola konštrukcia zaťažovaná kombináciou zaťažovacích stavov ZS 1 Supports a ZS 3 zaťaženie predpätím s koeficientom kroku 0,5 z dôvodu predpínania nosníka vo výrobe taktiež v dvoch krokoch. V ďalších krokoch sa konštrukcia zaťažovala prírastkom silového zaťaženia až do porušenia konštrukcie. Koeficient výpočtových krokov bol postupne zjemňovaný s blížiacim sa kolapsom konštrukcie.

Na zobrazenie výsledkov boli v modeli umiestnené dva monitorovacie body (vid. obr. 3.16). Monitorovací bod M1, umiestnený v ľavej podpore, sledoval nárast podporovej reakcie v smere „y“, druhý monitorovací bod M2, umiestnený v ose symetrie, sledoval posunutie nosníka v smere „y“ v polovici skutočného rozpätia. Ďalej boli v modeli rozmiestnené priečne a pozdĺžne rezy na vykreslenie napätí a vnútorných síl (vid. obr. 3.17).



Obrázek 3.16: Umiestnenie monitorovacích bodov



Obrázek 3.17: Umiestnenie priečných a pozdĺžnych rezov

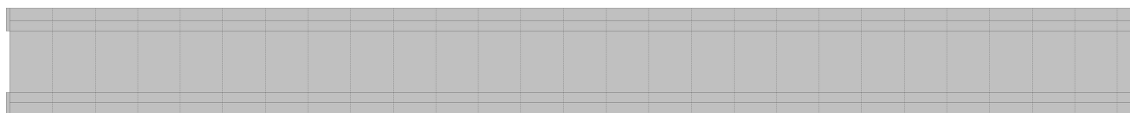
3.5 Výpočtový model so šmykovou výstužou

Pre tvorbu modelu so šmykovou výstužou bola geometria, materiálové modely, makroprvky, zaťažovacie stavy a parametre výpočtu prevzaté zo zjednodušeného modelu (vid.kap. 3.4). Šmyková výstuž bola modelovaná v dvoch výpočtových modeloch:

- V prvom prípade ako rozptýlená výstuž
- V druhom prípade ako diskretná výstuž (strmienky)

3.5.1 Rozptýlená šmyková výstuž

V prvom modeli so šmykovou výstužou bola šmyková výstuž uvažovaná ako rozptýlená. Vo výpočtovom modeli bola pridaná jedna vrstva rozptýlenej výstuže. Materiálový model pre rozptýlenú výstuž bol uvažovaný s pomocou bi-lineárneho pracovného diagramu pre rozptýlenú výstuž s medzou sklzu $\sigma_y = 506$ MPa. Stupeň vystuženia bol spočítaný podľa vzťahu pre výpočet stupňa šmykového vystuženia [5] na hodnotu 0,00785 [-], smer výstuže bol zadaný pomocou stupňov – hodnotou 90° .



Obrázek 3.18: Schéma rozptýlenej výstuže

3.5.2 Diskretná šmyková výstuž

V druhom výpočtovom modeli so šmykovou výstužou bola šmyková výstuž uvažovaná ako diskretná (strmienky). Bolo vymodelovaných 47 kusov diskretnej výstuže, materiál pre diskretnú výstuž bol uvažovaný rovnako ako pre hladkú betonársku výstuž. Plocha jednotlivých prútov diskretnej výstuže bola stanovená podľa typových podkladov pre prefabrikované nosníky KA-73 [2].

č. prútu v modeli ATENA 2D	Typ diskkrétnej výstuže	Profil [m]	Plocha [m ²]
7-53	štvorstrižný str.	0,01	3,142E-04

Tabulka 3.13: Prehľad prútov diskkrétnej výstuže



Obrázek 3.19: Schéma diskkrétnej výstuže

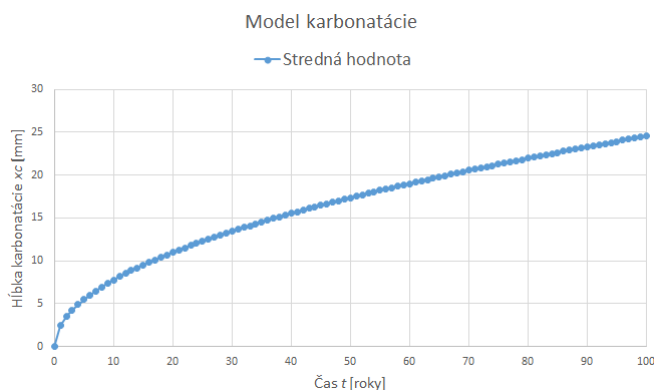
3.6 Popis modelov degradácie z programu FReET-D

3.6.1 Model pre karbonatáciu betónu

Karbonatácia betónu je chemický proces v betóne, riadený okolitým CO_2 prenikajúcim z povrchu do betónu a klesajúcim pH betónu na hodnotu približne 9. Keď sa hĺbka karbonatácie x_c rovná hrúbke vrstvy krytia ocele, obnažená oceľ môže začať korodovať. Faktory ovplyvňujúce karbonatáciu betónu sú rýchlosť difúzie CO_2 a pôsobenie CO_2 s betónom. Difúzia CO_2 závisí na systéme pórov v zatvrdnutom betóne. Systém pórov je výrazne ovplyvnený zložením betónu. Pôsobenie CO_2 na betón je ovplyvnené zložením betónu a množstvom pôsobiaceho CO_2 .

Modely pre karbonatáciu betónu sú založené na použití medznej rovnice, v ktorej je krycia vrstva betónu porovnávaná s hĺbkou karbonatácie x_c , v čase t . Ako alternatíva, kritický iniciačný čas t_i môže byť porovnávaný s návrhovou životnosťou t_D .

Pre účely modelovania karbonatácie betónu bol použitý model časovej závislosti karbonatačnej hĺbky betónu x_c . Analytický model je založený na zachovaní množstva CO_2 , $Ca(HO)_2$ a CSH v každom kontrolnom objeme betónovej zmesi [13]. Z daného modelu dostávame priebeh hĺbky karbonatácie x_c v závislosti na čase.



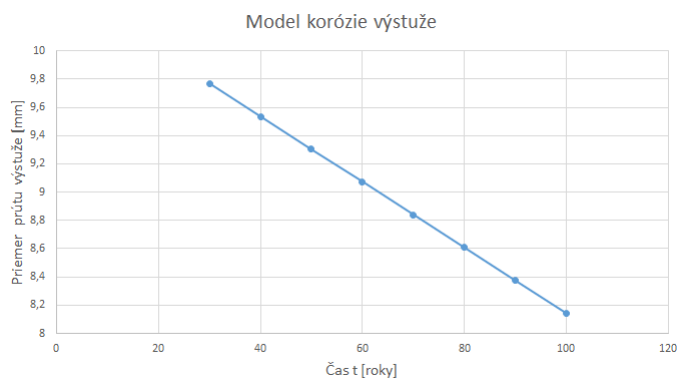
Obrázek 3.20: Karbonatačná hĺbka v závislosti na čase

3.6.2 Model pre koróziu výstuže

Korózia výstuže vlozenej do betónu je elektrochemický proces, ktorého podstatou je tvorba lokálnych elektrických článkov. Rýchlosť korózie je ovplyvnená množstvom vody a kyslíka v blízkosti povrchu ocele. Negatívnym vplyvom korózie ocele je pokles efektívnej plochy a nárast objemu. Pri zväčšení objemu ocele vznikajú v betóne ťahové napätia, čo má za následok vznik trhlin. Existujú dva typy korózie. V prvom prípade sa jedná o rovnomerný úbytok efektívnej plochy ocele po celom obvode, v druhom prípade ide o lokalizovaný úbytok ocele v malej oblasti.

Korózne modely popisujú dobu šírenia, ktorá spolu s iniciačným časom tvorí životnosť konštrukcie. Iniciačný čas je doba od zhotovenia konštrukcie po obnaženie výstuže vplyvom karbonatácie betónu.

Model použitý pre modelovanie korózie výstuže popisuje rovnomernú koróziu úbytkom efektívnej plochy. Úbytok efektívnej plochy je ovplyvnený zmenšením priemeru výstuže v závislosti na čase. Pre predpokladaný iniciačný čas $t_i=20$ rokov a počiatočný priemer výstuže $d_i=10$ mm, môžeme percentuálne vyjadriť pokles efektívnej plochy výstuže v čase [13].



Obrázek 3.21: Pokles priemeru výstuže v závislosti na čase

3.7 Výpočtový model s modelovaním degradácie

Z popisu degradačných modelov z programu FReET-D uvedených v kap. 3.6 pre karbonatáciu betónu a následnú koróziu výstuže môžeme odhadnúť pokles efektívnej plochy výstuže v čase. Pokles efektívnej plochy výstuže v čase je vyjadrený percentuálne. Hodnoty poklesu efektívnej plochy v čase sú zhrnuté v nasledujúcej tabuľke:

Roky	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Hĺbka karb. [mm]	7,77	10,98	13,45	15,53	17,36	19,00	20,55	21,9	23,3	24,56
Pokles plochy [%]	0	0	2,32	4,64	6,96	9,28	11,6	13,92	16,24	18,56

Tabuľka 3.14: Hodnoty hĺbky karbonatácie a poklesu ef. plochy výstuže

V modeli zahŕňajúcom degradáciu konštrukcie bol uvažovaný iniciačný čas začiatku korózie výstuže $t_i=20$ rokov. Čas od postavenia konštrukcie bol stanovený na 80 rokov. Z toho vyplýva čas trvania korózie výstuže 60 rokov. Po percentuálnom odhade poklesu efektívnej plochy výstuže bola upravená plocha výstuže vo výpočtovom modeli v programe ATENA 2D. Pre životnosť konštrukcie 80 rokov bol odhadnutý rovnomerný pokles efektívnej plochy výstuže zaokrúhlene o 15 %.

Číslo prútu v modeli ATENA 2D	Počet drôtov ØP 4,5	A_s pôvodná [m_2]	A_s upravená [m_2]
1	48	7,634E-04	6,489E-04
2	12	1,909E-04	1,623E-04
3	48	7,634E-04	6,489E-04
4	48	7,634E-04	6,489E-04

Tabulka 3.15: Upravená plocha výstuže v programe ATENA 2D pre model s vplyvom degradácie

3.8 Výsledky nelineárneho výpočtu MKP bez modelovania degradácie

Po zhotovení výpočtu nelineárnou MKP v programe ATENA 2D na troch rôznych modeloch boli stanovené nasledujúce údaje:

- Ohybový moment na medzi dekompresie
- Ohybový moment pri vzniku teoretickej trhliny
- Ohybový moment na medzi únosnosti
- Ohybový moment pri šírke trhliny 0,2 mm (ohybové trhliny)

Po zistení hodnôt ohybových momentov, sa v charakteristických výpočtových krokoch zhotovili tieto grafické výstupy:

- Hlavných normálových napätí
- Vzniku trhlín
- Priehybu nosníka v polovici rozpätia
- Vzopätia po zavedení plného predpätia

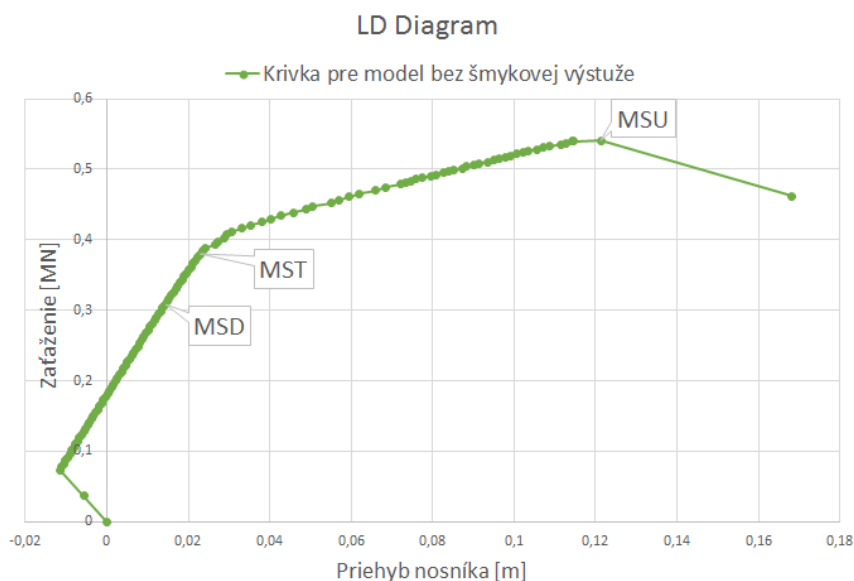
Pre každý výpočtový model bol zhotovený LD Diagram v závislosti nárastu podpornej reakcie v krajnej podpore nosníka a poklesu nosníka v polovici rozpätia.

3.8.1 Diagram v závislosti zaťaženie – priehyb (LD Diagram)

Posudzované medzné stavy (MS) v modeli *bez šmykovej výstuže*:

Medzný stav	Výpočtový krok	Hodnota zaťaženia [MN]	Hodnota priehybu [m]
Dekompresie (MSD)	54	0,308	0,0143
Vzniku trhlín (MST)	70	0,380	0,0229
Únosnosti (MSU)	121	0,540	0,121

Tabulka 3.16: Hodnoty zaťaženia a priehybu získané z LD diagramu

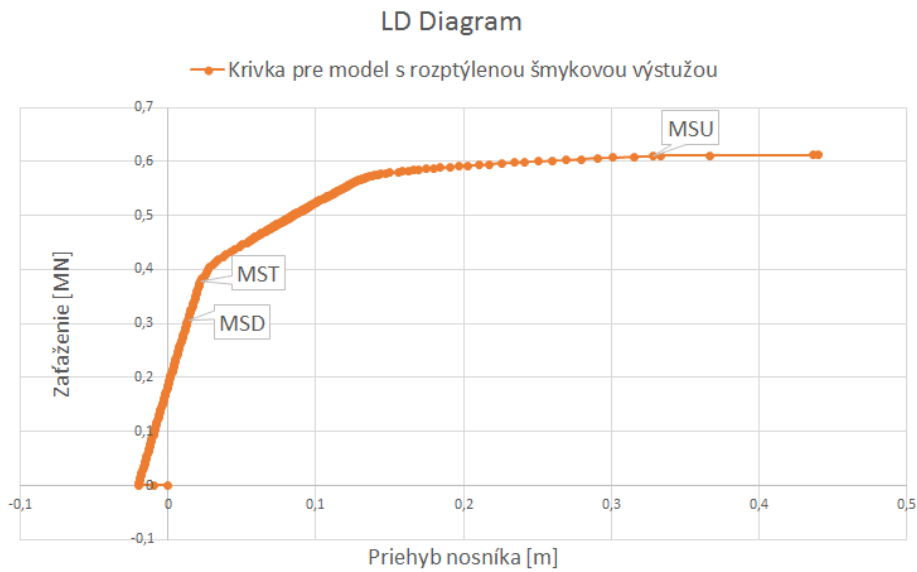


Obrázek 3.22: LD Diagram zaťaženie–priehyb pre model *bez šmykovej výstuže*

Posudzované MS v modeli s *rozptýlenou šmykovou výstužou*:

Medzný stav	Výpočtový krok	Hodnota zaťaženia [MN]	Hodnota priehybu [m]
Dekompresie (MSD)	70	0,306	0,0136
Vzniku trhlín (MST)	86	0,378	0,0221
Únosnosti (MSU)	282	0,611	0,334

Tabulka 3.17: Hodnoty zaťaženia a priehybu získané z LD diagramu

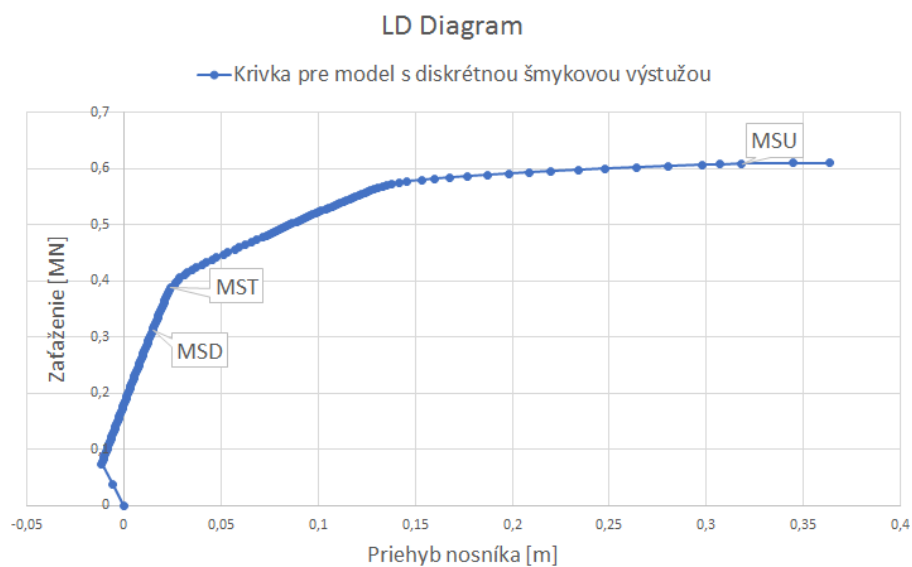


Obrázek 3.23: LD Diagram zaťaženie–priehyb pre model s rozptýlenou šmykovou výstužou

Posudzované MS v modeli s *diskrétnou šmykovou výstužou*:

Medzný stav	Výpočtový krok	Hodnota zaťaženia [MN]	Hodnota priehybu [m]
Dekompresie (MSD)	55	0,312	0,0148
Vzniku trhlin (MST)	72	0,388	0,0241
Únosnosti (MSU)	151	0,609	0,318

Tabulka 3.18: Hodnoty zaťaženia a priehybu získané z LD diagramu



Obrázek 3.24: LD Diagram zaťaženie–priehyb pre model s *diskrétnou šmykovou výstužou*

3.8.2 Ohybové momenty na MSD, MST, MSU

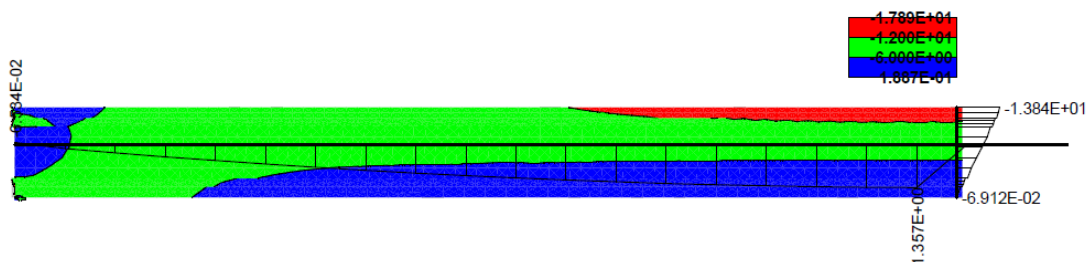
Ohybový moment na medzi dekompresie (MSD) sa stanovil pri nulovom normálovom napätí v dolných vláknoch prierezu nosníka. Moment na medznom stave teoretického vzniku trhlín (MST) bol stanovený pri dosiahnutí hodnoty normálového napätia v dolných vláknoch 3,508 MPa, čo predstavuje hodnotu pevnosti betónu v ťahu. Moment na medzi únosnosti (MSU) bol stanovený vo výpočtovom kroku pri kolapse konštrukcie. Navyiac bol stanovený ohybový moment pri šírke vzniknutých trhlín 0,2 mm, pri vzniku takzvaných ohybových trhlín.

Výpočtový model	Moment na MSD	Moment na MST	Moment na MSU	Moment pri šírke trhlín 0,2mm
Bez šmykovej v.	1,357	1,671	2,398	1,994
S rozptýlenou v.	1,349	1,664	2,7	1,869
S diskretnou v.	1,376	1,705	2,714	1,934

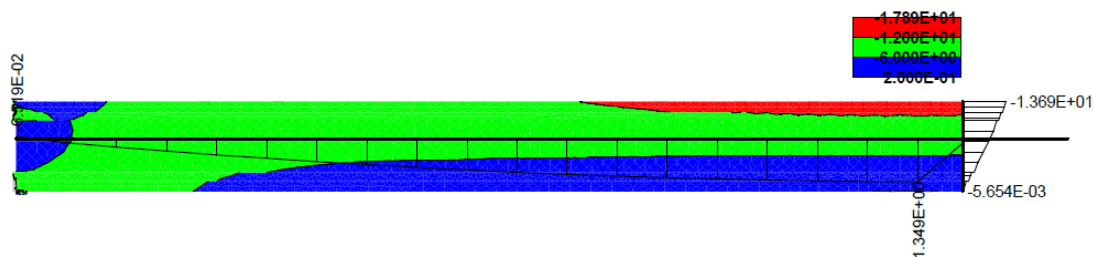
Tabulka 3.19: Hodnoty ohybových momentov v [MNm]

3.8.3 Priebehy hlavných normálových napätí

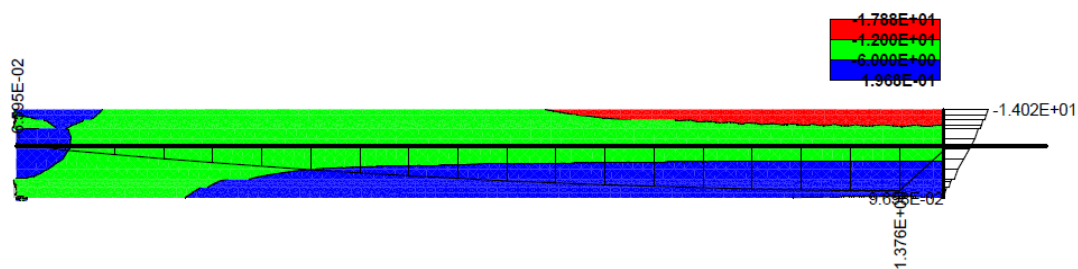
Priebeh hlavných normálových napätí v konštrukcii na *medzi dekompresie*, priebeh normálových napätí po výške prierezu v polovici rozpätia + priebeh ohybových momentov.



Obrázek 3.25: Priebeh hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebeh ohybových momentov v MNm, pre model *bez šmykovej výstuže*

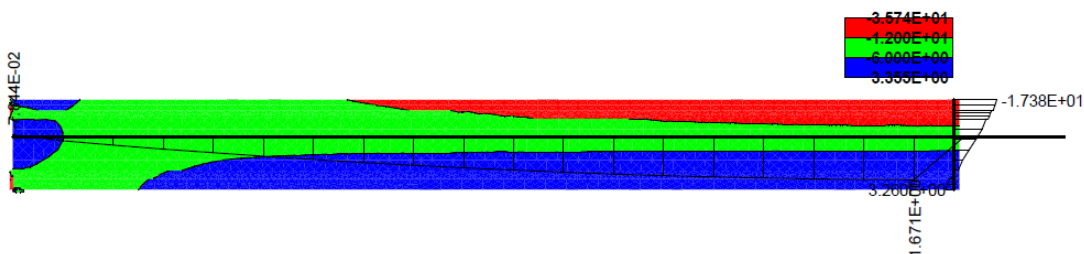


Obrázek 3.26: Priebeh hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebeh ohybových momentov v MNm, pre model *s rozptýlenou šmykovou výstužou*

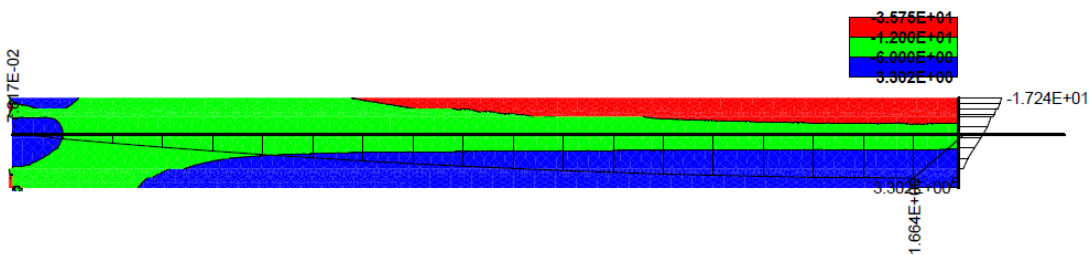


Obrázek 3.27: Priebch hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebch ohybových momentov v MNm, pre model *s diskretnou šmykovou výstužou*

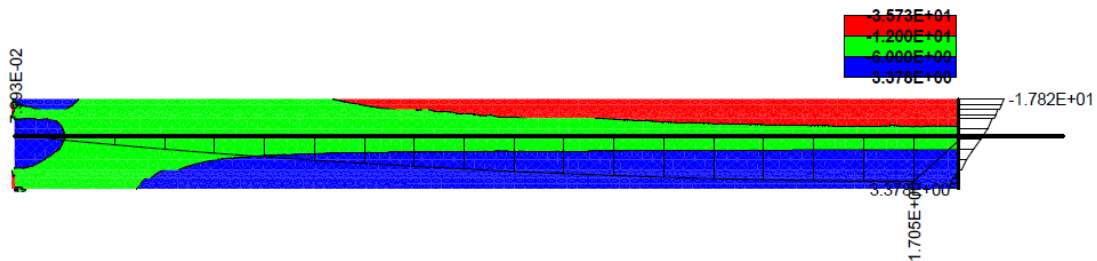
Priebch hlavných normálových napätí v konštrukcii na *medzi teoretického vzniku trhlin*, priebch normálových napätí po výške prierezu v polovici rozpätia + priebch ohybových momentov.



Obrázek 3.28: Priebch hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebch ohybových momentov v MNm, pre model *bez šmykovej výstuže*

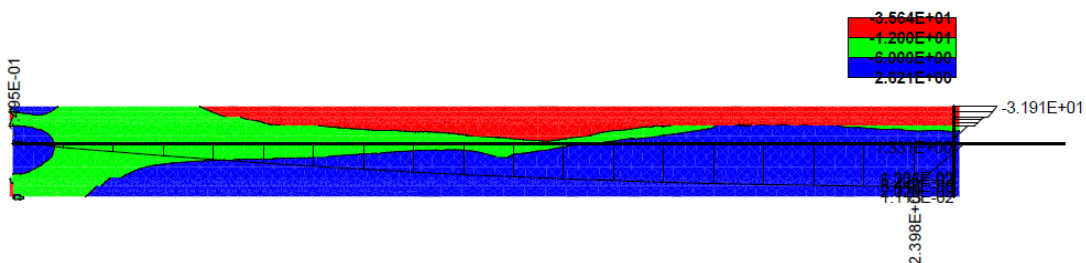


Obrázek 3.29: Priebch hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebch ohybových momentov v MNm, pre model *s rozptýlenou šmykovou výstužou*

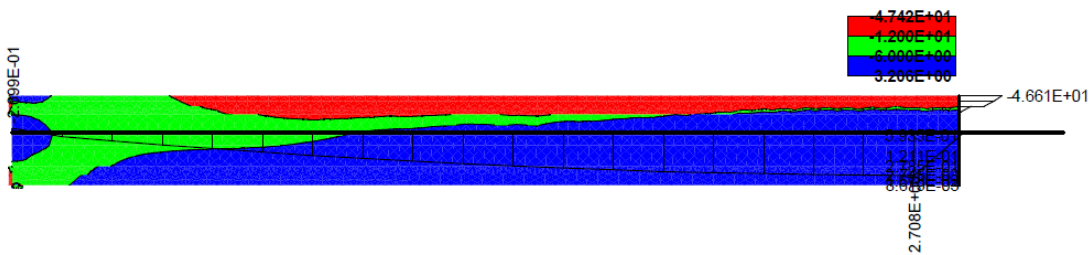


Obrázek 3.30: Priebek hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebek ohybových momentov v MNm, pre model *s diskretnou šmykovou výstužou*

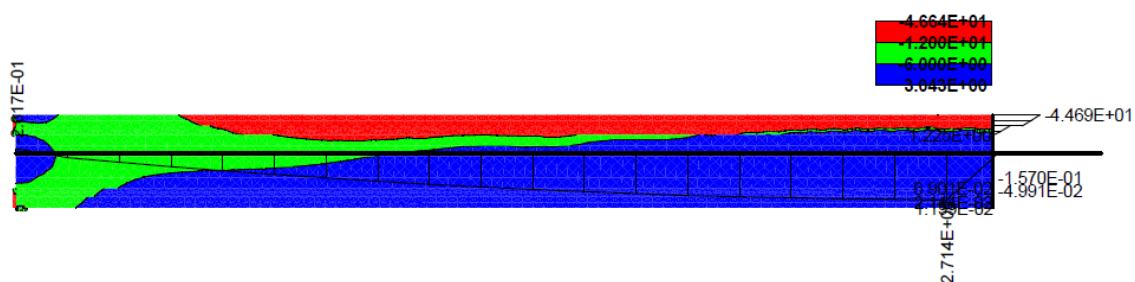
Priebek hlavných normálových napätí v konštrukcii na *medzi únosnosti*, priebek normálových napätí po výške prierezu v polovici rozpätia + priebek ohybových momentov.



Obrázek 3.31: Priebek hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebek ohybových momentov v MNm, pre model *bez šmykovej výstuže*



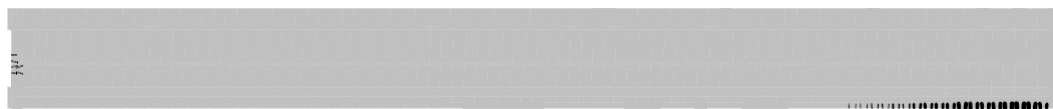
Obrázek 3.32: Priebek hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebek ohybových momentov v MNm, pre model *s rozptýlenou šmykovou výstužou*



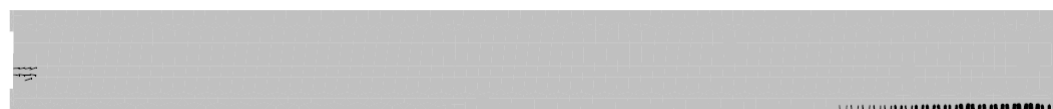
Obrázek 3.33: Priebeh hlavných normálových napätí Stress-Sigma xx v MPa + priebeh ohybových momentov v MNm, pre model s *diskrétnou šmykovou výstužou*

3.8.4 Trhliny

Vzniknuté trhliny v oblasti líniovej podpory v polovici skutočného rozpätia nosníka pre *medzný stav teoretického vzniku trhlín (MST)*.



Obrázek 3.34: Vzniknuté trhliny v integračných bodoch pre model *bez šmykovej výstuže*, max. šírka roztvorenia trhliny je 4,224E-06 m.



Obrázek 3.35: Vzniknuté trhliny v integračných bodoch pre model s *rozptýlenou šmykovou výstužou*, max. šírka roztvorenia trhliny je 5,185E-06 m.

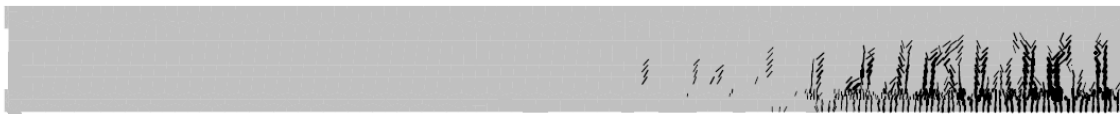


Obrázek 3.36: Vzniknuté trhliny v integračných bodoch pre model s *diskrétnou šmykovou výstužou*, max. šírka roztvorenia trhliny je 9,197E-06 m.

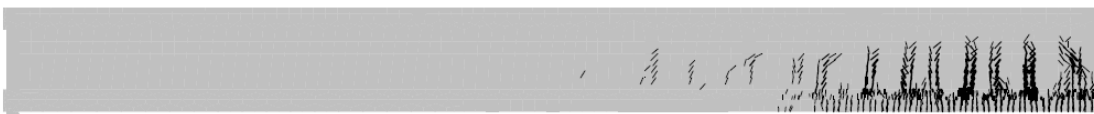
Vzniknuté trhliny v oblasti líniovej podpory v polovici skutočného rozpätia nosníka pre *medzný stav únosnosti* (MSU), zobrazenie trhlín bolo obmedzené nastaveným filtrom pre minimálnu šírku trhliny 0,5mm.



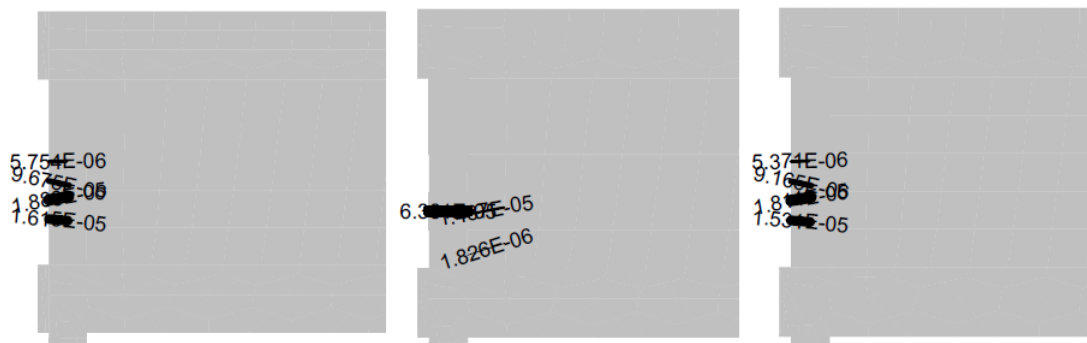
Obrázek 3.37: Vzniknuté trhliny v integračných bodoch pre model *bez šmykovej výstuže*, max. šírka roztvorenia trhliny je 5.128E-03 m.



Obrázek 3.38: Vzniknuté trhliny v integračných bodoch pre model *s rozptýlenou šmykovou výstužou*, max. šírka roztvorenia trhliny je 2,692E-03 m.



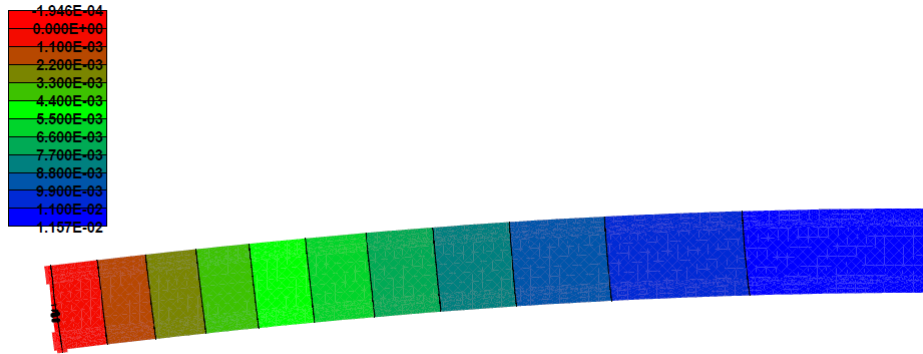
Obrázek 3.39: Vzniknuté trhliny v integračných bodoch pre model *s diskretnou šmykovou výstužou*, max. šírka roztvorenia trhliny je 3,370E-03 m



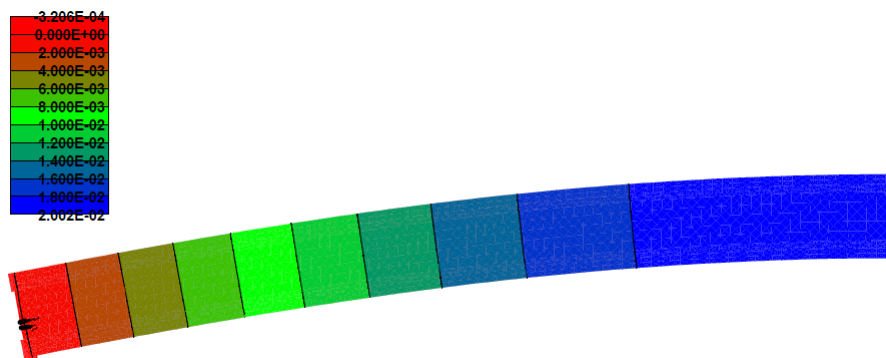
Obrázek 3.40: Detail vzniku trhlín v čele nosníka po zaťažení plnou predpínaciu silou pre všetky tri modely

3.8.5 Deformácie

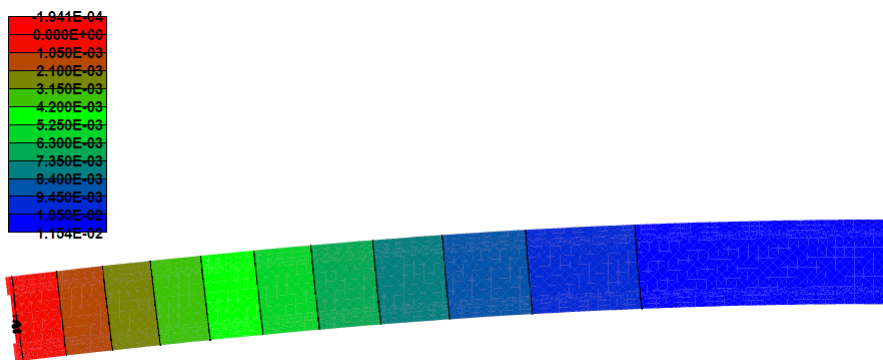
Vzopätie nosníka v polovici skutočného rozpätia v smere „y“ (Displacements, x(2)) po zaťažení kombináciou zaťažovacích stavov ZS 1 a ZS 3 (vid. kap.3.4.4), vzniknuté trhliny v čele nosníka.



Obrázek 3.41: Vzopätie nosníka v násobku deformácie 50x pre model *bez šmykovej výstuže*

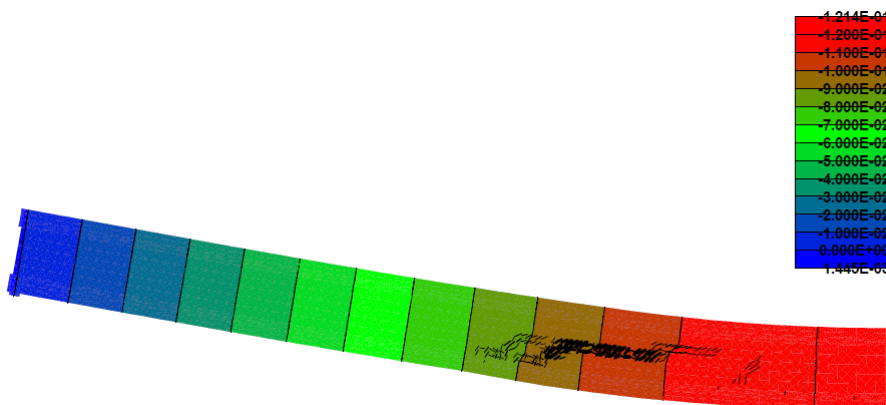


Obrázek 3.42: Vzopätie nosníka v násobku deformácie 50x pre model *s rozptýlenou šmykovou výstužou*

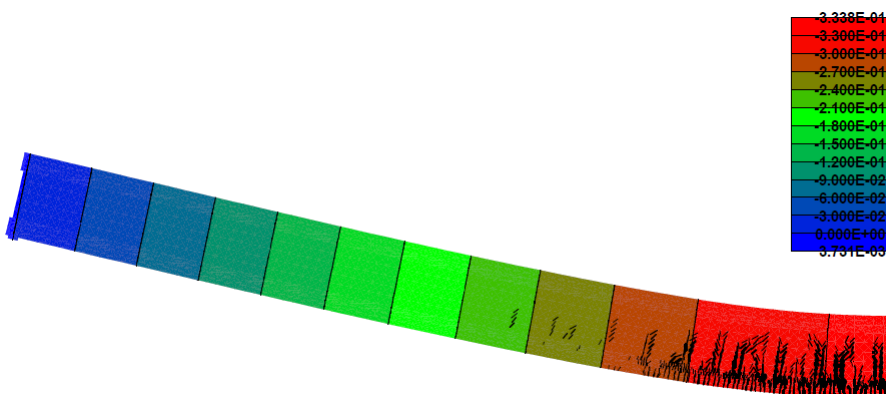


Obrázek 3.43: Vzopätie nosníka v násobku deformácie 50x pre model *s diskretnou šmykovou výstužou*

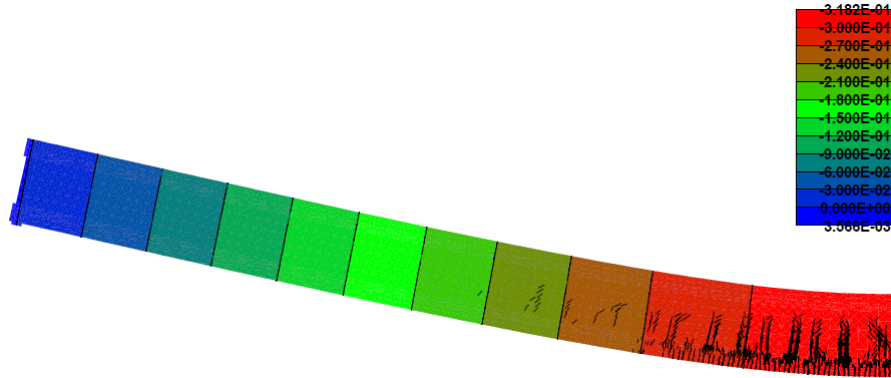
Pokles nosníka v polovici skutočného rozpätia v smere „y“ (Displacements, $x(2)$) po dosiahnutí *medzného stavu únosnosti*, vzniknuté trhliny s nadstaveným filtrom pre minimálnu šírku trhliny 0,5mm .



Obrázek 3.44: Pokles nosníka v násobku deformácie 10x pre model *bez šmykovej výstuže*



Obrázek 3.45: Pokles nosníka v násobku deformácie 5x pre model *s rozptýlenou šmykovou výstužou*



Obrázek 3.46: Pokles nosníka v násobku deformácie 5x pre model s *diskrétnou šmykovou výstužou*

Typ nosníka	Max. vzopätie [mm]	Max. pokles [mm]
Bez šmykovej v.	11,6	121
Rozptýlená šmyk. v.	20	334
Diskrétna šmyk. v.	11,5	318

Tabulka 3.20: Hodnoty deformácií v polovici rozpätia v smere „y“

3.9 Výsledky nelineárneho výpočtu MKP s modelovaním degradácie

Po zhotovení výpočtu nelineárnou MKP s vplyvom degradácie v programe ATENA 2D na troch rôznych modeloch boli stanovené nasledujúce údaje:

- Ohybový moment na medzi dekompresie
- Ohybový moment pri vzniku teoretickej trhliny
- Ohybový moment na medzi únosnosti
- Ohybový moment pri šírke trhliny 0,2 mm (ohybové trhliny)

Pre každý výpočtový model bol zhotovený LD Diagram v závislosti nárastu podpornej reakcie v krajnej podpore nosníka a poklesu nosníka v polovici rozpätia.

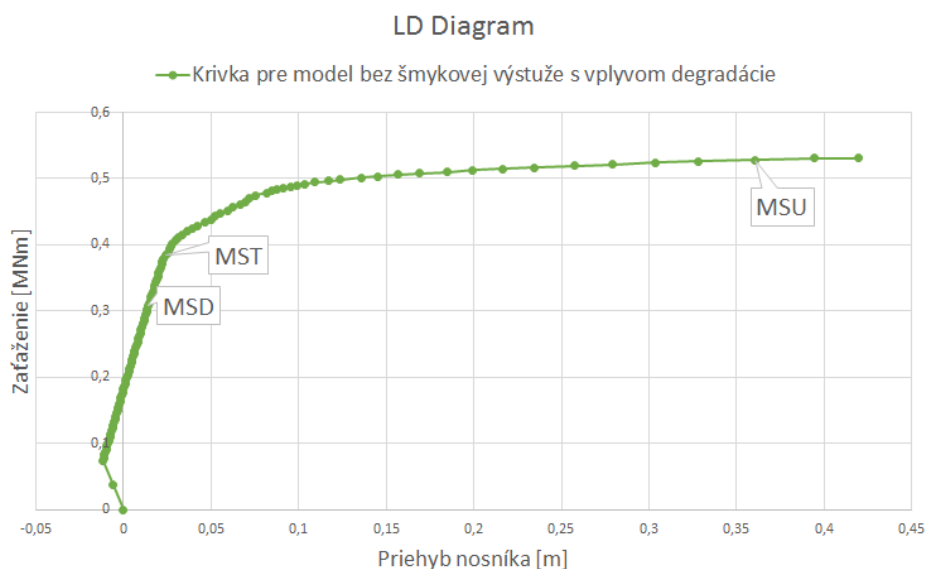
Grafické výstupy, pre modely zahŕňajúce vplyv degradácie, neboli zhotovené. Hlavným dôvodom zhotovenia výpočtu so zahrnutím vplyvu degradácie bolo stanovenie poklesu únosnosti konštrukcie v čase, v charakteristických medzných stavoch, MSD, MST a MSU. Pokles únosnosti v čase bol modelovaný ako úbytok plochy výstuže o 15%.

3.9.1 Diagram v závislosti zafaženie – priehyb (LD Diagram)

Posudzované medzné stavy (MS) v modeli *bez šmykovej výstuže*, s vplyvom degradácie:

Medzný stav	Výpočtový krok	Hodnota zafaženia [MN]	Hodnota priehybu [m]
Dekompresie (MSD)	54	0,308	0,0143
Vzniku trhlin (MST)	70	0,380	0,0229
Únosnosti (MSU)	114	0,528	0,361

Tabulka 3.21: Hodnoty zafaženia a priehybu získané z LD diagramu

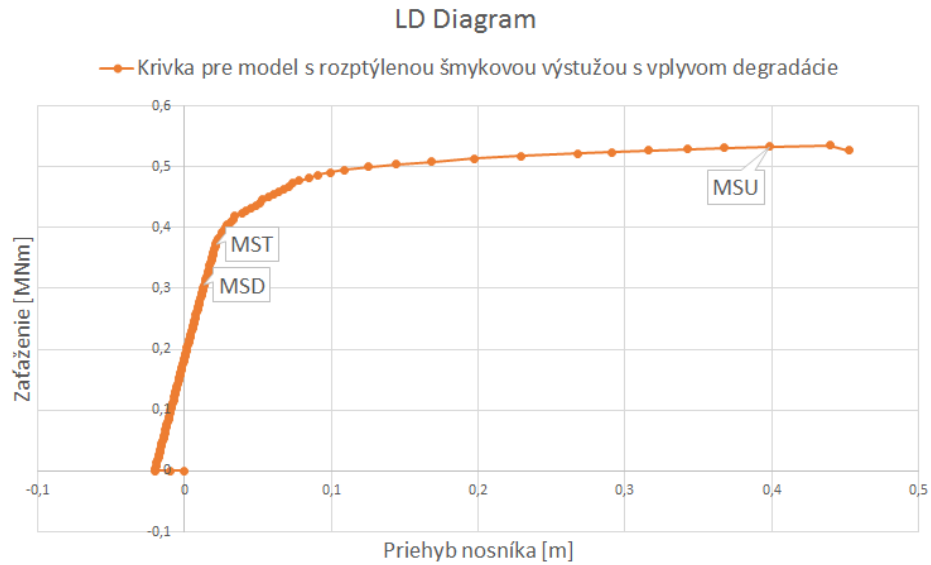


Obrázek 3.47: LD Diagram zafaženie–priehyb pre model *bez šmykovej výstuže*

Posudzované MS v modeli s *rozptýlenou šmykovou výstužou*, s vplyvom degradácie:

Medzný stav	Výpočtový krok	Hodnota zafaženia [MN]	Hodnota priehybu [m]
Dekompresie (MSD)	70	0,306	0,0135
Vzniku trhlin (MST)	85	0,374	0,0215
Únosnosti (MSU)	123	0,533	0,398

Tabulka 3.22: Hodnoty zafaženia a priehybu získané z LD diagramu

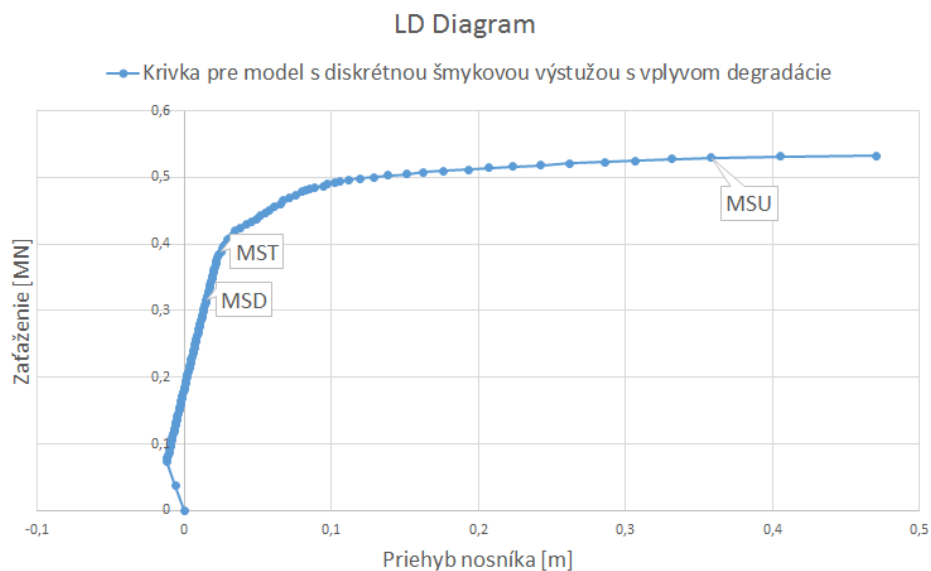


Obrázek 3.48: LD Diagram zaťaženie–priehyb pre model s rozptýlenou šmykovou výstužou

Posudzované MS v modeli s *diskrétnou šmykovou výstužou*, s vplyvom degradácie:

Medzný stav	Výpočtový krok	Hodnota zaťaženia [MN]	Hodnota priehybu [m]
Dekompresie (MSD)	55	0,312	0,0147
Vzniku trhlín (MST)	71	0,384	0,0234
Únosnosti (MSU)	115	0,530	0,358

Tabulka 3.23: Hodnoty zaťaženia a priehybu získané z LD diagramu



Obrázek 3.49: LD Diagram zaťaženie–priehyb pre model s *diskrétnou šmykovou výstužou*

3.9.2 Ohybové momenty na MSD, MST, MSU

Ohybové momenty na MSD, MST, MSU a pri šírke trhlín 0,2 mm pre výpočtové modely zahŕňajúce vplyv degradácie, boli stanovené rovnako ako pre výpočtové modely bez vplyvu degradácie.

Výpočtový model	Moment na MSD	Moment na MST	Moment na MSU	Moment pri šírke trhlín 0,2mm
Bez šmykovej v.	1,357	1,671	2,337	1,852
S rozptýlenou v.	1,349	1,663	2,363	1,869
S diskretnou v.	1,376	1,687	2,348	1,874

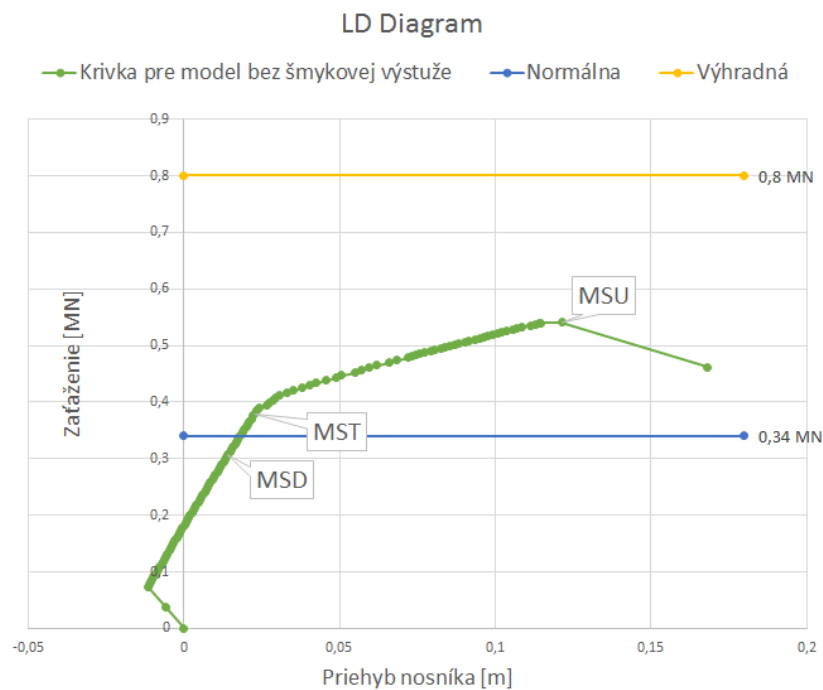
Tabulka 3.24: Hodnoty ohybových momentov pre modely s vplyvom degradácie v [MNm]

Kapitola 4

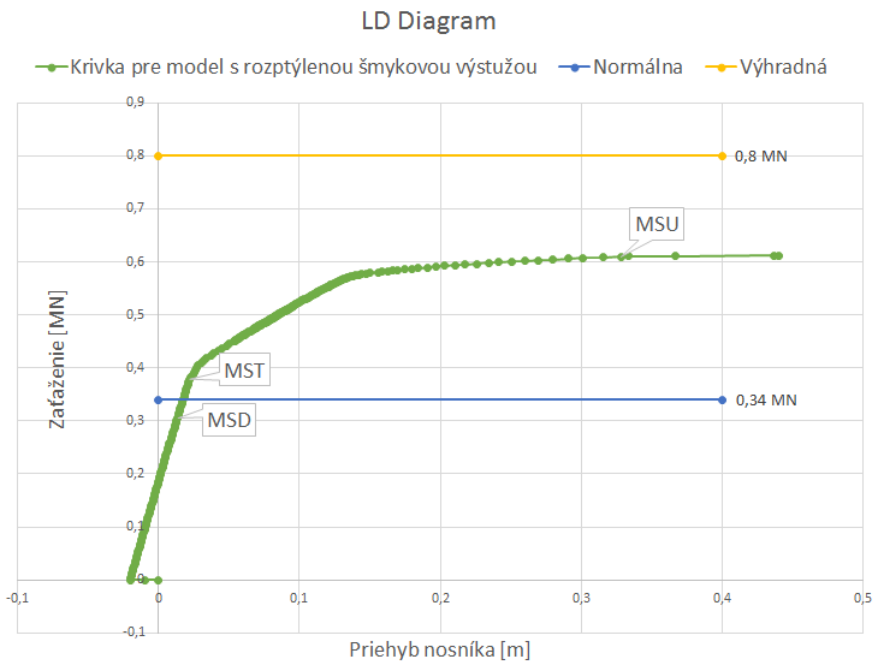
Parametrická analýza

4.1 Porovnanie výsledkov s T.P.

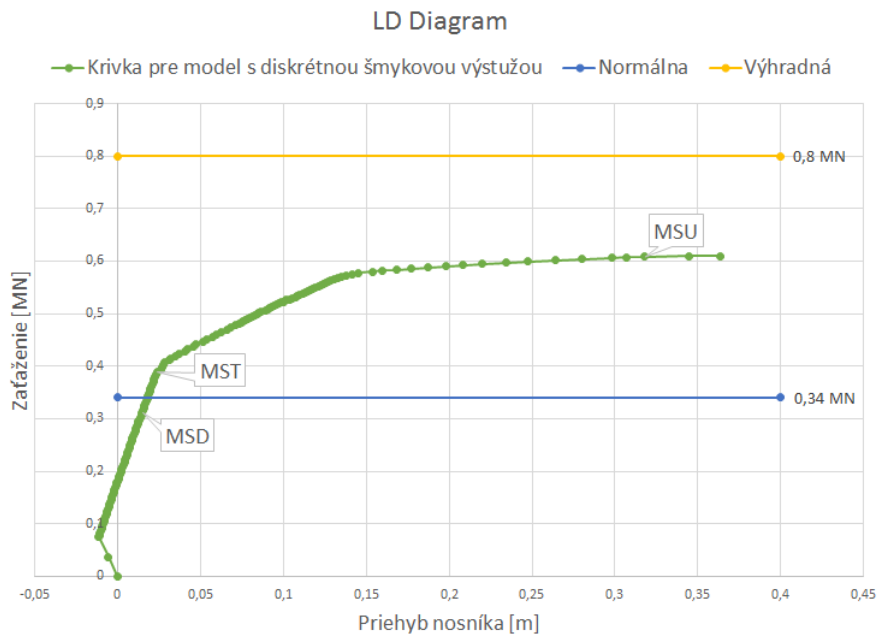
Typový podklad uvádza údaje o zaťažiteľnosti nosných konštrukcií mostov z nosníkov KA-73 [2]. Stanovuje informatívne hodnoty zaťažiteľnosti na úrovni normálnej, výhradnej a výnimočnej. Úroveň normálnej a výhradnej zaťažiteľnosti bola vynesená pre porovnanie s vypočítanými hodnotami do LD Diagramu pre všetky tri výpočtové modely.



Obrázek 4.1: LD Diagram s vyznačenou normálnou a výhradnou zaťažiteľnosťou pre model bez šmykovej výstuže



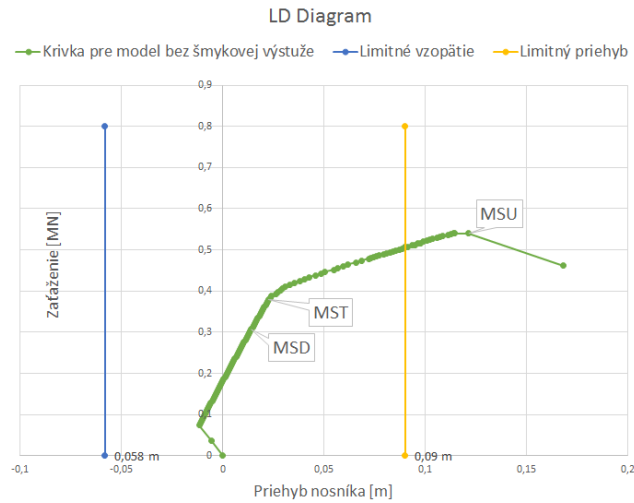
Obrázek 4.2: LD Diagram s vyznačenou normálnou a výhradnou zaťažiteľnosťou pre model s rozptýlenou šmykovou výstužou



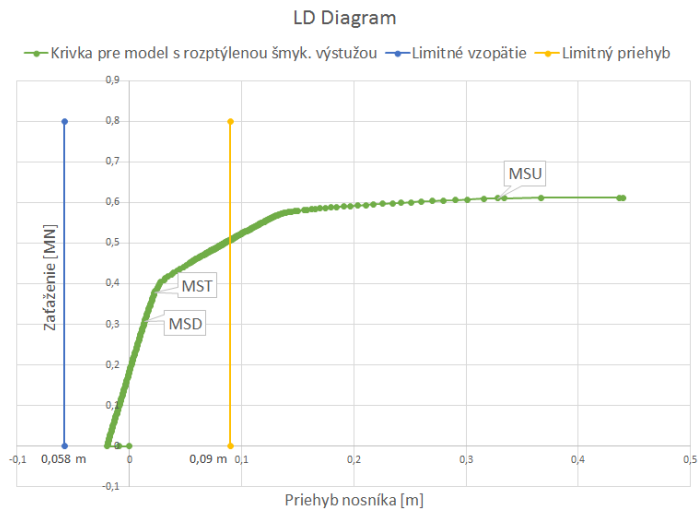
Obrázek 4.3: LD Diagram s vyznačenou normálnou a výhradnou zaťažiteľnosťou pre model s diskretnou šmykovou výstužou

Pri vnášaní predpätej sily do káblov predpätej výstuže dochádza k vzopätiu nosníka. Prípustné hodnoty vzopätia sú udávané pre základné typové dĺžky nosníkov v strede ich rozpätia. Pre typovú dĺžku 18 m udáva T.P. prípustné vzopätie 58,8 mm (vid. tab. 3.2) s toleranciou 20 mm [2].

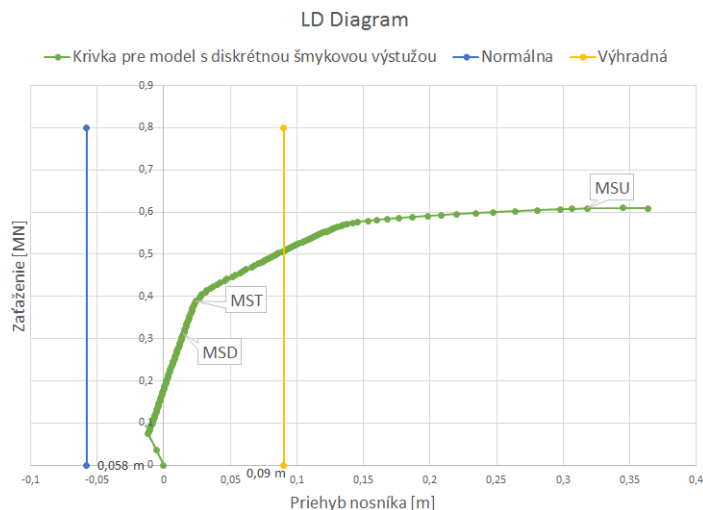
Limitný priehyb nosníka v polovici rozpätia bol stanovený ako $l/200$ na hodnotu 90 mm. Hodnoty vzopätia a priehybu boli vynesené do LD Diagramu pre porovnanie s vypočítanými hodnotami pre všetky tri výpočtové modely.



Obrázek 4.4: LD Diagram s vyznačeným limitným vzopätím a priehybom pre model *bez šmykovej výstuže*



Obrázek 4.5: LD Diagram s vyznačeným limitným vzopätím a priehybom pre model *s rozptýlenou šmykovou výstužou*



Obrázek 4.6: LD Diagram s vyznačeným limitným vzopätím a priehybom pre model s diskretnou šmykovou výstužou

Pre porovnanie ohybových momentov s výpočtom v programe ATENA 2D, stanovuje T.P. dimenzačný moment M_{dim} v polovici rozpätia nosníka od hlavného zaťaženia na medzi dekompresie na hodnotu 131,14 Mpm, čo je v prepočte 1,3114 MNm [2].

Moment pre:	Hodnota v MNm
Výp. model bez šmyk. výstuže	1,357
Výp. model s rozpt. šmyk. výstužou	1,349
Výp. model s diskretnou šmyk. výstužou	1,376
Stanovený v T.P.	1,311

Tabulka 4.1: Porovnanie hodnôt ohybových momentov na medzi dekompresie

4.2 Vplyv šmykovej výstuže na únosnosť

Pre porovnanie vplyvu šmykovej výstuže bol zhotovený jeden výpočtový model bez šmykovej výstuže a dva modely so šmykovou výstužou. Šmyková výstuž bola modelovaná v jednom prípade ako rozptýlená a v druhom prípade ako diskretná (strmienky). Boli porovnávané ohybové momenty, zaťažiteľnosť a priehyb v charakteristických medzných stavoch.

Výpočtový model	MSD	MST	MSU
Bez šmykovej výstuže	1,357	1,671	2,398
Rozptýlená šmyk. výstuž	1,349	1,664	2,708
Diskretná šmyk. výstuž	1,367	1,705	2,714

Tabulka 4.2: Hodnoty ohybových momentov v posudzovaných medzných stavoch v MNm

Výpočtový model	MSD	MST	MSU
Bez šmykovej výstuže	0,308	0,380	0,540
Rozptýlená šmyk. výstuž	0,306	0,378	0,611
Diskrétna šmyk. výstuž	0,312	0,388	0,609

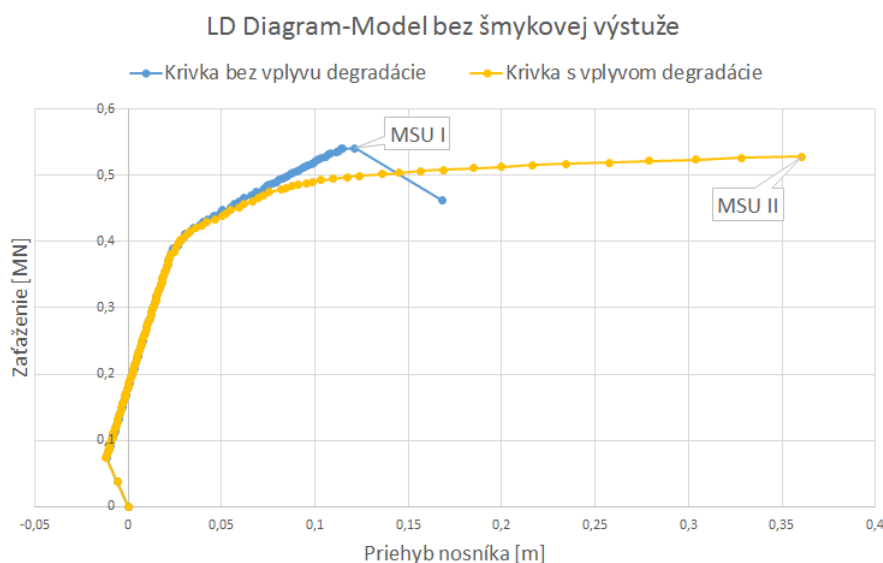
Tabulka 4.3: Hodnoty zaťažiteľnosti v posudzovaných medzných stavoch v MN

Výpočtový model	MSD	MST	MSU
Bez šmykovej výstuže	0,0143	0,0229	0,121
Rozptýlená šmyk. výstuž	0,0136	0,0221	0,334
Diskrétna šmyk. výstuž	0,0148	0,0241	0,318

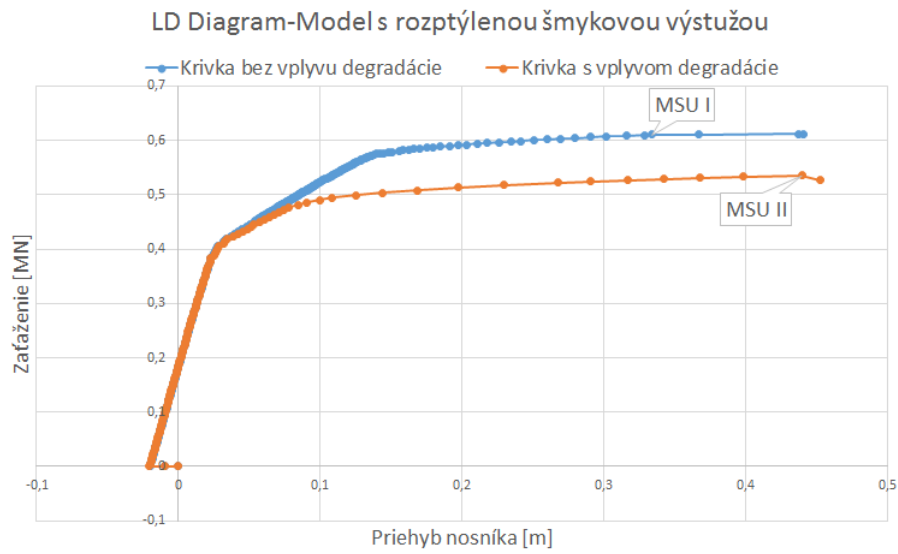
Tabulka 4.4: Hodnoty priehybu v posudzovaných medzných stavoch v m

4.3 Vplyv degradácie materiálu

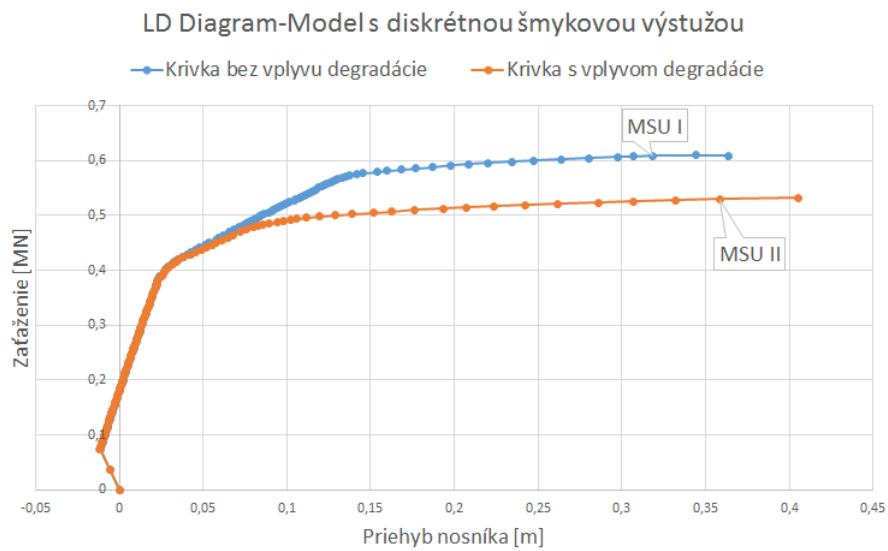
Vplyv degradácie materiálu bol pre účely tejto práce modelovaný pomocou zjednodušených degradačných modelov z programu FReET-D vid. kap. 3.6. Boli použité dva degradačné modely. V prvom bola stanovená hĺbka karbonatácie betónu v čase. V druhom rovnomerný pokles plochy výstuže vplyvom korózie. Pre porovnanie boli výsledky výpočtu bez uváženia vplyvu degradácie vynesené do jedného grafu spolu s výsledkami výpočtu zahrňajúcimi vplyv degradácie.



Obrázek 4.7: Graf pre porovnanie vplyvu degradácie materiálu pre model *bez šmykovej výstuže*



Obrázek 4.8: Graf pre porovnanie vplyvu degradácie materiálu s rozptýlenou šmykovou výstužou



Obrázek 4.9: Graf pre porovnanie vplyvu degradácie materiálu s diskretnou šmykovou výstužou

Model	Hodnota zať. [MN]	Ohybový moment na MSU [MNm]
Bez šmyk. v.	0,528	2,337
S rozptýlenou š.v.	0,533	2,363
S diskretnou š.v.	0,530	2,348

Tabulka 4.5: Hodnoty zaťaženia a ohybových momentov na MSU s uvažovaním degradácie

4.4 Vyhodnotenie

Za účelom nelineárneho výpočtu metódou konečných prvkov (MKP) boli v programe ATENA 2D vymodelované tri modely nosníka KA-73 s typovou dĺžkou 18 m. Z toho jeden model bol vymodelovaný len s predpätou výstužou a štyrmi prútmi hladkej betonárskej výstuže umiestnenej pri dolných vláknoch nosníka. V ďalších dvoch modeloch bola pridaná šmyková výstuž.

Z nelineárneho výpočtu pomocou MKP a hodnotami uvedenými v T.P. boli stanovené nasledujúce závery:

Zaťažiteľnosť nosníka na medzi únosnosti (MSU) sa pohybovala pre všetky tri modely v rozmedzí normálnej a výhradnej zaťažiteľnosti (vid. kap. 3.2.6). Model bez šmykovej výstuže vykazoval na MSU menšiu únosnosť ako modely so šmykovou výstužou, rádovo v desiatkach kN. Pre medzný stav dekompresie (MSD) a medzný stav teoretického vzniku trhlin (MST) boli hodnoty zaťažiteľnosti stanovené s rozdielom rádovo v kN.

Podobne ako pri zaťažiteľnosti bol dosiahnutý menší ohybový moment na MSU pre model bez šmykovej výstuže, rádovo v stovkách kNm. Pri MSD a MST bola odchýlka ohybových momentov rádovo v desiatkach kNm.

Vzopätie nosníka po zavedení predpätia nedosiahlo ani v jednom prípade limitnú hodnotu vzopätia uvedenú v T.P. [2].

Priehyb nosníka prekročil limitnú hodnotu priehybu stanovenú ako $l/200$ vo všetkých troch modeloch. Hodnota priehybu pre model bez šmykovej výstuže pri kolapse konštrukcie bola menšia ako priehyb nosníka v modeloch so šmykovou výstužou rádovo v desiatkach cm. Pri MSD a MST boli rozdiely v priehybe rádovo v mm. Rozdiel v priehybe nosníka bez šmykovej výstuže a nosníka so šmykovou výstužou, na MSU, bol ovplyvnený nedosiahnutým výraznej plastickej oblasti v modeli bez šmykovej výstuže.

Z uvedeného hodnotenia môžeme konštatovať, že vplyv šmykovej výstuže výrazne ovplyvňuje mieru zaťažiteľnosti, priehybu a hodnotu ohybového momentu pri MSU. Čo sa týka zaťažiteľnosti, priehybu a hodnoty ohybového momentu na MSD a MST boli odchýlky minimálne.

V ďalšej časti práce bol pre výpočet únosnosti konštrukcie uvažovaný vplyv degradácie materiálu. Po porovnaní výsledkov nelineárneho výpočtu bez uvažovania degradácie, s výsledkami zahrňujúcimi vplyv degradácie materiálu boli stanovené nasledujúce závery:

Pri porovnávaní úrovne zaťažiteľnosti na MSD a MST boli zistené zanedbateľné odchýlky. Takisto hodnoty ohybových momentov na MSD a MST vykazovali rovnaké hodnoty. Výraznejšie ovplyvnenie degradáciou materiálu bolo zistené až pri MSU. Rozdiely v zaťažiteľnosti sa pohybovali v rozmedzí desiatok kN. Hodnoty ohybových momentov sa pohybovali v rozmedzí stoviek kNm.

Kapitola 5

Záver

Cieľom tejto práce bol výpočet životnosti jestvujúcej mostnej konštrukcie, stanovením maximálnej zaťažiteľnosti, s ohľadom na jej súčasný stav. Pre potreby stanovenia zaťažiteľnosti bola použitá nelineárna analýza v kombinácii s metódou konečných prvkov. Samotný výpočet bol zhotovený výpočtovým softvérom ATENA 2D, pre modelovanie konštrukcií v 2D priestore. Nelineárny výpočet bol aplikovaný na mostnú konštrukciu zostavenú z trinástich nosníkov typu KA-73. Výpočtový model predstavoval jeden predpätý mostný nosník KA-73. Pre účely tejto práce bola vymodelovaná len jedna polovica nosníka určená osou symetrie v pozdĺžnom smere. Výpočtom boli stanovené hodnoty zaťažiteľnosti na medzi dekompresie (MSD), vzniku trhlin (MST) a na medzi únosnosti (MSU). Rovnako bol pozorovaný vplyv šmykovej výstuže na celkovú zaťažiteľnosť. Model so šmykovou výstužou, rozptýlenou, či diskretnou, vykazoval väčšiu mieru zaťažiteľnosti ako model bez šmykovej výstuže. Hodnoty ohybových momentov v polovici rozpätia nosníka na medzi dekompresie sa zhodovali s malou odchýlkou s hodnotami uvedenými v typovom podklade pre konštrukcie cestných a diaľničných mostov z prefabrikátov KA-73 dĺžky 9-12-15-18 m. V ďalšej časti práce bol pri modelovaní uvažovaný vplyv degradácie materiálu. Pre popis degračných modelov bol použitý program FReET-D. V prvom kroku bola modelovaná karbonatácia betónu v závislosti hĺbky karbonatácie betónu v čase. V druhom kroku, úzko nadväzujúcim na prvý bola modelovaná korózia výstuže. V konečnom dôsledku bola do výpočtu zahrnutá degradácia materiálu percentuálnym poklesom plochy výstuže. Výsledky s modelovaním degradácie vykazovali odlišné hodnoty iba pri MSU. Pri MSD a MST boli odchýlky zanedbateľné. Nelineárny výpočet metódou konečných prvkov by mohol byť v budúcnosti rozhodujúci pre stanovenie maximálnej zaťažiteľnosti existujúcich konštrukcií. Čo najpresnejšie stanovenie maximálnej zaťažiteľnosti by malo veľký vplyv v určovaní potreby rekonštrukcie konštrukcií, z čoho by vyplývala efektivita pri rozdeľovaní finančných prostriedkov. V kombinácii s pokročilými pravdepodobnostnými metódami zahrňujúcimi modelovanie degradácie, by sa okrem maximálnej zaťažiteľnosti dala stanoviť celková životnosť konštrukcie. Pokročilá pravdepodobnostná analýza na stanovenie poklesu únosnosti v čase, s modelovaním degradácie (karbonatácia betónu, vplyv chloridov, korózia výstuže) mostnej konštrukcie, by mohla byť predmetom ďalšieho výskumu.

Literatura

- [1] Bohumír Voves: Počátky předpjatých trémových mostů v ČSR. *BETON TKS*, ročník 4, 2003: s. 28–32, ISSN 12-133-116.
- [2] Šechný B.: Typový podklad pre konštrukcie cestných a diaľničných mostov z prefabrikátov KA-73 dĺžky 9-12-15-18 m. *Štátny ústav pre projektovanie dopravných stavieb, Dopravoprojekt, Bratislava, 1973.*
- [3] Ředitelství silnic a dálnic: Přehledy z informačního systému o silniční a dálniční síti ČR.
<http://www.rsd.cz/sdb_intranet/sdb/download/prehledy_2015_1_cr.pdf>, 2015, [cit. 15-marec-2015].
- [4] Česká technická norma: ČSN ISO 13822 (730038) Zásady navrhování konstrukcí - Hodnocení existujících konstrukcí. *Český normalizační institut, Praha, 2005.*
- [5] Česká technická norma: ČSN EN 1992-1-1 (731201) Navrhování betonových konstrukcí - Část 1-1: Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby. *Český normalizační institut, Praha, 2006.*
- [6] Lehký D., Šomodíková M., Doležel J., Novák D.: Pravděpodobnostní analýza zatížitelnosti a spolehlivosti spřaženého mostu z MPD nosníků. *BETON TKS*, ročník 4, 2013: s. 108–113, ISSN 12-133-116.
- [7] Novák D., Teplý B., Keršner Z., Vořechovský M.: FREET Program Documentation, Part 1, Theory. Technická zpráva, Červenka Consulting, Praha, Česká Republika, 2002.
URL <<http://www.freet.cz>>
- [8] Pukl R.: Moderní metodika pro stanovení bezpečnosti a spolehlivosti betonových konstrukcí. *BETON TKS*, ročník 4, 2008: s. 74–78, ISSN 12-133-116.
- [9] ROVNANÍKOVÁ, Pavla, Pavel ROVNANÍK a Richard KŘÍSTEK: Stavební chemie, MODUL 3, Degradace stavebních materiálů a chemie kovů. *Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005: str. 48, ISBN 80-7204-410-9.*
- [10] Slovenská správa ciest: Štatistické prehľady.
<http://www.cdb.sk/files/img/shm/statistika_grafy/sr_grafy_mosty.jpg>, 2015, [cit. 15-marec-2015].
- [11] Suza I. a kolektiv: Diagnostický průzkum levého mostu EV. č. D2-055..2 přes kanál Hakalovská a lesní cestu za Lanžhotem. Technická zpráva, Mostní a silniční, s.r.o., Brno, 2009.

- [12] Technické podmienky TP 224: Ověřování existujících betonových mostů pozemních komunikací. Technická zpráva, Ministerstvo dopravy, Odbor silniční infrastruktury, Praha, 2010.
- [13] Teplý B., Chromá M., Vořechovská D., Rovnaník P.: FReRT-D Deterioration Module Program Documentation. Technická zpráva, Červenka Consulting, Praha, Česká Republika, 2012.
- [14] Vořechovský M., Červenka V.: ATENA 2D-Uživatelský manuál. Technická zpráva, Červenka Consulting, Praha, Česká Republika, 2002.

Seznam použitých zkratek a symbolů

A_s – plocha výstuže [m^2]

α – koeficient teplotnej rozťažnosti [$1/K$]

β_n – súčiniteľ odhadu 5% kvantilu [-]

β – súčiniteľ smeru plastického tečenia [-]

d_i – priemer prútu výstuže [m]

δ – dynamický súčiniteľ [-]

E_{cm}, E_b – modul pružnosti betónu [MPa]

E_s – modul pružnosti ocele [MPa]

e – extencivita tvaru plochy porušenia [-]

f_t – pevnosť betónu v ťahu [MPa]

f_c – pevnosť betónu v tlaku [MPa]

$f_{c,LIM}$ – redukcia vplyvom trhlin [-]

f_y, σ_y – medza klzu ocele [MPa]

f_u, σ_a – medza pevnosti ocele [MPa]

$\sigma_{0,2}$ – medza prietážnosti [MPa]

G_f – špecifická lomová energia [MN/m]

J_o – moment zotrvačnosti prierezu jedného nosníka [m^4]

J_k – moment zotrvačnosti prierezu v krútení jedného nosníka [m^4]

l – rozpätie nosníka [m]

M_{DIM} – dimenzačný moment od zaťaženia hlavného vrátane dynamických účinkov [MNm]

M_ρ – moment od vlastnej váhy nosníka [MNm]

μ – Poissonove číslo [-]

R_{be} – orientačná pevnosť betónu [MPa]

R_b – aritmetický priemer pevnosti [MPa]

ρ – špecifická tiaž [MN/m^3]

S_k, S_r – výberová smerodatná odchýlka [-]

S_{rez} – reziduálna smerodatná odchýlka [-]

S_F – faktor šmykovej pevnosti [-]

t_i – iniciačný čas [roky]

t_D – návrhová životnosť [roky]

w_d – kritická tlaková deformácia [m]

x_c – hĺbka karbonatácie [mm]

Příloha A

Výkresy

Výkres č.1 – Uloženie predpínacej výstuže v nosníku druhu „A“ dĺžky 18 m

Výkres č.2 – Armovací výkres nosníka druhu „A“ dĺžky 18 m