

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

VYHODNOCENÍ LOMOVÝCH TESTŮ MATERIÁLŮ TĚLES Z VÝVRTŮ

EVALUATION OF FRACTURE TEST OF SELECTED CORE-DRILLED CYLINDRICAL
SPECIMEN

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Halfar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.

BRNO 2018



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Petr Halfar
Název	Vyhodnocení lomových testů materiálů těles z vývrtů
Vedoucí práce	prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
Vedoucí-specialista	doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2017
Datum odevzdání	12. 1. 2018

V Brně dne 31. 3. 2017

prof. Ing. Drahomír Novák, DrSc.
Vedoucí ústavu

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

PODKLADY A LITERATURA

- A. M. NEVILE, Properties of Concrete, Pearson Education Limited, Harlow 2011.
- F. OUCHTERLONY, Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts. 25 (1988) 71–96.
- T. BACKERS, Fracture toughness determination and micromechanics of rock under mode I and mode II loading. Dissertation, University of Potsdam, 2004.
- L. VAVRO, Fracture toughness of rock and its determination for geomechanical evaluation of rock and rock mass. Dissertation, VŠB–Technical University of Ostrava, 2014.
- B. L. KARIHALOO, Fracture Mechanics and Structural Concrete, Longman Scientific & Technical, New York, 1995.
- V. VESELÝ, P. FRANTÍK, An application for the fracture characterisation of quasi-brittle materials taking into account fracture process zone influence, Advances in Engineering Software. 72 (2014) 66–76.
- P. FRANTÍK, J. MAŠEK, GTDiPS software, <http://gtdips.kitnarf.cz/>, 2015.
- RILEM TC-50 FMC Recommendation. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend test on notched beams, Materials & Structures. 18 (1985) 285–290.

Další podklady podle pokynů vedoucího práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Studium doporučených podkladů a souvisejících materiálů, průzkum webových zdrojů, orientace v zadané problematice vyhodnocování lomových testů materiálů těles z vývrtů, lomové parametry, identifikace parametrů, vyhodnocení lomových experimentů na tělesech z vybraných materiálů, diskuse výsledků, závěrečné shrnutí.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchování vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá použitím přístupu modelu efektivní trhliny na válcové zkušební těleso se šípovým vrubem, zatěžované třibodovým ohybem. První část práce je teoretická a můžeme v ní najít popis použití lomové mechaniky na kvazi-křehké materiály – beton a horniny. Dále je zde více rozvedena lineární elastická lomová mechanika a hledání funkce geometrie pro různé geometrie zatěžovacích testů. Poté se v teoretické části nachází popis modelu efektivní trhliny. Druhá část se zabývá popisem MKP programu, který byl využit pro výpočet lomových parametrů, které byly použity pro nalezení délky efektivní trhliny a také jak se daný program před jeho použitím testoval. V poslední části se nachází výpočet lomových houževnatostí pomocí užití modelu efektivní trhliny na vybraná horninová a betonová tělesa.

KLÍČOVÁ SLOVA

Lomová mechanika, beton, hornina, trhlina, program chevroncylinder, funkce geometrie, model efektivní trhliny

ABSTRACT

The diploma thesis deals with effective crack model for a cylinder specimen with an chevron-shaped notch, loaded by a three-point bending. The first part of the thesis is theoretical and the it describes the use of fracture mechanics for quasi-brittle materials – concrete and rocks. Furthermore there is described the linear elastic fracture mechanics and founding the geometry function for a different geometries of fracture tests. The second part describes the FEM program, which was used to calculate the fracture parameters, that were used to determine the length of the effective crack and how the program was tested before it was used. The last part describe calculations of fracture toughness by using the effective crack model on selected rock and concrete specimens.

KEYWORDS

Fracture mechanics, concrete, rock, crack, chevroncylinder application, geometry function, effective crack model

Vyhodnocení lomových testů materiálů těles z vývrtů: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky, 2018. 65 s. Vedoucí práce byl prof. Ing. Zbyněk Keršner, CSc., vedoucí-specialista doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

Brno

.....

Bc. Petr Halfar
(podpis autora)

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu diplomové práce panu prof. Ing. Zbyňku Keršnerovi, CSc. za jeho velkou trpělivost a odbornou pomoc s vypracováním mé práce. Také děkuji svému odbornému specialistovi doc. Ing. Petru Frantíkovi, Ph.D. za dodané podklady, pomoc při řešení problémů v mé práci a hlavně za tvorbu MKP programu pro výpočet lomových parametrů válce se šípovým vrubem.

V neposlední řadě chci poděkovat svým rodičům za finanční i psychickou podporu ve studiu.

Práce vznikla v rámci řešení projektu GA16-18702S – Problematika porušování v blízkosti rozhraní plniva a matrice kompozitů na silikátové bázi (AMIRI), podporovaném Grantovou agenturou České republiky.

OBSAH

Úvod	14
1 Lomová mechanika	15
1.1 Lineárně elastická lomová mechanika (LELM)	15
1.1.1 Griffithova teorie	15
1.1.2 Irwinova teorie	16
1.1.3 Módy zatěžování	17
1.1.4 Lomová houževnatost	18
1.1.5 Houževnatost	18
1.2 Těleso konečných rozměrů	19
1.2.1 Příklady tvarových funkcí	19
1.3 Model efektivní trhliny	22
2 MKP model	24
2.1 Tvorba sítě konečných prvků	24
2.2 Vstupní parametry	25
2.3 Výstupní parametry	26
3 Testování MKP programu	28
3.1 Test konvergence	28
3.2 Varianty hodnocených lomových zkoušek	30
4 Aplikace modelu efektivní trhliny na válec se šípovým zářezem	34
5 Využití modelu k analýze odezvy reálných těles	37
5.1 Pískovcová tělesa	37
5.2 Betonová tělesa z nosné konstrukce stávající budovy	39
5.3 Betonová tělesa z panelů požárního testu	40
6 Výsledky	43
6.1 Pískovcová tělesa	44
6.2 Betonová tělesa z nosné konstrukce stávající budovy	44
6.3 Betonová tělesa z panelů požárního experimentu	45
7 Závěr	46
Literatura	47
Seznam symbolů, veličin a zkratk	49

Seznam příloh	51
A Zatěžovací diagramy pro hledání efektivní délky trhliny	52
A.1 Pískovcová tělesa	53
A.2 Betonová tělesa z nosné konstrukce stávající budovy	56
A.3 Betonová tělesa z panelů požárního experimentu	59

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Složky napětí v blízkosti kořene trhliny	16
1.2	Zatěžovací módy tělesa s trhlinou	17
1.3	Schéma testu v třibodovém a čtyřbodovém ohybu	20
1.4	Schéma testu v excentrickém tahu	21
1.5	Schéma testu válce se šípovým vrubem	22
1.6	Ilustrace počáteční větve diagramu síla–posun trámce s počáteční trhlinou délky a_0 a s efektivní trhlinou délky a_e , podle Karihaloo (1995)	23
2.1	Schéma modelu	24
2.2	Schéma sítě konečných prvků	24
2.3	Poloha vrcholu trhliny – symetrický vrub	25
2.4	Poloha vrcholu trhliny – nesymetrický vrub	25
2.5	Vybrané vstupní parametry	26
2.6	Výstupní parametry	27
2.7	Detail singularity	27
3.1	Závislost velikosti KP vzhledem k otevření ústí trhliny $CMOD$	28
3.2	Závislost velikosti KP vzhledem k průhybu d	29
3.3	Závislost velikosti KP vzhledem k zatěžovací síle F	29
3.4	Ilustrace sítě KP pro největší a nejmenší volený maximální rozměr KP	29
3.5	Schéma měnící se hloubky zářezu a_0 a délky trhliny a	30
3.6	Detail sítě KP pro průměry těles 50, 75 a 100 mm	31
3.7	Závislost $CMOD$ na měnící se velikosti a_{eff} pro tělesa s průměrem 100 mm	31
3.8	Závislost $CMOD$ na měnící se velikosti a_{eff} pro tělesa s průměrem 75 mm	32
3.9	Závislost $CMOD$ na měnící se velikosti a_{eff} pro tělesa s průměrem 50 mm	32
3.10	Závislost k_{CMOD} na měnící se velikosti a_{eff} pro tělesa s průměrem 100 (modře)/75 (zeleně)/50 mm (červeně)	33
3.11	Ukázka modelu pro měnící se velikost trhliny (červeně)	33
4.1	Vybraný upravený pracovní diagram $F–CMOD$	34
4.2	Klesající tuhost vzhledem k rostoucí trhlině	35
4.3	Ilustrace nalezení a_e pomocí průsečíku přímk	36
5.1	Detail zkoušky pískovcového tělesa v lisu (Kubeš (2016))	38
5.2	Detail modelu pro výpočet pískovcových těles	38
5.3	Detail modelu pro výpočet betonových těles z nádražní budovy	40
5.4	Pec pro zkoušky požáru stavebních materiálů v centru AdMaS (Rozsypalová et al. (2017), Šimonová, H. et al. (2017b))	41

5.5	Detail modelu pro výpočet betonových těles z panelů požárního experimentu	41
A.1	Pískovcové těleso ja22	53
A.2	Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro pískovcové těleso ja22	53
A.3	Pískovcové těleso ja23	54
A.4	Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro pískovcové těleso ja23	54
A.5	Pískovcové těleso ja26	55
A.6	Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro pískovcové těleso ja26	55
A.7	Betonové těleso v7	56
A.8	Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso v7	56
A.9	Betonové těleso v15	57
A.10	Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso v15	57
A.11	Betonové těleso v18	58
A.12	Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso v18	58
A.13	Betonové těleso P4_D23E23	59
A.14	Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso P4_D23E23	59
A.15	Betonové těleso P4_C45D45	60
A.16	Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso P4_C45D45	60
A.17	Betonové těleso P4_B45C45	61
A.18	Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso P4_B45C45	61
A.19	Betonové těleso P4_D62_X1	62
A.20	Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso P4_D62_X1	62
A.21	Betonové těleso P7_4FEE	63
A.22	Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso P7_4FEE	63
A.23	Betonové těleso P7_4BC	64
A.24	Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso P7_4BC	64
A.25	Betonové těleso P7_4EF	65

A.26 Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso P7_4EF	65
---	----

SEZNAM TABULEK

5.1	Tabulka rozměrů a vybraných parametrů pro pískovcová tělesa Javorka (Kubeš (2016))	37
5.2	Tabulka rozměrů a vybraných parametrů pro betonová tělesa z nádražní budovy	39
5.3	Tabulka rozměrů a vybraných parametrů pro betonová tělesa nezatížená požárem	42
5.4	Tabulka rozměrů a vybraných parametrů pro betonová tělesa zatížená maximální teplotou 1000 °C	42
6.1	Tabulka porovnání lineárních a efektivních lomových parametrů pro pískovcová tělesa Javorka	44
6.2	Tabulka porovnání lineárních a efektivních lomových parametrů pro betonová tělesa z nádražní budovy	44
6.3	Tabulka porovnání lineárních a efektivních lomových parametrů pro betonová tělesa z panelů požárního experimentu	45

ÚVOD

Materiály okolo nás nejsou zcela homogenní, obsahují různé póry, či trhliny, které tvoří v materiálu koncentrátoři napětí a materiál se tak začne porušovat dříve, než-li dojde k vyčerpání jeho pevnosti. Toto dalo za vznik lomové mechanice. Ta popisuje chování materiálu v blízkém okolí koncentrátoru napětí a hledá různé funkce a matematické modely, kterými lze napětí v tomto místě popsat a zpřesnit. Ve stavební praxi se lomová mechanika užívá jen okrajově, i když by její použití mohlo zefektivnit návrhy konstrukcí.

Tato práce se zabývá využitím modelu efektivní trhliny na tělesech specifického tvaru – válcích se šípovým vrubem. Tato tělesa se získávají pomocí vývrtů z hornin nebo betonových konstrukcí či prvků a dají se bez většího dalšího zpracování rovnou použít k testování. Model efektivní trhliny byl aplikován pomocí metody konečných prvků. Tou byly simulovány stejné zatěžovací zkoušky, které dříve proběhly v laboratořích na reálných tělesech. Jednalo se o tři pískovcová tělesa, tři betonová tělesa z nosné konstrukce stávající budovy a sedm těles z panelů požárního experimentu. Následně byly vypočítané efektivní hodnoty porovnány s hodnotami zjištěnými pomocí lineární elastické lomové mechaniky.

1 LOMOVÁ MECHANIKA

Jak již jsem uvedl ve své bakalářské práci (Halfar (2016)), lomová mechanika je vědní obor, který se řadí do oblasti aplikované mechaniky. Jedná se o část mechaniky zabývající se chováním těles s koncentrátorem napětí. Zkoumá odolnost konstrukcí z jiného hlediska než klasické pevnostní analýzy. V minulosti se používala především pro kovové materiály, ale od 60. let minulého století ji lze aplikovat i pro kompozity založené na cementové matrici. Její použitelnost na beton a betonové konstrukce popisuje Karihaloo (1995). Pomocí jejich principů by se dalo dosáhnout například zefektivnění návrhu konstrukcí. Základní kámen lomové mechaniky tvoří lineárně elastická lomová mechanika, ze které je odvozena elasto-plastická lomová mechanika a většina dalších nelineárních modelů.

1.1 Lineárně elastická lomová mechanika (LELM)

V LELM předpokládáme platnost Hookeova zákona mezi složkami napětí a deformací v okolí trhliny. Můžeme připustit vznik malé plastické zóny za předpokladu, že tato zóna je mnohem menší, než délka trhliny, nebo rozměry tělesa. Za tvůrce LELM se považuje Alan Arnold Griffith, který jako první dokázal, že v materiálech existuje množství diskontinuit, které způsobují snížení pevnosti materiálu oproti jejich pevnosti předpokládané (Griffith, 1920). Tyto trhliny tvoří v materiálu koncentrátoři napětí, díky kterým dojde k selhání průřezu mnohem dříve, než-li napětí dosáhne meze únosnosti tohoto průřezu.

1.1.1 Griffithova teorie

Griffithova teorie je založena na energetických principech, pomocí kterých popisuje mechanismus křehkého lomu. Teorie uvažuje ideálně křehký materiál, kterému se v realitě nejvíce blíží sklo. Jak uvádí ve své práci Vlček – Florian (2007), vycházel Griffith z kritéria celkové potenciální energie v soustavě. Z prvního termodynamického zákona víme, že celkové množství energie v soustavě je konstantní a pokud dochází k přechodu z rovnovážného stavu do nerovnovážného, dochází ke změně celkové energie. Při šíření trhliny, vznikají nové lomové plochy. K vytvoření lomových ploch se spotřebovává energie a tato energie se dle Griffithových úvah musí rovnat celkové změně energie napjatosti tělesa:

$$\frac{\partial \Pi}{\partial a} = -\frac{\partial W}{\partial a}, \quad (1.1)$$

Π – potenciální energie tělesa; W – energie nutná k šíření trhliny; a – délka trhliny.

Tenhle poznatek aplikoval Griffith na Inglisovo řešení nekonečné elastické desky s eliptickou trhlinou. Pro trhlinu délky $2a$ v rovině lze popsat velikost kritického napětí:

$$\sigma\sqrt{\pi a} = \sqrt{2E'\gamma} = konst. \quad (1.2)$$

σ – napětí; a – délka trhliny; γ – měrná povrchová energie,

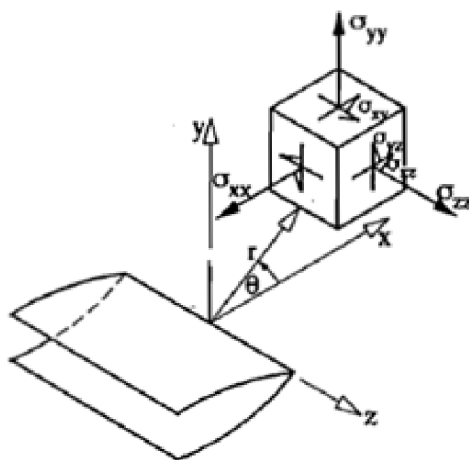
- $E' = E$ – úloha rovinné napjatosti,
- $E' = E(1 - \nu^2)$ – úloha rovinné deformace.

Úloha tělesa s trhlinou je obecně trojrozměrná, ale lze ji často zjednodušit na rovinnou úlohu, jelikož se jedná jen o malou oblast u kořene trhliny a největší napětí působí ve směru namáhání.

Griffith tento vzorec také ověřil pomocí experimentu na skelných vláknech. Prokázal, že se zmenšujícím se průměrem vláken stoupá jejich pevnost. To je způsobeno tím, že poměr povrchu vláken k jejich objemu je větší. Pevnost je tudíž dána povrchovým napětím. Ze vzorce dále vyplývá, že s rostoucí délkou trhliny je zapotřebí stále menší napětí. Takže když se trhlina začne šířit při konstantním napětí, roste katastrofálním způsobem.

1.1.2 Irwinova teorie

Griffithova teorie je silně závislá na délce trhliny a také platí pouze pro ideálně křehké materiály. Irwin (1957) zobecnil tuto teorii na materiály, které selhávají s určitou plastickou deformací, jako například kovy. Irwin matematicky popsal okolí kořene trhliny a rozdělil namáhání do tří základních módů (1.3).



Obr. 1.1: Složky napětí v blízkosti kořene trhliny (Karihaloo, 1995)

Vztahy pro výpočet napětí jsou uvedeny v polárních souřadnicích s počátkem v kořeni trhliny, ve vzdálenosti r a úhlu θ od kořene:

$$\begin{aligned}\sigma_{xx} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \\ \sigma_{yy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2} \right), \\ \tau_{xy} &= \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2},\end{aligned}\quad (1.3)$$

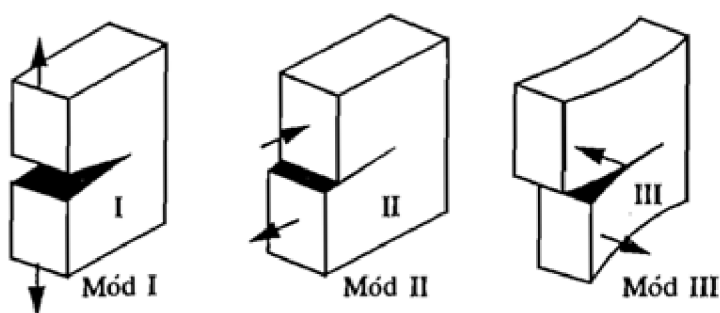
K – součinitel intenzity napětí (popsaný později). Uvedené vzorce platí pro zatěžovací Múd I, který je v inženýrské praxi nejvýznamnější.

Z uvedených vzorců můžeme vyčíst, že napětí klesá s druhou odmocninou vzdálenosti r od kořene trhliny. To ale znamená, že těsně u kořene jsou hodnoty napětí nekonečné.

1.1.3 Módy zatěžování

Tři základní zatěžovací módy, které definoval George Rankin Irwin:

- **Múd I** – tahový – tahové napětí působí kolmo k rovině trhliny.
- **Múd II** – rovinný smykový – smykové napětí působí rovnoběžně s rovinou trhliny a zároveň kolmo k jejím čelům.
- **Múd III** – antirovinný smykový – smykové napětí působí rovnoběžně s rovinou trhliny a zároveň rovnoběžně s jejími čely.



Obr. 1.2: Zatěžovací módy tělesa s trhlinou (Karihaloo, 1995)

1.1.4 Lomová houževnatost

Z Irwinovy teorie vyplývá jedna z nejdůležitějších veličin popisující stabilitu trhliny – faktor intenzity napětí. Jedná se v podstatě o upravený Griffithův vzorec pro popis velikosti kritického napětí, viz rovnice 1.2.

$$K = \sigma \sqrt{a\pi}, \quad (1.4)$$

pro jednotlivé zatěžovací módy lze psát K_I , K_{II} a K_{III} :

$$\begin{aligned} K_I &= \sigma \sqrt{a\pi}, \\ K_{II} &= \tau \sqrt{a\pi}, \\ K_{III} &= \tau \sqrt{a\pi}. \end{aligned} \quad (1.5)$$

Pro určitý materiál lze zjistit kritickou hodnotu faktoru intenzity napětí K . Značí se K_c (pro jednotlivé módy K_{Ic} , K_{IIc} a K_{IIIc}) a nazýváme ji lomová houževnatost. Když faktor intenzity napětí K nabude této kritické hodnoty K_c , trhlina se začne šířit nestabilně.

$$K = K_c. \quad (1.6)$$

1.1.5 Houževnatost

Oproti lomové houževnatosti vychází toto kritérium stability z Griffithovy teorie. Je zde používána lomová charakteristika s názvem hnací síla trhliny G , kterou si můžeme představit jako pokles celkové mechanické energie soustavy W . Ekvivalentně s předchozím případem lze psát s ohledem na typ namáhání G_I , G_{II} a G_{III} :

$$G = -\frac{\partial W}{\partial a}. \quad (1.7)$$

Kritickou hodnotou hnací síly trhliny je houževnatost G_c . Posouzení stability trhliny je pak stejné jako u lomové houževnatosti. Když nabude G své kritické hodnoty G_c , začne se trhlina šířit nestabilně.

$$G = G_c \quad (1.8)$$

Pro ideálně křehké materiály platí jednoduchý vztah pro přepočtení houževnatosti a lomové houževnatosti. Na tyto vztahy přišel Kies, který spolupracoval na pokusech s Irwinem:

$$K_c = \sqrt{G_c E'}. \quad (1.9)$$

1.2 Těleso konečných rozměrů

Vztahy uvedené pro výpočet faktoru intenzity napětí v předchozí podkapitole lze uvažovat pouze pro nekonečně velké těleso s centrální trhlinou. Pro reálné zkoušky a výpočty se používají upravené vzorce, které obsahují mimo napětí a délky trhliny také člen Y – který do vzorce vnáší vliv konečnosti, tvaru tělesa a trhliny a způsobu zatěžování – tvarová funkce. Potom lze vzorce pro výpočet faktoru intenzity napětí uvést v tomto tvaru:

$$\begin{aligned} K_I &= \sigma \sqrt{a\pi} \cdot Y(a, W, l, \dots), \\ K_{II} &= \tau \sqrt{a\pi} \cdot Y(a, W, l, \dots), \\ K_{III} &= \tau \sqrt{a\pi} \cdot Y(a, W, l, \dots). \end{aligned} \quad (1.10)$$

Existuje několik metod, kterými lze funkci geometrie zjistit. Dají se rozdělit do čtyř základních skupin jak popisuje Vlček – Florian (2007):

- **metody analytické** – metoda komplexních napěťových potenciálů, metoda konformního zobrazení apod.,
- **metody semianalytické** – metoda kolokace okrajových podmínek apod.,
- **metody numerické** – ve většině případů metoda konečných prvků
- **metody experimentální** – využívají se různé měřicí techniky, např., fotoelastimetrie, odporová tenzometrie, interferometrie apod.

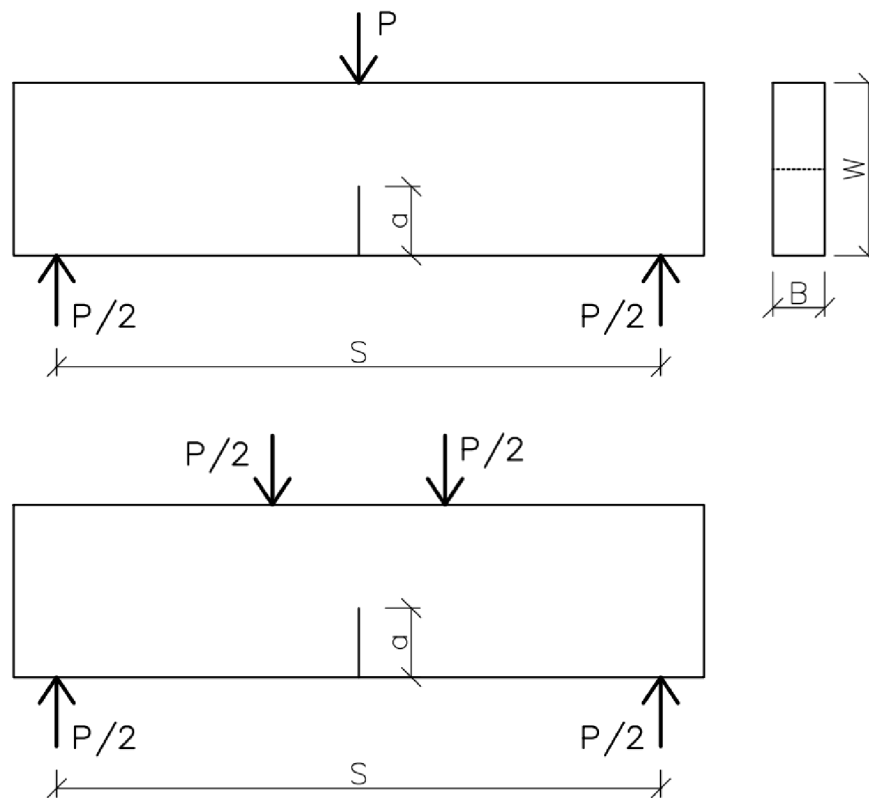
1.2.1 Příklady tvarových funkcí

Pro účel výpočtu faktoru intenzity napětí K byla v minulosti použita tělesa mnoha různých tvarů a rozměrů. Jak uvádí Karimhaloo (1995), nejběžnější tvar pro zkoušky je trámec se zářezem uprostřed, který je zatěžovaný pomocí tříbodového, nebo čtyřbodového ohybu (obr. 1.3).

Tyto vzorky jsou postupně zatěžovány, dokud nedojde k propagaci ostré trhliny. Tento začátek praskání odpovídá teoreticky maximální zatěžovací síle F_{\max} , díky které se následně vypočítá faktor intenzity napětí K pomocí tohoto vzorce:

$$K_{Ic} = 6YM_{\max} \sqrt{a} / BW^2, \quad (1.11)$$

Y – bezrozměrná funkce geometrie; $M = M_1 + M_2$; M_1 – ohybový moment během maximálního zatížení silou F_{\max} ; M_2 – ohybový moment od vlastní tíhy trámce; B – šířka trámce; W – výška trámce; a – délka zářezu.



Obr. 1.3: Schéma testu v třibodovém a čtyřbodovém ohybu

Pro tuto geometrii třibodového (3BO) i čtyřbodového ohybu bylo navrženo několik funkcí, v současné době je pro 3BO nejpoužívanější funkce, kterou navrhl Srawley v roce 1976. Zahrnuje v sobě výpočet pro celý rozsah hloubky zářezu. Přitom v rozmezí poměru a/W od 0 do 0,6 pracuje vzorec s velmi malou chybou do 0,2 %.

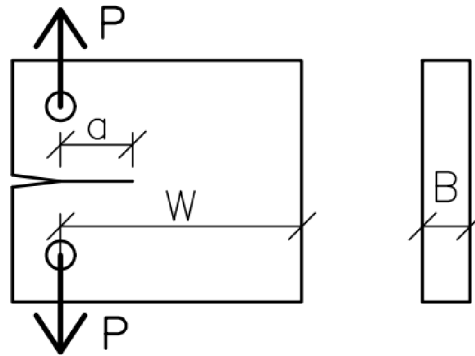
$$Y(\alpha) = \frac{[1,99 - \alpha(1 - \alpha) \cdot (2,15 - 3,93\alpha + 2,7\alpha^2)]}{(1 + 2\alpha) \cdot (1 - \alpha)^{2/3}}, \quad (1.12)$$

$\alpha = a/W$ – poměrná hloubka zářezu.

Další hojně používanou geometrií je test excentrickým tahem (obr. 1.4). Nejčastěji je využíván pro určení lomové houževnatosti kovových materiálů. Faktor intenzity napětí je vypočítán podle vzorce:

$$K_{Ic} = YP_{\max} \sqrt{a}/BW, \quad (1.13)$$

Y – bezrozměrná funkce geometrie; P_{\max} – kritická zatěžovací síla; B – šířka tělesa; W – výška tělesa; a – délka zářezu.



Obr. 1.4: Schéma testu v excentrickém tahu

Funkci geometrie uvedli Brown – Srawley v roce 1966 a následně ji v roce 1967 upravili Hillemeier – Hilsdorf, kteří upravili rozsah platnosti vzorce na poměrnou délku zářezu a/W od 0,125 do 0,925:

$$Y(\alpha) = 29,6 - 185,5(\alpha) + 655,7(\alpha)^2 - 1017,0(\alpha)^3 + 638,0(\alpha)^4 \quad (1.14)$$

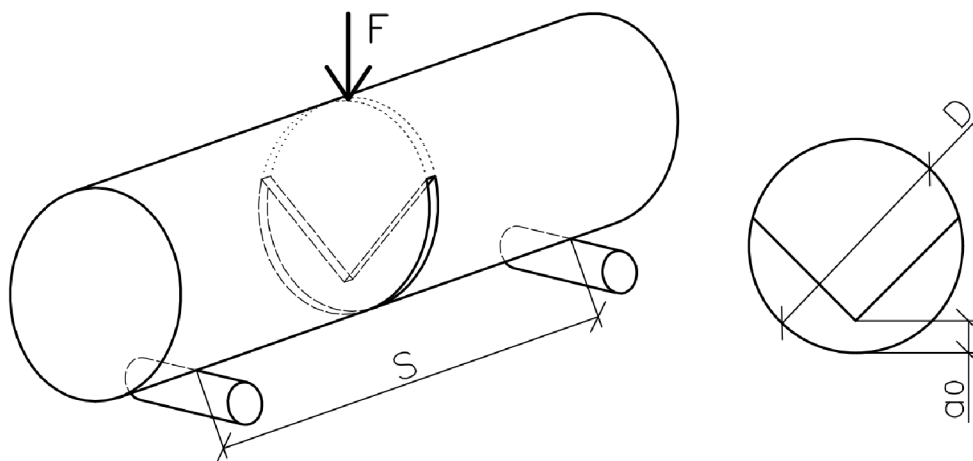
$\alpha = a/W$ – poměrná hloubka zářezu.

Geometrie, kterou se dále zabývám ve své diplomové práci, je válec se šípovým vrubem (obr. 1.5). Zároveň se jedná o nejčastěji používanou geometrii pro zkoušky horninových těles. Taková tělesa se získávají vývrtem ze zmíněných hornin nebo také betonových konstrukcí a jsou velmi vhodná, jelikož se vývrt nemusí dále více zpracovávat a po vytvoření šípového vrubu jsou tělesa připravena na testování. Jak uvádí Backers (2004), faktor intenzity napětí se potom vypočítá podle tohoto vzorce:

$$K_c = A_{\min} F_{\max} / D^{1.5}, \quad (1.15)$$

A_{\min} – bezrozměrná funkce geometrie; F_{\max} – kritická zatěžovací síla; D – průměr válce.

$$A_{\min} = [1,835 + 7,15a_0/D + 9,85(a_0/D)^2]S/D. \quad (1.16)$$

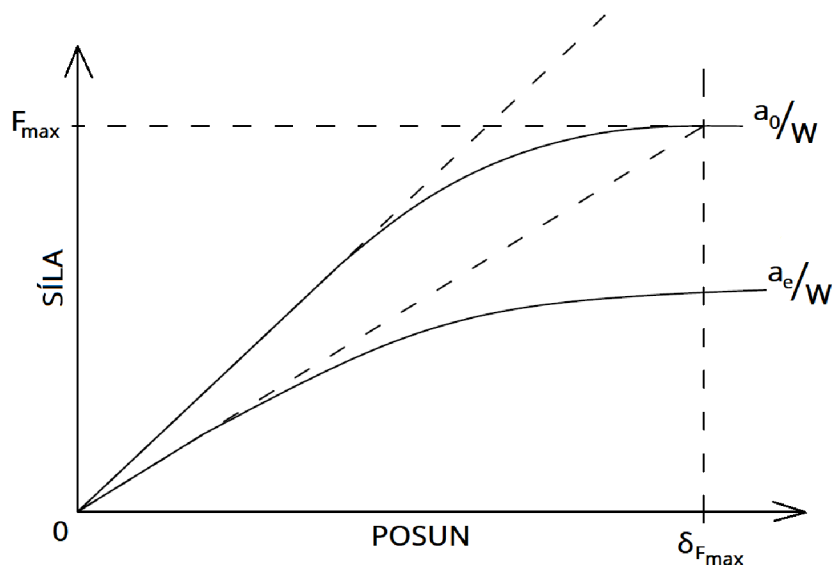


Obr. 1.5: Schéma testu válce se šípovým vrubem v tříbodovém ohybu

1.3 Model efektivní trhliny

Model efektivní trhliny se řadí mezi nelineární modely, ale využívá poznatky z lineární elastické lomové mechaniky. Jak uvádí Karihaloo (1995), z LELM víme, že k výpočtu lomové houževnatosti K_{Ic} potřebujeme znát délku zářezu a_0 , ta však není dobře známá z důvodu výskytu lomové procesní zóny. Proto zde, u materiálů s nelinearitou před vrcholem pracovního diagramu, nastupuje efektivní délka zářezu a_e , pomocí které se vypočítá efektivní lomová houževnatost K_{Ice} (efektivní hodnota faktoru intenzity napětí). Efektivní délka zářezu je takový zářez, při které

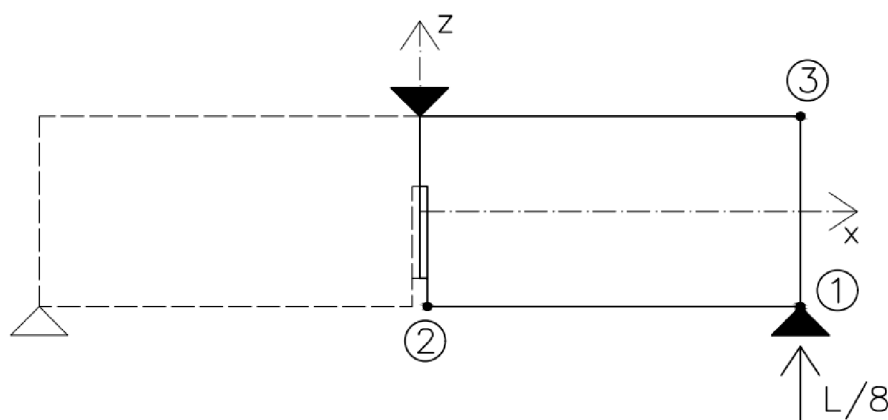
by měl trámec z dokonale elastického materiálu stejnou tuhost, jako reálný trámec se zářezem délky a_0 při stejném zatížení. Pro model efektivní trhliny se využívá kritická zatěžovací síla F_{\max} , zjištěná z vrcholu pracovního diagramu a odpovídající přetvoření $\delta_{F_{\max}}$. Při proložení přímkou počátkem soustavy souřadnic a právě tímto bodem dostáváme sečnový modul pružnosti, který počátečnímu modulu pružnosti stejného trámce, ovšem s efektivním zářezem délky a_e . Kritické šíření trhliny tudíž nastane až když zářez dosáhne hodnoty a_e a z toho vyplývá nárůst lomové houževnatosti oproti lineárnímu výpočtu.



Obr. 1.6: Ilustrace počáteční větve diagramu síla–posun trámce s počáteční trhlinou délky a_0 a s efektivní trhlinou délky a_e , podle Karihaloo (1995)

2 MKP MODEL

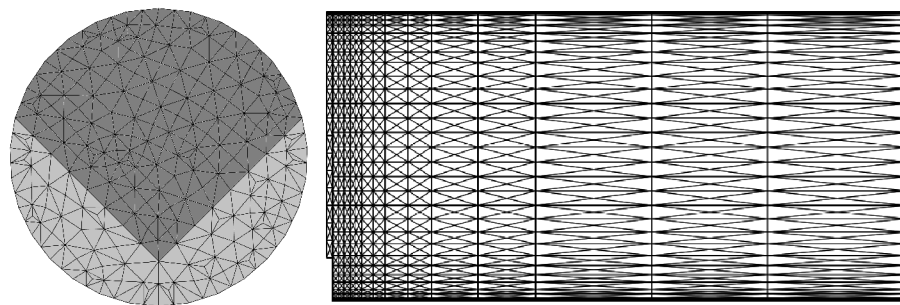
Pro výpočet byl použit program s názvem *chevroncylinder*, který vytvořil vědecký pracovník na Ústavu stavební mechaniky při Fakultě stavební VUT v Brně, doc. Ing. Petr Frantík, Ph.D. Program je napsán v jazyce Java, nedisponuje žádným grafickým prostředím, takže se spouští přes příkazový řádek. Program počítá zatěžovací zkoušku třibodovým ohybem. Zkušební těleso je válec se šípovým vrubem. Program pro zjednodušení vytvoří dle zadaných parametrů polovinu válce, u kterého jsou v ose symetrie odebrány vazby, aby deformace odpovídala třibodovému ohybu celého válce. Model je zatížený posunem o velikosti $L/8$ v krajní podpoře, kde L je délka válce. (obr. 2.1)



Obr. 2.1: Schéma modelu

2.1 Tvorba sítě konečných prvků

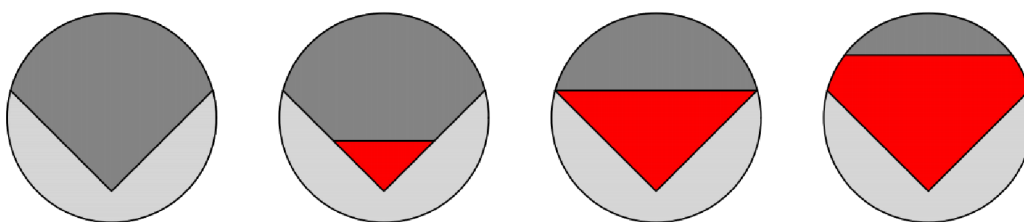
Síť konečných prvků viz obr. 2.2 je tvořena triangulací čelní plochy poloviny válcového tělesa na straně zářezu a dále tažením této sítě podél strany válce.



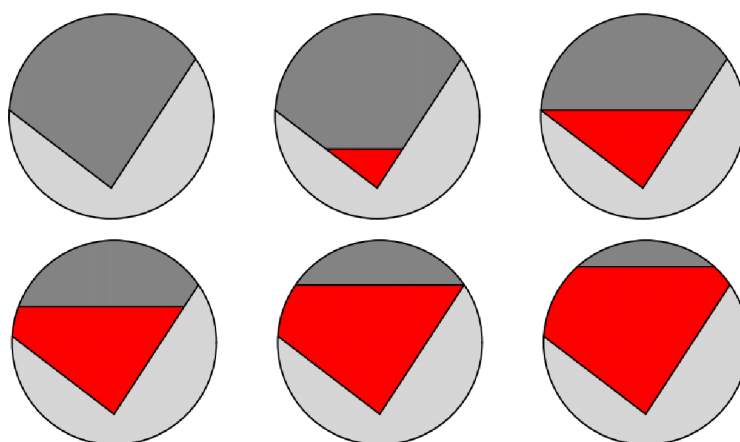
Obr. 2.2: Schéma sítě konečných prvků

Zde nastává geometrický problém vzhledem k hloubce trhliny. Bylo nutno vyřešit správné vytvoření sítě ve všech případech které mohou nastat (viz obr. 2.3 a 2.4):

- vrchol trhliny se nevyskytuje, koncentrátorem napětí je iniciační vrub,
- vrchol trhliny se nachází mezi stranami vrubu,
- vrchol trhliny se nachází na průsečících hrany vrubu a obvodového kruhu válce,
- vrchol trhliny se nachází mezi průsečíky hran vrubu a obvodového kruhu válce (pouze u nesymetrického vrubu),
- vrchol trhliny se nachází v kruhové úseči nad vrubem.



Obr. 2.3: Poloha vrcholu trhliny – symetrický vrub



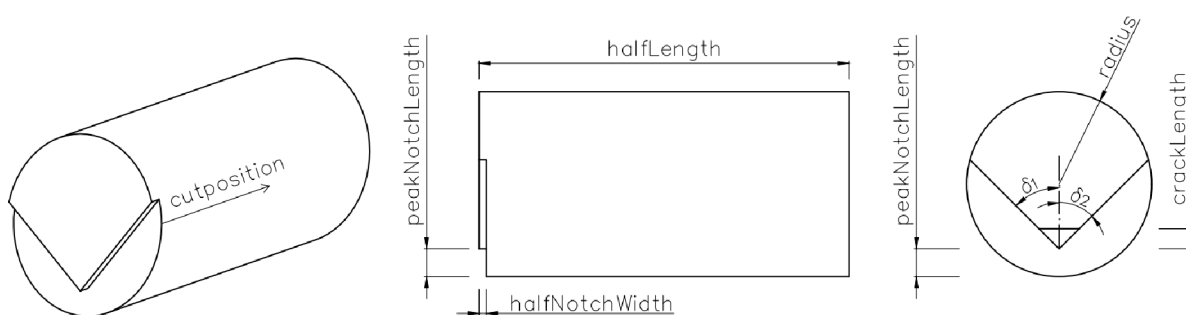
Obr. 2.4: Poloha vrcholu trhliny – nesymetrický vrub

2.2 Vstupní parametry

Do programu se zadávají hodnoty vstupních parametrů přes textový soubor. Nastavit se dají tyto parametry:

- elasticityModulus – modul pružnosti,
- contractionCoefficient – Poissonův součinitel (součinitel příčné kontrakce),

- halfLength – polovina délky zkušební tělesa (válce),
- radius – průměr zkušební tělesa,
- peakNotchLength – hloubka iniciačního zářezu (měřená od vrcholu vrubu po kraj válce),
- halfNotchWidth – polovina šířky iniciačního zářezu,
- notchAngles – úhly stran vrubu měřené od osy z ,
- crackLength – délka trhliny,
- segmentCount – počet stran mnohostranu nahrazujícího kruh,
- cutPositionCoefficients – poměr rozdělení sítě konečných prvků po délce zkušební tělesa,
- meshSize – velikost konečného prvku.



Obr. 2.5: Vybrané vstupní parametry

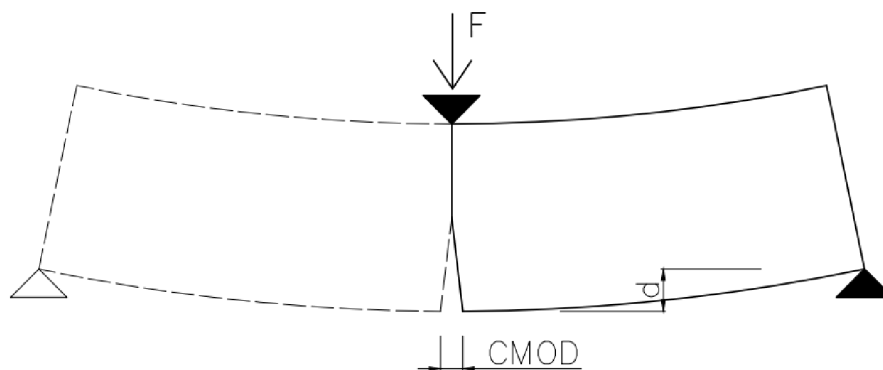
2.3 Výstupní parametry

Výstupních souborů z programu je hned několik. Nejdůležitější je textový soubor, do kterého se ukládají výsledná data bodů 1, 2 a 3 z obr. 2.1. Jedná se o tyto hodnoty:

- x_0, y_0, z_0 – poloha bodu,
- F_x, F_y, F_z – složky reakce na příslušný bod,
- u, v, w – posunutí ve směru x, y, z .

Dále se jedná o textové soubory se stejnými údaji o všech bodech sítě konečných prvků a to před i po zatížení zkušební tělesa. Také se vytvoří trojrozměrné grafické soubory ve formátu *DXF* (Drawing Exchange Format), které tuto síť konečných prvků zobrazují.

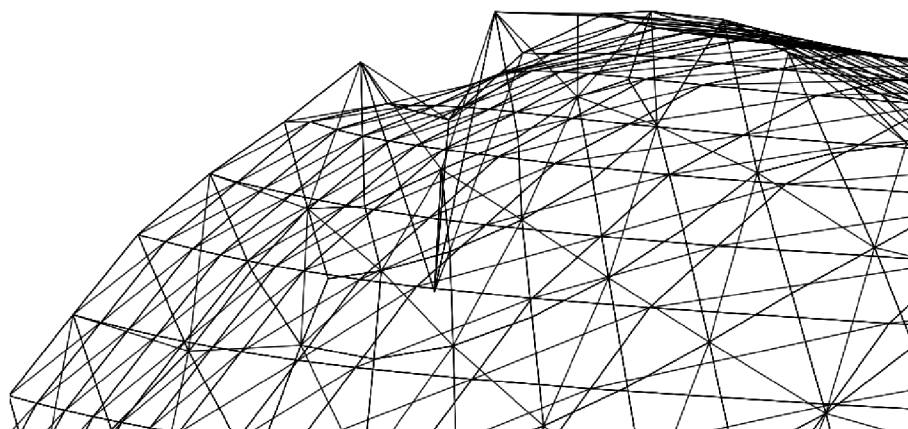
Z těchto hodnot se potom vypočítají hodnoty průhybu d , otevření ústí trhliny $CMOD$, hodnota působící síly F .



Obr. 2.6: Výstupní parametry

Pozn.: model je zatížen bodově, tudíž v oblasti podpor vznikají singularity. Průhyb d je proto vypočítán za pomoci rozdílu posunutí bodů 3 a 2 (obr. 2.7), které jsou dostatečně daleko od těchto singularit a nejsou jimi ovlivněny.

$$d = w_3 - w_2 \quad (2.1)$$

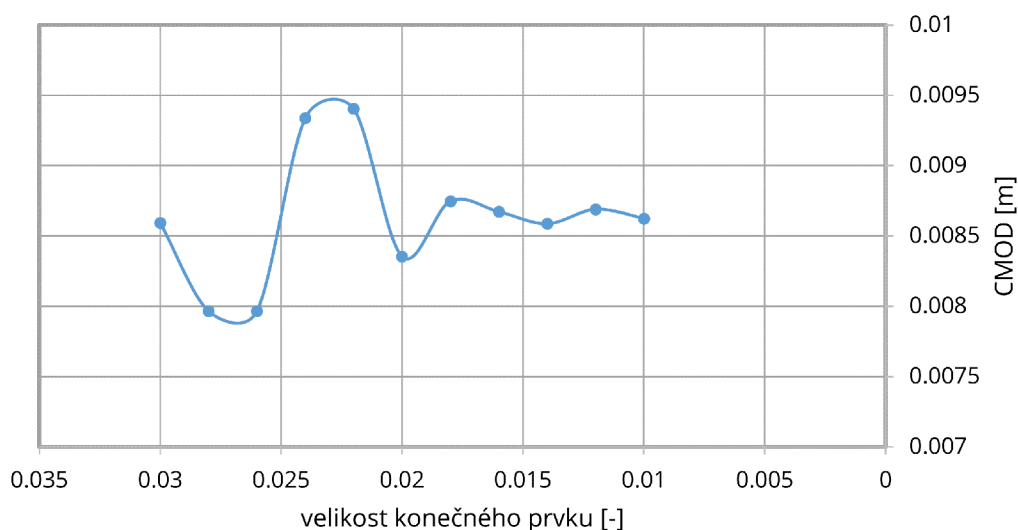


Obr. 2.7: Detail singularity

3 TESTOVÁNÍ MKP PROGRAMU

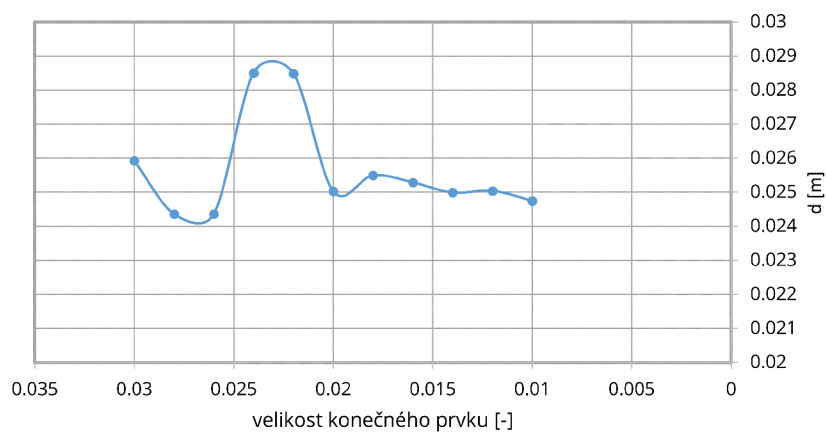
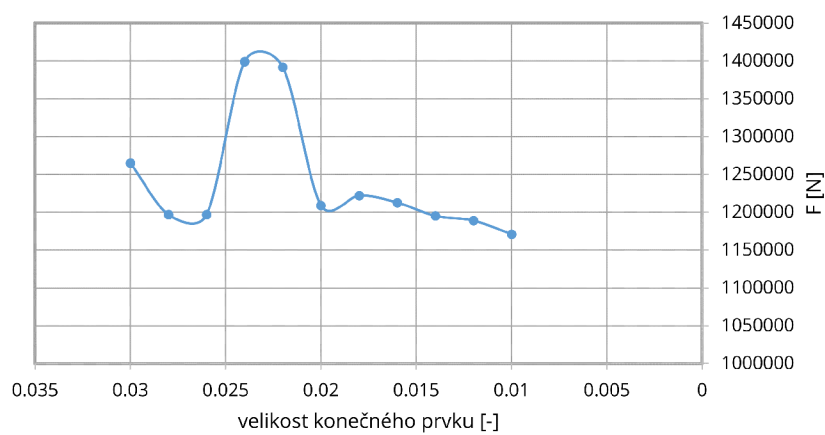
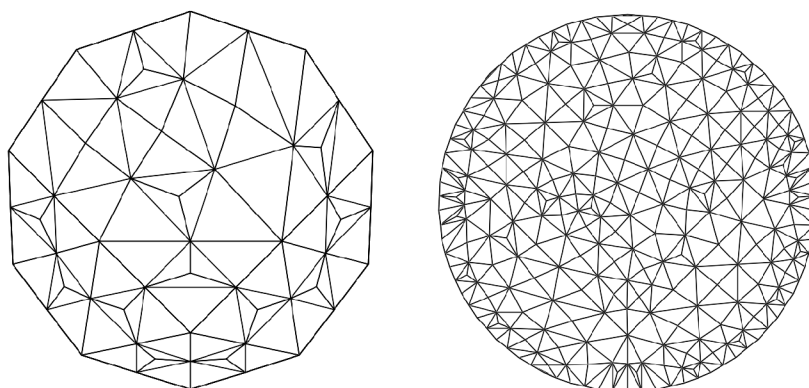
3.1 Test konvergence

Konvergence hodnot výsledných parametrů byla otestována výpočtem jednoho zkušební tělesa s měnící se velikostí sítě konečných prvků. Jednalo se o válec s průměrem $d=100$ mm o vzdálenosti podpor $S=400$ mm, hodnota a_0 byla nastavena na 15 % průměru, čili 15 mm a šípový vrub byl nastaven jako symetrický s pravým úhlem u spodního vrcholu. Bylo počítáno bez počáteční trhliny. Rozsah velikostí KP byl volen od 0,03 do 0,01 m, spolu s velikostí KP byl volen i počet stran mnohoúhelníku, který nahrazuje kruhovou podstavu válce, vždy tak, aby bylo dosaženo co nejvhodnější sítě KP. Byly vykresleny grafy (3.1, 3.2, 3.3), na kterých můžeme vidět změnu hodnot otevření ústí trhliny $CMOD$, průhybu d a zatěžovací síly F vzhledem ke zjemňování sítě KP.



Obr. 3.1: Závislost velikosti KP vzhledem k otevření ústí trhliny $CMOD$

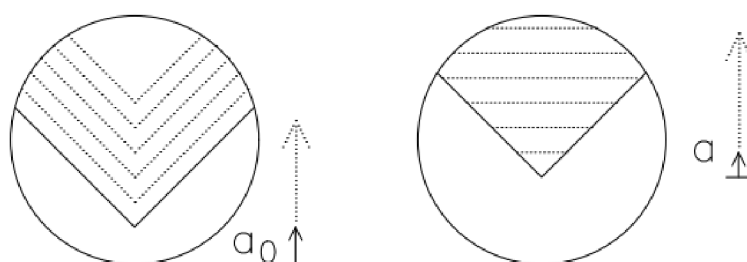
Maximální hodnota (0,03 m) byla zvolena s ohledem na průměr zkušební tělesa, větší hodnoty by nebyly schopny pokrýt geometrii válce s vrubem. Minimální hodnotu (0,01 m) omezoval výkon používaného výpočetního zařízení (3.4). Na přiložených grafech můžeme vidět, že nejlépe konvergovala hodnota $CMOD$ (3.1).

Obr. 3.2: Závislost velikosti KP vzhledem k průhybu d Obr. 3.3: Závislost velikosti KP vzhledem k zatěžovací síle F 

Obr. 3.4: Ilustrace sítě KP pro největší a nejmenší volený maximální rozměr KP

3.2 Varianty hodnocených lomových zkoušek

V rámci testování, byly vypočítány 3 varianty průměrů zkušebních těles – 50, 75 a 100 mm (obr. 3.6). Všechna tělesa měla vzdálenost podpor nastavenou na 400 mm, modul pružnosti byl zvolen $E = 20$ GPa s Poissonovým součinitelem $\nu = 0,2$ [-]. U těchto těles se měnila velikost šípového vrubu, hodnoty a_0 nabývaly 10 až 80 % velikosti průměru válce se skokem po 5 % (obr. 3.5). Samotné lomové zkoušky jednotlivých těles byly simulovány pomocí zvětšování délky trhliny – odřezáváním ligamentu z vrubu po 5 mm (obr. 3.5). Ze všech těchto stavů byly zjištěny parametry průhybu d , otevření ústí trhliny $CMOD$ a zatěžovací síly F .

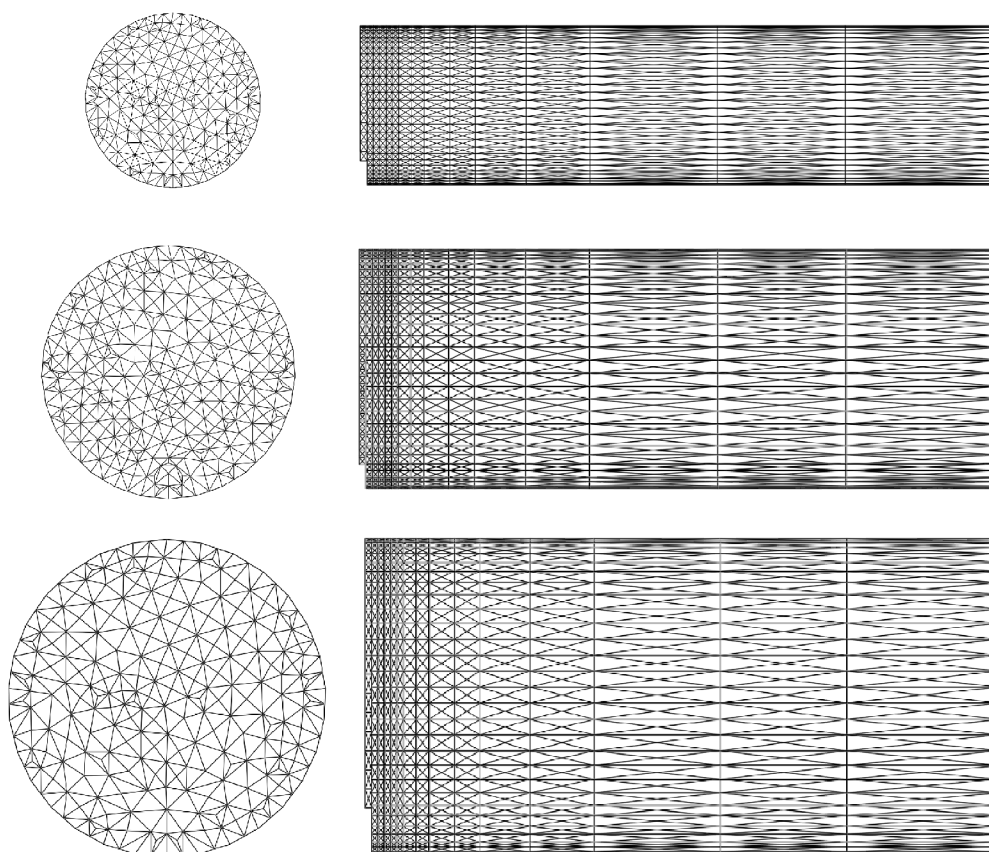


Obr. 3.5: Schéma měnící se hloubky zářezu a_0 a délky trhliny a

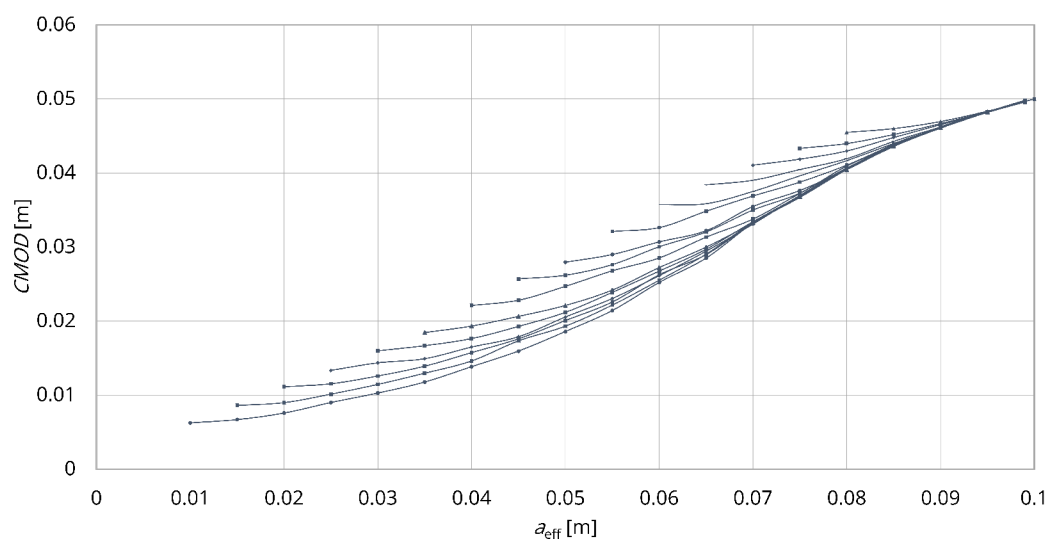
Z těchto hodnot byly vypočítány hodnoty efektivní délky trhliny a_{eff} a hodnoty tuhostí modelu vzhledem k průhybu k_d a otevření ústí trhliny k_{CMOD} .

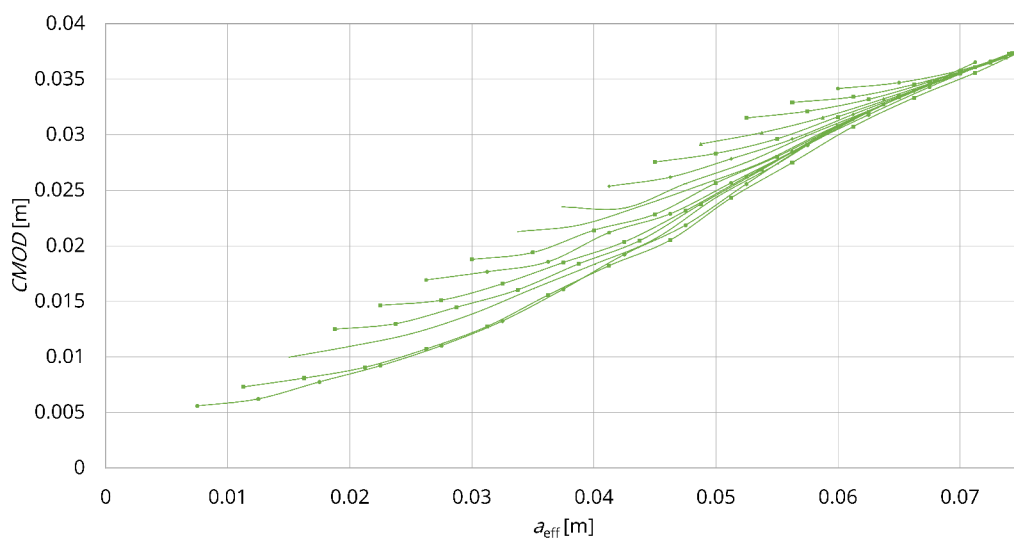
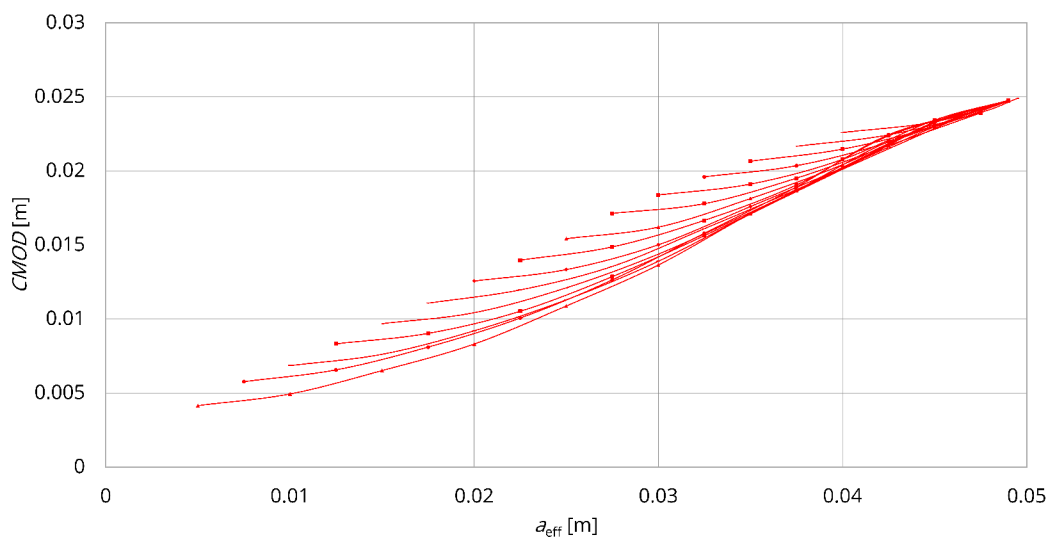
$$\begin{aligned} a_{eff} &= a_0 + a, \\ k_d &= F/d, \\ k_{CMOD} &= F/CMOD. \end{aligned} \tag{3.1}$$

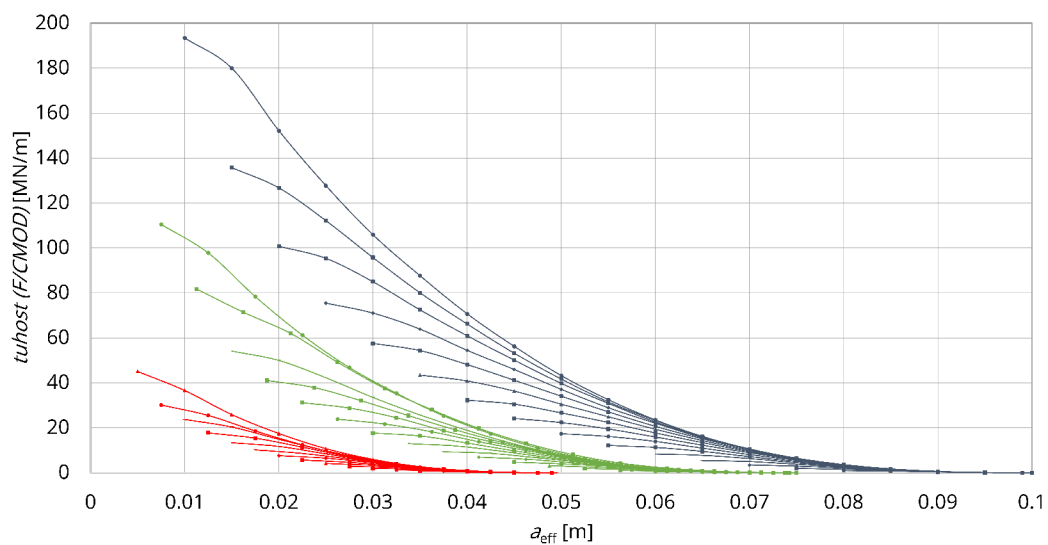
Následně byly vykresleny grafy závislostí a_{eff} na $CMOD$ (obr. 3.7, 3.8, 3.9) a k_{CMOD} (obr. 3.10). Lze na nich názorně vidět rostoucí $CMOD$ a klesající tuhost k_{CMOD} vzhledem k rostoucí trhlíně. Každá křivka v grafu značí těleso s různými počátečními velikostmi šípového vrubu (různá hodnota a_0).



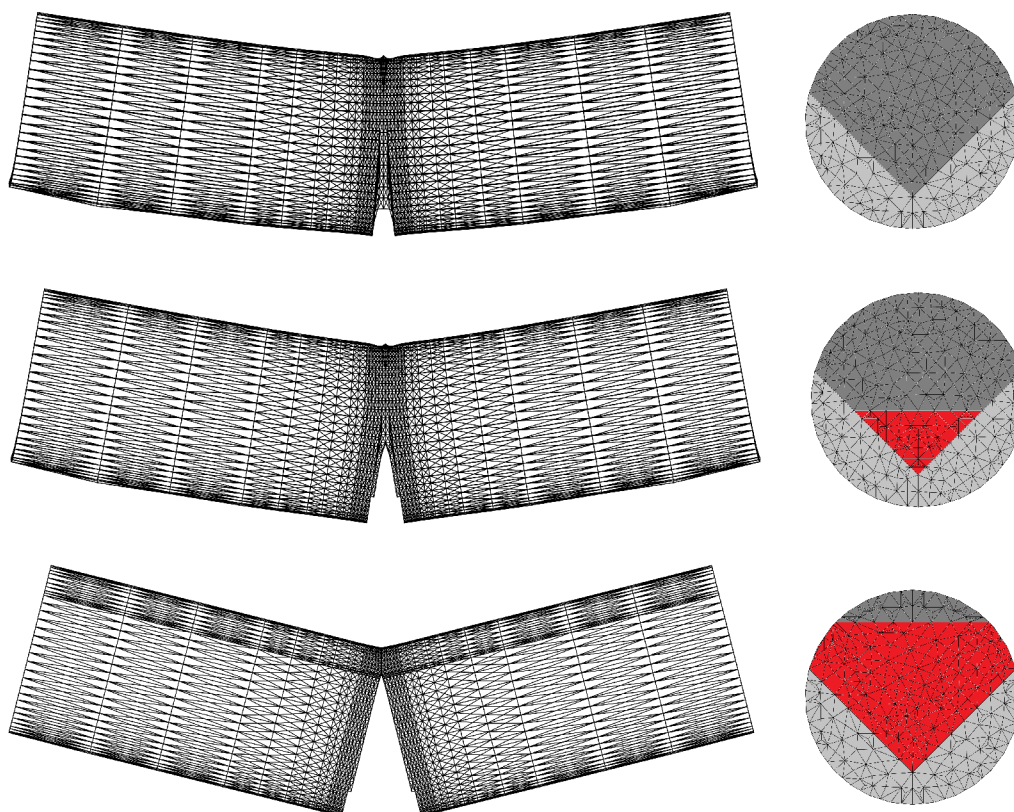
Obr. 3.6: Detail sítě KP pro průměry těles 50, 75 a 100 mm

Obr. 3.7: Závislost $CMOD$ na měnící se velikosti a_{eff} pro tělesa s průměrem 100 mm

Obr. 3.8: Závislost $CMOD$ na měnící se velikosti a_{eff} pro tělesa s průměrem 75 mmObr. 3.9: Závislost $CMOD$ na měnící se velikosti a_{eff} pro tělesa s průměrem 50 mm



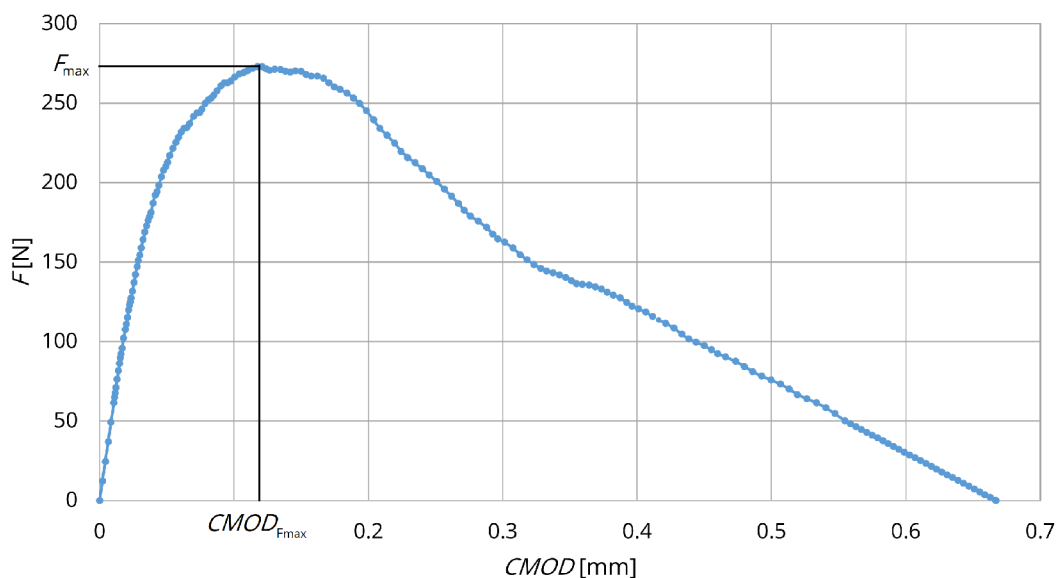
Obr. 3.10: Závislost k_{CMOD} na měnící se velikosti a_{eff} pro tělesa s průměrem 100 (modře)/75 (zeleně)/50 mm (červeně)



Obr. 3.11: Ukázka modelu pro měnící se velikost trhliny (červeně)

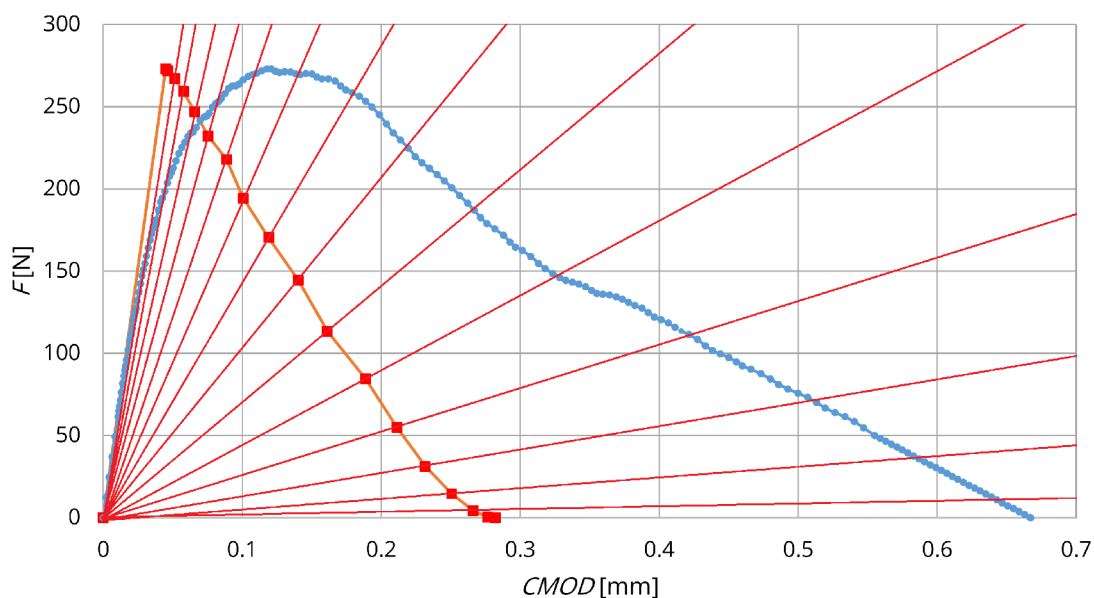
4 APLIKACE MODELU EFEKTIVNÍ TRHLINY NA VÁLEC SE ŠÍPOVÝM ZÁŘEZEM

Jak už bylo uvedeno v kapitole 2 – MKP model, hlavními výstupními hodnotami z modelu jsou průhyb d , otevření ústí trhliny $CMOD$, hodnota působící síly F . Z těchto hodnot byly následně vypočítány hodnoty tuhostí modelu vzhledem k průhybu k_d a otevření ústí trhliny k_{CMOD} . Všechny tyto hodnoty byly získány pro postupně se šířící trhlinu pomocí odřezávání ligamentu. Naopak z laboratoře máme naměřené rozměry jednotlivých těles a také pracovní diagramy, které již byly upraveny a zpracovány. Rozměry vstupovaly jako zadání do programu k výpočtu lomových testů.



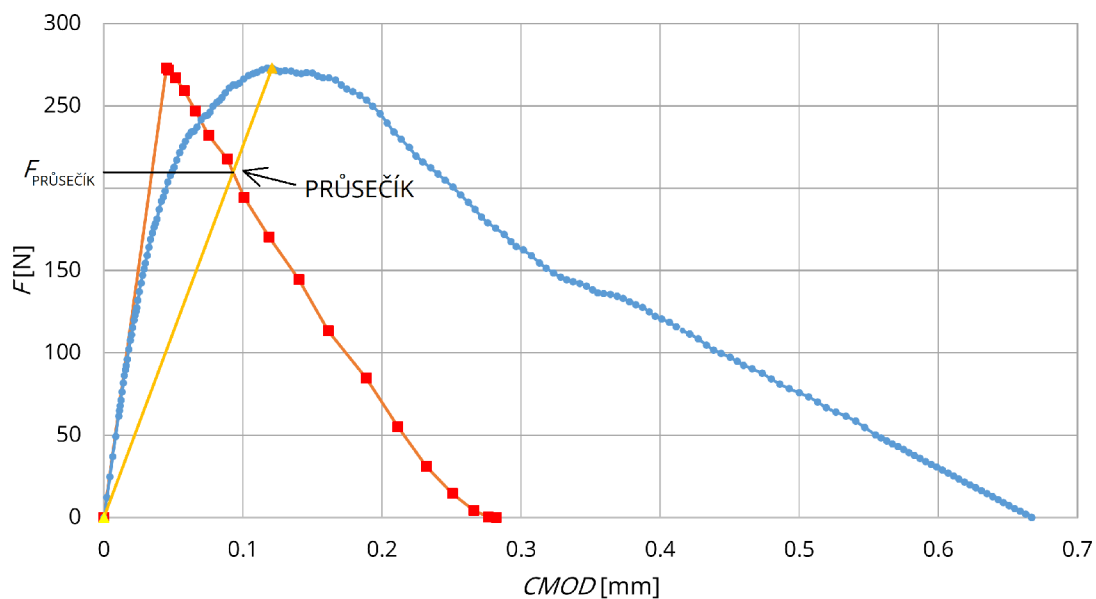
Obr. 4.1: Vybraný upravený pracovní diagram $F - CMOD$

Z tohoto lomového testu můžeme zjistit maximální zatěžovací sílu F_{max} a odpovídající posun $CMOD_{Fmax}$ (d_{Fmax}). Jelikož program počítá s fiktivní pevně danou deformací, musely být vypočítané síly upraveny pomocí hodnoty maximální síly F_{max} z pracovního diagramu. To znamená, že maximální vypočítaná síla (síla, při které se v modelu nenacházela žádná trhlina) byla nahrazena silou F_{max} z pracovního diagramu a v poměru těchto sil byly upraveny i ostatní síly, vypočítané při rostoucí trhlíně. Poté byly pomocí tuhostí dopočítány reálné hodnoty posunu $CMOD_{Fmax}$ (d_{Fmax}), oproti vypočítaným fiktivním vyvolaných fiktivní silou. Takto nám vznikne „vějíř“ přímek, které naznačují, jak klesá tuhost vzhledem k šířící se trhlíně (obr. 4.2).



Obr. 4.2: Klesající tuhost vzhledem k rostoucí trhlině

Poté se do tohoto grafu zanesou spojnice počátku souřadnic s bodem o souřadnicích $[CMOD_{F_{max}}(d_{F_{max}}), F_{max}]$. Takto dostaneme podklad pro sečnový modul pružnosti válcového trámce, který odpovídá počátečnímu modulu pružnosti trámce s efektivní délkou trhliny a_e . Průsečík této přímky se spojnicí bodů naznačujících klesající tuhost nám dá hodnotu síly $F_{PRŮSEČIK}$, pomocí které můžeme zjistit hodnotu efektivní délky trhliny a_e . Pro zjištění přesné délky trhliny byla použita lineární interpolace mezi dvěmi známými vypočítanými hodnotami – viz obr. 4.3.



Obr. 4.3: Ilustrace nalezení a_e pomocí průsečíku přímek

Hodnota efektivní délky trhliny a_e se použije do vzorce pro výpočet lomové houževnatosti, označované dále jako efektivní lomová houževnatost K_{Ice} .

$$K_{\text{Ice}} = A_{\text{min,e}} F_{\text{max}} / D^{1,5}, \quad (4.1)$$

$A_{\text{min,e}}$ – bezrozměrná funkce geometrie; F_{max} – kritická zatěžovací síla; D – průměr válce.

$$A_{\text{min,e}} = [1, 835 + 7, 15a_e/D + 9, 85(a_e/D)^2] S/D. \quad (4.2)$$

5 VYUŽITÍ MODELU K ANALÝZE ODEZVY REÁLNÝCH TĚLES

Tento model byl aplikován na třech pískovcových, třech betonových tělesech z nosné konstrukce stávající budovy a sedmi betonových tělesech z panelů požárního experimentu. Rozměry z tabulek 5.1, 5.2, 5.3 a 5.4 byly použity jako vstupní parametry do programu, výstupní hodnoty byly použity pro výpočet efektivní délky trhliny a_e a následně efektivní hodnoty lomové houževnatosti K_{Ic} podle postupu z kapitoly 4 – Použití modelu efektivní trhliny.

5.1 Pískovcová tělesa

Zvolená pískovcová tělesa byla testována v laboratoři Ústavu geoniky AV ČR v Ostravě-Porubě pod vedením Ing. Leony Vavro, Ph.D. Data byla následně zpracována v bakalářské práci Kubeš (2016). Lomové parametry v následující tabulce byly vypočítány pomocí LELM s využitím neupravené délky zářezu a_0 .

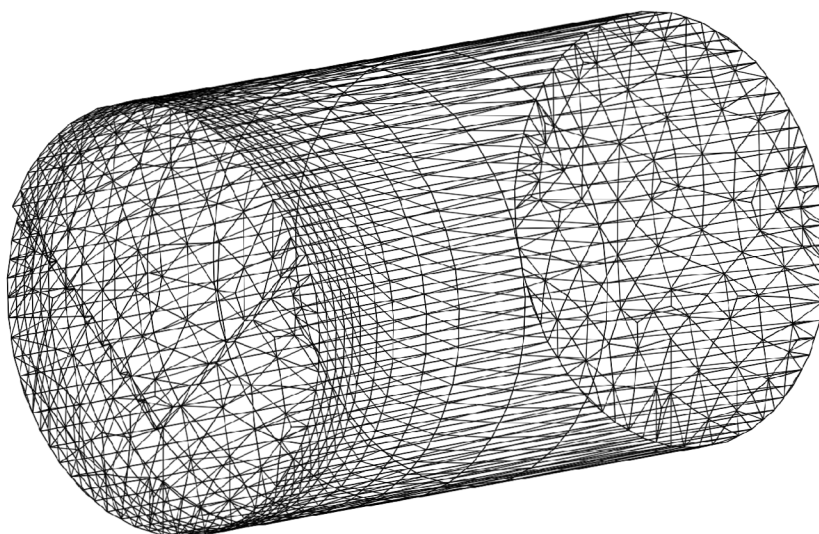
Symbol	Jednotka	Vzorek			Průměr	Výběr. směr. odch.	Var. koef. [%]
		ja22	ja23	ja26			
D	mm	48.43	48.43	48.52	48.46	0.05	0.11
h_0	mm	12.05	12.05	12.20	12.10	0.09	0.7
a_0	mm	7.24	7.24	7.33	7.27	0.05	0.7
a_0/D	1	0.15	0.15	0.15	0.15	0.00	0.6
L	mm	168.00	172.00	194.00	178.00	14.00	7.9
S	mm	161.20	161.20	161.50	161.30	0.17	0.1
A_{min}	1	10.40	10.40	10.45	10.42	0.03	0.3
g_0	1	21.08	21.08	21.12	21.09	0.02	0.1
A_{lig}	mm ²	1175.85	1175.85	1169.98	1173.89	3.39	0.3
F_{max}	N	272.91	401.17	231.74	301.94	88.37	29.3
K_{Ic}	MPa · m ^{1/2}	0.27	0.39	0.23	0.29	0.09	29.2

Tab. 5.1: Tabulka rozměrů a vybraných parametrů pro pískovcová tělesa Javorka (Kubeš (2016))



Obr. 5.1: Detail zkoušky pískovcového tělesa v lisu (Kubeš (2016))

Každé těleso bylo počítáno samostatně se svými přesnými rozměry z tabulky 5.1. Síť konečných prvků byla zvolena s ohledem na rozměry zkušebních těles. Maximální velikost KP byla nastavena na 0,007 m a jako náhrada za kruh byl zvolen mnohostěn o 35 stranách (obr. 5.2).



Obr. 5.2: Detail modelu pro výpočet pískovcových těles

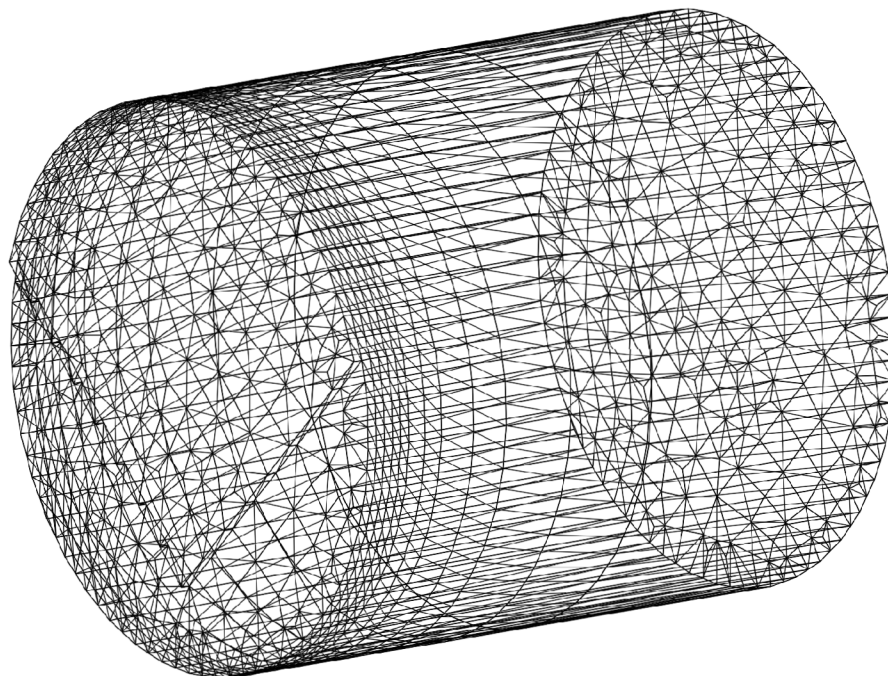
5.2 Betonová tělesa z nosné konstrukce stávající budovy

Jako betonová tělesa byla zvolena tělesa z vývrtů konstrukčního betonu z nádražní budovy v Ostravě-Vítkovicích, která byla postavena roku 1970. Tělesa byla testována na Vysokém učení technickém v Brně. Lomové parametry byly převzaty z článku Šimonová, H. et al. (2017a). Lomové parametry v následující tabulce byly vypočítány pomocí LELM s využitím neupravené délky zářezu a_0 .

Symbol	Jednotka	Vzorek			Průměr	Výběr. směr. odch.	Var. koef. [%]
		v7	v15	v18			
D	mm	74.09	75.05	74.68	74.61	0.48	0.7
h_0	mm	18.54	19.30	19.12	18.99	0.40	2.1
a_0	mm	11.28	11.77	12.55	11.87	0.64	5.4
L	mm	215.00	224.00	194.00	211.00	15.39	7.3
A_{lig}	mm ²	2742.99	2751.28	2762.72	2752.33	9.91	0.4
F_{max}	N	2863.206	2055.23	2863.206	2593.88	466.49	18.0
K_{Ic}	MPa · m ^{1/2}	1.15	0.73	1.06	0.98	0.22	22.6

Tab. 5.2: Tabulka rozměrů a vybraných parametrů pro betonová tělesa z nádražní budovy

Každé těleso bylo počítáno s přesnými rozměry z tabulky 5.2. Síť konečných prvků byla zvolena s ohledem na rozměry zkušebních těles. Tato zkušební tělesa byla větší, než tělesa pískovcová, přesto byla maximální velikost KP ponechána na hodnotě 0,007 m, ale kvůli většímu průměru byl použit mnohostěn o 40 stranách (obr. 5.3).



Obr. 5.3: Detail modelu pro výpočet betonových těles z nádražní budovy

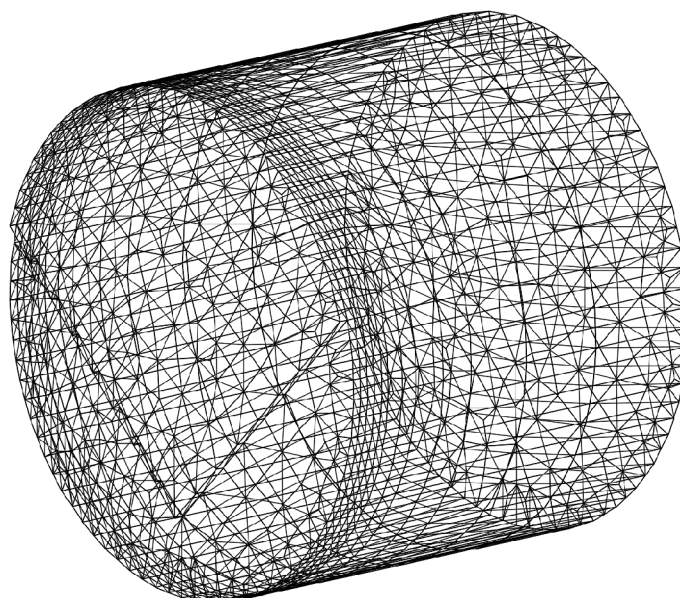
5.3 Betonová tělesa z panelů požárního testu

Jedná se o sadu válcových vzorků, které byly získány jádrovými vývrty z betonových panelů požárního experimentu. Požár při svém působení na beton zahrnuje širokou škálu fyzikálních a chemických procesů, které vedou ke změnám struktury kompozitů a tím ovlivňují mechanické vlastnosti betonu. Jak uvádí Rozsypalová et al. (2017) či Šimonová, H. et al. (2017b), bylo vyrobeno 7 panelů o jmenovitých rozměrech $2300 \times 1300 \times 150$ mm. Panel s označením P4 byl referenční a nebyl zatížen požárem vůbec. Zbylé panely P1, P2, P3, a P7 byly zatěžovány ze spodní strany (strana přímo vystavená požáru) maximálními teplotami 550, 600, 800 a 1000 °C. Experimenty probíhaly pomocí speciální pece pro zkoušky požáru u stavebních materiálů v centru AdMaS (5.4). Z každého panelu byla následně vyvrtána tři (u panelu P4 pět) tělesa o jmenovitém průměru 75 mm, byl do nich proveden šípový vrub a byla otestována pomocí třibodového ohybu. V této diplomové práci byla více zpracována čtyři tělesa, která byla nezatížena požárem a tři tělesa, která byla zatížena maximální teplotou 1000 °C. Lomové parametry v následující tabulce byly vypočítány pomocí LELM s využitím neupravené délky zářezu a_0 .



Obr. 5.4: Pec pro zkoušky požáru stavebních materiálů v centru AdMaS (Rozsypalová et al. (2017), Šimonová, H. et al. (2017b))

Tělesa byla počítána s přesnými rozměry z tabulky 5.3. Sít konečných prvků byla opět zvolena s ohledem na rozměry zkušebních těles. Tato zkušební tělesa měla podobný průměr, jako tělesa z nosné konstrukce nádražní budovy, proto zůstaly hodnoty maximální velikosti KP i počtu stran mnohostěnu zachovány. Muselo být změněno podélné dělení výšky válce, kvůli kratším zkušebním tělesům (obr. 5.5).



Obr. 5.5: Detail modelu pro výpočet betonových těles z panelů požárního experimentu

Sym.	Jedn.	Vzorek				Průměr	Výběr. směr. odch.	Var. koef. [%]
		P4 D23E23	P4 B45C45	P4 C45D45	P4 D62_X1			
D	mm	74.09	74.05	74.07	74.09	74.08	0.02	0.0
L	mm	153.94	147.13	157.10	155.31	153.37	4.36	2.8
a_0	mm	11.79	11.46	11.64	11.60	11.62	0.14	1.2
S	mm	127.00	127.00	127.00	127.00	127.00	0.00	0.0
F_{max}	N	3974.30	4732.00	4461.00	5077.00	4561.08	465.37	10.2
a_0/d	-	0.16	0.15	0.16	0.16	0.16	0.00	1.2
A_{min}	-	5.52	5.45	5.49	5.49	5.49	0.03	0.6
K_{Ic}	MPa $m^{1/2}$	1.09	1.28	1.21	1.38	1.24	0.12	9.8
E	GPa	10.57	7.96	27.30	21.75	16.89	9.16	54.2

Tab. 5.3: Tabulka rozměrů a vybraných parametrů pro betonová tělesa nezatížená požárem

Symbol	Jednotka	Vzorek			Průměr	Výběr. směr. odch.	Var. koef. [%]
		P7 4FEE	P7 4BC	P7 4EF			
D	mm	74.11	74.06	73.99	74.05	0.06	0.0
L	mm	161.37	155.77	160.79	159.31	3.08	1.9
a_0	mm	11.89	11.33	11.36	11.53	0.32	2.7
S	mm	127.00	127.00	127.00	127.00	0.00	0.0
F_{max}	N	3117.00	2712.00	2914.00	2914.33	202.50	7.0
a_0/d	-	0.16	0.15	0.15	0.16	0.00	2.7
A_{min}	-	5.54	5.42	5.43	5.47	0.07	1.3
K_{Ic}	MPa · m $^{1/2}$	0.86	0.73	0.79	0.79	0.06	8.1
E	GPa	10.59	7.94	31.18	16.57	12.72	76.8

Tab. 5.4: Tabulka rozměrů a vybraných parametrů pro betonová tělesa zatížená maximální teplotou 1000 °C

6 VÝSLEDKY

Výsledkem výpočtů podle modelu efektivní trhliny jsou hodnoty efektivních délek trhlín a_e a také efektivních lomových houževnatostí K_{lce} z jednotlivých aplikací modelu na lomové zkoušky těles. V následujících tabulkách můžeme vidět porovnání hodnot trhlín a lomových houževnatostí vzhledem k výpočtům pomocí lineární elastické lomové mechaniky. Také bylo provedeno základní statistické vyhodnocení pomocí aritmetických průměrů těchto hodnot, jejich výběrových směrodatných odchylek a variačních koeficientů:

$$x_p = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n}, \quad (6.1)$$

$$s_x = \sqrt{\frac{1}{n-1} \left((x_1 - x_p)^2 + (x_2 - x_p)^2 + \dots + (x_n - x_p)^2 \right)}, \quad (6.2)$$

$$v_k = \frac{s_x}{x_p} \cdot 100, \quad (6.3)$$

x_p – aritmetický průměr; s_x – výběrová směrodatná odchylka; v_k – variační koeficient [%]; x_1 až x_n – hodnoty veličin z jednotlivých výpočtů.

Dále se v tabulkách nachází poměr efektivních parametrů ku základním lineárním parametrům a_e/a_0 a K_{lce}/K_{lcr} , na kterých je názorně vidět nárůst těchto hodnot.

6.1 Pískovcová tělesa

	a_0 [mm]	a_e [mm]	a_e/a_0 [%]	K_{Ic} [MPa/m ^{1/2}]	K_{Ice} [MPa/m ^{1/2}]	K_{Ice}/K_{Ic} [%]
ja22	7.24	23.10	319.0	0.270	0.638	236.4
ja23	7.24	22.56	311.6	0.390	0.915	234.5
ja26	7.33	25.84	352.6	0.230	0.610	265.1
průměr	7.270	23.833	327.7	0.297	0.721	245.3
sm.odch.	0.052	1.762	21.8	0.083	0.168	17.1
var.koef. [%]	0.7	7.4	6.7	28.1	23.4	7.0

Tab. 6.1: Tabulka porovnání lineárních a efektivních lomových parametrů pro pískovcová tělesa Javorka

6.2 Betonová tělesa z nosné konstrukce stávající budovy

	a_0 [mm]	a_e [mm]	a_e/a_0 [%]	K_{Ic} [MPa/m ^{1/2}]	K_{Ice} [MPa/m ^{1/2}]	K_{Ice}/K_{Ic} [%]
v7	11.28	22.90	203.0	1.150	1.624	141.2
v15	11.77	19.16	162.8	0.730	0.974	133.5
v18	12.55	21.13	168.4	1.060	1.484	140.0
průměr	11.867	21.063	178.1	0.980	1.361	138.2
sm.odch.	0.640	1.867	21.8	0.221	0.342	4.2
var.koef. [%]	5.4	8.9	12.2	22.6	25.1	3.0

Tab. 6.2: Tabulka porovnání lineárních a efektivních lomových parametrů pro betonová tělesa z nádražní budovy

6.3 Betonová tělesa z panelů požárního experimentu

	a_0 [mm]	a_e [mm]	a_e/a_0 [%]	K_{Ic} [MPa/m ^{1/2}]	K_{Ice} [MPa/m ^{1/2}]	K_{Ice}/K_{Ic} [%]
P4_D23E23	11.79	40.08	340.0	1.088	2.900	266.5
P4_B45C45	11.46	16.89	147.4	1.280	1.601	125.1
P4_C45D45	11.64	36.77	315.9	1.215	2.961	243.8
P4_D62_X1	11.60	18.95	163.4	1.215	1.859	153.0
průměr	11.623	28.173	241.7	1.199	2.330	197.1
sm.odch.	0.136	11.945	100.3	0.080	0.702	68.6
var.koef. [%]	1.2	42.4	41.5	6.7	30.1	34.8
P7_4BC	11.33	26.20	231.3	0.729	1.292	177.2
P7_4EF	11.36	17.98	158.3	0.787	1.029	130.8
P7_4FEE	11.89	21.68	182.3	0.857	1.264	147.5
průměr	11.527	21.954	190.6	0.791	1.195	151.9
sm.odch.	0.315	4.119	37.2	0.064	0.144	23.5
var.koef. [%]	2.733	18.763	19.5	8.085	12.083	15.5

Tab. 6.3: Tabulka porovnání lineárních a efektivních lomových parametrů pro betonová tělesa z panelů požárního experimentu

7 ZÁVĚR

V této diplomové práci jsou popsány základy lineární elastické lomové mechaniky. Z nelineárních principů je uveden model efektivní trhliny a také jeho detailní postup aplikace na válcová tělesa se šípovým vrubem. To bylo umožněno užitím programu *chevroncylinder*, který je v práci také popsán, nalezneme zde výpis všech jeho funkcí a použití. Nejprve byl program otestován pomocí výpočtů mnoha referenčních těles. Následně pomocí něj byly simulovány lomové zkoušky na vybraných reálných tělesech a to postupným odřezáváním ligamentu z vrubu – modelováním šířící se trhliny. Tyto hodnoty byly následně použity pro výpočet efektivních lomových parametrů vybraných těles. Jednalo se o tři pískovcová tělesa, tři betonová tělesa z nosné konstrukce stávající budovy a sedm betonových těles z panelů požárního experimentu. Poté byly tyto hodnoty porovnány s hodnotami získanými prostřednictvím LELM.

Z poznatků uvedených v práci můžeme vyvodit, že se podařilo najít vhodná metoda aplikace modelu efektivní trhliny na válcová tělesa s vrubem zatěžovaná tříbodovým ohybem. Použití této metody nám pomůže zpřesnit hodnoty lomových parametrů u materiálů s nelinearitou před dosažením kritické hodnoty zatěžovací síly.

LITERATURA

- BACKERS, T. *Fracture toughness determination and micromechanics of rock under mode I and mode II loading*. PhD thesis, University of Potsdam, 2004.
- FRANTÍK, P. – MAŠEK, J. *Aplikace GTDiPS*. Brno: VUT FAST, 2014.
- GRIFFITH, A. A. *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. Philosophical transactions of the Royal Society of London. 1920. Dostupné z: <<http://mbarkey.eng.ua.edu/courses/AEM644/Griffith1921fracture.pdf>>.
- HALFAR, P. Vyhodnocení a simulace lomových testů betonových těles ve vybraných konfiguracích. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, květen 2016.
- IRWIN, G. R. Analysis of Stresses and Strains Near the End of a Crack Traversing a Plate. *Journal of Applied Mechanics* 24. 1957, s. 361–364.
- KARIHALOO, B. L. *Fracture Mechanics and Structural Concrete*. Essex: Longman Scientific and Technical, 1995. ISBN 0-582-21582-X.
- KERŠNER, Z. – PUKL, R. – NOVÁK, D. *Nelineární lomová mechanika pro modelování prvků a konstrukcí z kvazikřehkých materiálů. Studijní opora předmětu Vybrané stati z nosných konstrukcí budov, modul BL13-MO3*. Brno: VUT FAST, 2006.
- KUBEŠ, P. Pokročilé vyhodnocení lomových testů vybraných horninových těles. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, květen 2016.
- KUNZ, J. *Aplikovaná lomová mechanika*. Praha: ČVUT FJFI, 2005.
- NEVILE, A. M. *Properties of Concrete, Pearson Education Limited*. Harlow, 2011.
- OUCHTERLONY, F. Suggested methods for determining the fracture toughness of rock. *Advances in Engineering Software*. 1988, , 25, s. 71–96.
- RILEM TC-50 FMC. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*. Nov 1985, 18, 6, s. 285–290. ISSN 1871-6873. doi:10.1007/BF02498757. Dostupné z: <<https://doi.org/10.1007/BF02498757>>.
- ROZSYPALOVÁ, I. et al. Strength characteristics of concrete exposed to the elevated temperatures according to the temperature-time curve ISO 834. 2017, Vol. 107, pilot tests. In: MELCER, J., KOTRASOVA, K., eds. MATEC Web of Conferences: Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering – DYN-WIND 2017. EDP Sciences – Web of Conferences. ISSN 2261-236X. doi:<https://doi.org/10.1051/mateconf/201710700041>.

- ŠIMONOVÁ, H. ET AL. Tentative Characterization of Old Structural Concrete through Mechanical Fracture Parameters. *Procedia Engineering*. 2017a, 190, Supplement C, s. 414 – 418. ISSN 1877-7058. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.357>. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817324979>>. Structural and Physical Aspects of Construction Engineering.
- ŠIMONOVÁ, H. ET AL. Fracture parameters of concrete after exposure to high temperatures. 2017b, Vol. 107, pilot tests. In: MELCER, J., KOTRASOVÁ, K., eds. MATEC Web of Conferences: Dynamics of Civil Engineering and Transport Structures and Wind Engineering – DYN-WIND 2017. EDP Sciences – Web of Conferences. ISSN 2261-236X. doi:<https://doi.org/10.1051/mateccconf/201710700039>. Dostupné z: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705817324979>>.
- VAVRO, L. *Fracture toughness of rock and its determination for geomechanical evaluation of rock and rock mass*. PhD thesis, VŠB–Technical University of Ostrava, 2014.
- VESELÝ, V. *The role of process zone in quasi-brittle fracture. Zkrácená verze habilitační práce*. Brno: Vutium, 2015. ISBN 978-80-214-5255-8.
- VESELÝ, V. – FRANTÍK, P. An application for the fracture characterisation of quasi-brittle materials taking into account fracture process zone influence. *Advances in Engineering Software*. 2014, , 72, s. 66–76.
- VLK, M. – FLORIAN, Z. *Mezní stavy a spolehlivost*. Brno: VUT FSI, 2007.

SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

- a délka trhliny [m]
- a_0 hloubka počátečního iniciačního zářezu [m]
- a_e délka efektivní trhliny [m]
- A_{lig} plocha odolávající lomu, ligament [m²]
- $CMOD$ otevření ústí trhliny [m]
- d svislý průhyb uprostřed rozpětí [m]
- D průměr válcového tělesa [m]
- E Youngův modul pružnosti [MPa]
- ϵ_c kritické poměrné přetvoření [-]
- f'_t maximální tahová pevnost materiálu [MPa]
- F svislá zatěžovací síla [N]
- F_{max} maximální zatěžovací síla [N]
- f'_t maximální tahová pevnost materiálu [MPa]
- G hnací síla trhliny [N/m]
- G_F lomová energie [J/m²]
- G_c kritická hodnota hnací síly trhliny – houževnatost [J/m², N/m]
- γ měrná povrchová energie [J/m²]
- K faktor intenzity napětí (FIN) [MPa.m^{1/2}]
- K_c kritická hodnota FIN – lomová houževnatost [MPa.m^{1/2}]
- K_{Ic} lomová houževnatost pro zatěžovací mód I [MPa.m^{1/2}]
- K_{IIc} lomová houževnatost pro zatěžovací mód II [MPa.m^{1/2}]
- K_{IIIc} lomová houževnatost pro zatěžovací mód III [MPa.m^{1/2}]
- K_{Ice} efektivní kritická hodnota FIN pro zatěžovací mód I [MPa.m^{1/2}]
- l_p délka lomové procesní zóny [m]

LELM	lineární elastická lomová mechanika
MKP	metoda konečných prvků
ν	Poissonův součinitel (součinitel příčné kontrakce) [-]
Π	potenciální energie tělesa [J]
W	energie nutná k šíření trhliny [J]
W	výška zkušebního tělesa [m]
w_c	kritické otevření trhliny [m]
W_F	lomová práce [J]
S	rozpětí podpor u ohybového testu [m]
s_x	výběrová směrodatná odchylka
σ	napětí [MPa]
x_p	aritmetický průměr
v_k	variační koeficient

SEZNAM PŘÍLOH

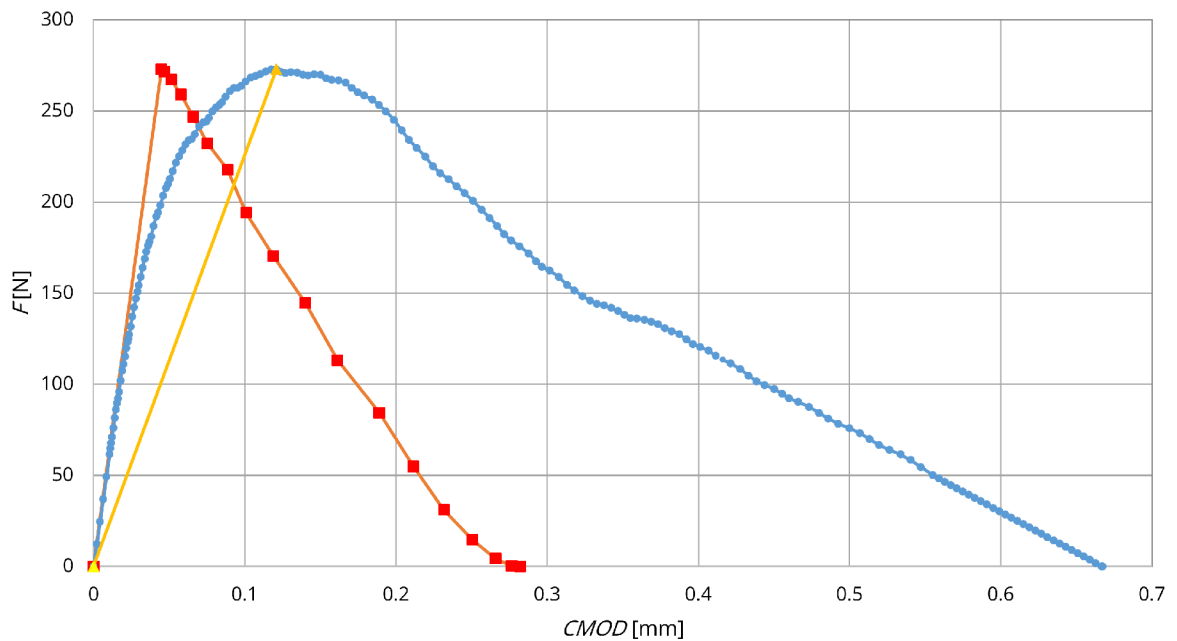
A	Zatěžovací diagramy pro hledání efektivní délky trhliny	52
A.1	Pískovcová tělesa	53
A.2	Betonová tělesa z nosné konstrukce stávající budovy	56
A.3	Betonová tělesa z panelů požárního experimentu	59

A ZATĚŽOVACÍ DIAGRAMY PRO HLEDÁNÍ EFEKTIVNÍ DĚLKY TRHLINY

Na následujících obrázcích se nacházejí upravené pracovní diagramy (modrá křivka) jednotlivých válcových zkušebních těles, na které byl aplikován model efektivní trhliny. Červeně je naznačena křivka, která znázorňuje pokles tuhosti vzhledem k šířící se trhlíně (obr. 4.2). Žlutá přímka je spojnice počátku souřadnic s bodem o souřadnicích $[CMOD_{F_{max}}(d_{F_{max}}), F_{max}]$.

Dále se v přílohách nacházejí ilustrace tabulek znázorňující postupný výpočet hodnot, které můžeme na zmíněných grafech vidět. Tyto tabulky následně sloužily k výpočtu efektivních lomových parametrů uvedených v kapitole 6 – Výsledky. Grafy a tabulky se pro lepší přehlednost nacházejí společně na následujících stránkách.

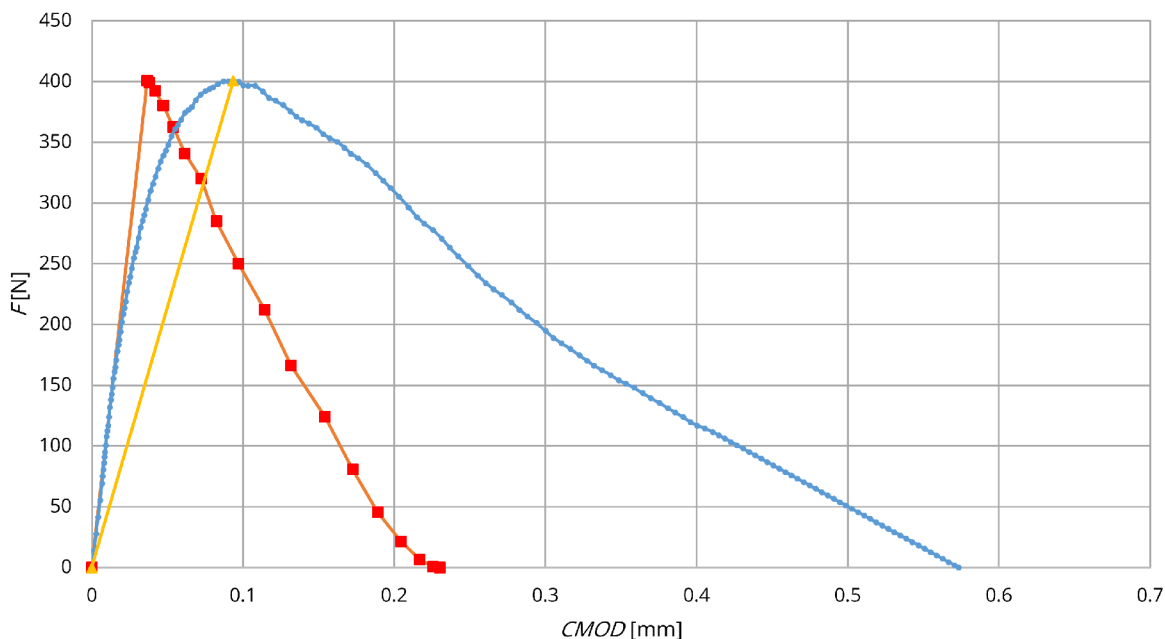
A.1 Pískovcová tělesa



Obr. A.1: Pískovcové těleso ja22

crl	původní hodnoty			ja22		ja22		fce přímky max bod	
	CMOD	f	kcmmod	CMOD	f	F_{max}		F	
0	0.00387	35289.24	6.079325	0.044906	273	273 N	0.001208 m	0	273
0.0025	0.004011	35119.76	5.837212	0.046544	271.6889	$F_{prusecik}$	209.742 N	0	0.120831
0.005	0.004419	34540.7	5.210467	0.051283	267.2092	a_0	0.00724 m		
0.0075	0.004984	33491.02	4.480126	0.057831	259.0888	a_{eff}	0.023097 m		
0.01	0.005678	31910.35	3.746825	0.065885	246.8606	K_{Ic}	0.27 Mpa*m ^{1/2}		
0.0125	0.006494	30007.94	3.080564	0.075357	232.1435	K_{IcE}	0.638192 Mpa*m ^{1/2}		
0.015	0.00764	28158	2.457073	0.088655	217.8322	A_{min}	24.91497		
0.0175	0.00869	25107.34	1.926244	0.100835	194.2321	S	0.1612 m		
0.02	0.010247	22009.23	1.43192	0.118907	170.2649	D	0.04843 m		
0.0225	0.012074	18681.52	1.031533	0.140104	144.5215				
0.025	0.0139	14640.07	0.702155	0.161299	113.2566				
0.0275	0.016277	10917.27	0.447139	0.188882	84.45672				
0.03	0.018226	7103.77	0.259844	0.211493	54.95525				
0.0325	0.019965	4027.849	0.134497	0.231675	31.15971				
0.035	0.021596	1884.662	0.058178	0.250607	14.57988				
0.0375	0.022908	560.8977	0.016323	0.265832	4.339143				
0.04	0.023822	46.05184	0.001289	0.276433	0.35626				
0.04127	0.0243	-1.2E-07	-3.4E-12	0.28198	-9.6E-10				

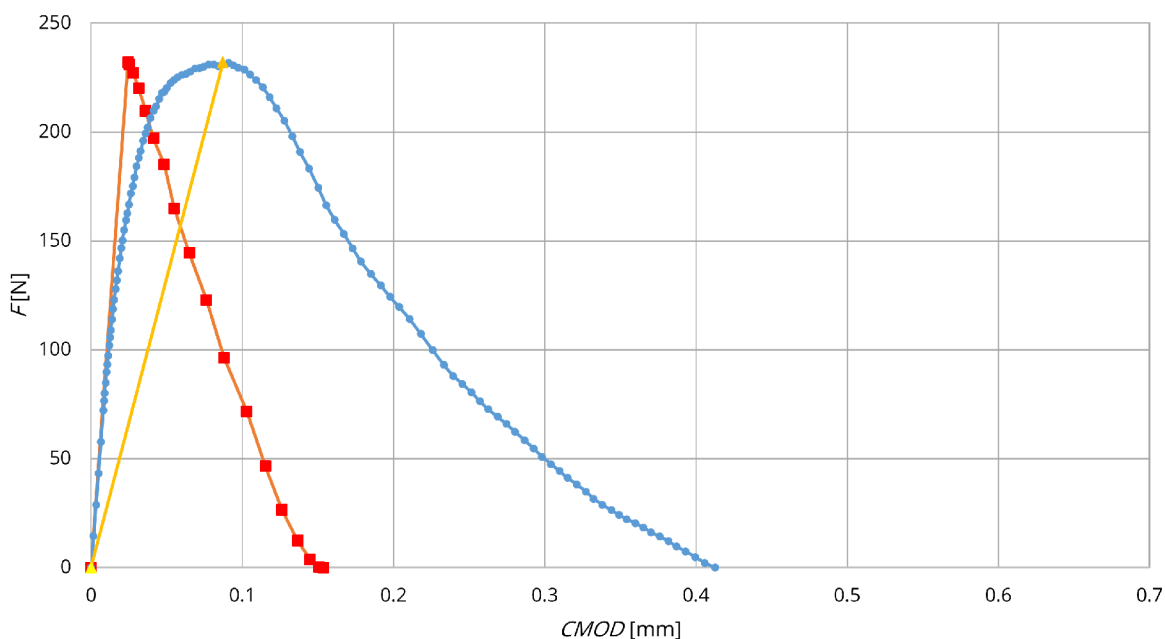
Obr. A.2: Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro pískovcové těleso ja22



Obr. A.3: Pískovcové těleso ja23

crl	původní hodnoty			ja23		ja23		fce přímky max bod	
	CMOD	f	kcmod	CMOD	f	F _{max}		F	
0	0.00387	50816.51	10.94279	0.036645	401	F _{max}	401 N	ja23	0 401
0.0025	0.004011	50572.46	10.50698	0.037982	399.0741	cmod	0.000935 m	CMOD	0 0.093543
0.005	0.004419	49738.6	9.378841	0.041849	392.4941	F _{prusecik}	315.554 N		
0.0075	0.004984	48227.07	8.064227	0.047192	380.5663	a ₀	0.00724 m		
0.01	0.005678	45950.9	6.744285	0.053765	362.6048	a _{eff}	0.022558 m		
0.0125	0.006494	43211.43	5.545016	0.061494	340.9873	K _{Ic}	0.39 Mpa*m ^{1/2}		
0.015	0.00764	40547.52	4.422732	0.072346	319.966	K _{Icice}	0.914517 Mpa*m ^{1/2}		
0.0175	0.00869	36154.57	3.46724	0.082285	285.3006	A _{min}	24.30631		
0.02	0.010247	31693.29	2.577455	0.097032	250.0961	S	0.1612 m		
0.0225	0.012074	26901.39	1.856759	0.11433	212.2826	D	0.04843 m		
0.025	0.0139	21081.7	1.263879	0.131625	166.3586				
0.0275	0.016277	15720.86	0.804851	0.154135	124.0555				
0.03	0.018226	10229.43	0.467719	0.172586	80.72181				
0.0325	0.019965	5800.102	0.242095	0.189055	45.7694				
0.035	0.021596	2713.914	0.104721	0.204504	21.41586				
0.0375	0.022908	807.6927	0.029381	0.216928	6.373613				
0.04	0.023822	66.31463	0.00232	0.225579	0.523298				
0.04128	0.0243	1.67E-07	5.72E-12	0.230106	1.32E-09				

Obr. A.4: Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro pískovcové těleso ja23

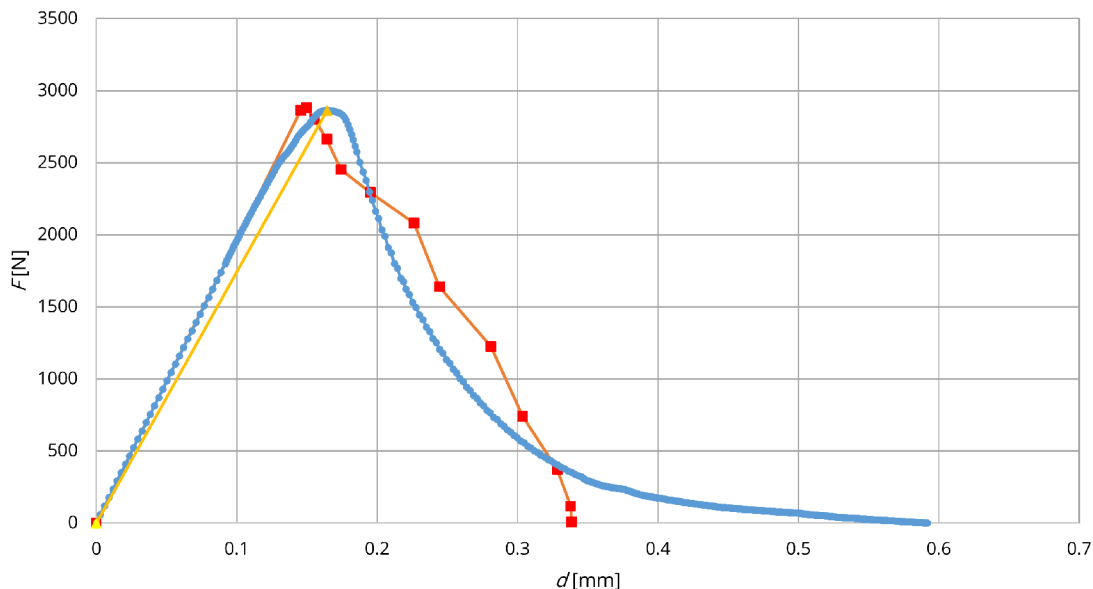


Obr. A.5: Pískovcové těleso ja26

crl	původní hodnoty			ja22		ja22		fce přímký max bod	
	CMOD	f	kcmo	CMOD	f	F _{max}	CMOD	F	CMOD
0	0.00387	50816.51	9.483747	0	0	232 N	0.08716997 m	232	0.087169972
0.0025	0.004011	50572.46	9.106051	0.024463	232	F _{prusecik} 156.807 N	0.007733 m		
0.005	0.004419	49738.6	8.128329	0.025355	230.8858	a ₀ 0.02584321 m			
0.0075	0.004984	48227.07	6.988997	0.027937	227.0789	a _{eff} 0.02584321 m			
0.01	0.005678	45950.9	5.845047	0.031504	220.178	K _{IC} 0.23 Mpa*m ^{1/2}			
0.0125	0.006494	43211.43	4.80568	0.035891	209.7863	K _{ICe} 0.60965275 Mpa*m ^{1/2}			
0.015	0.00764	40547.52	3.833034	0.041051	197.2794	A _{min} 28.0850848			
0.0175	0.00764	40547.52	3.833034	0.048295	185.1175	S 0.1615 m			
0.02	0.00869	36154.57	3.004941	0.05493	165.0617	D 0.04852 m			
0.0225	0.010247	31693.29	2.233795	0.064775	144.694				
0.025	0.012074	26901.39	1.609191	0.076322	122.8168				
0.0275	0.0139	21081.7	1.095362	0.087868	96.24736				
0.03	0.016277	15720.86	0.697537	0.102894	71.77274				
0.0325	0.018226	10229.43	0.405357	0.115212	46.7019				
0.035	0.019965	5800.102	0.209816	0.126206	26.48005				
0.0375	0.021596	2713.914	0.090758	0.136519	12.39023				
0.04	0.022908	807.6927	0.025464	0.144813	3.687477				
0.04128	0.023822	66.31463	0.00201	0.150588	0.302756				
	0.0243	1.67E-07	4.95E-12	0.15361	7.61E-10				

Obr. A.6: Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro pískovcové těleso ja26

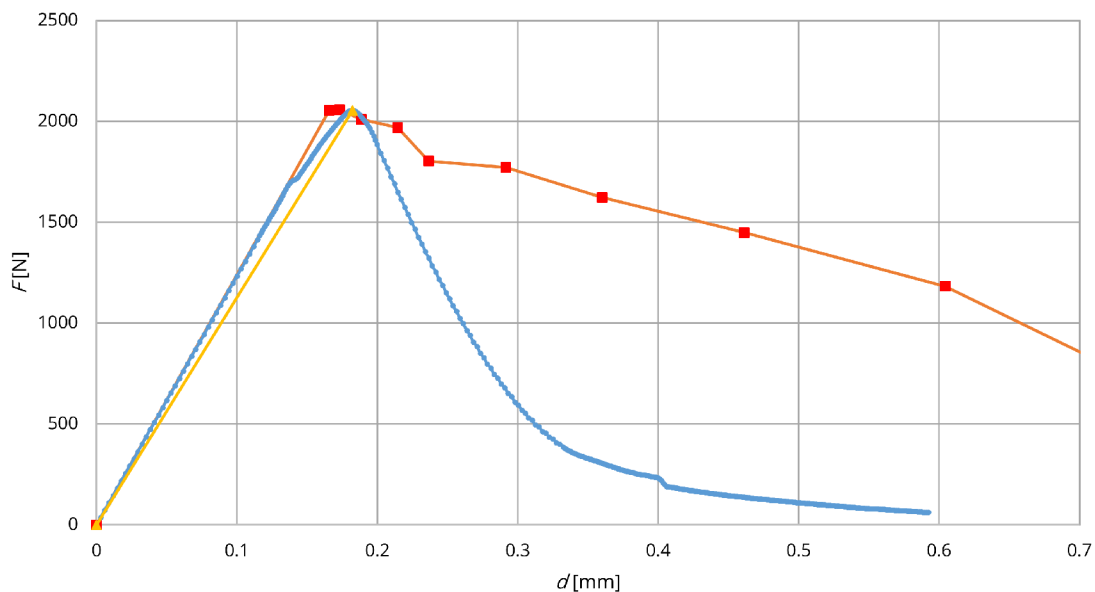
A.2 Betonová tělesa z nosné konstrukce stávající budovy



Obr. A.7: Betonové těleso v7

crl	původní hodnoty			v7		v7		fce přímký max bod	
	d	f	kd	d	f	F _{max}	d	F	d
0	0.011412	1796266	157.4083	0.145517402	2863.206	2863.206 N	0.164255 m	0	2863.206
0.005	0.011729	1809910	154.3156	0.149561187	2884.954	F _{prusecik}	0.01128 m	0	0.164255
0.01	0.012193	1758613	144.2257	0.155488994	2803.188	a ₀	0.022895 m		
0.015	0.012859	1670959	129.9448	0.163975417	2663.47	a _{eff}	1.15 Mpa*m ^{1/2}		
0.02	0.013667	1539421	112.6389	0.174277273	2453.801	K _{Ic}	1.623967 Mpa*m ^{1/2}		
0.025	0.016361	1440429	94.15302	0.195087491	2296.01	K _{Ice}	A _{min}		
0.03	0.017745	1306842	73.64654	0.226278108	2083.075	A _{min}	11.43837		
0.035	0.019154	1029978	53.77454	0.244243553	1641.761	S	0.17 m		
0.04	0.022036	769136.7	34.90397	0.280996325	1225.986	D	0.07409 m		
0.045	0.023807	464957.4	19.53017	0.303584048	741.1312				
0.05	0.025739	235131.7	9.135099	0.328223604	374.7944				
0.055	0.026483	74090.83	2.79772	0.337700822	118.099				
0.06	0.026536	6715.493	0.253071	0.338382106	10.70434				

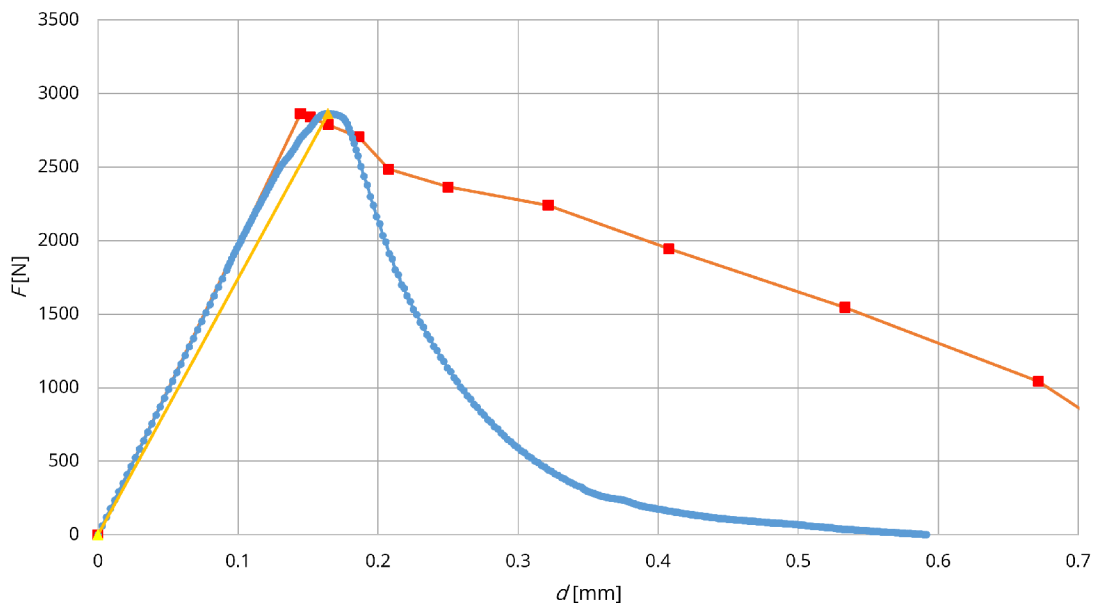
Obr. A.8: Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso v7



Obr. A.9: Betonové těleso v15

cri	původní hodnoty			v15		v15		fce přímký max bod	
	d (m)	f (N)	kd (MN/m)	d (mm)	f (N)	F _{max}	d	F	d
				0	0	2055.23	0.18228	0	2055.23
0	0.003542	732106.9	206.6649259	0.165746	2055.23	2034.54		0	0.18228
0.005	0.003696	732769.3	198.2683714	0.172921	2057.089		0.01177		
0.01	0.004031	715989.1	177.6067305	0.188617	2009.983		0.019163		
0.015	0.004583	701587.2	153.071157	0.214448	1969.553		0.73		
0.02	0.005054	642407.9	127.1022818	0.236479	1803.42		0.974306		
0.025	0.006911	630804.8	101.2598236	0.291469	1770.846		9.746779		
0.03	0.008494	577979.2	75.10711229	0.360052	1622.55		0.17		
0.035	0.009856	515991.5	52.35143963	0.461157	1448.533		0.07505		
0.04	0.012914	421253.5	32.61907332	0.604236	1182.577				
0.045	0.01546	277451.4	17.9468852	0.723323	778.8842				
0.05	0.018913	147806.5	7.815233901	0.884884	414.9343				
0.055	0.020507	53027.72	2.585838385	0.959481	148.8637				
0.06	0.021178	5475.869	0.258559203	0.990895	15.3723				

Obr. A.10: Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso v15

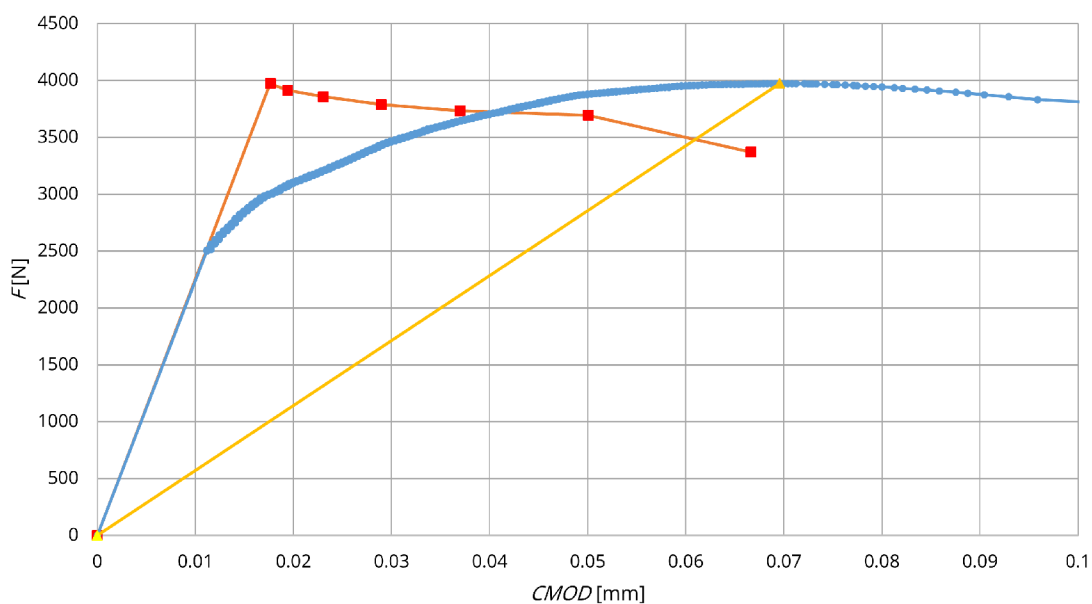


Obr. A.11: Betonové těleso v18

crl	původní hodnoty			v18		v18		fce přímky max bod		
	d	f	kd	d	f	F_{max}		v18	F	
				0	0	d	0.16425518 m		d	0 0.164255176
0	0.003672	1118362	304.5782	0.144624	2863.206	$F_{prusecik}$	2802.37 N			
0.005	0.004015	1109652	288.563	0.151462	2840.907	a_0	0.01255 m			
0.01	0.004175	1088636	260.7337	0.164453	2787.103	a_{eff}	0.02113126 m			
0.015	0.004731	1056625	223.3626	0.186323	2705.15	K_{Ic}	1.06 Mpa*m ^{1/2}			
0.02	0.005268	970554.2	184.2286	0.207501	2484.792	K_{Ice}	1.48403219 Mpa*m ^{1/2}			
0.025	0.007243	923632.9	145.4672	0.250087	2364.665	A_{min}	10.5778447			
0.03	0.00816	874990.3	107.2342	0.321386	2240.131	S	0.17 m			
0.035	0.010353	759240.6	73.33436	0.407783	1943.791	D	0.07468 m			
0.04	0.013543	603636.4	44.57219	0.533419	1545.417					
0.045	0.017053	407298.9	23.88454	0.671666	1042.758					
0.05	0.019239	196953.8	10.23707	0.757784	504.2369					
0.055	0.020783	56541.56	2.720555	0.818591	144.7565					
0.06	0.021138	3127.192	0.147939	0.832583	8.00617					
0.062	0.020929	2.17E-06	1.04E-10	0.824328	5.56E-09					

Obr. A.12: Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso v18

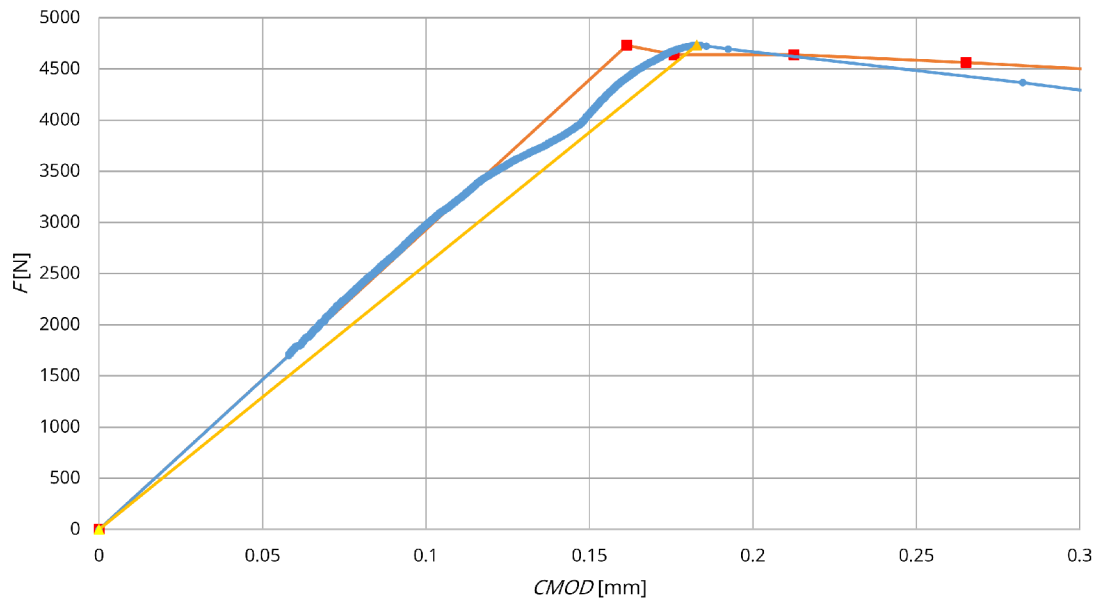
A.3 Betonová tělesa z panelů požárního experimentu



Obr. A.13: Betonové těleso P4_D23E23

původní hodnoty				P4_D23E23		P4_D23E23		fce přímký max bod			
crl	CMOD [mm]	f [N]	kcmod [MN/m]	CMOD [mm]	f [N]	F _{max}		F			
				0	0		3974.3 N	P4_D23E23	0	3974.3	
						cmod	0.00006958 m		CMOD	0	0.06958
0	0.001654699	213069.3	128.7661958	0.017636838	3974.3	F _{prusecik}	3482.17 N				
0.005	0.0018193	209939.9	115.395979	0.019391263	3915.929	a ₀	0.01179 m				
0.01	0.002162467	206845.3	95.65250587	0.023048947	3858.207	a _{eff}	0.04008116 m				
0.015	0.002809039	203154	74.8135133	0.028943237	3789.354	K _{Ic}	1.08847786 Mpa*m ^{1/2}				
0.02	0.003471317	200175.9	57.66568243	0.036999507	3733.803	K _{Ice}	2.90028481 Mpa*m ^{1/2}				
0.025	0.004696171	198042.4	42.1710301	0.050054782	3694.008	A _{min}	14.7170035				
0.03	0.006251352	180788.6	28.91991421	0.066630897	3372.18	S	0.127 m				
						D	0.07409 m				

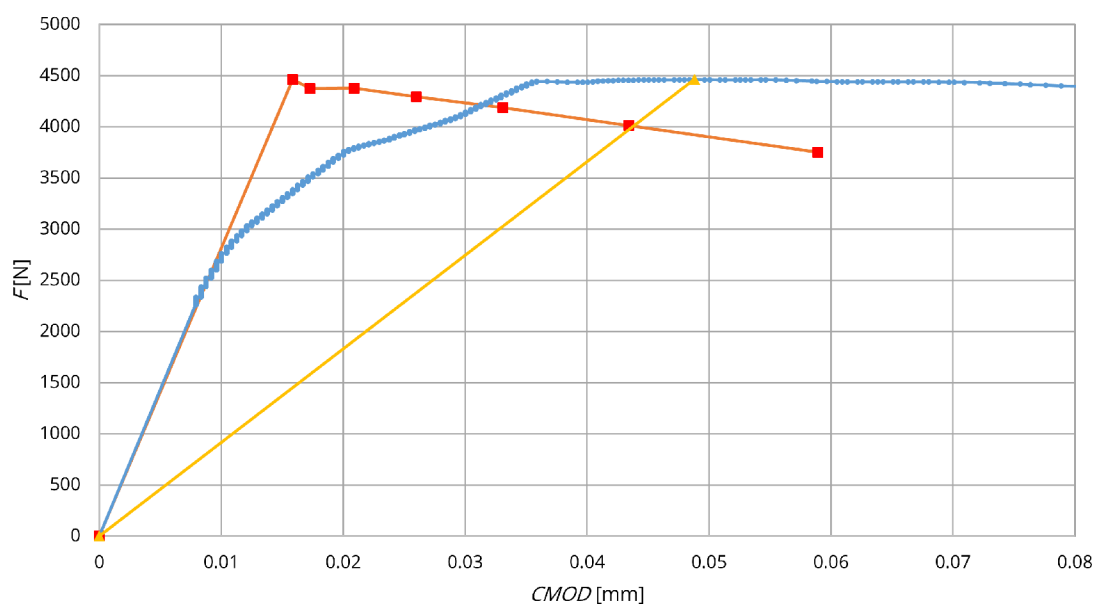
Obr. A.14: Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso P4_D23E23



Obr. A.15: Betonové těleso P4_C45D45

crl	původní hodnoty			P4_C45D45		P4_C45D45		fce přímký max bod			
	CMOD	f	kcmod	CMOD	f	F _{max}		F			
				0	0	4731.73 N			0	4731.73	
						cmod	0.18281 m	P4_C45D45	CMOD	0	0.18281
0	0.001616	157903.9	97.69381	0.161448	4731.73	F _{prusecik}	4639.47 N				
0.005	0.00176	154818.7	87.95899	0.175812	4639.279	a ₀	0.01146 m				
0.01	0.002127	154892.3	72.80839	0.212498	4641.484	a _{eff}	0.01689258 m				
0.015	0.002654	152316.8	57.3824	0.26514	4564.306	K _{Ic}	1.27971913 Mpa*m ^{1/2}				
0.02	0.00337	148151.9	43.96186	0.336618	4439.503	K _{Ice}	1.60095527 Mpa*m ^{1/2}				
0.025	0.004423	142054.7	32.11895	0.441774	4256.795	A _{min}	6.82060283				
0.03	0.006	132758.1	22.12492	0.599356	3978.214	S	0.127 m				
						D	0.07407 m				

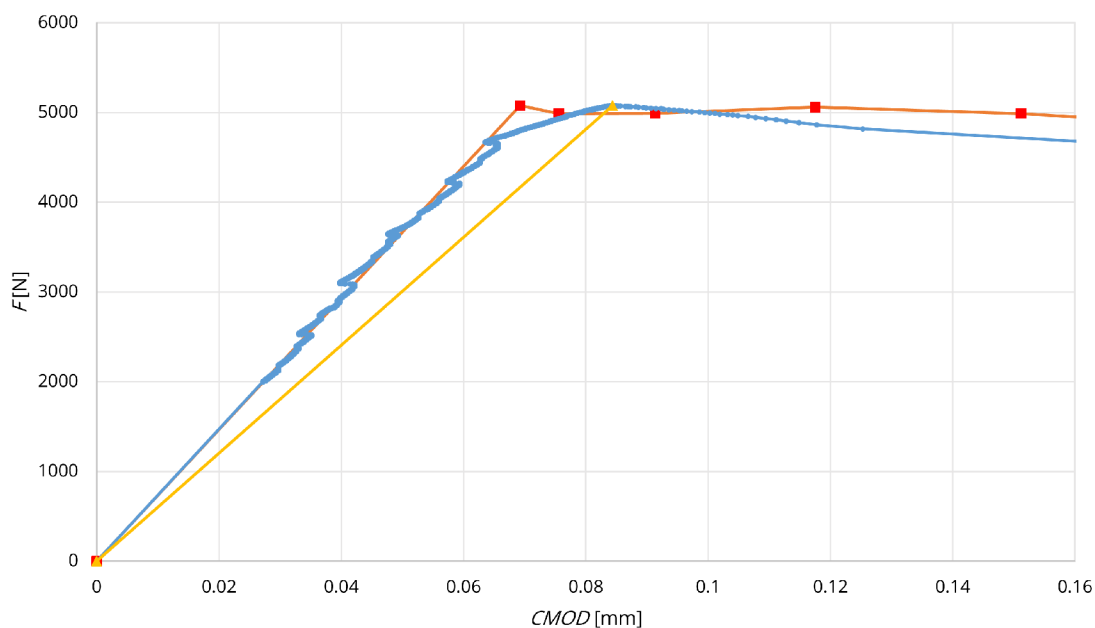
Obr. A.16: Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso P4_C45D45



Obr. A.17: Betonové těleso P4_B45C45

crl	původní hodnoty			P4_B45C45		P4_B45C45		fce přímký max bod		
	CMOD	f	kcmmod	CMOD	f			F	CMOD	
				0	0	F_{max}	4461.45 N	P4_B45C45	0	4461.45
						cmod	0.0488 m		0	0.0488
0	0.001617	541397.6	334.7873	0.015865	4461.45	$F_{prusecik}$	4006.2 N			
0.005	0.001761	530816.3	301.4222	0.017276	4374.254	a_0	0.01164 m			
0.01	0.002129	531059.3	249.489	0.020882	4376.257	a_{eff}	0.036769 m			
0.015	0.00265	520850.6	196.5775	0.025993	4292.13	K_{Ic}	1.214879 Mpa*m ^{3/2}			
0.02	0.003372	507914.8	150.6109	0.033084	4185.532	K_{Ice}	2.961395 Mpa*m ^{3/2}			
0.025	0.004426	486978	110.0196	0.043423	4012.999	A_{min}	13.38627			
0.03	0.006006	455056.6	75.76906	0.058919	3749.947	S	0.127 m			
						D	0.07409 m			

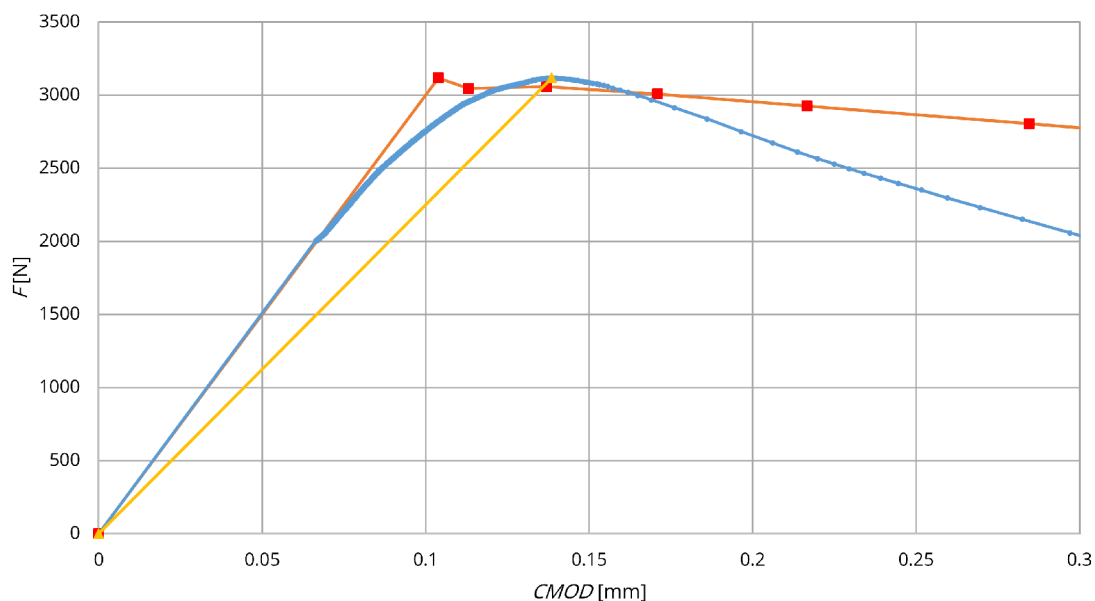
Obr. A.18: Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso P4_B45C45



Obr. A.19: Betonové těleso P4_D62_X1

původní hodnoty			P4_D62_X1		P4_D62_X1		fce přímký max bod		
CMOD	f	kcmod	CMOD	f	F _{max}		F		
			0	0	5077.11 N		0	5077.11	
					cmod	0.08437 m	P4_D62_X1	CMOD	0 0.08437
0.001205	1731267	1004.362	0.069247	5077.11	F _{prusecik}	4989.72 N			
0.001149	1701150	904.2667	0.075575	4988.789	a ₀	0.0116 m			
0.001504	1701826	748.4669	0.091342	4990.77	a _{eff}	0.018949 m			
0.001523	1725364	589.7326	0.117532	5059.798	K _{Ic}	1.214879 Mpa*m ^{1/2}			
0.001693	1700938	451.8327	0.151231	4988.168	K _{Ice}	1.859088 Mpa*m ^{1/2}			
0.016133	1634158	330.0587	0.198899	4792.329	A _{min}	7.384528			
0.011913	1508673	227.3072	0.266632	4424.332	S	0.127 m			
					D	0.07409 m			

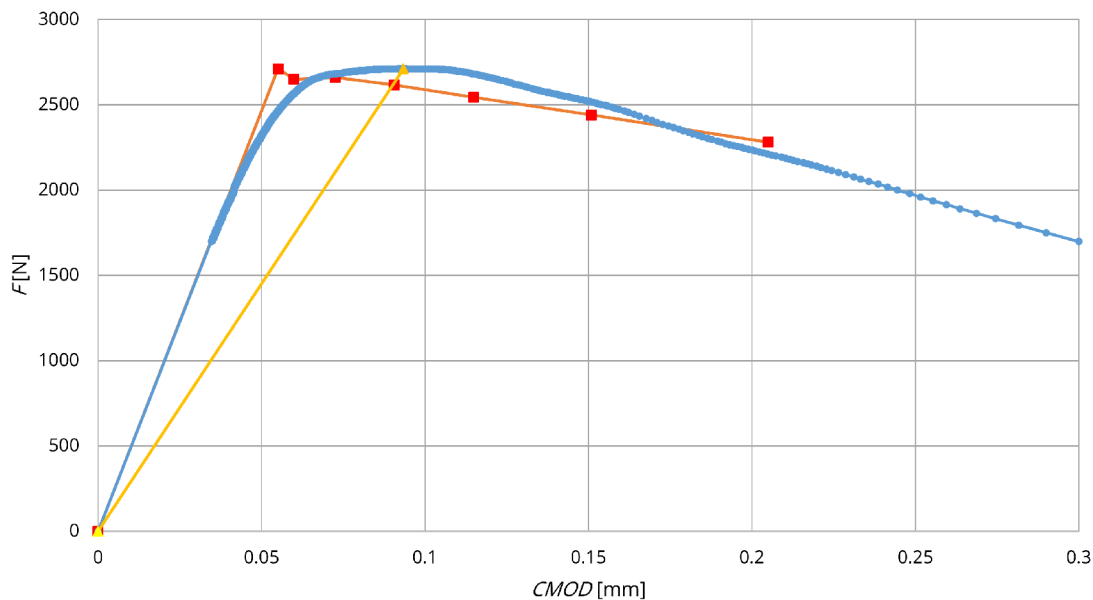
Obr. A.20: Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso P4_D62_X1



Obr. A.21: Betonové těleso P7_4FEE

crl	původní hodnoty			P7_4FEE		P7_4FEE		fce přímký max bod	
	CMOD	f	kcmo	CMOD	f	F _{max}	P7_4FEE	F	CMOD
				0	0	3116.87 N		0	3116.87
						cmod	0.13849 m		0
0	0.001608	618494.2	384.6849	0.103877	3116.87	F _{prusecik}	3057.01 N		
0.005	0.00175	604368.8	345.3542	0.113064	3045.685	a ₀	0.01189 m		
0.01	0.002119	606715.4	286.3452	0.136894	3057.511	a _{eff}	0.02168 m		
0.015	0.002645	596645.1	225.5709	0.170892	3006.762	K _{IC}	0.86 Mpa*m ^{1/2}		
0.02	0.003353	580455.6	173.1409	0.2166	2925.176	K _{ICe}	1.263771338 Mpa*m ^{1/2}		
0.025	0.004405	556555.7	126.3531	0.284584	2804.734	A _{min}	8.176909759		
0.03	0.005983	520105.3	86.92453	0.386578	2621.044	S	0.127 m		
						D	0.07409 m		

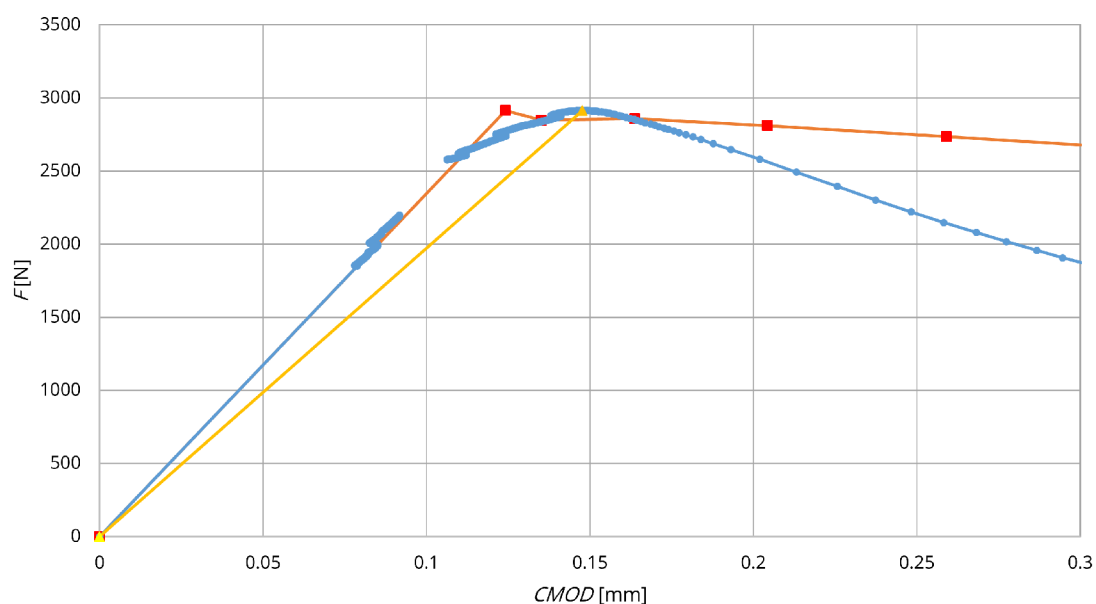
Obr. A.22: Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso P7_4FEE



Obr. A.23: Betonové těleso P7_4BC

crl	původní hodnoty			P7_4BC		P7_4BC		fce přímký max bod			
	CMOD [mm]	f [N]	kcmod [MN/m]	CMOD [mm]	f [N]	F _{max}		F			
0	0.001607794	618494.2	384.6849089	0.055086683	2712.45	F _{max}	2712.45 N	P7_4BC	F	0	2712.45
0.005	0.001749997	604368.8	345.3542266	0.059958859	2650.502	cmod	0.00009343 m		CMOD	0	0.09343
0.01	0.002118825	606715.4	286.3452044	0.072595751	2660.793	F _{prusecik}	2617.74 N				
0.015	0.002645045	596645.1	225.5708671	0.090625241	2616.629	a ₀	0.01133 m				
0.02	0.003352504	580455.6	173.1409271	0.114864381	2545.629	a _{eff}	0.02620422 m				
0.025	0.004404765	556555.7	126.3531013	0.150917254	2440.814	K _{IC}	0.73 Mpa*m ^{1/2}				
0.03	0.005983412	520105.3	86.92453162	0.205005261	2280.958	K _{ICE}	1.29192572 Mpa*m ^{1/2}				
						A _{min}	9.59956081				
						S	0.127 m				
						D	0.07406 m				

Obr. A.24: Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso P7_4BC



Obr. A.25: Betonové těleso P7_4EF

crl	původní hodnoty			P7_4EF		P7_4EF		fce přímky max bod	
	CMOD	f	kcmod	CMOD	f	F _{max}	2914.46 N	P7_4EF	F
				0	0	cmod	0.14768 m		0
0	0.001608	618494.2	384.6849	0.1242	2914.46	F _{prusecik}	2851.48 N		2914.46
0.005	0.00175	604368.8	345.3542	0.135185	2847.898	a ₀	0.01136 m		0.14768
0.01	0.002119	606715.4	286.3452	0.163677	2858.956	a _{eff}	0.0179796 m		
0.015	0.002645	596645.1	225.5709	0.204327	2811.503	K _{Ic}	0.79 Mpa*m ^{1/2}		
0.02	0.003353	580455.6	173.1409	0.258977	2735.215	K _{Ice}	1.0289731 Mpa*m ^{1/2}		
0.025	0.004405	556555.7	126.3531	0.340264	2622.594	A _{min}	7.11720438		
0.03	0.005983	520105.3	86.92453	0.462212	2450.833	S	0.127 m		
						D	0.07407 m		

Obr. A.26: Ilustrace tabulky pro výpočet efektivních lomových parametrů pro betonové těleso P7_4EF