

MENDELOVA UNIVERZITA V BRNĚ
LESNICKÁ A DŘEVAŘSKÁ FAKULTA

ÚSTAV NAUKY O DŘEVĚ

**NUMERICKÝ MODEL ODEZVY STROMU BĚHEM TAHOVÉ
ZKOUŠKY**

DIPLOMOVÁ PRÁCE

2014/2015

BARBORA VOJÁČKOVÁ

*Prohlašuji, že jsem práci: **Numerický model odezvy stromu během tahové zkoušky** zpracovala samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b Zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.*

Jsem si vědoma, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne:

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych tímto poděkovala především svému vedoucímu práce Ing. Janu Tippnerovi, Ph.D. za cenné podněty, připomínky a pomoc při sestavení výpočetního modelu a také při psaní diplomové práce. Dále děkuji za podněty a pomoc v oblasti numerických simulací Ing. Václavu Seberovi, Ph.D., a v problematice analytického řešení, tahových zkoušek a stability stromu prof. Dr. Ing. Petru Horáčkovi a Ing. Lud'kovi Prausovi, Ph.D. V neposlední řadě také děkuji týmu KoSzoVo za praktické podněty, podporu a pomoc.

ABSTRAKT

Práce je zaměřena na tvorbu numerické simulace odezvy stromu při tahové zkoušce. Za pomoci skriptovacího jazyka byl v prostředí ANSYS® sestaven parametrický model tahové zkoušky, který umožňuje jednoduchou změnu geometrie, materiálu a např. pozicí bodů pro odečet sledovaných veličin. Numerický výpočet byl porovnán s experimentálním měřením tří dubů a s analytickým výpočtem. Následně byla provedena citlivostní analýza vlivu polohy přístrojů, parametrů kmene a parametrů kořenového balu na hodnoty náklonu a posunutí bodů na kmeni. Dále byl zjišťován vliv defektů na tyto výstupní hodnoty. Při provedení citlivostní analýzy se projevil významný vliv průměru kmene a podílu kořenového balu na výsledné hodnoty náklonu a posunutí. Zároveň bylo zjištěno, že výskyt defektů může způsobit nepřesnou interpretaci naměřených hodnot náklonu a deformací. Parametrizace geometrie, nastavení materiálových modelů a rozčlenění modelu do segmentů umožňuje univerzální využití pro simulaci tahové zkoušky při různé konfiguraci, včetně variabilního umístění defektů kmene a kořenového systému. Nastíněno je využití výsledků pro rozvoj metody hodnocení stromů tahovou zkouškou i další rozvoj numerického modelu.

Klíčová slova: numerické simulace, tahová zkouška, stabilita stromu

ABSTRACT

The numerical simulation of the tree pulling test was carried out in the thesis. ANSYS® Parametric Design Language was used for the simulation. The parametric design enables use of simulation for variations of tree dimensions, material properties and device positions. Results from numerical solution were compared with a field experiment and analytical solution in cases of three oaks. To find significant influence of input parameters probabilistic analysis was carried out. The analysis found that there is a significant correlation among stem diameter, root volume and tree inclination and nodes displacement on the tree stem. The influence of stem defect and root-plate damage on ability of devices was found as well. Numerical model can be used for the simulation of tree pulling test in wide variety of different configurations, for example change of geometry, material properties and defects extension and position of stem and root-plate system. The practical impact of results and further development of numerical simulation are discussed at the end.

Key words: numerical simulation, pulling test, tree stability

OBSAH

1	Úvod.....	3
2	Cíl práce.....	4
3	Literární přehled	5
3.1	Přístrojové metody	5
3.2	Tahová zkouška.....	6
3.2.1	Tahová zkouška – Static Integrated Method.....	6
3.2.2	Tahová zkouška - ostatní metody vyhodnocení.....	13
3.3	Numerické metody (simulace)	16
3.3.1	Numerické simulace v oblasti biomechaniky stromů.....	16
4	Materiál a metodika	20
4.1	Numerický model odezvy stromu během tahové zkoušky	20
4.1.1	Fyzikální podstata modelu	20
4.1.2	Tvorba výpočetního modelu	21
4.2	Porovnání numerického řešení, experimentálního měření a analytického výpočtu.....	36
4.2.1	Experimentální měření.....	36
4.2.2	Analytický výpočet	39
4.2.3	Vyhodnocení výsledků	40
4.3	Citlivostní analýza.....	40
4.4	Zjištění vlivu defektů na náklon a posunutí	43
5	Výsledky a diskuze	46
5.1	Porovnání numerického řešení, experimentálního měření a analytického výpočtu.....	46
5.2	Citlivostní analýza.....	56
5.2.1	Zjištění vlivu různého umístění přístrojů.....	56
5.2.2	Zjištění vlivu změny rozměrů kmene	60

5.2.3	Zjištění vlivu změny rozměrů a vlastností kořenového balu	64
5.3	Zjištění vlivu defektů na náklon a posunutí	66
5.3.1	Kořenový systém	66
5.3.2	Kmen.....	76
5.4	Vývoj výpočtového modelu	79
5.5	Výstupy pro praxi.....	81
6	Závěr	83
7	Summary	85
8	Použitá literatura	86
9	Přílohy.....	96

1 ÚVOD

„Strom je jednoslabičné slovo, ale skrývá celý svět pohádek a zázraků“ Theodor Heuss

Citát od Theodora Heusse vystihuje, jak jsou stromy vnímány člověkem. Stromy jsou organizmy, které dosahují neuvěřitelných rozměrů, neustále rostou a přitom musí celý svůj život strávit na jednom místě. U některých jedinců se pak dokonce jedná o stovky až tisíce let. Těmto požadavkům je zcela přizpůsobená jejich růstová strategie. V mládí stromy rychle obsazují svůj prostor, pro svůj asimilační aparát se snaží zajistit co největší dostatek světla a pro kořenový systém zase naopak dostatek živin a roztoků v půdě. Přičemž komunikaci mezi asimilačním aparátem a kořeny zajišťují přes větve a kmeny, přesněji řečeno přes pletiva s vodivou funkcí. Adaptabilita na prostředí a zároveň dosažení masivních rozměrů a vysokého věku je naprosto jedinečná schopnost stromů, kterou bychom měli respektovat a využít pro inspiraci. S přibývajícím věkem a rozměry se stále víc adaptují na stresové faktory v jejich prostředí. Jedním z těchto významných faktorů je mechanické zatížení způsobené jednak klimatickými faktory, především větrem a jednak vlastní rozsáhlou konstrukcí. Schopnost stromů dlouhodobě se přizpůsobit prostředí za kombinace fyziologických a mechanických vlastností je předmět zájmu člověka už řadu let, podvědomě možná už od samotného počátku. S pokročilým vývojem a koncentrací populace ve městech se aktuálním tématem stává dostatek zeleného prostoru při zajištění provozní bezpečnosti. S tím vzrůstají i nároky na standardizovaný a jednoznačný popis stavu stromu, i přes to že se jedná o komplikovaný systém, který je úzce spojen s prostředím. Za tímto účelem vzniká řada metodik, které se zabývají různými úrovněmi dendrologických průzkumů. Hodnocení se rozděluje na část, kdy jsme schopni posoudit strom vizuálně a na část, kdy je třeba využít různých přístrojových metod. Zároveň je ze systematických přístupů zřejmé, že je nezbytné hodnotit jak stránku fyziologickou, tak i stránku mechanickou a ty následně propojit při výsledném návrhu péstebních opatření. Pro vyhodnocení stability stromu je za jednu z nejkompexnějších metod považována tahová zkouška stromu. S jejím využitím se snažíme detailněji popsat a uchopit mechanickou stránku chování stromu v poměrně uceleném zhodnocení. Porovnáním výsledků z tahových zkoušek, případně jiných přístrojových metod a různých teoretických modelů a předpokladů se snažíme zjednodušeně, ale přesto v dostatečné míře přiblížit principům chování stromů. Pokud budeme schopni **teoreticky** dostatečně věrohodně popsat tak složitou konstrukci, kterou je strom, tím spíše budeme schopni s ní pracovat v našem okolí.

2 CÍL PRÁCE

Cílem práce je popsat mechanickou odezvu stromu při provedení tahové zkoušky za pomoci numerické simulace. Zároveň zjistit a popsat vliv parametrů, které tuto odezvu významně ovlivňují. Hlavní částí práce je samotná tvorba parametrického konečně-prvkového modelu. Dalšími dílčími cíli práce je numerický model:

- a) vyzkoušet v několika variantách,
- b) porovnat model s analytickým výpočtem,
- c) provést citlivostní analýzu a zjistit, které parametry významně ovlivňují odezvu modelu.

Výsledky by měly být interpretovány s ohledem na jejich praktické využití při tahové zkoušce stromu, případně při dalším vývoji v oblasti stability stromů. Součástí práce je i popis současné problematiky tahových zkoušek s postupným zaměřením na numerické simulace.

3 LITERÁRNÍ PŘEHLED

3.1 PŘÍSTROJOVÉ METODY

Přístrojové metody jsou chápány jako nadstavbové hodnocení, které se používá v případech, kdy vizuální průzkumy nestačí (SPPK A01 001:2015 – Standardy péče o přírodu a krajinu; ANSI A300 – American National Standard; Praus, 2009). Přesto jsou při sledování parametrů stability stromů z pohledu biomechanického hojně využívány. V podstatě se ve většině přístupů jedná o porovnání měřených parametrů, buď s teoretickým (analytickým) předpokladem (Villaggio, 1997) nebo s empiricky zjištěnými daty (Szórádová et al. 2003, Wesolly, 1995a,b,c).

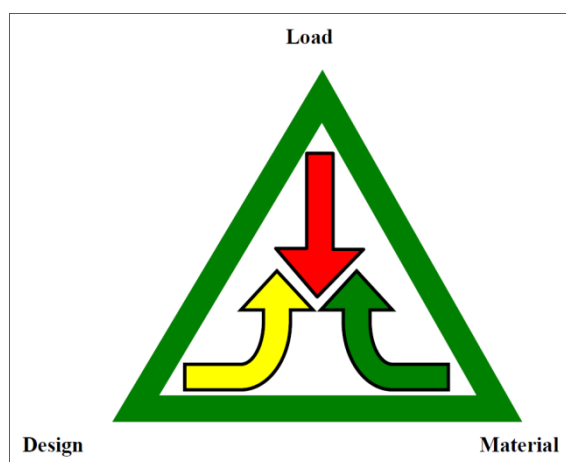
Z přístrojových metod pro detekci poškození a zjištění stability stromu se v praxi v současné době nejvíce využívá akustická tomografie, půdní radar GPR a tahová zkouška. Kompletní přehled přístrojových metod je uveden ve standardu Hodnocení stavu stromů (SPPK A01 001:2015). Z výše jmenovaných přístupů každý sleduje odlišná výstupní data a často bývá využívána jejich kombinace (Buza a Goncz, 2015). Půdní radar sleduje především geometrii kořenového systému (Nadehzdina a Čermák, 2003, Bassuk et al. 2011) a funguje na principu přenosu a odrazu elektromagnetických vln (Szórádová, 2013). Akustická tomografie je založena na měření rychlosti šíření zvuku materiálem (Cheng-Jung et al. 2008). Výsledný obraz prezentuje materiálové vlastnosti průřezu kmene v místě měření, včetně zjištění tloušťky zbytkové stěny v případě dutiny. Při znalosti materiálových vlastností, geometrie kmene a zatížení je možné následně vypočítat bezpečnostní faktor odolnosti kmene proti zlomu v místě měření (Buza a Goncz, 2015). Akustická tomografie umožňuje i zjištění rozložení kořenového systému (SPPK A01 001:2015). Poslední z výše jmenovaných metod je tzv. tahová zkouška stromu. Ačkoliv v rámci vyhodnocení tahové zkoušky je možné posoudit odolnost kmene proti zlomu, je oceňována především pro schopnost posouzení odolnosti proti vývratu (Brudi a Wassenaer, 2001). Tahová zkouška je tak využívána nejen pro vyhodnocení stability stromů v městském prostředí (Kolařík et al. 2010), ale i pro výzkumné účely. Jedná se především o oblast stability kořenových systémů ve vazbě na následnou aplikaci pro stabilizaci porostů, svahů apod. (Jonsson et al. 2006, Dupuy, et al. 2007, Kamimura et al. 2011).

Všechny zmiňované metody jsou nedestruktivní, ačkoliv k malé invazi dochází (ve většině případů musí být sondy umístěny do aktivního dřeva). Pro hodnocení stromů ve městech je faktor nedestruktivního testování rozhodující.

3.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA

3.2.1 TAHOVÁ ZKOUŠKA – STATIC INTEGRATED METHOD

Tahová zkouška je v České republice pojem, který je používán především pro komplexní vyhodnocení stability stromu za užití vybrané přístrojové metody. Vyhodnocení stability se však skládá ze tří kroků, přičemž pouze jedním z nich je tahová zkouška jako taková. Přístup komplexního zhodnocení stromu za použití tahové zkoušky byl prvně publikován doktorem Wessolym pod názvem Static Integrated Method (Wessolly, 1995a,b,c, Wessolly, 1996). Tento přístup vychází z tzv. trojúhelníku stability, který v sobě zahrnuje tři základní složky stability – zatížení, geometrie a materiál (obr. 1), přičemž nejvýznamnější složkou je zatížení (Wessolly, 1995a, Kolařík et al. 2010). Wessolly (1995a) uvádí, že poměr významnosti mezi jednotlivými složkami zatížení:materiál:geometrie je v případech kmenů se silnější zbytkovou stěnou (vliv geometrie) 800:25:25, v případech zmenšování zbytkové stěny pak roste podíl významnosti geometrie na 800:25:75. Stále je však znatelná naprostá převaha vlivu zatížení. Pokud je tedy prováděna tahová zkouška za účelem stanovení koeficientu bezpečnosti v případě odolnosti kmene proti zlomu a odolnosti stromu proti vývratu, provádí se v třech základních krocích: a) zátěžová analýza, b) vlastní tahová zkouška b) výpočet odolnosti stromu vůči selhání (Szórádová, 2013).



Obr. 1 Trojúhelník stability (Kolařík, 2003)

3.2.1.1 Zátěžová analýza

Zátěžová analýza slouží k výpočtu velikosti zatížení větrem a vlastní tíhou stromu. Při zatížení větrem je vypočtena působící síla na základě Newtonovy rovnice proudění kapalin (Szórádová, 2013). Vstupními parametry této rovnice jsou rychlost větru, koeficient prodouvavosti, hustota vzduchu a náporová plocha koruny (Peltola, 2006).

Jako referenční rychlost pro výpočet se používá $32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Kolařík, 2003). Vzhledem k tomu, že rychlost větru se mění s výškou stromu, je pro výpočet využíváno různých profilů (např. Davenport, 1961). V České republice je v současné době využíván standard Eurocode 1 (Szórádová, 2013). Při výpočtu rychlosti větru je také počítáno s vlivem drsnosti povrchu okolí, vedoucí ke snížení rychlosti. Ve městech může být ovšem tento předpoklad zavádějící, protože vlivem vysokých budov a úzkých ulic je pravděpodobný vznik tzv. tunelového efektu, kdy se rychlost vzduchu zvýší (Brudi a Wassenaer, 2001).

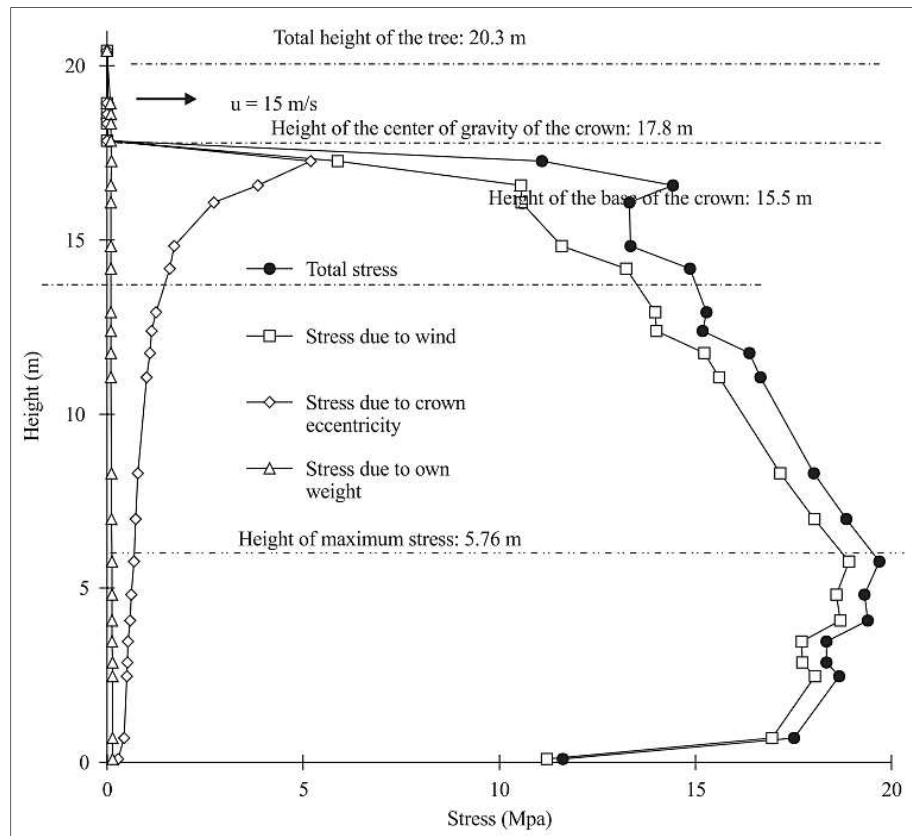
Koeficient prodouvavosti stanovuje odpor koruny proti pronikání vzduchu (Kolařík et al. 2010). Koeficient se stanovuje buď výpočtem, nebo experimentálním měřením (Davenport, 1961, Mayhead et al. 1975). Jeho velikost je ovlivněna mimo jiné také stavem olistění a přizpůsobením tvaru koruny (tzv. streamlining) (Vollsinger et al. 2005). Je zřejmé, že tyto faktory ovlivňují i stanovení plochy koruny.

Zátěžová analýza je kritizována právě pro variabilitu vstupních parametrů. Tento fakt kritizují především tvůrci metodik, které jsou zaměřeny spíše na materiál a geometrii. Tyto metodiky vychází z předpokladu, že důležitá je reakce stromu na zatížení aniž by bylo nutné znát jeho přesnou velikost (Mattheck a Breoler, 1994). Na druhou stranu stanovení zatížení pro výpočet odolnosti proti porušení je běžně využívaný postup v technické praxi.

Zatížení vlastní hmotností je vypočteno součinem hmotnosti stromu a gravitační konstantou (Kolařík et al. 2010). Hmotnost stromu je možné stanovit přepočtem z dendrometrických parametrů. Vzhledem k tomu, že napětí, které vzniká vlastní vahou, je minimální v porovnání se zatížením jinými vlivy není limitující využití těchto zjednodušených výpočtů (obr. 2) (Mattheck, 1991, Ezquerro a Gil 2001).

Z vypočteného zatížení, které působí na korunu a ze stanovené výšky těžiště, je následně stanoven kritický ohybový moment. V případě excentricity koruny, je zahrnuta i vzdálenost těžiště koruny od vertikální osy kmene.

Kromě působení vlastní hmotnosti a větru působí na strom ještě další zdroje zatížení jako voda (déšť), sníh, námraza. Tyto faktory jsou až na různé studie (Gaffrey a Kniemeyer, 2002) zatím opomíjeny.



Obr. 2 Rozložení vznikajících tlakových napětí po výšce kmene. Stanoveno mechanickým modelem, při počítané rychlosti větru $15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (Ezquerro a Gil, 2001).

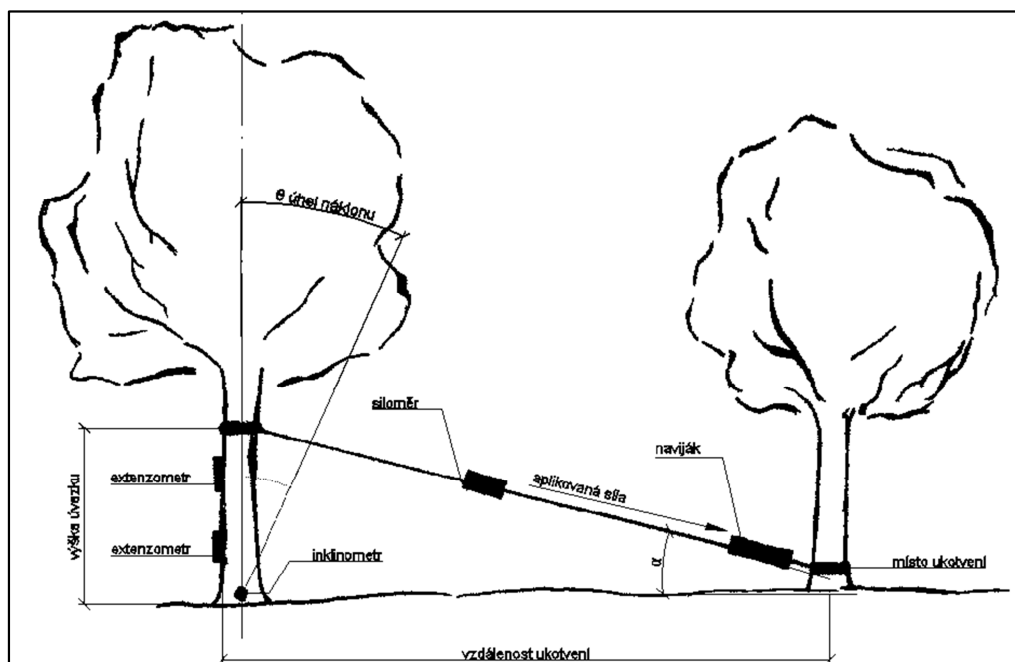
3.2.1.2 Provedení tahové zkoušky

Vlastní měření probíhá umělým zatěžováním stromu a snímáním reakce kmene a kořenového balu (Praus, 2005). Síla je aplikovaná v místě umístění úvazku (lana) pomocí navíjecího systému, který je ukotven např. u báze kmene kotvícího stromu. Velikost aplikované síly je měřena siloměrem. Pomocí snímačů posunutí (extenzometrů) umístěných na kmeni a snímačů náklonu kmene (inklinometrů) je zaznamenávána reakce stromu (obr. 3) (Brudi a Wassenaer, 2001, Praus, 2005, Szórádová, 2013).

Výška úvazku je daná tvarem kmene, výškou prvního větvení a velikostí stromu. Kotevní bod (strom) je vybrán podle směru zatížení. Vzdálenost kotevního bodu by měla být dostatečná pro minimalizaci vertikální složky aplikované síly (minimální úhel mezi zemí a kotvícím lanem, obr. 3). Maximální velikost aplikované síly je dána požadavkem na nedestruktivní provedení zkoušky. Po odlehčení se strom musí vrátit zpět do původního stavu bez narušení pletiv, případně spojení mezi půdou a kořeny. Pohybujeme se tedy v oblasti elastického chování.

Umístění extenzometrů je voleno v místech, kde dochází k největším poměrným deformacím, tedy na tlakové nebo na tahové straně kmene. Extenzometry by měly být na základě vizuálního posouzení umístěny na místa předpokládaného defektu (Wessolly, 1995a, Brudi a Wassenaer, 2011). Extenzometry měří s přesností na 0.001 mm, přičemž maximální posunutí při zkoušce by mělo odpovídat poměrné deformaci při mezi úměrnosti pro daný materiál.

Inklinometr bývá umístěn na bázi kmene v neutrální rovině, kde je předpoklad největší rotace (obr. 3). Maximální náklon je opět limitován elastickou odezvou stromu. V kořenovém balu však dochází k přenosu zatížení pomocí systému kořenů a půdy, kde hranice mezi elastickým a plastickým chováním není známá. Wessolly (1996) uvádí, že při náklonu do 0.5 °, nedochází k narušení kořenového systému. Brudi a Wassenaer (2001) pokládají za nedestruktivní hranici náklonu 0.25 °. Některé studie pak pokládají za hraniční limit pro elastické chování hodnoty nižší (Johnsson et al. 2006).



Obr. 3 Schéma tahové zkoušky

Pokud shrneme způsob provedení tahové zkoušky, je možné identifikovat faktory, které mohou mít vliv na naměřené hodnoty. Mezi tyto parametry patří:

- výška umístění úvazku resp. velikost úhlu mezi zemí a kotevním lanem,
- směr zatížení, v případě jednostranného narušení kořenového systému (Szórádová, 2013),
- rozdíl mezi umístěním extenzometrů na tlakovou nebo tahovou stranu,
- rozdíl mezi umístěním extenzometrů v různých výškách a polohách,
- měřicí schopnost extenzometru v případě umístění na protilehlou stranu kmene, než možný výskyt defektu,
- vliv umístění inklinometrů mimo neutrální osu (Szórádová, 2013),
- vliv umístění inklinometrů v případě skrytých defektů na bázi kmene, případně poškozeného kořenového systému,
- vliv schopnosti záznamu inklinometrů pouze v jedné ose,
- vliv rozdílu naměřených hodnot mezi prvním a dalším tahem a vliv opakování měření,
- vztah mezi rychlostí zatížení a frekvencí odečtu dat při průběhu tahové zkoušky.

3.2.1.3 Výpočet odolnosti stromu vůči selhání

Výstupem tahové zkoušky je tzv. koeficient bezpečnosti pro odolnost stromu proti zlomu a proti vývratu (Brudi a Wassenaer, 2001, Szórádová, 2013).

Vyhodnocení odolnosti kmene proti zlomu vychází z předpokladu, že limitní hodnotou z pohledu materiálu - dřeva je tzv. mez úměrnosti. Mez úměrnosti vyjadřuje hodnotu napětí, do které platí Hookeův zákon, tedy lineární vztah mezi napětím a vznikající deformací (Požgaj et al. 1993). Do meze úměrnosti (pružnosti) se materiál chová elasticky, tedy po odlehčení zatížení se vrací do původního stavu. Niklas (1992) a Wessolly (1995a) uvádí, že při překročení meze úměrnosti již dochází k primárnímu selhání dřeva ve stromě (materiálu), deformace začínají narůstat neúměrně zatížení a dochází k plastifikaci. Tento přístup je odlišný od Mattheck a Breoler (1994), Moore (2000), kteří počítají jako limitní hodnotu mez pevnosti, kdy dochází k trvalému porušení materiálu.

Na základě změřeného posunutí je vypočítána poměrná deformace dle vztahu:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} [-] \quad 3.2-1$$

kde Δl je prodloužení a l je referenční délka extenzometru (Brudi a Wassenaer, 2001).

Vyhodnocení může probíhat na základě poměrné deformace, vypočteného napětí (Szórádová, 2013), nebo vypočteného modulu pružnosti (Brudi a Wassenaer, 2001). Do výpočtu napětí vstupuje změřená poměrná deformace a tabulková hodnota modulu pružnosti. Do výpočtu modulu pružnosti změřená poměrná deformace a napětí přepočtené z modulu průřezu a ohybového momentu. Ohybový moment je vypočtený z aplikované síly a rozdílu hodnot mezi výškou úvazku a umístěním extenzometru.

Vypočtené hodnoty jsou pak porovnávány se standardními vlastnostmi materiálu. Tyto hodnoty jsou definované např. v Stuttgartsém katalogu vlastností dřeva (Erb a Wessolly, 1998). Katalog obsahuje hodnoty pro mez úměrnosti v tlaku $\sigma_{\text{Útlak}}$, moduly pružnosti E a poměrné deformace ε na mezi úměrnosti. Hodnoty jsou uvedeny pro základní druhy stromů, které se nacházejí ve střední Evropě a byly zjišťovány na vzorcích dřeva v čerstvém stavu (Brudi a Wassenaer, 2001, Kolařík et al. 2010).

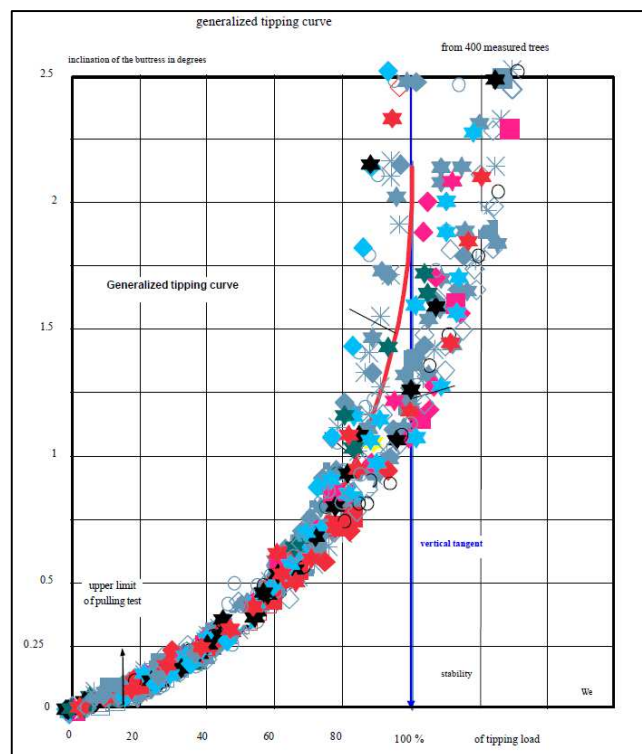
Z podílu kritického ohybového momentu a ohybového momentu dosaženého při zkoušce, jsou zjištěny hodnoty poměrné deformace (resp. napětí či modulu pružnosti) konkrétního jedince při maximálním počítaném zatížení. Podíl mezi standardními „tabulkovými“ hodnotami a skutečně zjištěnými hodnotami v procentech je vyhodnocen jako koeficient bezpečnosti (odolnost vůči zlomu kmene) (Szórádová, 2013).

Wessolly (1995a) uvádí, že poměrná deformace na mezi úměrnosti ukazuje menší variabilitu v průběhu výšky kmene než odvozený modul pružnosti nebo napětí. Nepřesnost může být dána i tím, že do přepočtu těchto dvou hodnot vstupuje zjednodušená geometrie průřezu kmene (výpočet průřezového modulu) nebo tabulková hodnota modulu pružnosti. Oproti tomu Brudi a Wassenaer (2001), Horáček (2003) uvádějí, že je vhodné využít modulu pružnosti, jako jediné konstantní hodnoty v oblasti elastických deformací, dle platnosti Hookeova zákona.

Pro **vyhodnocení odolnosti stromu proti vývratu** se využívá křivky publikované Dr. Wessollym (1996) (obr. 4). Tato křivka byla vytvořena na základě experimentálních měření u více než 400 stromů (Brudi a Wassenaer, 2001, Szórádová, 2013). Wessolly

(1996) uvádí, že strom je odolný proti vývratu při vzrůstajícím zatížení pouze do pootočení báze kmene o 2.5° . Nad tuto hodnotu už dochází ke kombinaci plastifikace kořenového balu a působení zatížení vlastní vahou, kdy se začne projevovat zvyšující se vzdálenost od vertikální osy (Peltola, 2006, Urata et al. 2011). Při vyhodnocení se pomocí definované křivky zjišťuje, zda náklon odpovídající maximálnímu zatížení (při působení kritického ohybového momentu) nedosahuje velikosti 2.5° . Výsledkem je bezpečnostní koeficient udávající odolnost stromu proti vývratu.

Nevýhodou tohoto přístupu je skutečnost, že relevance této křivky nebyla dosud potvrzena (Szórádová, 2013, Mattheck, Bethge, Karft, 2008). Na druhou stranu nebyla zatím její platnost nikým vyvrácena.



Obr. 4 Vývratová křivka (Erb a Wessolly, 1998).

Po zhodnocení současného přístupu využívaného pro stanovení odolnosti stromu proti selhání vyplývají následující otázky:

- jaký je vliv změn modulů pružnosti po výšce kmene na změnu deformace,
- jak ovlivňuje vstup zjednodušené geometrie výpočet modulu pružnosti oproti poměrné deformaci, a jaký má toto zjednodušení vliv v případě výskytu skrytých defektů,

- jaký je rozptyl hodnot mezi tabulkovými hodnotami materiálu a hodnotami změřenými na stromě,
- jak se vypořádat s relevancí vývratové křivky,
- je nějaká možnost vyhodnotit měření bez použití výpočtu předpokládaného zatížení na základě zátěžové analýzy a eliminovat tak variabilitu vstupních parametrů.

3.2.2 TAHOVÁ ZKOUŠKA - OSTATNÍ METODY VYHODNOCENÍ

Stabilita stromů je dlouhodobě řešenou problematikou, především díky nutnosti zajištění stability porostů. Základní řešené otázky, pojednávají o tom, zda je možné najít okamžik, při kterém dochází k selhání stromu, a jaké faktory stabilitu stromu ovlivňují. Téma stability stromů je úzce spojené s teoriemi pojednávající o principu jejich vzrůstu (McMahon, 1973), přičemž dochází k prolínání teorie konstantního napětí a teorie pružné podobnosti (McMahon 1975, Mosbrugger, 1990, Niklas, 1992, Morgan a Cannell, 1994, Praus, 2005). Pokud se zaměříme čistě na stabilitu stromu a vezmeme v úvahu, že nejvyšší podíl zatížení je způsoben větrem (Wessolly, 1995a, Ezquerra a Gil, 2001), můžeme se věnovat pracím, které popisují chování stromu právě při tomto převládajícím zatížení. Základní teorie pak vychází především z mechanického popisu ohybu jednostranně vetknutého nosníku (Morgan a Cannell, 1987). Teorie jednostranně vetknutého nosníku se při malých i velkých deformacích, využívá pro zpracování a interpretaci dat získaných při měření tahovou zkouškou. Z toho následně vychází popis chování stromu při statickém zatížení a jsou zjišťovány parametry, které strom a jeho stabilitu ovlivňují (Neild a Wood, 1998, Moore, 2000). Přehled různých způsobů vyhodnocení stability stromů při použití tahové zkoušky, větrných tunelů a numerických simulací popisuje Peltola (2006).

3.2.2.1 *Strom jako jednostranně vetknutý nosník*

V případě malých deformací a předpokladu, že je strom pevně ukotven v zemi lze pro popis ohybu kmene využít teorii ohybové čáry, při níž popisujeme celkový průhyb nosníku dle vztahu:

$$\frac{d^2x_2}{dx_1^2} = \frac{M}{EI} \quad [m] \quad 3.2-2$$

kde x_2 je průhyb nosníku (vzdálenost bodu v místě ohybu od vertikální osy), x_1 je vzdálenost místa průhybu od ukotvení, M je ohybový moment působící v místě

průhybu, E je modul pružnosti a I je moment setrvačnosti plochy v místě průhybu. (Požgaj, et al. 1993, Bodig a Jayne, 1993). Při první integraci tohoto vztahu získáváme směrnici tečny ohybové čáry v daném bodě (tedy pootočení/rotaci bodu) – $\text{tg } \alpha$, při druhé integraci pak získáme velikost posunutí daného bodu po zatížení (x_2) (Požgaj, et al. 1993). V případě, že je tento vztah použit na strom, můžeme předpokládat, že pootočení bodu ($\text{tg } \alpha$) odpovídá úhlu, který vzniká při ohybu stromu v konkrétních místech (Mattheck, 1991). Velikost průhybu kmene je tedy závislá na jeho tuhosti, jenž je funkcí vlastností materiálu (E) a geometrie (I/W^1) (Neild a Wood, 1998).

Ve skutečnosti je ovšem velikost průhybu (ohybu kmene) ovlivněna také náklonem kořenového balu. Strom tedy není pevně ukotvený v zemi, ale při zatížení dochází k rotaci v rámci kořenového balu (Peltola, 2006). Pokud se pohybujeme v elastické oblasti chování, vychází velikost rotace z podobného předpokladu jako pootočení kmene. Tedy, že velikost potočení je závislá na tuhosti kořenového balu, dle vztahu:

$$\theta = \frac{M_o}{k} \text{ [rad]} \quad 3.2-3$$

kde θ je pootočení báze kmene, M_o je ohybový moment v místě ukotvení a k je tuhost kořenového balu (Neild a Wood, 1998). Tuhost kořenového balu (ukotvení) je opět funkcí jeho materiálových vlastností a geometrie. Kořenový bal tvoří určitý komplex kořenů a půdy. Geometrie kořenů a materiálové vlastnosti kořenů i půdy jsou vysoce variabilní a nelze tak jednoznačně vylišit, jaké vlastnosti (parametry) mají významný vliv na tuhost ukotvení.

3.2.2.2 Tuhost ukotvení

Pro hledání vztahu mezi tuhostí ukotvení a různými parametry se využívá vytváření zjednodušených modelů, numerických simulací, analytických modelů, experimentálních měření a kombinace uvedených metod. Tvorbu zjednodušeného modelu využil například Mickovski et al. (2007), kdy vytvořil tři typy kořenového systému z dřeva a pryže, které vnořil do různých typů materiálu a sledoval jejich reakci na zatížení pomocí digitální techniky PIV. Z měření zjistil, že odolnost kořenového systému proti vytažení je významně ovlivněna hloubkou a přítomností a pozicí postranních kořenů. Podobný závěr uvádí i Stokes et al. (1996), která vytvořila různé typy kořenového systému ze

¹ W je modul průřezu, použití modulu průřezu nebo momentu setrvačnosti I závisí na tom, zda pracujeme s momentem nebo napětím.

stejného materiálu a sledovala především vliv jejich tvaru na odolnost vůči vytažení. Velmi častá je kombinace experimentálních měření a analytických řešení, kdy je sledován vztah mezi maximálním ohybovým momentem, nezbytný pro selhání stromu, a vybranými parametry (Moore, 2000, Lundström, 2007, Ghani et al. 2009). Z faktorů, které významně ovlivňují stabilitu stromu (tuhost systému kmen – kořenový bal), jsou uváděny: štíhlostní koeficient (Urata et al. 2011), sbíhavost kmene (Moore, 2000), průměr kmene (Lundström, 2007, Smiley, 2008, Achim a Nicoll, 2009), plošné rozměry a hloubka kořenového systému (Moore, 2000, Ghani et al. 2009, Achim a Nicoll, 2009), biomasa kmene a koruny (Lundström, 2007, Urata et al. 2011), pevnost kořenů na tahové straně, umístění bodu otáčení kořenového balu (Coutts, 1986), vlastnosti půdy (Coutts, 1986, Kamimura et al. 2011) a obsah vody v půdě (Kamimura et al. 2011).

Zajímavé je zpracování závislosti průměru kmene (případně jeho mocnin) na výslednou odolnost stromu proti vyvrácení. Achim a Nicoll (2009) hledají závislost mezi průměrem kmene a popisem rozměrů kořenového balu, pro následné vyjádření tuhosti ukotvení. Na rozdíl od tohoto přístupu kombinují Ghani et al. (2009) a Moore (2000) naměřené hodnoty náklonu a maximálního ohybového momentu, kdy se při výpočtu prolíná jak rotace kořenového balu, tak i průhyb kmene. Pokud se vezme v úvahu, že výsledný měřený náklon se skládá z těchto dvou složek (Neild a Wood, 1998), může být dán vliv průměru kmene především složkou ovlivňující průhyb kmene. Stejný vliv může být pozorován i u experimentálního měření, které prováděl Smiley (2008).

V případě výpočtu pootočení báze kmene je také otázkou, zda vycházet ze základního vztahu (viz. 3.2-3) mezi ohybovým momentem a tuhostí kořenového balu. Z pohledu mechaniky se jedná o situaci se složitější geometrií a okrajovými podmínkami. Pokud například předpokládáme, že kořenový systém vytváří desku o určité tloušťce, vstupuje do výpočtu náklonu, kromě materiálu a geometrie ještě další konstanta, která vychází ze vztahu poloměru kořenového balu a kmene (Young a Budynas, 2002). Villaggio (1997) který popisuje analytický vztah pootočení kořenového balu a tuhosti materiálu, také využívá jiného přístupu a předpokládá, že půda je polokulový prostor s elastickým chováním a vnořenými elastickými pruty.

Náklon stromu, který měříme při zatížení tahovou zkouškou v sobě, kombinuje jak průhyb nosníku, tak i rotaci kořenového balu (Neild a Wood, 1998). Není zatím zcela jasné, jaký vztah ovlivňuje rotaci bázi kmene a jaké parametry jsou pro velikost rotace

významné. Při vyhodnocení stability stromu je ovšem změřený náklon stromu při definovaném zatížení stěžejní. Pro interpretaci stability a pochopení chování stromu se proto hledají i další nástroje, jako například statistické porovnání chování zdravých a poškozených stromů (Szórádová et al. 2013), mapování pohybů kořenového prostoru digitálními kamerami (Kamimura et al. 2001) či sledování chování stromu metodou korelace digitálního obrazu (Sebera et al. 2014) a numerické simulace (viz. 3.3).

3.3 NUMERICKÉ METODY (SIMULACE)

V řadě případů, kdy se snažíme najít řešení pro různé fyzikální úlohy, narážíme na skutečnost, že tyto úlohy jsou příliš komplexní pro exaktní analytické řešení. V takových případech je možné využít numerických aproximací, to znamená přiblížení se přesnému řešení v každém bodě, řešením v omezeném (konečném) množství bodů (Moaveni, 2008). V současné době je jednou z nejpoužívanějších numerických (výpočetních) metod metoda konečných prvků (MKP). Podstata MKP je v tzv. diskretizaci úlohy, kdy je řešení diferenciálních rovnic převedeno na řešení soustav algebraických rovnic (Kolář et al. 1997, Moaveni, 2008), za pomoci rozdělení oblasti na definované jednoduché prvky (elementy) (Sebera, 2013). Podstatu MKP a numerických metod popisuje Kolář et al. (1997), Zienkiewicz et al. (2006), Moaveni (2008), v rámci aplikovaných úloh pak také například Javořík (2002), Tippner (2010), Sebera (2013).

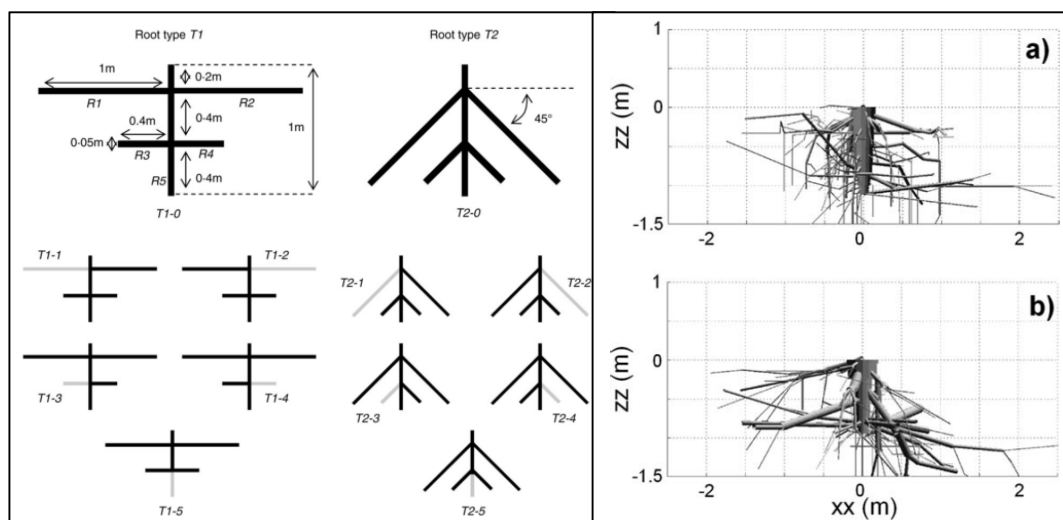
Vzhledem k rychlému rozvoji výpočetní techniky a výzkumu, který byl věnován MKP, je možné za pomoci různých programových systémů řešit řadu složitých úloh. Mezi takové úlohy můžeme zařadit i problematiku stability stromů a jeho jednotlivých částí. Numerické simulace začínají být v této oblasti hojně využívaným doplňkem, kdy jednak mohou v určitém rámci nahradit časově náročná terénní měření (Dupuy et al. 2005), a jednak poskytnout komplexnější řešení otázek mechanické odezvy stromu při namáhání (Jonsson et al. 2006).

3.3.1 NUMERICKÉ SIMULACE V OBLASTI BIOMECHANIKY STROMŮ

Velká pozornost v oblasti numerických simulací a biomechaniky stromu se soustředí na problematiku vztahu mezi kořeny a půdou. Jednu z prvních studií publikoval Mattheck et al. (1997). Cílem této práce bylo ukázat, které vlastnosti půdy ovlivňují tvar kořenového systému. Podkladem byla teorie konstantního napětí, kdy bylo za pomoci opakovaných výpočtů zobrazeno rozložení tužšího materiálu (kořenů) v půdě pro dosažení rovnoměrně rozloženého smykového napětí. Studie prokázala, že z čistě

mechanického pohledu tvar kořenového systému ovlivňuje koheze (soudržnost) a úhel tření půdy. I další práce používají smykové napětí jako limitní faktor pro půdu (Mickovski et al. 2011). Numerické simulace kořenových systému vytvořeny ve 2D (Fourcaud et al. 2008) i ve 3D (Fourcaud et al. 2003, Dupuy et al. 2005, Jonsson et al. 2006, Dupuy et al. 2007, Khalilnejad et al. 2012) pracují s půdou na základě Mohr-Coloumbova modelu, který předpokládá, že mez selhání je definována maximálním smykovým napětím (Khalilnejad et al. 2012). Půda je definována jako elasticko-plastický izotropní materiál. Pro definici elastické části chování se využívá modulu pružnosti a poissonova čísla. Parametry pro popis plastické části chování jsou koheze a úhel tření, které se mění dle půdního typu (Dupuy et al. 2005, Dupuy et al. 2007, Fourcaud et al. 2008). Na rozdíl od studií pracujících se stromy se Yang a Jeremi (2002) zabývali průhybem nosníku v závislosti na půdních vlastnostech a využívali pro jílovité půdy von Misesův materiálový model a pro písčité půdy Drucker-Pragerův model. Autoři uvádějí, že tento přístup vystihuje průhyb nosníku s vyšší přesností, především v oblasti nelineárního chování. U kořenů se většinou předpokládá lineárně elastické chování materiálu, a hranice plasticity je definována von Misesovým kritériem pevnosti (Dupuy et al. 2005, Dupuy et al. 2007, Fourcaud et al. 2008). Ve všech případech je dřevo kořenů považováno za izotropní materiál (Dupuy et al. 2005, Jonsson et al. 2006, Dupuy et al. 2007, Fourcaud et al. 2008, Khalilnejad et al. 2012).

Z pohledu geometrie je využívána buď velmi zjednodušená charakteristika typů kořenových systémů v podobě různě vnořených prutů do půdního substrátu (Fourcaud et al. 2008, Khalilnejad et al. 2012), nebo jsou využívány modely s reálnou geometrií. Přesnou charakteristikou kořenového systému se zabýval především Dupuy et al. (2005), Dupuy et al. (2007), Reubens et al. (2007), Danjon a Reubens (2008), kteří pracovali s programy Archiroot, AMAP, Simlul3R. Tyto programy umožňují zadání komplikované geometrie na základě měření, nebo dokonce sami generují rozvětvení a tvar kořenových systémů na základě zadaných okrajových podmínek (Danjon a Reubens 2008) (obr. 5). Pro diskretizace objektů jsou využívány prutové elementy (beam) pro kořeny, pro půdu pak dle složitosti geometrie hexahedrony (jednodušší případy) (Khalilnejad et al. 2012) nebo tetrahedrony (složitější případy) (Fourcaud et al. 2008).



Obr. 5 Ukázka použití zjednodušené geometrie kořenového systému – vlevo (Fourcaud et al. 2008) a přesné geometrie vytvořené programem ARCHIROOT (Dupuy et al. 2007).

Cílem simulací je najít významné faktory ovlivňující tuhost nebo pevnost ukotvení stromů, přičemž hlavním měřítkem je srovnání zadaného posunutí a reakční síly (Fourcaud et al. 2003, Dupuy et al. 2007, Fourcaud et al. 2008, Khalilnejad et al. 2012). Fourcaud et al. (2003) uvádí jako důležité faktory ukotvení přítomnost silných vertikálních kořenů a vysoký podíl kořenů v balu (dobře rozvětvená síť kořenů v prostoru kořenového balu). Dupuy et al. (2005) zjistil, že významným faktorem je typ kořenového systému. Mezi nejstabilnější uvádí tvar srdičtý a kořenové systémy s kůlovým kořenem. Hloubka kořenového systému se zdá být zásadní pouze v písčitéch půdách. Zajímavé je i sledování tzv. bodu otáčení kořenového systému, který je až pod hranicí půdy a báze kmene a jeho pozice se mění s vlastnostmi půdy (Dupuy et al. 2005, Dupuy et al. 2007, Fourcaud et al. 2008). Dupuy et al. (2007) v případě kdy porovnával výsledky numerických simulací s experimentálním měřením našel výrazný vliv vlastností půdy na odolnost proti vyvrácení stromu. Rozdíl mezi simulacemi a experimentálním měřením byl 20 % na písčitéch půdách a až 70 % na půdách kohezních (jílovitých). Fourcaud et al. (2008) uvádí, že v jílovitých půdách ovlivňují ukotvení především nejdelší kořeny, kdežto u písčitéch půd ovlivňují pevnost ukotvení i ostatní kořeny, přičemž důležitý je úhel rozvětvení kořenů. Khalilnejad et al. (2012), prováděl simulaci v nenasyčené písčité půdě, také uvádí vysoký vliv tvaru kořenového systému, přičemž tvar kořenového systému je důležitější než umístění kůlového kořenu. Na základě experimentálních měření je evidentní, že vysoký význam bude mít i nasycení

půdy vodou (Kamimura et al. 2011), v numerických simulacích tento faktor zatím nebyl zařazen, ale s jeho přidáním se počítá při dalším vývoji.

Studie, kterou prováděl Jonsson et al. (2006) se na rozdíl od ostatních soustředí pouze na oblast elastického chování ukotvení stromu. Cílem bylo objasnit, který parametr ovlivňuje celkový náklon stromu kromě samotného průhybu kmene (viz. 3.2.2). Toho dosáhnul přidáním počátečního náklonu při numerické simulaci. Ze vztahu ohybového momentu a pootočení kmene získal tuhost systému a následně pracoval s modulem pružnosti, dokud mezi simulací a experimentálním měřením, nebyla odchylka menší než 5 %. Výsledky ukazují na významnou závislost mezi tuhostí kořenového balu a druhou mocninou průměru kmene. Autor také upozorňuje na to, že opomenutí masy koruny způsobuje podhodnocení tuhosti ukotvení kořenového balu. Mickovski et al. (2011) ve své práci srovnával kromě vlivu kořenového systému na stabilitu půdy také rozdíl mezi 2D a 3D simulací. 3D simulace ukazují vyšší odolnost systému kořeny-půda proti působícímu zatížení, což může být způsobeno i tím, že při 3D simulaci je celková délka kořenů větší.

Kromě úloh věnovaných systému kořeny-půda a vztahu mezi nimi, se simulace často zabývají ještě výpočtovými modely pro stabilitu porostů (Ancelin et al. 2004) a faktory ovlivňujícími tvar stromů z pohledu růstových napětí (Fourcaud a Lac 2003, Fourcaud et al. 2003, Guillon et al. 2012). Malá pozornost je zatím věnována deformacím kmene a parametrům, které mohou ovlivňovat jejich měření a s tím i spojenou odolnost kmene proti zlomu (Praus a Horáček, 2005, Sebera et al. 2014). V poslední době začíná být aktuální také problematika stability stromu a dynamického zatížení. Analytická řešení dynamického chování se týkají již diferenciálních rovnic vyšších řádu a numerická řešení proto mohou být dobrou alternativou (Saunderson et al. 1999, Sellier a Fourcaud 2005, Sellier et al. 2006).

4 MATERIÁL A METODIKA

Metodika je rozdělena na čtyři dílčí části: I. tvorba numerického modelu, II. srovnání numerického řešení s experimentálním měřením a analytickým výpočtem (Horáček, 2014), III. příklad aplikace modelu při provedení citlivostní analýzy, IV. příklad aplikace modelu pro zjištění vlivu defektů na náklon a posunutí.

4.1 NUMERICKÝ MODEL ODEZVY STROMU BĚHEM TAHOVÉ ZKOUŠKY

4.1.1 FYZIKÁLNÍ PODSTATA MODELU

Práce je zaměřena na mechanickou analýzu chování stromu při tahové zkoušce. Analýza je prováděna při statickém zatížení a z mechanických dějů je sledován především vztah mezi vznikajícím napětím a deformací, kdy pracujeme s pohybem (posunem) bodů v prostředí. Řešená úloha je orientována na oblast lineárně elastického chování, můžeme tedy využít Hookeova zákona, který vychází z předpokladu, že vznikající deformace je přímo úměrná působícímu napětí (viz 3.2 – 2).

Pohyb bodů v prostředí lze vyjádřit vztahem:

$$[K] * \{u\} = \{F\} \quad 4.1-1$$

, kdy $[K]$ je globální matice tuhosti, $\{u\}$ je vektor posunutí, $\{F\}$ je vektor objemových sil.

V případě nahrazení hodnot absolutních (u – posun, F – objemové síly), hodnotami relativními získáme vztah napětí – deformace dle:

$$\{\sigma\} = [D] * \{\varepsilon\} \quad 4.1-2$$

, kdy $[D]$ je matice elasticity, $\{\varepsilon\}$ je vektor deformace, $\{\sigma\}$, je vektor napětí.

Vektory napětí a deformací se skládají ze složek normálových a smykových. Matice elasticity, resp. matice poddajnosti $[D]^{-1}$ pracuje v případě ortotropních materiálů také s moduly pružnosti normálovými a smykovými (Požgaj et al. 1993).

Metoda konečných prvků nahrazuje kontinuální analytické řešení napětí-o-deformační rovnice řešením algebraických rovnic pro konkrétní body diskretizovaných oblastí, na základě Lagrangeova variačního principu. Výsledkem je konvergované řešení dané úlohy (Tippner, 2010, Sebera, 2013).

4.1.2 TVORBA VÝPOČETNÍHO MODELU

Výpočetní model byl vytvořen za využití programu ANSYS® - Mechanical APDL verze 15.0. Výpočetní systém ANSYS® pracuje na bázi metody konečných prvků a umožňuje řešení různých fyzikálních úloh.

Cílem práce bylo vytvořit 3D model, který bude možné využít pro různé případové studie v podobě měnících se dendrometrických parametrů stromu a velikosti zátěže. Změna modelu by tedy měla být umožněna na základě jednoduché úpravy několika vstupních parametrů bez nutnosti zasahovat do další struktury modelu. Pro dosažení tohoto cíle bylo využito parametrického skriptovacího jazyka APDL (*Ansys Parametric Desing Language*).

Tvorba výpočtového modelu se skládá ze tří základních částí a) preprocessing (příprava), b) solution (řešič), c) postprocessing (zpracování dat).

4.1.2.1 Preprocessing

Obsahem preprocessingu je vytvoření geometrického modelu (zadání tvaru), konečně-prvkového modelu (rozdělení spojité oblasti na končeny počet prvků) a fyzikálního modelu (zadání materiálových vlastností a počátečních a okrajových podmínek řešení).

TVORBA GEOMETRIE

Pro tvorbu geometrického modelu byla využita metoda *from the top to bottom*, kdy se nejdříve vytvořily jednoduché objemy, kterým se automaticky přiřadily nižší entity (plochy, linie, keypointy). Model se skládá ze dvou základních typů objemů, podle toho zda se jedná o kmen nebo kořenový bal.

Kmen je tvořen z komolých kuželů. Kužely jsou poskládány na sebe v šesti různých výškových segmentech a po dvojicích vnořeny jeden do druhého. Výškové segmenty byly zvoleny v rozměrech, které jednak respektují změnu tvaru kmene (0 m, 0.6 m, 1 m, výška umístění úvazku) a jednak reflektují pozice měření průměru kmene při tahové zkoušce (0.3 m, 1.3 m, 2 m). Spodní část kmene vykazuje vyšší variabilitu změny průměrů, především díky kořenovým náběhům, proto je rozčleněna na více částí, které umožňují lepší vystižení výtvarnice. Průměry, které nejsou zjišťovány měřením, jsou dopočítávány jako střední hodnota dvou nejbližších průměrů. Tvorba vnitřního a vnějšího kuželu byla zvolena kvůli možnostem změny materiálového modelu. Vnější a

vnitřní vrstva tak může rozlišovat např. běl a jádro, případně hnilobu a zdravé dřevo ve stejné výškové úrovni kmene.

Kořenový bal je tvořen z kulových výsečí, které reprezentují kompozit tvořený kořeny a půdou. Ačkoliv současné studie ukazují, že významný vliv na tuhost ukotvení stromu má tvar kořenového systému (viz. 3.3.1), byla pro tuto studii upřednostněna praktická využitelnost. Tvar kořenových systémů může být druhové specifický, ale může být i významně ovlivněn vnějším prostředím (Mattheck, 1998, Coutts et al. 1999). Na rozdíl od lesního prostředí, kde je taxon celkem spolehlivým ukazatelem tvaru kořenového systému, v městském prostředí, kde jsou zcela odlišné až extrémní půdní podmínky (Craul, 1999, Urban, 2008), může být odhad tvaru kořenového systému na základě druhu dřeviny zavádějící (Day et al. 2010). U stromů ve městech se také ve většině případů setkáváme s tím, že byly vysazeny člověkem. Tyto stromy tedy byly zapěstovány ve školkách a před vysazením na stanoviště došlo několikrát k jejich přesazení. Školkování sazenic má významný vliv na tvar kořenového systému, kdy převažují kořeny adventivní a chybí zde kořen kulový (Dupuy et al. 2005) (obr. 6). Na rozdíl od tvaru kořenového systému je možné využít nadzemních parametrů pro rámcový odhad velikosti kořenového balu. Z dostupných zdrojů je asi nejlépe popsán vztah mezi dendrometrickými parametry nadzemní části a plošným rozsahem (poloměrem, průměrem) kořenového systému (Mattheck, 1994; Štofko, 2010). Jako ukazatel průměru kořenového systému je buď využíván průměr koruny (ČSN 83 9061) nebo průměr kmene (SPPK A01 002:2015). Pro popis staticky významné části kořenového systému je uváděna vzdálenost rovnající se průměru kmene, od báze kmene na styku s půdou, na každou stranu (Smiley, 2008, SPPK A01 002:2015).



Obr. 6 Kořenový systém sazenice alejového stromu: vlevo ze spodu, vpravo ze strany. Tyto sazenice se běžně používají pro výsadby v městském prostředí.

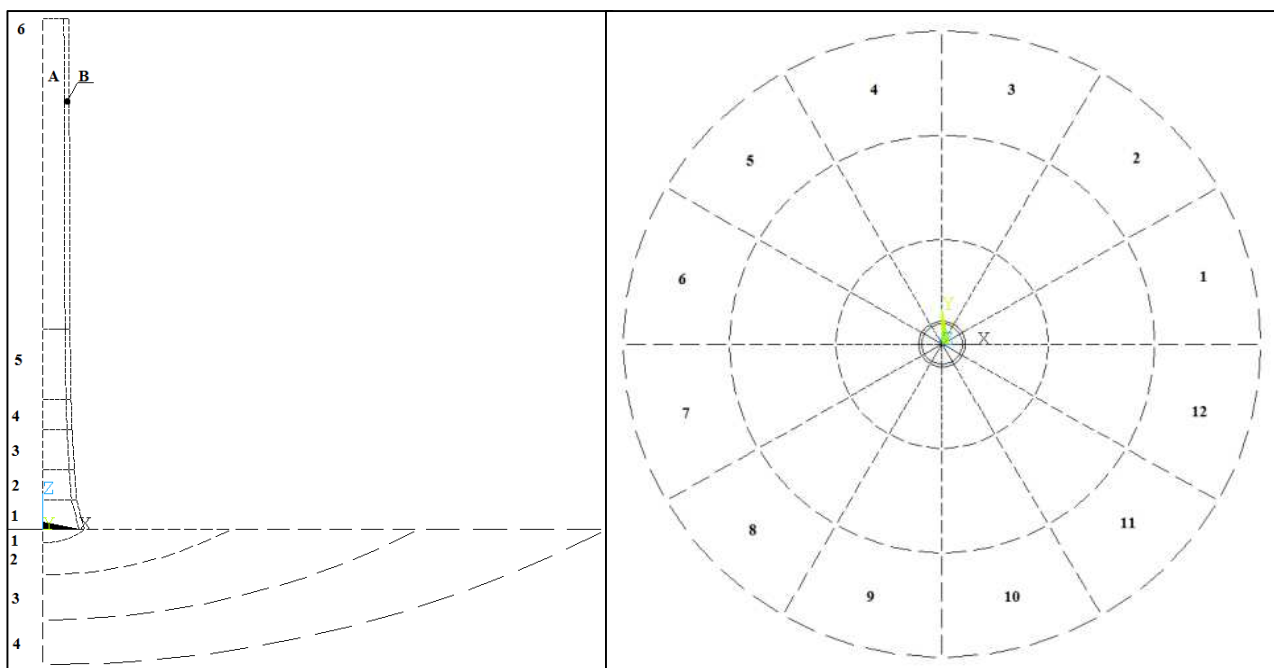
Model kořenového balu je rozdělen na čtyři vrstvy. První vrstva kopíruje průměr báze kmene a reprezentuje oddenek² kmene zasahující pod zem. Tato vrstva je tvořena pouze dřevem. U dalších vrstev se zvyšuje jejich průměr a snižuje podíl dřeva. Poslední čtvrtá vrstva je tvořena jen půdou a slouží k uchycení balu v prostoru. Ve stávajícím nastavení je zadávána velikost druhé vrstvy kořenového balu, kdy se vychází z experimentálního měření, nebo je možné zadat trojnásobek průměru kmene. Ostatní vrstvy jsou dopočítávány v třetinovém poměru k zadávané druhé vrstvě. Jednoduchou úpravou je možné nastavení změnit na zadávání parametrů vnější vrstvy a dopočítání velikosti vrstev vnitřních (například je možné použít jako vstupní parametr průměr koruny).

Hloubka kořenového systému je mnohem variabilnější než plošné rozměry. Vztah mezi nadzemními parametry (průměrem kmene) a hloubkou kořenového systému proto není zatím tak dobře popsán (Day et al. 2010, Štofko, 2010). Při tvorbě modelu tak vycházíme z předpokladu, že kořenový systém se vyskytuje spíše ve svrchních částech půdního profilu (Crow, 2005, Wang et al. 2006) a největší objem kořenů se většinou nachází přibližně do 60cm (Crown, 2005). V současném nastavení modelu je hloubka kořenového balu zadávána pro druhou vrstvu a ostatní vrstvy jsou dopočítávány v třetinovém poměru. Opět lze jednoduchou úpravou nastavit zadávání hloubky poslední vrstvy a dopočítání hloubky vrstev ostatních.

V poslední fázi tvorby modelu jsou všechny objemy rozděleny (rozřezány) do dvanácti výsečí po 30 °. Rozdělení objemů na jednotlivé výseče, bylo zvoleno kvůli požadavku na vysokou variabilitu modelu a jeho využití pro různé situace (např. zjištění reakce při poškození části kořenového systému).

Z vnořených objemů jsou vytvořeny objemy nové pomocí příkazu průniku objemů `VOVLAP`. Sdílení společných hranic všech objemů je zajištěno příkazem lepení objemů `VGLUE`.

² Oddenkem je pro účely práce myšlena část kořenové systému, která se nachází těsně pod zemí v rámci průměru kmene a je stále tvořena pouze dřevem.



Obr. 7 Geometrie modelu: vlevo nárys – zobrazuje a) rozdělení kmene na 6 výškových segmentů a na vnitřní (A) a vnější (B) vrstvu, b) rozdělení kořenového balu na čtyři vrstvy; vpravo půdorys – zobrazuje 12 výsečí.

MATERIÁLOVÝ MODEL

Zadání materiálu řeší dva základní požadavky: 1) využití segmentové geometrie a definice materiálu pro jednotlivé části modelu, 2) zadání materiálových vlastností pro ortotropní materiál, s využitím údajů pro čerstvé dřevo.

1) Definice a přiřazení materiálu pro jednotlivé části modelu

Pro přiřazení vlastností materiálu k jednotlivým objemům bylo využito příkazu `VATT`. `VATT` přiřadí vybraným objemům atributy. Mezi tyto se řadí číslo materiálového modelu, reálná konstanta, typ elementu, souřadný systém elementu.

Aby mohly být vlastnosti přiřazeny, musely být vybrány objemy postupně, zvlášť pro jednotlivé vrstvy a zvlášť pro výseče. Postupný výběr výsečí je zajištěn pomocí cyklického odkazu `*DO, *ENDDO` který zajišťuje opakování nadefinované smyčky pro stanovený počet cyklů (i). V případě výsečí se pro každou vrstvu, (kořenový bal), výškový segment (kmen), opakuje 12 cyklů. Celkem tedy 192 cyklů (kořenový bal – 4 vrstvy*12 cyklů, vnější vrstva kmene – 6 výškových segmentů*12 cyklů, vnitřní vrstva kmene – 6 výškových segmentů*12 cyklů). Problematický se ukázal výběr objemů jednotlivých vrstev. ANSYS® vybírá jednotlivé entity podle polohy těžiště. U koncentricky vytvořených kuželů a výsečí často dochází k překryvu těžiště. Proto byl

zvolen nejdříve výběr jednotlivých ploch, ke kterým se přiřadily objemy sdílející stejné hranice (obr. 8).

```
*DO,1,1,12
  CSYS,2                                !SFER. SOUR. SYST.
  ASEL,S,LOC,X,0,PRUM_PATA/2           !ODDENEK - VYBER PLOCHY
  ASEL,R,LOC,Y,(I-1)*30,I*30          !ODDENEK - 0.AZ I. HOD.
  CSYS,0                                !KART. SOUR. SYST.
  ASEL,R,LOC,Z,-(VYSKA_I*0.01),(VYSKA_I*0.01)
  VSLA,S,0                              !VYBER OBJEMU PRIRAZENYCH K PLOSE
  VSEL,U,LOC,Z,0,VYSKA_KMEN
  VATT,%100+I%,1,2,12                 !MAT.MODEL 100_112 - JEN DREVO
*ENDDO
```

Obr. 8 Ukázka výběru 1 vrstvy kořenového balu (oddenku) a přiřazení vlastností k těmto objemům.

Kvůli přiřazení zvoleného materiálu k vybranému objemu, je nutné zadaný materiál nadefinovat a pojmenovat. K tomuto účelu byly vytvořeny dva dávkovací soubory. Jeden pro kmen *mat_kmen*, a druhý pro kořenový bal *mat_korsys*. V každém souboru jsou definovány materiálové vlastnosti a pomocí vnořeného cyklu jsou tyto materiálové modely pojmenovány a jsou jim přiřazeny vlastnosti. Pro kořenový bal jsou zvoleny čísla materiálu ve stovkách, pro kmen v tisících (tab. 1).

Tab. 1 Pojmenování přiřazených materiálových modelů.

Vybraná část	Název materiálu (1-12 výseč)
Kořenový bal - vrstvy	
1. vrstva	100-112
2. vrstva	200-212
3. vrstva	300-312
4. vrstva	400-412
Kmen - vnitřní vrstvy	
1. výškový segment	1000-1012
2. výškový segment	1100-1112
3. výškový segment	1200-1212
4. výškový segment	1300-1312
5. výškový segment	1400-1412
6. výškový segment	1500-1512
Kmen - vnější vrstvy	
1. výškový segment	2000-2012
2. výškový segment	2100-2112
3. výškový segment	2200-2212
4. výškový segment	2300-2312
5. výškový segment	2400-2412
6. výškový segment	2500-2512

Pro plné využití rozčlenění geometrie na jednotlivé části a variability materiálu byla vytvořena matice koeficientů *koef_mat* (obr. 9). Nadefinované vlastnosti jsou násobeny jednotlivými koeficienty dle vztahu:

$$E_{II_name} = E_{II_i} * k_{(i,j)} \quad 4.1-3$$

kde E_{II_name} je modul pružnosti ve směru vláken pro vybranou výseč, E_{II_i} je nadefinovaný modul pružnosti pro vybranou vrstvu, nebo výškový segment a $k_{(i,j)}$ je koeficient v zadané pozici.

Vrstvy (i)	Vysece (j)											
0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Obr. 9 Ukázka matice ovlivňující materiálový model, vybraných částí. Za současného stavu mají všechny části 100% vlastnosti ze zadaných hodnot.

Všechny dávkové soubory *mat_kmen*, *mat_korsys*, *koef_mat* jsou načteny do hlavního souboru před započítáním výběru jednotlivých částí modelu. Aby matice koeficientů byla uspořádána v tabulce je využito příkazů ***DIM** – vytvoření tabulky a ***TREAD** – vyplnění tabulky.

2) Zadání materiálových vlastností pro ortotropní materiál, s využitím údajů pro čertsvé dřevo

Do materiálového modelu byly zadávány hodnoty pro moduly pružnosti, Poissonovy konstanty a hustotu. Tyto hodnoty byly definovány zvlášť pro kmen a zvlášť pro kořenový bal.

Kmen je tvořen dřevem. Dřevo je materiál s anizotropními vlastnostmi, tedy v každém směru se chová odlišně. Pro zjednodušení je často využíváno materiálového modelu ortotropního, který je pro dřevo ve většině případů dostačující (Požgaj et al. 1993, Bodig a Jayne, 1993). Do modelu tedy byly zadávány hodnoty definující ortotropní materiál, kdy předpokládáme tři roviny symetrie a definujeme tak tři normálové složky

a tři složky smykové. Hodnoty pro materiálový model mohly být získány buď z dostupné literatury, nebo přímo z měření. U simulace stromů je nezbytné vzít v úvahu, že pracujeme s dřevem v čerstvém stavu, tzn. že hodnoty modulů pružnosti se liší od těch, které byly naměřeny při 12% vlhkosti nebo v absolutně suchém stavu. Modul pružnosti se snižuje se zvyšující vlhkostí až do dosažení meze hygroskopicity (Horáček, 2010). Zdrojů, které by popisovaly chování dřeva v čerstvém stavu, není mnoho. Modul pružnosti v ohybu ve směru vláken pro čerstvé dřevo uvádí Lavers (1993) (LV) a Wood Handbook (2010) (WH). Modul pružnosti v tlaku ve směru vláken pro čerstvé dřevo taxonů rostoucích ve střední Evropě uvádí Erb a Wessolly (1998) (WE). Hodnoty těchto tří zdrojů byly porovnány pro různé druhy dubů. Rozdíl mezi LV a WH byl kolem 12%, kdežto mezi WE a WH kolem 29% a mezi LV a WE dokonce 45%. Spatz a Pfisterer (2013), kteří srovnávali korelaci mezi jednotlivými vlastnostmi a hustotou dřeva v čerstvém stavu, také uvádějí, že hodnoty LV a WH si odpovídají. Jako referenční hodnoty byly tedy použity hodnoty z Wood Handbook (2010). Další výhodou této publikace je fakt, že uvádí poměr hodnot mezi vlastnostmi jednotlivých druhů ve směru a napříč vláken pro normálové i smykové namáhání.

Wessolly (1995a) uvádí, že hodnoty modulů pružnosti se v průběhu výšky kmene mění. Ke stejnému závěru dojdeme i na základě provedených měření, kdy modul pružnosti dopočítáváme z naměřené deformace. Při používání naměřených hodnot je nezbytné vzít v úvahu, že výpočet modulu pružnosti může být ovlivněn zjednodušenou geometrií a skrytými defekty. Proto byly hodnoty z experimentálního měření porovnány s referenční hodnotou uváděnou Wood Handbook (2010). Rozdíl mezi průměrnou hodnotou měřených modulů pružnosti a hodnotou z Wood Handbook je 1,7 %. Hodnoty naměřené ve vyšší části kmene a v nižší části kmene se pak odlišují přibližně o 18 %. Na základě těchto informací byly pro tvorbu modelu zvoleny hodnoty modulů pružnosti z experimentálních měření. Jednotlivé hodnoty pro různé směry namáhání byly následně dopočítány z poměrů hodnot uvedených ve Wood Handbook (2010). Hodnoty Poissonových konstant pro čerstvá dřeva nejsou zatím nikde publikovány, proto byly použity hodnoty pro dřeva při 12% vlhkosti z Wood Handbook (2010). Z uvedených hodnot (tab. 2) byla následně vybrána malá Poissonova čísla, kvůli splnění požadavku na pozitivní definitnost matice elasticity (Tippner, 2010). Hustota dřeva byla zjištěna pro dřevo přesahující mez hygroskopicity také z Wood Handbook (2010).

Tab. 2 Hodnoty materiálových vlastností kmene pro tvorbu modelů pro *Quercus palustris*, Muenchh (vlastní měření, Wood Handbook, 2010).

Strom č. 1	$E_{L=z}$ [Pa]	$E_{R=x}$ [Pa]	$E_{T=y}$ [Pa]	$G_{LR=zx}$ [Pa]	$G_{LT=zy}$ [Pa]	$G_{RT=xy}$ [Pa]
Báze	7.59E+09	1.17E+09	6.23E+08	6.76E+08	6.15E+08	1.22E+08
1 m	9.22E+09	1.42E+09	7.56E+08	8.21E+08	7.47E+08	1.48E+08
2 m	1.10E+10	1.69E+09	9.00E+08	9.77E+08	8.89E+08	1.77E+08
Strom č. 2	$E_{L=z}$ [Pa]	$E_{R=x}$ [Pa]	$E_{T=y}$ [Pa]	$G_{LR=zx}$ [Pa]	$G_{LT=zy}$ [Pa]	$G_{RT=xy}$ [Pa]
Báze	4.70E+09	7.23E+08	3.85E+08	4.18E+08	3.80E+08	7.55E+07
1 m	8.98E+09	1.38E+09	7.36E+08	7.99E+08	7.27E+08	1.44E+08
2 m	1.02E+10	1.58E+09	8.40E+08	9.12E+08	8.30E+08	1.65E+08
Strom č. 3	$E_{L=z}$ [Pa]	$E_{R=x}$ [Pa]	$E_{T=y}$ [Pa]	$G_{LR=zx}$ [Pa]	$G_{LT=zy}$ [Pa]	$G_{RT=xy}$ [Pa]
Báze	3.97E+09	6.11E+08	3.25E+08	3.53E+08	3.21E+08	6.38E+07
1 m	7.75E+09	1.19E+09	6.36E+08	6.90E+08	6.28E+08	1.25E+08
2 m	8.03E+09	1.24E+09	6.58E+08	7.14E+08	6.50E+08	1.29E+08
	μ_{RL} [-]	μ_{TL} [-]	μ_{TR} [-]	μ_{LR} [-]	μ_{RT} [-]	μ_{LT} [-]
	0.064	0.033	0.292	0.35	0.56	0.448
	$\rho_{\text{dřevo}}$ [kg.m ⁻³]					
	1021					

Při definici materiálu pro **kořenový bal** vycházíme z předpokladu, že se jedná o kompozit dřeva kořenů a půdy. Pro stanovení modulu pružnosti kompozitu využíváme směsné pravidlo dle vztahu:

$$E_{\text{bal}_i} = E_{\text{kořen}} * k_{\text{kořen}_i} - E_{\text{puda}} * (1 - k_{\text{kořen}_i}) \quad 4.1-4$$

kde E_{bal_i} je modul pružnosti balu pro danou vrstvu, $E_{\text{kořen}_i}$ je modul pružnosti kořenů, E_{puda} je modul pružnosti půdy a $k_{\text{kořen}_i}$ je podíl kořenů v dané vrstvě.

Vzhledem k tomu, že u kořenového balu předpokládáme izotropní chování materiálu, zadáváme pouze jeden modul pružnosti pro kořen. Ačkoliv literatura uvádí, že hodnoty modulů pružnosti pro kořeny jsou řádově nižší než pro dřevo kmene (Commandeur a Pyles, 1991, Lui et al. 1994), nebyl zatím žádný spolehlivý přehled na toto téma zpracován. Vycházíme tedy z předpokladu, že dřevo kořenů má v blízkosti kmene podobnou stavbu jako dřevo kmene. Se vzrůstající vzdáleností od kmene se pak dřevo kořenů začíná významně odlišovat (Schweingruber, 2007, Vavrčík et al. 2006). Pro modul pružnosti dřeva byla tedy zvolena hodnota naměřená ve spodní části kmene a případný úbytek tuhosti je vyřešen snižováním podílu kořenů v jednotlivých vrstvách. Podíl kořenů $k_{\text{kořen}_i}$ je zatím přibližně odhadován a v jednotlivých vrstvách se snižuje. Pro strom č. 1 byl předpokládán 50% objem kořenů v druhé vrstvě a 10% objem kořenů

ve třetí vrstvě (první vrstva je oddenek a je tedy tvořena jen kořeny, čtvrtá vrstva je zase tvořena pouze půdou).

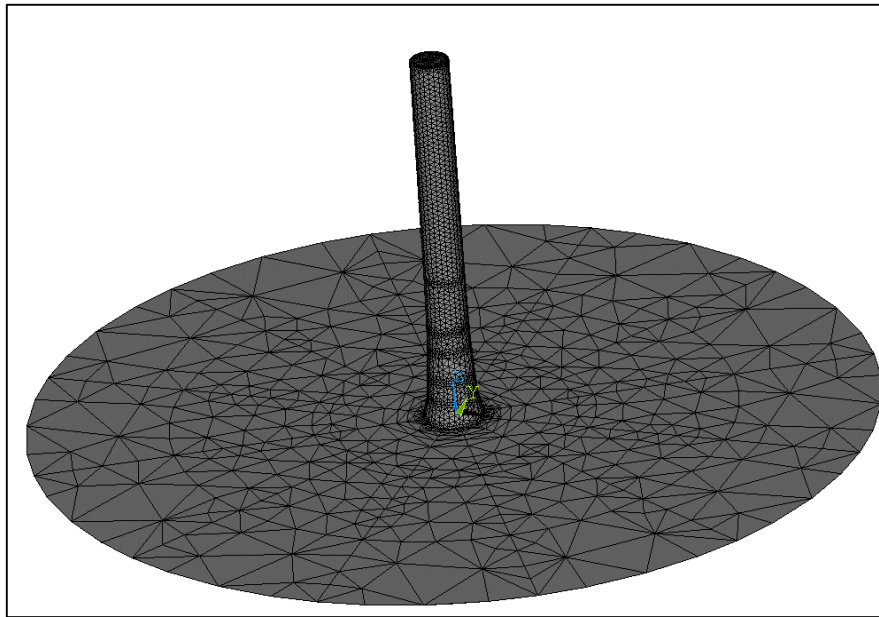
Modul pružnosti půdy a Poissonova konstanta jsou velmi obtížně zjistitelné parametry. Především pro půdy v městském prostředí jsou tyto údaje mizivé. Stanovení hodnot těchto parametrů pro tvorbu materiálového modelu opět probíhalo porovnáním několika zdrojů. Porovnány byly články, které se zabývaly numerickými simulacemi (Yang a Jeremi 2002, Dupuy et al. 2007, Fourcaud et al. 2008, Khalilnejad et al. 2012) a literatura popisující mechanické vlastnosti půdy (Bowles, 1996, Obrzud a Truty, 2012). Na základě porovnání literatury a podmínek stanoviště byla zvolena hodnota modulu pružnosti 20 MPa a Poissonovy konstanty 0.3 dle Bowles (1996). Hustota půdy byla stanovena na 2000 kg.m^{-3} dle (Fourcaud et al. 2008).

VYTVOŘENÍ SÍŤE

Numerický model je sestavován pro výpočetní řešení, které je založené na metodě konečných prvků. Pro odpovídající výsledky je proto nutné zvolit vhodný typ a velikost elementů. Pro strukturální 3D úlohy je možné volit prvky ze skupiny SOLID. Síť je možné vytvořit ze dvou základních typů elementů – hexahedronů a tetrahedronů. Hexahedrony poskytují kvalitnější výpočet díky své pravidelné struktuře. Na druhou stranu tetrahedrony umožňují síťování objektů se složitější geometrií. Pro vytvoření vhodné sítě byly zkoušeny obě varianty. Pro hexahedronovou síť byl zvolen element SOLID185 s osmi uzly a třemi stupni volnosti, umožňující posunutí ve všech třech směrech. Pro tetrahedronovou síť byl zvolen element SOLID187 s deseti uzly a třemi stupni volnosti.

Síťování elementem SOLID185 se ukázalo jako problematické především u 1 vrstvy kořenového balu, kdy objemy neměly požadovaný tvar pro využití automatické funkce na tažení sítě. Tažení sítě byl přitom jediný možný způsob pro vysíťování tohoto typu geometrie. Proto bylo zvoleno manuální zadání počáteční a konečné plochy pro vytvoření tažené sítě. Pro snížení počtu deformovaných elementů byla zvolena menší velikost elementu. Tím se ovšem neúměrně zvýšil čas nutný pro výpočet a pokles špatných elementů nebyl významný. Následně byla zvažována možnost kombinace hexahedronové sítě pro kmen a tetrahedronové pro kořenový bal, současná verze ANSYS® 15.0 ovšem neobsahuje strukturální elementy (pyramidy), které by umožňovaly propojení těchto dvou typů elementů.

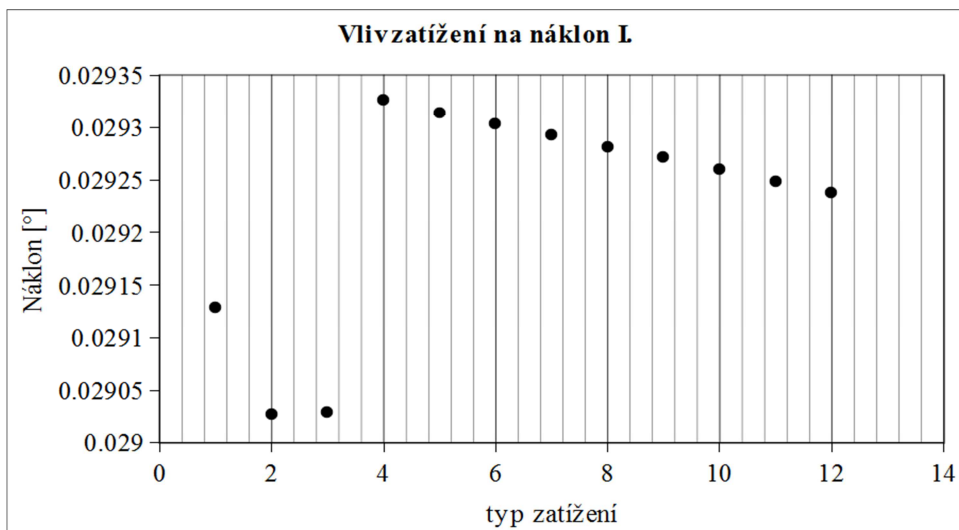
Nakonec je tedy pro model zvoleno síťování elementem SOLID187. Výběr tetrahedronů umožňuje zároveň i využití funkce `SMRTSIZE`, která automaticky přiřadí menším nepravidelným objemům menší elementy a větším pravidelným tvarům elementy vyšší, čímž šetří nároky na výpočetní čas v místě, kde je to vhodné. Při využití příkazu `SMRTSIZE` se nezadává konkrétní velikost elementů, ale úroveň jemnosti sítě. Pro model byla zvolena hodnota 1, což je nejjemnější typ sítě. Cílem bylo dosáhnout dostatečného počtu elementů i ve vnější části kmene.



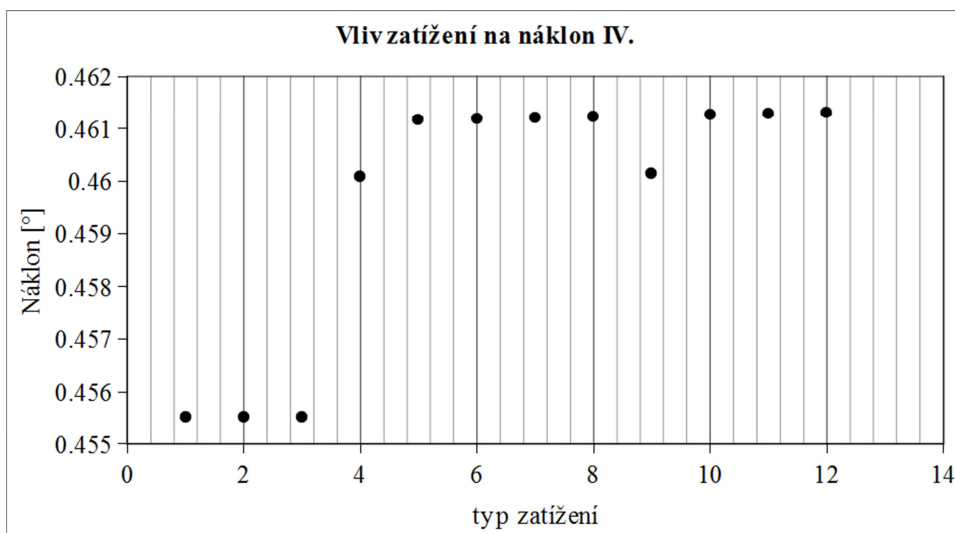
Obr. 10 Ukázka vytvořené sítě modelu (SOLID187).

POČÁTEČNÍ A OKRAJOVÉ PODMÍNKY

Při zadávání počátečních a okrajových podmínek bylo zvažováno, zda zadávat zatížení vlastní hmotností a zatížení hmotou koruny. Jak bylo uvedeno v kap. 3.2.1.1 při malých deformacích vyvolaných tahovou zkouškou, je toto zatížení zanedbatelné. Pro posouzení vlivu byly vyzkoušeny varianty: bez zatížení vlastní hmotností, se zatížením pouze kmenem, se zatížením kmenem a půdou a se zatížením kmenem, půdou a korunou v rozsahu od 20 – 100% z hmotnosti kmene. Výsledky ukazují, že k vyššímu nárůstu náklonu dochází při započítání všech třech typů zatížení (obr. 11). I přesto je ale maximální rozdíl mezi výstupy bez zatížení a se zatížením 1,3 %. Pro simulaci byla zvolena hodnota zatížení 60 % hmotnosti koruny z hmotnosti kmene (obr. 12).



Obr. 11 Výsledky náklonu z inklinometru č. 1, typy zatížení jsou v následujícím pořadí: bez zatížení, zatížení vlivem kmene, zatížení vlivem kmene a půdy, zatížení vlivem, kmene, půdy a hmoty koruny – 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %, 100 %.



Obr. 12 Výsledky náklonu z inklinometru č. 4 – výška ukotvení stromu, typy zatížení jsou v následujícím pořadí: bez zatížení, zatížení vlivem kmene, zatížení vlivem kmene a půdy, zatížení vlivem, kmene, půdy a hmoty koruny – 20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %, 70 %, 80 %, 90 %, 100 %.

Zadání tíhy kmene a půdy je provedeno příkazem `ACEL`, které aplikuje zrychlení. V tomto případě se jedná o zadání gravitační konstanty $9.81 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Zatížení hmotou koruny probíhá aplikováním síly ve směru osy z na všechny keypointy, které se nacházejí na vrchní ploše kmene.

Síla vyvolaná při tahové zkoušce působí na strom pod úhlem, při kterém je lano ukotveno. Jednotlivé složky působící síly jsou tedy vypočítány dle:

$$F_x = F * \cos \alpha \quad 4.1-5$$

$$F_z = -(F * \sin \alpha) \quad 4.1-6$$

kde F_x je horizontální složka síly, F_z je vertikální složka síly, F je síla aplikovaná při tahové zkoušce, α je úhel taženého lana.

Jednotlivé složky síly jsou aplikovány na keypointy, které se nacházejí v 1/2 obvodu části kmene ve výšce úvazku. Podobný efekt se předpokládá při umístění úvazku u tahové zkoušky. Velikost aplikované síly se shoduje s maximální aplikovanou silou při terénním měření: strom č.1 $F=17048\text{N}$, strom č.2 $F=21\,009\text{N}$, strom č.3 $F=13\,459\text{N}$.

Ukotvení stromu je zajištěno aplikováním nulových stupňů volnosti ve všech třech směrech. Toto ukotvení je nastaveno pro všechny plochy vnějšího pláště kořenového balu (4. vrstva).

4.1.2.2 Solution (řešič)

Samotné řešení probíhá v rámci implementovaných numerických řešičů. Řešič je spuštěn v deseti krocích, ve kterých postupně narůstá aplikovaná síla. Tohoto principu je dosaženo pomocí cyklu *DO. Každý z kroků řešení je zapisován do výsledkového souboru. Řešení je nastaveno pro lineární chování a malé deformace. Bylo zvažováno zařazení velkých deformací a nelineárního chování. Toto řešení bylo vyzkoušeno pomocí příkazu NLGEOM. Následně byl srovnán rozdíl mezi výstupními hodnotami pro řešení malých a velkých deformací. Nárůst hodnot se objevil pouze u extenzometru č. 3 a to maximálně o 1,9 %. Vzhledem k významnému zvýšení výpočetního času bylo proto zatím spuštění velkých deformací vyřazeno.

4.1.2.3 Postprocessing

Pro zpracování vypočtených dat byl zvolen *General postprocessor*, který umožňuje získat výsledky jednoho kroku v jednom okamžiku. ANSYS® poskytuje mnoho možností pro extrakci a zobrazení výsledků. Mezi základní parametry, se kterými pracuje v rámci strukturální analýzy, jsou posunutí uzlových bodů.

Pro výstup tedy byly zvoleny hodnoty posunutí bodů v místech, kde jsou při tahové zkoušce umístěny snímače posunutí (extenzometry) a náklonu (inklinometry).

POSTPROCESSING - HODNOT EXTENZOMETRŮ

Výpočet je nastaven pro tři extenzometry umístěné ve výšce EL1 – 0.3 m, EL2 – 1 m a EL3 – 2 m. Vzhledem k tomu, že extenzometry u reálných měření sledují posunutí vláken mezi místem kde je fixně umístěna spodní část a místem kde je možný posun čidla, bylo zhodnoceno, že pro zjištění adekvátní hodnoty je nutné získat rozdíl posunutí mezi dvěma body (obr. 13). Získání těchto hodnot probíhá na základě tří kroků: 1) získání původní polohy bodů a velikosti vektoru mezi nimi, 2) získání polohy bodů po zatížení a velikosti vektoru mezi nimi, 3) výpočet rozdílu mezi vektorem před zatížením a po zatížení. Práce s vektory byla zvolena, kvůli vystižení posunu bodů v trojrozměrném prostoru.

1) Získání původní polohy bodů a velikosti vektorů posunutí mezi nimi

Výběr polohy (souřadnic) bodů probíhá na základě příkazu `*GET`, kdy zadáme vypsát polohu v ose x, y, z pro body, které vyžadujeme. Aby mohl být tento příkaz použit, pro body, musíme požadované body nejdříve označit. Poloha bodu je vybírána pomocí cylindrického souřadného systému, tedy výška umístění extenzometru - osa z, průměr kmene v dané výšce – osa x, a úhel umístění extenzometru na kmeni – osa y. Bod č. 1 – EL1 je vždy zvolen ve výšce umístění extenzometru při měření, bod č. 2 – EL1b je zvolen 20 cm bodem EL1, stejně jako je stanovena referenční výška extenzometrů.

Ze získaných souřadnic x, y, z bodů EL1 a EL1b je vypočítaná velikost výsledného vektoru dle vztahu:

$$|\vec{u}| = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} \quad 4.1-7$$

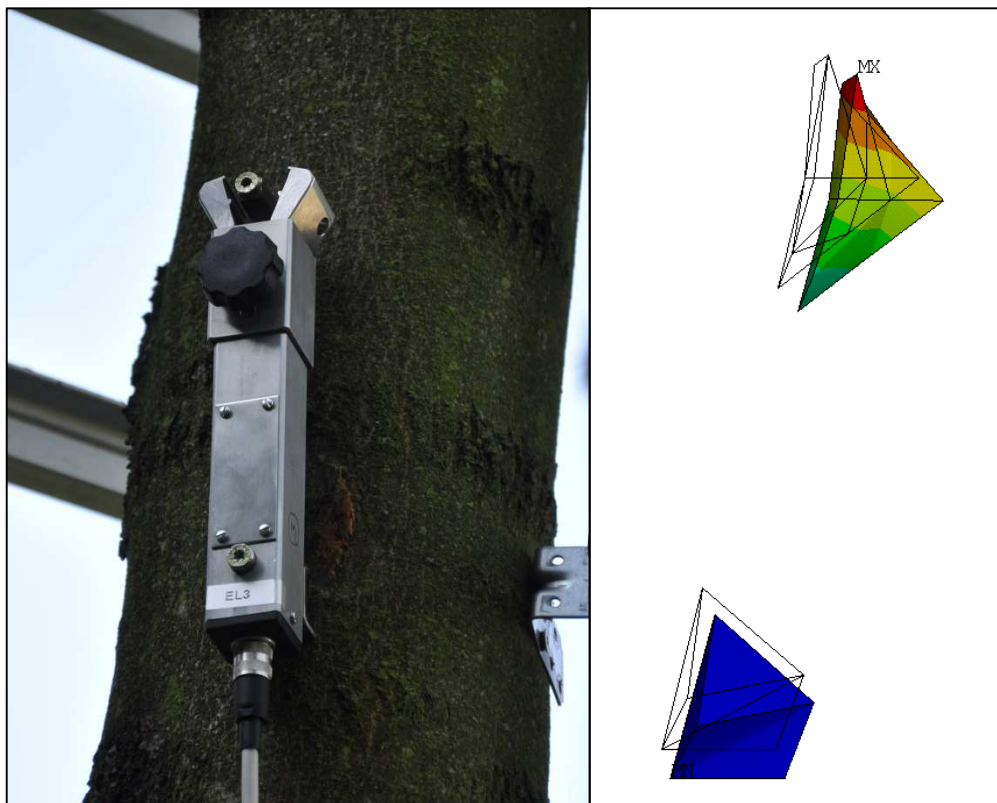
kde \vec{u} je velikost výsledného vektoru (tedy vzdálenost mezi původními body v rámci 3D), u_x , u_y , u_z jsou vzdálenosti mezi polohou bodu EL a ELb v jednotlivých osách.

2) Získání polohy bodů po zatížení a velikosti vektoru posunutí mezi nimi

Polohu bodů po jejich zatížení je možné dopočítat z hodnot jejich posunutí. Hodnoty posunutí jsou opět získávány příkazem `*GET`. Pro vypočítání polohy bodů po jejich zatížení se opakuje stejný postup výpočtu velikosti vektoru dle vztahu 4.1-7. Abychom získali pozici v každém kroku výpočty je opět využito cyklu `*DO,*ENDDO` pro 10 kroků.

3) Výpočet rozdílu mezi vektorem posunutí před zatížením a po zatížení

Rozdíl mezi velikostí vektoru posunutí před a po zatížení probíhá prostým odečtením. Získaná hodnota by měla dle předpokladu odpovídat Δl , která je měřena extenzometry.



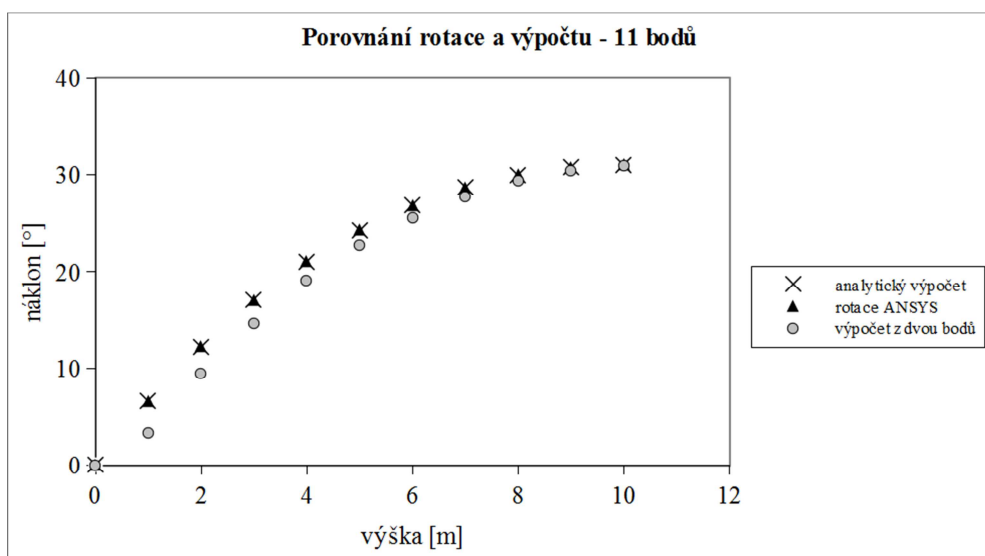
Obr. 13 Vlevo - měření: umístění extenzometru při měření, spodní část je pevně přichycena ke kmeni, vrchní část umožňuje pohyb a snímá pomocí čidla posunutí dřevních vláken; vpravo - simulace: elementy, přiřazené k bodům v poloze umístění extenzometrů, před a po zatížení.

POSTPROCESSING – HODNOT INKLINOMETRŮ

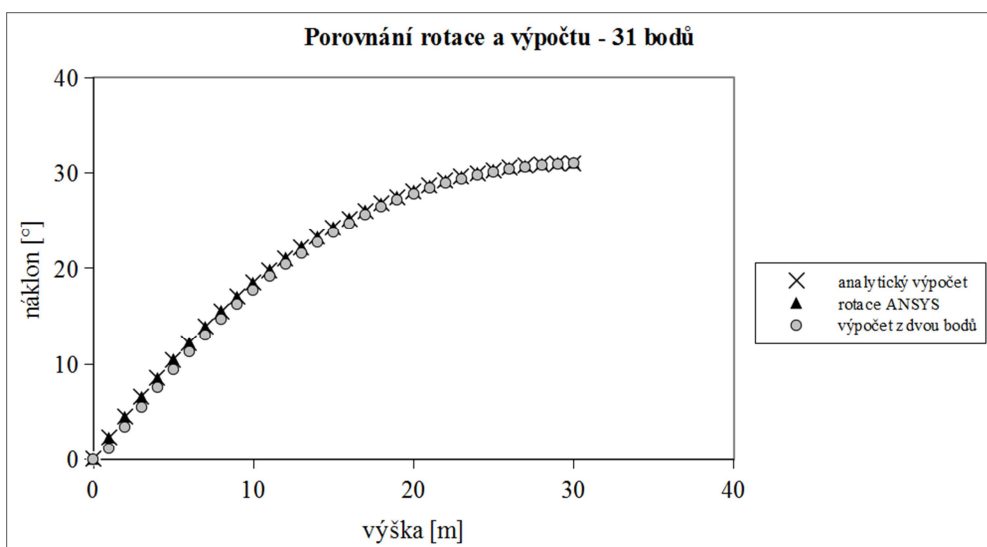
Výpočet je nastaven pro čtyři inklinometry umístěné ve výšce 0.3 m, 1 m, 2 m, výška umístění úvazku a pro jeden úhel, vyjadřující rotaci na bázi kmene (viz. 4.2.2). Podobně jako u extenzometrů bylo cílem zjistit parametry odpovídající reálnému měření. Při měření inklinometry je získanou hodnotou úhel, který vyjadřuje pootočení inklinometru v daném místě. Úhel v sobě tedy kombinuje jednak pootočení kmene a jednak pootočení kořenového balu.

V případě, kdy je řešena problematika průhybu nosníku je možné v ANSYS® využít prutové elementy (BEAM), u kterých lze zobrazit jejich rotaci. U prvků tělesových (SOLID) byl pro získání rotace bodů tedy opět zvažován výpočet z posunutí dvou bodů.

Aby se tento předpoklad ověřil, byla vytvořena verifikační úloha z jednostranně vetknutého nosníku. V jednotlivých bodech nosníku byly vylistovány jejich rotace a tyto následně porovnány s vypočteným úhlem mezi posuny dvou nejbližších bodů (viz. 4.1-8). Abychom ověřili, že rotace poskytují hodnoty odpovídající potočení nosníku, byl pro kontrolu proveden také analytický výpočet dle 3.2-3. Hodnoty rotací a analytického výpočtu si odpovídaly na 100 %, u porovnání hodnot výpočtu úhlu z dvou bodů a rotací dochází k malé odchylce ve spodní části nosníku, která se ovšem zmenšuje se klesající vzdáleností mezi vybranými body (obr. 14, 15). Postup výpočtu úhlu z dvou bodů je tedy adekvátní.



Obr. 14 Výsledky verifikační úlohy pro ověření postupu výpočtu náklonu pro 11 bodů.



Obr. 15 Výsledky verifikační úlohy pro ověření postupu výpočtu náklonu pro 31 bodů.

Získání výsledné hodnoty úhlu se opět skládá z tří kroků: 1) získání původní polohy bodů a vzdáleností mezi nimi v jednotlivých osách (x, y, z), 2) získání polohy bodů a vzdáleností mezi nimi v jednotlivých osách (x, y, z) po zatížení, 3) výpočet úhlu mezi výslednými vektory. Výsledné vektory opět vyjadřují pozice bodů v trojrozměrném prostoru a počítaný úhel je mezi vektorem před a po zatížení.

Získání, 1) **původní polohy bodů a 2) polohy bodů po zatížení a vzdáleností mezi nimi**, je založeno na stejném principu jako u extenzometrů. Lokalizace bodů v prostoru je: výška umístění inklinometru – osa z, průměr kmene v dané výšce – osa x, úhel umístění inklinometru – osa y. Bod č. 1 – I1 je vždy zvolen ve výšce umístění inklinometru při měření, bod č. 2 – I1b je zvolen 5cm pod bodem I1.

3) **Výpočet úhlu mezi výslednými vektory** je dán vztahem:

$$\theta = \cos^{-1} \left[\frac{(u_x * v_x + u_y * v_y + u_z * v_z)}{\sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2} * \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}} \right] \quad 4.1-8$$

kde θ je výsledný úhel, u_x, u_y, u_z jsou vzdálenosti mezi původní polohou bodu I a I1, v_x, v_y, v_z jsou vzdálenosti mezi body I a I1b po zatížení.

Údaje pro náklon kořenového balu jsou získávány na stejném principu, akorát body I5 a I5b jsou od sebe vzdálené v ose x, nikoliv v ose z. Bod I5 je vybrán v počátku souřadného systému [0,0,0]. Počátek je umístěn ve středu kmene na rozhraní kmene a kořenového balu.

4.2 POROVNÁNÍ NUMERICKÉHO ŘEŠENÍ, EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ A ANALYTICKÉHO VÝPOČTU

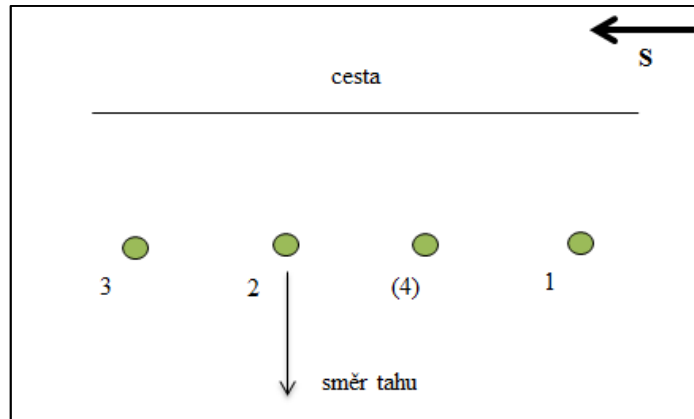
4.2.1 EXPERIMENTÁLNÍ MĚŘENÍ

4.2.1.1 Stanoviště

Měření probíhalo na výzkumných plochách společnosti Davey Tree Expert – Ravenna Ohio, USA. Stanoviště se nachází v oblasti Ravenna. Půda je tvořena prachovitou jílovitou hlínou dle klasifikace NRSCS USDA s nízkou až velmi nízkou rychlostí infiltrace. Mírný 2-6% svah je orientován západně. Průměrný roční úhrn srážek je 800 – 1000 mm, a průměrná roční teplota se pohybuje v rozmezí 8 – 12 °C.

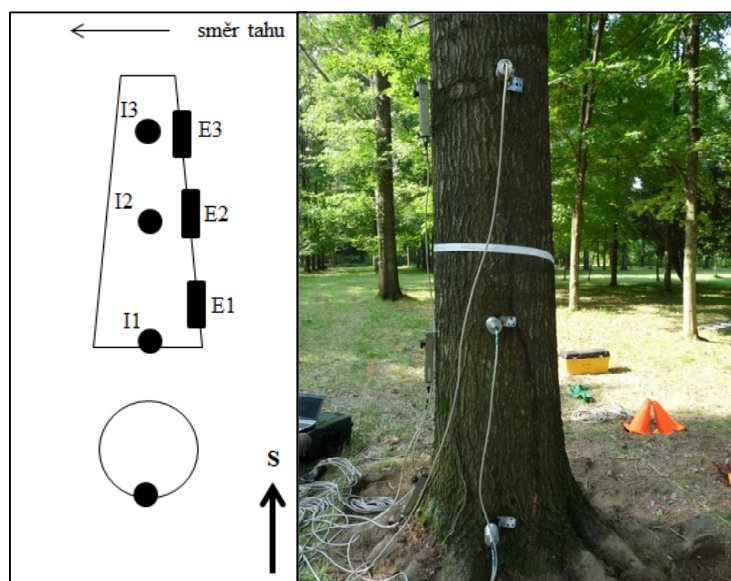
4.2.1.2 Měření

Pro měření byly vybrány tři duby bažinné (*Quercus palustris*, Muenchh.), které spadají do sekce červených dubů. Tyto duby byly vysazeny v pravidelných rozestupech přibližně 15 m od sebe (obr. 16). Dendrometrické parametry jsou uvedeny v tab. 3.



Obr. 16 Schématické zobrazení pozice stromů. Strom. č. 4 byl vyřazen na základě chybného měření.

Na stromy byly umístěny tři extenzometry a tři inklinometry po výšce kmene (tab. 3, obr. 17). Extenzometry byly umístěny na tahovou stranu (západ) a inklinometry do neutrální osy, tedy o 90° dále. Typ extenzometrů je T101F od firmy, Mesing Ltd. s citlivostí $0.01 \mu\text{m}$ a měřícím rozsahem $\pm 2 \text{ mm}$. Extenzometry musí být umístěny do bělové části kmene. Inklinometry Sitall STS 110 zaznamenávají s přesností 0.001° a jejich měřicí rozsah je $\pm 10^\circ$ do $\pm 45^\circ$.



Obr. 17 Pozice přístrojů, vlevo: schématické zobrazení.

Siloměr byl připojen na tažné lano, které bylo na jedné straně umístěno ve výšce úvazku a na druhé straně v místě ukotvení elektrického navijáku (úhel tažného lana a výška umístění úvazku jsou uvedeny v tab. 3). Všechny stromy byly tahány východním směrem. Siloměr je značky Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH s kapacitou 50 kN a třídou přesnosti 0.1.

Všechna data byla synchronně zaznamenávána za použití dataloggeru DEWE43 od společnosti DEWETRON Elektronische Messgeräte. Datalogger má 8 synchronizovaných kanálů, frekvence byla nastavena na 10 Hz.

Během jednoho měření byl strom zatěžován třikrát po sobě, hraniční hodnotou byl náklon 0.1° inklinometru umístěného u báze, pro vyloučení plastifikace kořenového balu (Jonsson, 2006).

Po provedení tahových zkoušek, byly stromy záměrně poškozeny a na závěr zatěžovány až do bodu selhání, kdy byla snímána jejich reakce. Po úplném vyvrácení byl změřen průměr a hloubka kořenového systému a odhadnut podíl kořenů (tab. 3, obr. 18).



Obr. 18 Kořenový bal po vyvrácení – strom č. 1.

Tab. 3 Dendrometrické parametry a pozice měření při tahové zkoušce.

Číslo stromu		1	2	3
Dendrometrické parametry				
Výška stromu	[m]	25	27	22
Průměr kmene báze	[cm]	81	70	55
Průměr kmene 1.3 m	[cm]	55	45	38
Kořenový bal				
t (hloubka koren. Balu)	[m]	0.45	0.45	0.75
a (polomer koren. Balu)	[m]	1.85	1.50	1.50
Podíl kořenů		0.50	0.50	0.50
Pozice přístrojů				
Pozice umístění snímačů E1/I1	[m]	0.3	0.3	0.3
Průměr kmene E1/I1	[cm]	66	62	48
Pozice umístění snímačů E2/I2	[m]	1	1	0.3
Průměr kmene E2/I2	[cm]	57	49	48
Pozice umístění snímačů E3/I3	[m]	2	2	2
Průměr kmene E3/I3	[cm]	53	45	37
Výška úvazu	[m]	5.1	4.7	3.65
Vzdálenost kotvení	[m]	11	11	10
Úhel lana	[°]	22	19	14

4.2.2 ANALYTICKÝ VÝPOČET

Analytický výpočet, byl vytvořen (Horáček 2013, Ústav nauky o dřevě, LDF MENDELU) jako nový nástroj pro vyhodnocení odolnosti stromu proti vývratu. V současné době je tento přístup ve fázi vývoje. Základní princip je postaven na porovnání naměřených a vypočtených hodnot. Vypočtené hodnoty podávají informace o předpokládaném náklonu hodnoceného stromu bez poškození. Pokud jsou hodnoty měřeného náklonu významně vyšší, je možné předpokládat narušení kořenového systému (Horáček, 2014).

Předpokládaný náklon stromu je počítán dle vztahu:

$$M = k_{kmen} * \theta_1 + k_{kb} * \theta_2 \quad 4.2-1$$

kde M je aplikovaný ohybový moment, k_{kmen} je tuhost kmene, k_{kb} je tuhost kořenového balu, θ_1 je náklon způsobený průhybem kmene, θ_2 je náklon způsobený pootočením kořenového balu.

Průhyb kmene je počítán na základě vztahu pro průhyb nosníku (viz. 3.2-3). U vyjádření vztahu pro pootočení kořenového balu se vychází z předpokladu, že kořenový bal vytváří desku o daných materiálových vlastnostech (kompozit kořenů a půdy), na

kteřé je položen čep (kmen). Vstupní parametry pro výpočet náklonu kořenového balu jsou: a) poměr mezi poloměrem kmene a poloměrem kořenového balu, b) aplikovaný ohybový moment, c) modul pružnosti kompozitu kořeny-půda (podíl kořenů), d) hloubka kořenového systému a to dokonce ve třetí mocnině (Horáček, 2014).

Princip volby některých parametrů numerického modelu odpovídá principu analytického modelu. Stejný přístup byl zvolen především u rozměrů kořenového balu a jeho definice jako kompozitu, bez rozlišování konkrétní geometrie.

4.2.3 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Vyhodnocení výsledků je provedeno na základě zjištěných směrnic ze vztahu aplikovaného ohybového momentu a výsledného náklonu nebo posunutí. Směrnice vyjadřují lineární vztah mezi ohybovým momentem a náklonem a jsou parametrem tuhosti celého systému (kmen a kořenový bal). V případě posunutí pak vyjadřují tuhost kmene. Moment je vypočítán pro každou pozici přístroje dle vztahu:

$$M_i = F_x * (h - h_i) \quad [\text{kNm}] \quad 4.2-2$$

kde M_i je ohybový moment v místě umístění přístroje, F_x je horizontální složka síly, h je výška umístění úvazku, h_i je výška umístění přístroje.

Směrnice jsou porovnávány relativní odchylkou, kde za referenční hodnotu (100 %) je považována hodnota měření. Při porovnání hodnot z numerického a analytického výpočtu je za referenční hodnotu pokládán analytický výpočet. Dále bylo zjišťováno, zda je mezi různými typy řešení (numerický výpočet, analytický výpočet, experimentální měření) statisticky významný rozdíl za použití ANOVY. Pro zpracování dat byl použit program GNUPLOT, pro statistické zpracování program STATISTICA 12.

4.3 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

Citlivostní analýza slouží ke zjištění vztahu mezi jednotlivými parametry (např. vstupních hodnot na výstup). ANSYS® umožňuje u parametrizovaných modelů provedení pravděpodobnostní citlivostní analýzy opakovanými výpočty při náhodném generování hodnot metodou *Monte Carlo*. Generování hodnot je zajištěno vnitřním příkazem. Citlivostní analýza byla provedena ve třech variantách pro: 1) zjištění vlivu různého umístění přístrojů, 2) zjištění vlivu změny rozměrů kmene, 3) zjištění vlivu

změny rozměrů a vlastností kořenového balu. Všechny citlivostní analýzy byly provedeny na stromu č. 1.

1) Zjištění vlivu různého umístění přístrojů

Jako vstupní parametry byly definovány výšky a úhly umístění přístrojů. Pro inklinometry byl zvolen rozsah změny výšky (`VYSKA_I(1)`) v rámci 10cm od původní pozice (0.3 m, 1 m, 2 m) a 0-180 ° pro změnu polohy kolem obvodu kmene (`UHEL(1)Y`). Pozice pro zjištění úhlu na bázi kmene (`I5OSAX`) se měnila na ose x v rozsahu 0 až poloměr kmene na bázi. Umístění extenzometrů se po výšce (`VYSKA_EL(1)`) mění také v rozsahu 10cm, jejich poloha (`UHELEL(1)Y`) kolem obvodu kmene se mění v rozsahu 0-90 °. Pro generování hodnot bylo zvoleno normální rozdělení (`UNIFORM`).

```

PDVAR,VYSKA_I1,UNIF,0.2,0.3      !ROZSAH ZMENY VYSKY 0.2M – 0.3M
PDVAR,UHEL1Y,UNIF,0,180         !ROZSAH ZMENY POLOHY 0-180°
                                (CYL.SOUR. SYS.– OSA Y)
prikaz UNIF definuje normalni rozdeleni generovanych hodnot

```

Obr. 19 Ukázka definice rozsahu vstupních parametrů.

Jako výstupní parametry byly definovány všechny náklony a posunutí pro zadané pozice přístrojů. Analýza byla provedena pro 300 výpočtů.

Tab. 4 Přehled vstupních a výstupních parametrů pro citlivostní analýzu – 1. Zjištění vlivu různého umístění přístrojů (`PHI(1)_10` je zjišťovaný úhel náklonu θ při maximálním zatížení, `u_EL(1)10` je zjišťované posunutí Δl při maximálním zatížení).

vstup	výstup
vyska_I1	phi1_10
uhel1y	phi2_10
vyska_I2	phi3_10
uhel2y	phi4_10
vyska_I3	phi5_10
uhel3y	u_EL110
vyska_I4	u_EL210
uhel4y	u_EL310
I5osax	
vyska_EL1	
uhelEL1y	
vyska_EL2	
uhelEL2y	
vyska_EL3	
uhelEL3y	

2) Zjištění vlivu změny rozměrů kmene

Tato analýza vyžadovala úpravu tvorby geometrie kmene. Jediný parametr, který je zadáván je průměr kmene ve výčetní výšce (1.3 m), ostatní průměry jsou dopočítávány na základě koeficientu sbíhavosti. Pro vystižení rozšiřující se báze kmene je k poslednímu segmentu přičítáno ještě 20 %, k předposlednímu segmentu 10 %, z poloměru kmene. Vstupní parametry a jejich rozsahy jsou: a) průměr kmene v 1.3 m (PRUM_4) 0.4-1 m, b) výška kmene v místě úvazku (VYSKA_KMEN) 2.5-6 m, c) sbíhavost (D_L) 0.01-0.04 cm.m⁻¹. Výstupními parametry jsou a) všechny náklony (PHI(i)_I0) a posunutí (U_EL(i)I0) pro zadané pozice přístrojů, b) štíhlostní koeficient (D_H), c) čtvrtá mocnina průměru v 1.3 m (D4). Pro generování hodnot bylo zvoleno normální rozdělení (UNIFORM). Analýza byla provedena ve dvou krocích, které byly spojeny. Celkem bylo provedeno 114 výpočtů.

Tab. 5 Přehled vstupních a výstupních parametrů pro citlivostní analýzu – 2. Zjištění vlivu změny rozměrů kmene (PHI(i)_I0 je zjišťovaný úhel náklonu θ při maximálním zatížení, U_EL(i)I0 je zjišťované posunutí Δl při maximálním zatížení).

vstup	výstup
prum_4	phi1_10
vyska_kmen	phi2_10
d_1	phi3_10
	phi4_10
	phi5_10
	d_h
	d4
	u_EL110
	u_EL210
	u_EL310

3) Zjištění vlivu změny rozměrů a vlastností kořenového balu

Vstupními parametry a jejich rozsahy této analýzy jsou: a) hloubka druhé vrstvy kořenového balu (HLOUBKA_BAL_IVR) 0.35-0.8 m, b) průměr balu druhé vrstvy (PRUM_BAL_IVR) 2.4-3.8 m, c) podíl kořenů v druhé vrstvě 0.2-0.8 (20-80 %). Výstupními parametry jsou opět všechny náklony (PHI(i)_I0) a posunutí (U_EL(i)I0) pro zadané pozice přístrojů. Pro generování hodnot bylo zvoleno normální rozdělení (UNIFORM). Analýza byla provedena ve dvou krocích, které byly spojeny. Celkem bylo provedeno 323 výpočtů.

Tab. 6 Přehled vstupních a výstupních parametrů pro citlivostní analýzu – 2. Zjištění vlivu změny rozměrů a vlastností kořenového balu ($\phi_{i,10}$ je zjišťovaný úhel náklonu θ při maximálním zatížení, $u_{EL(i)10}$ je zjišťované posunutí „l“ při maximálním zatížení).

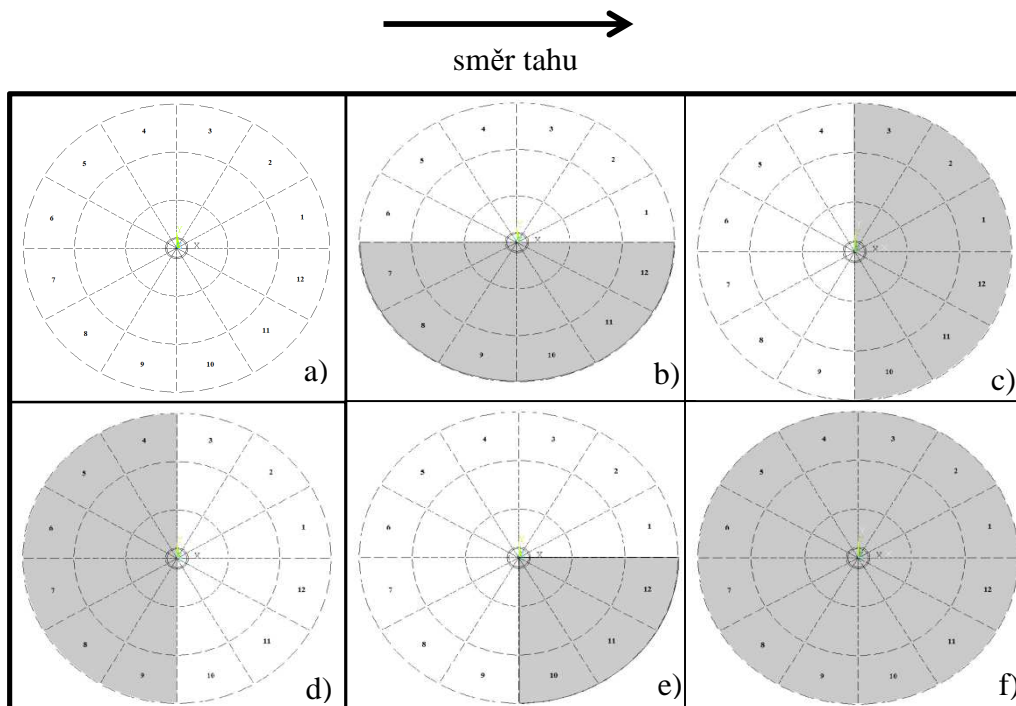
vstup	výstup
hloubka_bal_1vr	phi1_10
prum_bal_1vr	phi2_10
podil_koren_2	phi3_10
	phi4_10
	phi5_10
	u_EL110
	u_EL210
	u_EL310

U všech typů analýz byla zjišťována korelace mezi vstupními a výstupními daty za použití Spearmanova korelačního koeficientu. Data byla zpracována v programu GNUMERIC a STATISTICA 12.

4.4 ZJIŠTĚNÍ VLIVU DEFEKTŮ NA NÁKLON A POSUNUTÍ

Pro zjištění možností využití modelu bylo vyzkoušeno několik variant vlivu změny materiálových vlastností kmene a kořenového systému. Při této studii se pracovalo se stejnými parametry jako u stromu č. 1 (tab. 3).

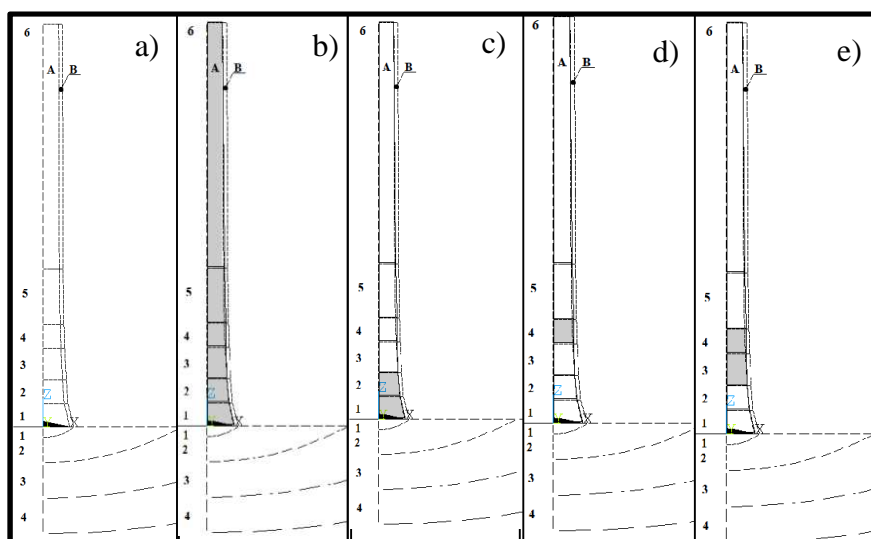
U **kořenového systému** bylo provedeno 6 variant výpočtu (obr. 20). Různé varianty probíhaly změnou podílu $k_{(i,j)}$ (viz. 4.1-3) na 0.1 (tedy 10 % z materiálových vlastností) ve vybraných výsečích. Změna byla nastavena pro 2 a 3 vrstvu, kde je kompozit dřeva a půdy.



Obr. 20 Varianty poškození kořenového systému:

a) bez poškození, b) postranní poškození kořenového systému tj. rovnoběžně se směrem působící síly („ve směru“), c) poškození na tlakové straně kořenového systému/kmene tj. kolmo na směr působící síly („kolmo“); d) poškození na tahové straně kořenového systému tj. kolmo na směr působící síly („kolmo_2“), e) postranní poškození jedné čtvrtiny na tlakové straně kořenového systému („čtvrtina“), f) poškození celého kořenového systému („celý“).

U **kmene** bylo provedeno 5 variant výpočtu (obr. 21). Různé varianty probíhaly změnou podílu $k_{(i,j)}$ (viz. 4.1-3) na 0.1 (tedy 10 % z materiálových vlastností) ve vybraných výsečích a výškových segmentech, ve vnitřní části kmene.



Obr. 21 Varianty poškození kmene:

a) bez poškození, b) poškození v celém kmene c) poškození na bázi – výškový segment 1,2, d) poškození ve kmene – výškový segment 4, e) poškození výseče 1,2,11,12 – výškový segment 3,4.

Výstupem jsou hodnoty posunutí v místě umístění extenzometrů a inklinometrů, a zobrazení poměrných deformací, posunutí a vektorů posunutí u vybraných variant. Virtuální extenzometry (odečet hodnot v postprocessingu) byly umístěny na tahové straně ve výškách 0.3 m, 1 m, 2 m. Inklinometry byly umístěny v neutrální zóně – 90 ° (proti směru hodinových ručiček) ve výškách 0.3 m, 1 m, 2 m a výška umístění úvazku (5.1 m). Také byl zjišťován úhel vznikající na bázi kmene I5 (viz. 4.1.2.3).

Data byla zpracována v programu GNUMERIC. Hodnoty byly porovnány relativní odchylkou a varianta a) bez poškození byla považována za hodnotu referenční (tedy 100 %).

5 VÝSLEDKY A DISKUZE

5.1 POROVNÁNÍ NUMERICKÉHO ŘEŠENÍ, EXPERIMENTÁLNÍHO MĚŘENÍ A ANALYTICKÉHO VÝPOČTU

Vyhodnocení rozdílů mezi numerickým výpočtem, analytickým výpočtem a měřením probíhá na základě směrnic. Směrnice přímkou jsou zjištěny ze vztahu aplikovaného ohybového momentu a výsledného náklonu nebo posunutí. Směrnice vyjadřují lineární vztah mezi ohybovým momentem a náklonem a jsou parametrem tuhosti celého systému (kmen a kořenový bal). V případě posunutí vyjadřují tuhost kmene. Výsledné směrnice jsou uvedeny v tab. 7.

Tab. 7 Směrnice pro náklon a posunutí.

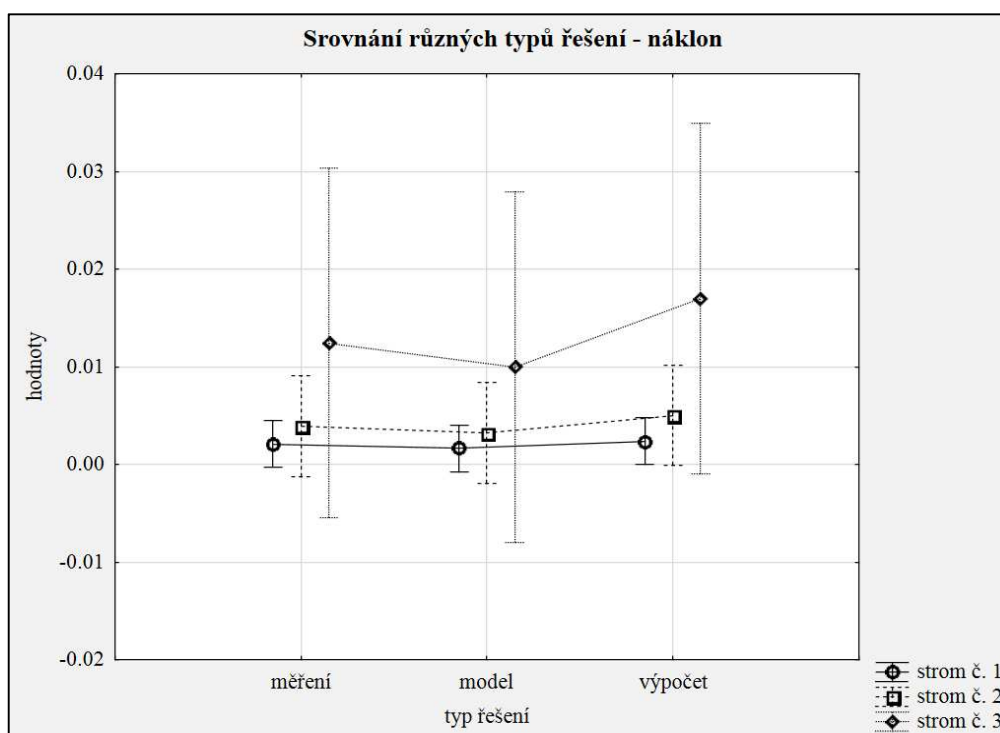
Směrnice - náklon				
typ řešení	pozice	strom č. 1	strom č. 2	strom č. 3
model	h = 0.3	0.0005	0.0010	0.0025
model	h = 1	0.0012	0.0022	0.0064
model	h = 2	0.0032	0.0065	0.0210
měření	h = 0.3	0.0007	0.0012	0.0027
měření	h = 1	0.0018	0.0030	0.0095
měření	h = 2	0.0038	0.0074	0.0251
výpočet	h = 0.3	0.0006	0.0012	0.0035
výpočet	h = 1	0.0019	0.0037	0.0128
výpočet	h = 2	0.0047	0.0101	0.0346
Směrnice - posunutí				
typ řešení	pozice	strom č. 1	strom č. 2	strom č. 3
model	h = 0.3	0.0011	0.0018	0.0045
model	h = 1	0.0012	0.0019	0.0044
model	h = 2	0.0012	0.0022	0.0053
měření	h = 0.3	0.0010	0.0020	0.0053
měření	h = 1	0.0013	0.0022	0.0056
měření	h = 2	0.0014	0.0025	0.0070

Směrnice byly porovnány relativní odchylkou a statistickým vyhodnocením. Hodnoty pro náklon jsou uvedeny v tab. 8 a na obr. 22. Hodnoty pro posunutí jsou uvedeny v tab. 9 a na obr. 23.

Tab. 8 Srovnání numerického modelu, analytického výpočtu a měření pro náklon (model – je označení numerického výpočtu, výpočet – je označení analytického výpočtu)

Srovnání různých typů řešení - náklon						
strom	pozice	měření	model	výpočet	výpočet	model
strom č. 1	h = 0.3	100%	-32%	-15%	100%	-19%
	h = 1	100%	-31%	9%	100%	-37%
	h = 2	100%	-16%	22%	100%	-31%
strom č. 2	h = 0.3	100%	-20%	-3%	100%	-18%
	h = 1	100%	-28%	25%	100%	-42%
	h = 2	100%	-12%	36%	100%	-35%
strom č. 3	h = 0.3	100%	-7%	29%	100%	-28%
	h = 1	100%	-32%	35%	100%	-50%
	h = 2	100%	-16%	38%	100%	-39%

Z výsledků je patrné, že se numerický výpočet odchyluje od experimentálního měření v rozmezí od 7 až 32 % pro hodnoty náklonu. Celkově vykazuje numerické řešení tužší chování systému (menší náklon) než hodnoty měřené. Naopak analytický výpočet vykazuje vyšší náklon než měření v rozmezí od 9 do 38 %, přičemž ve dvou případech jsou hodnoty náklonu také nižší než experiment o 3 a 15 %.



Obr. 22 Srovnání numerického modelu, analytického výpočtu a měření pro náklon analýzou rozptylu.

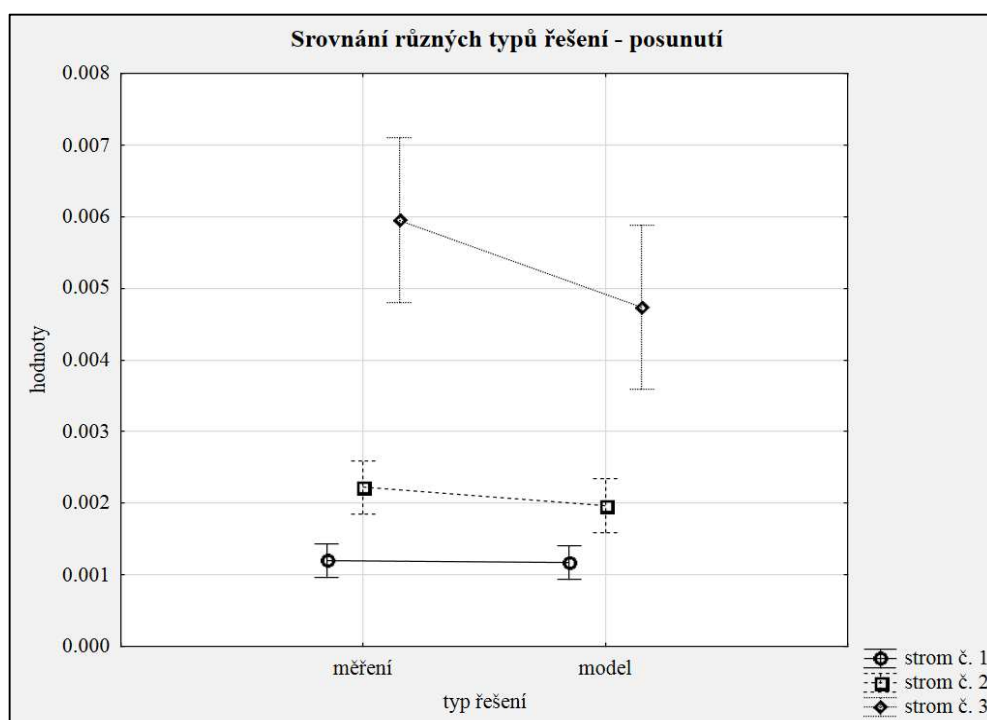
Obr. 22 ukazuje, že mezi různými metodami vyhodnocení není statisticky významný rozdíl. I přesto, že u stromu č. 1 jsou vyšší relativní odchylky (kolem 30%), analýza

rozptylů vykazuje větší rozdíl mezi středními hodnotami u stromu č. 3. Což je zřejmě způsobeno větším rozptylem hodnot pro jednotlivé pozice přístrojů u stromu č. 3. Výrazně vyšší hodnotu směrnice vykazuje strom č. 3 u inklinometru ve výšce 2 m i u měření a analytického výpočtu (tab. 7). Strom č. 3 má nejmenší průměr kmene, což může vést k největším rozdílům v měření náklonu na bázi kmene a ve výšce 2 m.

Tab. 9 Srovnání numerického modelu, analytického výpočtu a měření pro posunutí.

Srovnání různých typů řešení - posunutí			
strom	pozice	měření	model
strom č. 1	h = 0.3	100%	16%
	h = 1	100%	-9%
	h = 2	100%	-9%
strom č. 2	h = 0.3	100%	-9%
	h = 1	100%	-15%
	h = 2	100%	-11%
strom č. 3	h = 0.3	100%	-14%
	h = 1	100%	-21%
	h = 2	100%	-25%

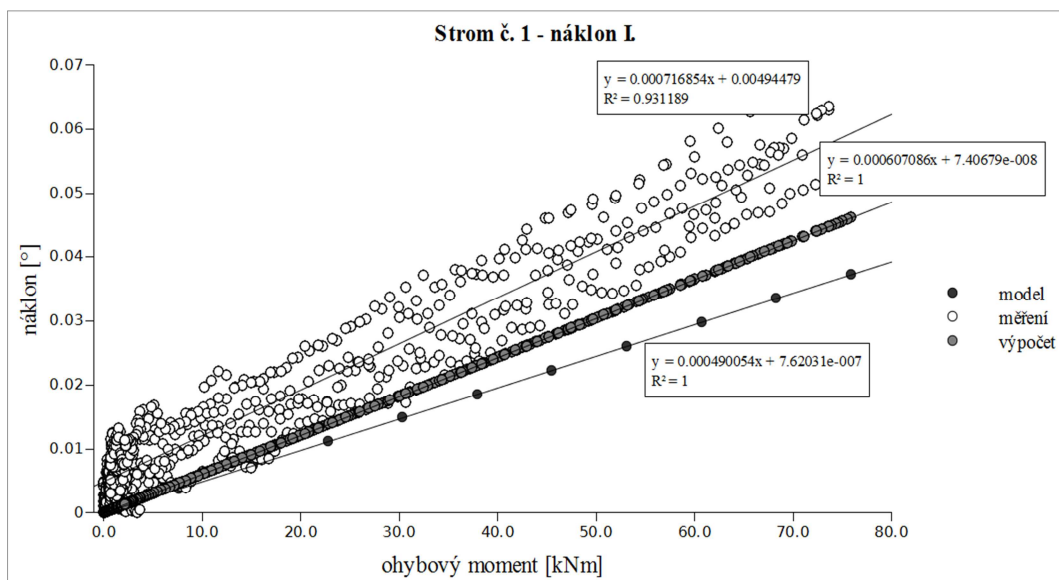
Pro posunutí se odchylka numerického výpočtu od měření pohybuje v rozmezí 9 až 25 %. Numerické řešení opět vykazuje tužší chování (menší posunutí) než měření, kromě stromu č. 1 a pozice přístroje umístěného ve výšce 0.3 m, kdy je hodnota řešení vyšší o 16 %.



Obr. 23 Srovnání numerického modelu a měření pro posunutí analýzou rozptylu.

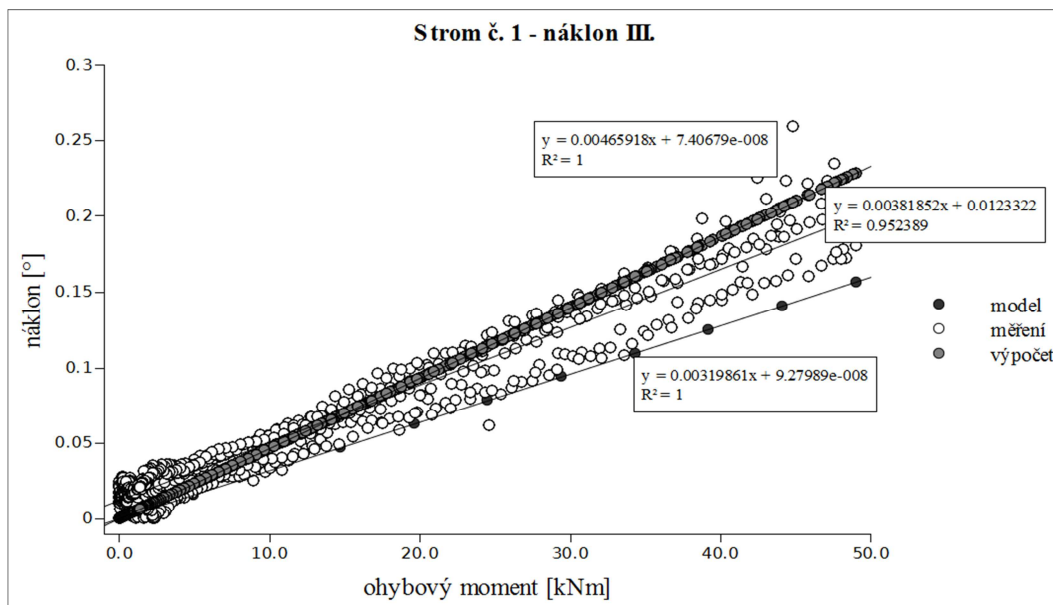
Měření a numerický výpočet také nevykazuje statisticky významný rozdíl, ačkoliv obr. 23 naznačuje, že u stromu č. 3 je rozdíl celkem výrazný. Opět u stromu č. 3 dochází k většímu rozptylu hodnot mezi jednotlivými pozicemi.

Strom č. 1 vykazuje největší rozdíl mezi numerickým řešením a měřením pro hodnoty náklonu. Směrnice pro náklon je o 16 až 32 % menší než směrnice reálného měření. Na rozdíl od analytického výpočtu, který se měření blíží nejvíce právě u stromu č. 1 (obr. 24, 25). V případě posunutí se numerický výpočet blíží nejvíce reálnému měření u stromu č. 1. Směrnice je pro pozici extenzometru ve výšce 0.3 m vyšší o 16 % než měření, pro pozice extenzometrů ve výšce 1 a 2 m je o 9 % nižší než měření (tab. 9, obr. 27, 28).



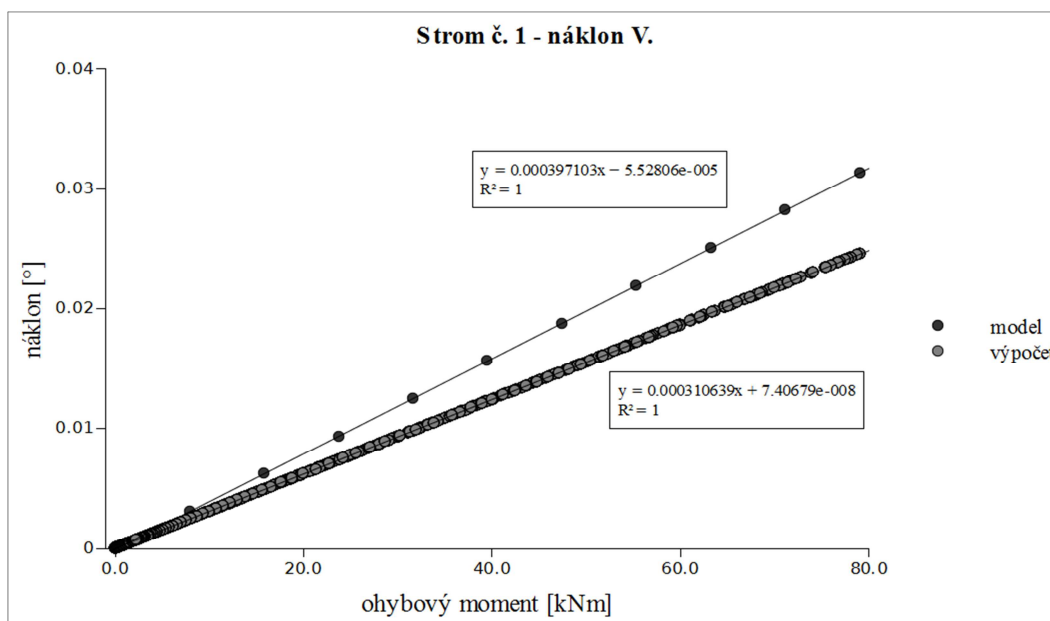
Obr. 24 Porovnání náklonů z numerického modelu, analytického výpočtu a měření pomocí směrnic pro strom č. 1, pozici inklinometru ve výšce 0.3 m.

Obr. 24 ukazuje, že se analytický výpočet blíží více skutečnosti než numerické řešení. Na rozdíl od obr. 25, kde analytický výpočet dosahuje vyššího trendu než měření (22 %) a simulace, která je o 16 % níže. Na obr. 24 i 25 je vidět, že směrnice pro měřená data nezačíná v počátku. Tato tendence může být ovlivněna měřicí schopností přístroje (při opakovaném měření se nevrací na nulovou hodnotu), případně mírnou plastifikací kořenového balu. Je nutné vzít v úvahu, že tato odchylka ovlivňuje výslednou směrnici a tedy i porovnání s numerickým a analytickým výpočtem.



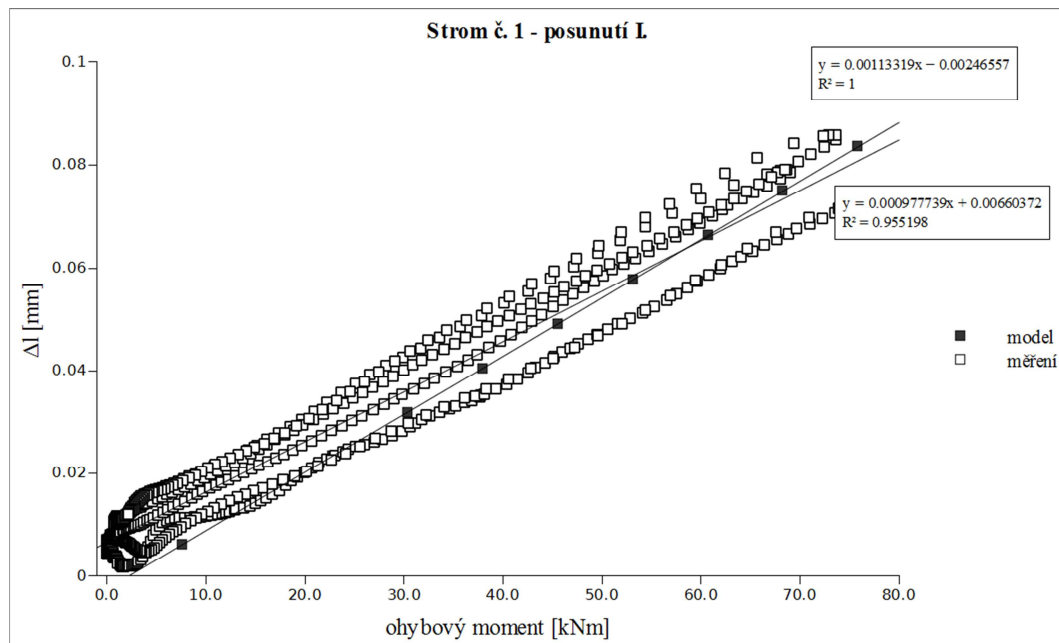
Obr. 25 Porovnání náklonů numerického modelu, analytického výpočtu a měření pomocí směrnice pro strom č. 1, pozici inklinometru ve výšce 2 m.

Zajímavé je, že ačkoliv vykazuje analytický výpočet vyšší hodnoty pro celkový náklon, v případě výpočtu náklonu kořenového balu dosahuje analytický výpočet hodnot nižších (obr. 26). Hodnota směrnice numerické simulace je o 28 % vyšší. U hodnot náklonu v jednotlivých pozicích přitom přepokládáme kombinaci průhybu kmene a pootočení kořenového balu (viz. 4.2-1). Výsledky ukazují, že samostatný průhyb u analytického výpočtu pravděpodobně dosahuje významně vyšších hodnot, než numerická simulace.

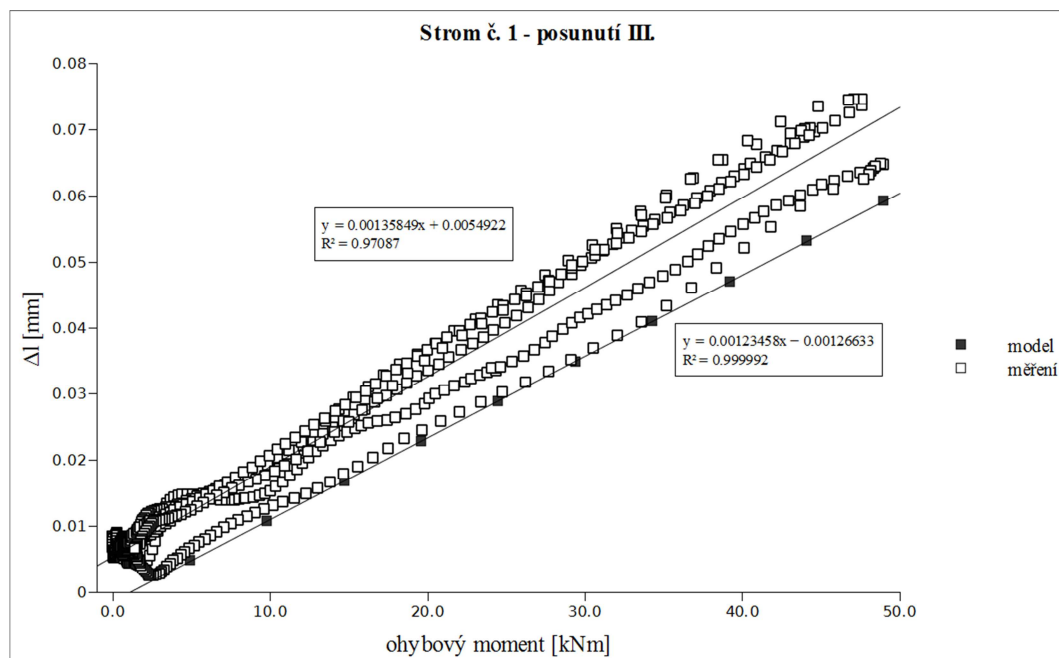


Obr. 26 Porovnání náklonu kořenového balu (I5) z numerického modelu a analytického výpočtu pomocí směrnice pro strom č. 1.

Při pozici extenzometru ve výšce 0.3 m dochází k jedinému případu, kdy u numerické simulace dosahujeme vyšších hodnot než u měření (16 %) (obr. 27). V případě pozice přístroje ve výšce 1 a 2 m se numerická simulace přiblížila nejvíce skutečnosti. Směrnice ukazuje o 9 % nižší hodnotu než směrnice měření (tab. 9, obr. 28).

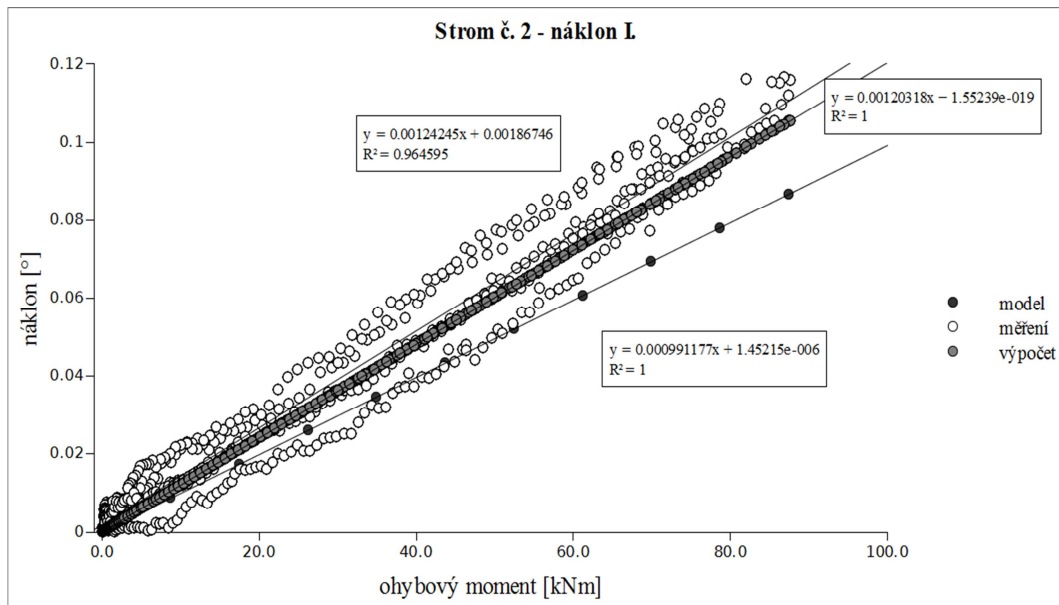


Obr. 27 Porovnání posunutí numerického modelu a měření pomocí směrnic pro strom č. 1, pozici extenzometru ve výšce 0.3 m.



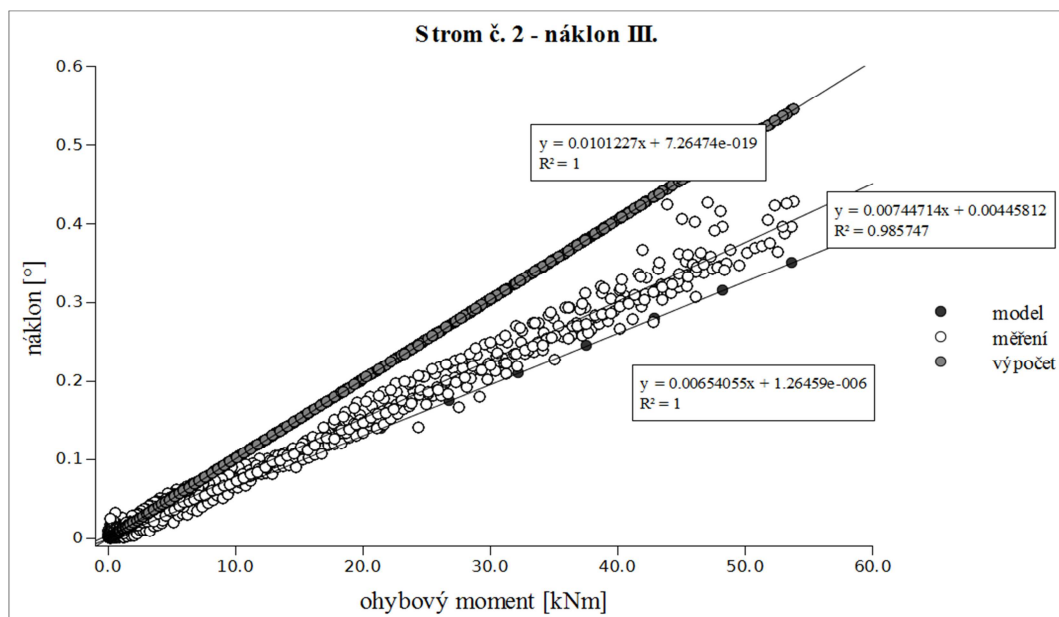
Obr. 28 Porovnání posunutí numerického modelu a měření pomocí směrnic pro strom č. 1, pozici extenzometru ve výšce 2 m.

Rozdíl směrnic pro náklon u **stromu č. 2** je od 12 do 28 %, kdy náklon u numerické simulace vychází nižší než měření. Analytický výpočet se pohybuje v rozmezí od o 3 % nižší hodnoty po 36 % vyšší hodnoty směrnic než měření (tab. 9, obr. 29, 30).



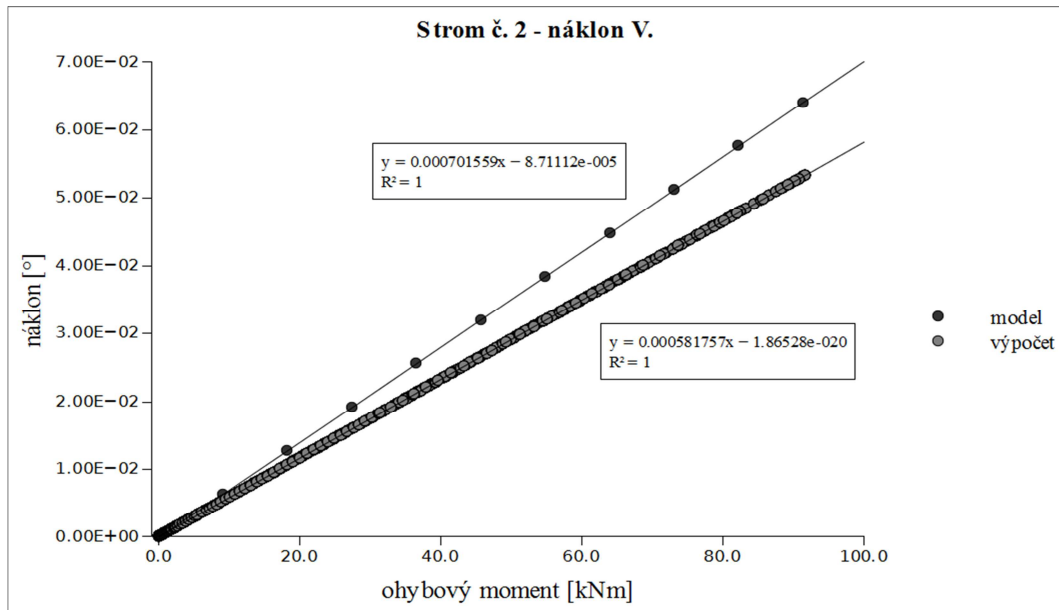
Obr. 29 Porovnání náklonů z numerického modelu, analytického výpočtu a měření pomocí směrnic pro strom č. 2, pozici inklinometru ve výšce 0.3 m.

Ačkoliv se analytický výpočet v případě inklinometru umístěného ve výšce 0.3 m blíží reálnému měření (obr. 29), v případě inklinometru ve výšce 2m dosahuje druhé největší odchylky (36 %) (obr. 30). Zatímco u numerického řešení je odchylka směrnic od reálného měření ve spodní části 20 % a ve vrchní části pouze 12 % (tab. 9).



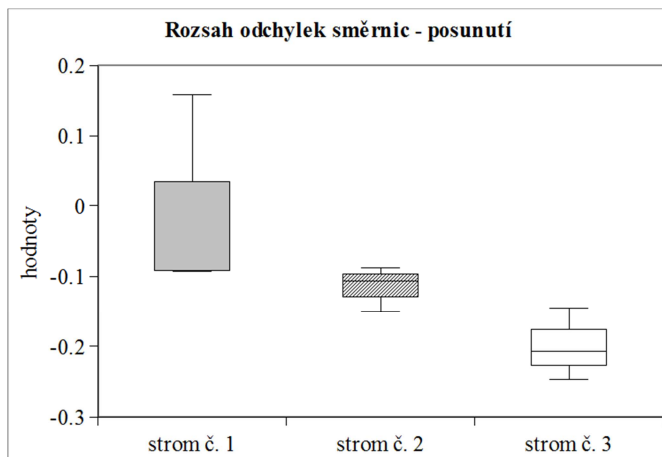
Obr. 30 Porovnání náklonů z numerického modelu, analytického výpočtu a měření pomocí směrnic pro strom č. 2, pozici inklinometru ve výšce 2 m.

Hodnota směrnice pro náklon kořenového balu vychází opět vyšší (o 21 %) než hodnota směrnice analytického výpočtu (obr. 31).

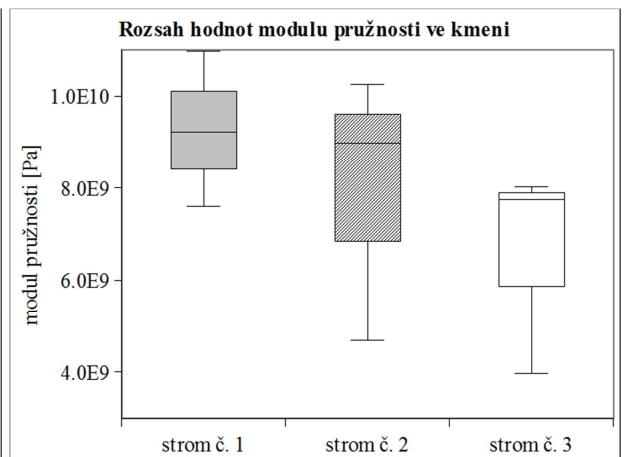


Obr. 31 Porovnání náklonu kořenového balu (I5) z numerického modelu a analytického výpočtu pomocí směrnic pro strom č. 2.

V případě posunutí se strom č. 2 odchyloje od reálného měření o 9-15 % (tab. 9). Hodnoty odchylek směrnic (9 %, 11 %, 15 %) vykazují nejmenší rozsah hodnot (obr. 32), ale přitom zadané moduly pružnosti v tahu ve směru vláken mají největší rozsah právě u stromu č. 2 (obr. 33). Zadávaní rozdílných hodnot modulů pružnosti v různých výškových segmentech kmene se tedy zatím ukazuje opodstatněné. Samozřejmě důležitou roli hraje i volba geometrie (viz. strom č. 3).

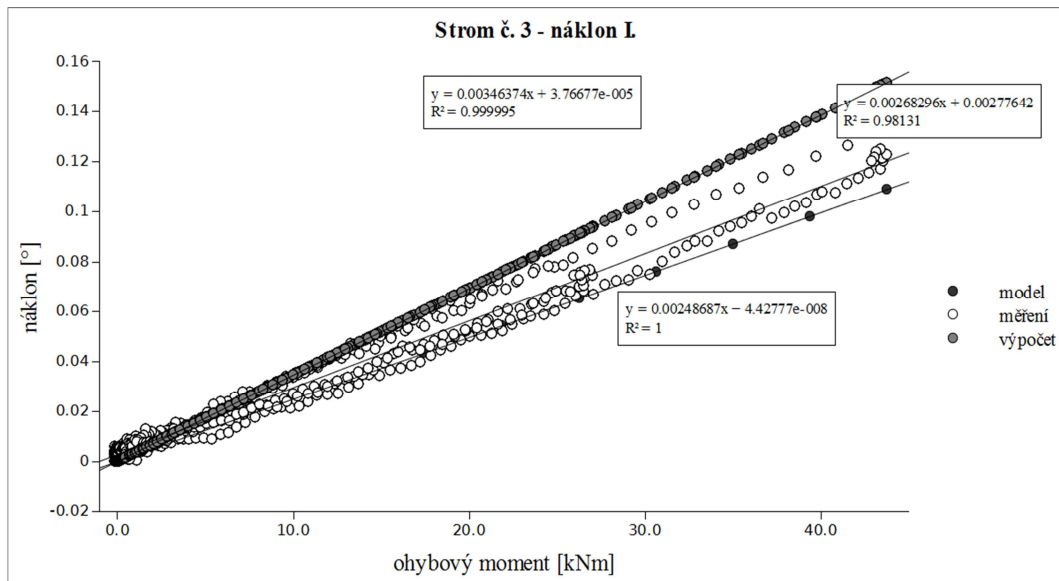


Obr. 32 Rozsah odchylek směrnic pro posunutí u jednotlivých stromů.



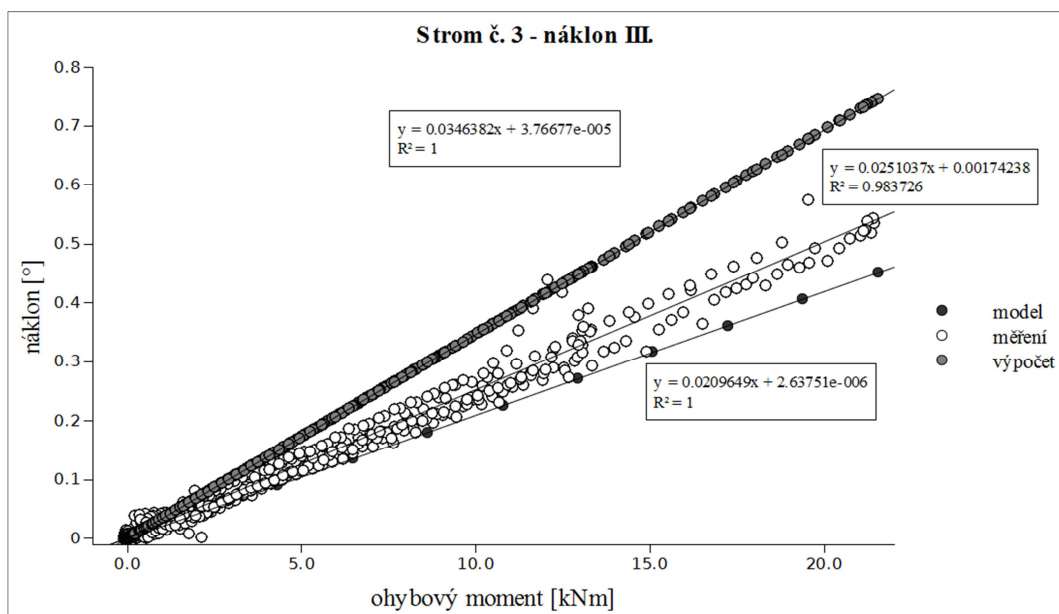
Obr. 33 Rozsah hodnot modulů pružnosti v tahu ve směru vláken jednotlivých stromů.

Numerické řešení náklonu **stromu č. 3** se odchyľuje od měření o 7 až 32 %. Numerické řešení opět vykazuje nižší hodnoty náklonu, než řešení analytické, které se pohybuje v rozmezí od 29 do 30 % nad měřením (tab. 9, obr. 34, 35).



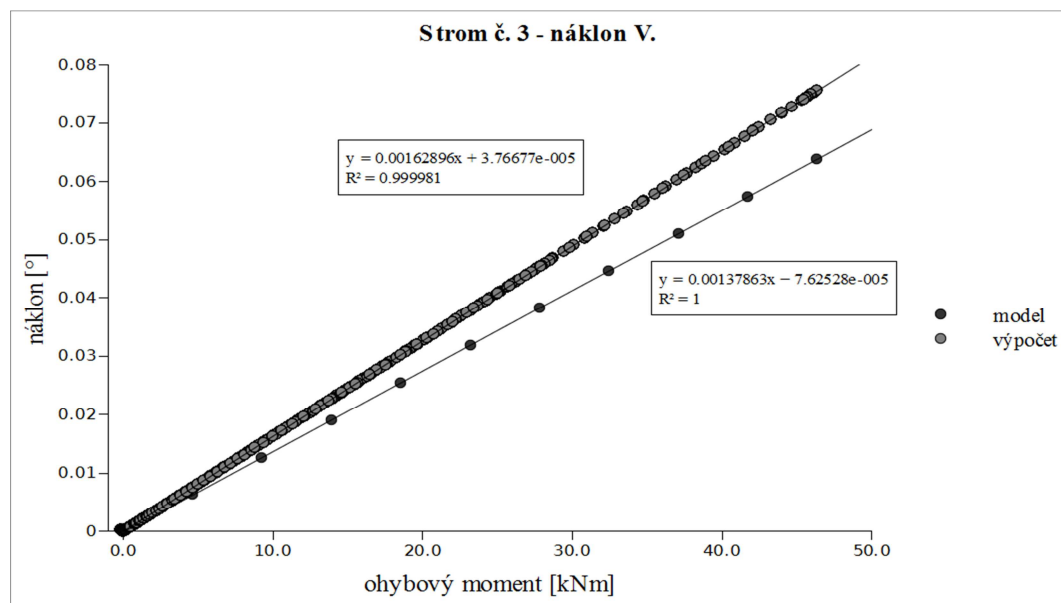
Obr. 34 Porovnání náklonů z numerického modelu, analytického výpočtu a měření pomocí směrnice pro strom č. 3, pozici inklinometru ve výšce 0.3 m.

Hodnoty numerického řešení z inklinometru ve výšce 0.3 m pro strom č. 3 se nejvíce přibližují reálnému měření. Hodnoty směrnice jsou o 7 % níže než reálné měření. Zatímco analytický výpočet se odchyľuje o 29 % (obr. 34). U inklinometru umístěného ve výšce 2 m je hodnota směrnice analytického výpočtu vyšší dokonce o 38 % (obr. 35).



Obr. 35 Porovnání náklonů z numerického modelu, analytického výpočtu a měření pomocí směrnice pro strom č. 3, pozici inklinometru ve výšce 2 m.

Na rozdíl od stromu č. 1 a 2 hodnota směrnice pro náklon kořenového balu vychází nižší a to o 15 % než hodnota směrnice analytického výpočtu (obr. 36). Celkově všechny hodnoty analytického výpočtu vychází pro strom č. 3 významně vyšší než numerické řešení. Tyto výstupy mohou být ovlivněny tím, že pro analytický výpočet byl použit jiný rozměr pro hloubku kořenového systému. Zatímco pro analytický výpočet byly použity hodnoty odvozené z poloměru kmene (0.28 m), pro numerické řešení byly použity hodnoty z experimentálního měření (0.75 m).



Obr. 36 Porovnání náklonu kořenového balu (15) z numerického modelu a analytického výpočtu pomocí směrnic pro strom č. 3.

Hodnoty směrnic posunutí pro strom č. 3 jsou o 14-25 % nižší než měření (tab. 9, příloha č. 1). Pro strom č. 3 se tedy hodnoty náklonu nejvíce blíží experimentálnímu měření a hodnoty posunutí nejvíce přibližují. Kdežto u stromu č. 1 je tomu naopak.

Celkově je možné zhodnotit, že nejvyšších odchylek numerické řešení dosahovalo u pozice inklinometru ve výšce 1 m (31 %, 21 %, 28 %) zatímco analytické řešení u pozice inklinometrů ve výšce 2 m (22 %, 36 %, 38 %). Přičemž numerické řešení vykazuje hodnoty nižší a analytické řešení hodnoty vyšší (tab. 9). Kromě tohoto trendu výsledná data nevykazují žádný významný vztah a ani jeden z přístupů (analytické výpočet, numerické řešení) nevychází výrazně blíže reálnému měření než druhý. Maximální odchylka směrnice numerického řešení od směrnice měření je 32 %, u analytického řešení je maximální odchylka směrnice 38 %. Dosažené výsledky jsou pro současný stav zhodnoceny jako dostačující. Dupuy et al. 2007 uvádí odchylku

experimentálních měření a numerických simulací 20 % pro písčité půdy a 70 % pro jílovité půdy. Numerická simulace a experimentální měření v našem případě pracují s jílovo-hlinitou půdou. Do budoucna je samozřejmě zvažováno postupné přiblížení numerického řešení experimentálním měření. Abychom zjistili, na které ze zadávaných parametrů je vhodné se zaměřit, byla zpracována citlivostní analýza (viz. 5.2). Podstata modelu a složitější geometrie neumožnila použití prutových elementů (BEAM) na rozdíl od ostatních studií (Fourcaud et al. 2008, Khalilnejad et al. 2012). Tím bylo znemožněno využití funkcí pro přímé vylistování rotací a byl použit jiný přístup pro získání dat z postprocessingu. Výsledkem je přiblížení výstupních dat měřeným veličinám v terénu a možnost využití modelu pro práci se změnou materiálu v různých částech modelu (viz. 5.3). Model také na rozdíl od ostatních studií (Dupuy et al. 2005, Jonsson et al. 2006, Dupuy et al. 2007, Fourcaud et al. 2008, Khalilnejad et al. 2012) pracuje se dřevem jako materiálem ortotropním a umožňuje tak i sledování chování kmene, které zatím není nijak významně zpracováno.

5.2 CITLIVOSTNÍ ANALÝZA

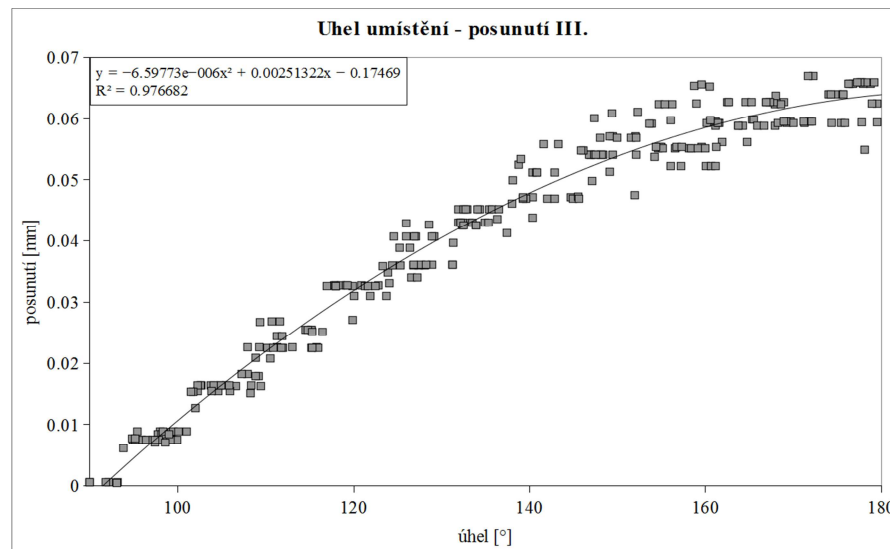
5.2.1 ZJIŠTĚNÍ VLIVU RŮZNÉHO UMÍSTĚNÍ PŘÍSTROJŮ

Na základě náhodně generovaných dat byla provedena analýza závislosti umístění přístrojů na výsledné hodnoty. Přehled výsledných hodnot je uveden v tab. 10.

Tab. 10 Vliv změny umístění přístrojů na výsledné hodnoty, zvýrazněny jsou korelační koeficienty pro významné vztahy.

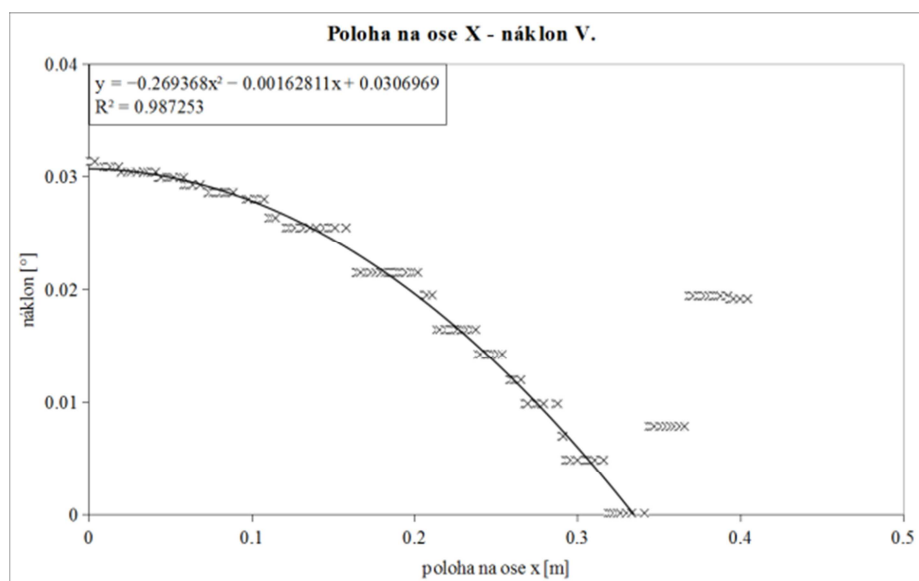
Závislost změny umístění přístrojů na výsledné hodnoty (Spearmanovy korelace, $p < 0.05$)			
	výška	úhel	pozice X
Náklon I.	0.5545	-0.0380	
Náklon II.	0.3973	-0.1111	
Náklon III.	0.5918	0.0390	
Náklon IV.	0.0127	0.6166	
Náklon V.			-0.8777
Posunutí I.	0.0569	0.9576	
Posunutí II.	0.0115	0.9627	
Posunutí III.	0.0481	0.9732	

Jednoznačná závislost se projevila mezi umístěním extenzoměrů po obvodu kmene, zároveň se tato závislost zvyšuje s výškou umístění extenzoměrů. Na obr. 37 je zřetelné, že velikost posunutí roste s přiblížením extenzoměru na tahovou stranu (180 °). Výsledky tak potvrzují, že extenzometry by měly být umístěovány na tahovou nebo tlakovou stranu, kde dochází k největším deformacím, jak uvádí Wessolly, 1995a.



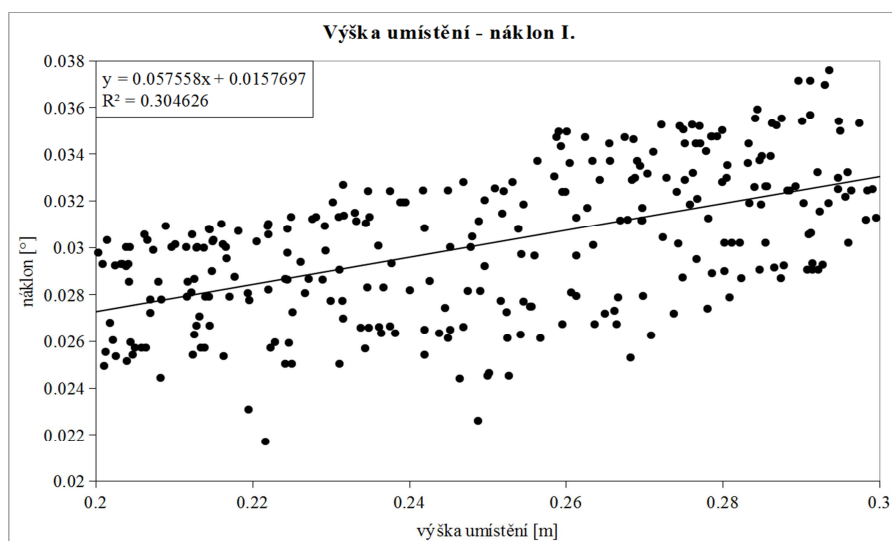
Obr. 37 Vliv umístění extenzometru po obvodu kmene na výsledné hodnoty posunutí pro pozici přístroje ve výšce 2 m.

Další významná závislost se projevila u polohy bodů, které definují náklon kořenového balu (I5), po ose x (tab. 10). Se vzrůstající vzdáleností od počátku se snižuje zjišťovaný náklon kořenového balu, až do hodnoty 0.35 m (obr. 38). Na základě těchto dat je možné přepokládat, že pokud je cílem měření zjistit i náklon kořenového balu, je vhodné umístit inklinometr co nejbližně neutrální ose. Pro další vyhodnocení je vhodné zvážit vliv polohy nejen na ose x, ale také v kombinaci s osou y. Charakter dat zobrazených na obr. 38 odpovídá charakteru diskretizované oblasti numerického řešení, kdy v některých krocích došlo k výběru stejných bodů. Stejný vliv je znatelný i u dosažení hranice 0.35 m, kdy byl následně vybrán bod mimo oblast průměru kmene a tím se výrazně zmenšil sledovaný náklon.

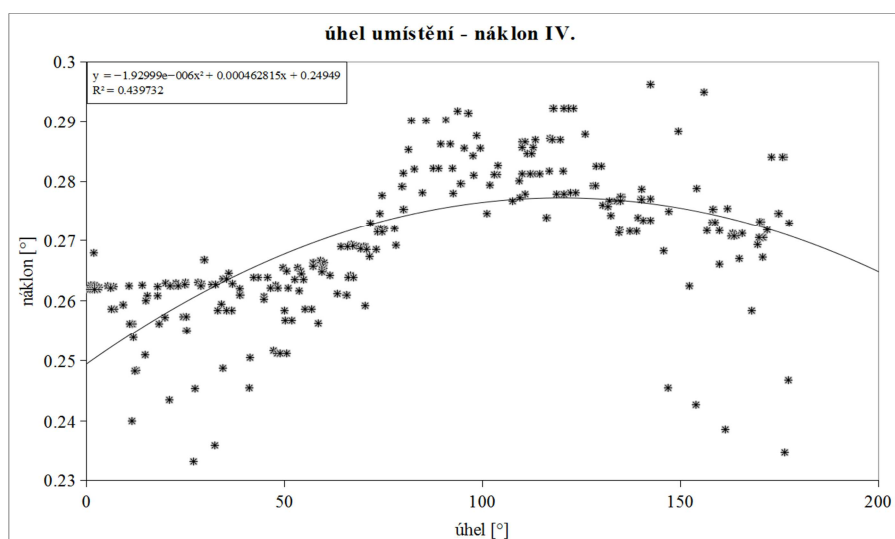


Obr. 38 Vliv posunu bodů po ose x n vypočtený náklon kořenového balu.

Korelační koeficient vztahu výšky umístění inklinometrů a výsledných hodnot náklonu dosahují nižších hodnot (pod 0.6), i přesto je závislost stále pokládána za významnou (tab. 10). Se zvyšující se výškou roste i velikost náklonu. I přes významnou závislost nebyl nalezen statisticky významný regresní model. V případě využití lineární závislosti, je možné sledovat, že při změně výšky inklinometru od 0.2 do 0.3 m výsledné hodnoty rostou o 5 % (obr. 39), při změně výšky inklinometru od 0.9 do 1 m o 9 % a při změně výšky od 1.9 do 2 m opět o 5 % (příloha č. 8). Oproti předpokladu nevzrůstá významnost tohoto vlivu s výškou umístění inklinometrů. Dokonce u inklinometru, který je ve výšce úvazku (5.1 m) převládá vliv jeho umístění po obvodu kmene (tab. 10, obr. 40).



Obr. 39 Vliv změny výšky umístění inklinometru na zjišťovaný náklon v rozmezí 0.2 až 0.3 m.



Obr. 40 Vliv umístění inklinometru ve výšce úvazku po obvodu kmene v rozsahu 0-180 °.

Na obr. 40 je možné sledovat, že kolem 90 ° dosahujeme nejvyšších hodnot náklonu, což odpovídá umístění neutrální osy. U nižších pozic inklinometrů se vliv různého umístění po obvodu významně neprojevil. Podobný závěr uvádí i Szórádová, 2013, která ve své studii srovnávala vliv umístění inklinometrů na výslednou hodnotu tuhosti ukotvení. Wessolly, 1995a i Brudi a Wassenaer, 2001 také ve svých studiích uvádějí pouze umístění inklinometrů co nejbližší bázi, bez uvádění přesné polohy po obvodu kmene. Za předpokladu, že měřený úhel je kombinací náklonu kmene a náklonu kořenového balu (Neild a Wood, 1998), je překvapivé, že je významná pozice pro zjištění náklonu kořenového balu (obr. 38) a nevýznamná v případě měřeného úhlu. Podíl náklonu kořenového balu je tedy zřejmě velmi slabý vzhledem k celkovému

náklonu. Vztah mezi celkovým náklonem a náklonem kořenového balu by měl být předmět budoucího pozorování.

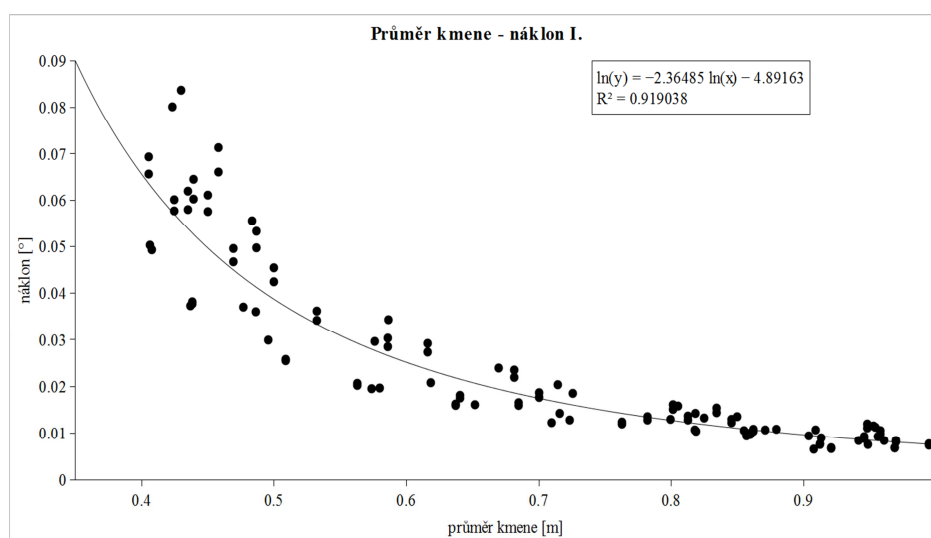
5.2.2 ZJIŠTĚNÍ VLIVU ZMĚNY ROZMĚRŮ KMENE

Výsledné hodnoty korelačních koeficientů mezi parametry kmene a výstupními hodnotami uvádí tab. 11. Z tabulky je zřejmé, že mezi významnými faktory, které ovlivňují výsledné hodnoty, jsou průměr kmene ve výčetní výšce, jeho čtvrtá mocnina, výška kmene a z toho vyplývající štiřlostní koeficient.

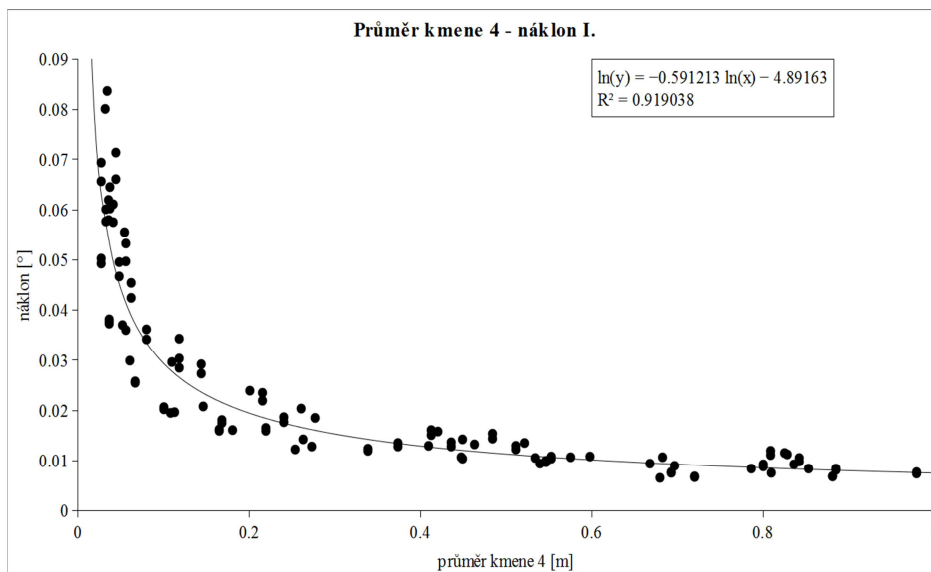
Tab. 11 Vliv změny rozměrů kmene na výsledné hodnoty, zvýrazněny jsou korelační koeficienty pro významné vztahy

Závislost změny rozměrů kmene na výsledné hodnoty (Spearmanovy korelace, $p < 0.05$)					
	průměr kmene (1.3 m)	průměr kmene (1.3 m) ⁴	výška kmene	sbíhavost kmene	štiřlostní koeficient
Náklon I.	-0.9538	-0.9538	0.2923	0.0062	-0.9114
Náklon II.	-0.9647	-0.9647	0.2417	-0.0184	-0.8807
Náklon III.	-0.9535	-0.9535	0.2975	0.0315	-0.9137
Náklon IV.	-0.9584	-0.9584	0.2696	0.0278	-0.8984
Náklon V.	-0.9123	-0.9123	0.3990	0.0122	-0.9543
Posunutí I.	-0.9546	-0.9546	0.2956	0.0162	-0.9117
Posunutí II.	-0.9379	-0.9379	0.3445	0.0278	-0.9336
Posunutí III.	-0.9293	-0.9293	0.3667	0.0585	-0.9413

Průměr kmene a jeho čtvrtá mocnina vykazují stejnou korelaci mezi výstupními hodnotami. Nárůst náklonu se zmenšujícím se průměrem kmene (obr. 41) pak v případě čtvrté mocniny roste exponenciálně (obr. 42). Tyto výsledky potvrzují, že celkový náklon je značnou měrou ovlivněn průměrem kmene a jeho čtvrtou mocninou dle vztahu 3.2-2. Významný vliv průměru kmene uvádí i Lundström (2007), Smiley (2008), Achim a Nicoll (2009), případně jeho druhé mocniny Jonsson et al. (2006), Szórádová (2013).

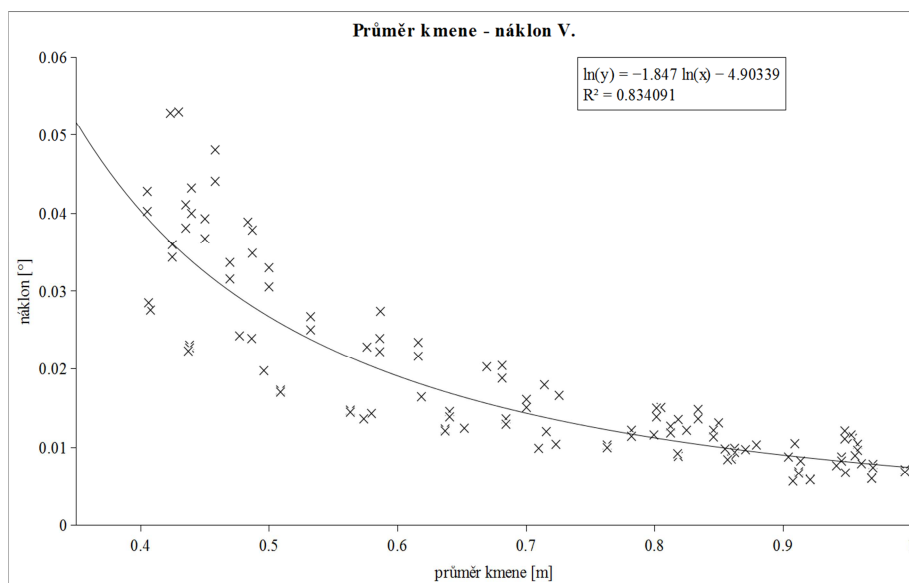


Obr. 41 Vliv změny průměru kmene na náklon ve výšce 0.3 m.

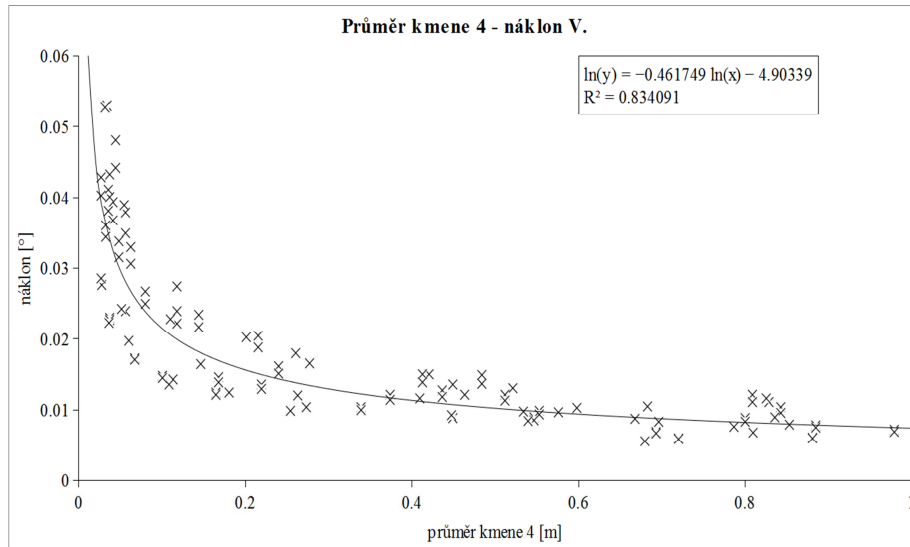


Obr. 42 Vliv změny čtvrté mocniny průměru kmene na náklon ve výšce 0.3 m.

Stejný trend ukazuje i náklon kořenového balu (obr. 43, 44). Podle předpokladu analytického modelu ovšem náklon kořenového balu ovlivňuje průměr kmene v jiném formátu než jeho čtvrtá mocnina.

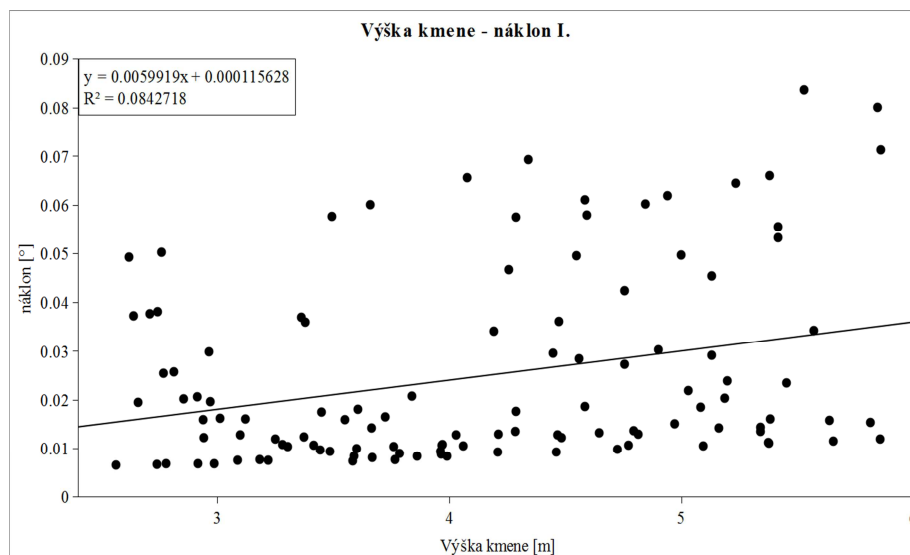


Obr. 43 Vliv změny průměru kmene na náklon kořenového balu.



Obr. 44 Vliv změny čtvrté mocniny průměru kmene na náklon kořenového balu.

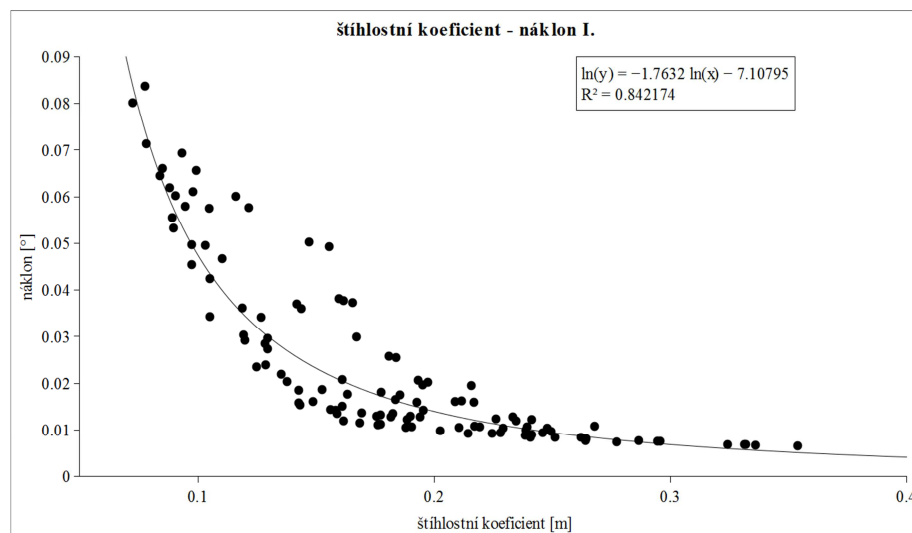
Změna výšky kmene sice ukazuje významný vliv, ale hodnoty korelačních koeficientů jsou nižší než u průměru kmene (0.2-0.4) (tab. 11). Zároveň se pro daný vztah nepodařilo najít statisticky významný regresní model, který by dostatečně popisoval danou závislost. V případě lineárního proložení je zřejmé, že náklon (obr. 45), případně posunutí (příloha č. 8) roste s výškou kmene. Vzhledem k tomu, že výška kmene je v simulaci spojena s aplikací tahové síly, s rostoucí výškou vzrůstal i ohybový moment. Nízké hodnoty závislosti jsou tedy celkem překvapivé.



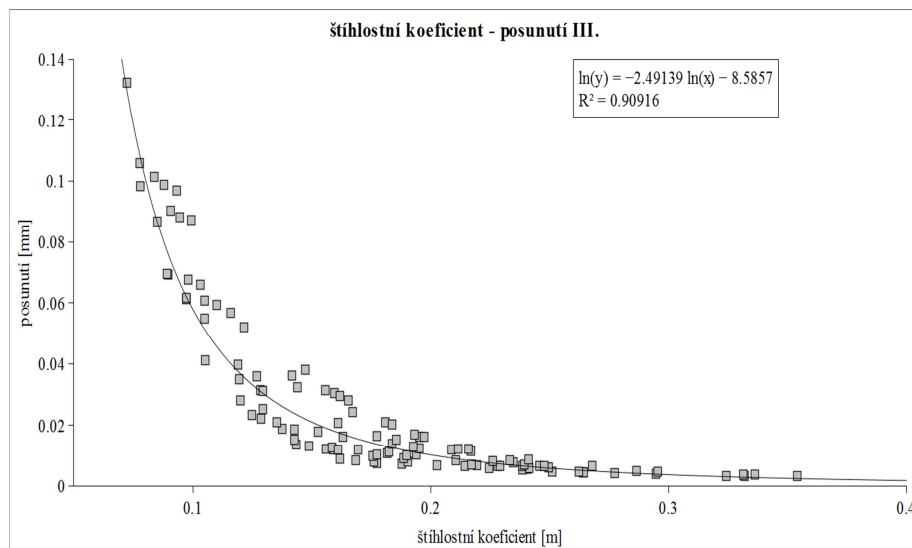
Obr. 45 Vliv změny výšky kmene (výška umístění úvazku) na náklon ve výšce 0.3 m.

V případě náklonu (obr. 46), posunutí (příloha č. 8) a štíhlostního koeficientu byla také nalezena významná korelace. Vzhledem k tomu, že štíhlostní koeficient je poměrem

průměru a výšky kmene, lze z předchozích výsledků (obr. 41, 45) předpokládat, že významnější faktor je průměr kmene, než poměr hodnot jako takový. Výsledky ukazují, že volba výšky umístění úvazku při tahové zkoušce bude významně ovlivněna i průměrem kmene. Z hodnot korelačních koeficientů (tab. 11) není zřejmé, že by se závislost u inklinometrů zvyšovala s výškou pozice přístrojů, i přesto že by se dala předpokládat vyšší citlivost u vyšší polohy přístrojů. Tento trend je možné sledovat u posunutí (tab. 11). Hodnoty posunutí ukazují, že při nižším štíhlostním koeficientu dochází k většímu posunutí (obr. 47) a tato závislost se zvyšuje s pozicí extenzometru. Je možné, že vliv štíhlostního koeficientu bude souviset spíše s deformací kmene a náklonem kmene než s náklonem kořenového balu. Urata et al. (2011), který uvádí významnou závislost mezi štíhlostním koeficientem a odolností stromu proti vyvrácení nerozlišuje mezi průhybem kmene a rotací kořenového balu.



Obr. 46 Vliv změny štíhlostního koeficientu na náklon ve výšce 0.3 m.



Obr. 47 Vliv změny štíhlostního koeficientu na posunutí ve výšce 2 m.

Vliv sbíhavosti kmene, kterou uvádí Moore (2000) se při numerické simulaci nepotvrdila (tab. 11).

Rozložení dat, které zobrazuje hodnoty náklonu (obr. 46) a hodnoty posunutí (obr. 47) ve vztahu ke štíhlostnímu koeficientu, je podobné. Tato podobnost může být způsobena stejným principem při zjišťování hodnot posunutí a náklonu z výslednic (viz. 4.1.2.3).

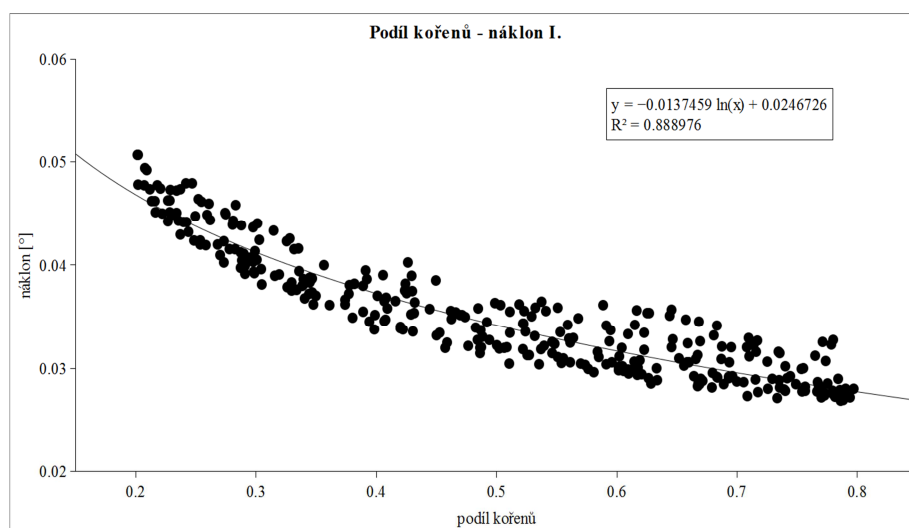
5.2.3 ZJIŠTĚNÍ VLIVU ZMĚNY ROZMĚRŮ A VLASTNOSTÍ KOŘENOVÉHO BALU

Poslední citlivostní analýza byla provedena na změnu hloubky, průměru a materiálových vlastností kořenového balu. Přehled korelačních koeficientů je uveden v tab. 12.

Tab. 12 Vliv změny rozměrů a vlastností kořenového balu na výsledné hodnoty, zvýrazněny jsou korelační koeficienty pro významné vztahy.

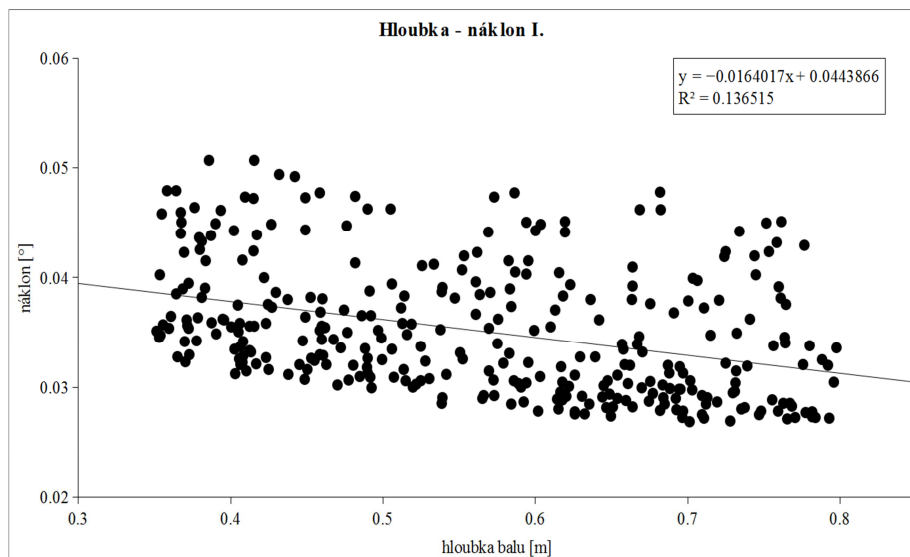
Závislost změny rozměrů a vlastností balu na výsledné hodnoty (Spearmanovy korelace, $p < 0.05$)			
	Hloubka balu	Průměr balu	Podíl kořenů
Náklon I.	-0.4133	0.0067	-0.9220
Náklon II.	-0.4138	0.0094	-0.9221
Náklon III.	-0.4137	0.0093	-0.9221
Náklon IV.	-0.4137	0.0093	-0.9221
Náklon V.	-0.4104	0.0158	-0.9245
Posunutí I.	-0.2586	0.0618	-0.9788
Posunutí II.	-0.3537	0.0275	-0.9468
Posunutí III.	-0.4199	0.0065	-0.9162

Úzká závislost se projevila mezi podílem kořenů a výslednými hodnotami (tab. 12). S klesajícím podílem kořenů se zvyšuje měřený náklon (obr. 48), přičemž vliv je stejný pro všechny pozice inklinometrů. Tyto výsledky se shodují s údaji, které uvádí Fourcaud et al. (2003), který také upozorňuje, že kromě podílu je důležitá i přítomnost silných vertikálních kořenů. Tomu odpovídají také výsledky, které publikoval Coutts (1986), který uvádí, že významná je pevnost kořenů na tahové straně.



Obr. 48 Vliv podílu kořenů v druhé vrstvě kořenového balu na náklon ve výšce 0.3m.

Významná závislost se projevila také u hloubky kořenového systému (tab. 12), kde se ale nepodařilo najít statisticky významný regresní model pro vyjádření závislosti (obr. 49). Závislost může být vázána i na vlastnosti půdy, jak uvádí Dupuy et al. (2005), kdy význam hloubky kořenového systému roste u písčitéch půd. Hloubka kořenového systému je považována za významnou řadou autorů (Moore, 2000, Ghani et al. 2009, Achim a Nicoll, 2009), stejně jako plošné rozměry kořenového systému. Výsledky numerické simulace ale ukazují, že mezi průměrem balu a výslednými hodnotami není významná korelace.



Obr. 49 Vliv hloubky kořenového balu na náklon ve výšce 0.3 m.

Vzhledem k významné závislosti podílu kořenů a výsledných hodnot je do budoucna určitě nezbytné zvážit simulaci konkrétních typů kořenových systémů, jak uvádí (Fourcaud et al. 2003, Dupuy et al. 2005, Khalilnejad et al. 2012) a její porovnání se současným přístupem, kdy se s kořenovým balem pracuje jako s kompozitem.

Rozložení dat, které zobrazuje hodnoty náklonu (obr. 48) a hodnoty posunutí (příloha č. 8) ve vztahu k podílu kořenů a hloubce balu, je podobné. Tato podobnost může být způsobena stejným principem při zjišťování hodnot posunutí a náklonu z výslednic (viz. 4.1.2.3).

5.3 ZJIŠTĚNÍ VLIVU DEFEKTŮ NA NÁKLON A POSUNUTÍ

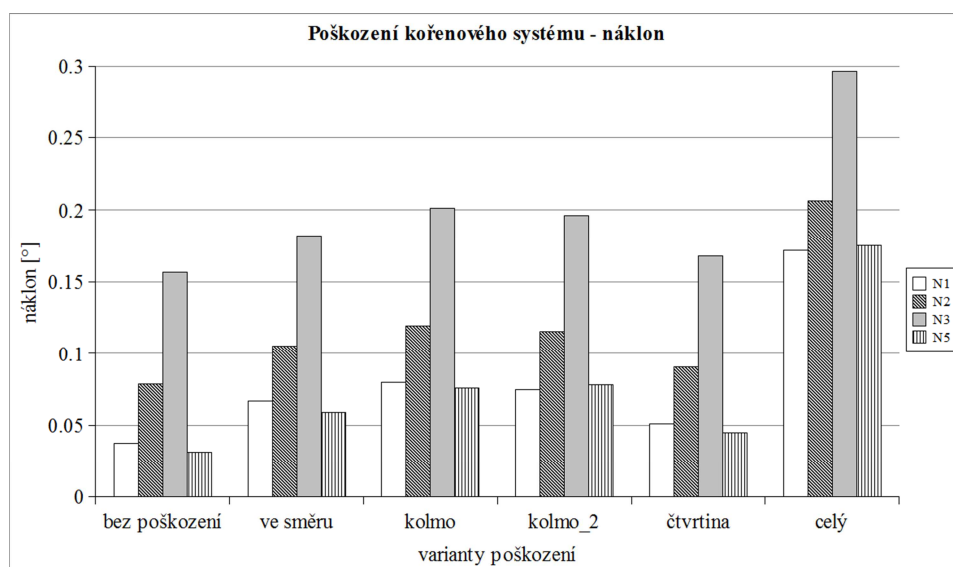
5.3.1 KOŘENOVÝ SYSTÉM

Přehled vlivu poškození jednotlivých částí kořenového systému je uveden v tab. 13. Poškození kořenového systému je způsobeno změnou materiálových vlastností vybraných výsečí (viz. 4.4). Poškození různých částí kořenového systému se nejvíce projevuje na náklonu ve výšce 0.3 m a na náklonu kořenového balu (obr. 50). Také posunutí ve výšce 0.3 m je ovlivněno poškozením kořenového systému. Výsledky modelu tedy poukazují, že umístěním snímačů do výšky 0.3 m nejlépe vystihuje poškození kořenového systému.

Tab. 13 Vliv poškození částí kořenového systému na hodnoty posunutí a náklonu. EL je relativní změna hodnot posunutí, N je relativní změna hodnot náklonu.

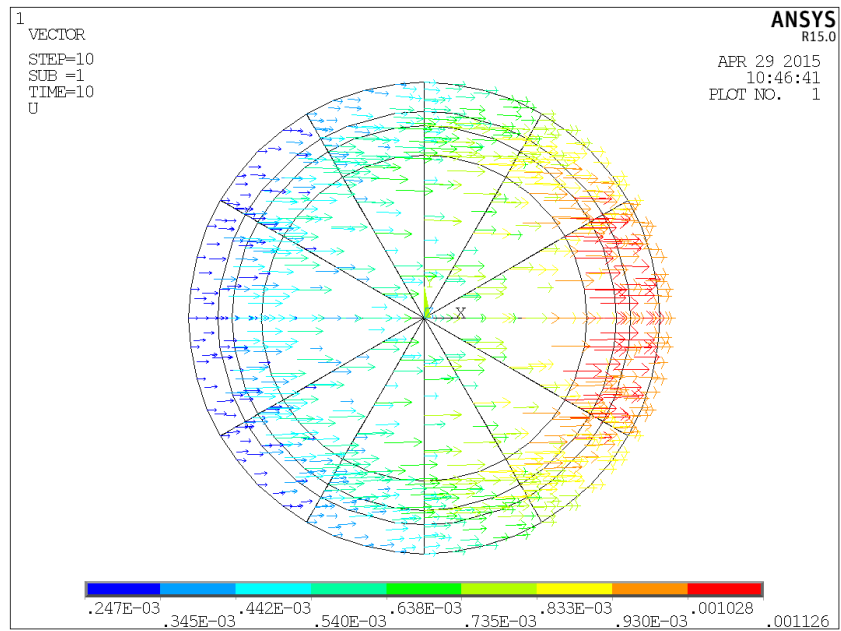
Vliv poškození částí kořenového systému								
	EL1	EL2	EL3	N1	N2	N3	N4	N5
bez poškození	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
ve směru	15%	0%	0%	80%	33%	16%	5%	87%
kolmo	-26%	-3%	1%	114%	52%	28%	8%	142%
kolmo_2	54%	4%	1%	101%	46%	25%	7%	149%
čtvrtina	16%	1%	0%	37%	15%	7%	2%	44%
celý	22%	2%	3%	363%	162%	89%	25%	459%

Obr. 50 zobrazuje průběh náklonu v případě různých typů poškození. Nejvyšších hodnot (kromě poškození celého systému) dosahuje náklon v případě poškození umístěného na tlakové straně („kolmo“). K celkem výraznému rozdílu (34 %) dochází mezi postranním poškozením („ve směru“) a poškozením na tlakové straně kořenového systému („kolmo“) (tab. 13). Szórádová (2013) uvádí, že mezi tahem ve směru předpokládaného poškození a kolmo na něj není statisticky významný rozdíl. Výsledky simulace ale ukazují, že rozdíl mezi směrem zatížení v případě jednostranného defektu je celkem výrazný.

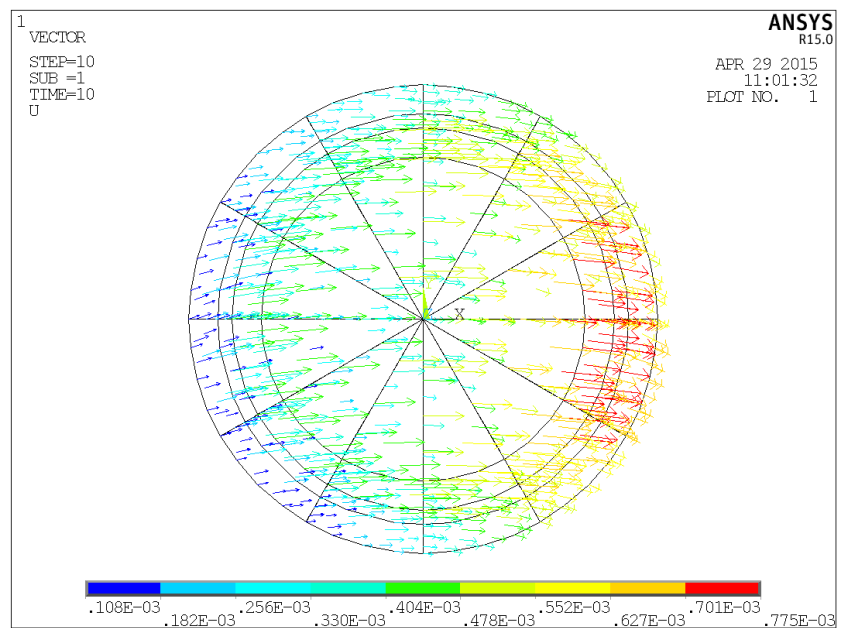


Obr. 50 Změna náklonu při různých variantách poškození ve výšce 0.3, 1, 2 m a náklonu kořenového balu.

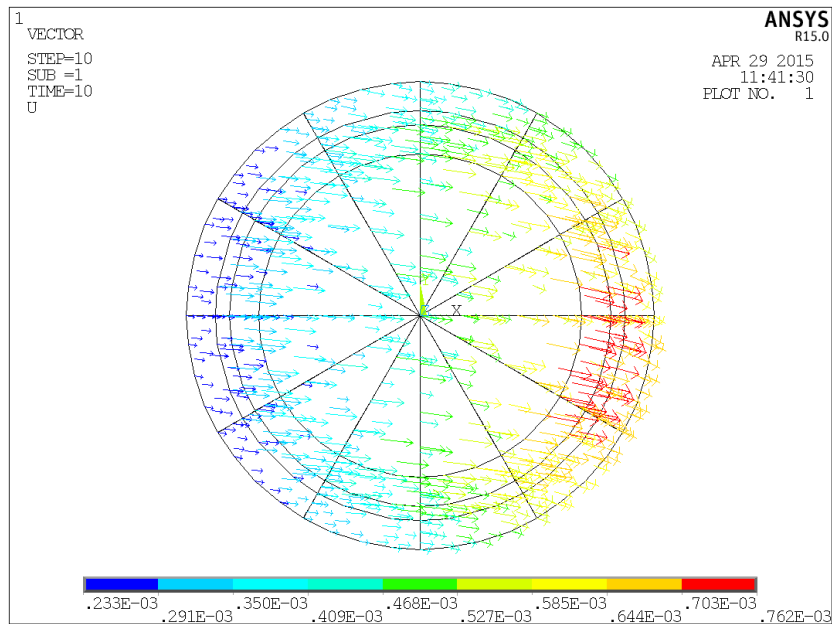
Při zobrazení vektorového posunutí bodů (ve výšce 0.3 m) v případě poškození na tlakové straně (obr. 51) a postranního poškození (obr. 52) je viditelné, že při zatížení stromu s postranním poškozením dochází ke stáčení kmene. Při použití přístrojů, které zaznamenávají náklon pouze v jedné ose, tak zřejmě může docházet k podhodnocení. To samé nastává v případě poškození jedné čtvrtiny kořenového systému (obr. 53).



Obr. 51 Zobrazení vektorů posunutí v případě poškození kořenového systému na tlakové straně („kolmo“). Pohled na kmen svrchu – řez v 0.3 m výšky kmene.

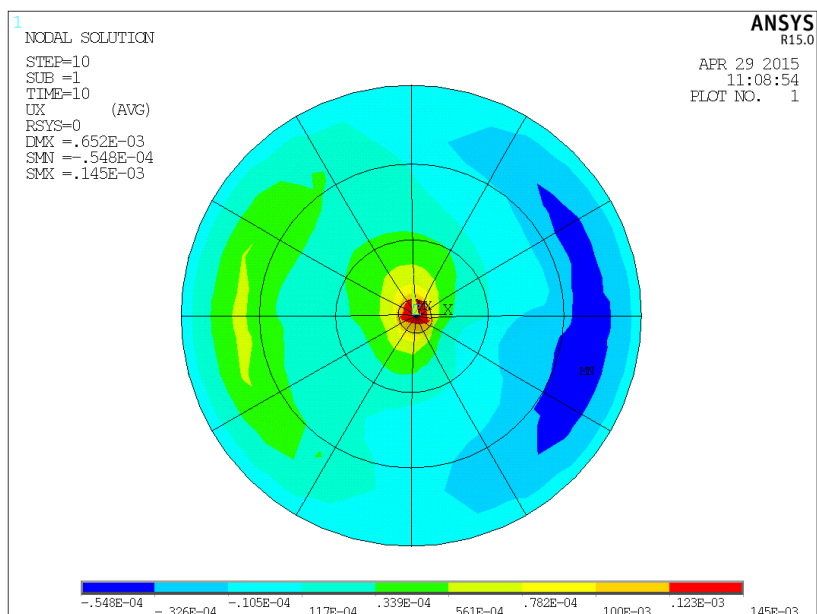


Obr. 52 Zobrazení vektorů posunutí v případě postranního poškození kořenového systému („ve směru“). Pohled na kmen svrchu – řez v 0.3 m výšky kmene.

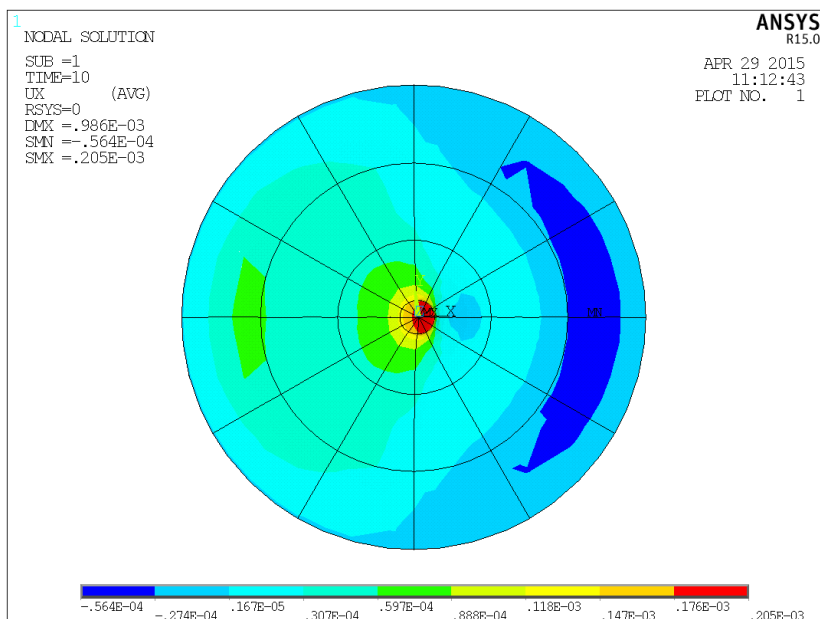


Obr. 53 Zobrazení vektorů posunutí v případě poškození čtvrtiny kořenového systému. Pohled na kmen svrchu – řez v 0.3 m výšky kmene.

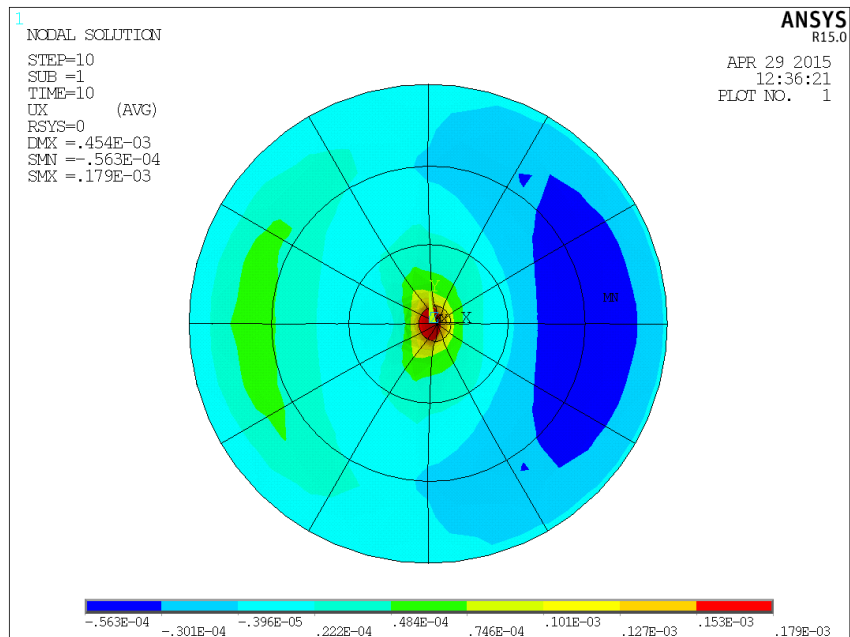
K podobnému výsledku docházíme i při zobrazení posunutí bodů v kořenovém balu. Maximální posunutí bodů v ose x (směr zatížení) při postranním poškození je 0.145 mm (obr. 54) a při poškození na tlakové straně je 0.205 mm (obr. 55), přičemž poškození je stejného rozsahu. Tento rozdíl je méně výrazný, pokud je poškození na tahové straně. Při pozici poškození na tahové straně je maximální posunutí kořenového balu v ose x 0.179 mm (obr. 55). Zároveň je na obr. 54 zřetelné nerovnoměrné rozložení posunutí v ose x, na rozdíl od poškození na tlakové nebo na tahové straně kořenového systému (obr. 54, 56). Z uvedeného vyplývá, že pokud bychom při provádění tahové zkoušky chtěli dosáhnout maximálních hodnot náklonu, měl by být směr tahu situován kolmo k poškození, přičemž poškození by mělo být na tlakové straně kořenového systému. Vzhledem k tomu, že defekty kořenového systému jsou ve většině případů skryté, je vhodné využívat přístroje, které jsou schopny záznamu ve třech osách.



Obr. 54 Zobrazení posunutí kořenového balu v ose x (ve směru působící síly) v případě postranního poškození kořenového systému („ve směru“). Pohled na kořenový bal svrchu.

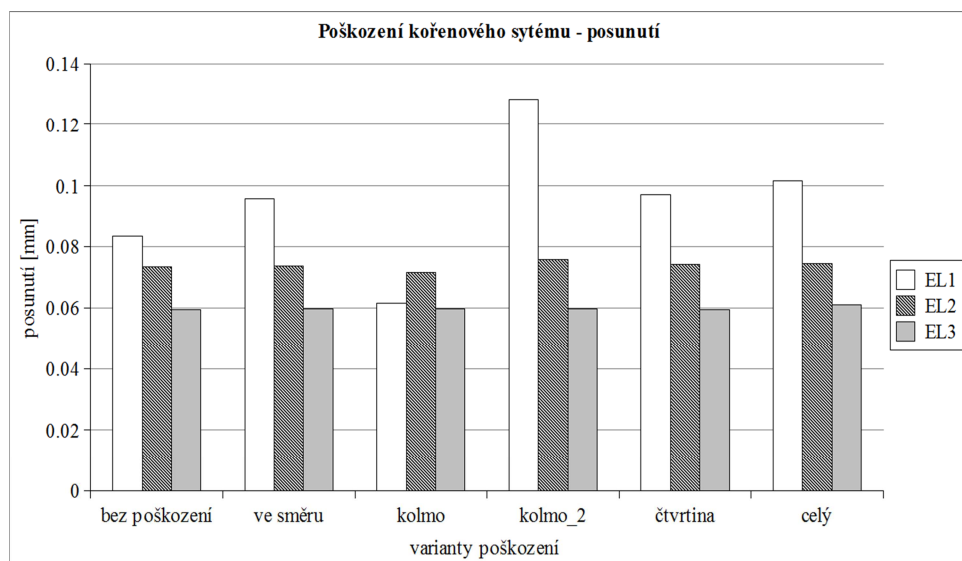


Obr. 55 Zobrazení posunutí kořenového balu v ose x (ve směru působící síly) při poškození kořenového systému na tlakové straně („kolmo“). Pohled na kořenový bal svrchu.



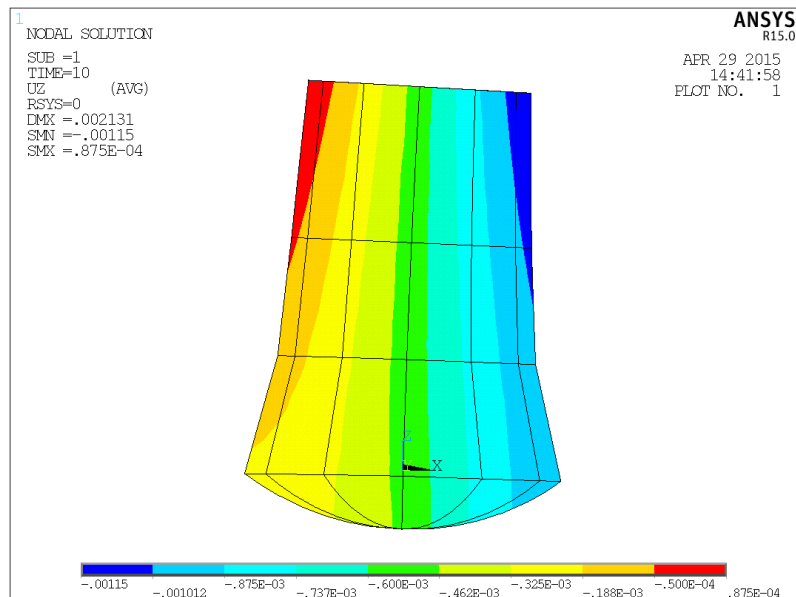
Obr. 56 Zobrazení posunutí kořenového balu v ose x (ve směru působící síly) při poškození kořenového systému na tahové straně („kolmo_2“). Pohled na kořenový bal svrchu.

Posunutí se s poškozením kořenového systému mění výrazně pouze ve výšce 0.3 m. Přičemž v případě poškození kořenového systému na tlakové („kolmo“) a tahové straně („kolmo_2“) dochází k rozdílným reakcím (obr. 57). Při poškození, které se nachází na tlakové straně, je posunutí o 26 % nižší než posunutí u nepoškozeného kořenového systému. Při poškození na tahové straně je posunutí o 54 % vyšší než v případě neporušeného kořenového systému (tab. 13).

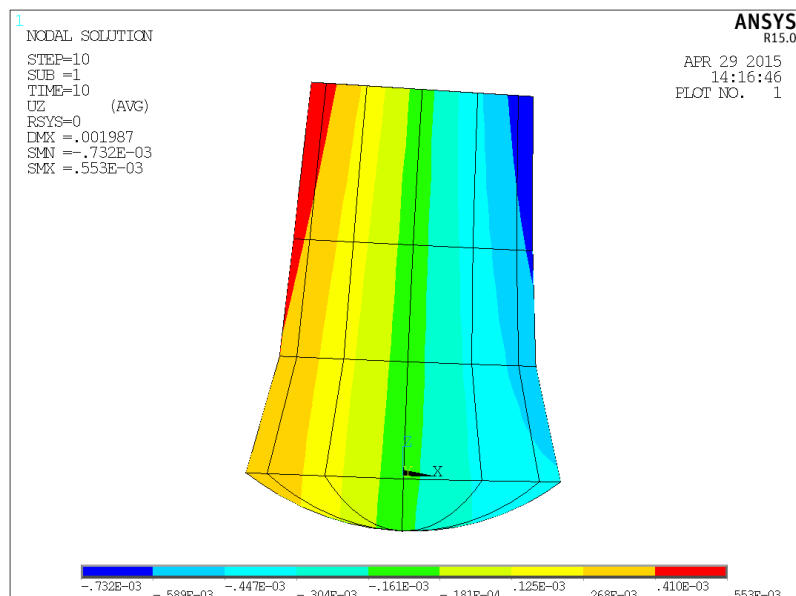


Obr. 57 Posunutí při různých variantách poškození ve výšce 0.3, 1, 2 m.

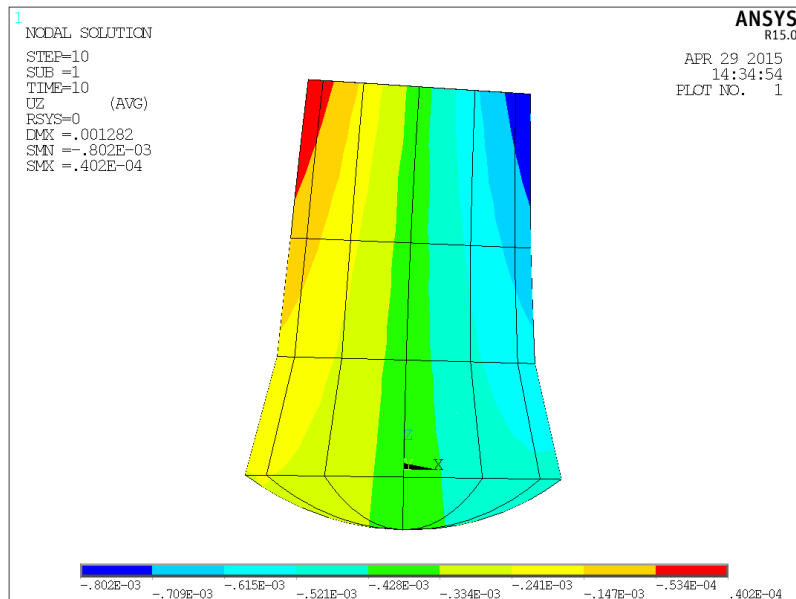
Ze zobrazení posunutí ve směru osy kmene (osa z) je viditelné, že při poškození kořenového systému na tlakové straně je maximální posun na tahové straně kmene 0.08 mm a na tlakové straně kmene 1.15 mm (obr. 58). Při poškození na tahové straně kořenového systému je maximální hodnota posunutí na tahové straně kmene 0.55 mm a na tlakové straně 0.73 mm (obr. 59). U nepoškozeného kořenového systému je maximální hodnota posunutí v ose z na tahové straně kmene 0.04 mm a na tlakové straně kmene 0.8 mm (obr. 60).



Obr. 58 Posunutí v ose z (osa kmene) ve kmeni při poškození na tlakové straně kořenového systému. Detail báze kmene (do 1 m) včetně oddenku, bez kořenového systému.



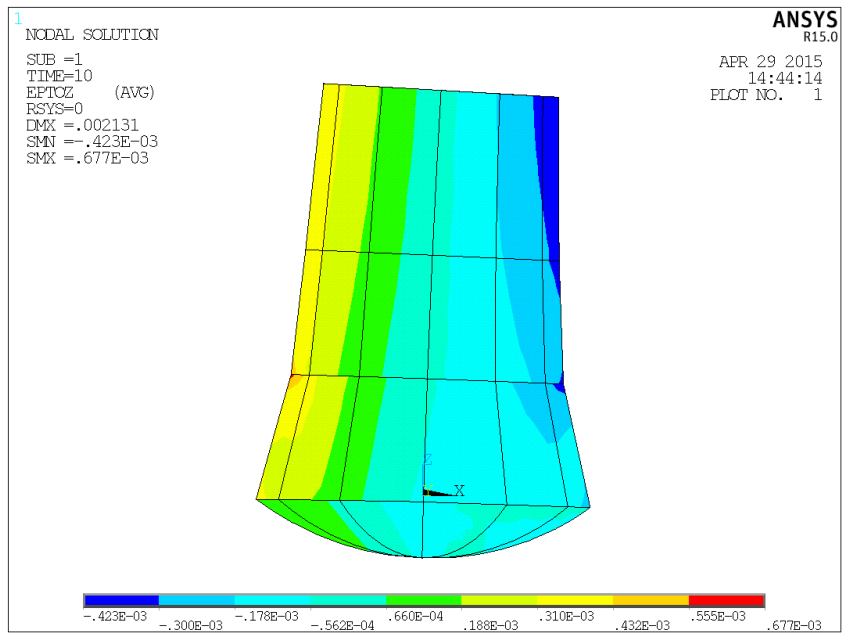
Obr. 59 Posunutí v ose z (osa kmene) ve kmeni při poškození na tahové straně kořenového systému. Detail báze kmene (do 1 m) včetně oddenku, bez kořenového systému.



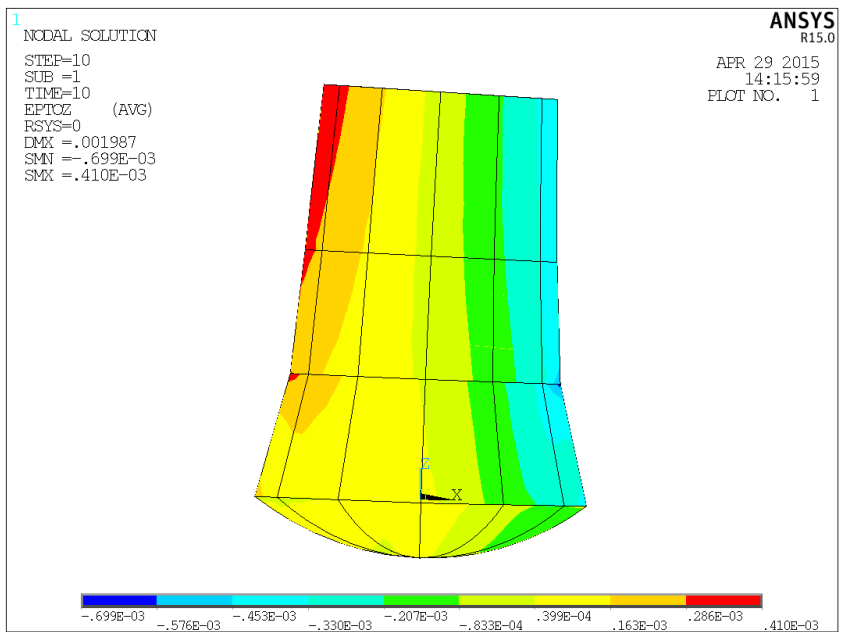
Obr. 60 Posunutí v ose z (osa kmene) ve kmeni při nepoškozeném kořenovém systému. Detail báze kmene (do 1 m) včetně oddenku, bez kořenového systému.

Poměrné deformace ve směru osy kmene (osa z) při poškození kořenového systému na tlakové straně dosahují ve výšce 0.3 m na tahové straně kmene velikosti $6.77e-4$ (0.06 %) na tlakové straně kmene $4.2e-4$ (0.04 %) (obr. 61). V případě poškození kořenového systému na tahové straně je poměrná deformace na tahové straně kmene $4.1e-4$ (0.04 %) a na tlakové straně kmene $6.9e-4$ (0.06 %) (obr. 62). Poměrné deformace na kmeni v případě kdy kořenový systém není poškozen, jsou $5.05e-4$ (0.05 %) na tahové straně kmene a $5.29e-4$ (0.05%) na tlakové straně kmene (obr. 63).

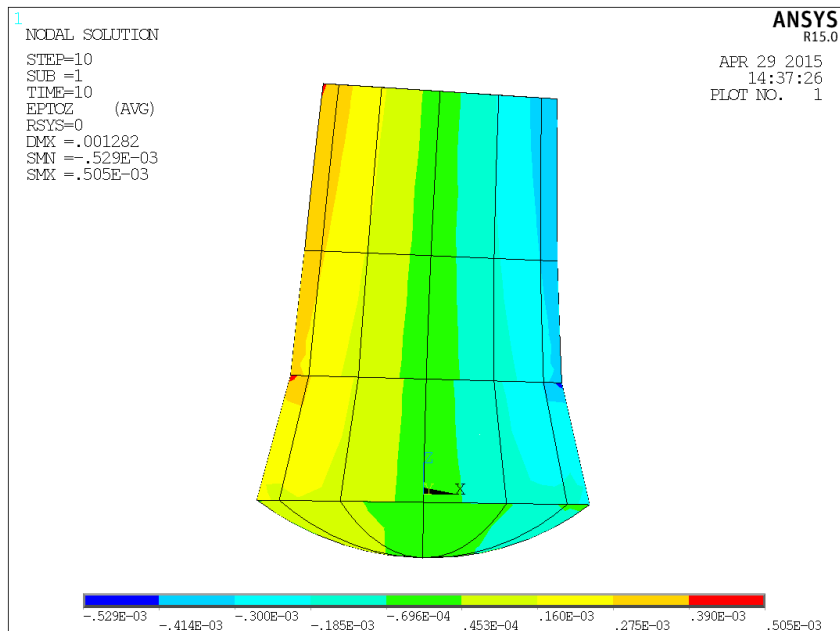
Ze zjištěných hodnot lze pozorovat, že poškození kořenového systému ovlivňuje měření extenzometry. Zároveň je patrné, že při umístění extenzometru na tahové straně kmene a poškozením na tahové nebo tlakové straně kořenového systému je rozdíl mezi poměrnou deformací 0.02 %. Při poškození kořenového systému bude tedy záležet i na umístění extenzometru na tahovou nebo tlakovou stranu. Ze zobrazení poměrných deformací v případě poškození celého kořenového systému (obr. 64) je patrné, že ve kmeni dochází k menším deformacím než u kmene bez poškození ($4.5e-4$ tahová strana kmene, $5.04e-4$ tlaková strana kmene). U poškození celého kořenového systému se navíc poměrná deformace ve kmeni zmenšuje s rostoucí výškou. Při interpretaci naměřených dat tak může docházet k chybnému předpokladu, že kmen vykazuje tužší chování než kmen stromu, který je bez poškození kořenového systému. Tato skutečnost může být zavádějící jak při výpočtu modulu pružnosti z naměřených dat, tak i při interpretaci dat z extenzometrů.



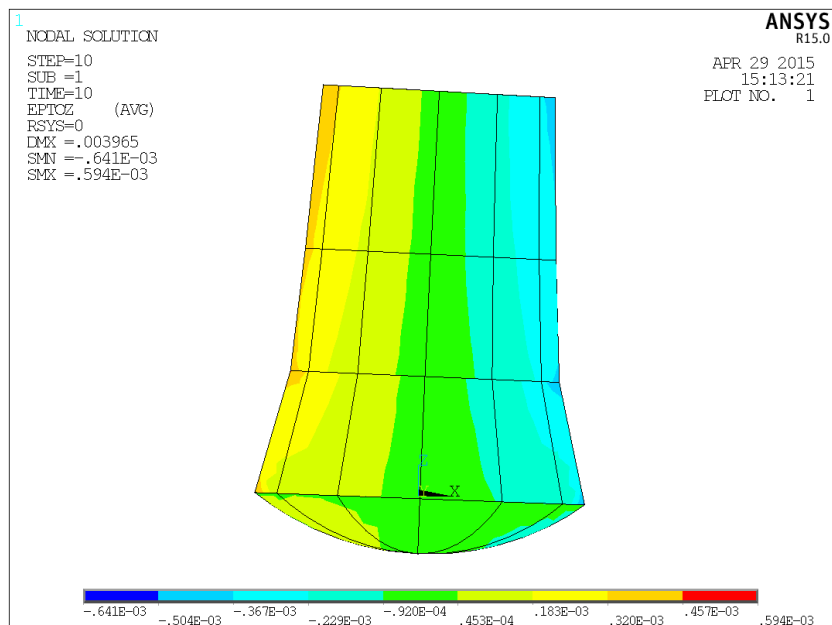
Obr. 61 Poměrné deformace v ose z (osa kmene) ve kmeni při poškození na tlakové straně kořenového systému. Detail báze kmene (do 1 m) včetně oddenku, bez kořenového systému.



Obr. 62 Poměrné deformace v ose z (osa kmene) ve kmeni při poškození na tahové straně kořenového systému. Detail báze kmene (do 1 m) včetně oddenku, bez kořenového systému.



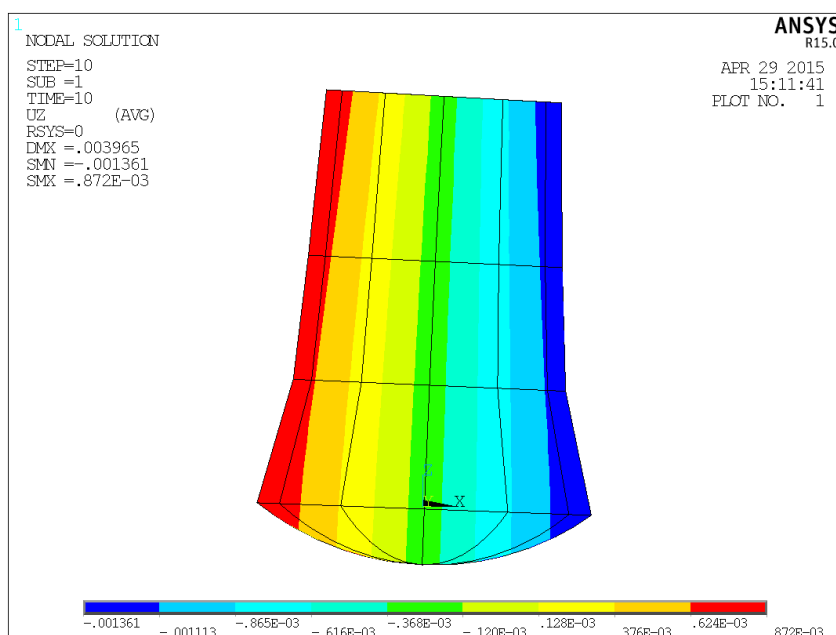
Obr. 63 Poměrné deformace v ose z (osa kmene) ve kmeni při nepoškozeném kořenovém systému. Detail báze kmene (do 1 m) včetně oddenku, bez kořenového systému.



Obr. 64 Poměrné deformace v ose z (osa kmene) ve kmeni při poškození celého kořenového systému. Detail báze kmene (do 1 m) včetně oddenku, bez kořenového systému.

Na obr. 65 můžeme sledovat, že při poškození celého kořenového systému, hodnoty posunutí v ose z (směr osy kmene), dosahují maximálních hodnot 0.08 mm na tahové straně kmene a 1.3 mm na tlakové straně kmene. Tyto výsledky ukazují, že při sledování posunutí opravdu zjišťujeme vyšší hodnoty než při nepoškozeném kořenovém systému. Stejně jako v tab. 13., kdy pracujeme s výslednicí posunutí mezi dvěma body,

ale ve všech třech směrech. Vykreslení deformací, ale tomuto trendu neodpovídá, jak už bylo uvedeno výše. Správná interpretace výsledků bude tedy zřejmě opět závislá na schopnosti přístrojů zaznamenat posunutí v jedné nebo více osách a následně správně zvoleném přepočtu pro poměrné deformace. Podrobnější grafické znázornění posunutí a poměrných deformací kořenového balu a kmene v různých osách je uvedeno příloze č. 9 a 10.



Obr. 65 Posunutí v ose z (osa kmene) ve kmeni při poškození celého kořenového systému. Detail báze kmene (do 1 m) včetně oddenku, bez kořenového systému.

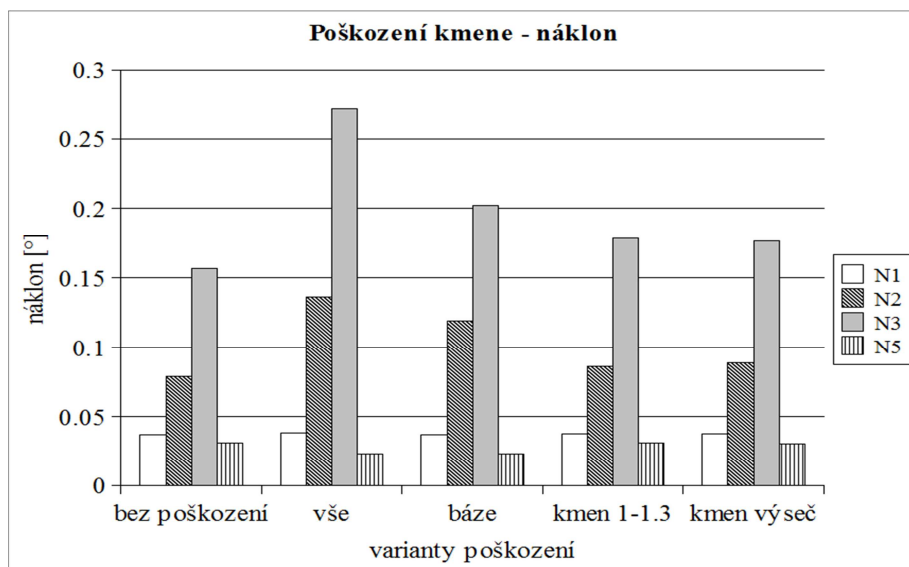
5.3.2 KMEN

Výsledky různých variant poškození kmene jsou uvedeny v tabulce 14. Poškození částí kmene je způsobeno změnou materiálových vlastností vybraných výškových segmentů a výsečí (viz. 4.4). Nejvyšších hodnot dosahuje posunutí ve výšce 0.3 m při poškození v rámci celého kmene. Oproti tomu náклон ve výšce 0.3m dosahuje hodnot nejnižších.

Tab. 14 Vliv poškození částí kmene na hodnoty posunutí a náklonu. EL je relativní změna hodnot posunutí, N je relativní změna hodnot náklonu.

Vliv poškození částí kmene								
	EL1	EL2	EL3	N1	N2	N3	N4	N5
bez poškození	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
vše	93%	72%	66%	3%	73%	73%	32%	-26%
báze	91%	14%	1%	-1%	51%	29%	8%	-25%
kmen 1-1.3	0%	26%	2%	1%	10%	14%	4%	0%
kmen výseč	4%	11%	2%	1%	12%	13%	4%	-3%

Nejnižší reakce na přítomnost dutiny u inklinometru umístěného ve výšce 0.3 m na rozdíl od citlivosti přístrojů umístěných ve vyšších polohách potvrzují, že pozice inklinometrů co nejbližší bázi je opodstatněná. Zároveň je zajímavé, že v případě dutiny na bázi kmene se náklon ve vyšších pozicích výrazně zmenšuje (obr. 66), což potvrzuje, že pracujeme s pootočení bodů v daných pozicích.

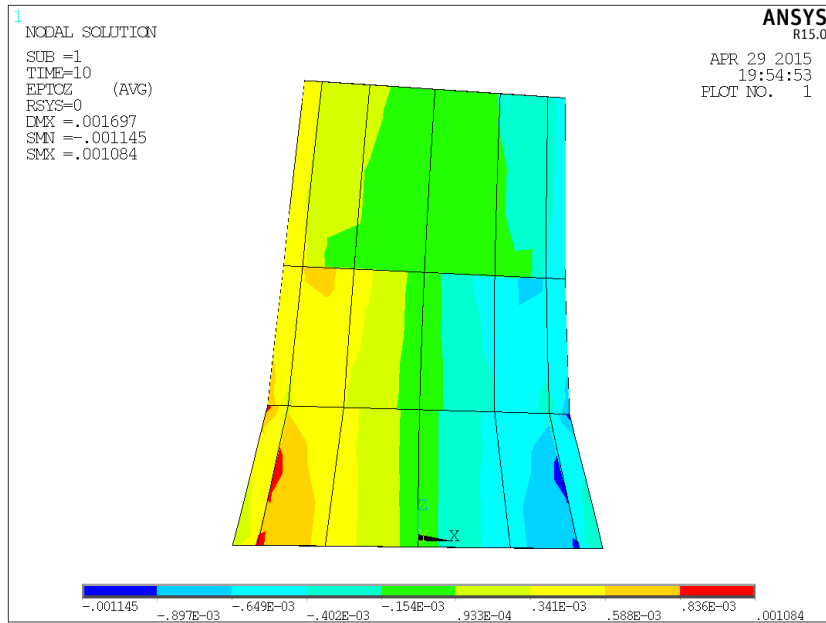


Obr. 66 Změna náklonu ve výšce 0.3, 1, 2m a náklonu kořenového balu při různých variantách poškození kmene.

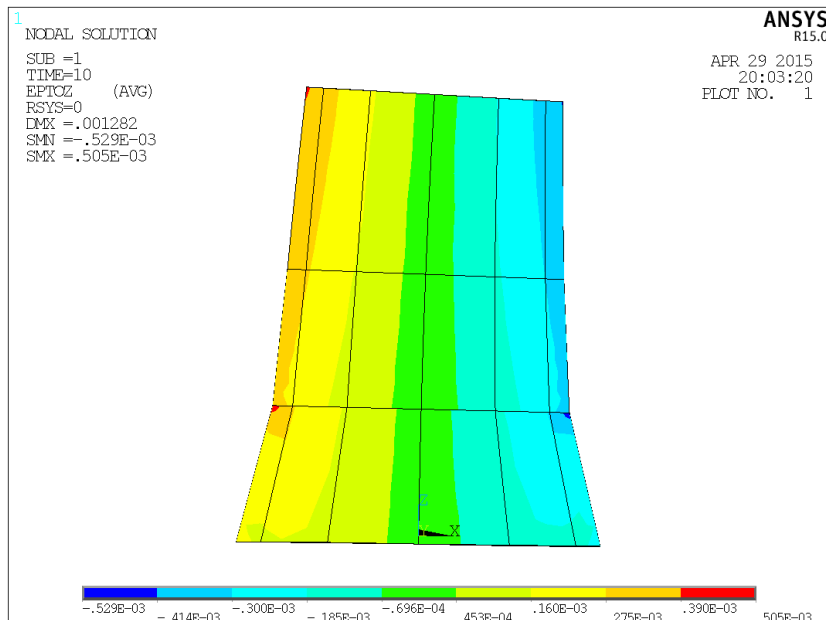
Na poškození celého kmene je nejsilnější odezva v posunutích opět ve výšce 0.3m. V případě, že se poškození kmene nachází nad extenzometrem, nedochází k velké změně v posunutí oproti variantě bez poškození (obr. 66). V případě umístění extenzometrů nad defektem je změna znatelná (14 %). Pokud se extenzometr nachází nad defektem, je změna dokonce znatelnější, než v případě poškození třetiny kmene v místě umístění extenzometru na straně protilehlé k defektu (nárůst posunutí o 11 %).

Při zobrazení poměrných deformací mají hodnoty podobný trend, jako u poškození kořenového systému. Na obr. 67 je patrné, že při poškození kmene na bázi dosahuje poměrná deformace ve směru osy kmene (osa z) v místě defektu hodnot 0.001 (1 %), ve výšce 1 m pak $3.41e-4$ (0.03 %). Obr. 68 ukazuje rozložení deformací v ose z pro kmen bez poškození. Hodnota poměrné deformace ve výšce 0.3 m dosahuje hodnot $5.04e-4$ (0.05 %), ve výšce 1 m hodnoty $4.1e-4$ (0.04 %). Poměrná deformace na kmeni při poškození báze je menší než v případě kmene nepoškozeného. Ve výšce 2 m pak dosahují hodnoty u nepoškozeného kmene $2.75e-4$ (0.02 %) a u kmene poškozeného na bázi $9.33e-5$ (0.009 %). Kmen, u kterého je simulována dutina na bázi, tedy vykazuje ve

vrchní části menší poměrné deformace než kmen bez poškození. Tato skutečnost opět může ovlivnit vyhodnocení dat. Nutné je tedy zvážit zda přístroje, zaznamenávají pohyb v jedné nebo více osách a zvolit správný postup při přepočtu na poměrnou deformaci. Také je důležité správné rozložení pozic přístrojů a po kmeni, případně při vyhodnocení sledovat reakce ve více pozicích a zvážit jejich interakci.



Obr. 67 Zobrazení poměrných deformací v ose z (osa kmene) ve kmeni při poškození báze. Detail báze kmene (do 1m), bez kořenového systému.

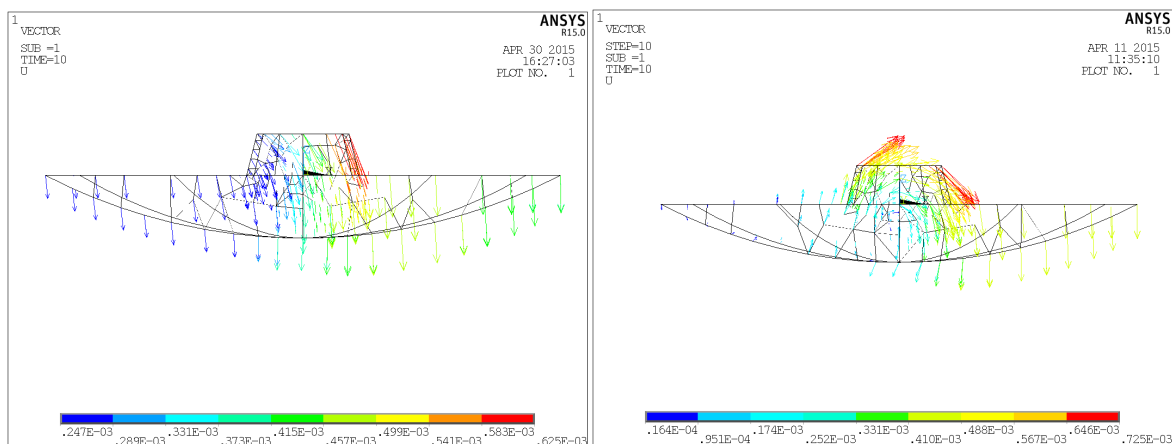


Obr. 68 Zobrazení poměrných deformací v ose z (osa kmene) ve kmeni při poškození báze. Detail báze kmene (do 1m), bez kořenového systému.

Ze zpracování výstupů analýz popisujících vliv defektů na hodnoty náklonu a posunutí, vyplývá, že je nezbytné používat vždy kombinaci inklinometrů a extenzometrů. Inklinometry na bázi tak mohou upozornit nejen na poškození kořenového systému, ale i na jeho vliv na výstupy extenzometrů. Zároveň je důležitá další studie zaměřená na měřicí rozsah a schopnosti používaných přístrojů. V této souvislosti je zřejmý potenciál optických metod, založených na korelaci obrazu, které jsou schopny zaznamenat deformaci a posunutí v různých směrech a plno polně (Sebera et al. 2014). Ačkoliv byl původní záměr při sestavení numerického modelu směřován ke zjišťování stejných parametrů, jako výstup tahové zkoušky, tedy posunutí Δl a náklon θ , studie ukázala, že pro kmen bude zřejmě přesnější výstup simulace v podobě poměrných deformací zjištěných v odpovídacích konečných prvcích modelu.

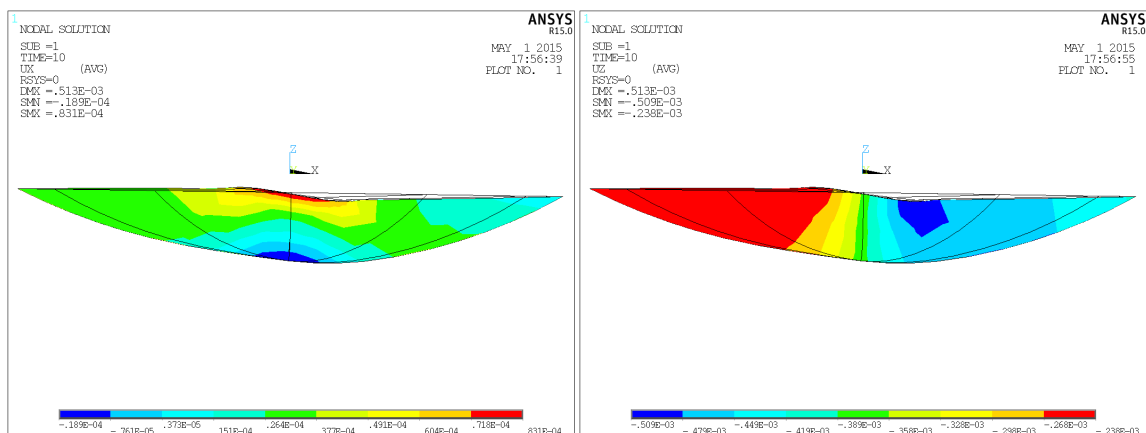
5.4 VÝVOJ VÝPOČTOVÉHO MODELU

Tvorba modelu vedla k odhalení dalších jevů, jejichž studium je vhodné při dalším rozvoji. Jedním z nich je např. bod otáčení/rotace kořenového systému. Coutts (1986) uvádí bod otáčení kořenového systému jako jeden z faktorů, které mají vliv na interpretaci stability stromu. Bod otáčení se přitom mění s různými vlastnostmi půdy a typem kořenového systému (Dupuy et al. 2005, Dupuy et al. 2007 i Fourcaud et al. 2008). Při zobrazení vektorů posunutí při nepoškozeném kořenovém balu se bod rotace zobrazuje v na tahové straně kmene v místě vetknutí (obr. 69). Při zatížení stromu ve směru kolmo k jednostranně poškozenému kořenovému systému se bod rotace zobrazuje pod kořenovým systémem (obr. 69). Další vývoj by se měl zaměřit na vhodný způsob zatížení stromu vlastní hmotností, a zpracování různých tvarů kořenového systému (Dupuy et al. 2005, Dupuy et al. 2007, Reubens et al. 2007, Danjon a Reubens 2008, Fourcaud et al. 2008, Khalilnejad et al. 2012), které bod otáčení také ovlivňují.



Obr. 69 Zobrazení vektorů posunutí: vlevo – u nepoškozeného kořenového balu, vpravo – u kořenového balu poškozeného kolmo ke směru zatížení. Pohled na bázi kmene a druhou vrstvu kořenového systému.

Kromě bodu rotace kořenového systému je také zajímavé sledování kombinace náklonu kořenového balu a pootočení kmene. Jak ukazuje model, parametry, které mají významný vliv na měřený náklon, úzce souvisejí i s pootočením kořenového balu. Zároveň se ale z výsledků simulace jeví, že vliv potočení kořenového balu na celkový náklon je nízký.



Obr. 70 Zobrazení náklonu kořenového balu po zatížení: vlevo – posunutí v ose x, vpravo – posunutí v ose z. Pohled na druhou vrstvu kořenového systému.

Při verifikaci výpočtového modelu se problematickým ukázalo i získání odpovídajících výstupních hodnot, jaké jsou zjišťovány při měření. Pro další vývoj tedy bude nezbytné zaměřit se na zpracování výstupních hodnot experimentu a záznam přístrojů v jedné nebo více osách.

Model projevil citlivost na zadávání odlišných modulů pružnosti v průběhu kmene. Další citlivostní analýza by tedy měla být zaměřena také na různé varianty materiálových vlastností dřeva a půdy.

Podstatný rozvoj modelu lze spatřit v náhradě teoretických lineárně-elastických modelů chování materiálu. Je vhodné zařadit popis plastické deformace půdy za využití Mohr-Coulombova a Drucker-Pragerova modelu. S tím je spojený i popis vlivu zatížení v čase. Jak uvádí Neild a Wood (1998) při velkých deformacích vzrůstá vliv hmotnosti a extřenticity koruny, pro aplikaci většího zatížení by tedy měly být zpracovány i tyto parametry více. U aplikace většího zatížení by se následně mohlo projevit účelné i využití velkých deformací. Přirozeným pokračováním popisu statické odezvy stromu je sledování odezvy stromu na dynamické namáhání, které je v současné době předmětem řady studií (Saunderson et al. 1999, Sellier a Fourcaud 2005, Sellier et al. 2006) a kde je využití numerických simulací žádoucí.

5.5 VÝSTUPY PRO PRAXI

Výsledky potvrdily, že vytvořený model je využitelný pro analýzu tahových zkoušek. Parametrické zadávání geometrie a materiálových vlastností, je vhodné pro univerzální využití modelu a simulaci široké škály konkrétních měření. Rozdělení modelu do jednotlivých výsečí a segmentů poskytuje možnost i pro umístění viditelných nebo předpokládaných defektů a umožňuje tak srovnání i několika variant, včetně porovnání s experimentálním měřením.

Důležitým zjištěním je významný vliv podílu objemu kořenů a hloubky kořenů na náklon kmene, který je zásadnější než průměr kořenového systému. V případě ochrany stromů při stavební činnosti, praxe vychází především z ochrany dostatečně velké plochy v rozsahu kořenového systému. Pokud by se podařilo potvrdit, že je zásadní spíše podíl kořenů, je možné v opodstatněných případech pracovat i se zásahy v chráněném kořenovém prostoru jak definuje SPPK 01 002:2015.

K samotnému provedení tahové zkoušky je zásadní popis vlivu defektů kořenového systému a skrytých defektů ve kmeni na výstupy extenzometrů. V případě defektů kořenového systému je nezbytné umisťovat extenzometry dostatečně vysoko. V případě defektů na bázi kmene je důležité zvažovat jejich vliv na měření extenzometry. Tento problém by mohl řešit záznam posunutí ve třech osách. U inklinometrů je pak schopnost záznamu ve třech osách ještě významnější vzhledem k tomu, že poloha poškození

kořenového systému není často zřejmá. Inklinometry by měly být umísťovány vždy co nejbližší bázi kmene, přičemž jejich poloha po obvodu kmene nebyla stanovena jako významná. Zatím ovšem nebyl sledován vliv kořenových náběhů. V případě jednostranného poškození kořenového systému je vhodné strom zatěžovat, tak aby poškození bylo na tlakové straně kmene/kořenového systému. Zcela jednoznačné je nutné při provedení tahové zkoušky využívat extenzometrů i inklinometrů. Vzhledem k nárokům na vhodné umístění přístrojů a kombinaci faktorů, které mohou ovlivňovat interpretaci dat je zřejmé, že tahová zkouška a její vyhodnocení by mělo být zpracováno dostatečně kvalifikovanou osobou a to i přes skutečnost, že jsou v současné době dostupné uživatelsky příjemné vyhodnocovací softwary s jednoduchým použitím.

6 ZÁVĚR

V prostředí ANSYS APDL byl vytvořen numerický model tahové zkoušky stromu a byla provedena simulace odezvy na zatížení v případě tří stromů, které byly experimentálně posouzeny tahovou zkouškou. Výsledky z výpočtového modelu byly porovnány s výstupy experimentálního měření a s výsledky analytického výpočtu vyvíjeného na Ústavu nauky o dřevě (Horáček, 2014). Odchylka numerického výpočtu od experimentu činila od 7 do 32 % a byla zhodnocena jako přijatelná na základě výsledku ostatních studií. Numerický výpočet celkově vykazoval tužší chování systému kmen - kořenový bal než měření a než analytický výpočet. Na druhou stranu analytický výpočet dosahoval až o 38 % vyšších hodnot náklonu než měření. Parametrický výpočtový model umožňuje využití pro různé varianty simulace tahových zkoušek, včetně změny dendrometrických parametrů, materiálu a polohy odečtu výstupů odpovídající poloze snímačů při experimentu. Rozdělení modelu do jednotlivých vrstev a segmentů také umožnilo simulaci výskytu různých defektů. Parametrizace modelu dovoluje jeho využití pro simulaci konkrétních praktických situací zkoušky a napomoci tak zlepšit samotné měření i analytický výpočet.

Pro vylišení významnosti vlivu zadávaných parametrů na výstupní hodnoty náklonu stromu a posunutí ve kmene byla provedena pravděpodobnostní citlivostní analýza. Tato citlivostní analýza byla provedena ve třech variantách zaměřujících se na polohu přístrojů, parametry kmene a parametry kořenového balu. Ze vstupních parametrů, které ovlivňují výsledný náklon stromu a posunutí bodů v rámci kmene, jednoznačně převažují průměr kmene a podíl kořenů v kořenovém balu. Významný vliv byl nalezen také u hloubky kořenového balu, ale neprojevil se u průměru kořenového balu. Významný vliv na výsledné hodnoty se projevil i u výšky kmene, štíhlostního koeficientu, výšky umístění inklinometrů a pozice umístění extenzometrů. Sbíhavost kmene a výška umístění extenzometrů se projeví jako nevýznamné. Další pozornost by dle výsledků měla být věnována především přesnějšímu/jednotnějšímu zjišťování hloubky kořenového systému a podílu kořenů.

Kromě stanovených cílů byla dále provedena analýza vlivu různých defektů kořenového systému a kmene na výsledné náklony a posunutí. Výsledky těchto analýz poukazují na fakt, že poškození kořenového systému může ovlivnit výstupy extenzometrů umístěných ve spodní části kmene a stejný princip se projevuje u extenzometrů, které

jsou umístěny nad defekty ve kmeni. Také bylo zjištěno, že při směru zatížení, které není orientováno kolmo na výskyt poškození kořenového systému, model vykazuje stáčení kmene, což může mít vliv na výsledné hodnoty náklonu především u jednoosých přístrojů.

Výstupy práce byly diskutovány v jejich rozsahu pro praktické provádění samotné tahové zkoušky, kde je rozhodující správné umístění přístrojů. Významná je i možnost zjišťování náklonu a deformací v jedné nebo více osách a tomu přizpůsobená interpretace dat. Dále byly nastíněny další možnosti práce v oblasti numerické simulace odezvy stromů na zatížení a úpravy směřující ke zpřesnění modelu.

7 SUMMARY

A numerical simulation for tree pulling test in ANSYS® software environment was developed. Simulation was performed in variety of tree dimensions and properties according experimental measurements. Results were compared with data from experimental measurements and with results from analytical solutions. Analytical solution for the tree uprooting resistance analysis is now being developed on the Mendel University, Brno. Tree pulling test simulation is established with use of ANSYS® parametric design language. Due to parametric design there is a possibility to change dendrometric parameters of trees and sets of devices quite comfortable. Differences between experimental measurements and numerical simulations are considered to be acceptable with reference to published results by other studies. There was no significant correlation among numerical and analytical solutions to identify reasons for differences. To find which input parameters significantly influence results, probabilistic analysis was carried out. The influences of device locations stem dimensions, root-plate dimensions and root-plate properties were analysed. Significant correlations were found among output parameters and stem diameter and root content. The output parameters are inclination of the tree in positions of inclinometers and nodes displacement in position of extensometers. Significant correlation is found between output parameters and depth of root-plate, but not at all with root-plate diameter. Simulation of several kinds of root-plate damage and stem defects was carried out as well. Important point is that root-plate damage can influence measurement ability of extensometers. The same situation is in case of lower stem defect, where deformation in higher part of stem could seem lower. In case of asymmetrical root-plate damage there is a significant influence of important perpendicular pulling, because of stem rotation. Inclinometers which can measure only in one direction are not able to recognize the stem rotation, so measured values could be lower than real inclination. The measurement ability of devices and output of numerical solution is fundamental point of numerical simulation and need to be inspected further.

Significant part of the thesis is a reflection of results for practical use, especially in field measurements. Important parameters seem to be correct device positions and accurate interpretations of results. Variety of possibilities for further numerical simulations of tree behaviour is proposed.

8 POUŽITÁ LITERATURA

- ANCELIN, P., COURBAUD, B., FOURCAUD, T. 2004. Development of an individual tree-based mechanical model to predict wind damage within forest stands. In *Forest Ecology and Management* [online]. roč. 203, č. 1-3, s. 101–121. ISSN 03781127. Dostupné z: doi:10.1016/j.foreco.2004.07.067
- ACHIM, A., NICOLL, B. C. 2009. Modelling the anchorage of shallow-rooted trees. In *Forestry*. Roč.. 82. No. 3. s. 273 – 284.
- ANSI A300 (Part 9). 2011. *Tree Risk Assessment a. Tree Structure Assessment – Tree Care Operations*. Londonderry: Tree Care Industry Association.
- BS 3998:2010. 2010. *Tree work – Recommendations*. London: BSI Standards Publications.
- BASSUK, N., GRABOVSKY, J., MUCCIARDY, A., RAFFEL, G. 2011. Ground-penetrating radar accurately locates tree roots in two soil media under pavement. In *Arboriculture and Urban Forestry*. Roč. 37. No. 4. s. 160-166.
- BODIG, J., JAYNE, B. A. 1993. *Mechanics of wood and wood composites*. 2. vyd. Florida: Krieger publishing company. 712 s. ISBN 0-89464-777-6
- BOWLES J.E. 1996. *Foundation Analysis and Design*. 5. vyd. USA: McGraw-Hill. ISBN 0-07-912247-7
- BRUDI, E., WASSENAER, P. V. 2001. Trees and statics: Nondestructive failure analysis. In: THOMAS, E. S., KIM, D. K. (eds). *Trees structure and mechanics conference proceedings: how trees stand up and fall down*. International Society of Arboriculture. s. 53-69.
- BUZA A. K., GONCZ, B. 2015. Comparison of trees ad NDT methods. In *Wood Research*. Roč. 60. No. 1. s. 45-58.
- COMMANDEUR, P.R., PYLES, M.R. 1991. Modulus of elasticity and tensile strength of Douglas-fir roots. In *Canadien Journal of Forestry Research* 21: 48-51.
- COUTTS, M. P., 1986. Components of tree stability in sitka spruce on peaty gley soil. *Forestry* [online]. roč. 59, č. 2, s. 173–197. ISSN 0015752X. Dostupné z: doi:10.1093/forestry/59.2.173

- CRAUL, J. P. 1999. *Urban soils –applications and practices*. 1. vyd. USA: John Wiley & Sons. 366 s. ISBN 0-471-18903-0
- CROWN, P. 2005. *The influence of soil and species on tree depth - Information Note FCINO78*. Forestry Commission Edinburgh. 8 s.
- COUTTS, M. P., NIELSEN, C. C. N., NICOLL, B. C. 1999. The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. In *Plant and soil*. roč. 217, s. 1–15.
- ČSN 83 9061. 2006. *Ochrana stromů, porostů a vegetačních ploch při stavebních pracích – Technologie vegetačních úprav v krajině*. Praha: Český normalizační institut.
- DANJON, F., REUBENS, B. 2008. Assessing and analyzing 3D architecture of woody root systems, a review of methods and applications in tree and soil stability, resource acquisition and allocation. In *Plant and Soil* [online]. roč. 303, č. 1-2, s. 1–34. ISSN 0032079X. Dostupné z: doi:10.1007/s11104-007-9470-7
- DAVENPORT, A.G. 1961. The application of statistical concepts to the wind loading of structures. In *Proc. Inst. Civil Eng.* roč. 19, s. 449–471
- DAY, S. D., WISEMAN, E. P., DICKINSON, S. B., HARRIS, R. J. 2010. Contemporary Concepts of Root System Architecture of Urban Trees. In *Arboriculture & Urban Forestry* [online]. roč. 36, č. 4, s. 149–159. Dostupné z: doi:10.1111/j.1469-8137.2008.02648.x
- DUPUY, L., FOURCARD, T., LAC, P., STOKES, A. 2007. A generic 3D finite element model of tree anchorage integrating soil mechanics and real root system architecture. In *American Journal of Botany*, roč. 94, č. 9, s. 1506 – 1514.
- DUPUY, L., FOURCAUD T., STOKES, A. 2005. A numerical investigation into the influence of soil type and root architecture on tree anchorage. In *Plant and Soil* [online]. roč. 278, č. 1-2, s. 119–134. ISSN 0032079X. Dostupné z: doi:10.1007/s11104-005-7577-2
- ERB, M., WESSOLLY, L., 1998. *Handbuch der Baumstatik und Baumkontrolle*. Berlin: Patzer Verlag. 270 s.

- EZQUERRA, F., GIL, L. 2001. Wood anatomy and stress distribution in the stem of *Pinus pinaster* Ait . In *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*. roč. 10, č. 1, s. 166–177.
- FOURCAUD, T., JI J. N., ZHANG, Z. Q., STOKES, A. 2008. Understanding the impact of root morphology on overturning mechanisms: A modelling approach. In *Annals of Botany* [online]. roč. 101, č. 8, s. 1267–1280. ISSN 03057364. Dostupné z: doi:10.1093/aob/mcm245
- FOURCAUD, T., BLAISE, F., LAC, P., CASTÉRA, P. DE REFFYE, P. 2003. Numerical modelling of shape regulation and growth stresses in trees: II. Implementation in the AMAPpara software and simulation of tree growth. In *Trees - Structure and Function* [online]. roč. 17, č. 1, s. 31–39. ISSN 09311890. Dostupné z: doi:10.1007/s00468-002-0203-5
- FOURCAUD, T., DANJON, F., DUPUY, L. 2003. Numerical analysis of the anchorage of Maritime pine trees in connection with root structure. In *International Conference Wind Effects on Trees September 16-18, 2003, Universitat Karlsruhe, Germany*.
- FOURCAUD, T., LAC, P. 2003. Numerical modelling of shape regulation and growth stresses in trees: I. An incremental static finite element formulation. In *Trees - Structure and Function* [online]. roč. 17, č. 1, s. 23–30. ISSN 09311890. Dostupné z: doi:10.1007/s00468-002-0202-6
- GAFFREY, D., KNIEMEYER, O. 2002. The elasto-mechanical behaviour of Douglas fir, its sensitivity to tree-specific properties, wind and snow loads, and implication for stability – a simulation study. In *Journal of Forest Science*. roč. 48. č. 2. s. 49-69.
- GHANI, M. A., STOKES, A., FOURCARD, T. 2009. The effect of root architecture and root loss through trenching on the anchorage of tropical urban trees (*Eugenia grandis* Wight). In *Trees*. roč. 23. s. 197 – 209.

- GUILLON, T., DUMONT, Y., FOURCAUD, T. 2012. Numerical methods for the biomechanics of growing trees. In *Computers and Mathematics with Applications* [online]. B.m.: Elsevier Ltd, roč. 64, č. 3, s. 289–309. ISSN 08981221. Dostupné z: doi:10.1016/j.camwa.2012.02.040
- HORÁČEK, P., 2014. *Ústní sdělení*. (2014-11-29)
- HORÁČEK, P. 2010. *Mechanické vlastnosti dřeva – studijní pomůcka*. Mendelova univerzita v Brně.
- HORÁČEK, P. 2003. Introduction to the Tree Statics & Static Assessment. In *Conference proceedings: Tree statics & dynamics*. Seminar Westonbirt. Treework enviromental practice, 6 s.
- CHENG-JUNG, L., YU-CHIEN, K., TA-TE, L., MING-JER, T., SONG-YOUNG, W., LANG-DONG, L., YA-NAN, W., MING-HSUN, CH. 2008. Application of an ultrasonic tomographic technique for detecting defects in standing trees. In *International Biodeterioration & Biodegradation*. roč. 62. s. 434-441.
- JAVOŘÍK, J. *Návrh modelu mechanického chování dřeva na mikroskopické úrovni a jeho numerické simulace*. Brno. 2002. 128 s. Disertační práce na Lesnické a dřevařské fakultě Mendelovy univerzity v Brně. Vedoucí disertační práce Dr. Ing. Petr Horáček.
- JONSSON, M. J., FOETZKI, M. KALBERER, T. LUNDSTRÖM, W. AMMANN, V. STÖCKLI, 2006. Root-soil rotation stiffness of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst) growing on subalpine forested slopes. In *Plant and Soil* [online]. roč. 285, č. 1-2, s. 267–277. ISSN 0032079X. Dostupné z: doi:10.1007/s11104-006-9013-7
- KAMIMURA, K., KITAGAWA, K., SAITO, S., MIZUNAGA, H. 2011. Root anchorage of hinokya (*Chamaecyparis obtuse* (Sieb. Et. Zucc.) Endl.) under the combined loading wind and rapidly supplied water on soil: analysas based on tree-pulling experiments. In *European Journal of Forest Research*. roč. 131. s. 267-277.

- KHALILNEJAD, Abdolhossein, Faisal Hj ALI a Ruslan HASHIM, 2012. Finite element simulation for the impact of Root Morphology on pulling-out process. [on-line]. c2012, poslední revize neuvedena [cit. 2014-02-04]. Dostupný z http://imechanica.org/files/Khalilnejad_UMalaya_final_3202012.pdf
- KOLÁŘ V., NĚMEC I., KANICKÝ V. 1997. *FEM Principy a praxe metody konečných prvků* Praha, Computer Press, 402 s.
- KOLAŘÍK, J. et al. 2010. Hodnocení stromů. In KOLAŘÍK, J. et al. *Péče o dřeviny rostoucí mimo les. 2. díl. 3. vyd.* Vlašim: ČSOP. 710 s. ISBN 978-80-86327-85-3
- KOLAŘÍK, J. 2003. The application of the static integrated approach for arboricultural practice. In *conference proceedings: Tree statics & dynamics*. Seminar Westonbirt. Treework environmental practice, 5 s.
- LAVERS, G. M. 1993. *The strength properties of timber*. Building Research Establishment.
- LIU, J., KOOLEN, A.J., HEIJ, W. 1994. The tensile strength of beech and larch roots. In *Proceedings 6th European ISTVS Conference*, Vienna, Austria, September 28-30.
- LUNDSTRÖM, T., JONAS, T., STÖCKLI, V., AMMANN, W. 2007. Anchorage of mature conifers: resistive turning moment, root-soil plate geometry and root growth orientation. In *Tree Physiology*. roč. 27. s. 1217 – 1227.
- MATTHECK, C., BETHGE, K., KARFT, O. 2008. Are the silure criteria of SIA (Statistic integrated assessment) and tree pruning tests wrong? In: *Arboricultural Journal*. Roč. 31, AB Academic Publishers, Great Britain, s. 181 – 188.
- MATTHECK, C., BEHGE, K. 1998. The structural optimization of trees. *Naturwissenschaften*. roč. 85, s. 1–10.
- MATTHECK, C., M. TESCHNER a J. SCHÄFER, 1997. Mechanical Control of Root Growth: A Computer Simulation. *Journal of theoretical Biology* [online]. roč. 184, s. 261–269. ISSN 00225193. Dostupné z: doi:10.1006/jtbi.1996.0263

- MATTHECK, C., BRELOER, H. 1994. *The body language of trees. Research for amenity trees, number 4*. 1st ed. Great Britain: TSO – The Stationery Office. 239 s. ISBN 0 11 753067 0
- MATTHECK, C. 1991. *Trees – the mechanical design*. Berlin: Springer-Verlag. 121 s.
- MAYHEAD, G. J. 1973. Some drag coefficients for British forest trees derived from wind tunnel studies. *Agric. Meteorol.* 12, 123–130.
- MCMAHON, T. 1993. Size and shape in Biology. In *Science*. roč. 179, č. 4079, s. 1201–1204.
- MCMAHON, T. A. 1975. The mechanical design of trees. In *Scientific Am.* Roč. 233. s. 93 – 102.
- MICKOVSKI, P. B., BENGOUGH, A. G., BRANSBY, M. F., DAVIES, M. C. R., HALLETT, S. D., SONNENBERG, R. 2007. Material stiffness, branching pattern and soil matric potential affect the pullout resistance of model root systems. In *European Journal of Soil Science*. roč. 58. s. 1471 – 1481.
- MICKOVSKI, S. B., STOKES, A., VAN BEEK, R., GHESTEM, M., FOURCAUD, T., 2011. Simulation of direct shear tests on rooted and non-rooted soil using finite element analysis. In *Ecological Engineering* [online]. B.m.: Elsevier B.V., roč. 37, č. 10, s. 1523–1532. ISSN 09258574. Dostupné z: doi:10.1016/j.ecoleng.2011.06.001
- MOAVENI, S. 2008. *Finite element analysis – Theory and application with ANSYS*. 3. vyd. USA: Pearson Education, Inc. 861 s. ISBN 13: 978-0-13-241651-1
- MOORE, J. R. 2000. Differences in maximum resistive bending moments of *Pinus radiata* trees grown on a range of soil types. In *Forest Ecology and Management*. Roč. 135. s. 63 –71.
- MOSBRUGGER, V. 1990. *The Tree Habit in Land Plants - Lecture Notes in Earth Sciences*. 1st ed. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 161 s. ISBN 3-540-52374-X
- MORGAN J., CANNELL, M. G. R. 1994. Shape of tree stems—a re-examination of the uniform stress hypothesis. In *Tree physiology*. roč. 14. s. 49 – 62.

- MORGAN, J., CANNELL, M. G. R. 1987. Structural analysis of tree trunks and branches: tapered cantilever beams subject to large deflections under complex loading. In *Tree physiology* [online]. roč. 3, č. 4, s. 365–74. ISSN 1758-4469. Dostupné z: doi:10.1093/treephys/3.4.365
- NADEZHDINA, N., ČERMÁK, J. 2003. Instrumental methods for studies of structure and function of root system of large trees. In *Journal of Experimental Botany*. roč. 54. s. 1511-1521.
- NEILD, S. A., WOOD, C. J. 1999. Estimating stem and root anchorage flexibility in trees. In *Tree physiology*. roč. 19. s. 141 – 151.
- NIKLAS, J. 1992. *Plant biomechanics: an engineering approach to plant form and function*. 1st ed. Chicago: The University of Chicago Press. 607 s. ISBN 0-226-58641-6
- OBRZUD R., TRUTY, A. *The Hardening Soil Model - A Practical Guidebook*. Dostupné z: Soil.PC 100701 report, revised [31.01.2012]
- PELTOLA, H. M. 2006. Mechanical stability of trees under static loads. In *American Journal of Botany*. Roč. 93. s. 1501-1511.
- POŽGAJ, A., CHOVANEC, D., KURJATKO, S., BABIAK, M. 1993. *Štruktúra a vlastnosti dreva*. 1. vyd. Bratislava: Príroda a.s. 486 s. ISBN 80-07-00600-1
- PRAUS, L. 2009. Hodnocení stromů. In *Zahrada-Park-Krajina*. Roč. 02. s. 36-38.
- PRAUS, L. 2005. *Stabilita kmene stromu*. Brno. 134 s. Disertační práce na Lesnické a dřevařské fakultě Mendelovy univerzity v Brně. Školitel Doc. Dr. Ing. Petr Horáček.
- REUBENS, B., POESEN, J., DANJON, F., GEUDENS, G., MUYS, B. 2007. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: A review. In *Trees - Structure and Function* [online]. roč. 21, č. 4, s. 385–402. ISSN 09311890. Dostupné z: doi:10.1007/s00468-007-0132-4

- SAUNDERSON, S., ENGLAND A., BAKER, C. 1999. A dynamic model of the behaviour of sitka spruce in high winds. *Journal of theoretical biology* [online]. roč. 200, č. 3, s. 249–59. ISSN 1095-8541. Dostupné z: doi:10.1006/jtbi.1999.0983
- SEBERA, V., PRAUS, L., TIPPNER, J., KUNECKÝ, J., ČEPELA, J. WIMMER, R. 2014. Using optical full-field measurement based on digital image correlation to measure strain on tree subjected to mechanical load. In *Trees*. Roč. 28. s. 1173 – 1184.
- SEBERA, V. *Výpočetní modelování vybraných kompozitů na bázi dřeva*. Brno. 2013. 117 s. Disertační práce na Lesnické a dřevařské fakultě Mendelovy univerzity v Brně. Vedoucí disertační práce Dr. Ing. Petr Horáček.
- SELLIER, D., FOURCAUD T., LAC, P. 2006. A finite element model for investigating effects of aerial architecture on tree oscillations. *Tree physiology* [online]. roč. 26, č. 6, s. 799–806. ISSN 0829-318X. Dostupné z: doi:10.1093/treephys/26.6.799
- SELLIER, D., FOURCAUD, T. 2005. A mechanical analysis of the relationship between free oscillations of *Pinus pinaster* Ait. saplings and their aerial architecture. *Journal of Experimental Botany* [online]. roč. 56, č. 416, s. 1563–1573. ISSN 00220957. Dostupné z: doi:10.1093/jxb/eri151
- SCHWEINGRUBER, F.H. 2007. *Wood Structure and Environment*. Springer-Verlag. Berlin.
- SMILEY, T. E., 2008. Root pruning and stability of young willow oak. In *Arboriculture & Urban forestry* . Roč. 34. No. 2. s. 123 – 128.
- SPATZ, Hanns Christof a Jochen PFISTERER, 2013. Mechanical properties of green wood and their relevance for tree risk assessment. *Arboriculture and Urban Forestry*. roč. 39, č. 5, s. 218–225. ISSN 02785226.
- SPPK A01 001:2015. 2015. *Hodnocení stavu stromů - Standard péče o přírodu a krajinu, řada A Arboristické standardy - koncept*. Praha: Agentura ochrany a přírody krajiny ČR.

- SPPK A01 002:2015. 2015. *Ochrana dřevin při stavební činnosti - Standard péče o přírodu a krajinu, řada A Arboristické standardy - koncept*. Praha: Agentura ochrany a přírody krajiny ČR.
- STOKES, A., BALL, J., FITTER, A. H., BRAIN, P., COUTTS, M. P. 1996. An experimental investigation of the resistance of model root systems to uprooting. In *Annals of botany*. roč. 78. s. 415 – 421.
- SZÓRÁDOVÁ, A. 2013. *Analýza mechanické funkce kořenového systému*. Brno. 104 s. Disertační práce na Lesnické a dřevařské fakultě Mendelovy univerzity v Brně. Vedoucí disertační práce Ing. Luděk Praus, Ph.D.
- SZORADOVA, A., L. PRAUS a J. KOLARIK, 2013. Evaluation of the root system resistance against failure of urban trees using principal component analysis. In *Biosystems Engineering* [online]. B.m.: IAgRE, roč. 115, č. 3, s. 244–249. ISSN 15375110. Dostupné z: doi:10.1016/j.biosystemseng.2013.03.001
- ŠTOFKO, P. 2010. Relationship between the parameters of aboveground parts and the parameters of root plates in Norway spruce with respect to soil drainage. In *Journal of forest science*. roč. 56, č. 8, s. 353–360.
- TIPPNER, J. 2010. *Numerická simulace rezonanční desky klavíru*. Brno. 229 s. Disertační práce na Lesnické a dřevařské fakultě Mendelovy univerzity v Brně. Vedoucí disertační práce Doc. Ing. Petr Koňas, Ph.D.
- URATA, T., SHIBUYA, M., KOIZUMI, A., TORITA, H., CHA, J. Y. 2011. Both stem and crown mass affect tree resistance to uprooting. In *Journal of Forest Research*. DOI 10.1007/s10310-011-0249-6.
- URBAN, J. 2008. *Up by roots – healthy soils and trees in the built environment*. USA: ADR Bookprint. 479 s. ISBN 1-881956-65-2
- VAVRČÍK, H., GRYC, V., RYBNÍČEK, M. 2006. Analysis of root-wood in Scots pine. In *Proceedings of the Dendrosymposium 2006*, April 20th – 22nd 2006, Tervuren, Belgium. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt Roč. 74, s. 267 - 276.

- VILLAGIO, P. 1998. The roots of trees. In *Continuum Mech. Thermodyn.*, Roč. 10. s. 233-240.
- VOLLSINGER, S., MITCHELL, S. J., BYRNE, K. E., NOVAK, M. D., RUDNICKI, M. 2005. Wind tunnel measurements of crown streamlining and drag relationship for several hardwood species. In *Canadian Journal of Forest Research*. Roč. 35. s. 1238-1249.
- WANG, Z., GUO, D., WANG, X., GU, J., MEI, L. 2006. Fine root architecture, morphology, and biomass of different branch orders of two Chinese temperate tree species. In *Plant and soil*. roč. 288, č. 1, s. 155–171.
- WESSOLLY. L. 1996. Explanation of the Tipping Process. In *Stadt und Grün*. No. 4. s. 635-640.
- WESSOLLY. L. 1995a. Part 1: Statics-Integrated Methods – Measurement with Tension Test. In *Stadt und Grün*. č. 6. s. 416-422.
- WESSOLLY. L. 1995b. Part 2: Statics-Integrated Methods - Statically-Integrated Assessment (SIA). In *Stadt und Grün*. č. 8. s. 570-573.
- WESSOLLY. L. 1995c. Part 3: Boring is no way for reliable fracture diagnosis. In *Stadt und Grün*. č. 9. s. 635-640.
- WOOD-HANDBOOK – Wood as Engineering Material. Centennial edition.* Madison: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 s.
- YANG, Zhaohui a Boris JEREMI, 2002. Numerical Analysis of Pile Behavior under Lateral Loads in Layered Elastic - Plastic Soils. In *International Journal for numerical and analytical methods in geomechanics*. roč. 2. s. 1–31.
- YOUNG, W. C., BUDYNAS, R. G. 2002. *Roark's formulas for stress and strain*. 7th ed. New York: McGraw – Hill. 854 s. ISBN 0-07-072542-X
- ZIENKIEWICZ, O.C., TAYLOR, R.L., ZHU, J.Z. 2006. *The finite element method: Basis and Fundamentals*. 6. vyd. London: Butterworth-heinemann. 752 s.

9 PŘÍLOHY

SEZNAM TIŠTĚNÝCH PŘÍLOH

- Příloha č. 1** Hlavní dávkový soubor tvorby numerické simulace odezvy stromu při tahové zkoušce
- Příloha č. 2** Dávkový soubor definice parametrů materiálového modelu kmene
- Příloha č. 3** Dávkový soubor definice parametrů materiálového modelu kořenového balu
- Příloha č. 4** Dávkový soubor matice koeficientů pro materiálový model
- Příloha č. 5** Dávkový soubor pro export výsledků
- Příloha č. 6** Dávkové soubory pro citlivostní analýzy
- Příloha č. 7** Porovnání výsledných směrnic numerického řešení, analytického výpočtu a měření
- Příloha č. 8** Zobrazení významných korelací mezi vstupními a výstupními parametry
- Příloha č. 9** Grafické výstupy poškození kořenového systému
- Příloha č. 10** Grafické výstupy poškození kořenového systému - kmen

PŘÍLOHA Č. 1 HLAVNÍ DÁVKOVÝ SOUBOR TVORBY NUMERICKÉ SIMULACE ODEZVY STROMU PŘI TAHOVÉ ZKOUŠCE

```

!IDB_USA-----MODEL TAHOVE ZKOUSKY KMENE (KRUH. PRUREZ) A VRSTEVNATEHO KORENOVEHO BALU (KUL. VYSEC)[M,N,PA]-----
!=====
!-----GEOMETRIE PARAMETRY-----
!
!PARAMETRY KMEN - KMEN MA DVE CASTI (KURA/BEL,DREVO)
!
!PARAMETRY VYSKY KMENE
!
VYSKA_1=0.3                                !VYSKA KMENE - NEJNIZSI CAST
VYSKA_2=0.6
VYSKA_3=1
VYSKA_4=1.3
VYSKA_5=2
VYSKA_KMEN=5.1                              !VYSKA KMENE - NEJVYSSI CAST (=VYSKA UVAZU)
!
!PARAMETRY PRUMERU KMENE
!
IN=0.1
PRUM_PATA=0.81                              !ZADAVANO NAHORE
PRUM_PATA_IN=PRUM_PATA-IN                   !PRUMER PATY KMENE - VNITRI ZONA
PRUM_1=0.66                                 !PRUMERY KMENE VE VYSCE
PRUM_1_IN=PRUM_1-IN                         !PRUMERY VNITRNI ZONA
PRUM_2=(0.66+0.57)/2
PRUM_2_IN=PRUM_2-IN
PRUM_3=0.57
PRUM_3_IN=PRUM_3-IN
PRUM_4=0.55
PRUM_4_IN=PRUM_4-IN
PRUM_5=0.53
PRUM_5_IN=PRUM_5-IN
PRUM_CEP=0.53-0.02                          !PRUMER KMENE VE VYSCE UVAZU A EXC.
PRUM_CEP_IN=PRUM_CEP-IN
!
!PARAMETRY BAL
!
POMER_VR=1/3                                !POMER VRSTEV BALU
PRUM_BAL_IVR=3.7                            !IVRSTVA PRUMER BALU - ZADANO
HLOUBKA_BAL_IVR=0.45                       !IVRSTVA HLOUBKA - ZADANO
PRUM_BAL=PRUM_BAL_IVR/(POMER_VR)          !CELKOVY PRUMER BALU - VYPOCTANY Z PRUMERU I VRSTVY
HLOUBKA_ODDENEK=(PRUM_PATA/2)*1/3        !HLOUBKA ODDENKU - POCITA SE JAKO 1/3 PRUMERU KMENE
HLOUBKA_BAL=HLOUBKA_BAL_IVR/(POMER_VR)   !HLOUBKA CELEHO BALU - POCITA SE JAKO NASOBEK HLOUBKY I VRSTVY
POC_VR_BAL=3                               !POCET VRSTEV BALU (BEZ ODDENKU)
!
!

```

```

!PARAMETRY BAL - DAL UZ SE VYPOCITAJI - NEMEMENI SE
!
PRUM_BAL_2VR=PRUM_BAL*(1-POMER_VR)
HLOUBKA_BAL_2VR=HLOUBKA_BAL*(1-POMER_VR)
!
!VRSTVA ODDENEK
KOULE_POLOMER_OD=((PRUM_PATA/2)**2+HLOUBKA_ODDENEK**2)/(2*HLOUBKA_ODDENEK)
KOULE_POSUN_OD=KOULE_POLOMER_OD-HLOUBKA_ODDENEK
!
!VRSTVA CELKOVY BAL
KOULE_POLOMER=((PRUM_BAL/2)**2+HLOUBKA_BAL**2)/(2*HLOUBKA_BAL)
KOULE_POSUN=KOULE_POLOMER-HLOUBKA_BAL
!
!1_VRSTVA
KOULE_POLOMER_IVR=((PRUM_BAL_IVR/2)**2+HLOUBKA_BAL_IVR**2)/(2*HLOUBKA_BAL_IVR)
KOULE_POSUN_IVR=KOULE_POLOMER_IVR-HLOUBKA_BAL_IVR
!
!2_VRSTVA
KOULE_POLOMER_2VR=((PRUM_BAL_2VR/2)**2+HLOUBKA_BAL_2VR**2)/(2*HLOUBKA_BAL_2VR)
KOULE_POSUN_2VR=KOULE_POLOMER_2VR-HLOUBKA_BAL_2VR
!
!PARAMETRY_SIT
!
E_SIZE=0.05
E_SIZE_BAL=0.05
!
!PARAMETRY OKRAJOVE PODMINKY
!
PODILZ=0.6
VZDAL_NAV=10
*AFUN,DEG
UHEL=22
SILA_TAH=17048.16
!
!ZMENIT MATERIAL KMEN + KORSYS!
!
!-----TVORBA GEOM -----
/PREP7
!
!BAL
WPOFFS,,KOULE_POSUN_OD
SPH4,0,0,KOULE_POLOMER_OD
WPCSYS,,0
!
WPOFFS,,KOULE_POSUN_IVR
SPH4,0,0,KOULE_POLOMER_IVR
WPCSYS,,0
!
!2VRSTVA PRUMER BALU - DVE TRETINY CEKOVEHO BALU
!2VRSTVA HLOUBKA - DVE TRETINY CELKOVEHO BALU
!ODDENEK
!POSUNUTI STREDU KOULE
!VRSTVA CELKOVY BAL
!POSUNUTI STREDU KOULE
!1_VRSTVA
!POSUNUTI STREDU KOULE
!2_VRSTVA
!POSUNUTI STREDU KOULE
!PODIL ZATIZENI KORUNY
!VZDALENOST NAVIJAKU
!ZADAVANI PARAMETRU VE STUPNICH
!UHEL LANA
!PUSOBICI SILA
!POSUNUTI SS V OSE Z
!ODDENEK
!NAVRAT SS DO POCATKU
!POSUNUTI SS V OSE Z - 1_VRSTVA
!1VRSTVA BALU
!NAVRAT SS DO POCATKU

```

WPOFFS,, ,KOULE_POSUN_2VR	!POSUNUTI SS V OSE Z - 2_VRSTVA
SPH4,0,0,KOULE_POLOMER_2VR	!2VRSTVA BALU
WPCSYS,,0	!NAVRAT SS DO POCATKU
!	
WPOFFS,, ,KOULE_POSUN	!POSUNUTI SS V OSE Z - CELY BAL
SPH4,0,0,,KOULE_POLOMER	!CELY BAL
!	
VOVLAP,ALL	!VYTVORI NOVE OBJEMY Z PREKRYVAJICICH
WPCSYS,,0	!NAVRAT SS DO POCATKU
!	
VSBW,ALL,,DELETE	!ODDELI CO PROCHAZI PRACOVNI PLOCHOU - ODDELENI A ODECTENI KOULE
VSEL,S,LOC,Z,0,KOULE_POLOMER*2,	!VYBER VRCHNI CASTI KOULE
VDELE,ALL,, ,	!VYMAZE VYBRANE OBJEMY (VRCHNI CAST KOULE)
ASEL,S,LOC,Z,KOULE_POLOMER_OD*0.01,KOULE_POLOMER*2,	!VYBER VRCHNI CASTI KOULE - PLOCHY
ADELE,ALL,, ,	!VYMAZE VYBRANE PLOCHY (VRCHNI CAST KOULE)
!	
!KMEN	
CONE,PRUM_PATA/2,PRUM_1/2,0,VYSKA_1,0,360	!KMEN VNEJSI VRSTVY
CONE,PRUM_1/2,PRUM_2/2,VYSKA_1,VYSKA_2,0,360	
CONE,PRUM_2/2,PRUM_3/2,VYSKA_2,VYSKA_3,0,360	
CONE,PRUM_3/2,PRUM_4/2,VYSKA_3,VYSKA_4,0,360	
CONE,PRUM_4/2,PRUM_5/2,VYSKA_4,VYSKA_5,0,360	
CONE,PRUM_5/2,PRUM_CEP/2,VYSKA_5,VYSKA_KMEN,0,360	
!	
CONE,PRUM_PATA_IN/2,PRUM_1_IN/2,0,VYSKA_1,0,360	!KMEN VNITRNI VRSTVY
CONE,PRUM_1_IN/2,PRUM_2_IN/2,VYSKA_1,VYSKA_2,0,360	
CONE,PRUM_2_IN/2,PRUM_3_IN/2,VYSKA_2,VYSKA_3,0,360	
CONE,PRUM_3_IN/2,PRUM_4_IN/2,VYSKA_3,VYSKA_4,0,360	
CONE,PRUM_4_IN/2,PRUM_5_IN/2,VYSKA_4,VYSKA_5,0,360	
CONE,PRUM_5_IN/2,PRUM_CEP_IN/2,VYSKA_5,VYSKA_KMEN,0,360	
!	
VOVLAP,ALL	!VYTVORI NOVE OBJEMY Z PREKRYVAJICICH
VSEL,ALL	
!	
WPRO,,90	!OTOCENI SS KOLEM OSY X (Y K Z - 90')
*DO,1,1,6	!CYKLUS
WPRO,,30	!OTOCENI SS KOLEM OSY Y (Z K X-30')
VSBW,ALL	!DELENI OBJEMU PO 30' (TO CO PROCHAZI PRACOVNI PLOCHOU - OSA Z)
*ENDDO	!UKONCENI CYKLU
WPCSYS,-1,0	!NAVRAT SS
!	
VGLUE,ALL	!OBJEMY BUDOU SDILET HRANICE
!	
CSWPLA,1,1,1,1	!LOKAL. SOUR. SYSTEM - CYLINDRICKY
CSWPLA,12,2,1,1	!LOKAL. SOUR. SYSTEM - SFERICKY
!	
ALLSEL	
!	

```

!----- MATERIALOVE VLASTNOSTI -----
!
*DIM,KOEF_MAT, TABLE,16,12,1,,VRSTVY,VYSECE           !DEFINUJE TABULKU A JEJI DIMENZI
*TREAD,KOEF_MAT,KOEF_MAT,MAC,,I                       !NACITA DATA DO TABULKY ZE SOUBORU
!
MAT_KMEN.MAC                                           !NADEFINOVANE MATERIALOVE VLASTNOSTI KMEN
MAT_KORSYS.MAC                                         !NADEFINOVANE MATERIALOVE VLASTNOSTI BAL
!
!BAL
!
*DO,1,1,12
  CSYS,2
  ASEL,S,LOC,X,0,PRUM_PATA/2
  ASEL,R,LOC,Y,(I-1)*30,I*30
  CSYS,0
  ASEL,R,LOC,Z,-(VYSKA_I*0.01),(VYSKA_I*0.01)
  VSLA,S,0
  VSEL,U,LOC,Z,0,VYSKA_KMEN
  VATT,%100+I%,1,2,12
*ENDDO
!
*DO,1,1,12
  CSYS,2
  ASEL,S,LOC,X,PRUM_PATA/2,PRUM_BAL_IVR/2
  ASEL,R,LOC,Y,(I-1)*30,I*30
  CSYS,0
  ASEL,R,LOC,Z,-(VYSKA_I*0.01),(VYSKA_I*0.01)
  VSLA,S,0
  VSEL,U,LOC,Z,0,VYSKA_KMEN
  VATT,%200+I%,1,2,12
*ENDDO
!
*DO,1,1,12
  CSYS,2
  ASEL,S,LOC,X,PRUM_BAL_IVR/2,PRUM_BAL_2VR/2
  ASEL,R,LOC,Y,(I-1)*30,I*30
  CSYS,0
  ASEL,R,LOC,Z,-(VYSKA_I*0.01),(VYSKA_I*0.01)
  VSLA,S,0
  VSEL,U,LOC,Z,0,VYSKA_KMEN
  VATT,%300+I%,1,2,12
*ENDDO
!
*DO,1,1,12
  CSYS,2
  ASEL,S,LOC,X,PRUM_BAL_2VR/2,PRUM_BAL/2
  ASEL,R,LOC,Y,(I-1)*30,I*30
  CSYS,0
!SFER. SOUR. SYST.
!ODDENEK - VYBER PLOCHY
!ODDENEK - VYBER PLOCHY - 0.AZ I. HODINA
!KART. SOUR. SYST.
!VYBER OBJEMU PRIRAZENYCH K PLOSE
!MAT.MODEL 100_112 - JEN DREVO
!1. VRSTVA - VYBER PLOCHY
!KART. SOUR. SYST.
!MAT.MODEL 200_212
!2. VRSTVA - VYBER PLOCHY
!KART. SOUR. SYST.
!MAT.MODEL 300_312
!3. VRSTVA - VYBER PLOCHY
!KART. SOUR. SYST.

```

```

ASEL,R,LOC,Z,-(VYSKA_1*0.01),(VYSKA_1*0.01)
VSLA,S,0
VSEL,U,LOC,Z,0,VYSKA_KMEN
VATT,%400+1%,1,2,12
*ENDDO
!
!KMEN-VNITRNI
!
*DO,1,1,12
CSYS,1
ASEL,S,LOC,X,0,PRUM_1_IN/2
ASEL,R,LOC,Y,(1-1)*30,1*30
CSYS,0
ASEL,R,LOC,Z,VYSKA_1-(VYSKA_1*0.01),VYSKA_1+(VYSKA_1*0.01)
VSLA,S,0
VSEL,U,LOC,Z,VYSKA_1,VYSKA_KMEN
VATT,%1000+1%,1,1,11
*ENDDO
!
*DO,1,1,12
CSYS,1
ASEL,S,LOC,X,0,PRUM_2_IN/2
ASEL,R,LOC,Y,(1-1)*30,1*30
CSYS,0
ASEL,R,LOC,Z,VYSKA_2-(VYSKA_1*0.01),VYSKA_2+(VYSKA_1*0.01)
VSLA,S,0
VSEL,U,LOC,Z,VYSKA_2,VYSKA_KMEN
VATT,%1100+1%,1,1,11
*ENDDO
!
*DO,1,1,12
CSYS,1
ASEL,S,LOC,X,0,PRUM_3_IN/2
ASEL,R,LOC,Y,(1-1)*30,1*30
CSYS,0
ASEL,R,LOC,Z,VYSKA_3-(VYSKA_1*0.01),VYSKA_3+(VYSKA_1*0.01)
VSLA,S,0
VSEL,U,LOC,Z,VYSKA_3,VYSKA_KMEN
VATT,%1200+1%,1,1,11
*ENDDO
!
*DO,1,1,12
CSYS,1
ASEL,S,LOC,X,0,PRUM_4_IN/2
ASEL,R,LOC,Y,(1-1)*30,1*30
CSYS,0
ASEL,R,LOC,Z,VYSKA_4-(VYSKA_1*0.01),VYSKA_4+(VYSKA_1*0.01)
VSLA,S,0

```

!MAT.MODEL 400_412 - JEN PUDA

!CYLINDR. SOUR. SYST.
!1 CAST - BAZE - VYBER PLOCHY
!1 CAST - BAZE - VYBER PLOCHY 0.AZ 1. HODINA
!KART. SOUR. SYST.

!VYBER OBJEMU PRIRAZENYCH K PLOSE

!MAT.MODEL 1000_1012

!CYLINDR. SOUR. SYST.
!2 CAST - VYBER PLOCHY

!MAT.MODEL 1100_1112

!CYLINDR. SOUR. SYST.
!3 CAST - VYBER PLOCHY

!MAT.MODEL 1200_1212

!CYLINDR. SOUR. SYST.
!4 CAST - VYBER PLOCHY

```

VSEL,U,LOC,Z,VYSKA_4,VYSKA_KMEN
VATT,%I300+I%,I,I,I
!MAT.MODEL I300_I3I2
*ENDDO
!
*DO,I,I,I2
CSYS,I
ASEL,S,LOC,X,0,PRUM_5_IN/2
ASEL,R,LOC,Y,(I-I)*30,I*30
CSYS,0
ASEL,R,LOC,Z,VYSKA_5-(VYSKA_I*0.0I),VYSKA_5+(VYSKA_I*0.0I)
VSLA,S,0
VSEL,U,LOC,Z,VYSKA_5,VYSKA_KMEN
VATT,%I400+I%,I,I,I
!MAT.MODEL I400_I4I2
*ENDDO
!
*DO,I,I,I2
CSYS,I
ASEL,S,LOC,X,0,PRUM_CEP_IN/2
ASEL,R,LOC,Y,(I-I)*30,I*30
CSYS,0
ASEL,R,LOC,Z,VYSKA_KMEN-(VYSKA_I*0.0I),VYSKA_KMEN+(VYSKA_I*0.0I)
VSLA,S,0
VATT,%I500+I%,I,I,I
!MAT.MODEL I500_I5I2
*ENDDO
!
!KMEN-VNEJSI
!
*DO,I,I,I2
CSYS,I
ASEL,S,LOC,X,PRUM_I_IN/2,PRUM_I/2
ASEL,R,LOC,Y,(I-I)*30,I*30
CSYS,0
ASEL,R,LOC,Z,VYSKA_I-(VYSKA_I*0.0I),VYSKA_I+(VYSKA_I*0.0I)
VSLA,S,0
VSEL,U,LOC,Z,VYSKA_I,VYSKA_KMEN
VATT,%2000+I%,I,I,I
!MAT.MODEL 2000_20I2
*ENDDO
!
*DO,I,I,I2
CSYS,I
ASEL,S,LOC,X,PRUM_2_IN/2,PRUM_2/2
ASEL,R,LOC,Y,(I-I)*30,I*30
CSYS,0
ASEL,R,LOC,Z,VYSKA_2-(VYSKA_I*0.0I),VYSKA_2+(VYSKA_I*0.0I)
VSLA,S,0
VSEL,U,LOC,Z,VYSKA_2,VYSKA_KMEN
VATT,%2100+I%,I,I,I
!MAT.MODEL 2100_2I12
*ENDDO

```

```

!
*DO,1,1,12
  CSYS,1
  ASEL,S,LOC,X,PRUM_3_IN/2,PRUM_3/2
  ASEL,R,LOC,Y,(I-I)*30,I*30
  CSYS,0
  ASEL,R,LOC,Z,VYSKA_3-(VYSKA_I*0.01),VYSKA_3+(VYSKA_I*0.01)
  VSLA,S,0
  VSEL,U,LOC,Z,VYSKA_3,VYSKA_KMEN
  VATT,%2200+I%,I,I,I
!MAT.MODEL 2200_2212
*ENDDO
!
*DO,1,1,12
  CSYS,1
  ASEL,S,LOC,X,PRUM_4_IN/2,PRUM_4/2
  ASEL,R,LOC,Y,(I-I)*30,I*30
  CSYS,0
  ASEL,R,LOC,Z,VYSKA_4-(VYSKA_I*0.01),VYSKA_4+(VYSKA_I*0.01)
  VSLA,S,0
  VSEL,U,LOC,Z,VYSKA_4,VYSKA_KMEN
  VATT,%2300+I%,I,I,I
!MAT.MODEL 2300_2312
*ENDDO
!
*DO,1,1,12
  CSYS,1
  ASEL,S,LOC,X,PRUM_5_IN/2,PRUM_5/2
  ASEL,R,LOC,Y,(I-I)*30,I*30
  CSYS,0
  ASEL,R,LOC,Z,VYSKA_5-(VYSKA_I*0.01),VYSKA_5+(VYSKA_I*0.01)
  VSLA,S,0
  VSEL,U,LOC,Z,VYSKA_5,VYSKA_KMEN
  VATT,%2400+I%,I,I,I
!MAT.MODEL 2400_2412
*ENDDO
!
*DO,1,1,12
  CSYS,1
  ASEL,S,LOC,X,PRUM_CEP_IN/2,PRUM_CEP/2
  ASEL,R,LOC,Y,(I-I)*30,I*30
  CSYS,0
  ASEL,R,LOC,Z,VYSKA_KMEN-(VYSKA_I*0.01),VYSKA_KMEN+(VYSKA_I*0.01)
  VSLA,S,0
  VATT,%2500+I%,I,I,I
!MAT.MODEL 2500_2512
*ENDDO
!
CSYS,0
ALLSEL,ALL
!KART. SOUR. SYST.
!VYBER VSEHO
!

```



```

!----- SIT-----
ET,1,SOLID187
ET,2,SOLID187
!
SMRTSIZE,1
MSHKEY,0
VMESH,ALL
!
ALLSEL,ALL
!
!-----OKRAJOVE PODMINKY + VYPOCET -----
!
!VYPOCET PARAMETRU PRO ZADANI SILY
VSEL,S,LOC,Z,0,VYSKA_KMEN
VSUM,
*GET,VKMEN,VOLU,0,VOLU
ALLSEL
MKMEN=DENS_W*VKMEN
MKORUNA=MKMEN*PODILZ
FKOR=- (MKORUNA*9.81)
!
SILA_X=SILA_TAH*COS(UHEL)
SILA_Z=- (SILA_TAH*SIN(UHEL))
!
!
/SOLU
ANTYPE,0
ACEL,0,0,9.81
!
!ZADANI OKRAJOVYCH PODMINEK V 10TI LOAD STEPS
!
POC_KR=10
*DO,1,1,POC_KR
CSYS,0
!
ASEL,S,LOC,X,PRUM_BAL/2,PRUM_BAL/2
ASEL,A,LOC,Y,PRUM_BAL/2,PRUM_BAL/2
ASEL,A,LOC,Z,-(HLOUBKA_BAL_2VR),-(HLOUBKA_BAL)
!
DA,ALL,UX,0
DA,ALL,UY,0
DA,ALL,UZ,0
ALLSEL,ALL
!
CSYS,1
KSEL,S,LOC,X,PRUM_CEP/2
KSEL,R,LOC,Z,VYSKA_KMEN
KSEL,R,LOC,Y,90,270
!
!VYBER ELEMENTU KMEN - TERTA
!VYBER ELEMENTU BAL - TETRA
!
!NASTAVENI VELIKOSTI - SMART
!VOLNE SITOvani
!VYTVORENI SITE VSECHNY OBJEMY
!
!VYBER VSEHO
!
!VYBER OBJEMU KMENE
!SOUcET VYBRANYCH OBJEMU
!ZISKANI OBJEMU VYBRANYCH OBJEMU
!VYBER VSEHO
!VYPOCET HMOTNOSTI KMENE
!VYPOCET HMOTNOSTI KORUNY
!VYPOCET SILY PUSOBICI TIHOu KORUNY
!
!X SLOZKA SILY
!Y SLOZKA SILY
!
!PREPNUTI DO SOLVERU
!TYP ANALYZY STATICKY
!ZATIZENI - GRAVITACE
!
!POCET KROKU
!KART. SOUR. SYST.
!VYBER PLOCH PRO UKOTVENI DOF
!
!STUPNÝ VOLNOSTI NA PLOCHACH_VNEJSI PLAST
!
!VYBER VSEHO
!CYLINDR. SOUR. SYST.
!VYBER BODU PRO PUSOBENI SILY - 1/2 KMENE - ZE STRANY PUSOBENI UVAZKU

```

```

!
*GET,KEYPOINTS,KP,0,COUNT
!
CSYS,0
FK,ALL,FX,((SILA_X/KEYPOINTS)/10)*I
FK,ALL,FZ,((SILA_Z/KEYPOINTS)/10)*I
ALLSEL,ALL
!
ASEL,S,LOC,Z,VYSKA_KMEN,VYSKA_KMEN+0.0I
ALLSEL,BELOW,AREA
KSEL,R,LOC,Z,VYSKA_KMEN
!
*GET,KEYPOINTS_1,KP,0,COUNT
!
FK,ALL,FZ,FKOR/KEYPOINTS_1
!
ALLSEL,ALL
OUTRES,ALL,ALL
LSWRITE,I
SOLVE
*ENDDO
!-----VYSLEDKY-----
/POSTI
ALLSEL,ALL
!
!
*DIM,VYS,ARRAY,10,9
*DO,1,1,POC_KR
SET,I
!
!ZJISTENI RF V DOF=0
!
CSYS,0
ASEL,S,LOC,X,PRUM_BAL/2,PRUM_BAL/2
ASEL,A,LOC,Y,PRUM_BAL/2,PRUM_BAL/2
ASEL,A,LOC,Z,-(HLOUBKA_BAL_2VR),-(HLOUBKA_BAL)
NSLA,S
FSUM,,
*GET,RFx%1%,FSUM,0,ITEM,FX
*GET,RFy%1%,FSUM,0,ITEM,FY
*GET,RFz%1%,FSUM,0,ITEM,FZ
RF%1%=SQRT(RFx%1%**2+RFy%1%**2+RFz%1%**2)
ALLSEL,ALL
!
!ZJISTENI RF NA KEYPOINTS KDE PUSOBI SILA
!
CSYS,I
KSEL,S,LOC,X,PRUM_CEP/2

```

```

!SOUCET BODU PRO PUSOBENI SILY
!KART. SOUR. SYST.
!ZADANI SILY ZPUSOBENE TAHEM
!VYBER VSEHO
!VYBER PLOCHY PRO PUSOBENI ZATIZENI KORUNY
!VYBER ENTIT POD PLOCHOU
!VYBER KEYPOINTS
!SOUCET BODU PRO PUSOBENI ZATIZENI
!ZADANI SILY ZPUSOBENE ZATIZENIM KORUNY
!VYBER VSEHO
!ZAPISUJE DATA DO DATABAZE (SOUBOR RST) - VSECHNY, KAZDY KROK
!ZAPISUJE SOUBOR KROKU I DO JOBNAME.SOI
!SPUSTENI VYPOCTU
!VYTVORENI TABULKY VYSLEDKU_VYS PRO FKx,EL1,EL2,EL3,I1,I2,I3,I4,I5
!SPUSTENI CYKLU
!NACTENI VYPOCTOVEHO KROKU
!VYBER PLOCH PRO ZJISTENI REAKCNICH SIL - DOF=0
!VYBER BODU Z VYBRANYCH PLOCH
!SUMA REAKCNICH SIL A MOMNETU NA VYBRANYCH BODECH
!ZISKANI REAKCNI SILY V OSE X PRO KAZDY KROK
!ZISKANI REAKCNI SILY V OSE Y PRO KAZDY KROK
!ZISKANI REAKCNI SILY V OSE Z PRO KAZDY KROK
!VYPOCET VYSLEDNICE REAKCNICH SIL - NA BODECH S NULOVYM POSUNUTIM
!CYLINDR. SOUR. SYST.
!VYBER KEYPOINTS PRO ZJISTENI REAKCNICH SIL - KDE PUSOBI SILA

```

```

KSEL,R,LOC,Z,VYSKA_KMEN
KSEL,R,LOC,Y,90,270
NSLK,S
CSYS,0
FSUM,,
*GET,RFKX%I%,FSUM,0,ITEM,FX
RFKXA%I%=ABS(RFKX%I%)
*GET,RFKY%I%,FSUM,0,ITEM,FY
*GET,RFKZ%I%,FSUM,0,ITEM,FZ
RFK%I%=SQRT(RFKX%I%**2+RFKY%I%**2+RFKZ%I%**2)
ALLSEL,ALL
!
!VYPOCET POLOHY EXTENZOMETRU ELI
!
VYSKA_ELI=0.3
VZDAL_LICHELI=PRUM_PATA/2-PRUM_I/2
UHEL_ELI=VYSKA_I/VZDAL_LICHELI
PRUM_BODELI=PRUM_PATA/2-(VYSKA_ELI/UHEL_ELI)
!
VYSKA_ELI_B=VYSKA_ELI-0.2
VZDAL_LICHELI_B=PRUM_PATA/2-PRUM_I/2
UHEL_ELI_B=VYSKA_I/VZDAL_LICHELI_B
PRUM_BODELI_B=PRUM_PATA/2-(VYSKA_ELI_B/UHEL_ELI_B)
!
CSYS,I
UHELELIY=I80
ELI=NODE(PRUM_BODELI,UHELELIY,VYSKA_ELI)
ELI_B=NODE(PRUM_BODELI_B,UHELELIY,VYSKA_ELI_B)
CSYS,0
!
*GET,ELIX,NODE,ELI,LOC,X
*GET,ELI_BX,NODE,ELI_B,LOC,X
L_ELIX=ELIX-ELI_BX
!
*GET,ELIZ,NODE,ELI,LOC,Z
*GET,ELI_BZ,NODE,ELI_B,LOC,Z
L_ELIZ=ELIZ-ELI_BZ
!
*GET,ELIY,NODE,ELI,LOC,Y
*GET,ELI_BY,NODE,ELI_B,LOC,Y
L_ELIY=ELIY-ELI_BY
!
L_ELI=SQRT(L_ELIX**2+L_ELIZ**2+L_ELIY**2)
!
!VYPOCET POSUNUTI EXTENZOMETRU ELI
!
*GET,ELI_UX%I%,NODE,ELI,U,X
*GET,ELI_BUX%I%,NODE,ELI_B,U,X

```

```

!VYBER BODU (NODE) Z VYBRANYCH KEYPOINTS
!KART. SOUR. SYST.
!SUMA REAKCNIH SIL A MOMNETU NA VYBRANYCH BODECH
!ZISKANI REAKCNI SILY V OSE X PRO KAZDY KROK
!ZISKANI ABSOLUTNI HODNOTY RFKX - POTREBNE PRO VYPOCET MOMENTU
!ZISKANI REAKCNI SILY V OSE Y PRO KAZDY KROK
!ZISKANI REAKCNI SILY V OSE Z PRO KAZDY KROK
!VYPOCET VYSLEDNICE REAKCNIH SIL - V MISTECH ZATIZENI

!EXTENZOMERY SLEDUJI POSUNUTI V OSE X A Z, OSA Y ZATIM CHYBI

!VYSKA UMISTENI EXTENZOMETRU I - VRCHNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU I NA OSE X - STRANA - VRCHNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU I NA OSE X - UHEL - VRCHNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU I NA OSE X - VRCHNI CAST

!VYSKA UMISTENI EXTENZOMETRU I - SPODNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU I NA OSE X - STRANA - SPODNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU I NA OSE X - UHEL - SPODNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU I NA OSE X - SPODNI CAST

!ZISKANI BODU V POZICI - EXTENZOMETRU VE VYSCE 30CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI BODU V POZICI - EXTENZOMETRU VE VYSCE 30CM - SPODNI CAST

!ZISKANI POZICE ELI V OSE X - EXTENZOMETR VE VYSCE 30CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POZICE ELI V OSE X - EXTENZOMETR VE VYSCE 30CM - SPODNI CAST
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU I V OSE X

!ZISKANI POZICE ELI V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 30CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POZICE ELI V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 30CM - SPODNI CAST
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU I V OSE Z

!ZISKANI POZICE ELI V OSE Y - EXTENZOMETR VE VYSCE 30CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POZICE ELI V OSE Y - EXTENZOMETR VE VYSCE 30CM - SPODNI CAST
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU I V OSE Y

!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU I

!ZISKANI POSUNUTI ELI V OSE X - EXTENZOMETR VE VYSCE 30CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POSUNUTI ELI V OSE X - EXTENZOMETR VE VYSCE 30CM - SPODNI CAST

```

```

*GET,ELI_UZ%1%,NODE,ELI,U,Z
*GET,ELI_BUZ%1%,NODE,ELI_B,U,Z
*GET,ELI_UY%1%,NODE,ELI,U,Y
*GET,ELI_BUY%1%,NODE,ELI_B,U,Y
!
ELIX_2%1%=ELIX+ELI_UX%1%
ELIBX_2%1%=ELI_BX+ELI_BUX%1%
ELIZ_2%1%=ELIZ+ELI_UZ%1%
ELIBZ_2%1%=ELI_BZ+ELI_BUZ%1%
ELIY_2%1%=ELIY+ELI_UY%1%
ELIBY_2%1%=ELI_BY+ELI_BUY%1%
!
L_ELIUx%1%=ELIX_2%1%-ELIBX_2%1%
L_ELIUz%1%=ELIZ_2%1%-ELIBZ_2%1%
L_ELIUy%1%=ELIY_2%1%-ELIBY_2%1%
!
L_ELIU%1%=SQRT(L_ELIUx%1%**2+L_ELIUz%1%**2+L_ELIUy%1%**2)
U_ELIL%1%=ABS((L_ELIU%1%-L_ELIL)*1000)
!
!VYPOCET POLOHY EXTENZOMETRU EL2
!
VYSKA_EL2=I
VZDAL_LICHEL2=PRUM_2/2-PRUM_3/2
UHEL_EL2=VYSKA_4/VZDAL_LICHEL2
PRUM_BODEL2=PRUM_3/2-(VYSKA_EL2/UHEL_EL2)
!
VYSKA_EL2_B=VYSKA_EL2-0.2
VZDAL_LICHEL2B=PRUM_2/2-PRUM_3/2
UHEL_EL2B=VYSKA_3/VZDAL_LICHEL2B
PRUM_BODEL2_B=PRUM_2/2-(VYSKA_EL2_B/UHEL_EL2B)
!
CSYS,I
UHELEL2Y=I80
EL2=NODE(PRUM_BODEL2,UHELEL2Y,VYSKA_EL2)
EL2_B=NODE(PRUM_BODEL2_B,UHELEL2Y,VYSKA_EL2_B)
CSYS,0
!
!
*GET,EL2X,NODE,EL2,LOC,X
*GET,EL2_BX,NODE,EL2_B,LOC,X
L_EL2x=EL2X-EL2_BX
!
*GET,EL2Z,NODE,EL2,LOC,Z
*GET,EL2_BZ,NODE,EL2_B,LOC,Z
L_EL2z=EL2Z-EL2_BZ
!
*GET,EL2Y,NODE,EL2,LOC,Y
*GET,EL2_BY,NODE,EL2_B,LOC,Y

```

```

!ZISKANI POSUNUTI ELI V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 30CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POSUNUTI ELI V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 30CM - SPODNI CAST
!ZISKANI POSUNUTI ELI V OSE Y - EXTENZOMETR VE VYSCE 30CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POSUNUTI ELI V OSE Y - EXTENZOMETR VE VYSCE 30CM - SPODNI CAST
!
!ZISKANI POLOHY ELI V OSE X PO ZATIZENI - VRCHNI CAST
!ZISKANI POLOHY ELI V OSE X PO ZATIZENI - SPODNI CAST
!ZISKANI POLOHY ELI V OSE Z PO ZATIZENI - VRCHNI CAST
!ZISKANI POLOHY ELI V OSE Z PO ZATIZENI - SPODNI CAST
!ZISKANI POLOHY ELI V OSE Z PO ZATIZENI - VRCHNI CAST
!ZISKANI POLOHY ELI V OSE Z PO ZATIZENI - SPODNI CAST
!
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU I V OSE X - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU I V OSE Z - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU I V OSE Z - PO ZATIZENI
!
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU I - PO ZATIZENI
!ROZDIL MEZI VZDALENOSTI ELI A ELIB PRED A PO ZATIZENI
!
!VYSKA UMISTENI EXTENZOMETRU2 - VRCHNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU2 NA OSE X - STRANA - VRCHNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU2 NA OSE X - UHEL - VRCHNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU2 NA OSE X - VRCHNI CAST
!
!VYSKA UMISTENI EXTENZOMETRU2 - SPODNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU2 NA OSE X - STRANA - SPODNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU2 NA OSE X - UHEL - SPODNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU2 NA OSE X - SPODNI CAST
!
!ZISKANI BODU V POZICI - EXTENZOMETRU VE VYSCE 100CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI BODU V POZICI - EXTENZOMETRU VE VYSCE 100CM - SPODNI CAST
!
!ZISKANI POZICE EL2 V OSE X - EXTENZOMETR2 VE VYSCE 100 CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POZICE EL2 V OSE X - EXTENZOMETR2 VE VYSCE 100 CM - SPODNI CAST
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU2 V OSE X
!
!ZISKANI POZICE EL2 V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POZICE EL2 V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - SPODNI CAST
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU2 V OSE Z
!
!ZISKANI POZICE EL2 V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POZICE EL2 V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - SPODNI CAST

```

```

L_EL2Y=EL2Y-EL2_BY
!
L_EL2=SQRT(L_EL2X**2+L_EL2Z**2+L_EL2Y**2)
!
!VYPOCET POSUNUTI EXTENZOMETRU EL2
!
*GET,EL2_UX%,NODE,EL2,U,X
*GET,EL2_BUX%,NODE,EL2_B,U,X
*GET,EL2_UZ%,NODE,EL2,U,Z
*GET,EL2_BUZ%,NODE,EL2_B,U,Z
*GET,EL2_UY%,NODE,EL2,U,Y
*GET,EL2_BUY%,NODE,EL2_B,U,Y
!
EL2X_2%=EL2X+EL2_UX%
EL2BX_2%=EL2_BX+EL2_BUX%
EL2Z_2%=EL2Z+EL2_UZ%
EL2BZ_2%=EL2_BZ+EL2_BUZ%
EL2Y_2%=EL2Y+EL2_UY%
EL2BY_2%=EL2_BY+EL2_BUY%
!
L_EL2UX%=EL2X_2%-EL2BX_2%
L_EL2UZ%=EL2Z_2%-EL2BZ_2%
L_EL2UY%=EL2Y_2%-EL2BY_2%
!
L_EL2U%=SQRT(L_EL2UX%**2+L_EL2UZ%**2+L_EL2UY%**2)
U_EL2%=ABS((L_EL2U%-L_EL2)*1000)
!
!VYPOCET POLOHY EXTENZOMETRU EL3
!
VYSKA_EL3=2
VZDAL_LICHEL3=PRUM_4/2-PRUM_5/2
UHEL_EL3=VYSKA_5/VZDAL_LICHEL3
PRUM_BODEL3=PRUM_4/2-(VYSKA_EL3/UHEL_EL3)
!
VYSKA_EL3_B=VYSKA_EL3-0.2
VZDAL_LICHEL3B=PRUM_4/2-PRUM_5/2
UHEL_EL3B=VYSKA_5/VZDAL_LICHEL3B
PRUM_BODEL3_B=PRUM_4/2-(VYSKA_EL3_B/UHEL_EL3B)
!
CSYS,1
UHEL_EL3Y=180
EL3=NODE(PRUM_BODEL3,UHEL_EL3Y,VYSKA_EL3)
EL3_B=NODE(PRUM_BODEL3_B,UHEL_EL3Y,VYSKA_EL3_B)
CSYS,0
!
!
*GET,EL3X,NODE,EL3,LOC,X
*GET,EL3_BX,NODE,EL3_B,LOC,X

```

```

!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU2 V OSE Z
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU2
!ZISKANI POSUNUTI EL2 V OSE X - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POSUNUTI EL2 V OSE X - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - SPODNI CAST
!ZISKANI POSUNUTI EL2 V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POSUNUTI EL2 V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - SPODNI CAST
!ZISKANI POSUNUTI EL2 V OSE Y - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POSUNUTI EL2 V OSE Y - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - SPODNI CAST
!ZISKANI POLOHY EL2 V OSE X PO ZATIZENI - VRCHNI CAST
!ZISKANI POLOHY EL2 V OSE X PO ZATIZENI - SPODNI CAST
!ZISKANI POLOHY EL2 V OSE Z PO ZATIZENI - VRCHNI CAST
!ZISKANI POLOHY EL2 V OSE Z PO ZATIZENI - SPODNI CAST
!ZISKANI POLOHY EL2 V OSE Y PO ZATIZENI - VRCHNI CAST
!ZISKANI POLOHY EL2 V OSE Y PO ZATIZENI - SPODNI CAST
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU2 V OSE X - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU2 V OSE Z - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU2 V OSE Z - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU2 - PO ZATIZENI
!ROZDIL MEZI VZDALENOSTI EL2 A EL2B PRED A PO ZATIZENI
!VYSKA UMISTENI EXTENZOMETRU3 - VRCHNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU3 NA OSE X - STRANA - VRCHNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU3 NA OSE X - UHEL - VRCHNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU3 NA OSE X - VRCHNI CAST
!VYSKA UMISTENI EXTENZOMETRU3 - SPODNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU3 NA OSE X - STRANA - SPODNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU3 NA OSE X - UHEL - SPODNI CAST
!VYPOCET POLOHY UMISTENI EXTENZOMETRU3 NA OSE X - SPODNI CAST
!ZISKANI BODU V POZICI - EXTENZOMETRU VE VYSCE 100CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI BODU V POZICI - EXTENZOMETRU VE VYSCE 100CM - SPODNI CAST
!ZISKANI POZICE EL3 V OSE X - EXTENZOMETR3 VE VYSCE 100 CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POZICE EL3 V OSE X - EXTENZOMETR3 VE VYSCE 100 CM - SPODNI CAST

```

```

L_EL3x=EL3x-EL3_BX
!
*GET,EL3Z,NODE,EL3,LOC,Z
*GET,EL3_BZ,NODE,EL3_B,LOC,Z
L_EL3z=EL3z-EL3_BZ
!
*GET,EL3Y,NODE,EL3,LOC,Y
*GET,EL3_BY,NODE,EL3_B,LOC,Y
L_EL3Y=EL3Y-EL3_BY
!
L_EL3=sqrt(L_EL3x**2+L_EL3z**2+L_EL3Y**2)
!
!VYPOCET POSUNUTI EXTENZOMETRU EL3
!
*GET,EL3_UX%1%,NODE,EL3,U,X
*GET,EL3_BUX%1%,NODE,EL3_B,U,X
*GET,EL3_UZ%1%,NODE,EL3,U,Z
*GET,EL3_BUZ%1%,NODE,EL3_B,U,Z
*GET,EL3_UY%1%,NODE,EL3,U,Y
*GET,EL3_BUY%1%,NODE,EL3_B,U,Y
!
EL3x_2%1%=EL3x+EL3_UX%1%
EL3Bx_2%1%=EL3_Bx+EL3_BUX%1%
EL3z_2%1%=EL3z+EL3_UZ%1%
EL3Bz_2%1%=EL3_Bz+EL3_BUZ%1%
EL3Y_2%1%=EL3Y+EL3_UY%1%
EL3BY_2%1%=EL3_BY+EL3_BUY%1%
!
L_EL3UX%1%=EL3x_2%1%-EL3Bx_2%1%
L_EL3UZ%1%=EL3z_2%1%-EL3Bz_2%1%
L_EL3UY%1%=EL3Y_2%1%-EL3BY_2%1%
!
L_EL3U%1%=sqrt(L_EL3UX%1%**2+L_EL3UZ%1%**2+L_EL3UY%1%**2)
U_EL3%1%=abs((L_EL3U%1%-L_EL3)*1000)
!
!VYPOCET POLOHY INKLINOMETRU I
!
CSYS,I
VYSKA_I=0.3
VZDAL_LIHI=PRUM_PATA/2-PRUM_I/2
UHEL_I=VYSKA_I/VZDAL_LIHI
PRUM_BODI=PRUM_PATA/2-(VYSKA_I/UHEL_I)
!
VYSKA_IIB=VYSKA_I-0.05
VZDAL_LIHIIB=PRUM_PATA/2-PRUM_I/2
UHEL_IIB=VYSKA_I/VZDAL_LIHIIB
PRUM_BODIIB=PRUM_PATA/2-(VYSKA_IIB/UHEL_IIB)
!
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU3 V OSE X
!ZISKANI POZICE EL3 V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POZICE EL3 V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - SPODNI CAST
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU3 V OSE Z
!ZISKANI POZICE EL3 V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POZICE EL3 V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - SPODNI CAST
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU3 V OSE Y
!ZISKANI POZICE EL3 V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POZICE EL3 V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - SPODNI CAST
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU3
!ZISKANI POSUNUTI EL3 V OSE X - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POSUNUTI EL3 V OSE X - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - SPODNI CAST
!ZISKANI POSUNUTI EL3 V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POSUNUTI EL3 V OSE Z - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - SPODNI CAST
!ZISKANI POSUNUTI EL3 V OSE Y - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - VRCHNI CAST
!ZISKANI POSUNUTI EL3 V OSE Y - EXTENZOMETR VE VYSCE 100CM - SPODNI CAST
!ZISKANI POLOHY EL3 V OSE X PO ZATIZENI - VRCHNI CAST
!ZISKANI POLOHY EL3 V OSE X PO ZATIZENI - SPODNI CAST
!ZISKANI POLOHY EL3 V OSE Z PO ZATIZENI - VRCHNI CAST
!ZISKANI POLOHY EL3 V OSE Z PO ZATIZENI - SPODNI CAST
!ZISKANI POLOHY EL3 V OSE Y PO ZATIZENI - VRCHNI CAST
!ZISKANI POLOHY EL3 V OSE Y PO ZATIZENI - SPODNI CAST
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU3 V OSE X - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU3 V OSE Z - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU3 V OSE Z - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNI A SPODNI CASTI EXTENZOMETRU3 - PO ZATIZENI
!ROZDIL MEZI VZDALENOSTI EL3 A EL3B PRED A PO ZATIZENI
!CYLINDR. SOUR. SYST.
!VYSKA UMISTENI INKLINOMETRU I - VRCHNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU I NA OSE X - STRANA - VRCHNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU I NA OSE X - UHEL - VRCHNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU I NA OSE X - VRCHNI BOD
!VYSKA UMISTENI INKLINOMETRU I - VRCHNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU I NA OSE X - STRANA - SPODNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU I NA OSE X - UHEL - SPODNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU I NA OSE X - SPODNI BOD

```

```

UHEL_IY=90
II=NODE(PRUM_BODI,UHEL_IY,VYSKA_I1)
II_B=NODE(PRUM_BODI_B,UHEL_IY,VYSKA_I1B)
CSYS,0
!
*GET,II_X,NODE,II,LOC,X
*GET,II_BX,NODE,II_B,LOC,X
L_II_X=II_X-II_BX
!
*GET,II_Z,NODE,II,LOC,Z
*GET,II_BZ,NODE,II_B,LOC,Z
L_II_Z=II_Z-II_BZ
!
*GET,II_Y,NODE,II,LOC,Y
*GET,II_BY,NODE,II_B,LOC,Y
L_II_Y=II_Y-II_BY
!
!VYPOCET POSUNUTI INKLINOMETRU II
!
*GET,II_UX%I%,NODE,II,U,X
*GET,II_BUX%I%,NODE,II_B,U,X
*GET,II_UZ%I%,NODE,II,U,Z
*GET,II_BUZ%I%,NODE,II_B,U,Z
*GET,II_UY%I%,NODE,II,U,Y
*GET,II_BUY%I%,NODE,II_B,U,Y
!
II_X_2%I%=II_X+II_UX%I%
II_BX_2%I%=II_BX+II_BUX%I%
II_Z_2%I%=II_Z+II_UZ%I%
II_BZ_2%I%=II_BZ+II_BUZ%I%
II_Y_2%I%=II_Y+II_UY%I%
II_BY_2%I%=II_BY+II_BUY%I%
!
L_II_2UX%I%=II_X_2%I%-II_BX_2%I%
L_II_2UZ%I%=II_Z_2%I%-II_BZ_2%I%
L_II_2UY%I%=II_Y_2%I%-II_BY_2%I%
!
!VYPOCET UHLU MEZI TREMI VEKTORY
!
PHI_I%I%=ACOS((L_II_X*L_II_2UX%I%+L_II_Z*L_II_2UZ%I%+L_II_Y*L_II_2UY%I%)/(SQRT(L_II_X**2+L_II_Z**2+L_II_Y**2)*SQRT(L_II_2UX%I%**2+L_II_2UZ%I%**2+L_II_2UY%I%**2)))
!
!VYPOCET POLOHY INKLINOMETRU 2
!
CSYS,I
VYSKA_I2=I
VZDAL_LICHI2=PRUM_2/2-PRUM_3/2
UHEL_I2=VYSKA_3/VZDAL_LICHI2
PRUM_BODI2=PRUM_2/2-(VYSKA_I2/UHEL_I2)

```

```

!ZISKANI BODU V POZICI - INKLINOMETRU1 - NEUTRALNI OSA - VRCHNI BOD
!ZISKANI BODU V POZICI - INKLINOMETRU1 - NEUTRALNI OSA - SPODNI BOD

!ZISKANI POZICE II V OSE X - INKLINOMETRU1 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POZICE II V OSE X - INKLINOMETRU1 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU1 V OSE X

!ZISKANI POZICE II V OSE Z - INKLINOMETRU1 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POZICE II V OSE Z - INKLINOMETRU1 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU1 V OSE Z

!ZISKANI POZICE II V OSE Y - INKLINOMETRU1 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POZICE II V OSE Y - INKLINOMETRU1 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU1 V OSE Y

!ZISKANI POSUNUTI II V OSE X - INKLINOMETRU1 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI II V OSE X - INKLINOMETRU1 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI II V OSE Z - INKLINOMETRU1 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI II V OSE Z - INKLINOMETRU1 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI II V OSE Y - INKLINOMETRU1 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI II V OSE Y - INKLINOMETRU1 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD

!ZISKANI POLOHY II V OSE X PO ZATIZENI - VRCHNI BOD
!ZISKANI POLOHY II V OSE X PO ZATIZENI - SPODNI BOD
!ZISKANI POLOHY II V OSE Z PO ZATIZENI - VRCHNI BOD
!ZISKANI POLOHY II V OSE Z PO ZATIZENI - SPODNI BOD
!ZISKANI POLOHY II V OSE Y PO ZATIZENI - VRCHNI BOD
!ZISKANI POLOHY II V OSE Y PO ZATIZENI - SPODNI BOD

!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU1 V OSE X - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU1 V OSE Z - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU1 V OSE Y - PO ZATIZENI

!CYLINDR. SOUR. SYST.
!VYSKA UMISTENI INKLINOMETRU2 - VRCHNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU2 NA OSE X - STRANA - VRCHNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU2 NA OSE X - UHEL - VRCHNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU2 NA OSE X - VRCHNI BOD

```

```

!
VYSKA_I2B=VYSKA_I2-0.05
VZDAL_LICHI2B=PRUM_2/2-PRUM_3/2
UHEL_I2B=VYSKA_3/VZDAL_LICHI2B
PRUM_BODI2B=PRUM_3/2-(VYSKA_I2B/UHEL_I2B)
!
UHEL_I2Y=90
I2=NODE(PRUM_BODI2,UHEL_I2Y,VYSKA_I2)
I2_B=NODE(PRUM_BODI2B,UHEL_I2Y,VYSKA_I2B)
CSYS,0
!
*GET,I2X,NODE,I2,LOC,X
*GET,I2_BX,NODE,I2_B,LOC,X
L_I2X=I2X-I2_BX
!
*GET,I2Z,NODE,I2,LOC,Z
*GET,I2_BZ,NODE,I2_B,LOC,Z
L_I2Z=I2Z-I2_BZ
!
*GET,I2Y,NODE,I2,LOC,Y
*GET,I2_BY,NODE,I2_B,LOC,Y
L_I2Y=I2Y-I2_BY
!
!VYPOCET POSUNUTI INKLINOMETRU I2
!
*GET,I2_UX%I%,NODE,I2,U,X
*GET,I2_BUX%I%,NODE,I2_B,U,X
*GET,I2_UZ%I%,NODE,I2,U,Z
*GET,I2_BUZ%I%,NODE,I2_B,U,Z
*GET,I2_UY%I%,NODE,I2,U,Y
*GET,I2_BUY%I%,NODE,I2_B,U,Y
!
I2X_2%I%=I2X+I2_UX%I%
I2BX_2%I%=I2_BX+I2_BUX%I%
I2Z_2%I%=I2Z+I2_UZ%I%
I2BZ_2%I%=I2_BZ+I2_BUZ%I%
I2Y_2%I%=I2Y+I2_UY%I%
I2BY_2%I%=I2_BY+I2_BUY%I%
!
L_I2_2UX%I%=I2X_2%I%-I2BX_2%I%
L_I2_2UZ%I%=I2Z_2%I%-I2BZ_2%I%
L_I2_2UY%I%=I2Y_2%I%-I2BY_2%I%
!
!VYPOCET UHLU MEZI TREMI VEKTORY
!
PHI2_%I%=ACOS((L_I2X*L_I2_2UX%I%+L_I2Z*L_I2_2UZ%I%+L_I2Y*L_I2_2UY%I%)/(SQRT(L_I2X**2+L_I2Z**2+L_I2Y**2)*SQRT(L_I2_2UX%I%**2+L_I2_2UZ%I%**2+L_I2_2UY%I%**2)))
!
!VYPOCET POLOHY INKLINOMETRU 3

```

```

!VYSKA UMISTENI INKLINOMETRU2 - VRCHNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU2 NA OSE X - STRANA - SPODNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU2 NA OSE X - UHEL - SPODNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU2 NA OSE X - SPODNI BOD

```

```

!ZISKANI BODU V POZICI - INKLINOMETRU2 - NA STRANE TAHU - VRCHNI BOD
!ZISKANI BODU V POZICI - INKLINOMETRU2 - NA STRANE TAHU - SPODNI BOD

```

```

!ZISKANI POZICE I2 V OSE X - INKLINOMETRU2 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POZICE I2 V OSE X - INKLINOMETRU2 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU I V OSE X

```

```

!ZISKANI POZICE I2 V OSE Z - INKLINOMETRU2 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POZICE I2 V OSE Z - INKLINOMETRU2 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU2 V OSE Z

```

```

!ZISKANI POZICE I2 V OSE Y - INKLINOMETRU2 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POZICE I2 V OSE Y - INKLINOMETRU2 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU2 V OSE Y

```

```

!ZISKANI POSUNUTI I2 V OSE X - INKLINOMETRU2 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I2 V OSE X - INKLINOMETRU2 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I2 V OSE Z - INKLINOMETRU2 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I2 V OSE Z - INKLINOMETRU2 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I2 V OSE Y - INKLINOMETRU2 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I2 V OSE Y - INKLINOMETRU2 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD

```

```

!ZISKANI POLOHY I2 V OSE X PO ZATIZENI - VRCHNI BOD
!ZISKANI POLOHY I2 V OSE X PO ZATIZENI - SPODNI BOD
!ZISKANI POLOHY I2 V OSE Z PO ZATIZENI - VRCHNI BOD
!ZISKANI POLOHY I2 V OSE Z PO ZATIZENI - SPODNI BOD
!ZISKANI POLOHY I2 V OSE Y PO ZATIZENI - VRCHNI BOD
!ZISKANI POLOHY I2 V OSE Y PO ZATIZENI - SPODNI BOD

```

```

!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU2 V OSE X - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU2 V OSE Z - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU2 V OSE Z - PO ZATIZENI

```



```

!
CSYS,1
VYSKA_I3=2
VZDAL_LICHI3=PRUM_4/2-PRUM_5/2
UHEL_I3=VYSKA_5/VZDAL_LICHI3
PRUM_BODI3=PRUM_4/2-(VYSKA_I3/UHEL_I3)
!
VYSKA_I3B=VYSKA_I3-0.05
VZDAL_LICHI3B=PRUM_4/2-PRUM_5/2
UHEL_I3B=VYSKA_5/VZDAL_LICHI3B
PRUM_BODI3B=PRUM_4/2-(VYSKA_I3B/UHEL_I3B)
!
UHEL_I3Y=90
I3=NODE(PRUM_BODI3,UHEL_I3Y,VYSKA_I3)
I3_B=NODE(PRUM_BODI3B,UHEL_I3Y,VYSKA_I3B)
CSYS,0
!
*GET,I3,X,NODE,I3,LOC,X
*GET,I3_B,X,NODE,I3_B,LOC,X
L_I3X=I3X-I3_BX
!
*GET,I3,Z,NODE,I3,LOC,Z
*GET,I3_B,Z,NODE,I3_B,LOC,Z
L_I3Z=I3Z-I3_BZ
!
*GET,I3,Y,NODE,I3,LOC,Y
*GET,I3_B,Y,NODE,I3_B,LOC,Y
L_I3Y=I3Y-I3_BY
!
!VYPOCET POSUNUTI INKLINOMETRU I3
*GET,I3_UX%I%,NODE,I3,U,X
*GET,I3_BUX%I%,NODE,I3_B,U,X
*GET,I3_UZ%I%,NODE,I3,U,Z
*GET,I3_BUZ%I%,NODE,I3_B,U,Z
*GET,I3_UY%I%,NODE,I3,U,Y
*GET,I3_BUY%I%,NODE,I3_B,U,Y
!
I3X_2%I%=I3X+I3_UX%I%
I3BX_2%I%=I3_BX+I3_BUX%I%
I3Z_2%I%=I3Z+I3_UZ%I%
I3BZ_2%I%=I3_BZ+I3_BUZ%I%
I3Y_2%I%=I3Y+I3_UY%I%
I3BY_2%I%=I3_BY+I3_BUY%I%
!
L_I3_2UX%I%=I3X_2%I%-I3BX_2%I%
L_I3_2UZ%I%=I3Z_2%I%-I3BZ_2%I%
L_I3_2UY%I%=I3Y_2%I%-I3BY_2%I%
!

```

```
!CYLINDR. SOUR. SYST.
```

```
!VYSKA UMISTENI INKLINOMETRU3 - VRCHNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISETNI INKLINOMETRU3 NA OSE X - STRANA - VRCHNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISETNI INKLINOMETRU3 NA OSE X - UHEL - VRCHNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISETNI INKLINOMETRU3 NA OSE X - VRCHNI BOD
```

```
!VYSKA UMISTENI INKLINOMETRU3 - VRCHNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISETNI INKLINOMETRU3 NA OSE X - STRANA - SPODNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISETNI INKLINOMETRU3 NA OSE X - UHEL - SPODNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISETNI INKLINOMETRU3 NA OSE X - SPODNI BOD
```

```
!ZISKANI BODU V POZICI - INKLINOMETRU3 - NEUTRALNI OSA - VRCHNI BOD
!ZISKANI BODU V POZICI - INKLINOMETRU3 - NEUTRALNI OSA - SPODNI BOD
```

```
!ZISKANI POZICE I3 V OSE X - INKLINOMETRU3 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POZICE I3 V OSE X - INKLINOMETRU3 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI M BODEM INKLINOMETRU3 V OSE X
```

```
!ZISKANI POZICE I3 V OSE Z - INKLINOMETRU3 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POZICE I3 V OSE Z - INKLINOMETRU3 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI M BODEM INKLINOMETRU3 V OSE Z
```

```
!ZISKANI POZICE I3 V OSE Y - INKLINOMETRU3 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POZICE I3 V OSE Y - INKLINOMETRU3 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI M BODEM INKLINOMETRU3 V OSE Y
```

```
!ZISKANI POSUNUTI I3 V OSE X - INKLINOMETRU3 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I3 V OSE X - INKLINOMETRU3 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I3 V OSE Z - INKLINOMETRU3 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I3 V OSE Z - INKLINOMETRU3 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I3 V OSE Y - INKLINOMETRU3 VE VYSCE 10 CM - VRCHNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I3 V OSE Y - INKLINOMETRU3 VE VYSCE 10 CM - SPODNI BOD
```

```
!ZISKANI POLOHY I3 V OSE X PO ZATIZENI - VRCHNI BOD
!ZISKANI POLOHY I3 V OSE X PO ZATIZENI - SPODNI BOD
!ZISKANI POLOHY I3 V OSE Z PO ZATIZENI - VRCHNI BOD
!ZISKANI POLOHY I3 V OSE Z PO ZATIZENI - SPODNI BOD
!ZISKANI POLOHY I3 V OSE Y PO ZATIZENI - VRCHNI BOD
!ZISKANI POLOHY I3 V OSE Y PO ZATIZENI - SPODNI BOD
```

```
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI M BODEM INKLINOMETRU3 V OSE X - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI M BODEM INKLINOMETRU3 V OSE Z - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI M BODEM INKLINOMETRU3 V OSE Y - PO ZATIZENI
```

```

!VYPOCET UHLU MEZI TREMI VEKTORY
!
PHI3_%1%=ACOS((L_13x*L_13_2ux%1%+L_13z*L_13_2uz%1%+L_13y*L_13_2uy%1%)/(SQRT(L_13x**2+L_13z**2+L_13y**2)*SQRT(L_13_2ux%1%**2+L_13_2uz%1%**2+L_13_2uy%1%**2)))
!
!VYPOCET POLOHY INKLINOMETRU 4 - V MISTE UKOTVENI
!
CSYS,1
!
VYSKA_I4=VYSKA_KMEN
VZDAL_LI4=PRUM_5/2-PRUM_CEP/2
UHEL_I4=VYSKA_KMEN/VZDAL_LI4
PRUM_BODI4=PRUM_5/2-(VYSKA_I4/UHEL_I4)
!
VYSKA_I4B=VYSKA_I4-0.05
VZDAL_LI4B=PRUM_5/2-PRUM_CEP/2
UHEL_I4B=VYSKA_KMEN/VZDAL_LI4B
PRUM_BODI4B=PRUM_5/2-(VYSKA_I4B/UHEL_I4B)
!
UHEL_I4Y=90
I4=NODE(PRUM_BODI4,UHEL_I4Y,VYSKA_I4)
I4_B=NODE(PRUM_BODI4B,UHEL_I4Y,VYSKA_I4B)
CSYS,0
!
*GET,I4,X,NODE,I4,LOC,X
*GET,I4,_BX,NODE,I4,_B,LOC,X
L_I4X=I4X-I4_BX
!
*GET,I4,Z,NODE,I4,LOC,Z
*GET,I4,_BZ,NODE,I4,_B,LOC,Z
L_I4Z=I4Z-I4_BZ
!
*GET,I4,Y,NODE,I4,LOC,Y
*GET,I4,_BY,NODE,I4,_B,LOC,Y
L_I4Y=I4Y-I4_BY
!
!VYPOCET POSUNUTI INKLINOMETRU I4 - V MISTE UKOTVENI
*GET,I4,_UX%1%,NODE,I4,U,X
*GET,I4,_BUX%1%,NODE,I4,_B,U,X
*GET,I4,_UZ%1%,NODE,I4,U,Z
*GET,I4,_BUZ%1%,NODE,I4,_B,U,Z
*GET,I4,_UY%1%,NODE,I4,U,Y
*GET,I4,_BUY%1%,NODE,I4,_B,U,Y
!
I4X_2%1%=I4X+I4_UX%1%
I4BX_2%1%=I4_BX+I4_BUX%1%
I4Z_2%1%=I4Z+I4_UZ%1%
I4BZ_2%1%=I4_BZ+I4_BUZ%1%
I4Y_2%1%=I4Y+I4_UY%1%

```

!CYLINDR. SOUR. SYST.

!VYSKA UMISTENI INKLINOMETRU4 - VRCHNI BOD = VYSKA KMEN
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU4 NA OSE X - STRANA - SPODNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU4 NA OSE X - UHEL - SPODNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU4 NA OSE X - SPODNI BOD

!VYSKA UMISTENI INKLINOMETRU4 - VRCHNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU4 NA OSE X - STRANA - SPODNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU4 NA OSE X - UHEL - SPODNI BOD
!VYPOCET POLOHY UMISTENI INKLINOMETRU4 NA OSE X - SPODNI BOD

!ZISKANI BODU V POZICI - INKLINOMETRU4 - NEUTRALNI OSA - VRCHNI BOD
!ZISKANI BODU V POZICI - INKLINOMETRU4 - NEUTRALNI OSA - SPODNI BOD

!ZISKANI POZICE I4 V OSE X - INKLINOMETRU4 VE VYSCE VE UVAZKU - VRCHNI BOD
!ZISKANI POZICE I4 V OSE X - INKLINOMETRU4 VE VYSCE VE UVAZKU - SPODNI BOD
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU4 V OSE X

!ZISKANI POZICE I4 V OSE Z - INKLINOMETRU4 VE VYSCE VE UVAZKU - VRCHNI BOD
!ZISKANI POZICE I4 V OSE Z - INKLINOMETRU4 VE VYSCE VE UVAZKU - SPODNI BOD
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU4 V OSE Z

!ZISKANI POZICE I4 V OSE Y - INKLINOMETRU4 VE VYSCE VE UVAZKU - VRCHNI BOD
!ZISKANI POZICE I4 V OSE Y - INKLINOMETRU4 VE VYSCE VE UVAZKU - SPODNI BOD
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNI BODEM INKLINOMETRU4 V OSE Y

!ZISKANI POSUNUTI I4 V OSE X - INKLINOMETRU4 VE VYSCE VE UVAZKU - VRCHNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I4 V OSE X - INKLINOMETRU4 VE VYSCE VE UVAZKU - SPODNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I4 V OSE Z - INKLINOMETRU4 VE VYSCE VE UVAZKU - VRCHNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I4 V OSE Z - INKLINOMETRU4 VE VYSCE VE UVAZKU - SPODNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I4 V OSE Y - INKLINOMETRU4 VE VYSCE VE UVAZKU - VRCHNI BOD
!ZISKANI POSUNUTI I4 V OSE Y - INKLINOMETRU4 VE VYSCE VE UVAZKU - SPODNI BOD

!ZISKANI POLOHY I4 V OSE X PO ZATIZENI - VRCHNI BOD
!ZISKANI POLOHY I4 V OSE X PO ZATIZENI - SPODNI BOD
!ZISKANI POLOHY I4 V OSE Z PO ZATIZENI - VRCHNI BOD
!ZISKANI POLOHY I4 V OSE Z PO ZATIZENI - SPODNI BOD
!ZISKANI POLOHY I4 V OSE Y PO ZATIZENI - VRCHNI BOD

!4BY_2%1%=I4_BY+I4_BUY%1%	!ZISKANI POLOHY I4 V OSE Z PO ZATIZENI - SPODNI BOD
!	
L_I4_2UX%1%=I4X_2%1%-I4BX_2%1%	!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNIM BODEM INKLINOMETRU4 V OSE X - PO ZATIZENI
L_I4_2UZ%1%=I4Z_2%1%-I4BZ_2%1%	!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNIM BODEM INKLINOMETRU4 V OSE Z - PO ZATIZENI
L_I4_2UY%1%=I4Y_2%1%-I4BY_2%1%	!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNIM BODEM INKLINOMETRU4 V OSE Y - PO ZATIZENI
!	
!VYPOCET UHLU MEZI TREMI VEKTORY	
!	
PHI4_%1%=ACOS((L_I4X*L_I4_2UX%1%+L_I4Z*L_I4_2UZ%1%+L_I4Y*L_I4_2UY%1%)/(SQRT(L_I4X**2+L_I4Z**2+L_I4Y**2)*SQRT(L_I4_2UX%1%**2+L_I4_2UZ%1%**2+L_I4_2UY%1%**2)))	
!	
!VYPOCET POLOHY INKLINOMETRU 5 - V MISTE UKOTVENI - 5 POCITA UHEL MEZI KORENOVYM BALEM A ROVINOU	
!	
CSYS,I	!CYLINDR. SOUR. SYST.
!	
I5OSAX=0	
I5_BOSAX=I5OSAX+0.05	
I5=NODE(I5OSAX,0,0)	!ZISKANI BODU V POZICI - STRED KMENE
I5_B=NODE(I5_BOSAX,0,0)	!ZISKANI BODU V POZICI - STRED KMENE - BOD VPRAVO
CSYS,0	
!	
*GET,I5X,NODE,I5,LOC,X	!ZISKANI POZICE I5 V OSE X
*GET,I5_BX,NODE,I5_B,LOC,X	!ZISKANI POZICE I5 V OSE X
L_I5X=I5_BX-I5X	!VZDALENOST MEZI BODY I5 V OSE X
!	
*GET,I5Z,NODE,I5,LOC,Z	!ZISKANI POZICE I5 V OSE Z
*GET,I5_BZ,NODE,I5_B,LOC,Z	!ZISKANI POZICE I5 V OSE Z
L_I5Z=I5_BZ-I5Z	!VZDALENOST MEZI BODY I5 V OSE Z
!	
*GET,I5Y,NODE,I5,LOC,Y	!ZISKANI POZICE I4 V OSE Z
*GET,I5_BY,NODE,I5_B,LOC,Y	!ZISKANI POZICE I4 V OSE Z
L_I5Y=I5_BY-I5Y	!VZDALENOST MEZI BODY I5 V OSE Y
!	
!VYPOCET POSUNUTI INKLINOMETRU I5 - STRED KMENE	
*GET,I5_UX%1%,NODE,I5,U,X	!ZISKANI POSUNUTI I5 V OSE X
*GET,I5_BUX%1%,NODE,I5_B,U,X	!ZISKANI POSUNUTI I5 V OSE X
*GET,I5_UZ%1%,NODE,I5,U,Z	!ZISKANI POSUNUTI I5 V OSE Z
*GET,I5_BUZ%1%,NODE,I5_B,U,Z	!ZISKANI POSUNUTI I5 V OSE Z
*GET,I5_UY%1%,NODE,I5,U,Y	!ZISKANI POSUNUTI I5 V OSE Y
*GET,I5_BUY%1%,NODE,I5_B,U,Y	!ZISKANI POSUNUTI I5 V OSE Y
!	
I5X_2%1%=I5X+I5_UX%1%	!ZISKANI POLOHY I5 V OSE X PO ZATIZENI
I5BX_2%1%=I5_BX+I5_BUX%1%	!ZISKANI POLOHY I5 V OSE X PO ZATIZENI
I5Z_2%1%=I5Z+I5_UZ%1%	!ZISKANI POLOHY I5 V OSE Z PO ZATIZENI
I5BZ_2%1%=I5_BZ+I5_BUZ%1%	!ZISKANI POLOHY I5 V OSE Z PO ZATIZENI
I5Y_2%1%=I5Y+I5_UY%1%	!ZISKANI POLOHY I5 V OSE Z PO ZATIZENI
I5BY_2%1%=I5_BY+I5_BUY%1%	!ZISKANI POLOHY I5 V OSE Z PO ZATIZENI
!	
L_I5_2UX%1%=I5BX_2%1%-I5X_2%1%	!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNIM BODEM INKLINOMETRU4 V OSE X - PO ZATIZENI

```

L_I5_2UZ%1%=I5BZ_2%1%-I5Z_2%1%
L_I5_2UY%1%=I5BY_2%1%-I5Y_2%1%
!
!VYPOCET UHLU MEZI TREMI VEKTORY
!
PHI5_%1%=ACOS((L_I5X*L_I5_2UX%1%+L_I5Z*L_I5_2UZ%1%+L_I5Y*L_I5_2UY%1%)/(SQRT(L_I5X**2+L_I5Z**2+L_I5Y**2)*SQRT(L_I5_2UX%1%**2+L_I5_2UZ%1%**2+L_I5_2UY%1%**2)))
!
!ZAPSANI VYSLEDKU DO TABULKY VYS
!
VYS(1,1)=RFKxA%1%
VYS(1,2)=U_EL1%1%
VYS(1,3)=U_EL2%1%
VYS(1,4)=U_EL3%1%
VYS(1,5)=PHI1_%1%
VYS(1,6)=PHI2_%1%
VYS(1,7)=PHI3_%1%
VYS(1,8)=PHI4_%1%
VYS(1,9)=PHI5_%1%
*ENDDO
/EOF
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNIM BODEM INKLINOMETRU4 V OSE Z - PO ZATIZENI
!VZDALENOST MEZI VRCHNIM A SPODNIM BODEM INKLINOMETRU4 V OSE Y - PO ZATIZENI
!KONEC CYKLU
!KONEC

```

PŘÍLOHA Č. 2 DÁVKOVÝ SOUBOR DEFINICE PARAMETRŮ MATERIÁLOVÉHO MODELU KMENE

```
!MATERIAL KMEN - VNITRNI 1000-1500 - 6. VRSTEV, VNEJSI 2000-2500 - 6. VRSTEV
```

```
!=====
```

```
!-----PARAMETRY-----
```

```
DENS_W=1021          !HUSTOTA
```

```
!MATERIAL BAZE
```

```
E_X=1.17E9          !NORMALOVE SLOZKY
```

```
E_Y=6.23E8
```

```
E_Z=7.59E9
```

```
G_XY=1.22E8        !SMYKOVE SLOZKY
```

```
G_YZ=6.15E8
```

```
G_XZ=6.76E8
```

```
!MATERIAL DO 1M
```

```
E_X1=1.42E9
```

```
E_Y1=7.56E8
```

```
E_Z1=9.22E9
```

```
G_XY1=1.48E8
```

```
G_YZ1=7.47E8
```

```
G_XZ1=8.21E8
```

```
!MATERIAL DO 2M
```

```
E_X2=1.69E9
```

```
E_Y2=9.00E8
```

```
E_Z2=1.10E10
```

```
G_XY2=1.77E8
```

```
G_YZ2=8.89E8
```

```
G_XZ2=9.77E8
```

```
!POISSONOVY KONSTANTY
```

```
NU_XY=0.292
```

```
NU_YZ=0.033
```

```
NU_XZ=0.064
```

```
!
```

```

!-----NACTENI TABULKY KOEFICENTU A CYKLY-----
!KMEN VNITRNI DO 0.3 - OBJEM 1000
!
!CYKLUS DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI - VRSTVY I V KMENI
!CYKLUS DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI - CASTI VRSTVY
!DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI - S VLIIVEM KOEFICIENTU PRO UPRAVU MATERIALU KOEF_MAT
*DO,J,I,12
  MP,EX,1000+J,E_X*KOEF_MAT(5,J)
  MP,EY,1000+J,E_Y*KOEF_MAT(5,J)
  MP,EZ,1000+J,E_Z*KOEF_MAT(5,J)
  !
  MP,GXY,1000+J,G_XY*KOEF_MAT(5,J)
  MP,GYZ,1000+J,G_YZ*KOEF_MAT(5,J)
  MP,GXZ,1000+J,G_XZ*KOEF_MAT(5,J)
  !
  MP,NUXY,1000+J,NU_XY
  MP,NUYZ,1000+J,NU_YZ
  MP,NUXZ,1000+J,NU_XZ
  !
  MP,DENS,1000+J,DENS_W*KOEF_MAT(5,J)
*ENDDO
!
!KMEN VNITRNI OD 0.3 DO I - OBJEM 1100,1200
!
!CYKLUS DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI - VRSTVY V KMENI
!CYKLUS DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI - CASTI VRSTVY
!DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI - S VLIIVEM KOEFICIENTU PRO UPRAVU MATERIALU KOEF_MAT
*DO,I,6,7
*DO,J,I,12
  MP,EX,(1000+(I-5)*100)+J,E_XI*KOEF_MAT(I,J)
  MP,EY,(1000+(I-5)*100)+J,E_YI*KOEF_MAT(I,J)
  MP,EZ,(1000+(I-5)*100)+J,E_ZI*KOEF_MAT(I,J)
  !
  MP,GXY,(1000+(I-5)*100)+J,G_XYI*KOEF_MAT(I,J)
  MP,GYZ,(1000+(I-5)*100)+J,G_YZI*KOEF_MAT(I,J)
  MP,GXZ,(1000+(I-5)*100)+J,G_XZI*KOEF_MAT(I,J)
  !
  MP,NUXY,(1000+(I-5)*100)+J,NU_XY
  MP,NUYZ,(1000+(I-5)*100)+J,NU_YZ
  MP,NUXZ,(1000+(I-5)*100)+J,NU_XZ
  !
  MP,DENS,(1000+(I-5)*100)+J,DENS_W*KOEF_MAT(I,J)
*ENDDO
*ENDDO
!
!KMEN VNITRNI OD I DO VYSKA_KMEN - OBJEM 1300,1400,1500
!
!CYKLUS DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI - VRSTVY V KMENI
!CYKLUS DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI - CASTI VRSTVY
!DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI - S VLIIVEM KOEFICIENTU PRO UPRAVU MATERIALU KOEF_MAT
*DO,I,8,10
*DO,J,I,12
  MP,EX,(1000+(I-5)*100)+J,E_X2*KOEF_MAT(I,J)
  MP,EY,(1000+(I-5)*100)+J,E_Y2*KOEF_MAT(I,J)
  MP,EZ,(1000+(I-5)*100)+J,E_Z2*KOEF_MAT(I,J)
  !
  MP,GXY,(1000+(I-5)*100)+J,G_XY2*KOEF_MAT(I,J)

```

```

MP,GYZ,(1000+(1-5)*100)+J,G_YZ2*KOEF_MAT(1,J)
MP,GXZ,(1000+(1-5)*100)+J,G_XZ2*KOEF_MAT(1,J)
!
MP,NUXY,(1000+(1-5)*100)+J,NU_XY
MP,NUYZ,(1000+(1-5)*100)+J,NU_YZ
MP,NUXZ,(1000+(1-5)*100)+J,NU_XZ
!
MP,DENS,(1000+(1-5)*100)+J,DENS_W*KOEF_MAT(1,J)
*ENDDO
*ENDDO
!
!KMEN VNEJSI DO 0.3 - OBJEM 2000
!
!CYKLUS DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI - VRSTVA I V KMENI
!CYKLUS DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI- CASTI VRSTVY
*DO,J,I,12
MP,EX,2000+J,E_X*KOEF_MAT(11,J)
MP,EY,2000+J,E_Y*KOEF_MAT(11,J)
MP,EZ,2000+J,E_Z*KOEF_MAT(11,J)
!
MP,GXY,2000+J,G_XY*KOEF_MAT(11,J)
MP,GYZ,2000+J,G_YZ*KOEF_MAT(11,J)
MP,GXZ,2000+J,G_XZ*KOEF_MAT(11,J)
!
MP,NUXY,2000+J,NU_XY
MP,NUYZ,2000+J,NU_YZ
MP,NUXZ,2000+J,NU_XZ
!
MP,DENS,2000+J,DENS_W*KOEF_MAT(11,J)
*ENDDO
!
!KMEN VNEJSI OD 0.3 DO I - OBJEM 2100,2200
!
!CYKLUS DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI - VRSTVY V KMENI
!CYKLUS DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI- CASTI VRSTVY
*DO,I,12,13
*DO,J,I,12
MP,EX,(2000+(I-11)*100)+J,E_XI*KOEF_MAT(1,J)
MP,EY,(2000+(I-11)*100)+J,E_YI*KOEF_MAT(1,J)
MP,EZ,(2000+(I-11)*100)+J,E_ZI*KOEF_MAT(1,J)
!
MP,GXY,(2000+(I-11)*100)+J,G_XYI*KOEF_MAT(1,J)
MP,GYZ,(2000+(I-11)*100)+J,G_YZI*KOEF_MAT(1,J)
MP,GXZ,(2000+(I-11)*100)+J,G_XZI*KOEF_MAT(1,J)
!
MP,NUXY,(2000+(I-11)*100)+J,NU_XY
MP,NUYZ,(2000+(I-11)*100)+J,NU_YZ
MP,NUXZ,(2000+(I-11)*100)+J,NU_XZ
!
MP,DENS,(2000+(I-11)*100)+J,DENS_W*KOEF_MAT(1,J)
*ENDDO
*ENDDO

```

```

!
!KMEN VNEJSI OD I DO VYSKA_KMEN - OBJEM 2300,2400,2500
!
*DO,I,I4,I6                                !CYKLUS DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI - VRSTVY V KMENI
*DO,J,I,I2                                !CYKLUS DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI- CASTI VRSTVY
  MP,EX,(2000+(I-II)*100)+J,E_X2*KOEF_MAT(I,J)
  MP,EY,(2000+(I-II)*100)+J,E_Y2*KOEF_MAT(I,J)
  MP,EZ,(2000+(I-II)*100)+J,E_Z2*KOEF_MAT(I,J)
  !
  MP,GXY,(2000+(I-II)*100)+J,G_XY2*KOEF_MAT(I,J)
  MP,GYZ,(2000+(I-II)*100)+J,G_YZ2*KOEF_MAT(I,J)
  MP,GXZ,(2000+(I-II)*100)+J,G_XZ2*KOEF_MAT(I,J)
  !
  MP,NUXY,(2000+(I-II)*100)+J,NU_XY        !DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI - BEZ VLIVU KOEFICIENTU
  MP,NUYZ,(2000+(I-II)*100)+J,NU_YZ
  MP,NUXZ,(2000+(I-II)*100)+J,NU_XZ
  !
  MP,DENS,(2000+(I-II)*100)+J,DENS_W*KOEF_MAT(I,J)
*ENDDO
*ENDDO

```


PŘÍLOHA Č. 3 DÁVKOVÝ SOUBOR DEFINICE PARAMETRŮ MATERIÁLOVÉHO MODELU KOŘENOVÉHO BALU

```
!MATERIAL BAL 100-400 - 4. VRSTVY
!=====
!
!-----PARAMETRY-----
!
DENS_P=2000
!
E_KOREN=7.59E9          !MODUL PRUZNOSTI DREVA - 1. VRSTVA
E_PUDA=2E7             !MODUL PRUZNOSTI PUDA - 4. VRSTVA - FOUNDATION ANALYSIS
PR_XY_P=0.3           !FOUNDATION ANALYSIS
!
PODIL_KOREN_1=1        !PODIL KORENU 1.VRSTVA
PODIL_KOREN_2=0.5     !PODIL KORENU 2.VRSTVA
PODIL_KOREN_3=0.1     !PODIL KORENU 3.VRSTVA
PODIL_KOREN_4=0       !PODIL KORENU 4.VRSTVA
!
!-----NACTENI TABULKY KOEFICENTU A CYKLY-----
!
*DO,1,1,4              !CYKLUS DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI-VRSTVY V BALU
*DO,J,1,12             !CYKLUS DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI-CASTI VRSTVY
  E_%1%=E_KOREN*PODIL_KOREN_%1%+E_PUDA*(1-PODIL_KOREN_%1%) !VYPOCET MODULU PRUZNOSTI PRO JEDNOTLIVE VRSTVY - SMESNE PRAVIDLO
  MP,EX,(1*100)+J,E_%1%*KOEK_MAT(1,J)                       !DEFINICE MATERIALOVYCH VLASTNOSTI - S VLIIVEM KOEFICIENTU PRO UPRAVU MATERIALU KOEF_MAT
  MP,PRXY,(1*100)+J,PR_XY_P                                  !KOMBINACE PUDA KOREN?
  !
  DP_%1%=DENS_W*PODIL_KOREN_%1%+DENS_P*(1-PODIL_KOREN_%1%)
  MP,DENS,(1*100)+J,DP_%1%*KOEK_MAT(1,J)                     !HUSTOTA PUDA
*ENDDO
*ENDDO
```

PŘÍLOHA Č. 4 DÁVKOVÝ SOUBOR MATICE KOEFICIENTŮ PRO MATERIÁLOVÝ MODEL

VRTSVY	VYSECE	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0												
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												
11												
12												
13												
14												
15												
16												

PŘÍLOHA Č. 5 DÁVKOVÝ SOUBOR PRO EXPORT VÝSLEDKŮ

```
*CFOPEN,VYSLEDKY,TXT
*VWRITE,SEQU,VYS(1,1),VYS(1,2),VYS(1,3),VYS(1,4),VYS(1,5),VYS(1,6),VYS(1,7),VYS(1,8),VYS(1,9)
(F3.0,' ',F10.4,' ',F9.8,' ',F9.8,' ',F9.8,' ',F9.8,' ',F9.8,' ',F9.8,' ',F9.8,' ',F9.8)
*CFCLOSE
```

PŘÍLOHA Č. 6 DÁVKOVÉ SOUBORY PRO CITLIVOSTNÍ ANALÝZY

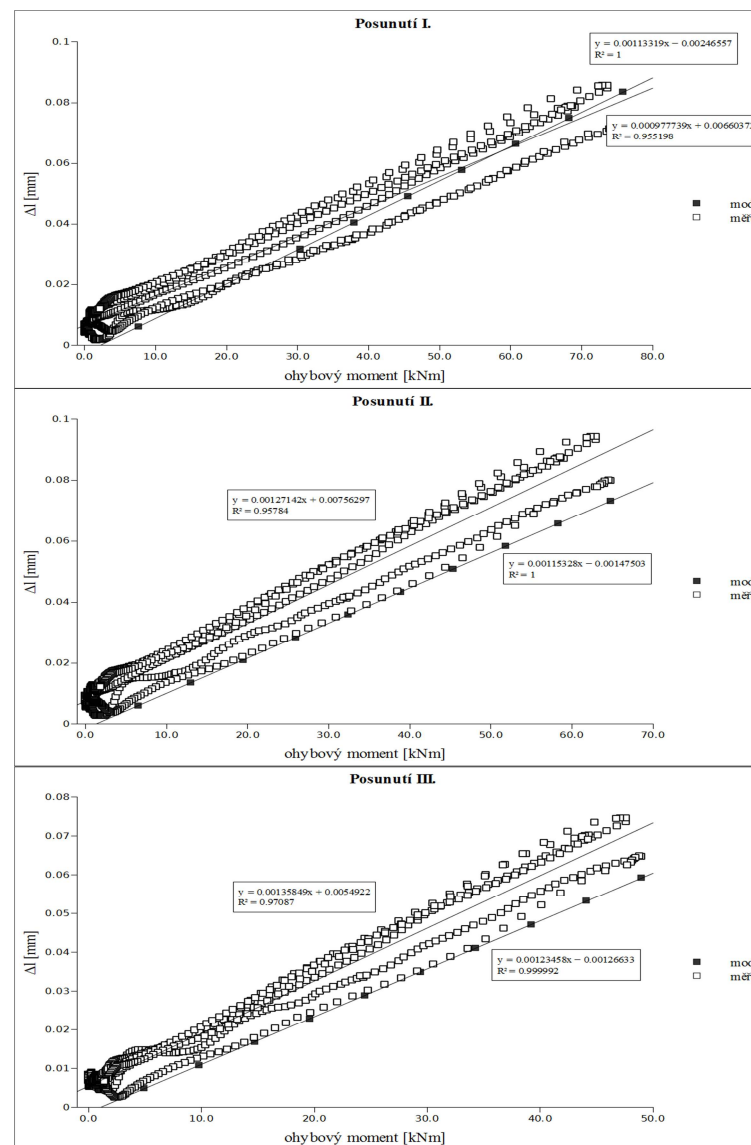
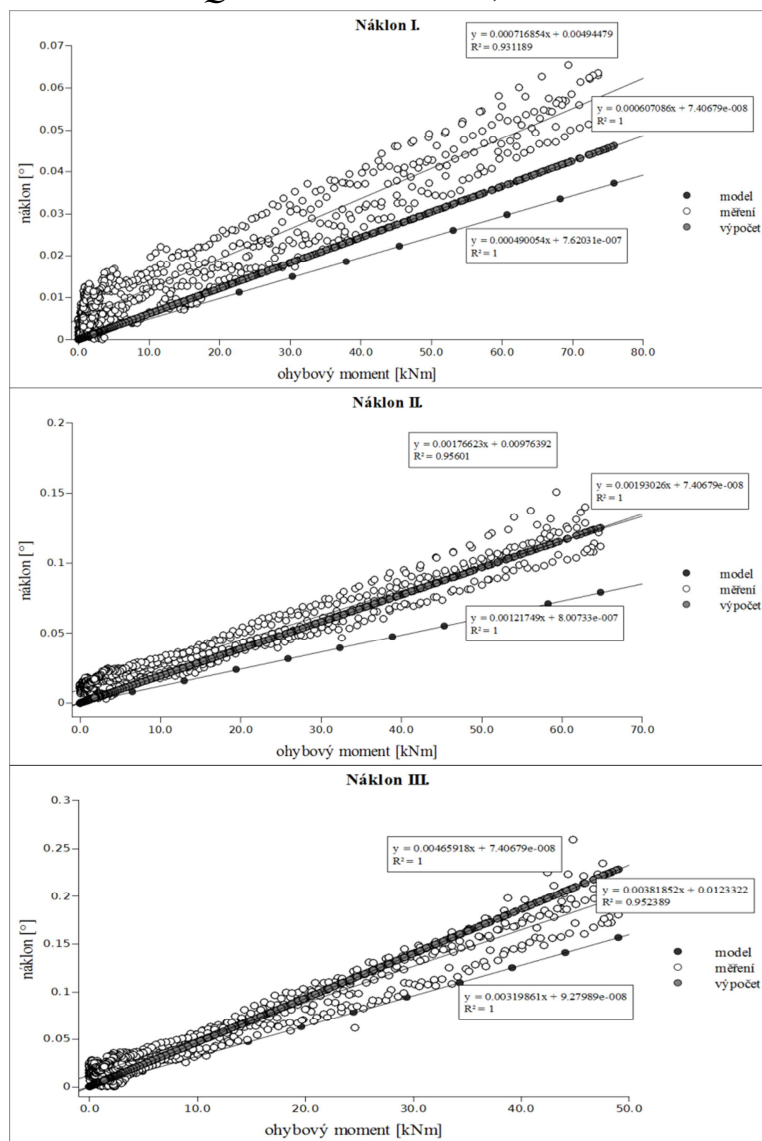
I. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA – ZJIŠTĚNÍ VLIVU POLOHY PŘÍSTROJŮ

```
!
!-----
! CITLIVOSTNI ANALYZA (PDS) - POLOHA PRISTROJU
!-----
/INP,STROM_IDB,MAC          !VSTUP MAKRA VYPOCTU
/PDS                        !PREPNI SE DO "PROBABILISTIC DESIGN SYSTEMU"
!
PDANL,STROM_IDB,MAC
!
!ZJISTENI VLIVU POSUNUTI INKLINOMETRU V RUZNYCH VYSKACH (POSUN 10CM), V RUZNE POLOZE (0-180')
!
PDVAR,VYSKA_I1,UNIF,0.2,0.3      !DEF. PARAMETR S NORMALNIM ROZDELENIM ALT. "TRIA", "TGAU"
PDVAR,UHELI1Y,UNIF,0,180        !DEF. PARAMETR S NORMALNIM ROZDELENIM ALT. "TRIA", "TGAU"
PDVAR,VYSKA_I2,UNIF,0.9,1
PDVAR,UHELI2Y,UNIF,0,180
PDVAR,VYSKA_I3,UNIF,1.9,2
PDVAR,UHELI3Y,UNIF,0,180
PDVAR,VYSKA_I4,UNIF,5.5,1
PDVAR,UHELI4Y,UNIF,0,180
PDVAR,I5OSAX,UNIF,0,PRUM_PATA/2
!
!ZJISTENI VLIVU POSUNUTI EXTENZOMETRU V RUZNYCH VYSKACH (POSUN 10CM) V RUZNE POLOZE (0-180')
!
PDVAR,VYSKA_EL1,UNIF,0.2,0.3    !DEF. PARAMETR S NORMALNIM ROZDELENIM ALT. "TRIA", "TGAU"
PDVAR,UHELEL1Y,UNIF,90,180     !DEF. PARAMETR S NORMALNIM ROZDELENIM ALT. "TRIA", "TGAU"
PDVAR,VYSKA_EL2,UNIF,0.9,1
PDVAR,UHELEL2Y,UNIF,90,180
PDVAR,VYSKA_EL3,UNIF,1.9,2
PDVAR,UHELEL3Y,UNIF,90,180
!
PDVAR,PHI_I10,RESP             !DEF. PARAM. ODEZVY
PDVAR,PHI2_I10,RESP            !DEF. PARAM. ODEZVY
PDVAR,PHI3_I10,RESP            !DEF. PARAM. ODEZVY
PDVAR,PHI4_I10,RESP            !DEF. PARAM. ODEZVY
PDVAR,PHI5_I10,RESP            !DEF. PARAM. ODEZVY
!
PDVAR,U_EL110,RESP             !DEF. PARAM. ODEZVY
PDVAR,U_EL210,RESP             !DEF. PARAM. ODEZVY
PDVAR,U_EL310,RESP             !DEF. PARAM. ODEZVY
!
PDMETH,MCS,DIR                 !VOLBA PRIME MONTE CARLO SIMULACE
PDDMCS,300,NONE,ALL,,,,,123457 !300 VZORKU, INITIAL SEED OF 123457
!
PDEXE,STROM_IDB                !SPUST ANALYZU
!
PDSESNS,STROM_IDB,PHI_I10,BOTH,RANK,0.025 !CITLIVOSTNI GRAF - SPEARMANUV KOEFICIENT, CITLIVOS 2.5%
/EOF
```

II. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA – ZJIŠTĚNÍ VLIVU PARAMETRŮ KMENE

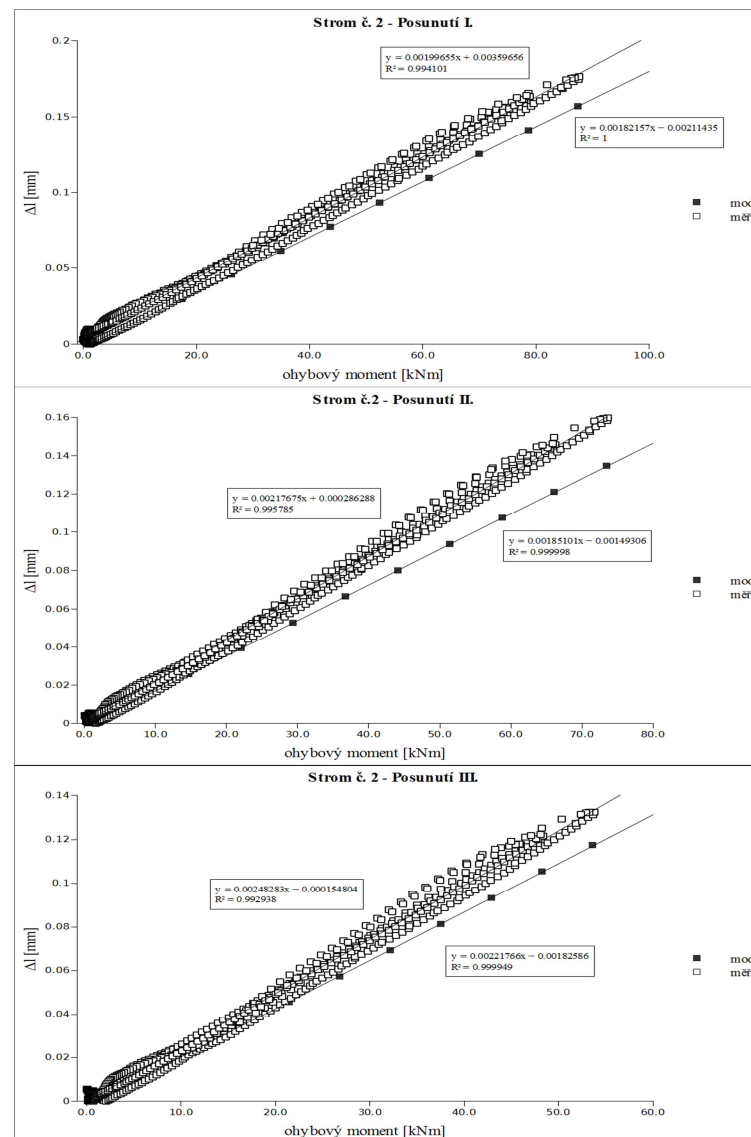
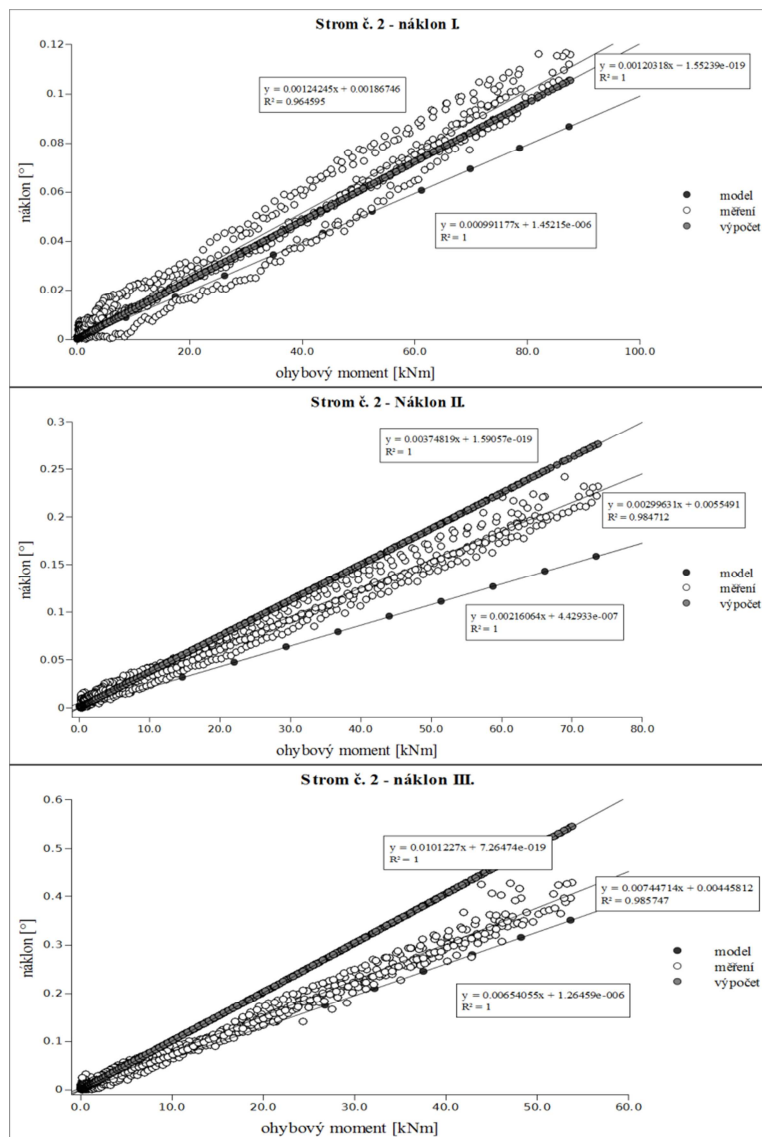
```
!
=====
!
!
/INP,STROM_IDB,MAC          !VSTUP MAKRA VYPOCTU
/PDS                        !PREPNI SE DO "PROBABILISTIC DESIGN SYSTEMU"
!
PDANL,STROM_IDB,MAC
!
!ZJISTENI VLIVU PARAMETRU KMENE
!
PDVAR,PRUM_4,UNIF,0.4,I     !DEF. PARAMETR S NORMALNIM ROZDELENIM - PRUMER KMENE V 1.3 OSTATNI SE DOPOCITAVAJI
PDVAR,VYSKA_KMEN,UNIF,2.5,6 !DEF. PARAMETR S NORMALNIM ROZDELENIM - VYSKA KMENE - POSLEDNI CAST
PDVAR,D_L,UNIF,0.01,0.04   !DEF. PARAMETR S NORMALNIM ROZDELENIM - SBIHAVOST
!
PDVAR,PHI1_I0,RESP         !DEF. PARAM. ODEZVY
PDVAR,PHI2_I0,RESP         !DEF. PARAM. ODEZVY
PDVAR,PHI3_I0,RESP         !DEF. PARAM. ODEZVY
PDVAR,PHI4_I0,RESP         !DEF. PARAM. ODEZVY
PDVAR,PHI5_I0,RESP         !DEF. PARAM. ODEZVY
PDVAR,D_H,RESP             !DEF. PARAM. ODEZVY
PDVAR,D4,RESP              !DEF. PARAM. ODEZVY
!
PDVAR,U_EL1I0,RESP         !DEF. PARAM. ODEZVY
PDVAR,U_EL2I0,RESP         !DEF. PARAM. ODEZVY
PDVAR,U_EL3I0,RESP         !DEF. PARAM. ODEZVY
!
PDMETH,MCS,DIR             !VOLBA PRIME MONTE CARLO SIMULACE
PDDMCS,I00,NONE,ALL,,,I23457 !I00 VYPOCTU, INITIAL SEED OF I23457
!
PDEXE,STROM_IDB            !SPUST ANALYZU
!
PDSESNS,STROM_IDB,PHI1_I0,BOTH,RANK,0.025 !CITLIVOSTNI GRAF
PDSESNS,STROM_IDB,PHI2_I0,BOTH,RANK,0.025 !CITLIVOSTNI GRAF
PDSESNS,STROM_IDB,PHI3_I0,BOTH,RANK,0.025 !CITLIVOSTNI GRAF
PDSESNS,STROM_IDB,PHI4_I0,BOTH,RANK,0.025 !CITLIVOSTNI GRAF
!
/EOF
```


PŘÍLOHA Č. 7 POROVNÁNÍ VÝSLEDNÝCH SMĚRNIC NUMERICKÉHO ŘEŠENÍ, ANALYTICKÉHO VÝPOČTU A MĚŘENÍ
 STROM Č. 1 – QUERCUS PALUSTRIS, MUENCHH.



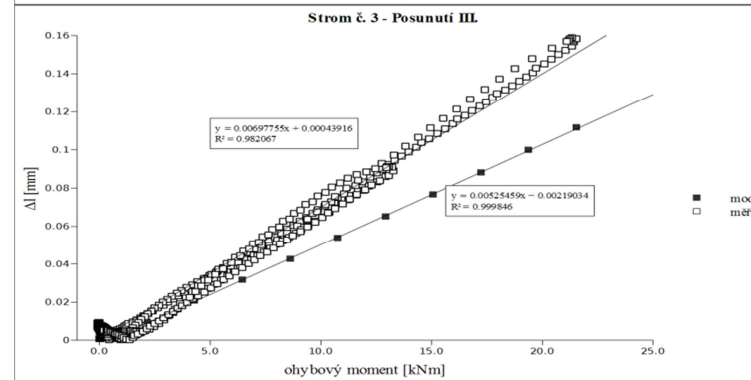
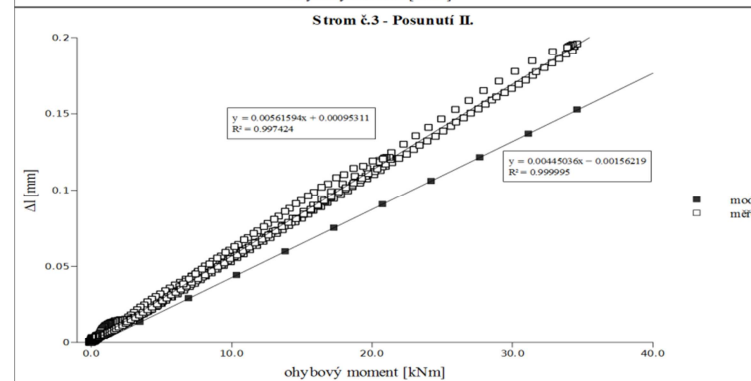
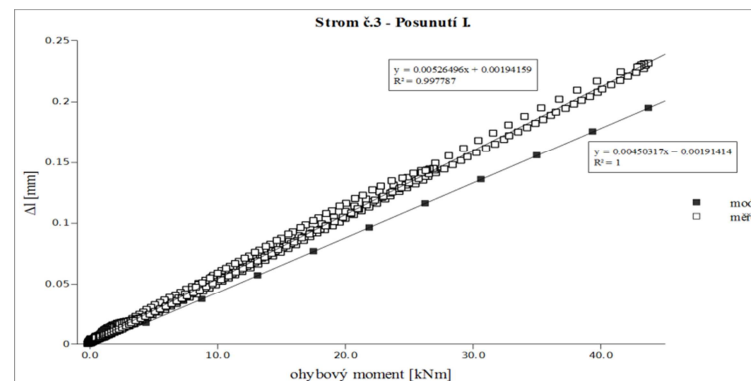
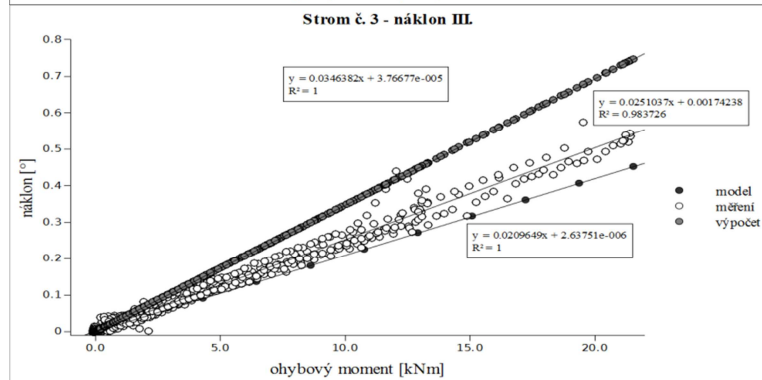
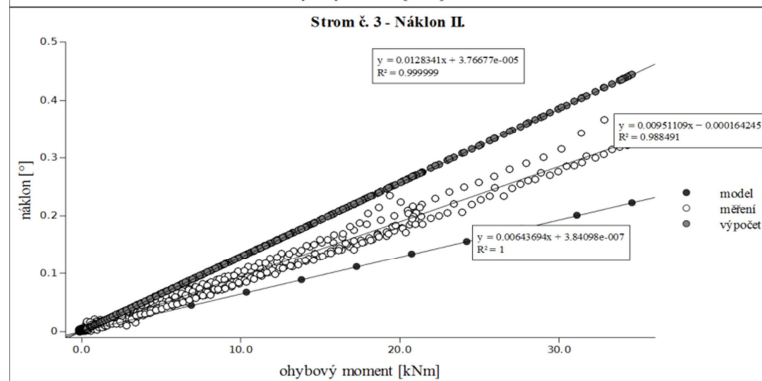
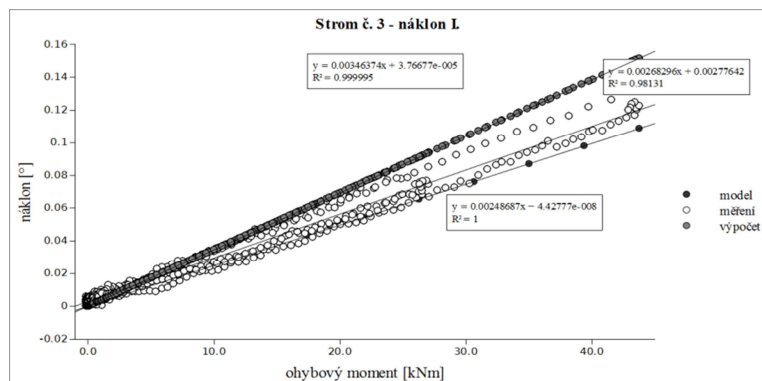
Příloha č. 7
 Porovnání
 výsledných směrníc
 numerického řešení,
 analytického výpočtu
 a měření

STROM Č. 2 – QUERCUS PALUSTRIS, MUENCHH.



Příloha č. 7
 Porovnání
 výsledných směrnic
 numerického řešení,
 analytického výpočtu
 a měření

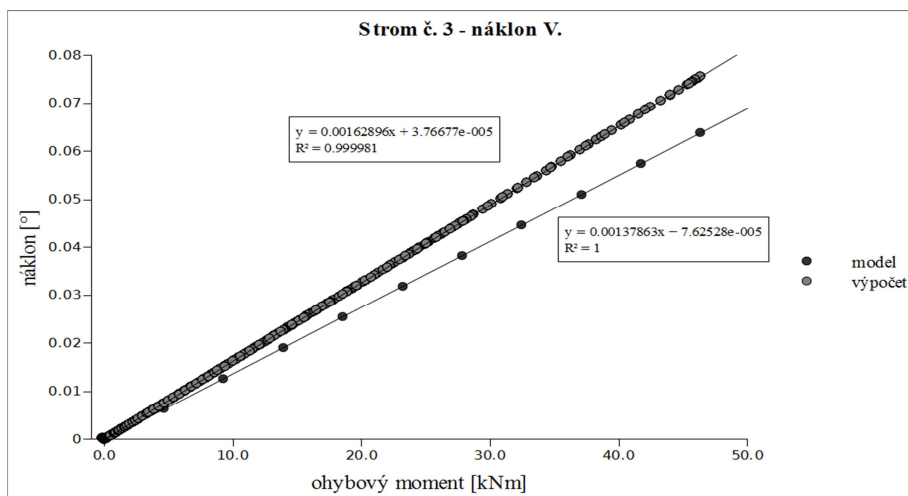
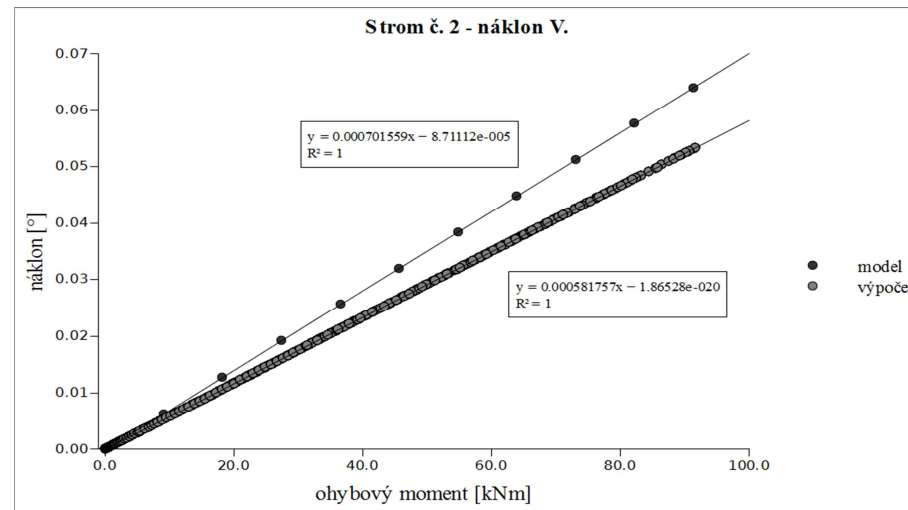
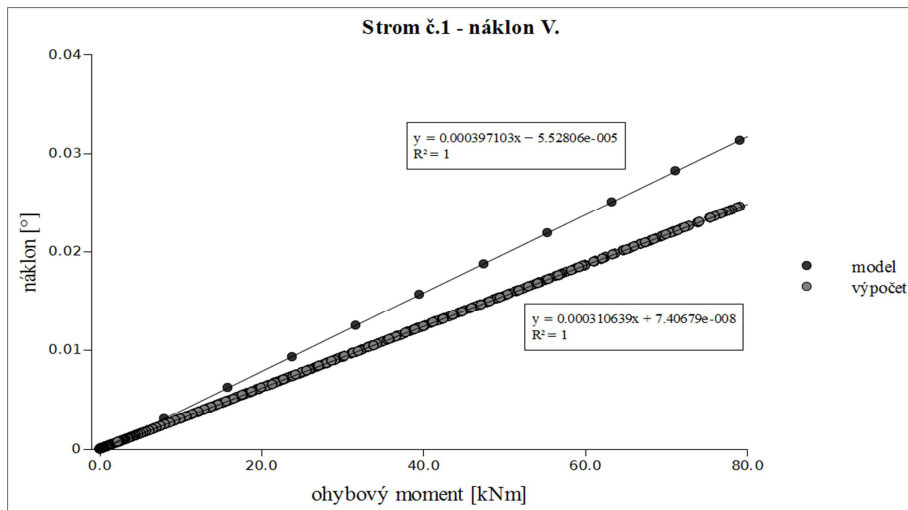
STROM Č. 3 – QUERCUS PALUSTRIS, MUENCHH.



Příloha č. 7

Porovnání
 výsledných směrnic
 numerického řešení,
 analytického výpočtu
 a měření

NÁKLON KOŘENOVÉHO BALU – 15.

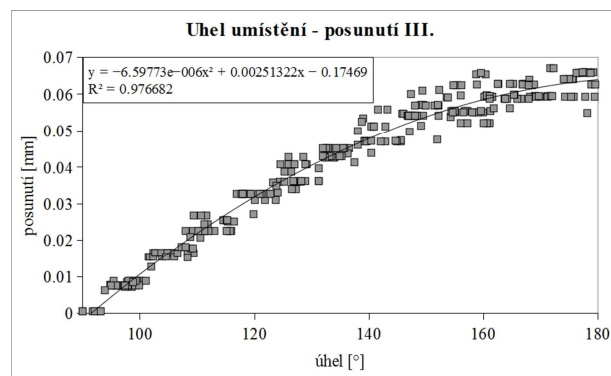
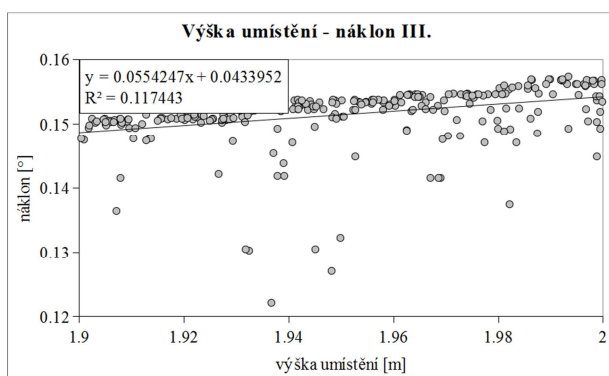
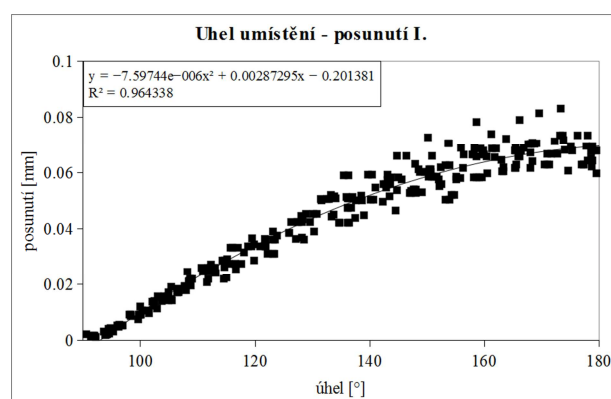
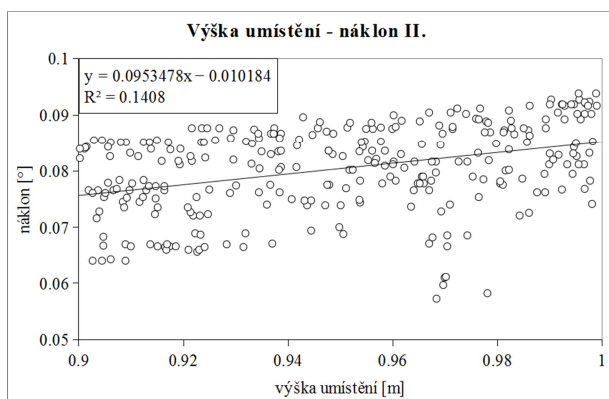
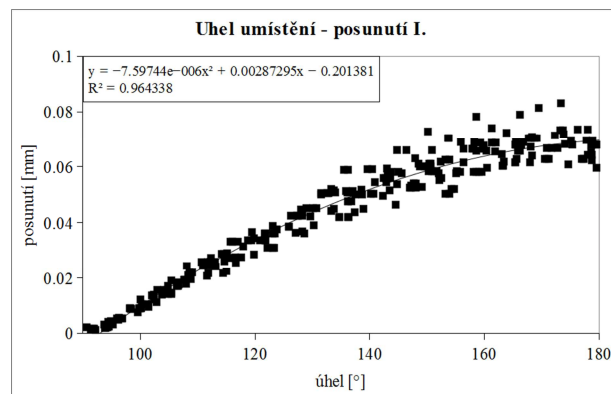
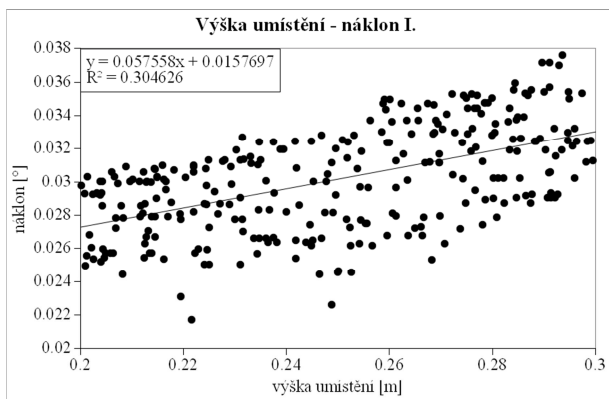


Příloha č. 7

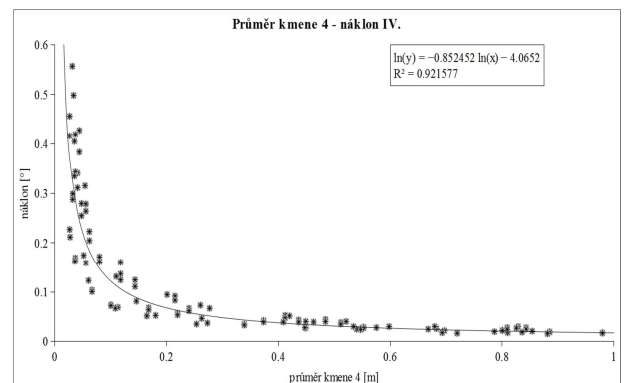
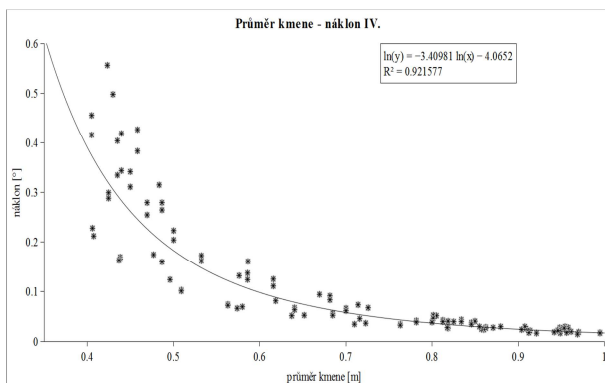
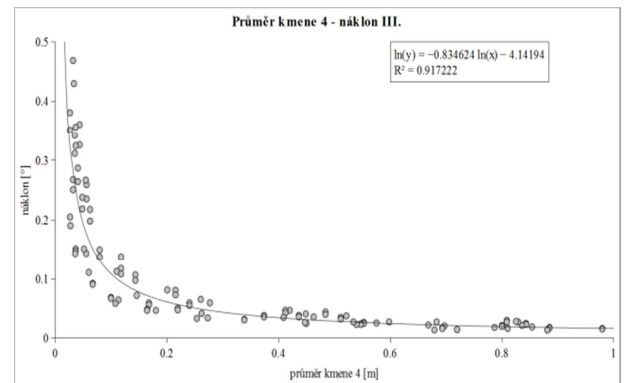
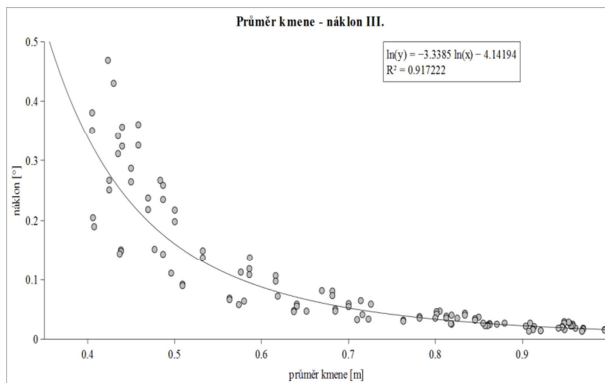
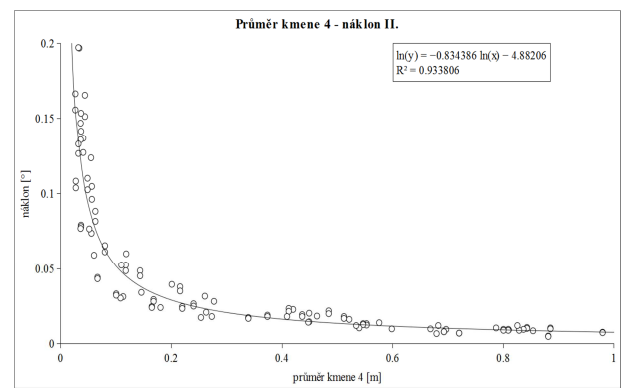
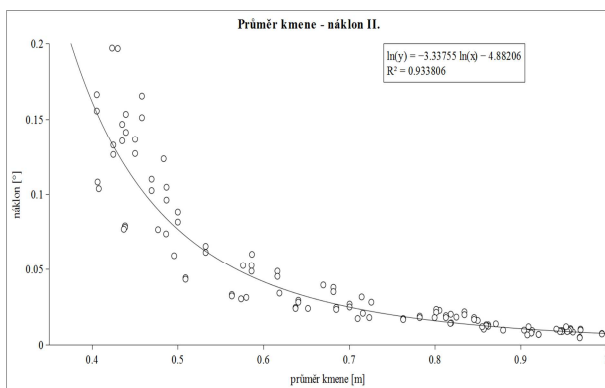
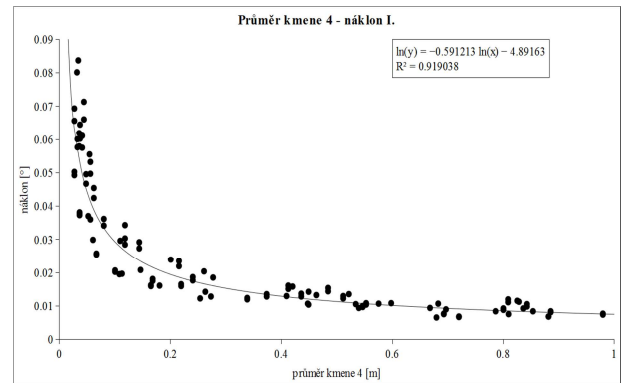
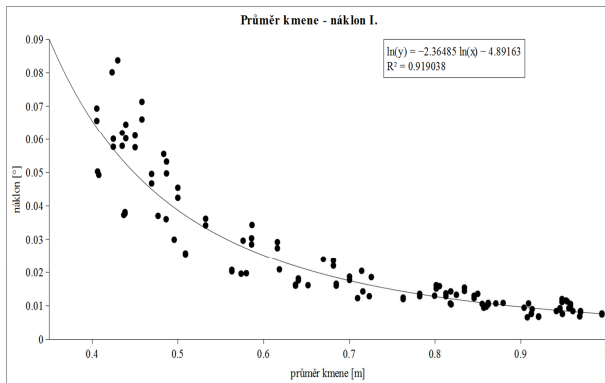
Porovnání
výsledných směrníc
numerického řešení,
analytického výpočtu
a měření

PŘÍLOHA Č. 8 ZOBRAZENÍ VÝZNAMNÝCH KORELACÍ MEZI VSTUPNÍMI A VÝSTUPNÍMI PARAMETRY

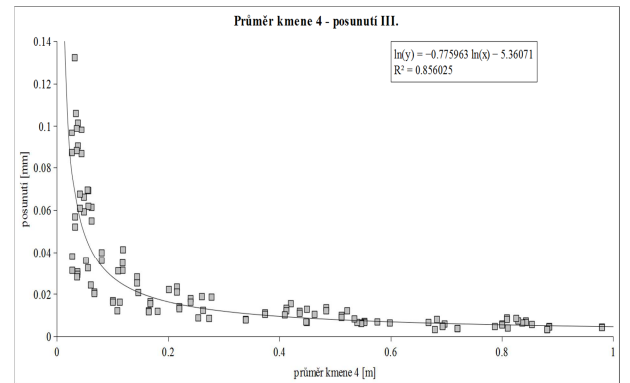
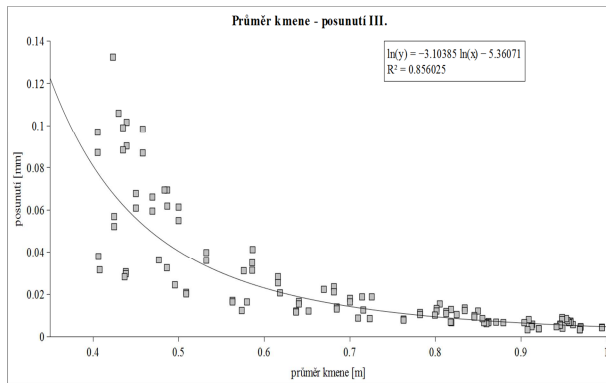
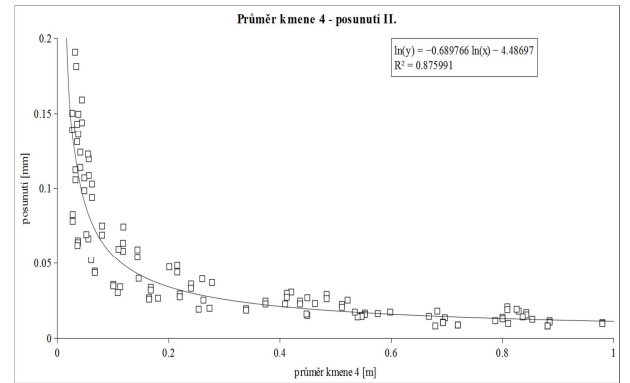
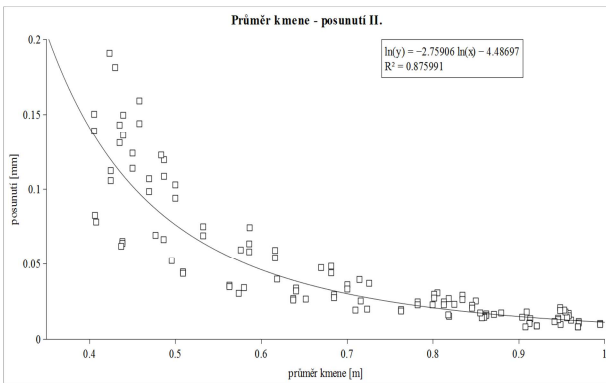
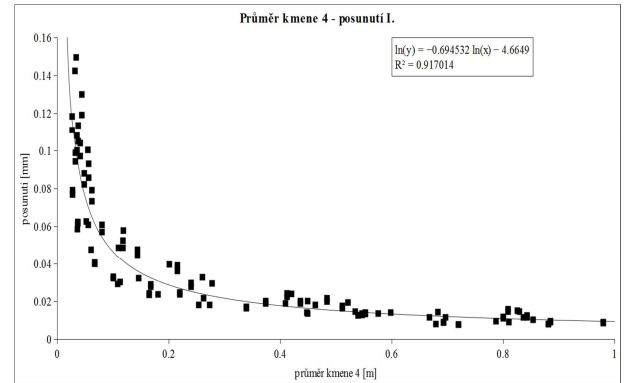
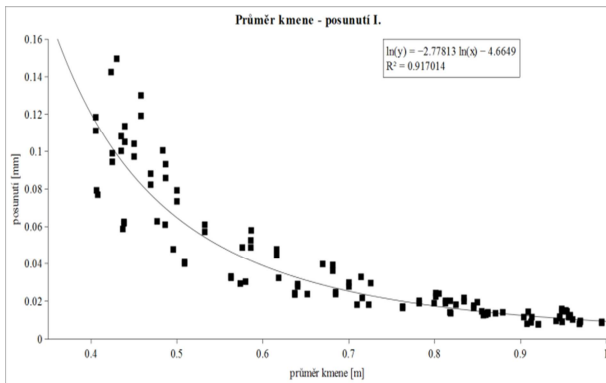
I. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA – ZJIŠTĚNÍ VLIVU POLOHY PŘÍSTROJŮ



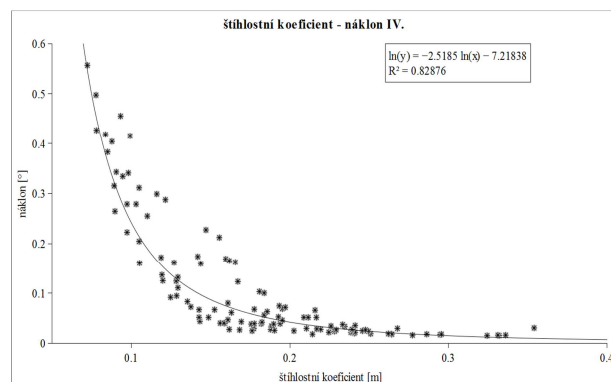
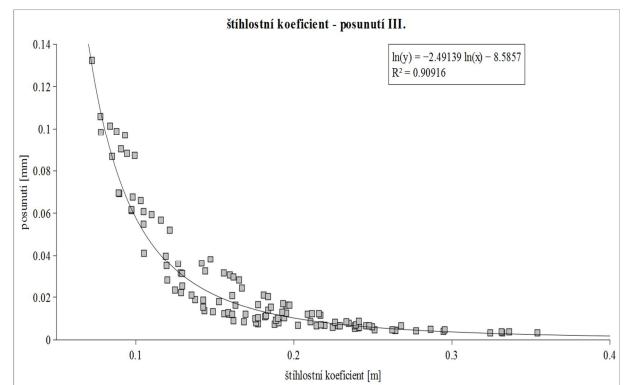
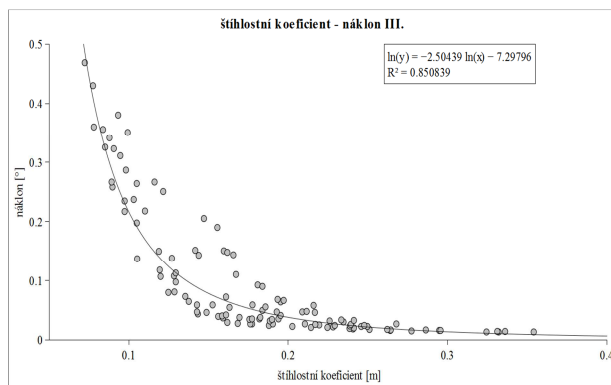
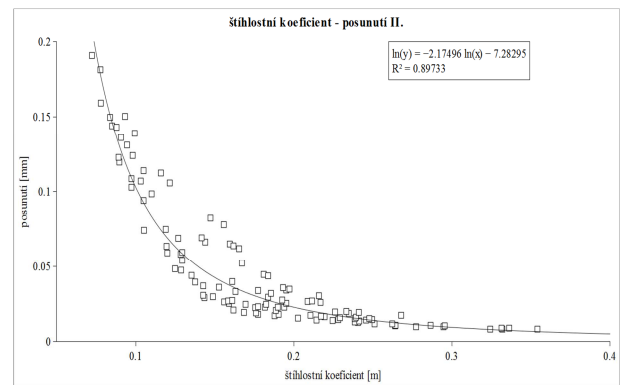
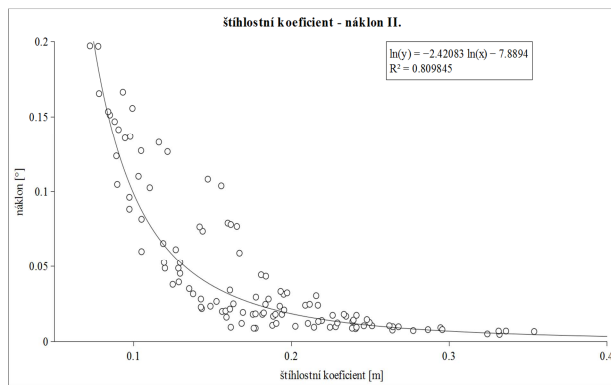
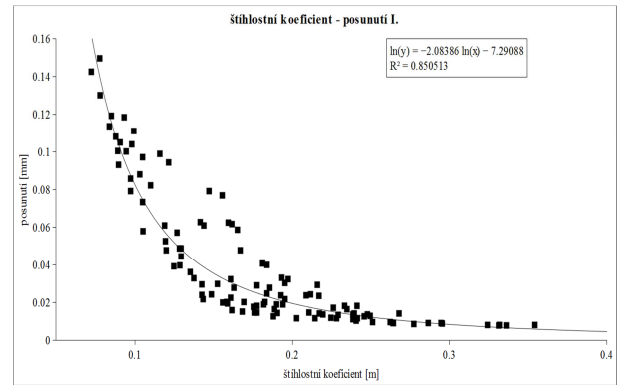
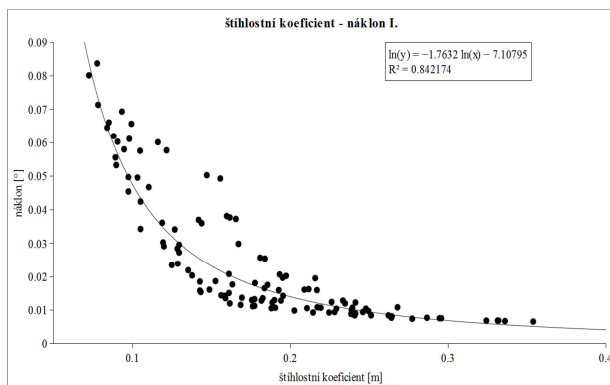
II. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA – ZJIŠTĚNÍ VLIVU PARAMETRŮ KMENE – PRŮMĚR KMENE



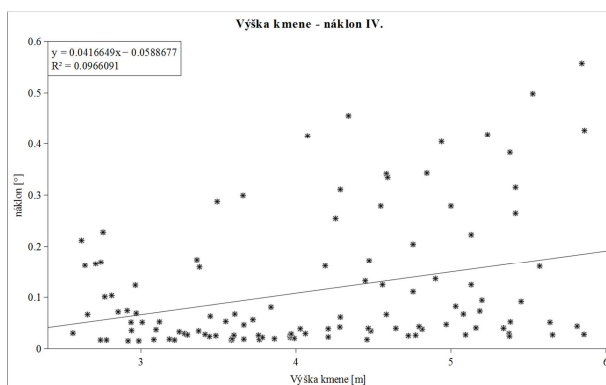
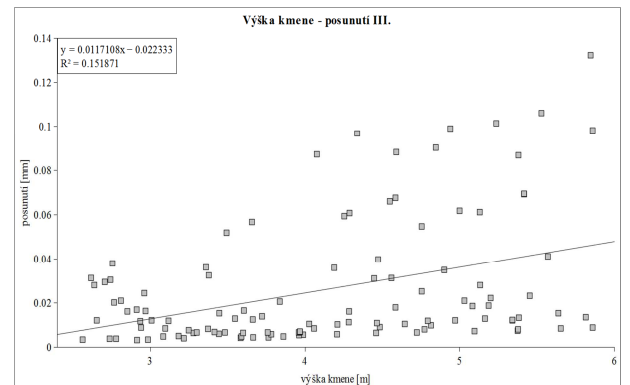
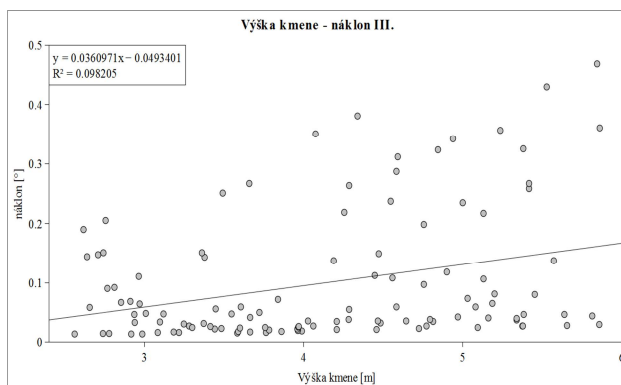
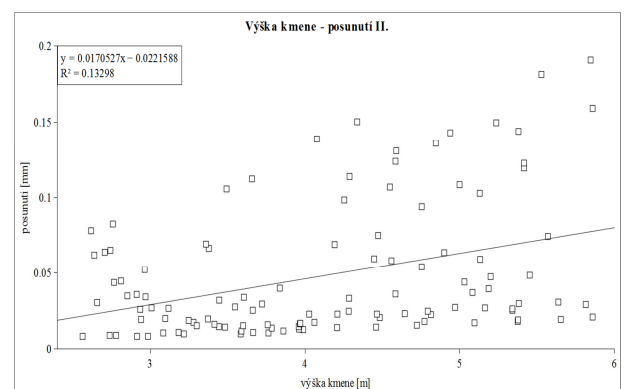
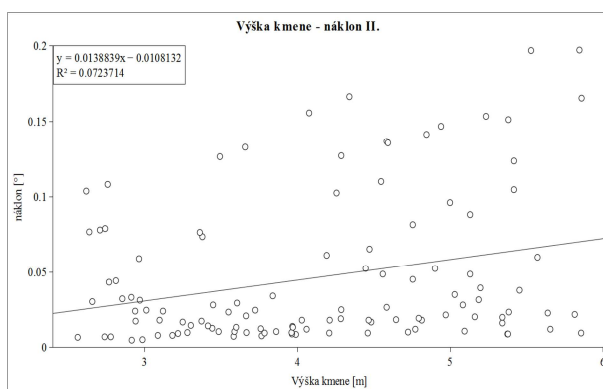
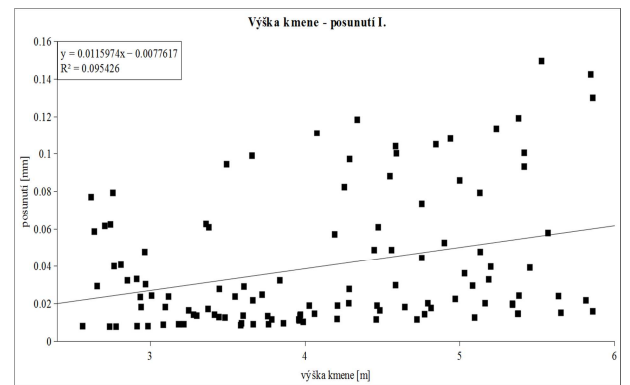
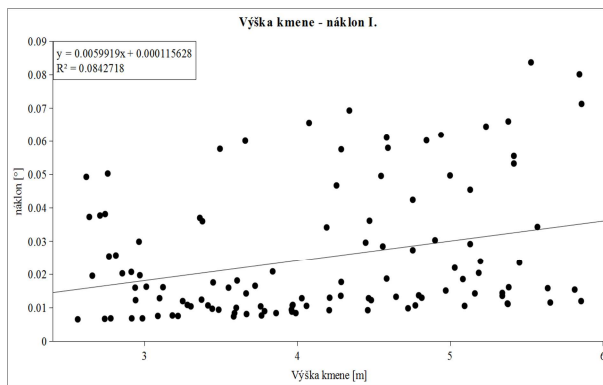
II. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA – ZJIŠTĚNÍ VLIVU PARAMETRŮ KMENE – PRŮMĚR KMENE



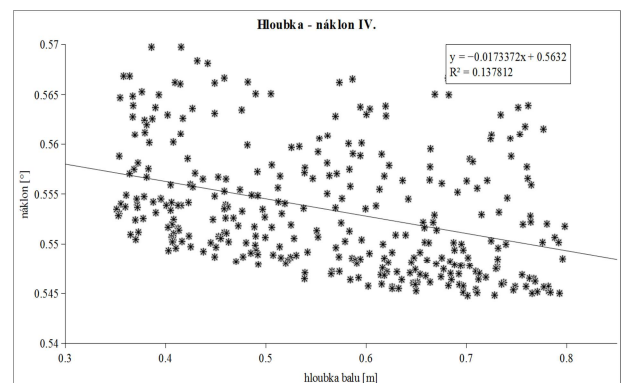
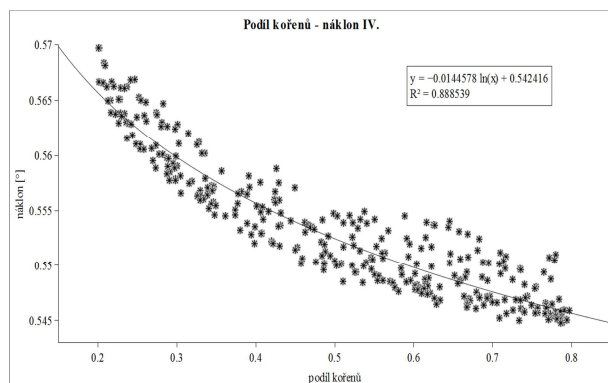
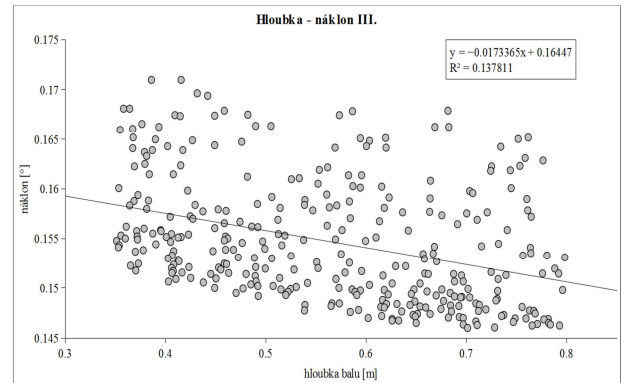
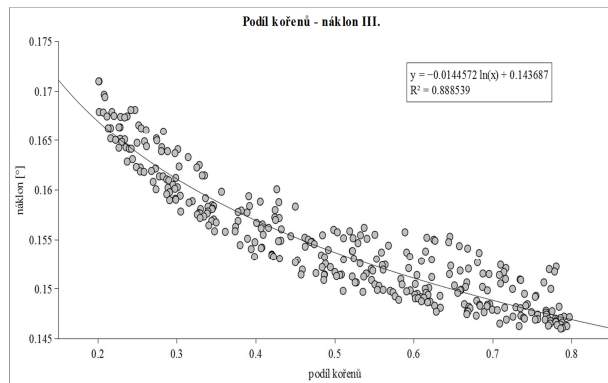
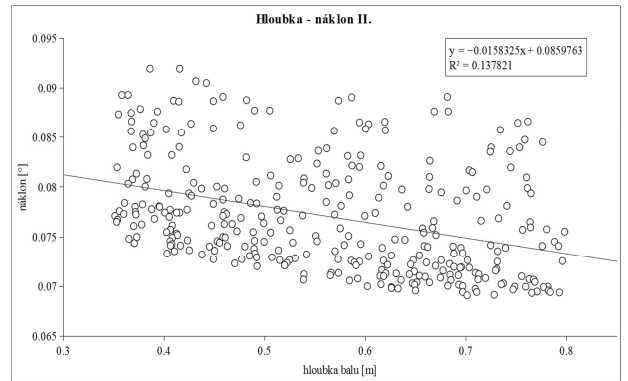
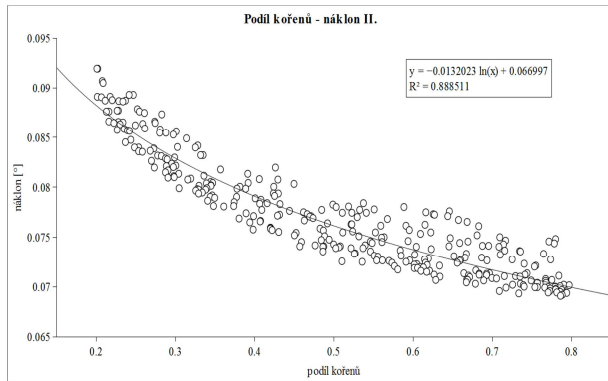
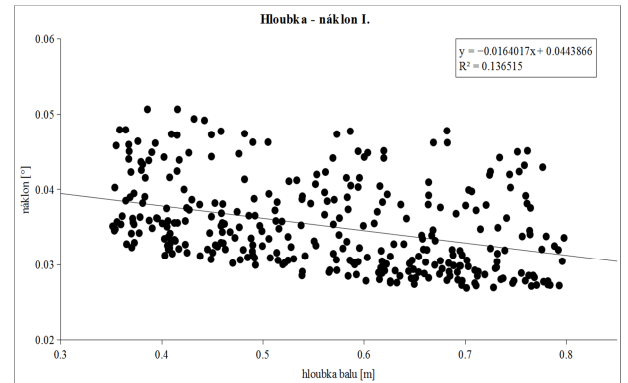
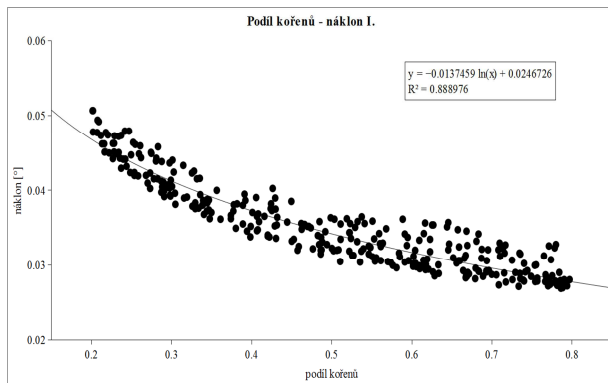
II. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA – ZJIŠTĚNÍ VLIVU PARAMETRŮ KMENE – ŠTÍHLOSTNÍ K.



II. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA – ZJIŠTĚNÍ VLIVU PARAMETRŮ KMENE - VÝŠKA



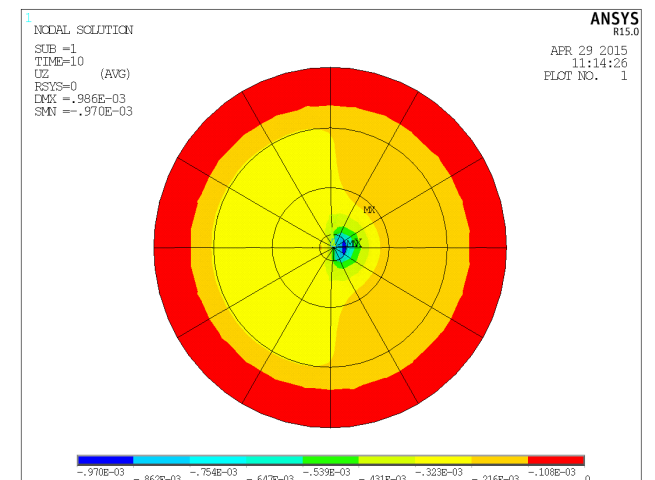
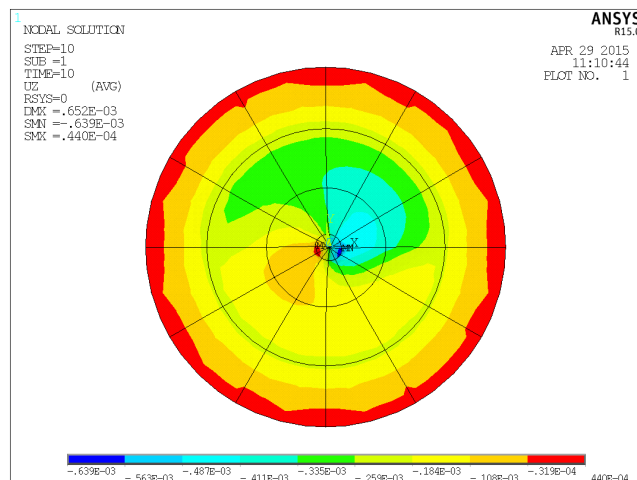
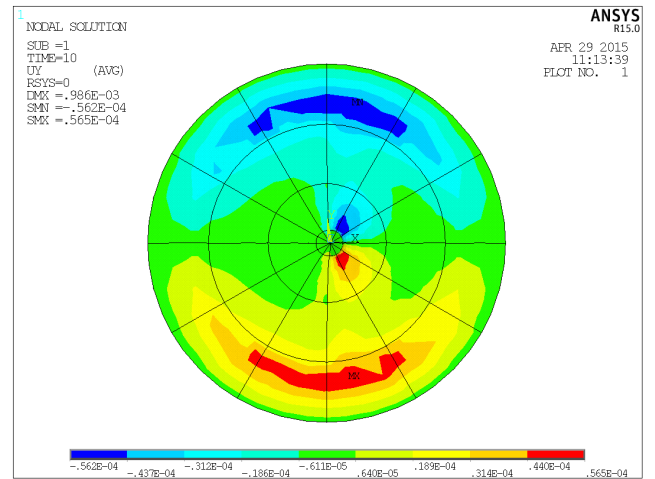
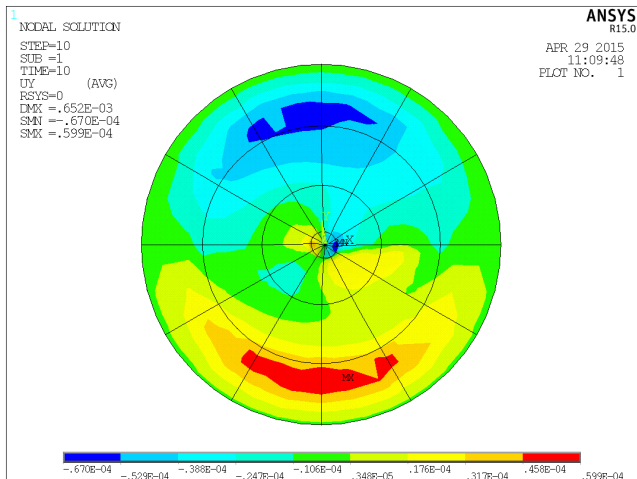
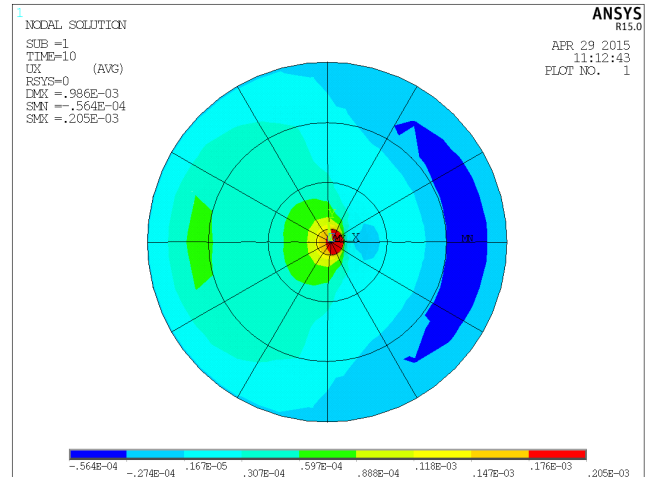
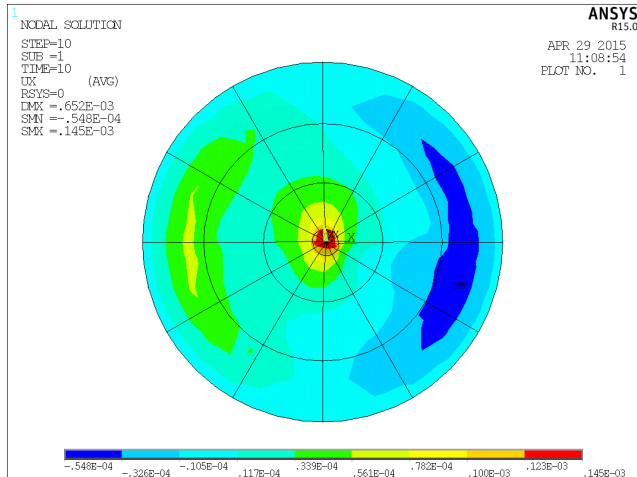
III. CITLIVOSTNÍ ANALÝZA – ZJIŠTĚNÍ VLIVU PARAMETRŮ A VLASTNOSTÍ KOŘENOVÉHO BALU



PŘÍLOHA Č. 9 GRAFICKÉ VÝSTUPY POŠKOZENÍ KOŘENOVÉHO SYSTÉMU

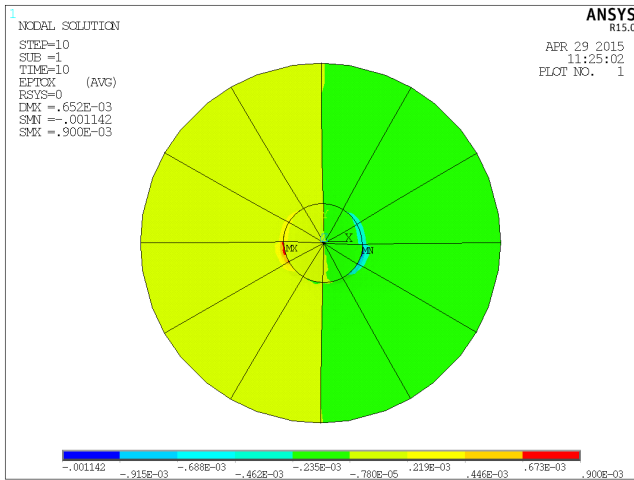
Postranní poškození kořenového systému („ve směru“),
pohled svrchu na kořenový bal.
Uzlová řešení posunutí ve směru - x,y,z

Poškození na tlakové straně kořenového systému
(„kolmo“), pohled svrchu na kořenový bal.
Uzlová řešení posunutí ve směru - x,y,z



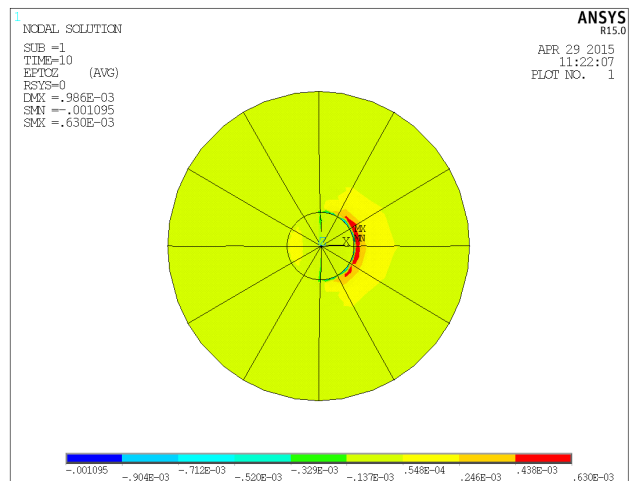
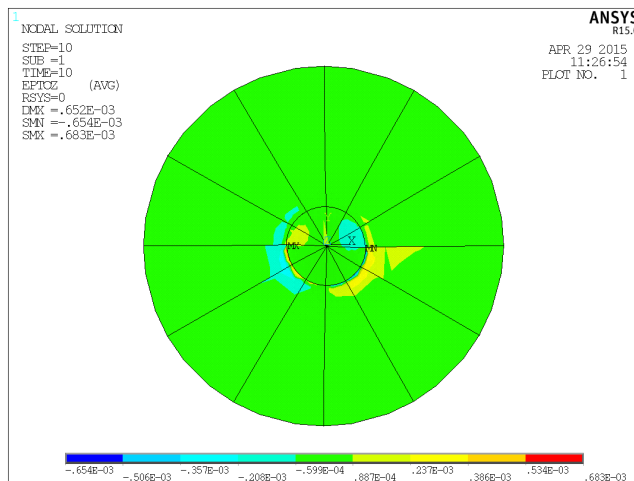
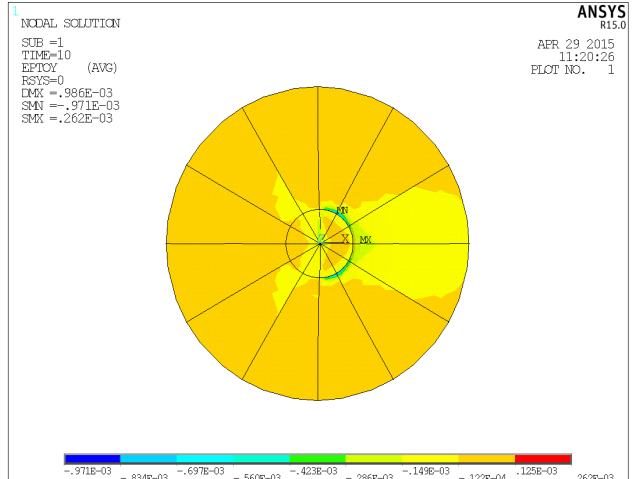
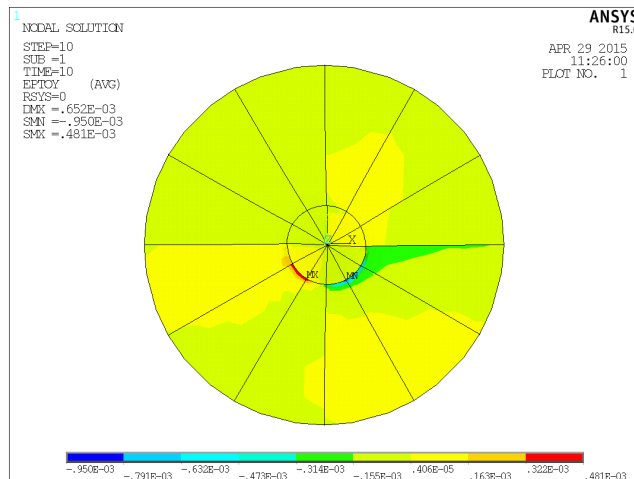
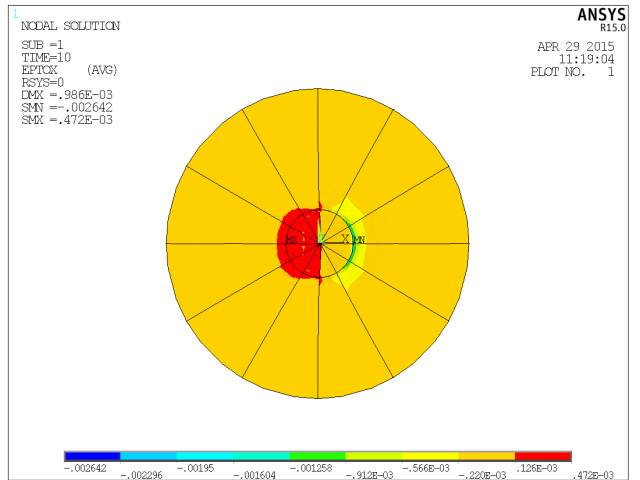
Postranní poškození kořenového systému („ve směru“), pohled svrchu na první a druhou vrstvu kořenového balu.

Poměrná deformace ve směru - x,y,z



Poškození na tlakové straně kořenového systému („kolmo“), pohled svrchu na první a druhou vrstvu kořenového balu.

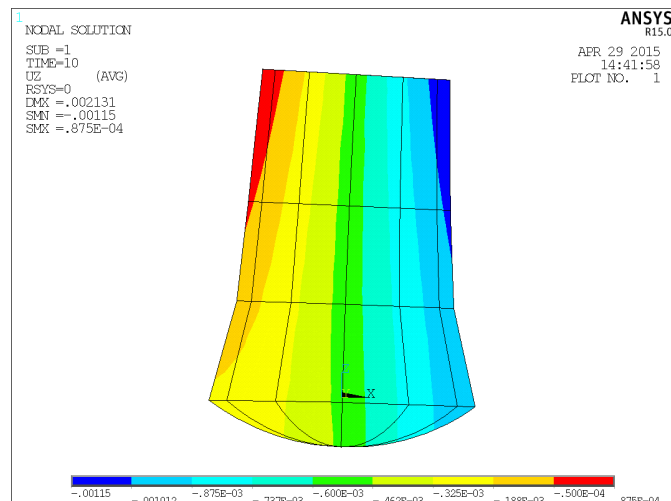
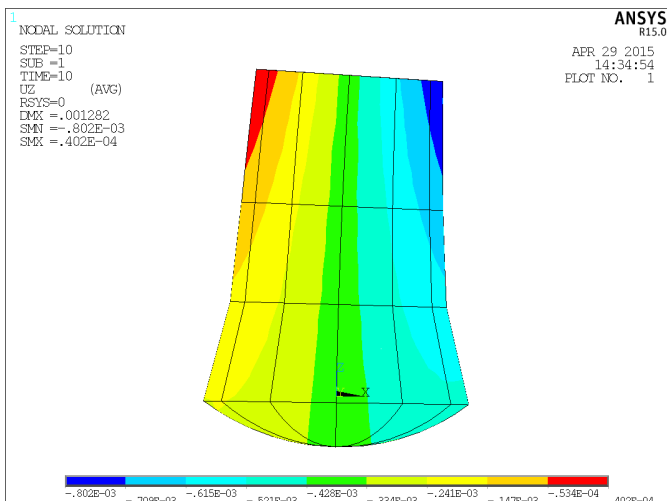
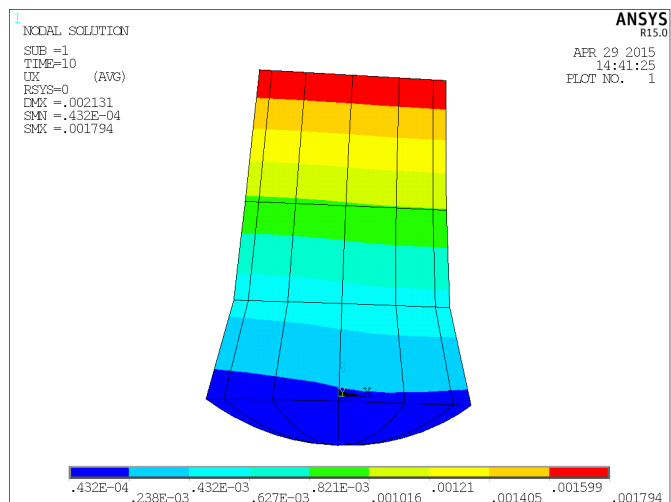
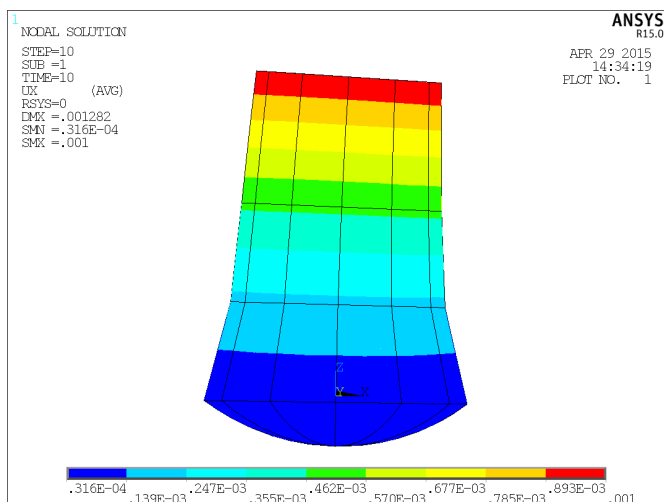
Poměrná deformace ve směru - x,y,z



PŘÍLOHA Č. 10 GRAFICKÉ VÝSTUPY POŠKOZENÍ KOŘENOVÉHO SYSTÉMU - KMEN

Bez poškození kořenového systému,
pohled na bázi kmene včetně oddenku.
Uzlová řešení posunutí ve směru - x,z

Poškození na tlakové straně kořenového systému
(„kolmo“), pohled na bázi kmene včetně oddenku.
Uzlová řešení posunutí ve směru - x,z



Bez poškození kořenového systému,
pohled na bázi kmene včetně oddenku.
Poměrná deformace ve směru - x,y,z

Poškození na tlakové straně kořenového systému
(„kolmo“), pohled na bázi kmene včetně oddenku.
Poměrná deformace ve směru - x,y,z

