



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV STAVEBNÍ MECHANIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF STRUCTURAL MECHANICS

STATICKÉ ŘEŠENÍ VODOVODNÍHO POTRUBÍ PŘI BEZVÝKOPOVÉ TECHNOLOGII

STATIC SOLUTION OF WATER PIPES IN TRENCHLESS TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. MARTINA MRÁČKOVÁ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ROMAN GRATZA, Ph.D.

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608T001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav stavební mechaniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. MARTINA MRÁČKOVÁ
Název	Statické řešení vodovodního potrubí při bezvýkopové technologii
Vedoucí diplomové práce	Ing. Roman Gratza, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2012
Datum odevzdání diplomové práce	11. 1. 2013
V Brně dne 31. 3. 2012	

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

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

Podklady a literatura

ATV-DVWK-A 127 Statische Berechnung von Abwasserkanälen und leitungen, 3. Auflage, GFA-Verlag, Hennef: 2000.

Kolář, V., Němec, I., Kanický, V. FEM – Principy a praxe metody konečných prvků. Vydavatelství Computer Press, Praha: 1997.

Mencl, V. Mechanika zemin a skalních hornin. Academia, Praha: 1966.

Theory Reference – ANSYS, release 13.0.

Weiglová, K. Mechanika zemin. Skriptum, CERM, Brno: 2007.

Zásady pro vypracování

Vypracovat přehled možností využití bezvýkopových technologií pro ukládání nového termoplastového potrubí. Analyzovat statické chování termoplastového vodovodního potrubí ukládaného do stávajícího ocelového potrubí (Relining). Jako prostředek pro statické řešení využít programový systém ANSYS. Získané výsledky porovnat s klasickými přístupy.

Předepsané přílohy

.....
Ing. Roman Gratza, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
FAKULTA STAVEBNÍ

POPISNÝ SOUBOR ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Vedoucí práce	Ing. Roman Gratza, Ph.D.
Autor práce	Bc. MARTINA MRÁČKOVÁ
Škola	Vysoké učení technické v Brně
Fakulta	Stavební
Ústav	Ústav stavební mechaniky
Studijní obor	3608T001 Pozemní stavby
Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Název práce	Statické řešení vodovodního potrubí při bezvýkopové technologii
Název práce v anglickém jazyce	Static Solution of Water Pipes in Trenchless Technology
Typ práce	Diplomová práce
Přidělovaný titul	Ing.
Jazyk práce	Čeština
Datový formát elektronické verze	PDF
Anotace práce	V práci je uveden přehled nejpoužívanějších bezvýkopových technologií a možností jejich využití pro ukládání nového termoplastového potrubí. Je analyzováno statické chování termoplastového vodovodního potrubí ukládaného do stávajícího ocelového potrubí pomocí technologie relining. Jako prostředek pro statické řešení potrubí je využit programový systém ANSYS. Získané výsledky jsou porovnány s klasickými přístupy.
Anotace práce v anglickém jazyce	The paper provides an overview of the most widely used trenchless technologies and the possibility of their utilization for laying new thermoplastic pipelines. It analyzes the static behavior of thermoplastic water pipes placed into the existing steel pipes using relining technology. The program system ANSYS is used as a tool for static solution of pipelines. Obtained results are compared with conventional approaches.
Klíčová slova	potrubí, bezvýkopové technologie, termoplasty, MKP modely
Klíčová slova v anglickém jazyce	pipeline, trenchless technologies, thermoplastics, FEM models

Bibliografická citace VŠKP

MRÁČKOVÁ, Martina. *Statické řešení vodovodního potrubí při bezvýkopové technologii*. Brno, 2013. 55s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavební mechaniky. Vedoucí práce Ing. Roman Gratza, Ph.D.

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 11. 1. 2013

.....
Bc. Martina Mráčková

Poděkování:

Chtěla bych poděkovat zaměstnancům firmy AQUA PROCON s.r.o za poskytnutí materiálů ke zpracování, zejména panu Ing. Pavlu Kopečkovi a panu Ing. Romanu Wognitschovi. Také bych ráda poděkovala vedoucímu své práce Ing. Romanu Gratzovi. Ph.D. za všechny poskytnuté rady a vznesené podněty.

Obsah

1	Úvod	1
2	Bezvýkopové technologie	2
2.1	Pluhování	2
2.2	Řízené horizontální vrtání	4
2.3	Relining	6
2.4	Burstlining	8
3	Materiál	11
4	Vybrané úlohy pružnosti	16
4.1	Prostorová úloha	16
4.2	Úloha rovinné deformace	20
4.3	Skořepiny	23
5	Statické řešení vodovodního potrubí	27
5.1	Srovnání modelů	29
5.2	Aplikace rovinné deformace	34
5.2.1	Vliv okrajových podmínek	34
5.3	Prostorový model	40
5.3.1	Zatížení vozidly	40
5.4	Skořepinový model	45
5.4.1	Trubka v trubce	45
6	Závěr	53
7	Použitá literatura a zdroje	54
8	Seznam symbolů	55

1 Úvod

Díky neustálému rozvoji se plasty poměrně rychle staly velice oblíbeným a rozšířeným materiálem snad ve všech odvětvích. Mají velice široké použití, a proto se v poslední době čím dál častěji uplatňují i ve stavebnictví. Především pro termoplasty se zde našlo mnoho příležitostí k využití jejich vlastností.

V současné době je aktuální problém poškození stávajících potrubních systémů. Mnoho potrubních rozvodů se nachází na konci své životnosti. Často jsou již v nevyhovujícím až havarijním stavu a vyžadují výměnu části či celého potrubí.

Dnes je již značná část nově budovaných potrubních rozvodů z nejrůznějších plastů, které nahradily dříve běžně používané materiály. Proto není divu, že se plasty začaly využívat i při rekonstrukcích stávajících potrubí. Neustálý pokrok vědy a techniky s sebou přináší stále efektivnější technologické postupy, které se vztahují i na sanace potrubních systémů a využívají přitom jedinečných vlastností termoplastů. Tyto nové technologie se rychle rozvíjejí. Představují totiž snadný způsob sanace, ale také nové pokládky potrubí. Jejich velkou výhodou je pak rychlé provádění v porovnání s klasickými výkopovými metodami. Díky příznivé ceně, za předpokladu nasazení ve vhodných podmínkách, jsou bezvýkopové technologie stále oblíbenější.

Pro návrh těchto konstrukcí však nejsou k dispozici opory v legislativě. Často se v praxi postupuje pouze na základě inženýrského odhadu a přesnější statické působení není známé. I přes mnoho výhod mají termoplasty svá úskalí a omezení, kterých si musí být zkušený projektant vědom při jejich návrhu. Zejména jsou to změny jejich vlastností v čase.

V praxi se často plastová potrubí při použití bezvýkopových technologií nijak zvlášť nenavrhuje. Postupuje se pouze na základě inženýrského odhadu. Na toto téma není zpracováno mnoho studií. Proto jsem se pokusila o přiblížení této problematiky a naznačení statického působení a chování potrubí v různých situacích. V teoretické části se práce zabývá obecně bezvýkopovými metodami, používaným materiálem a různými úrovněmi zjednodušení a popisem daného problému. V praktické části je pozornost věnována řešení části reálného projektu.

2 Bezvýkopové technologie

Bezvýkopové technologie pro ukládání termoplastového potrubí se mohou využívat jak k pokládce nového potrubí, tak i k rekonstrukci stávajících vodovodních, kanalizačních či plynovodních systémů. Oproti klasickým výkopovým metodám užívaným pro pokládku potrubí nevyžadují provedení výkopových prací po celé délce pokládaného potrubí. Z toho plynou některé jejich výhody, jako je například podstatně rychlejší realizace, minimální omezení dopravy a při použití ve vhodných podmínkách také nižší cena. Používaný materiál má dlouhou životnost a osvědčené vlastnosti [16], [17], [19], [20]. Mezi nevýhody naopak patří nutnost použití speciálního strojního zařízení, které není tolik rozšířené jako stroje užívané u běžné pokládky, ale dá se zapůjčit u specializovaných firem. Některé technologie lze provádět jen za příznivých teplot. V chladném prostředí totiž používané termoplastové potrubí ztrácí pružnost, která je při instalaci zásadní vlastností.

Dále jsou uvedeny čtyři bezvýkopové technologie, které se pro ukládání termoplastového potrubí využívají nejčastěji, a to pluhování, řízené horizontální vrtání, relining a burstlining. Existují však i další. Podrobnější informace a názorné ukázky lze najít třeba na internetových stránkách výrobců potrubí a specializovaných firem [15], [16], [18].

2.1 Pluhování

Pluhování slouží k pokládce nových kabelových systémů a potrubí vedoucí přes nepevněné plochy. Spočívá v zaorání potrubí do země.



Obr. 2.1 Základní strojní sestava pro pluhování [15]

Strojní sestava se skládá z výkonného tahače, zaorávacího pluhu a někdy může být doplněna i o logistickou jednotku. Tahač je vybaven lžicí, která slouží k zapření stroje o terén, a silným navijákem, který přitahuje zaorávací pluh. Ten je vybaven vyměnitelnou radlicí, do které jsou zavlečeny pokládané kabely či potrubí. Existuje několik druhů radlic s různým tvarem i velikostí. Logistická jednotka se používá při pokládce více kabelů zároveň. Slouží k přepravě velkých svitků, ze kterých se kabely průběžně odmotávají. Pomocí této technologie je možné ukládat až 40 svazků kabelů zároveň a potrubí až do průměru 600 mm. Společně s tím lze v jednom kroku pokládat také chráničky a výstražné pásy. Pokládka je možná až do hloubky 2,25 m pod terén [15]. Provádění je velice rychlé. Po zarytí kabelů zbyde jen jedna brázda, která se posléze přejede válcem, čímž se zarovná a je téměř neznatelná.



Obr. 2.2 Pluhování [15]

Po projetí pluhu se brázda sama volně zasype okolní zeminou. Vrchní vrstva zeminy se částečně zhutní tím, jak po ní projede válec. Nižší vrstvy v místě projetí radlice však zůstanou měkčí než okolní rostlá zemina. Po čase tato oblast částečně ulehne vlivem klimatických podmínek.

Výhody pluhování:

- až 20x rychlejší než bagr s klasickým výkopem [15],
- možnost použití i v náročném terénu,
- redukování šířky pracovního pásu a tím i škod na zemědělských plodinách,
- pokládka více systémů v jednom pracovním kroku,
- není potřeba zapískování,
- není nutná žádná manipulace se zeminou,
- flexibilní a šetrné k životnímu prostředí,
- nižší spotřeba paliva,
- snížení rizika krádeží, především u elektrického kabelu (žádný otevřený výkop),
- finanční úspora až 40 % [15] (v ideálních podmínkách).

Nevýhody pluhování:

- nemožnost použití v městské zástavbě nebo na zpevněných plochách,
- omezená hloubka pokládky,
- lze použít jen pro menší až střední průměr potrubí.

2.2 Řízené horizontální vrtání

Slouží k pokládce nového tlakového a gravitačního termoplastového potrubí. Je vhodné pro různé typy trubního vedení s širokým rozsahem použití, včetně protlaků pod parky, vodními toky, silnicemi a železnicemi. Navrtnou trasou se protahuje nové potrubí [16], [18].



Obr. 2.3 Vrtné zařízení se sadou tyčí [17]

Strojní sestavu tvoří vrtné zařízení se sadou nastavitelných tyčí. Nejprve se navrtá dráha budoucího potrubí. Jeho polohu je možné přesně vytyčit, protože při vrtání lze řídit směr i hloubku. Na konci úseku se vrt vyvede na povrch a na tyče se osadí speciální vrtná hlava. Pokládání potrubí se provádí z jednotlivých dílů na požadovanou délku a poté se upevní za vrtnou hlavu. Vrtné zařízení spustí opačný chod a potrubí se začne zatahovat do předvrtané dráhy. Přitom vrtná hlava rotačním pohybem zvětšuje velikost otvoru na požadovanou velikost potrubí. Pro usnadnění vrtání a současné vtahování potrubí je do hlavy přivedena voda nebo bentonitová suspenze, která z hlavy proudí pod vysokým tlakem do okolí, čímž uvolňuje zeminu i kameny a vypuzuje vrtnou drť z vrtného otvoru.



Obr. 2.4 Vrtná hlava se zaháknutým vtahovaným potrubím [17]

Při vrtání se vyplavuje zemina a kameny z profilu potrubí a jeho blízkého okolí. Nadloží a okolní vrstvy zeminy však zůstávají nedotčeny.

Výhody řízeného horizontálního vrtání:

- lze použít i v městské zástavbě při minimálním omezení dopravy,
- vhodné pro instalaci potrubí umístěného v nepřístupných místech - například pod vodními toky,
- vstupní šachty jsou pouze na začátku a na konci potrubí,
- použitelné pro mnoho typů trubních rozvodů,
- široký sortiment dimenzí potrubí.

Nevýhody řízeného horizontálního vrtání:

- při použití v tuhých až skalních horninách značně rostou náklady
- v náročných podmínkách se zvyšuje cena a tím klesá ekonomičnost.

2.3 Relining

Tato metoda je vhodná pro renovaci vodovodních a plynovodních potrubí stejně jako tlakových a gravitačních kanalizací. Do stávajícího poškozeného potrubí se vtáhne nové potrubí s menším průměrem. Vnější průměr nového potrubí může být jen o málo menší než stávající vnitřní průměr (např. 1 cm) a díky nízkému odporu materiálu při proudění může být kapacita nového potrubí dokonce vyšší než původní. Průměr ale také může být značně menší a kapacita pak bude výrazně redukována. Záleží na požadavku investora [16], [18].



Obr. 2.5 Strojní sestava pro relining [17]

Po vykopání dvou vstupních šachet a odhalení renovovaného potrubí se do daného úseku vyšle sonda, která prozkoumá, v jakém stavu je stávající potrubí. Dále se potrubí vyčistí a zarovná se případné ostré hrany vzniklé korozi nebo jiným opotřebením potrubí, které by mohly poškodit instalované nové trubky. Tyto úkony lze provádět speciálními přístroji ovládanými na dálku a není proto nutné do potrubí vstupovat. Poté se jednou vstupní šachtou do potrubí vsunují tyče, které se na sebe vzájemně napojují. Takto se tyče protáhnou až do druhé vstupní šachty. Zatahované termoplastové potrubí se svaří na požadovanou délku. Vzájemná vzdálenost šachet může být řádově ve stovkách metrů a díky pružnosti plastového potrubí mohou být úseky i zakřivené. Na jednom konci se provede speciální úprava čela potrubí tak, aby se dalo zaháknout za provlečené tyče. Zároveň se mírně zmenší jeho průměr kvůli snadnějšímu zatahování. To je vidět na obr. 2.6. Na stávající potrubí se osadí rám (viz obr. 2.7), který slouží pro snadnější zatahování

nového potrubí a zároveň zajišťuje jeho polohu. Je opatřený válečky, aby bylo sníženo riziko poškození plastového potrubí a odpor při vtahování. Po protažení začátku potrubí zpět do první vstupní jámy se zatahovací hlava odřízne, takže zůstane hladké čelo, které se připojí k dalšímu kladenému úseku. Odříznutá hlava se může přivařit k dalšímu připravenému vtahovanému úseku a opakovaně použít.



Obr. 2.6 Svařené termoplastové potrubí s hlavou upravenou pro zatahování [17]

Okolní zemina zůstává nedotčena a provádění technologie na ni nemá žádný vliv. Může však nastat několik možných zatěžovacích stavů potrubí v závislosti na stavu původního potrubí, např.:

- a) původní potrubí přenáší zatížení od okolní zeminy a od zatížení na terénu, nové plastové potrubí tedy není zvenčí zatíženo, brání však vnitřnímu přetlaku v potrubí;
- b) původní potrubí přenáší zatížení od okolní zeminy a od zatížení na terénu, nové potrubí je prázdné, ale vlivem netěsnosti původního potrubí do meziprostoru zatéká podzemní voda, která zatěžuje novou trubku vnějším tlakem;
- c) veškeré zatížení může přenášet nové plastové potrubí (např. ve vstupní šachtě, kde bylo původní potrubí odstraněno).



Obr. 2.7 Vtahování potrubí a zajištění jeho polohy [17]

Výhody reliningu:

- cenově velmi výhodná alternativa pro renovaci předdimenzovaných a nevyužitých tlakových řadů,
- těsné a spolehlivé řešení rekonstrukce potrubí,
- lze použít i v městské zástavbě s minimální nutností kopání a omezení dopravy,
- vstupní šachty jsou pouze na začátku a na konci potrubí,
- použitelné pro mnoho typů trubních rozvodů.

Nevýhody reliningu:

- dimenze potrubí je omezena stávajícím průměrem,
- nutnost přizpůsobit se stávající trase potrubí.

2.4 Burstlining

Tuto technologii je možné využít pro rekonstrukci ocelového nebo kameninového potrubí. Spočívá v roztrhání stávajícího vedení a vtažení potrubí o větším průměru než bylo staré potrubí, čímž je možné zvýšit existující kapacitu [16], [18].

Zařízení pro provádění je stejné jako u reliningu. Postup je také podobný. Potrubím se provléknou tyče a na volný konec se osadí rozbíjecí hlava (obr. 2.8). Poté se tyče mírně zasunou tak, aby se hlava částečně narazila na staré potrubí, ale její konec aby zůstal přístupný ve vstupní šachtě. Na něj se zahákne zatahované potrubí (obr. 2.9) svařené na

požadovanou délku renovovaného úseku. Tyče se pak dále zatahují k druhé vstupní šachtě. Při tom se rozbíjí stávající potrubí a těsně za ním se zatahuje nové plastové (obr. 2.10).



Obr. 2.8 Rozbíjecí hlava [17]

Po protažení rozbíjecí hlavy nelze přesně určit, jak se potrubí poruší. Zda dojde pouze k jeho podélnému rozpůlení, přičemž obě poloviny zůstanou v celku a jsou nadále schopny částečně přenášet zatížení do okolní zeminy, nebo dojde k úplnému roztržení potrubí na malé části, které nejsou schopny spolupůsobit. Nelze ani určit, jak se bude chovat zemina v okolí potrubí. Rozbité části potrubí navíc mohou poškozovat nově zatahované potrubí. Nadloží a zemina ve vzdálenějším okolí však zůstávají nedotčeny.



Obr. 2.9 Osazení plastového potrubí na konec rozbíjecí hlavy [17]



Obr. 2.10 Vtahování nového a rozbité staré potrubí [17]

Výhody burstliningu:

- možnost zvýšení kapacity potrubí bez velké pracnosti,
- lze použít i v městské zástavbě s minimální nutností kopání a omezení dopravy,
- vstupní šachty jsou pouze na začátku a na konci potrubí,
- široký sortiment dimenzí potrubí,
- použitelné pro mnoho typů trubních rozvodů.

Nevýhody burstliningu:

- vyšší nároky na odolnost vnější ochranné vrstvy potrubí, kvůli vyššímu riziku jeho poškození při montáži,
- nejasné statické podmínky po realizaci a nemožnost jakéhokoliv výpočtu či simulace,
- nutnost přizpůsobit se stávající trase potrubí.

3 Materiál

Výroba plastů se ve světě za posledních 15 let zdvojnásobila a i přes současnou krizi stále roste [2]. Mezi významné plasty patří polyolefiny. To jsou plastické hmoty vznikající polymerací olefinů, mezi které patří i ethylen a propylen.

Pro výrobu venkovního vodovodního potrubí se nejčastěji používají polyethyleny. To jsou obecně materiály velice chemicky odolné. Narušují se jen silnými oxidujícími kyselinami. Za normálních teplot se v běžných rozpouštědlech nerozpouštějí, v některých však bobtnají (např. benzin). Běžně odolávají teplotám až $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$, aniž by křehly. Dlouhodobá odolnost (pro nepřetržitě zatížení po dobu 50-ti let) proti vysokým teplotám závisí na typu PE a pohybuje se od $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ po $90\text{ }^{\circ}\text{C}$. Krátkodobá odolnost je podstatně vyšší. Všechny typy polyethylenu jsou velmi citlivé na působení UV záření a pro venkovní použití je nezbytné je stabilizovat. K tomu se nejčastěji používají saze [2].

Spojování PE se nejčastěji provádí svařováním, mohou se však použít i mechanické spojky.

Mezi výhody PE patří:

- vynikající odolnost proti nízkým teplotám (PE trubky se nepoškodí, pokud v nich zmrzne voda),
- jsou zdravotně nezávadné,
- lze je snadno svařovat,
- mají vysokou chemickou odolnost.

Nejběžnější typy polyethylenu jsou:

- nízkohustotní polyethylen PE-LD,
- vysokohustotní polyethylen PE-HD,
- středohustotní polyethylen PE-MD,
- polyethylen s vysokou teplotní odolností PE-RT,
- síťovaný polyethylen PE-X [2].

Vysokohustotní polyethylen PE-HD

Je dnes nejrozšířenějším typem polyethylenu a nejčastěji používaným materiálem pro potrubí na pitnou vodu a plyn. Používá se též pro potrubí na odpadní vodu. Běžně se z něj dělají desky pro výrobu nádrží.

Jeho hustota je obvykle $950 - 960\text{ kg/m}^3$. Dobře snáší nízké teploty, při $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ještě není křehký. Dlouhodobě je odolný vůči teplotám do $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, při vyšších teplotách životnost klesá.

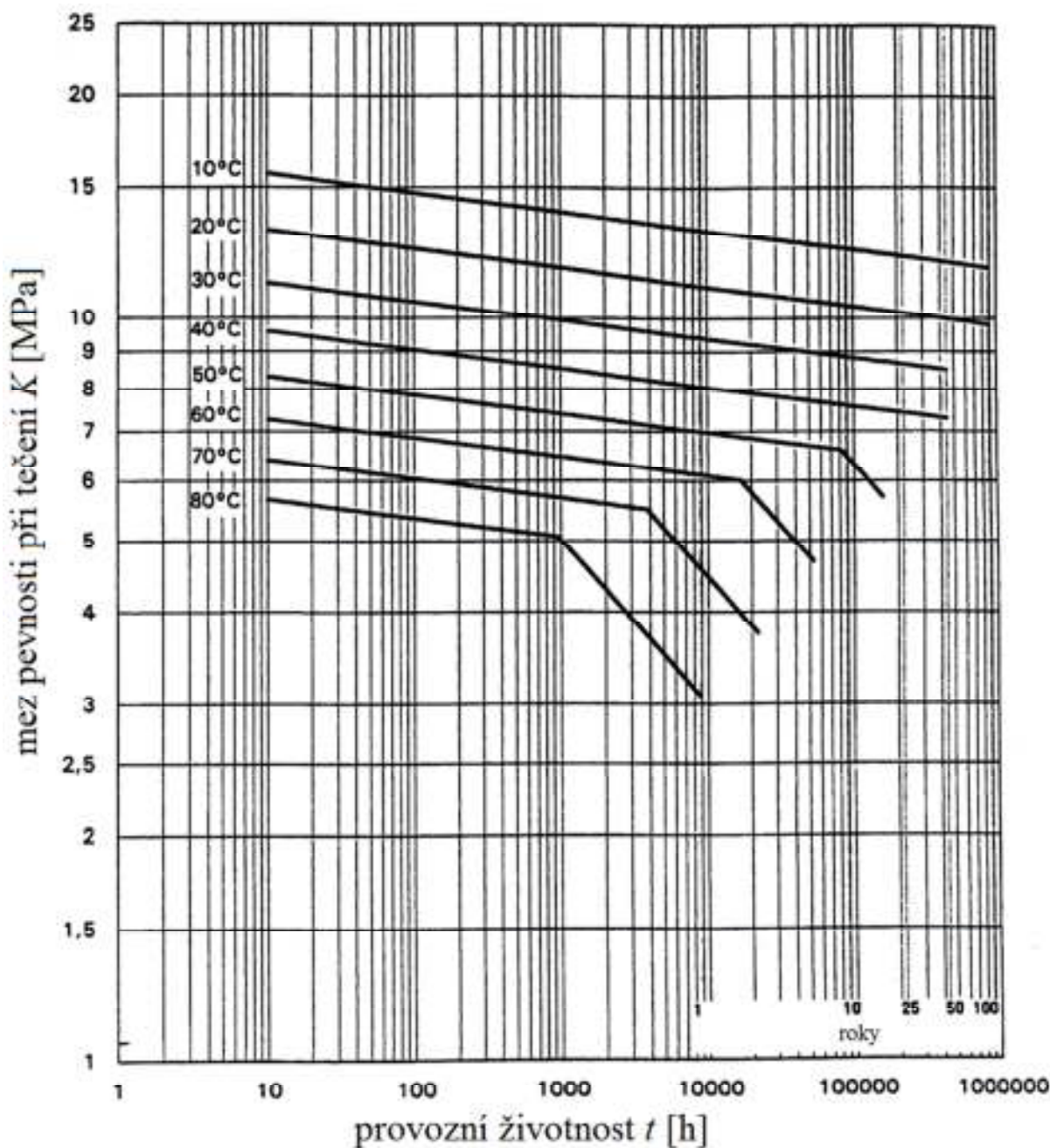
Pro návrh a posouzení konstrukcí nebo potrubí z termoplastů je rozhodujícím parametrem dlouhodobá pevnost. Ta je několikanásobně nižší než pevnost krátkodobá. Charakteristické

hodnoty nutné pro návrh jsou specifikovány v ČSN EN 1778 [10]. Je to dovolené napětí a dovolený modul tečení.

Dovolené napětí se vypočítá z meze pevnosti při tečení K , korekčních faktorů A_1 a A_{2K} , dlouhodobého svařovacího faktoru f_1 a koeficientu bezpečnosti S dle vztahu

$$\sigma_{\text{dov}} = \frac{K f_1}{A_1 A_{2K} S} \quad (3.1)$$

Mez pevnosti při tečení K pro daný materiál, návrhovou životnost a provozní teplotu se získá z křivek životnosti v [10], příloha A.



Obr. 3.1 Křivky životnosti pro trubky z vysokohustotního polyethylenu PE100[10]

Na spodní ose najdeme předpokládanou dobu životnosti a po odpovídající čáře jdeme nahoru, dokud nenarazíme na křivku s požadovanou provozní teplotou. V jejich průsečíku odečteme hodnotu meze pevnosti při tečení na vertikální ose.

Pro řešený příklad zadaný v kapitole 5 jsou vstupní hodnoty pro výpočet dovoleného napětí tyto:

- mez pevnosti při tečení $K = 12 \text{ MPa}$ obr. 3.1
- korekční faktor $A_1 = 1,0$ tab. 1, [10]
- korekční faktor $A_{2K} = 1,0$ tab. A.1, [10]
- dlouhodobý svařovací faktor $f_1 = 0,8$ tab. 2, [10]
- koeficient bezpečnosti $S = 2,0$ tab. 3, [10]

Po dosazení těchto hodnot do vztahu (3.1) vyjde dovolené napětí

$$\sigma_{\text{dov}} = 4,8 \text{ MPa.} \quad (3.2)$$

Pro napětí σ v kterémkoliv místě termoplastového potrubí musí vždy platit

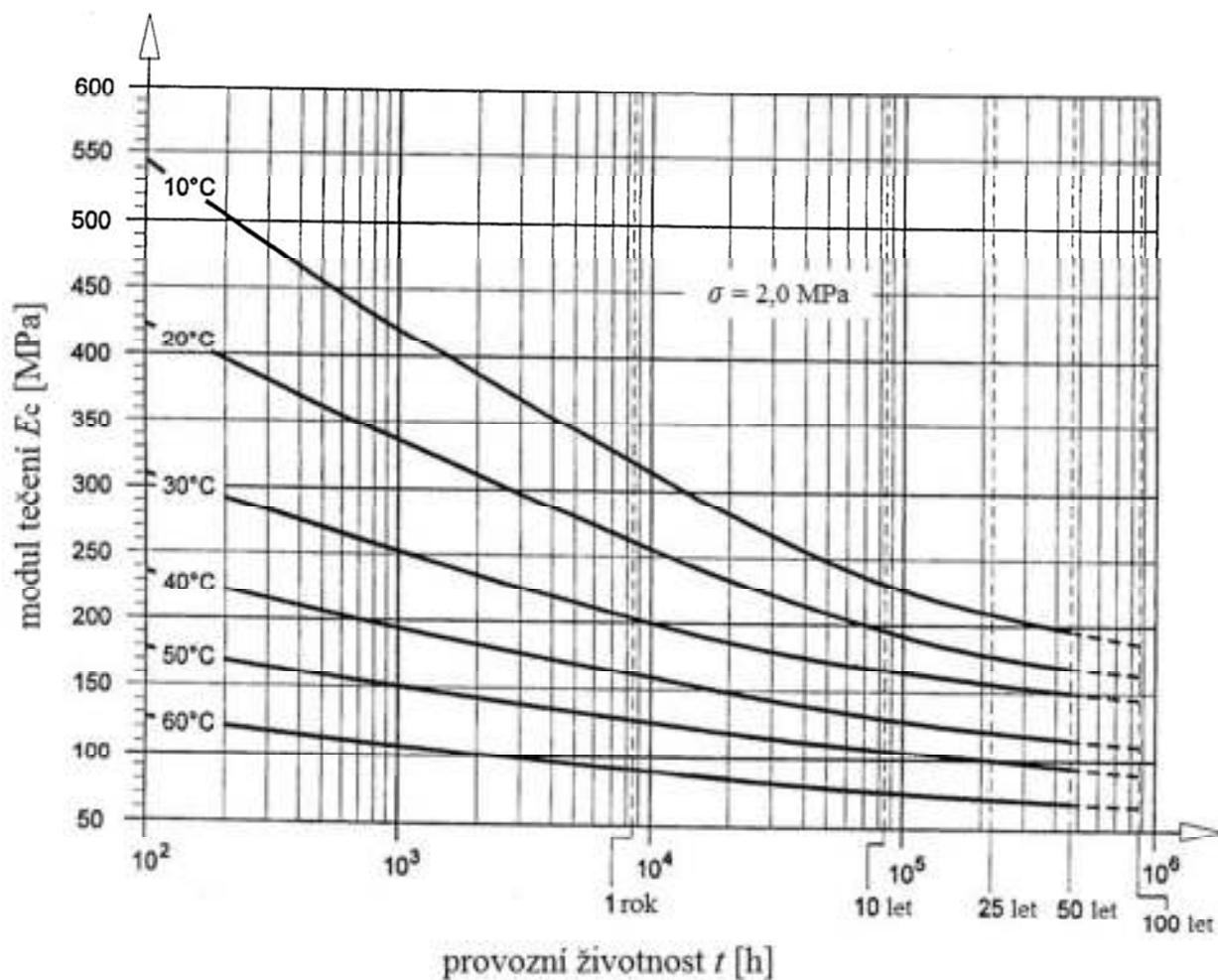
$$\sigma \leq \sigma_{\text{dov}}. \quad (3.3)$$

Místo klasického modulu pružnosti E se u plastů zavádí modul tečení E_C . Ve výpočtech se používá

$$E_{C,\text{dov}} = \frac{E_C}{A_{2E}}. \quad (3.4)$$

Hodnotu E_C lze získat z křivek v [10], příloha A. Zde jsou však uvedeny křivky závislosti modulu tečení na provozní teplotě a napětí pouze pro provozní životnost 1 rok, 10 a 25 let. Pro jiné hodnoty životností je však možné použít grafy některých osvědčených výrobců [17], [19].

Korekční faktor A_{2E} závisí na tom, zda okolní médium způsobuje bobtnání či vyluhování. Pro média nezpůsobující bobtnání ani vyluhování se uvažuje $A_{2E} = 1$. Pro média, která způsobují bobtnání nebo vyluhování (viz [10], A.1.3, poznámka 9) se faktor A_{2E} stanovuje na základě zkoušky.



Obr. 3.2 Moduly tečení vysokohustotního polyethylenu PE100 [19]

Pro danou provozní životnost a teplotu odečteme z grafu na obr. 3.2 modul tečení E_c . Takto zjištěné hodnoty platí, pokud je napětí v materiálu $\sigma = 2,0$ MPa. Pro jinou hodnotu napětí se zjištěný modul tečení přenásobí hodnotou z tab. 3.1.

Tab. 3.1 Násobitele modulu tečení PE100 pro různá napětí [19]

napětí v materiálu σ [MPa]	násobitel
0,5	1,20
1,0	1,08
2,0	1,00
3,0	0,78
4,0	0,70
5,0	0,60

Pro zadaný příklad (kap. 5) je modul tečení

$$E_C = 117 \text{ MPa}, \quad (3.5)$$

při uvažování maximálního přípustného napětí σ_{dov} . Pokud by skutečné napětí v materiálu σ nedosáhlo této meze, mohl by být uvažován modul tečení vyšší. Ovšem hodnota (3.5) směřuje na stranu bezpečnou a pro nižší napětí tak vzniká v materiálu rezerva únosnosti.

S využitím rovnice (3.4) je pak odpovídající dovolený modul tečení

$$E_{C,\text{dov}} = 117 \text{ MPa}. \quad (3.6)$$

Při posuzování stability potrubí musí platit podmínka

$$S \leq \lambda, \quad (3.7)$$

kde S je součinitel spolehlivosti a λ je kritický násobek zatížení. Pro výpočty stability se uvažuje součinitel spolehlivosti

$$S = 2, \quad (3.8)$$

při zatížení za střídavých podmínek (např. teplota, opakované plnění a vyprazdňování) a pokud v případě selhání konstrukce hrozí nebezpečí osobám, objektům nebo prostředí.

4 Vybrané úlohy pružnosti

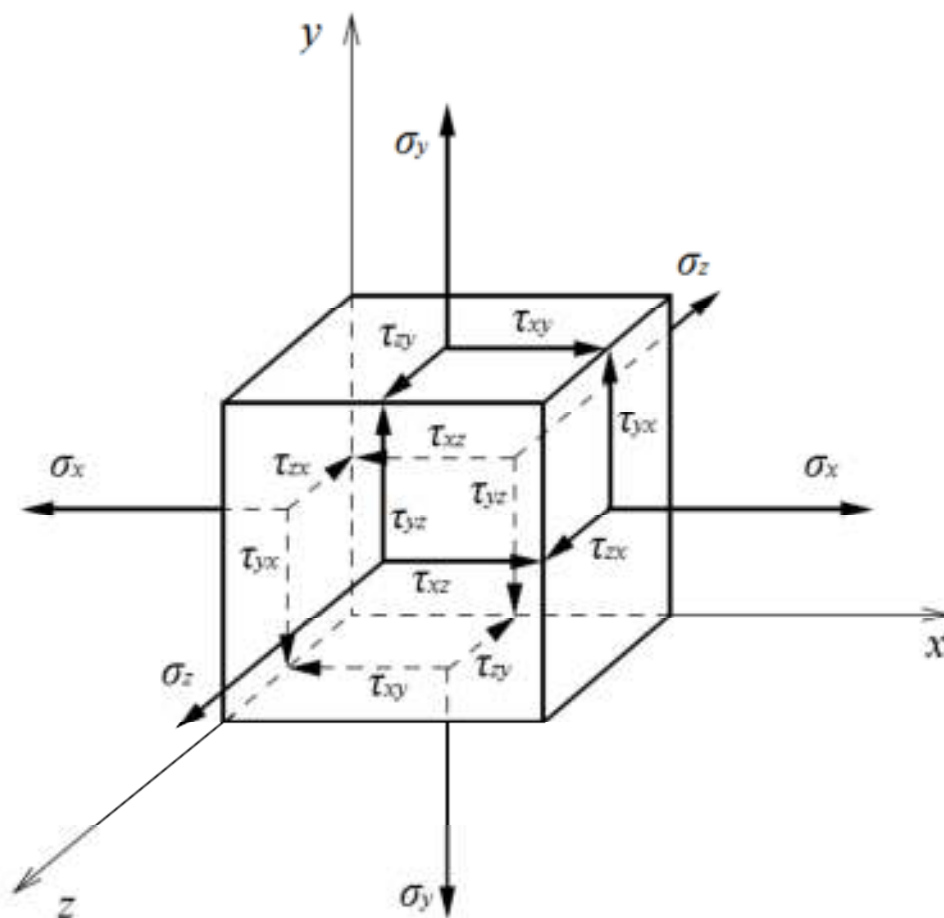
Existuje několik přístupů k statickému řešení potrubí. Na tento problém lze nahlížet dle stupně zjednodušení, např. jako na:

- prutovou úlohu (u příčného řezu potrubí),
- skořepinovou úlohu a to jako
 - tenkou skořepinu nebo
 - tlustou skořepinu,
- úlohu rovinné deformace,
- prostorovou úlohu.

4.1 Prostorová úloha

Zatížení tělesa vnějšími silami v něm vyvolá napětí a způsobí jeho deformaci. Při obecném zatížení tělesa v prostoru je pole napětí popsáno tenzorem napětí

$$\mathbf{A}_\sigma = \begin{bmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{bmatrix}. \quad (4.1)$$



Obr. 4.1 Prostorové složky napětí na elementární krychli

Platí věta o vzájemnosti smykových napětí, takže tenzor napětí je symetrický. Užitím Voigtova pravidla (viz [6]) ho lze přepsat do sloupcové matice složek napětí

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}, \quad (4.2)$$

která se pro jednoduchost a přehlednost často transformuje a uvádí se jako vektor napětí

$$\boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{yz}, \tau_{xz}, \tau_{xy}\}^T. \quad (4.3)$$

I když výraz vektor není z fyzikálního hlediska správný.

Statické rovnice vyjadřující silové podmínky rovnováhy na elementární krychli mají tvar

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + X &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + Y &= 0, \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + Z &= 0, \end{aligned} \quad (4.4)$$

kde X , Y a Z jsou vzájemně kolmé složky objemových sil.

K popisu pole posunutí se používá vektor posunu

$$\mathbf{u} = \{u, v, w\}^T, \quad (4.5)$$

jehož složky jsou souhlasné se směry kartézských souřadnicových os x , y , z .

Pole deformace tělesa je popsáno tenzorem deformace

$$\mathbf{A}_\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_x & \frac{1}{2}\gamma_{xy} & \frac{1}{2}\gamma_{xz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{yx} & \varepsilon_y & \frac{1}{2}\gamma_{yz} \\ \frac{1}{2}\gamma_{zx} & \frac{1}{2}\gamma_{zy} & \varepsilon_z \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

který se také dá pomocí Voigtova pravidla přepsat do sloupcové matice složek deformace

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{pmatrix} \quad (4.7)$$

a následně upravit na tvar vektoru deformace

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{yz}, \gamma_{xz}, \gamma_{xy}\}^T \quad (4.8)$$

Vztah mezi posuny a deformacemi popisují tzv. geometrické rovnice, které pro předpoklad malých deformací obsahují jen lineární členy a mají tvar

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}, \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}, \\ \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}, \\ \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}, \\ \gamma_{xz} &= \frac{\partial w}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial z}, \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}. \end{aligned} \quad (4.9)$$

Vztahy mezi složkami napětí a deformace se nazývají fyzikální rovnice (nebo také konstitutivní vztahy). V případě prostorové napjatosti jsou pro lineárně pružný izotropní materiál popsány tzv. zobecněným Hookovým zákonem, který lze zapsat ve tvaru

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)], \\
 \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)], \\
 \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)], \\
 \gamma_{xy} &= \frac{1}{G} \tau_{xy}, \\
 \gamma_{yz} &= \frac{1}{G} \tau_{yz}, \\
 \gamma_{xz} &= \frac{1}{G} \tau_{xz},
 \end{aligned}
 \tag{4.10}$$

kde G je modul pružnosti ve smyku

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}.
 \tag{4.11}$$

Rovnice kompatibility (spojitosti)

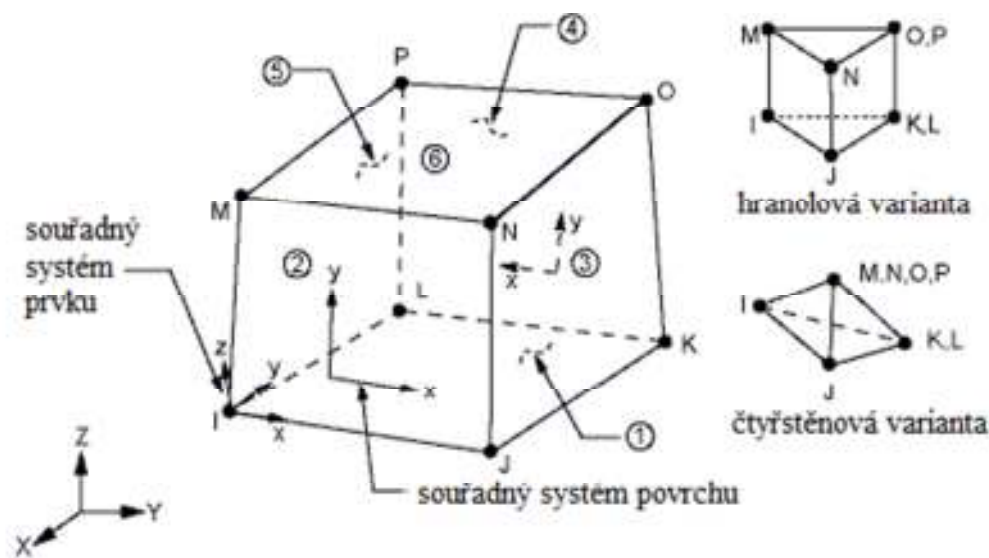
$$\begin{aligned}
 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xy}}{\partial x \partial y}, \\
 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial y^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{yz}}{\partial y \partial z}, \\
 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial z^2} &= \frac{\partial^2 \gamma_{xz}}{\partial x \partial z}, \\
 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} + \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} - \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_x}{\partial y \partial z}, \\
 \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} + \frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} - \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_y}{\partial x \partial z}, \\
 \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial \gamma_{yz}}{\partial x} + \frac{\partial \gamma_{xz}}{\partial y} - \frac{\partial \gamma_{xy}}{\partial z} \right) &= 2 \frac{\partial^2 \varepsilon_z}{\partial x \partial y}.
 \end{aligned}
 \tag{4.12}$$

popisují vzájemnou závislost složek deformací, tedy zachování spojitosti tělesa i po vzniku deformace.

Při analýze stavu napětí a deformace je tedy v prostoru celkem 15 neznámých. Jsou to tři složky posunutí \mathbf{u} , šest složek deformací $\boldsymbol{\varepsilon}$ a šest složek napětí $\boldsymbol{\sigma}$. K jejich řešení slouží 15 nezávislých rovnic, tj. tři statické rovnice (4.4), šest geometrických rovnic (4.9) a šest fyzikálních vztahů (4.10).

Použitý konečný prvek programového systému ANSYS – SOLID 45

Prvek SOLID 45 se používá pro 3-D modelování pevných struktur a konstrukcí. Je definován osmi uzly, které mají tři stupně volnosti v každém uzlu: posuny ve směrech os x , y a z . Lze mu zadat ortotropní materiálové vlastnosti. Základní tvar prvku je osmistěn (obr. 4.2), ale sloučením některých uzlů se může modifikovat do tvaru hranolu nebo čtyřstěnu, který ale není doporučen, protože může generovat velké chyby při výpočtu. Prvek je schopen postihnout plasticitu, tečení, bobtnání, vliv napjatosti na tuhost konstrukce a velké deformace. Je možné zadat zatížení tlakem, teplotou nebo prouděním [9].



Obr. 4.2 Základní a modifikovaný tvar prvku SOLID 45 [9]

4.2 Úloha rovinné deformace

Jedná se o speciální případ třírozměrného problému, který se dá díky symetrii redukovat na 2D úlohu. Těleso má teoreticky nekonečný rozměr ve směru osy z . Zatížení a podepření má pouze složky ležící v rovinách rovnoběžných s xy . Tvar, zatížení tělesa i jeho podepření jsou podél osy z neměnné a tedy kterákoliv rovina rovnoběžná se souřadnicovou rovinou xy je rovinou souměrnosti. Se změnou souřadnice z se tedy nemůže měnit napjatost ani deformace tělesa, nezávislé proměnné jsou pak jen x a y [3].

Dalšími případy, kdy lze 3D úlohu redukovat na dvojrozměrný problém jsou rovinná napjatost a rotační symetrie.

V praxi jde u rovinné deformace o případy masivních opěrných zdí, tížných hrází, ale též o úlohu napjatosti a deformace v horninovém masivu proraženém tunelem nebo právě potrubí uložené v zemině, jestliže lze předpokládat, že podél osy z není změna vlastností horninových vrstev a změna zatížení povrchu významná.

Sledujeme-li pomyslně vyřatou vrstvu se střednicovou rovinou xy o tloušťce $h = 1$, vidíme, že vzhledem k předpokladům neměnnosti vlastností tělesa a zatížení ve směru osy z (rozprostírajícího se do nekonečna) je dané vrstvě umožněna deformace jen v rovině xy . Okolní vrstvy brání deformaci ve směru z , tedy

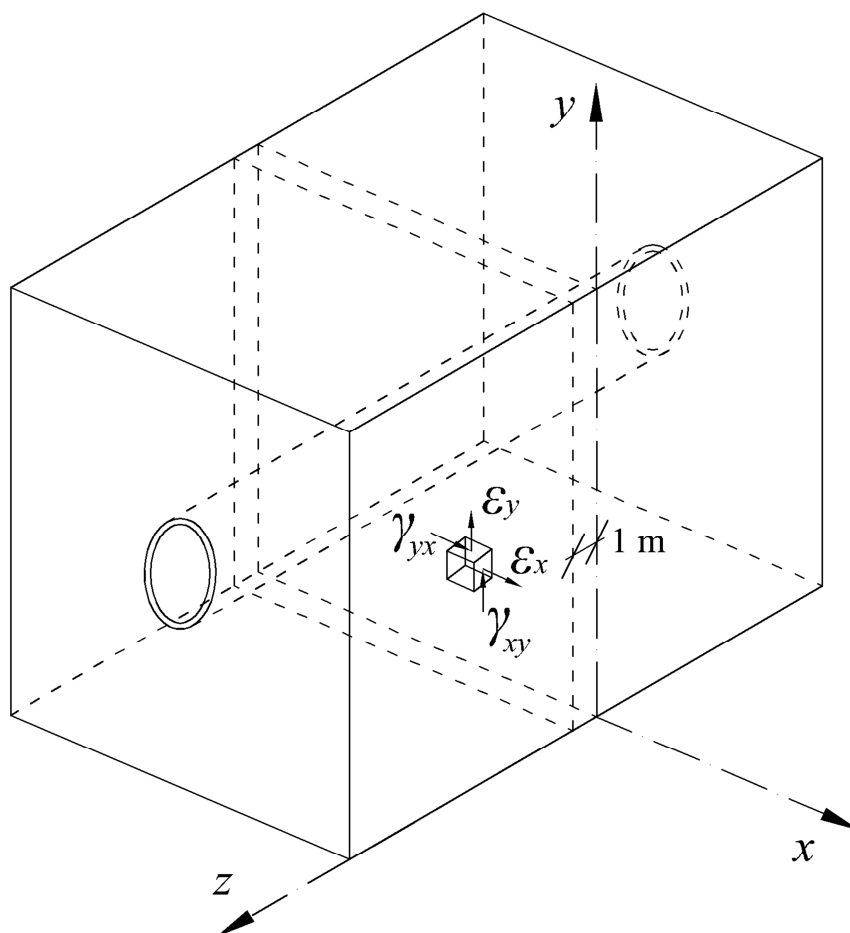
$$\varepsilon_z = \gamma_{zx} = \gamma_{zy} = 0 . \quad (4.13)$$

Vektor deformace je pak

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, 0, 0, 0, \gamma_{xy}\}^T \quad (4.14)$$

a vektor posunutí

$$\mathbf{u} = \{u, v, 0\}^T . \quad (4.15)$$



Obr. 4.3 Příklad rovinné deformace a poměrná přetvoření na elementární krychli

Z obecných fyzikálních rovnic (4.10) po dosazení plyne

$$\tau_{yz} = \tau_{xz} = 0 \quad (4.16)$$

a

$$\sigma_z = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)}(\varepsilon_x + \varepsilon_y). \quad (4.17)$$

Pro rovinnou deformaci je tedy vektor napětí

$$\boldsymbol{\sigma} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, 0, 0, \tau_{xy}\}^T. \quad (4.18)$$

Fyzikální rovnice (4.10) se dají přepsat do tvaru

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{D}^{-1}\boldsymbol{\sigma}, \quad (4.19)$$

respektive

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}\boldsymbol{\varepsilon}, \quad (4.20)$$

kde \mathbf{D} je redukovaná matice tuhosti materiálu, jejíž inverzí dostaneme redukovanou matici poddajnosti materiálu \mathbf{D}^{-1} .

Pro rovinnou deformaci platí [5]

$$\mathbf{D}^{-1} = \frac{1-\nu^2}{E} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{\nu}{1-\nu} & 0 \\ -\frac{\nu}{1-\nu} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{2}{1-\nu} \end{bmatrix} \quad (4.21)$$

a

$$\mathbf{D} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-2\nu)}{2} \end{bmatrix}. \quad (4.22)$$

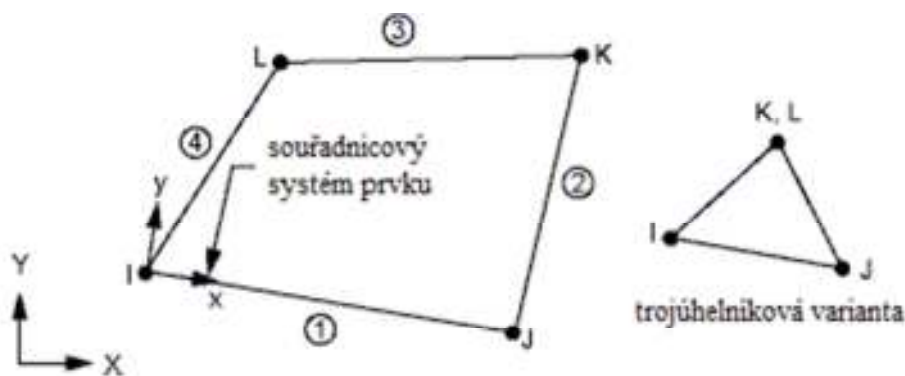
Geometrické rovnice (4.9) se pro rovinný problém redukuje na tyto 3 vztahy

$$\begin{aligned}\varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x'} \\ \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y'} \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}.\end{aligned}\tag{4.23}$$

Rovnice kompatibility (4.12) lze pro rovinnou deformaci také redukovat na jednodušší tvary (viz [4]).

Použitý konečný prvek programového systému ANSYS – PLANE 42

Prvek PLANE 42 se používá pro speciální případy 2-D modelování pevných konstrukcí. Může být použit buď jako rovinný prvek (rovinná napjatost nebo rovinná deformace), nebo jako prvek osové souměrnosti. Je definován čtyřmi uzly, z nichž každý má dva stupně volnosti: posunutí ve směrech x a y . Sloučením dvou uzlů může být původní tvar prvku modifikován na tříuzlovou variantu, která však není doporučována. V případě rovinné napjatosti je možné zadat i tloušťku prvku. Prvek postihuje plasticitu, tečení, bobtnání, vliv napjatosti na tuhost konstrukce i velké deformace a mohou mu být přiřazeny ortotropní materiálové vlastnosti.



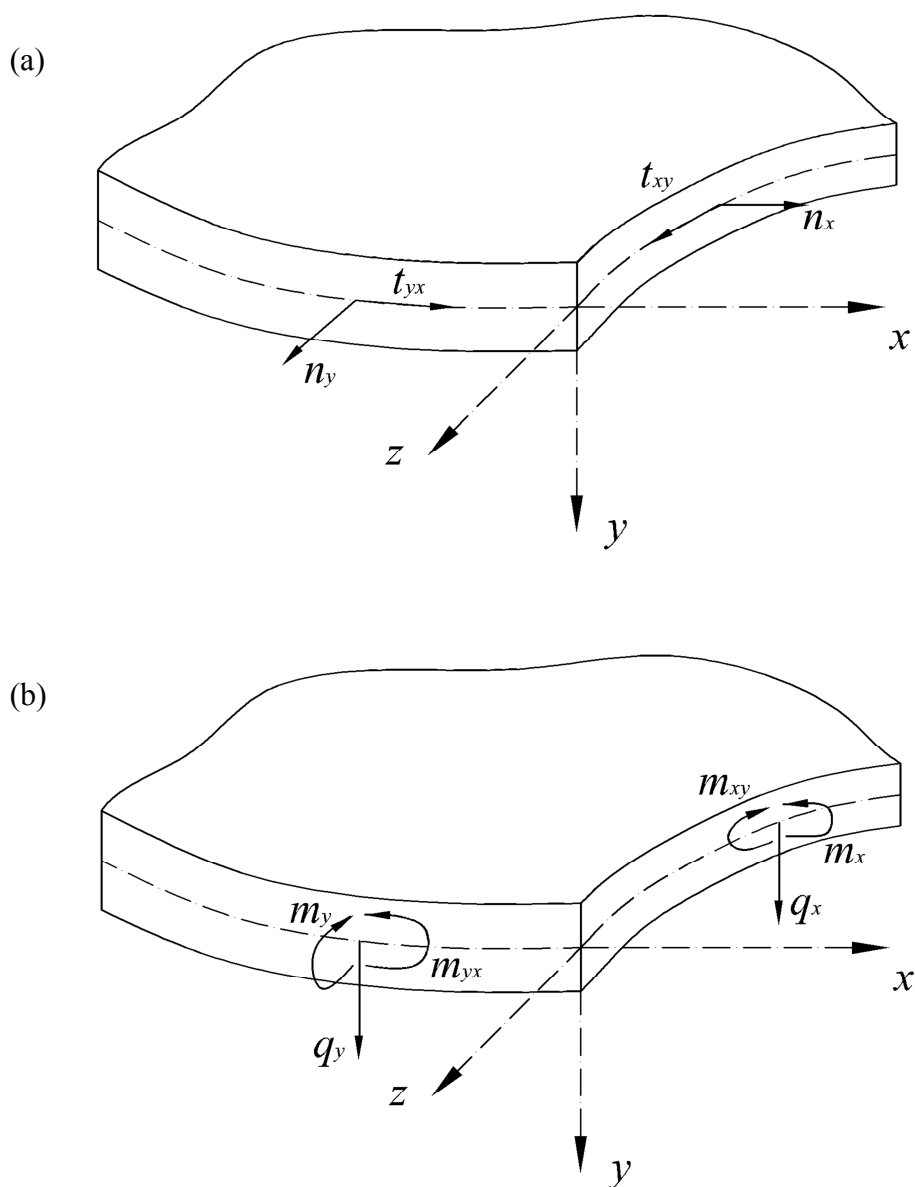
Obr. 4.4 Tvary prvku PLANE 42 [9]

4.3 Skořepiny

Skořepiny představují plošné konstrukce s oblou střednicovou plochou. Jejich geometrie je jednoznačně definována tehdy, je-li v každém místě určen tvar střednicové plochy a tloušťka skořepiny.

Skořepina představuje obecnější typ tenkostěnné konstrukce, než jsou stěny a desky, jež lze chápat jako její zvláštní případy. Při jejím statickém vyšetřování se vyskytnou veličiny charakteristické pro stěny i desky. Měrné vnitřní síly působící na skořepině se pak dají rozdělit na:

- stěnové, kam patří
 - normálové síly n_x, n_y ,
 - smykové síly t_{xy}, t_{yx} ,
- deskové, jež zahrnují
 - ohybové momenty m_x, m_y ,
 - krouticí momenty m_{xy}, m_{yx} ,
 - posouvající síly q_x, q_y .



Obr. 4.5 Stěnové (a) a deskové (b) měrné vnitřní síly na skořepině

Pro normálové měrné vnitřní síly platí

$$n_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x dz, \quad (4.24)$$

$$n_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y dz \quad (4.25)$$

a smykové měrné vnitřní síly lze určit podle rovnic

$$t_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} dz, \quad (4.26)$$

$$t_{yx} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{yx} dz. \quad (4.27)$$

Pro deskové měrné vnitřní síly platí vztahy

$$m_x = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_x z dz, \quad (4.28)$$

$$m_y = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_y z dz, \quad (4.29)$$

$$m_{xy} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xy} z dz, \quad (4.30)$$

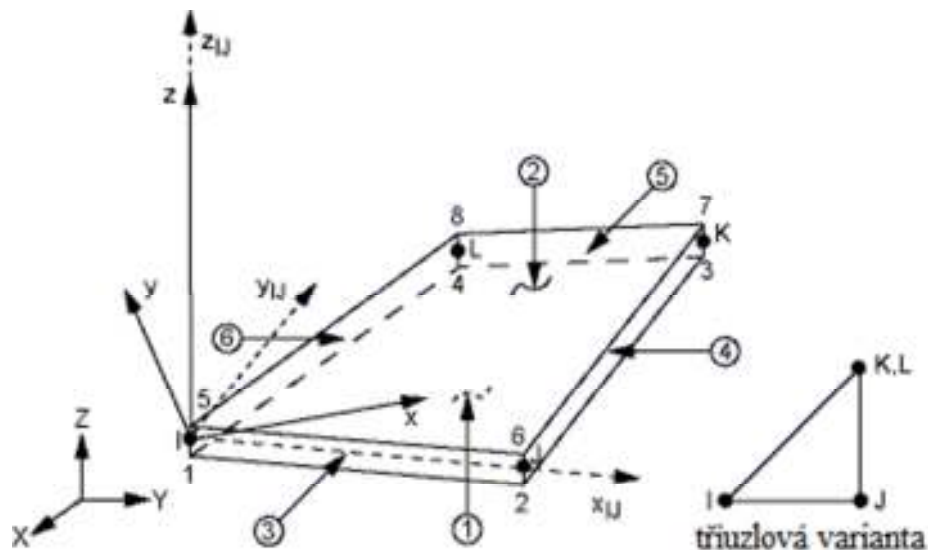
$$m_{yx} = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{yx} z dz, \quad (4.31)$$

$$q_x = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{xz} dz, \quad (4.32)$$

$$q_y = \int_{-h/2}^{h/2} \tau_{yz} dz. \quad (4.33)$$

Použití konečné prvky programového systému ANSYS – SHELL 63 a SHELL 43

Prvky SHELL 63 i SHELL 43 jsou čtyřuzlové, ale existuje i modifikovaná tříuzlová varianta, která vznikne sloučením uzlů K a L. Oba tyto tvary jsou znázorněny na obr. 4.6.



Obr. 4.6 Základní a modifikovaný tvar prvků SHELL 43 a SHELL 63 [9]

Prvek SHELL 63 slouží především k modelování tenkých desek a vychází z Kirchhoffovy teorie. Má schopnost postihnout ohybové i membránové stavy. Jsou přípustná rovinná i normálová zatížení. Prvek má šest stupňů volnosti v každém uzlu: posuny ve směrech os x , y , z a rotace kolem os x , y a z . Prvek je schopen postihnout vliv napjatosti na tuhost konstrukce a velké deformace. Lze zadávat proměnnou tloušťku prvku hodnotami v uzlech. Tloušťky zadané v jednotlivých uzlech prvku jsou přepočítávány tak, aby po ploše prvku plynule přecházely mezi zadanými hodnotami.

Prvek SHELL 43 vychází z Mindlinovy teorie, takže zahrnuje vliv smyku. Je vhodný k modelování skořepinových konstrukcí střední tloušťky. Prvek má šest stupňů volnosti v každém uzlu posuny ve směrech os x , y , z a rotace kolem os x , y a z . Deformace prvku se předpokládá lineární v obou směrech střednicové plochy prvku. Prvek je schopen postihnout plasticitu, tečení, vliv napjatosti na tuhost konstrukce, velké deformace i boulení. Může mít proměnnou tloušťku, která je přepočtena tak, aby se hladce měnila po ploše prvku mezi tloušťkami zadanými v rohových uzlech [9].

5 Statické řešení vodovodního potrubí

Ověřované příklady a studie se vztahují k projektu týkajícímu se rekonstrukce páteřních vodovodních přívaděčů na Blanensku. Konkrétně se jedná o část vodovodního přívaděče mezi obcemi Boskovice a Blansko. Tento projekt by měl být realizován na jaře roku 2013 firmou AQUA PROCON s.r.o., což je projektová a inženýrská společnost poskytující služby v oblasti vodního hospodářství. Tato firma poskytla ke zpracování podklady a materiály ve fázi dokumentace ke stavebnímu povolení.

Původní vodovodní přívaděč byl vybudován v roce 1985. Voda je v něm vedena gravitačně přívodním řadem DN 500 z oceli. Do stávajícího potrubí bude zatahováno potrubí z vysokohustotního polyethylenu PE100 RC. Přívlasek RC značí, že se jedná o trubky s ochrannou vrstvou, která má několik ochranných funkcí (viz např. [16]). Tyto trubky se používají u bezvýkopových technologií z důvodu většího rizika poškození.

Rekonstrukce přívaděče je navržena z důvodu zhoršeného technického stavu. Ten má negativní vliv na kvalitu vody zejména z důvodu možného druhotného oživení vody z inkrust na stěnách potrubí a vysoké hydraulické drsnosti vnitřních stěn potrubí.

Rozsah rekonstrukce:

- rekonstrukce stávajícího přívodního řadu z ocelového potrubí DN 500 z VDJ Obora (Boskovice) do VDJ Nový (Blansko) vtažením PE potrubí DN 315 do stávajícího potrubí vodovodního přívaděče Boskovice – Blansko,
- rekonstrukce dvouramenného podchodu pod řekou Svitavou bezvýkopovou metodou - řízeným horizontálním vrtáním.

Celková délka sanovaných úseků je 17 945 m, z toho je 254 m tvořeno podchody pod vodními toky (řízené horizontální vrtání). Vzhledem k velkým výškovým rozdílům po trase přívaděče se střídá potrubí rozměrové řady SDR17 (tlaková třída PN10) a SDR11 (PN16). Přesnější parametry potrubí jsou uvedeny v tab. 5.1.

Vlastní sanace bude probíhat po etapách, tak aby bylo možné zajistit obtok sanovaného úseku a byla tak zajištěna dodávka pitné vody po celou dobu stavby. Předpokládá se, že budou odstaveny max. 2 úseky za sebou, v prvním bude probíhat kamerový průzkum a čištění a v druhém pak vtahování PE potrubí. Úsekem se rozumí část potrubí mezi dvěma montážními jámami. Montážní jámy jsou navrhovány v místě kalosvodů, vzdušníků a odboček, v ostatních případech většinou do vzdálenosti cca 200 m. V případě rovných úseků a obtížného přístupu sanační techniky je výjimečně navržen větší rozestup jam. Nepřesahuje však vzdálenost 350 m.

Tab. 5.1 Přehled použitého potrubí [7]

technologie	rozměrová řada	rozměry potrubí (vnější průměr x tloušťka stěny)	celková délka potrubí
relining	SDR17	315 x 18,7 mm	7 845 m
	SDR11	315 x 28,6 mm	9 846 m
řízené horizontální vrtání	SDR17	315 x 18,7 mm	162 m
	SDR11	315 x 28,6 mm	92 m

Vtahované potrubí je standardní PE100 RC s barevně odlišenou 10% vrstvou. Konec ocelového potrubí, který je v montážní jámě umístěn níže bude obsypán jílovou zeminou (cca 1m³), aby se zamezilo vnikání vody do mezikruží mezi ocelové a PE potrubí. Spoje vtahovaného potrubí budou provedeny svarem na tupo. Současné potrubí pak vytváří chráničku pro nové potrubí. Nové potrubí bude uloženo na středících prvcích, které budou zabezpečeny proti vodorovnému posunu vlivem zatahování. Podélná vzdálenost těchto prvků bude max. 2,9 m pro SDR17 a 3,1 m pak u SDR11. Vzhledem k předpokladu podélného smršťování PE vlivem změny teploty budou v každé montážní jámě zřízeny tzv. fixační body. Ty zabrání podélnému pohybu potrubí. Fixační body budou provedeny min. 24 hodin po zatažení potrubí (obzvláště ve dnech s vyššími teplotami), kdy dojde k částečnému smrštění potrubí vlivem přizpůsobení se teplotě okolní zeminy [7].

Dle inženýrskogeologického průzkumu jsou v lokalitě provádění nejrozšířenější horninou biotitické a amfiboliticko-biotitické granodiority blanenského a doubravického typu a červenohnědé až rezivě hnědé slepence rokytenské facie a droby rozstáňského souvrství [8]. Tyto horniny lze dle [14] zařadit do tř. R4 - R5. Přítomné horniny mají následující parametry:

- pevnost horniny $\sigma_c \geq 1,5 \text{ MPa}$,
- modul přetvárnosti $E_{\text{def}} \geq 60 \text{ MPa}$,
- Poissonův součinitel $\nu = 0,25 - 0,3$ [8].

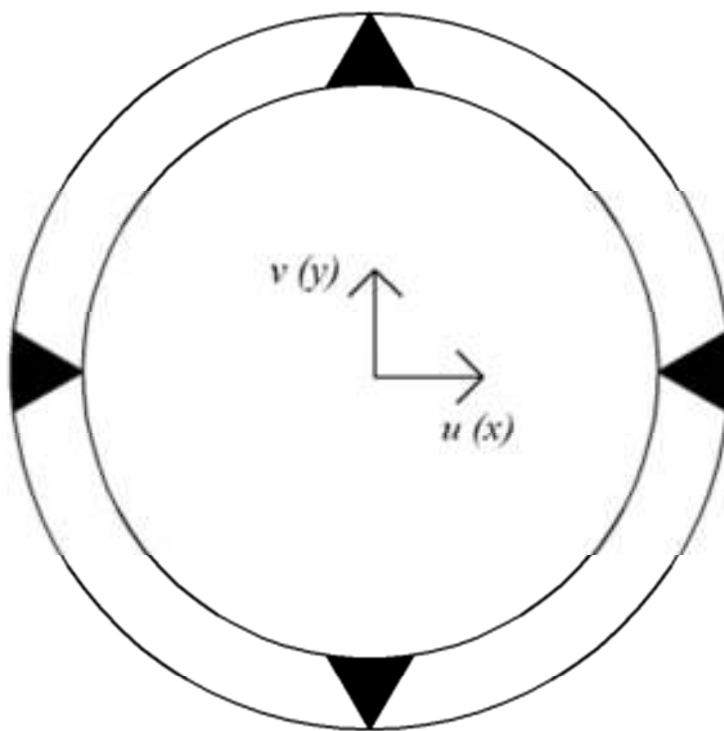
Požadovaná životnost potrubí sice nebyla zadána, ale pro účely této práce se předpokládá provozní životnost 50 let, což je běžně uvažovaná hodnota. Provozní teplota se uvažuje 10 °C.

Původní tloušťka stěny ocelového potrubí DN 500 byla 16 mm. Ovšem vzhledem ke stáří a jistému opotřebení potrubí se uvažuje, že je tato hodnota snížena na 14 mm. Přesnější údaje o stavu ocelového potrubí poskytne kamerový průzkum, který bude součástí realizačních prací a v každém úseku bude předcházet zatahování nového polyethylenového potrubí.

5.1 Srovnání modelů

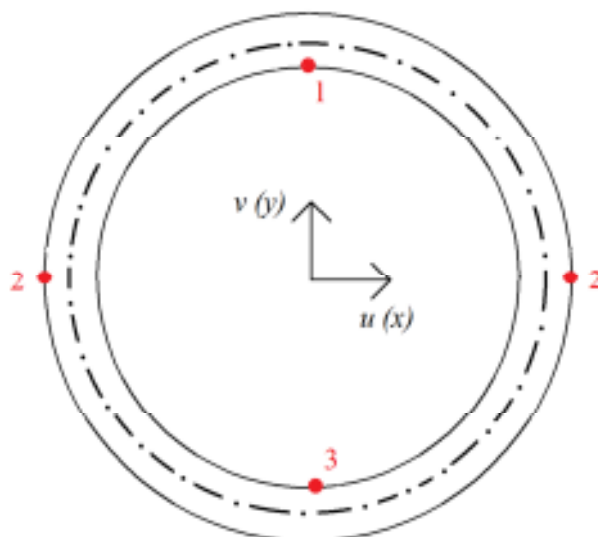
Jak bylo uvedeno na začátku čtvrté kapitoly, lze k problému řešení statického působení potrubí přistupovat z různých úhlů. Proto byla provedena základní studie s cílem porovnat výsledky různých přístupů. Např. v [1] je popsáno teoretické řešení založené na výpočtu kruhového prstence, který umožňuje ruční výpočet jednoduchých případů namáhání. Tento přístup byl porovnán s různými modely vytvořenými v programovém systému ANSYS pro případ zatížení vlastní tíhou.

Na obr. 5.1 je naznačen nejběžnější způsob porušení kanalizačního potrubí. Stejným způsobem je však namáháno i staré ocelové potrubí při osazení menšího termoplastového potrubí na středící prvky (zanedbáme-li úseky v blízkosti středících prvků). Toto schéma lze tedy aplikovat i na prázdné ocelové potrubí v zemině. K porušení potrubí dochází nejčastěji v podélném směru. Místa označená na obr. 5.1 černou šrafovou jsou oblasti porušení. Dochází zde k největšímu namáhání a tvoří se trhliny, které se rozvíjejí a tím po délce potrubí mohou vzniknout liniové klouby.



Obr. 5.1 Schéma porušení potrubí

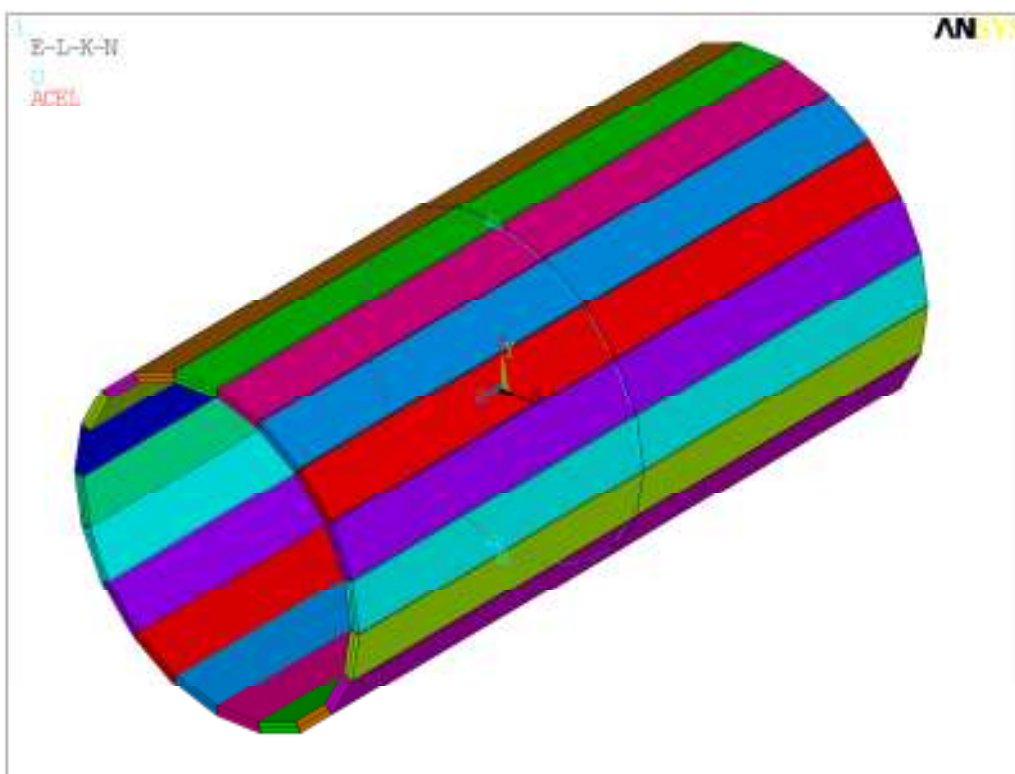
Proto byly na potrubí zjišťovány hodnoty vodorovného a svislého posunutí a také napětí ve třech místech, kde dochází k porušení. Hodnoty posunutí z jednotlivých modelů jsou srovnávány ve vrcholu potrubí, na boku a ve spodní části vždy na střednici. Zatímco napětí je bráno z nejnamáhanějších bodů ve vrcholu potrubí (1), na boku (2) a ve spodní části (3), tak, jak jsou naznačeny na obr. 5.2



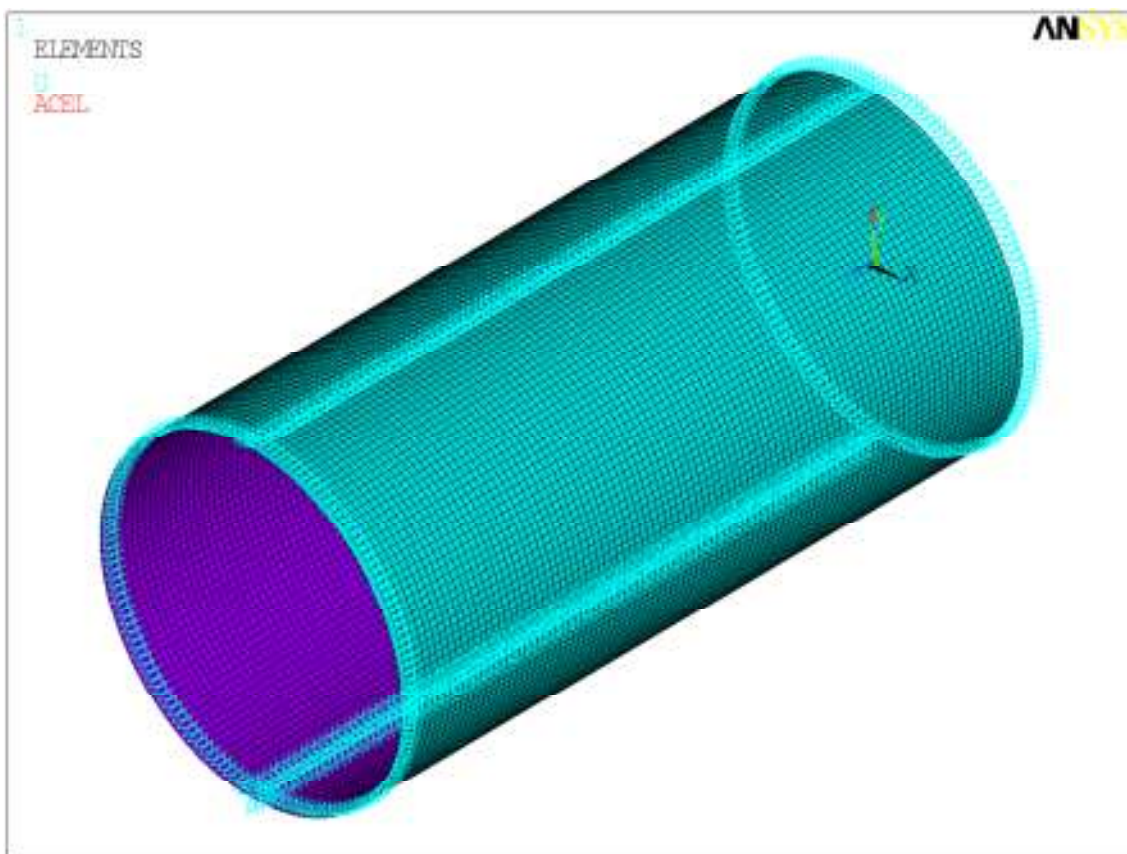
Obr. 5.2 Umístění vyhodnocovacích bodů pro napětí

Bylo modelováno polyetylenové potrubí o vnějším průměru $d = 0,5$ m a tloušťce stěny $h = 14$ mm. Zadané materiálové vlastnosti jsou modul pružnosti $E = 117$ GPa, Poissonův součinitel $\nu = 0,38$ a hustota $\rho = 910$ kg m⁻³. Bylo uvažováno potrubí o délce 1 m.

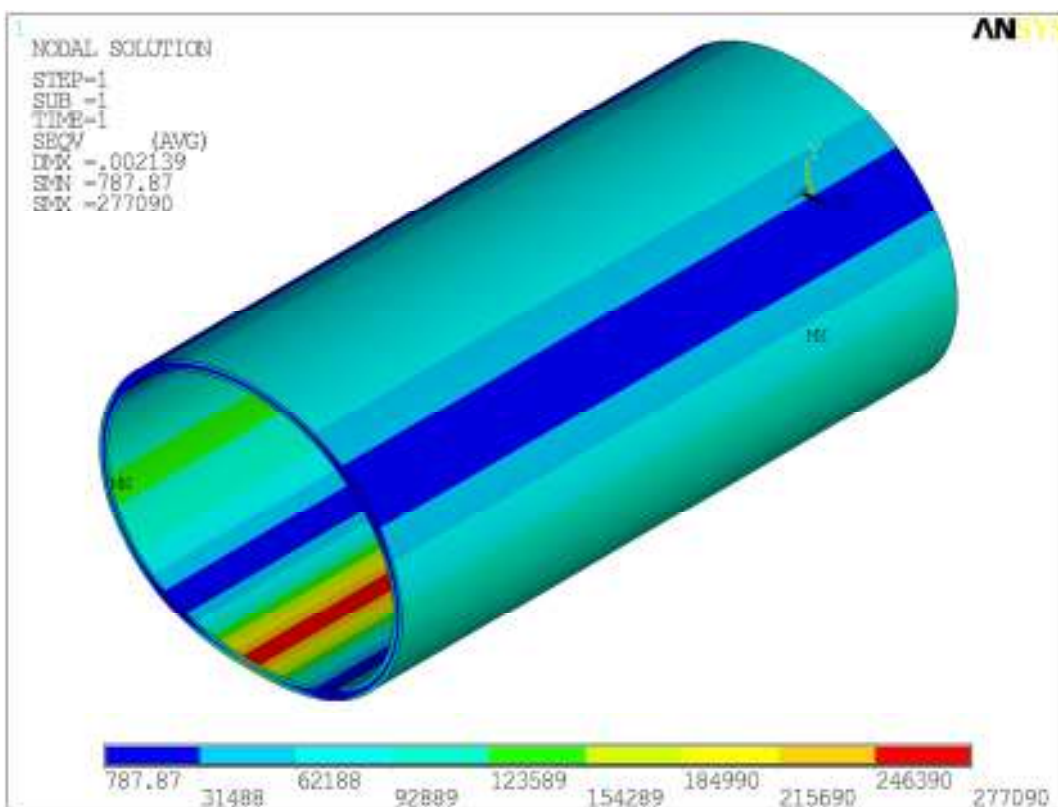
V patě a vrcholu potrubí bylo zabráněno vodorovnému posunu. Svislý posun byl znemožněn v patě. Na model bylo aplikováno tíhové zrychlení $g = 10$ m s⁻² ve směru y .



Obr. 5.3 Model z prutových prvků BEAM 44 (se zapnutým vykreslením tvaru)

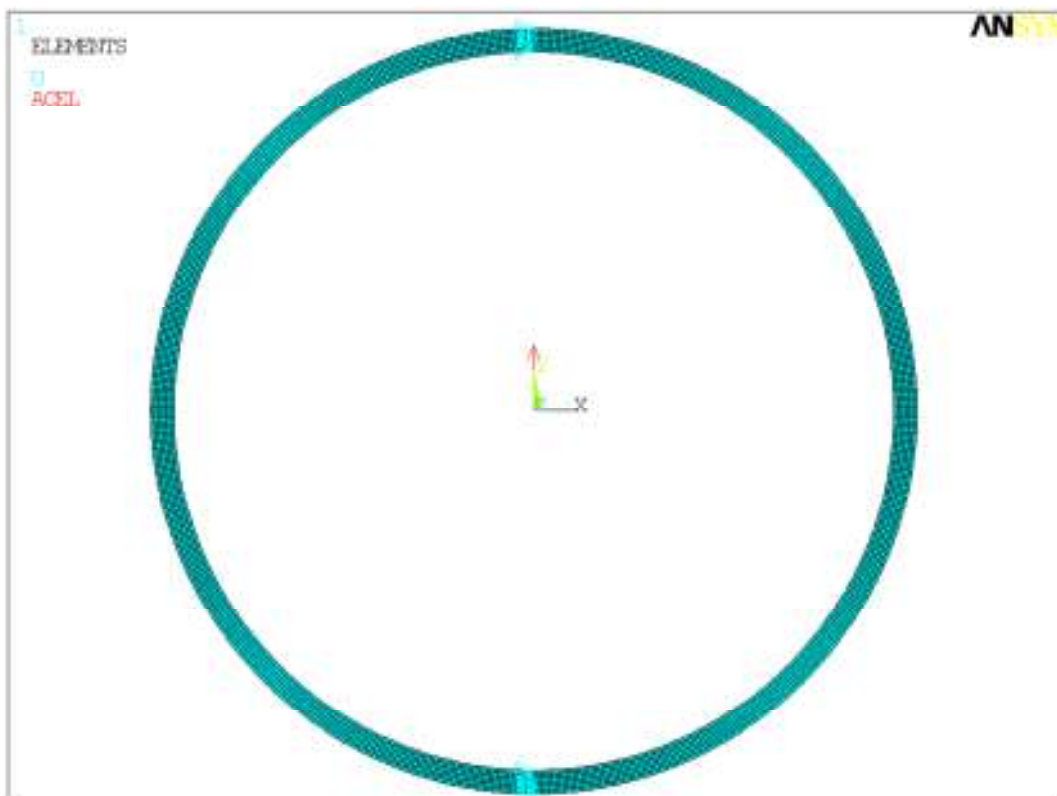


Obr. 5.4 Model ze skořepinových prvků

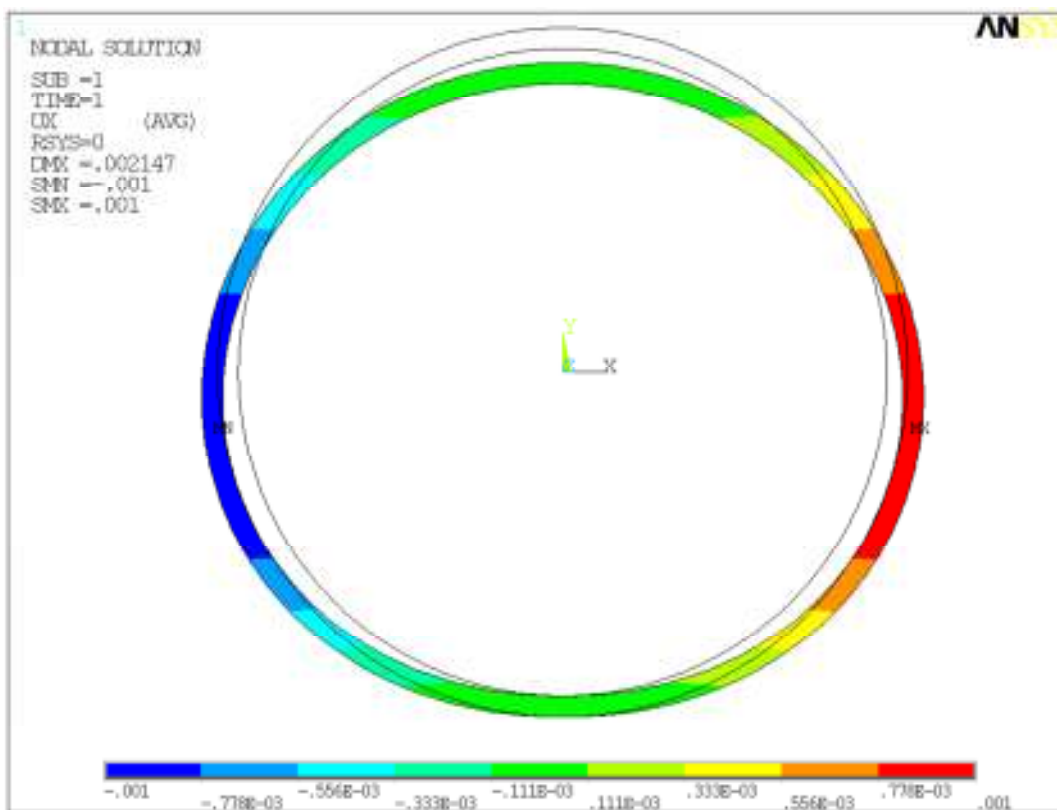


Obr. 5.5 Průběh Misesova napětí na prostorovém modelu

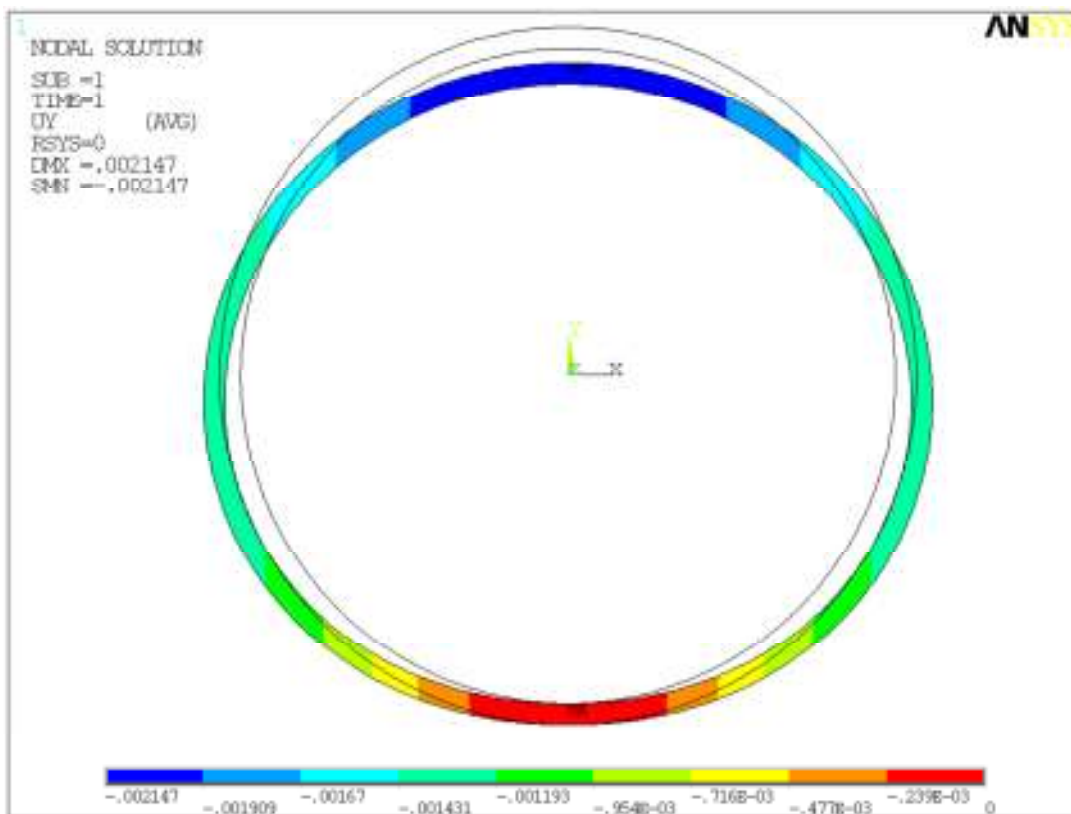
Na obr. 5.6 až obr. 5.9 jsou ukázky modelu rovinné deformace a posuzovaných výsledných hodnot.



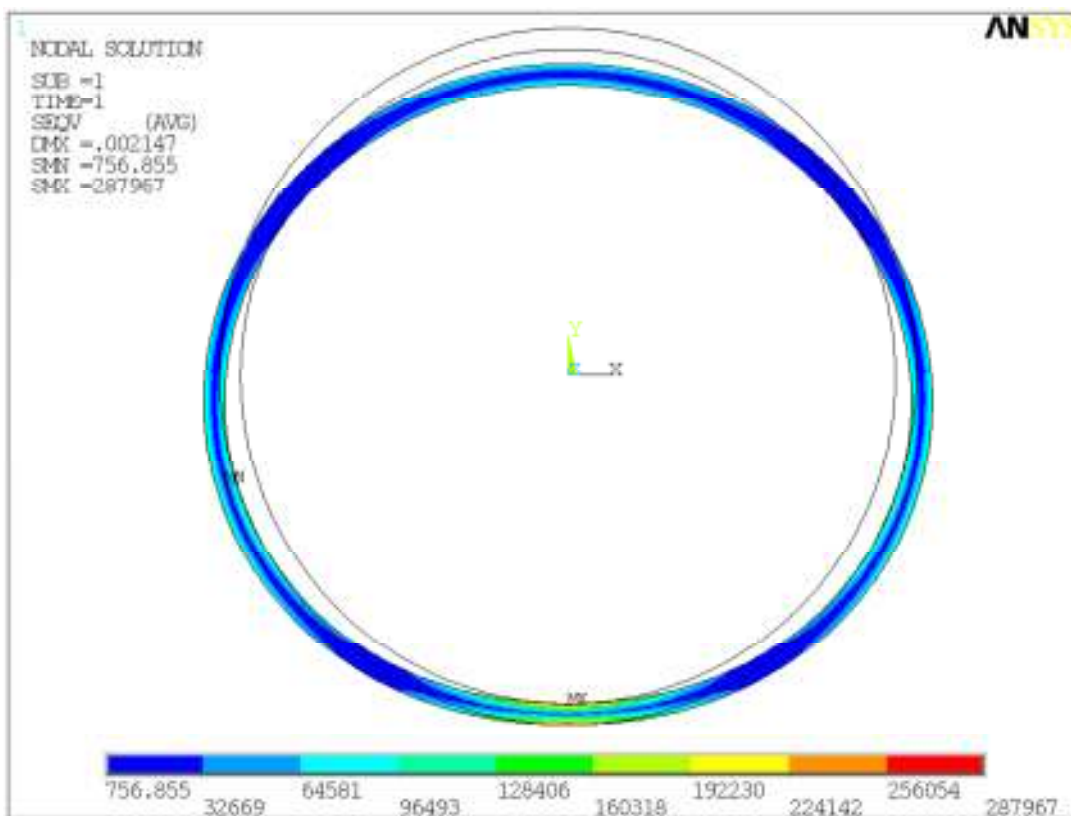
Obr. 5.6 Použitý model pro rovinnou deformaci a síť z prvků PLANE 42



Obr. 5.7 Vodorovný posun pro rovinnou deformaci (PLANE 42)



Obr. 5.8 Svislý posun pro rovinnou deformaci (PLANE 42)



Obr. 5.9 Misesovo napětí pro rovinnou deformaci (PLANE 42)

Tab. 5.2 Srovnání výsledků ručního výpočtu s modely z ANSYSu

typ modelu	místo na řezu potrubí	vodorovné posunutí u [mm]	svislé posunutí v [mm]	Misesovo napětí σ_e [Pa]
výpočet pomocí vzorců	nahoře	0,00	2,49	107 027
	na boku	1,14	1,49	122 182
	dole	0,00	0,00	321 082
BEAM 44 (prutový model)	nahoře	0,00	2,51	108 060
	na boku	1,15	1,50	118 720
	dole	0,00	0,00	313 120
SHELL 63 (skořepinový model - Kirchhoff)	nahoře	0,00	2,16	95 680
	na boku	0,99	1,29	110 950
	dole	0,00	0,00	279 800
SHELL 43 (skořepinový model - Mindlin)	nahoře	0,00	2,17	95 642
	na boku	0,99	1,30	110 940
	dole	0,00	0,00	270 880
PLANE 42 (rovinná deformace)	nahoře	0,00	2,14	90 741
	na boku	0,98	1,27	101 840
	dole	0,00	0,00	287 967
SOLID 45 (3D model z prostorových prvků)	nahoře	0,00	2,14	90 720
	na boku	0,98	1,28	101 810
	dole	0,00	0,00	277 090

Dle dosažených výsledků lze potvrdit, že řešení kruhového prstence je odvozeno z prutového modelu. Výsledná posunutí i napětí ve třech kontrolních bodech tomu nejvíce odpovídají. Z použitých variant je sice prutový model nejméně přesný, nicméně takto zjištěné hodnoty posunutí a napětí jsou z hlediska posuzování na straně bezpečné. Ovšem i u ostatních modelů je dosaženo dobré shody sledovaných hodnot.

5.2 Aplikace rovinné deformace

5.2.1 Vliv okrajových podmínek

Cílem je obecně zjistit potřebnou velikost modelu, aby okrajové podmínky neovlivňovaly výsledné hodnoty napětí v profilu potrubí a jeho okolí. Bylo zvoleno ocelové potrubí o vnějším průměru $d = 0,5$ m a tloušťce stěny $h = 14$ mm. Vrchol potrubí je uložen 1 m pod povrchem. Byl použit model rovinné deformace. Spodní linie modelu byla zajištěna proti svislému posunu a vodorovným okrajům ohraničujícím oblast zeminy bylo zabráněno ve vodorovném posunu. Materiálové vlastnosti použité pro ocel i zeminu jsou uvedeny v tab. 5.3. Model byl zatížen vlastní tíhou s hodnotou tíhového zrychlení $g = 10 \text{ m s}^{-2}$. Konečné prvky jsou typu PLANE 42.

Tab. 5.3 Použité materiálové vlastnosti

materiál	veličina		
	hustota ρ [kg m ⁻³]	modul pružnosti E [MPa]	Poissonův součinitel ν [-]
ocel	7850	210 000	0,3
zemina-třída R4	2000	60	0,25

Je zkoumán vliv okrajových podmínek zadaných na svislém okraji modelu. Oblast modelu ve vodorovném směru je rozšiřována a zvětšována šířka pásu zeminy od boku potrubí. Pro zadaný příklad byla zvolena celková hloubka modelované zeminy 5 m. To znamená, že pod dolním okrajem potrubí je ještě 3,5 m zeminy. Předpokládá se, že to bude dostatečná hloubka, aby uvedené okrajové podmínky aplikované na dolní linii modelu neovlivňovaly zkoumané parametry. Těmito parametry jsou hodnoty Misesova napětí:

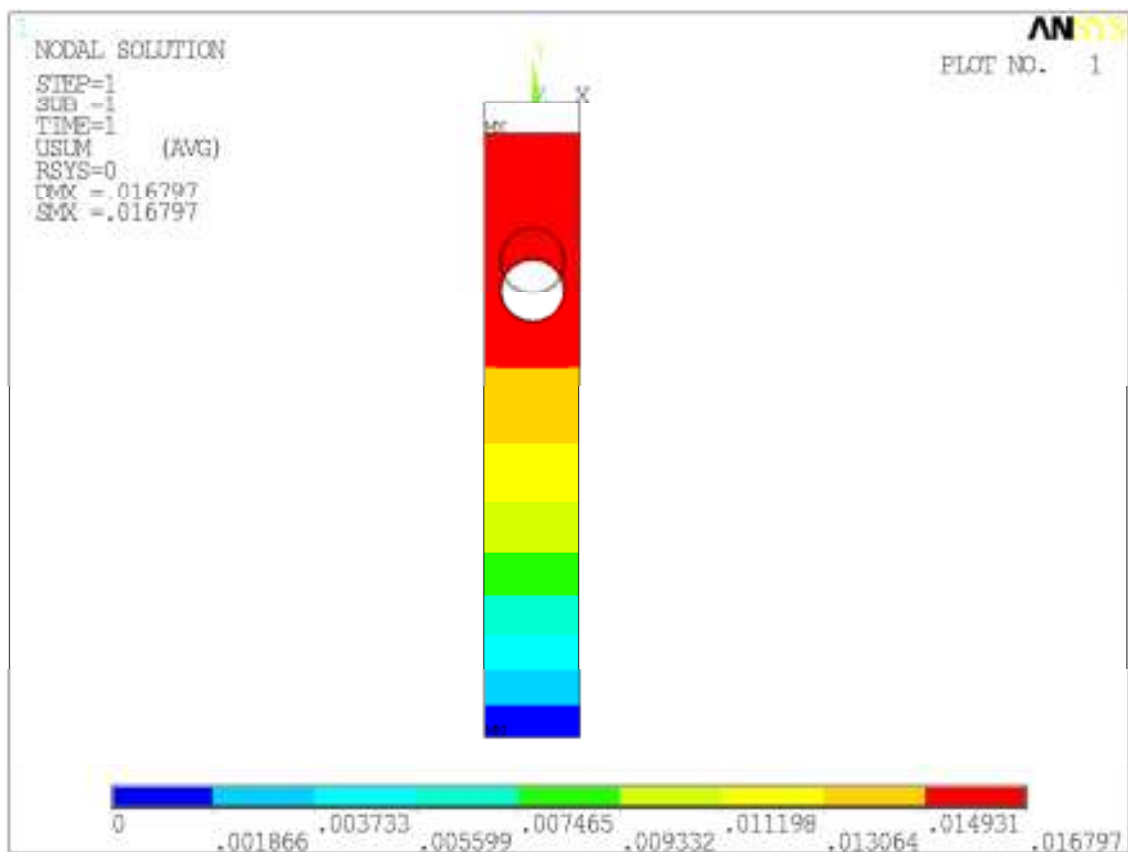
- v zemině
 - ve vrcholu potrubí na rozhraní materiálů,
 - na boku potrubí na rozhraní materiálů,
 - v patě potrubí na rozhraní materiálů,
- v oceli
 - maximální hodnota na boku potrubí.

Na obr. 5.15 je vidět, že hodnoty napětí v zemním tělese nejsou v okolí potrubí stejné. Naopak se mohou značně lišit. Proto byly vybrány 3 charakteristické body pro srovnávání hodnot. Napětí v oceli dosahuje maximální hodnoty vždy ve stejném místě a to na boku potrubí (obr. 5.16, obr. 5.17), kde je srovnáváno.

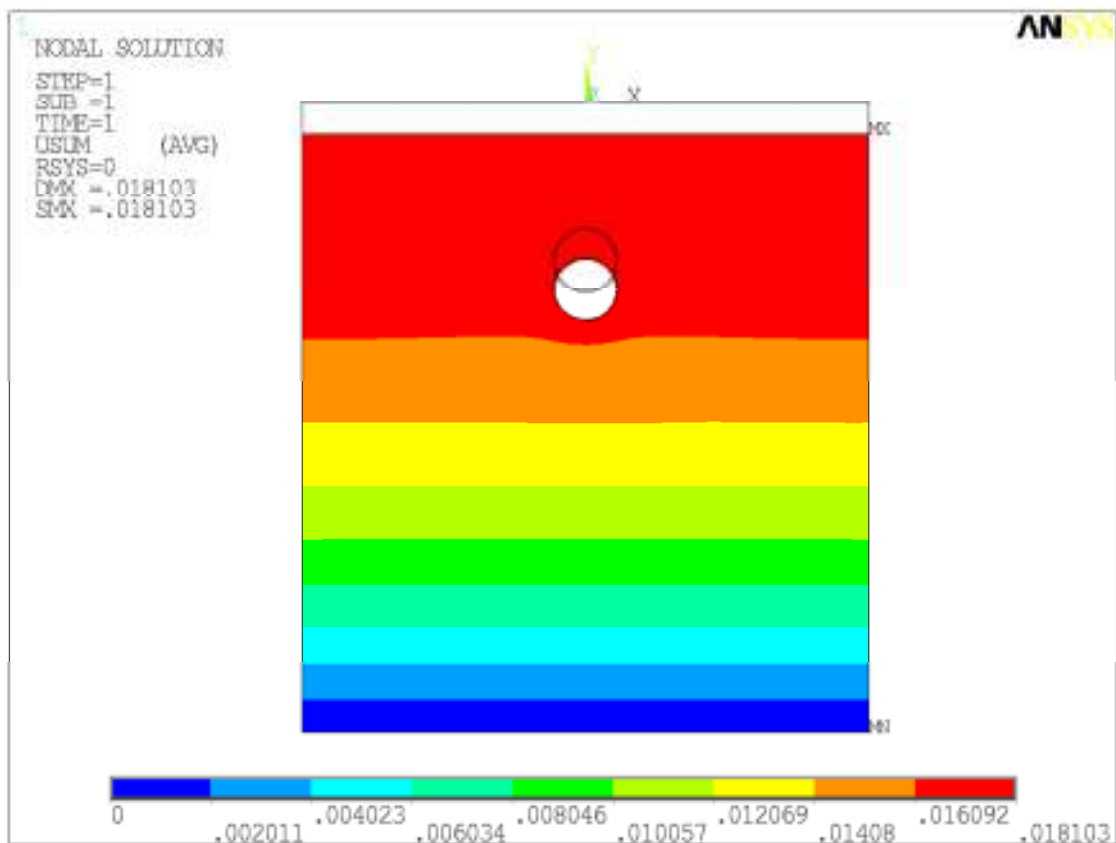
Snahou je nalézt minimální nutnou šířku pásu zeminy od boku potrubí, která zaručuje přesné výsledky a zároveň výsledný model klade přijatelné nároky na použitou výpočetní techniku. Pro zobecnění úlohy je vhodné volit přírůstky bočních vzdáleností v násobcích průměru potrubí.

Na obr. 5.10 a obr. 5.11 jsou vykresleny celkové posuny. U širšího modelu lze pozorovat nerovnoměrné sedání zeminy, které je větší pod potrubím. V případě úzkého modelu by se mohlo zdát, že zemina sedá rovnoměrně, což neodpovídá realitě.

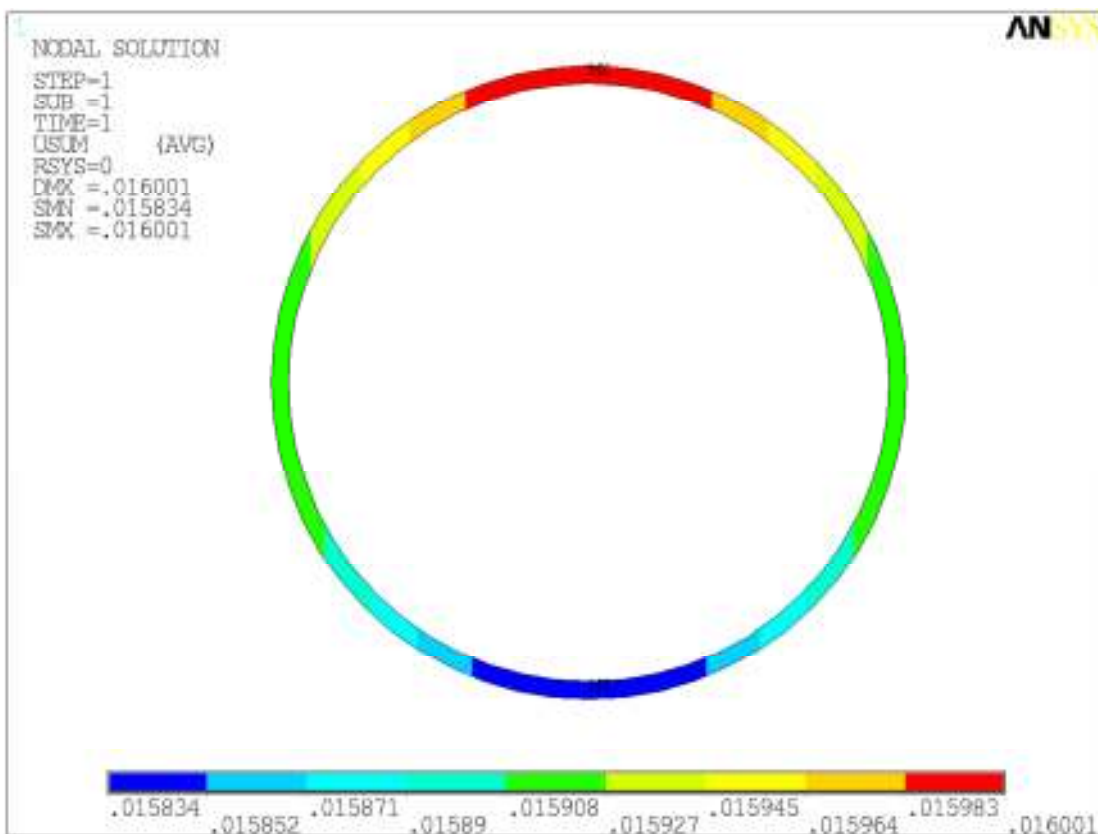
Na obr. 5.12 a obr. 5.13 jsou vykreslena posunutí ocelového potrubí. Je vidět, že posunutí vrcholu i paty potrubí si vzájemně mezi modely zcela neodpovídají. Při vzájemném odečtení extrémních hodnot zjistíme, že v modelu s bočním pásem zeminy šířky $0,25d$ se vrchol a pata potrubí vzájemně přiblížily o 0,167 mm. Zatímco pro model s pásem zeminy o šířce $4d$ se potrubí stlačilo o 0,203 mm. Obě tyto hodnoty jsou sice velmi malé, ale při použití měkčího materiálu než je ocel nebo větším zatížením by se mohly podstatně lišit.



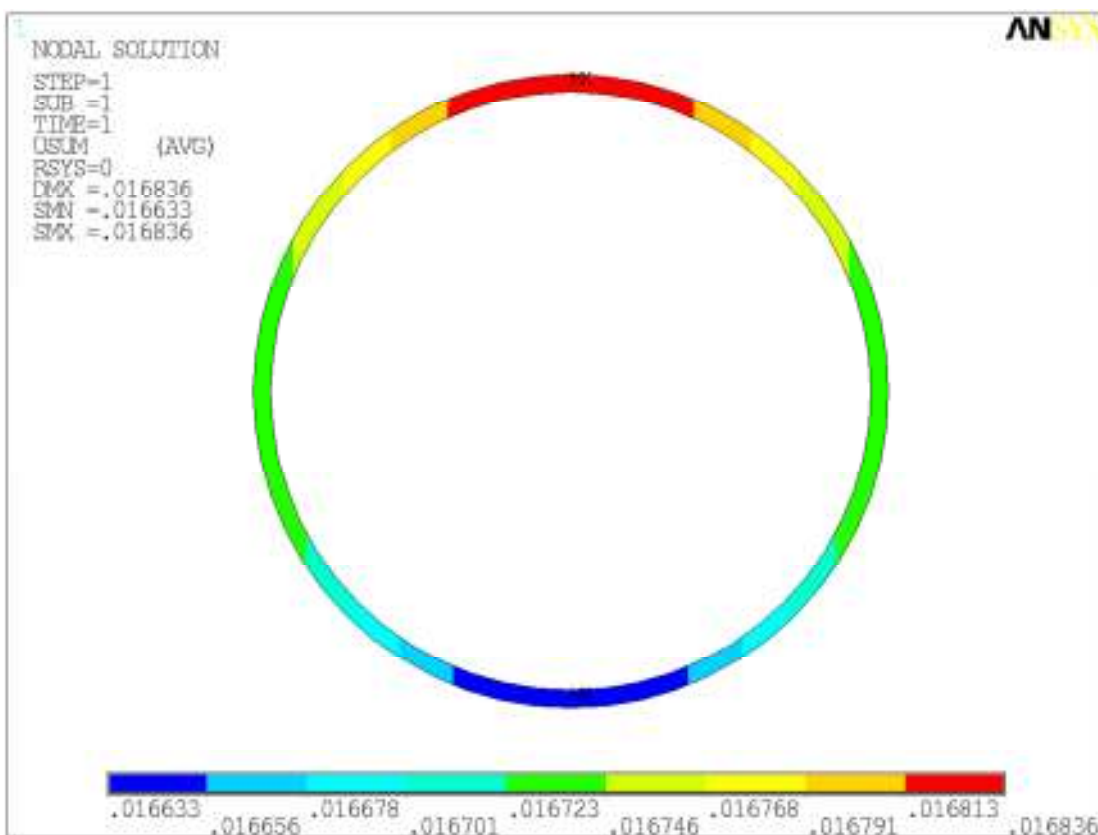
Obr. 5.10 Celkové posunutí pro boční vzdálenost 0,25d



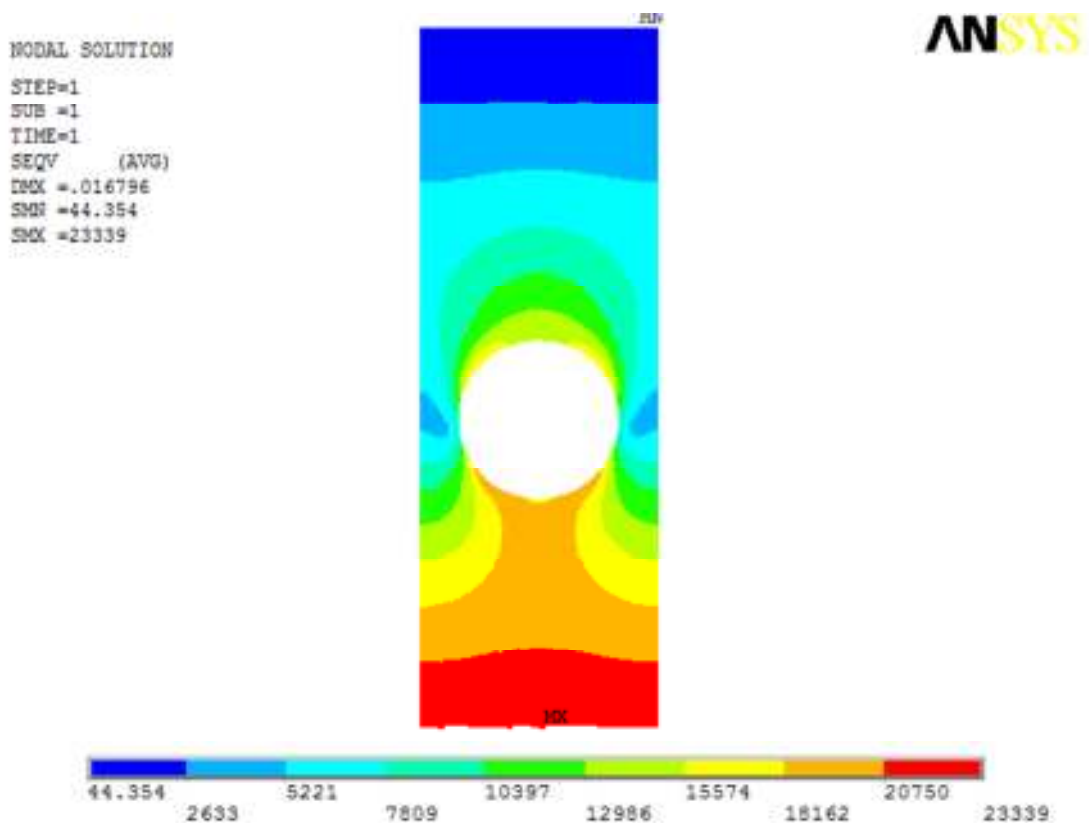
Obr. 5.11 Celkové posunutí pro boční vzdálenost 4d



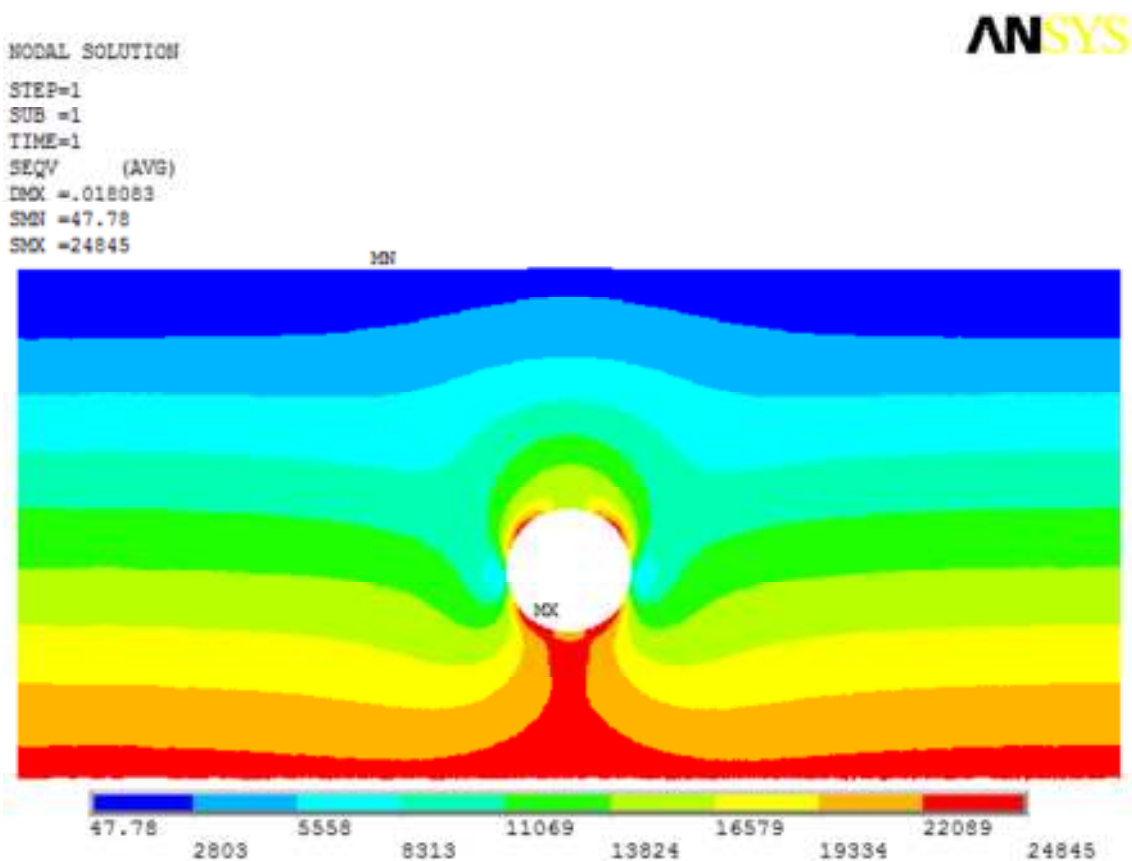
Obr. 5.12 Posunutí ocelového potrubí pro boční vzdálenost 0,25d



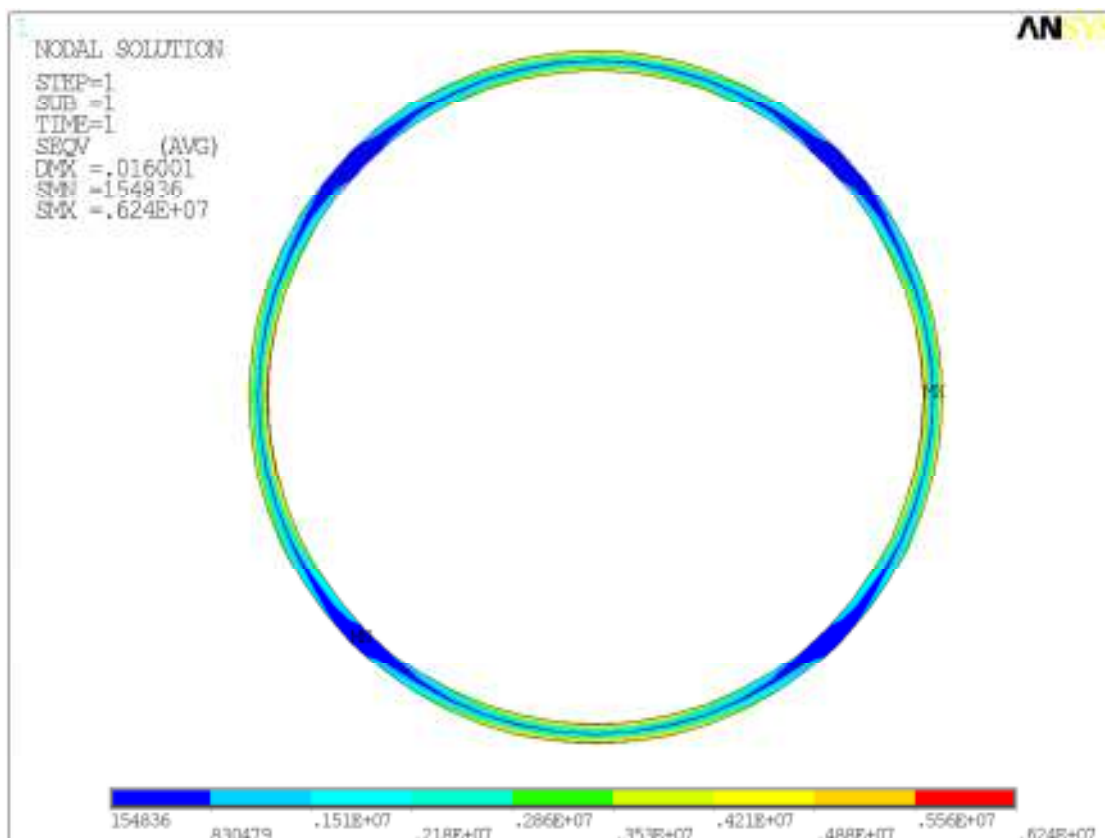
Obr. 5.13 Posunutí ocelového potrubí pro boční vzdálenost 4d



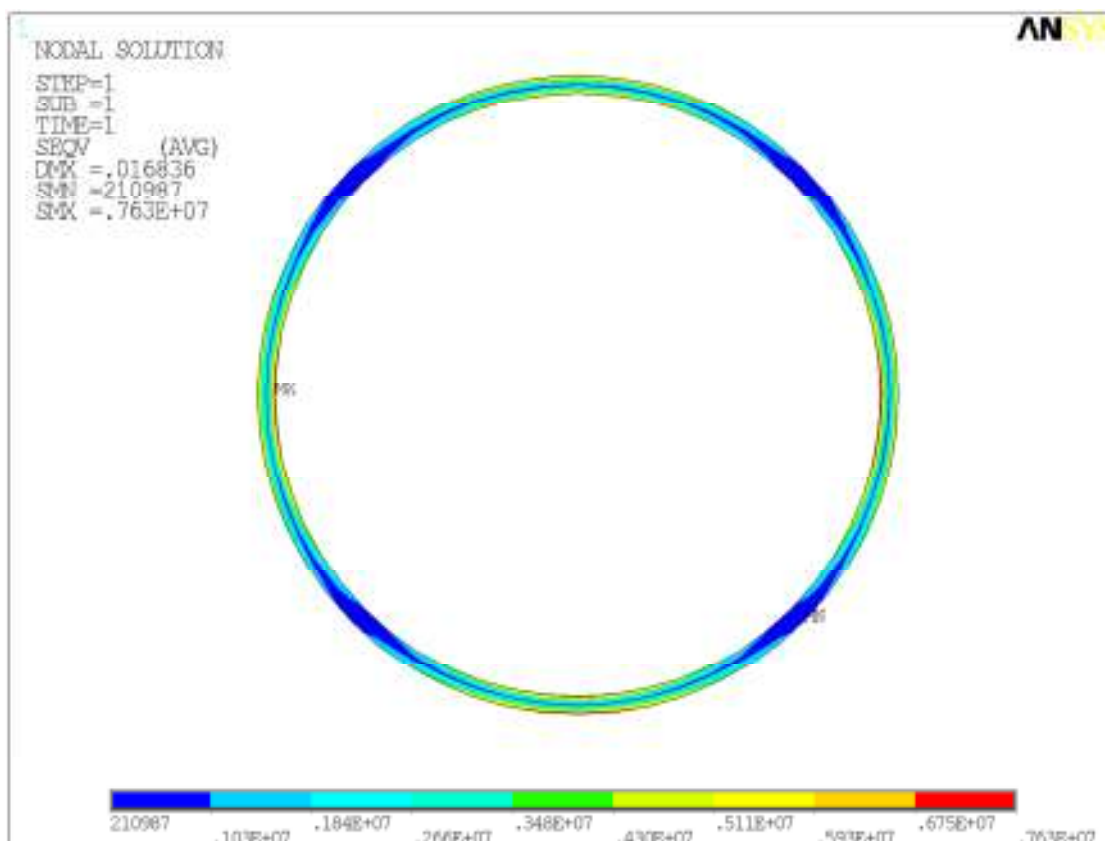
Obr. 5.14 Průběh Misesova napětí v zemině pro boční vzdálenost 0,25d



Obr. 5.15 Průběh Misesova napětí v zemině pro boční vzdálenost 4d



Obr. 5.16 Průběh Misesova napětí v oceli pro boční vzdálenost 0,25d



Obr. 5.17 Průběh Misesova napětí v oceli pro boční vzdálenost 4d

Na obr. 5.15 je vidět, jak napětí na okraji modelu, kde už není ovlivňováno potrubím, lineárně narůstá s hloubkou a pak se mění v blízkosti potrubí. To nelze pozorovat na obr. 5.14, kde je zvolený model příliš úzký a okrajové podmínky ovlivňují dosažené výsledky.

Tab. 5.4 Srovnání hodnot napětí

boční vzdálenost od okraje potrubí	napětí [Pa]			
	v zemině			v oceli
	ve vrcholu	dole	na boku	maximální
0,25d	12 846	17 402	9 566	6 243 500
0,5d	13 493	18 419	9 399	7 045 300
0,75d	13 916	19 001	10 325	7 327 000
d	14 175	19 350	10 572	7 471 100
1,5d	14 421	19 723	10 858	7 592 500
2d	14 503	19 895	11 037	7 618 200
4d	14 525	20 046	11 257	7 625 500

V tab. 5.4 jsou uvedeny zjištěné hodnoty napětí ve zvolených bodech pro různé šířky modelu. Z uvedených hodnot lze usoudit, že modely s pásem zeminy o šířce $2d$ a $4d$ od potrubí jsou již použitelné. Sledované hodnoty se již příliš neliší. Pro případ celoplošného rovnoměrného zatížení je dostačující celková šířka modelu odpovídající pětinasobku průměru potrubí ($2d$ na každou stranu). Pro případ zatížení silou nebo plošného zatížení působícího na malé ploše však bude lepší zvolit poloprostor s šířkou bočního pásu $4d$, aby došlo k roznosu zatížení.

Stejně jako boční vzdálenost od potrubí by se dala řešit i hloubka modelu, která by také měla být dvojnásobkem až čtyřnásobkem průměru potrubí. V tomto případě by to bylo 1 m až 2 m. Takže původní předpoklad, že 3,5 m zeminy pod potrubím by mělo dostačovat, se opravdu potvrdil a předchozí výsledky tak nejsou zkresleny nedostatečnou hloubkou modelu.

5.3 Prostorový model

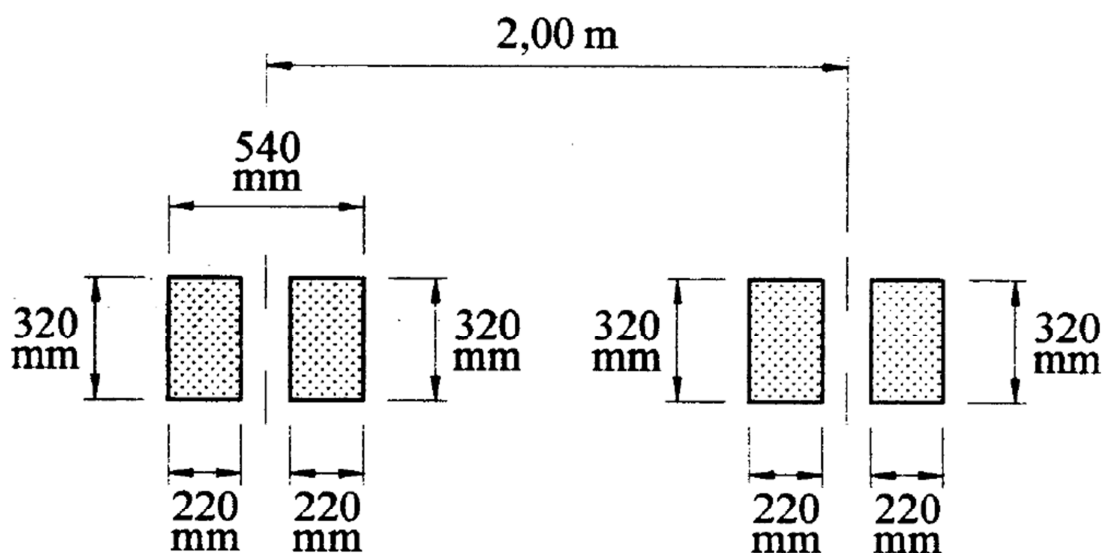
Jedná se o nejkompexnější model, který lze využít pro složitější případy namáhání, které už není možné přesně popsat některým z jiných zjednodušených modelů.

5.3.1 Zatížení vozidly

Části renovovaného potrubí procházejí pod pozemními komunikacemi. Je tedy nutné uvažovat situaci, kdy je potrubí zatíženo vozidly. V tomto případě se uvažuje, že celé zatížení přenáší stávající ocelové potrubí.

Při pojezdu vozidel je namáhání potrubí nepřímo úměrné hloubce jeho uložení. Nejméně příznivý stav tedy nastává, když je potrubí co nejbliže povrchu. Dle [13] je minimální dovolená hloubka uložení vodovodního potrubí pod silniční komunikací $H = 1,5$ m.

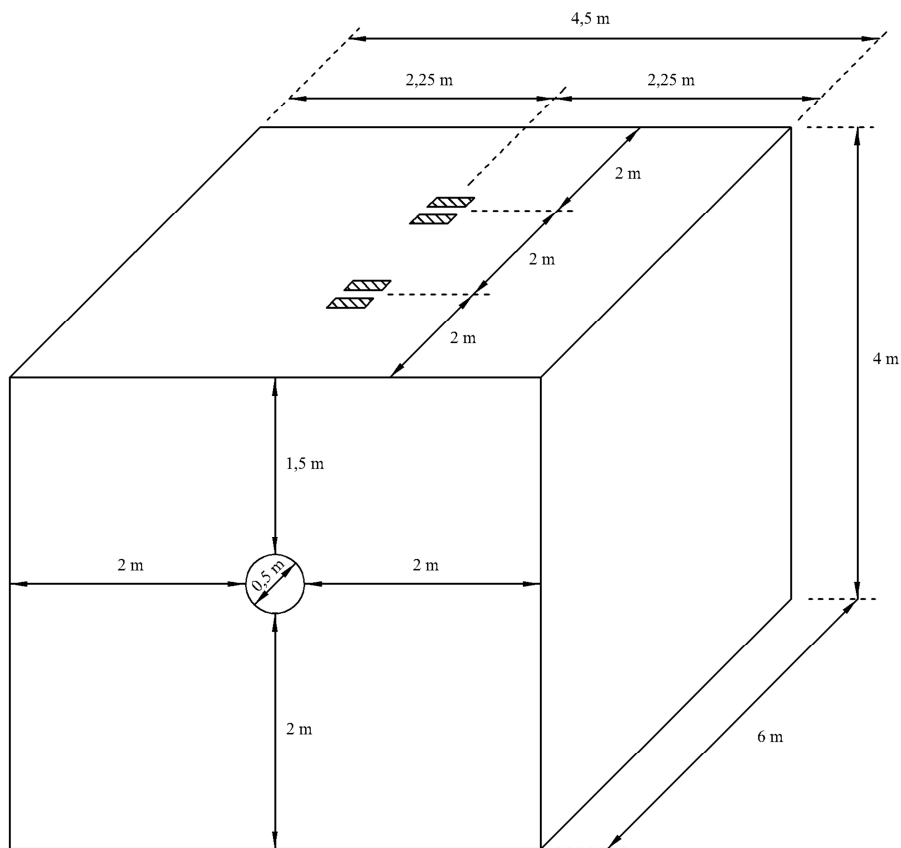
V dané lokalitě se nacházejí především silnice nižších tříd, kde je nejvíce zastoupena místní doprava. Podle [12] je tedy obvyklé extrémní zatížení představováno dvounápravovým vozidlem se vzdáleností náprav 4,5m. Na přední nápravu působí ekvivalentní síla 70 kN a na zadní 130 kN. Vzhledem k hloubce uložení jsou od sebe nápravy hodně vzdáleny a jejich účinky se nebudou vzájemně sčítat (k tomu by mohlo docházet ve větších hloubkách, kde už ale účinky zatížení nebudou tak výrazné). Proto byla modelována zadní náprava, na kterou působí větší ekvivalentní síla. Na obr. 5.18 je zobrazeno schéma rozmístění kol na zadní nápravě.



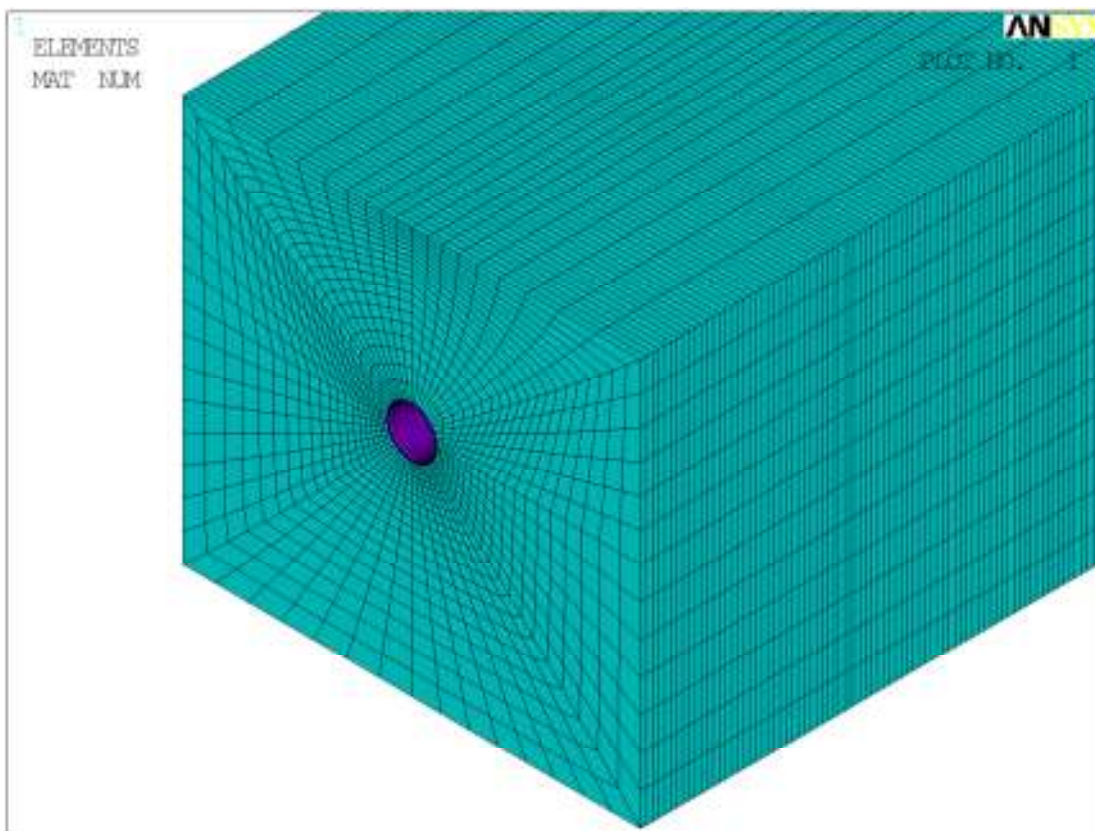
Obr. 5.18 Schéma zadní nápravy [12]

V následujícím příkladu je vytvořen prostorový model, jehož geometrie je naznačena na obr. 5.19. Rozměry modelu vycházejí ze studie v kap. 5.2.1. Působící ekvivalentní síla $F = 130$ kN se rozpočítá na plochu kol, která se pak zatíží náhradním tlakem p .

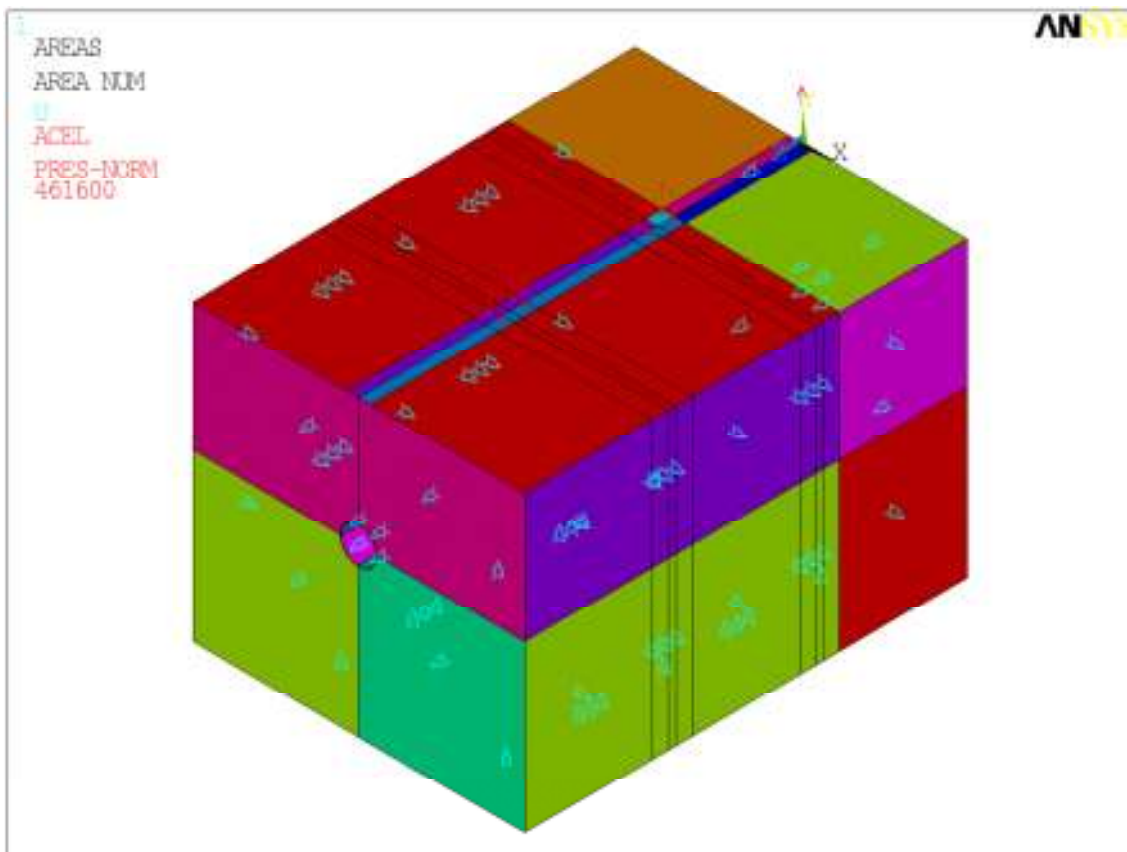
Na okrajových plochách modelu bylo zabráněno posunutí v příslušných směrech (viz obr. 5.21). Bylo aplikováno tíhové zrychlení $g = 10$ m s⁻² a plošky odpovídající ploše kol vozidla byly zatíženy tlakem $p = 461,6$ kPa. Materiálové vlastnosti byly zadány stejné jako u úlohy rovinné deformace (viz tab. 5.3).



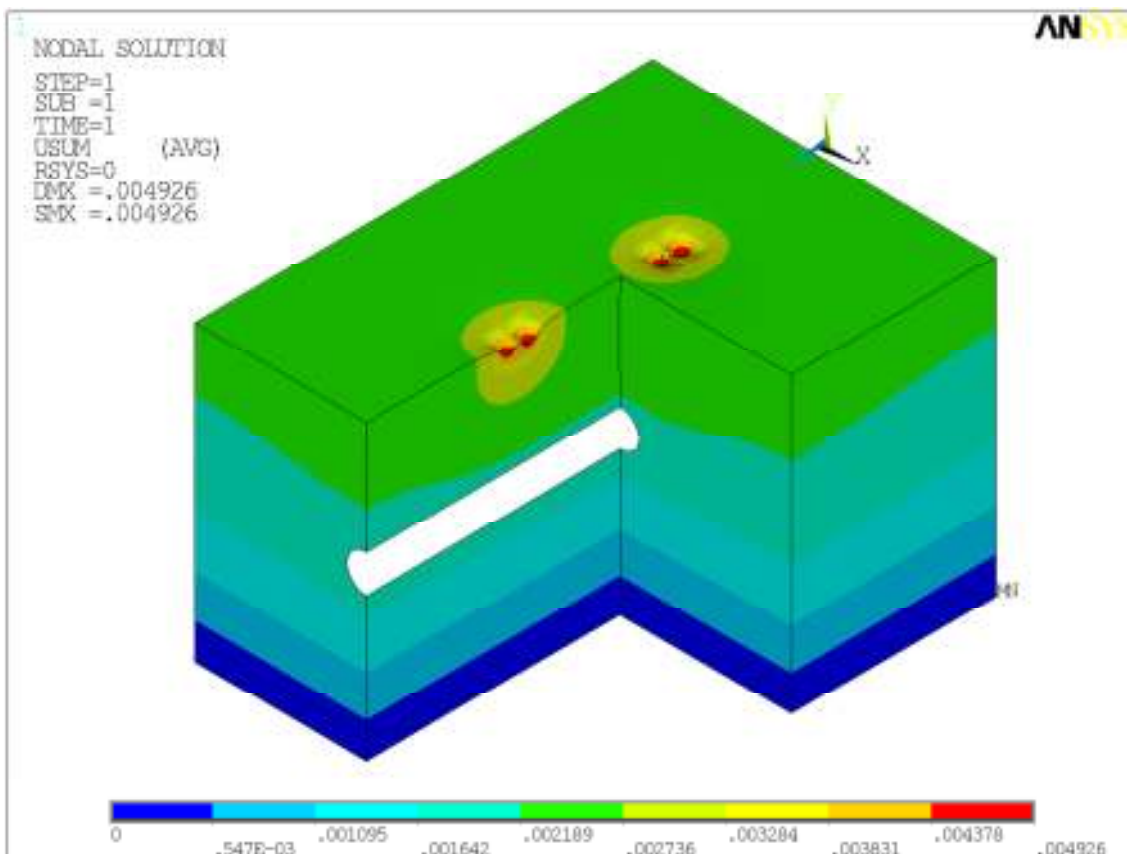
Obr. 5.19 Základní geometrie prostorového modelu



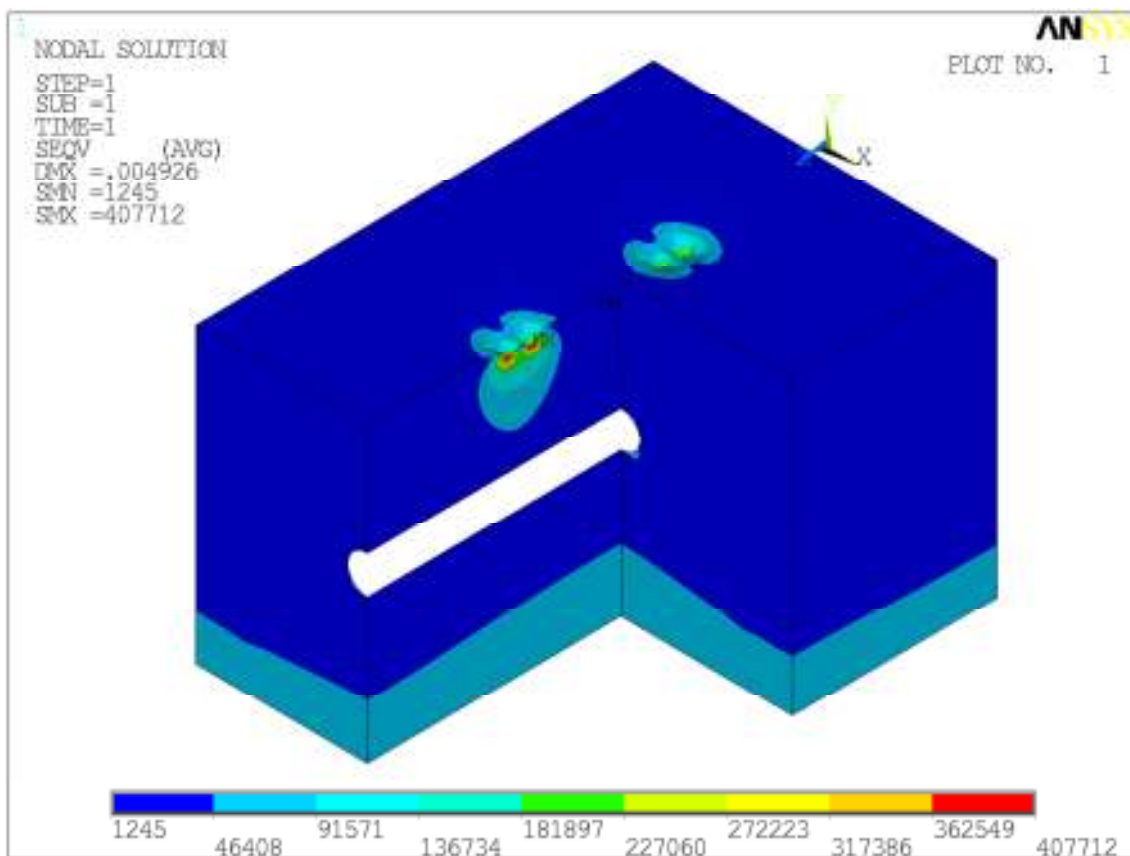
Obr. 5.20 Síť prostorového modelu z prvků SOLID 45



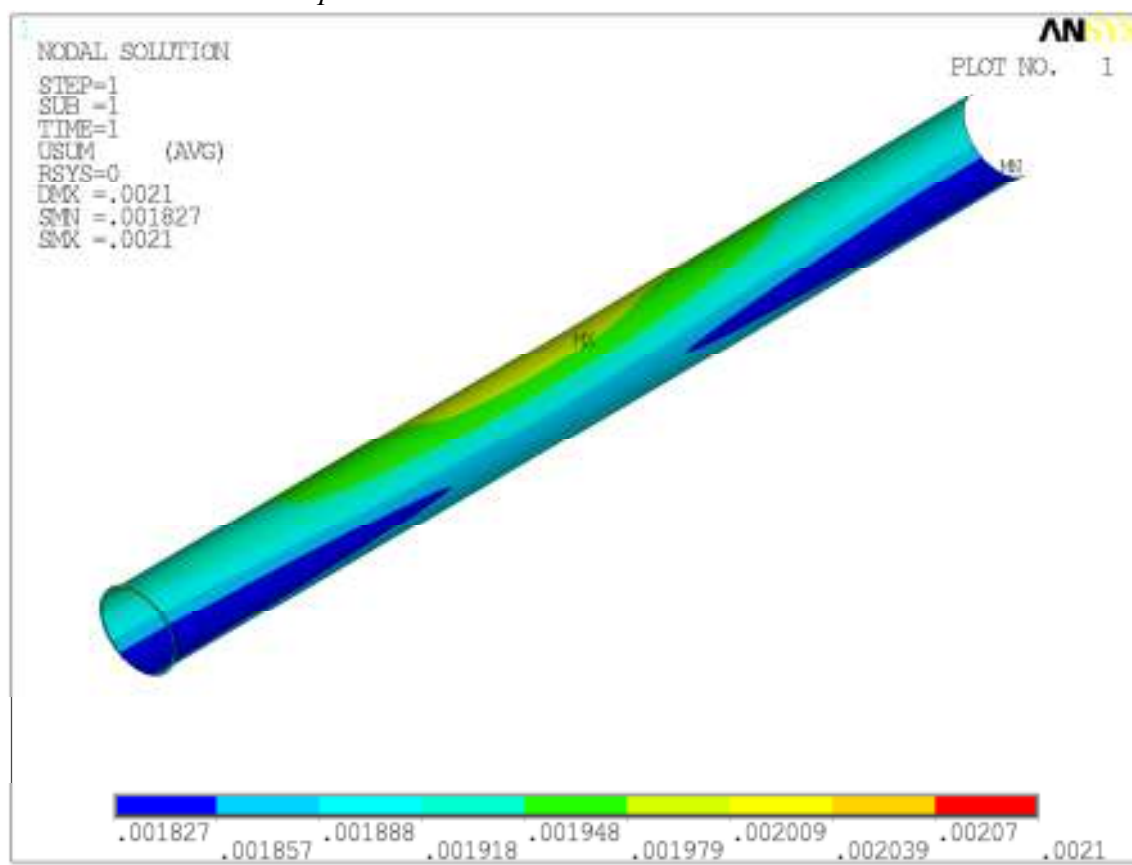
Obr. 5.21 Okrajové podmínky a zatížení modelu



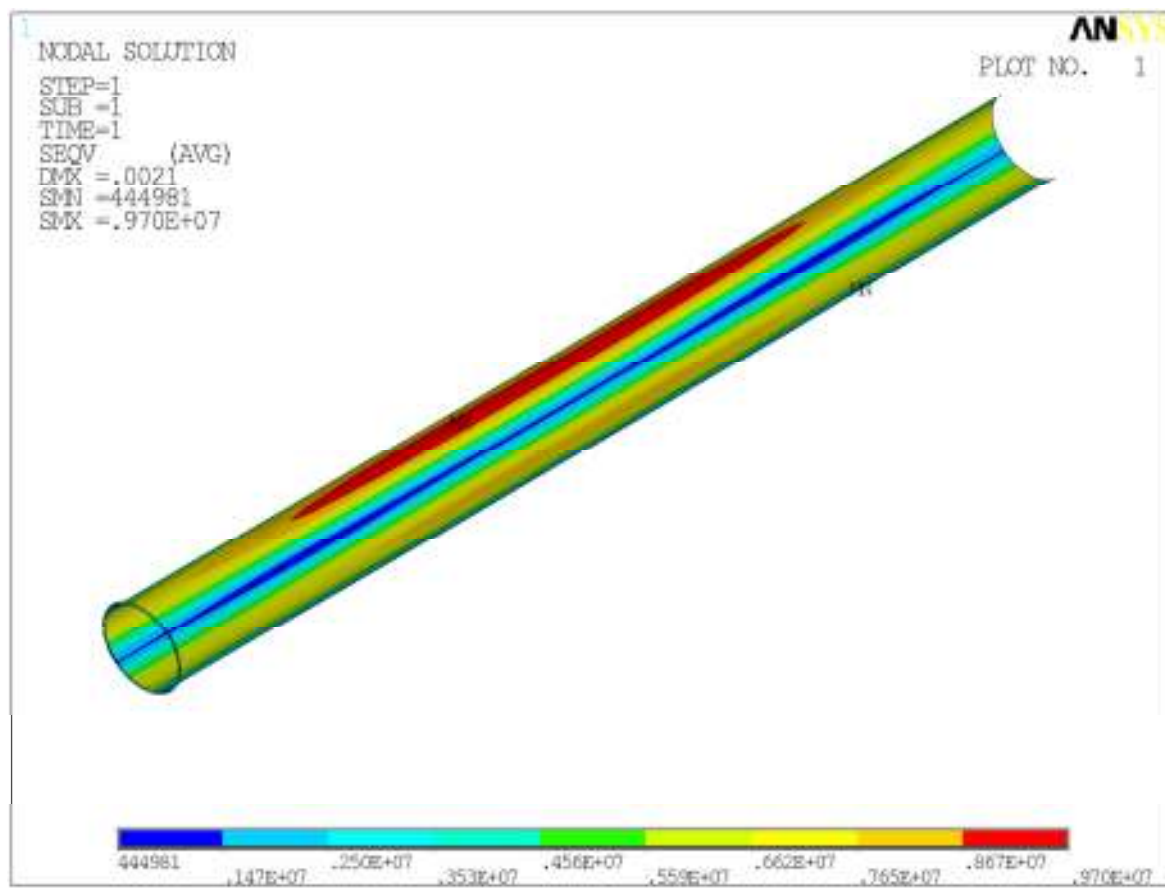
Obr. 5.22 Celková posunutí



Obr. 5.23 Průběh napětí



Obr. 5.24 Posunutí na ocelovém potrubí



Obr. 5.25 Průběh napětí na ocelovém potrubí

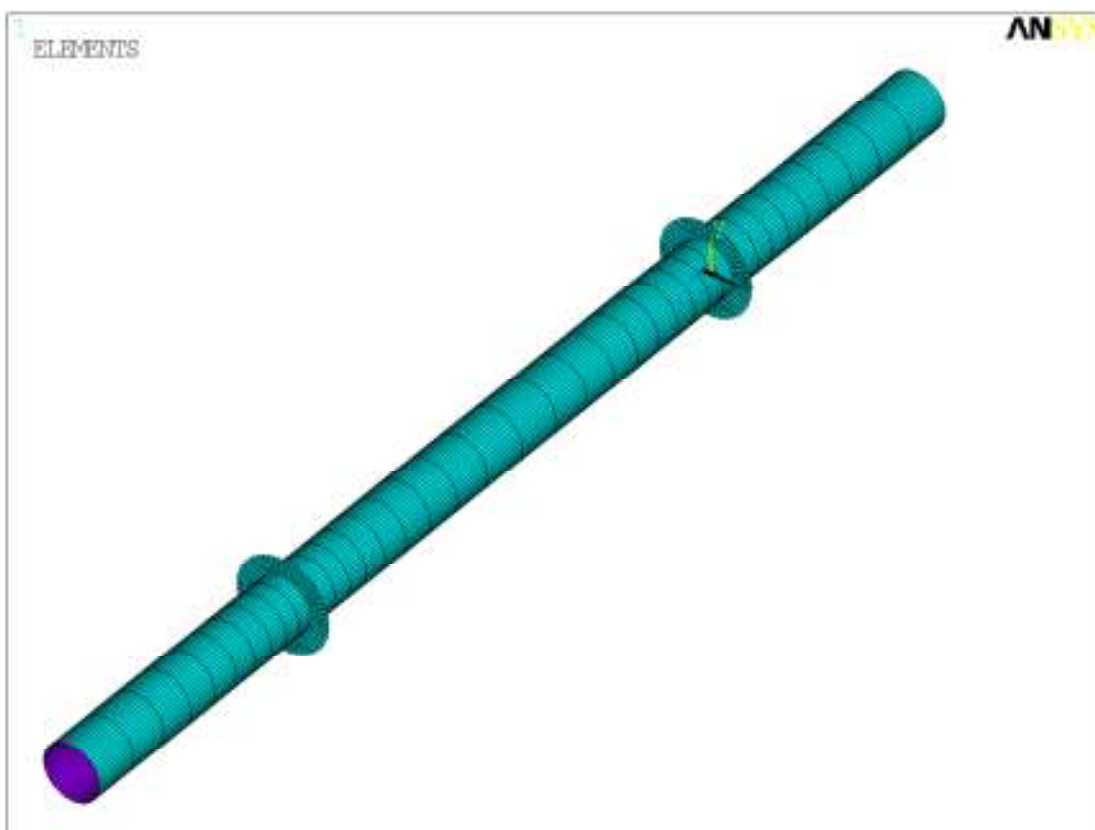
5.4 Skořepinový model

5.4.1 Trubka v trubce

Na skořepinovém modelu bylo ověřováno chování vnitřního polyethylenového potrubí. Mohou zde nastat 2 kombinace zatěžovacích stavů:

- K1: vlastní tíha + vnitřní přetlak,
- K2: vlastní tíha + podzemní voda.

Vnější průměr potrubí je $d = 315$ mm. Kvůli menší tloušťce stěny $h = 18,7$ mm a tím menší únosnosti byla pro modelování vybrána varianta potrubí rozměrové řady SDR17 s roztečí středících prvků 2,9 m. Tloušťka středícího prvku byla zvolena 20 mm. Materiálové vlastnosti PE100 jsou stejné jako v kap. 5.1, tj. modul tečení $E_C = 117$ MPa, Poissonův součinitel $\nu = 0,38$ a hustota $\rho = 950$ kg m⁻³. Síť (obr. 5.26) je tvořena prvky SHELL 43 na středně tlusté až tlusté desky. Je tedy uvažován případný vliv smyku. Aby nedocházelo ke zkreslení výsledků vlivem okrajových podmínek, bylo modelováno jedno celé pole a k němu ještě polovina vedlejšího pole na každou stranu.

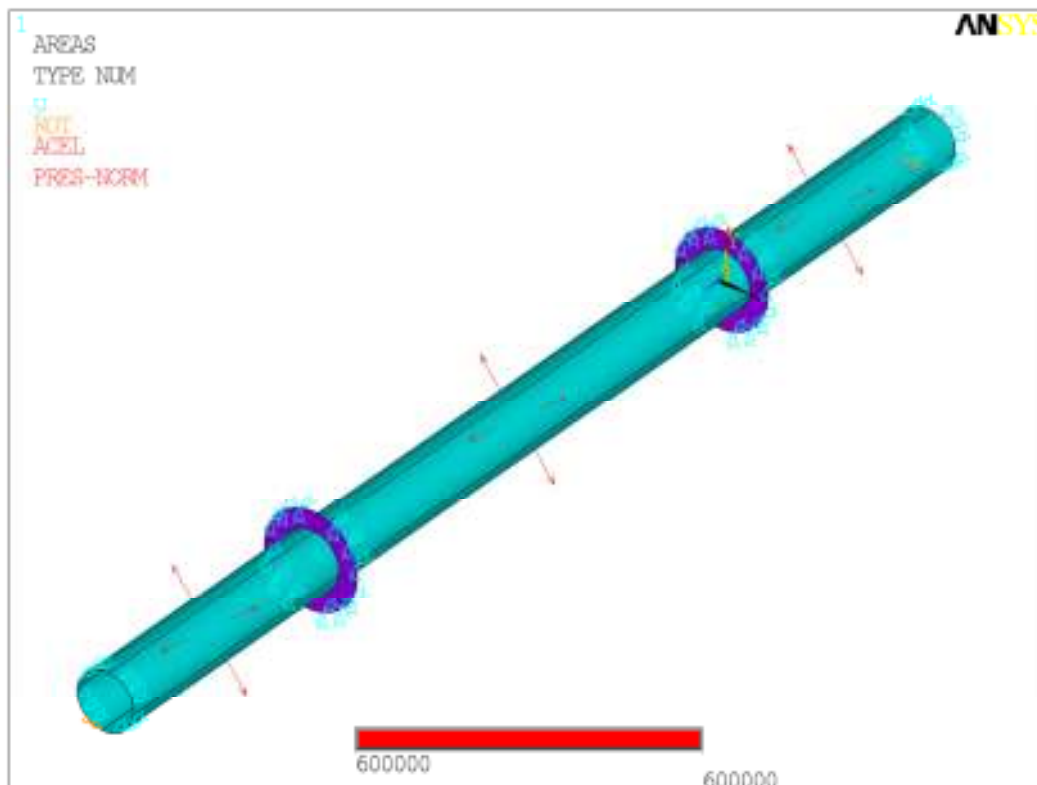


Obr. 5.26 Síť z konečných prvků SHELL 43

Okrajové podmínky jsou znázorněny na obr. 5.27. Spočívají v zabránění vodorovného a svislého posunutí po okraji středících prvků. Konce krajních polí jsou po celém obvodu zajištěny proti vodorovnému posunutí a v nejnižším bodě potrubí je zabráněno rotaci kolem osy x (po deformaci je zde tečna rovnoběžná s osou z).

K1: Vlastní tíha + vnitřní přetlak

Model je zatížen vlastní tíhou pomocí gravitačního pole definovaného tíhovým zrychlením $g = 10 \text{ m s}^{-2}$ a vnitřním přetlakem 0,6 MPa, což je maximální dovolený přetlak ve vodovodní síti.



Obr. 5.27 Okrajové podmínky a zatížení modelu (kombinace K1)

Hodnoty posunutí (obr. 5.28) jsou dle předpokladu maximální uprostřed pole a jeho velikost je stejná na krajích modelu i uprostřed celého modelovaného pole. Stejně tak rozložení napětí (obr. 5.29) je symetrické a odpovídá předpokladu, že nejvíce bude potrubí namáháno v okolí středících prvků. Z toho lze usoudit, že okrajové podmínky byly vhodně zvoleny. Pro příští simulace by bylo možné modelovat pouze středící prvek a polovinu přiléhajícího pole na každou stranu, čímž by se snížila výpočetní náročnost modelu.

Pro maximální dovolený průhyb platí podmínka

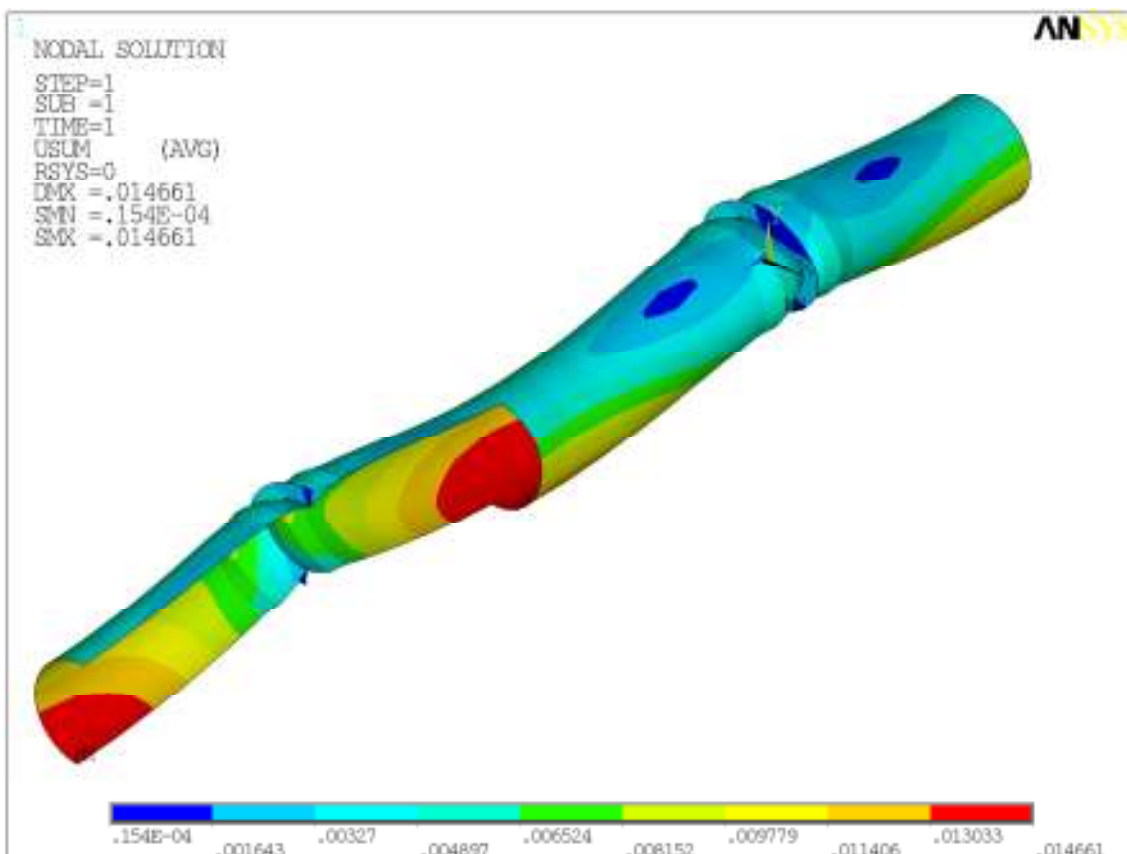
$$u \leq u_{\text{dov}} \quad (5.1)$$

kde se pro plasty uvažuje

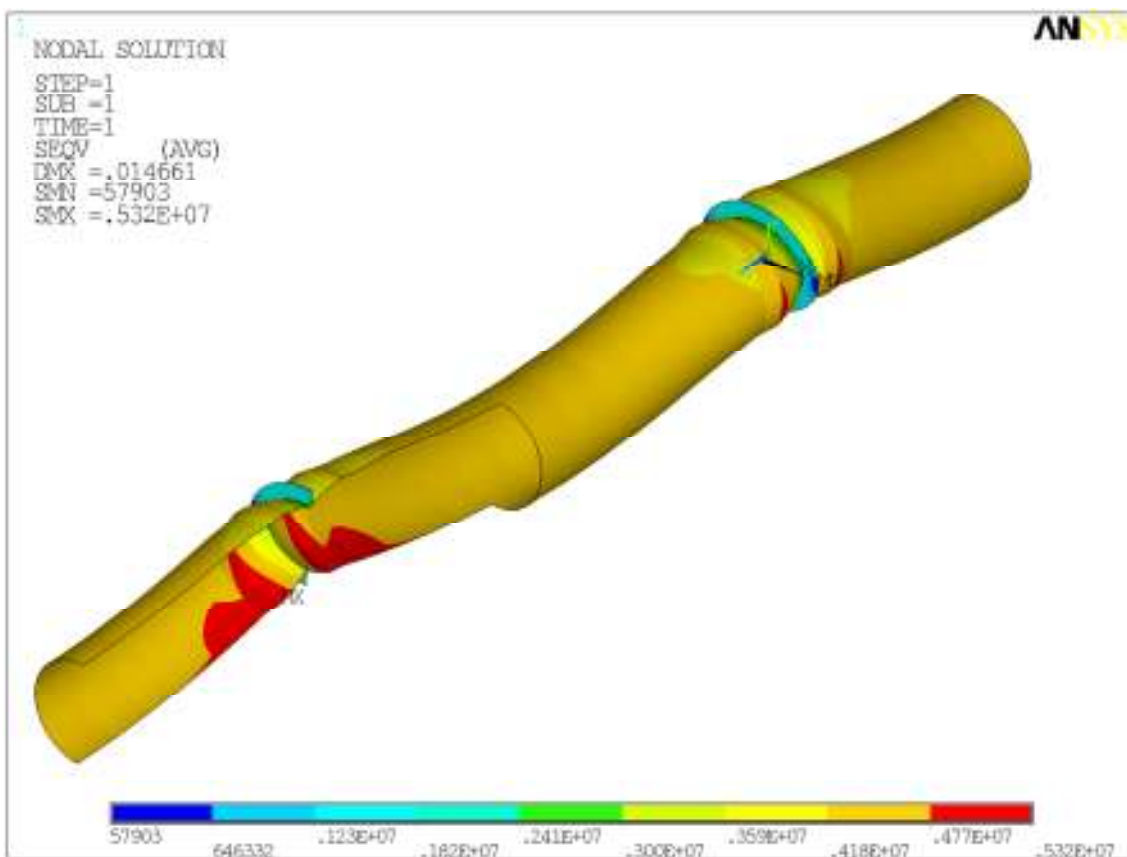
$$u_{\text{dov}} = \frac{1}{100} L \quad (5.2)$$

V tomto případě je rozpětí $L = 2,9$ m. Po dosazení do (5.2) tedy vychází $u_{\text{dov}} = 0,029$ m. Výsledný průhyb je $u = 0,014578$ m. Celkové posunutí je $0,014661$ m, což se velmi blíží posunu ve směru osy y . Ostatní složky posunutí jsou tedy zanedbatelné a dále lze za průhyb považovat celkové posunutí. Tato hodnota je navíc vždy větší, takže se jedná o zjednodušení na stranu bezpečnou. Maximální celkový průhyb splňuje podmínku (5.1), takže potrubí při daném zatížení vyhovuje na deformaci.

Maximální napětí $\sigma = 5,3166$ MPa nesplňuje podmínku (3.3). Je větší než $\sigma_{\text{dov}} = 4,8$ MPa a tudíž navržené potrubí nevyhoví.



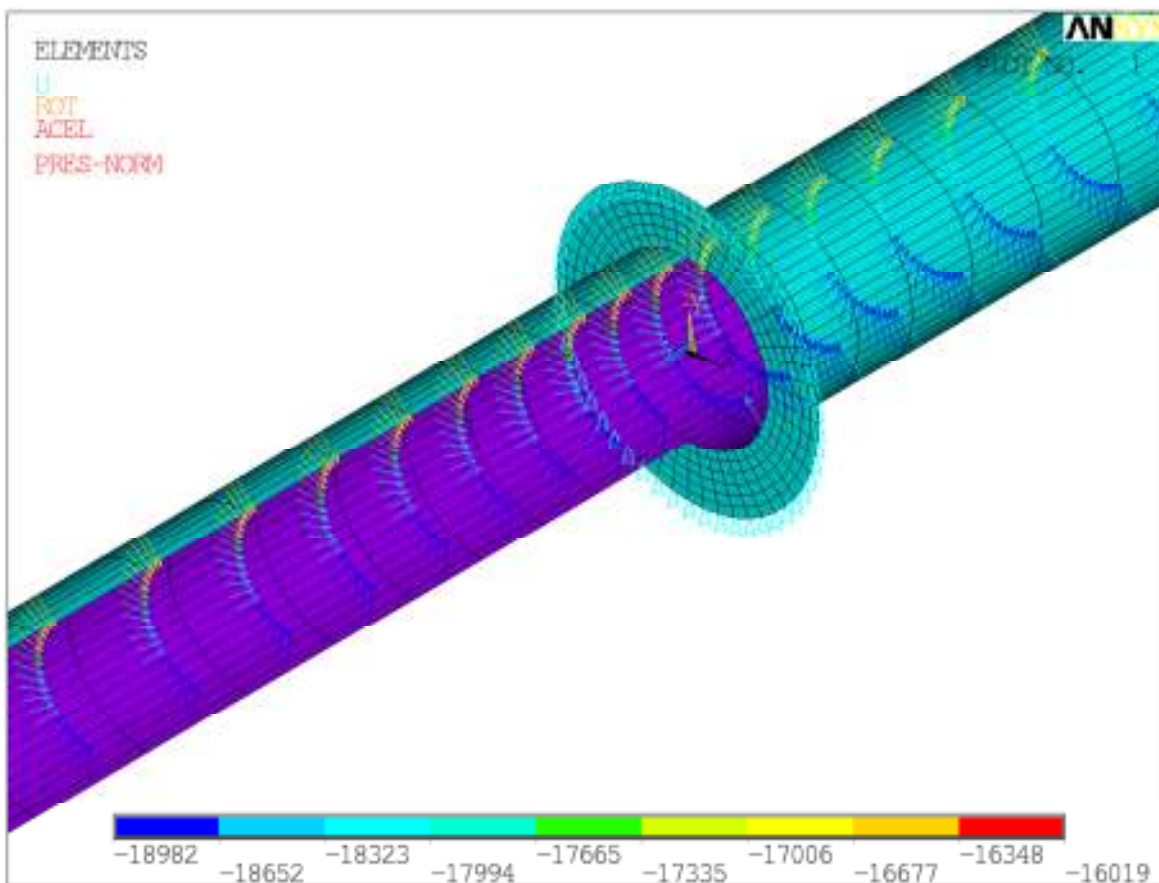
Obr. 5.28 Posunutí od vlastní tíhy a přetlaku (kombinace K1)



Obr. 5.29 Misesovo napětí od vlastní tíhy a přetlaku (kombinace K1)

K2: Vlastní tíha + podzemní voda

Dalším možným případem namáhání je zatížení vlastní tíhou ($g = 10 \text{ m s}^{-2}$) a vnějším tlakem od působení podzemní vody, která může vniknout do meziprostoru ocelového a plastového potrubí. Hloubka uložení se předpokládá $H = 1,5 \text{ m}$ od povrchu po vrchol stávajícího ocelového potrubí. Část rozvodů se vyskytuje v blízkosti vodního toku, kde lze předpokládat vysokou hladinu podzemní vody. Zvláště pak na jaře v období záplav může hladina podzemní vody dosahovat až povrchu terénu. Pro model byla vybrána tato extrémní varianta zatížení viditelná na obr. 5.30.



Obr. 5.30 Okrajové podmínky a zatížení modelu vlastní tíhou a podzemní vodou (kombinace K2)

Hodnoty posunutí (obr. 5.31) i napětí (obr. 5.32) jsou opět stejné uprostřed celého pole i na krajích modelu, takže okrajové podmínky neovlivňují výsledky.

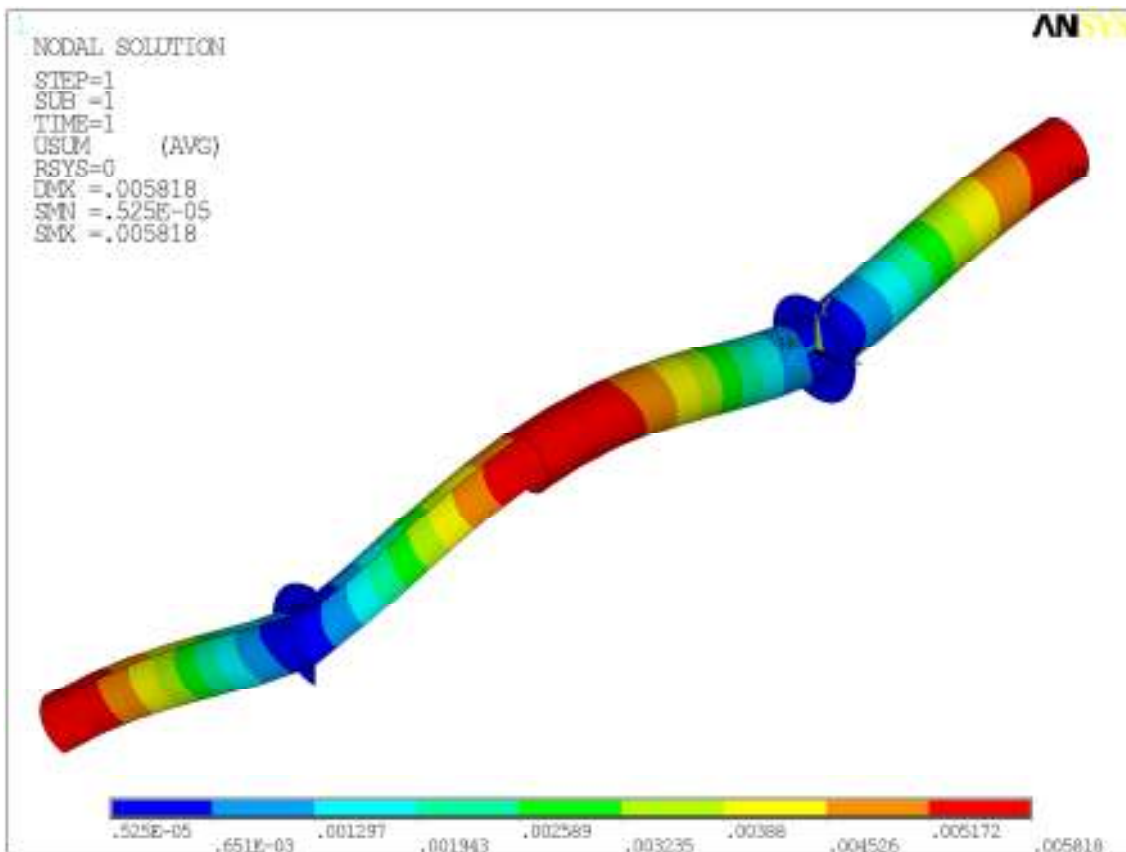
Maximální posunutí $u = 0,005818 \text{ m}$ je menší než dovolený průhyb $u_{\text{dov}} = 0,029 \text{ m}$ a je tedy splněna podmínka deformace (5.1).

Maximální napětí $\sigma = 332,297 \text{ kPa}$ splňuje podmínku (3.3), kde $\sigma_{\text{dov}} = 5 \text{ MPa}$ a tudíž navržené potrubí vyhoví na napětí.

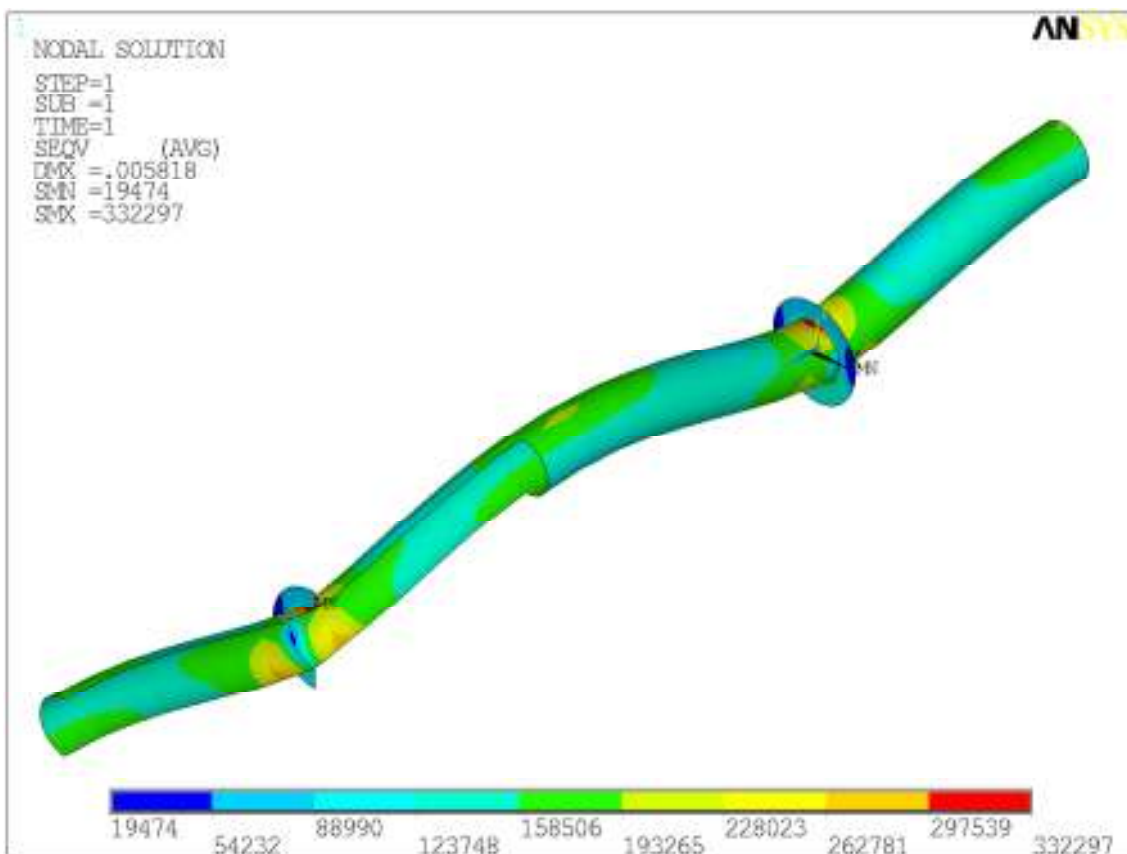
Deformace i napětí pro tento případ zatížení vyhoví s velkou rezervou. Nehrozí tedy nebezpečí porušení ani při níže položeném potrubí nebo zvýšené hladině vody při povodni, kdy bude zatížení od vody větší než v tomto případě.

U tohoto typu namáhání však může dojít ke ztrátě stability potrubí, kterou je také třeba posoudit.

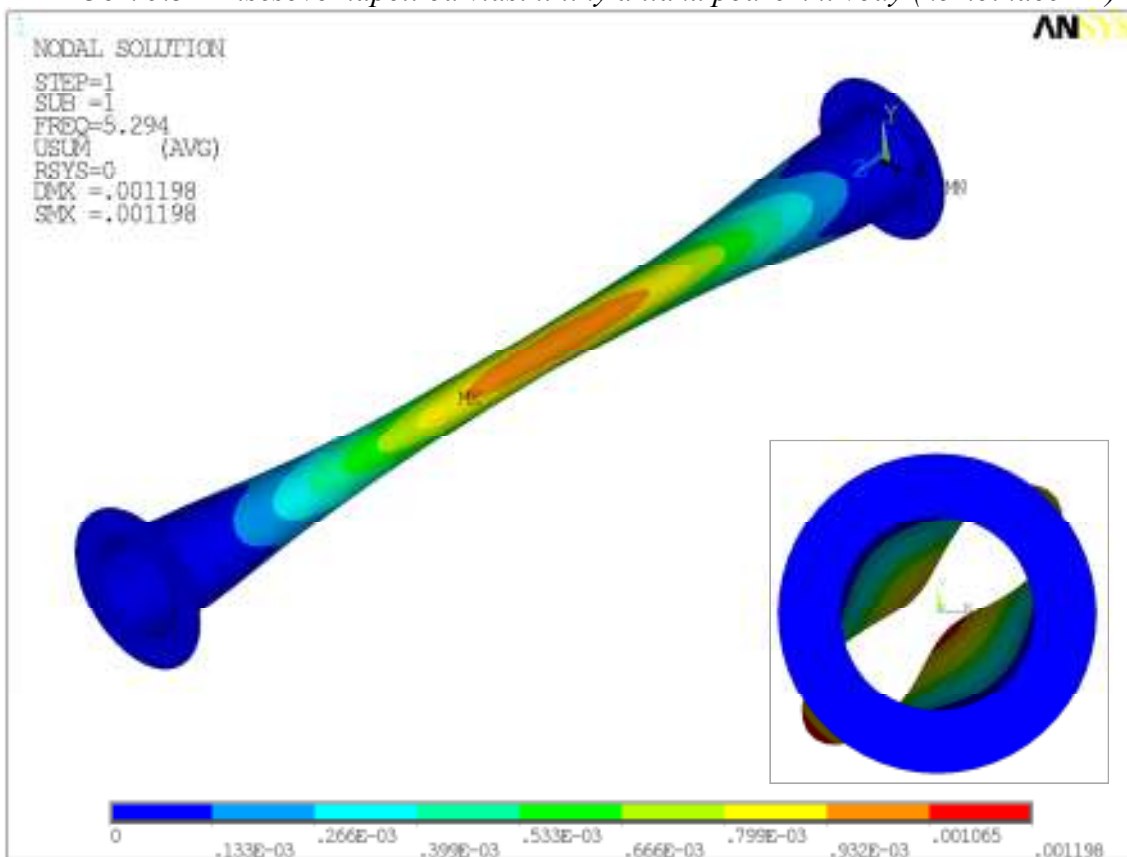
Pro první vlastní tvar potrubí vykreslený na obr. 5.33 je kritický násobek zatížení $\lambda = 5,294$. Je tedy s velkou rezervou splněna podmínka stability (3.7). Druhý vlastní tvar má stejný kritický násobek zatížení a oproti prvnímu vlastnímu tvaru je jen pootočen o 45° . U třetího vlastního tvaru už dochází k rozdělení potrubí na 2 části, přičemž obě poloviny potrubí se deformují do stejného tvaru, ale jsou vzájemně pootočené o 90° . Další vlastní tvary se tvoří stejně jen se zvyšuje počet vzájemně pootočených částí.



Obr. 5.31 Posunutí od vlastní tíhy a tlaku podzemní vody (kombinace K2)



Obr. 5.32 Misesovo napětí od vlastní tíhy a tlaku podzemní vody (kombinace K2)



Obr. 5.33 První vlastní tvar ($\lambda_1 = 5,294$) od vlastní tíhy a tlaku podzemní vody (kombinace K2)

Při první variantě zatížení vlastní tíhou a vnitřním přetlakem sice potrubí nevyhovuje z hlediska maximálního dovoleného napětí, ale překročení této meze není příliš výrazné. Proto lze předpokládat, že nedojde k okamžitému kolapsu či náhlému poškození ihned nebo v krátké době po uvedení do provozu. Částečná rezerva únosnosti je zahrnuta v zohlednění koeficientu bezpečnosti ve výpočtu dovoleného napětí, čímž je snížena jeho limitní hodnota. Pokud by ale působil stálý přetlak 0,6 MPa, byla by nejspíš snížena životnost potrubí. Zejména v extrémně namáhaných místech jako jsou napojení potrubí, odbočky a jiné detaily by časem mohlo docházet k poruchám. Bylo by proto vhodnější zvolit potrubí s větší tloušťkou stěny nebo snížit hodnotu přetlaku v potrubí.

V ostatních posuzovaných případech potrubí vyhovuje všem podmínkám.

6 Závěr

V úvodu této práce jsou shrnuty poznatky o čtyřech nejběžnějších bezvýkopových technologiích, možnostech jejich využití, způsobu provádění, jejich výhodách i nevýhodách. Dále jsou shrnuty některé význačné vlastnosti týkající se termoplastů, zejména polyethylenu.

Pro ruční výpočty a rámcovou kontrolu výsledků jednoduchých případů namáhání potrubí může sloužit teoretické řešení kruhového prstence, které je odvozeno na prutovém modelu. Takto získané výsledky sice nejsou zcela přesné, ale jsou srovnatelné s výslednými hodnotami z programových systémů založených na metodě konečných prvků. Zvláště u zjednodušených modelů lze dosáhnout velmi podobných výsledků.

Model rovinné deformace je dobře využitelný pro simulaci potrubí v pružném poloprostoru. Lze takto zkoumat chování zeminy a sledovat průběh napětí v zemině v okolí potrubí. Pro modelování vnitřního polyethylenového potrubí osazeného na středících prvcích se osvědčil skořepinový model.

Při posuzování vnitřního polyethylenového potrubí se ukázalo, že jeho návrh není ideální. Jeho rozměry totiž byly navrženy pouze inženýrským odhadem a nebylo posouzeno. Při zatížení vnitřním přetlakem byla překročena dovolená mez napětí v materiálu. Ovšem nejedná se o překročení únosnosti, které by mělo katastrofální následky. Ovšem bylo by vhodné provést přesnější návrh.

7 Použitá literatura a zdroje

- [1] Křupka, V., Schneider, P. *Konstrukce aparátů*. PC-DIR, spol. s r.o., Brno: 1998, 273 str., ISBN 80-214-1124-4.
- [2] Loyda, M., Šponer, V., Ondráček, L., Bareš, A. a kolektiv. *Svařování termoplastů*. UNO Praha, spol. s r.o., Praha: 2011, 530 str., ISBN 978-80-904949-0-9.
- [3] Teplý, B., Šmiřák, S. *Pružnost a plasticita II*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., Brno: 2000, 199 str., ISBN 80-214-1622-X.
- [4] Servít, R., Drahoňovský, Z., Šejnoha, J. *Teorie pružnosti a plasticity, 2. díl*. Vydavatelství ČVUT, Praha: 1979, 314 str.
- [5] Procházka, P. *The Theory of Elasticity 20*. Vydavatelství ČVUT, Praha: 1999, 151 str., ISBN 80-01-01949-7.
- [6] Němec, I. *Nelineární mechanika – modul OD7 - M01 (studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia)*. Brno: 2006, 70 str.
- [7] AQUA PROCON s.r.o. *Identifikační údaje stavby a stavebníka*. Brno: 2012
- [8] Kříž, J. *Zpráva o inženýrskogeologickém průzkumu*, Brno: 2011
- [9] Theory Reference for ANSYS, release 12.1.

Normy a směrnice

- [10] ČSN EN 1778 *Charakteristické hodnoty pro svařované konstrukce z termoplastů – Stanovení dovoleného namáhání a modulů pro navrhování svařovaných dílů z termoplastů*, 2002, 43 str.
- [11] ARBEITSBLATT ATV-DVWK-A 127 *Statische Berechnung von Abwasserkanälen und Leitungen – 3. Auflage*, Hennef: 2000, 68 str., ISBN 3-933707-37-4.
- [12] ČSN EN 1991-2 *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 2: Zatížení mostů dopravou*, 2005, 152 str.
- [13] ČSN 73 6005 *Prostorové uspořádání sítí technického vybavení*, 1994, 20 str.
- [14] ČSN 73 1001 *Zakládání staveb. Základová půda pod plošnými základy*, 1987, 76 str.

Internetové adresy

- [15] <http://www.verlegepflug.at>
- [16] <http://www.gerex.cz>
- [17] <http://www.wavin-osma.cz>
- [18] <http://www.maincor.cz>
- [19] <http://www.simona.de/cz>
- [20] <http://www.pipelife.cz>

8 Seznam symbolů

A_1	[-]	korekční faktor zohledňující vlivy specifického napětí
A_{2E}	[-]	korekční faktor zohledňující vlivy okolního media na změnu modulu pružnosti
A_{2K}	[-]	korekční faktor zohledňující vlivy okolního media
\mathbf{A}_e	[-]	tenzor deformace
\mathbf{A}_σ	[Pa]	tenzor napětí
\mathbf{D}		matice tuhosti materiálu
\mathbf{D}^{-1}		matice poddajnosti materiálu
d	[m]	vnější průměr potrubí
E	[Pa]	modul pružnosti materiálu
E_C	[Pa]	modul tečení při navržených podmínkách (v závislosti na teplotě, namáhání a čase)
$E_{C,dov}$	[Pa]	dovolený modul tečení při provozních podmínkách (v závislosti na teplotě, namáhání, čase a okolním médiu)
E_{def}	[Pa]	modul přetvárnosti horniny
F	[N]	síla
f_l	[-]	dlouhodobý svařovací faktor
g	[m s ⁻²]	tíhové zrychlení
G	[Pa]	modul pružnosti materiálu ve smyku
h	[m]	tloušťka potrubí
H	[m]	výška nadloží
I	[m ⁴]	moment setrvačnosti
K	[Pa]	mez pevnosti při tečení
L	[m]	rozpětí
p	[Pa]	tlak
r_m	[m]	poloměr potrubí ke střednici
S	[-]	koeficient bezpečnosti
S_n	[N m ⁻²]	kruhová tuhost
t	[h]	provozní životnost
u	[m]	průhyb
u_{dov}	[m]	dovolený průhyb
\mathbf{u}	[m]	vektor posunutí
γ	[-]	úhlové zkosení
ε	[-]	poměrné přetvoření
λ	[-]	kritický násobek zatížení
ν	[-]	Poissonův součinitel
ρ	[kg m ⁻³]	hustota
σ	[Pa]	napětí
σ_c	[Pa]	pevnost horniny
σ_{dov}	[Pa]	dovolené napětí
τ	[Pa]	smykové napětí