

Rozhodování o volbě technologie pro výstavbu inženýrských sítí pomocí multikriteriálního hodnocení

Lucie Nenadálová

Abstrakt

Výstavbu a obnovu inženýrských sítí je možné provádět klasickým způsobem výstavby nebo pomocí bezvýkopových technologií. Prováděcí firmy převážně nabízejí pouze jednu nebo několik málo variant bezvýkopových technologií z velké škály existujících, reálně použitelných bezvýkopových technologií. Svou bezvýkopovou variantu prezentují jako optimální a jediné možné řešení. Dosud chybí investorům a veřejnosti porovnání různých variant bezvýkopových technologií z technicko – ekonomicko - environmentálního hlediska. Článek popisuje rozhodování o způsobu výstavby inženýrských sítí s využitím multikriteriálního hodnocení.

Abstract

The construction and restoration of utilities is possible to build by conventional technology for installation (open cut method) or by trenchless technology. Utility companies offer only one trenchless technology from the wide range of trenchless technologies, its present as optimal and one possible solution. If the decision-making process includes environmental, technical and economic criteria, the advantages of particular technologies when compared to traditional utility installation methods, or their mutual comparison, are not yet known. The article describes decision making process for selecting the most appropriate technology for the construction of utilities using multi – criteria assessment.

Úvod

Investoři inženýrských sítí, města, obce, vodárenské, kanalizační, plynárenské a další společnosti se při výběru možnosti instalace, obnovy, oprav inženýrských sítí často rozhodují, jakou technologii ze škály bezvýkopových technologií¹ je optimální použít, nebo zda je lepší využít k ukládání klasickou výkopovou technologii [1,2,3,12]. Neexistuje zatím dostatečně ucelený přehled parametrů bezvýkopových technologií, postup výběru variant a jejich vyhodnocení pro investory, který by byl vodítkem k racionalizaci, jaký způsob výstavby a jakou variantu realizace zvolit [4]. Pokud do rozhodovacího procesu zahrneme ekologická kritéria, dosud nejsou známy přednosti jednotlivých variant bezvýkopových technologií v porovnání s výkopovou technologií, ani jejich vzájemné srovnání [5].

Prováděcí firmy převážně nabízejí pouze jednu nebo několik málo variant bezvýkopových technologií z velké škály existujících, reálně použitelných bezvýkopových technologií. Svou bezvýkopovou variantu prezentují jako optimální a jediné možné řešení. Dosud chybí

¹ První zmínka o použití bezvýkopových technologií, hydraulickém protlačování je z roku 1867 z Vídně. Průměr protlačovaného litinového potrubí byl DN 1100 mm a protlačovaná délka 27m.

investorům a veřejnosti porovnání různých variant bezvýkopových technologií z technicko – ekonomicko - environmentálního hlediska.

Hodnotová analýza

Hodnotová analýza (Value Analysis) našla praktické využití v technických oborech i ve stavebnictví již v minulosti pro optimální výběr stavebních materiálů a stavebních technologií [5]. Hodnotovou analýzu lze uplatnit nejen v investorské přípravě, ale i v projektování stavebních děl a stavebních objektů a ve výrobním procesu [6].

Metody hodnotové analýzy byly využity v rámci disertační práce zejména ke strukturování technologií pro výstavbu inženýrských sítí, jejich třídění a řazení, volbě ekologických kritérií, jejich vah, možnosti vzájemného porovnání technologických variant výstavby inženýrských sítí a výběru optimální varianty.

Obr. 1: Schéma pracovního plánu podle hodnotové analýzy



Zdroj: vlastní zpracování podle [5].

Multikriteriální hodnocení

Multikriteriální hodnocení umožňuje posuzovat varianty nejen podle ceny, ale i dalších hledisek. Multikriteriální hodnocení je založeno na teorii užitku prověřovaných variant a pracuje s konečným počtem posuzovaných reálných variant.

V rámci disertační práce byl zpracován návrh řešení Metodiky hodnocení bezvýkopových technologií inženýrských sítí z ekologického hlediska (MHBTEH) s

multikriteriálním hodnocením variant testovaných modelových staveb vyhodnocených podle produkce emisí a energetické náročnosti.

Stanovení úhrnné užítosti

Pro stanovení úhrnné užítosti U_j existují různé metody. Do skupiny jednoduchých metod patří například 1) bodovací metoda, 2) bodovací metoda s váhami, 3) metoda větveného grafu a 4) metoda párového porovnání. Ke složitějším metodám, ale i přesnějším metodám pro stanovení úhrnné užítosti jednotlivých variant patří 5) diskriminační analýza, která umožňuje stanovení hodnoty užítosti a tím i určení odchylky mezi jednotlivými variantami [7].

Diskriminační analýza s Ivanovičovou odchylkou

Diskriminační analýza je metodou vícerozměrné statistické analýzy, je užívána ke stanovení úhrnné užítosti v podobě odchylky mezi dvěma srovnávanými variantami.

Diskriminační analýza s *Ivanovičovou odchylkou* respektuje statistickou závislost kritérií rozhodování a obsahuje koeficienty korelace dvojic kritérií [8]. Metoda nevyužívá vah kritérií. Význam kritérií se zavádí do výpočtu pouze pomocí jejich pořadí důležitosti, což výrazně zvyšuje objektivitu hodnocení podle vztahu (1).

$$d_j = \frac{|x_1^f - x_1^j|}{s_1} + \sum_{i=2}^n \frac{|x_i^f - x_i^j|}{s_i} \prod_{k=1}^{i-1} (1 - |r_{ki}|) \quad (1)$$

kde x_i^f = hodnota fiktivní varianty i -tého kritéria,

x_i^j = hodnota i -tého kritéria j -té varianty,

$x_i^f - x_i^j = d_i$ = rozdíl hodnot dané a fiktivní varianty,

s_i = směrodatná odchylka,

r_{ki} = korelační koeficient dvou porovnávaných kritérií k a i ,

n = počet kritérií.

Normovaná odchylka hodnoty každého kritéria od jeho fiktivní varianty umožní vyčíslení výsledné hodnoty odchylky tím méně, čím je korelační závislost mezi tímto kritériem a kritériem s vyšším pořadím silnější [6].

Stanovení míry efektivity variant

Hodnoty míry efektivity umožňují určit pořadí hodnocených variant. Jsou vyčísleny jako poměr užítosti a nákladů podle vztahu (2) nebo ceny podle vztahu (3) [6].

$$E_j = \frac{U_j}{N_j} \quad (2)$$

kde U_j = výsledná užítost j -té varianty,

N_j = náklady j -té varianty.

$$E_j = \frac{U_j}{C_j} \quad (3)$$

kde U_j = výsledná užitnostj-tévarianty,
 C_j = cenaj-tévarianty.

Rozhodování

Pro rozhodovací proces výběru nejvhodnějšího způsobu realizace záměru výstavby inženýrských sítí a výběru vhodné varianty bezvýkopové technologie byla v rámci disertační práce využita eliminační metoda rozhodování - K.O. systém rozhodování a PREV2 [9,10].

Její využití bylo podmíněno zpracováním „listů technologií“, které obsahují: základní *technický popis konkrétní varianty bezvýkopové technologie, možný používaný materiál, omezující podmínky, specifikaci strojního a technologického zařízení, zpřesňující požadavky na monitoring a čištění potrubí trasy, možnost provádění za provozu, časové schéma provedení, doba trvání nového díla, zřehlednění rizik aplikace, citlivost technologie na vlivy počasí, citlivost na kvalitu vyčištěného potrubí, geologické podmínky, ekologická kritéria, velikost startovací a cílové jámy, postup a časové schéma, prostorové omezení, omezení při výstavbě, podmínky provozování a údržby, životnost, možnost vysazení odboček, minimální poloměr aplikovaného trubního materiálu.*

V rámci testování bylo vyhodnoceno sedm již zrealizovaných staveb (jsou v rámci disertační práce chápány jako modelové stavby), u kterých bylo na základě K.O. rozhodovacího systému specifikováno, jaké jsou možné varianty provedení. Jednotlivé hypotetické realizovatelné alternativy byly následně analyzovány z ekologického a ekonomického hlediska, což umožnilo označit tu nejvhodnější variantu provedení.

Popis modelové stavby

Výstavba vodovodního potrubí DN 300, silových kabelů a chrániček pro optické kabely v rakouském Schwanenstadtu, 2009

Tab. 1: Parametry stavby

Délka stavby	6000 m
Hloubka ukládání inženýrských sítí	1,3 m (vodovod)
Geologické podmínky	třída těžitelnosti 3
Umístění stavby	extravilán
Materiál	polyetylen

Zdroj: autor

Dle rozhodovacího K. O. procesu bylo zjištěno, že vhodnou technologií pro stavbu potrubí DN 300, silových kabelů a chrániček je technologie *pluhování, HDD* a alternativou byla spočítána *klasická výkopová technologie*.

Pluhování je metoda, kterou lze současně položit více druhů inženýrských sítí, ale v současné době pluhování umožňuje pokládku kabelů a potrubí až do DN 500 mm nebo

² PREV – Project Evaluation, nástroj pro hodnocení projektů

současné pokládání několika systémů – až desítek (maximálně bylo uloženo 40 ks) silových kabelů (až do 110 kV) a chrániček pro uložení optických kabelů. Použité strojní zařízení vždy zahrnuje: výkonný tahač (MAN FWF70), zaorávací pluh (FSP20), logistickou jednotku (pro odvíjení kabelů).

Obr. 2: instalace vodovodního potrubí DN 300, kabelu a chráničky.



Zdroj: autor

HDD – Vodorovné řízené vrtání -. jedná se o technologii, která je využitelná jak pro krátké vzdálenosti, tak i pro několikakilometrové úseky. Zemina je rozpojována pomocí vysokotlakého hydraulického paprsku.

Porovnáním vybraných technologií K.O. systémem a dostáváme následující vyhodnocení:

- strojní zařízení – každá z vybraných 3 technologií potřebuje jiné strojní zařízení (bude potřeba porovnat jednotlivé stroje),
- přesuny zeminy budou největší pro technologii klasickou,
- současné pokládání výstražné folie nebude u technologie HDD,
- pažení bude vyžadovat pouze výkopová technologie,
- největší přesnost ukládaných inženýrských sítí bude pro technologii pluhování,
- nejrychlejší příprava staveniště je pro technologii pluhování,
- nejrychlejší bude pokládka technologií pluhování, počet pracovníků bude nejnižší pro metodu pluhování,
- technologie HDD nepotřebuje zábor po celé délce,
- obě bezvýkopové technologie lze použít i v náročnějších terénních podmínkách,
- z ekologického pohledu největší škody na kořenovém systému bude mít jak technologie pluhování, tak klasická výkopová technologie.

Multikriteriální hodnocení technologických variant výstavby inženýrských sítí na modelové stavbě

Volba kritérií

Pro posouzení variant testované modelové stavby byla zvolena kvantitativní kritéria: primární spotřebovaná energie, CO₂, NO_x, CO, SO_x, tuhé znečišťující látky, organické látky uvedené v tabulce 2. Testovaná kritéria byla vyčíslena v disertační práci pomocí navrhované metodiky MHBTEH.

Tab. 2: Vstupní data pro multikriteriální hodnocení, příklad výstavba vodovodního potrubí DN 300 silových kabelů a chrániček.

Kritérium	Jednotka	V1 - bezvýkopová technologie pluhování	V2 - bezvýkopová technologie pluhování	V3 - klasická výkopová technologie
Primární spotřebovaná energie	[MJ]	6 370 394,9602	6 340 426,3564	17 773 995,0320
CO ₂	[t]	523,1343	520,6734	1 459,5936
SO _x	[t]	0,4464	0,4442	1,0719
NO _x	[t]	199,3209	198,3607	478,6518
CO	[t]	17,6981	17,6128	42,5004
Tuhé znečišťující látky	[t]	0,9669	0,9622	2,3219
Organické látky	[t]	1,7076	1,6994	4,1007
Ceny variant	v mil. [Kč]	19,0226	56,2476	24,5355

Zdroj: autor

Fiktivní srovnávací varianta

Fiktivní variantou se rozumí buď varianta s vykazovanými nejlepšími hodnotami kritérií, nebo nejhoršími hodnotami kritérií. Za fiktivní variantu byla považována varianta stavby prováděná výkopovými technologiemi. U hodnocené stavby bylo posouzením užití navrhované metodiky MHBTEH potvrzeno, že bezvýkopové technologie jsou z hlediska posouzení dopadu na životní prostředí šetrnější, lepší.

Výpočet úhrnné užítivosti a efektivity

Podkladem pro výpočet hodnot Ivanovičovy odchylky je matice vstupních dat. V popisu řádků jsou uvedena sestupně, podle své důležitosti, jednotlivá kritéria včetně číselného označení popisu měrné jednotky. Sloupce obsahují data jednotlivých technologických variant použitých bezvýkopových technologií.

Kritéria jsou seřazena sestupně. Směr preference kritérií byl zvolen klesající, čím menší hodnota daného kritéria, tím je její hodnocení preference vyšší.

Výpočet hodnot užítivosti s využitím algoritmu Ivanovičovy odchylky byl zpracován v programu *Priority*, [11].

Tab. 3: Odchylka od fiktivní - nejhorší varianty pro modelovou stavbu č. 1, technologie pluhování, HDD a klasická výkopová technologie.

Kritérium	Technologie pluhování	Technologie HDD	Klasická výkopová technologie (fiktivní varianta)
Primární spotřebovaná energie	-11 403 601,0719	-11 433 568,6757	0
CO ₂	-936,4593	-938,9202	0
SO _x	-0,6256	-0,6277	0
NO _x	-279,3310	-280,2911	0
CO	-24,8023	-24,8876	0
Tuhé znečišťující látky	-1,3550	-1,3597	0
Organické látky	-2,3931	-2,4013	0
Ceny variant	-11 403 601,0719	-11 433 568,6757	0

Zdroj: autor

Největší užítost má technologie HDD, po porovnání s cenou a provedením výpočtu efektivnosti je možné za nejefektivnější označit bezvýkopovou technologii pluhování, viz tabulka 4.

Tab. 4: Výpočet užítosti a efektivnosti pro modelovou stavbu.

Číslo kritéria	Název kritéria	V1 - bezvýkopová varianta pluhování	V2 - bezvýkopová varianta HDD	V3 - klasická výkopová varianta	Fiktivní varianta	Směrodatná odchylka
1	Primární spotřebovaná energie [MJ]	6 370 393	6 340 426	17 773 995	17 773 995	5 382 786
2	CO ₂ [t]	523,1343	520,6734	1 459,5936	1 459,5936	442,0323
3	SO _x [t]	0,4464	0,4442	1,0719	1,0719	0,2954
4	NO _x [t]	199,3209	198,3607	478,6518	478,6518	131,9048
5	CO [t]	17,6981	17,6128	42,5004	42,5004	11,7121
6	Tuhé znečišťující látky [t]	0,9669	0,9622	2,3219	2,3219	0,6399
7	Organické látky [t]	1,7076	1,6994	4,1007	4,1007	1,1301
D _j	Ivanovičova odchylka	0,9450	0,9480	0,0000	-	-
Pořadí	-	2	1	3	-	-
C _j	Užítost	19,0226	56,2476	24,5355	-	-
E _j	Efektivnost	0,0500	0,0170	0,0000	-	-
Pořadí	-	1	2	3	-	-

Zdroj: autor

Závěr

Rozdíly ve výsledcích jednotlivých variant ekologických hodnocení jsou u sledovaných staveb natolik různé, že umožňují jednoznačná rozhodnutí i bez použití metod vícekriteriálního hodnocení. Složitější rozhodovací proces nastává při zakomponování parametru náklady. V rámci disertační práce byly zpracovány pro všechny varianty testovaných staveb a vyhodnoceny náklady za celou stavbu a na 1 bm stavby, k vyhodnocení byly použity metody vícekriteriálního hodnocení.

Vyhodnocením nákladů bylo zjištěno, že bezvýkopové technologie jsou v případě výše popsané modelové stavby nejen z ekologického hlediska, ale i z ekonomického hlediska vhodnější.

Publikace vznikla z grantu Českého vysokého učení technického v Praze SGS SGS12/012/OHK5/1T/11, „Rozhodovací metody pro energeticky úsporné stavby a opatření“ Katedry ekonomiky a řízení ve stavebnictví, Fakulty stavební.

Literatura:

- [1] ŠRYTR, P. *Městské inženýrství I.* Praha: Academia, 1999. ISBN 80-200-0663-X.
- [2] KLEPSATEL, F.; ČULÍK, M. *Bezvýkopová výstavba podzemních vedení.* Bratislava: Alfa, 1986.
- [3] STEIN, R. *Practical Guideline for the Application of Microtunnelling Methods.* Bochum: Stein & Partner. 2005, ISBN 3-9810648-0-1.
- [4] FRITZ, R. *Handbuch der Rationalisierung* Reichskuratorium für Wirtschaftlichkeit. Berlin: Industrieverlag Spaeth & Linde, 1932.
- [5] VOLF, F. *Hodnotová analýza ve stavebnictví.* Praha: SNTL, 1982.
- [6] KADLČÁKOVÁ, A. *Ekonomika ve stavebnictví 50, Hodnotový management.* Praha: ČVUT, 2002 b. ISBN 80-01-02602-1
- [7] ČERNÝ, M.; GLÜCKAUFOVÁ, D. *Vícekriteriální vyhodnocování v praxi.* Praha: SNTL, 1982.
- [8] IVANOC, B. *Diskriminaciona analiza.* Naučna knjiga. Beograd, 1963.
- [9] BERAN, V.; DLASK, P. *Software pro hodnocení projektů.* Praha: ČVUT, 2011, ISBN 978-80-01-04880-1.
- [10] HÁJEK, P. *Integrovaný environmentální návrh a optimalizace konstrukcí budov.* Praha: ČVUT. 2006, ISBN 80-01-03484-4
- [11] Priority, program (Metody stanovení priorit, diskriminační analýza), ČVUT v Praze, katedra ekonomiky a řízení ve stavebnictví, autoři Dlask, P.; Kadlčáková, A., 2010.
- [12] Zákon č.83/2006 Sb. o územním plánování a stavebním řádu (stavební zákon).