

**Univerzita Karlova v Praze**

**Přírodovědecká fakulta**

**Ústav pro životní prostředí**

**Modelování svozu komunálního odpadu  
s využitím GIS**

**Modelling of municipal solid waste treatment  
with GIS**

**Kateřina Jiřičková**

**srpen 2010**

## **Poděkování**

Mé poděkování patří především Ing. Luboši Matějčíkovi, Dr. za vedení a konzultace během zpracování diplomové práce. Dále bych chtěla poděkovat Ing. Anně Vojtěchové Ph.D. za poskytnuté informace o nakládání s odpadem v hl. m. Praze. Jmenovité poděkování za rady, korektury a podporu patří také Daně Jiříčkové, Martinu Jiříčkovi, Petru Machatovi, Lukáši Linhartovi, Jakubu Kužílkovi, Nině Ondruškové a Petře Dvořákové. V neposlední řadě děkuji i celému zbytku rodiny a přátelům, kteří mě podporovali během celého studia.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala samostatně s využitím uvedené literatury a informací, na něž odkazuji. Svoluji k jejímu zapůjčení s tím, že veškeré (i přejaté) informace budou řádně citovány. Rovněž prohlašuji, že předložená diplomová práce je totožná s elektronickou verzí vloženou do SIS.

Datum: 23. 8. 2010

Podpis:

# Obsah

Abstrakt.....	6
Abstract.....	7
1. Úvod.....	8
2. Sběr a svoz komunálního odpadu.....	10
2.1. Sběr komunálního odpadu v obci.....	10
2.1.2. Systémy sběru.....	10
2.1.3. Situace sběru v ČR.....	11
2.2. Systémy sběru ve vybraných zemích.....	12
2.3. Možnosti stanovení množství odpadu v území.....	14
2.3.1. Evidence na úřadech.....	14
2.3.2. Odhad na základě měrné produkce domovního odpadu.....	14
3. Přehled vybraných modelů zabývajících se svozem odpadu.....	16
3.1. Modely spojené s metodikou LCA.....	17
3.2. Modely využívající GIS.....	18
3.2.1. Modely zabývajících se svozem odpadu.....	18
3.2.2. Ostatní modely .....	19
3.3. Modely využívající operační výzkum.....	19
3.3.1. Modely zabývajících se svozem odpadu.....	19
3.3.2. Ostatní modely .....	19
4. Metodika.....	22
4.1. Popis modelovaného území - hl. m. Praha.....	22
4.1.1. Množství odpadu.....	24
4.1.2. Sběr a svoz.....	25
4.1.3. Plán odpadového hospodářství.....	26
4.2. Geografický informační systém.....	26
4.2.1. Důležité pojmy související s GIS.....	27
4.2.2. Software ArcGIS.....	27
4.3. Operační výzkum.....	28
4.3.1. Optimalizační modely.....	29
4.3.2. Indexová metoda.....	30
4.3.3. Nevyvážené dopravní úlohy.....	31

4.3.4. Microsoft Excel.....	31
4.3.5. Visual Basic a Python.....	31
4.4. Sestavení modelu.....	32
4.4.1. Množství a skladba komunálního separovaného odpadu v území ( $a_i$ ).....	32
4.4.2. Sběrná místa odpadu.....	32
4.4.3. Cílová zařízení na zpracování odpadu a jejich kapacita ( $b_j$ ).....	33
4.4.4. Určení frekvence svozu.....	34
4.4.5. Vzdálenosti od sběrných center k třídícím linkám ( $c_{ij}$ ).....	34
4.4.6. Řešení a zobrazení výsledku dopravní úlohy.....	35
4.4.7. Sloučení území s nedostatečným množstvím odpadu.....	35
4.5. Možnosti využití modelu.....	36
4.5.1. Zobrazení výsledné mapy svozu.....	36
4.5.2. Celková přepravní vzdálenost.....	36
4.5.3. Změna vstupních údajů.....	37
5. Výsledky - ověření modelu na území hl. m. Prahy.....	38
5.1. Papír .....	38
5.2. Plast.....	39
5.3. Sklo.....	39
5.4. Nápojový karton.....	39
5.5. Změna vstupních údajů - případové studie.....	40
5.5.1. Změna umístění zařízení.....	40
5.5.2. Studie výstavby nových zařízení.....	40
5.6. Zhodnocení.....	41
6. Diskuse.....	42
7. Závěry.....	44
Přehled citované literatury.....	45
Seznam zkratk.....	50
Seznam příloh.....	51

# Abstrakt

Současná legislativa České republiky i Evropské Unie upřednostňuje materiálové využívání před ostatními způsoby nakládání s komunálním odpadem. Svoz tříděného odpadu má však negativní dopady na životní prostředí. Práce se zabývá modelováním a optimalizací tras svozu tříděného komunálního odpadu s cílem tyto dopady snížit.

Model využívá softwaru ArcGIS a optimalizaci tras provádí pomocí operačního výzkumu. Pracuje se vstupními údaji o množství odpadu v území, umístění cílových zařízení a s jejich kapacitou. Odhad množství odpadu byl proveden na základě rozdělení celkové hmotnosti do katastrálních území úměrně k počtu obyvatel. Cílová zařízení jsou třídící linky. Vzdálenosti mezi katastrálními územími a cílovými zařízeními počítá nadstavba ArcGIS Network Analyst. Indexová metoda vyhledává ke katastrálním územím třídící linky tak, aby byl výsledný počet najetých kilometrů co nejmenší, zároveň respektuje omezenou kapacitu linek.

Výstupem jsou trasy svozu a přepravní vzdálenost pro každý druh separovaného odpadu. Model umožňuje měnit vstupní údaje a sledovat změnu v systému svozu.

Model byl ověřen na území hl. m. Prahy a na sběru papíru, plastu, skla a nápojových kartonů. Ukázal se být vhodný pro optimalizaci svozu komunálního odpadu.

# Abstract

Under the current waste legislation in both European Union and Czech Republic, material recovery is preferred over other types of municipal solid waste treatment. However, waste collection systems have negative environmental impacts. This thesis deals with modeling and optimization of waste collection routes, which should lower their impact.

The model makes use of the ArcGIS software system and operations research to optimize routes. Inputs of the model are the amount of waste produced in the region, locations of the final facilities, and their capacities. The amount of waste produced per district was estimated to be the portion of total waste produced corresponding to the number of inhabitants of given district. Final facilities are the assorting lines. Distances between districts and final facilities were computed by Network Analyst Extension of ArcGIS. The index method assigns the assorting lines to districts in a way that minimizes total distance traveled by waste collection vehicles, while respecting the capacity of the assorting lines.

Outputs are waste collection routes and the distance, per waste type, traveled by the waste collection vehicles. The model allows changing the input data to observe changes in the waste collection system.

The model was applied to the data from the capital of Czech Republic, Prague, where the collection of paper, plastic, glass and liquid packaging board was simulated. The model turned out to be able to optimize municipal waste collection.

# 1. Úvod

Naše planeta je každým dnem zahlcována obrovským množstvím odpadu. Otázka, jak s ním naložit, dnes patří k nejzávažnějším politickým, hospodářským i environmentálním problémům celého světa.

Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech ukládá každému při své činnosti předcházet vzniku odpadů, omezovat jejich množství a nebezpečné vlastnosti. Pokud dojde ke vzniku odpadu, musí být zpracován tak, aby neohrožoval lidské zdraví a životní prostředí. Využití odpadu je upřednostňováno před odstraňováním, materiálové využití před energetickým. Popsaná hierarchie je v souladu se směrnicí Evropského Parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008 o odpadech, může být však pozměněna, pokud to bude v souladu s hodnocením životního cyklu celého výrobku. Je stanoven cíl opětovného použití a recyklace 50 % recyklovatelného domovního odpadu (alespoň papíru, skla, kovů a plastu) do roku 2020.

Snížení dopadu vzniku odpadů na životní prostředí (ale i spotřeby energie a ceny) díky materiálovému a energetickému využití potvrzují také závěry VaV 720/5/03 (Benešová et al., 2003) nebo Eriksson et al. (2005). Merrild (2009) ve své práci ukazuje, že většinou je materiálové využití lepším řešením než energetické, s jistými výhradami u vysokokalorických materiálů, dlouhých vzdáleností transportu a některých specifických druhů dopadu na životní prostředí. Aby bylo možné využitelné složky odpadu recyklovat, je třeba je nejprve vytřídit od odpadu zbytkového. Přitom látky se v odpadu navzájem směšují a rozptylují, takže jejich opětovné zkoncentrování lze provést jen za dodání energie (Kuraš, 1994).

Sběr a svoz tříděného odpadu bohužel způsobuje mnoho problémů, které souvisí s cenou, zdravím obyvatel a životním prostředím. Z nákladů na provoz tříděného sběru tvoří největší část právě náklady na přepravu (Vrbová, 2003). Jedním ze způsobů, jak dopad těchto problémů snížit, je tedy provést optimalizaci tras svozu (Bhat, 1996; Zamorane et al. 2009). Tyto úlohy patří do oboru reversní logistiky, která se, na rozdíl od té tradiční, zabývá zpětným odběrem odpadu a použitého materiálu (Brewer et al., 2001).



Diplomová práce využívá geografických informačních systémů (GIS) a operačního výzkumu. Model pracuje se vstupními údaji o množství odpadu, umístění zařízení a jejich kapacitě. Indexová metoda, která patří k metodám distribučních úloh, bude hledat ke zdrojům odpadu vhodná zařízení tak, aby byla minimalizována výsledná přepravní vzdálenost. Na závěr bude model využit ke zpracování tras svozu papíru, plastu, skla a nápojových kartonů na území hl. m. Prahy.

Vytyčené cíle práce jsou:

- provést rešerši na téma sběr a svoz odpadu a modelů svozu odpadu,
- vytvořit model svozu tříděného komunálního odpadu,
  - odhadnout množství tříděného komunálního odpadu v území,
  - lokalizovat producenty a odběratele odpadu,
  - vytvořit dopravní síť v GIS,
  - pomocí indexové metody minimalizovat celkovou přepravní vzdálenost tras svozu,
- zkoumat možnosti využití modelu,
- ověřit model na území hl. m. Prahy.

## 2. Sběr a svoz komunálního odpadu

Sběrem odpadu se podle zákona č. 185/2001 Sb. o odpadech rozumí soustředování odpadů za účelem jejich předání k dalšímu zpracování. Původcem komunálních odpadů je určena obec.

### 2.1. Sběr komunálního odpadu v obci

Obec musí rozhodnout o způsobu sběru a svozu tříděných látek na svém území a to z hlediska ekonomického, technického a organizačního. Potřebuje k tomu zajistit dlouhodobý odbyt vyseparovaných surovin a zvolit účinný systém sběru, kterým zajistí dostatečné množství a kvalitu suroviny (Ryšánek, 1999). Je při tom vázána cíli uzákoněnými v Plánu odpadového hospodářství ČR.

Celkové náklady na sběr a svoz 1 tuny vytříděných odpadů jsou přibližně 2x vyšší než u směsného komunálního odpadu. Z nákladů na tříděný sběr jsou nejvyšší náklady na přepravu, zejména u plastů (kvůli jeho nízké objemové hmotnosti). Na druhé straně plynou obci příjmy z prodeje surovin a od systému EKO-KOM (Vrbová, 2003). EKO-KOM, a.s. je autorizovaná obalová společnost, která zajišťuje plnění zpětného odběru a využití odpadu z obalů vyžadovaného zákonem.

#### 2.1.2. Systémy sběru

Systémy sběru odpadů se dělí podle:

- dostupnosti sběrného místa (donáškový, odvozový, sběrný dvůr),
- stupně třídění odpadů (směsný, vícedruhový, jednodruhový),
- využívané technologie sběru (sběrné nádoby s horním nebo spodním výsypem, kontejnery s větším objemem, podzemní kontejnery, boxy, pytle, beznádobový sběr),
- způsobu sběru (stacionární, mobilní).

Práce se při ověření modelu zabývá donáškovým a odvozovým systémem. U donáškového systému jsou sběrné nádoby umístovány ve skupinách do „hnízd“. Donášková vzdálenost by neměla přesáhnout 100-200 m, na jedno hnízdo připadá 300-500

obyvatel (u obcí spíše 200).

Při odvozovém způsobu donášková vzdálenost nepřesahuje 30 m. Na sídlišti připadá na jedno hnízdo 200 obyvatel, u rodinných domků se instalují nádoby pro 2 - 5 domů. Uplatňuje se zejména v historické zástavbě, památkově chráněných a lázeňských městech. K odvozovému systému patří také sběr "dům od domu" (Vrbová et al., 2003).

Sociologický výzkum mezi obcemi v ČR VaV/SL/7/102/05 (2006) ukázal, že 22 % obcí má problémy se špatným tříděním odpadu, 9 % s odpady obecně, 3 % s komunálním odpadem, 3 % se zajištěním svozu tříděného odpadu a 3 % s pokročením v třídění odpadu.

Faktory, které ovlivňují úspěch sběru, jsou systém sběru, počet a typ sbíraných látkových skupin, přítomnost dostatečného množství kontejnerů a frekvence jejich svozu, přítomnost omezení na směsný odpad. Dále je úspěch ovlivňován socio-ekonomickými faktory jako pozitivním vnímáním sběru občany a dostatečnou propagací a vzděláváním (Crichton et al., 2003). Podle Anonym 1 (2009) 50 - 70 % občanů ČR nevěří, že se vytríděný separovaný odpad skutečně recykluje.

Crichton et al. (2003) vypracoval doporučení pro zavedení úspěšného systému sběru: sběr nejvyššího možného počtu komodit, pilotními projekty lze reagovat na změny trhu, zavádět omezení na směsný odpad, doporučuje vlastnictví sběrných boxů domácnostmi, zvyšovat frekvenci svozu po dobu zvyšování výtěžnosti sběru a přímou komunikaci osádky vozu s obyvateli (při systému sběru "dům od domu").

### **2.1.3. Situace sběru v ČR**

Systémy sběru komunálního odpadu se u nás za poslední desetiletí neměnily. Sběr se provádí po jednotlivých komoditách, jen nápojové kartony se často třídí dohromady s papírem nebo plastem. Nádobový sběr využívá 97 % obcí, pytlový 21 % obcí a kombinaci 9 % obcí napojených na systém EKO-KOM. Obce disponují největší vybaveností pro sběr plastů. Efektivita sběru závisí na hustotě sběrné sítě, ta se však těžko zvyšuje v husté zástavbě měst, proto se často spíše zvyšuje frekvence svozu (Kotoulová, 2008). Výtěžnost tříděného sběru je u nás 53 kg.občan<sup>-1</sup>.rok<sup>-1</sup>, 70 % obyvatel odpad třídí (Anonym 2, 2009).

Snížení počtu kontejnerů při vícesložkovém sběru vede k vyšší zahuštěnosti sběrné sítě a zjednodušení systému třídění, což příznivě ovlivňuje účinnost systému (Ryšánek, 1999). V Ústí nad Labem a Děčíně byl takový systém zaveden, jedna nádoba sloužila ke sběru

duchého materiálu (PET a skleněné lahve, nápojový karton, plechovky) a druhá plochého (plastové fólie, tiskoviny, papír). Třídilo se na poloautomatické lince a ploché odpady ručně. Města však systém změnila na jednokomoditní kvůli drahému dotřídování (Kotoulová, 2008).

Jedinou novinkou, která se uchytila v České Republice, jsou podzemní kontejnery. Využívají se tam, kde není možno zřídit nová stanoviště, a do center měst. Tyto kontejnery jsou estetické, bez zápachu a navíc lze pod zem umístit i kontejner velkého objemu. Jejich vybudování je však drahé. U nás byly zavedeny ve městech Hradec Králové, Uničov, Brno a Praha.

## **2.2. Systémy sběru ve vybraných zemích**

### **2.2.1. Německo**

Po třiceti letech intenzivního sběru se v Německu objevují otázky, v jakém rozsahu je třídění odpadu původcem zapotřebí a zda ho pomocí rozvoje techniky třídění nelze zjednodušit. V Německu se třídí na zhruba 15 komodit. Stoupajícími kvótami využití a narůstajícími způsoby systémů sběru hrozí snížení výtěžnosti (Anonym 3, 2006).

Jeden z německých zjednodušujících systémů využívá bílý kontejner na čiré sklo, zelený na sklo barevné a žlutý na ostatní suroviny (papír, plast, plechovky) (Ryšánek, 1999). Ještě jednodušší systém má nádobu na suché hodnotné látky a společný sběr zbytkového odpadu a lehkých obalů s cílem zvýšit jejich energetické zhodnocení. Jiný sbírá odděleně bioodpad a společně ostatní využitelné složky (Kotoulová, 2008).

### **2.2.2. Spojené státy americké**

Ještě radikálnější řešení složitěho sběru, tzv. „single stream“ zavedli ve Spojených státech. Jedná se o shromažďování využitelných složek domovního odpadu do jedné nádoby. Většinou se mění i donáškový systém na odvozový. Přednosti tohoto systému tkví v nižších nákladech na svoz a jednodušší logistice. Náklady na dotřídění jsou naopak vyšší a kvalita surovin nižší. Mezi odpůrce systému patří papírenský průmysl, kterému částice skla poškozují papírenské stroje (Anonym 4, 2005).

### 2.2.3. Španělsko

Gallardo et al. (2010) porovnával čtyři systémy sběru, které se vyskytují ve Španělsku ve městech nad 50 000 obyvatel. Za indikátory byly zvoleny: podíl tříděného odpadu v kontejnerech v celkovém množství komunálního odpadu, míra separace a kvalita sběru (podíl množství správně vhozeného odpadu v celkovém množství odpadu v kontejneru). Hodnocené byly následující systémy sběru tříděného sběru:

- 1) donáškový systém - papír, sklo a lehké obaly;
- 2) „dům od domu“ - lehké obaly, donáškový systém - papír, sklo;
- 3) „dům od domu“ - bioodpad, donáškový systém - papír, sklo;
- 4) „dům od domu“ - bioodpad, donáškový systém - papír, sklo, lehké obaly.

Z hlediska uvedených indikátorů dosáhl nejlepšího výsledku systém 4), který třídil nejvíce složek a měl nejvyšší kvalitu sběru. Jejich výzkum také ukázal, že pokud se pro sběr lehkých obalů používá odvozový způsob, klesá kvalita sběru, protože lidé po naplnění směsných košů hází odpady tam.

### 2.2.4. Dánsko

Hodnocení environmentálních (globální oteplování, acidifikace, eutrofizace, přízemní ozón, toxicita) a ekonomických (náklady na vybavení, sběr, nakládání) dopadů systému sběru v dánském Aarhusu a dalších navržených scénářů provedli Larsen et al. (2010). V Aarhusu se třídí papír a sklo donáškovým systémem a 40 % papíru sběrem „dům od domu“. Navrženy byly další systémy sběru: jiné modifikace sběru „dům od domu“, používání výhradně donáškového sběru a používání výhradně sběrných dvorů. Nejlépe byly hodnoceny systémy „dům od domu“, sběrné dvory se neukázaly ke sběru vhodné. Z hlediska životního prostředí autoři doporučují ve městě Aarhus materiálové využívání odpadu i když je možnost spalování s výrobou energie, ovšem s výhradou, že pro jiná města je třeba provést vlastní šetření.

### 2.2.5. Švédsko

Dahlén et al. (2007) hodnotili systémy sběru ve Švédsku z hlediska množství sebraného materiálu a poplatků. Ve sledovaných městech probíhal sběr „dům od domu“ se sběrem nebo beze sběru separovaného bioodpadu nebo převážně donáškový systém. V případě zavedení poplatku na směsný odpad vypočítávaný z jeho hmotnosti se omezilo množství svezeneho směsného odpadu o 50 %, není ale známo, zda lidé v takovém případě

neodhazovali odpad na černé skládky. Mnoho nečistot bylo nalezeno v bioodpadu. Po zavedení sběru bioodpadu se zvýšilo i množství sebraného suchého materiálu.

### **2.3. Možnosti stanovení množství odpadu v území**

Ke stanovení vhodného systému sběru i pro tvorbu modelů je třeba stanovit množství odpadu v území. Stanovení se může provádět vlastním průzkumem vážením svozových vozidel při příjmu odpadu do zařízení pro zpracování odpadu, převzetím údajů od oprávněné osoby, která se svozem zabývá, nebo převzetím statisticky zpracovaných údajů zjištěných v jiných obcích (Mrázek et al., 1998).

#### **2.3.1. Evidence na úřadech**

Zákon o odpadech stanoví, že původci odpadů a oprávněné osoby, které nakládají s odpady, musí vytvářet průběžnou evidenci odpadů. Pokud hmotnost přesáhne 100 kg nebezpečných nebo 100 t ostatních odpadů, musí zasílat roční hlášení na obecní úřad s rozšířenou působností nebo správní obvod Prahy. Data se po verifikaci a zpracování dále předávají na Ministerstvo životního prostředí (MŽP), krajské úřady a Český statistický úřad (ČSÚ). Ukládáním dat do Informačního systému odpadového hospodářství je od MŽP pověřena servisní organizace CENIA. Je zde možno provádět kontroly předávání odpadů a sledovat tak tok odpadů napříč ČR. Zvláštní databázi vede také ČSÚ, jehož zjišťování od respondentů je však méně přesné (Grusman, 2009).

#### **2.3.2. Odhad na základě měrné produkce domovního odpadu**

Odhad celkového množství a složení odpadů lze provést na základě počtu obyvatel a ukazatelů průměrných hodnot měrné produkce domovního odpadu, které jsou dané pro různé typy obytných zástaveb. Je třeba znát převažující typy zástavby v dané sídelní jednotce, počet obyvatel ve zvolených typech zástavby a průměrná měrná množství domovního odpadu ve zvolených typech zástavby (tab. 1). Z celkového množství lze podobně odhadnout podíl látkových skupin v domovním odpadu (tab. 2). Více v Benešová et al. (2003).

Tab. 1: Ukazatele měrného množství domovního odpadu (celková produkce domovního odpadu od občanů (Benešová et al., 2003).

Typ zástavby	kg . obyvatel <sup>-1</sup> . týden <sup>-1</sup>			kg . obyv. <sup>-1</sup> . rok <sup>-1</sup>
	průměr	max. hodnota	min. hodnota	průměr
sídlíštní zástavba velkých měst	3,0	3,9	1,4	156,0
sídlíštní zástavba menších měst	2,5	3,2	2,3	130,0
smíšená zástavba měst	3,0	3,4	2,5	156,0
vesnická zástavba	3,8	4,7	3,0	198,0

Tab. 2: Ukazatele skladby domovního odpadu (% hmotností) (Benešová et al., 2003).

Látková skupina	Sídlíštní zástavba velkých měst	Sídlíštní zástavba menších měst	Smíšená zástavba měst	Vesnická zástavba
papír, lepenka	22,7	22,2	25,6	7,6
plasty	13,8	16,8	18,0	9,0
sklo	8,7	6,7	7,6	8,9
kovy	3,4	3,0	3,1	4,5
biodpad	18,2	19,6	17,3	6,3
textil	5,6	6,6	5,1	2,2
minerální odpad	1,9	0,8	2,3	4,0
nebezpečný odpad	0,5	1,1	0,4	0,5
spalitelný odpad	12,4	6,7	7,0	6,2
zbytek 20-40 mm	3,1	8,4	5,4	5,0
frakce 8-20 mm	6,6	5,1	3,8	8,9
frakce menší 8 mm	3,1	3,0	4,4	36,9

V současné době probíhá aktualizace údajů měrné produkce a skladby domovního odpadu. Z prozatímních srovnání se ukazuje, že skladba domovního odpadu se od posledního výzkumu příliš nezměnila. V sídlíštní zástavbě vzrůstá podíl papíru (nárůst o 7,5 %), plastů (nárůst o 26 %) a skla (13 %), ve venkovské zástavbě plastů (7,8 %), spalitelného odpadu (55 %) a biodpadu (93 %) (Benešová et al., 2009).

### 3. Přehled vybraných modelů zabývajících se svozem odpadu

Tato kapitola se zabývá modely odpadového hospodářství s důrazem na jejich přístup ke svozu odpadu a na využití GIS a operačního výzkumu. Přehled vybraných nástrojů, které modely v oblasti odpadového hospodářství nejčastěji používají, je v tabulce 3. O GIS a optimalizaci, použitých v diplomové práci, je napsáno více v kapitolách 4.2. a 4.3.

Tab. 3: Přehled vybraných nástrojů k modelování problémů odpadového hospodářství (Shmelev, Powell, 2006).

metoda	silné stránky	slabé stránky
LCA	hodnotí široké spektrum emisí	hodnotí jen emise, chybí informace o dopadu na receptory
	umožňuje společné hodnocení environmentálních a ekonomických dat	neobsahuje časové ani prostorové informace
	umožňuje jednoduché porovnání scénářů	nelze udělat lokální / regionální / globální porovnání
multi-kriteriální analýza	umožňuje porovnání scénářů z hlediska mnoha kritérií	problematické ohodnocení váhy kritérií
	flexibilita ve výběru kritérií	porovnává jen relativně malé množství alternativ, které nemohou reprezentovat všechna řešení
	integrace kvantitavních i kvalitativních dat	
optimalizace	dává nejlepší řešení z daného výběru	nelineární celočíselné problémy jsou limitovány existujícím algoritmem
	zapojuje počítačové programování k automatizaci výpočtů	je nutné předpovídat vztahy v modelu
	dovoluje uživateli určit hranice pro přípustné řešení	
GIS	zapojuje prostorové informace	vyžaduje integraci s jinými technikami pro analýzu scénářů
	geografické analýzy založené na prolínání různých objektů	nemá časovou dimenzi
		množství vygenerovaných informací je příliš velké pro podporu rozhodování

Využití ekonomické optimalizace pro plánování odpadového hospodářství bylo poprvé zdůrazněno v práci Andersona z roku 1968. Od té doby se mnoho modelů soustředilo na analýzy minimalizace nákladů. Počátkem osmdesátých let výzkum začal zohledňovat i ochranu prostředí. Potřeba nových zařízení, uzákoněná míra recyklace a jiné aspekty

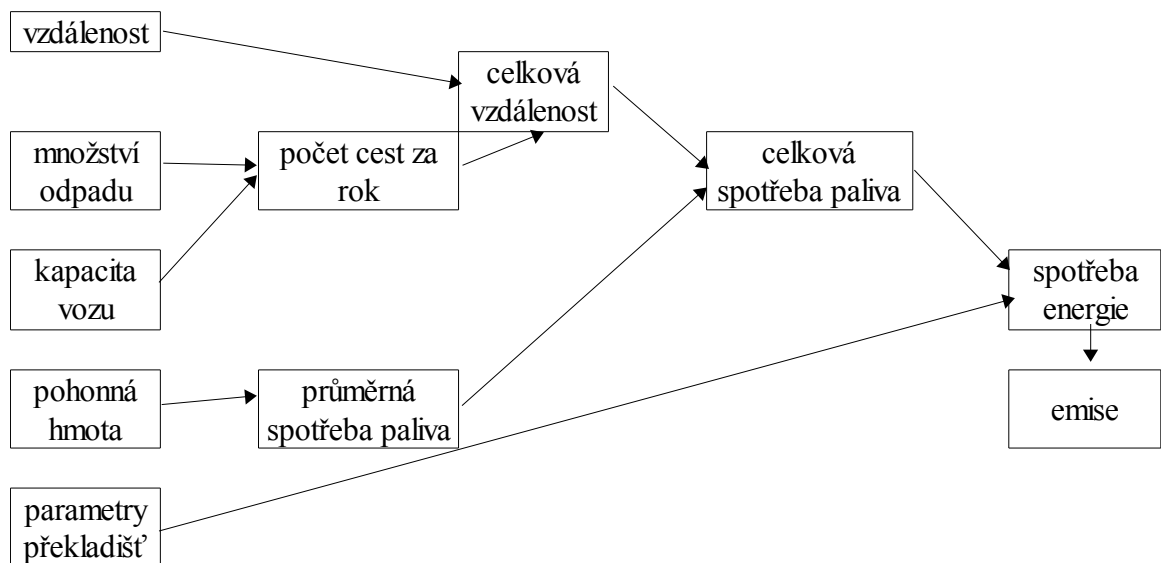


odpadového hospodářství vyžadují sofistikované techniky analýzy, proto jsou vyvíjeny stále nové matematické modely (Chang, 1996).

### 3.1. Modely spojené s metodikou LCA

Pomocí hodnocení LCA počítali emise z hospodaření s organickými odpady, obrát energie, množství produkce paliva a živin pro zemědělství Sonesson et al. (2000). Energetická spotřeba svozu domovního odpadu je počítána jako funkce najetých kilometrů a množství zastávek. Míra spotřeby paliva je zde brána jako konstantní hodnota  $1,2 \text{ MJ tun}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$ .

Následky odpadového hospodářství na životním prostředí hodnotili Diaz et al. (2006). Model počítá energetickou bilanci, zábor plochy, emise do vody a vzduchu. Problém byl rozdělen na mnoho submodelů, které zahrnují vznik odpadu, sběr, materiálové a energetické využívání, kompostování a skládkování. Vstupy pro submodel svozu jsou znázorněny na obrázku 1.



Obr. 1: Grafické znázornění submodelu pro svoz odpadu (Diaz et al., 2006).

## 3.2. Modely využívající GIS

### 3.2.1. Modely zabývající se svozem odpadu

Teixeira et al. (2004) plánovali ve spolupráci se svozovou společností trasy svozu každého dne v měsíci. Nejprve definovali obslužné zóny zpracovatelských zařízení, poté definovali trasy svozu. Na každý den určili, který odpad svážet. Frekvence svozu byla dána množstvím nádob a odpadu. Optimalizací dosáhli úspory 29 % délky přepravních tras.

S Arc/Info od ESRI a jeho network modulem pracovali Ghose et al. (2006), v jejich modelu optimalizovali trasy svozu na základě nákladů a délek tras. Do modelu vložili informace o hustotě populace, množství vyprodukovaného odpadu, síti silnic, druhu silnic podle jejich šířky, množství košů a svozových vozidel. Navrhli tři objemové kategorie košů a ty rozmístili po městě v závislosti na hustotě obyvatel, šířce ulic a nejmenší možné vzdálenosti od domů. Dále se zabývali trasami různě velkých vozidel, která svážela koše rozměrově odpovídající velikosti vozidla.

ArcGIS a jeho nadstavbu Network Analyst použili pro optimalizaci svozu organického materiálu a směsného odpadu Zamorano et al. (2009). Jejich práce sestávala ze tří fází: vytvořit síť ulic a rozdělit je do tří kategorií podle průjezdnosti svozovým vozidlem, optimalizovat rozmístění nádob a nalézt nejkratší cestu svozu. Pro umístění nádob použili funkci *Service Area*, pro nalezení trasy svozu funkci *New Route*. Spočítali čas potřebný ke sběru, čas potřebný k vyprázdnění nádoby a čas k vysypání odpadu v zařízení. Na základě jejich metody může město Churriana de la Vega snížit množství kontejnerů, aniž by donášková vzdálenost přesáhla 75 m, a dokázali také snížit o 40,6 % vzdálenost najetou při jejich sběru.

Zařízení pro výrobu energie z biomasy se pomocí ArcGIS snažili umístit Perpiñá et al. (2009). Nejprve rozdělili studované území na čtverce o straně 1 km. V každém z nich ohodnotili množství vyprodukované biomasy za rok. Pro každý čtverec také určili na základě technických, ekonomických, environmentálních a sociálních omezení, zda na něm může stát elektrárna. S pomocí funkce *OD Cost Matrix* nadstavby Network Analyst spočítali vzdálenosti z každého bodu zdroje biomasy do míst možného umístění elektrárny. Délku trasy vynásobili počtem cest nutných k odvozu biomasy. Optimální umístění zařízení určili podle celkového počtu najetých kilometrů.

### **3.2.2. Ostatní modely**

Software SIRUS, který využívá operační výzkum a GIS, vytvořili Bautista a Pereira (2006), jeho úkolem je umístit sběrná místa odpadu. Snaží se najít rovnováhu mezi snahou umístit nejmenší možný počet nádob kvůli snížení nákladů, obtěžování obyvatel hlukem při vysypávání nádob a negativního vlivu na estetiku, na druhé straně však respektovat donáškovou vzdálenost, po kterou je občan ochoten třídit.

## **3.3. Modely využívající operační výzkum**

### **3.3.1. Modely zabývající se svozem odpadu**

Kulcar (1996) použil lineární programování a systémové inženýrství k řešení problému svozu odpadu. Hodnotil přepravu autem, železnicí a po vodě. Zařadil 4 kategorie dat: topologické (vytyčil možné trasy sběru, koncová zařízení, depa pro svozová auta), data o cenách, data o kapacitách a externí data (např. počet vozů). Řeší potřebu vybudování meziskladů před odvozem do spalovny, zkoumá dopad snížení počtu dep a hodnotí cenu svozu po silnici, železnicí a po vodě.

Bhat (1996) vytvořil simulaci, která se zabývá problémem svozových vozů. Ty stráví mnoho času cestováním a čekáním v zařízeních. Optimalizuje přiřazení svozových vozidel k zařízením nejen podle vzdáleností. Bere v úvahu i čekání vozů, ke kterému dochází tím, že do jednoho zařízení přijíždí mnoho vozidel.

Nuortio et al. (2006) dosáhli 46% úspory délky tras při svozu odpadu v Kuopio. Jejich algoritmus hledá nejbližší nevysypaný koš s ohledem na typ odpadu, interval jeho svozu, kapacitě vozu a délku pracovní doby.

Simonetto a Borenstein (2007) dosáhli úspory 8,82 % délky najetých tras ve městě Porto Alegre. K řešení používali dopravní úlohu (kap. 4.3.1), která řešila svoz mezi skupinami sběrných míst do zaplnění kapacity vozidla a následně do zaplnění cílového zařízení.

### **3.3.2. Ostatní modely**

Celočíselné programování použili při optimalizaci rozšiřování a využití zařízení pro nakládání s odpadem Huang et al. (1995). Vzali v úvahu data o množství odpadu vyprodukovaného v obcích, provozní náklady zařízení a náklady na přepravu.

Chang et al. (1996) byli první, kdo výslovně vnesli environmentální kritéria do hodnocení strategií odpadového hospodářství. Vzali v potaz znečištění ovzduší a výluhy ze skládek. Model určuje kapacitu a umístění zařízení k nakládání s odpady.

O rok později využili Chang et al. (1997) multikriteriální smíšené celočíselné programování jako protiklad deterministickým matematickým modelům pro odpadové hospodářství, které nejsou vhodné k řešení tak komplexní problematiky. Jejich řešení je založené na fuzzy logice, která má podstatu v nestatistických postupech, kde chybí ostré hranice informací. Takové se v odpadovém hospodářství nachází, neboť při sestavování modelů jsou často nejistoty v zadávaných údajích, chyby v parametrech a použitých veličinách. Celková cena svozu je v tomto modelu, hodnotícím nakládání s odpady, vyjádřena jako lineární závislost množství svezeneho odpadu a průměrné ceny svozu jednotkového množství.

Model pro studii nakládání s komunálním separovaným odpadem sestavil i Tanskanen (2000). Zkoumá, jak zajistit naplnění národních cílů množství recyklovaného materiálu. Nejprve provádí analýzu sběrného systému k definování několika strategií separace a výpočtu množství odpadů tím sesbíraného. Poté model pro tyto strategie počítá náklady a emise celého systému. Pro sběr a svoz odpadu hodnotí emise CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub> a VOC jako jednotkovou hmotnost plynu na litr spotřebovaného paliva (tab. 4).

Tab. 4: Hodnota emisí na litr spotřebovaného paliva (Tanskanen, 2000).

plyny	emise	
	jednotka	hodnota
způsobující eutrofizaci	g O <sub>2</sub> · l <sup>-1</sup>	154,5
skleníkové	g CO <sub>2</sub> · l <sup>-1</sup>	2,7
kyselé	g SO <sub>2</sub> · l <sup>-1</sup>	18,1
narušující ozónovou díru	g C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> · l <sup>-1</sup>	2,7

Costi et al. (2004) vytvořili model pro podporu rozhodování, kolik odpadu využívat a kolik ukládat na skládky za technických, legislativních a environmentálních omezení. Hledá optimální počet, druh a lokalizaci zařízení v systému. Zabývá se také cenou svozu, kterou počítá podle počtu vozidel, spotřebovaných pohonných hmot, odměn zaměstnancům a silničních poplatků. Počet svozů nevyjde jako celé číslo, ale vzhledem k tomu, že se jedná o počet za celý rok, půjde o drobnou nepřesnost. Použitý vzorec:

$$C^t = \sum_{(s,d) \in X} Q_{sd} C_{sd} V_{sd}^{-1}$$

$C_t$  - cena svozu odpadu za rok;  $s, d$  - obecná trasa;  $X$  - soubor možných tras;  $Q_{s,d}$  - roční objem odpadů na trase  $s, d$ , vypočítána podle vzorce  $V = m \cdot \rho^{-1}$ ;  $C_{s,d}$  - cena svozu na dané trase;  $V_{s,d}$  - kapacita svozového vozidla.

## 4. Metodika

Model je soubor algoritmů zjednodušeně popisující části reality. Zjednodušeně znamená, že se zobrazují jen některé znaky pozorovaného procesu a jiné se vynechávají, buď úmyslně nebo protože jsou nepoznatelné či nedostupné. O tom, které vlastnosti má model zobrazit, rozhoduje hlavně jeho účel (Mitášova et al., 1990). Tento soubor algoritmů však nejen popisuje daný proces, ale také z něj odvozuje nové informace, které je třeba na závěr správně interpretovat (Burrough, McDonell, 1998).

Při tvorbě modelu svozu odpadu byly použity následující nástroje:

- Geografický informační systém,
  - software ArcGIS, aplikace ArcMap a ArcCatalog, nadstavba Network Analyst, funkce *Service Area*, *OD Cost Matrix*, *New Route*.
- Operační výzkum, optimalizační model, distribuční úloha, indexová metoda,
  - Microsoft Excel, programovací jazyky Visual Basic a Python.

GIS sloužil k zadávání prostorových objektů a měření vzdáleností, čímž byla získána data pro operační výzkum. Ten pomocí indexové metody optimalizoval trasy svozu. Výsledky optimalizace byly zobrazeny opět v GIS. Model byl aplikován na území hl. m. Prahy.

### 4.1. Popis modelovaného území - hl. m. Praha

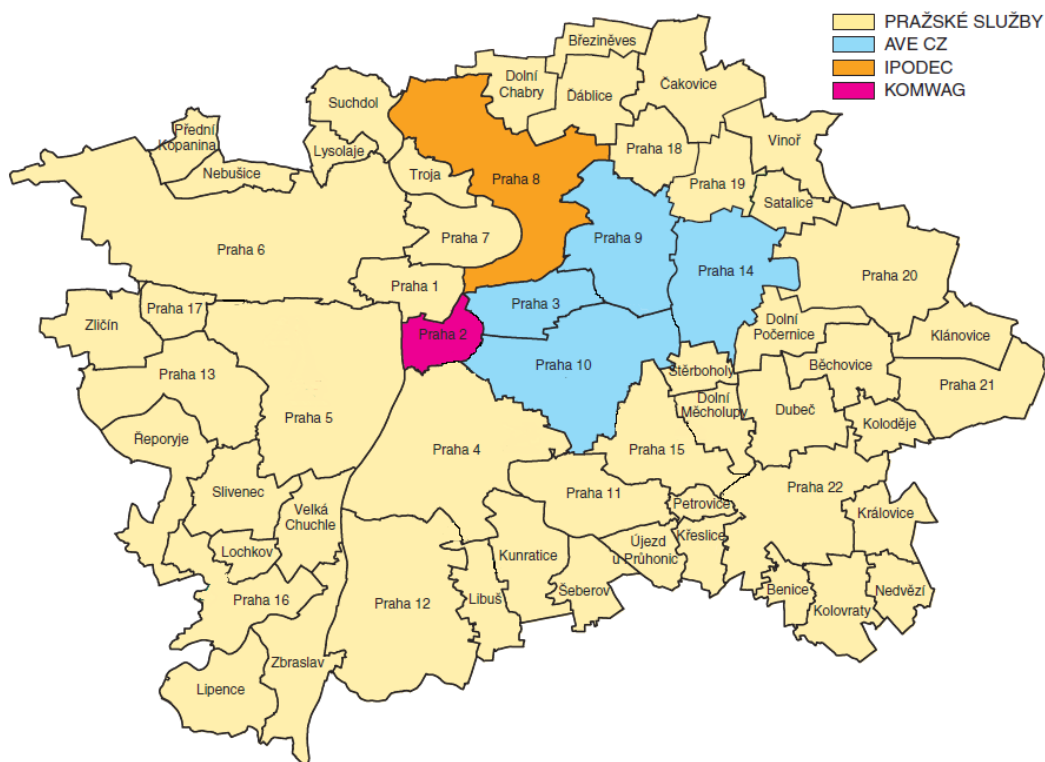
Praha se rozkládá na ploše 496 km<sup>2</sup>. Žije zde 1 249 026 obyvatel (údaj z 31.12. 2009). Počet obyvatel se neustále zvyšoval od poloviny 17. století až do roku 1994. V roce 2002 se začali započítávat také cizinci s dlouhodobým pobytem, takže počet lidí podle statistiky znovu narůstá především vlivem zahraniční migrace. Praha je členěna na 22 správních obvodů, 57 autonomních městských částí a 112 katastrálních území. Celková délka komunikační sítě dosahuje 3 400 km (ČSÚ, 2009). V současnosti je ve výstavbě vnitřní i vnější okruh města, který by měl dopravě v centru ulehčit.

Prahu nejvíce sužuje špatná kvalita ovzduší v centru a některých oblastech středních pásů osídlení (ČSÚ, 2009). Většina případů překročení imisních limitů (IL) souvisí se značným dopravním zatížením, hlavní dopravní tahy vedou přímo středem města. V roce 2008 byly překročeny IL a cílové IL u částic PM<sub>10</sub>, NO<sub>2</sub>, benz(a)pyrenu, arsenu a přízemního ozónu. Na 5 z 19 stanic byl překročen 24hodinový IL u částic PM<sub>10</sub>, roční IL na jedné. Na stanici v Legerově ulici byl překročen 84x. U NO<sub>2</sub> došlo na 5 lokalitách k překročení ročního IL. 106x byl překročený imisní limit na Legerově ulici. Cílový IL byl překročen u benzo(a)pyrenu na 2 ze 3 stanicích, u arsenu na 1 z 9, u přízemního ozónu na 3 z 8 stanic (ČHMÚ, 2009). Nákladní vozidla mají největší podíl na emisi částic PM<sub>10</sub> (55,2 % z celkových emisí z dopravy) a emisí NO<sub>x</sub> (39,2 %) (Coňková et al., 2009).

Z hlediska hluku je Praha nejvíce zatíženým regionem z celé republiky, nadměrným hodnotám je vystaveno přibližně 30 % obyvatel. Odhaduje se, že asi 90 % akustické energie ve městě generuje silniční doprava (ČSÚ, 2009). Na nejhluchnějších komunikacích dosahuje skoro 80 dB, limity hluku jsou překračovány ve dne i v noci (Coňková et al., 2009).

Na území Prahy se nachází 4 státní přírodní rezervace, 2 chráněné přírodní památky, 2 chráněná naleziště a 75 chráněných přírodních výtvorů. Po zrušení městských hradeb byl vzniklý prostor zastavěn, takže Praha má poměrně málo veřejné zeleně (ČSÚ, 2009).

Základní smlouvu na zajištění nakládání s komunálními odpady uzavřel Magistrát hl. m. Prahy se společností Pražské služby, a.s., dále zde působí její subdodavatelé AVE CZ, IPODEC a KOMWAG (obr. 2). Zajišťují celoplošný svoz směsného, tříděného a objemného odpadu (internet 1). Sběr tříděného odpadu je řešen ve spolupráci se společností EKO-KOM, a.s. Náklady na tříděný sběr po odečtení tržeb z prodeje těchto surovin činily v roce 2008 280 997 tis. Kč.



Obr. 2: Mapa svozových oblastí (internet 2).

#### 4.1.1. Množství odpadu

Množství komunálního odpadu na území Prahy neustále narůstá. Hmotnost směsného odpadu roste od roku 2003 průměrně o 1,08 % za rok. Díky třídění se zvyšuje hmotnost materiálově využívaného odpadu na úkor spalovaného. 20 % odpadu se v roce 2008 skládalo (tab. 5). Vývoj množství vytríděného komunálního odpadu ukazuje tabulka 6. V přepočtu na jednoho obyvatele se v roce 2007 vytrídilo 23 kg papíru, přes 8 kg plastů a 15 kg skla (internet 1).

Tab. 5: Vývoj produkce a nakládání s komunálním odpadem v Praze v [kt], vytríděné odpady jsou uvedeny včetně nebezpečných odpadů (Horvathová et al., 2009).

Rok	Komunální odpad [kt]	Odstranění		Využití		
		skládkování	celkem	termické-energetické	materiálové	
					vytríděno*	Fe – ze škváry
2003	292,9	43,4	249,5	205,4	44,1	3,6
2004	305,0	42,4	262,6	208,1	54,5	2,8
2005	319,1	54,0	265,1	201,2	63,9	3,4
2006	326,4	53,7	272,7	200,5	72,2	3,3
2007	340,5	62,9	277,6	197,3	80,3	3,1
2008	392,4	78,0	314,4	190,8	86,1	3,1



Tab. 6: Množství vyříděného komunálního odpadu v [t] (Horvathová et al., 2009).

Rok	Papír [t]	Sklo barevné [t]	Sklo čiré [t]	Plasty [t]	Nápojový karton [t]	Celkem [t]	Papír ZŠ [t]
2003	16 097	7 436		6 040		29 573	1 251
2004	18 003	7 909	2	6 596	9	32 519	1 411
2005	19 214	8 399	432	7 164	171	35 380	1 597
2006	22 244	9 119	828	8 114	424	33 429	1 571
2007	23 711	10 425	996	9 643	536	45 311	1 287
2008	26 732	11 805	1 529	10 639	702	51 407	1 157

#### 4.1.2. Sběr a svoz

Od roku 1998 probíhá „Projekt hospodaření s odpady na území hl. m. Prahy“, v rámci něhož se celoplošně třídí komunální odpad, v roce 2004 a 2006 byly pilotními projekty doplněny další složky. Třídí se tedy papír a lepenka, sklo barevné, sklo čiré, plasty směsné, nápojové kartony, nebezpečný odpad, kovy železné a neželezné, stavební suť, elektronický odpad, odpad z údržby zeleně, dřevěný odpad, pneumatiky, objemný odpad, směsný odpad, elektrozařízení z domácností a baterie (Horvathová et al., 2009).

Pro sběr papíru a lepenky, skla, plastů a nápojových kartonů se zavedl donáškový, odvozný a kombinovaný systém. Ulice jsou osázeny nádobami s horním nebo spodním výsypem o objemu 1100 - 3200 litrů. Jejich počet je v současnosti stabilní, sběrných hnízd je přes 3200. Zvýšenou potřebu objemu si mohou hlásit sami občané a řeší se vyšší četností svozů. Odvozný způsob se praktikuje na území Pražské památkové rezervace. Nádoby o objemu 120-240 litrů jsou schovány ve více než tisíci bytových domů. Od roku 2004 se separují i nápojové kartony na 2217 místech do nádob o objemu 240 nebo 1100 litrů. Od stejného roku se začalo na 854 místech třídít směsné sklo na čiré a barevné. Dále je možné tyto suroviny odložit ve sběrných dvorech a ve školách při sběrech (Horvathová et al., 2009).

Pražské služby postupně mění vozidla na naftu za vozidla na stlačený zemní plyn. Jejich emise CO<sub>2</sub> činí 703 g.kWh<sup>-1</sup>, tj cca 75 % hodnot srovnatelného motoru s naftovým pohonem. Využívají se v centru Prahy a k odvozu biodpadu. Zemní plyn se doplňuje ve vlastní plnicí stanici v ulici Pod Šancemi (Zvejška, 2010).

### **4.1.3. Plán odpadového hospodářství**

Současný POH je zpracován pro období 2006-2010. V oblasti separovaných komunálních odpadů si ukládá za cíle, které jsou specifické pro město Praha (nejsou obsaženy v POH ČR):

- dohodu o společném logistickém systému pro vybrané odpady mezi Prahou a Středočeským krajem,
- zahustit síť nádob, aby na každé hnízdo připadalo 250 spádových obyvatel a donášková vzdálenost nepřesahovala 150 m,
- zvyšovat podle potřeb četnost svozu,
- zpracovat a realizovat studie o podzemních kontejnerech a vakuovém sběru,
- zajistit oddělený sběr bílého a barevného skla,
- mezikrajskou a meziresortní spolupráci při řešení problematiky odpadového hospodářství.

Pražské služby provozují dotřídňovací linku na papír, což výrazně vylepšuje finanční bilanci nakládání s touto druhotnou surovinou. Plasty jsou předávány společnosti ECO-SUN, s.r.o., za předané plasty se tedy musí navíc zaplatit. POH tedy ukládá vypracovat studii a posoudit ekonomickou rentabilitu výstavby dotřídňovací linky.

## **4.2. Geografický informační systém**

Geografický informační systém je „soubor prostředků pro sběr, ukládání, vyhledávání, transformaci, analýzu a zobrazování prostorových údajů z reálného světa z hlediska jejich polohy vzhledem k definovanému souřadnicovému systému, jejich popisných vlastností a jejich prostorových vztahů k jiným objektům“ (Burrough, McDonell, 1998).

Software pro GIS plní tři úlohy (ESRI, 2004; Johnston, 1998):

- 1) Databáze: obsahuje datové sady, které reprezentují geografické informace. Slouží k ukládání, správě a vyhledávání dat. Data mohou být zadávána manuálně nebo pomocí digitalizace map.
- 2) Vizualizace: zobrazuje prvky a vztahy mezi prvky na zemském povrchu. Zobrazení lze dále využívat pro dotazování a analýzu dat.

- 3) Analýza: obsahuje sadu nástrojů pro odvozování nových informací ze zadaných pomocí analytických funkcí. Výstupy jsou tabulkové a grafické.

#### **4.2.1. Důležité pojmy související s GIS**

Data jsou v GIS organizována do tématických vrstev. Tyto datové sady nesou informaci o svém prostorovém umístění, díky čemuž lze vrstvy navzájem překrývat. Další informace obsahuje tabulka atributů. Každý její řádek reprezentuje jeden záznam, sloupec jednu vlastnost (atribut). Atribut je negrafická informace spojená s body, liniemi a polygony. Tabulky je možné propojovat relačním spojením na základě společného atributu. U vrstev je možné měnit řadu nastavení (symbolů, popisků, vybírat jen některé záznamy apod.).

Vrstva může obsahovat vektorové nebo rastrové prvky. Vektorová vrstva zobrazuje diskrétní prvky (body, linie, polygony). Jako jednu z vlastností mají uloženu informaci o svém tvaru a poloze. Rastrová vrstva reprezentuje jevy spojitě se měnící v území. Je rozdělena do sítě buněk, každá buňka obsahuje hodnotu (Johnston, 1998; Burrough, McDonell, 1998). Vzhledem k povaze zadávaných dat (např. silnice, zařízení, katastrální území) byly v diplomové práci využity jen vrstvy s vektorovými prvky.

GIS je pro řešení úlohy v prostoru, jakou je svoz odpadu, ideálním nástrojem. Umožňuje zadávat umístění důležitých prvků a využívat již existující převzaté vrstvy. Obsahuje řadu specializovaných nástrojů pro vytváření odvozených dat z dat zadaných, operace je možné řetězit a tím vytvořit tzv. model zpracování dat. Následně zobrazí výsledky do map, ke kterým lze přidat legendu, měřítko, směrovou růžici apod.

#### **4.2.2. Software ArcGIS**

Pro řešení diplomové práce byl použit software ArcGIS od společnosti ESRI, což je integrovaná sada softwarových produktů pro vytvoření kompletního GIS. Znamená to, že ho lze používat na serverech, prostřednictvím internetu nebo v terénu. ArcGIS Desktop je sada aplikací GIS, společným použitím těchto aplikací lze provádět úlohy GIS všech úrovní (databáze, vizualizace, analýza dat) (Booth, Mitchell, 2001).

Byly použity následující aplikace (Booth, Mitchell, 2001):

- ArcCatalog (slouží pro správu skladů prostorových dat, návrh databází, zápis, zobrazení a správu metadat),
- ArcMap (slouží pro tvorbu map, editaci a provádění analýz na mapovém základě),
- nadstavba Network Analyst (slouží k řešení úloh založených na analýze sítí v mapách, obsahuje funkce *Service Area*, *OD Cost Matrix*, *New Route*).

V aplikaci ArcCatalog se určí příkazem *New Network Dataset* vrstva, kterou potom využívá nadstavba Network Analyst pro analýzu sítí. V případě modelu to byla vrstva "silnice". Další práce probíhaly v aplikaci ArcMap a nadstavbě Network Analyst.

Popis funkcí:

- *Service Area* vytváří polygony reprezentující vzdálenost, kterou lze urazit z výchozího bodu za určený čas nebo po najetí určitého počtu kilometrů.
- *OD Cost Matrix* počítá vzdálenosti mezi zadanými množinami výchozích a cílových bodů po nejkratší či nejrychlejší trase. Na trasy je možné vkládat překážky či nastavit možnost obrátů vozidel do protisměru. Výstupem je zjednodušené znázornění tras a jejich délky.
- *New Route* nalezne nejlepší trasu pro objetí zadaných zastávek na základě cestovního času nebo najetých kilometrů. Na trasy je možné vkládat překážky, nastavit možnost obrátů do protisměru či přeskupení zadaného pořadí zastávek pro dosažení lepšího výsledku. Výstupem je grafické znázornění trasy a její délka.

### 4.3. Operační výzkum

Předmětem operačního výzkumu je studium a rozbor procesů v rámci nějaké organizační jednotky s cílem poskytnout informace, které jsou podkladem pro řízení a rozhodování. Operační výzkum je aplikací vědeckých metod na komplex problémů vznikajících při řízení složitých systémů lidí, strojů či peněz ve výrobě, vojenství, životním prostředí apod. Rozvoj je svázán s pokrokem v oblastech teorie informací, automatického řízení a výpočetní techniky (Mainzová, Zborník, 2001).

Operační výzkum se používá, pokud je větší počet variant řešení, mezi kterými je třeba vybrat podle nějakého kritéria (kritérium optimality). Vnitřní i vnější souvislosti se

v systému zobrazují zpravidla modelem a další zkoumání systému se provádí jeho prostřednictvím. Funkční vztah (F) každého modelu může být zapsán v obecném tvaru (Mainzová, Zborník, 2001):

$$U = F(Y_j, X_i)$$

U užitečnost (hodnota kritéria charakterizující kvalitu fungování systému),

$Y_j$  konstanty (veličiny, které v systému není možné měnit),

$X_i$  proměnné (veličiny, které lze v daném systému měnit).

Jestliže je model sestaven, lze najít hodnoty  $X_i$  při zadaných hodnotách  $Y_j$ . Optimální řešení se rozpozná podle hodnoty užitečnosti.

Svoz odpadu z většího území je složitým procesem, pro jehož řešení se zdá být vhodné použití operačního výzkumu. Pro účely optimalizace svozu byly užitečnost a veličiny určeny takto:

U celková délka tras najetých svozovými vozidly,

$Y_j$  hmotnosti odpadu vyprodukované původci, kapacity zařízení, délky tras mezi původci odpadu a zařízeními,

$X_i$  množství odpadu proudící po jednotlivých trasách.

#### 4.3.1. Optimalizační modely

Cílem optimalizačních modelů je nalézt optimální řešení z množiny přípustných řešení. Přípustné řešení je řešení, které splňuje řešitelem udané omezující podmínky. Optimální řešení je takové, které obsahuje nejvhodnější hodnotu kritériální funkce. Optimalizační modely se často používají v oboru ochrany životního prostředí (Fiala, Šauer, 2005). Pro jejich řešení bylo využito lineárního programování.

V lineárním programování existuje řada speciálních algoritmů vytvořených pro oblast problémů se specifickým charakterem. Jedním z nich je distribuční úloha. Mimo jiné řeší dopravní úlohy, u nichž je třeba najít nejlepší způsob přepravy zboží mezi poskytovateli a odběrateli (Mainzová, Zborník, 2001). V případě této práce tedy způsob přepravy separovaných odpadů od původců do cílových zařízení. Pro řešení distribuční úlohy byla použita indexová metoda. Tato metoda hledá suboptimální řešení, které lze dalšími postupy, tzv. upravenou simplexovou metodou pro řešení dopravních úloh nebo Vogelovou aproximační metodou, dále zlepšovat. Suboptimální řešení je optimálnímu velmi blízko, proto bylo v porovnání s délkou optimalizovaných tras ponecháno jako konečné.

### 4.3.2. Indexová metoda

Metoda je založena na snaze využívat přednostně cesty, které jsou nejvýhodnější z hlediska zadaného kritéria. Zadané údaje se zapíší do tzv. přepravní matice (= tabulky dopravní úlohy), kde se také úloha řeší (Gros, 2003). Její tvar upravený pro potřeby optimalizace tras svozu je v tabulce 7. V polích tabulky jsou vzdálenosti  $c_{ij}$  mezi zdrojem odpadu  $i$  a cílovým zařízením  $j$ , poslední sloupec slouží pro zápis kapacit  $b_j$  cílových míst, poslední řádek pro množství vyprodukovaného odpadu  $a_i$  zdroji. Řešením jsou přepravovaná množství odpadu  $x_{ij}$  v jednotlivých polích tabulky, což znamená množství dopravované do daného cílového místa od zdrojů. Součty dosazovaných hodnot v řádcích musí být rovny kapacitám v posledním sloupci, stejně tak součty hodnot ve sloupcích musí být rovny hodnotám v posledním řádku.

Tab. 7: Obecný tvar přepravní matice (pro potřeby svozu odpady upraveno podle Gros, 2003). Vysvětlivky:  $c_{ij}$  - vzdálenosti;  $x_{ij}$  - přepravovaná množství odpadu;  $a_i$  - množství odpadu vyprodukované  $i$ -tým zdrojem;  $b_j$  - kapacita  $j$ -tého cílového zařízení;  $m$  - počet cílových zařízení;  $n$  - počet zdrojů odpadu.

Cílová zařízení	Zdroje odpadu				Kapacita cílových zařízení
	1	2	...	n	
1	$c_{11} x_{11}$	$c_{12} x_{12}$	...	$c_{1n} x_{1n}$	$b_1$
2	$c_{21} x_{21}$	$c_{22} x_{22}$	...	$c_{2n} x_{2n}$	$b_2$
...	...	...	...	...	...
m	$c_{m1} x_{m1}$	$c_{m2} x_{m2}$	...	$c_{mn} x_{mn}$	$b_m$
Množství odpadu	$a_1$	$a_2$	...	$a_n$	$\Sigma a = \Sigma b$

Při řešení se opakují tyto tři kroky (Gros, 2003):

1. Na neobsazených polích se nalezne pole s nejnižší hodnotou  $c_{ij}$ . Na ni se dosadí za  $x_{ij} = \min(a_i, b_j)$ .
2. Pokud  $x_{ij} = a_i$ , pokryjí se požadavky  $i$ -tého zdroje, k ostatním  $x_{ij}$  v  $i$ -tém sloupci se napíše nula a sníží se hodnota  $b_j$  na  $b_j - a_i$ . Nebo pokud  $x_{ij} = b_j$ , vyčerpá se kapacita  $j$ -tého cílového místa, k ostatním  $x_{ij}$  v  $j$ -tém řádku se napíše nula a sníží se hodnota  $a_i$  na  $a_i - b_j$ .
3. Pokud jsou všechna pole obsazena, bylo dosaženo řešení úlohy. V opačném případě se opakuje krok 1.

### 4.3.3. Nevyvážené dopravní úlohy

Při řešení úloh se často stane, že součet požadavků výchozích míst ( $a_i$ ) není roven kapacitám cílových míst ( $b_j$ ). Platí tedy jedna z nerovností (Gross, 2003):

$$\sum_{i=1}^m a_i \leq \sum_{j=1}^n b_j \text{ nebo } \sum_{i=1}^m a_i \geq \sum_{j=1}^n b_j .$$

Do tabulky se přidá fiktivní zdroj / cílové místo, které bude rozdíl vyrovnávat. V případě první nerovnice se tato nerovnice převede na rovnici (Gross, 2003):

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} + x_{m+1,j} = b_j, \text{ kde } \sum_{j=1}^n x_{m+1,j} = \sum_{j=1}^n b_j - \sum_{i=1}^m a_i .$$

Vzdálenost ( $c_{ij}$ ) fiktivního místa od ostatních míst byla zvolena vyšší než ostatní vzdálenosti, díky čemuž se řešil její rozvoz jako poslední, aby fiktivní odpad nezabíral místo v cílových zařízeních (příp. aby se odpad nevozil do fiktivní linky). Na konci se musí tato vzdálenost odečíst od celkově najeté vzdálenosti.

### 4.3.4. Microsoft Excel

Microsoft Excel (dále jen Excel) je obecně rozšířený tabulkový procesor. Pomohl při správě dat, výpočtech množství odpadu, kapacit zařízení a délky přepravních tras a také při zadávání dat do tabulky dopravní úlohy. Data lze také přenášet do programu ArcGIS. V tabulce atributů se příkazem *Join* propojují atributy vstev s daty v Excelu. Naopak se příkazem *Export data* přenesou z tabulky atributů do Excelu, kde s nimi lze dále pracovat.

### 4.3.5. Visual Basic a Python

Programovací jazyky Visual Basic a Python sloužily k automatizaci dopravní úlohy. V programu Excel je prostředí pro tvorbu maker, která se programují v jazyku Visual Basic. Výhodou tedy je, že se úloha zadává i řeší v jednom programu. Z důvodu zvýšení kompatibility řešení úlohy s jinými bezplatnými tabulkovými procesory byl vytvořen program v programovacím jazyku Python. Zpracovává soubory v textovém formátu CSV, které se dají vyexportovat z Excelu i z jiných tabulkových programů, kde je lze po provedení výpočtu programem znovu zobrazit i s výsledky.

## 4.4. Sestavení modelu

### 4.4.1. Množství a skladba komunálního separovaného odpadu v území (a<sub>i</sub>)

Data o množství sebraného tříděného komunálního odpadu byla získána od příslušného úřadu, v případě modelovaného území Prahy od Odboru ochrany prostředí Magistrátu hl. m. Prahy. Jejich údaje pocházejí od svozových firem. Každá z nich dodává hmotnost jednotlivých tříděných komodit v jednotkách [t.měsíc<sup>-1</sup>] za svoji svozovou oblast. Odlišnosti množství odpadu během měsíců v roce nebyly brány v úvahu a pracovalo se s údajem za celý rok. Dále bylo území Prahy rozděleno na menší jednotky podle stávajících katastrálních území. Výpočet hmotnosti odpadu pro tyto jednotky:

$$m_{kú,k} = m_{so,k} \cdot N_{so}^{-1} \cdot N_{kú}$$

$m_{kú,k}$  hmotnost komodity v katastrálním území,

$m_{so,k}$  hmotnost komodity ve svozové oblasti,

$N_{kú}$  počet obyvatel v katastrálním území,

$N_{so}$  počet obyvatel ve svozové oblasti,

$k$  komodita.

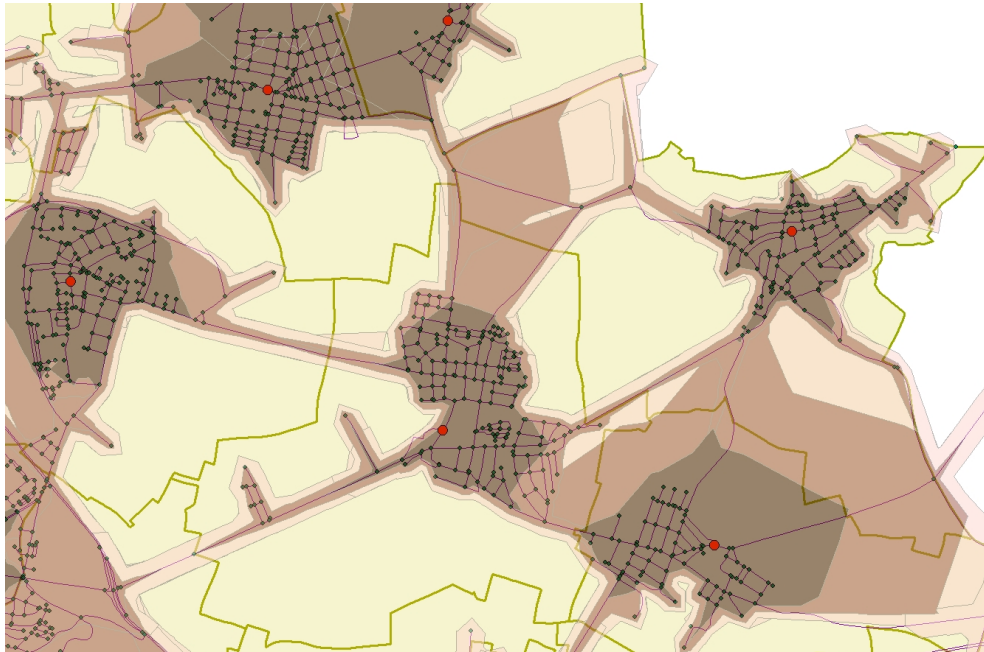
Nepřesnosti vyplývající z toho, že oblasti svozových firem se v některých místech přesně nepřekrývají s územním rozdělením katastrálních území, jsou vzhledem k malé ploše těchto nepřesností zanedbány. U skla byla data rozdělena na sklo čiré a směsné, tato data byla sečtena a v úloze se řeší pouze sklo směsné, protože třídění skla není zatím zavedeno plošně. Množství odpadu bylo do GIS zaneseno jako atribut polygonové vrstvy „katastrální území“ a do dopravní úlohy za veličinu  $a_i$ .

### 4.4.2. Sběrná místa odpadu

Zdrojem odpadu  $a_i$  je pro účely řešení dopravní úlohy nádoba na tříděný sběr. "Hnízda" jsou zanesena ve vrstvě "nádoby". Při zkoumání většího území by však byla úloha výpočetně náročná. Další problémy spočívají v tom, že všechna stanoviště nejsou osázena nádobami pro všechny druhy tříděných komodit a frekvence odvozu jednotlivých stanovišť se různí. Proto došlo ke sloučení nádob do jednoho bodu, který reprezentuje celé katastrální území. Nezáleží poté na tom, ze kterých konkrétních stanovišť byl odpad



odvezen. Dochází tím však k zjednodušení a ztrátě údaje o množství najetých kilometrů od nádob k tomuto bodu. Tyto body byly do GIS zanášeny ručně tak, aby se nacházely do určité vzdálenosti od všech nádob, k čemuž pomohla funkce *Service Area* (obr. 3). Z těchto bodů byla vytvořena v GIS vrstva nazvaná "centra svozu".



Obr. 3: Ukázka výsledku funkce *Service Area*. Červené body - centra svozu; zelené body - nádoby; odstíny polygonů - obslužné plochy center svozu, odstín dán vzdáleností (1, 2, 3 km) od center svozu vedoucí po silnicích.

#### 4.4.3. Cílová zařízení na zpracování odpadu a jejich kapacita ( $b_j$ )

Za cílová zařízení byly určeny třídící linky, kam se odpad sváží ze sběrných míst, aby mohl být po úpravě předán k dalšímu využití. Pokud mezi sběrným místem a třídící linkou existuje překladiště, je bráno jako cílové zařízení místo třídící linky. Umístění cílových zařízení bylo zjištěno na Magistrátu hl. m. Prahy a od společnosti Pražské služby, a.s.. Pro výpočet indexovou metodou je třeba dále znát kapacitu zařízení v tunách za časovou jednotku. Tyto kapacity byly opět zjištěny z Magistrátu hl. m. Prahy nebo přímým dotazem na dané zařízení. Třídící linky vytvořily v GIS samostatnou bodovou vrstvu "třídící zařízení" a v dopravní úloze představují jejich kapacity veličinu  $b_j$ .

#### 4.4.4. Určení frekvence svozu

Nejprve byla určena základní frekvence svozu na základě frekvencí v katastrálních územích s nejnižší hmotností vyprodukovaného odpadu. Pro papír a plast byla určena frekvence 1x týdně, pro nápojové kartony 1x za 2 týdny a pro sklo 1x za 6 týdnů. Na takové hodnoty byla také přepočítána hmotnost odpadu z jednotek [t.rok<sup>-1</sup>] na 1x[t.týden<sup>-1</sup>] u plastu a papíru, na 2x[t.týden<sup>-1</sup>] u nápojových kartonů a na 6x[t.týden<sup>-1</sup>] u skla. Obdobně byla přepočítána také kapacita třídících zařízení.

Optimalizace se v této úloze soustřeďuje na počet najetých kilometrů. Proto je potřeba zvýšené frekvence svozu z území určena kapacitou svozového vozidla a hmotností vyprodukovaného odpadu. Standardní kapacity svozových vozidel jsou uvedeny v tabulce 8.

Tab. 8: Kapacita standardních svozových vozidel v Praze [t] (zdroj Pražské služby, a.s.).

komodita	kapacita svozového vozidla [t]
papír	3,5
plast	2,1 - 2,3
sklo	4,5
n. kartony	2,1 - 2,3

V územích, ve kterých se vyprodukuje více odpadu, než se vejde do svozového vozidla, je poté frekvence svozu vyšší. Území, ve kterých se vyprodukuje méně odpadu než 60 % kapacity vozidla (rezerva na výchyly hmotnosti během roku), byla sloučena, aby z těchto území nejezdila poloprázdná vozidla. Sloučení probíhalo ručně na základě blízkosti území, případně mezi územími ležícími přibližně v jedné linii směrem k třídícím zařízením a vždy mezi územími přiřazenými dopravní úlohou k jedné třídící lince (viz kapitola 4.4.6.). Počet území sloučených do jednoho sloučeného území byl omezen součtem hmotností odpadu vyprodukovaných v těchto územích tak, aby se tento odpad vešel do jednoho svozového vozidla.

#### 4.4.5. Vzdálenosti od sběrných center k třídícím linkám ( $c_{ij}$ )

Dopravní síť byla převzata stejně jako vrstvy "katastrální území" a "nádoby" z vrstev GIS o životním prostředí v Praze. Institut městské informatiky hl. m. Prahy je vytváří jako součást prací na Informačním systému o životním prostředí v Praze (IOŽIP). Data jsou

standardně udržována ve formátu "ArcView shapefile".

Pomocí této dopravní sítě a funkce *OD Cost Matrix* v ArGIS lze spočítat vzdálenosti mezi množinami center svozu a třídícími linkami. V tabulce dopravní úlohy se tyto vzdálenosti dosadí za veličinu  $c_{ij}$ . Výsledná vrstva linií spojující centra svozu se všemi zařízeními je nazvána „trasa svozu-celek“.

#### 4.4.6. Řešení a zobrazení výsledku dopravní úlohy

Dopravní úloha pomocí indexové metody a případně nevyvážené dopravní úlohy nalezneme po zadání veličin  $a_i$ ,  $b_j$  a  $c_{ij}$  vhodné zařízení ke každému centru svozu tak, aby celkový počet najetých kilometrů byl nejmenší možný. Řeší se každá komodita zvlášť. Zadání i výsledek se zobrazí v Excelu. Algoritmus probíhá pomocí programovacích jazyků Visual Basic a Python. V buňkách tabulky (tab. 9) se zobrazí množství odpadu, které bude v optimálním případě proudit do třídící linky v daném řádku.

Tab. 9: Ukázka tabulky dopravní úlohy v Excelu.  $a_{1-112}$ : hmotnost sebraného odpadu vyprodukovaného v katastrálním území;  $a_{113}$ : hmotnost sebraného odpadu vyprodukovaného na fiktivním místě;  $b_{1-2}$ : kapacita třídících linek; tučné číslo: součet kapacit třídících linek = množství odpadu vyprodukované původci; bílá pole: vzdálenosti; šedá pole: hmotnosti odpadu proudící po daných trasách.

	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$a_4$	...	$a_{112}$	$a_{113}$
<b>909</b>	1,16	3,49	0,47	0,15	...	2,34	454,23
<b><math>b_1</math></b>	24,9	22,9	21,3	21,6	...	9,6	100
384	0,00	0,00	0,00	0,00	...	2,34	161,29
<b><math>b_2</math></b>	14,1	12,4	12,1	12,7	...	12,4	100
525	1,16	3,49	0,47	0,15	...	0,00	292,95

Nyní se výsledek dopravní úlohy přeneseme do tabulky atributů vrstvy „trasa svozu-celek“. Lze tak graficky zobrazit výsledky optimalizace, tj. do kterého zařízení se bude odpad vozit z daného centra svozu. Tloušťkou čar byl naznačen počet standardních svozových automobilů potřebných k přepravě odpadu z území.

#### 4.4.7. Sloučení území s nedostatečným množstvím odpadu

Mapa je díky zobrazení vrstvy „trasa svozu-celek“ rozdělena na oblasti podle příslušnosti k cílovému zařízení. V těchto oblastech došlo ke sloučení katastrálních území, ve kterých se vyprodukuje nedostatečná hmotnost odpadu (viz. kapitola 4.4.4.). Funkci

*New Route* se jako zastávky zadají centra svozu sloučených oblastí a příslušná třídící linka. Vrstva obsahující výsledné trasy vozů svážících odpad ze všech sloučených území se jmenuje „trasa svozu-su“. Přehledný seznam a informace o původu vrstev použitých v modelu je v příloze I.

## 4.5. Možnosti využití modelu

### 4.5.1. Zobrazení výsledné mapy svozu

K zobrazení výsledné mapy svozu po proběhlé optimalizaci jsou třeba tyto vrstvy:

- „trasa svozu-su“,
- „trasa svozu-celek“ bez linií vedoucích ke sloučeným územím.

Je třeba upozornit, že čáry jsou zobrazeny jako rovné linie, obsahují však informaci o jejich skutečné délce po silnicích.

### 4.5.2. Celková přepravní vzdálenost

Pomocí modelu lze spočítat celkovou přepravní vzdálenost najetou svozovými vozidly od center svozu k cílovým zařízením a zpět po proběhlé optimalizaci. Délky tras počítají funkce *OD Cost Matrix* a *New Route*. Výsledek nezahrnuje přepravní vzdálenosti mezi nádobami v katastrálních územích. Vzorec vypadá takto:

$$L_{t,k} = 2 \cdot \sum_{kú} \left( \left[ m_{kú,k} \cdot c_k^{-1} \right] \cdot l_{kú-cz,k} \right) + l_{sú-cz,k} + l_{cz-sú,k}$$

$L_{t,k}$  celková délka tras svozu komodity k za počet týdnů t, zahrnující i zpáteční cesty,

$m_{kú,k}$  hmotnost sebrané komodity k v katastrálním území kú za počet týdnů t,

$c_k$  kapacita standardního svozového vozidla pro svoz komodity k,

$l_{kú-cz,k}$  délka trasy svozu komodity k mezi centrem svozu samostatného katastrálního území a příslušným cílovým zařízením,

$l_{sú-cz,k}$  celková délka tras svozu komodity k spojující všechna centra svozu sloučených území a příslušná cílová zařízení,

$l_{cz-sú,k}$  celková délka zpátečních tras svozu komodity k mezi cílovými zařízeními a prvním centrem svozu sloučených území.

Dále je možné vypočítat celkový počet svozových vozidel potřebných k odvozu odpadu za předpokladu, že každé pojede jen jednu trasu:

$$N_{t,k} = \sum_{kú} \left( \left\lceil m_{kú,k} \cdot c_k^{-1} \right\rceil \right) + N_{sú}$$

$N_{t,k}$  celkový počet svozů komodity k za počet týdnů t,

$N_{sú}$  počet sloučených území.

Podílem těchto dvou údajů je možné získat průměrnou délku svozových tras pro danou komoditu.

#### 4.5.3. Změna vstupních údajů

Po zpracování map svozu a výpočtu délky tras za současného stavu je možné vytvářet případové studie. V modelu je možné měnit:

- hmotnosti odpadu v území,
- umístění cílových zařízení,
- kapacity cílových zařízení,
- kapacity svozových vozů,
- systém sběru.

Z nově vzniklých výsledků je možné usuzovat na výhodnost dané změny z hlediska délky tras přepravy odpadu.

## 5. Výsledky - ověření modelu na území hl. m. Prahy

Správnost modelu byla ověřena na území hlavního města Prahy. Výchozí mapa pro potřeby modelu se zakreslenými katastrálními územími, silnicemi a centry svozu je v příloze II. Příloha III obsahuje odhad množství papíru, plastu, skla a nápojových kartonů v jednotlivých katastrálních územích. V tabulce 10 je seznam a kapacita zařízení, které využívá město Praha pro úpravu separovaného odpadu. Jedná se o třídící linky a v případě skla o překladiště.

Tab. 10: Seznam cílových zařízení v Praze pro rok 2010.

Společnost	Adresa	Druh zařízení	Druh zpracovávané suroviny	Kapacita [t.týden <sup>-1</sup> ]	Kapacita [t.rok <sup>-1</sup> ]
Pražské služby, a.s.	Chrást'any	třídící linka	papír / n.karton	479	25 000
Pražské služby, a.s.	Pod Šancemi 444/1, Praha 9	třídící linka	papír / n.karton	525	27 378
EKO-SUN, s.r.o.	Paroplavební 50/10, Praha 5	třídící linka	plast	196	10 200
AMT, s.r.o. Příbram	Freyova 291, Praha 9	překladiště	sklo	2 301	120 000

### 5.1. Papír

Papír se vozí na třídící linky v Chrásťanech a v ulici Pod Šancemi v Praze 9. Byla vytvořena výchozí mapa se zakreslenou hmotností papíru v katastrálních územích a třídícími linkami (příloha IV). Rozpětí barevné škály znázornění hmotnosti bylo zvoleno tak, aby odráželo množství svozových vozidel o standardní kapacitě potřebných k odvezení odpadu z území. Dále byla provedena optimalizace na základě funkce *OD Cost Matrix* a dopravní úlohy (příloha V). Území produkující neostatečnost hmotnost odpadu byla sloučena a mezi centry svozu těchto území a třídícími linkami byla pomocí funkce *New Route* nalezena nejkratší svozová trasa (příloha VI). Výslednou mapu optimalizace svozu papíru ukazuje příloha VII. Na základě výsledku optimalizace byla spočítána přepravní vzdálenost tras najetých svozovými vozidly za týden a počet vozidel potřebných ke svozu papíru:

$$L_{1,\text{papír}} = 2243 + 221 + 161 = 2625 \text{ km}$$

$$N_{1,\text{papír}} = 158$$

## 5.2. Plast

Plast se vozí na třídící linku společnosti EKO-SUN, s.r.o. v Paroplavební ulici. Pražské služby na svých linkách v Chrášťanech a v ulici Pod Šancemi provádí doplňkové třídění fólií, které nebylo do modelu zahrnuto. Výchozí mapu množství plastu a umístění třídících linek obsahuje příloha VIII a výslednou mapu svozu příloha IX, ačkoli zde nebylo zapotřebí použití indexové metody vzhledem k přítomnosti pouze jednoho zařízení. Celková délka tras za týden a počet vozidel nutných k zajištění přepravy:

$$L_{1,\text{plast}} = 2566 + 317 + 261 = 3144 \text{ km}$$

$$N_{1,\text{plast}} = 111$$

## 5.3. Sklo

Sklo se sváží na překladiště ve Freyově ulici na Praze 9, odkud je dále odesíláno do Příbrami. Zde byl řešen pouze svoz na překladiště. Výchozí mapa s množstvím skla za 6 týdnů a překladištěm se nachází v příloze X, výsledná mapa v příloze XI. Celková délka tras byla také počítána za období šesti týdnů, stejně jako počet svozových vozidel, a dále přepočítána 1 týden a zaokrouhlena:

$$L_{6,\text{sklo}} = 6277 + 283 + 187 = 6747 \text{ km}$$

$$L_{1,\text{sklo}} = 1125 \text{ km}$$

$$N_{6,\text{sklo}} = 328$$

$$N_{1,\text{sklo}} = 55$$

## 5.4. Nápojový karton

Nápojový karton se třídí na linkách v Chrášťanech a Pod Šancemi v Praze 9. Výchozí mapu s hmotností nápojových kartonů za 2 týdny ukazuje příloha XII a výsledek optimalizace příloha XIII. Celková délka tras a přepočítání na 1 týden se zaokrouhlením:

$$L_{2,\text{n.karton}} = 0 + 341 + 145 = 486 \text{ km}$$

$$L_{1,\text{n.karton}} = 243$$

$$N_{2,\text{n.karton}} = 13$$

$$N_{1,\text{n.karton}} = 7$$

## 5.5. Změna vstupních údajů - případové studie

### 5.5.1. Změna umístění zařízení

Před nedávnou výstavbou linky v Chrášťanech bylo zvažováno více variant umístění. Na okraji města byla zvolena fiktivní varianta umístění, na které byla otestována funkce modelu pro změnu umístění cílových zařízení. Fiktivní zařízení bylo voleno na okraji Prahy, stejně jako je nyní umístěna linka v Chrášťanech, z důvodu husté zástavby uvnitř města. Optimalizace byla provedena na případě papíru, který se svážel do stávající linky Pod Šancemi a na fiktivní linku. Výsledná mapa optimalizovaného svozu je v příloze XIII. Celková délka tras svozu za týden:

$$L_{1,\text{papír}} = 2168 + 252 + 178 = 2598 \text{ km}$$

$$N_{1,\text{papír}} = 159$$

### 5.5.2. Studie výstavby nových zařízení

POH hl. m. Prahy vyžaduje vypracovat studii o výstavbě třídící linky plastů (kap. 4.1.3.). Byla zvolena modelová situace, kdy by linky v Chrášťanech a Pod Šancemi začaly třídít kromě fólií i směsné plasty. Je možné buď stanovit kapacity těchto zařízení při zadání úlohy nebo zadat dostatečnou kapacitu pro zpracování všech plastů a sledovat, jaká by byla optimální kapacita z hlediska najetých kilometrů. Při řešení případové studie byla zvolena druhá varianta. Kapacita linky ECO-SUN, s.r.o. byla ponechána stávající. Výsledná přepravní vzdálenost za týden a počet potřebných vozidel:

$$L_{1,\text{plast}} = 1342 + 262 + 157 = 1761 \text{ km}$$

$$N_{1,\text{plast}} = 112$$

Postačující kapacita linky v ulici Pod Šancemi z hlediska najetých kilometrů by byla  $126 \text{ t.týden}^{-1}$ , linky v Chrášťanech  $28 \text{ t.týden}^{-1}$ , linky v Paroplavební  $31 \text{ t.týden}^{-1}$ .



## 5.6. Zhodnocení

V Praze se nachází dostatečné kapacity pro úpravu tříděných komunálních odpadů. Nejvíce kilometrů ujedou, při přepočtu všech hodnot na 1 týden, vozy s plastem, a to i když je ke svozu třeba méně vozidel než ke svozu papíru. Průměrná délka trasy svozu papíru je 16,6 km, kdežto plastu 28,3 km. Příčina tedy není v nízké objemové hmotnosti plastu, ale především v umístění pouze jednoho třídícího zařízení mimo okolí centra. U případu skla je průměrná délka trasy 20,5 km díky vhodnějšímu umístění zařízení. Nejkratší vzdálenost urazí vozidla svázející nápojové kartony, protože se jich nevyprodukuje velké množství.

V případové studii bylo zjištěno, že umístění fiktivní linky papíru znamenalo jen velmi malé snížení přepravní vzdálenosti, a to o 1 %. Naopak výstavba nových linek pro třídění plastu má značný vliv na výslednou délku tras, a to zkrácením vzdáleností o 1383 km týdně, tedy o 44 %. Úspora je pochopitelná, protože svoz odpadu pouze do jedné linky vede k vysokým přepravním vzdálenostem.

## 6. Diskuse

Propojení GIS a operačního výzkumu se ukázalo být efektivním řešením tématu diplomové práce. Podobná řešení byla nalezena v pracích Perpiňá et al. (2009), Zamorano et al. (2009), Ghose et al. (2006), Teixeira et al. (2004) a Simonetto, Borenstein (2007). Indexovou metodu a software ArcView od ESRI používala ve své diplomové práci také Chvojková (2002).

Některé modely se před vlastním určením tras svozu zabývají umístováním nádob (Zamorano et al, 2009; Ghose et al., 2006, Bautista, 2006) nebo zařízení (Perpiňá et al., 2009), model v této diplomové práci vychází z předem daného rozmístění zdrojů a cílových zařízení, proto se hodí k řešení situací v místech s již zavedeným systémem sběru.

Odhad množství odpadu byl proveden pro nejmenší možná území, aby zachoval jejich různost. Výpočet hmotnosti odpadu v menších územích z celkové hmotnosti v obci úměrné k počtu obyvatel byl využit také v práci Teixeira et al. (2004). Přímo pro území Prahy lze považovat výpočet množství za svozové oblasti společností AVE CZ, IPODEC a KOMWAG jako relativně přesný, protože data reprezentovala malá území a odrážela tak místní odlišnosti. Oblast Pražských služeb, a.s. zahrnuje území v centru i na okraji Prahy, kde se hmotnost jednotlivých látkových skupin na obyvatele může lišit.

Při svozu odpadu z katastrálního území prováděného pouze z centra svozu došlo ke ztrátě informace o počtu kilometrů najetých uvnitř katastrálního území, ovšem pro optimalizaci svozu a vypracování případových studií nemá tato skutečnost vliv. Seskupení nádob při svém plánování tras svozu, ovšem na základě geometrického středu, použili také Teixeira et al. (2004), z důvodu vysokých výpočetních nároků provedli sloučení území na základě algoritmu popsaného v práci Gillet a Miller (1974) také Simonetto a Borenstein (2007). Funkci programu ArcGIS *Service Area* k umístění košů vzhledem k hustotě obyvatel (analogická úloha k hledání center svozu k „hnízdům“ nádob) použili Zamorano et al. (2009).

Při zjišťování počtu vozidel potřebných k odvozu odpadu z území s údajem hmotnosti za 1 - 6 týdnů je model přesnější, než když počítá s údajem za celý rok (jako u Costi et al., 2004; Perpiňá et al. (2009)). Slučování území svozu bylo provedeno ručně, dalo by se však použít shlukovacích algoritmů. Model počítá jen se standardními kapacitami svozových vozidel, nebere v úvahu např. menší vozidla používaná hlavně v centru města.

Optimalizace se provádí jen v závislosti na počtu kilometrů, tudíž je frekvence svozu dána kapacitou vozidla. Stejný postup použili Diaz a Warith (2006). Nebere v úvahu kapacitu sběrných nádob a potřebu frekvence svozu z hlediska jejich naplnění, to je ovšem ošetřeno tím, že je vždy dána frekvence základní. Dále by bylo možné přidat např. restriktce na průjezd vozidel centrem města.

Funkci software ArcGIS *New Route* pro hledání trasy použili Zamorano et al. (2009), funkci *OD Cost Matrix* Perpiñá et al. (2009).

Výhodou modelu je, že je místně univerzální. Jeho ověření proběhlo na území Prahy. Byly vytvořeny mapy svozu papíru, plastu, skla a nápojových kartonů a vypočítána přepravní vzdálenost tras při jejich sběru od centra svozu k cílovým zařízením. U skla a plastu se indexová metoda neuplatnila, protože se odpad sváží na jedno místo. Výsledky odpovídaly rozmístění třídících linek v území.

Model lze využívat pro analýzu případových studií po změně vkládaných dat, např. vyhledávat z nabízených variant nejvýhodnější umístění nového třídícího zařízení, omezovat kapacity třídících linek blízko centra města z důvodu snižování dopravního zatížení, měnit množství odpadů podle vývoje situace v území nebo studovat změnu systému, např. společný sběr vybraných komodit. Je třeba říci, že rozhodování o takových změnách se bude řídit i jinými faktory, než je přepravní vzdálenost, tento údaj však může pomoci při dalších analýzách.

Z vypočtených hodnot přepravní vzdálenosti by bylo možné dále usuzovat například na množství spotřeby paliva či emise pomocí lineárních závislostí, jako počítají Sonneson et al. (2000), resp. Tanskanen (2000). Na tato témata ovšem byly zpracovány podrobnější práce, například Pandian et al. (2009) o množství emisí v závislosti na typu a stáří vozidla, spotřebovaného paliva, jeho váhy a velikosti, počtu najetých kilometrů, stylu jízdy atd.. Tato práce se tudíž omezuje na hodnocení délek tras.

## 7. Závěry

Model svozu tříděného komunálního odpadu využívá geografické informační systémy a indexovou metodu řešení distribučních úloh k optimalizaci tras svozu. Pro každé katastrální území byla nalezena vhodná třídící linka tak, aby byla minimalizována výsledná délka tras. Model poté umožnil zobrazení map svozu, spočítání přepravních vzdáleností od center svozu katastrálních území do třídících linek a zpět pro každou z komodit. Model je možné použít při rozhodování o změnách v systému sběru a svozu díky možnosti vypracovat případovou studii po změně vstupních dat.

Na území hl. m. Prahy byla ověřena funkčnost modelu, vytvořeny mapy svozu pro papír, plast, sklo a nápojové kartony a spočítány celkové přepravní vzdálenosti. Svozové vozy s papírem najedou týdně po optimalizaci tras 2625 km, s plastem 3144 km, se sklem 1125 km a s nápojovým kartonem 243 km. Případová studie určila úsporu 44 % přepravní vzdálenosti po výstavbě nových linek třídění plastu u současných linek Pražských služeb, a.s..

Postupy uvedené v modelu odpovídají postupům v jiných vědeckých pracích. Model se ukázal být vhodný pro optimalizaci svozu tříděného komunálního odpadu.

## Přehled citované literatury

- Anonym 1 (2009): Postoje obyvatel v oblasti nakládání s odpady. Odpadové fórum 6, str. 17-20.
- Anonym 2 (2009) Zpětný odběr a integrované systémy. Odpadové fórum 9, str. 22-23.
- Anonym 3 (2006): Vývoj systémů separovaného sběru. Odpadové fórum 6, str. 14-15.
- Anonym 4 (2005): Single stream – Nová perspektiva nebo slepá ulička. Odpadové fórum, č. 6, str. 25-26.
- Bautista, J., Pereira, J. (2006) Modeling the problem of locating collection areas for urban waste management. An application to the metropolitan area of Barcelona. Omega 34: 617 - 629.
- Benešová, L., Kotoulová, Z., Černík, B., Vrbová, M., Křečková, K. (2003) Intenzifikace sběru, dopravy a třídění komunálního odpadu : Stanovení skladby komunálních odpadů. MŽP, Praha. 150 str.
- Benešová, L., Černík, B., Gašpar, P., Hnaťuková, P., Kotoulová, Z., Pešek, P., Vrbová, M. (2009) Výzkum vlastností komunálních odpadů a optimalizace jejich využívání. MŽP, Praha.
- Benešová, L., Černík, B., Kotoulová, Z., Vrbová, M. (2004) VaV 720/5/03: Výzkum možností zvýšené recyklace papíru, plastů, skla a neželezných kovů s ohledem na legislativu EU. Univerzita Karlova v Praze, Ústav pro životní prostředí.
- Bhat, V. N. (1996) A model for the optimal allocation of trucks for solid waste management. Waste Management & Research 14: 87-96.
- Booth, B., Mitchell, A. (2001) Getting Started with ArcGIS. ESRI, USA.
- Brewer, A.M., Button, K.J., Hensher D.A., (2001) Handbook of logistics and supply-chain management. Elsevier Science, Amsterdam.
- Burrough, P. A., McDonnell, A. R. (1998) Principles of Geographical Information Systems. Oxford. 333 str.
- Costi, P., Minciardi, R., Robba, M., Rovatti, M., Sacile, R. (2004) An environmentally sustainable decision model for urban solid waste management. Waste Management 24: 277-295.

- Coňková, M., Černý, E., Doubrava, J., Fott, D., Hrubý, O., Karel, J., Kohoutek, Z., Machálek, P., Němec, L., Novák, V., Ostatnická, J., Píša, V., Pokorný, R., Polanská, J., Sládeček, J., Vácha, D. (2009) Praha životní prostředí 2008. Magistrát hl. m. Prahy, Praha. 333 str.
- Crichton, L., Jamieson, D., Ludley, K., Pannett, L. (2003) Separate Waste Collection Systems Best Practice Review. Scottish Executive. 90 str.
- Český hydrometeorologický ústav (2009) Znečištění ovzduší na území České republiky v roce 2008. ČHMÚ, Praha.
- Český statistický úřad (2009) Charakteristika území hl. m. Prahy, dostupné online: [http://www.praha.czso.cz/xa/redakce.nsf/i/charakteristika\\_hl\\_m\\_prahy](http://www.praha.czso.cz/xa/redakce.nsf/i/charakteristika_hl_m_prahy).
- Dahlén, L., Vukicevic, S., Meijer, J.-E., Lagerkvist A. (2007) Comparison of different collection systems for sorted household waste in Sweden. Waste Management 27: 1298 - 1305.
- Diaz, R., Warith, M. (2006) Life-cycle assessment of municipal solid wastes: Development of the WASTED model. Waste Management 26: 886-901.
- ESRI (2004) ArcGIS 9, co je ArcGIS?. ESRI. 125 str.
- Eriksson, O., Carlsson Reich, M., Frestell, B., Bjorklund, A., Assefa, G., Sundqvist, J.-O., Granath, J., Baky, A., Thyselius, L. (2005) Municipal solid waste management from a systems perspective. Journal of Cleaner Production 13: 241-252.
- Fiala, P., Šauer, P. (2005) Ke kvantitativním metodám a modelům vhodným pro optimalizaci nákladů na ochranu životního prostředí. MŽP: Optimalizace nákladů na ochranu životního prostředí, sborník příspěvků seminářů projektu VaV. MŽP, Oeconomica Praha.
- Gallardo, A., Bovea, M.D., Colomer, F. J., Prades M., Carlos, M. (2010) Comparison of different collection systems for sorted household waste in Spain. Waste Management: In press.
- Ghose, M.K., Dikshit, A.K., Sharma, S.K. (2006) A GIS based transportation model for solid waste disposal - A case study on Asansol municipality. Waste Management 26: 1287-1293.
- Gros, I. (2003) Kvantitativní metody v manažerském rozhodování. Grada Praha. 432 str.
- Grusman, P. (2009) Data o odpadech a jejich tok. Odpadové fórum 4. Str. 10-12.

- Horvathová, R., Horvathová, V., Janečková, D., Klein, M., Kuběnová, M., Macura, R., Polák, R., Valta, J., Vojířová, K., Vojtěchová, A. (2009) Praha životní prostředí 2008. Magistrát hl. m. Prahy, Praha. 333 str.
- Huang, G.H., Baetz, B.W., Patry, G.G. (1995) Grey Fuzzy Integer Programming: An Application to Regional Waste Management Planning Under Uncertainty. *Socio-Econ* 29: 17-38.
- Chang, N.B., Chen, Y.L., Wang, S.F. (1997) A fuzzy interval multiobjective mixed integer programming approach for the optimal planning of solid waste management systems. *Fuzzy Sets and Systems* 89: 35-60.
- Chang, N.B., Shoemaker, C.A., Schuler, R.E. (1996) Solid waste management system analysis with air pollution and leachate impact limitations. *Waste Management and Research* 14: 463-481.
- Chvojková, E. (2002) Model pro nakládání s komunálním odpadem. PřF UK, diplomová práce.
- Internet 1: Systém sběru komunálního odpadu v Praze <http://envis.praha-mesto.cz>.
- Internet 2: <http://www.psas.cz/>
- Johnston, C. A. (1998) *Geographic Information Systems in Ecology*. Blackwell Science. 239 str.
- Kotoulová, Z. (2008) Sběr a svoz odpadů v podmínkách ČR. *Odpadové fórum* 6, str. 12-15.
- Kulcar, T. (1996) Optimizing solid waste collection in Brussels. *European Journal of Operational Research* 90: 71-77.
- Kuraš, M. (1994) *Odpady, jejich využití a zneškodňování*. VŠCHT, Praha.
- Larsen, A.W., Merrild, H., Møller, J., Christensen, T.H. (2010) Waste collection systems for recyclables: An environmental and economic assessment for the municipality of Aarhus (Denmark). *Waste management* 30: 744-754.
- Mainzová, E., Zborník, T. (2001) *Základy operační analýzy*. Západočeská univerzita v Plzni, Plzeň.
- Merrild, H. (2009) . Indicators for waste management: how representative is global warming as an indicator for environmental performance of waste management. Ph.D. Thesis. Department of Environmental Engineering, Technical University of Denmark, Kongens Lyngby.

- Mitášova, Veverka, Pezlár (1990) *Základy teórie systémov s aplikáciami v geodézii a kartografii*. ALFA Bratislava.
- Mrázek, P., Kotoulová, Z., Černík, B. (1998) *Systém nakládání s odpady v obcích*. MŽP, Praha.
- Nuortio, T., Kytöjoki, J., Niska, H., Bräysy, O. (2006) Improved route planning and scheduling of waste collection and transport. *Expert Systems with Applications* 30: 223–232.
- Perpiñá, C., Alfonso, D., Pérez-Navarro, A., Peñalvo, E., Vargas, C., Cárdenas R. (2009) Methodology based on Geographic Information Systems for biomass logistics and transport optimisation. *Renewable Energy* 34: 555-565.
- Plán odpadového hospodářství hl. m. Prahy - původce odpadů (2006). ISES, s.r.o., Praha.
- PřF UK, Ústav pro životní prostředí, Markent, s.r.o (2006) *Odpady obcí - environmentální a sociální problém budoucnosti : Problematika nakládání s odpady z pohledu veřejné správy: Závěrečná zpráva*. MŽP, Praha.
- Ryšánek, Z. (1999) *Sběr využitelných plastových obalů od obyvatelstva. Plastové odpady, sborník semináře, VŠCHT, Praha*.
- Shmelev, S.E., Powell, J.R. (2006) Ecological-economic modelling for strategic regional waste management systems, *Ecological economics* 59: 115-130.
- Simonetto, E., Borenstein, D. (2007) A decision support system for the operational planning of solid waste collection. *Waste Management* 27: 1286 - 1297.
- Směrnice Evropského Parlamentu a Rady (ES) č. 98/2008 ze dne 19. listopadu 2008 o odpadech a o zrušení některých směrnic.
- Sonesson, U., Bjoerklund, A., Carlsson, M., Dalemo, M. (2000) Environmental and economic analysis of management systems for biodegradable waste. *Resources, Conservation and Recycling* 28: 29-53.
- Tanskanen, J.-H. (2000) Strategic planning of municipal solid waste management. *Resources, Conservation and Recycling* 30: 111-133.
- Teixeira, J., Antunes, A.P., Pinho de Sousa, J. (2004) Recyclable waste collection planning - a case study. *European Journal of Operational Research* 158: 543-554.
- Vrbová, M. et al. (2003) *Hospodaření s odpady v obcích*. EKO-KOM, Praha.



- Zamorano, M., Molero, E., Grindlay, A., Rodríguez, M.I., Hurtado, A., Calvo, F.J. (2009)  
A planning scenario for the application of geographical information systems in  
municipal waste collection: A case of Churriana de la Vega (Granada, Spain).  
Resources, Conservation and Recycling 54: 123-133.
- Zvejška, P. (2010) Technika pro sběr a svoz odpadu v Praze. Odpadové fórum 6, str. 13-14.  
Zákon č. 185/2001 Sb., o odpadech a o změně některých dalších zákonů.

## Seznam zkratk

GIS	geografický informační systém
ČSÚ	Český statistický úřad
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
IL	emisní limit
IOŽIP	Informační systém o životním prostředí v Praze
MŽP	Ministerstvo životního prostředí
POH	Plán odpadového hospodářství

## Seznam příloh

- I Popis použitých vstev
- II Výchozí mapa modelu svozu odpadu na území hl. m. Prahy
- III Odhad množství odpadu v Praze
- IV Papír, výchozí mapa
- V Papír, funkce *OD Cost Matrix* se zobrazením výsledku dopravní úlohy
- VI Papír, zobrazení svozu ve sloučených územích
- VII Papír, výsledná mapa svozu
- VIII Plast, výchozí mapa
- IX Plast, výsledná mapa svozu
- X Sklo, výchozí mapa
- XI Sklo, výsledná mapa svozu
- XII Nápojový karton, výchozí mapa
- XIII Nápojový karton, výsledná mapa svozu
- XIV Zkouška funkce modelu pro umístování nových zařízení, papír
- XV Plast, výsledná mapa svozu případové studie