



Fakulta zemědělská
a technologická
Faculty of Agriculture
and Technology

Jihočeská univerzita
v Českých Budějovicích
University of South Bohemia
in České Budějovice

JIHOČESKÁ UNIVERZITA V ČESKÝCH BUDĚJOVICÍCH FAKULTA ZEMĚDĚLSKÁ A TECHNOLOGICKÁ

Katedra techniky a kybernetiky

Dizertační práce

Počítačové modelování pohybu zemědělské techniky
po pozemku

Autor práce: Ing. Martin Filip
Školitel: doc. RNDr. Petr Bartoš, Ph.D.

České Budějovice
2024

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval(a) pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne

.....
Podpis

Abstrakt

Tato disertační práce se zabývá problematikou optimalizace počtu odvozních souprav a nakladačů při manipulaci, svozu a přepravě balíků píce, nebo slámy z pozemku na místo skladování tak, aby bylo dosaženo co nejnižší spotřeby lidské práce. Automatizovaný rozhodovací proces umožňuje zvolit optimální počet odvozních souprav a nakladačů tak, aby nedocházelo ke zbytečným prostojům manipulačních prostředků při čekání na přepravní techniku, nebo naopak aby nevznikaly ztrátové časy odvozních souprav nedostatečnou kapacitou nakladačů.

Základní funkcí optimalizačního programu je zpracování obrazového snímku reálného pozemku, detekování jeho hranic a na základě odhadů výnosu píce nebo slámy odhadnout přibližné rozmístění velikostně předem definovaných balíků a určení centroidů, tedy míst, kde by měla být přistavena odvozní souprava při nakládání. Centroid je současně místo, ze kterého jsou nejkratší pojezdové vzdálenosti pro nakladač. K centroidům jsou postupně přiřazovány balíky s nejnižší vzdáleností až do naplnění skupiny. Jedná se o stav, kdy počet balíků ve skupině odpovídá přepravní kapacitě odvozního prostředku.

Další funkcí optimalizačního algoritmu je naplánování pojezdových tras v centroidu, a na základě vstupní hodnoty průměrné rychlosti nakladače, je vypočítán potřebný čas pro pojezd tohoto stroje. K celkovému pracovnímu času nakladače je přičten i čas potřebný na jízdu z prostoru uskladnění stroje k pozemku, a také čas potřebný pro pojezd z místa vstupu na pracovní plochu k centroidu, i doba jízdy od zpracovaného centroidu k dalším centroidům, včetně doby pojezdu ze sklizených ploch zpět na místo, kde bude nakladač odstaven. K pojezdu nakladače je dále přičtena hodnota potřebného času zdvihu všech balíků v centroidech a jejich uložení na odvozní prostředek a doba prostojů manipulátoru, čímž je zjištěn celkový čas práce nakladače.

Pracovní čas odvozních souprav je vypočten z délky trasy (násobené průměrnou rychlostí těchto strojů) z místa uskladnění strojů k centroidu, doby nakládání a času potřebného na pojezd k místu skladování balíků, včetně doby potřebné na složení balíků z odvozní soupravy. Čas nakladačů a odvozních souprav je vyhodnocován souběžně, v synchronizaci, a je rozhodováno, zda dochází ke ztrátovým časům, které jsou postupně připočítávány k pracovním časům. Optimalizační program postupně počítá různé varianty pro (n) nakladačů, (n) odvozních souprav, vyhodnocuje, která varianta spotřebuje nejméně času a je tedy optimální z pohledu nejnižší spotřeby času.

Klíčová slova: optimalizace spotřeby pracovního času, nakladače, odvozní soupravy, simulace

Abstract

This dissertation deals with the problem of optimizing the number of hauling trailers and loaders in the handling, collection and transport of bales of fodder or straw from the land to the storage site in order to achieve the lowest possible consumption of human labour. The automated decision-making process allows the optimum number of removal trailers and loaders to be selected so that there is no unnecessary downtime for the handling equipment while waiting for the transport equipment or, conversely, no lost time for the removal trailers due to insufficient loader capacity.

The basic function of the optimization program is to process a Google Maps image of a real plot of land, detect its boundaries and, on the basis of estimates of forage or straw yields, estimate the approximate distribution of predefined bale sizes and determine the centroids, i.e. the locations where the hauler should be positioned when loading. The centroid is also the point from which the shortest travel distances for the loader are obtained. The centroids are assigned successively to the packages with the lowest distance until the group is full. This is the condition where the number of bales in the group corresponds to the transport capacity of the conveyor.

Another function of the optimization algorithm is to schedule the travel routes in the centroid and based on the input value of the average speed of the loader, the time required for the travel of this machine is calculated. To the total working time of the loader is added the time required for driving from the storage area of the machine to the plot, as well as the time required for driving from the point of entry to the working area to the centroid, and the driving time from the processed centroid to the other centroids, including the driving time from the harvested areas back to the place where the loader will be parked. In addition, the value of the time required to lift all bales in the centroids and place them on the conveyor and the downtime of the manipulator are added to the loader's travel time to obtain the loader's total time.

The working time of the removal trains is calculated from the distance of the route (multiplied by the average speed of these machines) from the storage location of the machines to the centroid, the loading time and the time required to travel to the storage location of the bales, including the time required to remove the bales from the removal trains. The time of the loaders and the removal trains is evaluated simultaneously, in

synchronisation, and it is calculated whether there are any lost times, which are added successively to the working times. The optimization program sequentially calculates the different variants for (n) loaders, (n) transfer sets, evaluates which variant consumes the least time and is therefore optimal in terms of the lowest time consumption.

Keywords: Optimization of time consumption, loaders, transport sets, simulations

Poděkování

Děkuji doc. RNDr. Petru Bartošovi, Ph.D. za cenné rady a odborné vedení.

Obsah

Úvod.....	10
1 Literární přehled.....	12
1.1 Optimalizace pohybu zemědělského stroje po pozemku.....	12
1.2 Optimalizace současného pohybu několika zemědělských strojů po pozemku.....	15
1.3 Algoritmy pro dekompozici pracovní oblasti	16
1.4 3D algoritmy pro pohyb zemědělských strojů	19
1.5 Výpočetní metody a jejich využití pro optimalizaci činnosti zemědělských strojů	20
2 Doprava a manipulace v zemědělství	24
2.1 Traktorové dopravní soupravy	25
2.2 Traktorová přípojná vozidla pro převoz balíků	28
3 Lisy na balíky	32
3.1 Lisy na hranolovité balíky	33
3.2 Lisy na válcové balíky	37
4 Cíle dizertační práce	40
5 Metodika	41
6 Výsledková část	44
6.1 Vstupní data – data o pozemku.....	44
6.1.1 Funkce getScale	48
6.1.2 Funkce getEntrance.....	50
6.2 Simulace rozmístění balíků a jejich optimalizace rozdělení do skupin	51
6.2.1 Funkce randpoints	60
6.2.2 Funkce getStartCentroids1	62
6.2.3 Funkce getStartCentroids2.....	63
6.3 Výpočet celkové časové náročnosti pracovních cyklů	63
6.4 Výsledky – stanovení vstupních hodnot na konkrétním pozemku	72

6.5 Výsledky – simulace	73
7 Komentář k výsledkům a diskuse.....	98
Závěr.....	108
Seznam použité literatury.....	109
Seznam obrázků	115
Seznam tabulek	117

Úvod

Rostlinná produkce je jedním ze základních stavebních kamenů lidské společnosti. Vedle přímé produkce základních potravin nabízí možnost dalšího zhodnocení svých produktů ve formě vstupních surovin (především krmiv) pro živočišnou výrobu, nebo třeba materiálu pro výrobu energií. Stále se zvyšující nároky na množství rostlinné produkce jsou do značné míry umožněny díky výkonným strojním zařízením, které nahradily manuální lidskou práci a které jsou na trhu k dispozici. Provoz těchto zařízení se řídí stejnými pravidly, jako většina jiných lidských činností – snahou o co největší minimalizaci nákladů a maximalizaci zisku, eliminaci negativních dopadů hospodářské činnosti na životní prostředí, snahou vytvořit trvale udržitelný systém atp.

Prudký rozvoj techniky, ke kterému došlo v uplynulých desetiletích, by nebyl možný bez významného technického pokroku na poli elektroniky. Bez sofistikovaného systému řízení a automatizace se dnes většina zemědělských podniků neobejde – zejména těch, které se orientují na živočišnou produkci. V provozech orientovaných na rostlinnou produkci se s elektronickými systémy setkáme nejčastěji u moderních strojů pro polní práce, kde jsou významným pomocníkem šetřícím čas i peníze. V současnosti se také jeví jako velice perspektivní oblast tzv. precizní zemědělství, které by bez elektroniky vůbec nemohlo fungovat.

Pokrok v oblasti elektroniky zcela logicky vyústil k prudkému zvýšení výkonu a snížení ceny počítačů, které posléze pronikly do většiny lidských činností. Ve vědě a výzkumu jsou počítače využívány intenzivně například k řízení experimentů a zpracování experimentálních dat. V posledních cca dvou desetiletích se značně rozšířilo využití počítačů také k realizaci počítačových simulací. Numerické řešení matematického modelu umožňuje predikovat chování zvoleného systému za předem daných vstupních podmínek. Jako ukázkou je možno zmínit například všem dobře známé počítačové modely navržené k předpovědi počasí, se kterými se setkáváme v televizních relacích, komplikované modely pohybu těles v kosmickém prostoru nebo návrhy strojních zařízení pomocí počítače. Počítačové modelování – relativně nová vědní oblast – se tak stalo prostředkem, jak ušetřit nemalé finanční prostředky, a to díky možnosti zvolit to nejlepší řešení z celé řady možných postupů.

Zatímco donedávna nacházelo počítačové modelování uplatnění především při návrhu a optimalizaci technologií s vysokou přidanou hodnotou, v současnosti se začíná pozornost zaměřovat také do tradičních oblastí lidské činnosti, jako je již zmíněná

zemědělská činnost. Dlouhodobým cílem vývojových týmů je vytvořit „smart“ systém, který umožní v reálném čase optimalizovat činnost zemědělského podniku, ve kterém budou všechny realizované aktivity ideálně navazovat a ve kterém bude široce využívána automatizace.

Dosáhnout tohoto komplikovaného cíle je možno pouze tak, že se podaří vytvořit tento chytrý systém v dílčích segmentech. Jednou takovou klíčovou oblastí je řízení pohybu zemědělských strojů při pohybu po pozemku.

1 Literární přehled

1.1 Optimalizace pohybu zemědělského stroje po pozemku

Podle realistických odhadů se bude počet lidí obývajících planetu Zemi v roce 2050 pohybovat kolem devíti miliard osob (Gilpin, 2015). Požadavky na zajištění dostatečného množství potravin tak bude v následujících letech představovat klíčový problém pro většinu států tohoto světa. Klíčovou úlohu přitom budou hrát moderní technologie, především elektronika a automatizace. Vývoj v posledních letech potvrzuje trend intenzivního pronikání moderních technologií do zemědělských podniků, který je motivován zejména těmito faktory:

- 1) snižování nákladů na pracovní sílu,
- 2) náhrada za pracovní sílu, která není na pracovním trhu k dispozici,
- 3) intenzifikace výroby spojená s vyššími zisky zemědělských podniků,
- 4) optimalizace zemědělské činnosti.

V zemědělských podnicích se tak často setkáváme s velice sofistikovanými zařízeními, jako jsou automatizované dojící roboty, moderní traktory nebo komplikované informační systémy. Vedení podniku se pak snaží o logickou a ekonomicky výhodnou provázanost všech využívaných strojů, a to nejen v rámci jedné pracovní operace, ale také v rámci těchto operací navzájem (předset'ová příprava půdy, setí, postřik, sklizeň, hnojení).

Mění se také kvalifikační struktura zaměstnávaných osob. Zatímco ještě před dvaceti lety pracovalo v zemědělství mnoho lidí s malou nebo žádnou kvalifikací, v současnosti jsou často požadovány specializované profese s komplexním přehledem ve většině oblastí zemědělské činnosti. Rutinní aktivity přebírají „programovatelné stroje,“ nad jejichž činností člověk pouze dohlíží a jen v odůvodněných případech je přebírá pod svou kontrolu.

Také pohyb zemědělských strojů při provádění polních prací zcela závisel na obsluze. Ta se zpravidla rozhodovala spíše podle zažitých zvyklostí než podle objektivních hledisek. S postupným zaváděním senzorů do vozidel a s možnostmi výpočetně optimalizovat pohyb zemědělské techniky po pozemku se ukazuje, nakolik je tento postup neefektivní. Ve studii Bochtis (2013) se například uvádí, že optimalizací trajektorie zemědělských strojů došlo ke snížení mimopracovních přejezdů o více než 58 procent a velikost ošetřené plochy za jednotku času se zvýšila o téměř 20 procent.

Vysoký aplikační potenciál výpočetní techniky v zemědělské produkci potvrdil také například Darnhofer et al. (2012).

V případě, kdy byly realizovány operace vyžadující časté doplňování materiálu, jako je například rozmetání hnoje, povedlo se výpočetními metodami snížit neproduktivně uražené vzdálenosti o 15,7 až 43,5 procent, přičemž celková uražená vzdálenost se snížila o 5,8 až 11,8 procenta. Detailní popis algoritmu, který byl pro tuto studii využit, je uveden ve článku (Jensen et al., 2015).

Výhody plánování polních operací jsou diskutovány v řadě publikací, jako je například Bochtis (2014), Casoli et al. (2014), Hameed (2012), Liu (2018) a další. Ekonomické hledisko je detailněji diskutováno například v publikacích Abbaspour-Gilandeh (2007), Bottarelli et al. (2019), Hameed (2013 b), Lacour (2014), Lee (2016), Prakash a Loganathan (2014) nebo Safa a Samarasinghe (2013).

Algoritmy, které lze k optimalizaci pohybu strojů použít, nejsou omezeny jen na oblast zemědělství, ale nalézají uplatnění také v jiných oblastech lidské činnosti. Galceran a Careras (2013) například uvádějí jejich možné využití u těžebních a sklízecích strojů, u zařízení pro čištění a nátěr povrchů různých předmětů, systémy pro autonomní mapování atp. V obecné rovině pak tyto algoritmy mají jisté charakteristické rysy, kterými jsou (Galceran a Careras, 2013):

- 1) zařízení musí navštívit všechny body ošetřované oblasti,
- 2) zařízení musí pracovní oblast kompletně pokrýt svým pohybem,
- 3) zařízení musí pokrýt celou oblast s minimálním překryvem jednotlivých cest,
- 4) zařízení se pohybuje mezi body bez opakování,
- 5) zařízení se musí vyhnout všem překážkám,
- 6) k pohybu jsou využívány trajektorie jednoduchých tvarů,
- 7) zařízení využije optimální dráhu s respektem k požadavkům uvedeným v předchozích bodech.

Při realizaci skutečných polních prací samozřejmě nemusí být všechny uvedené předpoklady splněny a vyvíjený algoritmus může vycházet z méně náročných požadavků. Většina autorů vychází ze známého algoritmu obchodního cestujícího, který je převeden spárováním pracovních oblastí na tzv. VRP algoritmus (Vehicle Routing Problem)

V současnosti jsou do těchto algoritmů implementovány moderní výpočetní metody, jako jsou například genetické algoritmy, neuronové sítě nebo principy Fuzzy logiky – například Miodragović (2012), Mittal (2013), Nazarahari et al. (2019) nebo Yakoubi a Laskri (2016).

Některé algoritmy nejsou omežovány jen na oblast polních prací. Jensen et al. (2012) vytvořili jeden z prvních algoritmů, který tyto základní algoritmy rozšiřuje a pokouší se do nich implementovat také operace, které souvisejí s logistikou mezi podnikem a polem.

1.2 Optimalizace současného pohybu několika zemědělských strojů po pozemku

Většina publikovaných prací nahlíží na problém tak, aby byla zajištěna optimální trajektorie jedné pracovní jednotky (Jensen, 2013; Jensen et al., 2015). Při provádění polních prací se však obvykle využívá několik pracovních strojů, které můžeme rozdělit do dvou skupin. Do první skupiny patří stroje, které přímo vykonávají pracovní operaci, do druhé pak „servisní“ pracovní jednotky, které zpravidla zajišťují odvoz nebo navážení materiálu. Obě skupiny strojů spolu vzájemně interagují (např. souběžná jízda sklízecí mlátičky a dopravního prostředku při vysypávání sklizeného zrna).

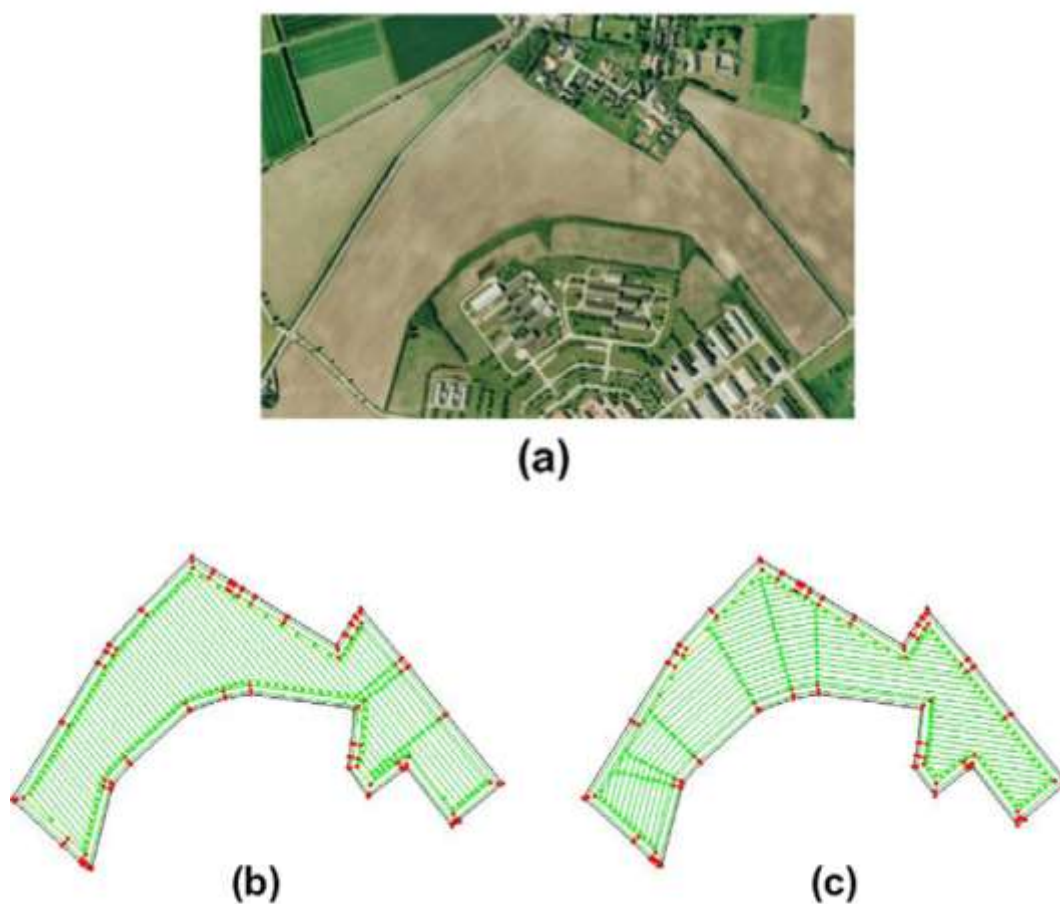
Problematikou optimalizace paralelní činnosti zemědělských strojů se zabývala například pracovní skupina pod vedením Bochtise (2010a) prezentovala algoritmus, který umožňuje přibližně stanovit polohy servisních strojů a redukovat tak čas potřebný například pro zajištění odvozu sklizeného materiálu. Navržený algoritmus má malé výpočetní nároky a může být efektivně využit i při výpočtech pro skupinu s větším počtem strojů. Na druhou stranu je díky svým omezujícím předpokladům stále poměrně vzdálen reálným situacím a dá se předpokládat, že jeho vývoj ještě není zcela dokončen.

Otázkou zůstává, zda je zvolený přístup vhodný. Cílem vývoje v této oblasti je totiž optimalizace pracovních cest všech použitých strojů, která je velice závislá na reálné situaci přímo na poli, zde však selhává. S dalším pronikáním automatizace do zemědělské činnosti je možno očekávat vývoj nových algoritmů založených na jiných principech, které budou určovat optimální trajektorie zemědělských strojů podle aktuální situace, tj. v reálném čase. V současnosti je však takový přístup v praxi nepoužitelný, protože náročnost výpočtu vzrůstá exponenciálně s počtem použitých strojů, jak

ukázal Vougioukas (2009). Chování celého systému je navíc významně ovlivněno celou řadou vnějších parametrů, které není možné předem přesně stanovit a které mají do značné míry náhodný charakter – například intenzita dopravy mezi polem, na kterém jsou práce realizovány, a skladem (zrna, hnoje atp.), se kterým servisní pracovní jednotky komunikují.

1.3 Algoritmy pro dekompozici pracovní oblasti

V reálných situacích nemusí pracovní plocha představovat pouze konvexní útvar, ale zpravidla se jedná o konkávní obrazec (viz obrázek 1.3) s menším či větším počtem „nepřekonatelných“ překážek. Při provádění polních prací je vhodné takový prostor vhodně rozdělit do menších a zpravidla přehlednějších celků.

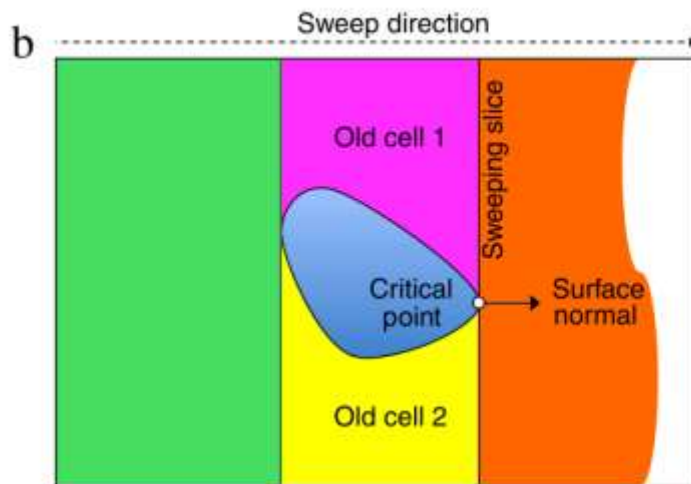
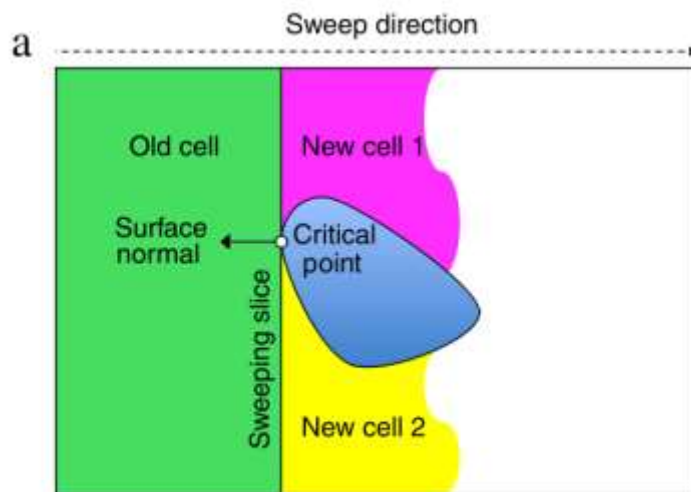


Obrázek 1.3: Příklad konkávní 2D pracovní oblasti (a) a ilustrativní generované trajektorie s využitím přímočarých (b) a zakřivených (c) tras (Hameed, 2013a)

Oksanen a Visala (2009) prezentovali efektivní algoritmus pro rozklad pracovní plochy do několika menších pracovních oblastí, na které je možno následně aplikovat algoritmy pro nalezení optimální trasy. Algoritmus usnadní práci jak v případě využití robotů, tak v případě nasazení zemědělských strojů vyžadujících obsluhu člověkem.

Podrobně se problematikou dekompozice pracovní oblasti do několika dílčích oblastí zabývá také práce, kterou publikovali autoři Jin a Tang (2010). Vedle časové náročnosti prováděných operací jsou uvedeny také konkrétní příklady, které jsou analyzovány s využitím výpočetních metod a ověřeny v praxi. Náročnost algoritmu je $O(n^3 \log(n))$, kde n označuje počet vrcholů pozemku – je tedy výpočetně poměrně náročná a pro pozemky s větším počtem překážek a složitými tvary je obtížně použitelná. Nevýhodou uvedené studie je také řada zjednodušujících předpokladů, které snižují aplikovatelnost výsledků v praxi a které autoři plánují odstranit v některé z dalších studií.

V publikaci Galceran a Careras (2013) je popsán základní algoritmus pro dekompozici pracovní oblasti, který je založen na pomyslném pohybu přímky v definovaném směru, přičemž tento pohyb začíná z jedné strany pracovní oblasti. V okamžiku, kdy se pohybující se přímka stane tečnou k překážce, dojde ke vzniku zpravidla tří pracovních oblastí (viz obrázek 1.4). V okamžiku, kdy pohybující se přímka překážku překoná, dojde k sloučení některých pracovních oblastí v jeden celek. Tento postup je používán opakovaně, dokud nedojde k pokrytí celé pracovní oblasti. Výše popsany algoritmus je samozřejmě možno zobecnit pro obecnější křivky, například pro kružnici, jak je zřejmé z obrázku 1.5.



Obrázek 1.4: Dekompozice pracovní oblasti dle Morse (Galcer, 2013)

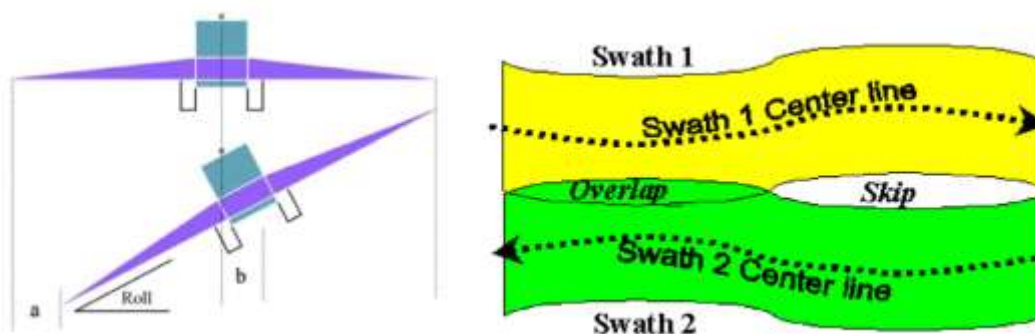


Obrázek 1.5: Dekompozice pracovní oblasti dle Morse pomocí soustředných kružnic (Galcer, 2013)

1.4 3D algoritmy pro pohyb zemědělských strojů

Většina výše prezentovaných algoritmů je založena na předpokladu, že se jedná o rovinný povrch. V zemědělské praxi však není tento předpoklad často splněn a je potřeba uvažovat komplikovanější uspořádání. I pro tyto případy byly vyvinuty algoritmy, které umožňují pokrýt celou pracovní oblast. Nicméně i v této oblasti je další intenzivní vývoj otázkou několika dalších let.

Pomocí modelů uvažujících 3D reliéf povrchu je možno výpočet významně zpřesnit. Pokud například uvážíme rozpětí pracovních nástrojů dnešních strojů (např. ramena postřikovače mají standardně rozpětí 24 metrů) a přesnost současných navigačních přístrojů, která dosahuje až 2 centimetrů, je zřejmé, že přesnost 2D algoritmů není dostatečná. Sklon pozemku povede k vícenásobnému ošetření některých úseků, respektive k jejich neobdělání (viz ilustrativní obrázek 1.6).



Obrázek 1.6: Ilustrace zkrácení záběru pracovního stroje o vzdálenost a (vlevo). Schématické znázornění vzniku překryvu, respektive neopracované části pozemku při realizaci polních prací na svahu (vpravo) (Hameed, 2016)

Studie, kterou publikovali autoři Jin a Tang (2011), se podrobně zabývá čtyřmi aspekty, které ovlivňují výsledky získané pomocí 3D algoritmu:

- 1) modelování reliéfu terénu,
- 2) analýza nákladů na provedení operací,
- 3) rozklad pracovní oblasti,
- 4) vývoj algoritmu pro nalezení optimální trajektorie stroje.

Autoři porovnali teoretické výsledky s výsledky, které byly dosaženy při skutečných pracích, a uvádějí, že čas potřebný k otáčení na souvrati se snížil díky optimalizaci pomocí navrženého algoritmu o 10,3 procenta, 24,7 procenta se podařilo ušetřit

na ztrátách v důsledku eroze a 81,2 procenta na nepřímých nákladech. Celkově došlo ke snížení nákladů o 22 procent.

Zdařilým přístupem v oblasti vývoje algoritmů pro pohyb zemědělské techniky s respektem k 3D reliéfu povrchu je práce Hameed (2013a), ve které je prezentován algoritmus pro optimalizaci zemědělských strojů při vykonávání prací vyžadujících časté doplňování materiálu (hnojení pozemku), který uvažuje také vliv 3D charakteristiky obdělávaného pozemku (terénu). Optimalizačním kritériem byla minimální spotřeba energie. Teoreticky se podařilo snížit náklady na energie o 6,5 procenta.

Han, 2019 publikoval obecně definovaný efektivní algoritmus pro plánování trajektorie po 3D povrchu. Z provedené rešerše vyplývá, že 3D algoritmy nejsou příliš rozpracované a jejich vývoj je možno předpokládat v následujících letech.

1.5 Výpočetní metody a jejich využití pro optimalizaci činnosti zemědělských strojů

Algoritmy umožňující analyzovat pohyb zemědělské techniky po pozemku se dají použít v různých modifikacích pro různé typy polních prací. Ve spolupráci s doktorandy z Brazílie jsme například tyto algoritmy využili při vývoji procesů používaných při pěstování cukrové třtiny, která je v Brazílie jednou z klíčových plodin. Vzhledem k tomu, že řada algoritmů byla odzkoušena pro tuto plodinu, budeme jí v této kapitole věnovat větší pozornost. Můžeme však předpokládat, že u ostatních plodin je situace velice podobná.

Využití přístupů založených na aplikaci metod metaheuristické optimalizace a chytré automatizace umožnila rychlé zvýšení produktivity operací na poli a nabídla nebývalé ekonomické výhody.

Optimalizace je klíčem ke zvýšení produktivity a efektivity zemědělských strojů po celá desetiletí. To souvisí s úsporami vyplývajícími ze zlepšené mechanické funkčnosti strojů. V současné době existují environmentální a biologické faktory, které brání dalšímu vývoji v oblasti optimalizace. Zejména se jedná o omezení velikosti a hmotnosti strojů, kde problémem je nadměrné utužování půdy (Day et al., 2011).

Analýza plánování operace, optimalizace se zaměřením na volbu nejvhodnější trasy a dimenzování kapacit, jsou nedílnou součástí moderních zemědělských činností, které doplňují tradiční metody řízení práce (Bochtis et al., 2018).

Vzhledem k současnému vývoji automatizačních systémů využívajících komunikační a informační technologie je možné, že v budoucnu lidská práce zcela nahrazena stroji.

Použití těchto automatizačních systémů poskytuje řadu nových výhod, včetně opakovatelnosti spojené se zvýšeným pracovním výkonem a kapacitou. Navíc se snižují mzdové náklady a materiálové vstupy (např. agrochemikálie a hnojiva). Navíc se zvyšuje flexibilita výrobního systému díky snadnějšímu přijetí nových postupů. Automatizační systémy také poskytují lepší řízení procesů, což vede ke zvýšení kvality produktů (Bochtis et al., 2014).

Udržitelnost ve výrobních systémech sebou přináší zvýšené nároky na rozhodování během provozního řízení s ohledem na dopady na životní prostředí (Bochtis et al., 2018).

Zkrácení neproduktivních časů je klíčem ke snížení výrobních nákladů. Neproduktivní časy snižují celkovou efektivitu práce, při nakládání a vykládání zemědělských materiálů na poli (Witney B., 1988).

Při řízení a optimalizaci práce zemědělských strojů lze za zásadní považovat otázky plánování tras při polních operacích (Bochtis et al., 2014). Plánování zemědělských tras musí zahrnovat parametry vozového parku, řízené úkoly a optimalizované operace. Uvažujeme-li vozový park, je důležitým faktorem typ a počet vozidel, režim provozu a spotřeba. Mezi důležité úkoly patří zpracování půdy, setí, zavlažování, aplikace hnojiv a sklizeň. Optimalizované operace zohledňují zejména časovou a nákladovou náročnost (Bochtis et al., 2015, Bochtis et al., 2010 b, Seyyedhasani a Dvorak, 2018, Jensen et al., 2015). Přibližně 30–35 % výrobních nákladů souvisí se sklizní. Sklizeň cukrové třtiny stráví v průměru pouze 36 % svého času efektivní prací (Goldemberg et al., 2008). Je důležité minimalizovat počet manévrů, které snižují výkon stroje (Anselmi, 2008). Aires také uvedl, že je možné zvýšit provozní výnos sklizně systematizací pozemků (Aires, 2019). Salvi et al. zdůraznili, že řízení mechanizovaného systému před a během realizace projektu se stává relevantním pro snižování nákladů. V této studii autoři zjistili, že 5% zvýšení provozní účinnosti snižuje náklady na mechanizované řezání o 8 %. Optimální využití strojního zařízení výrazně snižuje výrobní náklady (Salvi et al., 2010).

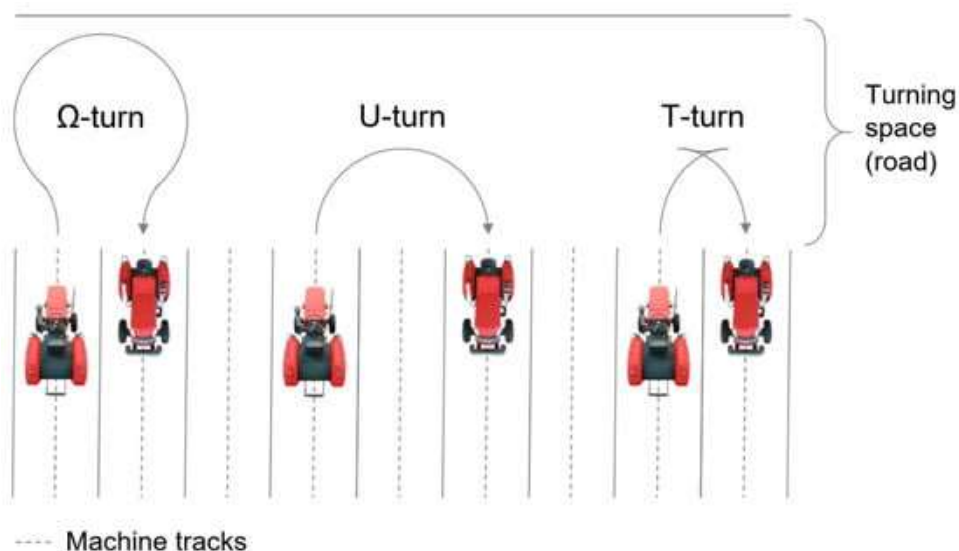
Efektivita pohybu po pozemku je definovaná jako míra výkonu zemědělského stroje během polních operací a vypočítává se z poměru mezi skutečnou a teoretickou maximální produktivitou stroje (Asabe, 2005). Efektivita pohybu po pozemku závisí na několika faktorech, a pro konkrétní zemědělský stroj není konstantní. Mezi tyto faktory patří mimo jiné velikost a tvar pole, výnos plodin a vlhkost. Nejdůležitějším

faktorem je však provoz v terénu, který významně ovlivňuje časové ztráty při neproduktivním pohybu (Hunt, 2001).

Obecně se plánování trasy zabývá otázkami souvisejícími s cílem projet všemi body vymezené oblasti a vyhnout se překážkám (Galceran a Carreras, 2013). Problém plánování tras se zabývá otázkami spojenými s minimalizací ujeté vzdálenosti zemědělskými stroji (Utamima et al., 2018). Řešení problému plánování tras obvykle dále směřuje k minimalizaci vstupních nákladů, lepšímu využití více strojů a optimalizaci potřebného času, přičemž jej komplikují překážky, jako omezená výrobní kapacita stroje nebo požadavek na využití ve více oborech (Utamima et al., 2019).

Nedávná studie provedená Bochtisem a Vougioukasem se zabývala problémem zemědělského trasování a byla zaměřena na výpočet rozkladu pole s komplexní geometrií na dílčí části a také na určení optimálního směru jízdy v každé části (Bochtis a Vougioukas, 2008).

Pohyb strojů při zemědělských polních operacích lze klasifikovat podle tvaru jejich trajektorie (Bochtis a Vougioukas, 2008, Spekken a Bruin, 2013). Tři nejběžnější typy otáčení (Ω -otočka, U-otočka a T-otočka) jsou znázorněny na obrázku 1.7 (Filip et al., 2020).



Obrázek 1.7: Typy běžných manévřů při operacích v terénu (Filip et al., 2020)

K provedení Ω -otočky jsou vyžadovány větší souvratě, zatímco je možná vyšší pracovní rychlost manévru a stroj navazuje práci sousedním řádkem. (Cariou et al., 2010)

Otočky U vyžadují menší souvratě a mají nejnižší spotřebu času, ale musí být splněna alespoň jedna z následujících dvou podmínek. Buď musí být šířka náradí větší

než poloměr otáčení, nebo je nutné zpracovávat pozemek ob řádek (Bochtis a Vougioukas, 2008).

T-otočky vyžadují malý manévrovací prostor na souvrati, navazují práci v sousedním řádku, ale současně spotřebují nejvíce času (Spekken et al., 2015).

Mechanizovaná sklizeň, vykládání a nakládání kamionů jsou náročné a složité činnosti vyžadující matematické a výpočetní techniky, které pomáhají při rozhodování. Díaz a Pérez například navrhli počítačovou simulační studii zaměřenou na optimalizaci procesu sklizně a přepravy cukrové třtiny. Výsledek zlepšil proces plánování a sklizně cukrové třtiny (Díaz a Perez, 2000).

Cervi navrhl výpočetní algoritmus na základě provozních a ekonomických ukazatelů výkonnosti pro mechanickou sklizeň cukrové třtiny. Získal data z případové studie provedené poblíž Botucatu (Brazílie) v roce 2011. Poté Cervi porovnal provozní a ekonomické ukazatele získané z optimalizovaného výpočtu s naměřenými daty a zlepšil efektivitu strojů provádějících činnosti řezání a nakládání o 12 % na tunu (Cervi, 2013).

2 Doprava a manipulace v zemědělství

Zemědělství je obor, který zajišťuje základní komodity určené pro výrobu potravin, zároveň se ale vyznačuje velkou spotřebou pohonných hmot a energií. Podle Syrového et al. (2008a) z Výzkumného ústavu zemědělské techniky je ročně v zemědělství České republiky průměrně spotřebovááno přibližně 420 milionů litrů motorové nafty. Zemědělství bývá řazeno mezi obory s největší přepravní kapacitou a ročně je přemístěno přibližně 100 milionů tun materiálu. Největší množství materiálu a to přibližně 83 % je manipulováno v rámci vnitropodnikové dopravy na krátké vzdálenosti, přesto tato činnost představuje spotřebu až 118 milionů litrů pohonných hmot ročně (Srový et al. 2008b).

Manipulace materiálů bývá definována jako souhrn operací, které zahrnují balení, nakládání, přepravu, vykládání, skladování a vážení. Doprava je soubor činností, kterými se uskutečňuje tok materiálu za pomoci přepravních prostředků. Dopravu lze rozdělit z různých hledisek. Podle místa, kde je doprava vykonávána se dělí na mimo podnikovou a vnitropodnikovou. Mimopodniková doprava bývá složena ze služeb, přepravy uskutečňované směrem od dodavatelů k zemědělskému podniku, nebo tokem materiálu a zboží opačnou cestou. Vnitropodniková doprava je složena z meziobjektové a vnitro objektové přepravy. U vnitroobjektové dopravy se jedná o pohyb materiálu a zboží v rámci budovy. Meziobjektová doprava bývá realizována uvnitř, nebo mimo zemědělský areál. Doprava mimo zemědělský areál je přeprava materiálu směřující z nebo na pole (Gašparík a Gaff, 2016).

Doprava v zemědělské výrobě je charakteristická složitým časovým a prostorovým uspořádáním. Procesy v zemědělské výrobě jsou závislé na přírodních podmínkách, mají dlouhé pracovní cykly a jsou realizovány na rozsáhlém území. Dopravní procesy v zemědělské výrobě jsou také výrazně ovlivňovány biologickou podstatou velké části materiálů a produktů, které jsou transportovány. Přepravovány jsou velká množství různých druhů materiálů často s nízkou objemovou hmotností. V zemědělství je většina materiálových toků jednosměrná s velkým počtem ložných operací uskutečňovaných na různých místech, prováděných často i za pohybu odvozního prostředku. Dopravu v zemědělství také charakterizuje sezónnost některých operací, a současně nutnost uskutečnit tok materiálu za každého počasí. Průměrná vzdálenost vnitropodnikové přepravy v zemědělské výrobě je 3,5–6,2 km. Průměrná přepravní rychlost je nižší, než je běžné u materiálového toku v jiných odvětvích průmyslu, což

je způsobeno i skladbou přepravních prostředků. Přepravní prostředky jsou voleny podle druhu materiálu, který mají transportovat a povrchu po kterém se mají pohybovat. Například v Německu z celkového množství kilometrů ujetých při vnitropodnikových přepravních operacích se pohybují dopravní prostředky ze 40 % terénem, 20 % na zpevněných polních cestách a 40 % na veřejných komunikacích (Syrový et al. 2008b).

2.1 Traktorové dopravní soupravy

Traktory jsou dynamicky se rozvíjející skupinou energetických prostředků používaných v zemědělské výrobě. Traktor je univerzální pohonná jednotka, která dodává energii významné části zemědělských strojů. Energie je zemědělským strojům předávána nejčastěji od spalovacího motoru traktoru prostřednictvím hydraulických a pneumatických okruhů, vývodového hřídele a pojezdového ústrojí. Cílem neustálého vývoje traktorů je zvyšování kvality práce a efektivity využití energie z paliva. Traktor se pohybuje v rozmanitých pracovních podmínkách a mění se tak režim práce i jeho spotřeba. Z tohoto důvodu došlo v konstrukci traktorů k nárůstu počtu regulačních uzlů řízených elektronikou. Elektronické prvky nám umožňují automatizaci řízení činnosti spalovacího motoru, převodových ústrojí a hydraulických obvodů. Řídící uzly ovládané elektronikou jsou vzájemně propojeny digitální sběrnici CABUS. Elektronické ovládání snižuje riziko poškození traktoru, umožňuje navyšování výkonu spalovacích motorů, zařazení souvratového managementu a automatické převodovky, nebo propojení se satelitní navigací a automatické řízení (Bauer et al. 2006).

Automatické řízení je ovládání objektu, zaměřené na dosažení konkrétního cíle bez přímé účasti operátora. V případě přímé interakce obsluhy do činnosti řídicího systému v podobě zapínání a vypínání (řídící funkci částečně vykonává osoba) je tato technologie nazývána automatizovanou. Automatický řídicí systém se skládá z řízeného objektu a automatického řídicího zařízení, které na sebe vzájemně působí. Správné provedení tohoto procesu je určeno sadou instrukcí nazývaných algoritmus zpracování. Aby spravovaný objekt mohl spustit algoritmus zpracování, automatický řídicí systém musí mít speciálně organizované vnější vlivy. Povaha těchto efektů je určena sadou instrukcí nazývaných řídicí algoritmus. Řídící program je propojený s ovládacími uzly jednotlivých částí traktoru, a současně s globálním polohovým systémem (Utemisov a Yuldashova, 2022).

Zemědělské průmyslové podniky intenzivně investují do rozvoje mechanizace s autonomním ovládáním. Tento trend je stimulován požadavkem na efektivní zpracování obrovských ploch, při současném úbytku kvalifikované pracovní síly.

Řídicí systémy určené k vedení traktorů lze rozdělit do tří skupin na manuální, asistované a automatizované. Manuální navádění využívá ledkové světelné lišty, která pomocí rozsvěcení jednotlivých diod, znázorňuje obsluze traktoru odchylku od trasy plánovanou navigačním systémem. Tento systém je jednoduchý, oproti pokročilejším navigačním technologiím levnější, ale předpokládá plné soustředění obsluhy traktoru.

Asistované řízení spočívá v ovládní volantu traktoru pomocí elektromotoru a třecího pastorku. Stroj je veden podle předem připraveného programu na rovných úsecích trasy a otáčení na souvrati je prováděno řidičem traktoru. Systém vyniká především jednoduchou instalací, která spočívá v dovybavení volantu o elektromotor s třecím pastorkem, případně existují varianty plně integrovaných prvků již z výroby. Nevýhodou systému dodávaného na starší typy traktorů je zmenšení prostoru na nohy a současně lze asistované řízení implementovat do stávajícího stroje pouze za předpokladu, že je traktor vybavený posilovačem řízení. Další nevýhodou asistovaného řízení je delší reakční doba a nižší přesnost. Systém se obvykle používá na operace, kde postačuje bezplatný signál s přesností 15–20 cm. Zpřesněný signál RTK s přesností do 1,5 cm je možné využít pouze u některých typů traktorů. Automatické naváděcí systémy vedou traktor po trajektorii za pomoci polohových snímačů volantu a natočení kol, hydraulických řídicích prvků a aktivačního spínače. Obsluha aktivuje systém, který traktor vede nejen po rovných trasách, ale také po souvratích. Systém neustále vyhodnocuje aktuální polohu stroje a v případě odchylky od žádané pozice vysílá řídicí jednotka impuls k aktivaci hydraulických okruhů, které natočí kola nápravy a usměrní traktor na plánovanou trasu. Řidič v průběhu chodu stroje vyhodnocuje kvalitu práce, sleduje rizikové faktory a v případě mimořádné události může traktor zastavit, nebo převzít řízení pohybem volantu. Nevýhodou automatických naváděcích systémů je vysoká pořizovací cena a značné nároky na kvalitu přijímaného diferenčního signálu (Radoča et al., 2022, AGRIS.cz, 2023).

Významný faktor pro plánování pojezdových tras traktorů po pozemku a souvratového managementu je poloměr otáčení. Sarhan et al. (2010) se zabývali matematickými rovnicemi pro odvození poloměrů otáčení.

Poloměry otáčení v reálném prostoru zemědělského podniku podléhají samozřejmě dalším faktorům a oproti teoretickému výpočtu jsou odlišné. Domša (2018) ve své

práci měřil poloměry otáčení (levotočivý a pravotočivý) u traktorů John Deere 9620RX, CaseIH Quadtrac 620 a NewHolland T9 na různých typech povrchů při jezdových rychlostech 3, 8 a 12 km · h⁻¹. Oproti teoretickému poloměru otáčení NewHolland T9 (4,7 m) při rychlosti 12 km · h⁻¹ Domša naměřil na hlinitém povrchu 9,6 m. Traktor John Deere 9620RX s teoretickým poloměrem otáčení 5,2 m dosáhl při měření na hlinitém povrchu hodnoty 10,8 m. Traktor CaseIH Quadtrac 620 s teoretickým poloměrem otáčení 4,7 m dosáhl při měření na hlinitém povrchu hodnoty 9 m. Poduška (2019) ve své práci měřil poloměry otáčení traktorů John Deere 6210 R s náradím Opall Agri Saturn 6, John Deere 8320 R s diskerem Horsch Joker 6 RT a Massey ferguson 7620 s podmítačem Kuhn Optimizer + 6003.

U moderních traktorů došlo ke zvýšení jezdové rychlosti na více než 40 km · h⁻¹, což přispělo k širšímu a ekonomicky efektivnějšímu nasazení těchto souprav v dopravě. Traktorová dopravní souprava je složena z energetického prostředku a přípojného vozidla. Z důvodu časté změny jezdového povrchu a univerzálnosti souprav, musí být jak energetický prostředek, tak přípojné vozidlo uzpůsobeno na práci v terénních podmínkách. Přípojná vozidla by rovněž měla vyhovovat co nejširšímu spektru materiálů, které jsou jejich prostřednictvím transportovány. Materiály přepravované v zemědělské výrobě mají různé fyzikální, mechanické, chemické a biologické vlastnosti, které určují požadavky, které jsou kladeny na přípojná vozidla. Přípojné vozidlo by se mělo vyznačovat:

- 1) nízkou provozní hmotností,
- 2) dostatečným ložným objemem,
- 3) ložnou plochou nízko nad zemí pro snížení výšky těžiště a zlepšení stability v terénu,
- 4) zařízením určeným pro rychlé vyprazdňování ložné plochy,
- 5) odpružením náprav,
- 6) nízkým měrným tlakem, který působí na povrch,
- 7) systémem, který optimalizuje účinky brzd podle aktuálního hmotnostního využití prostředku.

Přípojná vozidla lze členit z hlediska konstrukce podvozku na přívěsy a návěsy. Přívěs je vozidlo bez vlastního energetického prostředku, určené k transportu materiálu, které

nepřenáší část své hmotnosti na traktor. Návěsy se vyznačují přenosem části své hmotnosti na energetický prostředek, zvyšuje zátěž na hnací nápravu, a tím zlepšuje trakční vlastnosti traktorové soupravy. Výhodou návěsu je lepší poměr mezi provozní a užitečnou hmotností, který je zapříčiněn přenosem síly na traktor. Návěsové podvozky jsou častěji využívány jako nosiče speciálních nástaveb z důvodů lepších jízdních vlastností a snazšího couvání. Nevýhodou návěsů je především nižší svahová dostupnost. Přípojná vozidla jsou vyráběná ve značné variabilitě a jejich hlavními ukazateli jsou:

- 1) provozní hmotnost, která je rovna tíze přípojného vozidla bez nákladu,
- 2) užitečná hmotnost, která je největším zatížením přípojného vozidla,
- 3) největší celková hmotnost, která je součtem nejvyššího přípustného zatížení nákladem a tíhy přípojného vozidla,
- 4) užitečný objem, který je určen základními rozměry ložné plochy, délkou, šířkou a výškou,
- 5) maximální povolená rychlost,
- 6) povolená svahová dostupnost, která je ovlivněna rozchodem a rozvorem kol a výškou těžiště.

Nejčastěji vyráběná přípojná vozidla jsou koncipována jako zadní nebo stranové sklápěče s užitečnou nosností od 4 000 do 24 000 kg. Užitečný objem je limitovaný vyhláškou 341/2002 sb. Norma definuje maximální povolenou výšku vozidel 4 m, největší šířku 2,55 m a délku do 18 m (Syrový et al., 2008a).

2.2 Traktorová přípojná vozidla pro převoz balíků

Základem přípojných vozidel pro převoz balíků je především dostatečně velká ložná plocha. S velikostí ložné plochy vzrůstá pracovní efektivita přepravy. Běžně vyráběná přípojná vozidla pro převoz balíků slámy, nebo sena jsou bez bočnic, mají pouze přední a zadní výklopné čelo. Příkladem mohou být přípojná vozidla Pronar T024 (viz obrázek 2.1), T022, T025, T027, T023, T026 a T028KM.



Obrázek 2.1: Pronar T024 (STROM, 2020)

Tabulka 2.1: Parametry vybraných přípojných vozidel Pronar (STROM, 2020)

	T024	T022	T025	T027
Schválená celková hmotnost [kg]	12 000	10 000	12 000	18 000
Provozní hmotnost [kg]	3 100	2 640	2 960	4 800
Užitečná hmotnost [kg]	8 900	7 360	9 040	13 200
Prodloužení – výsuvné zadní čelo [mm]		530	530	1 100
Délka ložné plochy [mm]	7 170	6 740	6 495	8 500
Šířka ložné plochy [mm]	2 435	2 435	2 435	2 470
Výška ložné plochy od země [mm]	1 100	1 100	1 180	1 100
Rozchod kol [mm]	1 750	1 730	1 820	1 960
Počet náprav [mm]	Tandem	2	2	2
Maximální povolená rychlost [km · h ⁻¹]	40	40	40	30

Příklad přípojného vozidla určeného pro převoz balíků, který má současně hydraulicky ovládané bočnice je Pronar T028 KM. Výhodou systému je zachování efektivity při nakládání balíků a současně není nutné před výjezdem vozidla na komunikaci náklad stahovat pomocí popruhů, jako je tomu u předchozích strojů. Pronar T028 KM znázorněný na obrázku 2.2 dosahuje vyšší produktivity práce (STROM, 2020).

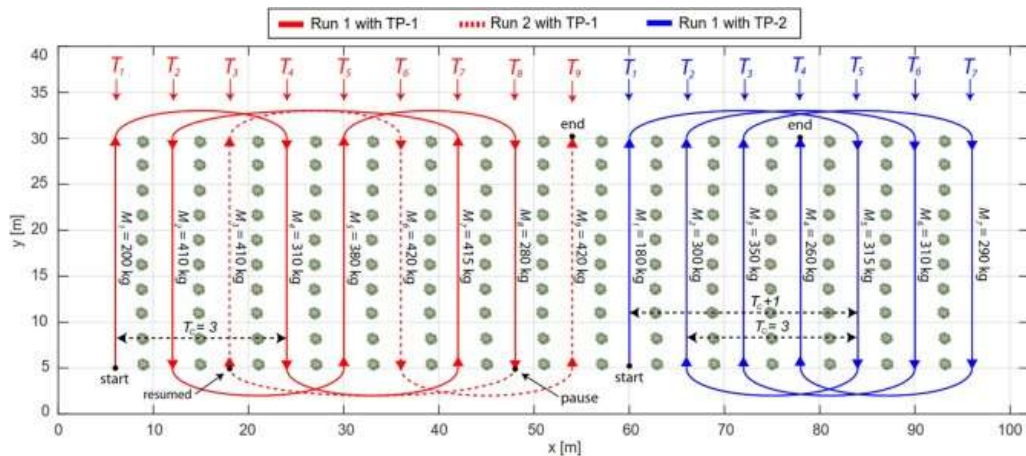


Obrázek 2.2: Pronar T028 KM (STROM, 2020)

Další běžně používanou technikou pro převoz balíků sena a slámy na krátké vzdálenosti jsou traktorové soupravy tvořené energetickým prostředkem a univerzálním přívěsným vozidlem. Tyto přívěsy jsou určeny k přepravě nejrůznějších komodit včetně ovoce, zeleniny, obilovin a biomasy (Biris, 2013). Starší typy univerzálních přívěsných vozidel mají maximální pojzdovou rychlost do $25 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Nově vyráběné typy univerzálních přípojných vozidel jsou konstruované s maximální povolenou pojzdovou rychlostí do $40 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ (Linder, 2018). Specifickou hmotností traktorových přívěsů se zabývali Limont et al. (2020) a definovali ji jako podíl mezi hmotností a nosností zemědělského přípojného vozidla. Hmotnost přívěsů ve skupině byla v rozsahu 1,2 t až 7,1 t. Nosnost přívěsů byla zjištěna v rozmezí 5 t až 24 t.

Traktorové soupravy je možné zvětšovat přidáním dalších univerzálních přípojných vozidel. Podle Guevara et al. (2020), který se zabýval problematikou otáčení soupravy na souvrati složené z traktoru a několika pasivních přívěsů, je zvyšován tímto způsobem přepravní potenciál a efektivita práce, ale zhoršuje se pohybová schopnost především při otáčení a vzrůstá riziko vybočení přívěsu z plánované trasy

a kolize. Problematiku vybočování přívěsů řešil Michalek (2015) zaváděním virtuálního naváděcího bodu. Guevara et al. (2019) představil řešení problematiky soupravy s větším množstvím pasivních přívěsů pomocí úprav plánovaných otáček na souvrati. Souvratový management řeší mimo jiné i pomocí takzvaných super-eliptických obloeků prezentovaných na obrázku 2.3. Ze závěrů práce je zřejmé, že bezkolizní průběh soupravy lze zajistit pouze do třech přípojných vozidel.



Obrázek 2.3: Příklady dvou tras generovaných pro soupravu se 4 přívěsy a super-eliptickými otáčkami na souvrati (Guevara et al, 2019)

3 Lisy na balíky

Sběrací lisy jsou technologická zařízení, která vznikla za účelem usnadnění a zefektivnění manipulace píce a posklizňových zbytků. Lisy hmotu sbírají z předem připravených řádků, stlačují ji a svazují do celků různých tvarů a velikostí, které nazýváme balíky. Balíky jsou vytvářeny především hranolovitěho a válcovitěho tvaru (Ye-hua et al., 2021). Lisy na balíky mají různé konstrukce, podle toho, o jaký typ lisu se jedná. Nejčastěji jsou konstruovány jako stroje návěsné připojené za traktor a poháněné jsou od vývodového hřídele, ale existují i varianty samojízdných lisů. Podle objemové hmotnosti slisovaného materiálu bývají tyto stroje rozdělovány na nízkotlaké (do $100 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$) a vysokotlaké, kde hustota dosahuje $100\text{--}400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Balíky mohou být například malé hranolovité s parametry profilu 40×45 , délkou $40\text{--}110 \text{ cm}$ a hmotností $20\text{--}40 \text{ kg}$. Balíky této velikosti umožňují ruční manipulaci, ale vyznačují se nižší produktivitou práce. Velké hranolovité balíky s parametry profilu $150 \times 150 \text{ cm}$ a délkou $150\text{--}250 \text{ cm}$ dosahují hmotnosti $380\text{--}1\,000 \text{ kg}$. Zvláště velké hranolovité balíky dosahují rozměrů profilu $200 \times 300 \text{ cm}$, délkou 600 cm a jejich hmotnost bývá až $6\,000 \text{ kg}$. Válcovité balíky jsou tvořeny s utuženým, nebo neutuženým jádrem a jejich průměr dosahuje až 180 cm . Šířka válcovitých balíků bývá 150 cm a hmotnost dosahuje hodnot $190\text{--}500 \text{ kg}$ (Kumhála, 2007).

Náklady na sklizeň píce, nebo posklizňových zbytků jsou vysoké a jsou ovlivněny velikostí a hustotou balíků. Vysoká hustota balíků může snížit náklady na dopravu organických hmot (Yu et al., 2016).

Sběrací lisy jsou složeny z pěti pracovních částí, a to ze sběracího, dopravního, lisovacího, vázacího mechanismu, nebo zařízení na balení do fólie a dopravníku malých balíků. Šířka sběracího mechanismu bývá $140\text{--}240 \text{ cm}$ a bývá tvořeno sběračem s opěrnými koly a shrnovacím plechem. Sběrací ústrojí bývá doplněno o pomocné šnekové dopravníky, které zajišťují rovnoměrné rozložení řádku. Sběrač bývá konstruován několika řadami unašečů, na kterých jsou připevněny sběrací prsty a kulisovým mechanismem pro naklápění prstů. Existují i varianty bez kulisové dráhy, kde naklápění prstů nahrazuje speciálně formovaný plech sběrače.

Dopravní zařízení realizují pohyb hmoty od sběracího směrem k lisovacímu ústrojí. Dopravníky rozdělujeme dle kontinuálnosti pohybu hmoty na přerušované

a nepřerušované. Typickými zástupci dopravníků s přerušovaným pohybem jsou vidlicové, nebo kývavé podavače, jejichž pohyb je synchronizován s posuvem lisovacího pístu (Krepl, 2006).

Lisovací mechanismy jsou uzpůsobeny tvarům balíků, které vytvářejí. Lisovací mechanismus pro malé hranolovité balíky bývá na principu přímočarého, nebo kývavého pohybu pístu. Stroje na velké hranolovité balíky bývají opatřeny pěchovacím mechanismem, který je předřazen před lisovací píst. Flick et al. (2019) v publikaci zaměřené na kontinuální lisování velkých hranolovitých balíků uvádí, že pístové lisovacího zařízení s vratným pohybem je neefektivní z důvodu, že proces není kontinuální.

Flick se zabýval návrhem řídicího systému pro lisy na hranolovité balíky, který má kontinuální proces pěchování hmoty a je realizován pomocí šnekového lisovacího zařízení. Stroje na zvlášť velké hranolovité balíky mívají lisovací skříň se svisle pohyblivým stropem, ale po vytvarování kvádrů neprobíhá vázání, jako u ostatních technologií (Kumhála, 2007). Lisy na válcovité balíky mívají buď pevnou, nebo variabilní lisovací komoru. Lisy s pevnou komorou utváří balíky s neutuženým jádrem, tedy jejich objemová hmotnost je rozdílná v průřezu balíku. U lisů s variabilní komorou je balík hutněn již od středu a komora je postupně zvětšována, při zachování stejného lisovacího tlaku. Tím je dosahováno stejné objemové hmotnosti balíků v celém jejich průřezu (Kroulík et al., 2011).

3.1 Lisy na hranolovité balíky

Lisy na hranolovité balíky jsou v praxi nejčastěji používané i přes jejich vyšší pořizovací cenu. Jsou rozděleny na lisy pro velké a malé hranolovité balíky. Lisovací zařízení u strojů na malé hranolovité balíky bývá tvořeno pístem, které je poháněno klikovým mechanismem. Klikovému mechanismu je energie dodávána od vývodového hřídele traktoru, přes třecí spojku, setrvačnickou a převodovku. Lisovací kanál, do kterého je píce, nebo sláma vtlačována, má výstupky, které zvyšují odpor lisovaného materiálu proti jeho pohybu. Průřez lisovacího kanálu je ke konci zužován. Píst je opatřen drážkami, kterými procházejí jehly vázacího mechanismu a na jeho boku je umístěn nůž, který prochází podávacím kanálem a odřezává lisovanou hmotu. Vázací mechanismus je složen z jehel, motouzové svěrky, uzlovače, nože a hnacího ozubeného kotouče. Pohyb jehel, které bývají uloženy pod lisovacím kanálem, je odvozen od hřídele vázacího mechanismu. Jehly v prvním kroku prochází lisovacím kanálem a v očku nese motouz až do horní části ke svěrkám. Svěrky sevřou motouzy pomocí dvou kotoučů, které jsou

přitlačovány k sobě za pomoci stavitelné pružiny, a následně se jehly vrací do výchozí pozice. Po naplnění lisovacího tunelu materiálem jehly podávají přídržovačům druhý konec motouzu a jsou spuštěny uzlovače. Uzlovače uchopí motouzy svěrkou a začnou se otáčet. Uzlovače vytvoří oka, kterými za pomoci pohyblivých jazýčků jsou provlečeny svazky motouzů, oka stáhnou a tím vytvoří uzly. Následuje odříznutí motouzů. Ovázaný balík je usměrněn po skluzu na sklizený pozemek, nebo je usměrněn na akumulární vozík. Další možností je posunutí do vrhače balíků, nebo transport po ližinách do vedle jedoucího vozu (Krepl, 2006).



Obrázek 3.1: Lis na malé hranolovité balíky (John Deere, 2021)

Lisy na malé hranolovité balíky s příchodem výkonné manipulační techniky byly z trhu téměř vytlačeny a používají je výhradně drobní zemědělství podnikatelé. Na trhu jsou nejprodávanější lisy na velké hranolovité balíky.

Lisy na velké hranolovité balíky jsou specifické použitím plnicí komory, která je umístěna před lisovací komorou. Základním konstrukčním prvkem lisů je rám s jednou, nebo dvěma nápravami a přípojným závěsem, který spojuje stroj s traktorem. Dalšími částmi lisu jsou sběrač, usměrňovací plech, plnicí komora s pýchovacím zařízením a případně řezacím zařízením, lisovací píst a komora, vázací ústrojí, pohon se setrvačnickem a klikový mechanismus. Sběrač bývá umístěný v přední části stroje a za pomoci bubnového ústrojí se sklopnými pružnými prsty získává hmotu z předem připraveného řádku a posouvá ji směrem ke vkládacímu mechanismu. Výška sběrače nad terénem je nastavitelná pomocí kopírovacích kol. Kopírovací kola udržují sběrací

zařízení v optimální výšce, brání nárazům pružných prstů o zem a současně zabraňuje vzniku ztrát nesebráním materiálu z řádku.

Zvedání a spouštění sběrače je ovládáno hydraulicky. Za sběracím zařízením může být také zařazeno řezací ústrojí, které bývá složeno z pevných, nebo pohyblivých nožů (Kumhála, 2007). Příkladem použití pohyblivých nožů u dnes prodávané lisovací technologie může být například plně integrovaný drtič PreChop od společnosti Krone s 96 rotujícími noži a dvěma řadami proti ostří (Krone, 2020). V případě varianty pevných nožů je materiál posouván za pomoci podávacího rotoru. Rotor je složený z řady lamel hvězdicovitého tvaru, sestaveného na hřídeli spirálovitě. Spirálovité uložení lamel zajišťuje plynulý průchod materiálu přes pevné nože bez rázů. Nože bývají ve stroji umístěné v jedné, nebo dvou řadách a proti poškození bývají jištěné vinutými pružinami. K vyřazení řezacího ústrojí z činnosti stačí vyklopit celé sady a vyjmout jednotlivé nože. Nařezaný materiál je výhodnější pro jeho snazší slisování a jednodušší rozdrůžování balíků. Negativem řezání materiálu je rostoucí energetická náročnost lisu a snížená soudržnost balíků.

Pořezaný materiál vstupuje do plnicí komory, kde je pěchován. Pěchovací zařízení bývá bubnové, klikové, nebo rotorové. Například lisy Big Pack používají rotorové variabilní plnicí zařízení s pěti řadami prstů. Pěchovací ústrojí stlačuje materiál a vytváří tlak na zádržný systém, který brání průchodu hmoty do lisovací komory. Po naplnění pěchovací komory se zvyšují síly působící na tlakové čidlo a program při dosažení stanovené hodnoty elektronicky odkloní zádržný systém. Podavač následně posouvá hmotu do lisovací komory.

Lisovací zařízení je tvořeno komorou a pístem. Píst je veden na kladkách v lisovací komoře a mění polohu přímočarým vratným pohybem, který je odvozen od pohonného, klikového mechanismu, který vytváří tlak přesahující 700 kPa a působí na čelo balíku. Tento proces lisování je diskontinuální. Účinnější variantou by mohlo být šnekové lisovací zařízení, které by umožnilo kontinuální pohyb materiálu, snížení energetické náročnosti a zvýšení ekonomické efektivity (Flick et al., 2019). Čelo pístu je osazeno šikmým nožem a jsou na něm vytvořeny drážky. Drážkami v čele pístu prostupují jehly při procesu vázání. Lisovací komora je také opatřena výstupky, které přidržují hmotu a zabraňují zpětnému pohybu lisovaného materiálu. Délka komory je například u strojů Big Pack prodloužená o 20 % a dosahuje tak 3,6 m (Krone, 2020).

Čtyři až šest uzlovačů, které jsou uloženy nad lisovací komorou, jsou součástí vázacího mechanismu. Další částí vázacího zařízení jsou zapínací, hnací, brzdící, pojistné mechanismy a jehly. Ovázaný balík opouští lisovací tunel po válečkovém skluzu, který může být opatřen čidly pro určování hmotnostních parametrů balíků, nebo může být usměrněn na akumulární vozík. Soustředování na akumulární vozík umožňuje koncentraci několika balíků na jednom místě pozemku, což zefektivní následnou manipulaci.

Výhodou strojů na hranolovité balíky oproti lisům na válcové balíky je výrazně vyšší hektarová výkonnost dosažená také vázáním balíků při pojezdu stroje. Lisy na válcové balíky ve většině případů musí na proces balení úplně zastavit pojezd a tím i sběr další hmoty (Grisso et al., 2020).



Obrázek 3.2: Lis na velké hranolovité balíky Big Pack (Krone, 2020)

Významné inovace lisů na hranolovité balíky směrem k získávání precizních dat popisuje Beneš (2023). Firma Fendt nabízí systém pro získávání a zpracování dat o každém vytvořeném balíku, včetně jeho GPS polohy, hmotnosti a vlhkosti. Data o GPS

poloze balíků lze využít jako podklady pro plánování tras pojezdu manipulačních a odvozních prostředků. Systém Bale Link provozovaný firmou Fendt získává informace prostřednictvím RFID Chipu, který je součástí vázacího provázku. Data jsou ukládané na cloud a umožní automatizovanou optimalizaci pojezdu nakladačů i odvozních souprav (Beneš, 2023).

3.2 Lisy na válcové balíky

Lisy na válcové balíky jsou technologické celky, které sbírají píci, nebo posklizňové zbytky z připravených řádků a tvarují je do útvarů kruhového průřezu 0,32–1,80 m a délky 0,4–1,5 m. Výhodou lisů na balíky válcovitého tvaru je jejich nižší pořizovací cena (oproti lisům na hranolovité balíky), finančně méně náročný provoz a možnost agregace s výkonově nižší řadou traktorů. Válcové balíky je také možné skladovat ve vlhkém prostředí v polních podmínkách, zatímco hranolovité je nutné uchovávat v krytých halách. Oproti tomu, nevýhodou lisů na kulaté balíky je nižší hektarová výkonnost, nižší efektivita využití odvozních prostředků a skladovacích hal (Grisso et al., 2020).

Svinovací lisy mohou pracovat kontinuálně, podobně jako u lisů na hranolovité balíky, nebo diskontinuálně se zastavením při vázání balíku. Na trhu jsou dostupné dvě základní konstrukční varianty svinovacích lisů, a to s pevnou a variabilní lisovací komorou. Svinovací lisy s variabilní komorou jsou řešeny jako jednonápravové konstrukce a jsou připojovány za traktor pomocí závěsu. Lisy jsou tvořeny pohonem, svinovací komorou s pásy, která bývá v zadní části odklopná, sběracím, napínacím, vázacím a řezacím mechanismem, nebo bubnem. Materiál je sbírán z připravených řádků bubnovým ústrojím, které dosahuje až 2,2 m. Například u lisu Comprima společnosti Krone dosahuje délky 2 150 mm, používají sběrací prsty o průměru 6 mm a místo kulisy, která se běžně používá na řízení pohybu prutů, jsou využívány tvarované usměrňovací plechy pro snazší pohyb materiálu směrem k podávacímu rotoru, nebo řezacímu ústrojí (Vobosystem, 2021).

Podávací zařízení přebírá hmotu od sběrače a mimo funkce přepravní, při které realizuje pohyb materiálu směrem k lisovací komoře, umožňuje také pořezání píce, nebo slámy. Při řezání jsou hydraulicky zasunuty nože do vkládacího kanálu. Vzdálenost nožů bývá 128 mm, nebo 64 mm při použití dvou sad, přičemž na každé ostří připadají dva prsty podávacího rotoru, které protlačují materiál do lisovací komory. V lisovací komoře jsou nekonečné gumotextilní pásy, které jsou poháněné ocelovými

válci, které jsou potaženy gumou a napojené na řetězové převody. Jakmile je hmota v lisovací komoře, je roztočena vlivem třecí síly o pohybující se gumotextilní pásy a dochází k postupnému formování balíků (Kumhála, 2007). V případě, že jsou připevněny na pásy příčníky, ke tření nedochází a zároveň je eliminován prokluz balíku. Rostoucí balík zvyšuje tlak působící na lisovací komoru a napínací mechanismus tento nárůst kompenzuje. Dochází ke zvětšování lisovací komory. U lisů s variabilní komorou je materiál stlačován od počátku formování balíku a jeho hustota je konstantní téměř v celém jeho průřezu. U lisů s pevnou komorou nemá formující se balík zpočátku válcovitý ráz a výsledný útvar má ve svém průřezu rozdílnou hustotu.

Lisovací komora je tvořena kovovými profilovými válci umístěnými v pevných pozicích po jejím obvodu, případně pásovými, nebo válečkovými dopravníky. Zvukovým signálem informuje řídicí jednotka obsluhu o dokončení lisovacího procesu. Obsluha zastaví sběr materiálu a spouští proces vázání. Vázání je realizováno pomocí motouzu, sítě, nebo kombinací těchto dvou systémů (Krepl, 2006). Po zastavení pohybu stroje a potvrzení příkazu vázání se vykloní trubka nesoucí konec motouzu směrem k rotujícímu balíku. Motouz je vtažen do prostoru mezi balíkem a válcem (případně pásem) a je následně namotáván na balík. V časovém rozpětí 2–3 sekund je balík v jednom místě omotán až třikrát a trubka usměřující motouz změní polohu a celý tento proces se opakuje přibližně 15krát. Značnou dobu vázání zkracují výrobci lisů dvojitým vázáním, které uspoří přibližně polovinu času. Balení do nízkotlaké polyethylenové sítě je efektivnější variantou. Konec sítě je fixován zuby přídržovacího plechu a přečnává o 20 cm. Přídržovací plech je po dobu lisování balíku odkloněn od zaváděcích válců. Povel spustit balení je aktivován elektromotor, který posune přídržovací plech pomocí kulisové dráhy k zaváděcím válcům. Zaváděcí válce usměrní síť mezi balík a lisovací komoru. Balík síť zachytí a začíná proces ovíjení. Po ovínutí balíku je přídržovací plech vrácen do výchozí pozice, aktivuje se brzda sítě, což vede k napnutí sítě a je uvolněna západka řezacího zařízení. Nůž odřízne síť a v dalším kroku je hotový balík uvolněn z lisovací komory a usměrněn na pozemek, nebo posunut do baličky. Stroje pro obalování balíků strečovou fólií se používají především kvůli ochraně senáží před působením aerobních bakterií a jejich negativnímu vlivu. Balíky hranaté, ale především kulaté jsou ovíjeny plastovou fólií o šířce 500–700 mm tak, aby byla senážní hmota oddělena od vzdušného prostředí. Baličky je možné využívat jak na poli, tak i u skladu balíků, což značně snižuje riziko poškození fólie a současně zvyšuje efektivitu následné manipulace. Pokud je senáž balena strečovou fólií přímo

na pozemku, jsou možnosti následné manipulace výrazně omezeny. Není možné balíky nabodávat hroty umístěné na nakladači kvůli poškození ochranné vrstvy, ale je možné manipulovat balíky pouze po jednom a za pomoci klešťového adaptéru umístěné na čelním nakladači (Bell a Rickatson, 2015).

4 Cíle dizertační práce

Cílem dizertační práce je vyvinout algoritmus pro optimalizaci činnosti odvozních souprav a nakladačů při manipulaci, svozu a přepravě balíků píce, nebo slámy z pozemku na místo skladování tak, aby bylo dosaženo co nejnižší spotřeby lidské práce. Záměrem je vytvořit podpůrný program jako nástroj automatického rozhodovacího procesu, pomocí kterého zvolíme nejvhodnější počet odvozních souprav a nakladačů balíků.

Podpůrný program bude zpracovávat mapové podklady reálných pozemků, vytvářet jejich hranice pro potřeby výpočtů a na základě odhadů výnosů slámy, nebo píce dopočítávat předpokládané pozice balíků. Na základě znalosti pozic balíků bude program plánovat optimální trasy pojezdů nakladačů i odvozních souprav a v kombinaci s jejich průměrnou pojezdovou rychlostí vypočítávat pracovní časy. Pracovní časy obou typů strojů budou průběžně počítány v synchronizaci pro různé varianty počtu nakladačů a odvozních souprav a bude zjišťováno, zda nedochází k prostojeům.

Výstupem programu bude výpočet (teoretický) celkové spotřeby časů (včetně prostojeů) všech strojů zařazených do procesu manipulace a odvozu balíků z pozemku ve všech možných početních kombinacích až do hodnoty jejího předem definovaného maxima.

Dalším výstupem bude výběr varianty počtu nakladačů a odvozních souprav, která má nejnižší součet celkových spotřeb časů. Posledním výstupem bude výběr varianty počtu nakladačů a odvozních souprav, která má nejkratší celkovou dobu trvání.

5 Metodika

Optimalizační program bude vytvořen v programovacím jazyce Python a jeho základní funkcí bude zpracování obrazového snímku reálného pozemku vytvořeného v Google Maps, detekování jeho hranice a na základě odhadů výnosu píce nebo slámy vypočítat přibližné rozmístění velikostně předem definovaných balíků (velikost balíků a výnos hmoty budou vstupní hodnoty optimalizačního programu). Program dále umožní odhadnout polohu tzv. centroidů, tedy místa, kde by měla být přistavena odvozní souprava při nakládání, aby byl tento proces co nejefektivnější.

K centroidům budou postupně přiřazovány balíky s nejnižší vzdáleností až do naplnění skupiny. Jedná se o stav, kdy počet balíků ve skupině odpovídá přepravní kapacitě odvozního prostředku. Přepravní kapacita odvozních souprav bude jedním ze vstupních údajů programu. Dalším cílem optimalizačního algoritmu bude naplánování pojezdových tras a na základě vstupní hodnoty průměrné rychlosti nakladače (vstupní hodnota programu) bude vypočítáný potřebný čas pro pojezd tohoto stroje. K celkovému pracovnímu času nakladače bude přičten i čas potřebný na jízdu z prostoru uskladnění stroje k pozemku, a také čas potřebný pro pojezd z místa vstupu na pracovní plochu k centroidu, i doba jízdy od zpracovaného centroidu k dalším centroidům, včetně doby pojezdu ze sklizených ploch zpět na místo, kde bude nakladač odstaven.

K pojezdu nakladače bude dále přičtena hodnota potřebného času zdvihu všech balíků v centroidu a jejich uložení na odvozní prostředek, doba prostoje manipulátoru, čímž bude zjištěn celkový čas práce nakladače. Průměrná doba zdvihu a uložení balíků bude vstupní hodnotou optimalizačního programu. Pracovní čas odvozních souprav bude vypočten z délky trasy a z průměrné rychlosti těchto strojů, z doby nakládání a času potřebného na pojezd k místu skladování balíků, včetně doby potřebné na složení balíků z odvozní soupravy. Čas nakladačů a odvozních souprav bude vyhodnocován souběžně (v synchronizaci) a bude vypočítáváno, zda dochází ke ztrátovým časům. Optimalizační program bude postupně počítat různé varianty pro různý počet nakladačů a odvozních souprav a vyhodnotí, která varianta spotřebuje nejméně času a je tedy optimální z pohledu nejnižších časových ztrát.

Vstupní hodnoty pro výpočet průměrné doby zdvihu balíků, jejich ukládání na odvozní soupravu, průměrné pojezdové rychlosti budou zjištěny na základě terénního měření, které bude sloužit i k porovnání simulovaných hodnot s reálným provozem.

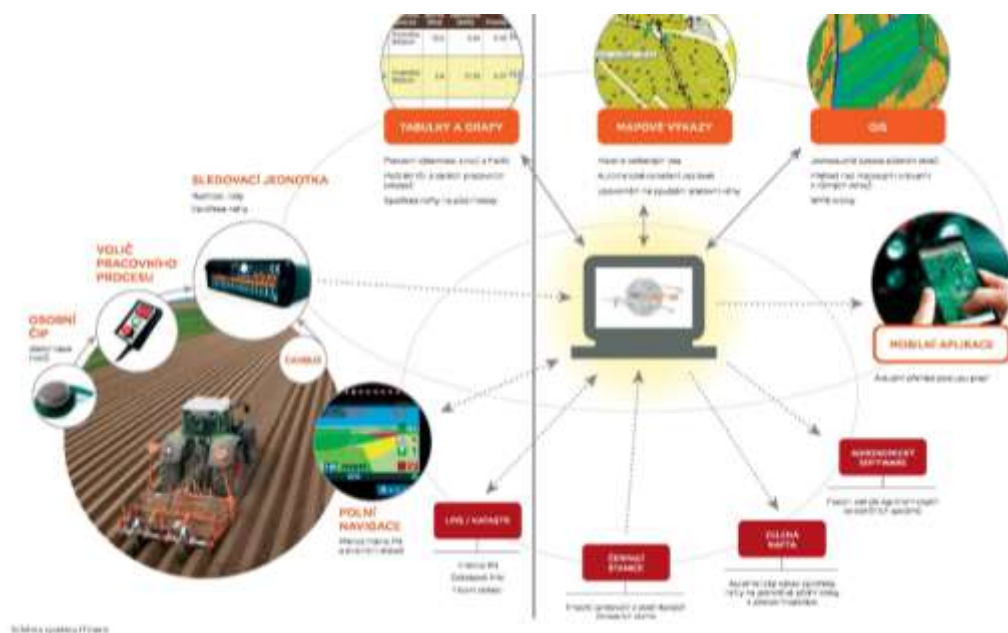
Měření bude probíhat na pozemcích podniku KOOPRODUKT a.s. Lišov. Balíky sena, nebo slámy budou na pokusném pozemku lokalizovány pomocí ortofotomapy získané spojením digitálních snímků vyfocených dronem DJI M300 viz obrázek 5.1. Zmiňovaný dron je osazen kamerou H20T a jeho letová doba je 45 minut. Kamera H20T má 12Mp širokoúhlý fotoaparát 82,9 FOV, fotoaparát s rozlišením 20MP a 23násobným hybridním zoomem. Fotoaparát je vybaven radiometrickou termální kamerou s DFOV 40,6°, rozlišením 640 × 512, s frekvencí 30 snímků za sekundu a Tepelnou citlivostí: $\leq 50\text{mk}@f1.0$ (Fakulta zemědělská a technologická, 2020)



Obrázek 5.1: DJI M300 s kamerou H20T (Fakulta zemědělská a technologická, 2020)

Ortomapa bude vytvořena v programu ArcGis a bude určena souřadnicová poloha balíků. Délka pojezdu manipulačních prostředků, včetně celkových spotřeb času budou monitorovány pomocí mobilního GPS sledovacího systému ITineris od společnosti AGRI-PRECISION s.r.o. Tento systém je složený ze sledovací jednotky Atlas, voliče pracovních procesů a softwaru WayQuest, který zaznamenává veškerá strojově čitelná data z mechnizace každou sekundu. Díky napojení na CANBUS stroje lze číst informace o aktuální spotřebě paliva, otáčkách motoru, zatížení, rychlosti a zrychlení. Sledovací jednotka bude napojená na GPS signál, což umožní zjišťování trasy manipulačních prostředků s místopisnou přesností 2,5 cm. Data budou zpracovaná v programu WayQuest, který je propojený se systémem LPIS a ostatními stroji v podniku. Přesto, že zmiňovaná technologie je schopna vypočítat průměrnou rychlost stroje, není

zde možné zvlášt' odlišit operační časy, kdy manipulátor zdvihá balík, anebo ukládá na odvozní soupravu.



Obrázek 5.2: Schéma ITineris (Agri-precizion, 2020)

Operační časy budou odečteny ze záznamů z digitálního video snímku pořízeného za pomoci kamery Canon Legria HF G25. Kamera má snímač HD CMOS PRO s úhlopříčkou 1/3 palce, ohniskovou vzdálenost 4,25 až 42,5 mm, umožňuje deseti násobný optický a čtyřiceti násobný digitální zoom. Záznam je ukládán do dvou slotů s 32 GB paměťovými kartami. Doba záznamu je maximálně 12 hodin a 15 minut. Baterie kamery je lithium-iontový zdroj umožňující až 6 hodin záznamu (Canon Group, 2015). Operační časy budou rozděleny na pojezdové a nepojezdové. Pojezdové časy budou definovány jako ty, při kterých nakladač mění zeměpisnou polohu. U nepojezdových časů budou v pohybu pouze hydraulické okruhy. Nepojezdové časy budou rozděleny na zdvih balíku a ukládání na odvozní soupravu. Průměrná doba zdvihu balíků bude následně vypočtena jako suma času spotřebovaného na zdvih všech balíků, dělené počtem zdvihů. Průměrná doba ukládání balíků bude vypočtena jako suma času spotřebovaného na uložení všech balíků dělené počtem ukládacích cyklů. Průměrná rychlost jízdy manipulátoru bude vypočtena z délky projeté trasy zjištěné pomocí GPS monitoringu dělené sumou času spotřebovanou na pojezd.

6 Výsledková část

6.1 Vstupní data – data o pozemku

Vstupní obraz pozemku pro simulaci byl vytvořen v rozhraní Google Maps vložением bodů, které ohraničují zpracovávanou plochu. Plocha byla vyplněna barvou RGB (255, 82, 82) s průhledností 75 %. Místo vjezdu na pracovní plochu bylo vyznačeno čarou o délce 4 metry, v těsné blízkosti pozemku. Čára označující vjezd byla označena barvou RGB (103, 58, 183). Pro potřeby výpočtu velikosti plochy bylo vyznačeno v mapě měřítko o délce 100 metrů, které je standardně nastavené v modré barvě a udávaná vzdálenost je měřena ze středu tečky až na konec čárkované čáry. Celá podkladová mapa byla uložena pomocí aplikace Výstřižky, viz. obrázek 6.1.



Obrázek 6.1: Vstupní mapa – Slabec

Pro získání souřadnic bodů obrysu pozemku a jejich zasazení do reálných rozměrů bylo zapotřebí nejprve vstupní obraz zpracovat aplikací vytvořeného skriptu, kdy dochází nejprve k vytvoření třídy `Coords` v rámci jejíž inicializace je zapotřebí zadat dva vstupy v podobě cesty do adresáře obrázku a hodnoty v něm vyznačené referenční vzdálenosti. Při vyvolání objektu dané třídy nejprve dochází k načtení obrazu, vytvoření jeho kopie sloužící pro jeho zpracování a rozdělení obrazu do tří matic představujících jednotlivé barevné kanály prostoru BGR. Následně je zjištěna šířka a výška obrazu, referenční vzdálenosti je přiřazena proměnná `self.l` prázdné listy pro budoucí doplnění souřadnic kontury pozemku a další pomocné proměnné.

```

1 class Coords:
2     def __init__(self, path, length):
3         self.img = cv2.imread(path)
4         self.img0 = self.img.copy()
5         self.imb = self.img[:, :, 0]
6         self.imgr = self.img[:, :, 1]
7         self.imr = self.img[:, :, 2]
8         self.w = self.img.shape[1]
9         self.h = self.img.shape[0]
10        self.l = length
11        self.scale = 0
12        self.cx = []
13        self.cy = []
14        self.vx = 0
15        self.vy = 0
16        self.c_xs, self.c_ys = 0, 0
17        self.c_xs1, self.c_ys1 = 0, 0

```

Zdrojový kód 6.1: Třída Coords

Hlavní část objektu je tvořena funkcí pro získání souřadnic bodů vyznačujících hranice pozemku a jejich přepočítání do reálné velikosti. V rámci činnosti funkce dochází nejprve k výpočtu proměnné `scale` představující poměru mezi reálnou a pixelovou vzdáleností referenční úsečky v obraze pomocí funkce `getScale`.

Následuje získání souřadnic vjezdu na pozemek aplikací funkce `getEntrance`, následně je vstupní obraz binarizován funkcí `filtercolor1`, dochází k jeho segmentaci na sledovaný pozemek a okolí na základě barevných vlastností jednotlivých pixelů, kdy body náležící pozemku získají hodnotu 255 a body okolí 0.



Obrázek 6.2: Binarizovaný obraz pozemku

Pro úpravu vzniklého obrazu jsou využity morfologické transformace otevření, při které dochází k odstranění malých segmentů, jež nemají spojitost s pozemkem a uzavření, v rámci něhož, jsou zaplněny malé nespojitosti, či díry uvnitř větších objektů.

Po tomto kroku jsou vygenerovány kontury objektů vzniklých segmentací obrazu funkcí `findContours` z knihovny OpenCV (funkce z této knihovny budou dále již označovány prefixem `cv2.` psaným před názvem funkce), přičemž ústředním je polygon kopírující pozemek, během tohoto procesu však mohou vzniknout i nepatrné nespojitě objekty představující například barvící se vrcholky listnatých stromů. Výběr kontury sledovaného objektu je proveden za základě jeho velikosti, kdy nejdelší kontura obsahuje nejvíce bodů. Získané body společně s referenční vzdáleností vyjádřenou úsečkou v obrazu jsou zakresleny do kontrolního obrazu funkcí `cv2.drawContours` viz obrázky 6.2 a následně funkcí `getPoints` rozděleny do skupiny x a y . Všechny body ve skupině x jsou posunuty o minimální hodnotu z této skupiny tak, že nová minimální hodnota je 0. Stejná operace byla provedená také pro skupinu souřadnic y i souřadnice vstupního bodu. V posledním kroku dochází k vynásobení hodnot všech bodů proměnnou `scale`, čímž získáváme reálné vzdálenosti hranic pozemku.

```
1 def getPolCoords(self):
2     self.getScale()
3     self.getEntrance()
4     im1 = self.filtercolor1()
5     kernel2 = np.ones((3, 3), np.uint8)
6     for i in range(3):
7         im1 = cv2.morphologyEx(im1, cv2.MORPH_OPEN, kernel2)
8         im1 = cv2.morphologyEx(im1, cv2.MORPH_CLOSE, kernel2)
9     contours, _ = cv2.findContours(im1, cv2.RETR_TREE, cv2.CHAIN_APPROX_NONE)
10    maxl = 0
11    max_c = []
12    for obj in contours:
13        if len(obj) > maxl:
14            maxl = len(obj)
15            max_c = obj
16    im2 = cv2.drawContours(self.img0, max_c, -1, (0, 255, 0), 3)
17    cv2.line(im2, (int(self.c_xs), int(self.c_ys)),
18            (int(self.c_xs1), int(self.c_ys1)), (255, 0, 0), 5)
19    cv2.line(im2, (int(self.c_xs), int(self.c_ys)),
20            (int(self.c_xs1), int(self.c_ys1)), (255, 255, 255), 1)
```

```
22     cv2.imshow('test', im2)
23     cv2.waitKey(0)
24     cx, cy = self.getPoints(max_c)
25     mcx, mcy = min(cx), min(cy)
26     cx = cx - mcx
27     cy = cy - mcy
28     self.vx = self.vx - mcx
29     self.vy = self.vy - mcy
30     self.cx = np.round(cx * self.scale)
31     self.cy = np.round(cy * self.scale)
32     self.vx = np.round(self.vx * self.scale)
33     self.vy = np.round(self.vy * self.scale)
34     return self.cx, self.cy, self.vx, self.vy
```

Zdrojový kód 6.2: Funkce pro získání souřadnic bodů vymežujících pozemek



Obrázek 6.3: Kontrolní snímek znázorňující hranice pozemku

6.1.1 Funkce `getScale`

Funkce `getscale` se využívá pro zpracování graficky vytvořené referenční vzdálenosti, nejprve dochází k binarizaci obrazu na základě segmentace barev, kdy jsou získány pixely splňující podmínku, že hodnota červeného kanálu je menší než 100, hodnota modrého kanálu je větší než 220 a zároveň zeleného kanálu je větší než 120. Poté získáváme kontury všech objektů ve vzniklém obrazu, následně je získán index největší kontury a následně jsou prozkoumány kontury všech objektů, a pokud splní podmínku, že obsahují méně bodů, než kontura největšího objektu a zároveň žádný jejich bod neleží v největším objektu, tak jsou jejich souřadnice rozděleny do skupiny x a y , ty jsou připojeny ke skupinám bodů z ostatních podmínku splňujících objektů a dále dochází k výpočtu středu těchto objektů.

Funkce `getscale` se využívá pro zpracování graficky vytvořené referenční vzdálenosti, nejprve dochází k binarizaci obrazu na základě segmentace barev, kdy jsou získány pixely splňující podmínku, že hodnota červeného kanálu je menší než 100, hodnota modrého kanálu je větší než 220 a zároveň zeleného kanálu je větší než 120. Poté získáváme kontury všech objektů ve vzniklém obrazu, následně je získán index největší kontury a následně jsou prozkoumány kontury všech objektů, a pokud splní podmínku, že obsahují méně bodů, než kontura největšího objektu a zároveň žádný jejich bod neleží v největším objektu, tak jsou jejich souřadnice rozděleny do skupiny x a y , ty jsou připojeny ke skupinám bodů z ostatních podmínku splňujících objektů a dále dochází k výpočtu středu těchto objektů.

Největší objekt a s ním i objekty v něm ležící jsou uvedenou podmínkou odfiltrovány, protože nejsou součástí úsečky referenční vzdálenosti, ale pouze součástí značky popisující reálnou velikost. Novým největším objektem ve skupině je tečka, v jejímž středu začíná referenční vzdálenost. Proto je posuzována vzdálenost právě od jejího středu ke středům ostatních objektů k nalezení nejvzdálenějšího bodu, který představuje konec referenční vzdálenosti, načež je posuzována vzdálenost všech bodů objektu s nejvzdálenějším středem. Proměnná `scale` je vypočítána jako podíl vstupní vzdálenosti zadané uživatelem, jejíž hodnota je uvedena ve značce referenční vzdálenosti, a délky referenční úsečky.

```
1 def getScale(self):  
2     im1 = self.filtercolor2()
```

```

3     contours, _ = cv2.findContours(im1, cv2.RETR_TREE, cv2.CHAIN_AP-
4         PROX_NONE)
5     centers_x = []
6     centers_y = []
7     cxx, cyy = [], []
8     cl = []
9     clen = []
10    clen.extend([len(c) for c in contours])
11    ci = clen.index(max(clen))
12    for obj in contours:
13        if (len(obj) < max(clen)) and (cv2.pointPolygonTest(con-
14            tours[ci], (int(obj[0][0][0]), int(obj[0][0][1])), False)
15            == -1):
16            cx, cy = self.getPoints(obj)
17            cxx.append(cx)
18            cyy.append(cy)
19            centers_x.append(sum(cx) / len(cx))
20            centers_y.append(sum(cy) / len(cy))
21            cl.append(len(obj))
22    self.c_xs, self.c_ys = centers_x[cl.index(max(cl))], cen-
23        ters_y[cl.index(max(cl))]
24    d = []
25    for i in range(len(centers_x)):
26        d.append(np.sqrt((self.c_xs - centers_x[i]) ** 2 +
27            (self.c_ys - centers_y[i]) ** 2))
28    max_d = d.index(max(d))
29    ds = 0
30    for j in range(len(cxx[max_d])):
31        if np.sqrt((self.c_xs - cxx[max_d][j]) ** 2 + (self.c_ys -
32            cyy[max_d][j]) ** 2) > ds:
33            ds = np.sqrt((self.c_xs - cxx[max_d][j]) ** 2 +
34                (self.c_ys - cyy[max_d][j]) ** 2)
35            self.c_xs1, self.c_ys1 = cxx[max_d][j], cyy[max_d][j]
36    self.scale = self.l / ds

```

Zdrojový kód 6.3: Funkce getScale



Obrázek 6.4: Binarizace obrazu pro získání referenční vzdálenosti

6.1.2 Funkce getEntrance

Souřadnice vjezdu na pozemek jsou získány pomocí funkce `getEntrance`, jež je založená na totožném principu jako funkce `getScale`, pouze se liší podmínka pro binarizaci, která je stanovená tak, že červený kanál musí mít hodnotu větší, než 90, modrý kanál větší než 170 a zároveň zelený kanál musí mít hodnotu menší, než 100. Pokud ve vstupním obrazu není vjezd vyznačen, nebo je vyznačen barvou nesplňující zadanou podmínku, je souřadnice vjezdu jako 0,0 a zároveň je vypsána hláška, že nebyl žádný vjezd nalezen.

```
1 def getEntrance(self):
2     im1 = self.filtercolor3()
3     contours, _ = cv2.findContours(im1, cv2.RETR_TREE, cv2.CHAIN_APPROX_NONE)
4     print(len(contours), contours)
5     if len(contours) > 0:
6         vxg, v yg = self.getPoints(contours[0])
7         self.vx, self.vy = sum(vxg) / len(vxg), sum(v yg) / len(v yg)
8     else:
```

```
10     self.vx, self.vy = 0, 0
11     print("No entrance found")
```

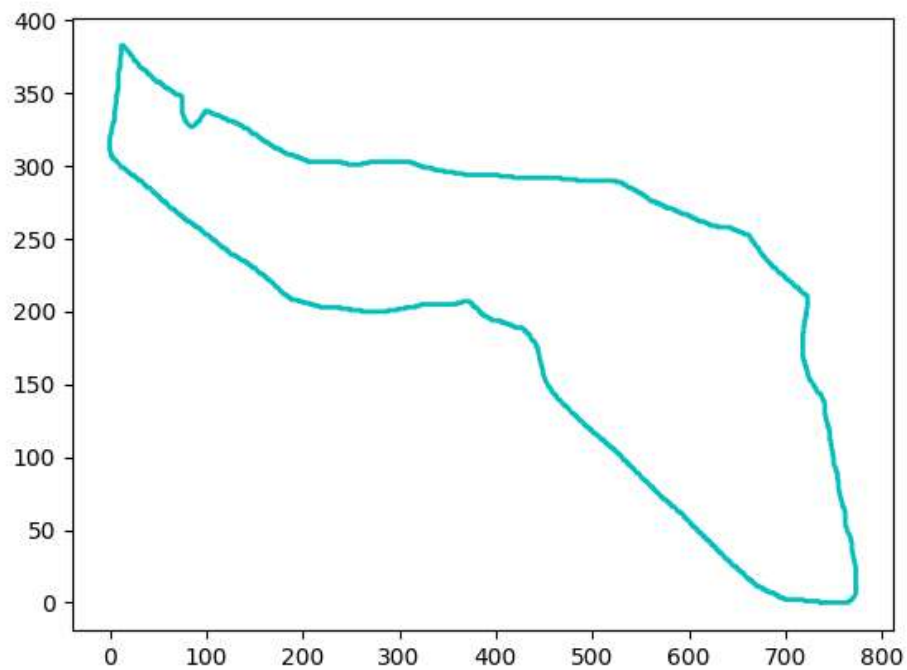
Zdrojový kód 6.4: Funkce `getEntrance`

6.2 Simulace rozmístění balíků a jejich optimalizace rozdělení do skupin

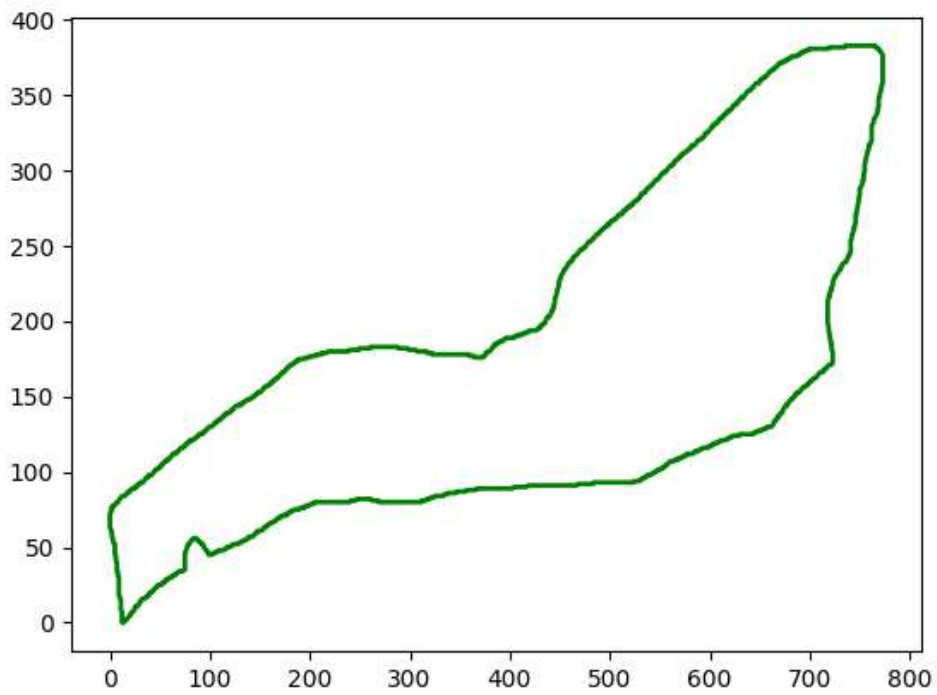
Získané souřadnice obrysu pozemku je nutné upravit, protože při zpracování obrazu pomocí balíku `OpenCV` je počáteční bod 0,0 situován v levém horním rohu, zatímco při zobrazení grafů funkcí z balíku `Mathplotlib` souřadnice 0,0 vychází z levého spodního rohu. Úprava souřadnic se týká pouze jejich složky y , od které je odečtena maximální hodnota y ze všech bodů obrysu a vypočtená hodnota je uvedena v absolutní hodnotě. Dále je vytvořenou funkcí `randpoints` získána plocha pozemku a souřadnice pomocných bodů rozmístěných po pozemku ve vysoké hustotě, na jejímž základě jsou aplikací algoritmu `kmeans` vygenerováno rozmístění balíků o daném počtu, který vychází z podílu hmotnosti sklizené hmoty na ploše a hmotnosti balíku. Množství sklizené hmoty je vyjádřeno jako součin plochy pozemku a výnosu hmoty na metr čtvereční. Matice získaných souřadnic balíků je transponována a rozdělena na skupinu x -ových a y -nových složek. Dále vypočítáme počet skupin balíků jako podíl mezi počtem balíků a kapacitou odvozní soupravy. Poté dochází k vygenerování vstupních centroidů vytvořenou funkcí `getStartCentroid`.

```
1  Field_coords = Coords(path, 100)
2  x_f, y_f, x_v, y_v = Field_coords.getPolCoords()
3  y_f = abs(y_f - max(y_f))
4  y_v = abs(y_v - max(y_f))
5  pf2, area2, t2 = randpoints(x_f, y_f)
6  n_b = int(area2 * h_f / m_b)
7  kmeans = KMeans(n_clusters=n_b).fit(pf2)
8  bal = np.transpose(kmeans.cluster_centers_)
9  x_b = bal[0]
10 y_b = bal[1]
11 k_s = 15
12 num_c = int(np.ceil(n_b / k_s))
13 x_c, y_c = getStartCentroids(pf2, num_c)
```

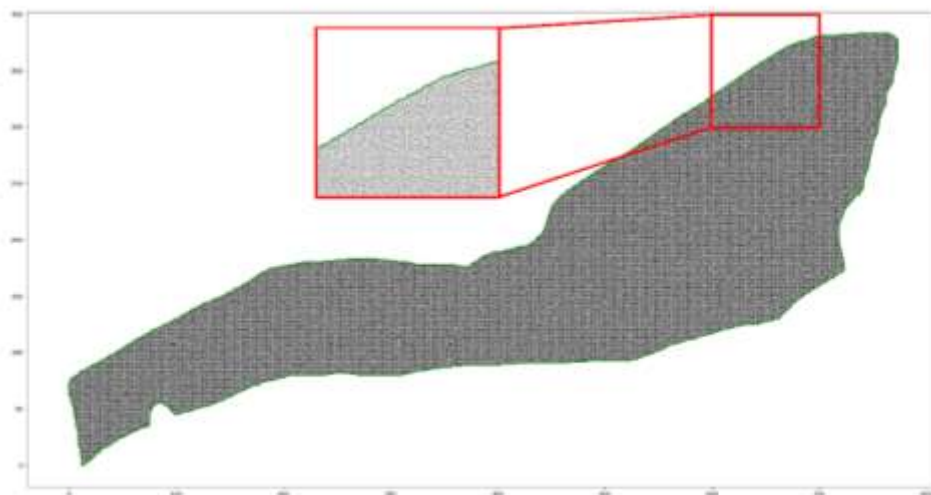
Zdrojový kód 6.5: Vygenerování počáteční polohy balíků a jejich centroidů



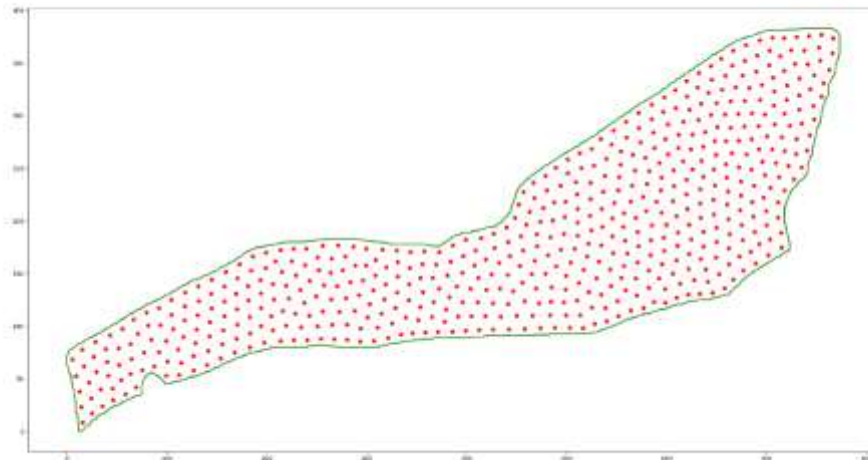
Obrázek 6.5: Převrácený tvar pozemku



Obrázek 6.6: Reálný tvar pozemku



Obrázek 6.7: Vygenerované body



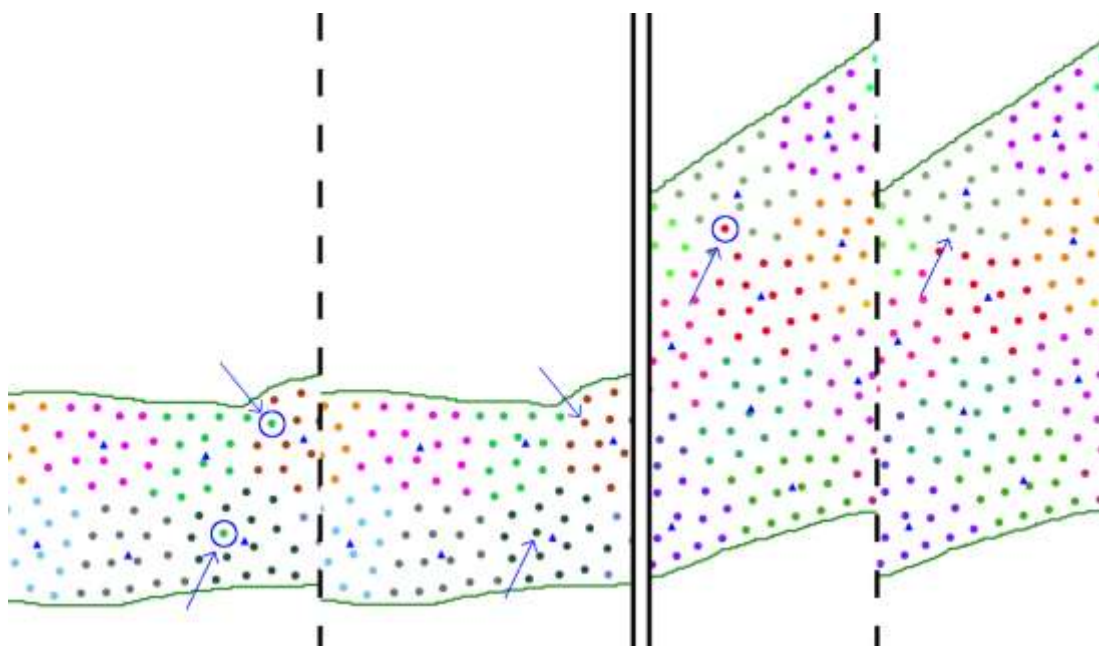
Obrázek 6.8: Vygenerované body balíků



Obrázek 6.9: Výstupní Centroidy

V následném kroku je aplikován algoritmus vytvořený na základě použití algoritmu `kmeans`. Nejprve jsou vytvořené prázdné listy obsahující stejný počet prázdných listů, jako je požadovaný počet skupin. Dále je vstupní počet balíků i vstupní skupiny souřadnic balíků uloženy jako pomocné proměnné. Následně je definována proměnná $i = -1$, která je v každém průběhu cyklu `while` zvětšena o 1 a znázorňuje index aktuálně řešeného balíku.

Uvnitř cyklu jsou definovány prázdné množiny pro uložení vzdáleností každého balíku od všech centroidů a jejich indexů. Po vypočtení vzdáleností sledovaného balíku od všech centroidů dochází k jejich seřazení od nejmenší po největší, přičemž na základě těchto hodnot jsou zároveň setříděny i indexy centroidů. Poté dochází k zařazení balíků ke skupině, k jejímuž centroidu má nejbližší. Pokud je tato skupina již zaplněna, dochází k porovnání vzdálenosti sledovaného balíku se vzdálenostmi všech členů skupiny od centroidu skupiny, když je některý ze členů ve větší vzdálenosti, než je sledovaný balík, dojde k jeho nahrazení a takto nahrazený balík je přiřazen na konec vstupní skupiny balíků, aby došlo k jeho opětovnému zpracování.



Obrázek 6.10: Výměna členů skupiny centroidu nově zpracovávaným bodem, jehož vzdálenost je menší, než nejvzdálenější bod skupiny

V případě, že ve skupině není vzdálenější člen, než sledovaný balík dochází k pokusu o zařazení do skupiny druhého nejbližšího centroidu. Tento proces je opakován, dokud není balík zařazen do jedné ze skupin. Po rozřazení všech balíků jsou vypočítány nové souřadnice centroidů skupin a celý proces rozdělování balíků se od začátku opakuje. Pro zamezení situace, kdy se již centroidy nové generace neliší od centroidů předchozích, je zavedeno pravidlo, které při nulovém rozdílu poloh centroidů vzniklých v kole n a $n-1$, či n a $n-2$ zvětší hodnotu proměnné `same` o 1, a v opačném případě přiřadí této proměnné hodnotu 0. Když `same` dosáhne hodnoty 3 je celý cyklus ukončen.

```

1 same = 0
2 x_c0, y_c0 = [], []
3 for xyz in range(1000):
4     x_groups = getlistOFlists(num_c)
5     y_groups = getlistOFlists(num_c)
6     d_bc0 = getlistOFlists(num_c)
7     n_b0 = n_b
8     x_b0, y_b0 = x_b, y_b
9     i = -1
10    while i < (n_b-1):
11        i += 1
12        d_bc = []
13        ind = []
14        for j in range(num_c):
15            d_bc.append(np.sqrt((x_b[i] - x_c[j]) ** 2 + (y_b[i] -
16                y_c[j]) ** 2))
17            ind.append(j)
18        ind_sort = [ix for _, ix in sorted(zip(d_bc, ind))]
19        for k in range(num_c):
20            if len(x_groups[ind_sort[k]]) < k_s:
21                x_groups[ind_sort[k]].append(x_b[i])
22                y_groups[ind_sort[k]].append(y_b[i])
23                d_bc0[ind_sort[k]].append(d_bc)
24                break
25            elif len(x_groups[ind_sort[k]]) == k_s:
26                d_bc2 =
27                    list(np.sqrt((np.array(x_groups[ind_sort[k]]) -
28                        x_c[ind_sort[k]]) ** 2 +
29                        (np.array(y_groups[ind_sort[k]]) -
30                            y_c[ind_sort[k]]) ** 2))
31                ind2 = d_bc2.index(max(d_bc2))
32                if (max(d_bc2) > d_bc[ind_sort[k]]):
33                    x_b = np.append(x_b,
34                        x_groups[ind_sort[k]][ind2])
35                    y_b = np.append(y_b,
36                        y_groups[ind_sort[k]][ind2])
37                    x_groups[ind_sort[k]][ind2] = x_b[i]
38                    y_groups[ind_sort[k]][ind2] = y_b[i]
39                    d_bc0[ind_sort[k]][ind2] = d_bc
40                    n_b += 1
41                    break

```



```

42     n_b = n_b0
43     x_b, y_b = x_b0, y_b0
44     if len(x_c0) > 0:
45         x_c00, y_c00 = x_c0.copy(), y_c0.copy()
46     else:
47         x_c00, y_c00 = list(np.zeros(len(x_c))), list(np.zeros(len(x_c)))
48     x_c0, y_c0 = x_c.copy(), y_c.copy()
49     for i in range(num_c):
50         x_c[i] = sum(x_groups[i]) / len(x_groups[i])
51         y_c[i] = sum(y_groups[i]) / len(y_groups[i])
52     if (sum(np.abs(np.array(x_c) - np.array(x_c0))) == 0 and
53         sum(np.abs(np.array(y_c) - np.array(y_c0))) == 0) or
54         (sum(np.abs(np.array(x_c) - np.array(x_c00))) == 0 and
55         sum(np.abs(np.array(y_c) - np.array(y_c00))) == 0):
56         same += 1
57         if same == 3:
58             makeplot(x_groups, y_groups, x_c, y_c, num_c, colors)
59             break
60     else:
61         same = 0

```

Zdrojový kód 6.6: Výměna členů skupiny centroidu nově zpracovávaným bodem, jehož vzdálenost je menší, než nejvzdálenější bod skupiny

Po přiřazení balíků do skupin může nastat situace, že body, které se již nevejdou do skupiny nejbližšího centroidu a zároveň jejich vzdálenost je větší, než jsou vzdálenosti všech členů skupiny, jsou zařazeny do skupin vzdálenějších centroidů. Tyto body mohou být od přiřazené skupiny ve výrazně větší vzdálenosti, než je průměr ve skupině, případně také opticky odděleny jinou skupinou.

Pomocí vytvořeného algoritmu je tento problém efektivně řešen v rámci procesu, kdy je posuzován vektor vzdáleností každého balíku od všech centroidů, pokud se sledovaný bod nenachází ve skupině centroidu, ke kterému má nejbližší, a zároveň vzdálenost od přiděleného centroidu je větší než 110 % vzdálenosti od nejbližšího centroidu, dochází k hledání bodu ze skupiny nejbližšího centroidu vhodného pro záměnu. K tomu je posuzována vzdálenost všech bodů nejbližšího centroidu od aktuálního centroidu. Následně je vybrán k výměně bod ze skupiny nejbližšího centroidu, který je nejbližší k aktuálnímu centroidu. Pokud je nejbližší centroid od aktuálního centroidu

vzdálen více než druhý nejbližší centroid, probíhá tato výměna se skupinou bodů druhého nejbližšího centroidu.

```
1 for i in range(num_c):
2     for j in range(len(x_groups[i])):
3         d_bc = d_bc0[i][j]
4         ind = d_bc.index(min(d_bc))
5         ind2 = d_bc.index(sorted(d_bc)[1])
6         if ind != i and min(d_bc) * 1.1 < d_bc[i]:
7             if np.sqrt((x_c[i]-x_c[ind])**2 + (y_c[i]-y_c[ind])**
8                 2) > np.sqrt((x_c[i]-x_c[ind2])**2 + (y_c[i]-
9                 y_c[ind2])**2):
10                nind = ind2
11            else:
12                nind = ind
13            min_d = []
14            for k in range(len(x_groups[nind])):
15                min_d.append(np.sqrt((x_c[i]-x_groups[nind][k])**2
16                    + (y_c[i]-y_groups[nind][k])**2))
17            inde = min_d.index(min(min_d))
18            a, b = x_groups[nind][inde].copy(),
19                y_groups[nind][inde].copy()
20            abd = d_bc0[nind][inde].copy()
21            x_groups[nind][inde], y_groups[nind][inde] =
22                x_groups[i][j], y_groups[i][j]
23            d_bc0[nind][inde] = d_bc0[i][j]
24            x_groups[i][j], y_groups[i][j] = a, b
25            d_bc0[i][j] = abd
```

Zdrojový kód 6.7: Výměna vzdálených bodů mezi skupinami pro zajištění větší skupinové homogeneity v prostoru a snížení průměrné vzdálenosti ve skupinách

V závěru jsou znovu přepočítány souřadnice všech centroidů a poté dochází k výpočtu průměrné vzdálenosti od bodů ve skupinách k příslušným centroidům a průměrné vzdálenosti od vjezdu na pole k centroidům.

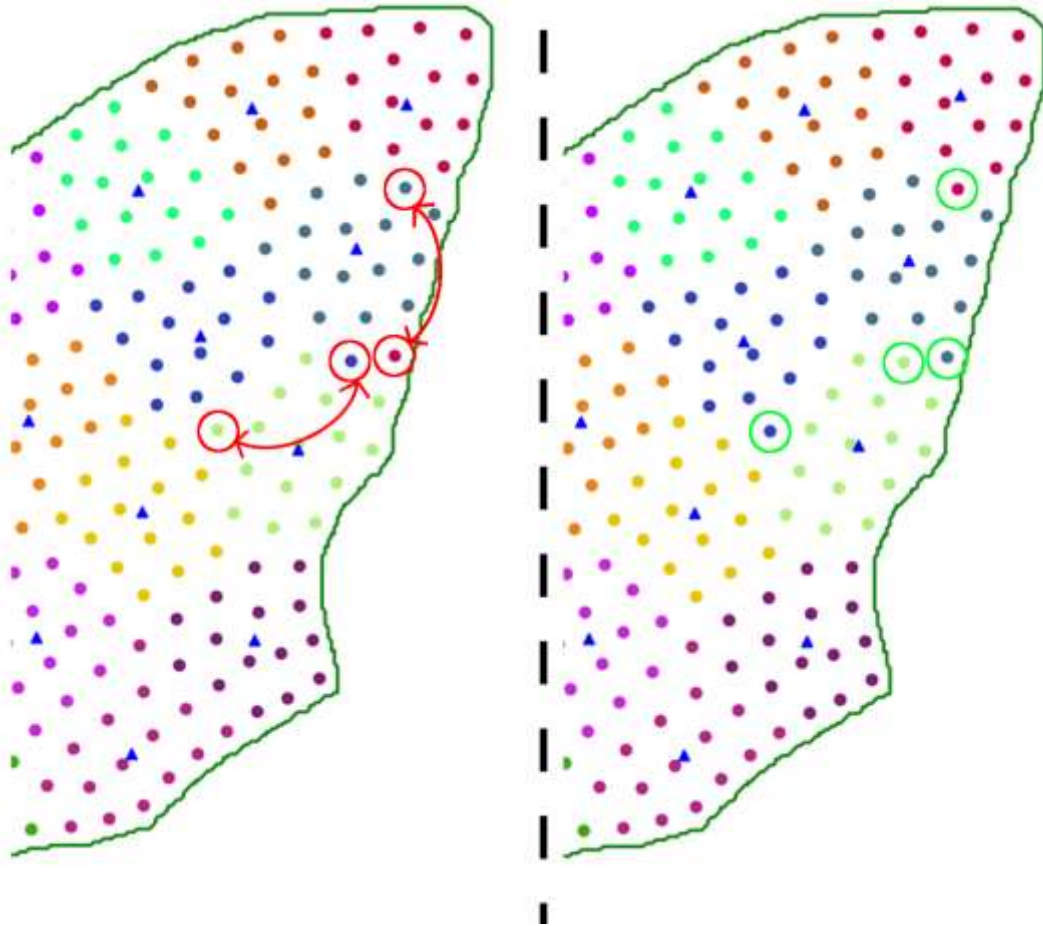
```
1 v = 0
2 v_c = 0
3 for i in range(num_c):
4     x_c[i] = sum(x_groups[i]) / len(x_groups[i])
5     y_c[i] = sum(y_groups[i]) / len(y_groups[i])
```

```

6     v_c += np.sqrt((x_c[i] - x_v) ** 2 + (y_c[i] - y_v) ** 2)
7     for j in range(len(x_groups[i])):
8         v += np.sqrt((x_groups[i][j] - x_c[i]) ** 2 +
9 (y_groups[i][j] - y_c[i]) ** 2)
10    v = v / len(x_b)
11    v_cp = v_c / num_c

```

Zdrojový kód 6.8: Výpočet průměrné vzdálenosti uvnitř skupin vůči příslušným centroidům



Obrázek 6.11: Výměna vzdálených bodů mezi skupinami pro zajištění větší skupinové homogenity v prostoru a snížení průměrné vzdálenosti ve skupinách

6.2.1 Funkce randpoints

Funkce `randpoints` byla vytvořena ve dvou variantách, při čemž první varianta využívá pro ověření polohy náhodně vygenerovaných bodů vůči pozemku funkce z knihovny `shapely`. Ve druhé variantě jsou aplikovány funkce z balíku `matplotlib`. Varianty se navzájem liší v přístupu práce s body a tím i rychlostí jejich vygenerování. V rámci první varianty jsou nejprve vstupní souřadnice pozemku převedeny příkazem `zip` do formátu `tuple` ze kterého je funkcí `Polygon` vytvořen `polygon field` představující pole. Poté jsou zjištěny maximální hodnoty souřadnic x a y . Následuje `for` cyklus generující hodnoty i z rozsahu 0 až $\max(x)$ a do něj vnořený cyklus, který proměnné j přiřazuje hodnoty z rozsahu 0 až $\max(y)$. V podcyklu dochází ke generování bodů o souřadnicích $x0$ a $y0$, kdy x je tvořeno součtem i a poloviny hodnoty náhodně vygenerované funkcí `random`, y je vytvořené stejným způsobem, pouze místo i je brána proměnná j . Poté příkazem `field.contains(point(x0, y0))` dochází k ověření, zda se právě vygenerovaný bod nachází v polygonu, pokud ano, tak je bod připojen k množině výstupních bodů. Po dokončení cyklů je příkazem `field.area` zjištěna plocha pozemku.

```
1 def randpoints1(x, y):
2     p_coords = zip(x, y)
3     field = Polygon(p_coords)
4     m, n = int(max(x)), int(max(y))
5     pf = []
6     for i in range(0, m, 1):
7         for j in range(0, n, 1):
8             x0 = i + (random.random() / 2)
9             y0 = j + (random.random() / 2)
10            if field.contains(Point(x0, y0)):
11                pf.append([x0, y0])
12        area = field.area
13    return pf, area
```

Zdrojový kód 6.9: Funkce `randpoints1`

Druhá varianta funkce `randpoints` nejprve seznam souřadnic bodů převede na pole, které je následně transponováno, to slouží jako vstup pro vytvoření polygonu pomocí funkce `Path` z knihovny `matplotlib`. Stejně jako v první variantě dochází k nalezení maximálních hodnot x a y . Následuje `for` cyklus generující hodnoty i z rozsahu 0 až $\max(x)$ a za ním cyklus, který v tomto případě není vnořený a proměnné j přiřazuje

hodnoty z rozsahu 0 až $\max(y)$. V prvním cyklu jsou vygenerovány hodnoty x_0 v druhém y_0 , stejným způsobem jako v první variantě, nevznikne však $\max(x) \cdot \max(y)$ bodů, $\max(x) + \max(y)$ bodů. Funkcí `meshgrid` jsou vytvořeny matice souřadnic pro (x) i (y) , které jsou funkcí `reshape` převedeny na vektor o délce $\max(x) \cdot \max(y)$, vzniklé vektory jsou sloučeny do matice, která je transponována do matice výstupních bodů. Plocha pozemku je vypočítána dle vzorce 6.1 Shoalace formula.

$$A = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^n (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \right| \quad (6.1)$$

```

1 def randpoints2(x, y):
2     p_coords = np.transpose(np.array([x, y]))
3     pol = mp.Path(p_coords)
4     m, n = int(max(x)), int(max(y))
5     x0, y0 = [], []
6     for i in range(0, m, 1):
7         x0.append(i + (random.random() / 2))
8     for j in range(0, n, 1):
9         y0.append(j + (random.random() / 2))
10    x0 = np.array(x0)
11    y0 = np.array(y0)
12    X, Y = np.meshgrid(x0, y0)
13    XX, YY = np.reshape(X, X.shape[0] * X.shape[1]), np.reshape(Y,
14        Y.shape[0] * Y.shape[1])
15    pf = np.transpose(np.array([XX, YY]))
16    pf = pf[pol.contains_points(pf) == True]
17    area = 0.5 * np.sum(x[:-1] * np.diff(y) - y[:-1] * np.diff(x))
18    return pf, area, toc

```

Zdrojový kód 6.10: Funkce `randpoints2`

6.2.2 Funkce `getStartCentroids1`

Funkce `getStartCentroids1` je založená na náhodném vygenerování počátečních centroidů při zadání podmínky minimální vzájemné vzdálenosti, a současně přítomnosti v polygonu představující pozemek. Nejprve získáme proměnné m a n , které jsou maximy x-ových a y-ových souřadnic bodů polygonu. Skupiny souřadnic jsou funkcí `zip` převedeny na formát `tuple`, poté je vytvořen objekt `field` představující polygon a ten je vytvořený funkcí `Polygon` z knihovny `shapely`. Následně začíná cyklus `while`, který bude trvat, dokud množina xc nebude mít počet členů rovný počtu skupin balíků. V rámci tohoto cyklu dochází k náhodnému vygenerování hodnot $c1$ a $c2$ z rozsahu 0 až m a 0 až n aplikací funkce `random.randrange`. Pokud bod o souřadnicích $c1$ a $c2$ leží v polygonu, což ověříme funkcí `field.contains` a množina xc je prázdná, jsou $c1$ a $c2$ zařazeny do množiny xc a yc . Pokud množina xc prázdná není, tak dochází k výpočtu vzdáleností bodů $[xc_j; yc_j]$, kde j vyznačuje pořadí proměnné v množině, a $[c1; c2]$. Pokud nejmenší z vypočtených vzdáleností je větší, než je podíl součtu m , n a počtu skupin, tak je $c1$ přiřazená do množiny xc a $c2$ do yc .

```
1 def getStartCentroids1(x_f, y_f, num_c):
2     m, n = int(max(x_f)), int(max(y_f))
3     p_coords = zip(x_f, y_f)
4     field = Polygon(p_coords)
5     x_c = []
6     y_c = []
7     while len(x_c) != num_c:
8         c1 = (random.randrange(m))
9         c2 = (random.randrange(n))
10        if field.contains(Point(c1, c2)) and len(x_c) > 1:
11            d = []
12            for j in range(len(y_c)):
13                d.append(np.sqrt((x_c[j] - c1) ** 2 + (y_c[j] - c2) ** 2))
14                if min(d) > (m + n) / num_c:
15                    x_c.append(c1)
16                    y_c.append(c2)
17            elif field.contains(Point(c1, c2)):
18                x_c.append(c1)
19                y_c.append(c2)
20    return x_c, y_c
```

Zdrojový kód 6.11: Funkce `getStartCentroids1`

6.2.3 Funkce getStartCentroids2

Pro získání inicializačních centroidů s pravidelnějším rozložením v rámci pozemků tato funkce využívá `KMeans` algoritmus z knihovny `sklearn`, který vygeneruje souřadnice požadovaného počtu centroidů skupin bodů bez omezení počtu bodů na skupinu. Výsledné pole bodů je transponováno a množinám x_c a y_c je přiřazena první a druhá množina z transponovaného pole.

```
1 def getStartCentroids2(pf2, num_c):
2     kmeans_c = KMeans(n_clusters=num_c).fit(pf2)
3     bal_cent = np.transpose(kmeans_c.cluster_centers_)
4     x_c = bal_cent[0]
5     y_c = bal_cent[1]
6     return x_c, y_c
```

Zdrojový kód 6.12: Funkce `getStartCentroids2`

6.3 Výpočet celkové časové náročnosti pracovních cyklů

Výpočty celkové spotřeby času potřebnou na naložení, odvoz píce, nebo slámy z pozemku a jeho složení budou provedeny pomocí vzorce 6.2. Výpočet vychází z časové spotřeby cyklů od 1 do $n - 1$, kde n je počet celých cyklů, násobené počtem odvozních souprav a nakladačů pracujících na přepravě a manipulaci balíků píce, nebo slámy. Přičtené jsou odjezdové cykly, následně je připočten poslední úplný cyklus násobený počtem odvozních souprav, který odváží zbývající skupiny balíků a nakladačů, následně je přičten počet odvozních souprav odvážející zbylé balíky násobený dobou nakládky jedné soupravy a počtem nakladačů, dále je přičtena doba potřebná pro jízdu na zpracovávaný pozemek násobený dvojnásobkem počtu nakladačů (cesta tam i zpět) a počtem odvozních souprav, a v poslední řadě je odečten rozdíl mezi dobou nakládky jedné soupravy a doby nakládky poslední skupiny balíků násobené počtem nakladačů:

$$T_{mot} = T_x(S_o + N_a) + T_a + T_y(S_{oz} + N_a) + S_{oz} \cdot T_n \cdot N_a + \quad (6.2) \\ + T_c(2N_a + S_o) - (T_n - T_{np}) \cdot N_a,$$

kde:

T_{mot} Celková spotřeba času [s]

T_x Doba trvání cyklů od 1 do $n - 1$, kde n je počet celých cyklů [s]

S_o	Počet odvozních souprav
N_a	Počet nakladačů
T_a	Doba trvání odjezdových cyklů [s]
T_y	Doba trvání posledního celého cyklu [s]
S_{oz}	Počet souprav odvázejících zbylé skupiny balíků
T_{np}	Doba nakládky poslední skupiny balíků [s]
T_n	Doba nakládky jedné soupravy [s]
T_c	Doba jízdy na pozemek [s]

Cyklus představuje dobu mezi okamžikem odpovídající začátku nakládky první soupravy a končící jejím návratem z vykládky. T_x je doba trvání cyklů od 1 do $n - 1$, kde n je počet celých cyklů a vypočteme ze vzorce 6.3. Výpočet vychází z rozdílu mezi celkovým počtem skupin balíků a zbytkem skupin balíků po vydělení počtem souprav, děleným počtem souprav, následně je odečtena jednotka, a to celé je násobeno součinem počtu odvozních souprav dobou nakládky jedné soupravy k němuž jsou přičteny ztrátové časy:

$$T_x = \left(\left(\frac{p_c - p_{cz}}{S_o} \right) - 1 \right) \cdot (S_o \cdot T_n + T_r), \quad (6.3)$$

kde:

T_x	Doba trvání cyklů od 1 do $n - 1$, kde n je počet celých cyklů [s]
p_c	Celkový počet skupin balíků
p_{cz}	Zbytek skupin balíků po vydělení počtem souprav
S_o	Počet odvozních souprav
T_n	Doba nakládky jedné soupravy [s]
T_r	Rozdíl doby nakládání počtu souprav $S_o - 1$ a otáčky první odvozní soupravy (prostoje) [s]

Dobu nakládky jedné soupravy vypočteme ze vztahu 6.4. Vztah vychází z výpočtu času spotřebovaného na pojezd z centroidu k průměrně vzdálenému balíku a zpět, k tomu je přičten čas potřebný na zdvih balíku a uložení na odvozní soupravu, celé je to vyděleno počtem nakladačů a celé je to následně násobeno rozdílem mezi počtem

balíků ve skupině a počtem balík, které ve skupině zbyly, k tomu celému je připočten čas potřebný na pojezd a naložení zbylých balíků ze skupiny. Vzhledem k tomu, že počet zbývajících balíků musí být menší, než je počet nakladačů, může být každý zbývajících balík naložen jedním z nakladačů, tedy dochází k naložení zbývajících balíků současně, tj.:

$$T_n = (b - b_z) \cdot \frac{\frac{2s_c}{v_2} + u_1 + z}{N_a} + \left(\frac{2s_c}{v_2} + u_1 + z \right), \quad (6.4)$$

kde:

- T_n Doba nakládky jedné soupravy [s]
- b Počet balíků ve skupině
- b_z Zbytek balíků ve skupině po vydělení počtem nakladačů
- s_c Průměrná vzdálenost balíků k příslušným centroidům ve skupinách
- v_2 Průměrná pojezdová rychlost nakladače pohybujícího se po poli [$m \cdot s^{-1}$]
- u_1 Doba naložení balíků na odvozní soupravu [s]
- z Doba zdvihu balíku [s]
- N_a Počet nakladačů

Dobu odjezdových cyklů vypočteme ze vztahu 6.5. Odjezdové cykly vypočteme jako sumu od jedné do počtu odvozních souprav násobené dobou nakládání jedné soupravy, následně je přičten čas potřebný na pojezd průměrné vzdálenosti od centroidů k místu skládky a dobu složení nákladu.

$$T_a = \sum_{n=1}^{S_o} n \cdot T_n + \frac{s}{v_1} + T_v, \quad (6.5)$$

kde:

- T_a Odjezdové cykly [s]
- v_1 Průměrná rychlost pojezdu soupravy z pole na místo vykládky [$m \cdot s^{-1}$]
- S_o Počet odvozních souprav
- T_n Doba nakládky jedné soupravy [s]
- T_v Doba vykládky jedné soupravy [s]

Doba jízdy na pozemek vychází ze vztahu 6.6. Výpočet je založený na průměrné vzdálenosti centroidů od místa skládky, která je dělena průměrnou rychlostí pojezdu soupravy:

$$T_c = \frac{s}{v_1}, \quad (6.6)$$

kde:

- T_c Doba jízdy na pozemek [s]
- v_1 Průměrná rychlost pojezdu soupravy z pole na místo vykládky [$m \cdot s^{-1}$]
- s Průměrná vzdálenost centroidů od místa vykládky [m]

Prostoje vypočteme ze vztahu 6.7. Prostoje definujeme jako rozdíl doba trvání jízdy odvozní soupravy z pozemku na místo skládky a zpět, včetně času potřebného na vyložení nákladu a doby nakládání násobené počtem odvozních souprav zmenšené o jedna:

$$T_r = T_o - (S_o - 1) \cdot T_n, \quad (6.7)$$

kde:

- T_r Rozdíl doby nakládání a otáček odvozních souprav (prostoje) [s]
- T_o Doba trvání jízdy odvozní soupravy z pozemku na místo skládky a zpět, včetně času potřebného na vyložení nákladu [s]
- S_o Počet odvozních souprav
- T_n Doba nakládky jedné soupravy [s]

Doba trvání jízdy odvozní soupravy z pozemku na místo skládky a zpět, včetně času potřebného na vyložení nákladu definujeme pomocí vztahu 6.8. Výpočet vychází z dvojnásobku dráhy, která je určena průměrnou vzdáleností centroidu od místa skládky dělená pojezdovou rychlostí soupravy a k tomu je přičtena doba potřebná ke složení balíků, tj.

$$T_o = \frac{2s}{v_1} + T_v, \quad (6.8)$$

kde:

- T_o Doba trvání jízdy odvozní soupravy z pozemku na místo skládky a zpět, včetně času potřebného na vyložení nákladu [s]
- s Průměrná vzdálenost centroidů od místa vykládky [m]

v_1 Průměrná rychlost pojezdu soupravy z pole na místo vykládky [$m \cdot s^{-1}$]

T_v Doba vykládky jedné soupravy [s]

Doba vykládky odvozená ze vztahu 6.9. Vypočteme jako počet balíků na odvozní soupravě, násobený dobou potřebnou na zdvih, uložení a časem potřebným pro ujetí trasy 5 metrů.

$$T_v = b \cdot \left(u_1 + z + \frac{5}{v_2} \right), \quad (6.9)$$

kde:

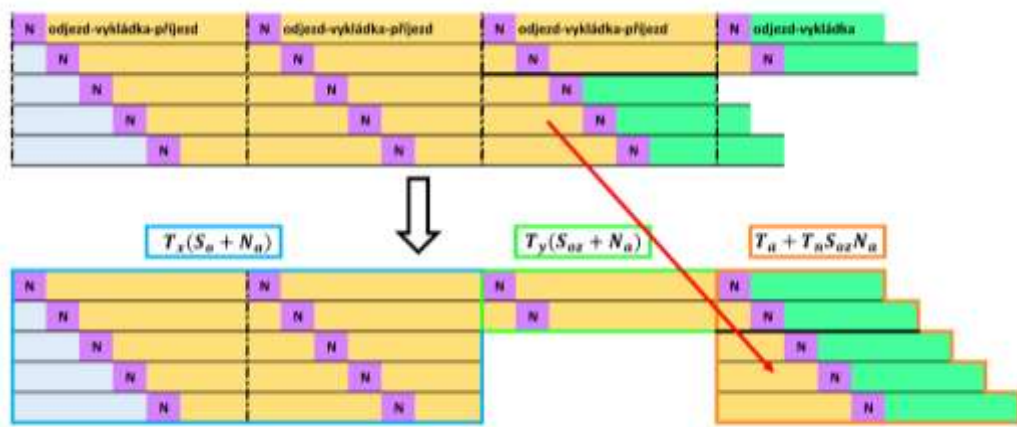
T_v Doba vykládky jedné soupravy [s]

b Počet balíků

u_1 Doba potřebná pro uložení balíku [s]

z Doba zdvihu balíku [s]

v_2 Průměrná rychlost pohybu nakladače po poli [$m \cdot s^{-1}$]



Obrázek 6.12: Grafické znázornění pracovních cyklů a principu výpočtu

```

1  s_vv = 1800 #průměrná vzdálenost vjezdu od místa vykládky [m]
2  v_1 = 10    #průměrná rychlost pojezdu soupravy z pole na místo vy-
3              kládky a zpět [m/s]
4  v_2 = 1.95 #průměrná rychlost pohybu nakladače po poli [m/s]
5  b = 10     #kapacita soupravy (počet balíků v 1 skupině)
6  u_1 = 7.28 #doba, kterou trvá naložení balíku na soupravu [s]
7  #u_2 = 7   #doba, kterou trvá naložení balíku do hnízda [s]
8  z = 4.68  #doba zdvihu balíku [s]
9  na = 10   #max počet nakladačů
10 so = 10   #max počet souprav
11 path = r'C:\Users\Filip\Pictures\Pole\Pole_1_vchod.PNG'
12 h_f = 0.26 #množství hmoty na metr čtvereční [kg/m2]
13 r_svd = [1.2, 0.7, 2.1] #rozměry balíku [š×v×d]
14 r_b = 160  #slisovatelnost hmoty (hustota) [kg/m3]
15 s_c, s_pc, n_b, p_c = getDistances(path, b, h_f, r_svd, r_b)
16     #s_c - průměrná vzdálenost z průměrné vzdálenosti centroidu k ba-
17     líku ve skupině [m], s_pc - průměrná vzdálenost centroidů od
18     vjezdu na pole, n_b - celkový počet balíků, p_c - počet centroidů
19 b_p = n_b % (p_c - 1) #počet balíků v poslední skupině
20 s = s_vv + s_pc #průměrná vzdálenost centroidů od místa vykládky [m]
21 t_v = 2 * b * (u_1 / 2 * z) + (5 / v_2) * b #průměrná doba vy-
22     kládky balíků [s] 2× manipulace s každým balíkem + průměrná rych-
23     lost nakladače * vzdálenost * počet balíků
24
25 m_l = []
26 n_l = []
27 t_l = []
28 t_motl = []
29 t_zfn = []
30 t_zfs = []
31 t_jennakladac = []
32 nakladka = []
33 if so > p_c:
34     so = p_c
35
36 for i in range(1, na + 1):
37     for j in range(1, so + 1):
38         p_cz = p_c % j #zbytek skupin po vydělení počtem souprav
39         b_z = b % i    #zbytek balíků ve skupině po vydělení po-
40         čtem traktorů

```

```

41     b_zp = b_p % i      #zbytek balíků v poslední skupině po vydě-
42         lení počtem traktorů
43     t_o = 2 * s / v_1 + t_v      #doba otočky s vykládkou
44     t_n = (b - b_z) * (2 * s_c / v_2 + u_1 + z) / (i) + (2 * s_c
45         / v_2 + u_1 + z)      #doba nakládky
46     t_np = (b_p - b_zp) * (2 * s_c / v_2 + u_1 + z) / (i) + (2 *
47         s_c / v_2 + u_1 + z)  #doba nakládky poslední skupiny ba-
48         líků
49     t_r = t_o - (j - 1) * t_n      #rozdíl doby nakládky
50         a otočení ("prostoje")
51     t_zs = 0
52     if t_r < 0:
53         t_zs = abs(t_r) * ((p_c - p_cz) / j) * j      #celkový
54             čas prostoje souprav
55         t_r = 0
56     t_zn = t_r * ((p_c - p_cz) / j) * i #celkový čas prostoje
57         nakladačů
58     #print(((p_c - p_cz) / j) * (i - b_z) * (2 * s_c / v_2 + u_1
59         + z))
60     T_x = ((p_c - p_cz) / j - 1) * (j * t_n + t_r)      #doba
61         trvání cyklů 1 až n-1 --> (počet cyklů - 1) * (počet sou-
62         prav * doba_nakládky + prostoje) cyklus zahrnuje všechny
63         soupravy
64     T_a = 0
65     #for n in range(1, j + 1):
66     for n in range(1, j + 1):
67         T_a += n * t_n + s / v_1 + t_v      #suma délek posled-
68             ních cyklů jednotlivých souprav (cyklus: pořadí sou-
69             pravy * doba_nakládky + cesta + vykládka)
70     T_y = j * t_n + t_r      #doba trvání posled-
71         ního cyklu --> (počet souprav * doba_nakládky + prostoje)
72         (z hlediska motohodin se počítá pouze pro soupravy, které
73         se vrací pro zbylé skupiny balíků)
74     T_nak = s / v_1      #doba cesty nakla-
75         dačů z pole do místa vykládky
76     T_cesta = s / v_1
77     T_nak_odjezd = p_cz * t_n * i      #doba nakládky po-
78         sledních zbylých souprav (p_cz souprav)
79     #T_mot = T_x * (i + j) + T_a + j * t_n * i + T_y * (p_cz +
80         i) + T_nak * i + T_cesta * (i + j) + (t_np - t_n) * (i + 1)

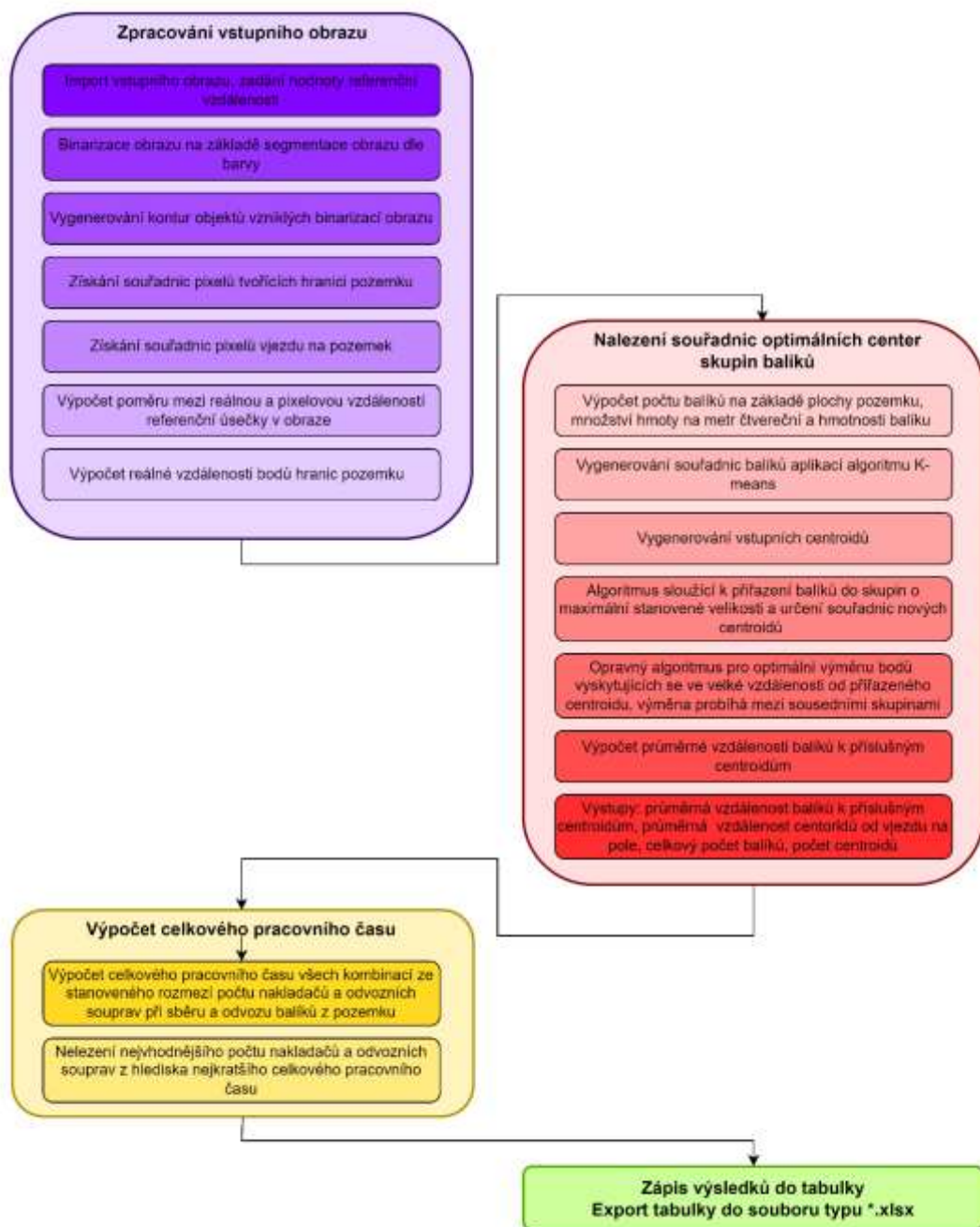
```

```

81     T_mot = T_x * (i + j) + T_a + T_y * (p_cz + i) + p_cz * t_n
82           * i + T_nak * i + T_cesta * (i + j) - (t_n - t_np) * (i)
83     T_jennakladac = T_x * i + T_y * i + p_cz * t_n * i
84     T_max = T_x + T_y + p_cz * t_n + s / v_l + t_v
85     t_motl.append(T_mot)
86     t_l.append(T_max)
87     m_l.append(j)
88     n_l.append(i)
89     t_zfn.append(t_zn)
90     t_zfs.append(t_zs)
91     t_jennakladac.append(T_jennakladac)
92
93     min_t_mot, por = min(t_motl), t_motl.index(min(t_motl))
94     min_t, por_t = min(t_l), t_l.index(min(t_l))
95
96     print(f'min počet motohodin je: {min_t_mot/3600}, při počtu nakla-
97     dačů: {n_l[por]} a souprav: {m_l[por]}, celkový čas bude:
98     {t_l[por]/3600}')
99     print(f'min doba celého odvozu je: {min_t/3600}, při počtu nakla-
100    dačů: {n_l[por_t]} a souprav: {m_l[por_t]}, počet motohodin:
101    {t_motl[por_t]/3600}')
102     print(f'počet hodin prostojů nakladačů: {t_zfn[por]/3600}')
103     print(f'počet hodin prostojů nakladačů při nejkratším celkovém čase:
104    {t_zfn[por_t]/3600}')
105     print(f'počet hodin prostojů souprav: {t_zfs[por]/3600}')
106     print(f'počet hodin prostojů souprav při nejkratším celkovém čase:
107    {t_zfs[por_t]/3600}')

```

Zdrojový kód 6.13: Výpočet celkové časové náročnosti pracovních cyklů



Obrázek 6.13: Schématický popis funkce algoritmu

6.4 Výsledky – stanovení vstupních hodnot na konkrétním pozemku

Měření vstupních hodnot pro výpočet pojezdové rychlosti nakladače, zdvihu a uložení balíků proběhlo dne 24. 7. 2020 na pozemku o výměře 9,24 ha zobrazeném na obrázku 6.1, v těsné blízkosti policejní střelnice Slabec. Jedná se o pozemek trvalého travního porostu se sklonem 0–3°. Půda je málo produkční. Počasí bylo slunečné, bez srážek s maximální teplotou 27 °C.

Práce byla zahájena v 9:48 a ukončená 13:17. Práce byla přerušena pauzou na oběd od 10:35 až do 12:05. Celková doba práce byla 118 minut. Na pracovišti byl přítomný jeden nakladač a dvě odvozní soupravy s kapacitou 10 balíků. Balíky byly odváženy do skladovacích prostor zemědělského podniku v Lišově, který je vzdálený 1 800 m. Počet balíků na pozemku byl 94.

Pracovní plocha byla nafocena dronem (viz obrázek 6.14) a ke každému balíku bylo přiděleno číslo. Pracovní časy zdvihu, uložení balíků a pojezdů byly rozepsány ve 412 úkonech a jsou přílohou této práce. Trasa ujetá nakladačem byla v čase 9:48 až 10:35 3,7 km a nebyl měřen příjezd k pozemku. Trasa nakladače v časovém pásmu 12:05 až 13:17 byla 6,5 km a nebyl měřen příjezd ke zkušební ploše ani odjezd do prostoru pro odstavení stroje. Maximální rychlost pohybu po pozemku byla $15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Celkový čas pojezdu byl 5 237 s a průměrná rychlost pojezdu očištěná od nepojezdových operací byla vypočtena $7,0 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Celkový čas zdvihů byl u 111 položek 520 s a průměrná doba zdvihu 1 balíku byla vypočtena 4,7 s. Celková doba uložení balíků byla 808 s u 111 položek a průměrná doba uložení jednoho balíku byla vypočtena 7,27s. Nepojezdový čas ostatní byl 555 s a souvisel s vyprošťováním zapadlé odvozní soupravy na pozemku a udílení pokynů.



Obrázek 6.14: Mapa pokusného pozemku s číselným označením balíků



Obrázek 6.15: Mapa tras nakladače z GPS

6.5 Výsledky – simulace

Simulace má nastaveny stejné vstupní parametry rychlostí pojezdu nakladače, odvozních souprav i vzdálenosti od místa vykládky jako práce, která byla měřena. Vstupní fotografie je na obrázku 6.1. Průměrná rychlost odvozních souprav $7,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, průměrná rychlost nakladače pohybujícího se po pozemku $1,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, maximální počet nakladačů 10, maximální počet odvozních souprav 10, doba, kterou trvá naložení balíku na soupravu $7,28 \text{ s}$, doba zdvihu $4,68 \text{ s}$, množství hmoty na metr čtvereční $0,26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, rozměry balíků $1,2 \times 0,7 \times 2,1 \text{ m}$, slisovatelnost hmoty $160 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, vzdálenost vjezdu od místa vykládky $1\,800 \text{ m}$.

Tabulka 6.1: Výsledky pozemek 1, vzdálenost $1\,800 \text{ m}$ od místa skládky – nejhodnější varianty (simulace 1)

	Varianta – nejnižší počet spotřebovaných hodin	Varianta – minimální doba celého procesu
Celková spotřeba času [h]	5,493	6,213
Doba realizace [h]	0,699	0,415
Počet souprav	5	9
Počet nakladačů	3	6
Prostoje nakladačů [h]	0,000	0,000
Prostoje souprav [h]	0,079	0,000

Tabulka 6.2: Výsledky pozemek 1, vzdálenost 1 800 m od místa skládky (simulace 1)

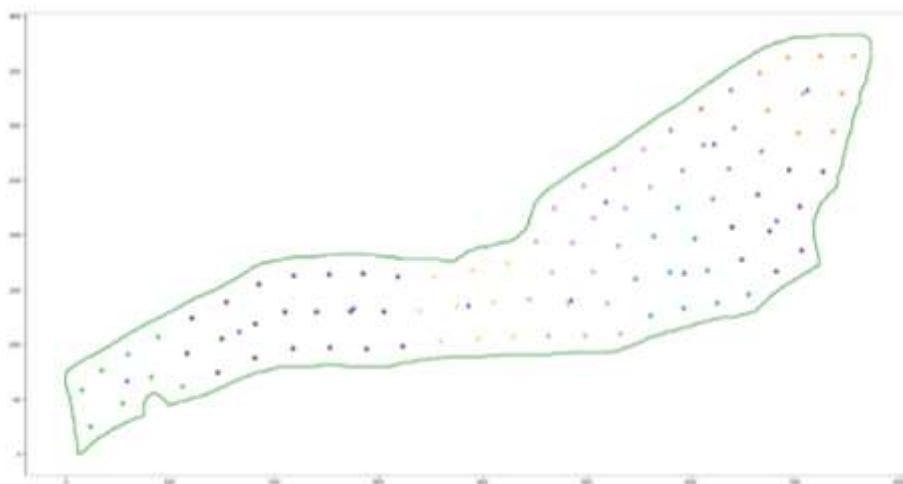
Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
1	1	7,591	3,763
2	1	5,866	1,881
3	1	6,515	1,565
4	1	7,830	1,565
5	1	8,989	1,565
6	1	9,991	1,565
7	1	10,837	1,565
8	1	11,526	1,565
9	1	12,059	1,565
10	1	12,435	1,565
1	2	9,399	6,102
2	2	6,433	3,051
3	2	5,554	2,001
4	2	5,734	1,707
5	2	6,466	1,707
6	2	7,112	1,707
7	2	7,673	1,707
8	2	8,149	1,707
9	2	8,540	1,707
10	2	8,845	1,707
1	3	11,477	8,300
2	3	7,384	4,150
3	3	6,008	2,661
4	3	5,520	2,001
5	3	5,493	1,707
6	3	5,997	1,707
7	3	6,444	1,707
8	3	6,835	1,707
9	3	7,168	1,707
10	3	7,445	1,707
1	4	13,726	10,498
2	4	8,520	5,249
3	4	6,676	3,320
4	4	5,925	2,441
5	4	5,755	2,100
6	4	5,601	1,733
7	4	5,941	1,707
8	4	6,289	1,707
9	4	6,594	1,707
10	4	6,856	1,707
1	5	16,501	13,122

Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
2	5	9,983	6,561
3	5	7,657	4,150
4	5	6,687	3,051
5	5	6,431	2,624
6	5	6,185	2,166
7	5	6,519	2,134
8	5	6,866	2,134
9	5	7,171	2,134
10	5	7,434	2,134
1	6	18,366	14,893
2	6	10,948	7,447
3	6	8,197	4,639
4	6	6,964	3,320
5	6	6,736	2,979
6	6	6,072	2,172
7	6	6,072	2,001
8	6	6,101	1,831
9	6	6,213	1,707
10	6	6,461	1,707
1	7	21,014	17,375
2	7	12,355	8,688
3	7	9,136	5,412
4	7	7,683	3,873
5	7	7,398	3,475
6	7	6,600	2,534
7	7	6,571	2,335
8	7	6,571	2,136
9	7	6,662	1,992
10	7	6,911	1,992
1	8	23,661	19,857
2	8	13,761	9,929
3	8	10,074	6,185
4	8	8,401	4,427
5	8	8,060	3,971
6	8	7,127	2,896
7	8	7,070	2,669
8	8	7,041	2,441
9	8	7,112	2,276
10	8	7,360	2,276
1	9	26,308	22,340
2	9	15,167	11,170
3	9	11,012	6,958
4	9	9,120	4,980

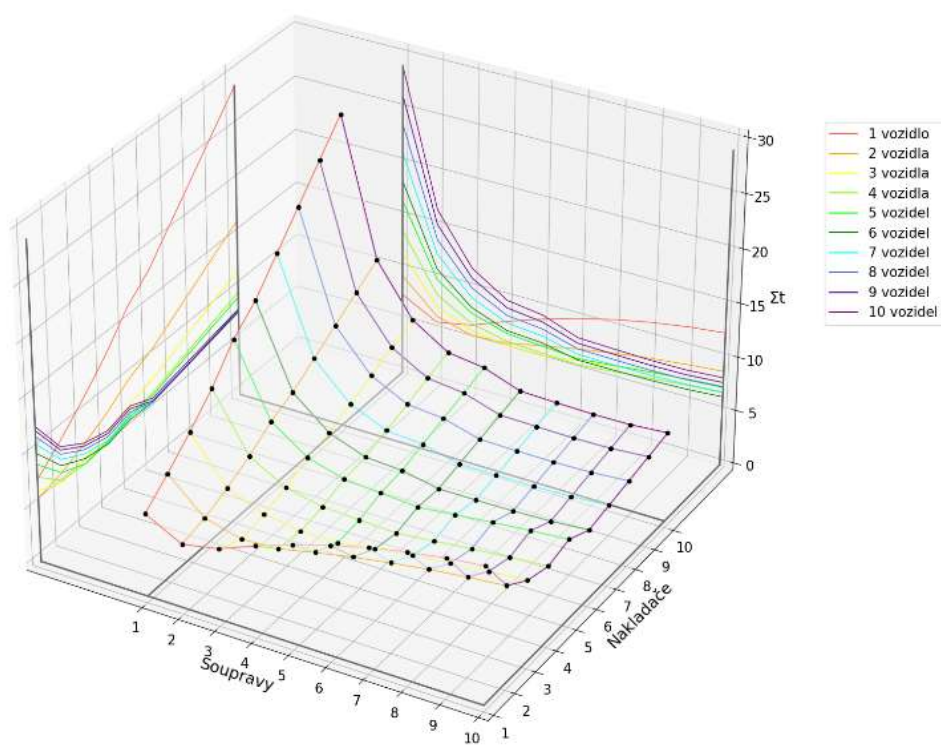
Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
5	9	8,721	4,468
6	9	7,654	3,258
7	9	7,569	3,002
8	9	7,512	2,746
9	9	7,562	2,561
10	9	7,810	2,561
1	10	28,956	24,822
2	10	16,573	12,411
3	10	11,950	7,731
4	10	9,838	5,533
5	10	9,383	4,964
6	10	8,181	3,620
7	10	8,067	3,336
8	10	7,982	3,051
9	10	8,012	2,845
10	10	8,260	2,845



Obrázek 6.16: Mapa odhadovaného rozložení balíků, pozemek 1



Obrázek 6.17: Mapa odhadovaného rozložení skupin, pozemek 1



Obrázek 6.18: Graf závislosti počtu odvozených souprav, nakladačů a spotřeby času – simulace 1 (pozemek 1, vzdálenost 1 800 m místa skládky)

Následující simulace se dotýká stejného pozemku, i stejného nastavení, změněno je pouze místo skládky balíků do odloučeného pracoviště ve Slovenicích. Vzdálenost místa skládky od vjezdu na pozemek byl měřený na portálu Mapy.cz. Průměrná rychlost odvozních souprav $7,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, průměrná rychlost nakladače pohybujícího se po pozemku $1,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, maximální počet nakladačů 10, maximální počet odvozních souprav 10, doba, kterou trvá naložení balíku na soupravu 7,28 s, doba zdvihu 4,68 s, množství hmoty na metr čtvereční $0,26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, rozměry balíků $1,2 \times 0,7 \times 2,1 \text{ m}$, sliso-vatelnost hmoty $160 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, vzdálenost vjezdu od místa vykládky 8 600 m.

Tabulka 6.3: Výsledky pozemek 1, vzdálenost 8 600 m od místa skládky – nejhodnější varianty (simulace 2)

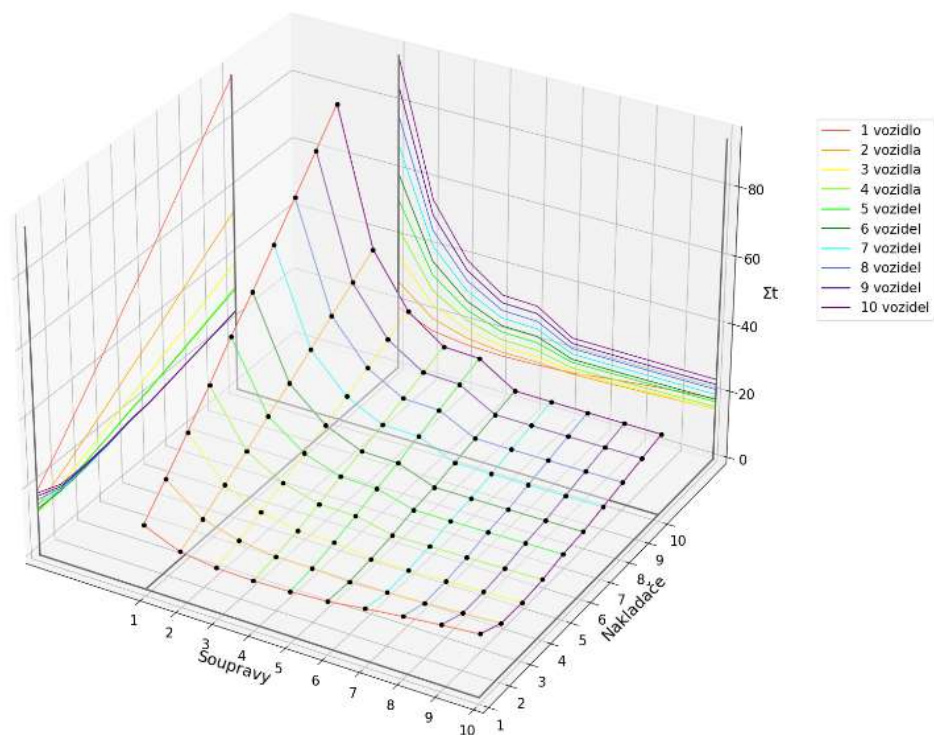
	Varianta – nejnížší počet spotřebovaných hodin	Varianta – minimální doba celého procesu
Celková spotřeba času [h]	12,840	18,108
Doba realizace [h]	2,543	1,187
Počet souprav	4	10
Počet nakladačů	1	6
Prostoje nakladačů [h]	0,581	3,022
Prostoje souprav [h]	0,000	0,000

Tabulka 6.4: Výsledky pozemek 1, vzdálenost 8 600 m od místa skládky (simulace 2)

Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
1	1	18,914	9,154
2	1	14,493	4,577
3	1	13,130	2,902
4	1	12,840	2,143
5	1	13,152	1,831
6	1	13,751	1,562
7	1	15,135	1,562
8	1	16,363	1,562
9	1	17,435	1,562
10	1	18,350	1,562
1	2	26,657	16,888
2	2	18,298	8,444
3	2	15,261	5,237
4	2	13,998	3,718
5	2	13,998	3,378

Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
6	2	13,417	2,370
7	2	13,758	2,200
8	2	14,183	2,030
9	2	14,695	1,859
10	2	15,306	1,704
1	3	34,670	24,481
2	3	22,486	12,240
3	3	17,874	7,515
4	3	15,767	5,237
5	3	15,653	4,896
6	3	14,171	3,130
7	3	14,341	2,959
8	3	14,568	2,789
9	3	14,852	2,618
10	3	15,193	2,448
1	4	42,853	32,073
2	4	26,859	16,036
3	4	20,700	9,792
4	4	17,791	6,755
5	4	17,621	6,415
6	4	15,308	3,889
7	4	15,393	3,718
8	4	15,521	3,548
9	4	15,691	3,378
10	4	15,904	3,207
1	5	51,562	40,091
2	5	31,559	20,046
3	5	23,839	12,24
4	5	20,170	8,444
5	5	19,915	8,018
6	5	16,971	4,861
7	5	17,013	4,648
8	5	17,098	4,435
9	5	17,226	4,222
10	5	17,397	4,009
1	6	59,362	47,257
2	6	35,761	23,629
3	6	26,537	14,348
4	6	22,067	9,792
5	6	21,84	9,451
6	6	17,938	5,407
7	6	17,938	5,237
8	6	17,966	5,067

Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
9	6	18,023	4,896
10	6	18,108	4,726
1	7	67,943	55,134
2	7	40,404	27,567
3	7	29,633	16,739
4	7	24,404	11,424
5	7	24,120	11,027
6	7	19,543	6,309
7	7	19,515	6,110
8	7	19,515	5,911
9	7	19,543	5,712
10	7	19,600	5,513
1	8	76,523	63,010
2	8	45,047	31,505
3	8	32,729	19,130
4	8	26,740	13,056
5	8	26,400	12,602
6	8	21,149	7,210
7	8	21,093	6,983
8	8	21,064	6,755
9	8	21,064	6,528
10	8	21,093	6,301
1	9	85,104	70,886
2	9	49,690	35,443
3	9	35,825	21,521
4	9	29,077	14,688
5	9	28,680	14,177
6	9	22,755	8,111
7	9	22,670	7,855
8	9	22,613	7,600
9	9	22,585	7,344
10	9	22,585	7,089
1	10	93,685	78,762
2	10	54,333	39,381
3	10	38,921	23,913
4	10	31,414	16,320
5	10	30,959	15,752
6	10	24,361	9,012
7	10	24,248	8,728
8	10	24,162	8,444
9	10	24,106	8,160
10	10	24,077	7,876



Obrázek 6.19: Graf závislosti odvozních souprav, nakladačů a spotřeby času – simulace 2 (pozemek 1, vzdálenost 8 600 m od místa skládky)

Následující simulace se dotýká pozemku, který se nachází v těsné blízkosti skladovacích prostor firmy Kooproduct a.s. Lišov. Vzdálenost místa skládky od vjezdu na pozemek je 400 m a byl měřený na portálu Mapy.cz. Průměrná rychlost odvozních souprav $7,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, průměrná rychlost nakladače pohybujícího se po pozemku $1,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, maximální počet nakladačů 10, maximální počet odvozních souprav 10, doba, kterou trvá naložení balíku na soupravu 7,28 s, doba zdvihu 4,68 s, množství hmoty na metr čtvereční $0,26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, rozměry balíků $1,2 \times 0,7 \times 2,1 \text{ m}$, slisovatelnost hmoty $160 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.



Obrázek 6.20: Vstupní snímek pro simulaci – pozemek 2

Tabulka 6.5: Výsledky pozemek 2, vzdálenost 400 m od místa skládky – nevhodnější varianty (simulace 3)

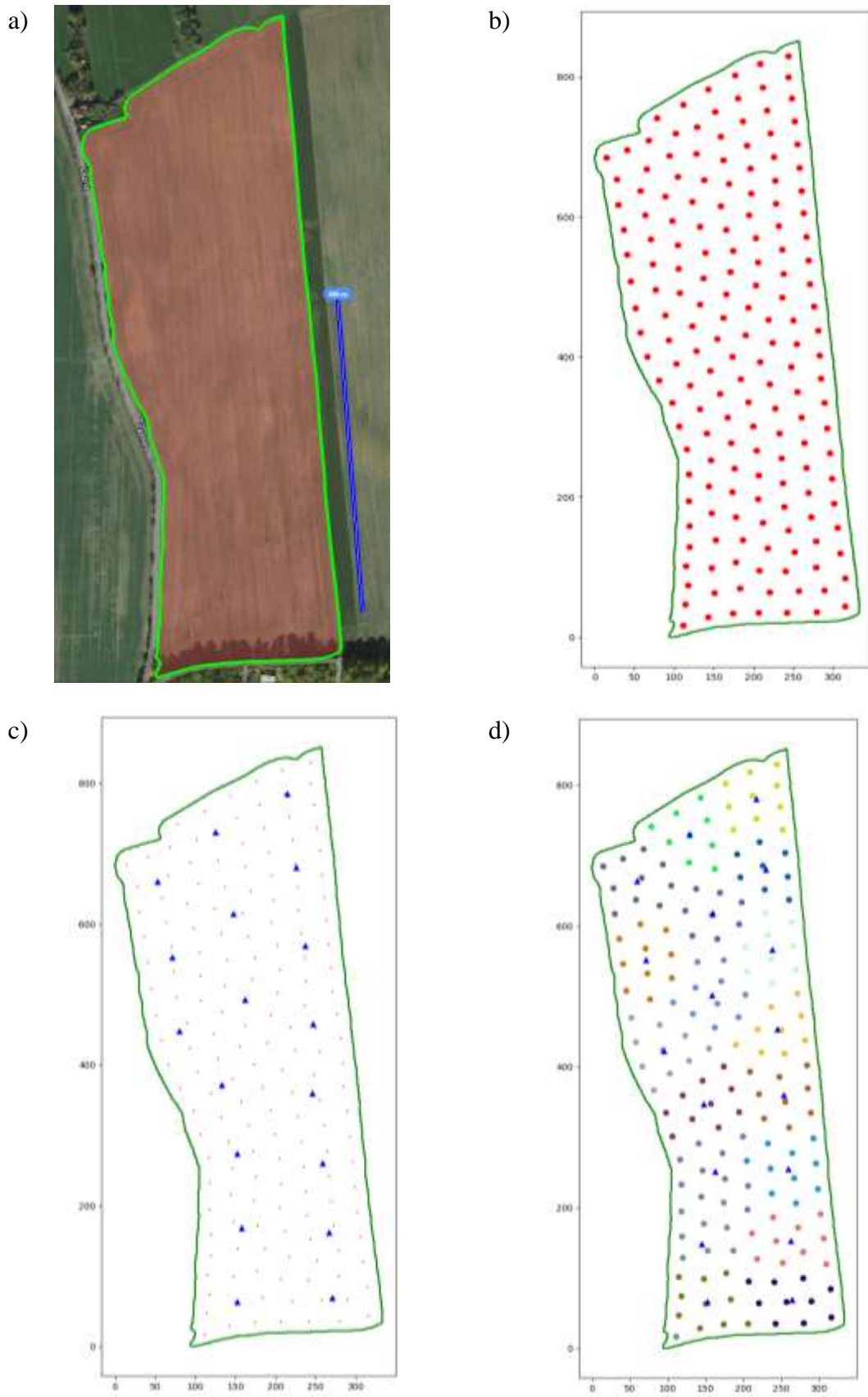
	Varianta – nejnižší počet spotřebovaných hodin	Varianta – minimální doba celého procesu
Celková spotřeba času [h]	6,221	8,967
Doba realizace [h]	0,589	0,588
Počet souprav	5	6
Počet nakladačů	6	10
Prostoje nakladačů [h]	0,000	0,000
Prostoje souprav [h]	0,135	1,000

Tabulka 6.6: Výsledky pozemek 2, vzdálenost 400 m od místa skládky (simulace 3)

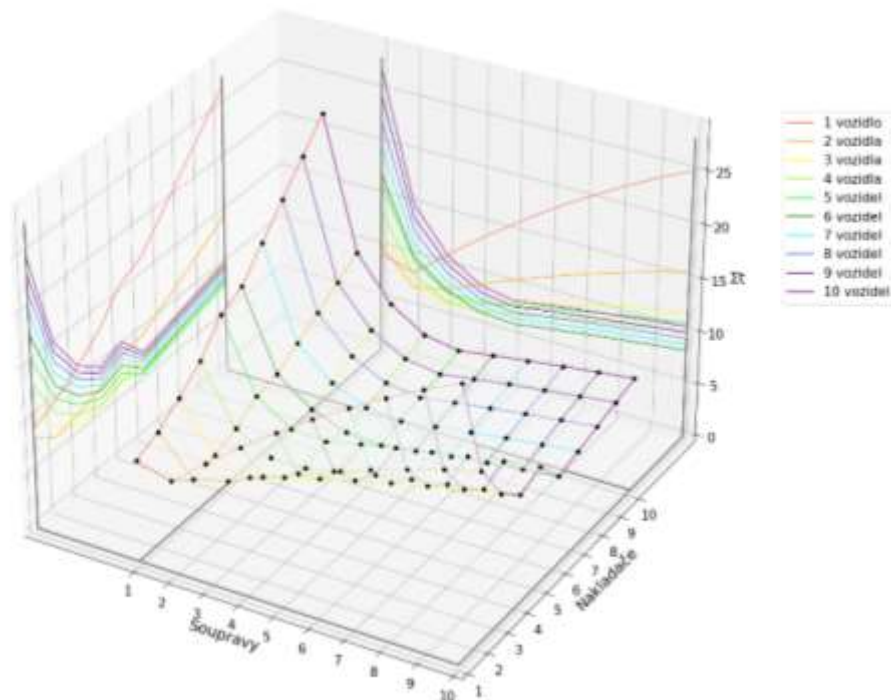
Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
1	1	9,414	4,739
2	1	8,501	2,837
3	1	11,128	2,837
4	1	13,598	2,837
5	1	15,910	2,837
6	1	18,065	2,837
7	1	20,062	2,837
8	1	21,901	2,837
9	1	23,583	2,837
10	1	25,107	2,837
1	2	10,335	6,898
2	2	6,972	3,449
3	2	7,783	3,095
4	2	9,179	3,095
5	2	10,488	3,095
6	2	11,711	3,095
7	2	12,848	3,095
8	2	13,900	3,095
9	2	14,865	3,095
10	2	15,744	3,095
1	3	11,800	8,800
2	3	7,458	4,400
3	3	6,402	3,095
4	3	7,367	3,095
5	3	8,275	3,095
6	3	9,126	3,095

Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
7	3	9,919	3,095
8	3	10,655	3,095
9	3	11,334	3,095
10	3	11,955	3,095
1	4	13,524	10,702
2	4	8,216	5,351
3	4	6,518	3,567
4	4	6,501	3,095
5	4	7,208	3,095
6	4	7,873	3,095
7	4	8,494	3,095
8	4	9,073	3,095
9	4	9,608	3,095
10	4	10,101	3,095
1	5	16,236	13,377
2	5	9,590	6,689
3	5	7,447	4,459
4	5	7,311	3,869
5	5	8,019	3,869
6	5	8,683	3,869
7	5	9,305	3,869
8	5	9,883	3,869
9	5	10,419	3,869
10	5	10,911	3,869
1	6	17,228	14,505
2	6	10,005	7,253
3	6	7,644	4,835
4	6	6,463	3,567
5	6	6,221	3,095
6	6	6,700	3,095
7	6	7,149	3,095
8	6	7,570	3,095
9	6	7,962	3,095
10	6	8,326	3,095
1	7	19,697	16,923
2	7	11,264	8,461
3	7	8,501	5,641
4	7	7,108	4,162
5	7	6,788	3,611
6	7	7,266	3,611
7	7	7,716	3,611
8	7	8,137	3,611
9	7	8,529	3,611

Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
10	7	8,893	3,611
1	8	22,165	19,340
2	8	12,524	9,670
3	8	9,358	6,447
4	8	7,754	4,756
5	8	7,355	4,126
6	8	7,833	4,126
7	8	8,283	4,126
8	8	8,704	4,126
9	8	9,096	4,126
10	8	9,459	4,126
1	9	24,634	21,758
2	9	13,784	10,879
3	9	10,215	7,253
4	9	8,399	5,351
5	9	7,922	4,642
6	9	8,400	4,642
7	9	8,849	4,642
8	9	9,270	4,642
9	9	9,663	4,642
10	9	10,026	4,642
1	10	27,102	24,175
2	10	15,043	12,088
3	10	11,072	8,058
4	10	9,045	5,945
5	10	8,489	5,158
6	10	8,967	5,158
7	10	9,416	5,158
8	10	9,837	5,158
9	10	10,229	5,158
10	10	10,593	5,158



Obrázek 6.21: a) obrys polygonu hranic pozemku 2, b) predikované rozmístění balíků, c) vygenerované body centroidů, d) rozdělení balíků do skupin



– **Obrázek 6.22:** Graf závislosti počtu odvozních soustav, nakladačů a spotřeby času – simulace 3 (pozemek 2, vzdálenost 400 m od místa skládky)

Následující simulace se dotýká stejného pozemku, i stejného nastavení, změněno je pouze místo skládky balíků do odloučeného pracoviště ve Slovonicích. Vzdálenost místa skládky od vjezdu na pozemek byl měřený na portálu Mapy.cz. Průměrná rychlost odvozních souprav $7,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, průměrná rychlost nakladače pohybujícího se po pozemku $1,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, maximální počet nakladačů 10, maximální počet odvozních souprav 10, doba, kterou trvá naložení balíku na soupravu 7,28 s, doba zdvihu 4,68 s, množství hmoty na metr čtvereční $0,26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, rozměry balíků $1,2 \times 0,7 \times 2,1 \text{ m}$, sliso-vatelnost hmoty $160 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, vzdálenost vjezdu od místa vykládky 7 300 m.

Tabulka 6.7: Výsledky pozemek 2, vzdálenost 7 300 m od místa skládky – nejhodnější varianty (simulace 4)

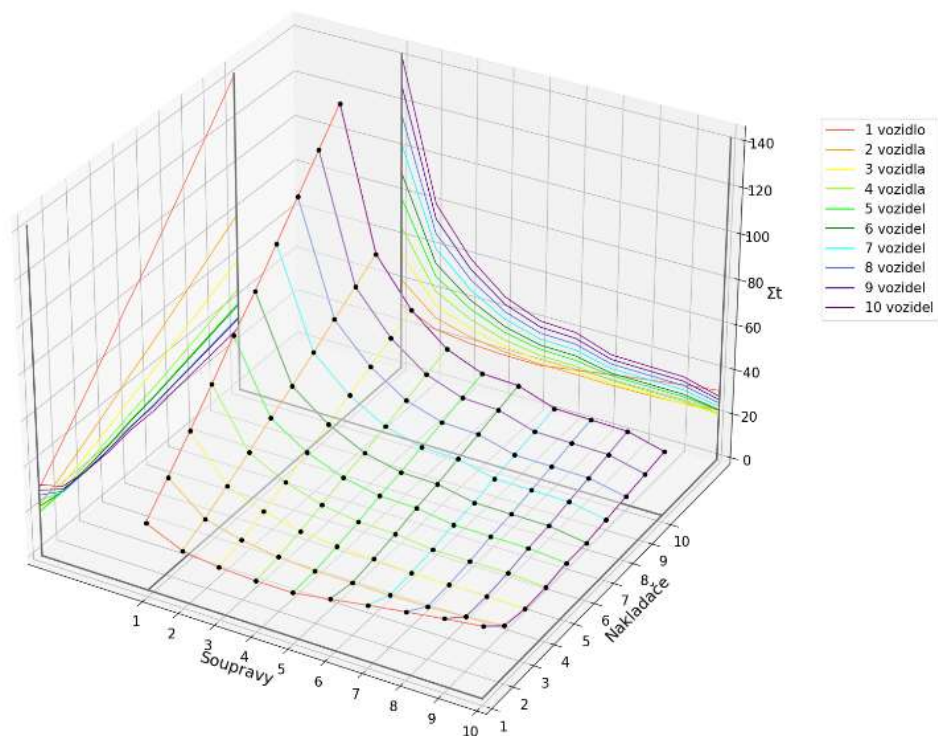
	Varianta – nejnižší počet spotřebovaných hodin	Varianta – minimální doba celého procesu
Celková spotřeba času [h]	19,612	22,656
Doba realizace [h]	3,261	1,261
Počet souprav	5	10
Počet nakladačů	1	6
Prostoje nakladačů [h]	0,052	2,359
Prostoje souprav [h]	0,000	0,000

Tabulka 6.8: Výsledky pozemek 2, vzdálenost 7 300 m od místa skládky (simulace 4)

Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
1	1	29,731	14,624
2	1	22,578	7,312
3	1	20,459	4,875
4	1	19,629	3,568
5	1	19,612	2,915
6	1	22,058	2,863
7	1	24,620	2,863
8	1	27,023	2,863
9	1	29,267	2,863
10	1	31,352	2,863
1	2	41,050	26,645
2	2	27,814	13,323
3	2	23,546	8,882
4	2	21,193	6,268
5	2	20,233	4,961
6	2	20,146	4,441
7	2	19,881	3,655
8	2	20,141	3,308
9	2	21,017	3,123
10	2	22,451	3,123
1	3	52,918	38,406
2	3	33,772	19,203
3	3	27,487	12,802
4	3	23,740	8,882
5	3	22,011	6,922
6	3	21,780	6,401
7	3	20,687	4,961
8	3	20,745	4,614
9	3	20,861	4,267
10	3	20,636	3,522
1	4	65,046	50,167
2	4	40,005	25,084
3	4	31,731	16,722
4	4	26,634	11,495
5	4	24,194	8,882
6	4	23,890	8,361
7	4	22,058	6,268
8	4	22,014	5,921
9	4	22,014	5,574
10	4	21,006	4,175
1	5	78,172	62,709

Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
2	5	46,861	31,355
3	5	36,496	20,903
4	5	30,092	14,369
5	5	26,999	11,102
6	5	26,565	10,452
7	5	24,209	7,835
8	5	24,079	7,401
9	5	23,992	6,968
10	5	22,634	5,219
1	6	89,563	73,690
2	6	52,747	36,845
3	6	40,523	24,563
4	6	32,769	16,722
5	6	28,964	12,802
6	6	28,588	12,282
7	6	25,362	8,882
8	6	25,218	8,535
9	6	25,102	8,188
10	6	22,656	5,482
1	7	102,443	85,971
2	7	59,486	42,986
3	7	45,216	28,657
4	7	36,155	19,510
5	7	31,697	14,936
6	7	31,234	14,329
7	7	27,441	10,362
8	7	27,239	9,957
9	7	27,065	9,552
10	7	24,169	6,396
1	8	115,323	98,253
2	8	66,226	49,126
3	8	49,908	32,751
4	8	39,540	22,297
5	8	34,429	17,070
6	8	33,880	16,375
7	8	29,520	11,842
8	8	29,260	11,380
9	8	29,028	10,917
10	8	25,681	7,309
1	9	128,203	110,534
2	9	72,965	55,267
3	9	54,600	36,845
4	9	42,926	25,084

Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
5	9	37,161	19,203
6	9	36,525	18,422
7	9	31,599	13,323
8	9	31,281	12,802
9	9	30,992	12,282
10	9	27,193	8,223
1	10	141,083	122,816
2	10	79,704	61,408
3	10	59,293	40,939
4	10	46,312	27,871
5	10	39,894	21,337
6	10	39,171	20,469
7	10	33,678	14,803
8	10	33,302	14,225
9	10	32,955	13,646
10	10	28,705	9,137



Obrázek 6.23: Graf závislosti odvozních souprav, nakladačů a spotřeby času – simulace 4 (pozemek 2, vzdálenost 7 300 m od místa skládky)

Následující simulace se dotýká pozemku, který se nachází v lokalitě na Větrníku, která je součástí města Lišov a je vzdálená od firmy Kooprodukt a.s. Lišov 2 100 m. Vzdálenost místa skládky od vjezdu na pozemek je 400 m a byl měřený na portálu Mapy.cz. Průměrná rychlost odvozních souprav $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, průměrná rychlost nakladače pohybujícího se po pozemku $1,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, maximální počet nakladačů 10, maximální počet odvozních souprav 10, doba, kterou trvá naložení balíku na soupravu 7,28 s, doba zdvihu 4,68 s, množství hmoty na metr čtvereční $0,26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, rozměry balíků $1,2 \times 0,7 \times 2,1 \text{ m}$, slisovatelnost hmoty $160 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.



Obrázek 6.24: Vstupní snímek simulace – pozemek 3 lokalita na Větrníku

Tabulka 6.9: Výsledky pozemek 3, vzdálenost 2 100 m od místa skládky – nejhodnější varianty (simulace 5)

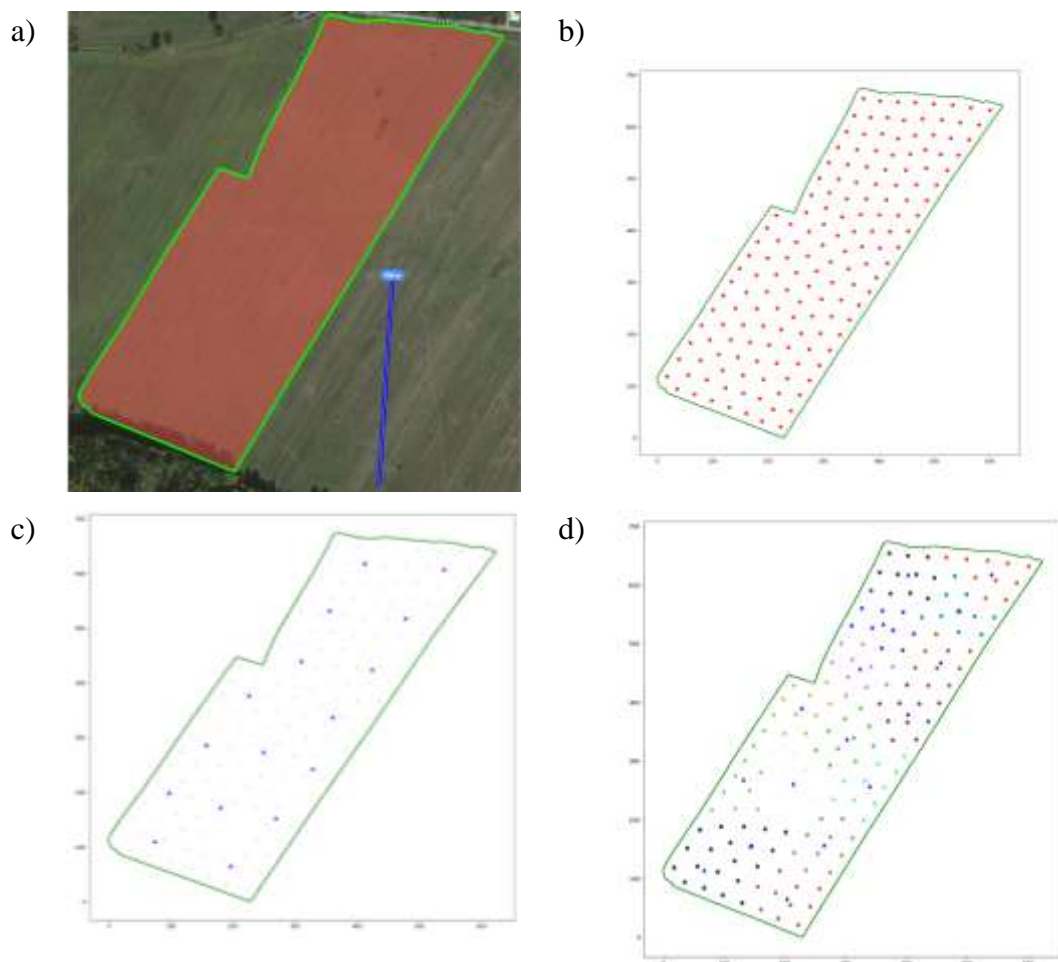
	Varianta – nejnížší počet spotřebovaných hodin	Varianta – minimální doba celého procesu
Celková spotřeba času [h]	8,841	9,854
Doba realizace [h]	1,096	0,615
Počet souprav	5	10
Počet nakladačů	3	6
Prostoje nakladačů [h]	0,018	0,000
Prostoje souprav [h]	0,000	0,000

Tabulka 6.10: Výsledky pozemek 3, vzdálenost 2 100 m od místa skládky (simulace 5)

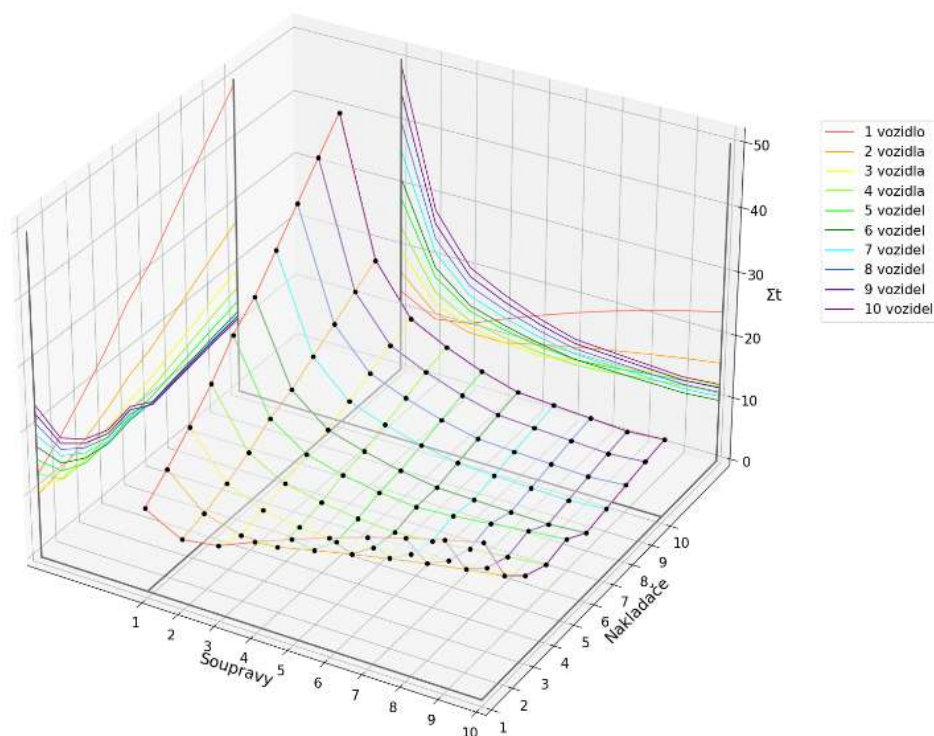
Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
1	1	13,073	6,444
2	1	10,014	3,222
3	1	10,862	2,612
4	1	13,224	2,612
5	1	15,423	2,612
6	1	17,458	2,612
7	1	19,330	2,612
8	1	21,039	2,612
9	1	22,585	2,612
10	1	23,967	2,612
1	2	16,140	10,514
2	2	10,972	5,257
3	2	9,357	3,464
4	2	9,342	2,850
5	2	10,65	2,850
6	2	11,869	2,850
7	2	12,999	2,850
8	2	14,040	2,850
9	2	14,992	2,850
10	2	15,855	2,850
1	3	19,726	14,346
2	3	12,612	7,173
3	3	10,219	4,661
4	3	9,323	3,587
5	3	8,841	2,868
6	3	9,693	2,850
7	3	10,526	2,850
8	3	11,300	2,850
9	3	12,015	2,850
10	3	12,670	2,850
1	4	23,520	18,179
2	4	14,475	9,089
3	4	11,334	5,859
4	4	10,153	4,545
5	4	9,373	3,587
6	4	8,994	2,985
7	4	9,375	2,850
8	4	10,015	2,850
9	4	10,611	2,850
10	4	11,162	2,850
1	5	28,190	22,723

Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
2	5	16,873	11,362
3	5	12,924	7,324
4	5	11,414	5,681
5	5	10,395	4,483
6	5	9,865	3,731
7	5	10,212	3,562
8	5	10,853	3,562
9	5	11,448	3,562
10	5	11,999	3,562
1	6	31,345	25,843
2	6	18,454	12,922
3	6	13,845	8,254
4	6	12,141	6,461
5	6	10,823	5,024
6	6	9,890	3,943
7	6	9,712	3,587
8	6	9,564	3,230
9	6	9,433	2,862
10	6	9,854	2,850
1	7	35,852	30,150
2	7	20,806	15,075
3	7	15,420	9,630
4	7	13,417	7,538
5	7	11,859	5,861
6	7	10,747	4,600
7	7	10,509	4,184
8	7	10,301	3,769
9	7	10,109	3,339
10	7	10,528	3,325
1	8	40,358	34,458
2	8	23,159	17,229
3	8	16,995	11,005
4	8	14,693	8,614
5	8	12,896	6,698
6	8	11,603	5,257
7	8	11,306	4,782
8	8	11,039	4,307
9	8	10,785	3,816
10	8	11,202	3,800
1	9	44,865	38,765
2	9	25,512	19,382
3	9	18,570	12,381
4	9	15,969	9,691

Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
5	9	13,932	7,536
6	9	12,459	5,914
7	9	12,103	5,380
8	9	11,777	4,846
9	9	11,461	4,293
10	9	11,876	4,275
1	10	49,223	43,072
2	10	27,716	21,536
3	10	19,996	13,757
4	10	17,097	10,768
5	10	14,820	8,373
6	10	13,167	6,571
7	10	12,752	5,978
8	10	12,366	5,384
9	10	11,989	4,770
10	10	12,402	4,750



Obrázek 6.25: a) obrys polygonu hranic pozemku 3, b) predikované rozmístění balíků, c) vygenerované body centroidů, d) rozdělení balíků do skupin



Obrázek 6.26: Graf závislosti počtu odvozních souprav, nakladačů a spotřeby času – simulace 5 (pozemek 3, vzdálenost 2 100 m od místa skládky)

Následující simulace se dotýká pozemku, který se nachází v lokalitě na Větrníku, která je součástí města Lišov a je vzdálená od skladiště ve Slovonicích 8 700 m. Průměrná rychlost odvozních souprav $7,00 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, průměrná rychlost nakladače pohybujícího se po pozemku $1,95 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, maximální počet nakladačů 10, maximální počet odvozních souprav 10, doba, kterou trvá naložení balíku na soupravu 7,28 s, doba zdvihu 4,68 s, množství hmoty na metr čtvereční $0,26 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, rozměry balíků $1,2 \times 0,7 \times 2,1 \text{ m}$, sliso-
vatelnost hmoty $160 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Tabulka 6.11: Výsledky pozemek 3, vzdálenost 8 700 m od místa skládky – nejvhodnější varianty (simulace 6)

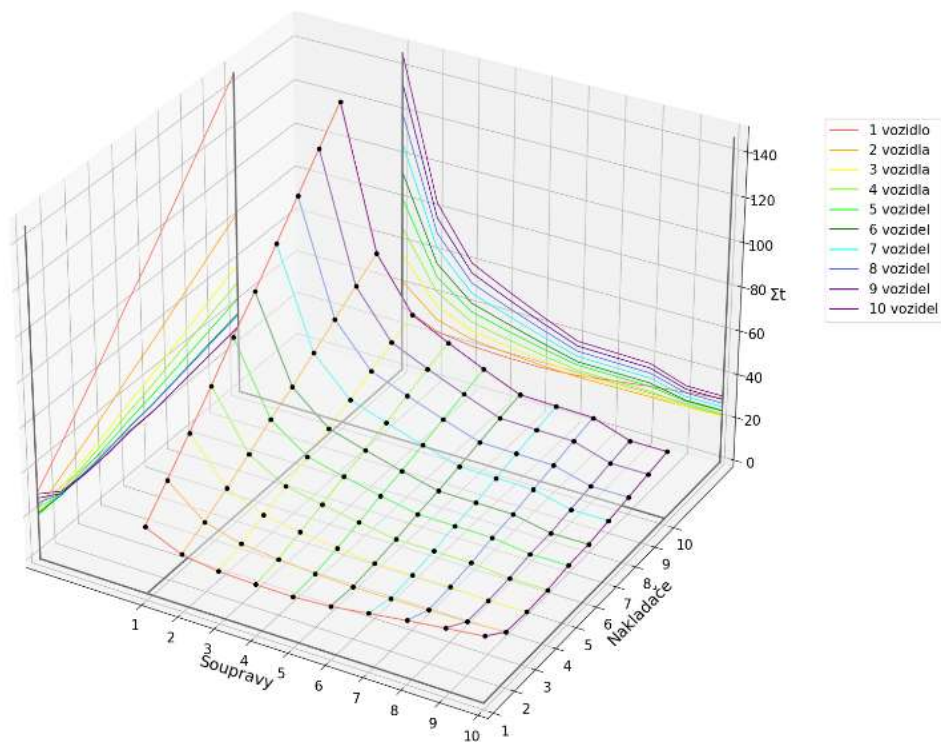
	Varianta – nejnižší počet spotřebovaných hodin	Varianta – minimální doba celého procesu
Celková spotřeba času [h]	20,111	24,194
Doba realizace [h]	3,345	1,373
Počet souprav	5	10
Počet nakladačů	1	6
Prostoje nakladačů [h]	0,334	2,980
Prostoje souprav [h]	0,000	0,000

Tabulka 6.12: Výsledky pozemek 3, vzdálenost 8 700 m od místa skládky (simulace 6)

Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
1	1	30,364	14,828
2	1	23,114	7,414
3	1	20,823	4,797
4	1	20,222	3,707
5	1	20,111	2,943
6	1	21,111	2,610
7	1	23,506	2,610
8	1	25,738	2,610
9	1	27,806	2,610
10	1	29,711	2,610
1	2	42,342	27,284
2	2	28,789	13,642
3	2	24,030	8,704
4	2	22,413	6,821
5	2	21,242	5,294
6	2	20,515	4,122
7	2	20,693	3,766
8	2	20,960	3,410
9	2	21,212	2,951
10	2	22,131	2,847
1	3	54,839	39,502
2	3	35,147	19,751
3	3	28,037	12,522
4	3	25,569	9,875
5	3	23,515	7,585
6	3	21,876	5,649
7	3	21,876	5,294
8	3	21,936	4,938
9	3	21,187	3,714
10	3	21,543	3,536
1	4	67,543	51,720
2	4	41,728	25,860
3	4	32,297	16,340
4	4	29,020	12,930
5	4	26,144	9,875
6	4	23,667	7,177
7	4	23,578	6,821
8	4	23,534	6,465
9	4	21,903	4,478
10	4	22,125	4,300
1	5	81,123	64,650

Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
2	5	48,842	32,325
3	5	37,031	20,426
4	5	32,902	16,163
5	5	29,262	12,344
6	5	26,111	8,971
7	5	25,933	8,526
8	5	25,799	8,081
9	5	23,671	5,598
10	5	23,849	5,375
1	6	93,189	76,157
2	6	55,141	38,078
3	6	41,098	23,977
4	6	36,250	19,039
5	6	31,786	14,457
6	6	27,709	10,231
7	6	27,531	9,875
8	6	27,383	9,520
9	6	24,105	6,005
10	6	24,194	5,827
1	7	106,606	88,850
2	7	62,210	44,425
3	7	45,818	27,973
4	7	40,146	22,212
5	7	34,919	16,867
6	7	30,137	11,937
7	7	29,900	11,521
8	7	29,692	11,106
9	7	25,830	7,006
10	7	25,889	6,799
1	8	120,022	101,542
2	8	69,280	50,771
3	8	50,537	31,969
4	8	44,043	25,386
5	8	38,052	19,276
6	8	32,566	13,642
7	8	32,269	13,167
8	8	32,002	12,693
9	8	27,554	8,007
10	8	27,584	7,770
1	9	133,438	114,235
2	9	76,350	57,118
3	9	55,257	35,965
4	9	47,939	28,559

Počet souprav	Počet nakladačů	Spotřeba času celkem [h]	Spotřeba času nakladačů na pozemku [h]
5	9	41,185	21,686
6	9	34,994	15,347
7	9	34,638	14,813
8	9	34,312	14,279
9	9	29,278	9,008
10	9	29,278	8,741
1	10	146,706	126,928
2	10	83,271	63,464
3	10	59,828	39,962
4	10	51,687	31,732
5	10	44,170	24,096
6	10	37,275	17,052
7	10	36,859	16,459
8	10	36,474	15,866
9	10	30,854	10,009
10	10	30,824	9,712



Obrázek 6.27: Graf závislosti počtu odvozních souprav, nakladačů a spotřeby času –simulace 6 (pozemek 3, vzdálenost 8 700 m od místa skládky)

7 Komentář k výsledkům a diskuse

Měření vstupních hodnot bylo provedeno 24. 7. 2020 při manipulaci a odvozu balíků sena na pozemku v těsné blízkosti policejního výcvikového prostoru Slabec s jedním nakladačem a dvěma odvozními soupravami o ložné kapacitě 10 balíků. Spotřeba času nakladače bez doby potřebné na příjezd a odjezd byla 1,966 h. Spotřeba času u nakladače na pozemku z výsledků simulace 1 (1 nakladač, dvě odvozní soupravy), která nejvíce odpovídala měřenému pokusu, byla vypočítána na hodnotu 1,881 h, což je méně o 4,323 %. Rozdíl mezi referenční a vypočítanou hodnotou může být z velké části způsoben neproduktivními přejezdy, které jsou nad rámec optimální trasy. S určitou mírou nepřesnosti lze konstatovat, že referenční hodnoty odpovídají predikcím v simulaci.

Simulace 1 ukazuje potencionální úsporu v případě, že by práci manipulace a odvozu balíků sena oproti 1 nakladači a 2 odvozním soupravám vykonávali tři stroje pro manipulaci a 5 pro dopravu balíků. Jeden nakladač s 2 odvozními soupravami dosáhl spotřeby času 1,881 h u nakladačů na poli a celková spotřeba včetně odvozních souprav a cest z a na pozemek 5,866 h. Varianta se 3 nakladači a 5 odvozními soupravami spotřebovala 1,707 h u nakladačů při práci na pozemku (u všech třech dohromady) a celkový čas činnosti včetně odvozních souprav a cest z a na pozemek 5,493 h. Celková úspora by mohla dosáhnout na pozemku 1 oproti reálně zvolené variantě (1 nakladač, 2 odvozní soupravy) 0,373 h, tedy dosahuje o 6,359 % nižších hodnot. Doba trvání realizace varianty s jedním nakladačem a dvěma odvozními soupravami dosahuje více než 1,955 h a s použitím 3 nakladačů a 5 odvozních souprav pouze 0,699 h. Celková doba realizace může být také významným faktorem při volbě varianty, především s ohledem na počasí, anebo následné práce na pozemku.

Z tabulky výsledků 6.2 (simulace 1) je zjevné, že při použití jedné odvozní soupravy je nejvhodnější manipulaci realizovat pouze jedním nakladačem, kdy celková spotřeba času dosahuje 7,591 hodin práce všech strojů. Z tabulky výsledků 6.2 je zřejmý, rostoucí trend spotřeby času, kdy jedna odvozní souprava je v případě simulace 1 nedostatečný počet, při kterém přidáním většího množství nakladačů nezkracuje dobu realizace, ale pouze jsou navyšovány ztráty prostřednictvím neproduktivních časů manipulátorů. Z tabulky výsledků 6.2 (simulace 1) je dále zjevné, že při použití

dvou odvozních souprav je nevhodnější manipulaci realizovat pouze jedním nakladačem, kdy celková spotřeba času dosahuje 5,866 hodin práce všech strojů. Další navyšování počtu nakladačů zvyšuje celkovou spotřebu času.

Tyto hodnoty potvrzují fakt, že jedna odvozní souprava je v případě simulace 1 nedostačující a přidání další přepravní jednotky snižuje celkovou spotřebu času. Z tabulky výsledků 6.2 (simulace 1) je dále zjevné, že při použití tří odvozních souprav již není nevhodnější manipulaci realizovat pouze jedním nakladačem, protože při této variantě celková spotřeba času dosahuje 6,515 hodin práce všech strojů a přidáním dalšího nakladače celková spotřeba času klesá na hodnotu 5,554. Další navyšování (tři a více) počtu nakladačů (u varianty s třemi odvozními soupravami) opět zvyšuje celkovou spotřebu času, kdy u 10 nakladačů by teoreticky dosáhla 11,95 h.

Je zřejmé, že varianta tří odvozních souprav v simulaci 1 umožňuje přidat druhý nakladač, aby byla zvýšena produktivita práce, přesto zde není přílišná variabilita navyšování počtu manipulátorů. Ze simulace 1 je zřejmé, že se vzrůstajícím počtem odvozních souprav je možné nasazovat i další nakladače a tím se přibližovat k optimu spotřeby času, minimalizací ztrát (pro stojů) a současně zkracovat celkovou dobu realizace. Nejkratší doba realizace manipulace a odvozu balíků z pozemku u výcvikového střediska Slabec do skladovacích prostor v Lišově je u varianty s 9 odvozními soupravami a 6 nakladači, kdy dosahuje hodnoty 0,415 h a celkové spotřeby času 6,213 h. U varianty, kterou simulace vyhodnotila jako optimum z pohledu celkové spotřeby času (3 nakladače a 5 odvozních souprav) trvala doba realizace 0,699 h, což je o 68,43 % delší časový úsek, ale celková spotřeba času všech strojů dosahuje hodnoty 5,493 h, tedy o 11,59 % méně.

Simulace 2 má stejné nastavení vstupních parametrů, které vychází z realizované manipulace a odvozu balíků z pozemků u výcvikového střediska Slabec (pozemek 1), s výjimkou místa uskladnění balíků. Místo uskladnění je uvažováno ve vesnici Slověnice, kde firma Kooprodukt a. s. vlastní skladovací prostory. Vzdálenost pracovní plochy od skladu je 8 600 m. Výsledky simulace 2 prokazují, že se vzrůstající vzdáleností skladovacích prostor se zvyšuje celková spotřeba času, a především u odvozních souprav. Nejnižší spotřeba času je při použití 4 odvozních souprav a jednoho nakladače, a to 12,84 h, což je o 133,75 % více než u simulace 1, která uvažovala trasu ke skladovacím prostorům o 6 800 m kratší. Nejkratší doba realizace manipulace a svozu je u druhé simulace 1,187 h při použití 10 odvozních souprav a 6 nakladačů s celkovou spotřebou času 18,108 h. Minimální doba trvání celého procesu je tedy o 186,02 %

více než u simulace 1, kde hodnota dosahovala 0,415 h a rovněž spotřeba času vzrostla z 6,213 h (u simulace 1) o 191,45 %.

Je zřejmé, že se vzrůstající vzdáleností od skladovacích prostor je nutné posilovat zejména množství odvozních souprav, v případě, že je dosaženo maximálního počtu nastaveného ve vstupních hodnotách, nemá smysl dále navyšovat počty nakladačů (z 6 na 7, nebo více), protože již nedochází ke zkracování celkové doby realizace. Pouze zvyšujeme ztrátové časy nakladačů. Z tabulky výsledků 6.4 (simulace 2) je zjevné, že při použití pouze jedné odvozní soupravy je nejvhodnější manipulaci realizovat jen jedním nakladačem, kdy celková spotřeba času dosahuje 18,914 h práce všech strojů, což je oproti 7,591 h vypočteným u simulace 1, při stejném počtu strojů o 149,16 % více. V případě použití jedné odvozní soupravy a deseti nakladačů spotřeba času dosáhne až hodnoty 93,685 h. Z hodnot simulace 1 a 2 je patrné, že se vzrůstající vzdáleností skladovacích prostor roste potřeba odvozních souprav a spotřeba času dosahuje významně vyšších hodnot. Pro simulaci 2 je tedy volba 1 odvozní soupravy extrémně nevhodná. Z tabulky 6.4 (simulace 2) je zřejmé, že u varianty se 2 odvozními soupravami se snižuje (oproti variantě s 1 odvozní soupravou) celková spotřeba času na hodnotu 14,493 h, což je o 23,37 % méně, ale další zařazení nakladačů není možné bez výrazného zhoršení bilance ztrátových časů. Navyšování počtu nakladačů je vhodné až od nasazení 6 odvozních souprav, kdy při použití 1 nakladače je celková spotřeba času 13,751 a při nasazení 2 nakladačů klesá na hodnotu 13,417, tedy o 2,43 % méně. Skladovací prostor vzdálenější o 6 800 m tedy snížil možnost nasazení většího množství nakladačů. Zatímco u simulace 1 bylo vhodné nasazení druhého nakladače již u 3 odvozních souprav, u simulace 2 to bylo až u 6 odvozních souprav.

Simulace 3 je situovaná na pozemku 2 o rozloze 18,8 ha, s místem vjezdu ve vzdálenosti 400 metrů od skladovacích prostor firmy Kooprodukt a. s. v Lišově. Ostatní parametry včetně výnosů hmoty, pojezdové rychlosti strojů, velikosti ložné plochy odvozních prostředků zůstaly nezměněné. Z tabulky výsledků 6.5 (simulace 3) je zřejmé, že nejnižší spotřeba času je u varianty s 5 odvozními soupravami a 6 nakladači, kdy bylo spotřebováno celkem 6,221 h a doba realizace manipulace a odvozu trvala celkem 0,589 h. Prostoje nakladačů u této varianty byly vypočítány na hodnotu 0,000 h (bez ztrátových časů) a u odvozních souprav byly predikovány na 0,135 h. Varianta s nejkratší možnou dobou realizace byla při použití 10 nakladačů a 6 odvozních souprav 0,588 h s celkovou spotřebou času 8,967 h. Časový rozdíl mezi dobou realizace u obou variant je 0,001 h tedy 0,17 %, ale spotřeba času u varianty s nejkratší

dobou realizace je vyšší o 44,14 %. Je zřejmé, že zvýšení množství techniky na maximální možnou mez nemusí přinést výrazné zkrácení pracovního procesu, ale může vzrůstat především spotřeba času, a tedy i peněz. Celková doba realizace se významně nezkrátila, protože při množství 171 balíků, které byly predikovány na pozemku, přidání několika strojů nesníží počet celých cyklů a současně je u simulace 3 nízká přepravní vzdálenost, která má v tomto případě zanedbatelný vliv. V případě, že by počet balíků byl výrazně nižší, případně vyšší, nebo přepravní vzdálenost delší, tak by se rozdíl v době realizace při přidávání dalších strojů významně změnil.

Z tabulky výsledků 6.6 (simulace 3) je zřejmé, že při volbě 1 odvozní soupravy je optimální nasazení 1 nakladače s celkovou spotřebou času 9,414 h. Přiřazování dalších nakladačů zvyšuje celkovou spotřebu času až na hodnotu 27,102 h tedy o 187,89 % více (u varianty jedné odvozní soupravy a 10 nakladačů). Z dat vyplývá, že u varianty s jednou odvozní soupravou neumožňuje efektivní nasazení více nakladačů. Varianta vhodná pro nasazení vyššího počtu nakladačů začíná při volbě 2 odvozních souprav. V případě volby 2 odvozních souprav a 1 nakladače dosahuje celková spotřeba 8,501 h a nasazením dalšího nakladače (varianta 2 odvozní soupravy a 2 nakladače) klesá hodnota na 6,972 h, je tedy nižší o 17,99 %, další přidávání manipulátorů (3 a více nakladačů při použití 2 odvozních souprav) není efektivní. Z dat je ovšem zřejmý progres v možnosti dřívějšího, efektivního nasazení více nakladačů oproti předchozím simulacím. Při použití 3 odvozních souprav je lokální minimum celkové spotřeby času u 3 nakladačů. Při volbě 3 odvozních souprav a jednoho nakladače dosahuje celková spotřeba času 11,128 h, ale nasazením dalších dvou manipulátorů (3 odvozní soupravy a 3 nakladače) konsumpce klesá až na hodnotu 6,402 h, tedy o 42,47 % méně. Další efektivní přidávání manipulátorů není možné, od čtvrtého nakladače je trend celkové spotřeby rostoucí. Při použití 6 odvozních souprav je v simulaci 3 lokální minimum celkové spotřeby času u 6 nakladačů. V případě volby 6 odvozních souprav a 1 nakladače dosahuje spotřeba času 18,065 h, přidáním dalších 5 manipulátorů (6 odvozních souprav a 6 nakladačů) konsumpce klesá na hodnotu 6,7 h, což je o 62,091 % méně. Dalším navýšením počtu manipulátorů snižujeme efektivitu procesu a spotřebováváme více času. U varianty se 6 odvozními soupravami a 10 nakladači by bylo spotřebováno 8,967 h, což je více oproti lokálnímu minimu (v úrovni 6 odvozních souprav a 6 nakladačů) o 2,267 h více, ale pořád je to o 9,098 h méně než varianta 6 přepravních strojů a 1 manipulátoru. Z dat simulace 3 je zřejmá zvýšená

potřeba počtu manipulátorů oproti simulaci 1 a 2, která je pravděpodobně způsobená extrémně krátkou přepravní vzdáleností.

Simulace 4 se zabývá variantou, kdy je významně prodloužená vzdálenost k místu skládky balíků, probíhá na pozemku 2 a má stejné nastavení jako simulace 3, jen místo skládky je uvažováno ve vzdálenosti 7 300 m. Z tabulky výsledků 6.7 (simulace 4) je zřejmé, že nejnižší spotřeba času je u varianty s 5 odvozními soupravami a 1 nakladačem, kdy bylo spotřebováno celkem 19,612 h a doba realizace manipulace a odvozu trvala celkem 3,261 h. Prostoje nakladačů u této varianty byly vypočítány na hodnotu 0,052 h a u odvozních souprav byly predikovány na 0,000 h (bez ztrátových časů). Z výsledků simulace 4 je zřejmé, že významně stoupla spotřeba odvozních souprav, zatímco u simulace 4 je optimální volba 5 odvozních souprav a 1 nakladač, u simulace 3 to bylo 5 strojů pro přepravu a 6 nakladačů. Množství spotřebované práce nakladačů je u simulace 4 mírně nižší (varianta 5 odvozních souprav 1 nakladač) a to 2,915 h, oproti hodnotě 3,095 h u simulace 3 (varianta 5 odvozních souprav a 6 nakladačů), ale to je způsobeno především faktem, že pojezd na pozemek a z něj vykonával pouze 1 manipulátor, ostatní trasy se příliš nezměnily. Minimální celková spotřeba času u simulace 3 dosahovala hodnoty 6,221 h a u simulace 4 vzrostla až na 19,612 h, tedy o 215,25 % více. Varianta s nejkratší možnou dobou realizace při použití 10 odvozních souprav a 6 nakladačů trvala 1,261 h s celkovou spotřebou času dosáhla hodnoty 22,656 h. Časový rozdíl mezi dobou realizace u obou variant je 2 h tedy lze říci, že je možné zkrácení pracovního procesu o 61,33 %, ale celková spotřeba času (u varianty s nejkratší dobou realizace) je vyšší o 15,52 %.

Z dat je zřejmé, že prodloužením odvozní trasy o 6 900 m se významně změnil poměr mezi potřebou nakladačů a odvozních souprav. Zatímco u simulace 3 bylo u varianty s nejkratší realizační dobou realizace zapotřebí 10 nakladačů a 6 odvozních souprav u simulace se poměr změnil na 10 strojů pro přepravu balíků a 6 manipulátorů. Je tedy zjevné, že i drobná změna v místě uskladnění materiálu může mít významný vliv na volbu počtu nakladačů a odvozních souprav. Z tabulky výsledků 6.8 je zřejmé, že při volbě 1 odvozní soupravy (u simulace 4) je nejvhodnější použít pouze 1 nakladač, kdy celková spotřeba času dosahuje 29,731 h. Další efektivní přidávání nakladačů (2 a více) není možné s ohledem na rostoucí trend celkové spotřeby, kdy u 1 odvozní soupravy a 10 manipulátorů dosahuje až hodnoty 141,083 h, tedy o 374,53 % více (než u 1 odvozní soupravy a 1 nakladače). Efektivní nasazení druhého nakladače je možné až u varianty se 6 odvozními soupravami, ale u simulace 3 to bylo možné již u varianty

se 2 odvozními soupravami. V případě volby 6 odvozních souprav a 1 nakladače (u simulace 4) spotřeba času dosahuje 22,058 h a přidáním dalšího manipulátoru (varianta se 6 odvozními soupravami a 2 nakladači) hodnota klesá na 20,146 h, tedy dochází ke snížení konzumpce o 8,67 %. Další efektivní přidávání počtu nakladačů (3 a více nakladačů a 6 odvozních souprav) není vhodné s ohledem na rostoucí trend celkové spotřeby, kdy u 6 odvozních souprav a 10 manipulátorů dosahuje až hodnoty 39,171 h, tedy o 94,44 % více (než u 6 odvozních souprav a 2 nakladačů). Efektivní nasazení 3 nakladačů je možné až u varianty s 9 odvozními soupravami. V případě volby 9 odvozních souprav a 1 nakladače (u simulace 4) spotřeba času dosahuje 29,267 h a přidáním dalších 2 manipulátorů (varianta se 9 odvozními soupravami a 3 nakladači) hodnota klesá na 20,861 h, tedy dochází ke snížení konzumpce o 28,72 %. Další efektivní přidávání počtu nakladačů (4 a více nakladačů a 9 odvozních souprav) není vhodné s ohledem na rostoucí trend celkové spotřeby, kdy u 9 odvozních souprav a 10 manipulátorů dosahuje až hodnoty 32,955 h, tedy o 57,97 % více (než u 9 odvozních souprav a 3 nakladačů). Z výsledku simulace 4 je zřejmé, že změna ve vzdálenosti místa skládky má zásadní vliv především na spotřebu času odvozních souprav a je nutné v závislosti na tomto faktoru měnit počet nakladačů a strojů pro odvoz.

Simulace 5 je situovaná na pozemku 3 o rozloze 17,3 ha, s místem vjezdu ve vzdálenosti 2 100 m od skladovacích prostor firmy Kooprodukt a. s. v Lišově. Ostatní parametry včetně výnosů hmoty, pojezdové rychlosti strojů, velikosti ložné plochy odvozních prostředků zůstaly nezměněné. Z tabulky výsledků 6.9 (simulace 5) je zřejmé, že nejnižší spotřeba času je u varianty s 5 odvozními soupravami a 3 nakladači, kdy bylo spotřebováno celkem 8,841 h a doba realizace manipulace a odvozu trvala celkem 1,096 h. Prostoje nakladačů u této varianty byly vypočítány na hodnotu 0,018 h a u odvozních souprav byly predikovány na 0,000 h (bez ztrátových časů). Varianta s nejkratší možnou dobou realizace (u simulace 5) byla při použití 6 nakladačů a 10 odvozních souprav 0,615 h s celkovou spotřebou času 9,854 h. Časový rozdíl mezi dobou realizace u obou variant je 0,481 h tedy 43,89 % (nižší u varianty s nejkratší dobou realizace), ale celková spotřeba času u varianty s nejkratší dobou realizace je vyšší o 11,46 %. Z tabulky výsledků 6.10 (simulace 5) je zřejmé, že při volbě 1 odvozní soupravy je optimální nasazení 1 nakladače s celkovou spotřebou času 13,073 h. Přiřazování dalších nakladačů zvyšuje celkovou spotřebu času až na hodnotu 49,223 h tedy o 276,52 % více (u varianty jedné odvozní soupravy a 10 nakladačů).

Z dat vyplývá, že varianta s 1 odvozní soupravou neumožňuje efektivní nasazení více nakladačů.

Varianta vhodná pro nasazení vyššího počtu nakladačů začíná při volbě 3 odvozních souprav. V případě volby 3 odvozních souprav a 1 nakladače dosahuje celková spotřeba 10,862 h a nasazením dalšího nakladače (varianta 3 odvozní soupravy a 2 nakladače) klesá hodnota na 9,357 h, je tedy nižší o 13,86 %, další přidávání manipulátorů (3 a více nakladačů při použití 3 odvozních souprav) není efektivní. Efektivní nasazení 3 nakladačů umožňuje varianta s použitím 4 odvozních souprav. Při použití 4 odvozních souprav je lokální minimum celkové spotřeby času při použití 3 nakladačů. Při volbě 4 odvozních souprav a jednoho nakladače dosahuje celková spotřeba času 13,224 h, ale nasazením dalších dvou manipulátorů (4 odvozních souprav a 3 nakladačů) konsumpce klesá až na hodnotu 9,323 h, tedy spotřebuje o 29,50 % méně času. Další efektivní přidávání manipulátorů není možné, od čtvrtého nakladače je trend celkové spotřeby rostoucí. Při použití 6 odvozních souprav je v simulaci 5 lokální minimum celkové spotřeby času u 4 nakladačů. V případě volby 6 odvozních souprav a 1 nakladače dosahuje spotřeba času 17,458 h, přidáním dalších 3 manipulátorů (6 odvozních souprav a 4 nakladačů) konsumpce klesá na hodnotu 8,994 h, což je o 48,48 % méně. Další navýšení počtu manipulátorů snižuje efektivitu procesu a spotřeba času stoupá až na hodnotu 13,167 h (u varianty 6 odvozních souprav a 10 nakladačů). U varianty s 10 odvozními soupravami je možné efektivně nasadit až 6 nakladačů. V případě volby varianty s použitím 10 odvozních souprav a 1 nakladače dosahuje celková spotřeba 23,967 h a nasazením dalších 5 nakladačů (varianta 10 odvozních souprav a 6 nakladačů) konsumpce klesá na hodnotu 9,357 h a je tedy nižší o 60,96 %, další přidávání manipulátorů (7 a více nakladačů při použití 10 odvozních souprav) není efektivní kvůli stoupajícímu trendu spotřeby. Z dat simulace 5 je zřejmá vysoká variabilita jednotlivých variant počtu nasazení odvozních souprav, kdy v lokálních minimech spotřeby času dosahuje velmi podobných hodnot. Je tedy reálně možné snižovat počty strojů na pracovišti, aniž by došlo k výraznému zvýšení celkové spotřeby času.

Simulace 6 probíhá na pozemku 3 a má stejné nastavení jako je v simulaci 5, jen s výjimkou místa skládky balíků, které je uvažováno ve vesnici Slověnice, kde firma Kooprodukt a. s. vlastní skladovací prostory. Vzdálenost pracovní plochy od skladu je 8 700 m, tedy o 6 600 m více, než v případě simulace 5.

Z tabulky výsledků 6.11 (simulace 6) je zřejmé, že nejnižší spotřeba času je u varianty s 5 odvozními soupravami a 1 nakladačem, kdy bylo spotřebováno celkem 20,111 h a doba realizace manipulace a odvozu trvala celkem 3,345 h. Prostoje nakladačů u této varianty byly vypočítány na hodnotu 0,334 h a u odvozních souprav byly predikovány bez ztrátových časů. Z výsledků simulace 6 je zřejmé, že významně stoupla spotřeba času u odvozních souprav. Zatímco u simulace 6 je optimální volbou z pohledu minimální celkové spotřeby času 5 odvozních souprav a 1 nakladač, u simulace 5 to bylo 5 strojů pro přepravu balíků a 3 manipulátory. Minimální celková spotřeba času u simulace 5 dosahovala hodnoty 8,841 h a u simulace 6 vzrostla až na hodnotu 20,111 h, tedy o 127,47 % více a současně se výrazně nezměnila spotřeba času u nakladačů. Zatímco u simulace 5 byla spotřeba času nakladačů na pozemku 2,868 h (u varianty 5 odvozních souprav a 3 nakladačů), v případě simulace 6 dosahovala hodnoty 2,943 h (u varianty 5 odvozních souprav a 1 nakladače), tedy pouze o 2,59 % více. Varianta s nejkratší možnou dobou realizace (při použití 10 odvozních souprav a 6 nakladačů) trvala 1,373 h a celková spotřeba času dosáhla hodnoty 24,194 h. Časový rozdíl mezi variantami s nejkratší dobou realizace a nejnižší spotřebou času (simulace 6) je 1,972 h a lze tedy říct, že je možné zkrácení délky pracovního procesu o 58,95 %, ale celková spotřeba času (u varianty s nejkratší dobou realizace) je vyšší o 20,30 %. Z dat je zřejmé, že prodloužením odvozní trasy o 6 600 m nebyl významně změněn poměr mezi potřebou nakladačů a odvozních souprav, ale významně se prodloužila nejkratší doba realizace a celková spotřeba času. V případě simulace 5 bylo u varianty s nejkratší dobou realizace zapotřebí 6 nakladačů a 10 odvozních souprav a stejný poměr byl i u simulace 6. Rozdíly byly především v délce realizačního času, kdy u simulace 5 dosahovala 0,615 h a v případě simulace 6 vzrostla na 1,373 h, tedy o 123,25 % více. Celková spotřeba času (u varianty s nejkratší dobou realizace) u simulace 5 dosáhla 9,85 h a v případě simulace 6 vzrostla na hodnotu 24,194 h, tedy o 145,62 % více. Z dat je zjevné, že poměr mezi potřebou nakladačů a odvozních souprav se nezměnil především z toho důvodu, že již při simulaci 5 hodnoty u odvozních souprav dosahovaly maxima. Další zvýšení nároků na odvozní soupravy bylo u simulace 6 kompenzováno delší dobou realizace procesu i vyšší celkovou spotřebou času. Z tabulky výsledků 6.12 je zřejmé, že při volbě 1 odvozní soupravy (u simulace 6) je nejvhodnější použít pouze 1 nakladač, kdy celková spotřeba času dosahuje 30,364 h. Další efektivní přidávání nakladačů (2 a více) není možné

s ohledem na rostoucí trend celkové spotřeby, kdy u 1 odvozní soupravy a 10 manipulátorů dosahuje až hodnoty 146,706 h, tedy o 383,16 % více (než u 1 odvozní soupravy a 1 nakladače). Efektivní nasazení 2 nakladače je možné až u varianty se 6 odvozními soupravami, ale u simulace 5 to bylo možné již u varianty se 3 odvozními soupravami. V případě volby 6 odvozních souprav a 1 nakladače (u simulace 6) spotřeba času dosahuje 21,111 h a přidáním dalšího manipulátoru (varianta se 6 odvozními soupravami a 2 nakladači) hodnota klesá na 20,515 h, tedy dochází ke snížení konzumpce o 2,82 %. Další efektivní přidávání počtu nakladačů (3 a více nakladačů a 6 odvozních souprav) není vhodné s ohledem na rostoucí trend celkové spotřeby, kdy u 6 odvozních souprav a 10 manipulátorů dosahuje až hodnoty 37,275 h, tedy o 81,70 % více (než u 6 odvozních souprav a 2 nakladačů). Efektivní nasazení 3 nakladačů je možné až u varianty s 10 odvozními soupravami. V případě volby 10 odvozních souprav a 1 nakladače (u simulace 6) spotřeba času dosahuje 29,711 h a přidáním dalších 2 manipulátorů (varianta s 10 odvozními soupravami a 3 nakladači) hodnota klesá na 21,543 h, tedy dochází ke snížení konzumpce o 27,49 %. Další efektivní přidávání počtu nakladačů (4 a více nakladačů a 10 odvozních souprav) není vhodné s ohledem na rostoucí trend celkové spotřeby, kdy u 10 odvozních souprav a 10 manipulátorů dosahuje až hodnoty 30,824 h, tedy o 43,08 % více (než u 10 odvozních souprav a 3 nakladačů). Z výsledku simulace 6 je zřejmé, že změna ve vzdálenosti místa skládky má zásadní vliv především na možnost efektivního nasazení dalších nakladačů, spotřebu času odvozních souprav a je nutné v závislosti na tomto faktoru měnit poměr počtu manipulátorů a strojů pro odvoz balíků.

Simulace jednoznačně definují lokální minima spotřeby času a na základě nich lze zvolit optimální variantu počtu nakladačů a odvozních souprav. Slabým místem simulací jsou vstupní hodnoty, které vedoucí pracovník musí zadat, aby získal výsledky. V případě, že hodnoty výnosů, rychlosti pojezdu odvozních souprav, nebo nakladačů budou nepřesné, může dojít k výrazným chybám ve výpočtu a k volbě nevhodné varianty. Slabinou může být také značná variabilita možností manipulace s balíky, které tato práce nepostihuje všechny a není tedy univerzálním nástrojem pro odhad.

V praxi je možné nasazení například samosběracích vozů na balíky, manipulátorů, které jsou schopny na čelním zdvihací zařízení manipulovat více než jeden balík a stejně tak je možné například na tříbodový závěs traktoru umístit přídatné zdvihací

zařízení. Variabilita manipulace balíků je obrovská a není reálné vytvořit univerzální software pro všechny možnosti.

Další nevýhodou je, že výstup z této práce je pouhý odhad pozic balíků, předpokládaných tras a spotřeb času. Není tedy možné podle těchto tras reálně jezdit a skutečné pojezdy budou neustále v dikci řidiče, přičemž každý řidič pracuje podle svých schopností. Při měření pokusu byl na odpolední část vyměněn řidič nakladače a bylo zřejmé, že se rychlost nakládky snížila. Lze tedy předpokládat, že ani časové hodnoty získané na základě simulace z této práce jsou pouze aproximacemi, které přibližně modelují reálný provoz.

Na druhou stranu pro optimalizaci počtu odvozních souprav a nakladačů to stále může být dostačující. Abychom byli schopni jezdit podle navržených pojezdových tras, bylo by nutné přesně lokalizovat balíky. To by bylo možné buď snímkováním plochy s balíky pomocí dronu a propojení těchto snímků s mapami, nebo přímým označováním pomocí GPS lokátoru již v průběhu lisování. V praxi se však na manipulaci a odvoz balíků sena a slámy používají starší stroje, které dovybavit GPS navigací by bylo ekonomicky nerentabilní a takový přístup je tedy spíše otázkou budoucnosti.

Závěr

Zemědělství je základním kamenem lidské společnosti, na který jsou kladeny stále větší nároky. Lidská společnost je dynamicky rostoucí a dosahuje již téměř 8 miliard obyvatel, přičemž jejich počet se za posledních 60 let více než zdvojnásobil. Významně vzrůstá potřeba produkce základních potravin a současně je nutný důraz na minimalizaci vstupních surovin, především fosilních zdrojů. Jedním ze způsobů, jak zvýšit efektivitu je zavádění nových technologií.

Technika aplikovaná v praxi, proměnila celou společnost a umožnila nahrazení lidské práce stroji. Stroje zvyšují množství produkce, její kvalitu, snižují její cenu, významně zlepšují ekonomickou efektivitu a minimalizují negativní dopady hospodářské činnosti na životní prostředí. Prudký rozvoj, ke kterému došlo v předešlých desetiletích, byl umožněn rozvojem v oblasti elektroniky. Počítače jsou schopny ovládat prakticky všechny stroje a umožnily nástup čtvrté průmyslové revoluce. V zemědělství se aplikují technologie GPS, autonomní stroje a mnohá zařízení umožňující sběr a zpracování informací, které následně umožňují aplikovat například variabilní hnojení, postřikování, nebo zpracování půdy.

Nové technologie jsou však finančně náročné na pořízení, a proto se implementují především v sektorech s nejvyšší přidanou hodnotou, kde je investice návratná v „rozumném“ čase. Oblast manipulace a odvozu balíků sena, nebo slámy je z tohoto pohledu málo perspektivní a tyto činnosti vykonávají stroje staré i několik desítek let. Takto staré manipulátory a odvozní soupravy není možné dovybavit autonomním ovládáním a nelze tedy v praxi využít plného potenciálu optimalizace a nechat tyto stroje jezdit podle připraveného algoritmu. Lze ovšem jednoduchými výpočty optimalizovat počet nakladačů a odvozních souprav tak, aby nedocházelo ke zbytečným prostojům. Je zřejmé, že volbu počtu strojů ovlivňuje nejen množství balíků na pozemku, ale například také vzdálenost skladovacích prostor, pojezdová rychlost nakladačů a odvozních souprav. Odhadnout správně množství techniky není jednoduchý úkol vzhledem k velkému množství proměnných – v praxi se běžně stává, že nakladač čeká na návrat odvozních souprav, nebo naopak. Jednoduchá optimalizace na základě odhadu tak může snížit spotřebu času i o desítky procent.

Seznam použité literatury

- Abbaspour-Gilandeh, Y., Omid, M., Keyhani, A., 2007. *Simulation Program for Predicting Tractor Field Performance*. World Appl. Sci. J. 2, 552–558. <https://doi.org/10.13140/2.1.4307.0409>
- AGRIS.CZ (2023). *Navádění a řízení* [online] [cit. 10. 2. 2023]. Dostupné z: <https://www.agrics.cz/produkty/precizni-zemedelstvi/navadeni-a-rizeni>
- Agri-precision (2020). *Monitoring zemědělských strojů* [online] [cit. 17. 3. 2021]. Dostupné z: <https://www.agri-precision.cz/produkty/monitoring-stroju>
- Aires, M. (2019). *Talhão Sistematizá-lo Pode Aumentar nebo Rendimento Operacional*. [online] [cit. 24. 6. 2019]. Dostupné z: http://www.jornalparana.com.br/materia/ver_edicao.php?id=1944andtipo=96
- Anselmi, R. (2008). *Sistematização correta reduz custo das operações no campo*. JornalCana, 171, 36.
- ASABE (2005). *Uniform Terminology for Agricultural Machinery Management*; ASABE: St. Joseph, MI, USA.
- Bauer, F., a kolektiv (2006). *Traktory*. Vyd. 1. Praha: Profi Press, 2006. 192 s. ISBN 80-86726-15-0.
- Biris, I., Sorin-Stefan, (2013). *Adaptive Tyre for Agricultural Trailer*. Agriculture, volume 2, ISSN No 227-8179, DOI: 10.15373/22778179/JULY2013/1.
- Bell, B., Rickatson, M., (2015). *Farm Machinery 6th Edition*. 5M Publishing Ltd, ISBN 978-1-910456-06-4.
- Beneš, P. (2023) *Nová generace lisů na hranolové balíky*. Mechanizace zemědělství 7, 2023, Profi Press s.r.o.
- Bochtis, D.D., Vougioukas, S.G. (2008). *Minimising the non-working distance travelled by machines operating in a headland field pattern*. Biosyst. Eng. 101, 1–12.
- Bochtis, D.D., Sørensen, C.G., (2010 a). *The vehicle routing problem in field logistics: Part II*. Biosyst. Eng. 105, 180–188. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2009.10.006>
- Bochtis, D.D., Sørensen, C.G., Vougioukas, S.G., (2010 b). *Path planning for in-field navigation-aiding of service units*. Comput. Electron. Agric. 74, 80–90. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2010.06.008>
- Bochtis, D.D., Sørensen, C.G., Green, O. (2012). *A DSS for planning of soil-sensitive field operations*. Decis. Support Syst. 53, 66–75.
- Bochtis, D.D., Sørensen, C.G., Busato, P., Berruto, R., (2013). *Benefits from optimal route planning based on B-patterns*. Biosyst. Eng. 115, 389–395. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.04.006>
- Bochtis, D.D., Sørensen, C.G.C., Busato, P. (2014). *Advances in agricultural machinery management: A review*. Biosyst. Eng. 126, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.07.012>
-

-
- Bochtis, D., Griepentrog, H.W., Vougioukas, S., Busato, P., Berruto, R., Zhou, K. (2015). *Route planning for orchard operations*. *Comput. Electron. Agric.* 113, 51–60.
- Bochtis, D., Sørensen, C. A. G., Kateris, D. (2018). *Operations Management in Agriculture, 1st ed.* Academic Press: Cambridge, MA, USA. Elsevier: Amsterdam, The Netherlands.
- Bottarelli, L., Bicego, M., Blum, J., Farinelli, A., (2019). *Orienteering-based informative path planning for environmental monitoring*. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 77, 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.09.015>
- Canon Group (2015). *Návod k použití pro videokameru LEGRIA HF G25*. [online] [cit. 12. 8. 2021]. Dostupné z: https://www.canon.cz/support/consumer_products/products/camcorders/digital/hdv_series/hf_g25_e.html?type=manuals&manualid=tcm:126-1058448#disclaimer
- Cariou, C., Lenain, R., Thuilot, B., Humbert, T., Berducat, M. (2010). *Maneuvers automation for agricultural vehicle in headland*. In *Proceedings of the International Conference on Agricultural Engineering*, Clermont-Ferrand, France, 6–8.
- Casoli, P., Gambarotta, A., Pompini, N., Riccò, L. (2014). *Development and application of co-simulation and “control-oriented” modeling in the improvement of performance and energy saving of mobile machinery*. *Energy Procedia* 45, 849–858. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.090>
- Cervi, R.G. (2013). *Modelagem Matemática Para Maximização da Produção da Cana-de-Açúcar (Saccharum spp.) e Impactos Sobre o Custo de Operações Mecanizadas de Corte e Carregamento*. Ph.D. Thesis, São Paulo State University, São Paulo, Brazil.
- Darnhofer, I., Gibbon, D., Dedieu, B., (2012). *Chapter 13 Simulation models in Farming Systems Research: potential and challenges*. *Farming Syst. Res. into 21st Century New Dyn.* 281–306. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-4503-2>.
- Day, W., Pajares, G., Ribeiro, A., (2011). *Engineering advances for input reduction and systems management to meet the challenges of global food and farming futures: A new route operator for optimal coverage path planning for a fleet in an agricultural environment*. *J. Agric. Sci.* 2011, 149, 55–61.
- Domša, J. (2018) *Stanovení poloměru otáčení u traktorů New Holland T9, Case Quadtrac a John Deere 9RX pro potřeby počítačových modelů* [online] [cit. 5. 12. 2022]. Dostupné z: https://dspace.jcu.cz/bitstream/handle/123456789/39055/Stanoveni_polomeru_otaceni_u_traktoru_New_Holland_T9_Case_Quadtrac_a_John_Deere_9RX_pro_potreby_pocitacovych_modelu.pdf?sequence=1
- Díaz, J.A., Perez, H.G. (2000). *Simulation and optimization of sugar cane transportation in harvest season*. In *Proceedings of the Winter Simulation Conference*, Orlando, FL, USA, 10–13 December.
- Fakulta zemědělská a technologická, (2020). *DJI M300*. [online] [cit. 15. 2. 2022]. Dostupné z: <https://www.fzt.jcu.cz/cz/fakulta/katedry/katedra-krajinného-managementu/bezpilotni-systemy/dji-m300>
-

-
- Filip, M., Zoubek, T., Bumbalek, R., Cerny, P., Batista, C.E., Olsan, P., Bartos, P., Kriz, P., Xiao, M., Dolan, A., Findura, P. (2020). *Advanced Computational Methods for Agriculture Machinery Movement Optimization with Applications in Sugarcane Production*. *Agriculture* 2020. 10, 434. <https://doi.org/10.3390/agriculture10100434>
- Flick, Daniel, E., Nigon, Cyrus, M., Shinnars, Kevin, J., Friede, Joshua, C. (2019). *Control system for a continuous compaction large square baler*. *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 165, 104969, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104969>
- Galceran, E., Carreras, M., (2013). *A survey on coverage path planning for robotics*. *Rob. Auton. Syst.* 61, 1258–1276. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2013.09.004>
- Gašparík, M., Gaff M., (2016). *Manipulační a dopravní technika I*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, ISBN 978-80-213-2619-4.
- Gilpin, L., (2015). *How Big Data Is Going to Help Feed Nine Billion People by 2050*. TechRepublic. [online] [cit. 12. 4. 2022]. Dostupné z: <http://www.techrepublic.com/article/how-big-data-is-going-to-help-feed-9-billion-people-by-2050/>
- Goldemberg, J., Coelho, S.T., Guardabassi, P. (2008). *The sustainability of ethanol production from sugarcane*. *Energy Policy*, 36, 2086–2097.
- Grisso, R., Webb, E.G.; Cundiff, J.S. (2020). *In-Field Performance of Biomass Balers*. *Agri Engineering*, 2, 568-580. <https://doi.org/10.3390/agriengineering2040038>
- Guevara, L., Michałek, M., Marcin, Ch., Fernando, A. (2020). *Headland turning algorithmization for autonomous N-trailer vehicles in agricultural scenarios*. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volume 175, ISSN 0168-1699. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105541>
- Hameed, I.A., Bochtis, D.D., Sørensen, C.G., Vougioukas, S., (2012). *An object-oriented model for simulating agricultural in-field machinery activities*. *Comput. Electron. Agric.* 81, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2011.11.003>
- Hameed, I.A., Bochtis, D.D., Sørensen, C.G., Jensen, A.L., Larsen, R., (2013a). *Optimized driving direction based on a three-dimensional field representation*. *Comput. Electron. Agric.* 91, 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.12.009>
- Hameed, I.A., Bochtis, D., Sørensen, C.A. (2013b). *An optimized field coverage planning approach for navigation of agricultural robots in fields involving obstacle areas*. *Int. J. Adv. Robot. Syst.* 10. <https://doi.org/10.5772/56248>
- Hameed, I.A., La Cour-Harbo, A., Osen, O.L., (2016). *Side-to-side 3D coverage path planning approach for agricultural robots to minimize skip/overlap areas between swaths*. *Rob. Auton. Syst.* 76, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.11.009>
- Han, J. (2019). *An efficient approach to 3D path planning*. *Inf. Sci. (Ny)*. 478, 318–330. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2018.11.045>
- Hunt, D. (2001). *Farm Power and Machinery Management, 10th ed.*; Iowa State Press: Iowa City, IA, USA.
-

-
- Jensen, M.A.F., Bochtis, D., Sorensen, C.G., Blas, M.R., Lykkegaard, K.L., (2012). *In-field and inter-field path planning for agricultural transport units*. Comput. Ind. Eng. 63, 1054–1061. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2012.07.004>
- Jensen, M.A.F. (2013). *Algorithms for Operational Planning of agricultural field operations* 23.
- Jensen, M.F., Bochtis, D., Sørensen, C.G. (2015). *Coverage planning for capacitated field operations, part II: Optimisation*. Biosyst. Eng. 139, 149–164. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.07.002>
- Jin J., Tang, L. (2010). *Optimal Coverage Path Planning for Arable Farming on 2D Surfaces*. Trans. ASABE 53, 283–295. <https://doi.org/10.13031/2013.29488>
- Jin, J., Tang, L. (2011). *Coverage path planning on three-dimensional terrain for arable farming*. Journal of Field Robotics 28 (3), 424–440, <https://doi.org/10.1002/rob.20388>
- John Deere (2021). *S160* [online] [cit. 07. 06. 2021]. Dostupné z: <https://www.deere.cz/cs/lisy/lis-na-mal%C3%A9-hranat%C3%A9-bal%C3%ADky/s160/>
- Krepl V. (2006). *Farm machinery*. Prague: Czech University of Agriculture, Institute of Tropics and Subtropics. ISBN 80-213-1513-X.
- Krone (2020). *KRONE BiG Pack – nová generace lisů*. [online] [cit. 07. 06. 2021]. Dostupné z: <https://media.mykrone.green/index.php?eID=dump-File&t=f&f=96189&token=24f80a0ca3c6871b0923e2bf3b591d2a7047da36>
- Kroulík, M., Mašek, J., Kvíz, Z., Jošt, B., Prošek, V., (2011). *Sensors connection for yield determination on round balers, with variable chamber*, Res. Agric. Eng., 57(2), pp. 51–55
- Kumhála, F. (2007). *Zemědělská technika: stroje a technologie pro rostlinnou výrobu*. V Praze: Česká zemědělská univerzita, ISBN 978-80-213-1701-7.
- Lacour, S., Burgun, C., Perilhon, C., Descombes, G., Doyen, V. (2014). *A model to assess tractor operational efficiency from bench test data*. J. Terramechanics 54, 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.jterra.2014.04.001>
- Lee, J.W., Kim, J.S., Kim, K.U. (2016). *Computer simulations to maximise fuel efficiency and work performance of agricultural tractors in rotovating and ploughing operations*. Biosyst. Eng. 142, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.11.012>
- Limont, A., Limont, Z., Lomakin, V. (2020). *Specific tonnage capacity of tractor trailers*. DOI: 10.31473/2305-5987-2020-1-26(40)–14.
- Liu, C., Zhao, X., Du, Y., Cao, C., Zhu, Z., Mao, E. (2018). *Research on static path planning method of small obstacles for automatic navigation of agricultural machinery*. IFAC-PapersOnLine 51, 673–677. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.119>
- Michalek, M., (2015). *Motion control with minimization of a boundary off-track for non-Standard N-trailers along forward-followed paths*. In: IEEE International Conference on Automation Science and Engineering, Gothenburg volume 2015 – Octob, pp. 1564–1569.
-

-
- Miodragović, R., Tanasijević, M., Mileusnić, Z., Jovančić, P. (2012). *Effectiveness assessment of agricultural machinery based on fuzzy sets theory*. Expert Syst. Appl. 39, 8940–8946. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.013>
- Mittal, G.S. (2013). *Artificial Neural Network (ANN) Based Process Modeling, Handbook of Farm, Dairy and Food Machinery Engineering: Second Edition*. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-385881-8.00018-5>
- Nazarahari, M., Khanmirza, E., Doostie, S., (2019). *Multi-objective multi-robot path planning in continuous environment using an enhanced genetic algorithm*. Expert Syst. Appl. 115, 106–120. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2018.08.008>
- Oksanen, T.; Visala, A. (2009). *Coverage path planning algorithms for agricultural field machines*. J. Field Robot. 26, 651–668.
- Poduška, R. (2019) *Stanovení poloměrů otáčení u zemědělských souprav* [online] [cit. 7. 12. 2022]. Dostupné z: https://dspace.jcu.cz/bitstream/handle/123456789/41535/Bakalarska_prace_Radek_Poduska.pdf?sequence=1
- Prakash, N., Loganathan, M., (2014). *Energy Efficient Autonomous Field Vehicle for Complete Coverage 3*, 1325–1328.
- Safa, M., Samarasinghe, S. (2013). *Modelling fuel consumption in wheat production using artificial neural networks*. Energy 49, 337–343. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.055>
- Salvi, J.V., Oliveira, P., Fioranvente F. S. R., Santos, J. A. (2010). *Análise do desempenho operacional e econômico da colheita mecanizada em um sistema de produção de cana-de-açúcar*. In Congressi da Sociedade Brasileira de Economia Administracao e Sociologia Rural, 48. vydání; Federální univerzita Mato Grosso do Sul: Balneário Camboriú, Brazílie, 2010; s. 1–18.
- Sarhan, A. M. M., Al – Katary, H. S., El-Awady, M. N. (2010). 'A STUDY ON AGRICULTURAL TRACTORS STEERING MECHANISM 2- The turning radius 3- Deviation of the turning center (DTC)', *Misr Journal of Agricultural Engineering*, 27(3), pp. 780-798. doi: 10.21608/mjae.2010.105571
- Seyyedhasani, H., Dvorak, J. S. (2018). *Dynamic rerouting of a fleet of vehicles in agricultural operations through a Dynamic Multiple Depot Vehicle Routing Problem representation*. Biosyst. Eng. 171, 63–77.
- Spekken, M., de Bruin, S. (2013) *Optimized routing on agricultural fields by minimizing maneuvering and servicing time*. Precis. Agric. 14, 224–244.
- Spekken, M., Molin, J. P., Romanelli, T. L. (2015). *Cost of boundary manoeuvres in sugarcane production*. Biosyst. Eng. 129, 112–126.
- STROM (2020). *Transportní technika pro přepravu balíků*, [online] [cit. 5. 11. 2021]. Dostupné z: <https://www.strom.cz/zemedelska-technika/transportni-technika/prepravniky-baliku/t-022-10-000-kg>
- Syrový, O., et. al. (2008 a) *Úspory energie v technologiích rostlinné výroby*. Praha: Výzkumný ústav zemědělské techniky, ISBN 978-80-86884-44-8.
- Syrový, O., et. al. (2008 b) *Doprava v zemědělství*, Profi Press, EAN: 9788086726304.
- Utemisov, A. a Yuldashova, K. (2022). Automatic control systems, DOI: 10.32743/UniTech.2022.98.5.13710
-

-
- Utamima, A., Reiners, T., Ansariipoor, A., Seyyedhasani, H. (2018). *Contemporary Approaches and Strategies For Applied Logistics*. In *The Agricultural Routing Planning in Field Logistics*; Wood, L.C., Ed.; IGI Global: Hershey, PA, USA, pp. 261–283.
- Utamima, A., Reiners, T., Ansariipoor, A. H. (2019). *Optimisation of agricultural routing planning in field logistics with Evolutionary Hybrid Neighbourhood Search*. *Biosyst. Eng.* 184, 166–180.
- Vobosystem (2021). *KRONE – svinováci lisy Comprima X-treme*. [online] [cit. 08. 06. 2021]. Dostupné z: <https://www.prima-extemevobosystem.cz/krone-lisy-com>
- Vougioukas, S., (2009). *A framework for motion coordination of small teams of agricultural robots*. In: van Henten, E.J., Goense, D., Lokhorstpp, C. (Eds.), *Proceedings of the Precision Agriculture '09*, pp. 585–593.
- Witney, B., (1988). *Choosing and Using Farm Machines, 1st ed.*; Longman Scientific & Technical: Madison, WI, USA.
- Yakoubi, M. A., Laskri, M. T. (2016). The path planning of cleaner robot for coverage region using Genetic Algorithms. *J. Innov. Digit. Ecosyst.* 3, 37–43. <https://doi.org/10.1016/j.jides.2016.05.004>
- Yehua Shang, Zhijun Meng, Yue Cong, Jianjun Dong, Changhai Luo, Zhenghe Song, (2021). Development of a control system with remote monitoring function for round baler, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 182, 2021, 106044, ISSN 0168-1699, <https://doi.org/10.1016/j.compag.2021.106044>
- Yu, T. E., English, B. C., He, L. *et al.* (2016). *Analyzing Economic and Environmental Performance of Switchgrass Biofuel Supply Chains*. *Bioenerg. Res.* 9, 566–577. <https://doi.org/10.1007/s12155-015-9699-6>
-

Seznam obrázků

Obrázek 1.1: Korespondence mezi pohybem zemědělských strojů při vykonávání polních prací a systémy VRP (Bochtis, 2008)	14
Obrázek 1.2: Ukázky možného otáčení stroje na souvrati (Bochtis, 2008).....	14
Obrázek 1.3: Příklad konkávní 2D pracovní oblasti (a) a ilustrativní generované trajektorie s využitím přímočarých (b) a zakřivených (c) tras (Hameed, 2013a)	16
Obrázek 1.4: Dekompozice pracovní oblasti dle Morse (Galcer, 2013).....	18
Obrázek 1.5: Dekompozice pracovní oblasti dle Morse pomocí soustředných kružnic (Galcer, 2013)	18
Obrázek 1.6: Ilustrace zkrácení záběru pracovního stroje o vzdálenost a (vlevo). Schématické znázornění vzniku překryvu, respektive neopracované části pozemku při realizaci polních prací na svahu (vpravo) (Hameed, 2016)	19
Obrázek 1.7: Typy běžných manévřů při operacích v terénu (Filip et al., 2020)	22
Obrázek 2.1: Pronar T024 (STROM, 2020).....	29
Obrázek 2.2: Pronar T028 KM (STROM, 2020)	30
Obrázek 2.3: Příklady dvou tras generovaných pro soupravu se 4 přívěsy a super-eliptickými otáčkami na souvrati (Guevara et al, 2019)	31
Obrázek 3.1: Lis na malé hranolovité balíky (John Deere, 2021)	34
Obrázek 3.2: Lis na velké hranolovité balíky Big Pack (Krone, 2020)	36
Obrázek 5.1: DJI M300 s kamerou H20T (Fakulta zemědělská a technologická, 2020)	42
Obrázek 5.2: Schéma ITineris (Agri-precizion, 2020).....	43
Obrázek 6.1: Vstupní mapa – Slabec	44
Obrázek 6.2: Binarizovaný obraz pozemku	45
Obrázek 6.3: Kontrolní snímek znázorňující hranice pozemku.....	47
Obrázek 6.4: Binarizace obrazu pro získání referenční vzdálenosti	50
Obrázek 6.5: Převrácený tvar pozemku	52
Obrázek 6.6: Reálný tvar pozemku.....	53
Obrázek 6.7: Vygenerované body.....	53
Obrázek 6.8: Vygenerované body balíků.....	54
Obrázek 6.9: Výstupní Centroidy	54
Obrázek 6.10: Výměna členů skupiny centroidu nově zpracovávaným bodem, jehož vzdálenost je menší, než nejvzdálenější bod skupiny	55

Obrázek 6.11: Výměna vzdálených bodů mezi skupinami pro zajištění větší skupinové homogenity v prostoru a snížení průměrné vzdálenosti ve skupinách.....	59
Obrázek 6.12: Grafické znázornění pracovních cyklů a principu výpočtu	67
Obrázek 6.13: Schématický popis funkce algoritmu	71
Obrázek 6.14: Mapa pokusného pozemku s číselným označením balíků.....	72
Obrázek 6.15: Mapa tras nakladače z GPS	73
Obrázek 6.16: Mapa odhadovaného rozložení balíků, pozemek 1	76
Obrázek 6.17: Mapa odhadovaného rozložení skupin, pozemek 1.....	77
Obrázek 6.18: Graf závislosti počtu odvozených souprav, nakladačů a spotřeby času – simulace 1 (pozemek 1, vzdálenost 1 800 m místa skládky).....	77
Obrázek 6.19: Graf závislosti odvozních souprav, nakladačů a spotřeby času – simulace 2 (pozemek 1, vzdálenost 8 600 m od místa skládky)	81
Obrázek 6.20: Vstupní snímek pro simulaci – pozemek 2.....	81
Obrázek 6.21: a) obrys polygonu hranic pozemku 2, b) predikované rozmístění balíků, c) vygenerované body centroidů, d) rozdělení balíků do skupin	85
Obrázek 6.22: Graf závislosti počtu odvozních soustav, nakladačů a spotřeby času – simulace 3 (pozemek 2, vzdálenost 400 m od místa skládky).....	86
Obrázek 6.23: Graf závislosti odvozních souprav, nakladačů a spotřeby času – simulace 4 (pozemek 2, vzdálenost 7 300 m od místa skládky)	89
Obrázek 6.24: Vstupní snímek simulace – pozemek 3 lokalita na Větrníku	90
Obrázek 6.25: a) obrys polygonu hranic pozemku 3, b) predikované rozmístění balíků, c) vygenerované body centroidů, d) rozdělení balíků do skupin	93
Obrázek 6.26: Graf závislosti počtu odvozních souprav, nakladačů a spotřeby času – simulace 5 (pozemek 3, vzdálenost 2 100 m od místa skládky)	94
Obrázek 6.27: Graf závislosti počtu odvozních souprav, nakladačů a spotřeby času – simulace 6 (pozemek 3, vzdálenost 8 700 m od místa skládky)	97

Seznam tabulek

Tabulka 2.1: Parametry vybraných přípojných vozidel Pronar (STROM, 2020)	29
Tabulka 6.1: Výsledky pozemek 1, vzdálenost 1 800 m od místa skládky – nejvhodnější varianty (simulace 1)	73
Tabulka 6.2: Výsledky pozemek 1, vzdálenost 1 800 m od místa skládky (simulace 1)	74
Tabulka 6.3: Výsledky pozemek 1, vzdálenost 8 600 m od místa skládky – nejvhodnější varianty (simulace 2)	78
Tabulka 6.4: Výsledky pozemek 1, vzdálenost 8 600 m od místa skládky (simulace 2)	78
Tabulka 6.5: Výsledky pozemek 2, vzdálenost 400 m od místa skládky – nejvhodnější varianty (simulace 3).....	82
Tabulka 6.6: Výsledky pozemek 2, vzdálenost 400 m od místa skládky (simulace 3)	82
Tabulka 6.7: Výsledky pozemek 2, vzdálenost 7 300 m od místa skládky – nejvhodnější varianty (simulace 4)	86
Tabulka 6.8: Výsledky pozemek 2, vzdálenost 7 300 m od místa skládky (simulace 4)	87
Tabulka 6.9: Výsledky pozemek 3, vzdálenost 2 100 m od místa skládky – nejvhodnější varianty (simulace 5)	90
Tabulka 6.10: Výsledky pozemek 3, vzdálenost 2 100 m od místa skládky (simulace 5)	91
Tabulka 6.11: Výsledky pozemek 3, vzdálenost 8 700 m od místa skládky – nejvhodnější varianty (simulace 6)	94
Tabulka 6.12: Výsledky pozemek 3, vzdálenost 8 700 m od místa skládky (simulace 6)	95
