

UNIVERZITA PARDUBICE
DOPRAVNÍ FAKULTA JANA PERNERA

Využití simulace pro stanovení optimální kapacity
dráhového systému letiště

Bc. Vlastimil Andrlé

Diplomová práce
2008

Univerzita Pardubice
Dopravní fakulta Jana Pernera
Katedra informatiky v dopravě
Akademický rok: 2007/2008

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Vlastimil ANDRLE**

Studijní program: **N3708 Dopravní inženýrství a spoje**

Studijní obor: **Aplikovaná informatika v dopravě**

Název tématu: **Využití simulace pro stanovení kapacity dráhového systému letišť**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Práce bude zaměřena na stanovení maximální kapacity dráhového systému na vybraném letišti. Práce by měla obsahovat simulaci dráhového systému před a po změně uspořádání a zhodnocení vlivu tohoto uspořádání na maximální kapacitu. Pro stanovení bude použit simulační program Arena.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy: **50 normostran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. **KAZDA, A.** *Letiská, Design a prevádzka. Žilina : Vysoká škola dopravy a spojov v Žilině, 1995. ISBN 80-7100-240-2.*
2. **PRŮŠA, J. a kol.** *Svět letecké dopravy. Praha : Gallileo CEE Service ČR s. r. o., 2007. ISBN 80-239-9206-9.*
3. **KERNER, L., KULČÁK, L., SÝKORA, V.** *Provozní aspekty letišť. Praha : ČVUT, 2003. ISBN 80-010-2841-0.*
4. **KELTON, W. D., SADOWSKI, P. R., STURROCK, T. D.** *Simulation with Arena. Third edition. New York : McGraw-Hill Companies, Inc., 2004. ISBN 00-728-5694-7.*

Vedoucí diplomové práce:

Ing. David Šourek

Katedra technologie a řízení dopravy

Datum zadání diplomové práce:

4. prosince 2007

Termín odevzdání diplomové práce:

4. června 2008

prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

děkan

L.S.

doc. Ing. Josef Volek, CSc.

vedoucí katedry

V Pardubicích dne 30. listopadu 2007

Souhrn

Tato diplomová práce se zabývá problematikou spojenou s určením optimální kapacity dráhového systému Letiště Praha Ruzyně. Dále se zaměřuje na možnost provedení určitých změn za účelem zvýšení stávající kapacity dráhového systému. Pro namodelování dráhového systému byl použit nástroj Arena od firmy Rockwell Automation.

Klíčová slova

Dráhový systém, modelování, simulace, optimální kapacita, Letiště Praha Ruzyně

Abstract

This graduation theses be engaged in problems joint with determination optimum capacity of runway system on airport Prague Ruzyně. Below be focusing on possibility implementation certain changes with the view of increasing current capacity runway systém. For simulation runway system was used tool Arena from company Rockwell Automation.

Keywords

Runway system, modelling, simulation, optimal capacity, Prague Ruzyně Airport

Poděkování:

Rád bych poděkoval především vedoucímu práce Ing. Davidu Šourkovi, PhD. za všechny rady, připomínky a materiály, které mi poskytl při zpracování diplomové práce. Děkuji také všem, kdo mi v kterékoli fázi práce pomohli radou, případně jinak.

Obsah

1	Úvod	10
2	Problémy letecké dopravy	11
2.1	Omezená kapacita letišť	11
2.1.1	Omezená kapacita terminálů	12
2.1.2	Omezená kapacita provozních ploch.....	13
2.2	Omezená kapacita letových cest ve vzdušném prostoru	13
2.2.1	Rozdělení vzdušného prostoru.....	13
2.2.2	Současný vývoj a budoucnost vzdušného prostoru	15
2.3	Různá politická a ekonomická situace.....	16
2.3.1	Politická situace	16
2.3.2	Ekonomická situace	17
3	Řešení kapacitních problémů letišť	18
3.1	Měření kapacity letiště.....	18
3.2	Zvýšení kapacity terminálu	19
3.2.1	Metoda systémové změny	20
3.2.2	Výstavba nového terminálu	20
3.2.3	Situace na Letišti Praha Ruzyně - terminálová kapacita	21
3.3	Zvýšení kapacity dráhového systému.....	22
3.3.1	Úprava a zavedení nových technologií při řízení letového provozu	23
3.3.2	Úprava stávajícího dráhového systému	23
3.3.3	Výstavba nové přistávací a/nebo vzletové dráhy	24
3.3.4	Situace na Letišti Praha Ruzyně - dráhová kapacita.....	25
4	Simulace dráhového systému Letiště Praha	29
4.1	Pojem simulace.....	29
4.2	Simulace a simulátory pro řízení leteckého provozu	29
4.3	Simulační prostředí.....	30
4.3.1	Firma Rockwell Automation	30
4.3.2	Aplikace Arena	30
4.4	Potřebné informace pro tvorbu simulačního modelu	31
4.4.1	Informace o stávajícím dráhovém systému	31
4.4.2	Informace o systému s paralelní dráhou	34
4.5	Simulace stávajícího systému.....	36
4.5.1	Tvorba simulačního modelu	36
4.5.2	Tvorba on-line animační podpory	42

4.5.3	Získání výsledků stávajícího systému	43
4.6	Simulace systému s paralelní dráhou	44
4.6.1	Doplnění simulačního modelu o paralelní dráhu.....	44
4.6.2	Doplnění on-line animační podpory o paralelní dráhu.....	46
4.6.3	Získání výsledků systému s paralelní dráhou	47
4.7	Porovnání výsledků obou systémů	48
4.8	Zhodnocení vlivu paralelní dráhy na kapacitu na letišti.....	49
5	Závěr.....	50
	Soupis bibliografických citací:	51

Seznam ilustrací

Obrázek 1: Vývoj letecké dopravy v letech 1999-2005 mezi EU a zbytkem světa.....	12
Obrázek 2: Funkční bloky "One Sky"	15
Obrázek 3: Trend světového vývoje objemu osobní letecké dopravy	16
Obrázek 4: Srovnávací pohled na Letiště Praha Ruzyně - rok 2001 a rok 2006	21
Obrázek 5: Nákres rychlého výjezdu z RWY	24
Obrázek 6: Vizualizace pražského letiště po výstavbě paralelní dráhy 06R /24L.....	27
Obrázek 7: Letištní ICAO mapa Letiště Praha Ruzyně.....	32
Obrázek 8: Denní špičky odletů a příletů na Letišti Praha Ruzyně	34
Obrázek 9: Další návrh paralelní dráhy	35
Obrázek 10: Nastavení modulu Create	39
Obrázek 11: Nastavení modulu Decide	40
Obrázek 12: Ukázka křižovatky pojezdových drah F_L_H	41
Obrázek 13: Opatření proti křížení entit na dráze 06/24 (směr 24).....	42
Obrázek 14: Ukázka Route a Station v animačním schématu	43
Obrázek 15: Náhled na výsledný model stávajícího systému	44
Obrázek 16: Nové opatření proti křížení na 06R24L (směr 06)	45
Obrázek 17: Animační model s paralelní dráhou	46

Seznam tabulek

Tabulka 1: Fyzikální vlastnosti RWY na Letišti Praha Ruzyně	25
Tabulka 2: Výsledky všech variant režimu 1	47
Tabulka 3: Výsledky všech variant režimu 2	48

1 Úvod

Ve své diplomové práci jsem se zaměřil na leteckou dopravu, která se mi vždy jevila jako velice zajímavý a technicky vyspělý druh dopravy. Celé toto rozsáhlé odvětví, kterým letecká doprava bezesporu je, je plně propojeno s informačními technologiemi. Právě toto spojení jsem chtěl ve své práci předvést a tím ukázat, jak můžeme v letecké dopravě informační technologie využít. Jako příklad propojení informatiky a letecké dopravy jsem si zvolil využití simulace pro stanovení kapacity dráhového systému letiště. To by nám mohlo pomoci v řešení problémů, které nyní mnoho letišť na světě řeší. Především dráhové systémy velkých světových letišť mezinárodního charakteru jsou momentálně nejvíce vytíženou a nedostačující částí letecké dopravy.

Cílem druhé kapitoly bylo vymezení problémů, které momentálně leteckou dopravu sužují a to především problémy kapacitní z pohledu letišť, ale i problémy přeplněného vzdušného prostoru. Částečně jsem zmínil i ekonomické a politické problémy, které se mohou týkat především leteckých společností.

Třetí kapitola pojednává již konkrétněji o možnosti řešení kapacitních problémů letišť a to především cestou technických úprav či systémové změny. Také jsou zde uvedeny související informace o konkrétní situaci na Letišti Praha Ruzyně.

Ve čtvrté kapitole je seznámení se simulačním programem Arena a popis tvorby vlastní simulace dráhového systému Letiště Praha Ruzyně v této aplikaci. Nejprve je popisován postup pro vytvoření stávajícího dráhového systému a následně se zaměřuji na změny, jenž byly provedeny pro namodelování dráhového systému, který již počítá s paralelní dráhou ke stávající dráze 06-24. Dále je zde srovnání výkonu obou namodelovaných situací dráhového systému, pomocí porovnání čekacích dob na uvolnění dráhy při stávající situaci na letišti a čekacích dob u nové paralelní dráhy. Snažil jsem se zde také doporučit nejvýhodnější režim využívání vzletových a přistávacích drah, který by umožňoval čekací doby stlačovat na co nejmenší hodnotu a tím v podstatě zvyšoval optimální kapacitu dráhového systému.

Na závěr byl zhodnocen přínos této práce, zmíněna další možná řešení, uplatnění výsledků a návrhy, jak tuto práci dále rozvinout.

2 Problémy letecké dopravy

Letecká doprava je pravděpodobně nejrychlejší a nejpohodlnější způsob dopravy na velké vzdálenosti. Také je obecně mnohem levnější, než když cestujeme sami jiným způsobem dopravy. Například námořní a pozemní doprava vyjde mnohem draž, jestliže plánujeme dlouhé cesty. Proto si mnoho lidí oblíbilo létání, buď veřejnou dopravou nebo soukromým letadlem. Dalšími faktory, které činí leteckou dopravu oblíbeným způsobem dopravy jsou, že je mnohem bezpečnější než pozemní a námořní doprava a že šetří čas. Za normálních podmínek totiž překoná dopravní letadlo vzdálenost 900 km zhruba za jednu hodinu, zatímco s autem by vám to trvalo přibližně 9 hodin.

S rychlostí a kvalitou letecké dopravy roste její oblíbenost a tedy i počet lidí, kteří chtějí cestování letadlem využívat. Ale právě se zvyšujícím se počtem pasažerů vznikají letecké dopravě problémy, které začínají pomalu její dostupnost omezovat. Nemůžeme však zapomínat ani na letecké cargo, které je především kvůli své rychlosti stále vyhledávanějším druhem nákladní dopravy, a tak se i letecká nákladní doprava podílí na zhušťování leteckého provozu ve vzduchu i na zemi. Ne však všechny problémy letecké dopravy jsou ovlivňovány a způsobovány zvyšující se poptávkou po letecké dopravě. Jsou tu také jiné vlivy, jako je třeba politická a ekonomická situace daných oblastí.

2.1 Omezená kapacita letišť

Kapacitou určitého letištního zařízení rozumíme jeho schopnost pojmout určitý počet pohybů letadel, odbavených cestujících nebo přepravovaného nákladu. Měříme ji příslušnými výkonovými ukazateli za jednotku času, např. počet pohybů letadel za hodinu bude důležitým ukazatelem pro kapacitu vzletové a přistávací dráhy, počet odbavených cestujících za hodinu pak bude ukazatelem např. pro přepážky bezpečnostní kontroly na letišti. Na infrastrukturu letiště je nutné pohlížet jako na vzájemně propojený systém, jehož jednotlivé části musí být kapacitně sladěny. Plánování koordinovaného rozvoje kapacit je proto důležitým strategickým úkolem pro management letišť.[1]

Problém omezené kapacity stávajících letišť se týká především regionů jako je Severní Amerika, Evropa a Dálný východ. U prvních dvou jmenovaných se dá říci, že je to způsobeno hlavně rostoucí oblíbeností letecké dopravy, kdy lidé chtějí cestováním na střední a dlouhé vzdálenosti trávit co nejméně času a to přesně letecká doprava nabízí. V moderní době je to již nedílná součást života především západní společnosti, ať při zvládání pracovních úkolů, tak i při cestování ve volném čase. V oblasti Dálného východu je to spíše způsobeno nedostatečnou připraveností tamních letišť na nárůst poptávky po letecké dopravě v tomto dynamicky se rozvíjejícím regionu a na příliv turistů zejména z Evropy a Severní Ameriky. Mělo by se také zmínit, že během roku celkový objem letecké dopravy kolísá. Je to způsobeno poptávkou po letecké dopravě během letní sezóny, kdy je objem letecké dopravy největší. To je částečně podpořeno kromě pravidelných linek i tzv. charterovými lety, takže letiště musejí odbavovat kromě pravidelných letů i lety nepravidelné, což zvyšuje nároky právě na kapacitu letiště. Kdežto v zimních měsících je poptávka nižší, takže i objem letecké dopravy se znatelně snižuje.

Musíme brát v úvahu i to, že poptávka po letecké dopravě má stále vzestupnou tendenci, vždyť v Evropské unii narůstá ročně v průměru o 5,2 procenta. Pokud by tento trend pokračoval, do roku 2025 by se poptávka po letecké dopravě zvýšila dvaapůlkrát. Více než šedesát evropských letišť by v takovém případě nebylo schopno zvládat obvyklou poptávku v dopravní špičce bez zpoždění a značnou část poptávky by nemohlo uspokojit vůbec.

Momentální vývoj ukazuje na stále rostoucí rozdíl mezi kapacitou letišť a poptávkou po letecké dopravě.



Obrázek 1: Vývoj letecké dopravy v letech 1999-2005 mezi EU a zbytkem světa (zdroj: [7])

Krise kapacity letišť ohrožuje bezpečnost, efektivitu a konkurenceschopnost všech účastníků zapojených do řetězce letecké dopravy. Přetížení letecké infrastruktury s sebou přinese také ekologické a bezpečnostní náklady, neboť hustota a složitost operací dosáhnou nebývalé výše. Toto přetížení bude mít pravděpodobně vážný dopad na schopnost leteckých společností dodržovat své letové řády, zejména na centrálních letištích, a proto povede k nižší efektivitě odvětví letecké dopravy v problémových oblastech.

Jelikož se letištní infrastruktura skládá ze dvou hlavních subsystémů, je nutno zdůraznit, že u problému přeplněných letišť, resp. omezené kapacity letišť, musíme chápat, že to může být způsobeno dvěma odlišnými faktory a to buď kapacitou terminálů nebo kapacitou provozních ploch.

2.1.1 Omezená kapacita terminálů

Tento problém se týká především odbavovacího procesu, který je samozřejmě nezbytnou součástí letištní infrastruktury. Složitost odbavovacího procesu a počet subjektů, které jsou v něm zúčastněny, klade vysoké nároky na velikost a hlavně rozmístění jednotlivých subjektů v areálu terminálu. Mezi subjekty systému letiště patří například provozovatel letiště, složky policie a celní služba, odbavovací společnosti, plnicí společnosti a komerční firmy provozující letištní infrastrukturu.

Pro plynulý a bezproblémový chod letištních služeb je nutná důkladná koordinace činností, které jednotlivé subjekty provozují. Vnitřní uspořádání terminálu a způsob a kvalita provádění jednotlivých činností má rozhodující vliv na plynulost odbavovacího procesu.

Také bychom neměli zapomínat, že na letišti by se měly nacházet i komerční plochy pro restaurace, obchody a jiné služby, které zvyšují kvantitu, resp. i kvalitu služeb zákazníkovi a zvyšují tak celkovou spokojenost zákazníka se službami na letišti nabízenými. Tyto komerční služby musí být vyvážené k odbavovací infrastruktuře, neboť příjmy z komerčních ploch jsou pro efektivní fungování letiště velice důležité. Když bude

odbavovací proces probíhat plynule, tak to umožní zákazníkovi, aby se věnoval více nakupování či občerstvení, což přinese výnosy pro i letiště.

2.1.2 Omezená kapacita provozních ploch

Kapacitu provozních ploch je třeba rozdělit na:

- kapacitu dráhového systému,
- kapacitu pojezdového systému,
- kapacitu stojánek na odbavovací ploše.

Kapacita vzletové a přistávací dráhy odpovídá maximálnímu počtu přistávajících a vzlétajících letadel, při zohlednění fyzikálních omezení, která mají vliv na bezpečnost. U omezené kapacity dráhového systému jde především právě o bezpečnost, která by byla ohrožena při případném zvýšení provozu na drahách, které již mají úplně vyčerpanou kapacitu. Z toho důvodu se již běžně stává, že není některým leteckým společnostem umožněn přilet v optimálních časech, velká část poptávky po letecké dopravě tak může zůstat neuspokojena nebo se přesune na jiná mezinárodní letiště.

Vzletová a přistávací kapacita je u přeplněných centrálních letišť tíživým problémem, který má nepříznivé důsledky na vzájemnou konkurenceschopnost světových leteckých společností. Úpravy, které by zvýšily kapacitu dráhového systému letiště, jsou poměrně hodně náročné po finanční stránce projektu. Buď se může jednat o úpravu stávajícího dráhového systému, nebo o vybudování nových přistávacích a vzletových drah.

Jelikož nedostatečná kapacita dráhového systému bývá často úzkým hrdlem letiště, musíme s tím spojit i poptávku po letištních službách, která je velice závislá na jejich kvalitě. Jestliže je kvalita služeb letištem nabízených konstantní v průběhu dlouhých časových období, je poptávka po těchto službách vysoká. Avšak kolísavá kvalita není dobrou propagací přepravních zařízení, obzvláště tehdy, je-li kolísání kvality časově nepředvídatelné.

2.2 Omezená kapacita letových cest ve vzdušném prostoru

2.2.1 Rozdělení vzdušného prostoru

Tento problém, se kterým se letecká doprava potýká, je palčivým tématem nejvíce v oblasti Západní Evropy a Středního Východu. Struktura vzdušného prostoru je mezinárodní, překračuje hranice a umožňuje nám dlouhé lety v chráněném prostoru. Dlouhodobým vývojem došlo k organizačnímu uspořádání a postupnému sjednocení. Vzdušný prostor se začal členit a uspořádávat na letové informační oblasti (FIR), řízené oblasti (CTA), koncové řízené oblasti (TMA), řízené okrsky letišť (CTR) a ještě několik dalších, většinou časově vymezených oblastí. Nyní je vytvořena síť mezinárodních letových cest, které mají své unifikované mezinárodní označení od výchozího do koncového bodu. Tyto letové cesty navazují na příletové a odletové tratě letišť. Letové cesty můžeme ještě rozdělit na pevné letové cesty a na letové linie. U pevných letových cest se můžeme spolehnout na přesné vyznačení pomocí radionavigačních prostředků, jejichž směrování bývá nejčastěji dáno vstupními a výstupními body z letové informační oblasti.

Nárůst požadavků na využívání vzdušného prostoru všemi jeho skupinami uživatelů nám ukazuje další problém, se kterým se letecká doprava musí v současné době vyrovnávat. Současné předpovědi ukazují 50 % nárůst komerčních přepravních letů v Evropě do roku

2012 v porovnání s provozem v roce 2000. Je tedy jasné, že se kapacita vzdušného prostoru v Evropě musí zvýšit, aby bylo možné vyhovět těmto požadavkům. Jedna z hlavních oblastí změn, se týká organizace evropského vzdušného prostoru. Hlavní překážkou vytváření další kapacity je, že současná struktura evropského vzdušného prostoru je příliš složitá a různorodá.

Každý stát má zodpovědnost uspořádat si svůj vlastní vzdušný prostor, což souvisí s jednou z nejdůležitějších oblastí letecké dopravy a to je zajištění organizovaného a bezpečného pohybu letadel ve svém vzdušném prostoru. Je tedy velice důležité, aby všechny další pohledy, plánování a následné realizace byly sledovány a koordinovány ve spolupráci s ostatními státy, kterých se daná situace týká.

Ve vzdušném prostoru ČR se nachází několik prostorů, které jsou vymezeny jak horizontálně, tak i vertikálně.

Horizontálně je prostor rozdělen na:

- CTR – okrsky letišť,
- TMA – koncové řízené oblasti,
- LKP – zakázané prostory,
- CTA, TRA – dočasně omezené prostory, které jsou vyhlášeny na určitou dobu pro zálety a tréninkové lety,
- LKR – omezené prostory, vymezené převážně pro střelby,
- TSA – dočasně vymezené prostory, vyhrazené pouze pro přelety,
- AZR – řízené prostory sportovních letišť.

Vzdušný prostor se vertikálně dělí na třídy a v nich se liší pravidla létání.

Jsou určena pravidla která stanovují:

- jaké typy letů lze v daném prostoru provádět (IFR x VFR),
- zda a jaké služby poskytují stanoviště ŘLP,
- jaké jsou minimální meteorologické podmínky pro lety VFR,
- případná omezení rychlosti,
- požadavky na radiové spojení,
- zda let v prostoru dané třídy podléhá letovému povolení (nutné podat letový plán).

Vertikální rozdělení na třídy je následující:

- třída G – od země do 300m,
- třída E – od 300 do 2900m,
- třída D – od 2900m do 3800m,
- třída C – nad 3800m,

2.2.2 Současný vývoj a budoucnost vzdušného prostoru

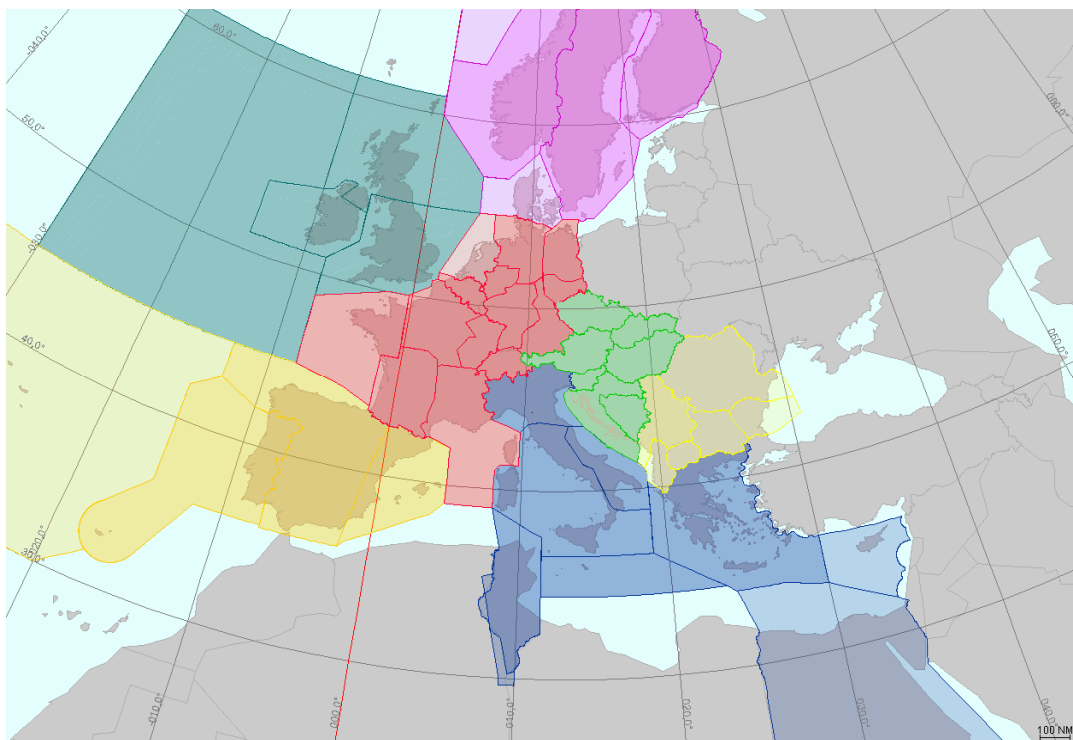
V současné době se hledají cesty, jak zabezpečit dostatečnou kapacitu vzdušného prostoru pro narůstající letecký provoz tak, aby zůstal bezpečný a plynulý. Již z podstaty letecké dopravy je jasné, že toho nelze dosáhnout jinak než mezinárodní spoluprací. Důležitým nástrojem jsou změny v uspořádání vzdušného prostoru tak, aby se postupně stávalo jednotným kontinuem, které není ovlivněno národními hranicemi a rozdílnými postupy. I ŘLP ČR, s.p. sleduje strategické cíle mezinárodních organizací, jichž je ČR členem či na jejichž členství se připravuje.

EUROCONTROL - One Sky

Mezinárodní agentura EUROCONTROL formuluje základní požadavky uspořádání vzdušného prostoru v projektu „Strategie vzdušného prostoru EUROCONTROL“ pro státy ECAC, kde se prezentuje vize „One Sky for Europe“. Podle tohoto dokumentu aplikují všechny členské státy ECAC, harmonizační kroky, které směřují ke zjednodušení a sjednocení klasifikace vzdušného prostoru a jeho flexibilnímu využívání. Budoucí vzdušný prostor nad Evropou by měl umožňovat pružnou změnu tratí podle konkrétního provozu, tzv. free-route airspace.

CEATS - Central European ATS

Jedním z prvních konkrétních kroků, nad nimiž postupně převzal záštitu EUROCONTROL svým "One Sky for Europe", je projekt osmi středoevropských států. Jeho cílem je vybudovat společné nadnárodní středoevropské středisko řízení letového provozu pro horní vzdušný prostor. Osm států (Bosna a Hercegovina, ČR, Chorvatsko, Itálie, Maďarsko, Slovensko, Slovinsko a Rakousko) koordinovaně spolupracují na realizaci svým rozsahem ojedinělém projektu CEATS (Central European Air Traffic Services Upper Area Control Centre).



Obrázek 2: Funkční bloky "One Sky" (zdroj: [6])

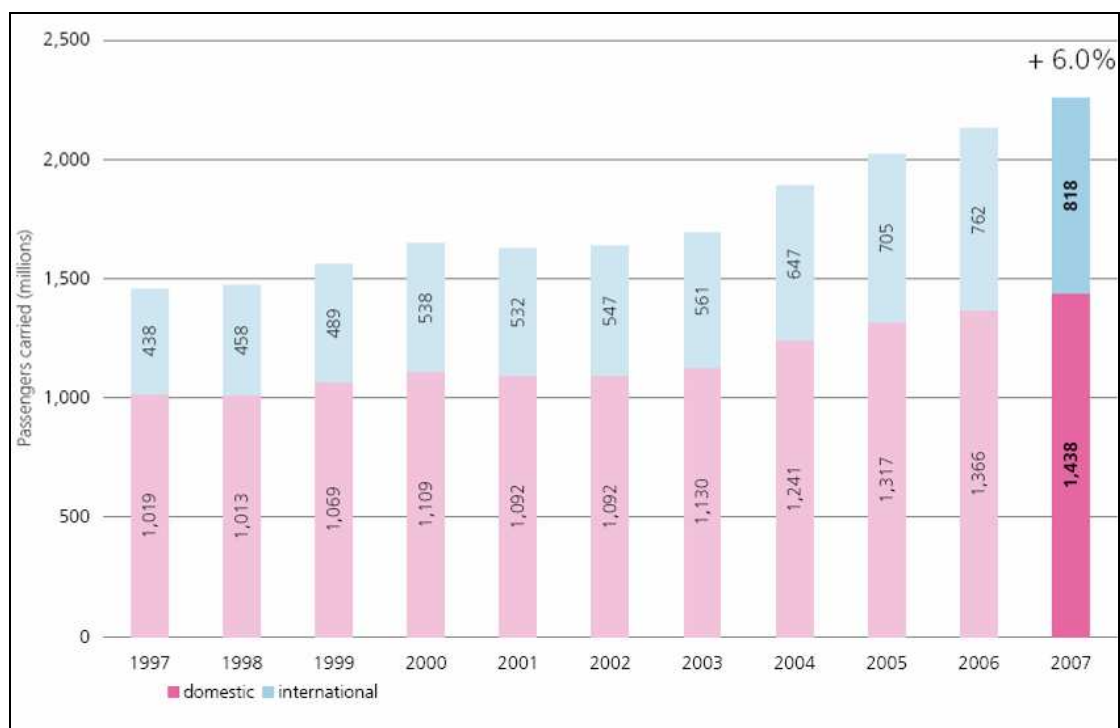
Evropská Unie - Single Sky

Problematikou vzdušného prostoru se zabývá rovněž EU. Evropské komise schválila projekt tzv. „Single Sky“. Podle tohoto projektu bude v horním vzdušném prostoru členských států EU zřízena pouze jedna letová informační oblast, ve které bude monopolním poskytovatelem ATM pouze jediná organizace. Ostatní služby (např. meteorologické) mohou být předmětem soutěže. V rámci EU bude zřízen jediný „regulátor“, který stanoví standardy a postupy platné pro celou Unii.

2.3 Různá politická a ekonomická situace

2.3.1 Politická situace

Na některých místech světa v minulosti byla, nyní je nebo bude, určitá politická či ekonomická krize a i to je problém, který někdy limituje leteckou dopravu. Jedná se především o ozbrojené konflikty jako například v letech 1990-1994 válka v Perském zálivu či existenci vojensky nestabilních oblastí jako je například Severní Korea. Tyto situace omezují leteckou dopravu v daném regionu a zhoršují tak i ekonomickou situaci leteckých dopravců, kteří v této oblasti působí. Dalším problémem tohoto typu je určitě i terorismus. Například po útocích z 11. září 2001 poptávka po letecké dopravě na určitou dobu klesla, v USA to bylo dokonce až o 80 %, což znamenalo konec existence pro řadu leteckých společností. Na obrázku č. 2 je jasně vidět dopad teroristických útoků z 11. září 2001 na vývoj v osobní letecké dopravě. V letech 2001 až 2003 se objem osobní letecké dopravy v podstatě vůbec nezvýšil, ač k tomu mělo dojít podle trendu vývoje v předešlých letech.



Obrázek 3: Trend světového vývoje objemu osobní letecké dopravy (zdroj: [5])

Nemusí to ale být hned války a ozbrojené konflikty, co omezuje leteckou dopravu v dané oblasti. Mohou to být i povinnosti, které jsou letčtí dopravci nuceni splňovat při přeletu státních hranic do některých zemí. Přelety hranic jsou nyní u letů do výšky 300

metrů možné v podstatě kdekoliv, jen místo přeletu státní hranice musí být uvedeno v letovém plánu a čas přeletu se může lišit maximálně o 10 minut. Tyto přelety v minulosti nebyly možné. U letů ve výšce nad 300m se hranice mohou překonávat pouze v prostoru stálých tratí ATS a tyto lety musí být vedeny mezi dvěma mezinárodními letišti. Je zde nutné také dodat letový plán minimálně hodinu před provedením letu a let musí být řádně pasově a celně odbaven na některém z mezinárodních letišť. Avšak u letů do některých zemí je ještě navíc požadováno tzv. oznámení o letu, nebo přeletová či přistávací povolení a bez těchto povolení nelze daný úkon uskutečnit. I tyto speciality dopravní politiky určitého státu můžeme brát jako jistá omezení pro leteckou dopravu.

2.3.2 Ekonomická situace

Jako příklad ekonomické krize si můžeme dát dejme tomu ropnou krizi v 70. letech minulého století, kdy docházelo ke snižování cestovních výloh jak soukromých, tak i služebních. Těmto problémům však letecká doprava nijak předcházet nemůže, nemůže je ani nijak řešit, jedinou cestou tedy je se dané situaci přizpůsobit.

Nejen ekonomické krize, ale například i jiné ekonomické faktory, které ovlivňují leteckou dopravu, mohou mít jistý omezující charakter. Mezi ně můžeme zařadit kupříkladu:

- pořizovací cena letadel, náhradních dílů a povinného vybavení,
- náklady na servis a údržbu letadlové techniky,
- přiblížovací a přistávací poplatky, poplatky za hangárová stání,
- ceny leteckého paliva a různých provozních hmot (včetně nákladů na uskladnění a dopravu).

3 Řešení kapacitních problémů letišť

Kapacita letišť je v současné době celosvětový fenomén, který se skloňuje na všech mezinárodních jednáních. Letiště se stala svojí kapacitou nejužším hrdlem letového provozu ve světě. Proto se v obrovském měřítku stavějí nové terminály, paralelní dráhy, instalují nová sestupová zařízení (MLS) pro snížení rozestupů na konečném přiblížení a to vše, aby bylo možné tento problém úspěšně řešit.

Jako i v jiných oblastech lidské činnosti, je to vždy kapacita nejslabší části, která určuje celkovou kapacitu daného systému. V případě letišť se většinou jedná o snahu o dosažení kapacitní hranice dráhového systému, maximální kapacity terminálů pro osobní dopravu nebo nákladových terminálů. Dalším možným případem je zvyšování kapacity letadlových stojánek či nástupních mostů. U řešení nedostatečné kapacity dráhového systému letišť se musíme vyrovnávat s velkými omezeními ze strany ekologické zátěže takového projektu a zároveň i s tím, že takové řešení je velice náročné i co se týče potřeby velké plochy. Ze všeho řečeného vyplývá, že řešit problém nedostatečného dráhového systému je nejsložitějším úkolem, který se kapacity letišť týká. I právě proto jsou mnohá evropská letiště ve svém dalším rozvoji silně omezena, protože nemají možnost dalšího rozšíření dráhového systému a dosáhnout tak zvýšení jeho kapacity.

3.1 Měření kapacity letiště

Kapacitu letiště měříme pomocí příslušných výkonnostních ukazatelů za jednotku času. Pro určité části letiště měříme kapacitu různými způsoby. U dráhového systému jsou využívány dva způsoby vyjádření kapacity. Často užívaným způsobem je kvantitativní vyjádření kapacity maximálním počtem pohybů letadel zvládnutelným dráhovým systémem za rok. Do výpočtu roční kapacity se z důvodu dosažení maximální reálné přesnosti zapracovávají vlivy skladby letadel v provozu, nerovnoměrnosti provozu během roku a dne, provozní využití RWY a další provozní a povětrnostní podmínky. Druhým způsobem je vyjádření kapacity maximálním počtem pohybů letadel zvládnutelným dráhovým systémem za hodinu. U terminálů osobní letecké dopravy měříme množství pasažérů, které je terminál schopen odbavit za jednotku času. A nakonec u nákladních terminálů je to objem připravovaného nákladu, který je terminál schopen odbavit za jednotku času.

Na letištní infrastrukturu musíme pohlížet jako na systém, kde jsou jeho části pevně propojeny a také spolu vzájemně spolupracují podle předem přesně daných pravidel a postupů.. Pro vedení letiště z toho také vyvstává úkol, že musí při strategickém rozvoji letiště přesně koordinovat rozvoj jeho jednotlivých částí, aby se dosáhlo optimálního výsledku jak z pohledu kvalitativního, tak i ekonomického.

Považuji za důležité zmínit i to, že poptávka po letecké dopravě je z časového hlediska značně nevyrovnaná a to během dne, týdne i během roku. Je jasné, že během dne je špička leteckého provozu v dopoledních a odpoledních hodinách. Můžeme poměrně jasně určit období, kdy má převahu turistická klientela a na druhou stranu zase období, kdy jsou více uskutečňovány lety obchodní.

Výpočet kapacity u terminálů je velice složitá záležitost, která musí být před stavbou terminálu odhadnuta. K výpočtu jsou použity 2 hlavní ukazatele a to:

- hodinová špička,
- hodinová špička upravená.

Oba tyto ukazatele se zjišťují statistikami a průzkumy. Rozdíl mezi těmito dvěma ukazateli je ten, že hodinová špička bere v úvahu pohyb pasažérů oběma směry, oproti tomu hodinová špička upravená řeší pohyb cestujících jen jedním směrem. Tyto dva uvedené ukazatele se dosazují do vzorců, které každý rok ve své příručce vydává IATA a pomocí nich se následně vypočítává počet přepážek pro odbavení, velikost různých prostor v terminálech atd.

Při určování kapacity jednotlivých částí letištního systému musí brát ohled na dva základní prvky:

- ekonomické,
- kvalitativní.

U ekonomických prvků, vycházíme z předpokladu, že dosažení nulových čekacích dob ve špičce by bylo z ekonomického hlediska neúnosné a zároveň by byl letištní systém mimo špičku, tedy po většinu času, nevyužit. Za to u kvalitativních prvků se snažíme pozorovat v různých časových okamžicích během dne, jak dlouhé jsou čekací doby u vzletů a přiletů, nebo jak dlouho trvá proces odbavení a zda jsou tyto časy přijatelné.

Při plánování kapacity letiště musíme brát ohled na trend vývoje v oblasti osobní i nákladní letecké dopravy, ale nesmíme zapomínat ani na technický vývoj v oblasti leteckého průmyslu. Toto plánování se musí realizovat na velmi dlouhé časové období dopředu. Při nerespektování tohoto doporučení by se nám mohlo stát, že již za pár let by letiště nedostačovalo kapacitně nárokům letecké dopravy nebo by nevyhovovalo po technické stránce letecké technice a jejímu vývoji. Veškeré následné úpravy letiště pro provoz velkých a kapacitních letadel by byl velmi finančně náročný a po technické stránce složitý projekt.

Také počasí má nezanedbatelný vliv při projektování letiště a vůbec na celou leteckou dopravu. V zájmu všech letišť je, aby při případné nepříznivé klimatické situaci nebyla jeho kapacita nijak výrazněji omezena. Proto je většina významných letišť již nyní vybavena podpurnými navigačními systémy, které umožňují přiblížení a přistání i za velice špatné viditelnosti. Ty nejlepší systémy dokáží provést přistání i za nulové viditelnosti. Takto kvalitním zařízením však musí být vybaveno nejen letiště, ale i letadlo a personál využívající tento systém musí být řádně proškolen.

3.2 Zvýšení kapacity terminálu

Zvyšování terminálové kapacity na letištích je jedním z cílů mnoha světových letišť. Budova terminálu je vstupním i výstupním bodem do daného státu, resp. města. Z kapacitního hlediska je nejvíce vytíženým místem, protože zde dochází k velmi intenzivnímu pohybu cestujících, zboží, personálu, technických prostředků a dalších procesů.

Terminál a jeho zázemí musí být navržen tak, aby svou kapacitou zvládl, nejen odlétávající a přilétávající pasažéry, ale i jejich doprovod. Ale to není jediný úkol, který musí terminál po kapacitní stránce splňovat. Budova terminálu by měla také zajistit dostatečný komfort a rychlost odbavení. Terminál můžeme rozdělit na několik podsystémů a je nutností tyto podsystémy dimenzovat tak, aby byly schopné odbavit cestující za danou dobu a s danou kvalitní úrovní.

Některé z těchto subsystémů musí být dimenzovány tak, aby zvládly odbavit cestující v obou směrech. Při dimenzování terminálu je důležité určit jednotlivé podsystémy, ve kterých probíhá tok cestujících. Při navrhování a určování musíme mít na paměti, že tyto

podsystemy musí ve výsledku koordinovaně spolupracovat, aby nedocházelo k narušení plynulé posloupnosti odbavovacího procesu.

Možnosti zvýšení kapacity letištních terminálů:

- Metodou systémové změny,
- stavbou nového terminálu.

3.2.1 Metoda systémové změny

Tato metoda je určitě levnější variantou zvyšování kapacity terminálů letiště, z toho důvodu bude také v mnoha případech i variantou vyhledávanější a používanější. Právě cenu tohoto řešení můžeme brát jako velkou výhodu. U této varianty zvýšení kapacity však musíme počítat i s tím, že nám pomůže řešit otázku nedostatečné kapacity terminálu pouze dočasně nebo dokonce i s tím, že není tato varianta použitelná ve všech případech. Jako dočasné řešení to musíme brát v tom smyslu, že nám to neumožní zvyšování kapacity tzv. do nekonečna. Systémová změna nám umožní většinou zvýšit kapacitu pouze jen o nějaké menší procento objemu cestujících. Při plánech zvyšování kapacity nemůžeme počítat s tím, nebo-li je velice nepravděpodobné, že by nám tato metoda pomohla zvýšit kapacitu terminálu třeba o deset či více procent.

Při metodě systémové změny dochází ke zjišťování volných kapacit v aktuálním stavu systému, k jejich následnému přeskupení a co nejhospodárnějšímu využití. V této metodě se často využívá simulace či modelování. Umožňuje nám to například se stávajícími prostředky zkoušet různé varianty rozmístění a následně zjišťovat výkon při jednotlivých variantách. Další možností je například zvyšování počtu určitých prostředků podsystemu a zda tomuto navýšení odpovídá i navýšení výkonu podsystemu. Případně dochází i ke kombinaci, tedy k různým variantám rozmístění a i ke změnám počtu prostředků v podsystemu. Pokud měl daný systém ještě nějaké rezervy, tak nám je tato metoda při správném použití pomohla odhalit a můžeme je využít ke zvýšení kapacity terminálu. Avšak jestliže nebyly, ani po zevrubném namodelování a nasimulování situace, zjištěny žádné volné prostředky, zbývá nám už jen použít ke zvýšení kapacity terminálu možnost technických úprav čili výstavbu nového terminálu.

3.2.2 Výstavba nového terminálu

Tato varianta zvyšování kapacity terminálů je finančně několikanásobně náročnější, než varianta předcházející. Většinou je však také jedinou možnou variantou, protože ve stávajícím systému nebyly nalezeny již žádné volné kapacity. Některé letiště mohou mít však i s touto variantou problémy, protože nemají dostatečně velké volné plochy pro další výstavbu. Díky tomu mají však velice špatné vyhlídky do budoucna, jelikož taková letiště se nebudou moci dále rozvíjet a nebudou tedy časem schopna uspokojovat resp. přijímat zvyšující se objem cestujících.

Jestliže má letiště k dispozici volné finanční prostředky, odpovídající volné plochy a nutná povolení, mohou tedy stávající kapacitu terminálu zvýšit výstavbou nové budovy. Výstavbou nového terminálu dosáhneme zvýšení kapacity ve velkém měřítku, v některých případech to může být i o sto či více procent a díky tomu řeší výstavba nového terminálu kapacitní problém dlouhodobě. Právě i při výstavbě nové letištní budovy se při plánování vnitřního uspořádání musí brát zřetel na efektivní rozmístění jednotlivých podsystemů tak, aby bylo dosaženo maximální kapacity při optimálním využití všech dostupných prostředků.

K tomu všemu nám opět pomůže modelování a simulace, které nám stejně jako u systémové změny pomohou určit ideální rozmístění a optimální počty potřebných prostředků.

3.2.3 Situace na Letišti Praha Ruzyně - terminálová kapacita

Jelikož mám svou diplomovou práci zaměřenou především na Letiště Praha Ruzyně, přiblížíme si i situaci na tomto významném leteckém uzlu ve střední Evropě, která se týká zvyšování kapacity terminálu.

I na Letišti Praha Ruzyně je výrazně patrná zvyšující se poptávka po letecké dopravě, vždyť v roce 2007 Letiště Praha odbavilo rekordních 12,44 mil. cestujících a jelikož zájem o leteckou dopravu i nadále roste, tak by do konce roku 2008 mělo jeho terminály hlavně na mezinárodních, ale i na vnitrostátních linkách, projít 13,3 mil. cestujících. Letiště Praha bylo vyhlášeno v roce 2007 jako nejlepší ve střední a východní Evropě v prestižní celosvětové anketě mezi cestujícími World Airport Awards. Cestující mají k dispozici nabídku 54 leteckých společností spojujících Prahu přímou linkou se 124 destinacemi po celém světě. Operuje zde také 6 nákladových dopravců.

Letiště Praha s výjimečnou lokalitou ve středu Evropy nabývá na významu také jako přestupní uzel. Dlouhodobému růstu výrazně pomohl vstup České republiky do Evropské unie v roce 2004 a do schengenského prostoru. Od konce března 2008 probíhá odbavení do zemí Schengenu již bez celních a pasových kontrol. Největším dopravcem jsou České aerolinie, které pokrývají téměř polovinu trhu. Nejrychleji se rozvíjí nízkonákladová přeprava.

Důsledkem zvyšujícího se zájmu o leteckou dopravu bylo, že kapacita odbavovacího komplexu byla na začátku tohoto tisíciletí limitující kapacitou pražského letiště. Proto byl vypracován projekt výstavby Terminálu 2 a jeho následným úplným zprovozněním v roce 2006 došlo k výraznému a skokovému navýšení kapacity odbavovacího komplexu, který je dnes schopen odbavit o cca 20 % provozu více než je kapacita dráhového systému letiště.



Obrázek 4: Srovnávací pohled na Letiště Praha Ruzyně - rok 2001 a rok 2006 (zdroj: [4])

Jeho otevřením došlo k navýšení počtu odbavovacích přepážek z 62 na 122, počtu odletových východů z 27 na 53, z nichž 33 je vybaveno nástupními mosty pro spojení terminálu s letadlem, a počtu odbavovacích stání o dalších 6 (v letošním roce by mělo přibýt ještě 7 stání pro turbopropy). Zároveň s Terminálem 2 byla dána do provozu i nová třídiřna zavazadel o kapacitě 3 000 kusů za hodinu, která posílila původní třídiřnu v Terminálu 1. Proti nárůstu kapacit stojí skutečnost, že je nelze, vzhledem ke vstupu České republiky do schengenského prostoru a z něj plynoucího požadavku oddělit schengenský a mezinárodní provoz, využívat s takovou flexibilitou jako v minulosti. Důvodem je nerovnoměrné rozložení schengenského a mezinárodního provozu v čase. Výsledkem je, že špičky provozu v obou

terminálech nastávají v jinou dobu a tak je celková kapacita odbavovacího komplexu nižší než prostý součet kapacit obou terminálů.

Nová budova má tři nadzemní a jedno podzemní podlaží a s původním Terminálem 1 je propojena spojovacím objektem. Již v září 2005 byla část nového projektu otevřena a zprovozněna a to první podlaží spojovací budovy, která navazuje na nový Terminál 2 a zároveň i třetí odbavovací prst označený C. Již tímto byla zvýšena okamžitá odbavovací kapacita a pohodlí cestujících. Zbylá část projektu byla plně zprovozněna 17. ledna 2006.

Momentální roční kapacita terminálů na Letišti Praha Ruzyně je následující:

- Terminál 1: 6 500 000 cestujících, 3 200 zavazadel/hod (doporučená optimální 2400),
- Terminál 2: 6 500 000 cestujících, 3 200 zavazadel/hod (doporučená optimální 2400),
- Terminál 3: 200 000 cestujících, 80 zavazadel / hod.

Na základě prognóz budoucích požadavků a kapacit stávající infrastruktury lze předpokládat, že v této oblasti bude současná infrastruktura Letiště Praha Ruzyně, po nezbytném doplnění technologií pro odbavení cestujících a třídrázný zavazadel, kapacitně stačit v časovém horizontu příštích minimálně deseti let.

3.3 Zvýšení kapacity dráhového systému

Tento úkol momentálně řeší mnoho světových letišť, neboť dráhový systém bývá často tzv. úzkým hrdlem provozu na letišti v závislosti na rostoucím zájmu o leteckou osobní a nákladní dopravu.

Maximální kapacita dráhového systému je závislá zejména na těchto parametrech:

- na minimálních podélných rozestupech
- na minimálním přistávacím intervalu
- na procentuálním zastoupení letadel v provozu podle kategorie turbulence v úplavu
- na přibližovací a odletové rychlosti
- na rozdělení provozu na jednotlivé RWY podle kategorie turbulence v úplavu a na provozních podmínkách
- na řazení při přiblížení
- na provozním využívání jednotlivých RWY
- na vzdálenosti os rovnoběžných RWY
- na umístění, počtu a charakteru TWY umožňujících vjezd a výjezd z RWY [2]

K řešení problému nedostačující kapacity dráhového systému můžeme opět přistoupit několika způsoby:

- Úpravou a zavedením nových technologií při řízení letového provozu,
- úpravou stávajícího dráhového systému,
- výstavbou nové přistávací a vzletové dráhy.

Každá z těchto možností řešení nedostatečné kapacity dráhového systému má své klady i zápory a ne vždy můžeme využít ke zvýšení kapacity vzletových a přiletových drah všechny uvedené možnosti. Na mnoha světových letištích se můžeme setkat i s tím, že pro zvýšení kapacity bylo použito i více uvedených variant, případně dokonce všechny uvedené varianty.

Všechny tyto varianty řešení se liší ve výši použitých finančních prostředků, v rychlosti uskutečnění daného řešení a v efektivitě, s jakou nám řešení pomůže zvýšit kapacitu dráhového systému.

3.3.1 Úprava a zavedení nových technologií při řízení letového provozu

S tímto řešením se setkáváme celkem často z důvodu jeho nepříliš vysoké finanční náročnosti. Pokud jsou dané moderní technologie k dispozici a není problematické tyto technologie získat, například kvůli určitým politickým problémům, tak to je řešení, které lze i poměrně rychle realizovat. Finanční stránku a rychlost řešení můžeme považovat za výhody tohoto řešení. Také rychlost vývoje v oblasti moderních technologií nám dává určité možnosti i do budoucna, že bude možné podobná řešení s větší či menší efektivitou využívat i nadále.

Na druhou stranu nevýhodou technologického řešení je určitě to, že je to řešení poměrně krátkodobé. Efektivita se kterou pomáhá zvýšit kapacitu letiště není příliš vysoká. Po úpravě a zavedení nových technologií při řízení letového provozu můžeme počítat většinou s navýšením kapacity dráhového systému přibližně o pět až patnáct procent, pouze v ojedinělých případech se můžeme setkat s vyšším přírůstkem kapacity. I tak bývá ale dané řešení jedním z nejčastěji využívaných a to i v kombinaci s úpravou stávajícího dráhového systému.

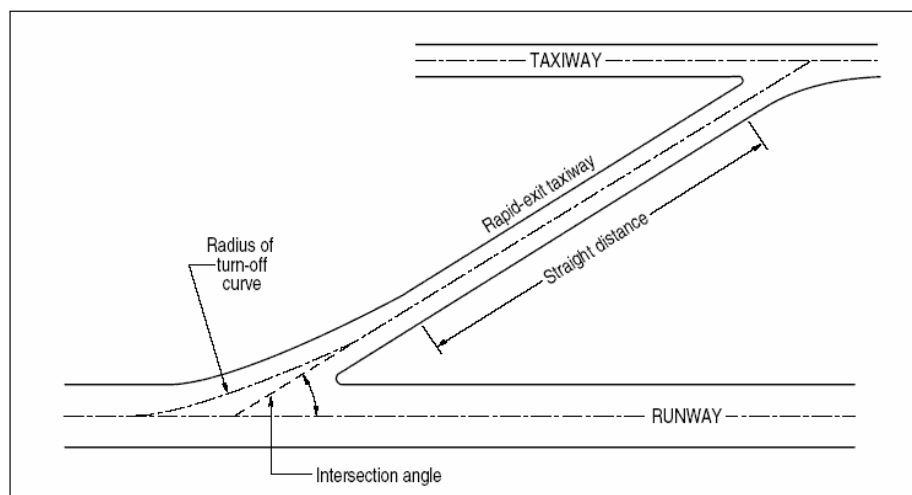
3.3.2 Úprava stávajícího dráhového systému

Další možností jak zvýšit kapacitu dráhového systému, je úprava stávajícího dráhového systému na letišti. Toto řešení bývá často kombinováno s předchozím, kdy je spolu se zavedením nových technologií do řízení letového provozu inovován i systém letových a pojezdových drah. Kombinací těchto dvou řešení se může dosáhnout již podstatnějiho navýšení kapacity, většinou o dvacet až třicet procent oproti stávajícímu stavu.

Úprava stávajícího dráhového systému je již poměrně vyšší finanční investicí, většinou v řádech stovek milionů korun, ale tato investice se i tak vyplatí, protože touto změnou dochází ve stávajícím systému k poměrně znatelnému skokovému navýšení kapacity.

Nejčastější úprava dráhového systému je dostavba rychlých výjezdů z hlavní vzletové a přistávací dráhy. Rychlé výjezdy z obou směrů hlavní vzletové a přistávací dráhy umožní letadlům opouštět ve větší rychlosti ranvej a řídicí letového provozu tak budou moci pouštět letadla na přistání v kratších intervalech po sobě. Pojezdová dráha pro rychlé odbočení má za odbočovacím obloukem z ranveje obsahovat přímou část dostatečně dlouhou k úplnému zastavení letadla před jakoukoliv křížující pojezdovou dráhou, viz. obrázek 5.

Další možností úpravy je vybudování paralelní pojezdové dráhy, která umožní pohyb většího počtu letadel po zemi. Při využití této varianty musíme velice dbát na správné umístění paralelní pojezdové dráhy, aby jejím umístěním nedošlo ke zkomplikování pohybů letadel po zemi, například nadměrným křížením pojezdových drah, či velkou vzdáleností dráhy od Terminálu.



Obrázek 5: Nákres rychlého výjezdu z RWY (zdroj: [3])

Třetí možnost úpravy dráhového systému je vybudování dalších odmrazovacích resp. čekacích míst před prahem ranveje. Tím se zvýší rychlost reakce na uvolnění ranveje, nájezd na ranvej a tím i rychlejší start.

3.3.3 Výstavba nové přistávací a/nebo vzletové dráhy

Tato varianta je bezesporu nejnákladnější možností, jak zvýšit kapacitu dráhového systému. Je to náročný projekt jak po technické, logistické, tak i po finanční stránce. Cena tohoto řešení se obvykle pohybuje v řádech miliard korun, což může být někdy zásadní problém, pokud za projektem nestojí silný investor. Nutnost je i posouzení vlivu na okolí v důsledku leteckého provozu na nové RWY. Náročnost projektu spočívá také v potřebě dostatečně velkých volných ploch v okolí letiště, kde by mohla být nová vzletová a přistávací dráha vystavěna. To bývá velký a limitující problém pro mnoho letišť, která se během svého vývoje dostala do situace, že jejich okolí bylo zastavěno městskou, průmyslovou nebo jinou zástavbou. Nyní tedy neumožňuje další výstavbu dráhového systému v důsledku neexistence dostatečně velkých volných ploch v okolí letiště.

Velkým kladem při vybudování nové dráhy je určitě to, že je to dlouhodobé řešení kapacitního problému, jelikož po uvedení nové dráhy do provozu se zvýší kapacita dráhového systému skokově o mnoho desítek procent.

Při výstavbě se musí dodržovat i následující technické požadavky na paralelní dráhy a to jestliže jsou paralelní přístrojové RWY určeny pro současné použití za běžných podmínek, minimální vzdálenost mezi jejich osami má být:

- 1 035 m pro nezávislé paralelní přiblížení;
- 915 m pro závislé paralelní přiblížení;
- 760 m pro nezávislé paralelní odlety;
- 760 m pro oddělené paralelní operace.

3.3.4 Situace na Letišti Praha Ruzyně - dráhová kapacita

3.3.4.1 *Současný stav*

Současný dráhový systém Letiště Praha je nyní provozován téměř na svých limitních možnostech. V období provozních špiček je již kapacita dráhového systému zcela vyčerpána a letový provoz musí být regulován. S neustále se zvyšujícím zájmem cestujících a leteckých přepravců o pražské letiště má tento stav za následek navyšování objemu zdržení v období provozních špiček a ve velmi krátké době bude mít za následek stagnaci výkonů letiště. V této souvislosti je nutné si uvědomit, že každá minuta zdržení na letišti v Ruzyni se okamžitě projeví kumulovaným zdržením na dalších evropských nebo světových letištích. Případy, kdy nelze umožnit dopravci přiletět v optimálním termínu jsou stále častější. Velká část poptávky po letecké dopravě, tak zůstává neuspokojena a může se přesunout na jiná mezinárodní letiště, např. konkurenční Vídeň.

Nárůst letového provozu na Letišti Praha-Ruzyně až do roku 2003 nebyl nijak zvlášť významný a snad kromě vstupu ČR do Evropské unie nic nenaznačovalo, že by letový provoz mohl nějak významněji vzrůst. Avšak oproti předpokladům vzrostl provoz na pražském letišti v letech 2003–2008 o 61 procent. V roce 2004 deklarovala Praha-Ruzyně kapacitu letiště 34 pohybů za hodinu, ale uskutečněný počet pohybů byl přes 40, avšak jen díky nadstandardní organizaci odletů při využívání více odletových směrů. Současná maximální kapacita dráhy je 44 vzletů a přistání za hodinu. Po určitých úpravách by mohla v roce 2010 dosáhnout 48 pohybů. To však bude její strop. Dráhový systém letiště bude bez dalšího rozšíření hlavní překážkou v plánovaném růstu letiště v Ruzyni.

V současné době se dráhový systém Letiště Praha Ruzyně sestává ze tří vzletových a přistávacích drah. Jedna z těchto drah (04/22) je však pro přílety i odlety uzavřena z důvodu špatného technického stavu a je používána pouze pro pojezdy nebo pro parkování velkých letadel. Hlavní vzletovou a přistávací drahou je 06/24, která je přibližně ve směru z východu na západ a její délka činí 3715m. Hlavní dráha je v obou směrech vybavena systémem ILS (kursový maják). Další vzletovou a přistávací drahou, která se používá na přílety a odlety je dráha 13/31, což odpovídá přibližně směru ze severu na jih, má délku 3250m a v obou směrech je vybavena kursovým majákem ILS. Na letišti jsou pro pohyb letadel po zemi vybudovány pojezdové dráhy se značením pomocí písmen. Jejich šířka je 22,5m kromě jednoho úseku na pojezdu P, který má šířku 40m. Na letišti jsou také umístěny čtyři plochy pro přistávání vrtulníků s označením H1-H4.

Tabulka 1: Fyzikální vlastnosti RWY na Letišti Praha Ruzyně

Označení	Směr	Rozměry RWY(m)	Rozměry pásu (m)	Rozměry předpolí	Únosnost
06	065°GEO; 064°MAG	3715x45	4315x300	300x300	62/R/B/X/T
24	245°GEO; 244°MAG	3715x45	4315x300	300x300	62/R/B/X/T
13	127°GEO; 126°MAG	3250x45	3850x300	300x300	40/R/C/X/T
31	307°GEO; 306°MAG	3250x45	3850x300	300x300	40/R/C/X/T
04	037°GEO; 036°MAG	2120x60	2420x300	60x300	45/F/B/X/T
22	217°GEO; 216°MAG	2120x60	2420x300	60x300	45/F/B/X/T

Zdroj [4]

Provozní statut jednotlivých RWY:

- RWY 06: přístrojová RWY (umožňuje provoz pomocí IFR i VFR),
- RWY 24: přístrojová RWY pro přesné přístrojové přiblížení kategorie III.b,
- RWY 13: přístrojová RWY,
- RWY 31: přístrojová RWY pro přesné přístrojové přiblížení kategorie I,
- RWY 04: nepřístrojová RWY (pouze pro VFR),
- RWY 22: nepřístrojová RWY. [8]

3.3.4.2 Výstavba nové paralelní dráhy

Jako poslední možné řešení kapacitní problematiky dráhového systému na Letišti Ruzyně se jeví už jen plánovaná výstavba paralelní vzletové a přistávací dráhy 06R/24L. Záměr postavit na pražském letišti druhou, paralelní dráhu nemůžeme považovat za žádnou novinku, protože již při stavbě současné hlavní dráhy RWY 06/24 v letech 1961 – 1963 se počítalo s tím, že v případě potřeby bude dráhový systém doplněn druhou, paralelní dráhou. Na počátku 70. let byla dokonce druhá dráha zapracována do územně plánovací dokumentace, včetně územního plánu hl. m. Prahy. Od uvedení do provozu hlavní dráhy v roce 1963 se objem cestujících zvýšil téměř dvanásobně a počet pohybů letadel téměř čtyřnásobně, ale dráhový systém se od té doby nezměnil. I do budoucna se čeká rostoucí počet letadel i cestujících. Překonání hranice patnácti milionů cestujících se čeká v roce 2012 a v roce 2019 se počítá s překonáním hranice dvaceti milionů cestujících.

Rozvoj letiště však bude možný jen tehdy, pokud bude schopno tento nárůst kapacitně zvládat a možnosti původního dráhového systému jsou již zcela vyčerpány. Jedinou další možností rozvoje tohoto centrálního českého letiště je výstavba nové paralelní dráhy. Nový dráhový systém fungující na principu dvou nezávislých paralelních drah by letišti plně postačil k uspokojení rostoucí poptávky ze strany cestujících i leteckých společností nejméně na několik příštích desetiletí.

Projekt nové paralelní dráhy počítá s tím, že nová dráha nahradí stávající dráhu 04/22, která je dlouhodobě mimo provoz a používá se pouze k parkování letadel. Dráha bude rovnoběžná se stávající dráhou RWY 06/24 ve vzdálenosti 1525 m, aby byl umožněn nezávislý provoz na obou drahách. Provoz na dráze 13/31 se poté omezí pouze na případy údržby, mimořádné události nebo situace, kdy na dráhu 06/24 vane velmi silný boční vítr.[4]

Technické parametry paralelní dráhy 06R/24L:

- Stavební délka dráhy: 3550m,
- Stavební šířka dráhy: 45m (s nejvyšší únosností), 60m (základní) a 75m (včetně postranních pásů),
- Pás dráhy: délka 3670m, šířka 300m,

Provozní status paralelní dráhy 06R/24L:

- RWY 06R přístrojová dráha pro přesné přiblížení III. kategorie,
- RWY 24L přístrojová dráha pro přesné přiblížení III. kategorie.

Po technické stránce se počítá s radionavigačním vybavením, které by umožňovalo přiblížení a přistání letadel v obou směrech dráhy i za nepříznivých meteorologických

podmínek, respektive i za nulové viditelnosti bez manuálních zásahů posádky. Dráha je navíc navržena tak, aby vyhovovala i těm největším letadlům jako je Boeing 747, Airbus A340 nebo A380.

Momentální situace ohledně začátku výstavby paralelní dráhy je nejasná, zvláště kvůli stále nedokončenému výkupu pozemků a nevyjasněným neshodám v pražském územním plánu. Zatím se stále počítá s rokem 2013, kdy by měla být nová ranvej otevřena pro provoz.



Obrázek 6: Vizualizace pražského letiště po výstavbě paralelní dráhy 06R /24L (zdroj:[4])

3.3.4.3 *Životní prostředí a Letiště Praha Ruzyně*

Vybudování nové paralelní dráhy RWY 06R/24L na letišti v Praze bude mít vliv i na životní prostředí v okolí letiště, respektive na velkou část obyvatel Prahy a okolí. Podle odborných studií výstavba nové dráhy a s ní související omezení provozu na dráze RWY 13/31 ulehčí život více než 200 000 obyvatel městských částí ležících pod vzdušnými koridory této dráhy. Hluková zátěž se sníží především pro obyvatele Horoměřic a městských částí Praha 5, Praha 17 a podstatné části Prahy 6. Vzhledem k orientaci dráhy RWY 13/31 letadla dosud létají nad Bílou Horou, Ruzyní, Dědinou, Řepy, ale také částmi Kladna a řadou přilehlých obcí, jako jsou Buštěhrad, Tuchlovice či Braškov. Jenom v městské části Praha 6, pro jejíž podstatnou část bude nová dráha znamenat výrazné snížení hlukové zátěže, žije více než 100 000 obyvatel, plus přes 77 000 obyvatel Prahy 5 a 23 000 obyvatel Prahy 17. Dostaneme se tedy pouze v Praze k číslu 200 000 obyvatel, na které bude mít výstavba nové dráhy pozitivní vliv. V okolních obcích, kterým se rovněž uleví, žijí další tisíce obyvatel – například v Horoměřicích je jich téměř 2 500. V Kladně, jehož obyvatelé si v roce 2007 také stěžovali na zvýšený provoz na dráze RWY 13/31, žije dalších více než 70 000 obyvatel.

Z uvedených faktů vyplývá, že výrazné utlumení provozu na dráze RWY 13/31 spojené s výstavbou nové dráhy se pozitivně projeví v kvalitě života velké části obyvatel Prahy a okolí. Momentálně musí letadla v letních měsících kvůli totálnímu vytížení dráhového systému čekat ve vzduchu na uvolnění přistávací dráhy, což zatěžuje životní

prostředí velké části Prahy. Díky výstavbě paralelní dráhy bude nový systém kapacitně plně postačovat rostoucí poptávce nejméně na několik příštích desetiletí a přispěje i ke zvýšení bezpečnosti leteckého provozu na letišti v Ruzyni. Společně s dalšími výhodami, které rozšíření dráhového systému přinese, se její výstavba jeví jako optimální řešení neustále rostoucích požadavků na kapacitu pražského letiště.

Správa Letiště Praha vyvíjí snahu minimalizovat vliv letecké dopravy na obyvatele bydlící v okolí letiště a podporovat ty aktivity, které vedou ke zkvalitnění jejich životních podmínek. Mimo jiné Letiště Praha soustavně realizuje protihlukový program ve vyhlášeném ochranném hlukovém pásmu Letiště Praha a hodnotí vlivy všech činností podniku na životní prostředí. Letiště také rozvíjí systém environmentálního managementu a o investičních záměrech a jejich realizaci rozhoduje s ohledem na životní prostředí.

3.3.4.4 *Ekonomická situace*

Rozvoj každého letiště přináší výhody pro region i ekonomiku země. Obdobně je tomu i v případě Letiště Praha Ruzyně, které již nyní patří k velmi důležitým motorům české ekonomiky. Z hlediska ekonomického rozvoje státu představuje letiště důležitou součást dopravní infrastruktury. Dobré dopravní spojení, včetně leteckého, patří mezi tři nejdůležitější kritéria, která investoři posuzují při výběru lokalit pro své podnikání. Nezanedbatelný je vliv leteckého průmyslu na cestovní ruch, který neustále roste a i do budoucna se očekává další nárůst.

Letiště Praha je jedním z nejvýznamnějších zaměstnavatelů v regionu Prahy a okolí. V současnosti na letišti pracuje více než 17 000 lidí. Odborné studie dokládají, že každý další milion odbavených cestujících vytvoří přibližně 1 000 pracovních míst přímo na letišti a více než 2 100 míst v ekonomice země.

4 Simulace dráhového systému Letiště Praha

Simulace dráhového systému je zajímavý projekt v tom smyslu, že může najít skryté, dosud nevyužité kapacity dráhového systému, který je v dnešní době velice vytíženou částí infrastruktury mnoha světových letišť.

Pro konkrétní zpracování se jevil jako nejvhodnější projekt simulace dráhového systému Letiště Praha Ruzyně. Jelikož je to největší letiště v České Republice a momentálně také řeší kapacitní problém ohledně nedostačujícího dráhového systému. Pro srovnání bylo také dobré, že management letiště již má pro tuto situaci připravené řešení a realizace tohoto řešení by měla do několika let začít. Moje simulace stávajícího a budoucího dráhového systému dá částečně nahlédnout do budoucnosti a bude možno srovnat stávající systém vzletových a pojezdových drah se systémem, který se bude teprve v příštích letech na Letišti Praha Ruzyně budovat.

4.1 Pojem simulace

Simulace má dlouhou tradici zejména při analýze fyzikálních systémů, které lze popsat pomocí matematického aparátu, který máme k dispozici již po několik staletí - diferenciálních rovnic. Jednou z oblastí, na které se simulace již léta zaměřuje, jsou kupříkladu logistické systémy. Například při analýze systémů, se můžeme setkat se simulací, neboť jejím základem je vytvoření abstraktního modelu reálného systému.

Ve valné většině situací, kde jsou vysoké finanční, personální, časové či technologické nároky, se snažíme budoucí systém vyzkoušet tzv. nanečisto na počítači. Po ověření správnosti struktury a shody modelu s reálným systémem (verifikace modelu) můžeme pomocí experimentování s různými variantami modelu nalézt takové uspořádání, které nejlépe vyhovuje našim požadavkům na systém.

Existuje několik důvodů, proč dát simulaci přednost před získáváním zkušeností experimentováním s reálným systémem. Simulace je určitě levnější a zároveň i rychlejší (simulační čas může plynout mnohem rychleji než skutečný), můžeme testovat mnohem více možných variant. Simulace je také bezpečná (lze testovat i katastrofické varianty), můžeme analyzovat i plánované systémy, které ještě neexistují a podobně.

V současnosti se setkáváme zejména s následujícími typy simulace, téměř bez výjimky realizované s využitím výpočetní techniky:

- simulace dynamických a fyzikálních systémů (diferenciální rovnice, metoda konečných prvků, ...)
- simulace systémů diskrétních událostí (teorie sítí, front, ...)
- simulace zaměřená na výcvik osob (letecké simulátory a тренаžéry, operátorské simulátory, ...)

4.2 Simulace a simulátory pro řízení leteckého provozu

Všechny systémy pro technickou podporu řízení letového provozu (ATM systémy) mají svou obdobu v simulačních systémech. Simulace se používá pro zjištění toho, jak se systémy chovají při maximální provozní zátěži, nebo jak reagují na některé úpravy. Tyto simulace se provádějí na technické vývojové platformě (OTC). Jiným druhem simulace jsou simulátory určené pro výcvik řídicích letového provozu. Jsou buď jednoduché pro získání

základních návyků, nebo složité (HIFI SIMU), dokonale napodobující vzhled a chování skutečného pracoviště. Takové simulátory slouží k perfektnímu osvojení potřebných dovedností včetně napodobení nouzových situací provozního i technického charakteru.

4.3 Simulační prostředí

Jelikož simulace dráhového systému Letiště Praha Ruzyně je již poměrně rozsáhlý a náročný projekt, jehož řešení bude potřebovat velké množství objektů s možností různých specifikací, musel jsem při výběru simulačního prostředí dbát na různé parametry, které bude dané vývojové prostředí splňovat. Jako stěžejní jsem si určil, že prostředí musí být flexibilní, dostatečně rozsáhlé a také uživatelsky vstřícné, aby mi pomáhalo zjednodušit vypracovávání simulačního projektu. Jako ideální řešení se po analýze mých nároků jevílo prostředí aplikace Arena od firmy Rockwell Automation, která je i na univerzitě Pardubice využívána k výuce několika předmětů jako je například diskretní simulace. Z toho také plynula výhoda, že jsem již toto prostředí částečně znal.

4.3.1 Firma Rockwell Automation

Firma Rockwell Automation pomáhá výrobcům v dosahování úspěchu a růstu jejich výkonů. Je špičkou ve svém oboru, kde se specializuje na průmyslovou automatizační kontrolu a dodává zlepšovací řešení, která dávají jejich zákazníkům konkurenční výhodu. Poskytuje řešení napříč celým průmyslovým odvětvím, od malých samostatných průmyslových komponent až po podnikové, široce integrované systémy se širokým rozsahem funkčnosti a to vše v mnoha průmyslových odvětvích.

Koncoví uživatelé a strojní inženýři se mohou spolehnout na komplexní portfolio produktů, programového vybavení a služeb. To vše jim pomáhá vytvářet hodnoty a dosahovat jejich cílů jako jsou:

- **Rychlejší dodání zákazníkovi** - skrze rychlost, citlivost a flexibilitu automatizované výroby.
- **Nižší celkové náklady na vlastnictví** - pomocí měřitelné, modulární, energeticky účinné a otevřené automatizační kontroly a informačním systémům.
- **Lepší aktivní management/optimalizace** - diagnostikováním závislým na monitorování, nedostatkové analýze a skladovém managementu.
- **Širší výrobně-obchodní risk management** - skrze procesní analýzu, regulační shodu a bezpečnostní řešení.

Po celém světě se snaží pomáhat s plněním potřeb jejich zákazníků. Jejich schopnosti rozšiřuje ještě partnerská síť v osmdesáti zemích světa, kde je více než 5600 oborově či komplexně zaměřených specialistů v oblasti distribuce, systémové integrace a produktového managementu. Snaží se poskytovat různá řešení, která vydrží i pro budoucí léta. Rockwell Automation se silným finančním zázemím stále pokračuje v získávání odborných znalostí a v investování do agresivního výzkumu a vývoje.

4.3.2 Aplikace Arena

Vývojové prostředí Arena nabízí kvalitní řešení pro lepší obchodní rozhodnutí pomocí simulace. Arena je snadno použitelná, je to vysoce výkonný a schopný pracovní nástroj, takže nám dovolí vytvářet a zpracovávat experimenty na modelech našeho vlastního systému.

Otestováním neověřených myšlenek v této počítačové „laboratoři“ můžeme předpovídat budoucnost s jistotou a bez přerušení či narušení současného systému či obchodního prostředí.

Každému obchodnímu prostředí, od zákaznického servisu přes výrobu až ke zdravotní péči, může simulace přinášet prospěch. Pokud má určité řešení zjistit optimální stav zásob či kapacitu nové čekárny nebo něco podobného, stačí k vyřešení problému udělat pět snadných kroků s Arenou:

- **Vytvoření základního modelu** - Aréna poskytuje intuitivní prostředí pro tvorbu vývojových diagramů z procesů. Jednoduše řečeno, můžeme moduly aplikace Arena ve vývojovém diagramu spojovat do technologického schématu.
- **Zdokonalení (vyčištění) modelu** - Přidáním dat z reálného světa, například dobu zpracování, požadavky zdroje, úroveň pracovníků, do našeho modelu můžeme lépe specifikovat danou situaci.
- **Simulace modelu** - Spuštěním simulace ověříme, že model správně odráží aktuální systém. Simulace taktéž rozpozná případnou překážku a umožňuje nám i vidět grafický průběh simulace.
- **Analýza simulačních výsledky** - Aréna také poskytuje automatické zprávy podle běžných rozhodovacích kritérií, jako je využití jednotlivých zdrojů a doba čekání. Můžeme také vytvářet vlastní statistiky, které nám pomůžou k podrobnější analýze výsledků simulace našeho systému.
- **Vybrat nejlepší možnost** – Změnou v modelu dle vhodných scénářů, je možné získat výsledky, které pak můžeme zkoumat a porovnávat s dalšími a z nich následně vybrat nejlepší budoucí řešení.

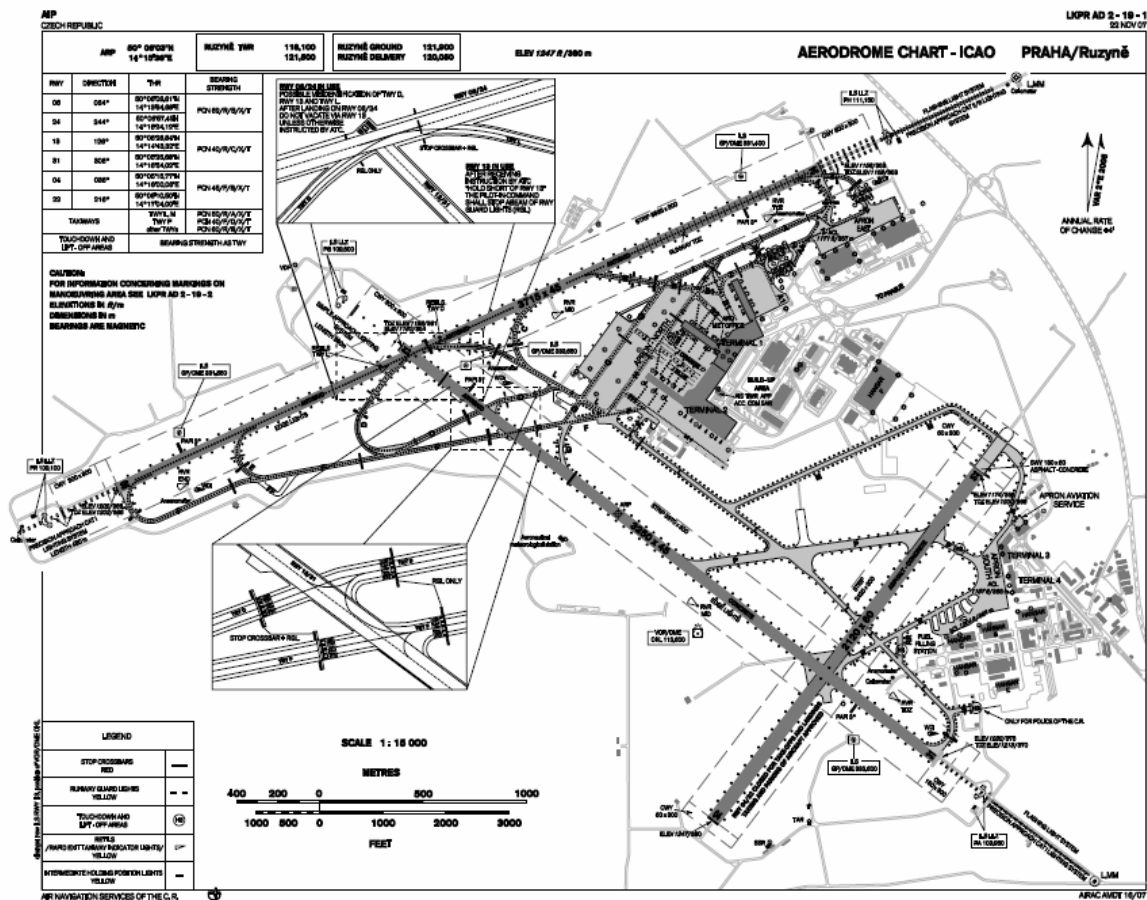
4.4 Potřebné informace pro tvorbu simulačního modelu

Tvorba simulačního modelu a k němu on-line animační podpory, které mají věrně simulovat nějaký existující systém, mají poměrně vysoké nároky na potřebné informace, vztahující se k reálně existujícímu systému. Pro co nejrealističtější a nejméně nejpravděpodobnější namodelování daného systému jsou většinou potřeba informace vztahující se k fyzikálním vlastnostem modelovaného systému, informace o chování jednotlivých částí a i o chování systému jako celku. V neposlední řadě jsou důležité i informace o entitách, které do simulovaného systému vstupují a případně z něj i vystupují. To, v jakém množství a v jaké kvalitě se nám podaří dané potřebné informace získat, nám může následně napovědět, do jaké míry simulační model odpovídá modelu simulovanému, tedy reálně existujícímu systému.

4.4.1 Informace o stávajícím dráhovém systému

4.4.1.1 Fyzikální vlastnosti stávajícího systému

Získání dat o stávajícím dráhovém systému Letiště Praha Ruzyň, bylo jedním z prvních úkolů, se kterým jsem se při přípravě na vypracování simulačního modelu setkal. Jako velice důležité se jevílo získat přesná data fyzikálního charakteru, která by mi pomohla určit přesné rozměry letiště, jako jsou například celkové délky i délky jednotlivých úseků přistávacích a vzletových ploch, stejně tak délky pojezdových drah, po kterých se pohybují letadla od terminálů k RWY a obráceně.



Obrázek 7: Letištní ICAO mapa Letiště Praha Ruzyně (zdroj:[10])

Z těchto délek jsem pak po dosažení průměrné rychlosti pohybu letadel po pojezdových drahách dokázal určit dobu pohybu, kterou letadlo stráví pojetím po letišti z bodu A do bodu B. U délek úseků vzletových a přistávacích drah, jsem taktéž po dosažení průměrné rychlosti pohybu po RWY dokázal určit čas pohybu po dráze a následně i okamžik, kdy je podle leteckých předpisů možné na dráhu pustit další stroj, provádějící vzlet či přistání.

4.4.1.2 Data o využití stávajících vzletových a přistávacích drah

Abych dosáhl, co největší věrohodnosti simulačního modelu a výsledných dat získaných při jeho simulování, bylo nezbytné získat informace o procentuálním využití jednotlivých vzletových a přistávacích drah. Tyto data byla použita pro rozdělení celkového denního objemu pohybů letadel na jednotlivé dráhy tak, aby co nejvíce odpovídala obvyklému rozdělení na simulovaném letišti. Šlo o rozdělení na RWY 06/24 a RWY 13/31. Jako absolutně nejvíce vytíženou se z dlouhodobějšího hlediska na Letišti Praha Ruzyně ukázala vzletová a přistávací dráha ve směru 24. Po zjištění procentuálního využití bylo řádově přibližně stejné vytížení této dráhy provedeno i v simulačním modelu.

Využití drah pro vzlet či přistání bylo přibližně následující:

- směr 24 82 %
- směr 06 12 %
- směr 13 4 %
- směr 31 2 %

4.4.1.3 *Informace o pohybech letadel během dne*

Nezbytnými informacemi pro nastavení denního pohybu letadel po letišti, byly informace o příletech a odletech letadel během dne. Zároveň bylo z těchto dat zjištěno, ke kterému terminálu konkrétní přistávající letadlo po pojezdových drahách přijede a stejně tak, od kterého terminálu, případně i od které brány, bude konkrétní odlétající letadlo odjíždět na hlavní dráhu. Použitá data pocházela z července 2006, neboť aktuálnější takto podrobná data, která byla nutností pro správnou a co nejvíce realitě odpovídající tvorbu simulačního modelu letiště, se od Letiště Praha Ruzyně ani Řízení leteckého provozu nepodařilo získat. Jako částečnou kompenzaci lze brát to, že data pocházejí z letního měsíce, kdy právě v červenci je sezónní špička a objem pohybů letadel po Letišti Ruzyně je nejvyšší. Z toho můžeme usoudit, že popisované množství pohybů letadel se bude nejvíce podobat průměrným denním objemům pohybů letadel na Ruzyni v roce 2008 a to i když vezmeme v úvahu každoroční růst objemu letecké dopravy.

Získaná data obsahovala i přesné časové údaje odletů a příletů jednotlivých letadel, což bylo další velice důležitou, ne-li nezbytnou informací pro nastavení generování entit (v tomto případě letadel) v simulačním modelu. Data obsahovala, jak údaj o plánovaném čase příletu či odletu, tak i jejich skutečný čas. Pro simulační model jsem zvolil jako směrodatný údaj plánovaný čas, neboť ten dle mého názoru více vypovídá o rozložení pohybů letadel během dne. Pouze u neplánovaných letů, nebo charterových letů, které neměly udaný plánovaný čas odletu či příletu, byl použit čas skutečný, aby bylo co nejpřesněji zachováno množství pohybů letadel.

Data o pohybech letadel dále uváděla i informaci o jednotlivých letadlech jako například kapacitu, či rozpětí křídel. A právě rozpětí křídel umožnilo rozdělit všechna letadla do kategorií podle velikosti. Toto rozdělení jsem dále použil pro zjištění konkrétního výjezdu ze vzletové a přistávací dráhy, který dané letadlo použije pro urychlení vyklizení hlavní dráhy pro další, po něm následující stroj. Další možností, jak rozdělit letadla podle velikosti, je rozdělení podle vnějšího rozchodu kol hlavního podvozku. Tyto informace jsem však neměl k dispozici, tak jsem zvolil rozdělení podle velikosti rozpětí křídel.

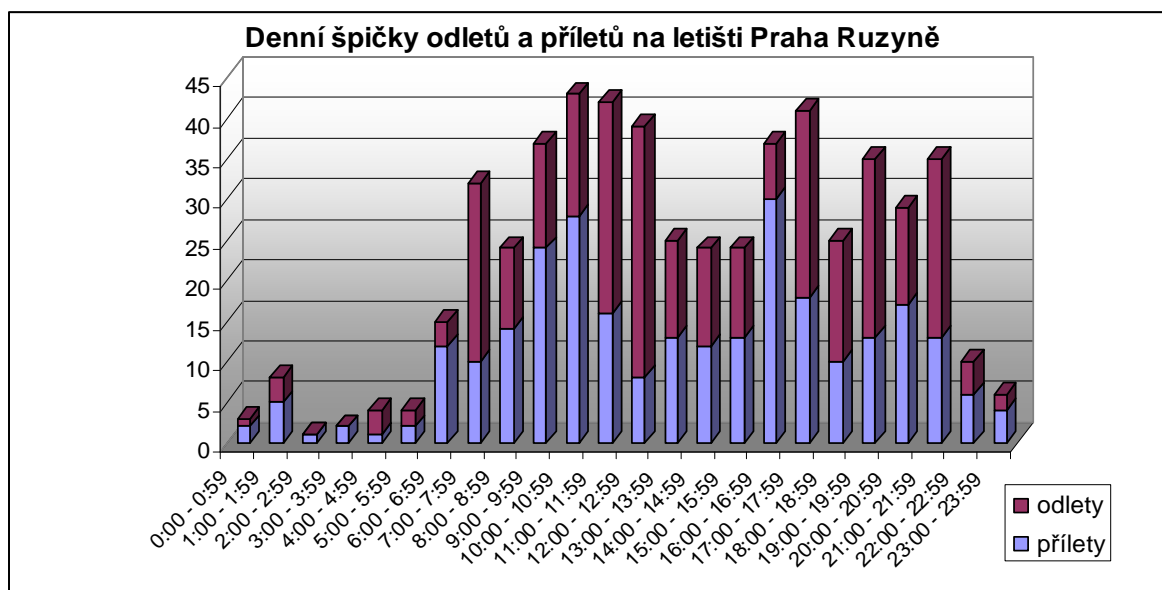
Kategorie letadel podle rozpětí křídel byly určeny následovně:

- A rozpětí menší než 15 metrů
- B rozpětí od velikosti 15 metrů až po 24 metrů, ne včetně
- C rozpětí od velikosti 24 metrů až po 36 metrů, ne včetně
- D rozpětí od velikosti 36 metrů až po 52 metrů, ne včetně
- E rozpětí od velikosti 52 metrů až po 65 metrů, ne včetně

Z uvedených dat o pohybech letadel lze také získat informace, které časové intervaly během dne jsou nejvytíženější a kolik pohybů letadel lze v daných intervalech očekávat. To nám přiblíží, jak je asi vytížen dráhový systém během dne. Toto rozložení příletů a odletů během dne lze s malými odchylkami očekávat i v budoucnu, neboť se jedná pro letecké společnosti o nejlukrativnější časy, které si budou snažit udržet i v příštích letech.

Z obrázku 8 můžeme vyzorovat, že objem příletů a odletů během dne značně kolísá. V nočních a brzkých ranních hodinách je množství pohybů letadel většinou jen do pěti za hodinu a poměr mezi odlety a přílety je téměř vyrovnaný. Přibližně mezi šestou a osmou hodinou ranní dochází ke značnému nárůstu objemu pohybů až na hodnotu kolem třiceti za hodinu, kde poměr mezi přílety a odlety je nejdříve ve prospěch příletů a hned další hodinu ve prospěch odletů. Od této chvíle množství pohybů stále roste, převážně však příletů a až

mezi desátou až třináctou hodinou stagnuje na hodnotě okolo 40 pohybů za hodinu, což lze označit jako první denní špičku provozu na letišti.



Obrázek 8: Denní špičky odletů a příletů na Letišti Praha Ruzyně

V této době už celkem jasně opět převládají odlety. Mezi třináctou a šestnáctou hodinou dochází ke znatelnému poklesu počtu pohybů až na hodnotu mezi 20 a 25 pohyby v hodině, kde je opět poměr vyrovnaný. Jako druhou denní špičku můžeme s mírným kolísáním označit čas mezi šestnáctou až dvaadvacátou hodinou, kde se počet pohybů blíží nejdříve k hodnotě 40, následně se pak drží na hodnotě těsně pod 35 pohyby za hodinu. Nejdříve v tomto časovém úseku převládají přílety, následně se situace na dvě hodiny přibližně vyrovnává a nakonec převládají odlety. V čase od dvaadvacáté hodiny až do půlnoci objem pohybů strmě klesá, až na hodnoty kolem pěti pohybů za hodinu, kde je opět poměr celkem vyrovnaný.

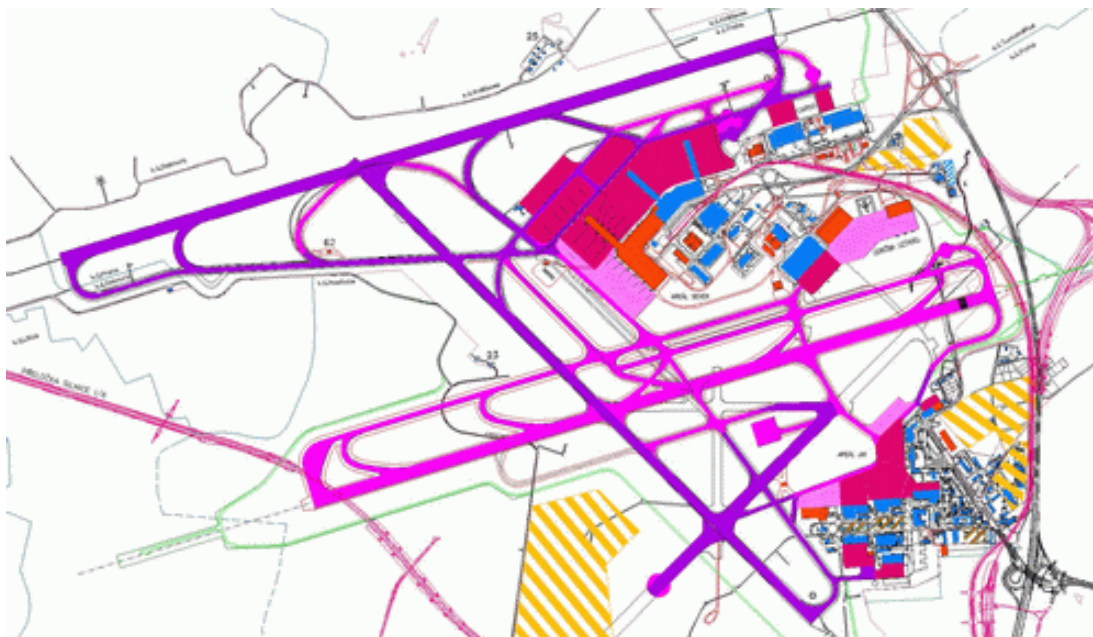
4.4.2 Informace o systému s paralelní dráhou

Data o systému s paralelní dráhou 06R/24L bohužel nebylo jednoduché sehnat, neboť ještě zatím není znám oficiální plán nové paralelní dráhy a na ni navazujících pojezdových drah. K dispozici je pouze několik různých návrhů, více či méně přesných a tak bylo zejména na vlastním úsudku, podle kterého návrhu bude simulační model systému s paralelní dráhou vytvářen. Nakonec jsem se po konzultaci s vedoucím přiklonil k návrhu, který byl na stránkách letiště použit pro prezentaci projektu výstavby paralelní dráhy 06R/24L, viz. obrázek 6.

4.4.2.1 Fyzikální vlastnosti systému s paralelní dráhou

Informace fyzikální charakteru, jako je délka nové paralelní dráhy, její umístění v areálu letiště a vzdálenost od stávající dráhy 06/24, byly zjištěny z dokumentů týkajících se plánovaného rozvoje dráhového systému Letiště Praha Ruzyně, které má Letiště Praha na svých stránkách. Avšak další upřesňující informace, týkající se zejména počtu, délek a směrů nových či přepracovaných pojezdových drah, které se na paralelní dráhu napojují a umožňují tak pohyb letadel od terminálů či od vzletových a přistávacích drah, zde uvedeny nebyly. Tyto doplňující informace byly získány z jiného nákresu, který se od návrhu použitého

pro prezentaci projektu výstavby paralelní dráhy lišil pouze v několika drobných detailech, ale byl vhodnější pro získání potřebných fyzikálních dat.



Obrázek 9: Další návrh paralelní dráhy (zdroj:[9])

Pomocí návrhu, viz. obrázek 9 jsem dle možností co nejpřesněji určil fyzikální vlastnosti pojezdových drah. Kvůli nedostatečné dokumentaci k projektu paralelní dráhy jsem také musel nové pojezdové dráhy označit písmeny, stejně jako tomu je u stávajících pojezdů, aby byl simulační model přehlednější a usnadnilo to orientaci. Po změření jednotlivých úseků pojezdových drah jsem stejně jako u stávajícího systému dosadil průměrnou rychlost pohybu po pojezdech a získal jsem časové údaje odpovídající době pohybu letadla po těchto úsecích. Obdobně jsem určil po změření a dosazení průměrné rychlosti pohybu po vzletové a přistávací dráze i dobu pohybu po paralelní dráze 06R/24L.

Z návrhu bylo také potřeba zjistit, které pojezdové dráhy byly zrušeny, nebo které byly upraveny, aby byly provedeny i odpovídající změny v simulačním modelu, který byl přepracováván ze stávajícího systému na systém s paralelní dráhou.

4.4.2.2 Využití vzletových a přistávacích drah v systému s paralelní dráhou

Jelikož dostavbou nové paralelní dráhy 06R/24L dojde ke křížení se stávající, méně využívanou dráhou 13/31, což by v podstatě znemožňovalo plynulé využívání obou drah, rozhodlo se vedení letiště, že bude provoz na této dráze 13/31 omezen pouze na výjimečné případy, jako je například údržba ostatních drah a podobně. S ohledem na tuto skutečnost jsem provedl převedení všech letadel (entit), které doposud ve stávajícím systému používaly dráhu 13/31, mezi novou paralelní dráhu 06R/24L a stávající dráhu 06/24. Důležité je taktéž uvést, že stávající dráha 06/24 bude po výstavbě paralelní dráhy přejmenována na 06L/24R. Jelikož obě dráhy, které budou v systému s paralelní dráhou využívány, jsou ve stejném směru, bylo procentuální využití jednotlivých směrů 06L(resp. 06R) a směru 24R(resp. 24L) nastaveno pro obě dráhy stejně s tím, že měnit se bude pouze objem příletů či odletů z jednotlivých drah, případně objem všech pohybů letadel za den.

Přibližné procentuální využití směrů 06 a 24 po převedení pohybů letadel z dráhy 13/31 na dráhy 06L/24R a 06R/24L:

- směr 24 (24R a 24L): 90 %
- směr 06 (06L a 06R): 10 %

4.4.2.3 *Objem pohybů letadel v systému s paralelní dráhou*

Neboť se zatím jedná pouze o projekt, který je ve fázi plánování, není stále jasné, jaký objem pohybů letadel, bude systém s paralelní dráhou bezproblémově zvládat. Když budeme uvažovat, že nyní je stávající systém na hranici svých možností a má ve špičce provozu plně vyčerpanou, ne-li překročenou kapacitu, pak se jako logické jeví, že systém s paralelní dráhou pojme maximálně dvojnásobek stávajícího objemu pohybů na letišti. Z tohoto předpokladu jsem také vycházel při plánování počtu pohybů strojů při vytváření simulačního modelu s paralelní dráhou a následném nastavení při simulaci tohoto modelu. Domnívám se, že letecké společnosti budou mít zájem uskutečňovat své lety v přibližně stejných časech jako tomu je ve stávajícím systému, aby dokázali dodržovat i výhodné časy na ostatních letištích, mezi kterými jsou tyto lety prováděny. Proto jsem použil i při tvorbě simulačního modelu s paralelní dráhou stejné časové údaje o pohybech, které jsou použity ve stávajícím systému. Došlo však k navýšení počtu pohybů a to řádově až na dvojnásobek v závislosti na zvoleném režimu testování. S ohledem na omezení provozu na dráze 13/31 byly u letů, které byly přesunuty na dráhy 06L/24R resp. 06R/24L, zachovány časy odletů, příp. příletů.

U systému s paralelní dráhou byly taktéž zachovány kategorie letadel, které dělí letadla podle rozpětí křídel stejně, jako je tomu u stávajícího systému. Tyto kategorie opět slouží pro určení přibližné délky dráhy pro přistání a z toho pak můžeme následně určit, který výjezd bude použit pro vyklizení dráhy.

4.5 Simulace stávajícího systému

Prvním krokem při tvorbě projektu mé diplomové práce v aplikaci Arena bylo vytvoření simulačního modelu, který by věrně simuloval provoz na dráhovém systému Letiště Praha. Z něho měl pak vycházet i další simulační model, který už simuloval plánovaný systém s paralelní dráhou. Pro simulaci bylo nutné zpracovat získaná data tak, aby mohla být účelně použita pro nastavení simulačního modelu. Při simulaci by se pak měly výsledky blížit co nejlépe realitě, s ohledem na množství a kvalitu získaných vstupních informací. Také je důležité konstatovat, že simulační model vznikl přibližně souběžně s jeho on-line animační podporou, takže se i popis těchto dvou postupů bude v některých částech textu prolínat.

4.5.1 *Tvorba simulačního modelu*

4.5.1.1 *Použité Attributes, Resources, Variables a Files*

Ke správnému nastavení simulačního modelu, tak aby se co nejvíce blížil k realitě, bylo potřeba použít několik různých modulů, které napomáhaly k upřesnění některých vlastností, k uložení určitých hodnot, k zajištění správného chování a k ukládání dat do souboru.

Nejčastěji používaným z těchto modulů byl modul `Attribute` (vlastnost), do kterého lze entitě uložit nějakou hodnotu či informaci, kterou si tato entita nese stále sebou při pohybu v simulačním modelu. Atributy se mohou entitám přiřazovat kdekoli v modelu a pro přiřazení se používá modul `Assign`.

V modelu stávajícího systému byly použity následující *Attributes*:

- *Draha* – má hodnotu 1 nebo 2 a slouží pro upřesnění použité dráhy pro entity, které jsou vedeny jako přistávající letadla,
- *Kategorie* – je atribut, který nabývá hodnot 1 až 5 v závislosti na velikosti rozpětí křídel letadla, kterému odpovídá daná entita a používá se pro určení výjezdu, na kterém přistávající letadlo opouští RWY,
- *OdT1* – toto je pomocný atribut, který je použit pro určení směru entit od terminálu 1, kde je několik vstupních bodů,
- *Smer* – je nejvíce využívaný a velice důležitý z hlediska pohybu entit po celém simulačním modelu. Používají ho rozhodovací moduly *Decide* pro určení směru dalšího pohybu entity z bodu A do bodu B. *Smer* je přiřazován entitám hned po jejich vygenerování ve vstupních bodech simulačního modelu. Nabývá hodnot od 1 až po 14, kde tyto hodnoty odpovídají různým výstupním bodům simulačního modelu (1 – terminál Sever 1; 2 – terminál Sever 2; 3 – terminál Jih 1; 4 – terminál Jih 2; 5 – terminál Cargo; 11 – dráha 06; 12 – dráha 24; 13 – dráha 13; 14 – dráha 31),
- *Vyjimka0624D* – je pomocný atribut, který slouží pro ošetření situace na křižovatce RWY06/24 s pojezdovou drahou D, která vznikla po křížení drah 06/24 a 13/31,
- *ZacatekFronty* – je atribut sloužící pro uložení hodnoty aktuálního simulačního času, pomocí kterého se pak následně zjišťuje doba strávená entitou ve frontě, kde čeká na uvolnění vzletové a přistávací dráhy.
- *Zdroj0624_1331* – je opět pomocný atribut, který slouží pro ošetření situace po křížení drah 06/24 s 13/31 a tento atribut je použit přímo na křižovatce obou drah.

Dalším, také často používaným modulem, byl modul *Resource* (Zdroj), který byl použit v několika různých situacích. Při vytvoření tohoto modulu se po nastavení jeho jména zadá i počet těchto zdrojů, které budou entitám v simulačním modelu k dispozici. V každém okamžiku může daný zdroj používat pouze tolik entit, kolik je těchto daných zdrojů. Toto velice oceníme zejména v situacích, kdy chceme docílit toho, aby se nám v určitém místě vyskytoval pouze určitý počet entit. Entitám jsou *Resources* přiřazeny pomocí modulu *Seize*, kde lze nastavit i počet zdrojů, které mají být entitě přiřazeny. U každého z těchto modulů *Seize* existuje *Queue* (fronta) čekajících entit na přidělení zdroje. Tento modul umožňuje použití čtyř různých frontových režimů (FIFO, LIFO, dle nejvyššího atributu a dle nejnižšího atributu). Pro uvolnění obsazených zdrojů slouží modul *Release*, kde je entitě odebrán určitý zdroj či více zdrojů, které jsou v tomto modulu nastaveny. Další možností pro dealokaci zdrojů je modul *Proces*, který umožňuje provedení více akcí (i současně) během průchodu entity tímto modulem a jednou z těchto akcí je právě i odebrání zdroje entitě.

V simulačním modelu byly použity tyto typy *Resources*:

- Zdroje křižovatek – které sloužily pro dosažení toho, aby se v jeden okamžik nevyskytovala na jedné křižovatce pojezdových drah, či pojezdové dráhy a RWY, více než jedna entita, resp. letadlo, aby bylo dosaženo bezpečnosti na dráhovém systému letiště. Z toho důvodu byl pro každou křižovatku

vytvořen pouze jeden zdroj. Příkladem zdroje křižovatek je např. RWY0624_D a F_L_H. Zdrojů křižovatek je v modelu použito okolo padesáti.

- Zdroje vzletových a přistávacích drah – byly použity pro zabezpečení pohybu po RWY, tak aby nedocházelo ke křížení neboli protisměrnému pohybu entit po vzletové a přistávací dráze. Dráha 13/31 má pouze 1 zdroj, ale dráha 06/24 má z důvodu mnohem většího využívání zdroje pro každý směr zvlášť, tyto zdroje mají kapacitu 2 pro každý směr. Pak ještě existují další pomocné zdroje, které dráhu rozdělují na dvě části, aby se mohly na jedné dráze pohybovat 2 entity, pouze však ve stejném směru a s dostatečným odstupem. Zdrojů vzletových a přistávacích drah se v simulačním modelu používá 7 a z toho 2 mají kapacitu 2. Příkladem těchto zdrojů je např. draha0624 a draha2406b.

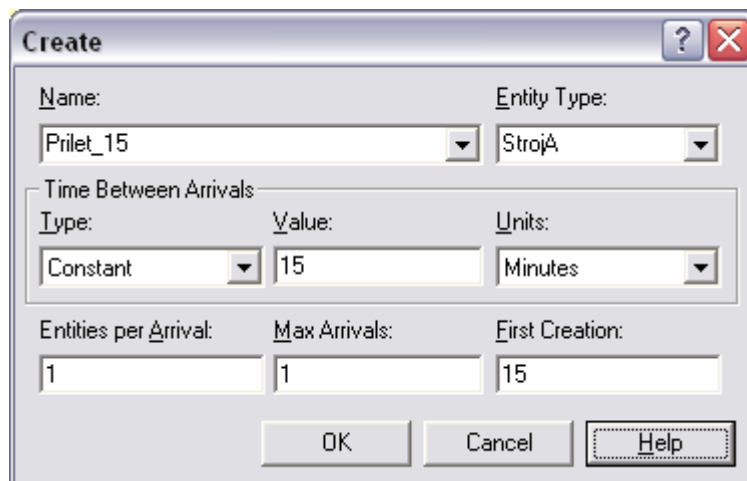
Dalším modulem, v tomto simulačním modelu již méně často užitým, je modul *Variable* (proměnná). Slouží pro uložení určité hodnoty do proměnné, kterou lze následně použít při různých výpočtech či zápisu do souboru. V modelu byl použit hlavně pro uložení aktuálního simulačního času a následnému uložení do souboru na disk. Dalším užitím byl výpočet čekacích dob strávených entitami ve frontě v určitých bodech simulačního modelu. Hodnota do proměnné se v modelu ukládá stejně jako předchozí moduly pomocí *Assign*. Příkladem použitých proměnných je např. *GeneratorCargo* a *Frontal*.

Modul typu *File* (soubor) je používán pro ukládání (příp. načítání) dat do souboru na disk. Vše se děje pomocí modulu *ReadWrite*, kde se nejčastěji hodnota nějaké konkrétní proměnné ukládá do předem nastaveného souboru. V tomto modelu se modul *File* používá pro ukládání časových okamžiků, sloužících pro kontrolu správnosti generovaných dat. Dále se používá pro ukládání výsledků simulace v podobě čekacích dob na uvolnění vzletových a přistávacích drah. Příkladem použitých souborů je např. *Generátor Priletu06* a *Fronta0624*.

4.5.1.2 Vstupní a výstupní body modelu

Na začátek bylo nutné určit jaké budou všechny vstupní body simulačního modelu. V těchto vstupních bodech byly následně vytvořeny moduly *Create*, které generují entity vstupující do systému, dle předem nastavených podmínek. U tohoto modulu se nastavil vždy typ entity, kterou modul generuje, v našem případě to byla vždy entita *StrojA*. Následně se zde nastavil čas mezi jednotlivými přílety pomocí typu, hodnoty a jednotek. Zde byl nastaven typ *Constant*, určitá časová hodnota odpovídající konkrétnímu času příletu či odletu letadla a jednotka *Minutes*, která byla zvolena hlavní časovou jednotkou pro nastavení modulu *Create*. Dalším možným nastavením byl počet vygenerovaných entit během jednoho příletu, což bylo v našem případě nastaveno na 1. Dále pak byl nastaven na hodnotu 1 i maximální počet vygenerovaných příletů z tohoto jednoho modulu.

Posledním krokem v nastavení byl čas prvního generování, což zde odpovídalo časovému okamžiku konkrétního příletu či odletu, pro který byl tento modul vytvořen. V tomto simulačním modelu, stávajícího dráhového systému, byl pro každý přílet a odlet vytvořen samostatný modul *Create*.



Obrázek 10: Nastavení modulu Create

Z důvodu používání čtyřiašedesátihodinového cyklu, nebylo bohužel možné využít pouze několik těchto modulů s nastavením typu Schedule (rozvrh), protože ten je koncipován pro hodinový cyklus. Za zmínku určitě stojí i podmínka, že každý modul musí mít unikátní a jednoznačné jméno. Nastavení modulu Create v našem simulačním modelu je znázorněno na obrázku 10.

Vstupní body do modelu byly různé pro přílety a odlety. Pro přílety se jednalo samozřejmě o začátky vzletových a přistávacích drah. Jelikož se na těchto bodech generovalo velké množství entit, bylo tedy použito mnoho modulů Create. Z důvodu přehlednosti byly tyto moduly umístěny do submodelů, v tomto případě do Create_přílety06, Create_přílety24, Create_přílety13 a Create_přílety31. V případě nutnosti i do dalších submodelů umístěných uvnitř těchto uvedených submodelů. Z důvodu kontroly správnosti časových okamžiků, ve kterých jsou přílety generovány, byla vytvořena za každý submodel na začátku dráhy dvojice modulů – Assign a ReadWrite, pro zjištění a zápis přesných časů do souboru na disk.

Pro odlety byly vstupními body terminály, či přesněji části terminálů, určené podle toho, jakou měl ten který konkrétní odlet uvedenou nástupní bránu ve vstupních datech. Stejně jako u příletů byly použity submodely. Avšak u terminálu 1 a 2 byla situace složitější právě kvůli několika možným nástupním místům (nástupním branám), i když se jednalo stále o jeden a ten samý terminál. Kvůli nutnosti nasměrování entit na správnou křižovatku pojezdových drah, které sousedí s nástupní branou, bylo potřeba pomocí několika modulů Decide a podmínek v nich nastavených, určit správný směr pro každou vygenerovanou entitu. Toho bylo docíleno také pomocí atributů, které byly jednotlivým entitám hned po vygenerování přiděleny modulem Assign. Stejně jako u příletů byla pro kontrolu správného generování použita dvojice modulů – Assign a ReadWrite, což umožňovalo pozdější porovnání generovaných dat s daty ze vstupního souboru.

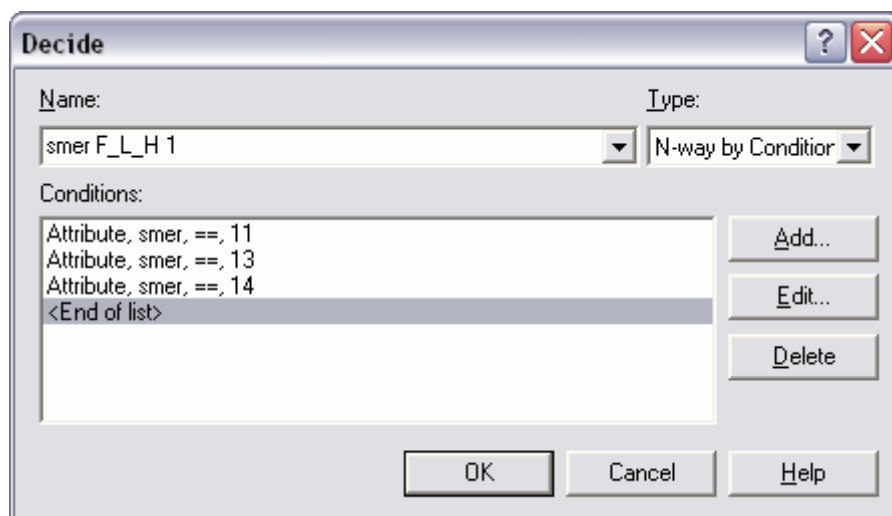
Na opačné straně modelu jsou výstupní body, kterými jsou terminály pro přílety a konce vzletových a přistávacích drah pro odlety. Na těchto bodech jsou umístěny moduly Dispose, do kterých mívají entity, které již opouštějí model. Tento modul není specifikován na určitý typ entit, dokáže tedy pojmout všechny entity. Stejně jako u všech ostatních modulů, musí být i u Dispose dodržena unikátnost a jednoznačnost jména. V tomto simulačním modelu byly použity například názvy DispoT1 a DispoT2.

4.5.1.3 Křižovatky

Křižovatky lze ustanovit za jednu z nejpočetnějších a poměrně složitějších součástí simulačního modelu. Dochází zde ke křížení pojezdových drah mezi sebou, nebo pojezdových drah se vzletovou a přistávací dráhou. Dále můžeme křižovatky rozdělit podle počtu směrů, které křižovatka má a to na křižovatky se třemi, čtyřmi nebo pěti možnými směry pohybu. Nejvíce byly zastoupeny třisměrné křižovatky, následovaly křižovatky se čtyřmi směry a nakonec jedna s pěti možnými směry pohybu.

Každá z těchto křižovatek měla pro pohyb uvnitř křižovatky k dispozici jeden Resource, který zajišťoval bezpečný pohyb entit (letadel) v prostoru křižovatky. Tím bylo dosaženo bezpečnosti při pohybu letadel po pojezdových drahách a křižovatkách.

Každá křižovatka byla umístěna ve vlastním submodelu, aby byla zajištěna přehlednost modelu. Uvnitř submodelu se v každém směru vjezdu do křižovatky nacházel modul Seize, který alokoval zdroj křižovatky pro každou entitu do ní vstupující. V některých případech, například na křižovatkách ležících na drahách 06/24 nebo 13/31, mohl tento modul alokovat ještě nějaký další zdroj pro entitu do něj vstupující. Potom následuje rozhodovací modul Decide, který podle určitých pravidel určí směr dalšího pohybu entity do některého ze zbývajících směrů. Záměrně není mezi nabízenými směry směr, ze kterého entita do křižovatky vstoupila. Vycházíme totiž z předpokladu, že letadlo se na křižovatce neotáčí a nevrací zpět do stejného směru, neboť je tento manévr z technického hlediska pro většinu letadel velice náročný nebo dokonce nemožný.

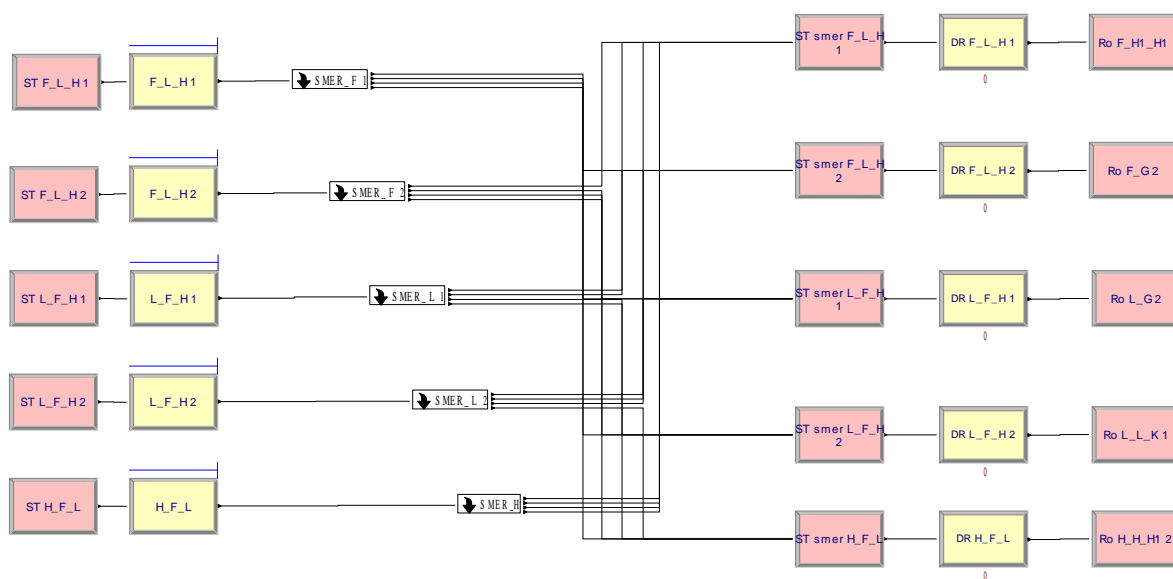


Obrázek 11: Nastavení modulu Decide

Rozhodování v modulu Decide může být několika typů. Jednodušší varianta je podle zadaných procentuálních hodnot, dle kterých entity vystupují do dvou či více směrů. Další možností, která byla hojně využívána i v tomto simulačním modelu, je rozhodování dle nastavených podmínek. Stejně jako u procentního rozhodování, jsou podle těchto podmínek entity směřovány do dvou či více směrů. Ke směřování na křižovatkách byly sestaveny podmínky, kde byl používán atribut entit Smer. Hodnota tohoto atributu odpovídala určitému výstupnímu bodu systému, na který byla tato konkrétní entita směřována. Na obrázku 11 je vidět, jak vypadá nastavený modul Decide pro jeden ze směrů křižovatky pojezdových drah F, L a H. Na křižovatkách vzletových a přistávacích drah s pojezdovými drahami se ještě v rozhodovacích modulech používaly atributy Kategorie pro vytváření podmínek

pro určení dalšího směru pohybu entity. Ty se týkaly pouze přistávajících letadel a jejich velikosti, dle které byl určován výjezd z přistávací dráhy.

Po rozhodnutí, kterým směrem bude entita pokračovat, následoval posun do modulu Process, který zde zastupoval funkci dvou jiných modulů a to Delay a Release. Tento modul byl použit pro dealokaci konkrétního zdroje nebo i více zdrojů a následné zpoždění, které v tomto případě znázorňovalo dobu průjezdu křižovatkou. U některých křižovatek, zejména při křížení pojezdů se vzletovou a přistávací dráhou, byla situace složitější z důvodu ošetření situace při dealokaci použitých zdrojů. Následně se entita začala přesouvat do dalšího bodu modelu (na další křižovatku nebo do výstupního bodu modelu) pomocí modulů on-line animační podpory.



Obrázek 12: Ukázka křižovatky pojezdových drah F_L_H

4.5.1.4 Fronty na obsazení RWY

Z důvodu toho, že na vzletové a přistávací dráhy je umožněn vjezd entitám v několika bodech, bylo nutné tuto situaci vyřešit s ohledem na správnost přidělování zdrojů a hlavně na zabezpečení situace, aby nedocházelo ke křížení (protisměrnému pohybu) letadel na RWY. Na dráze 13/31 nebylo z důvodu malého provozu nutno tuto situaci řešit, ale vzhledem k velkému provozu na dráze 06/24 bylo potřeba zavést určitá bezpečnostní opatření.

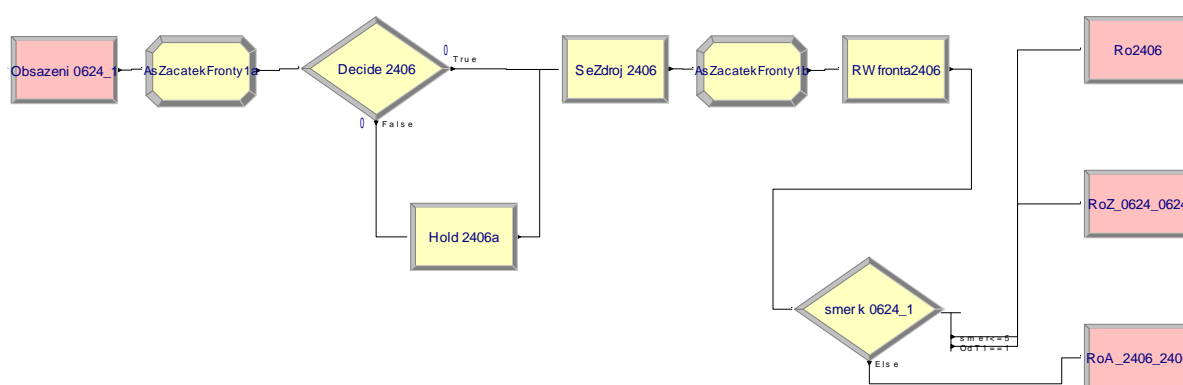
Vstupní body na dráhu 06/24 jsou:

- ve směru 06 – Create_prilety06 a křižovatka 0624_0624_F,
- ve směru 24 – Create_prilety24 a křižovatky 0624_0624_Z a 0624_0624_A.

Jako řešení bylo potřeba zvolit posloupnost modulů a v nich nastavených podmínek, které by nedovolily vjezd entity na dráhu, na které se nachází jiná entita pohybující se v opačném směru. Stejně tak bylo nutné zajistit dostatečný časový rozstup mezi entitami, vjíždějícími na dráhu ve stejném směru, aby byl dodržen minimální bezpečnostní rozstup, jak je uvedeno v předpisech ICAO. Dodržení těchto rozstupů bylo dosaženo pomocí zdrojů dráhy a různé délky doby jejich dealokace na určitých místech dráhy. K tomu slouží především zdroje dráhy draha0624a a draha0624b, nebo draha2406a a draha2406b

v závislosti na směru dráhy. Toto umožnilo vstup a pohyb i dvou entit ve stejném směru, samozřejmě s dostatečným bezpečnostním rozstupem, který odpovídá předpisům.

Pro zamezení protisměrného pohybu entit na dráze 06/24 byla vytvořena tato posloupnost modulů, viz. obrázek 13. Ten se vztahuje k situaci ve směru 24. Nejdříve je zjištěno pomocí modulu *Decide* a nastavení podmínky *Expression* ve tvaru $NR(draha0624) == 0$, zda není používán zdroj směru 06, což by značilo, že se na dráze pohybuje nějaká entita v opačném směru. Pokud je používán zdroj směru 06, tak je entita poslána do modulu *Hold*, kde je nastavena podmínka dalšího pohybu entity na okamžik uvolnění zdroje směru 06. Pak entita postupuje do modulu *Seize*, kde jí je přiřazen zdroj směru 24 a může pokračovat na dráhu. Pokud není při průchodu modulem *Decide* využíván zdroj směru 06, tak entita pokračuje přímo na modul *Seize*, kde jí je alokován zdroj směru 24 a může vjet na dráhu.



Obrázek 13: Opatření proti křížení entit na dráze 06/24 (směr 24)

Další součástí schématu na obrázku 13 jsou ještě moduly *Assign* a *ReadWrite*, které zde slouží ke zjišťování a k zápisu výsledků do souborů v podobě délky doby čekání na RWY. Další rozhodovací modul slouží k určení, ke kterému ze vstupních bodů na dráhu ve směru 24 se má entita vydat. Poslední součástí jsou moduly animační podpory.

4.5.2 Tvorba on-line animační podpory

Tato část modelu stávajícího systému drah probíhala v podstatě souběžně s předchozí částí, to především kvůli větší přehlednosti a díky tomu i časově menší náročnosti implementace.

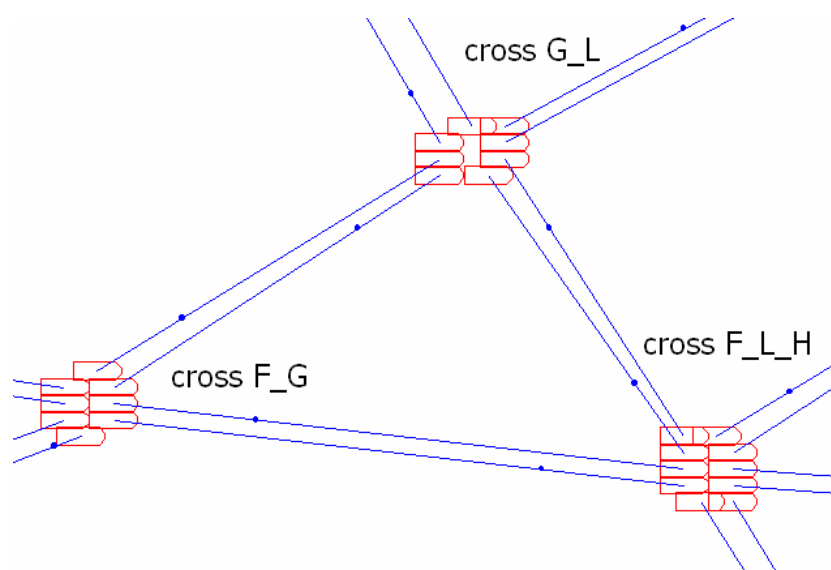
4.5.2.1 Modul *Station* a animační prvek *Station*

Modul *Station* (stanice) se použil pro znázornění konkrétního bodu modelu. Vzhledem k rozsáhlosti celého projektu bylo použito několik set modulů *Station*. I u tohoto modulu platí, že musí mít jedinečné jméno. Avšak i více modulů může odpovídat jednomu animačnímu prvku *Station*. Tyto prvky jsou pak v animační podpoře znázorněny červeným obdélníkem do kterých, nebo ze kterých, vedou animační prvky *Route*. Jsou to tedy body, mezi kterými se při animaci pohybují entity. Každá křižovatka vytvořená v simulačním modelu měla svou animační část, kde moduly *Station* odpovídaly vjezdům či výjezdům této křižovatky v on-line animaci. Stejně jako tomu bylo u křižovatek, tak i u vstupních a výstupních bodů celého modelu se vyskytovaly moduly *Station* jako místa vzniku či zániku entit.

4.5.2.2 Modul Route a animační prvek Route

V animaci slouží animační prvek Route (cesta) pro pohyb mezi jednotlivými body. Je to jakási dráha určující odkud a kam se entita (přesněji řečeno obrázek entitu znázorňující) má pohybovat. Tento prvek je již v simulačním modelu definován pomocí modulu Route. V něm se nastavuje opět jedinečné jméno, hodnota délky doby pohybu po této cestě a časová jednotka, ve které je doba zadána. Nakonec se nastaví typ cíle této cesty a jeho jméno.

Animační prvek Route je v animaci primárně znázorněn modrou čarou a spojuje prvky Station podle toho, jak je nastaven modul Route v simulačním modelu. Propojováním animačních prvků Route a Station vzniká celkové on-line animační schéma, kde po spuštění simulace nastává pohyb objektů znázorňujících entity simulačního modelu.



Obrázek 14: Ukázka Route a Station v animačním schématu

4.5.3 Získání výsledků stávajícího systému

Po kompletním dotvoření systému simulujícího stávající dráhový systém na Letišti Praha Ruzyně bylo důležité provést validaci a kalibraci modelu. Za to se může označit kontrola správnosti zadaných hodnot generovaných příletů či odletů a následně kontrola pohybů entit po modelu, zda nedochází k něčemu, co by se dalo považovat za nepřijatelné v reálném systému. Za poslední část této validace a kalibrace se může označit porovnání přepravních výsledků simulačního modelu s reálným systémem.

Jak je všeobecně známo, tak Letiště Praha je v době denních špiček již na absolutní hranici svých kapacitních možností. Po provedení simulace se to samé ukázalo i v modelu, kde čekací doby na uvolnění dráhy dosahovaly poměrně vyšších hodnot. Jako ideální pro tento ukazatel se jevila dráha 06/24, protože je nejvíce využívanou vzletovou a přistávací dráhou na letišti. Maximální doba čekání pro směr 06 byla přibližně 31,5 minuty v době špičky a denní průměrná doba čekání byla necelých 5 minut. U směru 24, který je nejvíce využíván, byla maximální doba čekání také mírně přes půl hodiny a to přibližně 32 minut. Průměrná doba čekání v tomto směru byla 9 minut. Grafické znázornění situace na RWY 0624 je v přílohách. Maximální doba čekání na poměrně málo využívanou dráhu 1331 byla

Mezi Resources přibyly v novém modelu zdroje pro nově vzniklé křižovatky, těch je v modelu s paralelní dráhou asi dalších třicet. Jsou vytvořeny také zdroje pro novou paralelní dráhu 06R24L, kde vzniklo pět nových zdrojů a to draha06R24L, draha06R24La, draha06R24Lb, draha24L06Ra a draha24L06Rb.

Pro získávání výsledků bylo nutno opět vytvořit další Variables (Fronta3 a Fronta4) pro pomoc při výpočtu výsledných čekacích dob na uvolnění RWY a následně i dva nové moduly Files (Fronta06R24L a Fronta24L06R), které umožňovaly tyto výsledky zapisovat do souboru. I pro kontrolu vstupních dat ve směrech 06R a 24L byly vytvořeny další dvě proměnné a další dva soubory pro jejich zápis.

4.6.1.2 Nové vstupní a výstupní body modelu

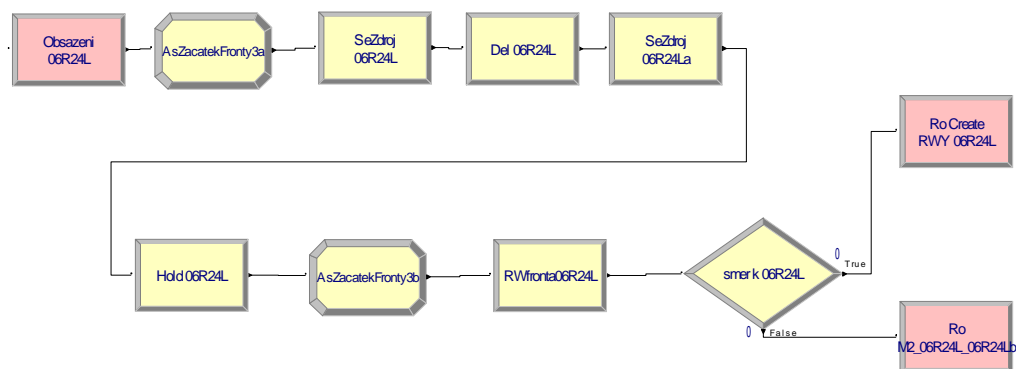
Jako další vstupně-výstupní body modelu byly vytvořeny již zmíněné konce a začátky dráhy 06R a dráhy 24L. Generování entit typu StrojA zde bylo provedeno také pomocí obdobně nastavených modulů Create, jako tomu je v modelu stávajícího systému. Stejně jsou řešeny i výstupní body pomocí modulu Dispose.

4.6.1.3 Křižovatky

Při změně ze stávajícího systému na systém s paralelní dráhou prodělal model největší změnu v počtu křižovatek. Ty byly vytvářeny podle stejných postupů jako křižovatky ve stávajícím systému, ale byly pro ně použity nově vytvořené zdroje. Tři výjezdy mělo mezi novými šestnáct křižovatek, čtrnáct křižovatek mělo čtyři výjezdy a pět výjezdů měly dvě křižovatky. Několik již existujících křižovatek muselo být přepracováno a některé dokonce z modelu odstraněny.

4.6.1.4 Nový systém front na obsazení RWY

Poměrně výraznou změnu prodělal i systém, který má na starost přidělování zdrojů na vzletových a přistávacích drahách a k tomu ještě zabezpečuje ochranu proti případnému protisměrnému pohybu entit po RWY. Systém front z modelu stávajícího systému bylo nutné přepracovat, neboť entity často křižovaly dráhu 06R/24L po pojezdech L a PP a tím docházelo k nepřesnému přidělování a následné dealokaci zdrojů na vstupních bodech dráhy 06R/24L. To někdy vedlo k situaci, že ve stejnou chvíli vyjely dvě entity po dráze proti sobě. To však bylo z hlediska správnosti modelu nepřijatelné.



Obrázek 16: Nové opatření proti křížení na 06R24L (směr 06)

Na obrázku 16 je vidět nově navržená posloupnost modulů, která zabránila křížení na dráze. Změnou je i použití pouze jednoho zdroje (draha06R24L) o kapacitě 2 pro celou

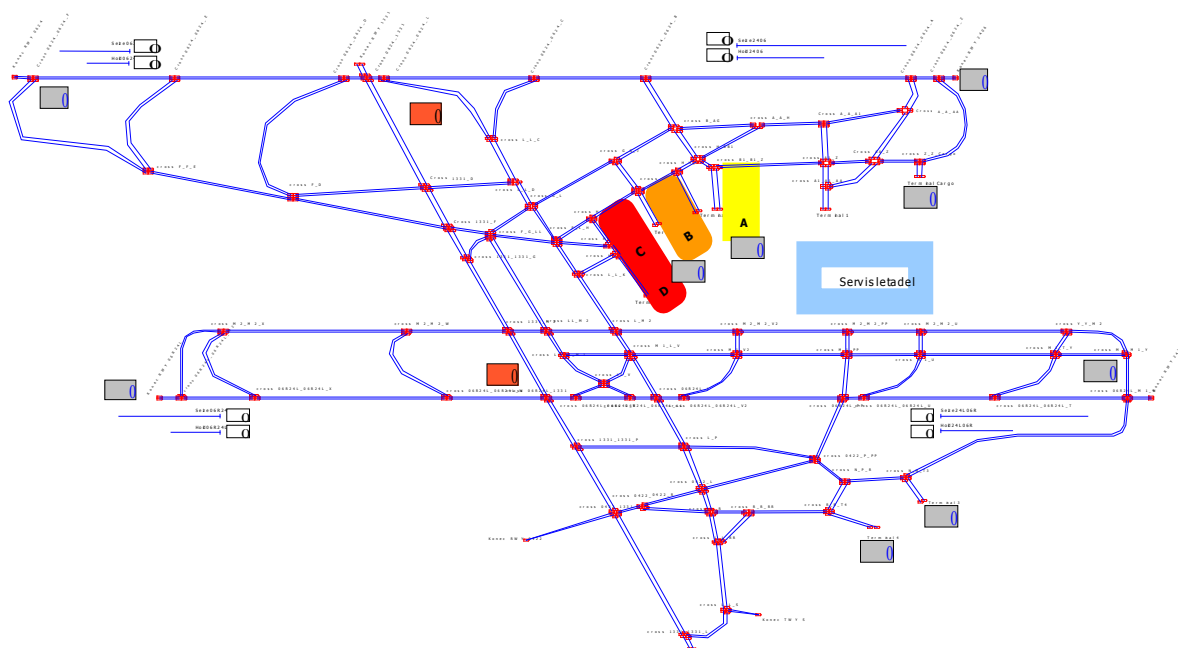
dráhu 06R/24L v obou směrech. Dále jsou použity další zdroje pro tuto dráhu, které jsou využívány pouze pro určité části dráhy v jednom směru. Na začátku posloupnosti je *Seize*, který entitě přidělí jeden ze zdrojů dráhy. V dalším modulu *Seize* jí je přidělen pomocný zdroj (draha06R24La) pro první úsek dráhy v tomto směru (v našem případě 06) a následuje čekání v modulu *Hold*, dokud se neuvolní oba pomocné zdroje protějšího směru. Když dojde k uvolnění těchto zdrojů, je vypuštěna i entita z modulu *Hold* a pokračuje na vzletovou a přistávací dráhu. Výhodou tohoto opatření je i fakt, že pro oba směry je využívána jedna fronta pro čekání na zdroj dráhy, čímž je zajištěno jeho spravedlivé přidělování entitám. Na zobrazeném schématu jsou samozřejmě ještě obsaženy moduly, které jsou užity pro výpočet a zápis výsledků a v neposlední řadě i moduly animační části modelu.

4.6.1.5 Použití signálů

Nově bylo při tvorbě paralelní dráhy využito i signálů. Vyžadovala si to situace při křížení RWY 06R/24L s pojezdy L a PP. Na každé z křižovatek byl na vstupech z obou směrů pojezdů doplněn rozhodovací modul *Decide*, který hlídal zda je v tom daném okamžiku vzletová a přistávací dráha využívána. Pokud nebyla, tak poslal entitu do křižovatky. Pokud však RWY byla v ten okamžik využívána, tak nasměroval letadlo do modulu *Hold*. V tomto modulu byla nastavena podmínka na přijetí určitého signálu vyslaného z modulu *Signal* a až poté následovalo vypuštění entity. Tyto moduly se nacházely hned za křižovatkou a na výjezdech z RWY. Což v praxi znamenalo, že entita jedoucí po pojezdu mohla křížovat hlavní dráhu, až po průjezdu jiné entity (jedoucí po hlavní dráze) danou konkrétní křižovatkou nebo při uvolnění hlavní dráhy.

4.6.2 Doplnění on-line animační podpory o paralelní dráhu

U animační podpory systému s paralelní dráhou došlo opět k výraznému rozšíření animačního schématu. Pomocí *Route* a *Station* byly doplněny všechny nově vytvořené křižovatky ze simulačního modelu s paralelní dráhou. I při doplňování animace byly použity již známé postupy z předešlého modelu.



Obrázek 17: Animační model s paralelní dráhou

Důsledně bylo dodržováno správné prostorové rozmístění všech objektů či případná rovnoběžnost drah a pojezdů. Snahou bylo také zachovat správné poměry délek vůči nákresu plánovaného systému s paralelní dráhou. Zde jsem však opět narážel na prozatímní nedostatečnou znalost plánovaného projektu paralelní dráhy na Letišti Praha Ruzyně. Výsledek po doplnění animačních prvků paralelní dráhy je vidět na obrázku č. 17.

4.6.3 Získání výsledků systému s paralelní dráhou

Ještě před spuštěním simulace a získáváním výsledků bylo nutné zhodnotit, jaké režimy simulace provést, aby bylo dosaženo maximální transparentnosti výsledků a aby co nejlépe vypovídaly o výkonnosti dráhového systému s paralelní dráhou.

Jako optimální pro získání výsledků se jevíly tyto režimy využívání jednotlivých vzletových a přistávacích drah:

1) smíšený režim využívání drah 06L/24R a 06R/24L

- a) dráha 06L/24R: přílet – 75 %, odlet – 25 %
dráha 06R/24L: přílet – 25 %, odlet – 75 %
- b) dráha 06L/24R: přílet – 50 %, odlet – 50 %
dráha 06R/24L: přílet – 50 %, odlet – 50 %
- c) dráha 06L/24R: přílet – 25 %, odlet – 75 %
dráha 06R/24L: přílet – 75 %, odlet – 25 %

2) oddělený režim využívání drah 06L/24R a 06R/24L

- a) dráha 06L/24R: pouze odlet
dráha 06R/24L: pouze přílet
- b) dráha 06L/24R: pouze přílet
dráha 06R/24L: pouze odlet

Dále bylo určeno, že každý z uvedených režimů bude simulován pro tři různé objemy pohybů letadel. A to pro 50 %, 75 % a 100 % objemu, kde jako 100 % objemu byl brán dvojnásobek nynějšího objemu pohybů, to znamená dvojnásobek počtu pohybů užitých v simulaci stávajícího systému drah.

Tabulka 2: Výsledky všech variant režimu 1

		Doba čekání na uvolnění dráhy (min)						
		50 %		75 %		100 %		
		směr	maximální	průměrná	maximální	průměrná	maximální	průměrná
režim 1	A	06L	16,8	3	20,8	4	30,6	7,5
		24R	10,7	1,5	25	4,4	50,8	18,5
		06R	4,7	1,2	8	2,1	19,7	4,6
		24L	11,2	1,5	21	5	44,5	12,7
	B	06L	8,9	1,8	18	3,8	26	7,5
		24R	8,5	1	13,8	2,8	39,7	15
		06R	1,7	0,3	14,6	3	21,5	5,2
		24L	6,8	1	13	3	31,7	12,2
	C	06L	4,2	0,8	11,6	2,3	17	4
		24R	7,4	1,2	17,5	4,1	30,8	9,1
		06R	7,5	1	14,6	3,2	28,8	6
		24L	10	2	24,9	5	54,1	22,6

Díky zvolení těchto režimů bylo nutné razantně přeorganizovat data na vstupních bodech modelu a to vždy pro každý z režimů zvlášť. Tím vzniklo celkem 15 verzí modelu s paralelní dráhou. Výsledky v podobě maximálních a průměrných dob čekání jsou uvedeny v tabulce 2 a v tabulce 3.

Tabulka 3: Výsledky všech variant režimu 2

		Doba čekání na uvolnění dráhy (min)						
		50 %		75 %		100 %		
		směr	maximální	průměrná	maximální	průměrná	maximální	průměrná
režim 2	A	06L	10,7	2,8	18,3	5,1	30,8	7,7
		24R	13,9	2	27,2	7,8	54,7	15,7
		06R	5,7	0,9	11,1	2,3	18,9	4,2
		24L	18,1	3,12	34,3	8,9	63,5	25,2
	B	06L	6,9	1,1	16,8	3,5	22,7	5,1
		24R	15,9	2,9	34,4	8,8	62,2	24,5
		06R	5,9	1,8	19,8	5,5	41	16,9
		24L	16,6	2,6	33,6	8,6	68,8	22,3

Pro podrobnější posuzování a větší přehlednost byly pro každou variantu všech režimů sestrojeny 4 grafy znázorňující jednotlivé směry drah. Na těchto grafech je jasně vidět vývoj čekacích dob na uvolnění vzletových a přistávacích drah během dne. Je z nich patrna i velká souvislost s denními špičkami dopravy na Letišti Praha. V době špiček totiž čekací doby strmě rostou, zatímco v době tzv. sedla se snižují až na nulu. Uvedené grafy jsou umístěny v přílohách.

4.7 Porovnání výsledků obou systémů

Pokud chceme přímo porovnávat výsledné čekací doby dosažené oběma simulačními modely, musíme brát v úvahu, že s modelem stávajícího dráhového systému, lze porovnávat pouze režimy modelu s paralelní dráhou, u kterých je kapacita objemu pohybů nastavena na 100 %. Nabízí se to z toho důvodu, že u obou simulačních modelů, byla použita stejná vstupní data o příletech a odletech. Pouze u režimů modelu s paralelní dráhou, byla tato data násobena z důvodu potřeby většího objemu dat. V malém měřítku šlo také o přesouvání dat s ohledem na nevyužívání dráhy 13/31 v modelu s paralelní dráhou.

Při bližším zkoumání výsledků z tabulky 2 a 3 a následném porovnání s výsledky modelu stávajícího systému lze jasně vyčíst, že pouze dva z pěti režimů modelu s paralelní dráhou dosáhly přibližně podobných výsledků jako model stávajícího systému. Jsou to režimy 1b a 1c, avšak i u nich je vidět patrný rozdíl výsledků na jedné a druhé dráze.

Vliv na výsledné čekací doby u režimů modelu paralelní dráhy měla i změna frontového režimu, resp. zabezpečení proti křížení. Po této změně došlo na všech režimech k mírnému navýšení dob čekání. Bylo dosaženo také přiblížení hodnot vyjadřujících dobu čekání v obou směrech. Toto mírné navýšení bylo z důvodu toho, že se častěji měnil směr pohybu entit po RWY a tato změna směru zabere více času než stálejší pohyb stejným směrem, ke kterému docházelo v modelu stávajícího systému. Nutno však poznamenat, že změna zmiňovaného frontového režimu byla z hlediska bezpečnosti provozu na drahách nevyhnutelná a bez ní by nebyl model validní.

Jak je z výsledků v tabulkách 2 a 3 patrné, i při malém objemu pohybů dosahují režimy poměrně různých výsledků.

To může být způsobeno například ne zcela ideálním rozdělením provozu na obě dráhy z hlediska času. Další možností je také nestejná vzdálenost obou drah od terminálu a jejich nástupních mostů. Pravděpodobně dochází ke smíšení obou vlivů, což má za následek různý dopad na výsledky jednotlivých režimů.

4.8 Zhodnocení vlivu paralelní dráhy na kapacitu na letišti

Z výsledků simulace obou modelů systému drah a z jejich porovnání lze usoudit, že přínos paralelní dráhy bude zásadní. V podstatě dojde ke zdvojnásobení nynější maximální dráhové kapacity. Musíme však brát zřetel i na to, že nyní již je letištní dráhový systém na hranici svých možností, proto i systém s paralelní dráhou by se při zdvojnásobení dosavadního objemu pohybů pohyboval na vrcholu své kapacity a docházelo by k vyšším čekacím dobám, jako to ukázala simulace. Tuto situaci můžeme však očekávat za poměrně dlouhou dobu, jelikož je velice nepravděpodobné, že by se během několika málo příštích let zvedl objem letecké dopravy na Ruzyni na dvojnásob.

V případě, že by byla paralelní dráha již postavena, byl by provoz na dráhovém systému letiště zcela bezproblémový, snad pouze jen v době denních špiček by se občas tvořily fronty, ale i tak by letadla měla pouze zanedbatelné čekací doby. V této variantě se počítá přibližně s počtem 530 příletů či odletů za den. Avšak i pro tento objem pohybů v systému s paralelní dráhou, by se vyplatilo vybrat vhodný režim využívání drah 06L/24R a 06R/24L. Nejvhodnějším režimem je zde 1b.

Kdyby byl provoz na letišti s paralelní dráhou již 1,5krát větší, než je nyní, což odpovídá 75 % celkové kapacity (cca 780 příletů a odletů), stálo by za to podrobněji prozkoumat výsledky jednotlivých režimů. Při tomto objemu dopravy na letišti již dochází v době špiček k vytváření delších front na uvolnění dráhy a díky tomu rostou i čekací doby. Průměrné doby čekání jsou však ještě stále velice přijatelné. I zde by se však hodilo po prozkoumání výsledků jednotlivých režimů, vybrat ten nejlepší pro tuto kapacitu. Zde se nejlepším jeví opět režim 1b.

Když vezmeme v úvahu případ naplnění dráhové kapacity na 100 % u systému s paralelní dráhou, dostáváme opět již vyšší hodnoty dob čekání. Zde se jedná již přibližně o 1030 pohybů letadel za den. I v této situaci dosahují režimy různých výsledků a proto se vyplatí vybrat pro provoz ten nejvýkonnější. Opět se dle výsledků jako nejvhodnější ukazuje režim 1b, což je vyrovnaný režim odletů a příletů na obou drahách.

5 Závěr

Plánovaná výstavba paralelní dráhy na Letišti Praha je projektem, který skokově navýší kapacitu dráhového systému letiště a já jsem se pomocí této práce snažil zodpovědět otázku, na kolik bude přibližně navýšena optimální kapacita dráhového systému s paralelní dráhou. Z dosažených výsledků při simulování jednotlivých modelů vytvořených v aplikaci Arena se ukázalo, že optimální kapacita nového systému by se mohla pohybovat přibližně okolo 85 % maximální kapacity (přibližně 880 pohybů za den). Toto je odhad s ohledem na co nejpříznivější předpokládané doby čekání a i na potřebu zvládat co největší počet přilétávajících či odlétávajících letadel.

Pomocí navržených režimů využívání jednotlivých RWY jsem chtěl ukázat, jaké jsou asi možnosti využívání a jakých výsledků by přibližně jednotlivé režimy dosahovaly. V případě získání a znalosti podrobnějších dat o pohybu letadel, využívání drah ve stávajícím systému atd., by bylo jistě zajímavé vypracovat ještě nějaké složitější režimy pro lepší transparentnost výsledků. Stejně tak by se zde nabízela možnost vypracovat výsledky i pro více různých objemů pohybů letadel. To by nám mohlo podrobněji napovědět, jak přibližně by se mohla vyvíjet situace kapacity dráhového systému v čase, lépe řečeno v kratších časových intervalech. Toto by mělo opodstatnění především v situaci, kdy předpokládáme stálý růst letecké dopravy, jakého jsme nyní svědky. Všechny tyto varianty dalšího podrobnějšího rozpracování jsou však podmíněny dostatkem kvalitních, podrobných a souvisejících informací. V mém případě byl nedostatek nebo nekonzistence některých důležitých dat hlavní a těžko překonatelnou překážkou ve snaze o podrobnější rozpracování daného problému a dosažení některých cílů práce.

V grafech sestrojených z výsledků simulací u všech modelů jsem si stanovil za cíl, ukázat co nejprehledněji vývoj čekacích dob při různých režimech a různém objemu dopravy. Snažil jsem se o co nejtransparentnější ukázkou výsledků, aby bylo po krátkém pohledu na výsledný graf jasné, jak daný režim ovlivňuje délku čekací doby.

V budoucnu lze však očekávat zlepšení situace, přesněji řečeno zkrácení čekacích dob. Jistě k tomu přispěje především vývoj nových technologií, které přinesou větší bezpečnost i větší rychlost provozu. Délky čekání na uvolnění dráhy by také bylo možné znatelně snížit lepším a pro dráhový systém efektivnějším rozložením pohybů letadel do větší části dne. Avšak toto je již úkol pro Řízení leteckého provozu a letecké společnosti, které si do jisté míry určují blokované časy pro své lety. Další prostor pro zkrácení čekacích dob vidím i v dokonalejší časové synchronizaci pohybů na stávající dráze 06L/24R s paralelní dráhou 06R/24L. Tento úkol je však spíš cílen pro obor statistiky.

Z dopravního hlediska, zejména pak z hlediska letecké dopravy a Letiště Praha si myslím, že byl tento simulační experiment přínosem a ukázkou možností, jak spojit informační technologie s plánováním a přípravou projektů v oblasti letištní infrastruktury. Samozřejmě je také důležité zdůraznit, že podobný projekt by se dal aplikovat na jakýkoli jiný druh dopravy.

Soupis bibliografických citací:

- [1] PRŮŠA, Jiří a kolektiv. *Svět letecké dopravy*. 1. vydání. Praha: Galileo CEE Service ČR s.r.o., 2007. ISBN 978-80-239-9206-9.
- [2] KERNER, Libor, KULČÁK, Ludvík, SÝKORA, Viktor. *Provozní aspekty letišť*. 1.vydání. Praha: vydavatelství ČVUT, 2003. ISBN 80-01-02841-0.
- [3] Civil Aviation, [online]. [cit. 2008-10-20]. dostupný na www: <<http://www.tc.gc.ca/CivilAviation/publications/tp312/Chapter3/3-4.htm>>.
- [4] Letiště Praha, [online]. [cit. 2008-10-15]. dostupné na www: <www.prg.aero>.
- [5] International Civil Aviation Organization. [online]. [cit. 2008-10-15]. dostupné na www: <<http://www.icao.int/icao/en/new.htm>>.
- [6] Blue Med. [online]. [cit. 2008-09-21]. dostupné na www: <<http://www.bluedmed.aero/bluedmed/fabvision.php>>.
- [7] Flying together. [online]. [cit. 2008-10-20]. dostupné na www: <http://ec.europa.eu/transport/air_portal/international/doc/brochures/2007_air_transport_flying_together_en.pdf>.
- [8] PROCHÁZKA, Robert. *Způsob řešení růstu provozu na Letišti Praha-Ruzyně v současnosti a příštích letech*. Pardubice, 2006. Bakalářská práce
- [9] Rozvoj Letiště Praha. [online]. [cit. 2008-11-19]. dostupné na www: <http://www2.prg.aero/en/site/airport/o_spolecnosti/rozvoj_letiste/letiste_rozvoj.htm>.
- [10] Letecká informační služba. [online]. [cit. 2008-11-28]. dostupné na www: <http://lis.rlp.cz/ais_data/www_main_control/frm_cz_aip.htm>.
- [11] KAVIČKA, Antonín. *Modelování a simulace*. Elektronické sylaby přednášek předmětu Modelování a simulace. 2005.
- [12] KURZWEIL, Libor. *Vývoj metody ROTAC po hodnocení dráhové kapacity a její aplikace na RWY 06-24 Letiště Praha Ruzyně*. Praha, 2004. Diplomová práce.

Přílohy

Seznam příloh:

Příloha A: Grafy doby čekání – režim 1a – 50 % kapacity

Příloha B: Grafy doby čekání – režim 1a – 75 % kapacity

Příloha C: Grafy doby čekání – režim 1a – 100 % kapacity

Příloha D: Grafy doby čekání – režim 1b – 50 % kapacity

Příloha E: Grafy doby čekání – režim 1b – 75 % kapacity

Příloha F: Grafy doby čekání – režim 1b – 100 % kapacity

Příloha G: Grafy doby čekání – režim 1c – 50 % kapacity

Příloha H: Grafy doby čekání – režim 1c – 75 % kapacity

Příloha I: Grafy doby čekání – režim 1c – 100 % kapacity

Příloha J: Grafy doby čekání – režim 2a – 50 % kapacity

Příloha K: Grafy doby čekání – režim 2a – 75 % kapacity

Příloha L: Grafy doby čekání – režim 2a – 100 % kapacity

Příloha M: Grafy doby čekání – režim 2b – 50 % kapacity

Příloha N: Grafy doby čekání – režim 2b – 75 % kapacity

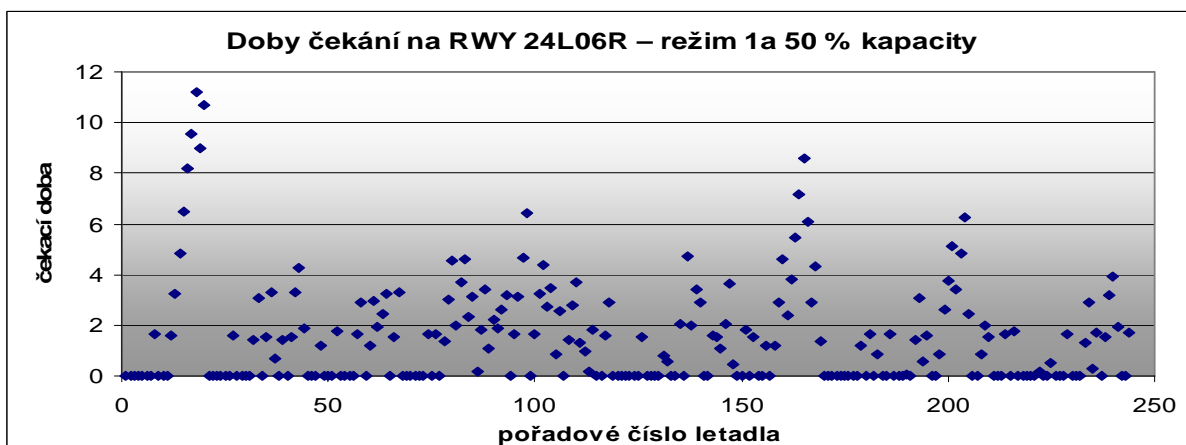
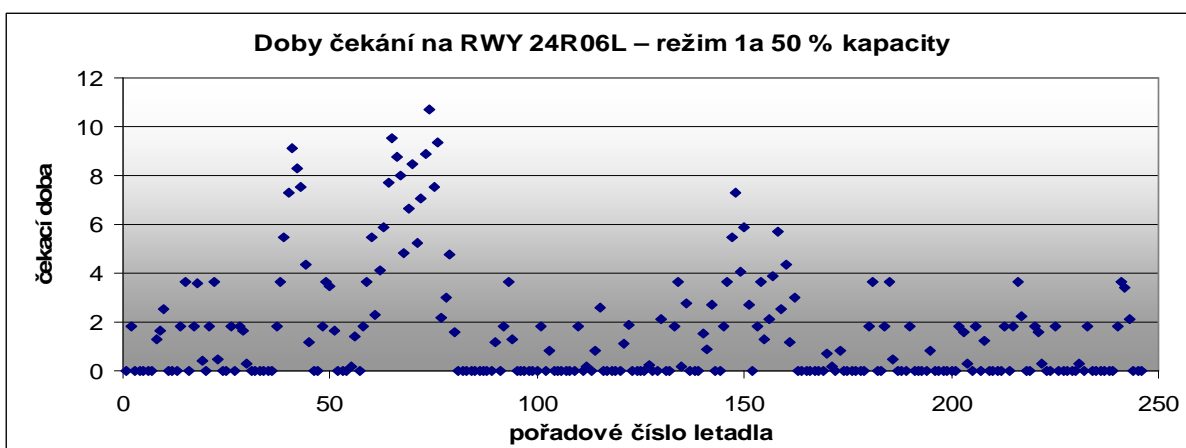
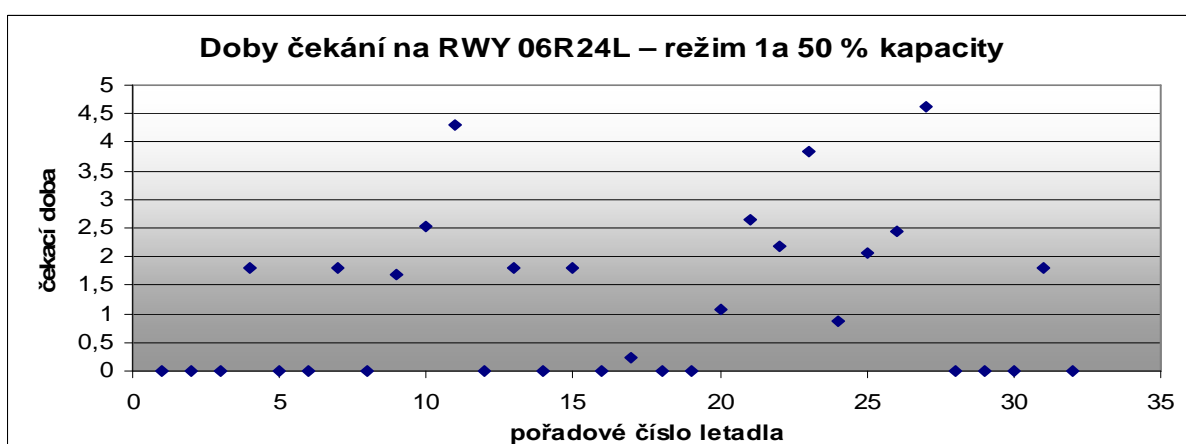
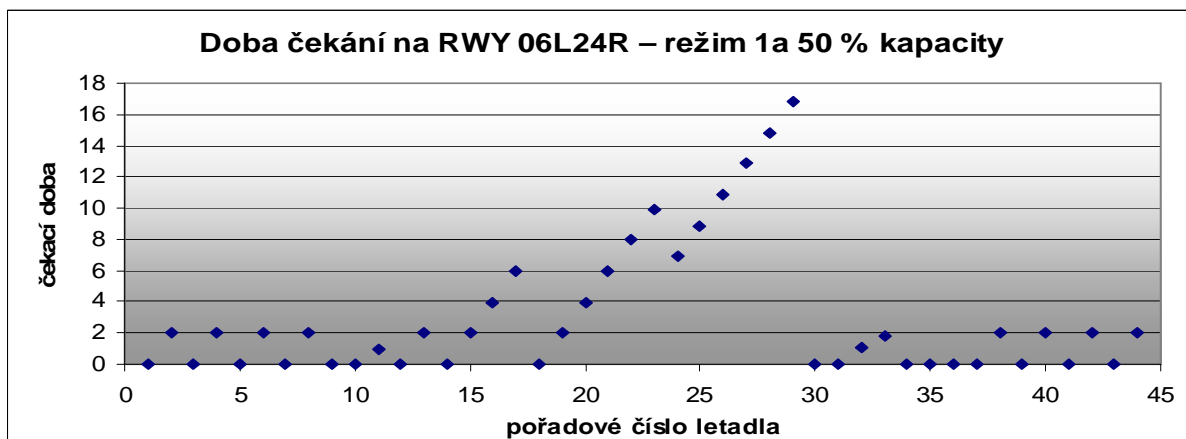
Příloha O: Grafy doby čekání – režim 2b – 100 % kapacity

Příloha P: Grafy doby čekání – stávající dráhový systém

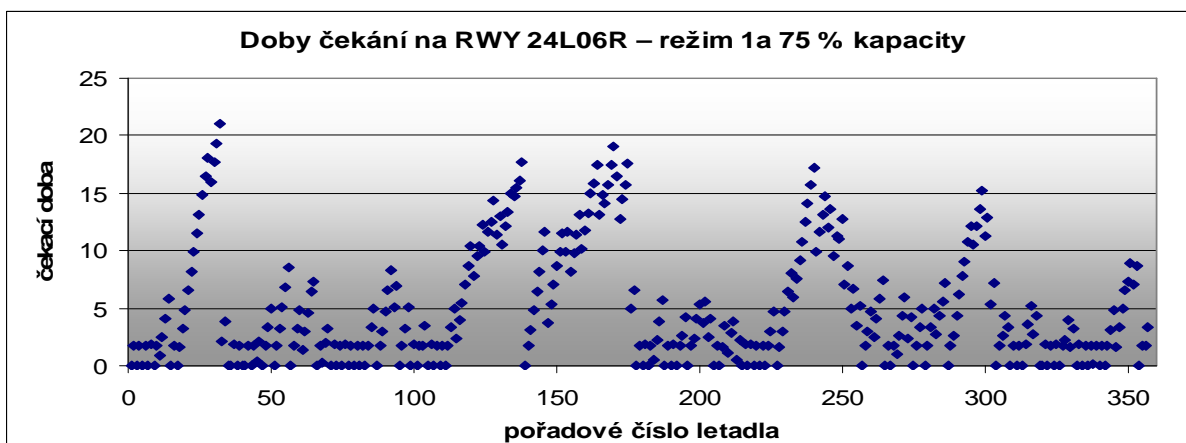
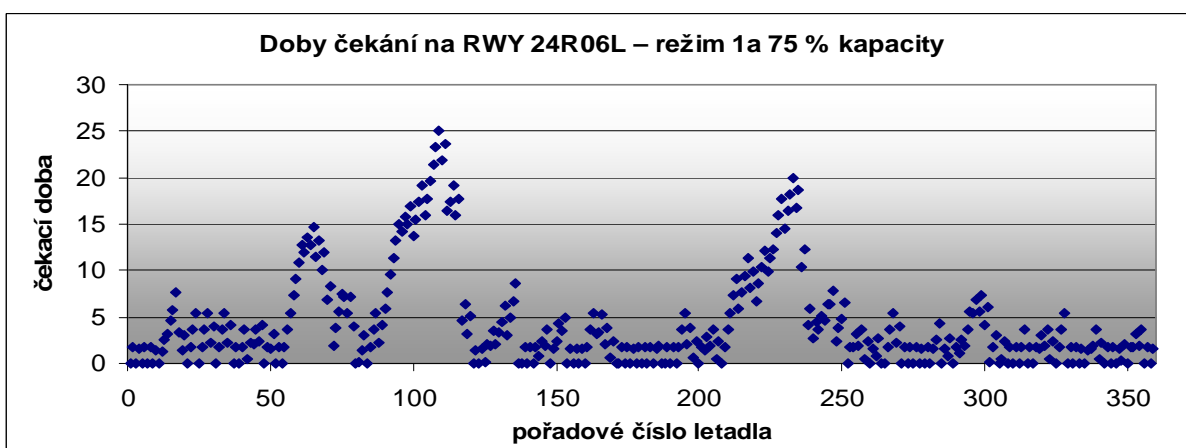
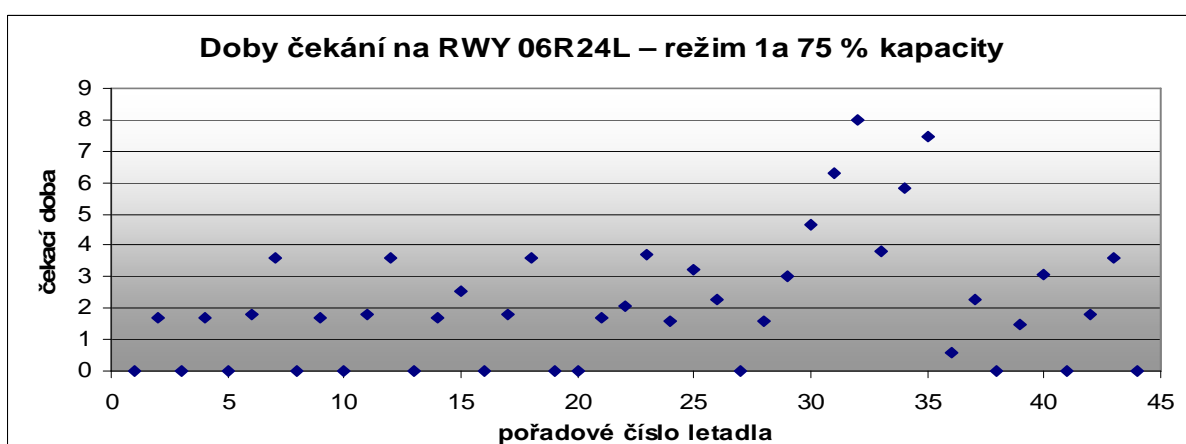
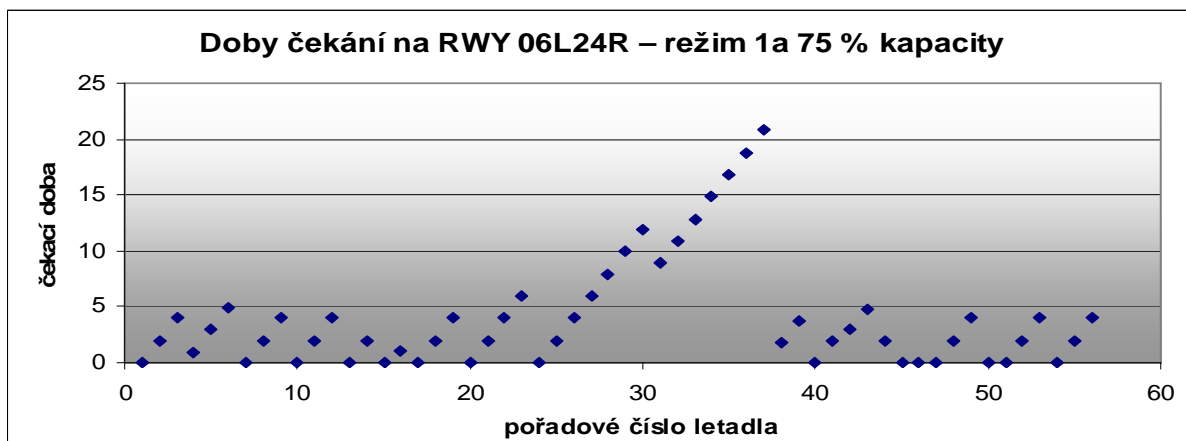
Příloha Q: CD se simulačními z aplikace Arena:

- model stávajícího dráhového systému,
- modely systému s paralelní dráhou (všechny režimy využívání RWY).

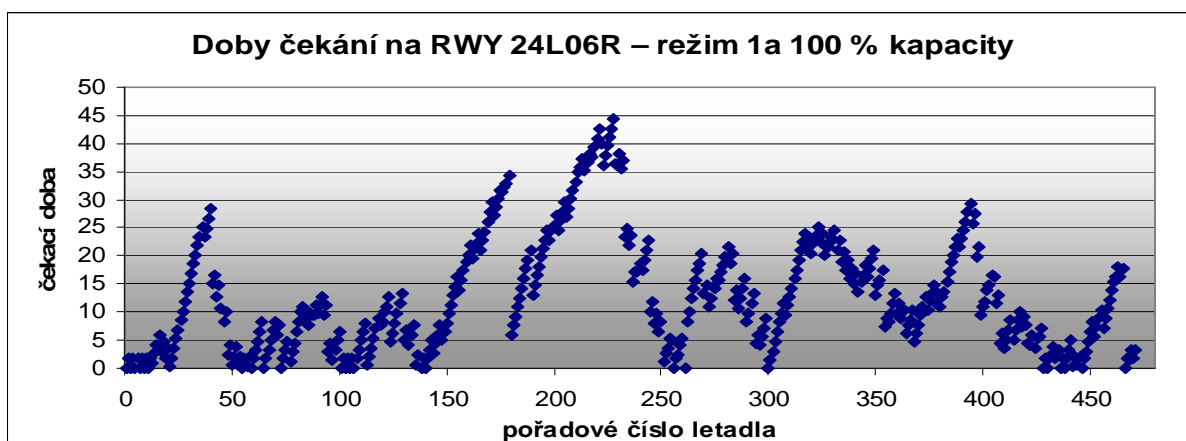
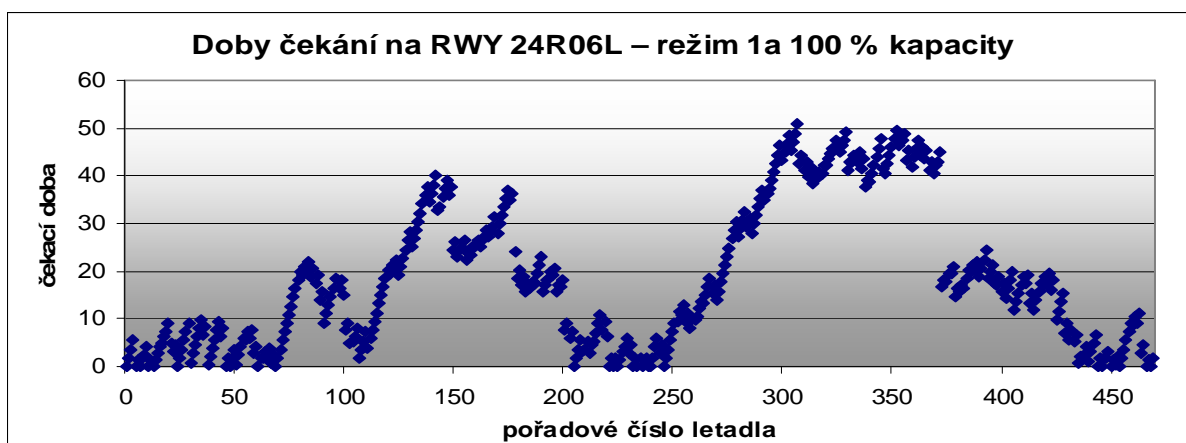
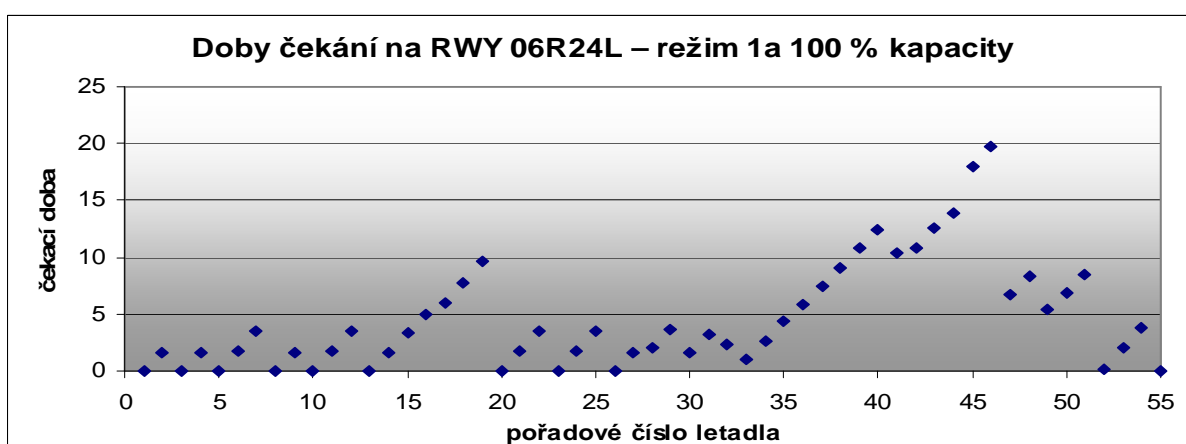
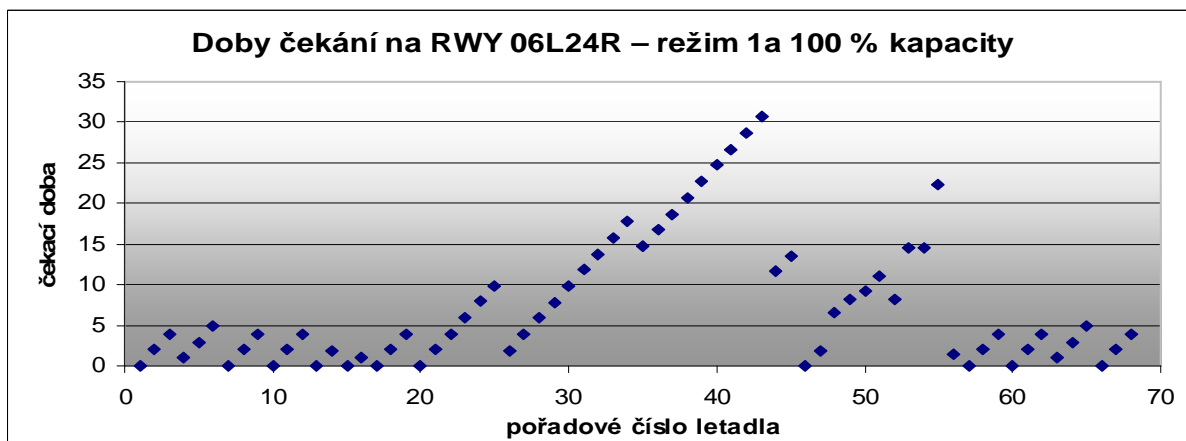
Příloha A: Grafy doby čekání – režim 1a – 50 % kapacity



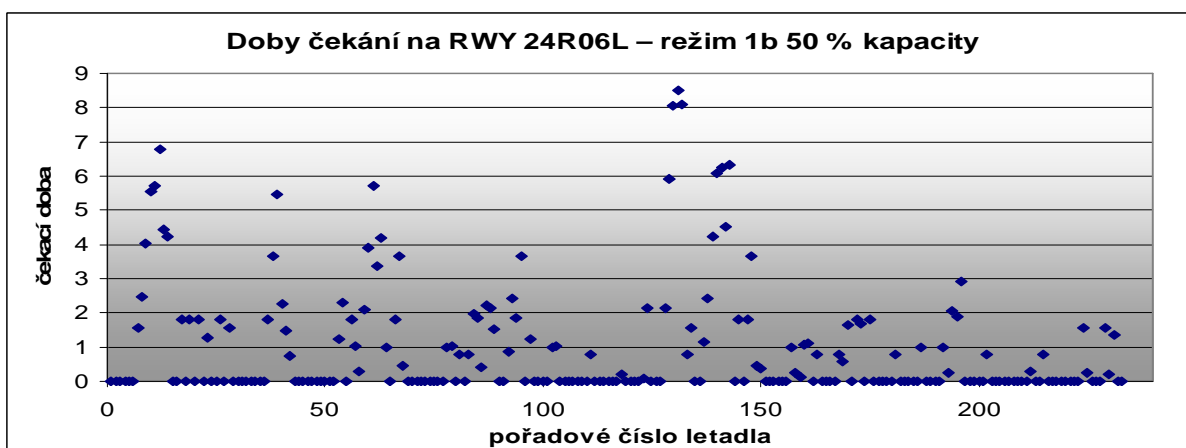
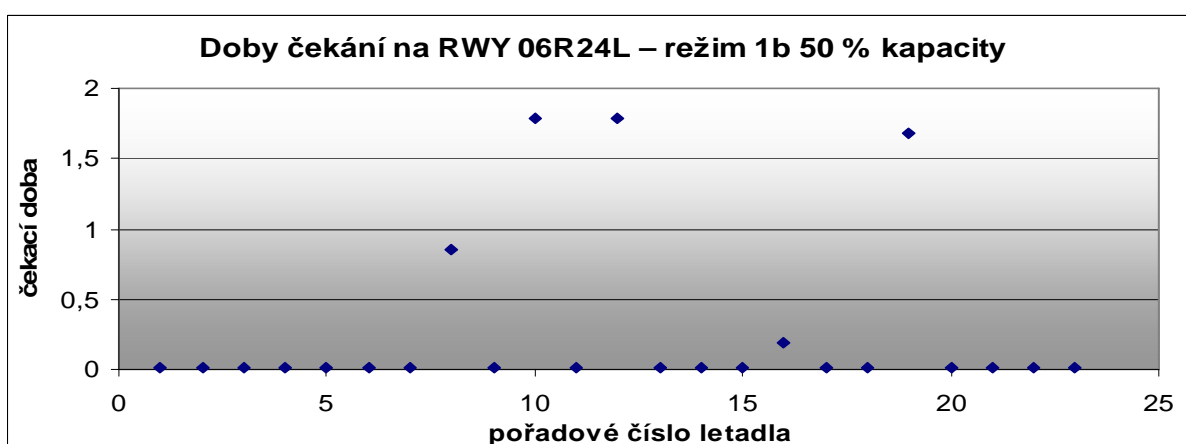
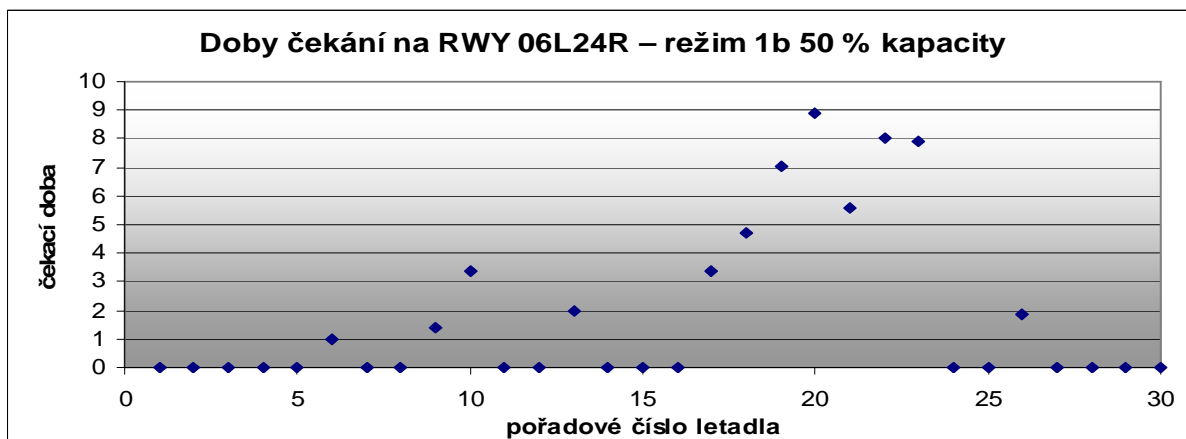
Příloha B: Grafy doby čekání – režim 1a – 75 % kapacity



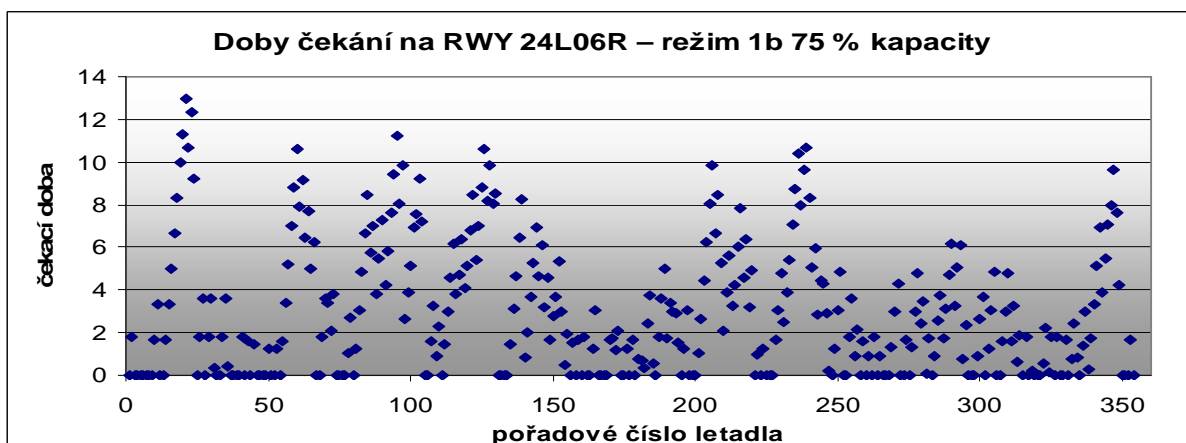
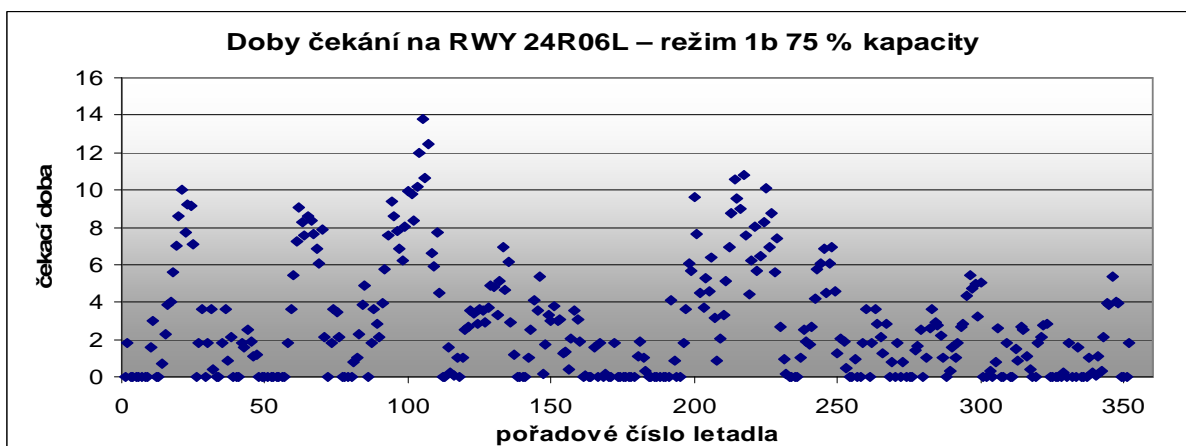
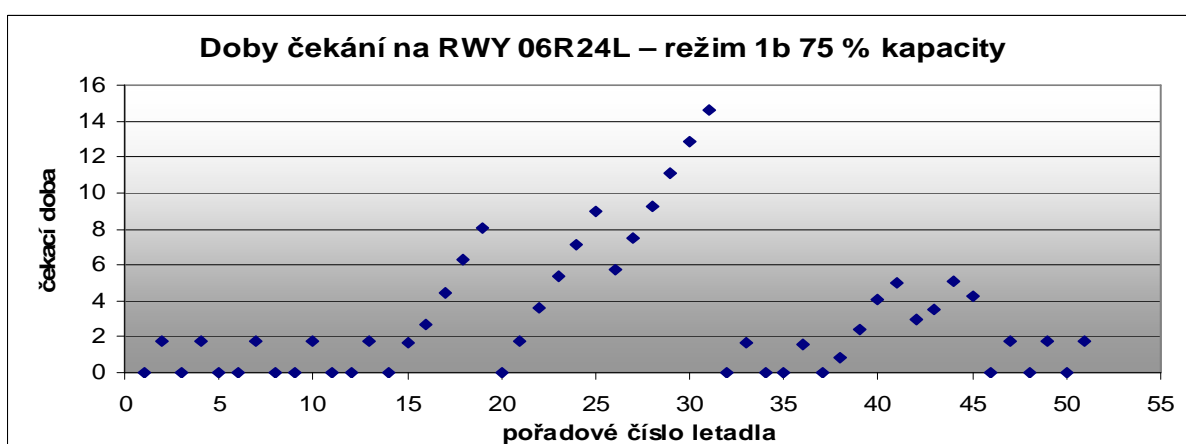
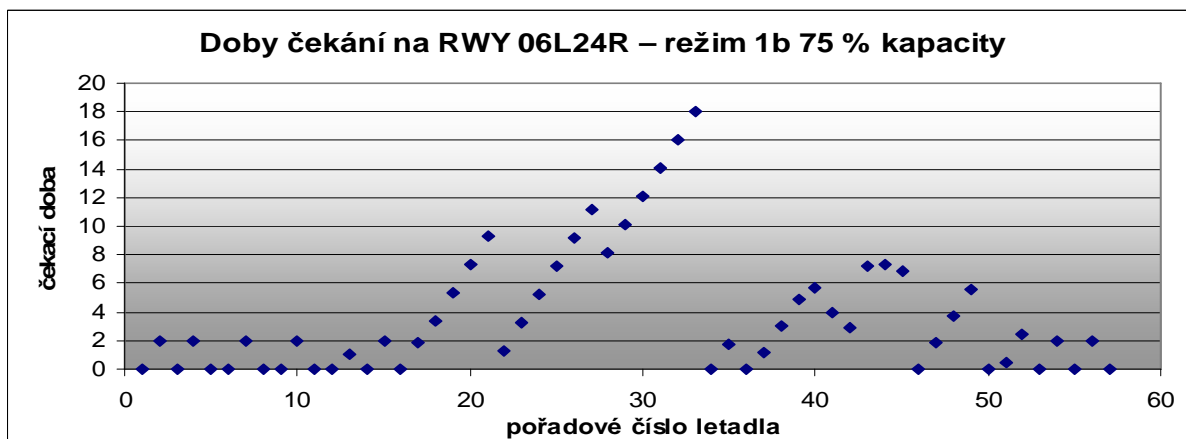
Příloha C: Grafy doby čekání – režim 1a – 100 % kapacity



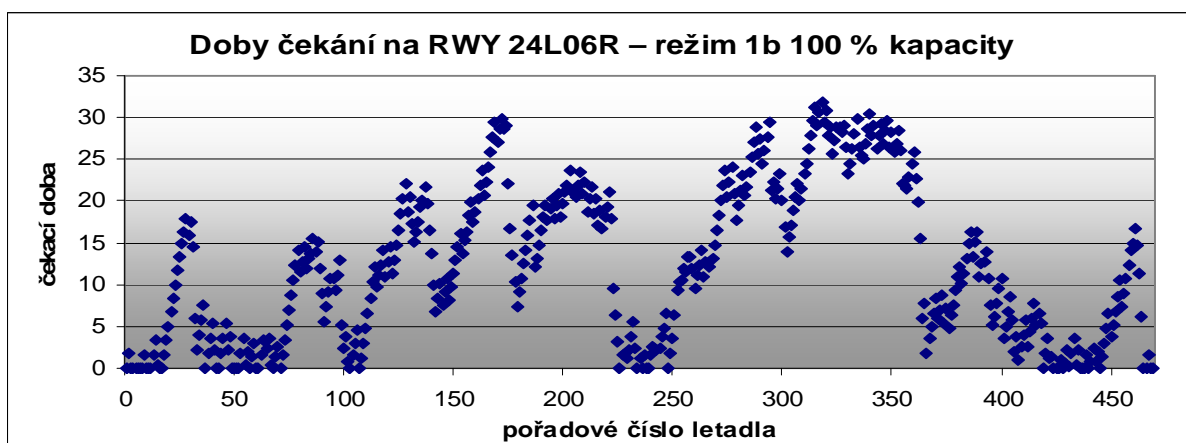
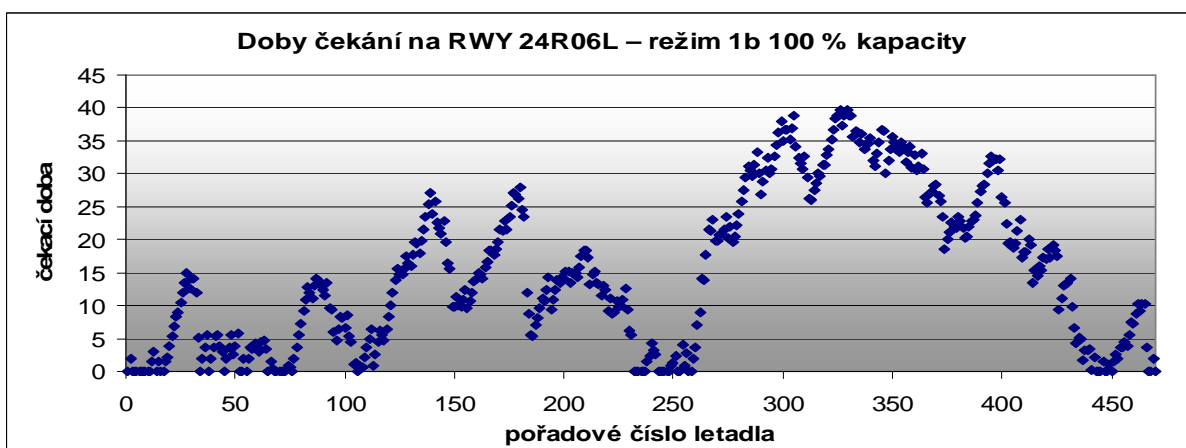
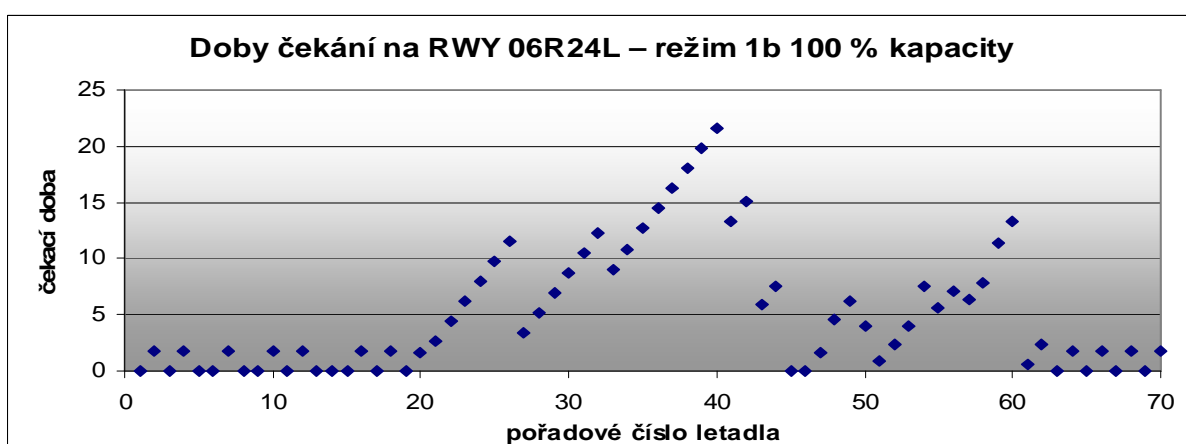
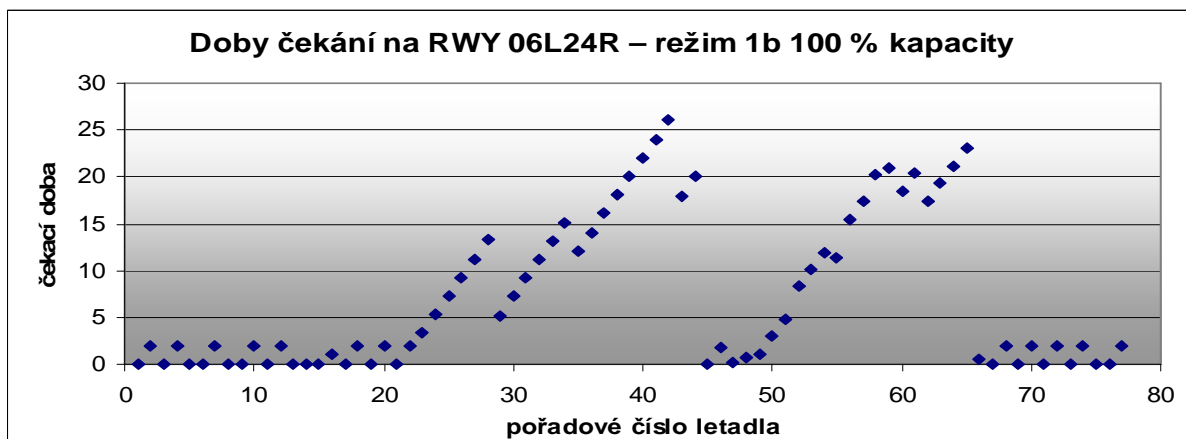
Příloha D: Grafy doby čekání – režim 1b – 50 % kapacity



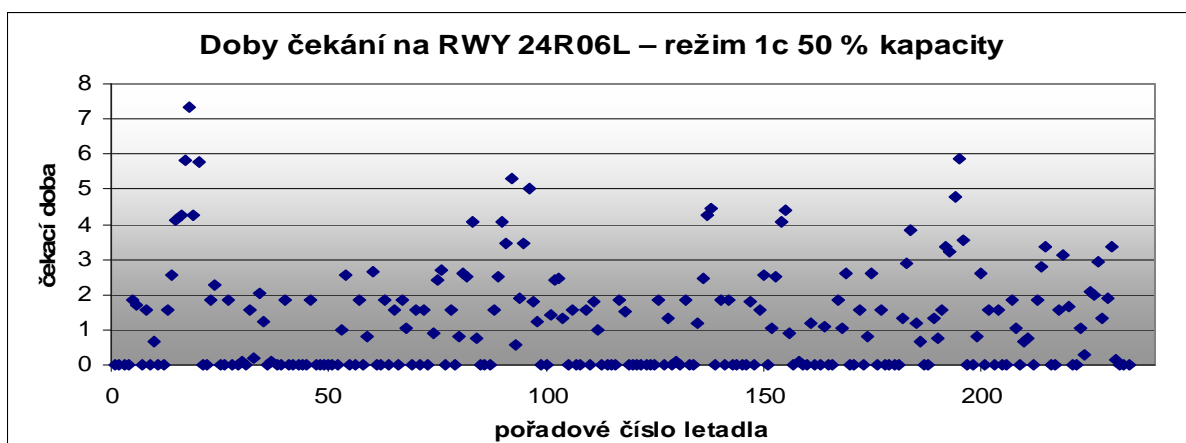
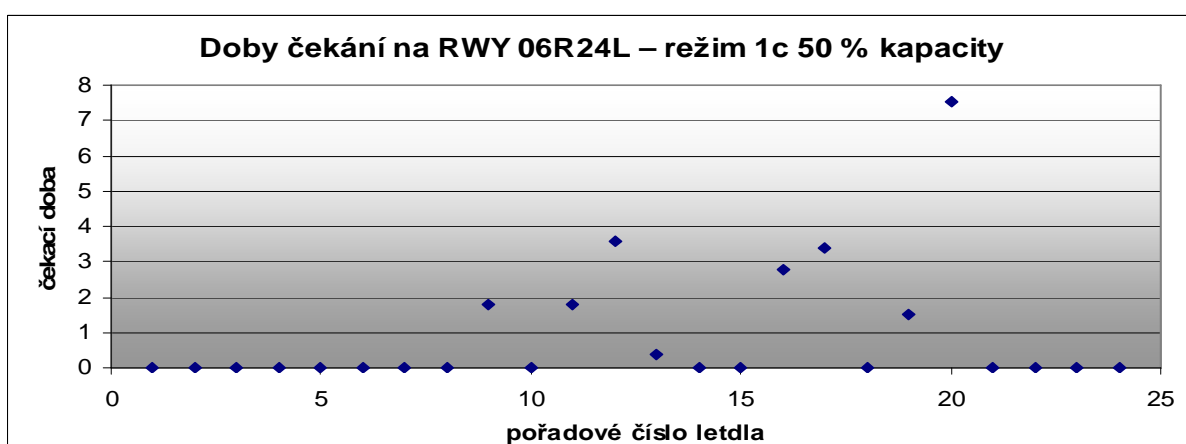
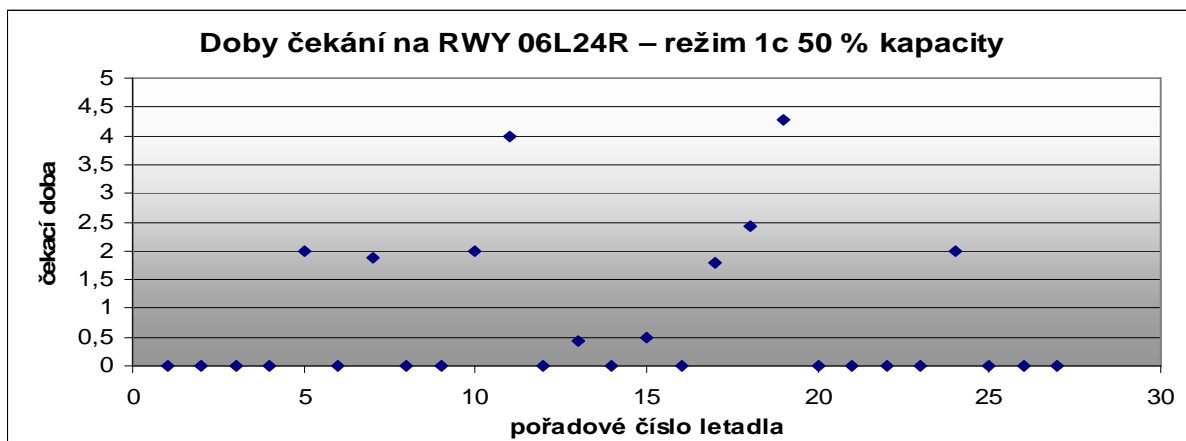
Příloha E: Grafy doby čekání – režim 1b – 75 % kapacity



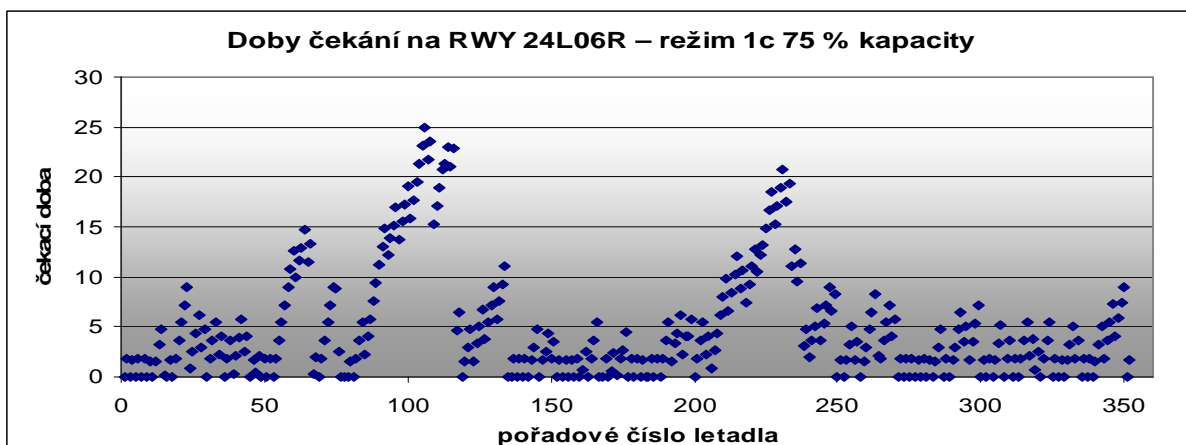
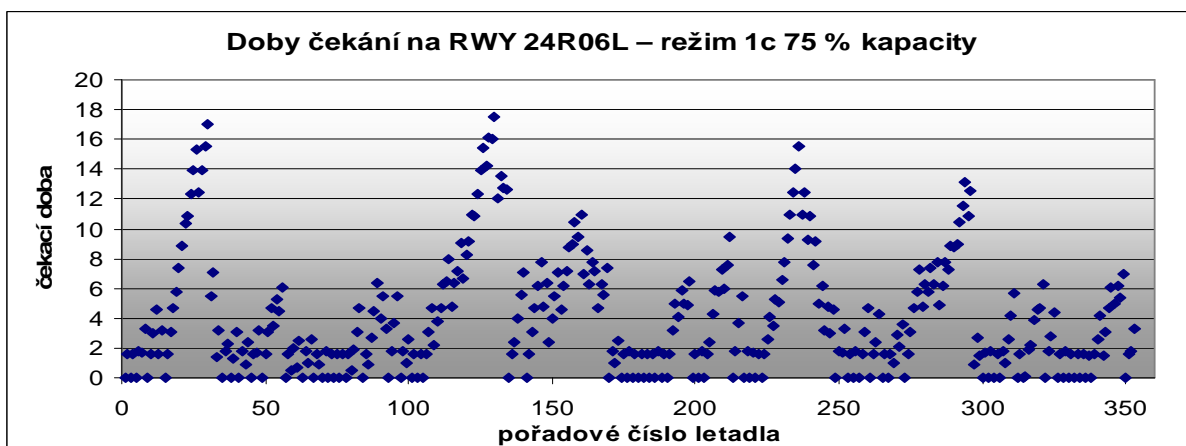
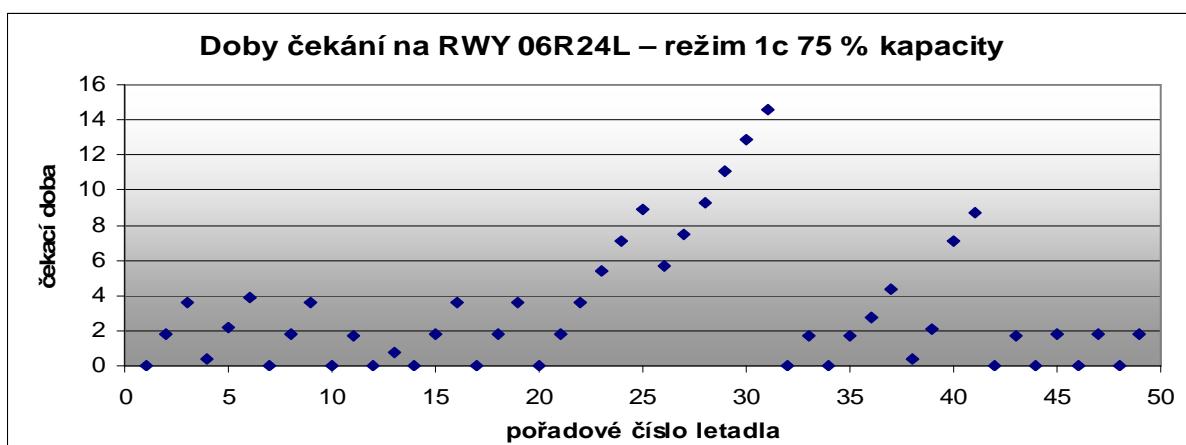
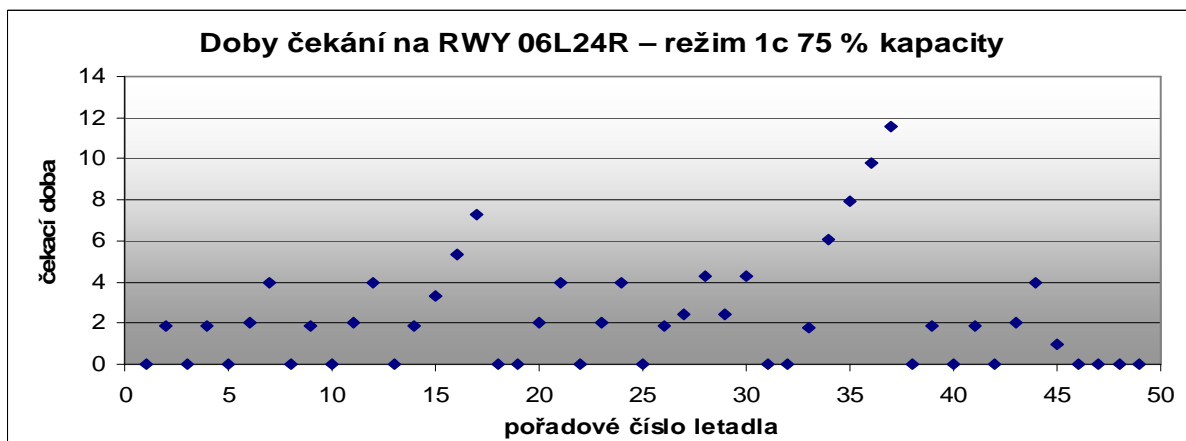
Příloha F: Grafy doby čekání – režim 1b – 100 % kapacity



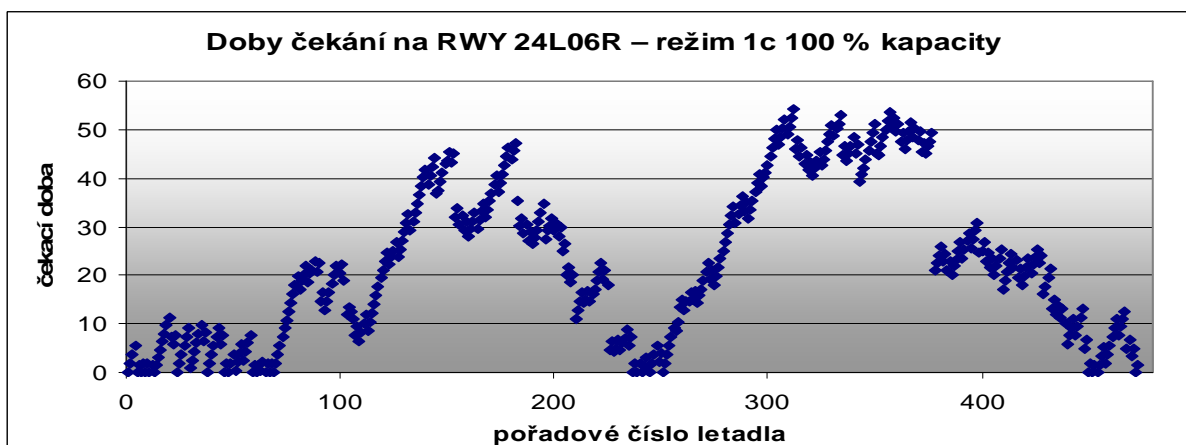
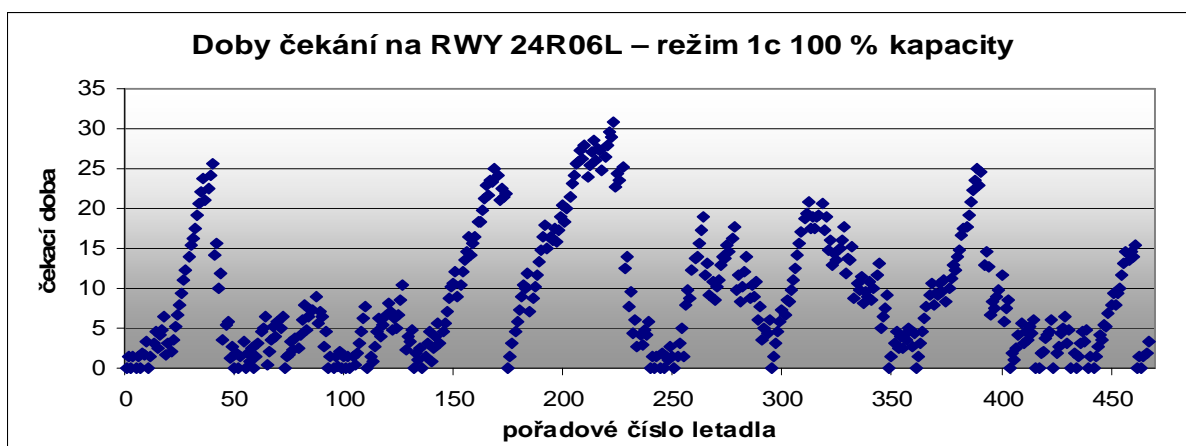
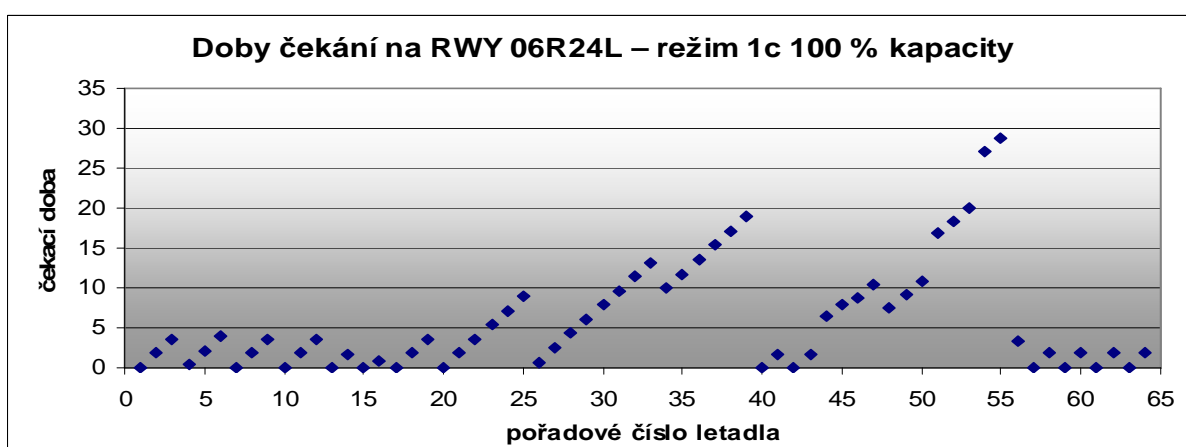
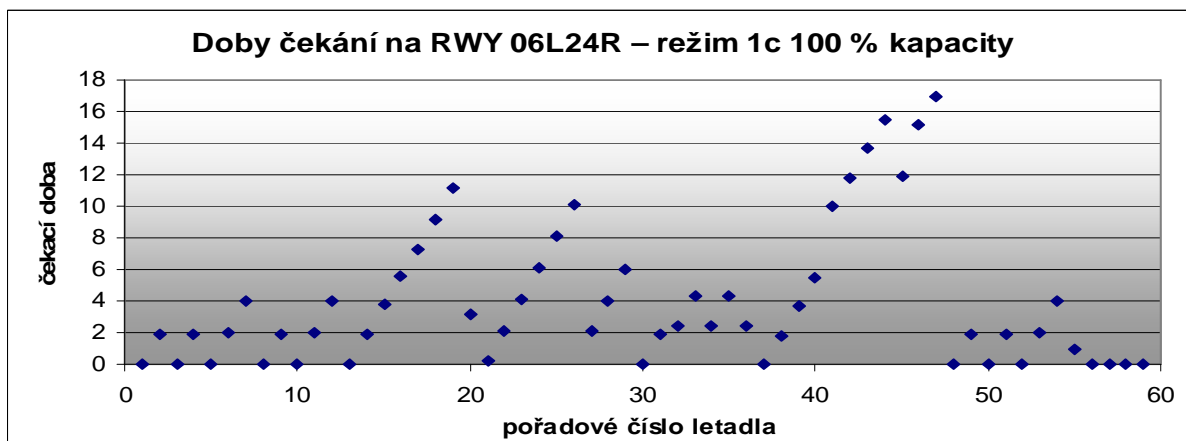
Příloha G: Grafy doby čekání – režim 1c – 50 % kapacity



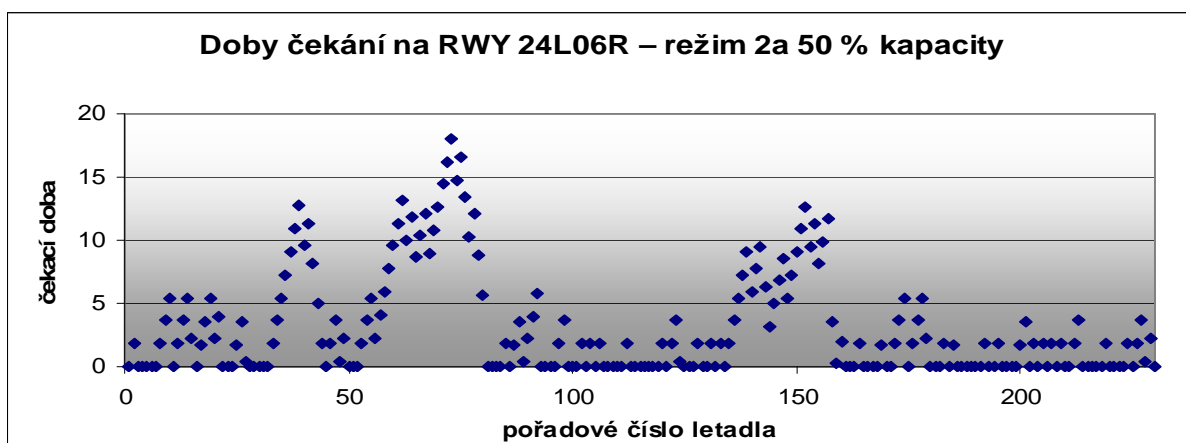
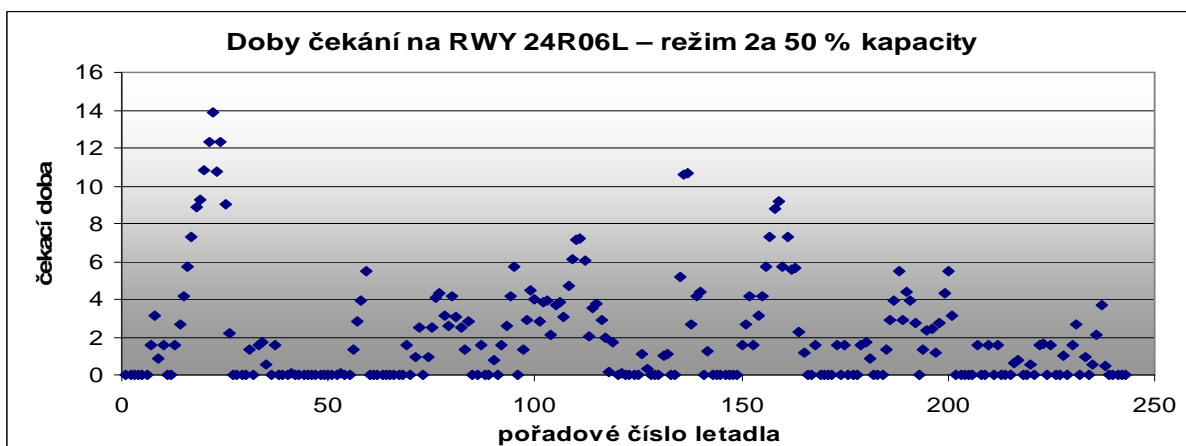
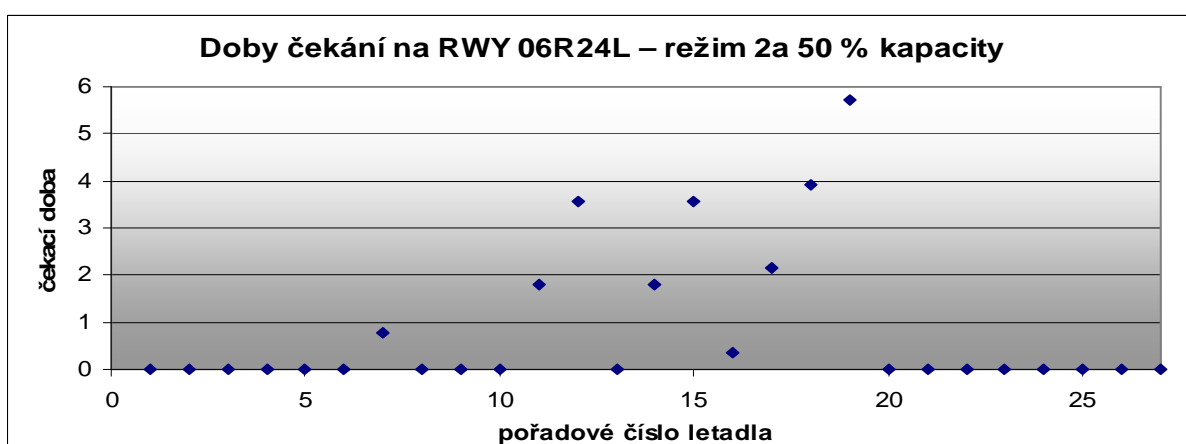
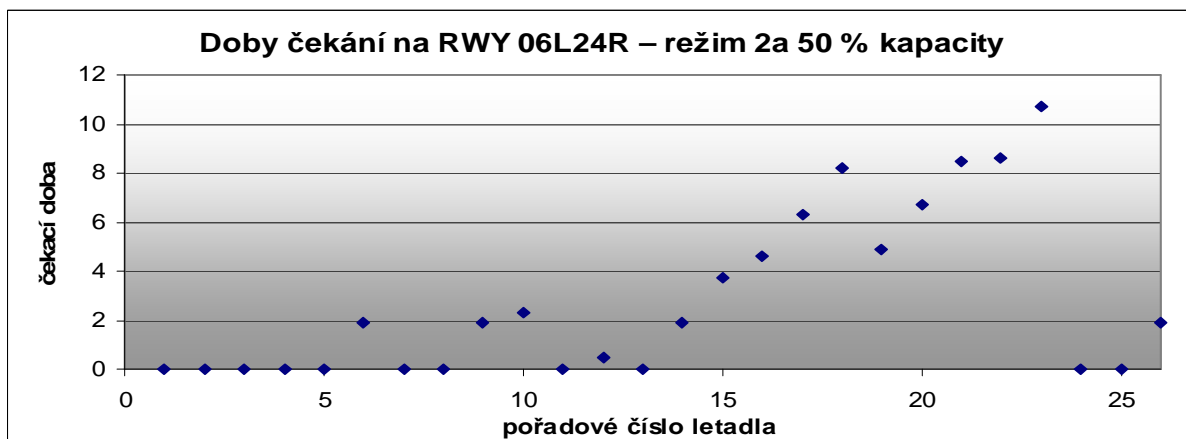
Příloha H: Grafy doby čekání – režim 1c – 75 % kapacity



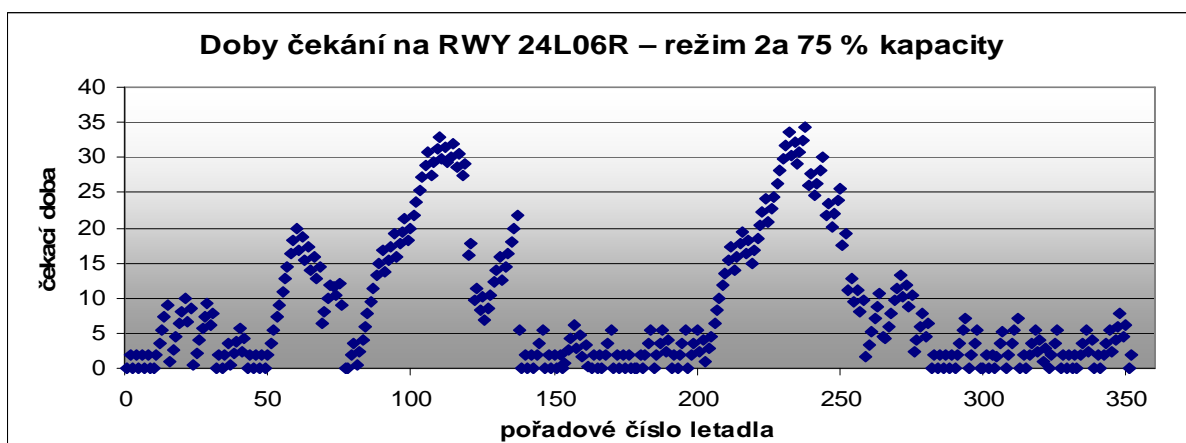
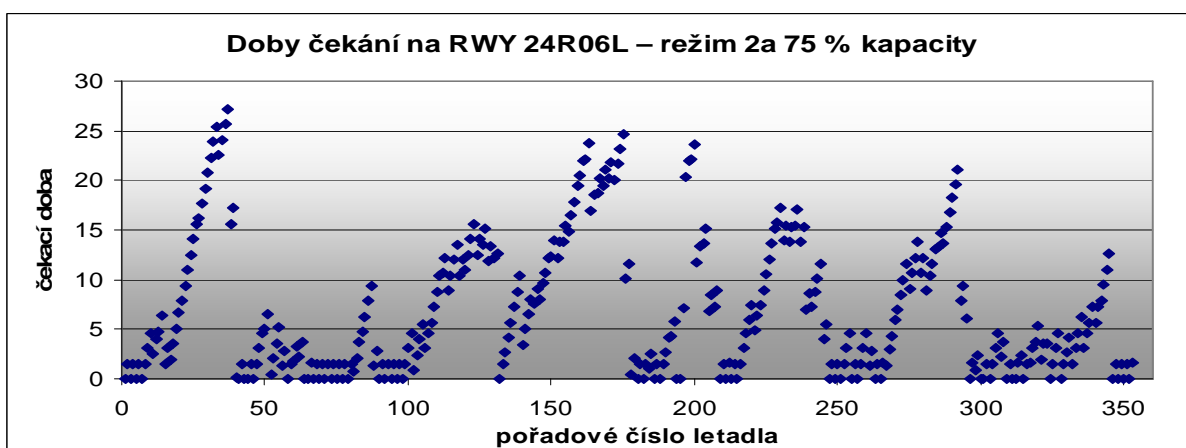
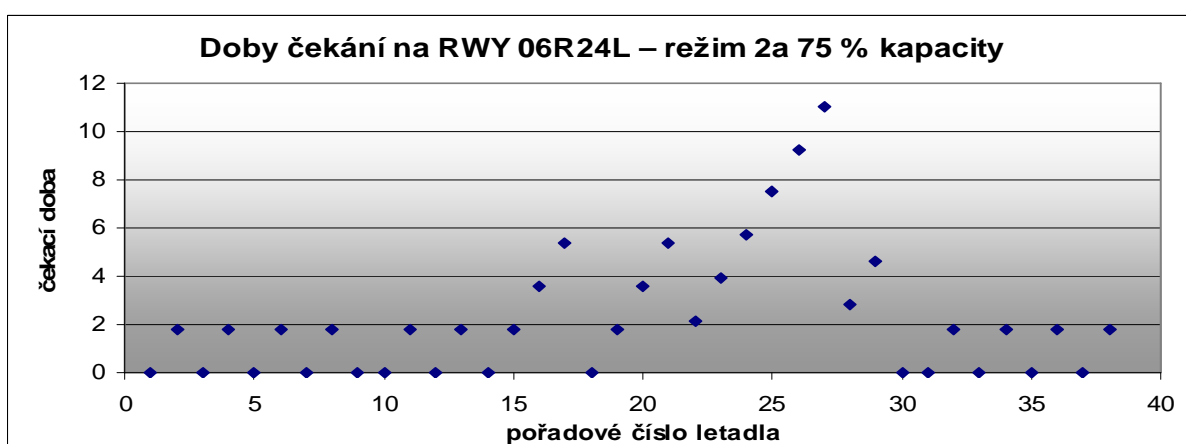
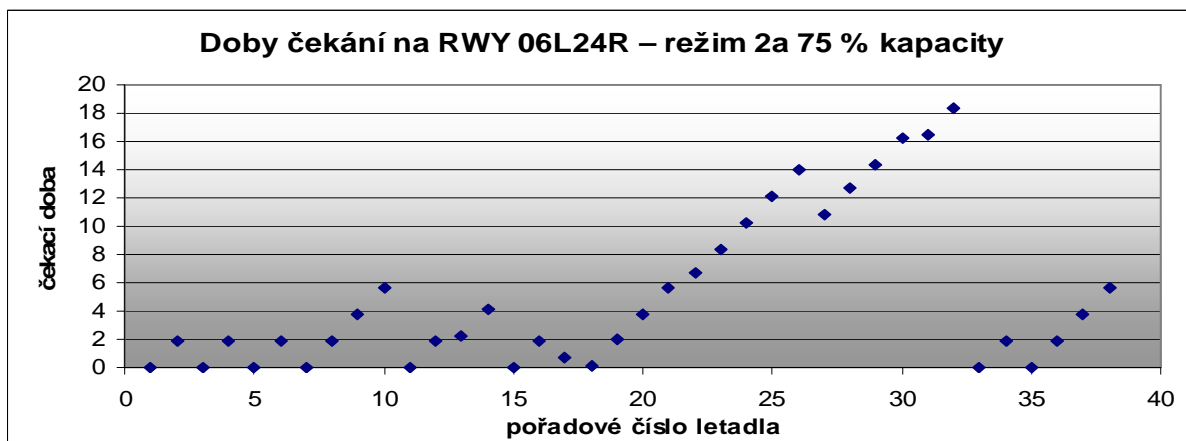
Příloha I: Grafy doby čekání – režim 1c – 100 % kapacity



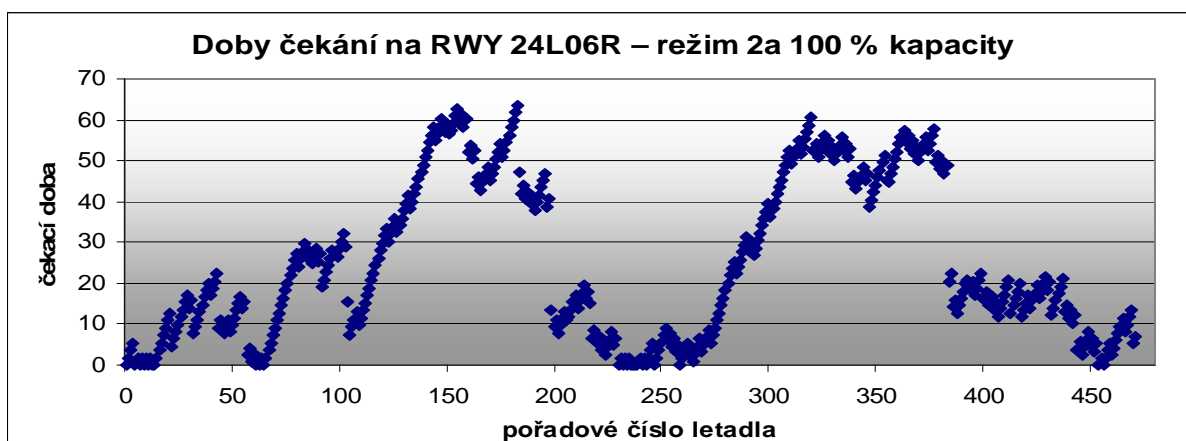
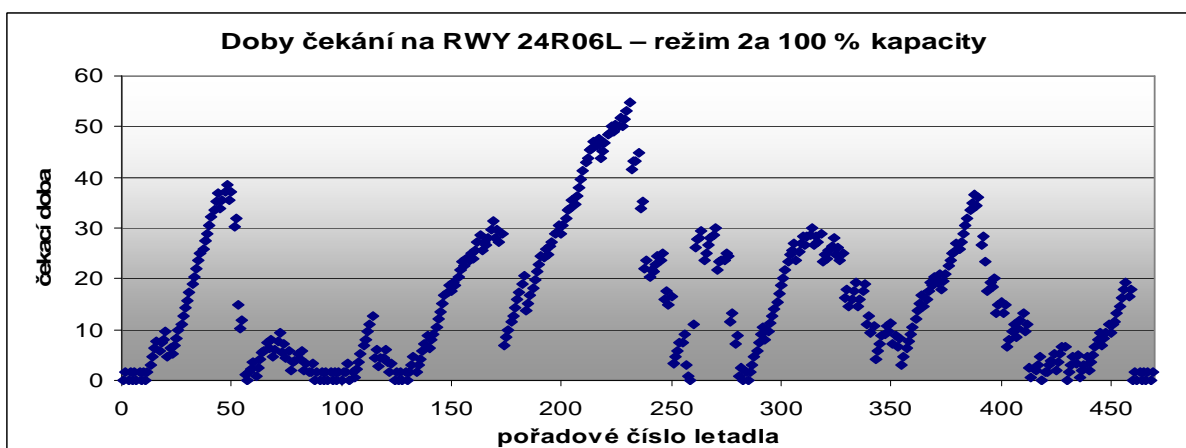
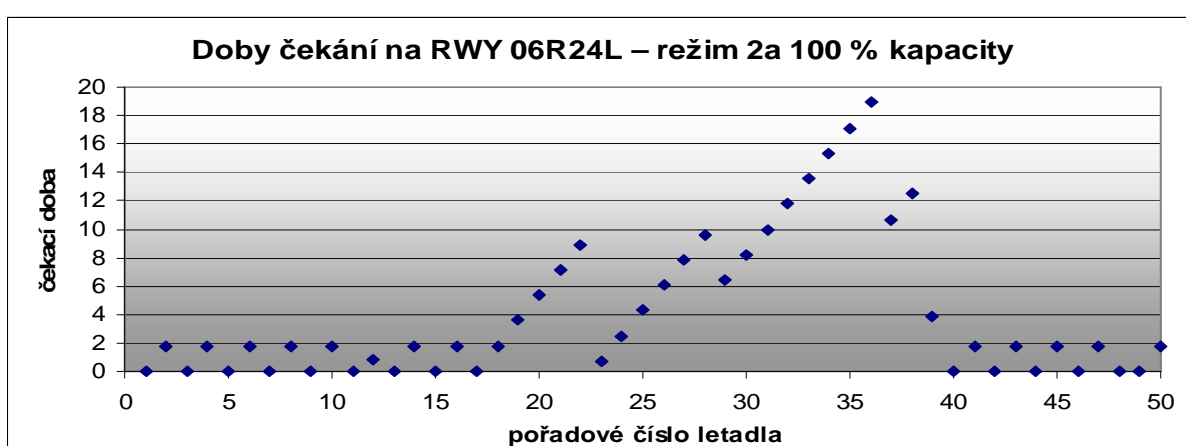
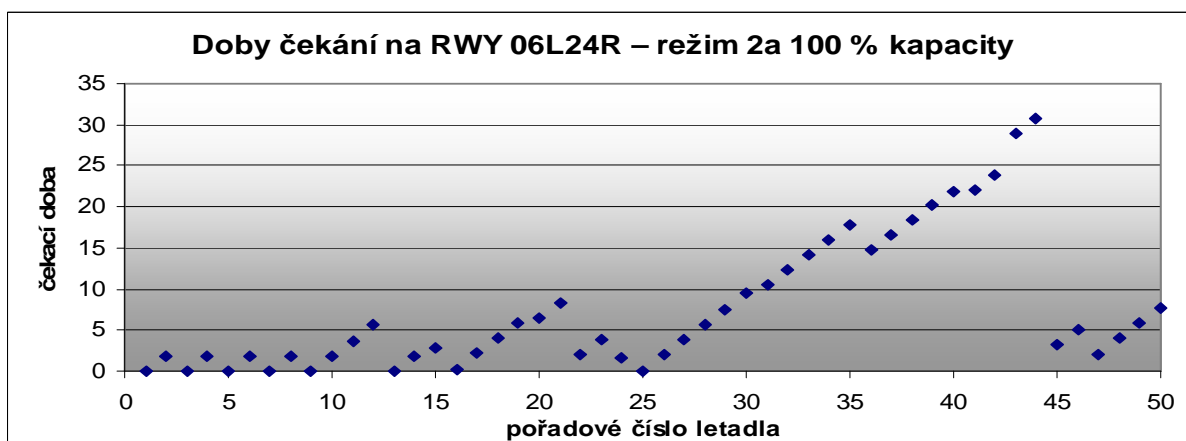
Příloha J: Grafy doby čekání – režim 2a – 50 % kapacity



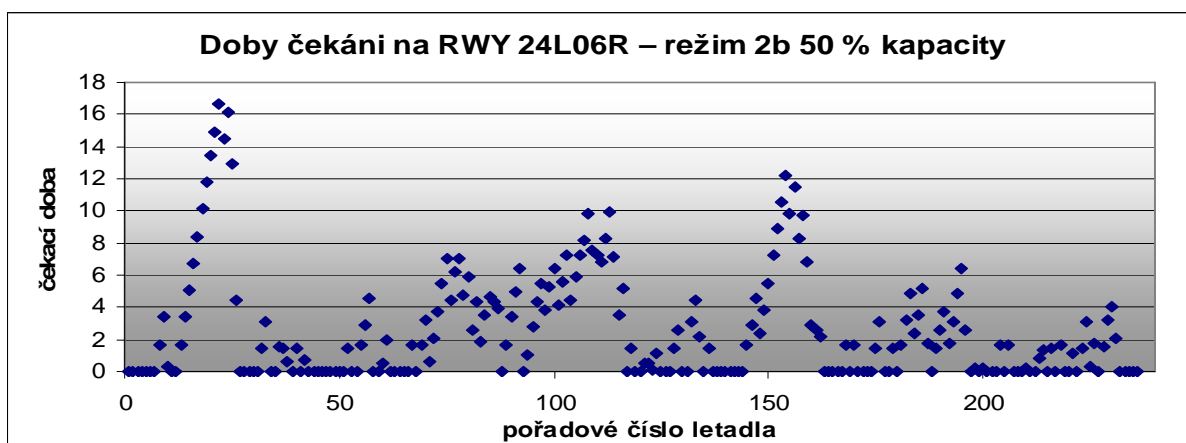
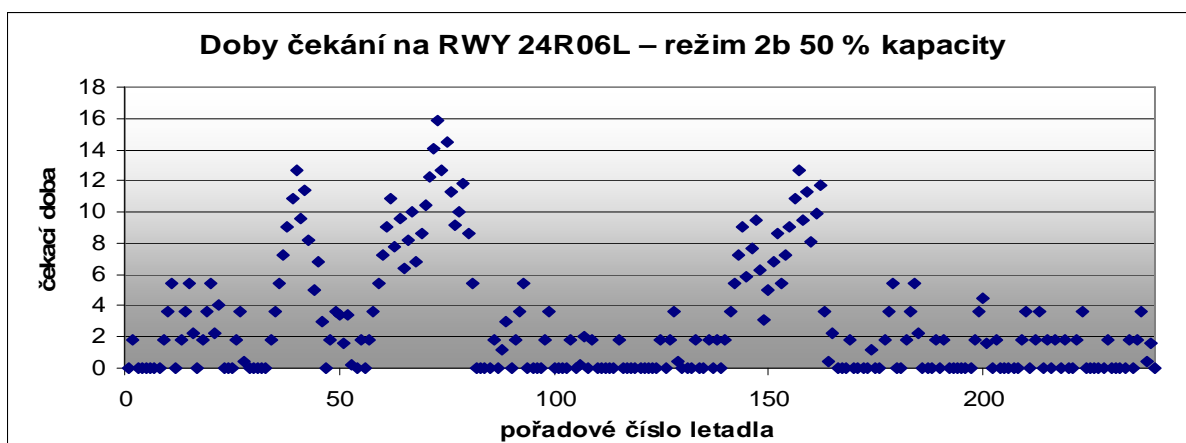
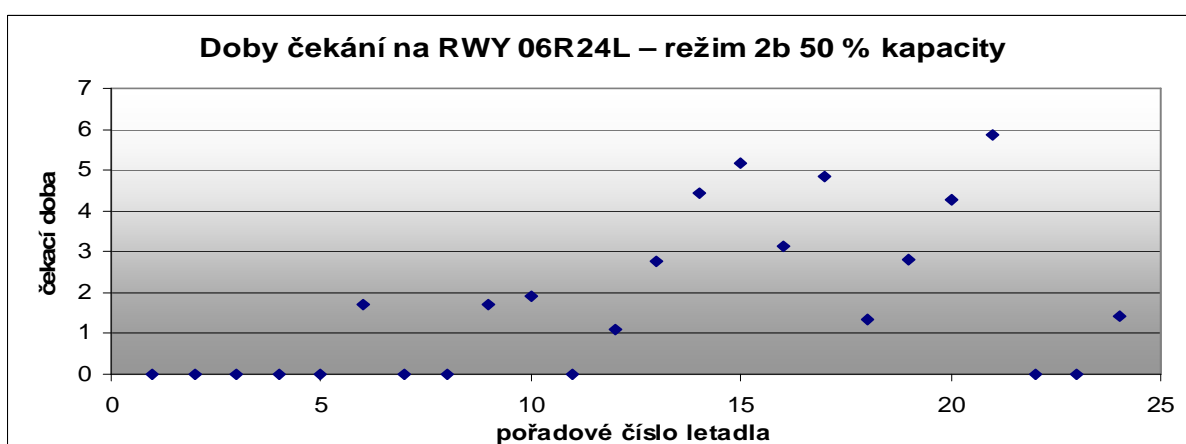
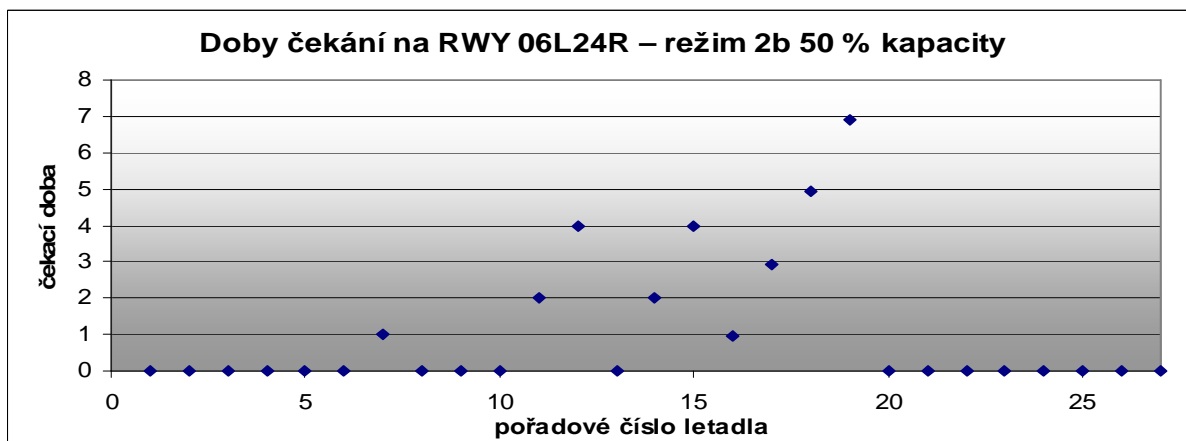
Příloha K: Grafy doby čekání – režim 2a – 75 % kapacity



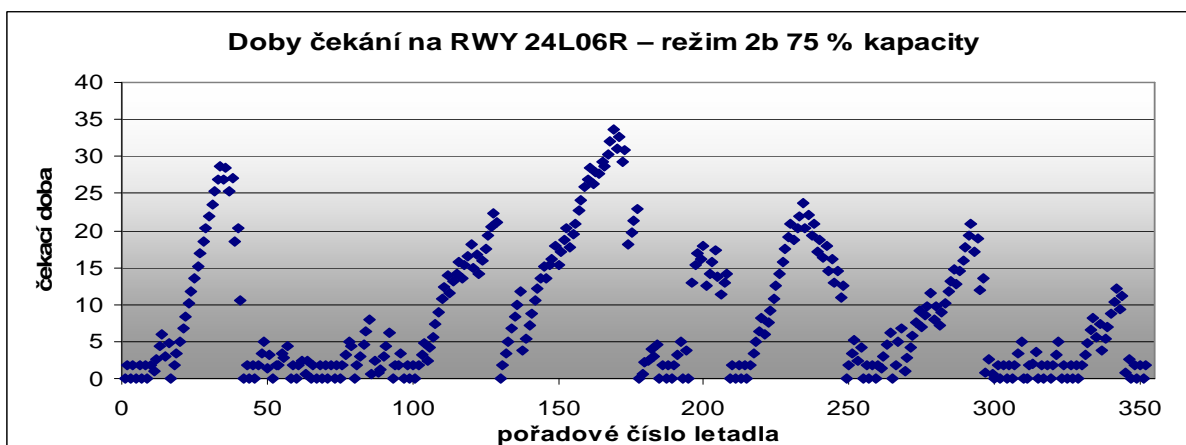
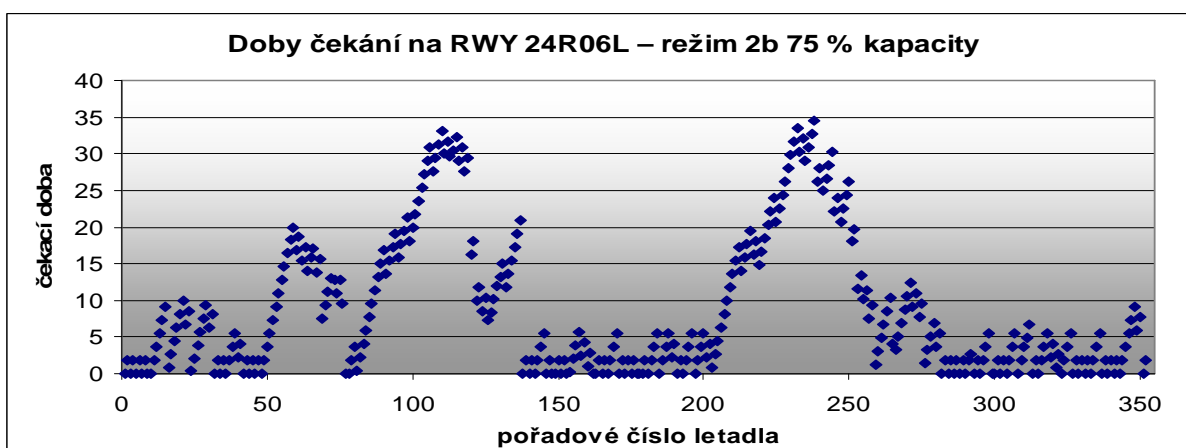
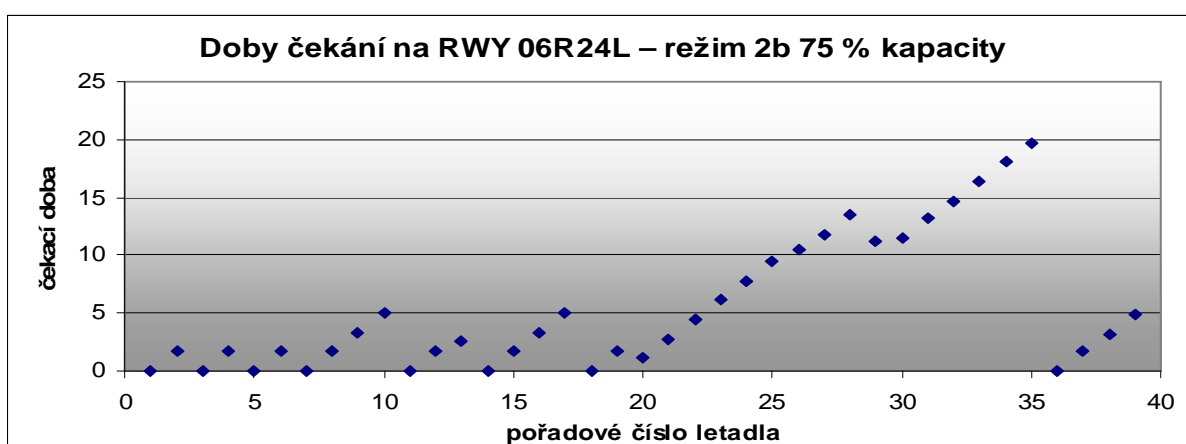
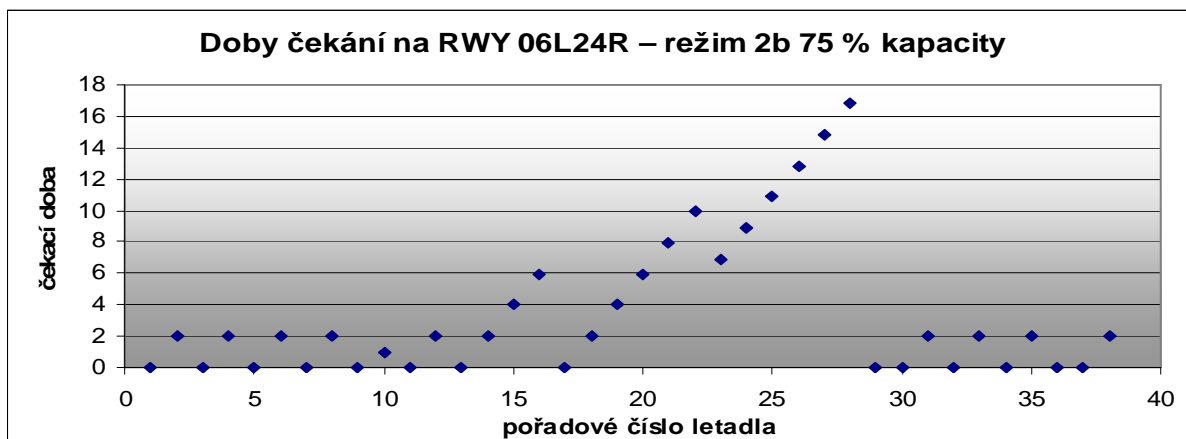
Příloha L: Grafy doby čekání – režim 2a – 100 % kapacity



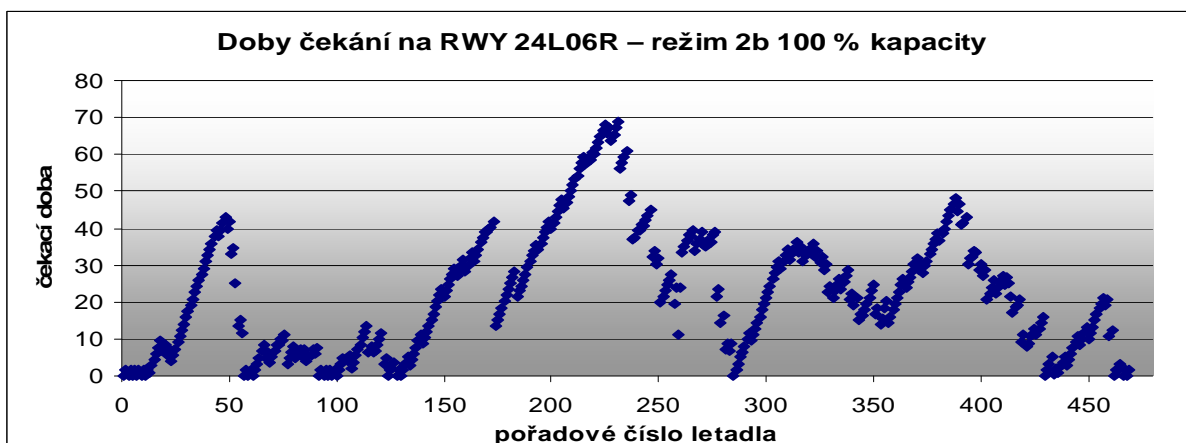
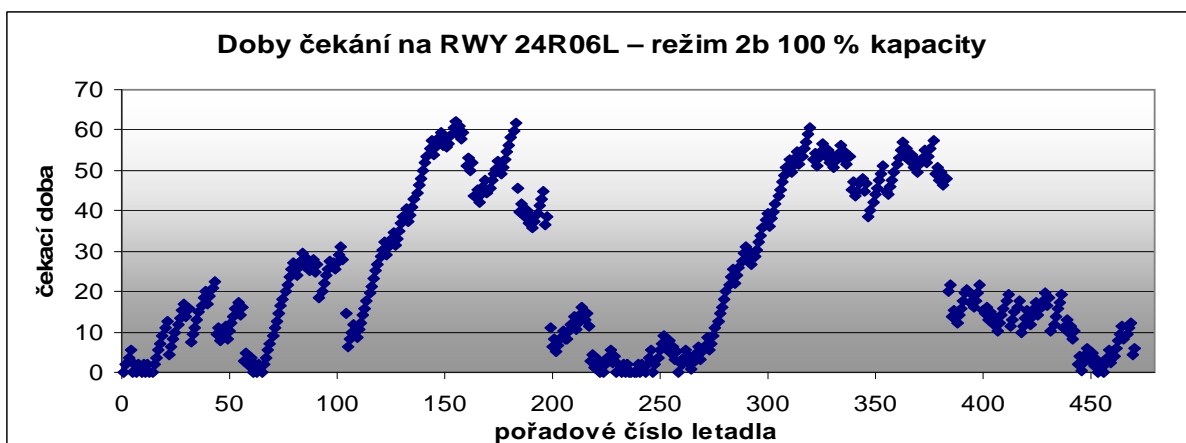
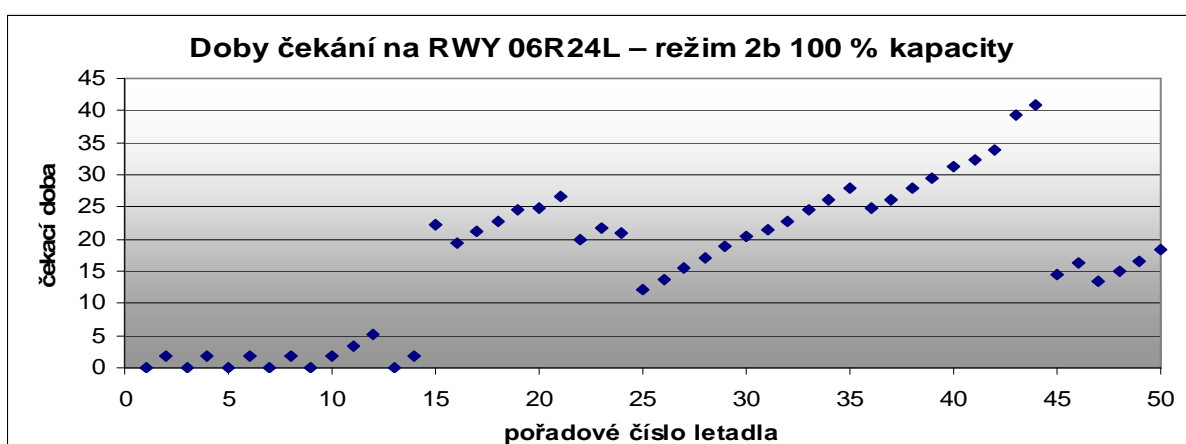
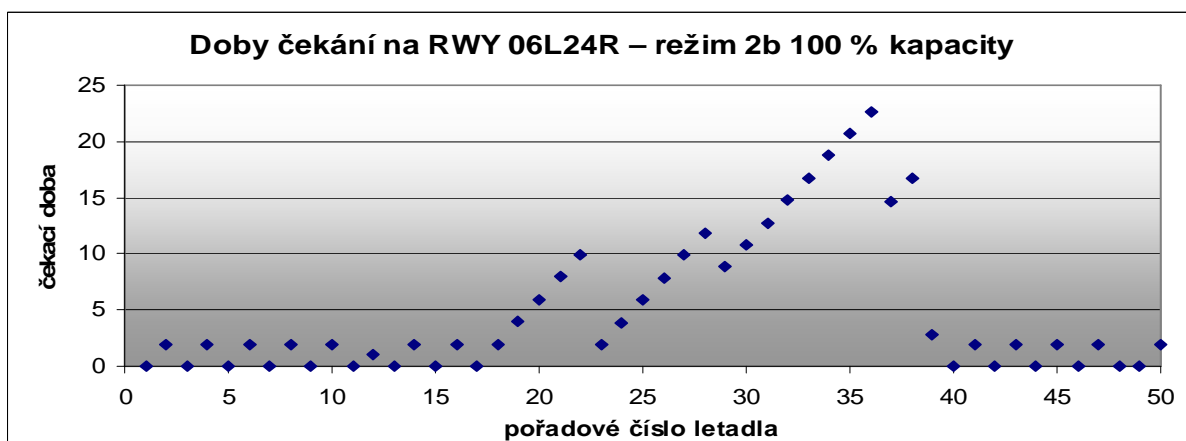
Příloha M: Grafy doby čekání – režim 2b – 50 % kapacity



Příloha N: Grafy doby čekání – režim 2b – 75 % kapacity



Příloha O: Grafy doby čekání – režim 2b – 100 % kapacity



Příloha P: Grafy doby čekání – stávající dráhový systém

