

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra počítačů

Studijní program: Lékařská elektronika a bioinformatika

Obor: Bioinformatika



Analýza transportu vzorků do klinické laboratoře

Analysis of sample transport to the clinical laboratory

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracovala: Bc. Hana Hladíková

Vedoucí práce: doc. Ing. Přemysl Šůcha, Ph.D.

Rok: 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Hladíková** Jméno: **Hana** Osobní číslo: **487026**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra počítačů**
Studijní program: **Lékařská elektronika a bioinformatika**
Specializace: **Bioinformatika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Analýza transportu vzorků do klinické laboratoře

Název diplomové práce anglicky:

Analysis of sample transport to the clinical laboratory

Pokyny pro vypracování:

Klíčovým ukazatelem výkonu každé klinické laboratoře je takzvaný laboratorní TAT (turnaround time). To je čas od příjmu vzorku v laboratoři do vydání výsledku. Nicméně tento ukazatel kompletně zanedbává vlastní transport vzorku od pacienta do laboratoře. Tento čas nejenže není konstantní, ale záleží na řadě faktorů a velmi ovlivňuje jak rychle se lékař či pacient dozví výsledek. Cílem této práce je na reálných datech z nemocnice analyzovat dobu transportu vzorků, zmapovat důvody vzniku zpoždění a identifikovat příležitosti pro jeho zkrácení případně snížení jeho rozptylu. Práce se skládá z těchto úkolů:

1. Proveďte rešerši literatury.
2. Proveďte analýzu dat z laboratorního informačního systému nemocnice a systému potrubní pošty.
3. Vytvořte algoritmus pro vytěžení potřebných informací z výše uvedených datových souborů. Algoritmus se musí umět vypořádat s chybami v datech.
4. Modelujte systém potrubní pošty za účelem stanovení její průchodnosti a tento model vyzkoušejte v rámci algoritmu pro optimalizaci průchodnosti pošty.
5. Vyhodnoťte výsledky analýzy dat a vytvořeného optimalizačního algoritmu.

Seznam doporučené literatury:

[1] B. Breil, F. Fritz, V. Thiemann, and M. Dugas, "Mapping turnaround times (TAT) to a generic timeline: A systematic review of TAT definitions in clinical domains," *BMC Medical Informatics and Decision Making*, vol. 11, no. 1, May 2011.
[2] Eline R. Tsai, Andrei N. Tintu, Derya Demirtas, Richard J. Boucherie, Robert de Jonge & Yolanda B. de Rijke (2019) A critical review of laboratory performance indicators, *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences*, 56:7, 458-471.
[3] Patrik Březina (2021) Data Analysis of Laboratory Workflow and Data-driven Laboratory Process Optimization, Diploma thesis, CTU.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Přemysl Šůcha, Ph.D. katedra řídicí techniky FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **20.09.2023**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce: **16.02.2025**

doc. Ing. Přemysl Šůcha, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomantka bere na vědomí, že je povinna vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studentky

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně a že jsem uvedla veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne

.....
Bc. Hana Hladíková

Poděkování

V první řadě děkuji vedoucímu práce panu doc. Ing. Přemyslu Šůchovi, Ph.D. za odborné vedení, připomínky, vstřícnost, ochotu a čas, který mi po celou dobu psaní práce věnoval.

Dále děkuji paní Ing. Lence Žaloudkové, Ph.D. a panu doc. MUDr. Radomíru Hyšplerovi, Ph.D. za poskytnutí dat a cenných informací o procesu zpracování vzorků ve Fakultní nemocnici Hradec Králové a také za snahu o zlepšení současné situace.

V neposlední řadě patří poděkování mé rodině a mým blízkým za jejich podporu nejen při studiu.

Bc. Hana Hladíková

Název práce:

Analýza transportu vzorků do klinické laboratoře

Autor: Bc. Hana Hladíková

Studijní program: Lékařská elektronika a bioinformatika

Specializace: Bioinformatika

Druh práce: Diplomová práce

Vedoucí práce: doc. Ing. Přemysl Šůcha, Ph.D.
katedra řídicí techniky FEL

Abstrakt: Pro správnou klinickou diagnózu je včasné dodání výsledků laboratorních vyšetření klíčové. Tato oblast je však nedostatečně studována v současné literatuře. Proto se tato práce zabývá analýzou transportu vzorků do laboratoře. Analýza je provedena nad reálnými daty z Fakultní nemocnice Hradec Králové, která pro transport vzorků do laboratoře využívá systém potrubní pošty. Práce ukazuje výsledky analýzy dílčích časů transportu vzorku od odebrání biologického vzorku po export výsledku do laboratorního informačního systému a navrhuje metodu, která by mohla transport, a tím pádem i celkový klinický TAT zefektivnit.

Klíčová slova: potrubní pošta, turnaround time, transport vzorku, optimalizace, laboratoř

Title:

Analysis of sample transport to the clinical laboratory

Author: Bc. Hana Hladíková

Abstract: Timely delivery of laboratory test results is crucial for a correct clinical diagnosis. However, this area is understudied in the current literature. Therefore, this thesis focuses on the analysis of sample transport to the laboratory. The analysis is performed on real data from the University Hospital Hradec Králové, which uses a pneumatic tube system for transporting samples to the laboratory. The thesis shows the results of the analysis of the partial times of sample transport from the collection of biological sample to the export of the result to the laboratory information system and proposes a method that could make the transport and thus the overall clinical TAT more efficient.

Key words: pneumatic tube system, turnaround time, sample transport, optimization, laboratory

Obsah

Seznam použitých zkratk	xi
Seznam obrázků	xii
1 Úvod	1
2 Rešerše	3
2.1 Turnaround time	3
2.2 Transport vzorků do laboratoře	4
2.3 Optimalizace TATu	5
2.4 Shrnutí	6
3 Popis problematiky	7
3.1 Zpracování vzorků ve FNHK	7
3.1.1 Průchod vzorků potrubní poštou	8
3.1.2 Patrony a vzorky	9
3.1.3 Časová osa zpracování vzorku	9
3.1.4 Zpětná cesta patron	10
3.2 Popis problému	10
3.3 Popis dat	11
4 Analýza dat	15
4.1 Úprava vstupních dat	15
4.2 Algoritmus pro mapování zkumavek na patrony	16
4.2.1 Propojení tabulek na základě jednoznačných parametrů	16
4.2.2 Algoritmus mapování vzorků na patrony	17
4.3 Výsledky propojení dat	19
5 Optimalizace	21
5.1 Příprava dat	22
5.2 Optimalizační model	24
5.2.1 Množiny a proměnné	24
5.2.2 Omezení a kriteriální funkce	26
5.3 Zpětné odesílání patron	28
6 Výsledky	29
6.1 Analýza dat	29
6.1.1 Z pohledu potrubních stanic	31
6.1.2 Z pohledu linek	32
6.1.3 Z pohledu času	34
6.2 Optimalizace	38
7 Závěr	41

Seznam použitých zkratek

FNHK	Fakultní nemocnice Hradec Králové
IČP	Identifikační číslo pracoviště
INT	Interna
JIP	Jednotka intenzivní péče
OAP	Oddělení ambulantních provozů
PIO	Pavilon interních oborů
TAT	Doba obratu (<i>Turnaround time</i>)
ÚKBD	Ústav klinické biochemie a diagnostiky

Seznam obrázků

2.1	Podrobná časová osa laboratorních TATů	4
3.1	Časové značky zaznamenávané v průběhu zpracování vzorku	9
5.1	Ilustrační popis procesu detekce jednotlivých dávek	23
5.2	Příklad časových oken pro přiřazování dávek	25
6.1	Zavedení časových pojmů	30
6.2	Počet použitých dat pro vybrané stanice potrubní pošty	31
6.3	Mediány dob zpracování vzorků v závislosti na hodině příjmu vzorku pro stanici 0921 – PIO – OAP – odběry	32
6.4	80% percentil dob zpracování vzorků pro jednotlivé linky s rozlišením statim/rutina – seřazeno podle četnosti vzorků	33
6.5	Mediány dob zpracování vzorků v závislosti na hodině příjmu vzorku	34
6.6	80% percentily dob zpracování vzorků v závislosti na hodině příjmu vzorku	35
6.7	80% percentily dob zpracování statimových vzorků v závislosti na hodině příjmu vzorku	36
6.8	Radarové grafy s různými statistickými charakteristikami dob zpracování vzorků	37
6.9	Čekací doba a doba transportu patron potrubní poštou v závislosti na hodině registrace patrony	37
6.10	Výsledky optimalizace	39

Kapitola 1

Úvod

Akutní infarkt myokardu je celosvětově jedním z nejčastějších příčin úmrtí. Tomu se dá předcházet, pokud je rychle stanovena správná diagnóza a následně zahájena odpovídající léčba. Nejpoužívanějším diagnostickým testem je stanovení hladiny troponinu v krvi, jehož výsledky je třeba znát co nejdříve. Přestože tato analýza není pro laboratoř velmi časově náročná, transport vzorku do laboratoře značně prodlužuje dobu, než je výsledek testu dostupný lékaři. V tomto případě je však důležitá každá minuta a jakékoliv zpoždění může mít fatální následky [1]. Tento příklad pouze ilustruje stav v nemocnicích, kdy po odběru vzorku může trvat například 2 hodiny, než je výsledek analýzy zobrazen lékařem.

Odhaduje se, že až 70% diagnostických rozhodnutí je prováděno na základě výsledků laboratorních testů [2]. Včasné dodání výsledku je mnohdy pro správnou diagnostiku klíčové. Jak bude ukázáno v rešerši dostupné literatury v kapitole 2, většina laboratorních zařízení zkoumá pouze laboratorní TAT. Naopak klinický TAT, který je z pohledu diagnostiky důležitý, je přehlížen. Díky automatizovaným analyzátorům v laboratořích je laboratorní TAT převážně uspokojivý, proto je potřeba zkoumat a zlepšovat především transport vzorků do laboratoře, jelikož tato doba je přibližně stejná, mnohdy větší, než čas potřebný k samotné analýze vzorku.

Tato práce je založena na spolupráci s Fakultní nemocnicí Hradec Králové, která pro přepravu vzorků využívá systém potrubní pošty. V kapitole 2 jsou uvedeny výsledky dostupné literatury na téma TAT, transport vzorků do laboratoře a optimalizace TATu. V kapitole 3 si nejprve popíšeme způsob transportu a zpracování vzorků v reálném provozu. Dále zde budou popsány dostupné záznamy o vzorcích a patronách, nad kterými bude v kapitole 4 provedena analýza. Ta pomůže odhalit

různé problémy v celém procesu zpracování vzorků. V následující kapitole 5 navrhne prototyp optimalizačního modelu pro zefektivnění celého procesu zpracování vzorku. V kapitole 6 se podíváme na výsledky analýzy dat a navrženého modelu. Při celém procesu zpracování vzorků je důležitá kooperace mezi jeho dílčími částmi. Jak bude patrné právě z výsledků zpracování reálných dat, každé oddělení pracuje samostatně bez ohledu na celkový systém, což může vést ke značným prodlevám v procesu zpracování vzorku a zbytečnému navýšení celkového TATu. Nakonec je v kapitole 7 uveden závěr celé práce.

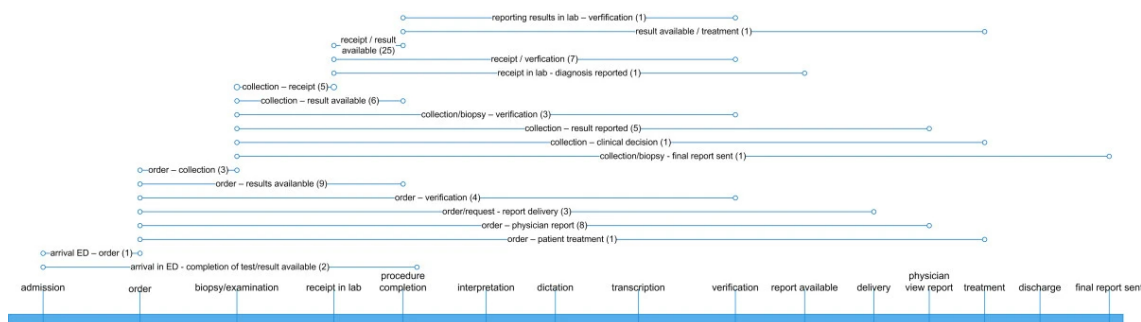
Kapitola 2

Rešerše

Tato kapitola se zabývá rešerší dostupné literatury. Nejprve si popíšeme, co je parametr TAT, proč je důležitý a jaké jsou jeho různé definice. V druhé části se budeme zabývat různými formami transportu vzorků do laboratoře a v poslední části optimalizací TATu.

2.1 Turnaround time

Rychlost a kvalitu zpracování vzorků a obecně výkon laboratoře můžeme měřit a porovnávat pomocí různých parametrů. Tsai, Eline R., et al. [3] vytvořili přehled indikátorů výkonnosti na základě četnosti jejich výskytu v literatuře. Nejčastěji citovaným indikátorem byl turnaround time (TAT). Podle jejich definice se jedná o čas mezi dvěma kroky v diagnostickém procesu. Tyto dva kroky jsou stanoveny podle toho, jaká část procesu je zkoumána, proto neexistuje jednoznačná definice. Tím se zabývali Breil, Bernhard, et al. [4], kteří provedli rešerší dostupné literatury na toto téma a vytvořili podrobnou časovou osu všech dokumentovaných TATů v celém procesu zpracování vzorků laboratořích, viz obr. 2.1. Jsou zde uvedeny počáteční a koncové body konkrétních TATů a v závorce je uvedena četnost jejich referencí. Nejvíce článků zkoumá rozdíl časů mezi příjmem vzorku do laboratoře a dostupností výsledků analýzy, tedy laboratorní TAT. Naopak minimum článků se zabývá celkovou dobou, kterou pacient respektive lékař čeká na výsledek.



Obrázek 2.1: Podrobná časová osa laboratorních TATů [4]

Celkový klinický TAT, tedy dobu od vypsání žádanky po příjem výsledku lékařem, můžeme rozdělit do třech fází. V první – preanalytické fázi – dochází například právě k vypsání žádanky, odběru vzorku a transportu vzorku do laboratoře. Tato fáze je z pohledu laboratorního TATu často označována jako pre-preanalytická, jelikož do laboratorní preanalytické fáze je zahrnuta pouze manipulace se vzorkem v laboratoři před samotnou analýzou. Druhá – analytická fáze – představuje samotnou analýzu vzorku. Do třetí – postanalytické fáze – můžeme zahrnout export výsledku pečujícímu lékaři. Goswami, Binita, et al. [5] zkoumali TAT v nemocnici, kde vzorky i výsledky analýzy byly přepravovány pomocí kurýrů. Zjistili, že z celkového klinického TATu v jejich nemocnici je okolo 75% v preanalytické a postanalytické fázi. Proto je důležité se zaměřit a zefektivňovat všechny dílčí části TATu, nejen TAT laboratorní.

2.2 Transport vzorků do laboratoře

Transport vzorků do laboratoře může probíhat různými způsoby, které se také odvíjí od typu laboratoře. U centrálních laboratořích se může jednat o transport přepravními společnostmi, u nemocničních laboratořích o přepravu vzorků personálem nebo pomocí systému potrubní pošty.

Systém potrubní pošty popisují Isken, Mark W., and Steven J. Littig. [6] jako uspořádání trubek, jimiž se pomocí podtlaku přepravují mezi jednotlivými cílovými stanicemi patrony, které mohou obsahovat malé předměty – například zkumavky s biologickým materiálem nebo léky. Stanice potrubní pošty mohou být buď jednosměrné, tedy patrony pouze přijímají nebo odesílají, anebo obousměrné. Před odesláním patrona čeká v odesílající stanici dokud nemá volnou cestu do cílové stanice, teprve poté je zahájen transport.

V nemocničním prostředí porovnávali Fernandes, Christopher M. B., et al. [7] právě systém potrubní pošty a přepravu vzorků personálem nemocnice. Zaměřili se na TAT, který stanovili jako rozdíl časů mezi vypsáním žádanky lékařem a exportem výsledků do nemocničního informačního systému. Dále zkoumali, zda není kvalita vzorků ovlivněna zrychlením, kterému jsou vzorky vystaveny při transportu potrubní poštou. Podle jejich studie byla doba obratu signifikantně menší při použití potrubní pošty oproti přepravě personálem a zároveň potrubní pošta neměla významný vliv na kvalitu vzorků.

Další vylepšení navrhli Suchsland, Juliane, et al. [8]. Jejich inovativní systém potrubní pošty přepravuje místo patron rovnou zkumavky s biologickým materiálem. Zkumavky jsou směrovány přímo do laboratorního analyzátoru, tudíž nemusí personál laboratoře odbavovat patrony a manuálně umisťovat zkumavky do analyzátoru. Tím se potenciálně sníží TAT a zároveň možnost preanalytických chyb. Doba obratu byla podle jejich studie opět signifikantně menší, než při přepravě vzorků personálem, přitom nezaznamenali významný vliv inovativního systému na kvalitu vzorku a následné výsledky prováděných analýz.

2.3 Optimalizace TATu

Snížování dílčích částí celkového patientského TATu je důležité pro efektivní chod nemocnice. Holland, Lorne L., et al. [9] zkoumali vliv laboratorního TATu na celkovou dobu pobytu pacienta na pohotovostním oddělení. Zjistili, že důležitější ukazatel než průměrný TAT je procento odlehlých hodnot TATu. Pro různé druhy analýz stanovili různé časové prahy. Jakákoliv hodnota nad tento práh byla zařazena mezi hodnoty odlehlé. Snížováním procent odlehlých hodnot v průběhu roku vedlo ke snížení celkové doby pobytu pacienta na pohotovostním oddělení. Pro porovnávání TATů je tedy lepší místo střední hodnoty zohledňovat procento testů, které jsou provedeny do stanoveného času.

V laboratořích nejsou zodpovědní pouze za dobu, po kterou je vzorek analyzován, přestože laboratoře monitorují zpravidla tento čas. Personál laboratoře většinou přijímá vzorek, zadává informace do systému a umisťuje vzorek do analyzátoru. Tomuto problému se věnovali Stotler, Brie A., and Alexander Kratz. [10]. Zjistili, že právě manipulace personálu se vzorky po příjezdu patrony potrubní poštou značně prodlužuje dobu, kterou vzorek v laboratoři stráví. Jejich analýza vzorků z 90% splňovala TAT do jedné hodiny, avšak další přibližně půl hodiny bylo se vzorky manipu-

lováno před samotnou analýzou. Proto se rozhodli navýšit personál pro zpracovávání příchozích vzorků do laboratoře, což vedlo ke statisticky významnému snížení doby manipulace se vzorky a tedy i celkového TATu. Po navýšení personálu laboratoř splňovala TAT od příjmu vzorku po export výsledku do 1 hodiny pro 90% vzorků.

2.4 Shrnutí

Doba obratu je jedním z nejdůležitějších faktorů zohledňujících efektivitu zpracování vzorků. Je potřeba se zaměřit na jednotlivé části celého patientského TATu a zlepšovat je. Nejprobádanějším a nejvíce zefektivněným je momentálně laboratorní TAT, tedy čas od příjmu vzorku, přes jeho analýzu automatizovanými analyzátory, až po export výsledku analýzy. Neméně důležitá je však preanalytická fáze, která z velké části závisí na lidském faktoru a lidských zdrojích. Zavedení systému potrubní pošty může značně zjednodušit transport a snížit preanalytické chyby, avšak musí s ním být správně zacházeno.

Kapitola 3

Popis problematiky

Jak bylo ukázáno v rešerši, doba mezi odebráním vzorku pacienta a exportem výsledku je v dnešní době zanedbávána. Laboratorní zařízení se zaměřují především na dobu obratu vzorku v laboratoři, avšak ta tvoří jen část celkového patientského TATu, který je z pohledu pacienta důležitější. Tímto problémem se začali zabývat ve Fakultní nemocnici Hradec Králové FNHK, kde přes uspokojivý laboratorní TAT nejsou sestry na odděleních spokojeny s časem dodání výsledků. Zároveň pro přepravu vzorků využívají potrubní poštu, která může být nárazově zahlcena a je těžké bez datové analýzy odhalit konkrétní příčiny problémů. Tato práce je proto založena na spolupráci s FNHK, neboť projevíli zájem o zpracování jejich dat a následnou analýzu. V této kapitole bude podrobně vysvětleno, jak celý proces zpracování vzorků ve FNHK probíhá.

3.1 Zpracování vzorků ve FNHK

Fakultní nemocnice Hradec Králové používá pro přepravu vzorků do laboratoře systém potrubní pošty. Na jednotlivých odděleních dochází k odběru biologického vzorku. Tyto vzorky jsou ve zkumavkách naskládány do patron a ty jsou následně přepraveny pomocí potrubní pošty do laboratoře. V laboratoři jsou vzorky z patron vyndány, zaznamenány do laboratorního informačního systému, a poté se zpracovávají pomocí různých analytických metod. V této podkapitole bude proces zpracování vzorku blíže popsán, včetně jednotlivých používaných časových značek, které jsou důležité pro navazující datovou analýzu.

3.1.1 Průchod vzorků potrubní poštou

Celý proces zpracování vzorku začíná na jednotlivých odděleních, kde dochází k vypsání žádanky pro zpracování vzorku a k jeho samotnému odběru. Čas odběru vzorku je zaznamenáván jako t_{OV} . Jelikož je tento čas zaznamenáván na většině odděleních ručně, nemusí být přesný. To se týká především žádanek, které jsou vypisovány dopředu pro ranní vizitu kolem 6:00.

Každé oddělení ve FNHK má své nákladové středisko. Nákladových středisek je celkem 341. Tato nákladová střediska jsou shlukována do přípravných míst, kterých je 127. Jedno přípravné místo má přiřazené jedno nebo více nákladových středisek, zatímco nákladové středisko má jednoznačně definované své přípravné místo. Existuje 56 méně vytížených přípravných míst, která využívají manuální transport vzorků do laboratoře pomocí personálu. Ostatní přípravná místa se dělí o stanice potrubní pošty. Zde je pár výjimek vytíženějších přípravných míst, kterým jsou naopak přiděleny dvě stanice potrubní pošty. Přípravné místo může mít tedy 0, 1 nebo 2 přiřazené potrubní stanice. Jedné potrubní stanici může být přiřazeno jedno a více přípravných míst. Potrubních stanic je celkem 89.

Systém potrubní pošty shlukuje jednotlivé stanice do 14 linek. Tyto linky jsou svedeny do centrálního karuselu, ze kterého jsou patrony posílány do cílových stanic. Chod potrubní pošty je řízen automaticky. Jakmile je patrona vložena do potrubní stanice, je zaznamenán přesný čas registrace patrony jako t_{RP} . Patrona vyčkává ve stanici, dokud nemá volnou cestu. V momentě, kdy je cesta uvolněná, započne transport patrony, který je zaznamenán jako čas odjezdu patrony t_{OP} . Čas, kdy patrona dorazí do cílové stanice, je zaznamenán jako čas příjezdu patrony t_{PP} .

Laboratoř má pro příjem patron stanicí s číslem 7671, která je pouze jednosměrná. To znamená, že tato stanice patrony pouze přijímá, a ty jsou vykládány na pás. Na cestě do této stanice tedy nemusí být v jeden čas pouze jedna patrona, ale mohou být posílány rychleji za sebou, aniž by došlo ke kolizi. Zároveň zde chybí anténa, která by dokázala detekovat přesný čas příjezdu patrony. Proto je čas příjezdu patrony t_{PP} nepřesný, jelikož je odhadován z času odjezdu patrony t_{OP} .

Po tom, co jsou patrony vyloženy na pás, je sestry otevírají a zapisují čísla žádanek do laboratorního informačního systému. Čas zápisu vzorku do systému je zaznamenán jako čas příjmu vzorku t_{PV} . Poté se provede samotná analýza vzorku v laboratoři a posledním zaznamenávaným časem je čas exportu výsledku do laboratorního informačního systému t_{EV} .

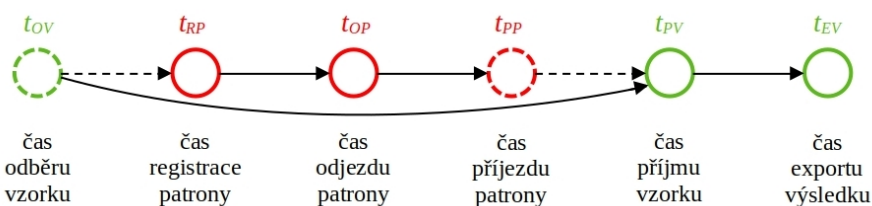
V ojedinělých případech může docházet také k transportu vzorku z oddělení do laboratoře manuálně personálem, tzn. mimo potrubní poštu. Pro tyto vzorky proto neexistuje v záznamech patrona, která by vzorek přepravovala, avšak tato anomálie není z dat nijak čitelná.

3.1.2 Patrony a vzorky

Jedna patrona může pojmout zhruba až 25 zkumavek s odebranými vzorky spolu s papírovými žádankami. Patronami se posílají vzorky dvojího typu – statimové a rutinní vzorky. Statimové vzorky jsou prioritizovány před rutinními vzorky. Nicméně potrubní pošta nedokáže rozlišit obsah patron a prioritu vzorků. Proto k upřednostňování těchto vzorků dochází pouze na dvou místech. Prvním místem jsou jednotlivá oddělení, kdy mohou sestry do potrubní pošty vložit dříve patronu se statimovými, než s rutinními vzorky. Druhým místem je až samotná laboratoř, kdy sestra po otevření patrony nejprve zaznamená statimové vzorky a až následně vzorky rutinní.

3.1.3 Časová osa zpracování vzorku

V sekcích výše je popsáno šest různých časů, které jsou zaznamenávány v průběhu zpracování vzorku. Na obrázku 3.1 je názorně zobrazena časová osa jednotlivých časových značek. Zeleně jsou uvedeny časy, které zaznamenává laboratorní informační systém. Červeně jsou uvedeny časy, které zaznamenává systém potrubní pošty. Tyto skupiny časů nejsou zatím nijak provázané, jelikož potrubní pošta nemá informace o tom, jaké vzorky jsou přepravovány jakou patronou a ani laboratoř nezaznamenává, jakou patronou byly konkrétní vzorky přepravovány. Kružnicí s plnou čarou jsou znázorněny časy, které jsou přesně zaznamenávány systémem. Kružnicí s přerušovanou čarou jsou znázorněny časy, které jsou buď zaznamenávány ručně, nebo jsou odhadovány z jiného času, tudíž jsou nepřesné.



Obrázek 3.1: Časové značky zaznamenávané v průběhu zpracování vzorku

3.1.4 Zpětná cesta patron

Po vyprázdění patron v laboratoři musí být patrony dopraveny zpět na své oddělení. Každá patrona je označena unikátním číslem a přísluší vždy nějakému konkrétnímu oddělení. Tyto informace jsou také uloženy v čipu, který potrubní pošta čte během přepravy patrony. Patrona se může zpět na své oddělení dostat z automatizované potrubní stanice se třemi vstupy, která je umístěna v laboratoři. Při vložení patrony do této stanice systém načte z čipu její domácí stanici a v momentě, kdy je pro patronu volná cesta, je odeslána zpět. Tento zpětný chod si však vzájemně blokuje cestu s patronami putujícími do laboratoře a to zejména v době ranní špičky. V tuto dobu se prázdné patrony v laboratoři často kumulují, jelikož se nedá do jednoho vstupu vložit více patron. Pokud se nějaká patrona odešle a uvolní vstup, musí to nejprve zaznamenat personál a následně vložit jednu další patronu. Proto jsou patrony v tuto dobu často přepravovány personálem, který odnese z laboratoře velký počet prázdných patron, a následně je manuálně přepravuje na příslušná oddělení.

3.2 Popis problému

Časové značky zaznamenávané systémem potrubní pošty a laboratorním informačním systémem spolu nejsou nijak provázány (viz obrázek 3.1). Neexistuje tedy záznam vazby vzorek – patrona. Tato vazba musí být odhadována na dvou místech – mezi časem odběru vzorku a registrací patrony, a také mezi časem příjezdu patrony a příjmem vzorku. V prvním případě známe pouze nepřesný čas odběru konkrétního vzorku a přesné časy registrací patron z oddělení, které vzorku přísluší. V druhém případě známe nepřesné časy příjezdu patron do laboratoře z příslušného oddělení a přesný čas příjmu vzorku v laboratoři. V sekci 4 se budeme více věnovat propojení těchto časových značek.

Dalším faktorem, který ovlivňuje průchod vzorků potrubní poštou do laboratoře, je pohyb na pozadí. Potrubní pošta je využívána celou nemocnicí a přepravuje vzorky i do jiných laboratoří, nebo například léky z lékárny atp. Tento provoz tedy zasahuje do toku vzorků do a z laboratoře a celý chod zpožďuje. Tato skutečnost není žádnou překážkou pro provedení analýzy TATů, avšak bude třeba se jí zaobírat v interpretaci výsledků analýzy a následné optimalizaci.

3.3 Popis dat

Fakultní nemocnice Hradec Králové poskytla pro analýzu celkem 5 souborů s daty. Soubory obsahovaly informace o vzorcích, informace o nákladových střediscích, informace o stanicích potrubní pošty, data ze systému potrubní pošty a informace o zpracovávání vzorků z laboratoře.

První hlavní soubor obsahuje data o jednotlivých vzorcích analyzovaných ve FNHK během května 2022. Pro každý vzorek jsou k dispozici tato data:

- identifikátor žádanky – např. *Sp-0001-01.05.*,
- číslo žádanky – např. *1*,
- datum a čas odběru vzorku – t_{OV} ,
- datum a čas příjmu vzorku – t_{PV} ,
- zkratka oddělení – např. *1111*,
- název oddělení – např. *1.INT – akutní kardiologie*,
- název bloku – např. *Statim – biochemie*.

Identifikátor žádanky je unikátní sada znaků v rámci dne, která se většinou skládá ze tří částí oddělených spojovníkem. První část je dvoupísmenná zkratka názvu bloku, což je uskupení laboratorních testů, které mohou být provedeny z jedné zkumavky (na žádance jsou seřazeny do jednotlivých bloků) – např. *Sp* je zkratkou pro *Statim – biochemie*. Druhá část je číslo žádanky ve tvaru čtyřciferného čísla doplněného nulami – např. *0001* a nakonec volitelná část datum ve formátu *dd.mm*. Číslo žádanky je celé číslo unikátní v rámci dne a typu prováděné analýzy. Datum a čas odběru vzorku je čas, který je ručně zapsán do systému často v době, kdy se dopředu vyplňují žádanky pro ranní vizitu. V analýze je označen jako t_{OV} . Datum a čas příjmu vzorku je čas, kdy je přijatý vzorek zaznamenán v laboratoři do systému a následně se začne provádět požadovaná analýza. Tento čas je přesný a v analýze je označován jako t_{PV} . Zkratka oddělení je unikátní identifikační čtyř až pěticefurné číslo pro každé oddělení a spolu s názvem oddělení tvoří dvojici hodnot, která je identifikačně ekvivalentní. Název bloku je již zmiňovaný název pro blok analýz, které lze provést z jedné odebrané zkumavky. Dále tabulka obsahuje různé další informace jako pohlaví pacienta, pojišťovnu pacienta, rozšířenou zkratku diagnostické metody

nebo IČP oddělení. Tyto informace však nejsou relevantní pro datovou analýzu, proto se jimi nebudeme zabývat.

Druhý soubor obsahuje informace o nákladových střediscích, díky kterým bude možnost přiřadit vzorkům z první tabulky další důležité informace. Pro jednotlivá oddělení jsou v souboru tato data:

- číslo nákladového střediska (oddělení) – např. *1111*,
- název nákladového střediska – např. *1.INT akutní kardiologie*,
- číslo přípravného místa – např. *111*,
- název přípravného místa – např. *1. INT JIP korona*,
- číslo potrubní stanice – např. *0927*,
- název potrubní stanice – např. *PIO – I. Int. kl. – JIP arytmo*.

Číslo nákladového střediska je vždy čtyřciferné číslo. Je to jednoznačný identifikátor a je informačně doplněn názvem nákladového střediska. Číslo přípravného místa je trojciferné číslo a je také informačně doplněno o název. Jedno nákladové středisko má definované právě jedno přípravné místo. Číslo potrubní stanice může být buď čtyřciferné číslo odkazující na konkrétní stanici, nebo slovní komentář – např. *manuál* nebo *jiný pavilon, svoz*. V takovém případě nelze nákladovému středisku žádnou stanici přiřadit.

Třetí soubor obsahuje informace o stanicích potrubní pošty, tudíž navazuje na druhý soubor s daty o nákladových střediscích. Najdeme zde seznam 89 stanic potrubní pošty a ke každé stanici tyto informace:

- číslo potrubní stanice – např. *9146*,
- název potrubní stanice – např. *CENTRÁLNÍ VELÍN*,
- linka – např. *8*.

Číslo potrubní stanice je vždy čtyřciferné číslo a opět slouží jako identifikátor, název potrubní stanice je název odpovídající číslu stanice. Linka odpovídá číslu linky, na které se potrubní stanice nachází. Je to celé číslo nabývající hodnot {1 – 10, 12 –

14, 17}. Dále jsou v souboru informace o patře, na kterém je umístěna potrubní stanice, a telefonní spojení stanice, avšak tyto údaje jsou pro analýzu irelevantní.

Další soubor obsahuje záznamy průchodu patron potrubní poštou. Soubor znamená data o všech patronách, která systémem prošla během května 2022, tzn. přibližně 57 000 záznamů. Pro každou patronu jsou k dispozici tyto informace:

- číslo odesílatele – např. *1223*,
- název odesílatele – např. *EMERG-KARIM*,
- číslo příjemce – např. *7671*,
- název příjemce – např. *ÚKBD-laborator 1*,
- datum a čas registrace patrony – t_{RP} ,
- datum a čas odjezdu patrony – t_{OP} ,
- datum a čas příjezdu patrony – t_{PP} ,
- číslo patrony – např. *410*.

Číslo a název odesílatele, respektive příjemce je číslo a název stanice potrubní pošty, která patronu odeslala, respektive přijala. Číslo stanic se shodují s čísly stanic v souboru výše, avšak názvy stanic má systém potrubní pošty zaveden jinak. Datum a čas registrace patrony je záznam času, kdy byla patrona vložena do potrubní pošty na straně odesílatele a v analýze je označen jako t_{RP} . Datum a čas odjezdu patrony je čas, kdy potrubní pošta započala přepravu patrony do cílové stanice a je označen jako t_{OP} . Datum a čas příjezdu patrony je čas, kdy patrona dorazila do cílové stanice a je označován jako t_{PP} . Všechny časy jsou zaznamenávány systémem potrubní pošty s přesností na sekundy. Číslo patrony je unikátní trojčíferné číslo, které jednoznačně identifikuje patronu.

Poslední soubor obsahuje záznamy o zpracování vzorků v laboratoři. Jeden záznam obsahuje vždy informace o jedné konkrétní metodě aplikované na vzorku, proto pro jeden vzorek může existovat více záznamů. Každý záznam obsahuje tyto informace:

- datum a čas odběru vzorku – t_{OV} ,
- datum a čas příjmu vzorku – t_{PV} ,
- název bloku – např. Sp ,
- číslo žádanky – např. 7,
- doba exportu – např. 24.

Datum a čas odběru vzorku, respektive příjmu vzorku odpovídá údajům z prvního souboru. K těmto datům se váže také shodné číslo žádanky a název bloku, který je uveden na začátku identifikátoru žádanky v prvním souboru. Jedinou doplňující informací z tohoto souboru je doba exportu, která udává časový rozdíl mezi příjmem vzorku t_{PV} a exportem výsledku t_{EV} v minutách. Z doby exportu a času příjmu vzorku bude proto dopočten datum a čas exportu výsledku t_{EV} . Dále záznamy obsahují různé další informace o provedené metodě, o osobách, které se vzorkem nebo s výsledkem pracovaly a další údaje o mezičasech zpracování vzorku v laboratoři. Tyto údaje jsou však pro následnou analýzu nepodstatné.

V následující kapitole si podrobně popíšeme, jakým způsobem se dají datové soubory propojit a podíváme se na výsledky tohoto propojení.

Kapitola 4

Analýza dat

V této kapitole bude nejprve popsána nutná úprava dat, která jsou pro analýzu k dispozici. V druhé části bude podrobně vysvětlen algoritmus, který se snaží každému vzorku přiřadit patronu, kterou byl vzorek pravděpodobně do laboratoře přepraven. V poslední části bude uvedeno, jak bylo mapování úspěšné, kolik vzorků se jakým způsobem podařilo namapovat na patrony, a důvody, proč byly některé vzorky z analýzy vyřazeny.

4.1 Úprava vstupních dat

Pro zpracování dat bylo potřeba nejprve načíst data z tabulek popsaných v sekci 3.3 a poté je upravit před následnou analýzou. U první tabulky s informacemi o vzorcích bylo podle prvních dvou písmen identifikátoru žádanky, tj. podle názvu bloku, rozhodnuto, zda se jedná o statimový či rutinní vzorek. Zkratkám *Sk* a *Sp* odpovídá statim, vzorky s ostatními zkratkami jsou považovány za rutinu.

Pro zpracování vzorků posílaných do laboratoře byly ze všech patron za zpracovávané období vybrány pouze ty, které měly jako příjemce uvedenou laboratoř, tzn. patrony s číslem příjemce 7671. Dále bylo potřeba upravit záznamy o exportu výsledků, jelikož pro jeden vzorek existovalo více záznamů podle počtu prováděných testů. Proto byla data v této tabulce sdružena na základě stejného data a času odběru a příjmu vzorku, stejného čísla žádanky a stejného názvu bloku.

4.2 Algoritmus pro mapování zkumavek na patrony

V této podkapitole bude nejprve popsáno propojení tabulek, které je jednoznačné. Tedy spojení tabulky s hlavními daty o vzorcích s tabulkami s daty o nákladových střediscích a stanicích potrubní pošty a dále spojení s tabulkou s informacemi o dobách exportu výsledků. Toto propojení pouze rozšiřuje informace o vzorcích. V druhé části bude detailně popsán algoritmus mapování jednotlivých vzorků na patrony.

4.2.1 Propojení tabulek na základě jednoznačných parametrů

Nejprve byla propojena tabulka se vzorky s tabulkou s nákladovými středisky na základě čísla oddělení na straně vzorků a čísla nákladového střediska v druhé z tabulek. Na základě čísla potrubní stanice z druhé tabulky mohla být připojena třetí tabulka, která poskytuje také informace o čísle linky. Na základě data a času odběru a příjmu vzorku, čísla žádanky a názvu bloku byla připojena tabulka s informacemi o času exportu výsledků. Tímto spojením vznikla jedna tabulka s následujícími hodnotami pro každý vzorek:

- hodnoty důležité pro mapování vzorků na patrony a následnou analýzu výsledků:
 - identifikátor žádanky – např. *Sp-0001-01.05.*,
 - datum a čas odběru vzorku – t_{OV} ,
 - datum a čas příjmu vzorku – t_{PV} ,
 - číslo potrubní stanice – např. *0927*,
- hodnoty důležité pro následnou analýzu výsledků:
 - datum a čas exportu výsledků – t_{EV} ,
 - název potrubní stanice – např. *PIO – I. Int. kl. – JIP arytmo*,
 - linka – např. *7*,
 - typ vzorku – *statim/rutina*.

4.2.2 Algoritmus mapování vzorků na patrony

Jak již bylo dříve zmíněno, v datech neexistuje vazba vzorek – patrona. Proto bylo potřeba vyvinout heuristický algoritmus, který na základě informací o vzorcích a patronách dokáže vzorek propojit s konkrétní patronou, kterou byl pravděpodobně do laboratoře přepraven. U vzorků máme k dispozici pouze datum a čas odběru a příjmu vzorku a oddělení, které vzorek odebralo. U patron máme k dispozici následující informace důležité pro mapování:

- číslo potrubní stanice odesílatele – např. 0927,
- datum a čas registrace patrony – t_{RP} ,
- datum a čas odjezdu patrony – t_{OP} ,
- datum a čas příjezdu patrony – t_{PP} .

Prvním parametrem, kterým se budeme zabývat, je číslo potrubní stanice z dat potrubní pošty a číslo nákladového střediska z informací o vzorcích, na které lze jednoznačně navázat jedno nebo dvě čísla potrubní stanice. Mimo to, že mohou existovat dvě potrubní stanice, ze kterých oddělení, které vzorek odebralo, odesílá patrony, může být také vzorek odeslán z kterékoli jiné potrubní stanice v systému. Proto je algoritmus mapování rozdělen do dvou fází. V první (standardní) fázi se pokusí namapovat vzorky patronám na základě jedné až dvou potrubních stanic příslušných tomu oddělení, ke kterému vzorek náleží. V druhé (nestandardní) fázi proběhne tentýž algoritmus, avšak pouze na dosud nepřirazených vzorcích a nyní se bude pokoušet mapovat vzorek na takové patrony, které byly odeslány z potrubních stanic nacházejících se ve stejné budově jako oddělení, ve kterém byl vzorek odebrán. V obou případech musí být zohledněna maximální kapacita jedné patrony, která je stanovena na 25 vzorků.

Z časové osy jasně vyplývá, že pokud má být konkrétní vzorek spojen s konkrétní patronou, musí být dodrženy tyto dvě časové posloupnosti: odběr vzorku – registrace patrony a příjezd patrony – příjem vzorku. Musí být však zohledněn fakt, že datum a čas odběru vzorku je zaznamenáván ručně, proto nemusí první časová posloupnost platit implicitně. Zároveň se mohou v datech vyskytovat vzorky, které mají stejný čas odběru i čas příjmu a to z toho důvodu, že čas odběru je neznámý, a proto byl vyplněn časem příjmu. Z důvodu nespolehlivosti časového údaje o odběru vzorku bylo rozhodnuto, že časová vazba odběr vzorku – registrace patrony nebude zohledněna v algoritmu mapování vzorků na patrony. U druhé časové posloupnosti

existuje také určitá nejistota, jelikož je datum a čas příjezdu patrony odhadován systémem, neboť v laboratoři chybí anténa, která by přesný čas příjezdu patrony zaznamenala. Tento problém je vyřešen 4 minutovou časovou rezervou, kdy může být vzorek přiřazen patroně, která podle záznamů přijela do laboratoře až 4 minuty po času příjmu vzorku. Rezerva byla odhadnuta na 3 minuty, avšak z důvodu na sekundu přesného času příjezdu patrony a času příjmu vzorku zaokrouhleného na minuty dolů byla přidána další minuta. Pro pár patrona – vzorek tedy musí z pohledu času platit rovnice $t_{PP} \leq t_{PV} + 4 \text{ min}$.

Jelikož není při mapování zohledněn čas odběru vzorku a odjezdu patrony, jsou vzorky k patronám přiřazovány pozpátku v čase metodou fronty – first in first out. Vzorky, respektive patrony jsou seřazeny sestupně podle data a času příjmu vzorku, respektive příjezdu patrony. V obou fázích algoritmu jsou procházeny vzorky v tomto pořadí a pro každý vzorek je nalezena taková patrona, která byla odeslána z příslušné stanice a zároveň ještě nebyla naplněna její maximální kapacita jinými vzorky. Tedy každému vzorku je přiřazena nejbližší dřívější volná patrona z pohledu času a podle první nebo druhé fáze je upraven výběr patron podle čísla stanice odesílatele. V tento moment by algoritmus mohl namapovat vzorku jakoukoliv předešlou odpovídající volnou patronu třeba i s několikadenním časovým rozdílem mezi příjezdem patrony a příjmem vzorku. Proto je zavedeno omezení na rozdíl těchto časů. Podle personálu laboratoře může trvat maximálně 30 minut, než jsou vzorky po příjezdu do laboratoře zadány do systému. Z důvodu možných odchylek je tato rezerva v první fázi navýšena o dalších 15 minut, v druhé fázi je z důvodu minimalizace případných chyb ponechána na 30 minutách. Pro první, respektive druhou fázi proto musí platit, že rozdíl mezi časem příjezdu patrony a příjmem vzorku je omezen na $t_{diff_max} = 45 \text{ min}$, respektive $t_{diff_max} = 30 \text{ min}$. Pro obě fáze pak platí rovnice $t_{PV} - t_{PP} \leq t_{diff_max}$.

Algoritmus 1 Algoritmus mapování vzorků na patrony

```

1:  $C = 25$                                 ▷ Maximální kapacita patrony
2:  $V = V.sort\_descendent(by = t_{PV})$      ▷ Sestupně řazená množina vzorků
3:  $P = P.sort\_descendent(by = t_{PP})$      ▷ Sestupně řazená množina patron
4: for  $v$  in  $V$  do
5:   for  $p$  in  $P$  do
6:     if  $p.t_{PP} \leq v.t_{PV} + 4 \text{ min}$  and  $v.t_{PV} - p.t_{PP} \leq t_{diff\_max}$  and
        $p.cislo\_stanice$  is in  $v.cisla\_stanic$  and  $p.count < C$  then
7:        $v.patrona = p.idx$                  ▷ Přiřazení patrony vzorku
8:        $p.count+ = 1$                        ▷ Zvýšení počtu vzorků v patroně
9:       break
10:    end if
11:  end for
12: end for

```

Pseudokód algoritmu, který je shodný pro obě fáze mapování, je popsán výše jako algoritmus 1. Na řádku jedna je deklarována kapacita patrony. Řádek dvě znázorňuje deklaraci sestupně seřazené množiny vzorků podle času příjmu vzorku. Tato množina nese také informaci o času odběru a příjmu vzorku, dále také o stanicích potrubní pošty, ze kterých mohly odejít patrony přepravující daný vzorek. V první fázi to jsou potrubní stanice odpovídající danému oddělení, v druhé fázi to jsou všechny stanice ve stejné budově jako příslušné oddělení. Třetí řádek odpovídá deklaraci množiny patron seřazené sestupně podle času příjezdu patrony. Každá patrona z této množiny si nese informaci o času odjezdu a příjezdu patrony, o počtu přiřazených vzorků této patroně a čísle potrubní stanice odesílatele. Dále algoritmus iteruje přes všechny vzorky, vnořeně přes všechny patrony, a vzorku přiřadí první takovou patronu, která splňuje podmínky na řádku 6, pokud existuje. První podmínka kontroluje, že příjezd patrony byl v čase dříve než příjem vzorku. Druhá podmínka kontroluje, zda od příjezdu patrony do příjmu vzorku neuběhlo více než 45, respektive 30 minut podle fáze algoritmu. Třetí podmínka je splněna, pokud vzorek mohl být poslán z té stanice, ze které byla odeslána patrona. Poslední podmínka kontroluje, zda nebyla překročena maximální kapacita patrony. Pokud je vyhovující patrona nalezena, je přiřazena vzorku a její počet vzorků je zvýšen o jedna. Výše popsáný algoritmus proběhne pro obě fáze s rozdílem množiny vzorků a jejich přípustných čísel potrubních stanic a různým časovým omezením t_{diff_max} .

Algoritmus 1 je pouze principiálním vysvětlením myšlenky propojování dat, avšak tato přímočará implementace je časově velmi náročná. Proto je skutečný algoritmus pro rychlejší průběh upravený především různou preselekcí patron podle oddělení a času, ale i přesto dává stejné výsledky.

4.3 Výsledky propojení dat

Během spojování tabulek dochází ke ztrátě dat z různých důvodů. Původní tabulka obsahující všechny vzorky přijaté laboratoří za květen 2022 čítá celkem 47 144 vzorků. Jelikož jsou některé vzorky odesílány z externích pracovišť mimo potrubní poštu, například od praktických lékařů, nepodařilo se pro 2 301 vzorků najít odpovídající nákladové středisko, proto nejsou tyto vzorky zahrnuty do analýzy. Další 3 158 vzorků je z tabulky odstraněno, jelikož sice mají přiřazené nákladové středisko, avšak nikoli stanici potrubní pošty. Jedná se o vzorky, které jsou přepravovány manuálně personálem nemocnice a potrubní poštou opět neprocházejí. Dále tato tabulka obsahuje záznamy o vzorcích, které se zpracovávají na jiném místě, proto nejsou

přepřevovány potrubní poštou do této laboratoře. Takové vzorky lze jednoznačně identifikovat podle názvu bloku, spadají sem například moče nebo jiné speciální odběry. Celkem je těchto vzorků 6 448 a jsou z dat také odstraněny.

V tabulce z laboratoře, která obsahuje časy exportu výsledků, chybí všechny vzorky s časem příjmu mezi 0. a 1. hodinou ranní a všechny vzorky z 31.5.2022. Takových vzorků je celkem 1 588. Z tabulky však odstraněny nejsou a při mapování jsou jejich časy exportu výsledků nastaveny na null hodnoty a budou v následné analýze časů ignorovány. Mimo tyto vzorky je propojení této tabulky s hlavní tabulkou stoprocentní.

Po spojení tabulek a předzpracování dat zůstane 35 237 vzorků použitelných pro mapování a následnou analýzu. Z původních 47 144 vzorků se jedná o 74,74 %. Po první fázi mapování zůstane nepřirazených 3 683 vzorků. Z těchto vzorků se v druhé fázi nepodaří patrony přiřadit již pouze 836 zkumavkám. Celkem je tedy po proběhnutí obou fází algoritmu přiřazeno 34 401 vzorků k patronám, což je 97,63 % ze vzorků, které prošly předzpracováním. Oddělením s největším počtem nepřirazených vzorků (133) je kožní ambulance. Ta se však nachází ve stejné budově a blízko laboratoře, tudíž lze předpokládat, že jsou vzorky přenášeny ručně.

Co se patron týče, za celé období května 2022 bylo laboratoří přijato celkem 11 512 patron z celého systému potrubní pošty. Při mapování byl alespoň jeden vzorek přiřazen 8 501 patronám, tedy celkem 73,84 % patron bylo při procesu využito, z nichž maximální kapacita, tedy 25 vzorků, byla naplněna u 189 patron.

Kapitola 5

Optimalizace

Největší zátěž systému potrubní pošty ve FNHK představuje ranní špička kolem 6:00, kdy probíhají vizity. Mnoho vzorků je odebíráno a posíláno potrubní poštou do laboratoře kolem tohoto času, přestože to jsou rutinní odběry a lékaři nepotřebují znát výsledky analýz v nejkratším možném čase. Cílem optimalizace je rozprostřít zátěž potrubní pošty právě během ranní špičky, což může zlepšit celkový klinický TAT především pro statimové vzorky, jelikož nebudou blokovány nárazovým množstvím vzorků rutinních.

Základní myšlenka optimalizace spočívá v rozdělení časové osy do 10minutových bloků. Každému oddělení s větším počtem odesílaných vzorků bude přiřazen časový blok okolo času, kdy posílá nárazově více vzorků. Počet těchto vzorků bude označován jako dávka. Jedno oddělení může mít přiřazeno více bloků, pokud existuje více dávek. Na každé lince by měl být konkrétní časový blok vyhrazen vždy pouze pro jedno oddělení. Tím by měl být zajištěn rychlejší odjezd patrony po registraci do systému, tedy menší rozdíl mezi časem registrace patrony a časem odjezdu patrony, jelikož linka bude méně vytížená patronami z ostatních oddělení. Vyhrazením časového bloku pro jedno oddělení by se také zkrátila doba, kdy plné patrony čekají vedle stanice potrubní pošty, jelikož registrovat lze vždy pouze jednu patronu. Další patrona může být zaregistrována až po odjezdu té předchozí, proto patrona čeká na registraci, dokud si nějaký pracovník nevšimne, že je stanice volná. Pokud by měla stanice vyhrazený čas pro odesílání patron, pracovník by mohl celou dobu kontrolovat stanici a po odjezdu patrony ihned registrovat další. Další výhodou by bylo využívání maximální kapacity patron, čímž by se snížil celkový počet patron přepravovaný systémem potrubní pošty.

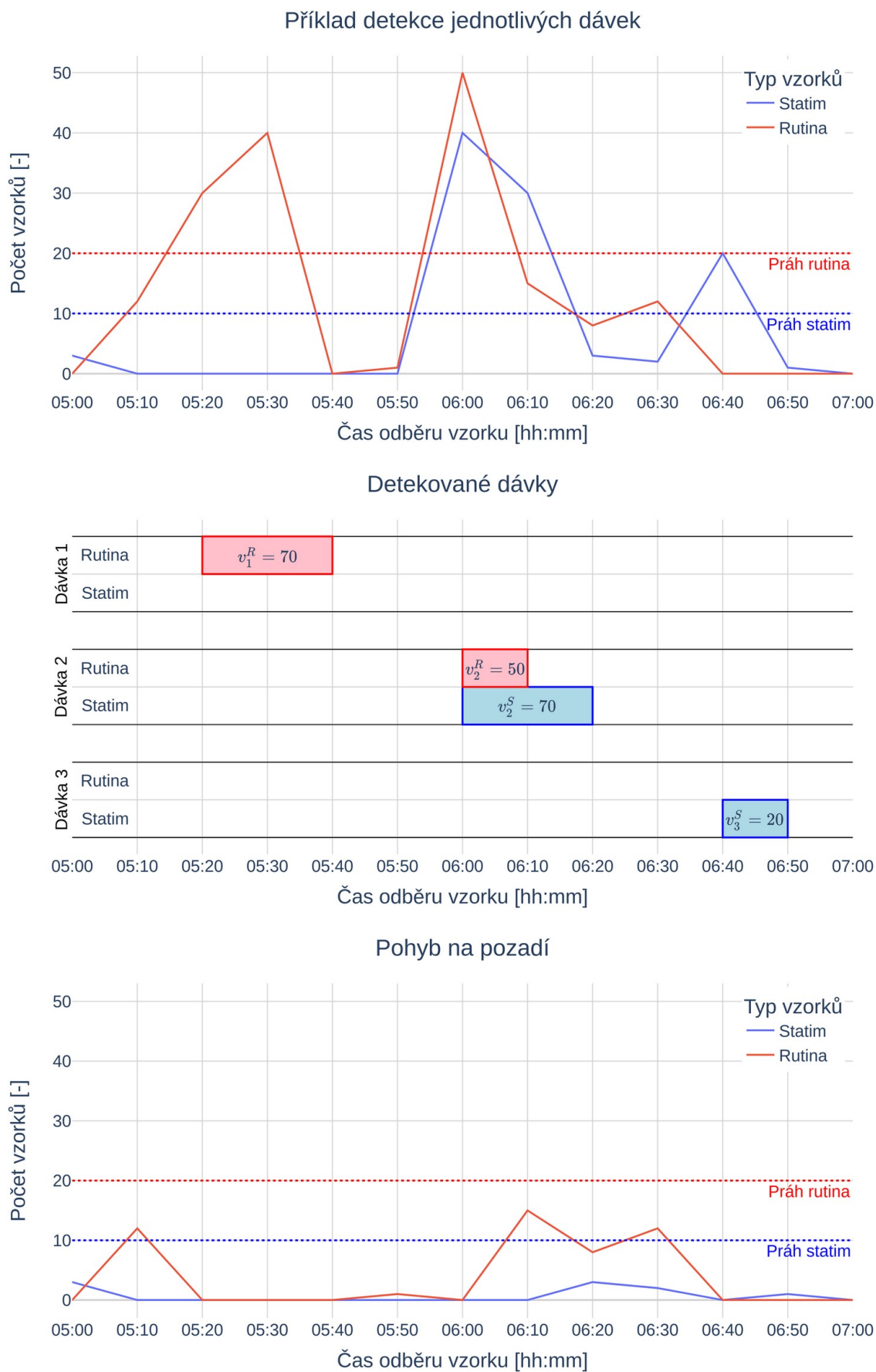
Ze všech časů byl pro optimalizaci vybrán čas odběru. Přestože je nepřesný, alespoň z části ilustruje zátěž pošty a je z něj počítán celkový klinický TAT. Zároveň kapacita potrubní pošty u ostatních časů vzorky přirozeně rozprostírá v čase, a to právě z důvodu, že ve stanici může být v jeden moment registrovaná pouze jedna patrona, přestože další mohou být také připravené k odeslání.

Optimalizace by měla také zohledňovat prioritu vzorků. Některá oddělení mohou posílat nárazově větší množství statimových vzorků. Je však jasné, že časová flexibilita pro takové dávky by měla být značně menší než pro dávky tvořené rutinními vzorky. Proto je s jiným přístupem nahlíženo na vzorky statimové a rutinní, jak v případě detekce dávek, tak ve volbě velikosti časového okna, kdy mohou být vzorky posílány.

V této kapitole bude nejprve popsána příprava dat a mechanismus detekování vysokých dávek pro jednotlivá oddělení v závislosti na čase. V druhé části bude matematicky popsán optimalizační model, konkrétně použité množiny a proměnné spolu s omezeními a kritériální funkcí.

5.1 Příprava dat

Pro detekování jednotlivých dávek pro každé oddělení bylo potřeba diskretizovat čas na 10minutové bloky a sečíst počet vzorků odeslaných v konkrétním časovém bloku každý den v měsíci. Do součtu byly zahrnuty pouze vzorky odesílané ve všední dny, jelikož nepracovní dny jsou mnohem méně vytížené a zkreslovaly by reálnou zátěž potrubní pošty během pracovního dne. Dále byly vzorky rozděleny na statimové a rutinní. Pro každé oddělení vznikly dva grafy popisující počet odeslaných vzorků v rámci dne v závislosti na čase. Příkladem takového grafu je první graf na obrázku 5.1. Z těchto grafů jsou pomocí prahů detekovány jednotlivé dávky a to tak, že pokud je počet vzorků v jednom časovém okně větší nebo roven hodnotě 10, respektive 20 pro statimové, respektive rutinní vzorky, je v tomto čase detekována jedna dávka. Časový interval dávky může být tvořen jedním až třemi 10minutovými časovými bloky, pokud se jedná o po sobě jdoucí bloky a všechny převyšují prahovou hodnotu. Velikost dávky je dána jako součet vzorků ve vybraném detekovaném intervalu. Jak je vidět na druhém grafu obrázku 5.1, jedna dávka může mít detekované okno buď pro jeden z typu vzorků, nebo pro statimové i rutinní vzorky zároveň, pokud se dávky v čase překrývají. Tato skutečnost v optimalizačním modelu umožňuje oddělením odesílat vzorky obou priorit najednou, ale zároveň podle potřeby dávky



Obrázek 5.1: Ilustrační popis procesu detekce jednotlivých dávek

dle typu priority rozdělit. Zároveň je na obrázku vidět, že pro jedno oddělení lze detekovat více dávek, v tomto případě tři.

Poté co jsou v každém grafu detekovány dávky, jsou odpovídající počty vzorků odečteny od původních grafů, čímž je získán tzv. pohyb na pozadí, jak je patrné z třetího grafu na obrázku 5.1. Tato data nejsou nijak optimalizována, avšak do modelu vstupují jako konstanta a teprve nad nimi probíhá optimalizace dávek.

Do procesu detekce dávek nejsou zahrnuty oddělení, jako jsou poradny a ambulance. Mají sice vysoký odbyt vzorků obou priorit, avšak vzorky odesílají v průběhu celého dne, proto jsou opět započítány jako konstantní tok na pozadí.

5.2 Optimalizační model

Úloha je formulována jako mixed integer quadratic model, jelikož jsou použity binární proměnné, lineární omezení a kvadratická kritériální funkce. Vstupem pro optimalizační model jsou detekované dávky a pohyb vzorků na pozadí, na který je nahlíženo jako na konstantu. Jedna detekovaná dávka obsahuje informace o oddělení, ze kterého je dávka odesílána a tedy i linku, po které je posílána. Dále velikost dávky a začátek a konec časového okna, kdy je posílána pro statimové a/nebo rutinní vzorky. Cílem optimalizace je co nejvíce vyrovnat zátěž potrubní pošty během ranní špičky.

5.2.1 Množiny a proměnné

První a nejjednodušší množinou je množina všech využitých linek $L = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 12, 13, 17\}$.

Druhá množina znázorňuje časovou podstatu a jedná se o indexaci 10minutových binů na časové ose. Pro optimalizaci byly vybrány časy okolo špičky v rozmezí 4:00 až 12:00, což vytváří dohromady 48 binů v množině $T = \{0, 1, \dots, 47\}$.

Množina J představuje množinu všech dávek. Každá j -tá dávka má svou velikost pro statimové v_j^S a/nebo rutinní v_j^R vzorky. Dále má každá detekovaná dávka definovaný začátek a konec časového intervalu, ve kterém je reálně odesílána, ty

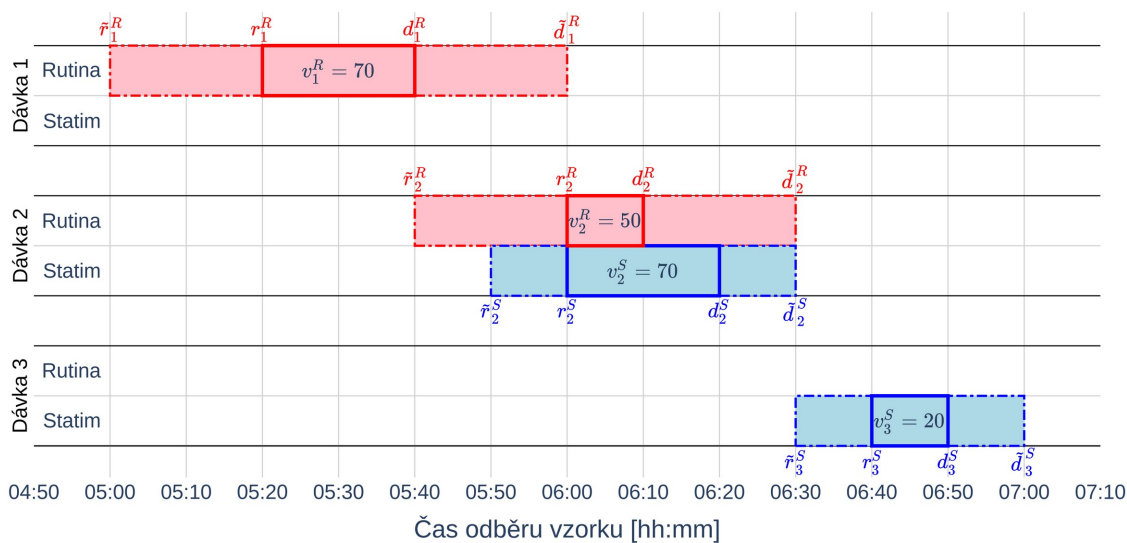
jsou označeny proměnnými r_j^S a d_j^S pro statimové a r_j^R a d_j^R pro rutinní dávky. Tyto parametry nabývají hodnot z množiny T .

Dále jsou zavedeny koeficienty c^S a c^R , které definují, jak velký bude časový interval, do kterého může být konkrétní dávka přiřazena. Koeficient $c^S \in \mathbb{N}^+$ udává, o kolik binů bude na obou stranách širší interval, do kterého může být statimová dávka algoritmem přiřazena, než je časový interval detekovaný pomocí prahů. Tím vznikají další proměnné \tilde{r}_j^S a \tilde{d}_j^S , které nabývají hodnot z množiny T a představují začátek a konec intervalu, do kterého může být konkrétní j -tá statimová dávka algoritmem přiřazena. Tyto proměnné jsou odvozeny od parametrů r_j^S a d_j^S pomocí vztahů v rovnicích (5.1).

$$\begin{aligned}\tilde{r}_j^S &= \max\{0, r_j^S - c^S\}, & \forall j \in J \\ \tilde{d}_j^S &= \min\{T, d_j^S + c^S\}, & \forall j \in J\end{aligned}\tag{5.1}$$

Obdobně jsou pomocí parametrů r_j^R a d_j^R a koeficientu c^R zavedeny proměnné \tilde{r}_j^R a \tilde{d}_j^R pro dávky rutinních vzorků.

$$\begin{aligned}\tilde{r}_j^R &= \max\{0, r_j^R - c^R\}, & \forall j \in J \\ \tilde{d}_j^R &= \min\{T, d_j^R + c^R\}, & \forall j \in J\end{aligned}\tag{5.2}$$



Obrázek 5.2: Příklad časových oken pro přiřazování dávek

Na obrázku 5.2 je názorně předvedeno, jak by vypadala jednotlivá okna, do kterých by mohly být umístěny dávky pro příklad z obrázku 5.1. Pro jednoduchost jsou zde zvoleny proměnné $c^S = 1$ a $c^R = 2$. Plnou čarou jsou označeny původní detekované dávky v intervalech d_j a r_j , přerušovanou čarou jsou označena celá časová okna, do kterých může být dávka umístěna s intervaly \tilde{d}_j a \tilde{r}_j .

Pro statimová, respektive rutinní data na pozadí je zavedena množina parametrů W_t^S , respektive W_t^R pro všechna t z množiny T . Jedná se o součet všech vzorků v konkrétním časovém binu t (bez ohledu na oddělení), které nejsou zahrnuty v detekovaných dávkách.

Pro přiřazování dávek konkrétním časovým oknům je použita binární proměnná x^S , respektive x^R pro všechny statimové, respektive rutinní dávky a všechny časové biny. Pokud je dávka j přiřazena do binu t je odpovídající proměnná $x_{j,t}^S$ nebo $x_{j,t}^R$ nastavena na hodnotu 1, v opačném případě na hodnotu 0.

$$\begin{aligned} x_{j,t}^S &= \begin{cases} 1, & \text{pokud je dávka } j \text{ přiřazena binu } t. \\ 0, & \text{jinak.} \end{cases}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T \\ x_{j,t}^R &= \begin{cases} 1, & \text{pokud je dávka } j \text{ přiřazena binu } t. \\ 0, & \text{jinak.} \end{cases}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T \end{aligned} \quad (5.3)$$

Aby bylo možné přiřadit jednomu časovému oknu statimovou i rutinní dávku ze stejného oddělení, je zavedena pomocná binární proměnná x . Její vztah vůči proměnným x^S a x^R bude uveden níže v sekci 5.2.2 rovnicí (5.6).

$$x_{j,t} \in \{0, 1\}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T \quad (5.4)$$

5.2.2 Omezení a kriteriální funkce

První omezení zajišťuje, že jedna dávka bude přiřazena právě jednomu časovému oknu v odpovídajícím rozmezí $\{\tilde{r}_j, \dots, \tilde{d}_j - 1\}$. To platí jak pro statimové, tak i pro rutinní vzorky.

$$\begin{aligned}
& \sum_{t=\tilde{r}_j^S}^{\tilde{d}_j^S-1} x_{j,t}^S = 1, \quad \forall j \in J \\
& \sum_{t=\tilde{r}_j^R}^{\tilde{d}_j^R-1} x_{j,t}^R = 1, \quad \forall j \in J
\end{aligned} \tag{5.5}$$

Aby mohlo jedno oddělení odesílat rutinní i statimové vzorky zároveň, je zavedeno následující omezení, které dává do vztahu proměnné x^S a x^R s pomocnou proměnnou x . Pokud je alespoň jedna z proměnných $x_{j,t}^S$ a $x_{j,t}^R$ rovna jedné, pak $x_{j,t} = 1$.

$$\frac{x_{j,t}^S + x_{j,t}^R}{2} \leq x_{j,t}, \quad \forall j \in J, \forall t \in T \tag{5.6}$$

Další omezení je zavedeno na pomocné proměnné x . To zaručuje, že na jedné lince bude jedno časové okno přiřazeno maximálně jednomu oddělení.

$$\sum_{\forall j \in J(l)} x_{j,t} \leq 1, \quad \forall l \in L, \forall t \in T \tag{5.7}$$

Nakonec je zavedena kritériální funkce v následujícím tvaru:

$$\begin{aligned}
& \min \left\{ \alpha \sum_{t \in T} |\bar{v}^S - (w_t^S + \sum_{\forall j} x_{j,t} \cdot v_j^S)|^2 \right. \\
& \left. + \beta \sum_{t \in T} |\bar{v}^R - (w_t^R + \sum_{\forall j} x_{j,t} \cdot v_j^R)|^2 \right\},
\end{aligned} \tag{5.8}$$

kde $\alpha \in \langle 0, 1 \rangle$ a $\beta \in \langle 0, 1 \rangle$ jsou váhovací koeficienty pro statimové a rutinní dávky. Pomocí těchto koeficientů může být upravena míra důležitosti optimalizace statimových dávek vůči rutinním. Počet vzorků, tedy součet pohybu na pozadí w_t^S , respektive w_t^R a velikostí dávek v_j^S , respektive v_j^R přiřazených konkrétním binům, je pro každé časové okno t kritériální funkcí během optimalizace co nejlépe přibližován

k průměrnému počtu vzorků v jednom časovém okně, tedy k parametrům \bar{v}^S a \bar{v}^R pro statimové a rutinní vzorky, pro jejichž výpočet platí následující rovnice.

$$\begin{aligned}\bar{v}^S &= \frac{1}{|T|} \cdot \left(\sum_{\forall j} v_j^S + \sum_{t \in T} w_t^S \right) \\ \bar{v}^R &= \frac{1}{|T|} \cdot \left(\sum_{\forall j} v_j^R + \sum_{t \in T} w_t^R \right)\end{aligned}\tag{5.9}$$

5.3 Zpětné odesílání patron

Mimo toku patron do laboratoře je třeba se zabývat i odesíláním patron zpět na jednotlivá oddělení. V laboratoři ve FNHK je pro zpětný tok instalována stanice potrubní pošty, která na základě dat z čipu patrony odešle patronu zpět na příslušné oddělení. Tato stanice má vstupy pro 3 patrony. Patrony se hromadí u této stanice a personál do ní patrony vkládá, pokud si všimne, že je stanice prázdná. Zpětný tok také zatěžuje systém potrubní pošty, jelikož vždy blokuje linku pro příchozí patrony. Při opravdu velké zátěži potrubní pošty jsou patrony na oddělení distribuovány manuálně personálem.

Základní myšlenka optimalizace zpětného toku spočívá ve vyhrazení časového okna pro vracení všech patron z oddělení na jedné lince. V tuto dobu by se pozastavilo odesílání patron do laboratoře na konkrétní lince a laboratoř by odesílala pouze patrony zpět. Tento koncept je však nerealizovatelný, jelikož na patroně není nikde uvedeno, ze které linky pochází. Bylo by tedy velice náročné třídit patrony podle linek a následně je odesílat v příslušných časových oknech. Proto bylo od optimalizace zpětných toků upuštěno, avšak je rozhodně důležité se touto problematikou do budoucna zabývat pro lepší fungování celého systému.

Kapitola 6

Výsledky

Celý proces analýzy dat a optimalizace byl proveden pomocí programovacího jazyka python verze 3.10.12 v integrovaném vývojovém prostředí PyCharm pro linux na počítači s procesorem Intel® Core™ i5-7200U CPU @ 2.50GHz × 4. Pro práci s daty byly použity knihovny numpy verze 1.24.2 a pandas verze 1.5.3. Pro vytváření grafů byla použita knihovna plotly verze 5.13.0 a pro optimalizační algoritmus byl použit software Gurobi pro python, tedy knihovna gurobipy verze 11.0.0.

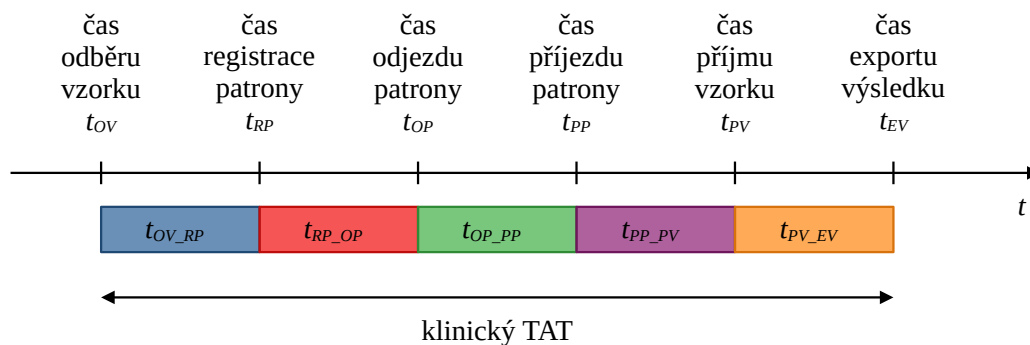
V této kapitole budou popsány nejprve výsledky mapování a následné analýzy dílčích časů klinického TATu. Na data bude nahlíženo nejprve z pohledu jednotlivých potrubních stanic, dále z pohledu linek a nakonec z pohledu času v rámci dne. Také se podíváme na zatížení samotné potrubní pošty. V druhé části budou interpretovány výsledky optimalizačního algoritmu.

6.1 Analýza dat

V této části budou popsány výsledky analýzy dat z FNHK za období květen 2022. Po propojení informací o patronách s informacemi o jednotlivých vzorcích je k dispozici 34 401 záznamů a nad těmito vzorky je provedena analýza zatížení potrubní pošty z pohledu potrubních stanic, linek a změny dílčích časů klinického TATu v závislosti na denní hodině. Pro jednodušší popis výsledků jsou zavedeny následující veličiny jednotlivých časových rozdílů:

- t_{OV_RP} – časový rozdíl mezi časem registrace patrony a časem odběru vzorku,
- t_{RP_OP} – časový rozdíl mezi časem odjezdu patrony a časem registrace patrony,
- t_{OP_PP} – časový rozdíl mezi časem příjezdu patrony a časem odjezdu patrony,
- t_{PP_PV} – časový rozdíl mezi časem příjmu vzorku a časem příjezdu patrony,
- t_{PV_EV} – časový rozdíl mezi časem exportu výsledku a časem příjmu vzorku.

Pro přehlednost jsou tyto časové rozdíly vyobrazeny na obrázku 6.1. Zároveň jednotlivé barvy korespondují s barvami použitými v grafech vyobrazených níže.



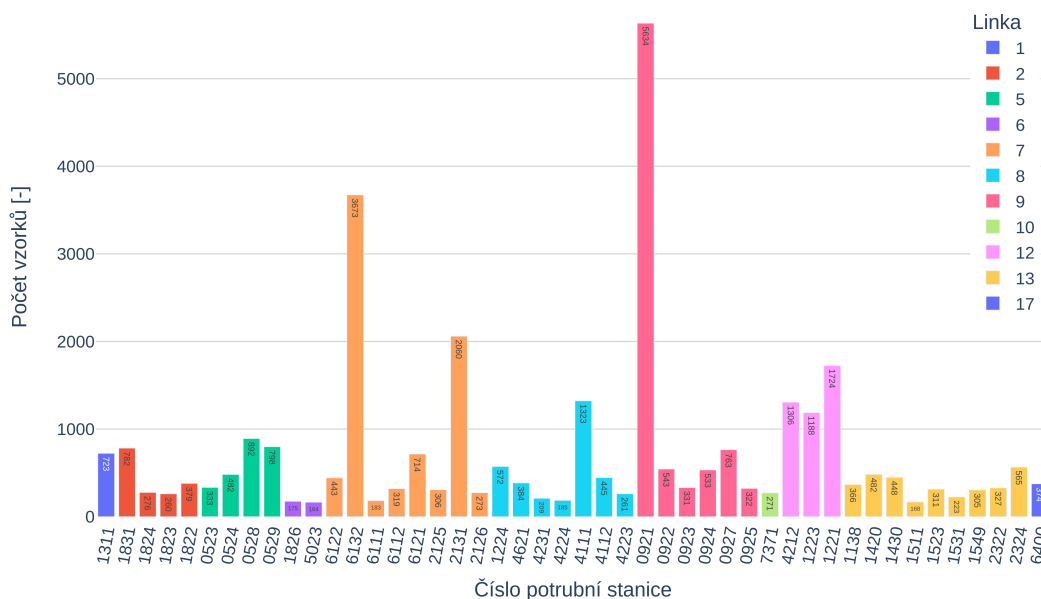
Obrázek 6.1: Zavedení časových pojmů

Pro analýzu a interpretaci výsledků jednotlivých časových rozdílů jsou použity statistické charakteristiky – medián, 80% percentil a 95% percentil. Tyto hodnoty jsou vždy vypočteny ze všech možných časových rozdílů, které jsou k dispozici. Po mapování vzorků na patrony nemusí být pro jeden vzorek dostupných všech 5 časových rozdílů. Statistické charakteristiky jsou tedy počítány jen z těch hodnot, které jsou známe. Pro větší přehlednost grafů jsou zavedeny tyto veličiny odpovídající statistickým charakteristikám:

- med – medián,
- $q80$ – 80% percentil,
- $q95$ – 95% percentil.

6.1.1 Z pohledu potrubních stanic

Nejprve se podíváme na celkový počet vzorků odeslaný z jednotlivých potrubních stanic za celé období. Na obrázku 6.2 jsou na ose x vyneseny jednotlivé potrubní stanice uspořádané podle příslušné linky, která je zobrazena rozdílnou barvou. Na ose y jsou vyneseny počty vzorků odeslané za celé období. V grafu jsou pro přehlednost a dobrou čitelnost uvedeny pouze potrubní stanice s počtem odeslaných vzorků větším než 150. Z celkových 76 potrubních stanic je v grafu uvedeno pouze 46. Z grafu je vidět, že nejvíce vzorků odeslala potrubní stanice 0921 – PIO – OAP – odběry s počtem vzorků 5 432. Druhou nejvytíženější potrubní stanicí je stanice s číslem 6132 – IV. interní klinika – hematologická ambulance 2. NP s celkovým počtem vzorků 3 495.

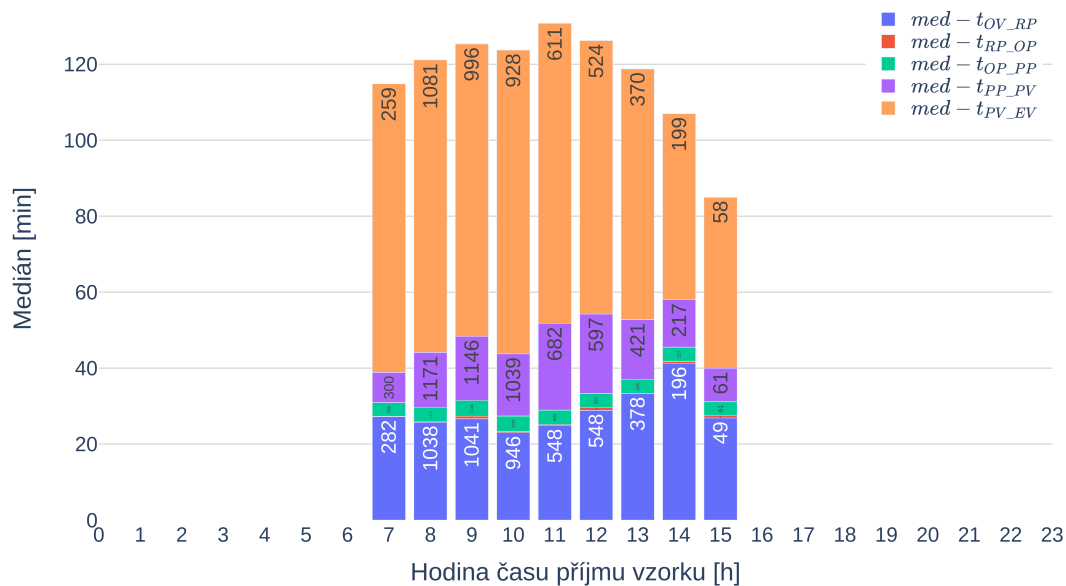


Obrázek 6.2: Počet použitých dat pro vybrané stanice potrubní pošty

Stanice 0921 – PIO – OAP – odběry je kromě nejvyšší vytíženosti také výjimečná tím, že čas odběru vzorku není zaznamenáván ručně, ale pomocí čtečky čárových kódů. Tou je do systému zaznamenán při odběru vzorku personálem. Proto jsou u těchto vzorků na rozdíl od vzorků z ostatních oddělení časy odběrů přesné. Na obrázku 6.3 jsou vyobrazeny mediány dílčích časů transportu vzorků z tohoto oddělení. Vzorky z celého období jsou seskupeny nejprve podle hodiny času příjmu vzorku t_{PV} , jelikož tento údaj je pro všechny vzorky nejpřesnější, a obdobně budou zobrazeny i další grafy v této kapitole. Po seskupení vzorků je u každé skupiny vypočítán medián ze všech existujících záznamů časových rozdílů. Jak bylo dříve zmíněno

pro jeden vzorek nemusí být dostupná informace o všech šesti časových značkách, proto nemusí být známo všech pět časových rozdílů. V grafu je proto počet časových rozdílů, ze kterých byl medián vypočten, uveden vždy ve sloupci představující konkrétní medián.

Oddělení na této potrubní stanici odesílají vzorky pouze mezi přibližně 6. a 15. hodinou. Proto je na tomto grafu jednoduše pozorovatelné seskupení vzorků podle času odběru vzorku t_{OV} . Vzorky přijaté mezi 7. a 8. hodinou ránní mají medián rozdílů mezi časem odběru vzorku t_{OV} a příjmu vzorku t_{PV} zhruba 40 minut. Což odpovídá začátku odběrů po 6. hodině ránní. Medián klinického TATu se u tohoto oddělení pohybuje kolem 2 hodin. U 14. hodiny pozorujeme vyšší t_{OV_RP} , přestože vzorků je pětina oproti 8. hodině, což může být způsobeno pauzou na oběd a tedy nižším počtem personálu kolem 13. hodiny.



Obrázek 6.3: Mediány dob zpracování vzorků v závislosti na hodině příjmu vzorku pro stanici 0921 – PIO – OAP – odběry

6.1.2 Z pohledu linek

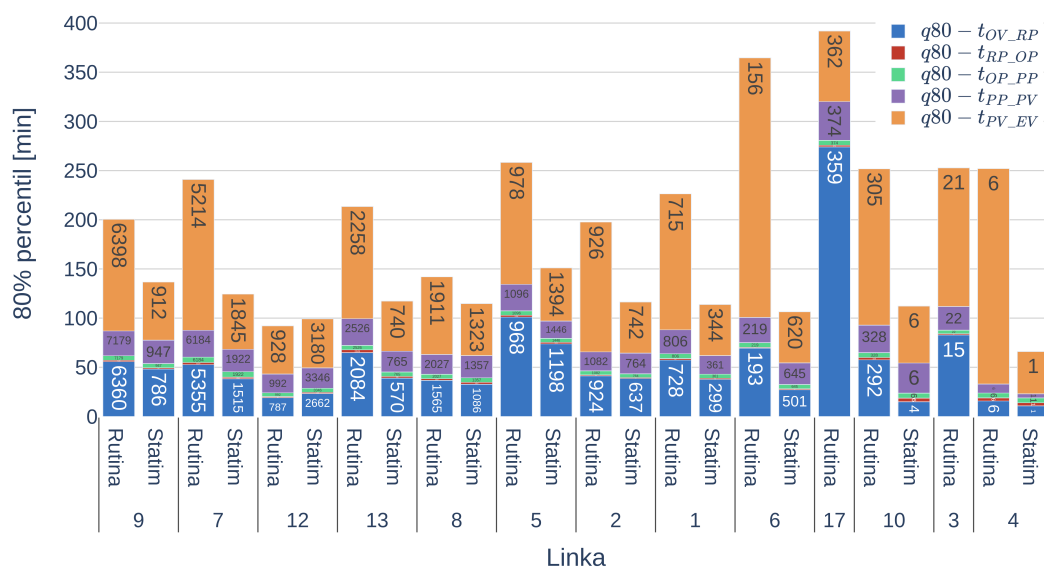
Nyní se podíváme na jednotlivé dílčí časy TATů z pohledu linek s rozlišením priority vzorků. Na obrázku 6.4 jsou v grafu zobrazeny 80% percentily jednotlivých časů. Vzorky jsou shlukovány na základě stejné linky a priority statim/rutina a vyneseny na ose x. Zároveň jsou zleva doprava seřazeny sestupně podle počtu vzorků na

jednotlivých linkách. Čísla ve sloupcích jednotlivých vyobrazených 80% percentilů udávají počet hodnot, ze kterých byl percentil vypočítán.

Z grafu lze pozorovat, že téměř všechny linky mají menší 80% percentil klinického TATu pro statimy. To je způsobeno především rozdílem v $q80 - t_{PV_EV}$ mezi staimem a rutinou. Jedinou výjimku tvoří linka 12, kde mají statimy klinický TAT vyšší o přibližně 7 minut. Tento rozdíl je způsoben především rozdílem v $q80 - t_{OV_RP}$, který je pro statimy přibližně o 4 minuty větší. Jelikož je linka 12 využívána oddělením urgentní medicíny, převažují statimové vzorky nad rutinními více než třikrát. Zároveň má tato linka nejlepší 80% percentil klinického TATu, což je dobré, vzhledem k typu vzorků, které přepravuje.

Nad všechny linky vyčnívá linka 17 především kvůli vysokému $q80 - t_{OV_RP}$. Na této lince je pouze stanice 6400 pro transfuzní oddělení. Na tomto oddělení jsou žádanky vypisovány dlouho před samotným odběrem, proto je 80% percentil pro t_{OV_RP} tak vysoký. Oddělení zároveň neposílá žádné statimové vzorky.

Z uvedeného grafu to není jednoznačně patrné, avšak linka 7 má oproti ostatním linkám v průměru o minutu větší 80% percentil t_{OP_PP} (linka 7 – 5,6 minut, ostatní linky okolo 4,2 minuty). Pravděpodobně z toho důvodu, že je linka 7 nejdelší, a proto musí patrony urazit největší vzdálenost.

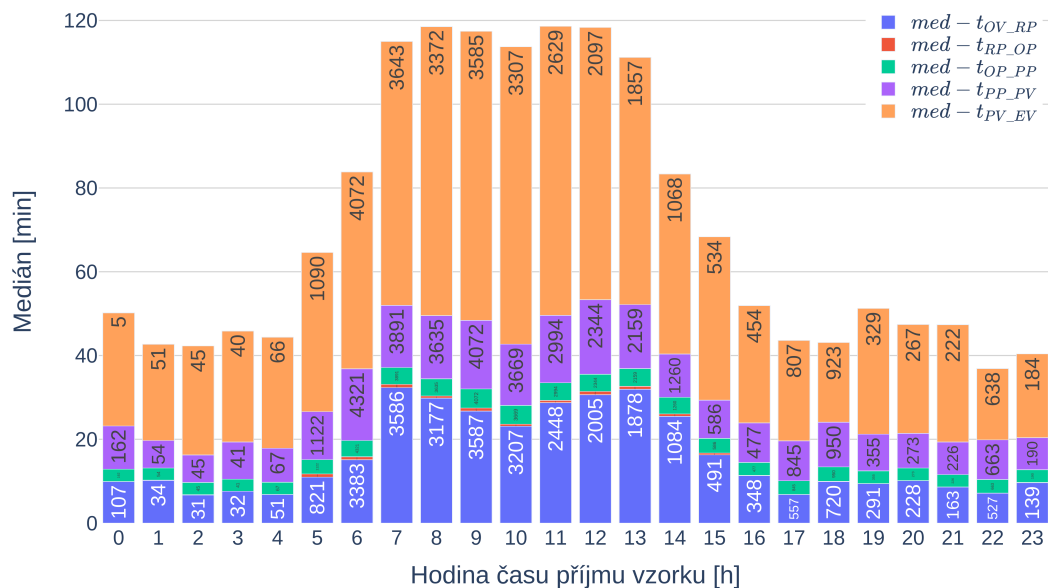


Obrázek 6.4: 80% percentil dob zpracování vzorků pro jednotlivé linky s rozlišením statim/rutina – seřazeno podle četnosti vzorků

6.1.3 Z pohledu času

V této sekci se podíváme na statistické charakteristiky v závislosti na denní hodině. Podobně jako na obrázku 6.3 jsou vzorky z celého období seskupeny podle času příjmu vzorku t_{PV} a následně je vypočtena statistická charakteristika pro všech 5 časových rozdílů. Počet vzorků, ze kterých byla charakteristika vypočtena je uveden ve sloupci odpovídajícímu příslušné statistické charakteristice.

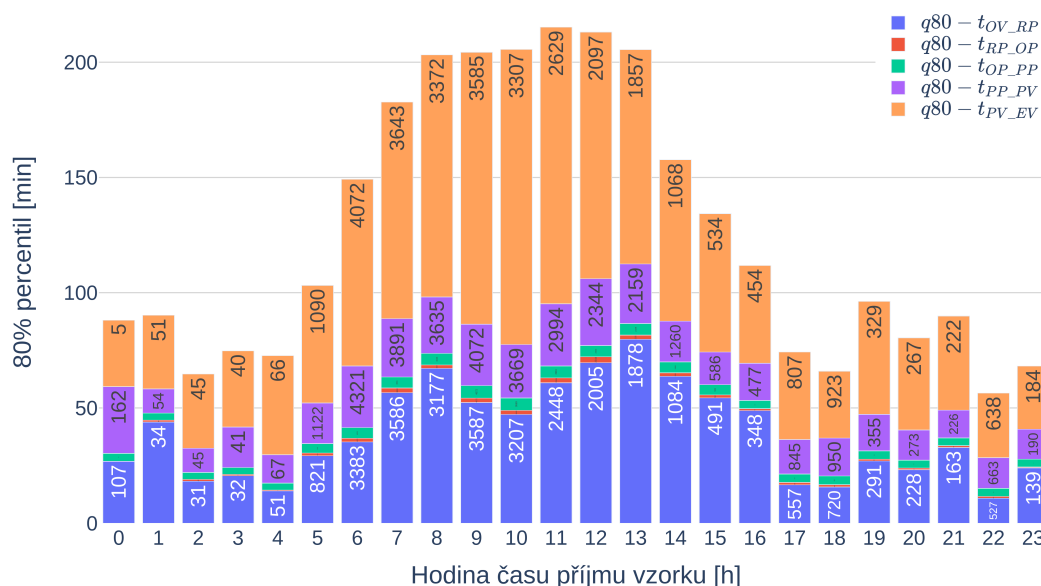
Na obrázku 6.5 jsou vyobrazeny mediány dílčích časů. Lze zde pozorovat ranní špičku, která nastupuje kolem 5. hodiny. Zvýší se počet vzorků a zároveň se značně prodlouží medián klinického TATu, který se mimo špičku pohybuje okolo 45 minut a ve špičce okolo 115 minut. Během špičky dochází ke zvětšení mediánů všech časových rozdílů. Medián t_{OV_RP} se prodlouží z 10 minut na necelou půl hodinu, což je značně ovlivněno ručním zápisem času odběru vzorku. V tomto časovém rozdílu je také zahrnuta doba, kdy odebraný vzorek v patroně čeká u stanice potrubní pošty, dokud nebude stanice volná. Tato doba může být ve špičce značně vyšší. Medián doby transportu patrony t_{OP_PP} se zvětší z 3 minut na 4 minuty, to je pravděpodobně způsobeno větší vytížeností celého systému potrubní pošty, proto patrony déle čekají v karuselu, než budou moci být odeslány do cílové stanice. Medián příjmu vzorku t_{PP_PV} se prodlouží z 8 minut na 15 minut, pravděpodobně z důvodu zahlcenosti personálu laboratoře. Nakonec medián zpracování vzorku t_{PV_EV} se prodlouží z necelých 30 minut na přibližně 65 minut. To může být způsobeno nejen zahlceností



Obrázek 6.5: Mediány dob zpracování vzorků v závislosti na hodině příjmu vzorku

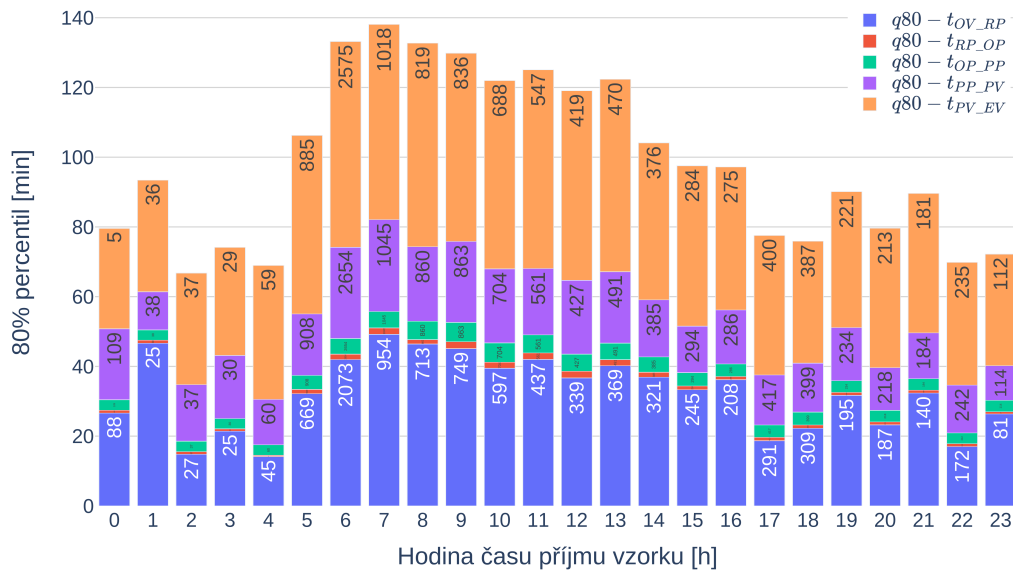
laboratoře, ale také typem analýz, které jsou v různou denní dobu prováděné. Mimo špičku – především v nočních hodinách – jsou posílány rutinní vzorky minimálně a jsou prováděny především analýzy statimových vzorků.

Na obrázku 6.6 jsou obdobně zobrazeny 80% percentily dílčích časů transportu vzorku v čase. Ve špičce se 80% percentil klinického TATu pohybuje okolo 200 minut a mimo špičku okolo 75 minut. Okolo 13. hodiny je 80% percentil t_{OV_RP} větší než během ranních hodin, přestože počet vzorků je zhruba poloviční. To může být způsobeno například delším čekáním, než se naplní patrona k odeslání, nebo obědovou pauzou a tedy nižším počtem personálu. Obdobně to platí i pro 80% percentil t_{PP_PV} ve 12 hodin oproti ranním hodinám, avšak zde není rozdíl tak velký. Na tento výkyv má největší vliv pravděpodobně obědová pauza.



Obrázek 6.6: 80% percentily dob zpracování vzorků v závislosti na hodině příjmu vzorku

Nyní se podíváme na 80% percentily dílčích časů zpracování pouze statimových vzorků, které je zobrazeno na obrázku 6.7. U statimových vzorků je mnohem menší rozdíl 80% percentilu klinického TATu mezi denními hodinami (přibližně 125 minut) a nočními hodinami (přibližně 75 minut). Obecně jsou 80% percentily rozdílů časů mnohem menší, než u stejné charakteristiky vypočtené ze všech vzorků. To jen potvrzuje předpoklad, že jsou statimové vzorky zpracovávány prioritně. Mezi 6. a 13. hodinou se 80% percentily dílčích časů o mnoho neliší, přestože s časem klesá počet zpracovávaných vzorků z přibližně 2 600 na 500. Pravděpodobně se celý systém zpracování vzorků vzpamatovává z velkého náporu okolo 6. hodiny až do 13. hodiny, kdy začíná 80% percentil klinického TATu opět klesat.

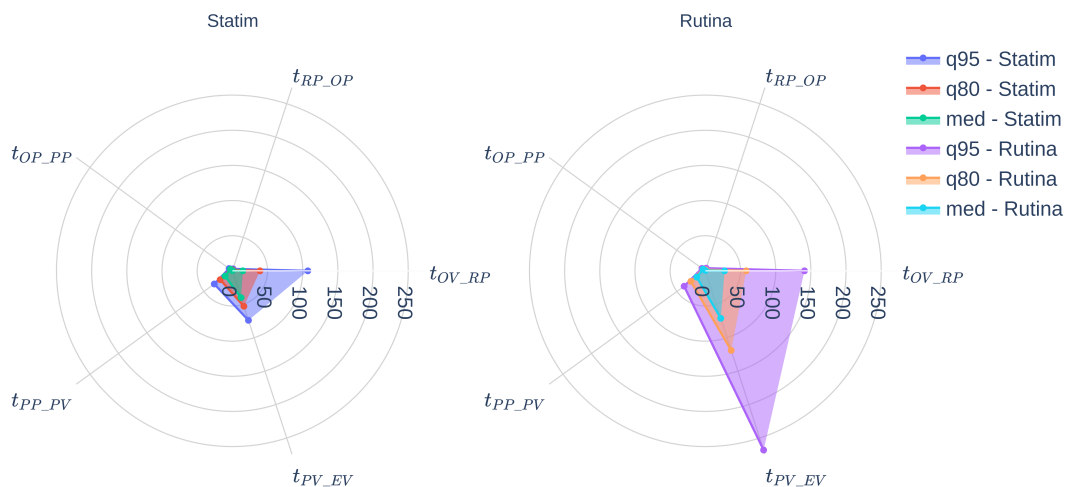


Obrázek 6.7: 80% percentily dob zpracování STATIMOVÝCH vzorků v závislosti na hodině příjmu vzorku

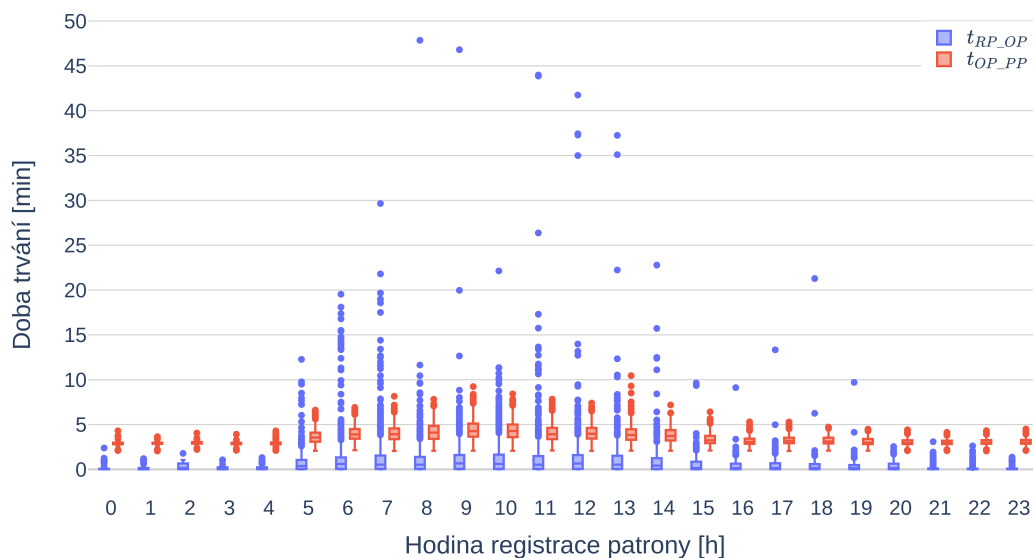
Pro jednoduché porovnání mezi statistickými charakteristikami pro statimové a rutinní vzorky jsou na obrázku 6.8 zobrazeny radarové grafy. Na pěti osách jsou postupně vyneseny charakteristiky pro všechny časové rozdíly v protisměru hodinových ručiček počínaje vodorovnou osou. Tyto statistické charakteristiky jsou počítány ze všech statimových, respektive rutinních vzorků. U všech 3 charakteristik je vidět jednoznačný rozdíl mezi statimovými vzorky, které jsou zpracovávány mnohem kratší dobu, než vzorky rutinní.

U statimových vzorků je součet všech pěti 80% percentilů časových rozdílů roven přibližně 120 minutám. To znamená, že pro 80 % statimových vzorků uplyne od odběru vzorku do exportu výsledku maximálně 120 minut. Největší podíl v této sumě je zastoupen 80% percentilem t_{PV_EV} s hodnotou 53 minut. Spolu s $q80 - t_{PP_PV}$ dávají dohromady 75 minut, což odpovídá maximální době, kterou 80 % statimových vzorků od času příjezdu patrony stráví v laboratoři. U 95% percentilu je naopak největší t_{OV_RP} . To je pravděpodobně způsobeno ručním předepisováním časů odběru vzorku, jelikož se tato doba blíží ke 120 minutám.

Pro rutinní vzorky je součet všech pěti 80% percentilů časových rozdílů roven přibližně 210 minutám. U 95% percentilu se značně zvětší t_{OV_RP} i t_{PV_EV} . První z těchto charakteristik je pravděpodobně ovlivněna ručním předvyplňováním žádánek. Druhá charakteristika se blíží k 270 minutám pravděpodobně kvůli vysokým časům některých rutinních analýz.



Obrázek 6.8: Radarové grafy s různými statistickými charakteristikami dob zpracování vzorků



Obrázek 6.9: Čekací doba a doba transportu patron potrubní poštou v závislosti na hodině registrace patrony

Z radarových grafů je patrné, že nejméně času z klinického TATu stráví vzorky v systému potrubní pošty. Je třeba mít na paměti, že stanice potrubní pošty nepojmou k registraci více než jednu patronu, proto se doba, kdy plná patrona čeká vedle stanice potrubní pošty, nezapočítává do času stráveného v potrubní poště. Pro

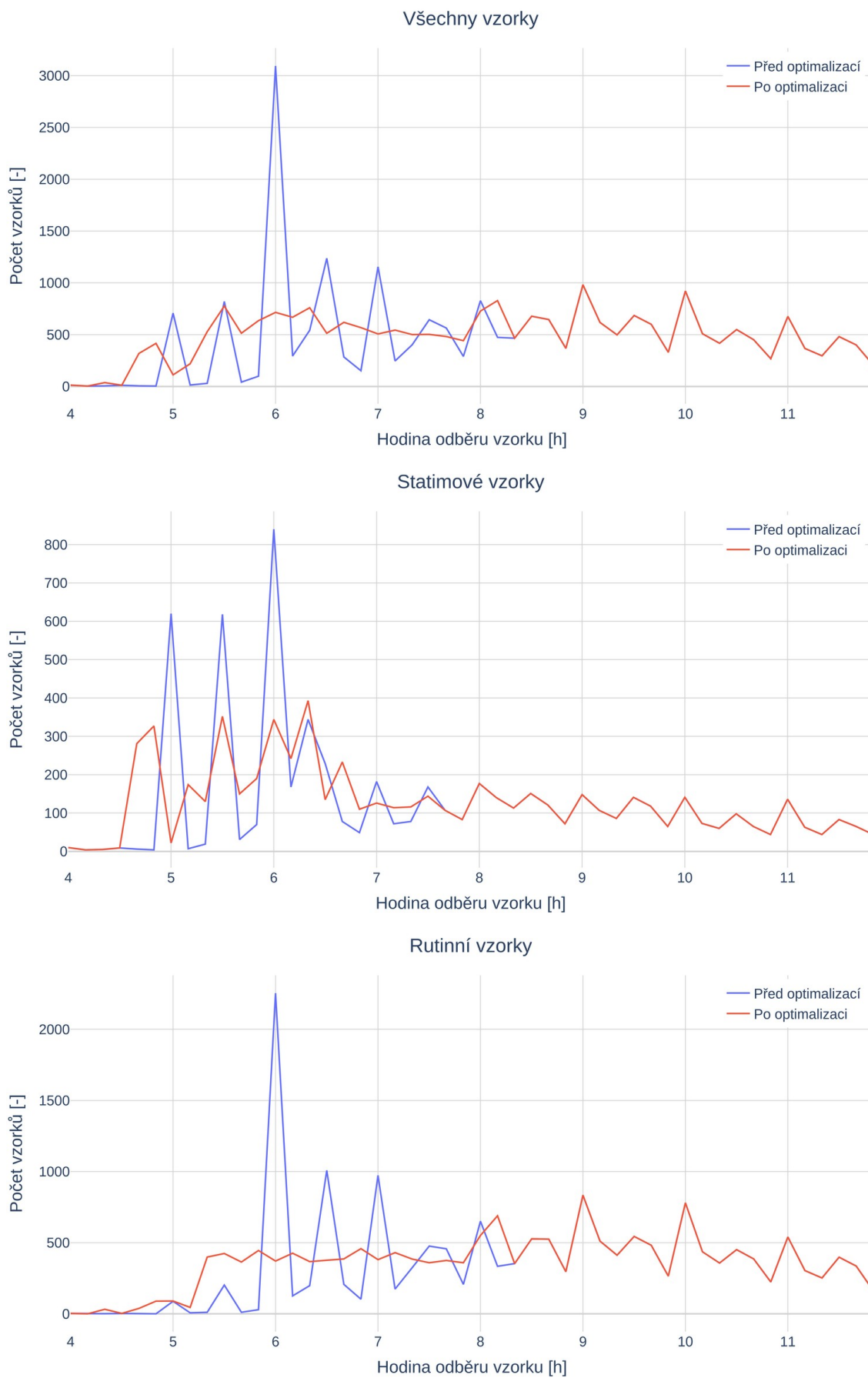
pozorování časových rozdílů t_{RP_OP} a t_{OP_PP} v závislosti na denní hodině registrace patrony byl vytvořen graf na obrázku 6.9. Tento graf byl vypočten ze všech 11 512 patron putujících do laboratoře ÚKBD za celé období.

Z boxplotů je patrné, že kvartily čekací doby t_{RP_OP} i doby transportu patrony t_{OP_PP} se pohybují na velmi nízkých hodnotách v řádu jednotek minut. Tyto časy jsou vůči klinickému TATu zanedbatelné. Avšak především u čekací doby t_{RP_OP} se během dne vyskytují odlehle hodnoty, které se pohybují od 5 minut až k 48 minutám. I zde se projevuje zvýšená zátěž potrubní pošty během dne. Kvartil doby čekání patrony t_{RP_OP} se zvětší z méně než minuty na 1,5 minut. Pro dobu transportu t_{OP_PP} se během dne kvartil zvýší z 3 minut na 4,5 minuty.

6.2 Optimalizace

Pro simulaci rozložení zátěže potrubní pošty v ranní špičce kolem 6. hodiny byl spuštěn optimalizační algoritmus podle modelu popsaného v kapitole 5. Koeficienty určující velikost okna, do kterého může být dávka přiřazena, byly zvoleny jako nejmenší koeficienty, pro které byl optimalizační model řešitelný. Pro statimové dávky byl koeficient $c^S = 2$ a pro rutinní dávky $c^R = 4$. Velikost časového intervalu pro přiřazení statimové, respektive rutinní dávky byla tedy větší o 20, respektive 40 minut na každé straně oproti detekovanému oknu. Váhovací koeficienty α a β byly ponechány na hodnotě 1. Jelikož bylo pro optimalizaci zvoleno pouze časové pásmo mezi 4:00 a 12:00, bylo celkem využito pouze 23 379 vzorků. Předzpracování dat detekovalo 38 statimových dávek s celkovým objemem 2 772 vzorků a 50 rutinních dávek s celkovým objemem 4 831 vzorků. Po odečtení vzorků odpovídajících detekovaným dávkám zůstalo 3 384 statimových a 12 392 rutinních vzorků jako data na pozadí.

Na prvním grafu obrázku 6.10 jsou modrou křivkou vyneseny počty vzorků za celé období v závislosti na čase odběru vzorku před optimalizací a červenou křivkou po optimalizaci. Z grafu je vidět, že všechny dávky byly detekované do 8:20, proto jsou po tomto čase obě křivky identické. V čase 6:00 pozorujeme vysoký nárůst počtu vzorků před optimalizací. To jen potvrzuje předpoklad, že jsou žádanky vypisovány dopředu s časem odběru vzorku 6:00 bez ohledu na to, kdy jsou reálně vzorky odebrány. Obdobně to platí vždy pro celé a půl hodiny, pravděpodobně jsou ručně zaznamenávané časy odběru vzorků takto zaokrouhlovány.



Obrázek 6.10: Výsledky optimalizace

Z křivek je jednoznačné, že optimalizace přinesla rovnoměrnější rozložení vzorků v čase. Pro obě křivky byla spočítána směrodatná odchylka s , ze které byl pomocí průměrného počtu vzorků μ spočítán variační koeficient v podle rovnice (6.1). Data před optimalizací měla směrodatnou odchylku $s_{před} = 492,60$ a variační koeficient $v_{před} = 1,01$, pro data po optimalizaci vyšlo $s_{po} = 227,82$ a $v_{po} = 0,47$. Méně než poloviční variační koeficient pro data po optimalizaci dokazuje zřejmé zlepšení rozložení vzorků v čase.

$$v = \frac{s}{\mu} \tag{6.1}$$

Na druhém, respektive třetím grafu obrázku 6.10 jsou obdobně vyneseny počty vzorků před a po optimalizaci pro statimové, respektive rutinní vzorky. U statimových vzorků nedošlo k úplnému vyhlazení křivky, a to pravděpodobně z důvodu menší velikosti časových intervalů, do kterých může být konkrétní dávka přiřazena. Naopak u rutinních vzorků pozorujeme značné rozprostření vzorků během ranní špičky.

Pokud by se na principu tohoto optimalizačního modelu přiřadilo jednotlivým oddělením časové okno pro odesílání vzorků a oddělení by tato okna respektovala, podařilo by se rozprostřít zátěž potrubní pošty během ranní špičky.

Kapitola 7

Závěr

Tato práce se věnovala tématu transportu a analýzy vzorků v nemocničním prostředí z pohledu času. Pro pacienta je nesmírně důležitý celkový klinický TAT, který je v současnosti značně opomíjený. Ve většině případů je zkoumán především laboratorní TAT, který o celkovém TATu téměř nic nevyovídá.

Analýza dat byla provedena nad záznamy z nemocnice FNHK, která pro transport vzorků do laboratoře využívá systém potrubní pošty a u vzorků rozlišuje dvojí prioritu. Nejprve byla zpracována data o vzorcích a patronách za období květen 2022 a z těchto dat byly následně provedeny různé analýzy. Z těch jasně vyplývá, že největší slabinou celého systému je nespolupráce mezi dílčími částmi procesu zpracování vzorků. Na odděleních je nejvíce vzorků odebíráno a následně odesíláno potrubní poštou kolem 6. hodiny ranní. Tento nápor zahltí celý systém, kterému trvá dalších přibližně 7 hodin, než se z tak velkého objemu vzorků vzpamatuje. Potrubní pošta má oddělený systém od zbytku celého procesu. Čekací a transportní doby patron jsou vesměs dobré, avšak existují i patrony, které na odjezd čekají více než 10 minut. Laboratoř zkoumá především laboratorní TAT, tedy dobu od příjmu vzorku po export výsledku do laboratorního systému. Do tohoto času však nezahrnuje čas potřebný pro přijetí vzorku a dobu, než je výsledek analýzy zobrazen lékařem, na jehož základě jsou provedeny další diagnostické kroky. Časové prodlevy v dílčích částech se postupně nasčítají, což vede k tomu, že 80% percentil klinického TATu se během dne pohybuje okolo 200 minut. Z těchto poznatků vyplývá, že v systému chybí harmonizační prvek na nemocniční úrovni, který by se staral o celkový tok vzorků od odběru až po zobrazení výsledku lékařem.

Na základě toho vznikl prototyp optimalizace, který by mohl pomoci zefektivnit celý proces. Princip spočívá v přiřazení časových oken jednotlivým oddělením, ve kterých by měly být vzorky prioritně odesílány. Výsledky ukazují, že by se díky tomu měla rozložit zátěž systému okolo ranní špičky. V tento okamžik je na místě hledání způsobu, jak takový postup integrovat v nemocnici. Naprosto klíčová je však spolupráce jednotlivých oddělení se systémem potrubní pošty a laboratoří, aby bylo dosaženo kýžených výsledků.

Další prostor pro zefektivnění celkového procesu transportu vzorků systémem potrubní pošty se nachází v zlepšení zpětného odesílání patron z laboratoře na domácí oddělení. Za současného stavu je však ve FNHK nemožné tento problém řešit, jelikož zde není kapacita pro manuální třídění patron.

Bibliografie

1. FATHIL, M. F. M.; MD ARSHAD, M. K.; GOPINATH, Subash C. B.; HASHIM, U.; ADZHRI, R.; AYUB, R. M.; RUSLINDA, A. R.; NUZAIHAN M.N., M.; AZMAN, A. H.; ZAKI, M.; TANG, Thean-Hock. Diagnostics on acute myocardial infarction: Cardiac troponin biomarkers. *Biosensors and Bioelectronics* [online]. 2015, roč. 70, s. 209–220 [cit. 2024-05-24]. ISSN 0956-5663. Dostupné z DOI: 10.1016/j.bios.2015.03.037.
2. BADRICK, Tony. Evidence-Based Laboratory Medicine. *The Clinical Biochemist Reviews* [online]. 2013, roč. 34, č. 2, s. 43–46 [cit. 2024-05-24]. ISSN 0159-8090. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC3799218/>.
3. TSAI, Eline R.; TINTU, Andrei N.; DEMIRTAS, Derya; BOUCHERIE, Richard J.; DE JONGE, Robert; DE RIJKE, Yolanda B. A critical review of laboratory performance indicators. *Critical Reviews in Clinical Laboratory Sciences*. 2019, roč. 56, č. 7, s. 458–471. ISSN 1040-8363, ISSN 1549-781X. Dostupné z DOI: 10.1080/10408363.2019.1641789.
4. BREIL, Bernhard; FRITZ, Fleur; THIEMANN, Volker; DUGAS, Martin. Mapping Turnaround Times (TAT) to a Generic Timeline: A Systematic Review of TAT Definitions in Clinical Domains. *BMC Medical Informatics and Decision Making*. 2011, roč. 11, č. 1, s. 34. ISSN 1472-6947. Dostupné z DOI: 10.1186/1472-6947-11-34.
5. GOSWAMI, Binita; SINGH, Bhawna; CHAWLA, Ranjna; GUPTA, V. K.; MALLIKA, V. Turn Around Time (TAT) as a Benchmark of Laboratory Performance. *Indian Journal of Clinical Biochemistry*. 2010, roč. 25, č. 4, s. 376–379. ISSN 0970-1915, ISSN 0974-0422. Dostupné z DOI: 10.1007/s12291-010-0056-4.
6. ISKEN, Mark W.; LITTIG, Steven J. Simulation Analysis of Pneumatic Tube Systems. *Journal of Medical Systems*. 2002, roč. 26, č. 1, s. 9–19. ISSN 01485598. Dostupné z DOI: 10.1023/A:1013034719088.

7. FERNANDES, Christopher M.B.; WORSTER, Andrew; EVA, Kevin; HILL, Stephen; MCCALLUM, Catherine. Pneumatic Tube Delivery System for Blood Samples Reduces Turnaround Times Without Affecting Sample Quality. *Journal of Emergency Nursing*. 2006, roč. 32, č. 2, s. 139–143. ISSN 00991767. Dostupné z DOI: 10.1016/j.jen.2005.11.013.
8. SUCHSLAND, Juliane; WINTER, Theresa; GREISER, Anne; STREICHERT, Thomas; OTTO, Benjamin; MAYERLE, Julia; RUNGE, Sören; KALLNER, Anders; NAUCK, Matthias; PETERSMANN, Astrid. Extending laboratory automation to the wards: effect of an innovative pneumatic tube system on diagnostic samples and transport time. *Clinical Chemistry and Laboratory Medicine (CCLM)*. 2017, roč. 55, č. 2, s. 225–230. ISSN 1437-4331, ISSN 1434-6621. Dostupné z DOI: 10.1515/cc1m-2016-0380.
9. HOLLAND, Lorne L.; SMITH, Linda L.; BLICK, Kenneth E. Reducing Laboratory Turnaround Time Outliers Can Reduce Emergency Department Patient Length of Stay: An 11-Hospital Study. *American Journal of Clinical Pathology*. 2005, roč. 124, č. 5, s. 672–674. ISSN 0002-9173, ISSN 1943-7722. Dostupné z DOI: 10.1309/E9QPVQ6G2FBVMJ3B.
10. STOTLER, Brie A.; KRATZ, Alexander. Determination of Turnaround Time in the Clinical Laboratory: “Accessioning-to-Result” Time Does Not Always Accurately Reflect Laboratory Performance. *American Journal of Clinical Pathology*. 2012, roč. 138, č. 5, s. 724–729. ISSN 0002-9173, ISSN 1943-7722. Dostupné z DOI: 10.1309/AJCPYHBT90QRM8DX.