Univerzita Hradec Králové
Fakulta informatiky a managementu
katedra informatiky a kvantitativních metod

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vert.x jako platforma pro webové aplikace

Autor: Michael Kutý

Vedoucí práce: doc. Ing. Filip Malý, Ph.D.

Hradec Králové, 2014

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny použité prameny a literaturu.

V Kroměříži dne 1. srpna 2014 Michael Kutý

Poděkování

Rád bych zde poděkoval doc. Ing. Filipu Malému, Ph.D. za odborné vedení práce, podnětné rady a čas, který mi věnoval.

Anotace

Bakalářská práce se zaměřuje na problematiku vývoje distribuovaných webových aplikací. Teoretická část práce popisuje architekturu platformy Vert.x a problémy, které tato platforma řeší. V praktické části bude implementovaná malá jednostránková kolaborativní aplikace jejíž jednotlivé části budou rozdistribuované na více instancí aby byla zajištěna vysoká dostupnost. Aplikace se nasadí do dvou referenčních instalací. První do prostředí VirtualBox a druhá v prostředí laboratoře CEPSOS při UHK.

Annotation

EN verze

Obsah

1 Úvod

V současné době existuje nespočet nástrojů(framework[1]) pro vývoj webových aplikací ve spoustě programovacích jazycích. Výběr takového nástroje pak může být pro danou aplikaci klíčový. Vzhledem k faktu, že je s aplikací po celý životní cyklus, může se s časem stát svazujícím a nedostačujícím. Na reimplementaci však již není čas nebo peníze. Většina webových aplikací tak dříve nebo později narazí na na problematiku škálování, kdy je třeba rozložit aplikaci na více serverů ať už pro zajištění vysoké dostupnosti nebo kvůli velké výpočetní náročnosti. Dnes také není nic neobvyklého, že aplikaci najednou začnou navštěvovat tisíce klientů za minutu. Z rychlé a stabilní aplikace se tak může stát často padající aplikace s nepřiměřenou odezvou.

Právě proto, jsem se rozhodl k hlubšímu zkoumání v dané oblasti webových aplikací. V první části bakalářské práce je popsána architektura a jednotlivé technologie, které mě motivovali k hlubšímu studiu platformy Vert.x. V hlavní části práce následuje návrh, implementace a nasazení jednostránkové aplikace. V závěru je pak shrnutí kladů a záporů platformy.

1.1 Cíl a metodika práce

Hlavním cílem práce bude zjištění zda-li se platforma Vert.x hodí pro vývoj distribuovaných webových aplikací. Vytvoření jednoduchého webového editoru pro správu myšlenkových map. Na této jednoduché aplikaci bude demonstrována architektura a nasazení aplikace na více serverů pro zajištění vysoké dostupnosti. Zdrojové kódy včetně návodu na spuštění aplikace jsou umístěny veřejně na serveru Github[2] a na přiloženém médiu.

Je nutné uchopit problematiku platformy Vert.x v širších souvislostech, proto se práce snaží neopomenout všechny technologie, které s Vert.x souvisí, z kterých Vert.x vychází nebo které přímo integruje. V teoretické části bude čtenář seznámen s důležitými filozofiemi, které platforma nabízí.

Cílem teoretické části je tedy popsat jednotlivé části platformy a jejich účel či problém, který řeší. V závěru teoretické části bude platforma srovnána s nástrojem Node.js.

[1] jeho cílem je převzetí typických problémů dané oblasti, čímž se usnadní vývoj tak, aby se návrháři a vývojáři mohli soustředit pouze na své zadání

[2] www.github.com/michaelkuty

Srovnání bude obsahovat test výkonnosti a porovnání vlastností.

V praktické části bude vytvořen editor pro správu a tvorbu myšlenkových map. Tyto mapy bude moci upravovat více uživatelů najednou v reálném čase. Budou popsány a vysvětleny aspekty komunikace v reálném čase včetně samotného nasazení webové aplikace na jednotlivé servery, kde bude prověřena funkčnost distribuovaného provozu aplikace v režimu vysoké dostupnosti.

1.2 Postup a předpoklady práce

Práce předpokládá základní znalost programovacího jazyku Java a JavaScript. Teoretická část se neomezuje pouze na nezbytný popis technologií potřebných k realizaci malé jednostránkové webové aplikace. Představuje stručný pohled na celou platformu Vert.x. Teoretická část může být použita jako odraz k hlubšímu studiu daných technologií. Pro realizaci webové aplikace budou použity pokročilé techniky, které učiní aplikaci ještě více znovupoužitelnou a škálovatelnou. Tyto techniky budou čtenáři vysvětleny podrobným způsobem s použitím ukázek. Práce předpokládá znalost základní terminologie související s programováním obecně. Méně zažité pojmy budou vysvětleny poznámkou pod čarou.

Při vývoji webové aplikace budou použity následující softwarové technologie:

- Java Developement Kit 7: soubor základních nástrojů a knihoven pro běh a vývoj Java aplikací.
- Ubuntu 12.04: operační systém vhodný pro běh Vert.x aplikací
- Vert.x 2.1M3+: platforma pro vývoj webových aplikací
- MongoDB: dokumentové orientovaná NoSQL[3] databáze
- D3.js: framework pro práci s grafy
- JQuery framework pro práci s GUI(Graphical user interface)

[3] databázový koncept, ve kterém datové úložiště i zpracování dat používají jiné prostředky než tabulková schémata tradiční relační databáze

2 Platforma Vert.x

Dnešním trendem internetu jsou real-time kolaborativní aplikace, které drasticky změnily potřeby programátorů, na jednotlivé nástroje. Programátor tak má možnost zvolit si z velké řádky nástrojů mezi než patří například Node.js, Akka či ruby EventMachine. Problémem těchto jinak časem a komunitou prověřených platforem může být fakt, že jsou úzce spjaté s konkretním programovacím jazykem či velmi náročná integrace do již stávající aplikace.

Vert.x je projekt vycházející z Node.js, který jako první framework, pokořil v roce 2010 C10K[1] problém. Obě platformy poskytují asynchronní API, které si je co do zaměření velice podobné. Node.js, jak již název napovídá je napsán v jazyce JavaScript, zatím co Vert.x je implementován v Javě. Vert.x ale není pouhá reimplementace Node.js do jazyka Java. Platforma má svou vlastní unikátní filozofii a terminologii, která je diametrálně odlišná od Node.js.

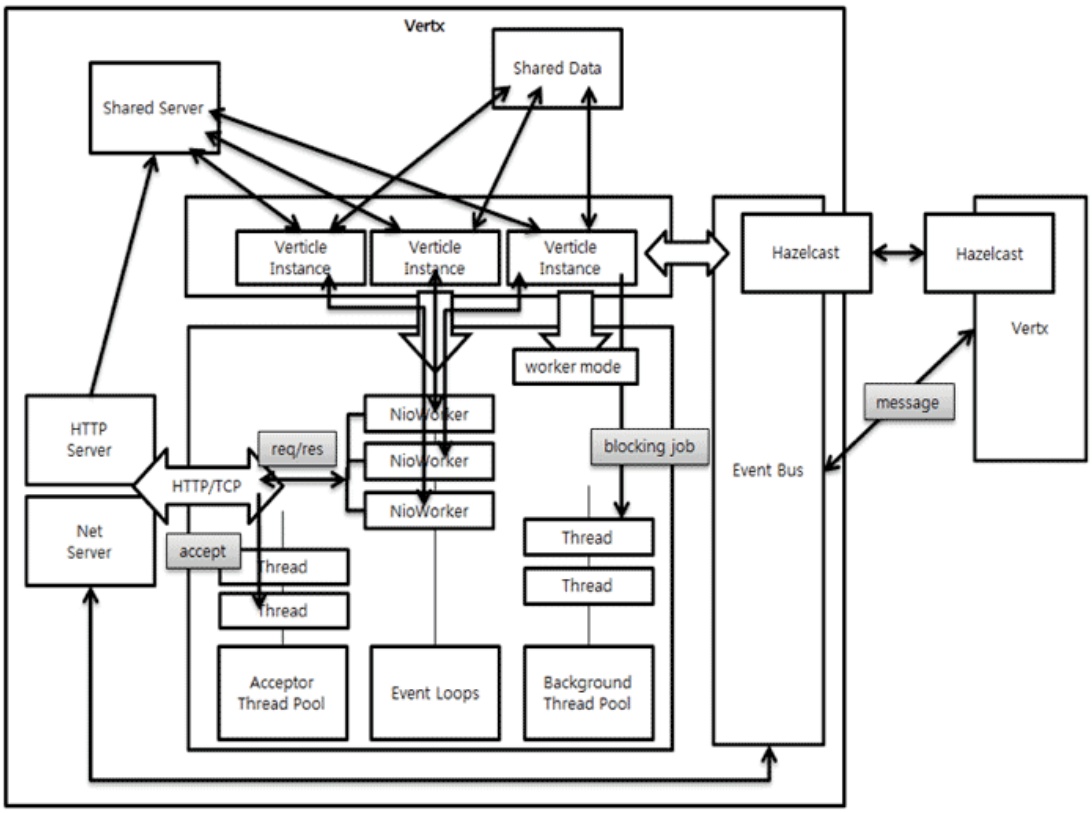
2.1 Historie

Začátek vývoje projektu Vert.x je datován do roku 2011. Tedy rok poté co spatřil světlo světa framework Node.js a za pouhý rok si vydobyl své místo u komunity, která si jej velmi oblíbila. Pravděpodobně největší motivací pro vývoj nové platformy podobné Node.js byla právě oblíbenost Node.js.

Hlavním autorem platformy byl a je Tim Fox, který v době začátku vývoje platformy pracoval ve společnosti VMWare. Tato společnost si vzápětí nárokovala všechny zásluhy Tima Foxe na Vert.x platformu. Právníci společnosti vydaly výzvu, ve které požadovali mimo jiné doménu, veškerý zdrojový kód a účet Tima Foxe na Githubu. Z toho důvodu Tim Fox odešel od společnosti v roce 2012. V témže roce projevila o platformu zájem firma RedHat, která nabídla Timovi pracovní místo, absolutně volnou ruku ve vývoji a vedení projektu[1].

Po několika debatách jak s představiteli společnosti RedHat tak i komunitou došel Tim Fox k názoru, že nejlepší pro budoucí zdravý rozvoj platformy bude přesunutí celé platformy pod nadaci Eclipse Foundation, k čemuž došlo na konci roku 2013. V dnešní

[1] C10K problém řeší otázku: „Jak je možné obsloužit deset tisíc klientů za pomocí jednoho serveru, a to s co možná nejnižším zatížením serveru



Obrázek 2.1: Architektura Vert.x *Jaehong Kim* [8]

době se platforma těší velkému vývoji, který čítá desítky pravidelných přispěvatelů mezi něž patří mimo Tima například také Norman Maurer, který se řadí mezi přední inženýry vyvíjející framework Netty.io a zodpovídá za integraci Netty frameworku do platformy Vert.x.

Na tomto místě by bylo vhodné uvést, že platforma Vert.x letos vyhrála prestižní cenu "Most Innovative Java Technology"v soutěži JAX Innovation awards[2].

2.2 Architektura

Na obrázku 2.1 jsou znázorněny dvě nezávislé Vert.x instance, které spolu komunikují pomocí zpráv. V levé části je blíže zobrazena jedna Vert.x instance, která bude blíže rozebrána v následujících kapitolách.

2.2.1 Jádro

Velikost samotného jádra aplikace nepřekračuje 10Mb kódu v jazyce Java. V současné verzi je jádro platformy koherentní, dobře čitelné a poskytuje málé, ale za to stabilní API. Jak je popsáno v kapitole 2.3, Vert.x se nesnaží umět vše, ale specializuje se na určitou činnost.

Lze jej následně rozšířit o novou funkčnost dokompilovaním balíčků, které lze naleznout v oficiálním repositáři. Pravděpodobnou inspirací byl již zmíněný Node.js respektive NPM[2] u kterého se takováto forma vývoje velice oblíbila. Od doby vzniku této platformy vzniklo nespočet rozšíření, které udělaly z Node.js silný násroj pro rychlý vývoj webových aplikací. Klíčové jsou aspekty jako událostmi řízené programování a neblokující asynchronní model.
Zásadní technologie, které integruje Vert.x.

Netty.io framework pro práci se vstupy a výstupy

Hazelcast In-memory data grid

Netty.io samotný, lze použít pro vývoj webových aplikací stejně dobře jako kterýkoliv jiný nástroj. Jeho specializací však je práce se vstupy a výstupy tzv. IO. V této oblasti poskytuje nízkoúrovňové API, nad kterým Vert.x přidává vyšší míru abstrakce. Druhou technologií, která je pro Vert.x klíčová je popsána v samostatné kapitole 2.2.4.

2.2.2 Asynchronní model

Událostmi řízené programování je podle Tomáše Pitnera[9] základním principem tvorby aplikací s GUI. Netýká se však pouze GUI, je to obecnější pojem označující typ asynchronního programování, kdy je tok programu řízen událostmi na které navěšuje tzv. event handlery[3].

Události nastávají obvykle určitou uživatelskou akcí(klik či pohyb myši, stisk tlačítka). Událostmi řízené aplikace musí být většinou programovány jako vícevláknové (i když spouštění vláken obvykle explicitně programovat nemusíme). Asynchronní někdy také paralelní model je přímo závislý na způsobu implementace samotným programovacím jazykem. Základním pojmem je zde proces, který je vnímán jako jedna instance programu, který je plánován pro nezávislé vykonávání. Naproti tomu Vlákno[4] je posloupnost po sobě jdoucích událostí. V dřívější době nebylo potřeba rozlišovat proces a vlákno, protože proces se dále v aplikaci nedělil. Vytvoření vlákna je poměrně

[2] Node package manager
[3] obslužná rutina události
[4] Označuje v informatice odlehčený proces, pomocí něhož se snižuje režie operačního systému při změně kontextu, které je nutné pro zajištění multitaskingu

drahá a pomalá operace. Což se často obchází vytvořením zásoby uspaných vláken dopředu s nějakým managementem, co vlákna přidává a ubírá dle potřeby. Základním principem Vert.x a jemu podobných frameworků je jedno hlavní vlákno, obvykle pro každý procesor jedno. Takovéto vlákno si pak samo řídí vytváření a přidělování vláken.

Tento model bývá často kritizován, že nutí programátory psát špatně udržovatelný kód, především pak v situacích, kdy je potřeba koordinovat výsledky mezi více handlery. Pro tyhle situace ovšem vznikla řada nástrojů, které se liší podle použitého jazyka.

Samotné jádro Vert.x je implementováno v jazyce Java a pro Vert.x je tedy důležité, jak moc je dobrá implementace paralélního modelu v tomto jazyce. Neznamená to však, že se celá aplikace musí implementovat výhradně v jazyce Java. Jedinému požadavek pro běh Vert.x instancí je přítomnost Java development Kitu ve verzi 1.7 a novější. Tato verze přinesla nespočet vylepšení, pro jejichž výpis zde není místo. Došlo také na přepsání či úpravy v několika zásadních třídách z balíčku java.util.concurrent, což je třída zabývající se prací s multitaskingem a konkurencí.

ExecutorService z balíčku java.util.concurrent

CyclicBarrier[5] z balíčku java.util.concurrent

CountDownLatch z balíčku java.util.concurrent

File z balíčku java.nio

Vylepšený ClassLoader[6] lepší odolnost vůči deadlockům[7]

Více o java.concurrent[6]

Ed Gardoh v roce 2011 ve svém jednoduchém testu[3] prověřil práci s paralelizací úkonů. Z jeho testů vyplývá, že Java 1.7 je až o 40% rychlejší při práci s vlákny nejenom díky nové metodě Fork/Join[5].

Event loop

Základem asynchronního modelu je vlákno, které se stará o všechny události. Když událost dorazí vlákno se postará o to aby byla zavolána ta správná obslužná rutina. Každá Vert.x instance interně obsluhuje malý počet těchto vláken, zpravidla pak jedno na každé procesorové jádro. Těmto vláknům se ve Vert.x komunitě říká *Event Loop*. V komunitách Nginx nebo Node.js se ovšem setkáme spíše s pojmem *Run Loop*. Přeloženo volně do češtiny pak „událostní smyčka". Obrovská nevýhoda takového přístupu je, že

[7] je odborný výraz pro situaci, kdy úspěšné dokončení první akce je podmíněno předchozím dokončením druhé akce, přičemž druhá akce může být dokončena až po dokončení první akce.

nikdy nesmí dojít k blokování takového vlákna. Jakmile k tomu dojde, celá aplikace tzv. zamrzne. Při startu verticlu 2.2.3 je pak vybrán jeden event loop, který ho obsluhuje po celý životní cyklus. Event loop je schopný obsloužit tisíce vertclů v ten samý čas.

Příklady blokujících volání:

- tradiční API (JDBC, externí systémy)
- dlouhotrvající operace (generování apod.)

Multi-reactor pattern

Základ jádra je postaven na tzv. Multi-reactor pattern[11], který vychází z Reactor patternu[4], ten lze charakterizovat několika body:

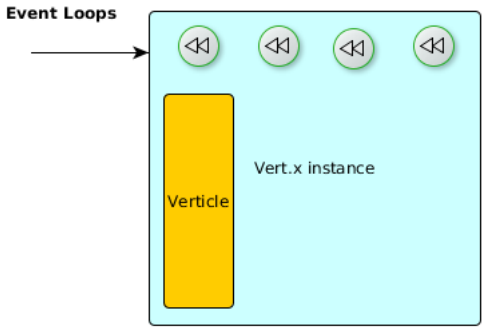
- aplikace je řízena událostmi
- na události se registrují handlery
- vlákno zpracovává události a spouští registrované handlery
- toto vlákno nesmí být blokováno[8]

Multi-reactor pattern[11] se od Reactor patternu liší pouze tím, že může mít více hlavních vláken. Tím přináší Vert.x možnost pohodlně škálovat instance na více procesorových jader. Jak je vidět z obrázku 2.2 na následující straně Vert.x platforma poskytuje více hlavních vláken, zpravidla však jedno hlavní vlákno na jeden procesor. Toho lze snadno docílit pomocí *Runtime.getRuntime().availableProcessors()* o kterém se dozvíte více v kapitole 3.7. Na obrázku 2.3 na straně 9 pak lze vidět situaci čtyř hlavních vláken na čtyři procesorové jádra.

Hybridní model vláken

Platforma Vert.x přišla s inovací v oblasti hlavních vláken a to takovou, že k hlavním *Event loops* přidala další sadu vláken *Background thread pool*, které jsou vyčleněny z hlavní architektury a poskytující samostatnou kapitolu pro škálování aplikace. To lze ostatně vidět na obrázku 2.1 na straně 4. Díky tomu, lze psát specializované moduly nebo verticle tzv. *workery* pro blokující volání či dlouhotrvající operace aniž by nějak omezovaly běh celé aplikace. Více o *workerech* v kapitole 2.2.3.

[8] pokud dojde k zablokování hlavního vlákna dojde k zablokování celé aplikace např.*Thread.sleep(), a další z java.util.concurrent*



Obrázek 2.2: Vert.x instance

2.2.3 Terminologie

Vert.x definuje svou vlastní terminologii, která je specifická jen pro tuhle platformu. Před dalším výkladem je tak nutné porozumět jednotlivým pojmům, které budou vysvětleny v následujících podkapitolách.

Verticle

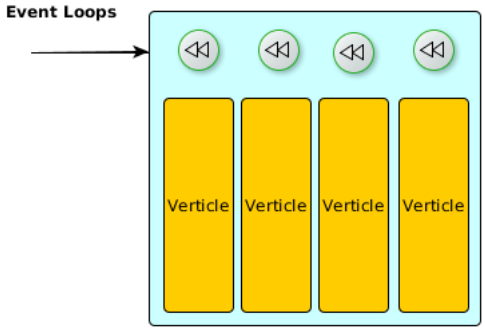
Základní jednotka vývoje a nasazení. verticle si lze představit jako kus kódu v jazyce Java pak jako třídu s hlavní metodou. verticle je tak nejmenší funkční jednotkou Vert.x. verticle lze spouštět samostatně přímo z příkazové řádky podobně jako skript. Každý verticle běží ve vlastním vlákně z čehož plynou výhody, ale také nevýhody. Díky tomu, že každý verticle běží ve vlastním vlákně odpadá nutnost zámků nad proměnnýma, synchronizace vláken. V případě jedno vláknového modelu také odpadají deadlocky. Vzhledem k tomu, že každý verticle má svůj vlastní classloader nemůže tak sdílet statické metody ani hodnoty proměnných s ostatníma. Sdílet data je tak možné pouze dvěma způsoby.

- pomocí Message Queue[13] dále jen MQ
- SharedData object a SharedSet *vertx.sharedData()*

Objekty v SharedData musí být immutable[9]. V dnešní době je řada MQ frameworků přes které lze vést komunikaci u platformy Vert.x však není potřeba externí služba, protože má vlastní Event Bus o kterém pojednává kapitola 2.2.4. Na obrázku 2.2 je vidět jeden verticle v kontextu jedné Vert.x instance. Následuje sumarizace vlastností verticle.

- nejmenší spustitelná jednotka

[9] jakmile jednou takovýto objekt vznikne nejde dále měnit jeho proměnné



Obrázek 2.3: Příklad vertikálního škálování *vertx run HelloWord -instances 4*

- třída / skript
- vykonává neblokující operace
- běží vždy v jednom vlákně
- přímý přístup k API, registrace handlerů, nasazení dalších verticlů

Worker verticle

V standardním verticlu by nemělo nikdy dojít k blokování hlavního vlákna. V dnešní době se bez klasického synchronního volání pravděpodobně neobejdeme, protože většina knihoven a modulů je napsána jako blokující kód. Z toho důvodu je v platformě Vert.x možnost označit verticle jako workera respektive pustit je jako worker verticle. Tím dojde k vyčlenění verticle z asociace na hlavní vlákna a takovému vláknu pak bude přiděleno vlákno z Background thread poolu. Uvnitř takového verticle lze pak vykonávat blokující volání bez blokování celé aplikace. To se v praxi ukázalo jako velice užitečná věc. Bohužel tímto ztrácíme efektivní možnost škálování pro velký počet konkurenčních vláken. Velikost background thread poolu čítá na 20 před připravených vláken. Tento počet lze změnit v konfiguraci Vert.x.

Vert.x instance

Každý verticle běží uvnitř Vert.x instance 2.2 na předchozí straně a každá instance běží ve vlastní JVM instanci. V jedné Vert.x instanci může najednou běžet nespočet Vertclů. Všechny verticle můžou běžet souběžně na jednom serveru. Na jedno serveru může současně běžet mnoho Vert.x instancí v případě clusterování i na více serverech. verticle spolu pak komunikuji pomocí distribuovaného EventBusu.

Moduly

Moduly poskytují možnost zapouzdření a znovupoužitelnost funkcionality. V praxi se mohou moduly skládat z více modulů či verticlů ve více programovacích jazycích. Modly mohou být uloženy v centrálním repozitáři[10] nebo může být využit jakýkoliv jiný repozitář. Repozitáře v kterých hledá Vert.x při startu instance dostupné moduly lze definovat v hlavní konfiguraci Vert.x. Každý modul musí mít svůj deskriptor ve formátu JSON[11]. Jak může vypadat deskriptor je více popsáno v kapitole 3.5.

Výhody plynoucí z použití modulů:

- classpath[12] je zapouzdřený a díky tomu lze moduly pouštět mnohem snáze
- všechny závislosti jsou zapouzdřeny v jediném souboru ve formátu ZIP
- moduly mohou být umístěny v repozitářích
- Vert.x dokáže automaticky stahovat moduly, pokud je nenalezne v lokální instalaci

Typy modulů lze rozdělit do dvou základních skupin, které lze dál rozdělit podle typu určení modulu.

spustitelné mají definovanou hlavní verticle v deskriptoru, takovéto moduly je pak možné spustit jako samostatné jednotky pomocí parametru *runmod* nebo programově *deployModule*

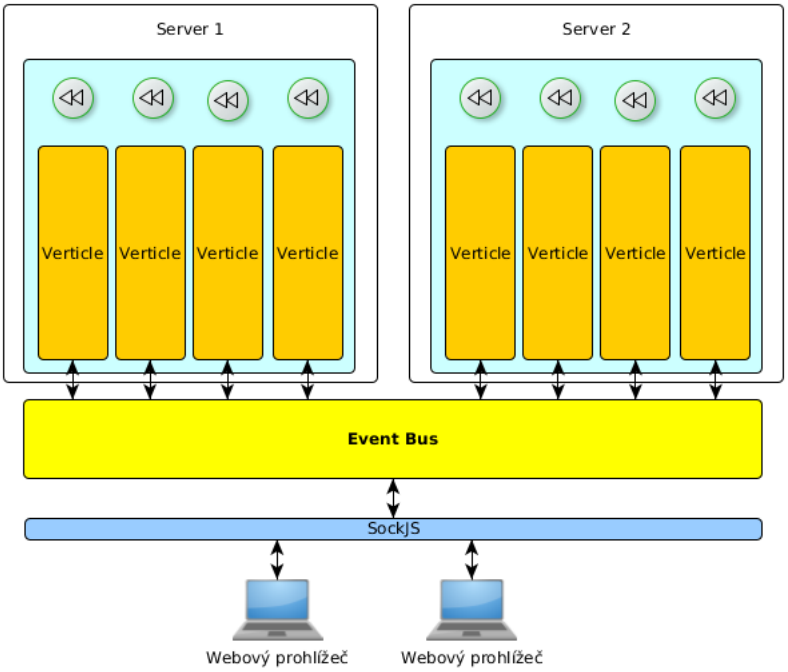
nespustitelné modul nemá specifikovaný hlavní verticle a lze jej použít v jiném modulu použitím metody *includes*

Pro vyčlenění modulu z asociace na event loop stačí přidat parametr *worker: true* do deskriptoru modulu.

2.2.4 Event Bus

Nervový systém celého Vert.x, jehož název lze volně přeložit jako sběrnice událostí. Cílem EventBusu je zpozdředkování komunikace mezi jednotlivými komponentami a vlákny aplikace. Podobně jako při použití externí MQ. Díky faktu, že komponenta Event Bus je implementována přímo v jádru platformy odpadá nutnost používat další knihovny pro práci s MQ a v neposlední řadě také režijní náklady či výpočetní výkon. Jak je vidět na obrázku , komponenta Event Bus je distribuovaná přes všechny instance

[10] http://modulereg.vertx.io/
[11] je odlehčený formát pro výměnu dat
[12] říká JVM, kde má hledat třídy a balíčky



Obrázek 2.4: Event Bus distribuovaný mezi dva servery

v clusteru. Obrovskou výhodou oproti externí MQ je fakt, že lze takovouto komunikaci snadno přemostit ke klientovi na straně webového prohlížeče což je detailněji popsáno v kapitole 3.4.

Základní typy komunikace:

- Point to Point
- Publish/Subscribe

typy zpráv:

- String
- primitivní typy (int, long, short, float double, ..)
- org.vertx.java.core.json.JsonObject
- org.vertx.java.core.buffer.Buffer

Toto je výčet pouze základních typů zpráv, které Vert.x podporuje v jádře. Není ale vůbec problém výčet stávajících typů rozšířit implementací vlastního modulu. Například modul bson.vertx.eventbus[13] rozšíří EventBus o možnost používat mnohem komplexnější typy zpráv jejichž výčet se nachází níže.

[13]https://github.com/pmlopes/mod-bson-io

- java.util.UUID
- java.util.List
- java.util.Map
- java.util.Date
- java.util.regex.Pattern
- java.sql.Timestamp

Mezi doporučené se ovšem řadí JSON, protože je jednoduše serializovatelný mezi jednotlivými programovacími jazyky.

Hazelcast

Jednou z nejdůležitějších architektonických součástí Vert.x je knihovna Hazelcast, kterou tvoří jenom neuvěřitelných 3,1MB kódu v jazyce Java. V platformě Vert.x zaujímá důležité postavení jako In-memory data grid jehož vlastnosti [7] lze podle Ki Sun Song sumarizovat:

- Data jsou distribuovaná a uložená na více serverech ve více geografických lokacích
- Datový model je většinou objektově orientovaný a ne-relační
- Každý server pracuje v aktivním režimu
- Dle potřeby lze přidávat a odebírat servery

Knihovnu Hazelcast lze využít v několika rolích:

- NoSQL databáze v paměti
- Cache[14]
- Data grid
- Zasílání zpráv
- Aplikační škálování
- Clustrování aplikací

[14] specializovaný typ paměti pro krátkodobé ukládání

Hazelcast je tedy typ distribuovaného úložiště, které běží jako vestavěný systém a lze díky němu distribuovat celou aplikaci do více geografických lokací nebo zasílat zprávy mezi jednotlivými komponentami. Vert.x API využívá Hazelcast API a odstiňuje tak programátora od poměrně nízko úrovňové API Hazelcastu.Když je Vert.x spuštěn, Hazelcast je spuštěn v módu vestavěného systému. Odpadá tak režie další služby. Jako nejčastější příklad užití samotného Hazelcastu bývá uváděno ukládání uživatelské session[12]. Hazelcast tedy usnadní práci v situaci, kdy budeme potřebovat uložit uživatelskou session například pro eshop. Mohli bychom využít externí RDBMS tedy databázový server, který by obstarával komunikaci s kleinty a udržoval integritu dat díky, kterému by jsme dosáhli stejného výsledku. S využitím knihovny Hazelcast ovšem odpadá nezbytná režie a monitoring, nemluvě o serverových prostředcích.

2.3 API

Vert.x poskytuje malou sadu metod, kterou lze volat na přímo z jednotlivých verticlů. Funkcionalitu platformy lze jednoduše rozšířit pomocí modulů, které po zveřejnění do centrálního repozitáře může využívat kdokoliv a pomáhá tak znovu použitelnosti kódu. Samotné jádro Vert.x je tak velice malé a kompaktní. Vert.x API je rozděleno na *Základní API* a *Kontainer API*.

2.3.1 Základní API

Základní API, které Vert.x poskytuje programátorovi je poněkud strohé a obdobné jako u frameworku Node.js. Platforma tak poskytuje stabilní základ, který se v praxi neobejde bez modulů o kterých pojednává kapitola 2.2.3.

- TCP/SSL server/klient
- HTTP/HTTPS server/klient
- Websockets server/klient, SockJS
- Distribuovaný Event Bus
- Časovače
- Práce s buffery
- Přístup k souborovému systému
- Přístup ke konfiguraci

2.3.2 Kontainer API

Díky této části API může programátor řídit spouštění a vypínání nových modulů a verticlů za běhu aplikace. V praxi jsme tak schopní škálovat aplikaci za běhu či měnit funkcionalitu celé aplikace aniž by to někdo mohl zaregistrovat. Tuto API můžeme také volat přímo z příkazové řádky dále jen CLI[15].

- Nasazení a zrušení nasazení verticlů
- Nasazení a zrušení nasazení Modulů
- Získání konfigurace jednotlivých verticlů
- Logování

2.3.3 Polyglot

Polyglot je označován člověk, který ovládá více jazyků. V terminologii Vert.x to znamená, že API je dostupná ve více programovacích jazycích. Což v praxi znamená, že si programátor může sám zvolit v jakém jazyce bude implementovat svůj kód. Díky faktu, že spolu všechny verticly komunikují skrze zprávy je tak možné mít část aplikace napsanou například v jazyce Java a druhou část v jazyce Python apod. Tento fakt hodně napomáhá celé platformě nalákat nové programátory, protože ne každý na světě umí programovací jazyk Java. Výčet podporovaných jazyků ve verzi 2.0. Do verze 3.0 se pak chystá automatické generování API pro každý jazyk.

- Java
- Javascript, CoffeeScript
- Ruby
- Python
- Groovy
- PHP
- Clojure

[15]Command Line Interface

2.4 Clustering

Díky integraci Hazelcastu získala platforma Vert.x řadu zajímavých vlastností mezi které patří také možnost vertikálního škálování neboli clusteringu. To znamená, že můžeme aplikace jednoduše škálovat přes více serverů bez nutnosti běhu dalších služeb a režijních nákladů. Přímo za běhu aplikace lze přidávat další Vert.x instance do clusterů. Samotná konfigurace clusteru není pak nic složitého a odehrává se v souboru *conf/cluster.xml* a spočívá v nastavení členů clusteru nebo specifikování multicastové[16] adresy a portu na které bude Hazelcast po startu vyhledávat členy clusteru. Velkou výhodou je pak možnost šifrované komunikace, díky čemuž odpadá nutnost použití nejrůznějších služeb zajišťující šifrování komunikace na sítové vrstvě v případě nasazení na veřejné síti nebo ve více geografických lokacích. Pro spuštění aplikace v režimu cluster ji stačí spustit s parametrem *-cluster*. Pokud se na daném serveru nachází více síťových rozhraní je potřeba specifikovat *-cluster-host*. Na tomto rozhraní pak bude komunikovat Hazelcast. V kapitole 3.7.3 je pak tato možnost využita pro běh Vert.x clusteru na odlišném rozhraní něž je běží webový server.

2.4.1 Vysoká dostupnost

Samostatnou kapitolou v oblasti clusteringu je HA[17] česky tedy vysoká dostupnost. Díky Hazelcastu ji lze řešit již na aplikační úrovni, a není potřeba dalších služeb, které řeší vysokou dostupnost.

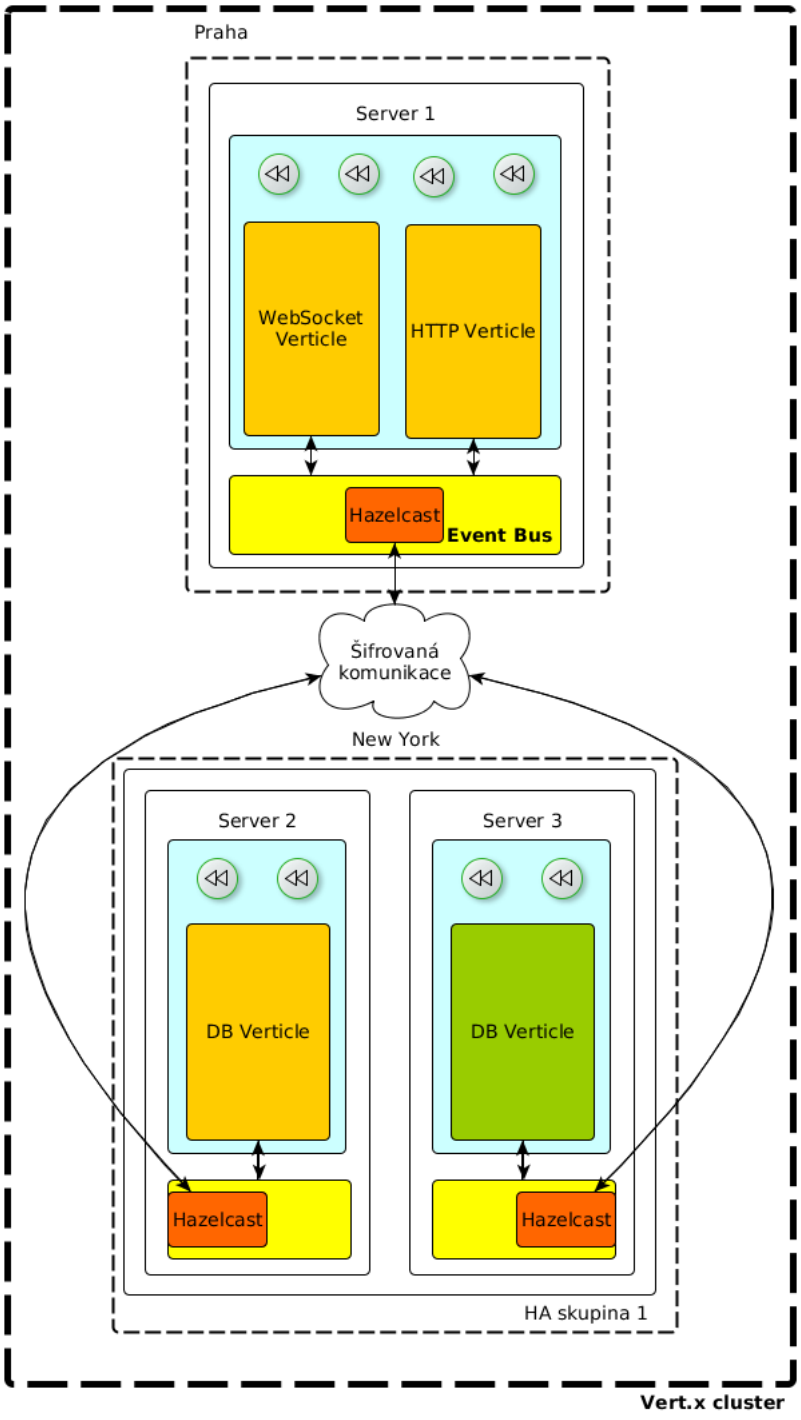
Automatické zotavení z havárie

Pokud je modul spuštěn s argumentem *-ha* a dojde k pádu Vert.x instance. Modul bude automaticky nasazen na jiné instanci v clusteru. V takovém případě již není potřeba spouštět modul s parametrem *-cluster*. Jak je vidět na obrázku 2.5 v případě pádu Serveru 2, tedy části aplikace, která komunikuje s databází dojde automaticky k novému nasazení této části do nové instance, která je taky členem Vert.x clusteru. Výpadek tak bude pro uživatele skoro nepostřehnutelný.

Skupiny HA

V případě spuštění modulů v režimu HA lze pak specifikovat logické skupiny. Pro spuštění instance v určité HA skupině stačí přidat parametr *-hagroup <jméno skupiny>*. Díky tomu lze přesně určit, kde se mají moduly v případě pádu nasadit. To je v praxi

[16] logický identifikátor skupiny sítových hostů
[17] HA - High Availability



Obrázek 2.5: Clustering mezi třemi Vert.x instancemi

vhodné především v situacích, kdy je do internetu vystavena pouze část clusteru. Například jako na obrázku 3.9.

Kvorum

Při spuštění Vert.x instance lze specifikovat kvorum[18]. Pokud nebude splněno kvorum nebude instance nasazena v režimu HA. Kvorum lze pak snadno spočítat ze vzorce $Q = 1 + N/2$, kde N je počet serverů. Pokud dojde při běhu aplikace k porušení kvora bude režim HA automaticky vysazen.

2.5 Porovnání s Node.js

V následující kapitole bude porovnána platforma Vert.x s již zmíněnou platformou Node.js. Výkonnostní test[15] je převzat od samotného autora projektu a jsou v něm zahrnuty jazyky, které v té době platforma podporovala. V druhé části kapitoly 2.5.1 je pak tabulka2.1 srovnání odezev s vybranými webovými platformami z daty ze zdroje[14].

2.5.1 Výkon

Tato kapitola se zabývá výkonnostními testy jednotlivých platforem. V prvním testu je obsaženo více programovacích jazyků, ve kterých byla implementována stejná logika pod platformou Vert.x. Rychlost aplikace implementované v jiném jazyce než Javě je pak závislá na konkrétním adaptéru.

Metody testování

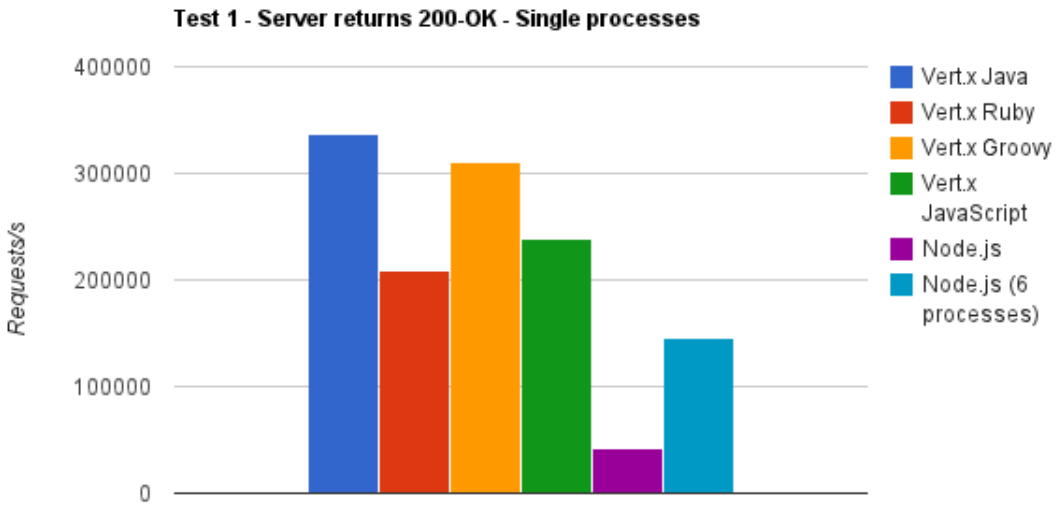
V obou testech je testovaná aplikace škálovaná na šest procesorových jader tedy byla spuštěna s parametrem *-instances 6*, oproti tomu je spuštěna aplikace Node.js ve dvou variantách. Samostatná a šest procesů v jednom clusteru. V legendě grafů je to odlišeno příponou *cl*.

1. Triviální dotazování serveru a návrat statusu 200[19]
2. Dotaz na statický soubor o velikosti 72 bytů

Hardware

V prvním testu od Tima Foxe je požit AMD Phenom II X6, 8GB RAM a systém Ubuntu 11.04. Tento procesor se 6 jádry není úplně běžný proto je výklad doplněn o druhý

[18] minimální počet serverů pro zajištění vysoké dostupnosti
[19] HTTP status - OK



Obrázek 2.6: Výsledky prvního testu *Tim Fox* [15]

test, který proběhl na Sandy Bridge Core i7-2600K, 8GB RAM a SSD disku a systému Ubuntu 12.04.

Výsledky

Jak lze vidět na obrázku 2.6 a 2.7 výsledky obou testů lze shrnout do jedné věty. Vert.x zvládá řádově o desítky tisíc více odpovědí než platforma Node.js a i v případě režimu clusteru.

Srovnání s vybranými platformami

Metoda srovnání s ostatními platformami je založená na podobném principu jako předchozí testy s tím rozdílem, že místo statického souboru vrací odpověď ve formátu JSON. Na straně serveru tedy musí dojít k JSON serializaci.

Platforma	Průměrná odezva	Maximální
Vert.x	1,2ms	18,7ms
Netty	1,3ms	24,0ms
Ruby on Rails	1.8ms	241.6
Node.js	3.7ms	12,5

Tabulka 2.1: Srovnání odezvy, *převzato a upraveno z* [14]

2.5.2 Vlastnosti

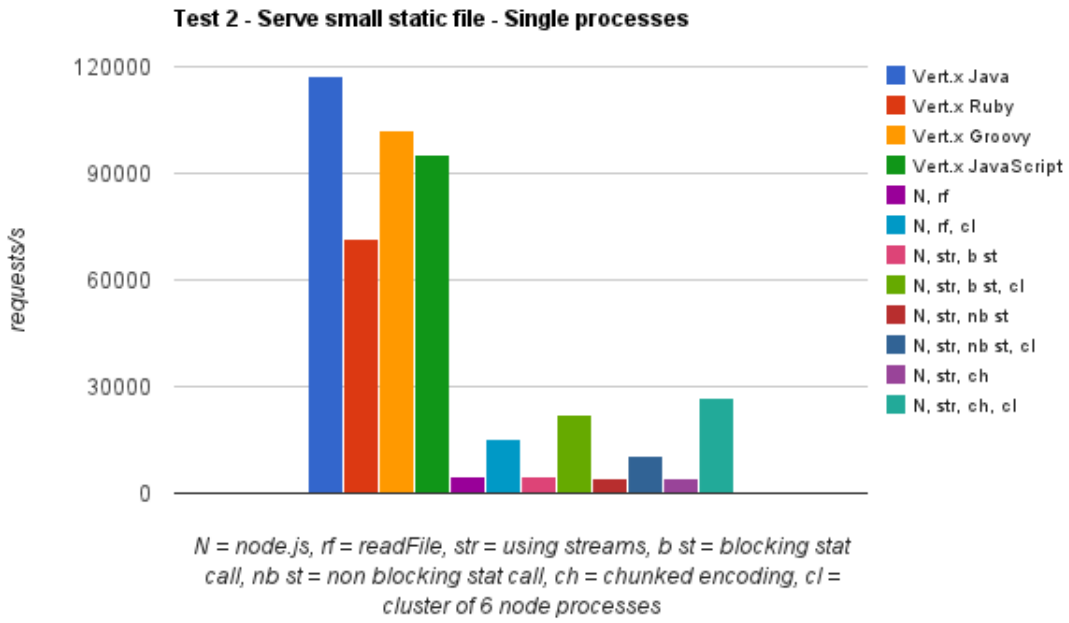
Následující tabulka ukazuje srovnání důležitých vlastností jednotlivých platforem, jejichž důležitost byla popsána v předchozích kapitolách.

Vlastnost	Node.js	Vert.x
CLI	Ano	Ano
Cluster	Ano	Ano
Moduly	Ano	Ano
HA	Ne	Ano
MQ	Ne	Ano
Hybridní model vláken	Ne	Ano
In-memory data grid	Ne	Ano
Polygnot	Ne	Ano

Tabulka 2.2: Srovnání vlastností s Node.js

2.5.3 Závěr srovnání

Výsledkem srovnání je tedy fakt, že pokud by se dnes někdo rozhodoval o výběru platformy pro novou real-time aplikaci měl by určitě zvolit platformu Vert.x, která poskytuje řádově větší výkon a počet vlastností, nehledě na fakt, že v případě Node.js lze psát aplikaci pouze v jazyce JavaScipt, který se může jevit jako naprosto nevhodný pro Enteprise aplikaci.



Obrázek 2.7: Výsledek druhého testu *Tim Fox* [15]

3 Praktická část

V této kapitole je popsán software a postupy použité při implementaci a nasazení Vert.x aplikací.

3.1 Návrh

Hlavní částí aplikace budou tři verticly. Tyto verticly pak budou sloužit jako základ pro jeden z modulů.

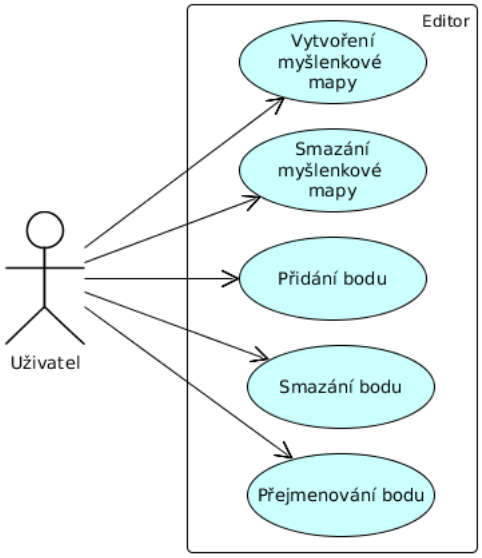
main.js stará se o spouštění celé aplikace v několika rolích

editor.js obsluha editoru

database.js obsluha událostí

3.1.1 Cíle aplikace

- Přidání a odstranění myšlenkových map
- Přidání a odstranění jednotlivých bodů v myšlenkové mapě
- Přejmenování bodů v myšlenkové mapě



Obrázek 3.1: Případy užití

3.1.2 Architektura

Jak je vidět na obrázku 3.2 klienti se budou připojovat přes jeden webový server, který bude spojený clusterem se serverem druhým. Na tomto serveru pak poběží samotná databáze.

Adresářová struktura aplikace

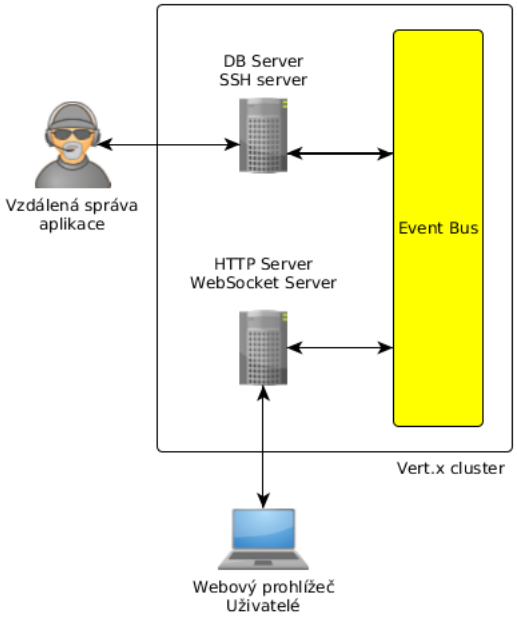
```
main.js
editor.js
web
utils

vertx runmod io.majklk~mindmapeditor~0.0.1 -conf
    /srv/mindmap/conf/mindmajson -cluster-host 10.10.10.161 -ha
```

3.2 Řídící verticle

Vzhledem k tomu, že bude aplikace nasazená na více serverech ve více rolích bylo by potřeba napsat několik modulů podle zaměření, které tam startovat. To lze vyřešit napsáním „startéru", který dle konfigurace nastartuje příslušné moduly či verticly.

```
JsonObject config = new JsonObject();
config.putString("foo", "wibble");
```



Obrázek 3.2: Architektura nasazené aplikace

```
config.putBoolean("bar", false);
container.deployVerticle("foo.ChildVerticle", config);
```

Spuštění verticle z příkazové řádky

```
vertx run foo.js -conf myconf.json
```

3.3 Integrace s databází MongoDB

Vzhledem k jednoduchosti aplikace nebyl vytvořen diagram tříd. V aplikaci budou pouze dva modely a to mapa a její potomek, který se od mapy liší pouze tím, že má místo globálního unikátního identifikátoru pouze unikátní identifikátor v rámci jedné mapy.

_id unikátní identifikátor[1]

name název samotné mapy

children potomci

[1] podtržítkem se běžně označující neměnné proměnné

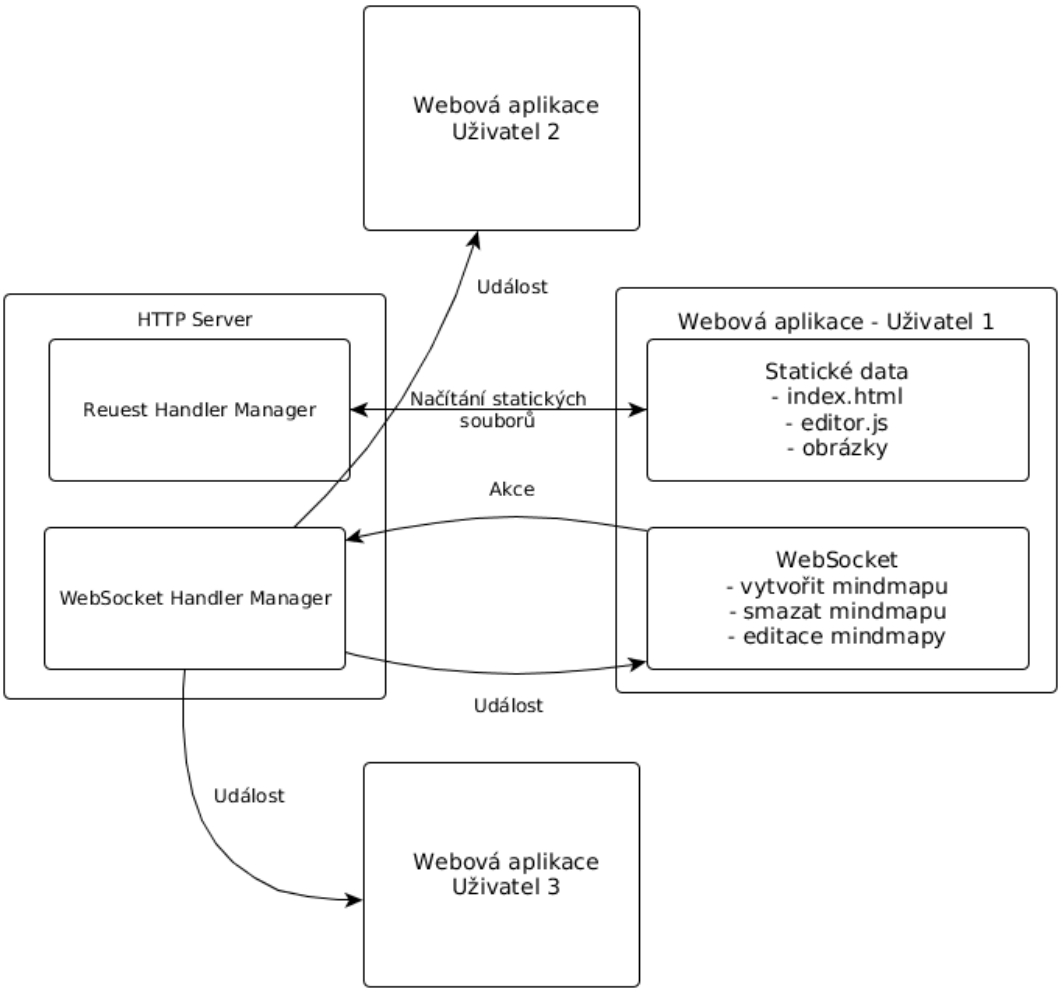
```
{
   "_id": "1234-6545-5612-3456",
   "name": "Živočichové",
   "children": [
      {
         "key": "1",
         "name": "Obratolvci",
         "children": [
            {
               "key": "2",
               "name": "Ryby"
            },
            {
               "key": "3",
               "name": "Plazi"
            }
         ]
      },
      {
         "key": "4",
         "name": "Bezobratlí"
      }
   ]
}
```

3.4 Komunikace v reálném čase

Po načtení myšlenkové mapy přichází na řadu aspekty komunikace v reálném čase. V rámci editoru myšlenkových map budou implementovány tři základní operace.

- Přidání objektu do myšlenkové mapy
- Odstranění objektu z myšlenkové mapy
- Přejmenování objektu v myšlenkové mapě

V tradiční webové aplikaci by to znamenalo implementaci těchto metod typem požadavek-odpověď jako operací konkrétní API. Při přidání objektu by se zavolala API a nazpět by přišla odpověď zda-li byla akce úspěšná. Pokud bychom však chtěli mít editor, který by propagoval změny ke všem, kdo mají myšlenkovou mapu otevřenou museli bychom znát přihlášené uživatele, kterým by server poslal notifikaci o změně. Mnohem jednoduší cesta je rozdělení požadavku a odpovědi do dvou částí což odpovídá návrhovému



Obrázek 3.3: Komunikace v reálném čase

vzoru Command. V takovém případě při otevření webového prohlížeče s danou myšlenkovou mapou dojde k zaregistrování klienta na určitou adresu. V případě jakékoli změny, kterou provede jiný uživatel nebo kdokoliv jiný, dojde k odeslání události všem zaregistrovaným klientům okamžitě v době vykonání události. Tuto situaci lze vidět na obrázku 3.3. V případě, kdy u uživatele dojde k vyvolání akce, ostatním uživatelům bude zaslána událost, která s sebou nese všechny informace o změně. Všem klientům zaregistrovaným na stejnou adresu přijde stejná událost. Tento typ zasílání zpráv je znám jako návrhový vzor Publish/Subscribe.

3.4.1 Akce

Když bude uživatel chtít změnit myšlenkovou mapu (přidat objekt, odebrat objekt nebo přejmenovat objekt), vyšle akci na server. Tato akce bude poslána přes přemostěný event bus, který byl představen v kapitole 2.2.4. Na straně serveru je pak verticle, který má zaregistrovány metody na příchozí akce. Samotná akce nemá žádnou návratovou hodnotu, pokud tak dojde k chybě nedojde k vyslání události, která s sebou nese změny myšlenkové mapy.

3.4.2 Události

Pokud uživatel otevře webový prohlížeč s konkrétní myšlenkovou mapou, dojde tak k přihlášení odběru událostí nad touto myšlenkovou mapou. Pokud ji někdo změní tento uživatel dostane stejnou událost s informací o změně jako každý jiný uživatel přihlášený k odběru událostí. Na straně klienta tak budou implementovány metody, které budou mít definované chování pro každou z definovaných událostí: přidání, odebrání a přejmenování objektu v myšlenkové mapě.

3.5 Polyglot vývoj a moduly

Každý modul ve Vert.x platformě musí spl

deskriptor*toto je poze základní výčet parametrů všechny lze nalézt v dokumentaci Vert.x*

Jmenná konvence pro jména modulů *com.mycompany my-mod 1.0*.

```
{
  "main": "EchoServer.java",
  "worker": true,
  "includes": "io.vertx~some-module~1.1",
  "auto-redeploy": true
}
```

Parametr *auto-redeploy* mluví sám za sebe.

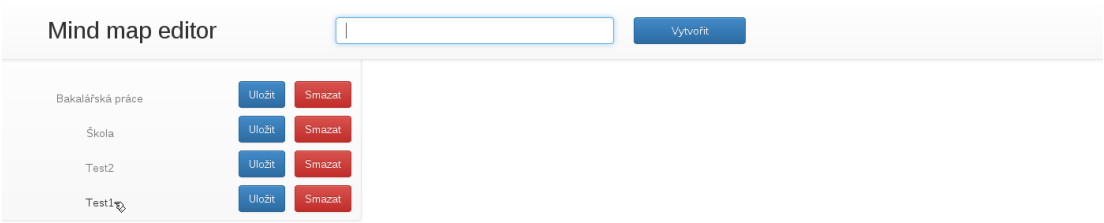
Jak bylo řečeno v 2.2.2 Vert.x instance má dvě sady vláken. Parametrem *worker* v deskriptoru modulu, lze říci Vert.x jádru aby spustil modul v *background worker poolu*.

Spuštění modulu programově v jazyce Java

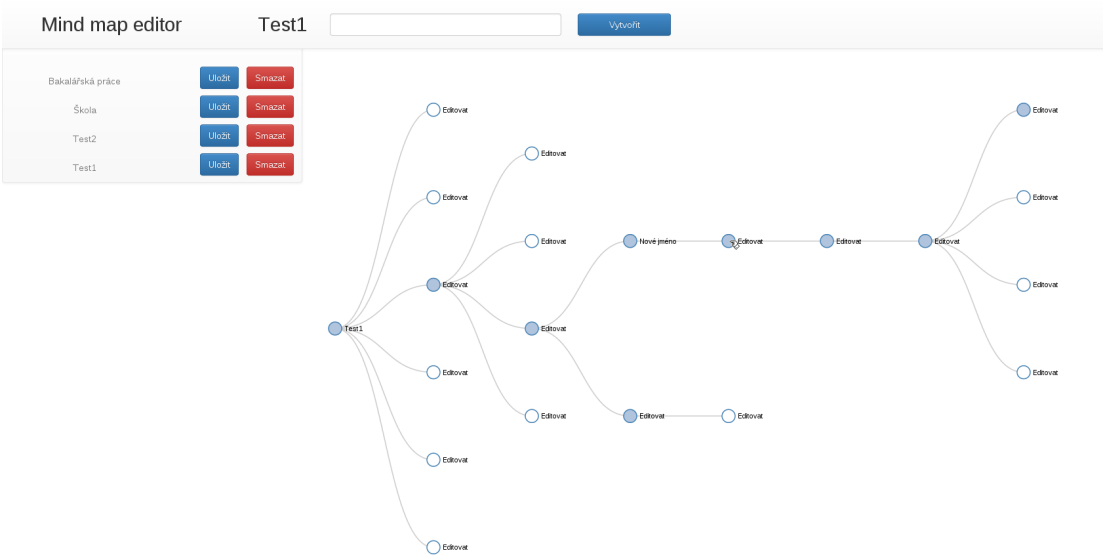
```
container.deployModule("io.vertx~mod-mailer~2.0.0-beta1",
   JSONconfig);
```

Spuštění modulu z příkazové řádky

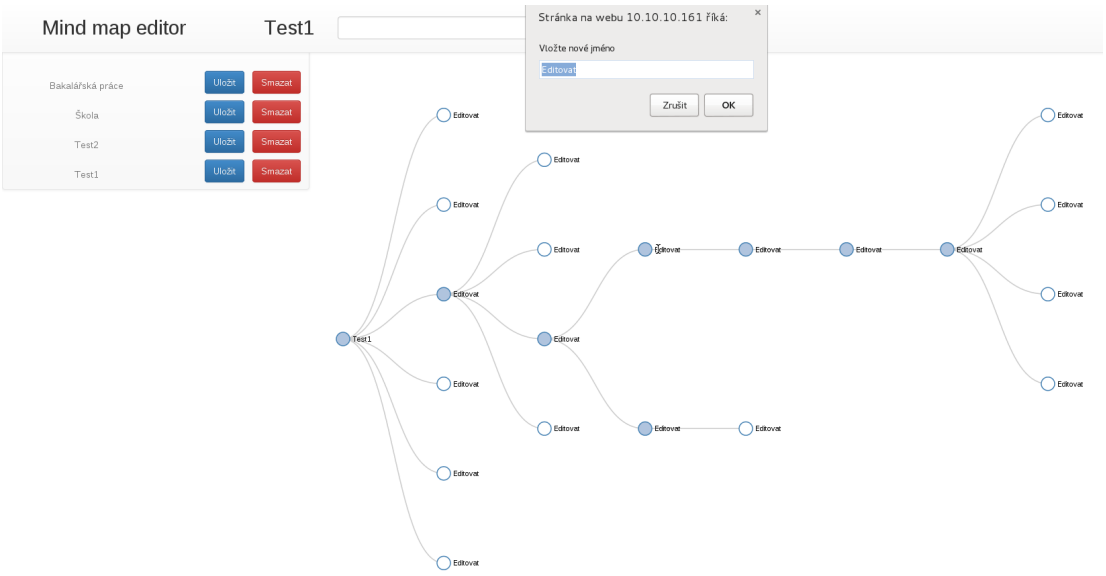
```
vertx runmod com.mycompany~my-mod~1.0 -conf config.json
```



Obrázek 3.4: Webová aplikace



Obrázek 3.5: Webová aplikace - otevření myšlenkové mapy



Obrázek 3.6: Webová aplikace - akce - editace

moduly vice jazyku

3.6 Základní služby

Jádrem serveru je operační systém Ubuntu[18] 14.04 LTS[2] Server Edition s kódovým označením Trusty Tahr. Je to osvědčený systém, který bude mít podporu do roku 2019. Systém má aplikaci pro správu softwarových balíků aptitude. Všechny aplikace kromě samotného Vert.x šli hravě nainstalovat.

3.6.1 Java

Jako hlavní přísadou celého prostředí je otevřená implementace Java Platform, knihovna OpenJDK ve verzi 7.

3.6.2 Vert.x

Jediná služba, která se zatím nenachází jako systémový balíček je samotný Vert.x. Pro jeho instalaci je nutné stáhnout distribuci ze stránek platformy. Tento archiv potom rozbalit do požadované lokace. Následně stačí v závislosti na konkrétním systému přidat soubor *vertx/bin/vertx* do systémové proměnné *PATH*. Následně by měla být funkční interakce s platformou skrz příkazovou řádku. Příklad proměnné *PATH* lze vidět v kapi-

[2] dlouhodobá podpora

tole 3.6.4. Správné nastavení lze otestovat napsáním *vertx* do příkazové řádky. Správný výstup jsou pak pomocné informace pro komunikaci s platformou tzv. help.

3.6.3 Databázový server

Pro ukládání myšlenkových map je použita NoSQl databáze MongoDB ve verzi 2.6. MongoDb má za sebou více než pět let vývoje a několik obřích investicí. Vzhledem k tomu, že již existuje Vert.x modul pro pohodlnou spolupráci s touto databází byla vybrána pravě tato NoSQL databáze.

3.6.4 Nasazení produkční služby

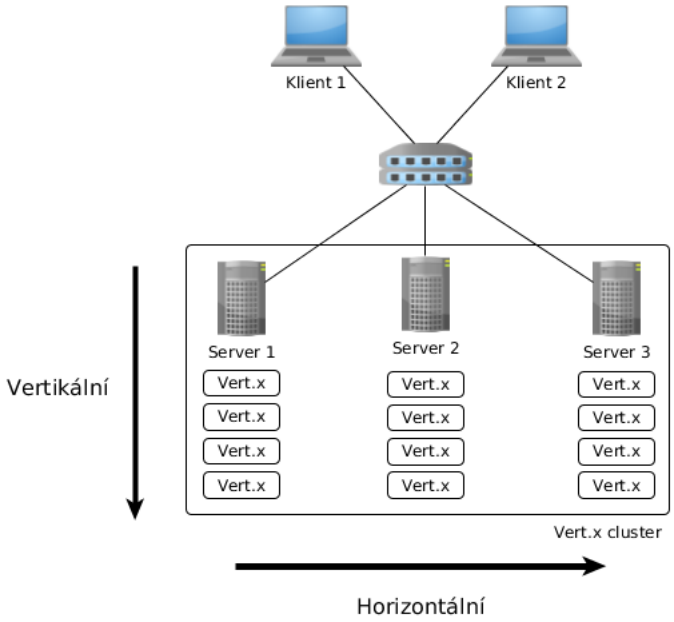
V současné verzi(2.1.2) Vert.x nepodporuje běh v režimu daemon[3]. Nasazení v režimu daemon je však nutnost pro běh v produkčním prostředí. Pro běh aplikace MindMap editoru byla využita systémová služba Supervisord[4], která běží jako linuxový daemon a stará se o běh aplikace, v případě pádu se ji pokusí znovu nasadit. Samotná konfigurace služby pro běh v Supervisordu pak obsahuje základní parametry. V verzi 3.0 je však plánovaná funkce běhu v režimu daemona a nebude tak tato berlička potřeba.

```
[program:vertx_mindmap_editor]
directory=/srv/mindmap/app
environment=PATH="/srv/vert.x-2.1RC3/bin/vertx"
environment=JAVA_HOME="/usr/lib/jvm/java-7-openjdk-amd64/"
command=vertx runmod io.majklk~mindmapeditor~0.0.1 -conf
    /srv/mindmap/conf/allinone.json
user=root
autostart=true
autorestart=true
redirect_stderr=true
stdout_logfile=/srv/mindmap/app/app.log
stderr_logfile=/srv/mindmap/app/error.log
startsecs=10
stopwaitsecs=600
```

3.7 Horizontální a vertikální škálování

sadsadasdds

[3]je program, který běží v pozadí, čeká na události, které nastanou, reaguje na ně a poskytuje služby.
[4]supervisord.org



Obrázek 3.7: Horizontální a vertikální škálování

scaling
možnosti škálování a HA
Server 1

```
command=vertx runmod io.majklk~mindmapeditor~0.0.1 -conf
   /srv/mindmap/conf/webserver.json -cluster-host 10.10.10.162 -ha
```

Server 2

```
command=vertx runmod io.majklk~mindmapeditor~0.0.1 -conf
   /srv/mindmap/conf/dbserver.json -cluster-host 10.10.10.162 -ha
```

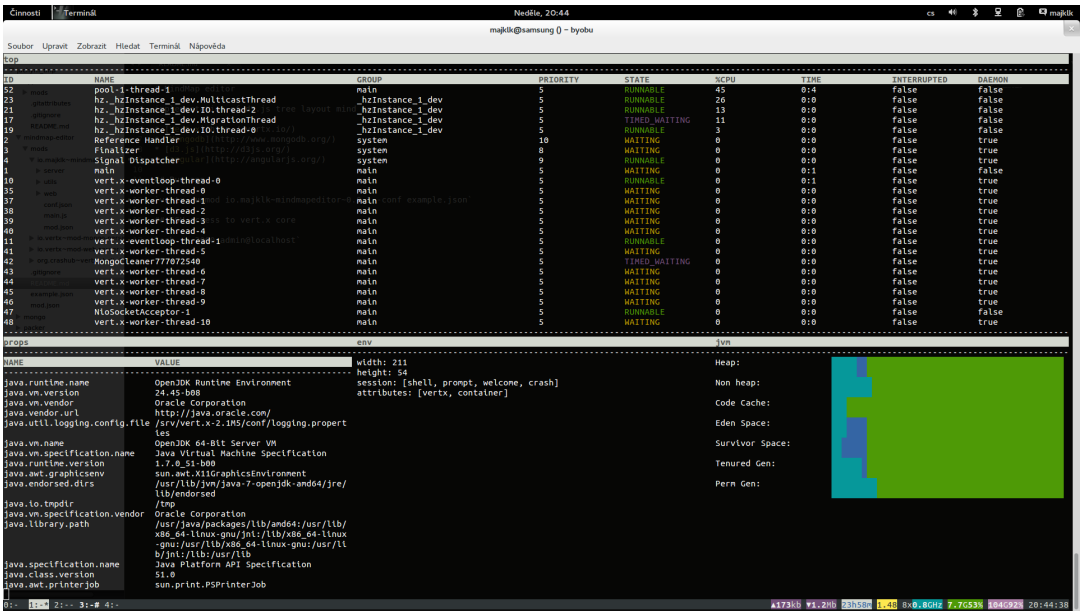
3.7.1 Počet Verticlů

verticle count

3.7.2 Interakce s Vert.x

Díky modulu CrasHub Shell[5] se lze protokolem SSH[6] přihlásit přímo do Vert.x. Modul pak nabízí možnost interakce s jednotlivými komponentami samotného Vert.x. Lze

[5] https://github.com/crashub/mod-shell
[6] Secure Shell



Obrázek 3.8: Modul CrasHub Shell

například posílat zprávy přes Event Bus nebo nasazovat nové moduly za běhu celé aplikace. Samotný modul pak nabízí jednoduchou možnost přidání vlastním příkazů. Na obrázku je pak vidět přehledová obrazovka. Na obrázku 3.8 pak je hlavní přehledová stránka na které lze vidět činnost, vytížení a status všech vláken v celém clusteru. Dostupné jsou také informace o velikosti zásobníku, paměti či verze Javy.

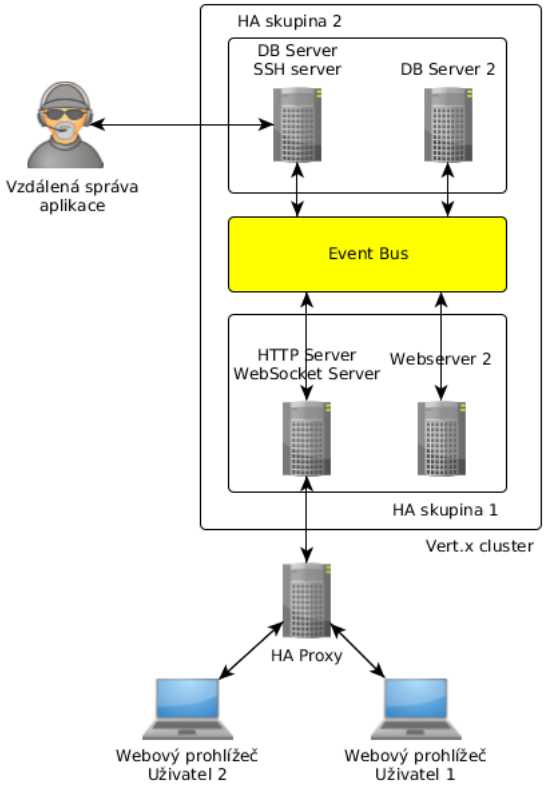
3.7.3 Vert.x v clusteru

Pro zajištění bezpečnosti databázového serveru, kde běží také služba pro vzdálený přístup k Vert.x instanci bude aplikace nasazena v clusteru. Webový server(HTTP Server) na obrázku 3.2 je připojen do dvou sítí.

Internet pouze webový server

Síť clusteru všechny servery

Pro maximální bezpečnost budou na webovém serveru otevřeny pouze porty 80 a 443. Na druhém serveru pak poběží samotná databáze a druhá část aplikace, která v sobě bude zahrnovat modul zajišťující komunikaci s databází a modul pro vzdálenou správu Vert.x instancí, který byl představen v kapitole 3.7.2.



Obrázek 3.9: Ideální architekutra nasazení aplikace

3.8 Vysoká dostupnost

Pro zajištění vysoké dostupnosti klíčových prvků aplikace, je potřeba upravit architekturu clusteru. Před webový server je postavená HA proxy[7], která při úpadku jednoho z webových serverů přesměruje komunikaci na server druhý. Vert.x cluster je pak rozdělený na dvě HA skupiny(obr.3.9), které se liší svým zaměřením. První dva servery slouží jako webové a jsou napojeny na HA proxy. Další dva pak slouží pro komunikaci s databází, která na nich ležet nemusí.

[7] služba zajišťující vyrovnávání zatížení

4 Závěr

Podařilo se vytvořit webovou aplikaci, do které jdou jednoduše přidávat a odebírat mindmapy. Pokud má stejnou mindmapu otevřeno více lidí najednou, okamžitě vidí všechny změny, ostatních klientů. Aplikace používá volně šiřitelný software, který je ve většině případů špičkové úrovně. Tento postup dovoluje, s relativně nízkými náklady, řešit velmi komplikované problémy. Možnosti pro vylepšení aplikace jsou jak na straně vizuální tak na straně funkcionální. Bylo by vhodné rozšířit aplikaci o možnost přihlášení a správy pouze svých mindmap či případné sdílení jednotlivých mindmap.

Literatura

[1] Phipps, Simon *Who controls Vert.x: Red Hat, VMware, or neither?* [online]. [cit. 2014-06-30]. Dostupný z WWW: `http://www.infoworld.com/d/open-source-software/who-controls-vertx-red-hat-vmware-or-neither-210549`

[2] Kamali, Masoud *The Winners of the JAX Innovation Awards 2014* [online]. [cit. 2014-06-30]. Dostupný z WWW: `http://jax.de/awards2014/`

[3] Gardoh, Ed *Parallel Processing and Multi-Core Utilization with Java* [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupný z WWW: `http://embarcaderos.net/2011/01/23/parallel-processing-and-multi-core-utilization-with-java/`

[4] Merta, Zdeněk*Vert.x jOpenSpace 2013* [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupný z WWW: `http://jopenspace.cz/2013/presentations/zdenek-merta-vert.x.pdf`

[5] Ponge, Julien *Fork and Join: Java Can Excel at Painless Parallel Programming Too!* [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupný z WWW: `http://www.oracle.com/technetwork/articles/java/fork-join-422606.html`

[6] *Package java.util.concurrent Description* [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupný z WWW: `http://docs.oracle.com/javase/7/docs/api/java/util/concurrent/package-summary.html#package_description`

[7] Sun Song, Ki *Understanding Vert.x Architecture - Part II* [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupný z WWW: `http://www.cubrid.org/blog/dev-platform/introduction-to-in-memory-data-grid-main-features/`

[8] Jaehong, Kim *Introduction to In-Memory Data Grid: Main Features* [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupný z WWW: `http://www.cubrid.org/blog/dev-platform/understanding-vertx-architecture-part-2/`

[9] Pitner, Tomáš *Programování v jazyce Java* [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupný z WWW: `http://www.fi.muni.cz/~tomp/slides/pb162/printable.html`

[10] Lažanský, J. *Procesy a vlákna* [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupný z WWW: `http://labe.felk.cvut.cz/vyuka/A4B33OSS/Tema-03-ProcesyVlakna.pdf`

[11] Fox, Tim *Event loops* [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupný z WWW: `http://vertx.io/manual.html#event-loops`

[12] Kosek, Jiří *Session proměnné* [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupný z WWW: `http://www.kosek.cz/clanky/php4/session.html`

[13] Janssen, Cory *Message Queue* [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupný z WWW: `http://www.techopedia.com/definition/25971/message-queue`

[14] Froemke, Dina *Framework Benchmarks Round 8* [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupný z WWW: `http://www.techempower.com/blog/2013/12/17/framework-benchmarks-round-8/`

[15] Fox, Tim *Vert.x vs node.js simple HTTP benchmarks* [online]. [cit. 2014-03-22]. Dostupný z WWW: `http://vertxproject.wordpress.com/2012/05/09/vert-x-vs-node-js-simple-http-benchmarks/`

[16] Osuszek, Lukasz *Distributed Architecture of Enterprise Information Systems* [online]. [cit. 2014-07-31]. Dostupný z WWW `http://www.soainstitute.org/resources/articles/distributed-architecture-enterprise-information-systems`

[17] Bostock, Mike *Collapsible Tree* [online]. [cit. 2014-07-31]. Dostupný z WWW `http://bl.ocks.org/mbostock/4339083`

[18] Canonical Ltd. *Ubuntu Server Edition* [online]. [cit. 2014-08-01]. Dostupný z WWW `http://www.ubuntu.com/server`

Přílohy

Seznam obrázků

Seznam tabulek