

Juho Saukko

Microsoft Hyper-V ja Red Hat Enterprise Virtualization virtualisointialustat



Tradenomi, tietojen-
käsittely

Syksy 2015



KAJAANIN
AMMATTIKORKEAKOULU
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

TIIVISTELMÄ

Tekijä(t): Saukko Juho

Työn nimi: Microsoft Hyper-V ja Red Hat Enterprise Virtualization virtualisointialustat

Tutkintonimike: Tradenomi, tietojenkäsittely

Asiasanat: Virtualisointi, Hyper-V, Red Hat, RHEV, Microsoft, KVM

Tämä opinnäytetyö toteutettiin selvitystyönä konesalipalveluja tarjoavalle yritykselle, jolla on käytössä useampia eri virtualisointialustoja. Selvitystyössä käytiin läpi kahden eri virtualisointialustan arkkitehtuurin eroavaisuuksia, käyttöönottoa sekä suoritettiin erilaisia ohjelmistopohjaisia testejä, joilla pyrittiin havainnoimaan virtualisointialustojen suorituskykyä esimerkiksi tietokannoissa, lohkotason tiedonsiirrossa ja palvelinsovellusten suorituksessa. Molemmat virtualisointialustat käyttävät omia arkkitehtuuriratkaisujaan, jotka poikkeavat merkittävästi toisistaan. Myös virtualisointialustojen tuomat rajoitukset pitää ottaa huomioon erittäin suurissa virtualisointiympäristöissä.

Käyttöönotossa asennettiin ja konfiguroitiin kahden virtualisointipalvelimen välinen vikasietoinen klusteri ja kokeiltiin niiden hallintasovelluksia. Virtualisointiympäristöjen hallinta ja toimintaperiaatteet olivat pääpiirtein identtisiä, jolloin yhden virtualisointiympäristön osaamisen voi hyödyntää tehokkaasti muissa virtualisointiympäristöissä. Suorituskykytestit toteutettiin kahdella identtisellä palvelimella sekä erillisellä levypalvelinjärjestelmällä. Selvitystyössä tutkittiin ja testattiin myös virtualisointiympäristöstä siirtymistä toiseen virtualisointiympäristöön erilaisten muunnostyökalujen avulla. Selvitystyössä tutkittiin myös virtualisointialustojen lisensointimallit ja niistä aiheutuvat kustannukset. Vaihtamalla VMware virtualisointiympäristöstä vaihtoehtoisiin virtualisointiympäristöihin voidaan saavuttaa suuria säästöjä vuositasolla. Selvitystyössä todettiin, että eri virtualisointiympäristöjen lisensointimallit olivat jokaisella valmistajalla omanlaisensa, joista monimutkaisin oli Microsoftilla. Kaksi virtuaalista webpalvelinkonetta konvertoitiin kolmen erilaisen virtualisointiympäristöjen välillä ja virtuaalikoneiden toimivuus todettiin kyseisissä virtualisointiympäristöissä onnistuneeksi. Suorituskykytesteissä havaittiin virtualisointialustojen välillä niin suuria kuin myös erittäin pieniäkin eroavaisuuksia tuloksissa, mutta KVM-pohjainen RHEV-virtualisointialusta oli pääosin suorituskykyisempi tai vähintään samalla tasolla lähes jokaisessa testissä Hyper-V-virtualisointialustan kanssa, muutamaa poikkeusta lukuun ottamatta. Virtualisointialustojen suorittamat virtualisointioperaatiot sekä laiteajurituki ovat merkittävässä roolissa suorituskyvyssä.

ABSTRACT

Author(s): Saukko Juho

Title of the Publication: Microsoft Hyper-V ja Red Hat Enterprise Virtualization virtualisointialustat

Degree Title: Bachelor of Business, Computer science

Keywords: Virtualization, KVM, Red Hat, Microsoft, Hyper-V, RHEV

The thesis was made as a study for a company offering datacenter services with several virtualization platforms. The main purpose of the thesis was to compare the architecture and management of two distinct virtualization platforms and conduct a series of various benchmarking tests such as database and server software benchmarks to evaluate the performance. The platforms utilize different kind of architecture which is one of the primary factors in understanding the performance behind them. While the everyday usage and management in virtualization platforms are nearly identical and thus familiar for the experienced user, the licensing model varies greatly in them. Another study aspect was comparing the licensing expenses of the two alternative virtualization platform choices to a major leading virtualization platform.

An identical two server high availability cluster with an external storage server was used in these benchmarks to provide results for the comparison. Conversion of virtual machines to do transfers between the different virtualization platforms was also tested to provide insight into using various virtualization platforms together. The KVM-based RHEV virtualization platform performed better in most benchmarks than the Hyper-V virtualization platform, while in a couple of benchmarks the results were negligible to consider which one performed best.

Use of the alternative virtualization platforms can reduce the costs a lot. The platform's virtualization overhead and device driver support is one of the main factors when it comes to the performance.

SYMBOLISANAT

Agent	Sovellus, joka lähettää tietoa isäntäsovellukselle
AMD V	AMD:n käyttämä virtualisointikäskykanta
Baremetal hypervisor	Virtualisointialusta, joka asentuu suoraan fyysisen raudan päälle
CAL	Käyttöoikeuslisenssi Windows palvelinohjelmistoja varten
Cluster	Kahden tai useamman kohteen muodostama kokonaisuus
CPU Socket	Suoritinkanta, johon prosessori asennetaan
Daemon	Palveluprosessi esimerkiksi UNIX-pohjaisissa järjestelmissä
Domain	Toimialue, jossa noudatetaan erilaisia käytänteitä
Hypervisor	Virtualisointialusta
Intel VT	Intelin käyttämä virtualisointikäskykanta
I/O	Tiedon siirräntä tietokoneen komponenttien välillä
KVM	Linux-pohjainen virtualisointialusta
Live Migration	Palvelun siirtäminen palvelimelta toiselle verkon yli
LUN	Looginen numerotunniste, jolla tunnistetaan tallennusresurssi
NFS	Verkkolevypalvelin
OSE	Käyttöjärjestelmäympäristö
Pool	Kokonaisuus, joka voi sisältää useita samanlaisia kohteita
RAID	Mahdollistaa kiintolevyjen peilauksen ja lomittamisen
VDI	Virtuaalinen työpöytäratkaisu

SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 VIRTUALISOINTIALUSTAT	2
3 MICROSOFT HYPER-V	5
3.1 Arkkitehtuuri	5
3.1.1 Parent partition	6
3.1.2 Child partition	6
3.1.3 Tallennus	7
3.1.4 Verkko	9
3.2 Ympäristön vaatimukset ja rajoitukset	9
3.3 Ympäristön käyttöönotto	11
3.3.1 Palvelimet	11
3.3.2 5nine Manager for Hyper-V PLUS	11
3.4 Ympäristön hallinta	12
3.5 Lisensointi	14
4 RED HAT ENTERPRISE VIRTUALIZATION	17
4.1 Arkkitehtuuri	17
4.1.1 QEMU	18
4.1.2 VDSM	19
4.1.3 SPM	19
4.1.4 Libvirt	19
4.1.5 Tallennus	20
4.1.6 Verkko	21
4.2 Ympäristön vaatimukset ja rajoitukset	22
4.3 Ympäristön käyttöönotto	24
4.3.1 Palvelimet	24
4.3.2 Red Hat Enterprise Virtualization Manager	24
4.4 Ympäristön hallinta	25
4.5 Lisensointi	27
5 VIRTUALISOINTIALUSTOJEN SUORITUSKYKY	29
5.1 IOMeter	31
5.1.1 4kB suorituskykytestit	32

5.1.2 64kB suorituskykytestit	35
5.1.3 256kB suorituskykytestit	37
5.1.4 512B suorituskykytestit	41
5.2 Iperf	42
5.3 Sysbench	43
5.3.1 MySQL suorituskykytestit	43
5.4 Phoronix Test Suite	44
5.4.1 Apache suorituskykytestit	44
5.4.2 NGINX suorituskykytestit	45
5.4.3 PostgreSQL suorituskykytestit	45
5.4.4 SQLite suorituskykytestit	47
5.4.5 IOZONE suorituskykytestit	47
6 VIRTUALISOINTIYMPÄRISTÖN SIIRTO	49
7 POHDINTA	51
LÄHTEET	54

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on tutkia ja vertailla Red Hat Enterprise Virtualization ja Microsoft Hyper-V -ympäristöjen käyttöönottoa, ominaisuuksia ja lyhyesti niiden hallintaa jokapäiväisessä käytössä. Käyttöönotossa keskitytään vertailemaan arkkitehtuurin eroavaisuuksia, suorituskykyä ja erilaisia työkaluja, jotka helpottavat käyttöä erilaisissa skenaarioissa, kuten ympäristön ja virtuaalikoneiden raportointi, päivitykset ja huolto. Tarkoituksena on myös selvittää, kuinka siirrytään vanhasta ympäristöstä uuteen ympäristöön (esimerkiksi VMwaresta Hyper-V:hen) ja mitä kaikkea se tulee vaatimaan käyttöönottopuolelta. Opinnäytetyö toteutetaan selvitystyönä konesalipalveluita tarjoavalle yritykselle, jolla on käytössä pääosin VMwaren virtualisointiympäristö, mutta myös muita virtualisointiympäristöjä. Tässä opinnäytetyössä pyritään myös selvittämään, tulevatko kilpailijoiden virtualisointiympäristöt halvemmaksi kuin VMwaren ympäristö, vai onko kannattavaa ajaa useampia ympäristöjä yhtä aikaa. VMwaren ja Microsoftin virtualisointialustoista on tehty paljon tutkimustöitä ja opinnäytetöitä, mutta Red Hatin virtualisointialustaa ei ole tutkittu yhtä paljon kuin muita KVM-pohjaisia virtualisointialustoja. Lopputuloksena pitäisi jäädä kattava käsitys molempien virtualisointialustojen vahvuuksista ja heikkouksista. VMwaren virtualisointia käsitellään tässä opinnäytetyössä hyvin vähän ja vain tietyissä vertaus-tilanteissa, mikäli on aihetta tuoda asia selville.

2 VIRTUALISOINTIALUSTAT

Virtualisoinnissa tietokoneen tai palvelimen fyysiset resurssit piilotetaan muilta käyttöjärjestelmiltä, loppukäyttäjiltä ja sovelluksilta. Näin voidaan muuttaa yksi tai useampi fyysinen kokonaisuus useaksi eri loogiseksi kokonaisuudeksi pilkkomalla osiin fyysisiä resursseja. Virtualisointi ei ole uusi juttu IT-alalla, sillä tekniikka on peräisin jo 1960-luvulta, jolloin sitä käytettiin sen ajan suurtietokoneissa. (IBM. 2007.)

Virtualisoinnilla on erittäin iso vaikutus nykypäivän tietokonesaleissa ja se on kasvattanut suuresti asemaansa tekniikan ja ohjelmistojen kehittyessä. Markkinoilla on useita yrityksiä, jotka tarjoavat virtualisointialustoja erilaisilla lisensointivaihtoehtoilla. VMwaren pitäessä markkinajohtajan asemaa jo useamman vuoden, ovat muut virtualisointialustojen kehittäjät lähteneet kilpailemaan kärkipaikoista. Kaupallisten virtualisointialustojen rinnalle on tullut avoimeen lähdekoodiin perustuvia ilmaisia ja ns. puoli-ilmaisia virtualisointialustoja. Virtualisointialustat kykenevät kaikki lähes samoihin asioihin, jolloin kilpailuvaltiksi pääosin muodostuu lisensointi ja käyttäjätuki sekä yhteistyökumppanuus muissa palveluissa. (NASDAQ. 2014.)

Useampi yritys on jo vaihtanut VMware-ympäristöstä halvempaan vaihtoehtoon tai tuonut rinnalle uuden virtualisointialustan, vaikka VMwarella on olemassa muita kehittyneempiä ominaisuuksia. Kilpailu on selvästi nopeuttanut virtualisointialustojen kehitystä, sillä Hyper-V- ja KVM-pohjaiset alustat ovat jo varteenotettavia kilpailijoita VMwarelle. (NASDAQ. 2014.)

Virtualisointialustoilla on oma arkkitehtuurinsa, jonka mukaan virtuaaliympäristö toimii, jolloin selvitetäväksi jää myös se, tarjoaako eri arkkitehtuuriratkaisu paremman suorituskyvyn. Nykyään on myös tarvetta ns. multihypervisor ratkaisuille, joissa palveluntarjoajalla on käytössä eri virtuaalisointialustoja. Useimmiten tällöin käytetään eri palvelutasoja eri virtuaalisointialustoille, esimerkiksi kultatasoa VMwarelle ja hopeatasoa muille alustoille. Jos esimerkiksi asiakas haluaa

vaihtaa kultatasolta hopealle, palveluntarjoajan pitää pystyä siirtämään virtuaalikone toiselle ”halvemmalle” alustalle.

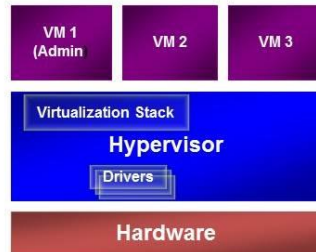
Microsoft Hyper-V ja Red Hatin käyttämän KVM-hypervisorin ensimmäiset versiot julkaistiin vuonna 2008, joten ne ovat yhtä uudet tulokkaat virtualisointimarkkinoilla. VMware toi ensimmäisen hypervisorinsa markkinoille vuonna 2001, mikä selittää mahdollisesti VMwaren markkina-aseman sekä kypsyyden virtualisointiympäristöissä. Hyper-V ja RHEV käyttävät erilaista arkkitehtuuria, mutta molemmat kykenevät hoitamaan pääosin samat toiminnallisuudet. Yritykselle on tärkeää, että ympäristön hallinta on tehokasta ja mahdollisimman ”ongelmavaapa”, jolloin tärkeäksi mittariksi muodostuvat hallintatyökalut ja niiden monipuolisuus. Virtualisointiympäristön hinta on myös yksi ratkaisevimmista tekijöistä yritysmaailmassa.

Mikrokernel-arkkitehtuurissa laitteiston ajurit eivät ole samalla tasolla virtualisointialustan (hypervisor) koodissa, vaan itse isäntäkäyttöjärjestelmän tasossa (operating system). Mikrokernel-arkkitehtuuria hyödyntävä virtualisointialusta sisältää ainoastaan yksinkertaiset ja muuttumattomat toiminnallisuudet, kuten fyysisen muistinhallinnan (physical memory management) ja prosessorin ajankäytön (processor scheduling) (kuva 1). Mikrokernel-arkkitehtuuria hyödyntää Microsoft Hyper-V. Monoliittisessa arkkitehtuurissa laiteajurit sijaitsevat itse virtualisointialustan koodissa. Esimerkiksi VMware ESXi hyödyntää monoliittista arkkitehtuuria.

Hypervisor Design Principals

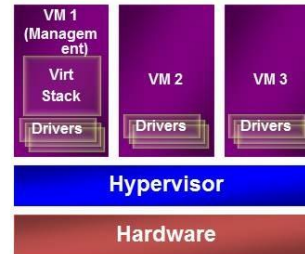
Monolithic vs. Microkernel

- Monolithic Hypervisor



- Implements a proprietary driver model within the hypervisor
- More simple than a modern kernel, but still complex

- Microkernel Hypervisor



- Simple partitioning functionality
- Increases reliability and minimizes attack surface
- No third-party code (drivers run within VMs)

Kuva 1. Monoliittinen ja Mikrokernel arkkitehtuurit. (Microsoft Technet Blogs. 2011.)

Molemmissa arkkitehtuureissa on kolme eri kerrosta: rautatason kerros (hardware layer), virtualisointikerros (hypervisor) ja hallintakerros (control layer). Rautatason kerros käsittää fyysiset laitteet. Rautatason päällä ajetaan virtualisointikerrosta, joka luo loogisia resursseja fyysisistä resursseista. Hallintakerroksessa hallitaan erilaisia virtualisointikomponentteja, jotka mahdollistavat esimerkiksi virtuaalikoneiden kommunikaation virtualisointikerroksen kanssa.

Virtualisointialustoja on kahdentyyppisiä: tyyppin 1 ja tyyppin 2. Tyyppin 1 alustoja kutsutaan nimellä baremetal hypervisor, ja ne eivät ole riippuvaisia erillisestä isäntäkäyttöjärjestelmästä. Tyyppin 2 virtuaalisointialustoja kutsutaan pelkällä hypervisor-nimellä, ja ne vaativat taustalleen erillisen isäntäkäyttöjärjestelmän, kuten esimerkiksi Windows 7 ja ne soveltuvat parhaiten pienimuotoiseen virtuaalisointiin. Tunnetuimpia virtualisointialustojen valmistajia ovat VMware, Microsoft, Citrix ja RedHat. Tunnetuimpia baremetal hypervisor-alustoja ovat VMware ESXi, Microsoft Hyper-V, Citrix XenServer ja RedHat Enterprise Virtualization. VMware tarjoaa kevyeen virtualisointiin VMware Workstation ja -Fusion alustoja ja Oracle avoimen lähdekoodin Oracle Virtual Boxia. (Vanover, R. 2009.)

3 MICROSOFT HYPER-V

Microsoft Hyper-V on vuonna 2008 julkistettu tyypin 1 virtualisointialusta. Siitä on saatavilla kaupallinen versio sekä ilmainen versio, josta on poistettu tavallisen Windows Serverin ominaisuuksia kuten graafinen työpöytäympäristö. Hyper-V korvaa Microsoftin edellisen virtualisointiratkaisun Microsoft Virtual PC:n, jonka tarkoituksena oli ajaa uudemmissa käyttöjärjestelmissä vanhoja sovelluksia (legacy software), jotka eivät toimineet uudemmissa käyttöjärjestelmissä. Hyper-V tuotiin markkinoille ensimmäistä kertaa Windows Server 2008-käyttöjärjestelmän mukana.

3.1 Arkkitehtuuri

Hyper-V-virtualisointiympäristö koostuu seuraavista asioista:

- Yksi tai useampi Windows Server palvelin, johon on asennettu Hyper-V rooli (isäntäpalvelin/hypervisor).
- Vaihtoehtoinen palvelin ylläpitotyökaluille/toimialueelle.

Hyper-V-virtualisointialusta hyödyntää ns. mikrokernel-tyyppistä arkkitehtuuria. Kun Hyper-V rooli asennetaan Windows Server-käyttöjärjestelmään, asennus luo käyttäjälle näkymättömän isäntäosion (parent partition), jossa virtualisointikerros sekä käyttöjärjestelmä pyörivät. Tällöin virtualisointikerroksella on suora pääsy isäntäkoneen fyysisiin resursseihin. Virtuaalikoneille luodaan omat vierasosiot (child partition), jolloin saavutetaan eristetyn ympäristön hyödyt (kuva 2). (Tulloch, M 2010, 27.)

3.1.1 Parent partition

Isäntäosiossa (Parent partition) toimivat VMWP- ja VMMS-palvelut (Virtual Machine Worker Process & Virtual Machine Management Service), jotka hoitavat virtualisointikerroksen toimintoja. VMMS-palvelun tehtävänä on ylläpitää virtuaalikoneiden tilaa isäntäpalvelimella. VMWP-palvelu (Virtual Machine Worker Progress) mahdollistaa virtuaalikoneiden hallintapalvelut isäntäosion kautta kaikille virtuaalikoneille. VMMS-palvelu luo jokaiselle virtuaalikoneelle oman VMWP-prosessin.

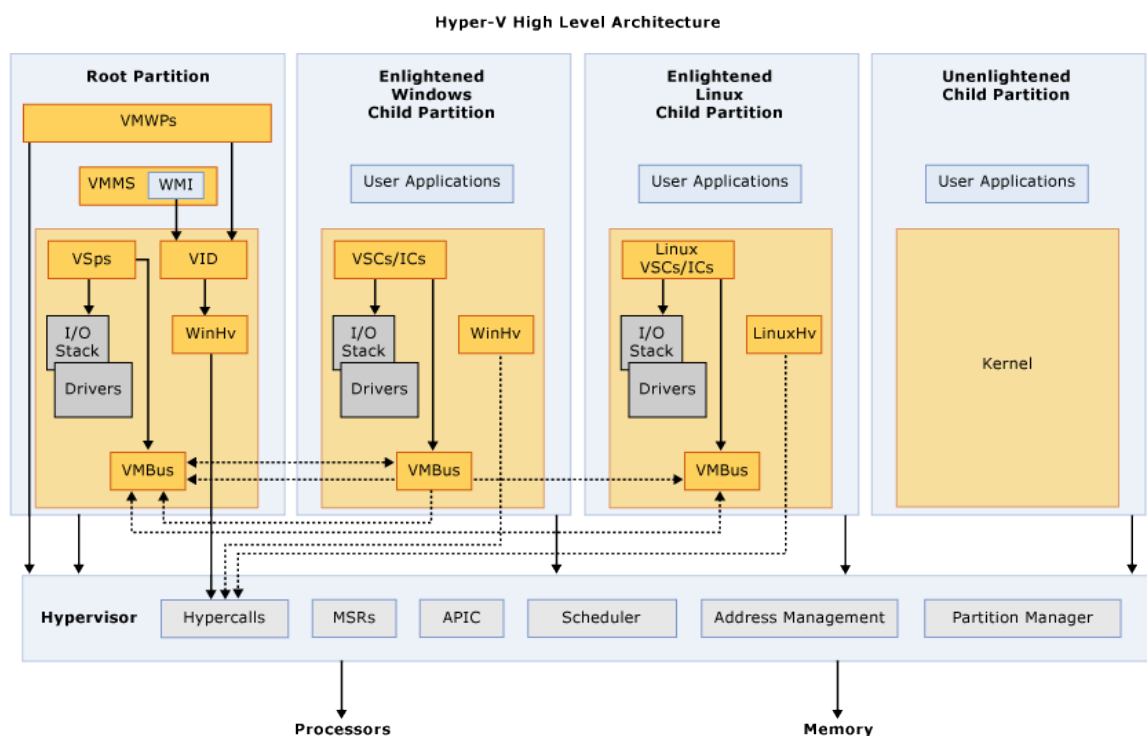
Laiteajurirajapinta toimii kolmella eri tavalla: synteettisesti (para-virtualization), emuloidusti ja suoralla yhteydellä (passthrough). Synteettiset ajurit ovat nopeampia, mutta niiden käyttäminen vaatii Integration Services paketin asentamista virtuaalikoneille. Tällöin virtuaalikone saa tehokkaamman pääsyn isäntäkäyttöjärjestelmän laiteresursseihin VMBus-väylän kautta. Emuloidussa ratkaisussa ajurit toteutetaan ohjelmallisesti, jolloin yhteensopivuus on hyvä, mutta suorituskyky laskee vastaavasti. (Microsoft Developer Network. 2008.)

3.1.2 Child partition

Vierasosioilla ei ole suoraa pääsyä isäntäkoneen laiteresursseihin. Sen sijaan vierasosioille (child partition) näytetään isäntäkoneen laiteresurssit virtuaalisina laitteina (Virtual Devices). Virtuaalilaitteiden resurssipyynnöt ohjataan joko VMBus-väylää pitkin tai suoraan hypervisor kerrokselle isäntäosiolle, joka käsittelee resurssipyynnöt. VMBus toimii loogisten osioiden (parent & child partition) välisenä kommunikointikanavana.

Virtuaalikoneessa, johon on asennettu synteettiset ajurit, pyörii oma VSC-palvelu (Virtualization Service Consumers), joka ohjaa kaikki virtuaalikoneen resurssipyynnöt VMBus-väylän kautta isäntäkoneen VSP-palveluun (Virtualization Service Providers), josta VSP-palvelu pyytää lopuksi isäntäkoneen laiteresursseja (kuva 2). Hyper-V:ssä on tuki myös suoraan yhteyteen tiettyjen laitteiden kanssa

esimerkiksi Virtual Fibre Channel -ominaisuuden kautta. (Microsoft Developer Network. 2008.)



Kuva 2. Hyper-V:n arkkitehtuuri (Microsoft TechNet. 2008).

3.1.3 Tallennus

Server Message Block (SMB) on tiedostojen jakoon verkossa tarkoitettu protokolla, joka on käytössä Windows- käyttöjärjestelmässä yleisesti. SMB-protokollaa kutsutaan joskus myös CIFS-protokollaksi (Common Internet File System). SMB-protokollaa on ennen pidetty varsin huonona ratkaisuna levypalvelimissa pääosin yhteysluotettavuuksien takia. Windows Server 2012 tuo mukanaan uudistetun SMB 3 -protokollan, jonka tarkoituksena on tarjota yrityksille halvempaa levypalvelinratkaisua, joka on silti luotettava ja suorituskykyinen.

Hyper-V voi tallentaa virtuaalikoneiden datan SMB 3 -protokollaa käyttäville tiedostopalvelimille. Tuettuna on ei-klusteroidut ja klusteroidut Hyper-V palvelimet, joissa tiedon tallentamista varten käytetään Failover Clusterin vaatimaa jaettua

tallennuspaikkaa (shared storage). Virtuaalikoneiden migraatiot palvelimelta toiselle onnistuvat keskitetysti jaetussa SMB-jaossa, vaikka palvelimia ei ole konfiguroitu klusteriksi. (Evans, C. 2013.)

Hyper-V käyttää virtuaalikoneissaan virtuaalilevyinä omia VHD- ja VHDX-formaatteja. Virtuaalilevy toimii kokoelmana levylohkoja, ja se tallennetaan tavallisena tiedostona käyttäen NTFS-tiedostojärjestelmää. Virtuaalilevyt voidaan luoda neljänä erityyppisenä:

- Kiinteänä (varaa järjestelmästä heti koko määritetyn kapasiteetin).
- Dynaamisesti kasvavana (kasvaa sitä mukaa kun tietoa tallentuu levyille).
- Eroteltuna (eroteltuun levyyn tehdyt muutokset säilytetään kyseisessä levyssä kunnes, se yhdistetään päälevyn kanssa).
- LUN-tyyppisenä (erillisestä levypalvelimesta tuotu valmis virtuaalinen levy).

Virtuaalinen kuituratkaisu (Virtual Fibre Channel) mahdollistaa virtuaalikoneiden suoran kommunikoinnin kuitujärjestelmäratkaisujen (Fibre Channel) kanssa. Hyper-V voi käyttää kahdenlaista keskitettyä tallennusratkaisua: tiedostotason (SMB 3.0) ja lohkotason tallennusta (ISCSI & FC).

Klusteroiduissa Hyper-V ympäristöissä käytetään yleensä Clustered Shared Volumes (CSV) tallennusratkaisua, joka on yksi tärkeä osa Failover Cluster palvelun käyttöönotossa. Ilman CSV-ratkaisua vain yksi palvelin voi olla yhteydessä jaettuun levyyn (tässä tapauksessa LUN-tyyppinen levy) kerrallaan, jolloin klusterin toimintaperiaate kärsii. CSV-ratkaisu mahdollistaa myös yhden LUN-tyyppisen levyn käytön useammassa kuin yhdessä virtuaalikoneessa. Tällöin jokaiselle virtuaalikoneelle ei tarvitse luoda erillisestä levyjärjestelmästä omaa LUN-tyyppistä levyä.

3.1.4 Verkko

Hyper-V luo virtuaalisen kytkimen virtuaaliverkoille (Virtual Switch). Virtuaalinen kytkin voidaan määritellä kolmelle eri tyypille:

- External (Mahdollistaa virtuaalikoneiden pääsyn isäntäpalvelimen fyysiseen verkkoon. Isäntäpalvelimen ja virtuaalikytkimen verkkokortin välille luodaan siltaus, joka varaa yhden fyysisen verkkokortin isäntäpalvelimelta.)
- Internal (Mahdollistaa virtuaalikoneiden liikenteen isäntäpalvelimen ja muiden virtuaalikoneiden kanssa. Isäntäpalvelimen ja virtuaalikytkimen verkkokortille luodaan yhteys, joka sallii ainoastaan sisäliikenteen.)
- Private (Mahdollistaa isäntäpalvelimellä olevien virtuaalikoneiden välisen kommunikoinnin. Virtuaalikytkimen verkkokorttia ei yhdistetä isäntäpalvelimen verkkokortteihin ollenkaan.)

Internal- ja Private-tyypin loogisia verkkoja voi luoda rajattomasti virtualisointiympäristöön.

External- ja Internal-virtuaaliverkot voivat operoida Trunk ja Access Mode-tilassa. Oletuksena virtuaaliverkot toimivat Trunk-tilassa, jossa virtuaalikytkin vastaanottaa ja lähettää kaikki sille saapuvat verkkopaketit kaikkiin portteihin. Access Mode-tilassa virtuaalikytkin lähettää verkkopaketit eteenpäin, jos verkkopaketin ja virtuaalikytkimen VLAN ID täsmäävät. (Sharma, N. 2013)

3.2 Ympäristön vaatimukset ja rajoitukset

Taulukoissa esiintyvät rajoitukset koskevat Windows Server 2012 R2-käyttöjärjestelmää ja sen Hyper-V roolia, jota tutkittiin tässä opinnäytetyössä. (Microsoft Technet. 2015.)

Isäntäpalvelimien rajoitukset

Taulukko 1. Isäntäpalvelimien (Hyper-V) rajoitukset.

Kohde	Rajoitukset
Loogiset prosessorit	<ul style="list-style-type: none"> Enintään 320 loogista prosessoria.
Virtuaalikoneet	<ul style="list-style-type: none"> Enintään 1024 kappaletta.
Virtuaaliset prosessorit	<ul style="list-style-type: none"> Enintään 2048 vCPU.
Keskusmuisti (RAM)	<ul style="list-style-type: none"> 4 TB.
Tallennus	<ul style="list-style-type: none"> Vain käyttöjärjestelmän tuomat rajoitukset.

Virtuaalikoneiden rajoitukset

Taulukko 2. Hyper-V virtuaalikoneen rajoitukset.

Kohde	Rajoitukset
Virtuaaliset prosessorit	<ul style="list-style-type: none"> Enintään 64 kappaletta.
Keskusmuisti (RAM)	<ul style="list-style-type: none"> 1 TB.
Tallennus	<ul style="list-style-type: none"> VHDX: 64 TB. VHD: 2 TB.
Oheislaitteet	<ul style="list-style-type: none"> Enintään 4 kpl virtuaalisia IDE-levyjä. Enintään 4 kpl virtuaalisia SCSI ohjaimia. Enintään 256 kpl virtuaalisia SCSI levyjä. Enintään 4 kpl virtuaalisia Fibre Channel adaptereita. Enintään 12 kpl verkkokortteja, joista 4 kpl emuloituja ja 8 kpl synteettisiä. Enintään 1 kpl virtuaalisia Floppy asemia. Enintään 2 kpl Serial COM portteja.

Failover Cluster rajoitukset

Taulukko 3. Hyper-V Failover Cluster rajoitukset.

Kohde	Rajoitukset
Palvelinten määrä klusterissa	<ul style="list-style-type: none"> Enintään 64 kpl.
Virtuaalikoneiden määrä klusterissa	<ul style="list-style-type: none"> Enintään 8000 kpl yhdessä klusterissa.

3.3 Ympäristön käyttöönotto

Ympäristön luomiseksi valittiin yksinkertainen kahden klusterin kokoonpano, jolla voitiin suorittaa tarpeelliset suorituskykytestit ja testata laajemmin ympäristön hallintaa ja toimintaa. Hallintakoneeksi ja toimialueohjaimeksi luotiin oma työasemakone. Ympäristöä hallittiin kolmannen osapuolen sovelluksella (5nine Manager for Hyper-V), josta on saatavilla maksullinen versio yrityksille (PLUS) ja ilmainen rajoitettu versio esimerkiksi kevyeen kotikäyttöön.

3.3.1 Palvelimet

Palvelimiin asennettiin Microsoftin Windows Server 2012 R2-käyttöjärjestelmät, joille ladattiin uusimmat päivitykset. Tämän jälkeen asennettiin työasemakoneelle Windows Server 2012 R2-käyttöjärjestelmä, jolla luotiin myös oma toimialue testiympäristöön. Palvelimet liitettiin toimialueeseen, jonka jälkeen niille asennettiin Hyper-V ja Failover Cluster-roolit. Palvelinten verkkokortit konfiguroitiin omiin aliverkkoihinsa suositusten mukaisesti (1x Cluster, 1x ISCSI, 1x Live Migration, 1x Management ja 1x Virtual Machine). Ulkoverkkoon suuntautuvaa liikennettä ohjaavat ainoastaan Management- ja Virtual Machine-verkot.

Molempiin palvelimiin liitettiin levypalvelimesta yksi jaettu 10 GB osio CSV-datalle ja jaettu 500 GB osio virtuaalikoneille ja niiden datalle. Tämän jälkeen palvelinten välille luotiin vikasietoinen klusteri (Failover Cluster) Failover Cluster Managerin avulla.

3.3.2 5nine Manager for Hyper-V PLUS

5nine Manager for Hyper-V PLUS asennettiin työasemakoneelle, joka toimi myös ympäristön toimialueohjaimena (domain controller). Palvelinkoneille asennettiin omat *5nine Manager for Hyper-V PLUS Console*-laajennukset, jotka mahdollistavat palvelinten monipuolisemman etähallinnan pääohjelmasta. Tämän jäl-

keen hallintaohjelmaan lisättiin aiemmin luotu klusteri ja palvelimet. Myös virustentorjunta-agentit on mahdollista asentaa palvelimille *5nine Antivirus Agent* -laajennuksella. Suorituskykytesteissä virustentorjunta ei ollut ympäristössä käytössä. 5nine Manager for Hyper-V PLUS -lisenssi maksaa noin 263 dollaria vuodessa, mikä sisältää oikeuden kahteen prosessoriyksikköön (CPU socket).

3.4 Ympäristön hallinta

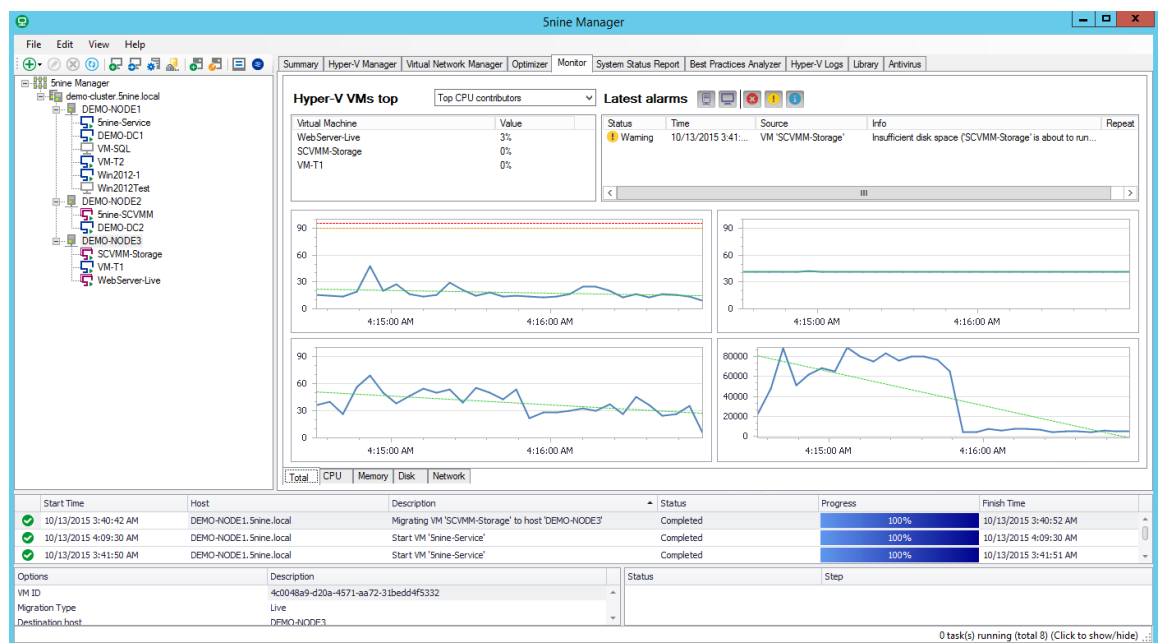
Hyper-V:n hallinta perustuu PowerShell-komentoihin, jolloin siihen on helppo kehittää omia hallintatyökaluja. Erillistä hallintaympäristöä ei tarvitse käyttää. Windows Server 2012 R2:n mukana tulevat yksinkertaiset työkalut Hyper-V:n graafiseen hallintaan. Lisätoiminnallisuutta ympäristön hallitsemiseen saadaan asentamalla Microsoftin System Center Virtual Machine Manager -ohjelmisto tai kolmannen osapuolen tarjoama ratkaisu.

5nine Manager for Hyper-V PLUS tarjoaa laajat hallinta- ja käyttöominaisuudet verrattuna ilmaiseen Hyper-V Manager -hallintatyökaluun. Sovelluksella voidaan tehdä pääosin samat tärkeät asiat kuin System Center Virtual Machine Managerilla. 5nine Manager for Hyper-V PLUS sisältää myös mahdollisuuden valita integroitu virustentorjuntaratkaisu virtualisointiympäristölle. Vaihtoehtoina on agentin ja agentillinen versio. Hallintaohjelma mahdollistaa myös yhtäaikaisen hallinnan vanhoille ja uusille palvelimille (Windows Server 2008 R2- ja 2012-pohjaiset Hyper-V-palvelimet). Hallintaohjelma sisältää myös oman tiedostonhallintapalvelun, jonka avulla voidaan siirtää tiedostoja virtuaalikoneelta isäntäpalvelimelle ja toisinpäin.

Hallintaohjelma koostuu kolmesta kerroksesta: DataCenter, Cluster ja Host. DataCenter sisältää Cluster- ja Host kerrokset. DataCenter kerroksessa määritetään Windows Server -toimialueen tunnukset, joilla on oikeudet hallita isäntäpalvelimia. Cluster- ja Host-kerroksissa voidaan käyttää automaattista hakutoimintoa, joka hakee kaikki toimialueella olevat klusterit ja isäntäpalvelimet ja lisää ne hallintaympäristöön automaattisesti. Haku toimii joko Active Directoryn tai IP-

avaruuden kautta. Cluster-kerroksessa näytetään kaikki klusteroidut virtuaalikoneet. Host kerroksessa näkyvät kaikki isäntäpalvelimissa olevat virtuaalikoneet, mukaan lukien paikalliset virtuaalikoneet, joita ei ole klusteroitu.

Hallintaohjelma näyttää jokaisessa kerroksessa informaatiotekstin lisäksi graafista dataa kyseisen kerroksen toiminnasta (kuva 3). Hallintaohjelmaan kuuluu oma kirjastomoduuli, johon voidaan tallentaa ISO-levykvien, virtuaalikoneiden levy- ja mallikuvien omat erilliset sijainnit käytettävyyden parantamiseksi. Hallintaohjelma mahdollistaa myös kuormantasauksen virtualisointiympäristössä CPU:n-, muistin- ja levynkäytön perusteella. Hallintaohjelma voi ajaa myös isäntäpalvelimille Best Practices Analyzer -toiminnon, joka tarkistaa automaattisesti isäntäpalvelimista löytyneitä mahdollisia puutteita tai ongelmia. Lisäksi hallintaohjelma hakee isäntäpalvelimesta useat eri lokitiedostot helposti luettavaksi käyttäjälle. Käyttäjä voi tulostaa isäntäpalvelimilla sijaitsevista virtuaalikoneista kokonaiskat- sauksen, joista selviää esimerkiksi käyttöjärjestelmät, levynkäyttö ja tilanneve- dokset. Hallintaohjelma voi lähettää sähköpostilla käyttäjälle ilmoituksen, jos esimerkiksi virtuaalikoneen toiminta pysähtyy tai virustentorjunta havaitsee on- gelmakohteen.



Kuva 3. 5nine Manager for Hyper-V PLUS.

3.5 Lisensointi

Windows Server lisensoidaan Processor/Client Access License (CAL) -mallin mukaan. Kun Windows Server -ohjelmistoa ajetaan palvelimessa, täytyy sen palvelimen prosessorit lisensoida. Standard- ja Datacenter-version lisenssit sisältävät kaksi prosessoriyksikköä yhdellä palvelimella. Palvelin, jossa on neljä erillistä prosessoriyksikköä, vaatii yhteensä kaksi lisenssiä. Windows Server -instanssien määrä yhdellä palvelimella riippuu Windows Serverin versiosta. Standard- ja Datacenter-versioilla on täysin samat ominaisuudet lukuun ottamatta virtualisointioikeuksia.

Instanssilla tarkoitetaan käyttöjärjestelmäympäristöä (Operating System Environment OSE), ja se voi olla joko fyysinen tai virtuaalinen. Fyysinen järjestelmä voi sisältää yhden tai kummankin vaihtoehdon seuraavista:

- yksi fyysinen käyttöjärjestelmäympäristö
- yksi tai useampi virtuaalinen käyttöjärjestelmäympäristö.

Datacenter-versio mahdollistaa rajattomat määrät Windows Server -instansseja yhdellä lisensoidulla palvelimella (1 fyysinen instanssi ja rajaton määrä virtuaalisia instansseja). Standard versio mahdollistaa yhden fyysisen instanssin ja kaksi virtuaalista instanssia yhdellä lisenssillä. Jos molemmat virtuaali-instanssit ovat käytössä yhtä aikaa, fyysistä instanssia saa käyttää ainoastaan näiden kahden virtuaali-instanssin hallintaan (virtualisointipalvelut). Virtuaalinen käyttöjärjestelmäympäristö ei saa ylittää prosessoriyksiköissä fyysisen instanssin määrää ilman erillistä lisensointia. Palvelin voi kuitenkin sisältää useamman instanssin kuin mitä lisenssi sallii. Tällöin ylimääräisiä instansseja ei saa ajaa yhtäaikaaisesti. Esimerkiksi Standard-versiolla voi pitää kahta virtuaalista instanssia päällä, ja nämä sammutettuina. Kahden palvelimen ympäristössä, jossa on Standard lisenssi molemmissa palvelimissa, toisessa palvelimessa päällä olevia virtuaalisia instansseja ei saa siirtää toiselle palvelimelle, vaikka oikeudet neljään virtuaaliseen instanssiin täytyvät. Tällaisessa tapauksessa toisella palvelimella pitäisi olla ylimääräinen lisenssi hankittuna. (Microsoft 2015.)

Windows Server -ohjelmiston käyttö muissa baremetal-tason hypervisoreissa kuten VMware ESXi:ssä toimii samalla tavoin kuin muutenkin, mutta fyysistä käyttöjärjestelmäympäristöä ei oteta käyttöön. Esimerkiksi VMware ESXi -ympäristössä Standard lisenssillä voi ajaa kahta virtuaalista Windows Server -instanssia, mikäli ESXi-ympäristössä on myös oikea määrä prosessoriyksiköitä (tässä tapauksessa kaksi prosessoriyksikköä). (Microsoft 2015.)

Virtuaalinen Windows Server -käyttöjärjestelmäympäristö vaatii lisäksi erilliset CAL-lisenssit, jotka määräytyvät laitteiden tai käyttäjien mukaan. CAL-lisenssi vaaditaan jokaiselta käyttäjältä tai laitteelta, jolla on pääsy instanssiin. Poikkeuksena kaksi käyttäjää tai laitetta saa pääsyn fyysisiin instansseihin, jos niissä pyörii ainoastaan virtualisointiin tarkoitettuja palveluita. Virtuaali-instanssit vaativat kuitenkin CAL-lisenssoinnin. (Microsoft 2015.)

Hyper-V:n ilmainen versio, Hyper-V Server, ei tarvitse erillistä lisenssointia, mutta siinä pyörivät virtuaalikoneet tarvitsevat omat lisenssinsä. Käytännössä on mahdollista luoda täysin ilmainen virtualisointiympäristö Hyper-V Serverin avulla, jos virtuaalikoneet eivät vaadi erillisiä lisenssejä.

Esimerkkitapaus

Tässä tapauksessa yrityksellä on käytössään neljä palvelinta, joissa jokaisessa on kaksi prosessoria (4x 2 CPU socket). Yritys haluaa ajaa palvelimissa Windows Server 2012 R2 ja RHEL 7 -käyttöjärjestelmiä. Windows Server 2012 R2-virtuaalikoneita on käytössä kahdeksan kappaletta ja RHEL 7 -virtuaalikoneita neljä kappaletta. Ympäristöä ylläpitää kaksi eri henkilöä. Sopimuskaudeksi valittiin kolme vuotta ja summa maksettiin kerralla.

Windows Server 2012 R2 -instansseja muodostuu tässä tapauksessa yhteensä 12, joista virtuaalisia instansseja on yhteensä 8. RHEL 7 -instansseja on yhteensä 4 kappaletta. Virtualisointiympäristöä hallittiin erillisellä 5nine Manager for Hyper-V PLUS -sovelluksella.

Virtualisointiympäristön hinnaksi tulee yhteensä 27 401 euroa, joka sisältää neljä kappaletta Windows Server 2012 R2 Datacenter -lisenssejä (21 728 €), neljä

kappaletta 5nine Manager for Hyper-V PLUS -lisenssejä (3156 €), kaksi kappaletta CAL-käyttöoikeuslisenssiä (879 €) ja neljä kappaletta RHEL 7 Server Standard -lisenssejä (4794 €).

Vaihtoehtoisesti virtualisointiympäristöä voidaan hallita Microsoftin System Center 2012 R2 -ohjelmistokokonaisuudella, jota Microsoft suosittelee ympäristön hallintaan. System Center 2012 R2 -lisensointi on myös prosessoriyksikkökohtainen, ja yksi lisenssi sisältää oikeudet kahteen prosessoriyksikköön. System Center 2012 R2:sta on saatavilla Datacenter- ja Standard-versiot, jotka vastaavat ominaisuuksiltaan Windows Server 2012 R2 Datacenter- ja Standard -versioita.

Virtualisointiympäristön hinnaksi tulee yhteensä 40 129 euroa, joka sisältää neljä kappaletta Windows Server 2012 R2 Datacenter -lisenssejä (21 728 €), neljä kappaletta System Center 2012 R2 Datacenter -lisenssejä (12 728 €), kaksi kappaletta CAL-käyttöoikeuslisenssiä (879 €) ja neljä kappaletta RHEL 7 Server Standard -lisenssejä (4794 €).

4 RED HAT ENTERPRISE VIRTUALIZATION

Red Hat Enterprise Virtualization (RHEV) on vuonna 2010 julkistettu tyypin 1 KVM-pohjainen virtualisointialusta.

RHEV-virtualisointialusta perustuu RedHatin kehittämään ilmaiseen avoimen lähdekoodin oVirt-virtualisointialustaan. oVirtin kehitys on nopeampaa kuin RHEV-alustan, koska RHEV-alusta halutaan pitää mahdollisimman vakaana ja luotettavana. Vasta kun oVirt-alustalla on todettu uuden ominaisuuden vakaus, lisätään se RHEV-alustaan. Myös Red Hatin RHEL-käyttöjärjestelmä perustuu Fedora Linux -käyttöjärjestelmään, jota kehitetään nopeaan tahtiin. (eWEEK. 2014.)

4.1 Arkkitehtuuri

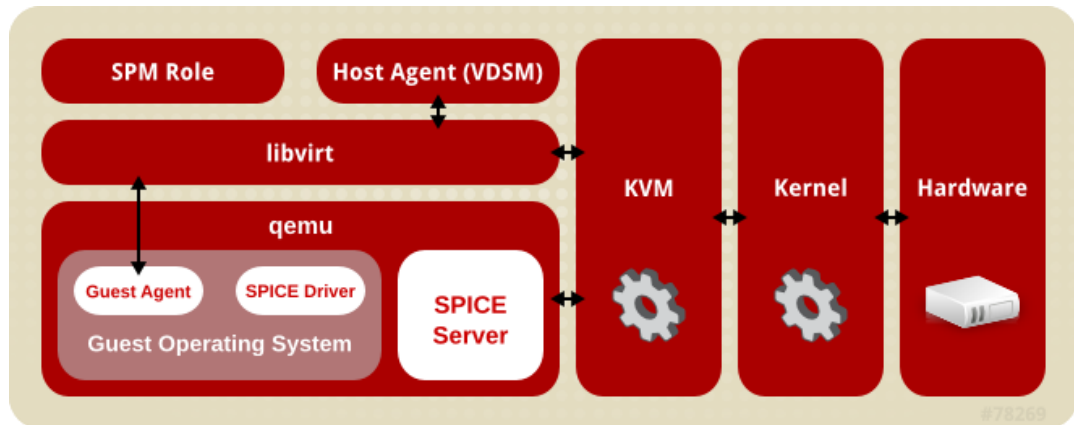
RHEV-virtualisointiympäristö koostuu seuraavista asioista:

- Red Hat Enterprise Virtualization Manager -ohjelmisto (hallintakerros).
- Yksi tai useampi Red Hat Enterprise Virtualization Hypervisor -palvelin (isäntäpalvelin).

RHEV Hypervisor sisältää RHEL-käyttöjärjestelmästä erillisen optimoidun version, joka on tarkoitettu virtuaalikoneiden luomiseen. Tavallinen RHEL-käyttöjärjestelmä voidaan muuttaa myös virtualisointi-isännäksi (Red Hat. 2015a). Red Hat Enterprise Virtualization -laiteajurirajapinta toimii kolmella eri tavalla: emuloidusti, synteettisesti (para-virtualization) ja suoralla yhteydellä (passthrough). (Red Hat. 2015b)

RHEV Hypervisor perustuu KVM-pohjaiseen virtualisointiratkaisuun, jossa virtuaalikoneet pyörivät normaaleina Linux-prosesseina isäntäpalvelimessä (kuvat 4 & 5) (IBM. 2011). KVM-pohjaisessa virtualisoinnissa virtuaalikoneiden suorittimia käytetään tavallisina säikeinä, joita ohjaa Linux scheduler. Virtuaalikoneet perivät

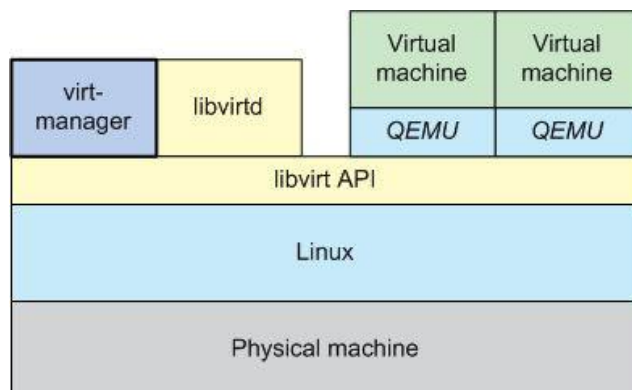
ominaisuuksia kuten esimerkiksi NUMA:n suoraan Linuxin kernel-ytimeistä. KVM-pohjaisessa virtualisoinnissa esiintyy vähemmän ns. virtualization overheadia kuin esimerkiksi Hyper-V:ssä, joka tarkoittaa virtualisointiympäristön suorittamia operaatioita isäntäpalvelimessa.



Kuva 4. Red Hat Enterprise Virtualization -arkkitehtuuri (Red Hat. 2015a).

4.1.1 QEMU

QEMU on emulaattori, jota käytetään eri järjestelmien ajamiseen virtuaalisesti. QEMU:n toiminta pyrkii mallintamaan kokonaista järjestelmää, kuten esimerkiksi tietokonetta, joka sisältää käyttöjärjestelmän ja eri laiteresursseja. QEMU toimii KVM-moduulin kanssa yhdessä, tarjoten täyden rautatuen virtualisointiin (kuva 5). (Red Hat. 2015a.)



Kuva 5. QEMU KVM-pohjaisessa arkkitehtuurissa (IBM. 2011).

4.1.2 VDSM

RHEV-virtualisointiympäristö sisältää erillisen VDSM-agentin (Red Hat Enterprise Virtualization Manager Host Agent), jonka tehtävänä on ajaa eri komentoja virtuaalikoneille ja levyjärjestelmille. VDSM-agentti valvoo isäntäpalvelimen resurssien käyttöä kuten muistia ja verkkoa. VDSM-agentti luo virtuaalikoneet, kerää statistiikkaa ja luo lokitiedostoja. VDSM-agentti asennetaan jokaiselle hallittavalle isäntäpalvelimelle. Red Hat Enterprise Virtualization Manager lähettää komennot VDSM-agenteille, jotka toteuttavat operaatiot isäntäpalvelimissa. (Red Hat. 2015a.)

4.1.3 SPM

Storage Pool Manager -rooli liitetään yhdelle isäntäpalvelimelle virtualisointiympäristössä, jolloin kyseinen isäntäpalvelin hallitsee kaikkea virtualisointiympäristön Storage Domainin metadatan muutoksia, kuten esimerkiksi virtuaalilevyjen (virtual disk images) luontia, tuhoamista ja virtuaalikoneiden tilannevedoksia (snapshots). SPM rooli voidaan siirtää mille tahansa toiselle isäntäpalvelimelle kyseisessä virtualisointiympäristössä. Red Hat Enterprise Virtualization Manager pitää automaattisesti huolen, että rooli löytyy joltain isäntäpalvelimelta. Isäntäpalvelimen mennessä toimintakyvyttömäksi rooli siirtyy automaattisesti toiselle isäntäpalvelimelle. (Red Hat. 2015a.)

4.1.4 Libvirt

Libvirt on avoimen lähdekoodin ohjelmointirajapinta (API) ja hallintatyökalu virtuaalikoneiden ja muiden virtualisointitoimintojen yksinkertaiseen hallintaan. Libvirt sisältää ohjelmointirajapinnan, daemonin (libvirtd) ja komentotyökalun (virsh). (libvirt.org. 2015.)

4.1.5 Tallennus

RHEV-virtualisointiympäristö käyttää keskitettyä tallennusjärjestelmää virtuaalikoneiden levytiedoille, malleille (template), tilannevedoksille (snapshots) ja ISO-levykuville. Tallennusympäristö jaetaan loogisiin Storage Pooleihin, jotka kuuluvat Storage Domain -alueisiin. Storage Domain -alueita on kolmea tyyppiä:

- Data (sisältää virtuaalikoneiden datan kuten virtuaalilevyt).
- Export (sisältää virtualisointiympäristöstä viedyn datan, esimerkiksi konvertoitu virtuaalikone tai ympäristöjen välinen tiedonsiirto).
- ISO (sisältää käyttöjärjestelmien levykuvat virtuaalikoneiden asennuksia varten).

Export ja ISO Storage Domainit toimivat ainoastaan NFS-tallennusratkaisuilla. Data Storage Domain -alue tukee NFS-, ISCSI- ja FCP-tallennusratkaisuja. NFS tallennusratkaisussa kaikki virtuaalikoneet, mallikuvat ja tilannevedokset ovat erillisiä tiedostoja. ISCSI- ja FCP- tallennusratkaisussa vastaavasti tiedot tallennetaan loogisina volyymeinä. Lohkotason laitteet lasketaan yhdeksi loogiseksi kokonaisuudeksi (volume group), josta LVM (Logical Volume Manager) jakaa ne virtuaalikoneille loogisina volyymeinä. (Red Hat. 2015c.)

RHEV-virtualisointiympäristö tukee RAW- ja QCOW2-tallennusformaatteja virtuaalikoneille. QCOW2-tallennusformaatti erottaa fyysisen tallennuskerroksen virtuaalisesta kerroksesta lisäämällä yhteydet loogisten ja fyysisten lohkojen välille. Jokainen looginen lohko on yhdistetty sen vastaavaan fyysiseen lohkoon. Tämä tallennusformaatti mahdollistaa vedoksien luonnin virtuaalikoneista (snapshots). RAW-tallennusformaatti tarjoaa parempaa suorituskykyä kuin QCOW2, sillä levykuville ei kohdisteta mitään erillisiä muotoiluja. RAW-tallennusformaatti vaatii, että koko levytila allokoidaan heti käytettäväksi, ellei levytiedostoa tuoda erillisestä tallennusjärjestelmästä. (Red Hat. 2015c.)

Valmiiksi allokoitua levytilaa suositellaan virtuaalikoneille, joissa tapahtuu paljon I/O-kuormaa, sillä täysin allokoituun levytiedostoon kohdistuu vähemmän viivettä. Vaikka erillisessä levyjärjestelmässä levyjä ei ole välttämättä valmiiksi täysin allokoitu erikseen, suosittelee Red Hat silti virtuaalikoneille valmiiksi täysin allokoituja levyjä virtualisointiympäristössä. (Red Hat. 2015c.)

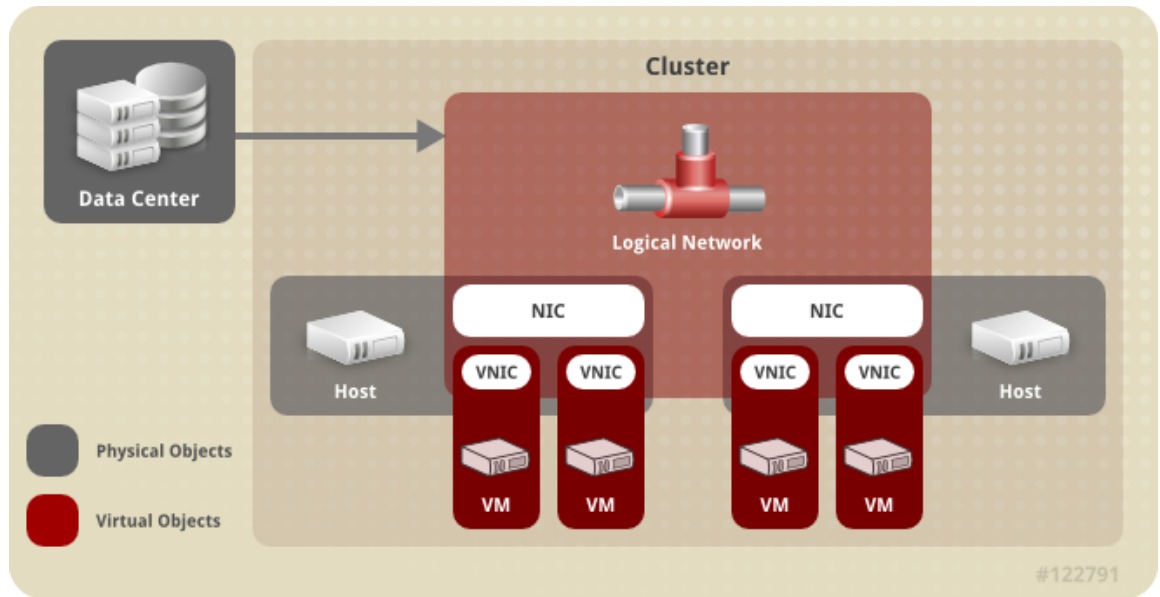
4.1.6 Verkko

Loogiset verkot tarjoavat ratkaisun eristää erityyppiset verkkoliikenteet toisistaan. Oletuksena Red Hat Enterprise Virtualization luo *rhev*m-nimisen loogisen verkon, joka on tarkoitettu vain hallintaliikenteelle palvelinten ja hallintakoneen välillä. Ympäristöön voidaan luoda myös omat loogiset verkkonsa virtuaalikoneiden liikenteelle, levyjärjestelmän liikenteelle sekä graafiselle liikenteelle (display network). Klusterin jokaisella palvelimella tulee olla määriteltynä samat loogiset verkot. (Red Hat. 2015d.)

Virtuaalikoneiden liikenteelle tarkoitetuille loogisille verkoille luodaan aina automaattisesti isäntäpalvelimiin siltauslaite (network bridge device). Klusterin kaikilta palvelimilta konfiguroidaan yksi verkkokortti siltausta varten. Virtuaalikoneiden virtuaaliset verkkokortit liitetään samaan siltaan, jolloin virtuaalikoneet voivat kommunikoida kaikkien samassa siltauksessa olevien kohteiden kanssa. Muissa loogisissa verkoissa muodostetaan suoraan yhteys palvelinten verkkokortteihin.

Loogisia verkkoja voidaan luoda kahdella eri määritteellä: Required (jokaisella klusterin palvelimella pitää olla määritettynä) ja Optional (voidaan luoda palvelimille omat erikoisverkkonsa, joita ei ole pakko käyttää muissa palvelimissa).

Loogiset verkot luodaan Data Center -kerroksessa, jonka jälkeen niitä voidaan ottaa käyttöön Cluster kerroksessa. Virtualisointiympäristön kaikki verkkoliikenne kulkee oletuksena loogisen *rhev*m-verkon läpi, ellei muita loogisia verkkoja ole luotu ja määritetty ympäristöön (kuva 6). (Red Hat. 2015e.)



Kuva 6. Verkkoympäristö (Red Hat. 2015d).

4.2 Ympäristön vaatimukset ja rajoitukset

Tässä opinnäytetyössä on käytetty RHEV-Hypervisor 7.1 ja RHEV-Manager 3.5 -versioita. Vaatimukset koskevat kyseisiä käyttöjärjestelmiä tai ohjelmia. (Red Hat. 2015f.)

Data Center -kerroksen rajoitukset

Taulukko 4. RHEV Data Center kerroksen rajoitukset

Kohde	Rajoitukset
Storage Domainien määrä	<ul style="list-style-type: none"> Suositus: yksi Data- ja ISO storage domain. Yksi data storage domain on aina pakollinen
Isäntäpalvelimien määrä	<ul style="list-style-type: none"> Enintään 200 isäntäpalvelinta

Cluster-kerroksen rajoitukset

- Kaikkien hallittavien isäntäpalvelimien täytyy sijaita klusterissa.
- Kaikissa hallittavissa isäntäpalvelimissa tulee olla sama prosessorityyppi.

Storage Domain rajoitukset

Taulukko 5. RHEV Storage Domain rajoitukset.

Kohde	Rajoitukset
Tallennusratkaisutyypit	<ul style="list-style-type: none"> Tuetut tallennusratkaisut: Fibre Channel Protocol ISCSI NFS Data Center-kerroksen data storage domainien tulee olla samaa tyyppiä (FCP, ISCSI tai NFS).
Loogiset tallennusyksiköt (LUNs)	<ul style="list-style-type: none"> 300 kpl jokaiselle data storage domainille (ISCSI tai FCP).
Loogiset volyymit (LVs)	<ul style="list-style-type: none"> Suositus 350 kpl per data storage domain (ISCSI tai FCP).

Red Hat Enterprise Virtualization Manager rajoitukset

Taulukko 6. RHEV Manager rajoitukset.

Kohde	Rajoitukset
RAM (keskusmuisti)	<ul style="list-style-type: none"> Vähintään 3 GB.
PCI oheislaitteet	<ul style="list-style-type: none"> Vähintään yksi verkkokortti, joka tukee 1 GB kaistanleveyttä.
Tallennus	<ul style="list-style-type: none"> Vähintään 3 GB levytilaa.

Isäntäpalvelimien rajoitukset

Taulukko 7. Isäntäpalvelimien (RHEV-Hypervisor) rajoitukset.

Kohde	Rajoitukset
CPU	<ul style="list-style-type: none"> Vähintään 1 CPU. Prossessorin tulee tukea Intel 64 ja Intel VT- tai AMD64 ja AMD-V- CPU-käskykanta.
RAM	<ul style="list-style-type: none"> Vähintään 2 GB. Enintään 2 TB.
Tallennus	<ul style="list-style-type: none"> Isäntäosio vähintään 512 MB. Konfiguraatio-osio vähintään 8 MB. Lokitiedosto-osio vähintään 2 GB. Dataosio vähintään 256 MB. Swap vähintään 8 MB.
PCI oheislaitteet	<ul style="list-style-type: none"> Vähintään yksi verkkokortti, joka tukee 1 GB kaistanleveyttä.

Virtuaalikoneiden rajoitukset

Taulukko 8. Virtuaalikoneiden rajoitukset

Kohde	Rajoitukset
CPU	<ul style="list-style-type: none"> • Enintään 160 CPU / RHEL 6. • Enintään 240 CPU / RHEL 7.
RAM	<ul style="list-style-type: none"> • Vähintään 512 MB. • Enintään 4 TB.
PCI oheislaitteet	<ul style="list-style-type: none"> • Enintään 31 kpl virtualisoituja oheislaitteita. Oletuksena on varattu 6 kpl luonnin yhteydessä.
Tallennus	<ul style="list-style-type: none"> • Enintään 28 kpl tallennuslaitetta. 3 kpl IDE- ja 25 kpl VirtIO-tyyppistä laitetta.

4.3 Ympäristön käyttöönotto

Ympäristön luomiseksi valittiin yksinkertainen kahden klusterin kokoonpano, jolla voitiin suorittaa tarpeelliset suorituskykytestit ja testata laajemmin ympäristön hallintaa ja toimintaa. Hallintakoneena toimi erillinen työasemakone.

4.3.1 Palvelimet

Palvelimiin asennettiin aluksi RHEV-Hypervisor 7.1 -käyttöjärjestelmät, jonka jälkeen ne liitettiin Red Hat Enterprise Virtualization Manager -ympäristöön hallittaviksi. Palvelimiin määriteltiin Management-verkkokorteille omat hallintaosoitteet, ja lisäksi avattiin SSH-yhteydet.

4.3.2 Red Hat Enterprise Virtualization Manager

Työasemakoneelle asennettiin aluksi Red Hat Enterprise Linux 7 -käyttöjärjestelmä, joka yhdistettiin Red Hatin lisensointi- ja päivityspalvelimeen omilla käyttäjätunnuksilla. Tämän jälkeen järjestelmään asennettiin virtualisointipaketit, joiden mukana tulee mm. hallintaohjelmisto (RHEV-Manager) virtu-

alisointiympäristöä varten. Virtualisointiympäristöä hallitaan web-pohjaisella käyttöliittymällä, joka sisältää myös erillisen raportointiympäristön. Käyttöliittymän kautta asennettiin hallintaympäristöön molemmat virtualisointipalvelimet, jotka sijoitettiin omaan klusteriinsa. Seuraavaksi määriteltiin Storage Domainit virtualisointiympäristölle. Data Storage Domain määriteltiin iSCSI-tyyppiseksi, joka mahdollisti erillisen levyjärjestelmän liittämisen ympäristöön. Tässä vaiheessa toinen palvelin sai SPM-roolin automaattisesti. Käyttöjärjestelmien levykuvia varten määriteltiin ISO Storage Domain NFS-tyyppiseksi. Levyjärjestelmään oli tätä varten luotu oma NFS-jako kapasiteettialtaaseen.

Virtualisointiympäristön verkkoinfrastruktuuri määriteltiin neljään eri loogiseen verkkoon: Management (Hallintayhteys palvelimien ja RHEV-Managerin välillä), Live Migration (Virtuaalikoneiden migraatio), iSCSI (Levyjärjestelmän liikenne) ja Virtual Machine (Virtuaalikoneiden verkkoyhteys).

Verkkoinfrastruktuuri luotiin Data Center -tasolla, jonka jälkeen Host -tasolla määriteltiin palvelimien eri verkkokorteille omat loogiset verkkonsa.

4.4 Ympäristön hallinta

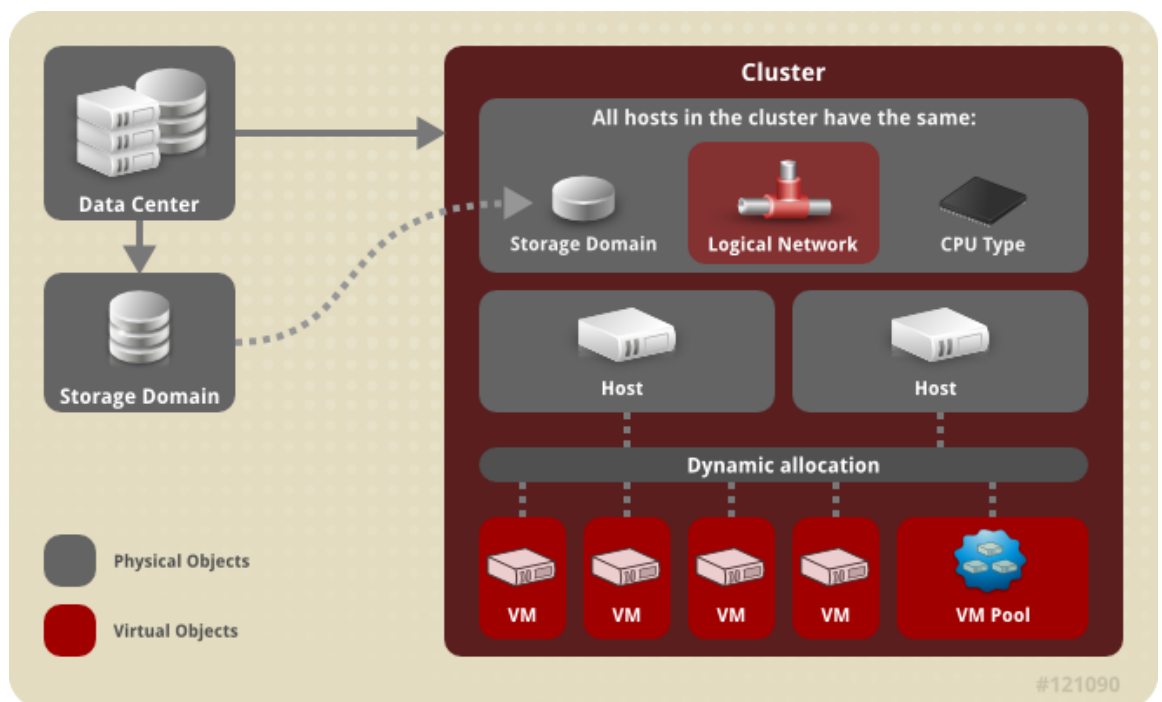
RHEV-virtualisointiympäristöä hallittiin RHEV-Manager -sovelluksella, joka asennetaan RHEL-käyttöjärjestelmään. Hallintasovellusta käytetään verkkoselaimen avulla. Hallintaympäristö koostuu useammasta eri kerroksesta, jotka ovat Data Center, Storage, Networks, Templates, Clusters, Hosts ja Virtual Machines.

Data Center -kerros voi sisältää yhden tai useamman eri data centerin, joka sisältää omat palvelimet ja klusterit. Data Center -kerroksessa määritetään data center -ympäristölle omat Storage Domainit, verkot (Networks), mallikuvat (Templates) ja klusterit (Clusters).

Templates kerroksessa säilytetään virtuaalikoneista tehtyjä mallikuvia. Kun virtuaalikoneesta luodaan mallikuva, virtualisointiympäristö luo uuden "vain luku" -kopion virtuaalikoneesta. Tästä uudesta kopiosta luodaan "pohjalevy" muille vir-

tuualikoneille. Mallikuvaa ei voi poistaa, jos ympäristössä on olemassa virtuaalikoneita, jotka on luotu kyseisestä mallikuvasta. Virtualisointiympäristö tukee myös Pools-ratkaisua, joka mahdollistaa mallikuvien käytön esimerkiksi VDI-ratkaisuna. Kun käyttäjä pyytää virtualisointiportaalista virtuaalikonetta, voidaan Poolista jakaa käyttäjälle oma virtuaalikone käytön ajaksi, jonka jälkeen virtuaalikoneeseen tehdyt muutokset nollataan. (Red Hat. 2015g.)

Clusters kerroksessa voidaan määrittellä isäntäpalvelimet omiin klustereihinsa, kuten esimerkiksi AMD/Intel -pohjaisiin klustereihin, jos ympäristön isäntäpalvelimissa on useampaa eri arkkitehtuuria. Jos klusterissa olevissa isäntäpalvelimissa on sekoitettu keskenään eri sukupolven prosessoreita, klusterissa käytetään ainoastaan ominaisuuksia, jotka löytyvät kaikista prosessoreista. Klusterikerroksessa voidaan määrittää erilaisia virransäästö- ja kuormantasaus käytäntöjä. Klusterissa voidaan ajaa yhtä aikaa joko ainoastaan virtuaalikoneita tai Red Hatin Gluster Storage -palvelimia (kuva 7) (Red Hat 2015h.).



Kuva 7. Klusterikerros (Red Hat. 2015h).

Red Hat Enterprise Virtualization Manager sisältää myös erillisen Red Hat Enterprise Virtualization Reports -palvelun, jonka kautta voidaan luoda erilaisia ra-

portteja ja visuaalisia kaavioita virtualisointiympäristöstä. Red Hat Enterprise Virtualization Reports -palvelu perustuu avoimen lähdekoodin JasperReports- ja JasperServer-sovelluksiin.

4.5 Lisensointi

Kaikki Red Hatin tuotteet perustuvat tilauspohjaiseen (subscription) malliin, joka sisältää itse tuotteen, sen päivitykset ja tukipalvelut. Tilauspalvelusta veloitetaan joka vuosi sama kiinteä hinta, joka perustuu tukipalvelun tasoon (Standard ja Premium) sekä virtualisoinnissa palvelinten prosessoreiden lukumäärään. Tuotteen käyttöoikeus säilyy vaikka tilausta ei jatkaisi sen vanhetessa. Tällöin kuitenkin menetetään esimerkiksi tukipalvelut ja sertifioidut päivitykset.

Red Hat Enterprise Virtualization tilaus sisältää: rajattoman määrän Red Hat Enterprise Virtualization Manager hallintapalvelimia, kaksi prosessorikantaa (CPU socket) virtualisointipalvelimille, päivitys- ja tukipalvelut, ei rajoituksia VRAM:iin sekä kaikki Red Hat Enterprise Virtualizationin tarjoamat ominaisuudet palvelimille ja työpöydille. (Red Hat. 2013.)

Esimerkkitapaus

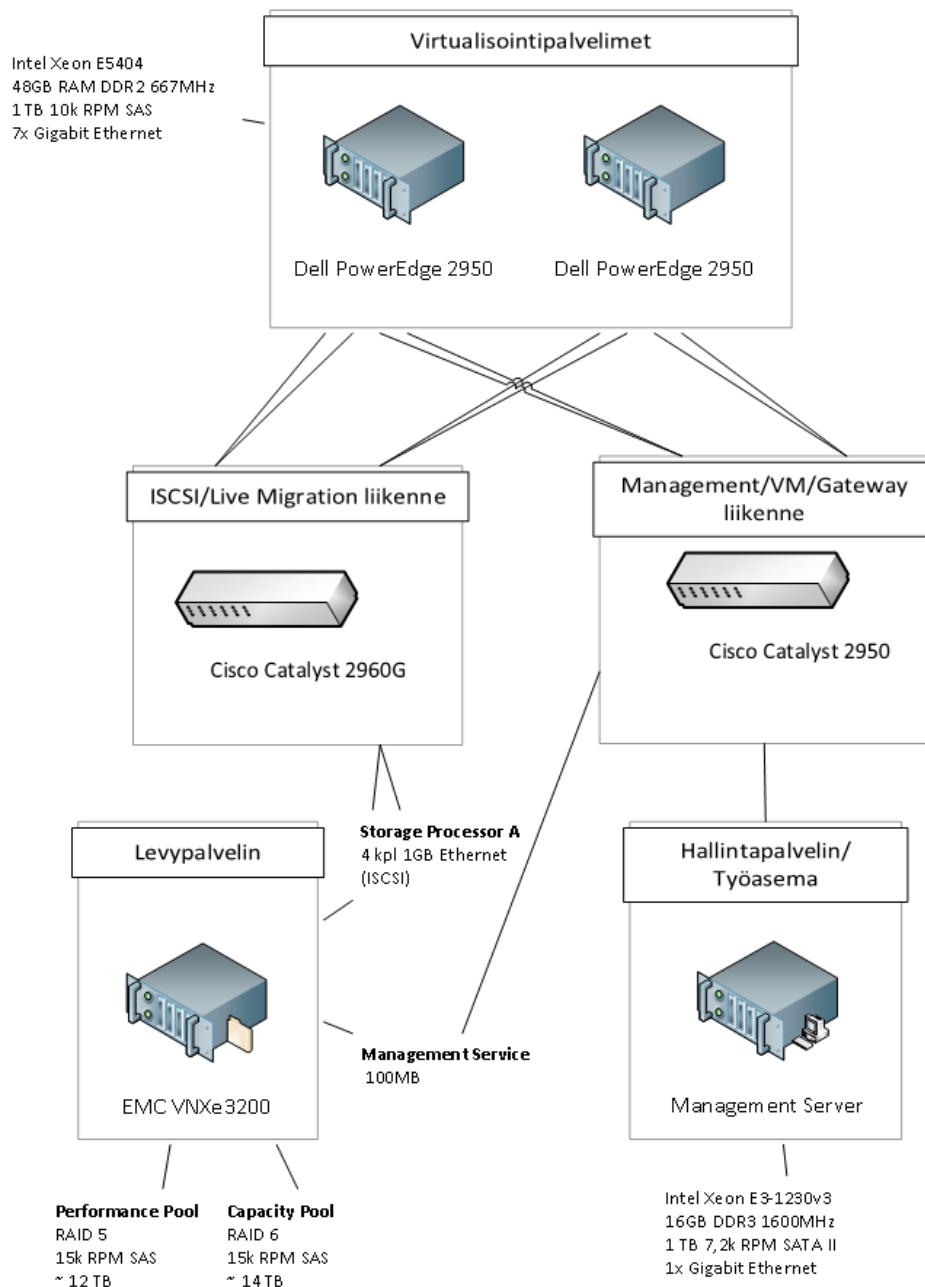
Tässä tapauksessa yrityksellä on käytössään neljä palvelinta, joissa jokaisessa on kaksi prosessoria (4x 2 CPU socket). Yritys haluaa ajaa palvelimissa Windows Server 2012 R2- ja RHEL 7 -käyttöjärjestelmiä. Windows Server 2012 R2-virtuaalikoneita on käytössä kahdeksan kappaletta ja RHEL 7-virtuaalikoneita neljä kappaletta. Yritys valitsee Standard tukipalvelun. Sopimuskaudeksi valittiin kolme vuotta. Hallintakone vaatii yhden ylimääräisen RHEL7 Server lisenssin.

Windows Server 2012 R2 -instansseja muodostuu tässä tapauksessa yhteensä kahdeksan kappaletta, jotka ovat kaikkia virtuaalisia instansseja. RHEL 7 -instansseja on yhteensä viisi kappaletta.

Virtualisointiympäristön hinnaksi tulee yhteensä 40 370 euroa, joka sisältää neljä kappaletta RHEV Standard Support -lisenssejä (10 562 €), neljä kappaletta Windows Server 2012 R2 Datacenter -lisenssejä (21 728 €), kaksi kappaletta CAL-käyttöoikeuslisenssiä (879 €) ja viisi kappaletta RHEL 7 Server Standard -lisenssejä (7191 €).

5 VIRTUALISOINTIALUSTOJEN SUORITUSKYKY

Tutkimusta varten ympäristöön valittiin kaksi identtistä palvelinta, jotka pyörittävät virtualisointialustaa ja yksi erillinen työasema, jolla hallitaan kyseisiä palvelimia. Lisäksi mukana on erillinen levypalvelin (kuva 8).



Kuva 8. Virtualisointiympäristö kokonaisuudessaan.

Palvelimina toimii kaksi kappaletta Dell PowerEdge 2950 palvelinta, joissa molemmissa on yksi neliytiminen prosessori (Intel Xeon E5405), 48 gigatavua keskusmuistia (DDR2 667) ja yhteensä noin teratavu tallennustilaa (10k SAS RAID 5). Verkkoportteja (Gigabit Ethernet) molemmissa palvelimissa on seitsemän kappaletta.

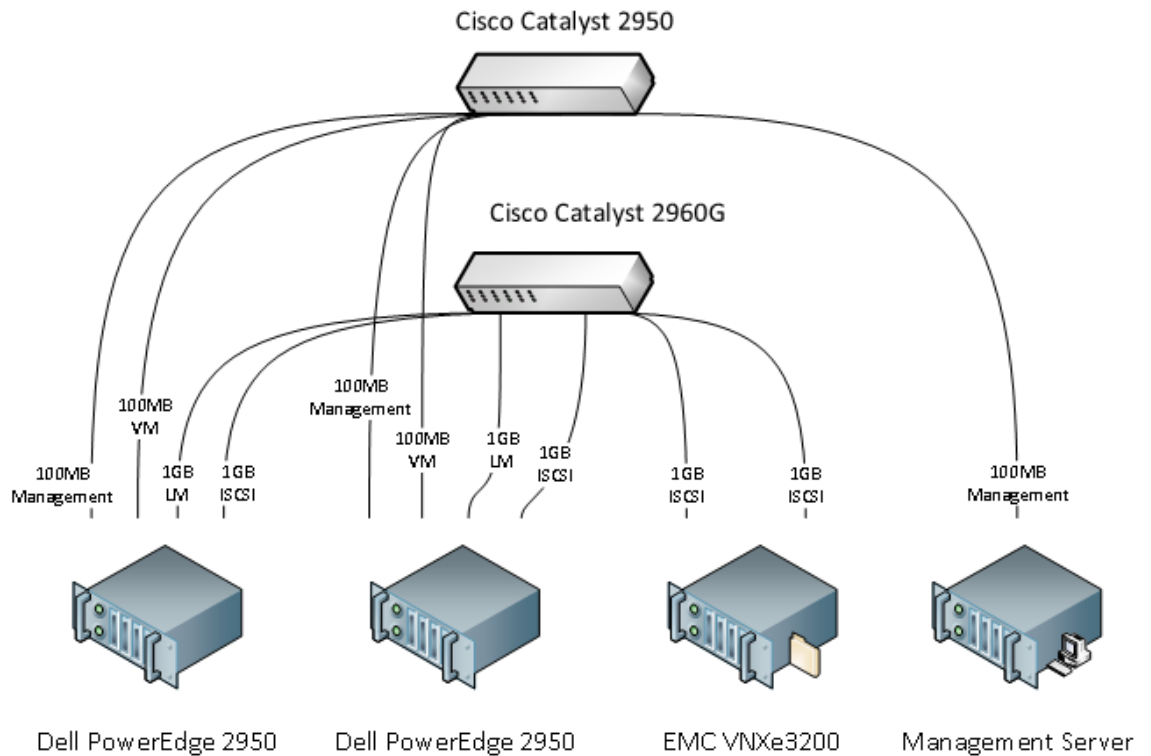
Työasemakoneessa on yksi neliytiminen prosessori (Intel Xeon E3-1230v3), 16 gigatavua keskusmuistia (DDR3 1600) ja noin teratavu tallennustilaa (7,2k SATA II). Työasemassa on yksi gigabitin verkkokortti.

Levypalvelimena toimii EMC VNXe3200. Levyjärjestelmässä on kaksi eri poolia, Performance ja Capacity. Performance poolissa on nopeammat levyt kuin Capacity poolissa. Performance poolin levykonfiguraatio on RAID5 (SAS 15k) ja Capacity poolissa RAID6 (SAS 15k). Yhteensä tallennustilaa Performance poolissa on 12 teratavua, ja Capacity poolissa 14 teratavua. Levyjärjestelmässä on kaksi prosessointiyksikköä (SP A ja SP B), joilla molemmilla on käytössä neljä kappaletta gigabitin verkkoportteja ISCSI-liikenteelle. Testeissä molemmat palvelimet olivat yhden prosessointiyksikön takana kahdella linkillä. Levypalvelin liitettiin virtualisointialustoihin ISCSI-yhteydellä.

Virtualisointiympäristön verkkoliikenne kulki osittain omassa suljetussa verkossa, jossa virtuaalikoneiden siirtoliikenteelle (Live Migration) ja palvelinten levyliikenteelle (ISCSI) oli määritetty omat verkot. Virtuaalikoneiden verkko (VM) oli 100 megabitin nopeudella toimiva ja palvelinten levyliikenne sekä virtuaalikoneiden siirtoliikenne (ISCSI ja Live Migration) gigabitin nopeudella toimiva. Palvelinten hallintaliikenne (Management) ja virtuaalikoneiden liikenne oli sijoitettu omalle kytkimelleen, josta oli pääsy myös ulkoverkkoon (kuva 9). Kytkiminä toimivat Ciscon Catalyst 2950 ja 2960G mallit, joista 2960G tukee gigabitin yhteyksiä ja 2950 100MB yhteyksiä.

Suorituskykytestejä ajettiin kahdella eri käyttöjärjestelmällä; Windows Server 2012 R2:lla ja CentOS 7:llä, jotka vastaavat yrityskäytössä olevia palvelinkäyttöjärjestelmiä. Virtuaalikoneille määriteltiin neljä prosessoriydintä, neljä gigatavua keskusmuistia ja erilliset käyttöjärjestelmä- ja suorituskykytestauslevyt. Käyttöjär-

jestelmä- ja suorituskykytestauslevyt tulivat Performance poolista. Virtuaalikoneille asennettiin myös virtualisointialustan tarjoamat viralliset ajuripaketit, jotka parantavat virtuaalikoneiden toimintaa ja suorituskykyä. Suorituskykytestit ajettiin viisi kertaa läpi, jonka jälkeen mitattavista arvoista luotiin keskiarvot.



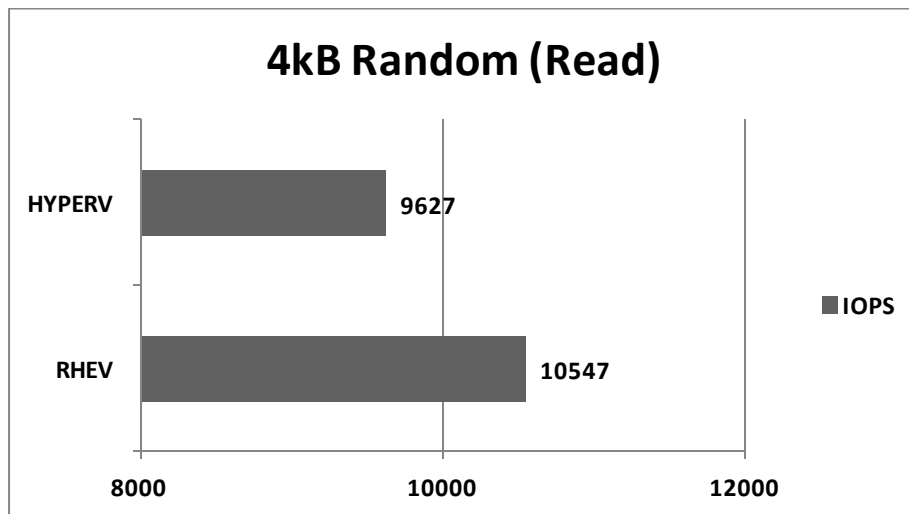
Kuva 9. Testiympäristön palvelinten verkkoliikenteen konfiguraatio.

5.1 IOMeter

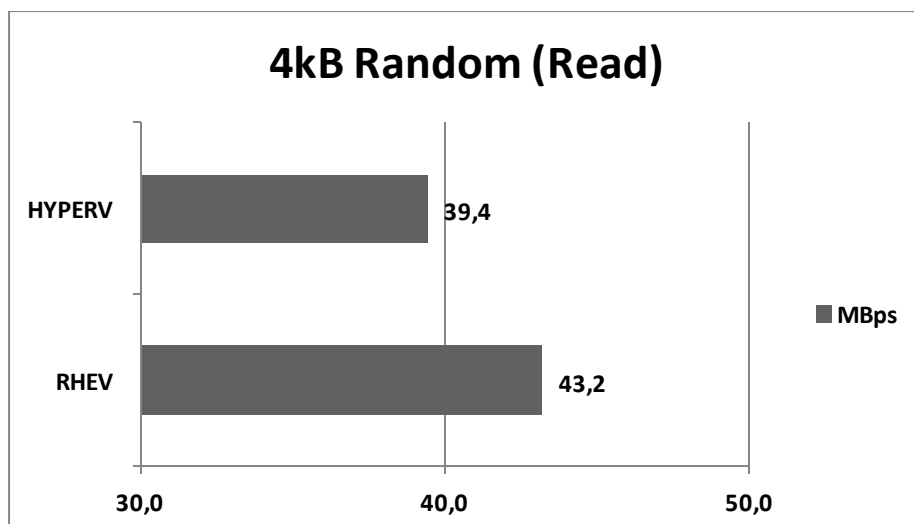
IOMeter työkalua käytetään mittaamaan ja havainnoimaan yksittäisen tai klustroidun järjestelmän I/O-suorituskykyä ja mahdollisia ongelmia. IOMeterilla voidaan simuloida erilaisia toimintoja kuten VDI- ja SQL-kuormaa. Tässä tutkimuksessa IOMeter asennettiin Windows Server 2012 R2 virtuaalikoneelle, johon on liitetty erillinen suorituskykylevy. Testeiksi luotiin erilaisia I/O kuormia, jotka vastaavat esimerkiksi SQL- tai VDI-tyyppistä kuormaa. Kaikissa testeissä käytettiin asetuksena 16 kappaletta Outstanding I/O:ta, joka tarjoaa hyvän latenssin ja suuremmat I/O-lukemat. (Iometer. 2015)

5.1.1 4kB suorituskykytestit

4kB testejä suoritettiin kolme kappaletta. Ensimmäisessä testissä mitattiin satunnaisdatan lukunopeutta (IOPS ja MBps). Testin asetukset olivat 100 % luku ja 100 % satunnaisdata (kaaviot 1 & 2). 4kB:n testit pyrkivät kuvaamaan käyttäjän kevyttä työskentelyä normaalissa työasemassa, kuten esimerkiksi tekstinkäsittelyä ja verkkosivujen selaamista.



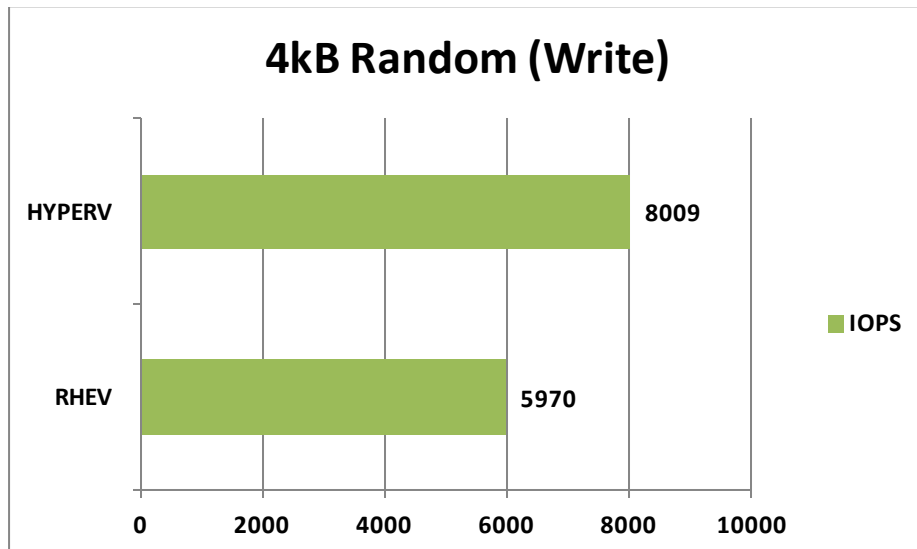
Kaavio 1. 4kB satunnaisdata (luku) IOPS.



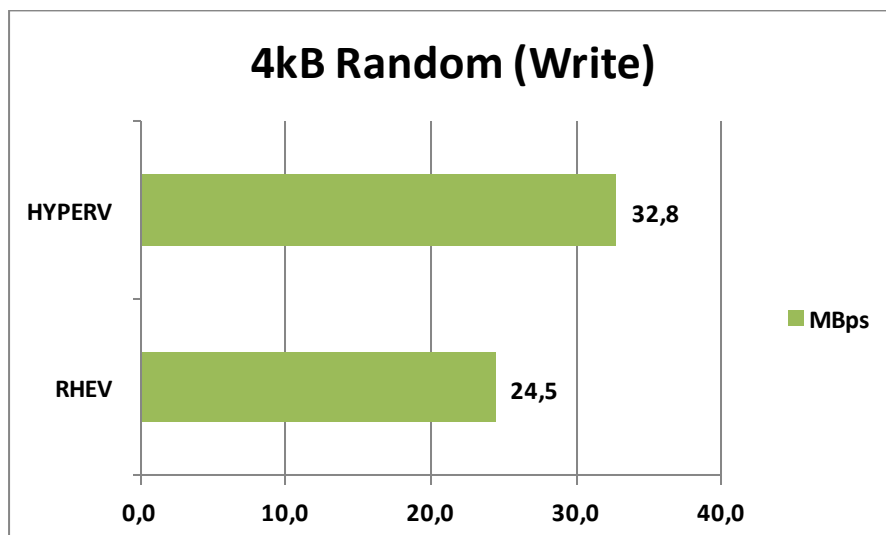
Kaavio 2. 4kB satunnaisdata (luku) MBps.

4kB:n satunnaisdatan lukutestissä RHEV-virtualisointialustalla saavutettiin 920 I/O-operaatiota enemmän (+9,5 %) kuin Hyper-V-virtualisointialustalla. Megatavuina ero oli 3,8 MBps (+9,6 %) RHEV:n hyväksi.

Toisessa testissä mitattiin satunnaisdatan kirjoitusnopeutta (IOPS ja MBps). Testin asetukset olivat 100 % kirjoitus ja 100 % satunnaisdata (kaaviot 3 & 4).



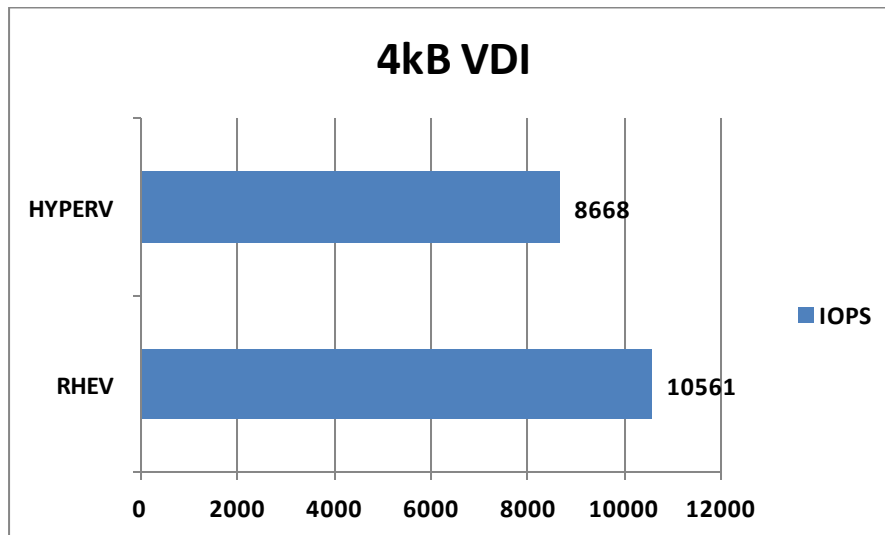
Kaavio 3. 4kB satunnaisdata (kirjoitus) IOPS.



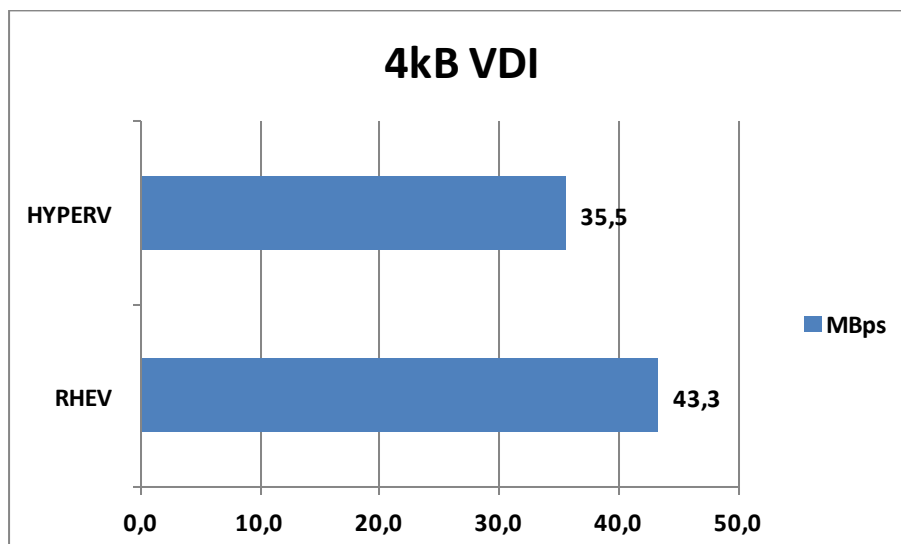
Kaavio 4. 4kB satunnaisdata (kirjoitus) MBps.

4kB:n satunnaisdatan kirjoitustestissä Hyper-V-virtualisointialustalla saavutettiin 2039 I/O-operaatiota enemmän (+34,1 %) kuin RHEV-virtualisointialustalla. Megatavuina ero oli 8,3 MBps (+33,8 %) Hyper-V:n hyväksi.

Viimeisessä testissä havainnointiin VDI-kuormaa 4kB loholla. Testissä datan asetuksina olivat 80 % satunnaisdataa ja 20 % peräkkäisdataa. Kirjoitus/luku suhde oli 80/20 (kaaviot 5 & 6).



Kaavio 5. 4kB VDI IOPS.

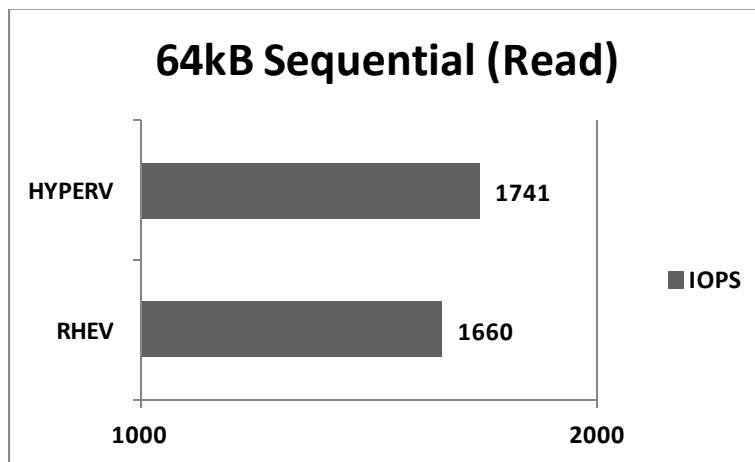


Kaavio 6. 4kB VDI MBps.

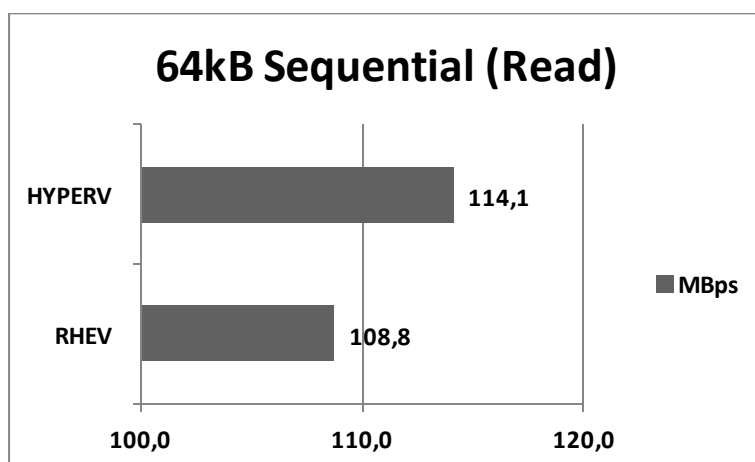
4kB:n VDI-testissä RHEV-virtualisointialustalla saavutettiin 1893 I/O-opeaatiota enemmän (+21,8 %) kuin Hyper-V-virtualisointialustalla. Megabitteinä ero oli 7,8 MBps (+21,9 %) RHEV:n hyväksi.

5.1.2 64kB suorituskykytestit

64kB suorituskykytestejä suoritettiin kaksi kappaletta. Testeissä mitattiin peräkkäisdatan luku- ja kirjoitusnopeutta (IOPS ja MBps) (kaaviot 7, 8, 9 & 10). Tällä testillä pyrittiin simuloimaan esimerkiksi SQL:n toimintaa.

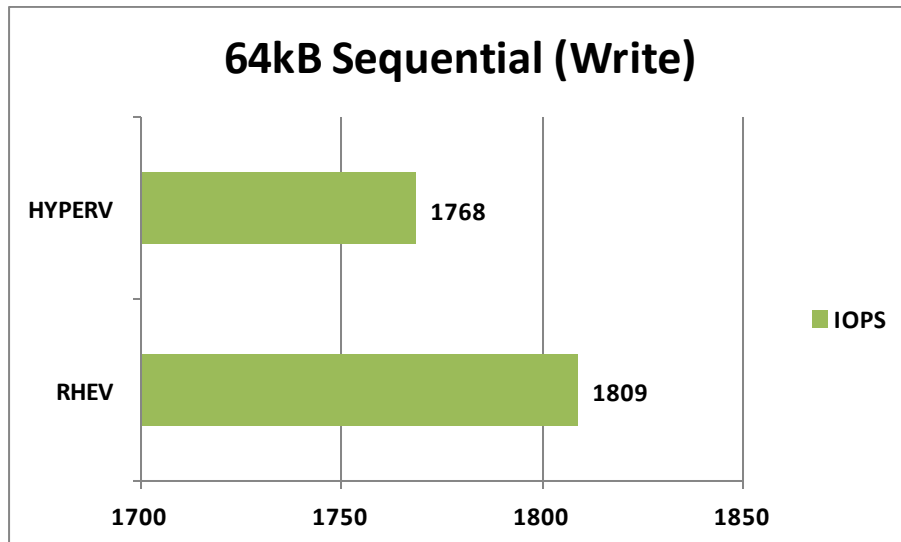


Kaavio 7. 64kB peräkkäisdata (luku) IOPS.

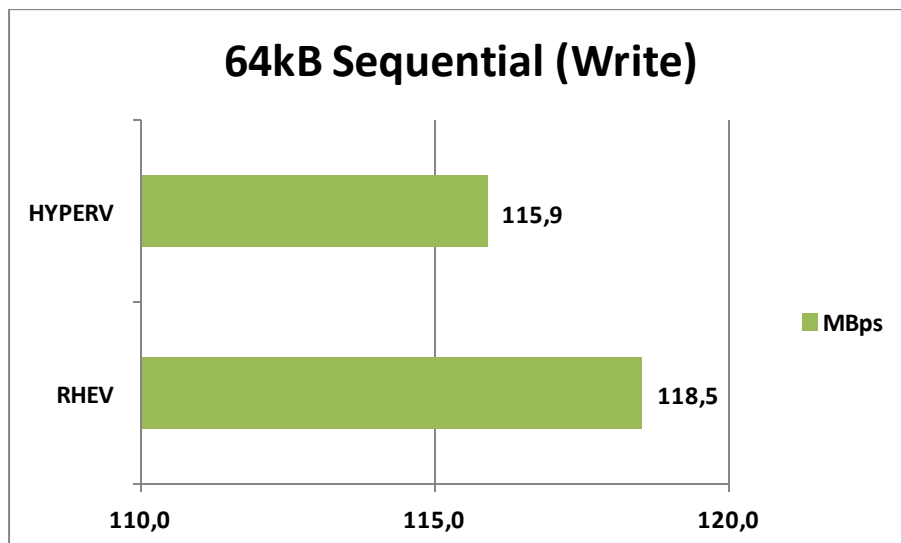


Kaavio 8. 64kB peräkkäisdata (luku) MBps.

64kB:n peräkkäisdatan lukutestissä Hyper-V-virtualisointialustalla saavutettiin 81 I/O-operaatiota enemmän (+4,8 %) kuin RHEV-virtualisointialustalla. Megatavuina ero oli 5,3 MBps (+4,8 %) Hyper-V:n hyväksi.



Kaavio 9. 64kB peräkkäisdata (kirjoitus) IOPS.

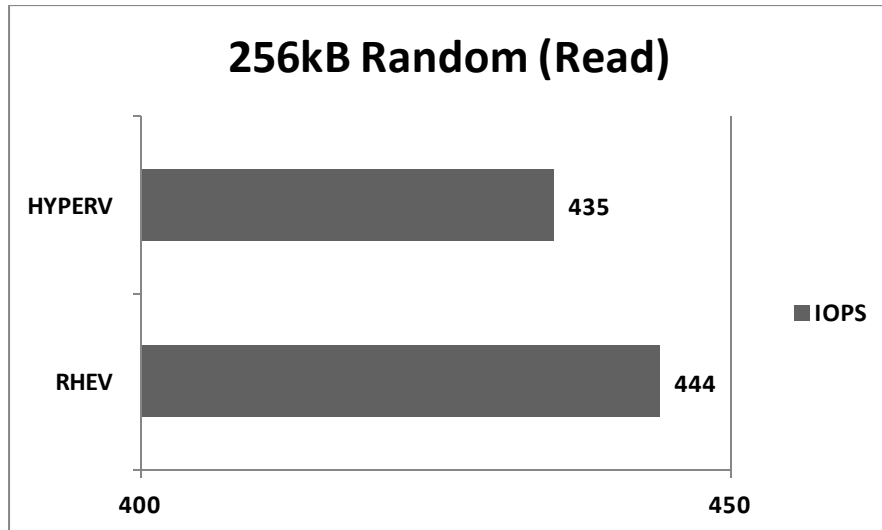


Kaavio 10. 64kB peräkkäisdata (kirjoitus) MBps.

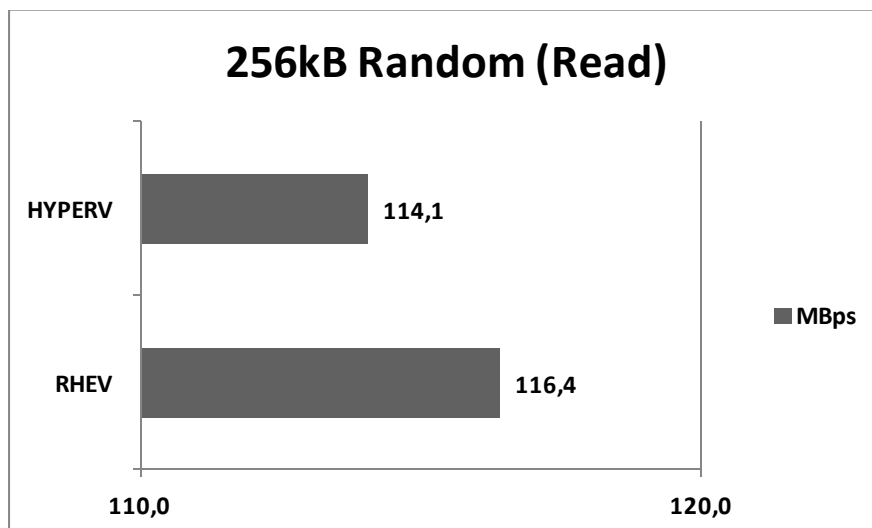
64kB:n peräkkäisdatan kirjoitustestissä RHEV-virtualisointialustalla saavutettiin 41 I/O-operaatiota enemmän (+2,3 %) kuin Hyper-V-virtualisointialustalla. Megatavuina ero oli 2,6 MBps (+2,2 %) RHEV:n hyväksi.

5.1.3 256kB suorituskykytestit

256kB testejä suoritettiin neljä kappaletta. Testeissä mitattiin peräkkäis- ja satunnaisdatan kirjoitus- ja lukunopeutta (IOPS ja MBps) (kaaviot 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 & 18).

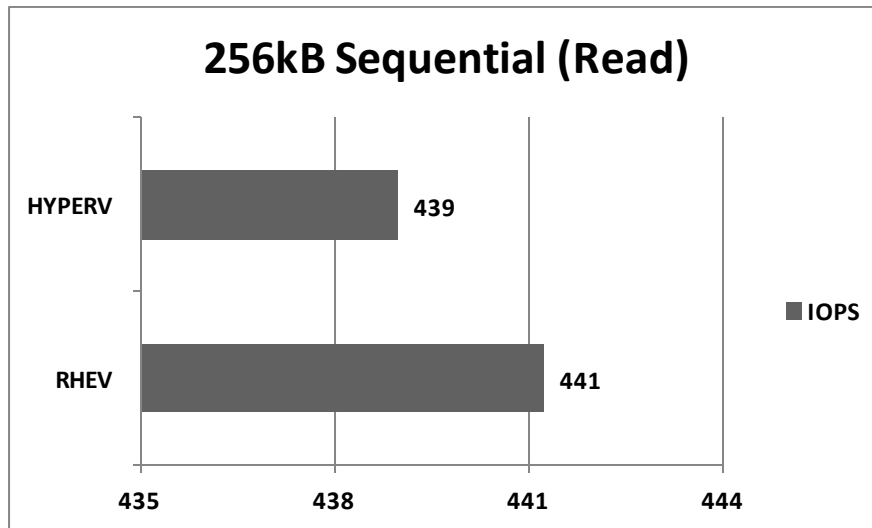


Kaavio 11. 256kB satunnaisdata (luku) IOPS.

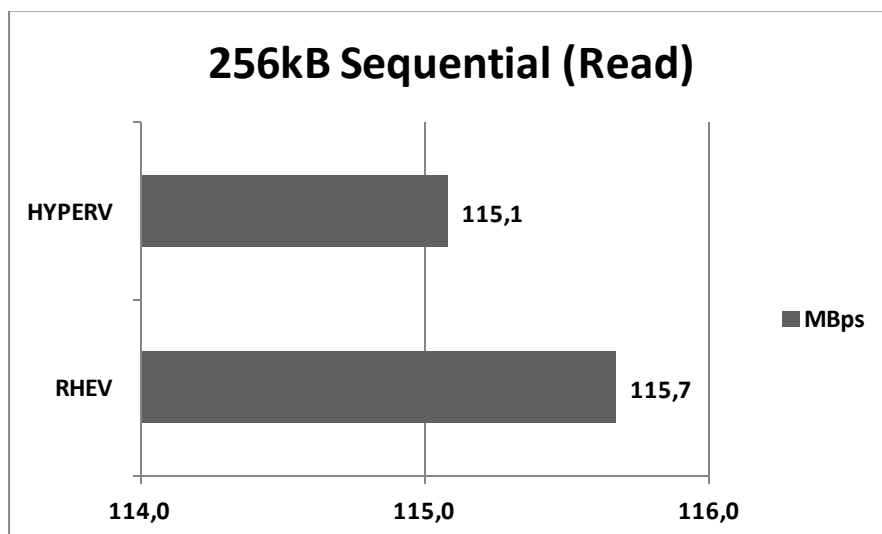


Kaavio 12. 256kB satunnaisdata (luku) MBps.

256kB:n satunnaisdatan lukutestissä RHEV-virtualisointialustalla saavutettiin 9 I/O-operaatiota enemmän (+2 %) kuin Hyper-V-virtualisointialustalla. Megatavuinä ero oli 2,3 MBps (+2 %) RHEV:n hyväksi.

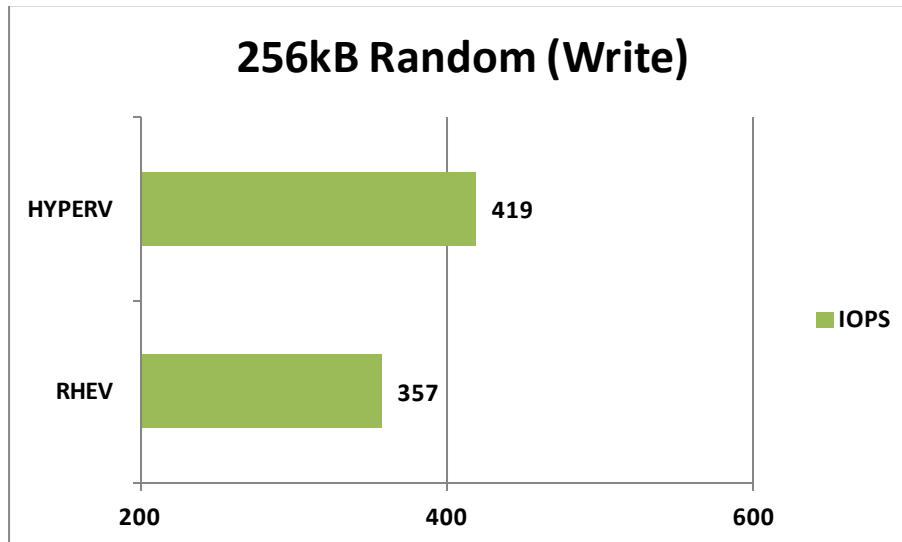


Kaavio 13. 256kB peräkkäisdata (luku) IOPS.

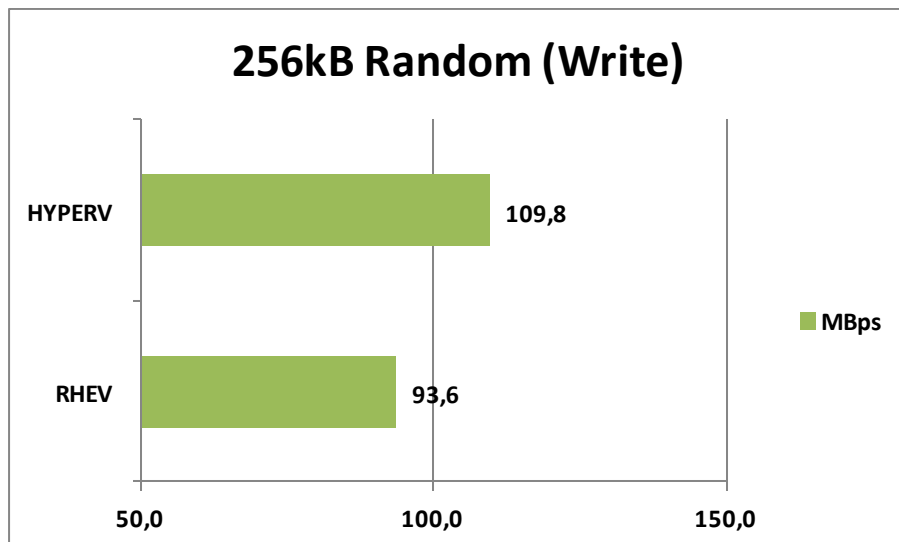


Kaavio 14. 256kB peräkkäisdata (luku) MBPS.

256kB:n peräkkäisdatan lukutestissä RHEV-virtualisointialustalla saavutettiin 2 I/O-operaatiota enemmän (+0,4 %) kuin Hyper-V-virtualisointialustalla. Megatavuinä ero oli 0,6 MBps (+0,5 %) RHEV:n hyväksi.

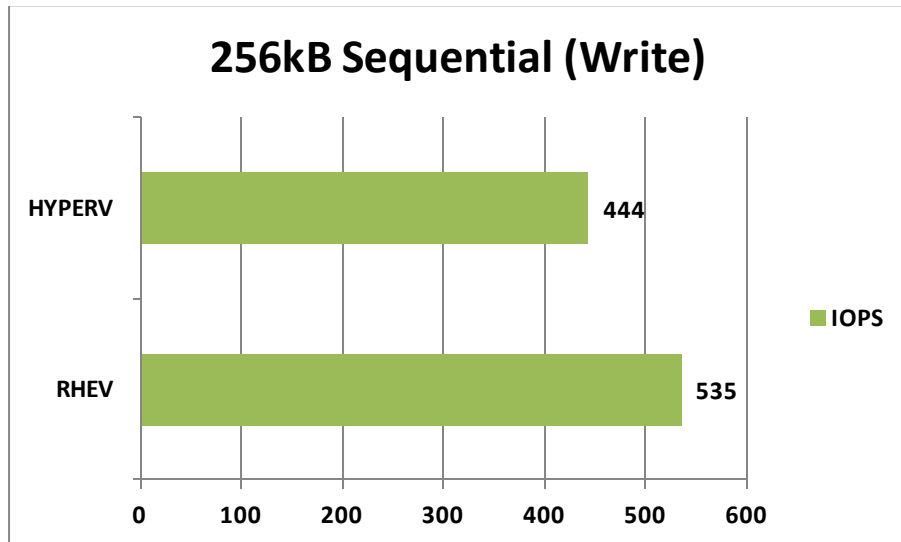


Kaavio 15. 256kB satunnaisdata (kirjoitus) IOPS.

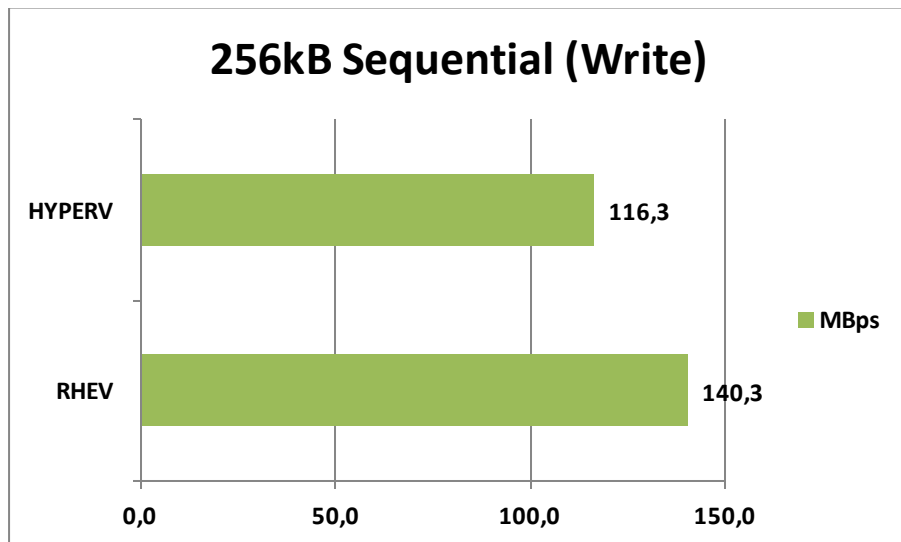


Kaavio 16. 256kB satunnaisdata (kirjoitus) MBps.

256kB:n satunnaisdatan kirjoitustestissä Hyper-V-virtualisointialustalla saavutettiin 62 I/O-operaatiota enemmän (+17,3 %) kuin RHEV-virtualisointialustalla. Megatavuina ero oli 16,2 MBps (+17,3 %) Hyper-V:n hyväksi.



Kaavio 17. 256kB peräkkäisdata (kirjoitus) IOPS.

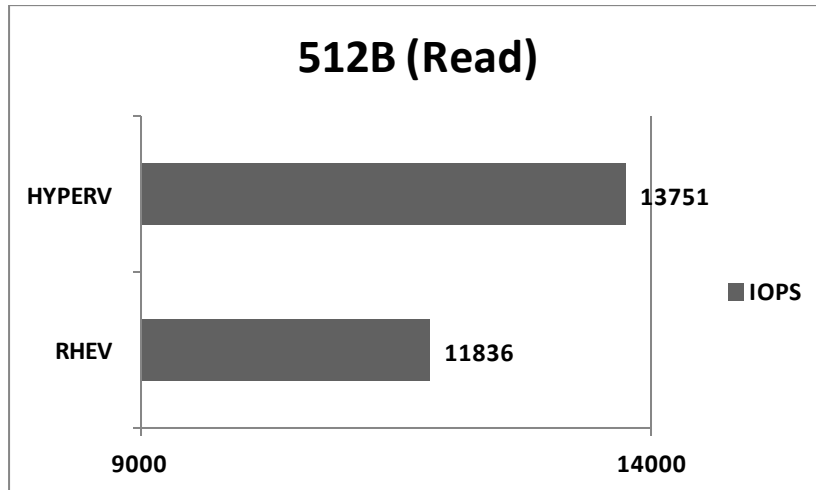


Kaavio 18. 256kB peräkkäisdata (kirjoitus) MBps.

256kB:n peräkkäisdatan kirjoitustestissä RHEV-virtualisointialustalla saavutettiin 91 I/O-operaatiota enemmän (+20 %) kuin Hyper-V-virtualisointialustalla. Megatavuina ero oli 24 MBps (+20,6 %) RHEV:n hyväksi.

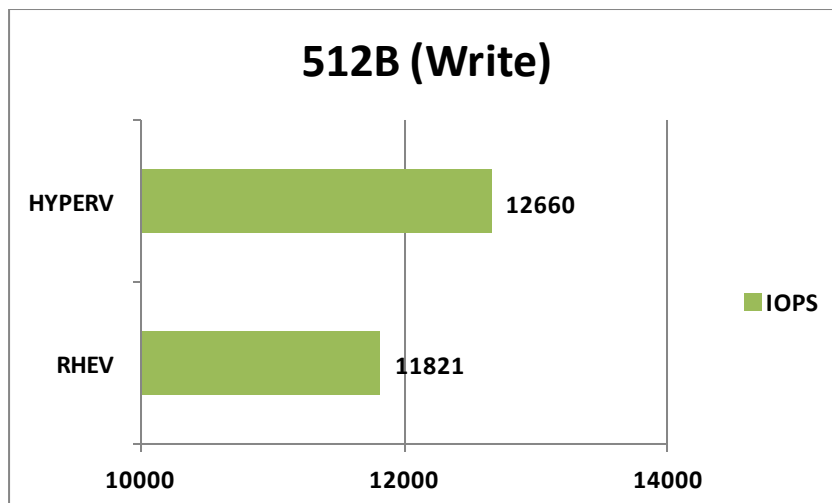
5.1.4 512B suorituskykytestit

512B suorituskykytesteissä oli tarkoitus mitata mahdollisimman nopeaa kirjoitus- ja luku I/O-kuormaa (IOPS) peräkkäisdatalla erittäin pienellä lohkon koolla (kaaviot 19 & 20).



Kaavio 19. 512B peräkkäisdata (luku).

512B:n peräkkäisdatan lukutestissä Hyper-V-virtualisointialustalla saavutettiin 1915 I/O-operaatiota enemmän (+16,1 %) kuin RHEV-virtualisointialustalla.

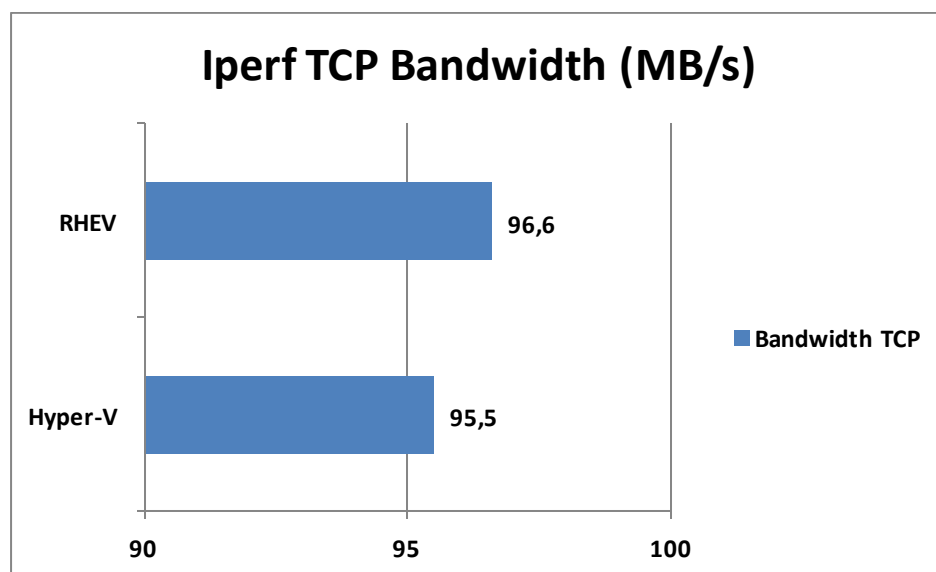


Kaavio 20. 512B peräkkäisdata (kirjoitus).

512B:n peräkkäisdatan kirjoitustestissä Hyper-V-virtualisointialustalla saavutettiin 839 I/O-operaatiota enemmän (+7 %) kuin RHEV-virtualisointialustalla.

5.2 Iperf

Iperf työkalua käytetään mittaamaan suurinta saatavilla olevaa kaistanleveyttä IP-verkoissa. Sillä voidaan testata TCP- ja UDP-liikennettä IPv4 ja 6 verkoissa. Iperf testissä pyrittiin selvittämään kahden virtuaalikoneen välinen kaistanleveys, virtuaalikoneiden ollessa eripalvelin ympäristössä. Testissä käytettiin lähettävän virtuaalikoneen lisäksi vastaanottavaa virtuaalikonetta, joka toimi erillisessä virtualisointiympäristössä (VMware ESXi). Verkkoliikenne näiden ympäristöjen välillä on 100 Mb/s, mikä toimii myös rajoittimena kaistanleveydessä. Lähettävänä virtuaalikoneena toimii CentOS 7- pohjainen palvelin ja vastaanottavana Ubuntu Server- pohjainen palvelin. Testissä mitattiin TCP-liikenteen kaistanleveyttä (Kaavio 21.) (Iperf. 2015.)



Kaavio 21. Iperf kaistanleveydesti (tcp-liikenne).

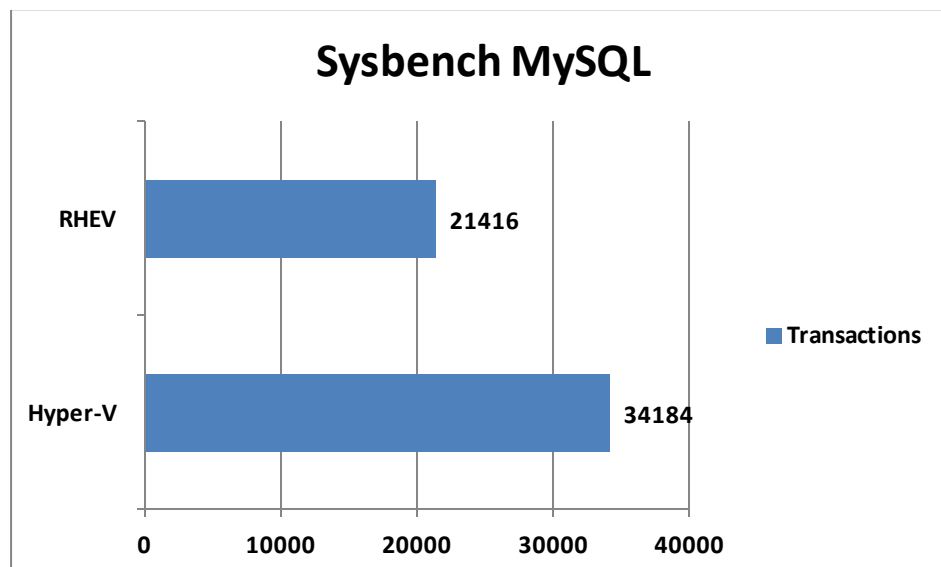
Iperf kaistanleveydestissä RHEV-virtualisointialustalla saavutettiin 1,1 MB/s (+1,1 %) suurempi kaistanleveys kuin Hyper-V-virtualisointialustalla.

5.3 Sysbench

Sysbench on modulaarinen ja monisäikeinen suorituskykyökalu joka on tarkoitettu mittaamaan käyttöjärjestelmän eri parametrejä, jotka ovat tärkeitä esimerkiksi tietokantapalvelimien suorituskyvyssä. Sysbench testit suoritettiin Centos 7 virtuaalikoneella. (Sysbench. 2015.)

5.3.1 MySQL suorituskykytestit

MySQL suorituskykytestissä luotiin aluksi testattavaan tietokantaan 1000000 riviä satunnaista dataa. Testin kestoksi asetettiin 1 minuutti, jonka aikana tietokannasta luetaan 8 säikeellä dataa mahdollisimman nopeasti (transaktiot, kaavio 22).



Kaavio 22. MySQL suorituskykytesti, transaktiot (luku).

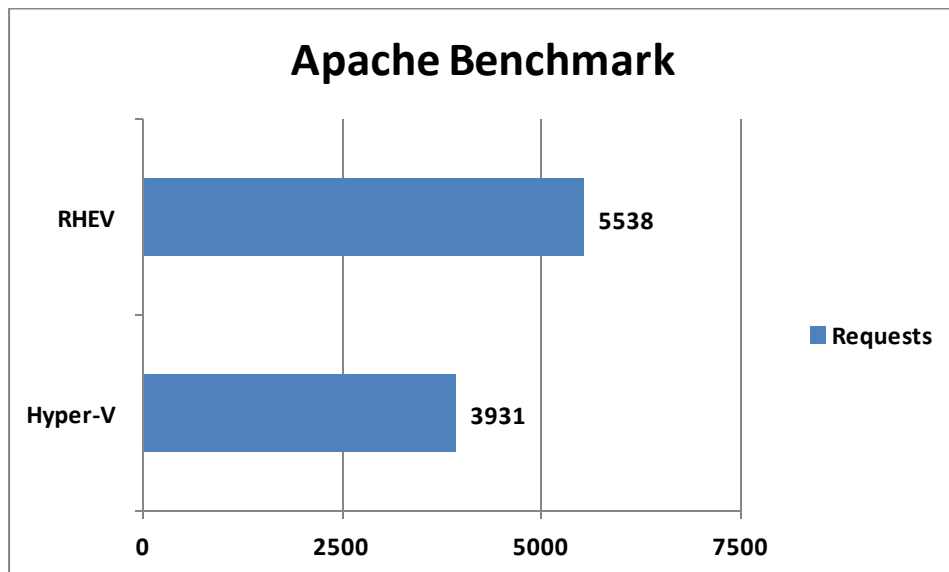
Tässä testissä Hyper-V-virtualisointialustalla saavutettiin 12768 (+59,6 %) luku transaktioita enemmän kuin RHEV-virtualisointialustalla.

5.4 Phoronix Test Suite

Phoronix Test Suite työkalussa on kokoelma erilaisia suorituskykytestejä palvelimille ja työasemille. Se sisältää esimerkiksi tietokannan, levyn, prosessorin ja graafisen suorituskyvyn mittaustyökaluja. Virtualisointialustan testeiksi valittiin erilaista I/O-kuormaa simuloiva IOZONE, tietokantojen suoritusta mittaavat SQLi-te ja PostgreSQL -testit sekä web-palvelin ohjelmistoista yleisimmät Apache- ja NGINX -suorituskykytestit. Tämän osion testit suoritettiin Centos 7 virtuaalikooneella. (Phoronix. 2015.)

5.4.1 Apache suorituskykytestit

Apache webpalvelinohjelmistoa testattiin yleisellä ApacheBench (AB) suorituskykytestillä, jolla mitataan palvelimen pyyntöjen käsittelyä (kaavio 23).

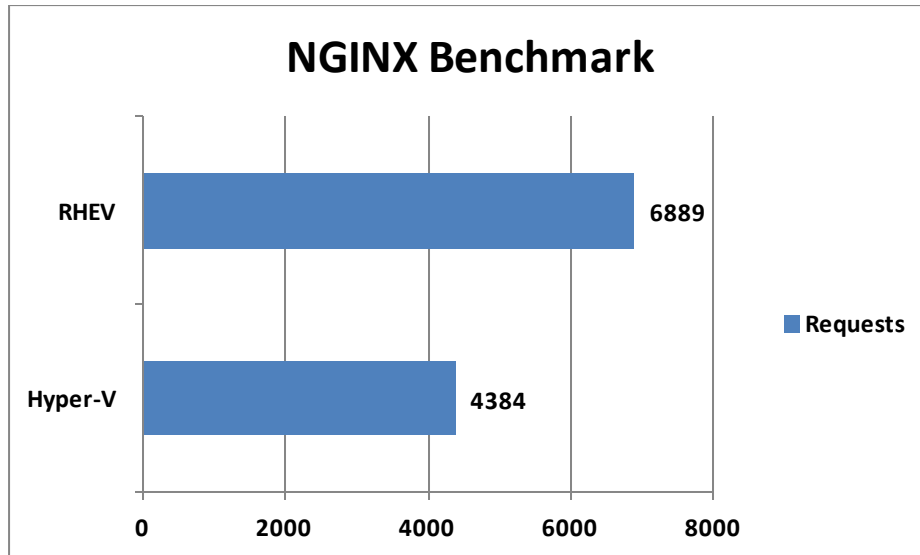


Kaavio 23. Apache Benchmark (pyynnöt).

Apache Benchmark suorituskykytestissä RHEV-virtualisointialustalla saavutettiin 1607 pyyntöä (+40 %) enemmän kuin Hyper-V virtualisointialustalla.

5.4.2 NGINX suorituskykytestit

NGINX on Apachen ohella yksi yleisimmistä webpalvelinohjelmistoista. NGINX-pohjaisen webpalvelimen suorituskykyä testattiin NGINX Benchmark suorituskykytestillä, jolla mitataan palvelimen pyyntöjen käsittelyä (kaavio 24).

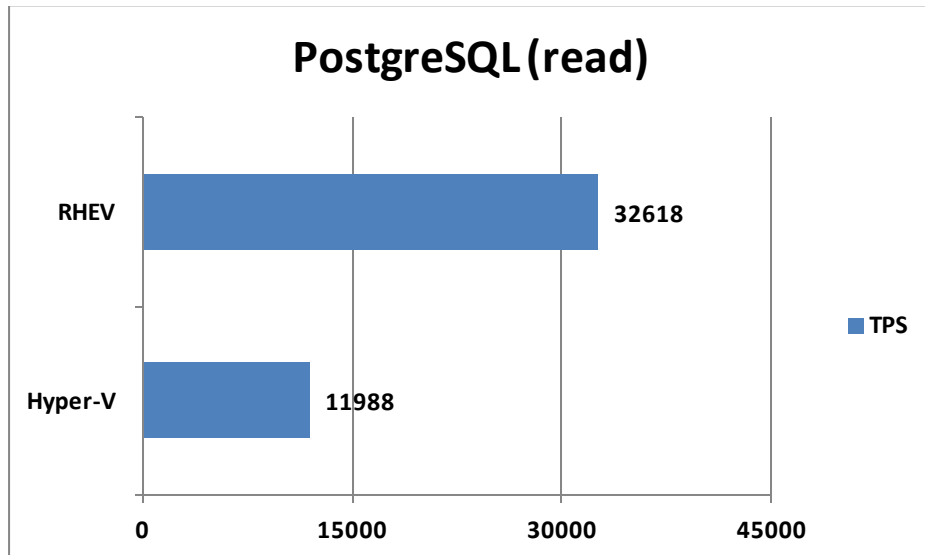


Kaavio 24. NGINX Benchmark (pyynnöt).

NGINX suorituskykytestissä RHEV-virtualisointialustalla saavutettiin 2505 pyyntöä (+57 %) enemmän kuin Hyper-V virtualisointialustalla.

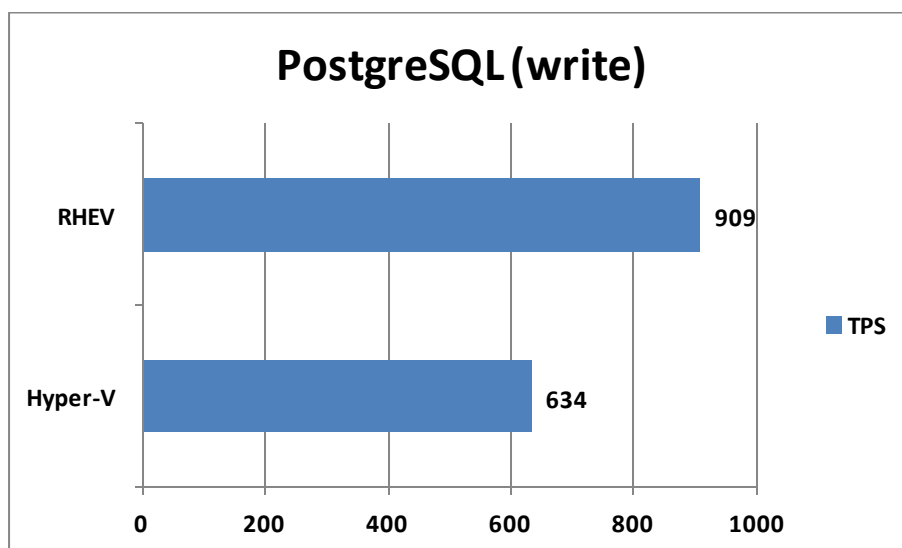
5.4.3 PostgreSQL suorituskykytestit

PostgreSQL suorituskykytestissä mitattiin tietokantapalvelimen luku/kirjoitusnopeutta transaktioina (kaaviot 25 & 26). Yhdessä transaktiossa suoritetaan 7 eri käskyä.



Kaavio 25. PostgreSQL (luku, transaktiot).

PostgreSQL-lukusuorituskykytestissä RHEV-virtualisointialustalla saavutettiin 20630 transaktiota (+ 172 %) sekunnissa enemmän kuin Hyper-V-virtualisointialustalla.

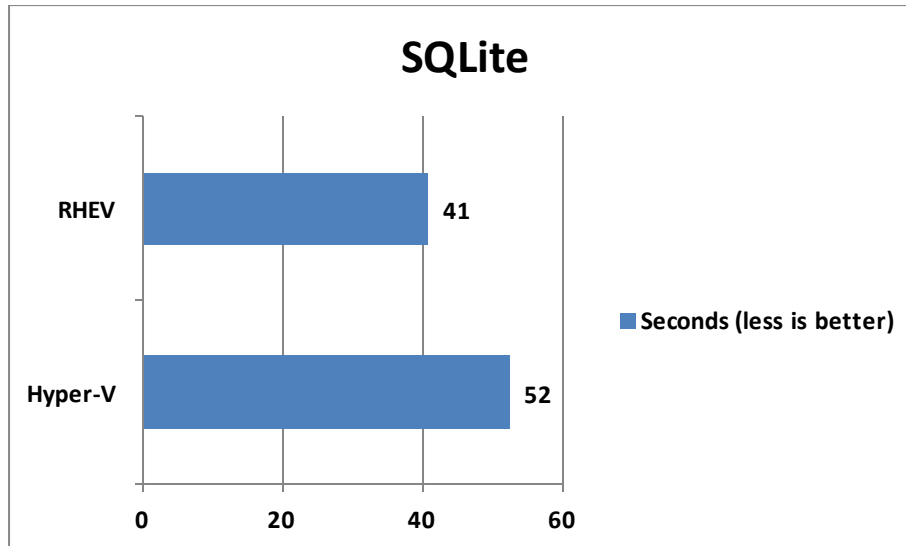


Kaavio 26. PostgreSQL (kirjoitus, transaktiot).

PostgreSQL kirjoitus-suorituskykytestissä RHEV-virtualisointialustalla saavutettiin 275 transaktiota (+ 43 %) sekunnissa nopeammin kuin Hyper-V virtualisointialustalla.

5.4.4 SQLite suorituskykytestit

SQLite suorituskykytestissä mitataan tietokantapalvelimen käyttämää aikaa indeksoidussa tietokannassa, johon kirjoitetaan ennalta määritelty määrä dataa (kaavio 27).

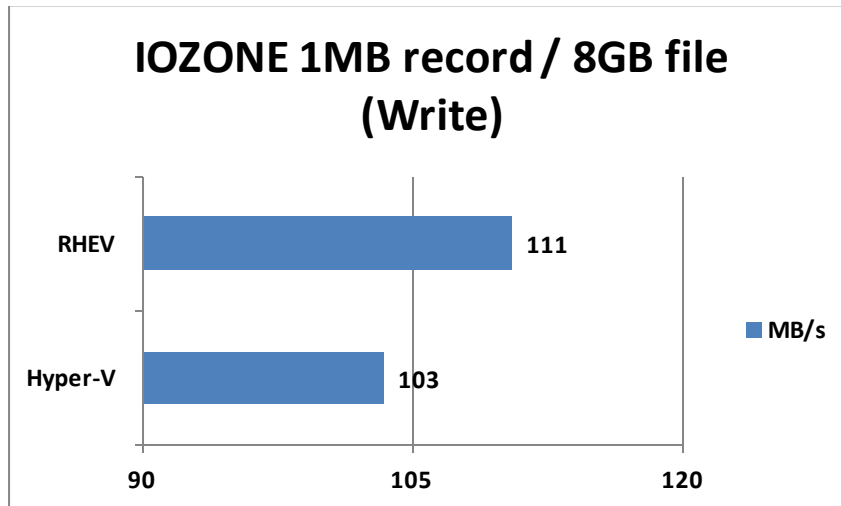


Kaavio 27. SQLite suorituskykytesti (pienempi tulos parempi).

SQLite suorituskykytestissä RHEV-virtualisointialustalla saavutettiin 11 sekuntia (+26 %) nopeammin operaatiot kuin Hyper-V-virtualisointialustalla.

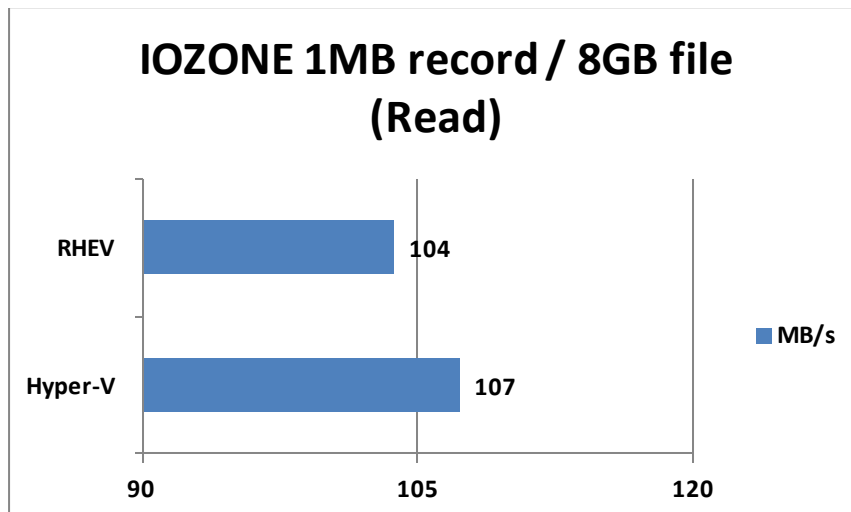
5.4.5 IOZONE suorituskykytestit

IOZONE suorituskykytestit ovat tarkoitettu mittaamaan tiedostojärjestelmien suorituskykyä. IOZONE suorituskykytesteissä asetuksina oli 1 MB tietue, tiedoston koon ollessa 8 GB. Testissä mitattiin luku- ja kirjoitusnopeutta (kaaviot 28 & 29). IOZONE-testit suoritettiin Centos 7 virtuaalikoneella.



Kaavio 28. IOZONE (kirjoitus).

IOZONE kirjoitus-suorituskykytestissä RHEV-virtualisointialustalla saavutettiin 8 MB/s (+7,7 %) suurempi kirjoitusnopeus kuin Hyper-V-virtualisointialustalla.



Kaavio 29. IOZONE (luku).

IOZONE lukusuorituskykytestissä Hyper-V-virtualisointialustalla saavutettiin 3 MB/s (+ 2,8 %) suurempi lukunopeus kuin RHEV-virtualisointialustalla.

6 VIRTUALISOINTIYMPÄRISTÖN SIIRTO

Virtuaalikoneiden siirtoa virtualisointiympäristöstä toiseen kokeiltiin Windows Server 2012 R2- ja CentOS 7 -virtuaalikoneilla. Virtuaalikoneille oli asennettu erikseen Apache -verkkopalvelinsovellus. Siirto todettiin onnistuneeksi, jos palvelut pyörähtivät käyntiin uudessa virtualisointiympäristössä ilman suurempia ongelmia. Virtuaalikoneista poistettiin synteettiset ajurit ennen konvertoimista.

Virtuaalikoneet konvertoitiin Starwind Softwaren V2V Convert-sovelluksella, jolla on mahdollista konvertoida sekä VMware, KVM että Hyper-V virtualisointiympäristöjen virtuaalikoneita. Hyper-V virtualisointiympäristö käyttää virtuaalikoneissaan VHD- ja VHDX -tyyppisiä virtuaalilevyjä, kun taas VMwaren virtualisointiympäristössä käytetään VMDK -tyyppisiä virtuaalilevyjä. KVM-pohjaiset virtualisointiympäristöt käyttävät yleensä joko QCOW2- tai RAW-tyyppisiä virtuaalilevyjä. V2V Convert-sovellus luo uuden kopion virtuaalikoneesta, jolloin muunnosvaihe on turvallinen eikä se vaikuta alkuperäisen virtuaalikoneen toimintaan. Sovelluksella voidaan muuntaa Hyper-V:n VHD- formaatti VMDK-, RAW- tai QCOW2-tyyppiseksi ja toisinpäin. Virtuaalikoneet konvertoitiin VMDK-, QCOW2- ja VHD-tyyppisiksi, jonka jälkeen ne lisättiin uusiin virtualisointiympäristöihin (VMware ESX, Hyper-V ja RHEV). Virtuaalikoneet käynnistyivät uusissa ympäristöissään, ja virtuaalikoneiden uudelleenkäynnistämisen sekä ajureiden asennuksen jälkeen niiden toiminta palasi alkuperäiselle tasolle.

Esimerkkitapaus

Yrityksellä on käytössä VMwaren virtualisointiympäristö. Virtualisointiympäristössä pyörii useita Windows Server 2012 R2-pohjaisia virtuaalikoneita sekä muutamia Linux-pohjaisia virtuaalikoneita. Yrityksellä on käytössään neljä palvelinta, joissa jokaisessa on 2 prosessoria. Palvelimissa pyörii VMware vSphere 5.5 Enterprise -virtualisointialusta ja niiden sisällä VMware vCenter hallintapalvelin. Yritys haluaa siirtyä Hyper-V virtualisointiympäristöön. Yritys on hankkinut uudet tehokkaammat palvelimet, joihin ympäristö halutaan siirtää. Hyper-V virtualisointiympäristön asennuksen ja konfiguroinnin jälkeen yritys alkaa konvertoida virtu-

aalikoneita Hyper-V yhteensopiviksi ilmaisella Starwind Softwaren V2V Convert sovelluksella. Yritys ostaa hallintasoikeudeksi 5nine Manager for Hyper-V PLUS:n. Summat muodostuvat tuotteen perushinnasta ja vähintään yhden vuoden mittaisesta tilauksesta (tilauspohjaiset lisenssit) (VMware. 2015.).

VMware-pohjaisen virtualisointiympäristön arvioitu hinta tässä tapauksessa on yhteensä 54 122 euroa, joka sisältää yhden vCenter Server Standard -lisenssin (4495 €), vCenter Server Standard Basic tukipalvelun (943 €), kahdeksan kappaletta vSphere Enterprise -lisenssejä (20 680 €) ja näille tukipalvelut (4345 €), neljä kappaletta Windows Server 2012 R2 Datacenter -lisenssejä (21 728 €), neljä kappaletta 5nine Manager for Hyper-V PLUS -lisenssejä (1052 €) ja kaksi kappaletta CAL-käyttöoikeuslisenssiä (879 €).

Hyper-V-pohjaisen virtualisointiympäristön arvioitu hinta tässä tapauksessa on yhteensä 23 659 €, joka sisältää neljä kappaletta Windows Server 2012 R2 Datacenter -lisenssejä (21 728 €), neljä kappaletta 5nine Manager for Hyper-V PLUS -lisenssejä (1052 €) ja kaksi kappaletta CAL-käyttöoikeuslisenssiä (879 €).

VMware-pohjaisesta virtualisointiympäristöstä Hyper-V-pohjaiseen virtualisointiympäristöön siirtymisen jälkeen yritys säästää 30 463 € vuodessa lisenssien suhteen virtualisoinnissa verrattuna vanhoihin lisenssikustannuksiin.

7 POHDINTA

Tässä tutkimuksessa suoritettiin 29 erilaista suorituskykytestiä, jotka mittasivat erilaisia työkuormia virtuaaliympäristöissä. Virtualisointiympäristön arkkitehtuuri on yksi ratkaisevimpia tekijöitä suorituskykytesteissä. Tähän tutkimukseen oli valittu Microsoftin Hyper-V, joka hyödyntää mikrokernel-tyyppistä arkkitehtuuria, ja Red Hat Enterprise Virtualization Hypervisor, joka hyödyntää osittain monoliittista arkkitehtuuria. Molemmat arkkitehtuurityypit tarjoavat omanlaisensa hyödyt ja haitat. Microsoft ei tarjoa ohjelmointirajapintaa hypervisor tasolle, jolloin hyökkäyspinta-ala pienenee, koska ulkopuolista koodia ei voida ajaa hypervisor tasolla esimerkiksi viallisten ajureiden kautta. Mikrokernel -arkkitehtuurissa laiteajurit eivät ole hypervisor tasolla, jolloin laitetuki on huomattavasti parempi kuin monoliittisessä arkkitehtuurissa. Mikrokernel arkkitehtuurin huonoja puolia ovat erillisen käyttöjärjestelmän asentaminen hallintatasolle (control layer), jotta virtualisointialusta (hypervisor layer) voisi toimia. Tämä käytäntö aiheuttaa sen, että hallintatason käyttöjärjestelmän kaatuessa myös virtuaalikoneet kaatuvat ympäristössä. Mikrokernel -arkkitehtuurissa käytetään enemmän virtualisointioperaatioita (virtualization overhead) hallitsemaan virtuaalikoneiden toimintaa hallintatason ja hypervisor tason välillä. Monoliittisessä arkkitehtuurissa ei käytetä erillistä hallintatason käyttöjärjestelmää virtualisointikomponenttien hallinnassa kuten mikrokernel-pohjaisessa arkkitehtuurissa. Haittapuolena on laitetuen määrä, koska monoliittisessä arkkitehtuurissa laiteajurit sijaitsevat hypervisor tasolla, joka on suljettu useissa virtualisointialustoissa. Myös virtualisointialustan alustus kestää sitä kauemmin, mitä enemmän ajureita joudutaan lataamaan hypervisor tasolla.

Suorituskykytesteissä Hyper-V-virtualisointialustalla saavutettiin 11 eri testissä (37 %) paremmat tulokset kuin RHEV (63 %) virtualisointialustalla. Tietyissä testeissä (64kB ja 256kB peräkkäisdata) tuloksien erot olivat erittäin marginaalisia (0,4 % ja 2 %), jonka perusteella ne voidaan luokitella mitättömiksi. Huomioon otettavat tulokset saavutetaan ≥ 5 % eroavaisuudella, ja merkittävät erot ≥ 15 % eroavaisuudella. Suorituskykytesteissä huomattiin myös se, että virtualisointialustalla ja virtuaalikoneen käyttöjärjestelmällä ei ole varsinaista suoraa yhteyttä

tuloksien paremmuudessa (esimerkiksi Windows virtuaalikoneet Hyper-V alustalla). Virtuaalikoneita ei optimoitu ympäristöihin erikseen muuten kuin asentamalla virtualisointialustan valmistajan suosittelemat ajuripaketit.

Tutkimuksessa myös selvitettiin virtualisointiympäristön aiheuttamat kulut lisensoinnin muodossa. Hyper-V virtualisointiympäristö voidaan käytännön tasolla toteuttaa täysin ilmaiseksi käyttämällä Microsoft Hyper-V Server virtualisointialustaa ja muita avoimen lähdekoodin tuotteita (esimerkiksi CentOS). Tässä tutkimuksessa Hyper-V-virtualisointiympäristön hallintatyökaluna käytettiin kolmannen osapuolen tarjoamaa sovellusta (5nine Manager for Hyper-V PLUS). Microsoftin suosittelema System Center 2012 R2 -ohjelmistokokonaisuus jätettiin pois, koska markkinoilla on halvempia ja vähintään yhtä hyviä ohjelmistoja sen tilalle. Toisin kuin Red Hatin virtualisoinnin lisensoinnissa, Microsoftin vaatimat lisenssit voi ostaa erikseen ilman liittymättä vuosikohtaiseen tilausmalliin ja tukipalveluihin. Red Hatin tilausmallista voi erota sopimuskauden jälkeen, mutta tällöin tuotteille ei saada virallisia päivityksiä ja korjauksia. Esimerkitapauksissa kuvattujen ympäristöjen lähtökohdat olivat samat. Hyper-V-virtualisointiympäristö tuli esimerkitapauksessa n. 13 000 € halvemmaksi kuin vastaava RHEV-virtualisointiympäristö, koska erillisiä virtualisointialustojen lisenssejä ei tarvittu. System Center 2012 R2 -ohjelmiston kanssa Hyper-V-virtualisointiympäristön kustannukset olivat lähes identtiset RHEV-virtualisointiympäristön kanssa.

Virtualisointiympäristöjen hallinta oli varsin samanlaista. Molemmissa ympäristöissä luotiin kahden palvelimen välinen klusteri, johon liitettiin myös erillinen levyjärjestelmäpalvelin. Kun osaa hyvin yhden virtualisointiympäristön hallinnan, siirtyminen muihin virtualisointiympäristöihin onnistuu varsin helposti, sillä toimenpiteet noudattavat samoja kaavoja. Virtualisointiympäristöjen käyttöönotoissa oli selviä eroavaisuuksia. RHEV-virtualisointiympäristön käyttöönotto ja konfigurointi tapahtui pääosin selaimen kautta toimivassa hallintaohjelmassa, toisin kuin Windows Serverissä konfigurointi tapahtui paikallisesti tai etäyhteyden avulla toiselta koneelta. RHEV-virtualisointiympäristössä asennusvaiheita oli vähemmän kuin Hyper-V-virtualisointiympäristössä. Hallintaohjelmat muistuttivat käyttöliittymien osalta toisiaan; molemmissa on käytössä puuvalikkorakenne si-

vupalkissa, jota täydennetään välilehdillä, jotka sisältävät itse konfiguroitavat kohteet.

Molemmilla virtualisointialustoilla on olemassa omat viralliset konvertointityökalunsa, mutta tässä tutkimuksessa käytettiin kolmannen osapuolen sovellusta, jolla on mahdollista konvertoida kaikkien virtualisointialustojen virtuaalikoneita. Microsoft Hyper-V:n virtuaalikoneet voi konvertoida Microsoft Virtual Machine Converter -sovelluksella, RHEV:n virtuaalikoneet virt-v2v työkalulla ja VMwaren virtuaalikoneet VMware vCenter Converter -sovelluksella.

Virtuaalikoneiden konvertointi virtualisointialustalta toiselle sujui pääosin ongelmitta. Virtuaalikoneet olivat pääosin hyvin yksinkertaisia toimintoiltaan ja laiteresursseiltaan, mikä auttoi konvertoinnissa. VMware ympäristöstä siirtyminen esimerkiksi Hyper-V ympäristöön tuo merkittäviä säästöjä lisensoinnin suhteen, sillä sekä Microsoft että Red Hat tarjoavat lisensointimallia, jossa yksi lisenssi kattaa kaksi prosessoriyksikköä, siinä missä VMwaren lisensointimallissa vain yhden prosessoriyksikön.

Useamman virtualisointiympäristön ajaminen on siinä mielessä kannattavaa, jos on laaja asiakaskunta, joka vaatii tiettyjä tuoteperheitä palveluihinsa. Esimerkiksi yritys, joka on vuokrannut konesaltilaa ja ylläpitää omaa verkkopalvelinklusteria, johon asiakkailla ei ole kiinnostusta mikä virtualisointialusta pyörittää palveluita, on kannattavampaa ajaa ympäristöä vain yhdellä virtualisointialustalla.

LÄHTEET

Kirja:

Mitch Tullock. (2010). Understanding Microsoft Virtualization Solutions From the Desktop to the Datacenter, Redmond, WA, USA: Microsoft Press.

Internet-sivut:

eWEEK. 2014. oVirt 3.4 Debut, Red Hat's RHEV 3.4 Enters Beta Phase. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <http://www.eweek.com/enterprise-apps/with-ovirt-3.4-debut-red-hats-rhev-3.4-enters-beta-phase.html>

Evans, C. 2013. SMB 3.0 brings enterprise-class storage to Hyper-V deployments. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <http://www.computerweekly.com/feature/SMB-30-brings-enterprise-class-storage-to-Hyper-V-deployments>

IBM. 2007. Virtualization in education. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <http://www07.ibm.com/solutions/in/education/download/Virtualization%20in%20Education.pdf>

IBM. 2011. KVM Architecture: The Key Components of Open Virtualization with KVM. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: https://www.ibm.com/developerworks/community/blogs/ibmvirtualization/entry/kvm_architecture_the_key_components_of_open_virtualization_with_kvm2

Iometer. 2015. Introduction. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <http://www.iometer.org/>

iPerf. 2015. What is iPerf? Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <https://iperf.fr/>

libvirt.org. 2015. What is libvirt? Haettu 10.11.2015, osoitteesta: http://wiki.libvirt.org/page/FAQ#What_is_libvirt.3F

Microsoft. 2015. Volume Licensing reference guide. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: http://download.microsoft.com/download/E/6/4/E64F72BF-55E9-4D85-9EFE-39605D7CE272/WindowsServer2012R2_Licensing_Guide.pdf

Microsoft Developer Network. 2008. Hyper-V Architecture. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <https://msdn.microsoft.com/en-us/library/cc768520%28v=bts.10%29.aspx>

Microsoft Technet Magazine. 2012. Cloud Computing: Virtualization Classes. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <https://technet.microsoft.com/en-us/magazine/hh802393.aspx>

Microsoft Technet Blogs. 2011. Hyper-V: Microkernelized or Monolithic. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <http://blogs.technet.com/b/chenley/archive/2011/02/23/hyper-v-microkernelized-or-monolithic.aspx>

Microsoft Technet. 2015. Hyper-V Scalability in Windows Server 2012 and Windows Server 2012 R2. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <https://technet.microsoft.com/en-us/library/jj680093.aspx>

NASDAQ. 2014. Growing Competition For VMware In Virtualization Market. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <http://www.nasdaq.com/article/growing-competition-for-vmware-in-virtualization-market-cm316783>

Phoronix. 2015. Phoronix Test Suite Features. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <http://www.phoronix-test-suite.com/?k=features>

Red Hat 2013. RED HAT ENTERPRISE VIRTUALIZATION VERSUS VMWARE VSPHERE. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <https://www.redhat.com/en/files/resources/en-rhev-vs-vmware-vsphere-competitive-pricing-review-11717847.pdf>

Red Hat 2015a. Chapter 1. Red Hat Virtualization Hypervisor. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <https://access.redhat.com/documentation/en->

[US/Red_Hat_Enterprise_Virtualization/3.5/html/Technical_Guide/Red_Hat_Virtualization_Hypervisor.html](https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red_Hat_Enterprise_Virtualization/3.5/html/Technical_Guide/Red_Hat_Virtualization_Hypervisor.html)

Red Hat 2015b. Chapter 9. Hardware Drivers and Devices. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red_Hat_Enterprise_Virtualization/3.5/html/Technical_Guide/Red_Hat_Virtualization_Hypervisor.html

Red Hat 2015c. Chapter 1. Storage. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red_Hat_Enterprise_Virtualization/3.5/html/Technical_Guide/Storage1.html

Red Hat 2015d. Chapter 6. Logical Networks. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red_Hat_Enterprise_Virtualization/3.5/html/Administration_Guide/chap-Logical_Networks.html

Red Hat 2015e. Chapter 1. Network. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red_Hat_Enterprise_Virtualization/3.5/html/Technical_Guide/Network.html

Red Hat 2015f. Chapter 10. Minimum Requirements and Technical Limitations. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red_Hat_Enterprise_Virtualization/3.5/html/Technical_Guide/chap-Minimum_Requirements_and_Technical_Limitations.html

Red Hat 2015g. Chapter 7. Templates and pools. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red_Hat_Enterprise_Virtualization/3.5/html/Technical_Guide/chap-Templates_and_Pools.html

Red Hat 2015h. Chapter 5. Clusters. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: https://access.redhat.com/documentation/en-US/Red_Hat_Enterprise_Virtualization/3.5/html/Administration_Guide/chap-Clusters.html

Sharma, N. 2013. Hyper-V Virtual Switch Explained. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <http://www.serverwatch.com/server-tutorials/harnessing-the-power-of-hyper-v-network-virtual-switches.html>

Sysbench. 2015. Sysbench. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <https://launchpad.net/sysbench>

Vanover, R. 2009. Type 1 and Type 2 Hypervisors Explained. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <http://virtualizationreview.com/blogs/everyday-virtualization/2009/06/type-1-and-type-2-hypervisors-explained.aspx>

VMware 2015. vSphere Pricing & Licensing. Haettu 10.11.2015, osoitteesta: <http://www.vmware.com/products/vsphere/pricing.html>