



**TEKNIikka JA LIIKENNE**

**Tietotekniikka**

**Tietoliikennetekniikka**

**INSINÖÖRITYÖ**

**BGP Internetin runkoreititysprotokollana**

**Työn tekijä: Antti Karjala  
Työn ohjaajat: Matti Nikula**

**Työ hyväksytty: 25.11. 2010**

**Janne Salonen  
lehtori**



## **ALKULAUSE**

Tämän opinnäytteen tavoitteena oli todentaa BGP-protokollan (Border Gateway Protocol) toimintaa Internetin runkoreititysprotokollana. Henkilökohtaisesti BGP oli aiheena minulle uusi, ja opiskelin työn ohessa BGP-protokollan toiminnan. BGP:n monimuotoisuuden kautta opiskelumateriaalia oli runsaasti ja aiheen rajausta osoittautui ajoittain hankalaksi.

Haluan kiittää työssä mukana olleita valvoja Janne Salosta, kielenohjaaja Jussi Alhorinnettä sekä ohjaajana toiminutta Matti Nikulaa Cygate Oy:ltä. Haluan myös kiittää veljeäni Juho Karjalaa hyvistä neuvoista matkan varrella.

Helsingissä 25.11.2010

Antti Karjala

## TIIVISTELMÄ

<b>Työn tekijä:</b> Antti Karjala	
<b>Työn nimi:</b> BGP Internetin reititysprotokollana	
<b>Päivämäärä:</b> 25.11.2010	<b>Sivumäärä:</b> 67 s. + 2 liitettä
<b>Koulutusohjelma:</b> Tietotekniikka	<b>Suuntautumisvaihtoehto:</b> Tietoliikennetekniikka
<b>Työn ohjaaja:</b> Matti Nikula, Cygate Oy <b>Työn ohjaaja:</b> Janne Salonen, Ammattikorkeakoulu Metropolia	
<p>Tämä insinööryö tehtiin tutkielmana BGP-protokollan toiminnasta Internetin reititysalueiden välillä. Työn tavoitteena oli selvittää, miten BGP:tä hyödynnetään Internetin eri verkkojen välillä.</p> <p>Työ aloitettiin selvittämällä BGP:n toimintaa ja sen sisältämiä ominaisuuksia. Tämän jälkeen käytiin läpi BGP:n toiminta reititysalueiden sisällä ja Internetin reititysalueiden välillä. BGP:n reititysalueiden käyttämät politiikkamallit selvitettiin sekä reititykselle ja reititysinformaation hallinnointiin. Työn teoriaosuudessa selvitettiin myös Internet-palveluntarjoajien sekä yritysten verkkojen rakennetta. Tavoitteena oli selvittää ja mallintaa BGP:n reititys Internetissä käyttäen laboratorioverkkoa.</p> <p>Tehdyn tutkielman voidaan todeta, että BGP on lisättyine ominaisuuksineen ja joustavuudeltaan hyvin monipuolinen reititysprotokolla.</p>	
<b>Avainsanat:</b> BGP, Border Gateway Protocol, Internet, autonominen järjestelmä	

## ABSTRACT

<b>Name:</b> Antti Karjala	
<b>Title:</b> BGP routing in the Internet	
<b>Date:</b> 25.11.2010	<b>Number of pages:</b> 67 + 2 appendices
<b>Department:</b> Information Technology	<b>Study Programme:</b> Telecommunications
<b>Instructor:</b> Matti Nikula, Cygate Oy	
<b>Supervisor:</b> Janne Salonen, Metropolia University of Applied Sciences	
<p>This project was made as thesis regarding the BGP protocol operation between the Internet routing domains. The objective was to clarify how BGP is being utilized between the different networks in the Internet.</p> <p>First, BGP operation with all its features was introduced. After that, BGP functions within routing domains and between the routing domains in the Internet were introduced. The routing and administrative policies used by BGP routing domains were then clarified. In the theory section of the project it was also discussed how Internet service provider and business networks are organized. The goal was to clarify and model out BGP routing in the Internet using a laboratory network.</p> <p>It was concluded that BGP, with all its added attributes and flexibility, is an extremely versatile routing protocol.</p>	
<b>Keywords:</b> BGP, Border Gateway Protocol, Internet, autonomous system	

# SISÄLLYS

## ALKULAUSE

## TIIVISTELMÄ

## ABSTRACT

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>INTERNET</b>	<b>1</b>
<b>2.1</b>	<b>Internetin lyhyt historia</b>	<b>2</b>
2.1.1	<i>ARPANET</i>	2
2.1.2	<i>Internetin järjestöjä</i>	3
<b>3</b>	<b>BORDER GATEWAY PROTOCOL</b>	<b>5</b>
<b>3.1</b>	<b>BGPv4</b>	<b>6</b>
<b>3.2</b>	<b>Reititysprotokollat</b>	<b>6</b>
<b>3.3</b>	<b>Sisäiset ja ulkoiset reititysprotokollat</b>	<b>7</b>
3.3.1	<i>Autonominen järjestelmä</i>	7
3.3.2	<i>Reitittimen reititystaulu</i>	8
3.3.3	<i>Reitittimen prosessit</i>	9
3.3.4	<i>BGP:n reititystaulu</i>	10
<b>3.4</b>	<b>BGP peering-yhteys</b>	<b>10</b>
3.4.1	<i>Peering-yhteyden tilat</i>	11
3.4.2	<i>BGP:n sanomat</i>	15
3.4.3	<i>BGP:n sessiomääritykset</i>	16
<b>3.5</b>	<b>BGP attribuutit</b>	<b>18</b>
<b>3.6</b>	<b>BGP autonomisen järjestelmän sisällä</b>	<b>21</b>
<b>3.7</b>	<b>BGP:n parhaan polun algoritmi</b>	<b>22</b>
<b>3.8</b>	<b>Peering-yhteyden konfigurointi</b>	<b>24</b>
<b>3.9</b>	<b>Peer group</b>	<b>25</b>
<b>4</b>	<b>BGP-POLITIIKKA</b>	<b>26</b>
<b>4.1</b>	<b>Suodatinlistat</b>	<b>27</b>
4.1.1	<i>Standardi pääsyylista</i>	27
4.1.2	<i>Laajennettu pääsyylista</i>	28
4.1.3	<i>Prefiksilista</i>	28
4.1.4	<i>AS Path-lista</i>	29
4.1.5	<i>Community-lista</i>	29
<b>4.2</b>	<b>Route map</b>	<b>30</b>

<b>5</b>	<b>INTERNET-PALVELUNTARJOAJAT JA YRITYSVERKOT</b>	<b>31</b>
5.1	<b>Verkon ytimen muodostaminen iBGP:llä</b>	<b>31</b>
5.1.1	<i>Reittiheijastimet</i>	32
5.1.2	<i>BGP konfederaatio</i>	34
5.2	<b>Ytimestä Internetiin</b>	<b>34</b>
5.3	<b>Internet-palveluntarjoajan verkko</b>	<b>38</b>
5.3.1	<i>Palveluntarjoajaverkon kerrokset</i>	38
5.3.2	<i>Palveluntarjoajan peering-yhteydet</i>	41
5.3.3	<i>Palveluntarjoajan community-attribuutti</i>	44
<b>6</b>	<b>BGP:N TIETOTURVA</b>	<b>45</b>
6.1	<b>MD5 allekirjoitus</b>	<b>45</b>
6.2	<b>Epäkelpojen prefiksien suodatus</b>	<b>46</b>
6.3	<b>Graded Route Flap Dampening</b>	<b>46</b>
6.4	<b>Prefiksien maksimimäärä</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>BGP REITITYSPROTOKOLLANA</b>	<b>47</b>
7.1	<b>BGP-reitityspolitiikka</b>	<b>48</b>
7.1.1	<i>Internet-palveluntarjoajaverkon rakenne</i>	48
7.1.2	<i>Transit-yhteys palveluntarjoajien välillä</i>	50
7.1.3	<i>Asiakasyhteys privaatile AS-numerolla</i>	52
7.1.4	<i>Multi homing-yhteys</i>	53
7.1.5	<i>Palveluntarjoajien peering-yhteys</i>	56
7.2	<b>Suodatus autonomisten järjestelmien rajalla</b>	<b>57</b>
7.2.1	<i>AS 100:n hallinnollinen politiikka</i>	57
7.2.2	<i>AS 200:n hallinnollinen politiikka</i>	61
7.2.3	<i>AS 65001:n hallinnollinen politiikka</i>	63
7.2.4	<i>AS 600:n hallinnollinen politiikka</i>	63
7.2.5	<i>AS 900:n hallinnollinen politiikka</i>	64
<b>8</b>	<b>YHTEENVETO</b>	<b>66</b>

## LYHENTEET

AfriNIC	African Network Information Centre. Afrikan paikallinen RIR-rekisteri.
APNIC	Asian Pacific Network Information Centre. Aasian ja Tyynenmeren alueen paikallinen RIR-rekisteri.
ARIN	American Registry for Internet Numbers. Kanadan, Yhdysvaltain sekä joidenkin Karibianmeren saarten paikallinen RIR-rekisteri.
ARPA	Advanced Research Project Agency. Yhdysvaltain puolustusvoimien virasto, joka on vastuussa uuden aseteknologian kehityksestä.
ARPANET	Advanced Research Project Agency Network. Maailman ensimmäinen pakettikytkentäinen tietoverkko, johon Internet perustuu.
AS	Autonomous System. Autonominen, saman hallinnon vastuulla oleva tietojärjestelmä Internetissä.
ASN	Autonomous System Number. Autonomisen järjestelmän tunnisteenä toimiva numero.
BGP	Border Gateway Protocol. Polkuvektoreihin perustuva reititysprotokolla, joka vastaa Internetin runkoverkossa tehtävistä reitityspäätöksistä.
CentOS	Community ENTERprise Operating System. Red Hat Linuxiin perustuva ja vapaasti välitettävä käyttöjärjestelmä.
CIDR	Classless Inter Domain Routing. IP-osoitteiden allokointimetodiikka, joka suunniteltiin hidastamaan IPv4-osoitteiden loppumista kesken.
CIX	Commercial Internet eXchange. Internetin ensimmäinen kaupallinen yhdysliikennepiste.
DNS	Domain Name System. Nimipalvelujärjestelmä, jolla Internetin IP-osoitteet voidaan muuttaa verkkotunnuksiksi.
eBGP	external BGP. Autonomisten järjestelmien välillä toimiva BGP-protokolla.
EGP	Exterior Gateway Protocol. Reititysinformaatiota reititusalueiden välillä välitettävä protokolla.
FICIX	Finnish Communication and Internet Exchange. Suomalainen yhdysliikennepiste Internetissä.
GGP	Gateway to Gateway Protocol. ARPANET:in reititysprotokolla.
IAB	Internet Architecture Board. Komitea, joka valvoo Internetin teknistä kehitystä.
IANA	Internet Assigned Numbers Authority. Järjestö, joka vastaa muun muassa IP-osoitteiden ja AS-numeroiden maailmanlaajuisesta hallinnoinnista.
iBGP	internal BGP. Autonomisen järjestelmän sisällä toimiva BGP-protokolla.

ICANN	Internet Corporation for Assigned Names and Numbers. ICANN valvoo monien muiden Internetin järjestöjen, kuten IANA:n, toimintaa.
IETF	Internet Engineering Task Force. Kehittää ja ylläpitää erilaisia Internetin standardeja.
IGP	Interior Gateway Protocol. Reititysalueen sisällä reititysinformaatiota välittävä protokolla.
IOS	Internetwork Operating System. Ciscon reitittimistä ja kytkimistä löytyvä hallintasovellus.
IRTF	Internet Resource Task Force. Kehittää Internetin toimintaa ja standardeja pitkällä aikavälillä.
IS-IS	Intermediate System To Intermediate System. Linkkitilaa hyödyntävä IGP-reititysprotokolla.
ISOC	Internet Society. Internetin kansainvälinen kattojärjestö, joka hallinnoi Internetin kehitystä ja käytäntöä.
IXP	Internet Exchange Point. Internetin yhdysliikennepiste.
LACNIC	Latin American and Caribbean Network Information Centre. Latinalaisen Amerikan ja Karibian alueen alueellinen RIR-rekisteri.
MD5	Message-Digest algorithm 5. Kryptograafinen tarkistussumma, jota vertailemalla voidaan onko lähde muuttunut siirron aikana.
MED	MULTI EXIT DISC. BGP:n attribuutti, joka koostuu lähetettävästä metriikkatiedosta.
NASA	National Aeronautics and Space Administration. Yhdysvaltain ilmailu- ja avaruushallinto.
NSF	National Science Foundation. NSF on Yhdysvaltain virasto, joka tukee ei-lääketieteellistä tutkimusta.
NSFNET	National Science Foundation Network. NSF:n ylläpitämä tietoverkko, joka oli osa Internetin runkoverkkoa.
ORF	Outbound Route Filter. BGP:n toiminnallisuus, jolla vastaanottamatta jätettävät prefiksit voidaan suodattaa lähettävällä reitittimellä.
OSPF	Open Shortest Path First. Linkkitilaa hyödyntävä IGP-reititysprotokolla.
RAND	Research And Development. Voittoa tavoittelematon tutkimusorganisaatio Yhdysvalloissa.
RFC	Request For Comments. RFC on dokumentti, jota esimerkiksi IETF käyttää julkaistessaan uusia standardeja.
RIB	Routing Information Base. Reititystaulu.
RIPE	Réseaux IP Européens. Eurooppalainen järjestö, joka muun muassa osallistuu Internetin kehitystyöhön.



- RIPE NCC Réseaux IP Européens Network Coordination Centre. Euroopan, Lähi-Idän sekä Keski-Aasian alueellinen RIR-rekisteri.
- RIR Regional Internet Registry. Organisaatio, joka vastaa IP-osoitteiden sekä AS-numeroiden jakelusta tietyllä alueella.
- TCP Transmission Control Protocol. Luotettavan tiedonsiirron tarjoava tiedonsiirtoprotokolla.

## 1 JOHDANTO

Internetin runkoreititysinfrastruktuuria välittää tällä hetkellä yksi ainoa reititysprotokolla nimeltään Border Gateway Protocol (BGP). BGP on protokolla, joka vastaa Internetin rungossa tehtävistä reitityspäätöksistä ja välittää tiedon verkkojen saavutettavuudesta ympäri maailman.

Työ on jaettu kuuteen lukuun. Toisessa luvussa käydään lyhyesti läpi Internetin rakennetta sekä historiaa. Kolmannessa luvussa selvitetään BGP:n toimintaa ja neljännessä käydään läpi BGP:n hallinnollista politiikkaa. Viides luku kuvaa BGP:n toimintaa yrityksen ja Internet-palveluntarjoajan verkossa. Kuudennessa luvussa BGP:n toimintaa testataan laboratorioympäristössä.

Kuudennen luvun työosuus toteutettiin työnantajani Cygate Oy:n laboratorioympäristössä verkkolaittevalmistaja Ciscon virtuaalireitittimillä. Työssä oletetaan lukijan tuntevan jonkun verran Ciscon IOS (Internetwork Operating System)-ohjelmiston toimintaa.

## 2 INTERNET

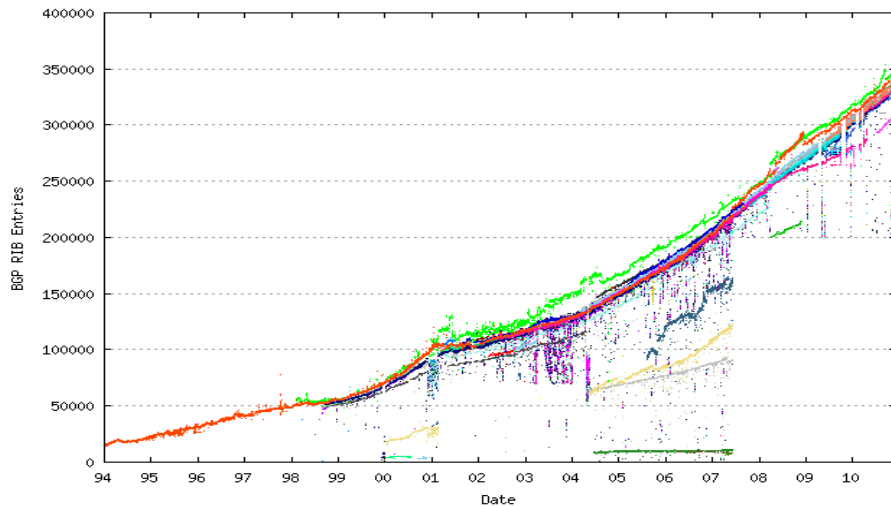
Internet koostuu joukosta itsenäisesti toimivia verkkoja, jotka yhdistyvät toisiinsa suoraan tai kohtaavat Internetin yhdysliikennepisteissä. Verkkoja hallitsevat tuhannet kaupalliset ja ei-kaupalliset toimijat. [1, s. 8-9.]



*Kuva 1. Internet[2]*

1990-luvulla alkanut kaupallinen kasvu on levittänyt Internetin yli laajan maantieteellisen alueen. Käyttäjämäärissä tapahtunut muutos vuoden 1995

kuudestatoista miljoonasta käyttäjästä vuoden 2010 lähes kahteen miljardiin [3] on tuonut mukanaan uusia haasteita Internetin runkoverkon toimintaan. Internetin reititustaulussa on kirjoitushetkellä reilusti yli 300 000 reittiä. [4.]



Kuva 2. Internetin reititustaulun kasvu vuosina 1994-2010[3]

## 2.1 Internetin lyhyt historia

Yhdysvaltain puolustusvoimat perusti 1958 viraston nimeltä ARPA (Advanced Research Project Agency) vastauksena Neuvostoliiton laukaisemalle Sputnik-satelliitille. Pelot Neuvostoliiton kyvystä laukaista ohjuksia avaruudesta kiihdyttivät Yhdysvalloissa tarvetta kehittää uusi, entistä vikasietoisempi kommunikaatiojärjestelmä. [5.]

### 2.1.1 ARPANET

Tutkimusyhtiö RAND (Research And Development) esitteli 1964 Yhdysvaltain puolustusvoimille mallin uudenlaisesta kommunikaatioteknologiasta. Tutkimuksessa tartuttiin piirikytkentäisten verkkojen keskusjohtoiseen rakenteeseen, jonka keskus olisi hyvin todennäköinen kohde hyökkäyksen sattuessa. RAND esitti ratkaisuna uuden viestintämallin, jossa verkko koostui keskenään tasavertaisista solmuista. Solmujen välittämät viestit jaettiin pienempiin lohkoihin ja lohkot kulkivat itsenäisesti solmujen välillä. Eri reittejä kulkeneet sanomalohkot koottiin jälleen viestiksi vasta niiden saavuttua määränpäähänsä. Teknologiaan adoptoitiin myöhemmin termi pakettikytkentäinen tiedonsiirtotekniikka. [6.]

RAND:in suunnittelemaa viestintämallia päästiin toteuttamaan käytännössä joulukuussa 1969, kun ARPANET (Advanced Research Project Agency Network) -verkon ensimmäiset neljä solmua otettiin käyttöön. Solmut yhdistivät toisiinsa useita Yhdysvaltain yliopistoja ja vuoteen 1972 mennessä solmuja oli jo 37. [7.]

ARPANET:issa solmuja yhdistäviä laitteita kutsuttiin yhdyskäytäviksi. Vastine ARPANET:in yhdyskäytävälle on Internetissä reititin. ARPANET:in aikana yhdyskäytävien yhteydenpidon evoluutio johti GGP (Gateway to Gateway Protocol) -reititysprotokollan määrittämiseen. GGP:stä poiketen vuonna 1984 kehitetyn EGP (Exterior Gateway Protocol) -protokollan pääsääntöinen käyttötarkoitus oli erotella verkko eri reititysalueisiin ja välittää tietoa alueiden välillä. GGP säilyi edelleen käytössä reititysalueiden sisällä. [8.]

Käyttäjämäärän kasvaessa ARPANET oli suuren kuormituksen alla ja vuonna 1985 NSF (National Science Foundation) lähti kehittämään ARPANET:ille vaihtoehtoa. Syntyi NSFNET, joka koostui useista alueellisista verkoista, kuten NASA:n (National Aeronautics and Space Administration) rakennuttamasta tutkimusverkosta. Verkot olivat toisiinsa yhteydessä runkoyhteyksien kautta, jotka yhdessä muodostivat NSFNET:in ytimen.

Liikennemäärät kasvoivat huomattavasti vuoteen 1991 mennessä ja NSFNET korvasi runkolinkkejään yhä nopeammilla yhteyksillä. NSFNET oli ARPANET:in tavoin varattu ainoastaan tutkimuskäyttöön. Verkkoyhteyksien muodostamiseen kaupallisessa tarkoituksessa oli yhä suurempaa kiinnostusta, johon Internet-palveluntarjoajat lähtivät vastaamaan. Yhdysvaltain länsirannikolle muodostettiin ensimmäinen Internetin liityntäpiste kaupallisille toimijoille, joka oli nimeltään CIX (Commercial Internet eXchange).

NSFNET:in lopullinen alasajo tapahtui huhtikuussa 1995, ja yhteydet siirrettiin NSFNET:ista eri Internet-palveluntarjoajien verkkoihin. Palveluntarjoajat jatkoivat runkoverkkojensa rakentamista ja alueellisista solmupisteistä tuli ensisijaisia yhteyksiä monien verkkojen välillä. Internet laajeni kaupallistumisen myötä yleiseen käyttöön. [1, s. 7-9.]

### 2.1.2 Internetin järjestöjä

ISOC (Internet Society) on Internetin katto-organisaatio, joka keskittyy Internetin standardeihin, koulutukseen ja käyttöön liittyviin asioihin.

*IAB* (Internet Architecture Board) on hallinnollinen järjestö, joka keskittyy Internetin tekniseen kehitykseen. IAB:illa on kaksi alajärjestöä, IETF sekä IRTF.

*IETF* (Internet Engineering Task Force) kehittää ja edistää Internetin standardeja. IETF:n standardit julkaistaan RFC (Request For Comment) -dokumentteina. BGP:n versio 4 julkaistiin dokumentissa RFC 1771, "A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4)".

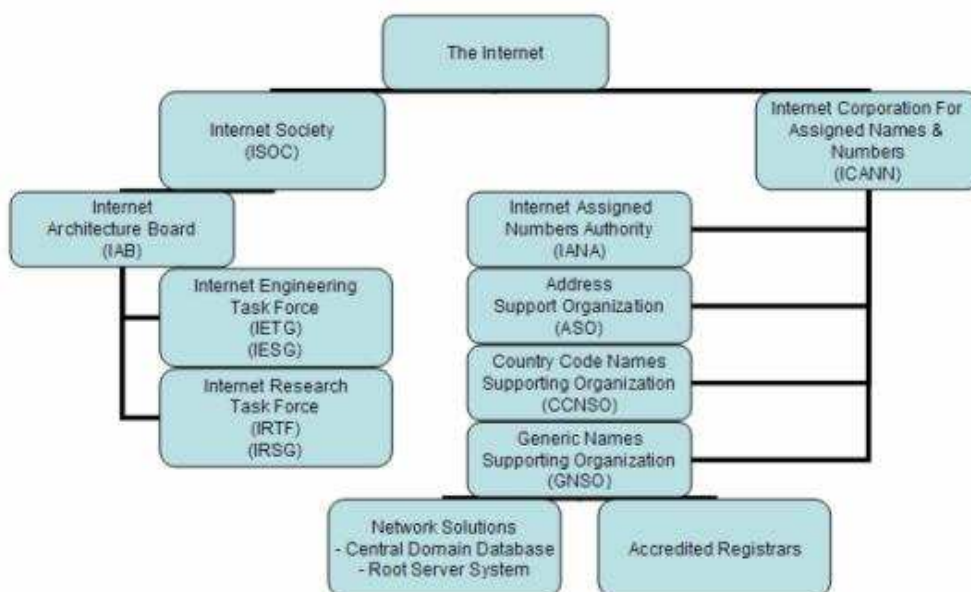
*IRTF* (Internet Resource Task Force) keskittyy Internetin kehitykseen pitkällä tähtäimellä. IRTF:n tehtävänä hakea ratkaisuja tulevaisuuden haasteisiin.

*ICANN* (Internet Corporation for Assigned Names and Numbers) hallinnoi IP-osoiteavaruuksia ja luovuttaa osoitelohkoja alueellisille rekistereille. IANA toimii ICANN:in alaisuudessa.

*IANA* (Internet Assigned Numbers Authority) valvoo ja ylläpitää muun muassa Internetin IP-osoiteavaruutta, AS (Autonomous System) -numeroita sekä Internetin juurininimipalvelimien osoitteita.

*RIR* (Regional Internet Registry) on alueellinen rekisteri, joka allokoii ja rekisteröi IP-osoitteita tietyn maanosan sisällä. Alueellisia RIR-rekistereitä ovat *AfriNIC* (African Network Information Centre), *APNIC* (Asian Pacific Network Information Centre), *ARIN* (American Registry for Internet Numbers), *LACNIC* (Latin American and Caribbean Network Information Centre) sekä Eurooppalainen *RIPE NCC* (Réseaux IP Européens Network Coordination Centre).

*DNS* (Domain Name System) -juurialue on IANA:n hallinnoima DNS hierarkian korkeimman tason alue. DNS juurialue sisältää 13 juurininimipalvelinta, jotka toimivat Internetin ylimpinä nimipalveliminä. [8.]



Kuva 3. Internetin hallinnon kerrokset [9.]

### 3 BORDER GATEWAY PROTOCOL

Border Gateway Protocol sai alkunsa IETF-kokouksen yhteydessä Texasissa vuonna 1989. Kokoukseen osallistuneet Len Bosack, Kirk Lougheed sekä Yakov Rekhter jakoivat näkemyksen uudesta reititysalueiden välillä toimivasta protokollasta. BGP perustui muutamaankin yksinkertaiseen ajatukseen.

Uuden EGP(Exterior Gateway Protocol) -protokollan tuli kyetä estämään reitityssilmukoiden muodostaminen sekä supistaa välitetyt reititysinformaation määrä mahdollisimman pieneksi. Syntyivät BGP:n tavat kantaa mukanaan kulkemansa polun informaatio sekä vaihtaa reititysinformaatiota ainoastaan muutoksen sattuessa.

Uudella protokollalla tuli olla myös luotettava siirtotapa ja siihen tuli kyetä lisäämään tarvittaessa uusia ominaisuuksia. TCP (Transmission Control Protocol) -protokolla otettiin käyttöön tiedonsiirron luotettavuuden varmistamiseksi ja BGP:n välittämä informaatio suunniteltiin koodattavaksi erillisinä attribuutteina, joka mahdollisti uusien ominaisuuksien lisäämisen myös tulevaisuudessa. BGP:n kehitys on jatkunut alusta asti IETF:n julkaisemien RFC (Request For Comment) -dokumenttien muodossa. [10, Foreword.]

### 3.1 BGPv4

BGP:n alkuperäinen tarkoitus oli olla lyhytikäinen ratkaisu Internetin eri reititysalueiden väliseen liikennöintiin. Toistakymmentä vuotta myöhemmin BGP kuitenkin toimii ainoana reititysprotokollana Internetin reititysalueiden välillä. Toiminnassaan BGP ei aseta rajoituksia välittämänsä informaation tyypille vaan keskittyy ainoastaan reititystiedon välittämiseen.

Ensimmäisen kuuden elinvuotensa aikana BGP vaihtoi versionumeroaan neljästi, BGP-1:stä BGP-4:ään. BGP:n versionumero 4 on pysynyt samana vuodesta 1995. Tärkeimpiä uudistuksia vuosien varrella ovat olleet muun muassa moniprotokollatuki, reittiheijastimet sekä BGP/MPLS-VPN, joka toi kokonaan uuden osa-alueen BGP:n toimintaan. [10, Foreword.]

BGP:n mukana ovat tulleet samanaikaisesti myös monet muut uudistukset, kuten IPv4 CIDR (Classless Inter Domain Routing). CIDR salli IP-osoiteavaruuden tehokkaan hyödyntämisen ja antoi mahdollisuuden eripituisten aliverkkojen muodostamiseen. IP-osoitteen pituutta kuvataan prefiksillä, joka on merkintä IP-osoitteen perässä kauttaviivalla eroteltuna ja joka kuvaa IP-osoitteeseen yhdistettyä verkkomaskin pituutta. [11.] Liitteenä CIDR-muuntotaulukko. [1.]

### 3.2 Reititysprotokollat

Reititysprotokollat välittävät tietoa verkon topologiasta reitittimeltä toiselle. Reitittimet määrittävät luomansa tietokannan perusteella parhaan reitin verkon eri kohteisiin. Reititysprotokollat välittävät verkon topologiatietoa joko linkkitilätietoina tai vektoreina. Vektoreihin pohjautuvia reititystapoja on kaksi, etäisyysvektori ja polkuvektori. [10, luku 1.]

#### *Linkkitila*

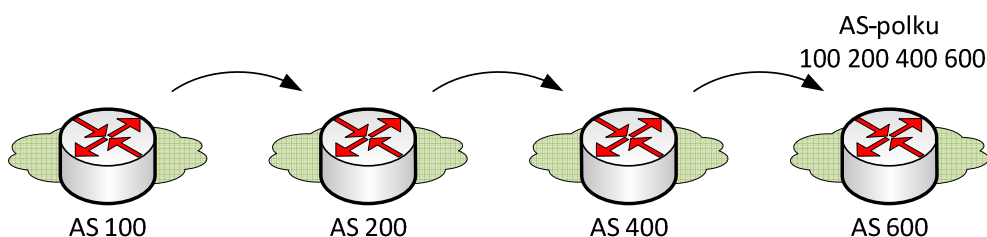
Linkkitilaprotokollien, joita ovat esimerkiksi IS-IS (Intermediate System To Intermediate System) ja OSPF (Open Shortest Path First), toiminta perustuu reititysalueen linkkien mainostamiseen reitittimen välillä. Jokainen reititin tällöin mainostaa siihen yhdistettyjen linkkien tilaa reititysalueen sisällä muille reitittimille. Kukin reititin määrittää vastaanottamiensa linkkitilojen perusteella reitityspuun, joka toimii verkon topologiakarttana. [10, luku 1.]

#### *Etäisyysvektori*

Etäisyysvektoriprotokollaa ajavat reitittimet mainostavat polun sekä sen metriikan tiedot saavutettavista reiteistä vektorina vierekkäisille reitittimille. Vastaanottava reititin vertailee muilta reitittimiltä saatuja kohdeosoitteita ja niiden sisältämää informaatiota, ja määrittää parhaan polun kullekin kohdeosoitteelle. Parhaat polut mainostetaan vierekkäiselle reitittimelle. [10, luku 1.]

### *Polkuvektori*

Polkuvektoriprotokolla käyttää parhaan polun valitsemiseen hierarkkista algoritmia, jossa on painopisteitä reittien sisältämällä eri attribuuteilla ja määrittäyksillä. BGP kohtelee jokaista autonomista järjestelmää yksittäisenä pisteenä viestin kulkemalla polulla. Polkuvektorin muodostavat ne AS-numerot, joiden läpi BGP-informaatio on kulkenut. [10, luku 1.] BGP:n algoritmi parhaan polun muodostamiseksi käydään tarkemmin läpi luvussa 4, BGP:n attribuutit.



*Kuva 4. AS-polun muodostus*

## **3.3 Sisäiset ja ulkoiset reititysprotokollat**

Reititysprotokollat voidaan jakaa reititysalueen suhteen sisäisiin IGP- ja ulkoisiin EGP-reititysprotokolliin. Alkuperäinen EGP (Exterior Gateway Protocol) -reititysprotokolla huolehti aikanaan ARPANET-verkon yhdyskäytävien välisestä liikenteestä. BGP toimii ensisijaisesti ulkoisena reititysprotokollana reititysalueiden välillä, mutta se voidaan ottaa käyttöön myös reititysalueen sisäpuolella.

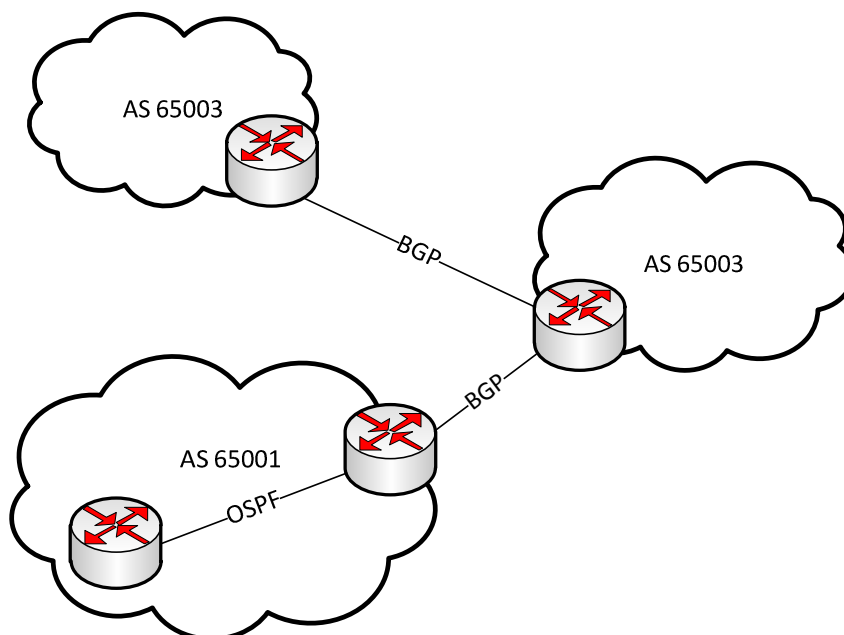
Reititysalueella tarkoitetaan joukkoa reitittimiä sekä verkkoja, joita hallinnoi yksittäinen tekijä. BGP:ssä reititysalueita kutsutaan autonomiseksi järjestelmäksi (AS, Autonomous System). [10, luku 1.]

### *3.3.1 Autonominen järjestelmä*

Yksittäinen autonominen järjestelmä voi olla esimerkiksi Internet-palveluntarjoajan verkko. Autonomisten järjestelmien tunnistamiseen käyte-



tään AS-numeroa (ASN, Autonomous System Number), joka on 16-bittinen numerosarja, kuten esimerkiksi 1000 tai 65535. [1, s. 102, 117.]



Kuva 5. BGP autonomisten järjestelmien välillä

IGP (Interior Gateway Protocol) -protokollat toimivat autonomisen järjestelmän sisällä, jolloin verkossa tapahtuvat muutokset eivät oletusarvoisesti heijastu verkon ulkopuolelle. Autonominen järjestelmä voi käyttää mitä tahansa IGP-protokollaa sisäverkossaan.

Verkon konvergenssin nopeus on yksi merkittävimmistä syistä erotella IGP- ja EGP-reititysprotokollat toisistaan. Konvergenssi on prosessi, jossa verkko synkronoituu samaan reititysinformaatioon verkossa tapahtuneen muutoksen jälkeen. Esimerkiksi kahden reitittimen välisen yhteyden katkeamisen johdosta tapahtunut muutos liikenteen polussa voidaan ohittaa huomattavasti nopeammin rajaamalla verkon konvergoituminen sisäiseen reititysprotokollaan. Reititysalueen ylläpitäjä voi myös piilottaa verkon alueita muilta tahoilta. [10, luku 1.]

### 3.3.2 Reitittimen reititystaulu

Reititystaulu (RIB, Routing Information Base) on taulu, jonka reititin muodostaa vastaanottamiensa reittien perusteella. Reititystoiminnot perustuvat reititystauluun ja sen suorituskyky on sidottu kahden loogisen komponentin, ohjauksen- ja välitystason yhteistoimintaan.

Reitittimen ohjaustaso on vastuussa reititystaulun luonnista ja välitystaso lukee tietoja reititystaulusta, luokittelee sekä välittää paketteja eteenpäin.

```

as100_reuna_r3>show ip route
Codes: C - connected, S - static, R - RIP, M - mobile, B - BGP
       D - EIGRP, EX - EIGRP external, O - OSPF, IA - OSPF inter area
       N1 - OSPF NSSA external type 1, N2 - OSPF NSSA external type 2
       E1 - OSPF external type 1, E2 - OSPF external type 2
       i - IS-IS, su - IS-IS summary, L1 - IS-IS level-1, L2 - IS-IS level-2
       ia - IS-IS inter area, * - candidate default, U - per-user static route
       o - ODR, P - periodic downloaded static route

Gateway of last resort is 10.0.5.254 to network 0.0.0.0

    172.16.0.0/16 is variably subnetted, 6 subnets, 4 masks
B       172.16.128.0/30 [200/0] via 10.0.5.254, 02:30:39
B       172.16.1.32/29 [20/0] via 172.16.1.18, 02:30:16
C       172.16.1.16/30 is directly connected, GigabitEthernet1/0
C       172.16.1.0/30 is directly connected, GigabitEthernet0/0
B       172.16.1.0/26 [200/0] via 0.0.0.0, 02:30:16, Null0
B       172.16.10.64/28 [200/0] via 10.0.4.254, 02:42:38
B       192.168.20.0/24 [200/20] via 172.16.10.66, 00:56:00

```

*Kuva 6. Reitittimen reititystaulu*

Reititystaulua muodostaessaan reititin voi käyttää useita lähteitä. Lukuisia verkkoja yhdistävässä ympäristössä, kuten Internetissä, reititysinformaatiota voidaan vaihtaa useiden sisäisten ja ulkoisten reititysprotokollien kesken.

Määrittäessään parasta polkua kullekin kohteelle käyvät reititysprotokollat ensin läpi polun valintaprosessin ja yrittävät sen jälkeen lisätä parhaat reitit reitittimen reititystauluun. Kun samaan kohteeseen on olemassa useita polkuja, suosii reititin sitä prefiksiä, jolla on pienin hallinnollinen etäisyys. Hallinnollinen etäisyys vaihtelee reititysprotokollan mukaan. Esimerkiksi BGP:n hallinnollinen etäisyys on 20 ja OSPF:n 110. Mikäli molemmat yrittäisivät lisätä samaa reittiä reititystauluun, valitsisi reititin BGP:n kautta tunnetun prefiksin.

Jos BGP ei onnistu lisäämään reittiä reitittimen reititystauluun, kirjataan epäonnistuminen BGP:n omaan reititystauluun. [12, s. 13-16.]

### 3.3.3 Reitittimen prosessit

Välittäessään paketteja BGP kilpailee suoritinajasta reitittimellä pyörivien muiden prosessien kanssa. BGP:n kannalta merkittävimmät reitittimen prosessit ovat BGP Router sekä BGP Scanner.

BGP Router

Reitittimellä pyörivistä prosesseista BGP Router on BGP:n pääprosessi. Kun kaikki reitit on lisätty BGP:n reititystauluun, ajaa BGP Router -prosessi polunvalinta-algoritmin ja päivittää parhaat polut itse reitittimen reititystauluun. Vastavuoroisesti mikäli reitti toisesta protokollasta tarvitsee päivittää BGP:hen, huomauttaa reitittimen reititystaulu asiasta BGP Router-prosessia joka päivittää BGP:n reititystaulun.

### BGP Scanner

BGP Scanner -prosessi käy ajoittain läpi BGP-reititystaulua määrittääkseen, mikäli prefiksejä tai attribuutteja tulisi vetää sieltä pois tai mikäli BGP:n muita toimintoja, kuten reittikarttojen tai suodatuksen välimuisteja tulisi päivittää. BGP Scanner -prosessi käy läpi myös reitittimen reititystaulun varmistaakseen, että sieltä löytyvät kaikki BGP:n käyttämät next hop -osoitteet. Next hop -osoite kertoo kohdeosoitteen, mihin paketit tulee lähettää. [12, s. 13-16.]

#### 3.3.4 BGP:n reititystaulu

BGP tallentaa vastaanottamansa parhaat polut BGP-reititystauluun, josta ne siirretään reitittimen reititystauluun asennettaviksi. BGP:n reititystaulu sisältää myös ne prefiksit, jotka reititin on itse BGP:hen lisännyt. [12, s. 13-16.]

```
as100_reuna_r3>show ip bgp
BGP table version is 70, local router ID is 172.16.1.1
Status codes: s suppressed, d damped, h history, * valid, > best, i - internal,
               r RIB-failure, S stale
Origin codes: i - IGP, e - EGP, ? - incomplete

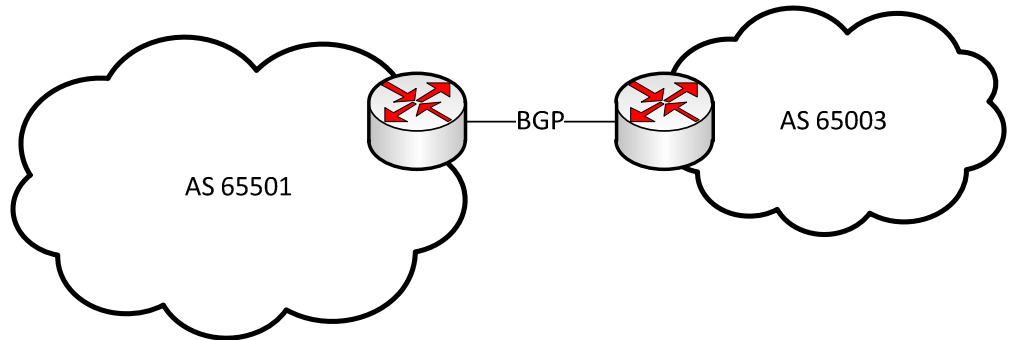
   Network        Next Hop        Metric LocPrf Weight Path
*>i0.0.0.0        10.0.5.254      0      100      0  i
s> 172.16.1.0/30  0.0.0.0         0              32768  i
*> 172.16.1.0/26  0.0.0.0         0              100   32768 200  i
s> 172.16.1.16/30 0.0.0.0         0              32768  i
s> 172.16.1.32/29 172.16.1.18     120             0 200  i
s                   172.16.1.2      80              0 200  i
*>i172.16.10.64/28 10.0.4.254      0      100      0  i
*>i172.16.128.0/30 10.0.5.254      0      100      0  i
*>i192.168.20.0   172.16.10.66   20      100      0 600  ?
```

Kuva 7. BGP:n reititystaulu

### 3.4 BGP peering-yhteys

BGP-informaatiota käsittelevää laitetta kutsutaan BGP-puhujaksi. BGP-puhuja on useimmiten reititin, mutta se voi myös olla laite, joka kuljettaa BGP-informaatiota reitittimien välillä. Ennen kuin BGP-puhujat voivat vaihtaa reititysinformaatiota keskenään, tulee niiden muodostaa *peering*-yhteys.

Käytännössä peering-yhteyden luominen usein vaatii erillisen sopimuksen yhteyttä muodostavien osapuolten välillä.

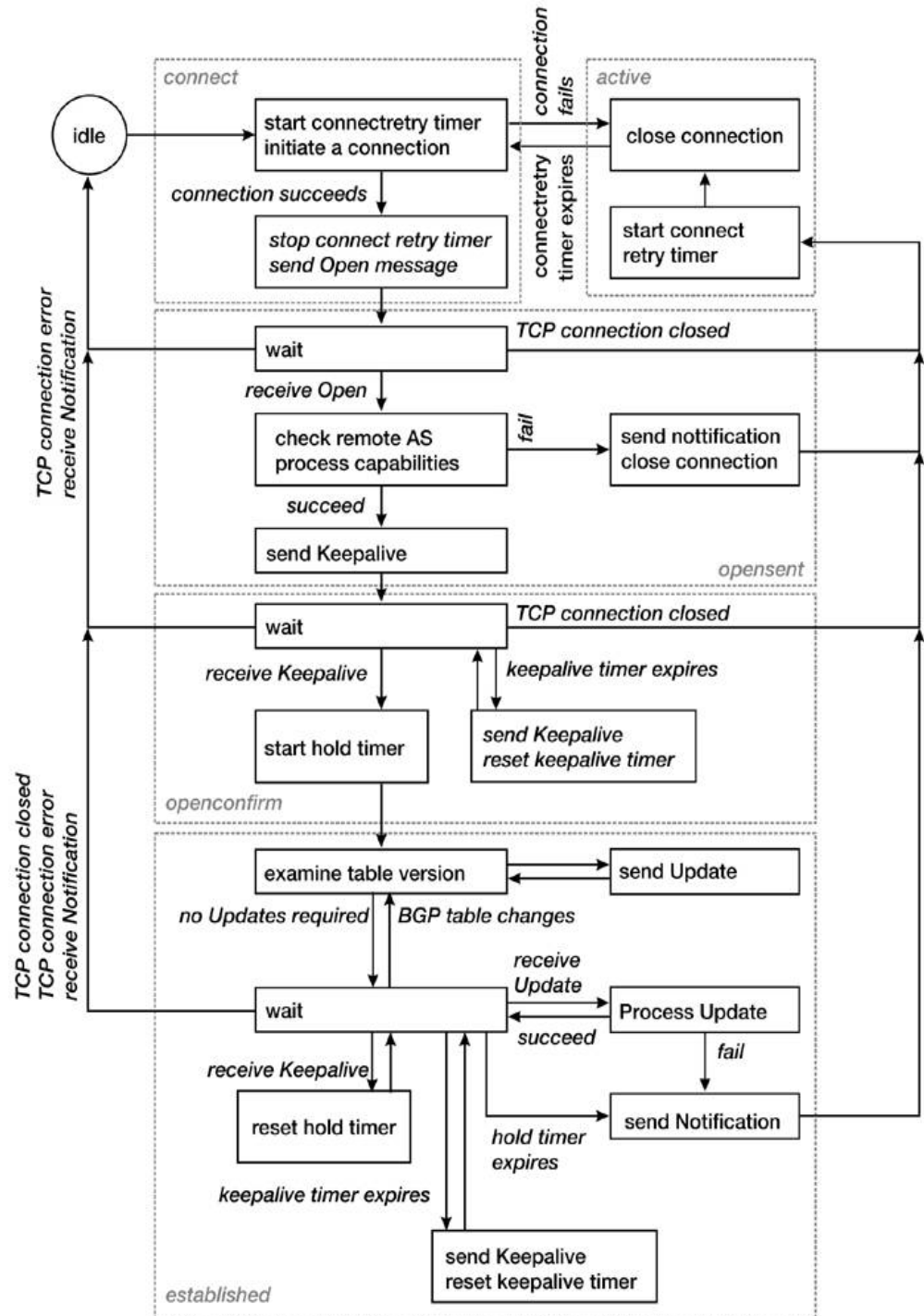


*Kuva 8. BGP peering -yhteys*

Muodostaessaan peering-yhteyttä BGP luo ensin TCP-yhteyden puhujien välille. TCP-protokollan omat mekanismit pitävät huolen yhteyden virheenkorjauksesta ja pakettien uudelleenlähetyksestä. TCP-yhteys pysyy auki koko peering-session ajan ja se käyttää kohdeporttia 179. [10, luku 1.]

#### *3.4.1 Peering-yhteyden tilat*

Kun TCP-yhteys on muodostunut, BGP-puhujat voivat neuvotella peering-yhteyden.



Kuva 9. BGP peering-yhteyden tilataulu [10, luku 1.]

BGP on käynnistyessään tilassa *Idle*. Idle-tilassa se hylkää naapureiltaan tulevat yhteyksien avauspyynnöt. Saatuaan reititysprosesseilta käskyn aloittaa, BGP käynnistää ConnectRetry-ajastimen ja alkaa muodostaa TCP-yhteyksiä konfiguroituihin naapureihin samalla kuunnellen mahdollisia yhteydenavauspyyntöjä. Tilaksi vaihdetaan *Connect*.

Mikäli yhteydenmuodostuksessa tapahtuu virhe, BGP sulkee yhteyden ja vaihtaa takaisin tilaan *Idle*. *ConnectRetry*-ajastin määrittelee, kuinka kauan BGP pysyy *Idle*-tilassa ennen kuin se yrittää yhteydenmuodostusta uudelleen.

*ConnectRetry* on ajastin, joka antaa reitittimen yrittää yhteyden muodostamista vasta tietyn ajan kuluttua. Ciscon reitittimillä *ConnectRetry*-ajastimen oletusarvo on kaksi minuuttia. Ajastimen ollessa käynnissä BGP kuitenkin hyväksyy *Open*-sanoman naapurilta.

*Connect*-tilassa BGP odottaa TCP-yhteyden muodostumista. Mikäli yhteyden muodostuminen onnistuu, BGP alustaa *ConnectRetry* ajastimen, lähettää *Open*-sanoman naapurilleen ja vaihtaa tilakseen *OpenSent*.

Mikäli yhteydenmuodostus epäonnistuu, BGP käynnistää uudelleen *ConnectRetry* ajastimen, jatkaa yhteydenavauspyyntöjen kuuntelemista ja vaihtaa tilaan *Active*.

Jos *ConnectRetry* ajastin kuluu loppuun, BGP käynnistää sen uudelleen ja lähtee jälleen muodostamaan TCP-yhteyttä, samalla kuunnellen yhteydenmuodostuksen aloitusta naapureilta ja pysyen tilassa *Connect*.

*Active*-tilassa BGP yrittää TCP-yhteyden muodostusta uudelleen. Mikäli TCP-yhteyden muodostus onnistuu BGP:n ollessa tilassa *Active*, BGP tyhjentää *ConnectRetry* ajastimen, lähettää *Open*-sanoman, asettaa pidempikestoisen *HoldTimer*-arvon ja vaihtaa tilaan *OpenSent*.

Mikäli *ConnectRetry* ajastin ehtii kulua loppuun ennen kuin TCP-yhteys on muodostunut, BGP alustaa ajastimen, yrittää yhteyden muodostusta uudelleen, jatkaa vastaavan viestin kuuntelemista ja vaihtaa tilaan *Connect*.

*HoldTimer*-ajastinta käytetään BGP-session sulkemiseen. *HoldTimer*-ajastimen pituus on tyypillisesti kolme kertaa *KeepAlive*-ajastimen pituus. Mikäli BGP-naapuri jättää kolme *Keepalive*-sanomaa välittämättä peräjälkeen, BGP-sessio suljetaan.

Mikäli naapureiden välillä on kaksi mahdollista polkua ja ensisijainen polku katkeaa, BGP oletuksena odottaa *HoldTimer*-ajastimen kulumista loppuun ennen kuin se purkaa session. *Peering*-yhteys voidaan kuitenkin liittää portin tilaan, jolloin *peering*-yhteys puretaan heti, mikäli käytettävän portin tila

muuttuu tai se vikaantuu. Ciscon reitittimellä toiminto on nimeltään *BGP fast external failover*.

Tilassa *OpenSent* BGP puhuja on siirtynyt odottamaan Open-sanomaa vastauksena naapurilta. Kun Open-sanoma vastaanotetaan, BGP käy sen vielä läpi mahdollisten virheiden varalta. Mikäli viestin tunnisteessa tai itse viestissä on epäselvyyksiä, BGP käyttää Notification-viestiä tiedottaakseen virheestä naapuria ja vaihtaa takaisin tilaan *Idle*.

Mikäli vastaanotettu Open-sanoma on tarkastettu ja virheetön, BGP vastaa Keepalive-viestillä ja jää odottamaan naapurilta vastausta. BGP vaihtaa tilaan *OpenConfirm*.

KeepAlive-ajastin käynnistyy BGP:n ollessa tilassa, jossa se odottaa Keepalive-sanomaa naapuriltaan. Kun KeepAlive-ajastin ehtii kulua loppuun, lähettää BGP puhuja uuden Keepalive-sanoman naapurilleen ja jää odottamaan uudelleen vastausta.

Mikäli HoldTimer-ajastin kuluu loppuun, lähettää järjestelmä Notification-viestin naapurilleen ja vaihtaa tilaan *Idle*.

*OpenConfirm*-tilassa BGP odottaa naapuriltaan Keepalive- tai Notification-sanomaa. Mikäli järjestelmä vastaanottaa Keepalive-viestin, vaihtaa se yhteyden tilaan *Established*.

Mikäli HoldTimer kuluu umpeen ennen kuin Keepalive-viesti on vastaanotettu, tiedottaa järjestelmä naapuria Notification-viestillä ja vaihtaa tilaan *Idle*. Mikäli järjestelmä vastaanottaa Notification-viestin, vaihtaa se tilaan *Idle*.

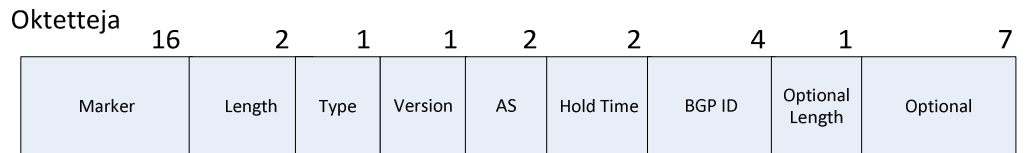
Mikäli KeepAlive ajastin kuluu umpeen, järjestelmä lähettää uuden Keepalive-viestin naapurille ja käynnistää KeepAlive-ajastimen uudestaan.

### *Established*

Peering-yhteyden ollessa tilassa *Established*, yhteys on muodostunut ja BGP voi vaihtaa naapuriensa kanssa Update-, Notification ja Keepalive-sanomia. [13.]

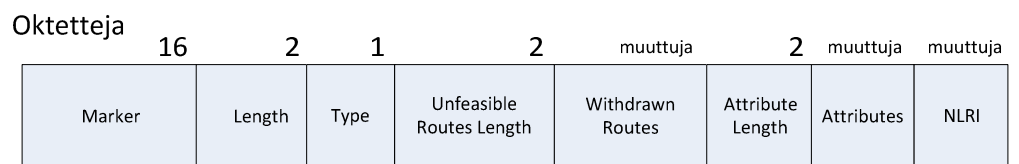
### 3.4.2 BGP:n sanomat

Ensimmäisenä sanomanaan TCP-yhteyden muodostuksen jälkeen BGP välittää sanoman *Open*. Open-sanoma on keino, jolla puhuja avaa session naapureiden välillä. Open-sanomaan sisällytetään puhujan naapurilleen välittämät sessioparametrit. [1, s. 116-117.]



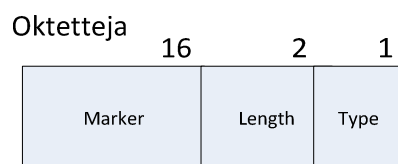
Kuva 10. Open-sanoman rakenne

*Update*-sanomilla BGP-puhujat välittävät reittien saavutettavuustietoja. *Update*-sanomilla voidaan mainostaa tiettyä reittiä ja vetää pois verkkoja, jotka eivät ole enää saavutettavissa. Yhdessä *Update*-sanomassa voidaan mainostaa vain yhtä reittiä, mutta pois vedettäviä reittejä voidaan sisällyttää viestiin useita. Reittejä pois vedettäessä tarvitaan vain verkon osoite, mutta verkkoa mainostettaessa välitettyyn informaatioon sisältyvät myös reitin attribuutit. [1, s. 116-117.]



Kuva 11. Update-sanoman rakenne

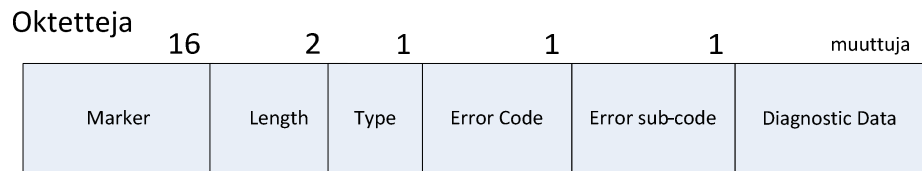
*Keepalive*-sanomia käytetään peering-session ylläpitämiseen. Välittämällä *Keepalive*-sanomia säännöllisin väliajoin BGP-puhujat varmistavat, että yhteys naapuriin on edelleen olemassa. *Keepalive*-sanomien lähetystahti voidaan konfiguroida jokaiselle sessiolle erikseen. *Keepalive*-sanoma sisältää ainoastaan BGP-otsikon. [1, s. 116-117.]



Kuva 12. Keepalive-sanoman rakenne



BGP käyttää *Notification*-sanomia tiedottaessaan naapureitaan sessiossa tapahtuneista virheistä. Naapurin lähettäessä tietoa, joka ei ole tunnistettavissa tai tieto on muuten virheellistä, lähettää BGP Notification-sanoman joka koostuu kolmesta osasta: virhekoodista, sen alakoodista sekä datakentän muuttujasta.



Kuva 13. Notification-viestin rakenne

Notification-sanoman virhekoodi kertoo, minkä tyyppinen virhe tapahtui. Virhekoodeja on yhteensä kuusi:

Virhekoodi 1, virhe viestin tunnisteessa

Virhekoodi 2, virhe Open-sanomassa

Virhekoodi 3, virhe Update-sanomassa

Virhekoodi 4, Hold Timer kulunut umpeen

Virhekoodi 5, virhe BGP:n tilataulussa

Virhekoodi 6, Cease

Viestin alakoodi antaa lisätietoja virheestä, kuten esimerkiksi missä kohden Open-sanomaa virhe tapahtui. Notification-viestin lähettävä BGP-puhuja voi myös täyttää datakentän esimerkiksi sillä osalla sanomaa, jossa virhe tapahtui. [1, s. 116-117.]

### 3.4.3 BGP:n sessiomääritykset

Muodostaessaan sessiota BGP-puhujat käyvät läpi vuoropuhelun, jossa yhteyden aloittanut BGP-puhuja ehdottaa joukkoa sessiossa käytettäviä attribuutteja ja ominaisuuksia. Sessiomäärityksiä voidaan määrittää myös dynaamisesti session aikana, mikäli molemmat naapurit sitä tukevat.

Vastaanottaessaan BGP-puhujan ehdotuksen sessiomäärityksistä naapuri joko hyväksyy tai hylkää ominaisuudet, tai osan niistä. Mikäli vastaanottava

BGP-puhuja ei tue jotain ehdotetuista attribuuteista, se välittää tiedon naapurilleen Notification-sanomalla. Aloittava BGP-puhuja voi tämän jälkeen joko katkaista yhteyden tai yrittää yhteyden luomista ilman kyseistä attribuuttia. [10, luku 1.]

Sessiomääritykset sisällytetään Open-sanomaan yksinkertaisina numeroarvoina. Sessiomäärityksiä ovat muun muassa:

Multiprotocol extensions, koodi 1

Route refresh, koodi 2

Dynamic capability exchange, koodi 6

Graceful restart, koodi 64

ORF (Outbound Route Filter), koodi 130[23]

*Route refresh* on toiminto, jolla BGP:n reitti-informaatio voidaan päivittää ilman, että BGP-sessio alustetaan. Prosessissa BGP-puhuja lähettää naapurilleen reittien päivityspyynnön, johon naapuri vastaa lähettämällä BGP-taulunsa sisällön. Lähettävä reititin lisää viestin loppuun End-of-RIB tunnuksen, jonka perusteella alkuperäinen BGP-puhuja tietää vastaanottaneensa koko BGP-taulun. Pyynnön tehnyt BGP-puhuja suorittaa taulua läpikäydessään parhaan polun algoritmin ja määrittää paikallisen reititystaulun. [1, 88; 94-95].

*Graceful restart* mahdollistaa reitittimen käynnistyksen uudelleen ilman, että BGP-sessio välissä puretaan. Reititin tällöin informoi naapuriaan uudelleenkäynnistymisestä. Uudelleenkäynnistysprosessin aikana reititin lähettää naapurilleen Graceful restart-koodin sisältävän Open-viestin. Vastaanottava reitin huomaa, että sillä on jo sessio kyseiselle reitittimelle auki ja käynnistää RestartTimer-ajastimen. Mikäli ajastin on kulunut loppuun ennen kuin peering-yhteys reitittimien välillä on muodostunut, alustaa vastaanottava reititin BGP-session. Graceful restart käyttää hyödykseen tämän jälkeen Route refresh-toimintoa ja päivittää reititystaulunsa uudelleenkäynnistyksen jälkeen. Mikäli BGP-session muodostus on sujunut normaalisti ja aikarajoitusten puitteissa, sessio jää voimaan ja BGP:n toiminta jatkuu normaalisti. [1, 88-90.]

*ORF (Outbound Route Filtering)* on BGP:n toiminto, jolla voidaan minimoida lähetettävien Update-sanomien määrä. ORF tiedottaa BGP-naapuriaan etukäteen niistä filttereistä, joilla prefiksit tullaan vastaanottajan päässä suodattamaan. Update-sanomien lukumäärää pienennetään jättämällä jo valmiiksi lähetävällä reitittimellä ne kokonaan lähettämättä. [1, 96.]

### 3.5 BGP:n attribuutit

BGP:n attribuutteja voidaan käyttää ilmaisemaan lisätietoja mainostettuun prefiksiin. Attribuuteilla voidaan vaikuttaa muun muassa parhaan polun valintaan.

Attribuutteja on neljää tyyppiä:

#### *Well-known mandatory-attribuutit*

Well-known mandatory-attribuutit sisältyvät jokaiseen Update-viestiin ja ne tulee jokaisen BGP-puhujan myös tunnistaa.

#### *Well-known discretionary-attribuutit*

Well-known discretionary-attribuutit tulee jokaisen BGP-puhujan tunnistaa, mutta ne eivät ole viesteissä pakollisia.

#### *Optional transitive-attribuutit*

Optional transitive-attribuutit voivat olla joidenkin BGP-puhujien tunnistettavissa, mutta eivät kaikkien. Attribuutit tulisi kuitenkin mainostaa eteenpäin naapureille huolimatta siitä, onko niitä tunnistettu vai ei.

#### *Optional nontransitive-attribuutit*

Optional nontransitive-attribuutit saattavat olla joidenkin BGP-puhujien tunnistettavissa, mutta eivät kaikkien. Mikäli vastaanotettu päivitysviesti sisältää näitä attribuutteja, päivitysviesti tulisi mainostaa BGP-naapureille ilman tunnistamattomia attribuutteja. [10, luku 1.]

Seuraavassa käydään läpi muutamia BGP:n useimmin käytettyjä attribuutteja kuten Origin, AS-path ja Community.

### *Origin*

Origin-attribuutti määrittää sen, mitä kautta tietty prefiksi on vastaanotettu tai injektoitu BGP:hen. Origin on well-known mandatory -attribuutti.

ORIGIN	0	1	2
	IGP	EGP	INCOMPLETE

*Taulukko 1. Origin-attribuutin arvot*

IGP tarkoittaa, että prefiksi on vastaanotettu sisäisen reititysprotokollan kautta. EGP tarkoittaa vastaavasti prefiksiä, joka on vastaanotettu ulkoisen reititysprotokollan kautta.

Arvolla INCOMPLETE merkittyjen prefiksien alkuperä on tuntematon. Nämä prefiksit on tyypillisesti injektoitu BGP:hen aggregaation tai toisen reititysprotokollan välityksellä.

Prefiksiä alimmalla origin-koodilla suositetaan parhaan polun valitsemisprosessissa. Origin-arvo määräytyy automaattisesti prefiksiä lisättäessä BGP:hen, mutta sitä voidaan myös tarvittaessa muuttaa. [10, luku 1.]

### *AS Path*

AS Path kuuluu well-known mandatory -attribuutteihin. AS Path -attribuutti listaa käänteisessä järjestyksessä ne autonomiset järjestelmät, joiden läpi prefiksi on kulkenut. Viimeisin AS on listassa ensimmäisenä. AS Path -attribuutin ensisijainen tarkoitus on estää reitityssilmukoiden muodostuminen autonomisten järjestelmien välillä. AS Path -attribuutilla voi olla arvo väliltä 0 - 255. AS Path -attribuutilla voidaan myös vaikuttaa esimerkiksi BGP:n parhaan polun valintaan lisäämällä (engl. prepend) AS-numeroita AS Path -listaan. ReitINVALinnassa paino on polulla, jolla on lyhin AS Path-lista.[10, luku 1.]

### *Next Hop*

Well-known mandatory -attribuutti next hop määrittelee sen IP-osoitteen, jonka kautta tietty prefiksi on saavutettavissa. Mikäli next hop -osoite ei ole suoraan kytketty, BGP tarkastaa reitin voimassaolon reitittimen reititystaulusta.

Prefiksillä tulee olla saavutettavissa oleva next hop -osoite ennen kuin se hyväksytään osaksi BGP:n parhaan polun algoritmia. [10, luku 1.]

### *MED*

MED (MULTI EXIT DISC) -attribuuttia käytetään tyypillisesti autonomisten järjestelmien välillä erottelemaan useita yhteyksiä samaan AS:ään. MED käyttää metriikkaa polkujen määrittämiseen. [10, luku 1.]

### *Local Preference*

Local preference on well-known discretionary -attribuutti, jota BGP-puhuja käyttää AS:n sisällä asettaakseen suositusarvon ulkoiselle reitille. Suurimman Local preference -attribuutin arvon omaavaa reittiä suositaan parhaan polun algoritmissa.

Local preference-attribuuttia ei sisällytetä prefikseihin, joita mainostetaan AS:n ulkopuolisille BGP-naapurille. Local preference -attribuuttia käytetään ainoastaan AS:n sisällä parhaan polun valinnassa. [10, luku 1.]

### *Community*

Community-attribuuttia voidaan käyttää kuljettamaan informaatiota koskien tiettyä reittiä autonomisten järjestelmien sisällä tai niiden välillä. Community-attribuutti ei suoraan vaikuta reitinvalintaan, mutta sillä voidaan määrittää muita valintaan vaikuttavia attribuutteja.

Yhdellä reitillä voi olla useita community-attribuutteja. BGP-puhujat tunnistavat tietyt community-attribuutit automaattisesti ja suorittavat attribuuttien edellyttämät toiminnot. Automaattisesti tunnistettavia attribuutteja ovat well-known community-attribuutit kuten No Export, No Advertise ja No Peer.

No export on community-attribuutti, jolla merkittävät reittejä ei mainosteta autonomisen järjestelmän ulkopuolelle.

No advertise community-attribuutilla merkittävät prefiksejä ei mainosteta millenkään muulle naapurille.

No peer on community-attribuutti, jolla voidaan sallia reitin mainostus vain tiettyihin autonomisiin järjestelmiin.

Privaatteja community-attribuutteja voi myös määrittää reitittimelle staattisesti, jolloin ne täytyy koordinoita autonomisten järjestelmien välillä. Community-attribuuttien suositeltu koodaustapa on autonomisen järjestelmän numeron eli AS-numeron sekä sisäisten määritysten yhdistelmä. Mikäli autonomisen järjestelmän numero on 1000, voidaan määrittellä community-attribuutti esimerkiksi muodossa 1000:8024. [10, luku 1.]

### 3.6 BGP autonomisen järjestelmän sisällä

Kuten luvussa 3.3 todettiin, BGP voi toimia joko reititysalueiden välillä tai reititysalueen sisällä. Se, kumpaan toteutukseen BGP on otettu käyttöön, tuo kuitenkin merkittäviä eroja BGP:n toimintaan.

iBGP (internal BGP) eli reititysalueen sisällä toimiva BGP edellyttää full mesh -verkkotopologiaa. Autonomisten järjestelmien sisällä AS Path -attribuutti ei muutu, joten BGP:llä ei ole näin ollen keinoja estää reititysinformaation kiertäminen silmukassa. Yksinkertaisena ratkaisuna tähän onkin noudattaa full mesh -topologiaa. iBGP-naapurit eivät oletusarvoisesti mainosta mitään reittejä toisilleen.

Reitityssilmukoita ehkäistään myös määrittämällä kaikille iBGP-naapureille yhteinen paras polku ulos autonomisesta järjestelmästä. iBGP-naapureiden välillä attribuutit pysyvät normaalisti muuttumattomina eivätkä vaikuta polun valitsemisprosessissa.

eBGP (external BGP) eli reititysalueiden välillä toimiva BGP muokkaa AS Path -attribuuttia, kun reittejä mainostetaan eBGP-naapurille. eBGP-puhuja ei kuitenkaan lisää AS Path-attribuuttiin omaa AS-numeroaan mainostaessaan reittiä iBGP-naapurille. BGP:n next hop -osoite pysyy myös samana, kun reittiä mainostetaan iBGP-vertaiselle, mutta se muutetaan aina vastaamaan eBGP-puhujan terminoivaa IP-osoitetta, kun reittiä mainostetaan eBGP-naapurille. [10, luku 1.]

#### *Reittien injektointi BGP:hen*

Reittejä injektoidaessa eli tuotaessa BGP:hen voidaan käyttää eri vaihtoehtoja.

Reittien injektointi käyttäen *network*-komentoa

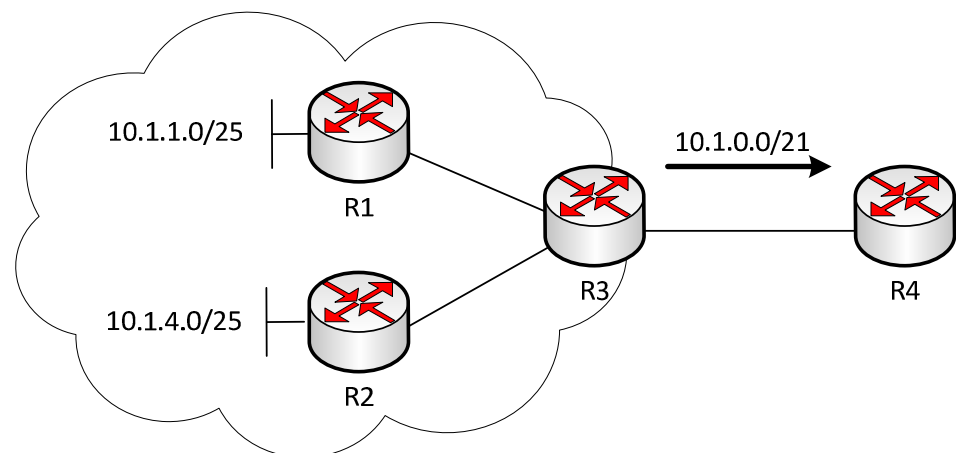
BGP:n `network`-komennolla voidaan verkko injektoida BGP:hen manuaalisesti. Verkko lisätään BGP:n reititystauluun vain jos verkko on saavutettavissa ja siihen on olemassa reitti reitittimen reititystaulussa. [12, s. 145.]

Reittien injektointi käyttäen `redistribute`-komentoa

IGP-reittejä voidaan injektoida dynaamisesti BGP:hen käyttäen `redistribute`-komentoa. Reittien tuominen BGP:hen `redistribute`-komennolla on yksinkertainen tapa vain jakaa reittejä reititysalueen ja BGP-naapureiden välillä. [10, luku 3.]

Reittien aggregaatio

Prefiksit voidaan johtaa suoran `redistribute`-komennon sijaan BGP:hen aggregoimalla. Mikäli reitittimien takaa löytyy useita verkkoja, jotka voidaan yhdistää yhden kattavamman prefiksin alle, voidaan naapureiden reititystaulua pienentää. [10, luku 3.]



Kuva 14. Reittien aggregaatio

Reittien reoriginaatio

Reoriginaatiolla voidaan käyttää esimerkiksi staattista reittiä aggregoidulle prefiksille, jonka verkon reunalla oleva reititin injektoida BGP:hen käyttäen `network`-komentoa. Tavoitteena on tuoda enemmän vakautta BGP:hen, välttämättä siitä onko alkuperäisen reitin ilmoittajalla mahdollisuutta saavuttaa kohdeosoite vai ei. [10, luku 3.]

### 3.7 BGP:n parhaan polun algoritmi

BGP-tunniste

BGP-tunniste (eng. Router ID) on neljän oktetin arvo, jonka BGP-naapurit vaihtavat Open-viestissä. Tunniste on IP-osoite ja se on sama kaikille BGP-puhujan naapureille. Mikäli BGP-tunnisteen arvo muuttuu, kaikki BGP-sessiot muodostetaan uudelleen käyttäen uutta arvoa. BGP-tunnisteen arvo otetaan tyypillisesti IP-osoitteesta, joka on liitetty reitittimen loopback-osoitteeseen tai muuhun virtuaaliseen liityntään. Käyttämällä virtuaalista osoitetta vältetään fyysisten liityntöjen mahdolliselta epävakaisuudelta tai hajoamiselta. Arvoa ei kuitenkaan ole pakko ottaa paikallisen järjestelmän IP-osoitteesta tai mikäli se otetaan, sen ei ole pakko pysyä aktiivisena. Arvon tulee kuitenkin olla reitityssysteemin sisällä uniikki. [10, luku 1.]

### Weight

Useimmat BGP-toteutukset tarjoavat verkon ylläpitäjälle mekanismin asettaa painoa tietyille prefiksille niin, että se valitaan parhaaksi poluksi vaikuttamatta muualla verkossa käytäviin parhaan polun laskelmiin. Tähän tekijään viitataan yleensä termillä weight, ja se vaikuttaa päätöksiin ainoastaan paikallisella reitittimellä. Weight ei ole määritelty BGP-metriikka, eikä sitä mainosteta reitin attribuuttina BGP:ssä. [10, luku 1.]

### *Polunmuodostusprosessi*

BGP käy läpi monivaiheisen algoritmin määrittäessään parasta polkua. BGP asettaa ensin parhaaksi poluksi reititystaulustaan uusimman merkinnän ja lähtee vertaamaan polkua aina seuraavaan, kunnes se saavuttaa taulun loppun. Mikäli BGP vastaanottaa polut 1, 2 ja 3, joista 3 on uusin, BGP valitsee ensin polun 3 parhaaksi poluksi. BGP sen jälkeen vertaa polkua 3 polkuun 2, jonka vertailun tulosta verrataan polkuun 1. Viimeisen vertailun tuloksena syntynyt reitti asetetaan lopulta parhaaksi poluksi.

Polkua ei hyväksytä mukaan valintaprosessiin, mikäli se ei täytä tiettyjä kriteerejä. Kriteerejä ovat muun muassa se, että polun next hop -osoite on saavutettavissa eikä reittiä ole BGP:n toimesta vaimennettu. [12, s. 24-25.]

### *BGP-polunmuodostusprosessi Ciscon reitittimillä*

Cisco-reitittimien BGP polunvalintaprosessissa on yhteensä kolmetoista kohtaa. Reittejä verrataan toisiinsa kohta kohdalta vuoron perään kunnes erottava kriteeri löytyy. [12, s. 25-27.]

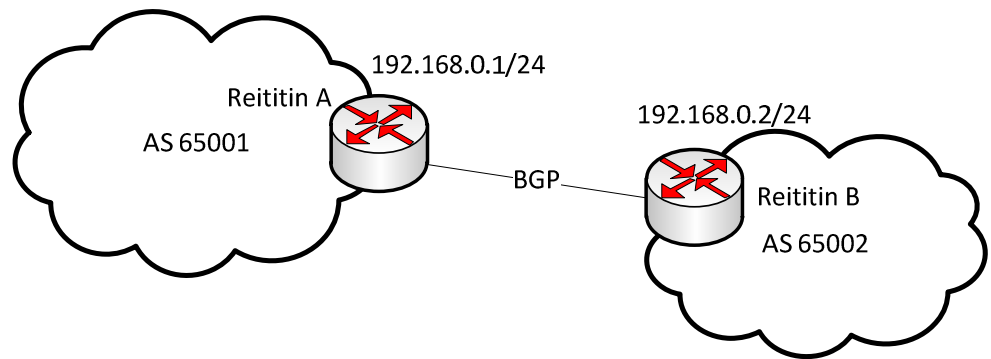


Taulukko 2. BGP parhaan polun algoritmi

1. Weight	Korkein weight-arvo
2. Local Preference	Korkein local preference-arvo
3. Paikallinen reitti	Injektointitapa (network, redistribute)
4. AS Path	Lyhin AS Path-lista
5. Origin	Alin origin-attribuutin arvo
6. MED	Alin MED-arvo
7. Ulkoinen BGP-reitti	Ulkoinen polku valitaan
8. IGP-metriikka	Alin IGP-metriikka BGP:n käyttämään next hop -osoitteeseen
9. Multipath	Mikäli multipath on konfiguroitu, lisätään samanarvoiset reitit reititystauluun
10. Vanhin ulkoinen BGP-reitti	Valitaan BGP-polku, joka on vastaanotettu ensimmäisenä
11. BGP-tunniste	Alin BGP-tunniste
12. Cluster List	Lyhin Cluster list
13. Peering-osoite	Alin naapurien käyttämistä IP-osoitteista

### 3.8 Peering-yhteyden konfigurointi

Alla olevassa esimerkissä nähdään yksinkertaisen peering-yhteyden konfigurointi BGP-naapureiden. Käytetyt komennot ovat Cisco IOS -käyttöjärjestelmän komentoja ja ne asetetaan global configuration-moodissa.



Konfiguraatio reitittimellä A:

```
(config)# bgp router 65001
```

Komento `bgp router 65001` käynnistää BGP prosessin ja määrittää AS-numeron 65001.

```
(config-router) network 192.168.0.0 mask 255.255.255.0
```

Komennolla `network 192.168.0.0 mask 255.255.255.0` reititin A injektioi verkon 192.168.0.0/24 BGP:hen.

```
(config-router) neighbor 192.168.0.2 remote-as 65002
```

Komento `neighbor 192.168.0.2 remote-as 65002` määrittää eBGP-session naapurin 192.168.0.2 kanssa.

Konfiguraatio reitittimellä B:

```
(config) bgp router 65002
```

```
(config-router) network 192.168.0.0 mask 255.255.255.0
```

```
(config-router) neighbor 192.168.0.1 remote-as 65001
```

### 3.9 Peer group

Muodostamalla BGP-naapureista ryhmiä voidaan vähentää konfiguraation tarvetta ja pienentää päivityssanomien määrää. Peer group on BGP-naapureista muodostettu ryhmä, jonka jäsenille voidaan luoda useita päivityssanomia yhdellä kertaa. Kun peer group-ryhmän kaikilla jäsenillä on sama, AS:stä ulospäin suuntautuva reitityspolitiikka, reitittimen tarvitsee luoda ainoastaan yksi päivityssanoma jonka se voi kopioida kaikille ryhmän jäsenille. [11 s. 74-76.]

Peer group-ryhmän konfigurointiesimerkki:

```
(config) router bgp 65001
(config-router) neighbor CUST_GROUP peer-group
```

Komento `neighbor CUST_GROUP peer-group` luo uuden ryhmän nimeltä `CUST_GROUP`.

```
(config-router) neighbor CUST_GROUP password customer
```

Komennolla `neighbor CUST_GROUP password` määritetään yhteydenmuodostuksessa käytettävän TCP MD5 (Message-Digest algorithm 5) -allekirjoituksen salasana. Komento ei ole pakollinen peer group-ryhmää luodessa.

```
(config-router) neighbor 192.168.0.2 remote-as 65002
(config-router) neighbor 192.168.0.2 peer-group CUST_GROUP
```

BGP-naapuri `192.168.0.2` lisätään ryhmään `CUST_GROUP`.

Peer group-ryhmien hyödyttää reititintä vähentämällä sen kuormaa. BGP-prosessi käy päivityssanomiamuodostaessaan reititystaulun läpi kerran jokaista ryhmää kohden. Mikäli ryhmiä ei ole konfiguroitu reititystaulu käydään läpi jokaisen naapurin kohdalla, joka voi moninkertaistaa BGP:n työkuorman. [11 s. 74-76.]

#### 4 BGP-POLITIIKKA

Reitityspolitiikan lisäksi BGP:lle muodostetaan hallinnollinen politiikka, joka kattaa reittien suodatuksen autonomiseen järjestelmään sisään ja sieltä ulos.

Säännöllinen lauseke

Säännöllinen lauseke (engl. regular expression) on monipuolinen työkalu, jota voidaan hyödyntää prefiksien suodattamisessa.

Säännöllisen lausekkeen käyttöesimerkkejä:

*Taulukko 3. Säännöllisen lausekkeen esimerkkejä*

.	vastaa mitä tahansa yksittäistä merkkiä
^	vastaa merkkijonon ensimmäistä merkkiä

\$	vastaa merkkijonon viimeistä merkkiä
	vastaa toista merkkijonoista (looginen OR)
*	vastaa mitä tahansa edeltävien merkkien jaksoa (0 tai enemmän)
+	vastaa yhtä tai useampaa edeltävien merkkien jaksoa
?	vastaa edeltävää merkkiä

Esimerkiksi `^1000$` vastaa ainoastaan merkkijonoa 1000.

Merkkejä voidaan rajata hakasuluilla []. Silloin hakutulosta haetaan vain yhdelle rajauksen sisällä olevista merkeistä. `^`-merkkiä voidaan käyttää rajauksen alussa, kun halutaan sulkea pois kaikki rajauksen sisällä olevat merkit. Väliviivalla voi määrittää ensimmäisen ja viimeisen kirjaimen. [12, s. 109-113.]

## 4.1 Suodatinlistat

Peering-yhteyksillä käytetään laajalti erilaisia suodatinlistoja. Suodatinlistoja ovat pääsyylojen lisäksi prefiksilista, AS Path-lista sekä community-lista. [12, s. 114.]

### 4.1.1 Standardi pääsyylista

Standardeilla pääsyyloilla rajoitetaan liikennettä lähettäjän IP-osoitteen perusteella.

Standardin pääsyylojen syntaksi:

*access-list (list-number) (permit | deny) (ip-address) (subnet-mask)*

BGP voi käyttää pääsyylistaa esimerkiksi naapurille mainostettujen reittien hallinnoimiseen. Alla oleva konfiguraatio estää verkkojen 172.16.1.0/24 ja 172.16.2.0/24 mainostuksen naapurille 192.168.1.1.

```
(config)# router bgp 65500
(config-router)# neighbor 192.168.1.1 remote-as 65501
(config-router)# neighbor 192.168.1.1 distribute-list 10 out
!
```

```
(config)# access-list 10 deny 10.1.1.0 0.0.0.255
(config)# access-list 10 deny 10.1.2.0 0.0.0.255
```

Pääsyylista liitetään naapuriin komennolla `neighbor 192.168.1.1 distribute-list 10 out`. Pääsyylista määritetään vastaamaan joko ulos- tai sisäänpäin tulevaa liikennettä komennolla `in | out`. [10, luku 6.]

#### 4.1.2 Laajennettu pääsyylista

Laajennetuilla pääsyylistoilla voidaan suodattaa liikennettä sen lähde- ja kohdeosoitteilla. Suodatukseen voidaan käyttää myös porttinumeroita. [10, luku 6.]

Laajennetun pääsyylistan syntaksi:

```
Access-list (list-number) (deny | permit) [protocol] (prefix) (prefix-wildcard)
(network-mask) (network-mas-wildcard)
```

Pääsyylistaesimerkkejä:

```
access-list 101 10.1.1.0 0.0.0.0 255.255.255.0 0.0.0.0
```

Pääsyylista 101 osuu vain tarkalleen prefiksiin 10.1.1.0/24.

```
access-list 102 10.1.1.0 0.0.0.0.255 255.255.255.0 0.0.0.255
```

Pääsyylista 102 osuu prefiksiin 10.1.1.0/24 ja kaikkiin sen aliverkkoihin.

#### 4.1.3 Prefiksilista

Prefiksilistoilla voidaan suodattaa liikennettä joko prefiksin IP-osoitteella tai sen pituudella. Prefiksilistat ovat normaaleja pääsyylistoja joustavampia ja sopivat paremmin reititysinformaation suodattamiseen. Prefiksilistoja ei voi käyttää pakettien suodattamiseen. [10, luku 6.]

Prefiksilistan syntaksi:

```
ip prefix-list (name) [seq] (deny | permit) (prefix/length)
```

Listaan liitettävät osoitteet muutetaan automaattisesti vastaamaan prefiksin pituutta. Mikäli listaan lisätään esimerkiksi verkko 10.1.1.0/8, muuntuu se muotoon 10.0.0.0/8.

Prefiksilistojen kanssa voi käyttää sekvenssinumeroita, jolloin listaa ei joudu rakentamaan uudelleen sitä päivitettäessä. Jos sekvenssinumeroa ei ole määritetty, lisätään uusi merkintä listan viimeiseksi ja sen arvoa kasvatetaan edellisen merkinnän arvoon nähden viidellä. Prefiksilista käydään läpi järjestyksessä pienimmästä sekvenssiarvosta suurimpaan. [10, luku 6.]

```
ip prefix-list 10 permit 10.0.0.0/8
```

Prefiksilista 10 sallii ainoastaan prefiksin 10.0.0.0/8.

Prefiksilista voi myös osua joukkoon prefiksejä. Prefiksilistalla on kaksi lisäoptiota, *ge* (greater-than-equal-to) sekä *le* (less-than-equal-to). [10, luku 6.]

```
ip prefix-list 20 permit 0.0.0.0/24 le 32
```

Prefiksilista 120 sallii kaikki prefiksit, joiden pituus on välillä 24 - 32.

#### 4.1.4 AS Path-lista

AS Path-attribuuttia voidaan käyttää reititysinformaation suodatukseen muiden suodatuslistojen tavoin. [10, luku 6.]

AS Path-attribuutin syntaksi:

```
ip as-path access-list (access-list-number) (permit | deny) (as-regular-expression)
```

AS Path-suodatuslista voidaan liittää BGP-naapuriin komennolla *filter-list*.

```
(config-router)# neighbor 172.16.1.1 filter-list 1 in
!
(config)# ip as-path access-list 1 permit ^100$
```

AS Path-lista 1 sallii BGP-naapurin mainostamista reiteistä ainoastaan ne, joiden AS Path-attribuutin arvo on täsmälleen 100. [10, luku 6.]

#### 4.1.5 Community-lista

Community-listaa käytetään suodattamaan reittejä niiden community-attribuutin perusteella. Mikäli reitittimellä on otettu käyttöön community-attribuutin uudempi formaatti komennolla *ip bgp-community new-format*, voidaan kaikki community-listat esittää muodossa AA:NN, jossa AA on au-

tonomisen järjestelmän AS-numero ja NN muuttuva arvo. Community-lista voidaan määritellä joko nimen tai numeron perusteella. [10, luku 6.]

Standardi community-lista:

```
ip community-list standard (list-name | list-number) (permit | deny) (community-number)
```

Laajennettu community-lista:

```
ip community-list standard (list-name | list-number) (permit | deny) (regular-expression)
```

Jos listaan asettaa useita community-numeroita peräkkäin, positiivinen hakutulokseen vaaditaan osuma kaikkiin ehtoihin. Kun community-arvoja asetetaan eri riveille samalla listanimellä tai numerolla, tarvitsee ainoastaan yhden arvoista osua hakuehtoihin. [10, luku 6.]

```
ip community-list 1 deny 100:666 100:777
```

Community-listassa 1 molempien community-arvojen tulee olla liitettynä suodatettavaan reittiin, jotta hakutulos löytyy.

## 4.2 Route map

Route map kokoaa yhteen reitit, attribuutit ja suodatuslistat. Route map voidaan liittää esimerkiksi peer group-ryhmään asettamaan määrittäviä useammalla reitille tai naapurille kerrallaan.

Route map koostuu lausekkeista match ja set, joilla asetetaan ehtoja ja määritetään attribuutteja. Route map mahdollistaa erilaisten ehtokokonaisuuksi-  
en luomisen, joissa ehdot suoritetaan numerojärjestyksessä.

Kun osuma hakuehtoihin löytyy, route map:in suorittaminen lopetetaan. Määrittäksen voi kuitenkin kiertää käyttäen *continue*-lisäasetusta. Mikäli route map liitetään BGP:n neighbor-komentoon, voidaan niitä kerralla liittää vain yksi. [10, luku 6.]

```
(config)# router bgp 100
(config-router)# neighbor 192.168.0.1 route-map set_community
in
!
(config)# route-map set_community permit 10
```

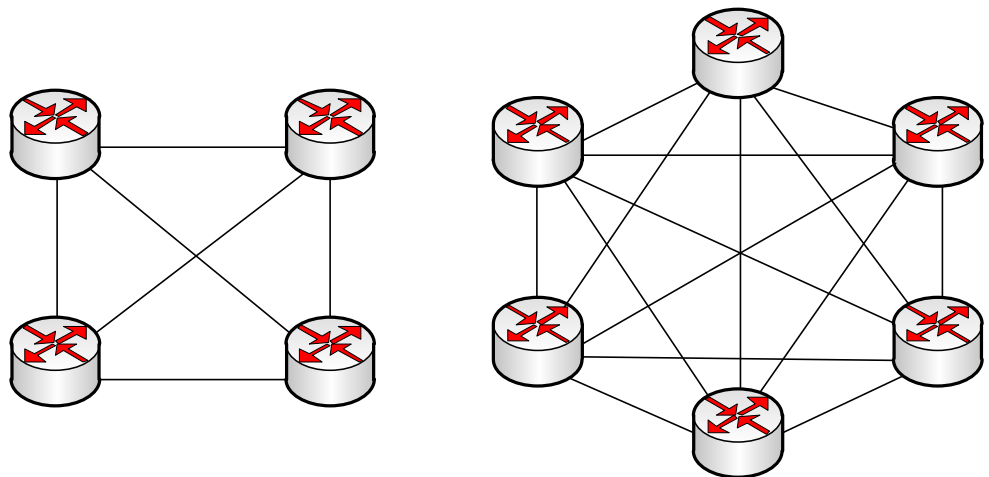
```
(config-route-map)# match community 1
(config-route-map)# set local-preference 120
!
(config)# ip community-list 1 permit 100:120
```

Esimerkkikonfiguraatiossa määritetään community-list 1, jota vasten naapurilta 192.168.0.1 vastaanotettuja reittejä suodatetaan. Mikäli naapuri mainostaa reittiä community-arvolla 100:120, asettaa vastaanottava BGP-puhuja reitin local preference-arvoksi 120.

## 5 INTERNET-PALVELUNTARJOAJAT JA YRITYSVERKOT

### 5.1 Verkon ytimen muodostaminen iBGP:llä

Kuten luvussa 3.6 todettiin, verkon ytimen muodostaminen iBGP:llä edellyttää full mesh-topologiaa. AS Path -attribuuttia ei muuteta AS:n sisällä, eikä BGP:llä ole mahdollisuutta reitityssilmukan havaitsemiseen.



Kuva 15. Neljän ja kuuden iBGP-puhujan muodostamat full mesh-topologiat

Full mesh-topologiassa tarvittavien peering-yhteyksien määrä kasvaa nopeasti suhteessa reitittimien lukumäärään. iBGP:n peering-yhteyksien laskemiseksi on olemassa kaava

$$\frac{n * (n - 1)}{2}$$

jossa n on verkon reitittimien lukumäärä. [10, luku 4.]



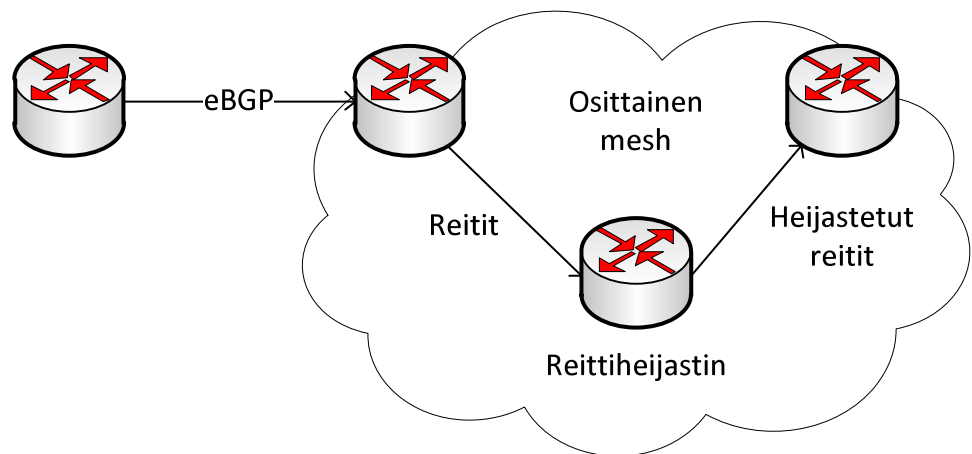
Mikäli verkkoon kuuluu esimerkiksi 25 iBGP-reititintä, saadaan tarvittavien peering-yhteyksien lukumääräksi:

$$25 \cdot (25 - 1) / 2 = 300$$

Uuden reitittimen lisääminen verkkoon voi osoittautua työlääksi, kun peering-yhteys tulee konfiguroida jokaiselle verkossa jo valmiina olevalle reitittimelle.

### 5.1.1 Reittiheijastimet

Reittiheijastimilla voidaan ohittaa iBGP:n vaatiman full mesh -topologia. asettamat rajoitukset. Reittiheijastimet sallivat iBGP-puhujien mainostaa välillään heijastettuja reittejä. Reittiheijastimia käytetään ensisijaisesti verkon ytimessä vähentämään iBGP-sessioiden sekä iBGP-puhujilla olevien reittien määrää.



Kuva 16. Reittiheijastin

Reittiheijastimen naapurit joko ovat tai eivät ole sen asiakkaita. Reittiheijastin heijastaa reittejä eteenpäin riippuen naapurin välisestä suhteesta. Mikäli reittiheijastin on vastaanottanut reitin naapurilta, joka ei ole sen asiakas, reittiheijastin heijastaa tuon reitin asiakkailleen. Mikäli reittiheijastimen vastaanottama reitti on taas tullut asiakkaalta, reitti heijastetaan kaikille naapureille, mukaan lukien muut asiakkaat.

Reittiheijastin asiakkaineen muodostaa reittiheijastinryppään. Yhdessä ryppäessä voi olla useita reittiheijastimia. Reittiheijastinryppään asiakkailta ei vaadita keskinäistä full mesh -topologiaa reittiheijastimen heijastaessa asiakkailtaan oppimansa reitit muille asiakkaille.

Reittiheijastin käy läpi vastaanottamiensa reittien välillä parhaan polun algoritmin aina riippumatta siitä vastaanotettiin reitti asiakkaalta vai ei. [10, luku 4.]

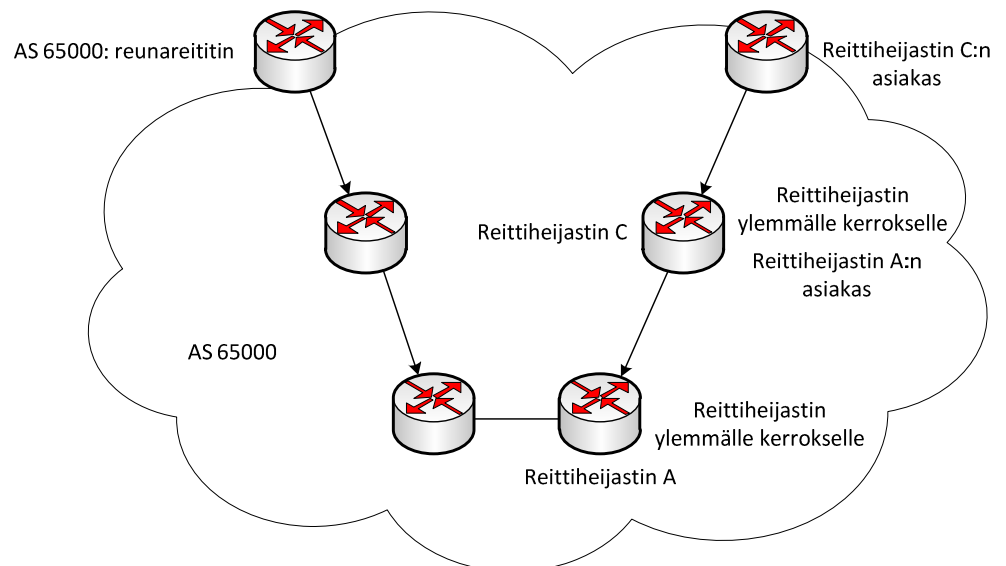
#### Reittiheijastin ja reitityssilmukat

Reittiheijastukselle on määritelty kaksi omaa BGP-attribuuttia, jotka ovat Originator ID sekä Cluster List. Cluster list -attribuutti tallentaa heijastuneen polun läpäisemien reittiheijastinryppäiden Cluster ID -arvot. Cluster list toimii samoin kuin AS Path -attribuutti. Reitittimellä Originator ID-arvo on oletusarvoisesti reittiheijastimena toimivan reitittimen tunniste.

Vastaanottaessaan reittiä asiakkaalta reittiheijastin asettaa Originator ID-attribuutin arvoksi lähettävän naapurireitittimen tunnisteen. Cluster ID- tai Originator ID -attribuutteja ei mainosteta eBGP-naapureille. [10, luku 4.]

#### Hierarkia

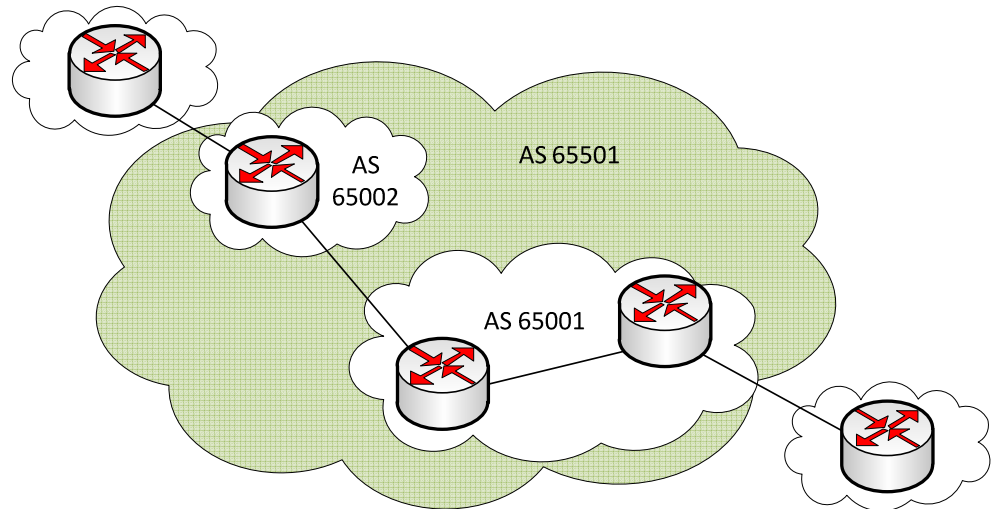
Verkon hierarkiaa voidaan lisätä järjestämällä reittiheijastimet eri kerroksiin. Luomalla kerroksia verkkoon saadaan verkkoon laajennettavuutta tukevaa rakennetta, samalla vähentäen eri tasoilla olevilla reitittimille keskittyvää kuormaa. [12, s. 388.]



Verkon kerroksilla reitittimet suorittavat erilaisia tehtäviä. Esimerkiksi verkon ytimessä ei enää tehdä reittien suodatusta, vaan reitit suodatetaan verkon reunalla ja välitetään eteenpäin eri kerrosten kautta. [12, s. 389 - 394.]

### 5.1.2 BGP konfедераatio

Autonomisen järjestelmän sisällä voi myös olla useita aliautonomisia järjestelmiä. Autonomisten järjestelmiä voidaan konfiguroida niin, että järjestelmät näkyvät ulkopuolisille toimijoille kuin yhtenä suurena AS:nä. Konfiguraatiotaapaa kutsutaan BGP konfедераatioksi. Autonomisen järjestelmän sisältämät aliautonomiset järjestelmät näkyvät yksittäisinä AS:inä konfедераation jäsenille.



Kuten myös reittiheijastimille, konfедераation jäsenille on määritetty kaksi BGP-attribuuttia reititysinformaations havaitsemiseksi. Attribuutit ovat AS Confederation Sequence sekä AS Confederation Set.

AS Confederation Sequence pitää kirjaa niistä autonomisista järjestelmistä konfедераation sisällä, joiden läpi tietty reitti on kulkenut.

AS Confederation Set on lista niistä autonomisista järjestelmistä konfедераation sisällä, joiden läpi yksittäinen päivityssanoma on kulkenut.

BGP konfедераatioilla ei voida saavuttaa samoin tavoin verkon hierarkkisuutta kuin esimerkiksi reittiheijastimilla. [10, luku 4.]

## 5.2 Ytimestä Internetiin

Asiakas voi hyödyntää BGP:tä reunareitittimellään yhdistyessään palveluntarjoajan verkkoon. Asiakas tarvitsee BGP:tä varten IP-osoitteen sekä AS-numeron, jonka voi myöntää Internet-palveluntarjoajalta tai alueellinen RIR-

rekisteri. Julkisia AS-numeroita myöntää ja ylläpitää RIR (Regional Internet Registry)-rekisteri. [10, luku 2.]

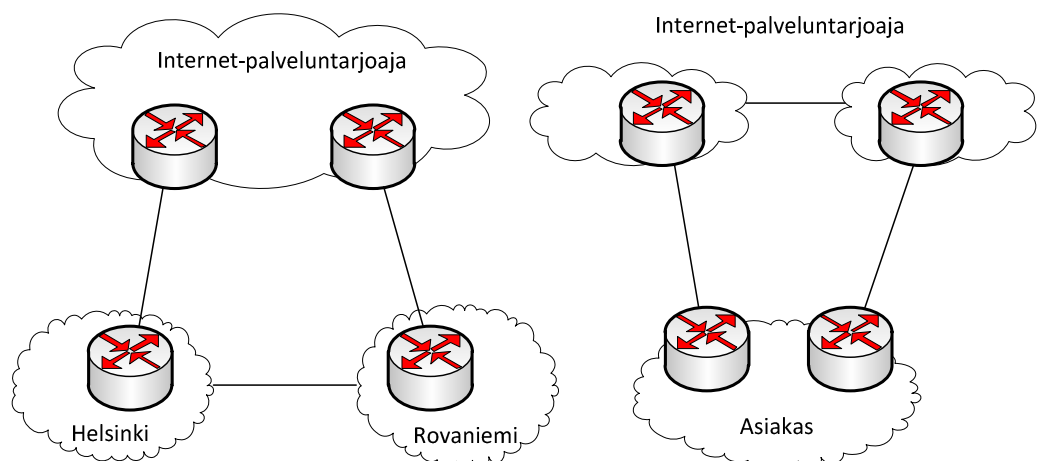
Internet-palveluntarjoaja voi myöntää myös privaatin AS-numero. Palveluntarjoaja riisuu privaatin AS-numeron reittien AS Path -listasta mainostaessaan reittejä eteenpäin eBGP-naapureille. Privaatteja AS-numeroita ovat IANA:n (Internet Assigned Numbers Authority) määrittämät numerot välillä 64512 - 65535. Privaatteja AS-numeroita ei mainosteta Internetissä ja autonomiset järjestelmät usein suodattavat ne verkkonsa reunalla. [10, luku 2.]

### *Yhteystavat*

*Single homing*, eli yksittäinen yhteys palveluntarjoajan ja asiakkaan välillä voidaan toteuttaa staattisilla reiteillä ilman BGP:tä. BGP:n tarjoamat hyödyt ovat yksittäiselle yhteydelle hyvin vähäiset. [10, luku 2.]

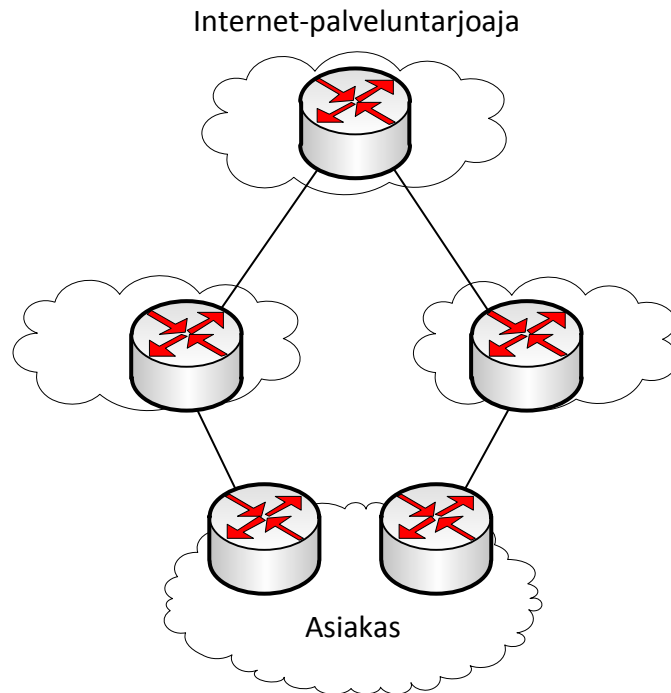
*Dual homing* tarkoittaa kahden yhteyden luomista yhden tai useamman palveluntarjoajan verkkoon. Kun palveluntarjoaja on yhteyksille sama, voidaan verkkoon yhdistyä useammasta sijainnista tai käyttäen useita kohtia palveluntarjoajan verkossa. [10, luku 2.]

Kun käytössä on useampia yhteyksiä, voi asiakas vaikuttaa siihen miten palveluntarjoaja liikennettä yhteyksiä pitkin ohjaa. Asiakkaalla on käytössään esimerkiksi MED- ja community-attribuutti, joita voi käyttää ilmaisemaan palveluntarjoajalle, kumpi reiteistä sen tulisi ensisijaisesti valita.



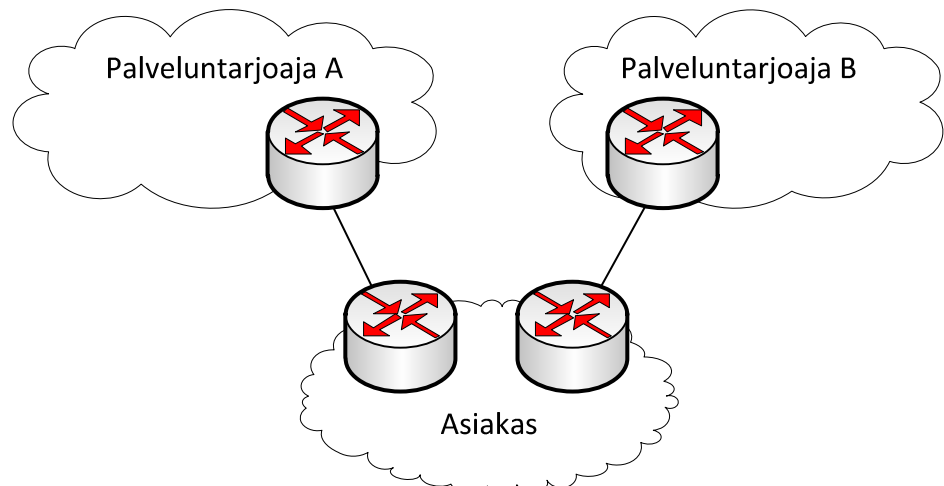
Kuva 17. Dual homing-yhteydet saman palveluntarjoajan verkkoon

Kuvassa 17 näkyvällä dual homing-arkkitehtuurilla on mahdollista parantaa Internet-yhteyden vikasetoisuutta. Kun molemmat yhteydet liittyvät samaan palveluntarjoajaan, asiakas ei kuitenkaan näe, miten palveluntarjoaja yhdistää asiakkaan tulevat yhteydet.



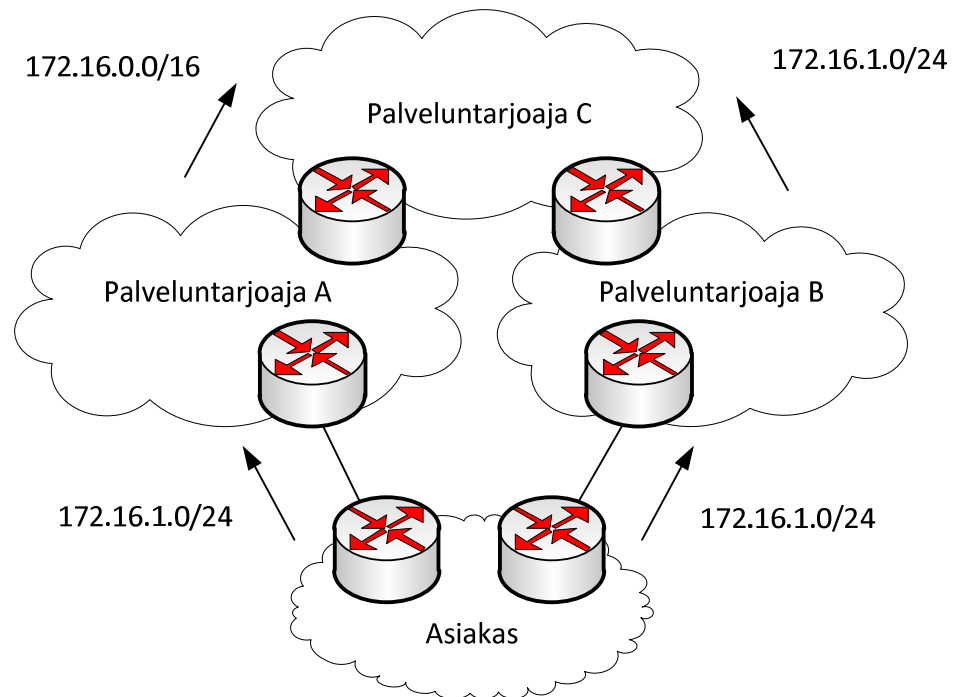
*Kuva 18. Yksittäinen vikaantumispiste palveluntarjoajan verkossa*

Palveluntarjoajan verkossa olevasta reitittimestä voi muodostua yksittäinen piste, jonka vikaantuminen voi aiheuttaa molempien yhteyksien katkeamisen. [10, luku 2.]



*Kuva 19. Dual homing useamman palveluntarjoajan verkkoon*

Muodostamalla dual homing -yhteys eri palveluntarjoajiin vikasietoisuus teoriassa kasvaa. Käytettäessä dual homing -yhteyksiä asiakkaalla on useita eri tapoja vaikuttaa palveluntarjoajien reitinvalintaan.



Kuva 20. Asiakkaan verkon mainostus

Palveluntarjoajien liikenteen ohjaus kuitenkin harvoin on yksinkertaista. Kuvassa 20 palveluntarjoaja A on tarjonnut asiakkaalle verkon osoitetilän 172.16.1.0/24, jota asiakas mainostaa myös palveluntarjoajalle B. Palveluntarjoaja A mainostaa paljon suurempaa osoitelohkoa 172.16.0.0/16 peering-yhteyksilleen Internetin runkoverkossa. Koska palveluntarjoaja B ei hallinnoi osoitelohkoa 172.16.0.0/16, joutuu se mainostamaan asiakkaan pidempää prefiksiä 172.16.1.0/24. Palveluntarjoaja C vastaanottaa kaksi polkua kohti asiakkaan verkkoa:

172.16.0.0/16 palveluntarjoaja A:n kautta

172.16.1.0/24 palveluntarjoaja B:n kautta

Koska palveluntarjoaja C valitsee tuntemistaan poluista tarkimman, se reitittää kaiken liikenteen palveluntarjoaja B:n kautta. Tällöin esimerkiksi asiakas voi pyytää palveluntarjoajalta A, että se vuotaisi prefiksin 172.16.1.0/24 aggregoimastaan 172.16.0.0/16-osoitelohkosta.

Palveluntarjoajalla C on tämän jälkeen kaksi reittiä kohdeosoitteeseen 172.16.1.0/24. Mikäli C valitsee reitin palveluntarjoaja B:n kautta, on tilanne sama kuin aikaisemminkin.

Vastaavista tilanteista aiheutuvat ongelmat kuormittavat Internetin reititystaulua. Reititystaulu sisältää tällä hetkellä yli 350 000 reittiä, joista iso osa on lisätty joko virheellisesti tai kahden palveluntarjoajayhteyden kuormanjakoyrityksen yhteydessä. [ [10, luku 2.]

### 5.3 Internet-palveluntarjoajan verkko

Kun verkossa käsitellään suuria reittimääriä, on hierarkkisuus yksi tapa vähentää kuorman keskittymistä tiettyyn verkon pisteeseen. [12, s. 388.]

#### 5.3.1 Palveluntarjoajaverkon kerrokset

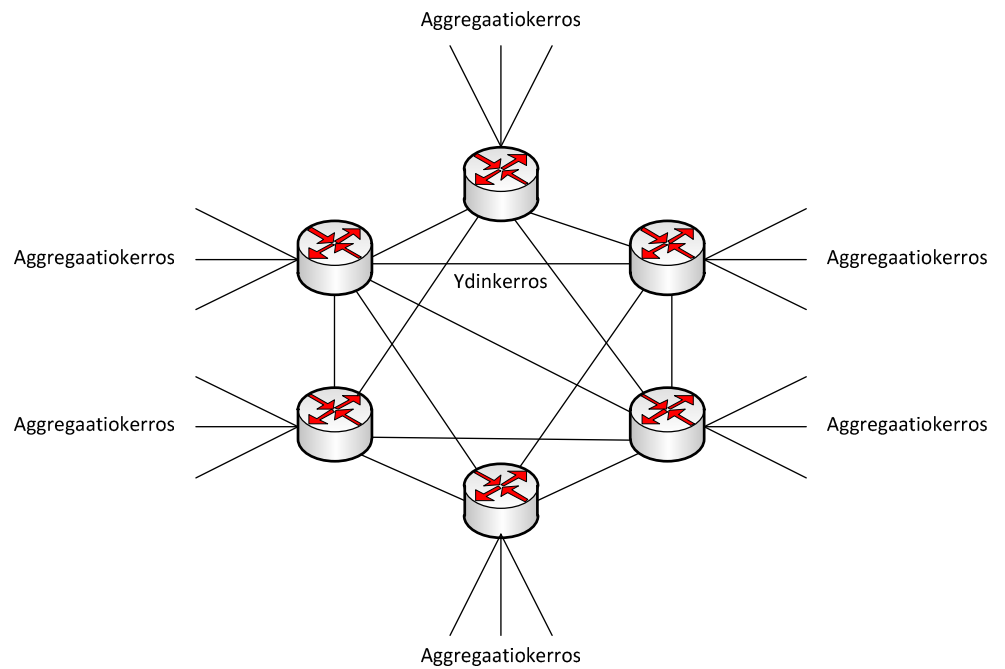
Palveluntarjoajan verkko jaetaan usein kolmeen tasoon.

- ydinkerros (engl. network core layer)
- aggregaatiokerros (engl. aggregation layer)
- reunakerros (engl. network edge layer)

Jokaisella kerroksella on oma roolinsa. Reitittimien konfigurointi on optimoitu sille tasolle, missä reititin sijaitsee. [12, s. 388-389.]

#### *Ydinkerros*

Ydinkerroksen ensisijainen tehtävä on siirtää paketteja linjanopeudella. Ydinkerros koostuu verrattain pienestä määrästä reitittimiä, jotka on kytketty joko osittaiseen tai full mesh -topologiaan. Ydinkerros tarjoaa liitettävyyden aggregaatiokerroksen reitittimille.



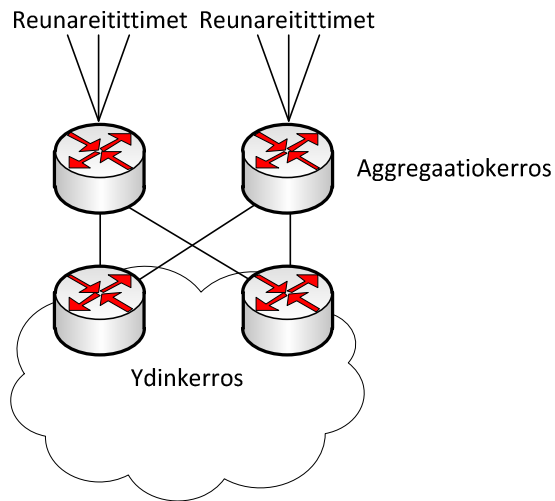
Kuva 21. Verkon ydinkerros

Ydinreitittimet muodostavat yhteyden toisiinsa sekä aggregaatiokerroksen reitittimiin. Reitittimiä ei ole fyysisesti sijoitettu verkon keskelle, jotta välttyttäisiin yksittäisen vikaantumispisteen muodostumiselta. Ydinkerroksella ei määritellä suodateta reittejä tai terminoida verkon ulkopuolisia yhteyksiä. [12, s. 389.]

#### Aggregaatiokerros

Aggregaatiokerroksen tarkoitus on vähentää ydinkerroksen kuormaa tuomalla verkkoon lisää hierarkkisuuutta. Aggregaatiokerroksen reitittimet mainostavat aggregoituja prefiksejä ydinkerrokselle. Palveluntarjoajan verkossa tämä kerros on voitu myös jättää pois.



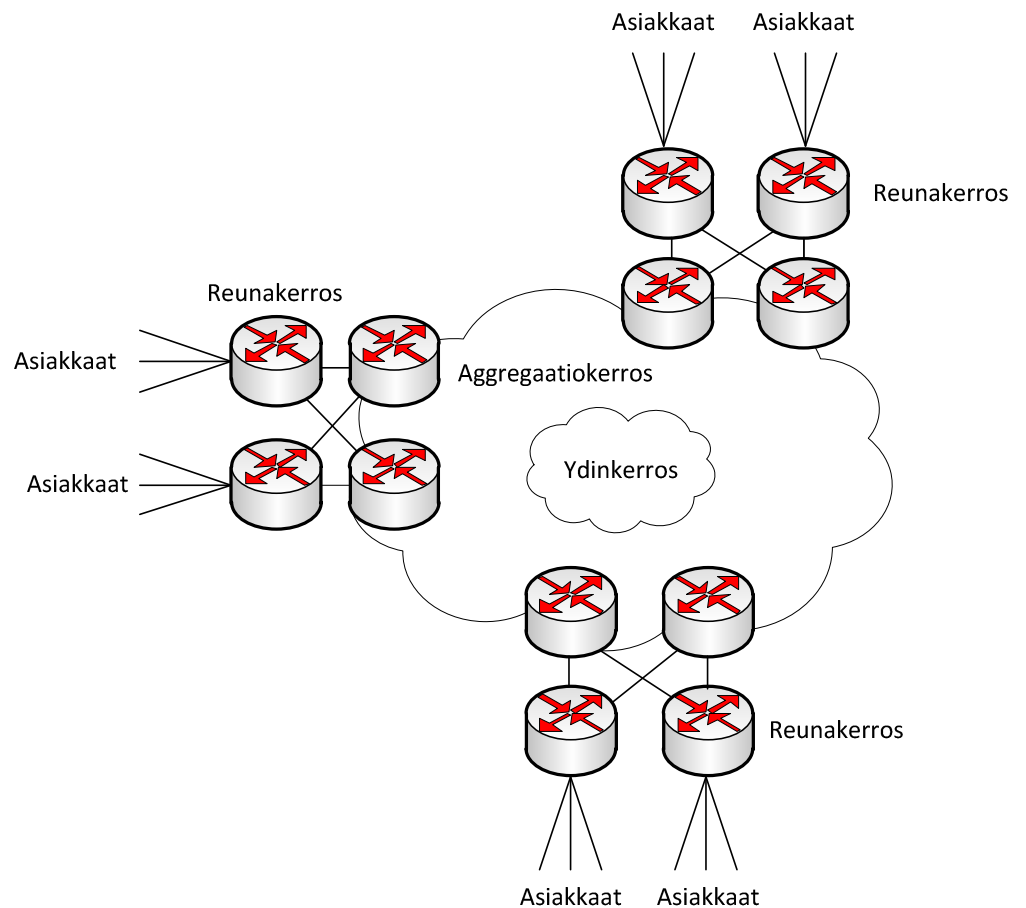


*Kuva 22. Verkon aggregaatiokerros*

Aggregaatiokerrokseen yhdistyy ydinkerroksen lisäksi reunakerros. Tyypillisesti aggregaatiokerroksen reitittimillä on kaksi yhteyttä ydinkerrokselle. Yhteen ydinreitittimeen voi olla liitetty lukuisia aggregaatioreitittimiä. [12, s. 390-392.]

#### *Reunakerros*

Reunakerros terminoi verkon ulkopuoliset yhteydet, kuten asiakkaiden peering-yhteydet. Reunakerroksella voidaan myös aggregoida prefiksejä. Tyypillisesti reunareititin on liitetty kahteen aggregaatiokerroksen reitittimeen.



Kuva 23. Verkon reunakerros

Operaattoriliikenteen politiikka sanellaan verkon reunalla. Liikennemäärät reunareitittimillä ovat pienempiä kuin aggregaatio- tai ydinkerroksen reitittimillä. [12, s. 393-396.]

### 5.3.2 Palveluntarjoajan peering-yhteydet

Palveluntarjoaja käyttää BGP:tä useissa eri yhteyksissä.

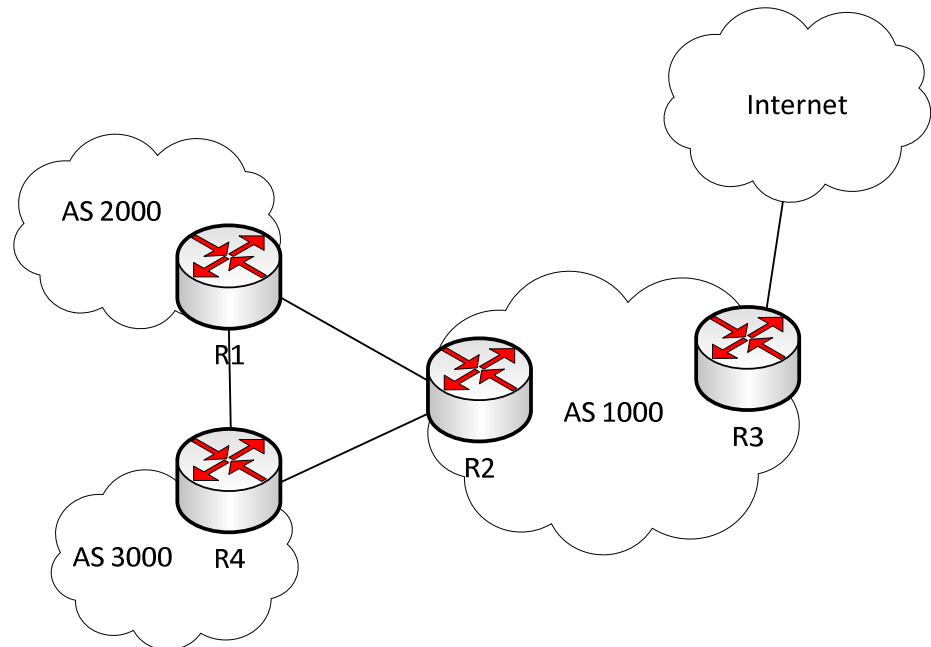
#### Asiakasyhteydet

Mikäli asiakkaalla ei ole tarvetta mainostaa prefiksejä dynaamisesti tai palveluntarjoajayhteyksiä on vain yksi, vaihtoehtona staattiselle reitille on muodostaa peering-yhteys asiakkaan kanssa.

Palveluntarjoajan reunareitittimillä asiakkaita voi olla tuhansia. Jos jokainen asiakas muodostaa peering-yhteyden, aiheuttaa se merkittävää prosessikuormaa palveluntarjoajan reitittimelle. [12, s. 398-399.]

### Transit-yhteydet

Transit-yhteyksiä muodostetaan usein Internet-palveluntarjoajien välille. Palveluntarjoaja tällöin ostaa verkon kapasiteettia siirtääkseen liikennettä toisen palveluntarjoajan verkon läpi. [12, s. 400-401.]



Kuva 24. Palveluntarjoajan transit-yhteys

Kuvassa 24 palveluntarjoaja AS-numerolla 1000 tarjoaa Internet-yhteyden AS:ille 2000 sekä 3000, joiden välillä on myös keskinäinen peering-yhteys. AS:t 2000 ja 3000 eivät kuitenkaan vaihda kaikkia Internetin reittejä keskenään, joten mikäli toisen yhteys palveluntarjoajaan 1000 katkeaa, ei liikennettä Internetiin ole mahdollista reitittää AS:ien keskinäisen peering-yhteyden kautta.

### Peering-yhteydet

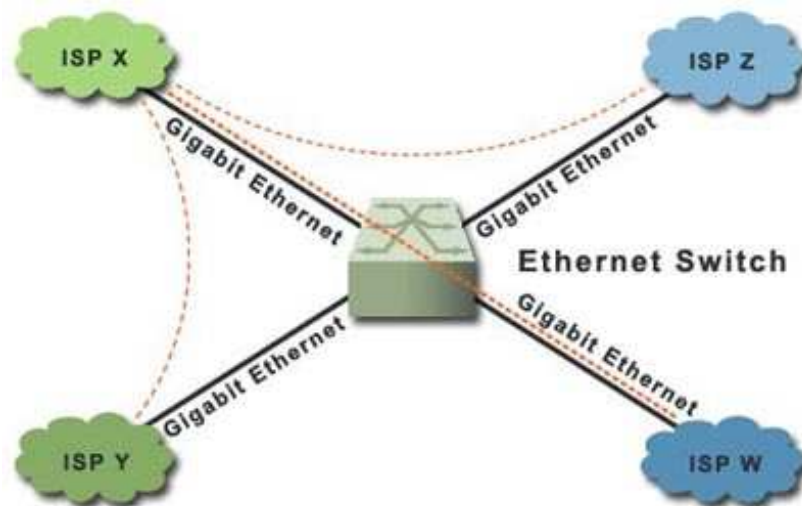
Peering-yhteyksiä on sekä yksityisiä että julkisia. Peering-yhteyden kustannukset ovat tyypillisesti pienemmät kuin transit-yhteydessä, koska molemmat palveluntarjoajat käyttävät yhteyttä välittääkseen liikennettä. [12, s. 400.]

#### Julkiset peering-yhteydet

Julkisten peering-yhteyksien muodostus tapahtuu Internetin yhdysliikennepisteessä (IXP, Internet Exchange Point). Autonomisen järjestelmän ylläpitäjä

tarvitsee yhteyden yhdysliikennepisteeseen muodostaakseen peering-yhteyden kenen tahansa kanssa, joka pisteeseen on yhdistynyt. [12, s. 400]

FICIX (Finnish Communication and Internet Exchange) on suomalainen yhdysliikennepiste, jolla on kolme toimipistettä. Toimipisteet sijaitsevat Espoossa, Helsingissä ja Oulussa. FICIX:issä kulkeva yhdysliikenne on vastikkeetonta, eli liikenteen välitys jäseneltä toiselle on ilmaista. Yhdysliikenne muodostetaan monipisteyhteyksin (engl. point-to-multipoint) käyttäen Ethernet-kytkimiä. Monipisteyhteyksillä yhden portin kautta voi olla yhteydessä lukuisiin muihin laitteisiin yhden fyysisen portin kautta. Jäsenten välillä muodostetut BGP-yhteydet ovat kaksipisteyhteyksiä (engl. point-to-point). [2.]



Kuva 25. Peering-yhteys FICIX:issä [2.]

Kuvassa 25 näkyvät Internet-palveluntarjoajien muodostamat BGP-yhteydet peering-yhteydet yhdysliikennepisteeseen kautta. Tunnettuja Internetin yhdysliikennepisteitä on maailmanlaajuisesti tällä hetkellä 282. [14.]

#### Yksityiset peering-yhteydet

Kaksi autonomista järjestelmää voi myös muodostaa välilleen yksityisen peering-yhteyden. Yksityinen peering-yhteys tarjoaa mahdollisuuden siirtyä pois päin mahdollisesti kuormitetulta yhteyspisteeltä. Yksityisen peering-yhteyden ehdot määritetään yhteyden muodostavien naapurien kesken. [12, s. 401]

### 5.3.3 Palveluntarjoajan community-attribuutti

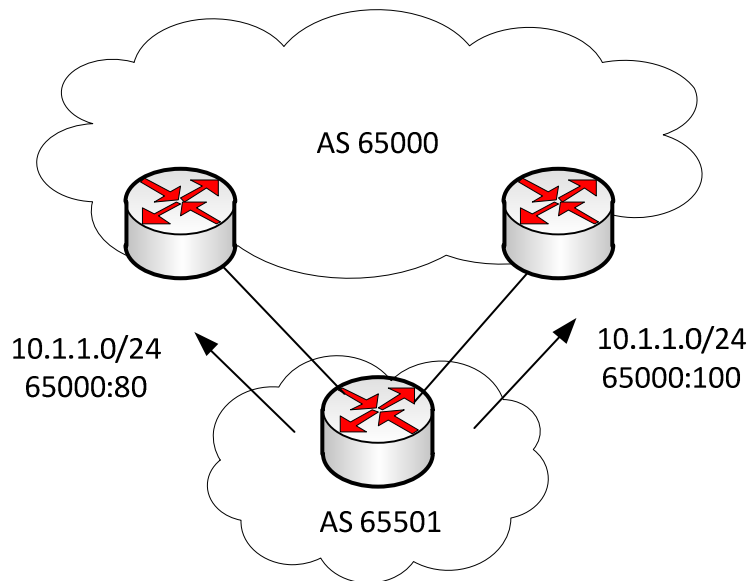
Internet-palveluntarjoaja voi määrittellä itselleen staattisen tavan käsitellä privaatteja community-attribuutteja. Muodostettu määritelmä kertoo mitä community-arvoja palveluntarjoajan BGP-naapurit voivat yhteyksissään käyttää.

Määritely kanta taulukossa 4 antaa asiakkaille mahdollisuuden painottaa tiettyä reittiä palveluntarjoajan reitinvalinnassa. Asiakas voi liittää mainostamaansa prefiksiin community-arvon, joka kertoo palveluntarjoajalle minkä local preference-arvon se reitille asettaa. Reitin local preference -attribuutti vaikuttaa BGP:n parhaan polun valintaan heti ensimmäisenä olevan weight-arvon jälkeen. Korkeimman local preference -arvon omaavaa reittiä suositetaan reitinvalinnassa.

Taulukko 4. Palveluntarjoajan local preference -arvot

Community	Local preference	Toiminta
65000:80	80	Alin reittiprioriteetti
65000:100	100	Oletusarvo asiakkaiden reiteille
65000:110	110	Priorisoi ennen asiakkaiden reittejä
65000:120	120	Ylin reittiprioriteetti

Kuvassa 26 AS 65501 mainostaa verkkoa 10.1.1.0/24 molempia yhteyksiään pitkin palveluntarjoajalle AS 65000. AS 65501 haluaa priorisoida liikennettä toisen yhteyden kautta ja liittää mainostettaviin prefikseihin community-attribuutit 65000:80 ja 65000:100.



Kuva 26. Autonomisen järjestelmän community-attribuutti

Palveluntarjoaja tarkastaa vastaanottamiensa prefiksien attribuutit ja asettaa niiden perusteella reiteille local preference -arvot 80 ja 100. Reitit mainostuvat local preference -attribuutein palveluntarjoajan AS:n sisällä ja liikennettä priorisoidaan asiakkaalle korkeamman local preference-arvon omaavaa polkua pitkin. [10, luku 6.]

## 6 BGP:N TIETOTURVA

BGP:n peering-yhteyksien tietoturvan parantamiseen on useita eri tekniikoita.

### 6.1 MD5 allekirjoitus

TCP-yhteyden MD5-allekirjoituksella suojellaan BGP-session TCP-yhteyttä. Mikäli mahdollinen hyökkääjä tuntee BGP-session käyttämät IP-osoitteet sekä TCP-session käyttämän kohdeportin 179 lisäksi session toisen pään lähdeportin, voi hyökkääjä katkaista TCP-yhteyden lähettämällä toiselle BGP-naapureista käskyn *TCP reset*.

TCP MD5 allekirjoitus on 18-tavun pituinen arvo, joka luodaan käyttäen lähetettävän paketin sisältämää dataa sekä naapurireitittimille konfiguroitua salasanaa. Ilman oikeaa salasanaa TCP-yhteyden tilan muokkaus ei onnistu. [12, s. 412-413.]

## 6.2 Epäkelpojen prefiksien suodatus

Epäkelpoja osoiteavaruuksia kutsutaan Internetissä bogon-osoiteavaruuksiksi. Seuraavat osoiteavaruudet tulisi suodattaa jokaisen Internetiin kytkeytyneen AS:n reunalla:

*Taulukko 5. Bogon-osoiteavaruudet*

Privaatit IPv4 osoiteavaruudet	Privaattiosoitteet 10.0.0.0/8, 172.16.0.0/12 ja 192.168.0.0/16 eivät ole reititettävissä Internetin runkoverkossa
Multicast-osoitteet 224.0.0.0/5	Multicast-prefiksit tulisi suodattaa pois, ellei peering-yhteyttä ole etukäteen asetettu sallimaan multicast-prefiksien mainostus BGP:ssä.
Määrittämätön osoitetila	Osoitelohkot, joita IANA ei ole vielä allokoanut millekään alueelliselle RIR-rekisterille.

### *Team Cymru*

Team Cymru tarjoaa listan epäkelvoista osoitteista, jota päivitetään jatkuvasti, kun kukin RIR-rekisteri julkaisee allokointimuutoksia tietyssä osoitelohkossa. Team Cymrun reittipalvelimet julkaisevat bogon-prefiksit käyttäen AS-numeroa 65333 ja yhteisöä 888. [10, luku 6.] Ajantasainen lista löytyy Team Cymru:n verkkosivuilta. [15.]

## 6.3 Graded Route Flap Dampening

Vaimennettaessa prefiksejä ei kaikki tarvitse välttämättä kohdella tasapuolisesti. Prefiksin pituus /8 sisältää huomattavasti enemmän osoitteita kuin /24. On myös olemassa tiettyjä prefiksejä, jotka ovat olennaisia Internetin toiminnalle, kuten DNS (Domain Name System) -juurinimipalvelimet. Mikäli yhteys palvelimiin katkeaa, menetetään nimipalvelut joiden pohjalta Internet toimii. [12, s. 414 - 416.]

## 6.4 Prefiksien maksimimäärä

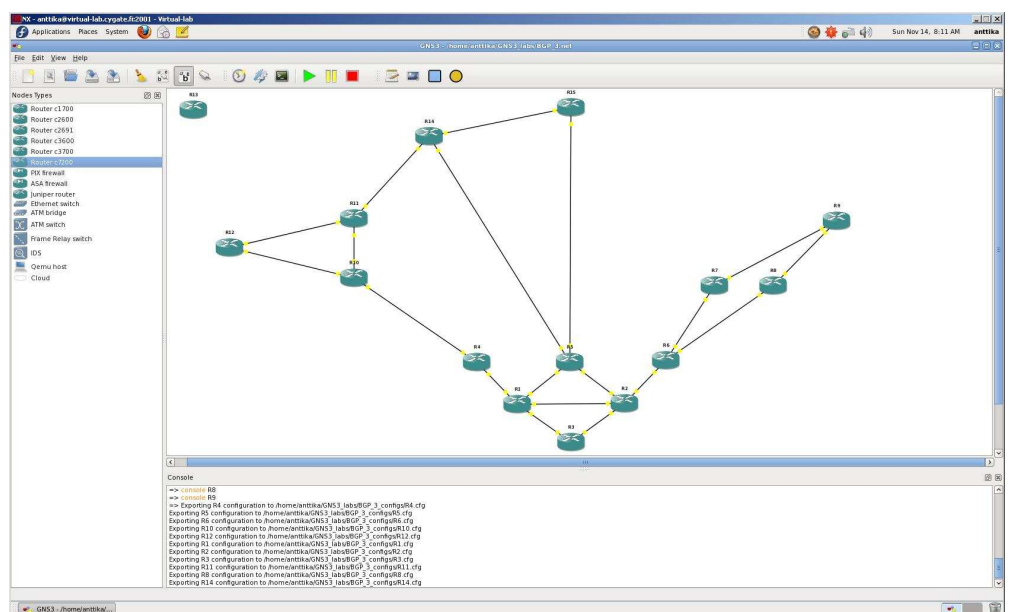
BGP-naapurilta vastaanotettujen prefiksien määrää voidaan rajoittaa. Mikäli naapuri lähettää useampia reittejä kuin mitä raja-arvossa on määritelty, vastaanottava reititin voi sulkea peering-session.

```
(config-router) neighbor 192.168.0.1 maximum-prefix 1000
```

Komento `maximum-prefix` määrittää vastaanotettavien prefiksien maksimimäärän. Kun sessio on suljettu raja-arvon ylityksen takia, täytyy reitittimelle antaa manuaalisesti komento, jotta BGP-sessio muodostetaan uudelleen. Tämän voi myös ohittaa asettamalla reitittimelle automaattisen uudelleenkäynnistysajan. Vastaanotettavien prefiksien maksimimäärä tulisi määritellä jokaiselle reitittimelle, jolla on BGP-yhteyksiä ulkomaailmaan. Konfiguroimalla raja-arvot vältetään siltä, ettei toisen AS:n sisällä tehty konfigurointivirhe ylikuormita reititintä ylimääräisellä reititystiedolla. [10, luku 6.]

## 7 BGP REITITYSPROTOKOLLANA

Insinööriyössä tutkin BGP:n toiminnallisuutta tilanteissa, joihin asiakkaat ja palveluntarjoaja usein törmäävät. Toteutuksen tein työpaikkani laboratorioympäristössä. Laboratorioalustana toimi CentOS:n (Community ENTerprise Operating System) käyttöjärjestelmään asennettu reitittimien virtualisointiin tarkoitettu GNS3-sovellus. Käytetyt reitittimet olivat Cisco:n 7200-sarjan reitittimiä IOS-versiolla 12.4(21a).



Kuva 27. GNS3-sovellus



Työssä lähdin yksinkertaistetusta Internet-palveluntarjoajan verkkomallista terminoidakseni siihen asiakkaiden sekä palveluntarjoajien peering-yhteydet. Työssä halusin tuoda esiin asiakkaiden sekä palveluntarjoajien käyttämiä yhteystapoja.

Jaoin työn kahteen suurempaan osaan, joista ensimmäisessä luotiin reitityspolitiikka autonomisten järjestelmien välille. Työn toisessa osassa autonomisten järjestelmien hallinnollinen politiikka asetettiin autonomisten järjestelmien reunareitittimille.

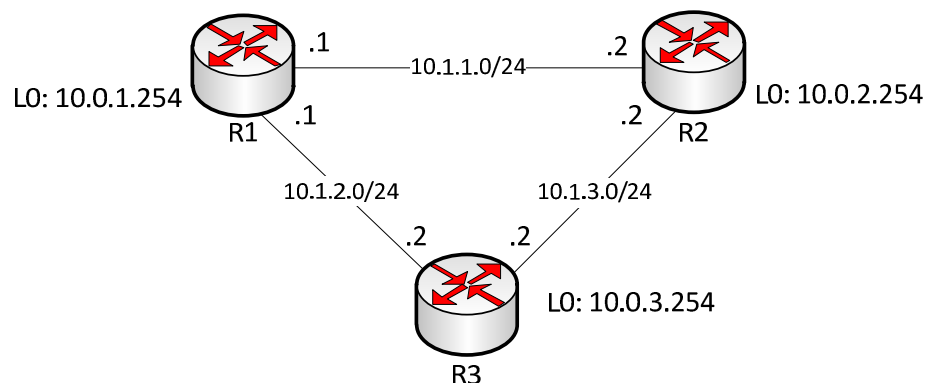
## 7.1 BGP-reitityspolitiikka

### 7.1.1 Internet-palveluntarjoajaverkon rakenne

Internet-palveluntarjoajan verkkoon luotiin kahden tason hierarkia.

#### Ydinkerros

Palveluntarjoajalla on ydinkerroksellaan kolme reititintä R1, R2 sekä R3.



Kuva 28. Palveluntarjoajaverkon ydinkerros

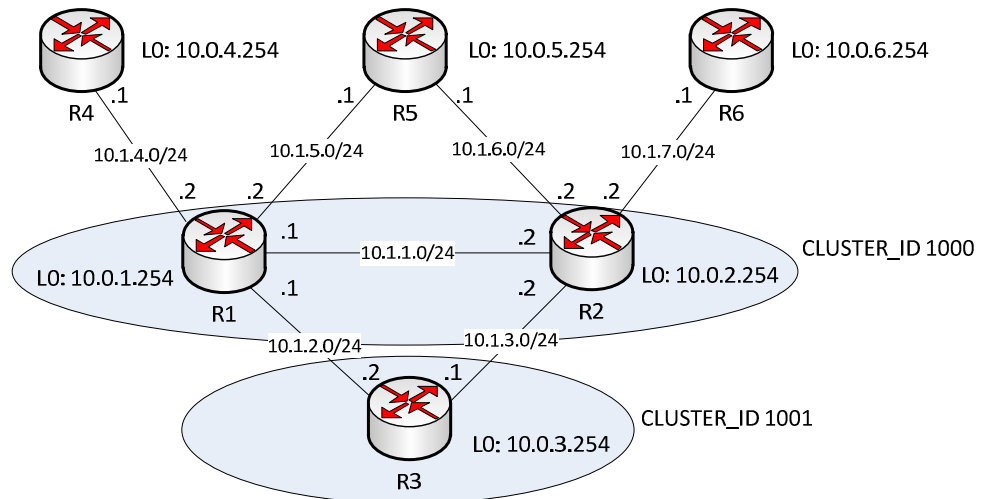
Ydinkerroksen reitittimet ovat palveluntarjoajan sisäverkossa ja konfiguroitiin samaan peer group-ryhmään.

Konfiguraatio reitittimellä R1:

```
(config)# router bgp 100
(config-router)# neighbor YDIN_REIT peer-group
(config-router)# neighbor YDIN_REIT remote-as 100
(config-router)# neighbor YDIN_REIT password asdf1234
(config-router)# neighbor YDIN_REIT update-source Loopback0
(config-router)# neighbor YDIN_REIT version 4
(config-router)# neighbor 10.0.2.254 peer-group YDIN_REIT
(config-router)# neighbor 10.0.3.254 peer-group YDIN_REIT
```

Ydinkerroksen reitittimet muodostavat peering-yhteyden käyttäen loopback-osoitetta. iBGP-sessiot luodaan autonomisen järjestelmän sisällä käyttäen AS-numeroa 100.

Ydinkerroksen reitittimet R1 ja R2 toimivat reittiheijastimina reunakerrokselle.



Kuva 29. Reittiheijastusryppäät 1000 ja 1001

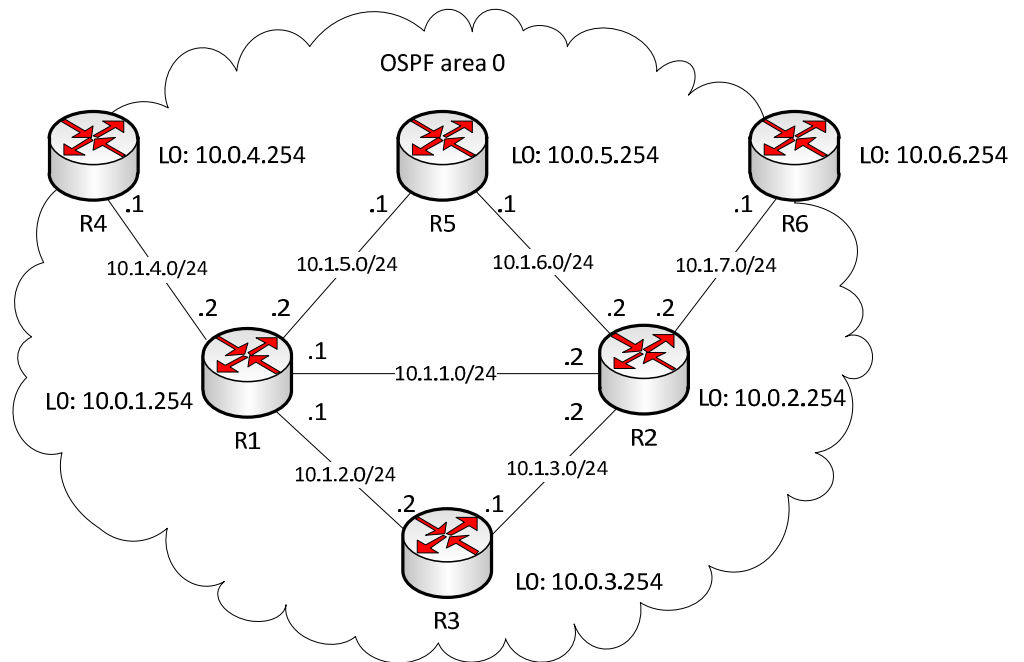
Reitittimet R1 ja R2 kuuluvat samaan reittiheijastinryppäeseen 1000. Reititin R3 kuuluu reittiheijastinryppäeseen 1001. Reunareitittimille määriteltiin oma peer group-ryhmä, jonka jäsenet määriteltiin reittiheijastinryppään 1000 asiakkaiksi neighbor-komennon lisäoptiolla route-reflector-client.

Konfiguraatio reitittimellä R1:

```
(config)# router bgp 100
(config-router)# bgp cluster-id 1000
(config-router)# neighbor REUNA_REIT peer-group
(config-router)# neighbor REUNA_REIT remote-as 100
(config-router)# neighbor REUNA_REIT route-reflector-client
```

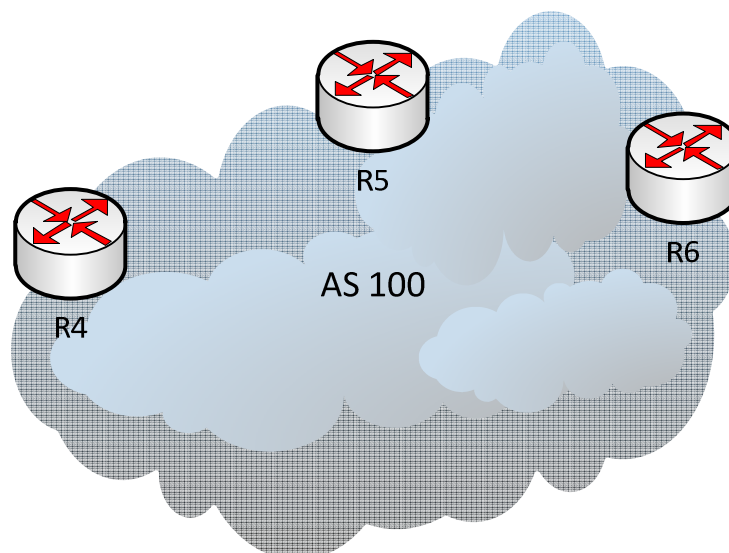
*Reunakerros*

Palveluntarjoajaverkon reunakerroksella ovat reitittimet R4, R5 ja R6.



Kuva 30. Palveluntarjoajaverkon reunakerros

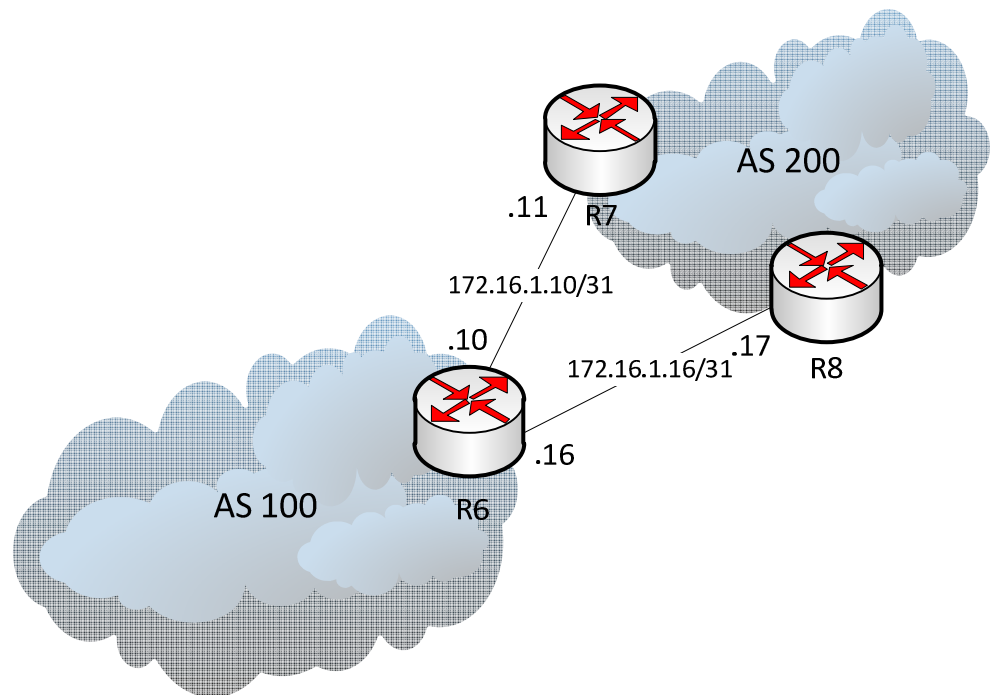
Verkon IGP-protokollana toimii OSPF. Reunareitittimet terminoivat peering-yhteydet ja aggregoivat vastaanottamiaan prefiksejä välittäessään reititysinformaation ydinkerrokselle.



Kuva 31. Internet-palveluntarjoajan peering-reitittimet

### 7.1.2 Transit-yhteys palveluntarjoajien välillä

AS 100:n reunareititin R6 muodostaa transit-yhteyden toiseen palveluntarjoajaan AS 200.



Kuva 32. Transit-yhteys palveluntarjoajien välillä

AS 200 vastaanottaa reittejä ja välittää asiakkaidensa liikennettä AS 100:n kautta. AS 100 on määrittellyt reunareitittimilleen community-arvot, joita peering-yhteyden muodostavat naapurit voivat hyödyntää.

Taulukko 6. AS 100:n community-arvot

Community	Local preference
100:80	80
Oletusarvo	100
100:120	120

AS 200 ohjaa kaiken liikenteen ensisijaisesti reitittimen R8 kautta ja liittää R8:n mainostamiin prefikseihin AS 100:n määrittelemää reittien oletusarvoa korkeamman community-arvon. Prefiksejä mainostettaessa reitittimen R7 kautta liitetään oletusarvoa pienempi community-arvo.

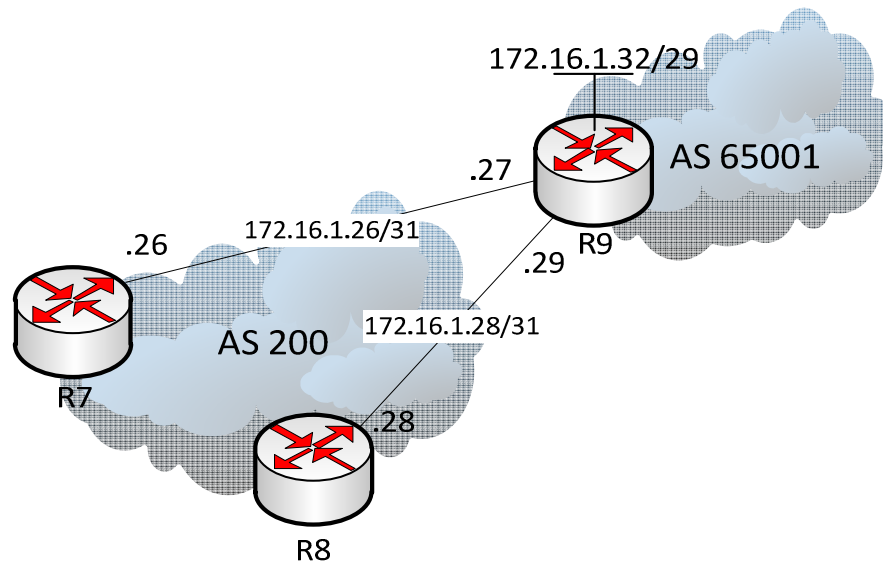
konfiguraatio reitittimellä R7:

```
(config)# router bgp 200
(config-router)# neighbor 172.16.1.10 remote-as 100
(config-router)# neighbor 172.16.1.10 send-community
(config-router)# neighbor 172.16.1.10 route-map SET_COMMUNITY out
!
(config)# route-map SET_COMMUNITY permit 10
(config-route-map)# set community 100:80
```

Reitittimellä R7 määritelty route map asettaa community-arvon kaikkiin naapurille 172.16.1.10 mainostettaviin reitteihin.

### 7.1.3 Asiakasyhteys privaatilla AS-numerolla

Palveluntarjoaja AS-numerolla 200 tarjoaa asiakkailleen mahdollisuuden privaattien AS-numeroiden käyttöön.



Kuva 33. Privaatti AS 65001

AS 200 tarjoaa asiakkaidensa käyttöön AS-numeron 65001. AS 200 käyttää myös asiakasyhteiksissään primäärinä reitintä R8 ja varareitittimenä reitintä R7. Ohjatakseen asiakasliikenteen ensisijaisesti R8:n kautta eteenpäin, mainostaa AS 200 oletusreittiä asiakkailleen eri metriikalla.

Konfiguraatio reitittimillä R7 ja R8:

```
(config)# router bgp 200
(config-router)# neighbor ASIAKAS_PRIV_ASN peer-group
(config-router)# neighbor ASIAKAS_PRIV_ASN remote-as 65001
(config-router)# neighbor ASIAKAS_PRIV_ASN default-originate route-map SET_METRIC
```

Konfiguraatio reitittimellä R7:

```
(config)# route-map SET_METRIC permit 10
(config-route-map)# set metric 200
```

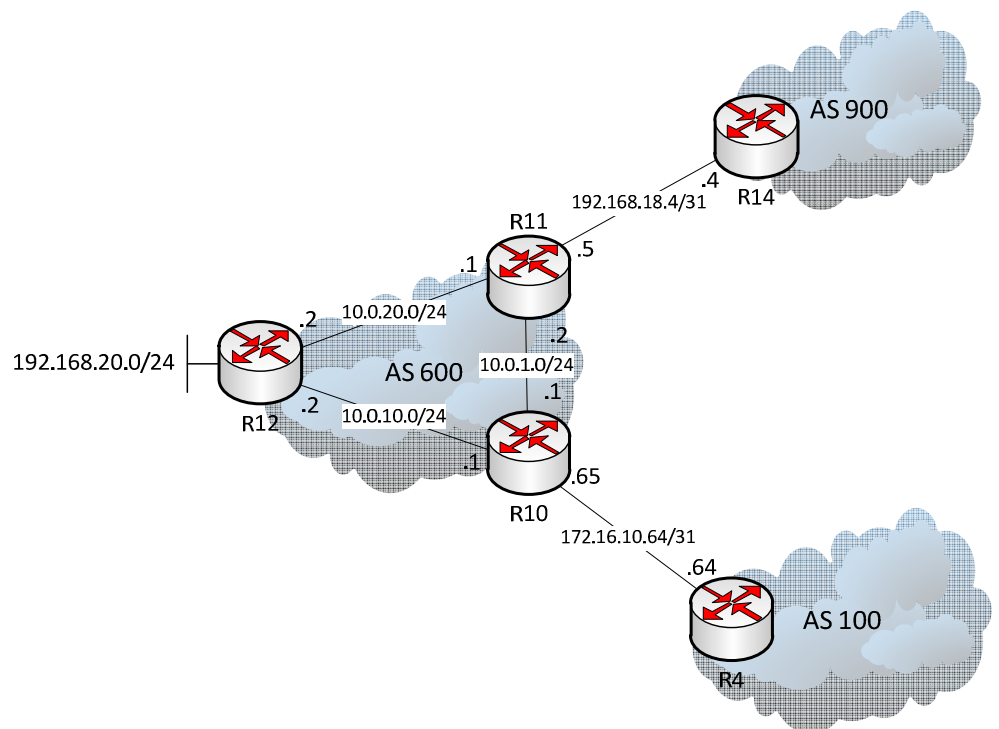
Konfiguraatio reitittimellä R8:

```
(config)# route-map SET_METRIC permit 10
(config-route-map)# set metric 100
```

MED-attribuuttina mainostettu mainostettu metriikkaa liitetään peer group-ryhmälle ASIAKAS\_PRIV\_ASN mainostettaviin reitteihin.

#### 7.1.4 Multi homing-yhteys

AS 600 on kahden Internet-palveluntarjoajan AS 100:n ja AS 900:n asiakas. AS 600 vastaanottaa reunareitittimillään molemmilta palveluntarjoajilta ainoastaan oletusreitit Internetiin.



Kuva 34. Multi homing-yhteys

AS 600 injektoidaan OSPF-protokollasta BGP:hen verkon 192.168.20.0/24 ja käyttää ensisijaisena yhteytenään Internetiin polkua AS 100:n kautta. Polku AS 900:n kautta otetaan käyttöön vain, jos peering-yhteys reitittimien R10 ja R4 katkeaa.

Reitittimet R10 ja R11 konfiguroitiin asettamaan OSPF:ään oletusreitti ainoastaan silloin, kun niille määriteltyjen route map:ien ehtoihin löytyi osuma.

Konfiguraatio reitittimillä R10 ja R11:

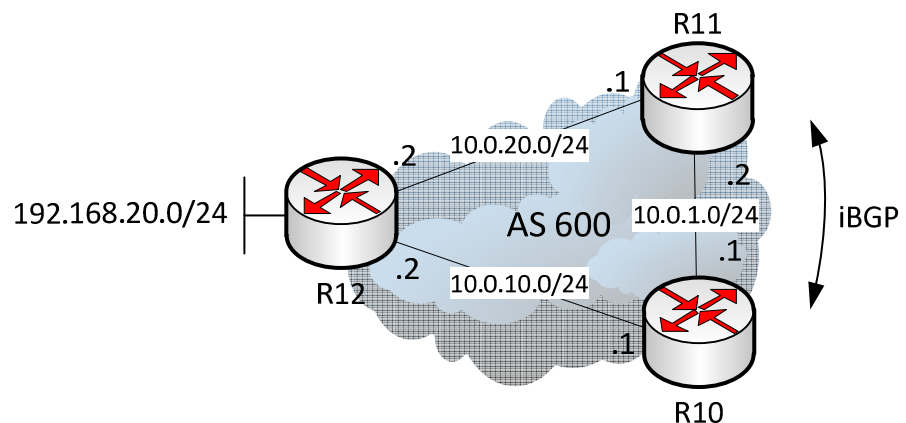
```
(config)# router ospf 1
(config-router)# network 10.0.0.0 0.0.255.255 area 0
(config-router)# default-information originate route-map SET_DEFAULT
!
(config)# route-map SET_DEFAULT permit 10
(config-route-map)# match ip address 1
(config-route-map)# match ip next-hop 2
```

Reitittimellä R10 sen reititystaulusta tulee löytyä oletusreitit lisäksi next hop -osoite AS 100:n BGP-yhteyden terminoivaan IP-osoitteeseen, jotta reititin mainostaa oletusreittiä OSPF:ään.

Konfiguraatio reitittimellä R10:

```
(config)# access-list 1 permit 0.0.0.0
(config)# access-list 2 permit 172.16.10.64
```

Reitittimillä R10 ja R11 verkko 192.168.20.0/24 injektoidaan OSPF:stä BGP:hen. Muut OSPF-verkon osoitteet suodatetaan prefiksilistalla.



Kuva 35. AS 600

Konfiguraatio reitittimillä R10 ja R11:

```
(config)# router bgp 600
(config-router)# redistribute ospf 1 route-map ADV_INTERNAL
!
(config)# route-map ADV_INTERNAL permit 10
(config-route-map)# match ip address prefix-list 1
!
(config)# ip prefix-list 1 seq 5 permit 192.168.20.0/24
```

Reititin R10 mainostaa verkkoa 172.16.10.64/31 AS:n sisällä. iBGP-naapuri R11 näin olleen huomaa, mikäli yhteys AS 100:n ja AS 200:n välillä katkeaa verkon kadotessa sen reititystaulusta. Reititin R10 myös asettaa AS:n reunalta mainostamiensa reittien next hop -osoitteen omaan, BGP-yhteydet terminoivaan IP-osoitteeseensa.

Konfiguraatio reitittimellä R10:

```
(config-router)# network 172.16.10.64 mask 255.255.255.254 route-map NO_EXPORT
(config-router)# neighbor 172.16.10.64 remote-as 100
(config-router)# neighbor 172.16.10.64 next-hop-self
!
(config)# route-map NO_EXPORT permit 10
(config-route-map)# set community no-export
```

Reititin R11 asettaa R10:lta vastaanottamiensa reittien local preference-arvoksi korkean arvon ja suosii näin ollen polkua R10:n kautta AS 900:lta vastaanottamansa oletusreitit sijaan.

Konfiguraatio reitittimellä R11:

```
(config)# router bgp 600
(config-router)# neighbor 10.0.1.1 remote-as 600
(config-router)# neighbor 10.0.1.1 route-map SET_LOCAL_PREF in
!
(config)# route-map SET_LOCAL_PREF permit 10
(config-route-map)# set local-preference 250
```

R11 asettaa advertise map:in ja non-exist map:in yhdistelmällä sisäverkon mainostukselle ehdon. Reititin R11 mainostaa verkkoa 192.168.20.0/24 eBGP-naapureilleen ainoastaan silloin, kun reitittimen reititystaulusta ei löydy prefiksiä 172.16.10.64/31.

Konfiguraatio reitittimellä R11:

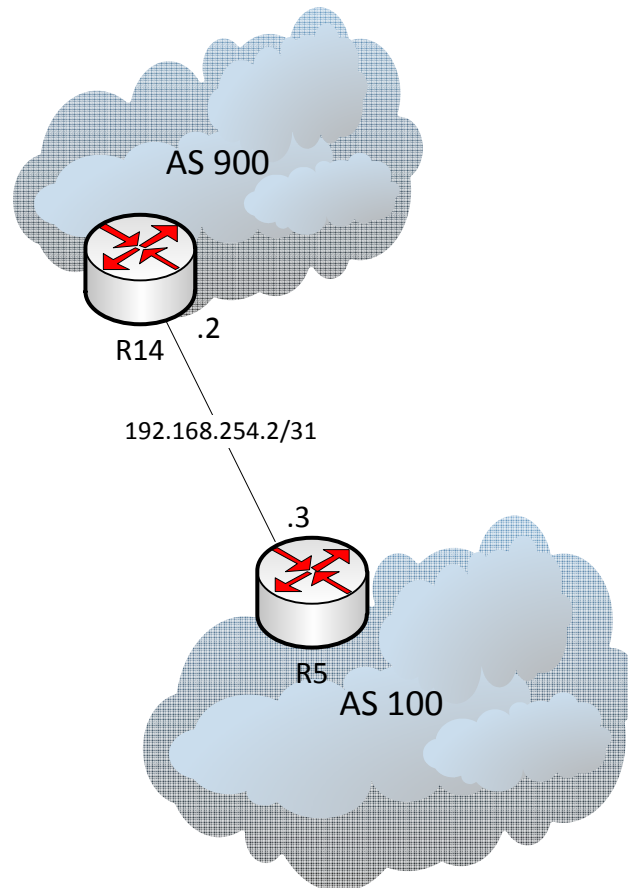
```
(config-router)# neighbor 192.168.18.4 remote-as 900
(config-router)# neighbor 192.168.18.4 advertise-map AS_900_OUT non-exist-map AS_100_IN
!
(config)# route-map AS_900_OUT permit 10
(config-route-map)# match ip address prefix-list 1
!
(config)# route-map AS_100_IN permit 10
(config-route-map)# match ip address prefix-list 2
!
(config)# ip prefix-list 1 seq 5 permit 192.168.20.0/24
(config)# ip prefix-list 2 seq 5 permit 172.16.10.64/31
```



Näin ollen verkkoa 192.168.20.0/24 mainostetaan palveluntarjoajalle AS 900 ainoastaan silloin, kun yhteys AS 200:stä AS 100:aan on katkennut.

### 7.1.5 Palveluntarjoajien peering-yhteys

AS 100:n ja AS 900:n välillä on yksityinen peering-yhteys.



Kuva 36. Palveluntarjoajien välinen peering-yhteys

Molemmat palveluntarjoajat AS 100 sekä AS 900 välittävät toisilleen järjestelmien sisällä generoidut sekä osan asiakkaidensa prefikseistä. Kumpikin AS estää vastaanottamiensa prefiksien mainostuksen eBGP-naapureille asettamalla prefikseillä community-attribuutin no-export.

Konfiguraatio reitittimellä R14:

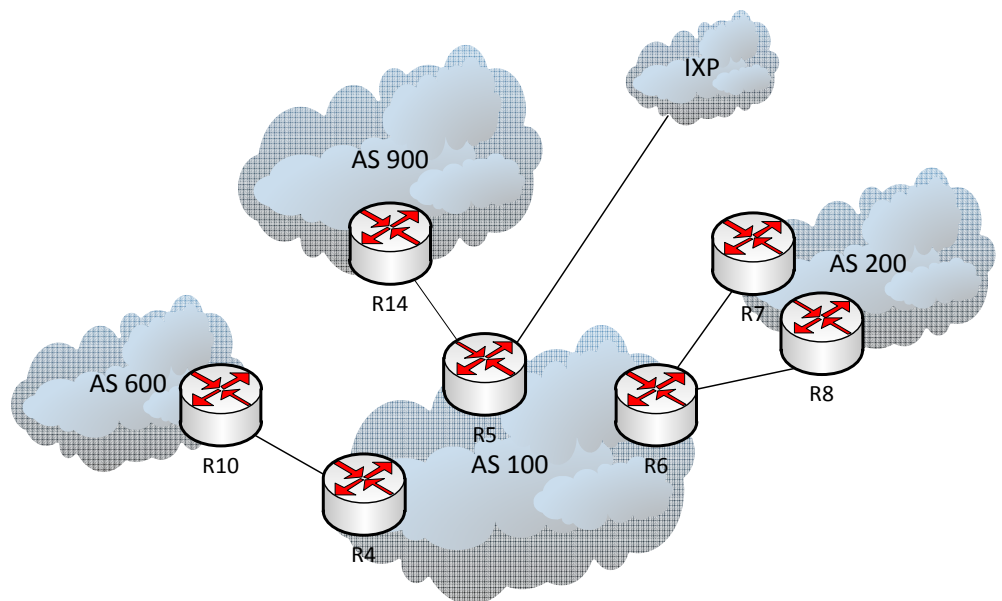
```
(config)# router bgp 900
(config-router)# neighbor VERT_YHT peer-group
(config-router)# neighbor VERT_YHT route-map VERT_FILTER_PFX in
!
(config)# route-map VERT_FILTER_PFX permit 10
(config-route-map)# set community no-export
```

## 7.2 Suodatus autonomisten järjestelmien rajalla

Jokaiselle AS:n reunareitittimille luotiin hallinnollinen politiikka prefiksien suodatukseen.

### 7.2.1 AS 100:n hallinnollinen politiikka

AS 100:n reunareitittimillä prefiksien suodatus on liitetty peer group-ryhmiin. Lisäksi reitittimet suodattavat itsenäisesti prefiksistä myös peering-yhteyden perusteella.



Kuva 37. AS 100:n eBGP-yhteydet

Reunareitittimille on asetettu yleisiä BGP-asetuksia, kuten AS-Path-attribuutin maksimipituus. Reitittimet myös asettavat vastaanotetuille reiteille vaimennusarvot prefiksien pituuden perusteella.

konfiguraatio reitittimillä R4, R5 ja R6:

```
(config-router)# bgp maxas-limit 30
(config-router)# bgp dampening route-map SET_DAMPENING
!
(config)# route-map SET_DAMPENING permit 10
(config-route-map)# match ip address prefix-list match_dampening
(config-route-map)# set dampening 30 125 2000 120
!
(config)# route-map SET_DAMPENING permit 20
(config-route-map)# set dampening 25 750 2000 45
!
```

```
(config)# ip prefix-list match_dampening seq 5 permit 0.0.0.0/24 le
32
```

AS 100:n reunareitittimille R4, R5 ja R6 konfiguroitiin peering-yhteyksiä varten kolme peer group:ia: VERT\_TRANSIT, VERT\_ASIAKAS ja VERT\_PEER.

Konfiguraatio reitittimillä R4, R5 ja R6:

```
(config-router)# neighbor VERT_TRANSIT prefix-list 30 in
(config-router)# neighbor VERT_TRANSIT maximum-prefix 1000
(config-router)# neighbor VERT_ASIAKAS prefix-list 30 in
(config-router)# neighbor VERT_ASIAKAS maximum-prefix 50
!
(config)# ip prefix-list 30 seq 5 deny 0.0.0.0/0
(config)# ip prefix-list 30 seq 10 permit 0.0.0.0/0 le 32
```

Asiakkaiden sekä transit-yhteyksien mainostamista prefikseistä suodatetaan oletusreitti käyttäen prefiksiliistaa 30. AS 100 ei peer group-ryhmän perusteella estä minkään prefiksien mainostusta transit-yhteyksiin. Kaikki reunareitittimet rajoittavat naapureilta vastaanottamiensa prefiksien määrää.

Konfiguraatio reitittimillä R4, R5 ja R6:

```
(config-router)# neighbor VERT_ASIAKAS route-map FILTER_DEFAULT in
(config-router)# neighbor VERT_ASIAKAS route-map CUSTOMER_OUT out
(config-router)# neighbor VERT_ASIAKAS maximum-prefix 50
!
(config)# route-map CUSTOMER_OUT permit 10
(config-route-map)# match ip address 2
(config-route-map)# match as-path 4
!
(config)# access-list 2 permit 0.0.0.0
!
(config)# ip as-path access-list 4 permit ^$
```

Peer group-ryhmälle VERT\_ASIAKAS konfiguroitiin mainostettavaksi ainoastaan oletusreitti. Muut prefiksit suodatetaan pois.

Konfiguraatio reitittimillä R4, R5 ja R6:

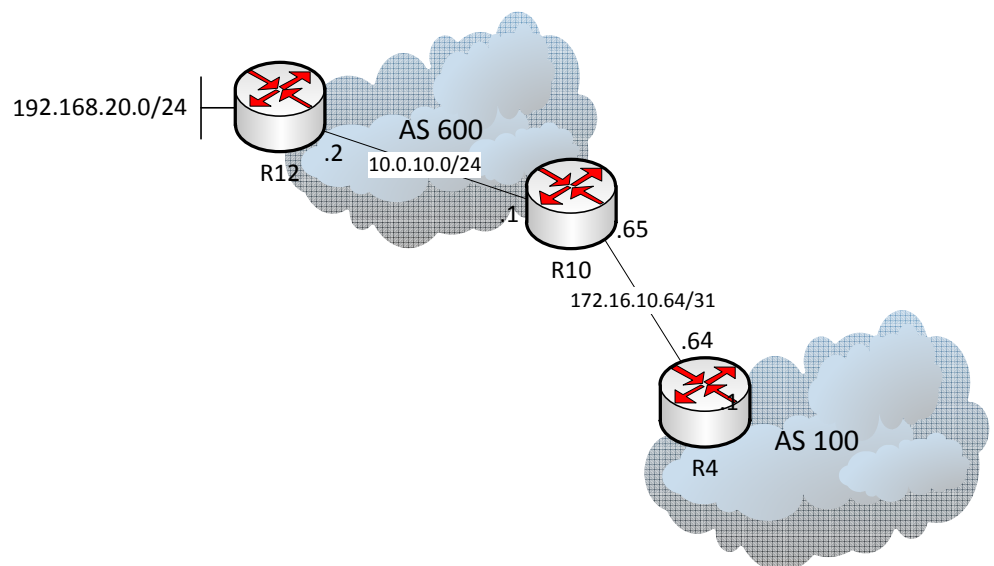
```
(config-router)# neighbor VERT_PEER route-map FILTER_DEFAULT_INTERNAL in
!
route-map FILTER_DEFAULT_INTERNAL permit 10
  match ip address prefix-list 25
!
ip prefix-list 25 seq 5 deny 0.0.0.0/0
ip prefix-list 25 seq 10 deny 172.16.1.0/26
ip prefix-list 25 seq 15 deny 172.16.1.64/28
ip prefix-list 25 seq 20 deny 172.16.1.128/30
ip prefix-list 25 seq 25 permit 0.0.0.0/0 le 32
```

AS 100 suodattaa peering-yhteyksiltä vastaanottamistaan reiteistä oletusreitien lisäksi ne osoitelohkot, joita se itse hallinnoi. Suodatus tehdään prefiksillä 25.

Konfiguraatio reitittimillä R4, R5 ja R6:

```
(config-router)# neighbor VERT_PEER route-map PEER_OUT out
!
(config)# route-map PEER_OUT permit 10
(config-route-map)# match as-path 6
!
(config)# ip as-path access-list 6 permit ^_[0-9]*$
```

AS 100 mainostaa peering-yhteyksilleen oletuksena myös omien asiakkaidensa reitit. Tarkempi suodatus tehdään reitittimillä yhteyskohtaisesti

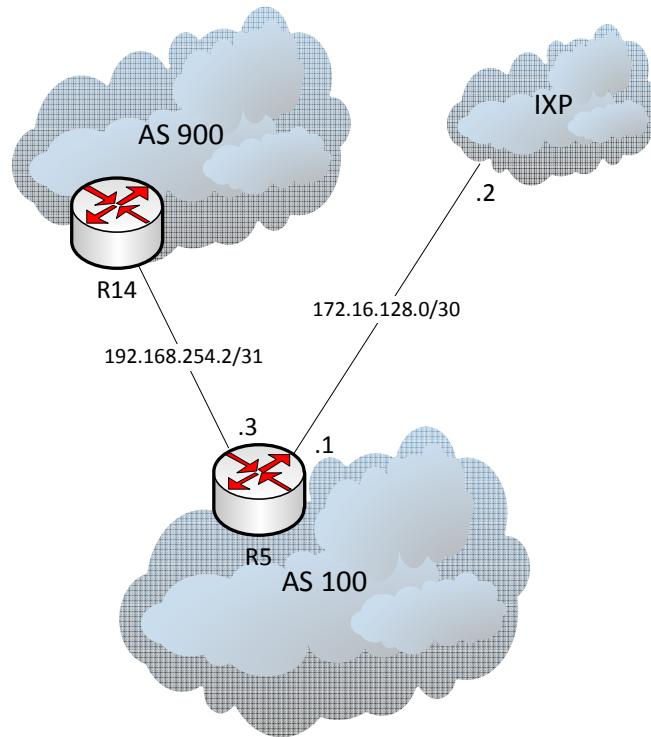


Kuva 38. Reunareititin R4

Reunareititin R4 mainostaa oletusreitit ja sallii reitit, joiden alkuperä on AS 600:n verkossa. R4 sallii siis AS 600:lta ne reitit, joiden AS Path-listassa ei ole muita merkintöjä kuin 600.

Konfiguraatio reitittimellä R4:

```
(config-router)# neighbor 172.16.10.65 default-originate
(config-router)# neighbor 172.16.10.65 filter-list 10 in
!
(config)# ip as-path access-list 10 permit ^600$
```

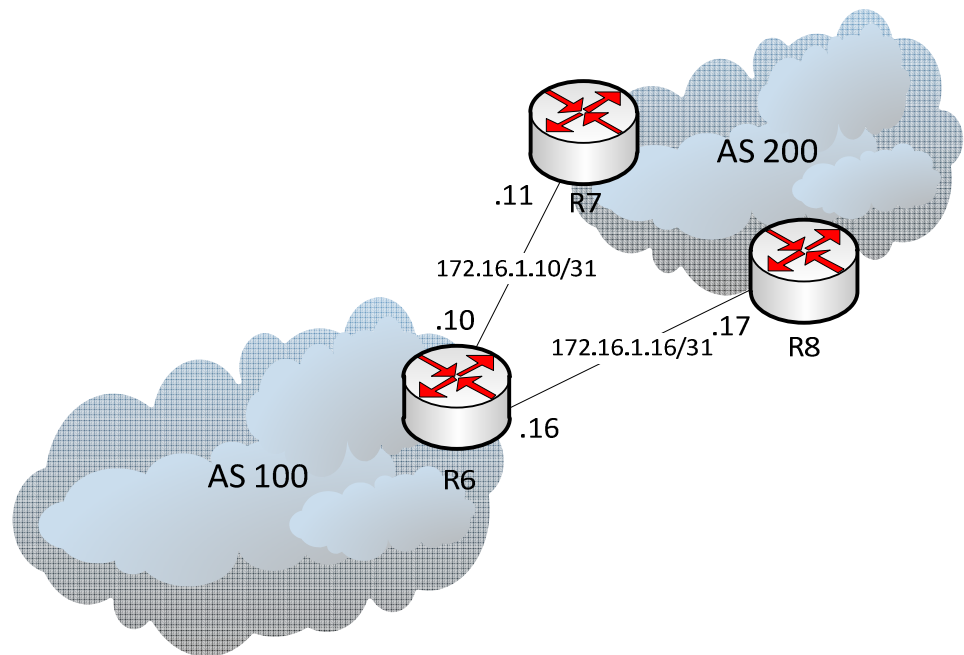


Kuva 39. Reunareititin R5

Reunareititin R5 sallii ne reitit sisäänpäin, joiden alkuperä on AS 900:n verkossa. Lisäksi R5 sallii valikoitujen asiakkaiden prefiksit AS Path-attribuutin perusteella.

Konfiguraatio reitittimellä R5:

```
(config-router)# neighbor 192.168.254.2 route-map AS_900_IN in
!
(config)# route-map AS_900_IN permit 10
(config-route-map)# match as-path 10
!
(config)# route-map AS_900_IN permit 20
(config-route-map)# match as-path 20
!
(config)# ip as-path access-list 10 permit ^900$
(config)# ip as-path access-list 20 permit ^900 600$
```



Kuva 40. Reunareititin R6

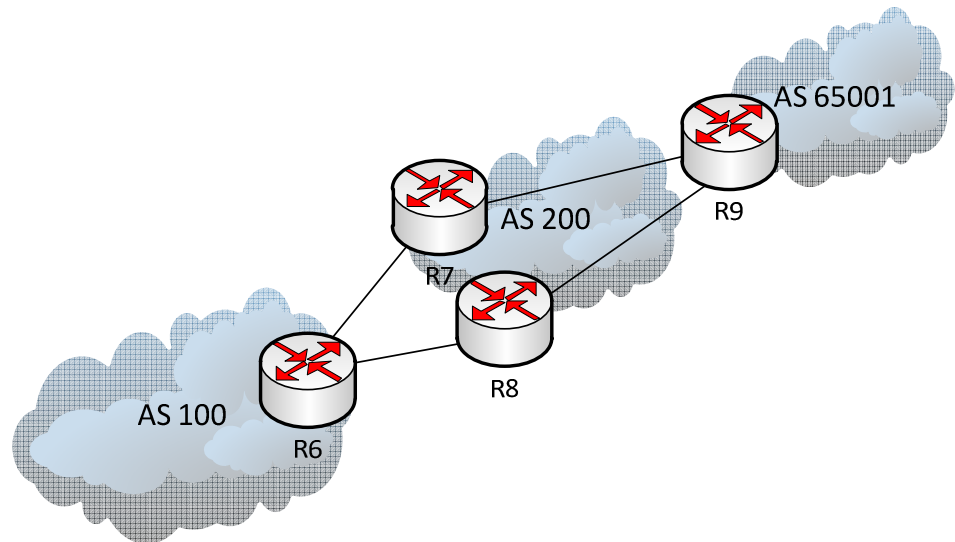
Reunareititin R6 suodattaa AS 100:n reunalla AS 200:lta vastaanottamistaan reiteistä ne, joiden alkuperä on AS 200:n verkossa.

Konfiguraatio reitittimellä R6:

```
(config-router)# neighbor 172.16.1.11 filter-list 8 in
(config-router)# neighbor 172.16.1.17 filter-list 8 in
!
(config)# ip as-path access-list 8 permit ^200$
```

### 7.2.2 AS 200:n hallinnollinen politiikka

AS 200:n reunareitittimet ottavat vastaan AS 100:n koko reititystaulun. Reunareitittimet R7 ja R8 mainostavat AS 100:lle oman verkkonsa sekä asiakkaidensa reitit.



Kuva 41. AS 200:n eBGP-yhteydet

Konfiguraatio reitittimillä R7 ja R8:

```
(config-router)# neighbor 172.16.1.10 maximum-prefix 10000
(config-router)# neighbor 172.16.1.10 filter-list 6 in
(config-router)# neighbor 172.16.1.10 filter-list 8 out
!
ip as-path access-list 6 permit ^100 ?[0-9]*$
ip as-path access-list 8 permit ^65001$
ip as-path access-list 8 permit ^$
```

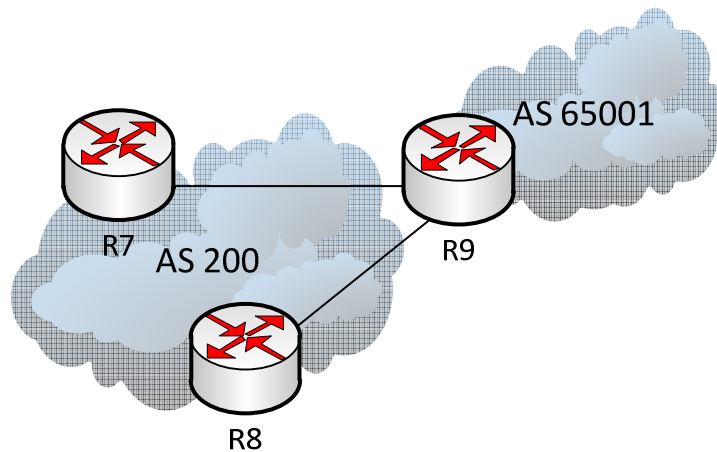
Reitittimet R7 ja R8 suodattavat asiakkaidensa reittejä prefiksilistan sekä reittien alkuperän perusteella.

Konfiguraatio reitittimillä R7 ja R8:

```
(config-router)# neighbor ASIAKAS_PRIV_ASN route-map ASIAKAS_IN in
(config-router)# neighbor ASIAKAS_PRIV_ASN route-map ASIAKAS_OUT out
(config-router)# neighbor ASIAKAS_PRIV_ASN maximum-prefix 20
!
(config)# route-map ASIAKAS_IN permit 10
(config-route-map)# match ip address prefix-list 2
(config-route-map)# match as-path 2
!
(config)# route-map ASIAKAS_OUT permit 10
(config-route-map)# match ip address prefix-list 4
(config-route-map)# match as-path 4
!
(config)# ip as-path access-list 2 permit ^65001$
(config)# ip as-path access-list 4 permit ^$
```

### 7.2.3 AS 65001:n hallinnollinen politiikka

Reunareititin R9 suodattaa vastaanottamiaan prefiksejä AS-polun perusteella. AS 65001 sallii AS 200:lta maksimissaan 10 prefiksiä.



Kuva 42. AS 65001:n eBGP-yhteydet

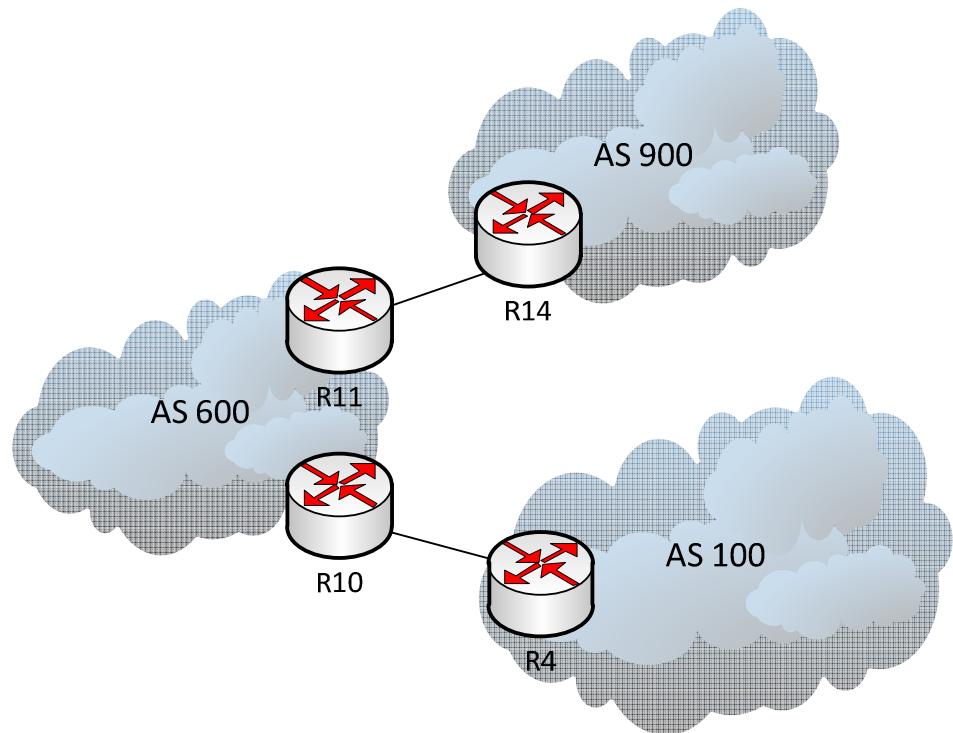
Konfiguraatio reitittimellä R9:

```
(config-router)# neighbor 172.16.1.26 maximum-prefix 10
(config-router)# neighbor 172.16.1.26 filter-list 5 in
(config-router)# neighbor 172.16.1.26 filter-list 10 out
(config-router)# neighbor 172.16.1.28 maximum-prefix 10
(config-router)# neighbor 172.16.1.28 filter-list 5 in
(config-router)# neighbor 172.16.1.28 filter-list 10 out
!
(config)# ip as-path access-list 5 permit ^200$
(config)# ip as-path access-list 10 permit ^$
```

### 7.2.4 AS 600:n hallinnollinen politiikka

AS 600 sallii reunareitittimillään R10 ja R11 verkkoonsa oletusreititin. Reunareitittimet sallivat AS:stä ulospäin sisäverkon 192.168.20.0/24.





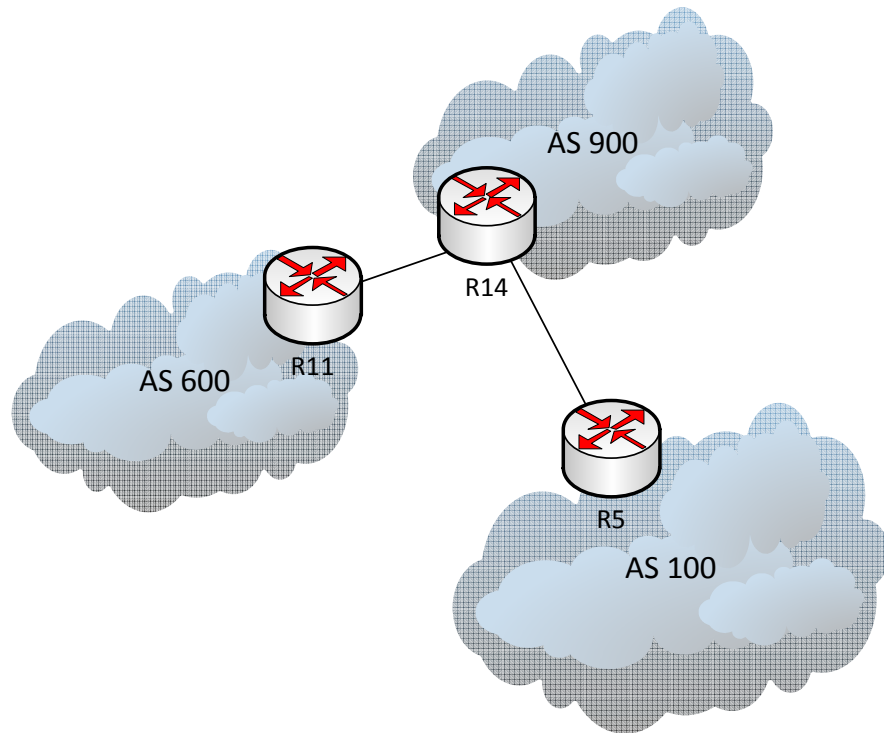
Kuva 43. AS 600:n eBGP-yhteydet

konfiguraatio reitittimellä R10:

```
(config-router)# neighbor 172.16.10.64 prefix-list 1 out
(config-router)# neighbor 172.16.10.64 route-map DEFAULT_ONLY
in
(config-router)# neighbor 172.16.10.64 route-map FILTER_PFX
out
!
(config)# route-map DEFAULT_ONLY permit 10
(config-route-map)# match ip address 1
(config-route-map)# match as-path 20
!
(config)# route-map FILTER_PFX permit 10
(config-route-map)# match ip address prefix-list 1
(config-route-map)# match as-path 10
!
(config)# access-list 1 permit 0.0.0.0
!
(config)# ip prefix-list 1 seq 5 permit 192.168.20.0/24
(config)# ip prefix-list 1 seq 10 deny 0.0.0.0/0 le 32
!
(config)# ip as-path access-list 10 permit ^$
(config)# ip as-path access-list 20 permit ^100$
```

### 7.2.5 AS 900:n hallinnollinen politiikka

AS 900 suodattaa asiakkaidensa prefiksejä AS-polun perusteella reunareitittimellään R14. Reititin R14 sallii oletusreititin mainostamisen asiakkailleen ja estää sen vastaanottamisen kaikkien peering-yhteyksiensä kautta.



Kuva 44. AS 900:n eBGP-yhteydet

Reunareitittimellä R14 myös suodatetaan osa AS 100:n mainostamista prefikseistä.

Reititin R14:

```
(config-router)# neighbor ASIAKAS_YHT route-map ASI-
AKAS_FILTER_DEF in
(config-router)# neighbor ASIAKAS_YHT route-map ASI-
AKAS_DEFAULT out
(config-router)# neighbor ASIAKAS_YHT maximum-prefix 30
(config-router)# neighbor VERT_YHT route-map VERT_FILTER_PFX
in
(config-router)# neighbor VERT_YHT route-map VERT_DEFAULT out
(config-router)# neighbor VERT_YHT maximum-prefix 20000
(config-router)# neighbor 192.168.18.5 filter-list 10 in
(config-router)# neighbor 192.168.254.3 route-map AS_100_PFX
in
!
(config)# route-map ASIAKAS_FILTER_DEF permit 10
(config-route-map)# match ip address prefix-list 60
!
(config)# route-map ASIAKAS_DEFAULT permit 10
(config-route-map)# match ip address 2
(config-route-map)# match as-path 4
!
(config)# route-map VERT_FILTER_PFX permit 10
(config-route-map)# match ip address prefix-list 70
(config-route-map)# set community no-export
!
(config)# route-map VERT_DEFAULT permit 10
```

```

(config-route-map)# match as-path 4
!
(config)# route-map VERT_DEFAULT permit 20
(config-route-map)# match as-path 5
!
(config)# route-map AS_100_PFX permit 10
(config-route-map)# match as-path 50
!
(config)# route-map AS_100_PFX permit 20
(config-route-map)# match as-path 51
!
(config)# access-list 2 permit 0.0.0.0
!
(config)# ip as-path access-list 4 permit ^$
(config)# ip as-path access-list 5 permit ^[0-9]*$
(config)# ip as-path access-list 50 permit ^100$
(config)# ip as-path access-list 51 permit ^100 600$
!
(config)# ip prefix-list 60 seq 5 deny 0.0.0.0/0
(config)# ip prefix-list 60 seq 10 permit 0.0.0.0/0 le 32
!
(config)# ip prefix-list 70 seq 5 deny 0.0.0.0/0
(config)# ip prefix-list 70 seq 10 deny 192.168.18.0/24
(config)# ip prefix-list 70 seq 15 permit 0.0.0.0/0 le 32

```

Laboratorioverkon topologiakuva on saatavana liitteissä. [2.]

## 8 YHTEENVETO

Työssä asetetut tavoitteet BGP-reititysprotokollan toiminnan selvittämiseksi Internetissä saavutettiin ja testaus laboratorioympäristössä yhteensä 14 Cisco virtuaalireitittimellä sujui ongelmitta.

Vaativuudesta lähtökohdistaan huolimatta BGP on vuonna 2010 mennessä ehtinyt ylittää monin verroin sille asetetut tavoitteet. Uusien ominaisuuksien huomattavan määrän kautta BGP:stä on kehittynyt hyvin monipuolinen protokolla laajojen verkkokokonaisuuksien sekä suurten reititysinformaatiomäärien hallintaan ja ohjaamiseen.

BGP monimuotoisuudessaan tarjosi useita uusia haasteita ja jätti arvokasta tietoa testaajan päähän.

## VIITELUETTELO

- [1] Internet Routing Architectures, Second Edition, 2001; Sam Halabi with Dany McPherson [ISBN 1-57870-233-X].
- [2] Peering, [WWW-dokumentti], <http://www.ficix.fi/tekniikka.php>.
- [3] INTERNET GROWTH STATISTICS, [WWW-dokumentti], <http://www.internetworldstats.com/emarketing.htm>.
- [4] BGP Routing Table Analysis Reports, [WWW-dokumentti], <http://bgp.potaroo.net/>.
- [5] Internet History -- One Page Summary, [WWW-dokumentti], [http://www.livinginternet.com/ii\\_summary.htm](http://www.livinginternet.com/ii_summary.htm).
- [6] Paul Baran Invents Packet Switching, [WWW-dokumentti], [http://www.livinginternet.com/ii\\_rand.htm](http://www.livinginternet.com/ii_rand.htm).
- [7] ARPANET -- The First Internet, [WWW-dokumentti], [http://www.livinginternet.com/ii\\_arpanet.htm](http://www.livinginternet.com/ii_arpanet.htm).
- [8] BGP, 2002; Iljitsch van Beijnum [ISBN 978-0596002541].
- [9] Internet Management, [WWW-dokumentti], [http://www.livinginternet.com/i/iw\\_mgmt.htm](http://www.livinginternet.com/i/iw_mgmt.htm).
- [10] Practical BGP, 200; Russ White, Danny McPherson, Sangli Srihari [ISBN 0-321-12700-5].
- [11] Classless Inter-Domain Routing (CIDR), [WWW-dokumentti], <http://elqui.dcsc.utfsm.cl/util/redes/TCPIP%20Tutorial%20and%20Technical%20Overview/3376c22.html#cidr>.
- [12] BGP Design and Implementation, 2004; Randy Zhang, Micah Bartell [ISBN 1-58705-109-5].
- [13] IETF RFC 1771, A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4).
- [14] List of the 282 known IXPs around the globe, [WWW-dokumentti], <https://www.euro-ix.net/resources/list/>.
- [15] Bogon Route Announcements, [WWW-dokumentti], <http://www.cymru.com/BGP/bogons.html>.

<b>Prefiksin pituus</b>	<b>Verkkomaski</b>
/1	128.0.0.0
/2	192.0.0.0
/3	224.0.0.0
/4	240.0.0.0
/5	248.0.0.0
/6	252.0.0.0
/7	254.0.0.0
/8	255.0.0.0
/9	255.128.0.0
/10	255.192.0.0
/11	255.224.0.0
/12	255.240.0.0
/13	255.248.0.0
/14	255.252.0.0
/15	255.254.0.0
/16	255.255.0.0
/17	255.255.128.0
/18	255.255.192.0
/19	255.255.224.0
/20	255.255.240.0
/21	255.255.248.0
/22	255.255.252.0
/23	255.255.254.0
/24	255.255.255.0
/25	255.255.255.128
/26	255.255.255.192
/27	255.255.255.224
/28	255.255.255.240
/29	255.255.255.248
/30	255.255.255.252
/31	255.255.255.254
/32	255.255.255.255

