

Janne Ukkonen

**Netflixin videon suoratoiston mahdollistava infrastruktuuri
ja sen toiminta**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

25. huhtikuuta 2022

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Janne Ukkonen

Yhteystiedot: jataukko@student.jyu.fi

Ohjaaja: Sanna Juutinen

Työn nimi: Netflixin videon suoratoiston mahdollistava infrastruktuuri ja sen toiminta

Title in English: Infrastructure and operation of Netflix's streaming service

Työ: Kandidaatintutkielma

Opintosuunta: Tietotekniikka

Sivumäärä: 19+0

Tiivistelmä: Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää ja kuvata miten kansainvälinen videon suoratoistopalvelu Netflix suorittaa liiketoiminnassaan videokuvan jakamisen kuluttajille. Palvelu on erittäin suosittu ja siksi viime vuosina kartuttanut paljon huomioita vanhoilta mediajäteiltä, jotka osa on julkaissut omia kilpailevia palvelujaan. Mitä tällaisen alustan rakentamiseksi tarvitaan, ja miten erottua joukosta? Näihin kysymyksiin pyritään vastaamaan tämän kirjoitelman avulla.

Avainsanat: Sisällönjakeluverkot, Tietoliikenneprotokollat, Videontoistopalvelut, Suoratoisto, Netflix

Abstract: The purpose of this thesis is to explain how the international streaming platform Netflix handles its video broadcasting service for consumers. The service is extremely popular and so has attracted the attention of old media giants, some of which have launched their own competing platforms. What is needed to build this kind of a service, and how does this it distinguish itself from the others? This thesis attempts to find an answer to these questions.

Keywords: Content delivery networks, communication protocols, streaming services, streaming, Netflix

Kuviot

Kuvio 1. Kuvaelma Netflixin arkkitehtuurista (Vijay K. Adhikari ym. 2015).....	8
--------------------------------------------------------------------------------	---

Sisällys

1	JOHDANTO	1
2	TIETOLIIKENNEPROTOKOLLAT JA KOODEKIT	2
2.1	Tietoliikenneprotokollat	2
2.2	DASH-protokolla	2
2.3	Koodekit ja miten Netflix hyödyntää niitä	3
3	SISÄLLÖNJAKELUVERKOT	5
3.1	Sisällönjakeluverkot yleisesti	5
3.2	Netflixin käyttämät sisällönjakeluverkot	5
3.3	Open Connect Appliances	6
4	NETFLIXIN TOIMINTA	8
4.1	Asiakasdatan ja maksutapahtumien käsittely	8
4.2	Videosisällön käsittely	9
4.3	Skaalautuvuus, lähetyksen tehostaminen ja laadunvarmistus	10
4.4	Miten tulevaisuudessa videon suoratoiston prosessia voi parantaa	11
5	YHTEENVETO	13
	LÄHTEET	14

1 Johdanto

Tämän tutkielman tarkoituksena on selvittää ja kuvata miten kansainvälinen videon suoratoistopalvelu Netflix suorittaa liiketoiminnassaan videokuvan jakamisen kuluttajille.

Nykymaailmassa suoratoistopalvelut ovat syrjäyttämässä kaapelitelevisiion tarjonnan ja infrastruktuuri mitä tarvitaan satojen miljoonien asiakkaiden videoiden lähettämiseen, on massiivinen. Suoraan verrannollisesti tästä seuraa, että videon suoratoistoon kuluu paljon sähköä, kaistanleveyttä, laitteistoa, rahoitusta ja henkilötyötunteja. Tutkielma käsittelee aihetta siksi, että voitaisiin ymmärtää mitä kaikkia resursseja videon suoratoistoon kuluu ja miten prosessia voisi mahdollisesti tehostaa tulevaisuudessa.

Luvussa 2 käsitellään teknologioita ja käytänteitä, jotka ovat olennaisia videon suoratoistoon. Luvussa 3 käsitellään sisällönjakeluverkkoja, jotka ovat tärkein yksittäinen palvelu mitä videon suoratoistoon tarvitsee. Luvussa 4 tuodaan jo esiteltyt konseptit yhteen kuvaamalla niiden yhteistoiminta Netflixin työympäristössä, ja miten ne mahdollistavat videon suoratoiston maailmanlaajuisessa skaalassa.

2 Tietoliikenneprotokollat ja koodekit

Tässä luvussa käsitellään teknologioita, joita usein hyödynnetään videon suoratoistossa. Aiheeseen syvennytään kuvaamalla niitä teknologioita, joita Netflix hyödyntää omassa palveluksessaan ja myös mahdolliset muutokset tai omaperäiset käytänteet niiden implementoinnissa otetaan huomioon.

2.1 Tietoliikenneprotokollat

Tietoliikenneprotokolla on ryhmä sääntöjä ja käytänteitä, jolla kaksi tai useampi verkkoon kytketty laite kommunikoi keskenään. (Cerf ja Kahn 1974) Protokollia käytetään myös kokonaisten verkkojen väliseen kommunikaatioon, sekä pienemmällä tasolla laitteen sisäisillä eri prosesseillakin voi olla protokollia, joilla ne välittävät viestejä toisilleen. (Cerf ja Kahn 1974)

Protokollat toteutetaan lähettämällä yksittäisiä datapaketteja, jotka sisältävät osia koko lähetettävästä viestistä. Protokollat määrittävät miten lähetettävää dataa puskuroidaan, reititetään ja miten mahdolliset pakettihäviöt selvitetään. (Cerf ja Kahn 1974) (KIRK 2009)

Tietoliikenneprotokollat erikoistuvat eri protokollakerroksille, joita ovat linkkikerros, internet-kerros, kuljetuskerros ja sovelluskerros. Protokollan kerros määrittää, mitkä laitteet tai verkot kommunikoivat keskenään ja millaista tietoa välitetään. (Braden 1989)

2.2 DASH-protokolla

Netflix käyttää DASH (Dynamic Streaming over HTTP) - protokollaa videon lähetykseen. (Vijay Kumar Adhikari ym. 2012) DASH erikoistuu multimedian lähetykseen, käyttäen bittinopeutta sopeuttavaa algoritmia (Adaptive Bitrate Streaming, ABR) valitakseen automaattisesti asiakassovellukselle korkeimman bittinopeuden jonka se ehtii ladata ajoissa toistettavaksi ilman, että toisto pysähtee tai sitä tarvitsisi uudelleen puskuroida. (Spiteri, Sitaraman ja Sparacio 2019)

DASH-protokollaa käyttävät asiakassovellukset voivat tarpeen mukaan vaihdella sopeutus-algoritmejaan joko puskuripohjaiseksi tai dynaamiseen algoritmiin perustuvaksi. Puskuripohjaisessa toteutuksessa bittinopeus valitaan sillä perusteella, kuinka paljon toistossa on puskuria jäljellä. Jos puskuria on jäljellä paljon niin asiakassovelluksella on aikaa ladata korkealaatuisempaa mediaa, jos vähemmän niin mediakin hankitaan huonommalla laadulla. (Spiteri, Sitaraman ja Sparacio 2019) Toinen valintaperiaate on dynaaminen algoritmi, eli historialliseen latausnopeuteen perustuva. Jos aikaisemmin lataus onnistui nopeasti, niin tulevaisuudessa valitaan korkealaatuisempia pätkiä mediaa ladattavaksi, kuitenkin siten että median toistoon ei tulisi keskeytyksiä tai puskueroita. (Spiteri, Sitaraman ja Sparacio 2019)

Vorobeva, Zakharov ja Skvortsov (2021) testasivat DASH-protokollan toimivuutta eri latausnopeuksilla, ja he myös kokeilivat latausnopeuden muutosta kesken prosessin kokeillakseen DASH:in todellista kykyä sopeutua verkon olotiloihin. He päätyivät suurimmalta osin samoihin lopputuloksiin kuin aikaisemmatkin tutkimukset, todeten että DASH kasvattaa tasaisesti bittinopeutta ja puskurin kokoa latausnopeuden kasvaessa mutta lisäksi he huomasivat, että pakettihävikin tapahtuessa DASH pienentää bittinopeutta jopa kolmasosaan, 1500kbps nopeudesta tiputtiin 500kbs:ään. Pakettihäviöllä on siis suuri vaikutus DASH-protokollan vakauteen, ja se tarvitsee enemmän aikaa sopeutua käyttäjän todelliseen latausnopeuteen kuin sellaisessa tilanteessa, missä pakettihävikkiä ei tapahdu.

2.3 Koodekit ja miten Netflix hyödyntää niitä

Koodekit ovat algoritmeja tai ohjelmia, joilla pyritään pakkaamaan dataa pienempään muotoon, jotta sitä olisi tehokkaampaa kuljettaa tietoverkon yli ilman, että laatu kärsii. (Chen ym. 2018)

Spiteri, Sitaraman ja Sparacio (2019) kuvailevat, miten DASH-protokolla hyödyntää koodekkeja tallentamalla niiden avulla videot useaan eri laatutasoon, jotka sitten pilkotaan useiksi pienemmiksi palasiksi, noin sekuntien pituisiksi videopätkiksi joita asiakas sitten pyytää HTTP:n yli. Netflixin prosessi on havaittu myös toimivan näin Vijay Kumar Adhikari ym. (2012) toimesta. Videoita ladatessa asiakkaan päätelaitteen ominaisuustiedoista generoidaan manifestitiedosto, joka sisältää ohjeet miten ja millaista videolaatua asiakkaalle la-

dataan. Esimerkiksi jos päätelaitteen tiedoissa lukee että se voi toistaa vain .wmv-formaattia, niin vain .wmv-formaatin videota ladataan. (Vijay Kumar Adhikari ym. 2012) Netflix voi tarjota HD-laatusia videoita jopa neljällätoista eri bittinopeudella, ja ei-HD-laatuja kahdeksalla eri bittinopeudella. (Vijay Kumar Adhikari ym. 2012)

3 Sisällönjakeluverkot

Tässä luvussa käsitellään sisällönjakeluverkkoja, ja miten Netflix hyödyntää niitä palvelusaan. Koska sisällönjakeluverkot ovat enneminkin palvelu kuin teknologia, niille on omistettu oma lukunsa, jossa selvitetään miten ne toimivat vuorovaikutuksessa internet-palveluntarjoajien, pilvipalveluiden, sekä yksittäisten yritysten kuten Netflixin kanssa.

3.1 Sisällönjakeluverkot yleisesti

Sisällönjakeluverkko on järjestelmä, jossa käyttäjien haluama sisältö talletetaan sijaispalvelimille, jotka ovat asiakkaita lähempänä. (Dilley ym. 2002) Sisällönjakeluverkkoa alettiin hyödyntämään ratkaisemaan ongelmia nettisivujen skaalautuvuuteen, luotettavuuteen ja tehokkuuteen liittyen. (Dilley ym. 2002) Yksi esimerkki ensimmäisistä tällaisista jakeluverkkoista on Akamai, jonka ominaisuuksia esittelivät Nygren, Sitaraman ja Sun (2010). He myös totesivat sisällönjakelussa olennaisimpien ongelmien olevan verkon keskeisten pisteiden ruuhkautuminen, reitittäminen, luotettavuus ja skaalautuvuus. Sisällönjakeluverkkojen ydinidea on hajauttaa verkkoliikennettä, jotta pullonkauloja verkossa ei pääsisi syntymään yhtä helposti. Erityisesti jos käyttäjä sijaitsee topologisesti lähellä jotain palvelinta, pyritään käyttäjä uudelleenohjaamaan tämän lähimmän palvelimen palvelemaksi. Lisäksi yhden palvelimen kaatuessa sisällön voi mahdollisesti saada vielä toiselta palvelimelta, kun käyttäjät uudelleenohjataan toimivalle palvelimelle. (Dilley ym. 2002)

3.2 Netflixin käyttämät sisällönjakeluverkot

Ennen vuotta 2012 Netflix säilöi videosisältöään Amazonin pilvipalvelimilla ja jakeli sisältöä sieltä useita sisällönjakeluverkkoja hyödyntäen, ml. *Akamai*, *LimeLight* ja *Level-3* (Vijay Kumar Adhikari ym. 2012). Myöhemmin Netflix implementoi oman sisällönjakeluverkkonsa, jota kutsutaan Open Connect Appliances:ksi (OCA). (Doan, Bajpai ja Crawford 2020) Netflixin oman sisällönjakeluverkon laitteet operoivat kaksoispinoverkossa, eli ne käsittelevät verkkoliikennettä sekä IPv4 että IPv6 muodossa. (Doan, Bajpai ja Crawford 2020) Videosisältö säilytetään ja kuljetetaan DRM-suojeltuna ja valmiiksi pakattuna. (Vijay Kumar

Adhikari ym. 2012)

3.3 Open Connect Appliances

Netflix käytti ennen ulkopuolisia sisällönjakeluverkkoja, mutta on sittemmin julkaissut Open Connect Appliances - ohjelman, joka on suurimmaksi osaksi korvannut ulkopuolisten sisällönjakeluverkkojen tarpeen. Netflixin oman sisällönjakeluverkon laitteistoa sijaitsee nykyään yhdeksässä kymmenestä Internet Exchange Point:issa (IXP) maailmalla.(Doan, Bajpai ja Crawford 2020)

Palveluntarjoajat voivat reitittää asiakkaidensa datapyynnöt IXP:eillä sijaitseviin Netflixin laitteisiin, tai vaihtoehtoisesti OCA tarjoaa internet-palveluntarjoajille mahdollisuuden asentaa myös omaan palvelinkoneistoonsa kiinni laitteita, jotka säilövät videosisältöä paikallisesti jotta kuvanlaatu ei kärsisi verkon ajoittaisen kuormittumisen myötä. (Doan, Bajpai ja Crawford 2020) Tutkimuksen mukaan (Doan, Bajpai ja Crawford 2020) palveluntarjoajat jotka ovat asentaneet Netflixin Open Connect - laitteita ovat pystyneet yhdistämään asiakkaita TCP-yhteyksiä pitkin jopa 64 prosenttia nopeammin. Saman tutkimuksen mukaan 90 prosenttia tapauksista osoittaa, että datan läpisyöttö on suurempaa kun palveluntarjoajalla on käytössä Netflixin laitteita, jotka tallettavat videosisältöä välimuistiinsa. Tutkimuksen mukaan 75 prosentissa tapauksista läpisyöttö oli jopa kolme kertaa suurempaa, 11 MB/s nopeudesta kasvoi 33 MB/s.

Kaikissa Netflixin käyttämissä sisällönjakeluverkon palvelimissa on tallessa sama sisältö. Jos asiakkaan yhteys hidastuu yhteen palvelimeen, Netflixin palvelu ensin madaltaa videonlaatua progressiivisesti, ja jos yhteys hidastuu liian paljon niin asiakas reititetään toisen palvelimen piiriin. (Vijay Kumar Adhikari ym. 2012)

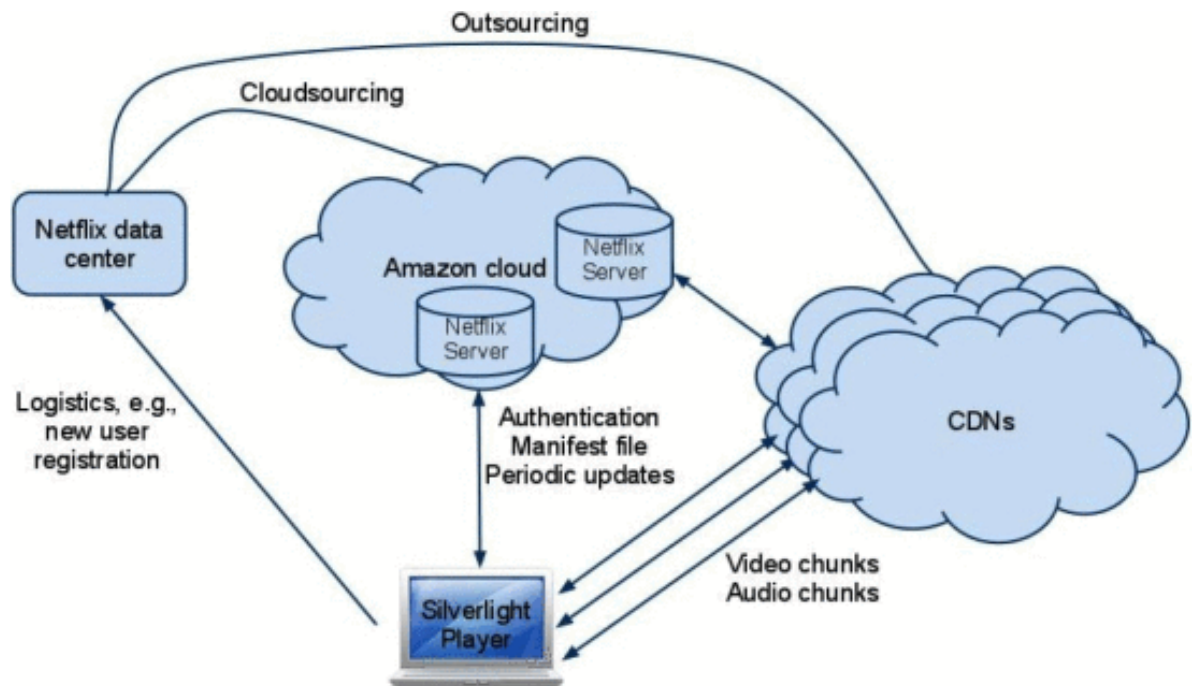
Trinh Viet Doanin tutkimuksessa (Doan, Bajpai ja Crawford 2020) osoitetaan, että Netflixin OCA - ohjelma on ajan kanssa tasaisesti levinnyt kattamaan suuremman ja suuremman osan verkosta. Tutkimuksen tarkasteluvuosina, 2016–2019, on todettu että asiakkaiden tarvitsemien IP-osoitteiden välisien hyppyjen määrä on keskiarvoisesti vähentynyt videosisältöä haikissa. Vuonna 2016 tarkasteltiin molempia IP-osoiteperheitä, IPv4 ja IPv6, ja todettiin että asiakas saavutti Netflixin verkon maksimissaan yhdeksässä IP-hypyssä 82.1 prosenttia ta-

pauksista IPv4 reiteistä ja 78.5 prosenttia tapauksista IPv6 reiteistä. Vuonna 2019 luvut olivat paljon suuremmat: asiakkaat saavuttivat Netflixin verkon 99.1 prosenttia tapauksista alle yhdeksässä hypyssä IPv4 reiteistä ja 98.4 prosenttia IPv6 reiteistä.

Böttger ym. (2018) tutkimuksessaan ovat todenneet, että Netflixin OCA-hanke on ollut laajan skaalansa ansiosta osana kansainvälisen verkon topografian tasoittumista. Vain suurimmat palveluntarjoajat, kuten USA:n AT-T, Comcast, Verizon, ja Time Warner ovat kieltäytyneet implementoimasta Netflixin palvelinlaitteistoa, sen sijaan vaatien vertaisverkkosopimuksia toimittaakseen videomateriaalia verkkojensa yli.

4 Netflixin toiminta

Tässä luvussa kuvataan koko prosessi, mikä vaaditaan Netflixin toimintaympäristössä videon suoratoistoon, aloittaen asiakasdatan ja maksujen tarkistuksella, jatkuen varsinaisen videosisällön pyytämiseen ja siihen vastaamiseen, datan reitittämiseen ja siihen liittyvien palveluntarjoajien kanssa ennalta sovittujen tehostusmenetelmien kuvaamiseen, sitten videon pakkaamisen ja varsinaisen lähettämismetodin kuvaukseen, edeten skaalautuvuuteen, lähetyksen tehostamiseen ja ongelmien käsittelyyn liittyvien olemassa olevien ratkaisujen kuvaukseen. Lopuksi vielä käydään läpi parannuksia, joita Netflix voisi tulevaisuudessa mahdollisesti implementoida palvelunsa laadun ja tehokkuuden parantamiseksi.



Kuvio 1. (Vijay K. Adhikari ym. 2015) Tämä kuva havainnollistaa miten Netflixin infrastruktuurin eri osat kommunikoivat keskenään ja loppukäyttäjän kanssa.

4.1 Asiakasdatan ja maksutapahtumien käsittely

Vijay K. Adhikari ym. (2015) tutkimuksessa on selvitetty Netflixin arkkitehtuuria verkkoliikenteen seurannalla, IP-osoitteiden kääntämisellä Domain-nimiksi, sekä WHOIS-kyselyprotokollien

avulla. Tutkimuksessa luotiin uusi käyttäjätili, kirjauduttiin sillä Netflixin verkkosivulle ja toistettiin elokuva. Näin tekemällä tutkimus havaitsi, että käyttäjätiliä tehdessä ja maksutietoja käsitellessä Netflix käyttää omaa IP-osoiteavaruuttaan, eli tässä vaiheessa asiakas vuorovaikuttaa vielä Netflixin oman palvelimen kanssa. Tämä palvelin ei vuorovaikuta enää asiakkaan kanssa elokuvan toiston aikana.

4.2 Videosisällön käsittely

Tilitietojen käsittelyn jälkeen asiakas uudelleenohjataan Netflixin vuokraamille palvelimille Amazonin pilvessä. (Vijay K. Adhikari ym. 2015) Suuri osa tärkeistä Netflixin toiminnoista, kuten videosisällön tuominen sisällönjakeluverkoille, logitietojen tallennus ja analysointi, tekijänoikeussuojaukset, sisällönjakeluverkkojen reititys, käyttäjien sisäänkirjautuminen, sekä mobiililaitteiden tuki tapahtuu Amazonin pilvipalvelun kautta. (Vijay K. Adhikari ym. 2015)

Amazonin osoiteavaruudesta asiakas ennen reititettiin kolmansien osapuolien sisällönjakeluverkkojen palveltavaksi (Vijay K. Adhikari ym. 2015), mutta nykyään Netflix käyttää omaa sisällönjakeluverkkoaan, Open Connect Appliances:ia, jonne Amazon Web Services reitittää asiakkaat. (Doan, Bajpai ja Crawford 2020) OCA hoitaa Netflixin videosisällön varsinaisen jakamisen, usein pitämällä välimuistia suosituimmasta videosisällöstä palveluntarjoajien tiloissa, josta ne voidaan nopeasti hakea ja toimittaa asiakkaalle. (Doan, Bajpai ja Crawford 2020) Netflix käyttää Amazon Web Services:ia hallinta-alustana reitittämään pyyntöjä lähimmälle laitteelle OCA:n piirissä perustuen verkon senhetkiseen olotilaan, laitteen tyyppiin, ja käyttäjän sijaintiin. (Doan, Bajpai ja Crawford 2020)

Varsinaiseen videonlähetykseen Netflix käyttää Dynamic Streaming over HTTP (DASH) -protokollaa, missä jokainen video on koodattu useilla eri laatutasoilla ja jaettu pienempiin osiin, joita asiakas pyytää yksi osa kerrallaan HTTP-verkkoprotokollan kautta. Jokaisen latauksen päätyttyä protokolla mittaa vastaanotetun kaistanleveyden ja pyörittää nopeutta määrittävää algoritmia päättääkseen seuraavaksi ladattavan osan laadun. (Vijay K. Adhikari ym. 2015)

Netflix käyttää videontoistoon Silverlight-sovellusta, joka lataa, koodaa ja toistaa elokuvia verkkoselaimessa. (Vijay K. Adhikari ym. 2015) Asiakkaalle ladataan puskuriin osia halu-

tusta videosisällöstä, mikä tarkoittaa että alussa latauksen määrä on suurempaa kuin myöhemmin, jolloin vain ajoittain ladataan osia lisää jotta puskuri pysyy täytettynä. (Vijay K. Adhikari ym. 2015)

4.3 Skaalautuvuus, lähetyksen tehostaminen ja laadunvarmistus

Chalaby J.K. totesi artikkelissaan (J.K. ja S. 2021), että Internetin selkäranka ei pystyisi kannattelemaan yksinään videonjakelun asettamaa kysyntää, vaan sisällönjakeluverkkoja on pitänyt rakentaa tämän liikenteen käsittelyyn. Aikaisemmissa kappaleissa on mainittu kuinka Netflix käyttää omaa sisällönjakeluverkkoaan, Open Connect Appliances:ia toimittaakseen videosisältöä nopeammin ja laajemmalle alueelle. OCA:ta skaalataan suuremmaksi edelleen, (Doan, Bajpai ja Crawford 2020) jotta palvelu toimisi käyttäjäkunnan yhä kasvaessa. Hajautettu sisällönjakeluverkko auttaa skaalautuvuutta huomattavasti esimerkiksi siten, että joka kerta kun Euroopassa sijaitseva asiakas haluaa katsoa videoita, hänen ei tarvitse pyytää sitä amerikkalaisilta palvelimilta missä Netflixin pääkonttori sijaitsee, vaan todennäköisesti paikallisen palveluntarjoajan asentamat Netflixin laitteet riittävät sisällön noutamiseen. Tämä säästää verkolta paljon liikennettä, mikä kääntyy suoraan säästöiksi muun muassa kaistanleveyden, laskentatehon ja sähkövirran kannalta.

Lähetyksen tehostamiseen Netflix käyttää paitsi sisällönjakeluverkkoja, niin myös videon suoratoistoon erikoistunutta verkkoliikenneprotokollaa eli DASH:ia. DASH:in avulla lähetyksen laatua voi muunnella sen mukaan, kuinka nopea yhteys asiakkaalla on. (Spiteri, Sitarman ja Sparacio 2019) Tällainen teknologia on tärkeä videonlähetyksessä, koska eri geograafisilla alueilla on hyvin erilaiset olotilat verkossa ja latauksen aikana nopeus voi muuttua paljonkin. Lisäksi videotiedostot ovat yleisesti normaalia verkkoliikennettä suurempia, joten niiden lähettämiseen vaaditaan tehokkaampi infrastruktuuri.

Laadunvarmistusta varten Netflix kerää dataa käyttäjäkokemuksesta, josta pyydetään raportteja tasaisin väliajoin asiakassovelluksilta ja toimitetaan videon toiston ohessa. (Vijay K. Adhikari ym. 2015)

4.4 Miten tulevaisuudessa videon suoratoiston prosessia voi parantaa

Vijay K. Adhikari ym. (2015) huomasivat tutkimuksessaan, että Netflix ei ottanut ennen OCA:n käyttöönottoa huomioon asiakkaiden hyödyntämien verkkojen olosuhteita valitessaan palvelevaa sisällönjakeluverkkoa. Tutkijat totesivat, että suorittamalla kevyitä nopeusmittauksia jokaiselle sisällönjakeluverkolle videon suoratoiston alkaessa voi suorituskykyä nostaa jopa 12 prosenttia. Lisäksi käyttämällä useita sisällönjakeluverkkoja samanaikaisesti suorituskykyä voi nostaa jopa 50 prosenttia, lataamalla videosta osat aina siitä sisällönjakeluverkosta, josta se on nopeinten saatavilla.

Doan, Bajpai ja Crawford (2020) jatkoivat tätä tutkimusta sisällönjakeluverkoista. He totesivat, että Netflixin Open Connect Appliances:in käyttöönotto oli huomattavasti parantanut viiveaikoja, nostanut keskimääräisiä lähety nopeuksia ja vähentänyt IP-hyppyjä verkossa sisällön toimittamiseksi. Tutkijat korostivat erityisesti välimuistia säilövien laitteiden osuutta suorituskyvyn parantamisessa. Laitteiden asentaminen verkon reunapaikoille oli suurin yksittäinen tekijä latausnopeuksien nostamisessa ja viiveaikojen vähentämisessä. Tutkimus ei kuitenkaan osoittanut, oliko Netflix implementoinut uutta reitityslogiikkaa sisällönjakeluverkoissaan niin kuin Vijay K. Adhikari ym. (2015) olivat suositelleet vai johtuvatko suorituskyvyn parannukset pelkästään laitteiston ja verkkoresurssien määrän kasvamisesta ja suuremmasta levinneisyydestä.

Ma (2021) oli päässyt tutkimuksessaan samankaltaiseen tulokseen välimuistipalvelimista, osoittamalla että sisällöntuottajan omien palvelimien kaistanleveyttä nostamalla ei voi olennaisesti parantaa palvelun laatua, koska verkon muut osat osoittautuisivat pullonkaulaksi ja vähentäisivät investointien hyötyä. Tutkimus vahvistaa havainnon, että verkossa "viimeisen mailin"toimitukseen on hyödyllisintä investoida, asentamalla välimuistipalvelimia mitä Netflix on OCA-hankkeellaan jo tehnytkin.

Doan, Bajpai ja Crawford (2020) myös huomasivat tutkimuksessaan, että joissakin sijainneissa sisältöä ei saatu ladattua kuin vain yhden IP-osoiteperheen kautta, vaikka laitteiden pitäisi toimia kaksoispinoverkossa. Tutkijat esittivät tämän tulevana parannusehdotuksena Netflixin ja palveluntarjoajien infrastruktuurissa, sillä laitteista ei silloin vielä ole kaikki ominaisuudet käytössä jos vain yhtä IP-osoiteperhettä hyödynnetään.

Lähestyen toisesta näkökulmasta, Spiteri, Sitaraman ja Sparacio (2019) ehdottivat parannuksia DASH - protokollaan, kuten "FAST SWITCHING- algoritmi, joka voi korvata jo valmiiksi ladattuja videonpätkiä paremman laatusilla latausnopeuden sen salliessa. Lisäksi uusilla algoritmeilla voisi reagoida nopeammin käyttäjälähtöisiin tapahtumiin kuten aloitus ja etsintä, sekä verkkolähtöisiin tapahtumiin kuten parannukset latausnopeudessa. Näillä parannuksilla on pyritty nostamaan käyttäjien kokemuksen laatua (Quality of Experience, QOE).

5 Yhteenveto

Tämän tutkielman aiheena oli kirjallisuuskartoituksen avulla selvittää miten Netflix suorittaa liiketoiminnassaan videon jakamisen kuluttajille.

Tutkielmassa korostettiin erityisesti tietoliikenneprotokolla DASH:in ja Netflixin sisällönjako-verkon OCA:n merkitystä videon jakamisessa, koska ne ovat kaksi merkittävintä tekijää, jotka mahdollistavat juuri Netflixin toiminnan. myös Amazonin pilvipalveluilla on merkittävä vaikutus Netflixin infrastruktuuriin, mutta ennemminkin tarjoamalla analytiikkaa ja liiketoimintaa ylläpitäviä palveluita, joten niitä ei käsitelty lähemmin.

Tutkielmassa osoitettiin, että Netflix kerää jatkuvasti lisää dataa käyttäjäkokemuksestaan ja pyrkii laajentamaan kattavuuttaan maailmalla. Tutkielma havaitsi muutamia parannettavia asioita Netflixin laitteiden ja algoritmien hyödyntämisessä, joista osaa Netflix itse työstää edelleen. Esimerkkejä tästä on välimuistipalvelimien lisääminen lähemmäs kuluttajia, ja näiden laitteiden tehokkaampi hyödyntäminen. Tutkielmassa todettiin, että Netflix ei voi enää saavuttaa olennaisia lisähyötyjä nostamalla omien palvelimiensa lähetysnopeutta, vaan koko infrastruktuuria pitää päivittää tasaisesti ja samanaikaisesti jotta parannukset näkyisivät loppukäyttäjän kokemuksessa.

Lähteet

Adhikari, Vijay K., Yang Guo, Fang Hao, Volker Hilt, Zhi-Li Zhang, Matteo Varvello ja Moritz Steiner. 2015. “Measurement Study of Netflix, Hulu, and a Tale of Three CDNs”. *IEEE/ACM Transactions on Networking* 23 (6): 1984–1997. <https://doi.org/10.1109/TNET.2014.2354262>.

Adhikari, Vijay Kumar, Yang Guo, Fang Hao, Matteo Varvello, Volker Hilt, Moritz Steiner ja Zhi-Li Zhang. 2012. “Unreeling netflix: Understanding and improving multi-CDN movie delivery”. Teoksessa *2012 Proceedings IEEE INFOCOM*, 1620–1628. <https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2012.6195531>.

Braden, R., toimittanut. 1989. *Requirements for Internet Hosts – Communication Layers*. RFC. Internet Engineering Task Force, lokakuu. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1122>.

Böttger, Timm, Felix Cuadrado, Gareth Tyson, Ignacio Castro ja Steve Uhlig. 2018. “Open Connect Everywhere: A Glimpse at the Internet Ecosystem through the Lens of the Netflix CDN”. *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.* (New York, NY, USA) 48, numero 1 (huhtikuu): 28–34. ISSN: 0146-4833. <https://doi.org/10.1145/3211852.3211857>. <https://doi-org.ezproxy.jyu.fi/10.1145/3211852.3211857>.

Cerf, V., ja R. Kahn. 1974. “A Protocol for Packet Network Intercommunication”. *IEEE Transactions on Communications* 22 (5): 637–648. <https://doi.org/10.1109/TCOM.1974.1092259>.

Chen, Yue, Debargha Murherjee, Jingning Han, Adrian Grange, Yaowu Xu, Zoe Liu, Sarah Parker ym. 2018. “An Overview of Core Coding Tools in the AV1 Video Codec”. Teoksessa *2018 Picture Coding Symposium (PCS)*, 41–45. <https://doi.org/10.1109/PCS.2018.8456249>.

Dilley, J., B. Maggs, J. Parikh, H. Prokop, R. Sitaraman ja B. Weihl. 2002. “Globally distributed content delivery”. *IEEE Internet Computing* 6 (5): 50–58. <https://doi.org/10.1109/MIC.2002.1036038>.

Doan, Trinh Viet, Vaibhav Bajpai ja Sam Crawford. 2020. "A Longitudinal View of Netflix: Content Delivery over IPv6 and Content Cache Deployments". Teoksessa *IEEE INFOCOM 2020 - IEEE Conference on Computer Communications*, 1073–1082. <https://doi.org/10.1109/INFOCOM41043.2020.9155367>.

J.K., Chalaby, ja Plunkett S. 2021. "Standing on the shoulders of tech giants: Media delivery, streaming television and the rise of global suppliers". Cited by: 3; All Open Access, Hybrid Gold Open Access, *New Media and Society* 23 (11): 3206–3228. <https://doi.org/10.1177/1461444820946681>. <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85089197275&doi=10.1177%2f1461444820946681&partnerID=40&md5=cf0adfb19b5201b289c97ceacbb3ce8d>.

KIRK, HILPISCH ROBERT E [US]; DUCHSCHER ROB [US]; SEEL MARK [US]; HANSEN PETER SOREN KIRK [DK] HILPISCH ROBERT E.; DUCHSCHER ROB; SEEL MARK; HANSEN PETER SOREN. 2009. Wireless communication protocol. Patentti, haettu 2009.

Ma, Richard T. B. 2021. "Internet Transport Economics: Model and Analysis". *IEEE/ACM Transactions on Networking* 29 (6): 2843–2854. <https://doi.org/10.1109/TNET.2021.3103796>.

Nygren, Erik, Ramesh K. Sitaraman ja Jennifer Sun. 2010. "The Akamai Network: A Platform for High-Performance Internet Applications". *SIGOPS Oper. Syst. Rev.* (New York, NY, USA) 44, numero 3 (elokuu): 2–19. ISSN: 0163-5980. <https://doi.org/10.1145/1842733.1842736>. <https://doi.org/10.1145/1842733.1842736>.

Spiteri, Kevin, Ramesh Sitaraman ja Daniel Sparacio. 2019. "From theory to practice: Improving bitrate adaptation in the DASH reference player". *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)* 15 (2s): 1–29.

Vorobeva, Anastasiia, Mikhail Zakharov ja Vadim Skvortsov. 2021. "Analysis Of The Dash Protocol Behavior In A Closed Network Environment". Teoksessa *2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*, 1951–1954. <https://doi.org/10.1109/EIConRus51938.2021.9396160>.