



**TURUN  
YLIOPISTO**

ODOTETTU VAJE, VALUE-AT-RISK SEKÄ NIIDEN ROOLI  
MARKKINARISKIEN PÄÄOMAVAATEISSA

Aino Peurala

Pro gradu -tutkielma  
Toukokuu 2025

MATEMATIIKAN JA TILASTOTIETEEN LAITOS

**Tarkastajat:**

Prof. Jukka Lempa

Dos. Kalle Parvinen

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO, Matematiikan ja tilastotieteen laitos

Pro gradu -tutkielma

**Pääaine:** Matematiikka

**Tekijä:** Aino Peurala

**Otsikko:** Odotettu vaje, Value-at-Risk sekä niiden rooli markkinariskien pääomavaateissa

**Ohjaaja:** Prof. Jukka Lempa

**Sivumäärä:** 41 sivua

**Aika:** Toukokuu 2025

---

Tämä tutkielma käsittelee markkinariskien minimipääomavaateita, joita sääntely velvoittaa pankkeja laskemaan. Pääomavaateiden tarkoitus on velvoittaa pankkeja varaamaan riittävästi pääomaa kattamaan niiden ottamat riskit. Näin niiden avulla pyritään estämään yksittäisten pankkien konkurssseja, sekä laajojen finanssikriisien syntyä.

Markkinariskien pääomavaateiden sääntelyssä on tapahtunut viime vuosina suuria muutoksia. Eräs huomattavimmista muutoksista on aiemmin käytetyn Value-at-Risk-riskimitan korvaaminen odotetun vajeen riskimitalla. Sekä muutoksen, että pääomavaateiden ymmärtämiseksi tutkielmassa käsitellään vaatimuksia, joita hyvälle riskimitalle on asetettu. Tämän lisäksi esitellään kahden edellä mainitun riskimitan laskentapojaa sekä niiden ominaisuuksia ja eroavaisuuksia.

Riskimittojen laskentaan käytettävien mallien toimivuus on varmistettava toteumatestein. Mallin toimivuuden lisäksi halutaan varmentaa sen tulosten kattavan myös poikkeuksellisen heikoista olosuhteista seuraavia tappioita. Tämän vuoksi malleihin suoritetaan stressitestausta. Molempien suorittamista vaaditaan myös sääntelyssä ja nämä käsitellään tässä tutkielmassa lyhyesti.

Markkinariskien minimipääomavaateiden laskentaa tarkastellaan erityisesti sisäisten menetelmien näkökulmasta. Lisäksi esitellään pääomavaateiden historiaa ja markkinariskien pääomavaateissa tapahtuneita viimeaikaisimpia muutoksia. Tutkielman lopuksi tarkastellaan pääomavaateiden muutosten vaikutuksia.

Asiasanat: Value-at-Risk, Odotettu vaje, Pääomavaade, Markkinariski.



# Sisälllys

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Riskit</b>	<b>3</b>
2.1	Markkinariski . . . . .	3
2.1.1	Korkoriski . . . . .	3
2.1.2	Valuuttariski . . . . .	4
2.1.3	Osakeriski . . . . .	4
2.1.4	Hyödykeriski . . . . .	4
2.1.5	Luottomarginaaliriski . . . . .	4
2.2	Muita riskejä . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Riskimitta</b>	<b>6</b>
3.1	Koherentti riskimitta . . . . .	7
3.1.1	Subadditiivisuus . . . . .	8
3.2	Konsistentti pisteytyvyys . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Value-at-Risk ja odotettu vaje</b>	<b>11</b>
4.1	Value-at-Risk . . . . .	11
4.1.1	Varianssi-kovarianssi tapa . . . . .	12
4.1.2	Historiallinen tapa . . . . .	13
4.1.3	Monte Carlo simulointi . . . . .	14
4.2	Value-at-Risk ja heikkoudet . . . . .	15
4.3	Odotettu vaje . . . . .	15
4.4	Riskimittojen eroavaisuuksia . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Mallin tuloksien varmentaminen</b>	<b>18</b>
5.1	Value-at-Risk-riskimitan toteumatestaus . . . . .	18
5.2	Odotetun vajeen toteumatestaus . . . . .	20
5.2.1	Value-at-Risk-riskimitan toteumatestauksen hyödyntäminen . . . . .	20
5.2.2	Odotetun vajeen toteumatestaus suoraan . . . . .	21
5.2.3	Muita toteumatestausmenetelmiä . . . . .	22
5.3	Stressitestausta . . . . .	23
5.3.1	Value-at-Risk-riskimitan toteumatestaus . . . . .	24
<b>6</b>	<b>Markkinariskien pääomavaatimukset</b>	<b>25</b>
6.1	Historia . . . . .	26
6.2	Fundamental review of trading book ja uudistunut markkinariskisääntely . . . . .	26
6.2.1	Sisäiset menetelmät . . . . .	26
6.2.2	Muita muutoksia . . . . .	27
6.3	Sisäiset mallit . . . . .	28
6.3.1	Mallinnettavat riskitekijät . . . . .	29
6.3.2	Ei-mallinnettavat riskitekijät . . . . .	30
6.3.3	Maksukyvyttömyysriski . . . . .	31
6.3.4	Lopulliset pääomavaatimukset . . . . .	32

<b>7</b>	<b>Uudistuneiden pääomavaatimusten vaikutus</b>	<b>34</b>
<b>8</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>36</b>

# 1 Johdanto

Pankeilla on maailmantaloudessa keskeinen rooli, mutta silti niillä on yksi hauraimista liiketoimintamalleista. Pankit ovatkin olleet keskeisessä asemassa monissa finanssikriiseissä läpi historian. [1] Vuosina 2007 ja 2008 koko maailmaa koskettavan finanssikriisin seurauksena pankit kärsivät valtavia tappioita ja valtiot joutuivat lunnastamaan niistä useita. Ennen tätä finanssikriisiä, taantuma oli ollut yhtä vakava viimeksi 1930-luvulla.[2]

Pankkien ottamien riskien toteutuessa tappioita voi koitua pankin lisäksi myös sen asiakkaille esimerkiksi menetettyjen talletusten muodossa. Asiakkaat saattavat olla henkilöitä, yrityksiä ja muita pankkeja, jolloin vaikutukset voivat olla hyvin laajat. Tämän vuoksi riskienhallinta tärkeää sekä pankin johdolle, että pankkien toimintaa valvoville viranomaisille. Pankin ja valvojan viranomaisen tavoitteet ovat kuitenkin hieman erilaiset. Pankin johdon tavoitteena on yrityksen toiminnan ja arvon suojaaminen. Kansallisten viranomaisten tavoitteina ovat yksittäisten pankkien turvaaminen, sijoittajien sekä kuluttajien oikeudenmukaisen ja läpinäkyvän kohtelun varmistaminen sekä rahoitusjärjestelmän vakaus. [1] Pääomavaateet eivät estä pankkeja ottamasta riskejä, mutta ne velvoittavat pankkeja varautumaan riskeihin riittävällä pääomalla.

Pankkien toiminnan vakautta koskeva sääntely perustuu vahvasti Baselin pankkivalvontakomitean luomaan Basel sääntelykehikkoon.[3] Finanssikriisin seurauksena todettiin, että muun muassa markkinariskien pääomavaatimuksia koskevaa sääntelyä on uudistettava. Välittömänä reagoitina kriisiin julkaistiin Basel II.5 -sääntely vuonna 2009. Vuonna 2013 Baselin pankkivalvontakomitea julkaisi lopullisen version dokumentista "Fundamental review of the trading book: A revised market risk framework", joka on kokoelma ehdotuksia markkinariskejä koskevan sääntelyn parantamiseksi.[4] Vuonna 2019 julkaistiin lopullinen versio Baselin uudistuneista minimipääomavaatimuksista markkinariskeille.[5]

Tämä tutkielma esittelee erilaiset markkinariskit sekä niiden pääomavaateiden mittaamista. Menetelmät pääomavaateiden mittaamiseen perustuvat Baselin pankkivalvontakomitean julkaisemaan markkinariskien pääomavaateiden sääntelyyn. [5] Pääomavaateiden laskennan esittelyn lisäksi tarkastellaan uuden kokonaisuuden tuomia muutoksia ja mahdollisia vaikutuksia pankkien pääomavaatimukseen ja käyttäytymiseen. Sääntelyn ja sen muutosten ymmärtämisen taustaksi tarkastellaan riskimittojen ominaisuuksia yleisesti, jonka lisäksi esitellään kaksi pääomavaateiden kannalta keskeisessä roolissa olevaa riskimittaa: Value-at-Risk ja odotettu vaje.

Markkinariskit ovat riskejä, jotka syntyvät omaisuuden arvon vaihtelusta ja tämän aiheuttamasta tappion mahdollisuudesta. Markkinariskeiksi luetaan yleisesti korkoriski, valuuttariski, osakeriski sekä hyödykeriski. Markkinariskiä ei voida poistaa täysin hajauttamalla. Toisin kuin yrityskohtainen riski, esimerkiksi korkojen muutokset vaikuttavat kaikkien markkinoilla olevien sijoituskohteiden arvoon. [6] Erilaiset markkinariskit esitellään tarkemmin luvussa 2. Luvussa esitellään lyhyesti myös muita riskejä, joita pankkien tulee hallita.

Pankkien liiketoiminta ja sen tuotto perustuvat riskien hyväksymiseen asiakkaalta saatua palkkiota vastaan. Jotta voidaan tehdä päätös riskin säilyttämisen ja hajauttamisen välillä on riski välttämätöntä mitata. [7] Riskien mittaamista se-

kä riskimittoja käsitellään luvussa 3. Lisäksi esitellään koherentin ja konsistentisti pisteytyvän riskimitan määritelmät, sekä näiden ominaisuuksien tarjoamat hyödyt.

Yksi suurimmista sääntelykokonaisuuden tuomista muutoksista on siirtyminen Value-at-Risk-riskimitasta odotetun vajeen riskimitaan pankkien sisäisissä menetelmissä. Value-at-Risk kuvaa tappion, jota tietyllä luottamustasolla ei ylitetä. Odotettu vaje sen sijaan mittaa keskimääräisen tappion niistä tappioista, jotka jäävät luottamustason ulkopuolelle.

Value-at-Risk-riskimita on ollut laajasti käytössä jo 90-luvulta lähtien. [6] Luotokriisin jälkeen Value-at-Risk-riskimitaa on kuitenkin arvosteltu laajasti ja sitä on jopa syytetty finanssikriisin synnystä. [8] Value-at-Risk-riskimitan merkittävimpiä heikkouksia on, ettei se ole koherentti riskimita. Value-at-Risk ei täytä subadditiivisuuden ehtoa. [9] Odotetun vajeen riskimita sen sijaan täyttää koherentin riskimitan vaatimukset. Se onkin yksi syy sille, miksi odotettu vaje korvaa Value-at-Risk-riskimitan uudessa sääntelyssä.

Odotetun vajeen riskimitallakin on kuitenkin merkittävä heikkous. Se ei ole konsistentisti pisteytyvä. Tämän ominaisuuden puuttuminen hankaloittaa riskimitan estimointiin käytetyn mallin toteumatestaamista. Toteumatestaamalla arvioidaan, kuinka hyvin malli kykenee kuvaamaan todellisuutta. Tämän puutteen vuoksi odotetun vajeen roolia sääntelyssä on kritisoitu. Molempien riskimittojen ominaisuuksia käsitellään tarkemmin luvussa 4.

Luvussa 5 käsitellään mallien toteumatestausta ja stressitestausta. Kumpaakin prosessia käytetään mallin tuloksien varmentamiseen. Toteumatestausta hyödynnetään mallin oikeellisuuden varmentamiseen. Stressitestaamalla sen sijaan varaudutaan siihen, että mallin tulokset huomioivat myös kaikista heikoimmat ajanjaksot.

Markkinariskien pääomavaatimusten historiaa sekä niiden laskentaa sisäisillä menetelmillä käsitellään luvussa 6. Pankit voivat sisäisten menetelmien sijaan laskea pääomavaateet myös standardimenetelmällä. Sisäisten mallien mukainen laskenta vaatii pankeilta enemmän resursseja kuin standardimenetelmä. Sisäisten menetelmien käyttö vaatii pankilta kyvykkyyttä mallintaa esimerkiksi odotetulle vajeelle arvo menetelmällä, jonka myös pankin valvontaviranomainen hyväksyy.

Luvussa 7 on koottuna mahdollisia vaikutuksia, joita markkinariskejä koskevat sääntelymuutokset aiheuttavat. Uudistunut sääntely ei ole astunut vielä voimaan, joten muutosten seurauksia voidaan vasta arvioida. Kahdeksas luku on viimeinen ja se sisältää yhteenvedon tutkielmasta.

## 2 Riskit

Tässä luvussa esitellään erilaiset taloudelliset riskit keskittyen erityisesti markkinariskeihin. Taloudellinen riski voidaan määritellä usealla tavalla. Ensimmäisen määritelmän mukaan riski on rahoitusyhtiöön kohdistuva riski. Toisen määritelmän mukaan taloudellinen riski on riski, joka koskee rahoitusinstrumentteja. [10] Kolmas määritelmä taloudelliselle riskille on vaihtelu ja epävarmuus tulevaisuuden arvossa.[9] Viimeisen määritelmän mukaisesti tulevaisuudessa toteutuvaa arvoa on luonnollista kohdella satunnaismuuttujana. Taloudelliset riskit jaetaan useimmiten neljään eri riskiin, joita ovat markkinariski, luottoriski, likviditeettiriski ja operatiivinen riski.

Riskifaktori tai riskitekijä on muuttuja, joka pääasiallisesti määrittelee instrumentin arvon. Riskitekijä voi olla esimerkiksi korko tai valuuttakurssi. [2]

### 2.1 Markkinariski

Markkinariski on markkinahintojen vaihteluista aiheutuva tappion mahdollisuus. Markkinariski ei koske pelkästään markkinapaikalla myytävää varallisuutta. Kaikella rahoitusvarallisuudella on markkinariski, sillä kaikkien varallisuuden muotojen arvo voi muuttua ajan kuluessa. Markkinariskiä voidaan kutsua myös systemaattiseksi riskiksi, eikä sitä voi poistaa hajauttamalla.[10] Hajautettavissa olevia riskejä kutsutaan idiosynkraattisiksi riskeiksi. Ne koskevat esimerkiksi yksittäistä omaisuuslajia tai toimialaa.

Markkinariski jaetaan yleisesti neljään eri riskilajiin, joita ovat korkoriski, valuuttariski, osakeriski ja hyödykeriski. Baselin markkinariskien pääomavaatimuksissa riskiluokaksi luetaan myös luottomarginaaliriski. [5] Markkinariskejä ovat myös riskitekijöiden muutoksista aiheutuvat potentiaaliset tappiot.

Markkinariskien mittausta tehdään usein lyhyeltä ajanjaksolta, jolla pankki voi oletettavasti riskin suojata. Tämän vuoksi omaisuuslajin odotettu tuotto ei vaikuta markkinariskin laskentaan, sillä sen oletetaan olevan lyhyellä aikavälillä sama kuin riskitön tuotto. [7] Rahoitusinstrumenttien hintojen oletetaan muuttuvan tasaisesti ja jatkuvasti. Suuret ja epäjatkuvat muutokset ovat harvinaisia. Tämän vuoksi markkinariskimalleissa käytetään usein jatkuvia jakaumia.[10]

#### 2.1.1 Korkoriski

Korot ovat monien markkinahintojen taustatekijä. Markkinakorkoihin vaikuttavat muun muassa inflaation odotettu taso, yleinen taloustilanne, rahapolitiikka ja keskuspankin näkemys, valuutanvaihdon aktiivisuus ja poliittinen tasapaino.[6]

Kiinteäkorkoisten omaisuuserien arvo riippuu koroista käänteisesti. Mikäli korot laskevat, joukkovelkakirjojen arvo nousee. Sama pätee myös päinvastaisessa asetelmassa. Korkotaso määrittää myös diskonttokoron kaikille omaisuuserille. Tämän vuoksi koroilla on merkittävä vaikutus kaikessa arvonmäärityksessä. [6]

Korkoriski on markkinariskeistä vaikein hallittava. Eräs syy tähän on se, että eri korkoja on laajasti. Vaikka eri korkojen liikehdintä on useimmiten saman suuntaista, eivät ne ole täysin korreloituneita. [2] Erilaisia korkoja ovat esimerkiksi eri maturiteetteihin sidotut Euribor-korot, Euroopan keskuspankin ohjauskorko ja Swap-korot.

Korkoriski vaikuttaa pankkeihin, omaisuuserien arvonmuutosten lisäksi pankin korkokatteen kautta. Korkokate on pankin ansaitseman koron ja pankin maksaman koron erotus. Korkokatetta tulisi hallita siten, että se pysyisi samalla tasolla markkinamuutoksista huolimatta. [2]

### **2.1.2 Valuuttariski**

Valuuttakursseissa tapahtuvat muutokset vaikuttavat vieraaseen valuuttaan sidottujen omaisuuserien arvoon. Näiden muutosten aiheuttamaa riskiä kutsutaan valuuttariskiksi. Usein myös kullon hinnan vaihtelun aiheuttamat riskit käsitellään valuuttariskinä hyödykeriskin sijaan. Tämä johtuu siitä, että kullon markkinahinnan vaihtelu muistuttaa enemmän valuuttojen arvonmuutoksia kuin tavanomaisten hyödykkeiden.

### **2.1.3 Osakeriski**

Osake on osuus yrityksen nettovarallisuudesta. Osakkeen omistaja hyötyy yrityksen voitoista, mutta samanaikaisesti joutuu kantamaan yrityksen riskiä. Vastuut rajoittuvat yritykseen sijoitetun omaisuuden suuruuteen. [6]

Osakeriskiä voidaan kutsua myös osakkeen hintariskiksi. Se on riski, joka osakkeisiin sijoittamisesta ja osakkeiden hintojen vaihtelusta syntyy. Osakkeiden hintojen muutoksiin vaikuttaa kyseisen yrityksen menestys, mutta myös esimerkiksi poliittinen ilmapiiri. Tehokkaiden markkinoiden hypoteesin mukaan tehokkailla markkinoilla osakkeiden hinnat heijastavat kaikkea saatavilla olevaa tietoa oikein ja välittömästi tiedon julkistamisen jälkeen. [11]

### **2.1.4 Hyödykeriski**

Hyödykkeiden varastoinnista saatavan hyödyn ja kustannusten vaihtelu erottaa hyödykemarkkinat muista markkinoista. Hyödykkeiden hinnassa onkin tärkeää huomioida kaupan kohteen toimitusehdot. [6]

Hyödykeriskiksi kutsutaan riskiä, joka aiheutuu kaupankäynnin kohteena olevien hyödykkeiden markkinahinnan muutoksista. Hyödykkeitä ovat fyysiset tuotteet, joita voidaan myydä tai vaihtaa jatkomarkkinoilla. Näihin kuuluvat muun muassa maatalouden tuotteet, mineraalit ja muut jalometallit kuin kulta.

### **2.1.5 Luottomarginaaliriski**

Omaisuuserän luottomarginaali heijastaa velallisen luottoriskiä. Mitä suurempi riski velan takaisinmaksulla on, sen korkeampaa tuottoa myönnetystä rahoituksesta vaaditaan. Arvopaperin luottomarginaali on siitä maksettavan koron ja vertailuarvopaperin koron erotus. Vertailuarvopaperi voi olla esimerkiksi valtion velkakirja.

Luottomarginaaliriski on riski arvopaperin luottomarginaalin muutoksesta, jonka seurauksena arvopaperin markkina-arvo muuttuu. [2] Marginaali muutos voi johtua arvopaperin liikkeeseen laskeneen yrityksen muuttuneesta riskitasosta, mutta myös markkinaolosuhteiden muutoksesta.

## 2.2 Muita riskejä

Esitellään lyhyesti vielä muita riskejä, joita pankkien on seurattava.

Luottoriski on riski taloudellisesta tappiosta, joka aiheutuu toisen osapuolen kykenemättömyydestä suorittaa velvoitteitaan. [12] Pankeille luottoriskiä syntyy muun muassa asuntolainoista tai luottokorttiveloista. Tappio aiheutuu, mikäli velallinen ei pysty maksamaan lainaamiaan varoja takaisin. Luottoriskit ovat satunnaisia ja harvoja, mutta yksittäiset tapahtumat ovat usein kooltaan merkittäviä.

Likviditeettiriski on riski siitä, että omaisuuserää ei voi myydä tai ostaa halutessaan, joko ollenkaan tai nykyisellä markkinahinnalla. Vaikka likviditeettiriski on merkittävä riski, joka tulee huomioida, on sen kuvaileminen matemaattisesti haastavaa.[10] Pankille likviditeettiriski toteutuu esimerkiksi tilanteessa, jossa pankin likvidit varat eivät riitä kattamaan tallettajien nostamia summia.

Operatiivinen riski syntyy yrityksen kaikesta liiketoiminnasta. Operatiivisia riskejä ovat muun muassa järjestelmähäiriöt sekä inhimilliset vahingot. Laajat operatiiviset riskit ovat harvinaisia, mutta niiden realisoituessa tappiot voivat olla hyvin suuria.

Malliriski on mahdollisuus tappiosta, joka johtuu epätasaisen tai virheellisen mallin pohjautuvasta päätöksenteosta. Malliriskejä ovat esimerkiksi mallin väärinmäärittely ja arviointivirheet. Tällainen virhe voisi olla mallin määrittely ohut-  
hänntäisen normaali-jakauman perusteella, vaikka aineisto viittaisi paksuhänntäiseen jakaumaan. [13] Malliriskin hallitsemiseksi malleja toteumatestatetaan. Toteumatestatuksesta kerrotaan kattavammin luvussa 5.

Järjestelmäriski on riski siitä, että taloudellinen toiminta häiriintyy laajasti äkillisen poikkeuman seurauksena. Järjestelmäriskin myötä vaikeudet siirtyvät pankista toiseen. Riskiin liittyy vahvasti myös flight-to-quality ilmiö, joka muodostuu, kun sijoittajat myyvät riskialttiimpana pitämiään sijoituksia ja ostavat tilalle vakaampia sijoituksia. [6]

Järjestelmäriskille on kaksi aiheuttajaa. Tallettajien ja sijoittajien paniikinomainen käytös ja tästä aiheutuva talletuspako. Talletuspako syntyy, kun suuri määrä tallettajia haluaa nostaa talletuksensa ja aiheuttaa pankille likviditeettivajeen. Toinen järjestelmäriskin aiheuttaja on häiriö maksujärjestelmässä.

### 3 Riskimitta

Taloudellinen riskienhallinta koostuu riskien mittaamisesta sekä niiden kontrolloinnista. Taloudellisten riskien hallinnassa voidaan hyödyntää likvidejä markkinoita, joka erottaa sen muun tyyppisten riskien hallinnasta. [14] Riskejä voidaan mitata yhtiön omistajien tai johtajien halusta sekä valvojan vaatimusten seurauksena. Näistä ensimmäiseen käytettäviä mittoja voidaan kutsua sisäisiksi riskimitoiksi ja jälkimmäisiä ulkoisiksi riskimitoiksi. On mahdollista, että toimiva sisäinen riskimitta ei sovellu ulkoiseksi riskimitaksi, eikä ulkoinen sisäiseksi. [15]

Jos markkinat olisivat täydellisesti likvidit, voisi riskienhallinta sisältää ainoastaan tappiorajat kullekin sijoittajalle. Kun raja saavutetaan, voitaisiin positio likvidoida ilman lisäkustannuksia. Tällainenkin tilanne vaatisi kuitenkin sääntöjä.[14]

Täydellisesti likvideillä markkinoilla toimiville tappiorajoille olisi asetettava ainakin viisi vaatimusta. Ensimmäiseksi olemassa olevien positioiden markkinahintoja tulisi seurata jatkuvasti ja huolellisesti, jotta tappiorajan ylitys huomattaisiin. Toiseksi tappiorajat olisi suhteutettava sijoittajan kokemukseen sekä sijoitusstrategiaan. Kolmanneksi tappiorajojen nostamiseen tulisi asettaa omat säännöt. Neljänneksi suuret voitot ja tappiot vaatisivat analysointia. Viimeisenä ehtona olisi vaatimus rahoitussuunnitelmasta.[14]

Koska täydellinen likviditeetti ei voi käytännössä toteutua on sijoittajan varauduttava epälikvidien markkinoiden tuottamiin kustannuksiin. Tästä johtuen tarvitaan edellä mainittujen sääntöjen lisäksi keinoja riskien hallintaan. [14]

Riskin suuruuteen vaikuttavat sen todennäköisyys ja mahdollisen tappion suuruus. Markkinariskien tapauksessa riskin suuruus riippuu omaisuuserien hinnoista. Oletetaan, että kaikki nämä hinnat tiedetään. Todennäköisyys, jolla omaisuuserä saavuttaa kunkin hinnan on tuntematon. Riskin suuruus arvioidaan riskimitalla. Määritellään riskimitta perustuen lähteeseen [9].

**Määritelmä 1.** Olkoon  $\Omega$  kaikkien mahdollisten tilojen joukko, jonka oletetaan olevan äärellinen. Olkoon  $\mathcal{G}$  kaikkien riskien joukko, joka koostuu kaikkista reaaliarvoisista funktioista joukossa  $\Omega$ . Riskimitta on kuvaus

$$\rho : \mathcal{G} \mapsto \mathbb{R}.$$

Riskimittoja on erilaisia eri käyttötarkoituksiin ja näiltä vaaditaan siten myös erilaisia ominaisuuksia. Sääntelyn näkökulmasta on tärkeää, että riskimitta sopeutuu mallin heikkoon määrittelyyn, eikä se ole herkkä datan pienille muutoksille. Tällaista riskimittaa kutsutaan robustiksi. Sääntelyn määräämän riskimitan on oltava yksiselitteinen, vakaa ja kaikkien olennaisten toimijoiden on kyettävä toteuttamaan sen mittaaminen. Ilman näitä ominaisuuksia, kaksi samassa riskiasemassa olevaa portfoliota voivat saada tulokseksi erilaiset riskiluvut. Tämä puolestaan mahdollistaa sääntelyyn kohdistuvan arbitraasin, joka tarkoittaa sääntelyn vaateiden täyttämistä sekä kiertämistä keinotekoisesti.[15]

Markkinariskien arviointiin käytettävien riskimittojen keskitytään usein erityisesti kahteen ominaisuuteen, riskimitan koherenttiuteen sekä konsistenttiin pisteytyvyyteen. Näitä käsitellään kahdessa seuraavassa aliluvussa.

### 3.1 Koherentti riskimitta

Artzner, Felbaen, Eber ja Heath esittelivät vuonna 1999 neljä aksioomaa, joita hyvän riskimitan tulisi noudattaa. [9] Riskimittaa, joka täyttää neljä aksioomaa kutsutaan koherentiksi. Esitellyt aksioomat ovat käänteinen invarianssi, subadditiivisuus, positiivinen homogeenisuus ja monotonisuus. Tarkastellaan näitä neljää aksioomaa edellä mainitussa järjestyksessä.

**Aksiooma 1** (Käänteinen invarianssi). Jokaiselle satunnaismuuttujalle  $X \in \mathcal{G}$ , sekä vakiolle  $\alpha \in \mathbb{R}$  pätee

$$\rho(X + \alpha \cdot r) = \rho(X) - \alpha,$$

jossa  $r$  on riskitön kohde-etuus.

Käänteisen invarianssin mukaan, lisäämällä määrän  $\alpha$  riskitöntä kohde-etuutta  $r$ , riski pienenee vakion  $\alpha$  verran.

**Aksiooma 2** (Subadditiivisuus). Jokaiselle satunnaismuuttujalle  $X_1, X_2 \in \mathcal{G}$  pätee

$$\rho(X_1 + X_2) \leq \rho(X_1) + \rho(X_2).$$

Aksiooman mukaan kohde-etuuksien yhdistäminen ei lisää niistä aiheutuvaa riskiä. Subadditiivisuuden aksioomaan palataan omassa aliluvussa, koska sen sillä on huomattava merkitys sääntelyssä tapahtuneissa muutoksissa.

**Aksiooma 3** (Positiivinen homogeenisuus). Jokaiselle vakiolle  $\lambda \geq 0$  ja satunnaismuuttujalle  $X \in \mathcal{G}$  pätee

$$\rho(\lambda X) = \lambda \rho(X).$$

Positiivisen homogeenisuuden nojalla position koko vaikuttaa position riskiin.

**Aksiooma 4** (Monotonisuus). Jokaiselle satunnaismuuttujalle  $X, Y \in \mathcal{G}$ , kun  $X \leq Y$ , pätee

$$\rho(Y) \leq \rho(X).$$

Monotonisuuden mukaan kohteen  $Y$  arvon ollessa aina kohdetta  $X$  suurempi, on kohteen  $Y$  riski aina suurempi.

### 3.1.1 Subadditiivisuus

Näkemyksistä tuleeko riskimitan täyttää subadditiivisuusvaatimus ollakseen luotettava ei ole täysin yksimielinen.

Lähteessä [9] listataan neljä syytä, miksi subadditiivisuus on luonnollinen vaatimus riskimitalle:

1. Jos valuuttakursseja kuvaava riskimitta ei täytä subadditiivisuutta, voisi riskiä pienentää esimerkiksi kahden pankkitilin avaamisella.
2. Mikäli yritys ei täyttäisi lisäpääoman vaatimuksia, olisi sillä houkutus jakautua kahteen osaan pienentääkseen valvontaviranomaiselle tuottamaansa riskilukua.
3. Konkurssiriskin vuoksi yritykseltä, jonka eri toiminnot eivät ole vastuissa toistensa veloista, vaaditaan enemmän pääomaa kuin yrityksiltä, joilla ei ole tällaisia rajoitteita.
4. Oletetaan kahden eri kohteen riskejä mitattavan erillään ja keskittämättä. Näiden yhdistetyn riskin kattona voidaan pitää riskimittojen summaa, jos ne täyttävät subadditiivisuuden ehdon.

Kou et al 2013 [15] esittelivät dataan perustuvat riskimitat. He myös osoittavat, että subadditiivisuuden sijaan riittää, että riskimitta täyttää komonotonisen subadditiivisuuden ehdon, joka on helpompi saavuttaa. Näin ollen heidän mukaansa subadditiivisuus ei olisi välttämätön ominaisuus toimivalle riskimitalle.

Subadditiivisuuden mukaan kahden fuusioituneen pankin riski on pienempi tai yhtä suuri kuin kahden erillisen pankin yhteenlaskettu riski. Yhdistymisen vaikutusta voidaan kuitenkin tarkastella kahdesta näkökulmasta. Pankin toiminnan rahoittajia (esimerkiksi tallettajat) ja pankin omistajia koskevat riskit eivät aina käyttäydy täysin samalla tavalla. Pankkien yhdistymisellä on rahoittajien näkökulmasta aina positiivinen vaikutus, kun taas pankin omistajille vaikutus on negatiivinen. Havainnollistetaan yhdistymisen vaikutuksia esimerkillä. [16]

**Esimerkki 1.** Olkoon  $X > 0$  pankin varallisuuden arvo hetkellä  $t = 1$  ja  $D$  pankin kokonaisvelan nimellisarvo. Pankin rahoittajille maksetaan takaisin joko koko velkasaldo tai pankin ollessa kyvytön maksamaan koko velkaa, maksaa se rahoittajilleen varojensa arvon  $X$ . Tällöin pankin rahoittajien saama kassavirta on

$$\min(X, D)$$

ja pankin omistajien haltuun jäävä varallisuus on

$$X - \min(X, D) = \max(0, X - D).$$

Tarkastellaan seuraavaksi kahta pankkia, jotka ovat suunnitelleet yhdistymistä. Tällöin rahoittajien saama kassavirta hetkellä  $t = 1$  on riippuvainen siitä, ovatko kaksi pankkia yhdistyneet hetkellä  $t = 0$ . Tällöin pankin rahoittajien saama kassavirta on

$$\min(X_1, D_1) + \min(X_2, D_2) \leq \min(X_1 + X_2, D_1 + D_2)$$

ja pankin omistajien haltuun jäävä varallisuus on

$$\max(0, X_1 - D_1) + \max(0, X_2 - D_2) \geq \max(0, X_1 + X_2 - D_1 - D_2).$$

Huomataan pankin tulevaisuuden varojen arvosta riippumatta yhdistyneenä niiden suorittama maksu koko rahoittajien joukolle on korkeampi kuin ne olisivat ilman pankkien yhdistymistä. Yksittäisen velkojan kannalta pankkien yhdistyminen saattaa olla huono asia. Vaikka jaettavat varat lisääntyvät, samaan aikaan myös velat ja rahoittajien määrä lisääntyy. Pankin omistajille kokonaisuudessaan jäävä varallisuus on puolestaan korkeampi silloin, jos pankit eivät ole yhdistyneet.

Pankin rahoittajien, kuten tallettajien, voidaan katsoa tarvitsevan enemmän suojelua kuin niiden omistajat. Tällöin sääntelijän on perusteltua suosia subadditiivisuuden toteuttavaa riskimittaa. [16]

Pankkien välisillä markkinoilla pankit toimivat usein toistensa rahoittajina. Tällöin yhden pankin konkurssi aiheuttaa vaikeuksia pankeille, jotka ovat lainanneet tälle rahaa. Mikäli nämäkin pankit joutuvat konkurssiin siirtyvät vaikeudet näiden rahoittajille ja järjestelmäriski toteutuu. Pankkien yhdistyminen saattaa aiheuttaa tällaisen ketjureaktion. Kuten yllä todettiin, vaikka yhdistyneiden pankkien konkurssissa velkojien koko joukon saama tulo kasvaa saattaa yksittäisen velkojan tilanne heikentyä. Jos tällainen velkoja on pankki saattaa konkurssiaalto syntyä. [16]

Pankeilla on lakisääteisiä suojia, kuten talletussuoja. Suomessa talletussuojasta vastaa Rahoitusvakausvirasto ja sen toiminta on säädetty EU:n talletussuojadirektiivillä. Talletussuoja turvaa talletuspankin asiakkaiden talletukset tilanteessa, jossa pankki on maksukyvytön tai konkurssissa. [17] Talletussuoja lisää tallettajien luottamusta pankkia kohtaan ja vähentää talletuspaon riskiä. Talletussuoja aiheuttaa kuitenkin tilanteen, jossa pankkien yhdistyminen ei välttämättä pienennäkään näiden aiheuttamia riskejä. Pankkien yhdistyessä myös näiden talletukset saattavat kasvaa. Jos yhdistynyt pankki ajautuu konkurssiin, korvaa talletussuoja pankissa olevat talletukset. Rajoituksia voi esiintyä esimerkiksi korvattavassa summassa asiakasta kohden. Talletussuojan korvaama määrä on suurempi kuin, jos vain toinen pankeista ajautuisi konkurssiin. [16]

## 3.2 Konsistentti pisteytyvyys

Riskimittojen ennusteita käytetään sekä sisäisen riskienhallintaan, että sääntelyn vaatimien pääomavaateiden laskentaan. Riskimitan valinnan lisäksi on tehtävä päätös myös käytettävästä ennustemenetelmästä. Ennustemenetelmän valintaa edeltää usein päätös menetelmästä, jota käytetään portfolion tappiojakauman arviointiin. [18]

Ennusteiden, sekä ennustemenetelmien arviointiin sekä vertailuun hyödynnetään usein pisteytyksfunktioita. Pisteytyksfunktio on funktio, jonka arvo on riippuvainen ennusteiden ja aitojen havaintojen arvoista ja erityisesti arvojen eroavaisuuksista. Useimmiten pisteytyksfunktiot ovat määritelty siten, että pienet funktion arvot kertovat onnistuneista ennusteista. Eräitä tunnettuja pisteytyksfunktioita ovat neliövirhe  $(x - y)^2$  ja absoluuttinen virhe  $|x - y|$ . [19]

Ennusteen pisteytysfunktio voidaan johtaa soveltamalla mitä tahansa pisteytysfunktioita, joka on konsistentti ennusteen jakauman ennalta määrätyn funktionaalin kanssa. Määritellään seuraavaksi pisteytysfunktio ja funktionaali perustuen lähteeseen [19].

**Määritelmä 2.** Olkoon väli  $I$  ennusteen tulosten mahdollinen arvojoukko ja  $F$  näiden havaintoarvojen todennäköisyysjakauma. Pisteytysfunktio on mikä tahansa kuvaus

$$S : I \times I \rightarrow [0, \infty) .$$

Funktionaali puolestaan on joukkoarvoinen funktio

$$F \mapsto T(F) \subseteq I .$$

Pisteytysfunktion ja funktionaalin avulla määritellään vielä konsistentti ja aidosti konsistentti pisteytysfunktio, sekä konsistentisti pisteytyvä funktionaali.

**Määritelmä 3.** Olkoon  $I \subseteq \mathbb{R}$  väli,  $\mathcal{F}$  joukko jakaumafunktioita avaruudella  $(I, \mathcal{B}(I))$ ,  $T : \mathcal{F} \rightarrow P(I)$  funktionaali ja  $S : I \times I \rightarrow \mathbb{R}$  pisteytysfunktio.

1. Pisteytysfunktio  $S$  on konsistentti funktionaalin  $T$  suhteen, jos  $\mathbb{E}_F [S(x, Y)]$  on olemassa sekä äärellinen kaikilla  $F \in \mathcal{F}$  ja  $x \in I$  ja jos pätee

$$\mathbb{E}_F [S(t, Y)] \leq \mathbb{E}_F [S(x, Y)] ,$$

kaikilla  $F$ ,  $t \in T(F)$  ja  $x \in I$ .

2. Pisteytysfunktio  $S$  on aidosti konsistentti funktionaalin  $T$  suhteen, jos se on konsistentti ja, jos yhtälöstä

$$\mathbb{E}_F [S(t, Y)] = \mathbb{E}_F [S(x, Y)] ,$$

seuraa  $x \in T(F)$ , kun  $t \in T(F)$  .

3. Funktionaali  $T$  on konsistentisti pisteytyvä (elicitable) suhteessa luokkaan  $\mathcal{F}$ , jos on olemassa pisteytysfunktio  $S$ , joka on aidosti konsistentti funktionaalin  $T$  suhteen luokassa  $\mathcal{F}$ .

Kun pisteytysfunktio on aidosti konsistentti funktionaalin suhteen, voidaan pisteytysfunktion saamien arvojen perusteella arvioida ennusteen laatua. Mitä lähempänä pisteytysfunktion arvo on lukua 0, sitä lähempänä ennusteen arvot ovat aitoja havaintoja. Pisteytysfunktioita voidaankin tällöin hyödyntää mallin ja ennusteen toteumatestauksessa, sillä toteumatestin tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia. Konsistenttia pisteytyvyyttä voidaankin pitää tärkeänä ominaisuutena ennusteen arvioinnin toteuttamiseksi. [19]

## 4 Value-at-Risk ja odotettu vaje

Markkinariskien pääomavaateen laskennan muutoksista merkittävimpiä on Value-at-Risk-riskimitan korvaaminen odotetun vajeen riskimitalla. Tässä luvussa esitellään nämä riskimitat, niiden ominaisuuksia ja eroavaisuuksia.

### 4.1 Value-at-Risk

Value-at-Risk (lyhennettynä VaR) on J.P. Morganin 1990-luvulla levittämä riskimitta, joka kuvaa kuinka epävakaita portfolion omaisuuserät ovat.[20] Alkuperäisenä tavoitteena oli kehittää yksi tunnusluku, joka koosti yrityksen jokaisen portfolion riskin päivittäin. [10] Value-at-Risk esittää suurimman mahdollisen tappion valitulla luottamusvälillä, kun haitallisimmat tapahtumat ovat jätetty pois.[21] Jos lasketaan Value-at-Risk esimerkiksi 95% luottamustasolla, on 95% todennäköisyys, että portfolio ei tuota Value-at-Risk-arvoa suurempaa tappiota.

Kolme tärkeää parametria Value-at-Risk-arvon laskemisessa ovatkin valittu ajanjakso, luottamusväli ja havaintojakso. [6] Ajanjaksolla voidaan tarkoittaa esimerkiksi portfolion pitoaikaa.

Määritellään Value-at-Risk-riskimitta.

**Määritelmä 4.** Olkoon  $L$  portfolion tappio ja haluttu luottamustaso  $\alpha$ . Tällöin  $\text{VaR}_\alpha$  on

$$\mathbb{P}(L \geq \text{VaR}_{1-\alpha}) = \alpha.$$

Jos halutaan määritellä Value-at-Risk suoraan tuotosta  $R = -L$  merkitään

$$\mathbb{P}(R \leq -\text{VaR}_{1-\alpha}) = \alpha.$$

Value-at-Risk on laajasti käytetty tunnusluku riskienhallinnassa. Sen etuja ovat yksinkertaisuus, pelkkiin tappioihin keskittyminen sekä äärimmäisten tilanteiden poissulkeminen. [10] Mahdollisuus tiivistää monen muuttujan aiheuttama riski yhteen lukuun, on varsinkin johdon näkökulmasta houkutteleva. [2]

Jotta voidaan arvioida suurinta mahdollista tappiota Value-at-Risk-riskimitalla, on kyettävä arvioimaan tuottoja, sekä näiden jakaumaa. Jakauman määrittämiseksi on arvioitava portfolion arvoon vaikuttavat satunnaismuuttujat, oletukset ennalta määrättyjen satunnaismuuttujien tuottojen jakaumalle, tapa mallintaa yhteys satunnaismuuttujien arvon ja oikean portfolion välillä. On myös päätettävä, miten määritetään luottamustaso, jossa toteutuvaa tappiota seurataan. [21]

Value-at-Risk-arvon laskemiseen on useita tapoja. Kolme yleistä menetelmää ovat Varianssi-kovarianssi tapa, historiallinen tapa sekä Monte Carlo simulointi. Nämä menetelmät esitellään seuraavissa luvuissa.

#### 4.1.1 Varianssi-kovarianssi tapa

Varianssi-kovarianssi tapa on menetelmä, jonka J.P. Morgan esitteli ensimmäisenä nykyisessä muodossaan vuonna 1996.[20] Menetelmää kutsutaan joissain lähteissä myös Normaali lineaariseksi Value-at-Risk-malliksi.[7] Varianssi-kovarianssi lähestyminen johtaa Value-at-Risk-suureen arvioimalla portfolion varianssia ja kovarianssia ennalta määrättyjen riskifaktorien tuottoihin nähden. Tämän lisäksi arvioidaan myös portfolion herkkyyttä näiden riskifaktorien muutoksiin. [21]

Menetelmässä oletetaan riskitekijöiden tuottojen noudattavan normaalijakautumaa ja niiden yhteisjakautuman olevan multinormaalisti jakautunut. Lisäksi portfolion arvonmuutosten oletetaan olevan lineaarisesti riippuvaisia kaikkien riskitekijöiden tuotoista. [6] Johdetaan seuraavaksi Value-at-Risk tällä menetelmällä, kuten lähteessä. [7]

Olkoon  $t$  tarkastelun alkuhetki ja  $h$  kuinka monen päivän aikana ansaittuja tuottoja halutaan tarkastella. Value-at-Risk-arvon laskentaan huomiodaan siis tuotot väliltä  $[t, t + h]$ . Tämä ansaittu tuotto on normaalijakautunut satunnaismuuttuja  $X_{ht}$ . Oletetaan, että  $X_{ht} \sim N(\mu_{ht}, \sigma_{ht}^2)$ , jossa  $\mu_{ht}$  on tuottojen arvioitu odotusarvo ja  $\sigma_{ht}^2$  tuottojen arvioitu varianssi.  $\text{VaR}_{ht,1-\alpha}$  on Value-at-Risk luottamustasolla  $1 - \alpha$ . Tällöin todennäköisyys

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(X_{ht} < \text{VaR}_{ht,1-\alpha}) &= \mathbb{P}\left(\frac{X_{ht} - \mu_{ht}}{\sigma_{ht}} < \frac{\text{VaR}_{ht,1-\alpha} - \mu_{ht}}{\sigma_{ht}}\right) \\ &= \mathbb{P}\left(Z < \frac{\text{VaR}_{ht,1-\alpha} - \mu_{ht}}{\sigma_{ht}}\right), \end{aligned}$$

jossa  $Z \sim N(0, 1)$ . Määritelmän 4 mukaan  $\mathbb{P}(X_{ht} < \text{VaR}_{ht,1-\alpha}) = \alpha$ , joten

$$\mathbb{P}\left(Z < \frac{\text{VaR}_{1-\alpha} - \mu_{ht}}{\sigma_{ht}}\right) = \alpha.$$

Koska  $\mathbb{P}(Z < \Phi^{-1}(\alpha)) = \alpha$ , niin

$$\frac{\text{VaR}_{ht,1-\alpha} - \mu_{ht}}{\sigma_{ht}} = \Phi^{-1}(\alpha),$$

jossa  $\Phi$  on standardinormaalijakauman kertymäfunktio. Kyseinen kertymäfunktio on symmetrinen, jolloin  $\Phi^{-1}(\alpha) = -\Phi^{-1}(1 - \alpha)$ . Symmetrisyyttä hyödyntäen saadaan lopullinen muoto

$$\text{VaR}_{1-\alpha} = \Phi^{-1}(1 - \alpha)\sigma - \mu.$$

Varianssi-kovarianssi menetelmä soveltuu ainoastaan lineaaristen tuottojen portfolioille, eikä siten sovellu esimerkiksi optioita sisältävien portfolioiden Value-at-Risk laskentaan.[7]

Oletus tuottojen normaalijakautuneisuudesta on ongelmallinen, sillä todellisudessa poikkeavat arvot ovat yleisempiä ja suurempia. Yleinen uskomus on, että tuottojen jakaumalla on normaalijakautumaa paksimmat hännät. [6]

### 4.1.2 Historiallinen tapa

Historiallisessa tavassa lasketaan tuotto portfolion nykyisten painojen ja historiallisten tuottojen avulla. Menetelmä olettaa tulevaisuuden tuottojen noudattavan samaa jakaumaa kuin menneisyydessä. [6]

Määritellään historiallinen Value-at-Risk kuten lähteessä [7].

**Määritelmä 5.**  $100\alpha\%$  historiallinen  $h$ -päivän Value-at-Risk on  $\alpha$ :s kvantiili empiirisestä  $h$ -päivän tuottojakaumasta tai P&L-jakaumasta.

Menetelmän etu on, että se on helppo toteuttaa ja ymmärtää. Näin ollen sen tuloksia ymmärtää myös pankin johto, jolla ei välttämättä ole syvällistä ymmärrystä mallinnuksesta. [21] Historiallinen menetelmä ei vaadi täsmällisiä oletuksia tuottojen yhteisjakaumasta tai näiden parametreista, toisin kuin kaksi muuta tutkielmassa esiteltävää menetelmää. Menetelmälle riittää edellä mainittu oletus siitä, että tulevaisuuden ja menneisyyden tuottojen jakaumat ovat samat. Lisäksi historiallinen menetelmä on kyvykäs kuvaamaan riskifaktoreita, vaikka portfolion arvo ei olisi monotoninen. [21] Value-at-Risk-arvo voidaan laskea myös epälineaarille instrumenteille, kuten optioille. [7]

Menetelmällä on myös heikkoutensa. Otoksen pituudella on suuri vaikutus menetelmän toimivuuteen. Jos data on hyvin pitkältä ajalta, jakaumasta tulee yksityiskohtaisempi, mutta samaan aikaan sen herkkyys markkinaolosuhteiden muutoksiin pienenee. Haluttu luottamustaso voi olla haastavaa saavuttaa, sillä historialliset aikasarjat voivat olla verrattain lyhyitä. [21] Edes neljän vuoden päivittäinen data ei takaa tarpeeksi tarkkoja tuloksia, ilman mallin laajentamista. Tästä johtuen historiallinen Value-at-Risk perustuu usein yhden päivän Value-at-Risk-riskilukuun, joka skaalataan useampaa päivää edustavaksi arvioksi. Soveltuvan skaalausmenetelmän valitseminenkaan ei kuitenkaan ole yksinkertaista. [7]

Portfolion rakenne on saattanut historiassa muuttua. Koska tarkoituksena on arvioida nykyisen portfolion tuottoja, ei historiallista dataa voi käyttää sellaisenaan. Historialliset tuotot onkin simuloitava voimassa olevalla portfoliorakenteella. [7]

Viimeinen heikkous on, että menetelmä olettaa joko volatilitietin tai korrelaation pysyvän samana ajan kuluessa. Tämä johtuu siitä, että menetelmä olettaa jakauman olevan stationaarinen. [21] Usein pitkältä aikaväliltä koottu data sisältää lyhyempiä ajanjaksoja, joiden välillä riskifaktoreiden käyttäytyminen vaihtelee. Tällainen ajanjakso voi syntyä esimerkiksi pörssiromahduksen seurauksena. Mikäli kaikki data huomioidaan yhtäläisesti, ei sen pohjalta tehty arvio heijasta vallitsevien markkinaolosuhteiden mukaista tilannetta. [7]

Vaikka historiallisella menetelmällä on mahdollista mallintaa Value-at-Risk myös epälineaarille portfolioille, on se monimutkaisempaa. Esitellään sen vuoksi yleiset vaiheet lineaarisen portfolion historialliseen Value-at-Risk-laskentaan ja jätetään epälineaariset portfoliot käsittelemättä. Historiallisen Value-at-Riskin laskentaa optioista muodostetulle portfolioille käsitellään muun muassa lähteessä [7]

Historiallinen Value-at-Risk laskenta vaatii historiallista dataa riittävän pitkältä ajalta. Tämän pohjalta simuloidaan portfolion tuottoja, jotka muunnetaan vallitsevien markkinaolosuhteiden mukaisiksi. Muokattuihin tuottoihin sovitetaan empiirinen jakauma ja lopulta jakaumasta lasketaan Value-at-Risk halutulla luottamustalossa ja riskihorisontilla. [7]

### 4.1.3 Monte Carlo simulointi

Monte Carlo simuloinnin edellytyksenä on tuottojen reunajakaumien, sekä eri tuottojen välisen riippuvuuden mallintaminen. Vertailuerille arvioidaan yhteysjakauma, jonka avulla portfolion uusi arvo määritellään generoimalla jakaumasta satunnaisvektori. Kun generointi suoritetaan useasti, simuloidaan tuottojakauma koko portfoliolle. [21] Vektori koostuu pseudosatunnaisluvusta, jotka ovat algoritmilla luotuja mahdollisimman satunnaisia lukuja. Tiivistetysti Monte Carlo simulaatiota suunniteltaessa kaksi merkittävää valintaa ovat pseudosatunnaislukujen tuottamiseen käytettävä algoritmi ja satunnaislukujen riippuvuuksia kuvaava malli. [7]

Monte Carlo Value-at-Risk määritellään kuten historiallinen Value-at-Risk 5.

Kahteen edellä esiteltyyn tapaan verrattuna, Monte Carlo simulointi on edistynein menetelmä Value-at-Risk laskentaan. [6] Menetelmän tehokkuuteen voivat vaikuttaa reunajakaumien todenmukaisuus yksittäiselle omaisuuserälle, omaisuuserien riippuvuuden mallinnustapa, satunnaislukujen generointiin käytetty algoritmi sekä tuotettujen simulaatioiden lukumäärä. [21] Monte Carlo pohjaisten menetelmien tulokset Value-at-Risk-riskimitan tuottamisessa voivatkin vaihdella hyvin paljon keskenään. [6]

Tuottojen jakauman voidaan olettaa noudattavan moniulotteisen normaalijakauman lisäksi myös muita jakaumia, kuten Studentin t-jakaumaa. Moniulotteinen normaalijakauma on suosittu, sillä parametrien arviointi ja Monte Carlo simulaatioiden tuottaminen on sekä nopeampaa, että helpompaa kuin muita jakaumia käyttäessä. Moniulotteinen normaalijakauma Monte Carlo simuloinnissa altistaa sen vastaaville rajoitteille, joita varianssi-kovarianssi menetelmällä on. Historialliseen menetelmään verrattuna Monte Carlo simulaatio vaatii useampia laskentoja, sillä simulaatioiden lisäksi on estimoitava jakauman parametrit. [21] Toisaalta mahdollisuus simuloida estimoitujen parametrien pohjalta useita skenaarioita on suurimpia menetelmän etuja. Monte Carlo simuloinnin voidaan sanoa hyödyntävän historiallista dataa historiallista menetelmää kehittyneemmin. [7]

Jakauman lisäksi Monte Carlo simulaatiota tehdessä on valittava myös pseudosatunnaislukujen generointimenetelmä.

Kuten historiallinen menetelmä, myös Monte Carlo simulointi voi ratkaista riippuvuuksien ei-monotonisuudesta johtuvia ongelmia, jonka lisäksi sitä voidaan hyödyntää epälineaaristen tuottojen tapauksissa. Lisäksi voidaan laskea Value-at-Risk millä tahansa luottamusvälillä. Se vaatii vain useampia simulaatioita. [6] Monte Carlo simulointi voi onnistua monimutkaisten riippuvuussuhteiden ja muiden kuin normaalijakautuneiden reunajakaumien simuloinnissa. Tämä vaatii jakaumien huolellista ja yksityiskohtaista määrittelyä. Historiallisen tavan eduksi mainittiin edellä sen helppo toteutus ja ymmärrettävyys. Monte Carlo simuloinnin tulokset riippuvat useista tekijöistä, jonka vuoksi sen tuloksien raportointi ymmärrettävästi sattaa olla haastavaa. [21] Monte Carlo simulointi ei vaadi taustalleen laajaa historiallista dataa. Tämä on eduksi esimerkiksi silloin kun halutaan mallin heijastavan vallitsevia markkinaolosuhteita. [7]

## 4.2 Value-at-Risk ja heikkoudet

Edellä esiteltyjen laskentamenetelmille tyypillisten heikkouksien lisäksi, Value-at-Risk-riskimitalla on myös ongelmia myös riskimitana. Sen käyttöä onkin laajasti kritisoitu.

Jokainen menetelmä vaatii tuottojen jakauman arviointia ja sen epäonnistuessa saattaa tuloksena olla hyvin vääristynyt Value-at-Risk-arvo. [6]

Laskennan tuloksena saatu Value-at-Risk-arvo ei kerro mitään jakauman hänestä. Kaksi portfoliota voivat samasta Value-at-Risk-arvosta huolimatta olla hyvin erilaisia luottamustason ulkopuoliselta häntäjakaumaltaan.[10] Value-at-Risk ilmaisee suurimman mahdollisimman tappion, kun kaikkein tuhoisimpia ei huomioida. Tällöin tuhoisimpien, mutta kuitenkin mahdollisten, tappioiden suuruus jää tuntemattomaksi. [21]

Jokainen tapa, jolla Value-at-Risk voidaan määrittää hyödyntää dataa menneisyydestä. Historia ei kuitenkaan aina toista itseään. Poikkeuksellisen vakaa ajanjakso saattaa aiheuttaa liian matalan Value-at-Risk-arvon ja vastaavasti poikkeuksellisen epävakaa jakso liian korkean Value-at-Risk-arvon.[6] Vuosien 2003 ja 2006 välillä markkinoihin vaikuttavien muuttujien volatilitetti oli matala. Koska Value-at-Risk-arvon laskemiseen käytettiin historiallista dataa, tämän jakson Value-at-Risk-luvutkin olivat sen hetken markkinaolosuhteiden mukaiset. Pankkikriisin ollessa aluillaan, Value-at-Risk-arvon datan volatilitetti oli yhä liian pieni. Tämän seurauksena Value-at-Risk-arvon perusteella lasketut pääomavaatimuksetkin olivat liian matalat kriisin alkaessa. [2].

Usein Value-at-Risk laskentaan käytetään lyhyttä ajanjaksoa, kuten päivää tai viikkoja. On osoitettu, että Value-at-Risk-estimaatti heikkenee siirryttäessä lyhyemmistä jaksoista vuosittaisiin estimaatteihin.[6]

Value-at-Risk tuottaa suurimman tappion valitulla todennäköisyydellä. Tämä tekee siitä soveltumattoman yhtiöille, jotka vertailevat sijoituksia hyvin erilaisilla skaaloilla ja tuotoilla. Value-at-Risk kuvaa vain pienen osan riskistä, joka omaisuuserää rasittaa.

Jos investointipäätöksiä tehdään Value-at-Risk-arvon perusteella, se saattaa altistaa ylimääräiselle riskille. Altistuminen voi tapahtua, vaikka Value-at-Risk-arvo olisi arvioitu täsmällisesti. On huomattu Value-at-Risk-arvoa riskimitana käyttävien päälliköiden tekevän riskillisempiä investointeja kuin muita riskimittoja käyttävät päälliköt. [22]

Value-at-Risk ei ole koherentti riskimita, mutta se täyttää kuitenkin osan vaadittavista aksioomista. Value-at-Risk on käänteisesti invariantti, positiivisesti homogeeninen ja monotoninen riskimita. Subadditiivisuutta se ei kuitenkaan aina noudata.[10] Tämä voi aiheuttaa ongelmia esimerkiksi silloin, jos halutaan yhdistää useamman portfolion riskilukuja.

## 4.3 Odotettu vaje

Kuten edeltävässä luvussa todettiin Value-at-Risk kertoo luottamustason sisällä tapahtuvan suurimman tappion. Se ei kuitenkaan kerro sitä, minkä suuruisia luottamustason ulkopuoliset tappiot ovat. Odotettu luottamustason ulkopuolinen tappio voidaan määritellä ehdollisen odotusarvon kautta. Tätä ehdollista odotusarvoa kut-

sutaan odotetuksi vajeeksi (Expected shortfall, ES). Odotetusta vajeesta voidaan käyttää myös nimeä ehdollinen Value-at-Risk (conditional Value-at-Risk, cVaR).[10]

Määritellään odotetun vajeen riskimitta.

**Määritelmä 6.** Olkoon  $L$  portfolion arvo ja  $\text{VaR}_\alpha$  portfoliolle luottamustasolla  $\alpha$  laskettu Value-at-Risk-arvo. Odotettu vaje ES on

$$\text{ES} = \mathbb{E}[L|L \geq \text{VaR}_\alpha].$$

Kuvataan odotettua tuottoa tiheysfunktion  $f(x)$  avulla ja olkoon Value-at-Risk mitattu luottamustasolla  $\alpha$ . Tällöin odotettu vaje ES on

$$\text{ES} = \frac{1}{1-\alpha} \int_{-\infty}^{\text{VaR}} x f(x) dx.$$

Odotettu vaje voidaan määritellä myös seuraavasti

$$\text{ES}_\alpha = \frac{1}{1-\alpha} \int_\alpha^1 \text{VaR}_q dq.$$

Odotetun vajeen laskentaan voi hyödyntää samoja menetelmiä kuin Value-at-Riskin laskentaan. Odotettu vaje ja Value-at-Risk lasketaan usein samanaikaisesti sekä samalla mallilla, näiden ollessa vahvasti yhteydessä toisiinsa. [10]

#### 4.4 Riskimittojen eroavaisuuksia

Toisin kuin Value-at-Risk, odotettu vaje täyttää subadditiivisuuden ehdon. Odotetun vajeen subadditiivisuus todistetaan muun muassa lähteessä [23]. Se täyttää myös kolme muuta edellä esiteltyä aksioomaa ja onkin siten koherentti riskimitta.

Value-at-Risk ja odotettu vaje toteuttavat molemmat komonotonisen subadditiivisuuden, jota on ehdotettu korvaamaan subadditiivisuusehto. [15]

Odotetun vajeen estimaatti ei ole konsistentisti pisteytyvä, kuten Value-at-Risk. Tämän puutteen seurauksena sen käyttö riskin ennustamiseen saattaa olla haastavaa. [19] Haasteet kohdistuvat etenkin mallin toteumatestaukseen. Kuten edellä mainittiin, on toteumatestauksen tulosten vertailukelpoisuuden kannalta konsistentti pisteytyvyys tärkeä ominaisuus. Toteumatestauksen haastavuutta aiheuttaa myös odotetun vajeen keskittyminen ainoastaan jakauman häntään.

Odotetun vajeen toteumatestaus ei ole silti mahdotonta. Odotettu vaje ja Value-at-Risk-mitat ovat yhdistettyinä konsistentisti pisteytyviä. Tämä vaatii suppeita oletuksia, jotka ovat usein riskienhallinnallisiin tarkoituksiin soveltaessa voimassa. Yhdistetty konsistentti pisteytyvyys, sekä odotetun vajeen ja Value-at-Risk riskimittojen yhdistetty konsistentin pisteytyvyyden todistus esitellään lähteessä. [24]

Sekä Value-at-Risk että odotettu vaje -riskimittojen heikkous on tappiojakaumat, joiden häntä on paksu. Varsinkin Value-at-Riskin kohdalla tämä korostuu. Kaksi häntäjakaumaltaan hyvin erilaista häntäjakaumaa voivat saada tulokseksi saman riskiluvun.

Odotetun vajeen tuottama riskiluku on hyvin herkkä suurille tappioille, vaikka ne olisivat hyvin harvinaisia. Value-at-Risk-mittaan yksittäisillä poikkeavilla arvoilla ei ole juuri vaikutusta. Ero suurten lukujen vaikutuksessa on saman kaltainen kuin mediaanilla ja keskiarvolla. [10]

Odotetun vajeen odotusarvo saattaa sisältää tilanteita, joissa pankki ajautuu konkurssiin, mutta myös sellaisia tilanteita, joissa pankin haltuun jää varallisuutta. Tämän voidaan kokea sekoittavan pankin rahoittajien ja omistajien etua. Tappiojakaumaa ei tule sekoittaa konkurssin todennäköisyyteen. Omistajien ja rahoittajien edun eriarvoisuus saattaa toteutua myös tilanteessa, jossa odotettu vaje hyväksyy konkurssin aiheuttavan position ja hylätä toisen position, vaikka pankin olisi mahdollista selviytyä tappiosta. [25]

Eri tavoin määriteltyjen mallien vaikutusta Value-at-Risk ja odotettu vaje -riskilukuihin tutkiessa havaittiin odotettu vajeen olevan alttiimpi mallin määrittelystä aiheutuvalle vaihtelulle. Tämä voi johtaa sääntelyarbitraasiin. Minimipääomavaateita mallintaessa sääntelyarbitraasi voi olla esimerkiksi mallin parametrien valitseminen niin, että pääomavaade on mahdollisimman pieni. [13]

Tämä lisäksi odotetun vajeen -mallien parametrit ovat myös alttiimpia väärin määrittelylle kuin Value-at-Risk-mallien parametrit. [13] Tämä saattaa johtaa riskien aliarviointiin ja liian vähäiseen varautumiseen.

## 5 Mallin tuloksien varmentaminen

Tässä luvussa esitellään kaksi keinoa varmentaa mallin toimivuutta riskin mittaamisessa. Matemaattisten mallien tuottamia tuloksia ei voida automaattisesti pitää uskottavina ja todellisuutta kuvastavina. Yksi tapa testata mallien tuloksia on toteumatestausta, joka vertaa mallin ennustamia tuloksia aitoihin havaintoihin.

Toinen ongelma varsinkin markkinaolosuhteista riippuvien ilmiöiden mallintamisessa on se, että markkinaolosuhteet eivät pysy ajan kuluessa samana. Erityisesti nykyhetkeä ja historiaa heikommalla olosuhteet ovat riskien kannalta merkittäviä. Heikkoihin markkinaolosuhteisiin varaudutaan usein stressitestaamalla.

### 5.1 Value-at-Risk-riskimitan toteumatestausta

Eräs haaste Value-at-Risk-luvun laskemisessa on luottamustason valinta. Toteumatestaustausta avulla voidaan arvioida mallin tuloksia havaintoihin perustuvaan dataan verraten. Toteumatestaustausta suorittaminen riippuu siitä halutaanko testata ainoastaan Value-at-Risk-estimaattia, odotetua vajetta vai koko tuottojakaumaa.[21]

Value-at-Risk-estimaatin tapauksessa testausta on melko yksinkertaista. Mallin tuottamista tuotoista tulee testata valitun luottamustason ylittämisen todennäköisyys, sekä riippumattomuus muiden päivien toteumista.

Arvioidaan jokaista aikaväliä Bernoullin kokeena. Joko aikavälin tuotto sisältyy luottamustasovälillä oleviin tuottoihin, tai jää sen ulkopuolelle. Olkoon hetkellä  $i$  ansaitun tuoton  $R_i$  jääminen luottamustason ulkopuolelle tämän kokeen onnistuminen. Olkoon onnistumisen todennäköisyys  $\alpha$  ja Bernoullin kokeen lopputulos  $I_i$ . Koe voidaan esittää muodossa

$$I_i = \begin{cases} 1, & \text{jos } R_i < -\text{VaR}_{1-\alpha} \\ 0, & \text{jos } R_i \geq -\text{VaR}_{1-\alpha}. \end{cases}$$

Koska Value-at-Risk on tässä yhteydessä määritetty tuottojen kautta, se saa negatiivisia arvoja. Toteumatestaustausta nollahypoteesina on, että tarkasteltavien hetkien tuottojen jääminen luottamustasovälin ulkopuolelle ovat toisistaan riippumattomia ja Bernoulli-jakautuneita

$$H_0 : I_i \sim \text{i.i.d Bernoulli}(\alpha).$$

Olkoon koko otos  $T$ . Tällöin todennäköisyys, että otoksessa  $T$  on  $T_l$  kappaletta luottamustasovälin ulkopuolelle jääviä tuottoja on

$$\mathbb{P}(T_l) = \binom{T}{T_l} \alpha^{T_l} (1 - \alpha)^{T - T_l}.$$

Merkitään ulkopuolelle jäävien tuottojen ja koko otoksen suhdetta  $\hat{\pi} = T_l/T$ . Malli on tarkka, kun todennäköisyys  $\alpha = \hat{\pi}$ . Tätä nollahypoteesia voidaan testata uskot-

tavuustestisuureella

$$\begin{aligned} \text{LR}_{ua} &= -2\ln \left( \frac{L(\alpha)}{L(\hat{\pi})} \right) \\ &= -2\ln \left( \frac{\alpha^{T_i}(1-\alpha)^{T-T_i}}{\hat{\pi}^{T_i}(1-\hat{\pi})^{T-T_i}} \right), \end{aligned}$$

joka lähestyy asymptoottisesti  $\chi^2$ -jakaumaa. Testin avulla selviää ennustaako Value-at-Risk-estimaatti oikean kappalemäärän luottamustason ulkopuolisia tuottoja. Se ei kuitenkaan ota vielä kantaa siihen ovatko luottamustason ulkopuolelle jäävät toteutuneet tuotot toisistaan riippumattomia vai esiintyvätkö ne ryppäinä. [21].

Ryppäinä esiintyvät luottamustason ulkopuolelle jäävät havainnot merkitsevät, että päivänä  $l + 1$  ulkopuolelle jääminen on todennäköisempää, jos päivänä  $l$  on jääty luottamustason ulkopuolelle. Mallin tuottamien arvojen riippumattomuutta voidaan testata vertaamalla niitä Markovin ketjuun, jossa on kaksi jo aiemmasta toteumatestistä tuttua tilaa. Tuotolle mallinnettu arvo, on joko luottamustason sisällä tai ulkopuolella. Markovin ketjua noudattavan satunnaismuuttujan arvo on riippuvainen ainoastaan edeltävän ajanhetken satunnaismuuttujan arvosta.

Tilasta  $i$  tilaan  $j$  siirtymien todennäköisyyttä  $\pi_{ij}$  voidaan kuvata matriisina.

$$\Pi = \begin{pmatrix} 1 - \pi_{01} & \pi_{01} \\ 1 - \pi_{11} & \pi_{11} \end{pmatrix}$$

Matriisin todennäköisyyksien mukainen Markovin ketjun uskottavuusfunktio on

$$L(\Pi) = (1 - \pi_{01})^{T_{00}} \pi_{01}^{T_{01}} (1 - \pi_{11})^{T_{10}} \pi_{11}^{T_{11}},$$

jossa  $T_{ij}$  on sellaisten havaintojen lukumäärä, jossa siirrytään tilasta  $i$  tilaan  $j$ .

Ensimmäisen asteen derivaattojen nollakohtien avulla saadaan todennäköisyyksille suurimman uskottavuuden estimaatit

$$\begin{aligned} \hat{\pi}_{01} &= \frac{T_{01}}{T_{00} + T_{01}} \quad \text{ja} \\ \hat{\pi}_{11} &= \frac{T_{11}}{T_{10} + T_{11}} \end{aligned}$$

Jos tuotto on riippumaton edeltävän hetken tuotosta, tulisi yhtäsuuruuden  $\pi_{01} = \pi_{11}$  päteä. Tällöin nollahypoteesin mukainen uskottavuuskerroin on

$$L(\hat{\Pi}) = (1 - \hat{\pi})^{T_{00} + T_{10}} \hat{\pi}^{T_{01} + T_{11}},$$

jossa  $\hat{\pi} = \hat{\pi}_{01} = \hat{\pi}_{11}$ . Uskottavuuskerroin riippumattomille poikkeuksille on

$$\text{LR}_{\text{ind.}} = -2\ln \left( \frac{L(\hat{\pi})}{L(\hat{\Pi})} \right)$$

joka noudattaa asympotoottisesti  $\chi^2(2)$ -jakaumaa.  $L(\hat{\pi})$  on todennäköisyyden uskottavuusfunktio. Mallin oikeellisuuden arvioimiseksi uskottavuuskertoimet tulee muuntaa p-arvoiksi. Jos otos on suuri, tämä voidaan laskea suoraan  $\chi^2$ -jakauman kertymäfunktiosta. Pienillä otoksilla p-arvo on kannattavampaa laskea simuloimalla, sillä pienessä otoksessa voi olla vähän etenkin luottamustason ylittäviä havaintoja. [26]

## 5.2 Odotetun vajeen toteumatestaus

Koska odotetu vaje ei ole konsistentisti pisteytyvä, on sen laskentaan käytettävien mallien toteumatestaus monimutkaisempaa kuin Value-at-Risk-mallien. Siitä huolimatta menetelmiä on olemassa useita. Tässä luvussa esitellään niistä muutama.

Lähteessä [27] käsitellään kolme toteumatestaustapaa odotetulle vajeelle. Nämä menetelmät ovat ei-parametrisiä, riippumattomia jakaumasta eivätkä ole asympotoottista konvergenssia. Esitellään näistä kaksi tarkemmin seuraavissa aliluvuissa.

### 5.2.1 Value-at-Risk-riskimitan toteumatestauksen hyödyntäminen

Ensimmäisessä menetelmässä toteumatestataan ensin Value-at-Risk ja hyödynnetään tätä odotetun vajeen testaamisessa.

Olkoon  $X_t$  pankin ansaitsema tuotto päivänä  $t = 1, \dots, T$ .  $X_t$  noudattaa tuntematonta todennäköisyysjakaumaa  $F_t$ , jonka mallinnettu todennäköisyysjakauma on  $P_t$ . Satunnaismuuttujat  $\vec{X} = \{X_t\}$  ovat toisistaan riippumattomia, mutta eivät välttämättä samoin jakautuneita.

Odotetun vajeen  $ES_{\alpha,t}$  määritelmästä 6 voidaan johtaa

$$\mathbb{E} \left[ \frac{X_t}{ES_{\alpha,t}} + 1 \mid X_t + VaR_{\alpha,t} < 0 \right] = 0.$$

Jos  $VaR_{\alpha,t}$  on jo toteumatestattu, voidaan havaittujen poikkeamien suuruutta testata erikseen odotetun vajeen mallin tuottamia ennusteita vastaan. Olkoon  $\mathbb{I}_t$  indikaattorifunktio, joka on määritelty seuraavasti

$$\mathbb{I}_t = \begin{cases} 1, & \text{kun } X_t + VaR_{\alpha,t} < 0 \\ 0, & \text{kun } X_t + VaR_{\alpha,t} \geq 0. \end{cases}$$

Indikaattorifunktio saa arvon 1, kun tuotto on luottamustason sisällä ja muuten arvon 0. Määritellään tämän avulla testisuure

$$Z_1(\vec{X}) = \frac{\sum_{t=1}^T \frac{X_t \mathbb{I}_t}{ES_{\alpha,t}}}{N_T} + 1,$$

kun  $N_T = \sum_{t=1}^T \mathbb{I}_t > 0$ . Valitaan testille nollahypoteesi

$$H_0 : P_t^{[\alpha]} = F_t^{[\alpha]}, \forall t,$$

jossa  $P_t^{[\alpha]}(x) = \min(1, P_t(x)/\alpha)$  on häntäjakauma muuttujalle  $x$ . Muuttuja  $x$  on pienempi kuin  $-\text{VaR}_{\alpha,t}$ . Vastahypoteesi on

$$\begin{aligned} H_1 : \text{ES}_{\alpha,t}^F &\geq \text{ES}_{\alpha,t}, \text{ kaikilla } t, \\ \text{ES}_{\alpha,t}^F &> \text{ES}_{\alpha,t}, \text{ jollain } t \text{ ja} \\ \text{VaR}_{\alpha,t}^F &= \text{VaR}_{\alpha,t}, \text{ kaikilla } t, \end{aligned}$$

jossa  $\text{ES}_{\alpha,t}^F$  on odotetun vajeen toteuma, kun  $X \sim F$ .

Ennustettu  $\text{VaR}_\alpha$  pätee myös vastahypoteesin ollessa voimassa. Testi perustuu Value-at-Risk-mitan toteumatestaukseen, jonka vuoksi tämä on oleellinen huomio. Valitut hypoteesit toteuttavat seuraavan lauseen.

**Lause 1.** *Olkoon toteumatestin hypoteesit*

$$\begin{aligned} H_0 : P_t^{[\alpha]} &= F_t^{[\alpha]}, \forall t, \\ H_1 : \text{ES}_{\alpha,t}^F &\geq \text{ES}_{\alpha,t}, \forall t, \\ \text{ES}_{\alpha,t}^F &> \text{ES}_{\alpha,t}, \exists t \text{ ja} \\ \text{VaR}_{\alpha,t}^F &= \text{VaR}_{\alpha,t}, \forall t. \end{aligned}$$

*Nollahypoteesin  $H_0$  ollessa voimassa toteutuu odotusarvo*

$$\mathbb{E}_{H_0} [Z_1 | N_T > 0] = 0.$$

*Kun puolestaan vastahypoteesi  $H_1$  on voimassa, toteutuu odotusarvo*

$$\mathbb{E}_{H_1} [Z_1 | N_T > 0] < 0.$$

*Lauseen todistus esitetään lähteessä [27].*

Edellä esitellyn lauseen nojalla oletetaan  $Z_1(\vec{X})$  arvon olevan nolla, kun nollahypoteesi on voimassa. Muuttujan  $Z_1(\vec{X})$  negatiiviset arvot viestivät, että mallin tuottamat ennusteet eivät vastaa havaittuja arvoja.

### 5.2.2 Odotetun vajeen toteumatestaus suoraan

Toinen menetelmä testaa odotetua vajetta suoraan. Menetelmän testi seuraa suoraan odotusarvosta

$$\text{ES}_{\alpha,t} = -\mathbb{E} \left[ \frac{X_t I_t}{\alpha} \right].$$

Kyseiseen odotusarvoon perustuen määritellään

$$Z_2(\vec{X}) = \sum_{t=1}^T \frac{X_t I_t}{T \alpha \text{ES}_{\alpha,t}} + 1.$$

Testiin soveltuvat nollahypoteesi ja vastahypoteesi ovat

$$\begin{aligned} H_0 : P_t^{[\alpha]} &= F_t^{[\alpha]}, \quad \forall t \\ H_1 : \text{ES}_{\alpha,t}^F &. \end{aligned}$$

Näiden valittujen hypoteesien ollessa voimassa, toteutuu seuraava lause.

**Lause 2.** *Olkoon toteumatestin hypoteesit*

$$\begin{aligned} H_0 &: P_t^{[\alpha]} = F_t^{[\alpha]}, \quad \forall t \\ H_1 &: \text{ES}_{\alpha,t}^F. \end{aligned}$$

*Nollahypoteesin  $H_0$  ollessa voimassa toteutuu odotusarvo*

$$\mathbb{E}_{H_0} [Z_2] = 0.$$

*Kun puolestaan vastahypoteesi  $H_1$  on voimassa, toteutuu odotusarvo*

$$\mathbb{E}_{H_1} [Z_2] < 0.$$

*Lauseen todistus esitetään lähteessä [27].*

Kuten ensimmäisen toteumatestausmenetelmän kohdalla, negatiiviset arvot kertovat heikosta testituloksesta.

### 5.2.3 Muita toteumatestausmenetelmiä

Esitellään lopuksi lyhyesti muutama toteumatestausmenetelmä, joita voidaan käyttää odotetun vajeen toteumatestaamiseen joko suorasti tai epäsuorasti.

Kolmannessa lähteen [27] esittelemässä toteumatestissä tarkastellaan mallin tuotaman havaintojen jakauman häntiä. Onnistuneen mallin havaintojen pitäisi olla toisistaan riippumattomia ja noudattaa tasajakaumaa  $U(0, 1)$ . Menetelmä ei ole yhtä luonnollinen kuin kaksi aiemmin esiteltyä. Tästä huolimatta se on kuitenkin yleistettävissä

Lähteessä [28] odotetun vajeen toteumatestaukseen ehdotetaan Diebold-Mariano testiä, joka hyödyntää odotetun vajeen ja Value-at-Risk-mitan yhdistettyä konsistenttia pisteytyvyyttä. Diebold-Mariano testi vertailee kahta ennustetta ja näiden ennustevirheitä. Testi perustuu testisuureeseen, joka noudattaa asympotoottisesti normaalijakaumaa. [29]

Moniulotteisia toteumatestejä esitellään lähteessä [30]. Näitä ehdotetaan epäsuoraksi tavaksi toteumatestata odotetua vajetta ja nämäkin perustuvat Value-at-Risk-mallien toteumatestaukseen. Moniulotteinen testi mahdollistaa, että odotetun vajeen mallin arviointiin voidaan käyttää Value-at-Risk-mallin arvoja eri luottamustasoilta. Testejä luonnehditaan helpoiksi ymmärtää, selittää sekä toteuttaa. Moniulotteisen toteumatestin osoitetaan olevan perinteistä binomijakaumaan perustuvaa Value-at-Risk-mallin toteumatestiä parempi. Se erottelee paremmin hyvät ja huonot mallit etenkin, kun testataan havaintoja pidemmältä aikaväliltä.

Kumulatiivisiin poikkeamiin perustuvia toteumatestejä käsitellään lähteessä [31]. Testejä esitellään useampia, mutta kaikkien lähtökohta on samankaltainen kuin edellä esitellyssä Value-at-Risk-mallin toteumatestissä. Luottamustason ulkopuolelle jäävät havainnot ovat onnistuneen mallin tapauksessa satunnaisia. Kumulatiivisella poikkeamalla tarkoitetaan tämän testin yhteydessä integraalia yli luottamustason ylittävien havaintojen.

### 5.3 Stressitestausta

Stressitestaamalla selvitetään äärimmäisen vakavan ja harvinaisen, mutta kuitenkin mahdollisen skenaarion vaikutusta portfolioon ja sen arvoon. [10] Esimerkiksi EKP:n vuonna 2023 teettämässä stressitesteissä skenaariona oli korkean inflaation ja matalan kasvun, sekä korkeiden korkojen kausi.[32] Stressitesti on yksinkertainen ja läpinäkyvä, mutta skenaarioiden luominen saattaa olla lähempänä taidetta kuin tiedettä. [10]

Stressitestaamiseen ei ole yhtä maailmanlaajuisesti hyväksyttyä menetelmää. Eräs suosittu menetelmä pohjautuu regressioanalyysiin.

Ensimmäisessä vaiheessa määritellään skenaario. Skenaario voi perustua historiaan tai olla testausta varten kehitetty.[10] Stressitestausta varten halutaan kohdistaa skenaario muutamaan merkittävään riskifaktoriin tai rahoitusvälineeseen. Jos skenaarion määrittävät tekijät ovat vahvasti korreloituneita, se häiritsee mallin parametrien arviointia. Tätä kutsutaan multikollineaarisuudeksi. [10]

Seuraavaksi on määriteltävä, miten valittu skenaario vaikuttaa muihin rahoitusvälineisiin. Arvio voidaan muodostaa monimuuttujaregressiolla. Ensin regressoidaan jokaisen rahoitusvälineen tuotot skenaarion tuottojen kanssa. Regressointiin käytetään viimeaikaisia tuottoja, vaikka skenaarion tuotot olisivatkin historiallisia. Tämä johtuu käytännöllisistä syistä. Esimerkiksi euroa ja joitain nykyajan suurimpia yrityksiä ei ollut muutamia vuosikymmeniä sitten. Stressitestillä halutaan varautua tulevaisuuteen ja useimmiten nykyhetken tiedot ovat tähän parempia kuin menneet.[10]

Kun vallitseva skenaario ja tämän vaikutukset instrumenttien tuottoihin on määriteltä on viimeisenä vaiheena optioiden ja muiden johdannaisten hinnoittelu. [10]

Esitellään esimerkki stressitestin toiminnasta.

**Esimerkki 2.** [10] Olkoon skenaariona raakaöljyn hinnan nousu 20% ja S&P 500 indeksin lasku 10%. Portfoliossa on pelkästään 100 dollarin edestä öljy-yhtiön X osakkeita. Muodostetaan regressio, jotta voidaan nähdä vaikutus portfolion arvoon

$$R_X = \beta_1 + \beta_2 R_{l_jy} + \beta_3 R_{SPX} + \epsilon.$$

Käytetään muodostamiseen päivittäisiä tuottoja viimeisen vuoden ajalta. Oletetaan, että  $R_{l_jy}$  ja  $R_{SPX}$  ovat korreloimattomia, jolloin multikollineaarisuus ei ole ongelma. Kun lasketaan betojen arvot pienimmän neliösumman menetelmällä, saadaan öljy-yhtiön tuotoksi

$$R_X = 0.000 + 0.0899 R_{l_jy} + 0.7727 R_{SPX} + \epsilon.$$

Näin ollen odotettu tuotto öljy-yhtiölle annetussa stressiskenaariossa on

$$\begin{aligned} \mathbb{E}[R_X | \text{skenaario}] &= 0.000 + 0.0899 \cdot 0.20 + 0.7727 \cdot (-0.10) \\ &= 0.0593. \end{aligned}$$

Alkuperäisen portfolion arvon ollessa 100 dollaria, skenaarion odotettu tappio on 5.93 dollaria.

Esimerkissäkin käytetty pienimmän neliösumman menetelmä olettaa lineaarisen riippuvuuden selitettävän ja selittävän muuttujan välillä. [10]

### 5.3.1 Value-at-Risk-riskimitan toteumatestausta

Vuonna 1996 muutettu Basel I vaati ensimmäisen kerran pääomaa markkinariskien varalle. Tällöin pääomavaatimus määriteltiin 10 päivän 99% Value-at-Risk-arvolla.[2]

Ongelmien seurauksena Baselin komitea esitteli stressatun Value-at-Riskin (stressed Value-at-Risk, sVaR) [2]. Baselin vaatima stressattu Value-at-Risk lasketaan datalla, joka sisältää 12 kuukauden taloudellisesti poikkeuksellisen jakson. Sen tarkoituksena on kuvata, kuinka paljon stressattu data kasvattaa riskiä. [33]

Basel II.5 vaatii pankkeja laskemaan normaalin Value-at-Risk-arvon ja stressatun Value-at-Risk-arvon. Näiden avulla lasketaan pääomavaatimus

$$\max(\text{VaR}_{t-1}, m_c \cdot \bar{\text{VaR}}) + \max(\text{sVaR}_{t-1}, m_s \cdot \bar{\text{sVaR}}),$$

jossa  $\text{VaR}_{t-1}$  ja  $\text{sVaR}_{t-1}$  ovat Value-at-Risk ja stressattu Value-at-Risk edellisenä päivänä laskettuna.  $\bar{\text{VaR}}$  ja  $\bar{\text{sVaR}}$  ovat viimeisen 60 päivän keskimääräiset Value-at-Risk ja stressattu Value-at-Risk. Viimeisenä  $m_c$  ja  $m_s$  ovat pankkivalvojen määrittlemiä kertoimia. Koska stressattu Value-at-Risk on aina vähintään yhtä suuri kuin Value-at-Risk, voidaan pääomavaatimus kutistaa muotoon

$$\max(\text{VaR}_{t-1}, m_c \cdot \bar{\text{VaR}}).$$

Uudistetun sääntelyn mukaan lasketut pääomavaatimukset olivat yli kaksinkertaiset aiempaan verrattuna.[2]

## 6 Markkinariskien pääomavaatimukset

Pankeilla on globaalissa taloudessa keskeinen rooli lyhytaikaisten tallettajien varojen välittäjänä pitkäaikaisille lainaajille. Pankkitoiminnan luontaisten riskien seurauksena, sille on asetettu jatkuvaa ja tehokasta valvontaa.

Pankkisääntelyn tehtävä on varmistaa muun muassa pankkien pääoman riittävän kattamaan niiden ottamat riskit.[2] Mitä enemmän pankki ottaa riskiä, sitä enemmän sillä tulisi olla pääomaa toiminnan turvaamiseksi. Markkinariskin pääomavaatimukset varmistavat pankeilla olevan tarpeeksi pääomaa kattamaan portfolioiden markkinariskit. [6] Tiukkojen pääomavaatimusten on havaittu lisäävän pankkien välistä kilpailua. Pääomavaateiden vaikutus kilpailuun on heikompi silloin, kun kriisitilanne on käynnissä. [34]

Vaikka markkinariskit koskettavat kaikkea rahoitusvarallisuutta, markkinariskien pääomavaateet lasketaan ainoastaan pankin kaupankäyntivarastoon (trading book) kuuluville instrumenteille. [5] Kaupankäyntivarastoon kuuluvat instrumentit ovat sellaisia, joilla pankki käy kauppaa eikä pidä hallussaan sopimuksen koko maturiteettia. Pankin rahoitustase (banking book) sisältää omaisuuseriä, joita oletetaan omistavan niiden koko maturiteetin. Tällaisia eriä ovat esimerkiksi pankin asiakkaiden talletukset, sekä asiakkaille myönnettyt lainat. Rahoitustaseen korkoriskille ja luottomarginaaliriskille Baselin komitea on määritellyt oman sääntelykokonaisuuden. [35]

Baselin komitean sääntelykehikko asettaa maailmanlaajuisen perustan pankkien sääntelylle. [3] Pankkeja Baselin suositukset ja standardit velvoittavat vasta kansallisen tai ylikansallisen lainsäädännön kautta. Esimerkiksi suomalaisia pankkeja velvoittaa suomalainen lainsäädäntö, sekä EU-lainsäädäntö.[34] Euroopan pankkiviranomainen (European banking authority, EBA) osallistuu Baselin komitean toimintaan valvojana.[36] Suomessa pankkivalvonnasta vastaa Finanssivalvonta yhteistyössä Euroopan keskuspankin kanssa.[37] EU on sitoutunut noudattamaan Basel III -sääntelyä. [36] Markkinariskien osalta uusi pääomavaateita koskeva sääntely astuu voimaan 1.1.2026 [38]

Nykyisessä markkinariskien pääomavaateiden sääntelykehikossa pankit voivat valita kahden lähestymistavan välillä. Nämä ovat standardimenetelmä (standardised approach) ja sisäisten mallien menetelmä (internal models approach). Standardimenetelmästä on kehitetty myös yksinkertaistettu standardimenetelmä.

Standardimenetelmä on kehitetty pankeille, joiden liiketoiminta ei vaadi monimutkaisia malleja markkinariskien mittaamiseen. Se toimii myös varajärjestelmänä pankeille, joiden sisäiset mallit eivät täytä valvojan vaatimuksia sekä lisävaateena ja sisäisillä menetelmillä mitatun pääomavaateen alarajana. Standardimenetelmälle tärkeitä ominaisuuksia ovat läpinäkyvyys, yhdenmukaisuus ja raportoinnin vertailtavuus.

Tässä tutkielmassa keskitytään sisäisten mallien mukaiseen pääomavaateiden mittaamiseen. Sitä käyttäville pankeille on asetettu minimivaatimuksia, jotka esitellään myöhemmin.

## 6.1 Historia

Ensimmäinen Baselin pääomaohjeistus julkaistiin pankeille vuonna 1988. Tällöin ohjeistettiin, että minimipääomavaatimus riskilliseen omaisuuteen nähden tulisi olla kahdeksan prosenttia vuoden 1992 loppuun mennessä.[39]

Basel II julkaistiin vuonna 2004 korvaamaan alkuperäinen pääomaohjeistus. Se koostui kolmesta osasta

1. minimipääomavaatimuksista
2. valvonnan näkemyksestä pankin pääoman riittävydestä ja sisäisestä valvontaprosessista
3. läpinäkyvyyden hyödyntämisestä markkinakurin ja turvallisen pankkitoiminnan kasvattamiseksi.

Uuden sääntelykehikon tavoitteena oli lisätä säänneltyjen pääomavaatimusten vaikutusta riskeihin, sekä huomioida uudistuneet rahoitusmarkkinat.[39]

Vuosien 2007 – 2009 luottokriisin jälkeen Baselin komitean oli tarkastettava Basel II täysin. Basel II.5 julkaistiin vuonna 2009 ja se kasvatti pääomavaatimuksia markkinariskin suhteen. Baselin komitea tahtoi pääomavaatimusten huomioivan myös likviditeettiriskit.[2] Basel III kehikko esitteli pääomansääntelyn tueksi lisäpääomavaatimuksen (capital conservation buffer), muuttuvan lisäpääomavaatimuksen (countercyclical capital buffer) ja velkaantumisasteen. Tämän lisäksi Basel III-kehikossa on kaksi likviditeettivaatimusta, maksuvalmiusvaade (Liquidity Coverage Ratio, LCR) ja pysyvän varainhankinnan vaatimus (Net Stable Funding Ratio, NSFR). Myös pääomavaatimusten sisältö muuttui, vaikka oman pääoman minimivaade pysyi kahdeksassa prosentissa.

## 6.2 Fundamental review of trading book ja uudistunut markkinariskisääntely

Basel II.5 oli nopea reagointi finanssikriisiin. Baselin komitea kuitenkin koki, ettei se riittänyt korjaamaan kaikkia heikkouksia, joita markkinariskien sääntelyssä tuohon aikaan oli. Vuonna 2012 Baselin komitea julkaisi ensimmäisen arvion voimassa olleesta sääntelykehikosta. Lopullisessa muodossa "Fundamental review of the trading book: A revised market risk framework" julkaistiin vuonna 2013. [4] Tässä luvussa tiivistetään arvion [4] esiin tuomat heikkoudet keskittyen riskimittoja koskeviin havaintoihin.

### 6.2.1 Sisäiset menetelmät

Sääntelyn vaatiman pääoman määrän on oltava tarpeeksi kattava myös markkinoiden ollessa merkittävässä stressitilanteessa. On tavoiteltavaa, ettei pääomavaateen suuruus vaihtele syklisesti. Kalibroimalla riskien mittaamiseen käytettävät mallit markkinoiden stressin sisältävällä datalla, varaudutaan kriiseihin sekä tasoitetaan pääomavaatimusten vaihtelua. Stressiä hyödynnetään sekä sisäisiä menetelmiä, että standardimenetelmiä käytettäessä.

Tutkielmassa on jo esitelty Value-at-Risk riskimitan heikkouksia. Havaittujen heikkouksien vuoksi Baselin komitea korvaa sisäisissä menetelmissä pääomavaateen laskemiseen käytetyn 99% luottamustasolla lasketun kymmenen päivän Value-at-Risk estimaatin 97.5% luottamustasolla lasketulla kymmenen päivän odotetun vajeen estimaatilla. Value-at-Risk-mittaa käytetään yhä mallin hyväksymisprosessissa sekä toteumatestauksessa.

Pankin on pyydettävä valvojalta hyväksyntä sisäisten menetelmien käyttöön. Hyväksymiskäsittelyä on pilkottu uuteen sääntelyyn useampaan osaan ja hyväksyntä on nyt haettava jokaiselle kaupankäyntiyksikölle erikseen. Valvoja testaa pankin mallia muun muassa kvantitatiivisten työkalujen avulla ennen hyväksyntää. Mallin luotettavuuden arvioon vaikuttavat, kuinka hyvin malli kuvaa tuotto tappio -jakauman riskifaktoreita sekä päivittäin tehtävän toteumatestauksen tulokset. Tulosten on oltava riittävän korkealla tasolla, jotta yksikön pääomavaateen laskemiseen voidaan käyttää sisäistä menetelmää. Lisäksi uudistettu sääntely on luonut määritelmän sille, onko riskifaktori mallinnettava. Riskifaktori voi olla soveltumaton mallinnettavaksi esimerkiksi silloin, jos sen datan laadussa on puutteita.

Baselin komitea on tunnistanut markkinoiden suhteellisen likviditeetin aiheuttavan riskiä, joka on tärkeää huomioida myös pääomavaateissa. Ennen Basel II.5 sääntelyä, markkinariskisääntely oletti koko kaupankäyntivaraston olevan likvidi. Oletuksen virheellisyys paljastui finanssikriisin myötä. Kriisin aikana markkinoiden likvidiys heikkeni ja pankit kokivat suuria tappioita joutuessaan pitämään riskillisiä positioita hallussaan odotettua kauemmin.

Likvidiyden puutteesta johtuviin riskeihin varaudutaan sisällyttämällä pääomavaateisiin likviditeettihorisontti, joka esiteltiin jo Basel II.5 sääntelyssä. Likviditeettihorisontti on aika, joka oletetusti vaaditaan stressaantuneissa markkinaolosuhteissa riskiposition poistamiseksi tai hajauttamiseksi vaikuttamatta oleellisesti markkinahintoihin. Likviditeettihorisontteja on viisi ja niiden pituus vaihtelee kymmenestä päivästä yhteen vuoteen. Likviditeettihorisontti on otettu huomioon myös standardimenetelmän kehittämisessä.

Baselin komitea arvioi aikaisemmassa sääntelykehikossa sisäisten menetelmien olleen liian riippuvaisia pankkien omasta näkemyksestä. Tämä on aiheuttanut suuria eroja sisäisillä menetelmillä ja standardimenetelmillä laskettujen pääomavaateiden välille. Menetelmien yhteyttä toisiinsa halutaan vahvistaa. Tämän vuoksi kaikkien pankkien on esimerkiksi laskettava pääomavaade myös standardimenetelmällä.

### 6.2.2 Muita muutoksia

Kaupankäyntivarastoa ja rahoitustoiminnan varastoa koskevat erilaiset pääomavaatimukset, vaikka riskit saattaisivat olla samankaltaiset. FRTB tuo esiin aiemman kaupankäyntivaraston ja rahoitustoiminnan välisen määrittelyn heikkouden, sillä se on perustunut ainoastaan pankin itse määrittämään aikomukseen käydä kauppaa. Käsitteen kaupankäyntiaikeista on huomattu olevan monitulkintainen. Nämä kaksi tekijää yhdistettynä ovat mahdollistaneet arbitraasin ja uuden sääntelyn myötä määritelmiä on tarkennettu.

Arvopaperistaminen on tapa, jolla lainanantaja voi myydä myöntämiään luottoja arvopaperin muodossa sijoittajille. Luottoihin liittyvillä tuotteilla oli suuri merkitys finanssikriisissä, joka puolestaan osoittaa niitä koskevan sääntelyn olleen epäonnistu-

nutta. Korjatakseen aiempia puutteita uudessa sääntelykehikossa arvopaperistettuja ja ei arvopaperistettuja omaisuuseriä käsitellään eri tavoin.

Baselin komitea arvioi, etteivät pankit kykene sisäisillä menetelmillään kuvaamaan arvopaperistettujen tuotteiden riskiä. Tämän vuoksi arvopaperistettujen tuotteiden pääomavaateet perustuvat markkinariskisääntelyssä kuvattavaan standardimenetelmään.

Sisäisiä menetelmiä voidaan käyttää sellaisten omaisuuserien riskin mittaamiseen, jotka eivät ole arvopaperistettuja. Kaupankäyntivaraston ei-arvopaperistetuille omaisuuserille on kuitenkin laskettava erillinen maksukyvyttömyysriskin lisäpääomavaade.

Sijoitusten hajauttaminen ja suojaus on tyypillistä kaupankäyntivaraston hallinnassa ja niiden tavoitteena on pienentää sijoitusten riskejä. Suojaus altistaa sijoituskohteen kuitenkin korkoperuseriskille sekä vastapuoliriskille. Hajauttamisen hyödyt puolestaan saattavat kadota markkinoiden ollessa kriisissä. Aiemmin suojaamisen ja hajauttamisen riskiä pienentävät vaikutukset on voitu huomioda laajasti sisäisiä menetelmiä käyttäessä, mutta standardimenetelmässä vastaava hyöty on ollut rajoitetumpaa. Uudistetussa sääntelyssä käsittely on yhdenmukaisempaa.

Basel III sääntely vaatii minimipääomavaatimuksen laskemiseen käytettävältä dataalta suuria otoksia. Näiden on sisällettävä jokaisen riskitekijän ja likviditeettikkunan yhdistelmiä, joille pankki voi altistua. Otoksien avulla tuotetaan sisäisten mallien mukaisia estimaatteja riskimitoille, kuten stressattu odotetun vajeen estimaatti. [40]

### 6.3 Sisäiset mallit

Standardimenetelmän sijaan oman pääoman vaatimus voidaan määrittää myös sisäisten mallien avulla (Internal rating base approach, IRB). Tämä luku perustuu Baseli III markkinariskien pääomavaatimusten sääntelyyn [5].

Sisäisten mallien on oltava pankin valvontaviranomaisen hyväksymiä. Baselin komitea on antanut viisi vaatimusta, jotka pankin tulee vähintään täyttää käyttäessään sisäistä mallia.

1. Valvontaviranomainen katsoo, että pankin riskienhallinta on käsitteellisesti yhdenmukaista ja se toteutetaan rehellisesti.
2. Valvontaviranomaisen näkökulmasta pankilla on tarpeeksi riittävän kokenutta henkilökuntaa käyttämään monimutkaisia malleja.
3. Pankki on pystynyt todistamaan valvontaviranomaiselle riskienhallintansa tarkkuuden.
4. Pankki suorittaa säännöllisesti stressitestejä.
5. Minimipääomavaatimuksen määrittämiseen käytettävä menetelmä on valitun mallin kehityksestä riippumattoman yksikön puolesta.

Mallin validointi on toimintapa, jolla arvioidaan mallin soveltuvuutta.[6] Basel III -sääntelyn mukaan validointiin on sisällyttävä muun muassa hypoteettinen

tuotto-tappiolaskenta ja toteumatestaus. Validointi suoritetaan aina, jos malli on uusi tai siihen on tehty merkittäviä muutoksia. Validoinnin lisäksi malli on arvioitava vähintään vuosittain sellaisen yksikön toimesta, joka on erillinen mallin kehittäneeseen yksikköön.

Pääomavaateen laskentaan käytettävän mallin tulee kattaa riskitekijöiden arvomuutokset, joita ovat osakkeiden tai hyödykkeiden hintojen muutokset sekä koron, luottomarginaalin tai valuuttakurssin muutokset. Riskitekijät jaetaan mallinnettaviin ja ei-mallinnettaviin riskitekijöihin. Mallinnettava riskitekijä läpäisevät riskitekijän soveltuvuustestin (the risk factor eligibility test RFET). Testi vaatii, että mallinnettavasta riskitekijästä on saatavilla riittävä määrä aitoja hintahavaintoja tietyn aikavälin sisällä.

### 6.3.1 Mallinnettavat riskitekijät

Pankeilla on vapaus määrittää odotetun vajeen mallinsa tarkka luonne, kunhan se on minimivaatimusten mukainen. Yksittäisellä pankilla tai niiden valvontaviranomaisella on mahdollisuus vaatia tiukempia kriteerejä mallille.

Odotettu vaje on laskettava päivittäin pankkitasoisesti ja jokaiselle kaupankäyntiyksikölle, jonka minimipääomavaade laskentaan käytetään sisäistä mallia. Laskennassa huomioidaan riskitekijät, jotka ovat aiemmin hyväksytyt mallinnettaviksi riskitekijöiksi. Kuten edellä on mainittu, lasketaan odotettu vaje 97.5 luottamustasolla.

Likviditeettiriski huomioidaan suhteuttamalla kymmenen päivän odotetun vajeen estimaatti omaisuuserien likviditeettiin. Omaisuuserät kohdennetaan johonkin viidestä  $b_j$  päivän likviditeetti-ikkunasta. Likviditeetti-ikkunoita ovat  $b_1 = 10, b_2 = 20, b_3 = 40, b_4 = 60$  ja  $b_5 = 120$ . Olkoon  $LHb_j$  portfolio omaisuuseriä, joiden likviditeetti-ikkuna on  $b_j$  päivää tai enemmän. Esimerkiksi  $LH10$  on kaikki portfolion omaisuuserät ja  $LH40$  on portfolio omaisuuseristä, joiden likviditeetti on 40 päivää tai enemmän. Määritellään seuraavaksi likviditeettiin suhteutettu odotettu vaje.

**Määritelmä 7.** Olkoon  $LHb_j$  portfolio omaisuuseriä, joiden likviditeetti-ikkuna on  $b_j$  päivää tai enemmän ja  $ES(j)$  portfolion odotetun vajeen estimaatti. Likviditeettiin suhteutettu odotettu vaje  $ES$  on

$$ES = \sqrt{ES(LH 10)^2 + \sum_{j=2}^5 \left( \sqrt{\frac{b_j - b_{j-1}}{10}} ES(LH b_j) \right)^2},$$

jossa  $\sqrt{\frac{b_j - b_{j-1}}{10}}$  on tuottojen normaalisuusoletukseen perustuva likviditeettivakio.

Suhteuttaminen perustuu likviditeettiin, jonka seurauksena pidemmän likviditeetti-ikkunan odotetulla vajeella on korkeampi kerroin, sillä niiden likviditeettiriskin on korkeampi. Odotettu vaje on laskettava myös niin, että portfolion kannalta merkittävät riskitekijät ovat määriteltyjä haastavan ajanjakson mukaisesti.

Lopullista pääomavaadetta varten mallinnettaville riskitekijöille lasketaan pääomavaateet pankkitasoisesti yhdessä ilman riskiluokkien välisten korrelaatioiden valvojan asettamia rajoitteita sekä erikseen jokaiselle riskitekijälle. Riskifaktorit hyötyvät hajautuksesta, mutta finanssikriisit ja järjestelmäriski aiheuttavat korrelaatioiden kasvua. Se puolestaan heikentää hajautuksen hyötyä. Hallitakseen tätä riskiä

Basel III vaatii pankkien laskevan osittaispääomavaatimukset korkoriskille, osakeriskille, valuuttariskille, hyödykeriskille ja luottomarginaaliriskille. Määritellään pääomavaade riskifaktoreille.

**Määritelmä 8.** Olkoon  $i$  korko-, osake-, valuutta-, hyödyke- tai luottomarginaaliriski ja  $C_0$  kaikki riskitekijät. Sisäisten mallien pääomavaatimus mallinnettaville riskifaktoreille on

$$\text{IMCC}(C_i) = \text{ES}_{R,S_i} \cdot \frac{\text{ES}_{F,C_i}}{\text{ES}_{R,C_i}},$$

jossa  $\text{ES}_{R,S}$  on likviditeetillä suhteutettu odotetun vajeen estimaatti stressatuista riskitekijöistä,  $\text{ES}_{F,C}$  on likviditeetillä suhteutettu odotetun vajeen estimaatti nykyisen markkinatilanteen riskitekijöistä ja  $\text{ES}_{R,C}$  on likviditeetillä suhteutettu odotetun vajeen estimaatti nykyisen markkinatilanteen riskifaktoreista, jotka ovat myös estimaatissa  $\text{ES}_{R,S}$ . Suhde  $\frac{\text{ES}_{F,C}}{\text{ES}_{R,C}} \leq 1$ .

Kahden edellä esiteltyä  $\text{IMCC}(C_i)$ -arvojen avulla määritellään pankin yhdistetty pääomavaade sisäisten mallien menetelmällä.

**Määritelmä 9.** Sisäisten mallien yhdistetty pääomavaatimus  $\text{IMCC}$  on

$$\text{IMCC} = \rho(\text{IMCC}(C_0)) + (1 - \rho) \left( \sum_{i=1}^5 \text{IMCC}(C_i) \right),$$

jossa  $\rho = 0.5$ .

### 6.3.2 Ei-mallinnettavat riskitekijät

Riskifaktoreille, joita ei voida mallintaa määritellään pääomavaade sellaisen stressiskenaarion kautta, joka on vähintään yhtä varovainen kuin odotetun vajeen mallinnukseen käytetty. Stressijaksoksi pankin on määriteltävä yleinen 12 kuukauden stressijakso kaikille mallintamattomille riskifaktoreille samassa riskiluokassa. Myös ei-mallinnettavien riskitekijöiden pääomavaade lasketaan jokaiselle kaupankäyntiyksikölle erikseen.

Määritellään ei-mallinnettavien riskitekijöiden pääomavaade.

**Määritelmä 10.** Olkoon  $I$  joukko mallintamattomia idiosynkraattisia luottomarginaaliriskifaktoreita, joiden välinen korrelaatio on 0. Stressattua pääomavaatimusta riskifaktorille  $i$  joukosta  $I$  on merkitään  $\text{ISES}_{NM,i}$ . Olkoon  $J$  joukko mallintamattomia idiosynkraattisia osakeriskifaktoreita, joiden välinen korrelaatio on 0. Stressattua pääomavaatimusta riskifaktorille  $j$  joukosta  $J$  merkitään  $\text{ISES}_{NM,j}$ . Jäljelle jäävien mallintamattomien riskifaktoreiden joukko mallinnettavasta trading deskistä on  $K$ . Riskin  $k$  stressattu pääomavaatimus on  $\text{SES}_{NM,k}$ . Vakio  $\rho = 0,6$ . Näiden yhdistetty sääntelymukainen pääomavaatimus  $\text{SES}$  on

$$\begin{aligned} \text{SES} = & \sqrt{\sum_{i=1}^I \text{ISES}_{NM,i}^2} + \sqrt{\sum_{j=1}^J \text{ISES}_{NM,j}^2} \\ & + \sqrt{\left( \rho \cdot \sum_{k=1}^K \text{SES}_{NM,k}^2 \right)^2 + (1 - \rho^2) \cdot \sum_{k=1}^K \text{SES}_{NM,k}^2}. \end{aligned}$$

### 6.3.3 Maksukyvyttömyysriski

Kaupankäyntivaraston positioiden maksukyvyttömyysriskin pääomavaateen laskentaan pankeilla on oltava erillinen sisäinen malli. Sitä ei lasketa jokaiselle kaupankäyntiyksikölle erikseen. Maksukyvyttömyysriski aiheutuu tappion mahdollisuudesta liikkeeseenlaskijan maksukyvyttömyydestä tai maksukyvyttömyyden aiheuttamista epäsuorista tappioista. Maksukyvyttömyysriskin mittaamiseen käytetään Value-at-Risk-mallia yhden vuoden mittaisella aikaikkunalla, yksihäntäisenä ja luottamustasolla 99.9.

Pääomavaateen laskennassa huomioidaan kaikki maksukyvyttömyysriskilliset positiot, lukuun ottamatta standardimallin positioita. Tähän joukkoon kuuluvat valtioiden maksukyvyttömyysriskit, osakepositiot ja joukkovelkakirjapositiot. Osakkeiden liikkeeseenlaskijoiden maksukyvyttömyysriski on mallinnettava niin, että sen seurauksena osakkeen hinta putoaa nolnaan.

Pääomavaade on se, joka saa suuremman arvon:

1. Edellisen kahdentoista viikon aikana mitattujen maksukyvyttömyysriskin pääomavaatimusten keskiarvo tai
2. viimeisimmän laskennan tuloksena saatu pääomavaatimus.

Maksukyvyttömyysriski lasketaan jokaiselle liikkeellelaskijalle. Maksukyvyttömyyden todennäköisyyttä ei voida arvioida markkinahinnoista, ellei niitä ole korjattu kuvastamaan objektiivista todennäköisyyttä maksukyvyttömyyteen. Todennäköisyyden tulee olla aina vähintään 0.03%.

Käytettävän mallin on kuvattava samalta liikkeeseenlaskijalta olevien pitkien ja lyhyiden positioiden netotus. Näiden väliin jäävä korkoperusteriski on mallinnettava selvästi. Myös eri liikkeeseenlaskijoiden lyhyiden ja pitkien positioiden tuoma mahdollinen hyöty on sisällytettävä mallinnukseen. Netottamista ei saa kuitenkaan suorittaa ennen mallinnusta.

Mallin on tunnistettava eri liikkeeseenlaskijoiden maksukyvyttömyyden välinen korrelaatio. Korrelaatioiden on perustuttava objektiiviseen dataan eikä sitä saa vääristää tavalla, jolla pitkää ja lyhyttä positiota sisältävät portfoliot saisivat korkeamman korrelaatiokertoimen kuin pelkistä pitkistä positioista koostuvat. Malli on validoitava ja dokumentoida. Mallidokumentaation on sisällytettävä myös, kuinka usein malli kalibroidaan. Korrelaatiot ovat mitattava vuoden mittaiselta likviditeettihorisontilta ja kalibroitava 10 vuoden ajalta. Kaikki merkittävät perusteriskit, kuten maturiteettien eroavaisuudet ja sisäiset sekä ulkoiset ratingit, on huomioitava korrelaatioiden määrittelyssä.

Mallin on kuvattava jokainen positio ja hajautus, jotka eivät sovi yhteen. Tämän lisäksi mallin on tunnistettava markkinoiden ja niiden stressitilanteiden aiheuttamia keskittymiä liikkeeseenlaskijoissa sekä niiden tarjoamissa tuotteissa. Osana mallia on laskettava jokaisen position tappio tilanteessa, jossa liikkeeseenlaskija on maksukyvytön.

Korkeasta luottamustasosta ja pitkästä aikahorisontista johtuen maksukyvyttömyysriskin pääomavaateen laskentaan käytettävän mallin validointiin ei voida hyödyntää perinteistä toteumatestausta. Tämän sijaan on käytettävä epäsuoria menetelmiä, kuten stressitestausta, herkkyyksianalyysiä ja skenaarioanalyysiä.

Pankkien, jotka käyttävät maksukyvyttömyystodennäköisyyksiä osana sisäistä rating -menetelmää, on käytettävä samoja todennäköisyyksiä myös pääomavaatimusten laskentaan. Muussa tapauksessa todennäköisyyksien on laskettava täyttäen seuraavat ehdot. Todennäköisyydet eivät saa olla riskineutraaleja, niiden on perustuttava dataan, joka sisältää maksukyvyttömyyden toteutumisia sekä vastaavia arvonmenetyksiä, datan on oltava vähintään vuoden mittaiselta ajalta. Historiaan perustuvien todennäköisyyksien lisäksi ne on laskettava myös teoreettisesti. Pankkien ei ole välttämätöntä laskea todennäköisyyksiä itse, vaan ne voivat käyttää myös ulkoisen tarjoajan tuottamia lukuja. Tällöin on kuitenkin perusteltava niiden yhteensopivuus pankin portfolion kanssa.

Jos sisäisessä ratingissa käytetään arvioituja maksukyvyttömyydestä aiheutuva tappioita, on samoja lukuja käytettävä myös pääomavaatimuksen laskemisessa. Muuten luvut on laskettava erikseen täyttäen seuraavat ehdot. Tappiot on määriteltävä markkinoiden näkökulmasta perustuen position markkina-arvoon suhteessa odotettuun markkina-arvoon, kun liikkeeseenlaskijan maksukyvyttömyysriski realisoituu. Arvioiden on perustuttava historialliseen dataan. Kuten todennäköisyyksien kohdalla, myös tappioiden arviot voidaan hankkia ulkoiselta osapuolelta, jos se on perusteltua.

#### 6.3.4 Lopulliset pääomavaatimukset

Lopullinen markkinariskien aiheuttama pääomavaade sisäisillä menetelmillä laskettuna koostuu mallinnettavista, ei-mallinnettavista riskitekijöistä sekä maksukyvyttömyysriskin lisäyksestä. Määritellään yhdistetty pääomavaade.

**Määritelmä 11.** Olkoon  $IMCC_{t-1}$  edellisen päivän yhdistetty pääomavaatimus,  $IMCC_{avg}$  keskimääräinen yhdistetty pääomavaatimus,  $SES_{t-1}$  edellisen päivän mallintamattomien riskifaktoriin pääomavaatimus,  $SES_{avg}$  keskimääräinen mallintamattomien riskifaktoriin pääomavaatimus,  $m_c$  on valvojan asettama kerroin ja  $DRC$  maksukyvyttömyysriskin pääomavaatimus. Kaupankäyntiyksiköiden yhdistetty pääomavaade markkinariskille on

$$IMA_{G,A} = \max (IMCC_{t-1} + SES_{t-1}; m_c \cdot IMCC_{avg} + SES_{avg},) + DRC .$$

Oletuksena  $m_c = 1.5$ , mutta valvoja voi vaatia korkeampaa kertoimen käyttöä kuvastamaan kvalitatiivista lisäystä tai toteumatestauksen lisäystä. Toteumatestauksen lisäys voi olla välillä  $[0, 0.5]$ . Sen suuruus riippuu pankin päivittäisen luottamustasolla 0.99 lasketun  $Var$ :in toteumatestauksen tuloksesta.

Tuotto-tappiojakauma-testauksen heikosta tuloksesta seuraa lisävaateen lisääminen pääomavaateeseen. Määritellään pääomavaatimuksen lisävaade.

**Määritelmä 12.** Olkoon  $SA_i$  standardimenetelmän mukaan laskettu pääomavaade kaupankäyntiyksikölle  $i$  ja  $IMA_{G,A}$  on kaupankäyntiyksiköiden yhdistetty pääomavaade sisäisten menetelmien mukaan laskettuna. Markkinariskien sisäisten mallien mukaiseen pääomavaateeseen lisättävä lisävaade on

$$\text{Lisävaade} = 0.5 \cdot \frac{\sum_{i \in A} SA_i}{\sum_{i \in G,A} SA_i} \cdot \max (0, SA_{G,A} - IMA_{G,A} .) .$$

Määritellään viimeiseksi lopullinen yhdistetty pääomavaade.

**Määritelmä 13.** Olkoon  $SA_0$  koko varastolle standardimenetelmän mukaan laskettu pääomavaade,  $SA_{G,A}$  sisäisiä menetelmiä hyödyntävien kaupankäyntiyksiköiden pääomavaade standardimenetelmän mukaan laskettuna,  $C_U$  standardimenetelmällä laskettu pääomavaade kaupankäyntiyksiköille, jotka eivät sisälly sisäisen menetelmän laskentaan ja  $IMA_{G,A}$  kaupankäyntiyksiköiden yhdistetty pääomavaade sisäisten menetelmien mukaan laskettuna. Lopullinen yhdistetty pääomavaade on

$$ACR = \min(IMA_{G,A} + \text{Lisävaade} + C_U; SA_0) + \max(0; IMA_{G,A} - SA_{G,A}).$$

## 7 Uudistuneiden pääomavaatimusten vaikutus

Uudet pääomavaateet eivät ole vielä laajasti käytössä, sillä kuten edellä mainittiin esimerkiksi Euroopan Unionin alueella ne astuvat voimaan vuoden 2026 alusta lähtien. Uudistuneen sääntelyn todellisia vaikutuksia ei siis vielä tiedetä. Sääntelymuutosten seurauksia on arvioitu esimerkiksi pankeille teetettyjen kyselyiden pohjalta.

Vuonna 2019 Baselin komitea arvioi pankkien markkinariskien pääomavaateiden siirtymästä Basel II.5 sääntelystä Basel III sääntelyyn aiheutuvan kasvun mediaanin olevan 16 % ja kasvun painotetun keskiarvon olevan 22%. Pankeille, jotka käyttävät pääomavaateiden laskentaan ainoastaan standardimenetelmää, kasvun odotetaan olevan suhteellisesti suurempaa kuin sisäisiä menetelmiä käyttävillä pankeilla. [41]

Elokuussa 2022 Finanssivalvonta julkaisi arvion, jonka mukaan suomalaisten pankkien markkinariskien pääomavaatimukset kasvaisivat Basel III sääntelyn käyttöönoton myötä yhteensä 5.8%. [42] Vuoden 2024 syyskuussa Finanssivalvonta arvioi markkinariskien pääomavaatimusten kasvavan ainoastaan yhden prosentin suomalaisten pankkien osalta. [43]

Vuonna 2024 Baselin pankkivalvontakomitean julkaisemassa monitorointiraportissa pankit ovat jaettu kolmeen ryhmään näiden omien varojen koon ja kansainvälisen merkittävyyden perusteella. Raportin mukaan kasvun mediaani näissä kolmessa eri pankkiryhmässä vaihtelee välillä 12.6% – 37.6% ja kasvun painotettu keskiarvo vaihtelee välillä 34.7% – 58.5%. [44]

Uuden minimipääomavaateen myötä kaupankäyntitaseen ja rahoitustaseen määritelmät muuttuvat entistä tarkemmiksi. Tällä pyritään estämään arbitraasia eri taseiden välillä ja yhdenmukaistaa sääntelyn toteutumista pankkien väleillä. [45]

Sisäisten menetelmien mukainen pääomavaateen lasku on hyväksyttävä kaupankäyntiyrityksiköiden tasolla. Sen lisäksi, että jokaisen yksikön kohdalla tulee harkita standardimenetelmän ja sisäisen mallin välillä, on mahdollista, että jotkin kaupankäyntiyritykset osoittautuvat kannattamattomiksi uuden pääomavaateen myötä. [45]

Vaatus pääomavaateen alarajan laskentaan standardimenetelmällä saattaa hyödyttää historiallisesti standardimenetelmää käyttäneitä pienempiä pankkeja, sillä näiden pääomavaade on ollut sisäisiä menetelmiä käyttäneiden pankkien pääomavaateita suurempi. Lisäksi uusien sisäisten menetelmien käyttöönoton uskotaan olevan kallista ja työlästä, sen vaatiessa todennäköisesti useamman kuin yhden hyväksyntäkerroksen valvojalta. [46]

Pankit ovat uuden sääntelyn myötä mielenkiintoisen valinnan edessä. Oman pääoman ollessa usein kallista ylläpitää, pyrkivät pankit tästä syystä minimoimaan pääomavaateitaan. Näin ollen pankille on houkuttelevaa käyttää malleja, jotka tuottavat matalia odotetun vajeen arvoja. [40] Tämän lisäksi eri pankkien itse määrittelemät mallit, voivat luonnollisesti antaa erilaisia tuloksia samanlaisille portfolioille. [13] Odotetun vajeen tuottamien riskilukujen ollessa alttiimpi mallin määrittelyn vaikutuksille, saattaa mallin muokkaaminen matalien pääomavaateiden toivossa lisääntyä.

Samaan aikaan sääntely kuitenkin rankaisee pankkeja pääomavaateen korotuksella, jos pankin mallit generoivat liian monta Value-at-Risk luottamustason ylittävää arvoa. Tämä kannustaa pankkeja valitsemaan konservatiivisempia malleja, jotta

Value-at-Risk-arvot ovat korkeampia ja näiden ylittäminen olisi epätodennäköisempää. [40]

Itse malliin kohdistuvan taktikoinnin lisäksi pankkien on arvioitu suosivan sisäisen ja standardimenetelmän välillä sitä menetelmää, joka tuottaa pankille miellyttävämmän lopputuloksen. Pankit voivat pyrkiä alhaisempiin pääomavaatimuksiin valikoimalla kaupankäyntiyksikön pääomavaatimuksen laskuun menetelmän, joka tuottaa alhaisemman pääomavaatimuksen. [46]

Pankkien on oletettu ottavan käyttöön ensin standardimenetelmä, jolloin ne voivat kehittää sisäisiä menetelmiään rauhassa. Etenkin pienempien pankkien katsotaan odottavan isompien pankkien ottavan sisäiset menetelmät käyttöön, oppiakseen niiden kokemuksista. [46] Euroopan keskuspankki teetti pankeille vuonna 2019 kyselyn uusien pääomavaatimusten vaikutuksesta pankkien sisäisten menetelmien käyttöön liittyen. Arviolta noin 40% pankeista, jotka käyttivät kyselyn toteuttamisen aikaan sisäisiä menetelmiä, aikoivat hakea hyväksynnän uusien vaatimusten mukaisille sisäisille malleille. Noin 40% aikoi siirtyä käyttämään uudistettua standardimenetelmää ja noin 20% pankeista ei ollut vielä kyselyn aikaan tehnyt päätöstä. [47]

Sääntely asettaa pankkien datalle korkeat vaatimukset. Dataa on oltava pitkältä aikaväliltä ja usein tällaisessa datassa on aukkoja. Aukkoja voidaan täyttää esimerkiksi markkinadatan tilastollisella analyysillä. Aukottomuuden lisäksi datan tulee olla tarpeeksi laadukasta. [46] Uusi sääntely voi vaatia pankeilta huomattavaa panostusta täyttääkseen nämä vaatimukset.

## 8 Yhteenveto

Tutkielmassa on tarkasteltu markkinariskejä, riskimittoja, markkinariskien pääomavaateiden mittausta sekä siinä tapahtuneita muutoksia ja muutoksiin johtaneita syitä. Lopussa on koottu sääntelymuutoksen arvioituja vaikutuksia muun muassa pankkien pääomavaateiden toteumiin sekä pankkien käyttäytymiseen.

Riskimittoja on käsitelty yleisesti keskittyen sääntelyn näkökulmasta tärkeisiin ominaisuuksiin. Nämä ovat subadditiivisuus sekä konsistentti pisteytyvyys. Subadditiivisuuden mukaan omaisuususerien yhdistäminen ei lisää niistä aiheutuvaa riskiä. Tätä pidetään tärkeänä ominaisuutena riskimitalle, sillä se kuvastaa riskin hajauttamisen hyötyä. Subadditiivisuudelle on kuitenkin esitetty helpommin saavutettavissa oleva korvaava ominaisuus, jota kutsutaan komonotoniseksi subadditiivisuudeksi. Lisäksi tutkielmassa on havaittu, että riskien yhdistäminen ei aina pienennä riskiä pankin omistajan näkökulmasta. Tästä huolimatta subadditiivisuutta voidaan pitää sääntelijän näkökulmasta toivottavana ominaisuutena, sillä pankin rahoittajien voidaan katsoa tarvitsevan enemmän suojelua kuin sen omistajien.

Konsistentisti pisteytyvällä riskimitalla on pisteytysfunktio, joka on riskimitan suhteen aidosti konsistentti. Konsistentisti pisteytyvän riskimitan etu on, että sen toteumatestejä voidaan verrata siten, että vähenevä tulos kertoo laadukkaammasta mallista. Tämä tekee mallin toteumatestauksesta yksinkertaista.

Pankkeja koskevaa sääntelyä on viime vuosien uudistettu huomattavasti. Eräs merkittävimmistä muutoksista uudistuneissa markkinariskien pääomavaatimuksissa on siirtyminen Value-at-Risk-riskimitasta odotetun vajeen riskimitaan. Tutkielmassa on käsitelty näiden riskimittojen laskentaperiaatteita, heikkouksia sekä vahvuuksia. Value-at-Risk-arvon laskentaan on esitelty kolme menetelmää. Nämä ovat Varianssi-kovarianssi tapa, Historiallinen tapa sekä Monte Carlo simulointi. Odotettu vaje lasketaan useimmiten hyödyntäen jo laskettuja Value-at-Risk arvoja. Jokainen laskentamenetelmä vaatii historiallisen datan hyödyntämistä, sekä tuottojen jakauman arviointia. Arvioinnin epäonnistuessa laskettu Value-at-Risk-arvo saattaa olla virheellinen. Menetelmillä on havaittu myös menetelmäkohtaisia heikkouksia.

Value-at-Risk-riskimitan suurin heikkous on, ettei se ole subadditiivinen. Odotettu vaje kertoo myös tarkempaa tietoa jakauman hännästä kuin Value-at-Risk. Nämä ovat eräitä syitä siihen, miksi Value-at-Risk on haluttu korvata odotetun vajeen riskimitalla. Odotetun vajeen heikkous kuitenkin on, että se ei ole konsistentisti pisteytyvä. Odotettu vajeen tuottamat tulokset ovat myös herkempiä mallin määrittelylle. Määrittelyn aiheuttamia eroavaisuuksia voi syntyä tahattomasti, mutta myös tarkoituksellisesti. Näiden puutteiden vuoksi odotetun vajeen rooliin sääntelyssä ei olla täysin tyytyväisiä.

Sääntely vaatii markkinariskien pääomavaateiden laskentaan käytettävien mallien toteumatestausta, sekä stressitestausta. Näiden prosessien periaatteita sekä riskimitakohtaisia menetelmiä on käsitelty tutkielmassa lyhyesti. Odotetun vajeen toteumatestausta on haastavampaa kuin Value-at-Risk-riskimitan, koska odotettu vaje ei ole konsistentisti pisteytyvä. Odotetun vajeen toteumatestaukseen on esitelty kuitenkin useampi toteumatestausta menetelmä. Useassa odotetun vajeen toteumatestausta menetelmässä hyödynnetään Value-at-Risk-riskimitan toteumatestauksen tuloksia.

Pankki voi vaadittavat ehdot täyttäessään valita, käyttääkö se pääomavaateiden mittaamiseen standardimenetelmää vai sisäisiä menetelmiä. Markkinariskien pääomavaateen laskenta sisäisillä menetelmillä koostuu kolmesta tekijästä. Nämä ovat mallinnettavien riskitekijöiden pääomavaade, ei-mallinnettavien riskitekijöiden pääomavaade sekä maksukyvyttömyysriskin pääomavaade. Jos pankki suoriutuu heikosti tuotto-tappiojakauma-testauksesta lisätään lopulliseen pääomavaateeseen vielä lisävaade. Vaikka pankki käyttäisi sisäisiä menetelmiä, on pääomavaade laskettava silti myös standardimenetelmää käyttäen. Standardimenetelmällä laskettu pääomavaade toimii pääomavaateen alarajana.

Uuden sääntelyn vaikutuksia on vasta voitu arvioida, sillä pankkeja suoraan velvoittava sääntely ei ole vielä astunut laajasti voimaan. Esimerkiksi Euroopan Unionin alueella Basel III sääntelyn mukaiset markkinariskien pääomavaatimukset astuvat voimaan 1.1.2026. Arviot sääntelymuutoksien vaikutuksista pankkien pääomavaateisiin vaihtelevat pankin koosta sekä aiemmasta mittausmenetelmästä riippuen. Finanssivalvonta on arvioinut vaikutusten suomalaisten pankkien pääomavaateisiin pysyvän maltillisina. Huomattavan osuuden pankeista on arvioitu ottavan käyttöön ainakin alkuun standardimenetelmä.

Sääntelyn muuttuessa pankkeja velvoittavaksi onkin mielenkiintoinen mahdollisuus tutkia, millaisia vaikutukset ovat olleet niin yksittäisten pankkien kohdalla kuin laajemminkin finanssisektorilla. Lisäksi sisäisiä menetelmien laskentaan soveltuvien mallien ja näiden avulla laskettavien pääomavaatimusten eroavaisuudet olisivat erittäin mielenkiintoinen tutkimusaihe. Aineisto, kerääminen tähän olisi todennäköisesti haastavaa sillä pankkien käyttämät mallit eivät luonnollisesti ole julkista tietoa.

## Viitteet

- [1] Dill, Alexander. Bank Regulation, Risk Management, and Compliance: Theory, Practice, and Key Problem Areas. Bank Regulation, Risk Management, and Compliance: Theory, Practice, and Key Problem Areas, Informa Law from Routledge, 2020.
- [2] Hull, John. Risk Management and Financial Institutions. Fifth edition., Wiley, 2018.
- [3] Baselin pankkivalvontakomitea. The Basel Framework. [https://www.bis.org/basel\\_framework/index.htm?m=97](https://www.bis.org/basel_framework/index.htm?m=97) luettu 27.3.2025
- [4] Baselin pankkivalvontakomitea. Fundamental review of the trading book: A revised market risk framework, <https://www.bis.org/publ/bcbs265.pdf>
- [5] Baselin pankkivalvontakomitea. Minimum capital requirements for market risk. Basel, Switzerland, 2019.
- [6] Szytar, Christian. Handbook of Market Risk. 1st edition, John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [7] Alexander, Carol. Market Risk Analysis. Volume IV, Value-at-Risk-Models. 1st edition, Wiley, 2008.
- [8] Triana, Pablo. THE NUMBER THAT KILLED US: How the Mathematical Model Value at Risk Helped Cause the Credit Crisis. Yale Economic Review 7, no. 1 (2011): 30-.
- [9] Artzner, Philippe, et al. Coherent Measures of Risk. Mathematical Finance, vol. 9, no. 3, 1999, pp. 203–28, <https://doi.org/10.1111/1467-9965.00068>.
- [10] Miller, Michael B. Quantitative Financial Risk Management. Wiley, 2019.
- [11] Fama, EF. Efficient Capital Markets: A Review of Theory and Empirical Work. The Journal of Finance (New York), vol. 25, no. 2, 1970, pp. 383–423, <https://doi.org/10.2307/2325486>.
- [12] Finanssivalvonta Määräykset ja ohjeet [https://finanssivalvonta.fi/globalassets/fin/saantely/maarayskokoelma/2018/04\\_2018/2018\\_04.m3.pdf](https://finanssivalvonta.fi/globalassets/fin/saantely/maarayskokoelma/2018/04_2018/2018_04.m3.pdf) 4/2018
- [13] Kellner, Ralf, and Daniel Rösch. Quantifying Market Risk with Value-at-Risk or Expected Shortfall? – Consequences for Capital Requirements and Model Risk. Journal of Economic Dynamics & Control, vol. 68, 2016, pp. 45–63, <https://doi.org/10.1016/j.jedc.2016.05.002>.
- [14] Allen, Steve L. Financial Risk Management: A Practitioner’s Guide to Managing Market and Credit Risk. 2. Aufl., vol. 721, Wiley, 2012.
- [15] Kou, Steven, et al. External Risk Measures and Basel Accords. Mathematics of Operations Research, vol. 38, no. 3, 2013, pp. 393–417, <https://doi.org/10.1287/moor.1120.0577>.

- [16] Rau-Bredow, Hans. Bigger Is Not Always Safer: A Critical Analysis of the Subadditivity Assumption for Coherent Risk Measures. *Risks* (Basel), vol. 7, no. 3, 2019, pp. 1–18, <https://doi.org/10.3390/risks7030091>.
- [17] Rahoitusvakausvirasto, <https://rvv.fi/talletussuoja>, Luettu 2.11.2024
- [18] Nolde, Natalia, and Johanna F Ziegel. Elicitability and backtesting: Perspectives for banking regulation. *The Annals of Applied Statistics* 11, no. 4 (2017): 1833–74. <https://doi.org/10.1214/17-aos1041>.
- [19] Gneiting, Tilmann. Making and Evaluating Point Forecasts. *Journal of the American Statistical Association*, vol. 106, no. 494, 2011, pp. 746–62, <https://doi.org/10.1198/jasa.2011.r10138>.
- [20] J.P. Morgan. RiskMetrics<sup>TM</sup> Technical Document. 1996.
- [21] Saita, Francesco. Value at Risk and Bank Capital Management. 1st edition, Elsevier Academic Press, 2007.
- [22] Basak, Suleyman, and Alexander Shapiro. Value-at-Risk-Based Risk Management: Optimal Policies and Asset Prices. *The Review of Financial Studies*, vol. 14, no. 2, 2001, pp. 371–405, <https://doi.org/10.1093/rfs/14.2.371>.
- [23] Acerbi, Carlo, and Dirk Tasche. On the Coherence of Expected Shortfall. *Journal of Banking & Finance*, vol. 26, no. 7, 2002, pp. 1487–503, [https://doi.org/10.1016/S0378-4266\(02\)00283-2](https://doi.org/10.1016/S0378-4266(02)00283-2).
- [24] Fissler, T., & Ziegel, J. F. HIGHER ORDER ELICITABILITY AND OSBAND’S PRINCIPLE. *The Annals of Statistics*, 44(4), (2016): 1680–1707. <https://doi.org/10.1214/16-AOS1439>
- [25] Koch-Medina, Pablo, and Cosimo Munari. Unexpected Shortfalls of Expected Shortfall: Extreme Default Profiles and Regulatory Arbitrage. *Journal of Banking & Finance* 62 (2016): 141–51. <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2015.11.006>.
- [26] Christoffersen, Peter. Elements of Financial Risk Management. 1st ed. Oxford: Academic, 2003.
- [27] C. Acerbi and B. Szekely. Backtesting expected shortfall. *Risk*, December, 2014.
- [28] Fissler, T., et al. Expected Shortfall Is Jointly Elicitable with Value at Risk - Implications for Backtesting. 2015.
- [29] Diebold, Francis X, and Robert S Mariano. Comparing Predictive Accuracy. *Journal of Business & Economic Statistics* 20, no. 1 (2002): 134–44. <https://doi.org/10.1198/073500102753410444>.
- [30] Kratz, M., Lok, Y. H., & McNeil, A. J. Multinomial VaR backtests: A simple implicit approach to backtesting expected shortfall. *Journal of Banking & Finance*, 88, (2018): 393–407. <https://doi.org/10.1016/j.jbankfin.2018.01.002>

- [31] Du, Zaichao, and Juan Carlos Escanciano. Backtesting Expected Shortfall: Accounting for Tail Risk. *Management Science* 63, no. 4 (2017): 940–58. <https://doi.org/10.1287/mnsc.2015.2342>.
- [32] Macro-financial scenario for the 2023 EU-wide banking sector stress test , [https://www.esrb.europa.eu/mppa/stress/shared/pdf/esrb.stress\\_test230131\\_c4980ac646.en.pdf?3bd031b9f9f6c3e8c8c58f655e721294](https://www.esrb.europa.eu/mppa/stress/shared/pdf/esrb.stress_test230131_c4980ac646.en.pdf?3bd031b9f9f6c3e8c8c58f655e721294)
- [33] Kohei Marumo. A Non-parametric Method for Calculating Conditional Stressed Value at Risk. no. 5, 2017, pp. 42–48, <https://doi.org/10.21686/2500-3925-2017-5-42-48>.
- [34] Li, Shaofang. The Impact of Bank Regulation and Supervision on Competition: Evidence from Emerging Economies. *Emerging Markets Finance & Trade*, vol. 55, no. 10, 2019, pp. 2334–64, <https://doi.org/10.1080/1540496X.2018.1547191>.
- [35] Baselin pankkivalvontakomitea. Standards, Interest rate risk in the banking book. Bank for International Settlements 2016. <https://bis.org/bcbs/publ/d368.pdf>
- [36] Euroopan pankkiviranomainen. The Basel framework: the global regulatory standards for banks. <https://www.eba.europa.eu/activities/basel-framework-global-regulatory-standards-banks>
- [37] Finanssivalvonta. <https://www.finanssivalvonta.fi/finanssisektorin-toimijalle/pankki/>
- [38] Euroopan komissio. Banking package: Moving forward with the implementation of the Basel standards, while preserving the international level playing field. 24.07.2024 [https://finance.ec.europa.eu/news/banking-package-questions-and-answers-2024-07-24\\_en](https://finance.ec.europa.eu/news/banking-package-questions-and-answers-2024-07-24_en) Luettu 22.1.2024
- [39] Baselin pankkivalvontakomitea. <https://www.bis.org/bcbs/history.htm>
- [40] Liu, Fred, and Lars Stentoft. Regulatory Capital and Incentives for Risk Model Choice under Basel 3. *Journal of Financial Econometrics*, vol. 19, no. 1, 2021, pp. 53–96, <https://doi.org/10.1093/jjfinec/nbaa029>.
- [41] Baselin pankkivalvontakomitea. Explanatory note on the minimum capital requirements for market risk. [https://www.bis.org/bcbs/publ/d457\\_note.pdf](https://www.bis.org/bcbs/publ/d457_note.pdf) 2019
- [42] Kiviniemi, Arttu. Basel III -uudistusten ei arvioida kasvattavan suomalaispankkien pääomavaatimuksia merkittävästi. *Finanssivalvonta*, 16.8.2022 , <https://publications.bof.fi/bitstream/handle/10024/47142/Basel-III-uudistukset-paaomavaatimukset.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- [43] Heino, J., Mattinen O. EU:ssa sovellettava Basel III -vakavaraisuusuudistus vaikuttaa maltillisesti suomalaispankkien pääomavaatimuksiin. *Finanssivalvonta*, 12.9.2024, <https://publications.bof.fi/bitstream/handle/10024/53801/Basel-III-vakavaraisuusuudistus.pdf>

- [44] Baselin pankkivalvontakomitea. Basel III Monitoring Report. <https://www.bis.org/bcbs/publ/d581.pdf> 2024
- [45] Hortin, Nicola. The FRTB: Do Not Underestimate the Standardised Approach. *Journal of Securities Operations & Custody*, vol. 8, no. 3, 2016, pp. 197–200.
- [46] Banks Take Tactical Approach to FRTB. *International Financial Law Review*, 2024.
- [47] Euroopan keskuspankki. Market risk: implementing new rules for internal models. [https://www.bankingsupervision.europa.eu/press/supervisory-newsletters/newsletter/2020/html/ssm.nl200212\\_2.en.html](https://www.bankingsupervision.europa.eu/press/supervisory-newsletters/newsletter/2020/html/ssm.nl200212_2.en.html) luettu 21.1.2025